

항공기의 도어 댐퍼용 교축 오리피스의 설계 Design of Throttle Orifices for an Aircraft Door Damper

권용철 · 김종혁 · 홍예선 · 김상범

Y. C. Kwon, C. H. Kim, Y. S. Hong and S. B. Kim

접수일: 2012년 6월 28일, 수정일: 2012년 8월 23일, 게재확정일: 2012년 8월 29일

Key Words : Door damper, Damping orifice, Damping force, Discharge coefficient

Abstract: In this study the flow rate-to-pressure difference characteristics of short-tube type damping orifices for an aircraft door damper were investigated by CFD analyses and experiments. As the design parameters of the damping orifice its diameter, inlet and outlet angle, tube length and the viscosity of the working fluid were taken into consideration. The results showed that the discharge coefficient of the orifices are dependant on the inlet and outlet angle and the oil viscosity, while their length plays an little significant role. Although the short-tube type damping orifice was employed to induce a turbulent flow, their discharge coefficient decreases rapidly as the oil viscosity gets higher than 50mm²/s. Therefore, in order to determine the orifice size, satisfying the working temperature range of the door damper, the oil viscosity as well as the friction force on the damper piston should be kept within proper values. For the verification of the CFD analysis results the actual performance of a door damper was measured and compared with them.

기호 설명

- Q : flow rate, l/min
- Δp : pressure difference, bar
- α : discharge coefficient
- A_o : cross section area of damper orifice, mm^2
- A_p : effective cross section area of piston, mm^2
- F_d : damping force, N
- F_f : friction force of piston, N
- v : velocity of piston, mm/s
- ν : kinematic viscosity, mm^2/s
- ρ : oil density, kg/m^3
- s : specific gravity
- d : diameter of orifice, mm
- ℓ : length of orifice, mm
- θ : inlet/outlet angle of orifice, $^\circ$
- V : flow velocity at orifice section, mm/s

1. 서 론

항공기용 도어 댐퍼(door damper)는 정상 조건에서는 일반 도어 댐퍼와 유사한 기능을 발휘하면서 비상시에는 자체 동력으로 일정 시간 안에 출구를 개방하는 기능을 갖는다. 이 비상 작동은 일회에 한정되므로 압축 가스 등을 이용하여 구현할 수 있다.

Fig. 1은 본 논문의 연구 대상인 항공기용 도어 댐퍼의 구조를 보여 준다.

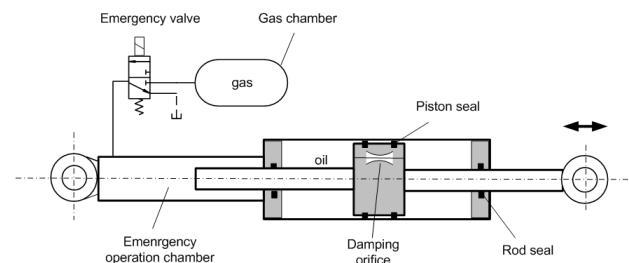


Fig. 1 Schematics of an aircraft door damper

댐퍼 기능은 양방향 로드(double rod)형 유압 피스톤에 오리피스를 장착함으로써 양방향으로 동일한 속도 대비 감쇠력 특성을 얻게 된다. 여기서 중요한 것은 사람이 가하는 외력의 크기와 문이 완전히 열

홍예선(책임저자) : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
 E-mail : yshong@kau.ac.kr, Tel : 02-300-0287
 권용철: 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부
 김종혁: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
 김상범: (주)한화 기계항공사업본부 항공우주/기계 연구소

리는 데 걸리는 시간이 특정 조건을 만족시켜야하는 것이다. 그리고 비상 작동 모드에서는 피스톤을 전진시키는 힘이 일정 수준으로 유지되면서 규정 시간 내에 출구를 완전 개방하는 것이 요구된다.

이러한 항공기용 도어 댐퍼가 충족시켜야하는 설계 조건들은 댐퍼 모드(mode)에서 외력 대비 행정(full stroke) 이동시간, 비상작동 모드에서의 최소 구동력과 행정 이동시간 및 완만한 가속 구간, 이러한 특성을 보장하는 허용 온도 범위 등이다.

도어 댐퍼의 감쇠력은 댐핑 오리피스스의 유량변화에 따른 압력차이 특성(이하 ‘유량-압력차 특성’)에 의해 결정된다. 여기서, 도어 댐퍼에 사용되는 오일의 점도는 온도의 영향을 받으므로 넓은 작동 온도 범위를 만족시키는 도어 댐퍼를 설계하려면 기본적으로 오일의 점도에 의해 압력 손실이 크게 변하지 않는 오리피스스의 형상을 설계하는 것이 중요하다. 그리고 피스톤에서는 댐핑 오리피스스의 압력 차이에 의한 감쇠력 외에도 실(seal)에서 발생하는 마찰력이 작용하므로 외력에 의해 피스톤이 이동하는 시간의 설계 조건을 충족시키려면 마찰력을 추가적으로 고려해야 한다.

본 논문에서는 상용 제품으로서 호환이 용이한 단관(short tube)형 교축 오리피스를 댐퍼에 적용하여 그 형상에 따라서 유량-압력차 특성이 오일의 점도에 의해 얼마나 변하는 지를 수치해석 프로그램으로 분석하였다. 이 결과를 근거로 댐핑 오리피스스의 크기를 기준으로 허용 온도 조건을 만족시키는 마찰력과 오일 점도 범위를 추정하였다. 이러한 추정 결과의 타당성을 검증하기 위해 유량-압력차 특성의 계산 결과를 바탕으로 예측한 댐퍼의 감쇠력-속도 특성을 실험에서 측정한 결과와 비교하였다.

2. 항공기용 도어 댐퍼의 이론 모델

도어 댐퍼는 사람의 힘으로 문을 열거나 닫을 때 피스톤이 전진, 또는 후진하여 피스톤의 속도에 비례하는 저항력을 발생시키는 것이 주된 기능이다. 항공기용 도어 댐퍼의 댐퍼 부분은 양방향 로드형 피스톤에 오리피스를 삽입함으로써 구현되고 감쇠력-피스톤 속도 특성은 오리피스스의 유량-압력차 특성에 의해서 결정된다.

오리피스에서의 유량과 압력차 간에는 다음과 같은 식이 성립된다[1, 2].

$$Q = \alpha A_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{1}$$

단관형 오리피스스의 유량계수 α 는 레이놀즈수가 충분히 크면 일정한 값을 가지나, 도어 댐퍼의 작동 조건에 따라서 레이놀즈수가 100 이하로 낮아지면 급격히 감소한다[1].

오리피스에서의 유량-압력차 특성이 주어지면 외력에 의해 댐퍼가 작동할 때 피스톤에 작용하는 힘 F_d 와 오리피스스의 압력차 Δp , 피스톤의 속도 v 와 오리피스 유량 Q 간에는 다음의 관계식이 성립된다.

$$F_d = F_f + (\Delta p)A_p \tag{2}$$

$$Q = A_p v \tag{3}$$

식(1)과 (3)을 식(2)에 대입하면 아래의 식이 유도된다.

$$F_d = F_f + \left[\frac{\rho A_p^3}{2\alpha^2 A_o^2} \right] v^2 \tag{4}$$

즉, 댐퍼의 감쇠력은 피스톤 속도의 제곱에 비례하여 증가한다.

3. 댐핑 오리피스스의 성능 분석

본 논문에서 댐퍼가 만족시켜야 하는 속도-감쇠력 특성의 제한 조건은 Fig. 2와 같이 설정되었다. 즉, 178N의 외력을 가했을 때 피스톤의 속도가 13.4 mm/s, 267N의 외력을 가했을 때 19 mm/s를 초과하면 안 되고 어느 경우든 5.7 mm/s보다 느려서는 안 된다. 이 조건은 영하 55°C부터 영상 85°C의 온도 범위에서 충족되어야 한다. 따라서 식(4)에서 피스톤의 면적과 마찰력, 오일 밀도가 먼저 정해지면 피스톤 속도와 감쇠력이 아래 그림의 조건을 만족시키도록 오리피스스의 유량계수를 고려하여 오리피스 크기를 결정해야 한다.

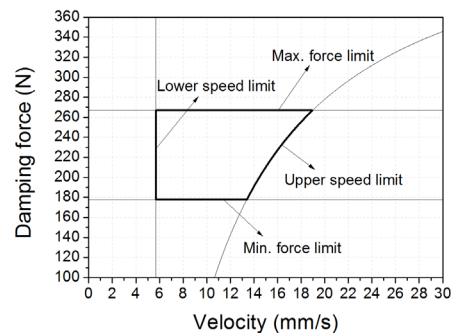


Fig. 2 Operation envelope for a door damper

일반 단관형 오리피스의 형상을 기반으로 댐핑 오리피스의 주요 설계 변수를 도출하면 Fig. 3과 같이 오리피스의 직경, 오리피스 입구와 출구의 경사각, 오리피스 길이 등이다.

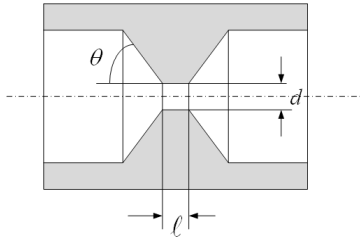


Fig. 3 Design parameters of a short-tube type orifice

오리피스의 길이, 오일의 점도에 따라서 short-tube형 오리피스의 유량-압력차 특성 즉, 유량계수가 어떻게 변하는 지에 대해서는 참고자료가 많이 있으나 오리피스 입구와 출구의 경사각을 고려한 정확한 수치를 확인하기 위해서는 실험적인 분석이 필요하다[2,3,4].

미지수 중에서 오리피스의 유량계수=0.6, 피스톤 마찰력=100N~150N으로 가정하고, 피스톤 직경=50mm, 로드 직경=16mm, 피스톤 행정=114mm, 오일의 비중 $s=0.87$, 동점성계수 $\nu=26 \text{ mm}^2/\text{s}$ (25°C, VG15), 오리피스의 수=2로 선정하였을 때 Fig. 2의 설계 기준을 만족시키는 오리피스의 직경 d 는 대략 1.1mm에서 1.5mm의 범위 안에 있는 것으로 추정할 수 있다.

수치해석 프로그램(CFX)을 이용하여 길이가 0.54mm인 직경 1.18mm, 1.4mm의 상용 오리피스에 대해 오리피스 입구와 출구의 경사각이 미치는 영향을 계산하면 Fig. 4와 같다. 이 계산 결과를 근거로 식(1)을 이용하여 유량계수를 확인하면 경사각이 90°일 때 0.8 내외, 45°일 때 0.9~0.95의 값으로서 일반적 가정치인 0.6보다 큰 것으로 나타난다. 경사각이 45°일 때 유량계수가 더 큰 것은 Fig. 5에서 보는 것과 같이 오리피스를 통과한 유체 기둥의 단면적이 90°일 때 보다 덜 수축되기 때문으로 추정된다.[1]

경사각이 90°인 오리피스의 길이를 0.54mm에서 1.5mm까지 변화시켰을 때 오리피스의 유량-압력차 특성에 미치는 영향은 Fig. 6과 같다. 이 현상은 경사각이 45°일 때에도 동일하게 나타난다. 오리피스의 길이가 짧을수록 점성마찰이 감소하여 유량이 미세하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 오리피스 길이를 0.54mm로 선정하였다.

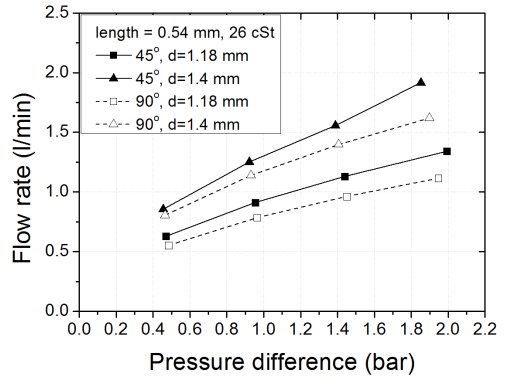
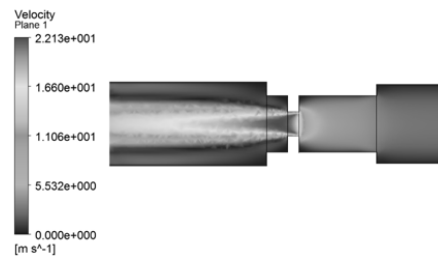
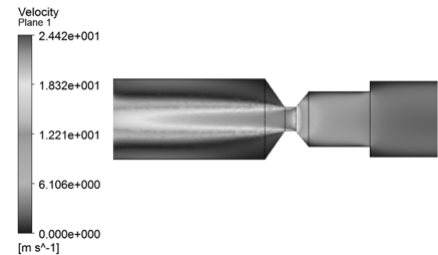


Fig. 4 Influence of orifice diameter on flow rate-to-pressure difference characteristics



(a) Inlet/outlet angle = 90°



(b) Inlet/outlet angle = 45°

Fig. 5 Velocity profile of orifice outlet with respect to inlet/outlet angle

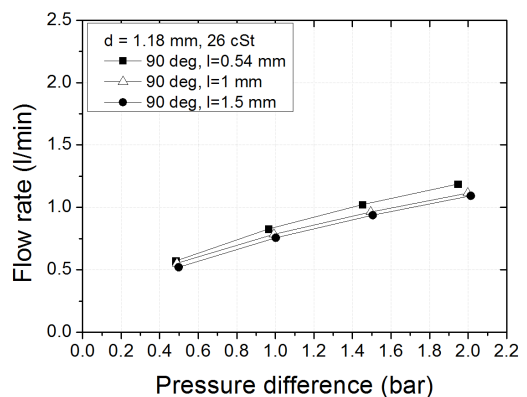


Fig. 6 Influence of orifice length on flow rate-to-pressure difference characteristics

오일의 점도와 오리피스를 통과하는 유속이 오리피스의 유량계수에 주는 영향을 총체적으로 파악하

기 위해 유량계수를 레이놀즈수에 대해 계산한 결과는 Fig. 7과 같다. 레이놀즈수는 아래와 같이 정의하였다. 즉,

$$Re = Vd/\nu \tag{5}$$

만일 댐퍼 오일의 최소 점도를 5mm²/s, 최대 점도를 400mm²/s로 가정하고[5], Fig. 2의 설계 조건을 고려하여 레이놀즈수의 범위를 대략적으로 계산하면 최하 10에서 최고 3,800이다. Fig.7에서는 특히 레이놀즈수가 400 이하의 범위에서 경사각이 45°인 경우가 90°인 경우보다 유량계수의 변화 폭이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 경사각이 90°인 오리피스를 채택하는 것이 오일 점도가 미치는 영향이 적다는 관점에서 유리하다.

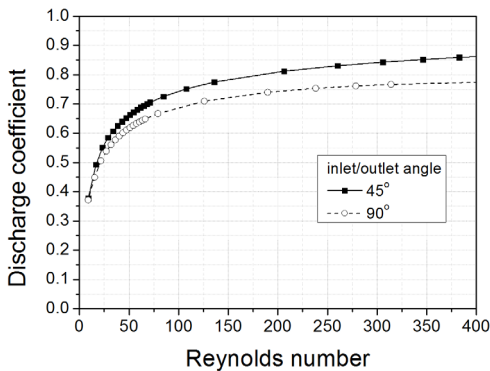


Fig. 7 Change of discharge coefficient with respect to Reynolds number

상온에서의 오일 점도를 26mm²/s로 가정하고, Fig. 2의 설계 조건을 고려하여 경사각이 90°인 오리피스의 레이놀즈수와 유량계수를 계산하면 최저 속도 5.7mm/s에서의 레이놀즈수는 170~210이고 이때의 유량계수는 약 0.74, 최대속도 19.8mm/s에서의 레이놀즈수는 610~720이고 이때의 유량계수는 0.78이다. 그리고 식(4)를 이용하여 오리피스 직경별로 $F_d = 267N$ 일 때 최고 속도 19mm/s를 초과하지 않을 마찰력의 최소치와 $F_d = 178N$ 일 때 최저 속도 5.7mm/s를 보장하는 마찰력의 최대치를 계산하면 Table 1과 같다.

Table 1 Limit conditions for friction force with respect to orifice diameter($\nu=26mm^2/s$)

Orifice diameter (mm)	Limit condition for Max. velocity	Limit condition for Min. velocity
1.18	$\geq 0N$	$\leq 148N$
1.3	$\geq 66N$	$\leq 158N$
1.4	$\geq 120N$	$\leq 163N$

피스톤의 마찰력은 댐퍼의 가공 상태에 따라서 달라지므로 이론적으로 추정하여 목표치를 정하는 것은 불가능하기 때문에 실험을 통한 확인이 필요하다.

4. 실험

CFD 해석 결과가 얼마나 정확한지를 확인하기 위해 본 논문에서는 실제 댐핑 오리피스에서의 유량-압력차를 측정하였으며 Fig. 8은 실험장치의 구성을 보여준다. 댐퍼의 피스톤을 고정된 상태에서 피스톤에 내장된 댐핑 오리피스로 공급되는 유량을 조절하기 위해 교축밸브를 사용하였고, 오리피스를 통과한 실제 유량을 유량 센서로 측정하였다. 오리피스 입구와 출구의 압력차를 측정하기 위해 각 포트에 압력 센서를 설치하였다.

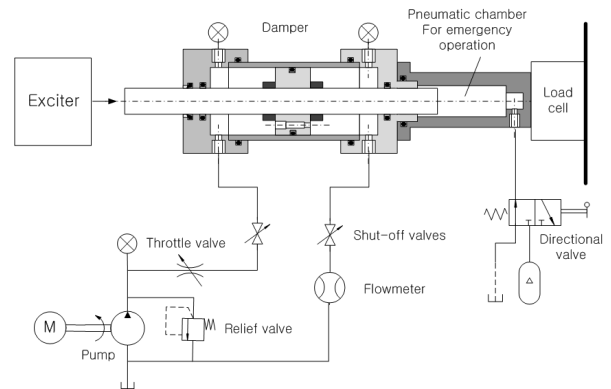


Fig. 8 Experimental setup for flow rate-to-pressure difference measurement

Fig. 9는 길이=0.54mm, 경사각=90°인 오리피스를 두 개씩 병렬로 피스톤에 설치하여 측정한 유량-압력차 특성과 Fig. 4의 결과를 환산한 특성을 비교한 것이다. 여기서 오리피스 직경은 1.18mm 또는 1.4mm이고 오일의 점도는 약 26mm²/s이다. 측정 결과가 계산 결과보다 작은 것을 볼 수 있는데, 이것은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 오리피스의 전후에 여과망이 내장되어 있어 추가적인 압력손실이 발생하기 때문인 것으로 추정된다[6]. 이 손실을 감안하면 수치 해석 결과는 신뢰할 만한 것으로 평가된다.

댐퍼의 오일 통로를 잠근 상태에서 주파수를 0.1Hz에서 1Hz까지 높이며 30mm의 진폭을 갖는 정현파로 댐퍼 피스톤을 가진했을 때 피스톤 변위-감쇠력 특성을 측정한 결과는 Fig. 11과 같다.

그림의 결과로부터 저마찰 실링을 사용하여 제작

된 댐퍼 피스톤의 마찰력이 약 100N임을 알 수 있고, 댐핑력과 피스톤 속도의 관계를 추출하여 그래프로 표시하면 Fig. 12와 같다.

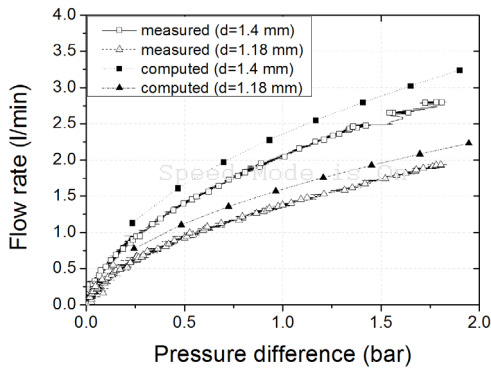


Fig. 9 Flow rate-to-pressure difference curves with orifice diameter changed

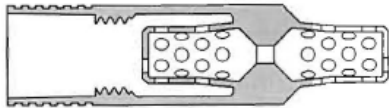
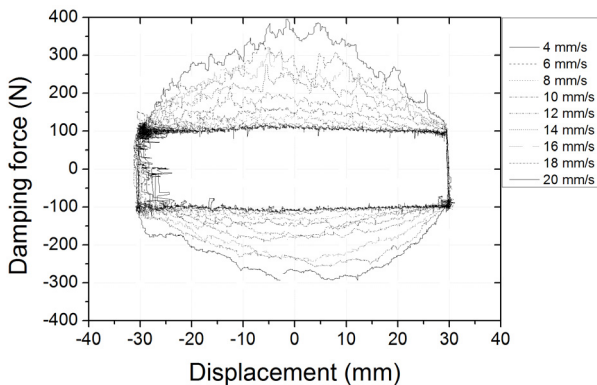
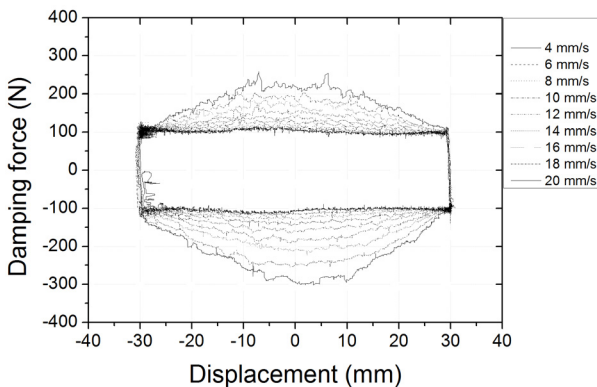


Fig. 10 Cross section view of damper orifice

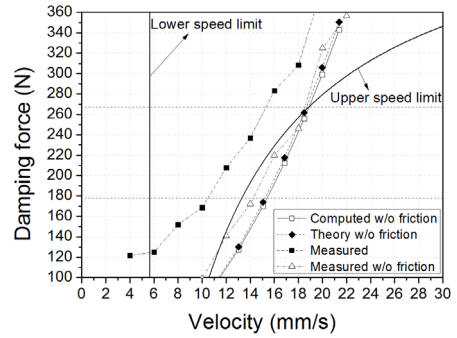


(a) Orifice diameter = 1.18mm

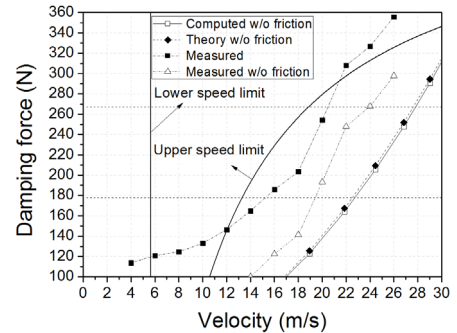


(b) Orifice diameter = 1.4mm

Fig. 11 Measured damping force-to-piston displacement curves($\nu=26\text{mm}^2/\text{s}$)



(a) Orifice diameter = 1.18mm



(b) Orifice diameter = 1.4mm

Fig. 12 Characteristics of damping force-to-piston velocity($\nu=26\text{mm}^2/\text{s}$)

오리피스 직경=1.18mm일 때에는 피스톤의 감쇠력-속도 곡선이 Fig. 2의 제한 조건을 모두 만족시킨다. 그러나 1.4mm일 때는 마찰력이 120N 이상 되어야 하나 100N에 불과하여 전체 감쇠력이 부족한 것을 알 수 있다.

감쇠력의 측정치에서 약 100N에 달하는 마찰력을 제외시킨 피스톤의 순수 감쇠력-속도 특성은 Fig. 4의 CFD 해석 결과를 이용한 계산값, 식(4)에 유량계수 0.78을 대입한 근사값과 거의 일치하였다[1]. CFD 해석을 통한 Fig. 7의 결과가 타당함을 근거로 하여 동점도계수가 $300\text{mm}^2/\text{s}$, $400\text{mm}^2/\text{s}$ 인 조건에서 오리피스 직경별로 최저 속도가 $5.7\text{mm}/\text{s}$ 보다 낮아지지 않는 마찰력의 허용한계를 계산한 결과는 Table 2와 같다. 반대로 동점도계수가 고온에서 $26\text{mm}^2/\text{s}$ 보다 낮아지는 경우는 유량계수에 변화가 없으므로 고려할 필요가 없다.

직경 1.18mm의 오리피스를 사용할 경우, 저온에서의 동점도계수가 최고 약 $400\text{mm}^2/\text{s}$ 인 오일을 사용하면 마찰력을 75N 이하로 줄여야 하는데 만일 피스톤 마찰력을 실험치와 유사한 95N보다 낮추는 것이 어려우면 동점도계수를 $300\text{mm}^2/\text{s}$ 로 제한해야 한다. 이때에는 유량계수가 약 0.45로 감소하여 $F_d=178\text{N}$ 일 때 $v=5.7\text{mm}/\text{s}$, $F_d=267\text{N}$ 일 때 $v=8.2\text{mm}/\text{s}$ 가 된다.

실제로 300mm²/s의 오일(25℃, VG100)을 사용한 실험 결과는 Fig. 13과 같다. 이론식으로 예측한 최대 마찰력보다 실제 마찰력이 5N 정도 크기 때문에 최저제한 속도에 조금 미달되는 것을 보여주고 있다.

오리피스 직경이 1.3mm인 경우에는 마찰력이 110N보다 작기만 하면, 오일의 동점도계수가 400mm²/s에 달하더라도 식(4)에 의해 $F_d=178N$ 일 때 $v=6.1mm/s$, $F_d=267N$ 일 때 $v=8.9mm/s$ 가 되어 Fig. 2의 속도 조건을 만족시킬 수 있음을 예측할 수 있다.

반면에 오리피스 직경이 1.4mm인 경우에는 피스톤 마찰력을 오히려 증가시켜 120N~125N의 범위에 있어야만 동점도계수가 5mm²/s~400mm²/s인 범위에서 사용이 가능하다. 그러나 최소 댐핑력과 마찰력의 차이가 불과 50N 정도로 감소하므로 마찰력을 증가시키는 것은 속도에 비례하는 감쇠 효과를 줄이는 단점이 있다.

Table 2 Limit conditions for friction force with respect to orifice diameter($\nu=300mm^2/s$ & $400mm^2/s$)

직경 (mm)	$\nu=300mm^2/s$ ($15 < Re < 27, \alpha = 0.45$)	$\nu=400mm^2/s$ ($12 < Re < 19, \alpha = 0.4$)
1.18	$\leq 95N$	$\leq 75N$
1.3	$\leq 125N$	$\leq 110N$
1.4	$\leq 138N$	$\leq 125N$

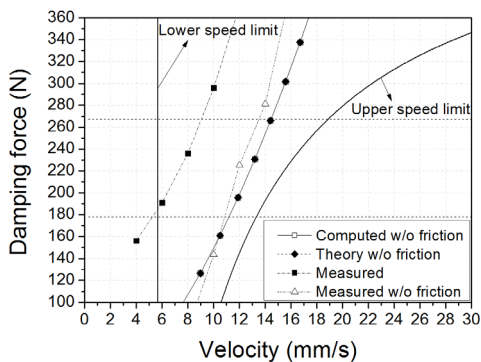


Fig. 13 Characteristics of damping force-to-piston velocity($\nu=300mm^2/s$)

5. 결론

항공기용 도어 댐퍼의 특성은 피스톤의 마찰력, 댐핑 오리피스의 형상, 오일의 점도에 의해 결정된다. 본 논문에서는 CFD 해석을 통해서 댐핑 오리피스의 형상, 오일의 점도가 유량-압력차 특성에 미치는 영

향을 분석하였는데, 난류를 형성하는 단관 형태의 댐핑 오리피스를 사용하여도 오일의 점도가 400mm²/s 이상이 되면 레이놀즈수가 20이하로 낮아져 오리피스의 유량계수가 약 50% 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 댐퍼의 작동온도 조건에 대한 설계 목표를 만족시키려면 오일의 최대 점도, 피스톤의 마찰력을 고려하여 댐핑 오리피스를 설계해야 한다. 오리피스의 설계 기준으로 사용된 CFD 해석 결과의 정확도를 검증하기 위해서 실제 댐퍼의 기본 특성을 측정하여 계산치와 비교한 결과 서로 잘 일치하였다.

본 연구에서는 댐핑 오리피스로서 단관 형태의 오리피스를 설계하여 설계 기준을 만족시킬 수 있었으나, 향후 날카로운 모서리를 가진 오리피스(sharp-edged orifice)를 적용하여 오일 점도의 영향을 거의 받지 않는 댐핑 오리피스의 설계를 추진할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 2011년도 항공우주부품기술개발사업으로 (주)한화에서 수행하는 “민항기용 도어 댐퍼 개발” 과제의 위탁연구로 수행되었음.

참고 문헌

- Galal Rabie, Fluid Power Engineering, McGraw, pp.20~150, 2007.
- 윤소남, 정황훈, 서정균, 함용범 “드레인 오리피스를 갖는 포핏 밸브의 상대 안정도에 관한 연구”, 유공압건설기계학회춘계학술회지, pp.12~17, 2010.
- Rui Cao, Yansheng Liu, Chaoyu Yan, "A criterion for flow mechanisms through vertical sharp-edged orifice and model for the orifice discharge coefficient", Petroleum Science Volume 8, Number 1 108-113 ISSN 1672-5107, pp.108~113, 2011.
- 신병수, 김남석, 이상규, 배용범, 금오현, “오리피스 유량계의 입구 속도 분포에 따른 유량 계측 왜곡 특성”, 한국전산유체공학회춘계학술회지, pp.596~600, 2011.
- George, E. Totten, Handbook of Hydraulic fluid technology, 3th Ed., John Wiley & Sons Inc., pp.305~338, 1992
- The Lee company, Technical hydraulic handbook, Release 10.3, pp.B-22~B-23, 2006