해 설

세라믹 볼베어링의 특성 및 기술 동향

김 완 두

한국기계연구소 재료강도연구실

각종 회전기계류의 고속화, 고온화 추세로 고속, 고온에 사용될 수 있는 베어링 개발이 요구되고 있다. 그러나, 기존에 많이 사용되어 오던 steel 베어링은 고온에서의 강도 저하 및 고속에의 전동체의 원심력 증가에 의한 급격한 피로수명의 감소 등으로 인해 사용이 불가능하게 된다. 고속화를 위해서 저밀도의 재질이 필요하며, 고온화를 위해서는 고온강도가 뛰어난 재질이 필요하다. 최근 개발되고 있는 기계구조용 세라믹은 이 두 가지 특성을 모두 지닌 재질로서 베어링에의 응용이 시도되고 있다[1-21].

세라믹스는 그의 일련의 탁월한 특성으로 인해 높은 응력을 받는 기계요소의 재료로서 응용이 기대된다. 구름베어링에 세라믹을 응용하려는 시도는 1960년대 초 미국에서 시작되었고, 그 후 미국을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 이 연구의 발단은 항공기용 가스터빈의 진보에 따라 베어링을 고속화 고온화에 대처하고자 하는데 있었다. 일본에서는 고속 및 고정밀도가 요구되는 공작기계에 사용할 수 있는 세라믹 볼베어링 개발에 대해 많은 연구를 하고 있다[11].

본 고에서는 여러 가지 세라믹 중 볼베어링에의 응용이 가장 적합하다고 보고되어 있는 질화규소(silion nitride)의 특성을 살펴보고, 세라믹 볼베어링의 특성, 응용사례 및 기술개발 현황 등을 살펴보고자 한다.

1. 세라믹 재료 특성

기계구조 용 세라믹 중 현재 베어링에의 응용이 유망시되고 있는 것은 Alumina, SiC, Si_3N_4 등이다.

Table 1은 고온용 베어링 재료로 현재 사용되고 있는 강종과 세라믹의 물리적, 기계적 특성을 나타낸 것이다. 강 종류에 비해 세라믹 종류가 고경도, 고탄성계수, 저밀도 등의 특징을 지님을 쉽게 알 수 있다.

Fig. 1은 Table 1의 주요 재료에 대한 온도에 따른 인장강도를 보여준다. 세라믹 이외의 재료는 600~1000℃에서 급격히 강도가 떨어짐을 알 수 있고, SiC와 Si_3N_4만이 1000℃ 이상에서도 충분한 강도를 유지함을 알 수 있다. 구름베어링은 궤도륜, 전동체, retainer로 구성되고, 궤도륜과 전동체의 접촉부에 외부로부터의 부하와 회전에 의한 접촉압력과 변형이 반복하여 생기게 된다. 취성재료인 세라믹을 구름베어링과 같은 구조부재로 이용하기에는 반복하중에 대한 부하능력이 문제가 된다. 종래의 베어링강(KS STB 2)과 각종 Ceramics 평판을 이용하여 시험한 부하능력(허용면압)을 Table 2에 보여준다. Hot Pressed(HP) 또는 HIP제 질화규소가 구름베어링용 소재로서 적당함을 알 수 있다.

Table 3에서는 세라믹 재료인 Si_3N_4와 표준 베어링 재료인 STB2의 재료특성을 나타낸다. Si_3N_4의 주요 특징은, (1) 경량(STB2의 40%), (2) 낮은 선팽창률(STB2의 25%), (3) 고탄성률(STB2의 1.5배) 등을 열거할 수 있다. 구름베어링에 대해 고려하면, 고속회전시의 원심하중이 작고 운전 중의 열팽창도 작으며, 변위량이 작기 때문에 세라믹 베어링은 온도상승이 작아 긴수명과 고강성을 기대할 수 있다.

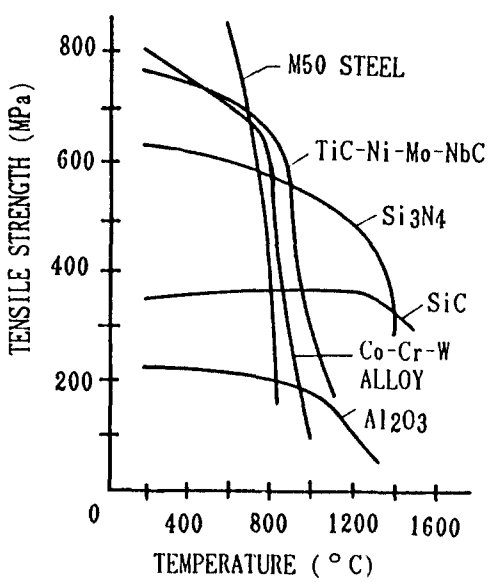

Fig. 1. High temperature tensile stength of candidate rolling bearing materials[13].

Table 1. 고온용 구름베어링 재료의 물성치[13]

Material	Hard. Rc at 20℃	Max. Useful Temp. ℃	Density g/cm³	Elastic Modulus GPa at 20℃	Poissons Ratio	Thermal Conductivity Cal/s m℃ 20℃	800℃	Coeff. of Ther. Exp. 10^{-6}/℃ 0-800℃
M-50 Steel	64	320						
M-1 Steel	66	430	7.6	190	0.28	13.4	—	12.3
M-41 Steel	69	540						
440C-Mo	62	260						
Cr-Mo-V	63	370	7.8	200	0.28	5.8	—	10.1
Cr-Co-Mo-V-W	66	450						
Co-Cr-W alloy	54	650	8.6	210	0.28	2.2	4.5	14.1
TiC-Ni-Mo-NbC Cermat	67	800	6.3	390	0.23	14.0	6.8	10.7
Al203	85	1000	3.9	350	0.25	7.2	1.7	8.5
SiC	90	1200	3.2	410	0.25	35.0	12.0	5.0
Si_3N_4	78	1200	3.2	310	0.26	7.3	4.7	2.9

2. 질화규소의 제조

앞에서 설명된 바와 같이 열간가압소결(HP : hot press), 또는 열간정수압 가압소결(HIP : hot isostation press) 법에 의한 질화규소가 부하능력 면에서 우수하여 구름베어링용 ceramics로 적당함을 알 수 있다. Fig. 2에 HP, HIP 각기 소결공정의 개요를 보여준다. HP법은 HIP법에 비해 공정이 작고, 판모양 등 비교적 단순한 형상으로 제품을 깍아내는 방법을 이용하는 것이 많기 때문에, 판상 소결단계에 초음파, X선 등에 의한 비파괴검사가 용이하며 품질보증상 유리하지만, HIP법에 비해 가공비가 높은 점 등의 문제가 있다. HIP법에 의한 SI_3N_4는 제품형상에 가까운 것(near net shape)을 직접 제조할 수 있고 가격면에서도 유리하여 품질개선과 더불어 실용화 되기에 이르렀다.

3. 세라믹베어링의 형식

세라믹베어링의 형식은 크게 하이브리드세라믹베어링(Hybrid Ceramic Bearing)과 전세라믹베어링(All Ceramic Bearing)의 두 가지로 구분할 수 있다. 하이브리드 세라믹베어링은 현재 공작기계용 베어링으로서 실용화 되어 있는 베어링 형식으로서 전동체에만 Si_3N_4 재료를 채용하는 것과 Fig. 3의 중앙그림과 같이 내륜에 Si_3N_4를 채용한 경우의 것이 있다. 후자의 것은 고속화에의 대응으로서 내륜내경 및 궤도직경의 원심 팽창량을 작게할 수 있는 이점이 있으며, 또한 외륜에 베어링강을 채용하면, 외경측으로부터의 냉각능률 향상과 외륜궤도 접촉부에 있어서의 면압 저하를 피할 수 있는 이점을 기대할 수 있다. 전 세라믹베어링은 내, 외륜 및 전동체 모두가 세라믹으로 만들어진 것으로서, 세라믹의 내식, 내열, 비자성 등의 성질이 꼭 필요한 곳에 사용되는 베어링이다[5].

Table 2. 각종 세라믹스와 베어링강의 부하능력과 수명

제법구분	시료 구분	재료	시험가능한 면압 (kgf/mm²)	베어링강의 수명비
열간가압소결 HP 또는 HIP	A	Si_3N_4	600	• 베어링강의 필적
	B	ZrO_2	600	• 베어링강의 1/100 이하
상압소결(CP)	C	Si_3N_4	300	◦ 단수명 ┐
	D	ZrO_2	300	◦ 단수명 ┤ 부하능력
	E	SiC	300	◦ 단수명 ┤ 적음
	F	Al_2O_3	300	◦ 단수명 ┘
비교 베어링강			540	—

4. 세라믹베어링의 특성

세라믹베어링의 특성은 앞서 세라믹재료(질화규소)의 특성을 언급할 때 대부분 드러났으며, 상세한 내용은 아래에 설명된다. Table 4는 세라믹베어링의 이용 특성과 용도를 보여준다.

4-1. 고속회전 베어링

4-1-1. 원심력 감소

고속회전하는 구름베어링의 하중을 구하기 위해서는,

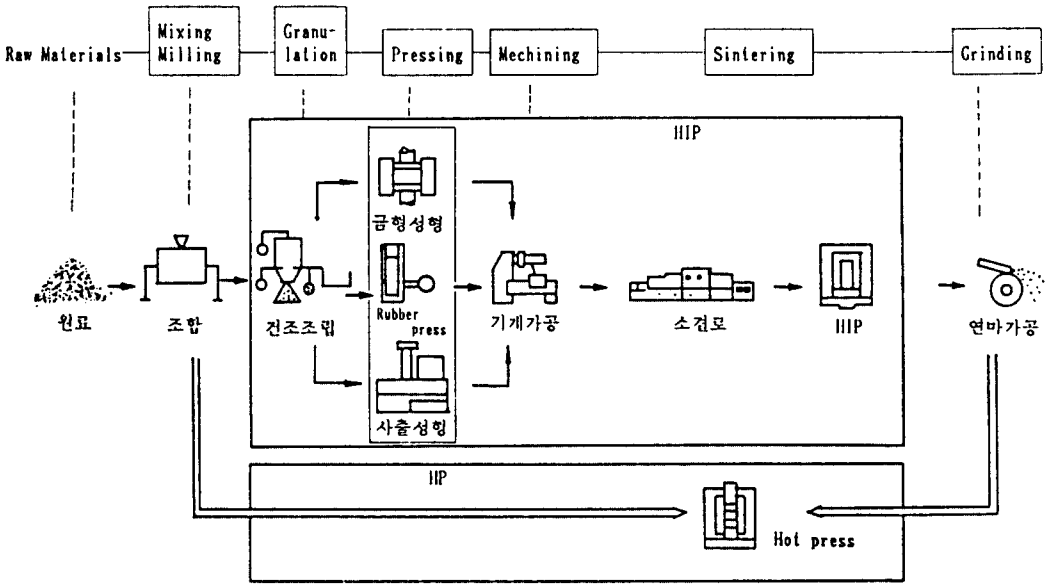

Fig. 2. Manufacturing process for silicon nitride[6].

Table 3. 질화규소의 특성[6]

No	항목 · 단위	Si_3N_4	베어링강 2종	세라믹스의 장점
1	내열성(℃)	800	180	고온에서 높은 부하능력 유지
2	밀도(g/ml)	3.2	7.8	전동체(Ball, Roller)의 원심력 경감→수명 향상, 온도상승 방지
3	선팽창계수(/℃)	3.2×10^{-6}	12.5×10^{-6}	온도상승에 의한 내부틈새의 변화가 작다. →진동방지, 예압변화가 작다.
4	Vickers 경도(kg/mm²)	1,400~1,700	700~800	
5	종탄성계수(kg/mm²)	3.2×10^{4}	2.1×10^{4}	구름접촉부의 변형작다→고강성화
6	Poisson 비	0.26	0.3	
7	내식성	양호	불량	해수중 등 특수환경하에서 사용 가능.
8	자성	비자성체	강자성체	강자계 중에서의 착자에 의한 회전변동이 작다.
9	도전성	절연체	도전체	전식에 의한 손상방지 가능.
10	소재의 결합형태	공유결합	금속결합	유막 파괴에 의한 구름접촉부의 응착이 작다.

베어링에 작용하는 외력이외에도 retainer 속도로 회전하는 전동체의 원심력도 고려하여야 한다. Steel 베어링의 경우 회전수가 높아지면 볼의 원심력에 의한 내부응력이 매우 높아진다. 세라믹볼(Steel 볼 밀도의 약 40 %)을 사용하면 원심력이 줄어듬에 따라 내부응력도 낮아지게 된다. 그러나 원심력 감소의 잇점은 탄성계수가 높아지는 것과 상반되는 관계에 있다. 세라믹의 경우 탄성계수가 Steel의 약 1.5배가 되어, 같은 하중하에서 세라믹볼의 내부응력이 Steel 볼 보다도 높아진다. 회전수가 커질 수록 세라믹볼의 중량이 작아짐에 따른 원심력 저하의 잇점이 탄성계수가 높아지는 것보다 월등하게 된다(Fig. 4).

4-1-2. Sliding Speed

베어링 구름요소의 회전은 필요한 마찰력을 발생시키기 위해 ball-race 접촉에서 어느 정도의 slip이 요구된다. 최적 작동상태에서 이 마찰력은 주로 접촉 물체의 geometry와 변형 등에 의한 접촉 내부의 micro-slip에 의해 제공된다. 그러나 상당한 원심하중이 외륜접촉에 작용하고 구름마찰이 증가되는 고속에서는, 내륜접촉의 slip은 ball을 움직이는데 충분한 마찰력을 발생시키는 skidding 점에 도달한다.

이 상태에서 베어링은 큰 동력 손실이 초래되고 접

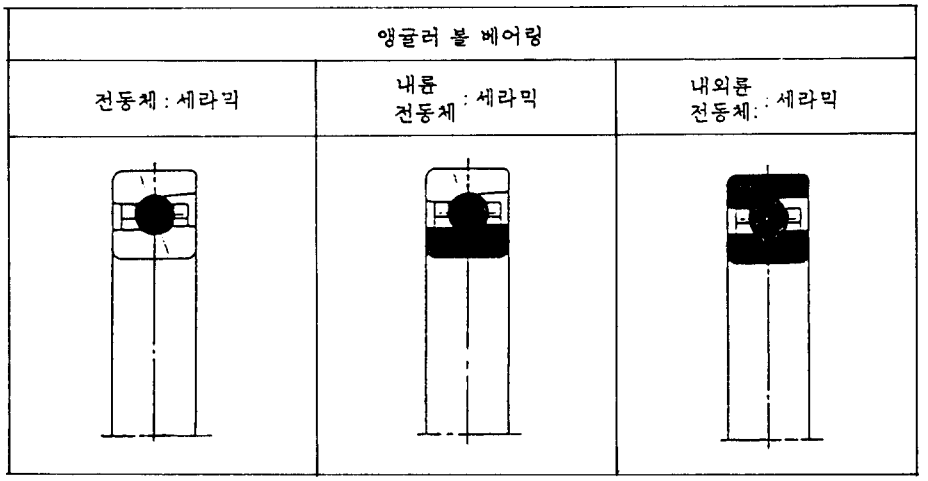

Fig. 3. Type of ceramic ball bearing.

Table 4. 세라믹베어링의 이용특성 및 용도[5]

내식성	내열성	고속회전	경량	절연성	비자성	내진공
화학	철강	공작기계	항공우주	전기	원자로	진공기기
섬유	화학	자동차	자동차	공작기계	반도체	기타
철강	자동차	항공우주	차량	수송기기	기타	
식품	진공기기	전기	기타	기타		
산업기계	산업기계	산업기계				
전기	전기	진공기기				
공작기계	기타	기타				
기타						

촉내부에 매우 높은 열이 발생된다. 게다가 과도한 sliding은 표면 하중응력을 증가시켜 조기 피로파손을 발생시킨다. Ball의 질량 감소로 인한 원심력의 저하는 외륜접촉에서 구름저항을 약화시키고, 따라서 ball의 작은 driving force가 필요해지고, 고속시 주로 내륜에 있는 미끄럼속도가 감소될 것이다. Fig. 5는 축속도에 따른 미끄럼속도를 보여준다. 축속도가 1000 rpm 이하일 때 즉 ball의 원심력이 작을 때의 미끄럼속도는 차이가 거의 없다. 축속도가 커짐에 따라 세라믹볼의 미끄럼 속도는 강구에 비해 작아진다.

4-2. 베어링 강성

Si_3N_4 재료의 탄성계수는 베어링강의 약 1.5배이므로, Si_3N_4구를 사용한 베어링의 강성은 steel 볼베어링보다 크게 된다(Fig. 6). Hybrid 세라믹볼베어링은 Hertz의 탄성접촉 이론에 따라 steel 볼베어링과 같은 변위를 발생시키는데, 약 1.2배의 축방향 하중이 필요하게 된다. 베어링 강성이 큰 것은, 단순히 외부하중에 의한 주축계의 변형강도가 증가되는 것 이외에 회전축계의 위험속도가 높아지게 되는 이점도 있다. 특히, 수 mm 축경의 고주파 motor 내장형의 연삭 spindle을 10만 rpm 이상의 최고속으로 회전시키는 경우에는 Si_3N_4 베어링의 사용으로 베어링 span과 모터의 치수에 대한 선택의 폭을 키워준다.

한편, Si_3N_4의 큰 탄성계수는 과대하중을 받았을 때 접촉부에 생기는 영구변형 관점에서 불리하게 된다. ISO 기본정격 하중을 정하는 접촉응력 기준에 의해 산출하면, Si_3N_4구와 베어링강 궤도 홈의 조합은 강대 강 조합보다 약 30% 허용 한계하중이 저하된다. Fig. 7에 베어링강 평판 위를 Si_3N_4구와 강구를 각기, 천천히 회전운동 시킬 때, 평판에 생기는 주행 궤적 깊이를 보여준다. 이 그림에서 Si_3N_4구에 의한 깊이가 강구보다 과대하중에 대해 불리함을 알 수 있다.

그러나 구름베어링이 사용되는 일반적인 하중크기로 보면, 공작기계 주축에 사용된 베어링이 받는 하중은 작은 경우가 많고, 실용상, 주축베어링에 이러한 영구변

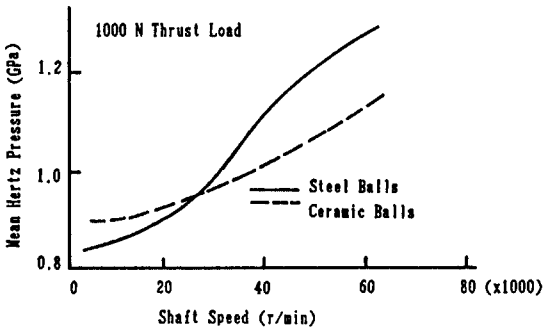

Fig. 4. The effect of shaft speed on the contact pressure at the outer raceway[9].

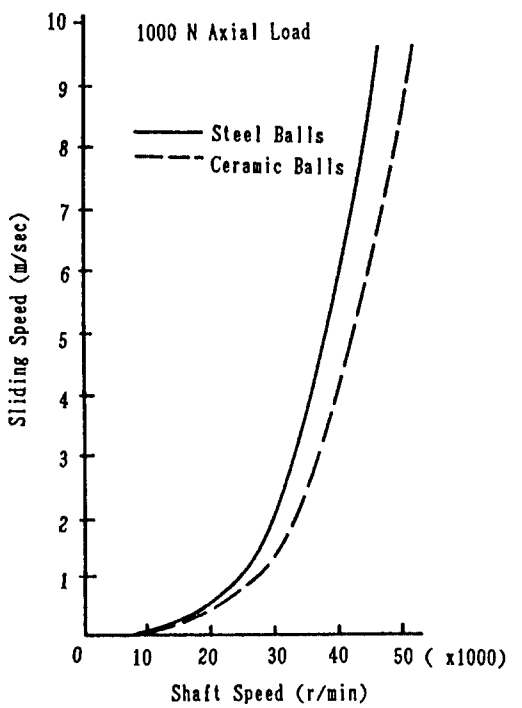

Fig. 5. Variation of inner race sliding speed with shaft speed[9].

형의 염려는 없다.

4-3. 온도상승과 한계 회전속도

고속형 algular 볼베어링(ID=65 mm, OD=100 mm, β=15°)을 이용하여, 고속회전시의 Si_3N_4 볼베어링의 온도상승 특성을 측정한 결과를 Fig. 8-10에 보여준다. Si_3N_4구 베어링의 온도상승은 저속 운전시에는 강구베어링과 차이가 없지만, 고속영역에서는 강구베어링보다 낮다. 이 경향은 Fig. 8에 보인 접촉각 40°의 고강성형

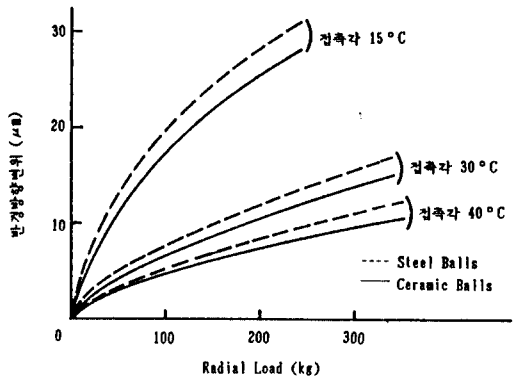

Fig. 6. Axial displacement of angular contact ball bearing(ID=65 mm, OD=100 mm)[11].

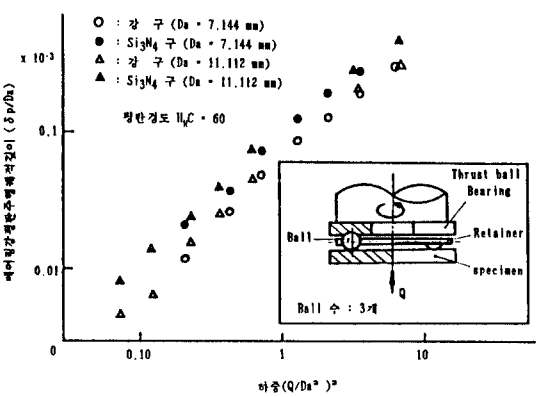

Fig. 7. Permanent deformation of bearing steel plate under rolling of ball[7].

베어링의 경우와 같다. 그러나, 고속영역에서는 온도상승 감소효과의 비율은 접촉각 15°의 고속형의 경우가 작음을 알 수 있다. 이 원인은 접촉각이 작은 베어링에서는 미끄럼 마찰손실의 베어링 전체 마찰손실에 접하는 비율이 원래 작은데 있다. Fig. 9에 보는 바와 같이, Si_3N_4 베어링은 oil air 윤활에서 24,000 rpm(dm n=200만)까지 이상없이 회전하지만, 강구의 베어링은 18,000 rpm에서 급격한 온도상승을 야기시켜 베어링에 마모를 발생시킨다. Si_3N_4 베어링의 고속한계가 강구베어링에 비해 상당히 높은 원인으로써 다음 사항이 고려된다.

1. 원심력 및 gyromoment가 작음으로 인한 낮은 접촉면압과 낮은 발열.

2. 볼과 궤도륜과의 열팽창차에 의한 접촉면압의 완화. (베어링 온도가 상승하면, Si_3N_4와 베어링강과의 선팽창계수의 차이로 인한 베어링 틈새가 커진다)

3. 〈베어링강/베어링강〉 조합과 〈Si_3N_4/베어링강〉 조합과의 본질적인 눌어붙음에 대한 내성 차이

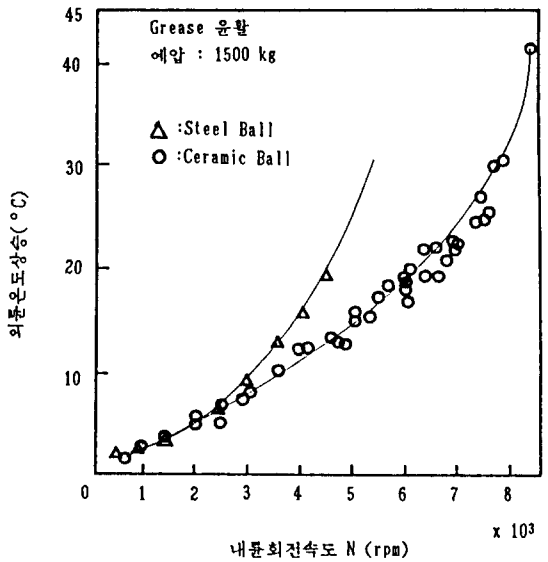

Fig. 8. Temperature rise of high stiffness angular contact ball bearing[7].

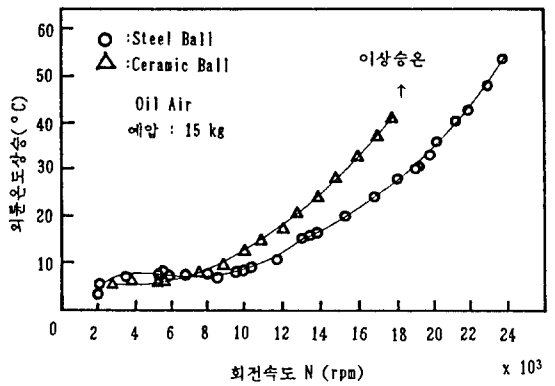

Fig. 9. Temperature rise of high speed angular contact ball bearing(oil -air lubrication)[7].

5. 세라믹 베어링의 응용

세라믹 베어링의 응용 사례는 현재까지 발표된 바에 의하면 주로 공작기계 주축 및 Jet 엔진 고속화, 그리고 고유로용 유니트, 내진, 내식용 유니트 등으로 알려져 있으며, 여기에서 그 일부를 소개한다. Table 5는 세라믹 베어링의 응용 가능분야를 보여준다.

5-1. 공작기계 주축의 고속화[7, 11]

공작기계주축, 특히 머시닝센터(M/C) 주축의 고속화가 생산성의 향상과 더불어 가공정밀도의 향상을 목표로

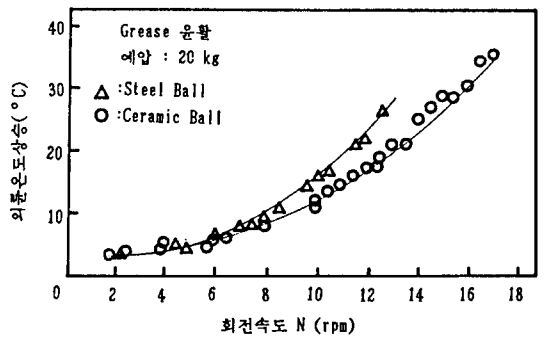

Fig. 10. Temperature rise of high speed angular contact ball bearing(grease lubrication)[7].

Table 5. 세라믹 볼베어링의 응용분야[1]

◆Machine Tools	◆Instruments
-ultra and high-speed spindles	-gyro, gimbal and platform
-extended life units	-spectroscopy
◆Aerospace	◆Defence
-gas and air turbines	-space
-gearboxes	-radar
-auxiliary power units/ generators	-missiles
-valves and nozzles	◆Automotive
◆General Industry	-turbochargers
-pumps & compressors	◆Biotechnology
-reactors & mixers	-rotating anode
-chemical processing	-medical centrifuge
-cryogenic	

하여 추진되어 왔다. Fig. 11에서는 공작기계 주축의 고속화 추이를 나타내는데, 과거 수년에 걸쳐 베어링 형식(원추롤러베어링～앵귤러 볼베어링), 윤활법(그리스 윤활법～오일에어윤활), 베어링 전동체 재료(베어링강～세라믹) 등을 개선함으로써 고속화가 실현되어 왔다. 그 중에서도 세라믹 재료를 전동체에 채용한 세라믹베어링이 등장함에 따라 종래 형식의 베어링과 윤활법으로는 도달할 수 없었던 고속회전의 주축이 실용화 되기에 이르렀다.

5-2. Jet Engine에의 응용[3]

미국의 C.W. Hosang 등은 터보 기계류에 사용되는 MERADCOM 10 kW 터어빈에 사용되는 세라믹베어링을 개발하였다. Fig. 12는 기존 베어링과 세라믹베어링의 수명 비교를 보여주며, Fig. 13은 최종 연구결과로 설계된 전세라믹 볼베어링의 모습을 보여준다.

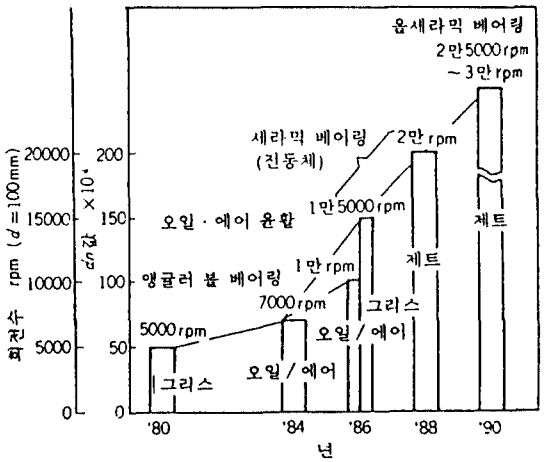

Fig. 11. Trend of high speed spindles for machine tools.

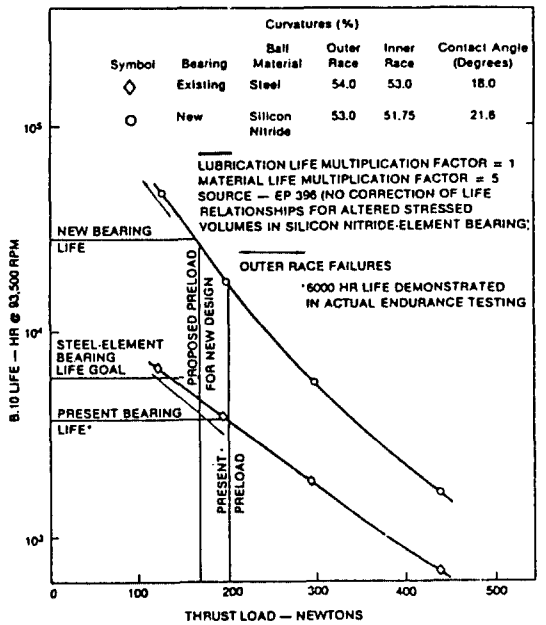

Fig. 12. Comparison of computed lives of existing bearing and new silicon nitride element design.

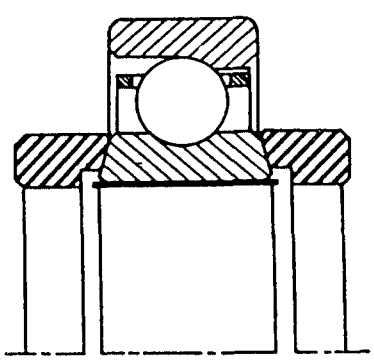

Fig. 13. Cross section of the all-ceramic bearing showing the conical surfaces and the corrugated liner.

5-3. 고온로용 베어링 유니트[8]

세라믹볼베어링을 고온로에 이용하는 잇점은 다음과 같다.

(1) 급유 등의 오염을 없애고 깨끗한 환경을 유지

(2) 분위기 제어로내의 회전부 compact화가 가능

(3) 수냉장치, 집중급유 등의 설비비, 보전비의 삭감

시판 SUS계 베어링은 단시간에 회전불능이 되는데 반해, ceramic ball unit는 1000시간 후에도 ball 표면에 아무런 손상이 없고, 내오륜도 계속 사용이 가능했다. Table 6은 고온로용 ceramic ball unit의 사용예를 보여준다.

5-4. 내진, 내식용 베어링 유니트[8]

고온로중 열풍환경으로, 가열 · 냉각이 반복되는 베어링과, 고속회전에 의해 내부발열을 받는 베어링은 dust와 이물을 베어링 내부에 둘러쌓아 그리스의 열화와 abrasive 마모에 의한 조기파손을 초래하기 쉽다. 또한, 부식성 분위기와 slurry의 침입이 있는 경우 동일한 현상이 발생된다. Ceramic ball을 사용한 unit는 위조건에 대해 우수한 특성을 가지고 있다.

표준품은, 겨우 5시간에 볼과 내외륜에 abrasive 마모를 초래하였고, 틈새는 50 μm로 증대했지만, ceramic ball unit는 그것의 100배 운전 시간 후에도 ball에 마모가 없고, 내륜의 마모도 미량이며, 틈새는 10 μm 증대되었다.

6. 연구동향 및 전망[1, 2, 21]

세라믹베어링에 관한 최근에 발표된 연구보고를 기본으로 하여, 베어링 재료로서 필요한 특성과 현재까지 가장 우수한 재료로 알려진 Si_3N_4의 특성과 동재질로 만들어진 베어링의 특성 및 응용사례를 알아보았다. 세라믹베어링은 종래의 베어링에서는 사용할 수 없었던 고온상태, 또는 부식 분위기 속에서 사용할 수 있는 가능성을 지니고 있으며, 각종 첨단기술개발의 진전에 공헌할 것으로 여겨진다.

베어링 분야에 있어서 세라믹스를 전면적으로 사용하는 것을 방해하고 있는 주요한 원인은 볼제조에 너무 많은 시간이 걸리고, 따라서 필연적으로 제조비용이 비싸게 되는 것이다. 그리고 고성능 구름베어링에 세라믹스를 사용하기 위해서는 품질보증 방법을 더욱더 개발할 필요가 있다. 그것에 의해서 세라믹스의 성능을 완전히

Table 6. 고온로용 Ceramic ball unit의 사용 예

사용설비	수지 Film 표면처리 Line	자동(용접) 땜납 부착로
사용형번	UCFL205J(축경 25 mm)	UCF206H(축경 30 mm)
로내온도	상용 230℃, max 250℃	저온부 220~230℃ 고온부 270~280℃
분위기	대기중, 열풍건조로내	무산화(질소 Gas) 분위기
회전수	max 600 rpm(부하작고, 24시간 변속운전)	max 100 rpm Tact(지휘봉) 24시간 운전
종래방법	• 미끄럼 베어링 사용 -단시간 사용불능 • 일반 내열풍에 Silicon 그리스를 연속급유 -제품오염속출	내열 표준품 사용, 2개월마다 정기교환 미끄럼 베어링은 사용 불능
사용후 상황	• 원활하고 정숙한 회전 얻어진다. 설치 8개월 후 베어링은 완전히 정상이고, 설치시와 거의 차이 없다. 베어링 진동 가속도(G) 변화 초기치 0.09가 0.01이 되었고, 요주의치의 0.5~1.0을 훨씬 밑돌아 ceramic ball unit의 안전성을 입증했고, G값은 급유에 의해 초기치에 복귀, 현재 6개월마다 점검급유 실시. • 급유에 의해 배출그리스의 오염을 해소했고, 로내의 clear화에 성공	• 1년간 무급유 운전중, 문제없고 양호, 년 1회 점검 급유. • 종래품보다 회전토오크 감소, 반송이 원활하게 되었다. • 돌발사고가 없어졌고, 예방보전 체제가 가능해졌다. • down time 손실과 pillow block의 교환시기가 비약적으로 연장되었고, 교체 등의 경비절약이 달성되었다.

파악할 수 있고, 여러 분야에 응용할 수 있게 될 것이다. 금후의 개발과 노력의 목표는 제조방식 개선의 달성에 놓여져 있다.

앞으로, 내열 내식에 사용할 수 있는 베어링의 모든 부품의 세라믹으로 만들어진 전세라믹 베어링의 실용화에 대한 연구개발과 저렴한 소결, 가공방법, 비파괴 검사방법, 설치방법, 사용환경에 적합한 윤활방법 등에 대한 연구개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구사업 연구결과의 일부로서 이의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.G. Hannoosh, Ceramic' bearings enter the mainstream, Design News, Vol., November 23, 1988, pp. 1-4
2. R. Nathan Katz, James G. Hannoosh, Ceramics for high performace rolling element bearings : A review and assessment, Int. J. High Tech. Ceramic, Vol.1, 1985, pp.69-79.
3. 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., June 1987, pp.1-11.
4. A. Wakigawa, S. Aiyoshizawa, K. Takagi, D. Konno, A study of ceramic beraing for vertical pumps, JSME Int. Journal Series II. No.2, Vol.31, 1988, pp. 263-268.
5. Hiroaki Takebayashi, Kouichi Ueda, 세라믹 구름베어링의 개발, 기계의 연구, Vol.39/12, 1987, pp.21-26.
6. Kazuo Rokkaku, Katutoshi Nishida, 세라믹 구름베어링(The outline of ceramic antifriction bearing) JSPE, Vol.54-07, 1988, pp.28-32.
7. Kakuta Katuo, Shoda Yoshio, Engineering ceramics의 구름베어링에의 응용, 기계설계(일본), Vol. 32/13, 1988. 10, pp.66-71.
8. Yoshimura Shigeru, Engineering ceramics의 pillow block에의 응용, 기계설계(일본), Vol.32/13, 1988. 10, 54-59.
9. M. Pasdari, C.R. Gentle, Analysis of a high-speed, deep-groove ball bearing with ceramic balls, IMechE, Vol., 1987, pp.851-858.
10. L.D. Wedeven, T.A. Harris, Rolling element bearing operating at extremes, Machine Design, Vol., August 6 1987, pp.72-76.
11. H. Aramaki, Y. Shoda, Y. Morishita, T. Sawamoto, The performance of ball bearing with silicon nitride ceramic balls in high speed spindle for machine tools, J.' of Trib., Vol.110, October 1988, pp.693-698.
12. J.M. Reddecliff, R. Valori, The performance of a high-speed ball thrust bearing using slicon nitrid balls, J. of Lubr. Tech., Vol.98, October 1976, pp. 553-563.
13. Bharat Bhushan, Lewis B. Sibley, Silicon nitride rolling bearings for extreme operating conditions,

ASLE Trac. No.4, Vol.25, 1981, pp.417-428.
14. J.V. Poplawski, J.A. Mauriello, Skidding in lightly loaded high-speed ball thrust bearings, ASME 69-Lubs-20, pp.1-11
15. C.R. Gentle, R.J. Boness, Prediction of ball motion in high-speed thrust-loaded ball bearings, J. of Lubr. Tech., Vol.98, July 1976, pp.463-471.
16. R.J. Parker, E.V. Zaretsky, Fatigue life of high-speed ball bearings with silicon nitrid balls, J. of Lubr. Tech., Vol.97, July 1975, pp.350-357.
17. F.R. Morrison, J.I. Mccool, T.M. Yonushonis, The Load-life relationship for M50 steel bearings with silicon nitride ceramic balls, J. of ASLE, Vol.40, March 1984, pp.153-159.
18. J. Blackweel, Effects of high temperature operation on rolling bearing materials Wear, Vol.56, 1979, pp. 131-138.
19. C.R. Gentle, M. Pasdari, Computer simulation of starvation in thrust-loaded ball-bearing, Wear, Vol. 92, 1983, pp.125-134.
20. Erwin V. Zaretsky, William J. Anderson, Rolling-contact fatigue studies with four tool steels and a crystallized glass ceramic, J. of Basic Engineering, Dec. 1961, pp.603-612.
21. Rudolf Weigand, Ceramics-tormorrow's rolling bearing materials, Power International, Feb. 1989, pp. 45-49.