



최적의 밀폐 성능 확보를 위한 수밀 댐퍼의 고무 오링 물림량 평가

정우영 · 한승훈 · 장지성[†]
(부경대학교)

Evaluation of Elastomeric O-ring Bite Amount of Watertight Damper for Optimum Sealing Performance

Woo-Young CHUNG · Seung-Hun HAN · Ji-Seong JANG[†]
(Pukyong National University)

Abstract

O-ring, one of the key component of watertight damper, is analyzed for contact and tensile stresses to ensure optimal sealing performance. The watertight damper consists of a disk, a body, a stem and an O-ring. The material of the O-ring that used in this test is Nitrile-butadiene rubber(NBR) with a Shore-A strength of 70 considering Mooney-rivlin constants. First of all, the amount of bite of disks is displaced from 1.0mm to 3.5mm. These are necessary to obtain the optimal contact and tensile stresses depending on the amount of bite. Based on the safety factors obtained by using the measured contact and tensile stresses, we select the amount of bite that will give the optimal sealing performance.

Key words : Sealing performance, Watertight damper, Nitrile-butadiene rubber, Mooney-rivlin constants, Safety factor

I. 서론

댐퍼에서 디스크 작동 시, 오링(O-ring)은 디스크와 바디의 기계적 마모를 경감시킨다. 또한 접촉면과의 압착에 의해 생기는 오링의 반발탄성에 의해 밀폐력이 유지되므로 오링은 유체의 누설을 방지하여 밸브의 밀폐 성능을 결정하는 매우 중요한 부품 중 하나이다.

오링의 중요성을 간과한 사고의 예로는 감속재 펌프 축 밀봉장치 내 오링의 설비 문제 및 파손으로 발생한 1999년 경주 월성원전 3호기 중수 누설 사고, 고무 오링의 저온에서의 복원 기능

상실로 인한 1986년 미국 우주왕복선 챌린저호의 폭발 사고 등이 있다. 이에 각 나라에서는 오링의 중요성을 인지하여 여러 연구 기관들을 중심으로 오링의 밀폐 성능에 대한 연구를 수행하여 왔다(Lindley, 1967; Leachy, 1971; Ebisu, 1983; Yokoyama, 1998).

수밀 댐퍼(Han, 2016)는 정상시에는 해당 구역의 통풍을 위해 사용되며, 선체 외벽이 손상을 받아 불가항적인 사고가 일어날 경우, 선체 내 해수 유입을 방지하여 선체침몰을 막는 역할을 한다. 수밀 댐퍼의 부속품 중 하나인 오링의 설계가 제대로 이루어지지 않는 경우, 댐퍼에 기계

[†] Corresponding author : 051-629-6196, jangjs@pknu.ac.kr

* 이 논문은 지역주력산업육성(R&D) 기술개발사업(과제번호 : R0004946)의 연구지원에 의해 연구되었음.

적 마모 및 누수 등의 큰 문제가 발생하며 그로 인해 밀폐 성능이 좋지 않게 되는데 이는 선체의 침몰 가능성이 높아짐을 의미한다.

오링의 밀폐 성능은 일반적으로 접촉 응력과 작용 압력의 비로 안전계수를 계산하여 평가된다. 또한 오링은 디스크와 오링의 접촉 부위에서 등가응력이 인장응력보다 작아야 파괴가 일어나지 않는다. 이를 위해 니트릴-부타디엔(NBR)을 재료로 사용한 shore-A 강도가 70인 고무 오링을 설계하여 분석하였으며, 고무 오링의 물림량에 따른 접촉 응력 및 등가 응력을 구하여 적정 물림량을 선정하였다.

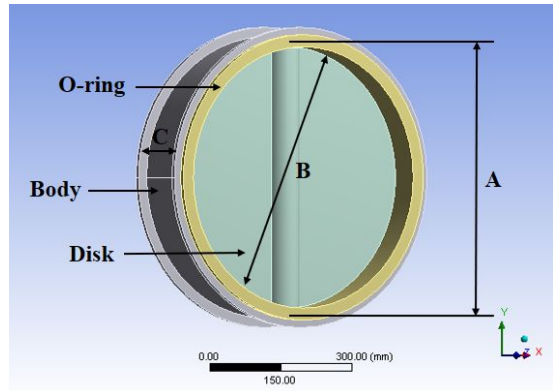
II. 수밀댐퍼 모델링

해석 대상의 형상 모델링은 3D CAD 설계 소프트웨어인 Solidworks를 사용하였다. 수밀 댐퍼는 바디, 디스크 및 오링으로 구성되며, 본 논문에서는 3가지 타입의 수밀댐퍼(Han, 2016)를 대상으로 연구를 진행하였다.

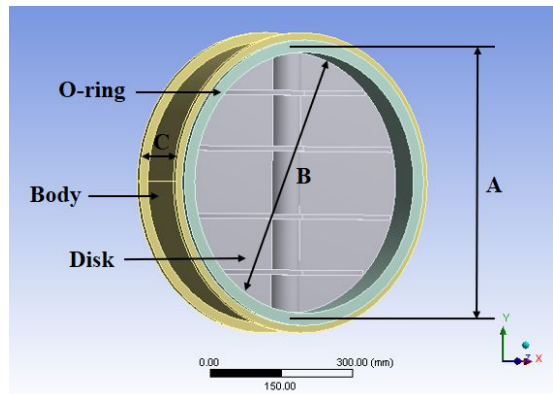
[Fig. 1]은 O-ring을 입힌 세 가지 디스크 댐퍼의 모델링 형상이다.(Han, 2016) (a)는 일반적인 접시형 디스크 댐퍼이며, (b)는 접시형 디스크 댐퍼의 강도 향상을 위해 립을 추가한 디스크 댐퍼이다. 마지막으로 (c)는 유체의 저항을 저감하기 위해 디스크 끝단을 유선형으로 설계한 유선형 디스크 댐퍼이다. [Fig. 1]에 나타낸 댐퍼의 물리적 파라미터는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Dimension of watertight dampers

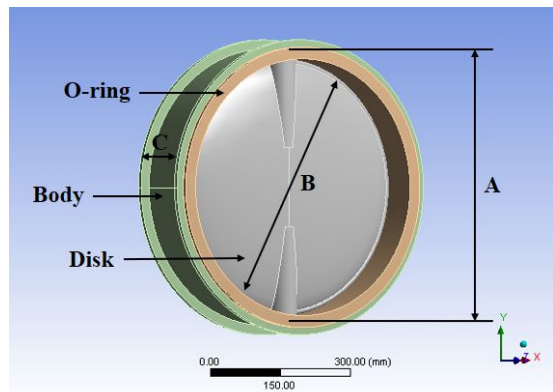
Parameter	Value	Unit
Internal diameter of flange body, A	570	mm
Diameter of disk, O-ring, B	550	mm
Flange to flange, C	150	mm
Thickness of O-ring	10	mm



(a) Disk Damper



(b) Rib-disk Damper



(c) Streamlined Disk Damper

[Fig. 1] 3 Types of Watertight Dampers with O-ring

Ⅲ. 밀폐 성능 평가

1. 구조해석

유한요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 구조해석을 수행하였다.

가. 구조해석 조건

1) 물성치

본 댐퍼는 일반적인 스틸의 녹 발생 문제를 해결하기 위해 오스테나이트(austenite)계 스테인리스강 중 내식성이 좋은 SUS316L을 기본 재료로 사용하였다. <Table 2>는 사용된 스테인리스강의 물성치를 나타낸다.

<Table 2> Material properties of stainless steel

Parameter	Value	Unit
Name of material	SUS316L	-
Density	7930	Kg/m ³
Young's modulus	193	GPa
Poisson's ratio	0.3	-
Yield stress	290	MPa
Tensile stress	580	MPa

본 논문에서의 주된 분석 대상인 오링은 밀폐력, 내마모 및 내노화성이 좋은 니트릴-부타디엔 고무(NBR)를 사용하였다. 비압축성 재료의 해석에는 이에 적합한 여러 가지의 모델이 있으며 Neo-Hookean 모델, Mooney-Rivlin 모델 그리고 Ogden 모델이 대표적이다.(Kim, 2016; Park, 2010)

본 논문에서는 Neo-Hookean 모델에서 제 2분변량이 포함되어 확장된 2차 Mooney-Rivlin을 사용하였다.

$$\Psi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 Ψ 는 에너지 함수, C_{10} , C_{01} 은

Mooney-Rivlin 2항 상수, I_1 , I_2 는 주 연신율의 불변량이다.

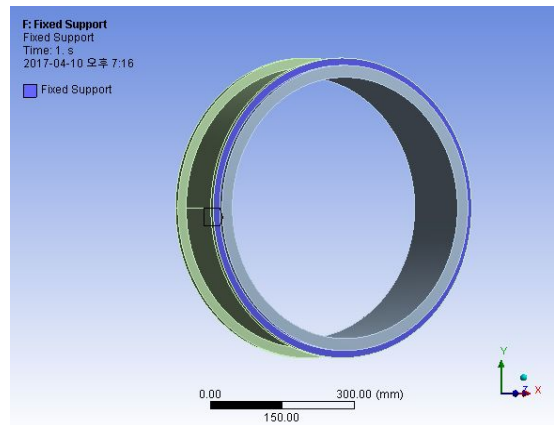
Mooney-Rivlin 모델은 주 변형률을 매개변수로 하여 200%의 변형률(Rivlin, 1948)까지 적용이 가능하다. <Table 3>은 2차 Mooney-Rivlin 모델을 적용한 니트릴-부타디엔 고무(NBR)의 물성치를 나타낸다.

<Table 3> Material properties of rubber

Parameter	Value	Unit
Name of material	NBR	-
Shore-A strength	70	-
Density	1122	Kg/m ³
Mooney-rivlin constants	C_{10}	0.586 MPa
	C_{01}	0.147 MPa
Tensile stress	10	MPa

2) 구속조건 및 물림량 설정

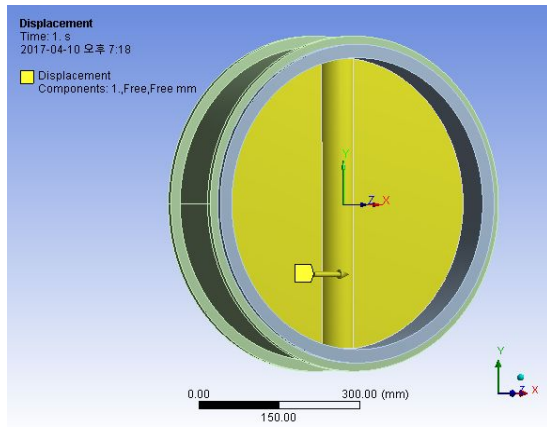
해석 모델의 구속조건은 [Fig. 2]와 같다.



[Fig. 2] Fixed support of watertight damper

오링이 바다와 밀착되는 부분은 압력을 받을 때 밀려나지 않도록 [Fig. 2]와 같이 오링과 바다

가 접촉하는 모든 해당 부분에 구속조건을 주었다.



[Fig. 3] Displacement of disk

[Fig. 3]은 물림량에 따른 구조해석을 수행하기 위한 디스크의 변위조건을 나타낸다. 디스크의 +X축 방향으로 변위를 주었으며, 세 가지 타입의 디스크 모두 물림량을 1mm~3.5mm로 설정하여 해석을 수행하였다. 접촉 응력 및 등가 응력을 이용하여 안전계수를 추정한 후, 해석 결과를 이용하여 물림량을 선정하였다.

나. 구조해석 결과

오링에 접하는 각 디스크들의 물림량을 변경하면서 구조해석을 수행한 후, 그 결과값인 접촉 응력과 등가 응력을 구하였다. [Fig. 4]는 각 디스크의 응력값을 나타낸다.

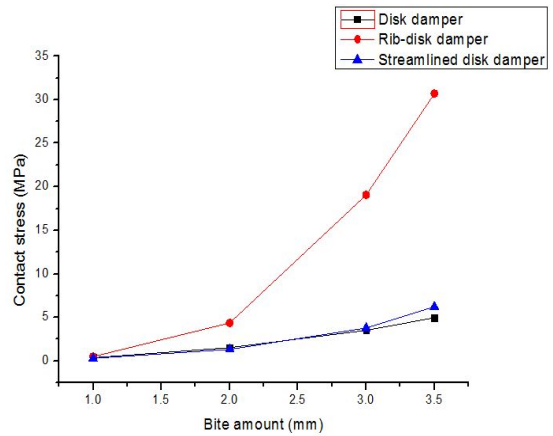
2. 안전계수

가. 계산 방법

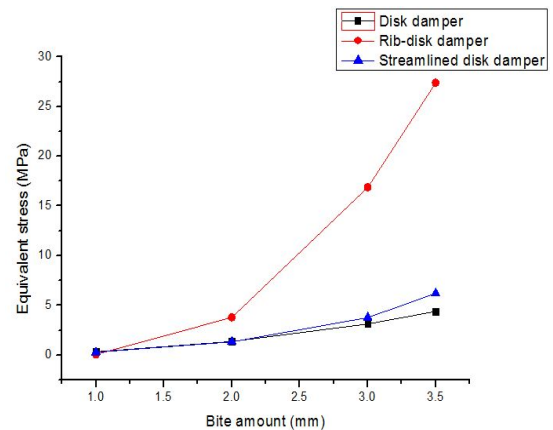
물림량에 따른 접촉 응력은 기본적으로 댐퍼에 작용하는 최대 사용 압력인 0.98MPa보다 높아야 하며, 아래의 안전 계수 계산 방정식을 근거로 하여, 3.43MPa보다 높아야 밀폐 성능이 보장된다.

또한 등가 응력은 오링의 인장 강도인 10MPa보다 낮은 값인 6.66MPa이하가 되어야 내마모성

이 보장된다.



(a) Contact stress of each damper according to the amount of bite



(b) Equivalent stress of each damper according to the amount of bite

[Fig. 4] Equivalent and contact stress of each damper according to the amount of bite

서론에서 언급하였듯, 일반적으로 오링의 밀폐 성능은 접촉 응력과 최대 작용 압력의 비에 의해 평가되며, 이에 따른 안전계수 계산은 다음과 같다.

$$S_{scal} = \frac{\sigma_c}{P_{max}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 S_{seal} 는 밀폐 성능을 평가하는 안전계수, σ_c 는 접촉 응력, P_{max} 는 최대 작용 압력, 즉 0.98MPa를 나타낸다. 이때의 S_{seal} 에 대한 기본 설계 값(Kong, 2007)은 3.5를 기준으로 평가하였고, 안전계수가 3.5이하가 되는 경우는 밀폐 능력이 떨어짐을 의미한다.

인장이 일어나는 경우를 방지하기 위한 안전계수의 평가는 다음과 같다.(Han, 2016)

$$S_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 S_t 는 인장의 가능성을 평가하기 위한 안전계수, σ_t 는 고무의 인장 강도, σ_c 는 등가 응력을 나타내며, 고무의 인장 강도 σ_t 는 10MPa를 목표치로 하였다. 그러므로 인장 가능성에 따른 S_t 의 기본 설계 값은 1.5를 기준으로 평가하였고, S_t 가 1.5이하가 되는 경우는 마모가 생기는 등의 파손 가능성이 있다고 보았다.

나. 계산 결과

<Table 4>는 접시형 디스크 댐퍼의 물림량에 따른 접촉 응력과 등가 응력의 안전계수를 나타내었다.

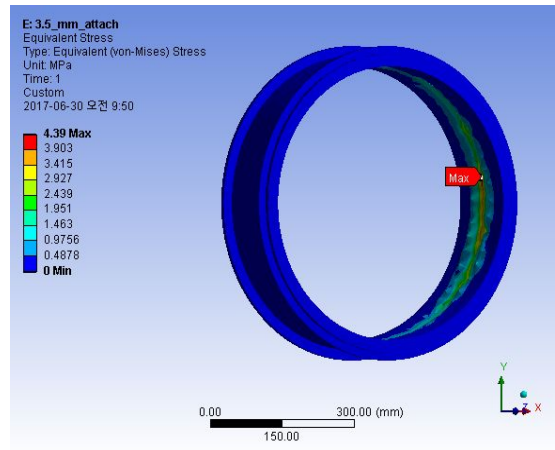
<Table 4> Safety factor of disk damper depending on bite

Bite amount	S_{seal}	S_t
1.0mm	0.376	29.762
2.0mm	1.556	7.256
3.0mm	3.587	3.198
3.1mm	3.832	2.996
3.2mm	4.113	2.796
3.3mm	4.412	2.610
3.4mm	4.734	2.436
3.5mm	5.069	2.278

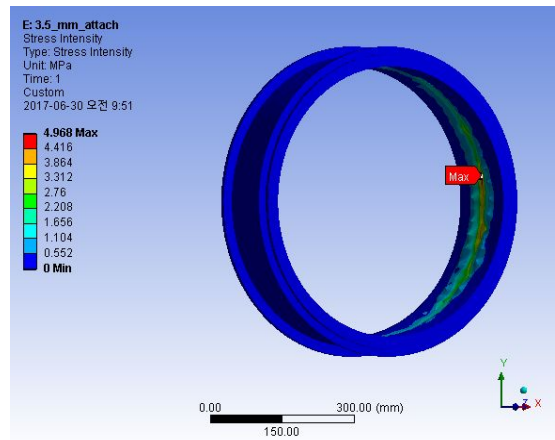
※ Lower limit of safety factor of S_{seal} and S_t are 3.5 and 1.5

기준으로 제시하였던 기본 설계 안전계수에 따라 적정 물림량을 선정한 결과, 물림량 3.0mm 이상인 경우에 S_{seal} 과 S_t 의 기본 설계 값을 만족하였으므로 물림량 3.0mm 이상을 적정 물림량으로 선정하였다.

[Fig. 5]는 접시형 디스크 댐퍼의 물림량이 3.5mm일 때의 구조해석 결과이다.



(a) Equivalent stress of 3.5mm bite



(b) Contact stress of 3.5mm bite

[Fig. 5] Equivalent and contact stress of disk damper

<Table 5>는 립 디스크 댐퍼의 물림량에 따른 접촉 응력과 등가 응력의 안전계수 분석 결과이다. 디스크 단면에 립을 길게 추가하였기 때문에 다른 댐퍼에 비해 물림량이 커질수록 작용하는 응력값의 증가량이 컸다. 그 결과, S_{seal} 은 물림량이 1.8mm이상일 때 기준을 만족하였다. S_t 는 물림량이 2.0mm이하일 때 기준을 만족하였다. 결론적으로 1.9mm, 2.0mm의 물림량만이 두 응력의 안전계수를 모두 만족하였다.

<Table 5> Results of rib-disk damper depending on bite

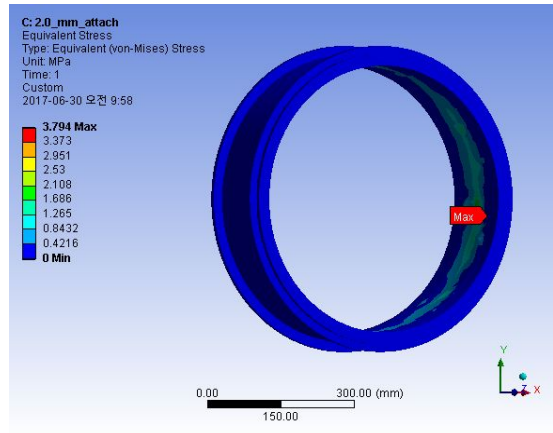
Bite amount	S_{seal}	S_t
1.0mm	0.061	20.161
1.5mm	1.819	6.472
1.6mm	2.202	5.351
1.7mm	2.639	4.466
1.8mm	3.143	3.748
1.9mm	3.757	3.135
2.0mm	3.868	2.114
3.0mm	17.220	0.524
3.5mm	27.941	0.326

※ Lower limit of safety factor of S_{seal} and S_t are 3.5 and 1.5

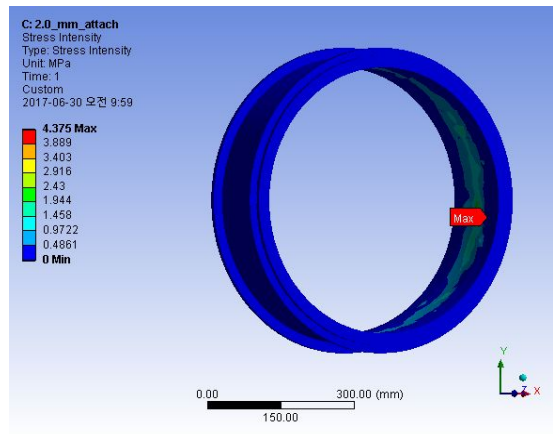
[Fig. 6]은 립 디스크 댐퍼의 물림량이 2.0mm 일 때의 구조해석 결과이다. 립을 추가하였기 때문에 오링과 맞물리는 유효한 단면적이 더 넓어져서 응력값이 타 댐퍼에 비해 높은 값이 나왔다.

마지막으로 <Table 6>는 유선형 디스크 댐퍼의 물림량에 따른 결과이다. <Table 4>의 접시형 디스크 댐퍼와 비슷한 결과를 나타내지만, 안전계수 값이 접시형 디스크 댐퍼에 비해 많이 증가하는 것을 알 수 있다. 유선형 디스크 댐퍼 또한 디스크 댐퍼와 마찬가지로 물림량 3.0mm 이상인

경우에 S_{seal} 과 S_t 의 기본 설계 값을 만족하였으므로 물림량 3.0mm 이상을 적정 물림량으로 선정하였다.



(a) Equivalent stress of 2.0mm bite



(b) Contact stress of 2.0mm bite

[Fig. 6] Equivalent and contact stress of rib-disk damper

[Fig. 7]은 유선형 디스크 댐퍼의 물림량이 3.5mm일 때의 구조해석 결과이다. 오링과 물리는 디스크 끝단의 모양이 유선형이기 때문에 물림량이 3.0mm 이상일 때는 접시형 디스크 댐퍼보다 접촉 응력 및 등가 응력이 높게 나왔다.

<Table 6> Results of streamlined disk damper depending on bite

Bite amount	S_{seal}	S_t
1.0mm	0.296	38.911
2.0mm	1.358	8.678
3.0mm	3.856	3.042
3.1mm	4.239	2.766
3.2mm	4.635	2.528
3.3mm	5.113	2.289
3.4mm	5.790	2.019
3.5mm	6.350	1.840

※ Lower limit of safety factor of S_{seal} and S_t are 3.5 and 1.5

IV. 결론

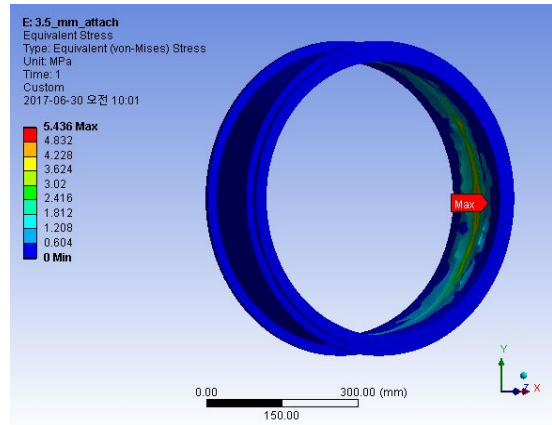
디스크의 각 형상에 따른 오링의 물림량을 조절하여 물림량에 따른 접촉 응력과 등가 응력을 도출한 후 적정 물림량을 선정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 논문에서 설계한 접시형 디스크 댐퍼에서는 디스크의 물림량이 3.0mm 이상일 때, 두 응력의 기본 설계 안전계수인 3.5와 1.5를 만족하였다.

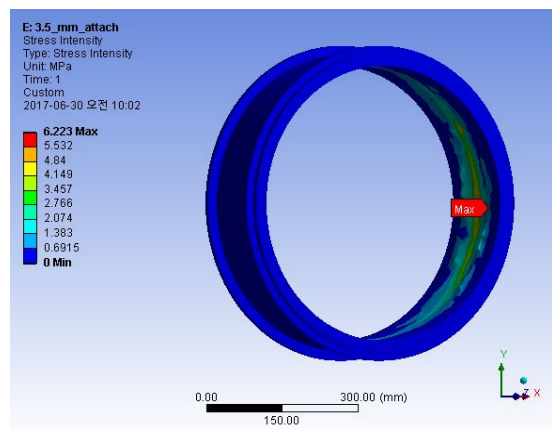
2. 본 논문에서 설계한 립 디스크 댐퍼에서는 디스크의 물림량이 1.9mm, 2.0mm일 때, 두 응력의 기본 설계 안전계수인 3.5와 1.5를 만족하였다.

3. 본 논문에서 설계한 유선형 디스크 댐퍼에서는 디스크의 물림량이 3.0mm 이상일 때, 두 응력의 기본 설계 안전계수인 3.5와 1.5를 만족하였다.

4. 디스크의 형상에 따라서 접촉 응력과 등가 응력이 변하고, 그 결과 안전계수가 각각 다른 물림량에서 적정의 값을 가짐을 확인 하였다.



(a) Equivalent stress of 3.5mm bite



(b) Contact stress of 3.5mm bite

[Fig. 7] Equivalent and contact stress of streamlined disk damper

References

B. K. Kim · S. B. Lee · J. O. Lee · S. H. Cho · H. M. Park · S. H. Yeom and S. H. Park(2012). A Comparison Among Neo-Hookean Model, Mooney-Rivlin Model, and Ogden Model for Chloroprene Rubber, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(5), 759~764.

Ebisu, T. · Yamamoto, M. · Maekawa, J. and

- Onodera, A.(1983). Fundamental studies on the performance of 'O'ring for cask, PATRAM 83, 672~679.
- H. G. Kong · D. H. Kang · S. G. Kim · J. H. Kang and Y. C. Park(2007). Design Sensitivity Analysis for Butterfly Valve Disc of Extra-large Concentric Type using Taguchi Method, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference papers, 143~148.
- Leachy, J. C.(1971). Sealing with Elastomers and Applications to Valve Seat Design for High Pressure, 5th International Conference on Fluid Sealing, 69~88.
- Lindley, P. B.(1967). Compression Characteristics of Laterally- Unrestrained Rubber O-Rings, Journal of Industrial Research Institute, Vol. 1, 209~213.
- M. S. Park, S. Song(2010). Comparative Study of Bifurcation Behavior of Rubber in Accordance with the Constitutive Equations, Journal of Mechanical Science and Technology, 34(6), 731~742.
- Ogden, R. W.(1972). Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber like Solids, Proceedings of the Royal Society A, 326(1567), 565~584.
- Rivlin, R. S.(1948). Large Elastic Deformations Isotropic Materials. IV. Further Developments of the General Theory, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 241(835), 379~397.
- S. H. Han · J. S. Jang and S. W. Ji(2016). Design of a Light Weight Watertight Damper for Offshore Rigs, Journal of the Korea Society for Fisheries and Marine Science Education, 28(5), 1470~1477.
- Selvadurai, A. P. S.(2006). Deflections of a Rubber Membrane, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 54(6), 1093~1119.
- Yokoyama, K. · Okazaki, M. and Komito, T.(1998). Effect of Contact Pressure and Thermal Degradation on the Sealability of O-ring, JSAE Review, 19(2), 123~128.
-
- Received : 26 June, 2017
 - Revised : 28 August, 2017
 - Accepted : 05 September, 2017