

학교시설 내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인 개발

연구책임자 | 이 강 석 (전남대학교)

학교시설 내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인 개발

발 행 일 2011년 8월
펴 낸 이 김태완
펴 낸 곳 한국교육개발원
등록번호 제16-35호
등록일자 1973년 6월 13일

주 소 서울시 서초구 바우뚝길 220-1 우면동 92-6(137-791)
전 화 (02)3460-0114, 1211
팩 스 (02)3460-0116

<http://www.kedi.re.kr>

ISBN _

최근 수년간 일본, 이탈리아, 알제리, 모로코, 터키, 파키스탄, 중국 등에서 지진에 따른 학교 건물 붕괴로 수많은 어린이학생이 희생되어 큰 사회적 파장을 불러 일으켰으며, 특히 1995년 일본 고베지진에서는 약 30%의 학교가 지진피해를 받았으며, 2005년 파키스탄 지진 때는 수많은 학교 건물이 붕괴하여 1만 7000여명 어린이가 사망하였다. 2008년 중국 쓰촨성 대지진에서도 어린이학생 수백명의 목숨을 한꺼번에 앗아간 학교 붕괴 현장들은 가장 참혹한 지진피해가 발생하여 중국사회에 큰 충격을 주었다. 한편, 국내 1987년 기준 전국의 학교 수는 12,860개교에서 2006년 14,681개교로 1988년 내진설계법 적용 이후 건립된 학교는 전체 학교 수의 약 14%에 해당되며, 약 86%의 학교는 내진기준 제정 전에 설립되어 내진설계가 되어 있지 않는 것이 현 실정으로서, 비 내진상세를 가지는 국내 학교 건물의 내진대책은 시급하다. 그러나 현재 내진대책의 기본이 되는 내진성능평가법에 대한 구체적인 지침이 없는 실정이며, 대부분 국외기준을 적용한 내진성능 평가결과에 관한 연구가 주류이며, 평가방법의 어려움으로 인한 고도의 전문적 지식이 필요하다. 따라서, 내진성능평가를 간단하게 수행가능하며, 결과에 대한 신뢰성이 확보가 가능한 한국형 내진성능 평가법 구축 필요하다.

본 연구는 교육과학기술부 시설과 내진업무 수행에 적합한 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능평가 및 내진보강 가이드라인 개발을 목적으로 한다. 지진 시 학교건물의 붕괴 또는 손상의 우려가 있는지를 판단할 내진성능 평가 방법 개발, 각 학교시설의 특성을 고려한 내진성능판정지표 구축 및 효율적이며 경제적인 내진보강의 기본계획을 제시하기 위한 가이드 라인을 개발하였다.

본 연구 결과가 궁극적으로 시·도 교육청 및 관계기관의 학교시설 내진보강사업에 유용한 자료가 되기를 기대한다.

2011년 8월

한국교육개발원
원장 김태완

| 연구요약

본 연구의 목적은 교육과학기술부 시설과 내진업무 수행에 적합한 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능 평가 지침 및 내진보강 기본계획을 위한 가이드라인을 개발하는 것이다.

본 내진성능 평가 지침은 기존 중·저층 철근콘크리트 학교 건축구조물의 구조체의 내진성능 평가를 수행하기 위해서 사용할 수 있다. 내진성능은 연속량의 수치를 기준으로 설정한 내진성능등급 (A, B, C, D, E)으로 평가가 가능하며, 내진보강 여부를 포함한 내진안전성의 판정은 목표 내진성능 수준 (500년 재현주기일 경우는 즉시거주, 2400년 재현주기의 2/3에서는 붕괴방지 수준)에서 결정한 판정기준에 의해서 수행한다.

본 지침은 기존 학교 건물을 대상으로 한 내진보강 전·후의 내진성능 확인에 적용하며, 또한 내진보강이 필요한 기존 학교건물에 대해서는 필요 내진보강량 (강도 및 변형)의 산정 등 내진보강 기본계획에 적용할 수가 있다.

본 지침에 의한 내진성능 평가방법은 계산의 수준이 다른 내진성능 예비평가법 및 내진성능 상세평가법의 2단계로 구성되어 있으며, 내진성능 확인만의 목적으로 이용할 경우에는 2가지 방법 가운데 1가지방법을 이용해도 좋지만, 각각의 내진성능 평가법을 적용 할 경우에는 성능 평가의 목적, 대상건물의 구조특성 등에 대응하여 적절한 방법을 선택한다. 기존 학교건물의 내진성능 확인 및 내진보강을 위한 목적으로 이용할 경우에는 내진성능 상세평가법은 반드시 수행해야한다.

내진성능 예비평가 결과, A 및 B등급 일 경우에는 내진성능이 우수한 학교로서 평가되며, C, D, E등급은 내진성능에 문제가 있는 학교시설이기 때문에 내진성능 상세평가를 실시하여 내진보강 여부를 평가해야 한다. 최종적으로 상세평가 결과 A 및 B등급은 OK, C 및 D 내진보강 실시, E등급은 내진보강 및 개축여부를 판단하여 내진대책을 강구한다.

○ I. 서 론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
가. 연구의 필요성	1
나. 연구의 목적	9
2. 기대효과	9
가. 기술적 기대성과	9
나. 경제·산업적 기대효과	10
3. 연구 내용 및 범위	11
가. 외국기술 적용상의 문제점	11
나. 연구내용 및 범위	12
○ II. 지침 본문 및 해설	15
1. 총칙	15
가. 기본방침	15
나. 적용범위	16
다. 건물의 조사 및 재료강도	17
1) 설계도면이 없는 경우의 조사	17
2) 재료강도의 결정	17
라. 용어 정의	18
2. 목표 내진성능 수준 및 내진성능 등급	21
가. 목표 내진성능 수준	21
나. 지진위험도	24
1) 평가용 지진가속도	24
2) 지진구역 및 지역계수	25

3) 지반의 분류 및 지반증폭계수	25
가) 지반종류	25
나) 지반분류의 기준면	26
다. 구조체의 성능수준 및 범위의 정의	27
라. 내진성능 등급의 결정	29
1) 내진성능 예비평가 결과 및 내진성능 등급	30
2) 내진성능 상세평가 결과 및 내진성능 등급	31
마. 내진성능 판정법	32
3. 내진성능 예비평가	33
가. 일반사항	33
나. 평가용 지진가속도 산정	33
다. 전단 및 휨파괴형 부재 내력산정	35
1) 휨파괴형 부재의 극한내력	36
2) 전단파괴형 부재의 극한내력	37
라. 요구성능 판정지표 및 평가용 지표산정	49
마. 건물의 지진피해도 및 내진성능 평가점수 산정	50
1) 경미한 피해 판정 및 내진성능 점수 계산	50
2) 소규모 피해 판정 및 내진성능 점수 계산	50
3) 중·대규모 피해 판정 및 내진성능 점수 계산	51
4) 대규모 피해용 내진성능 점수 계산	52
바. 내진성능 등급 결정	52
4. 내진성능 상세	53
가. 일반사항	53
나. 평가용 지진가속도 산정	53
다. 보유성능의 계산	54
1) 강도지표의 계산	56
2) 연성지표의 계산	59

라. 연성율별 지진가속도 수준의 산정	62
마. 연성율별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 산정	63
바. 건물의 지진피해도 및 내진성능 등급 결정	64
5. 내진보강 기본계획	65
가. 일반사항	65
나. 내진보강 기본계획	65
1) 내진보강 및 설계의 흐름	65
2) 내진보강 공법의 선택	69
3) 필요 내진보강량의 산정	69
다. 내진보강 효과의 확인	72

○ III. 내진성능 예비평가의 연구자료 73

1. 저층 RC 건물의 간이 내진성능 평가법의 제안	76
가. 간이 내진성능 평가법의 개요	76
나. 단계별 내진성능 평가법 상세	78
2. 실제 지진에서 피해를 받은 건물과의 비교	86
3. 예제 건물에 의한 간이 내진성능 평가법 타당성 검증	88
가. 대상건물 및 내진성능 평가	88
나. 내진진단법 및 비선형 정적·동적해석에 의한 대상건물 의 내진성능 평가	90
4. 소결	98

○ IV. 내진성능 상세평가의 연구자료 99

1. 저층 R/C 건물의 내진성능 평가법의 제안	100
가. Step-1: 보유 수평내력 및 변형능력 산정	101

나. Step-2: 특정 연성률 별 입력지진수준 산정	104
다. Step-3: 특정 연성률 별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 평가	105
라. Step-4: 내진성능 평가	108
2. 지진손상도 평가법 평가예제	108
가. 대상건물 개요	108
나. 보유 수평내력 및 변형능력 산정	110
다. Step-2: 특정 연성률 별 입력지진수준 산정	111
라. Step-3: 특정 연성률 별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 평가	111
마. Step-4: 내진성능 평가	112
3. 제안된 평가법의 타당성 및 적용가능성 검증	112
가. 적용가능성 및 타당성 검증 개요	112
나. 비선형 동적해석 결과와 비교 · 검토	113
다. 제2차 내진진단 결과와 비교 및 검토	116
4. 소결	117

○ V. 결 론 119

참고문헌	121
부 록	123
【부록 1】 내진성능 예비평가 시트	123
【부록 2】 내진성능 상세평가 시트	133
【부록 3】 내진성능 예비평가 예제	143
【부록 4】 내진성능 상세평가 예제	159

<표 I.1> 국외 대규모 지진 피해사례	2
<표 I.2> 국내 지진 사례(최근 10년간)	6
<표 I.3> 국외 기존 건축물 내진성능 평가법의 특징 및 문제점	12
<표 I.4> 연구개발 내용 및 범위	13
<표 II.1> 재료별 하한치와 평균치 보정계수	17
<표 II.2> 노후도계수	17
<표 II.3> 건설연도별 재료의 기본값	17
<표 II.4> 기존 학교건물의 기본 목표내진성능 수준	21
<표 II.5> 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도(SDS)	24
<표 II.6> 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(a)	25
<표 II.7> 지진구역 구분 및 지역계수	25
<표 II.8> 지반의 분류	26
<표 II.9> 지반증폭계수 F_a	27
<표 II.10> 구조체의 손상정도에 따른 성능수준 및 범위	28
<표 II.11> 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능등급의 정의	29
<표 II.12> 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계	30
<표 II.13> 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계	31
<표 II.14> 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법	32
<표 II.15> 내진성능 예비평가의 수직부재 분류 및 정의	35
<표 II.16> 건축시기별 장주의 평균전단응력도	37
<표 II.17> 건축시기별 단주 및 일반기둥의 평균전단응력도	38
<표 II.18> 벽체의 평균전단응력도	38
<표 II.19> 끼움조적조의 평균전단응력도	39

<표 II.20> 평가용 지진가속도(α)에 따른 요구성능 판정지표(E_{di}) 및 내진성 능 평가용 지표(β, G, P) 계산식	49
<표 II.21> 내진성능 상세평가용 수직부재의 파괴형식에 의한 분류	55
<표 II.22> α_2 및 α_3 의 값	56
<표 II.23> 상세평가용 연성지표	61
<표 II.24> 전단 (C_{su}) 및 휨파괴형(C_{fy}) 부재의 종국강도 분류	62
<표 II.25> 연성율별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능의 계산법 ..	63
<표 II.26> 부재의 내진성능 저감계수(η)	64
<표 II.27> 대표적인 내진보강법	69
<표 III.1> 벽체의 종류에 따른 단면적 및 전단응력도 산정	81
<표 III.2> 입력지진동(α)에 따른 요구성능판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β, G, P) 산정용 식	82
<표 III.3> 지진피해도 및 내진성능 등급	86
<표 III.4> 제안한 평가법에 의한 대상건물의 내진성능평가 결과	90
<표 III.5> 대상건물의 내진성능평가 결과 비교	95
<표 IV.1> 기둥 리스트	109
<표 IV.2> 종국강도 및 연성율의 계산결과	111
<표 IV.3> 내진성능 평가 결과	112
<표 IV.4> 비선형 동적해석의 결과 (지진가속도에 대한 연성율)	116
<표 IV.5> $E_s=0.6$ 을 가지는 RC 건물의 종국강도의 조합	117

그림차례

[그림 I.1] 건물의 지진피해 사례	3
[그림 I.2] 일본 고베지진(1995) 시의 학교건물 지진피해 현황	4
[그림 I.3] 한반도 지진발생 위치 (1978-2008)	5
[그림 I.4] 한반도에서의 지진발생 현황	6
[그림 I.5] 교육과학부 학교건물 내진화 우선도 평가 실시 결과 (2010년 상반기)	7
[그림 I.6] 단주효과에 의한 학교건물의 지진피해 상황	8
[그림 I.7] 외국기술 적용상의 문제점	11
[그림 II.1] 기둥의 내치수 (h_o)	35
[그림 II.2] 내진보강의 흐름	67
[그림 II.3] 보강설계의 흐름	68
[그림 II.4] 입력지진동과 보강목표의 관계	71
[그림 II.5] 입력지진동과 보강목표의 관계	71
[그림 III.1] 지진 피해가 예측가능한 저층 RC 건물의 요구내력스펙트럼(문헌[5]) ..	75
[그림 III.2] 본 연구에서 제안한 저층 RC 건물의 간이 내진성능평가법의 개념도	77
[그림 III.3] 본 연구에서 제안한 지진 피해도 판정곡선(판정식)	78
[그림 III.4] 간이 내진성능 평가법의 흐름도	79
[그림 III.5] 지진 피해도 영역 결정법 상세	83
[그림 III.6] 실제 지진에서 피해를 받은 RC 건물과 본 연구에서 제안한 평가법의 비교	87
[그림 III.7] 본 평가법의 적용 예제건물의 기준층 평면도	89
[그림 III.8] 부재의 모델링	93
[그림 III.9] 국내 RC 건물의 지진피해율과 I_s 와의 관계(문헌[3])	95

[그림 III.10] 2번건물의 비선형 해석 결과 상호비교(Hachinohe.EW, $\alpha=0.22g$)	96
[그림 III.11] 1번건물의 3차진단 및 비선형 해석 결과 상호비교	97
[그림 IV.1] 비선형 요구내력스펙트럼(문헌 3)	101
[그림 IV.2] 내진성능 평가법 절차	102
[그림 IV.3] Required Spectrum($\mu_f=0.3$)	106
[그림 IV.4] Required Spectrum($\mu_f=0.6$)	106
[그림 IV.5] Required Spectrum($\mu_f=1.0$)	106
[그림 IV.6] Required Spectrum($\mu_f=2.0$)	106
[그림 IV.7] Required Spectrum($\mu_f=4.0$)	107
[그림 IV.8] 내진성능 저감계수(η)3)	107
[그림 IV.9] 평면도	110
[그림 IV.10] 강도-연성과 지진피해고 관계 (Y방향)	113
[그림 IV.11] 부재모델	115
[그림 IV.12] 잔류내진성능(R)과 $E_s=0.6$ 의 상관관계	118

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

가. 연구의 필요성

- 최근 들어 1995년에 발생한 일본 고베(神戸)지진(M=7.2, 사상자: 약 6,310명), 1999년에 발생한 터키 이즈미트 지역지진(M=7.4, 사상자: 약 15,657명), 2001년에 발생한 인도 구자라트지진(M=7.7, 사상자: 20,085명), 2005년에 발생한 파키스탄 지진(M=7.6, 사상자: 86,000명), 2008년에 발생한 중국 스촨성지진(M=7.9, 사상자: 68,712명) 등의 한반도 주변을 포함한 세계각지에서 대규모 지진이 빈발하고 있으며(표 I.1 및 그림 I.1), 이로 인한 인명 및 경제적 손실 규모는 하나의 국가가 감당할 수 없을 정도로 큰 경우가 많아, 국가차원에서의 지진에 의한 피해를 줄이기 위한 대비가 반드시 필요함.
- 상기 지진에서 내진설계가 미비한 학교건물에 거대한 피해발생. 최근 수년간 일본, 이탈리아, 알제리, 모로코, 터키, 파키스탄, 중국 등에서 지진에 따른 학교 건물 붕괴로 수많은 어린학생이 희생되어 큰 사회적 파장을 불러 일으켰으며, 특히 1995년 발생한 내진국 일본 고베지진(그림 I.2)에서는 약 30%의 학교가 지진피

해를 받았으며, 2005년 8월 발생한 파키스탄 지진 때는 수많은 학교 건물이 붕괴하여 1만 7000여명 어린이가 사망하였음. 2008년 중국 쓰촨성 대지진에서도 어린 학생 수백명의 목숨을 한꺼번에 앗아간 학교 붕괴 현장들은 가장 참혹한 피해가 발생하여 중국사회에 큰 충격을 주었음.

- 우리나라는 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 그동안 지진에 대해 비교적 안전한 지역으로 인식되었으나, 최근 기상청 통계자료에 의하면 한반도에서 지난 31년(1978~2008년)간 총 816회의 지진이 관측되어, 연평균 26회의 빈도를 보이고 있으며, 이중 유감지진횟수가 212회이며 지진규모(M) 3이상 지진발생이 274회임(그림 I.3 및 표 I.2).
- 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과에 의하면 국내에도 과거 막대한 인명 및 재산의 피해를 준 지진이 발생하였으며(그림 I.4), 가까운 미래에 인명 및 재산 피해를 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 대규모의 지진에 대한 대책의 중요성이 점차 고조되고 있음.

<표 I.1> 국외 대규모 지진 피해사례

발생일시	지 역	사망자수(명)	규모
2010.04.14	중국 칭하이 지역	2,000명 이상	7.1
2008.05.12	중국 쓰촨성지진	68,712명	7.9
2010.02.27	칠레	700명 이상	8.8
2010.01.21	아이티 지역	200,000명 이상	7.0
2005.10.08	파키스탄 북부 지역	86,000명	7.6
2004.12.26	인도네시아 수마트라	283,106명	9.0
2003.12.26	이란 남부 지역	31,000명	6.6
2001.01.26	인도 구자라트	20,085명	7.7
1999.08.17	터키 이즈밋	15,657명	7.4
1995.01.17	일본 고베지역	6,310명	7.2
1990.06.20	이란 Rasht	45,000명	7.7



(a) 2004년 니카타지진



(b) 1995년 고베지진



(c) 1995년 고베지진



(d) 2005년 파키스탄지진



(e) 1999년 터키 코카에리지진



(f) 2004년 이란 밤지진

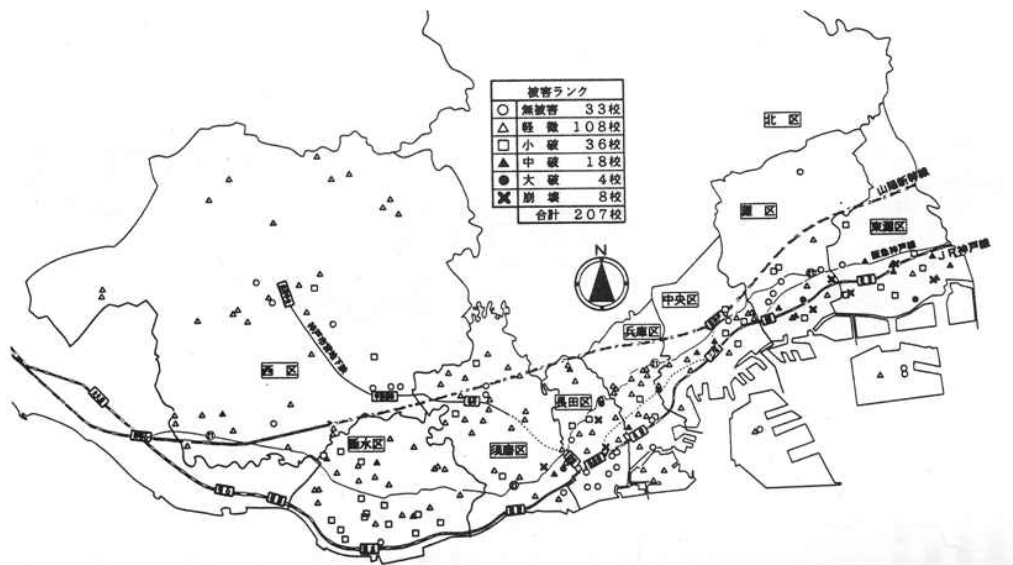


(g) 2008년 쓰촨성 지진



(h) 2010년 아이티 지진

[그림 I.1] 건물의 지진피해 사례

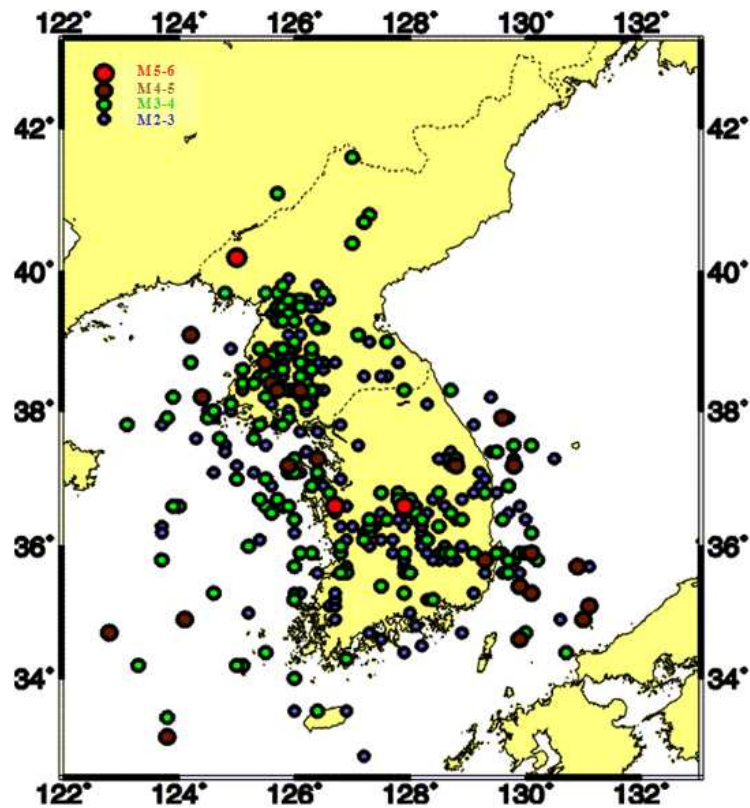


[그림 I.2] 일본 고베지진(1995) 시의 학교건물 지진피해 현황

- 상기 국내 지진통계자료에 나타나듯이 발생 빈도가 증가하며 발생지역이 확산됨에 따라 지진재해에 대한 우려가 고조되고 있음.
- 1987년 기준 전국의 학교 수는 12,860개교에서 2006년 14,681개교로 1988년 내진설계법 적용 이후 건립된 학교는 전체 학교 수의 약 14%에 해당, 약 86%의 학교는 내진기준 제정 전에 설립되어 내진설계가 되어 있지 않음.
- 2010년 상반기 실시된 교육과학부 학교 건물 내진화 우선도 평가 실시 결과에 의하면 150gal지진에서는 약 70%이상, 200gal 지진에서는 약 80% 이상이 중규모 피해를 받을 가능성이 있음(그림 I.5).
- 현재 기존 국내 학교건물의 현황에 적합한 내진성능평가법 및 내진보강에 대한 구체적인 지침이 없는 실정임: 대부분 국외기준을 적용한 내진성능 평가결과 및 보강안에 관한 연구가 주류이며, 평가방법의 어려움으로 인한 고도의 전문적 지

식이 필요함(예를 들면, 학교시설 안전관리 선진화 시스템 구축, 경기도 교육청).

- 일본 및 미국을 중심으로 개발된 내진진단/평가 시스템은 자국 특성에 맞는 시스템으로 구성되어 있어, 외국 내진성능 평가기술을 소화·흡수함에 있어 각각의 장점을 선별적으로 취합함으로써 내진성능 평가시스템을 개선할 필요성이 있음: 외국기술은 극취성, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 건물 상호작용 효과 및 조적조 끼움벽에 의한 단주효과(그림 I.6) 등의 국내 비내진 학교건축물의 구조/시방 특성을 적절히 고려하지 못하므로 이에 대한 개선이 필요함.



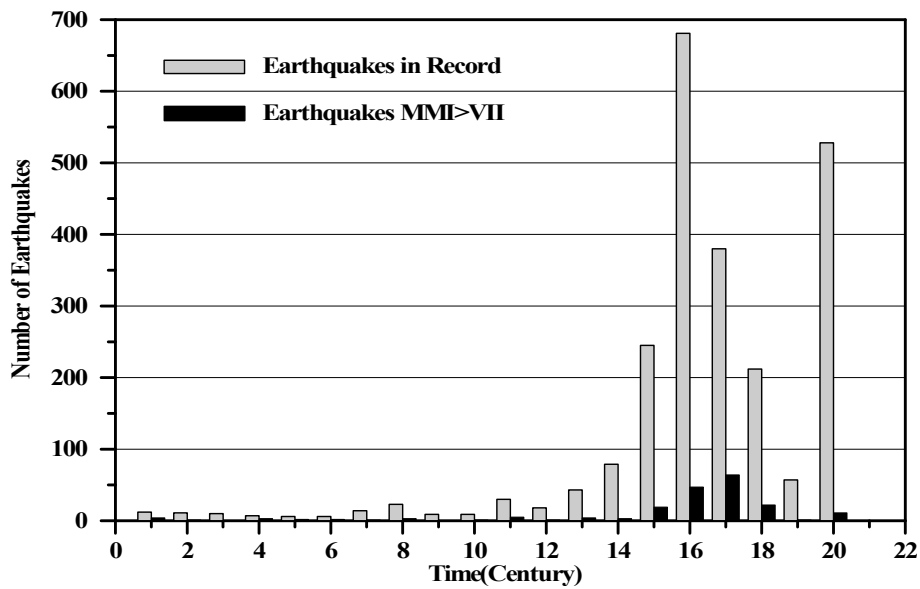
기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)

[그림 I.3] 한반도 지진발생 위치 (1978-2008)

<표 I.2> 국내 지진 사례(최근 10년간)

진앙일	규모	지진명	위치
2007. 01. 20	4.8	강릉 지역 지진	강원도 강릉시 서쪽 23km 지역
2004. 05. 29	5.2	울진 해역 지진	경상북도 울진 동쪽 약 80km 해역
2003. 03. 30	5.0	백령도 해역 지진	인천광역시 백령도 서남서쪽 약 80km 해역
2003. 03. 23	4.9	홍도 해역 지진	전라남도 홍도 북서쪽 약 50km 해역
2001. 11. 24	4.1	울진 해역 지진	경상북도 울진 동남동쪽 약 50km 해역
1999. 01. 11	4.2	속초 해역 지진	강원도 속초시 북동쪽 약 15km 해역
1997. 06. 26	4.2	경주 해역 지진	경상북도 경주 남동쪽 9km 해역

기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)



[그림 I.4] 한반도에서의 지진발생 현황



Damage Class	Damage Ratio(%)
NO Damage/Slight	19.99
Small	39.04
Medium	21.74
Severe	19.23

•중규모 이상 피해율
•40.97%



Damage Class	Damage Ratio(%)
NO Damage/Slight	14.42
Small	15.37
Medium	21.23
Severe	48.98

•중규모 이상 피해율
•70.21%



Damage Class	Damage Ratio(%)
NO Damage/Slight	9.29
Small	8.63
Medium	12.60
Severe	69.48

•중규모 이상 피해율
•82.08%



Damage Class	Damage Ratio(%)
NO Damage/Slight	7.68
Small	5.43
Medium	7.10
Severe	79.79

•중규모 이상 피해율
•86.89%

[그림 I.5] 교육과학부 학교건물 내진화 우선도 평가 실시 결과
(2010년 상반기)



[그림 1.6] 단주효과에 의한 학교건물의 지진피해 상황

- 내진성능평가를 간단하게 수행가능하면 결과에 대한 신뢰성이 확보가 가능한 한국형 내진성능 평가법 구축 필요.
- 현행 교육청 시설과 내진업무 관계자 용 내진화 우선도 평가법(교육과학부, 2010)은 다수의 학교건물 가운데 내진성능등급을 간단한 방법에 의해서 결정하여 내진대책의 우선순위를 결정하는 방법: 실효적인 내진보강을 위해서는 필요한 강도 및 변형능력을 계산 할 수 있는 내진성능 평가법이 필요.
- 학교시설의 내진대책을 교육과학부 시설과 주관으로 체계적이고 계획적으로 추진 (예, Green School사업)하기 위해서는 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능 평가법 및 내진보강 매뉴얼 개발이 시급하며, 이를 바탕으로 내진대책의 중요성과 긴급성에 대해 관계자 (교육위원회, 재무, 건설, 방재, 교직원, 보호자, 학부모 등)들에게 이해를 촉진하고 객관적으로 설명할 필요가 있음.

나. 연구의 목적

- 교육과학부 시설과 내진업무 수행에 적합한 (간단하게 수행가능하면 결과에 대한 신뢰성이 확보가능) 국내 학교건물의 특성(끼움조적조, 단주효과 등)을 고려한 내진성능평가 지침 개발.
- 지진 시 학교건물의 붕괴 또는 손상의 우려가 있는지를 판단할 내진성능 평가 방법 개발, 각 학교시설의 특성을 고려한 내진성능판정지표 (내진보강 또는 개축 대상 학교시설 결정법) 구축 및 효율적이며 경제적인 내진보강 기본계획을 위한 가이드라인을 제안.

2. 기대효과

가. 기술적 기대효과

- 국내 학교건물에 유효한 내진진단기술의 고도화: 국내 학교 건물의 특성인 끼움조적조 학교의 내진성능 평가기법 구축, 학교 건물의 특성인 조적벽에 의한 단주효과 고려, 학교 건물의 특성인 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 학교 건물의 내진성능 평가기술 확보.
- 국내 비내진 학교 건물 내진보강기술의 기반확보 및 정립: 외국 내진성능 평가 및 보강기술의 소화·흡수, 구축된 내진성능 향상 기술의 엔지니어링 보급을 위한 기반기술 구축.
- 한국형 내진성능 진단/평가 및 보강기술의 정립: 국내 학교 건물의 결함요인과 연계된 내진보강 지침 및 기술표준(안) 제시, 국내 학교 건물의 실질적 보강이 가능한 내진보강 공법 구축.

○ 교육과학부 시설과 내진업무 수행에 적합한 비내진 학교 건물의 내진성능 평가를 위한 엔지니어링 기반 Software 구축.

○ 국내 비내진 학교 건물의 구조안전성 확보 및 내진성능 향상 및 Green School사업(학교내진보강)에 효율적인 내진향상 기준안 제시가능.

나. 경제·산업적 기대효과

○ 국내 비내진 학교 건물의 지진안전성 제고로 국민재산 및 학생 인명보호 및 국내 비내진 학교 건물 내진성능향상에 따른 장수명화로 생애주기비용 절감.

○ 기존 학교의 최적 내진성능 평가에 의한 과다보강설계에 의한 초과비용 절감.

○ 국내 비내진 학교의 지진취약성 계몽 및 내진보강 중요성 홍보.

- 학교의 내진성능평가/진단 전산프로그램 작성보급으로 손쉽게 내진진단.
- 학교 건물의 지진피해 예측가능.

○ 학교시설의 내진대책을 체계적이고 계획적으로 추진하기 위해서는 내진대책의 중요성과 긴급성에 대해 관계자 (교육위원회, 재무, 건설, 방재, 교직원, 보호자, 학부모 등)들에게 이해를 촉진하고 객관적으로 설명할 필요가 있음.

○ 학교건물은 지역방재의 일익을 담당하는 공익의 역할을 수행하므로 내진성능 확보로 인한 지진 재해 발생 시에는 지역주민의 응급 피난장소 등 방재거점으로서의 역할 수행이 가능.

3. 연구내용 및 범위

가. 외국기술 적용상의 문제점

- 기존 비내진 학교 건축물의 내진성능 평가 외국기술 문제점(그림 1.7 및 표 1.3): 극취성부재, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 학교 건물 상호작용 효과에 대한 성능평가 불합리, 국내 취성부재의 전단내력 추정식 불합리, 철근콘크리트 끼움조적조의 내진성능 평가 미비, 조적조 끼움벽에 의한 단주효과 불합리 등의 국내 비내진 학교 건축물의 구조/시방 특성을 적절히 고려하지 못하므로 이에 대한 개선이 필요함.



[그림 1.7] 외국기술 적용상의 문제점

<표 1.3> 국외 기존 건축물 내진성능 평가법의 특징 및 문제점

평가법	FEMA310/356	일본내진진단법
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 목표성능지정가능 • 평가결과 지진동과의 상관관계 명확 	<ul style="list-style-type: none"> • 극취성, 전단파괴 부재의 영향 직접 적으로 고려가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 학교건물 구조특성인 전단 및 휨파괴형 부재 성능평가 불가 • 극취성, 전단파괴 부재의 영향 직접적으로 고려불가 • 한국 학교건물 특성인 끼움조적조 학교건물 성능평가 미비 	<ul style="list-style-type: none"> • 목표성능지정 불가능 • 성능평가결과: 지진동과의 상관관계 불명확 • 학교건물 구조특성인 전단 및 휨파괴형 건물 성능평가 불합리 • 한국 학교건물 특성인 끼움조적조 학교건물 성능평가 미비

나. 연구내용 및 범위

○ 내진성능 평가 핵심기술 구축 (1개월)

- 국내학교 학교 건물의 적합한 전단강도식 제안.
- 학교건물의 특징인 전단 및 휨 파괴형 부재가 혼합된 부재 내진성능평가 핵심 기술 구축.
- 국내 학교 건물의 특성인 끼움조적조 부재의 내진성능 평가 핵심기술 구축.

○ 통합 내진성능 평가법 개발 (1개월)

- 지진수준별 지진손상도(경미, 소파, 중파, 대파)가 평가 가능한 맞춤형 내진진단 및 평가기술 개발
- 교육과학부 시설과 내진업무 수행에 적합한 기존 비내진 학교 건축물 내진성능 평가 전산프로그램 개발을 위한 내진성능 평가 시트 제시.

○ 내진성능평가 지침 및 기본예제 작성(1개월)

- 내진성능 평가 지침 작성
- 기존 비내진 학교 건축물의 실용적인 내진보강 방안을 위한 대상건물 내진성능 평가 기본예제를 작성

○ 내진보강 기본계획을 위한 가이드라인 제안(1개월)

- 내진보강 및 설계법 검토
- 국내외 내진보강공법 특성 분석
- 필요 보강량의 산정법 제시

<표 I.4> 연구개발 내용 및 범위

연구개발목표		연구개발내용 및 범위	일정 (개월)
국내 비내진 학교 건축물의내 진성능 평가시스템 및 내진보강매 뉴얼 개발	내진성능 평가 핵심기술 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내학교 학교 건물의 적합한 전단강도식 제안 ▪ 학교건물의 특징인 전단 및 휨 파괴형 부재가 혼합된 부재 내진성능평가 핵심기술 구축 ▪ 국내 학교 건물의 특징인 끼움조적조 부재의 내진성능 평가 핵심기술 구축 	1
	통합 내진성능 평가법 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상기 핵심기술 통합 ▪ 지진수준별 지진손상도(경미, 소파, 중파, 대파)가 평가 가능한 맞춤형 내진진단/평가기술 개발 ▪ 교육과학기술부 시설과 내진업무 수행에 적합한 기존 비내진 학교 건축물 내진성능 평가 전산프로그램 개발을 위한 내진성능 평가 시트 개발 	1
	내진성능 평가 지침 작성 및 실용예제 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 내진성능 평가 지침 작성 ▪ 내진성능평가 기본예제를 작성 	1
	내진보강 기본계획 가이드라인 제안	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 내진보강 및 설계법 검토 ▪ 국내외 내진보강공법 특성 분석 ▪ 필요 보강량의 산정법 제시 	1

Ⅱ. 지침 본문

1. 총칙

가. 기본방침

본 내진성능 평가 및 내진보강 기본계획 지침(이하, 지침)은 기존 중·저층 철근콘크리트 학교 건축구조물 (이하, 학교 건물)의 구조체의 내진성능 평가 및 내진보강 기본계획을 수행하기 위해서 사용할 수 있다. 내진성능은 연속량의 수치를 기준으로 설정한 내진성능등급으로 평가가 가능하며, 내진보강 여부를 포함한 내진안전성의 판정은 목표 내진성능 수준에서 결정한 판정기준에 의해서 수행한다. 또한, 내진보강량 산정 등 내진보강 기본계획은 제5장에서 기술한 방법에 의해서 수립할 수가 있다.

[해설]

기존 중·저층 철근콘크리트 학교 건축구조물의 층수는 1층 - 6층을 나타내며, 구조체의 내진성능 평가는 비구조 부재는 제외한다. 내진성능등급은 후술하는 제2.4절의 A, B, C, D, E 등급으로 평가되며, 목표내진성능 수준은 제2.1절에 정의한 500년 재현주기에서는 즉시거주(IO) 수준을, 2400년 재현주기 2/3지진에서는 인명안전(LS) 수준을 만족해야한다.

나. 적용범위

본 지침은 기존 학교 건물을 대상으로 한 내진보강 전·후의 내진성능 확인에 적용하며, 또한 내진보강이 필요한 기존 학교건물에 대해서는 필요 내진보강량 (강도 및 변형)의 산정 등 내진보강 기본계획에 적용할 수가 있다. 본 지침에 의한 내진성능 평가방법은 계산의 수준이 다른 내진성능 예비평가법 및 내진성능 상세평가법의 2단계로 구성되어 있으며, 내진성능 확인만의 목적으로 이용 할 경우에는 2가지 방법 가운데 1가지 방법을 이용해도 좋지만, 각각의 내진성능 평가법을 적용 할 경우에는 성능 평가의 목적, 대상건물의 구조특성 등에 대응하여 적절한 방법을 선택한다. 기존 학교건물의 내진성능 확인 및 내진보강을 위한 목적으로 이용할 경우에는 내진성능 상세평가법은 반드시 수행해야한다.

또한, 구체적인 평가법은 본 지침 및 해설에 규정된 방법을 이용하는 것을 원칙으로 하지만, 실험, 상세한 해석 등에 의해서 본 지침의 방법과 동등이상의 평가법이라는 사실이 검증된 경우에는 그 방법을 사용할 수가 있다.

[해설]

내진성능을 단시간에 평가하는 것을 제1목표로 정하였으며, 정밀도가 다소 떨어지지만, 요소요소에 큰 계산가정을 설정하여 가능하다면 방법을 간략화 하였다. 따라서 보다 상세한 검토가 가능한 경우에는 그것에 의해야 하며, 내진성능이 극히 낮은 건물은 보다 상세한 평가법에 의해서 판단해야 한다.

본 평가매뉴얼은 정형의 학교건물에 적합한 방법으로써, 다음과 같은 학교건물은 내진성능 평가 시 주의가 필요하며, 보다 상세한 방법을 수행하는 것을 권장한다.

- 건물의 평면형상 및 입면형상이 정형이 아닌 골조(II, ㄷ, 곡면 등 요철이 심한 건물)
- 복잡한 개구부를 가지는 벽체가 많은 건물
- 벽체의 배치가 어떤 층에서 불연속인 골조

다. 건물의 조사 및 재료강도

건물의 조사는 기존 학교 건물의 내진성능 평가 시 필요한 구조체의 역학적 성질을 확인하기 위해서 현장조사, 설계도면 수집, 단면치수, 코어 채취에 의한 재료시험 등 적절한 방법에 의해서 수행한다.

1) 설계도면이 없는 경우의 조사

설계도면이 없는 경우 또는 불충분한 경우에는 구조부재의 치수, 철근직경, 배근상황, 코어 채취에 의한 콘크리트 인장강도 등 내진성능 평가에 필요한 항목을 현장실태 조사에 의해서 수집한다.

2) 재료강도의 결정

구조물의 재료강도는 설계도서, 현장실험을 통해 결정할 수 있다. 설계도서에 명기된 설계기준강도는 재료의 하한값으로 간주한다. 평균강도는 각 재료별로 하한값에 다음 표 II.1에 의한 계수를 곱하여 구할 수 있다. 단, 실험결과가 충분할 경우 적절한 값을 적용할 수 있다. 설계도면 강도를 사용할 경우 노후도를 고려하여 표 II.2과 같이 경과년수에 따른 감소계수를 곱하여 사용한다. 내진성능 예비평가의 경우는 표 II.3에 의한 건설연도별 기본값을 사용할 수 있다.

<표 II.1> 재료별 하한치와 평균치 보정계수

재료 특성	계수
콘크리트 압축강도	1.20
철근의 인장 및 항복강도	1.25

<표 II.2> 노후도계수

경과연수	콘크리트 압축강도	조적조 전단강도
30년 이상	0.8	0.3
20년 이상	0.9	0.6
20년 미만-10년 이상	1.0	0.8
10년 미만	1.0	1.0

<표 II.3> 건설연도별 재료의 기본값

건설연도	1970년 이전		1971-1988년 이전		1988-2000		2001년 이후	
	하한값	평균값	하한값	평균값	하한값	평균값	하한값	평균값
콘크리트 강도 (f_{ck} , MPa)	13	15	15	18	18	21	21	24
주근 항복강도 (f_y , MPa)	240	300	240	300	300	375	300	375

[해설]

표 II.1은 재료별 하한치와 평균치의 보정계수를 나타낸 것으로서, 표 II.1은 한국 시설안전기술공단 기준 건축물 내진성능 평가요령(2010)의 연구내용을 참조로 하였다. 표 II.2는 설계도면 강도를 사용할 경우의 노후도 계수를 나타낸 것으로서 경과 연수에 따른 감소계수를 곱하여 사용한다. 또한, 내진성능 예비평가의 경우는 표 II.3에 의한 건설연도별 기본값을 사용할 수 있다. 표 II.2 및 표 II.3은 한국시설안전기술공단 기준 건축물 내진성능 평가요령(2010)의 연구내용을 참조로 작성하였다.

라. 용어 정의

본 평가요령에 사용되는 주요 용어의 정의는 원칙적으로 '건축공사 표준 시방서 (국토해양부 제정)'에 따른다. 그 밖의 용어에 대해서는 아래의 정의를 따른다.

관성력 : 운동하는 물체에 작용하는 힘으로, 질량×가속도의 크기를 갖고 방향은 가속도와 반대되는 힘

내진성능 평가기준 지진 : 기존 건축물의 내진성능을 평가할 때 기준으로 정한 지진하중의 크기. 본 요령에서는 50년에 10% 초과발생확률의 지진 (500년 재현주기) 및 50년간 초과확률이 2%인 지진(즉 2400년 재현주기의 지진)의 2/3 수준의 지진으로 하였음.

밀면전단력 : 구조물의 밀면에 작용하는 설계용 총 전단력을 말한다.

구조체 성능수준 (Performance Level) 및 범위(range): 평가기준 지진작용 시 지진력에 의해 발생한 구조물의 변형 혹은 손상 등의 따른 구조물의 상태를 규정하기 위해 설정된 단계. 구조물의 성능수준으로는 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지의 세 단계, 성능의 범위는 지진피해 제어범위, 제한적인 인명안전 범위로 나뉜다.

스펙트럼 : 진동현상을 각 주파수 성분으로 분해하여 배열한 것. 구조물이 지나는 지진하중과 변위의 관계로, 등가 1자유도의 가속도-변위 관계로 나타낸 곡선을 말한다.

시간영역해석 : 실지진기록 혹은 인공지진기록을 이용하여 지진의 지속시간에 따른 구조물의 동적응답을 구하는 해석법

요구내력 (Required Strength) : 특정의 연성률에 머물기 위한 내력의 한계값

응답 : 어떤 계가 외부로부터 자극을 받아 반응하는 현상. 일반적으로 지진이나 바람 등의 외부 자극에 의해 건축물이 진동하는 현상 등에 쓰임

재현주기 : 강우, 홍수, 지진 등과 같이 구조물에 영향을 미치는 환경조건의 강도와 발생의 변동을 통계적으로 표시하는 지표의 하나로서, 이미 관측된 값에 대해서는 각 년의 최대치가 정상적으로 독립하여 발생하는 것으로 어떤 크기 이상의 연 최대치가 몇 년에 한번 발생할 확률이 있는지를 정하여 그 연수를 재현주기라 함

전단벽 : 벽의 면내로 횡력을 저항할 수 있도록 설계된 구조체를 말한다.

전단파속도 : 지반의 동적특성을 나타내는 지표의 하나로, 지반의 주기를 결정하거나 지반의 변형률을 결정하기 위해 필요한 요소

지진하중: 구조물의 질량에 설계지진가속도를 곱한 값

최대유효지반가속도(EPA): 최대유효지반가속도는 구조물에 실질적인 영향을 주지 않는 진동수가 높은 가속도 성분을 제외한 가속도 성분으로서, 일반적으로 최대유효지반가속도는 최대지반가속도보다 작다.

층간변위 : 인접 층 사이의 상대 변위를 말한다.

층지진하중 : 건축물의 각 층에 작용하는 지진 하중을 말한다.

보유성능: 건물이 보유하고 있는 기본적인 내진성능을 나타내며, 강도지표, 연성지표에 의해서 계산된다.

강도지표: 수평력에 대해서 건물 또는 부재가 보유하고 있는 강도를 대상층보다 상부층의 총 중량으로 나눈값이다.

연성지표: 부재의 변형능력을 나타내는 지표값을 나타낸다.

극한연성률: 극한변형과 항복변형의 비를 나타낸다.

극단주: h_o/D (기둥의 내치수/단면폭)가 2이하인 기둥을 나타낸다.

단주: h_o/D (기둥의 내치수/단면폭)가 $2 < h_o/D \leq 6$ 인 기둥을 나타낸다.

일반기둥: h_o/D (기둥의 내치수/단면폭)가 6이상인 기둥을 나타낸다.

휨기둥: 휨항복이 전단파괴보다 선행하는 기둥을 나타낸다.

전단기둥: 전단파괴가 휨항복보다 선행하는 기둥을 나타낸다.

요구성능 판정지표: 내진성능 예비평가를 위한 회귀분석에 의해서 도출된 수치를 나타낸다.

2. 목표 내진성능 수준 및 내진성능 등급

가. 목표 내진성능 수준

본 지침에서는 기존 학교건물의 기본 안전 목표 (Basic Safety Objective, BSO)는 표 II.4에 나타난 바와 같이 50년에 10% 초과발생확률의 지진 (500년 재현주기)에 대하여는 즉시거주수준(Immediate Occupancy Level)이 되도록 하며, KBC2009에 의한 지진하중 즉, 50년에 2% 초과 발생확률 지진 (2400년 재현주기)의 2/3수준에 대하여는 인명안전수준(Life Safety Level, LS)이 되도록 기본 목표내진성능을 설정한다. 내진성능 평가는 기존 학교건물이 이러한 목표성능을 확보하고 있는지를 평가하여야 한다.

<표 II.4> 기존 학교건의 기본 목표내진성능 수준

지진위험도	즉시거주(IO)	인명안전(LS)
500년 재현주기	●	×
2400년 재현주기의 2/3	◎	●

●: 기본 목표내진성능(OK) ◎: OK ×: NG

[해설]

• 재현주기 2,475년인 50년에 2% 초과 발생확률의 지진을 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)이라 하고, 최대고려지진의 2/3수준을 설계지진(Design Basis Earthquake, DBE), 그리고 50년 동안 발생할 수 있는 지진 중에 50%의 초과 확률의 지진(재현주기 72년)을 빈번한 지진(Frequent Occurrence Earthquake, FOE)으로 분류한다. 신축구조물에 대한 국내설계기준인 KBC2009에서는 최대고려지진의 2/3수준인 설계지진에 대하여 설계하고 있다.

초과확률	평균재현주기(년)	개략재현주기(년)
50%/50 년	72	75
20%/50 년	225	225
10%/50 년	474	500
2%/50 년	2,475	2500

• FEMA 356에서는 기존 건축물의 내진성능을 개선할 때, 재현주기에 따른 지반 가속도의 크기에 따라 건축물이 각각 다른 성능목표를 가질 수 있도록 규정하고 있으며, 내진 안전성 검토도 주어진 성능목표에 따라 수행된다. 예를 들어, 기본 안전 목표(Basic Safety Objective, BSO)는, 50년에 10% 초과발생확률의 지진에 대하여는 인명안전수준(Life Safety Level, LS)이 되도록 하고(k점), 50년에 2% 초과 발생 확률의 지진에 대하여는 붕괴방지수준(Collapse Prevention Level, CP)가 되도록 규정하고 있다(p점).

지진위험도	목표성능수준			
	기능수행(OP)	즉시거주(IO)	인명안전(LS)	붕괴방지(CP)
50%/50 년	a	b	c	d
20%/50 년	e	f	g	h
10%/50 년	i	j	k	l
2%/50 년	m	n	o	p

• 학교시설의 중요도계수는 2009년 4월 30일 교육과학기술부장관 고시된 "학교 시설 내진설계기준"에 따라 연면적에 따라 중요도계수를 다시 조정하도록 규정하고 있다. 이는 연면적이 큰 학교건축물의 경우 지진으로 인해 손상이 발생할 경우 학생들의 큰 인명피해가 예상되고, 지진 시 피난시설로 활용하기 위함이다. 연면적이 1,500 m² 이내인 학교시설의 경우 내진 I등급으로 분류하여 중요도계수는 1.2로 정하고, 연면적이 10,000m² 이상인 학교시설의 경우 내진(특)등급으로 분류하여 중요도계수 1.5

로 정한다. 연면적이 1,500m² 이상 10,000m² 이하인 경우 연면적에 따라 선형보간하여 사용한다.

연면적 A	중요도 계수 IE
$A < 1500 \text{ m}^2$	1.2
$1500 \text{ m}^2 < A < 10000 \text{ m}^2$	$3/85000 * (A - 1500) + 1.2$
$A > 10000 \text{ m}^2$	1.5

• 미국에서는 ASCE 41 및 ASCE 31에서 정의된 BSE-1의 지진(최대고려지진의 2/3 혹은 500년 재현주기 지진중 작은 값)과 BSE-2의 지진(최대고려지진, 약 2400년 재현주기 하중에 해당)에 대하여 신축건축물에 대하여 건축물의 중요도별로 다음과 같은 성능수준을 만족하도록 규정하고 있다.

중요도	500년 재현주기 지진	2400년 재현주기 지진
중요도(특)	즉시거주(IO)	인명안전(LS)
중요도(1)	중요도(특)과 중요도(2)의 성능수준의 중간수준: DCR	중요도(특)과 중요도(2)의 성능수준의 중간수준: LSR
중요도(2)	인명안전(LS)	붕괴방지(CP)
중요도(3)	인명안전(LS)	붕괴방지(CP)

• 상기의 연구내용을 바탕으로 본 지침에서는 학교건물의 중요도를 고려하여 일괄적으로 중요도(특)에 해당하는 500년 지진에서는 즉시거주(IO), 2400년 2/3 수준에서는 인명안전(LS)으로 목표성능을 정하였다. 그러나 $A < 1500 \text{ m}^2$ 인 중요도(1)에 해당하는 학교건물은 각각 DCR 및 LSR (내진등급 B에 해당)로 목표성능으로 간주할 수도 있다.

나. 지진위험도

1) 평가용 지진가속도

내진성능 평가를 위한 기본 지진가속도는 2.2.2절에 나타낸 각 지진구역별 500년, 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 평가용 최대 지진가속도(α)는 유효지반가속도(S)에 2.2.3절에 나타낸 지반종류에 따른 지반증폭계수(F_a) (표 II.9)를 곱한 단주기의 설계스펙트럼가속도(SDS)를 이용하여 식 (2.1) 및 식 (2.2)에 의해서 산정한다. 표 II.5에는 지반종류에 따른 단주기의 설계스펙트럼가속도(SDS)을 나타내며, 표 II.6에는 평가용 최대 지진가속도(α)를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \quad (500\text{년 재현주기의 경우}) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \times 2/3 \quad (2500\text{년 재현주기 } 2/3 \text{ 수준의 경우}) \quad (2.2)$$

<표 II.5> 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도(SDS)

지반종류	지진구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
SA	0.22	0.29	0.14	0.19
SB	0.28	0.37	0.175	0.23
SC	0.33	0.43	0.21	0.28
SD	0.44	0.50	0.28	0.35
SE	0.68	0.70	0.44	0.53

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 II.7참조

<표 II.6> 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(α)

지반종류	지진구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
SA	0.09	0.12	0.06	0.08
SB	0.11	0.15	0.07	0.09
SC	0.13	0.17	0.08	0.11
SD	0.18	0.20	0.11	0.14
SE	0.27	0.28	0.18	0.21

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 II.7참조

2) 지진구역 및 지역계수

우리나라의 지진구역 및 이에 따른 지역계수 값은 표 II.7와 같이 구분한다.

<표 II.7> 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역*	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

주* 강원도 북부(군,시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군,시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

3) 지반의 분류 및 지반증폭계수

가) 지반종류

국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 표 II.8와 같이 5종으로 분류한다. 지반의 분류를 위한 지반조사방법은 KBC2009의 “0402 지반조사”에 따라 수행한다.

나) 지반분류의 기준면

일반적으로 지반분류는 지표면을 기준으로 정한다. 다만, 지하층을 가진 구조물로서 직접기초를 사용하고 기초저면의 지반종류가 이상의 단단한 지반인 경우에는 기초저면을 지반분류의 기준면으로 사용할 수 있다. 이때 지진에 의하여 지하층구조벽에 작용하는 횡토압에 대하여 상부구조의 안전성을 확보하여야 한다. 말뚝기초를 사용하는 경우에는 지하구조 저면의 지반종류가 이상이고, 건물 진동의 입력이 지하구조의 저면을 통하여 전달되도록 설계, 시공되는 경우에 한하여 지하구조의 저면을 기준면으로 사용할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 지표면을 기준면으로 사용하여야 한다. 지반증폭계수는 지반분류에 따라 표 II.9과 같다.

<표 II.8> 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \overline{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ (×10-3MPa)
S _A	경암 지반	1500 초과	—	—
S _B	보통암 지반	760에서 1500		
S _C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S _E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

<표 II.9> 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

* S_s 는 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 S_s 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

[해설]

KBC 2009 지진하중 참조를 하여 제2.2.1절, 제2.2.2절 및 제2.2.3절을 작성하였다.

다. 구조체의 성능수준 및 범위의 정의

구조물의 성능수준은 지진에 의한 구조체의 손상정도에 따라 표 II.10과 같이 기능수행 성능수준(Operational level, OP), 즉시거주 성능수준(Immediate Occupancy level, IO), 지진피해 제어범위(Damage Control Range, DCR), 인명안전 성능수준(Life Safety level, LS), 제한적인 인명안전 범위(Limited Safety Range, LSR), 붕괴방지 성능수준(Collapse Prevention level, CP)의 6가지로 정의한다.

FEMA 356에서는 각 성능수준에 해당하는 층간변위각이 구조형식별로 제시하고 있으나 층간변위각은 같은 구조형식이라 할지라도 개별구조물의 특성에 따라 편차가 크므로 본 요령에서는 각 부재별로 극한강도 및 연성능력을 토대로 성능수준을 평가하고 이를 통해 구조물전체의 내진성능등급을 판정한다.

<표 II.10> 구조체의 손상정도에 따른 성능수준 및 범위

성능수준	전반적인 지진피해 정도	상세
기능수행 성능수준 (Operational level, OP)	경미	구조물 피해의 최소 수준을 나타낸다. 기능수행 수준을 만족하는 기존 학교건물은 지진이 발생한 경우 구조시스템에 단지 무시할만한 손상이 발생한 경우이다. 또한 구조체는 지진 피해를 입기 전의 강도와 강성을 거의 보유하고 있으며, 기능수행 수준을 만족하는 학교건물은 지진 발생동안의 인명안전에 대한 위험은 무시한다.
즉시거주 성능수준 (Immediate Occupancy level, IO)	소규모	지진 후 구조물의 피해는 소규모이며 중력, 지진력저항시스템은 지진전의 강성과 강도를 보유하고 있다. 구조부재의 손상으로 인명에 피해를 입을 가능성은 매우 낮으며 손상부재에 대한 보수가 필요하지만 즉시거주를 위해 반드시 필요하지는 않다.
지진피해 제어범위 (Damage Control Range, DCR)	IO와 LS의 중간수준	즉시거주 성능수준과 인명안전 성능수준의 연속성을 고려한 성능 범위으로써, 내진보수 및 보강을 최소화 할 수 있는 범위이다.
인명안전 성능수준 (Life Safety level, LS)	중규모	구조부재에 상당한 피해가 발생하여 원래의 횡강성과 강도를 손실한 경우이지만 붕괴에 대해서는 여전히 여력을 보유하고 있다. 구조물은 영구적인 변형을 보이며 지진력저항시스템의 몇몇 요소에서 충분한 균열, 파단, 항복, 그리고 좌굴을 보일 수 있으나 구조부재의 손상으로 인한 인명손실의 위험은 낮다. 구조부재의 보수는 가능하지만 경제적이지 않을 수도 있다. 당장 무너지지는 않으나 거주를 위해서는 내진보수와 보강이 요구된다.
제한적인 인명안전 범위 (Limited Safety Range, LSR)	LS와 CP의 중간수준	LS와 CP의 중간수준
붕괴방지 성능수준 (Collapse Prevention level, CP)	대규모	구조물이 심각한 피해를 입은 상태로 국부적 혹은 전체적으로 붕괴의 가능성이 있다. 지진력저항시스템에 상당한 강도 및 강성의 저하가 있으며 횡방향 영구변형이 있다. 그러나 중력하중 저항시스템은 여전히 하중을 지지할 수 있다. 구조부재의 박락 등으로 인명피해가 생길 수 있으며 일반적인 보수보강 후에도 거주에 안전하지 않을 수 있다. 여진으로 인해 붕괴가 발생할 수 있다.

[해설]

FEMA 356 및 일본진단법을 참조로 표 II.10의 구조체의 손상정도에 따른 성능수준 및 범위를 작성하였다.

라. 내진성능 등급의 결정

본 지침에 의한 내진성능평가결과는 A-E단계의 5등급으로 판정하며 각 내진성능 등급에 해당하는 학교건물의 구조체의 상태는 표 II.11과 같다.

<표 II.11> 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능등급의 정의

등급부호	상 태
A등급	문제점이 없는 최상의 상태. 평가기준 지진작용 시 구조부재의 피해는 무시할만 하며 비구조체에 손상이 있으나 거주에 안전하며 매우 간단한 보수와 청소를 통해 기능을 수행할 수 있음.
B등급	평가기준 지진 작용 시 구조물은 원래 횡강성과 강도를 손실하나 붕괴에 대해서는 여전히 여력을 보유하고 있음. 구조물은 영구변형이 발생하지만, 규모는 소규모이며, 지진 발생동안 인명안전에 대한 위험은 매우 낮음. 보수 및 보강을 최소화 할 수 있으며, 간략한 보수에 의해서 기능을 수행할 수 있음. 장기적인 측면에서 내진보강 계획을 수립하는 것이 바람직함.
C등급	평가기준 지진 작용 시 구조부재에 중규모 정도의 피해가 예상됨. 대부분 강도와 강성저하가 크게 일어나지만 수직하중저항시스템의 저항력에 의해 붕괴는 일어나지 않음. 여진에 의해 붕괴가능성이 있으므로 거주에 적합하지 않음. 내진보강설계에 의해서 내진보강을 실시하여 목표 내진성능을 확보해야 함.
D등급	평가기준 지진작용 시 일부 수직하중저항시스템이 연직하중저항능력을 소실하여 부분적인 붕괴가 발생함. 내진보강설계에 의해서 내진보강을 실시하여 목표 내진성능을 확보해야 함.
E등급	평가기준 지진작용 시 수직하중저항시스템이 연직하중저항능력을 소실하여 전면적인 붕괴가 발생함. 경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

[해설]

FEMA 356, 일본진단법, 한국시설안전기술공단 내진성능평가 요령을 참조로 5등급으로 정하였다.

1) 내진성능 예비평가 결과 및 내진성능 등급

본 지침에 의한 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계는 표 II.12와 같다.

<표 II.12> 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계

피해구분	성능수준	내진성능평가 점수 (SES)	내진성능 등급		
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3	
경미한 피해	OP	SES ≥ 120	A	A	
		110 ≤ SES < 120			
		100 ≤ SES < 110			
소규모 피해	IO	SES ≥ 120			
		110 ≤ SES < 120			
		100 ≤ SES < 110			
중규모 피해	DCR	SES ≥ 120			B
	LS	110 ≤ SES < 120			C
		100 ≤ SES < 110			D
대규모 피해	LSR	90 ≤ SES < 100	B		
	CP	70 ≤ SES < 90	C		
붕괴	C	50 ≤ SES < 70	E	D	
		0 ≤ SES < 50		E	

[해설]

내진성능 예비평가와 내진등급과의 관계 등 내진성능 예비평가와 관련한 이론적 연구배경 및 고찰은 III 장에 나타난 내진성능 예비 평가 연구자료를 참조 바람.

2) 내진성능 상세평가 결과 및 내진성능 등급

본 지침에 의한 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계는 표 II.13과 같다.

<표 II.13> 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계

피해구분	성능수준	잔존 내진성능 (RSC)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	$RSC \geq 95$	A	A
소규모 피해	IO	$80 \leq RSC < 95$		
중규모 피해	DCR	$70 \leq RSC < 80$	B	
	LS	$60 \leq RSC < 70$	C	
대규모 피해	LSR	$50 \leq RSC < 60$	D	B
	CP	$20 \leq RSC < 50$	E	C
붕괴	C	$10 \leq RSC < 20$		D
		$0 \leq RSC < 10$		E

[해설]

내진성능 상세평가와 내진등급과의 관계 등 내진성능 예비평가와 관련한 이론적 연구배경 및 고찰은 IV 장에 나타난 내진성능 상세평가 연구자료를 참조 바람.

마. 내진성능 판정법

내진성능평가 결과에 의한 구조물의 내진성능 판정법은 표 II.14과 같다.

<표 II.14> 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

3. 내진성능 예비평가

가. 일반사항

내진성능 예비평가는 2.2.1절에 나타난 평가용 지진가속도 수준에 대해서 수직부재(기둥, 벽체 및 끼움조적조)의 재료강도와 단면치수에 의해서 약산적으로 계산되는 구조체의 극한강도에 의해서 수행되는 것을 원칙으로 한다. 다만, 수직부재의 극한강도 및 파괴모드의 정확성을 높이기 위한 목적으로 4.2.1절에 나타내는 수직부재의 극한강도 정산식에 의해서 구조체의 극한강도를 계산하여 예비평가를 실시해된다. 또한, 본 지침에 의한 내진성능 예비평가에서는 평가 학교건물의 1층의 장변방향(이하, X방향) 및 단변방향(이하, Y방향)에 대해서 각각 독립적으로 수행하는 것을 원칙으로 한다.

[해설]

수직부재 구조체의 극한강도는 대상부재의 단면적을 이용하여 평균전단응력도법(Average Shear Stress Method, 일본 내진진단법 및 FEMA 310 참조)에 의해서 계산하는 것이 원칙으로 한다. 그러나 부칙에 나타내는 극한강도 정산식을 이용하여 수직부재의 극한강도 및 파괴형식(전단 및 휨파괴) 계산하여 3.3에 나타내는 예비성능 평가의 부재의 극한강도로 대치가가능하다.

내진성능 예비평가에 관한 이론적 연구자료는 III장의 내진성능 예비평가의 연구자료에 상세하게 기술한다.

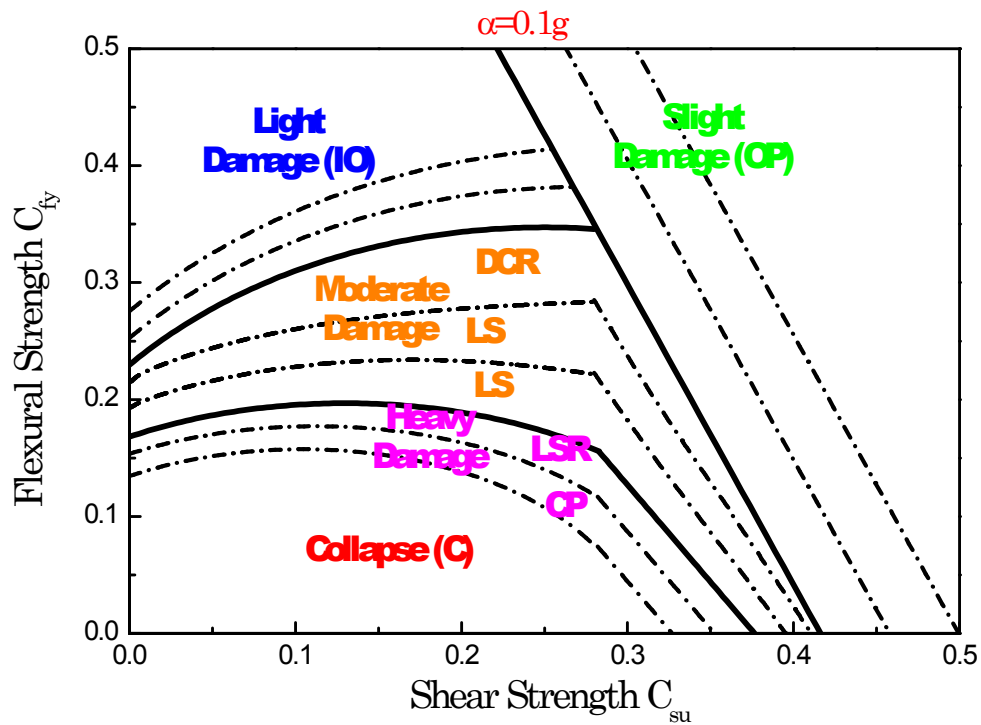
나. 평가용 지진가속도 산정

내진성능 예비평가를 위한 입력 지진가속도(α)는 식(2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정을 하며, 표 II.6을 이용하여 재현주기별 평가용 최대 지진가속도를 선택 가능하

다. 단, 지진가속도의 범위는 $0.1g \leq a \leq 0.3g$ 이며, $0.1g$ 이하인 경우는 $0.1g$ 를 이용하는 것을 권장하지만, 정산을 위해서는 선형보간하여 직접 예비평가를 수행할 수 있다.

[해설]

지진가속도의 계산범위 범위는 $0.1g \leq a \leq 0.3g$ 이며, $0.1g$ 이하인 경우(표 II.6의 지진구역 2의 0.06, 0.07, 0.08, 0.09)는 $0.1g$ 를 이용하는 것을 권장하지만, 정산을 위해서는 다음 그림을 참고로 선형보간하여 직접 예비평가를 수행하여도 된다.



다. 전단 및 휨파괴형 부재 내력산정

본 지침에 의한 예비평가에서는 휨파괴형 부재는 표 II.15에서 정의하는 일반기둥에 국한하며, 전단파괴형 부재는 표 II.15에서 정의하는 극단주, 단주, R/C 전단벽체 및 끼움조적조로 분류한다.

<표 II.15> 내진성능 예비평가의 수직부재 분류 및 정의

명칭		정의
휨파괴형 부재	일반기둥	$h_o/D > 6$ 인 독립기둥 (그림 II.1 참조)
전단파괴형 부재	단주	$2 < h_o/D < 6$ 인 독립기둥 (그림 II.1 참조)
	극단주	$h_o/D \leq 2$ 인 독립기둥 (그림 II.1 참조)
	벽체	라멘내에 포함되지 않는 벽체도 포함 (표 II.16 참조)
	끼움조적조	조적조 채움벽체 (표 II.17 참조)

주 h_o : 기둥의 내치수 (그림 II.1 참조), D : 기둥의 단면폭

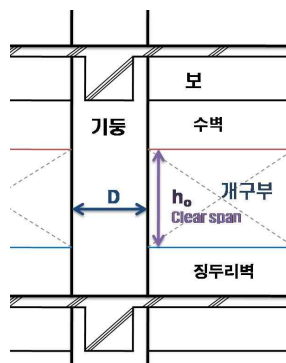
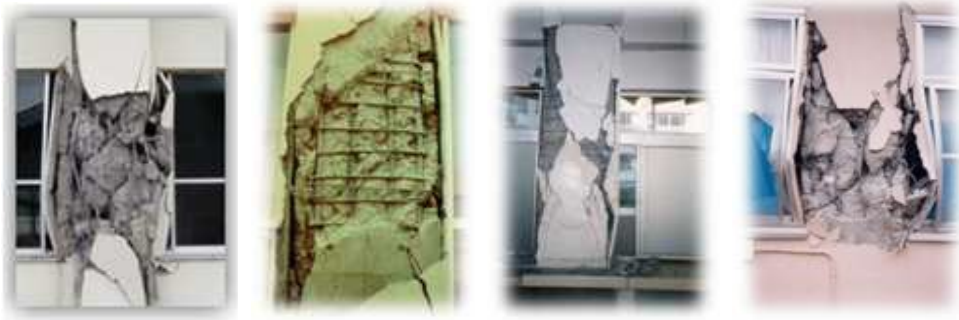


그림 II.1 기둥의 내치수 (h_o)

[해설]

- 극단주($h_o/D \leq 2$ 인 독립기둥)의 지진피해사례



1) 휨파괴형 부재의 극한내력

대상건물 1층의 X 및 Y방향에 대한 휨파괴형 부재의 종국강도(C_{fy})을 식(3.1)에 의해서 계산한다. 식(3.1) 가운데 바닥면적당 단위중량(w)은 건물자중에 지진용 적재하중을 합한 것으로서, 계산을 하지 않은 경우에는 $w=10$ kPa (1000 kgf/m²)을 사용해도 좋다.

$$\left(C_{fy} = \frac{V_{fy}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{fc} \sum a_{fc}}{\sum A_f \cdot w} \right) \quad (3.1)$$

여기서, $\sum a_{fc}$: 장주의 단면적 합 (표 II.16 참조)

τ_{fc} : 장주의 평균 전단응력도 (표 II.16 참조)

$\sum A_f$: 대상건물 전층의 바닥면적 합

w : 바닥면적당 단위중량

<표 II.16> 건축시기별 장주의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기동분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년이후
휨 파괴	장주 (ho/D ≥ 6)	0.73 (7.3)	0.74 (7.4)	0.85 (8.5)	0.86 (8.6)

2) 전단파괴형 부재의 극한내력

대상건물 1층의 X 및 Y방향에 대한 전단파괴형 부재의 종국강도(Csu)을 식(3.2)에 의해서 계산한다. 식(3.2) 가운데 바닥면적당 단위중량(w)은 건물자중에 지진용 적재하중을 합한 것으로서, 계산을 하지 않은 경우에는 w=10 kPa (1000 kgf/m²)을 사용해도 좋다.

$$\left(C_{su} = \frac{V_{su}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{sc} \sum a_{sc} + \tau_{oc} \sum a_{oc} + \tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw}}{\sum A_f \cdot w} \right) \quad (3.2)$$

여기서, $\sum a_{sc}$: 단주의 단면적 합 (표 II.17 참조)

τ_{sc} : 단주의 전단응력도 (표 II.17 참조)

$\sum a_{oc}$: 일반기둥의 단면적 합 (표 II.17 참조)

τ_{oc} : 일반기둥의 전단응력도 (표 II.17 참조)

$\sum a_{sw}$: 벽체의 단면적 합 (표 II.18 참조)

τ_{sw} : 벽체의 전단응력도 (표 II.18 참조)

$\sum a_{bw}$: 조적채움벽의 단면적 합 (표 II.19 참조)

τ_{bw} : 조적채움벽의 전단응력도 (표 II.19 참조)
$\sum A_f$: 대상건물 전층의 바닥면적 합
w : 바닥면적당 단위중량

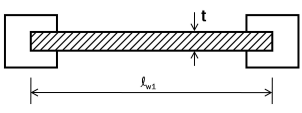
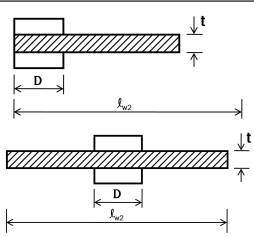
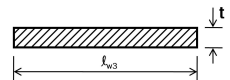
<표 II.17> 건축시기별 단주 및 일반기둥의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년이후
전단파괴	단주 ($h_o/D \leq 2$)	1.30 (13.0)	1.35 (13.5)	1.43 (14.3)	1.50 (15.0)
	일반기둥 ($2 < h_o/D < 6$)	1.14 (11.4)	1.18 (11.8)	1.24 (12.4)	1.30 (13.0)

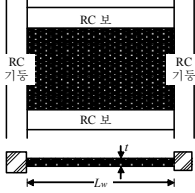
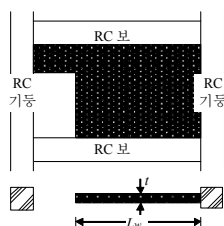
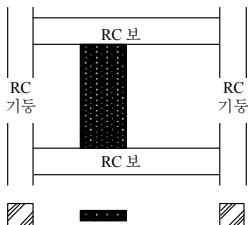
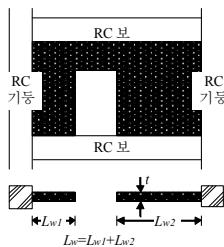
<표 II.18> 벽체의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

양측에 기둥이 있는 벽	한쪽에 기둥이 있는 벽	기둥이 없는 벽
		
$\tau_{sw} = 3(30), a_{sw} = t \times l_{w1}$	$\tau_{sw} = 2(20), a_{sw} = t \times l_{w2}$	$\tau_{sw} = 1(10), a_{sw} = t \times l_{w3}$

<표 II.19> 끼움조적조의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

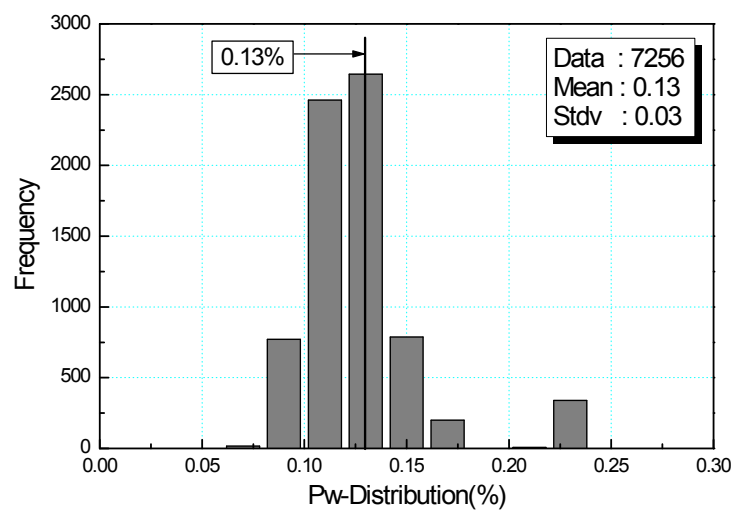
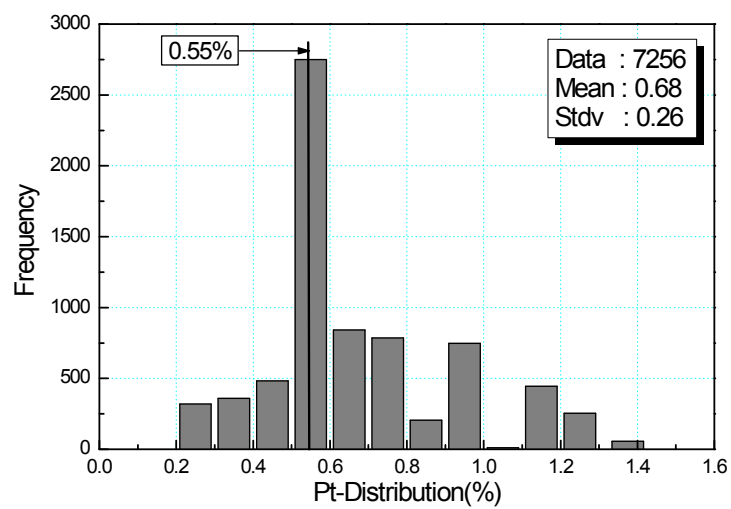
종류	전단응력도 및 단면적	종류	전단응력도 및 단면적
양측에 기둥이 있는 조적채움 벽	 $\tau_{bw} = 0.6(6) , \quad a_{bw} = t \cdot L_w$	한쪽만 기둥이 있는 조적채움 벽	 $\tau_{bw} = 0.2(2) , \quad a_{bw} = t \cdot L_w$
기둥이 없는 조적채움 벽	 $\tau_{bw} = 0.0$		 $\tau_{bw} = 0.2(2) , \quad a_{bw} = t \cdot L_w$

[해설]

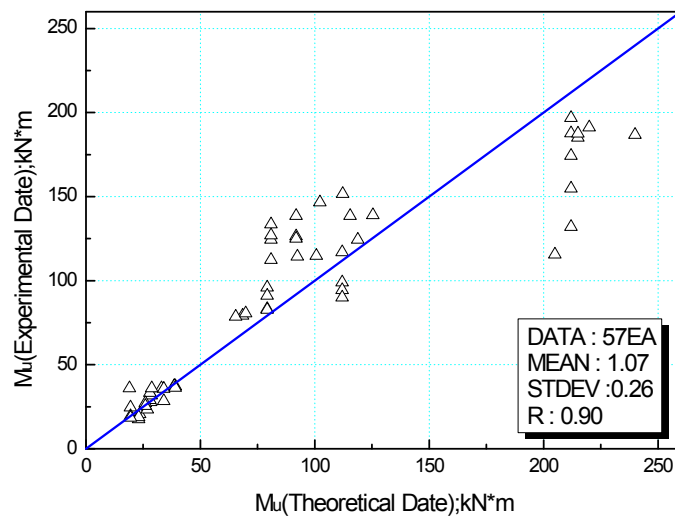
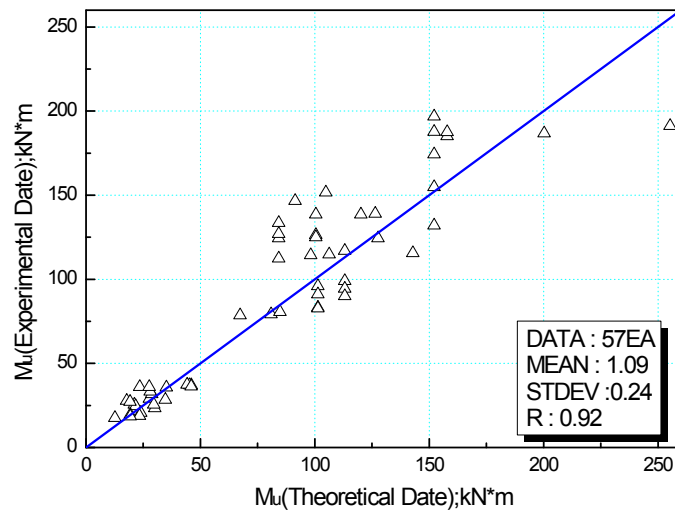
(1) 기둥의 파괴모드와 평균전단응력도의 계산가정

- 일반기둥, 단주, 극단주 구분하여 휨내력과 전단내력을 계산하여 파괴모드 및 평균 전단응력도를 제안하였다.
- 계산가정: 표 II.3 건설연도별 재료의 기본값 사용, 기둥의 단면적은 40*40, 계산에 필요한 변수(기둥단면적, 인장철근비, 형보강근 비, 축응력도)는 7256개의 기둥 자료를 바탕으로 계산함 (아래 표 및 그림 참조).

극한 평균전단응력도 산정의 변수	변수값
인장철근비	0.55%
횡보강근비	0.13%
평균 축응력도	2.0MPa



(2) 휨내력 계산식(일본 내진진단기준, ACI 318) 및 계산결과: 57실험 데이터를 비교한 결과 거의 동일하였으며, 따라서 간단한 일본 내진진단식 이용하여 휨내력을 산정하였음.



$$\begin{aligned}
 & \blacktriangleright [P_{\max} \geq P > 0.4bDf_{ck}] \text{ 일 때} \\
 & \quad M_u = (0.8A_s f_y D + 0.12bD^2 f_{ck}) \left(\frac{P_{\max} - P}{P_{\max} - 0.4bDf_{ck}} \right) \\
 & \blacktriangleright [0.4bDf_{ck} \geq P > 0] \text{ 일 때} \\
 & \quad M_u = 0.8A_s f_y D + 0.5PD \left(1 - \frac{P}{bDf_{ck}} \right) \\
 & \blacktriangleright [0 > P \geq P_{\min}] \text{ 일 때} \\
 & \quad M_u = 0.8A_s f_y D + 0.4PD
 \end{aligned}$$

(일본 내진진단기준 휨내력식)

$$\begin{aligned}
 & \blacktriangleright P_u = 0.85f_{ck}ab + A_s' f_s' - A_s f_s \\
 & \blacktriangleright M_u = P_u e = 0.85f_{ck}ab \left(\frac{D}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_s' \left(\frac{D}{2} - d' \right) + A_s f_s \left(d - \frac{D}{2} \right)
 \end{aligned}$$

(ACI 318 휨내력식)

(3) 전단내력 계산식: 일본 내진진단기준, FEMA 356, ACI 318-간편식 및 ACI 318-상세식을 이용하여 상기 (2)의 휨내력 결과와 비교 및 검토하여 기둥의 종류 별 평균 전단응력도를 도출하였다.

1. 일본 내진진단 기준식(JBDPA Code)

$$V_{SL1} = 0.85 \sqrt{\rho_s f_{sy}} bd + \left(\frac{0.053 \rho_s^{0.23} (18 + f_{ck})}{M/(Vd) + 0.12} + \frac{P}{10A_g} \right) bd$$

2. FEMA 356 Code

$$V_{SL2} = k_1 \frac{A_s f_{sy} d}{s} + \lambda k_2 \left(\frac{0.5 \sqrt{f_{ck}}}{M/(Vd)} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f_{ck}} A_g}} \right) 0.8A_g$$

3. ACI 318 - 간편식

$$V_{SL3} = \frac{A_s f_{sy} d}{s} + \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} bd \left(1 + \frac{P}{14A_g} \right)$$

4. ACI 318 - 상세식

$$\begin{aligned}
 V_{SL4} &= \frac{A_s f_{sy} d}{s} + \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} bd + \frac{17.6 \rho_s V d}{M - P \frac{4D-d}{8}} bd \leq V_{\max} \\
 V_{\max} &= 0.29 \sqrt{f_{ck}} bd \left(1 + \frac{P}{3.5A_g} \right)
 \end{aligned}$$

(전단내력 산정식)

(4) 기둥의 파괴모드와 평균전단응력도 계산 결과

- 일반기둥($h_0/D > 6$) : 휨내력 < 전단내력: 휨파괴가 지배적임.

년도	휨내력		전단내력					
			JBDPA Code	ACI 318 - 간편식	ACI 318 - 상세식	FEMA 356 ($\mu < 2$)	FEMA 356 ($2 < \mu < 4$)	FEMA 356 ($\mu > 4$)
1970이전	휨력 (kN)	116.62	141.54	127.84	123.74	151.65	134.89	118.14
	기둥응력 (MPa)	0.73	0.88	0.80	0.77	0.95	0.84	0.74
1971-1987	휨력 (kN)	117.81	145.33	134.36	129.44	157.74	140.07	122.40
	기둥응력 (MPa)	0.74	0.91	0.84	0.81	0.99	0.88	0.76
1988-2000	휨력 (kN)	136.25	151.02	153.36	147.31	166.09	157.15	128.25
	기둥응력 (MPa)	0.85	0.94	0.96	0.92	1.04	0.98	0.80
2001 이후	휨력 (kN)	136.89	156.70	161.65	155.71	173.73	163.64	133.59
	기둥응력 (MPa)	0.86	0.98	1.01	0.97	1.09	1.02	0.83

- 단주($2 < h_o/D \leq 6$): 휨내력 > 전단내력: 전단파괴가 지배적임.

년도	휨내력		전단내력					
			JBDPA Code	ACI 318 - 간편식	ACI 318 - 상세식	FEMA 356 ($\mu < 2$)	FEMA 356 ($2 < \mu < 4$)	FEMA 356 ($\mu > 4$)
1970이전	휨력 (kN)	233.24	182.72	127.84	130.62	207.51	182.37	157.24
	기동응력 (MPa)	1.46	1.14	0.80	0.82	1.30	1.14	0.98
1971-1987	휨력 (kN)	235.61	189.17	134.36	136.33	216.64	190.13	163.63
	기동응력 (MPa)	1.47	1.18	0.84	0.85	1.35	1.19	1.02
1988-2000	휨력 (kN)	272.51	198.84	153.36	154.20	229.17	210.77	172.40
	기동응력 (MPa)	1.70	1.24	0.96	0.96	1.43	1.32	1.08
2001 이후	휨력 (kN)	273.78	208.51	161.65	163.74	240.62	220.50	180.42
	기동응력 (MPa)	1.71	1.30	1.01	1.02	1.50	1.38	1.13

- 극단주($h_o/D \leq 2.0$): 휨내력 > 전단내력: 전단파괴가 지배적임.

년도	휨내력		전단내력					
			JBDPA Code	ACI 318 - 간편식	ACI 318 - 상세식	FEMA 356 ($\mu < 2$)	FEMA 356 ($2 < \mu < 4$)	FEMA 356 ($\mu > 4$)
1970	휨력 (kN)	349.87	227.93	127.84	137.51	207.51	182.37	157.24
이전	기둥응력 (MPa)	2.19	1.42	0.80	0.86	1.30	1.14	0.98
1971-1987	휨력 (kN)	353.42	237.30	134.36	143.21	216.64	190.13	163.63
	기둥응력 (MPa)	2.21	1.48	0.84	0.90	1.35	1.19	1.02
1988-2000	휨력 (kN)	408.76	251.34	153.36	161.08	229.17	210.77	172.40
	기둥응력 (MPa)	2.55	1.57	0.96	1.01	1.43	1.32	1.08
2001 이후	휨력 (kN)	410.67	265.39	161.65	171.77	240.62	220.50	180.42
	기둥응력 (MPa)	2.57	1.66	1.01	1.07	1.50	1.38	1.13

(5) 건축시기별 기둥의 평균전단응력도 제안

기둥분류		건설연도단위: MPa (kgf/cm ²)			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년 이후
전단파괴	극단주	1.30 (13.0)	1.35 (13.5)	1.43 (14.3)	1.50 (15.0)
	단주	1.14 (11.4)	1.18 (11.8)	1.24 (12.4)	1.30 (13.0)
휨파괴	일반기둥	0.73 (7.3)	0.74 (7.4)	0.85 (8.5)	0.86 (8.6)

[해설]

끼움조적벽체의 평균전단응력도 표 II.19에 나타낸 바와 같이 주위의 철근콘크리트 프레임에 의한 벽체의 구속상태로 분류하여,

- ① 양측에 기둥이 있는 끼움조적벽체 : $0.6 N/mm^2$
- ② 한쪽만 기둥이 있는 끼움조적벽체 : $0.2 N/mm^2$
- ③ 기둥이 없는 끼움조적벽체 : $0.0 N/mm^2$ (내력 무시)

로 정의한다.

끼움조적벽체의 항복 시 전단응력도는 국내에서 실시한 실험결과를 토대로 설정하였다. 참고한 데이터는 철근콘크리트 프레임 면내에 시멘트벽돌을 충전한 실험체를 대상으로 한 것이다(아래 표에 수집한 데이터 일람을 나타냄). 실험변수는 개구부의 유무, 개구부의 보강형식, 조적의 시공순서(선쌓기/후쌓기) 등이 이며, 다음과 같은 조건에 한정시켰다.

- ① 조적의 시공순서는 국내에서 일반적인 「조적 후쌓기」에 한정한다.
- ② 끼움조적벽체와 주위 철근콘크리트 프레임과의 일체성 개선을 목적으로 한 시공(아래표에 「cut off」로 표시) 이외의 일반적인 시공관행에 의한 것에 한정한다.
- ③ 개구부가 있는 끼움조적벽체에 대해서는 개구부 보강이 없는 것에 한정한다.

실험결과의 정리는 이하의 방침에 따르며, 본 연구에서는 끼움조적벽체를 갖는 철근콘크리트 프레임의 내력을 철근콘크리트 기둥 및 끼움조적벽체의 단순합으로 평가하였다. 따라서 각각의 부재의 내력을 아래와 같이 산정하였다.

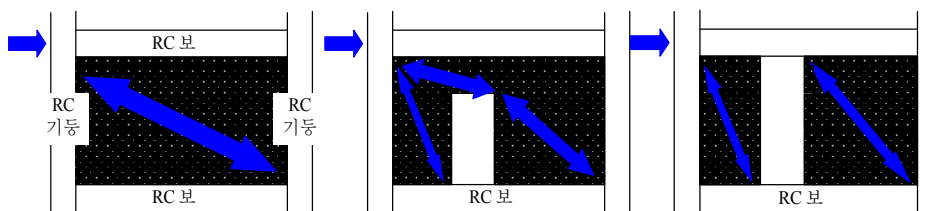
- ① 끼움조적벽체 파괴 시(변형 Δ)의 기둥 및 끼움조적벽체 전체의 내력($_{BIW}Q_{max}$)을 산출한다.
- ② 순수 철근콘크리트 프레임의 하중-변형 관계로부터 상기 ①의 변형 시(Δ)의 철근콘크리트 기둥 기여분($_{RC}V_{\Delta}$)을 산출한다.
- ③ 양자의 차($_{BIW}Q_{max} - _{RC}V_{\Delta}$)를 프레임의 최대내력 시의 끼움조적벽체의 기여분(V_{max})으로 한다.

- ④ 상기의 V_{max} 를 끼움조적벽체의 단면적 (개구부가 있는 실험체에서는 개구부를 제외)으로 나누어 이것을 끼움조적벽체의 항복강도 시 평균전단응력도 τ_{bw} 로 한다.

아래 표에 상기의 방침에 따라 산정한 τ_{bw} 를 나타낸다. 상기 ①~③의 조건에 맞는 실험체는 무개구 및 유개구 실험체에서 각각 3개씩으로, 수집된 데이터 수가 적고 전단응력도의 편차가 크지만 끼움조적벽체의 전단응력도 τ_{bw} 의 평균치를 산정하여 보면 무개구 실험체는 $0.78 N/mm^2$, 유개구 실험체는 $0.52 N/mm^2$ 이다.

상기의 결과에 부연하여 실제건물에서는 줄눈 모르타르의 충전상황과 조적개체의 품질의 편차가 있고, 실험체는 축소모델이므로 실제 전단응력도보다 과대평가할 가능성이 있으며, 장스팬 프레임 내의 끼움조적벽체는 면외로의 전도 등에 의한 강도 손실이 예상되는 것을 고려하여 무개구 끼움조적벽체의 평균전단응력도를 $0.6 N/mm^2$ 으로 설정하였다.

또한 기둥이 한쪽에만 있는 끼움조적벽체에서는 다음 그림에 나타낸 바와 같이 벽체의 좌우 중 어느 1변에서는 기둥에 의한 구속이 없으므로 줄눈의 미끌림 파괴 등이 발생할 가능성이 높기 때문에 항복 시 전단응력도는 기둥이 양측에 있는 경우의 1/3정도의 $0.2 N/mm^2$ 으로 설정하였다 (참고로, 대만 成功大學, 許茂雄 교수의 실험에 의하면 기둥이 양측에 있는 끼움조적벽체의 항복 시 전단응력도 τ_{bw} 는 평균 7~8 N/mm^2 정도이며, 기둥이 한쪽에만 있는 끼움조적벽체의 τ_{bw} 는 평균 4 N/mm^2 정도로 보고하였다). 또한 끼움조적벽체를 구속하는 철근콘크리트 기둥이 좌우의 어느 쪽에도 없는 끼움조적벽체는 그 강도를 기대하지 않는 것으로 하였다.



(끼움조적벽체의 응력 전달기구)

(끼움조적벽체 실험체의 실험결과)

	참고 문헌	실험 체명	변수	$BIW V_{max}$ (kN)*1	Δ *2 (mm)	h_0 *3 (mm)	Δ/h_0	$RC V_{max}$ (kN)*4	$RC V_{\Delta}$ (kN)*5	V_{max} (kN)*6	벽단면적 (m^2)	전단응력도*7 (N/mm^2)	비 고	
													측력 (kN)	가력 방식
프레임 구속에 따른 프레임 면내 조적 벽체	(1)	bare	순수프레임					81.8					양 기둥	cyclic
		infilled	조적벽체	288.0	7.53	1,950	0.0039		48.0	240.0	0.307	0.78	● 97.7kN씩	
	(2)*	FB-0	순수프레임					110.0						
		IFB-1	조적벽체	160.1	17.95		0.0163		77.1	83.0	0.098	0.85		
		IFBC-1	cut off	190.7	24.00	1,100	0.0218		76.5	114.0	0.100	1.14		
		IFBC-2	띠철근 간격변화	197.6	25.91		0.0236		68.7	129.0	0.100	1.29		
		IFBC-3		218.2	30.28		0.0275		65.1	153.0	0.100	1.53		
	(3)	FB-0	순수프레임					127.0						
		IFB-1	조적벽체	160.1	17.93		0.0160		107.5	53.0	0.098	0.54	● 양쪽 기둥에 각각 125.0kN	
		IFBC-1	cut off	190.7	23.63	1,100	0.0215		117.2	74.0	0.100	0.74		
		IFWB-1		283.9	25.77		0.0234		117.2	167.0	0.098	1.70		
		IFWB-2	프레임 후타설	266.4	21.86		0.0199		121.8	145.0	0.098	1.48		
	(4)	IFWB-3		242.0	17.96		0.0163		108.0	134.0	0.098	1.37		
		FB-0	순수프레임					<127.0>						
		IFBM-1	와이어	175.2	27.46	1,100	0.0250		125.1	50.0	0.098	0.51		
		IFBM-2	메쉬 보강	180.2	31.75		0.0289		127.0	53.0	0.098	0.54		
유개구 조적 벽체	(5)	CASE-1	순수프레임					41.5						push over
		CASE-2	조적벽체	117.8	1.81	1,010	0.0018		23.5	94.0	0.093	1.01	● 양쪽 기둥에 각각 96.0kN	
		CASE-3	개구부의 위치변화	89.9	1.27	×	-		19.9	70.0	0.065	1.08		
		CASE-4		68.9	8.50	×	-		37.5	31.0	0.065	0.48		
		CASE-5		95.9	5.02	×	-		32.8	63.0	0.065	0.97		
		CASE-6		101.3	13.22	1,010	0.0131		40.6	61.0	0.065	0.93		
		CASE-7		69.9	7.60	1,010	0.0075		36.4	34.0	0.065	0.52		
		CASE-8	개구부의 위치변화	69.5	2.18	1,010	0.0022		24.4	45.0	0.060	0.75	□	
		CASE-9		52.9	10.22	1,010	0.0101		38.4	15.0	0.031	0.48	□	
		CASE-10		53.1	8.94	×	-		37.9	15.0	0.093	0.16		
		CASE-11		40.4	18.66	×	-		39.5	1.0	0.093	0.01		
	(7)	FB-0	순수프레임					<127.0>						cyclic
		IFB-1	조적벽체	160.1	17.93		0.0160		107.5	53.0	0.098	<0.54>		
		IFBW-0	개구부	130.7	19.59	1,100	0.0178		108.4	22.0	0.070	0.32	□	
		IFBWR-1	주위의 보강의	145.8	21.42		0.0195		115.7	30.0	0.070	0.43		
		IFBWR-2	유두	152.1	26.90		0.0245		120.6	32.0	0.070	0.45		
		IFBWR-3	및	167.8	31.87		0.0290		127.0	41.0	0.070	0.58		
		IFBWR-4	보강방법	185.8	32.60		0.0296		127.0	59.0	0.070	0.84		

*1 프레임 면내 끼움조적벽체의 최대전단내력

*2 프레임 면내 끼움조적벽체의 최대내력 시의 변위

*3 기둥 순높이

*4 RC 프레임만의 최대전단내력

*5 Δ 시 RC 프레임만의 부담전단력

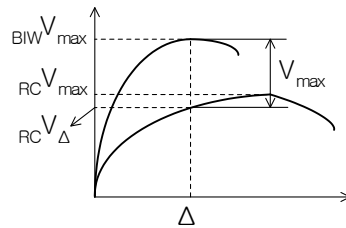
*6 끼움조적벽체만의 부담전단력 ($= BIW V_{max} - RC V_{\Delta}$)

*7 V_{max} / 벽단면적

× : CASE-1과 기둥 순높이가 다름

●, □ : 항복 시의 전단응력도를 결정할 때 참고한 값 (● : 개구부 없음, □ : 개구부 있음)

< > : 다른 문헌과 중복



* : 참고문헌 (3), (4), (7)과 동일한 실험체이나 $RC V_{max}$ 값이 일치하지 않아 참고하지 않았음

(1) 김석균, 김정환, 김명문 (1999), “메움벽에 의한 R/C프레임의 내진성능 평가에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표대회.

- (2) 신종학, 하기주, 최민권, 전하석 (1999), “철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 내진성능 평가 및 개선,” 한국콘크리트학회 추계학술발표대회논문집.
- (3) 신종학, 하기주, 김광연, 이희중, 남왕교 (2001), “반복하중을 받는 철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 프레임구속에 따른 구조성능 평가 및 개선,” 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집 13권 1호, pp.541.
- (4) 신종학, 하기주, 최민권, 권중배, 남왕교 (2001), “철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 내진성능개선 기술 개발,” 한국콘크리트학회 가을학술발표대회논문집 13권 2호, pp.1143.
- (5) 신종학, 김현산 (1989), “프레임면내 조적 메움벽의 내력 및 효율성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집 5권 1호.
- (6) 신종학, 김현산 (1989), “프레임면내 조적 메움벽의 내력 및 효율성에 관한 실험적 연구(II),” 대한건축학회 논문집 5권 6호.
- (7) 신종학, 하기주, 김광연, 권중배, 전재호 (2001), “개구부를 갖는 철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 내진성능 평가 및 개선,” 대한건축학회 춘계학술발표대회 21권 1호, pp.163.

라. 요구성능 판정지표 및 평가용 지표산정

평가용 지진가속도(α)에 따라 요구성능판정지표(E_{di}) 및 내진성능 예비평가용 지표(β , G , P)를 표 II.20에 의해서 산정한다.

<표 II.20> 평가용 지진가속도(α)에 따른 요구성능 판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β , G , P) 계산식

지진규모 지표값	$0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$	$0.2g < \alpha \leq 0.3g$			
E_{di} ($i = 1 \sim 4$)	$E_{d1} = E_{d2}$ $= E_{d3} = E_{d4}$	경미/무피해 판정용(E_{d1})	소규모 피해 판정용(E_{d2})	중규모 피해 판정용(E_{d3}, E_{d4})	대규모 피해 판정용
	$2\alpha + 0.05$	$1.1\alpha + 0.23$	$2\alpha + 0.05$	$1.5\alpha + 0.15(E_{d3})$ $2\alpha + 0.05(E_{d4})$	-
β	$2.1 - 6\alpha$	$1.42 - 2.6\alpha$			
G	$2.2\alpha + 0.06$	$\alpha + 0.3$			
P	0.15	$0.31 - 0.8\alpha$			

마. 건물의 지진피해도 및 내진성능 평가점수 산정

1) 경미한 피해 판정 및 내진성능 점수 계산

(1) 경미한 피해용 요구성능 계산 (식 3.3)

$$E_{p1} = (0.77C_{su} + 0.3C_{fy}) \times 0.78 \quad (3.3)$$

(2) 경미한 피해 판정

① $E_{d1} \leq E_{p1} \Rightarrow$ 본 건물은 「경미한 피해」로 최종판정: ③에서 내진성능 평가점수 계산

② $E_{d1} > E_{p1} \Rightarrow$ 3.5.2절의 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산으로 이동

③ 내진성능 평가점수 : $\frac{E_{p1}}{E_{d1}} \times 100 = (\quad)$ 점 (3.4)

2) 소규모 피해 판정 및 내진성능 점수 계산

(1) 소규모 피해 요구성능 계산 (식 3.5)

$$E_{p2} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d2}) \times 0.75\}^2 + \{0.9C_{fy} \times 0.8\}^2} \quad (3.5)$$

(2) 소규모 피해 판정

① $E_{d2} \leq E_{p2} \Rightarrow$ 본 건물은 「소규모 피해」로 최종판정: ③에서 내진성능 평

가점수 계산

② $E_{d2} > E_{p2} \Rightarrow$ 3.5.3절 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산으로 이동

$$\textcircled{3} \text{ 내진성능 평가점수 : } \frac{E_{p2}}{E_{d2}} \times 100 = (\quad) \text{ 점} \quad (3.6)$$

3) 중·대규모 피해 판정 및 내진성능 점수 계산

(1) 중규모 피해 요구성능 계산 (식 3.7 및 식 3.8)

$$E_{p3} = (0.83C_{su} + 0.5C_{fy}) \times 0.8 \quad (3.7)$$

$$E_{p4} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d4}/2)\}^2 + \{C_{fy} \times 1.27\}^2} \quad (3.8)$$

(2) 중규모 및 대규모 피해 판정

① $E_{d3} > E_{p3}$ 및 $E_{d4} > E_{p4}$: 하나만 만족하거나 둘 다 만족하지 않을 경우 \Rightarrow 본 건물은 「중규모 피해」로 최종 판정: ③에서 내진성능 평가점수 계산

② $E_{d3} > E_{p3}$ 및 $E_{d4} > E_{p4}$: 둘 다 만족하는 경우 \Rightarrow 본 건물은 「대규모 피해」로 최종 판정: 3.5.4절 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산으로 이동

③ 내진성능 평가점수 계산

$$C_{su} < G \text{ 이면 : } \frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 (1 - \sqrt{\beta C_{su}}) + 100 \sqrt{\beta C_{su}} = (\quad) \text{ 점} \quad (3.9)$$

$$C_{su} \geq G \text{ 이면 : } \frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 \left(1 + \frac{C_{su} - G}{P} \right) - \frac{C_{su} - G}{P} \times 100 = (\quad) \text{점} \quad (3.10)$$

4) 대규모 피해용 내진성능 점수 계산

① 내진성능 평가점수 계산

$$C_{su} < G \text{ 이면 : } \frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 = (\quad) \text{점} \quad (3.11)$$

$$C_{su} \geq G \text{ 이면 : } \frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 + \frac{200(E_{p3} - E_{d3})}{3E_{d3}} = (\quad) \text{점} \quad (3.12)$$

바. 내진성능 등급 결정

3.5절에서 평가한 학교 건물의 지진 피해도와 내진성능 평가점수에 의해서 내진성능 등급을 표 II.12와 같이 결정하며, 최종적으로 표 II.13과 같이 내진성능을 판정한다.

4. 내진성능 상세평가

가. 일반사항

내진성능 상세평가는 원칙적으로 보의 강도는 충분히 강하다고 가정을 하여 건물이 가지는 보유성능 (극한강도와 극한변형을 이용한 비선형 이력거동)을 간략하게 계산하여, 그 결과를 비선형요구내력스펙트럼을 이용하여 2.2.1절에 나타난 평가용 최대 지진가속도 수준까지 순차적으로 지진손상도를 추정 (잔존 내진성능)하여 내진성능을 평가한다.

보유성능은 수직부재의 배근상세 등을 이용하여 계산되는 부재의 극한강도 및 극한연성률(연성지표)에 근거하여 계산을 하며, 상세평가에서는 극단주 등의 국부적인 파괴부재, 휨파괴형 부재 및 전단파괴형 부재의 영향이 고려된다. 또한, 본 지침에 의한 내진성능 상세평가에서는 평가 학교건물 전체 층의 X방향 및 Y방향에 대해서 각각 독립적으로 수행하는 것을 원칙으로 한다.

[해설]

내진성능 상세평가에 관한 이론적 연구자료는 IV장의 내진성능 상세평가의 연구자료에 상세하게 기술한다.

나. 평가용 지진가속도 산정

내진성능 상세평가를 위한 입력 지진가속도(a)는 식(2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정을 하며, 표 II.6을 이용하여 재현주기별 평가용 최대 지진가속도를 선택 가능하다.

다. 보유성능의 계산

내진성능 상세평가에서는 대상으로 하는 층의 개개의 수직부재의 파괴형식 (표 II.21), 극한내력 시 전단력 (강도지표, C) (4.3.1절)을 계산하고, 4.3.2절에 나타낸 방법에 의해 대상으로 하는 층의 개개의 수직부재의 극한 연성률 (연성지표, F)를 계산한다.

다음으로, 그 파괴형식 및 연성지표의 값이 비슷한 것을 최대한 정리하여, 전 수직부재를 최대 3개의 수직부재 그룹으로 하여 연성지표가 작은 순으로 제1그룹, 제2그룹, 제3그룹으로 한다. 이들 수직부재 그룹의 강도지표(C)와 연성지표(F)를 조합하여 식 (4.1) 및 식(4.2)에 나타내는 방법으로 보유성능(Eo)을 산정한다.

(1) 극취성기둥이 없는 경우

식(4.1)과 식(4.2) 중 큰 값을 취한다.

$$E_o = \frac{n+1}{n+i} \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} \quad (4.1)$$

$$E_o = \frac{n+1}{n+i} (C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3) \times F_1 \quad (4.2)$$

여기서, $E_1 : C_1 \times F_1$

$E_2 : C_2 \times F_2$

$E_3 : C_3 \times F_3$

C_1 : 제1그룹 (F 지표가 가장 작은 그룹)의 C지표

C_2 : 제2그룹 (F 지표가 중간인 그룹)의 C지표

C_3 : 제3그룹 (F 지표가 가장 큰 그룹)의 C지표

F_1 : 제1그룹의 F 지표

F_2 : 제2그룹의 F 지표

F_3 : 제3그룹의 F 지표

α_2 : (제1그룹 종국강도 변형 시 제2그룹 강도의 합) / (제2그룹 종국강도의 합)

α_3 : (제1그룹 종국강도 변형 시 제3그룹 강도의 합) / (제3그룹 종국강도의 합)

α_2, α_3 는 표 II.22에 의해 결정할 수 있다.

(2) 극취성기둥이 있는 경우

극취성기둥이 있는 경우, 보유성능(E_o)는 극취성기둥을 무시하여 식(4.1) 및 식(4.2)에 의해 구한 값과, 극취성기둥을 고려하여 식(4.2)으로 구한 값 중 가장 큰 값을 취한다. 극취성기둥을 무시하는 경우에는 연성지표(F)가 두 번째로 작은 연직부재 그룹을 제1그룹으로 하고 순차적으로 그룹 번호를 올린다.

<표 II.21> 내진성능 상세평가용 수직부재의 파괴형식에 의한 분류

명 칭	정의
휨기둥	휨항복이 전단파괴보다 선행하는 기둥
휨벽체	휨항복이 전단파괴보다 선행하는 벽
전단기둥	전단파괴가 휨항복보다 선행하는 기둥, 단, 극취성기둥은 제외
전단벽체	전단파괴가 휨항복보다 선행하는 벽
끼움조적벽체	전단파괴가 휨항복보다 선행하는 끼움조적벽
극취성기둥	h_o/D 가 2이하(단주)이고, 전단파괴가 휨항복보다 선행하는 기둥

<표 II.22> α_2 및 α_3 의 값

식 (4.2)의 α_2 의 값			식 (4.2)의 α_3 의 값		
제1그룹 제2그룹	극취성 기둥	전단기둥 전단벽	제1그룹 제3그룹	극취성 기둥	전단기둥 전단벽
휨기둥	0.5	0.7	휨기둥	0.5	0.7
휨벽	0.7	1.0	휨벽	0.7	1.0
전단기둥 전단벽	0.7	-	전단기둥 전단벽	0.7	-

[해설]

보유성능의 개념 및 계산방법은 일본 내진진단기준을 참조하였다.

1) 강도지표의 계산

(1) 기본사항

내진성능 상세평가에서는 원칙적으로 보는 충분히 강하다고 가정하여, 수직부재의 수평력에 대한 극한강도로부터 강도지표 C 를 산정한다. 각 수직부재의 전단극한강도 Q_{su} 및 휨극한 시의 전단력 Q_{Mu} 를 구하여, 양자를 비교하여 파괴형식을 분류한다 (표 II.23).

(2) 부재의 극한강도의 계산

전단극한강도 Q_{su} 및 휨극한강도 M_{u} 의 계산에는 기존 연구된 적합성이 좋은 식을 사용하는 것으로 한다. 이 중, 특히 Q_{su} 에 대해서는 하한에 가까운 값이 얻어지는

식을 이용하는 것으로 하나, 특별한 검토를 하지 않을 때에는 Q_{su} 와 M_u 는 부칙1에 나타내는 부재 극한강도 계산식을 이용하는 것을 원칙으로 한다.

콘크리트 강도 및 강재의 항복점 강도는 설계기준강도를 사용한다. 단, 예비조사에 의해 현저히 노후화가 관찰되는 경우 혹은 정밀조사에 의해 재료강도에 관한 자료가 얻어진 경우에는 실제의 값을 사용한다.

(3) 파괴형식 및 종국시의 전단력의 계산

4.3.1(2)절에서 계산한 휨강도 및 전단강도를 이용하여 수직부재의 파괴형식 및 그때의 보유전단력 Q_u 를 다음과 같이 구한다.

① 기둥의 경우

휨종국강도 시 전단력 ${}_cQ_{Mu}$ 를 식(4.3)에 의해 계산하고, 이것과 전단종국강도 ${}_cQ_{su}$ 를 비교하여, 파괴형식과 종국보유전단력 ${}_cQ_u$ 를 구한다.

${}_cQ_{Mu} < {}_cQ_{su}$ 인 경우 : 휨기둥 (${}_cQ_u = {}_cQ_{Mu}$)

${}_cQ_{Mu} \geq {}_cQ_{su}$ 인 경우 : 전단기둥 (${}_cQ_u = {}_cQ_{su}$)

$${}_cQ_{Mu} = \frac{({}_cM_u)_{\text{상}} + ({}_sM_u)_{\text{하}}}{h_o} \quad (4.3)$$

여기서, $({}_cM_u)_{\text{상}}$: 주두의 휨종국강도

$({}_cM_u)_{\text{하}}$: 주각의 휨종국강도

h_o : 기둥의 내치수 (그림 II.1 참조)

다만, 전단기둥 중, $h_o/D \leq 2$ 인 기둥을 극취성기둥으로 취급한다.

② 벽의 경우

휨종국강도 시 전단력 ${}_wQ_{Mu}$ 를 식 (4.4)에 의해서 계산하고, 이것과 전단종국강도 ${}_wQ_{su}$ 를 비교하여 파괴형식과 종국보유전단력 ${}_wQ_u$ 를 구한다.

${}_wQ_{Mu} < {}_wQ_{su}$ 인 경우 : 휨벽 (${}_wQ_u = {}_wQ_{Mu}$)

${}_wQ_{Mu} \geq {}_wQ_{su}$ 인 경우 : 전단벽 (${}_wQ_u = {}_wQ_{su}$)

$${}_wQ_{Mu} = 2{}_wM_u/h_w \quad (4.4)$$

다만, 여러층에 연속된 벽 (1층 벽을 포함)의 최상층의 경우에는 우변의 계수 2를 1로 한다. 여기서, ${}_wM_u$ 는 고려하는 층의 벽 휨종국강도이고, h_w 는 고려하고 있는 층의 바닥에서부터 그 벽의 최상부까지의 높이이다.

(4) 연직부재의 그룹핑

파괴형식에 따라 구해지는 연성지표(F) (4.3.2절 참조)의 크기에 따라 수직부재를 최대 3종류로 분류하고 F지표가 작은 순으로 제1, 제2, 제3그룹이라 한다. 이때 다음 사항에 주의한다.

- F치가 근사한 것은 될 수 있는 대로 동일그룹으로 넣고, E_o 가 크게 되도록 그룹의 수를 3이하로 한다. 이 경우 그룹의 F지표는 그룹 부재중 가장 작은 F값을 사용한다.
- 극취성기둥은 독립시켜 그룹핑한다.

(5) 강도지표의 산출

각 그룹의 강도지표 C_i 는 식(4.5)에 의해서 계산한다.

$$C_i = (i \text{ 그룹에 속한 수직부재의 종국보유 전단력의 합}) / \sum W \quad (4.5)$$

여기서, $\sum W$ 는 그 층보다 위의 건물 전 중량으로, 건물자중에 지진용 적재하중을 합한 것으로서, 중량(W)을 계산할 하지 않은 경우에는 바닥면적당 단위중량 $w=10 \text{ kPa}$ ($1,000 \text{ kgf/m}^2$)을 사용하여 건물 전 중량을 계산해도 좋다.

[해설]

강도지표는 일본 내진진단기준을 참조하였다.

2) 연성지표의 계산

내진성능 상세평가의 연성지표는 표 II.23의 분류에 근거하여 표 II.24에 나타내는 값을 사용한다. 다만, 연성능력이 있는 휨항복이 선행하는 휨기둥 및 휨벽체에 대해서는 식(4.6) 및 식(4.7)에 의해서 계산을 하며, 날개벽을 가지는 기둥은 특별한 검토를 하지 않으면, $F=1.0$ 로 할 수가 있다.

① 휨기둥

$$F = \phi \sqrt{2\mu - 1} \quad (4.6)$$

여기서 μ : 휨기둥의 종국연성을

$$\phi : \frac{1}{0.75(1+0.05\mu)}$$

식(4.6)의 휨기둥의 종국연성율(μ)은 식(4.7)에 의해 계산한다. 다만, 식(4.8)의 어느 한 조건에 해당하는 경우에는 μ 의 값에 관계없이 연성지표 F를 1.0으로 한다.

$$\mu = \mu_o - k_1 - k_2 \quad [1 \leq \mu \leq 5] \quad (4.7)$$

여기서, $\mu_o = 10 \left(\frac{{}_cQ_{su}}{{}_cQ_{Mu}} - 1 \right)$

$k_1 = 2.0$ (다만, 띠철근간격이 주근지름의 8배 이하인 경우는 0로 해도 좋다)

$$k_2 = 30 \left(\frac{{}_c\tau_{Mu}}{f_{ck}} - 0.1 \right) \geq 0$$

${}_cQ_{su}$: 기둥의 종국 전단 강도

${}_cQ_M$: 기둥의 휨종국 강도시 전단력

${}_c\tau_{Mu} = Q_{Mu}/(b \cdot j)$ b : 기둥폭

j : 기둥의 응력중심간 거리 (0.8D로 해도 좋다)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도

연성지표 F를 1.0으로 하는 조건은 다음과 같다.

$N_s / (b D F_c) > 0.4$ (N_s 는 지진 시 축방향력)

${}_c\tau_{Mu} / F_c > 0.2$

$P_t > 1\%$ (P_t 는 인장철근비)

$h_o / D \leq 2.0$ (h_o 는 기둥 내치수 높이)

② 휨벽

$$\frac{{}_wQ_{su}}{{}_wQ_{Mu}} \leq 1.2 \text{ 의 경우 : } F=1.0 \quad (4.9)$$

중간은 직선보간

$$\frac{{}_wQ_{su}}{{}_wQ_{Mu}} \geq 1.3 \text{ 의 경우 : } F=2.0 \quad (4.10)$$

여기서, ${}_wQ_{su}$ 는 벽의 종국 전단강도

${}_wQ_{Mu}$ 는 벽의 휨종국 강도시 전단력

<표 II.23> 상세평가용 연성지표 F

수직부재	인성지표 F	참조
휨기둥	1.27~3.2*	식(4.6)
휨벽	1.0~2.0	식(4.9) 및 식(4.10)
전단기둥	1.0	-
전단벽	1.0	-
극취성기둥	0.8	-

주* 경우에 따라 1.0이 되는 경우가 있다.

[해설]

연성지표는 일본 내진진단기준을 참조하였다.

라. 연성율별 지진가속도 수준의 산정

4.3.1절의 식(4.5)에 의해서 계산한 극한강도지표를 4.3.2절의 연성지표 별로 표 II.24와 같이 전단 (C_{su}) 및 휨파괴형(C_{fy}) 부재의 극한강도로 분류한다. 전단파괴형 부재의 극한강도(C_{su}), 휨파괴형 부재의 극한강도(C_{su}), 연성율 (μ_f) 및 지진가속도(α)의 역학적 관계를 비선형 요구내력스펙트럼 결과에 근거하여 수식화 한 식 (4.10)를 바탕으로 특정 연성율 ($\mu_f=0.3$, $\mu_f=0.6$, $\mu_f=1$, $\mu_f=2$, $\mu_f=4$)별 지진가속도 수준을 계산한다.

$$\mu_{f=0.3} : 0.3 = \frac{0.08}{1.03} \alpha^{-0.97} [C_{fy} + 1.9\alpha(\alpha - 0.005)^{-0.7} C_{su}] \quad (4.10a)$$

$$\mu_{f=0.6} : 0.6 = \frac{0.24}{1.1} \alpha^{-0.99} [C_{fy} + 1.54\alpha(\alpha - 0.017)^{-0.6} C_{su}] \quad (4.10b)$$

$$\mu_{f=1.0} : 1.0 = \frac{0.65}{1.1} \alpha^{-0.9} [C_{fy} + 1.02\alpha(\alpha - 0.007)^{-0.58} C_{su} + 0.008\alpha(\alpha + 0.003)^{-3} C_{su}^2] \quad (4.10c)$$

$$\mu_{f=2.0} : 2.0 = \frac{1.7}{1.1} \alpha^{-1.12} [C_{fy} + 0.7\alpha^2(\alpha - 0.007)^{-0.96} C_{su} + 0.12\alpha(\alpha - 0.011)^{-1.7} C_{su}^2] \quad (4.10d)$$

$$\mu_{f=4.0} : 4.0 = \frac{4.1}{1.1} \alpha^{-1.23} [C_{fy} + 0.018\alpha^2(\alpha - 0.001)^{-1.1} C_{su} + 0.4\alpha(\alpha - 0.017)^{-1.16} C_{su}^2] \quad (4.10e)$$

<표 II.24> 전단 (C_{su}) 및 휨파괴형(C_{fy}) 부재의 종국강도 분류

종국강도 분류	종국강도 값
전단파괴형 부재의 종국강도 (C_{su})	C_{su} = 연성지표 F 가 1이하인 경우의 강도지표의 합 ΣC
휨파괴형부재의 종국강도 (C_{fy})	C_{fy} =연성지표 F 가 1을 초과한 경우의 강도지표의 합 ΣC

마. 연성율별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 산정

4.4절에서 계산한 특정 연성율 단계, 즉 $\mu_f=0.3$, $\mu_f=0.6$, $\mu_f=1$, $\mu_f=2$ 및 $\mu_f=4$ 단계의 잔존 내진성능(R)을 표 II.25 및 식(4.11)을 이용하여 계산한다. 본 지침에서는 잔존내진성능을 식(4.11)에 나타낸 지진피해 전·후의 보유성능(E_o 및 ${}_dE_o$)의 비율 (내진성능 잔존율, RSC)로 정의를 한다. 식(4.11)의 η 는 내진성능 저감계수를 나타내며, 전단 및 휨과괴형 부재의 손상정도를 지진에너지 흡수능력을 이용하여 제안된 계수이다 (표 II.26 참조).

$$RSC = \frac{{}_dE_o (= \eta E_o)}{E_o} \times 100(\%) \quad (4.11)$$

여기서, E_o : 지진피해 전의 보유성능 (4.3절 참조)

${}_dE_o$: 지진피해 후의 보유성능 ($=\eta \cdot E_o$)

η : 내진성능 저감계수 (표 II.26 참조)

<표 II.25> 연성율별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능의 계산법

특정 연성 율	연성율별 지진가속 도 수준 (4.4절)	보유 성능 (4.3절)	전단 및 휨과괴형 부재의 손상도 (표 II.26)		내진성능 저감계수 (η)		지진피 해 후의 보유성 능	잔존 내진성 능
μ_f	$\alpha(g)$	E_o	Shear	Flexural	Shear	Flexural	${}_dE_o$	RSC (%)
0.3	○	○	III	I	0.3 (0.4)	0.95	○	○
0.6	○		IV	I	0	0.95	○	○
1	○		IV	II	0	0.75	○	○
2	○		IV	III	0	0.5	○	○
4	○		IV	IV	0	0.1	○	○

○: 계산 값

<표 II.26> 부재의 내진성능 저감계수(η)

지진손상도	전단파괴형 기둥	휨파괴형 기둥	전단벽
I	0.95	0.95	0.95
II	0.6 (0.7)	0.75	0.6
III	0.3 (0.4)	0.5	0.3
IV	0	0.1	0
V	0	0	0

주) 내진성능 저감계수는 부재의 실험연구를 바탕으로 유도한 것으로서, 부재의 내력-변형관계곡선을 이상화하여 부재가 소산한 지진에너지와 잔존에너지 흡수능력을 이용하여 설정한 계수임.

[해설]

내진성능저감계수는 지진피해를 받은 건축물의 지진피해도 구분판정기준을 참조하였다.

바. 건물의 지진피해도 및 내진성능 등급 결정

4.5절에서 계산한 잔존 내진성능(RSC)에 의해서 지진피해도 및 내진성능 등급을 표 II.13과 같이 결정하며, 최종적으로 표 II.14과 같이 내진성능을 판정한다.

5. 내진보강 기본계획

가. 일반사항

내진보강 기본계획에서는 내진보강의 흐름, 내진보강 설계의 흐름, 내진보강 공법의 선택개념, 필요 보강량 산정방법 및 내진보강 효과의 확인절차를 기술한다. 다만, 특별한 연구결과를 바탕으로 내진보강 기본계획을 수행 할 경우에는 본 지침을 적용하지 않아도 된다. 또한, 내진보강 실시설계 및 시공에 관한 사항은 대한건축학회 및 한국콘크리트 학회의 콘크리트 구조 설계기준, 건축공사 표준시방서 등의 관련 법/기준을 및 지침에 의한다.

나. 내진보강 기본계획

1) 내진보강 및 설계의 흐름

내진보강은 일반적으로 그림 II.2처럼 내진성능 평가, 보강설계, 보강공사 시공의 순서로 구성되어 있으며, 보강설계는 보강계획, 기본설계, 상세설계, 보강효과의 확인의 순서를 권장하며, 보강 건물의 내진성능이 목표값 (목표 내진성능)을 만족하지 못하면 보강설계의 순서를 반복한다(그림 II.3).

① 보강계획

5.2.3절에 의한 목표 내진성능을 만족하기 위한 보강목표를 설정하여, 내진보강에 의해서 학교건물에 어느 정도의 강도 내지는 연성을 부여 해야 하는가 등의 기본 방침을 결정한다. 또한, 보강목표에 가장 최적의 보강공법을 선정한다.

② 기본설계

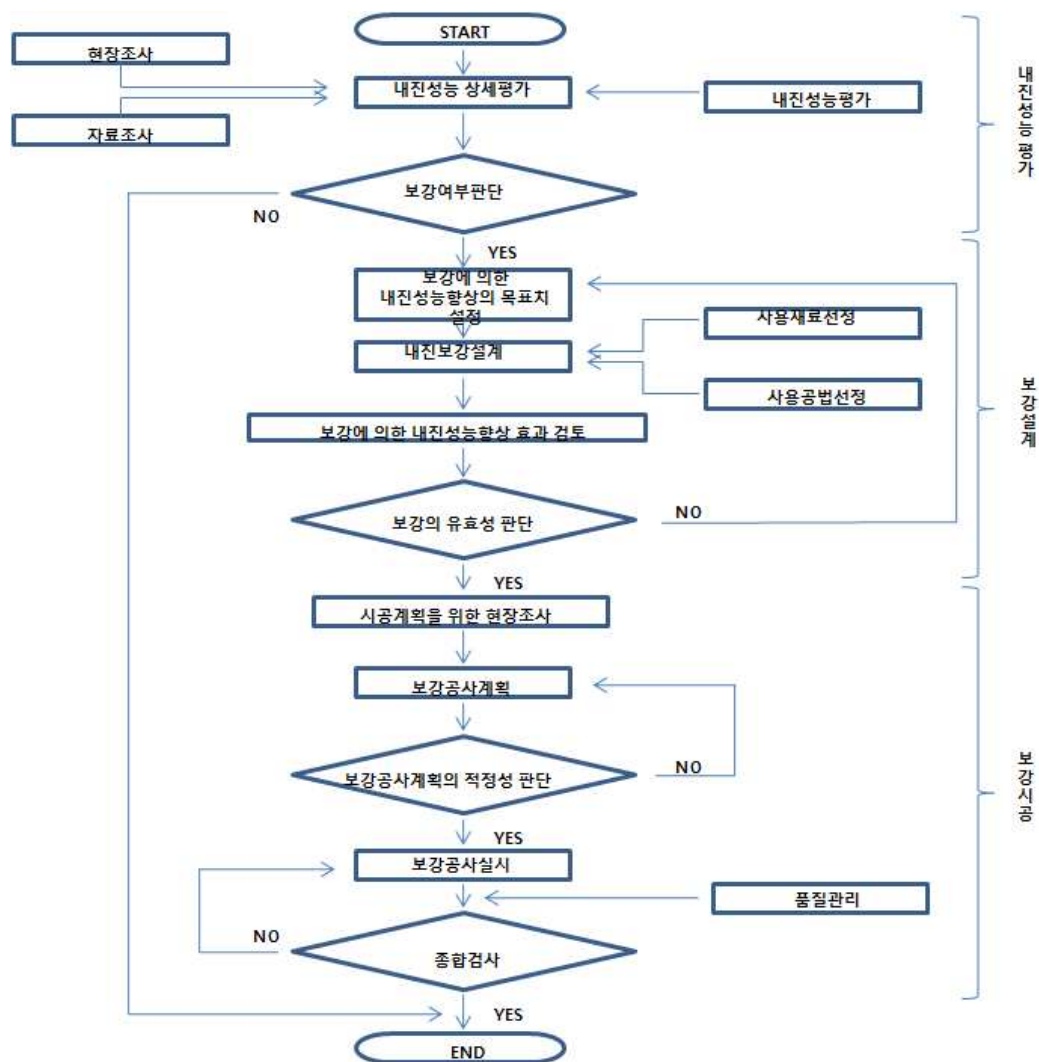
필요 보강량(보강부재 단면 및 그 수량)의 약산 및 보강부재의 배치를 수행한다.

③ 상세설계

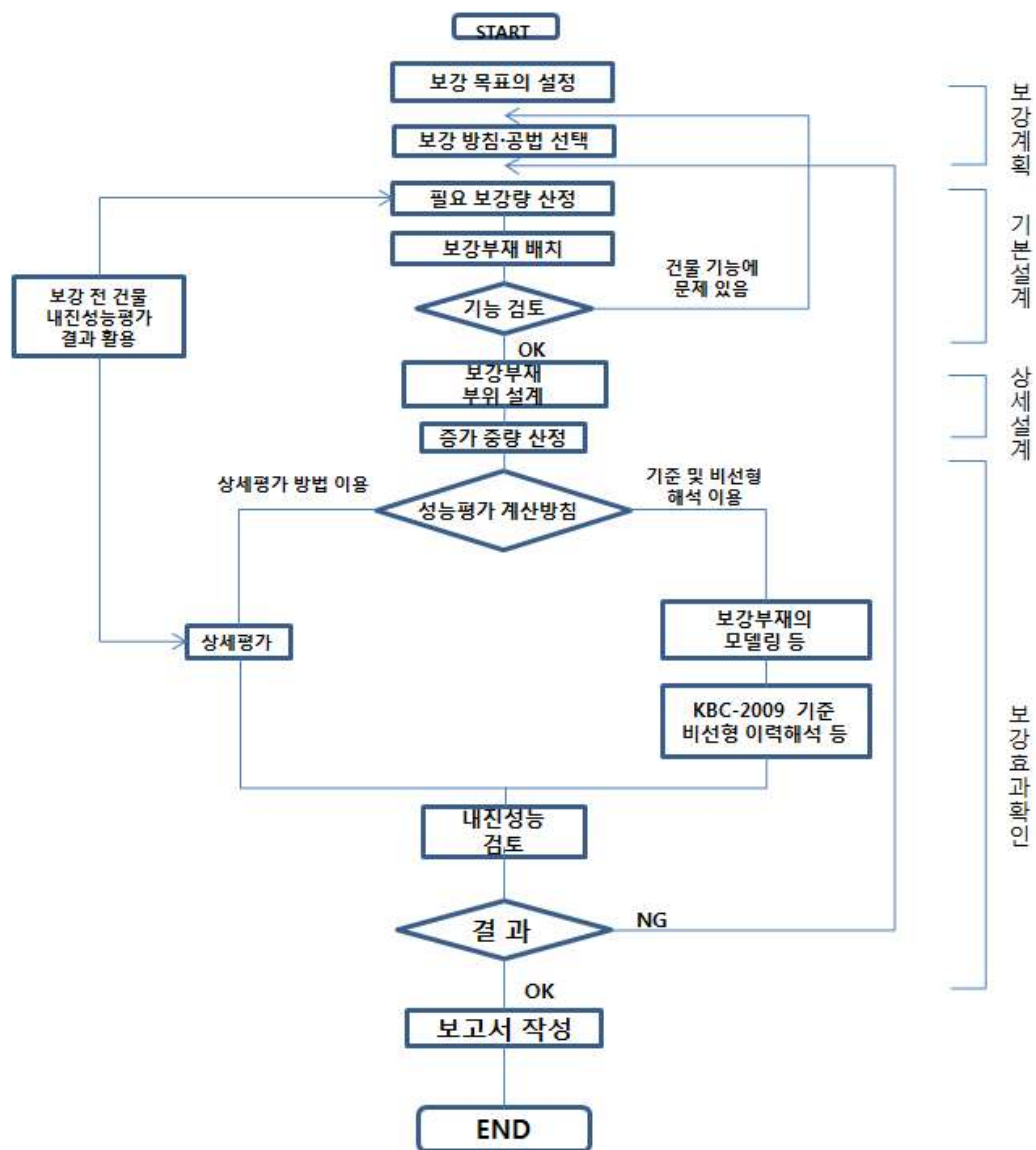
배치 계획된 보강부재, 기존골조와의 접합부 등의 상세를 설계함과 동시에, 보강부재의 극한강도지표 및 연성지표를 계산한다.

④ 보강효과의 확인

내진보강효과의 확인에는 본 지침의 내진성능 상세평가 방법을 기본적으로 활용할 것을 권장하지만, KBC-2009 등 관련 설계기준 및 비선형해석 등을 이용하여 확인을 하여도 된다. 다만, 제진브레이스 등 건물 강도뿐만 아니라 지진에너지 흡수능력에 의존하는 보강방법을 이용한 경우에는 비선형 시간이력해석을 실시하여 보강설계가 적절하게 수행되었는지를 확인해야 한다.



[그림 II.2] 내진보강의 흐름



[그림 II.3] 보강설계의 흐름

2) 내진보강 공법의 선택

내진보강에는 실험 등에 의해서 그 효과가 확인된 신뢰성이 검증된 공법을 이용한다. 또한, 기존 학교건물의 내진성능 평가 결과를 바탕으로 한 구조특성을 충분하게 파악하여, 건물의 내력(강도)향상, 연성의 향상, 에너지흡수 능력 개선 등, 보강 목표에 대응한 가장 최적의 공법을 선택한다 (표 II.27 참조).

<표 II.27> 대표적인 내진보강법

보강개념	학교 건물 보강법
강도보강	철골브레이스 접착공법, 패럴(parallel)공법, 전단벽 신설, PC 판넬, OFB 공법, 벽체 전면보강, 외부버팀벽, 슈퍼앵커 보강법 등
연성보강	SR-CF보강법, 강판보강, 섬유보강재 보강, SPAC 내진공법 등
제진공법	토글 제진공법, 외부접합 제진브레이스, 기타 제진브레이스 공법 등
면진공법	각종 면진구조 공법 등

3) 필요 내진보강량의 산정

입력 지진가속도(S)에 대해서 목표성능을 만족하기위한 필요 보강량(ΔQ)을 식 5.1에 의해서 산정한다. 다만, 검증된 연구결과를 바탕으로 필요 보강량을 산정 할 경우에는 본 지침을 적용하지 않아도 된다. 또한, 전단파괴 부재가 주요한 내진요소인 건물은 식(5.2)에 의해서 필요 증가내력을 계산하여도 된다.

$$\Delta Q = \left(\frac{n+i}{n+1} \right) \times \frac{1}{F} ({}_R E_o - E_o) \times \sum W_i \quad (5.1)$$

여기서, ΔQ : i층의 필요 증가내력(강도)

n, i : 건물의 층수, 해당 층의 층수

F : 식 4.2에 사용된 연성지표

E_o : 보강전의 보유성능

${}_R E_o$: 보강목표 보유성능[식 (5.3)] ($=2.7\alpha-0.02$)(그림 II.4.5 참조)

$\sum W_i$: i층으로 부터 상부층의 건물중량의 합

$$\Delta Q = \left(\frac{n+i}{n+1} \right) \times ({}_R E_o - E_o) \times \sum W_i \quad (5.2)$$

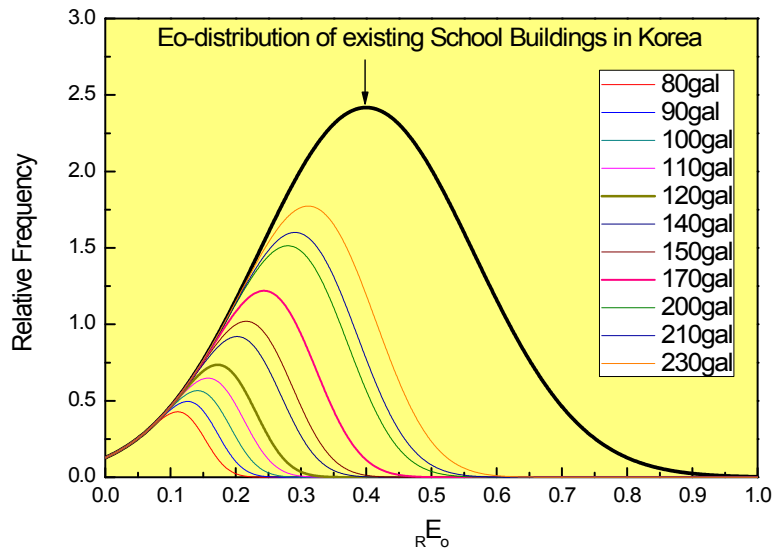
한편, 식(4.1)에 의해서 보유성능이 결정된 경우에는 식(5.1) 및 식(5.2)에 의해서 계산된 필요 증가내력이 불충분한 경우가 있기 때문에 식(4.1)을 이용해서 필요 보강량을 확인 할 필요가 있다.

필요 보강량(ΔQ) 산정을 위한 보강목표 보유성능(${}_R E_o$)는 식(5.3)에 의해서 추정한다.

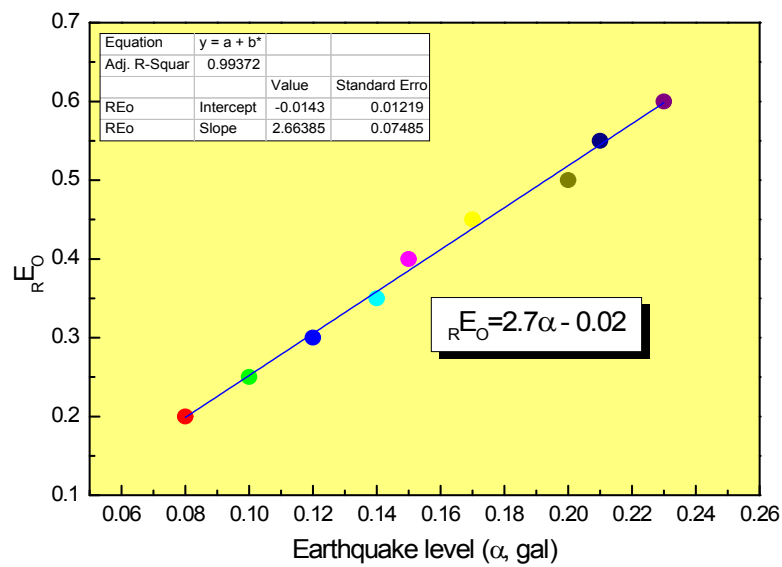
$${}_R E_o = 2.7\alpha - 0.02 \quad (5.3)$$

여기서, ${}_R E_o$: 보강목표 보유성능

α : 입력지진동(gal)



[그림 II.4] 입력지진동과 보강목표의 관계



[그림 II.5] 입력지진동과 보강목표의 관계

[해설]

보강목표 보유성능(RE_o)을 나타내는 식 (5.3) ($RE_o=2.7a-0.02$)은 「국내 철근콘크리트 건물의 내진안전성 평가에 관한 연구, 이강석 등, 한국콘크리트학회 2010 가을 학술발표 논문」 및 「일본의 기존 철근콘크리트 건물의 내진성능 및 지진피해율의 평가, 이강석 및 이리형, 한국전산구조공학회 논문집 Vol. 13. No. 1, pp. 63~74, 2000」 논문을 참조로 그림 II.4.5과 같은 입력지진동과 보강목표의 관계를 도출하였다.

다. 내진보강 효과의 확인

내진보강효과의 확인에는 본 지침의 내진성능 상세평가 방법을 기본적으로 활용할 것을 권장하지만, KBC-2009등 관련 설계기준 및 비선형해석 등을 이용하여 확인을 하여도 된다.

다만, 면진/제진 등 건물 강도뿐만 아니라 지진에너지 흡수능력에 의존하는 보강방법을 이용한 경우에는 비선형 시간이력해석을 실시하여 보강설계가 적절하게 수행되었는지를 확인해야 한다.

Ⅲ. 내진성능 예비평가의 연구자료

대다수의 철근콘크리트(이하, RC) 건물은 취성적인 파괴성상을 나타내는 전단벽(Shear Wall), 단주(Short Column) 등의 전단파괴형 부재 및 소성능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재로 이루어져 있다. 따라서, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물은 이들 부재들의 내력, 연성능력 등 역학적 상관관계가 고려된 내진성능 평가법에 의해서 내진성능을 평가해야 한다.

그러나, 현존 RC 건물의 내진성능을 단시간 내에 약산적으로 평가하여 내진성능이 우수한 건물을 우선적으로 선별을 하는 대표적인 간이 내진성능 평가법(Rapid-Screening Method)인 미국의 FEMA310의 Screening Phase¹⁾ 및 일본의 1차 내진진단법²⁾등에서는 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능에 관해서는 충분히 검토가 되어있지 않는 것이 현재의 실정이다. FEMA 310의 Screening Phase에서는 RC 건물을 주로 전단벽식 내지는 모멘트골조로 구분하여 내진성능을 평가하고 있으며, 각각의 구조형식에 대한 평가기준을 토대로 경험적인 판단을 근거로 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능을 약산적으로 평가한다¹⁾.

한편, 일본의 1차 내진진단법은 건물의 연성능력은 무시를 하며, 건물이 지진하중에 견디기 위하여 충분한 강도가 있는지 없는지를 평가하는 기법으로서, 일반적으로 전단파괴형 부재가 비교적 적은 건물의 내진성능을 과소평가 하는 경향이 있다^{2),3)}. 또한, 내진성능을 판정하는 내진판정지표는 과거 지진을 경험한 피해건물의 내진진단 결과를 토대로 설정한 경험적인 연구를 바탕으로 하고 있다^{2),3)}.

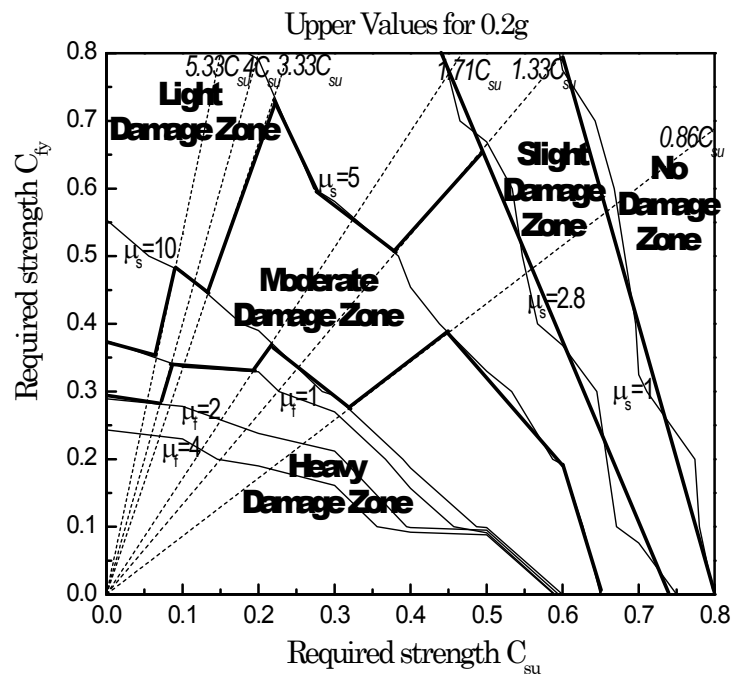
상기의 배경 하에, 본 연구의 필자는 문헌[4]에서 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물(6층 이하)의 내진성능을 보다 적절하게 평가를 하는데 있어서 기본적인 자료를 얻고자, 각각 파괴형 부재의 강도와 연성능력사이의 상관관계를 비선형 지진 응답해석을 실시하여 파악하였으며, 이를 바탕으로 특정연성율을 위한 요구내력(Required Strength)을 산정하였다. 또한, 저층 RC 건물의 내진성능을 단시간 내에 효율적으로 평가하는 기법을 제안하기 위해서는 전단파괴형 부재의 피해정도와 휨파괴형 부재의 피해정도와의 상관관계를 파악하여, 이것이 건물 전체의 피해상황에 어떻게 영향을 미치는가를 검토할 필요성이 있다는 것도 지적하였다.

한편, 문헌[5]에서는 문헌[4]의 검토사항을 바탕으로 전단 및 휨파괴형 부재의 손상도와 잔존내진성능(R지표)을 바탕으로 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 지진피해상황을 각 연성율별로 검토한 연구결과와 문헌[4]에서 각종 연성율별로 유도한 요구내력과 비교·검토하여 그림 1.1에 나타난 것처럼, 저층 RC 건물의 지진피해상황이 지진동 수준별로 예측가능한 요구내력스펙트럼을 제안함과 동시에 실제 지진에서 피해를 입은 건물을 대상으로 그 적용가능성을 검토하였다.

문헌[5]에서 제안한 요구내력스펙트럼은 전단 및 휨파괴형 부재의 내력과 연성능력사이의 상관관계를 바탕으로 어떤 지진규모에 대하여 건물에 예상되는 피해상황을 그 건물이 보유하는 내력에 의하여 추정 가능하며, 실제 지진에서 피해를 입은 저층 RC 건물의 피해상황과도 좋은 대응관계를 나타내었다. 그러나, 저층 RC 건물의 실용적인 간이 내진성능 평가법을 제안하기 위해서는 지진하중과 요구내력곡선의 일반적인 경향을 Newmark 응답스펙트럼과 같이 수식화할 필요성이 있으며, 또한 보다 상세한 내진성능 평가법 및 부재수준의 비선형 동적해석 결과와의 비교·분석 등의 충분한 연구가 필요하다.

본 연구의 주목적은 문헌[4] 및 [5]의 연구결과를 바탕으로 저층 RC 건물의 내진성능을 단시간 내에 보다 효율적이며 실용적으로 평가할 수 있는 간이 내진성능 평가법을 제안하는 것이다. 본 연구에서는 그림 1의 요구내력스펙트럼 곡선의 일반적인 경향을 수식·정량화하여 특정 지진동에 대한 건물의 피해율을 판정하고, 이를 바탕으로 건물의 내진성능을 등급화하여 나타내기 위해 내진성능 평가결과를 점수화하는 방법을

제안하였다. 즉, 특정 지진동에 대한 건물의 피해율을 판정할 수 있는 지진피해도 판정식과 평가결과를 점수화하기 위한 내진성능 평가식을 제안하여 정량적으로 건물의 내진성능을 평가할 수 있는 간이 내진성능평가법을 개발하였다.



[그림 III.1] 지진 피해가 예측가능한 저층 RC 건물의
요구내력스펙트럼(문헌[5])

또한, 실제 지진에서 피해를 입은 저층 RC 건물에 적용하여 본 연구에서 제안한 평가법의 타당성 여부를 검증함과 동시에, 저층 RC 순수 골조 및 전단벽체를 가지는 골조 건물을 대상으로 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법을 적용하여 평가한 결과와 보다 정밀한 내진성능 평가법, 즉 일본내진진단법(2차 및 3차)²⁾ 및 비선형 정적(Nonlinear Static Analysis) 및 동적해석(Nonlinear Dynamic Analysis)을 각각 실시하여 내진성능을 평가한 결과를 각각 비교·검토하여 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법의 적용가능성과 타당성을 검증하였다.

1. 저층 RC 건물의 간이 내진성능 평가법의 제안

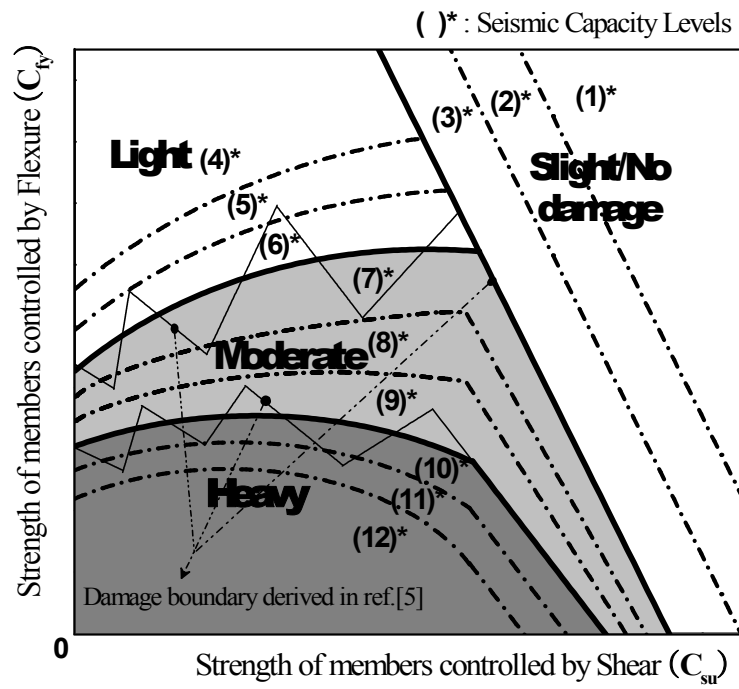
가. 간이 내진성능 평가법의 개요

그림 III.2에는 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법의 개념도를 나타낸다. 본 연구에서는 우선적으로 그림III.1의 지진피해가 예측가능한 요구내력스펙트럼⁵⁾에 나타난 지진에 대한 건물의 피해도 영역을 구분하는 굴곡진 선들을 평활화하여, 전단(C_{su}) 및 휨과괴형 부재의 내력값(C_{fy})과의 상관관계를 특정 지진동 수준으로 나타낼 수 있는 수식(지진피해도 판정식)을 제안하였다(제2.2절 참조).

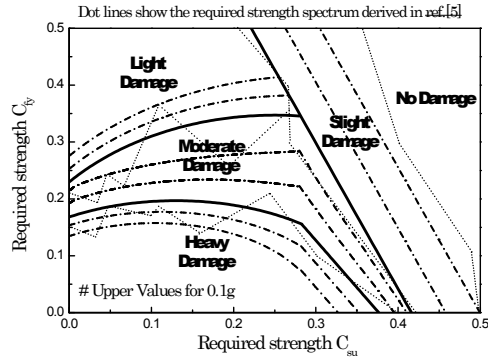
또한, 건물의 내진성능을 정량화하기 위해 평가점수를 도입하여, 내진성능 등급을 각각의 피해도 영역 내에서 평가점수 범위에 따라 3등급으로 구분하여 총 12등급으로 나타내었다.

그림 III.2에 나타난 것처럼, 내진성능 등급을 총 12등급으로 구분하였으며, 내진성능 등급이 높을수록 대규모 지진피해가 발생할 가능성이 높으며, 내진보강이 우선시 되는 건물로 분류된다. 한편, 문헌[5](그림III.1 참조)에서 무피해 영역(No Damage Zone)과 경미한 피해 영역(Slight Damage Zone)은 그 피해상황이 실제 지진피해를 입은 저층 RC 건물을 조사한 결과^{6),7)}에 의하면 거의 유사하기 때문에 본 연구에서는 경미 및 무피해 영역은 동일 범주로 취급하였다. 그림 III.3에는 문헌[5]에서 연구된 지진피해 상황이 예측가능한 요구내력스펙트럼(0.1g, 0.15g, 0.2g 및 0.3g의 상한값)을 공학적 판단에 근거하여 본 연구에서 제안한 지진피해도 판정식(그림III.2 참조), 즉 지진피해 영역과 전단(C_{su}) 및 휨과괴형 부재의 내력값(C_{fy})과의 상관관계를 나타낸다.

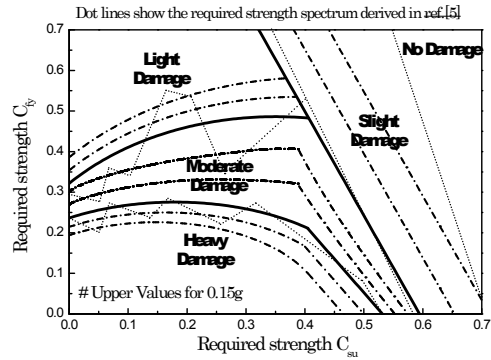
그림III.3의 지진 피해도 판정식을 바탕으로 본 연구에서는 저층 RC 건물의 내진성능을 단시간 내에 약산적으로 평가할 수 있는 실용적인 간이 내진성능 평가법을 개발하였다. 그림 III.4에는 상기 간이 내진성능 평가법의 흐름도를 나타낸다. 그림 III.4에 나타난 바와 같이 내진성능 평가는 ①전단 및 휨과괴형 부재 내력 산정, ②입력지진동 산정, ③요구성능 판정지표 및 평가용 지표값 산정, ④건물의 지진피해도 및 내진성능 평가점수 산정 및 ⑤내진성능 등급결정으로 구성된다. 이하에는 각 단계별(5단계) 상세를 나타낸다.



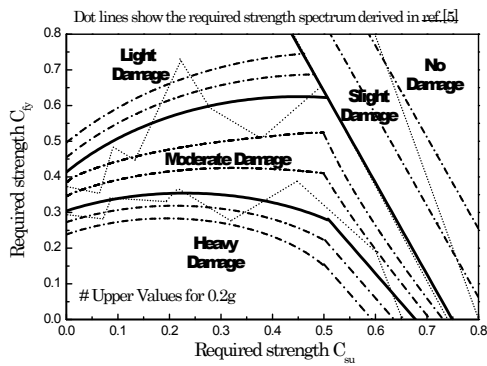
[그림 III.2] 본 연구에서 제안한 저층 RC 건물의 간이 내진성능평가법의 개념도



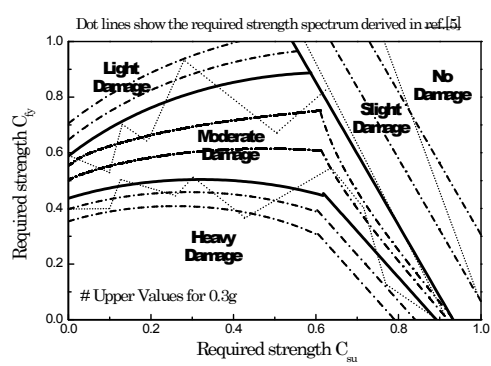
(a) 0.1g : 상한요구내력



(b) 0.15g : 상한요구내력



(c) 0.2g : 상한요구내력



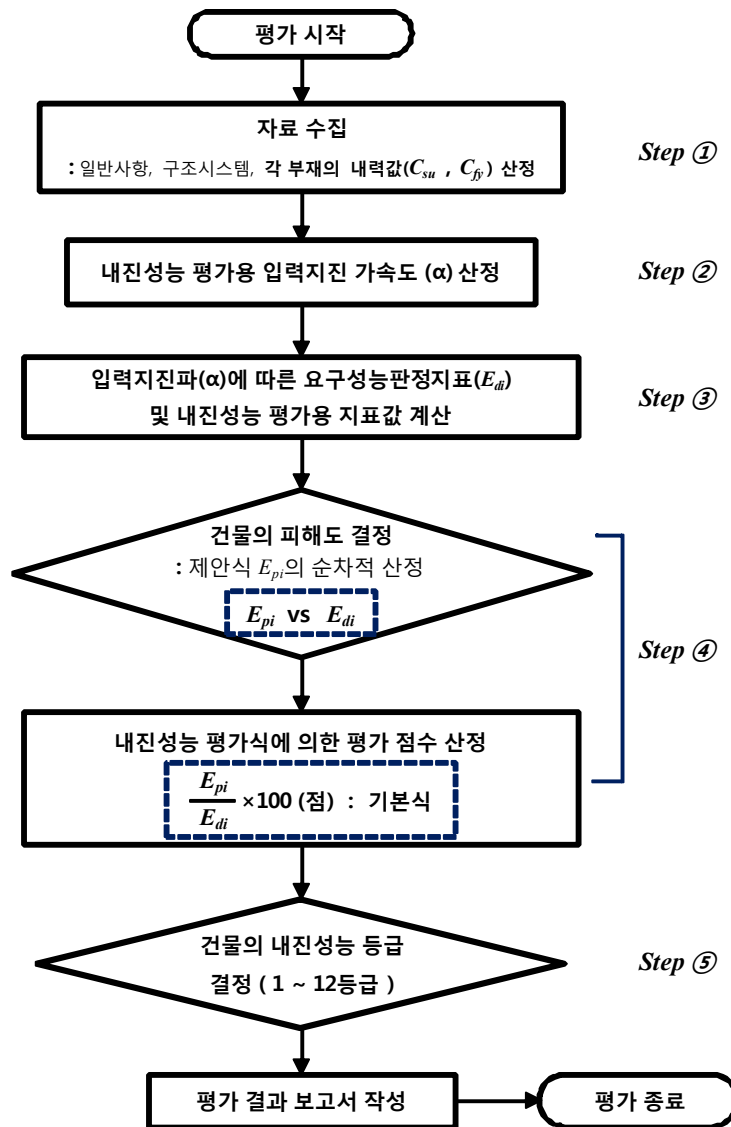
(d) 0.3g : 상한요구내력

[그림 III.3] 본 연구에서 제안한 지진 피해도 판정곡선(판정식)

나. 단계별 내진성능 평가법 상세

1) Step ① : 전단 및 휨과괴형 부재의 내력산정

Step ①에서는 대상건물 1층의 전단 및 휨과괴형 부재의 내력값을 각각 산정한다. 내력산정에는 장변(X방향) 및 단변방향(Y방향) 2방향에 대해서 각각 산정을 하며, 내진성능 평가도 2방향에 대해서 독립적으로 평가를 한다.



[그림 Ⅲ.4] 간이 내진성능 평가법의 흐름도

또한, 본 평가법에서는 저층건물의 지진응답이 1차모드에 의해서 주로 결정된다는 사실, 즉 2~6층 건물의 1층에는 등가 1질점계와 동일한 응답이 생긴다는 가정 하에 대상건물의 1층에 대해서 전단파괴형 부재의 내력(C_{su}) 및 휨파괴형 부재의 내력(C_{fy})을 산정하여, 제안한 평가법에 적용하여 내진성능을 평가한다. 여기서, 각 파괴형 부재의 내력은 층 전체의 바닥면적에 대한 전단부재(전단벽, 전단기둥) 및 휨부재(휨기둥)의 비율 등을 바탕으로 부재 내력을 산정하는 식(2.1) 및 (2.2)에 나타내는 평균전단응력도법(Average shear stress method)1),2)을 사용하였다.

$$C_{su} = \frac{V_{su}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{sc} \sum a_{sc}}{\sum A_f \cdot w} \quad (2.1)$$

$$C_{fy} = \frac{V_{fy}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{fw} \sum a_{fw} + \tau_{fc} \sum a_{fc}}{\sum A_f \cdot w} \quad (2.2)$$

여기서, $\sum A_f$: 층 전체의 바닥면적, w : 바닥면적당 단위중량, τ_{sw} 및 $\sum a_{sw}$: 벽의 전단파괴시의 평균전단응력도 및 그 전체 면적, τ_{sc} 및 $\sum a_{sc}$: 기둥의 전단파괴시의 평균전단응력도 및 그 전체 면적, τ_{fw} 및 $\sum a_{fw}$: 벽의 휨항복시의 평균전단응력도 및 그 전체 면적, τ_{fc} 및 $\sum a_{fc}$: 기둥의 휨항복시의 평균전단응력도 및 그 전체 면적

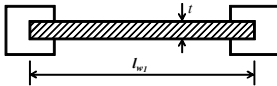
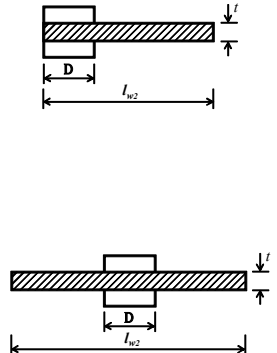
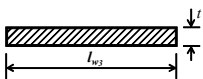
또한, 식 (2.1) 및 (2.2)을 이용한 내력 산정을 위하여 다음과 같은 가정이 도입되었다.

- ① 대상건물의 벽체는 전단파괴형 부재 ($\tau_{sw}=0$ 및 $\sum a_{fw}=0$)로 가정을 하여 내력을 산정하며, 문헌[2]를 참고로 표 III.1과 같이 분류하여 a_{sw} (벽체의 단면적) 및 τ_{sw} 을 산정한다.
- ② 기둥은 지진피해 조사결과⁷⁾를 바탕으로 전단 및 휨파괴형 부재로 분류를 하였으며, 문헌[1] 및 [2]를 참조로 h_0/D (h_0 : 기둥순길이, D : 기둥폭)비가 2이하인 경우 전단

파괴형 기둥으로 가정을 하며, $\tau_{sc}=1.5\text{MPa}$ (15kgf/cm^2)로 하였다. $2 < h_0/D \leq 6$ 인 경우도 전단파괴형 기둥으로 가정을 하였으며, $\tau_{fc}=1\text{MPa}$ (10kgf/cm^2)로 하였다. 한편, $h_0/D < 6$ 인 경우는 휨파괴형 기둥으로 가정을 하였으며, τ_{fc} 을 0.7MPa (7kgf/cm^2)로 하였다.

③ 바닥면적당 단위중량(w)은 12kPa (1.2tf/m^2)으로 하였다.

<표 III.1> 벽체의 종류에 따른 단면적 및 전단응력도 산정

종류 \ 단면	단면 상세	단면적 및 전단응력도
양측에 기둥이 있는 벽		$a_{sw} = t \times l_{w1}$ $\tau_{sw} = 3 \text{ MPa}$ (30 kgf/cm^2)
한쪽에 기둥이 있는 벽		$a_{sw} = t \times l_{w2}$ $\tau_{sw} = 2 \text{ MPa}$ (20 kgf/cm^2)
기둥이 없는 벽		$a_{sw} = t \times l_{w3}$ $\tau_{sw} = 1 \text{ MPa}$ (10 kgf/cm^2)

2) Step ② : 성능평가용 입력지진동(α)의 결정

입력지진동, 즉 최대 입력지진가속도(α)의 산정에는 KBC 2005의 건축구조설계기준 8)에 근거하여 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(s)로 정의하였으며, 식(2.3)에 의해서 결정한다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} \quad (2.3)$$

여기서, s_{DS} : KBC 2005 건축구조설계기준에서의 지진지역 단주기 설계스펙트럼 가속도 (g)

<표 III.2> 입력지진동(α)에 따른 요구성능판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β , G , P) 산정용 식

지진규모 지표값	$0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$	$0.2g < \alpha \leq 0.3g$			
E_{di} ($i = 1 \sim 4$)	$E_{d1} = E_{d2} = E_{d3} = E_{d4}$	경미/무피해 판정용(E_{d1})	소규모 피해 판정용(E_{d2})	중규모 피해 판정용(E_{d3}, E_{d4})	대규모 피해 판정용
	$2\alpha + 0.05$	$1.1\alpha + 0.23$	$2\alpha + 0.05$	$1.5\alpha + 0.15(E_{d3})$ $2\alpha + 0.05(E_{d4})$	-
β	$2.1 - 6\alpha$	$1.42 - 2.6\alpha$			
G	$2.2\alpha + 0.06$	$\alpha + 0.3$			
P	0.15	$0.31 - 0.8\alpha$			

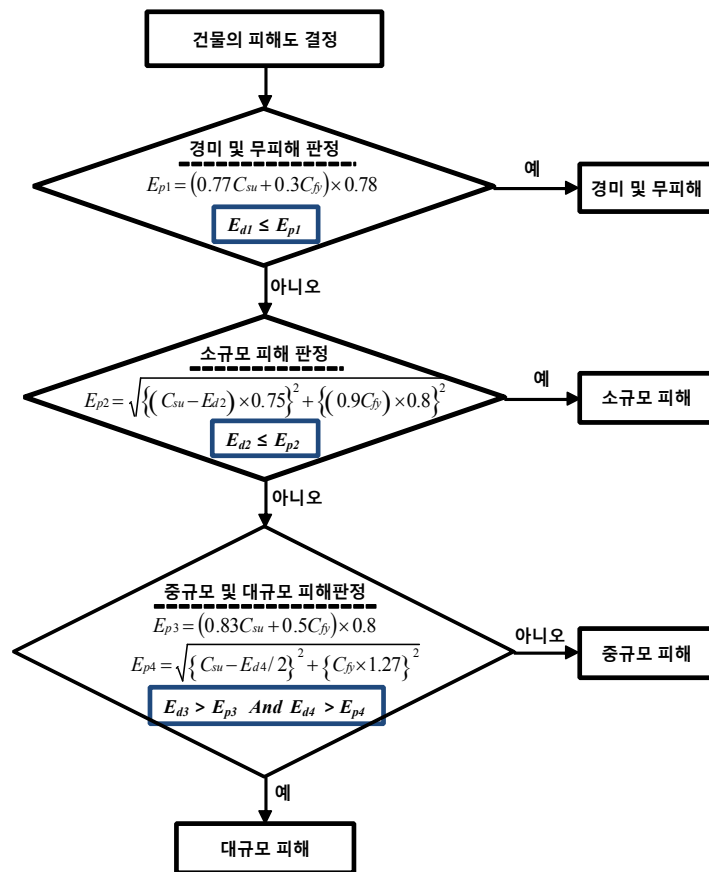
3) Step ③ : 요구성능 판정지표 및 내진성능 평가용 지표 산정

Step ③에서는 입력지진동(α)에 따라 요구성능판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β , G , P)를 산정한다. Step ④에 나타낸 지진 피해도별 요구성능(E_{pi})과 내진성능 등급(1~12등급)을 입력지진동의 크기에 따라 산술적으로 적용이 가능하도록 그림 III.3의 요구내력스펙트럼(0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g)에서 제안된 피해도별 요구성능과 내진성능 평가식을 직선보간하여 요구성능판정지표(E_{di})와 내진성능 평가용 지표값(β , G , P)을 산정하는 식을 표 III.2에 나타낸다.

4) Step ④ : 건물의 지진 피해도 및 내진성능 평가점수 산정

본 Step에서는 상기 Step ①~③에서 산정된 각 부재의 내력값과 입력지진동에 따른 요구성능판정지표 및 내진성능 평가용 지표값을 바탕으로 건물의 지진 피해도 및 내진성능 평가점수를 구한다. 건물의 피해도 판정은 그림 III.5에 나타낸 것처럼, 지진피해

도별 요구성능(E_{pi})과 요구성능판정지표(E_{di})의 대소관계를 비교하여 순차적으로 판정한다. 예를 들어, 「경미 및 무피해」 판정에서 E_{p1} 을 계산하여 E_{d1} 보다 크면, 평가건물은 「경미 및 무피해」로 판정되어 그에 해당하는 내진성능 평가점수를 계산하여 최종적으로 내진성능 등급을 결정한다. 그러나, E_{p1} 이 E_{d1} 보다 작을 경우엔 다음 단계인 「소규모 피해」 판정으로 이동하여 다시 E_{p2} 와 E_{d2} 의 대소관계를 비교하여 피해도를 판정하고 내진성능 평가점수를 계산하는 일련의 과정을 거쳐 최종적으로 내진성능을 평가한다.



[그림 III.5] 지진 피해도 영역 결정법 상세

이하에는 지진 피해도 판정 및 내진성능 평가점수 계산법 상세를 기술한다.

• 경미 및 무피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산

① 경미 및 무피해 요구성능 계산

$$: E_{p1} = (0.77 C_{su} + 0.3 C_{fy}) \times 0.78$$

② 경미/무피해 판정

㉠ $E_{d1} \leq E_{p1} \Rightarrow$ 본 건물은 「경미 및 무피해」로 최종판정 : ㉠에서 내진성능 평가점수 계산

㉢ $E_{d1} > E_{p1} \Rightarrow$ ‘소규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산’으로 이동

㉠ 내진성능 평가점수 : $\frac{E_{p1}}{E_{d1}} \times 100 = (\quad)$ 점

• 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산

① 소규모 피해 요구성능 계산

$$: E_{p2} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d2}) \times 0.75\}^2 + \{0.9 C_{fy} \times 0.8\}^2}$$

② 소규모 피해 판정

㉠ $E_{d2} \leq E_{p2} \Rightarrow$ 본 건물은 「소규모 피해」로 최종판정 : ㉠에서 내진성능 평가점수 계산

㉢ $E_{d2} > E_{p2} \Rightarrow$ ‘중규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산’으로 이동

㉠ 내진성능 평가점수 : $\frac{E_{p2}}{E_{d2}} \times 100 = (\quad)$ 점

• 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산

① 중규모 피해 요구성능 계산

$$E_{p3} = (0.83 C_{su} + 0.5 C_{fy}) \times 0.8$$

$$E_{p4} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d4}/2)\}^2 + \{C_{fy} \times 1.27\}^2}$$

② 중규모 피해 판정

㉠ $E_{d3} > E_{p3}$ and $E_{d4} > E_{p4}$: 하나만 만족하거나 둘 다 만족하지 않을 경우 \Rightarrow 본 건물

은 「중규모 피해」로 최종 판정 : ㉔에서 내진성능 평가점수 계산

㉔ $E_{d3} > E_{p3}$ and $E_{d4} > E_{p4}$: 둘다 만족하는 경우

⇒ 본 건물은 「대규모 피해」로 최종 판정 : ‘대규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산’으로 이동

㉔ 내진성능 평가점수 계산

• $C_{su} < G$ 이면 :

$$\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100(1 - \sqrt{\beta C_{su}}) + 100\sqrt{\beta C_{su}} = (\quad) \text{점}$$

• $C_{su} \geq G$ 이면 :

$$\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 \left(1 + \frac{C_{su} - G}{P} \right) - \frac{C_{su} - G}{P} \times 100 = (\quad) \text{점}$$

• 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산

㉔ 내진성능 평가점수 계산

• $C_{su} < G$ 이면 : $\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 = (\quad) \text{점}$




• $C_{su} \geq G$ 이면 :

$$\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 + \frac{200(E_{p3} - E_{d3})}{3E_{d3}} = (\quad) \text{점}$$

5) Step ⑤ : 내진성능 등급 결정

Step ⑤에서는 건물의 지진 피해도와 내진성능 평가점수에 따른 지진손상도^{9),10)} 수 준과의 관계를 바탕으로 표 III.3과 같이 내진성능 등급을 결정하여 내진성능을 최종적으로 평가한다. 여기서, 내진성능 등급이 높을수록 해당지진강도에 대한 내진성능이 취약하여 내진보강이 우선시 되는 건물로 분류된다.

<표 III.3> 지진피해도 및 내진성능 등급

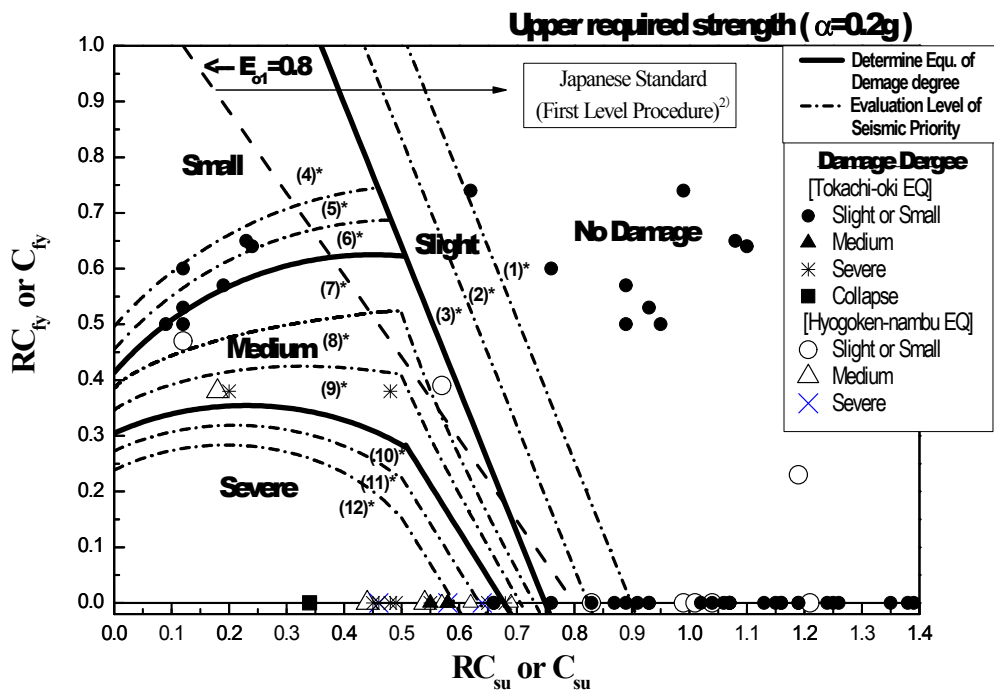
구분 \ 피해	내진성능평가 점수 수준	상 태	내진성능 등급
경미/ 무피해	120점이상	전반적으로 내진성능이 기준에 만족하는 최상의 상태	1
	110점이상 ~120점미만		2
	100점이상 ~110점미만		3
소규모 피해	120점이상		4
	110점이상 ~120점미만		5
	100점이상 ~110점미만		6
중규모 피해	120점이상		7
	110점이상 ~120점미만		8
	100점이상 ~110점미만		9
대규모 피해	90점이상 ~100점이하		10
	80점이상 ~90점미만		11
	80점미만		12

2. 실제 지진에서 피해를 받은 건물과의 비교

제2장에 나타난 지진 피해도 판정식과 내진성능 평가식을 바탕으로 본 연구에서 제안한 저층 RC 건물의 간이 내진성능 평가법과 실제 지진에서 피해를 받은 저층 RC 건물의 피해상황을 상호 비교하여 본 연구 평가법의 신뢰성을 검증하였다. 피해건물은 1968년 일본 도카치오키(十勝沖)지진에서 피해를 입은 하치노헤(八戸)지역^{6),7)} 및 1995년 일본 효고켄남부(兵庫縣南部)지진에서 피해를 입은 아와지(淡路)지역¹¹⁾에 위치한 2~4층(대다수가 3층)의 저층 RC 건물이다. 상기 지역의 입력가속도(α)의 크기는 八戸지역의 경우 예상 최대가속도의 크기는 약 0.2g정도(관측지진)이며, 淡路지역은 관측된 지진가속도의 기록은 없지만, 건물의 피해상황 및 내력과의 상관관계로부터 이 지

역의 예상가속도의 크기는 상기 八戸지역의 가속도(약0.2g)와 유사한 수준이 입력되었다고 보고되어 있다¹¹⁾.

그림 III.6에는 상기의 가속도 0.2g를 고려하여 그림 III.2,3,4,5 및 III.6에서 제안한 평가법(0.2g의 입력지진동)과 상기의 지역에서 피해를 입은 저층 RC 건물의 1층의 전단파괴형 부재의 내력(C_{su}) 및 휨파괴형 부재의 내력(C_{fy})을 지진피해상황별로 나타내어 제안한 평가법의 신뢰성을 검증하였다. 피해건물의 각 파괴형 부재의 내력은 본 연구에서 제안한 방법, 즉 제2.2절의 Step ①에 나타난 내력산정법을 이용하였다.



[그림 III.6] 실제 지진에서 피해를 받은 RC 건물과 본 연구에서 제안한 평가법의 비교

그림 III.6에서 나타난 파선은 일본의 1차 내진진단법의 내진판정지표인 $E_{o1}=0.8$ 의 경계선으로, 이 진단법은 건물의 연성능력을 무시하고 건물이 지진하중에 견디기 위하여 충분한 강도가 있는지 없는지를 부재의 내력을 산정하여 내진성능을 평가하는 방법

이기 때문에 전단파괴형 부재로만 구성된 건물($C_{fy}=0$ 부분) 또는 No Damage 영역에 위치한 전단타월형 건물(병렬계의 최대내력이 전단부재의 파괴점에서 결정되는 영역)⁴⁾, 등에서는 좋은 일치를 나타내었지만, 최대내력이 휨파괴형 부재의 파괴점에서 결정되는 휨타월형 건물(Small 영역에 위치한 건물)⁴⁾에 대해서는 그 내진성능을 과소평가하고 있다.

반면, 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법은 전반적으로 실제 지진에서 피해를 받은 저층 RC 건물의 피해상황과 좋은 대응관계를 나타내었다. 특히, No Damage, Slight 및 Small Damage 영역에 위치한 피해건물은 중규모이상의 큰 피해를 받은 건물은 없으며, 상기 영역이 내진성능이 탁월한 영역이라는 사실이 실제 지진에서 피해를 받은 건물을 통하여 입증되었다고 판단된다. 본 연구의 평가법은 전단 및 휨파괴형 부재의 내력과 연성능력사이의 상관관계 및 각각의 부재의 피해정도가 건물 전체의 피해상황에 어떻게 영향을 미치는가를 파악함과 동시에, 특정 지진강도에 대해 건물의 내진성능을 점수화하여 내진성능 등급이 결정 가능한 평가법으로서, 기존의 내력중심의 간이 내진성능 평가법에 비하여 보다 효율적으로 내진성능이 우수한 건물을 선별가능하다고 사료된다.

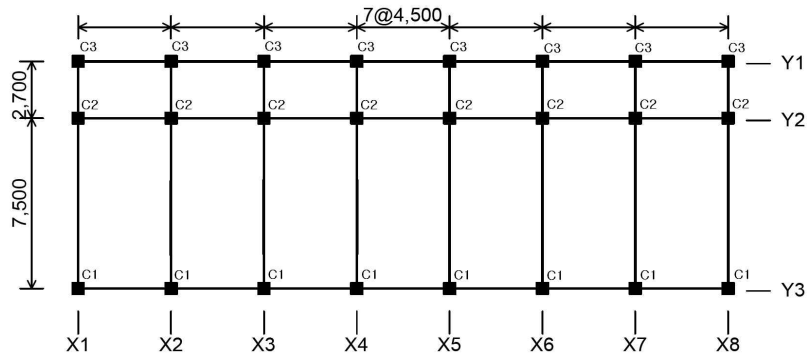
3. 예제 건물에 의한 간이 내진성능 평가법의 타당성 검증

본 연구에서 제안한 저층 RC 건물의 간이 내진성능 평가법을 토대로 현존 저층 RC 건물 2개동을 대상으로 내진성능을 평가하여 그 결과와 일본내진진단법(2차 및 3차), 비선형 정적해석(Push-over Analysis) 및 비선형 동적해석(Nonlinear Dynamic Analysis)을 실시하여 보다 상세하게 예제건물의 내진성능을 평가한 결과와 각각 비교·검토하여 본 연구의 간이 내진성능 평가법의 타당성 및 실용가능성을 검증하였다.

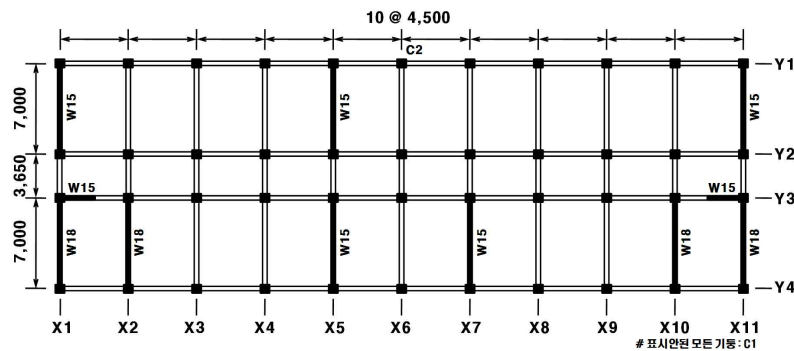
가. 대상건물 및 내진성능평가

대상건물 2개동의 기준층 평면도를 그림 III.7에 각각 나타낸다. 순수 골조로만 이루

어진 RC 건물(그림 III.7의 1번 건물, X방향)과 골조와 전단벽이 혼합된 RC 건물(그림 III.7의 2번 건물, Y방향)의 내진성능을 각각 평가하였다. 본 연구에서 제안한 성능평가법은 연직부재의 단면적과 그에 따른 평균전단응력도를 이용하여 평가하는 방법으로, 1번 건물 기둥의 단면적은 C1은 $350 \times 500\text{mm}^2$, C2와 C3는 $350 \times 400\text{mm}^2$ 이며, 2번 건물 기둥의 단면적은 모두 $500 \times 600\text{mm}^2$ 이고, 벽체의 두께는 150mm 이다.



(a) 1번 건물의 기준층(1F) 평면도



(b) 2번 건물의 기준층(1F) 평면도

[그림 III.7] 본 평가법의 적용 예제건물의 기준층 평면도

한편, 1번 건물의 Y2방향 기둥은 조적벽체의 영향으로 기둥의 순 길이가 짧아져 h_o/D (h_o : 기둥순길이, D : 기둥폭)비가 2이하인 단주로서 내력값 계산시에 전단파괴형 부재로 분류가 된다. 대상건물의 위치는 서울로, 지반의 종류는 1번 건물은 연암 지반, 2번 건물은 단단한 토사 지반으로 가정하였으며, 이것을 이용하면 입력지진가속도(α)

는 각각 0.18g와 0.22g로 산정된다.

표 III.4에는 대상건물의 내진성능 평가 결과를 나타낸다. 표 III.4에 나타난 것처럼, 1번 건물(X방향)은 부재의 내력(C_{su} 및 C_{fy})이 각각 0.15, 0.22으로 산정되었으며, 지진 피해 판정은 대규모 피해로 판정되었고, 내진성능 등급이 12등급으로써 해당 지진동에 대해 건물의 내진성능이 매우 취약한 것으로 나타났다.

한편, 2번 건물(Y방향)의 경우는 전단벽이 존재하여 전단파괴형 부재의 내력값(C_{su})이 크게 산정되어 입력지진가속도(α)가 0.22g임에도 불구하고 경미/무피해로 판정되었으며, 내진성능 등급 또한 1등급으로 평가되어 내진성능이 매우 우수한 건물로 평가되었다.

<표 III.4> 제안한 평가법에 의한 대상건물의 내진성능평가 결과

구 분 평가값	1번 건물	2번 건물
	X방향	Y방향
C_{su}	0.15	0.98
C_{fy}	0.22	0.27
입력지진가속도 (α)	0.18g	0.22g
지진피해 판정	대규모피해	경미/무피해
내진성능 등급	12	1

나. 내진진단법 및 비선형 정적·동적해석에 의한 대상건물의 내진성능 평가

1) 내진진단법 개요 및 진단 가정

일본 내진진단법²⁾은 건물의 내진성능을 건물의 내력과 변형성능에 의한 에너지 흡수 능력으로 점수화하여, 그 우열을 점수의 대소로 평가하는 기법으로 내진성능의 정량화를 시도한 것이 특징이며, 건물의 구조부분의 내진성능을 식(4.1)와 같이 정의되는 구

조내진지표(I_s)로 평가한다. 여기서, I_s 가 높으면 높을수록 내진성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

$$I_s = E_o \cdot S_D \cdot T \quad (4.1)$$

또한, 보유성능기본지표(E_o)는 가장 기본적인 내진성능을 나타내는 지표로서, 건물의 보유내력의 대소를 전단력계수의 형식으로 나타내는 강도 지표(C)와 변형 능력의 크기를 나타내는 연성지표(F)의 곱으로 산정하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이것은 지진을 받았을 때 안전하기 위해서는 벽이 많은 건물에서는 연성능력이 작기 때문에 상당한 강도가 필요하고, 또한 벽이 적은 라멘구조의 건물에서는 강도의 여유가 적기 때문에 연성이 있는 구조여야만 한다는 것을 고려한 것으로서, 벽이 많은 건물과 벽이 적은 라멘구조의 건물에 공통의 내진성능의 척도를 설정하기 위한 목적으로 정한 것이다. 형상지표(S_D) 및 경년지표(T)는 각각 건물의 정형성 및 건설후의 연수에 따라 보유성능 기본지표를 보정하는 1.0을 기준치로 한 계수이다.

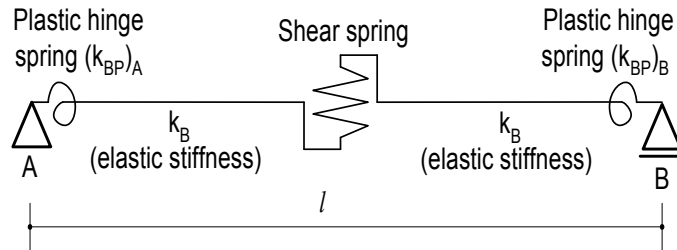
1차 진단법의 E_o 는 건물의 벽률($\Sigma A_w / \Sigma A_f$) 및 기둥률($\Sigma A_c / \Sigma A_f$)에 의하여 산정하며, 또한 S_D 및 T 역시 E_o 약산법의 수준에 맞춘 간편법에 의하여 산정한다. 2차 진단법의 E_o 는 보의 강도는 충분히 크다고 가정하고, 연직부재, 즉 기둥 및 벽의 종국강도, 파괴형식 및 연성능력 등으로부터 산정한다. S_D 및 T 에 관해서는 1차 진단법보다 상세한 평가 법을 적용한다. 3차 진단법은 2차 진단보다 더욱 정밀한 해석방법으로서, 보의 휨항복 혹은 전단파괴에 의해 보유내력이 지배되는 기둥 및 기초의 회전 등에 의해 성질이 지배되는 벽까지도 고려하여 내진성능을 상세하게 평가하는 것이 특징이다. 위의 1차~3차 진단법을 이용하면, 개별 건물의 내진성능이 점수(I_s)로 표시되며, I_s 가 높으면 높을수록 내진성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

본 연구에서는 2차 및 3차 상세 내진진단법을 이용하여 그림 III.7에 나타낸 대상건물 2개동의 내진성능을 평가하였다. 내진진단 시에는 비구조부재는 무시를 하였으나, 장두리벽 및 수벽(조적벽체)은 h_o/D 산정 시에 고려를 하였다.

2) 비선형해석 개요 및 가정

실제 구조물은 입체적으로 복잡하게 진동을 하지만, 본 연구에서는 기둥, 보 및 벽체를 선재로 치환하여, 수평방향의 지진력만 고려한 평면골조로 모델링한다. 구조물부분에서는 부재레벨에 입각하여 층 특성을 평가하며, 해석에 필요한 가정은 다음을 따른다.

- ① 각 부재의 항복힌지의 위치는 문헌[12] 및 문헌[13]을 참고로 다음과 같이 가정을 하며, 기둥 및 보의 접합부 등, 각 부재의 중심으로부터의 항복힌지가 발생하는 부재단까지는 강역(Rigid)으로 가정한다.
 - 일반층의 보 : 날개벽이 없는 경우는 기둥단 위치로 하며, 날개벽이 있는 경우는 가장자리로부터 $D_G/2$ (D_G :보높이)들어온 위치로 한다.
 - 지중보 : $DF' < (l_0/10' - 1) \cdot DF$ 인 경우는 기둥단의 위치로 하고, $DF' \geq (l_0/10' - 1) \cdot DF$ 인 경우는 기초판단의 위치로 한다.(DF : 지중보 높이, DF' : 기초판의 저면으로부터 지중보까지의 거리, l_0 : 기둥간 거리, $10'$: 기둥판간 거리)
 - 기둥 : 수벽 및 징두리벽이 없는 기둥은 보단의 위치로 한다. 수벽 및 징두리벽이 있는 경우는 수벽 및 징두리벽의 가장자리로부터 $D_c/200$ (D_c :기둥폭)들어온 위치로 한다.
- ② 각 골조를 양단핀의 강한보로 연결하여 구조물 전체를 하나의 평면골조로 해석하였다. 즉, 강막가정이 성립하는 것으로 한다.
- ③ 보의 내력은 보와 협력하는 범위인 슬래브의 유효폭내의 슬래브 철근의 영향도 고려하며, 보단의 장기하중에 의한 휨모멘트는 후술하는 부재의 휨스프링의 복원력특성에 초기치로서 부여하는 것으로 고려한다. 또한, 기둥의 내력계산용 축력은 장기축력으로 한다.
- ④ 콘크리트블록 등의 비내력벽은 무시한다.



[그림 III.8] 부재의 모델링

한편, 그림 III.8에 나타내는 것과 같이, 부재는 휨스프링과 전단스프링이 직렬 결합한 모델로 가정한다. 즉, 양단의 모멘트로부터 휨에 대한 강성메트릭스를 평가하는 Giberson모델(재단 소성스프링법)^{14)~16)}로 가정한 것으로서, 부재의 재축방향의 변형은 무시를 하며, 부재의 휨은 탄성강성 k_B 를 가지는 탄성선재와 그 양단에 설정한 $(k_{BP})_A$ 및 $(k_{BP})_B$ 의 강성을 가지는 소성회전스프링에 의하여 평가를 하며, 변형은 그것들의 합으로 나타낸다. 또한 전단변형에 대해서는 재중양부에 설정한 비선형 전단스프링¹³⁾에 의하여 평가를 한다.

휨부재에 대한 이력모델은 Degrading Tri-Linear형으로, 전단부재의 이력모델은 Origin-Oriented형으로 한다^{12),13),15)}. 또한, 각 기둥, 보, 벽체의 복원력특성을 결정하는 초기강성, 휨균열모멘트, 전단균열내력, 휨항복모멘트, 전단종국내력 등의 변수들은 내진진단결과와의 연관성을 고려하여 「일본내진진단기준²⁾」 및 「일본건축학회기준¹⁷⁾」 등에서 사용하고 있는 식을 토대로 산정하였다.

또한, 비선형 동적해석 시의 입력지진동으로서는 Elcentro (EW/NS), Hachinohe (EW/NS)의 기준지진파를 사용하였고, 입력지진동 규모는 표 III.5에 나타난 간이 내진 성능평가 시 이용한 입력지진동(α)의 규모, 즉 0.18g 및 0.22g로 각각 표준화하여 비선형 동적해석을 실시하였다.

3) 내진진단 및 비선형 해석 결과 · 비교

일본내진진단법 2차 및 3차진단 결과(I_s 값)와 비선형 정적(항복내력 및 변위) 및 동

적해석에 대한 응답치(응답연성율: 항복변위에 대한 최대변위 응답비)를 표 III.5에 나타내었다.

표 III.5에 나타난 것처럼, 2차 진단결과, I_s 지표가 1번건물은 0.34(3차진단: 0.28), 2번건물은 1.1로서, 이것은 문헌[3]에서 연구된 국내 RC 건물의 I_s 지표와 지진피해율과의 상관관계 및 내진판정지표값(I_s)를 나타내는 그림 III.9에 의하면, 1번 건물은 0.15g 규모의 지진(내진판정지표 값: 0.4)에서도 중규모 이상의 피해가 발생할 가능성이 높다. 반면, 2번 건물은 0.23g이상의 대규모 지진에서도 거의 피해가 발생할 가능성이 드물 것으로 판단된다.

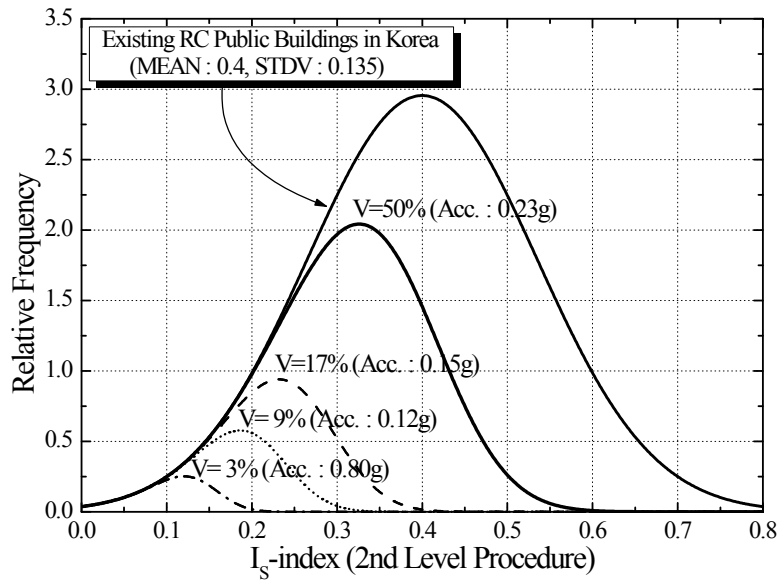
한편, 그림 III.10과 III.11에는 3차진단(1번 건물), 비선형 정적해석 및 동적해석의 결과를 모두 비교하여 나타내었다. 1번 건물은 약 22mm에서 항복을 하며 그때의 부재각(R)은 1/150정도로써 일반적인 골조의 항복범위^(2),5)와 유사하였고, 항복시의 최대 내력은 약 150tonf 정도이다. 3차진단 결과에 의한 1번 건물이 가지는 변형능력(자체능력)은 약 92.6mm($\mu=4.21$)정도로 평가되었으며, 비선형동적해석 결과, 상대적으로 응답이 큰 Hachinohe.EW의 지진에 대한 응답연성률이 $\mu=2.59$ 로, 지진피해도 판정법^(9),10)에 의하면 Damage Class III정도에 해당하는 중규모 피해를 입을 가능성이 있다고 판단된다.

2번 건물의 경우, 비선형 정적해석에 의하면 항복내력(Q_y)이 504tonf이며, 항복변위(d_y)는 약 20mm를 나타내었다. 비선형 동적해석에 의한 지진응답 최대변위가 $d_{max}=9.7$ mm로 응답연성률(μ)이 0.48로 2번 건물은 거의 탄성범위의 경미한 피해를 입을 것으로 추정된다.

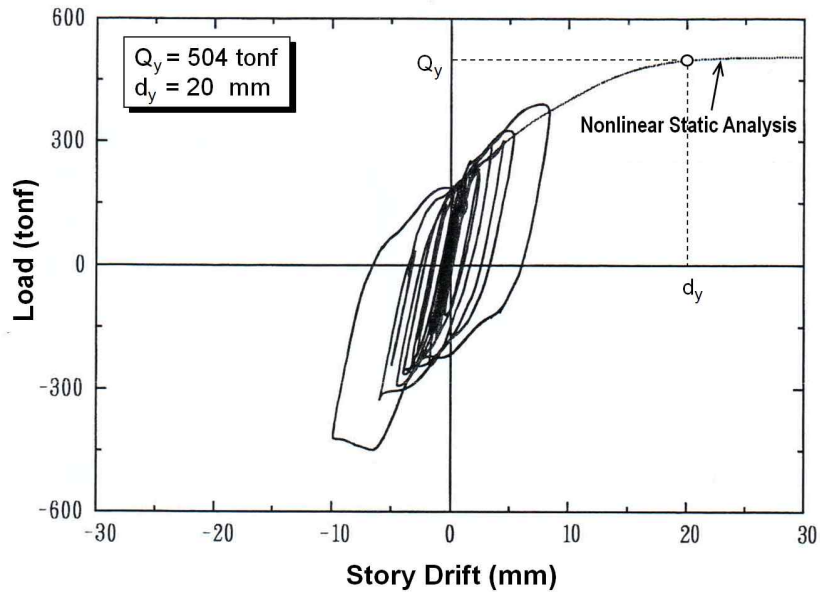
본 연구에서 제안한 간이 내진성능평가의 결과와 일본내진진단 및 비선형 해석에 의한 예제 건물의 내진성능평가 결과(표III.5 참조)에 의하면, 1번 건물의 경우 제안된 평가법에 의한 평가결과는 대규모피해(내진등급-12)로 나타났으며, 일본내진진단 및 비선형 동적해석에서는 중규모이상의 지진피해를 입을 것으로 평가되었다. 반면, 2번 건물의 경우 본 연구에서 제안한 평가법뿐만 아니라, 일본내진진단 및 비선형 동적해석에서도 경미한 피해를 입을 것으로 평가되었다.

<표 III.5> 대상건물의 내진성능평가 결과 비교

평가결과 비교		대상건물	1번 건물 (X방향)	2번 건물 (Y방향)
본 연구의 내진성능평가법 (내진성능 등급)			대규모피해 (12)	경미/무피해 (1)
일본내진진단	2차진단 (Is)		0.34	1.1
	3차진단 (Is)		0.28	-
비선형 정적해석	Q_y (tonf)		146.9	504
	d_y (mm)		22.1	20
비선형 동적해석	Q_{max} (tonf)		165.3	448.9
	d_{max} (mm)		57.2	9.7
	변위 연성률 ($\mu = d_{max}/d_y$)		2.59	0.48

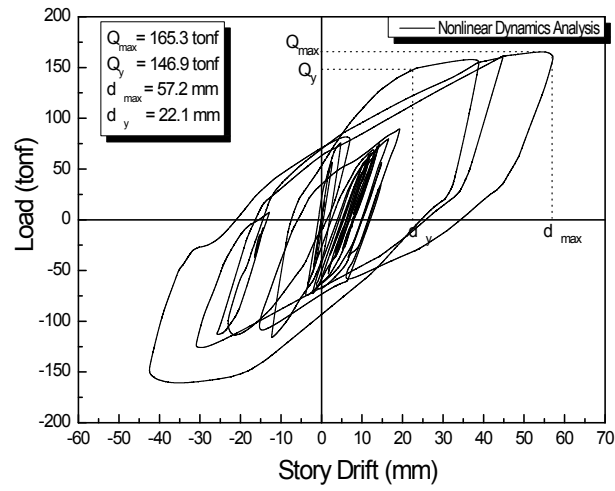


[그림 III.9] 국내 RC 건물의 지진피해율과 IS와의 관계(문헌[3])

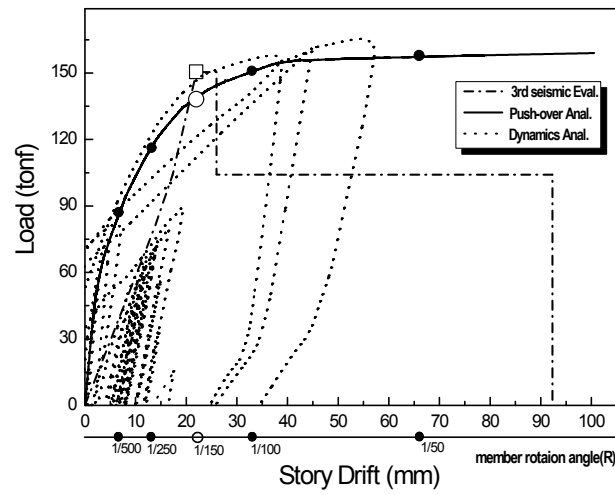


[그림 III.10] 2번건물의 비선형 해석 결과 상호비교(Hachinohe.EW, $\alpha=0.22g$)

상기의 결과는 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법은 전술한 바와 같이, FEMA 310의 Screening Phase 및 일본 1차 내진진단법과 유사한 성능평가 개념, 즉 상세한 내진성능법(FEMA: Evaluation Phase 및 비선형 해석, 일본진단법: 2차 및 3차진단)을 실시하기 전에 1차적으로 다수의 기존건물이 보유하는 내진성능을 신속하게 평가를 하는 것으로써, 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법은 제3장 및 제4장에서 검증된 바와 같이 기존 저층 RC 건물에 적용하여도 간단하면서도 효율적으로 그 내진성능을 신뢰성이 높게 평가가 가능하다는 사실을 나타낸다고 사료된다.



(a) 비선형 동적해석에 의한 하중-변위 관계
(Hachinohe.EW, $\alpha=0.18g$)



(b) 3차진단, 비선형 정적 및 동적해석 비교
(Hachinohe.EW, $\alpha=0.18g$)

[그림 III.11] 1번건물의 3차진단 및 비선형 해석 결과 상호비교

4. 소 결

본 연구에서는 저층 RC 건물의 내진성능을 간단하면서도 실무에서 효율적으로 평가가 가능한 간이 내진성능 평가법을 개발하였으며, 실제 지진에서 피해를 입은 건물을 대상으로 신뢰성을 검증하였다. 또한, 순수 골조로만 이루어진 RC 건물과 골조와 전단벽이 혼합된 RC 건물을 대상으로 상세 내진성능 평가(내진진단법 및 비선형 해석)를 각각 실시하여 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법의 적용가능성 및 타당성을 검증하였다.

본 평가법은 효율적이며 비교적 간단하게 건물의 내진성능평가가 가능하며, 내진성능 평가점수를 토대로 어떤 특정 지진강도에 대한 건물의 구조손상정도를 효과적으로 평가할 수 있다는 특징을 가지고 있으며, 또한 특정 성능수준에 만족하기 위한 저층 RC 건물의 전단 및 휨과괴형 부재의 요구내력이 산정 가능하여 향후 국내 RC 건물의 내진보강 등의 내진대책을 위한 기본 자료로서 활용이 가능하다고 판단된다.

향후, 중·고층 RC 건물로 확장·적용하기 위해서는 본 연구에서 제안한 저층 RC 건물의 내진성능 평가법(SDF 시스템을 근거로 제안)에 중·고층 건물의 응답특성(MDF 시스템)을 지진력(외력) 분포계수, 모드해석법 등을 바탕으로 추정할 수 있는 보정계수 적용에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

IV. 내진성능 상세평가의 연구자료

대다수의 저층 철근콘크리트(이하, RC) 건물은 취성적인 파괴성상을 나타내는 전단벽(Shear Wall), 단주(Short Column) 등의 전단파괴형 부재 및 소성능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재로 이루어져 있다. 따라서, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물은 이들 부재들의 내력 및 연성능력과 지진입력수준과의 역학적 상관관계가 고려된 내진성능 평가법에 의해서 내진성능을 평가해야 한다. 그러나, FEMA 310¹⁾, 일본 내진진단법²⁾ 등에서는 상기 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 내력 및 연성능력과 지진입력수준과의 역학적 상관관계에 대해서는 충분한 검토가 수행되지 않았다.

상기의 배경 하에 본 연구의 필자는 문헌[3]에서 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능을 보다 적절하게 평가를 하는데 있어서 기본적인 자료를 얻고자, 각각 파괴형 부재의 강도와 연성능력사이의 상관관계를 비선형 지진응답해석을 실시하여 파악하였으며, 이를 바탕으로 특정연성율을 위한 요구내력(Required Strength)을 산정하였다. 또한, 전단파괴형 부재의 피해정도와 휨파괴형 부재의 피해정도와 상관관계를 파악하여, 이것이 건물 전체의 피해상황에 어떻게 영향을 미치는가를 검토하였다.

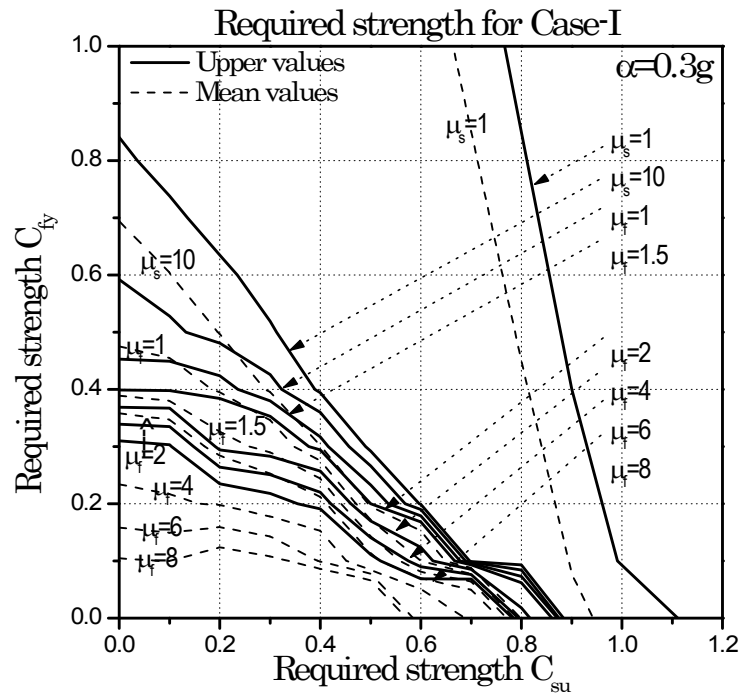
본 연구의 주 목적은 문헌[3]의 연구결과를 바탕으로 저층 RC 건물의 내진성능을 비선형 동적해석 (Non-linear Dynamic Analysis) 또는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method) 등의 상세 내진성능평가 방법을 수행하지 않고도 효율적이며 실용

적으로 지진손상정도를 예측 할 수 있는 새로운 내진성능 평가법을 제안하는 것이다.

본 연구에서는 문헌[3]에서 비선형 지진응답해석을 이용하여 유도된 전단 및 휨과괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 비선형 요구내력스펙트럼(그림 1.1)을 회귀분석법을 이용하여 수식화하여 특정 연성률(μ)별로 지진입력수준(α)과 내진성능잔존률(R)⁴⁾⁵⁾을 산정하여 구조물의 지진손상정도를 정량적으로 평가하는 내진성능 평가법을 제안하였다. 또한 실존 저층 RC 건물을 대상으로 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법을 적용하여 평가한 결과와 보다 상세한 부재수준의 비선형 동적해석을 실시하여 그 결과를 각각 비교·검토함과 동시에, 내진진단기준²⁾에서 입력지진동 0.2g 수준에 대해서 구조체에 대규모 이상의 지진피해를 막기 위한 임계값으로 설정한 내진성능판정지표($E_s=0.6$)와의 상관관계를 분석하여 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법의 타당성 및 그 적용가능성을 검증하였다.

1. 저층 R/C 건물의 내진성능 평가법의 제안

그림 IV.2에는 본 연구에서 제안한 비선형요구내력스펙트럼을 이용한 전단 및 휨과괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능 평가법의 흐름도를 나타낸다. 그림 IV.2에 나타낸 바와 같이, 내진성능 평가는 기둥, 전단벽 등의 연직부재를 대상으로, ① Step-1: 대상건물의 보유 수평내력 및 변형능력 산정, ② Step-2: 특정 연성률 별 비선형 요구내력스펙트럼을 이용한 입력지진수준 산정, ③ Step-3: 특정 연성률 별 내진성능저감계수(η)⁴⁾⁵⁾를 고려한 잔존내진성능(R) 평가, 최종적으로 ④ Step-4: 지진손상도 예측, 즉 내진성능 평가를 수행한다.



μ_s : 전단파괴형 부재의 균열변위에 대한 최대응답변위 비
 μ_f : 휨파괴형 부재의 항복변위에 대한 최대응답변위 비
 C_{su} : 전단파괴형 부재의 요구내력값 (전단력 계수)
 C_{fy} : 휨파괴형 부재의 요구내력값 (전단력 계수)

[그림 IV.1] 비선형 요구내력스펙트럼(문헌 3)

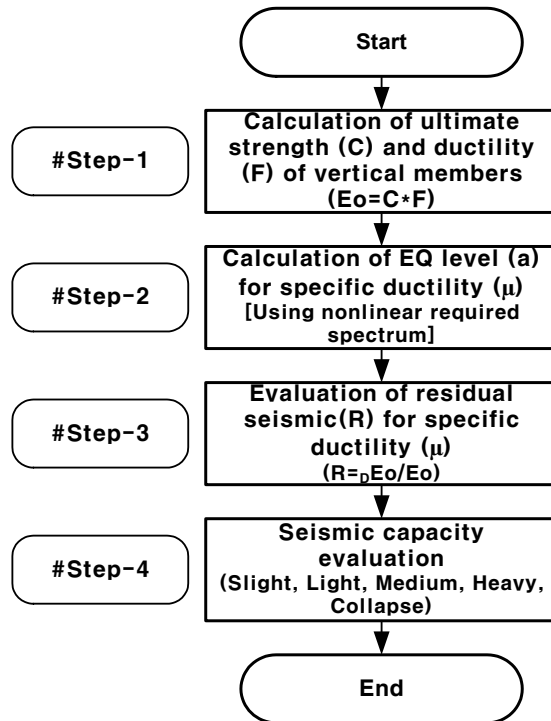
가. Step-1: 보유 수평내력 및 변형능력 산정

Step-1의 보유내력 및 변형능력은 FEMA 310¹⁾의 극한내력 및 극한변형 산정법, 비선형 정적해석 (Push-over Analysis), 골조의 소성해석법 등을 이용하여 산정 가능하지만, 본 연구에서는 건물이 보유하는 수평내력 및 극한 시 변형능력을 각각 강도지표(C) 및 연성지표(F)를 이용해서 간편하게 계산 가능한 내진진단법²⁾을 준용하며, 또한 Step-3의 잔존내진성능 산정용 보유성능지표(E_o)는 상기 내진진단법에 근거하여 계산한다.

강도지표(C)는 극한 시 보유 수평전단력(Q_u)을 건물 중량으로 나누어 산정하며, Q_u 는 식(2.1)에 의한 휨 극한 시 전단력(Q_{mu})과 식(2)에 의한 전단극한 시 전단력(Q_{su})을 비교하여 작은 값으로 산정한다²⁾. 식(2.1) 및 식(2.2)는 기둥의 보유내력을 계산하는 식으로써 문헌[2]의 내진진단법에는 벽체의 보유내력도 식(2.1) 및 식(2.2)를 준용하여 사용하고 있다.

$$Q_{mu} = \frac{M_u}{h_0/2} \quad (2.1)$$

$$M_u = 0.8 a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left(1 - \frac{N}{bDF_c} \right)$$



[그림 IV.2] 내진성능 평가법 절차

여기서, M_u : 휨극한강도($N \cdot mm$), a_t : 인장철근 단면적(mm^2), N : 축력(N), σ_y : 철근 항복강도(N/mm^2), b : 부재 단면 폭(하중 직각방향)(mm), D : 부재 단면 높이(하중 방향)(mm), F_c : 콘크리트 압축강도(N/mm^2), h_o : 순 길이(mm).

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 P_t^{0.23} (18 + F_c)}{(M/Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} \times bj \quad (2.2)$$

여기서, P_t : 인장철근비(%), σ_{wy} : 전단보강근 항복점 강도(N/mm^2), M/Q : 전단 스패 비($h_o/2$), σ_o : 축방향 응력도(N/bD)(N/mm^2), P_w : 전단보강근비(단, $P_w \leq 0.012$ 일 때는 $P_w=0.012$ 로 함), j : 응력 중심간 거리($0.8D$), d : 기둥유효폭 ($d=D-50mm$).

휨 기둥의 연성지표(F)는 식(2.3)²⁾에 의해서 계산하며, 전단파괴형 부재(전단벽체 및 전단기둥)의 연성지표는 $F=1.0$ 이다.

$$F = \phi \sqrt{2\mu - 1} \quad (2.3)$$

여기서, $\phi=1/[0.75(1+0.05\mu)]$, $\mu=\mu_0-k_1-k_2$ (극한연성률)[단, $1 \leq \mu \leq 5$], $\mu_0=10(Q_{su}/Q_{mu}-1)$, $k_1=2.0$, $k_2=30(\tau_{mu}/F_c-0.1) \geq 0$, $\tau_{mu}=Q_{mu}/(bj)$, F_c =콘크리트 압축강도.

한편, 보유성능 지표(E_o)는 식(2.4)에 의한 E_{o1} 과 식(2.5)에 의한 E_{o2} 중 큰 값으로 결정한다²⁾.

$$E_{o1} = \frac{n+1}{n+i} [C_1 + 0.7(C_2 + C_3)] \times F_1 \quad (2.4)$$

$$E_{o2} = \frac{n+1}{n+i} \sqrt{(C_1 \times F_1)^2 + (C_2 \times F_2)^2 + (C_3 \times F_3)^2} \quad (2.5)$$

여기서, n : 건물층수, i : 대상층, C_1 및 F_1 : 제1그룹에 속하는 강도 및 연성지표, C_2 및 F_2 : 제2그룹에 속하는 강도 및 연성지표, C_3 및 F_3 : 제3그룹에 속하는 강도 및 연성지표

강도지표(C) 중 연성지표(F)가 1인 경우의 강도지표(C)를 전단파괴형 부재내력(C_{su}), 연성지표(F)가 1초과한 경우의 강도지표(C)를 휨파괴형 부재내력(C_{fy})이라 정의하며, C_{su} 와 C_{fy} 를 이용하여 Step-2에서 특정 연성률 별로 입력지진수준을 산정한다.

나. Step-2: 특정 연성률 별 입력지진수준 산정

Step-2에서는 문헌 [3]의 비선형 요구내력스펙트럼을 수식화 한 식(2.6)~(2.10)를 바탕으로 특정 연성율($\mu_f=0.3[\mu_s=5]$, $\mu_f=0.6[\mu_s=10]$, $\mu_f=1$, $\mu_f=2$, $\mu_f=4$ 별 지진입력수준($\alpha=0.02\sim 0.5$)을 산정한다.

한편, 문헌[3]에서는 비선형 동적해석을 이용하여 비선형 요구내력스펙트럼을 그림 IV.1과 같이 어떤 지진입력수준 (예를 들면, $\alpha=0.3g$)에 대한 특정 연성율 별로 유도를 하였으나, 본 연구에서는 Step-2에서 특정연성율 별 지진입력수준($\alpha=0.02\sim 0.5$)을 산정하기위해서 지진입력수준을 변수로 하여 그림 IV.1을 그림 IV.3~IV.7과 같이 재해석을 실시하였다. 그림 IV.3~그림 IV.7의 점선은 재해석 결과를 나타내며, 이것을 다중회귀 분석을 이용하여 식(2.6)~(2.10)과 같이 수식화(그림 IV.3~IV.7의 실선) 하였다. 식(2.6)~(2.10)를 수식화 할 즈음, 문헌[3]에 서술한 바와 같이 Case I이 다른 Case보다 더 많은 요구내력을 필요로 한 사실 등을 근거로 하여 본 연구에서도 Case I의 결과 (평균 요구내력)를 이용하여 식(2.6)~(2.10)를 유도하였다.

식(2.6)~(2.10)를 이용하면 Step-1에서 계산되는 전단(C_{su}) 및 휨파괴형 부재의 보유내력값(C_{fy})을 입력하면 특정 연성률(μ_f)에 대한 입력지진수준(α)을 산정 할 수가 있다.

$$\mu_{f=0.3} : 0.3 = \frac{0.08}{1.03} \alpha^{-0.97} [C_{fy} + 1.9\alpha(\alpha - 0.005)^{-0.7} C_{su}] \quad (2.6)$$

$$\mu_{f=0.6} : 0.6 = \frac{0.24}{1.1} \alpha^{-0.99} [C_{fy} + 1.54\alpha(\alpha - 0.017)^{-0.6} C_{su}] \quad (2.7)$$

$$\mu_{f=1.0} : 1.0 = \frac{0.65}{1.1} \alpha^{-0.9} [C_{fy} + 1.02\alpha(\alpha - 0.007)^{-0.58} C_{su} + 0.008\alpha(\alpha + 0.003)^{-3} C_{su}^2] \quad (2.8)$$

$$\mu_{f=2.0} : 2.0 = \frac{1.7}{1.1} \alpha^{-1.12} [C_{fy} + 0.7\alpha^2(\alpha - 0.007)^{-0.96} C_{su} + 0.12\alpha(\alpha - 0.011)^{-1.7} C_{su}^2] \quad (2.9)$$

$$\mu_{f=4.0} : 4.0 = \frac{4.1}{1.1} \alpha^{-1.23} [C_{fy} + 0.018\alpha^2(\alpha - 0.001)^{-1.1} C_{su} + 0.4\alpha(\alpha - 0.017)^{-1.16} C_{su}^2] \quad (2.10)$$

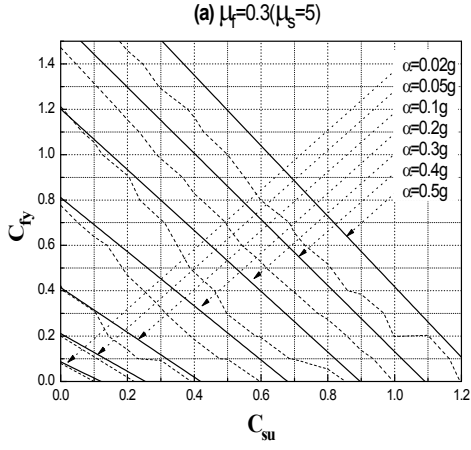
다. Step-3: 특정 연성률 별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 평가

Step-3에서는 특정 연성률 단계, 즉 $\mu_f=0.3$, $\mu_f=0.6$, $\mu_f=1$, $\mu_f=2$ 및 $\mu_f=4$ 단계의 잔존 내진성능(R-index)을 그림 IV.8에 나타내는 지진에 의하여 손상이 생긴 휨 및 전단 파괴형 부재 (Damage Class 별)의 내진성능 저감계수(η)⁴⁾⁵⁾를 고려하여, 지진피해도 구분판정기준⁴⁾⁵⁾을 토대로 산정한다.

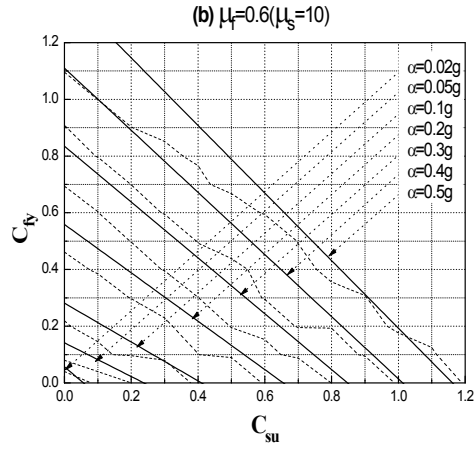
상기 내진성능 저감계수(η)는 부재의 실험 및 해석연구⁵⁾를 바탕으로 유도한 것으로서, 부재의 내력-변형관계 곡선을 이상화하여 부재가 소산한 지진에너지와 잔존에너지 흡수 능력을 이용하여 설정한 계수이다.

본 연구에서는 지진피해도 구분판정법⁴⁾⁵⁾을 이용하여 각 연성률 단계의 잔존 내진성능을 산정한 것으로서, 이 판정법은 식(2.11)에 나타난 지진피해 전·후의 보유성능 지표(E_0), 즉 강도지표 (보유수평내력, C) 및 연성지표 (변형능력, F)을 산정하여 그 비율 (내진성능 잔존율, R)에 의하여 잔존 내진성능을 산정한다.

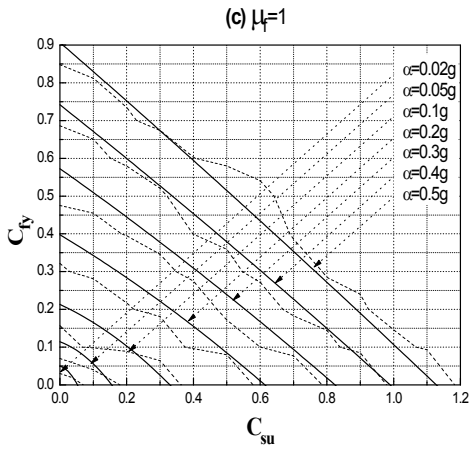
$$R = \frac{{}_DE_o(=\eta E_o)}{E_o} \times 100(\%) \quad (2.11)$$



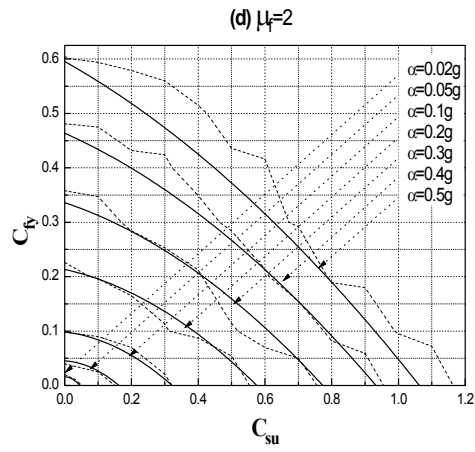
[그림 IV.3] Required Spectrum($\mu_f=0.3$)



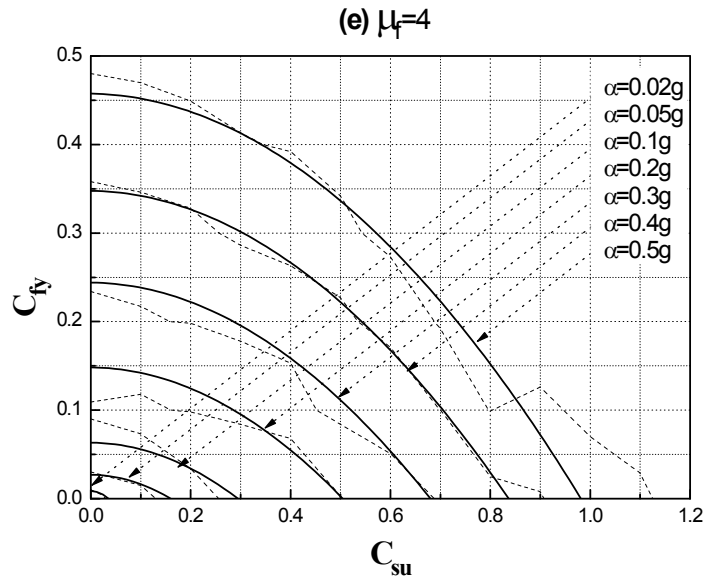
[그림 IV.4] Required Spectrum($\mu_f=0.6$)



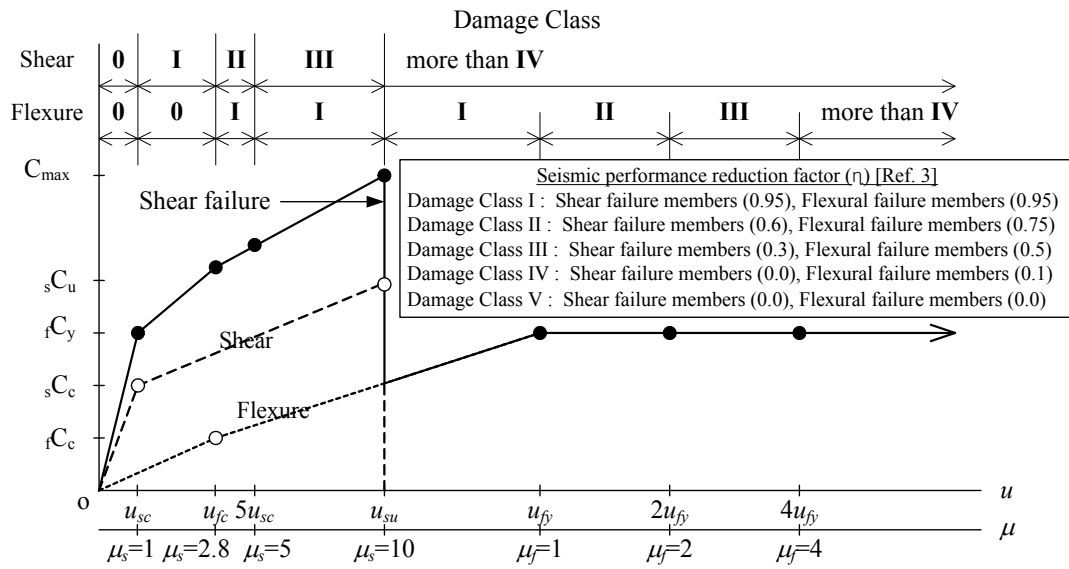
[그림 IV.5] Required Spectrum($\mu_f=1.0$)



[그림 IV.6] Required Spectrum($\mu_f=2.0$)



[그림 IV.7] Required Spectrum($\mu_f=4.0$)



[그림 IV.8] 내진성능 저감계수(η)³⁾

라. Step-4: 내진성능 평가

Step-4에서는 Step-3에서 계산한 내진성능 잔존율(R)을 다음에 나타내는 평가기준 4)5)에 의해서 지진손상도, 즉 내진성능을 최종적으로 평가한다.

- ① Slight: $R \geq 95$ (%)
- ② Small: $80 \leq R < 95$ (%)
- ③ Medium: $60 \leq R < 80$ (%)
- ④ Severe: $R < 60$ (%)
- ⑤ Collapse: 건물전체 또는 일부의 붕괴 등에 의하여 $R \approx 0$ 으로 판단 가능한 것

2. 지진손상도 평가법 평가예제

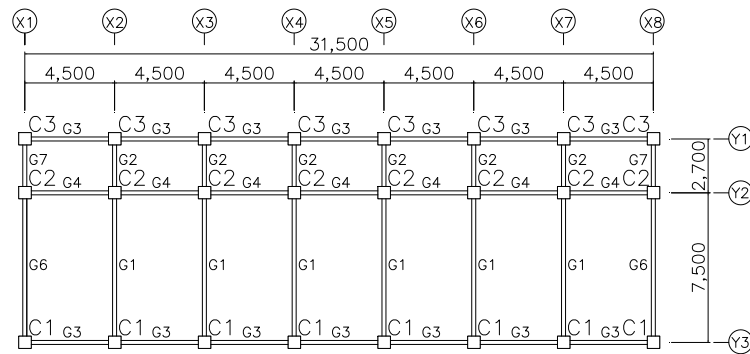
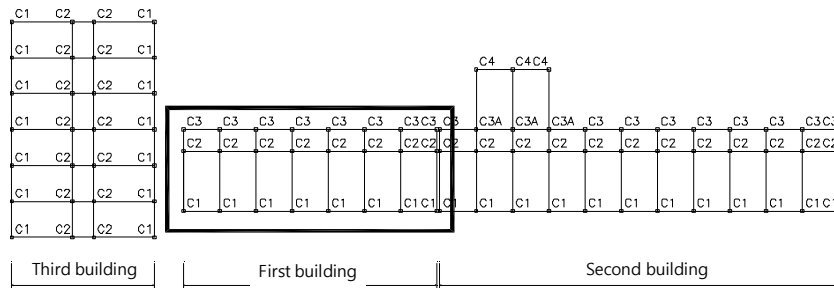
가. 대상건물 개요

본 대상건물은 내진설계가 수행되지 않은 1980년대 건설된 건설부 공고 제130호 표준설계도에 의한 (다)형 철근콘크리트 학교건물이다. 그림 IV.9에는 대상건물의 평면도를, 표 IV.1에는 대표적인 기둥리스트를 나타낸다. 설계용 콘크리트의 강도는 21MPa, 철근강도는 240MPa이며, 층고는 3.3m의 건물이다.

대상건물은 일반교실동과 특별교실동으로 구분되어 있으며, 일반교실동은 신축이음에 의해서 2동으로 분리되어 총 3동의 건물로 구성되어있다. 본 연구에서는 1번 건물의 1층 장변(X)방향을 대상으로 지진손상도를 추정하여 내진성능을 평가하였다.

<표 IV.1> 기둥 리스트

	C1	C2	C3
3			
	<div>3C1</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>3C2</div> <ul style="list-style-type: none"> • 6 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>3C3</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900
2			
	<div>2C1</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>2C2</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>2C3</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900
1			
	<div>1C1</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>1C2</div> <ul style="list-style-type: none"> • 12 - D19 × 2 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900 	<div>1C3</div> <ul style="list-style-type: none"> • 8 - D16 대근 D10 @ 300 보조근 D10 @ 900



[그림 IV.9] 평면도

나. 보유 수평내력 및 변형능력 산정

표 IV.2에는 식(1)~(3)을 이용하여 대상건물의 보유내력(강도지표, C) 및 변형능력(연성지표, F)의 평가결과를 나타낸다. 대상건물의 연직부재(기둥)는 휨극한 시 전단력(Q_{mu})이 전단극한 시 전단력(Q_{su})보다 작아 휨파괴가 전단파괴보다 선행하는 휨파괴 기둥($C_{fy}=0.21$)으로, 연성지표(F)는 2.5정도의 1그룹과 3.2정도의 2그룹으로 분류 가능하다. 식(4)에 의한 E_{01} 은 0.43, 식(5)에 의한 $E_{02}=0.45$ 로 최종 보유성능 지표(E_0)는 식(5)에 의한 0.45이다.

<표 IV.2> 종국강도 및 연성율의 계산결과

Members	M_u (t • m)	Q_{mu} (t)	Q_{su} (t)	Q_u (t)	FailureT ype	Q_{su}/Q_u	Failure Type	μ	F	Gro up
C11 × 2EA	7.13	5.01	12.6	5.01	Flexure	2.51	Flexure	5	3.2	2
C12 × 6EA	8.6	6.03	13.5	6.03	Flexure	2.24	Flexure	5	3.2	2
C21 × 2EA	15.03	10.54	16.00	10.54	Flexure	1.51	Flexure	3.1	$\frac{2.6}{3}$	1
C22 × 6EA	18.73	13.15	19.31	13.15	Flexure	1.47	Flexure	2.7	$\frac{2.4}{6}$	1
C31 × 2EA	14.23	9.98	17.11	9.98	Flexure	1.71	Flexure	5	3.2	2
C33 × 6EA	17.55	12.32	19.54	12.32	Flexure	1.59	Flexure	3.9	2.9	2

다. Step-2: 특정 연성률 별 입력지진수준 산정

3.2절에서 산정한 휨파괴형 부재내력($C_{fy}=0.21$)와 전단파괴형 부재내력($C_{su}=0$)를 제 2.2절의 비선형 요구내력스펙트럼(평균값)을 회귀분석을 이용하여 수식화한 식 (2.6)~(2.10)에 대입하여 해당 연성률 별($\mu_f=0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$) 입력지진수준(α)을 산정한 결과를 표 IV.3 (Step-2)에 나타낸다. 각각의 연성률 $\mu_f=0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$ 에 해당하는 입력지진수준은 $\alpha=0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.2g, 0.27g$ 로 산정되었다. 입력지진수준 약 0.1g인 경우 연성률 $\mu_f=1$ 이 발생하여 대상구조물은 항복상태에 이르는 것으로 판단된다.

라. Step-3: 특정 연성률 별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 평가

Step-1의 강도지표를 근거로 각 연성률 단계 별로 내진저감계수(η)를 곱하여 지진 피해후의 보유성능지표 ${}_dE_o$ 를 산정한 후, 식(2.11)을 이용하여 내진성능 잔존률(R)을 산정한다. 표 IV.3의 Step-3에 산정결과를 나타낸다.

마. Step-4: 내진성능 평가

표 IV.3의 Step-4에 지진손상도, 즉 내진성능 평가결과를 나타낸다. $\mu_f = 0.6$ ($\mu_s = 10$)의 경우 R=93 소규모 파괴, $\mu_f = 1$ 의 경우 R=73 중규모 파괴, $\mu_f = 2$ 이상 인 경우는 R=49 대규모 파괴로 최종적으로 판단할 수 있다. 그림 IV.10에는 대상건물 장변방향의 내력-변형과 지진손상도 상관 관계도를 나타낸다.

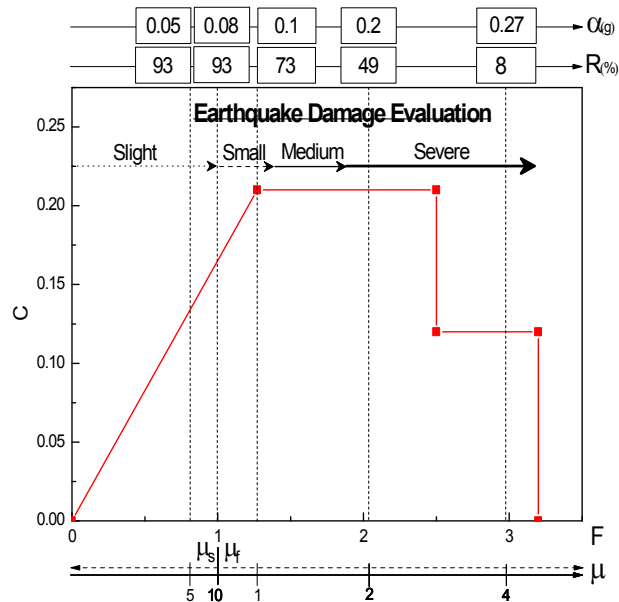
<표 IV.3> 내진성능 평가 결과

STEP 1				STEP 2		STEP 3				STEP 4
그룹	C	F	E_o	μ_f	$\alpha(g)$	Seismic reduction factor (η)		$D E_o$	$R(\%)$	Evaluation
						Shear	Flexure			
1	0.09	2.5	0.45	0.3	0.05	0.3	0.95	0.42	93	소파
2	0.12	3.2		0.6	0.08	0	0.95	0.42	93	소파
				1	0.1	0	0.75	0.33	73	중파
				2	0.2	0	0.5	0.22	49	대파
3	-	-		4	0.27	0	0.1	0.04	8	붕괴

3. 제안된 평가법의 타당성 및 적용가능성 검증

가. 적용가능성 및 타당성 검증 개요

본 연구 평가법의 타당성 검증을 위해 예제건물을 대상으로 본 연구의 내진성능 평가법을 적용하여 평가한 결과와 보다 상세한 부재수준의 비선형 동적해석을 실시하여 제3장 Step 2의 결과, 즉 입력지진동 $\alpha = 0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.2g, 0.27g$ 에서 각각 연성률 $\mu_f = 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$ 이 평균적으로 발생 하는지 비교·검토하였다. 또한 내진 진단기준²⁾에서 입력지진동 0.2g 수준에 대해서 구조체에 대규모 이상의 지진피해를 막기 위한 임계값으로 설정한 내진성능 판정지표($E_s = 0.6$)와의 상관관계를 분석하여 본 연구의 내진성능 평가법의 적용가능성을 검증하였다.



[그림 IV.10] 강도-연성과 지진피해고 관계 (Y방향)

나. 비선형 동적해석 결과와 비교 · 검토

실제 구조물은 입체적으로 복잡하게 진동을 하지만, 본 연구에서는 기둥 및 보를 선재로 치환하며, 수평방향의 지진력만 고려한 평면골조로 모델링한다. 구조물부분에서는 부재레벨에 입각하여 층 특성을 평가하며, 해석에 필요한 가정은 다음을 따른다.

- ① 각 부재의 항복한지의 위치는 문헌[6] 및 문헌[7]을 참고로 다음과 같이 가정을 하며, 기둥 및 보의 접합부 등, 각 부재의 중심으로부터의 항복한지가 발생하는 부재 단까지의 강역으로 가정한다.
 - 일반층의 보 : 날개벽이 없는 경우는 기둥단 위치로 하며, 날개벽이 있는 경우는 가장자리로부터 $D_G/2$ (D_G :보높이)들어온 위치로 한다.
 - 지중보 : $DF' < (10/10' - 1) \cdot DF$ 인 경우는 기둥단의 위치로 하고, $DF' \geq (10/10' - 1) \cdot$

DF인 경우는 기초판단의 위치로 한다.(DF : 지중보 높이, DF' : 기초판의 저면으로부터 지중보까지의 거리, 10 : 기둥간 거리, 10' : 기둥관간 거리)

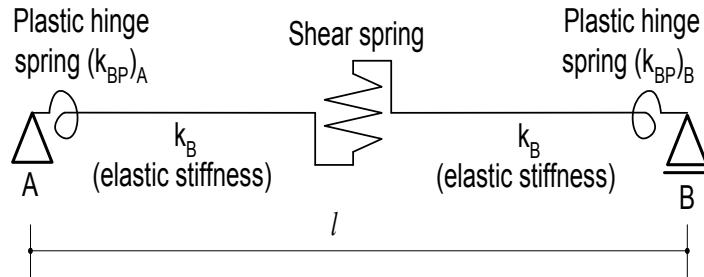
· 기둥: 수벽 및 정두리벽이 없는 기둥은 보단의 위치로 한다. 수벽 및 정두리벽이 있는 경우는 수벽 및 정두리벽의 가장자리로부터 $D_c/200$ (D_c :기둥폭)들어온 위치로 한다.

② 각 골조를 양단편의 강한보로 연결하여 구조물 전체를 하나의 평면골조로 해석하였다. 즉, 강막가정이 성립하는 것으로 한다.

③ 보의 내력은 보와 협력하는 범위인 슬래브의 유효폭내의 슬래브 철근의 영향도 고려하며, 보단의 장기하중에 의한 휨모멘트는 후술하는 부재의 휨스프링의 복원력특성에 초기치로서 부여하는 것으로 고려한다. 또한, 기둥의 내력계산용 축력은 장기축력으로 한다.

④ 조적조 등의 비내력벽은 무시한다.

한편, 그림 IV.11에 나타내는 것과 같이, 부재는 휨스프링과 전단스프링이 직렬 결합한 모델로 가정한다. 즉, 양단의 모멘트로부터 휨에 대한 강성메트릭스를 평가하는 Giberson모델(재단 소성스프링법)⁽⁸⁾⁽⁹⁾로 가정한 것으로서, 부재의 재축방향의 변형은 무시를 하며, 부재의 휨은 탄성강성 k_B 를 가지는 탄성선재와 그 양단에 설정한 $(k_{BP})_A$ 및 $(k_{BP})_B$ 의 강성을 가지는 소성회전스프링에 의하여 평가를 하며, 변형은 그것들의 합으로 나타낸다. 또한 전단변형에 대해서는 재중양부에 설정한 비선형 전단스프링에 의하여 평가를 한다.



[그림 IV.11] 부재모델

휨부재에 대한 이력모델은 Degrading Tri-Linear⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾형으로, 전단부재의 이력모델은 Origin- Oriented⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾형으로 한다. 또한, 각 기둥 및 보의 복원력특성을 결정하는 초기강성, 휨균열모멘트, 전단균열내력, 휨항복모멘트, 전단극한내력 등의 변수들은 「내진진단기준⁽²⁾」 및 「일본건축학회기준⁽¹²⁾」 등에서 사용하고 있는 식을 토대로 산정하였다.

또한, 비선형 동적해석 시의 입력지진동으로서는 문헌[3]에서 사용한 El Centro과 (USA), Taft과(USA), Hachinohe과 (Japan), Erzincan과 (Turkey) 및 Kobe JMA과 (Japan)의 각 수평성분(NS 및 EW)인 10개의 전형적인 피해지진의 가속도 성분을 토대로, 입력지진동 규모를 표 IV.3의 Step 2에서 산정된 $\alpha=0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.2g, 0.27g$ 로 표준화하여 비선형 동적해석을 각각 실시하였다.

표 IV.4에는 비선형 해석 결과 중 해당 입력지진수준에 대한 연성률을 나타낸다. 문헌[3]에서는 바닥이 무한강성을 가지며 다양한 수평저항시스템을 가지는 저층 RC 건물이 전단변형 및 휨변형이 지배적이라고 가정을 하여, 전단 스프링과 휨 스프링이 병렬 연결된 SDOF (Single Degree Of Freedom)로 가정을 하여 비선형 지진응답해석을 실시한 반면, 본 연구에서는 부재수준의 비선형 동적해석을 수행하였다.

표 IV.4에 의하면 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법에서는 $\alpha=0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.2g, 0.27g$ 에 대해서 $\mu_f=0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$ 이며, 부재수준의 비선형 지진응답해석에서는 입력지진동 $\alpha=0.05g$ 에서는 $\mu_f=0.15 \sim 0.34$ (평균 0.23), $\alpha=0.08g$ 에서는 $\mu_f=0.22 \sim 0.68$ (평균 0.42), $\alpha=0.1g$ 에서는 $\mu_f=0.3 \sim 0.99$ (평균 0.56), $\alpha=0.2g$ 에서는 μ_f

=0.71~4.38 (평균 1.6), $\alpha=0.27g$ 에서는 $\mu_f=0.97\sim7.56$ (평균 2.65)을 나타내어, 연성율은 지진응답해석에 이용한 지진파에 의해서 다소 변동을 하지만, 평균적으로는 본 연구에서 제안한 평가법에 의한 연성율은 상세한 비선형 해석법에 의한 그 값을 공학적으로 적절하게 예측 하고 있다고 판단된다.

<표 IV.4> 비선형 동적해석의 결과 (지진가속도에 대한 연성율)

EQs	Ductility ratio(μ_f) for EQ levels (α)				
	0.05	0.08	0.1	0.2	0.27
Elcentro.ew	0.31	0.46	0.56	1.23	2.00
Elcentro.ns	0.25	0.31	0.37	0.71	1.14
Taft.ew	0.15	0.22	0.30	0.83	1.37
Taft.ns	0.18	0.29	0.32	0.73	0.97
Hachinohe.ew	0.27	0.68	0.97	3.55	6.86
Hachinohe.ns	0.18	0.34	0.46	1.14	1.75
Erzincan.ew	0.18	0.31	0.41	1.07	1.56
Erzincan.ns	0.26	0.63	0.99	4.38	7.56
Kobe.ew	0.34	0.54	0.63	1.28	1.72
Kobe.ns	0.19	0.43	0.61	1.05	1.56
Mean values	0.23	0.42	0.56	1.6	2.65
This study	0.3	0.6	1.0	2.0	4.0

다. 제2차 내진진단 결과와 비교 및 검토

표 IV.5에 나타낸 바와 같이 내진진단기준²⁾에서 입력지진동 약 0.2g 수준에 대해서 구조체에 대규모 지진피해를 막기 위한 임계값으로 설정한 보유성능 지표값 $E_s=0.6$ 이 되는 경우의 전단 탁월형, 전단 및 휨 탁월형, 휨 탁월형 건물3) 총 15종류에 대해서 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법을 수행하였다. 그림 IV.12에는 휨과괴 연성률 $\mu_f=0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$ 이 발생하는 입력지진수준에 대한 잔존내진성능(R)을 산정한 R 값과 $E_s=0.6$ 의 상관관계를 나타내었다.

그림 IV.12에서 0.2g보다 높은 입력지진수준에는 대다수가 $R=60\%$ 이하 (대규모 지

진피해 이상), 0.2g보다 낮은 입력지진수준에는 잔존내진성능이 60% 이상 (중/소규모 지진피해)를 나타내어 문헌[2]의 내진진단기준에서 설정한 구조체에 대규모 지진피해를 막기 위한 지표값 $E_s=0.6$ 과 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법은 전반적으로 좋은 상관관계를 나타내어 실용적인 측면에서도 유용한 방법이라고 사료된다.

<표 IV.5> $E_s=0.6$ 을 가지는 RC 건물의 종국강도의 조합

Members controlled by shear				Members controlled by both shear and flexure				Members controlled by flexure			
ID	C_{su}	C_{fy}	F	ID	C_{su}	C_{fy}	F	ID	C_{su}	C_{fy}	F
1)	0.75	0.00	0.8	6)	0.35	0.37	1, 3.2	11)	0.00	0.19	3.2
2)	0.60	0.00	1	7)	0.15	0.18	1, 3.2	12)	0.00	0.21	2.8
3)	0.55	0.07	1, 3.2	8)	0.20	0.18	1, 3.2	13)	0.02	0.21	1, 2.8
4)	0.50	0.15	1, 3.2	9)	0.15	0.21	1, 2.8	14)	0.04	0.21	1, 2.8
5)	0.45	0.22	1, 3.2	10)	0.20	0.20	1, 2.8	15)	0.06	0.19	1, 3.2

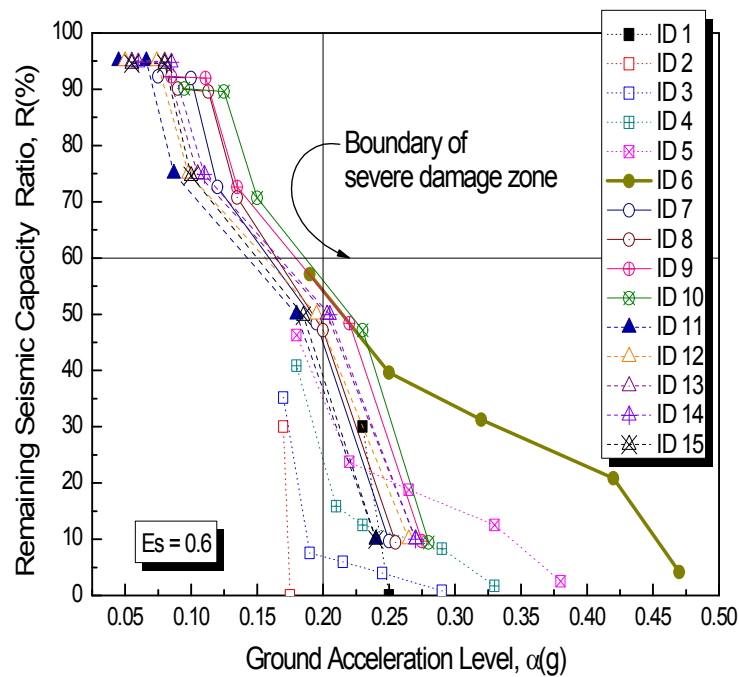
4. 소 결

본 연구에서는 비선형 지진응답해석을 이용하여 유도된 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 비선형 요구내력스펙트럼을 수식화하여 특정 연성률 별로 지진입력수준과 내진성능잔존률을 산정하여 구조물의 지진손상정도를 정량적으로 평가하는 새로운 내진성능평가법을 제안하였다.

또한, 실존하는 저층 RC 건물을 대상으로 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법을 적용하여 평가한 결과와 보다 상세한 부재수준의 비선형 동적해석을 실시하여 그 결과를 각각 비교·검토하였으며, 내진진단기준²⁾에서 입력지진동 0.2g 수준에 대해서 구조체에 대규모 이상의 지진피해를 막기 위한 임계값(Critical Value)으로 설정한 내진성능판정지표 ($E_s=0.6$)와의 상관관계를 분석하여, 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법의

타당성 및 그 적용가능성을 검증하였다.

본 평가법은 비선형 동적해석 또는 능력스펙트럼법 등의 상세 내진성능평가 방법을 수행하지 않고도 순차적으로 대상구조물(저층 RC 건물)의 연성률 단계별 입력지진수준, 잔존내진성능을 정량적으로 평가하여 지진손상도가 추정가능하며, 부재수준의 비선형지진응답해석 결과 및 내진성능판정지표($E_s=0.6$)와의 상관관계를 분석한 결과로부터 본 연구의 내진성능 평가법의 타당성 및 적용가능성이 검증되었다. 향후 전단 및 휨과 괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능을 효과적으로 평가하기 위한 자료로서 활용이 가능하다고 판단된다.



[그림 IV.12] 잔류내진성능(R)과 $E_s=0.6$ 의 상관관계

V. 결론

1995년에 발생한 일본 고베(神戸)지진(M=7.2, 사상자: 약 6,310명), 1999년에 발생한 터키 이즈미트 지역지진(M=7.4, 사상자: 약 15,657명), 2001년에 발생한 인도 구자라트지진(M=7.7, 사상자: 20,085명), 2005년에 발생한 파키스탄지진(M=7.6, 사상자: 86,000명), 2008년에 발생한 중국 쓰촨성지진(M=7.9, 사상자: 68,712명) 등의 한반도 주변을 포함한 세계각지에서 대규모 지진이 빈발하고 있으며, 이로 인한 인명 및 경제적 손실 규모는 하나의 국가가 감당할 수 없을 정도로 큰 경우가 많아, 국가차원에서의 지진에 의한 피해를 줄이기 위한 대비가 반드시 필요하다.

최근 수년간 일본, 이탈리아, 알제리, 모로코, 터키, 파키스탄, 중국 등에서 지진에 따른 학교 건물 붕괴로 수많은 어린학생이 희생되어 큰 사회적 파장을 불러 일으켰으며, 특히 1995년 일본 고베지진에서는 약 30%의 학교가 지진피해를 받았으며, 2005년 파키스탄 지진 때는 수많은 학교 건물이 붕괴하여 1만 7000여명 어린이가 사망하였다. 2008년 중국 쓰촨성 대지진에서도 어린학생 수백명의 목숨을 한꺼번에 앗아간 학교 붕괴 현장들은 가장 참혹한 지진피해가 발생하여 중국사회에 큰 충격을 주었다.

한편, 국내 1987년 기준 전국의 학교 수는 12,860개교에서 2006년 14,681개교로 1988년 내진설계법 적용 이후 건립된 학교는 전체 학교 수의 약 14%에 해당되며, 약 86%의 학교는 내진기준 제정 전에 설립되어 내진설계가 되어 있지 않는 것이 현실로, 비 내진상세를 가지는 국내 학교 건물의 내진대책은 시급하다. 그러나 현재 내진대책의 기본이 되는 내진성능평가법에 대한 구체적인 지침이 없는 실정이며, 대부분

국외기준을 적용한 내진성능 평가결과에 관한 연구가 주류이며, 평가방법의 어려움으로 인한 고도의 전문적 지식이 필요하다. 따라서, 내진성능평가를 간단하게 수행가능하며, 결과에 대한 신뢰성이 확보가 가능한 한국형 내진성능 평가법 구축 필요하다.

상기와 같은 배경 하에 본 연구에서는 교육과학기술부 시설과 내진업무 수행에 적합한 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능평가 및 내진보강 가이드라인을 개발하였다. 개발 주요 내용은 다음과 같다.

- (1) 목표 내진성능 수준 및 내진성능 등급의 결정
- (2) 내진성능 예비평가법 개발
- (3) 내진성능 상세평가법 개발
- (4) 내진성능 예비평가법 시트 제시
- (5) 내진성능 상세평가법 시트 제시
- (6) 내진성능 예비평가법을 이용한 기존 학교건물의 평가 사례
- (7) 내진성능 상세평가법을 이용한 기존 학교건물의 평가 사례

본 연구 결과가 교육과학기술부 시설과를 중심으로한 전국 시·도 교육청 및 관계기관의 학교시설 내진보강사업에 유용한 자료가 되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 고시, 「건축구조설계기준(2005)」, 대한건축학회
2. 이강석 「전단 및 휨과괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 간이 내진성능 평가법 제안」, 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 24. No. 11, pp.3~13, 2008
3. 이강석, 이원호, 류해상 「말뚝기초를 포함한 철근콘크리트 건물의 비선형 지진해석 법에 관한 연구」, 한국지진공학회 논문집, Vol. 7, No. 2 (통권30호), 2003
4. 이강석, 이원호 「전단 및 휨과괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 지진응답특성」, 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 18. No. 11, pp.35~46, 2002
5. 이강석, 최호, 이원호 「현존 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가 및 지진피해율의 상 정」, 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 18. No. 1(통권159호), pp. 11~20, 2002
6. Berg, G.V. and D.A. DaDeppo, 「Dynamic Analysis of Elastoplastic Structures」, Proc. ASCE, Vol.86, No. EM 2, 1960 논문집, 제7권 2호(통권30호), 2003
7. Federal Emergency Management Agency, 「FEMA-310·Handbook for Seismic Evaluation of Buildings -A Prestandard」, Washington. D.C., 268pp, 1988
8. Kang Seok Lee, "Seismic Capacity Requirements for Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Controlled by both Shear and Flexure", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8. No. 1, pp.75~91, February 2010.
9. K. S. Lee, Y. Nakano, H. Kumazawa and T. Okada,, Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Damaged by Hyogo-ken Nambu Earthquake 1995 (Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings in Awaji Island), Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, Japan Society of Civil Engineers, Vol.42B, March 1996(in Japanese).

10. Masaki Maeda, Yoshiaki Nakano and Kang Seok Lee 「Post-Earthquake Damage Evaluation for RC Buildings Based on Residual Seismic Capacity」, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, No. 1179, August 2004
11. Otani, S., 「Inelastic Analysis of RC Frame Structures」, Proceedings of ASCE, Vol.100, No. ST7, 1974
12. Shunsuke OTANI, “Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis”, journal of the faculty of engineering, the university of tokyo, Vol. 36, No. 2, 1981.
13. (財)日本建築防災協会, 「既存コンクリート造建築物の耐震診断基準・付解説」. 新洋社, 東京, 140pp, 1977(1990年, 2001年改訂)
14. (財)日本建築學會, 「1968十勝沖地震災害調査報告」, 1968
15. (財)日本建築防災協会, 「震災建築物の被災度区分判定基準および復舊技術指針」, 三榮社, 東京, 360pp, 2001
16. 日本建築學會, 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」, 1991
17. 志賀敏男, 「鉄筋コンクリート造建物の震害と壁率, 柱率」, 自然災害科学資料解析シンポジウム, pp.46~55, 1975
18. 梅村魁遍, 「鉄筋コンクリート建物の動的設計法續(中層)」, 技報堂, 1982(2003)

【부록 1】 내진성능 예비평가 시트

1. 평가년도

정리 번호 : _____ 호

■ 평가일시 : _____ 년 _____ 월 _____ 일

■ 평가횟수 : _____ 회

■ 평 가 자 : _____

■ 소 속 : _____

2. 일반 사항 (건물의 개요)

■ 건물 명칭 _____

▪ 건물 위치 _____

▪ 건물 규모 지상 ()층, 지하 ()층, 1층의 스패길이 : ()m × ()m

▪ 지상 높이 ()m

▪ 부지의 지형 _____

■ 시공 연도 ~ 년 (☐ 1988년 이전 ☐ 1988년 이후 ☐ 불명확)

3. 재료의 강도

- 콘크리트 ($F_c =$) kgf/cm^2

▪ 철 근 (σ_y) kgf/cm^2

4. 각 부재의 내력값 산정 (건물의 1층)

- 내력산정에는 장변 및 단변방향 2방향에 대해서 산정을 하며, 우선도 평가도 2방향에 대해서 독립적으로 평가를 한다.

<힘파괴형 부재>

- **힘파괴형 부재의 내력값 산정식: 장주**

$$\left(C_{fy} = \frac{V_{fy}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{fc} \sum a_{fc}}{\sum A_f \cdot w} \right)$$

(3.1)

여기서, $\sum a_{fc}$: 일반기둥의 단면적 합 (표 3.2 참조)

 τ_{fc} : 일반기둥의 평균 전단응력도 (표 3.2 참조) $\sum A_f$: 대상건물 전층의 바닥면적 합 w : 바닥면적당 단위중량

표 3.2 건축시기 별 일반기둥의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년 이후
휨 파괴	일반기둥 (h ₀ /D > 6)	0.73 (7.3)	0.74 (7.4)	0.85 (8.5)	0.86 (8.6)

<전단파괴형 부재>

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정식: 단주, 벽체, 조적채움벽 및 극단주

$$\left(C_{su} = \frac{V_{su}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{sc} \sum a_{sc} + \tau_{oc} \sum a_{oc} + \tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw}}{\sum A_f \cdot w} \right) \quad (3.2)$$

여기서, $\sum a_{sc}$: 극단주의 단면적 합 (표 3.3 참조)

τ_{sc} : 극단주의 전단응력도 (표 3.3 참조)

$\sum a_{oc}$: 단주의 단면적 합 (표 3.3 참조)

τ_{oc} : 단주의 전단응력도 (표 3.3 참조)

$\sum a_{sw}$: 벽체의 단면적 합 (표 3.4 참조)

τ_{sw} : 벽체의 전단응력도 (표 3.4 참조)

$\sum a_{bw}$: 조적채움벽의 단면적 합 (표 3.5 참조)

τ_{bw} : 조적채움벽의 전단응력도 (표 3.5 참조)

$\sum A_f$: 대상건물 전체의 바닥면적 합

w : 바닥면적당 단위중량

표 3.3 건축시기별 극단주 및 단주의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년 이후
전단파괴	극단주 (h ₀ /D ≤ 2)	1.30 (13.0)	1.35 (13.5)	1.43 (14.3)	1.50 (15.0)
	단주 (2 < h ₀ /D ≤ 6)	1.14 (11.4)	1.19 (11.9)	1.32 (13.2)	1.38 (13.8)

표 3.4 벽체의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

양측에 기둥이 있는 벽	한쪽에 기둥이 있는 벽	기둥이 없는 벽
$\tau_{sw} = 3(30), a_{sw} = t \times l_{w1}$	$\tau_{sw} = 2(20), a_{sw} = t \times l_{w2}$	$\tau_{sw} = 1(10), a_{sw} = t \times l_{w3}$

표 3.5 끼움조적조의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

종류	전단응력도 및 단면적	종류	전단응력도 및 단면적
양측에 기둥이 있는 조적채움벽	$\tau_{bw} = 0.6(6), a_{bw} = t \cdot L_w$	한쪽만 기둥이 있는 조적채움벽	
기둥이 없는 조적채움벽	$\tau_{bw} = 0.0$		$\tau_{bw} = 0.2(2), a_{bw} = t \cdot L_w$

4.1 장변방향(X방향)의 내력산정 (1층)

▪ 건물전층의 총중량 $\sum A_f (= \text{ } m^2) \times 1.2 \text{ tf}/m^2 (\text{바닥면적당 단위중량:w}) = (\text{ }) \text{ tf}$

- 횡파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{fe1}: \text{일반기둥의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{fe2}: \text{장주의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{fy} = \frac{\tau_{fc1} \sum a_{fc1} + \tau_{fc2} \sum a_{fc2}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{10 \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2 + 7 \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2}{[\underline{\hspace{2cm}}] \times 1000 \text{ kgf}} = [\underline{\hspace{2cm}}]$$

$$\therefore C_{fy} = (\underline{\hspace{2cm}})$$

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{sw}: \text{벽체의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sw}: \text{조적체움벽의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sc}: \text{단주의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{su} = \frac{\tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw} + \tau_{sc} \sum a_{sc}}{\sum A_f \cdot w}$$

$$= \frac{[\underline{\hspace{2cm}}] \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2 + [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2 + [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2}{[\underline{\hspace{2cm}}] \times 1000 \text{ kgf}} = [\underline{\hspace{2cm}}]$$

$$\therefore C_{su} = (\underline{\hspace{2cm}})$$

4.2 단변방향 (Y방향)의 내력산정 (1층)

$$\text{▪ 건물전층의 총중량} \quad \sum A_f (= \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}^2) \times 1.2 \text{ tf/m}^2 (\text{바닥면적당 단위중량:w}) = (\underline{\hspace{2cm}}) \text{ tf}$$

- 횡파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{fe1}: \text{일반기둥의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{fe2}: \text{장주의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{fy} = \frac{\tau_{fc1} \sum a_{fc1} + \tau_{fc2} \sum a_{fc2}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{10 \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2 + 7 \text{ kgf/cm}^2 \times [\underline{\hspace{2cm}}] \text{ cm}^2}{[\underline{\hspace{2cm}}] \times 1000 \text{ kgf}} = [\underline{\hspace{2cm}}]$$

$$\therefore C_{fy} = (\underline{\hspace{2cm}})$$

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{sw} : \text{벽체의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sw} : \text{조적채움벽의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sc} : \text{단주의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{su} = \frac{\tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw} + \tau_{sc} \sum a_{sc}}{\sum A_f \cdot w}$$

$$= \frac{[\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2 + [\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2 + [\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2}{[\quad] \times 1000 \text{ kgf}} = [\quad]$$

$$\therefore C_{su} = (\quad)$$

5. 최대 입력지진 가속도 (α) 산정

- 내진성능 평가를 위한 기본 지진가속도는 2.2.2절에 나타난 각 지진구역별 500년, 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 평가용 최대 지진가속도(α)는 유효지반가속도(S)에 2.2.3절에 나타난 지반종류에 따른 지반증폭계수(F_a)(표 2.6)를 곱한 단주의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})를 이용하여 식 (2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정한 다. 표 2.2에는 지반종류에 따른 단주의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})을 나타내며, 표 2.3에는 평가용 최대 지진가속도(α)를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \quad (500\text{년 재현주기의 경우}) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \times 2/3 \quad (2500\text{년 재현주기 } 2/3 \text{ 수준의 경우}) \quad (2.2)$$

5.1 지진지역 구분 및 지역계수 (A)

- 지역계수 : 지진지역 ()/지역계수 값 ($S =$) ☐ 지진지역 1 ☐ 지진지역 2

표 2.4 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역*	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

주* 강원도 북부(군,시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군,시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

5.2 지반종류 구분 및 지진지역 단주기 (S_{DS}) 계산

지반종류 체크 : ☐ S_A ☐ S_B ☐ S_C ☐ S_D ☐ S_E

표 2.5 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \overline{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ ($\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

표 2.6 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

* S_s 는 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 S_s 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

5.3 최대 입력가속도 (α) 결정

표 2.2 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도 (S_{DS})

지반종류	지역구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.22	0.29	0.14	0.19
S_B	0.28	0.37	0.175	0.23
S_C	0.33	0.43	0.21	0.28
S_D	0.44	0.50	0.28	0.35
S_E	0.68	0.70	0.44	0.53

* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

표 2.3 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(α)

지반종류	지진구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S _A	0.09	0.12	0.06	0.08
S _B	0.11	0.15	0.07	0.09
S _C	0.13	0.17	0.08	0.11
S _D	0.18	0.20	0.11	0.14
S _E	0.27	0.28	0.18	0.21

* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

입력가속도(α) : $\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = \frac{[\quad]}{2.5} = [\quad]g$

6. 입력지진파(α)에 따른 요구성능판정지표(E_d) 및 우선도 평가용 factor값 계산

- 요구성능판정지표(E_{di}) 및 우선도 평가용 factor 산정용 식

<표 2-2> 평가용 지진가속도(α)에 따른 요구성능 판정지표(E_{di}) 및
내진성능 평가용 지표(β , G , P) 계산식

지진규모 지표값	$0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$	$0.2g < \alpha \leq 0.3g$			
	$E_{d1} = E_{d2} = E_{d3} = E_{d4}$	경미/무피해 판정용(E_{d1})	소규모 피해 판정용(E_{d2})	중규모 피해 판정용(E_{d3} , E_{d4})	대규모 피해 판정용
E_{di} ($i = 1 \sim 4$)	$2\alpha + 0.05$	$1.1\alpha + 0.23$	$2\alpha + 0.05$	$1.5\alpha + 0.15(E_{d3})$ $2\alpha + 0.05(E_{d4})$	-
β	$2.1 - 6\alpha$	$1.42 - 2.6\alpha$			
G	$2.2\alpha + 0.06$	$\alpha + 0.3$			
P	0.15	$0.31 - 0.8\alpha$			

- 요구성능판정지표 값

<지진규모: $0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$ >

$E_{di}(i = 1 \sim 4) = 2\alpha + 0.05 = [\quad]$

<지진규모: $0.2g < \alpha \leq 0.3g$ >

$E_{d1} = 1.1\alpha + 0.23 = [\quad], E_{d2} = 2\alpha + 0.05 = [\quad], E_{d3} = 1.5\alpha + 0.15 = [\quad],$

$$\underline{E_{d4}} = 2\alpha + 0.05 = [\quad]$$

▪ 우선도 평가용 factor 값

<지진규모: $0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$ >

$$\beta = 2.1 - 6\alpha = [\quad], \quad G = 2.2\alpha + 0.06 = [\quad], \quad P = 0.15$$

<지진규모: $0.2g < \alpha \leq 0.3g$ >

$$\beta = 1.42 - 2.6\alpha = [\quad], \quad G = \alpha + 0.3 = [\quad], \quad P = 0.31 - 0.8\alpha = [\quad]$$

7. 건물피해 및 내진 성능 평가점수 산정

7.1 경미 및 무피해 판정 및 내진 성능 평가 점수 계산

▪ 경미/무피해 요구 성능 계산: $\underline{E_{p1}} = (0.75C_{su} + 0.3C_{fy}) \times 0.78 = [\quad]$

▪ 경미/무피해 판정

☐ $\underline{E_{d1}} \leq \underline{E_{p1}} = [\quad] \leq [\quad]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 경미 및 무피해 최종판정: 내진 성능 평가점수 계산

☐ $\underline{E_{d1}} > \underline{E_{p1}} = [\quad] > [\quad]$ (Yes) \Rightarrow 7.2항 소규모 피해 판정 및 내진 성능 평가 점수 계산으로 이동

▪ 내진 성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p1}}{E_{d1}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상(I) ☐ 110점 이상~120점 미만(II) ☐ 100점 이상~110점 미만(III)

7.2 소규모 피해 판정 및 내진 성능 평가 점수 계산

▪ 소규모 피해 요구 성능 계산: $\underline{E_{p2}} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d2}) \times 0.78\}^2 + \{0.9C_{fy} \times 0.8\}^2} = [\quad]$

▪ 소규모 피해 판정

☐ $\underline{E_{d2}} \leq \underline{E_{p2}} = [\quad] \leq [\quad]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 소규모 피해로 최종판정: 내진 성능 평가점수 계산

☐ $\underline{E_{d2}} > \underline{E_{p2}} = [\quad] > [\quad]$ (Yes) \Rightarrow "7.3항 중규모 피해 판정 및 내진 성능 평가 점수 계산"으로 이동

▪ 내진 성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p2}}{E_{d2}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상(I) ☐ 110점 이상~120점 미만(II) ☐ 100점 이상~110점 미만(III)

7.3 중규모 피해 판정 및 내진 성능 평가 점수 계산

▪ 중규모 피해 요구 성능 계산

▪ 최종 내진성능 판정 결과 = () 표 2.11 참조

표 2.9 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계

피해구분	성능수준	내진성능평가 점수 (SES)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	SES≥120	A	A
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
소규모 피해	IO	SES≥120		
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
중규모 피해	DCR	SES≥120	B	B
	LS	110≤SES<120	C	
		100≤SES<110	D	
대규모 피해	LSR	90≤SES<100	E	C
	CP	70≤SES<90		D
붕괴	C	50≤SES<70		E
		0≤SES<50		E

표 2.11 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

【부록 2】 내진성능 상세평가 시트

1. 기본 정보	3. 부재 성능 평가	⇒	4. 내진 성능 평가
↓	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">내력 (Q_u) 산정</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">연성지표 (F) 산정</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">강도지표 (C) 및 보유성능 (E_o) 산정</div>	⇒	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">각 연 성 를 별</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">지진동 (α) 산정</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">내진 성능 잔존률 (RSC) 및 최종 평가</div> </div>
2. 건물 및 재료 개요	⇒		

1. 기본정보

- 정리번호 : _____ 호

▪ 평가횟수 : _____ 회

▪ 평가일시 : _____ 년 _____ 월 _____ 일

▪ 평가자 : _____

▪ 소속 : _____

2. 건물 및 재료 개요

- 건물 명칭 : _____
- 건물 위치 : _____
- 건물 규모 지상 ()층, 지하 ()층, 1층의 스패길이 : ()m × ()m
- 지상 높이 ()m
- 부지의 지형 : _____
- 시공 년도 _____ 년 (☐ 1988년이전 ☐ 1988년이후 ☐ 불명확)
- 콘크리트 ($F_c =$) _____ kgf/cm^2 ▪ 철근 ($\sigma_y =$) _____ kgf/cm^2

3. 부재 성능 평가

3.1 내력 (Q_u) 산정

부재		M_u	$Q_{mu}(t)$	$Q_{su}(t)$	$Q_u(t)$	파괴 형식	Q_{su}/Q_{mu}
層	名	(t • m)					
1	W1						
	C1						
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

$$\bullet M_u = 0.8 a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b D F_c} \right)$$

a_t : 인장철근 단면적(cm^2)

N : 축력(kg)

σ_y : 철근 항복점 강도(kg/cm^2)

b : 부재 단면 폭(하중 직각방향)(cm)

D : 부재 단면 높이(하중 방향)(cm)

F_c : 콘크리트 압축강도(kg/cm^2)

$$\bullet Q_{mu} = \frac{M_u}{h_0/2} \quad h_0 : \text{순 길이(cm)}$$

$$\bullet Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 P_t^{0.23} (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot b \cdot j$$

P_t : 인장철근비(%)

σ_{wy} : 전단보강근 항복점 강도(kg/cm^2)

M/Q : $h_0/2$ 로 하여도 좋다.

σ_o : 축방향 응력도(N/bD)(kg/cm^2)

P_w : 전단보강근비. 단, $P_w \leq 0.012$ 일 때는 $P_w = 0.012$ 로 한다.

j : 응력 중심간 거리, $0.8D$ 로 하여도 좋다.

• Q_u 는 Q_{mu} 와 Q_{su} 중 작은 값을 사용

• 파괴형식

- 벽은 모두 전단벽, 기둥은 h_0/D 가 2이하인 기둥은 극취성기둥, h_0/D 가 2초과인 기둥 중 $Q_{mu} < Q_{su}$ 인 경우는 휨기둥, $Q_{mu} \geq Q_{su}$ 인 경우 전단기둥으로 분류.

3.2 연성지표(F) 산정

		F
기둥	극취성기둥	0.8
	전단기둥	1.0
	휨기둥	$\frac{\sqrt{2\mu-1}}{0.75(1+0.05\mu)}$
벽	전단벽	1.0

부재		파괴 형식	μ	F	그룹
층	각				
1	W1				
	C1				
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮

• 휨기둥의 종국소성율 μ

$\mu = \mu_o - k_1 - k_2$ 단, $1 \leq \mu \leq 5$ 로 한다.

$$\mu_o : 10 \left(\frac{Q_{su}}{Q_{mu}} - 1 \right)$$

$$k_2 : 30 \left(\frac{\tau_{M_u}}{F_c} - 0.1 \right) \geq 0$$

$$k_1 : 2.0$$

$$\tau_{Mu} : Qmu/(b \cdot j)$$

(k_1 의 경우, 띠철근간격이 주근지름의 8배 이하인 경우는 0으로 하여도 좋다)

- 파괴형식 및 연성지표 F 의 값이 비슷한 것을 최대한 정리하여 최대 3개의 그룹으로 분류한다.
- 연성지표 F 가 작은 순으로 제1그룹, 제2그룹, 제3그룹으로 명한다.

3.3 강도지표 (C) 및 보유성능(Eo) 산정

부재		$\sum Qu(t)$	$W(t)$	C	F	$\frac{(n+1)}{(n+i)}$	E_0		
층 (방향)	그룹						$E_{0(1)}$	$E_{0(2)}$	E_{0max}
1 (X)	1								
	2								
	3								
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- 강도지표 C

$$C = \frac{\sum Qu}{W}, \quad W: \text{그 층보다 위의 건물 전 중량}$$

n : 건물 층 수 i : 대상 층 수

표 4.4 전단 (C_{su}) 및 휨파괴형(C_{fy}) 부재의 종국강도 분류

종국강도 분류	종국강도 값
전단파괴형 부재의 종국강도 (C_{su})	C_{su} = 연성지표 F 가 1이하인 경우의 강도지표의 합 $\sum C$
휨파괴형부재의 종국강도 (C_{fy})	C_{fy} = 연성지표 F 가 1을 초과한 경우의 강도지표의 합 $\sum C$

<ul style="list-style-type: none"> - C_{su} : 연성지표 F가 1이하인 경우의 C - C_{fy} : 연성지표 F가 1초과한 경우의 C 	$C_{su} = (\quad)$
	$C_{fy} = (\quad)$

- 최종 E_0 는 $E_{0(1)}$ 과 $E_{0(2)}$ 중 더 큰 값으로 결정한다.

$$- E_{0(1)} = \frac{n+1}{n+i} (C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_{3w}) \times F_1$$

C_i, F_i : i 그룹의 강도지표, 연성지표

α_2, α_3	극취성기동	전단기동, 전단벽
휨기동	0.5	0.7
전단기동, 전단벽	0.7	-

$$- E_{0(2)} = \frac{n+1}{n+i} \sqrt{(C_1 \times F_1)^2 + (C_2 \times F_2)^2 + (C_3 \times F_3)^2}$$

4. 내진 성능 평가

4.1 지진 동 (α) 산정

C_{su}	C_{fy}

$\mu_f(\mu_s)$	0.3(5)	0.6(10)	1	2	4
$\alpha(g)$					

- C_{su}, C_{fy}, μ_f 및 α 의 관계식

$$\mu_{f=0.3} : 0.3 = \frac{0.08}{1.03} \alpha^{-0.97} [C_{fy} + 1.9\alpha(\alpha - 0.005)^{-0.7} C_{su}] \quad (4.10a)$$

$$\mu_{f=0.6} : 0.6 = \frac{0.24}{1.1} \alpha^{-0.99} [C_{fy} + 1.54\alpha(\alpha - 0.017)^{-0.6} C_{su}] \quad (4.10b)$$

$$\mu_{f=1.0} : 1.0 = \frac{0.65}{1.1} \alpha^{-0.9} [C_{fy} + 1.02\alpha(\alpha - 0.007)^{-0.58} C_{su} + 0.008\alpha(\alpha + 0.003)^{-3} C_{su}^2] \quad (4.10c)$$

$$\mu_{f=2.0} : 2.0 = \frac{1.7}{1.1} \alpha^{-1.12} [C_{fy} + 0.7\alpha^2(\alpha - 0.007)^{-0.96} C_{su} + 0.12\alpha(\alpha - 0.011)^{-1.7} C_{su}^2] \quad (4.10d)$$

$$\mu_{f=4.0} : 4.0 = \frac{4.1}{1.1} \alpha^{-1.23} [C_{fy} + 0.018\alpha^2(\alpha - 0.001)^{-1.1} C_{su} + 0.4\alpha(\alpha - 0.017)^{-1.16} C_{su}^2] \quad (4.10e)$$

▪ α 의 범위

- $\mu_f = 0.3, 0.6$ 식의 경우 $0 \leq \alpha \leq 0.35g$ - $\mu_f = 1, 2, 4$ 식의 경우 $0.1g \leq \alpha \leq 0.35g$

4.2 내진 성능 잔존률(RSC) 산정

특정 연성율	연성율별 지진가속 도 수준 (4.4절)	보유성 능 (4.3절)	전단 및 휨파괴형 부재의 손상도 (표 4.6)		내진성능 저감계수 (η)		지진피 해 후의 보유성 능	잔존 내진성능
μ_f	$\alpha(g)$	E_o	전단파괴	휨파괴	전단파괴	휨파괴	$_D E_o$	RSC(%)
0.3			Ⅲ	I	0.3(0.4)	0.95		
0.6			Ⅳ	I	0	0.95		
1			Ⅳ	Ⅱ	0	0.75		
2			Ⅳ	Ⅲ	0	0.5		
4			Ⅳ	Ⅳ	0	0.1		

▪ 내진 성능 잔존률(RSC)

$$RSC = \frac{{}_D E_o (= \eta E_o)}{E_o} \times 100(\%) \quad (4.11)$$

여기서, E_o : 지진피해 전의 보유성능 (4.3절 참조)

$_D E_o$: 지진피해 후의 보유성능 ($= \eta \cdot E_o$)

η : 내진성능 저감계수 (표 4.6 참조)

표 4.6 부재의 내진성능 저감계수(η)

지진손상도	전단파괴형 기둥	휨파괴형 기둥	전단벽
I	0.95	0.95	0.95
II	0.6	0.75	0.6
III	0.3	0.5	0.3
IV	0	0.1	0
V	0	0	0

주) 내진성능 저감계수는 부재의 실험연구를 바탕으로 유도한 것으로서, 부재의 내력-변형관계곡선을 이상화하여 부재가 소산한 지진에너지와 잔존에너지 흡수능력을 이용하여 설정한 계수임.

5. 최대 입력지진 가속도 (α) 산정

- 내진성능 평가를 위한 기본 지진가속도는 2.2.2절에 나타낸 각 지진구역별 500년, 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 평가용 최대 지진가속도(α)는 유효지반가속도(S)에 2.2.3절에 나타낸 지반종류에 따른 지반증폭계수(F_a)(표 2.6)를 곱한 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})를 이용하여 식 (2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정한 다. 표 2.2에는 지반종류에 따른 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})을 나타내며, 표 2.3에는 평가용 최대 지진가속도(α)를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \quad (500\text{년 재현주기의 경우}) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \times 2/3 \quad (2500\text{년 재현주기 } 2/3 \text{ 수준의 경우}) \quad (2.2)$$

5.1 지진지역 구분 및 지역계수 (A)

- 지역계수 : 지진지역 ()/지역계수 값 ($S =$) ☐ 지진지역 1 ☐ 지진지역 2

표 2.4 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역*	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

주* 강원도 북부(군,시): 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군,시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

5.2 지반종류 구분 및 지진지역 단주기 (S_{DS}) 계산

- 지반종류 체크 : ☐ S_A ☐ S_B ☐ S_C ☐ S_D ☐ S_E

표 2.5 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \overline{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ ($\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

표 2.6 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

* S_s 는 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 S_s 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

5.3 최대 입력가속도 (α) 결정

표 2.2 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})

지반종류	지역구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.22	0.29	0.14	0.19
S_B	0.28	0.37	0.175	0.23
S_C	0.33	0.43	0.21	0.28
S_D	0.44	0.50	0.28	0.35
S_E	0.68	0.70	0.44	0.53

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

표 2.3 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(α)

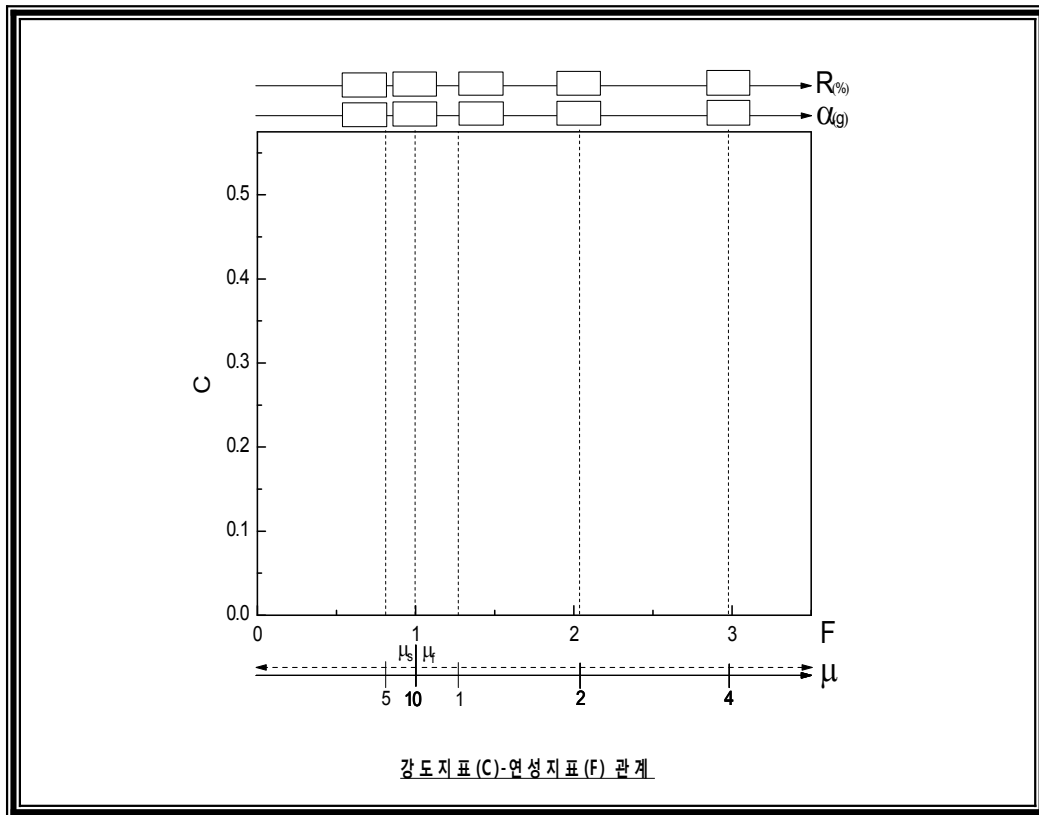
지반종류	지역구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.09	0.12	0.06	0.08
S_B	0.11	0.15	0.07	0.09
S_C	0.13	0.17	0.08	0.11
S_D	0.18	0.20	0.11	0.14
S_E	0.27	0.28	0.18	0.21

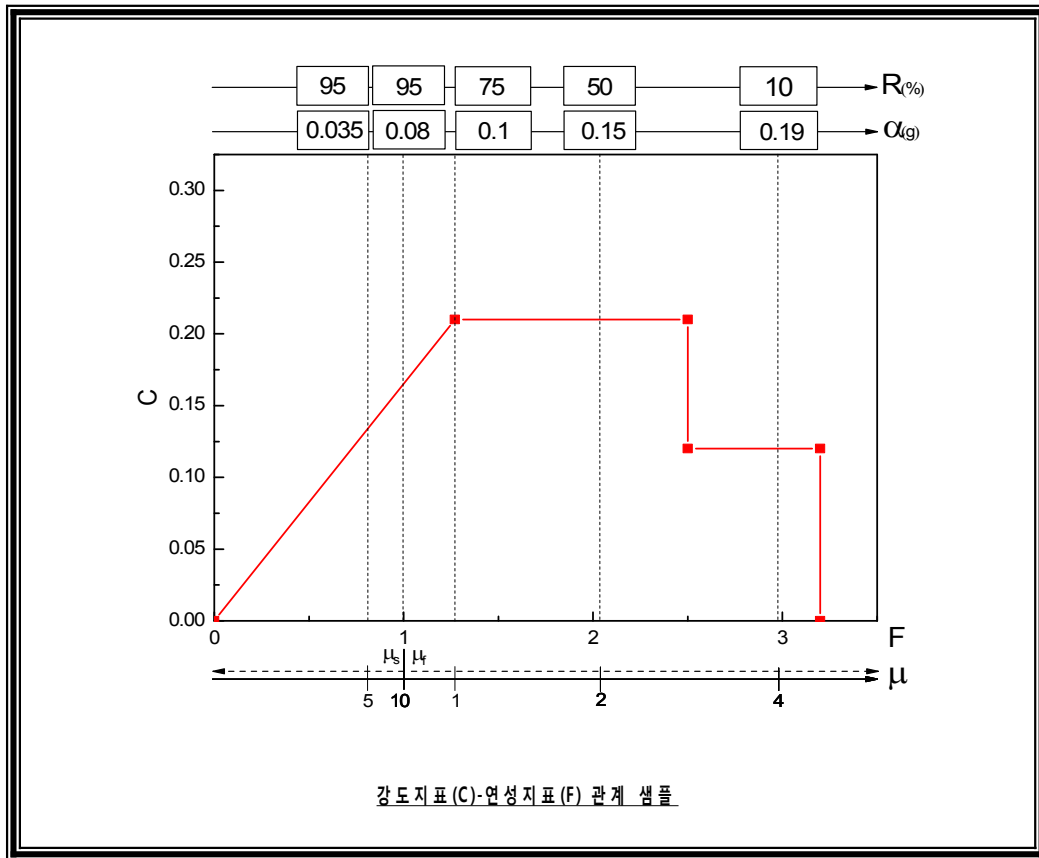
주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

▪ 입력가속도(α) : $\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = \left[\frac{\quad}{2.5} \right] = [\quad]g$

5. 강도지표(C)와 연성지표(F)의 관계 그림

- 강도지표-연성지표 관계를 C-F 샘플을 참조로 작성함.





6. 내진성능 등급 및 내진성능 최종판정

- 최종 내진등급 = () 표 2.9 참조
- 최종 내진성능 판정 결과 = () 표 2.11 참조

표 2.10 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계

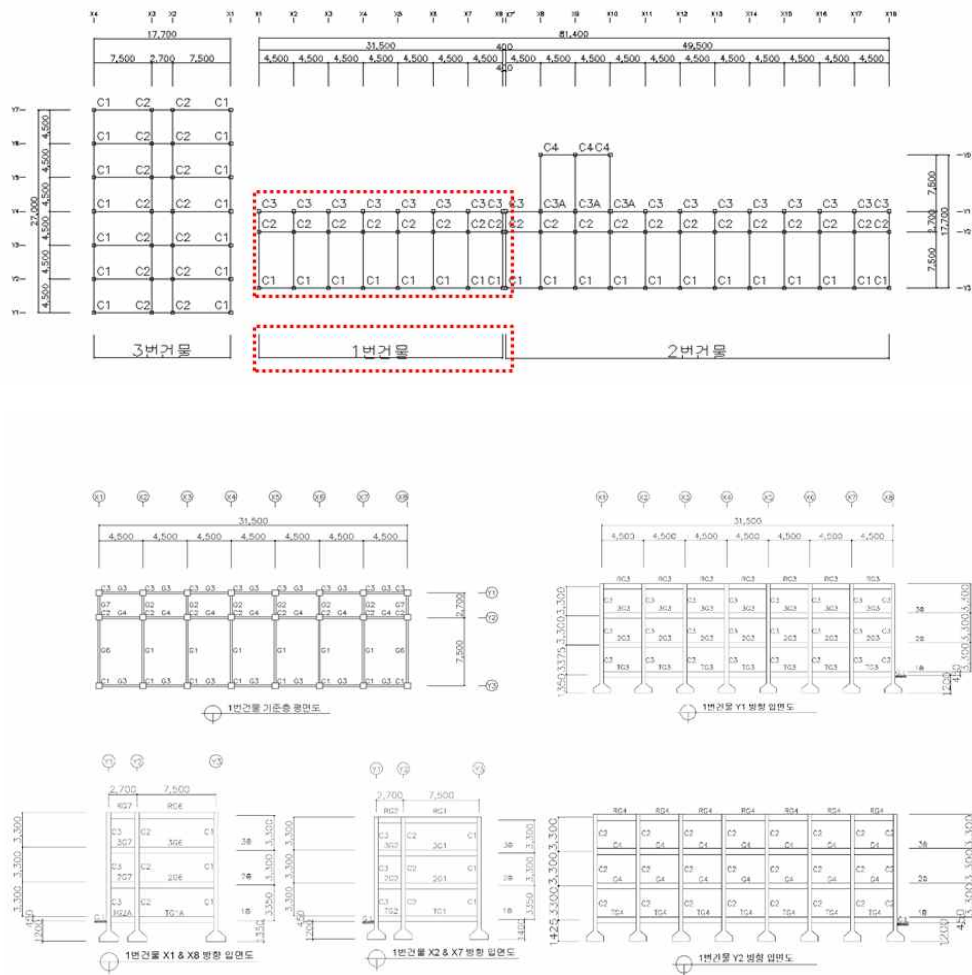
피해구분	성능수준	잔존 내진성능 (RSC)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	$RSC \geq 95$	A	A
소규모 피해	IO	$80 \leq RSC < 95$		
중규모 피해	DCR	$70 \leq RSC < 80$	B	
	LS	$60 \leq RSC < 70$	C	
대규모 피해	LSR	$50 \leq RSC < 60$	D	B
	CP	$20 \leq RSC < 50$	E	C
붕괴	C	$10 \leq RSC < 20$		D
		$0 \leq RSC < 10$		E










표 2.11 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

【부록 3】 내진성능 예비평가 예제

- 대상건물 도면: 1980년대 (다)형 표준도면
- 평가방향: 장변방향(X 방향)



	C1	C2	C3
3 층	 301 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 301 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 301 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300
2 층	 201 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 201 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 201 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300
1 층	 101 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 101 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300 	 101 <ul style="list-style-type: none"> • 0-DH • 2-DH ※DP 010 ● 300 ※DP 010 ● 300

1. 평가년도

- 정리번호 : _____ 호
- 평가일시 : _____ 년 _____ 월 _____ 일
- 평가횟수 : _____ 회
- 평가자 : _____
- 소속 : _____

2. 일반사항 (건물의 개요)

- 건물 명칭 : _____
- 건물 위치 : _____
- 건물 규모 : 지상 ()층, 지하 ()층, 1층의 스펜길이 : ()m × ()m
- 지상 높이 : ()m
- 부지의 지형 : _____
- 시공 년도 : _____ ~ _____ 년 (☐ 1988년이전 ☐ 1988년이후 ☐ 불명확)

3. 재료의 강도

- 콘크리트 ($F_c =$) _____ kgf/cm^2
- 철근 ($\sigma_y =$) _____ kgf/cm^2

4. 각 부재의 내력값 산정 (건물의 1층)

- 내력산정에는 장변 및 단변방향 2방향에 대해서 산정을 하며, 우선도 평가도 2방향에 대해서 독립적으로 평가를 한다.

<힘파괴형 부재>

- 힘파괴형 부재의 내력값 산정식: 일반기둥

$$\left(C_{fy} = \frac{V_{fy}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{fc} \sum a_{fc}}{\sum A_f \cdot w} \right) \quad (3.1)$$

여기서, $\sum a_{fc}$: 일반기둥의 단면적 합 (표 3.2 참조)
 τ_{fc} : 일반기둥의 평균 전단응력도 (표 3.2 참조)
 $\sum A_f$: 대상건물 전층의 바닥면적 합
 w : 바닥면적당 단위중량

표 3.2 건축시기 별 일반기둥의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년 이후
힘파괴	일반기둥 (h _o /D > 6)	0.73 (7.3)	0.74 (7.4)	0.85 (8.5)	0.86 (8.6)

<전단파괴형 부재>

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정식: 단주, 벽체, 조적채움벽 및 극단주

$$\left(C_{su} = \frac{V_{su}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{sc} \sum a_{sc} + \tau_{oc} \sum a_{oc} + \tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw}}{\sum A_f \cdot w} \right) \quad (3.2)$$

여기서, $\sum a_{sc}$: 극단주의 단면적 합 (표 3.3 참조)

τ_{sc} : 극단주의 전단응력도 (표 3.3 참조)

$\sum a_{oc}$: 단주의 단면적 합 (표 3.3 참조)

τ_{oc} : 단주의 전단응력도 (표 3.3 참조)

$\sum a_{sw}$: 벽체의 단면적 합 (표 3.4 참조)

τ_{sw} : 벽체의 전단응력도 (표 3.4 참조)

$\sum a_{bw}$: 조적채움벽의 단면적 합 (표 3.5 참조)

τ_{bw} : 조적채움벽의 전단응력도 (표 3.5 참조)

$\sum A_f$: 대상건물 전층의 바닥면적 합

w : 바닥면적당 단위중량

표 3.3 건축시기 별 극단주 및 단주의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년 -1987년	1988년 -2000년	2001년 이후
전단파괴	극단주 (h _o /D ≤ 2)	1.30 (13.0)	1.35 (13.5)	1.43 (14.3)	1.50 (15.0)
	단주 (2 < h _o /D ≤ 6)	1.14 (11.4)	1.19 (11.9)	1.32 (13.2)	1.38 (13.8)

표 3.4 벽체의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

양측에 기둥이 있는 벽	한쪽에 기둥이 있는 벽	기둥이 없는 벽
$\tau_{sw} = 3(30), a_{sw} = t \times l_{w1}$	$\tau_{sw} = 2(20), a_{sw} = t \times l_{w2}$	$\tau_{sw} = 1(10), a_{sw} = t \times l_{w3}$

표 3.5 끼움조적조의 평균전단응력도

단위: MPa (kgf/cm²)

종류	전단응력도 및 단면적	종류	전단응력도 및 단면적
양측에 기둥이 있는 조적채움벽	$\tau_{bw} = 0.6(6), a_{bw} = t \cdot L_w$	한쪽만 기둥이 있는 조적채움벽	
기둥이 없는 조적채움벽	$\tau_{bw} = 0.0$		$\tau_{bw} = 0.2(2), a_{bw} = t \cdot L_w$

4.1 장변방향(X방향)의 내력산정 (1층)

▪ 건물전층의 총중량 $\sum A_f (= 963.9 \text{ m}^2) \times 1.0 \text{ tf/m}^2$ (바닥면적당 단위중량: w) = (963.9) tf

- 횡파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{fe2}: \text{일반기둥의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{fy} = \frac{\tau_{fc} \sum a_{fc}}{\sum A_f \cdot w} = [\quad]$$

$$\therefore \checkmark_y = (\quad 0.21 \quad)$$

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{sw}: \text{벽체의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sw}: \text{조적체움벽의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sc}: \text{극단주의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{su} = \frac{\tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw} + \tau_{sc} \sum a_{sc}}{\sum A_f \cdot w}$$

$$= \frac{[\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2 + [\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2 + [\quad] \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2}{[\quad] \times 1000 \text{ kgf}} = [\quad]$$

$$\therefore \checkmark_u = (\quad 0.20 \quad)$$

4.2 단변방향 (Y방향)의 내력산정 (1층)

$$\text{▪ 건물전층의 총중량} \quad \sum A_f (= \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}^2) \times 1.2 \text{ tf/m}^2 (\text{바닥면적당 단위중량: } w) = (\quad) \text{ tf}$$

- 횡파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{fe1}: \text{일반기둥의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{fe2}: \text{장주의 단면적 합} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{fy} = \frac{\tau_{fc1} \sum a_{fc1} + \tau_{fc2} \sum a_{fc2}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{10 \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2 + 7 \text{ kgf/cm}^2 \times [\quad] \text{ cm}^2}{[\quad] \times 1000 \text{ kgf}} = [\quad]$$

$$\therefore C_{fy} = (\quad)$$

- 전단파괴형 부재의 내력값 산정

$$\sum a_{sw}: \text{벽체의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$\sum a_{sw}: \text{조적체움벽의 전체면적} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$C_{su} = \frac{\tau_{sw} \sum a_{sw} + \tau_{bw} \sum a_{bw} + \tau_{sc} \sum a_{sc}}{\sum A_f \cdot w}$$

$$= \frac{[\quad] kgf/cm^2 \times [\quad] cm^2 + [\quad] kgf/cm^2 \times [\quad] cm^2 + [\quad] kgf/cm^2 \times [\quad] cm^2}{[\quad] \times 1000 kgf} = [\quad]$$

$$\therefore C_{su} = (\quad)$$

5. 최대 입력지진 가속도 (α) 산정

- 내진성능 평가를 위한 기본 지진가속도는 2.2.2절에 나타난 각 지진구역별 500년, 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 평가용 최대 지진가속도(α)는 유효지반가속도(S)에 2.2.3절에 나타난 지반종류에 따른 지반증폭계수(F_a)(표 2.6)를 곱한 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})를 이용하여 식 (2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정한 다. 표 2.2에는 지반종류에 따른 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})를 나타내며, 표 2.3에는 평가용 최대 지진가속도(α)를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \quad (500\text{년} \quad \text{재현주기의} \quad \text{경우})$$

(2.1)

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \times 2/3 \quad (2500\text{년} \quad \text{재현주기} \quad 2/3 \quad \text{수준의} \quad \text{경우})$$

(2.2)

5.1 지진지역 구분 및 지역계수 (A)

- 지역계수 : 지진지역 (1)/지역계수 값 ($S = 0.22$) ☒ 지진지역 1 ☐ 지진지역 2

표 2.4 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역*	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

주* 강원도 북부(군,시): 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군,시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

5.2 지반종류 구분 및 지진지역 단주기 (S_{DS}) 계산

- 지반종류 체크 : ☐ S_A ☒ S_B ☐ S_C ☐ S_D ☐ S_E

표 2.5 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \overline{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ ($\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

표 2.6 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

* S_s 는 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 S_s 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

5.3 최대 입력가속도 (α) 결정

표 2.2 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})

지반종류	지진구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.22	0.29	0.14	0.19
S_B	0.28	0.37	0.175	0.23
S_C	0.33	0.43	0.21	0.28
S_D	0.44	0.50	0.28	0.35
S_E	0.68	0.70	0.44	0.53

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

표 2.3 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(α)

지반종류	지진구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
SA	0.09	0.12	0.06	0.08
SB	0.11	0.15	0.07	0.09
SC	0.13	0.17	0.08	0.11
SD	0.18	0.20	0.11	0.14
SE	0.27	0.28	0.18	0.21

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

입력지진파(α) : $\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = \frac{0.11}{2.5} = 0.11g / 0.15g$

6. 입력지진파(α)에 따른 요구성능판정지표(E_d) 및 우선도 평가용 factor값 계산

요구성능판정지표(E_{di}) 및 우선도 평가용 factor 산정용 식

<표 2-2> 평가용 지진가속도(α)에 따른 요구성능 판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β , G , P) 계산식

지진규모 지표값	$0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$	$0.2g < \alpha \leq 0.3g$			
	$E_{d1} = E_{d2} = E_{d3} = E_{d4}$	경미/무피해 판정용(E_{d1})	소규모 피해 판정용(E_{d2})	중규모 피해 판정용(E_{d3} , E_{d4})	대규모 피해 판정용
E_{di} ($i = 1 \sim 4$)	$2\alpha + 0.05$	$1.1\alpha + 0.23$	$2\alpha + 0.05$	$1.5\alpha + 0.15(E_{d3})$ $2\alpha + 0.05(E_{d4})$	-
β	$2.1 - 6\alpha$	$1.42 - 2.6\alpha$			
G	$2.2\alpha + 0.06$	$\alpha + 0.3$			
P	0.15	$0.31 - 0.8\alpha$			

성능판정지표 값
진규모: $0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$

$E_{di}(i = 1 \sim 4) = 2\alpha + 0.05 = 0.27 / 0.35$

<지진규모: $0.2g < \alpha \leq 0.3g$ >

$$\frac{E_{d1} = 1.1\alpha + 0.23 = [\quad], \quad E_{d2} = 2\alpha + 0.05 = [\quad], \quad E_{d3} = 1.5\alpha + 0.15 = [\quad],$$

$$E_{d4} = 2\alpha + 0.05 = [\quad]$$

▪ 도 평가용 factor 값

✓ 진규모: $0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$

$$\beta = 2.1 - 6\alpha = [1.44 / 1.2], \quad G = 2.2\alpha + 0.06 = [0.3 / 0.39], \quad P = 0.15$$

<지진규모: $0.2g < \alpha \leq 0.3g$ >

$$\beta = 1.42 - 2.6\alpha = [\quad], \quad G = \alpha + 0.3 = [\quad], \quad P = 0.31 - 0.8\alpha = [\quad]$$

500년 재현주기

7. 건물 피해 및 내진성능 평가점수 산정

7.1 경미 및 무피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

▪ 경미/무피해 요구성능 계산: $E_{p1} = (0.75C_{su} + 0.3C_{fy}) \times 0.78 = [\quad] [0.049]$

▪ 경미/무피해 판정

☐ $E_{d1} \leq E_{p1} = [0.27] < [0.049]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 경미 및 무피해 최종판정: 내진성능 평가점수 계산

✓ ☒ $E_{d1} > E_{p1} = [0.27] > [0.049]$ (Yes) \Rightarrow 7.2항 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산으로 이동

▪ 내진성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p1}}{E_{d1}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상 (I) ☐ 110점 이상~120점미만 (II) ☐ 100점 이상~110점미만 (III)

7.2 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

▪ 소규모 피해 요구성능 계산: $E_{p2} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d2}) \times 0.78\}^2 + \{0.9C_{fy} \times 0.8\}^2} = [\quad] [0.25]$

▪ 소규모 피해 판정

☐ $E_{d2} \leq E_{p2} = [0.27] < [0.25]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 소규모 피해로 최종판정: 내진성능 평가점수 계산

✓ ☒ $E_{d2} > E_{p2} = [0.27] > [0.25]$ (Yes) \Rightarrow "7.3항 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산"으로 이동

▪ 내진성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p2}}{E_{d2}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상 (I) ☐ 110점 이상~120점미만 (II) ☐ 100점 이상~110점미만 (III)

7.3 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

- 중규모 피해 요구성능 계산

$$E_{p3} = (0.83 C_{su} + 0.5 C_{fy}) \times 0.8 = [\quad] [0.084]$$

$$E_{p4} = \sqrt{\left\{ \left(C_{su} - \frac{E_{d4}}{2} \right)^2 + \{ C_{fy} \times 1.27 \}^2 \right\}} = [\quad] [0.3]$$

- 중규모 피해 판정

☒ $E_{d3} > E_{p3} = [0.27] > [0.084]$ and $E_{d4} > E_{p4} = [0.27] > [0.3]$ (No): 하나만 만족

하거나 둘 다 만족하지 않을 경우

⇒ 본 건물은 **중규모 피해로 최종 판정**: 내진성능 평가점수 계산

☐ $E_{d3} > E_{p3} = [\quad] > [\quad]$ and $E_{d4} > E_{p4} = [\quad] > [\quad]$ (Yes): 둘 다 만족하는 경우

⇒ 본 건물은 **대규모 피해로 최종 판정**: "7.4항 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산"으로 이동

- 내진성능 평가점수 계산

☒ $C_{su} < G$ 이면 식(6.2) = $\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100(1 - \sqrt{\beta C_{su}}) + 100\sqrt{\beta C_{su}} = (111)$ 점

☐ 120점 이상(I) ☐ 110점 이상~120점 미만(II) ☐ 100점 이상~110점 미만(III)

☐ $C_{su} \geq G$ 이면 식(6.3) = $\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 \left(1 + \frac{C_{su} - G}{P} \right) - \frac{C_{su} - G}{P} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상(I) ☐ 110점 이상~120점 미만(II) ☐ 100점 이상~110점 미만(III)

7.4 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

☐ $C_{su} < G$ 이면 식(6.1) = $\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 90점 이상~100점 미만(I) ☐ 80점 이상~90점 미만(II) ☐ 80점 미만(III)

☐ $C_{su} \geq G$ 이면 식(6.4) = $\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 + \frac{200(E_{p3} - E_{d3})}{3E_{d3}} = (\quad)$ 점

☐ 90점 이상~100점 미만(I) ☐ 80점 이상~90점 미만(II) ☐ 80점 미만(III)

9. 내진성능 점수와 내진등급 결정

- 최종 지진피해도 판정 결과 = (**중규모, LS**) 표 2.9 참조
- 최종 내진성능 평가 점수 = (**111**) 표 2.9 참조
- 최종 내진등급 = (**C**) 표 2.9 참조

10. 내진성능 최종판정

- 최종 내진성능 판정 결과 = (**상세평가 실시**) 표 2.11 참조

표 2.9 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계

피해구분	성능수준	내진성능평가 점수 (SES)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	SES≥120	A	A
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
소규모 피해	IO	SES≥120		
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
중규모 피해	DCR	SES≥120	B	
	LS	110≤SES<120	C	
		100≤SES<110		
대규모 피해	LSR	90≤SES<100	D	B
	CP	70≤SES<90		C
붕괴	C	50≤SES<70	E	D
		0≤SES<50		E

표 2.11 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

2400년 재현주기 2/3

7. 건물피해 및 내진성능 평가점수 산정

7.1 경미 및 무피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

▪ 경미/무피해 요구성능 계산: $E_{p1} = (0.75C_{su} + 0.3C_{fy}) \times 0.78 = [\quad] [0.049]$

▪ 경미/무피해 판정

☐ $E_{d1} \leq E_{p1} = [0.35] < [0.049]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 **경미 및 무피해 최종판정**: 내진성능 평가점수 계산

☒ $E_{d1} > E_{p1} = [0.35] > [0.049]$ (Yes) \Rightarrow 7.2항 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산으로 이동

▪ 내진성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p1}}{E_{d1}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상(I) ☐ 110점 이상~120점 미만(II) ☐ 100점 이상~110점 미만(III)

7.2 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

▪ 소규모 피해 요구성능 계산: $E_{p2} = \sqrt{\{(C_{su} - E_{d2}) \times 0.78\}^2 + \{0.9C_{fy} \times 0.8\}^2} = [\quad] [0.25]$

▪ 소규모 피해 판정

☐ $E_{d2} \leq E_{p2} = [0.35] < [0.25]$ (Yes) \Rightarrow 본 건물은 소규모 피해로 최종판정: 내진성능 평가점수 계산

☒ $E_{d2} > E_{p2} = [0.35] > [0.25]$ (Yes) \Rightarrow "7.3항 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산"으로 이동

▪ 내진성능 평가점수 : 식(6.1) = $\frac{E_{p2}}{E_{d2}} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상 (I) ☐ 110점 이상~120점미만 (II) ☐ 100점 이상~110점미만 (III)

7.3 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

▪ 중규모 피해 요구성능 계산

$E_{p3} = (0.83C_{su} + 0.5C_{fy}) \times 0.8 = [\quad] [0.084]$

$E_{p4} = \sqrt{\left\{ \left(C_{su} - \frac{E_{d4}}{2} \right) \right\}^2 + \{ C_{fy} \times 1.27 \}^2} = [\quad] [0.3]$

▪ 중규모 피해 판정

☐ $E_{d3} > E_{p3} = [0.35] > [0.084]$ and $E_{d4} > E_{p4} = [0.35] > [0.3]$ (No): 하나만 만족하거나 둘 다 만족하지 않을 경우

\Rightarrow 본 건물은 중규모 피해로 최종판정: 내진성능 평가점수 계산

☒ $E_{d3} > E_{p3} = [0.35] > [0.084]$ and $E_{d4} > E_{p4} = [0.35] > [0.3]$ (Yes): 둘다 만족하는 경우

\Rightarrow 본 건물은 대규모 피해로 최종판정: "7.4항 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산"으로

이동

▪ 내진성능 평가점수 계산

☐ $C_{su} < G$ 이면 식(6.2) = $\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 \left(1 - \sqrt{\beta C_{su}} \right) + 100 \sqrt{\beta C_{su}} = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상 (I) ☐ 110점 이상~120점미만 (II) ☐ 100점 이상~110점미만 (III)

☐ $C_{su} \geq G$ 이면 식(6.3) = $\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 \left(1 + \frac{C_{su} - G}{P} \right) - \frac{C_{su} - G}{P} \times 100 = (\quad)$ 점

☐ 120점 이상 (I) ☐ 110점 이상~120점미만 (II) ☐ 100점 이상~110점미만 (III)

7.4 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가 점수 계산

- ☒ $C_{su} < G$ 이면 식(6.1) = $\frac{E_{p4}}{E_{d4}} \times 100 = (\text{86})$ 점
☐ 90점 이상~100점 미만(I) ☐ 80점 이상~90점 미만(II) ☐ 80점 미만(III)
- ☐ $C_{su} \geq G$ 이면 식(6.4) = $\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 + \frac{200(E_{p3} - E_{d3})}{3E_{d3}} = (\quad)$ 점
☐ 90점 이상~100점 미만(I) ☐ 80점 이상~90점 미만(II) ☐ 80점 미만(III)

9. 내진성능 점수와 내진등급 결정

- 최종 지진피해도 판정 결과 = (대규모, CP) 표 2.9 참조
- 최종 내진성능 평가 점수 = (86) 표 2.9 참조
- 최종 내진등급 = (C) 표 2.9 참조

10. 내진성능 최종판정

- 최종 내진성능 판정 결과 = (상세평가 실시) 표 2.11 참조

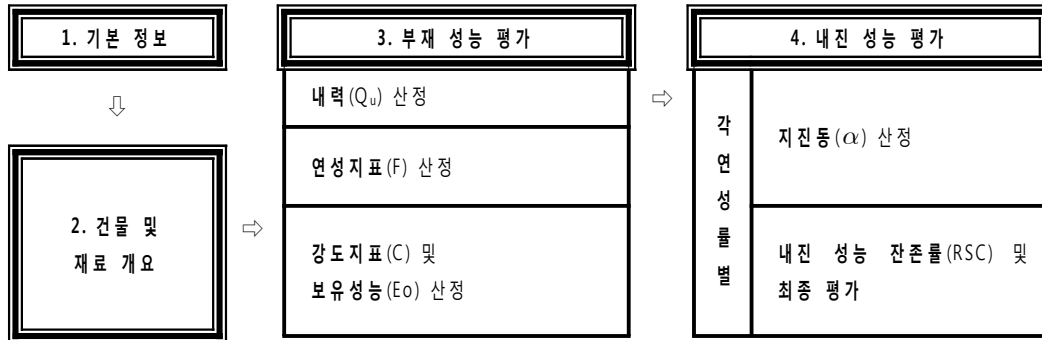
표 2.9 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계

피해구분	성능수준	내진성능평가 점수 (SES)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	SES≥120	A	A
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
소규모 피해	IO	SES≥120		
		110≤SES<120		
		100≤SES<110		
중규모 피해	DCR	SES≥120	B	
	LS	110≤SES<120	C	
		100≤SES<110	D	
대규모 피해	LSR	90≤SES<100		B
	CP	70≤SES<90	C	
붕괴	C	50≤SES<70	E	D
		0≤SES<50		E

표 2.11 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

【부록 4】 내진성능 상세평가 예제 및 내진보강 기본 계획안



1. 기본 정보

- 정리번호 : _____ 호
- 평가횟수 : _____ 회
- 평가일시 : _____ 년 _____ 월 _____ 일
- 평가자 : _____
- 소속 : _____

2. 건물 및 재료 개요

- 건물 명칭 : _____
- 건물 위치 : _____
- 건물 규모 : 지상 (3)층, 지하 ()층, 1층의 스패길이 : (36)m × (10.2)m
- 지상 높이 : (9.9)m
- 부지의 지형 : _____
- 시공 년도 : _____ ~ _____ 년 (☐ 1988년이전 ☐ 1988년이후 ☐ 불명확)
- 콘크리트 (F_c) : 210 kgf/cm^2
- 철근 (σ_y) : 2400 kgf/cm^2

3. 부재 성능 평가

3.1 내력 (Q_u) 산정

부재		M_u (t • m)	$Q_{mu}(t)$	$Q_{su}(t)$	$Q_u(t)$	파괴 형식	Q_{su}/Q_{mu}
층	명						
1	W1						
	C1						
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

부재		M_u	Q_{mu}	Q_{su}	Q_u	파괴 형식	Q_{su}/Q_{mu}
階	名 × 個	($kN \cdot m$)	(kN)	(kN)	(kN)		
1 (X)	C1 × 2 _{EA}	71.3	50.1	126	50.1	힘기둥	2.51
	C2 × 6 _{EA}	86	60.3	135	60.3	힘기둥	2.24
	C9 × 2 _{EA}	150.3	105.4	160.0	105.4	힘기둥	1.51
	C10 × 6 _{EA}	187.3	131.5	193.1	131.5	힘기둥	1.47
	C17 × 2 _{EA}	142.3	99.8	171.1	99.8	힘기둥	1.71
	C18 × 6 _{EA}	175.5	123.2	195.4	123.2	힘기둥	1.59

$$\bullet M_u = 0.8 a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b D F_c} \right)$$

a_t : 인장철근 단면적(cm^2)

N : 축력(kg)

σ_y : 철근 항복점 강도(kg/cm^2)

b : 부재 단면 폭(하중 직각방향)(cm)

D : 부재 단면 높이(하중 방향)(cm)

F_c : 콘크리트 압축강도(kg/cm^2)

$$\bullet Q_{mu} = \frac{M_u}{h_0/2} \quad h_0 : \text{순 길이}(cm)$$

$$\bullet Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 P_t^{0.23} (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot b \cdot j$$

P_t : 인장철근비(%)

σ_{wy} : 전단보강근 항복점 강도(kg/cm^2)

M/Q : $h_0/2$ 로 하여도 좋다.

σ_o : 축방향 응력도(N/bD)(kg/cm^2)

P_w : 전단보강근비. 단, $P_w \leq 0.012$ 일 때는 $P_w = 0.012$ 로 한다.

j : 응력 중심간 거리, $0.8D$ 로 하여도 좋다.

▪ Q_u 는 Q_{mu} 와 Q_{su} 중 작은 값을 사용

▪ 파괴형식

- 벽은 모두 전단벽, 기둥은 h_0/D 가 2이하인 기둥은 극취성기둥, h_0/D 가 2초과인 기둥 중 $Q_{mu} < Q_{su}$ 인

경우는 힘기둥, $Qmu \geq Qsu$ 인 경우 전단기둥으로 분류.

3.2 연성지표 (F) 산정

기둥	극취성기둥 전단기둥 힘기둥	F	부재		파괴 형식	μ	F	그룹
		0.8	층	각				
		1.0	1	W1				
		$\frac{\sqrt{2\mu-1}}{0.75(1+0.05\mu)}$		C1				
벽	전단벽	1.0	\vdots		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

부재		파괴 형식	μ	F	그룹
階	名				
1	C1	힘기둥	5	3.2	2
	C2	힘기둥	5	3.2	2
	C9	힘기둥	3.1	2.63	1
	C10	힘기둥	2.7	2.46	1
	C17	힘기둥	5	3.2	2
	C18	힘기둥	3.9	2.9	2

▪ 힘기둥의 종국소성율 μ

$\mu = \mu_o - k_1 - k_2$ 단, $1 \leq \mu \leq 5$ 로 한다.

$$\mu_o : 10 \left(\frac{Qsu}{Qmu} - 1 \right)$$

$$k_2 : 30 \left(\frac{\tau_{Mu}}{F_c} - 0.1 \right) \geq 0$$

$$k_1 : 2.0$$

$$\tau_{Mu} : Qmu / (b \cdot j)$$

(k_1 의 경우, 띠철근간격이 주근지름의 8배 이하인 경우는 0으로 하여도 좋다)

▪ 파괴형식 및 연성지표 F 의 값이 비슷한 것을 최대한 정리하여 최대 3개의 그룹으로 분류한다.

- 연성지표 F 가 작은 순으로 제1그룹, 제2그룹, 제3그룹으로 명한다.

3.3 강도지표 (C) 및 보유성능(Eo) 산정

부재		$\sum Q_u(t)$	$W(t)$	C	F	$\frac{(n+1)}{(n+i)}$	E_0		
층 (방향)	그룹						$E_{0(1)}$	$E_{0(2)}$	E_{0max}
1 (X)	1	999.8	11568	0.09	2.5	1	0.43	0.45	0.45
	2	1400.8		0.12	3.2				
	3	-		-	-				
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

▪ 강도지표 C

$$C = \frac{\sum Q_u}{W}, \quad W: \text{그 층보다 위의 건물 전 중량}$$

n : 건물 층 수 i : 대상 층 수

표 4.4 전단 (C_{su}) 및 휨파괴형(C_{fy}) 부재의 종국강도 분류

종국강도 분류	종국강도 값
전단파괴형 부재의 종국강도 (C_{su})	C_{su} = 연성지표 F 가 1이하인 경우의 강도지표의 합 $\sum C$
휨파괴형부재의 종국강도 (C_{fy})	C_{fy} = 연성지표 F 가 1을 초과한 경우의 강도지표의 합 $\sum C$

- C_{su} : 연성지표 F 가 1이하인 경우의 C	$C_{su} = (\underline{\quad 0 \quad})$
- C_{fy} : 연성지표 F 가 1초과한 경우의 C	$C_{fy} = (\underline{\quad 0.21 \quad})$

▪ 최종 E_0 는 $E_{0(1)}$ 과 $E_{0(2)}$ 중 더 큰 값으로 결정한다.

$$E_{0(1)} = \frac{n+1}{n+i} (C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_{3w}) \times F_1$$

C_i, F_i : i 그룹의 강도지표, 연성지표

α_2, α_3	극취성기둥	전단기둥, 전단벽
휨기둥	0.5	0.7
전단기둥, 전단벽	0.7	-

$$\cdot E_{0(2)} = \frac{n+1}{n+i} \sqrt{(C_1 \times F_1)^2 + (C_2 \times F_2)^2 + (C_3 \times F_3)^2}$$

4. 내진 성능 평가

4.1 지진 동(α) 산정

C_{su}	C_{fy}
0	0.21

$\mu_f(\mu_s)$	0.3(5)	0.6(10)	1	2	4
$\alpha(g)$	0.05	0.08	0.1	0.2	0.27

▪ C_{su}, C_{fy}, μ_f 및 α 의 관계식

$$\mu_{f=0.3} : 0.3 = \frac{0.08}{1.03} \alpha^{-0.97} [C_{fy} + 1.9\alpha(\alpha - 0.005)^{-0.7} C_{su}] \quad (4.10a)$$

$$\mu_{f=0.6} : 0.6 = \frac{0.24}{1.1} \alpha^{-0.99} [C_{fy} + 1.54\alpha(\alpha - 0.017)^{-0.6} C_{su}] \quad (4.10b)$$

$$\mu_{f=1.0} : 1.0 = \frac{0.65}{1.1} \alpha^{-0.9} [C_{fy} + 1.02\alpha(\alpha - 0.007)^{-0.58} C_{su} + 0.008\alpha(\alpha + 0.003)^{-3} C_{su}^2] \quad (4.10c)$$

$$\mu_{f=2.0} : 2.0 = \frac{1.7}{1.1} \alpha^{-1.12} [C_{fy} + 0.7\alpha^2(\alpha - 0.007)^{-0.96} C_{su} + 0.12\alpha(\alpha - 0.011)^{-1.7} C_{su}^2] \quad (4.10d)$$

$$\mu_{f=4.0} : 4.0 = \frac{4.1}{1.1} \alpha^{-1.23} [C_{fy} + 0.018\alpha^2(\alpha - 0.001)^{-1.1} C_{su} + 0.4\alpha(\alpha - 0.017)^{-1.16} C_{su}^2] \quad (4.10e)$$

▪ α 의 범위

$$\cdot \mu_{f=0.3, 0.6} \text{ 식의 경우 } 0 \leq \alpha \leq 0.35g \quad \cdot \mu_{f=1, 2, 4} \text{ 식의 경우 } 0.1g \leq \alpha \leq 0.35g$$

4.2 내진 성능 잔존률(RSC) 산정

특정 연성율	연성율별 지진가속도 수준 (4.4절)	보유성 능 (4.3절)	전단 및 휨파괴형 부 재의 손상도 (표 4.6)		내진성능 저감계수 (η)		지진피해 후의 보 유성능	잔존 내진성 능
μ_f	$\alpha(g)$	E_o	전단파괴	휨파괴	전단파괴	휨파괴	$_D E_o$	RSC (%)
0.3	0.05	0.45	Ⅲ	I	0.3(0.4)	0.95	0.42	93
0.6	0.08		Ⅳ	I	0	0.95	0.42	93
1	0.1		Ⅳ	Ⅱ	0	0.75	0.33	73
2	0.2		Ⅳ	Ⅲ	0	0.5	0.22	49
4	0.27		Ⅳ	Ⅳ	0	0.1	0.04	8

▪ 내진 성능 잔존률(RSC)

$$RSC = \frac{{}_D E_o (= \eta E_o)}{E_o} \times 100(\%)$$

(4.11)

여기서, E_o : 지진피해 전의 보유성능 (4.3절 참조)

$_D E_o$: 지진피해 후의 보유성능 ($= \eta \cdot E_o$)

η : 내진성능 저감계수 (표 4.6 참조)

표 4.6 부재의 내진성능 저감계수(η)

지진손상도	전단 파괴형 기둥	휨 파괴형 기둥	전단벽
I	0.95	0.95	0.95
II	0.6	0.75	0.6
III	0.3	0.5	0.3
IV	0	0.1	0
V	0	0	0

주) 내진성능 저감계수는 부재의 실험연구를 바탕으로 유도한 것으로서, 부재의 내력-변형관계곡선을 이상화하여 부재가 소산한 지진에너지와 잔존에너지 흡수능력을 이용하여 설정한 계수임.

5. 최대 입력지진 가속도 (α) 산정

- 내진성능 평가를 위한 기본 지진가속도는 2.2.2절에 나타난 각 지진구역별 500년, 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 평가용 최대 지진가속도(α)는 유효지반가속도(S)에 2.2.3절에 나타난 지반종류에 따른 지반증폭계수(F_a)(표 2.6)를 곱한 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})를 이용하여 식 (2.1) 및 식(2.2)에 의해서 산정한 다. 표 2.2에는 지반종류에 따른 단주기의 설계스펙트럼가속도(S_{DS})을 나타내며, 표 2.3에는 평가용 최대 지진가속도(α)를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \quad (500\text{년 재현주기의 경우}) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = S \times F_a \times 2/3 \quad (2500\text{년 재현주기 } 2/3 \text{ 수준의 경우}) \quad (2.2)$$

5.1 지진지역 구분 및 지역계수 (A)

- 지역계수 : 지진지역 ()/지역계수 값 ($S =$) ☐ 지진지역 1 ☐ 지진지역 2

표 2.4 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역*	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

주* 강원도 북부(군,시): 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군,시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

5.2 지반종류 구분 및 지진지역 단주기 (S_{DS}) 계산

- 지반종류 체크 : ☐ S_A ☐ S_B ☐ S_C ☐ S_D ☐ S_E

표 2.5 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \overline{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ ($\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

표 2.6 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

* S_s 는 S 를 2.5배한 값이다. 위 표에서 S_s 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

5.3 최대 입력가속도 (α) 결정

표 2.2 재현주기별 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})

지반종류	지역구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.22	0.29	0.14	0.19
S_B	0.28	0.37	0.175	0.23
S_C	0.33	0.43	0.21	0.28
S_D	0.44	0.50	0.28	0.35
S_E	0.68	0.70	0.44	0.53

주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

표 2.3 재현주기별 평가용 최대 지진가속도(α)

지반종류	지역구역 1*		지진구역 2*	
	500년	2400년 2/3	500년	2400년 2/3
S_A	0.09	0.12	0.06	0.08
S_B	0.11	0.15	0.07	0.09
S_C	0.13	0.17	0.08	0.11
S_D	0.18	0.20	0.11	0.14
S_E	0.27	0.28	0.18	0.21

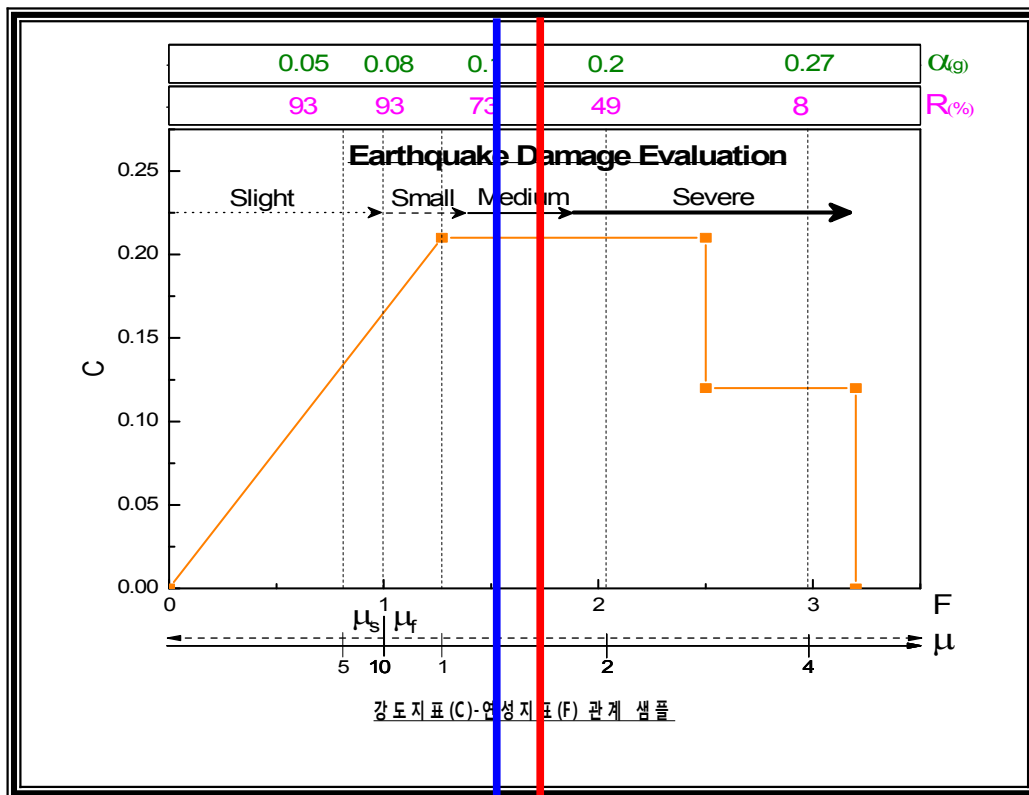
주* 지진구역1 및 지진구역2는 표 2.4참조

▪ 입력가속도(α) : $\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} = \frac{\quad}{2.5} = 0.11g / 0.15g$

5. 강도지표(C)와 연성지표(F)의 관계 그림

- 강도지표-연성지표 관계를 C-F 샘플을 참조로 작성함.

0.11g(RSC=70%) 0.15g(RSC=59%)



6. 내진성능 등급 및 내진성능 최종판정

500년 재현주기

- 최종 내진등급 = (**B**) 표 2.9 참조
- 최종 내진성능 판정 결과 = (**OK**) 표 2.11 참조

2400년 재현주기 2/3

- 최종 내진등급 = (**B**) 표 2.9 참조
- 최종 내진성능 판정 결과 = (**OK**) 표 2.11 참조

표 2.10 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계



피해구분	성능수준	잔존 내진성능 (RSC)	내진성능 등급	
			500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3
경미한 피해	OP	$RSC \geq 95$	A	A
소규모 피해	IO	$80 \leq RSC < 95$		
중규모 피해	DCR	$70 \leq RSC < 80$	 B	
	LS	$60 \leq RSC < 70$	C	
대규모 피해	LSR	$50 \leq RSC < 60$	D	 B
	CP	$20 \leq RSC < 50$	E	C
붕괴	C	$10 \leq RSC < 20$		D
		$0 \leq RSC < 10$		E

표 2.11 내진성능평가에 의한 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기별 성능수준		예비평가	상세평가	조 치
	500년	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	LS 이하	OK	OK	일상적인 유지관리
B등급	DCR	LSR	OK	 OK	간략한 보수나 보강에 의해 기능수행
C등급	LS	CP	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	LSR	C	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
E등급	CP 이상	C	상세평가 실시	보강/철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상