

자동차 조향장치의 볼 조인트 더스트 커버의 비선형 응력해석

김 지 호* · 이 부 윤**†

* 계명대학교 대학원 기계공학과, ** 계명대학교 기계자동차공학과

Nonlinear Stress Analysis of Dust Covers for Ball Joint of Automotive Steering System

Ji Ho Kim* and Boo Youn Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Keimyung Univ.,
** Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung Univ.

(Received June 11, 2013 ; Revised July 12, 2013 ; Accepted July 25, 2013)

Key Words: Dust Cover(더스트 커버), Ball Joint(볼 조인트), Rubber(고무), Stress(응력)

초록: 자동차 조향장치의 볼 조인트의 더스트 커버의 밀봉성과 응력 평가를 위하여 비선형 요한요소해석을 수행하였다. 주름형상과 항아리형상의 두 종류의 더스트 커버에 대하여 조립상태와 작동상태에 대하여 해석을 수행하여, 최대응력과 리브에서의 접촉응력 결과를 평가하고 비교하였다. 또한 작동상태에서의 몸통부 응력과 리브의 접촉응력이 조립상태 대비 증가하는 정도를 평가하였다. 해석 결과로부터 두 종류 모두 밀봉성이 우수한 것으로 확인되었으나, 상대적으로 최대응력이 작은 주름형상이 항아리형상보다 더 우수한 것으로 나타났다.

Abstract: A nonlinear finite element analysis is performed to evaluate the sealing capability and stress of dust covers for the ball joint of an automotive steering system. The analysis is performed for two types of dust covers: wrinkle type and pot type. The assembly condition and operation condition are analyzed, and the maximum stress and contact normal stress at the ribs are evaluated. It is confirmed that the sealing capability of both types is fairly good, but the wrinkle type is better than the pot type in terms of the maximum stress.

1. 서론

본 연구대상인 더스트 커버(dust cover)는 고무가 가지고 있는 밀봉성을 이용하여 먼지, 모래, 물 등의 이물질로부터 조인트를 보호하고 자동차 조향장치의 볼 조인트(ball joint) 동작부의 윤활유를 밀폐하여 윤활성을 유지시키는 중요한 부품이다.⁽¹⁾

더스트 커버는 차축의 회전에 따라 인장과 압축, 굽힘의 복합적인 변형을 하게 되며, 고무 소재가 서로 겹쳐서 운동하는 자체접촉도 일어나게 된다.⁽²⁾ 인장과 압축의 반복하중을 받으면서 더스트 커버의 내구성이 떨어지게 되며 손상에 따른

밀봉성 저하로 인해 볼 조인트부의 소음이 증가하거나 조향장치부의 결함이 발생하게 된다.⁽³⁾

더스트 커버와 같은 차량용 고무 부품의 성능을 평가하기 위해 유한요소해석을 통한 많은 연구가 진행되어 왔다. Jeong⁽⁴⁾은 고무 부품의 형태에 따른 최대 응력, 변형률, 반력을 비교 평가하여 제품의 최적설계에 관한 연구를 하였다. Kim 등⁽⁵⁾은 해석 결과로부터 변형 양상 및 취약 부위를 예측하였고 제품의 피로수명시험 결과로부터 하중-수명관계를 얻었으며, 해석결과와 피로수명시험에서의 피로파손 부위를 비교하였다. Park 등⁽¹⁾은 더스트 커버의 리브 형상 및 위치, 강재 링(steel ring)의 위치 등 설계변수에 따른 밀착력 및 변형을 해석하여 제품의 성능 가시화를 통해 설계변수에 따른 결과를 비교하여 설계하는 연구를 하였다. Kim 등⁽⁶⁾은 내구성 분석 과정을 개발하고 초기설계단계에서 피로수명을 예측하기 위한 방

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 대구경북지회 춘계학술대회(2013. 5. 10., 경북하이브리드부품연) 발표논문임.

† Corresponding Author, bylee@kmu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

법을 제안하고, 피로실험과 유한요소해석을 통해 수직 및 전단 변형률의 피로 파손 인자로서의 적용 가능성을 조사하였다.

Table 1 Material properties of rubber(Ogden function)

	Moduli (MPa)	Exponents
1	73.51	1.00
2	-85.99	2.99
3	93.60	2.96
4	-62.61	1.46

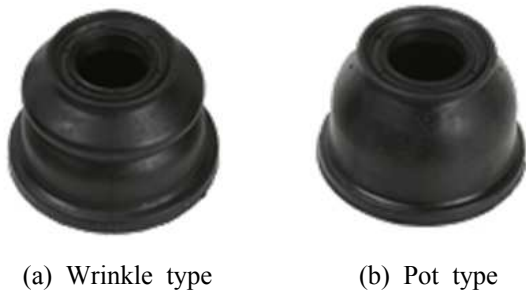


Fig. 1 Photographs of the dust covers for the ball joint

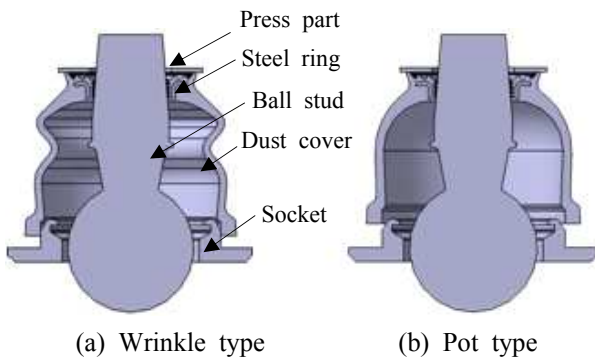


Fig. 2 Section view of the dust cover assembly

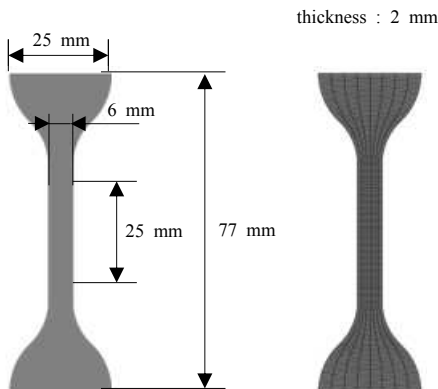


Fig. 3 Specimen for the tension test and the finite element model

최근 볼 조인트의 작동조건은 더 많은 굴절 각도를 요구하고 있으므로 반복하중 발생지점의 최대응력의 크기가 성능을 결정하는 주요 인자이다. 그러므로 본 연구에서는 주름형상(wrinkle type)과 항아리형상(pot type)의 두 종류의 더스트 커버에 대하여 비선형 유한요소 해석을 수행하여 조립상태 및 작동상태에서의 거동을 해석하고 기밀부의 접촉압력에 의거한 밀봉성과 최대응력에 의거한 내구성을 비교 및 평가하고자 한다.

2. 해석 방법

주름형상 및 항아리형상의 두 종류의 더스트 커버의 유한요소 모델에 대해 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC. MARC⁽⁷⁾를 사용하여 비선형 응력해석을 수행하였다. Fig. 1(a)와 (b)는 주름형상과 항아리형상 더스트 커버의 실제품 사진을 나타낸다. Fig. 2(a)와 (b)는 주름형상과 항아리형상 모델의 형상과 내부 구조를 나타내는데, 밀봉성을 강화하기 위하여 누름부(press part) 및 볼 스톱드(ball stud)와 접하는 리브(rib)의 안쪽에는 강재 링이 장착되어 있다.

더스트 커버의 몸통부에 해당되는 고무재료는 초탄성 특성을 지닌다. 고무와 같은 비압축성을 갖는 재료는 기하학적 대변형 등의 비선형성의 존재로 해석 시에 해의 수렴이 매우 어려우며, 해석에 많은 시간이 소요되게 된다.^(8,9) 이러한 고무의 특성을 잘 묘사하기 위해 고무의 인장시험을 수행하였으며 그 결과로부터 Table 1과 같이 Ogden 함수^(9,10)를 이용한 고무의 물성치를 구하여 해석을 수행하였다.

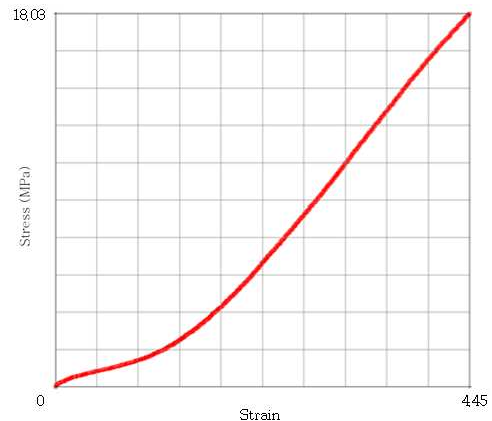
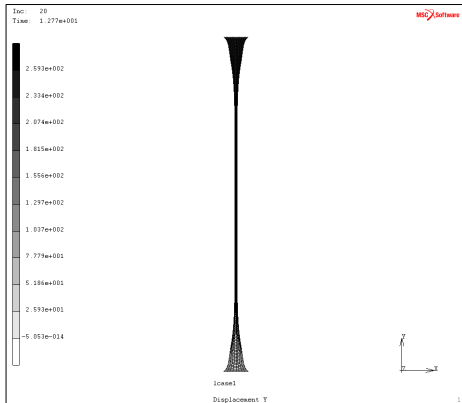
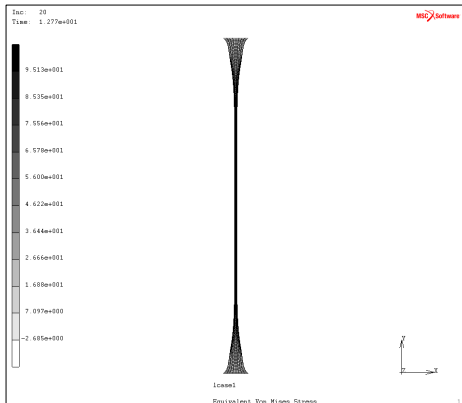


Fig. 4 Result of the tension test(stress-strain curve)



(a) Displacement in the tensile direction

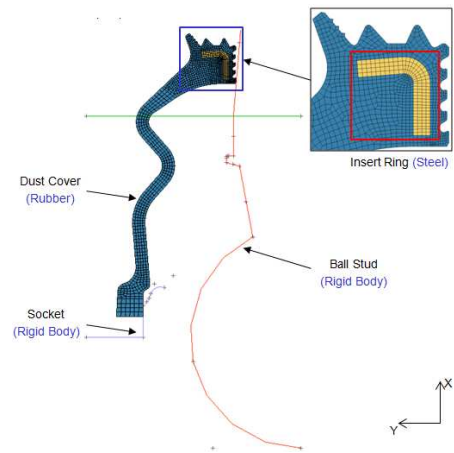


(b) Distribution of true stress in the tensile direction

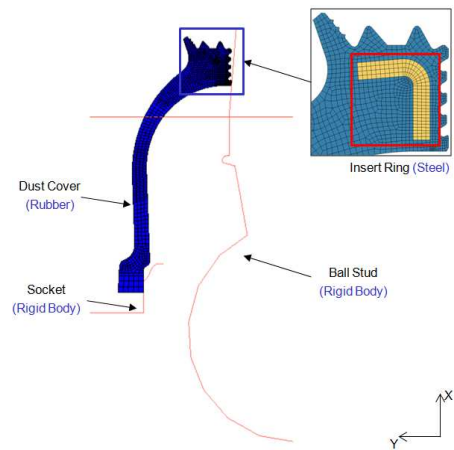
Fig. 5 Result of finite element analysis for tension test

이와 같이 구한 고무의 물성치를 사용한 해석의 정확성을 검증하기 위하여 인장시편을 이용한 인장시험 조건에 대하여, MSC. MARC⁽⁷⁾를 사용한 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. Fig. 3에 인장시험 시편의 컷수 및 유한요소모델을 나타내었으며, Fig. 4와 Fig. 5에 각각 실험결과 및 해석결과를 나타내었다. 실험결과 및 해석결과의 인장방향 변위를 비교해보면 실험이 106.3 mm, 해석이 105.2 mm로 거의 일치하였다. 또한 시편 중앙부의 진응력(true stress)은 실험이 93.0 MPa, 해석이 95.1 MPa로 거의 일치하였다.

더스트 커버의 조립상태를 해석하기 위하여, 먼저 축대칭 모델을 사용하여 1단계의 해석을 수행하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 4절점 사변형 요소로 구성된 주름형상과 향아리형상의 축대칭 모델을 나타내며 주름형상은 절점 수가 1570개, 요소 수가 1314개, 향아리형상은 절점 수가 1620개, 요소 수가 1369개이다. 조립상태는 하단부의 소켓(socket)이 x축 방향으로 3 mm 상승하고 누름



(a) Wrinkle type



(b) Pot type

Fig. 6 Finite element model (axi-symmetric model)

부가 11.9 mm 하강하면서 고무 몸통부를 x축 방향으로 압축하는 조립조건을 적용하였다.

작동상태에서는 볼 스테드가 z축에 관하여 좌우로 39° 회전하게 된다. 1단계의 조립상태 해석에 이어서 2단계의 작동상태 해석은 1/2대칭 모델을 사용하여 수행하였다. 이 1/2대칭 모델은 MSC. MARC⁽⁷⁾의 기능을 이용하여 1단계의 축대칭 해석 결과를 원주방향으로 180° 확장하여 구성하였다.⁽¹¹⁾ Fig. 7(a)와 (b)는 각각 8절점 육면체 요소로 구성된 주름형상과 향아리형상의 1/2대칭 모델을 나타내며 주름형상은 절점 수가 36087개, 요소 수가 28908개, 향아리형상은 절점 수가 27523개, 요소 수가 21940개이다.

각 부품 사이의 접촉조건은 MSC. MARC⁽⁷⁾의 접촉(glue)조건과 터치(touching)조건을 사용하여 실제 현상과 유사한 조립조건을 구현하였다. 조립조건에서는 두 형상 모두 누름부와 소켓이 고

무 몸통부를 x축 방향으로 동일한 양만큼 압축하고, 작동조건에서는 볼 스테르드가 z축에 관하여 양의 방향으로 39° 회전하도록 경계조건을 부여하였다. 강제 링은 일반 구조용 강철의 물성치를 사용하였고, 더스트 커버와 강제 링을 제외한 나머지 부품은 강체로 모델링하였다.

더스트 커버의 거동을 평가하는 요소 중 하나인 밀봉성은 유한요소 해석 결과에서 계산된 Fig. 8에 표시된 리브 R1~R8의 표면의 접촉수직응력, 즉 접촉압력을 통해 평가하였다. 또 다른 평가요소인 응력은 몸통부 1/2대칭면의 외표면과 내표면의 von-Mises 응력의 크기를 비교하여 평가하였다. Fig. 9에 표시된 바와 같이 주름형상은 외표면과

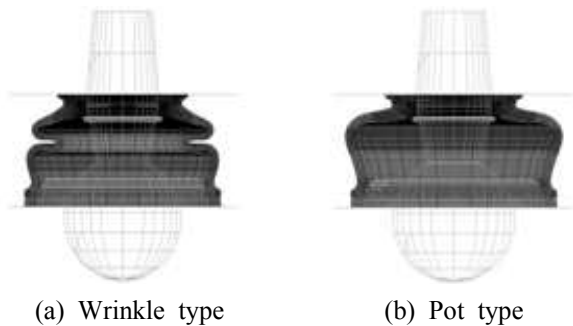


Fig. 7 Finite element model (half-symmetric model)

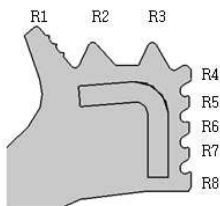


Fig. 8 Numbers of the ribs

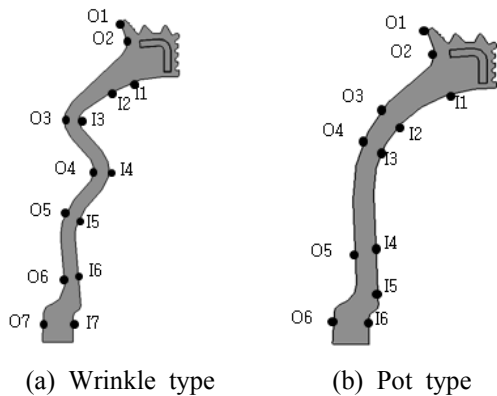


Fig. 9 Location on the outer and inner surface of dust cover body

내표면 상의 위치를 각각 O1~O7과 I1~I7로, 항아리형상은 O1~O6과 I1~I6으로 나타내었다. 그리고, 작동 시에 볼 스테르드가 39° 회전함에 따라 몸통부에서 발생하는 최대응력의 크기를 고무의 인장강도와 비교하여 평가하였다.⁽⁵⁾

3. 해석 결과

3.1 주름형상의 해석 결과

주름형상의 더스트 커버를 해석하여 대칭면의 리브와 누름부 및 볼 스테르드 접촉면의 접촉압력을 Table 2에 요약하였으며, 39° 회전방향 대칭면의 리브를 A로, 반대방향 대칭면의 리브를 B로 표기하였다. Fig. 10에는 조립상태와 작동상태에서 볼 스테르드와 접촉하는 리브 R4~R8의 접촉압력 분포를 비교하여 나타내었다.

조립상태에서의 접촉압력은 누름부와 접하는 리브 R2, R3에서 3.0 MPa 이상이며, 볼 스테르드와 접하는 하단 리브 R6~R8에서 8 MPa 이상으로 나타났다. 이와 같이 리브는 볼 스테르드 및 누름

Table 2 Contact normal stress on the ribs (wrinkle type)

Rib no.	Contact normal stress(MPa)		
	Assembly state	Operation state (A)	Operation state (B)
R1	0.50	0.53	0.47
R2	3.19	3.47	3.14
R3	3.26	3.69	3.11
R4	2.16	2.72	2.09
R5	3.40	3.84	3.41
R6	8.08	8.89	8.07
R7	9.39	9.84	9.04
R8	8.60	8.08	8.10

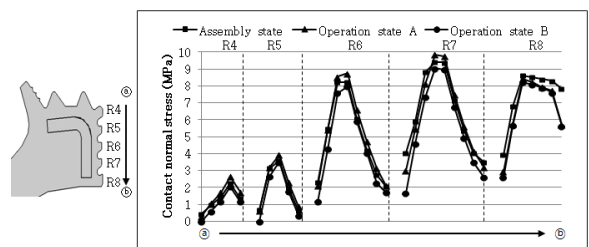


Fig. 10 Graph of contact normal stress on the ribs (wrinkle type)

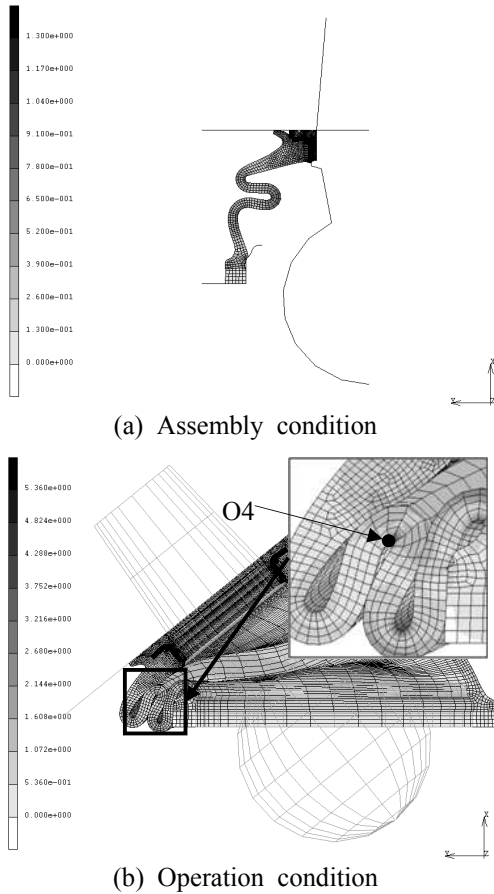


Fig. 11 Distribution of von-Mises stress (wrinkle type) (Unit: MPa)

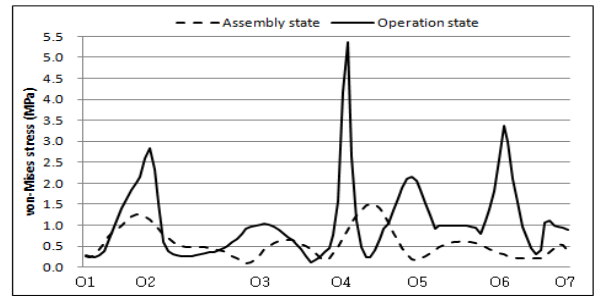
부와 잘 밀착되므로 더스트 커버의 조립상태에서 밀봉성이 우수하다고 할 수 있다. 작동상태에서의 접촉압력은 볼 스테드의 회전방향인 A 측은 조립상태 대비 소폭 증가하였고 반대방향인 B 측은 소폭 감소하였으나, 조립상태와 비교하여 큰 차이가 없으므로 작동상태에서도 밀봉성이 거의 악화되지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 11(a)와 (b)는 각각 조립상태와 작동상태의 주름형상 더스트 커버 몸통부의 von-Mises 응력 분포를 나타낸다. 주름형상의 더스트 커버의 응력은 상대적으로 압축을 많이 받는 리브와 몸통부의 주름부에서 높게 나타났다. Fig. 11(b)에 나타난 바와 같이, 특히 작동상태에서의 몸통부의 최대응력은 O4 위치에서 발생하였다.

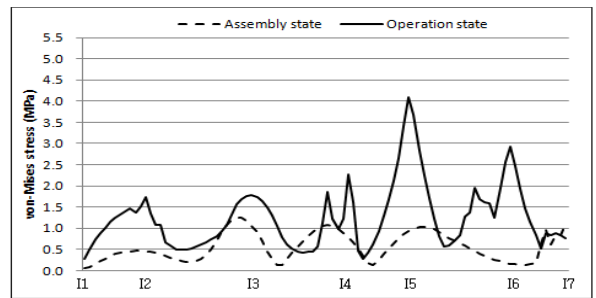
Fig. 12(a)와 (b)는 각각 더스트 커버 대칭면의 몸통부의 외표면과 내표면을 따라 추출한 응력 분포를 나타낸다. Fig. 12를 살펴보면 굴곡부에서 응력의 피크가 나타나며, 작동상태에서 조립상태보다 최대응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 최

Table 3 Contact normal stress on the ribs (pot type)

Rib no.	Contact normal stress(MPa)		
	Assembly state	Operation state (A)	Operation state (B)
R1	0.47	0.52	0.48
R2	3.25	3.12	2.91
R3	3.33	3.46	2.96
R4	2.22	2.43	1.95
R5	3.45	3.65	3.32
R6	8.33	8.83	8.09
R7	9.43	9.96	9.26
R8	8.65	8.36	8.48



(a) von-Mises stress on the outer surface



(b) von-Mises stress on the inner surface

Fig. 12 Graph of von-Mises stress on the body (wrinkle type)

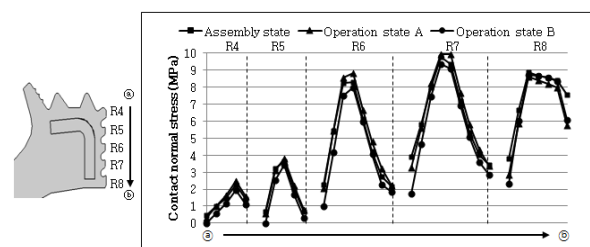


Fig. 13 Graph of contact normal stress on the ribs (pot type)

대응력은 조립상태에서는 1.30 MPa, 작동상태에서는 5.36 MPa로 재료의 인장강도인 18 MPa에

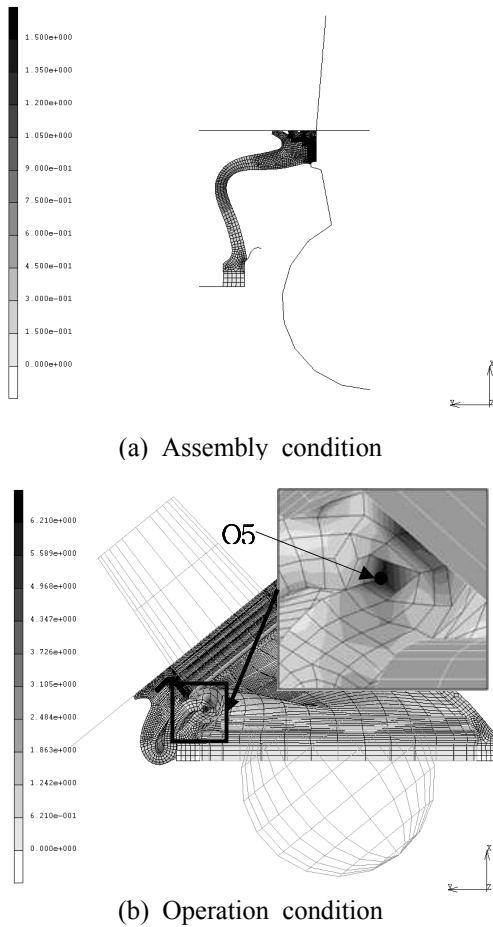


Fig. 14 Distribution of von-Mises stress (pot type) (Unit: MPa)

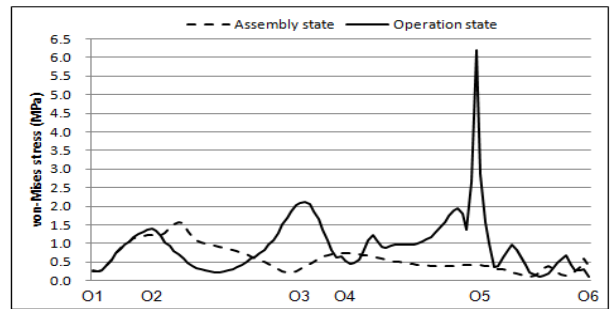
크게 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.2 향아리형상의 해석 결과

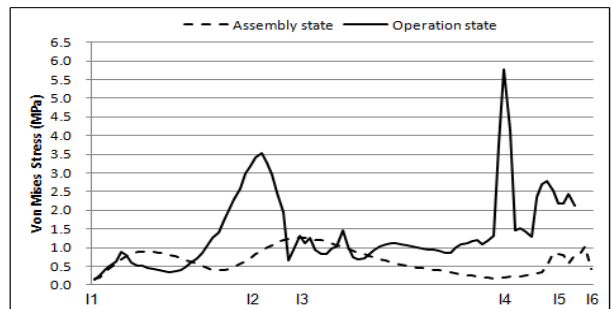
향아리형상의 더스트 커버를 해석하여 대칭면의 리브와 누름부 및 볼 스테드 접촉면의 접촉압력을 Table 3에 요약하였다. 39° 회전방향 대칭면의 리브를 A로, 반대방향 대칭면의 리브를 B로 표기하였다.

Table 3의 향아리형상의 리브의 접촉압력 크기는 Table 2의 주름형상 결과와 별로 차이가 없으며 각 리브에서의 접촉압력의 분포 경향도 유사하게 나타났다.

작동상태에서의 접촉압력은 볼 스테드의 회전 방향인 A 측은 조립상태 대비 소폭 증가하였고 반대방향인 B 측은 소폭 감소하였다. Fig. 13에는 조립상태와 작동상태에서 볼 스테드와 접촉하는 리브 R4~R8의 접촉압력 분포를 비교하여 나타내었다.



(a) von-Mises stress on the outer surface



(b) von-Mises stress on the inner surface

Fig. 15 Graph of von-Mises stress on the body (pot type)

Fig. 14(a)와 (b)는 각각 조립상태와 작동상태의 향아리형상 더스트 커버 몸통부의 von-Mises 응력 분포를 나타낸다. 향아리형상의 더스트 커버의 응력은 상대적으로 압축을 많이 받는 리브와 몸통부의 주름 형성 위치에서 높게 나타났다. Fig. 14(b)에 나타난 바와 같이, 특히 작동상태에서의 몸통부의 최대응력은 O5 위치에서 발생하였는데, 볼 스테드의 회전에 의해 안쪽으로 형성된 주름이 볼 스테드와의 접촉에 의해 압축을 받으면서 큰 응력이 발생하였다.

Fig. 15(a)와 (b)는 각각 더스트 커버 대칭면의 몸통부의 외표면과 내표면을 따라 추출한 응력 분포를 나타낸다. Fig. 11을 살펴보면 굴곡부에서 응력의 피크가 나타나며, 작동상태에서 조립상태보다 최대응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 최대응력은 조립상태에서는 1.50 MPa, 작동상태에서는 6.21 MPa로 재료의 인장강도인 18 MPa에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다.

한편, 향아리형상에서 발생하는 최대응력의 크기(조립상태 1.50 MPa, 작동상태 6.21 MPa)는 주름형상(조립상태 1.30 MPa, 작동상태 5.36 MPa)보다 조금 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 동일한 조립조건 및 작동조건에서는 주름형상이 향아리형상보다 최대응력이 작다. 그러므로 볼 스

터드의 좌우 회전이 반복되는 조건에서의 내구수명 관점에서 최대응력이 더 작은 주름형상이 향아리형상보다 더 우수한 것으로 결론지을 수 있다.

4. 결 론

주름형상과 향아리형상의 더스트 커버에 대하여 비선형 유한요소 해석을 수행하여 리브의 접촉압력과 최대응력을 비교 평가하였다.

고무를 포함하는 복잡한 비선형 문제의 해석 시간을 단축하기 위하여 1단계에서 조립상태를 축대칭 문제로 해석하고, 축대칭 해석 결과를 원주방향으로 확장하여 작동상태의 2단계 해석을 수행함으로써 해를 성공적으로 구하였다.

주름형상과 향아리형상에서 누름부 및 볼 스테드와 접촉하는 리브에서의 접촉압력은 비슷한 수준이며, 접촉압력 분포에 의거하여 더스트 커버의 밀봉성은 두 형상 모두 우수한 것으로 판단된다.

주름형상과 향아리형상 모두 최대응력은 인장강도에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났으나, 최대응력이 더 작은 주름형상이 향아리형상보다 더 우수한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부-한국산업기술진흥원 지정 계명대학교 전자화자동차부품지역혁신센터(B0008866)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Park, C. W., Park, C. H., Choi, S. D. and Choi, H. J., 2009, "Analysis of Deformations of Dust-seal in Ball Joint Used for Automobile Part," *Proc. of Korean Soc. Precision Eng. 2009 Spring Annual Meeting*, pp. 765~766.
- (2) Kim, S. H., Oh, S. T., Lee, C. H., Lee, J. H., Lee, H. W. and Huh, H., 1997, "Finite Element Analysis for 3-D Self-Contact Problems of C. V. Joint Rubber Boots," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 21, No. 12, pp. 2121~2133.
- (3) Kim, S. H., Oh, S. T., Lee, J. H., Lee, H. W. and Huh, H., 1998, "Stress Analysis of C.V. Joint Rubber Boots by Finite Element Method and Application to Design Modification," *Trans. KSAE*, Vol. 6, No. 3, pp. 123~137.
- (4) Jeong N. J., 2007, *A Study of Optimum Geometry for a Rubber Air Spring of Commercial Vehicle Using the Non-linear Finite Element Method*, MS Thesis, Inje University.
- (5) Kim, W. D., Woo, C. S. and Han, S., W., 1998, "Finite Element Analysis and Fatigue Life Evaluation of Automotive Rubber Insulator," *Elastomer*, Vol. 33, No. 3, pp. 168~176.
- (6) Kim, W. D., Moon, S. I., Woo, C. S. and Cho, I. J., 2011, "Study on Determination of Durability Analysis Process and Fatigue Damage Parameter for Rubber Component," *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 25, No. 5, pp. 1159~1165.
- (7) *MSC. MARC User's Guide*, MSC. Software.
- (8) Kwon, Y. D., Roh, K. T., Ri, C. S. and Hong, S. P., 1999, "A Study on the Convergency of the Finite Element Analysis of Rubber Using Numerical Differentiation Method," *Trans. KSAE*, Vol. 7, No. 5, pp. 141~153.
- (9) Mark, J. E., Erman, B. and Eirich, F. R., 1994, *Science and Technology of Rubber*, 2nd Ed., Academic, New York.
- (10) Baek, U. C., Cho, M. H. and Hawong, J. S., 2011, "Material Properties for Reliability Improvement in the FEA Results for Rubber Parts," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1521~1528.
- (11) Kang, T. H., Kim, Y. S. and Kim, I. K., 2005, "An Analysis of Rubber Dust-Cover for Automotive Parts," *Trans. Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 375~379.