

# 셀프 센터링이 가능한 디스크 스프링 브레이스의 이력특성에 관한 연구

## A Study on the Hysteretic Characteristics of Self-Centering Disc Spring Brace

박 병 태\*  
Park, Byung-Tae

신 동 현\*\*  
Shin, Dong-Hyeon

### Abstract

The seismic retrofits of existing structures have been focused on the control of structural responses which can be achieved by providing displacement capacity through inelastic ductile action at supplemental devices. Due to their hysteretic characteristics, it is expected to sustain damage through repeated inelastic behaviors including residual deformation which might increase repair costs. To solve such drawbacks of existing yielding devices, this study proposes a self-centering disc spring brace that sustains large axial deformation without structural damage while providing stable energy dissipation capacity. The hysteretic behaviors of suggested brace are first investigated based on the quasi-static cyclic test procedure. Experimental results present the effective self-centering behavior and an analytical model is then suggested in order to reasonably capture the flag-shaped hysteretic behavior of the disc spring brace.

**Keywords :** Self-centering, Hysteretic characteristic, Disc spring brace, Cyclic test, Analytical model

### 1. 서론

1988년 내진설계기준이 제정되기 이전에 설계된 건축물들은 주로 중력하중에 대해서만 설계됨에 따라, 지진발생시 기동 파괴 또는 보-기동 접합부 파괴양상을 보이는 것이 일반적이다. 이러한 파괴양상은 건물의 붕괴를 유발함에 따라 국내에서는 지진으로 인한 국민의 생명과 재산을 보호함과 동시에 사회·경제적 피해를 최소화하기 위하여 2011년부터 내진설계가 되지 않은 기존 공공시설물 내진보강 기본계획을 5년마다 수립하고 있다<sup>1)</sup>. 기존 공공시설물의 내진성능 향상을 위한 공법으로는 철골가새, 단면증타와 같은 구조물의 강도 및 강성을 증가시키는 내진보강방안과 제진장치를 이용하여 구조물의 강도, 강성뿐 아니라 에너지 소산 능력을 증대시

킨 보강공법이 주로 적용되고 있다<sup>2),3)</sup>. 그러나 이러한 공법은 보강공사시 철거면적이 커 폐기물 발생량이 크게 증가하고 일정 규모 이상의 지진이 발생할 경우 잔류 변형(Residual deformation)이 발생하여, 지진 피해 복구 시 회복탄력성(Resilience)에 많은 비용과 시간이 소요되어 2차 피해도 상당히 크게 발생할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 지진과 같은 대규모 재난 이후의 건축구조물의 재사용을 고려하여 회복탄력성을 위한 셀프 센터링 시스템(Self-centering system)이 다수 연구개발되고 있다<sup>4),5)</sup>. 셀프 센터링 시스템은 입력된 지진에너지를 부재의 소성거동에 의해 소산시키지만 복원력에 따라 잔류변형이 발생하지 않아 지진피해복구 시 시간과 비용을 감소시킬 수 있다.

본 연구는 이러한 에너지 소산 능력을 보유하였지만, 잔류변형이 없는 셀프 센터링이 가능한 시스템 중 디스크 스프링(Disc spring)을 이용한 디스크 스프링 가새(Disc spring brace, DSB)를 개발하고 그 성능을 실험적으로 검증하는 것에 있으며, 설계에 적용하기 위한 해석모델을 제안하고자 한다.

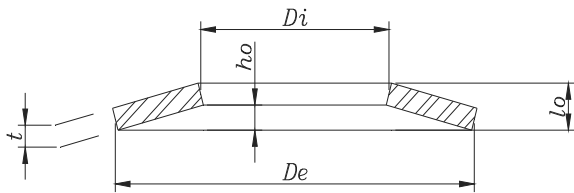
\* 정회원, 메트로티엔씨(주) 연구소장, 공학박사  
Metro T&C, Research Institute, CTO

\*\* 교신저자, 정회원, 부산대학교 건설융합학부 조교수, 공학박사  
School of Urban, Architecture and Civil Engineering,  
Pusan National University  
Tel: 051-510-2447 Fax: 051-514-1162  
E-mail: shindh@pusan.ac.kr

## 2. DSB 시스템

### 2.1 디스크 스프링의 구조적 특성

본 연구에서 사용한 디스크 스프링은 접시모양의 원형판 스프링 형태이며, 선형특성의 코일스프링 (Coil Spring)과 달리 2차, 3차 강성등이 포함된 비선형 특성이 있다. 이러한 디스크 스프링의 비선형 특성은 일관되고 반복가능하며, 피로수명에 대해 안정적으로 산정이 가능하여 주로 안전밸브, 엘리베이터용 클러치 및 브레이크 메커니즘, 산업용 파이프 시스템 지지대와 같은 분야에 주로 사용된다. <Fig. 1>은 이러한 디스크 스프링의 형상이며,  $D$ 는 내경,  $D_e$ 는 외경,  $l$ 는 스프링 전체 높이,  $h_0$ 는 평판부와 지점의 간극,  $t$ 는 스프링의 두께를 의미하며, 축하중이 내경상부와 외경하부의 가장자리에 고르게 분산될 수 있는 형상을 가지고 있다<sup>(6),(7)</sup>.



<Fig. 1> Shape of the Conventional Disc Spring

디스크 스프링의 축방향 내력은 스프링의 재원과 상대변위에 의해 제어되며, 식 (1)에 의해 산정된다<sup>(8),(9)</sup>.

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

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

$$\delta = \frac{D_e}{D_i} \quad (3)$$

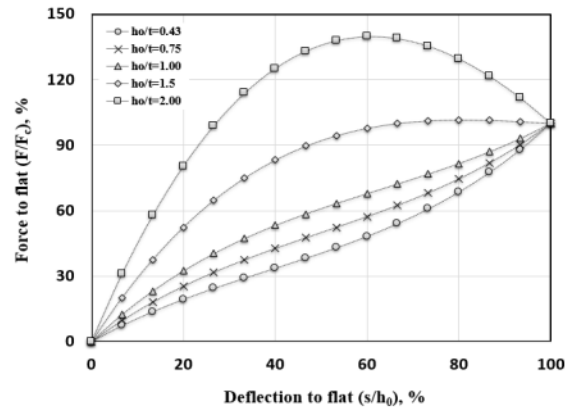
여기서,  $E$ 는 영계수 (Young's Modulus)이며 일

반적으로  $20.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  갖게 되며,  $\nu$ 는 프아송비 (Poisson's Ratio)로 강재 디스크 스프링은 0.3의 값을 갖게 된다.  $s$ ,  $t$ ,  $D_e$ ,  $h_0$ 는 각각 하중작용에 따른 스프링의 상대변위량, 두께, 외경지름, 하중이 작용하지 않을 때의 스프링 높이이다.  $K_1$ 은 식 (2)에 의해 산정되며,  $D_i$ 는 디스크 스프링의 내경 지름,  $\delta$ 는 외경 및 내경지름의 비율을 의미한다.

스프링의 상대변위,  $s$ 를  $s=h_0$ 로 가정하면, 스프링 1개의 최대내력은 식 (4)와 같이 정리된다.

$$F = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h_0 t^3}{K_1 D_e^2} \quad (4)$$

디스크 스프링은 높이( $h_0$ )/두께( $t$ )비에 따라 하중-변위의 응답특성이 달라진다. 일반적으로 디스크 스프링은  $h_0/t$ 비가 약 0.4일 때 선형의 응답특성을 보이며, 그 이상의 값을 가지면 비선형의 응답특성을 보이게 된다. 본 연구에서 적용한 스프링의  $h_0/t=0.43$ 이며, 해석을 통해  $h_0/t=0.75$ ,  $h_0/t=1.0$ ,  $h_0/t=1.5$ ,  $h_0/t=2.0$ 을 각각 비교하면 <Fig. 2>와 같다.



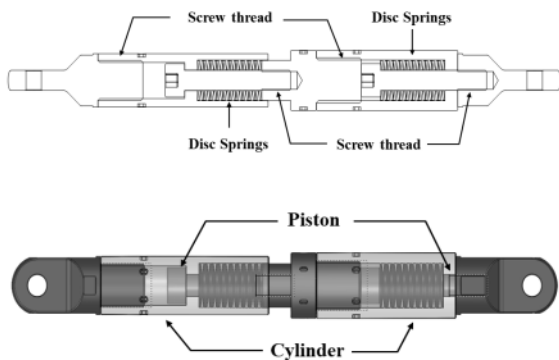
<Fig. 2> Spring Characteristic Curves with Respect to  $h_0/t$  Ratio

해석결과  $h_0/t$ 가 증가할수록 하중-변위의 응답특성은 비선형 곡선에 가까워지는 것으로 확인되었으며,  $h_0/t$ 비 0.43에서 1.0에서의 포텐셜 에너지 (Potential energy)의 차이는 크게 나타나지 않았으나,  $h_0/t$ 비 1.0을 초과하면서 포텐셜 에너지는 급

격히 증가하여 1.5비율에서 안정적인 포텐셜 에너지가 최대인 것으로 확인되었다. 1.5비율을 초과시에는 완전한 플랫(Flat)상태로 스프링이 압축될 때 하중저감이 나타날 수 있는 것으로 확인됨에 따라 구조물에 적용시에는 스프링의 내력을 고려하여  $h_0$ / $\delta$  1.5이하로 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

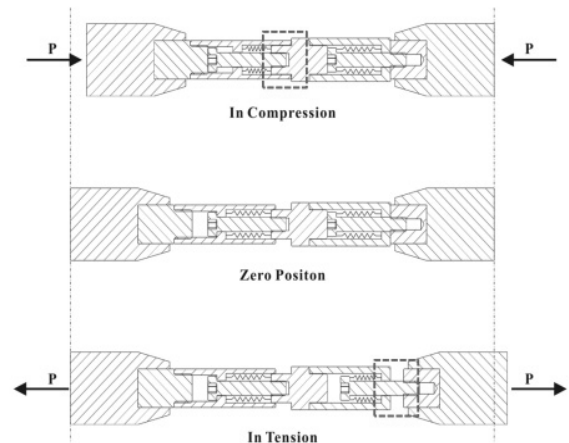
## 2.2 DSB의 원리

본 연구에서 제안한 DSB의 구조는 <Fig. 3>와 같으며, DSB는 내력을 결정하는 디스크 스프링, 스프링의 고정 및 하중전달을 위한 피스톤, 스프링의 이탈방지를 위한 외부케이싱으로 구성된다. DSB의 작동원리는 <Fig. 4>와 같이 DSB에 압축력 작용시 DSB의 중앙부 간격이 좁아지면서 중앙부의 디스크 스프링만 압축력을 받게 되고, 인장력 작용시에는 DSB의 단부 간격이 벌어지면 단부 디스크 스프링만 압축력을 받도록 설계되었다<sup>10)</sup>.



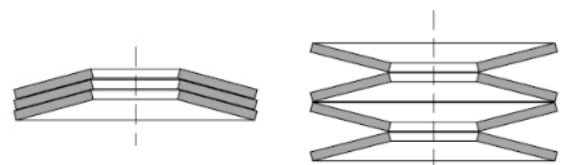
<Fig. 3> Configuration of the DSB System

이런 DSB의 작동 매커니즘으로 디스크 스프링은 압축력과 인장력에 의한 주기하중에 대해서도 스프링은 항상 압축력만 받도록 하여 안정적인 하중-변위의 이력특성을 보이고 잔류변형이 발생하지 않는 특징을 보유하게 된다.



<Fig. 4> Behavior of DSB in Compression and Tension

DSB는 스프링의 병렬(Paralled)과 직렬(Series) 배열에 따라 다양한 이력특성의 조합이 가능하다. 병렬 배열은 <Fig. 5(a)>와 같이 한 장 이상의 디스크 스프링을 같은 방향으로 쌓는 방식이며, 위쪽에 놓이는 디스크 스프링의 하부표면에 아래쪽 디스크 스프링의 상부표면에 쌓는 방식이다. 이렇게 병렬로 적층하면 변위 증가없이 스프링의 등가강성은 증가하는 특징을 보이게 된다. 직렬 배열은 <Fig. 5(b)>와 같이 한 장의 디스크 스프링을 반대 방향으로 연결하는 방식으로 위쪽에 놓이는 디스크 스프링의 상부표면과 아래쪽 디스크 스프링의 상부표면이 맞닿아 쌓는 방식이다. 이렇게 직렬로 적층하면 허용내력은 유지된 상태에서 스프링 개수에 비례적으로 허용변위가 증가하는 특징을 보이게 된다.



(a) Parallel stacking (b) Series stacking

<Fig. 5> Stacking Concept of the Disc Springs

따라서 스프링의 병렬 및 직렬조합에 따른 해석 개념도는 <Fig. 6>와 같으며, 강성과 허용내력의

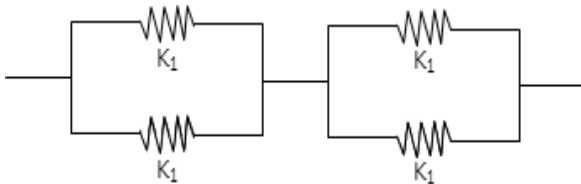
관계는 식 (5)~(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$K_n = \left(\frac{1}{K_1} \times \frac{1}{n_s}\right) \times n_p \tag{5}$$

$$S_n = S_1 \times n_s \tag{6}$$

$$F_n = F_1 \times n_p \tag{7}$$

여기서,  $K_n$ 는 한 장의 스프링 강성,  $S_n$ 는 한 장의 스프링 변위,  $F_n$ 는 한 장의 스프링 내력,  $n_p$ 는 병렬 적층된 스프링의 개수,  $n_s$ 는 직렬적층된 스프링의 개수이다.



〈Fig. 6〉 Analytical model for the DSB

### 3. DSB 실험

#### 3.1 실험체 개요

DSB의 성능실험에 사용된 실험체는 스프링의 병렬과 직렬적층 조합에 따라 DSB 1, DSB 2, DSB 3의 총 3개로 제작하였으며, 각 실험체에 대한 상세 내용은 〈Table 1〉에 정리하였다. 적층방법 4-4-4-4인 DSB 1은 4개씩 병렬적층한 스프링 더미를 4개 구간에 걸쳐 직렬적층으로 제작하였으며, DSB 2는 4개씩 병렬적층한 스프링 더미를 6개 구간에 걸쳐 직렬적층하였다. DSB 3는 6개씩 병렬적층한 스프링 더미를 4개 구간에 걸쳐 직렬적층으로 제작하였으며, 모든 실험체에 사용된 스프링의 크기는 외경 60mm, 내경 30.5mm, 두께 3.5mm, 허용높이 1.5mm이다.

이력특성 확인을 위한 실험에는 〈Fig. 7(a)〉와 같이 MTS사의 만능재료시험기(UTM)를 이용하였으며, UTM의 허용하중용량은  $\pm 1,000\text{kN}$ , 허용 변위는  $\pm 76.5\text{mm}$ 이다. 변위계는 DSB의 작동원리에 따른 실험변위 측정을 위해 압축 및 인장측 변형이 나타

나는 위치와 전체적인 이력 거동 확인을 위해 UTM에 추가적으로 설치되었으며, DSB의 구성부품 및 내부 피스톤에 설치된 스프링의 적층 상태는 〈Fig. 7(b)〉와 같다. 가력 하중은 변위제어에 의한 반복 가력을 하였으며, 가력은 총 4단계로 DSB의 허용 탄성변위비 ( $\delta/\delta_{max}$ ,  $\delta_{max}$ 는 최대 탄성 변위)를 25%씩 증가시켰으며, 각 변위 단계마다 6사이클씩 가력하였다. 실험에 적용한 가력 사이클은 〈Fig. 7(c)〉와 같으며, 입력파형은 사인(Sine)파를 적용하였다.

〈Table 1〉 Experimental conditions

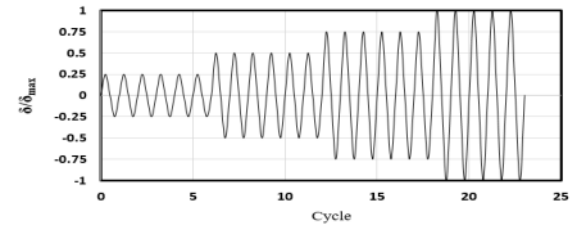
Specimens	Stack Method	Max disp. (mm)	Quantity (EA)
DSB 1	4444	6	16
DSB 2	444444	9	24
DSB 3	6-6-6-6	6	24



(a) Cyclic loading test setup



(b) Specimen (Spring stack)



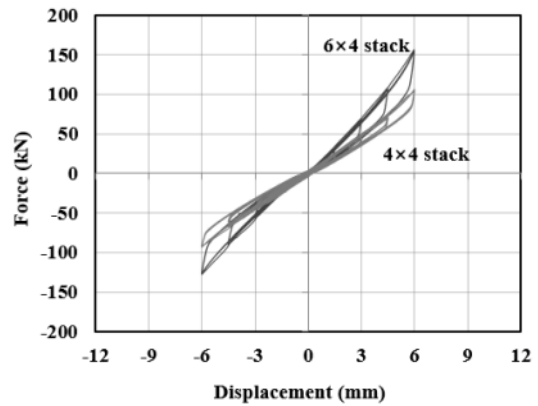
(c) Cyclic loading pattern  
〈Fig. 7〉 Loading test of specimens

#### 3.2 DSB 실험결과

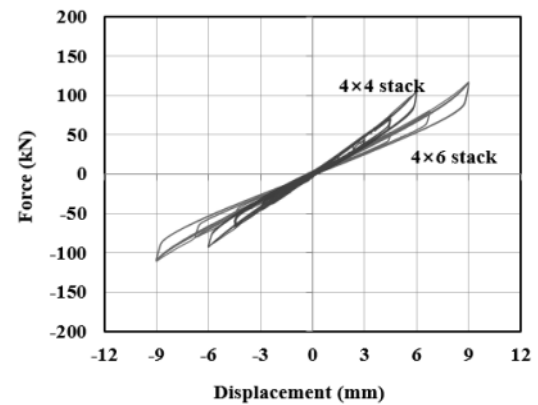
〈Fig. 8(a)~(b)〉는 반복가력에 따른 DSB의 하중-변위이력특성을 나타내며, 〈Fig. 8(c)〉는 주기응답에 대한 DSB의 중앙부 및 단부변형을 나타낸

다. DSB의 주기응답은 매우 안정적인 응답특성을 보이는 것으로 확인되었으며, 복원요소인 디스크 스프링의 적층배열에 따라 응답모양은 셀프 센터링의 이력특성에 해당하는 깃발형태(Flag-shaped)의 이력특성이 나타나는 것으로 확인되었다. <Table 2>는 실험결과에 따른 최대내력( $F_{max}$ ), 재하(Loadng) 및 제하(Unloading)시 초기강성( $K_{in}$ ), 2차 강성( $K_2$ ), 3차 강성( $K_3$ )과 식 (1), (2)에 의한 예상 내력( $F_{exp}$ )과 예상 초기 강성( $K_{exp}$ )를 나타낸다. 실험결과에 의한 DSB의 내력과 유도식에 의한 예상내력은 DSB의 허용 변위 6mm에 해당하는 DSB 1과 DSB 3 실험체에서는 약 5%의 오차율을 보이는 것으로 나타났으나, DSB 2에서는 21%의 오차를 보이는 것으로 확인되었다. 이는 DSB 2의 조립과정에서 스프링에 과도한 초기 압축력이 작용하여, DSB의 허용 변위가 감소되면서 최대변위에서 탄성하중이 급격히 증가하는 초탄성 이력거동이 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

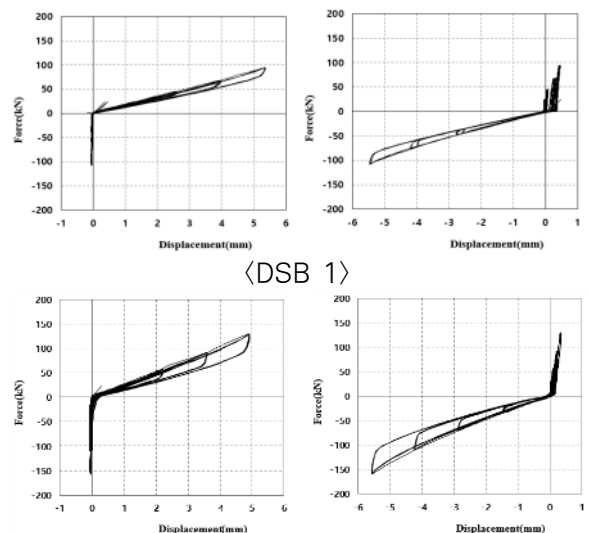
<Fig. 8(a)>는 병렬 적층에 따른 DSB 1과 DSB 3의 이력특성에 대한 비교로 병렬 적층 개수가 증가함에 따라 허용 탄성 변위는 유지된 채 허용 탄성 하중이 증가되는 것으로 확인되었으며, 압축력과 인장력의 최대내력에 대해 다소 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 압축과 인장축의 최대내력의 차이는 <Fig. 8(c)>와 같이 압축력에 대해서만 작동하는 중앙부는 인장력 작용시 작동하지 않는 것으로 확인되었으나, 인장력에 대해서만 작동하는 단부측은 압축력 작용시 미소하게 변위가 발생한 것으로 확인되었다. 이러한 미소한 변위는 인장축 순변위를 감소시켜 인장변위에 대해 최대내력에 도달하지 못하도록 하였으며, 이러한 미소변위는 나사선으로 조립되는 피스톤의 미소유격에 의한 것으로 판단된다. <Fig. 8(b)>는 직렬 적층에 따른 DSB 1과 DSB 2의 이력특성에 대한 비교로 직렬 적층 개수가 증가함에 따라 허용 탄성 하중은 유지된 채 허용 탄성 변위가 증가되는 것으로 확인되었으며, DSB 2 실험체는 스프링의 초기 압축력에 의한 최대 허용 변위 감소로 최대 변위에 가까워지면서 초탄성 거동이 나타났다.



(a) Comparison of cyclic response for parallel stacking



(b) Comparison of cycle response for series stacking



(c) Compression and tension position displacement comparison  
<Fig. 8> Hysteretic characteristics of the DSB systems

〈Table 2〉 Result of DSB test

Spec.	F <sub>max</sub> (kN)	K <sub>ini</sub> (kN/mm)	K <sub>2</sub> (kN/mm)	K <sub>3</sub> (kN/mm)	F <sub>exp</sub> (kN)	K <sub>exp</sub> (kN/mm)
DSB 1	99.6	16.4	104.1	14.1	94.1	15.7
DSB 2	113.9	12.6	91.8	10.1	94.1	10.5
DSB 3	141.8	23.5	136.4	17.8	141.2	23.5

허용 변위비에 따른 유효강성 및 에너지소산량을 〈Table 3〉에 나타냈다.

스프링 개수가 동일한 DSB 2와 DSB 3의 에너지 소산량 비교시, 초기 허용 변위비 25%에서는 동일하게 나타났으나, 그 이후로는 병렬적층에 따른 강성을 증가시킨 DSB 3가 더 큰 값을 보였다. 이는 내부 디스크 스프링 적층시 접촉부에서 발생한 마찰력에 의한 감쇠효과, 변위비 증가에 따른 강성 증가폭의 차이에 의한 것으로 판단됨에 따라 에너지 소산 측면에서는 직렬배열보다는 병렬배열이 우수한 것으로 분석되었다.

〈Table 3〉 Energy dissipation of DSB specimens

Allowable disp. ratio	DSB 1		DSB 2		DSB 3	
	K <sub>eff</sub> (kN/mm)	E <sub>d</sub> (kN·mm)	K <sub>eff</sub> (kN/mm)	E <sub>d</sub> (kN·mm)	K <sub>eff</sub> (kN/mm)	E <sub>d</sub> (kN·mm)
25%	15.3	10.9	12.6	25.5	19.5	25.5
50%	14.9	22.5	11.8	86.2	20.9	94.1
75%	15.5	53.9	12.2	194.0	21.9	213.6
100%	16.4	203.8	12.6	346.9	23.5	380.2

### 3.3 DSB 해석모델 및 평가

셀프 센터링이 가능한 DSB를 구조설계에 적용하기 위해서는 DSB의 이력특성을 구현할 수 있는 해석모델이 필요하다. DSB의 해석모델은 복원력이 있는 선형요소와 에너지를 소산할 수 있는 이선형요소로 결합하거나 깃발형태의 단일 이력모델로 제안이 가능하다. 단일 예측모델은 〈Fig. 9(a)〉와 같이 Hill이 제한한 Ring-Spring모델이 에너지를 소산할 수 있으면서 강성변화 후에도 제하시 원점으로 돌아가는 특징으로 잔류변형을 발생시키지 않아 많이 적용되고 있다<sup>11)</sup>. 그러나 해당 해석모델은 일부 연구프로그램에서만 지원됨에 따라 범용으로 적

용하기에는 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 〈Fig. 9(b)~(c)〉와 같이 복원역할은 Linear요소, 에너지소산은 Bi-linear요소로 조합하여 제안하였으며, 제안된 해석모델은 식 (8)~(9)와 같이 간단하게 표현할 수 있다<sup>12)</sup>.

$$F_0 = (k_{0,lin} + k_{0,bl})d_0 \tag{8}$$

$$F_y = (k_{0,lin} + r \cdot k_{0,bl})d_y \tag{9}$$

여기서,  $K_{0,lin}$ 는 탄성 강성,  $K_{0,bl}$ 는 이선형 모델 초기강성,  $d_0$ 는 초기변위,  $r$ 은 항복후 강성비,  $d_y$ 는 항복변위를 나타낸다.

본 연구에서 적용한 디스크 스프링은  $h_0/t$ 의 비율이 0.43임에 따라 〈Fig. 2〉에서 보듯이 선형의 응답특성을 보이게 된다. 따라서 항복전 초기 강성의 선형성을 나타내기 위해  $F_0$ 는 0.1kN을 적용하였으며, 각 요소별 해석에 적용한 매개변수는 〈Table 4〉와 같다.

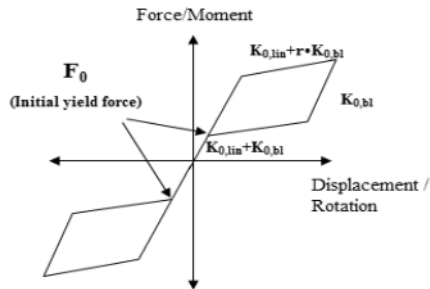
〈Table 4〉 Values adopted for the DSB model parameters

Linear Model	Adopted values		Bi-linear Model	Adopted values	
	6×4	4×4		6×4	4×4
			K <sub>0,bl</sub> (kN/m)	165,000	85,000
K <sub>0,lin</sub> (kN/m)	16,500	12,000	F <sub>0</sub> (kN)	0.1	0.1
			r	0.05	0.05

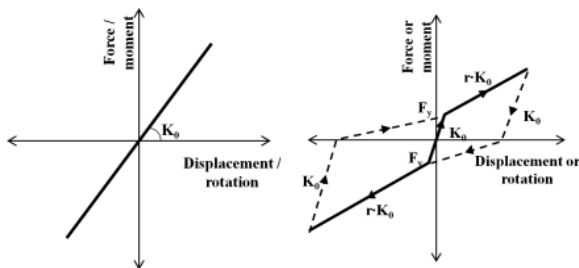
Linear와 Bi-linear요소로 모델링 된 DSB 1, DSB 3의 해석결과는 〈Fig. 10(a)~(b)〉에 제시하였으며, 실험 결과와의 비교는 〈Fig. 10(c)~(d)〉에 제시하였다. Bi-linear모델의 항복강도를 0.1kN으로 설정함에 따라 DSB의 해석결과는 선형의 특성을 보였으며, 제하시 강성은 초기강성에 따라 결정된 것으로 나타났다.

6×4배열된 DSB 3는 실험에서 인장력에 대해 약 0.35mm의 슬립에 의해 해석결과가 실험결과보다 크게 나타났으나, 압축력에서는 일치된 해석결과를 보였다. 4×4배열된 DSB 1은 압축과 인장력 모두에서 해석모델이 실험적 거동을 잘 묘사하는 것으로 나타났으며,

두 실험체의 에너지 소산 면적은 실험결과와 해석모델이 유사하게 나타났다.

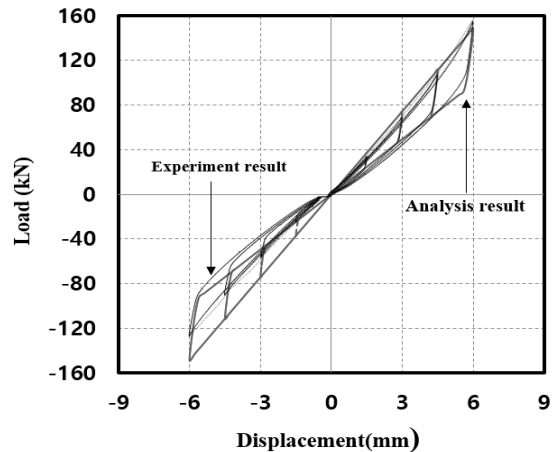


(a) Hysteretic model of Ring-spring



(b) Linear model (c) Bi-linear model

〈Fig. 9〉 Analytical model of DSB



(d) DSB 3

〈Fig. 10〉 Comparison of experiment and analysis results

#### 4. 결론

본 연구에서는 셀프 센터링이 가능한 디스크 스프링의 특성을 이용한 DSB를 제안하여 이력특성을 확인하고, 구조물설계에 활용하기 위해 해석모델을 제안하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 디스크 스프링은 병렬 적층시에는 허용 탄성 변위는 유지된 채 탄성하중이 증가하였으며, 직렬 적층시에는 내력 증가 없이 허용 탄성 변위가 증가하는 것으로 나타나 적층방법에 따라 다양한 응답 특성의 조합이 가능한 것으로 확인되었다.

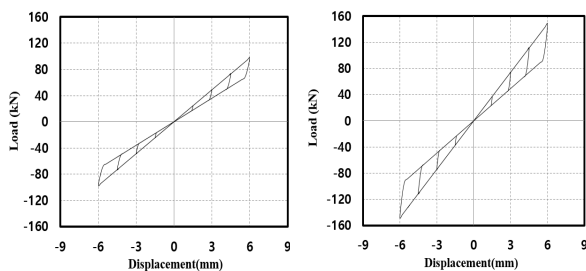
2) DSB는 조립과정에서 스프링에 과도한 압축력이 작용하면 허용 변위 감소에 따른 초탄성 거동이 나타나는 것으로 확인되었다.

3) DSB 2, DSB 3를 통해 동일수량의 디스크 스프링을 적용시 초기변위에서는 에너지 소산량이 동일하게 나타나지만, 변위가 증가 될수록 스프링 접촉마찰력에 의한 병렬적층이 에너지소산에서 유리한 것으로 확인되었다.

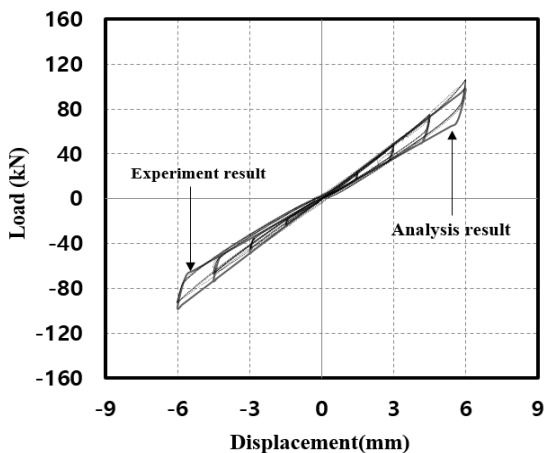
4) 모든 DSB는 좌굴과 잔류변형이 관찰되지 않았다.

5) 복원력 요소의 Linear모델과 에너지 소산 요소의 Bi-linear모델을 병렬배치하여 복합해석모델로 적용시 DSB의 이력거동을 잘 묘사하는 것으로 확인되었다.

6) 스프링의  $h_0/t$ 가 증가할수록 하중-변위의 응



(a) DSB 1 model curve (b) DSB 3 model curve



(c) DSB 1

답특성은 비선형 곡선에 가까워지는 것으로 확인됨에 따라 DSB의 안정적인 에너지 흡수 능력을 향상을 위해서는  $h_0/t$  비 1.5에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 분석되었다.

### 감사의 글

본 연구는 2022학년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.

### References

1. Ministry of the Interior and Safety, Phase 3 Basic Plan for Seismic Reinforcement of Existing Public Facilities(2021~2025), 2020  
DOI:<https://seismic.ndms.go.kr/bbs/bbsFile>
2. Ministry of Education, Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for School Facilities, 2021  
DOI:[http://www.edusis.or.kr/board/board\\_view.asp?board\\_idx=4&num=4](http://www.edusis.or.kr/board/board_view.asp?board_idx=4&num=4)
3. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Tips for Improving Seismic Performance of Existing Facilities (Buildings), 2022  
DOI:[https://www.kalis.or.kr/www/brd/m\\_435/list.do](https://www.kalis.or.kr/www/brd/m_435/list.do)
4. Kim, H. J. and Christopoulos, C., Friction Damped Posttensioned Self-Centering Steel Moment-Resisting Frames, Journal of Structural Engineering, Vol.134, No.11, pp.1768-1779, 2008  
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:11\(1768\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:11(1768))
5. Park, B. T., Kwan, K. H. and Kim, H. J., Development of Disc Spring Braces for Seismic Upgrading of Existing Building, Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Vol.31, No.2, pp.161-162, 2011  
DOI:[https://www.aunic.or.kr/User/Rdoc/DocRdoc.aspx?returnVal=RD\\_R&dn=251836](https://www.aunic.or.kr/User/Rdoc/DocRdoc.aspx?returnVal=RD_R&dn=251836)
6. Schnorr, Handbook for Disc Springs  
DOI:[http://www2.schnorr-group.com/uploads/media/handbuch\\_en.pdf](http://www2.schnorr-group.com/uploads/media/handbuch_en.pdf)
7. Spirol International Corporation, Spirol Disc Spring, 2011

- DOI:<https://www.spirol.com/assets/files/dsc-disc-spring-design-guide-us.pdf>
8. Bang, S. W., Lee, H. J., Kwon, O. C., Lee J. Y. and Oh, J. E., Non-linearity Characteristics Consideration of Disc Spring Under Shock Using Numerical Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.18, No.2, pp.1266-1271, 2008  
DOI:<https://doi.org/10.5050/KSNVN.2008.18.2.153>
  9. Monica Carfagni, A CAD Program for the Automated Checkout and Design of Belleville Springs, Journal of Mechanical Design, Vol.124, pp.393-398, 2002  
DOI:<https://doi.org/10.1115/1.1485292>
  10. Park, B. T., Development of Disc Spring Braces for Seismic Upgrading of Existing Buildings, University of Seoul, Korea, 2012  
DOI:<http://www.riss.kr/link?id=T12646525>
  11. Athol J. Carr, Volume 2 User manual for the 2-Dimensional Version Ruaumoko 2D, University of Canterbury, 2005  
DOI:<https://www.echere.net/Arch/ArchPublication/272883/RankedDman/links/554f0268927539e3/RankedDman.pdf>
  12. Seismosoft, SeismoStruct User Manual and Verification Report, 2021  
DOI:[https://seismosoft.com/wp-content/uploads/prods/lib/SeismoStruct-2021-User-Manual\\_ENG.pdf](https://seismosoft.com/wp-content/uploads/prods/lib/SeismoStruct-2021-User-Manual_ENG.pdf)
- Received : November 8, 2023
  - Revised : November 30, 2023
  - Accepted : November 30, 2023