

탄성 댐퍼가 추가된 대형철골 구조물의 응답특성

배춘희*, 조철환*, 양경현* 박영필**

Response Characteristics Of Steel Frame Structures With Added Elastic Dampers

Chun-Hee Bae, Cheul-Whan Cho, Kyeong-Hyeon Yang, Young Pil Park

Abstract

Coupling adjacent steel frame using elastic dampers for control of response to low and moderate dynamic event is investigated in this paper. The complex modal superposition method is first used to determine dynamic characteristic, mainly modal damping ratio and modal frequency, of damper linked linear adjacent steel frame for practical use. Dynamic response of steel frame linked by hydraulic-excitation method. This combined method can effectively and accurately determine dynamic response of non-classically damped systems in the frequency domain. Parametric studies are finally performed to identify optimal parameters of elastic dampers for achieving the maximum modal damping ratio or the maximum response reduction of steel frame. It is demonstrated that using discrete elastic dampers of proper parameters to link steel frame can reduce dynamic response significantly.

1. 개론

지진이 발생하면 대형구조물이 설치된 지반이 크게 움직여 구조물의 과도한 움직임이 발생하고, 심하게 되면 건물이 무너지게 된다. 이러한 이유 때문에 그동안 구조물의 내진 성능을 향상시키는 많은 수단들이 연구되고 개발되어 왔으며, 이러한 것들은 구조물의 개선, 진동 절연, 그리고 건물에 진동에너지를 흡수할수 있는 장치를 부착하는 방법, 즉 능동제어 같은 방법등이 사용되어 왔다. 상기에서 언급된 방법 가운데 진동에너지를 흡수하는 장치를 건물에 설치하는 수동제어 방법은 그것의 효과, 경제적 이유 및 양호한 내구성 때문에 광범위하게 사용되어 오고 있다. 이러한 수동적 진동제어장치로 Friction Damper, Bracing

및 다양한 댐퍼들이 있다.

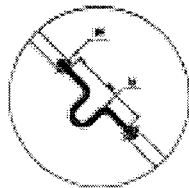
이러한 형태의 진동 저감장치 가운데 발전 소등 배관계등에 사용된 것이 Friction Damper 이며 대형 구조물 같은 철골구조물에 사용된 것이 Bracing 및 점.탄성 댐퍼 등이다. 본 논문에서는 점.탄성 댐퍼보다 구조가 간편하고 제작이 용이한 납으로 이루어진 탄성댐퍼를 다루고자 한다 본 논문의 주요 내용은 고층 건물 구조물에 지진 발생시 건물에 탄성 댐퍼를 추가함으로써 지진 진동이 얼마나 저감되는가에 대한 계산적인 내용으로서 실제적인 고층건물에 적용하는 것은 곤란함으로 4단 크기의 철골 구조물을 만들어 납으로 특수한 형상의 댐퍼를 만들어 계산 과 실험을 동시에 병행함으로써 실제 고층 건물 및 대형 철골 구조물에 적용시 얼마나 효과가 있는가를 나타내 보이고자 한다.

* 정회원 한전 전력연구원

** 정회원 연세대학교

2. 탄성 댐퍼의 Properties

탄성 댐퍼는 기존의 점,탄성 댐퍼나 Friction 댐퍼와는 다르게 댐핑이 납의 인장 압축특성에 따라 결정되어진다. 즉 납의 굴곡을 여러번 반복하여 납의 인장, 압축시 에너지를 크게 소산시키는 원리이다. 대형 철골 구조물에 탄성 댐퍼를 추가로 설치할 경우 두 가지 효과가 있는데, 첫 번째가 추가된 에너지 소산이고, 둘째가 시스템 강성의 조정이다. 이러한 특수 댐퍼의 설계는 여러 가지 방법이 있으며 본 논문에서는 아래 <그림 1>과 같이 모두다 납으로만 이루어지며, 댐퍼의 특성을 향상시키기 위해 납의 형상을 특수한 형태로 제작하였다.



<그림1> 탄성댐퍼 형상

만약 탄성 댐퍼의 총 체적이

V 라고 하면 1 사이클당 소산되어지는 에너지 크기는

$$E_d = E_0 V = \pi \gamma_0^2 G^n(w) V \quad (1)$$

이다. 여기서 V 와 G는 댐퍼의 재질 및 크기에 따라 주어지는 상수이다. 댐퍼의 설치시는 두 구조물 사이에 설치하거나 또는 한쪽은 고정되고 다른쪽은 움직이는 두개의 구조물사이에 설치하는데 이 번 논문에서는 아래 <그림2>와 같이 구조물 사이에 설치하였다.

3. 감쇠크기 규명

Damper는 에너지흡수장치로서 지금까지

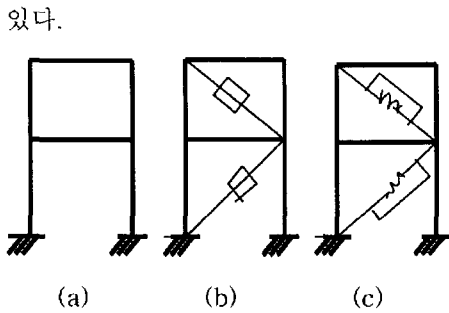
많이 사용되어왔다. 배관계에서 유체진동을 흡수하거나 기초바닥의 진동을 흡수하는데 주로 사용되어 왔는데, 각 Damper들의 감쇠 발생역학이 다르기는 하여도 소산된 에너지 Ed 와 시스템최대 Strain 에너지 Ems의 크기 비교를 통해서 댐퍼크기를 비교함으로써 흡수할 수 에너지 크기를 비교할수 있다. 1자유도계 시스템의 감쇠크기를 결정하는 사용되어지는 일반적인 Damping Ratio 방정식이 아래 <식2>와 같다

$$\zeta = \frac{E_d^i}{4\pi E_{ms}} \quad (2)$$

이것을 다 자유도계 시스템에 적용해보면 i 번째 Mode의 Damping Ratio는 아래 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\xi_i = \frac{E_d^i}{4\pi E_{ms}} \quad (3)$$

상기 식 (3)에서 알수 있듯이 i 번째 Mode의 Damping Ratio를 구하기 위해서는 시스템의 i 번째 소산된 에너지 Ed 와 i 번째 시스템 최대 Strain 에너지를 구해야 한다 이러한 것들을 구하기 위해서는 시스템에 가해지는 가진력에 대한 시스템의 응답해석을 수행함으로써 가능해진다. 이러한 과정을 간단하게 나타내기 위한 모델이 아래 <그림2>에 있다 아래 <그림2>(a)의 모델이 지반에서 지진진동을 받고 있다고 보면 시스템의 응답해석을 통해 시스템의 최대 modal displacements를 구할수 있으며 이러한 최대 modal displacements는 modal matrix를 통하여 각 진동 모드에 해당된 최대 physical displacements로 변환될수



<그림2> 구조물 형상

예를 들어 시스템의 첫 번째 3개 모드가 최대 변위를 가진다고 하면 변위 matrix는 아래와 같이 나타날 수 있고

(U_{ij} 는 각각 i, j 번째 모드의 최대 변위)

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} \end{bmatrix} \quad (4)$$

i 번째 모드에 대한 maximum strain 에너지는 아래 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ms}^i = \frac{1}{2} u_i^T K u_i \quad (5)$$

여기서 K 는 시스템 Stiffness matrix 이다. 2개의 탄성댐퍼가 상기 <그림2>(b)와 같이 구조물에 설치될 경우 시스템은 댐핑뿐만 아니라 강성도 동시에 증가하며 이러한 모델은 <그림2>(c)에 나타나 있다. 이러한 모델에서 스프링의 stiffness는 댐퍼의 특성에서 구해지고, 스프링을 포함한 structural member force는 시스템의 응답 해석을 통해 구할수 있다. 또한 스프링의 인장이나 압축된 크기, 즉 상대변위 Vector U_0 는 Spring forces를 stiffness로 나눔으로서 구해진다. 예를 들어 만약 i 번째 진동 모드의 spring forces vector가

$$f = \begin{bmatrix} f_{i1} \\ f_{i2} \end{bmatrix} \text{ 이면, 상대 변위 vector는}$$

$f = \begin{bmatrix} f_{i1} / k_1 \\ f_{i2} / k_2 \end{bmatrix}$ 이다. 따라서 이때 i 번째 모드의 소산된 에너지는 아래 식(6)과 같이 표현된다

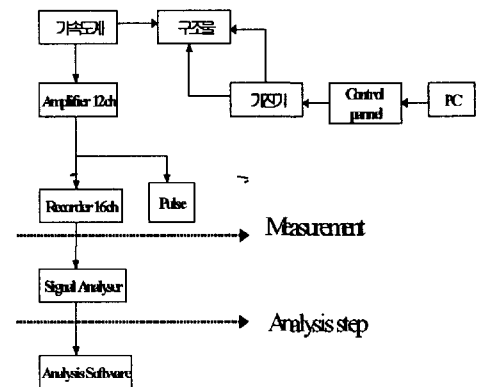
$$E_d^i = \pi \sum_j (u_{oik} / f_{kj}) G^n(w) V_j \quad (6)$$

4 동특성개선 실험

4.1 가진기 특성 및 장비 구성도

가진기 형태는 아래와 같이 기계식으로서

- Type: Mechanical Type
- Maximum Force 3 Ton at 12 Hz
- 구동 방식 : Invert 제어 방식
- 변조: PWM(Pulse Wide Modulation)방식 서로 반대방향으로 회전하는 평형한 두축에 부착된 불평형 질량을 이용하여 특정방향(수평 또는 수직)으로 주기적인 힘이 발생되도록 설계된 것으로 12 Hz의 주파수에서 3 Ton의 힘을 발생 할 수 있는 특성이 있고, 본 시험 및 분석시 사용된 장비의 구성도 및 장비 특성은 <그림3> 과 같다. 사용된 가진 시스템은 선박의 상부 구조물 가진 시험용으로 주로 사용되는 System으로서 통상 상용되는 주파수 영역은 약 5 Hz에서 12 Hz이나 여기서는 사용범위를 1 Hz에서 5.5 Hz 사이로 하였다.



<그림3> 구조물 가진시험

4.2 시험 대상 건물

가진시험을 실시한 화력발전소 보일러는 총 9층의 높이로 가진기를 설치한 옥상의

면적은 약 47M × 20.5M 정도이다.

4.3 가진기 및 가속도계 설치

일반적으로, 구조물 전체의 고유 진동수와 모드를 구하기 위해서는 관심 영역의 주파수 영역에서 분석 대상 모드를 충분히 가진 시킬 수 있는 가진기 용량 및 위치를 결정하여야 하며, 구조물의 전체적인 거동 양상을 묘사할 수 있는 위치에 센서를 설치하여야 한다. 특히, 감쇄계수를 정확히 추정하기 위해서는 가진력의 특성을 입력으로 하는 Modal Analysis가 수행되어야 한다. 본 시험에서는 주 관심대상 주파수 영역과 현재 사용된 계측 System의 실용 주파수 영역이 다소 상이하여 계측이 어려움이 예상되었지만, 건물의 Main Frame 구조를 고려하여 9층 옥상 중앙에 전후 방향으로 Sub Frame에 설치하였으며 Main Frame은 설치가 불가 하였다. 가진기 설치 시 콘크리트 위에 Steel Plate를 볼트로 다설한 후 가진기를 Plate위에 용접으로 취부하였으며 가진기의 유동을 막기 위해 주위 부재를 이용하여 부분적인 보강을 실시하였다. 가속도계의 부착 위치는 접근이 가능한 곳에 한하여 건물 전체의 Global 진동 특성을 나타낼 수 있는 곳을 선정하여 건물 옥상에 7곳, 건물 중앙의 계단을 따라 Frame의 수직 방향으로 3곳과 Reference Signal로 사용하기 위해 Exciter Bed에 1곳을 설치하여 총 11곳을 계측하였다.

4.4 가진 방법

구조물의 진동 특성을 규명하기 위한 가진방법은 여러 가지가 있으나, 선형 구조물인 경우, Impact, Random 및 Sinusoidal Sweeping 가진 등이 널리 쓰이며 각 방법마다의 장단점이 있다. 대개의 경우 본 대상 구조물과 같은 대형 구조물의 경우에는 Sinusoidal Sweeping 가진 방법이 많이 쓰이며 본 시험에서는 P.C의 Digital Analog Output를 통하여 Sweeping Test를 수행하였으며 자세한 가진방법은 아래와 같다.

- 가진방향: 전후 방향
- 가진 주파수 영역: 1.0 - 5.5 Hz
- Sweeping Rate: 0.2 Hz/min
- Estimated Excitation Force :
21 Kgf at 1 Hz 630 Kgf at 5.5 Hz

4.5 가진 시험 결과

분석 장비 및 결과는 아래와 같다.

- 분석 장비: B&K 3550 Multi Analyzer System

- Sampling Frequency : 25 Hz

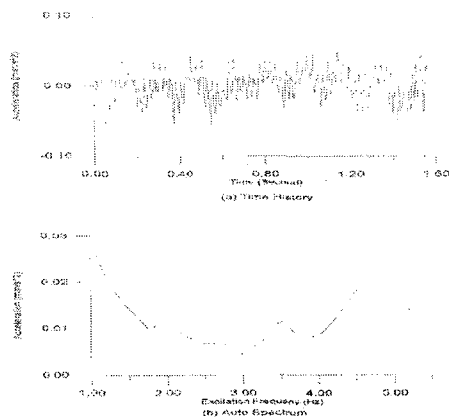
- Average Method: Peak Hold

- Time Signal Weighting: Hanning

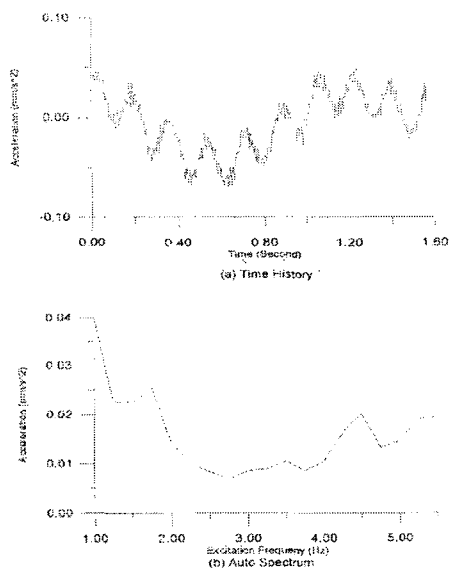
각 응답점의 Spectrum은 <그림4> 및 <그림5> 와 같고, 분석해 보면 발전소 구조물 옥상 전체의 1차 고유진동수가 1.75 Hz에 2,3차 고유진동수가 3.5 Hz와 4.5 Hz에 존재하고 있음을 알 수 있다. 각각의 모드에서 비교적 신호가 양호한 신호를 대상으로 Half-Power Band를 이용하여 계략적으로 추정된 감쇄계수를 <표1> 에 정리하였다. 물론 이미 주지한 바와 같이 정도 높은 감쇄계수를 추정하기 위해서는 Modal Analysis에 의한 분석이 필요하다.

차 수	Frequency (Hz)	Mode Description	Estimated Damping (%)
1	1.75 Hz		
2	3.5 Hz	평면상의 길이방향 응답치가 폭 방향으로 반대 위상	6.4
3	4.5 Hz	평면상의 길이방향 응답치가 폭 방향으로 동 위상	6.6

<표1> 감쇄크기



<그림4> 응답점의 spectrum

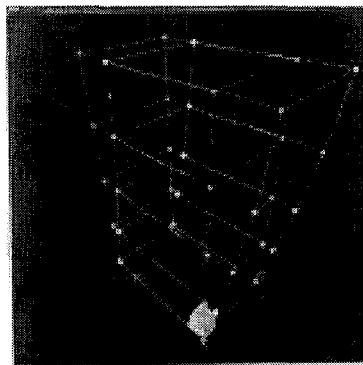


<그림5> 응답점의 spectrum

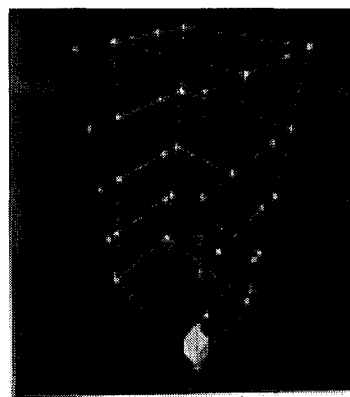
5. 구조물 응답특성

5.1 등가 모델 생성

동특성 규명을 위해 먼저 발전소 대형보일러 구조물의 축소 모델을 동특성해석을 통해 <그림6> 과 같이 설정하였다. 해석된 모델의 1차 고유진동수는 1.31Hz 이다.



$f_1=1.31(\text{Hz})$

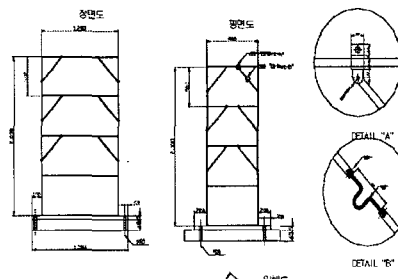


$f_2=1.52(\text{Hz})$

<그림6> 해석한 구조물 모델

5.2 댐퍼가 설치된 모델

해석을 통해 설정된 모델을 기초로 <그림 7> 과 같은 모형을 제작하였고, 모형 구조물은 직경 5mm의 환봉으로 아래 <그림7> 과 같이 4단으로 만들었으며 높이가 2m, 폭은 0.8m로 하였다.



<그림7> 댐퍼가 설치된 구조물

5.3 가진 실험

상기 모델을 동하중 3000kgf, 최대 변의 100mm, 시험가능 주파수 0에서 180Hz인 유압가진기 위에 설치하여 먼저 Sweeping 실험을 통해 고유진동수를 구하고, 가진기에서 주파수별로 진동을 발생시켜 구조물 상부 진동 변화정도를 규명하였다.

5.4 가진 실험 결과

시스템 sweeping 결과 댐퍼 설치전 고유진동수는 1차가 1Hz, 2차가 1.3Hz였고, 댐퍼 설치후에는 1차가 1.17Hz, 2차가 1.5Hz였다. 앞에서 알수 있듯이 시스템 특성상 강성이 같이 증가되는 것으로 나타났다. 상부 구조물의 진동 크기를 비교하기 위해 가진기에서 동적변위를 동일하게 5mm 발생시켜 아래 표와 같이 주파수별로 실험을 한 결과 아래 표와 같은 결과를 얻었다. 즉 댐퍼를 설치한 결과 공진영역에서의 진폭이 최대 68mm에서 15mm로 크게 저감되었다.

주파수(Hz)	진폭(mmp)	비고
0.5	7.5	
1	68	
1.5	19	

<표2> 댐퍼 설치이전 진동 시험 결과

6. 결론

이상에서 얻어진 결과를 가지고 요약한 결론은 아래와 같다.

- (1) 철골로 이루어진 화력발전소 대형 보일러 구조물의 고유진동수는 1차 Mode가 2Hz 이하에 있음을 알수 있다.
- (2) 화력발전소 대형구조물의 감쇄크기는 6%대로서 일반적인 구조물에 비해 비교적 큼을 알수 있다.
- (3) 댐퍼가 설치된 구조물의 진동은 설치이

전의 68mm에서 15mm로 크게 저감됨을 알수 있다.

- (4) 지진 진동과 같은 저주파수 진동이 대형 구조물에 작용할 때 구조물의 강성증가에 의한 진동 저감보다는 시스템 구조물에 댐핑증가에 의해 진동이 크게 저감됨을 알수 있다.
- (5) 대형 구조물의 지진 응답특성 개선을 위해서는 구조물의 강성 증대 보다는 전체 구조물의 댐핑 증대가 더 효과적임을 알수 있다.

참고문헌

- (1) P. Mahmoori, "Design and analysis of viscoelastic vibration dampers for structures". (1974)
- (2) P. Mahmoori, "Structural Dampers" ASCE 95.1661~1672(1972)
- (3) R. W. Clough and J. Penzien, Dynamics of structures, McGraw-Hill. New York. 1975