

세라믹 볼베어링의 특성해석에 관한 연구

김완두* · 한동철**

*한국기계연구원 기계구조실, **서울대학교 기계설계학과

A Study on the Characteristics of Ceramic Ball Bearing

Wan-Doo Kim* and Dong-Chul Han

*Structural Mechanics Lab. KIMM

**Dep. of Mech. & Production Eng. SNU

Abstract—The recent trends of rotating machinery demand high speed and high temperature operation, and the bearing with new material is required to be developed. Ceramic, especially silicon nitride, have been receiving attention as alternative material to conventional bearing steel. Ceramic ball bearing offers major performance advantages over steel bearing, for instance, high speed, maginal lubrication, high temperature, improved corrosion resistance and nonmagnetic capabilities etc.. In this paper, the mechanical characteristics of ceramic ball bearing (hybrid ceramic bearing and all ceramic bearing) were investigated, and the characteristics of ceramic bearing were compared with that of steel bearing. Deep groove ball bearing 6208 was taken the object of analysis. The main results of analysis were followings: the radial stiffness of hybrid and all ceramic bearing were 112% and 130% that of steel bearing, and the axial stiffness of all ceramic bearing was 110% that of steel bearing. According as rotating speed was up, the ball load, the contact angle, the contact stress and the spin-to-roll ratio between ball and raceway of ceramic bearing were far smaller than these of steel bearing. And there was not a significant difference between the minimum film thickness of ceramic bearing and steel bearing. It is expected that this research is contributed to enhanced fundamental technology for the practical applications of ceramic ball bearing.

1. 서 론

각종 회전 기계류의 고속화, 고온화 추세로 고속, 고온에서 사용할 수 있는 베어링이 요구되고 있다. 그러나 기존의 베어링강 소재의 베어링(이하에서 강 베어링이라 호칭)은 고온에서의 강도 저하 및 고속 회전 시 전동체의 원심력 증가에 의한 급격한 피로 수명의 감소 등으로 인해 사용이 불가능하게 된다. 고속화를 위해서 저밀도의 재질이 필요하며, 고온화를 위해서는 고온 강도가 뛰어난 재질이 필요하다.

최근 개발되고 있는 기계구조용 세라믹은 이 두가지 특성을 모두 가진 재질로써 베어링에의 응용이 시도되고 있으며, 특히 질화규소가 구름베어링의 대체재질로써 가장 각광을 받고 있다[4, 6, 9].

세라믹 볼베어링은 세라믹의 특성인 저밀도, 고강성

및 뛰어난 내열성, 내마모성으로 인하여 고속, 고온, 부식, 자성 및 진공 분위기 등에서도 사용이 가능하도록 개발된 첨단 요소부품으로써, 그 응용 범위가 날로 증가되고 있는 추세이다.

세라믹 볼베어링은 볼만 세라믹으로 대체한 하이브리드(hybrid) 세라믹 볼베어링(이하에서 하이브리드 베어링이라 호칭)과 내외륜까지 모두 세라믹으로 만든 전세라믹 베어링(이하에서 세라믹 베어링이라 호칭)으로 구분되며, 고속 공작기계의 주축, 고속 고온 가스터빈, 고온 내식용 베어링 유니트 등에 실제 응용 사례가 보고되고 있다[1-9].

베어링으로 지지된 축계는 외부 힘에 의해서 휨이나 진동을 일으키며, 이것에는 축의 강성과 더불어 베어링의 강성이 큰 영향을 끼친다. 축계의 강성은 회전축의 위험 속도, 즉 고속 회전 한계에 영향을 주며,

공작기계 주축에서는 가공 정도의 향상이나, 진동방지를 위해 높은 베어링의 강성, 즉 베어링에 작용되는 하중에 의해 발생하는 내외륜 사이의 상대 변위량의 관계는 볼과 내외륜과의 접촉부위의 변형으로 주어진다.

한편, 고속 회전하는 볼베어링은 볼의 원심력 크기가 외력에 비해 무시할 수 없을 정도의 크기이기 때문에 하중분포를 구할 때 이를 고려하여야 하며, 이 해석을 준정적 해석이라 부른다. 고속에서 볼의 접촉각은 볼의 원심력과 자이로모멘트의 영향으로 인해 내륜쪽에서 커지고, 외륜쪽에서 작아지게 된다. 이것은 베어링의 하중 대 변위 특성과 로우터 시스템의 동특성, 그리고 윤활특성 등에도 영향을 끼치게 된다.

본 논문에서는 복합하중하의 볼베어링의 하중분포 및 변형 해석을 통하여 세라믹볼베어링의 반경방향과 축방향 강성 특성을 살펴보았다. 또한 준정적 해석을 수행하여 고속회전시의 기존 강베어링과 세라믹 볼베어링의 특성을 비교평가하여 세라믹 볼베어링의 설계 및 특성 규명을 위한 해석 기술을 확보하고자 한다.

2. 볼베어링의 해석

볼베어링의 특성을 해석하기 위한 방법에는 볼과 궤도륜 사이의 접촉으로 인한 힘과 변형사이의 관계와 기하학적 조건으로부터 베어링의 변형 및 하중분포 등을 구하는 정적 해석(static analysis)과 고속 회전시의 볼의 원심력과 자이로모멘트에 의한 영향을 고려하는 준정적 해석(quasi-static analysis), 그리고 볼베어링의 각 구성요소간의 상대운동 및 동적 안정성 등을 평가하는 동적 해석(dynamic analysis) 등이 있다[10, 11].

본 논문에서는 세라믹 볼베어링의 강성 특성과 고속 회전 시의 볼접촉 하중 및 접촉각 등의 특성을 규명하기 위하여 정적 해석과 준정적 해석을 수행하였다.

정적 해석과 준정적 해석의 풀이 절차 및 방법 등은 이미 밝혀져 있으며, 본 논문에서는 Harris[12]와 Jones[13, 14]의 방법에 따라 해석 프로그램을 완성하여 볼베어링의 특성을 평가하였다.

본 논문에서는 해석절차 및 풀이방법에 대한 상세한 설명은 생략하고, 해석결과만을 제시하였다. 해석은 깊은홈 볼베어링(형번: 6208)을 대상으로 강베어링, 하이드 베어링 및 세라믹 베어링에 대해 수행하였으

Table 1. Dimensions of deep-groove ball bearing 6208

| | |
|-----------------------|-----------|
| pitch diameter | 60 mm |
| ball diameter | 11.906 mm |
| number of balls | 9 |
| inner groove radius | 6.02 mm |
| outer groove radius | 6.31 mm |
| nominal contact angle | 0 |
| diametral clearance | 0 |

Table 2. Materials and materials properites of bearings [8]

| | steel | ceramic |
|------------------|------------------------|-----------------------------------|
| materials | KS STB 2 (SAE 52100) | HPSN(hot pressed silicon nitride) |
| Young's modulus | 208 GPa | 315 GPa |
| Poission's ratio | 0.30 | 0.26 |
| density | 7850 kg/m ³ | 3200 kg/m ³ |

며, 각 베어링에 대해 동일한 치수를 적용하였다. Table 1과 2는 해석에 필요한 베어링의 주요치수 및 재료의 물성치를 보여준다.

세라믹 볼베어링의 소재는 볼베어링 재료로서 특성이 우수하다고 알려진 질화규소(Si₃N₄)를 이용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3-1. 베어링 강성

베어링 기본 특성중의 하나인 강성 평가를 위해 복합하중 하에서의 하중분포와 변형을 정적해석으로부터 구하였으며, 고속 회전 시 강성의 변화도 알아보기 위해 준정적 해석을 수행하였다. Table 3은 반경방향 하중과 축방향 하중이 작용할때의 강베어링과 세라믹 베어링에 대한 반경방향 변형과 축방향 변형 값을 보여준다. 이들 값들은 정적해석에 의해 구해졌으며, Fig. 1~4는 이들의 관계를 도식화한 그림이다.

Fig. 1과 2로부터 반경방향 하중이 일정할때 축방향 하중 변화에 따른 반경방향 변형은 거의 변화가 없음을 알았다. Fig. 3과 4로부터 강베어링과 세라믹 베어링 모두가 축방향 하중이 비교적 작은 경우에는 반경방향 하중이 커짐에 따라 축방향 변형이 약간 증가하는 경향을 보이며, 축방향 하중이 큰 경우에는 반경방향 하중이 커짐에 따라 약간 감소했다가 다시

Table 3. Results of static analysis under radial and thrust load for steel bearing and all ceramic bearing

| Ft (N) | | 0 | | 100 | | 2000 | | 4000 | | 6000 | | 8000 | |
|----------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fr (N) * | | dt (mm) | dr (mm) | dt (mm) | dr (mm) | dt (mm) | dr (mm) | dt (mm) | dr (mm) | dt (mm) | dr (mm) | dt (mm) | dr (mm) |
| | 0 | ST | .000 | .000 | .098 | .000 | .117 | .000 | .140 | .000 | .156 | .000 | .169 |
| CR | | .000 | .000 | .089 | .000 | .106 | .000 | .127 | .000 | .141 | .000 | .152 | .000 |
| 7750 | ST | .000 | .044 | .103 | .045 | .117 | .046 | .137 | .047 | .153 | .047 | .165 | .046 |
| | CR | .000 | .034 | .093 | .035 | .106 | .036 | .124 | .036 | .138 | .036 | .149 | .036 |
| 15500 | ST | .000 | .069 | .115 | .069 | .126 | .070 | .141 | .072 | .154 | .073 | .164 | .073 |
| | CR | .000 | .053 | .103 | .053 | .112 | .055 | .127 | .056 | .139 | .057 | .149 | .057 |
| 23250 | ST | .000 | .091 | .125 | .090 | .133 | .091 | .146 | .093 | .157 | .094 | .166 | .095 |
| | CR | .000 | .070 | .111 | .069 | .119 | .070 | .131 | .072 | .141 | .073 | .150 | .073 |
| 31000 | ST | .000 | .110 | .132 | .109 | .140 | .109 | .151 | .111 | .161 | .112 | .169 | .113 |
| | CR | .000 | .085 | .118 | .083 | .125 | .085 | .136 | .086 | .145 | .087 | .153 | .088 |

* ST : ball bearing with steel ball and steel race
 CR : ball bearing with ceramic ball and ceramic race
 dt : axial (or thrust) deflection
 dr : radial deflection
 Fr : radial load
 Ft : axial (or thrust) load

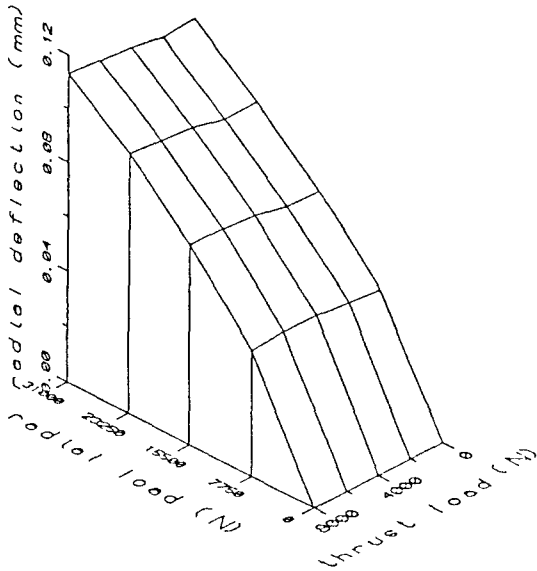


Fig. 1. Radial deflection of steel bearing under radial and thrust load

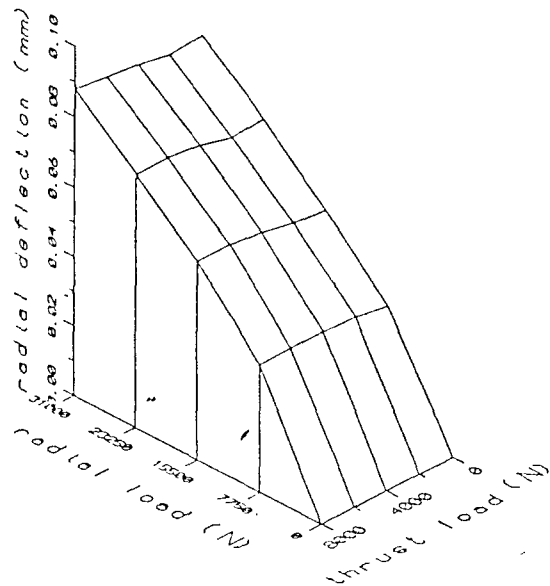


Fig. 2. Radial deflection of all ceramic bearing under radial and thrust load

커지는 경향을 보임을 알 수 있다.

한편, 세라믹 베어링과 강베어링의 각 하중 변화에 따른 변형되는 경향은 거의 동일하며, 세라믹 베어

링의 경우가 강베어링 반경방향 변형의 약 77%, 축방향 변형의 약 90%의 값을 지님으로써, 축방향 강성보다 반경방향 강성이 더 높음을 알 수 있었다. 같은

크기의 축방향 하중이 작용하는 경우 세라믹 베어링에서의 볼과 케드론 사이의 접촉각은 세라믹 소재 자체의 높은 강성도로 인하여 강베어링보다 작게 되므로, 볼접촉 하중은 오히려 강베어링보다 더 커지게 되며, 축방향 변형도 약간 증가되게 된다. 이러한 현상으로 인하여 축방향 강성의 경우 베어링 소재의 강성도 비율인 130% 보다 작은 값인 110% 정도의 값을 지니게 된다.

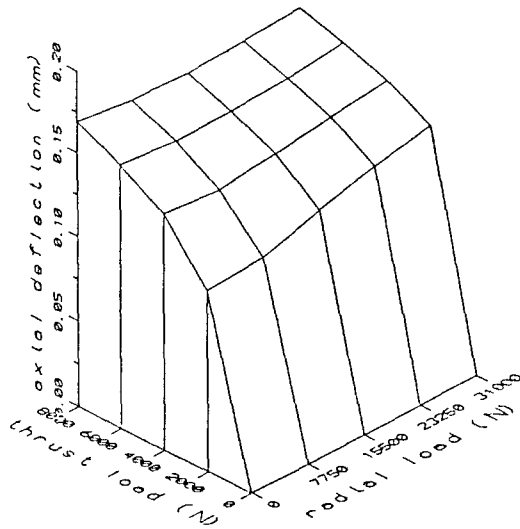


Fig. 3. Axial deflection of steel bearing under radial and thrust load

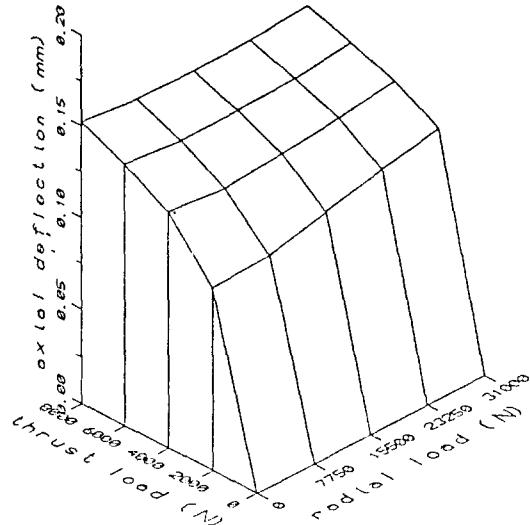


Fig. 4. Axial deflection of all ceramic bearing under radial and thrust load

Table 4. Radial stiff of 6208 bearing under 15700N radial load

| | Steel | Hybrid ceramic | All ceramic |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 저속 회전시 | 225 kN/mm (100%) | 253 kN/mm (112%) | 292 kN/mm (130%) |
| 50,000 rpm (300만 d_m N) | 217 kN/mm (100%) | 249 kN/mm (115%) | 288 kN/mm (133%) |

Table 5. Ball load distributions and contact angles of steel bearing and all ceramic bearing under 7750N radial load and 8000N thrust load

| shaft speed (rpm) | ball location (deg) | ball load (N) | | | | contact angle (deg) | | | |
|-------------------|---------------------|---------------|-------|---------|-------|---------------------|-------|---------|-------|
| | | steel | | ceramic | | steel | | ceramic | |
| | | inner | outer | inner | outer | inner | outer | inner | outer |
| 저속 50000 | 0 | 5153 | 5153 | 5351 | 5351 | 10.2 | 10.2 | 9.8 | 9.8 |
| | | 4865 | 5773 | 5167 | 5538 | 11.8 | 9.9 | 10.5 | 9.8 |
| 저속 50000 | ± 40 | 4200 | 4200 | 4418 | 4418 | 12.7 | 12.7 | 12.0 | 12.0 |
| | | 3862 | 4765 | 4232 | 4601 | 15.1 | 12.2 | 12.9 | 11.9 |
| 저속 50000 | ± 80 | 2564 | 2564 | 2798 | 2798 | 19.3 | 19.3 | 17.7 | 17.7 |
| | | 2171 | 3049 | 2612 | 2975 | 25.6 | 18.0 | 19.8 | 17.3 |
| 저속 50000 | ± 120 | 1793 | 1793 | 2003 | 2003 | 27.1 | 27.1 | 24.4 | 24.4 |
| | | 1476 | 2301 | 1830 | 2183 | 39.5 | 24.7 | 28.4 | 23.6 |
| 저속 50000 | ± 160 | 1791 | 1791 | 1971 | 1971 | 32.3 | 32.3 | 28.8 | 28.8 |
| | | 1504 | 2292 | 1804 | 2148 | 46.6 | 29.5 | 33.7 | 27.8 |

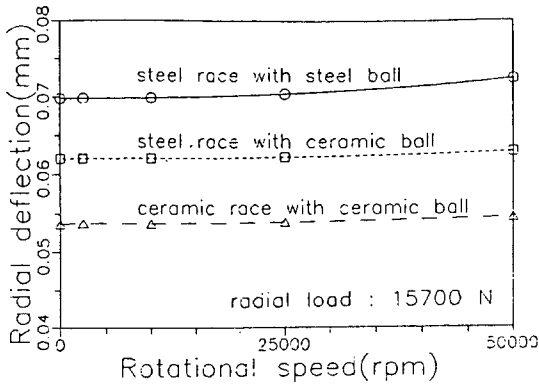


Fig. 5. Effects of speed on radial deflection under 15700N radial load

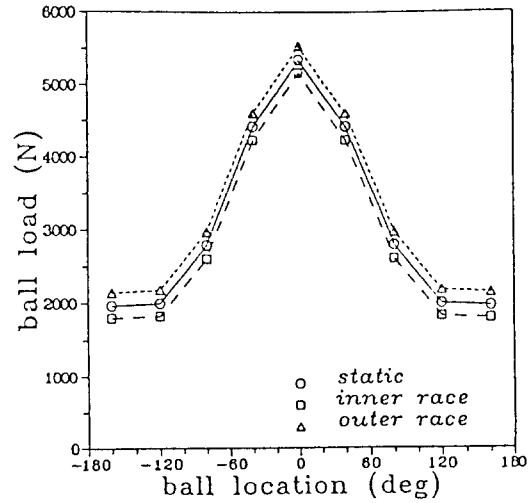


Fig. 7. Ball load distributions of all ceramic bearing under 7750N radial load and 8000N thrust load when speed is 50000 rpm

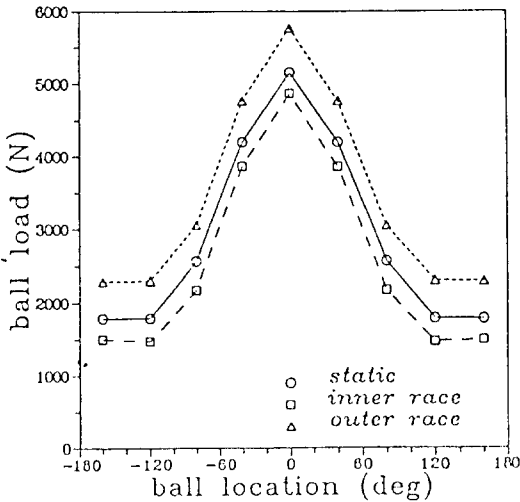


Fig. 6. Ball load distributions of steel bearing under 7750N radial load and 8000N thrust load when speed is 50000 rpm

한편, 고속 회전 시 원심력과 자이로 모멘트가 강성에 끼치는 영향을 알아보기 위해 반경방향하중이 15700N 작용할때 준정적 해석을 수행하였으며, Fig. 5와 같은 속도와 변형과의 관계를 구하였다. Table 4는 각 경우에 대한 베어링 반경방향 강성 값을 보여주는 값으로써, 정적인 상태에서 하이브리드 베어링 및 세라믹 베어링의 강성이 약간 더 높아짐을 알 수 있다.

3-2. 볼 하중분포 및 접촉각

Table 5는 저속과 고속 회전 시(50,000 rpm) 내의 룬에 전달되는 하중값과 각 볼위치에서의 접촉각을 보여준다. Fig. 6과 8은 강베어링, Fig. 7과 9는 세라믹

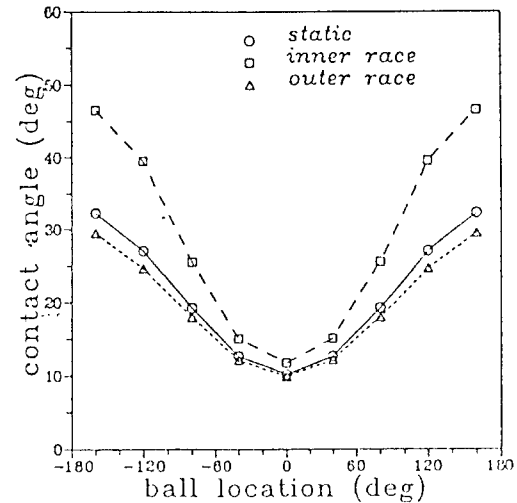


Fig. 8. Contact angles of steel bearing under 7750N radial load and 8000N thrust load when speed is 50000 rpm

베어링에 대한 결과를 나타낸 그림으로써, 세라믹 베어링이 강베어링에 비해 고속 회전 시 내외륜에 전달되는 볼하중과 접촉각의 변화가 작음을 알 수 있다. 또한, 볼의 원심력 및 자이로모멘트에 의해 외륜쪽의 볼하중이 내륜쪽 보다 더 크며, 이러한 현상은 강베어링이 세라믹 베어링보다 훨씬 더 현저하였다.

Fig. 10은 축방향 하중이 2000N 일때 볼과 궤도를 사이에 발생하는 최대 접촉압력을 나타낸 그림이다.

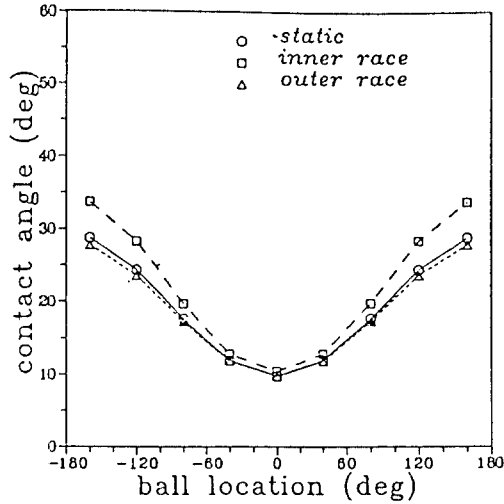


Fig. 9. Contact angles of all ceramic bearing under 7750N radial load and 8000N thrust load when speed is 50000 rpm

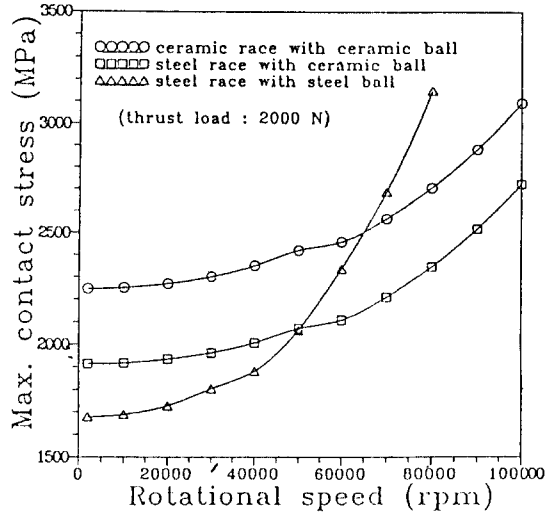


Fig. 10. Maximum contact stress of 6208 bearing under 2000N thrust load

회전속도가 낮은 영역에서는 하이브리드 및 세라믹 베어링이 높은 탄성계수로 인하여 좁은 접촉면적을 가지게 되어 강베어링보다 높은 접촉압력이 발생되나, 고속으로 갈수록 원심력의 영향으로 인하여 강베어링의 접촉압력이 현저히 증가하였다.

3-3. 스핀 속도

Harris[12]는 볼과 케도를 사이의 접촉각이 영이 아니면 회전 시 볼은 구름 운동과 함께 스핀 운동이 발생됨을 케도를 제어 이론을 이용한 준정적 해석을 통하여 밝힌 바 있다. 큰 스핀 운동은 볼과 케도 사이의 마찰력을 증대시키고, 탄성유체윤활 유막두께를 급속히 감소시킴으로써 베어링의 조기 파손 및 성능 저하를 초래하게 된다.

내외륜 접촉에서 spin-to-roll비(ω_s/ω_{ml})는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\left[\frac{\omega_s}{\omega_{ml}} \right]_i = (1 - \gamma' \cos \phi_i) \tan(\phi_i - \beta) + \gamma' \sin \phi_i$$

$$\left[\frac{\omega_s}{\omega_{ml}} \right]_0 = -(1 - \gamma' \cos \phi_0) \tan(\phi_0 - \beta) + \gamma' \sin \phi_0$$

단,

$$\text{내륜 제어인 경우 : } \tan \beta = \frac{\sin \phi_i}{\cos \phi_i - \gamma'}, \left[\frac{\omega_s}{\omega_{ml}} \right]_i = 0$$

$$\text{외륜 제어인 경우 : } \tan \beta = \frac{\sin \phi_0}{\cos \phi_0 - \gamma'}, \left[\frac{\omega_s}{\omega_{ml}} \right]_0 = 0$$

$$\gamma' = D/d_m$$

윗식에서 알 수 있는 바와 같이 spin-to-roll 비는 접촉각의 크기에 따라 변하게 되므로, 회전 속도와 베어링 소재에 따라 큰 차이를 띠게 된다. Fig. 11은 축방향 하중이 2000N일 때 회전속도에 따른 접촉각의 변화를 보여주는 그림으로써 강베어링이 하이브리드 및 세라믹 베어링보다 접촉각의 변화가 현저하게 크며, 내륜쪽 접촉각이 외륜쪽 접촉각의 변화보다 훨씬 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 12는 각 베어링에 대한 회전 속도에 따른 spin-to-roll 비를 보여준다. 하이브리드 베어링과 세라믹 베어링의 spin 속도 변화는 완만한 반면에, 강베어링의 경우 증가속도가 급격해 회전속도가 커짐에 따라 베어링에 치명적인 손상을 끼칠 우려가 높아지게 된다. Fig. 12의 선도에서 꺾인 지점은 속도가 커질수록 원심력이 증가되어 내륜 제어에서 외륜 제어로 옮겨 가는 영역이며, 강베어링의 경우 약 3만~4만 사이, 세라믹 볼베어링의 경우 5만~6만 사이에서 본 현상이 발생된다.

3-4. 최소 유막 두께

베어링의 케도륜과 볼 사이의 최소유막두께(h_{min})는

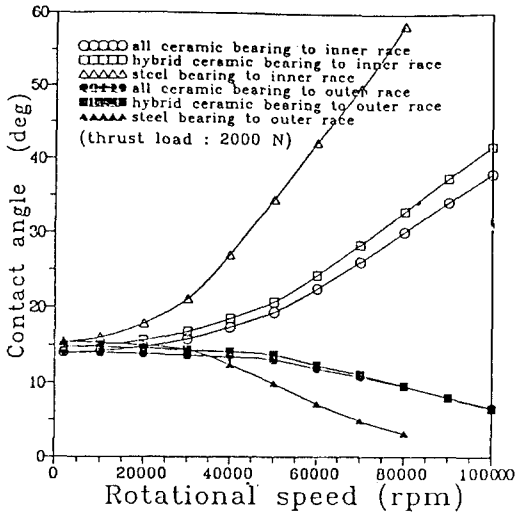


Fig. 11. The relationship between rotational speed and contact angle under 2000N thrust load

베어링의 피로수명과 밀접한 관계가 있음이 잘 알려져 있으며, 베어링 구성부품의 표면조도 관리에도 중요한 데이터로 활용된다[15]. 최소유막두께 식은 아래와 같은 Hamrock과 Dowson에 의한 식이 널리 이용되고 있으며, 본 논문에서는 이 식을 이용하여 축방향 하중이 2000N 작용할 때 속도에 따른 각 베어링의 유막두께를 계산하였다.

$$h_{min} = 3.65R_x U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.073} (1 - e^{-0.68k})$$

단, $U = \frac{\eta_0 u}{E'R_x}$

$$G = \alpha E'$$

$$W = \frac{F}{E'R_x^2}$$

$$\kappa = a/b$$

$$E' = \frac{2}{\left(\frac{1-\nu_b^2}{E_b} + \frac{1-\nu_r^2}{E_r}\right)}$$

$$\eta_0 = 0.04 \text{ Ns/m}^2$$

$$\alpha = 2.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$$

Fig. 13은 속도에 따른 유막두께 변화를 보여주는 그림이다. 하이브리드와 세라믹 베어링에서의 유막두께가 강베어링 경우의 90% 이상의 크기를 가지고 있으며, 6만 rpm 이상의 고속에서는 강베어링 경우 급격한 원심력 증가로 인하여 최소유막두께 발생위

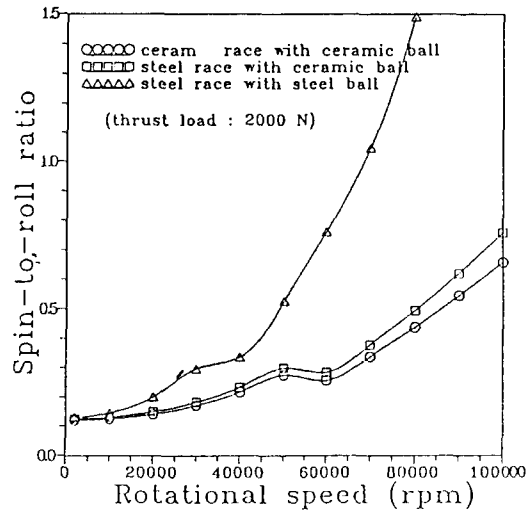


Fig. 12. The relationship between rotational speed and spin-to-roll ratio under 2000N thrust load

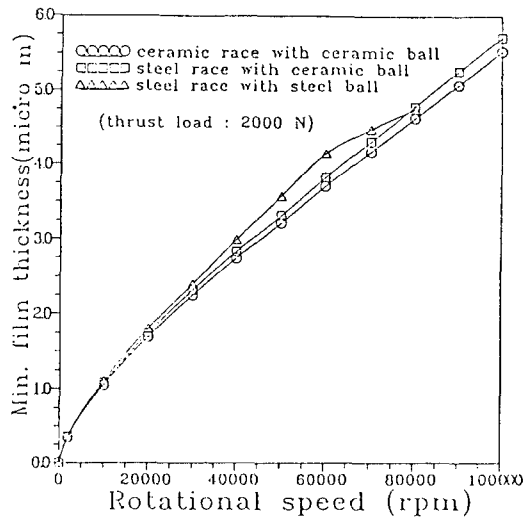


Fig. 13. Effects of speed on minimum film thickness

치가 내륜쪽에서 외륜쪽으로 옮겨가 8만 rpm에서는 하이브리드와 세라믹 베어링의 유막두께가 거의 같아지게 된다.

Fig. 13의 결과에서는 베어링의 회전속도가 커질수록 유막두께는 일방적으로 커지는 현상을 보였다. 그러나 회전속도가 증가되면 Fig. 12에서 보는 바와 같이 스핀속도도 따라서 증가하게 되며, spin-to-roll 비가 커지면 최소 유막 두께가 급격히 감소한다는 연구결과로부터 실제의 최소유막두께는 Fig. 13에 보

인 값보다 훨씬 작을 것으로 예상되며, 이러한 현상은 강베어링의 경우가 더욱 현저할 것으로 추정된다. Spin 운동이 존재하는 경우의 탄성유체윤활 해석 및 최소유막두께 산출에 관해서는 향후 지속되어야 할 연구과제로 남아있다[16, 17].

4. 결 론

최근 볼베어링의 대체 재질로 각광받고 있는 질화 규소 세라믹 볼베어링의 특성을 알아보기 위해 형번 6208 깊은홈 볼베어링을 대상으로 정적 해석과 준정적 해석을 수행하였으며, 기존의 강베어링과 특성을 비교, 검토하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 하이브리드 베어링과 세라믹 베어링의 반경방향 강성은 강베어링의 약 1.12배와 1.30배이며, 회전 속도 50,000 rpm에서는 각각 1.15배와 1.33배가 되어 고속에서 그 차이가 약간 더 커지는 경향을 보였다. 축방향 강성은 접촉각의 변화로 인한 영향 때문에 세라믹 베어링의 강성이 강베어링의 약 1.1배의 값을 지닌다.

2) 고속 회전 시 내외륜에 전달되는 볼하중과 접촉각은 세라믹 베어링이 강베어링 보다 월등히 작으며, 볼 원심력의 영향으로 외륜쪽의 볼 하중이 내륜 쪽보다 크다.

3) 볼과 궤도를 사이의 최대 접촉 압력은 저속 영역에서는 세라믹 재질의 높은 탄성계수의 영향으로 세라믹 베어링이 강베어링보다 더 크나, 회전속도가 높아짐에 따라 강베어링의 접촉압력이 급격히 증대 되어 세라믹 베어링보다 더 커진다.

4) 볼과 궤도를 사이의 마찰력 증대 및 유막 두께의 급격한 감소 등의 원인이 되는 볼의 스핀속도는 회전속도와 베어링 소재에 따라 큰 차이를 보인다. 하이브리드 베어링과 세라믹 베어링의 스핀 속도 변화는 완만한 반면, 강베어링은 증가 속도가 급격해 회전속도가 커짐에 따라 베어링의 조기 파손 및 성능 저하를 초래할 우려가 높아진다.

5) 최소유막두께는 하이브리드 및 세라믹 베어링이 강베어링의 90% 이상의 값을 지니 큰 차이를 보이고 있지 않으며, 강베어링의 경우 회전속도가 높아짐에 따라 급격한 원심력 증가로 최소유막두께 발생 위치가 내륜쪽에서 외륜쪽으로 옮겨가게 되며, 유막두께도 세라믹 베어링보다 작아지게 된다.

본 연구에서는 세라믹 볼베어링의 몇가지 기본적인

특성을 강베어링과 비교, 검토하여 동 베어링의 우월성을 보였으며, 향후 세라믹 볼베어링의 적극적인 활용 및 응용범위 확대 등을 위해서는 베어링의 동 특성 해석과 내열, 내식, 내진공 등 특수환경 하에서의 특성 평가 및 설계기술 개발이 요망된다.

Nomenclature

- a : semimajor axis of contact ellipse (m)
- b : semiminor axis of contact ellipse (m)
- d_m : pitch diameter (m)
- D : ball diameter (m)
- E' : elastic modulus (N/m²)
- F : normal applied load (N)
- G : dimensionless materials parameter ($\alpha E'$)
- h_{min} : minimum film thickness (m)
- k : ellipticity parameter (a/b)
- r : radius of curvature (m)
- R_x : effective radius x direction (m)
- u : surface velocity in x direction (m/s)
- U : dimensionless film thickness ($\eta_0 u / (E' R_x)$)
- W : dimensionless load parameter ($F / (E' R_x^2)$)
- α : viscosity pressure coefficient (m²/N)
- β : ball attitude angle (rad)
- γ' : D/d_m
- η_0 : atmospheric viscosity modulus (Ns/m²)
- ν : Poission's ratio
- ϕ : contact angle (rad)
- ω : rotational speed (rad/sec)

Subscripts

- b : refers to ball
- i : refers to inner raceway
- r : refers to raceway
- o : refers to outer raceway
- roll : refers to rolling motion
- s : refers to spinning motion
- x : refers to x-direction

참 고 문 헌

1. R. Nathan Katz, James G. Hannoosh, "Ceramics for high performance rolling element bearings: A review and assessment," Int. J. High Tech. Ceramic, Vol. 1, pp. 69-7, 1985.

2. G.W. Hosang, "Results and design techniques from the application of ceramic ball bearings to the MERADCOM 10 kW turbine," AIAA/SAE/ASME/23rd Joint Propulsion Conference, Vol. 1, June, pp. 111, 1987.
3. A. Wakigawa, S. Aiyoshizawa, K. Takagi, D. Konno, "A study of ceramic bearing for vertical pumps," JSME Int. Journal Series II, No. 2, Vol. 131, pp. 263-268, 1988.
4. Kazuo Rokkaku, Katutoshi Nishida, "The outline of ceramic antifriction bearing," JSPE, Vol. 54-07, pp. 28-32, 1988.
5. M. Pasdari, C. R. Gentle, "Analysis of a high-speed deep-groove ball bearing with ceramic balls," IMechE, pp. 851-858, 1987.
6. L. D. Wedeven, T. A. Harris, "Rolling element bearing operating at extremes," Machine Design, pp. 72-76, Aug. 6, 1987.
7. H. Aramaki, Y. Shoda, Y. Morishita, T. Sawamoto, "The performance of a high speed ball thrust bearing using silicon nitride balls," J. of Lubr. Tech., Vol. 98, pp. 553-563, Oct., 1976.
8. Rudolf Weigand, "Ceramics-tomorrow's rolling bearing materials," Power International, pp. 45-49, Feb., 1989.
9. Wan-Doo Kim, "Technical trend of main characteristics of ceramic ball bearing," Journal of KSLE, Vol. 7, No. 1, pp. 7-15, 1991.
10. P. K. Gupta, "Dynamics of rolling-element bearings," Part III: Ball bearing analysis, J. of Lub. Technology, ASME Trans., Vol. 101, pp. 312-318, July 1979.
11. P. K. Gupta, "Dynamics of rolling-element bearings", Part IV: Ball Bearing Results, J. of Lub. Tech., ASME Trans., Vol. 101, pp. 319-326, July 1979.
12. T. A. Harris, Rolling bearing analysis, 2nd ed., A Wiley-interscience pub., 1984.
13. A. B. Jones, "Ball Motion and Sliding Friction in Ball Bearings," J. of Basic Engineering, ASME Trans., pp. 1-12, March 1959.
14. A. B. Jones, "A general theory for elastically constrained ball and radial roller bearings under arbitrary load and speed conditions," J. of Basic Engineering, ASME Trans., pp. 309-320, June 1960.
15. B. J. Hamrock, D. Dowson, Ball bearing lubrication-The elasto-hydrodynamics of elliptical contact, A Wiley-Interscience Pub., pp. 68-97, 1981.
16. D. Dowson, H. Xu, "Elastohydrodynamic lubrication of elliptical contacts with spin and rolling," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 205, pp. 165-174, 1991.
17. A. Mostofi, R. Gohar, "Oil film thickness and pressure distribution in elasto-hydrodynamic point contacts," J. of Mech. Engineering Science, IMechE, Vol. 24, No. 4, pp. 173-182, 1982.