

초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링 개발

현준수*, 문호근*, 박태조**

* : 한화기계(주), ** : 경상대, 항공기부품 RRC

Abstract - A high precision angular contact ball bearing is developed in Korea by Hanwha Machinery Co. The developed bearing is 7004C with P4 tolerance class. The performance test was successful until 60,000 rpm.

Keywords : Angular contact ball bearing, Contact angle, Oil-air lubrication, Performance test

1. 서 론

기계장치의 고속화와 고정밀화에는 지지베어링의 고속화와 고정밀화가 필수적이다. 고속 스피들, 정밀 계측기, 고속 가공기, 군사용 기기 및 고속 원심분리기 등의 고속·고정밀 기계장치에 주로 사용되는 초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링(angular contact ball bearing)은 구름베어링중에서 가장 높은 정밀도가 요구된다[1]. 이 베어링은 접촉각(contact angle)을 지닌 볼 베어링으로서 운전시에는 축방향으로 정밀한 예압상태에서 작동된다. 또한, 내륜 또는 외륜의 한쪽 턱이 상대적으로 낮게 가공되어 많은 수의 볼을 장착할 수 있으므로 깊은 홈 볼 베어링(deep grooved ball bearing)에 비하여 높은 강성을 유지할 수 있으

며, 접촉각과 볼의 직경이 작기 때문에 그리이스 윤활에서도 80만 DmN 정도의 고속 운전이 가능하다. 특히, 오일-에어(oil-air) 윤활법의 개발에 따라서 120만 DmN 정도로 더욱 고속화되었을 뿐만 아니라 최근에 개발된 세라믹(ceramic) 볼을 채용한 경우에는 스틸(steel) 볼에 비하여 볼의 비중이 작고 강성이 높아서 200만 DmN 정도의 더욱 우수한 고속·고강성 성능을 발휘할 수 있게 되었다[2-5].

선진국에서는 이러한 고속용 정밀급 앵귤러 컨택트 볼 베어링을 20~30년 전부터 개발하기 시작하여 현재에는 정밀등급이 2급인 베어링을 생산하고 있지만 우리나라에서는 50만 DmN 정도의 용도에 사용되는 5급의 깊은 홈 볼 베어링을 생산하는 정도의 초보적인 수준에 머무르고 있는 실정이

다. 한편, 고속·고정밀의 기계장치에는 정밀도 등급이 4급이나 2급인 베어링이 요구되기 때문에 현재 이를 일본을 비롯한 선진국에서 전량 수입하여 사용하고 있다. 참고로 2급의 앵글러 컨택트 볼 베어링의 가격은 범용 베어링에 비하여 150배 정도로 고가이며 베어링의 수급사정이 좋지 않을 경우에는 더욱 비싼 가격으로 거래되기도 한다. 1996년을 기준으로 앵글러 컨택트 볼 베어링은 수량기준으로 국내 볼 베어링 수입량의 2.5%에 불과하지만 금액기준으로는 15% 정도(300억원)로 상당하다. 이 중에서 일본으로부터의 수입이 전체의 60%에 달하여 기계류의 대일무역수지역조에 많은 부분을 차지하고 있다. 따라서, 국내 기계관련 산업의 고도화를 위해서는 초정밀 앵글러 컨택트 볼 베어링의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. Table 1.에는 정밀급 볼 베어링에 대한 각 규격간의 등급과 명칭을 비교하여 나타내었다.

장벽이 최근에 강화되어 기술자료의 사외 유출이 극히 통제되고 있다. 특히, 초정밀 베어링의 설계, 제작, 시험 등에 관련된 모든 자료의 대외발표가 극히 제한적이고, 내용도 모호한 설명으로 그치고 있을 뿐만 아니라 수 년 전부터는 제조회사에서 발행하여 사용자들에게 제공되던 기술잡지도 절판되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 한화기계(주)에서 자체기술로 개발한 초정밀 앵글러 컨택트 볼 베어링의 설계, 제작 및 성능시험 등에 관련된 내용을 소개하여 우리나라의 정밀급 구름베어링에 관련된 기술발전에 기여함을 목표로 한다. 이러한 초정밀 앵글러 컨택트 볼 베어링의 개발은 대일 무역수지역조의 개선 및 수입대체효과와 아울러 국내 산업계의 베어링 수급문제의 해결과 선진국과의 기계류 성능향상경쟁에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

Table 1. 정밀급 볼 베어링의 등급과 등가규격

규격	정밀도 등급 및 순서				
ABMA	ABEC-1	ABEC-3	ABEC-5	ABEC-7	ABEC-9
JIS	Class 0	Class 6	Class 5	Class 4	Class 2
DIN	P 0	P 6	P 5	P 4	P 2

한편, 구름 베어링의 제조회사는 세계적으로 급격하게 합병되어 그 수가 20년전에 비하여 80% 이상 감소하였다. 이와 더불어 구름 베어링 회사들간에 기술적인 보호

2. 베어링의 설계 및 제작

여기에서는 정밀도 등급이 4급인 7004C 형번의 초정밀 앵글러 컨택트 볼 베어링의

설계와 제작에 관련된 내용을 소개하고자 한다.

2.1 설계 특성 및 기준

앵글러 컨택트 볼 베어링에서 하중은 일정한 접촉각하에서 한쪽 궤도륜으로부터 다른쪽 궤도륜으로 전달된다. 접촉각의 크기는 허용속도와 베어링의 강성에 따라서 거의 결정되며, 개발품에서는 15° 로 하였다. 분리되지 않은 일체형 케이지는 외륜 턱에 의해서 안내된다. 외륜은 한쪽 턱만을 갖고 있으나 외륜의 열린 쪽으로 베어링이 분리되지 않도록 여기에도 낮은 턱을 두었다. 앵글러 컨택트 볼 베어링의 이러한 설계특성 때문에 깊은 홈 볼 베어링보다 더 많은 볼을 장착할 수 있으며, 이는 결과적으로 강성과 하중지지용량의 증가에 기여하게 된다. 그러나, 강성이 크게 요구되는 경우에는 2개 이상의 베어링을 조합하여 사용해야만 된다.

다른 형태의 구름 베어링에서와 마찬가지로 베어링 내륜의 내경, 외륜의 외경, 폭 및 모따기 치수 등의 기본치수와 외부공차는 ISO(International Standards Organization)의 규정에 의거하여 결정한다. 피치 원경은 내경과 외경의 중간에 위치하도록 설계하며, 볼의 직경과 수는 베어링의 강성, DmN치 및 진동특성 등과 깊은 관련이 있으므로 베어링의 용도에 따라서 적절하게 조절한다.

2.2 요구조건

베어링의 정밀도에는 부품 및 조립체의

정밀도, 정지 및 운전 정밀도가 모두 포함된다. 베어링의 초정밀도는 이상적인 동부하 상태, 내부응력의 균일한 분배에 기여하여 베어링의 수명을 증가시키므로 이의 장점을 최대한으로 활용하기 위해서는 베어링과 조립되는 부품은 서로 동일한 수준의 정밀도를 가져야만 한다. 초정밀 앵글러 컨택트 베어링에서의 예압은 베어링의 강성을 증가시킬 목적으로 사용된다. 베어링의 고속사용한계를 의미하는 제한속도는 보통 베어링의 열발생이나 진동발생으로 인한 시스템의 사용한계로 결정되며 이의 설정은 윤활이 잘 되고 안정된 시스템으로 가정하여 정한다. 베어링 이론수명은 동하중 및 정하중 용량에 따라 결정되는 특성으로서 베어링의 작동조건, 회전속도범위, 반경방향 및 축방향 하중, 온도, 윤활방법 등의 인자에 의해서 결정된다.

2.3 베어링의 제작

정밀급 볼 베어링의 제작을 위해서는 이에 합당한 제조설비와 제작공정이 필요하다. 특히, 제조설비의 주축 정밀도 한계를 넘는 조립 정밀도를 가지는 베어링의 제작은 실용적으로 매우 중요한 기술이다. 이러한 베어링의 제작은 연삭공정 이후 여러가지 처리 및 래핑방법과 선별, 조립 등 부가처리가 필요하지만 기본적으로는 연삭 정밀도가 매우 중요하다. 연삭 정밀도에는 설비의 정밀도, 치공구의 선정 및 셋팅 등에 많은 노하우가 집결된다고 할 수 있다. 한편, 보통급 베어링은 보통 열처리 후 베어링 각 면에 대한 1차 연삭으로 마무리되

며, 궤도면만 랩핑가공하여 제작된다. 이와 비교하여 정밀급 베어링에서는 Table 2.에 나타낸 것과 같이 각변을 3차에 걸쳐서 연삭하고 궤도와 폭면의 경우에는 랩핑공정을 포함하여 4차 또는 5차 가공으로 마무리한다. 따라서, 이에 대한 설비와 각 설비당 치공구의 구성에 아주 신중한 선택이 요구된다.

Table 2. 정밀급 베어링의 제작공정

공 정 명		
외륜연삭	내륜연삭	리테이너
폭연삭(황삭)	폭연삭(황삭)	절 단
외경연삭(황삭)	외경연삭(황삭)	외경가공
내경연삭	궤도연삭	내경가공
경사면연삭	내경연삭	구멍가공
궤도연삭	모서리연삭	모떼기가공
모서리연삭		마무리가공
		Deburring
폭연삭(2차)	폭연삭(2차)	세 척
폭마무리(3차)	폭마무리(3차)	침 적
외경연삭(2차)	외경연삭(2차)	건 조
내경연삭	궤도연삭	침 적
경사면연삭	내경연삭	조 립
궤도연삭		
세 척	세 척	
궤도마무리	외경마무리	
경사면마무리	궤도마무리	
내경마무리	내경마무리	
궤도휘니싱	궤도휘니싱	
세 척	세 척	

3. 베어링의 성능시험

고속용 정밀베어링의 성능을 평가하기 위한 기준의 하나로 베어링에서의 발열에 따른 온도상승의 정도를 실험적으로 조사하는 것은 널리 인정되고 있는 항목이다.

즉, 구름 베어링을 고속회전 상태에서 부주의하게 사용하면 발열로 인하여 늘어붙음(seizure) 현상이 발생하거나 손상의 위험성이 현저하게 증가하여 고속회전이 불가능하게 된다[6]. 이러한 치명적인 문제 이외에 베어링부에서의 과도한 발열은 기계장치 전체의 열변형을 초래하기 때문에 적극적으로 억제해야만 된다. 특히, 앵글러 컨택트 볼 베어링에서는 예압인 상태로 불과 내·외륜이 일정한 각도로 접촉하고 있기 때문에 축의 회전에 따라서 붙은 스핀(spin) 운동과 동시에 고속회전시에는 자이로스코픽(Gyroscopic) 운동이 발생하여 불과 내·외륜과의 접촉면에서는 미끄럼 마찰로 인한 열발생이 원통형 로울러 베어링의 경우보다 한층 심각한 상태이다[7]. 베어링에서의 발열특성은 베어링의 형식, 하중 및 예압 상태, 가공정밀도, 조립정밀도, 사용재질 및 윤활방법 등에 따라서 크게 변화한다. 따라서, 베어링부에서의 운전조건에 대한 온도상승을 측정함으로써 베어링의 성능을 평가할 수 있다.

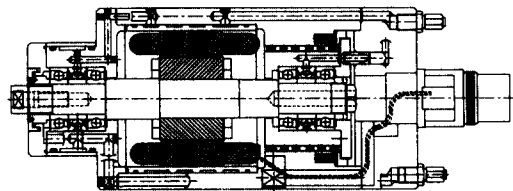


Fig.1 High speed spindle for bearing performance test.

Fig.1은 한화기계(주)에서 개발한 초정밀 앵글러 컨택트 볼 베어링의 성능시험을

위한 모터를 내장한(built-in motor) 고속 주축계의 그림으로서 모터 스테이터 외측 하우징에는 냉각용 자켓을 설치하여 냉각된 윤활유를 강제순환시켜 모터부에서 발생한 열이 축계로 전달되어 베어링부에 영향을 미치지 않도록 하였다. 스펀들의 전면부 베어링에는 정위치 예압방식을, 후면부 베어링에는 정압 예압방식을 각각 채용하여 주축의 열팽창으로 인하여 축변위가 발생하여도 스프링으로써 일정한 예압하중이 작용하게 하였다. 시험베어링의 온도는 외륜부에 설치된 열전대(thermocouple)로, 주축의 회전수는 스펀들 전면부에 설치된 비접촉식 타코메타(tacometer)로 각각 측정하였다. Fig. 2에는 고속 스펀들의 윤활에 많이 사용되는 오일-에어 윤활장치의 작동계통도를 나타내었다. 이 윤활방식에서는 정확하게 계측된 유량이 주어진 시간간격으로 파이프 계통으로 주유되며 윤활유는 압축공기로써 각 베어링으로 연속적으로 이송된다. 윤활유의 운송에 사용되는 압축공기는 베어링을 냉각시킵과 동시에 오염물질이 베어링에 유입되는 것을 방지하는 역할을 한다. 윤활유는 40℃에서 점도가 10cSt인 스펀들 오일이며 공급장치의 피스톤형 분배기에서 시간당 0.45cc의 유량으로 토출된 후 혼합밸브에서 압축공기와 혼합되어 베어링에 균일한 양으로 공급된다.

성능시험은 예압하중과 급유량을 일정하게 유지하면서 스펀들의 회전속도를 10,000 rpm에서 60,000 rpm까지 10,000 rpm 단위로 변화시켰다. 이때, 각 회전속도에서 스펀들의 회전수를 일정하게 유지

한 상태에서 전·후면부 베어링 외경부에서의 온도변화를 2시간 동안 측정하였다. 회전속도는 스펀들을 정지시켜 1시간 동안 윤활 및 냉각시켜 일정한 온도상태를 유지하게 한 후에 변화시켰다.

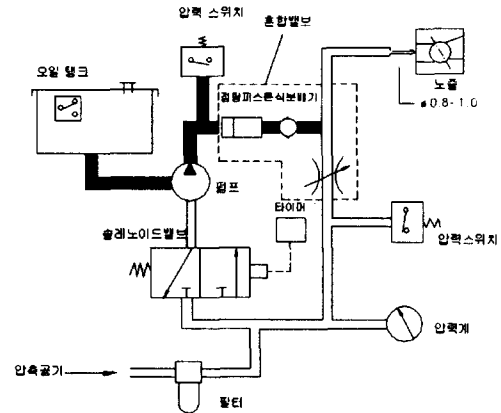


Fig.2 Oil-air lubrication system.

Fig.3은 스펀들 회전수가 20,000, 40,000 및 60,000 rpm인 경우, 개발품인 초정밀 앵글러 콘택트 볼 베어링의 시험시간의 경과에 따른 온도상승을 나타낸 것이다. 대부분의 결과에서 후면부 베어링의 온도는 시험개시후 1시간 이내에 일정한 상태를 유지하고 있는 것은 시험에 사용한 주축계가 열적평형상태에 도달하였음을 의미한다. 참고로 그림에서 60,000 rpm인 경우의 DmN치는 186만이며 시험후 베어링에는 아무런 손상이나 흔적이 발견되지 않았다. Fig.4의 결과는 스펀들의 각 회전수에 대하여 시험개시 2시간후의 후부베어링에서의 온도상승을 나타낸 것이다. 베어링부의 온도는 회전수의 증가에 따라서 급격하게 상

승하며, 특히, 볼과 레도면에 대한 코팅 (coating) 처리유무에 크게 영향을 받고 있다. 즉, 레도면과 볼을 코팅처리하지 않고 그대로 사용하는 경우에는 이들을 폴리머로 표면처리한 경우에 비하여 고마찰 때문에 고속이 될 수록 온도상승이 한층 높았다.

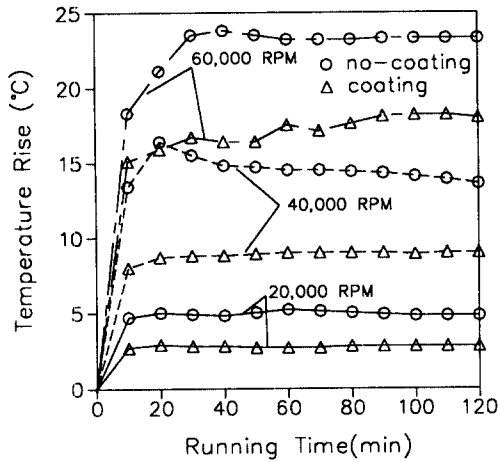


Fig.3 Temperature rise vs. running time.

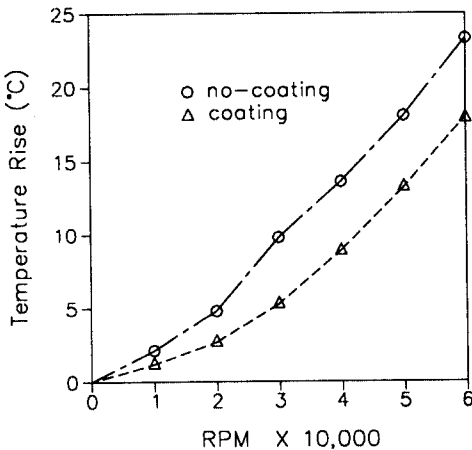


Fig.4 Temperature rise vs. speed.

4. 결론

본 논문에서는 정밀도 등급이 4급이고 베어링의 형번이 7004C인 초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링을 설계, 제작하고 이에 대한 성능시험을 실시하였다. 이 결과, 회전수가 60,000 rpm (186만 DmN)까지 운전되는 초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링을 성공적으로 개발함으로써 우리나라의 고속용 정밀급 구름베어링에 대한 제반 기술력을 획기적으로 발전시켰다. 이러한 성공을 바탕으로 현재에는 정밀도가 보다 높은 2급의 초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링을 제작중에 있다. 본 연구에서 개발한 초정밀 앵귤러 컨택트 볼 베어링은 대일 무역수지역조의 개선, 수입대체효과 및 국내 산업계의 베어링 수급문제해결에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1997년도 통상산업부에서 시행한 공업기반기술개발사업의 기술개발연구의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Weck, M. and Koch, A., Spindle - Bearing System for High-Speed Applications in Machine Tools, *Annals of the CIRP*, Vol.42, pp.445-478, 1993.
2. Sawamoto, T., 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, pp.527-539, 1991.
3. Aramaki, H. et al., The Performance of Ball Bearings with Silicon Nitride Ceramic Balls in High Speed Spindle for Machine Tools, *J. of Tribology*, Vol.110, pp.693-698, 1988.
 4. NSKテクニカルレポート, Pr. No.728b.
 5. SKF, Ball And Roller Bearing Engineering, 3rd ed, Burbank.
 6. Hamrock, B. J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, 1994.
 7. Harris, T. A., Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Son, 1984.
 8. 한국유화시험검사소, 베어링윤활, 1988
 9. 한국종합기계, 구름베어링공학, pp.227~259, 1987