

## 기존 건축물의 내진성능평가 및 향상 사례



이 석 호 대리  
한국시설안전공단 건축팀

최근 중국이나 일본 등 인접국가에서 발생한 강진으로 인한 인명 피해 및 경제적 손실 규모는 하나의 국가가 감당할 수 없을 정도로 큰 경우가 많아, 국가차원에서 피해를 줄이기 위한 대비가 반드시 필요하다. 우리나라는 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 그동안 지진에 대해 비교적 안전한 지역으로 인식되고 있었으나, 최근 기상청 통계자료에 의하면 한반도에서 지난 31년(1978~2008년)간 총 816회의 지진이 관측되어, 연평균 26회의 빈도를 보이고 있고, 이중 유감지진횟수가 212회이며 규모(M) 3.0 이상 지진발생이 274회로 발생빈도가 증가하며 발생지역이 확산됨에 따라 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 견해와 지진재해에 대한 우려가 고조되고 있다.

이에 소방방재청은 '11년부터 5년 단위 기본계획을 수립하고 매년 집행계획에 따라 내진보강을 추진할 예정이며, 현재 제1단계(11~15년) 계획을 수립하여 시행 중에 있다. 소방방재청에 의하면 전체 내진설계대상 시설물 31종 123,201개소 중 45,905개소(37%)는 내진성능이 확보(내진적용 29,104, 내진양호 15,385, 내진보강완료 1,416) 되었으나, 나머지 77,296개소(63%)는 내진보강이 필요하며, 그 중 내진보강이 가장 필요한 시설물은 공공건축물(43,437개소), 학교시설물(15,851개소), 도로시설물(13,353개소) 순으로 파악하고 있다.

우리나라의 내진설계기준은 1985년 멕시코 대지진을 계기로 1986년 내진설계법이 마련되었고, 1988년 내진기준이 제

정된 이후 3번의 개정을 통해 지금은 내용이 강화된 신 내진기준(건축구조기준, 이하 "KBC2009")이 사용되고 있다. 또한, 그 적용범위도 3층 이상 혹은 연면적 1,000m<sup>2</sup>이상으로 확대되었으며, 현재 2층 이하의 소규모 건축물도 내진성능 확보 대상에 포함시키는 것을 골자로 하는 건축법 시행령이 입법에 고된 상태이다. 이와 같은 내진기준의 개정·강화는 그동안 국내외에 수행되었던 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 연구의 결과물로서 이의 적용에 따라 새롭게 건설되는 건물의 내진안전성은 과거에 비해 향상되고 있다고 할 수 있다. 하지만, 국내 건물의 중저층 건물 중 대다수는 내진설계가 도입되기 이전에 건설되거나 혹은 현재의 내진설계기준에 의해 설계되지 않은 것들로서, 이러한 건물들의 내진성능에는 의문점이 있다. 이를 해소시키기 위해서는 우선 건축물이 보유하고 있는 내진성능을 효과적으로 평가할 수 있는 내진성능평가법이 필요하며 이를 바탕으로 부족한 내진성능을 향상시킬 수 있는 적절한 내진성능의 향상이 필요하다.

그 동안 국내에서도 기존 건축물의 내진성능 평가를 위한 연구가 여러 건 수행되었으며 그 중 대표적인 결과물은 한국시설안전공단에 의해 2004년 발간된 "기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상 요령"(이하 "기존요령")을 들 수 있다. 하지만, 실무자가 참고할 수 있는 자료가 부족하고 규정이 명확하지 않은 면이 있어 활발히 사용되지는 않았다. 이에 기존요령의 문제점을 개정·보완하여 2011년 7월에 "기존 시설물(건

[표 1] 사례 시설물 개요

시설물명	서울시 도봉구 소재 ○○소방서		
준공일	1988년(경과년수:23년)		
연면적(m <sup>2</sup> )	4,794.82	구조형식	RC라멘구조
층 수(옥탑제외)	지하1층~지상5층	주용도	공공업무시설(소방서)
기초형식	파일기초	최고높이(m)(옥탑제외)	18.6
콘크리트 설계강도(MPa)	21	철근종류(MPa)	350

축물) 내진성능 평가 및 향상 요령”(이하 “개정요령”)이 중앙 건설기술심의위원회의 심의를 거쳐 발간되었다. 개정요령은 현 내진설계기준과 성능기반 내진성능 평가 분야의 진전을 반영하였으며, 기존요령의 문제점을 인식하여 좀 더 넓게 활용될 수 있도록 각 규정을 보다 상세하게 명시하고 있다.

개정요령의 주요 특징을 간단하게 살펴보면,

- 1) 성능기반평가법의 도입 : 평가기준지진에 의한 요구량(Demand)과 구조물의 능력(Capacity)의 비교를 통해 성능수준을 판정하도록 하였으며, 구조물 전체의 성능수준은 구조부재의 연직하중 지지능력을 토대로 판정하도록 하였다.
- 2) 평가기준지진 및 목표성능수준의 설정 : 개정요령의 평가기준지진은 KBC2009와 동일하게 2,400년 재현주기의 2/3수준에 해당하는 지진으로 설정하고 목표성능수준은 평가기준지진 작용시 KBC2009에 건축물의 규모 및 용도별로 정의된 내진등급에 따라 설정되었다. 즉, 내진 특등급건물, 내진 1등급건물, 내진 2등급 건물은 평가기준지진 작용시 각각 거주가능, 인명안전, 붕괴방지를 목표성능수준으로 하였다.
- 3) 재료강도의 평가방법 : 과거에 건설되어진 소규모 건물의 경우 설계도서조차 없는 경우가 많다. 개정요령에서는 이처럼 설계도서가 없을 경우에도 간편하게 예비평가를 수행할 수 있도록 건설연도별 재료의 기본값을 제안하고 있다.

본 내진성능평가 및 향상 사례(이하 “사례”)는 서울시 도봉구 소재의 ○○소방서로 철근콘크리트라멘구조이며, 내진성능평가는 개정요령에 의하여 평가하였다. 사례 시설물에 대한 개요는 [표1]과 같으며, 모델링은 비선형정적해석이 가능한 MIDAS GENw(7.8.5)을 사용하였다.

내진성능평가 절차는 자료정리, 재료강도의 결정, 현장조

사, 비정형성평가, 내진성능 예비평가, 1단계 내진성능 상세평가, 2단계 내진성능 상세평가의 순서로 수행된다. 현장조사 등 기본적인 조사가 완료되면 내진성능 예비평가에서부터 1단계 내진성능 상세평가, 2단계 내진성능 상세평가의 순서로 수행하는 것이 일반적이나 상위단계의 평가를 바로 수행할 경우 하위단계의 평가절차는 생략할 수 있으므로 본 사례는 2단계 내진성능 상세평가를 바로 수행하였으며, 해석은 일반적으로 비선형정적해석(Pushover 해석, 이하 “푸시오버해석”), 즉 개별 부재의 비선형 거동특성을 정의한 후 횡변위를 점차적으로 증가시키면서 부재의 강도와 비선형변형의 관계를 구하는 기법을 사용하도록 한다.

푸시오버해석 결과는 일반적으로 밀면전단력과 최상층 횡변위로 나타낸다. 푸시오버해석시 사용되는 횡하중의 분포는 구조물의 1차모드가 지배적이라는 가정으로부터 구한 밀면전단력의 수직분포를 사용한다. 따라서, 푸시오버해석은 기본적으로 고차모드의 영향이 크지 않은 건물에 사용하며, 구조물의 기본주기가 1초 이상으로 유연한 구조물인 경우 고차모드의 영향을 고려하여야 한다. 푸시오버 곡선으로 나타내는 횡변위의 기준점(control node)은 최상층의 질량중심점으로 하며 각 구조부재 평가시 개정요령에서 제시된 허용기준과의 비교를 통해 성능수준을 판정한다.

사례 시설물의 내진성능평가 절차에 따른 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 목표성능의 결정 : KBC2009 0103절 및 0306절에 의하여 연면적 1,000m<sup>2</sup>이상인 소방서는 내진특등급으로 거주가능의 성능을 만족해야 하므로, 본 사례 시설물의 목표성능은 거주가능으로 한다.
- 2) 평가기준지진의 결정
  - ① 지진지역 및 지역계수

지진지역	1	2
지역계수(S)	0.22	0.14

지반 종류	$S_A$	$S_B$	$S_C$	$S_D$	$S_E$
표준관입시험(N치)	-	-	> 50	15~50	< 15
전단파속도(m/s)	> 1500	760~1500	360~760	180~360	< 180

② 지반의 분류 : 사례 시설물의 지반조사보고서가 보관되어 있지 않아 지반을 정확하게 분류할 수 없어 건축물의 규모와 기초의 형식 등을 감안하여 지반은  $S_D$ 로 가정함.

③ 설계스펙트럼 가속도

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times \frac{2}{3} = 0.22 \times 2.5 \times 1.36 \times \frac{2}{3} = 0.499$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times \frac{2}{3} = 0.22 \times 1.96 \times \frac{2}{3} = 0.287$$

▶ 단주기 지반증폭계수  $F_a = 1.36$

지반 종류	지진 지역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
$S_A$	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

※  $S_s = S \times 2.5$

▶ 1초주기 지반증폭계수  $F_v = 1.96$

지반 종류	지진 지역		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_A$	0.8	0.8	0.8
$S_B$	1.0	1.0	1.0
$S_C$	1.7	1.6	1.5
$S_D$	2.4	2.0	1.8
$S_E$	3.5	3.2	2.8

④ 평가스펙트럼의 작성

-  $T \leq T_0$  일 때,

$$\text{스펙트럼가속도 } S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS}$$

-  $T_0 \leq T \leq T_s$  일 때, 스펙트럼가속도  $= S_a = S_{DS}$

-  $T > T_s$  일 때, 스펙트럼가속도  $S_a = \frac{S_{D1}}{T}$

여기서,  $T$  = 구조물의 고유주기(초),

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}, T_s = S_{D1} / S_{DS}$$

3) 재료강도 : 재료강도는 2단계 내진성능 상세평가시 성능수준이 거주가능일 경우 비파괴 현장시험 등을 통하여 강도를 결정해야한다. 또한, 설계도서에 명기된 설계기준강도는 재료의 하한(Lower-bound)값으로 간주하며, 평균강도는 각 재료별로 설계기준강도에 [표2]에 따른 계수를 곱하여 구한다.

[표 2] 설계기준강도로부터 평균강도를 구하기 위한 재료별 보정계수

재료 특성	계수
콘크리트 압축강도	1.20
철근의 인장 및 항복강도	1.25

그리고, 설계도서상의 설계기준강도를 사용할 경우 [표3]과 같이 경과년수에 따른 감소계수와 재료상태에 따른 감소계수를 곱하여 사용한다. 재료의 상태는 구조부재에 발생한 균열발생, 변형, 화재이력, 마무리정도에 따라 엔지니어의 판단에 의해 결정하며, 조적조의 경우 쌓기 모르타르의 충전상태를 조사하지 않을 경우 재료상태를 불량으로 간주한다.

[표 3] 경과년수 및 재료상태에 따른 재료강도의 감소계수

구분	콘크리트 압축강도	조적조 압축강도	조적조 전단강도
경과 년수	30년 이상	0.8	0.5
	20년 이상	0.9	0.6
	20년 미만-10년 이상	1.0	0.8
	10년 미만	1.0	1.0
재료 상태	양호	1.0	1.0
	보통	0.9	0.8
	불량	0.8	0.5

[표 4] RC부재의 유효강성

구 분	휨강성	전단강성	축강성
보	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	—
기둥 (축력비가 0.5이상)	$0.7E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	$E_cA_g$
기둥 (축력비가 0.3이하)	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	$E_cA_g$
벽 (균열이 없는 경우)	$0.8E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	$E_cA_g$
벽 (균열이 있는 경우)	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	$E_cA_g$

4) RC 부재의 유효강성 : 해석모델에서 철근콘크리트 부재는 균열을 고려하여 [표4]와 같은 유효강성을 사용하여 모델링한다.

5) 부재의 강도 : 변형지배거동에서 부재강도는 평균강도를 사용하며, 하중지배거동에서 부재강도는 공칭강도를 사용한다. 부재의 각종 공칭강도는 이 요령에서 특별히 규정하지 않는 한 KBC2009에 따라 구한다. 모든 경우 구조설계기준에서 사용되는 강도감소계수  $\phi$ 는 기존건물의 평가에서는 적용하지 않는다.

① 보 : 보의 평균휨강도( $M_e$ )는 평균재료강도를 사용한 <식1>에 의하여 구할 수 있다.

$$M_e = A_s f_{ye} (d - a/2) \quad \dots \langle \text{식1} \rangle$$

또한, 보의 공칭전단강도( $V_n$ )는 공칭재료강도를 사용한 <식2>에 의하여 구할 수 있다.

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d \quad \dots \langle \text{식2} \rangle$$

$$V_s = \frac{A_s f_y d}{s}$$

② 기둥 : 기둥의 휨강도와 압축강도 및 인장강도는 철근콘크리트의 압축최연단의 변형도가 종국변형도인 0.003에 도달할 때 축력과 모멘트의 상관관계를 고려하여 휨 부재에 적용되는 단면의 평면유지 가정과 철근의 탄소성거동 및 힘의 평형조건을 사용하여 구할 수 있다. 단, 휨강도는 평균재료강도를 사용하여 구하여야 하며, 압축 또는 인장강도는 공칭재료강도를 사용하여 구하거나 평균재료강도를 사용하여 구한 값을 1.25로 나눈 값으로 한다. 기둥의 전단강도는 KBC2009의 전단강도식 대신 <식3>을 사용하여 평가한다. 이 식은 후프의 간격이 넓은 기둥의 전단강도가 휨항복 이후의 비선형거동구간에서 급격히 감소하는

현상을 고려하기 위한 경험식이다.

$$V_n = k_1 \frac{A_s f_y d}{s} + \lambda k_2 \left[ \frac{0.5 \sqrt{f_{ck}}}{M/(Vd)} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f_{ck}} A_g}} \right] 0.8 A_g \quad \dots \langle \text{식3} \rangle$$

③ 전단벽 : 대부분의 경우 전단벽의 압축응력은 상당히 낮으므로 압축력의 평가는 생략하고 휨모멘트 강도와 전단강도에 대해서만 검토할 수 있다. 전단벽의 휨모멘트강도는 <식4>와 같은 약산 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$M_e = 0.5 A_s f_{ye} (0.8 l_w) + 0.5 P_u (0.8 l_w) \quad \dots \langle \text{식4} \rangle$$

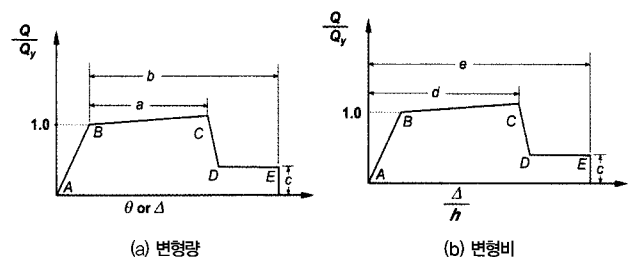
전단벽의 전단강도는 <식5>를 따른다.

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ce}} b (0.8 l_w) \quad \dots \langle \text{식5} \rangle$$

$$V_s = \frac{A_s f_y d}{s_h}$$

6) 구조요소의 모델링 : 부재별 비선형 거동 특성의 모델링, 즉 소성힌지의 특성은 철근콘크리트 구조의 경우 부재의 조건에 따라 [표5]에서 [표7]에 따라 모델링한다. 부재의 비선형거동특성은 [그림1]과 같이 보통 4개의 직선으로 모델링되며 부재에 따라 변형량의 절대치가 규정된 경우(a)와 각 지점의 위치를 항복하중 혹은 항복변위의 비율로 나타내는 경우(b)가 있다.



[그림1] 소성힌지 특성의 모델링

[표5] 철근콘크리트 보의 모델링파라미터 및 허용기준

		모델링 파라미터			허용기준 (소성회전각, rad.)				
		소성회전각 (rad.)		잔류 강도비	거주 가능	1차부재		2차부재	
		a	b			c	인명 안전	붕괴 방지	인명 안전
1) 힘에 의해 지배되는 비내진상세 단면일 경우									
주근의 배근상태	작용전단력의 크기								
0 이하	0.25 이하	0.02	0.03	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
	0.5 이상	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
0.5 이상	0.25 이하	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
	0.5 이상	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
2) 힘에 의해 지배되는 내진상세 단면일 경우									
주근의 배근상태	작용전단력의 크기								
0 이하	0.25 이하	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
	0.5 이상	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
0.5 이상	0.25 이하	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
	0.5 이상	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
3) 전단에 의해 지배되는 경우									
스터립 간격이 d/2 이하인 경우		0.003	0.02	0.2	0.0015	0.002	0.003	0.01	0.02
스터립 간격이 d/2 초과인 경우		0.003	0.01	0.2	0.0015	0.002	0.003	0.005	0.01
4) 정착 혹은 철근이음의 파괴가 예상되는 경우									
스터립 간격이 d/2 이하인 경우		0.003	0.02	0.0	0.0015	0.002	0.003	0.01	0.02
스터립 간격이 d/2 초과인 경우		0.003	0.01	0.0	0.0015	0.002	0.003	0.005	0.01
5) 보-기둥접합부의 정착파괴가 예상되는 경우									
		0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

주)

- 사이값은 선형보간한다.
- 1) ~ 5)중 복수의 상황에 해당하는 경우 가장 불리한 값을 사용한다.
- 내진상세단면과 비내진상세단면의 판단은 KBC2009 0520 내진설계시 특별고려사항의 규정에 따른 횡보강근의 만족여부에 따른다.(소성힌지구간에서 전단보 강근의 간격이 d/3이하이고 전단보강근에 의한 전단강도가 설계전단력의 3/4이상일 경우 내진상세를 만족하는 것으로 본다)
- 주근의 배근상태는  $(\rho - \rho') / \rho_{ud}$  로 평가한다.
- 작용전단력의 크기는  $V / (\sqrt{f_{ck} b_w d})$ 로 평가한다.

본 사례 시설물 보의 경우 주근의 배근상태는 대부분 0.4 이하이며, 작용전단력의 크기는 대부분 0.25 이하의 분포를 보이고 있다. 또한, 스테리프 간격은 d/2 이하이다.

[표6] 철근콘크리트 기둥의 모델링파라미터 및 허용기준

		모델링 파라미터			허용기준 (소성회전각, rad.)				
		소성회전각 (rad.)		잔류 강도비	거주 가능	1차부재		2차부재	
		a	b			c	인명 안전	붕괴 방지	인명 안전
1) 힘에 의해 지배되는 비내진상세 단면일 경우									
축력비	작용전단력의 크기								
0.1 이하	0.25 이하	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
	0.5 이상	0.005	0.012	0.2	0.005	0.005	0.005	0.008	0.012
0.4 이상	0.25 이하	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
	0.5 이상	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008
2) 힘에 의해 지배되는 내진상세 단면일 경우									
축력비	작용전단력의 크기								
0.1 이하	0.25 이하	0.02	0.03	0.2	0.005	0.015	0.02	0.02	0.03
	0.5 이상	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
0.4 이상	0.25 이하	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
	0.5 이상	0.012	0.02	0.1	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
3) 전단에 의해 지배되는 경우									
모든 경우		-	-	-	-	-	-	0.003	0.004
4) 정착 혹은 철근이음의 파괴가 예상되는 경우									
후프 간격이 d/2 이하인 경우		0.01	0.02	0.4	0.005	0.005	0.01	0.01	0.02
후프 간격이 d/2 초과인 경우		0	0.01	0.2	0	0	0	0.005	0.01
5) 축력이 0.7P <sub>0</sub> 를 초과하는 경우									
모든 경우		0	0	0	0	0	0	0	0

주)

1. 사이값은 선형보간한다.
2. 1) ~ 5)중 복수의 상황에 해당하는 경우 가장 불리한 값을 사용한다.
3. 내진상세단면과 비내진상세단면의 판단은 KBC2009 0520 내진설계시 특별고려사항의 규정에 따른 횡보강근의 만족여부에 따른다.(소성힌지구간에서 전단보 강근의 간격이 d/3이하이고 전단보강근에 의한 전단강도가 설계전단력의 3/4이상일 경우 내진상세를 만족하는 것으로 본다)
4. 축력비는  $P/A_c f_{ck}$  로 평가한다.
5. 작용전단력의 크기는  $V/(\sqrt{f_{ck} b_w d})$ 로 평가한다.

본 사례 시설물 기둥의 경우 축력비는 대부분 0.35 이하이며, 작용전단력의 크기는 대부분 0.12 이하의 분포를 보이고 있다. 또한, 후프 간격은 대부분 d/2 이하이다.

[표7] 철근콘크리트 전단벽의 모델링파라미터 및 허용기준

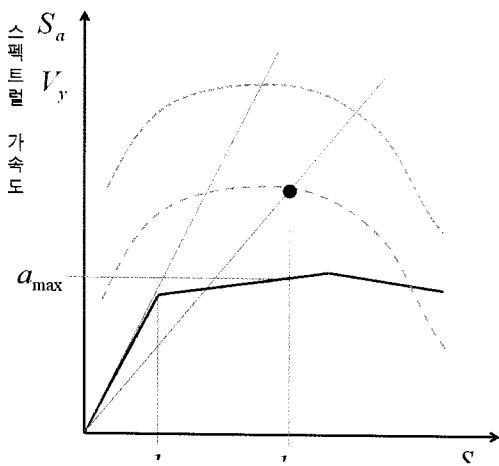
조 건			모델링파라미터			허용기준				
1-i. 힘에 의해 지배되는 경우 : 전단벽 요소										
특수경계요소 의 유무	배근상태와 축력비	작용 전단력의 크기	소성회전각 (rad.)		잔류 강도비 c	거주 가능	1차부재 (rad.)		2차부재 (rad.)	
			a	b			인명 안전	붕괴 방지	인명 안전	붕괴 방지
있음	0.1 이하	0.25 이하	0.015	0.020	0.75	0.005	0.010	0.015	0.015	0.020
		0.5 이상	0.01	0.015	0.4	0.004	0.008	0.01	0.01	0.015
	0.25 이상	0.25 이하	0.009	0.012	0.6	0.003	0.006	0.009	0.009	0.012
		0.5 이상	0.005	0.01	0.3	0.0015	0.003	0.005	0.005	0.01
없음	0.1 이하	0.25 이하	0.008	0.015	0.6	0.002	0.004	0.008	0.008	0.015
		0.5 이상	0.006	0.01	0.3	0.002	0.004	0.006	0.006	0.01
	0.25 이상	0.25 이하	0.003	0.005	0.25	0.001	0.002	0.003	0.003	0.005
		0.5 이상	0.002	0.004	0.2	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004
1-ii. 힘에 의해 지배되는 경우 : 상부의 전단벽을 지지하는 기둥										
내진상세단면인 경우			0.01	0.015	0.2	0.003	0.007	0.01	n.a.	n.a.
비내진상세단면인 경우			0	0	0	0	0	0	n.a.	n.a.
1-iii. 힘에 의해 지배되는 경우 : 연결보(coupling beam)										
내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.025	0.05	0.75	0.01	0.02	0.025	0.025	0.05
		0.5 이상	0.02	0.04	0.5	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
비내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.02	0.035	0.5	0.006	0.012	0.02	0.02	0.035
		0.5 이상	0.01	0.025	0.25	0.005	0.008	0.01	0.01	0.025
대각선배근		N.A.	0.03	0.05	0.8	0.006	0.018	0.03	0.03	0.05
2-i. 전단에 의해 지배되는 경우 : 전단벽 요소										
작용 전단력의 크기		전체횡변형각(%) 혹은 전체회전각 (rad.)		잔류 강도비 c	거주 가능	1차부재 (% 또는 rad.)		2차부재 (% 또는 rad.)		
		d	e			인명 안전	붕괴 방지	인명 안전	붕괴 방지	
모든 경우		0.75	2.0	0.40	0.40	0.60	0.75	0.75	1.5	
2-ii. 전단에 의해 지배되는 경우 : 연결보(coupling beam)										
내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.002	0.03	0.6	0.006	0.015	0.02	0.02	0.03
		0.5 이상	0.016	0.024	0.3	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
비내진상세단면인 경우		0.25 이하	0.012	0.025	0.4	0.006	0.008	0.01	0.01	0.02
		0.5 이상	0.008	0.014	0.2	0.004	0.006	0.007	0.007	0.012

주)

1. 사이값은 선형보간한다.
2. 배근상태와 축력비는  $\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w u f_{ck}}$  로 평가한다.
3. 작용전단력의 크기는  $(V/\sqrt{f_{ck} t_w u})$ 로 평가한다.
4. 내진상세단면과 비내진상세단면의 판단은 KBC2009 0520 내진설계시 특별고려사항의 규정에 따른 횡보강근의 만족여부에 따른다.

본 사례 시설물의 전단벽은 가장 불리한 값으로 검토한다.

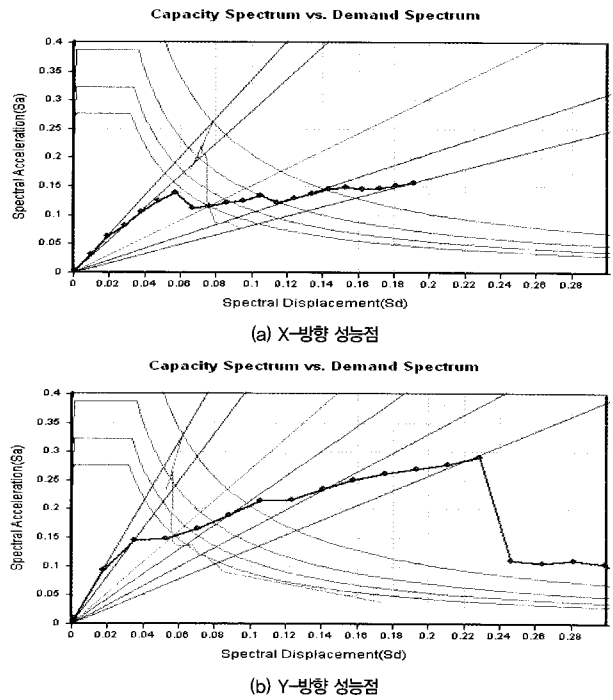
7) 성능점의 산정 : 성능점의 산정에는 역량스펙트럼법과 변위계수법을 사용할 수 있으며 본 사례는 역량스펙트럼법에 의하여 성능점을 산정하였다. 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)은 건축물의 횡하중에 대한 저항능력을 비선형 정적해석을 통해 구조물에서의 밀면전단력과 최상층 변위 곡선의 관계를 산정하고 이를 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 형태의 스펙트럼으로 나타내고, 지진의 요구내력을 나타내는 요구스펙트럼도 역시 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 형태로 나타낸다. 이 두 곡선을 하나의 좌표계로 표현함으로써 요구내력과 구조물의 저항력을 효과적으로 비교할 수 있는 방법이다. 능력스펙트럼과 요구스펙트럼 곡선의 교차점은 주어진 지진에 대한 구조물의 응답을 의미하나 요구스펙트럼이 탄성응답스펙트럼에 기초한 값이므로 구조물이 비선형 거동을 할 경우 비선형효과에 따른 요구스펙트럼의 감소를 고려해야 한다. 즉, 역량스펙트럼법은 실제건물의 비선형거동(최대변위)을 유효주기와 유효감쇠비를 가진 “등가의” 단자유도계 선형구조물의 응답으로부터 구하는 것이다.([그림2] 참조)



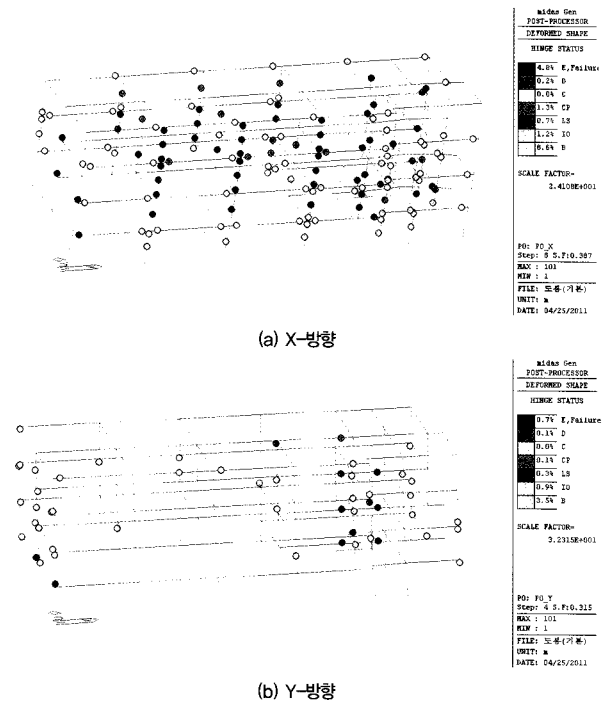
[그림2] 역량스펙트럼법에 의한 성능점

이상과 같이 목표성능 및 평가기준지진, 재료의 강도, 구조요소의 모델링파라미터 등을 결정하여 사례 시설물에 대한 내진성능평가를 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 성능점 : 역량스펙트럼법에 의한 사례 시설물의 방향별 성능점은 [그림3]과 같고, 성능점에서의 소성힌지 분포는 [그림4]와 같다.



[그림3] 사례 시설물의 성능점



[그림4] 사례 시설물의 성능점에서의 소성힌지분포

2) 성능점에서의 특성 : 방향별 성능점에서의 밀면전단력과 변위, 유효주기 등 특성은 [표8]과 같다.



[표8] 사례 시설물의 성능점에서의 특성

구 분	X-방향	Y-방향
지 반	$S_d$	$S_d$
Sa(g)	0.1155	0.1519
Sd(m)	0.07576	0.05612
유효주기(sec)	1.625	1.219
성능점에서의 지붕층 변위(m)	0.07927	0.03188
지붕층까지 높이(m)	13.8	13.8
지붕층 변위비	1/174	1/433
성능점에서의 밀면전단력(kN)	3,310	2,477
구조물의 최대강도(kN)	4,495.5	4,742

[표9] 사례 시설물의 층별, 방향별 성능평가 결과

층구분	방 향	성능수준	성능수준에서의 연직하중분담율(%)
1층	X-방향	거주가능	80.60
	Y-방향	거주가능	91.75
2층	X-방향	붕괴방지	76.96
	Y-방향	거주가능	96.31
3층	X-방향	붕괴위험	51.98
	Y-방향	거주가능	94.46
4층	X-방향	붕괴방지	80.52
	Y-방향	거주가능	93.42

∴ 내진성능판정 : 붕괴위험  
 ※ 현 기준에서 요구하는 대상 시설물의 목표성능수준 : 거주가능

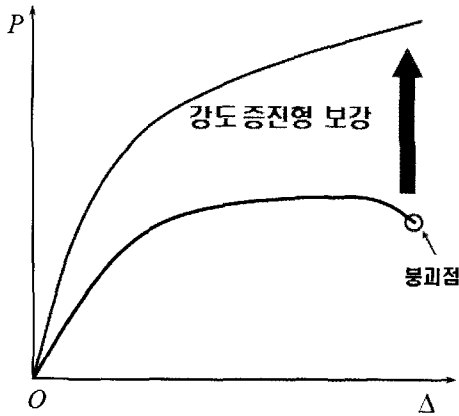
3) 성능평가 결과 : 사례 시설물의 층별, 방향별 성능평가 결과는 [표9]와 같다.

본 사례 시설물의 성능평가 결과, 붕괴위험으로 판정되어 평가기준지진 작용시 일부 연직하중저항시스템이 저항능력을 소실하여 부분적인 붕괴 혹은 전면적인 붕괴가 발생하는 것으로 나타났다. 본 시설물의 경우 현 기준에서 요구하는 성능수준이 거주가능이므로 내진성능의 향상이 필요한 것으로 판단된다.

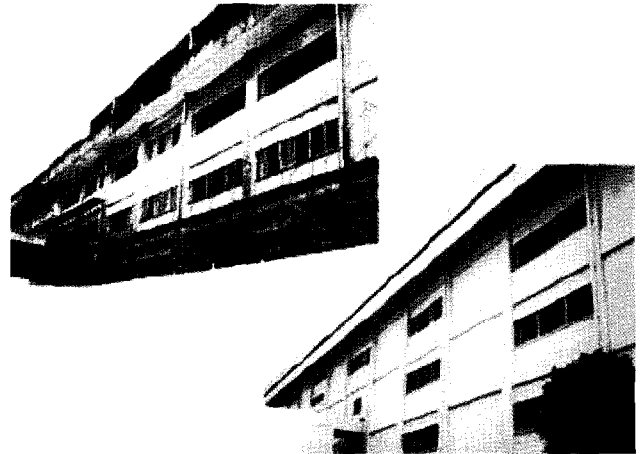
기존 건물의 내진성능을 향상시키는 방법으로는 크게 건물의 강도·강성을 증가시키는 방법, 건물의 변형(연성)능력을 향상시키는 방법, 그리고 에너지소산형 장치를 설치하여 요

구곡선의 크기를 줄이는 방법 등이 있다. 그러나, 건물의 변형능력 향상은 각 부재를 철판이나 탄소섬유 등으로 보강하는 방법으로 보강에 의한 연성능력 향상의 효과가 현재 관련 연구의 부족 등으로 다소 불확실한 면이 있다. 각 향상 방법 별 주요 특징은 다음과 같다.

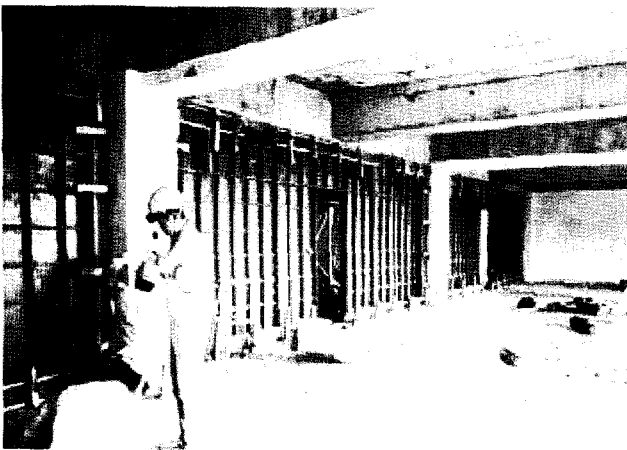
- 1) 강도·강성을 증가시키는 방법 : 기둥과 보로 구성된 골조 내에 새로운 벽을 증설하거나 기존 벽두께를 증가시켜 지진저항시스템을 변경하여 기존부재의 강성을 증가시켜 내진성능을 향상시키는 방법으로 벽의 증설은 공간 기능상 장애가 되므로 배치를 충분히 고려해야 하고, 평면상 또는 입면상으로 균형 있게 배치하여야 한다. 특히, 철근콘크리트구조로 벽체 등을 설치할 경우 시공성이 다소 떨어지는 것이 보통이다. 또한, 증설된 전단벽이 기존



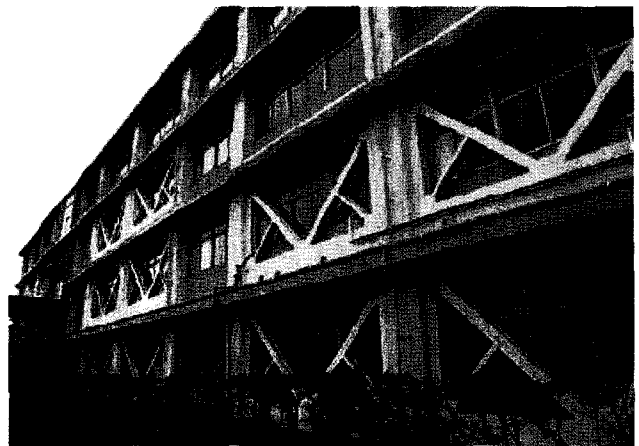
(a) 향상 개념



(b) 전단벽 증타



(c) 강판전단벽 설치



(d) 가새골조의 설치

[그림5] 강도·강성을 증가시키는 방법

구체와 완전하게 일체화 되지 않은 경우 연결부위에서 파괴 즉, 예상치 못한 부분에서의 항복이 일어날 수 있으므로 기존의 구체와 일체화되어야 한다. 더불어 새로운 재료와 기존 재료 사이의 연결부위는 조합된 설계하중을 충분히 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 기존 골조의 기둥과 보는 새로 설치된 벽이나 가새의 경계요소로 거동하므로 강도, 정착, 변형성 등을 충분히 점검해야 한다. (그림5 참조)

- 2) 연성능력을 증가시키는 방법 : 연성능력을 증가시키는 보강법은 주로 기둥의 전단보강에 이용된다. 이는 기둥의 파괴형식을 전단파괴에서 휨파괴로 이동시켜 연성을 향상시키는 방법으로 강판보강, 탄소섬유보강, 용접철물보강 등이 있다. 강판이나 탄소섬유 등으로 기둥의 전단력을 보강하는 방법은 건물의 중량증가를 최소한으로 억제할 수는 있지만, 내진성능 향상을 기대하기 위해서는

다수 또는 전체 기둥에 대해서 보강을 해야하고 보강한 부재와 보강하지 않은 부재의 변형능력의 균형도 건물의 내진성능에 크게 관여한다는 점에 유의해야 한다. (그림 6) 참조)

- 3) 에너지소산형 장치를 사용하는 방법 : 에너지소산형 장치는 구조물의 감쇠를 증가시킴으로써 지진에너지를 소산하는 장치로 크게 속도-의존 장치(velocity-dependent device)와 변위-의존 장치(displacement-dependent device) 및 기타 장치 등으로 분류하고 있다. 속도-의존 장치는 감쇠력이 속도에 비례하는 점성 및 점탄성감쇠기 등이 있으며, 변위-의존 장치로는 금속 항복형 장치, 마찰형 감쇠기, 비좌굴가새 등이 대표적이며 장치 자체가 소성거동에 의하여 에너지를 소산하므로 감쇠성능을 파악하기 위하여 탄소성해석을 수행하여야 한다. 그러나, 에너지소산형 장치가 구조물 내에서 효과

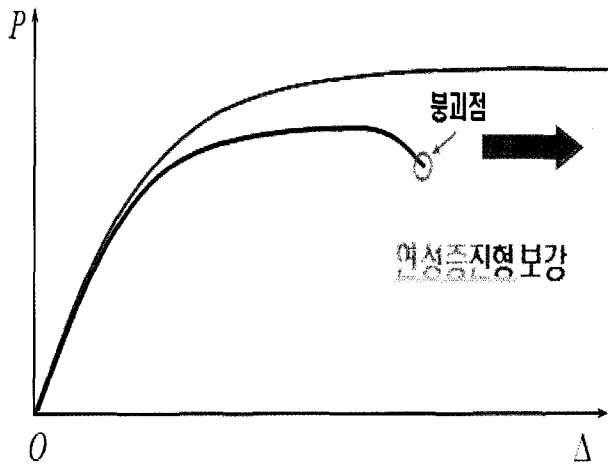
적으로 거동하기 위해서는 감쇠장치에 큰 변형이 발생해야 하며, 건축물의 강성이 큰 경우에는 감쇠장치가 작동하기 전에 구조물에 파괴가 발생할 수 있으므로 감쇠장치는 일반적으로 골조 구조물에 적용 가능하다.([그림7] 참조)

본 사례 구조물의 특성상 다음의 주안점을 두고 내진성능 향상 방안을 제안하였다.

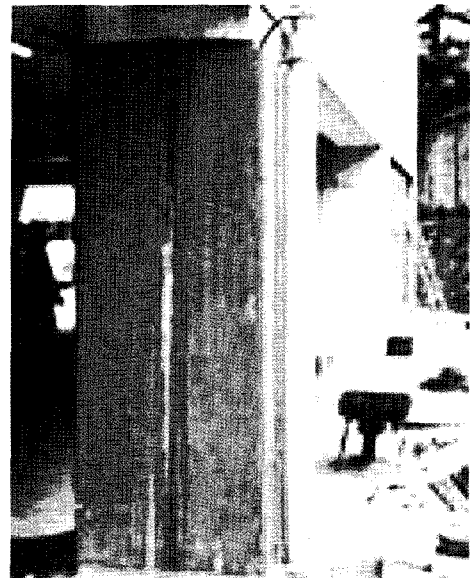
- ① 소방서의 특성상 1층 차고는 응급차량의 통행으로 인하여 보강재의 설치가 거의 불가능함. 이에 평면상 또는

입면상 연속적으로 설치해야 하는 전단벽식 또는 가새형 등의 강성보강 방법은 본 구조물에 적용하기 어려워 각 층에 발생하는 층전단력에 대한 전단강도 보강형 댐퍼를 고려함.

- ② 외벽에 내진보강재를 설치할 경우 외부마감(화강석, 커튼월) 복구비용이 커져 경제성이 저하되며, 실내에 내진보강재를 설치할 경우 창, 문 등의 제한적인 개구부 설치로 인하여 동선 등의 사용성이 저하됨.
- ③ RC전단벽 설치 등은 내부 습식공사가 필요하므로 공사의 품질 보장이 매우 어려움



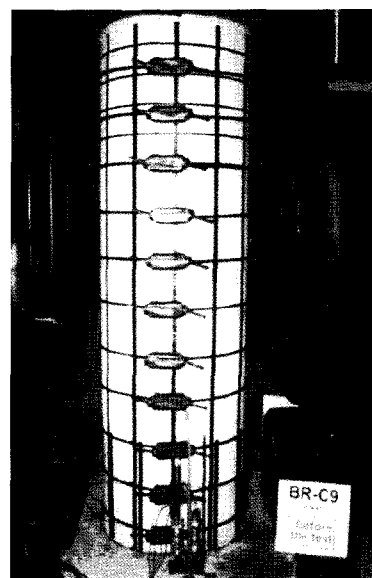
(a) 항상 개념



(b) 강판에 의한 기동보강



(c) 탄소섬유에 의한 기동보강



(d) 프리스트레스트 기동보강

[그림6] 연성능력을 증가시키는 방법

- ④ 관리주체에서 미관상 외벽에 설치하는 내진보강 공법은 지양토록 함.
- ⑤ 제한적인 예산(공사비)의 고려

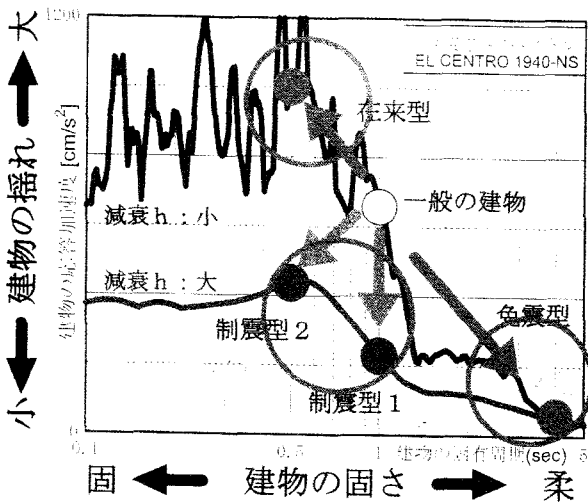
위 몇 가지 주안점을 고려하여 본 사례 시설물에 적용가능한 내진성능 향상공법을 정리하면 [표10]과 같다.

[표10]에서 보는 바와 같이 본 사례 시설물은 경제성, 공법의 적용성, 시공성, 미관, 사용성 등을 고려할 때 강판벽+이력댐퍼 보강공법(이하 “댐퍼보강”)이 가장 적절할 것으로 판단되어 이 공법을 본 사례 시설물의 내진성능 향상 공법으로

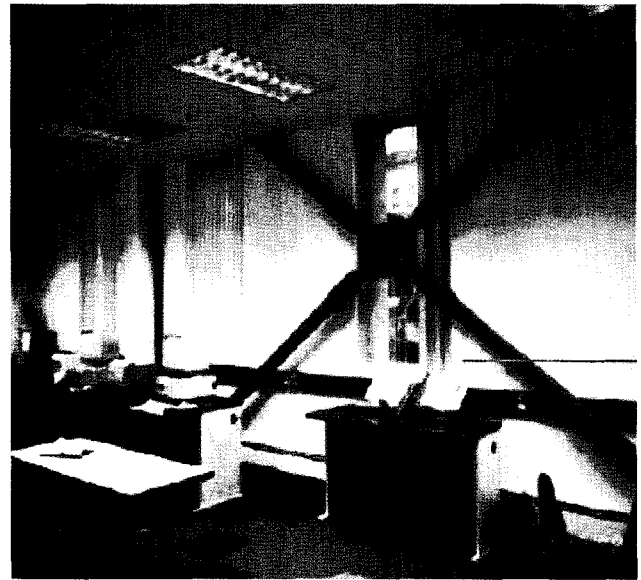
제안하였다.

댐퍼보강 적용 후 사례 시설물의 내진성능 향상 정도를 개정요령에 의하여 재평가한 결과는 다음과 같다.

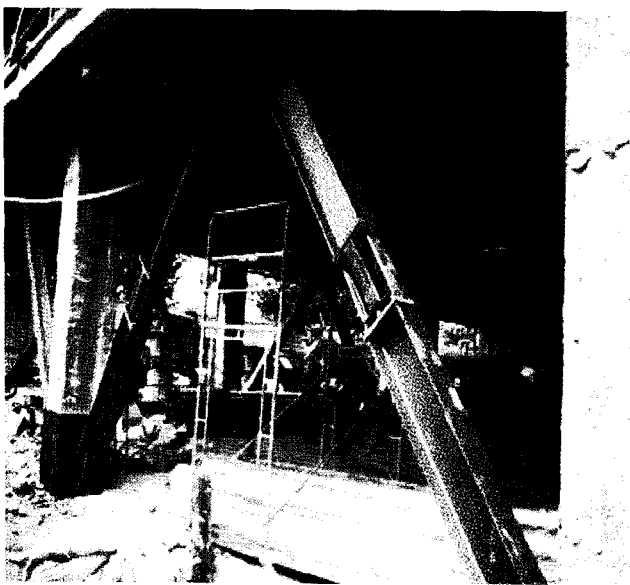
- 1) 댐퍼보강 위치의 선정 : 본 사례 시설물의 내진성능평가 결과 X방향에 대하여 현 기준에서 요구하는 성능수준을 만족하지 못하는 것으로 평가되었으며, 내진성능의 향상을 위하여 2층, 3층, 4층에 각각 내진보강이 필요한 것으로 평가되었다. 층별 보강 댐퍼 및 Device의 비선형 물성치는 [표11]과 같다.



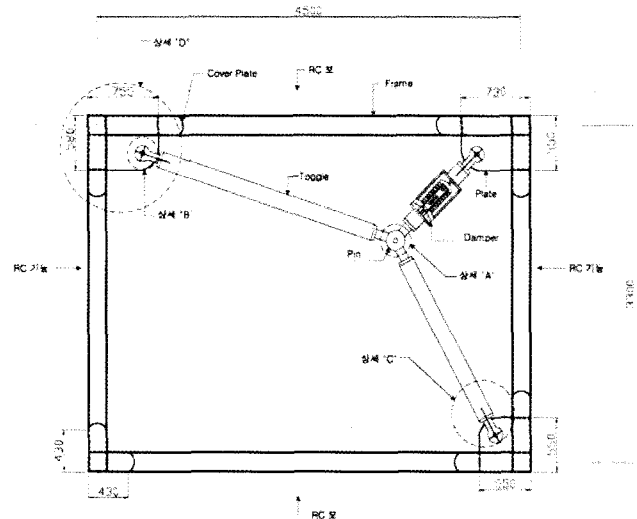
(a) 향상 개념



(b) 마찰감쇠기



(c) 가새형 금속항복장치



(d) 토글형 금속항복장치

[그림 7] 에너지소산형 장치를 사용하는 방법

[표10] 내진보강 공법별 특징 및 개략공사비 비교

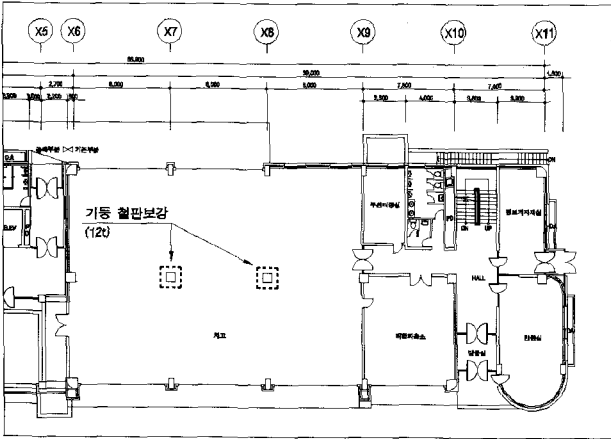
공 법	RC전단벽 추가	철판 또는 탄소섬유시트 보강	강판벽+이력댐퍼 보강
공 법 개 요	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 추가되는 RC전단벽이 발생하는 지진력을 기존 구조체와 분담시키는 방법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내력이 부족한 부재에 강성과 연성을 증대시키는 방법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구조물의 응답자체를 저감시켜서 내진성능을 향상시키는 방법</li> </ul>
장단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 벽체 증설시 기존 덕트 등 설비 등과 간섭되어 시공성 및 효율성이 떨어짐</li> <li>• 습식공사로 공기가 길고 시공성이 떨어져 품질 보장이 어려움</li> <li>• 건물의 강도 및 강성을 증가시키는 방법으로 변형능력의 향상 정도는 크지 않음</li> <li>• 자중 및 강성의 증가로 기초보강 비용이 추가될 수 있음</li> <li>• 기존 구조부재와 신설RC벽체의 일체화가 매우 중요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 철판보강시 철판 및 앵커 등에 의하여 미관이 저해됨</li> <li>• 부재단면치수의 변화가 크지 않아 평면계획에 영향이 적음</li> <li>• 건물 중량에 미치는 영향이 적음</li> <li>• 연성보강으로 성능향상 효과가 높지 않음</li> <li>• 보강 개소가 많아질 수 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 건물의 동선 및 평면 등 실내환경에 영향이 거의 없음</li> <li>• 다소 고가이며, 공기가 빠름</li> <li>• 에너지 흡수능력이 커서 건물의 안정성을 증대시킴</li> <li>• 건물의 응답을 저감시킬 경우 보강량이 다소 감소하는 경향이 있음</li> <li>• 댐퍼의 제작이 매우 중요</li> <li>• 기존 마감재의 해체</li> <li>• 복구 작업 필요</li> </ul>
보강방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 벽체 설치부위 기초에 마이크로파일 보강</li> <li>• 1층~4층에 THK200 전단벽 보강</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초보강 없음</li> <li>• 1층~4층에 12t 기동철판보강(4면)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초보강 없음</li> <li>• 1층 일부 기동 강판보강</li> <li>• 2층~4층에 강판벽+이력댐퍼 설치 (10개소)</li> </ul>
개략 공사비 (m <sup>2</sup> 당)	18,000원/m <sup>2</sup>	26,000원/m <sup>2</sup>	16,000원/m <sup>2</sup>
추천공법			◎

※ 위 개략 공사비는 순공사비임.

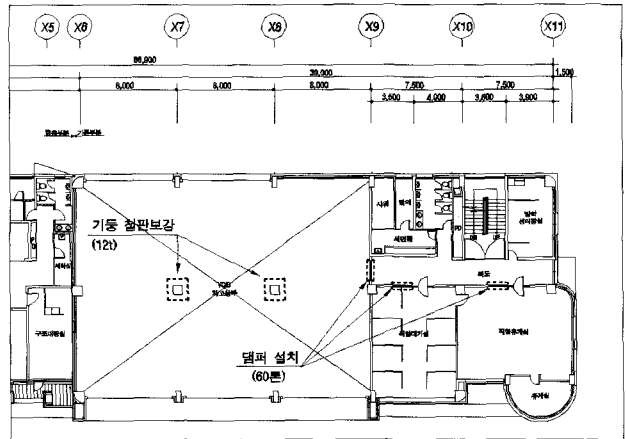
[표11] 보강 댐퍼 및 Device의 비선형 물성치(DRB동일(주) 제공)

층	성능점에서의 층간변위(mm)	항복강도 (kN)	초기강성 (kN/mm)	항복 후 강성 (kN/mm)	최대강도 (kN)	유효강성 (kN/mm)
4	11.43	410	788	7.88	495.97	43.39
3	21.12	410	788	7.88	572.33	27.10
2	22.60	616	1183	11.83	877.20	38.81

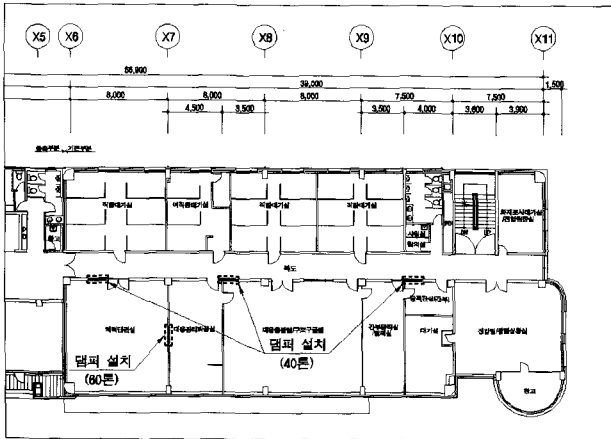
2) 층별 댐퍼보강 설치위치 : 층별 댐퍼보강 설치 위치는 [그림8]과 같다.



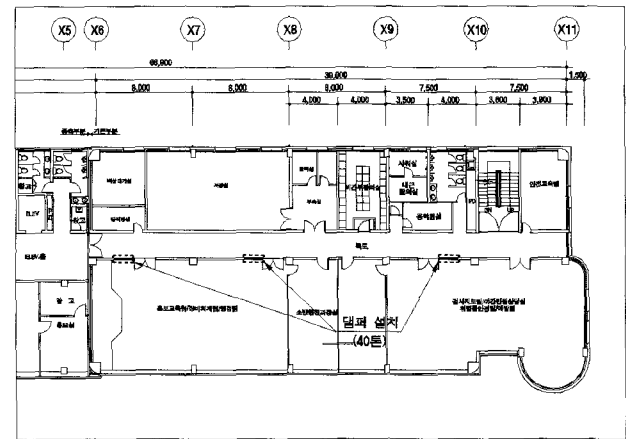
(a) 지상1층 보강재 설치 위치



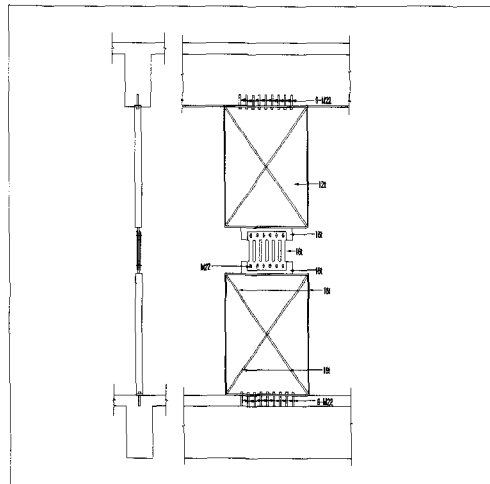
(b) 지상2층 보강재 및 댐퍼설치 위치



(c) 지상3층 보강재 및 댐퍼설치 위치



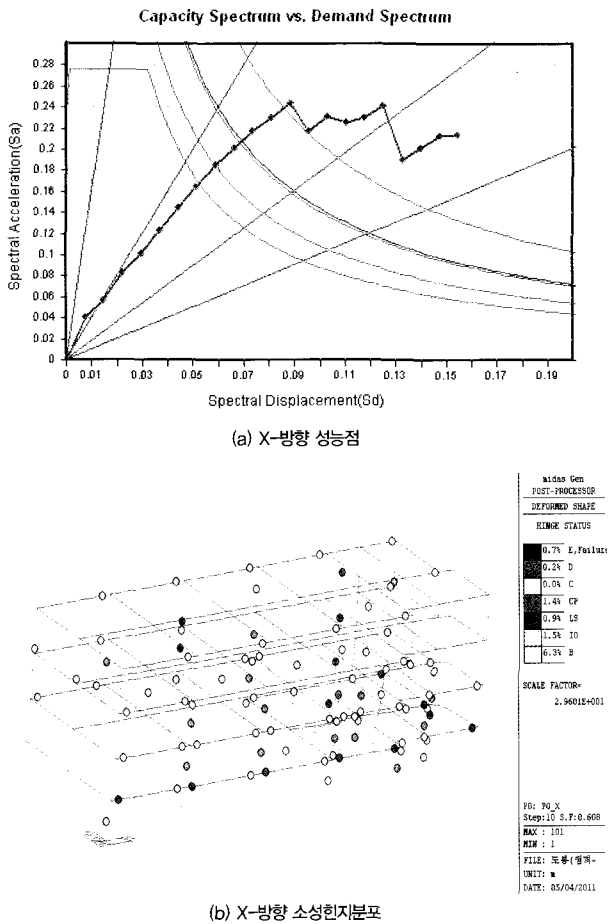
(d) 지상4층 댐퍼설치 위치



(e) 댐퍼의 기본형태(DRB동일주) 제공

[그림8] 사례 시설물의 댐퍼보강 설치위치 및 댐퍼의 기본형태

3) 성능 향상 후 성능점 및 소성힌지 분포 : 사례 시설물의 내진성능 향상 후 내진성능에 대하여 재평가를 실시하였으며, 보강후 방향별 성능점과 성능점에서의 소성힌지 분포는 [그림9]와 같다.



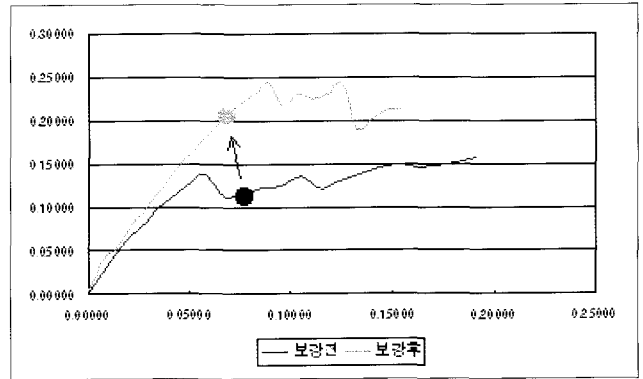
[그림9] 사례 시설물의 내진보강 후 성능점 및 소성힌지분포

4) 성능향상 후 층별 내진성능의 재평가 결과

[표12] 사례 시설물의 성능향상 후 층별 재평가 결과

층구분	방 향	성능수준
1층	X-방향	거주가능
2층	X-방향	거주가능
3층	X-방향	거주가능
4층	X-방향	거주가능

∴ 보강후 내진성능판정 : 거주가능  
 ※ 현 기준에서 요구하는 대상 시설물의 성능수준 : 거주가능



[그림10] 보강 전·후 내진성능 비교

또한, 내진보강 전·후 구조물의 능력곡선과 성능점 비교는 [그림10]과 같다.

끝으로 개정요령은 한국시설안전공단 홈페이지 ([www.kistec.or.kr](http://www.kistec.or.kr)) > 지진정보관 > 내진성능평가 및 향상요령에서 다운 받을 수 있으며, 예비평가를 위한 프로그램 개발, 상세평가를 위한 세부절차 및 상세 해설집(예제집 포함)을 내용으로 하는 “기존건축물 내진성능평가 활성화를 위한 연구”가 3개년(2011~2013)에 걸쳐 현재 진행 중에 있다.

### 참고문헌

- 소방방재청, “기존시설물 내진보강 기본계획( 11~ 15년)”, 2011
- 국토해양부, “건축구조기준”, 2009
- 한국시설안전공단, “기존건축물의 내진성능 평가 및 향상요령”, 2004
- 한국시설안전공단, “기존 시설물(건축물)의 내진성능 평가 및 향상요령”, 2011
- FEMA, “FEMA 356 PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS”, 2000
- 대한건축학회, “건축물의 내진·제진·면진 설계 및 보강 기술 세미나” 자료, 2011
- 기상청 지진센터 <http://www.kma.go.kr>
- 국토해양부 <http://www.mltm.go.kr>
- DRB동일(주) <http://www.drbworld.com>