

# 폴리우레탄 선압축량에 따른 자동복원 스마트 감쇠장치의 일축반복하중에 대한 성능 평가

장희명\*

## Performance Evaluation of Rcentering Smart Damper by Pre-Compression of Polyurethane

Jang, Heemyung

\* Senior Administrative Staff, Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, Eumseong, Korea

Abstract: As the magnitude and frequency of earthquakes increase in Korea, interest in earthquake damage reduction technology has increased. Therefore, research on vibration damping devices that directly respond to seismic loads is being actively researched. After an earthquake, damage or destruction of the device occurs due to the yield of materials, and thus it takes considerable cost and time for restoration and replacement. To supplement the problems of the existing earthquake damage reduction technology, a study was conducted on the recentering smart damper that can be used continuously after an earthquake. In this study, the recentering smart damper that can be restored to its original shape after load removal was developed using superelastic shape memory alloy, pre-compressed polyurethane. General steel was commonly applied to verify the seismic performance of the superelastic shape memory alloy, and the performance of the smart damper was verified according to the amount of polyurethane pre-compressed

**키 워 드:** 자동복원 스마트 감쇠장치, 초탄성 형상기억합금, 폴리우레탄, 선압축, 복원력

**Key Words:** Recentering Smart Damper, Superelastic Shape Memory Alloy, Polyurethane, Pre-Compression, Restoring force

### 1. 서 론

지진은 발생 예측이 어려운 재해로 발생 시 건축물 등의 붕괴로 인한 막대한 인명 피해 및 재산 피해를 발생시킬 수 있다. 해외의 경우 중국, 아이티, 터키 등에서 발생한 지진으로 막대한 피해가 발생하였으며, 인접 국가의 일본의 경우 규모 5.0 이상의 지진이 연평균 107회 발생하는 것으로 나타났다. 우리나라 또한 포항 지진 및 경주 지진으로 인명 및 재산 피해가 발생하였고, 2022년 11월 피산에서 발생한 지진 또한 우리나라가 지진안전국이 아닌 언제든 지진이 발생할 수 있는 지역이라는 인식이 확산되었다(국토안전관리원, 2022)

Table 1. 1978년~2019년 지진발생 현황

| 규모 | 5.0~5.9 | 6.0~6.9 | 7.0~7.9 | 8.0이상 | 총횟수    |
|----|---------|---------|---------|-------|--------|
| 한국 | 10      | -       | -       | -     | 10     |
| 일본 | 3,754   | 655     | 85      | 6     | 4,500  |
| 세계 | 63,262  | 4,882   | 583     | 36    | 68,763 |

출처 : 국토안전관리원(2022)

국내 내진설계 기준은 1988년부터 도입되었으며, 현재까지 지속적인 개정을 통해 적용 범위를 확대하고 있지만, 1988년 이전의 저층 건축물이 많으며, 내진설계 도입으로 인한 추가 비용 투입 측면에서 어려움이 있는 민간 건축물의 경우 기준을 적용하기 어려운 상황이다. 이에 따라 국내 현 실정에 맞는 내진설계 기법이 필요하다(김영찬, 2018). 내진기술은 구조물의 보강을 통해 구조물 자체에 에너지를 흡수시켜 구조물의 완전 붕괴를 방지하는 장점이 있지만, 부재의 단면적 증가 등으로 인한 구조물 자체의 중량 증가 및 비용 증가 측면에서 단점이 있다(Akira, W., 2006, Akira, W., 2012). 면진기술은 지반과 구조물을 분리하는 기술로 면진장치를 통해 지진동을 구조물로부터 차단하는 기술로 설계 자유도 향상 등 장점이 있지만, 보수가 어려운 단점이 있다. 제진기술은 구조물의 진동을 감쇠시키는 제진장치를 사용하는 기술로, 구조물의 사용성 증대 및 교체의 용이성 등의 장점이 있으나, 내부 시설 보호에 한계점을 가지고 있다(김형진, 2017). 현재 우리나라는 내진설계기준을 적용하지 않은 건축물이 많아, 경제적인 측면에서 보편 보수·보강이 용이한 제진기술을 적용하는 것이 유리하다(Hu, J., 2018, Mirzai, N., 2019). 따라서 이 연구의 목적은 현재까지 연구되고 있는 지진

\* 한국과학기술기획평가원 선임전문관리원,  
교신저자(jhm924@kistep.re.kr)

피해 저감 기술 중 제진기술(제진장치)의 보수·보강 비용을 줄일 수 있는 자동복원 스마트 감쇠장치에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 재료 특성 및 실험

이 연구에서 활용된 초탄성 형상기억합금은 최근 주목 받고있는 스마트 건설재료 중 하나로, 이상적인 깃발 형태의 거동으로 일반 강재와 달리 상온 상태에서 응력이 제거되면 원형 복원이 되는 특성을 갖는다(Wada, K., 2005, Speicher, M., 2011).

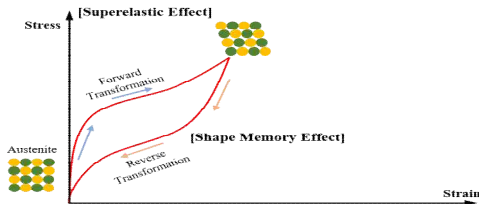


Fig 1. 초탄성 형상기억합금의 거동 특성

초탄성 형상기억합금의 재료 실험은 유효길이 200 mm의 시편으로 0 mm부터 20 mm까지 속도 4 mm/min의 환경에서 인장실험을 진행하였다. 최대변형률을 1%, 2%, 6%, 10%로 설정하여 실험한 결과 초탄성 형상기억합금은 최대 변형률 6%(12 mm)의 경우 거의 완전한 회복을 보였으며, 10%의 경우 잔류변위가 나타났다(Fig 2 참고).

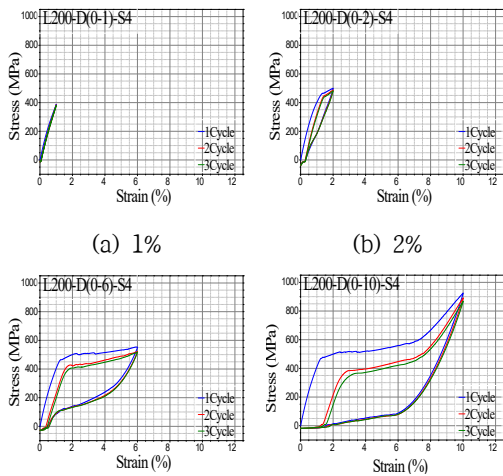


Fig 2. 초탄성 형상기억합금 재료 실험 결과

추가적으로 폴리우레탄은 강재 스프링을 대체하는 재료로, 수분에 의한 부식과 같은 환경에

대한 영향이 적으며, 복원력이 뛰어난 장점이 있다. 또한 폴리우레탄 스프링은 초탄성 형상기억합금의 거동과 비슷한 깃발 모양의 비선형적 거동을 나타낸다(Choi, E., 2017).

이 연구에서 활용되는 폴리우레탄 스프링의 재료 실험은 높이 100 mm, 직경 60 mm의 폴리우레탄 스프링을 사용하였으며, 선압축률을 0%, 5%, 10%, 20%로 적용하여 실험을 수행하였다. 폴리우레탄 스프링의 거동은 Fig 3과 같이 비선형적 거동을 보이며 원형으로 복원되었으며, 선압축 비율이 증가함에 따라 최대 하중이 큰 비율로 늘어나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 선압축 10%까지는 잔류변위가 발생하지만, 선압축 20%에는 선압축력이 발생하였다.(Table 2 참고)

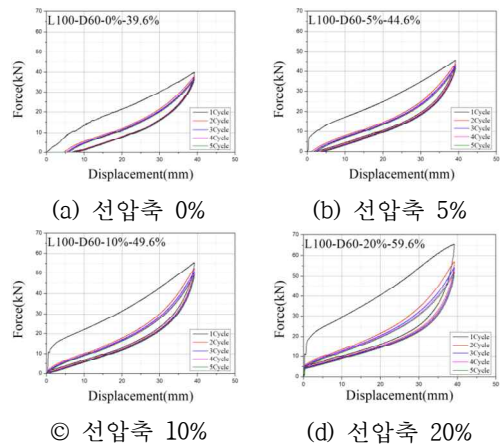


Fig 3. 선압축 폴리우레탄 스프링의 변위-하중 그래프

Table 2. 폴리우레탄 스프링의 재료실험 결과

| 선압축량          | 최대하중(kN) | 잔류변위(mm) | 선압축력(kN) |
|---------------|----------|----------|----------|
| 0 mm-39.6 mm  | 36.47    | 8.21     | 0        |
| 5 mm-44.6 mm  | 41.69    | 4.50     | 0        |
| 10 mm-49.6 mm | 49.07    | 0.41     | 0        |
| 20 mm-59.6 mm | 51.81    | 0        | 3.82     |

이 연구에서는 초탄성 형상기억합금 및 폴리우레탄 스프링을 활용하여 잔류변위를 감소시키고, 감쇠장치의 재료 손상 및 교체를 최소화할 수 있는 자동복원 스마트 감쇠장치를 연구하고자 한다. 앞서 언급한 초탄성 형상기억합금 및 폴리우레탄의 재료 실험을 통해 얻은 특성으로 고려하였다(Fig 4 참고).

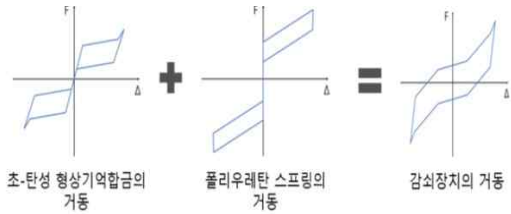


Fig 4. 자동복원 스마트 감쇠장치의 매커니즘

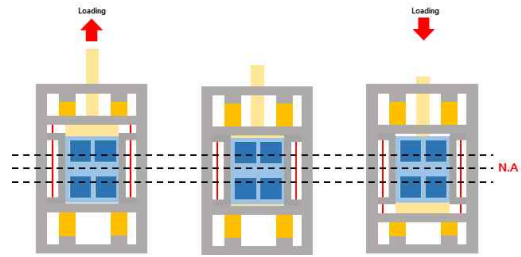


Fig 6. 자동복원 스마트 감쇠장치의 예상거동

### 3. 구조상세

재료실험을 통해 검증된 특성을 기반으로 한 자동복원 스마트 감쇠장치의 조립도는 Fig. 5를 통해 확인할 수 있으며, 기타 부품들도 조립도에서 확인할 수 있다.

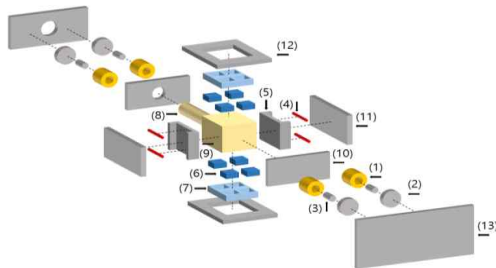


Fig 5. 자동복원 스마트 감쇠장치의 조립도

Table 3. 자동복원 스마트 감쇠장치의 부품 설명

| 구분  | 부품명                    | 구분   | 부품명              |
|-----|------------------------|------|------------------|
| (1) | Polyurethane spring    | (8)  | Inner Box Shaft  |
| (2) | Pre-compressing Plate  | (9)  | Inner Box        |
| (3) | Polyurethane Fix Shaft | (10) | Inner Plate      |
| (4) | Steel & SSMA wire      | (11) | Side Plate       |
| (5) | Inner Box Plate        | (12) | Top&Bottom Plate |
| (6) | Permanent Magnet       | (13) | Front Plate      |
| (7) | Permanent Magnet Case  |      |                  |

자동복원 스마트 감쇠장치는 Fig 6에서 볼 수 있듯이 일축반복하중 실험을 통해 변위로 제어되어 상하로 반복하여 하중을 가하는 형태로 진행하였다. 중립축을 기준으로 감쇠장치가 하향 거동을 하게 되면 초탄성 형상기억합금은 중립축을 기준으로 아래 방향으로 늘어나고, 하단의 폴리우레탄 스프링은 납작한 형태를 나타낸다. 하중 사이클이 끝나고, 중립축으로 복귀하려 할 때 초탄성 형상기억합금 및 폴리우레탄 스프링은 복원력을 부여하게 된다. 중립축으로 돌아온 감쇠장치는 상향 거동을 하게 되며, 이 때 하향 거동과 반대로 거동하면서 각 재료의 특성이 반대로 나타나게 된다.

### 4. 구조 실험

구조실험은 초탄성 형상기억합금이 적용된 감쇠장치에 폴리우레탄 스프링의 선압축률에 따른 복원력을 확인하기 선향 압축률을 0%, 10%, 20%로 조절하여 수행하였으며, 1000kN 베이의 유압 형식의 일축압축반복 시험기를 사용하여 실험을 진행하였다.

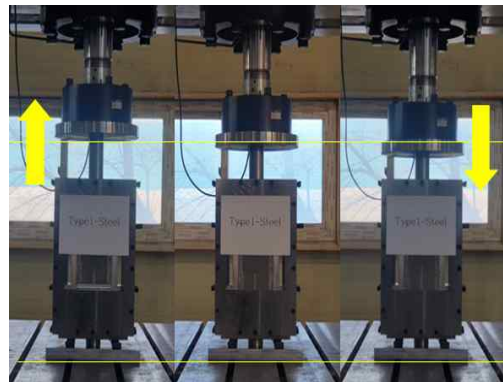


Fig 7. 자동복원 스마트 감쇠장치의 상하거동

감쇠장치의 구조실험은 변위를 점점 늘려가는 변위제어 실험으로 로딩프로토콜은 ATC-24를 참고하여 진행하였다(Helmut Krawinkler, 1992). 앞선 재료실험에서 파악한 초탄성 형상기억합의 항복변형률인 약 1.2 % (3.6 mm)를 적용하여 증가시켰다. 폴리우레탄 스프링의 경우 60 %이상 압축이 가해지면 영구변형이 발생할 수 있어, 제작에 고려된 폴리우레탄스프링의 길이 100 mm 및 선압축률(20 %)를 고려하여 로딩프로토콜의 최대 변위는 39.6 mm로 설정하였다. 따라서 총 13개 변위가 발생하게 되는데 변위당 인장 압축을 3번 반복함에 따라 많은 데이터가 생산되어, 분석의 효율성을 위해 D1(3.6 mm), D2(18 mm), D3(28.8 mm), D3(39.6 mm)를 선택하여 비교 분석을 진행하였다.(Fig 8 참고)

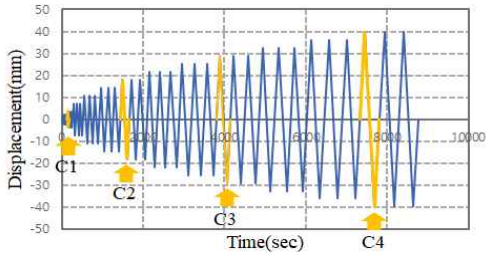


Fig 8. 시간에 따른 감쇠장치의 설계 변위

본 연구에서는 자동복원 스마트 감쇠장치의 우수성을 검증하기 위해 폴리우레탄 스프링의 선압축률을 동일하게 부여하고, 일반강재와 초탄성 형상기억합금 와이어 시편의 차별성을 두고 실험을 진행하였다(Table 4 참고).

Table 4. 자동복원 스마트 감쇠장치의 실험조건

| 구분            | SP1 | SP2 | SP3 | SSP1 | SSP2 | SSP3 |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 일반강재(개)       | 4   | 4   | 4   | -    | -    | -    |
| 초탄성 형상기억합금(개) | -   | -   | -   | 4    | 4    | 4    |
| 폴리우레탄 스프링(개)  | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    |
| 선압축률(%)       | 0%  | 10% | 20% | 0%   | 10%  | 20%  |

## 5. 실험결과

### 2.1 일반강재 적용 자동복원 스마트 감쇠장치

일반강재 및 선압축률 0%를 적용한 실험에서는 Fig 9와 같이 1사분면의 최대 인장하중 값은 83.66 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 84.65 kN으로 나타났다.

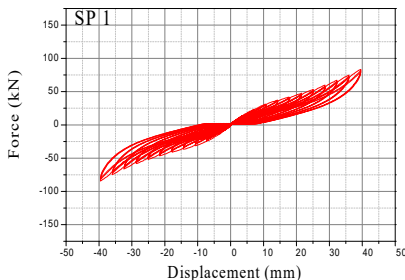


Fig 9. SP1 감쇠장치의 하중-변위 곡선

일반강재 및 선압축률 0%의 경우는 실험 초기에 Fig 10과 같이 회복력은 전혀 발생하지 않았으며, 잔류변위량은 Table 4에서 자세히 볼 수 있듯이 변위 제어가 증가할수록 잔류변위량이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

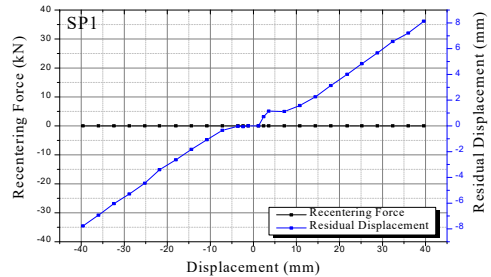


Fig 10. SP1 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

Table 5. SP1 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위량

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 0        | 1.15      | 0        | -0.03     |
| D2(18 mm)   | 0        | 3.13      | 0        | -2.64     |
| D3(28.8 mm) | 0        | 5.67      | 0        | -5.29     |
| D4(39.6 mm) | 0        | 8.13      | 0        | -7.77     |

일반강재 및 선압축률 10%를 적용한 실험에서는 Fig 11과 같이 1사분면의 최대 인장하중 값은 95.92 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 73.40 kN으로 나타났다. 3사분면 압축하중 값이 타 케이스에 비례하여 나타나지 않은 것은 폴리우레탄의 압축 거동 시 수직 압축거동이 아닌 비틀림 거동으로 인해 최대 압축하중 값이 낮아진 것으로 추측하였다.

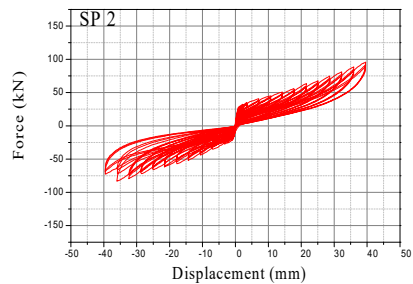


Fig 11. SP2 감쇠장치의 하중-변위 곡선

일반강재 및 선압축률 10%의 경우는 Fig 12와 같이 폴리우레탄 스프링의 선압축률로 인한 회복력이 발생하는 것으로 나타났다. Table 5에서 볼 수 있듯이 최대 회복력은 인장 측 19.72 kN이며, 사이클이 진행됨에 따라 회복력이 감소하는 것으로 나타났다. 잔류변위량은 D1(3.6 mm)부터 D4(39.6 mm)까지 0 mm로 발생하지 않은 것으로 나타났다.

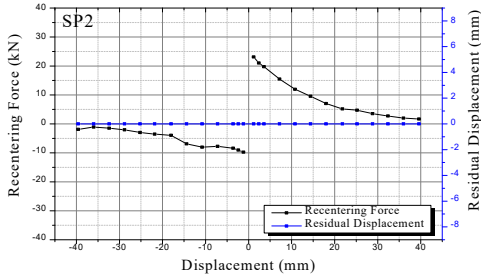


Fig 12. SP2 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

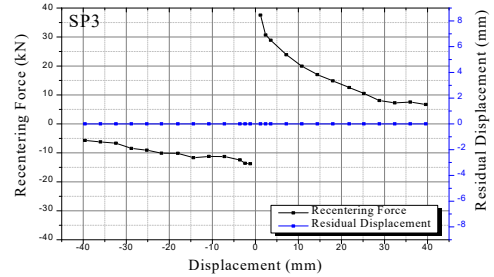


Fig 14. SP3 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

Table 6. SP2 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위량

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 19.72    | 0         | -8.33    | 0         |
| D2(18 mm)   | 7.02     | 0         | -3.91    | 0         |
| D3(28.8 mm) | 3.53     | 0         | -2.06    | 0         |
| D4(39.6 mm) | 1.67     | 0         | -1.89    | 0         |

Table 7. SP3 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위량

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 28.89    | 0         | -12.42   | 0         |
| D2(18 mm)   | 14.84    | 0         | -10.15   | 0         |
| D3(28.8 mm) | 8.05     | 0         | -8.45    | 0         |
| D4(39.6 mm) | 6.68     | 0         | -5.70    | 0         |

일반강재 및 선압축률 20 %를 적용한 실험에서는 Fig 13과 같이 1사분면의 최대 인장하중 값은 126.98 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 126.28 kN으로 나타났다.

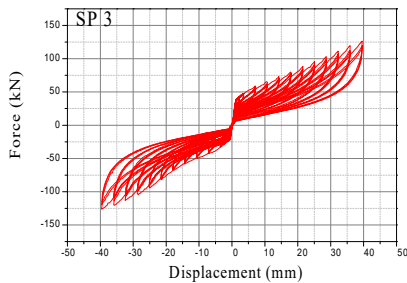


Fig 13. SP3 감쇠장치의 하중-변위 곡선

일반강재 및 선압축률 20 %의 경우는 Fig 14와 같이 폴리우레탄 스프링의 선압축력으로 인한 회복력이 발생하는 것으로 나타났다. Table 6에서 볼 수 있듯이 최대 회복력은 인장 측 19.72 kN이며, 사이클이 진행됨에 따라 회복력이 감소하는 것으로 나타났다. 잔류변위량은 D1(3.6 mm)부터 D4(39.6 mm)까지 0 mm로 발생하지 않은 것으로 나타났다.

## 2.2 초탄성 형상기억합금 적용 자동복원 스마트 감쇠장치

초탄성 형상기억합금 및 선압축률 0 %를 적용한 실험에서는 Fig 15와 같이 1사분면의 최대 인장하중 값은 113.33 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 118.13 kN으로 나타났다.

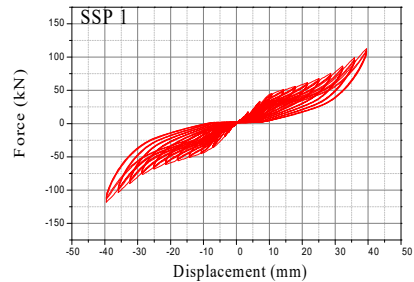


Fig 15. SSP1 감쇠장치의 하중-변위 곡선

선압축률 0 %의 경우는 실험 초기에 Fig 16과 같이 초탄성 형상기억합금에 의한 회복력이 발생하지만 D1(3.6 mm) 이전 0으로 수렴하였으며, 이후 회복력은 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, 잔류변위량은 Table 7에서 볼 수 있듯이 변위 제어가 증가할수록 잔류변위량이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

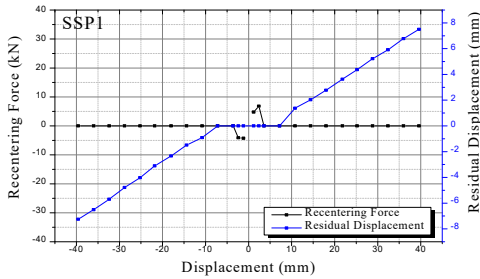


Fig 16. SSP1 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

Table 8. SSP1 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위량

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 0        | 0         | 0        | -7.25     |
| D2(18 mm)   | 0        | 2.77      | 0        | -4.78     |
| D3(28.8 mm) | 0        | 5.22      | 0        | -2.34     |
| D4(39.6 mm) | 0        | 7.50      | 0        | 0         |

선압축률 10 %를 적용한 실험결과는 Fig 17과 같이 1사분면의 최대 인장하중 값은 131.28 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 132.17 kN으로 나타났다.

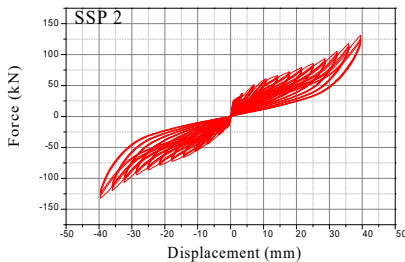


Fig 17. SSP2 감쇠장치의 하중-변위 곡선

선압축률 10 %의 경우는 Fig 18과 같이 실험 초기에 초탄성 형상기억합금 및 선압축 폴리우레탄 스프링으로 인한 회복력이 발생하였으며, 최대 변위 D4(39.6 mm)까지 회복력이 유지되는 것을 볼 수 있다. Table 8에서 볼 수 있듯이 회복력은 인장측 D1(3.6 mm)에서 19.50 kN으로 가장 크게 나타나며, 변위가 증가할수록 감소하여 최소 회복력은 압축측 D4(39.6 mm)에서 -0.45kN으로 나타났다. 잔류변위량은 D1(3.6 mm)부터 D4(39.6 mm)까지 0 mm로 발생하지 않은 것으로 나타났다.

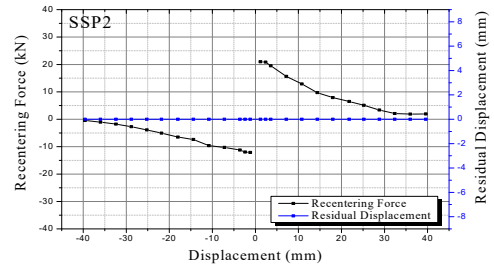


Fig 18. SSP2 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

Table 9. SSP2 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위량

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 19.50    | 0         | -11.25   | 0         |
| D2(18 mm)   | 7.91     | 0         | -6.51    | 0         |
| D3(28.8 mm) | 3.39     | 0         | -2.72    | 0         |
| D4(39.6 mm) | 1.94     | 0         | -0.45    | 0         |

선압축률이 20 %를 적용한 감쇠장치 실험에서는 Fig 19과 같이 1사분면의 최대 인장하중 값이 153.45 kN으로 나타나며, 반대 방향 3사분면의 압축하중 값은 148.98 kN으로 나타났다.

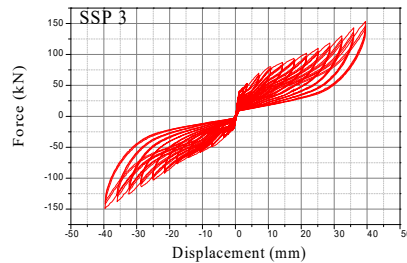


Fig 19. SSP3 감쇠장치의 하중-변위 곡선

선압축률 20 %의 경우는 Fig 20과 같이 실험 초기에 초탄성 형상기억합금 및 선압축 폴리우레탄 스프링으로 인한 회복력이 발생하였으며, Table 9에서 자세히 볼 수 있듯이 최대 변위 D4(39.6 mm)까지 회복력이 유지되는 것을 볼 수 있다. 회복력은 인장측 D1(3.6 mm)에서 30.27 kN으로 가장 크게 나타나며, 변위가 증가할수록 감소하여 최소 회복력은 압축측 D4(39.6 mm)에서 -3.03kN으로 나타났다. 잔류변위량은 D1(3.6 mm)부터 D4(39.6 mm)까지 0 mm로 발생하지 않은 것으로 나타났다.



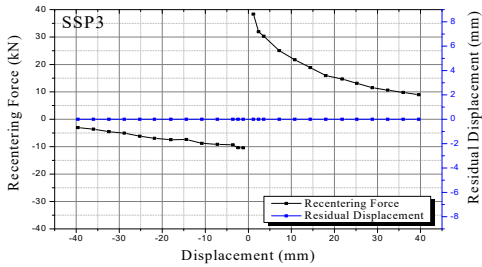


Fig 20. SSP3 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

Table 10. SSP2 감쇠장치의 회복력 및 잔류변위

|             | 인장       |           | 압축       |           |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
|             | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) | 회복력 (kN) | 잔류변위 (mm) |
| D1(3.6 mm)  | 30.27    | 0         | -9.37    | 0         |
| D2(18 mm)   | 15.95    | 0         | -7.48    | 0         |
| D3(28.8 mm) | 11.51    | 0         | -5.05    | 0         |
| D4(39.6 mm) | 8.94     | 0         | -3.03    | 0         |

## 6. 결론

본 연구는 지진으로 인한 피해를 최소화하고 복원력을 활용하여 재사용이 가능한 자동복원 스마트 감쇠장치에 대한 연구를 진행하였다. 초탄성 형상기억합금 및 폴리우레탄 스프링을 적용한 감쇠장치는 일반강재를 사용한 감쇠장치에 비해 뛰어난 성능을 보였으며, 폴리우레탄 스프링의 선압축률로 인한 추가적인 복원력이 작용하는 것으로 나타났다.

Table 10에서 볼 수 있듯이 초탄성 형상기억합금을 적용한 감쇠장치가 일반강재를 적용한 감쇠장치보다 잔류변위가 적은 것으로 나타났다.

Table 11. 와이어 시편 차이에 따른 최대 잔류변위

| 변위      | 인장      |         | 압축       |          |
|---------|---------|---------|----------|----------|
|         | SP1     | SSP1    | SP1      | SSP1     |
| 36 mm   | 7.21 mm | 6.78 mm | -6.93 mm | -6.51 mm |
| 39.6 mm | 8.13 mm | 7.5 mm  | -7.77 mm | -7.25 mm |

또한, Fig 11에 볼 수 있듯이 폴리우레탄 스프링의 선압축률에 따라 초기 발생회복력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 와이어 시편에 따른 초기 발생회복력의 미미한 차이는 폴리우레탄 스프링의 수직 거동에 따른 차이점으로 판단된다.

Table 12. 선압축률에 따른 초기 발생 회복력

|      |      | (단위 : kN) |        |        |        |  |
|------|------|-----------|--------|--------|--------|--|
| 하중방향 | 변위   | SP2       | SP3    | SSP2   | SSP3   |  |
| 인장   | 1.2  | 23.10     | 37.54  | 21.00  | 38.34  |  |
|      | 2.4  | 21.04     | 30.71  | 20.86  | 31.92  |  |
| 압축   | -1.2 | -9.74     | -13.75 | -12.12 | -10.45 |  |
|      | -2.4 | -9.04     | -13.58 | -11.97 | -10.40 |  |

재료 특성에 따른 감쇠장치별 에너지소산량을 비교하면, Fig 12에서 자세히 볼 수 있듯이 초탄성 형상기억합금을 적용하고 폴리우레탄 스프링의 선압축률이 가장 높은 SSP3 케이스가 가장 높은 에너지소산량을 보이는 것으로 나타났다.

Table 13. 감쇠장치별 에너지소산량

| 구분            | SP1    | SP2     | SP3     |
|---------------|--------|---------|---------|
| 에너지소산량(kN·mm) | 57,057 | 80,645  | 109,884 |
| <b>구분</b>     | SSP1   | SSP2    | SSP3    |
| 에너지소산량(kN·mm) | 75,495 | 104,712 | 127,213 |

실험결과를 토대로 보면 초탄성 형상기억합금이 일반강재에 비해 더 높은 에너지소산량 및 회복력을 가지고 있으며, 폴리우레탄 스프링 역시 초탄성 형상기억합금과 같이 회복력을 부여하여 하중 작용 후에도 감쇠장치가 원형 복원될 수 있는 작용을 한다. 이는 지진 발생으로 인해 내부 강재의 파손으로 인한 감쇠장치의 교체로 인한 경제적 손실을 방지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 확인하고자 하였던 폴리우레탄 스프링의 선압축으로 추가적인 회복력을 부가하여 감쇠장치의 복원력 성능이 충분한 것으로 판단된다. 자동복원 스마트 감쇠장치의 선압축률에 따라 초기 회복력이 달라지고 회복력 감소가 적어짐에 따라 감쇠장치의 적용할 위치나 용도에 따라 필요 회복력 및 최대 변위를 고려하여 가장 적합한 성능을 도출하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

## REFERENCES

국토안전관리원(<https://www.kalis.or.kr>)  
 김영찬, (2018), “자동복원이 가능한 댐퍼의 이력거동 특성 및 설계 최적화 연구”, 박사학위논문  
 김형진, (2017), “국내 내진기술 현황 및 전망”, 산은조사월보 제734호.  
 Akira, W., (2006), “Nest step to select good structures by people”, 4th International Conference on Earthquake Engineering,

Taipei, Taiwan, October 12-13.

- Akira, W., Nobuyuki, M., (2012), “ADVANCED SEISMIC DESIGN OF BUILDINGS FOR THE RESILIENT CITY”, 2nd International Conference on Archi-Cultural Translations through the Silk Road, Nishinomiya, Japan, July 14-16.
- Choi, E., Jeon, J., Seo, J., (2017), “Cyclic compressive behavior of polyurethane rubber springs for smart dampers”, *Smart Structures Systems*, 20(6), pp. 739-757.
- Choi, E., Youn, H., Park, K., Jeon, J., (2017), “Vibration tests of precompressed rubber springs and a flag-shaped smart damper”, *Engineering Structures*, 132, pp.372-382.
- Helmut Krawinkler, (1992), “Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures for buildings“, Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Hu, J., Noh, M., Ahn, J., (2018), “Experimental Investigation on the Behavior of Bracing Damper Systems by Utilizing Metallic Yielding and Recentering Material Devices”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, Article ID 2813058, 15 pages.
- Mirzai, N. M., Hu, J. W., (2019), “Pilot study for investigating the inelastic response of a new axial smart damper combined with friction devices”, *Steel and Composite Structures*, 32(3), pp. 373-388.
- Mirzai, N., Cho, H., Hu, J., (2021), “Experimental study of new axial recentering dampers equipped with shape memory alloy plates, *Structural Control Health Monitoring*, 28(3), e2680.
- Mirzai, N., Jeong, S., Hu, J., (2022), “Seismic collapse behavior of steel structures with a smart axial polyurethane friction damper” *Journal of Building Engineering*, 48, 103839.
- Speicher, M., DesRoches, R., Leon, R., (2011), “Experimental results of a NiTi shape memory alloy (SMA)-based recentering beam-column connection”, *Engineering Structures*, 33, pp.2448-2457.
- Wada, K., Liu, Y., (2005), “Shape recovery of NiTi shape memory alloy under various pre-strain and constraint conditions”, *Smart Materials and Structures*, 14, pp.273-286.