

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 40(12), 1080-1085(2012)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.12.1080>

민항기 door damper용 칼날형 댐핑 오리피스 설계

홍예선*, 권용철*, 김종혁*, 박설혜**, 박호열**, 김상범**

Design of Sharp-edged Type Damping Orifices for an Aircraft Door Damper

Yeh-Sun Hong*, Yong-Cheol Kwon*, Chong-Hyeok Kim*,
Seol-Hye Park**, Ho-Yeol Park** and Sang-Beom Kim**Korea Aerospace University Department of Aerospace & Mechanical Engineering*,
Hanwha Corporation Aerospace R&D center**

ABSTRACT

In this paper a sharp-edged type damping orifice for an aircraft door damper were designed, where the dynamic viscosity of working fluid were assumed to change up to 400cSt. The discharge coefficient of the damping orifice were investigated by CFD analyses and experiments. In particular, the influences of orifice diameter, edge angle, flow direction and the Reynolds number were taken into consideration. Based on this, it has been deduced how high Coulomb friction forces of damper seals is to be allowed to meet the performance criterion with respect to the orifice size.

초 록

본 논문에서는 작동유의 최대 동점성 계수가 400cSt까지 변하는 조건에서 항공기 도어 댐퍼용 칼날형 댐핑 오리피스를 설계하였다. 전산 유동 해석과 실험을 통하여 칼날 오리피스의 유량계수를 분석하였고, 오리피스의 크기와 칼날 각도, 유동방향, 레이놀즈수가 미치는 영향을 고려하였다. 이 결과를 바탕으로 오리피스의 크기에 따라 댐퍼의 성능 기준을 충족시키기 위해 제한해야 하는 댐퍼의 쿨롱 마찰력 범위를 유도하였다.

Key Words : Door damper(도어 댐퍼), Sharp edged orifice(칼날 오리피스), Discharge Coefficient(유량계수), Damping force(댐핑력), Friction force(마찰력)

1. 서 론

본 논문의 항공기용 도어 댐퍼(door damper)는 Fig. 1과 같이 양방향 로드형(double rod type) 유압 피스톤에 교축 오리피스를 장착함으로써 피스톤 속도에 비례하는 감쇠력 특성을 얻게 된다. 이 인과관계는 역으로 도어를 열고 닫

기 위해 댐퍼에 가해지는 외력이 클수록 댐퍼의 피스톤 속도가 높아지는 것으로 이해될 수도 있다. 그리고 비상 시에는 압축 가스를 이용하여 규정 시간 내에 출구를 자동으로 개방하는 기능이 요구된다.

이러한 항공기용 도어 댐퍼가 충족시켜야 하는 설계 조건들은 댐퍼 모드(mode)에서 외력 대비

† Received: June 28 2012, Accepted: November 16 2012

* Corresponding author, E-mail : yshong@kau.ac.ckr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

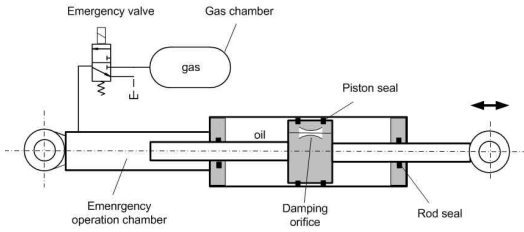


Fig. 1. Schematics of aircraft door damper

행정(full stroke) 이동시간, 비상작동 모드에서의 최소 구동력과 행정 이동시간, 그리고 이러한 특성을 보장하는 허용 온도 범위 등이다.

도어 댐퍼의 감쇠력은 교축 오리피스의 유량-압력차 특성에 의해 결정된다. 여기서, 도어 댐퍼에 사용되는 오일의 점도는 온도의 영향을 받으므로 넓은 작동 온도 범위에서 일정한 특성을 유지하는 도어 댐퍼를 설계하려면 기본적으로 오일의 점도에 의해 유량계수가 크게 변하지 않는 교축 오리피스를 사용하는 것이 필요하다. 그리고 피스톤의 실(seal)에서 발생하는 마찰력이 감쇠력에 비해 무시할 수 없는 크기를 가지므로 외력에 의해 피스톤이 이동하는 속도의 제한 조건을 충족시키려면 마찰력의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

본 논문에서는 칼날 오리피스(sharp edged orifice)를 사용함으로써 원리상 오일 점도의 영향을 배제하였으나 유량-압력차 특성이 오리피스 단면의 형상과 오일의 점도에 의해 실제로 얼마나 영향을 받는지를 전산유동 해석 프로그램으로 분석하였다. 이 결과를 근거로 온도 조건을 만족시키는 교축 오리피스의 크기, 마찰력, 오일 점도의 허용 범위를 추정하였다. 그리고 유량-압력차 특성의 계산 결과를 바탕으로 계산된 댐퍼의 감쇠력-속도 특성을 실험 모델의 측정 결과와 비교하였다.

II. 항공기 도어 댐퍼의 설계 조건

항공기용 도어 댐퍼의 주된 기능은 양방향 로드형 피스톤에 삽입된 교축 오리피스에 의해서 이루어지고 감쇠력-피스톤 속도 특성은 오리피스의 유량-압력차 특성에 의해서 결정된다.

단면적 A_o 의 오리피스에서 유량 Q 와 압력차 Δp 간에는 다음과 같은 식이 성립된다[1,2].

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

여기서 ρ 는 오일의 밀도, α 는 유량계수이다.

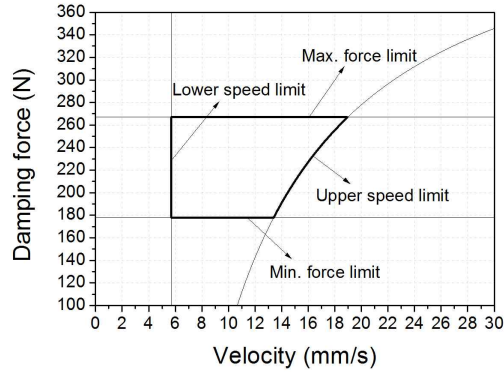


Fig. 2. Performance envelope for door damper

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

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

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

여기서 F_f 는 피스톤에 작용하는 마찰력이다. 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, 칼날 오리피스를 사용하는 댐퍼의 감쇠력은 엄밀히 표현하면 피스톤 속도의 제곱에 비례하여 증가한다.

본 논문에서 댐퍼가 만족시켜야 하는 속도-감쇠력 특성의 제한 조건은 Fig. 2와 같다. 즉, $F_d = 178N$ 일 때 $5.7mm/s \leq v \leq 13.4mm/s$, $F_d = 267N$ 일 때 $5.7mm/s \leq v \leq 19mm/s$ 이며, 이 조건은 $-55^\circ C \sim +85^\circ C$ 의 온도 범위에서 충족되어야 한다. 따라서 식(4)에서 피스톤의 면적과 마찰력, 오일 밀도가 먼저 정해지면 피스톤 속도와 감쇠력이 아래 Fig. 2의 조건을 만족시키도록 교축 오리피스의 유량계수 α 를 고려하여 단면적 A_o 를 결정해야 한다.

III. 칼날 오리피스의 유량계수 분석과 설계

칼날 오리피스의 형상을 결정하는 주요 설계 변수는 Fig. 3과 같이 오리피스 직경(d), 오리피

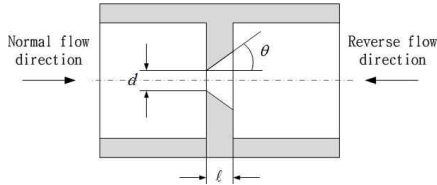


Fig. 3. Design parameters for sharp edged orifice

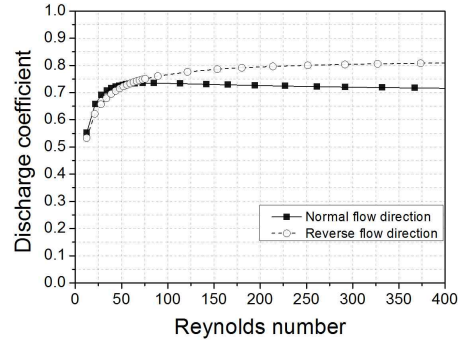
스 출구의 경사각(θ), 개구면적비 등이다. 오리피스 길이도 형상을 결정하는 인자이기는 하나 유량계수에는 큰 영향을 주지 않는 것을 선행연구를 통해 확인하였다[3]. 일반적으로 칼날 오리피스의 유량계수는 0.61로 가정하지만[2], 설계인자와 레이놀즈수에 따라서 오리피스의 유량계수가 얼마나 달라질 수 있는 지에 대해서는 정확한 분석이 필요하다. 또한, 칼날 오리피스는 오일 점도의 영향을 배제하려면 원칙적으로 정방향 흐름에서 사용되어야 하나 댐퍼는 양방향으로 작동하므로 역방향 흐름에서 오일 점도의 영향을 확인할 필요가 있다[4,7].

피스톤 직경=50mm, 로드 직경=16mm, 피스톤 행정=114mm, 오일의 비중=0.87, 유량계수=0.6, 오리피스의 수=2, 피스톤 마찰력=40N~60N으로 가정하였을 때 Fig. 2의 설계 기준을 만족시키는 오리피스의 직경은 1.0mm에서 1.2mm의 범위 안에 있는 것으로 추정할 수 있다. 전산유동 해석 프로그램(CFX)을 이용하여 $l=0.5\text{mm}$, $d=1.1\text{mm}$, θ 를 45° 또는 60° 로 가정한 오리피스의 유량계수를 레이놀즈수에 대해 계산하면 Fig. 4와 같다. 전산유동 해석 시의 mesh는 hexa 형태로서 element의 수는 22,401개이며, 경계 조건을 고려한 layer의 수는 5이다. 레이놀즈수는 아래와 같이 정의하였다[6]. 즉,

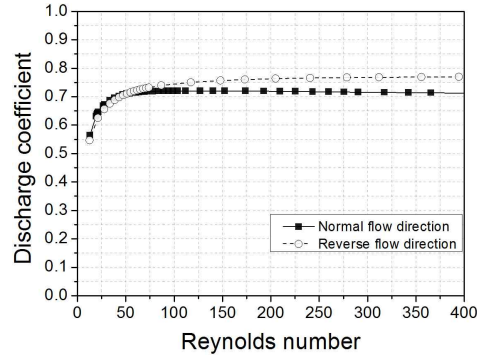
$$Re = (V \cdot d) / \nu \quad (5)$$

여기서 $V(\text{m/s})$ 는 오리피스 단면에서의 유속, $\nu(\text{cSt})$ 는 동점성계수이다.

그림에서 $\theta=45^\circ$ 인 경우 유체 흐름의 방향에 따라서 유량계수의 차이가 $\theta=60^\circ$ 인 경우보다 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 θ 를 60° 로 설계하는 것이 댐퍼의 작동 방향에 따라서 감쇠력이 변하지 않도록 하는데 유리하다. 레이놀즈수가 50이상이면 유량계수는 유동 방향에 따라 다르기는 하나 0.7~0.74사이의 값을 띠며, 일반적 가정치인 0.6 보다는 15% 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5의 오리피스 모델에서 보는 바와 같이 개구 면적비가 비교적 크기 때문인 것으로 판단



(a) $\theta=45^\circ$



(a) $\theta=60^\circ$

Fig. 4. Change of discharge coefficient w.r.t. Reynolds number

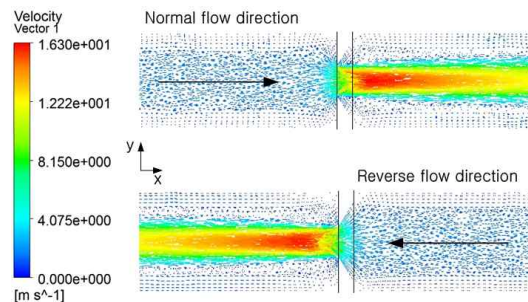


Fig. 5. Fluid velocity profile of sharp-edged orifice($Re=400$, $\nu=29\text{cSt}$, $\theta=60^\circ$)

된다. 그리고 $\theta=60^\circ$ 인 경우 유속의 분포 형태가 유체의 흐르는 방향에 따라 크게 변하지 않는 것을 그림의 결과에서 확인할 수 있다.

동점도계수, ν 가 20°C 에서 29cSt , -55°C 에서 400cSt 인 오일을 사용한다고 가정하고 20°C 에서 식(4)를 이용하여 $\theta=60^\circ$ 인 오리피스의 직경별로 $F_d=267\text{N}$ 일 때 최고 속도 19mm/s 를 초과하지 않을 마찰력의 최소치, $F_d=178\text{N}$ 일 때 최저 속도

Table 1. Limit conditions for friction force w.r.t orifice diameter($\nu=29cSt$)

Orifice size	1.0mm	1.1mm	1.2mm
Min. F_f for $v \leq 19$ mm/s @ $F_d=267N$	0N	0N	40N
Max. F_f for $5.7mm/s \leq v$ @ $F_d=178N$	115N	135N	145N
Re @ $v=5.7mm/s$	444	404	366

Table 2. Limit conditions for friction force w.r.t orifice diameter($\nu=400cSt$)

Orifice size	1.0mm	1.1mm	1.2mm
Min. F_f for $v \leq 19$ mm/s @ $F_d=267N$	0N	0N	40N
Max. F_f for $5.7mm/s \leq v$ @ $F_d=178N$	105N	125N	142N
Re @ $v=5.7mm/s$	31.7	29.7	26.7

5.7mm/s를 보장하는 마찰력의 최대치 그리고 최저속도에서의 레이놀즈수를 계산하면 Table 1 과 같다. 20°C보다 높은 온도에서는 레이놀즈수가 50이하로 낮아지지 않으므로 정방향 유량계수=0.71, 역방향 유량계수=0.75가 성립된다.

$\nu=400cSt$ 인 경우에 대한 동일한 계산 결과는 Table 2와 같다. 최저속도에서의 레이놀즈수가 50 이하이므로 이 경우에는 유량계수를 0.65를 적용하여 마찰력의 범위를 계산하였다. 최대 허용 마찰력이 Table 1보다 감소하였으나 그 차이는 9% 이내로 나타났다.

따라서 댐퍼의 실제 마찰력을 고려하여 Table 2를 기준으로 오리피스의 크기를 선정하면 목표하는 온도 조건에서 Fig. 2의 성능 조건을 만족시킬 수 있게 된다. 마찰력이 클수록 피스톤 속도에 비례하는 감쇠력의 비중이 감소하므로 마찰력은 작을수록 좋다고 볼 수 있다. 피스톤의 마찰력은 댐퍼의 가공 상태에 따라서 달라지므로 실제 댐퍼를 제작하여 확인하는 것이 필요하다.

IV. 실험

전산유동 해석 결과의 정확도를 확인하기 위해 본 논문에서는 실제 오리피스에서의 유량-압

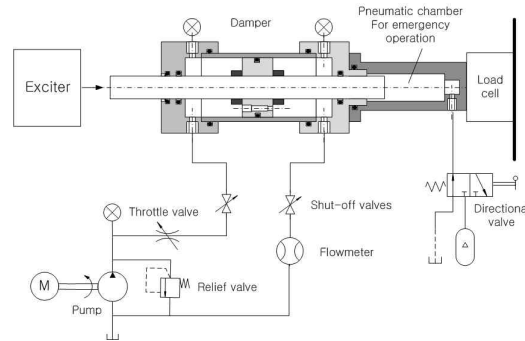


Fig. 6. Experimental setup for flow rate-to-pressure difference measurement on damping orifice

력차를 측정하였으며 Fig. 6은 실험장치의 구성을 보여준다. 댐퍼의 피스톤을 고정된 상태에서 피스톤에 내장된 교축 오리피스로 공급되는 유량을 조절하기 위해 유량제어밸브를 사용하였고, 오리피스를 통과한 실제 유량을 유량 센서로 측정하였다. 오리피스 입구와 출구의 압력차를 측정하기 위해 각 포트에 압력센서를 설치하였다[5].

Figure 7은 $l=0.5mm$, $d=1.1mm$, $\theta=60^\circ$ 인 오리피스 두 개를 병렬로 피스톤에 설치하여 측정된 유량-압력차 특성과 식(1)에 Fig. 4의 결과를 적용하여 계산된 결과를 비교한 것이다. 여기서 오일의 동점성계수가 29cSt 또는 300cSt인 두 가지 경우 모두 계산 결과가 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 오일의 동점성계수가 400cSt인 오일을 사용하지 않은 이유는 실험장치의 펌프 구동 동력이 부족하였기 때문이다.

댐퍼의 오일 통로를 잠근 상태에서 주파수를 0.1Hz에서 1Hz까지 높이며 30mm의 진폭을 갖는 정현파로 댐퍼 피스톤을 가진했을 때 피스톤 변위-감쇠력 특성을 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 그림의 결과로부터 저마찰 실링을 사용하여 제작된 댐퍼 피스톤의 마찰력이 약 40N임을 알 수 있다.

오일이 오리피스를 통과하는 방향 즉, 피스톤의 이동 방향을 기준으로 감쇠력과 피스톤 속도의 관계를 추출하여 오일 점도 별로 Fig. 2의 요구 성능기준과 함께 그래프로 표시하면 Fig. 9, Fig. 10과 같다. 실험 결과가 계산 결과와 잘 일치하므로 다음과 같은 추정이 가능하다. 즉, 마찰력이 40N에 불과하기 때문에 실험에서는 동점성계수가 300cSt인 오일을 사용하였으나 400cSt인 오일을 사용하는 경우에도 Table 2의 결과에 따르면 Fig. 2의 성능 조건을 충족시킬 수 있다.

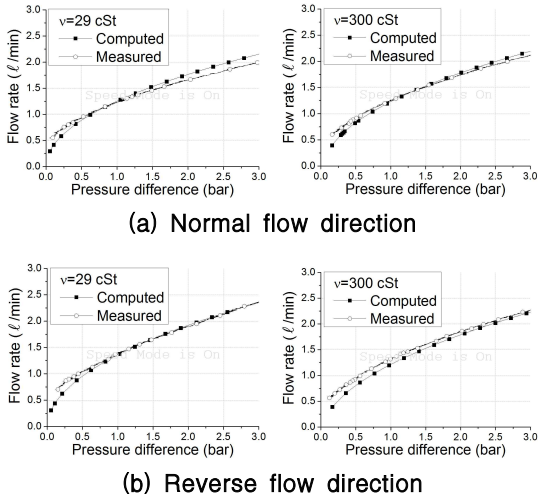


Fig. 7. Flow rate-to-pressure difference characteristics of sharp-edged orifice($\theta=60^\circ$)

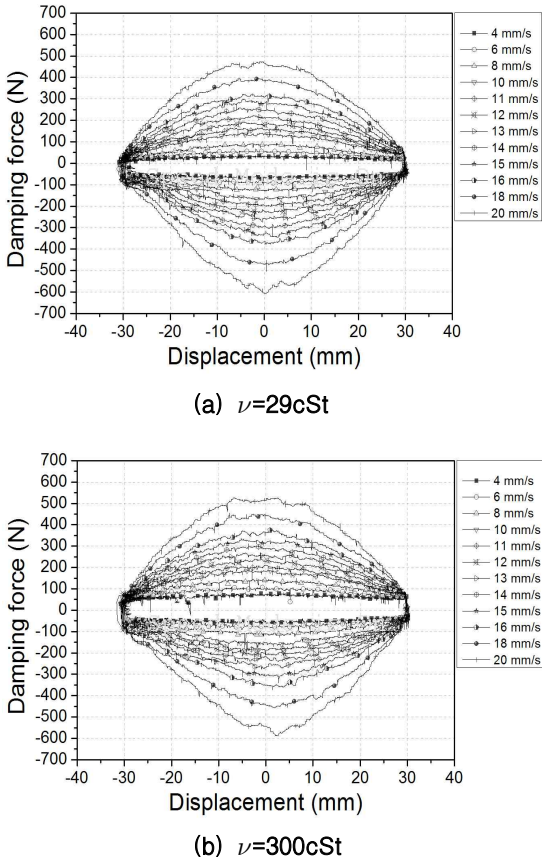
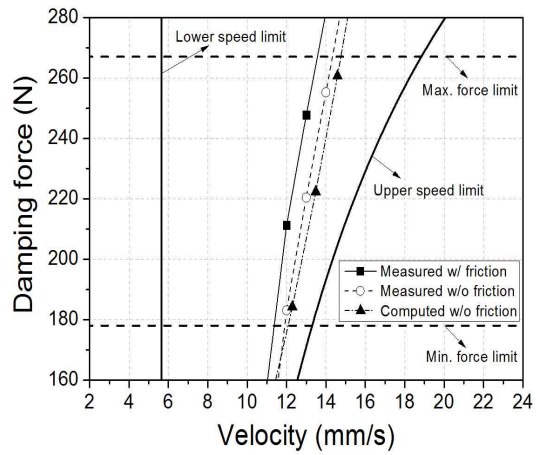


Fig. 8. Measured damping force-to-displacement characteristics

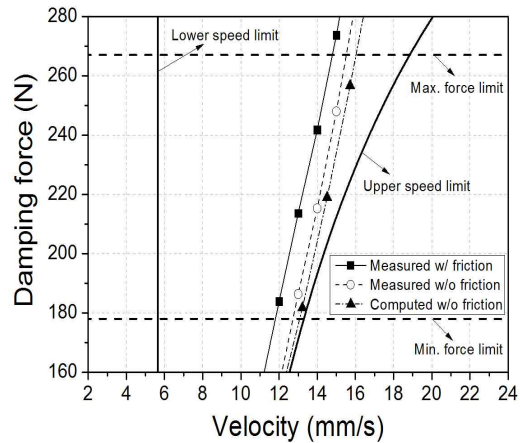
또한, 피스톤 실의 마찰력이 주변 온도의 변화에 의해 125N까지 증가하는 경우가 발생하기도 성능조건이 충족될 수 있다.

그리고 최대 마찰력이 105N이하이기만 하면 직경 1.0mm나 1.2mm의 오리피스도 성능기준을 만족시킬 수 있을 것이다. 이것은 오리피스 직경을 1.1mm로 설계하면 $\pm 0.1\text{mm}$ 의 가공 공차를 허용할 수 있음을 의미한다.

만일, 온도 변화에 따른 피스톤 실의 실제 마찰력 변화가 Table 2의 범위를 초과하면 오리피스 직경을 증가시키거나, 피스톤 마찰력이 일정 수준을 초과하지 않도록 피스톤 실과 마찰면의 특성을 개선하는 것이 필요하다.

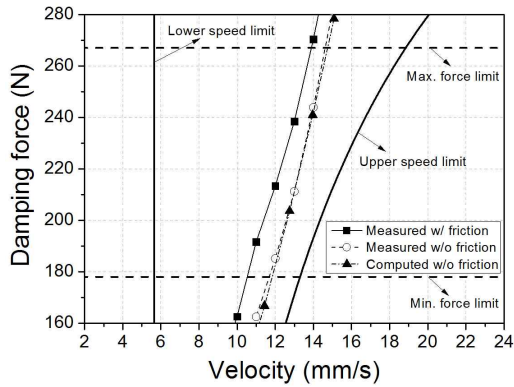


(a) Normal flow direction

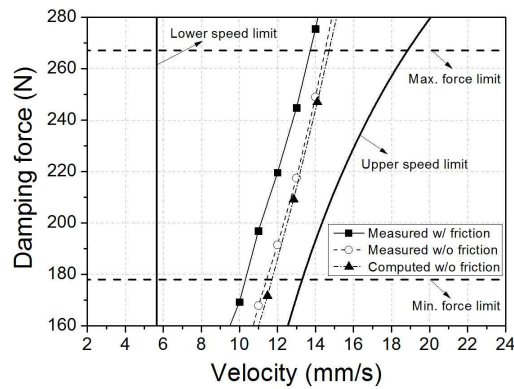


(b) Reverse flow direction

Fig. 9. Measured damping force-to-velocity characteristics of test damper with $\nu=29$ cSt



(a) Normal flow direction



(b) Reverse flow direction

Fig. 10. Measured damping force-to-velocity characteristics of test damper with $\nu=300\text{cSt}$

V. 결 론

항공기용 도어 댐퍼의 특성은 피스톤의 마찰력, 교축 오리피스의 형상, 오일의 점도에 의해 영향을 받는다. 본 논문에서는 전산유동 해석을 통해서 칼날 오리피스의 형상, 오일의 점도가 유량계수에 미치는 영향을 분석하였다.

유량계수가 오일의 점도에 의해 영향을 받지 않는 것으로 알려진 칼날 오리피스를 사용하여도 오일의 점도가 400cSt 이상이 되면 레이놀즈수가 약 30 정도로 낮아져 오리피스의 유량계수가 0.71에서 0.65로 감소하였다. 따라서 댐퍼의 작동 온도 조건에 대한 설계 목표를 만족시키려면 오일의 최대 점도, 피스톤의 마찰력을 고려하여 댐핑 오리피스를 설계해야 한다.

오리피스의 설계 기준으로 사용된 전산유동

해석 결과의 정확도를 검증하기 위해서 실제 댐퍼의 감쇠력-피스톤 속도 특성을 29cSt과 300cSt의 동점성계수 조건에서 측정하여 계산치와 비교한 결과, 서로 잘 일치하였다. 여기서 실험에 사용된 댐퍼의 마찰력은 약 40N에 불과하였다.

본 논문에서는 400cSt까지 증가하는 오일의 동점성계수를 고려하여 칼날형 댐핑 오리피스에서 발생하는 감쇠력을 예측하였고 이를 바탕으로 오리피스 직경의 크기에 따라 피스톤 마찰력의 허용 범위를 댐퍼의 설계 기준으로 도출하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 2012년도 항공우주부품기술개발사업의 지원을 받아 ㈜한화에서 수행하는 “민항기용 도어 댐퍼 개발” 과제의 위탁연구로 수행된 것임.

References

- 1) Galal Rabie, "Fluid Power Engineering", McGraw, 2007.
- 2) Herbert Merritt, "Hydraulic control systems", John Wiley & Sons Inc., pp.40~43, 1967.
- 3) Y. C. Kwon, C. H. Kim, Y. S. Hong, S. B. Kim, "Design of Throttle Orifices for an Aircraft Door Damper", Journal of Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 9, No. 3, pp. 23~28, 2012., DOI:http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2012.9.3.023.
- 4) 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, 2011.
- 5) B. S. Shin, N. S. Kim, S. K. Lee, O. H. Keum, "Distortion of Flow Measurement by Various Inlet Velocity Profile of Orifice Flowmeter", Proceeding of Korean Society for Computational Fluids Engineering spring Conference, pp. 596-600, 2011.
- 6) George, E. Totten, "Handbook of Hydraulic fluid technology", 3th Ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
- 7) The Lee company, "Technical hydraulic handbook", Release 10.3, 2006