

## 점탄성물질 난류댐퍼를 이용한 K형 철골 브레이스 골조의 진동응답해석

### A Vibration Response Analysis of Steel Building Frame with K Shape Brace Vibrationally Controlled by Turbulent Flow Dampers sealed by Visco-elastic Material

이 호\*

Lee, Ho

#### 요 약

본 논문에서는 패시브 진동제어시스템을 설치한 실대물 K형 철골브레이스 골조의 실험결과를 다루었다. 패시브 진동제어시스템은 점탄성물질을 이용하여 새롭게 개발된 댐퍼를 사용하였다. 이 실험모델의 진동제어 효율성을 확인하고 철골조 브레이싱의 진동반응특성을 조사하기 위하여 일련의 실험을 행하였다. 자유진동실험결과 댐퍼를 설치시 설치하지 않은 경우와 비교하여 3배정도의 진동제어능력을 나타냈다. 점탄성물질 난류댐퍼의 효율성은 진동실험에 의하여 확인되었다.

#### Abstract

In this thesis, a full-scale K shape damper test model was constructed in which a passive vibration control system. This passive vibration control system was incorporated with the use of a newly developed turbulent flow damper sealed by viscoelastic material. A series of tests and earthquake observation has been conducted in this test model. The purpose of the present thesis is to investigate the vibration response characteristics of the building and to verify the effectiveness of the vibration control system. By the static loading test, it was recognized that incorporation of the dampers had little influence on static horizontal stiffness of the building. Free vibration tests revealed that the dampers incorporated increased the damping ratio of the building up to 3 times compared with the undamped case. The effectiveness of the developed vibration control system was confirmed based on the excitation tests and earthquake response observation.

**키워드 :** K형댐퍼, 점탄성물질, 진동실험, 진동반응특성

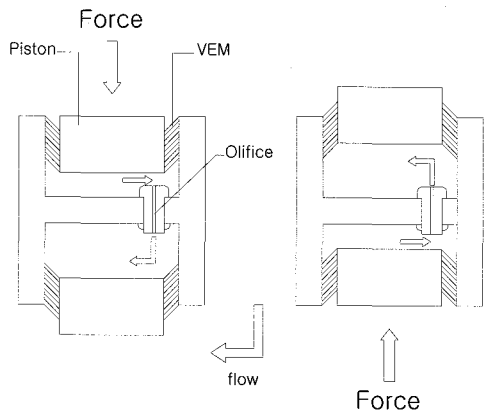
**Keywords :** K shape damper, viscoelastic material, earthquake observation, vibration response characteristics

## 1. 서 론

기존의 내진설계에서는 골조의 강도를 높이든가, 혹은 골조를 소성화시켜 진동에너지를 흡수하는 것으로 건물의 안정성을 확보하는 것이 가능하였지만 골조가 손상된 후에 진동을 저감시키는 것은 불가능하였다. 이러한 이유로 인하여 구조물의 설계지침이 힘을 근본으로 하는 설계방법에서 에너지를 근본으로 생각할 때 에너지 흡수장치의 도입이 중요한 한 요소로서 인식될 수 있다. 이러한 이점으로 제진구조가 주목되고 있다. 특히, 1995년의 일본 효고현 남부 지진에 의한 피해사항을 살펴보면 건물의 기능을 유

지하기 위한 목적으로서 기존의 내진설계법으로는 불충분한 것이 명확해졌다. 제진구조는 건축물의 강풍 혹은 교통진동 등의 각종 원인으로부터 생기는 진동을 억제하고 지진에 대한 안정성을 높여 진도7 클래스의 대지진에 대해서도 피해를 극소화시키고 지진 후에도 건물의 기능을 유지 할 수 있도록 진동을 인위적으로 제어할 수 있다. 또한, 풍압력, 지진 등에 의한 진동에 대해서 구조물 자체의 내력을 크게 하여 대응하는 내진구조와는 달리 건물에 진동을 제어하는 에너지 흡수장치를 부착시켜 컴퓨터제어에 의한 건물의 진동을 억제하는 댐퍼를 부가시켜 건물전체 지진시의 응답을 저감시키고 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다. 댐퍼의 저항력 특성에 관해서는 실제의 이력성상을 충실히 재현시킬 수 있는 모델을 구축하고 댐퍼를

\* 정희원, 상주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사  
Tel : 054-530-5372 E-mail : holee@sangju.ac.kr



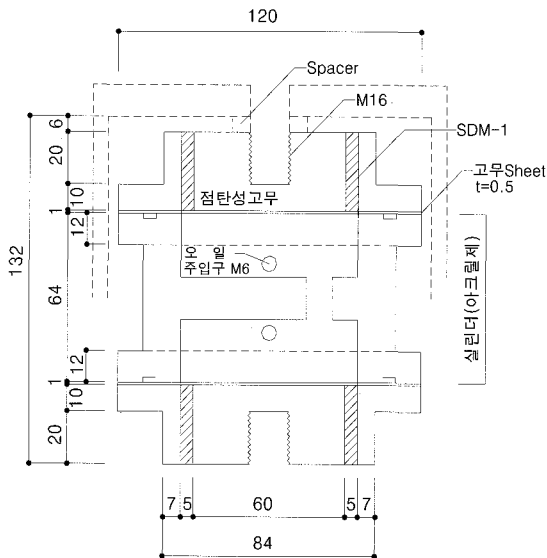
<그림 1> 댐퍼의 개념도

설치한 구조물의 진동방정식의 수치적분에 의한 응답 해석 제진효과를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서의 댐퍼는 봉입된 액체를 씨일하기 위하여 피스톤외면과 실린더내면의 간극에 아크릴계 고분자 재료를 충전하고 있다. <그림 1>에 사용된 댐퍼의 개념도를 나타낸다.

## 2. 시험체 개요

### 2.1 댐퍼 시험체

댐퍼의 상세도는 <그림 2>에 나타낸다. 실험에 사용된 댐퍼는 중앙부의 아크릴체의 실린더와 상, 하 강제피스톤과 피스톤형틀로서 구성되어 있다. 실린더는 다이아프레임에 의해 실린더내의 상, 하 액체실로 분리된다. 피스톤과 댐퍼를 둘러싸고 있는 강제피스톤

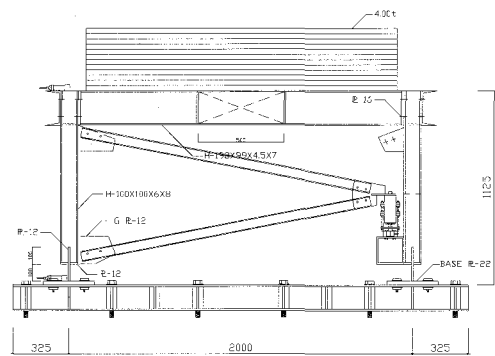


<그림 2> 댐퍼의 단면상세도

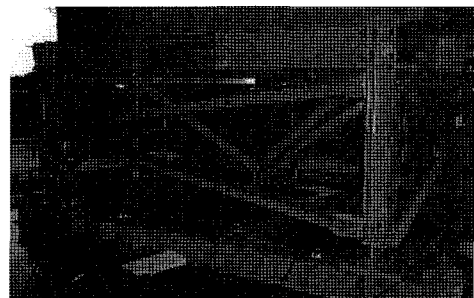
결합체는 상, 하 M16 보울트로서 고정되어진다. 피스톤결합체와 상, 하 피스톤은 일체화되어 각 피스톤은 상, 하 방향으로 같은 양의 변위를 갖게 된다. 다이아프레임에 설치된 오리피스(orifice)의 직경은 2mm, 길이는 24mm 이다. 피스톤의주면과 피스톤외곽의 내주면에 5mm의 간격을 두어 그 간격에 점탄성물질(SDM-1)로 충전하였다. 피스톤외곽의 4면에 M8 보울트로서 결합하여 실린더와 상, 하 피스톤 및 피스톤외곽부가 일체가 되게 하였다. 실린더 상, 하 액체실에 댐퍼오일을 주입시 피스톤과 피스톤외곽의 내면에 실리콘코킹제를 사용하고 대유성을 갖는 얇은 고무씨트(NBR 고무)를 부착하였다. 실린더단부와 피스톤이 접하는 부분에는 내압에 의한 액체누수를 방지하기 위하여 고무링을 설치하였다. 작용원리는 상부 실린더의 피스톤이 아래방향으로 작용되면 점탄성물질이 전단변형을 하여 피스톤의 변위만큼 변형된다. 따라서 액체는 상부 액체실부터 오리피스를 통과하여 난류저항이 생기게 됨으로 상부액체실에 높은 정내압이 생기게 된다.

### 2.2 제진골조 시험체

K형 브레이스 댐퍼의 설치방법은 <그림 3>과 <그림 4>에 나타낸다. 프레임의 주두와 주각에 설



<그림 3> 단층제진 K형 시험체

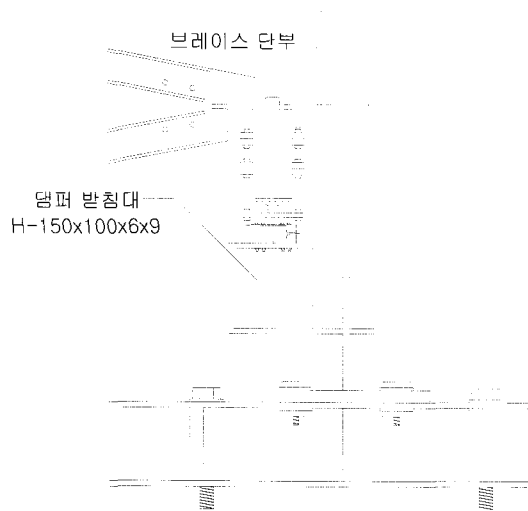


<그림 4> K형 브레이스 시험체

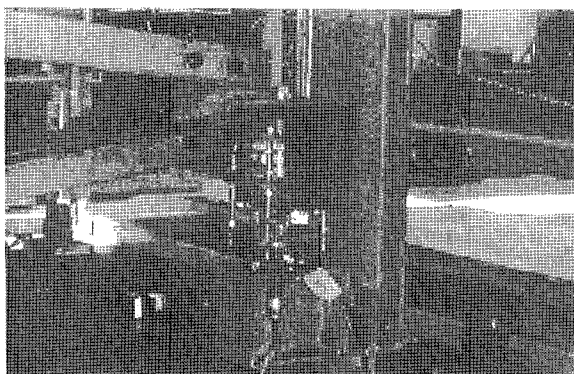
<표 1> 시험체 종류

시험체 명칭	브레이스 형식	댐퍼	실린더 액체
댐퍼 없는 프레임	K형 브레이스	無	-
K형 브레이스 제진 프레임	K형 브레이스	有	無
K형 브레이스 제진 프레임	K형 브레이스	有	댐퍼오일

치된 가세트 플레이트(Gusset Plate)에 K형 브레이스를 부착시켜 브레이스 단부에 댐퍼를 종방향으로 설치한다. 댐퍼는 브레이스 선단부측의 주각에 고정력보울트로 고정시킨다. 가진하여 프레임상부가 수평방향으로 변위하면 프레임의 회전에 의해서 브레이스단부에 상,하 방향의 상대변위가 생겨 댐퍼가 연직방향으로 작동하게 된다. 본 연구에서는 <표 1>에 나타난바와 같이 3가지 경우에 대하여 가진시험을 행한다. 또한 기존연구에 의한 V형 브레이스



<그림 5> K형 댐퍼 설치 상세도



<그림 6> 댐퍼 설치 전경

형태와의 비교분석을 통해 브레이싱 형태별 효율성에 대해서도 검토한다.

K형 브레이스제진은 기둥중앙부의 가세트 플레이트(Gusset Plate)에 연결된 K형 브레이스의 단부에 댐퍼를 수직으로 설치하여 프레임의 수직변위에 의해서 생기는 브레이스 단부의 수직방향의 상대변위로서 댐퍼를 작동시키는 방식이다(<그림 5, 6> 참조).

### 3. 제진골조의 가진실험

#### 3.1 시험목적

본 시험에서는 1/3축소의 개구부를 가진 K형 브레이스의 단층철골프레임 시험체를 대상으로 실험을 하였다. 시험항목은 아래와 같다.

- (1) 정적가력시험
- (2) 자유진동시험
- (3) 정현파가진시험
- (4) 지진파가진시험
- (5) White Noise가진시험

정적가력시험에서는 수평스프링정수를 구한다. 자유진동시험에서는 얻어진 진동파형에서 각각의 고유진동수 및 감쇠율을 조사 비교 검토한다. 정현파가진시험에서는 공진곡선을 작성하여 제진효과를 검토한다. White Noise 가진시험에서는 얻어진 진동파형에서 각각의 고유진동수를 조사하여 비교 검토한다.

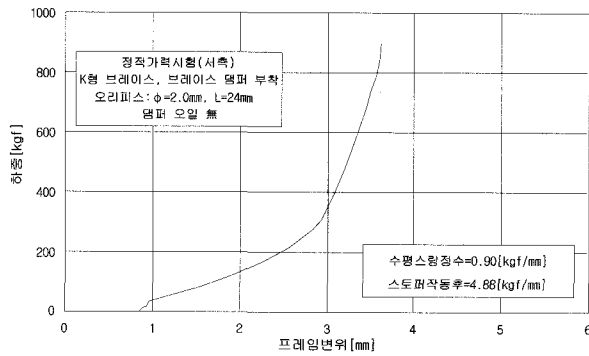
#### 3.2 K형 브레이스 댐퍼 시험결과

##### 3.2.1 정적가력시험

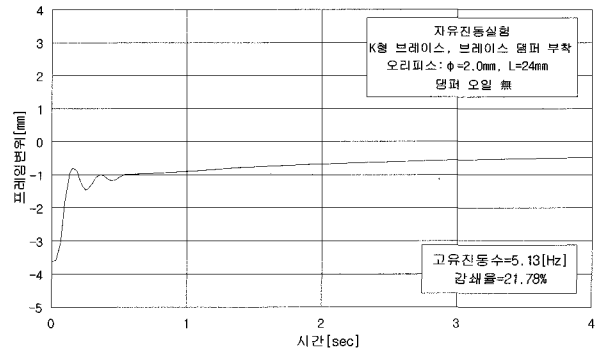
K형 제진프레임의 수평스프링 정수는 <표 2>에 나타낸다. 정적가력의 프레임변위-하중곡선 및 댐퍼 변위-하중곡선을 <그림 7(a)~(c)>에 나타낸다.

<표 2> 정적가력시험결과

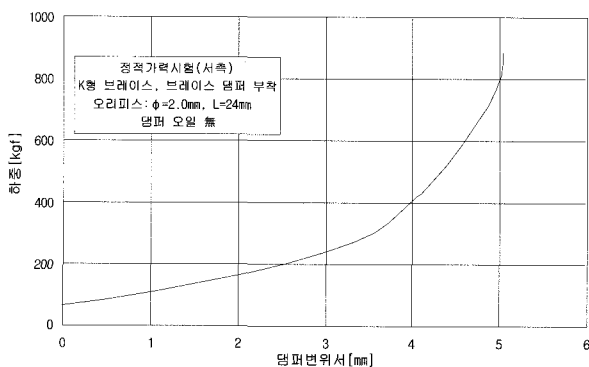
오일	수평스프링정수 [kg/mm]	수평스프링정수[kg/mm] (스토퍼 작동후)
無	108	846



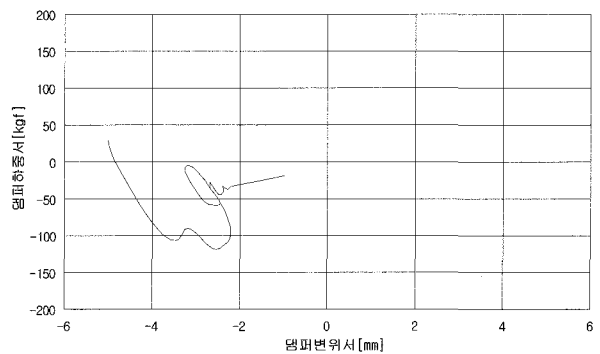
(a) 프레임변위-하중곡선



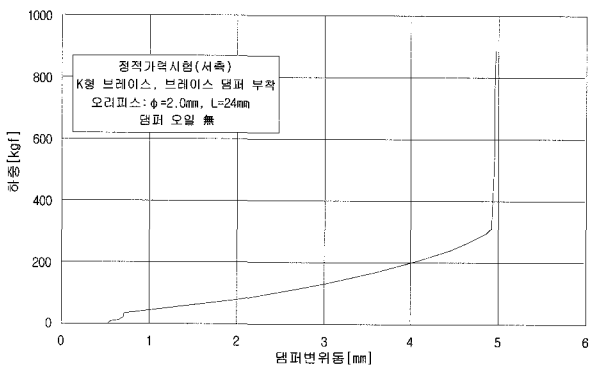
(a) 프레임변위의 계측파형



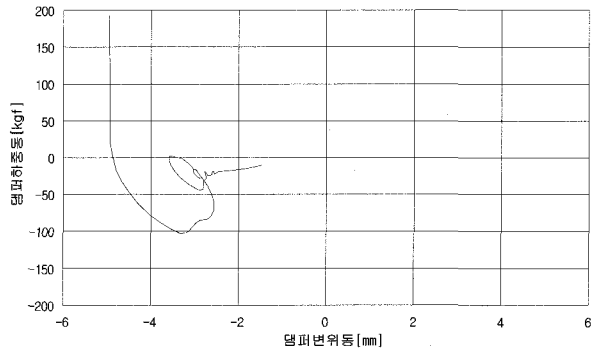
(b) 댐퍼변위-하중곡선(서측)



(b) 댐퍼변위-댐퍼하중 이력곡선(서측)



(c) 댐퍼변위-하중곡선(동측)



(c) 댐퍼변위-댐퍼하중 이력곡선(동측)

<그림 7> K형 브레이스 댐퍼, 프레임 정적가력 시험결과 (오일 無)

<그림 8> K형 브레이스 댐퍼프레임 정적가력 시험결과 (오일 無)

### 3.2.2 자유진동시험

고유진동수, 감쇠율은 <표 3>에 나타낸다.

<표 3> 자유진동 시험결과

댐퍼	고유진동수[Hz]	감쇠율[%]
有	5.13	21.78
無	2.38	2.17

### 3.2.3 정현파 가진시험

가진레벨, 가진진동수, 프레임변위, 댐퍼변위와 댐퍼하중, 프레임가속도, 진동대가속도에 대한 프레임가속도의 응답배율을 <표 4> 및 <표 5>에 나타낸다. 실험치에서 구한 공진곡선에 연속성이 없는 것으로 확인되었으며 진동대의 제어능력에 한계가 있는 것이 하나의 원인으로 사료된다. 연속적인 공진곡선을 얻기 위하여 진동대가속도, 프레임가속도의

<표 4> 정현파가진 시험결과(Ⅰ)

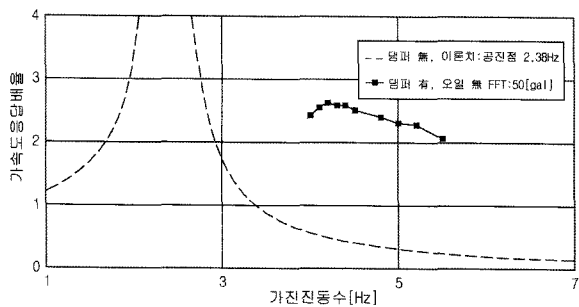
(가진레벨 50gal, 오일 有, orifice:φ2.0mm, L=24mm)

가진 진동 수 [Hz]	프레 임 변위 [mm]	댐퍼 변위 서측 [mm]	댐퍼 하중 서측 [kg]	댐퍼 변위 동측 [mm]	댐퍼 하중 동측 [kg]	프레 임가 속도 [gal]	진동 대가 속도 [gal]	가속 도응 답 배율
4.0	1.18	1.66	110.0	1.66	87.5	111.8	57.48	1.945
4.1	1.34	1.82	117.3	1.83	93.0	119.7	66.90	1.789
4.2	1.30	1.77	116.0	1.77	91.4	117.2	71.30	1.643
4.3	1.39	1.87	120.3	1.85	93.3	123.1	77.58	1.587
4.4	1.37	1.85	119.6	1.81	91.8	121.9	65.96	1.848
4.5	1.25	1.66	113.7	1.75	93.9	117.2	61.88	1.893
4.8	1.18	1.57	109.8	1.61	90.6	114.0	63.45	1.797
5.0	1.09	1.51	108.3	1.50	85.1	114.0	63.76	1.788
5.2	1.00	1.43	105.0	1.42	81.6	111.5	77.58	1.437
5.5	0.91	1.34	98.9	1.32	77.9	102.7	62.82	1.635

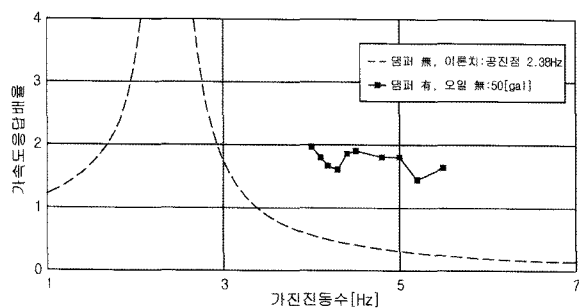
<표 5> 정현파가진 시험결과(Ⅱ)

(가진레벨 100gal, 오일 有, orifice:φ2.0mm, L=24mm)

가진 진동 수 [Hz]	프레 임 변위 [mm]	댐퍼 변위 서측 [mm]	댐퍼 하중 서측 [kg]	댐퍼 변위 동측 [mm]	댐퍼 하중 동측 [kg]	프레 임가 속도 [gal]	진동 대가 속도 [gal]	가속 도응 답 배율
4.0	3.41	3.27	155.6	3.39	144.15	213.6	104.9	2.036
4.1	3.14	2.76	144.3	3.16	128.85	194.1	123.4	1.573
4.2	2.87	2.45	137.6	2.96	122.4	180.9	126.3	1.433



(a) K형 브레이스 FFT 前



(b) K형 브레이스 FFT 後

<그림 9> 공진곡선

FFT해석(Fast Fourier Transform)을 하였으며, 그 결과 얻어진 공진곡선을 <그림 9(b)>에 나타낸다.

### 3.2.4 지진파 가진시험

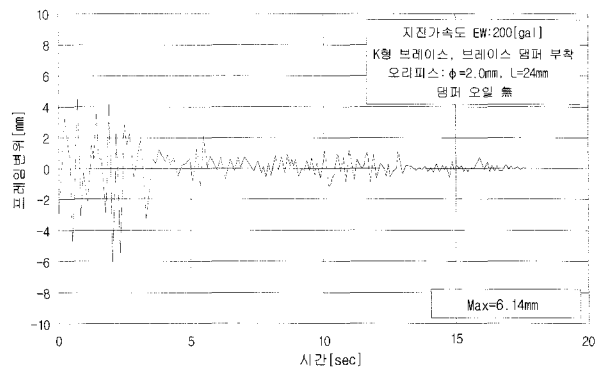
가진레벨, 가진진동수, 프레임변위, 댐퍼변위-댐퍼하중, 프레임가속도, 진동대가속도에 대한 프레임가속도 응답배율을 <표 6>에 나타낸다. 프레임변위, 프레임가속도, 진동대가속도 시각계측파형을 <그림 10(a)~(c)>부터 <그림 11(a)~(c)>에 나타낸다.

<표 6> 지진파가진 시험결과(Ⅰ)

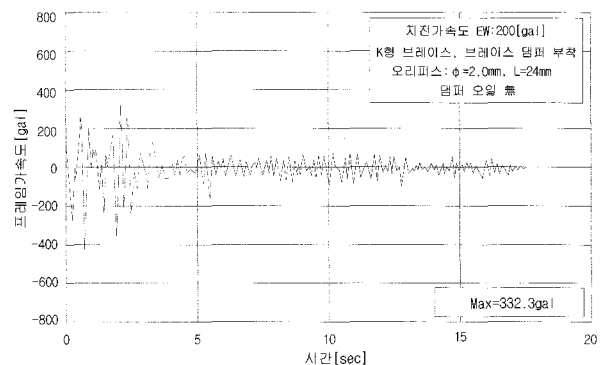
(오일 有, orifice:φ2.0mm, L=24mm)

지진지역	프레 임 변위 [mm]	댐퍼 변위 서측 [mm]	댐퍼 하중 서측 [kg]	댐퍼 변위 동측 [mm]	댐퍼 하중 동측 [kg]	프레 임가 속도 [gal]	진동 대가 속도 [gal]	가속 도 응답 배율
EL-CENIRONS 200gal	6.14	5.65	373.2	5.47	484.8	332.32	187.2	1.78
EL-CENIRONS 300gal	9.15	8.05	697.5	6.27	568.8	754.47	283.32	2.66

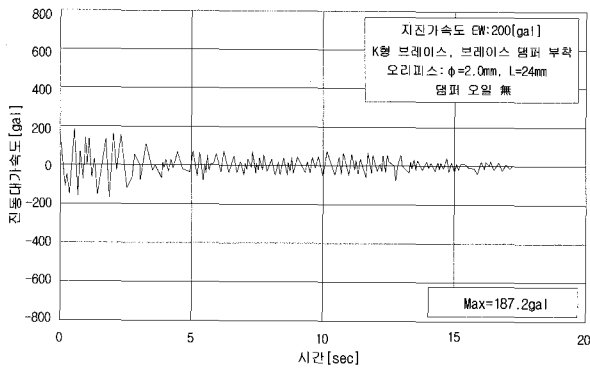
(EL-CENTRO. 1940년 5월18일 Max 326gal)



(a) 프레임 변위의 계측파형

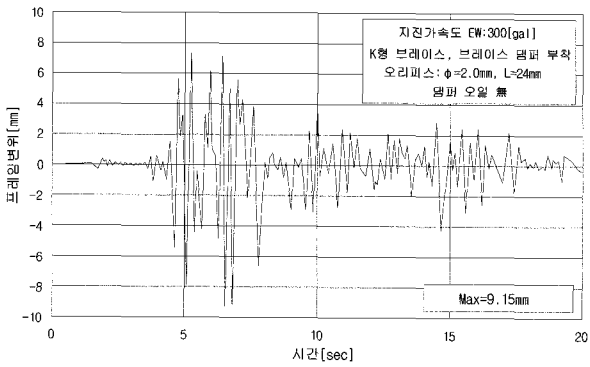


(b) 프레임 가속도의 계측파형

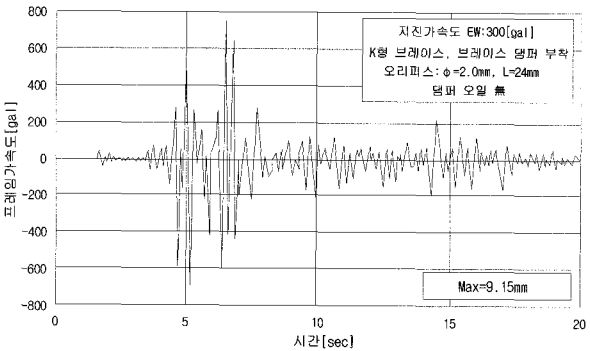


(c) 진동대 가속도의 계측파형

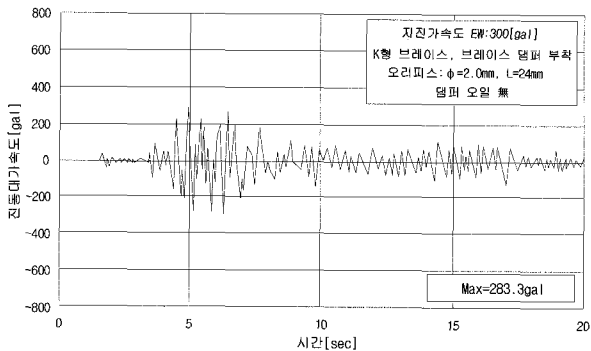
<그림 10> K형 브레이스 댐퍼 프레임(200(gal))



(a) 프레임 변위의 계측파형



(b) 프레임 가속도의 계측파형



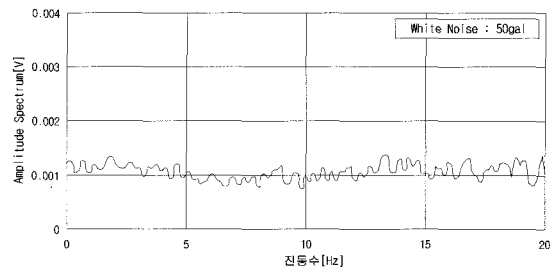
(c) 진동대 가속도의 계측파형

<그림 11> K형 브레이스 댐퍼 프레임(300(gal))

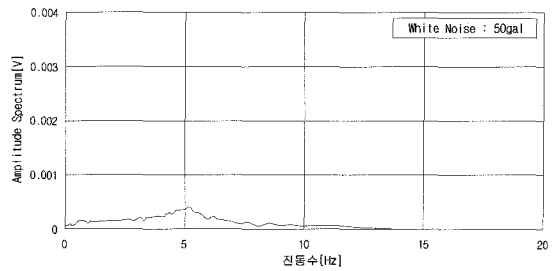
### 3.2.5 White Noise 가진시험

K형 브레이스 White Noise의 가진시험 결과를 <그림 12(a)~(c) 및 그림 13(a)~(c)>은 계측파형 및 FFT해석에 의해 얻어진 Fourier 해석결과이다.

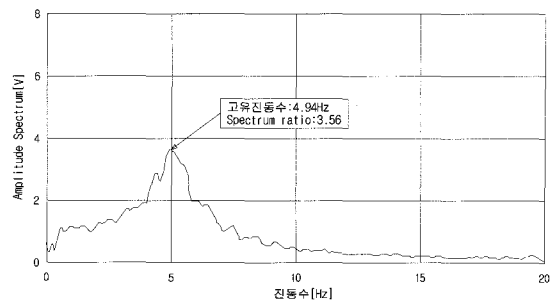
가진레벨, 가진진동수, 프레임변위, 댐퍼변위와 댐퍼하중, 프레임가속도를 <표 7>에 나타내고 Fourier 해석결과를 <표 8>에 나타낸다.



(a) 진동대의 Fourier Spectrum

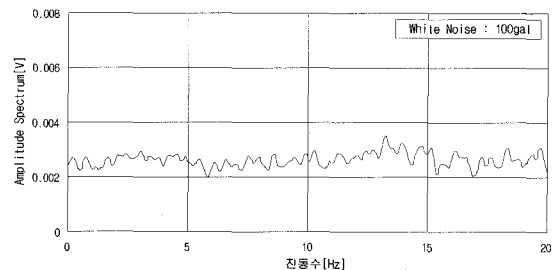


(b) 프레임의 Fourier Spectrum

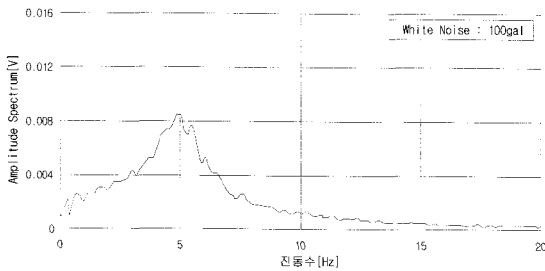


(c) 진동대에 대한 프레임의 Spectrum비

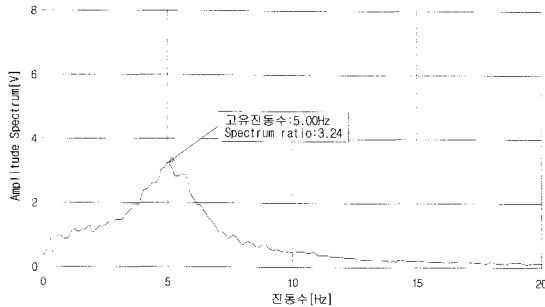
<그림 12> K형 브레이스 댐퍼(오일 有, White Noise : 50gal) 가진시험시 Fourier Spectrum



(a) 진동대의 Fourier Spectrum



(b) 프레임의 Fourier Spectrum



(c) 진동대에 대한 프레임의 Spectrum비

<그림 13> K형 브레이스 댐퍼(오일 有, White Noise : 100gal 가진시험시 Fourier Spectrum)

<표 7> White Noise 가진시험 결과 (orifice:ø2.0mm, L=24mm)

오일	가진 [gal]	프레임 변위 [mm]	댐퍼 변위 서측 [mm]	댐퍼 하중 서측 [kg]	댐퍼 변위 동측 [mm]	댐퍼 하중 동측 [kg]	프레임가속도 [gal]	진동대가속도 [gal]
無	50	0.21	0.51	27.2	0.52	30.9	25.76	46.49
	100	0.49	1.01	77.1	1.01	59.7	62.82	92.35

<표 8> White Noise 가진시험(FFT) 해석결과

오일	가진 [gal]	고유진동수 [Hz]	스펙트럼비	감쇠율 [%]
無	50	4.94	3.66	13.65
	100	5.00	3.24	15.45

## 4. 고찰

### 4.1 정적가력시험

가력시험에서 얻어진 수평스프링 정수는 <표 2>에 나타낸다. 표에서 V형 브레이스, K형 브레이스 모두 댐퍼에 의한 영향은 작았다. 또한 피스톤의 진폭이 크게 작동되어 댐퍼의 피스톤이 피스톤 결합체에 닿아 스톱퍼(stopper)로서 작동된 이후의 수평

정수는 V형 브레이스, K형 브레이스 모두 강상이 증가되는 것을 확인 할 수 있었다.

### 4.2 자유진동시험

자유진동시험 결과는 <표 3>에 나타낸다. <표 3>에서 고유진동수는 댐퍼가 없는 V형 브레이스에서는 2.38Hz, 댐퍼가 설치된 V형 브레이스에서는 3.08Hz, 댐퍼가 설치된 K형 브레이스에서 5.13Hz가 되었다. V형 브레이스의 감쇠율은 댐퍼가 설치됨에 따라 약 6배 정도 증가하였다. 이러한 실험결과에 의해 댐퍼가 진동에너지를 흡수하는 것이 확인되었다. 또한 댐퍼가 있는 V형 브레이스와 K형 브레이스의 감쇠율을 비교하면 K형 브레이스의 경우가 약 2배정도 크게 나타나 K형 브레이스 설치가 효과적인 것으로 나타났다.

### 4.3 정현파 가진시험

<표 4, 5>에서 공진점에 있어서 가속도응답배율은 V형 브레이스의 경우 가진레벨이 40gal경우의 1.2배, 80gal의 경우 1.3배가 되고 K형브레이스의 경우 가진레벨이 50gal 경우 1.9배, 100gal의 경우 2.0배가 되었다.

<그림 9>에서 K형 브레이스에 있어서 댐퍼를 설치하지 않은 프레임을 상정한 이론치 공진곡선과 댐퍼를 설치한 K형 브레이스 프레임의 공진 곡선의 결과를 비교하면 댐퍼를 설치됨에 따라 가속도응답배율이 대폭 저하된 것이 확인되었다.

### 4.4 지진파 가진시험

지진파 가진시험 결과를 <표 6>에 나타낸다. 댐퍼가 설치되지 않은 가진레벨 300gal의 경우 가속도 응답배율은 4.3배로 나타났고 같은레벨 경우 V형 브레이스 점탄성댐퍼를 설치했을 경우 1.65배, K형 브레이스 점탄성 댐퍼 경우 2.66배로 나타나 댐퍼에 의한 가속도 응답배율을 저감시킬수 있음을 확인하였다.

### 4.5 White Noise 가진시험

White Noise 가진시험에서 얻어진 결과에 의한 Fourier 해석을 <표 8>에 나타낸다. <표 8>에서 가

진레벨이 100gal인 경우 스펙트럼비가 댐퍼가 없을 경우 21.8, K형브레이스는 3.24로 나타나 댐퍼를 설치한 경우 스펙트럼비가 현저하게 감소됨을 알 수 있었다.

댐퍼가 설치하고 오일은 주입하지 않는 경우 스펙트럼비는 V형브레이스의 경우 가진레벨을 50gal에서 100gal로 증가하여도 스펙트럼비가 3.76에서 3.61로 되었고 K형브레이스의 경우도 가진레벨을 50gal에서 100gal 증가하여도 3.66에서 3.24로 되어 값의 차이가 거의 없었다. 오일을 주입하지 않은 경우 댐퍼 저항은 점탄성체에 의한 저항만을 나타내 속도에 선형적인 저항으로 스펙트럼비의 변화가 거의 없었으며, 오일을 주입한 경우 오일에 의해 댐퍼 저항이 속도에 대해 비선형적인 저항의 증가로 스펙트럼비가 커진 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 댐퍼에 의한 구조물의 제진 효과를 확인하기 위하여 댐퍼를 설치한 단층 제진 골조의 진동대 가진실험을 하였다. 제진 골조는 실물의 1/3축소, 철골프레임을 사용하였다. 댐퍼를 설치하지 않은 경우 정적가력시험, 자유진동시험, White Noise 가진시험을 행하고 V형 브레이스, K형 브레이스에 댐퍼를 설치하여 각각 정적가력시험, 자유진동시험, 정현파 가진시험, 지진파 가진시험, White Noise 가진시험을 행하였다. 시험의 결과는 아래와 같다.

- 1) 정적가력시험결과, V형 브레이스와 K형 브레이스 모두 수평스프링정수의 경우 댐퍼를 설치한 것에 따른 영향은 작았지만 스톱퍼 (stopper) 작동 후는 댐퍼와 브레이스가 1개의 강체가 되어 강성이 증가하였다.
- 2) 정현파 가진시험 및 지진파 가진시험 결과 공

진점에 있어서 가속도응답배율은 댐퍼를 설치하지 않은 프레임에 상정한 이론치에 비해 댐퍼를 설치한 V형, K형 브레이스의 가속도응답배율이 대폭 저하되었다.

- 3) White Noise 가진시험결과 댐퍼를 설치하지 않은 프레임에 대해 댐퍼를 설치한 프레임이 스펙트럼비가 작게 되었다. 또한 댐퍼에 오일을 주입하지 않은 경우 가진레벨을 상향시켜도 스펙트럼비의 차가 거의 없었지만 오일을 주입한 경우 댐퍼 저항은 속도에 대하여 비선형적인 저항의 증가로 스펙트럼비가 낮아지는 것이 확인되었다.

## 참고문헌

1. Ho Lee, Sang-Yeob Lee : A Vibration Response Analysis of Steel Building Frame with V shape Brace Vibrationally Controlled by Turbulent Flow Dampers sealed by Visco-Elastic Material, Journal of the Korean Association for Spatial Structure Vol.2. No. 3, pp.1003~113 .
2. Ri-Hue, Z.Hang & T.T.Soong : Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, pp.389~396, 1989.
3. K.C.Chang, T.T.Soong & S.T.Oh : Seismic Response of Steel-Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers, Proceedings of 10th W.C.E.E., pp.5169~5173, 1992. 7.
4. K. Kasai, Yi Hua Huang 他 : Hysteretic Model of Visco-Elastic Damper for Long Puration Loading, 日本建築學會大會學術講演梗概集 B-2, pp.829~830, 1997. 9.