

로터리 댐퍼의 토오크 특성에 관한 연구

A Study on the Torque Characteristics of Rotary Dampers

이춘태^{1*}Choon Tae Lee^{1*}

Received: 04 Nov. 2019, Revised: 20 Nov. 2019, Accepted: 28 Nov. 2019

Key Words : Rotary Damper(로터리댐퍼), Throttle(교축), Silicon Oil(실리콘 오일), Retard Chamber(지각실), Advance Chamber(진각실), Torque(토오크)

Abstract: Rotary dampers are damping devices which provide high resistance to shaft rotation. Rotary dampers are being used in various areas to enable the gentle opening and closing of the rotation motion relative to home furniture, industry machinery and automotive parts. Rotary dampers can be installed directly at the rotating point of a various part and can achieve uniform, gentle movement which increases quality and value of products. And generally, the silicone fluid is used as the damping medium because of its stable viscous properties. The movement of these little decelerators can be achieved with a high viscosity of working fluid and throttles installed in the body of the rotary damper. The damping force can be achieved clockwise, anti-clockwise or in both directions according to the structure of the orifices or throttles. In this paper, the torque performances of the rotary damper containing air in the working fluid were studied. For this purpose, the torque characteristic of the rotary damper according to the variation of various operating conditions such as clearance of leakage, dimensions of groove orifice, content ratio of air, etc., were simulated with AMESim software.

1. 서 론

로터리 댐퍼(rotary damper)는 회전축을 중심으로 회전하는 물체가 자중 또는 외부 하중에 의해 빠른 속도로 급격히 열리거나 닫히는 것을 방지하는 기능을 한다. 로터리 댐퍼는 물체의 회전에 따라 회전축과 일체로 구성된 베인(vane)이 회전하게 되며 베인의 회전에 의해 댐퍼 내부에 채워진 높은 점성의 실리콘은 댐퍼 내부의 좁은 유로인 오리피스스를 통하여 이동하게 된다. 오리피스스를 통과하는 실리콘의 저항에 의해 댐퍼 내부에 압력이 형성되고 이러한 압력은 물체의 움직임을 조절하는 토오크(torque)로서 작동하여 물체

의 움직임을 부드럽게 하는 역할을 한다. 특히, 운동의 끝부분에서 물체의 운동을 조절하여 부드러운 닫힘 동작에 많이 사용되고 있다. 이렇게 로터리 댐퍼를 장착함으로써 물체가 자중에 의해 급격히 떨어짐으로 발생하는 소음, 파손, 사용자 부상 등의 우려를 없앨 수 있기 때문에 각종 가정용 주방용품, 전자제품, 자동차 부품 및 산업용 기기 등에 광범위하게 사용되고 있다. 특히 자동차 분야에서는 시트 및 헤드레스트 등에 많이 사용되며 시트에 적용된 경우는 시트 댐퍼라고도 부른다. 이러한 로터리 댐퍼는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 물체의 회전축과 연결되어 직접 회전하는 로터(rotor), 로터와 일체로 조립 또는 가공된 베인(vane), 댐퍼 본체(housing)의 일부에 형성되어 베인의 끝단과 좁은 유로를 유지하는 고정자(stator), 고정자에 설치된 체크밸브(check valve), 베인 전, 후에 형성된 진각실(advance chamber), 지각실(retard chamber) 그리고 댐퍼의 저항 토오크를 조절하기 위해 형성된 그루브 오리피스(groove orifice) 등으로 구성되어 있다. 진각실과 지각실에는 높은 점성을 가진 실리콘 오일이 함유되어 있다.

* Corresponding author: charity@silla.ac.kr

1 Department of Intelligent Vehicle Engineering, Silla University, Pusan 46958, Korea

Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

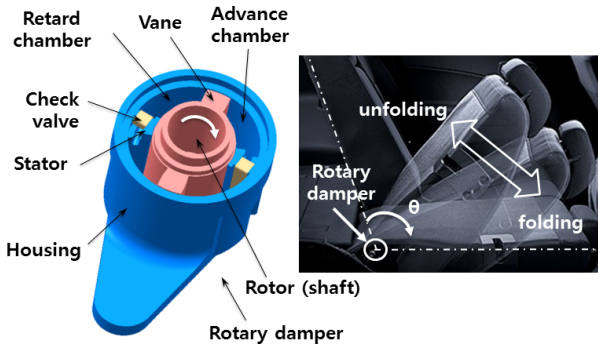


Fig. 1 Constitution and operating example of rotary damper in the vehicle application

로터리 댐퍼에 대한 연구는 국내외적으로 매우 부족한 실정이지만 최근 관련 연구들이 일부 수행되었다. 2009년 Zemmann¹⁾등에 의해 Fig. 2와 같이 감쇄비(damping rate)를 가변 시킬 수 있도록 교축의 직경을 변화시킬 수 있는 구조를 가진 실리콘이 충전된 로터리 댐퍼에 대한 실험적 연구를 진행하였으나 본 연구에서와 같은 수학적 모델이나 해석적 모델은 제시되지 않았다. 국내에서는 하이브리드 댐퍼²⁾와 MR 댐퍼³⁾와 같은 직선 운동형 댐퍼를 대상으로 한 연구들이 주로 진행되었고, 회전형 댐퍼에 대해서는 최근 자동차용 시트댐퍼의 주요 설계변수 변동에 따른 토오크 특성 변화에 대한 연구⁴⁾가 진행되었다.

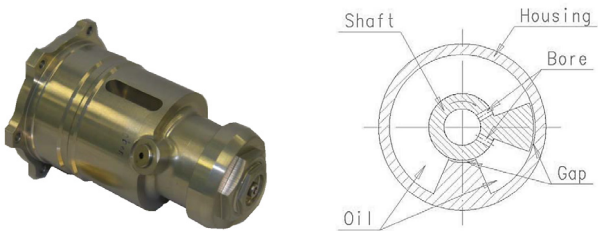


Fig. 2 Schematics of adjustable large range rotary deployment damper

본 논문에서는 이러한 기존 연구를 바탕으로 실리콘 작동유에 포함된 공기함유율을 고려하여 공기함유율이 로터리 댐퍼의 토오크 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 로터리 댐퍼의 누설특성이 실제 제품에서의 누설 형상과 유사하도록 사각형 오리피스로 누설 모델을 사용하고 세분화된 누설경로를 제시하여 누설에 대한 정확한 해석을 수행하였다. 또한, 로터리 댐퍼의 작동속도와 같은 외부 작동조건이 토오크 특성에 미치는 영향 등에 대한 연구도 진행하였다.

2. 로터리 댐퍼의 토오크 해석

연속방정식은 물리량의 국소적 보존에 관한 법칙으로, 어떤 체적을 가진 공간에서의 물리량의 변화는 그 표면을 통과하는 순속(net flux)의 합과 같고 물리량의 총량뿐만 아니라 국소적으로도 물리량이 보존되어야 한다는 것을 의미한다. 유체운동에서 압축성과 체적변화를 고려한 연속방정식⁵⁾은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\frac{V}{K} \frac{dP}{dt} + K_e \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (1)$$

식 (1)에서 V 는 체적, K 는 유체의 체적탄성계수를 나타낸다. 또한, K_e 는 재료의 탄성계수, P 는 압력, Q_{in} 과 Q_{out} 은 체적으로 유입 또는 유출되는 유량을 의미한다. 여기서 소재의 변형에 의한 체적변화를 나타내는 좌측의 두 번째 항을 무시하면, 체적으로 유입되는 순유량(net flow)은 압력 변화에 의한 압축성 유량과 체적 내부 물체의 운동에 의한 체적 변화량을 합한 것과 같음을 의미한다. 그러므로 Fig. 3에 표시한 진각실(advance chamber)에서의 연속방정식은 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dP_a}{dt} = \frac{K}{V_a} \left(\frac{dV_a}{dt} - Q_l \right) \quad (2)$$

여기서, V_a 는 진각실 체적, P_a 는 진각실 압력, Q_l 은 진각실에서 지각실로 빠져나가는 유량을 나타낸다. Q_l 은 로터리 댐퍼의 벽면 또는 밀면에 형성된 그루브 형상의 교축을 통과하는 유량 Q_{l1} , 본체의 고정자에 설치된 체크밸브를 통한 유량 Q_{l2} , 베인 끝과 본체 접촉면에서의 누설 및 고정자와 로터의 접촉면에서의 누설 Q_{l3} 그리고 본체 커버와 베인 틈새 사이의 누설 Q_{l4} 등으로 구성되어 있다. 단, 고정자에 설치된 체크밸브는 댐퍼가 접히는 동작에서는 닫혀 있고, 댐퍼가 펼쳐지는 동작에서만 댐퍼가 저항 없이 열리도록 하는 역할을 하므로 본 연구의 관심 영역인 닫히는 동작에서의 유량 Q_{l2} 는 무시한다. 또한, 이와 같은 방법으로 지각실(retard chamber)의 연속방정식은 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{K}{V_r} \left(-\frac{dV_r}{dt} + Q_l \right) \quad (3)$$

여기서, V_r 과 P_r 은 지각실의 체적과 압력을 나타낸다.

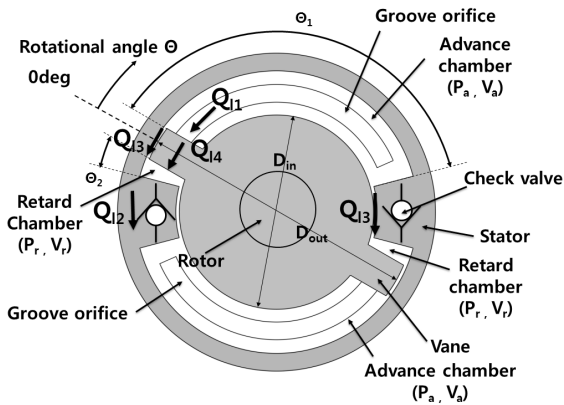


Fig. 3 Schematic of a rotary damper

그리고 실제 로터리 댐퍼 작동유에는 항상 얼마간의 공기를 포함하게 된다. 이러한 공기는 작동유에 용해되어 있던지 공기방울 형태로 존재하고 공기함유율(air/gas content)은 다음 식으로 정의한다.

$$air/gas\ content = \frac{V_{air/gas}}{V_{air/gas} + V_{liq}} \quad (4)$$

여기서, V_{liq} 는 0°C 대기압에서의 작동유의 체적, $V_{air/gas}$ 는 0°C 대기압에서의 공기의 체적이다. 또한 회전각도 θ 일 경우의 진각실과 지각실의 체적 V_a 와 V_r 은 다음과 같이 주어진다.

$$V_a = V_1 + \frac{L}{8}(D_{out}^2 - D_{in}^2)(\theta_1 - \theta) \quad (5)$$

$$V_r = V_2 + \frac{L}{8}(D_{out}^2 - D_{in}^2)(\theta_2 + \theta) \quad (6)$$

여기서, V_1 과 V_2 는 진각실과 지각실의 사체적 (dead volume), D_{out} 과 D_{in} 은 베인의 외경과 내경, L 은 베인의 축방향 길이이다. 그리고 θ_1 과 θ_2 는 진각실과 지각실에서의 각도 폭(angle width)을 나타낸다. 각도 폭은 스테이터와 베인 사이의 상대변위가 0일 때의 값 즉, 로터리 댐퍼 초기 장착 상태에서의 각도이다. 그리고, 진각실과 지각실의 압력차에 의해 발생하는 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T = (P_a - P_r) \frac{L}{8}(D_{out}^2 - D_{in}^2)n \quad (7)$$

여기서, n 은 베인의 총 개수를 나타낸다.

3. 로터리 댐퍼의 토크 특성 해석결과

아래의 Fig. 4에 로터리 댐퍼의 토크 특성 해석을 위해 제안된 해석 모델을 나타내었다. 해석은 최근 유공압시스템 해석 및 설계에 널리 사용되는 상용 소프트웨어인 SIEMENS사의 AMESim⁶⁾을 사용하여 수행하였다. 해석 모델에는 로터리 댐퍼 본체를 포함하여 그루브 오리피스 등의 주요 부품에 대한 모델링이 포함되어 있다. 그림에서와 같이 베인 회전각도에 따른 오리피스 개도를 데이터로 지정할 수 있는 모듈을 이용하여 그루브 오리피스를 통한 유량 Q_{11} 을 모델링하였다. 또한, 그림에서 a와 b는 상, 하 커버와 베인의 틈새를 통한 누설 Q_{14} 를, c와 d는 댐퍼 벽면과 베인 끝단 사이의 틈새를 통한 누설 Q_{13} 를 모델링하였다.

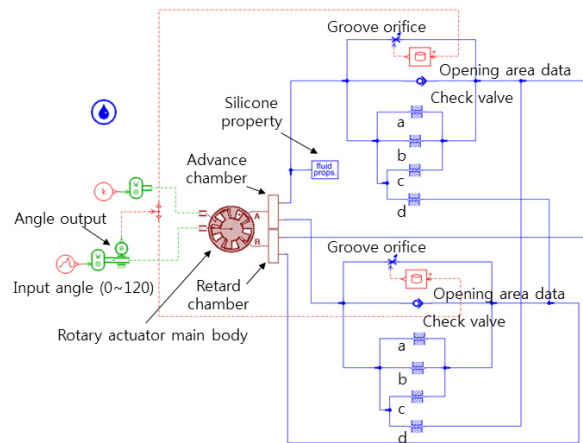


Fig. 4 Simulation model of rotary damper using AMESim

시뮬레이션에 사용한 주요 물성치를 Table 1에 나타내었다. 여기서, 그루브 오리피스는 사각형 오리피스를 사용하였고 Fig. 5와 같이 0°~60°에서는 최대 면적을 가지고 60°~120°에서는 직선적으로 감소하는 형상을 사용하였다. 또한 베인과 벽면 및 커버와의 틈새는 Fig. 6과 같은 사각 형상의 오리피스를 사용하였으며 시뮬레이션에 사용한 오리피스의 폭 w , 틈새 간격 δ , 틈새의 길이 h 는 그림에 표시된 바와 같다. Fig. 6에 나타낸 a~d는 Fig. 4에 표시한 오리피스를 나타낸다. 시뮬레이션은 0°~120°까지 베인을 10deg/sec의 일정 속도로 회전시켜 로터리 댐퍼 내부의 압력, 유량, 토크 등을 계산하였다.

Table 1 Simulation parameters

Parameter		value
Vane of rotor	Outer diameter	35mm
	Inner diameter	22mm
	Length	33mm
Dead volume	Advance chamber	10mm ³
	Retard chamber	10mm ³
Angle width	Retard chamber θ_2	0deg
	Advance chamber θ_1	120deg
Groove orifice	Width	3mm
	Maximum depth	1mm
Oil	Type	Silicon oil
	Density	968kg/m ³
	Absolute viscosity	100,000cP
	Bulk modulus of elasticity	10,500bar

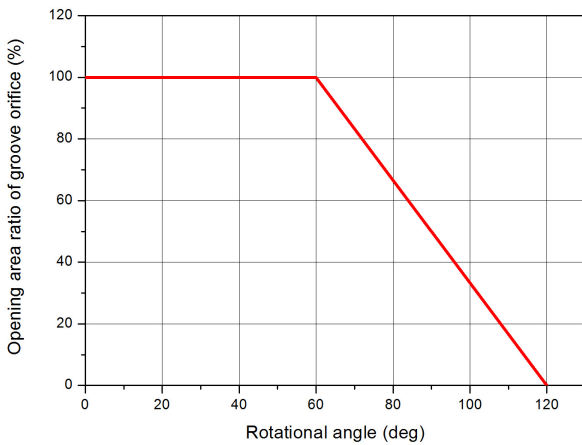


Fig. 5 Opening area ratio of groove orifice with rotational angle

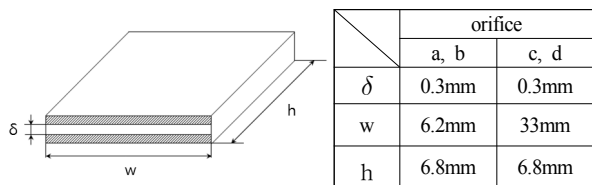


Fig. 6 Dimensions of rectangular orifice

Fig. 7에 실리콘 내의 공기함유율이 10%인 경우에 대한 토오크 특성을 나타내었다. 그림에서와 같이 초기 회전각도 약 24°까지 작동유체에 포함된 공기에 의해 영향으로 토오크 생성이 지연됨을 알 수 있다. 또한 0° 근방에서 지각실의 압력이 회전과 동시에 부압(negative pressure)으로 됨에 따라 초기 토오크 값이 나타난다. 그리고 회전각도 60°까지는 그루브 오리피스의 최대 단면적을 유지하는 구간이므로 저토오크 영역을 형성하고, 이후에는 그루브 오리피스의 단면

적이 선형적으로 감소하므로 토오크도 회전 각도와 함께 증가하는 고토오크 영역 특성을 나타내며 회전의 끝 부분에서 최대 토오크가 된다. Fig. 8은 작동유체 속의 공기함유량에 따른 초기 토오크 지연 특성을 나타낸다. 그림에서와 같이 공기함유량에 비례하여 토오크 지연 구간이 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

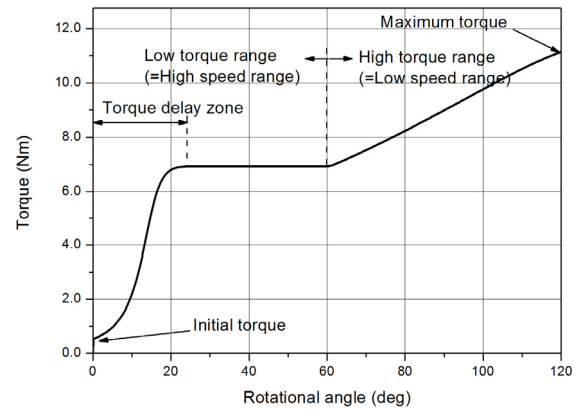


Fig. 7 Torque characteristics of rotary damper

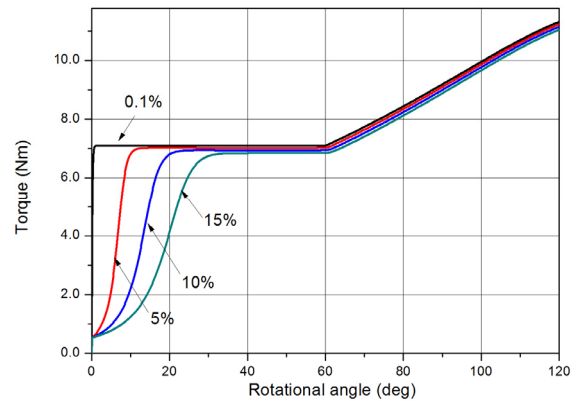


Fig. 8 Torque characteristics according to the variations of air/gas content

Fig. 9와 Fig. 10에는 그루브 오리피스의 단면적 변화와 베인과 댐퍼 벽면 사이의 틈새에 의한 토오크 변화 특성을 나타내었다. 그림에서와 같이 그루브 오리피스의 단면적 변화에 따른 토오크의 변화는 60° 이전의 저토오크 영역에서의 토오크 크기에 영향을 미치고 최대 토오크에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 베인과 댐퍼 벽면 사이의 틈새에 의한 토오크 변화는 전체 회전각도 영역에 걸쳐 큰 영향을 미치며, 작은 변화에도 매우 큰 변동을 보임을 알 수 있다. 그러므로 베인과 댐퍼 벽면 사이의 틈새는 토오크 특성에 많은 영향을 미치므로 제품생산 시, 철저한 관리가 중요함을 알 수 있다.

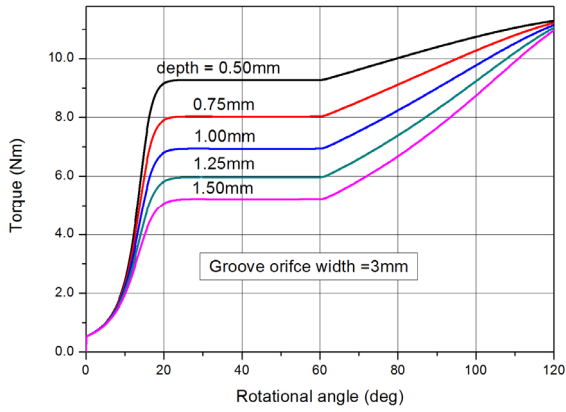


Fig. 9 Torque characteristics according to the variations of groove orifice area

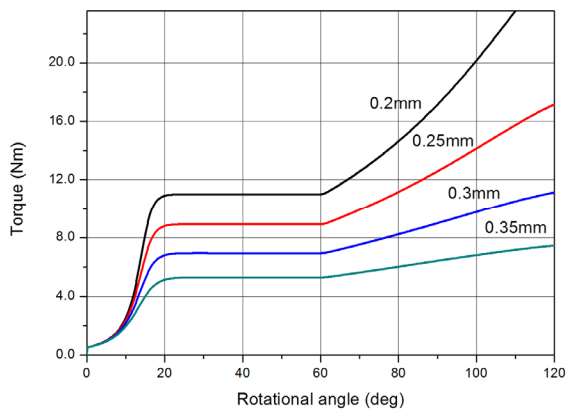


Fig. 10 Torque characteristics according to the variations of wall clearance

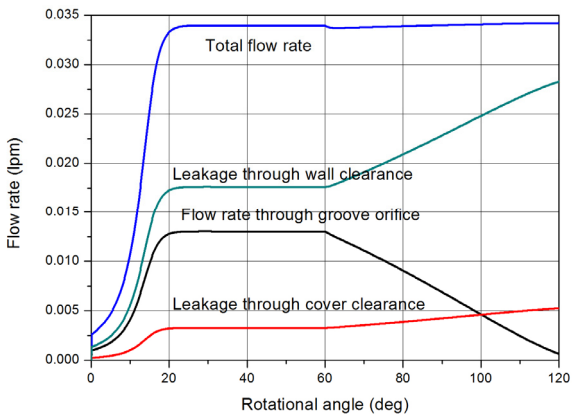


Fig. 11 Flow rate characteristic with rotational angle of rotary damper

Fig. 11과 Fig. 12에는 회전각도에 따른 로터리 댐퍼 내부의 유량과 압력변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 로터리 댐퍼를 통과하는 유량의 크기는 베인과 벽면 사이의 틈새를 통한 유량, 그루브 오리피스를 통한 유량 그리고 댐퍼 커버와 베인 사이의 틈새를 통한

유량 순으로 나타났다. 저토크 영역 이후에는 그루브 오리피스를 통과하는 유량은 감소하는 반면, 진각실의 압력 증가에 의한 나머지 두 개의 유량은 증가함을 알 수 있다. 그리고 전체유량은 공기함유량의 영향을 받는 초기 회전영역을 제외하고는 회전속도가 일정한 경우에는 거의 일정함을 알 수 있다. 진각실의 압력은 초기압력 0°에서 시작하여 작동유에 포함된 공기의 영향에 의해 압력 형성이 지연되고, 압력 지연 이후부터 60°까지는 거의 일정한 압력을 유지한다. 60° 이후는 글루브 단면적의 감소에 따라 압력이 증가하게 된다. 진각실의 압력은 전체 회전 각도에 걸쳐 부압을 나타내며 초기에 최대 부압을 나타내고 회전각도의 증가에 따라 부압이 조금씩 감소함을 알 수 있다. Fig. 13에는 댐퍼의 회전속도에 따른 토크 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 댐퍼 회전속도와 최대 토크는 거의 비례적인 관계를 가짐을 알 수 있다. 또한 댐퍼의 회전속도가 증가함에 따라서 저토크 영역에서의 토크 값은 비례적으로 증가하지만, 토크 지연 구간은 비례적으로 감소함을 알 수 있다.

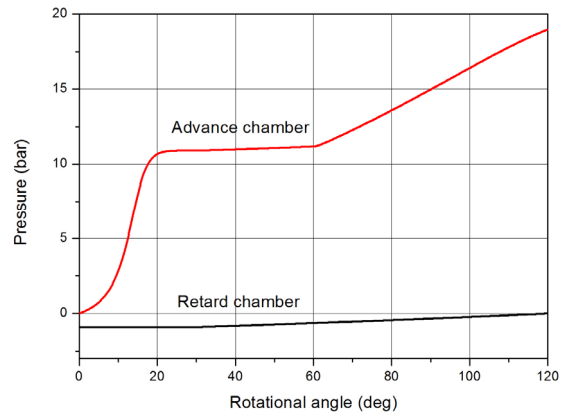


Fig. 12 Pressure characteristic with rotational angle of rotary damper

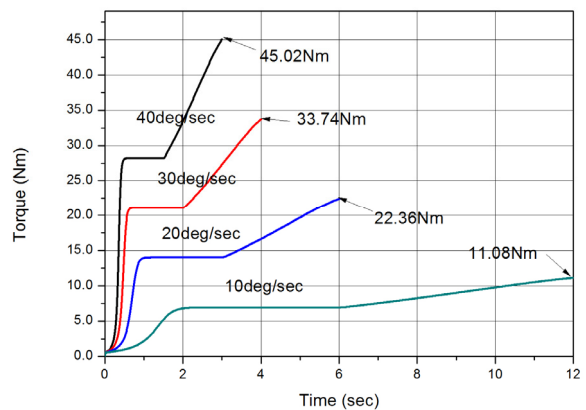


Fig. 13 Torque characteristics according to the variations of operating velocity

4. 결 론

이상과 같이 로터리 댐퍼의 토오크 특성에 관한 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 작동유체의 공기함유량에 따른 초기 토오크 지연 구간이 비례적으로 증가한다.
- 2) 그루브 오리피스스의 단면적 변화는 저토오크 영역에서의 토오크 크기에 영향을 미치고 최대 토오크에는 거의 영향을 미치지 않는다.
- 3) 베인과 댐퍼 벽면 사이의 간격에 의한 토오크 변화는 전체 회전각도 영역에 걸쳐 토오크에 큰 영향을 미치며 작은 변화에도 매우 큰 변동을 보였다.

References

- 1) W. Mitter et al., "Adjustable Large Range Rotary Deployment Damper", Proceedings of The 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium - ESMATS 2009, 2009.
- 2) C. H. Jin, Y. W. Yoon and J. H. Lee, "Development and Evaluation of a Hybrid Damper for Semi-active Suspension", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.1, pp.38-49, 2018.
- 3) M. S. Chang et al., "A Study of the Hydraulic Circuit Model for a Magnetorheological Damper Analysis", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.1, pp.8-13, 2017.
- 4) C. T. Lee, "Study on the Damping Mechanism of an Hydraulic-Type Automotive-Seat Damper", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.4, pp.1-6, 2016.
- 5) H. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons Inc., New York, 1967.
- 6) LMS Imagine Lab, AMESim User Manual Rev 17