

셀프센터링 기능을 갖는 제진시스템 적용을 위한 디스크 스프링의 역학특성에 관한 실험적 연구

박영상¹ · 홍원기¹ · 김영주² · 최광용³ · 김윤혁⁴ · 박해용^{5*}

¹석사과정, 국립한밭대학교, 건축공학과, ²대표이사, 한국건축구조연구원, ³연구소장, 한국건축구조연구원,

⁴수석연구원, 한국건축구조연구원, ⁵조교수, 국립한밭대학교, 건축공학과

Experimental Study on the Mechanical Characteristics of Disc Springs for Seismic Damping Systems with Self-Centering Capability

Park, Yeong Sang¹, Hong, Won Ki¹, Kim, Young Ju², Choi, Kwang Yong³,
Kim, Yoon Hyeok⁴, Park, Hae-Yong^{5*}

¹Master's Course, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²CEO, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

³Director of Research, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

⁴Principal Research, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

⁵Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract – In this study, the mechanical behavior of disc springs was precisely analyzed, and their structural performance was verified. The research was conducted in three stages: single unit tests, series/parallel arrangement tests, and module cyclic loading tests under initial pre-stress. Experimental results showed that the load-displacement characteristics of the disc springs closely matched the Almen-Laszlo theoretical formula. In particular, D3 ($h_0/t = 1.05$) disc springs were found to provide stable restorative performance with minimal residual deformation. Furthermore, the study analyzed factors influencing hysteretic behavior, such as stiffness discrepancy, pre-stress force deviation, and horizontal misalignment of the loading jig, which were observed during the experimental process.

Keywords – Self-centering, Disc spring, Pre-stress, Resilience, Residual deformation

1. 서론

세계적으로 지진 발생 빈도와 강도는 증가하는 추세이며 안전을 위협하고 있다. 특히 2023년 발생한 튀르키예·시리아 대지진은 많은 인명 피해와 건축물 피해를 기록하였으며, 2024년 발생한 일본 노토 반도 지진, 2025년 러시아 캅차카에서 발생한 거대 지진 등 대지진들이 잇따라 보고되면서 지진 방재에 대한 경각심이

고조되고 있다. 국내 또한 과거에는 지진 안전지대로 여겨졌으나, 2016년 경주 지진, 2017년 포항 지진, 그리고 최근 전북 부안 지진 등이 잇따라 발생하며 지진에 대한 경각심이 고조되어 있는 상황이다. 이러한 배경에서 내진보강 및 내진설계가 본격적으로 진행되고 있으며, 국내의 지역 특성을 고려할 때 에너지 소산장치를 갖춘 제진구조는 시공성과 경제성 측면에서 유효한 접근으로 판단된다^[1]. 특히 강재이력댐퍼는 강성 및 강도 설계가 명확하며 제작·시공·관리 측면에서의 편의성이 우수하여 유리하다^[15]. 그러나 소성변형을 통해 에너지를 소산하는 방식의 특성상 지진 후 잔류변형이 발생하며, 이는 신속한 기능 회복을 저해하는 본질적 한계로 작용한다^{[2],[3]}.

탄성 회복력은 단순한 구조물의 붕괴 방지를 넘어 지진 이후 기능 회복을 핵심 성능 지표로 삼는 개념으로,

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 21, 2026; revised on July 1, 2026; approved on July 9, 2026.

Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. haeyong@hanbat.ac.kr

최근 국내외에서 그 중요성이 강조되고 있다^[4]. 이에 따라 지진 에너지를 효과적으로 소산하면서도 지진 이후 구조물을 원점으로 회귀시키는 복원력을 결합한 셀프센터링(Self-Centering) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[5],[6]}.

셀프센터링 기술은 기존 제진장치를 활용하여 지진 에너지를 효과적으로 소산하는 기능과 더불어, 지진 이후 구조물을 변형 전 상태로 회귀시키는 복원력을 결합한 시스템이다. 이를 통해 잔류변형을 억제함으로써 지진 피해 복구 시 소요되는 경제적 비용과 시간을 획기적으로 절감할 수 있는 뚜렷한 장점이 존재한다. 셀프센터링 시스템의 복원력 제공 요소는 크게 고강도 강연선, 형상기억합금(SMA), 스프링 요소 등으로 분류된다. 강연선 방식은 프리스트레스 탄성 복원력을 활용하여 가장 널리 연구되어 왔으나, 설계 변위 초과 시 성능 저하 및 높은 시공 정밀도가 요구된다^[7]. SMA는 초탄성 거동을 통해 자동 형상 회복이 가능하나, 높은 재료 단가와 온도 의존성으로 인해 실용화에 한계가 존재한다^[8]. 한편 스프링 요소를 활용한 방식으로는 프리스트레스가 도입된 디스크 스프링 조합의 반복 거동 및 파괴 메커니즘에 대한 연구^{[12],[13]}와 회복탄력성 확보를 위한 디스크 스프링 기반 셀프센터링 장치 개발 연구^[14]가 수행되어 그 유효성이 보고된 바 있다.

이에 본 연구에서는 하중-변위 관계가 명확하고 직·병렬 적층 방식을 통해 강성 및 강도 설계가 직관적이며, 초기 프리스트레스 도입과 반복 하중 하에서의 안정적인 탄성 거동이 기대되는 디스크 스프링을 복원력 요소로 채택하였다. 다만 디스크 스프링을 셀프센터링 요소로 활용하기 위해서는 에너지 소산 요소와의 결합 방식과 시스템 전체의 역학적 거동을 면밀히 검토할 필요가 있다. 기존 연구에서의 셀프센터링 브레이스 시스템은 마찰댐퍼와 셀프센터링 요소를 병렬로 결합한 하

이브리드 구성이 다수 제안되어 왔다. 이 중 강재이력댐퍼를 에너지 소산 요소로 활용하는 경우, 제작·시공·관리 측면에서의 편의성은 우수하나, 부재 항복 이후 상대적으로 큰 2차 강성으로 인해 오버스트랭스가 발생하며, 이는 시스템 내 잔류변형을 효과적으로 억제하는 데 불리한 요인으로 작용한다^[9]. 이에 따라 셀프센터링 요소의 역학적 거동을 명확히 파악하는 것이 시스템 전체 성능 예측의 신뢰성 확보를 위한 핵심 선행 과제로 판단된다.

본 연구에서는 셀프센터링 시스템 내에서 복원력을 제공하는 핵심 요소인 디스크 스프링의 역학적 거동과 구조적 성능을 검토하고자 한다. 이를 위해 Unit 실험, Arrangement 실험, 그리고 Pre-Stressed 반복 가력 실험으로 3단계 실험적 분석을 수행하여 디스크 스프링의 구조적 성능을 평가하고자 한다.

2. 셀프센터링 요소의 요구조건

본 연구에서의 셀프센터링 시스템은 Fig. 1과 같이 지진 에너지를 소산하는 변단면 강재 댐퍼와 원점 복원 기능을 담당하는 적층 디스크 스프링이 병렬로 결합된

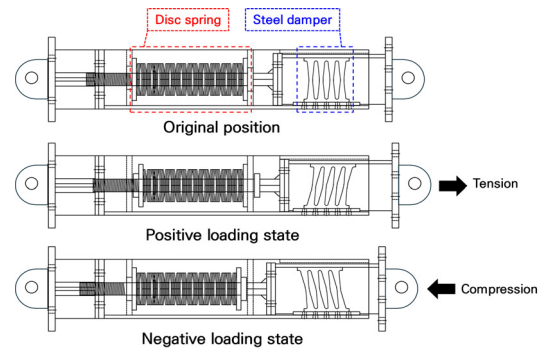


Fig. 1. Behavior pattern of BSSD system

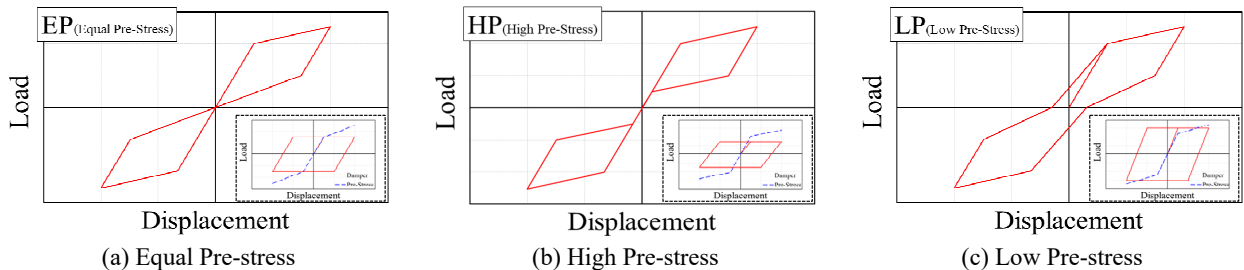


Fig. 2. Influence of pre-stressing force on the self-centering efficiency

하이브리드 제진 장치이다. 이 장치는 대각 가새나 V자형 가새 등 다양한 브레이스 형태로 제작되어 건축 구조물에 적용될 수 있다. 작동 원리의 핵심은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 조립 단계에서 디스크 스프링 모듈에 사전 도입된 프리스트레스를 기반으로 하여 인장이나 압축 등 외부 하중이 가해지는 방향과 관계없이 내부의 디스크 스프링이 항상 추가적으로 압축되며 강력한 복원력을 축적하게 된다. 결과적으로 하중 제거 단계에서는 디스크 스프링에 축적된 탄성 복원 에너지가 강재 댐퍼의 소성 변형으로 인해 발생한 잔류변형을 효과적으로 극복하고 시스템을 강제로 원점으로 회귀시킨다. 이를 통해 구조물의 영구적인 변형을 방지하며, 우수한 회복탄력성을 확보할 수 있다.

3. 디스크 스프링 역학적 특성

디스크 스프링은 Fig. 3와 같이 원뿔 형태의 환형 와셔 모양을 가진 판 스프링으로, 축 방향 하중에 대해 높은 저항력을 발휘하도록 설계된 정밀 부품이다. 이 부품은 축 방향 하중을 받을 때 기하학적 형상이 압축되며 적용 하중을 내경 상부와 외경 하부의 가장자리에 균등하게 분산하여 탄성 에너지를 효율적으로 저장하며 하중 제거 시에 저장된 에너지를 방출하며 복원되는 성질을 갖는다. 디스크 스프링은 좁은 설치 공간 내에서도 비교적 큰 하중을 안정적으로 수용할 수 있는 뛰어난 공간 효율성을 제공하며, 적층 방식을 자유롭게 조합함으로써 설계자가 요구하는 하중-변위 특성을 구

현할 수 있다는 장점을 지닌다. 더불어 적절한 설계 하에서 수백만 사이클 이상의 긴 피로 수명을 확보할 수 있어, 지진과 같은 강한 반복 가력이 발생하는 환경에서도 높은 신뢰성을 유지할 수 있다.

3.1 강도 및 강성 산정식

디스크 스프링의 비선형적 하중-변위 관계를 산정하기 위해 1936년 Almen과 Laszlo가 제안한 이론식을 바탕으로 하여 축 방향 하중(F) 발생 변위(s)의 관계는 식 (1)과 같이 표현되며, 보정 계수(K_1) 및 유효 강성(K_e)은 각각 식 (2), 식 (3)과 같이 산정된다^[10].

$$F = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{st^3}{K_1 D_e^2} \left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + 1 \right] \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\left\{ \frac{(D_e - D_i) - 1}{D_e - D_i} \right\}^2}{\frac{(D_e - D_i) + 1}{(D_e - D_i) - 1} - \frac{2}{\ln(D_e - D_i)}} \quad (2)$$

$$K_e = \frac{F_{(s=h_0)}}{h_0} \quad (3)$$

여기서, F : 디스크 스프링 하중이며, s : 상대변위량, E : 영계수이며 일반적으로 $206,000 \text{ N/mm}^2$ 를 가지며, ν : 프아송비로 0.3을 갖게된다. t, D_e, D_i, h_0 는 Fig. 3(a)에 제시된 것과 같이 각각 스프링의 두께, 외경 지름, 내경 지름, 하중이 작용하지 않을 때의 스프링 높이를 나타낸다.

3.2 적층 방식에 따른 이력특성

디스크 스프링은 직렬(Series), 병렬(Parallel) 적층 방식에 따라 다른 이력특성을 나타낸다. 직렬 배열은 서로 반대 방향으로 마주 보게 적층하여 전체 하중은 동일하나 허용 변위가 적층 개수(n_s)에 비례하여 증가하고, 병렬 배열은 동일 방향으로 적층하여 허용 변위는 동일하나 전체 하중이 적층 개수(n_p)에 비례하여 증가한다. 강도(F)와 강성(K_e) 산정식은 식 (4), 식 (5)와 같으며, 이를 이용해 단일 디스크 스프링 기준 적층 조합별 하중-변위 관계를 산정하여 Fig. 4에 나타내었다.

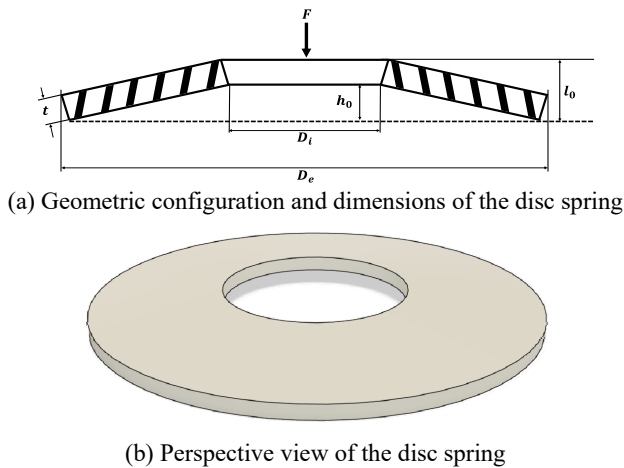


Fig. 3. Geometry of the disc spring

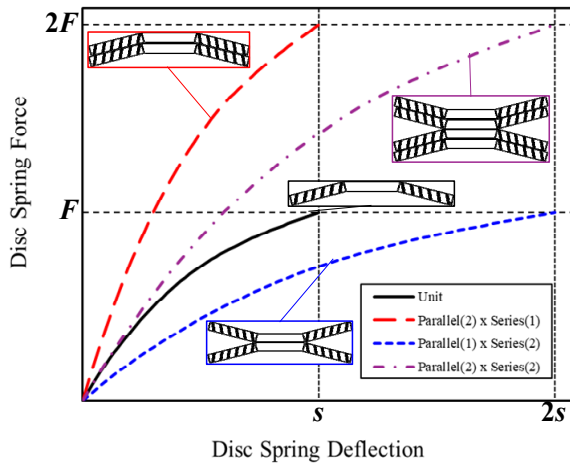


Fig. 4. Hysteresis characteristics in series and parallel configurations

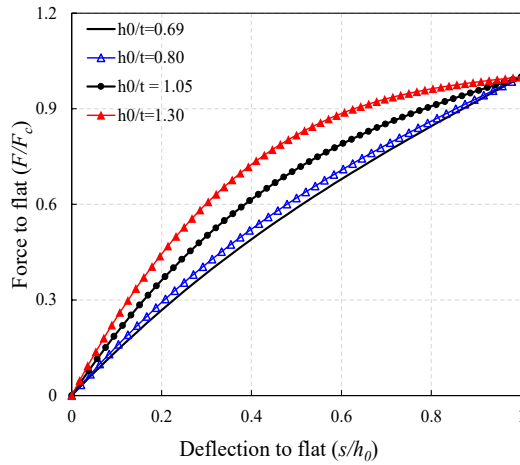


Fig. 5. Disc Spring characteristic curves about h_0/t ratio

$$F_p = n_p \times F_d, K_{e,p} = n_p \times K_{e,d} \quad (4)$$

$$F_s = F_d, K_{e,s} = \left\{ n_s \left(\frac{1}{K_{e,d}} \right) \right\}^{-1} \quad (5)$$

여기서, F_d : 디스크 스프링 하중, n_p : 병렬 적층 수, n_s : 직렬 적층 수, $K_{e,d}$: 단일 디스크 스프링 강성을 나타낸다.

3.3 높이/두께 비(h_0/t)에 따른 역학적 특성

디스크 스프링의 하중-변위 및 이력특성은 식 (1)~식 (3)을 이용하여 산정한 Fig. 5와 같이 높이/두께 비 (h_0/t)에 따라 결정되는데, 이는 설계자가 요구하는 시스템의 강성 특성을 정의하는 파라미터가 될 수 있다.

높이/두께 비가 작을수록 하중-변위 곡선은 선형에 가까우며, 비가 커질수록 비선형성이 뚜렷해지고 특히 1.41을 초과하면 하중이 정체되거나 감소하는 경향이 나타난다^[11]. 이러한 이력 곡선에서의 비선형성은 부재의 소성화가 아닌 부재의 기하학적 형상 변화와 접촉각 변화에 기인하는 기하학적 비선형성을 의미한다.

4. 실험계획

본 연구에서는 셀프센터링 시스템의 복원력 공급원으로 디스크 스프링 모듈의 역학적 타당성과 설계 범위를 검증하기 위해 순차적인 실험계획을 수립하였다. 실험은 기초 부품의 성능 확인부터 실제 장치 적용을 고려한 모듈 단위의 거동 분석까지 총 3단계의 체계적인 과정을 통해 실험을 계획하였다. Unit 실험과 Arrangement 실험을 통해 디스크 스프링의 구조 성능을 검토하며 마지막으로 Pre-Stressed 실험을 통해 초기 하중 도입 시의 복원 성능을 실증하여 실제 장치 개발을 위한 정량적 자료를 확보하고자 하였다.

4.1 Unit 실험계획

Unit 실험은 디스크 스프링의 가장 기초적인 역학적 성능을 검증하는 단계이다. 본 실험에 앞서 고찰하였던 Almen-Laszlo의 이론식을 바탕으로 단일 유닛의 하중-변위 거동을 분석하며, 높이/두께(h_0/t) 비에 따라 나타나는 비선형적 특성을 확인하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 가력 변위 증가에 따라 나타나는 하중 급상승 구간을 예측함으로써, 이론적 예측 범위와 실제 시스템 설계시 요구되는 허용 변위 임계치를 종합적으로 검토하고자 하였다. 실험 가력은 만능재료시험기(UTM)를 활용한 1방향 단조 가력 방식을 채택하였으며, 구체적인 장치 세팅은 Fig. 6(a)와 같다. 본 실험을 위해 선정한 4종류의 실험체의 상세 제원은 Table 1과 같다. 실험체는 형상비(h_0/t)에 따른 거동 변화를 폭넓게 비교하기 위해, 선형에 가까운 거동을 보이는 D1, D2부터 비선형이 나타나는 D3, 비선형성이 뚜렷한 D4까지 형상비를 단계적으로 달리하여 선정하였다.

4.2 Arrangement 실험계획

Arrangement 실험은 개별 유닛들이 결합되어 하나의 모듈을 형성할 때 나타나는 적층 방식의 역학적 상관관계를 규명하기 위해 수행되었다. 실제 셀프센터링

Table 1. Specimen of unit

Specimen	Detailed dimensions				h_0/t
	D_e (mm)	D_i (mm)	t (mm)	h_0 (mm)	
D1-U-1~3	150.0	61.0	7.0	4.8	0.69
D2-U-1~3	150.0	61.0	6.0	4.8	0.80
D3-U-1~3	150.0	61.0	5.0	5.3	1.05
D4-U-1~3	160.0	82.0	4.3	5.6	1.30

Table 2. Specimen of arrangement

Specimen	Arrangement	Expected maximum load (kN)	Elastic stiffness (kN/mm)	Max. permissible deflection (mm)
D2-A-1	4P X 1S	185.36	46.81	3.60
D2-A-2	4P X 3S	185.36	15.60	10.80
D2-A-3	3P X 4S	139.02	8.78	14.40
D3-A-1	4P X 1S	126.58	27.09	3.98
D3-A-2	4P X 3S	126.58	9.03	11.93
D3-A-3	3P X 4S	94.93	5.08	15.90

Table 3. Specimen of pre-stressed

Specimen	Arrangement	Applied load (kN)	Pre-set deformation (mm)	Loading method
D2-P-C	4P X 6S	50.66	4.32	Constant
D2-P-I				Increment
D3-P-C		40.56	4.77	Constant
D3-P-I				Increment

장치에서는 요구되는 강도와 허용 변위를 충족하기 위해 다수의 디스크 스프링을 직·병렬 조합을 통해 적층하게 된다. 본 단계에서는 이러한 직렬 및 병렬 적층에 따른 하중 저항력과 변위 수용 능력의 변화를 이론치와 비교 분석함으로써, 배열 형태가 시스템의 성능 발현에 미치는 영향력을 평가하고자 한다. 실험은 Unit 실험과 동일한 1방향 단조 가력 방식으로 진행되었으며, 구체적인 장치 세팅은 Fig. 6(b)와 같다. 본 실험을 위해 선정한 조합 방식에 따른 실험체 계획은 Table 2와 같다.

4.3 Pre-Stressed 실험계획

Pre-Stressed 실험은 실제 셀프센터링 브레이스의 작동 메커니즘을 모사하여 초기 압축력이 도입 시의 복원 성능을 실증하기 위한 최종 단계이다. 본 단계에서는 설계 목표 하중을 만족할 수 있는 변위만큼 모듈을 사전에 압축하여 실제 장치의 구속 조건을 재현하였다. 이를 통해 초기 도입 하중이 설계 의도대로 유효하게 작용하는지 검증하고, 반복 가력 시 하중 방향 전환에 따라 나타나는 모듈의 거동 특성을 분석하고자 한다. 또한 하중 제하 시 디스크 스프링의 탄성 에너지가 잔류 변형을 효과적으로 억제하는 복원 능력을 보유하고 있는지 실증하는 것을 목표로 하였다. 실험은 반복 가력 방식으로 수행되었으며, 구체적인 장치 세팅과 실험체 계획은 Fig. 6(c) 및 Table 3와 같으며 이때 Constant는 일정 진폭을 반복하며, Increment는 점진증폭을 의미한다.

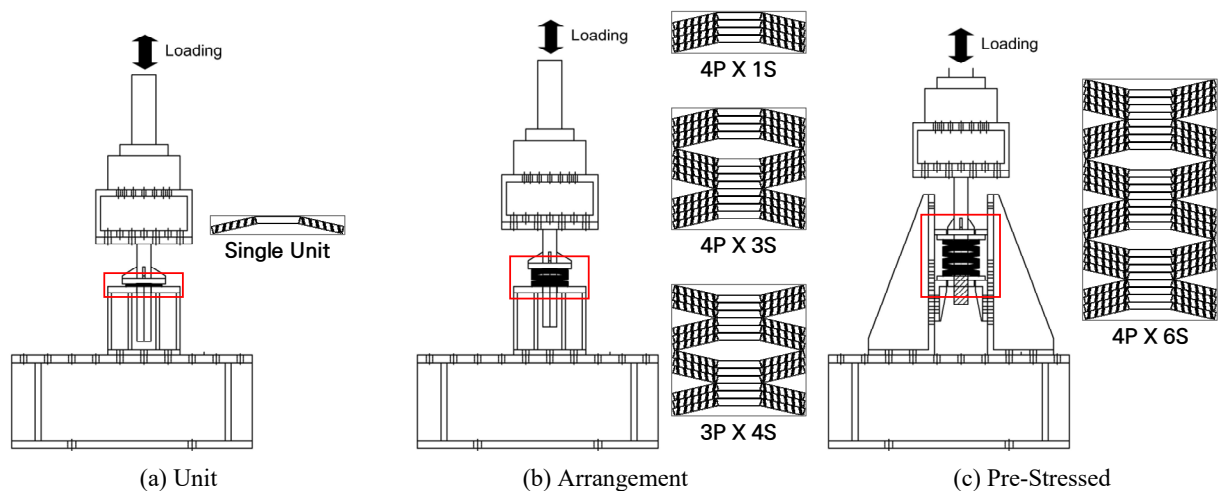


Fig. 6. Overall view of the experimental setup including the subjects

5. 실험결과

5.1 Unit 실험결과

Unit 실험을 수행한 결과, 모든 유닛 실험체는 Fig. 7

에 나타난 바와 같이 Almen-Laszlo 이론식을 바탕으로 산출된 하중-변위 곡선과 매우 높은 일치성을 나타내었으며, 주요 결과는 Table 4에 정리하였다. 하중-변위 곡선의 형상은 높이/두께 비(h_0/t)에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었으며, 비가 증가함에 따라 곡선의 형상이 선형

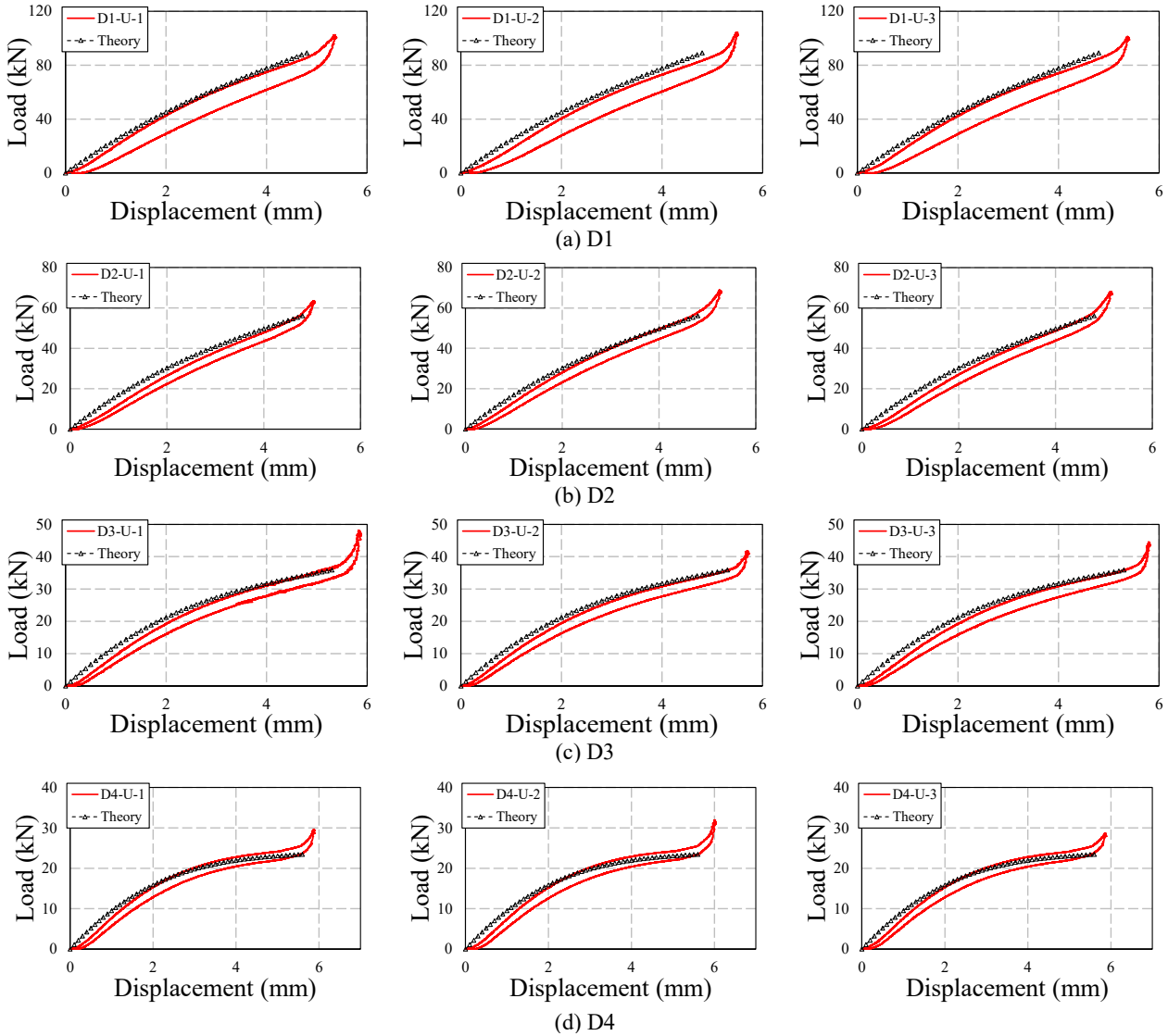


Fig. 7. Load-displacement curves of all unit specimens

Table 4. Key experimental results for unit specimen

Specimen	$s = 0.75h_0$			$s = h_0$			$K_{e,exp}$ (kN/mm)	$K_{e,theory}$ (kN/mm)	$\frac{K_{e,exp}}{K_{e,theory}}$	Permanent deformation (mm)
	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$				
D1-U-1~3	68.62	71.81	0.96	84.58	89.19	0.95	6.79	6.77	1.00	0.34
D2-U-1~3	44.90	46.34	0.97	57.69	56.17	1.03	12.02	11.70	1.03	0.17
D3-U-1~3	30.78	31.64	0.97	35.99	35.89	1.00	17.62	18.58	0.95	0.16
D4-U-1~3	23.18	21.95	1.06	25.64	23.47	1.09	4.58	4.19	1.09	0.21

에서 비선형으로 점진적으로 변화하는 양상이 관찰되었다. 구체적으로는 높이/두께 비가 작은 실험체(D1)에서는 하중-변위의 이력특성이 선형에 가깝게 비례하여 증가하는 특성을 나타내는 반면, 높이/두께 비가 큰 실험체(D4)에서는 가력 초기부터 하중 증가 속도가 변위 증가 대비 완만해지는 경향을 관찰하였으며, 다른 실험체는 허용 변위를 초과하는 시점에서 하중증가역이 나타나는 것과 비교하여 허용 변위 도달전 하중증가역이 발생하는 경향 역시 확인되었다. 이러한 거동 차이는 높이/두께 비가 클수록 압축 과정에서 부재의 기하학적 형상 변화 및 접촉각 변화의 영향이 하중-변위 관계와 하중증가역에 영향을 미치기 때문으로 분석된다. 또한 모든 실험체에서 가력 초기 일부 구간의 강성 구배가 이론치보다 낮게 측정되는 현상이 발생하였는데, 이는 디스크 스프링이 완벽하게 대칭일 수 없기 때문에 초기 하중 작용시 디스크 스프링과 가력 지그 사이에 존재하는 미세한 공극이 압착되며 물리적으로 자리를 잡는 과정에 의한 것으로 판단된다. 해당 초기 유격 구간을 보정하여 분석할 경우, 전체적인 이력곡선이 이론식과 밀접하게 일치하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 디스크 스프링 부재 자체의 구조성능과 역학적 타당성에는 문제가 없음을 실증하였다. 실험 결과를 통해 확인된 또 다른 특징은, 디스크 스프링의 기하학적 비선형 거동은 형상비에 따른 탄성 영역 내에서의 거동 특성일 뿐, 부재의 잔류변형 특성과는 비례하지 않는다는 점이다.

Table 4의 결과에 따라 하중-변위 관계가 가장 선형에 가까운 거동을 보였던 D1 실험체에서 오히려 0.34 mm로 가장 큰 잔류변형이 발생하였다. 이는 기하학적 비선형성은 잔류변형에 큰 영향을 미치지 않으며 부재의 기하학적 조건에 따른 응력 분포 및 국부적 소성 여부에 더 큰 영향을 받을 수 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 셀프센터링 효과를 목표로 하기 위해서는 단순한 거동의 선형성보다는 균일한 응력분포를 통해 잔류변형을 최소화할 수 있는 높이/두께 비(h_0/t)의 선정이 필수적임을 확인하였다.

5.2 Arrangement 실험결과

Arrangement 실험 결과, Fig. 8과 같이 디스크 스프링의 적층 구성에 따라 병렬 적층(n_p) 시에는 허용 변위는 증가하지 않지만 허용 저항력이 단일 유닛 대비 n_p 배에 비례하여 증가하며, 직렬 적층(n_s) 시에는 허용 하중은 증가하지 않지만 변위 수용 능력이 단일 유닛의 n_s 배만큼 선형적으로 확대되는 거동을 나타내었다. 이와 같은 실험의 주요 결과는 Table 5에 나타내었다. 이러한 실험 결과는 설계 단계에서 이론적으로 산정된 하중과 변위 조절 메커니즘이 다수의 유닛이 결합된 모듈 단위에서 유효하게 적용할 수 있음을 의미한다. 다만 D2-A-2, D2-A-3 두 실험체의 분석 결과, 설계상의 허용 변위(h_0)에 도달하기 전, 허용 변위의 75 %($0.75 h_0$)

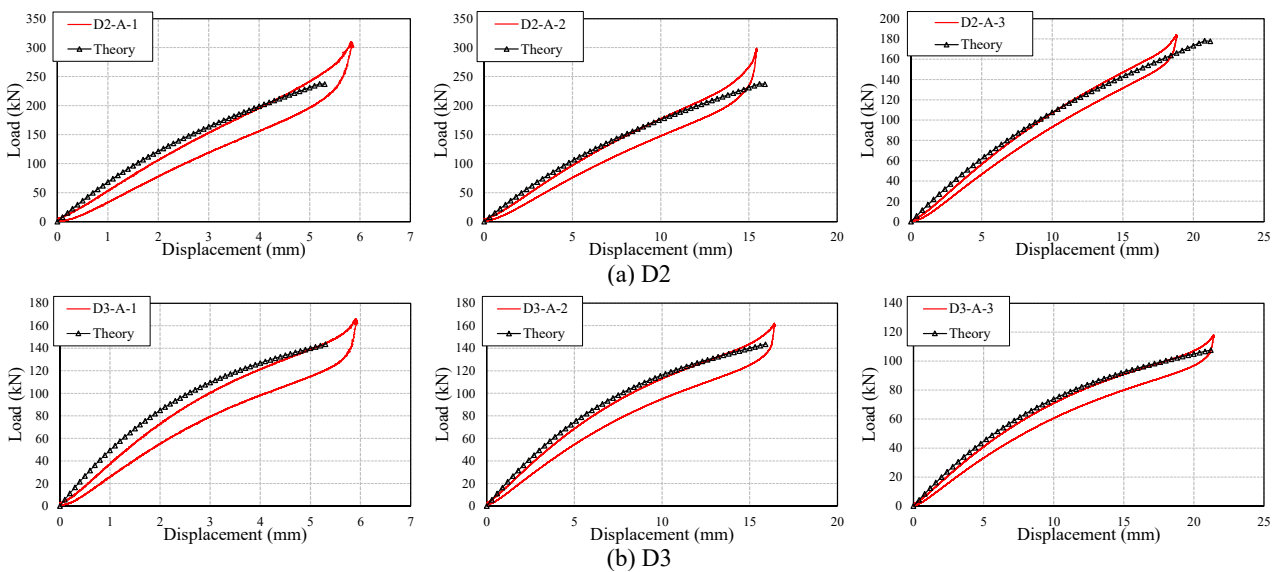


Fig. 8. Load-displacement curves of all arrangement specimens

Table 5. Key experimental results for arrangement specimen

Specimen	$s = 0.75h_0$			$s = h_0$			$K_{e,exp}$ (kN/mm)	$K_{e,theory}$ (kN/mm)	$\frac{K_{e,exp}}{K_{e,theory}}$	Permanent deformation (mm)
	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$				
D2-A-1	178.47	185.36	0.96	230.79	224.67	1.03	44.37	46.81	0.95	1.35
D2-A-2	187.89	185.36	1.01	-	224.67	-	15.55	15.60	1.00	1.42
D2-A-3	142.57	139.02	1.03	-	168.51	-	9.27	8.78	1.06	1.61
D3-A-1	120.7	126.58	0.95	144.22	143.56	1.01	26.85	27.09	0.99	0.55
D3-A-2	124.8	126.58	0.99	152.73	143.56	1.06	9.08	9.03	1.01	-
D3-A-3	93.83	94.93	0.99	115.19	107.67	1.07	5.23	5.08	1.03	0.92

부근에서 하중이 급격히 상승하는 현상이 관찰되었다. 실험 데이터에 따르면, 두 실험체는 허용 변위의 약 75 % 지점까지 도달하기 전에는 Almen-Laszlo 이론식과 높은 일치성을 나타내며 안정적인 하중-변위 이력 곡선을 나타내었으나, 이를 초과하는 가력 구간에서는 하중이 비선형적으로 급증하였다. 이러한 현상은 디스크 스프링이 평탄화에 근접하면서 나타나는 기하학적 형상 변화에 기인하며, 직·병렬로 다양하게 적층된 디스크 스프링 간의 물리적 간섭과 미세 이동에 의해 발생한 것으로 파악된다. 이러한 거동은 본 실험에 국한된 현상이 아니라 DIN 2093에서 스프링 하중을 $s=0.75 h_0$ 지점까지만 규정하고 그 이상에서는 계산값과의 편차가 커진다고 명시한 것^[11], 그리고 국내 선행연구에서도 디스크 스프링이 $0.75 h_0$ 이후 하중이 급격히 상승하는 거동이 실험적으로 확인된 것^[16]과 부합한다. 즉 디스크 스프링의 유효 작동 범위를 허용 변위의 75 % 이내로 제한하는 것은 본 실험에서 재확인된 동시에 기존 설계 기준 및 선행연구와도 일치하는 결과로, 셀프센터링 시스템 설계시 안정적인 하중-변위 특성과 신뢰성 확보를 위해 바람직할 것으로 판단된다.

5.3 Unit 및 Arrangement 실험결과 상세분석

Unit 및 Arrangement 실험 결과를 바탕으로 디스크 스프링의 형상비 및 적층 구성이 구조 성능에 미치는 영향을 심층적으로 분석하였다. 앞서 확인된 하중-변위 이력 특성에 더하여, 잔류변형, 목표 하중 도달 소요 변위, 그리고 디스크 스프링 배열시 직렬 배열의 홀수와 짝수 구성에 따른 접촉 경계조건 차이를 중심으로 고찰하였다.

Table 6. Permanent deformation of units and arrangements

Unit	Permanent deformation (mm)	Arrangement	Permanent deformation (mm)
D1	0.34	D2-A-1	1.35
		D2-A-2	1.42
D2	0.17	D2-A-3	1.61
D3	0.16	D3-A-1	0.55
		D3-A-2	-
D4	0.21	D3-A-3	0.92

5.3.1 잔류변형

Table 6에 정리된 Unit 실험 결과에 따르면, 디스크 스프링의 잔류변형 특성은 부재의 기하학적 형상비 (h_0/t) 및 적층 구성 방식에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다. Unit 실험 결과, 하중-변위 관계가 가장 선형에 가까운 거동을 보였던 D1 실험체에서 0.34 mm로 가장 큰 잔류변형이 발생한 반면, D3 실험체에서는 0.16 mm로 가장 작은 잔류변형이 관찰되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 하중-변위 이력거동의 선형성과 잔류변형 억제 성능이 반드시 비례하지 않음을 실증하는 결과이다. 즉, 잔류변형은 단순한 거동의 선형성보다는 부재의 기하학적 조건에 따른 복합적인 역학적 인자에 의해 결정됨을 시사한다. Arrangement 실험 결과에서는 적층 수가 증가하고 구성이 복잡해질수록 잔류변형이 증가하는 경향이 나타났다. 예를 들어, D2 계열의 경우 단일 유닛의 잔류 변형은 0.17 mm였으나, 배열 모듈에서는 1.35 mm에서 최대 1.61 mm까지 잔류변형이 누적 증가하였다. 이러한 결과는 다수의 디스크 스프링이 직·병렬로 적층됨에 따라 부재간의 물리적 간섭, 마찰, 그리고 접촉 조건의 비균질성이 누적되기 때문으로 판단된다. 계열 간 비교 측면에서, 동일한 적층 수 기준으로 D3 계열 모듈의 잔류변형이 D2 계열 대비 일관되게 낮게 측정되었다. 이는 유닛 단계에서 확인된 D3 형상

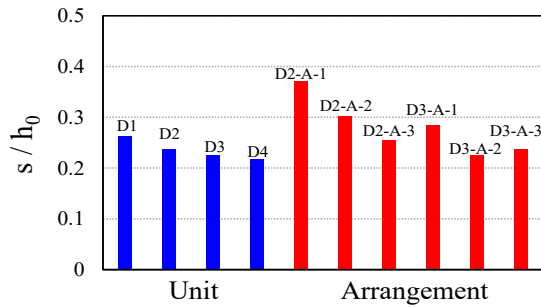


Fig. 9. Displacement ratio at target load for unit and arrangement

의 우수한 잔류변형 억제 특성이 다중 모듈 수준에서도 유효하게 유지됨을 입증한다. 결과적으로, 안정적인 복원력을 요구하는 셀프센터링 시스템 설계시에는 단일 부재의 선형적 거동 특성뿐만 아니라, 적층 시 발생하는 누적 잔류변형을 최소화할 수 있는 최적의 형상비 선정과 유효 작동 범위 제한을 고려해야 한다.

5.3.2 목표 하중 도달 시 소요 변위

Fig. 9은 각 실험체가 설계 목표 하중에 도달하기 위해 전체 허용 높이(h_0) 대비 소요된 변위(s)의 비율을 나타낸 것이다. 여기서 설계 목표 하중은 이론식에 따라 $s = 0.15h_0$ 에 해당하는 하중으로 정의하였다. Unit 실험에서는 높이/두께 비가 증가할수록 s/h_0 가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 형상비가 클수록 더 작은 변위 비율에서 목표 하중에 도달하였다. 이는 형상비가 클수록 하중-변위 곡선의 초기 구배가 상대적으로 완만하게 시작되더라도 기하학적 비선형 효과로 인해 하중 발현 효율이 높아지는 특성에 기인한다. 즉, 높은 형상비를 가진 실험체일수록 동일한 변위 투입 대비 더 빠르게 목표 저항력에 도달할 수 있음을 의미한다. Arrangement 실험에서는 적층 구성 방식에 따라 차이가 나타났다. 병렬 구성만으로 이루어진 실험체에서는 0.38, 0.28로 상대적으로 높게 측정된 반면, 직렬 구성이 추가된 실험체에서는 0.20–0.28 수준으로 낮아지는 경향을 보였다. 한편, 동일 적층 수 기준으로 D3 계열 배열 모듈이 D2 계열 대비 일관되게 낮게 나타난 점은, 유닛 단계에서 확인된 D3의 하중 발현 효율이 배열 모듈 수준에서도 유효하게 유지됨을 보여준다.

5.3.3 초기 압착 거동 및 순간 강성 일치 구간

디스크 스프링 실험 초기 구간에서 측정되는 강성이

Table 7. Displacements at which experimental stiffness converges to theoretical stiffness

(a) Unit specimens

Specimen	Test 1	Test 2	Test 3	Average
D1	0.08	0.10	0.06	0.08
D2	0.11	0.09	0.09	0.097
D3	0.10	0.08	0.14	0.11
D4	0.02	0.01	0.09	0.04

(b) Arrangement specimens

Specimen	Unit	A-1 (4PX1S) (odd)	A-2 (4PX3S) (odd)	A-3 (3PX4S) (even)
D2	0.097	0.5	0.9	0.12
D3	0.11	0.2	0.3	0.05

이론 강성보다 낮게 나타나는 현상은, 디스크 스프링과 가력 지그 사이의 미세한 공극이 압착되며 부재가 물리적으로 안착하는 과정에서 발생한다. 본 절에서는 이러한 초기 안착 구간이 종료되는 시점을 정량적으로 평가하기 위해, 각 실험체의 하중-변위 곡선에서 실험 강성 구배가 이론 곡선의 구배와 유사한 수준으로 수렴하기 시작하는 변위를 판정 기준으로 정의하고 그 결과를 Table 7에 정리하였다. Unit 실험체에서는 형상비의 차이에도 불구하고 강성이 이론치와 일치하기 시작하는 변위가 평균 0.04 mm–0.11 mm 수준으로 모두 매우 초기에 나타났다. 이는 단일 디스크 스프링의 초기 안착이 형상비보다는 가력 지그와 접촉 조건에 의해 지배적으로 결정됨을 시사한다. 반면 Arrangement 실험체에서는 직렬 적층 수의 구성에 따라 뚜렷한 차이가 나타났다. 홀수 직렬 배열은 적층 상하단 지지면이 교호적으로 저항하는 비대칭 접촉 구조를 형성하는 반면, 짝수 직렬 배열은 상하단이 대칭 접촉 구조를 형성한다. 이러한 접촉 경계 조건의 차이로 인해, 짝수 배열인 A-3에서는 강성이 이론치와 일치하기 시작하는 변위가 단일 유닛과 유사한 수준(D2:0.12 mm, D3:0.05 mm)으로 초기에 나타난 반면, 홀수 배열인 A-1, A-2에서는 해당 변위가 0.2 mm–0.9 mm로 상대적으로 뒤로 밀려 나타났다. 이는 짝수 배열에서 상하단 접촉면의 안착이 보다 균일하게 진행되어 초기 압착 구간이 축소되기 때문으로 판단되며, 짝수 배열이 초기 안착 과정에서 홀수 배열보다 유리한 거동 특성을 나타냄을 의미한다.

5.4 Pre-Stressed 실험결과

프리스트레스 도입 모듈에 대한 반복 가력 실험을 실시한 결과, Fig. 10과 같이 모든 실험체에서 사전에 의도한 깃발형 이력곡선(Flag-Shaped Hysteresis) 형태의 셀프센터링 거동이 전반적으로 구현됨을 확인하였다. 하중-변위 이력 곡선은 반복 가력 과정에서 에너지를

일부 소산하면서도 하중 제거 시 원점으로 안정적으로 회귀하는 거동을 나타내었으며, 이는 디스크 스프링 모듈에 저장된 탄성 복원 에너지가 잔류 변형을 효과적으로 억제하고 있음을 입증하는 결과로 판단된다. 다만, 초기 변위 단계에서 목표로 한 사전 도입 축력의 일부만 발현되었으며, 일정 수준의 변위가 가력된 이후에 이론 곡선과 유사한 거동으로 수렴하는 양상이 관찰되

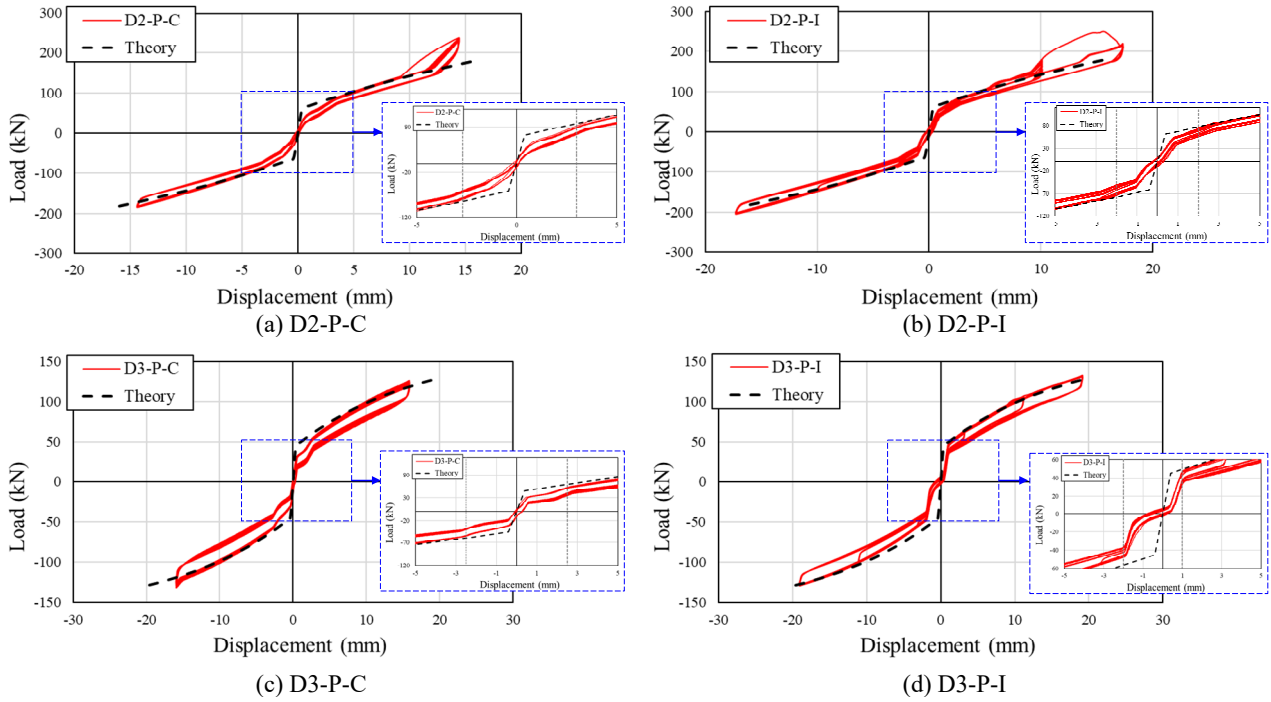


Fig. 10. Load-displacement curves of all pre-stressed specimens

Table 8. Key experimental results for pre-stressed specimens under constant loading

Specimen		Initial pre-load		$s = 0.25h_0$			$s = 0.5h_0$		
		$P_{i,exp}$ (kN)	$P_{i,theory}$ (kN)	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$
D2-P-C	(-)	-46.06	± 61.98	-127.19	± 122.84	1.04	-184.86	± 172.3	1.07
	(+)	44.64		125.38		1.02	237.4		1.38
D3-P-C	(-)	-30.90	± 45.19	-73.22	± 89.46	0.82	-119.12	± 118.75	1.00
	(+)	31.03		70.38		0.79	125.32		1.06

Table 9. Key experimental results for pre-stressed specimens by increasing loading

Specimen		Initial pre-load		$s = 0.25h_0$			$s = 0.5h_0$			$s = 0.7h_0$		
		$P_{i,exp}$ (kN)	$P_{i,theory}$ (kN)	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$	F_{exp} (kN)	F_{theory} (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_{theory}}$
D2-P-I	(-)	-52.22	± 61.98	-83.22	± 86.13	0.97	-150.0	± 144.11	1.04	-204.1	± 189.42	1.08
	(+)	49.93		87.96		1.02	164.05		1.14	205.15		1.08
D3-P-I	(-)	-44.45	± 45.19	-47.93	± 63.7	0.75	-99.03	± 102.91	0.96	-128.9	± 127.13	1.01
	(+)	49.45		60.45		0.95	106.35		1.03	127.7		1.01

었다. 이러한 현상은 앞서 Unit 실험을 통해 확인된 초기 가력 구간의 강성 구배가 이론치보다 낮게 나타나는 거동 특성과 연관된 것으로 판단된다. 구성 부재 간 접촉 메커니즘이 안정화되기까지 일정한 변형량이 요구되며, 이 과정에서 시스템의 유효 강성이 설계값보다 낮게 형성된다. 그 결과, 변위 제어 방식으로 프리스트레스를 도입하는 경우 동일한 변위 수준에서도 실제 도입 축력이 목표값에 미치지 못하는 상황이 발생할 수 있으며, 접촉 안정화에 필요한 초기 변형량을 별도로 고려하지 않을 경우 설계 단계에서 의도한 프리스트레스 수준이 실제 시스템에서 과대평가될 가능성이 있다. 프리스트레스 도입 모듈에 대한 주요 계측 결과는 Table 8, Table 9에 정리하였으며, 실험 과정에서 발생한 실험오차에 대한 분석을 다음과 같이 수행하였다.

5.4.1 지그 수평 오차의 영향

앞서 언급한 초기 축력 발현 지연 현상 외에, D3-P-I 실험체에서는 타 실험체와 비교하여 정방향과 부방향의 초기 강성 발현 시점이 비대칭적으로 나타나는 추가적인 편차가 관찰되었으며, 이는 Fig. 11에 나타내었다. 원인 규명을 위해 실험 장치를 점검한 결과, Fig. 12와 같이 가력 플레이트와 하부 받침 지그 사이에 좌우 방향의 수평 단차가 존재하는 것이 확인되었다. 이 단차로 인해 하부 플레이트의 좌측면이 우측면보다 먼저 지그에 접촉·가압되어, 플레이트 전단면이 동시에 거동하지 못하고 일부 영역이 선행적으로 하중을 부담하는 과정이 발생하였다. 그 결과, 전체 저항 메커니즘이 단계적으로 개입되면서 정방향과 부방향의 하중-변위 관계가 비대칭적으로 형성된 것으로 판단된다. 아울러 이 편심 접촉은 앞서 설명한 초기 축력 발현 지연을 D3-P-I 실험체에서 상대적으로 더 크게 심화시킨 요인으로 작용한 것으로 보인다. 이 결과는 접촉 기반 하중 전달 시스템에서 지그 수평 정밀도가 시스템 성능 재현성에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 실증하였다. 즉 이러한 정·부방향의 비대칭은 디스크 스프링 자체의 고유 거동이 아니라 지그 수평 정밀도라는 실험 장치 구성에서 비롯된 오차이며, 가력 초기에 국한되어 나타난다.

5.4.2 디스크 스프링 내부 마찰 및 축부 손상

D2-P-C 및 D2-P-I 실험체에서 계측된 급격한 하중

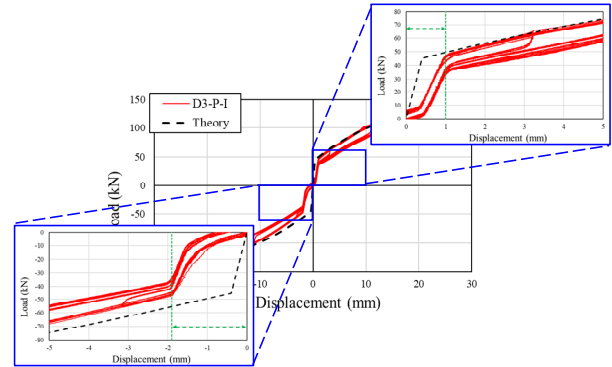


Fig. 11. Analysis of load-displacement curve about specimen D3-P-I

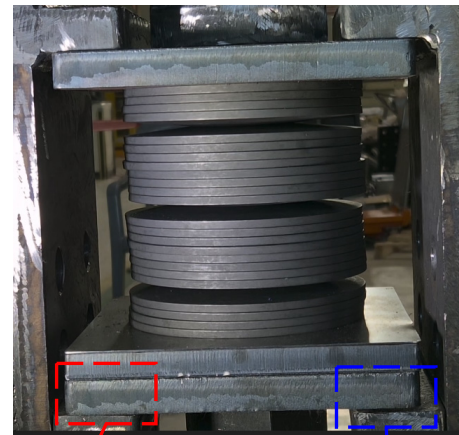


Fig. 12. Horizontal misalignment of the jig

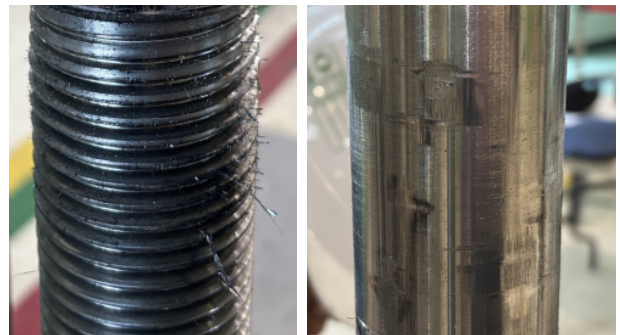


Fig. 13. Damage of the loading jig shaft and threading

상승과 실험 중 발생한 불규칙한 소음의 원인을 규명하기 위해 실험 종료 후 실험체를 해체하여 확인하였다.

그 결과, Fig. 13과 같이 가력축 역할을 수행하는 내부 강봉의 나사산 부위에서 다수의 굽힘과 물리적 손상이 발견되었다. 이는 가력 시 발생하는 미세한 횡방향 거동으로 인해 디스크 스프링의 내경 가장자리가 나사산에 직접적으로 걸리거나 끼이며 발생한 과도한 마찰 저항으로 판단된다. 이러한 간섭에 의한 마찰은 하중 예측의 불확실성을 높일 뿐만 아니라 반복 가력 시 부재의 내구성을 저해하는 요인이 된다. 즉 D2-P-C, D2-P-I 실험체에서 계측된 급격한 하중 상승은 앞서 5.2절에 설명한 허용 변위 75 % 부근의 고유 거동과는 구별되는 것으로, 디스크 스프링 자체의 역학적 거동이 아니라 가력 축부 나사산과의 간섭이라는 실험 장치 셋팅에서 비롯된 오차로 판단된다. 따라서 향후 전체적인 셀프센터링 브레이스 시스템 설계 시에는 디스크 스프링 모듈의 가력 축부의 나사산과 디스크 스프링 사이의 충분한 거리를 필수적으로 확보하여 물리적 접촉을 차단하는 정밀한 설계가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 셀프센터링 제진 시스템의 핵심 구성 요소인 디스크 스프링의 역학적 거동과 구조 성능을 평가하기 위해 Unit 실험, Arrangement 실험, 그리고 Pre-Stressed 반복 가력 실험을 단계적으로 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Unit 실험 결과, 모든 타입의 실험체는 이론식에 의한 하중-변위 곡선과 높은 일치성을 나타내어 설계 단계에서의 하중 예측 신뢰성을 확보하였다. 특히 D3 실험체는 안정적인 이력곡선과 최소한의 잔류변형을 나타내어 셀프센터링 모듈 구성을 위한 역학적 특성을 보유하고 있음을 확인하였다.
- (2) 가력 초기 구간에서 강성이 이론치보다 낮게 측정되는 현상은 디스크 스프링과 지그 사이의 미세한 공극이 압축되어 물리적으로 자리를 잡는 것으로 확인되었다. 또한 Arrangement 실험을 통해 병렬 및 직렬 조합에 따른 하중과 변위의 선형적 제어 가능성을 확인하였다.
- (3) Arrangement 실험 및 Pre-Stressed 실험 결과, 가

력 변위가 허용 변위의 75 %를 초과하는 시점부터 기하학적 형상 변화에 따라 하중이 급상승하는 현상이 관찰되었다. 따라서 시스템 설계 시 안정적인 하중-변위 특성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 디스크 스프링의 작동 범위를 허용 변위의 75 % 이내로 설계하는 것이 바람직하다.

- (4) Pre-Stressed 실험을 통해 깃발형 모양의 이력곡선과 원점 회귀 성능을 실증함으로써, 디스크 스프링 모듈이 잔류변형을 효과적으로 억제하는 복원력 공급원으로서 충분한 타당성을 가짐을 확인하였다. 다만, 지그의 수평 오차 및 축부 나사산과의 기구학적 간섭 등은 하중 예측의 불확실성과 초기 압축력 도입 등의 문제를 야기할 수 있으므로 정밀한 설계가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 경상남도 지진안전산업 기술사업화지원사업 및 행정안전부 재난안전산업진흥시설조성지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00418342).

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2022) *Seismic Design Standard for Buildings*, KDS 41 17 00:2022 (in Korean).
- [2] McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M. (2008) Permissible Residual Deformation Levels for Building Structures Considering Both Safety and Human Elements, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [3] Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R., and Choi, H. (2011) Residual Drift Response of SMRFs and BRB Frames in Steel Buildings Designed according to ASCE 7-05, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.137, No.5, pp.589-599.
- [4] Bruneau, M., and Reinhorn, A. (2007) Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities, *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.23, No.1, pp.41-62.
- [5] Zhong, C., and Christopoulos, C. (2022) Self-Centering

- Seismic-Resistant Structures: Historical Overview and State-of-the-Art, *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.38, No.2, pp.1321-1356.
- [6] Oh, S.H., Park, J.H., Yoon, S.H., and Han, S.M. (2025) Experimental Study on Hysteretic and Restoring Force Characteristics of Self-Centering Friction Damper, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.1, pp.43-51 (in Korean).
- [7] Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.J., and Lacerte, M. (2008) Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.134, No.1, pp.96-107.
- [8] Ozbulut, O.E., Hurlbauss, S., and Desroches, R. (2011) Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys: A Review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.22, No.14, pp.1531-1549.
- [9] Kim, Y.J., Choi, K.Y., Park, H.Y., and Kim, J.W. (2023) Seismic Performance of Structures Reinforced with Stud-Type Steel Slit Damper System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.357-366 (in Korean).
- [10] Almen, J.O., and Laszlo, A. (1936) The Uniform-Section Disk Spring, *Transactions of the ASME*, Vol.58, No.4, pp.305-314.
- [11] DIN. (2013) *Disc Springs - Quality Specifications - Dimensions*, DIN 2093, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- [12] Xu, L., Fan, X.W., and Li, Z. (2017) Experimental Behavior and Analysis of Self-Centering Steel Brace with Pre-Pressed Disc Springs, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.139, pp.363-373.
- [13] Xu, L.H., Fan, X.W., and Li, Z.X. (2017) Cyclic Behavior and Failure Mechanism of Self-Centering Energy Dissipation Braces with Pre-Pressed Combination Disc Springs, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.46, No.7, pp.1065-1080.
- [14] Fang, C., Wang, W., and Shen, D. (2021) Development and Experimental Study of Disc Spring-Based Self-Centering Devices for Seismic Resilience, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.147, No.7, 04021094.
- [15] Park, H.Y., Kim, H.R., Kim, S.B., Eom, T.S., and Kim, J.W. (2021) Mechanical Characteristics of H-Type Shear Panel Steel Damper with and without Stiffener Reinforcement, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.285-294 (in Korean).
- [16] Kim, S.B., Cho, S.H., and Kwon, H.O. (2025) Evaluation of the Stiffness and Time-dependent Clamping Characteristics of Disk Springs for Optimal Design of Friction Dampers, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.25, No.1, pp.125-136 (in Korean).

요약: 본 연구에서는 지진 피해 이후 구조물의 잔류변형을 억제할 수 있는 셀프센터링 제진장치의 핵심 구성 요소인 디스크 스프링의 역학적 거동을 정밀하게 분석하고 구조성능을 검증하였다. 본 연구는 단일 유닛 실험, 직병렬 배열 실험, 그리고 초기 프리스트레스 도입 하의 모듈 반복 가력 실험의 3단계로 수행되었다. 실험 결과, Almen-Laszlo 이론식과 실제 디스크 스프링의 하중-변위 특성은 매우 유사하였으며, 특히 D3 디스크 스프링에서 안정적인 복원 성능과 최소한의 잔류변형이 확인되었다. 또한 실험 과정에서 나타난 강성의 차이, 설계 프리스트레스력의 차이, 지그의 수평 오차 등 이력 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어: 셀프센터링, 디스크 스프링, 프리스트레스, 회복탄력성, 잔류변형
