

고속 앵글러 컨택트 볼 베어링의 온도특성

현준수*, 박태조**

Temperature Characteristics of High Speed Angular Contact Ball Bearing

Jun Soo Hyun* and Tae Jo Park**

ABSTRACT

This paper shows the temperature characteristics of a high speed angular contact ball bearing which is 7004C type with ISO P2 tolerance class. A built-in motor type high speed spindle which adopts an oil-air lubrication system was used to measure the temperature rise up to 60,000rpm. The bearing temperature was measured using thermocouples that were attached to the outside surfaces of the outer rings. The result showed that the continuous test method which was suggested in this paper is more effective than on and off method, and the lubrication oil supply rate should be reduced in high speed rolling bearings as long as the seizure does not occur. And the results were confirmed that the bearings packed with ceramic balls are superior to those with steel balls in temperature characteristics.

Key Words : angular contact ball bearing(앵글러 컨택트 볼베어링), spindle(스핀들), temperature rise(온도상승), oil-air lubrication(오일-에어 윤활), precision bearing(정밀 베어링), ceramic ball(세라믹 볼)

1. 서론

앵글러 컨택트 볼베어링(angular contact ball bearing)은 로울러 베어링에 비하여 강성은 다소 뒤지지만 소음발생이 작고 회전정밀도와 고속성능은 우수하다. 또한, 내륜이나 외륜의 한쪽 턱이 상대적으로 낮게 가공되어 많은 수의 볼을 조립할 수 있으므로 깊은 홈 볼베어링(deep grooved ball bearing) 보다 높은 강성을 나타낼 수 있다. 특히, 오일-에어(oil-air) 윤활법의 개발에 따라서 120만 dmN 정도로 고속화되었으며, 최근에는 상대적으

로 비중은 낮지만 강성이 높은 세라믹(ceramic) 볼을 채용하여 200만dmN 정도의 아주 높은 고속성과 함께 고강성 특성을 발휘할 수 있게 되었다^[1-6]. 이러한 특성으로 인하여 머시닝 센터(machining center)와 같은 공작기계 뿐만 아니라 섬유기계, 원심분리기 등의 고속 스펀들(spindle)용 베어링으로 그 사용이 급속하게 증가하는 추세이다.

한편, 앵글러 컨택트 볼베어링에서는 볼과 내·외륜이 접촉각(contact angle)이라는 경사진 각을 가

* FAG 한화베어링

** 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터

지도록 설계하여 축방향 하중을 지지할 수 있게 한다. 하지만 이러한 내부구조에 기인하여 볼은 베어링의 회전에 따라서 스핀(spin) 운동뿐만 아니라 자이로스코픽(Gyroscopic) 운동도 하므로 볼과 내·외륜 사이에서는 미끄럼 마찰의 발생이 필연적이다^[7]. 특히, 베어링이 고속으로 회전할수록 미끄럼 마찰로 인한 발열이 급격하게 증가하여 심각한 문제들을 유발시킨다. 즉, 구름베어링을 부적절하게 사용하면 비정상적인 발열로 인한 늘어붙음(seizure) 현상과 과도한 열변형 때문에 운전이 불가능하게 된다. 이러한 상태에는 이르지 않더라도 베어링에서의 발열은 스핀들과 이를 사용하는 기계 전체의 열변형을 초래하여 회전정밀도를 크게 저하시키기 때문에 적극적으로 억제해야 된다. 따라서, 고속 구름베어링의 성능과 품질을 평가하는 중요한 기준의 하나로 운전중의 온도상승 정도가 폭넓게 인정되고 있다. 현장에서 고속 구름베어링을 적용할 경우에는 다양한 조건에 대한 정확한 특성자료가 기본적으로 요구되므로 베어링 회사에서는 사용하중, 속도, 윤활조건 등에 따른 온도특성을 성능시험으로 구하여 사용자에게 제공하고 있다.

여러 사용분야에서 널리 적용되고 있는 초정밀급 앵글러 콘택트 볼베어링은 국내에서는 1998년도에 한화기계(현 FAG한화베어링)에서 처음으로 개발에 성공하였으며, 현재 이를 양산하고 있다^[8]. 하지만, 그 동안의 세계적인 구름베어링 제조회사간의 급격한 합병과 이에 따른 기술자료의 엄격한 통제로 인하여 정밀급 구름베어링의 설계 및 제작, 성능시험 등에 관련된 제반자료의 대외적인 발표는 극히 제한적이었을 뿐만 아니라 발표내용도 아주 단순하였다. 더구나, 초정밀 베어링의 성능평가에 관련된 시험 규격이나 절차는 아직까지 국제적으로 미확립 상태이므로 자료제공은 개별적인 성능시험에 의존하고 있는 실정이다.

이에, 본 논문에서는 국내기술로 개발된 앵글러 콘택트 볼베어링의 온도특성을 효과적으로 평가할 수 있는 성능시험방법을 개발함과 동시에 운전조건에 따른 온도변화를 조사하여 베어링의 성능향상을 위한 기초자료를 도출하고자 한다. 이를 위하여 고속 구름베어링용 성능시험기를 제작하여 단속 및 연속 운전시험을 실시하고, 스핀들의 회전수, 급유량 및 볼의 재질이 베어링의 온도상승에 미치는 영향을 중점적으로 조사하였다.

2. 성능시험

고속 구름베어링의 성능시험은 시험대상인 베어링이 장착되는 스핀들의 운전한계로 인하여 일반적인 방법으로는 힘들기 때문에 대부분 스핀들 자체를 시험기로 사용하고 있다. 본 논문에서도 고속 스핀들을 사용하여 국내기술로 개발한 초정밀 앵글러 콘택트 볼베어링의 발열에 의한 온도특성을 실험적으로 조사하고자 한다.

2.1 시험장치

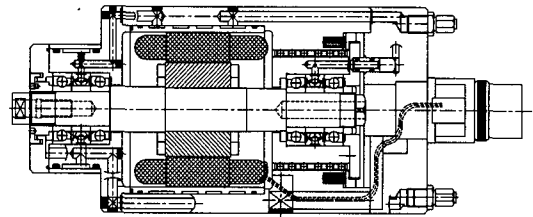


Fig. 1 High speed spindle used bearing performance test.

Fig.1은 앵글러 콘택트 볼베어링의 회전시 발열에 의한 온도상승을 측정하기 위한 모터 내장형(built-in motor type) 고속 스핀들을 개략적으로 나타낸 그림이다. 이 형식의 스핀들은 구조가 간단하고 소음과 진동이 작기 때문에 공작기계의 주축용으로 가장 많이 사용되고 있다. 이때, 모터부의 발열로 인한 베어링의 수명단축과 주축계의 열변형 등의 문제점발생을 방지하기 위하여 스테이터(stator) 외측 하우징에 설치된 냉각용 자켓에는 냉각수를 강제로 순환시켜 열이 축계로 전달되지 않게 하였다. 시험베어링은 스핀들의 전면부(Fig.1의 좌측)와 후면부에 각각 2개씩, 2쌍의 배면조합을 이루도록 병렬로 설치하였다. 베어링의 예압은 후면부 베어링의 하우징을 지지하는 스프링에 의한 정압 예압방식을 채용하여 스핀들에서의 온도차이에 의한 베어링 이동량을 과도한 접촉면압의 증가 없이 흡수할 수 있도록 설계하였다. 성능시험에 사용된 베어링은 접촉각이 15°이고 정밀도는 KS 2급(ISO class 2, ABEC 9)인 7004C 형번의 초정밀 앵글러 콘택트 볼베어링이다. 이 베어링은 재질이 적층 페룰수지이고 외륜에 의해 안내되는 리테이너

(retainer)를 사용하고 있으며 고속에 적합하도록 내부를 다음과 같이 설계하고 제작하였다. 즉, 볼과 레도간의 접촉면적은 가능한 한 작게 하였으며 리테이너와 볼간의 간극 크기는 엄격하게 규제하였다. Fig.2는 조립전후의 시험용 베어링 모양을 함께 나타낸 사진이다.



Fig. 2 Photograph of test bearing.

시에 오염물질이 베어링에 유입되는 것을 방지하는 역할을 한다. 베어링 온도는 스핀들에 장착된 전면부 베어링의 외륜 외경부 까지 스핀들에 가공된 홈에 열전대(thermocouple)를 설치하여 측정하였으며, 열전대가 베어링 외경부에 확실하게 접촉되도록 스프링으로써 가압시켰다.

2.2 시험방법

본 논문에서는 고속 구름베어링의 일정회전수에서의 온도특성을 효과적으로 평가할 수 있는 성능시험방법을 확립하기 위하여 다음과 같이 단속(on and off) 및 연속 운전시험을 실시하고 결과를 서로 비교하였다. 단속운전시험은 일정회전수에서 30분 동안의 베어링 온도변화를 기록한 후 스핀들을 정지시킨다. 그 다음, 이전의 시험에 의한 영향을 없애기 위하여 1시간 동안 급유장치를 이용하여 스핀들을 충분히 냉각시켜 일정한 온도로 유지시킨 후 변경된 조건에 대하여 시험한다. 반면에, 연속운전시험은 일정회전수에서 15분 동안 온도를 측정한 후 스핀들을 정지시키지 않고 회전수를 연속적으로 증가시키면서 각 회전수에 대하여 동일한 방법으로 시험한다. 시험시의 회전수 범위는 10,000rpm부터 60,000rpm까지이고 측정간격은 10,000rpm이다. 이때, 최고시험회전수 60,000rpm은 베어링이나 스핀들의 한계회전수 보다 낮은 범위이다. 윤활유는 40℃에서 점도가 10cSt인 스핀들 오일을 사용하였으며, 급유량은 2, 3, 4분을 단위시간으로 하여 0.035cc를 토출시킨 후 혼합밸브에서 압축공기와 혼합시켜 베어링에 균일하게 공급하였다(Fig.3 참조). 시험베어링에서 채용한 볼의 재질은 일반적인 베어링강(스틸, steel)과 질화실리콘(silicon nitride)인 세라믹의 2종류이며, 베어링에 작용하는 예압하중은 일정하게 유지시켰다.

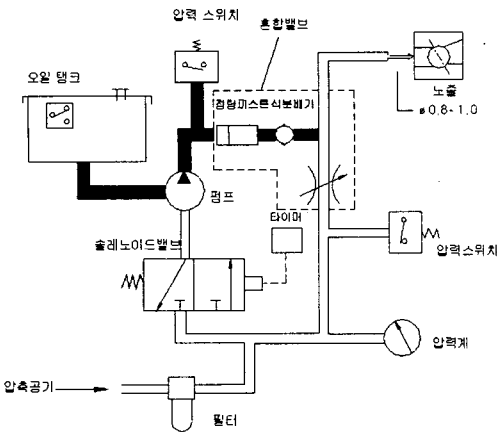


Fig. 3 Oil-air lubrication system.

Fig.3은 고속 스핀들에 장착되어 있는 성능시험용 베어링에 윤활유를 공급하기 위한 오일-에어 윤활장치의 계통도를 나타낸 그림이다. 이 윤활장치는 급유부의 크기가 작고 윤활유의 순환과 냉각을 위한 설비가 요구되지 않는 점 등으로 경제적이기 때문에 고속 스핀들의 윤활에 주로 채용되고 있다. 정량으로 계측되어 급유관으로 주유된 미량의 윤활유는 압축공기에 의하여 베어링에 연속적으로 이송된다. 이때, 압축공기는 베어링을 냉각시킴과 동

3. 결과 및 고찰

Fig.4는 급유량이 0.035cc/3min이고 스핀들 회전수가 20,000, 40,000 및 60,000rpm인 경우, 운전시간의 경과에 따른 온도상승을 단속운전시험으로 구한 결과로서 고속으로 회전할수록 베어링 온도는 높게 나타나고 있다. 특히, 운전개시 후 10분 정도이면 거의 정상온도상대에 도달하므로 본 논문에서 채용한 30분 동안의 단속시험시간은 일정회전수에 대

한 베어링에서의 발열에 의한 온도상승을 측정하기에 충분함을 알 수 있다. 또한, 이 결과는 고속 스핀들이 장착된 공작기계를 생산현장에서 사용할 경우에 가공품의 정밀도를 유지하기 위해서는 최소한 10분 정도의 예비운전이 필요하다는 사실도 제시하고 있다.

Fig.5는 스핀들의 회전수 뿐만 아니라 윤활유의 급유량도 고속 구름베어링의 온도상승에 큰 영향을 미치는 인자임을 보여주고 있다. 즉, 급유량이 많을수록 베어링 온도가 높게 상승하고 있다. 이러한 결과는 볼과 궤도면 사이의 탄성유체윤활막의 형성에 필요한 최소유량 이상으로 공급된 윤활유는 고속운동하는 볼에 의하여 교반되므로 점성저항에 의한 발열이 증가하기 때문인 것으로 추정된다^[7,9]. 따라서, 현재의 시험베어링인 경우에 윤활유의 점성저항에 의한 온도상승을 최소화하기 위해서는 최소유량(0.035cc/4min)보다 급유량을 더욱 줄여야 된다. 참고로, 오일-제트(oil-jet) 윤활장치를 사용하여 스핀들을 25,000rpm으로 회전시키는 경우, 출력의 65% 정도가 베어링부에서 소모됨을 참고문헌[10]에서 밝혔다. 이와 같은 이유에 근거하여 고속 스핀들에는 미량의 윤활유를 공급하는 오일-에어 윤활장치가 주로 사용되고 있다.

Fig.6은 단속운전과 연속운전에 의한 시험결과를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 여기서, 급유량은 0.035cc/2min이며, 연속운전시험은 10,000rpm에

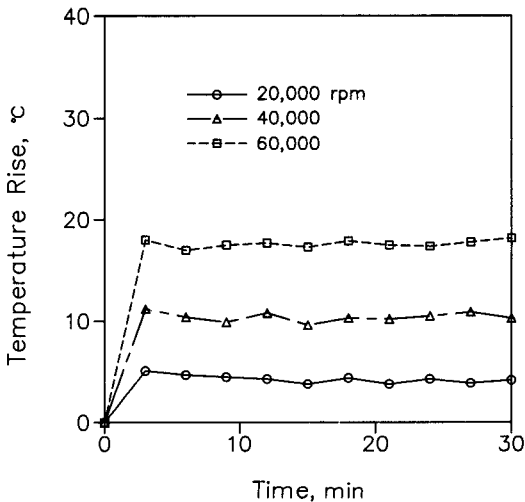


Fig. 4 Temperature rise vs. running time.

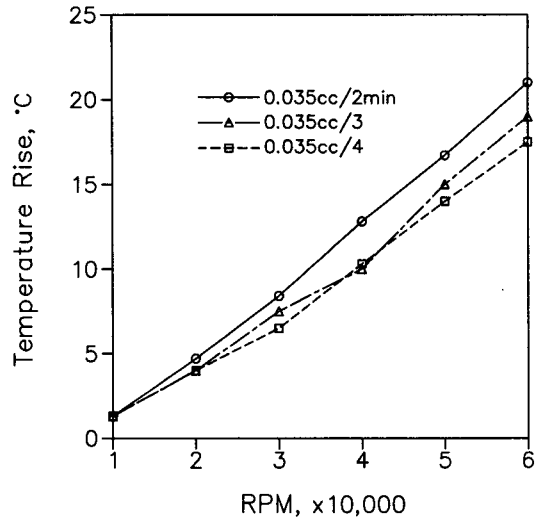


Fig. 5 Temperature rise vs. oil flow rate.

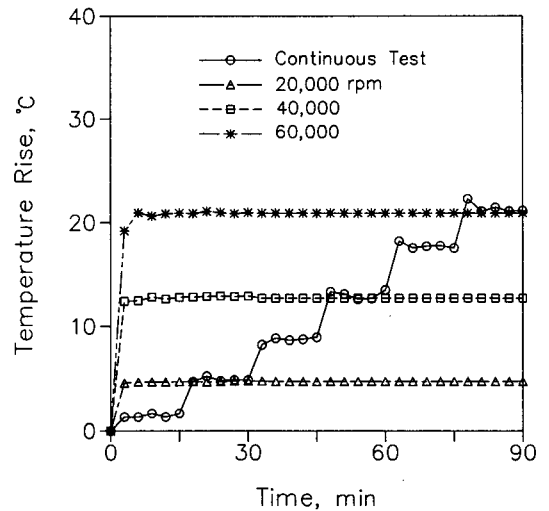


Fig. 6 Temperature rise according to test method.

서 시작하였다. 시험방법의 차이에도 불구하고 각 회전수에서 일정시간이 경과한 이후의 온도가 거의 일치하는 것은 볼의 운동에 따른 온도상승이 운전 개시초기의 베어링 온도에 크게 영향을 받지 않음을 의미한다. 따라서, 고속 구름베어링에 대한 일정회전수에서의 온도특성 평가시에 연속운전 시험방법을 채용하면 단속운전시험일 경우에 소요되는 제반절차, 노력 및 시간을 크게 줄일 수 있을 것으

로 예상된다.

Fig.7은 앵귤러 컨택트 볼베어링에서 채용한 볼의 재질이 베어링부 온도상승에 미치는 영향을 연속운전시험으로 조사한 결과이며, Fig.8에는 이를 각 회전수별 정상상태에서의 결과로 나타내었다. 이 결과, 볼의 재질에 따라서 베어링부 온도상승은 다음의 2가지 점에서 큰 차이를 보이고 있다. 먼저, 거의 모든 회전수 범위에서 세라믹 볼인 경우의 정상상태온도가 대략 2~3°C 정도 낮게 나타나는 것은 스틸보다 세라믹의 비중이 낮고 마찰계수도 작기 때문이다. 즉, 세라믹 볼을 사용한 경우에는 상대적으로 원심력의 영향이 작으므로 발생응력의 크기가 낮고, 세라믹과 스틸간의 마찰계수가 스틸과 스틸인 경우에 비하여 작다. 따라서, 볼의 미끄럼 마찰에 의한 열발생이 상대적으로 작을 것으로 추정된다^[2,5]. 다음으로, 스틸 볼인 경우에는 회전수의 증가에 따라서 베어링 온도가 급격하게 상승하는 경향을 나타내는 반면에 세라믹 볼에서는 상대적으로 완만하다. 이는 세라믹 볼의 가속시에 발생하는 발열이 스틸 볼인 경우보다 훨씬 작음을 의미한다. 특히, 스틸 볼인 경우에는 회전수를 증가시킨 직후에 온도가 급상승하였다가 약간 낮아지는 Heat spike 현상이 40,000rpm 이상일 경우에 선명하게 나타나는 것은 내·외륜과 볼 사이의 미끄럼에 의한 발열에 주로 기인하는 것으로 추정된다(Fig.6에서도 발생). 즉, 세라믹에 비하여 스틸의 관성이 크기 때문에 가속시에는 내·외륜과 볼 사이에서의 미끄럼 발생이 순간적으로 증대되어 급격한 온도상승을 유발하게 된다. 하지만 볼이 완전히 가속되어 일정회전수를 유지하면 볼과 내·외륜 사이의 미끄럼은 줄어들기 때문에 온도는 약간 감소한다. 한편, 세라믹 볼을 장착한 베어링은 스틸 볼의 경우에 비해서 온도상승 정도가 상대적으로 낮기 때문에 보다 가혹한 조건에서도 안전하게 운전될 수 있을 것으로 예상된다. 즉, 회전수가 30,000 rpm 이상인 경우에는 10,000rpm 증가함에 따라 베어링 온도는 대략 3~5°C 정도 상승하고 있다. 따라서, 이 결과를 바탕으로 온도상승의 관점으로만 추정하면 스틸 볼을 채용하는 경우 보다 동일조건하에서 10% 정도의 고속운전이 가능할 것으로 예측된다.

이상의 결과와 같이 본 논문에서는 국내에서 개발된 앵귤러 컨택트 볼베어링의 온도특성을 효과적으로 평가할 수 있는 시험방법을 확립하였으며 급

유량, 볼의 재질에 의한 영향도 함께 조사하였다. 현재, 본 논문의 결과를 이용하여 회전수, 급유량, 예압하중 등의 다양한 운전조건 변화에 대한 베어링의 상세한 온도특성 뿐만 아니라 이를 장착한 스핀들의 진동특성도 함께 연구중이므로 그 결과는 개발 베어링의 운전한계설정, 규격작성 등에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

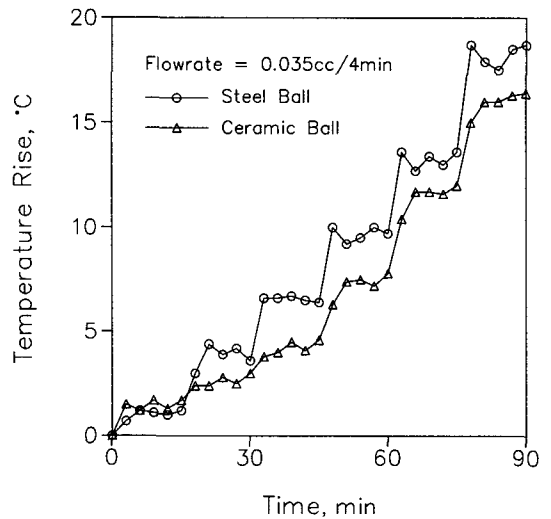


Fig. 7 Effect of ball materials on bearing temperature rise.

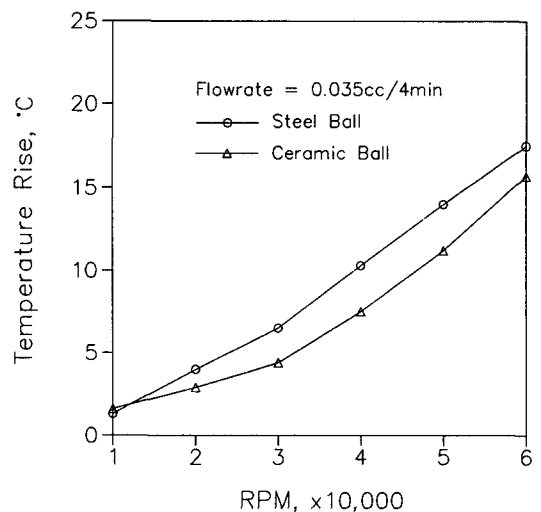


Fig. 8 Temperature rise according to rotating speed.

4. 결 론

본 논문에서는 국내기술로 개발된 고속 앵글러 컨택트 볼베어링의 성능향상방안을 도출하기 위한 기초연구의 일환으로 성능시험장치를 제작하여 시험방법과 운전조건의 변화에 따른 온도특성을 실험적으로 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 앵글러 컨택트 볼베어링을 장착한 모터내장형 고속 스피들은 운전개시 후 10분 정도가 경과되어야만 베어링 온도가 정상상태에 도달하였다. 따라서, 고속 스피들을 채용한 공작기계에서는 공작물에 대한 가공정밀도를 유지하기 위하여 10분 이상의 예비운전이 요구된다.

2) 일정회전수에 대한 고속 앵글러 컨택트 볼베어링의 온도특성을 평가하는 경우, 본 논문에서 제시한 연속운전시험은 단속운전시험시에 소요되는 제반 절차와 노력, 시간 등을 크게 줄일 수 있는 효과적인 시험방법이다.

3) 이 베어링의 적용을 위해서는 오일-에어 윤활장치의 채용이 필수적이며, 급유량은 윤활유의 점성저항에 의한 온도상승을 최소화하기 위하여 엄격하게 조절해야 된다.

4) 앵글러 컨택트 볼베어링용의 전동체로는 세라믹 볼을 사용하는 것이 스틸 볼인 경우보다 발열에 의한 온도상승이 낮으므로 고속회전에 보다 적합하다는 사실을 확인하였다.

후 기

본 논문의 일부는 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Brandlein, J., "Properties of Rolling Bearing Supported Machine Tool Spindles," Ball and Roller Bearing Engineering, pp. 15-27, 1985.
2. Weigand, R., "Ceramics - Tomorrow's Rolling Bearing Materials?," Ball and Roller Bearing Engineering, pp. 4-8, 1988.
3. Aramaki, H., Shoda, Y., Morishita, Y. and Sawamoto, T., "The Performance of Ball Bearings

- with Silicon Nitride Ceramic Balls in High Speed Spindles for Machine Tools," J. of Tribology, Vol. 110, pp. 693-698, 1988.
4. Sawamoto, T., Shoda, Y., Morishita, Y. and Aramaki, H., "The Performance of Angular Contact Ball Bearing with Silicon Nitride Balls for Machine Tool Spindles," Japanese J. of Tribology, Vol. 36, No. 5, pp. 381-387, 1991.
5. NSKテクニカルレポート, "Engineering Ceramics as Bearing Materials," Pr. No. A728, pp. 216-217, 1992.
6. Weck, M. and Koch, A., "Spindle-Bearing Systems for High-Speed Applications in Machine Tools," Annals of the CIRP, Vol. 42-1, pp. 445-448, 1993.
7. Harris, T. A., Rolling Bearing Analysis, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1984.
8. 현준수, 문호근, 박태조, "초정밀 앵글러 컨택트 볼베어링 개발," 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp. 300-306, 1998.
9. Hamrock, B. J., "Fundamentals of Fluid Film Lubrication," McGraw-Hill, 1994.
10. 이용희, 김석일, 김태형, 박보선, "오일제트윤활 방식의 25,000rpm급 모터내장형 고속주축계의 윤활특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 15권, 제5호, pp. 59-64, 1998.