

# 유니버설 조인트 베어링용 Seal의 성능평가를 위한 유한요소해석

김태완\*, 문석만\*, 구영필\*\*, 조용주\*\*\*

## FEM Analysis for Performance Evaluation of Seal in Universal Joint Bearing

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

### ABSTRACT

Seals in universal joint bearing are a important component reinforcing lubrication performance by holding a 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 the lib type seal and O-ring type seal, FEM analysis are conducted using Mooney-Rivlin Model. The results are indicate that O-ring having higher contact stress and larger contact area than lib type is more profitable.

**Key Words** : Universal joint bearing(유니버설 조인트 베어링), Lip seal(립시일), O-ring(오-링), FEM(유한요소 해석), Equivalent cauchy stress(접촉응력)

### 1. 서론

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

최근의 연구결과에 의하면 베어링의 고장원인 중 Seal 손상으로 인한 고장이 상당히 큰 것으로 보고되고 있는데, 이러한 시일의 밀봉 효율과 수명에 가장 큰 영향을 주고 있는 요소 중의 하나는 시일의 접촉면에서의 압력, 즉 시일의 긴박력으로써 이에 대한 해석은 시일의 최적 설계 측면에서 대단히 중요하며 시일의 수명을 연장시키고 시일 시스템의 유지와 보수 측면에서 립의 선단부와 회전축간의 접촉현상 해석 또한 매우 중요하다 하겠다.<sup>[1,2]</sup> 특히

유니버설 조인트용 베어링에 사용되고 있는 Seal은 이들 각각의 Seal 형상이나 부착위치 등의 차이로 인해 Seal 성능의 차이가 나타나고 있는데, 유니버설 조인트용 베어링에는 립(lib)타입과 오-링(O-ring)타입의 시일이 널리 사용되고 있다.

따라서 시일에 대한 기존의 연구가 많이 진행되고 있지만 이는 주로 시일의 선형성에 기초한 특성 해석<sup>[3]</sup>에 관한 것이었으나 최근 비선형 유한 요소 해석 프로그램의 발달로 시일에 대한 비선형성을 고려한 연구가 가능하게 되었다.

본 연구에서는 시일 재료의 비선형 변형 특성을 나타낼 수 있는 Mooney-Rivlin Model을 적용하여 이 립타입과 오링타입의 시일 각각에 대해 모델링을 하고, 비선형 유한요소 해석 프로그램인 Marc을 이용하여 FEM해석을 수행함으로써 두 타입의 성능을 가시화할 것이다. 그리고 정상적으로 Seal이 체결된 경우는 물론 Spider의 Misalignment가 발생할 경우에 대해서도 두가지 타입의 시일에 대하여 Sealing 성능을 비교 평가하고자 한다.

\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\* 부산대학교 기계기술연구소  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부

## 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 대변해 줄 수 있는 탄성 변형률 에너지 함수이론을 도입하는데, 본 연구에서는 Mooney-Rivlin 모델이 사용하여 등방성의 균질한 니트릴 고무(NBR) 재질에 대하여 해석하였다.<sup>[4,5]</sup>

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

여기서,  $\sigma$  = 소재내의 법선응력

$\lambda$  = 변형률 계수( $1+\epsilon$ )

$C_1, C_2$  = Mooney-Rivlin 상수

### 2.2 수치적 해석 방법

Fig. 1은 립타입과 오링타입의 시일 형상의 개략도를 도시한 것이다. 립 타입의 경우는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 Spider부에 Seal이 부착되어 Spider와 베어링의 체결시 베어링의 Shell case 부분과 접촉되어 Sealing 효과를 나타내는데, Seal형상의 특성상 두 부분에서 접촉하여 밀봉을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림에서 표시한 First sealing region과 Second sealing region 각각에 대해서 해석하였다. 이에 반에 오링타입은 베어링 내부의 Bearing shell case와 Thrust washer에 의해 고정되어 있으며 Spider와의 접촉에 의해 하나의 접촉부위에서 실링효과를 나타내게 된다.

해석 조건으로써 두 타입의 Seal 모두 기하학적인 형태는 축대칭이고 변형거동이나 온도분포는 등은 상태를 유지한다는 가정하에서 해석되었으며, 립 시일의 경우 Seal의 변형에 따른 영향은 금속 보강재(metal case) 이외의 고무부분에만 미친다고 가정하였다. 그리고 Seal의 접촉거동상태를 해석하기 위하여 재료의 비선형 거동, 기하적인 비선형성, 경계조건에 비선형성을 동시에 고려하여 해석할 수 있는 비선형 유한요소코드인 MARC를 사용하였다. 그리고 유한요소해석에 사용된 요소는 5노드 등파라메타 4각형의 축대칭 모드이며, 요소갯수는 오링타입의 경우 788개이고 립타입의 경우는 1681개이며, 절점의 개수는 각각 896개와 2560개이다.

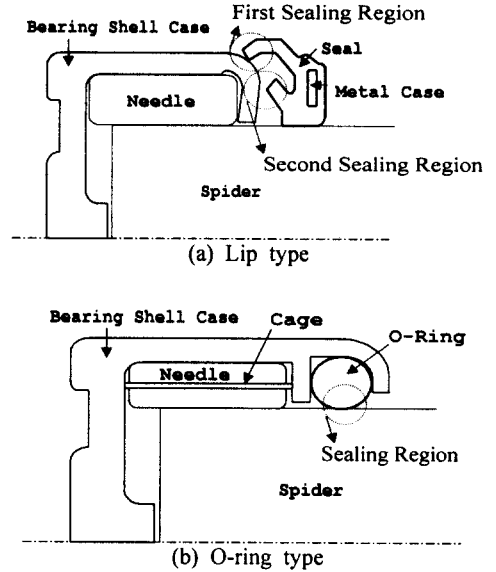


Fig. 1 Schematics of seal shape

## 3. 해석 결과

### 3.1 Spider와 Bearing의 체결시 해석

Fig. 2는 Spider 축 방향으로 체결하였을 때 립 타입의 시일에 작용하는 접촉 응력(Equivalent cauchy stress) 해석결과를 나타낸 것이다. 응력분포를 보면, First sealing region에서는 Seal의 끝단부위에만 높은 응력이 나타날 뿐 끝단 이외의 부분은 그다지 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있음에 반해, Second sealing region에서는 접촉 부위를 기준으로 비교적 넓은 부위에 걸쳐 높은 응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 Fig. 2에서 보인 각각의 접촉 부위에 대해 체결 변위에 따라서 접촉 부분의 node의 접촉응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서의 여러 데이터들은 접촉하고있는 부분내의 Seal의 node들을 의미하고 있다. 그리고 두 그래프에서 Shell case가 Seal에 체결될 때 First sealing region(Fig. 3)에서 먼저 접촉을 하게 되고 끝이어 Second sealing region(Fig. 4)에서 접촉을 하게 됨을 알 수 있다. First sealing region에서는 체결 변위에 따라 전체적으로 완만히 접촉 응력이 증가하고 Seal 끝단의 약 두 node에서만 급격히 증가하고 있으나 Second sealing region에서는 접촉이 일어난 후

짧은 변위내에서도 급격히 높은 접촉 응력을 유지하는 것으로 보인다.

Fig. 5는 오링과 Spider의 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 최대응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시일의 성능을 결정하는 것은 접촉부의 접촉압력이므로 접촉표면의 압력에 주안점을 두어야 한다. 따라서 Fig. 6에서 보면 립타입의 해석결과보다 많은 node에서의 응력변화치가 나타나 있는데 이는 립타입의 경우보다 오링과 Spider와의 접촉영역이 넓음에 기인한다.

Table 1는 정상적인 체결을 하였을 때의 립타입의 최대 접촉응력과 오링타입의 최대 접촉응력을 나타내었는데 오링타입이 최대 접촉응력이 다소 높게 나타나 있으므로 더 나은 Sealing 성능을 나타낼 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 Spider의 Misalignment 발생시의 해석

유니버설 조인트용 베어링은 그 작동조건상 다양한 하중과 모멘트를 받게 되며 따라서 그로 인한 Spider 축의 Misalignment, 즉 축이 삐뚤어지는 현상의 발생은 불가피하다. 본 연구에서 사용된 유니버설 조인트용 베어링내에서도 Spider축과 Needle의 접촉으로 인한 탄성변형, Needle이나 Spider사이의 공차 및 가공오차 등으로 인해 Misalignment가 불가피하며 이러한 동적인 작동조건하에서 발생하는 Misalignment 현상은 베어링내의 Sealing 성능에 상당히 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서 적용된 해석조건으로 Misalignment angle을  $-0.6^\circ$  에서  $+0.6^\circ$  까지  $0.2^\circ$  간격으로 하여 7가지의 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 7은 립타입에 대해 Misalignment angle이  $-0.6^\circ$  일 때와  $+0.6^\circ$  일 때 시일에 나타나는 응력분포를 나타내었고 Fig. 8은 오링타입에 대해 나타낸 것이다. 립타입의 경우 Misalignment angle이  $-0.6^\circ$  이었을 때에는 Seal의 접촉 영역을 중심으로 전체

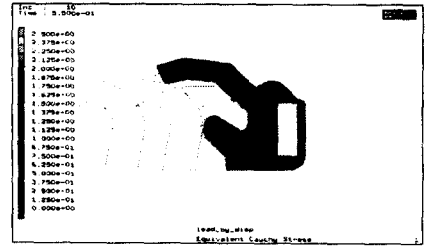


Fig. 2 Equivalent stress distribution of lip type

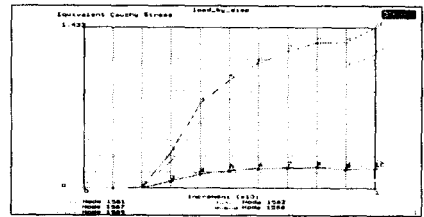


Fig. 3 Equivalent stress to displacement in 1st region

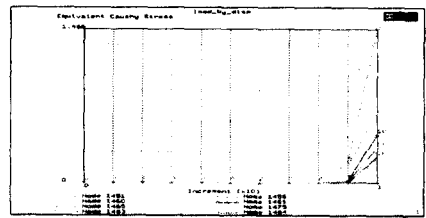


Fig. 4 Equivalent stress to displacement in 2nd region

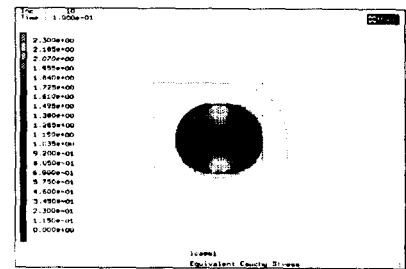


Fig. 5 Equivalent stress distribution of O-ring type

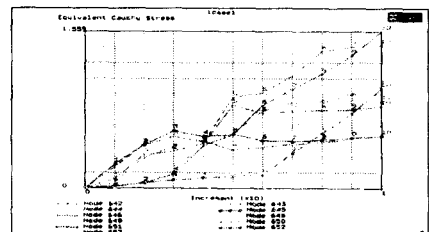


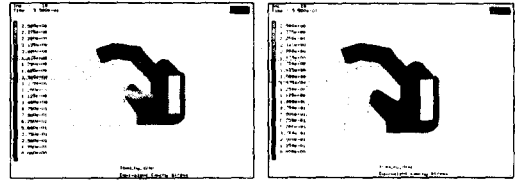
Fig. 6 Equivalent stress to displacement in O-ring

적으로 높은 응력 분포를 나타나고 있음을 알 수 있으나 Misalignment angle이  $0.6^\circ$  일 경우는 Seal의 응력 분포가 낮은 수준임을 알 수 있다. 반면 오링 타입의 경우는 Misalignment angle이 변함에 따라서 전체적인 O-Ring의 응력분포가 크게 변화하지 않고 있음을 알 수 있고 이는 전체적인 Seal의 응력분포의 측면에서 보면 오링타입이 립타입보다 동적하중이 작용하는 경우에 대해서 보다 안정적인 실링 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 Misalignment angle에 따른 해석결과에서 접촉영역에서의 최대접촉응력을 Misalignment angle에 대하여 나타낸 것이다. 립타입의 경우, Second sealing region의 경우는 대체로 일정수준의 최대 접촉 압력을 유지하고 있는 반면, First sealing region의 경우는 Misalignment angle이 작은 값일 때는 높은 최대 접촉 응력을 나타내나 Misalignment angle이 증가할수록 계속해서 최대 접촉 응력이 감소해감을 알 수 있다. 따라서 립타입의 1차 밀봉 역할을 담당하는 커버부분은 Misalignment angle에 대해 매우 민감하여 본래 목적인 외부 오염 물질의 방지 및 윤활제의 보호의 역할을 제대로 수행하지 못할 수 있다. 오링타입의 경우는 Misalignment angle에 관계없이 거의 일정한 최대접촉압력을 유지하고 있음을 알 수 있고, Second region과 비교해서도 최대 접촉 압력이 립타입보다는 대체적으로 높은 압력을 유지하고 있음을 알 수 있다.

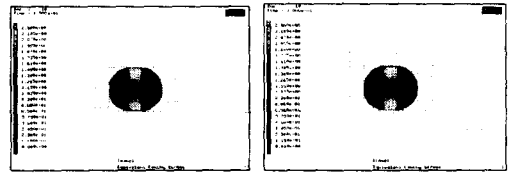
#### 4. 결론

본 연구에서는 유니버설 조인트에 사용되는 립타입 시일과 오링타입 시일에 대해 FEM 해석을 수행하여 시일 성능을 비교 분석하였다. 그 결과, 정상 상태의 체결조건에서는 실링 성능을 대변하는 접촉부의 접촉 압력이 오링이 립타입보다는 다소 높은 최대 접촉 압력을 나타내고 접촉면적에 있어서도 오링이 립타입보다 넓은 접촉면적을 유지함으로써 보다 안정적인 Sealing 성능을 가짐을 알 수 있었다. 그리고 Spider의 Misalignment가 발생하는 조건에 있어서도 립타입의 First sealing region의 최대 접촉 응력이 Misalignment angle의 변화에 따라 매우 민감하였음에 반해, 오링의 경우는 Misalignment angle에 관계없이 거의 일정한 최대접촉 압력을 유지하고 있음을 알 수 있었다.



(a)  $-0.6^\circ$  (b)  $0.6^\circ$

Fig. 7 Equivalent cauchy stress distribution according to misalignment angle (Lip type)



(a)  $-0.6^\circ$  (b)  $0.6^\circ$

Fig. 8 Equivalent cauchy stress distribution according to misalignment angle (O-ring type)

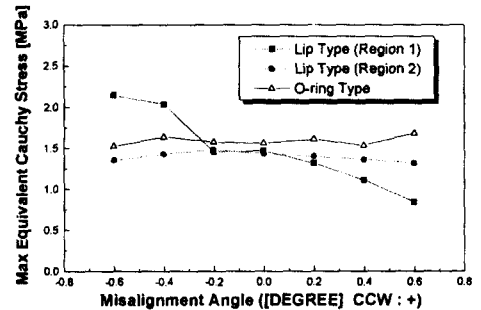


Fig. 9 Maximum equivalent cauchy stress to misalignment angle

#### 참고문헌

1. "ASM Handbook, Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology", The Materials Information Society, 1992.
2. 日本 潤滑學會 "潤滑 Handbook", 養賢堂, 1987.
3. Stakenborg, M. J. L., "On the Sealing and Lubrication Mechanism of Lip Seals", Ph.D. Thesis, 1988.
4. Treolar, L. R. G., "The Physics of Rubber Elasticity", Clarendon Press, Oxford, 1975.
5. Raymond, A., and Guyer, Jr., "Rolling Bearing Handbook and Troubleshooting Guide", Chilton Book Company, 1989.