

## 반응표면법을 사용한 자동차용 휠 베어링 시일의 형상 최적화

문형일<sup>1)</sup> · 임종순<sup>2)</sup> · 김현영<sup>\*1)</sup>

강원대학교 기계의용공학과<sup>1)</sup> · 일진글로벌<sup>2)</sup>

### Shape Optimization of an Automotive Wheel Bearing Seal Using the Response Surface Method

Hyung-il Moon<sup>1)</sup> · Jongsoon Im<sup>2)</sup> · Heon Young Kim<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

<sup>2)</sup>ILJIN Global, 1000 Jecheon Industrial Zone, Wangam-dong, Jecheon-si, Chungbuk 390-250, Korea

(Received 23 December 2009 / Accepted 14 April 2010)

**Abstract** : This paper presents the shape optimization process for the automotive wheel bearing seal lip using the finite element method and the response surface method. First, to predict performance of the bearing seal lip, we used the non-linear finite element analysis. And then, we compared the analysis results with the test results to verify the finite element model. The objective function in optimizing process was obtained from results of the mud slurry test, which is one of many tests for evaluating performance of wheel bearing. After the mud slurry test for the four models which have the similar cross-sectional shape, we measured the wear area of the seal lip and the moisture content in grease. The objective function has been chosen by comparing the results of mud slurry test and characteristics of seal lip, such as contact force, contact area, contact pressure, and interference. Finally, within limited design parameters, we suggested the optimized shape of seal lip, which is expected to improve the wear and the sealing effect of it.

**Key words** : Bearing seal lip(베어링 시일 립), Finite element analysis(유한요소해석), Hyperelastic(초탄성), Response surface method(반응표면법), Optimum design(최적 설계), Wear(마모), Ratio of moisture content(함수율)

### 1. 서론

차체 중량 지지 및 동력전달에 있어 핵심적인 부품인 휠 베어링은 조립의 간편화 및 경량화 등의 요구가 증가함에 따라 점차 주변 부품들과 유니트화 되고 있으며, 더 높은 내구성능을 요구한다.<sup>1,2)</sup>

대부분, 자동차용 휠 베어링의 내구성능은 전동체와 궤도 사이의 윤활성능에 큰 영향을 받으며, 베어링 시일의 밀봉성능과 밀접한 관계가 있다.<sup>1,2)</sup>

베어링 시일의 밀봉성능은 시일 립(seal lip)의 형상 및 재질에 의해 결정된다. 시일 립은 적정 수준의 접촉력(contact force)과 접촉 면적(contact area)을 가

지도록 설계 되어, 외부로부터의 이물질 유입을 방지해야 한다. 하지만 과도한 접촉력(면적)은 저항력(drag force) 증가로 인한 연비 저하와 과도한 영구변형 및 마모의 원인으로 작용한다.<sup>3,4)</sup>

베어링 시일 설계는 주로 간섭량(interference)을 이용한 계산식,<sup>1)</sup> 또는 시작품을 사용한 평가 결과를 사용하였다. 그러나 최근 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 이용한 설계 방법이 활발하게 연구되고 있다.<sup>2-5)</sup>

본 논문은 NBR 재질의 베어링 시일의 비선형 유한요소 해석을 수행하여 시일 립의 성능을 예측하였고, 시험 결과와 비교하여 해석 모델의 신뢰성을 평가하였다. 또한, 장착 방식 및 기본 형상은 유사하지만 립의 형상이 다른 4가지 모델의 변형해석과 머

\*Corresponding author, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

드 슬러리(mud slurry)시험을 수행하였고, 얻어진 결과들을 비교하여 최적화 시 사용될 목적함수(objective function)를 결정하였다.

그 후, 기존의 모델에 비하여 마모성과 실링성(sealing effect) 개선이 예상되는 형상을 제시하였다. 이때, 설계인자들간 교호작용(interaction effect)과 복수의 목적 함수 사용을 위해 반응표면법(response surface method)을 사용하였으며, 최적화 조건에 맞는 설계변수를 효과적으로 찾아내기 위해 수치해석 방법 중 하나인 Downhill simplex 알고리즘을 사용하였다.

### 2. 초탄성 이론

고무 재료의 유한요소 해석은 주로 초탄성(hyper-elastic) 이론을 사용한다.

대변형 탄성 거동에 대하여, 단위 체적당 변형률 에너지 포텐셜(strain energy potential)  $W$ 의 변화율이 응력에 의한 일률과 같다는 개념을 이용하여 고무와 같은 비선형 초탄성체의 거동을 기술하면 식 (1)과 같다.

$$T_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (1)$$

여기서  $T_{ij}$ 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서(tensor)이며  $\epsilon_{ij}$ 는 Green-Lagrange 변형률 텐서이다.

물질의 거동을 탄성이고 등방성이라고 가정하면  $W$ 는 변형률 불변량(strain invariant)의 함수로 표현될 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, J) \quad (2)$$

식 (2)의 변형률 불변량을 신장량(principal stretch;  $\lambda$ )으로 바꾸어 표현하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ J &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

고무 재료의 비압축성을 고려하면  $J$ 가 1이 되어,  $W$ 는 식 (4)와 같이  $I_1, I_2$  만의 함수가 된다.  $W$ 를 표현하는 모델은 많은 연구자들에 의해 많이 제시되었다. 그 중 식 (4)와 같은 Mooney-Rivlin 모델, (5)와

같은 다항식 (polynomial) 모델, 그리고 식 (6)과 같은 오그덴(Ogden) 모델이 주로 사용된다.<sup>5-7)</sup>

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5)$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} J^{-\alpha_n} 3(\lambda_1^{-\alpha_n} + \lambda_2^{-\alpha_n} + \lambda_3^{-\alpha_n} - 3) \quad (6)$$

### 3. 초탄성 모델의 검증

사용된 재료데이터는 표준 방진고무 시험법(KS M 6604)에 의한 단축 인장(uniaxial tension)과 평면 변형(planar) 시험 데이터를 사용하였다.<sup>2)</sup> (Fig. 1)

변형 해석에 앞서, Mooney-Rivlin 모델, 다항식(N=2) 모델, 그리고 Ogden(N=3) 모델의 신뢰성을 검증하여 보았다. 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.8을 사용하여, 각 변의 길이가 1mm인 8절점 정육면체 요소(8 node solid element)를 모델링하고, 각각 단축 인장과 평면변형 모드로 변화하도록 하는 경계조건(boundary condition)을 사용하여 해석을 실시하였다. 해석 결과는 식 (7), (8)과 같은 관계로 인해, 상단부 절점들의 반력(reaction force;  $F_i$ )의 합과 변위(Displacement;  $\Delta L$ )가 입력된 재료 시험 결과( $\sigma_n, \epsilon$ )와 동일해야 한다.<sup>2)</sup> 검증 해석 결과, Fig. 2와 같이 2차 다항식 모델이 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

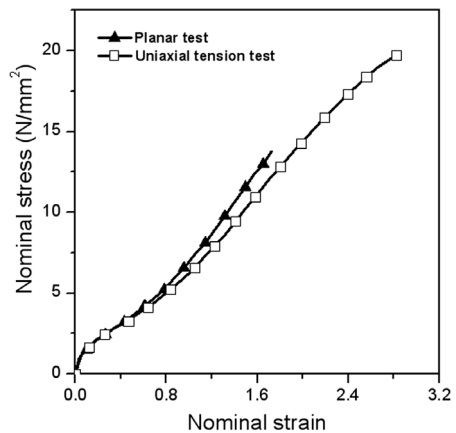
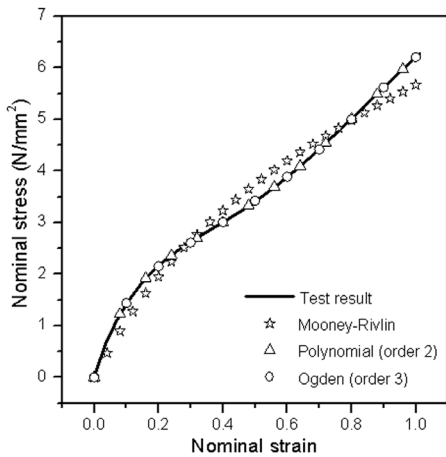
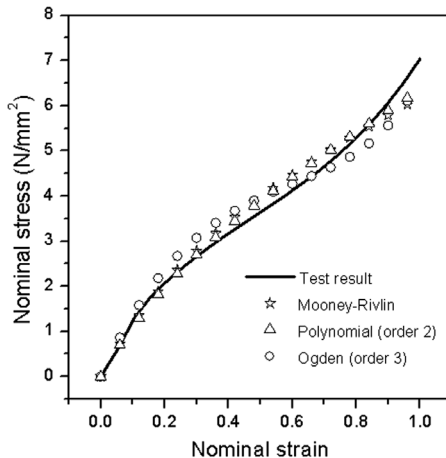


Fig. 1 The stress-strain curves of the NBR



(a) Uniaxial tension mode



(b) Planar mode

Fig. 2 Results of verification analysis using one element model

$$\sigma_n = \frac{F_r}{Area} = \frac{F_r}{1} = F_t \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_{initial}} = \frac{\Delta L}{1} = \Delta L \quad (8)$$

#### 4. 베어링 시일 립의 변형해석

변형해석의 경계조건(boundary condition)은 실제 조립 과정과 동일하다. 먼저, 압입 지그(pressing jig)를 사용하여 외륜(outer, outer race)과 베어링 시일을 장착시키고, 허브(hub)가 설계상 장착 위치로 이동하여 체결되는 과정으로 진행하였다.<sup>2)</sup> (Fig. 3)

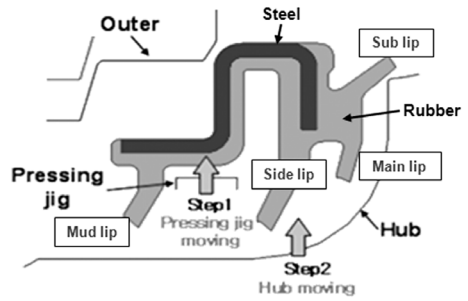


Fig. 3 The boundary condition for deformation analysis of a bearing seal

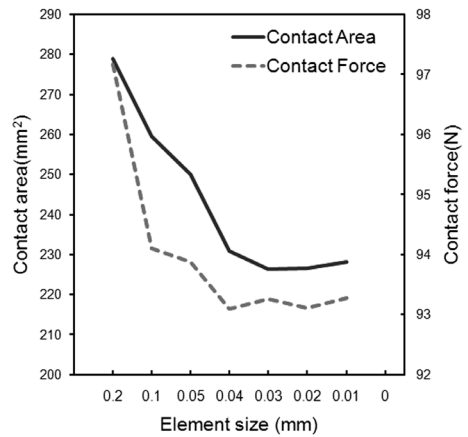


Fig. 4 Change of reaction force and contact force at seal lip according to variation of the element size

유한요소 모델은 축대칭 조건(axisymmetric condition)을 적용하였고, 99% 이상 8절점 사각형 요소(rubber=CAX4H, steel=CAX4)를 사용하였다. 또한 허브와 외륜은 강체로 가정하여 analytical surface로 모델링하였다.<sup>6)</sup> 금속 재료는  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ 를 사용하였다.

또한, 유한요소 모델에 영향을 받지 않도록 하기 위해, 변형이 집중되는 시일 립 부분의 요소 크기를 0.2mm ~ 0.01mm까지 다르게 모델링 한 후, 해석결과(접촉력, 접촉면적)의 변화를 확인하였다. 그 결과, Fig. 4와 같이 0.04mm 이하로 모델링 할 경우 안정된 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.<sup>2)</sup>

해석 결과의 신뢰성은 립의 반력시험 결과와 체결 형상을 비교하여 평가하였다. 시일 립의 반력은 U.T.M를 사용하여 베어링 시일과 허브가 체결될 때 발생하는 수직 하중을 측정하였다. 3번의 시험 결과

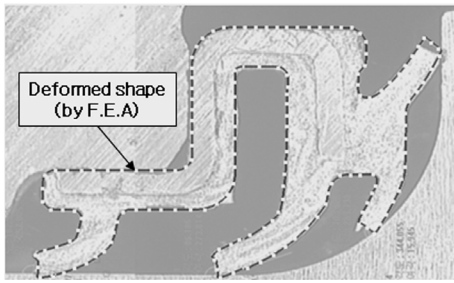


Fig. 5 Comparison the experimental deformed shape with the analytical deformed shape

평균 74.64N의 반력을 구할 수 있었다. 반면, 동일한 조건의 해석을 통해 73.69N을 얻어, 98%이상의 정확도를 확인하였다. 또한, Fig. 5와 같이, 실제 체결 형상과 해석에서의 변형 형상이 매우 유사하였다.<sup>2)</sup>

### 5. 베어링 시일의 마모성 및 실링성 평가

베어링 시일의 마모성 및 실링성 평가에 관한 구체화(공인화)된 방법은 존재하지 않는다. 대부분 제조사별로 다른 기준과 방식에 따라 평가되고 있다. 본 논문에서는 이러한 평가 방법 중 하나인 머드 슬러리 시험 결과를 사용하여 시일 립의 마모와 밀봉 성능을 평가하였다.

#### 5.1 머드 슬러리 시험

머드 슬러리 시험은 Fig. 6과 같은 4가지 타입의 모델에 대하여 실시하였다. 시험 방법은 Fig. 7과 같은 장비를 사용하여, 휠 베어링을 1000 rpm으로 회전시키며 10%의 진흙과 0.5%의 소금을 혼합한 용액을 1분당 6번씩 분사하였다. 이러한 과정을 총 96시간동안 24번 반복한 후 그리스 내의 함수량(moisture content in grease, G)과 각 립의 마모면적(wear area)을 측정하였다.

그리스 내의 함수율은 식 (9)와 같이 시험 전 그리스 중량( $M_b$ )과 시험 후 그리스 중량( $M_a$ )을 통해 구할 수 있으며, 시일 립의 마모량은 Fig. 8과 같이 고배율의 현미경을 사용하여 시험전의 형상(점선)을 기준으로 마모된 단면적을 계산하였다.

$$G(\%) = \frac{M_a}{M_b} \times 1000 \quad (9)$$

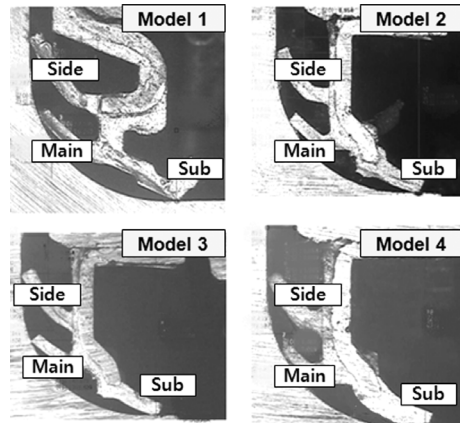


Fig. 6 Section shapes of models to test and analysis

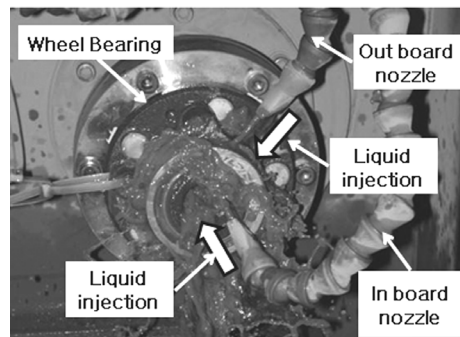


Fig. 7 The mud slurry test

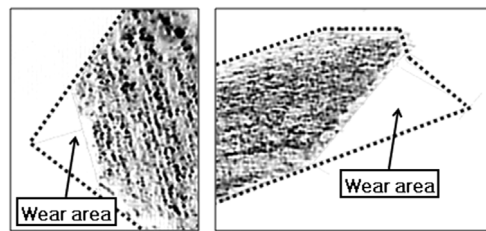


Fig. 8 Wear area of seal lip after the mud slurry test

#### 5.2 시험 결과와 해석 결과의 비교

머드 슬러리 테스트 후 측정된 결과와 유한요소 해석 결과로부터 구한 간섭량(interference, D), 접촉력, 접촉면적, 접촉압력(Pr)을 비교하여 보았다. 접촉력의 경우 기존에 알려진 내용과 같이 간섭량과 비례적인 관계를 확인하였으나, 접촉면적의 경우 시일의 위치 및 형상에 따른 영향으로 인하여 일관성 있는 관계를 확인할 수 없었다.

Fig. 9~11의 그래프는 함수율, 마모량, 접촉압력,

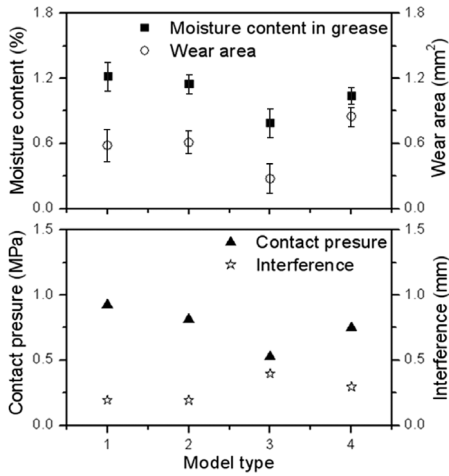


Fig. 9 Comparison of test and analysis results (sub lip)

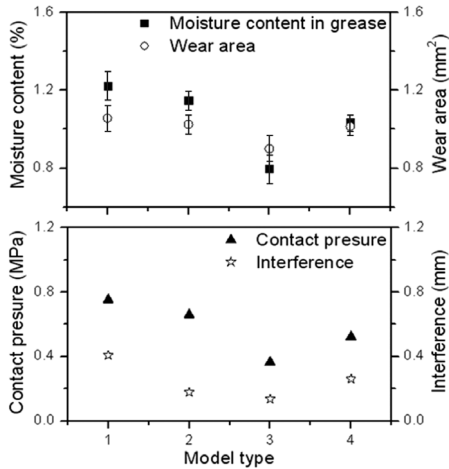


Fig. 10 Comparison of test and analysis results (main lip)

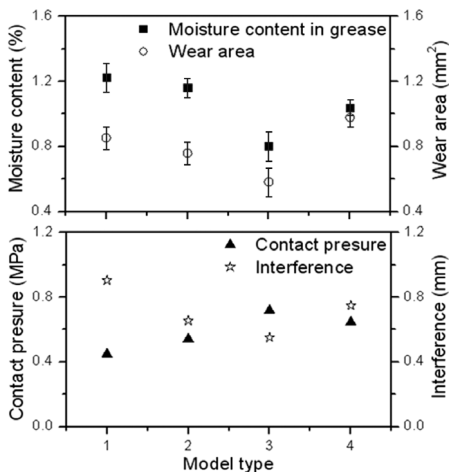


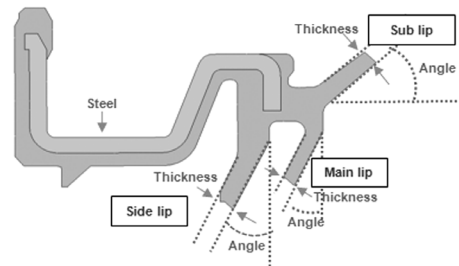
Fig. 11 Comparison of test and analysis results (side lip)

간섭량의 변화를 나타낸 그래프이다. 각 결과들의 정성적인 평가를 위해 함수율과 마모량은 자연로그 형태로 변환하였고, 접촉압력과 간섭량은 로그화하지 않은 값을 사용하였다. 비교 결과, 함수율의 변화와 각 립에서의 마모량 변화가 대체적으로 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 해석을 통해 얻어진 접촉압력의 경우, 시험을 통해 얻어진 함수율과 마모량의 변화와 연관성 있는 변화를 나타내었다. 특히, 서브 립과 메인 립에서는 접촉압력이 머드 슬러리 시험 결과와 비례적인 관계를 보였으며, 사이드 립에서는 접촉압력이 머드 슬러리 시험 결과와 반비례적인 관계로 나타났다. 반면, 간섭량의 경우 시험 결과와 대체적으로 연관성 있는 관계를 보였지만 접촉압력에 비해 작은 연관성을 확인하였다.

## 6. 시일 립의 형상 최적화

형상 최적화에 사용된 모델은 현재 상용화된 베어링 시일(original model)을 사용하였다(Fig. 12). 사용된 설계 변수(design factor)와 범위(level)는 Table 1과 같다. 가공 방식과 설계상의 제한을 고려해, 사이드 립과 머드 립은 길이(L), 각도( $\theta$ ), 두께(t)를, 메인 립은 길이와 각도만을 설계변수로 사용하였다.

상용 통계 프로그램인 Minitab을 사용하여 반응표면을 생성하기 위한 20개의 조건을 만들고, 이를 해석하여 립의 접촉압력 및 간섭량을 구하였다. 그 후, 설계 변수 변화를 예측할 수 있는 회귀 모델(regression model)을 결정하였고, 분산분석(ANOVA)을 통해 목적함수의 반응표면(response surface)을 완



Side lip	Main lip	Sub lip
L=0.58mm $\theta=26^\circ$ t=0.71mm	L=0.49mm $\theta=26^\circ$ t=0.49mm	L=0.495mm $\theta=47^\circ$ t=0.57mm

Fig. 12 The shape of original model

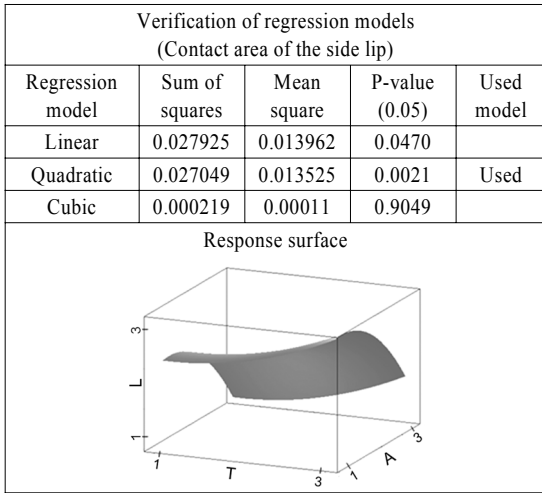


Fig. 13 Example to validate regression models and the creation of response surface

Table 1 Design factors and levels (unit=%)

Level	Side lip			Main lip		Sub lip		
	L	A	T	L	A	L	A	T
1	-20	-10	-10	-12	-12	-20	-5	-15
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	+50	10	+10	+12	+12	+20	+4	+15

※ Level 2 is the original model

Table 2 Results comparison of original model, estimation model and analysis model

	Side lip		Main lip		Sub lip	
	D	Pr	D	Pr	D	Pr
Original model	0.828	1.04	0.770	0.19	0.289	1.76
Estimation model	0.818	1.352	0.776	0.141	0.287	1.611
Analysis model	0.810	1.313	0.771	0.136	0.293	1.621

성하였다(Fig. 13). 그 후, Downhill simplex 알고리즘을 사용하여 마모량과 함수율이 작아질 수 있는 설계 변수를 결정하였다.<sup>8-11)</sup> Figs. 9-11의 결과를 바탕으로, 서브 립과 메인 립은 접촉압력이 작아지도록 하였으며, 사이드 립은 접촉압력이 커지는 조건을 갖도록 하였다. 또한, 간섭량은 저항력의 변화와 밀접한 관계가 있으므로, 기존 모델에서 5% 이내의 변화만 발생하도록 하였다.<sup>1,3,4)</sup>

Table 2는 최적화 과정을 통해 얻어진 베어링 시일 형상의 간섭량과 접촉압력을 나타낸 표이다. 최적화 과정을 통해 구한 형상(estimation model)의 예

측값과 예측된 설계 변수를 사용하여 모델링한 모델(analysis model)의 해석 결과 값이 서로 유사함을 확인할 수 있었다. 상용화 모델에서 사이드 립을 길이를 -5%, 두께를 -10%, 각도를 +10%로 바꿨을 때, 약 26% 증가한 접촉압력을 예측할 수 있다. 또한, 메인 립은 각도만 -5% 변화시킬 때, 약 46% 감소한 접촉압력이 예측되었으며, 서브 립의 길이를 -20%, 두께를 +15%, 각도를 -4.3% 변화하면 약 8.6% 감소된 접촉압력이 예상된다.

### 7. 결론

본 논문은 휠 베어링 시일 립의 밀봉성 및 마모성능의 개선을 위해 유한요소 해석 결과와 반응표면법을 사용한 최적화 방법을 기술하였다. 본 논문은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 베어링 시일 변형 해석 결과와 립 반력 시험 결과를 비교하여 약 98% 정도의 신뢰성을 확인하였고, 실제 체결 형상과 해석을 통해 얻어진 변형 형상을 비교하고 유사성을 확인하였다.
- 2) 체결 방식과 단면 형상이 유사한 4가지 시일 모델에 대하여 머드 슬러리 시험과 변형해석을 수행하였다. 또한 얻어진 결과들을 비교하여 함수율과 마모량의 변화와 접촉압력의 변화가 정성적인 연관성이 있음을 확인하였다.
- 3) 반응표면법 및 Downhill Simplex를 사용하여 상용화된 베어링 시일의 성능 개선을 위한 형상을 제안하였다. 각 각의 립별로 접촉압력과 간섭량의 최적화 조건을 설정하였고, 예측된 결과와 최적화된 모델의 해석 결과를 비교할 때, 약 4%의 오차를 확인하였다.
- 4) 기존모델에서 간섭량의 변화는 최소화하고, 접촉압력을 변화(사이드 립 +26%, 메인 립 -46%, 서브 립, -8.6%)시킬 수 있는 립 형상을 제시하였다.

### References

- 1) G. H. Kim, Y. M. Yoo, J. S. Im and S. H. Lee, "Prediction of the Reaction Force for Seal Lip Design with Wheel Bearing Unit," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.165-172, 2001.
- 2) H. Y. Kim, H. I. Moon, Y. T. Kim, J. H. Park

- and J. S. Im, "Deformation Analysis and Optimization of an Automotive Wheel Bearing Seal Lip," SAE 2007-01-1542, 2007.
- 3) N. J. Choi, Y. M. Hur, K. O. Lee and S. S. Kang, "A Study on Contact force of Rubber Seal for Wheel Bearing," Journal of KSPE, Vol.23, No.1, pp.145-151, 2006.
  - 4) I. K. Jun, W. J. Shim, I. H. Choi and C. K. Kim, "Experiment Study on the Contact Force of Rubber Seals for a All Bearing," Journal of KSLE, Vol.9, No.1, pp.32-37, 1993.
  - 5) H. Y. Kim, J. J. Jong and N. K. Lee, "Deformation Analysis and Shape Optimization for Automotive Engine Mounting Rubber," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.347-360, 1999.
  - 6) ABAQUS 6.8 Theory Manual, 2008.
  - 7) K.-J. Bathe, Finite Element Procedures, pp.485-641, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
  - 8) S. H. Park, Design of Experiments, pp.378-429, Min-young-sa, Seoul, 2004.
  - 9) J. A. Nelder and R. Mead, "Nelder-Mead Method," Computer Journal, Vol.7, pp.308-313, 1965.
  - 10) H. Satoru, H. Tomoyuki and M. Mitsunori, Downhill Simplex Method, ISDL Report, No 20060806006, 2006.
  - 11) Minitab User Manual, 2005.