https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.5.300

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

한 방향 선형 댐퍼 설계 및 성능 실험에 관한 연구

박창순[a], 신영훈[a], 정동희[a], 서영인[a], 이응석[a*]

A Study on the Design and Performance Test of One-way Linear Damper

Chang-soon Park[a], Yeong-hun Shin[a], Dong-hee Jung[a], Young-in Seo[a], Eung-suk Lee[a*]

a Department of Mechanical engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28644, Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 September 2019
Revised 14 October 2019
Accepted 14 October 2019

Keywords:
One-way linear damper
Damping coefficient
Damper test device
Servo motor
Piston check valve
Harpoon type piston head

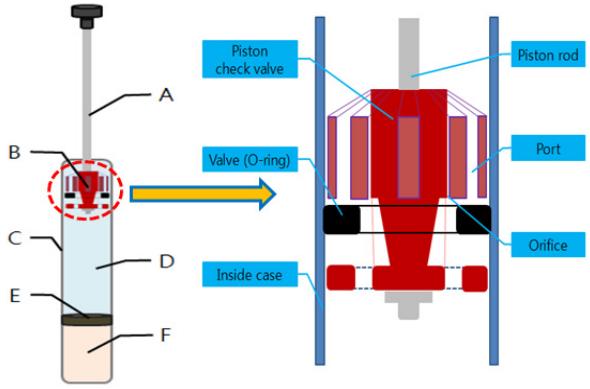
ABSTRACT

In this paper, we analyze the effects such as velocity and stroke on a one-way damper for doors. Experiments were conducted to acquire the data for the analysis. The experiments were done using a one-way damper tester developed in this study . The damping force for the stroke was measured by the damper tester. The damper used in this study has different stroke and damping force. We analyzed the data acquired in the one-way damper testing machine. The analysis results will be useful in improving the performance of the door damper and testing machine. To ensure that a one-way damper design is effective, some shapes are modeled by a 3D CAD program, analyzed using a flow analysis program, and the results are described in this paper.

1. 서 론

댐퍼는 주로 양 방향 댐퍼로서 차량과 자전거의 서스펜션 등 많은 산업과 기계장치에 사용되어 왔다. 더불어 최근에는 감쇠력을 전자적으로 컨트롤하는 수준까지 발전되어 왔다. 또한 기계의 사용에 있어서 불가피하게 생기는 진동이나 지진과 같은 자연재해를 방지하기 위해 만들어지고 발전되고 있다. 하지만 이렇게 댐퍼라고 하면 양 방향 댐퍼를 주로 떠올리곤 하지만 일상생활에서 양 방향이 아닌 한 방향으로만 감쇠력을 발생시켜야 하는 기능과 요구가 많아져 한쪽 방향으로만 감쇠력이 발생하는 한 방향 댐퍼의 필요성이 늘어나고 있다. 한 방향 댐퍼는 압축 시 저항하는 감쇠력을 인장 시 보다 상대적으로 크게 하여 감쇠계수(damping coefficient)를 높여야만 한 방향 댐퍼의 목적에 부합할 수 있는 것이다. 양 방향 댐퍼에 비해 한 방향 댐퍼의 장점은 한 방향으로 드는 힘이 반대방향으로 드는 힘보다 차이가 크게 난다는 것이다. 이러한 특징을 적용하여야 실생활 안에서 여닫이 형태의 슬라이딩 도어와 수납장, 자동차의 트렁크, 창문에서 적용되어지고 있다. 한 방향 선형 댐퍼의 종류로는 체크밸브의 기능이 포함되어진 일반적인 한 방향 댐퍼와, 전자석의 원리를 이용하여 전류량을 제어함으로 자력에 변화를 주어 MR (magneto-Rheological) 유체의 점성이 가감되는 현상으로 감쇠력을 얻는 전자식 자성 댐퍼 등이 존재한다[1]. 하지만 한 방향 댐퍼를 설계 후 실제 실험을 통해 감쇠력을 측정하여 그 크기와 특성을 알아볼 필요성이 생긴다. 댐퍼를 실제로 적용하기 위해 댐퍼시험기를 통해 감쇠력을 정하여 댐퍼의 한

* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2442
Fax: +82-43-273-8789
E-mail address: eungsuk@cbnu.ac.kr (Eung Suk Lee).



A	Linear damper piston rod
B	Linear damper piston check valve
C	Linear damper cylinder
D	Linear damper oil
E	Linear damper free piston
F	Linear damper gas chamber

Fig. 1 Piston structure of one-way linear damper inside

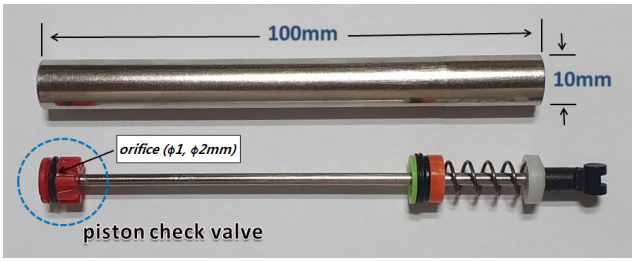


Fig. 2 One-way linear damper with piston check valve manufactured

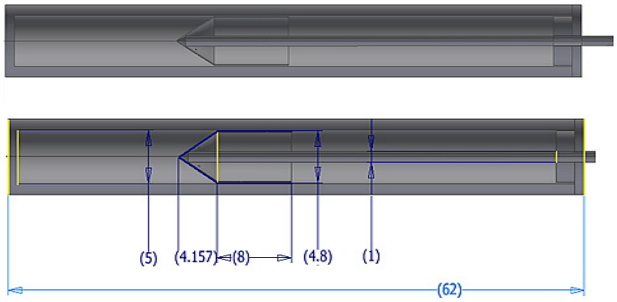


Fig. 3 Design of one-way damper with Harpoon type piston

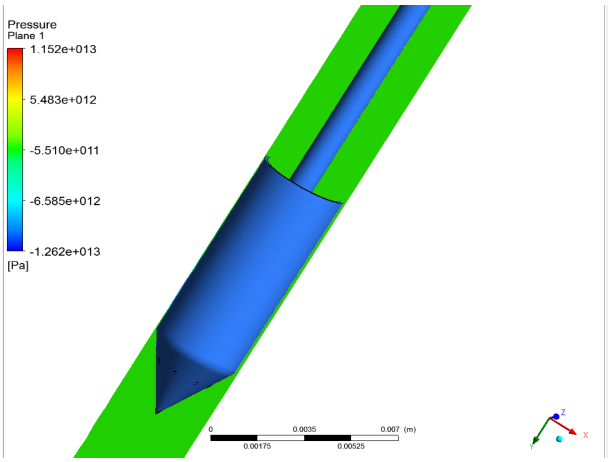


Fig. 4 3D modeling with pressure distribution around Harpoon type piston head without moving condition

계치, 피스톤 속도에 따른 변화, 압력에 따른 변화 등 많은 유용한 자료를 얻을 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 측정 가능한 한 방향 선형댐퍼의 설계를 위하여 체크밸브 기능이 있는 소형 댐퍼를 실험하기 위한 댐퍼 테스트 장치를 개발함과, 체크밸브가 적용되지 않는 한 방향 선형댐퍼를 설계하고 ANSYS를 이용한 전산유체유동 해석을 통한 실험으로 적합함을 검증하였다.

2. 한 방향 선형댐퍼 설계 및 제작

2.1 체크밸브를 적용한 선형댐퍼 설계

한 방향 댐퍼[2]는 크게 피스톤 축(Piston rod), 체크밸브(Check valve), 작은 구멍(Orifice), 유로입구(Port), 내부 원통(Inside case)로 이루어지면서 역류방지밸브 기능을 하게 된다. 댐퍼내의 유체가 작은 구멍(Orifice)과 유로입구(Port)로 흐르게 되는데 Valve (O-ring)에서 한쪽 방향에서는 유체의 흐름을 방해하고 반대 방향에는 유체의 흐름을 원활히 하게 하여 한쪽 방향으로만 유압을 발생시키게 된다. 한 방향 선형댐퍼의 방식은 Fig. 1의 구조에서 보듯이 댐퍼 피스톤 구조에 체크밸브(Check valve)를 두어 압축 상황에서는 유로입구(Port)를 밀폐하여 유체의 유동을 막고, 작은 구멍(Orifice)만을 통과하게 하여 감쇠력을 발생시키는 방식이다.

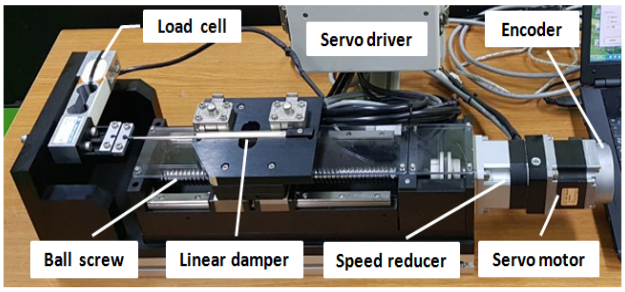
2.2 후류 발생을 이용한 선형댐퍼의 설계

피스톤(Piston) 주변에 발생하는 후류(wake)에 의한 유체마찰을 이용한 선형댐퍼로 체크밸브를 적용하지 않는 방식의 선형댐퍼 설계를 수행하였다. 간단히 피스톤 헤드의 형상변화 만을 통해 압축과 인장시의 유체의 유동 차이를 발생시키는 현상을 이용하여 한 방향 댐퍼의 원리를 구현하기 위해 Fig. 3과 같이 Harpoon type piston 형상으로 3D CAD 프로그램으로 모델링하고 ANSYS로 유체유동 해석을 진행하였다.

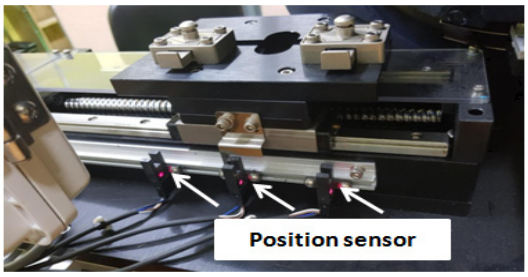
3. 성능 실험 및 결과 분석

3.1 성능 실험 장치 구성

한 방향 댐퍼의 최대감쇠력, 성능에 미치는 요소가 무엇이 있는



(a) testing device manufactured



(b) position sensor to control stroke

Fig. 5 One-way linear damper testing system using strain gage

지를 알기 위해 댐퍼시험기를 제작하였다. 이 댐퍼시험기의 원리와 전체적인 설계의 구성은 Fig. 5 (a)의 그림과 같다. 시험에 사용할 한 방향 댐퍼를 압축 시 안정한 상태로 실험하기 위해 구속, 설치하는 부분이 있다. 댐퍼를 설치한 후 댐퍼 행정의 압축속도를 속도감속기를 활용하여 댐퍼 속도를 정해주게 된다. 이때 댐퍼가 압축, 인장할 시 서보모터(Servo motor)의 속도를 조절하기 위해 설치된 엔코더를 활용한다. 댐퍼의 압축, 인장이 일어날 때 행정의 이동을 무한정으로 주게 된다면 댐퍼에 충격을 줄 수 있다. 이러한 문제를 피하기 위해 댐퍼의 정확한 피스톤 위치를 알아야 한다[3]. 행정의 위치는 Fig. 5(b)의 위치센서(Position sensor)로 측정하며 조절하게 하여 이러한 문제를 방지한다. 행정(Stroke)의 위치마다 발생하는 댐퍼의 감쇠력, 그리고 최대 감쇠력을 알기 위해 장치 끝부분에 하중계(Load cell)을 설치하여 하중을 측정한다. 로드 셀에 하중을 가하게 되면 부착된 Fig. 5의 스트레인게이지에서 전기적인 저항값이 변하게 되고 이러한 저항값의 변화를 이용하여 하중을 측정하게 된다[5]. 댐퍼시험기에 활용되고 시험에 적용되는 데이터는 USB 포트를 통해 컴퓨터에 저장되고 감쇠력은 Fig. 6과 같이 모니터의 그래프를 통해 표현되어진다.

3.2 선형댐퍼의 성능실험

3.2.1 선형댐퍼 시험 인자

한 방향 댐퍼에 영향을 미치는 인자는 수없이 많은 인자들이 있을 수 있지만 한 방향 댐퍼 중 오일 댐퍼는 댐퍼 내 유체에서 난류가 많이 발생하고 커질수록 유체의 흐름을 방해하여 감쇠력이 상

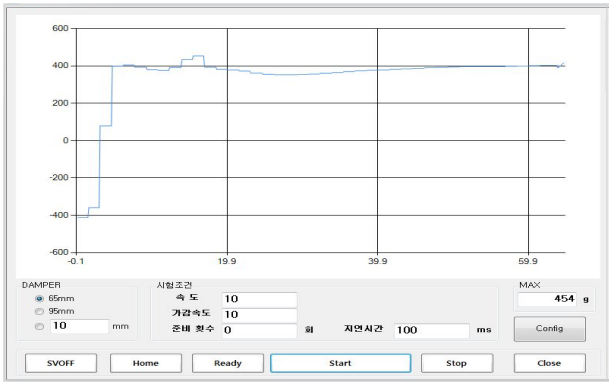


Fig. 6 Program window for testing damper performance, damping force vs. stroke for different velocities

승 한다. 속도에 대한 영향을 확인하기 위해 Stroke의 속도에 변화를 주어 감쇠력을 측정한 후 감쇠력에 영향을 미치는지, 경향성이 나타나는지, 설계이론이 실제 실험과 맞는지 확인한다. 또한 압력이 증가하면 힘도 비례하여 증가한 것과 같이 댐퍼 유체의 압력이 상승하면 감쇠력이 증가할 것이다.

따라서 실험을 통해 압력 인자가 감쇠력에 얼마나 영향을 미치는지, 경향성이 나타나는지 확인해 볼 필요가 있다. 마지막으로 행정의 길이가 서로 다른 한 방향 댐퍼를 시험함으로써 stroke의 길이가 감쇠력에 미치는 영향과 경향성을 실험을 통해 확인한다. 실험을 모두 진행한 후 분석에 활용할 공식은 다음과 같다. 댐퍼의 유체유동에 관계되는 힘과 속도와 상관관계는 운동량보존법칙을 통한 힘과 속도의 상관관계 식 (1)과 같다.

$$\sum \vec{F} = \int_{c.v} \rho \vec{v} dV + \int_{c.s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \qquad (1)$$

ρ = Density, v = Velocity

3.2.2 압력 인자 분석

댐퍼시험기를 사용하여 행정(Stroke)의 길이가 서로 다른 두 개의 한 방향 댐퍼를 속도별 감쇠력, 압력별 감쇠력의 변화를 다음과 같은 표와 사진으로 실험 데이터를 나타내었다. Table 1와 Fig. 7로부터 Fig. 8을 통해 행정(Stroke)이 65 mm인 한 방향 댐퍼에서 압력이 높은 댐퍼는 압력이 낮은 댐퍼에 비해 최대 감쇠력이 더 높게 실험 결과로써 확인되었다.

또한 Stroke 95 mm인 한 방향 댐퍼도 마찬가지로 압력이 높은 댐퍼가 최대 감쇠력이 더 크게 측정된 것을 확인 할 수 있다. 이러한 실험데이터의 해석 및 분석으로 댐퍼 내 압력이 높을수록 감쇠력이 증가함을 알 수 있다. Table 1에서 일반적으로 화살표까지 속도에 따라 감쇠력이 증가함을 보이며, 이후 속도가 빨라져도 감쇠력은 오히려 감소함을 보인다. 이것은 댐퍼의 사용적정구간을 벗어난 구간으로 설계 목표에서 벗어나 댐퍼의 기능을 상실한 것

으로 해석할 수 있다. Fig. 2에서 피스톤 밸브는 얇은 고무 O-ring으로 제작되어 속도가 빠른 경우, 후류(後流)로 인한 변형에 의해 체크밸브의 기능이 없어지는 것으로 보인다. 따라서 체크밸브 고무의 재질과 형상, 강도 보강 설계가 필요하며, 본 실험에 사용된 도어 댐퍼의 경우 최대 속도는 90 mm/s로 제한됨을 보인다.

3.2.3 속도 인자 분석

Table 1와 Fig. 8로 부터 Fig. 11을 통해 속도가 증가할수록 최대 감쇠력이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 속도와 난류의 관계를 나타내는 레이놀즈 공식에서 속도가 증가할수록 레이놀즈수가 증가하여 난류가 더 많이 발생한다. 난류가 많이 발생할수록 유체에 의한 피스톤의 마찰력이 상승하게 되고 유체 흐름을 방해하면서 이는 감쇠력 증가로 이어진다는 것으로 해석될 수 있다. 하지만 속도가 증가할수록 어느 구간부터는 최대 감쇠력이 증감으로 요동치는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 댐퍼마다 사용적정 속도가 있음으로 해석될 수 있다. 여기서 사용적정속도란 댐퍼가 제 기능을 하며 감쇠력 변화가 일정한 경향을 띄어 예측 가능한 구간의 속도이다.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \tag{2}$$

Re : Reynolds number, v : Velocity

ν : Dynamic friction coefficient

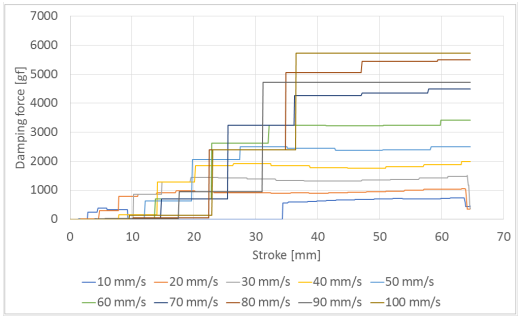
또한, 이러한 속도요소와 압력요소를 모두 고려하고 각 댐퍼의 사용적정속도를 고려하면 동일 행정(Stroke) 일 때 고압 댐퍼보다 저압 댐퍼가 사용적정속도 범위가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나 이는 한 방향 댐퍼의 구현원리(체크밸브의 형상, MR유체 등)가 되는 설계 형상마다 차이가 있을 수 있다.

3.2.4 행정(Stroke) 인자 분석

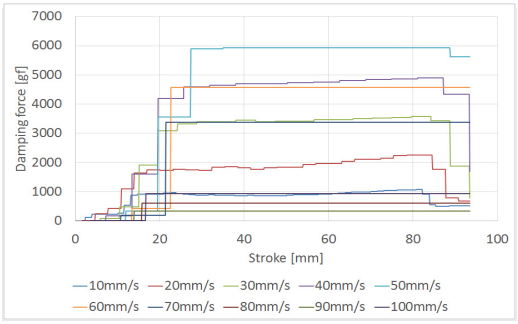
Table 1과 Fig. 7, 8을 통해 Stroke가 작을수록 사용적정속도의 범위가 더 크다는 것을 볼 수 있다. 또한, Stroke가 긴 경우 (95 mm)에서는 오히려 이러한 감쇠력의 감소 시기가 빨라지는 것으로 보이며, 이것은 긴 Stroke의 경우 댐퍼 내부의 유량이 많으므로 유체의 밀도 상승률이 빠르게 상승하는 것으로 추정된다. L-type의 경우는 가스실 (gas chamber)의 압력이 낮으므로, 댐핑 반력이 커서 결과적으로 최대 감쇠력이 떨어진 것으로 보인다. 즉, Stroke가 짧을수록 넓은 범위의 속도구간에서 한 방향 댐퍼를 사용가능하다는 해석을 얻을 수 있다. 마지막으로 사용적정구간을 벗어난 경향성이 보이지 않는 구간은 Table 1을 통해 사용적정속도 범위에서 벗어나면 최대감쇠력의 증감이 요동치는 것을 볼 수 있는데 이는 댐퍼의 누유 가능성을 생각해 볼 수 있다. 왜냐하면

Table 1 Damping forces experimented, H/L : high/low pressure damper type, Forces unit : [gf]

Stroke \Velocity		10 [mm/s]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
65 [mm]	H	2,067 → 3,528 → 4,651 → 5,625 → 5,889					1,488	3,118	789	5,189	2,034
	L	454 → 1,083 → 1,498 → 2,007 → 2,744 → 3,455 → 4,168 → 4,908 → 5,489									5,488
95 [mm]	H	1,827 → 3,374 → 4,805			4,225	3,363	1,548	2,697	875	3,133	5,846
	L	881 → 1,919 → 3,278 → 4,490 → 5,767					5,067	5,869	3,810	2,199	912



(a) Stroke 65 mm



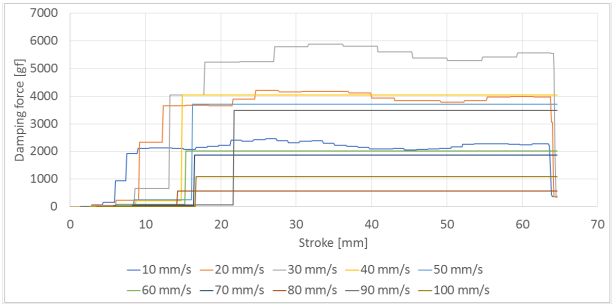
(b) Stroke 95 mm

Fig. 7 Damping forces variation for different strokes and velocities in low pressure type linear damper

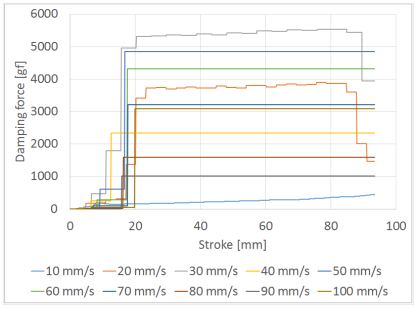
누유가 발생하면 그 만큼 댐퍼 내의 압력이 감소하고 최대 감쇠력이 작아질 수 있기 때문이다. 또한, 누유가 발생하면서 외부 공기가 유입된다면 댐퍼 내의 압력이 다시 증가할 수 있다. 이러한 상황에서 댐퍼 내 유체의 혼합과 감소로 인해 댐퍼 성능의 경향성을 볼 수 없다. Check valve type 선형댐퍼 설계에서는 작은 구멍(orifice) 직경을 변경하여 (ϕ1, ϕ2 mm) 고압 / 저압방식의 2가지 댐퍼 모델의 성능 실험을 수행하였다.

4. 후류 발생을 이용한 선형댐퍼 설계

실험에 설정한 작동유체의 점성계수와 피스톤의 속도 조건에서는 Fig. 9 (a)의 콘(cone) 형상과 Fig. 9 (b)의 우산(umbrella) 형상의 피스톤은 와류 발생이 미미하다는 것을 확인 할 수 있었다[4]. 따라서 와류가 발생하지 않아 큰 압력 차이를 얻을 수 없게



(a) Stroke 65 mm



(b) Stroke 95 mm

Fig. 8 Damping forces variation for different strokes and velocities in high pressure type linear damper

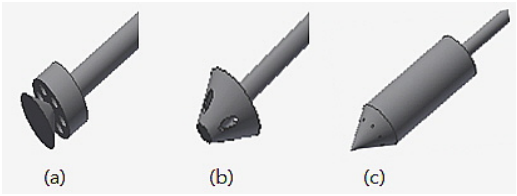


Fig. 9 Piston head design using wake fluid friction in linear damper system (a)Cone, (b)Umbrella, (c)Harpoon type

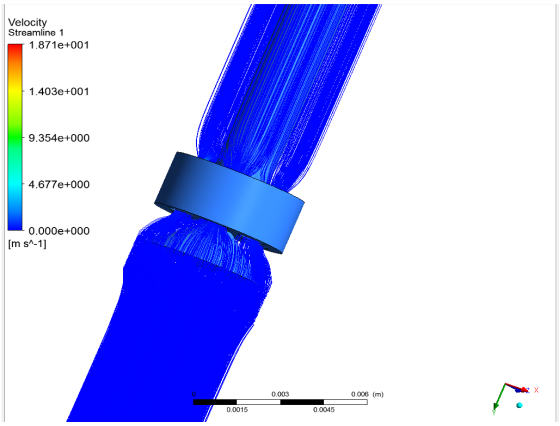


Fig. 10 Velocity distribution at Cone type angle piston head in the case of Compression

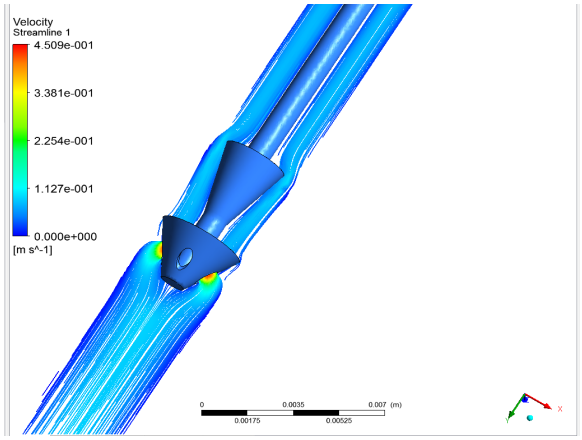
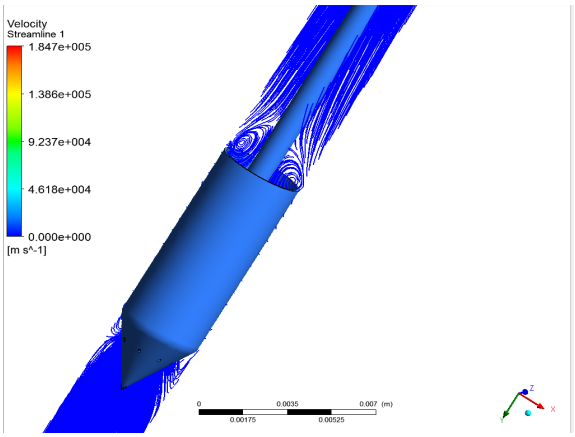
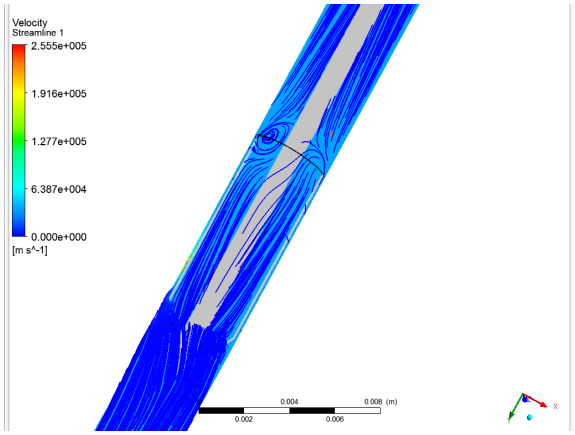


Fig. 11 Velocity distribution at Umbrella double type piston head in the case of Compression



(a) Compression



(b) Extension

Fig. 12 Velocity distribution at Harpoon type piston head in the case of Compression and Extension

됨에 따라 한 방향 댐퍼로서의 역할을 수행하지 못한다는 것을 해석에서 알 수가 있었다. Fig. 12의 작살 형(Harpoon type) 피스톤 헤드는 피스톤의 압축 시 유체의 저항을 최소한으로 받기 위해 날카롭게 설계 하였고, 낮은 저항을 통해 속도의 손실을 최소한으로 하였다. 또한 경사진 형상으로 인해 오리피스를 통해 들어가는 유체가 중공원통 내부에서 난류유동을 잘 일으키게 하도록 디자인

Table 2 Harpoon type effect with the pressure differences for wake generation, Piston Dia. 4.8 mm

Orifice Size	Pressure Differences	
	Compression [GPa]	Extension [GPa]
d = 0.1 [mm] (8 EA)	22.2	1.1

하였다. 해석결과인 Fig. 12를 참고하면 원통에서 많은 후류(Wake)가 발생함을 확인 할 수 있다. 이로 인해 원통 내부에서 존재하는 유체들은 서로 부딪혀 Table 2에서 볼 수 있듯이 압력이 높아지게 된다. 따라서 피스톤 헤드 앞부분과 중공 원통에서 압력 차이는 상당히 크게 나타나게 되는 것이다.

그러나 반대로 피스톤이 인장할 경우, 중공 형으로 된 원통은 많은 유체를 포함하며 위로 올라가게 되는데, 해석 결과 피스톤이 압축할 때와 비슷하게 인장에서 Fig. 12에서 보듯이 원통 안 에서 어느 정도의 후류가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 그로인해 인장에서도 상당히 큰 압력차이가 나타나게 되는 것이다. 그러나 그 정도가 압축에서와 비교할 때 상당히 작기 때문에 한 방향 댐퍼로써 특징을 충분히 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

한 방향 선형 댐퍼(One-way linear damper) 실험의 결과로 압력과 최대 감쇠력, 행정(Stroke)의 적정속도구간 등의 상관관계를 확인할 수 있었다. 속도가 증가할수록 레이놀즈수가 증가하여 난류가 더 많이 발생하고 난류가 많이 발생할수록 유체에 의한 피스톤의 마찰력이 상승 및 최대 감쇠력 증가로 이어진다.

동일 행정 일 때 고압 댐퍼보다 저압 댐퍼가 사용적정속도 범위가 더 큰 것을 확인할 있고 행정(Stroke)이 작을수록 사용적정속도의 범위가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 압력에 관해서는 고압 댐퍼일수록 감쇠력이 증가함을 알 수 있다. 추가로 엔코더의 분해능과 같은 시험기상의 한계와 온도와 같은 주변 환경의 요인으로 정확한 속도구간은 실제와 데이터가 다를 수 있다.

댐퍼시험기를 통한 데이터 분석은 댐퍼의 성능과 한계치, 댐퍼의 최대 감쇠력을 측정함으로써 한 방향 댐퍼의 제작, 설계, 특성 연구에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 이어 추가적으로 하중계 데이터의 표본화 시간(Sampling Time)이 충분하지 못하여 그래프 형상이 고르지 못하게 표현 되었고, 하중계(Load cell)의 아날로그 데이터(Analogue Data) 처리 속도를 높이기 위한 고속 아날로그 디지털 변환기(A/D converter)가 필요한 것으로 보인다.

한 방향 댐퍼를 설계하기 위해 다양한 형상을 여러 가지 조건으로 해석 하면서, 적합하지 않은 형상과 적합한 형상을 발견하게 되었다. 그 중 적합한 형상에서 Harpoon type piston head에서 인장과 압축 간 압력차이가 가장 크게 나타났다. 그 이유는 압축 시 중공형 원통 내부에서 발생하는 후류(Wake)의 크기가 인장 시 발생하는 것보다 상당히 많이 발생했기 때문이다. 반대로 적합하지 않는 형상인 Cone type, Umbrella type 모두 후류가 발생하지 않아 압축과 인장에서 압력 차이는 크게 나타나지 않았다.

체크밸브(Check valve)와 같은 기구를 사용하지 않고 피스톤 헤드 형상의 변화만을 통해 유체의 유동을 제어하려고 했던 이 논문이 한 방향 댐퍼 내 유체 거동에 대한 연구발전에 기여 할 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] Yang, G., Spencer, B. F. Jr., Carl, J. D., Sain, M. K., 2002, Large-Scale MR Fluid Dampers : Modeling and Dynamic Performance Considerations, Engineering Structures, 24:3 309-323.

[2] Chae, K. B., 2006, Experimental Study on the Reliability of the Compact Damper Hinge, Chosun University, MS Thesis.

[3] Merle, C. P., David, C. W., Bassem, H. R., 2015, MECHANICS of FLUIDS (4th Edition), UK, Hantee-Media, Korea.

[4] Lee, Y. L., 2016, Computational Fluid Engineering with ANSYS CFX Univ.of GoongJu Press, Korea.

[5] Joo, J. W., Kang, D. L., 1999, Strain Analysis and Calibration Test of Small Capacity Torque Sensor, Trans. Korean Soc. Mech. Eng., 162-A:3 382-391.