Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol. 25, No. 1, pp.81-92, February, 2013
DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2013.25.1.081
ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054

전단벽 제진시스템의 반복가력실험

안 태 상[1] · 김 영 주[2]* · 김 형 근[3] · 장 동 운[4] · 최 경 규[5] · 김 종 락[6]

[1] 소장, DRB동일, 면진제진기술연구소 [2] 수석연구원, DRB동일, 면진제진기술연구소 [3] 연구위원, SH공사, 도시연구소
[4] 부장, 쌍용건설, 건축기술부 [5] 조교수, 숭실대학교, 건축학부 [6] 교수, 숭실대학교, 건축학부

Cyclic Test of Shear Wall Damping Systems

Ahn, Tae Sang[1] *Kim, Young Ju*[2]* *Kim, Hyung Geun*[3] *Jang, Dong Woon*[4]
Choi, Kyoung Kyu[5] *Kim, Jong Rak*[6]

[1] Director, Seismic Isolation & Vibration Control Research Team, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea
[2] Senior researcher, Seismic Isolation & Vibration Control Research Team, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea
[3] Research Fellow, SH Corporation, Seoul, 135-988, Korea
[4] General manager, Construction technology development department, Ssangyong E&C, Seoul, 138-726, Korea
[5] Assistant professor, School of architecture, Soongsil University, Seoul, 156-743, Korea
[6] Professor, School of architecture, Soongsil University, Seoul, 156-743, Korea

ABSTRACT : The objective of conventional seismic design is to ensure an acceptable safety level while avoiding catastrophic failures of structures and loss of life. Over the last many years, a large amount of research has been devoted into developing effective earthquake resistant systems in order to raise the seismic performance level of structures. The purpose of this study is to propose a new damping system, which realize not only increasing seismic performance but also easy repairing after an earthquake. The proposed damping system is slit in the bottom of wall with damping devices installed in the slit horizontally aiming to dissipate energy during earthquakes. Cyclic loading tests were conducted to investigate hysteretic behavior and energy dissipation capacity. Test results show that the proposed systems exhibit a stable hysteretic response and the energy dissipation in this system is concentrated on the damping devices.

KEYWORDS : seismic design, repairing, damping system, cyclic loading test, energy dissipation capacity

1. 서 론

전통적인 내진설계의 기본개념은 구조물의 붕괴를 방지하고 인명을 보호하도록 안전성을 유지하는 것이다. 지진 후에 구조물이 완전히 붕괴되지 않고 거주자들의 생명이 보호받으면 그 구조물을 기능적으로 재사용을 할 수 없을지라도 이 건물은 내진설계의 목적을 충족했다고 할 수 있다. 일반적으로 소위 '인명안전'의 성능등급을 위한 설계는 일반구조물을 대상으로 고려하는 것이고 현재까지 내진기준의 근간을 이루고 있다[1]. 그러나 중요성이 큰 공공구조물의 경우에는 더욱 큰 성능등급을 갖도록 요구된다. 즉, 병원, 경찰서, 통신센터, 학교 등과 같은 구조물은 단지 붕괴방지라는 전통적인 내진설계 개념보다 상위의 등급인 '즉시기능유지' 성능을 발휘해야 할 필요성이 있다. 미국의 구조기준을 참조하면, 성능기반설계 (Performance Based Design)에서는 구조물의 성능목표 및 수준을 정하여 설계할 수 있도록 하고 있다[2],[3].

지난 수십년간 구조물의 내진성능을 향상시키는 혁신적인 지진저항시스템의 개발에 관한 수많은 연구들이 진행되었다. 이러한 혁신적인 시스템들은 구조물에 제진장치를 설치하여 지진 시에 에너지를 흡수하도록 하는 제진구조시스템과 구조물을 기초와 격리하도록 하는 면진구조시스템으로 구분할 수 있다[4],[5].

제진구조시스템은 구조물 내에 제진장치를 삽입하여 지진에 의한 진동을 제어하여 구조물을 보다 안전하게 하는 구조시스템이다. 에너지흡수에 의한 수동제진방법은 마찰에 의한

Note.-Discussion open until August 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 14, 2012; revised December 6, 2012; approved on January 30, 2013.
ⓒ KSSC 2013

* Corresponding author
Tel. +82-2-2168-9141 Fax. +82-2-2672-6423
E-mail: kim.young.ju@drbworld.com

미끄럼, 강재의 항복, 재료의 상변환, 점(탄성)재료의 변형 등에 따라서 다양하게 적용되고 있다. 마찰댐퍼는 변위에 의해 두 재료간의 마찰력을 열에너지로 발산시킴으로써 전체구조물의 변형을 저감시키는 장치이다[6],[7]. 강재댐퍼는 다양한 방법으로 항복메커니즘을 달성할 수 있다[8],[9],[10],[11]. 잘 알려진 ADAS 댐퍼[8] 또는 TADAS 댐퍼[9]의 경우에는 강판의 면외변형에 의해 에너지를 흡수한다. 슬릿댐퍼[10]의 경우에는 다수의 오프닝이 있는 강판의 면내 전단변형메커니즘에 의해 작동되고, 에너지는 오프닝 사이의 스트럿 휨변형에 의해 에너지를 소산하도록 계획되었다. 최근에는 캔틸레버타입 강재댐퍼(MEED 댐퍼)가 개발되었고 캔틸레버보와 같은 휨변형에 의해 에너지를 소산하도록 고안되었다[12].

본 연구의 목적은 새로운 지진저항시스템인 전단벽 제진시스템을 제안하고, 실험적으로 내진성능을 평가하는 것이다. 반복가력 실험을 실시하여 댐퍼종류에 따른 이력특성 및 에너지소산능력을 평가하였다.

2. 전단벽 제진시스템

2.1 전단벽 제진시스템의 개념

Fig. 1은 전단벽 제진시스템의 개념을 나타낸 것이다. 제안된 시스템은 콘크리트 전단벽, 댐퍼, 적층고무 면진장치로 구성되어 있으며, 전단벽 하부에 슬릿을 두어 가운데에는 댐퍼를, 양측에는 면진장치를 배치하였다. 본 제진시스템에는 변위의존형 장치인 마찰댐퍼와 강재이력댐퍼가 사용된다. 양측에 배치된 2개의 면진장치는 전단벽의 자중을 견디도록 하여, 제진장치가 중력하중에 영향을 받지 않도록 계획하였다.

본 제진시스템은 지진하중 하에서 건물이 수평변형을 하게 되면 강도가 큰 벽체는 탄성거동을 하게 되고, 강성이 매우 크게 설계된 댐퍼가 상대적인 수평변위를 경험하면서 에너지를 흡수하도록 하는 시스템이다. 또한, 면진장치는 제진장치가 변형능력을 잘 발휘할 수 있도록 충분한 수평변형능력을 갖도록 계획하였다[13]. 단, 제진장치가 안정적으로 거동하도록 하기 위해서 제진시스템의 상하부에 작용하는 모멘트나 전단력에 충분히 견디는 바닥시스템의 성능을 갖추어야 한다.

2.2 제진장치 및 면진장치

전단벽 제진시스템을 구성하고 있는 댐퍼 중에서 마찰댐퍼의 형상 및 실험결과[14]를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2는 단위마찰패드 실험을 위한 실험체 셋팅상황을 나타낸다. 마찰댐퍼는 내부강판 1개와 외부강판 2개로 구성되는데, 내부강판은 슬롯홀이 뚫려있고 양면에 스테인리스판이 부착되어 있으며, 외부강판에는 마찰패드가 부착되어 있다. 또한 마찰패드와 스테인리스판과의 접촉면에 고력볼트로 축력을 도입함으로써 상대변위가 발생하면 소정의 마찰내력을 얻도록 되어 있다. Fig. 2의 단위마찰패드 실험결과를 보면 매우 안정된 직사각형의 이력형상을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 전단벽 제진시스템에 설치될 실제 댐퍼의 형상과 실험결과를 나타내었다. 마찰댐퍼의 상부는 볼트로 강하게 고정되어 있고, 하부는 Fig. 2에서 관찰한 단위마찰패드가 2개소에 배치되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이 마찰댐퍼는 지진력과 같은 수평력 작용 시 상부와 하부에 상대변위가 발생하여 지진에너지를 소산하도록 계획되었으며, 상대변위는 슬롯홀의 길이에 의해 제한된다. Fig. 3의 마찰댐퍼는 마찰내력이 100 kN으로, 슬롯홀에 의해서 변위는 50mm의 목표로 계획되었고, 실험결과를 통해서 목표하는 내력 및 변형을 잘 발휘하는 것을 확인할 수 있다.

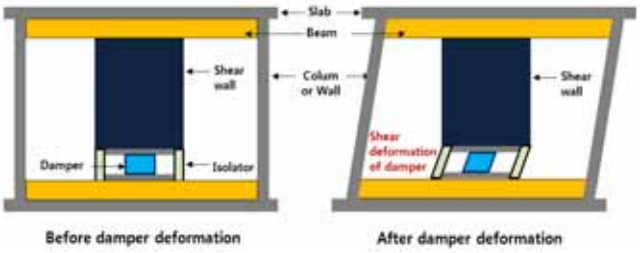


Fig. 1 Shear wall damping system

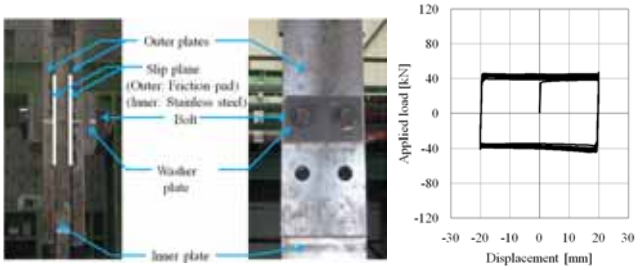


Fig. 2 Test and result of friction pads

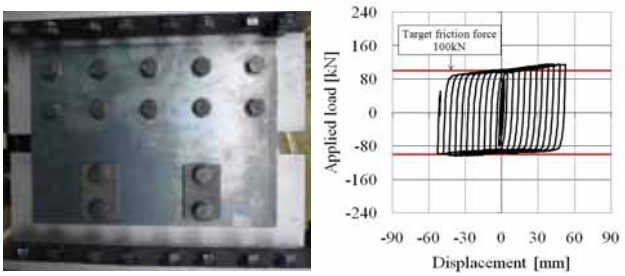


Fig. 3 Test result of friction damper

Fig. 4는 캔틸레버형 강재(이하 MEED 댐퍼)의 형상 및 거동개념을 나타낸 것이다[12]. MEED댐퍼는 그림과 같이 하부는 고정단이고 상부는 회전단의 지점을 가진 캔틸레버형 강재댐퍼로서, 회전단에서 고정단으로 갈수록 단면의 깊이가 점점 증가하는 형상을 하고 있다. 이는 댐퍼의 수평하중 발생 시 캔틸레버보와 같이 변형하되 모멘트 분포를 고려하여 고정단 부근에서의 응력집중현상을 방지하도록 계획한 것이다. Fig. 4의 하부는 MEED댐퍼의 제작과정 중에서 강판재료의 절단방법에 관해 나타낸 것인데, 댐퍼의 형상을 잘 활용하여 제작할 경우 강재의 손실을 절약하여 제작단가를 저감하는데 큰 효과가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 5는 MEED댐퍼의 실험결과를 나타낸 것이다. ASCE 7-10[3]에서는 변위의존형인 강재댐퍼의 경우, 최대지진시의 댐퍼의 변위를 $1/T_{1M}$의 진동수로 5회 가력하여 강성, 내력 및 에너지 등이 각 사이클에서의 평균값의 15% 이내에 있으면 장치의 성능이 확보되는 것으로 기술하고 있다. 여기서 T_{1M}은 최대고려지진 시 건물의 기본진동주기이다. Fig. 5의 이력루프를 바탕으로 Table 1은 각종 장치성능값을 요약하였는데, 모두 평균값의 2% 내외의 오차범위를 나타내고 있다. 따라서 MEED댐퍼의 경우는 ASCE에서 요구하는 제진장치의 성능을 잘 만족하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 면진장치형상 및 실험결과를 나타낸 것이다. 면진장치는 강판 및 고무로 구성된 적층고무와 상하단의 연결접합부로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용되는 면진장치는 상부의 전단벽 자중을 받는 상태에서 큰 수평변형능력을 발휘하도록 계획되었다. 즉, 제진장치가 중력하중에 의한 영향을 받지 않도록 하면서 수평변형에 의한 에너지소산능력을 극대화도록 하는 장치로써, 수평강성은 작아야 한다. 이러한 성능

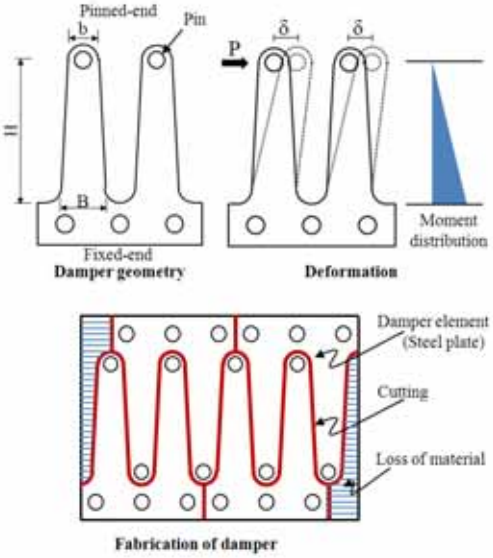


Fig. 4 Cantilever type steel damper (MEED)

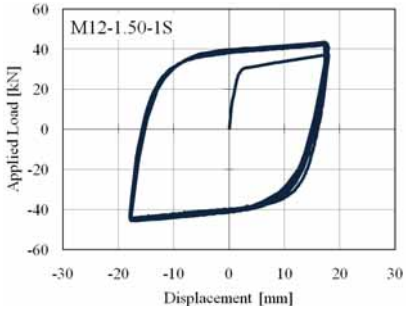


Fig. 5 Cyclic response of MEED damper

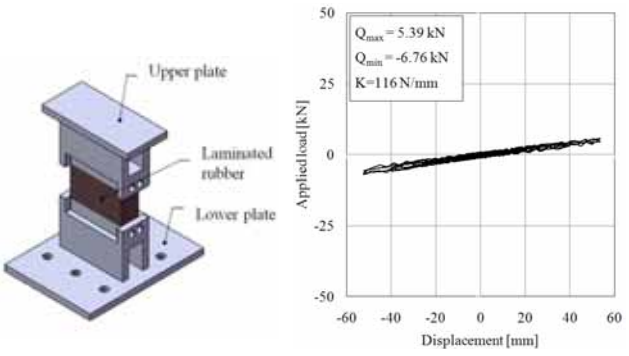


Fig. 6 Shape and test result of isolator

Table 1. Evaluation of seismic performance of MEED damper by ASCE/SEI 7-10

Cycle	Maximum & minimum forces at zero displacement				Maximum & minimum forces at maximum displacement				Hysteresis energy per one cycle		Effective stiffness	
	$_{zero}Q_{max}$ [kN]	Difference [%]	$_{zero}Q_{min}$ [kN]	Difference [%]	$_{m}Q_{max}$ [kN]	Difference [%]	$_{m}Q_{max}$ [kN]	Difference [%]	E_{loop} [kN]	Difference [%]	K_{eff} [kN]	Difference [%]
1	38.16	2.27	-41.04	-0.80	42.22	-1.72	-45.46	0.21	2383	1.55	2.45	-1.79
2	38.77	0.71	-41.07	-0.87	42.72	-0.56	-45.67	-0.12	2368	0.91	2.47	-0.94
3	39.29	-0.62	-40.09	1.54	43.20	0.56	-45.61	-0.25	2353	0.27	2.50	0.05
4	39.43	-0.98	-40.79	-0.18	43.44	1.12	-45.43	0.27	2315	-1.35	2.54	1.67
5	39.59	-1.39	-40.59	0.31	43.22	0.61	-45.60	-0.10	2314	-1.39	2.52	1.01

을 잘 발휘하는지 실험적으로 검증하기 위해서 그림1과 같이 상부에 전단벽이 있는 상태에서 면진장치를 양측에 설치하여 수평하중을 반복적으로 가력하였다.

Fig. 6의 우측그래프는 수평하중 작용 시 면진장치 2개의 이력을 함께 나타낸 것이다. 그래프는 천연고무계 적층고무의 선형적인 이력을 잘 나타내었고, 강성 및 내력은 매우 미미하여 댐퍼의 이력에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다. 이 결과는 MEED댐퍼가 큰 성능을 발휘하도록 요구되는 면진장치의 성능을 잘 발휘하는 것으로 판단된다.

3. 실험프로그램

3.1 실험체

전단벽 제진시스템의 실험체 일람은 Table. 2와 같고, Fig. 7에는 실험체 상세를 나타내었다. Fig. 7에 나타낸 실험체는 실대형 실험체로서 높이가 2700mm, 너비가 1500mm이고, 하부에는 중앙부 댐퍼와 양측 2개의 면진장치가 설치되어 있다. 상부의 철근콘크리트전단벽은 댐퍼가 최대내력에 도달하더라도 성능을 잘 발휘하도록 충분히 강하게 설계하였다(ASCE 7-10). 실험체의 상부는 T-자형으로 형상을 고안하여 볼트를 사용하여 가력보와 접합할 수 있도록 하였고, 하부는 강판을 통해 바로 하부지그에 결합하도록 계획하였다.

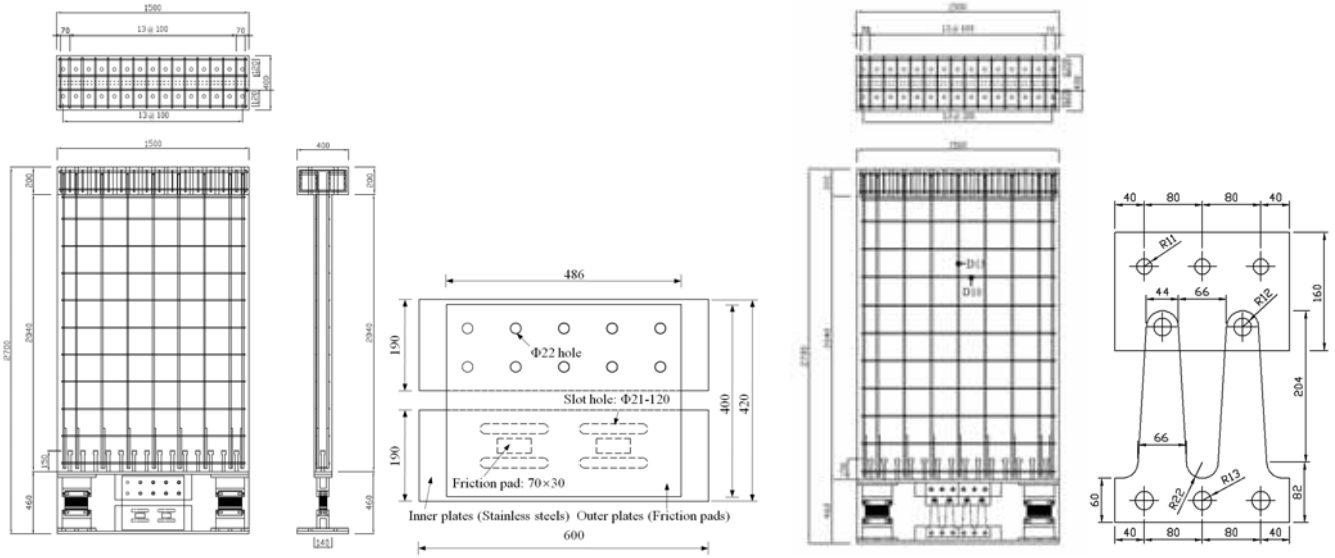
실험체는 모두 3개이며 2개의 실험체에는 마찰댐퍼가 설치되었고 나머지 한 개의 실험체에는 MEED댐퍼가 설치되었다. Fig. 7(a)에 나타낸 마찰댐퍼가 설치된 실험체 FR02 및 FR03은 각각 100kN 및 130kN의 목표내력으로 설계되었고, 실험 시 목표층간변형각은 각각 1.5%와 2.0%로 설정하였다. 마찰패드는 크기가 60×30mm이며 두께가 3.3mm로 계획하였고, 목표하는 마찰내력을 발휘하도록 고력볼트에 장력을 도입하였다. 마찰댐퍼에서 슬롯홀은 120mm로 제작하여 마찰패드가 약 ±55mm의 상대변형을 할 수 있어서 목표하는 층간변형각을 잘 발휘하도록 계획하였다.

MEED 댐퍼가 설치된 실험체 MEED01은 Fig. 7(b)에 상세가 표현되어 있다. FR실험체와 마찬가지로 철근콘크리트전단벽 하부의 중앙에 MEED댐퍼 2개가 설치되어 있고, 목표로 하는 항복내력이 100kN이 되도록 계획하였다. MEED01실험체는 FR03실험체와 이력특성 및 에너지소산능력을 비교하기 위해서 목표층간변형각을 2%로 설정하였다.

실험체에 사용된 철근콘크리트전단벽은 압축강도(f_{ck})가 24MPa인 콘크리트와 항복강도(f_y)가 400MPa인 철근재료(HD400)로 제작되었고, 마찰댐퍼와 강재댐퍼에 사용된 강재는 모두 항복강도(f_y)가 235MPa인 일반구조용강재(SS400)로 제작되었다.

Table 2. List of test specimen

Specimen ID	Type of damping device	Target story drift [%]	Target strength [kN]
FR02	Friction damper	1.5	100
FR03	Friction damper	2.0	130
MEED01	Steel damper	2.0	100



(a) FR (b) MEED01

Fig. 7 Specimen details

3.2 댐퍼의 설계

본 연구에서 개발한 전단벽 제진시스템에 사용된 마찰패드의 마찰 메커니즘은 마찰패드와 강재와의 슬라이딩을 통해 안정된 마찰거동을 나타내고 있다. 이러한 마찰댐퍼는 마찰재료와 스테인리스 스틸을 이용하여 마찰면을 구성하고, 볼트의 조임력을 마찰면에 지압형태로 가력하여 마찰을 발생시킨다. 따라서 볼트의 조임력에 의해서 마찰면에 작용하는 지압력의 분석이 매우 중요하다. 만약 볼트 조임력에 의한 마찰면에 작용하는 압축응력이 균등하게 분포한다면, 지압응력(σ_x)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_x = \frac{N}{A_c} \tag{1}$$

여기서 N은 조임력이며, A_c는 접촉면의 면적이다. 그러나 실제의 마찰면에서의 압축응력은 균등하지 않고 그 분포가 변화한다. 볼트 조임력에 의한 접촉면의 압축응력은 Fig. 8과 같은 모델(modified semi-infinite wedge model)로 나타낼 수 있고, 이를 토대로 마찰면에 작용하는 압축응력의 분포를 산정하면 다음 식과 같이 표현된다[6].

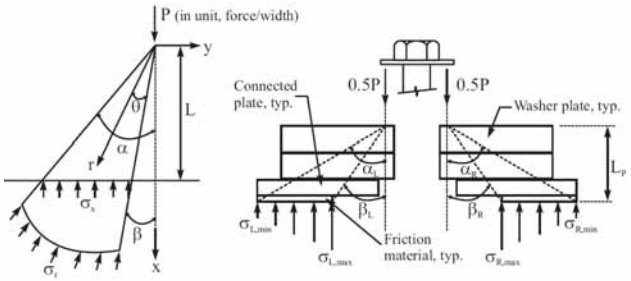


Fig. 8 Variable distribution of normal pressure on sliding interfaces

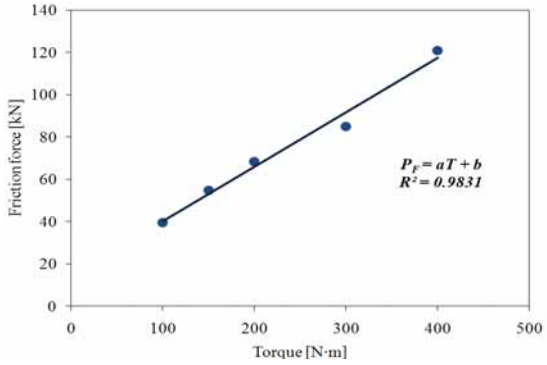


Fig. 9 Friction force vs. Torque of H.S bolt relationship

$$\sigma_x = -\frac{4P}{L}\frac{\cos^4\theta}{(\sin 2\alpha - \sin 2\beta) + 2(\alpha - \beta)} \tag{2}$$

본 연구에서는 보다 직접적인 마찰댐퍼의 성능산정을 위해서 Fig. 9와 같이 기존의 실험결과[14]를 통해 회귀분석방법을 사용하여 마찰성능(F_T)과 볼트 조임력(T)의 관계를 (3)식과 같이 나타냈다.

$$F_T = aT + b \tag{3}$$

여기서, F_T 와 T는 단위 마찰패드의 마찰력(kN)과 고력볼트의 토크값(N·m)을 나타내고, a와 b는 마찰패드의 종류에 따른 상수값이다.

식(3)과 Fig. 9를 참조해서 FR02와 FR03실험체의 마찰댐퍼의 고력볼트를 각각 166 N.m와 224 N.m의 토크로 조임으로써, 목표로 하는 마찰내력인 100kN과 130kN을 달성하도록 설계하였다.

강재댐퍼의 경우, 설계에서 중요한 항목은 항복내력 및 항복변위이며, MEED 댐퍼의 항복내력 및 항복변위를 구하는데 있어서, 설계의 편의를 위해 Fig. 10과 같이 댐퍼요소의 모델을 이상화 하였다. 댐퍼를 이상화하기 위해서 고정단부의 원형부분을 직선으로 가정하고, Benavent-Climent 등[15]의 연구를 참조하여 댐퍼요소의 유효길이(L′)를 산출하였다. 캔틸레버 거동에 대한 역학의 기본원리를 이용하여 댐퍼요소의 항복내력(Q_y), 항복변위 (δ_y) 및 초기강성(K_1)을 구하면 다음과 같다.

$$Q_y = \frac{tB^2 F_{ye}}{4L'} \tag{4}$$

$$\delta_y = \frac{2tB^2 L'^2 F_y}{EI_N}\left(\ln\frac{3}{2} - \frac{7}{18}\right) \tag{5}$$

$$K_1 = \frac{EI_N}{8L'^3\left(\ln\frac{3}{2} - \frac{7}{18}\right)} \tag{6}$$

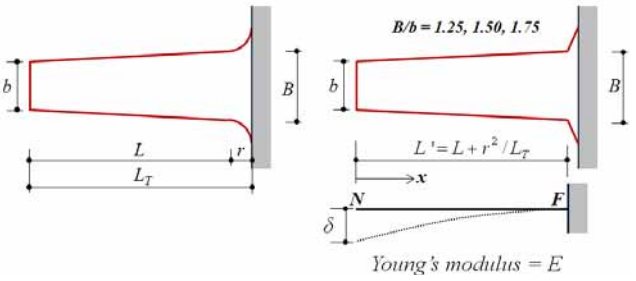


Fig. 10 Idealization of MEED damper

여기서, B 및 b는 각각 고정단 및 자유단의 폭이고, t는 댐퍼요소의 두께이다. L_T, L 및 L′은 각각 댐퍼의 총 길이, 순길이 및 유효길이(= $L+r^2/L_T$)이다. r은 고정단부 의 반경이고, F_{ye}는 강재의 예상공칭항복강도(expected yield stress)이다. 또한, E는 강재의 탄성계수, I_N은 댐퍼자유단의 단면이차모멘트이다.

안태상 등[12]의 연구에서는 자유단부의 폭(b)에 대한 고정단부의 폭(B) 비율(B/b)을 각각 1.25, 1.50, 1.75로 제안하였는데, 본 연구에서는 1.50의 폭비를 가진 강재댐퍼를 선정하여 적용하였다. MEED댐퍼 설계에 대한 자세한 사항은 안태상 등[12]의 문헌을 참조하기 바란다.

3.3 실험체 셋업 및 가력방법

Fig. 11은 실험체 셋업상태를 나타낸 것이다. 실험체는 사각형 강체프레임의 안쪽에 설치하였다. 실험 시, 실험체의 회전에 의한 변형을 최소화하고 수평적으로만 변위를 유도하여 제진시스템의 수평저항성능을 효과적으로 평가하기 위해서

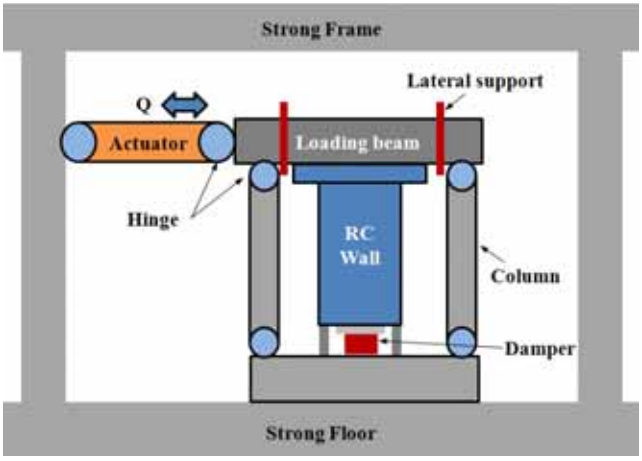


Fig. 11 Test setup

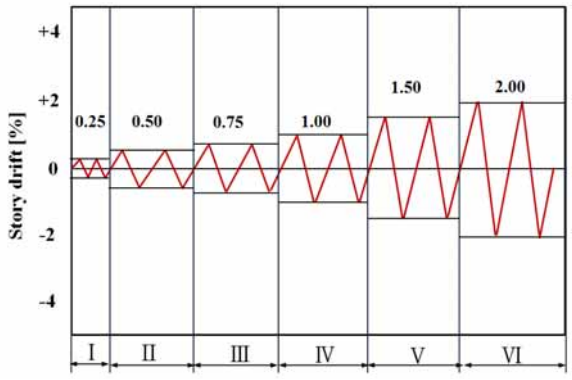


Fig. 12 Loading protocol

기둥의 상하부를 핀 지점으로 처리하였다. 가력은 500kN 용량의 엑츄에이터를 사용하여 수평방향으로 가력하였다. 또한 면외방지지그를 상부에 설치하여 실험체의 면외방향 변형을 방지하도록 하였다.

Fig. 12는 실험체의 가력 프로토콜을 나타낸 것이다. 실험체의 가력은 층간변형각이 0.25, 0.5, 0.75, 1.00, 1.5 및 2% rad으로 점증변위제어를 하되, 각 스텝당 2회를 가력한다. FR02실험체는 목표층간변형각인 1.5%까지 가력하고, FR03과 MEED01실험체는 2.0%를 목표로 가력한다.

4. 실험결과

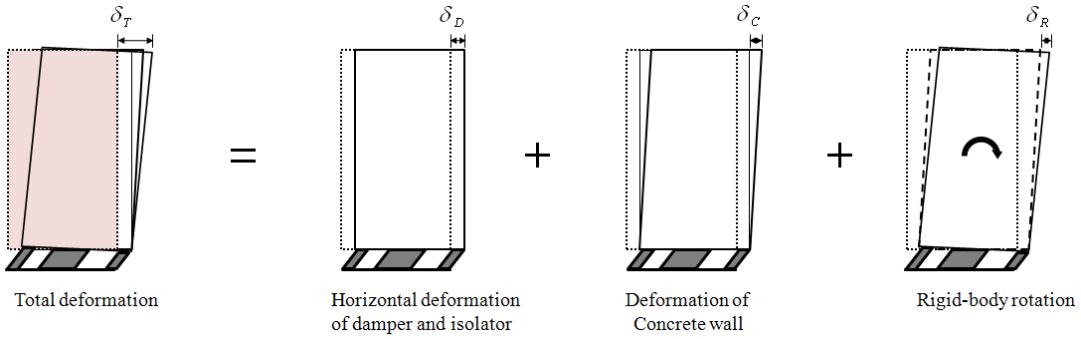
4.1 실험체의 거동 및 파괴상황

Fig. 13은 실험체의 하중–층간변형각 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 13(a)는 실험체 각 요소의 변형성분을 나타내었고, 총 변형(δ_T)은 댐퍼와 면진장치의 수평변형(δ_D), 콘크리트벽체의 전단변형(δ_C) 및 실험체의 강체회전변형(δ_R)로 구성되어 있다. 이러한 각 요소의 변형성분을 층간변형각으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\theta_T = \theta_D + \theta_C + \delta_R \tag{7}$$

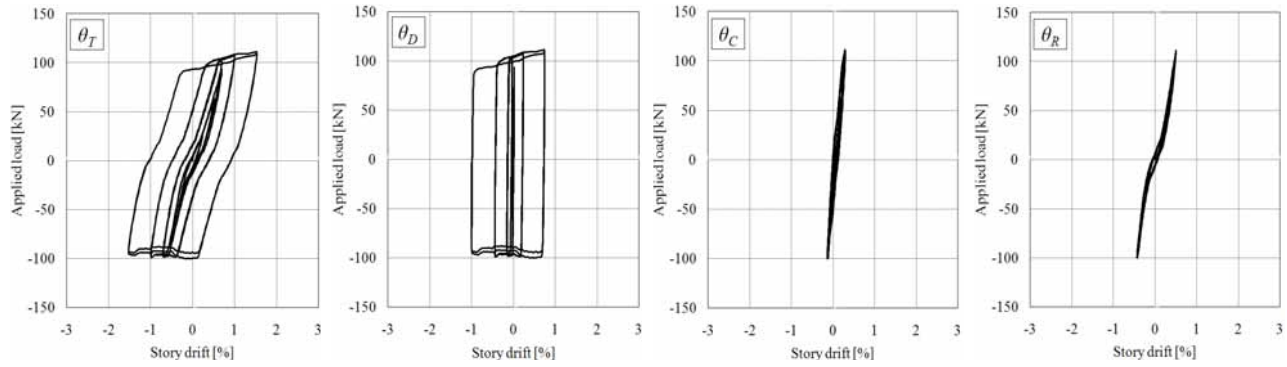
Fig. 13(b)~(c)는 FR02와 FR03실험체의 총 층간변형각과 각 요소의 층간변형각을 각각 나타낸 것이다. FR02실험체의 경우, 댐퍼의 수평변형성분(θ_D) 곡선은 마찰댐퍼의 이력특성을 잘 반영하고 있으며, 목표 마찰내력인 100kN을 발휘하고 있는 것을 알 수 있다. 이 그래프는 완벽한 직사각형 형태가 아니고 일부 사다리꼴 형태를 보이고 있는데, 이는 실험체 셋팅 시 실험체가 일부 어긋나는 부분이 발생하여 Fig. 15(a)에서와 같이 마찰패드의 전단면이 접촉되지 않았기 때문이다. 이러한 결과는 실험 셋팅상황에 의해서 발생한 것으로서, 실제 적용 시에는 공장에서 마찰댐퍼를 제작하여 정밀성을 유지하게 됨으로 위와 같은 문제점은 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 콘크리트의 전단변형성분과 강체회전변형성분 곡선들은 거의 탄성상태를 유지하고 있는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 14는 FR02실험체 가력 시 마찰댐퍼의 상대변형상황 및 면진장치의 전단변형 형상을 나타낸 것이다. 하부 내부강판에 설치한 슬롯홀을 따라서 마찰댐퍼가 잘 작동하고 있고, 면진장치는 이에 상응하는 우수한 변형능력을 잘 발휘하는 것을 알 수 있다.

FR03실험체는 FR02실험체의 다른 요소는 그대로 두고, 하부에 있는 마찰패드만을 교체한 실험체이다. Fig. 15는 마찰

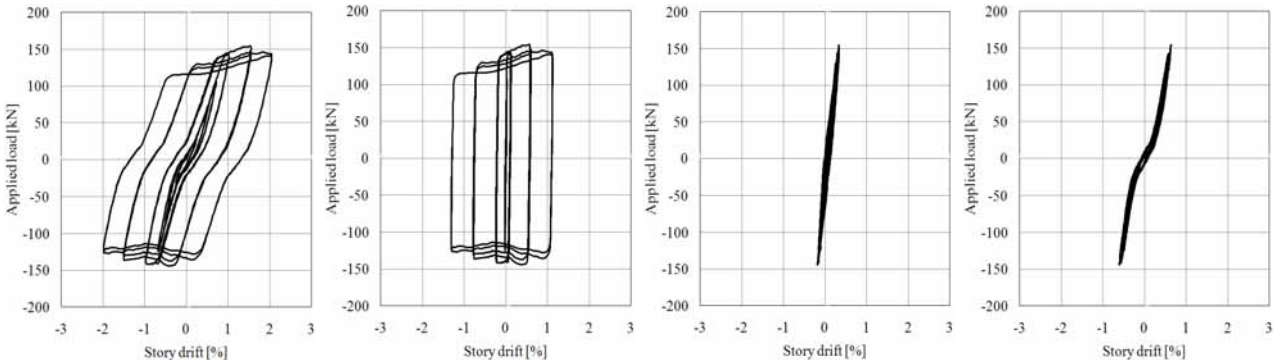


$$\delta_T = \delta_D + \delta_C + \delta_R$$

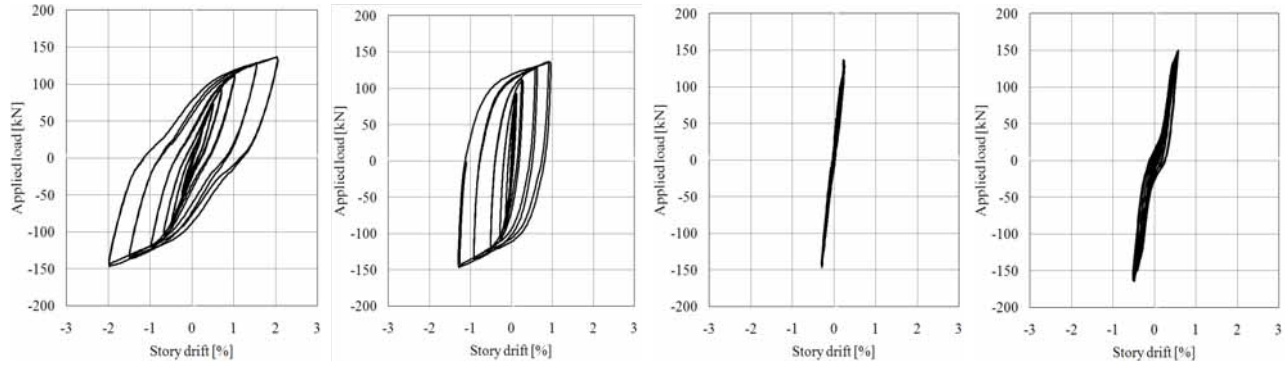
(a) Components of total displacement



(b) FR02



(c) FR03



(d) MEED01

Fig. 13 Cyclic response of each specimen

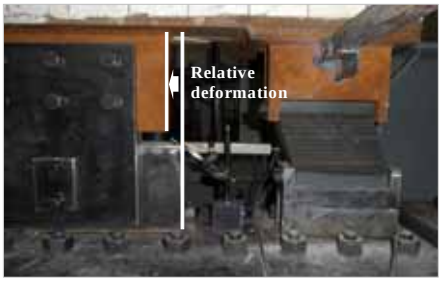
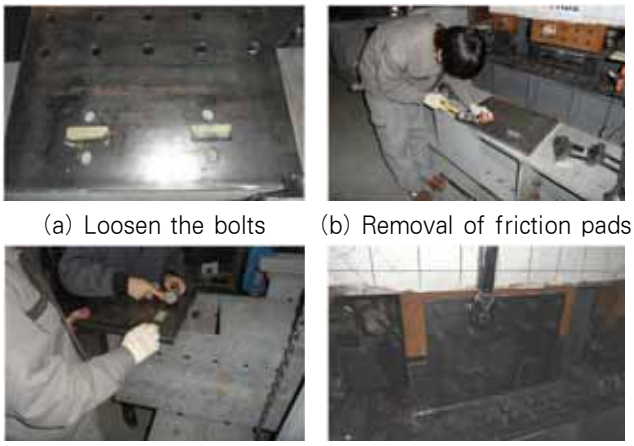


Fig. 14 Relative deformation of friction damper and isolator (FR02)



(a) Loosen the bolts (b) Removal of friction pads

(c) Insertion of new friction pads (d) assembly of friction damper

Fig. 15 Exchange of friction pads after loading

댐퍼의 교체작업을 순서대로 나타낸 것인데, Fig. 15(a)~(d)는 FR02실험체 마찰댐퍼의 외부강판 분리 후 마찰패드를 제거하고, 새로운 마찰패드를 삽입한 후 토크렌치를 사용하여 마찰댐퍼의 외부강판을 조립하여 FR03실험체 셋팅을 완성하였다.

Fig. 13(c)는 FR03실험체의 이력곡선을 나타낸 것인데, FR03 실험체와 같이 마찰댐퍼의 이력특성을 잘 반영하고 있으며, 목표로 계획한 마찰내력인 130kN을 잘 발휘하고 있는 것을 보여주고 있다. Fig. 15는 실험종료 후 콘크리트벽체의 균열패턴을 나타낸 것이다. FR03 실험체는 FR02실험체를 재사용한 것으로써 일부 균열이 추가적으로 발생하였지만, 균열로 인해서 실험체의 내력 및 이력특성에 미치는 영향은 미미한 것으로 조사되었다.

Fig. 13(d)는 강재댐퍼를 삽입한 MEED01실험체의 이력곡선을 나타낸 것이다. MEED01실험체의 총 변형성분 그래프를 살펴보면 마찰댐퍼가 삽입된 실험체의 그래프와 다르게 방추형의 이력성상을 보여주고 있다. 댐퍼의 수평변형성분(θ_D) 곡선은 MEED댐퍼가 탄성강성이 크고, 항복내력은 약 110kN으로 목표 항복내력인 100kN을 약간 상회하지만 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.Fig. 17은 MEED댐퍼의 변형성상을 나타내고 있는데, 단곡률의 캔틸레버거동을 잘 표현해 주고 있다.

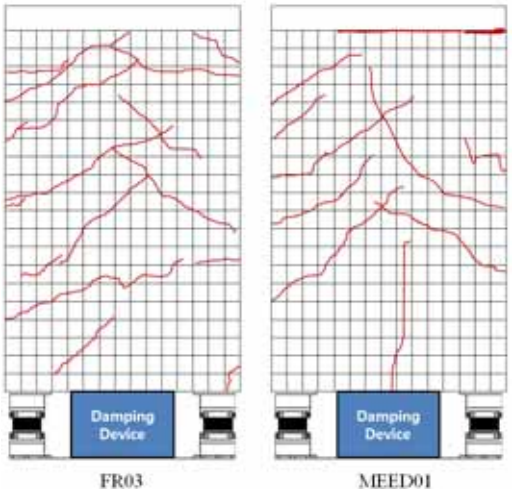


Fig. 16 Crack pattern of concrete wall

Fig. 17 Damper deformation (MEED01)

4.2 댐퍼의 거동 특성

본 연구에서 실험하고 있는 마찰댐퍼와 강재댐퍼는 그 이력루프의 형상이 다르므로 그 특성을 비교하고 조사할 필요가 있다. Fig. 18은 FR03실험체의 마찰댐퍼 이력곡선과 MEED01 실험체의 강재댐퍼 이력곡선을 함께 나타낸 것이다. 두 댐퍼의 목표내력은 다르지만 강재댐퍼의 경우는 강재의 변형경화 효과에 의해서 최대내력은 두 댐퍼가 거의 비슷한 결과를 보여준다. 마찰댐퍼는 초기강성이 거의 무한대에 가깝고 상응하는 마찰내력에 도달하면 변위가 발생하는 특징을 보이는데, 이는 Fig. 18의 점선으로 나타낸 마찰댐퍼의 이력에서 잘 알 수 있다.

강재댐퍼의 경우에는 초기강성을 기본으로 하여 탄성으로 거동하다가 요소일부가 항복강도에 도달하면 소성변형을 시작하여 에너지를 소산하게 되며, 이는 Fig. 18의 실선으로 표현된 MEED댐퍼의 이력을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 19는 누적변형에 따른 각 댐퍼의 변위를 실험초기부터 종료될 때까지 나타낸 것이다. 그림은 초기에는 MEED댐퍼가 큰 변위로 잘 작동하다가 후반부로 가면 강재댐퍼와 마찰댐퍼의 변위가 거의 비슷하게 경험하는 것을 알 수 있다.

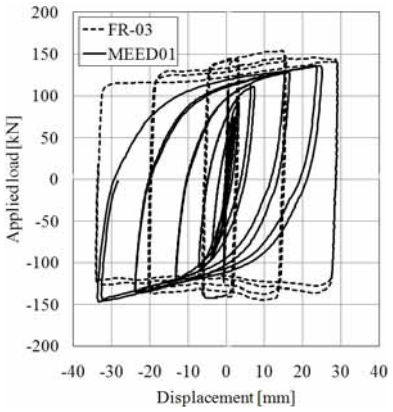


Fig. 18 Cyclic responses of damper elements

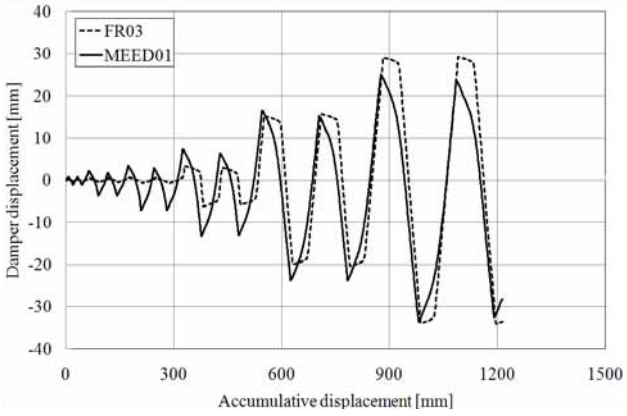


Fig. 19 Displacement of damper elements

4.3 변형도 분포

Fig. 20은 MEED댐퍼에 부착한 변형도게이지 결과를 바탕으로 누적변형에 따른 변형도 분포를 나타낸 것이다. 변형도가 인장을 받는 부분은 10000 마이크로 변형도 이후부터는 측정이 되지 않았는데, 측정장치, 부착방법 등의 문제가 발생한 것으로 보인다. 따라서 압축변형도를 중심으로 살펴보면, 그림은 댐퍼가 항복한 3번째 사이클부터는 큰 변형도 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 고정단이 되는 E점으로부터 D점, C점으로 변형도가 고루 저감되는 것으로 보아 댐퍼의 소성변형이 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 캔틸레버보의 모멘트구배를 따르도록 하기위해서, 댐퍼의 형상을 고

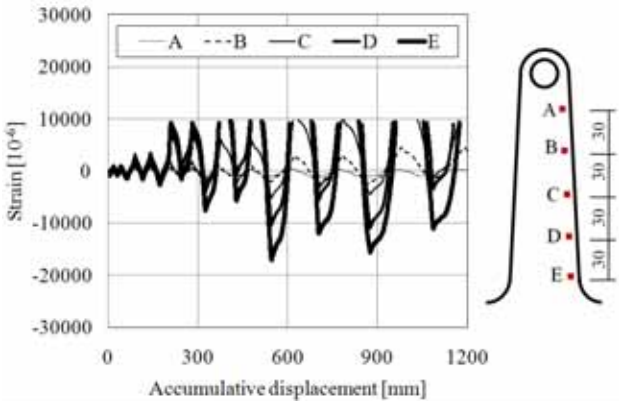


Fig. 20 Strain profile (MEED01)

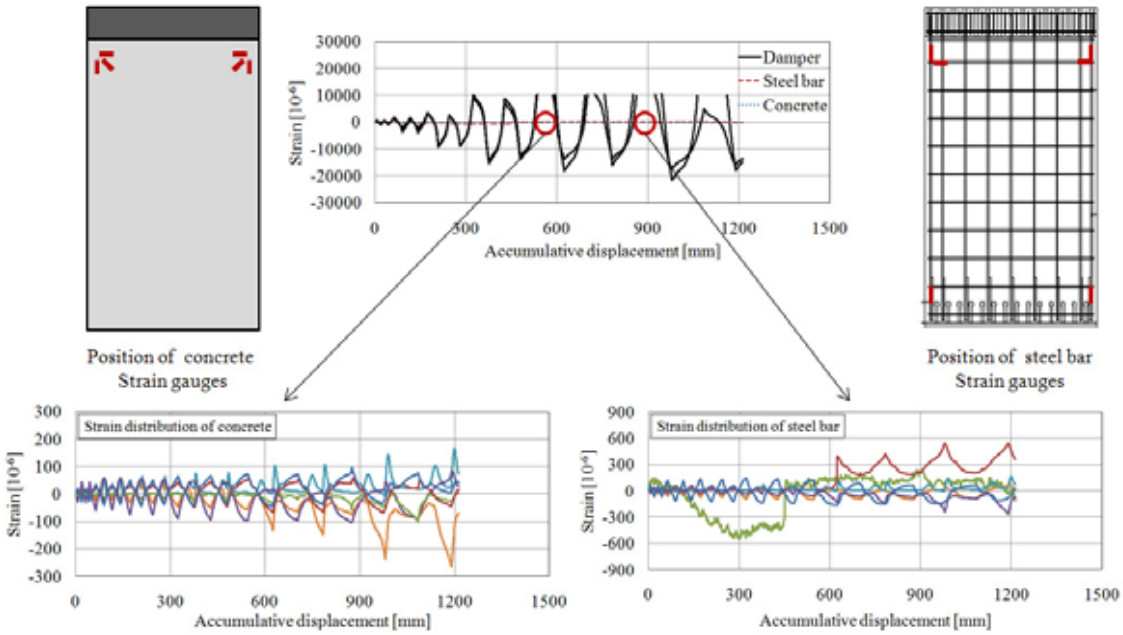


Fig. 21 Strain distribution

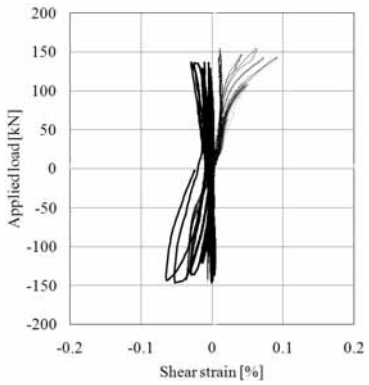


Fig. 22 Shear strain profile of concrete wall

정단으로 갈수록 크게 한 효과를 잘 나타낸 결과라고 할 수 있다.

Fig. 21은 실험체 각 요소의 변형도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 상부 중앙에 위치한 그래프는 강재댐퍼, 콘크리트 및 철근에 부탁된 변형도 값을 동시에 나타낸 것이다. 그래프는 변형도의 크기가 잘 비교되도록 앞에서와 같이 누적변형에 따라 각 변형도 분포를 나타내었다. Fig. 20은 모든 변형이 강재댐퍼에 집중되어 있음을 나타낸다. 하부 좌측의 그래프는 콘크리트에 부착해서 얻은 변형도 값을, 하부 우측의 그래프는 내부 철근에 부착해서 구한 변형도 값을 나타낸 것이다. 이 두 그래프는 변형도가 0.1%에도 이하에 분포하는 것을 나타낸다. Fig. 22는 콘크리트 벽체의 전단변형도를 나타낸 것인데, 최대 전단변형각도 0.1% 이하의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 변형도분포의 결과는 콘크리트 전단벽은 탄성상태에 머무르고 있지만, 댐퍼는 큰 소성변형을 경험하고 있음을 잘 보여준다.

4.4 에너지 소산능력

지진이 발생할 때 큰 에너지가 건물에 입력되게 되는데, 이러한 경우에 제진시스템은 에너지소산을 크게 하여 건물의 손상을 최소화 하는 것이 중요하다. 본 연구에서 제안한 전단벽 제진시스템의 에너지소산능력을 평가하기 위해서 Fig. 22에 각 실험체별 누적소산에너지를 나타내었다. Fig. 24는 누적변형량이 같은 경우, 총에너지소산량은 MEED01실험체에 비해서 FR03실험체가 약 16% 정도 크지만, 누적변위가 300mm~ 600mm가 되는 가력초기에는 오히려 FR03실험체에 비해서 MEED01실험체의 에너지소산량이 12~22%분포로 더 크게 나타났다. Fig. 24는 댐퍼만의 에너지소산량을 나타낸 것인데, 이는 가력초기에 MEED01실험체가 FR03실험체의 에너지소산능력이 우수한 원인을 보여준다. Fig. 24의 상부그래프를 보면 총 에너지소산분포와 마찬가지로 초기에는 에너지

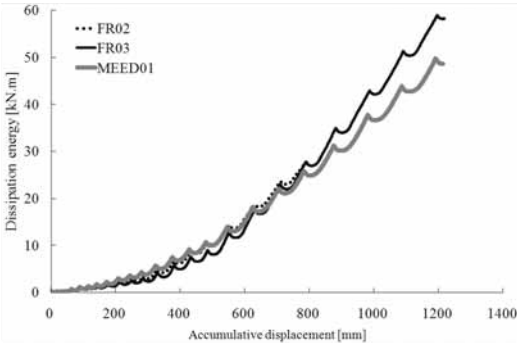


Fig. 23 Dissipated energy

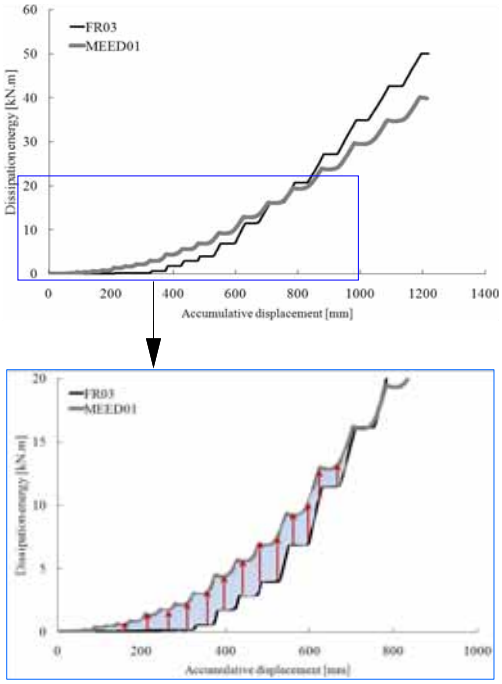


Fig. 24 Comparison of dissipated energy

소산능력이 MEED댐퍼가 우수하지만 가력의 최종시점에서는 마찰댐퍼가 우수한 결과를 보였다. Fig. 24의 하부 그래프는 가력초기에서 중반까지 MEED댐퍼의 에너지소산능력이 우수함을 잘 표현하고 있으며, 마찰댐퍼에 비해서 최대로 약 46%의 에너지소산능력이 우수한 결과를 얻었다.

미국 및 일본과 같은 강진지역에서는 댐퍼가 건물에 적용될 경우에 지진이 큰 만큼 댐퍼의 극한에너지소산능력이 매우 중요하다. 그러나 국내와 같이 중약진국가의 경우에는 댐퍼의 극한에너지소산능력보다 초기의 에너지소산능력이 더욱 더 중요하다. 그런 측면에서는 본 연구에서 제안하고 있는 MEED댐퍼가 적용된 제진시스템이 국내와 같은 지진환경에 있어서는 더욱 효과적이라고 판단된다.

Fig. 25는 각 요소별 에너지소산량과 각 실험체별 소산비율을 막대그래프로 나타낸 것이다. FR02, FR03 및 MEED01

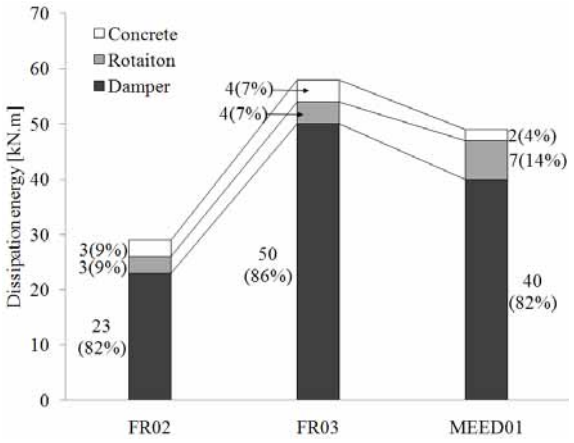


Fig. 25 Dissipated energy of each component

실험체의 댐퍼의 에너지소산비율은 각각 82%, 86% 및 82%의 결과를 나타내었다. 콘크리트의 에너지 소산비율도 각각 9%, 7%, 4%의 결과를 나타내고 있는데, 이는 콘크리트벽체의 균열에 따른 결과라고 할 수 있다. 실험체의 강체회전에 의한 에너지소산비율은 각각 9%, 7%, 14%의 결과를 나타내었다. 특히 MEED01실험체의 경우 그 비율이 다소 크게 나타났는데 이는 Fig. 16의 우측에 나타낸 벽체의 균열도를 보면, MEED01실험체는 가력 시 우측 상부의 슬래브와 벽체접합부의 균열이 과대하게 증가한데 따른 것이다. 결론적으로, Fig. 25의 결과는 콘크리트는 균열이 발생하였지만 탄성상태에 머무르고 대부분의 에너지를 댐퍼가 소산하고 있음을 알 수 있다. 이는 건물의 주요구조부재의 손상을 저감할 수 있음을 나타내 준다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 새로운 지진저항시스템인 전단벽 제진시스템을 제안하고, 반복가력 실험을 실시하여 댐퍼종류에 따른 이력특성 및 에너지소산능력을 평가하였다. 연구에 관한 주요결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 실험결과 제안된 구조시스템은 마찰댐퍼와 강재댐퍼의 이력특성을 반영한 안정된 하중-변형 이력성상을 나타냄으로써, 국내 구조물에 전단벽 제진시스템의 적용가능성을 보여준다.

(2) 마찰댐퍼가 적용된 실험체의 경우, 초기 가력(FR02) 후 마찰댐퍼만 교체하여 다시 실험(FR03)할지라도 강성, 내력 및 이력성상 등의 성능이 저하하지 않고 우수한 변형능력을 나타냈다. 이는 지진 후 댐퍼의 교체만으로 내진보강을 간단히 실시할 수 있음을 보여준다.

(3) 실험결과 제안된 시스템에서 마찰댐퍼와 강재댐퍼는 전형적인 이력특성을 제대로 발휘하였고, 또한 제안된 이론식은 댐퍼의 내력을 잘 예측하였다.

(4) 에너지소산능력 및 변형도분포를 살펴본 결과, 콘크리트와 철근은 종국상황에서도 탄성상태를 유지하였고 대부분의 에너지는 댐퍼에 집중되는 결과를 보였다.

(5) 마찰댐퍼와 MEED댐퍼의 에너지소산능력을 비교한 결과, 가력초기에는 강재댐퍼인 MEED댐퍼가 더욱 큰 성능을 나타냈다. 이는 국내와 같은 중·약진 지역특성에 적합한 시스템이라고 판단된다. 그러나 실험이 매우 제한적이므로 이러한 효과에 대한 추후 연구가 필요하다.

참 고 문 헌(References)

〔1〕 Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006) *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press.

〔2〕 ASCE STANDARD (2007) *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings(ASCE 41-06)*, ASCE.

〔3〕 ASCE STANDARD (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)*, ASCE.

〔4〕 Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley & Sons.

〔5〕 김현수, 강주원 (2012) 중약진지역에 대한 MR감쇠기가 구성된 스마트 면진시스템의 특성연구, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.325-337.
Kim, H.S. and Kang, J.W. (2012) Characteristics of smart base isolation system with MR damper for regions of low-to-moderate seismicity, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 3, pp.325-337 (in Korean).

〔6〕 Kim, H.J., Christopoulos, C., and Tremblay, R. (2004) Experimental characterization of bolt-stressed non-asbestos organic (NAO) material-to-steel interfaces, *Report No. UT2004-3*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.

〔7〕 김현수, 최재혁(2009) 전단형 마찰댐퍼의 이력특성에 관한 실험적 연구, **2009년도 학술대회 발표집**, 한국강구조학회, pp.155-156.
Kim, H.S. and Choi, J.H. (2009) An Experimental Study on Hysteretic Characteristics of Shear-type Friction Damper, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp. 155-156 (in Korean).

〔8〕 Bergman, D.M. and Goel, S.C. (1987) Evaluation of cyclic testing of steel plate devices for added damping

and stiffness, *Report UMCE87-10*, University of Michigan, Ann Arbor, MI.

〔9〕 Tsai, K., Chen, H., Hong, C., and Su, Y. (1993) Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp.505-528.

〔10〕 오상훈, 김영주, 유홍식, 강창훈(2006) 보의 하부플랜지에 에너지 흡수요소를 가지는 기둥-보 접합부의 이력특성, **대한건축학회구조계논문집**, 대한건축학회, 제22권, 제8호, pp.29-36.
Oh, S.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S., and Kang, C.H. (2006) Hysteretic Characteristics of Beam-to-Column Connections with Energy Absorption Elements at Beam Bottom Flanges, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 22, No. 8, pp.29-36 (in Korean).

〔11〕 오상훈, 최광용, 유홍식(2012) 고층 전단벽시스템 적용을 위한 직렬연결형 강재이력댐퍼의 구조성능평가, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.371-383.
Oh, S.H., Choi, K.Y., and Ryu, H.S. (2012) Performance Evaluations of Steel Hysteretic Damper in Series for High-Rise Shear Wall System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 4, pp.371-383 (in Korean).

〔12〕 안태상, 김영주, 박진화, 김형근, 장동운, 오상훈(2012) 건물의 내진보강을 위한 캔틸레버타입 강재댐퍼의 실험, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제24권, 제2호, pp.149-161.
Ahn, T.S., Kim, Y.J. Park, J.W., Kim, H.G., Jang, D.W., and Oh, S.H. (2012) Experimental study on a Cantilever Type Metallic Damper for Seismic Retrofit of Building Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 2, pp.149-161 (in Korean).

〔13〕 안태상, 김영주, 김형근, 장동운, 오상훈, 김종락(2012) 본진의 크기와 여진을 고려한 전단벽 제진시스템에 관한 실험적 연구, **대한건축학회구조계논문집**, 대한건축학회, 제28권, 제8호, pp.33-40.
Ahn, T.S., Kim, Y.J. Kim, H.G., Jang, D.W., Oh, S.H., and Kim, J.R. (2012) Experimental Investigation of a Damping Shear Wall System Considering Aftershocks and the Size of the Main Shocks, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 28, No. 8, pp.33-40 (in Korean).

〔14〕 SH공사(2011) *공동주택 리모델링을 위한 지진제어시스템 개발*, SH공사 도시연구소 연구보고서.
SH Corporation (2011) *Development of vibration control system for remodeling of apartment building*, Research Center of SH.

〔15〕 Benavent-Climent, A., Oh, S.H., and Akiyama, H. (1998), Ultimate energy absorption capacity of slit-type steel plates subjected to shear deformations, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 503, pp.139-147.

요 약 : 기존 내진설계의 목적은 구조물의 갑작스런 피해로 인한 인명손실을 방지하는 것이다. 지난 수십년간 구조물의 내진성능을 향상시키기 위해서 효과적인 지진저항시스템을 개발하는 수많은 연구들이 진행되었다. 본 연구의 목적은 내진성능을 향상시킴과 동시에 지진 이후 보수가 편리하도록 하는 새로운 제진시스템을 제안하는데 있다. 제안된 제진시스템은 벽의 하부에 슬릿을 두고 제진장치가 수평으로 작동하도록 하여 지진에너지를 소산하도록 계획되었다. 제안된 시스템의 이력거동과 에너지소산능력을 조사하기 위해서 반복가력실험을 실시하였다. 실험결과는 제안된 시스템이 안정된 이력응답을 나타내며, 에너지의 소산은 제진장치에 집중되는 것을 보여준다.

핵 심 용 어 : 내진설계, 보수, 제진시스템, 반복가력실험, 에너지소산능력