

# 스터드형 진동제어 강재댐퍼가 장착된 3층 강구조 골조의 강제진동실험에 관한 연구

## A Study on Forced Vibration Tests on a Structure with Stud Type of Vibration Control Damper

이 승 재\*

Lee, Seung-jae

### 요 약

최근 바람 및 지진에 대한 진동제어를 목적으로 한 저항복점강재를 이용한 댐퍼가 많이 사용되고 있다. 그러나 전체 구조물의 진동에 영향을 미치는 저항복점강재의 동적특성 및 지진에너지 소산효과는 명확히 밝혀지지 않고 있다. 본 연구에서는 저항복점강재에 대한 반복재하실험 결과 및 저항복점강재를 장착한 3층 규모의 구조물에 대하여 실시한 강제진동실험의 결과에 대해 보고한다. 또한 저항복점강재의 지진에너지 소산량의 정량적인 평가를 위하여 수학적 이력형모델 및 등가선형해석법을 이용하여 평가한 결과에 대해 보고한다.

### Abstract

In recent years, vibration control damper made of low yield point steel is expected to play an important role in controlling structural vibration induced earthquake and wind. But their dynamic characteristics and energy dissipation effects on the whole structure model are not clarified. In this paper, firstly, we presents the results of cyclic tests on low yield steel dampers. Secondly, forced vibration tests on existence three stories steel structure model with low yield point steel dampers are presented. Lastly, it is estimated energy amount which is dissipated through the hysteresis dampers by using two types of analytical models, hysteresis model and equivalent linear model.

**키워드 :** 진동제어 댐퍼, 강제진동실험, 지진에너지 소산량, 이력형 모델, 등가선형해석

**Keywords :** vibration control damper, forced vibration, earthquake energy dissipation, hysteresis model, equivalent linear model.

## 1. 서 론

장진(強震)이나 강풍(強風)에 의하여 구조물에 입력되어지는 에너지를 흡수하여 구조물의 진동을 억제하는 디바이스로서 다양한 이력감쇠형 제진(制振)댐퍼가 있다. 특히 댐퍼의 재료로서 극저항복점강(極低降伏点鋼)을 사용한 제진댐퍼는 중소지진(中小地震)시의 거주성의 향상과 대지진(大地震)시의 구조물의 손상을 저감시키는 목적으로 최근 연구자의 주목을 받고 있다. 극저항복점강을 사용한 제진댐퍼는, 소성화로 인한 구조감쇠 효과 및 큰 항복비의 재료적 특성, 또한 지진시에 항복을 하더라도 건축물의 연직하중을 직접 지지(支持)하지 않으므로 구조 전체의 붕괴로 연결되지 않는 점과 심한

손상을 입었다 하더라도 간단히 교체가 가능한 점 등으로부터 내진보강 및 보수의 장점이 크다고 할 수 있다.

그러나 이러한 제진댐퍼를 실제의 지반위의 건축물에 장착시켜 지진동(地震動)과 같은 외란(外亂)에 대한 동적거동(動的舉動)은 아직 미해명(未解明) 점이 많다고 할 수 있다.

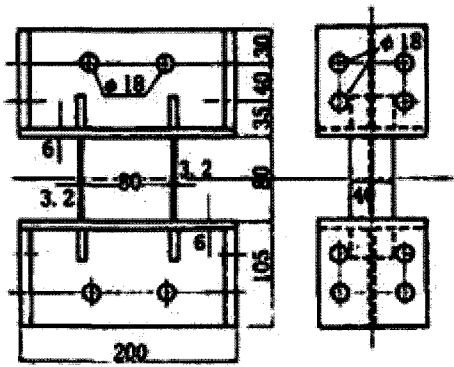
본 연구에서는, 우선 극저항복점강을 이용한 제진댐퍼를 대상으로 하여, 반복재하(反復載荷)실험을 하여 동적거동을 관찰하고, 또한 재하속도(速度)가 이력곡선(履歷曲線)에 미치는 영향에 대해 고찰한다. 다음은 3층 1스팬의 철골구조물에 스투드형식(Stud type)으로 장착하여 기진기(起振機)를 이용한 강제진동실험에 대한 결과를 보고한다. 마지막으로 기진기에 의한 강제진동실험의 결과의 제진댐퍼의 에너지흡수량을 예측하기 위하여, 수학적(數學的) 이력(履歷)모델을 이용한 경우와 등가선형화(等價線形化) 모델을 이용한 경우의 에너지흡수량의 예측(豫測)방법을 제안한다.

\* 정희원, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수 공학박사  
Tel : 041-560-1334 E-mail : leeseung@kut.ac.kr

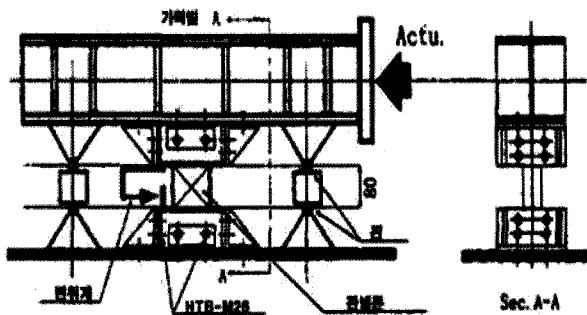
## 2. 극저항복점강을 사용한 제진댐퍼의 반복재하실험

### 2.1 실험개요

시험체는 <그림 1>에 나타내는 것과 같이 중앙부분에 극저항복점강판(鋼板) 80mm×80mm×2mm(폭 두께비 40)를 이용하여 좌우단부(左右端部)에 SS400급의 3.2-80×40mm의 플랜지를 용접하였다. 극저항복점강판 상하단부(上下端部)에 SS400급의 6-200mm×100mm 강판을 용접하고, 구조물 혹은 재하실험 장치와의 연결을 고려하여 H형강 H-200×100×5.5×8을 절단한 부재를 용접했다. 극저항복점강 소재(素材)의



<그림 1> 시험체 형상



<그림 2> 재하실험 장치

<표 1> 소재의 기계적 성질

항복강도 (tonf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (tonf/cm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	전단항복강도 (tonf/cm <sup>2</sup> )
0.82	2.51	40.7	0.48

<표 2> 소재의 화학적 성분(%)

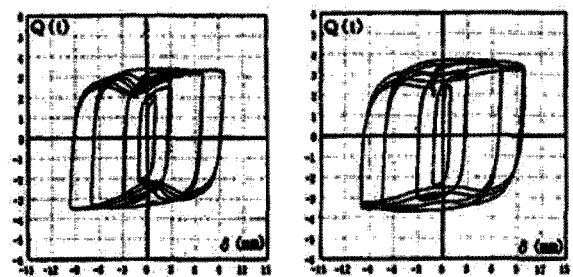
C	Si	Mn	P	S
0.004	0.05	0.08	0.005	0.0006

기계적 성질 및 화학적 성분을 <표 1, 2>에 나타낸다.

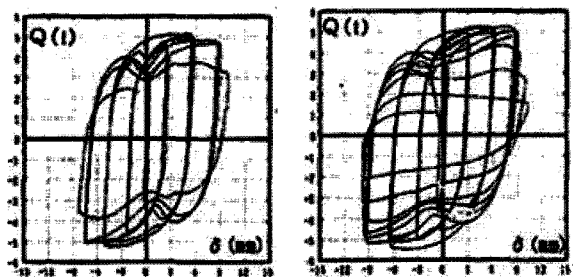
재하장치는 <그림 2>와 같이 전단력이 작용하도록 가력빔을 4개의 한방향 편으로 지지하였다. 또한 계측은 전기제어식 유압 액츄에이터의 로드셀(±20tonf, ±150mm)과 전단변형 계측을 위한 ±10mm의 직선변위계를 사용하여 측정하였다. 재하방법은 변위의 편진폭(片振幅) 0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 7.0, 10.0 mm로 하여 정부반복재하(正負反復載荷)를 실시하였다. 재하속도는 정적(靜的)재하의 경우 주파수 0.1Hz, 동적(動的)재하의 경우 1Hz를 각각의 진폭으로 3 사이클씩 반복했다.

### 2.2 실험결과 및 고찰

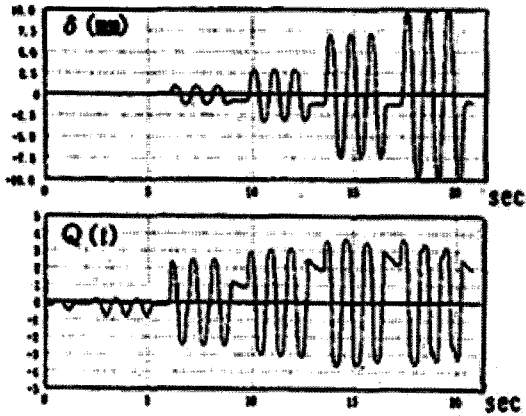
극저항복점강을 이용한 제진댐퍼의 이력곡선과 재하시각력(時刻歷)을 <그림 3, 5>에 나타낸다. 또한 비교를 위하여 SS400급 강재를 이용한 동형상·치수의 댐퍼의 이력곡선을 <그림 4>에 나타낸다. <그림 3>에 의하면 재하속도와 관계없이 극저항복점강을 사용한 제진댐퍼는 소성화후 소성변형 누적에 따라서 내력도 상승하지만, 어느 시점에 도달하면 소성 전단좌굴에 의한 면외변형의 성장으로 내력이 일단 저하하고, 그 후 장력장을 형성해서 내력이 또다시 상승한다. 그 후 진폭을 증가시켜도 예너



<그림 3> 극저항복점강 제진댐퍼의 이력곡선



<그림 4> SS400급 강 제진댐퍼의 이력곡선



〈그림 5〉 극저항복점강 제진댐퍼의 동적재하 시각력

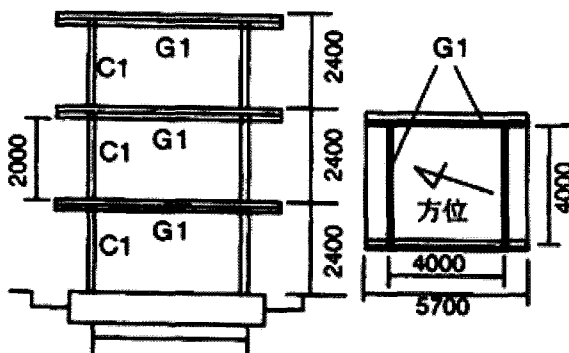
지 흡수능력의 현저한 저하는 관찰되지 않았다. 초기좌굴시의 내력은 동적재하의 경우가 정적재하보다 3할 정도 크게 나타났다. 그러나 최대내력에 대해서는 큰 변화가 없었다.

SS400급 강재를 이용한 제진댐퍼는, 극저항복점강을 사용한 댐퍼의 변형능력과 비교해서 정적·동적 모두 변형능력이 작았다. 내력에 영향을 미치는 재하속도에 관해서는 이번 실험의 재하속도(6cm/sec, 전단변형속도 0.8/sec)에서는 항복내력 및 최대내력의 큰 변화는 없었다. 그러나 SS400급 강재를 이용한 제진댐퍼의 좌굴내력저하의 현저함이 관찰되었다.

### 3. 극저항복점강 제진댐퍼가 설치된 철골조 골조모형의 기진기 실험

#### 3.1 3층 1스팬 철골조 골조모형

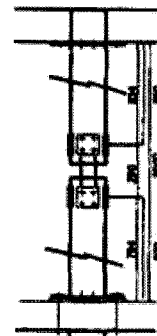
제진댐퍼를 설치할 철골조 골조모형은 3층 1스팬 2구면의 철골조 골조이다. 형상·치수 등의 주요한



〈그림 6〉 골조모형의 형상·치수

〈표 3〉 철골조 골조모형

슬래브 중량	1층 : 12.6tonf 2층 : 12.8tonf 3층 : 12.6tonf
부재단면	C1: H-125×125×6.5×9 G1: H-200×100×5.5×8
설계 베이스 시어 (Design Base Shear)	약축방향 : 0.2 강축방향: 0.43



〈그림 7〉 스텐드의 형상·치수

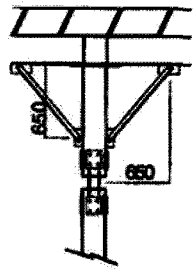
제원을 <그림 6> 및 <표 3>에 나타낸다. 이 모형에 극저항복점강을 사용한 제진댐퍼를 <그림 7>과 같이 각 층의 약축 2 구면 중앙에 스텐드형식으로 고력볼트로 접합하였다. 스텐드는 상부를 슬래브에 고력볼트로 고정시켰다.

#### 3.2 실험방법

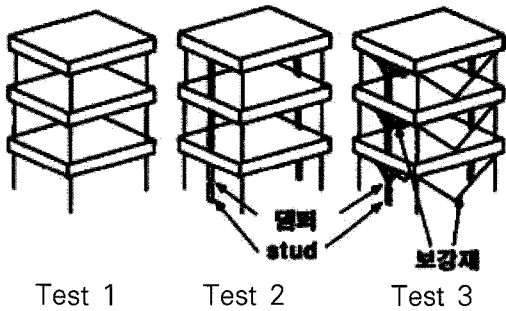
기진기를 옥상 슬래브 중앙에 설치하여 골조모형의 약축방향으로 가진(加振)하여 단계적 Sweep 실험을 실시하였다. <표 4>에 실험케이스의 일람표를 나타낸다. Test 3에서는 <그림 8>에 나타내는 것과 같이 앵글재로 스텐드를 보강(補剛)하고, 모형의 회전강성을 높이기 위해 가진 직교방향으로 브레이스를

〈표 4〉 실험케이스의 일람

	제진댐퍼 유무	스터드 보강유무	기진력 및 기진모멘트 (kgf)	진동수 (Hz)	계측 시간
Test 1	무	무	9.4, 17.5	0.5~5.0	각 30초
Test 2	유	무	2, 6, 8	1.0~5.8	각 30초
Test 3	유	유	2, 4, 6, 8, 20	1.7~2.4	각 30초
Test 4	유	유	10	1.9~2.4	각 30초
Test 5	유	유	10	2.17	9분



<그림 8> 스테드의 보강의 상세



<그림 9> 실험 케이스의 개략도

설치하였다. Test 3의 실험을 종료한 후 전층(全層)의 제진댐퍼를 교체하여 Test 4를 실시하고, 그 후 1층 부분의 댐퍼만을 교체한 후 Test 5를 수행하였다. 각 실험케이스의 개략도를 <그림 9>에 나타낸다.

### 3.3 측정방법

골조모형, 제진댐퍼, 스테드에 관하여 다음과 같은 실험데이터를 샘플링 간격 5 msec로 자기테이프 상에 기록하였다.

- ① 각층 슬래브 및 기초상의 수평 및 상하 절대 가속도
- ② 각층 슬래브의 하층에 대한 병진 및 회전의 상대변위
- ③ 각층 기둥의 휨변형
- ④ 각 제진댐퍼의 층간변위
- ⑤ 각 강체부의 변형(스테드 상하의 수평변위)
- ⑥ 각 스테드의 휨변형(각 스테드 2개소)
- ⑦ 각 스테드의 축변형
- ⑧ 각 기둥의 축변형

### 3.4 실험결과

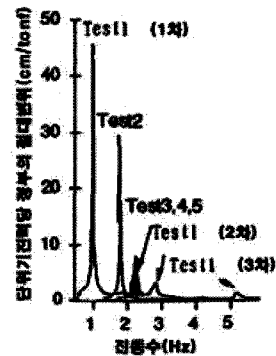
Test 1에서 얻어진 골조모형의 각차고유진동수

(各次固有振動數) 및 모드감쇠정수(減衰定數)를 <표 5>에 나타낸다. 정부(頂部)의 절대변위(單位起振力 당의 換算變位)를 각 진동수별로 플로트 한 것을 <그림 10, 11>에 나타낸다. 그림으로부터 강성의 증가에 따라 고유진동수가 커지는 점 및 제진댐퍼 설치에 따른 응답저감효과(應答低減效果)를 확인할 수 있다. 보강을 실시한 Test 3, 4, 5에서는 보강을 실시하지 않은 Test 2와 비교하여 제진댐퍼가 더욱 유효히 작용하고 있다는 것을 알 수 있다.

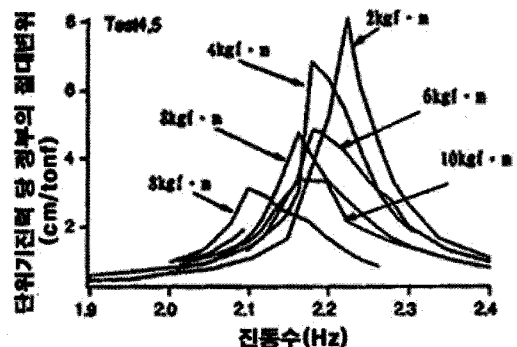
Test 3에서는 기진 모멘트 20kgf·m, 진동수 2.09Hz로 가진했을 때 2층 남측의 댐퍼가 좌굴하고 최종적으로 파단에 도달했다. 이것은 이론상 동일 강도의 댐퍼가 설치되어 있었다면 1층의 댐퍼만이 항복해야 되지만 1층과 2층의 댐퍼 재료의 항복강도 차이에 의해 2층 댐퍼부분에 손상이 집중되었기 때문이라 사료되어 진다. Test 4에서는 1층 남측 구

<표 5> Test 1의 결과

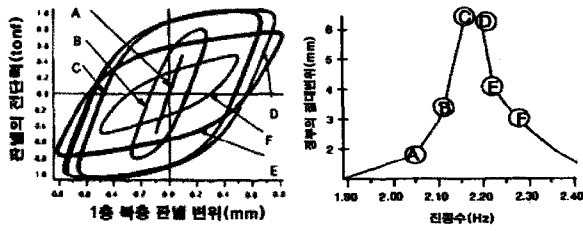
	고유진동수	모드 감쇠정수
1차	0.94 Hz	0.87 %
2차	2.76 Hz	0.40 %
3차	4.10 Hz	1.07 %



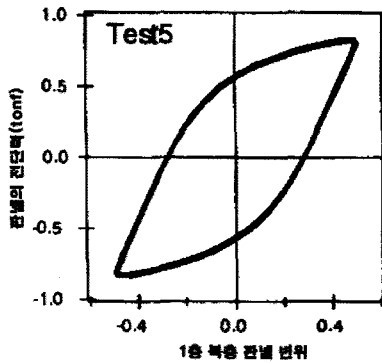
<그림 10> 단위기진력 당의 환산진폭



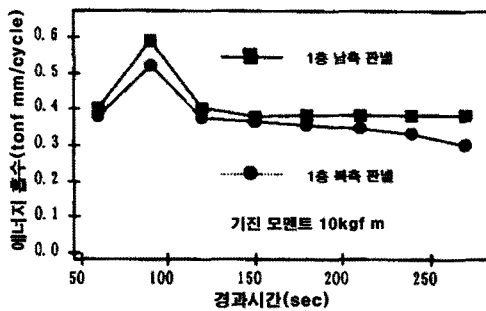
<그림 11> 단위기진력 당의 환산진폭



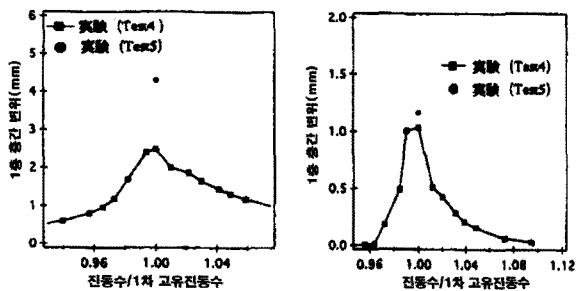
<그림 12> 북측 제진댐퍼의 진동수별의 하중변위 관계 (Test 4)



<그림 13> 제진댐퍼의 하중변위관계



<그림 14> 제진댐퍼의 에너지 흡수량의 시간경과



<그림 15> 1층의 최대 1층간 변위 및 에너지흡수량

면에 설치한 댐퍼의 항복점이 북측에 설치한 댐퍼보다 항복강도가 높았기 때문에 북측의 댐퍼만이 항복했다. 이때의 이력루프(Hysteresis loop)를 <그림 12>에 나타낸다.

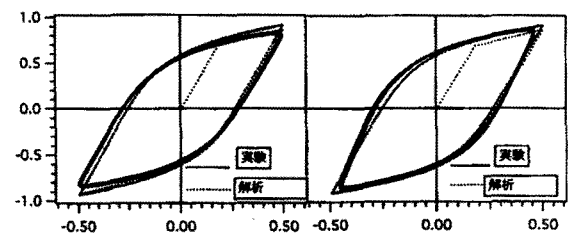
Test 5에서는 <그림 13>과 같이 1층 양측의 댐퍼가 항복하고 거의 같은 형태의 안정한 이력형상을 그린 후, 좌굴이 발생하고 최종적으로는 남측의 댐퍼가 파단에 도달했다. 1 사이클 당의 진동 에너지 흡수량의 시간적 경과를 <그림 14>에 나타낸다. 또한 1층의 최대 층간변위 및 진동 에너지흡수량을 <그림 15>에 나타낸다.

#### 4. 이력감쇠를 고려한 제진댐퍼의 해석

제진댐퍼를 설치한 골조 모형에 대하여 정부에 정현파(正弦波)를 입력한 경우의 변위응답 예측 및 제진댐퍼의 에너지흡수량의 예측을, 수학적 이력모델을 이용한 경우와 등가선형화 모델을 이용한 경우의 2가지 방법을 제안하고 실험 결과와 비교한다.

##### 4.1 수학적 이력모델

참고문헌 1에서 제안한 스켈톤 시프트 복원력특성 모델(Skeleton-Shift Restoring Force Model)1)을 제진댐퍼 부분에 적용한다. 스켈톤 시프트 복원력특성 모델은 초기강성, 항복강도, 소성화 후의 2차강성 및 3차강성을 고려한 모델로서 스켈톤을 3개의 직선으로 표현하고 이력부분을 Ramberg-Osgood 함수로 표현하고 있다. 댐퍼의 초기강성  $K_p$  및 2차강성  $K_{p1}$ 은 실험결과로부터 추출하였으며, 3차강성  $K_{p2}$ 는 0으로 했다. 댐퍼의 항복강도  $Q_y$ 는 General Yield법으로 정했다. 또한 Ramberg-Osgood 함수에 포함되는 지수  $\gamma$  및 제하시의 목표점을 정하기 위한 계수  $\phi$ 는 실험결과와 비교하여 각각 8, 0.25로 하였다. 이력모델을 정진폭(定振幅)으로 변형시켰을 때의 하중·변형관계와 실험결과로부터 얻어진 댐퍼의 하중·변형관계를 <그림 16>에 나타낸다.



<그림 16> 정진폭으로 반복재하시의 이력모델의 형상

### 4.2 등가선형화 모델

댐퍼부분의 복원력특성을 바이리니어(Bi-linear) 형으로 한다. 1층 골조부분의 변위진폭 a를 가정하면, 댐퍼를 설치한 스티드 1개의 등가강성Keq(바이리니어 모델의 활선강성을 채택) 및 등가점성감쇠계수(等價粘性減衰係數) Ceq는 각각 식 (1) 및 식 (2)로부터 구해지고 골조모형 전체를 그림 17과 같이 등가선형 모델로 치환할 수 있다.

$$Keq = \frac{K_2 + (K_1 - K_2)}{aK_1} Q_y \quad (1)$$

$$C_{eq} = \frac{2Q_y(K_1 - K_2)(aK_1 - Q_y)}{\pi^2 a^2 f K_1^2} \quad (2)$$

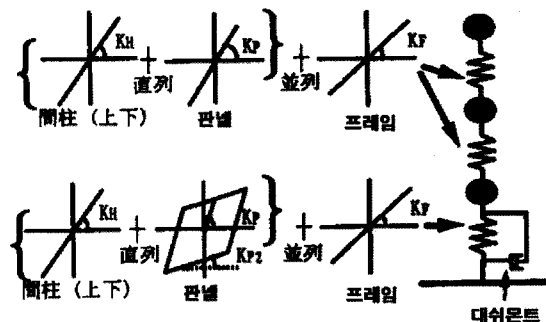
단,  $K_1 = \frac{K_p K_H}{K_p + K_H}$       $K_2 = \frac{K_{p2} K_H}{K_{p2} + K_H}$   
 f : 진동수     $K_H$  : 상하 스티드의 강성

고전적 감쇠이론에 의한 비연성화가정(非連成化假定)을 이용하면 1층의 층간변위의 진폭 a가 식 (3)으로부터 얻어진다. a가 수렴할 때까지 축차적(逐次的) 반복계산을 실행한다. 또한 1 사이클 당 댐퍼 1개가 흡수하는 에너지량  $E_{cyc}^{2-4}$ 은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$a = m_0 r \sum_{j=1}^3 \frac{w_1^j u_3^j}{K_j \sqrt{\left(1 - \left(\frac{w}{w_j}\right)^2\right)^2 + \left(2h_j \left(\frac{w}{w_j}\right)\right)^2}} \quad (3)$$

$$E_{cyc} = 2\pi^2 a^2 f C_{eq} \quad (4)$$

단,  $K_j$  : j차 기준스프링 강성  
 $f_j$  : j차 고유진동수  
 $h_j$  : j차 모드 감쇠정수



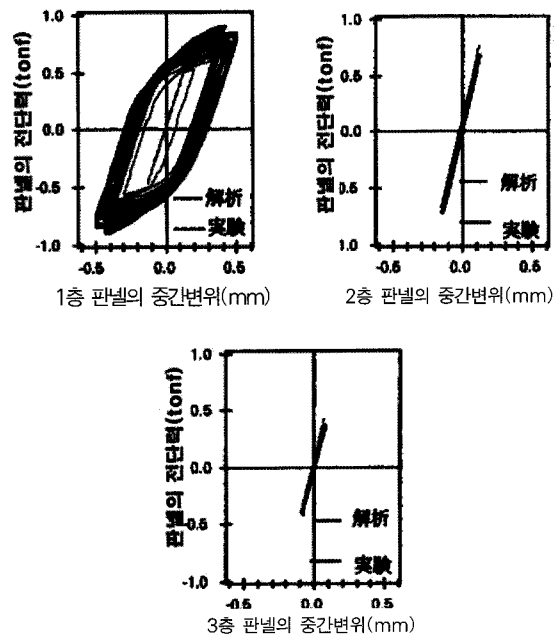
〈그림 17〉 골조모형의 등가선형화 모델

$m_0 r$  : 기진 모멘트

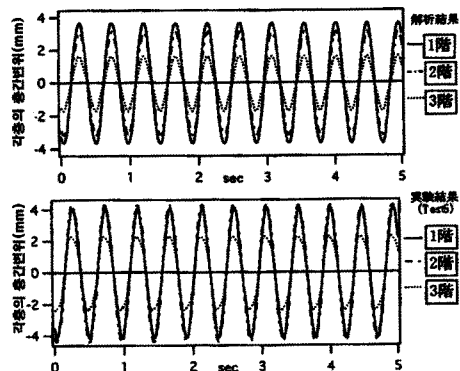
### 4.3 응답예측의 결과

Test 5와 같은 기진 모멘트 10kgf·m, 진동수 2.17Hz의 정현파를 정부에 입력한 경우의 수학적 이력모델을 이용한 해석으로부터 얻어진 각 층의 층간변위 및 제진댐퍼 일부분의 하중·변형관계를 <그림 18, 19>에 나타낸다. 실험결과와 이력 모델에 의한 결과는 좋은 대응을 나타내고 있음을 알 수 있다.

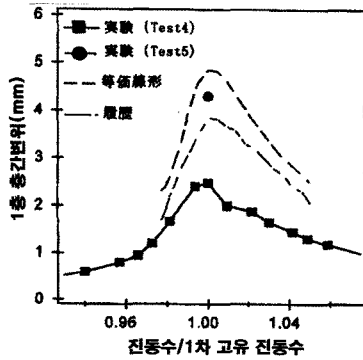
Test 4, 5의 수학적 이력모델 및 등가선형화 모델로부터 얻어진 1층 층간변위를 <그림 20>에 나타낸다. 또한 1 사이클 당의 1층 댐퍼부분의 흡수에너지를 <그림 21>에 나타낸다. 양쪽 모두 Test 4의 실험결과



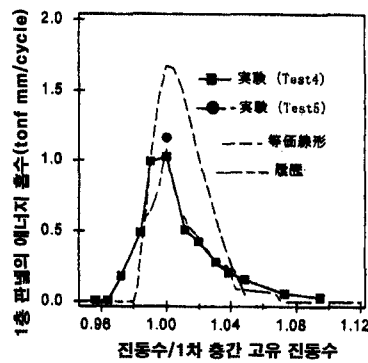
〈그림 18〉 각 층 제진댐퍼의 하중변위 관계



〈그림 19〉 실험과 해석모델에 의한 각 층의 층간변위



〈그림 20〉 1층 층간변위



〈그림 21〉 1층 제진댐퍼의 에너지 흡수

와 비교하여 큰값으로 나타나고 있으나, 이것은 Test 4에서는 1층의 남북구면에 설치된 댐퍼중 한쪽 댐퍼만이 항복했으므로 골조모형에 비틀림 응답이 발생하여 해석상의 가정(가진방향의 병진진동만 고려)과의 차이가 발생했기 때문으로 사료된다. 양쪽의 댐퍼가 항복한 Test5에서는 좋은 대응을 나타내고 있다.<sup>5)</sup> 이와 같은 결과로부터 수학적 이력모델 및 등가선형화 모델을 이용한 골조모형의 변위응답 및 댐퍼의 에너지흡수량의 예측<sup>7,8)</sup>은 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

극저항복점강을 사용한 제진댐퍼의 동적·정적 반복재하실험결과, 동적재하속도(6cm/sec, 전단변형속도 0.8/sec)에서는 정적재하와 비교하여 에너지흡수능력에는 큰 차이가 관찰되지 않았다. 그러나 동적재하시의 초기좌굴내력은 3할 정도의 상승이 확인되었다. 이는 내진설계시의 극저항복점강이 가지는 내진요소로서의 장점을 상쇄 시킬 수 있으므로 주의가 요망된다.

실제의 지반상의 구조모형에 대하여 실시한 강제진동

실험결과 제진댐퍼의 응답저감효과를 실증적으로 확인 할 수 있었으며, 스킵톤시프트 모델과 등가선형화 모델을 이용한 제진댐퍼의 흡수에너지의 예측에 있었서는, 양쪽 모두 거의 동정도(同程度)의 예측이 가능함이 확인 되었다.

## 참고문헌

1. 李昇宰. 耐震要素の偏在した多構面鐵骨架構の地震應答性狀に關する研究, 1998.
2. 日本建築學會. 建築物の限界狀態設計指針(案) 第 1版, 1999.
3. 日本建築學會. 鋼構造限界狀態設計指針同解説指針, 2000.
4. 오상훈, 김영주, 유홍식, 최홍배, 강창훈. "탄소성 이력댐퍼를 부착한 기둥-보 접합부의 이력거동", 대한건축학회 논문집, 2005.
5. Kenichi OHI, Seung-jae LEE, Yosuke SHIMAWAKI, Hideo OHTSUKA, Ruben GUZMAN. "Inelastic Behaviors of End-plate Connections during Earthquakes and Improvement on their Rotation Capacity", Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, Univ. of Tokyo, No.33, 2000
6. Amadeo Benavent Climent, Sang-Hoon Oh, Hiroshi Akiyama, "Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations", Journal of Construction and Structural Engineering, Architecture Institute of Japan, No. 503, January 1998
7. Newmark, N.M. and A.S. Veletsos, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions", The Second World Conference of Earthquake Engineering, Tokyo, 1960
8. K.Ohi, X.G.Lin, A.Nishida, S.Lee, K.Tanaka, "Vibration Tests on a 3-story Steel Building Model with Low-yield-point Steel Dampers", Proceedings of the Second International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, pp. 752-759, Japan, August 1997.