

스프링과 방진고무가 융합된 제진장치의 하중-변위 관계

문주현¹, 임채림², 왕혜린³, 양근혁^{4*}

Load-Displacement Relationship of Passive Vibration Units Composed with a Spring and Vibration-Proof Rubbers

Ju-Hyun Mun¹, Chae-Rim Im², Hye-Rin Wang³, Keun-Hyeok Yang^{4*}

Abstract: The objective of this study is to establish the fundamental design data for axial load-displacement relationship under axial monotonic or cyclic responses of seismic damping-isolation (SDI) units developed for ceiling structures. The main parameters include the installation of a spring, the number of rubber layer, prestress stress of bolts for connector between the spring and rubbers, and loading type. Test results showed that SDI units with a spring in the core and higher prestress stress of bolts tended to be higher stiffness at the ascending branch and more ductile behavior at the descending branch. This trends more notable for the specimens under monotonic load rather than cyclic loads. Consequently, the energy dissipation of SDI unit can be optimally designed with the following conditions: installation of a spring within 3-layer rubbers and prestress applied to the bolts at 10% of their yielding strength. When compared with the experimental tension capacity of the developed SDI units, the predictions by JIS B 2704-1 and KDS 31 00 are conservative under monotonic loading but higher by approximately 10% under cyclic loading.

Keywords: Passive vibration unit, Spring, Vibration-proof rubber, Load-displacement relationship

1. 서 론

건축물은 내진설계 및 구조부재의 내진보강을 통하여 지진에 대한 저항성을 충분히 확보하고 있지만, 건축물의 비구조부재는 지진에 대한 안전성의 확보가 상대적으로 미흡한 편이다(Kim et al., 2018). 따라서 지진에 의한 피해는 구조부재에서 발생하는 손상보다는 지진의 저항성이 상대적으로 낮은 비구조부재의 손상 및 탈락에 의한 인명 및 재산피해가 주를 이루고 있다(Lee et al., 2018). 특히 건축물 내부에 설치되는 천장구조는 클립 및 행어볼트를 이용하여 강재들을 단순히 끼우는 형태의 연결 구조로 되어 있어 진동 및 횡변위 저항에 매우 취약하다(Gilani et al., 2010). 이러한 천장구조의 구조적 한계를 보완하기 위해서 교육부(2019), ASCE 41-17(2017) 및 EC 8(2003)에서는 등가정적하중 개념을 도입한 최소 수평지진하중 뿐만 아니라 횡변위 저감을 위한 브레이스 보강방법

을 제시하고 있다. 하지만, 이들 기준들에서 제시하고 있는 방법은 천장구조의 전체 강성을 급격히 증가시키기 때문에 천장에 도입되는 횡저항력의 증가가 불가피하다(Jun et al., 2021). 결과적으로 강한 강성 및 높은 횡저항력의 도입은 천장구조재의 외측이 벽면과의 반복적인 강한 충격으로 이루어질 가능성이 높아 브레이스로 보강된 천장구조에서 오히려 하단부가 파손될 가능성이 높다(Lee, 2021).

최근에는 천장구조에서 횡저항력을 감소시키기 위해서 제진장치를 이용한 천장구조의 보강방법이 개발되고 있다(Wu et al., 2020; Yamasato et al., 2019). 하지만, 이들 보강방법에서 적용된 제진 재료는 대부분 강재로서 에너지의 흡수를 위해서 재료의 항복이 선행되어야 한다(Ahn et al., 2012). 강재의 항복은 큰 변형이 도달되도록 하여야 하며 특히, 재질의 높은 탄성계수로 인해 천장구조체에 강한 강성이 도입될 수밖에 없다(Jun et al., 2021). 따라서 높은 탄성계수와 항복이 동반되어야 하는 강재를 이용한 제진장치는 에너지 흡수 능력이 우수하지만, 강성과 횡저항력을 감소시키는 효과는 미미하다(Lee., 2021). 이에 반해 감쇠능력이 우수한 스프링과 방진고무를 이용한 내진보강방법은 횡저항력의 증가없이 진동 제어에 효과적임을 보였다(Wei et al., 2019; Khiavi et al., 2020). Kurita et al.(2011)는 스프링을 이용한 제진장치가 최대 응답가속도의 50 ~ 90% 수준의 감쇠가 가능함을 보였다.

¹정회원, 경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공, 조교수

²정회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과, 박사과정

³정회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과, 석사과정

⁴정회원, 경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공, 교수

*Corresponding author: yangkh@kgu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi, 16227, Korea.

• 본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

또한 Khiavi et al.(2020)는 방진고무로 융합된 제진장치는 강진에 대한 최대 응답변위의 10 ~ 20% 수준의 감쇠가 효과적임을 보고하였다. 이와 같이 재료 자체의 감쇠능력이 우수한 재료의 적용은 천장구조의 강성과 횡저항력의 증가 없이 지진에 의해 도입되는 지진의 진동 및 지진파를 감소시키는데 효과적일 것으로 기대된다.

이 연구의 목적은 천장구조재의 내진성능향상을 위해 개발된 제진장치의 압축 및 인장하중상태의 하중-변위 관계를 평가하고 축하중 설계를 위한 기초자료를 구축하는데 있다. 제진장치는 스프링, 방진고무 및 볼트를 이용하여 하나의 결합체(seismic damping · isolation unit, SDI 유닛)로 구성되어 있다. 주요변수는 스프링의 유무, 방진고무의 적층수와 스프링과 방진고무의 결합을 위해 설치된 볼트의 프리스트레스력의 크기 그리고 재하방법이다. 실험체는 총 10개를 제작하였으며, 압축과 인장하중하에서 축하중 실험을 수행하였다. 축하중-변위 관계로부터 분석된 성능은 최대내력, 각 반복 사이클에서의 강성 및 에너지소산능력의 변화 그리고 최대 축하중 이후의 거동이다. 또한 최대 인장내력은 JIS B 2704-1(2018) 및 KDS 31 00(2019)의 설계기법으로 산정된 예측값과 비교하였다. 결과적으로 이들 실험결과들을 기반으로 천장구조재에서 SDI 유닛의 최적의 상세를 제시하였다.

2. 스프링과 방진고무를 이용한 SDI 유닛의 개요

Fig. 1에는 천장달대구조에서 내진성능향상을 위한 스프링과 방진고무가 융합된 SDI 유닛을 나타내었다. SDI 유닛은 앵커 삽입부, 환출 방진고무, 강판, 스프링 및 육각랜치볼트 유닛의 연결부로 구성된다. 앵커 삽입부는 앵커볼트와 고정판으로 구성되며, SDI 유닛이 천장에 삽입된 슬리브에 설치될 수 있도록 연결 역할을 한다. 환출 방진고무, 강판 및 스프링은 볼트와 너트를 이용하여 한번에 결합하는데, 이때 환출 방진고무와 강판들은 상호적층되며, 그 사이에 스프링이 삽입된다. 볼트

는 프리스트레스력이 도입되어 방진고무와 스프링의 감쇠효과를 향상시킨다. 또한 행어볼트 유닛의 연결부는 내부에 나사산을 갖고 있어 행어볼트를 연결하는 역할을 한다. 이렇게 프리스트레스력이 도입된 볼트를 이용한 방진고무와 스프링의 융합은 높은 감쇠 능력으로 천장에 도입되는 지진에너지를 효과적으로 흡수하는 역할을 한다. 결과적으로 감쇠능력만으로 지진파 및 진동을 흡수하기 때문에 천장 달대 구조의 강성과 횡저항력의 증가를 최소화시킬 수 있다. 즉 SDI 유닛은 기존 행어볼트에 감쇠능력이 우수한 에너지 흡수 장치를 설치하여 천장달대 구조의 내진성능을 확보하는데 그 목적이 있다.

3. 실험

3.1 실험체 상세

Table 1과 Fig. 2에는 SDI 유닛의 실험체 상세를 나타내었다. 실험체들의 주요변수는 스프링의 유무, 방진고무의 적층수와 볼트의 프리스트레스력의 크기 그리고 재하방법이다. 환출 방진고무의 적층수는 1층과 3층이며, 프리스트레스력의

Table 1 Main parameters of each specimen

Specimens	Loading type	Layer number	Spring	f_{ps}/f_{by}
M-S	Monotonic	-	-	-
M-C	Monotonic	3	×	0
M-3-S-0	Monotonic	3	○	0
M-1-S-0	Monotonic	1	○	0
M-3-S-0.1	Monotonic	3	○	0.1
C-S	Cyclic	-	-	-
C-C	Cyclic	3	×	0
C-3-S-0	Cyclic	3	○	0
C-1-S-0	Cyclic	1	○	0
C-3-S-0.1	Cyclic	3	○	0.1

Note] f_{ps} = prestressed stress in the bolts, and f_{by} = yield strength of the bolt.

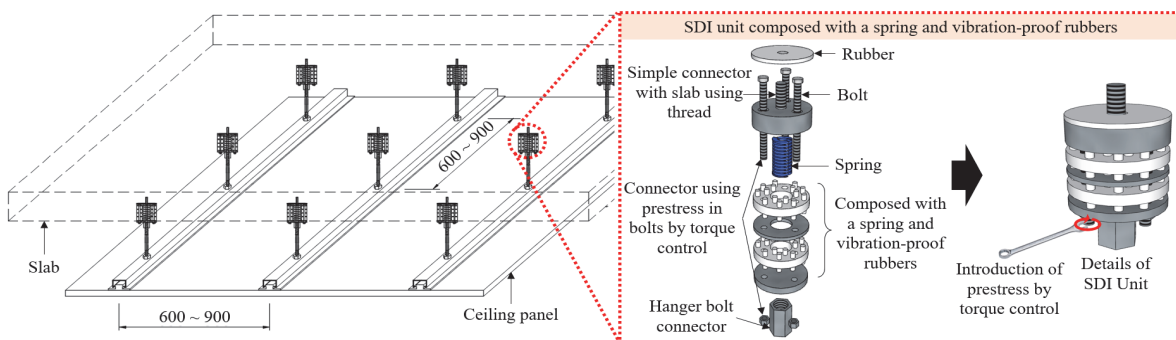


Fig. 1 Details of seismic damping · isolation unit

크기는 0과 $0.1f_{by}$ 로 변화하였는데, 여기서 f_{by} 는 볼트의 항복강도를 의미한다. Table 1의 실험체 명에서 첫 번째 알파벳은 재하방법(M = 단조하중, C = 반복하중)을, 두 번째 숫자는 환출 방지고무의 적층수(1 = 1층, 3 = 3층)를, 세 번째 알파벳은 스프링의 유무를, 마지막 숫자는 프리스트레스력의 크기(0 = $0f_{by}$, 0.1 = $0.1f_{by}$)를 의미한다. 또한, 실험체 명에서 M-S와 C-S는 각각 단조 및 반복하중을 받으면서 스프링만으로 구성된 실험체를(Fig. 2(a)), M-C와 C-C는 컨트롤 실험체로서 각

각 단조 및 반복하중을 받으면서 스프링과 볼트의 프리스트레스력이 없는 실험체를 의미한다(Fig. 2(b)). 이들 실험체들은 스프링 및 육각랜치볼트에 도입된 프리스트레스력이 최대압축 및 인장 그리고 에너지소산능력에 미치는 영향을 평가하기 위해 추가적으로 준비되었다. 한편, 실험체 명에서 C-3-S-0.1은 내부에 스프링이 있으면서 3층으로 적층된 환출 방지고무와 $0.1f_{by}$ 의 프리스트레스력으로 긴장된 볼트로 구성되어 있으며, 반복하중이 도입된 실험체이다.

환출 방지고무의 전체 두께는 15 mm이며, 돌출부의 직경과 높이는 각각 5 mm 및 5 mm이다. 이때 돌출부의 개수는 상부 및 하부에 각각 6개이다. 환출 방지고무 사이에 삽입되는 강판의 직경 및 두께는 각각 35 mm 및 2 mm이다. 스프링과 볼트의 관통을 위한 환출 방지고무 및 강판 홀의 크기는 모두 14 mm이다. 스프링 관통을 위한 홀의 위치는 중앙부에 있으며, 볼트의 관통을 위한 홀은 가장자리에 위치해 있다. 상부 및 하부의 강판은 내부에 스프링이 고정될 수 있도록 나사산이 있으며, 볼트체결을 위해 환출 방지고무 및 강판에 있는 볼트 관통 홀과 동일한 위치에 직경 4 mm의 홀이 있다. 스프링은 경소하중 스프링을 사용하였으며, 선경, 외경, 내경 및 높이가 각각 1 mm, 12 mm, 6 mm 및 35 mm이다. 각 재료들의 용합을 위한 볼트는 직경 4 mm의 육각랜치 볼트를 사용하였다. 실험체 M-3-S-0.1 및 C-3-S-0.1은 토크 드라이버를 이용하여 너트 조임방식으로 볼트에 프리스트레스력을 도입하였다.

3.2 재료 특성

Table 2에는 SDI 유닛에 사용된 재료들의 역학적 특성을 나타내었다. 인장 실험을 위해 강봉과 용접을 위한 상부 및 하부 판재와 환출 방지 고무판 사이에 삽입되는 강판의 강종은 SS 235이다. SS 235의 항복강도, 인장강도 및 탄성계수는 각각 247.0 MPa, 339.2 MPa 및 169,752 MPa이다. 환출 방지 고무판은 방진용으로서 압축강도 및 인장강도가 각각 0.81 MPa 및 20.3 MPa이었다. 환출 방지고무, 강판 및 스프링을 연결하기 위해 사용된 볼트는 열처리된 육각랜치볼트이다. 육각랜치볼트의 항복강도, 인장강도 및 탄성계수는 각각 1,146.2 MPa, 1,220.7 MPa 및 186,552 MPa이다. 사용된 스프링은 경

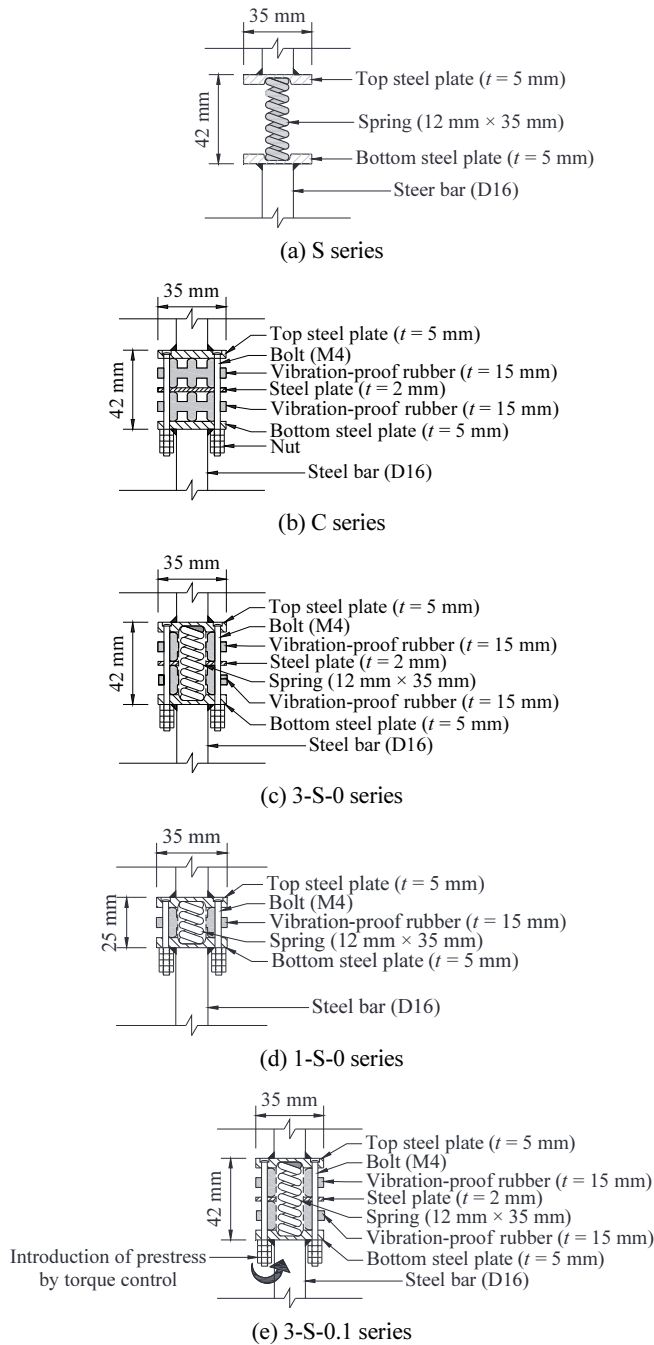


Fig. 2 Details of specimens

Table 2 Mechanical properties of SDI unit

Type	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)
Plate	247.0	339.2	169,752
Bolt	1,146.2	1,220.7	186,552
Spring	1,158.0	1,300.0	190,000
Rubber	-	20.3	145

Note] f_y = yield strength, f_u = tensile strength, and E_s = elastic modulus.

소하중 스프링을 사용하였으며, 스프링상수는 0.8 N/mm이었다. 스프링에 사용된 강종은 SAE 9254이다. SAE 9254의 항복강도 및 인장강도 및 탄성계수는 각각 1,158.0 MPa, 1,300.0 MPa 및 190,000 MPa이다.

3.3 측정상세

Fig. 3은 실험체의 측정상세를 나타내었다. 실험은 계명대학교 첨단건설재료실험센터 구조연구실의 250 kN 용량의 만능재료시험기를 이용하여 수행하였다. 단조 및 반복하중은 스프링의 설계변위까지 가력한 이후 인장력으로 도입하여 실험체가 파괴되는 시점까지 가력하였다. 최대 압축변위는 스프링의 스프링상수 및 자유장을 고려하여 결정하였다(JIS B 2704-1, 2018). 단, C-C는 스프링이 없으므로 기존 실험체들과 동일한 압축변위로 가력을 진행하였다. 반복하중에서 각 사이클의 증분변위는 단조하중에서 얻어진 하중-변위관계에서 탄성한계점을 기준으로 결정하였다. 탄성한계점은 응력설계법(AASHTO LRFD, 2004)을 이용하여 최대하중의 40%로 결정하였다. Fig. 4에는 반복하중에서 각 사이클의 증분변위를 나타내었다. 증분변위는 결정된 탄성한계점에서의 변위

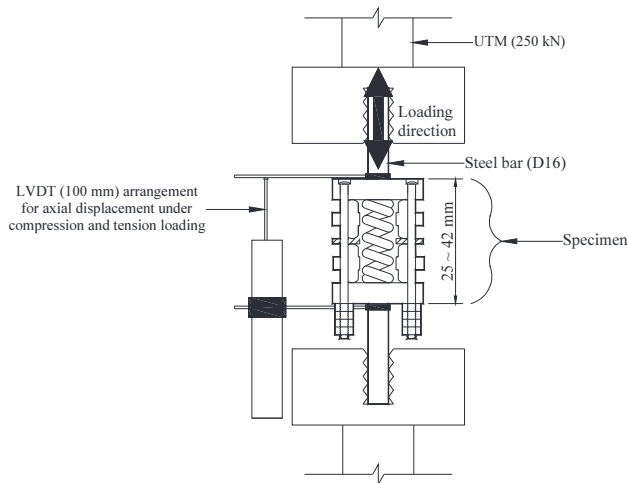


Fig. 3 Test setup

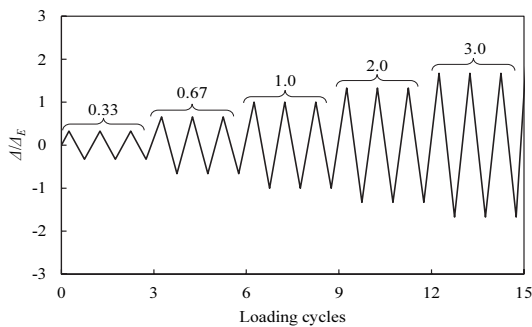


Fig. 4 Loading history

(ΔE)의 0.33, 0.67, 1.0, 2.0 및 3.0배로 설정하였으며, 각 변위당 3 사이클로 가력하였다. 축방향의 변위는 100 mm 용량의 LVDT(linear variable differential transducer)를 실험체의 연결된 강봉에 부착하여 측정하였다(Fig. 3).

4. 실험결과 분석

4.1 파괴모드

Photo 1에는 실험체의 파괴모드를 나타내었다. 스프링만으로 구성된 실험체와 환출 방지고무가 1개가 적층된 실험체를



Photo 1 Failure mode of specimens

제외한 나머지 실험체들은 모두 볼트의 인장파단에 의해 파괴되었다. 이에 반해 스프링만으로 구성된 실험체 M-C와 C-C는 탄성한계점 변위의 $2.0\Delta_E$ 에서 큰 인장변형이 발생하였다. Photo 1(d)에 나타낸바와 같이 환출 방진고무의 적층수가 1개인 실험체인 M-1-S-0 및 C-1-S-0은 접합부에서 파단이 발생하여 실험을 조기 종료하였기 때문에 실험결과에서 이들 실험체들의 분석을 제외하였다. 위의 파괴모드의 결과로부터, 인장내력에 기여하는 재료는 대부분 볼트와 스프링이 분담하고 있음을 확인하였다.

4.2 하중-변위 관계

Fig. 5에는 압축 및 인장상태에서의 하중-변위 관계를 나타내었다. 하중-변위관계에서 탄성한계점까지의 강성은 볼트의 프리스트레스력 크기와 스프링의 유무에 의해 다소 영향

을 받았다. 탄성한계점까지의 강성은 볼트의 프리스트레스력의 크기가 클수록, 반복하중 보다는 단조하중에서, 그리고 스프링이 있는 실험체에서 더 컸다. 방진고무, 볼트 및 스프링으로 융합된 실험체들의 탄성한계점까지의 강성은 컨트롤 실험체들 보다 약 1.10배 높았다. 실험체의 탄성한계점까지의 강성은 볼트의 프리스트레스력의 크기가 0에서 $0.1f_{py}$ 로 변화될 때에 약 1.02배 증가하였다. 또한 이들 값들은 반복 하중을 받는 실험체들 보다 약 1.44배 높았다. 탄성한계점 이후의 강성은 인장하중상태에서만 평가하였다. 변위가 증가할수록 탄성한계점 이후의 강성은 점차 감소하였으며, 최대인장하중 이후에는 하중이 급격히 감소하였다. 최대인장하중 이후의 거동은 볼트의 프리스트레스력의 크기가 클수록, 반복하중 보다는 단조하중에서, 그리고 스프링이 있는 실험체에서 더 완만하였다. 이와 같이 볼트의 프리스트레스력, 스프링의 유무

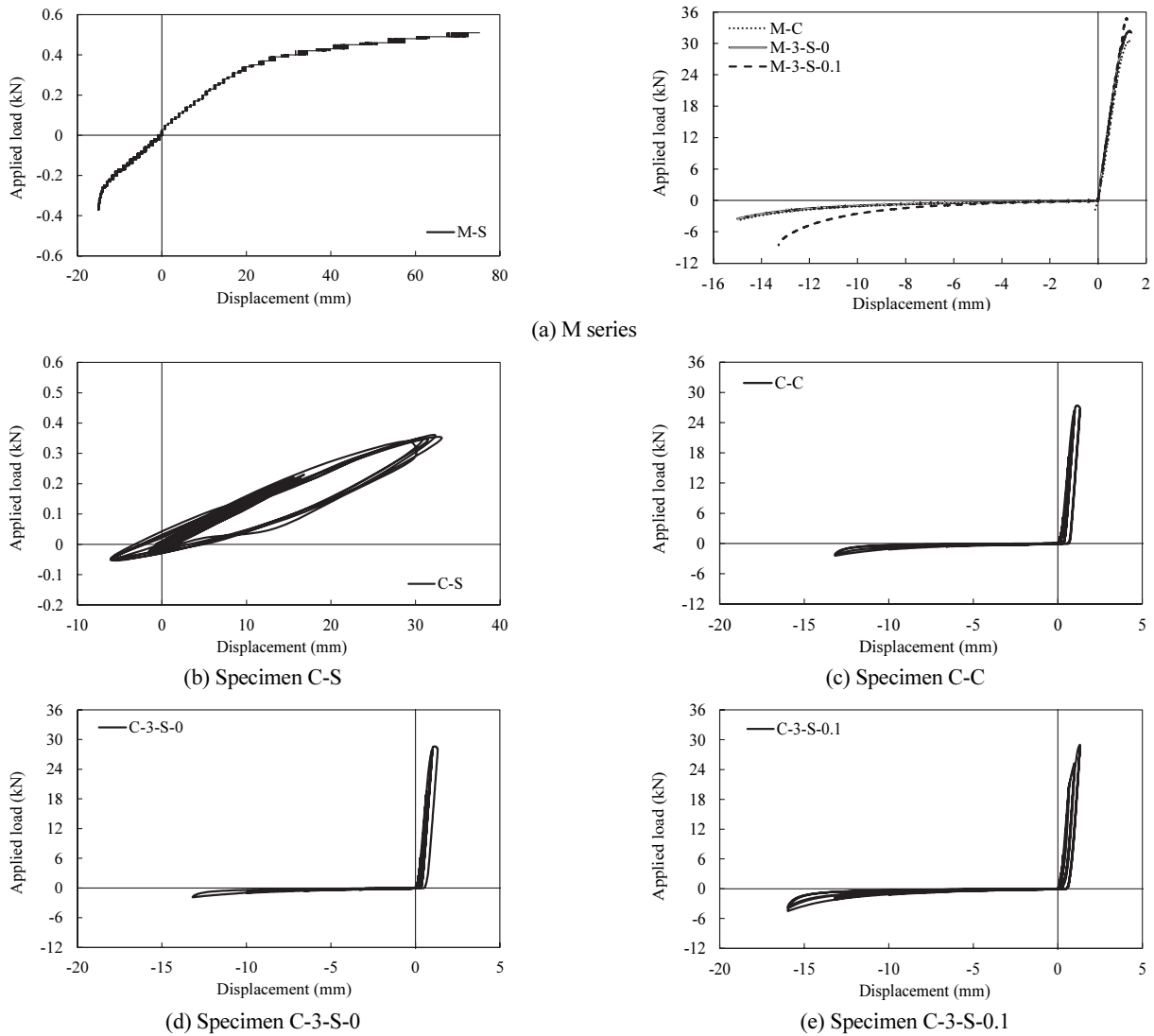


Fig. 5 Load-displacement curve

및 하중상태는 최대인장하중 이후의 거동, 즉 SDI 유닛의 연성능력에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이에 반해 방진고무의 적층수는 인장 및 압축하중 상태에 관계없이 SDI 유닛의 하중-변위 관계에 미치는 영향이 미미하였다.

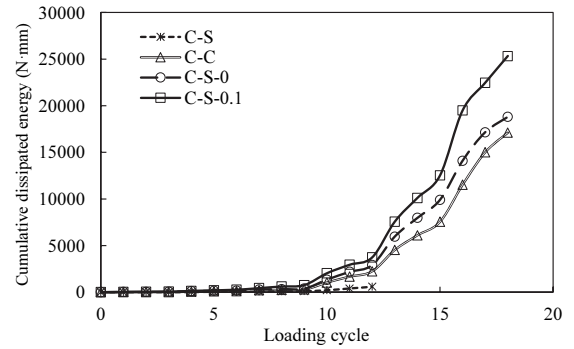
4.3 최대압축 및 인장하중

Table 3에는 압축 및 인장하중을 나타내었다. 압축 및 인장에서의 최대하중은 볼트의 프리스트레스력 크기, 스프링의 유무 및 재하방법에 의해 다소 영향을 받았다. 볼트의 프리스트레스력의 크기가 0에서 $0.1f_{py}$ 로 변화될 때에 압축 및 인장하중하에서 각각 1.15배 및 1.06배 증가하였으며, 스프링이 있는 실험체가 없는 실험체 보다 각각 1.23배 및 1.02배 높았다. 또한 이들 값들은 반복 하중을 받는 실험체들 보다 각각 1.24배 및 1.49배 높았다. 이로서 SDI 유닛에서 최대인장하중의 산정은 볼트의 프리스트레스력 크기, 스프링 및 하중 재하방법을 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

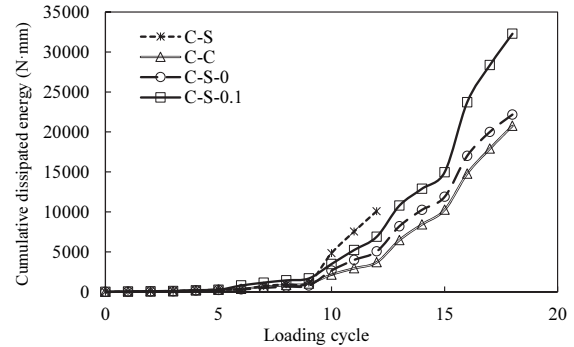
4.4 에너지 소산능력

실험체의 에너지 소산능력(E_d)은 최대내력시점까지 누적된 사이클의 면적으로 평가하였다(Lijuan, 2010; Kim and Kim, 2020). 또한, Fig. 6에는 사이클 증가에 따른 E_d 의 변화를 나타내었다. 에너지 소산량은 사이클이 증가함에 따라 항복시점까지 점진적으로 증가하였다. 항복시점 이후 E_d 는 실험 종료시점까지 급격히 증가하였다. 이러한 경향은 하중재하방법에 관계없이 방진고무의 적층 수 및 프리스트레스가 가장 높은 실험체인 C-3-S-0.1에서 가장 현저하였다. 또한 압축하중하에서 실험체의 E_d 는 스프링이 있으면서, 방진고무의 적층 수 및 프리스트

레스가 가장 높은 실험체인 C-3-S-0.1에서 가장 높았다. 실험체 C-3-S-0.1의 E_d 는 25,326.9 kN·mm로서 스프링이 없는 실험체와 프리스트레스력이 0인 실험체에 보다 각각 1.22배 및 1.14배 높았다. 인장하중하에서 실험체들의 에너지 소산능력도 압축하중하의 실험체의 경향과 동일하였다. 따라서 에너지 소산능력



(a) Compression loading



(b) Tension loading

Fig. 6 Cumulative dissipated energy with cycles increased

Table 3 Summary of test results

Specimens	Tension loading							Compression loading						
	$(P_e)_t$ (kN)	$(\Delta_e)_t$ (mm)	$(K_e)_t$ (kN/m)	$(P_n)_t$ (kN)	$(\Delta_n)_t$ (mm)	$(K_n)_t$ (kN/m)	$(E_d)_t$ (N·mm)	$(P_e)_c$ (kN)	$(\Delta_e)_c$ (mm)	$(K_e)_c$ (kN/m)	$(P_n)_c$ (kN)	$(\Delta_n)_c$ (mm)	$(K_n)_c$ (kN/m)	$(E_d)_c$ (N·mm)
M-S	0.37	24	15.4	0.52	80	6.5	-	0.08	4.5	17.8	0.37	15.0	24.7	-
M-C	13.5	0.48	28,125.0	31.3	1.45	21,586.2	-	0.39	4.5	86.7	3.5	15.0	233.3	-
M-3-S-0	13.1	0.43	30,465.1	32.4	1.43	22,657.3	-	0.58	4.5	128.9	3.8	14.9	255.0	-
M-1-S-0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M-3-S-0.1	13.7	0.44	31,136.4	35.2	1.47	23,945.6	-	0.52	4.11	126.5	3.9	13.7	284.7	-
C-S	0.21	16.8	12.5	0.37	69.9	5.3	10,108.4	0.1	3.0	33.3	0.19	12.2	15.6	585.8
C-C	6.0	0.33	18,181.8	27.4	1.33	20,601.5	18,109.3	0.3	3.3	90.9	2.1	13.2	159.1	20,773.8
C-3-S-0	6.5	0.33	19,697.0	27.6	1.33	20,751.9	18,806.3	0.36	3.3	109.1	2.9	13.2	219.7	22,171.3
C-1-S-0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-3-S-0.1	7.0	0.32	21,875.0	28.8	1.33	21,654.1	32,291.0	0.4	3.3	121.2	3.7	13.2	280.3	25,326.9

Note] Tension and compression are identified by subscripts t and c , respectively. P_e = strength at elastic limit, Δ_e = displacement at elastic limit, K_e = stiffness at elastic limit, P_n = peak load, Δ_n = displacement at peak load, K_n = stiffness at peak load, and E_d = cumulative dissipated energy.

은 스프링이 있으면서, 3층의 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스를 갖는 실험체 C-3-S-0.1에서 가장 높았다. 결과적으로 스프링과, 고무적층수 및 프리스트레스력의 크기는 SDI 유닛의 에너지 소산능력을 향상시키는데 효과적임을 확인하였다.

5. 설계값과의 비교

5.1 설계값

SDI 유닛의 인장최대내력은 4.3절의 실험결과를 기반으로 인장하중하에서 기여하는 재료들을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다. 스프링과 볼트의 기여분은 각각 JIS B 2704-1(2018) 및 KDS 31 00(2019)에 준하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = T_b + T_s \quad (1.a)$$

$$T_b = n_b A_b (f_u + f_{ps}) \quad (1.b)$$

$$T_s = K(L + d(N_e + (N_t - N_e))) \quad (1.c)$$

여기서, T_i 는 SDI 유닛의 인장력, T_b 는 볼트의 인장력, T_s 는 스프링의 인장력, n_b 는 볼트의 개수, A_b 는 볼트의 단면적, f_u 는 볼트의 인장강도, f_{ps} 는 볼트에 도입되는 프리스트레스력, K 는 스프링상수, L 은 자유장, d 는 선경, N_e 는 유효권수 및 N_t 는 총권수를 의미한다. 스프링, 3층의 환출 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력을 갖는 실험체를 기준으로 볼트 및 스프링이 SDI 유닛의 인장력에 기여하는 기여율은 식(1)으로부터 각각 99.97% 및 0.03%로 평가될 수 있었다. 압축하중하에서의 최대값은 스프링 및 고무의 기여분은 각각 JIS B 2704-1(2018)와 KS M 6518(2021)에 기반하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = C_r + C_s \quad (2.a)$$

$$C_r = F_{cr} A_r \quad (2.b)$$

$$C_s = K(L - d(N_e + (N_t - N_e))) \quad (2.c)$$

여기서, C_i 는 SDI 유닛의 압축력, C_r 은 고무의 압축력, C_s 는 스프링의 압축력, F_{cr} 은 고무의 압축강도, A_r 은 고무의 단면적을 의미한다. 스프링, 3층의 환출 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력을 갖는 실험체를 기준으로 고무 및 스프링이 SDI 유닛의 압축력에 기여하는 기여율은 식(1)으로부터 각각 87.6% 및 12.4%로 평가될 수 있었다.

5.2 설계값과 실험값의 비교

Table 4에는 5.1절에서 산정된 설계값과 실험값을 비교하였다. 압축하중은 스프링의 압축설계변위까지만 가력하였기 때문에 설계값과 최대압축하중 결과값의 비교를 제외하였다.

또한 만능재료시험기의 최대변위의 한계로 인해 중단된 실험체인 M-S와 C-S의 최대인장하중도 설계값과의 비교에서 제외하였다. 식(1)의 설계식은 1개의 방진고무의 적층수가 적용된 실험체를 제외한 나머지 실험체들의 단조상태의 최대인장하중을 안전적으로 예측하였다. 이때의 예측값 대비 실험 결과값의 비는 0.98 ~ 1.37에 있었다. 특히 식(1)의 설계식은 반복하중상태의 최대인장하중을 대부분 불안전측으로 예측하였다. 예측값 대비 실험결과값의 비는 0.82 ~ 0.97에 있었다. 이는 하중을 분담하는 재료들에서 반복하중에 의한 연화 효과로 발휘되는 하중이 저하된 것으로 판단된다(Kulak et al., 2001; Fares et al., 2006). 결과적으로 반복하중하에서의 SDI 유닛의 최대인장하중은 약 10% 낮게 평가할 필요가 있다.

5.3 최적의 상세 제시

Fig. 7에는 위의 실험결과를 기반으로 제시된 최적의 SDI 유

Table 4 Comparison of measured and predicted tension capacities

Specimens	$(T_i)_{Exp.}$ (kN)	$(T_i)_{Pre.}$ (kN)	$\frac{(T_i)_{Exp.}}{(T_i)_{Pre.}}$
M-S	0.52	0.38	1.37
M-C	31.3	32.1	0.98
M-3-S-0	32.4	32.2	1.01
M-1-S-0	-	-	-
M-3-S-0.1	35.2	35.2	1.00
C-S	0.37	0.38	0.97
C-C	27.4	32.1	0.85
C-3-S-0	27.6	32.2	0.86
C-1-S-0	-	-	-
C-3-S-0.1	28.8	35.2	0.82

Note] $(T_i)_{Exp.}$ = measured tension capacity, and $(T_i)_{Pre.}$ = predicted tension capacity.

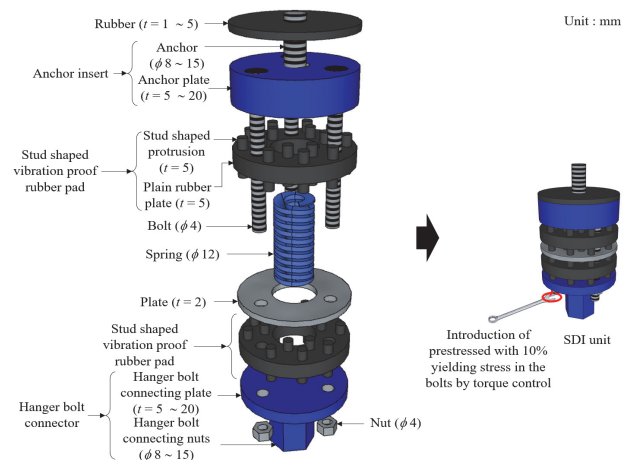


Fig. 7 Optimum details of the SDI unit

닛의 상세를 나타내었다. 하중-변위관계에서 탄성한계점까지의 강성, 최대인장하중 및 에너지소산능력을 고려하면 SDI 유닛에서 스프링, 3층의 환출 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력을 갖는 볼트의 구성이 필요하다. 결과적으로 C-3-S-0.1 실험체의 탄성한계점까지의 강성, 최대인장하중 및 에너지소산능력은 각각 21,875.0 kN/m, 28.8 kN 및 21,654.1 kN·mm으로 다른 실험체 보다 가장 높은 값을 보유하고 있다. 반면, 압축하중하에서는 스프링의 설계변위까지 가력하였기 때문에 강성, 최대하중 및 에너지소산능력을 파단시점까지 정량적인 분석이 불가능하였다. 하지만, SDI 유닛의 인장하중상태의 실험결과와 설계변위까지의 하중-변위관계를 분석하여 볼 때, 압축하중하에서도 스프링이 있으면서 3층의 환출 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력이 강성, 최대하중 및 에너지소산능력을 향상시키는데 효과적일 것으로 판단된다.

6. 결론

천장달대구조에서 내진성능향상을 위한 스프링과 방진고무가 융합된 제진장치(seismic damping · isolation unit, 이하 SDI 유닛)의 하중-변위 관계를 평가하고 실험값에 대한 인장하중 설계값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SDI 유닛은 방진고무의 적층수, 볼트의 프리스트레스력의 크기 및 채하방법에 관계없이 볼트의 인장파단에 의해 지배되었다.
- (2) 볼트의 프리스트레스력의 크기가 클수록, 반복하중 보다는 단조하중에서, 그리고 스프링이 있는 SDI 유닛은 하중-변위관계에서 탄성한계점까지의 강성증가 뿐만 아니라 최대하중 이후의 연성거동에 유리하였다. 결과적으로 에너지 소산능력은 스프링이 있으면서, 3층의 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력을 갖는 SDI 유닛에서 가장 높았다.
- (3) 압축 및 인장에서의 최대하중은 볼트의 프리스트레스력의 크기가 0에서 $0.1f_{py}$ 로 변화될 때에 각각 1.15배 및 1.06배 증가하였으며, 스프링이 있는 실험체가 없는 실험체 보다 각각 1.23배 및 1.02배 높았다. 또한 이들 값들은 반복하중을 받는 실험체들 보다 각각 1.24배 및 1.49배 높았다.
- (4) 개발된 SDI 유닛의 인장내력에 대해 JIS B 2704-1(2018) 및 KDS 31 00(2019)의 기준은 단조상태에서는 안전측에서 평가된 반면, 반복하중상태에서 약 10% 높게 평가되었다.
- (5) 하중-변위관계에서 최대인장하중 및 에너지소산능력을 고려하면서 설계기준 대비 안전한 성능발휘를 위해서는 SDI 유닛에서 스프링, 3층의 환출 방진고무 및 $0.1f_{py}$ 의 프리스트레스력을 갖는 볼트의 구성이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원으로 수행되었으며(과제번호 : 21CTAP-C164373-01), 2021학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행된 연구임.

References

1. AASHTO LRFD (2004), LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
2. Ahn, T. S., Kim, Y. J., Park, J. H., Kim, H. G., Jang, D. H., 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*, 24(2), 149-161.
3. ASCE (2017), Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers, Virginia, USA.
4. BSI (2003), Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance (EN 1998-1:2003), BSI, London, UK.
5. Fares, Y., Chaussumier, M., Daidie, A., and Guillot, J. (2006), Determining the Life Cycle of Bolts Using a Local Approach and the Dang Van Criterion, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29(8), 588-596.
6. Gilani, A. S. J., Reinhorn, A. M., Glasgow, B., Lavan, O., and Miyamoto, H. K. (2010), Earthquake Simulator Testing and Seismic Evaluation of Suspended Ceilings, *Journal of Architectural Engineering, ASCE*, 16(2), 63-73.
7. JIS B 2704-1 (2018), Coil Springs-Part 1: Basic Calculation Methods. Japanese Standards Association, Tokyo, Japan.
8. Jun, S. C., Lee, C. H., and Bae, S. J. (2021), Full-Scale Shaking Table Test and Analysis of Seismic Ceiling Systems, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 33(2), 63-74.
9. KDS 41 31 00 (2019), Korean Building Code for Steel Structures, Korean Design Standard, Kyonggi-do, Korea.
10. Khiavi, M. P., Ghorbani, M. A., and Rahmat, A. G. (2020), Seismic Optimization of Concrete Gravity Dams Using a Rubber Damper, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 25(3), 425-435.
11. Kim, H. Y., Choi, Y. S., Sim, J. I., and Cho, C. G. (2018), Full-Scale Shaking Table Test and Analysis of Seismic Ceiling Systems, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, 18(1), 135-143.
12. Kim, S. W., and Kim, K. H. (2020), Evaluation of Structural Behavior of Hysteretic Steel Dampers under Cyclic Loading, *Applied Sciences*, 10(22), 1-11.
13. KS M 6518 (2021), Physical Test Methods for Vulcanized Rubber, Korea Agency for Technology and Standards, Seoul, Korea.
14. Kulak, G. L., Fisher, J. W., and Struik, J. H. A. (2001), Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd Edition, American Institute of Steel Construction, New Jersey, USA.
15. Kurita, K., Aoki, S., Nakanishi, Y., Tominaga, K., and Kanazawa, M. (2011), Fundamental Characteristics of Reduction System for

- Seismic Response Using Friction Force, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(11), 1042-1047.
16. Lee, J. S. (2021), Seismic Design and Performance Evaluation of In-direct Suspended Ceiling System with Steel Panels using Shaking Table Test, Ph.D. dissertation, Ajou University, Department of Architecture Engineering.
 17. Lee, J. S., In, S. W., Jung, D. I., Lee, D. Y., Lee, S. H., and Cho, B. H. (2019), Seismic Performance Evaluation of Non-seismic T-bar type Steel-Panel Suspended Ceiling using Shaking Table Test, *Journal of Architectural Institute Korea Structure and Construction*, 35(10), 171-180.
 18. Lijuan, L. (2010), A Study on Dissipation of Cumulative Hysteretic Energy in Reinforced Concrete Frame Structures, *Advanced Materials Research*, 163(167), 4301-4308.
 19. MacArthur, L. S. (2014), A Computational Approach for Evaluating Helical Compression Springs, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(12), 224-229.
 20. MOE (2019), Seismic Performance Evaluation and Retrofit Manual for School Facilities, Ministry of Education, Sejong-si, Korea.
 21. Wei, B., Zhuo, Y., Li, C., and Yang, G. (2019), Parameter Optimization of a Vertical Spring-Viscous Damper-Coulomb Friction System, *Shock and Vibration*, 2019, 1-19.
 22. Wu, Z. Y., Meng, N., Yuan, X., and Xiang, J. R. (2020), Anti-Seismic Suspended Ceiling with Stone Curtain Wall and Mounting Method Thereof. China Patent No. CN112324040A.
 23. Yamasato, K., Morohoshi, M., and Harayama, H. (2019), Aseismatic Ceiling Structure. Japan Patent No. JP2020165110A.

Received : 11/02/2021

Revised : 11/22/2021

Accepted : 11/23/2021

요 지 : 이 연구의 목적은 천장구조재의 내진성능향상을 위해 개발된 제진장치(seismic damping-isolation unit, 이하 SDI 유닛)의 압축 및 인장하중상태의 하중-변위 관계를 평가하고 축하중 설계를 위한 기초자료를 구축하는데에 있다. 주요변수는 스프링의 유무, 방진고무의 적층수와 스프링과 방진고무의 결합을 위해 설치된 볼트의 프리스트레스력의 크기 그리고 재하방법이다. 실험결과 볼트의 프리스트레스력의 크기가 클수록, 반복하중 보다는 단조하중에서, 그리고 스프링이 있는 SDI 유닛은 하중-변위관계에서 탄성한계점까지의 강성증가 뿐만 아니라 최대 하중 이후의 연성거동에 유리하였다. 결과적으로 에너지 소산능력은 스프링이 있으면서, 3층의 방진고무 및 볼트 항복강도의 10%의 프리스트레스력을 갖는 SDI 유닛에서 가장 높았다. 개발된 SDI 유닛의 인장내력에 대해 JIS B 2704-1(2018) 및 KDS 31 00(2019)의 기준은 단조상태에서는 안전측에서 평가된 반면, 반복하중상태에서 약 10% 높게 평가되었다.

핵심용어 : 스프링, 방진고무, 제진장치, 압축하중, 인장하중
