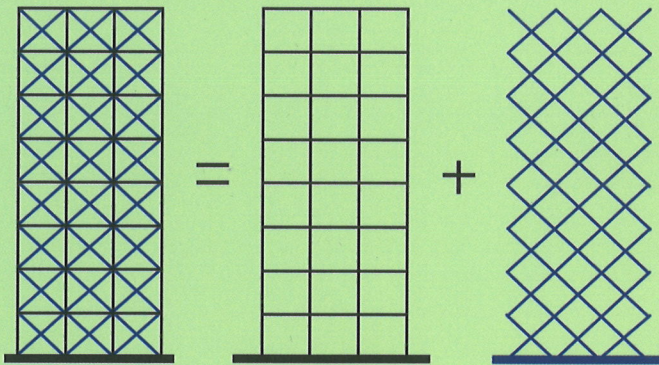


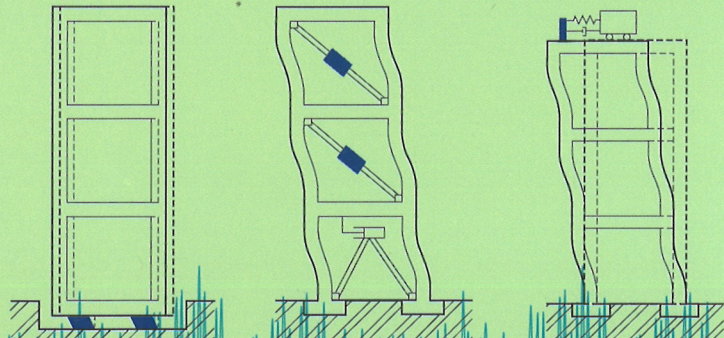
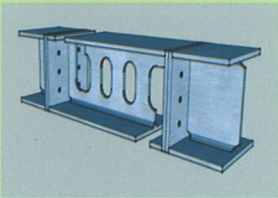
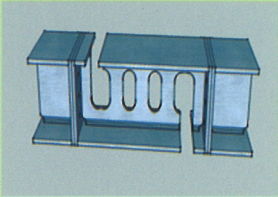
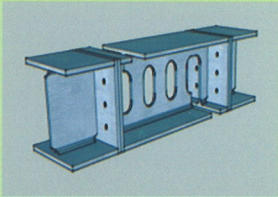
# 제진구조 설계기법 및 국내 적용사례



**Sivic** 사단법인 한국면진제진협회  
Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control







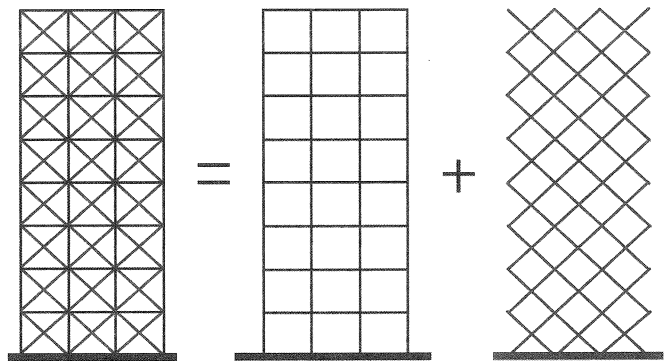
9 788962 2565 12

ISBN 978-89-6225-651-2

정가 13,000원

# 제진구조 설계기법 및 국내 적용사례

이원호 오상훈 김영주







## 머 리 말

지진으로부터는 국민의 생명과 재산을 보호하는 것이 최우선이지만 우리나라와 같이 고도로 산업화된 국가에서는 산업경제활동에 대한 파급효과와 정상적인 기능으로 회복하는 기간을 최소화하는 것도 갈수록 중요하게 부각되고 있습니다. 1994년 노스리지지진과 1995년 고베지진은 이러한 경제적 피해와 건물의 기능 회복에 대한 경각심을 불러 일으켰으며, 2011년의 일본대지진 피해는 경제적인 문제뿐만 아니라 인접 국가인 우리나라 국민의 두려움도 한층 증폭시켰습니다. 따라서 우리나라의 지진대책도 이러한 방향으로 한층 더 진화하고 발전시켜야 한다고 생각합니다.

지진에 대한 보다 효과적인 대책을 마련하기 위해서 2004년 (사)한국면진제진협회가 창립되었습니다. 최근까지도 발생하고 있는 일본, 중국 및 대만의 지진에 대한 피해 사례를 살펴보면, 우리나라도 지진재해에 대해서 더 이상 안전하다고 할 수 없게 되었습니다. 우리 협회는 그동안 기술강습회나 세미나를 통해 경제적이고 매우 효과적인 내진보강방안인 면진 및 제진장치에 대한 기술교육과 지진위험에 대비한 지진방재에 대해서 지속적으로 연구하고 있습니다. 또한 일본 및 중국 등 해외의 내진설계 사례 현장을 방문하여 면진 및 제진장치의 발전된 설계와 시공에 대해서도 지속적으로 모니터링함으로써 국내의 면진 및 제진기술 발전을 이끌고 있습니다.

이러한 노력의 일환으로 우리 협회에서는 제진설계에 대한 기본원리와 시공 사례에 대해 실무자들에게 도움을 줄 수 있는 서적을 발간하게 되었습니다. 본 서에서 제진구조 설계를 모두 포괄하기에는 부족한 면이 있지만 제진장치 및 설계기법에 대해서 실무자들의 이해를 돕는 데 활용되기를 기대합니다.

2015년 4월

한국면진제진협회 회장 이 원 호

한국면진제진협회 제진기술위원회 위원장 오 상 훈





# 차례

|  |    |
|--|----|
| 제1 장 내진설계와 제진설계 .....                      | 7  |
| 1.1 내진설계 현황 및 한계                           | 7  |
| 1.2 제진설계의 필요성                              | 9  |
| 1.3 제진구조 설계를 위한 기본 순서                      | 10 |
| 제2 장 제진구조의 개념 및 설계법 .....                  | 11 |
| 2.1 제진설계의 배경                               | 11 |
| 2.2 제진설계의 기본개념                             | 13 |
| 2.3 제진장치의 종류                               | 16 |
| 2.3.1 구조물의 수동제어                            | 16 |
| 2.3.2 수동제어형 제진장치                           | 18 |
| 2.4 제진설계법                                  | 26 |
| 2.4.1 제진구조 설계법의 발달                         | 26 |
| 2.4.2 강도기반 설계법                             | 28 |
| 2.4.3 에너지기반 설계법                            | 33 |
| 2.5 내진보강방법                                 | 34 |
| 2.5.1 내진보강방법의 종류                           | 34 |
| 2.5.2 제진에 의한 내진보강                          | 38 |
| 제3 장 에너지 평형식을 이용한 제진구조물 설계 프로세스 및 설계 예제 .. | 41 |
| 3.1 에너지 평형식에 의한 제진구조물 설계 프로세스              | 41 |
| 3.1.1 에너지 평형에 의한 제진구조 설계 개념                | 41 |
| 3.1.2 건축물이 흡수하는 에너지                        | 44 |
| 3.1.3 건축물에 입력되는 에너지                        | 46 |
| 3.1.4 설계용 에너지 스펙트럼                         | 48 |
| 3.1.5 건축물의 손상을 유발하는 지진에너지                  | 50 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 3.2 제진구조 설계 프로세스               | 50  |
| 3.2.1 일반 사항                    | 50  |
| 3.2.2 구조특성값 계산                 | 51  |
| 3.2.3 구조설계 순서                  | 62  |
| 3.3 제진구조 설계 예제                 | 69  |
| 3.3.1 설계 대상 건물 개요              | 69  |
| 3.3.2 에너지 평형식에 근거한 제진구조의 설계    | 69  |
| 3.3.3 기존 설계법에 의한 내진구조 설계       | 93  |
| 3.3.4 내진구조와 제진구조의 물량비교         | 94  |
| 3.3.5 내진구조와 제진구조의 내진성능 비교      | 95  |
| <br>                           |     |
| <b>제 4 장 제진구조물 적용 사례</b> ..... | 101 |
| 4.1 신축 건축물 사례                  | 102 |
| 4.1.1 커플링보 제진시스템               | 102 |
| 4.1.2 가새형 제진시스템                | 108 |
| 4.1.3 기둥-보 접합부형 제진시스템          | 110 |
| 4.2 리모델링 건축물 사례                | 111 |
| 4.2.1 벽체형 제진시스템                | 111 |
| 4.2.2 가새형 제진시스템                | 114 |
| 4.2.3 기둥형 제진시스템                | 117 |
| 4.2.4 분리형 듀얼 프레임 제진시스템         | 118 |
| 4.2.5 창호형 제진시스템                | 119 |
| <br>                           |     |
| <b>부 록</b> .....               | 121 |
| A1. 신축 건축물 적용 사례               | 121 |
| A2. 리모델링 건축물 적용 사례             | 122 |
| <br>                           |     |
| <b>참고문헌</b> .....              | 123 |



## 내진설계와 제진설계

- 1 내진설계 현황 및 한계
- 2 제진설계의 필요성
- 3 제진구조 설계를 위한 기본 순서

### 1.1 내진설계 현황 및 한계

최근 세계적으로 대지진 발생에 따른 피해 사례를 많이 접하게 되는데(그림 1.1), 이러한 지진은 그 예측이 어려워 사전대책 수립이 곤란하며, 일단 대지진이 발생하면 인명 및 재산피해 또한 막대하다. 보통 지진은 지진다발지역인 판의 경계 부위 지진대에서 주로 발생하고 있으나 사실은 지구 표면 어디에서나 발생할 수 있다는 것이 지진학자들의 일반적인 견해이다. 국내의 경우도 지진이 발생하지 않는 것으로 인식되어 왔으나 사실 크고 작은 지진들은 과거부터 현재까지 발생하고 있었으며, 그림 1.2와 같이 최근 뚜렷한 증가세를 보이고 있다. 이러한에도 불구하고 공공시설물의 내진설계 비율은 매우 낮은 것이 국내 건설시장의 현실이다.

우리나라의 경우 도시화율이 90% 정도로 도시지역에 인구가 집중되어 있는 상태이고, 아울러 주요 국가기반시설을 비롯한 산업시설 또한 도시에 집중되어 있기 때문에 지진으로 인한 건축물 붕괴와 비구조체의 손실에 따른 막대한 인명피해가 우려된다. 또한 지진하중으로 인한 건축물 손상과 같은 직접적인 피해뿐만 아니라 사회기반시설 손상과 영업정지와 같은 대규모 간접적인 피해가 발생할 가능성이 있다(그림 1.3).

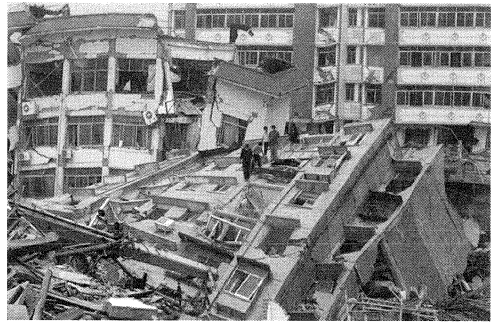


그림 1.1 중국 쓰촨성 지진에 의한 피해 사례

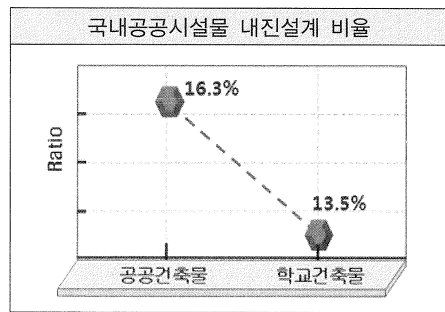
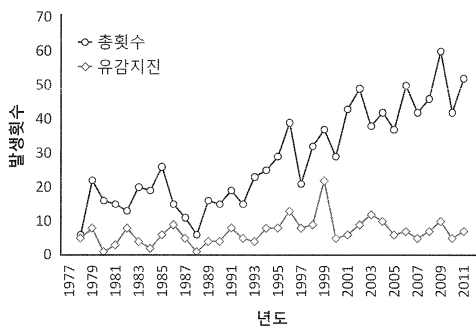


그림 1.2 국내 지진발생 추이와 공공시설물 내진설계 비율

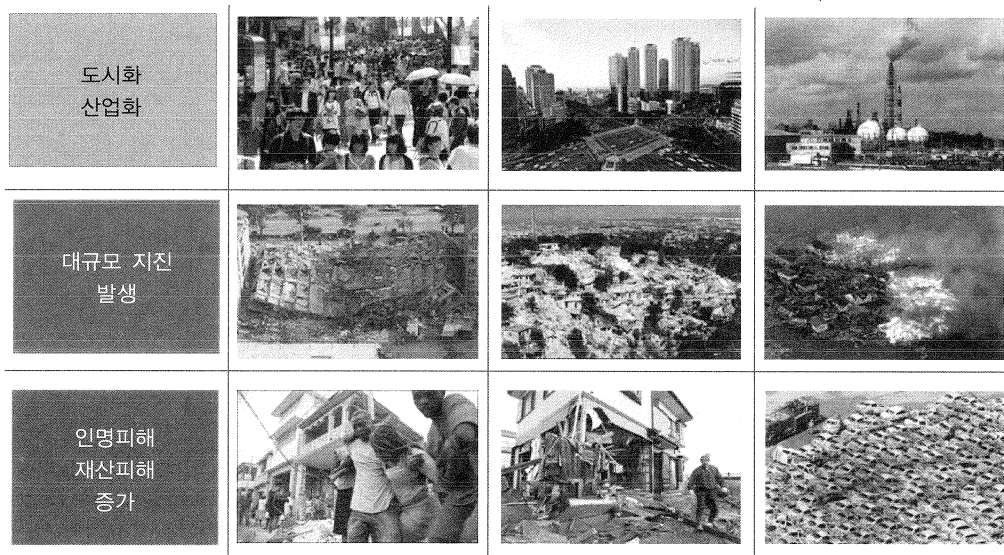


그림 1.3 최근 지진피해의 특징



전통적인 내진설계에서는 강진 발생 시 인명안전을 목적으로 구조물을 설계하고 있으며, 탄성지진하중에 반응수정계수( $R$ )를 적용함으로써 강진 시 구조물의 비탄성변형을 허용하고 있다. 따라서 일반적인 내진설계는 지진하중 작용 시 구조부재의 손상을 통해 지진에너지를 소산시키며, 지진 후에는 구조체에 발생한 균열과 잔류변형이 남게 된다. 따라서 내진구조는 예기치 못한 대지진이 발생할 경우 주요 구조부재의 소성변형, 즉 손상에 의한 피해가 발생하게 되어 지진피해 발생 후에 복구가 매우 힘들게 되어 지진에 의한 2차 피해액이 크게 증가할 수 있다. 실제로 1994년의 Northridge지진과 1995년 일본 고베지진과 같은 외국의 대표적 피해 발생 지진에서도 구조물의 직접적인 피해액보다 복구지연 및 이에 따른 사회적 비용 증가 등에 의한 2차 피해액이 수배에서 수십 배에 달하고 있다.

이러한 점들을 고려하면 내진설계는 구조부재의 소성변형을 허용함에 따른 한계를 분명히 드러내고 있다.

## 1.2 제진설계의 필요성

앞에서 설명한 바와 같이 내진구조의 한계를 극복하기 위해 최근에 면진구조와 제진구조에 대해 주목하고 있다. 특히 제진구조는 구조물에 제진장치를 설치하여 입력되는 지진에너지를 댐퍼에 의해 소산시키는 개념으로 구조물이 가지고 있는 감쇠와 댐퍼의 거동에 의한 추가감쇠를 더함으로써 구조물에 입력되는 지진에너지의 대부분을 제진장치가 소산시켜 구조물의 손상을 저감하고자 하고 있다.

다양한 댐퍼 중에서 에너지소산형 댐퍼가 가장 보편적으로 적용되고 있다. 이는 제진장치가 경제적인 반면 진동제어 효과가 우수하기 때문이다. 특히 강재를 이용한 제진장치의 경우, 강재의 재료 특성이 사용자들에게 가장 친숙하게 알려져 있고, 점(탄)성 댐퍼처럼 온도 및 시간경과에 따른 경년변화의 영향이 적기 때문에 향후 유지관리도 용이하여 가장 널리 사용되고 있다. 해외의 강진지역에서는 강재댐퍼의 요구성능으로 극한에너지소산능력이 최우선적으로 요구되지만, 국내와 같이 중·약진지역에서는 작은 변위에도 에너지를 흡수할 수 있도록 탄성강성과 에너지 소산능력이라는 두 가지의 필수 성능이 요구된다(그림 1.4).

따라서 국내의 제진시스템이 적용되는 신축 및 기존 비내진 건축물에 대해서는 그 적용효과를 높이기 위해 그림 1.5와 같이 국내 지진환경에 적합한 강재댐퍼, 즉 강성과

에너지소산능력이 크고 동시에 지진 후 재사용이 가능한 한국형 저비용·고효율 강재댐퍼 사용이 유리한 측면이 크다고 할 수 있다.

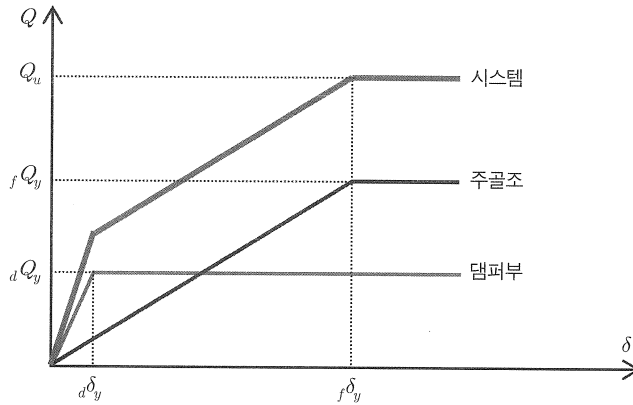


그림 1.4 강재댐퍼를 가진 구조시스템의 요구이력

### 1.3 제진구조 설계를 위한 기본 순서

제진설계의 설계기법 및 적용 사례를 체계적으로 소개하기 위하여 다음의 순서로 설명을 기술하도록 한다.

먼저 제진설계의 일반사항을 논함에 있어서 제진설계의 개념장치 종류 및 제진설계법에 대해 간단히 기술하고자 한다. 특히 제진설계법에 있어서 미국의 ASCE7-10에서 소개하고 있는 강도설계법과 최근 일본에서 기준에 포함된 에너지법을 이용한 설계법을 소개한다.

또한 에너지평형식에 근거한 설계법(이하 에너지법)을 제진구조에 적용할 수 있는 설계프로세스를 제안하고, 예제를 통해 에너지법에 의한 설계방법을 상세히 기술하고자 한다. 그리고 제안된 설계프로세스에 따라 설계된 제진구조를 대상으로 지진응답해석 등을 통해 기존 내진구조와의 내진성능과 경제성 등을 비교함으로써 그 유효성을 검증하고자 한다.

제진구조물 설계 사례는 국내의 사례를 중심으로 하되 신축건축물과 리모델링건축물 사례를 다루며, 그 적용형태를 분류하여 커플링 댐퍼, 벽식댐퍼, 브레이스형 댐퍼, 기동식 댐퍼 및 기동-보 접합부 댐퍼 등으로 대표적인 건물을 중심으로 소개하였다.



# 제진구조의 개념 및 설계법

- ▶ 제진설계의 배경
- ▶ 제진설계의 기본개념
- ▶ 제진장치의 종류
- ▶ 제진설계법
- ▶ 내진보강방법

## 2.1 제진설계의 배경

전 세계적으로 지진에 저항하는 구조시스템, 즉 면진구조, 제진구조(또는 손상제어구조), 강도기반구조 및 연성기반구조 등에 대해 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 방법 중에서 면진구조와 제진구조가 최고의 내진성능이 발휘된다는 것을 경험적으로 알아왔고, 또한 미래에도 이 분야의 발전은 매우 클 것으로 기대하고 있다. 만약 연구를 통해 향후 일어날 지진의 크기를 미리 예측할 수 있다면 위의 네 가지 방법을 통해 각종 요구사항을 만족시키는 설계가 가능할 것이다. 지진은 자연현상이다. 구조물의 내진설계에 있어서 가장 어려운 점은 구조물이 위치하고 있는 곳에서 발생할 가능성이 있는 지진동 크기의 예측이 매우 어렵고, 지진파 자체가 지니고 있는 불확정성이 매우 크다는 것이다. 즉 지진이 언제 일어나고 얼마나 큰 지진동을 유발할지를 전체적으로 예측할 수 없다는 것이다. 따라서 지진동의 크기 및 발생확률을 정확히 평가하지 못하면 설계과정에서 엔지니어의 경제적인 판단이 불가능하게 된다. 그러나 건물 각각은 수명을 약 50~60년 정도로 본다고 할지라도, 도시의 삶은 1000년 이상이 되기 때문에 엔지니어의 내진설계는 일종의 도박과도 같다고 할 수 있다. 구조물 개체 하나하나도 도시의 한

구성요소이다. 따라서 건물의 생애주기와 지진의 발생빈도에만 의존하여 내진설계가 이루어진다면 도시로서의 내진설계는 해결될 수 없는 문제이다. 그렇다고해서 도시의 개념에 맞추어 수천 년의 재현주기를 상정한 매우 큰 지진에 대해 설계한다면 수십 년의 수명을 가진 건물 각각의 측면에서 보면 매우 과대 설계되는 경향이 나타난다. 이러한 내용은 내진설계의 목표설정을 곤란하게 하는데, 이는 전통적인 강도기반 내진설계에 초점을 맞추고 있는 데 따른 것이다.

따라서 새로운 내진설계의 기술개발이 필요하다. 이는 현재의 시공방법을 가지고 현재의 비용과 같이 사용하여 도시와 각 건물에 적합한 내진설계를 수행하는 것이 최적이며, 이러한 새로운 구조시스템을 개발하는 것이 필요하다. 새로운 구조시스템의 적용으로 매우 드문 지진에도 건물의 손상을 최소화할 수 있다면 이는 내진설계 측면에서 합리적인 방안이 될 수 있다. 결과적으로 각 건물과 도시를 동시에 지진에 대한 안전성이 높아지게 할 수 있다. 도시의 생애주기가 약 1000년 또는 2000년 정도라고 예측하면 내진설계에 있어서 지진의 재현주기를 예측하고 적용하여 건물을 효과적으로 설계하는 것이 가능하다.

그림 2.1은 지진의 크기와 구조물의 손상 또는 보수에 소요되는 비용과의 관계를 나타낸 것이다. 전술한 4가지 구조시스템 중에서 면진구조가 지진 후 손상 또는 보수비용을 최소화하는 가장 좋은 방법이지만 초기투자비용이 크다는 단점이 있다.

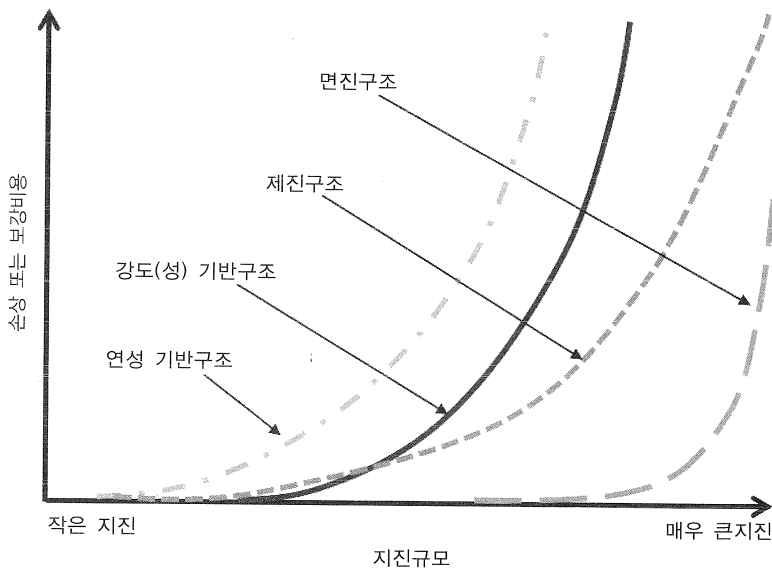


그림 2.1 지진의 크기에 따른 구조물 손상/보수비용(A. Wada, 2006)

연성기반구조는 지진이 커지면 손상에 따른 보수비용도 증가하며, 강도기반구조도 작은 지진에서는 탄성으로 견디지만 지진의 크기가 증가하면 손상비용이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 제진설계는 지진의 크기가 증가해도 강도나 연성기반 내진설계에 비하면 경제적으로 더 유리하다고 할 수 있다. 따라서 경제적이고 어느 정도의 지진레벨에서는 보수비용이 저렴한 제진설계가 각 건축구조물의 내진설계에 가장 적합하다고 할 수 있다.

## 2.2 제진설계의 기본개념

제진구조의 기본개념을 설명하기 위해서는 기존의 전통적인 내진설계에 대해 먼저 살펴 봐야 할 필요가 있다. 기존의 내진설계 개념을 설명하기 위해 그림 2.2에 라멘구조를 예로 들어 전통적인 내진설계 개념을 나타내었다(Wada, 2006). 그림에서 지진하중을 받은 라멘구조의 총 수평변위( $\Delta$ )는 탄성변위( $\Delta e$ )와 소성변위( $\Delta p$ )의 합으로 표현될 수 있고, 라멘구조만으로 구성된 구조물의 경우 탄성층간변형각이 1/200 내외라는 것을 나타내고 있다. 이는 라멘구조가 강성에 있어서 매우 유연함을 나타내지만 탄성변형으로써는 큰 값임이 분명하다. 또한 강기동-약보의 내진설계 개념에 입각하여 보에 소성힌지가

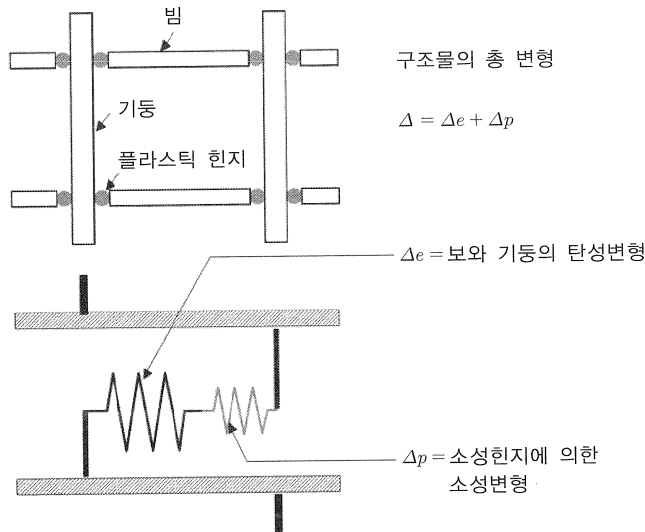


그림 2.2 전통적인 내진설계 개념



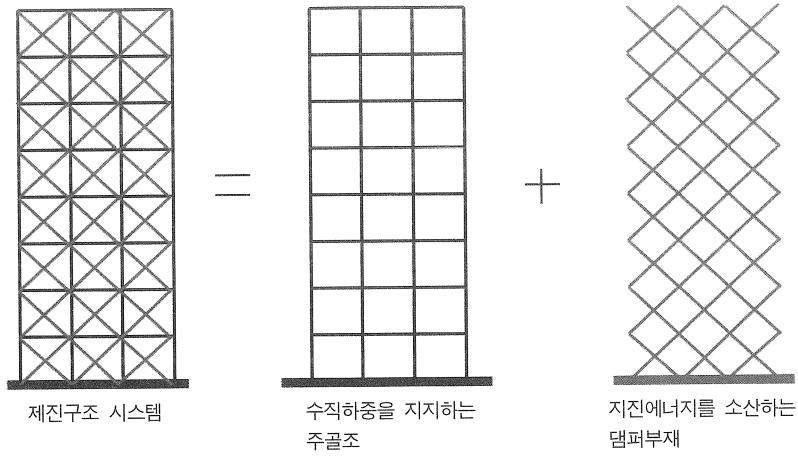
발생하여 소성변형에 의한 수평변위가 추가되면 총 층간변형각은 매우 증가되고 또한 주요구조부재가 에너지를 소산하기 때문에 잔류변위가 나타나게 된다. 이는 지진 시 내진설계의 목표인 인명보호가 달성되었다 할지라도 건물의 손상과 더불어 지진 후의 보수보강측면에서 살펴보면 경제적 손실이 매우 크게 되는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안 중 하나가 제진구조라고 할 수 있으며, 일본에서는 이를 손상제어구조라고 한다. 제진구조 시스템은 그림 2.3(a)와 같이 두 개의 다른 구조물의 조합이다. 첫 번째는 기둥과 보로 구성된 주요구조부재이며, 이는 수직하중을 저항하도록 계획되어 있다. 제진구조에서는 주요구조부재인 기둥과 보가 큰 지진 하에서도 탄성적으로만 거동하게 되며 지진 후 건물의 기능이 수행되도록 하는 역할을 한다. 두 번째는 에너지소산 시스템 또는 손상제어구조 시스템이며, 이는 지진으로부터 수평하중과 수평변위를 제어하도록 하는 역할을 한다. 따라서 제진구조는 지진에 의한 손상은 에너지소산 시스템에 의해 제어되며, 손상된 부분이 발견된 후 보수보강을 즉시 수행하게 된다.

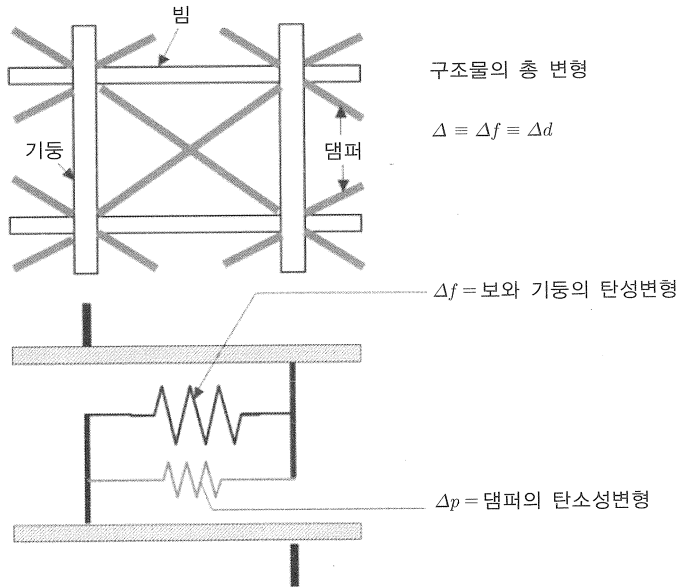
그림 2.3(b)는 제진구조 모델링을 나타낸 것이며, 이는 손상이 가새타입 에너지소산 시스템에 의해 제어되는 시스템이다. 그림에서 주요구조부재와 손상제어 시스템은 두 개의 병렬스프링으로 모델링할 수 있다. 전체 구조물( $\Delta$ )의 변형은 주요구조부재의 변형( $\Delta f$ )과 같고 또한 에너지소산 시스템의 변형( $\Delta d$ )과도 같다고 할 수 있다. 이 제진구조 시스템의 장점은 전체 구조물의 총 수평변위 증가 없이 에너지소산능력, 강도 및 강성을 증가시키는 매우 신뢰할 수 있다는 것이다.

큰 지진 하에서 전통적인 내진설계로 계획된 구조시스템은 입력된 에너지를 소산시키기 위해서 주요구조부재의 자체적인 소성변형능력에 의존하게 되어 큰 소성변형의 발생을 초래한다. 즉 더 큰 소성변형능력에 대한 요구도는 구조물에 있어서 더 큰 손상을 초래한다는 것이다(그림 2.4 참조). 반면에 제진구조 시스템이 사용되면 주요구조부재를 탄성에 머물도록 응답을 제어할 수 있는데, 이는 에너지소산장치 또는 시스템이 전체 구조물의 강성, 강도 및 특히 에너지소산능력을 증가시키기 때문이다(그림 2.5 참조).

제진구조 시스템의 장점은 지진 시 손상으로부터 구조물을 보호할 뿐만 아니라 전통적인 내진설계에 의해 계획된 구조시스템에 비해 보수·보강 비용을 절감할 수 있다는 데 있다. 일본의 일반적인 제진설계 경향을 살펴보면, 제진구조로 설계된 철골구조 시스템의 경우 그 물량이 기존의 내진설계에 비해 약 10%~20%가 절감된다고 보고되고 있다. 더욱이 제진구조 시스템에서 중요한 사실은 지진 후에 에너지소산 장치가 손상을 입게 되면 이것들은 간단하게 제거되고 빠르게 보강될 수 있다는 것이다.



(a) 제진(손상제어)구조의 개념



(b) 제진구조의 모델링

그림 2.3 제진(손상제어)구조(Wada, 2006)

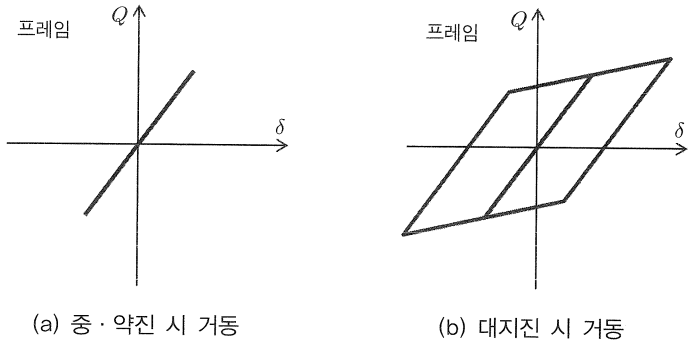


그림 2.4 전통적인 내진설계로 계획된 구조시스템

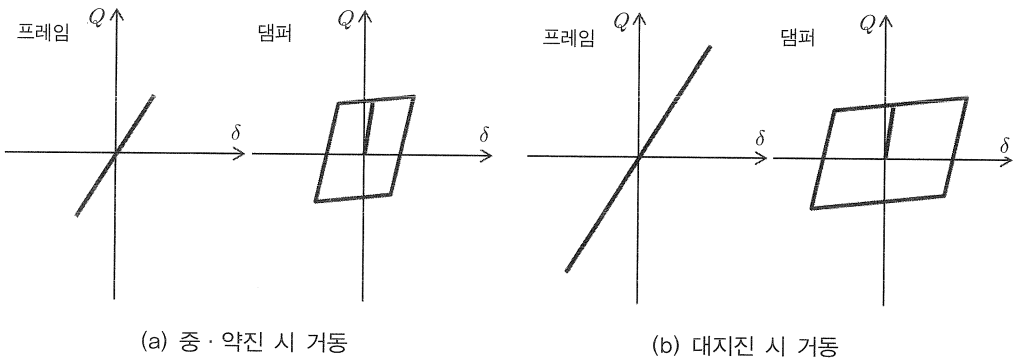


그림 2.5 제진구조 시스템

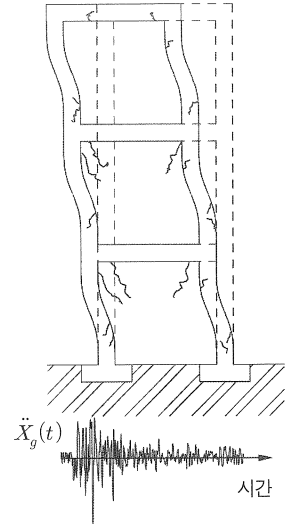
## 2.3 제진장치의 종류

### 2.3.1 구조물의 수동제어

지반진동이 발생하는 동안 구조물에는 다량의 에너지가 입력된다. 전통적인 내진설계의 원리는 각 구조부재가 비선형 반복변형에 의해 지진에너지를 흡수하고 소멸시켜 건물의 붕괴를 방지하도록 하는 것이다. 그림 2.6(a)에 나타낸 바와 같이 전통적인 내진설계를 적용한 구조물에는 복구가 더 이상 불가능한 정도의 피해가 발생할 수도 있다. 지난 20여 년 동안 특수한 보호시스템은 지진이 일어나는 동안 구조물의 피해를 감소시키고 안전성을 강화시키기 위해 발달되어 왔다. 구조물의 지진응답과 에너지소산을 제어하기 위해 이러한 대안 방법은 시스템의 동적 특성을 수정하도록 하는 구조시스템에 의존하게 된다.

제진구조 시스템은 크게 수동형 제진과 능동형 제진으로 구분할 수 있다(그림 2.7 참조). 요즘 가장 현실적이고 신뢰할 수 있는 지진응답 감소방법은 구조물에 수동응답 제어 시스템을 적용하는 것이다. 이 시스템은 입력된 지진 에너지를 관리하는 방법에 따라 면진 시스템과 수동에너지소산 시스템으로 분류될 수 있다.

그림 2.6(b)에 나타낸 면진시스템은 구조물과 기초 사이에 낮은 수평강성의 층을 삽입함으로써 지진에너지를 막거나 걸러낸다. 이러한 계획은 일정한 진동수 범위 내에 지배적인 모드가 있으며 규모가 큰 중·저층 구조물에 적합하다. 현재 여러 건물과 교량에는 기초면진 시스템이 설치되어 있다. 반면에 수동에너지소산 시스템은 진동에너지를 흡수하여 구조부재의 변형이 작게 일어나도록 작용한다.



(a) 기존의 전통적인 내진구조

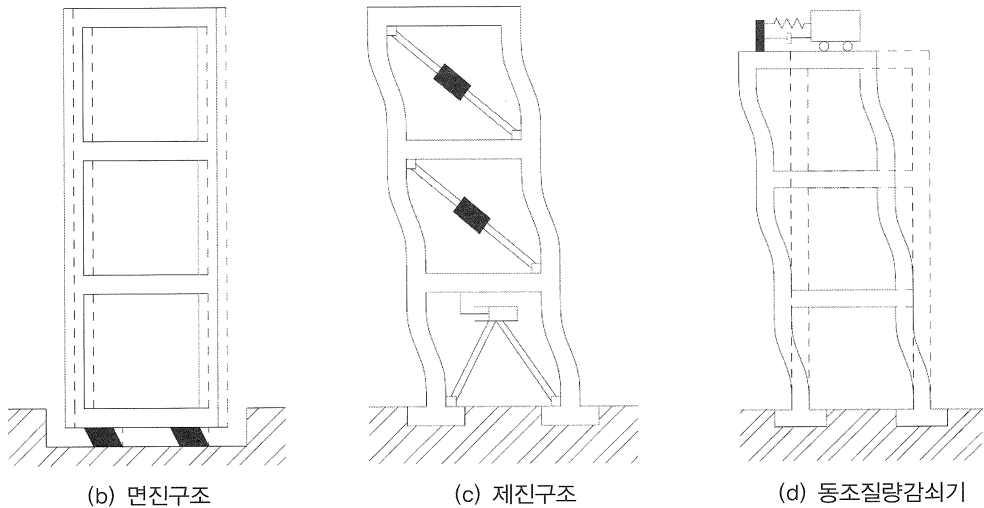


그림 2.6 내진구조 시스템

이 시스템은 그림 2.6(c)에 도시화한 것처럼 골조의 다양한 부분에 설치되고, 교체가 가능한 제진댐퍼나 항복부재로 구성된다. 동조감쇠기 또한 이 시스템에 속한다. 이 구조물의 응답은 진동에너지를 구조물에 설치되어 있는 진동자로 이동함으로써 감소된다. 그림 2.6(d)는 구조물에서 동조질량댐퍼의 전형적인 거동을 보여준다.

수동제진에 의한 보호시스템에 관하여 진행한 분석적이고 실험적인 연구에서는 지진



을 받는 구조물에 보호시스템 적용이 적합하다고 강하게 주장해 왔다. 이러한 수동제진 장치들은 실제 업무를 실행하는 데 신뢰성 있고, 매우 안정된 거동을 하는 것으로 알려져 있다. 에너지소산 장치의 구조적 실행을 위한 설계지침의 공식화와 구조설계규준은 이러한 기술들의 사용이 촉진되는 데 중요한 역할을 한다. 이 시스템은 기존의 구조물 보강뿐만 아니라 신축건물의 설계에도 고려되고 있다.

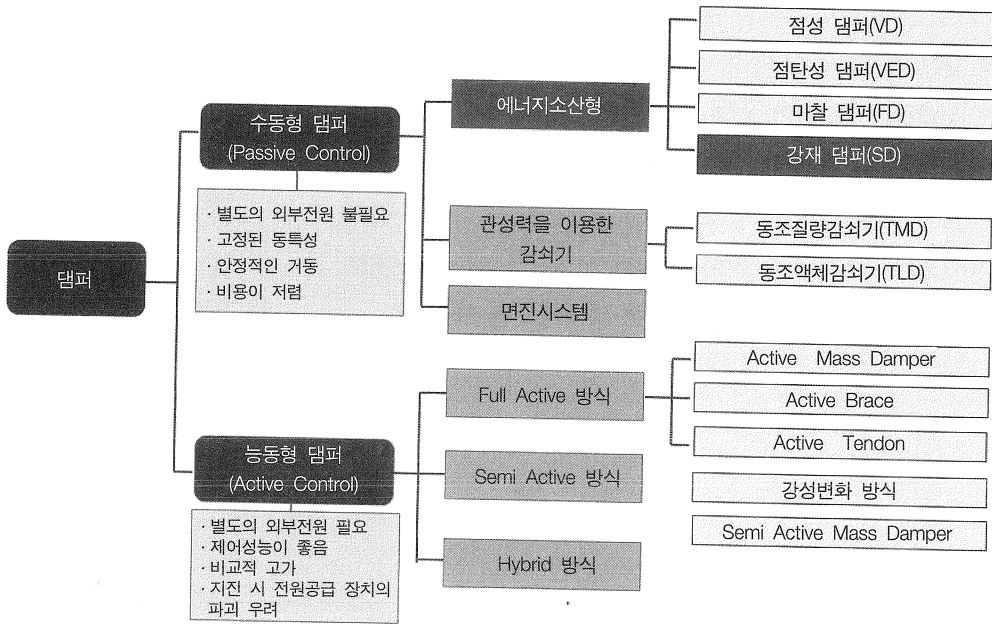


그림 2.7 제진장치(댐퍼)의 분류

### 2.3.2 수동제어형 제진장치

에너지소산에 의한 수동형 제진장치는 그림 2.7 및 그림 2.8과 같이 점성댐퍼(VD ; Viscous damper), 점탄성댐퍼(VE ; Visco-elastic damper), 강재댐퍼(SD ; Steel damper) 및 마찰댐퍼(FD ; Friction damper) 등 크게 4가지로 나눌 수 있으며, 상황에 따라서 다양하게 적용되고 있다(Benavent-Climent 등, 2010).

이러한 수동형 제진장치는 각각의 특성과 제한이 있다. 장치설계는 힘-변형 특성과 설치 위치의 영향을 많이 받는다. 전통적인 내진설계에 의존하여 설계된 일반적인 구조 시스템은 설계지진력이 가해지면 비탄성범위로 넘어갈 것이다. 그러나 비탄성거동으로 인한 피해를 방지하기 위해 추가된 제진장치는 구조부재가 탄성거동을 하도록 설계된다. 그림 2.8에는 각 댐퍼의 특성에 대해 간단히 요약하였다. 그림의 식으로부터 점성댐퍼

나 점탄성댐퍼는 속도의존형임을 알 수 있고, 강재댐퍼와 마찰댐퍼는 변위의존형 이력댐퍼라는 사실을 알 수 있다. 또한 점(탄)성댐퍼는 온도의존성도 있기 때문에 온도에 따른 이력특성을 잘 고려하여 설계해야 한다. 재료 측면에서 점성댐퍼는 실리콘액체 등의 점성유체를 사용하고, 점탄성댐퍼는 아크릴, 부타디엔 또는 고감쇠 고무 등을 재료로 각 특성에 맞게 사용할 수 있다. 강재댐퍼는 재료 자체의 비선형 특성을 최대한 발휘해야 하므로 연성능력이 좋은 강재를 사용하는 것이 유리하며, 마찰댐퍼의 경우 안정된 이력 특성을 발휘하는 마찰패드의 선택이 또한 중요하다.

그림 2.9는 설치방법에 따른 댐퍼의 분류를 나타낸 것이다. 즉 각 댐퍼별로 가새타입(Brace type), 벽타입(Wall type), 전단링크타입(Shear link type) 및 스티드타입(Stud type) 등으로 분류할 수 있다. 이러한 설치방법은 건물의 종류 및 업무형태에 따른 사용자들의 동선을 효율적으로 확보하도록 하는 조건을 조사한 후에 가장 적합한 설치방법을 선택하여 적용할 수 있다.

다음은 수동형 에너지소산장치에 대하여 기존 해외연구를 중심으로 살펴보고자 한다.

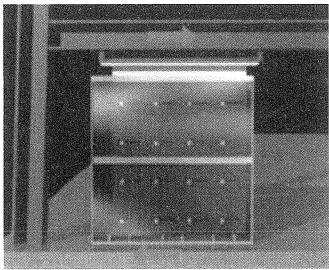
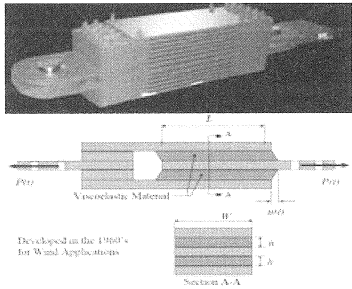
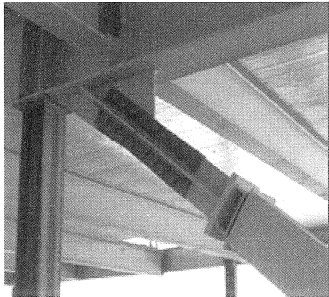
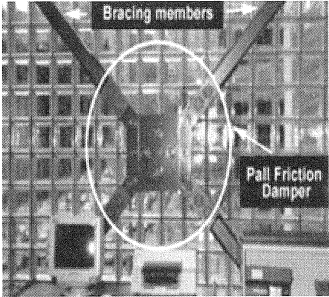
| 점성댐퍼  | 점탄성댐퍼  |
|---|--|
|   |   |
| $F = C\dot{u}$  | $F = K(\omega)u + C(\omega)\dot{u}$  |
| 강재댐퍼  | 마찰댐퍼   |
|  |  |
| $F = K \cdot u$   | $F = \mu \cdot N$  |

그림 2.8 수동형 에너지소산 장치

|        | 점성댐퍼  | 점탄성댐퍼   | 강제댐퍼  | 마찰댐퍼   |
|--------|---|---|---|--|
| 가새타입   |  |  |  |  |
| 벽타입    |  |  |  |  |
| 전단링크타입 |  |  |  |  |
| 스터드타입  |  |  |  |  |

그림 2.9 설치방법에 따른 분류

### (1) 점성댐퍼

본래 항공우주와 자동차산업에서 충격과 진동분리 시스템으로 사용된 점성댐퍼는 유도된 구멍을 통하여 흐르는 점성유체의 저항원리로 작동한다. 그림 2.10은 점성댐퍼의 이력특성 및 사례를 나타낸다. 가해지는 에너지는 유동분자와 장치구성요소 간의 마찰로 인한 점성열에 의해 소산된다. 여러 점성물질이 구조물의 강성과 감쇠특성을 강화하기 위해 고려된다. 점성댐퍼는 선형 혹은 비선형 점성 거동을 하기 때문에 이러한 특성을 잘 반영하여 설계할 수 있다. 점성댐퍼로 인한 다른 장점은 점성력은 변위에 의존하는 다른 힘과 달리 구조부재에서 발달된 최대 힘이 직접적으로 추가되지 않는다는 것이다. 이는 점성댐퍼로 보강하여 약한 기둥의 압축파괴를 예방할 수 있는 이로운 속성이다.

여러 수학적 모델은 이러한 장치들의 거동을 예상하기 위해 제안되어왔다. 감쇠장치와 스프링부재가 직렬로 연결된 고전적 맥스웰(Maxwell)모델은 관심 있는 진동수영역 내에서 점성댐퍼의 역학적 성질에 대한 의존성을 보여주기엔 적절하다(Constantinou 등, 1993). 일반화된 Maxwell모델 또한 분수 도함수의 개념을 바탕으로 제안되어 왔다. 하지만 일반적인 적용을 위해 점성댐퍼는 피스톤의 속력에 직접적으로 비례하는 감쇠력을 가지는 간단한 감쇠부재로 모델링될 수 있다.

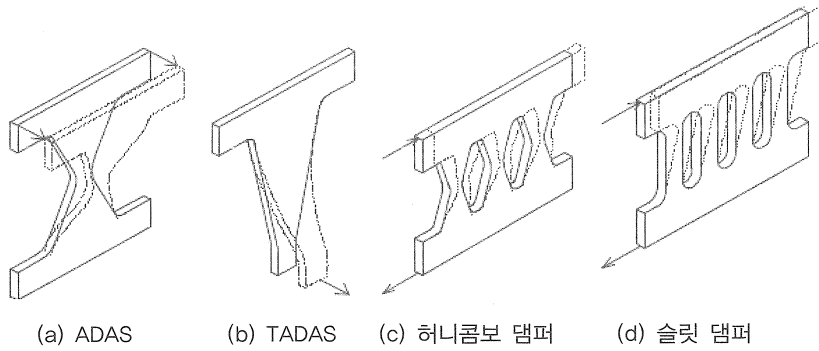


그림 2.10 기존의 강제댐퍼

## (2) 점탄성댐퍼

전형적인 점탄성댐퍼는 강판 사이에 접착된 중합의 물질층으로 구성된다(그림 2.11 참조). 이러한 장치들은 반복적인 전단변형이 일어날 때, 진동에너지가 열의 형태로 소산되도록 설계된다. 점탄성댐퍼는 초고층빌딩에서 풍응답을 제어하기 위해 성공적으로 적용되어 왔다. 최근에는 더 분석적이고 실험적인 연구들이 수행되어 다양한 작동조건 하에서 구조물의 지진응답을 감소시켜 점탄성댐퍼의 효율성을 증명하고 있다. 점탄성 댐퍼는 지진에 대비하여 건물을 보강하고, 새로운 시설공사에 제안되고 사용되어 왔다.

- 사용재료
  - 실리콘 유체
- 의존성
  - 속도
  - 변형
  - 보통의 온도 의존성

Damped Force,  $P$

Damped Displacement,  $u$

San Francisco State Office Building  
San Francisco, CA

Huntington Tower  
Boston, MA

**힘은 속성에 비례함**

점성벽체 댐퍼

점성유체 댐퍼

그림 2.11 점성댐퍼

광범위한 실험이 각 댐퍼의 힘-변형과 에너지소산 특성을 규정짓기 위해 수행되고 있다. 점탄성 중합체의 역학적 특성은 매우 복잡하고, 다양한 요소에 의존한다. 주변의 온도와 반복적인 거동으로 인한 점탄성 물질 내의 온도상승에 따른 영향이 조사되었다. 가진 진동수와 전단변형에 대한 점탄성댐퍼의 강성과 감쇠특성의 의존성은 다양한 레벨의 정확성과 정교함으로 고려된다. 여러 연구자는 Kelvin-Voight, Maxwell과 선형 이력부재들을 고려함으로써 모델링 문제에 대해 고심해왔다. 분수 도함수의 개념과 Boltzman의 중첩원리 또한 댐퍼거동을 예상하기 위해 제안되어 왔다. 이 개선된 모델들은 매우 유용한 연구적용의 목적을 제공하고 있지만 간소화된 모델들 또한 실제적인 설계구현을 위해 필요하다. 이와 관련하여 구조물의 내진성능 강화를 위해 실용적인 설계지침의 발달과 점탄성댐퍼 구현에 관한 절차는 연구자와 엔지니어링 전문가들의 관심을 받고 있다.

### (3) 강재댐퍼

구조부재의 비탄성변형은 가해지는 지진에너지의 상당한 양을 소산시킬 수 있다. 전통적인 내진설계 절차는 탄성으로 산정된 하중보다 상당히 작은 설계하중을 규정하여 이 사실을 이용한다. 즉 탄성에 기초한 하중을 반응수정계수로 나눈 값을 설계 밀면 전단력으로 정하여 사용하고 있다. 그러나 구조부재의 비탄성변형은 영구적인 변형을 초래하게 된다. 따라서 강진에 저항하고, 복구 가능한 최소한의 피해를 위한 대안은 하중전달부재 내의 에너지소산 요구량을 줄이기 위해 1970년대 초반에 최초로 제안되었다. 이러한 목적으로 특별히 설계된 강재댐퍼의 항복을 통해 구조물 내의 선택된 위치에서 진동에너지의 상당한 비율이 흡수되거나 소모된다. 구조체로부터 보호시스템, 즉 제진 시스템이 분리되어 설계되기 때문에 강진 발생 이후 피해를 입었을 경우 댐퍼는 구조물의 퓨즈와 같이 교체할 수 있다.

앞에서 언급한 점(탄)성댐퍼와 비교할 때 강재댐퍼는 가장 대중화되어 있고, 다수의 장치가 제안 및 적용되었다(그림 2.12 참조). 강재댐퍼는 다양한 방법으로 항복메커니즘을 달성할 수 있다. 잘 알려진 ADAS댐퍼 또는 TADAS댐퍼의 경우에는 그림 2.10(a)~(b)와 같이 강판의 면외변형에 의해 에너지를 흡수한다. 허니컴댐퍼 또는 슬릿댐퍼의 경우에는 다수의 오프닝이 있는 강판의 면내 전단변형메커니즘에 의해 작동되고, 에너지는 오프닝 사이의 스트럿 힘변형에 의해 흡수하도록 계획되었다. 또한 강판패널의 전단변형에 의해 에너지를 흡수하는 댐퍼도 개발되어 적용되고 있고, 최근 부재의 축변형에 의해 에너지를 흡수하는 비좌굴가새(Buckling Restrained Brace ; BRB)는 우수한 성능으



로 인해 국내·외에서 가장 많이 적용되고 있으며, 국내의 구조설계기준에도 반영되어 있다.

장치들을 특수한 적용에 대하여 설계하기 위해서는 임의의 반복재하 하에 예상되는 힘-변형응답을 특징짓는 것이 필요하다. 완전탄소성이나 항복 후 변형경화 거동하는 이 선형과 같은 이상화된 모델은 여러 연구에서 적용되었다.

Ramberg-Osgood 수식은 각 장치의 실험으로부터 얻어진 실험데이터를 맞추는 데 사용된다. Ozdemir모델의 확대는 다축하중조건과 관련 있는 상황을 고려하기 위해 발달되어 왔다. 이러한 장치의 모델링은 보다 역학적인 접근법을 도입함으로써 개선된 이력모델을 반영하였다. 큰 변형이론으로 결합된 비선형구성모델은 장치의 힘-변형모델을 발달시키기 위하여 사용된다. 2차원 소성모델을 바탕으로 한 한정된 부재공식은 풍하중과 지진하중에 대한 장치의 거동을 예상하기 위해 적용된다. 이러한 역학적 접근법의 중요한 이점은 요소 실험의 요구량/요구조건을 감소시키는 장치의 적합한 기하학적 배열로 이력모델을 합리적으로 규정짓기 위해 사용될 수 있다는 것이다.

구조물의 내진성능을 향상시키는 강재댐퍼의 효율성은 거동을 지배하는 변수의 적절한 선택에 의존한다. 수치적이고 분석적인 조사의 결과는 각 댐퍼의 설계와 관련 있는 주요변수, 즉 브레이스 강성과 장치 강성의 비율, 가새-댐퍼조립체 강성과 장치 강성의 비율, 조립체 강성과 해당 층강성의 비율 등이 있다.

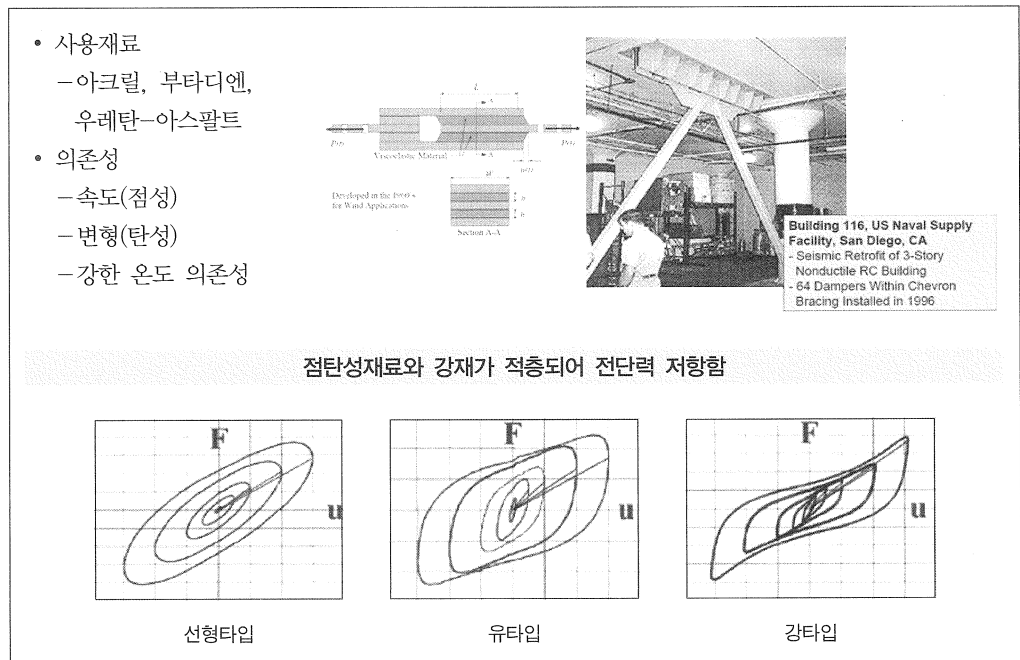


그림 2.12 점탄성댐퍼

#### (4) 마찰댐퍼

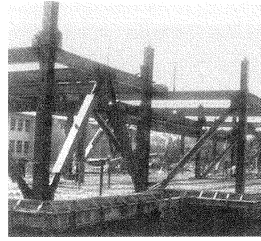
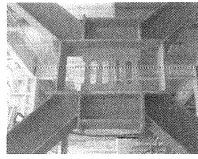
이 장치는 두 면 사이에서 미끄러지면서 상호 간에 발생하는 저항력에 의존한다(그림 2.13 참조). 강진이 발생하는 동안 공진진동수에 의해 기본모드가 변화하는 동시에 마찰에 의해 장치가 에너지를 소산하며 예정된 하중에서 미끄러진다. 수세기 동안 움직임을 효과적으로 제어하기 위해 마찰장치를 사용해왔지만, 토목구조물에 지진응답을 제어하기 위해 적용하는 마찰장치의 발달은 1970년대 후반에 개발되었다. 이로부터 다양한 마찰댐퍼, 즉 X가새형태의 마찰댐퍼, 슬롯볼트 연결형, Sumitomo 마찰댐퍼 등이 개발되고 적용되어 왔다. 이 장치들은 역학적 복잡성과 마찰면에 사용되는 물질이 다르다.

마찰댐퍼는 다양한 가진동조건 하에 많은 사이클 수에 대해 온도에 민감하지 않고, 믿을 수 있는 성능과 안정적인 이력거동을 가지고 있다. 마지막 특징은 지진이 오래 지속되는 동안 구조물을 보호하기 위해 설치된 장치가 기대되는 형상이다.

마찰댐퍼의 이력거동 특징을 나타내기 위하여 다양한 모델이 사용된다. 가장 흔한 모델은 힘-변형관계가 완전탄소성 이상화로 주어지는 이선형 모델이다. 다양한 단계의 경화모델은 다양한 정도의 강성을 가진 장치의 고정된 상태에서 미끄러지는 과정을 설명하기 위해 제안된다. 다른 연구는 Bouc-Wen 1차원 모델의 매끄러운 Ozdemir의 형태를 포함한다.

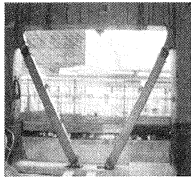
이는 점소성 원리를 바탕으로, 점진적인 형태의 모델이 탄성에서부터 미끄러지는 상태까지의 지속적인 이행을 제공한다. 임의의 반복 움직임에 대하여 과도기 형태를 계속 기록하는 것은 필요하지 않기 때문에 계산을 용이하게 하는 이 모델의 변수는 실험데이터로부터 곡면 조정 절차를 통해 산정된다. 마찰댐퍼의 효율적인 설계를 위한 중요한 주제는 구조물의 응답과 브레이스 강성-해당층 강성의 비율을 최소화하기 위한 미끄럼하중 분배와 관련 있다.

- 사용재료
  - 강재, 납 및 합금
- 의존성
  - 변형

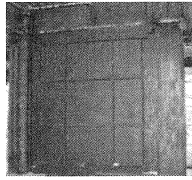


**Plant and Environmental Sciences Replacement Facility**  
 - New Three-Story Building on UC Davis Campus  
 - First Building in USA to Use Unbonded Brace Damper  
 - 132 Unbonded Braced Frames with Diagonal or Chevron Brace Installation  
 - Cost of Dampers = 0.5% of Building Cost

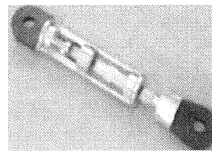
### 축방향 항복과 전단항복



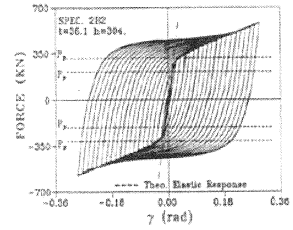
축방향 항복 댐퍼



전단항복 댐퍼



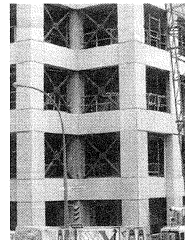
납 댐퍼



강재댐퍼이력

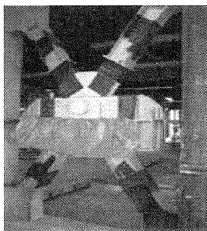
그림 2.13 강재댐퍼

- 사용재료
  - 강재와 마찰패드
- 의존성
  - 변형

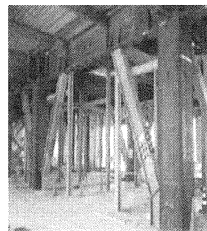


**McConnell Library at Concordia University, Montreal, Canada**  
 - Two Interconnected Buildings of 6 and 10 Stories  
 - RC Frames with Flat Slabs  
 - 143 Cross-Bracing Friction Dampers Installed in 1987  
 - 60 Dampers Exposed for Aesthetics

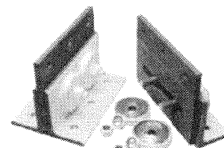
### 접촉면의 마찰력에 의한 완전소성 거동



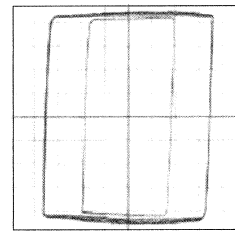
전단링크타입



가새타입



마찰접촉면



마찰댐퍼이력

그림 2.14 마찰댐퍼

## 2.4 제진설계법

### 2.4.1 제진구조 설계법의 발달

제진구조 설계법은 전 세계적으로 강진지역에서 주로 각 지역의 특성에 맞게 규정하여 사용해 왔다. 국내에는 아직까지 제진구조 설계법이 기준화되어 있지는 않지만 내진구조에 관한 사항은 주로 미국의 기준을 모태로 하고 있다(KBC 2009). 따라서 향후 개정될 국내의 구조에 관한 기준(가칭 KBC 2015)에는 제진구조설계법이 반영될 예정이며, 이 역시 미국의 기준을 기반으로 하여 제정 중에 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 장에서는 전 세계적인 제진설계법을 다루기보다는 미국기준을 중심으로 간단히 기술하고자 한다.

그림 2.14는 제진구조 설계법의 태동에 관하여 간단히 나타낸 것이다. 제진구조 설계법은 NEHRP 2000 Provisions의 부록 부분에서 제시되기 시작했으며, 이후 NEHRP 2003 Provisions에서 정식으로 본문에서 『Structures with Damping Systems』의 제목으로 한 장으로 지칭화되었다.

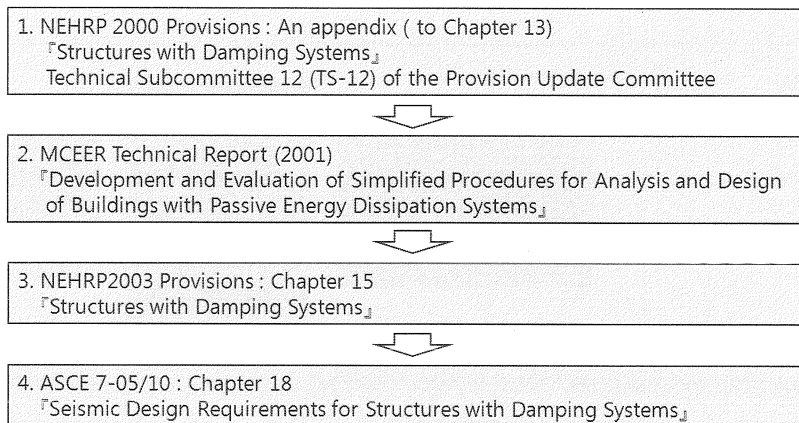


그림 2.14 제진구조 설계법의 태동

그리고 ASCE 7-05의 본문 18장에 『Seismic Design Requirements for Structures with Damping Systems』의 제목으로 정식으로 기준화되었다. 이하에 이러한 설계법의 발달사항에 대해 자세히 기술하였다.

건축물의 에너지소산 또는 제진장치의 적용을 위한 가이드라인은 구조엔지니어, 건물 관리인, 구조물 내의 에너지소산 또는 제진장치 적용을 담당하는 관리자들을 위하여 북

캘리포니아구조협회(SEAONC ; Engineers Association of Northern California)에서 제안되기 시작하였다. 이 가이드라인은 1989년 북캘리포니아의 Loma Prieta지진으로 광범위한 구조물의 피해와 감쇠장치 판매사의 출현으로 제진장치에 대한 관심이 커지면서 준비되었다. 이 가이드라인의 목적은 입력된 지진에너지의 소산을 중력저항시스템의 구조요소가 아닌 제진장치가 담당하게 하는 데 있다. 그렇게 함으로써 강진의 흔들림에도 복구 및 영업중단에 드는 비용이 감소되었다.

1990년 중반, FEMA(Federal Emergency Management Agency)는 구조물의 복구를 위한 가이드라인 발전을 위해 자금을 지원했다. 지진해석 및 평가의 새로운 4가지 방법이 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings ; FEMA Reports 273 and 274에 소개되었다 : (1) 선형정적해석, (2) 선형동적해석, (4) 비선형정적해석, (5) 비선형동적해석 등 4가지 방법 모두 변위를 기반으로 하고, 부재검토를 위해 직접 또는 간접적으로 변위와 관련된 정보를 활용하여 해석한다. 즉 FEMA 273과 274 방법은 힘에서 변형으로 초점을 맞추어 해석, 설계 및 평가하기 때문에 내진설계에 대한 인식의 대전환을 명확히 보여준다. 구조물 부재의 거동은 변형지배(보의 휨모멘트와 같은 연성거동) 또는 하중지배(기둥의 전단력과 같은 취성거동)로 특징짓는다. 변형지배거동에 대한 회전한계는 변형기반해석방법으로 측정된 요구회전과 비교하기 위하여 FEMA 273의 내용에 나타나 있다.

강도한계는 매뉴얼과 기준에 나와 있는 것과 유사한 방법을 이용한 하중지배거동에 대하여 수립되어 있다. 수동형 제진댐퍼가 적용된 구조물에 관해서는 다음과 같은 기본 원리가 포함되어 있다.

- ① 댐퍼의 공간적인 분배(구조물의 각 방향과 각 층에 대하여)
- ② 댐퍼의 중복연결(거동을 같이 하는 라인에 따라 최소한 2개 배치)
- ③ 최대 고려 지진에 대하여 파단을 피하기 위해 설계된 댐퍼와 그 연결부
- ④ 탄성상태에 머물도록 설계된 기초로 댐퍼력을 전달하는 부재

1997년, BSSC(Building Seismic Safety Council)의 Technical Subcommittee 12(TS-12)는 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures에 포함하기 위하여 제진시스템과 장치에 대한 해석, 설계, 실험 방법을 발달시키는 업무를 부여받았다. 그 결과로 생긴 조항은 재래식 구조물에 대하여 NEHRP Recommended Provisions에 제시된 사항과 100% 일치하도록 요구되었다. 제진구조물에 대한 등가수평력과 모드해석법은 NEHRP Rehabilitation Guidelines(FEMA 273 and 274)을 기반으로 하지만 다음 사항에 대한 기본가정이 잠



재되어 있다고 할 수 있다.

- ① 건물의 붕괴메커니즘은 1차 모드형상이나 역삼각형 같은 다른 모드특성을 이용하여 건물의 높이까지 변위 분배를 합리적으로 측정할 수 있게 단자유도도 가정한다.
- ② 건물은 층레벨별 단자유도 메커니즘을 바탕으로 주요 각 방향에 대하여 해석된다.
- ③ 건물의 비선형응답은 탄소성 관계로 표현될 수 있다.
- ④ 건물의 항복강도는 간단한 소성해석이나 명시된 최소밀면전단력과 NEHRP Recommended Provisions에 제시된 반응수정계수(R), 골조시스템의 초과강도계수( $\Omega_0$ ), 변위중폭 계수( $C_d$ ) 등의 사용으로 계산할 수 있다. TS-12의 업무를 통해 제진구조 설계에 관해서는 2000 NEHRP Recommended Provisions의 부록에서 처음 선보였고, 2003 NEHRP Recommended Provisions(BSSC 2004)에 신규로 추가된 “Structures with Damping Systems”이란 제목의 한 장이 되었다. 최근 2003 NEHRP Recommended Provisions은 재정비되었고, “건물과 그 외 구조물을 위한 최소설계하중”이라는 제목으로 ASCE/SIE 7-05 Standard에 포함되었다. ASCE/SEI 7-05 standard의 지진하중 조항은 미국에서 사용되던 2006 International Building Code(ICC 2006)과 the Building Construction and Safety Code (NFPA 2006)의 참조에 의해 상당히 적용되었다.

이와 같은 요구조건을 만족시키기 위해 실무에 적용할 수 있는 제진구조물의 설계법은 구조부재 및 제진장치의 에너지 소산능력을 적절히 평가할 수 있어야만 하며, 구조실무자가 익숙한 선형 해석으로도 제진구조물의 내진성능 예측이 가능해야 한다. 이와 같은 요구조건을 만족시키는 대표적인 제진구조물 설계법은 크게 강도기반 설계법, 변위기반 설계법, 그리고 에너지기반 설계법으로 구분할 수 있다. 하지만 변위기반 설계법의 많은 부분이 이미 대표적인 강도기반 설계법 중 하나인 ASCE 7-05(혹은 ASCE 7-10)의 제진구조 설계법에서 포함되어 있다고 할 수 있다.

#### 2.4.2 강도기반 설계법

ASCE 7-05 혹은 ASCE 7-10의 18장에서는 제진구조물 설계를 위해 제진구조물의 강도를 기반으로 한 지진력 결정방법과 제진구조물에 대한 설계요구조건을 제시하고 있다. ASCE 7에서 제시하고 있는 강도기반 제진구조물 설계법은 일반 내진구조물 설계법과 유사한 절차를 수행하도록 함으로써 실무 적용성을 극대화한 설계절차이다. 제진구조물의 지진력저항 시스템을 반응수정계수와 같은 내진설계변수를 이용하여 이선형 거동으

로 가정하고, 제진장치에 의한 에너지소산량을 이용하여 구한 등가점성감쇠비(Equivalent viscous damping ratio)와 지진력저항 시스템의 비선형 이력거동에 의한 감쇠비 합으로 구한 유효점성감쇠비(Effective viscous damping ratio)로 설계지진 응답가속도를 감소시켜 밀면전단력을 구한 후 지진력저항 시스템을 설계하는 절차를 제시하고 있다. 제진장치 설계는 설계지진뿐만 아니라 최대지진에 대한 요구성능을 계산하여 이를 만족시키도록 명시하고 있다.

제진장치를 적용한 구조물에 대하여 2003 NEHRP Recommended Provisions(BSSC 2004)는 관심모드의 유효감쇠율( $\beta$ )을 근거로 하는 감쇠계수( $B$ )에 의하여 감소된 구조물의 응답을 구체화한다(표 2.1 참조). 감쇠구조물의 기본모드 유효감쇠는 구조물의 비선형 힘-변형 특성을 기반으로 한다. 선형해석방법과 함께 사용하기 위하여 구조물의 비선형 특성은 반응수정계수( $R$ ), 골조시스템의 초과강도계수( $\Omega_0$ ), 변위증폭계수( $C_d$ ) 등을 고려한다. 비선형해석방법을 위하여 구조물의 특성은 부재의 항복 후 거동을 명백하게 반영한 모델링을 바탕으로 한다.

그림 2.15는 설계변위에서 유효감쇠( $B_{1D}$ ) 때문에 기인한 기본모드 설계지진응답의 감소를 나타낸다. 이 그림에서 두 연성스펙트럼이 보이는데, 한 가지는 공칭 고유감쇠 5%인 구조물(1초 주기의 스펙트럼 응답가속도 변수  $S_{D1}$ )에 대한 것과 다른 한 가지는 공칭 5%를 넘는 고유감쇠와 제진 시스템으로부터 추가된 점성감쇠에 의해 제공되는 추가감쇠가 적용된 구조물에 대한 것이다.

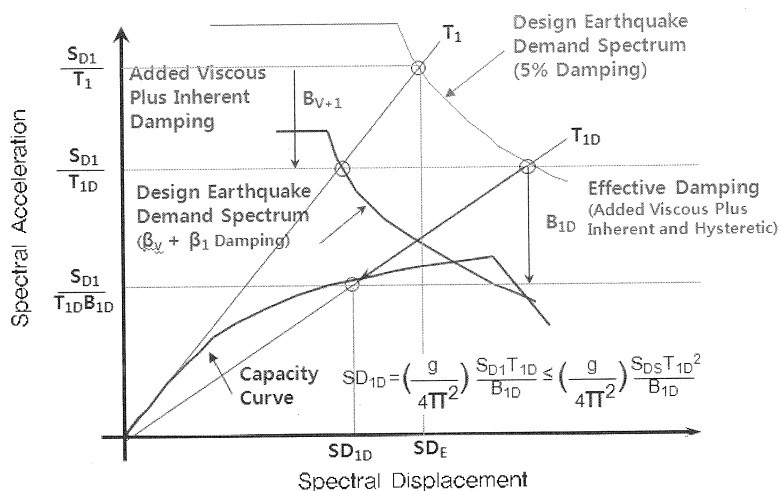


그림 2.15 유효감쇠와 설계요구도의 감소

구조물 성능곡선은 기본모드에 응답하는 구조물의 비선형 거동을 보여주고, 스펙트럼 가속도/변위좌표에 표시된다. 교차점(성능점)은 요구곡선과 구조물이 예상되는 성능을 정의하는 성능곡선 사이에 존재한다. 구조물이 탄성상태에 머물고 있다고 가정하면, 성능점은 고려중인 방향으로 구조물의 탄성기본주기인 점( $T_1$ )을 잇는 선을 따라 존재할 것이다. 비탄성거동을 설명하면 성능점은  $T_{1D}$ 가 표시된 선을 따라 있고,  $T_{1D}$ 은 고려중인 방향의 설계스펙트럼변위( $SD_{1D}$ )의 기본모드 유효주기를 나타낸다( $T_{1D}$ 은 설계변위의 교차하는 강성을 바탕으로 한다). 그림 2.15에 나타나 있는 바와 같이 유효주기의 요구 스펙트럼은 3가지 요소로부터 기여한 유효감쇠계수  $B_{1D}$ 에 따라 감소한다.

- ① 고유감쇠( $\beta_I$ ) : 추가점성감쇠를 제외한 항복 또는 바로 아래에서의 구조물 고유감쇠 ( $\beta_I$ 는 일반적으로 임계의 5%로 가정한다)
- ② 이력감쇠( $\beta_H$ ) : 관심진폭에서 제진 시스템의 부재와 지진하중저항 시스템의 항복 후 이력감쇠(항복 또는 바로 아래에서 임계의 0%를 갖는다.)
- ③ 추가점성감쇠( $\beta_{mV}$ ) : m차모드에서 제진 시스템의 부재에서 에너지소산의 점성요소 따라서 제진구조물의 감쇠비는 이상 세 가지의 감쇠비를 합한 값으로 계산하지만  $\beta_H$ 와  $\beta_{Vm}$ 는 지진력저항 시스템(SFRS, seismic force resisting system)의 항복변위에 대한 설계지진시 변위의 비로 계산되는 연성도  $\mu$ 에 따라 다르게 된다. 이를 고려한 제진구조물의 감쇠비는

$$\beta_m = \beta_I + \beta_{mV} \sqrt{\mu} + \beta_H \quad (2.1)$$

$$\beta_H = q_H(0.64 - \beta_I)(1 - \frac{1}{\mu}), \quad 0.5 \leq q_H = 0.67 \frac{T_S}{T_1} \leq 1.0 \quad (2.2)$$

으로 구하며,  $q_H$ 는 지진력저항 시스템의 이력곡선에 의해 결정되는 값이다.  $T_S$ 는 설계 가속도스펙트럼에서 가속도 일정구간에서 속도 일정구간으로 전이하는 주기이다. 이력감쇠와 추가점성감쇠 모두 진폭에 의존하고, 총 유효감쇠에 대한 상대적인 기여는 구조물의 항복 후 응답의 양에 따라 변한다. 예를 들어 구조물에 댐퍼를 추가하는 것은 구조물의 항복 후 변위를 감소시키므로 지진력저항 시스템에 의해 제공되는 이력감쇠의 양도 감소한다. 변위가 첫 번째 항복점으로 감소된다면 유효감쇠의 이력요소는 0이 되고, 유효감쇠는 고유감쇠와 추가된 점성감쇠의 합과 같을 것이다.

ASCE 7-10에서는 설계지진 시 지진력저항 시스템의 과도한 변형을 방지하기 위하여 지진력저항 시스템의 최대 연성비를 다음 식으로 제한하고 있다.

$$T_1 \leq T_S \text{인 경우, } \mu_{\max} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{R}{\Omega_0 I} \right)^2 + 1 \right) \quad (2.3)$$

$$T_1 \geq T_S \text{인 경우, } \mu_{\max} = \frac{R}{\Omega_0 I} \quad (2.4)$$

여기서,  $R$  : 반응수정계수

$\Omega_0$  : 초과강도계수

$I$  : 중요도계수이다.

제진장치로 인한 추가 감쇠비는 다음 식을 이용하여 등가점성감쇠비  $\beta_{Vm}$ 를 구한다.

$$\beta_{mV} = \frac{W_{Dm}}{4\pi W_{Sm}} \quad (2.5)$$

$W_{Dm}$ 는  $m$ 차모드에서 모든 제진장치의 에너지소산량이며,  $W_{Sm}$ 는  $m$ 차모드에서 지진 력저항 시스템의 최대변형에너지이다.

지진력저항 시스템과 제진장치의 지진에너지소산능력을 가속도응답스펙트럼을 감소시키는 방식으로 고려한다. 단자유도 구조물의 감쇠비가 증가함에 따라 가속도응답스펙트럼이 감소된다는 연구결과를 바탕으로 각 모드별 가속도응답감소계수  $B_m$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$B_m = \frac{S_a(T_m, \beta_m = 0.05)}{S_a(T_m, \beta_m)} \quad (2.6)$$

$S_a(T_m, \beta_m)$ 는 주기가  $T_m$ 이고, 식 (2.1)로부터 구한 등가점성감쇠가  $\beta_m$ 일 때 가속도응답스펙트럼으로 가속도응답감소계수  $B_m$ 을 표 2.1과 같이 구할 수 있다.

제진구조물의 성능점은 설계가속도스펙트럼에 의해 결정되는 요구성능과 제진구조물이 보유하고 있는 보유내력이 만나는 점으로 설계지진 또는 최대지진 시 제진구조물의 최대변위응답과 최대가속도응답으로 정의할 수 있다. 그림 2.16은 제진구조물의 성능점을 결정하는 일련의 과정을 도시한 것이다. 제진장치가 없는 지진력저항 시스템이 탄성거동을 하는 경우의 성능점은 A로 나타낼 수 있다. 제진장치와 지진력저항 시스템의 소성변형으로 인한 추가 감쇠비는 그림에서 보

표 2.1 가속도스펙트럼 감소계수

| 유효감쇠 [%] | 가속도응답스펙트럼 감소계수 |
|----------|----------------|
| ≤ 2      | 0.8            |
| 5        | 1.0            |
| 10       | 1.2            |
| 20       | 1.5            |
| 30       | 1.8            |
| 40       | 2.1            |
| 50       | 2.4            |
| 60       | 2.7            |
| 70       | 3.0            |
| 80       | 3.3            |
| 90       | 3.6            |
| ≥ 100    | 4.0            |

는 바와 같이 가속도응답스펙트럼을 감소시켜 성능점을 B로 이동시킨다. 뿐만 아니라 지진력저항 시스템의 항복은 유효주기를 증가시켜 제진구조물의 최종 성능점은 C가 된다. 이때 성능점에서의 가속도응답스펙트럼 계수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S_a(T_{eff}, \beta_m) = \frac{S_a(T_m, 0.05)}{B_m} \quad (2.7)$$

그리고 m차모드의 제진구조물의 설계밀면전단력은

$$V_{sm} = \frac{R}{C_d \Omega_0} \frac{S_a(T_m, 0.05)}{B_m} W_m \quad (2.8)$$

으로 구한다. 여기서 R은 반응수정계수, C<sub>d</sub>는 변위증폭계수, Ω<sub>0</sub>는 초과강도계수, W<sub>m</sub>은 m차 모드의 모드중량이다. 가속도응답스펙트럼계수 S<sub>a</sub>(T<sub>eff</sub>, β<sub>m</sub>)에 해당하는 변위 응답은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S_D(T_{eff}, \beta_m) = \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} S_a(T_{eff}, \beta_m) \quad (2.9)$$

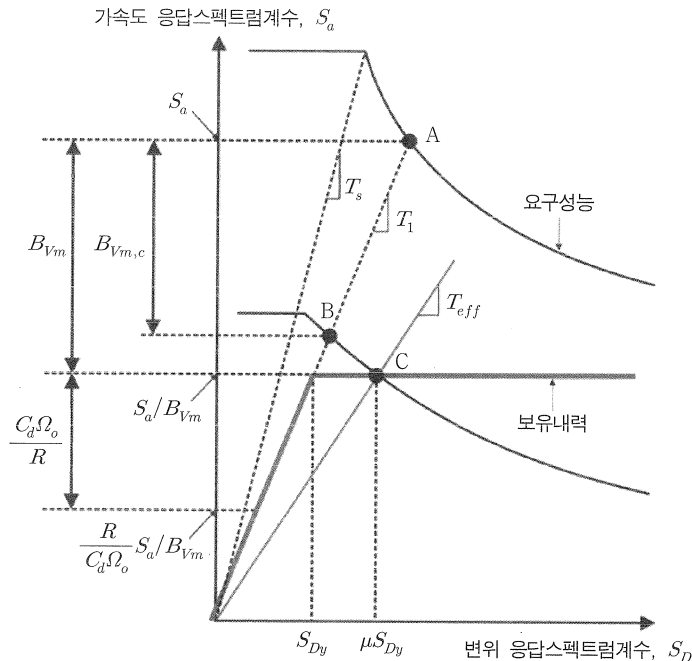


그림 2.16 제진구조물의 성능점 결정(한국면진제진협회, 2012)

### 2.4.3 에너지기반 설계법

현재 전 세계에서 주로 쓰이는 내진설계기법은 내력과 변형이라고 하는 직감적으로 이해하기 쉬운 물리량을 안전성 검증의 척도로 하여 가속도를 하중효과로 평가하고 있으며, 이를 바탕으로 계산한 탄성설계응답을 반응수정계수로 나누어서 골조의 소성변형 능력에 따라 설계지진하중을 낮출 수 있게 설정되어 있다. 그러나 지진을 가속도에 의한 하중효과만으로 평가한 경우 지진 가속도의 불확정성이 매우 크며, 구조부재 또는 구조체의 소성변형 능력의 차이에 의한 영향을 직접적으로 비교하기에는 어려운 점이 있다. 뿐만 아니라 지반가속도를 하중효과로 취급하는 현행 내진설계법에서는 구조물의 손상을 최소화하기 위하여 지반가속도가 클수록 구조물에 작용하는 지진력을 크게 한다.

그러나 지진으로 인한 구조물 피해에 직접적인 원인이 되는 지진입력 에너지양은 지반 가속도에 의존하는 물리량이 아니다. 제진구조에서는 제진장치의 성능이 아무리 우수해도 제진장치의 배치형식에 따라 성능을 발휘하기 위한 효율성이 달라지고, 그 결정방법은 구조물의 형태 및 규모, 제진장치의 종류에 따라 다른 방식을 취해야 한다. 따라서 제진구조의 성능을 극대화하기 위해서는 제진장치의 성능을 충분히 활용할 수 있도록 그 효율성을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 기존의 내진설계법을 이용하면 각 층별, 각 부재별 손상 정도를 직접적으로 예측하기 어렵다는 한계가 존재한다. 구조물의 손상을 보다 합리적으로 예측하기 위해서는 각 층 혹은 각 부재가 흡수한 에너지양을 평가할 수 있어야 한다. 이상에서 나열한 현행 내진설계방법의 문제점을 해결할 수 있다는 점에서 에너지법을 이용한 구조물 특히 제진구조물의 내진설계법은 논리적 당위성을 얻고 있다.

에너지 평형에 근거한 제진구조설계법(이하 에너지법)은 지진에 의해 건축물에 입력되는 에너지의 크기를 산정하고, 건축물이 흡수할 수 있는 에너지의 크기를 지진입력에너지보다 크게 하여 건축물의 안전성을 확보하고자 하는 설계법을 말하며, 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$E_P > E_{IN} \quad (2.10)$$

여기서,  $E_P$ 는 구조물 전체가 소산(또는 흡수)할 수 있는 에너지이며,  $E_{IN}$ 는 총 지진 입력에너지이다. 따라서 건축물의 내진안전성 검증은 지진에 의한 입력에너지를 건축물이 소산할 수 있는가에 의해 판단할 수 있다. 에너지 평형에 기초를 둔 내진설계는 식 (2.10)과 같이 지진에 의한 입력에너지보다 골조의 에너지소산능력을 더 크게 설계해야 한다는 점에서 지진에 의한 입력에너지 특성과 구조물의 에너지소산능력을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이중 입력에너지에 대해서는 지진을 하중과 변형의 곱이라 할 수



있는 에너지로 평가한 경우, 그 입력에너지는 구조물의 총질량과 1차 고유주기에 지배되며, 구조물의 강도 및 강성분포에는 거의 영향을 받지 않는 매우 안정된 양이 된다. 이는 구조물의 강성과 질량의 배치에 따라 변동성이 심한 지반가속도를 하중효과로 취급하는 현행 구조물 내진설계법에 비해 에너지기반 내진설계법이 지진으로 인한 구조물의 거동에 대한 불확실성을 줄일 수 있음을 의미한다. 지진에 의해 건축물에 작용하는 에너지량을 다음 식에 따라 계산한다.

$$E_{IN} = \frac{1}{2} M \cdot V_E^2 \quad (2.11)$$

여기서,  $E_{IN}$ 은 지진에 의한 건축물에 작용하는 에너지양이며,  $M$ 은 건축물 지상 부분의 전 질량(고정하중 및 적재하중과의 합을 중력가속도로 나눈 것),  $V_E$ 는 에너지의 속도환산치로 건축물의 감쇠 등을 고려하여 건축물에 작용하는 지진에너지양의 속도환산치를 별도로 계산하는 것이 가능한 경우에는 당해 속도치환치로 사용한다.

## 2.5 내진보강방법

### 2.5.1 내진보강방법의 종류

내진보강계획은 지진동의 크기를 가정하여 그때 건축물에 미치는 거동을 설정하여 수립하며 주요방침은 다음과 같다.

- ① 강도를 높게 함(강도저항형 보강)
- ② 연성을 향상시킴(연성저항형 보강)
- ③ ①과 ②의 중간형의 건축물(강도·연성저항형 보강)
- ④ 특수방법(면진·제진)을 이용

내진은 구조물 지진력에 대항할 만큼 튼튼하게 건설하는 것이고, 면진은 지진을 피하는 수동적이지만 상당히 내진여유도를 가지는 개념이며, 제진은 효율적으로 지진에 대항하여 지진의 피해를 극복하고자 하는 능동적 개념이다. 내진보강은 그림 2.17과 같이 제진 및 면진설계의 개념을 포함한다.

기존 건축물에 대한 내진보강은 강도가 낮고 연성이 불충분하기 때문에 수행한다. 강도저항형 보강은 일반적으로 벽과 브레이스를 증설한다. 보강 개소가 한정되고 설계가 비교적 쉬워 비용적 측면에서 유리한 경우가 많다.

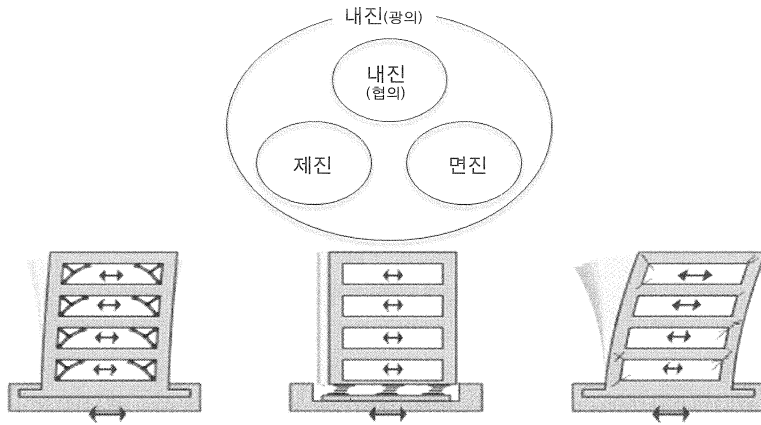


그림 2.17 내진, 제진 및 면진보강

그러나 건축물의 기능이 현저하게 저하할 가능성도 있어 건축물 용도에 따라서는 적합하지 않을 수도 있다. 이 경우에는 연성저항형 보강을 적절하게 병용한다. 강도저항형 보강과 연성저항형 보강 이외에 구조요소의 배치균형을 개선하는 방법도 있다. 내진보강의 효과를 개념적으로 나타내면 그림 2.18과 같다. 표 2.2에는 내진보강방법에 대한 특징을 요약해 놓았다.

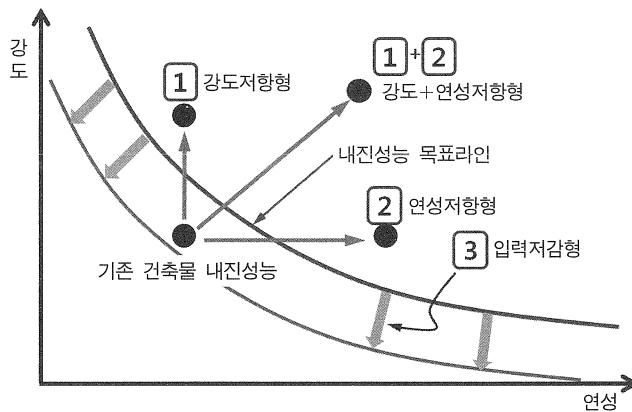


그림 2.18 내진보강방법의 종류

건축물의 내진성능평가 후 건축물 전체적으로 내력이 부족한 경우에는 내진벽 증설 또는 브레이스 등을 신설하며, 건축물을 구성하는 기둥, 보 등의 각각 부재의 단면내력과 연성이 부족한 경우에는 부재단면 보강을 실시한다.

표 2.2 내진보강공법의 분류

| 내진보강공법 종류 |                              | 내진보강공법 특징   |
|-----------|------------------------------|---|
| 1         | 건물의 내력을 향상시키는 방법<br>(강도보강)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 건물의 강도/강성은 증가하나 변형능력은 크지 않다.</li> <li>• 지진력의 증가로 기초보강 비용이 추가된다.</li> <li>• 습식공법으로 각종 작업을 고려하면 공기가 증가한다.</li> <li>• 철골가새의 경우는 좌굴에 의해 급격한 내력저하가 발생한다.</li> </ul> |
| 2         | 건물의 변형능력을 증진시키는 방법<br>(연성보강) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부재단면치수의 변화가 크지 않아 평면계획에 영향이 적다.</li> <li>• 경량 및 고강도의 특징으로 건물 중량에 미치는 영향이 적다.</li> <li>• 보강개소가 많기 때문에 공기가 길어지며 비용 상승이 크다.</li> </ul>                            |
| 3         | 입력저감을 위한 응답제어 방법<br>(제진보강)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 에너지흡수능력이 커서 건물의 안정성을 증대시킨다.</li> <li>• 건물의 응답을 저감시켜 강도/연성보강의 개소가 감소된다.</li> <li>• 보강개소가 적어서 타 보강공법에 비해 건물의 중량이 감소된다.</li> </ul>                                |

표 2.3 강성 및 연성보강기법의 특징

| 부재     | 보강기법        |   | 특징                             |                                      |                              |
|--------|-------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
|        |             |   | 내진성                            | 시공성                                  | 경제성                          |
| 벽체     | RC벽 증설      |    | 강도 증대<br>연성 감소<br>중량 증가        | 습식공법<br>작업공간 요구<br>공기증가              | 저렴<br>부분적인 기초보강<br>으로 시공비 증가 |
|        | 철골가새 보강     |   | 강도 증대<br>연성 일부 증가<br>경량        | 건식공법<br>작업공간 요구<br>공기단축<br>개구부 설치 용이 | RC벽 증설공법<br>대비 고비용           |
|        | 강판보강        |  | 강도 증대<br>연성 증대<br>경량           | 건식공법<br>작업공간 요구                      | RC벽 증설공법<br>대비 고비용           |
|        | PC패널 보강     |  | 강도 증대<br>연성 증대<br>중량 증가        | 건식공법<br>공기단축                         | RC벽 증설공법<br>대비 비용 일부 상승      |
| 기둥 / 보 | 강판보강 (자켓공법) |  | 강도 일부 증대<br>변형능력 증가<br>내화피복 필요 | 현장용접 요구<br>중장비기계 필요                  | 비교적 고비용                      |
|        | 탄소섬유 보강     |  | 강도 일부 증대<br>변형능력 증가<br>내화피복 필요 | 수작업 가능                               | 비교적 고비용                      |

강성보강기법에 비해 연성보강기법은 일반적으로 보강 대상 개소수가 많아 시공이 용이하지 않는 반면, 강성보강기법은 보강 후 인접 부재에 응력이 집중될 수 있으므로 구조계산을 재검토할 필요가 있다. 표 2.3에는 대표적인 강성 및 연성보강기법의 특징을 비교·기술하였다.

내진보강은 건물의 특징이나 여러 가지 요소에 의해 그림 2.19와 같이 다양한 방법으로 이루어진다. 내진보강방법은 보강체의 설치 위치에 따라 구조체 내 보강과 구조물의 외부보강방법으로 나뉜다. 구조체 내 보강방법은 벽체보강, 브레이스보강, 창호시스템 등이 있으며, 구조체와 보강체와의 일체성 확보 및 내력보강 효과가 우수한 장점을 가진다. 그러나 기존의 창호 또는 벽체의 교체로 인해 공사비가 상승할 수 있고, 보강체로 인해 채광 및 통풍이 기존에 비해 저하되며, 시공 시 구조물 사용 및 거주가 불가능하여 시공성, 경제성이 저하될 수도 있다. 구조물의 외부보강방법은 브레이스보강, 토글시스템 등이 있다. 이와 같은 방법은 시공 시 거주가 가능하고 채광 및 통풍 확보가 쉽지만 구조체와 보강체와의 일체성을 확보하기 위해 복잡한 접합상세를 가지므로 시공성 및 경제성이 저하될 수 있다.



그림 2.19 해외 내진보강 사례

## 2.5.2 제진에 의한 내진보강

건축물 리모델링 시 수직·수평증축에 의한 내진보강공사를 실시할 경우에는 중력에 의한 하중과 지진에 의해 추가되는 하중을 동시에 고려하여 계획할 필요가 있다. 수직증축 시 기존 층 및 수직으로 증축되는 층의 비내력벽을 경량화하더라도 기초 및 수직부재(기둥, 벽부재)가 부담해야 할 하중은 매우 크다. 따라서 기존의 강도보강과 연성보강을 사용하여 보강하더라도 제진장치를 사용하여 내진보강을 실시하면 구조물에 입력되는 지진하중을 저감할 수 있고, 결과적으로 강도보강 및 연성보강의 개소가 줄어들어 경제적인 보강설계가 가능하다.

국내에서는 앞서 소개된 내진성능평가 및 보강방안에 의해 내진보강설계가 가능하고, 미국의 ASCE41-06을 사용하여 내진보강을 실시하는 것도 가능하다. 이러한 내진성능평가 및 내진보강방법에는 모두 성능설계에 기반을 두고 있다. 특히 제진에 의한 내진보강을 할 경우에는 ASCE7-10의 제진설계 부분을 적용하여 설계가 가능하다. 조만간 발간 예정인 가칭 KBC 2015에는 ASCE7-10의 제진설계 부분도 일부 포함되어 그 적용성이 더욱 확대될 것으로 보인다.

제진장치를 사용하여 내진보강을 할 경우, 제진보강된 구조물의 내진성능평가를 위한 해석모델의 요구사항은 다음과 같다. 내진보강 후의 내진성능을 평가하기 위한 구조해석에서는 앞에서 살펴본 바와 같이 내진보강공법에 따라 해석모델이 달라진다. 기존에 자주 사용되었던 내력보강형 및 연성보강형의 경우에는 기존의 내진설계에서와 비슷한 프로세스로 모델링이 가능하지만 입력저감형 특히 제진공법에 의한 내진보강을 실시할 경우에는 제진장치를 비롯하여 제진구조물에 준하는 해석모델링이 필요하다. 제진장치에 의한 내진보강을 실시한 경우를 고려하여 KBC 2009에 따라 기존 건물, 내력보강 및 연성보강 구조물을 통틀어 지진력저항 시스템이라 정의하고, 제진장치 및 연결부재를 통틀어 제진 시스템으로 정의하여 해석모델링에 적용하였다. 구조물은 관련기준에서 정의되거나 실험 및 해석을 통하여 동등 이상의 성능이 검증된 구조시스템이 횡력에 저항하기 위하여 요구되는 강도 및 강성을 가져야 하며, 지진력저항 시스템과 제진 시스템의 조합을 통해 허용 층간변위 값을 만족해야 한다.

각 방향에 대한 지진력저항 시스템은 다음의 설계요구사항을 만족시켜야 한다. 단, 실험이나 해석을 통해 동등 이상의 성능이 입증되면 이 조항은 예외가 될 수 있다. 지진력저항 시스템 설계에 사용된 밀면 전단력은 식 (2.12)와 식 (2.13)에 의해 구해진 최소 밀면전단력( $V_{min}$ )보다 커야 한다.

$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (2.12)$$

$$V_{\min} = 0.75 V \quad (2.13)$$

여기서,  $V$ 는 내진설계기준(KBC)의 등가정적해석법에 따라 계산된 해당 방향의 밑면 전단력이며,  $B_{V+I}$ 는 가속도감소계수이다. 단, 다음 제한 사항에 해당하는 경우 지진력 저항 시스템 설계에 사용된 밑면 전단력은  $1.0 V$  이하보다 작아서는 안 된다.

- ① 해당 방향에 대해 비틀림에 저항하는 제진장치가 각 층당 두 개 이하
- ② 지진력저항 시스템이 과도한 평면비정형성과 수직비정형성이 존재

해석이나 실험에서 지진력저항 시스템과의 연결부재 비탄성응답이 제진 시스템에 불리한 영향을 미치는 경우 제진 시스템의 부재는 감소되지 않은 지진하중( $V$ )을 사용한 설계하중에 대해 탄성을 유지하도록 설계되어야 한다.

제진시스템을 가진 구조물의 해석과 설계에서는 관련 기준에 따라 정해진 설계지반운동과 발생 가능한 최대지반운동의 스펙트럼을 사용하여야 한다.

