

납압출댐퍼의 동특성에 관한 실험적 연구 Experimental Study on the Dynamic Characteristics of the Lead Extrusion Damper

정민기* 조해진* 권형오* 김두훈*
Jeong, Min Ki Cho, Hae Jin Kwon, Hyung Oh Kim, Doo Hoon

Abstract

The cyclic extrusion damper, Lead Extrusion Damper, was invented by the W H Robinson in order to produce the isolated buildings and bridges the damping force. Recently, LED was applied to reduce the vibration of the tall building. In this study, to verify the dynamic characteristics of LED, the tests to find out the dependences on the velocity, displacement, repeated cycle, and temperature were performed at structural lab of Unison Industrial Co. Ltd. Through the result of the dynamic characteristics, we'll define the design parameters and apply the appropriate parts.

1. 서 론

납압출댐퍼(Lead Extrusion Damper)는 뉴질랜드 토목학자인 W. H. Robinson이 1971년에 오리피스형의 압출 방식으로 개발한 것이 시초이다. 초기에는 건물이나 교량의 지진격리장치에 감쇠력을 제공하고 교량의 작용되는 차량하중을 분산 및 제어할 목적이었지만, 최근에는 그 적용처가 여러 방면에서 검토되어지고 있다.

납압출댐퍼의 적용처를 크게 4종류로 나누어서 살펴보면 첫째, 하중분담 및 변위제한장치로서 지진 시 상부구조의 관성력을 각 하부구조에 납압출댐퍼의 작동력만큼 분담하는 역할로 사용할 수 있다. 둘째, 일정 변위나 일정속도 이상의 하중에 대하여 일종의 Stopper 역할을 수행하는 STU(Shock Transmit Unit)장치이다. 셋째, 납면진반침의 기능과 유사하게 고무반침과 함께 응답 제어용 감쇠기로 사용이 가능하다. 그리고, 넷째 건물의 수평강성에 기여할 뿐만 아니라 감쇠기로서의 성능을 수행하여 지진 또는 진동을 동시에 제어할 목적으로 사용될 수 있다. 특히, 일본 등 외국에서는 납압출댐퍼를 이용하여 풍하중에 대한 건물의 진동응답을 줄이는 목적으로 적용된 예가 있다. 따라서, 본 논문은 건물 또는 교량 등의 구조물에 다양한 목적으로 사용되기 위하여 납압출댐퍼를 동특성실험을 통하여 거동 특성을 파악하여 납압출댐퍼의 설계에 반영할 목적으로 작성되었다.

* 유니슨산업(주) 기술연구소

2. 납압출템퍼 구조 및 작동원리

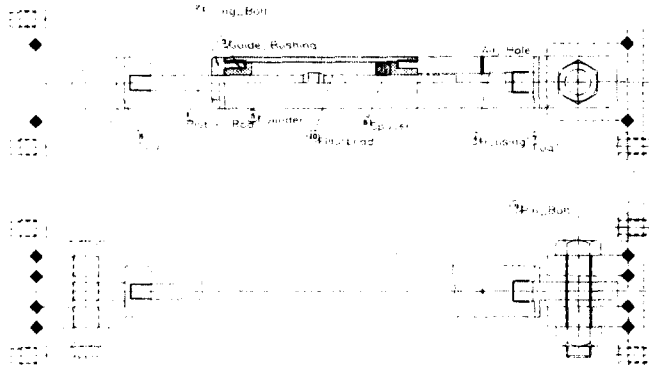


그림 1. 납압출템퍼 구조도

납압출템퍼의 구조는 납의 연성 특성 때문에 <그림 1>에서 처럼 오리피스형으로 금속을 소성 가공할 때 사용되는 압출가공 원리를 이용하여 설계되었다. 압출은 재료를 금형 속에서 압축하여 금형의 홀을 통하여 재료가 빠져나오게 하여 원래보다 단면적을 작게 하고 원하는 형태를 만드는 가공법으로 주로 비철금속의 열간가공에 사용되고 있다. 납압출템퍼의 작동력은 압출압력으로 표시하는데, 압출압력이란, 작동력을 납의 단면적으로 나눈 값이다. 이 압출압력에 영향을 미치는 주 인자는 크게 압출방식, 마찰, 압출비(단면감소율), 가공온도 및 변형속도, 압출부의 모양 등 여러 가지를 들 수 있으나, 이들 인자들은 완전히 독립인자가 아니고 상호관련이 있다.

2.1 작동력 예측

단면감소율과 압출 비는 식(1), 식(2)에서 정의되며, 단면감소율보다는 압출비를 사용하는 것이 편리하다.

$$\text{단면감소율} = \frac{[\text{재료의 압출 전 단면적}(A_0) - \text{압출 후 단면적}(A_f)]}{\text{압출 전 단면적}(A_0)} \quad \text{식(1)}$$

$$\text{압출비}(R) = A_0/A_f \quad \text{식(2)}$$

압출압력을 압출비의 대수(ln : 자연로그)로 일차함수로 회귀분석하면 식(3)이 된다.

$$p = \sigma_0 [a + b \cdot \ln R] \quad \text{식(3)}$$

여기서, p는 압출압력, σ_0 는 변형저항(평균항복응력), a와 b는 압출속도, 온도, 다이 모양 등에 좌우되는 상수이다. 여기서는 실험모델은 Johnson이 이론과 실험적인 접근에 의하여 납의 압출압력으로 제시한 식(4)을 이용하여 설계하였다.

$$\frac{p}{Y} = 0.8 + 1.5 \cdot \ln R \quad \text{식(4)}$$

여기서, \bar{Y} 는 $2k$ (=전단응력)로 가정하였다.

2.2 납의 소성거동

납압출담퍼의 거동 시 납이 오리피스(Orifice)를 통과하면서 발생하는 변형과정에서 납의 미세결정구조변화는 <그림 2>와 같다.

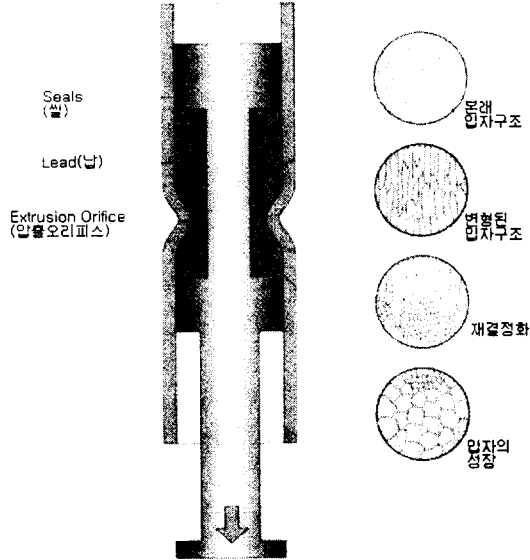


그림 2. 압출에 의해 변형된 납의 미세구조 변화

일반적으로 납과 같이 다결정금속이 오리피스를 통과하는 압출과정에서 결정구조가 팽창하게 되고 각 결정구조 내부에서 많은 결함들이 발생하게 된다. 그리고, 완전히 소성변형이 완료되었을 때는 온도조건만 납의 재결정도 이상 유지되면 납이 복구과정, 재결정화과정, 결정성장과정을 통하여 소성변형 이전의 결정구조로 회복이 된다.

3. 납압출담퍼 설계

식(4)를 근거로 하여 15 Ton 용량의 납압출담퍼를 <표 1>에서 제시된 치수대로 설계 및 제작하였다. 실린더는 KS B6370 유압실린더 규정을 적용했으며, 피스톤 로드는 압축재의 좌굴하중규정을 적용하였다. 중공부의 납은 <그림 3>과 같이 아답터를 이용하여 30 Ton 까지 압착하였다.

표 1. 납압출담퍼의 설계

| 실린더, mm | | 피스톤, mm | | 단면감소율 | 변위, mm |
|---------|-----|---------|------|--------|--------|
| 내경 | 외경 | 헤드지름 | 로드지름 | | |
| 80 | 100 | 40 | 30 | 0.1273 | ±100 |

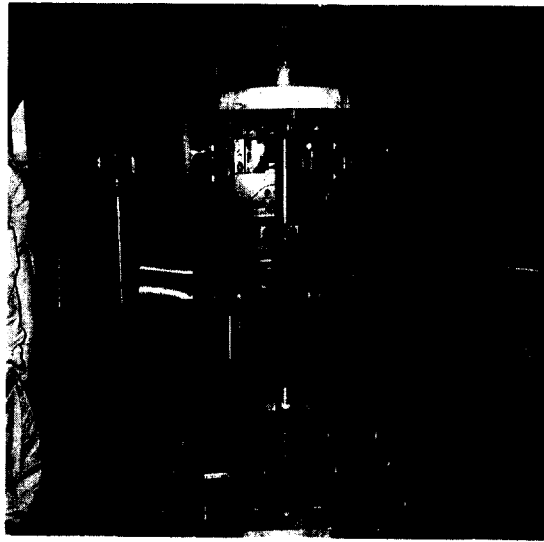


그림 3. 아답터를 이용한 납압착 과정

4. 동특성 실험

본 실험은 납압출담퍼의 속도, 온도, 반복사이클 의존특성을 파악하기 위하여 <표 2>의 조건에 따라 유니슨 기술연구소 구조시험동의 피로시험기를 이용하여 실험을 수행하였다.

표 2. 시험조건

| 파일명 | 속도, mm/s | 변위, mm | 파형 | 사이클 | 비고 | | | |
|----------|----------|--------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|
| 0.1V50D | 0.1 | 50 | Triangular | 1.5 | 속도의존성 | | | |
| 0.5V50D | 0.5 | 50 | | | | | | |
| 1V50D | 1 | 50 | | | | | | |
| 2V50D | 2 | 50 | | | | | | |
| 5V50D | 5 | 50 | | | | | | |
| 7.5V50D | 7.5 | 50 | | | | | | |
| 10V50D | 10 | 50 | | | | | | |
| 25V50D | 25 | 50 | | | | | | |
| 1V10D | 1 | 10 | | | | Triangular | 1.5 | 변위의존성 |
| 1V20D | | 20 | | | | | | |
| 1V30D | | 30 | | | | | | |
| 1V70D | | 70 | | | | | | |
| 5V50D50C | | 5 | 50 | 50 | 반복사이클 | | | |

4.1 속도의존성 시험결과

본 실험은 납압출담퍼의 속도의존성을 파악하기 위하여 작용변위를 50mm로 하고, 속도를 일정하게 Tri-angulark로 가력하였다. 속도는 7단계(0.1, 0.5, 1, 5, 7.5, 10, 25mm/s)로 변화하였다. 반복회수는 1.5사이클로 하였다.

가. 속도별 작동력 산정

위의 그림에서 제시된 속도의존성 실험에서 구한 속도별 납압출뎀퍼의 작동력을 <표 3>에서 정리하였다. 작동력은 '변위 = 0' 일 때 하중 값들의 평균값으로 가정하였다.

표 3. 속도별 작동력

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 속도(mm/s) | 0.1 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 7.5 | 10 | 25 |
| 작동력(KN) | 120 | 171 | 180 | 184 | 207 | 211 | 235 | 271 |

나. 속도의존성분석

위에서 제시된 속도별 작동력을 회귀분석을 이용하여, 납압출뎀퍼의 속도의존성을 수식화 하였다. 회귀분석(Curve-Fitting)함수는 일반적인 지수함수를 이용하였다.

$$F = C \cdot V^{\alpha} \tag{5}$$

여기서, C는 상수이며, α는 지수이다. 회귀분석결과는 식(6)과 같다.

$$F = 171.07 V^{0.13464} \tag{6}$$

여기서, 작동력(F)는 KN, 속도(V)는 mm/s 단위에 해당된다

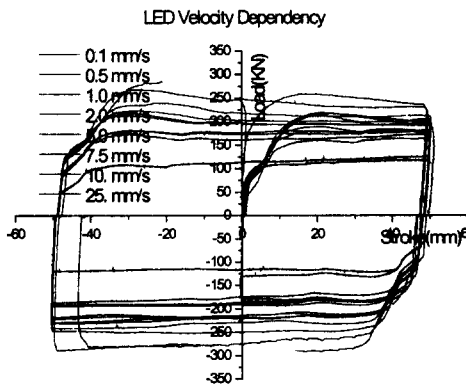


그림 4. 속도의존성 실험결과

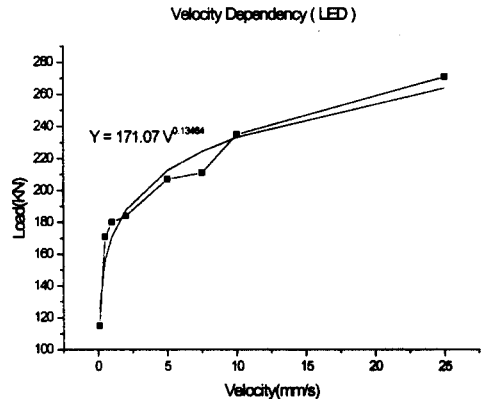


그림 5. 속도의존성 - 회귀분석결과

4.2 변위의존성

본 실험은 지정된 납압출뎀퍼의 이동 범위 내에서 작동력의 변위에 따른 안정성을 검증하기 위하여 실시하였으며, 시험결과는 <그림 6>와 <표 4>에서 정리하였다. 하중-변형곡선에서 납의 압착(Squashing)이 완전하지 않아, 하중 또는 변위가 역전되는 부분에서 납압출뎀퍼가 10~15mm 정도까지 완전하게 저항하지 않아서 하중이 단차가 지는 현상이 발생했다. 따라서, 10mm를 변위로 한 실험 결과를 제외하고 고찰하면, 모든 변위에서 거의 비슷한 작동력을 발휘됨을 알 수 있다. 따라서, 본 납압출뎀퍼는 거의 변위의존성이 없는 것으로 파악되었다.

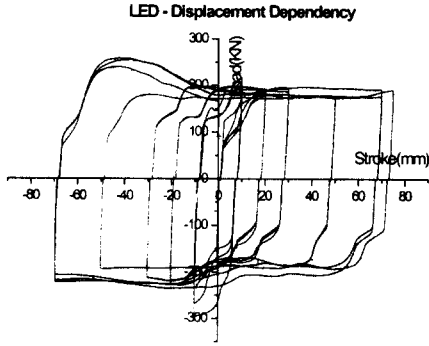


그림 6. 변위의존성 시험결과

표 4. 변위별 작동력 (속도 = 1 mm/s)

| 변위, mm | 작동력, KN |
|--------|---------|
| 10 | 150 |
| 20 | 185 |
| 30 | 186 |
| 50 | 180 |
| 70 | 195 |

4.3 반복하중-온도 특성 실험

반복하중-온도 특성 실험은 반복하중에 의한 납압출담퍼의 안정성을 검증하기 위하여 실시하였다. 납압출담퍼는 연속적인 반복 거동으로 내부에 충전된 납의 소성 거동으로 열이 발생하게 된다. 이 열은 내부 유체의 항복응력을 저하시켜서 납담퍼의 작동력을 감소시키는 역할을 하며, 거동속도와 지속시간에 영향을 받게 된다. 그리고, 납의 소성 거동으로 발생하는 열과 납의 재결정 과정과 실린더 등으로 통하여 외부 발산되는 열이 같아서 더 이상 온도 상승이 발생되지 않는 열 평형상태에 도달하게 된다. 이 때의 온도를 평형 온도라 정의하자. 따라서, 본 납담퍼의 평형온도가 얼마인지 살펴볼 필요도 있다.

본 실험에서는 1 ~ 5 mm/s의 속도로 진폭을 50mm로 해서 50사이클 반복하였다. 시험기 세팅은 <그림 7, 8>에서처럼 온도계를 실린더 외부 표면에 부착하였다. 본 실험에 사용된 온도계는 30~99.9℃ 범위에서 사용 가능하다.

본 시험은 실린더 외부 온도가 110℃에서 온도상승에 의한 주변상황 위험도를 고려하여 중단하였다. 그 때까지 결과를 고찰하면, 85℃이상에서 작동력은 거의 일정하게 유지되며, 작동력은 대략

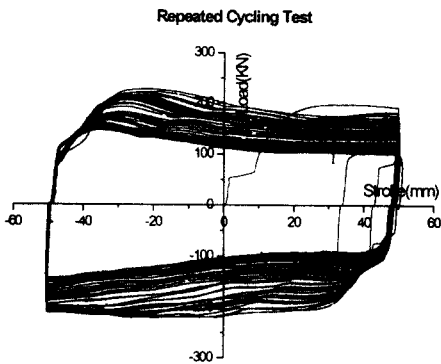


그림 7. 반복하중-변위 곡선

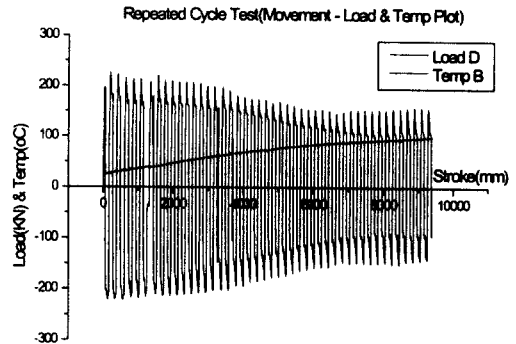


그림 8. 반복사이클증가에 따른 작동력 및 온도변화 곡선

200KN에서 120KN까지 40%정도 감소가 되는 것으로 나타났다. 온도는 계속 상승하므로 아직 평형상태에 도달하지 않은 것으로 나타났다.

4.4 반복재현성 실험

반복재현성 실험은 반복사이클 시험 후 납압출담퍼의 이력거동의 재현성을 평가할 목적으로 실시 하였으나, 반복사이클 실험을 과정에서 피스톤 로드와 좌굴과 납의 유출로 인한 하중 증가로 인하여 <그림 9>와 같이 거동하였다. 따라서, 납압출담퍼의 반복재현성은 본 실험에서는 평가되지 못하였다.

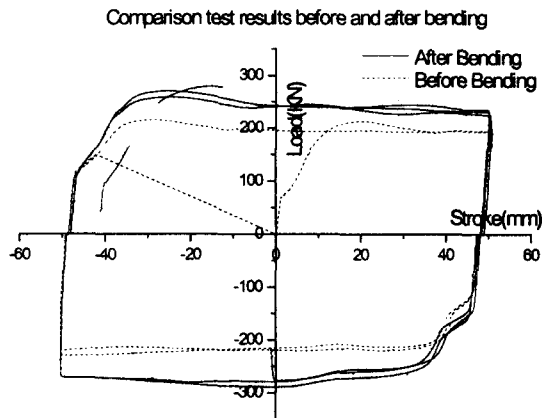


그림 9. 반복재현성 실험결과

5. 결론

이상에서 납압출담퍼 10 Ton 모델에 대한 속도의존성, 변위의존성, 반복-재현성, 반복하중-온도 특성 실험결론은 다음과 같다.

- 1) 납압출담퍼의 속도의존성은 다음과 같으며, 속도의존성이 아주 적다.

$$F = 171.07 V^{0.13464}$$

여기서, 작동력(F)는 KN, 속도(V)는 mm/s 단위에 해당된다.

- 2) 변위의존성 또한 거의 없는 안정된 거동이 나타났다.
- 3) 반복재현성은 납압출담퍼의 손상으로 인하여 직접적인 비교를 못하였지만, 일련의 실험이 3일 동안 실시되었으므로 어느 정도의 반복재현성은 인정된 것으로 사료된다.
- 4) 반복거동에 의한 하중-온도 변화 특성을 살펴보면, 85℃이상에서 작동력은 거의 일정하게 유지되며, 작동력은 대략 200KN에서 120KN까지 40%정도 감소가 되는 것으로 나타났다. 온도는 계속

상승하므로 아직 평형상태에 도달하지 않은 것으로 나타났다.

앞에서 수행된 시험결과에서 납압출댐퍼의 작동력은 속도의존성이 아주 적은 것으로 나타났다. 따라서, STU로 적용할 경우 상시하중이 설계력(Rated Load)의 20~40% 정도이므로 사용하기가 적용하기 곤란하다. 하지만, 본 실험에서도 나타났듯이 납압출댐퍼의 높은 작동력과 변위, 온도, 시간에 대한 안정성을 고려해 보면, 댐퍼 등 다른 용도로 충분히 사용할 수가 있을 것이다.

6. 참고문헌

- 1) R I Skinner, W H Robinson, G H McVerry, "An Introduction to Seismic Isolation", WILEY, 1993
- 2) C E Pearson, R N Parkins, "The Extrusion of Metals", Chapman & Hall LTD, 1961
- 3) W Johnson "The pressure for the cold extrusion of lubricated rod through square dies of moderate reduction at slow speeds" J. Inst. Metals, 1956-7, Vol 85, pp 403~408
- 4) W Johnson "Experiments in Plane-Strain Extrusion" Journal of Mechanics of Physics of Solid 1955-6, Vol 4, pp269-82
- 5) KS B 6370 "유압실린더 - Hydraulic Cylinders" 1987