

# 유니버설 조인트 베어링용 시일의 성능평가를 위한 유한요소해석

김태완\*, 문석만\*, 구영필\*\*, 조용주\*\*\*

## Finite Element Analysis for Performance Evaluation of the Seal in a Universal Joint Bearing

Tae Wan Kim\*, Suk Man Moon\*, Young Pil Koo\*\*, and Yong Joo Cho\*\*\*

### ABSTRACT

Seals in a universal joint bearing are important components reinforcing lubrication performance by holding lubricant and preventing infiltration of dust, moisture, etc.. There is a great difference in seal performance according to seal shape and bonding position. Therefore, in this study, as for both the lip type seal and the O-ring type seal, FE analysis is conducted using Mooney-Rivlin Model. The results show that O-ring type seal does not have any effect of misalignment angle compared with lip type seal, which is more profitable.

**Key Words** : Universal joint bearing(유니버설 조인트 베어링), Lip seal(립시일), O-ring(오-링), FEM(유한요소 해석), Misalignment(미스얼라인먼트), Cauchy stress(코시 응력)

### 1. 서론

유니버설 조인트에 사용되는 베어링용 고무 시일은 베어링 내부의 윤활제가 외부로 누설되는 것을 방지하고 또한 외부로부터의 이물질 및 수분의 침투를 방지함으로써 베어링의 윤활 기능을 보전시키고 진동이나 소음을 완화시켜 베어링의 수명을 연장할 수 있도록 보조해주는 역할을 하는 중요한 요소이다.

최근의 연구결과에 의하면 베어링의 고장원인 중 시일 손상으로 인한 고장이 상당한 부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다. 시일의 밀봉 효율과 수명에 큰 영향을 주는 인자 중의 하나는 시일의

접촉면에서의 압력, 즉 시일의 수축력으로 이에 대한 해석은 시일의 최적 설계 측면에서 대단히 중요하다. 즉, 시일 시스템의 작동조건하에서 시일의 선단부와 회전축사이에 작용하는 접촉압력이 어느 정도 유지되는지가 시일의 수명이나 시일 시스템의 성능을 결정한다고 할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

유니버설 조인트용 베어링에는 립(lib)타입과 오링(O-ring)타입의 시일이 널리 사용되고 있는데, 이들 시일 각각은 시일 형상이나 부착위치 등의 차이로 인해 접촉 압력의 차이가 발생하게 되고 이로 인한 시일 성능의 차이가 나타나고 있어 이에 대한 해석이 요구되고 있다.

\*\*\* 2000년 12월 19일 접수

\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

시일에 대한 기존의 연구가 많이 진행되어 왔지만 이는 주로 시일의 선형성에 기초한 특성해석<sup>(3)</sup>에 관한 것이었고 또 립시일과 오링에 대한 기존의 연구 결과<sup>(4, 5)</sup>들은 각각 다른 작동조건하에서 개별적으로 해석한 것들이었다. 따라서 시일의 비선형성에 기초하여 동일한 작동조건하에서 두 타입의 시일의 성능을 정량적으로 비교 평가한 결과는 아직 보고 되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 시일 재료의 비선형 변형 특성을 고려하여 시일의 성능을 평가하기 위하여 Mooney-Rivlin 모델을 적용하여 립타입과 오링타입의 시일 각각에 대해 모델링을 하고, 비선형 유한요소 해석 프로그램인 MARC를 이용하여 수치해석을 수행하여 두 타입의 성능을 가시화할 것이다. 그리고 정상적으로 시일이 체결된 경우는 물론 체결후 스파이더(spider)의 미스얼라인먼트(misalignment)가 발생할 경우에 대해서도 두가지 타입의 시일에 대하여 실링 성능(sealing effect)을 비교 평가하고자 한다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 고무재료의 해석

고무와 같은 초탄성재료(hyperelastic materials)에 대한 접촉응력을 해석하기 위해서는 재료의 비선형성을 고려해야 한다. 시일 재료로 널리 사용되는 고무는 비선형 응력-변형률 특성을 나타내기 때문에 이것을 잘 대변할 수 있는 탄성 변형률 에너지 함수(elastic strain energy function)이론을 도입한다. 일반적으로 고무재료의 물리적 특성값은 온도, 주파수, 주기적인 동변형률(cyclic dynamic strain), 노화(aging), 오일 등에 의하여 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 고무재료의 변형거동 특성을 정확히 평가하기 위해서는 현재까지 제안된 여러 가지 모델중 한가지를 선정하여 설계에 응용하여야 한다. 본 연구에 적용되는 시일의 재료는 등방성의 균질한 니트릴 고무(NBR)로서 다음과 같은 Mooney-Rivlin 모델을 적용하여 응력을 해석할 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

$$\sigma = 2 \left( C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$  는 소재내의 법선응력이고  $\lambda$  는 변형

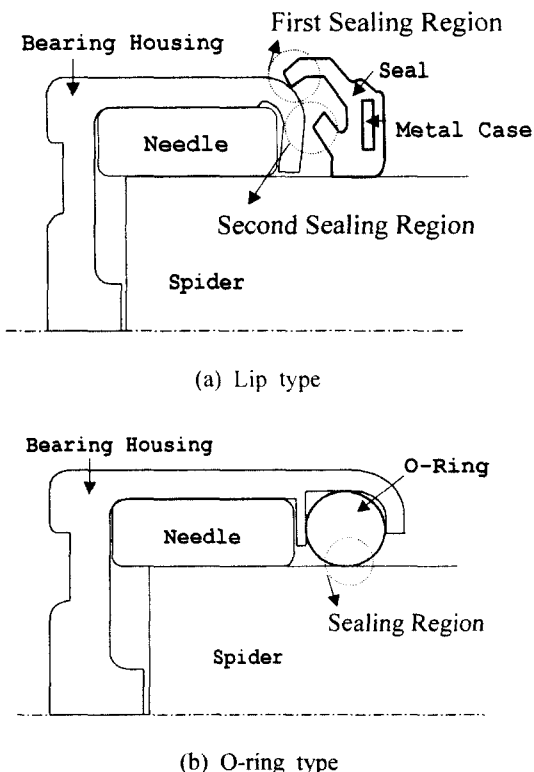
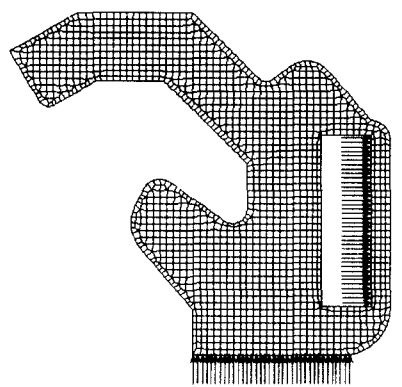


Fig. 1 Schematics of seal shape

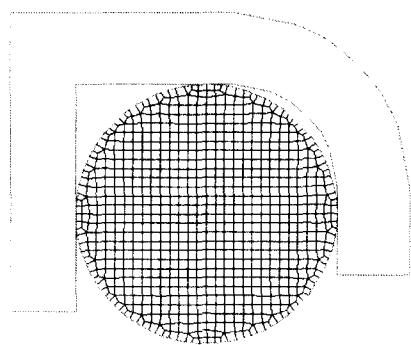
률 계수( $J+\epsilon$ )이며  $C_1$ 와  $C_2$ 는 Mooney-Rivlin 상수이다.

### 2.2 수치적 해석 방법

이상의 고무재료의 비선형 특성을 나타내는 Mooney-Rivlin 모델을 바탕으로 하여 유한요소해석을 하기 위해서는 두 타입의 시일에 대한 모델링을 수행하여야 한다. Fig. 1은 립타입과 오링타입의 시일 형상의 개략도를 도시한 것이다. 립 타입의 경우는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 스파이더부에 시일이 부착되어 스파이더와 베어링의 체결시 베어링의 하우징(housing)과 접촉되어 실링 효과를 나타내는데, 시일형상의 특성상 두 부분이 하우징에 접촉하여 밀봉을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림에서 표시한 1차 실링부(first sealing region)와 2차 실링부(second sealing region) 각각에 대해서 해석하였다. 이에 비해 오링타입은 시일이 베어링 하



(a) Lip type



(b) O-ring type

Fig. 2 FEM 2D solid model and boundary conditions for seals

우징과 스러스트 와셔(thrust washer)에 의해 고정되어 있으며 스파이더와의 접촉에 의해 하나의 접촉 부위에서 실링 효과를 나타내게 된다.

해석 조건으로서 두 타입의 시일 모두 기하학적 인 형태는 회전축, 스파이더 축에 대해 축대칭이고 변형거동이나 온도분포는 등온 상태를 유지한다는 가정이 적용되었으며, 립 시일의 경우 시일의 변형에 따른 영향은 금속보강태(metal case) 이외의 고무부분에만 미친다고 가정하였다. 그리고 시일의 접촉거동상태를 해석하기 위하여 재료의 비선형 거동, 기하적인 비선형성, 경계조건의 비선형성을 동시에 고려하여 해석할 수 있는 비선형 유한 요소 해석 코드인 MARC를 사용하였다.

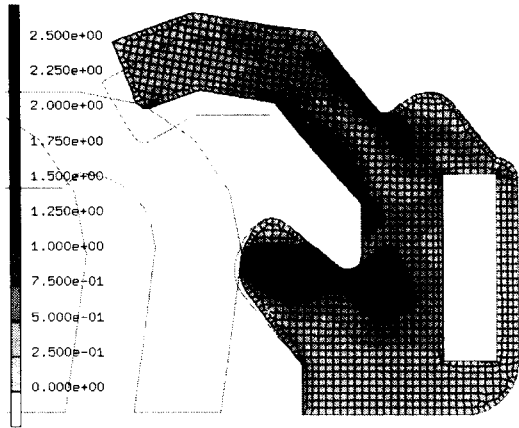
Fig. 2는 접촉력 거동해석을 위한 두 타입의 시일의 유한요소 메쉬를 보여주고 있다. 유한요소 해석을 위한 경계조건으로서 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이, 립타입의 경우는 시일의 아래부분에 접하고 있는 스파이더 축과 시일의 형상을 유지해 주는 역할을 하는 금속보강태는 모두 강체로 가정하여 변형이 없는 것으로 가정하였고 시일은 스파이더 축에 구속되어 있는 것으로 하여 해석하였다. 이와 달리 오링타입은 시일 주위로 둘러싸고 있는 하우징과 스러스트 와셔를 일체화 된 강체로 가정하였으나 하우징과 스러스트 와셔 부분에 구속되지 않은 것으로 가정하였다. 그리고 유한요소해석에 사용된 요소는 4절점 등매개변수 4각형의 축대칭 모드이며, 요소갯수는 오링타입의 경우 788개이고 립타입의 경우는 1681개이며, 절점의 개수는 각각 896개와 2560개이다. 또한 시일 선단부와 회전축 사이의 접촉문제 해석에서 초기에 접촉되었던 절점이 하중을 받게 되면 절점에서 변형이 일어나 초기의 접촉 절점이 서로 떨어지는 현상이 발생한다. 유한요소해석상 이들의 절점이 서로 떨어지면 해석을 할 수 없으므로 변형된 이후의 절점간 거리가  $1.0 \times 10^{-3}$  mm 이내에 있다면 절점은 서로 접촉된 것으로 간주하였으며 마찰의 영향은 배제하였다.

한편, 본 연구에서는 립타입 시일과 오링타입의 실링 성능을 동일 조건하에서 비교 평가하기 위하여 해석과정에서 사용된 시일의 재질은 두 타입 모두 순수 NBR로 가정하여 MARC에서 나온 물성치를 그대로 사용하였다.

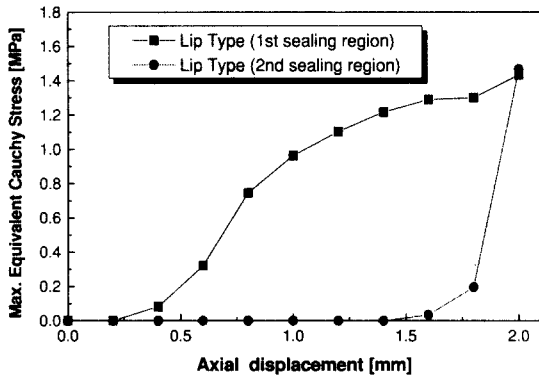
### 3. 해석 결과

#### 3.1 스파이더와 베어링의 체결시 해석

Fig. 3는 스파이더 축 방향으로 체결하였을 때 립타입의 시일에 작용하는 상당 코시 응력(equivalent Cauchy stress)의 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 1차 실링부에서는 시일의 끝단부 위에서만 높은 응력이 나타날 뿐 끝단 이외의 부분은 그다지 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있음에 비해, 2차 실링부에서는 접촉 부위를 기준으로 비교적 넓은 부위에 걸쳐 높은 응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 스파이더와 시일의 체결시 스파이더의 축방향 변위에 대한 최대 코시 응력의 변화를 도기한 것이다. 그래프에서 보면 립시일의 형상의 특성상 하우징이 시일에 체결될 때 1차 실링



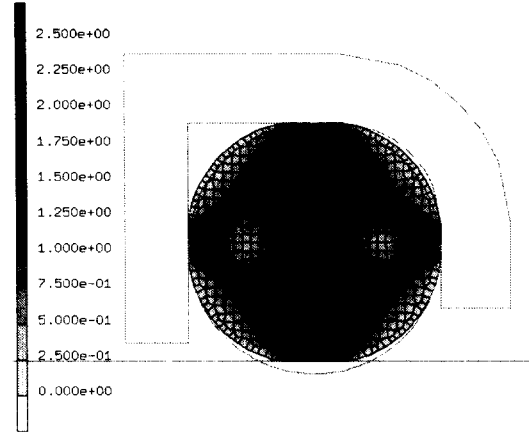
(a) Equivalent Cauchy stress distribution



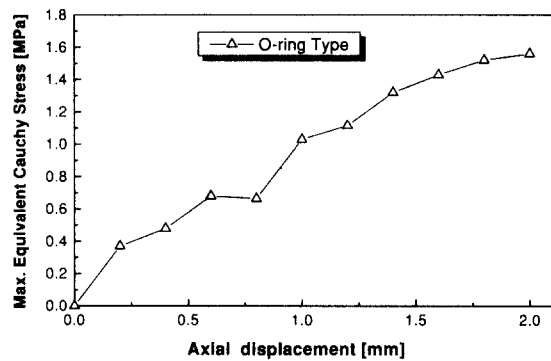
(b) Maximum equivalent Cauchy stress to axial displacement

Fig. 3 Equivalent Cauchy stress in the lip type seal during the joint of bearing and spider

부가 먼저 접촉하게 되고 곧이어 2차 실링부가 접촉하게 됨을 알 수 있다. 1차 실링부에서는 체결변위에 따라 전체적으로 최대 코시 응력의 증가가 완만한데 비해 2차 실링부에서는 접촉이 일어난 후 짧은 변위내에서 급격히 높은 응력으로 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 립타입의 경우 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 베어링 하우스와 접촉하여 스파이더의 축방향변위에 의해 실링 효과를 내게 되는데, 만약 체결불량이나 체결오차에 의해 축방향의 최대 변위에 조금이라도 못미치게 되면 2차 실링부에서는 시일의 응력상태가 상당히 줄어들므로 실링효과



(a) Equivalent Cauchy stress distribution



(b) Maximum equivalent Cauchy stress to axial displacement

Fig. 4 Equivalent Cauchy stress in the O-ring type seal during the joint of bearing and spider

에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 이에 비해 오링타입의 경우 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 립타입과는 달리 스파이더 축과 접촉을 하여 일단 어느 정도 체결이 되면 더 이상 스파이더 축의 축방향 변위가 더 이상 영향을 주지 않으므로 립타입보다는 유리할 수 있다.

Fig. 4(a)는 오링과 스파이더의 접촉이 완료되었을 때의 오링의 응력분포를 보여주고 있다. 그림에서 응력 분포는 아래 위의 대칭적인 형태로 나타나는데 오링내에서의 최대응력은 오링의 접촉표면이 아니라 표면에서 약간 내부로 들어간 부분에서 최

대 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시 일의 성능을 결정하는 것은 접촉부의 접촉력이므로 접촉표면의 응력상태에 주안점을 두어야 한다.

따라서 이러한 접촉 표면부의 절점들의 최대 응력변화치의 추이를 살펴보아야 하며, 이 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(b)에서 보면 접촉이 시작된 순간부터 완료시점까지 최대 코시 응력의 변화가 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Table 1는 정상적인 체결을 하였을 때의 립타입의 최대 응력과 오링타입의 최대 응력을 나타내었는데 립타입의 경우는 1차 실링부와 2차 실링부가 거의 비슷한 수치를 보이며, 오링타입의 최대 응력이 다소 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of maximum equivalent stresses

| Lip Type           |                    | O-Ring Type |
|--------------------|--------------------|-------------|
| 1st Sealing Region | 2nd Sealing Region |             |
| 1.433 MPa          | 1.466 MPa          | 1.559 MPa   |

### 3.2 스파이더축의 미스얼라인먼트 발생시 해석

유니버설 조인트용 베어링은 그 작동조건상 다양한 하중과 모멘트를 받게 되며 따라서 그로 인한 스파이더 축의 미스얼라인먼트(misalignment), 즉 축이 중심에서 벗어나 빠뚫어지는 현상의 발생은 불가피하다. 본 연구에서 사용된 유니버설 조인트용 베어링내에서도 스파이더 축과 니들(needle)의 접촉으로 인한 탄성변형, 니들이나 스파이더 축사이의 공차 및 가공오차 등으로 인해 미스얼라인먼트가 불가피하며 이러한 동적인 작동조건하에서 발생하는 미스얼라인먼트 현상은 베어링내의 실링 성능에 상당히 중요한 영향을 미치게 된다.<sup>(8,9)</sup>

미스얼라인먼트 발생시의 해석을 위하여 우선, 본 연구에서 사용된 유니버설 조인트에서 발생하는 미스얼라인먼트의 정도를 파악하여야 하며, 이러한 수치를 나타내는 것이 미스얼라인먼트 각도(misalignment angle)로써 Fig. 5에 도시한 바와 같다. 미스얼라인먼트 각도를 조사하기 위한 실험방법은 Fig. 6과 같이 한쪽 요크(yoke)를 고정하고 다른 쪽 요크에  $T = \pm 6 \text{ Nm}$ 의 토크를 가하면서 변위각  $\alpha$ 를 측정하여 Fig. 7과 같은 T- $\alpha$ 의 특성곡선을 산

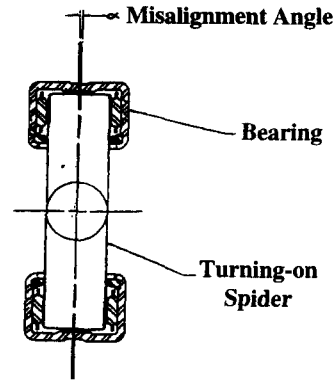


Fig. 5 Misalignment angle of universal joint

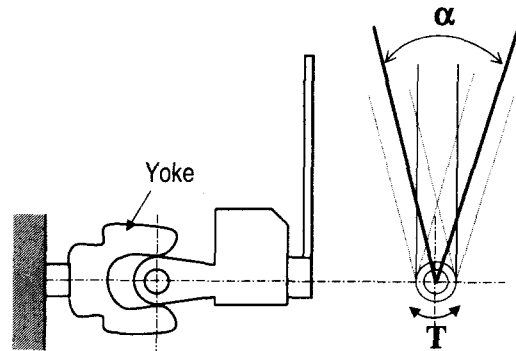


Fig. 6 Schematic drawing of misalignment angle measurement test

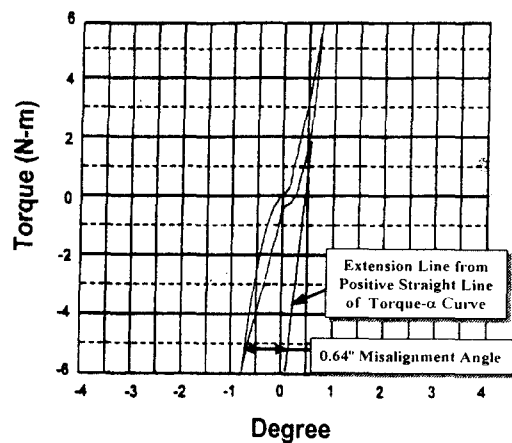


Fig. 7 Measured misalignment angle

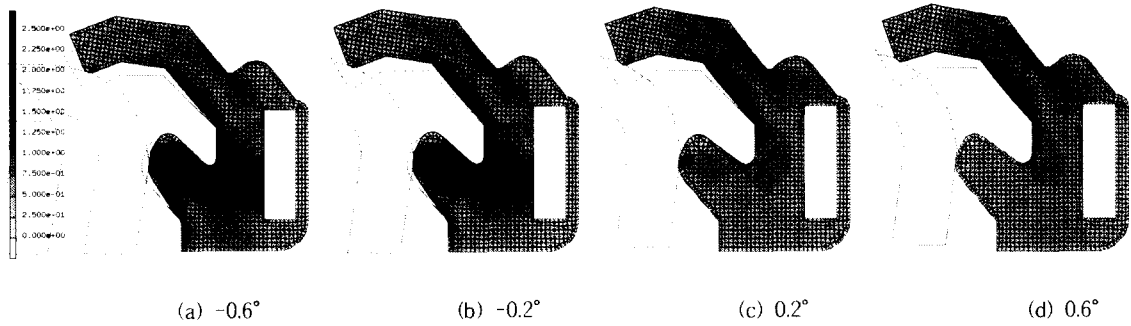


Fig. 8 Equivalent Cauchy stress distribution according to misalignment angles in the lip type seal

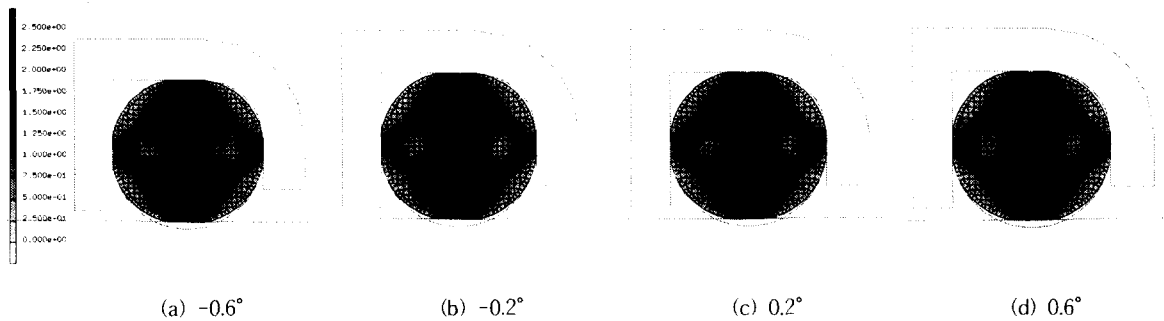


Fig. 9 Equivalent Cauchy stress distribution according to misalignment angles in the O-ring type seal

출하게 된다. Fig. 7에서 미스얼라인먼트 각도는 특성곡선의 양의 최대토크치로부터 역토크를 가하면서 생기는 직선부분의 확장선과 음의 최대 토크로부터 역토크를 가할 때 생기는 직선부와와의 거리(각도)를 계산함으로써 구할 수 있다. 실험 결과 그림에서 보는 바와 같이 최대  $0.64^\circ$ 의 미스얼라인먼트 각도가 발생함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 데이터를 기준으로 하여 해석조건으로서 미스얼라인먼트 각도를  $-0.6^\circ$ 에서  $+0.6^\circ$ 까지  $0.2^\circ$  간격으로 하여 7가지의 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 8은 립타입에 대해 미스얼라인먼트 각도가  $-0.6^\circ$ 일 때와  $+0.6^\circ$ 일 때 시일에 나타나는 응력분포를 나타내었고 Fig. 9은 오링타입에 대해 나타낸 것이다. 립타입의 경우 미스얼라인먼트 각도가  $0.6^\circ$ 이었을 때에는 시일의 접촉 영역을 중심으로 전체적으로 높은 응력 분포를 나타나고 있음을 알 수

있으나 미스얼라인먼트 각도가  $0.6^\circ$ 일 경우는 시일의 응력 분포가 낮은 수준임을 알 수 있다. 반면 오링타입의 경우는 미스얼라인먼트 각도가 변함에 따라서 전체적인 오링의 응력분포가 크게 변화하지 않고 있음을 알 수 있고 이는 전체적인 시일의 응력분포의 측면에서 보면 오링타입이 립타입보다 동적하중이 작용하는 경우에 대해서 보다 안정적인 실링성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 미스얼라인먼트 각도에 따른 해석 결과에서 접촉영역에서의 최대 코시 응력을 미스얼라인먼트 각도에 대하여 나타낸 것이다. 립타입의 경우, 2차 실링부의 경우는 대체로 일정수준의 최대 접촉 압력을 유지하고 있는 반면, 1차 실링부의 경우는 미스얼라인먼트 각도가 작은 값일 때는 응력이 상대적으로 높으나 미스얼라인먼트 각도가 증가할수록 계속해서 최대 응력이 감소해감을 알 수 있다. 따라서 립타입의 1차 밀봉 역할을 담당하는

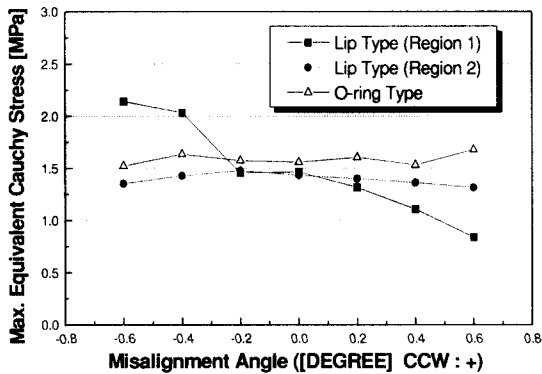


Fig. 10 Maximum equivalent Cauchy stress according to misalignment angle

커버부분은 미스얼라인먼트 각도에 대해 매우 민감하여 본래 목적인 외부 오염 물질의 방지 및 윤활제의 보호의 역할을 제대로 수행하지 못할 수 있다. 오링타입의 경우는 미스얼라인먼트 각도에 관계없이 거의 일정한 최대 응력을 유지하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유니버설 조인트 베어링에 사용되는 동일한 재료의 순수 NRB재질의 립타입 시일과 오링타입 시일에 대해 재료의 비선형특성을 고려한 Mooney-Rivlin 모델을 적용하고 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC를 이용한 수치 해석을 수행하여 시일 성능을 비교 분석하였다.

그 결과, 정상 상태의 체결조건에서는 오링타입과 립타입시일에 작용하는 최대 응력의 차이는 크지 않으나 립타입의 2차 실링부는 축방향 변위가 최대변위에 조금이라도 미치지 못한다면 실링성능에 악영향을 미칠수 있으나 오링의 경우는 접촉구조상 스파이더 축의 축방향 변위에는 그다지 큰 영향을 받지 않기 때문에 체결 오차등의 문제에 대해 보다 안정적인 실링 성능을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

또한 스파이더 축의 미스얼라인먼트가 발생하는 조건에 있어서도 립타입의 1차 실링부의 최대코시 응력이 미스얼라인먼트 각도의 변화에 따라 매우 민감하였음에 반에, 오링의 경우는 미스얼라

인먼트 각도에 관계없이 거의 일정한 최대 응력을 유지하고 있음을 알 수 있어 유니버설 조인트에서 사용되는 베어링용 시일에는 오링 타입의 시일이 립타입 시일보다 우수한 실링 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. "ASM Handbook, Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology," The Materials Information Society, pp. 546-552, 1992.
2. 日本 潤滑學會, 潤滑 Handbook, 養賢堂, pp. 510-513, 1987.
3. Stakenborg, M. J. L., "On the Sealing and Lubrication Mechanism of Lip Seals," Ph.D. Thesis, 1988.
4. Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Contact Behaviors of Rubber Lip Seals," J. of KSTLE, Vol. 10, No. 4, pp. 82-88, 1993
5. Green, I. and English, C., "Analysis of Elastomeric O-ring Seals in Compression Using the Finite Element Method, J. of Tribology. Trans., Vol. 35, pp. 83-88, 1992.
6. Lindley, E., "Compression Characteristics of Laterally unstrained Rubber O-Ring," J. of IRI, Vol. 1, pp. 202-213, 1967.
7. Aklonis, J. J. and MacKnight, W. J., Introduction to Polymer Viscoelasticity, Clarendon Press, Oxord, pp. 123-126, 1982.
8. Eschmann, Hasbargen and Weigand, Ball and Roller Bearings - Theory, Design, and Application, Second Edition, John Wiley & Sons, pp. 260-261, 1985.
9. Tedric A. Harris, Rollong Bearing Analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, pp. 214-216 1984.