

## 베어링 용 고무시일의 접촉력에 관한 실험적 연구

전인기\* · 심우전\* · 최인혁\*\* · 김청균\*\*\*

\*홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

\*\*한국종합기계(주) 부설연구소, \*\*\*홍익대학교 기계공학과

## Experimental Study on the Contact Force of Rubber Seals for a Ball Bearing

In Ki Jun\*, Woo Jeon Shim\*, In Hyeok Choi\*\* and Chung Kyun Kim\*\*\*

*\*Tribology Research Center, Hong Ik University*

*\*\*Korea Machinery Co., Ltd.*

*\*\*\*Department of Mech. Engineering, Hong Ik University*

**Abstract**—The equations are derived for the evaluation of the axial contact forces. The contact forces of rubber seals are analyzed as a function of the ratio of real contact length, the thickness of seal lip, the inclined angle of seal lip, and the interference between the edge of seal lip and the rotating inner ring. The experimental apparatus is developed for the test of seal lip contact force. The data for designing rubber seals are presented in terms of the ratio of real contact length, initial inclined lip angle, lip thickness and the interference. The results obtained from the derived equation for the contact force are in good agreement with the experimental results.

### 1. 서 론

베어링에 사용되는 접촉식 고무시일은 베어링 내부에 충전되어 윤활작용을 하는 밀봉 유체의 누설을 차단하고, 외부로부터의 이물질 및 수분의 침투를 방지하기 위하여 사용되는 기계요소로서, 특히 접촉식 고무시일은 작은 설치공간, 간편한 조립방법, 저렴한 가격 등의 장점을 갖고 있어 볼 베어링에서 널리 사용되고 있다.

고속 회전계에서 베어링, 시일 등의 신뢰도가 확보되지 못하면 고성능 기계를 설계하기가 대단히 어렵다는 점을 고려해 볼 때, 밀봉 기능을 충분히 수행하면서 긴 수명을 갖는 립시일의 설계 및 개발은 베어링 설계자의 중요한 과제임을 알 수 있다. 립시일의 밀봉 효율과 수명에 가장 큰 영향을 주고 있는 요소 중의 하나인 시일 접촉면에서의 압력, 즉 시일의 원주방향 긴박력에 관련된 해석은 시일의 최적설계 측면에서 대단히 중요하며, 시일의 수명을 연장시키고, 시일 시스템의 유지·보수 측면에서 립 선단부와 회전축간의 접촉현상 해석 또한 대단히 중요하다.

최근에 초고속, 초정밀, 고도의 안정성을 요구하는 기계가 급증하면서 거시적 관점의 기술보다는 미시적 관점의 첨단기술을 중요시하게 되었으며 트라이볼로지 요소에 관련된 기술, 특히 시일의 수명 연장 또는 신뢰도 회복에 커다란 관심을 갖게 되었다. 기계장치의 한 요소에 불과한 시일의 기능에 문제를 제기할 경우 기계장치 전체에 미치는 영향이 너무 심각하기 때문에 립시일에 관련된 시일의 접촉면 압력, 간섭량, 내유특성 및 열특성에 관련된 해석은 중요한 의미를 갖는다[1, 2].

볼 타입 밀봉 베어링의 윤활제로는 그리이스가 가장 많이 사용되고 있고, 시일 재질로는 고무계통이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 시일성능이 비교적 우수한 축방향 접촉식 고무시일의 접촉력에 관한 이론 및 실험적 연구를 통하여 이들의 결과를 비교·검토하고자 한다.

시일의 접촉면에서 축방향 접촉력이 크게 설계되면 시일 립 선단에서는 마찰과 마멸이 심하게 진행되어 시일수명을 크게 단축시킬 우려가 있고, 접촉력이 작게 설계되면 밀봉된 유체의 누설 우려가 증가되면서

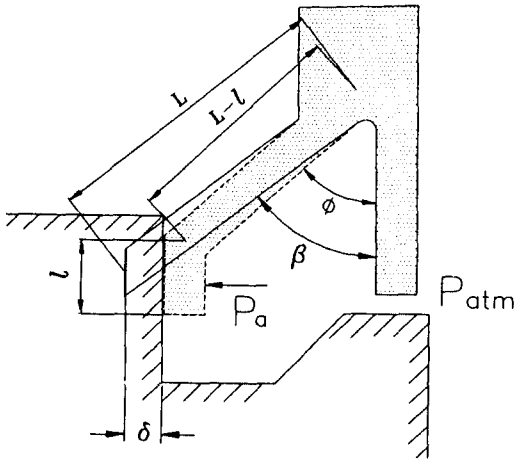


Fig. 1. Lip seal geometry of ball bearing

볼과 레이스 사이의 윤활상태를 나쁘게 하여 베어링 수명을 크게 단축하는 결과를 초래하게 된다. 따라서 본 연구에서는 시일의 성능에 가장 큰 영향을 주고 있는 변수로서 시일 립과 베어링 회전부 사이의 접촉면에 관련된 접촉력, 즉 접촉면에서의 간섭량에 관한 것을 해석하고, 접촉력과 간섭량에 관하여 이론 및 실험적 해석을 수행한다.

## 2. 이론적 연구

깊은 홈 볼 베어링용 고무시일에서 축방향의 접촉력 크기를 해석하기 위하여 Fig. 1과 같은 시일 립 모델을 설정하고, 이 모델에 대한 시일 립 선단부의 처짐에 의한 힘(복원력)과 원주방향 응력중 축방향으로 작용하는 성분에 의하여 시일 립에 작용하는 힘(후프응력의 축방향 성분)을 이론적으로 유도한 후 각각을 중첩하여[3-5] 시일 립에 작용하는 전체 접촉력 크기를 구하였다.

### 2-1. 시일 립 선단부의 처짐량에 의한 힘

Fig. 1과 같은 시일 립 모델에 대한 처짐량, 즉 시일 립 선단부의 간섭량 크기를 탄성체보 이론(Elastic Beam Theory)을 이용하여 해석하였다. 이 그림에서 시일을 볼 베어링에 설치하기 전의 립 상태는 실선으로 표시된 형태로 시일 립 선단부의 초기 경사각 \$\beta\$에 의하여 표현되고, 고무시일이 베어링 외륜 홈에 설치된 후의 립 상태는 립 선단부가 내륜의 측면에 접촉하면서 점선으로 표시된 형태로 변형하면서 시일

립의 초기 경사각 \$\beta\$는 설치각 \$\phi\$로 바뀌게 된다. 시일 립 선단부의 간섭량 때문에 발생하는 축방향의 접촉력은 시일 립의 전체 길이와 시일 립 선단부-내륜 사이의 실제 접촉길이 비를 나타내는 \$\xi=l/L\$의 값으로 표현될 수 있다. 주어진 간섭량 \$\delta\$에 의하여 발생하는 복원력은 시일 립 선단 접촉부위 \$l\$에 분포하중으로 작용하나 이것을 시일 립 접촉길이 중앙에 작용하는 집중하중으로 가정할 경우, 축방향의 접촉력 크기 \$P\_d\$는 탄성체 보 이론을 적용하여 해석하면 다음과 같이 구해진다.

$$P_d = \pi E d_1 \delta \left(\frac{t}{L}\right)^3 \frac{1}{(4-\xi)[(1-\xi)\cos\beta]^2} \quad (1)$$

여기서 \$E\$는 시일 립 재료의 탄성계수, \$d\_1\$은 시일 립 선단부의 직경, \$t\$는 시일 립 선단부의 두께, \$L\$은 시일 립의 전체길이를 각각 나타낸다. 간섭량 \$\delta\$에 따른 시일의 접촉력은 시일의 기하학적 형태(\$d\_1, L, t, \beta\$), 재료(\$E\$) 및 접촉 길이비(\$\xi\$)의 함수로 일반화시킬 수 있으며, 간섭량 \$\delta\$는 시일 립이 변형되기 전과 변형된 후의 기하학적인 형태를 고려하여 시일 립의 초기 경사각도 \$\beta\$와 시일의 설치 후 각도 \$\phi\$, 시일 선단부의 접촉 길이비 \$\xi\$의 함수로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$\delta = L[\sin\beta + (\xi - 1)\sin\phi] \quad (2)$$

### 2-2. 후프응력에 의한 힘

시일 립 설치시 축방향으로 간섭량의 크기 \$\delta(x)\$가 작용하면 Fig. 2에서 보여주고 있는 것과 같이 원주방향의 응력이 발생한다. 이 때 시일 립이 베어링의 측면부와 실제로 접촉하는 위치를 나타내는 안쪽 구간인 \$0 \le x \le L-l\$에서는 캔틸레버 보(Cantilever Beam) 이론에서 립 길이방향 변수 \$x\$에 따라 구해지는 처짐량을 그대로 적용하여 후프응력을 구할 수 있으나, \$L-l \le x \le L\$ 구간에서의 처짐량은 간섭량 \$\delta\$가 균일하게 그대로 유지되므로 원주방향으로 발생하는 후프응력은 두 구간으로 나누어 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$\sigma_{H1} = \frac{12E}{(4-\xi)(1-\xi)^2} \left(\frac{\delta}{d_1}\right) \left\{ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right\} \quad (3)$$

for \$0 \le x \le L-l\$

$$\sigma_{H2} = 2E \left(\frac{\delta}{d_1}\right) \quad \text{for } L-l \le x \le L$$

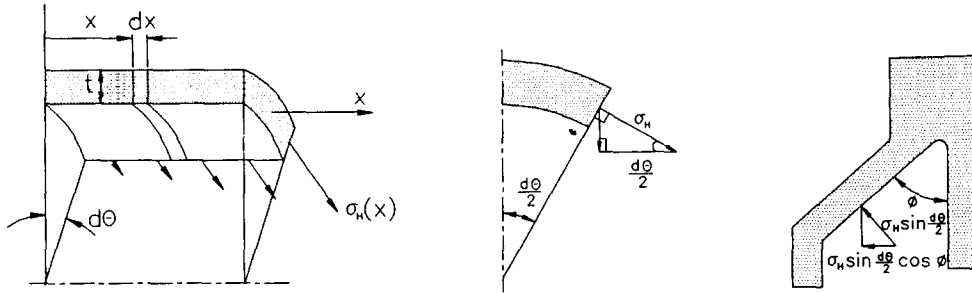


Fig. 2. Circumferential stretch forces due to beam deflection

Fig. 2에서 대단히 작은 원주방향의 각도  $d\theta$ 를 해석 대상으로 하면 원주방향의 응력  $\sigma_H$  중에서 시일 립의 축방향으로 작용하는 성분  $\sigma_a$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ai} = 2\sigma_{Hi} \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \cos\phi \approx \sigma_{Hi} \cos\phi d\theta$$

$$\text{where } i=1, 2 \quad (4)$$

시일 설치시의 간섭량  $\delta$ 에 의하여 발생하는 축방향의 접촉력 크기  $P_s$ 는 식 (4)를 이용하여 미소면적  $t dx$ 와 실제 접촉 길이의 두개 구간( $0 \leq x \leq L-l$ 와  $L-l \leq x \leq L$ )에 대하여 적분하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다. 즉,

$$P_s = \frac{1}{\cos\beta} \left( \int_0^{L-l} \int_0^{2\pi} \sigma_{a1t} dx + \int_{L-l}^L \int_0^{2\pi} \sigma_{a2t} dx \right) \\ = 2\pi EtL \left( \frac{\cos\phi}{\cos\beta} \right) \left( \frac{\delta}{d_1} \right) \frac{(3+4\xi - \xi^2)}{(4-\xi)} \quad (5)$$

베어링의 정적인 상태에서 작용하는 축방향 전체 접촉력 크기  $P_a$ 는 립의 처짐량(간섭량)에 의한 힘  $P_d$ 와 원주방향으로 발생하는 후프응력에 의한 힘  $P_s$ 의 합으로 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$P_a = P_d + P_s \quad (6)$$

### 3. 실험적 연구

#### 3-1. 실험장치

깊은 홈 볼 베어링 용 고무시일의 접촉력 크기를 측정하고, 접촉 운동면의 접촉상태를 고찰하기 위한 실험장치는 Fig. 3에서 보여주고 있다. 베어링의 밀봉을 위하여 사용된 시일의 재질은 NBR(Nitrile Butadiene Rubber)이고, 시일 립과 실제로 상대접촉 운동을

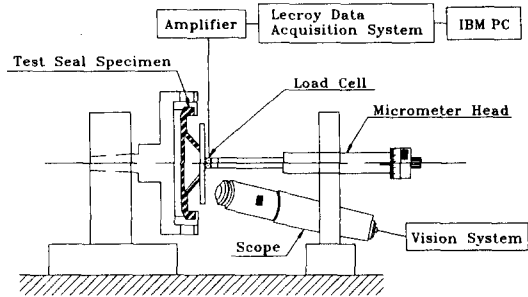


Fig. 3. Experimental set-up used for measuring the contact forces and observing the contact conditions

하는 베어링의 내륜 측면부를 대신하고 있는 아크릴 투명판은 시일 회전축에 대하여 직각상태를 유지할 수 있도록 설계하여 시일 립 선단부의 미끄럼 접촉상태를 확인할 수 있도록 설계하였다. 시일 립 선단부와 투명판 사이의 접촉상태를 확인하기 위하여 사용된 비전 시스템(Vision System)은 HiRox사의 Micro Hi-Scope(KH-2200 Model)이고, 접촉력의 크기를 측정하기 위하여 사용된 초소형 로드셀은 Entran ELF500 모델이다.

#### 3-2. 시험편

접촉력을 측정하기 위하여 사용된 밀봉 베어링 용 고무시일 시험편은 깊은 홈 볼 베어링에 사용되고 있는 NBR 계통의 고무시일(6206D)로서 그 재원과 재질에 관련된 데이터는 Table 1에 제시되고 있고, 고무시일이 장착된 밀봉 베어링과 고무시일 시험편의 단면도는 Fig. 4와 같다.

#### 3-3. 실험방법

밀봉 유체에 의한 시일 립의 팽윤 효과를 배제하기 위하여 시일 립에 밀봉 유체가 개입되지 않은 상태

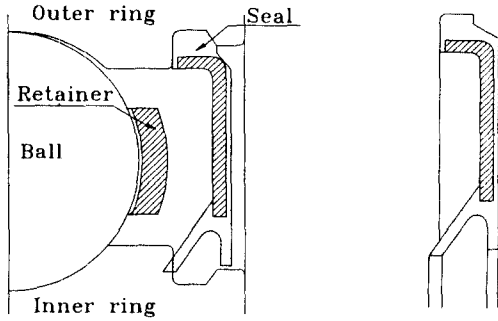


Fig. 4. Rubber seal for a deep groove ball bearing

Table 1. Basic data for contact force calculation

Diameter of seal lip edge, mm	39.0
Overall length of seal lip, mm	3.233
Thickness of seal lip, mm	0.35
Inclined angle of seal lip, Degree	30.0
Elastic Modulus, MPa	4.8

에서 Fig. 3과 같은 실험장치를 이용하여 접촉력을 측정하였다.

베어링이 정지된 상태에서 시일 립과 아크릴 투명판 사이의 최대 간섭량  $\delta$ 를 마이크로미터기(Micrometer Head)로 조절해 가면서 간섭량에 따른 접촉력의 크기를 로드셀(Load Cell)을 이용하여 측정하였다. 또한, 시일 립 선단부에 접촉하고 있는 투명판과의 접촉상태는 비전 장치를 사용하여 사진으로 촬영하였다.

#### 4. 연구결과 및 고찰

동적인 상태에서 밀봉 베어링의 접촉력을 측정하기 위하여는 시일의 립 선단부가 고무로 만들어졌기 때문에 베어링 회전축에 직각인 내륜의 측면과 시일립 선단부가 서로 평행하게 접촉된 상태에서 작동되어야 하고, 작동중 베어링 내외부로부터 발생할 수 있는 진동에 의한 영향이 완전히 배제된 상태에서만 신뢰할 수 있는 데이터를 얻을 수 있다. 작동 중인 베어링에서는 이와 같이 엄격한 실험조건을 만족시키기가 대단히 어렵기 때문에 본 연구에서는 정적인 상태의 볼 베어링에 대한 접촉력의 크기와 시일립의 접촉길이 상태를 실험적으로 측정하였다.

Fig. 5는 볼 베어링에서 사용하고 있는 접촉식 고무시일 립 선단부 간섭량의 변화에 따른 접촉력의 크기를 해석한 결과이다. 여기서 실선은 실험적으로

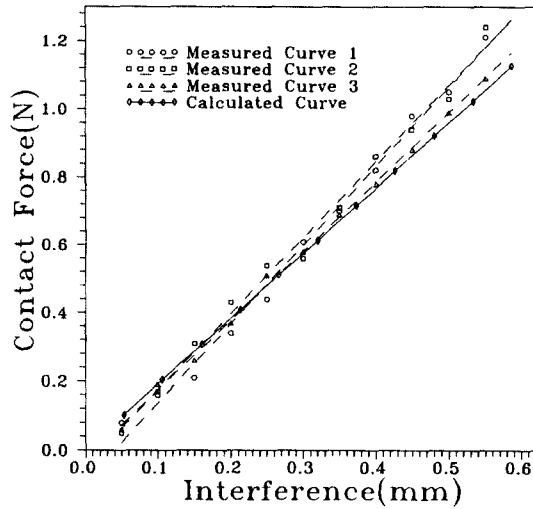


Fig. 5. Comparison between the calculated and measured contact forces when  $\xi=0.3$

측정한 결과이고, 점선은 이론적으로 해석한 식 (6)을 이용하여 계산된 결과로 두 데이터는 서로 잘 일치하고 있다. 특히, 이론 해석치는 선형 탄성체 보 이론에 의한 결과이므로 선형성을 나타내는 것은 당연한 결과이다. 실험 결과 또한 간섭량과 접촉력의 크기가 거의 직선적으로 변화함을 보여주고 있는데, 이것은 베어링용 시일에서 실제로 사용되고 있는 간섭량이 0.3 mm 이하에서 존재한다는 것을 고려하면(참조 Fig. 6) 비선형 재질이 작은 변형을 겪을 때 선형적인 성질을 나타낸다는 사실에 비추어 볼 때 적절한 실험 결과라 판단된다.

비록 Fig. 5는 정적인 상태에서 측정한 접촉력 크기를 이론적인 해석 결과와 비교한 것이지만, 접촉력의 크기가 실제로는 작동 중인 상태에서 작용하는 전체 접촉력 성분들 중에서 시일립 간섭량  $\delta$ 의 변화에 따른 복원력과 후프응력과 같은 정적 접촉력 성분들에 의하여 지배되고 있다는 사실이 이론적 해석을 통하여 밝혀진 것[6]을 고려하고, Fig. 5의 결과를 비교하면 이론적으로 간략화시켜 구한 접촉력 식 (6)도 대단히 유용하다고 생각된다.

Fig. 6은 간섭량을 변화시킴에 따라서 시일립 선단부가 어떻게 변화하는가를 아크릴 투명판에 접촉된 면의 형태를 비전 시스템으로 촬영한 것이다. 이 사진들은 접촉 길이비  $\xi$ 의 존재를 밝혀주는 좋은 데이터이다. 이것은 단순보 이론을 이용하여 립 선단이 회전부에 접촉하는 오일시일 형태를 이상화시켜 해

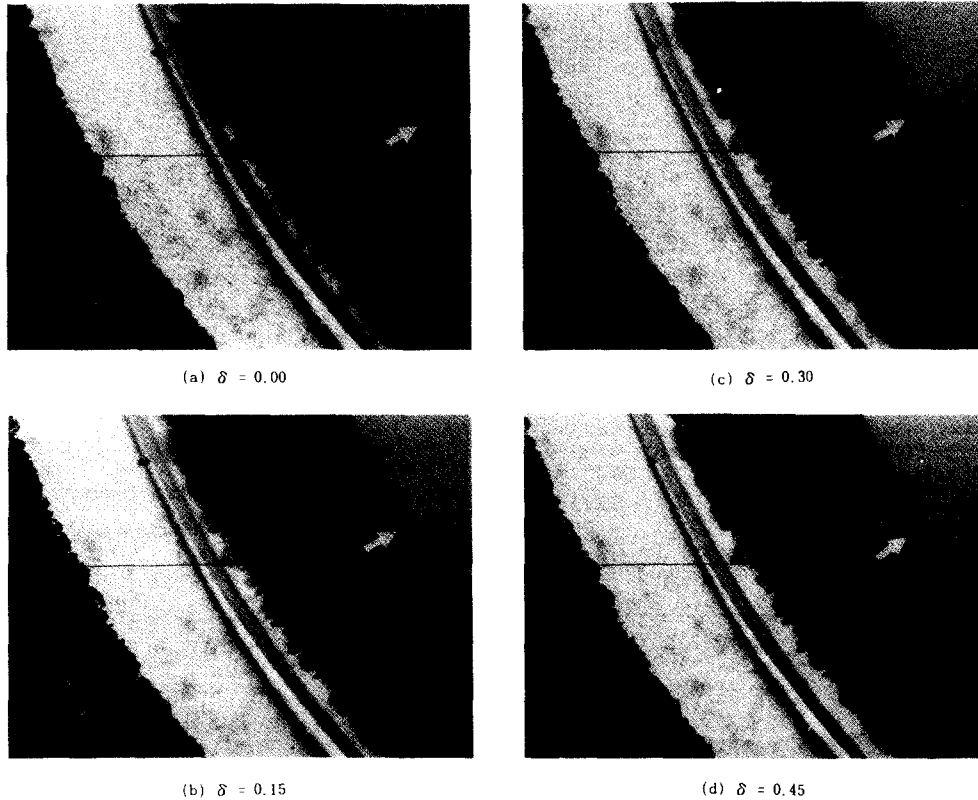


Fig. 6. Rubbing contact width between the seal lip and the transparent plate

석한 川上善久[7]의 연구와는 달리 좀 더 실제에 가깝게 해석하기 위해 접촉 길이비  $\xi$ 를 이론해석 과정에 도입한 것에 대한 타당성을 입증하는 실험적 데이터이다. 시일 립 선단부가 단지 접촉하고 있는 Fig. 6(a)로부터 선단부의 간섭량  $\delta=0.45$  mm를 준 상태를 나타내는 Fig. 6(d)에 이르기까지 네 가지 경우에 대한 시일 립 선단부의 변화를 촬영한 것이다. 이 결과에 의하면 시일 립 선단부의 간섭량이 증가함에 따라서 시일 립 접촉 길이비(사진에서 화살표 부분이) 크게 증가하는 것으로 보아 마찰과 마멸에 의한 손상이 크리라는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

## 5. 결 론

시일의 접촉력에 관한 이론적 해석을 보다 정확하게 하기 위하여 시일 립 선단부의 처짐에 따른 복원력과 후프 응력에 의한 축방향의 복원력에 의한 영향을 각각 해석한 후 중첩하여 전체 접촉력을 구하였다. 이론해석 결과에 의하면 시일의 접촉력은 간섭량에

의해 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 정지된 베어링에 대한 이론식 (6)에 의해 간섭량에 대하여 계산된 접촉력의 크기가 실험적으로 측정된 데이터와 비교한 결과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

시일의 접촉력을 실험적으로 측정하고 접촉면 형상을 관찰할 수 있는 실험장치를 개발하였다. 이것은 앞에서 거론된 몇 가지 사항에 대한 고려가 이루어진다면 작동 중인 베어링에 대한 실험도 수행될 수 있는 실험장치이다.

본 연구를 통해 간섭량이 커질수록 이론 및 실험 해석 결과 접촉력이 증가함을 알 수 있었고, 사진을 관찰한 결과 접촉 길이비가 증가함을 볼 수 있다. 접촉 간섭량의 증가는 이물침투 및 누설방지라는 관점에서는 유리하나 동력 손실량 증가와 시일 수명 감소의 결과를 가져오게 된다. 또한 접촉 길이비의 증가는 곧 마찰과 마멸에 의한 손상이 커지는 결과를 초래한다. 반면에 간섭량이 작아지면서 접촉력과 접촉 길이비가 감소하는데 이것은 동력 손실, 마찰 및 마멸이 감소한다는 점에서는 유리하나 누설과 이물질

침투에 취약한 결과를 낳게되어 문제가 될 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 최적화할 수 있는 접촉력이 결정되면 그에 따르는 간섭량에 관한 데이터가 본 연구를 통해 결정될 수 있고, 이것은 실제의 베어링 용 시일 립 설계에 반영될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1991년 한국종합기계(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Benktander, S.A., "Automotive Hub Bearing Units-

- European Experience," SAE Paper 810757, 1981.
2. Bras, J.C.M., "Specification and Seal Development for Passenger Vehicle Wheel Bearings," SAE Paper 871982, 1987.
3. Schmitt, W.A., "Radial Load as a Lip Seal Design and Quality Control Factor," J. of Lub. Tech., pp. 405-411, April 1968.
4. Stakenborg, M.J.L., "On the Sealing Mechanism of Radial Lip Seals," Tribology International, pp. 335-340, 1988.
5. Horve, L.A., "Achieving Dimensional Control with Molded Lip Seals," ASLE Trans., pp. 181-186, 1975.
6. 김청균, 전인기, 최인혁, "볼 베어링 용 고무시일의 접촉력 해석에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 16권 제 12호, pp. 2261-2267, 1992.
7. 川上善久, "高密封性能玉軸受とその用途" 機械設計, Vol. 27, No. 7, pp. 73-77, June 1983.