

경계윤활하에서 질화규소볼의 미세구조 및 조성이 구름피로수명에 미치는 영향

최인혁 · 송복한 · 신동우*

FAG한화베어링(주)

*경상대학교 재료공학부 무기복합재료연구실, 첨단소재연구소

Effect of Composition and Microstructure of Si₃N₄ Ball on Rolling Fatigue Life under Boundary Lubrication

In-Hyuk Choi, Bok-Han Song and Dong-Woo Shin*

FAG Hanwha Bearings Corp.,

*Kyongsang National University, Div. of Materials Science and Engineering,
Ceramic Matrix Composites Lab., AMRI

Abstract – Rolling contact fatigue (RCF) tests were performed for two kinds of commercial silicon nitride balls using 4-Ball rolling contact fatigue life tester under EHL condition ($\Lambda = 8.9$) and boundary lubrication condition ($\Lambda = 0.2$). All the test balls were finished up to the dimensional accuracy of Grade 5 defined in KS B 2001 (Steel Balls for Ball Bearings) with a size of 8.731 mm. RCF tests were then conducted under the initial theoretical maximum contact stress 6.63 GPa and the spindle speed 10,000 rpm. All the test balls were not failed until 3.75×10^7 contact cycles and wear tracks of test balls were not conspicuous under EHL condition ($\Lambda = 8.9$). In the operations of low lambda regime ($\Lambda = 0.2$), all the test balls were surface damaged and high rolling wear resistance was achievable in fully densified using MgO 1 wt% and HIPed balls. Rolling wear of silicon nitride balls under boundary lubrication condition depend mainly on grain size and intergranular phase content of silicon nitride balls.

Key word – Rolling wear, rolling fatigue, lubrication film parameter.

1. 서 론

질화규소세라믹으로 제작된 세라믹 베어링은 경량, 고강성 등의 특성을 갖기 때문에 공작기계를 비롯하여 항공기, 터보펌프 등 고속회전용 베어링으로 최근 활발히 응용되고 있으며[1-2], 강재로 제작된 베어링에 비하여 성능의 우수성이 입증되고 있다. 또한 기존 강재 베어링에 비하여 내열성, 내식성, 내마모성이 월등히 우수하기 때문에 고온용도, 진공용도, 부식분위기 등 특수환경에서의 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 특히 베어링강으로 제작된 케도륜과 세라믹볼을 조합한 형태인 하이브리드 세라믹베어링은 성능의 우수성과 함께 비교적 저렴한 가격으로 인해 자동차

용 부품으로도 양산적용이 이루어지고 있다.

질화규소세라믹의 구름피로수명과 구름마모에 대해서는 비교적 많은 연구가 이루어지고 있으며[3-5], 질화규소세라믹의 기계적물성과 구름피로수명과 상관성에 대한 연구를 통하여 우수한 구름피로수명을 갖는 질화규소세라믹에 대한 미세구조, 조성, 제조방법 등이 제시되고 있다.

일반적으로 구름베어링은 실적용시에 다양한 윤활 조건하에서 작동되며, 구름베어링용 소재로 사용하기 위해서는 이러한 다양한 윤활조건에 따른 구름피로 및 구름마모에 대한 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 상업적으로 적용하고 있는 2종의 질화규소세라믹볼에 대하여 윤활조건 즉,

탄성유체유희상태와 경계유희상태에서 각각 구름피로수명 및 구름마모에 대하여 조사하였으며, 질화규소세라믹이 갖는 미세구조와 물리적성질과의 상관관계를 고찰하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편

본 연구에서는 미국 Norton Advanced Ceramics에서 제조한 세라믹볼(시편 A)과 일본 AKS사에서 제조한 세라믹볼(시편 B)을 사용하였으며, 시편 각각의 물리적특성 및 용융 KOH에 의하여 부식시킨 미세구조사진을 Table 1에 나타내었다.

시편 A는 MgO를 소결첨가제로 하여 HIP에 의해 제조한 질화규소 소재이며, 시편 B는 Al₂O₃와 Y₂O₃를 소결첨가제로 하여 GPS에 의해 제조한 제품으로 두 제품 모두 현재 세라믹베어링 소재로 상용화되어 있는 제품이다. 모든 시험볼의 크기는 8.731 mm로 가공정밀도는 KS B 2001(볼베어링용 강구)에 준하여 등급 5를 만족하였으며, 등급 5의 기준은 표면

거칠기가 0.02 μmRa 이하이고 진원도는 0.13 μm 이하이다. 시험편의 경도와 인성의 측정은 Vickers indentation 방법으로 실시하였으며 경도는 9.8 N으로 15초간, 인성은 196 N으로 15초간 압입하여 측정하였다. 시험편의 미세구조사진을 통하여 시편 B가 시편 A에 비하여 입계상이 다소 많음을 알 수 있으며, 화상해석을 통하여 분석한 결과 시편 B 입자의 평균 직경은 0.53 μm 로 시편 A 입자의 평균직경 0.40 μm 에 비하여 입자크기가 컸다.

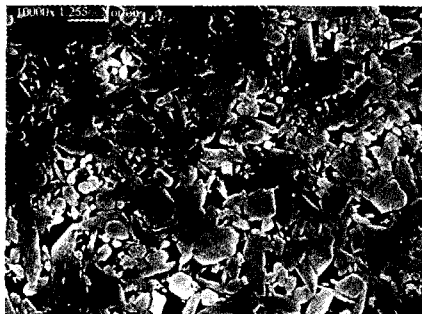
각각의 시험편을 평면으로 연마하여 X-선회절분석을 실시하였으며 Gazzara 등이 제안한 계산식[6]에 의하여 상분율을 계산한 결과 시편 A는 약 5%의 α 상 질화규소를 함유하고 있었으며, 시편 B에서는 α 상이 존재하지 않았다.

2-2. RFL 실험장치 및 실험조건

본 연구에서 사용한 4볼시험기는 영국의 CAME RON-PLINT사 제품으로 시험기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며 시험부위의 부분절개도를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Summary of specimens

		A	B
Material composition	Base	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
	Additive	MgO	Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
Sintering process		HIP	GPS
Porosity (area %)		< 0.1	< 0.1
Hardness (Hv, GPa)		16.59	16.26
Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})		4.92	5.10
Dimensional Accuracy	Roundness (μm)	0.053	0.067
	Roughness (μmRa)	0.009	0.010
Microstructure Analysis	Ave. Grain size (μm)	0.40	0.53
	Ave. Aspect ratio	2.19	2.90



A



B

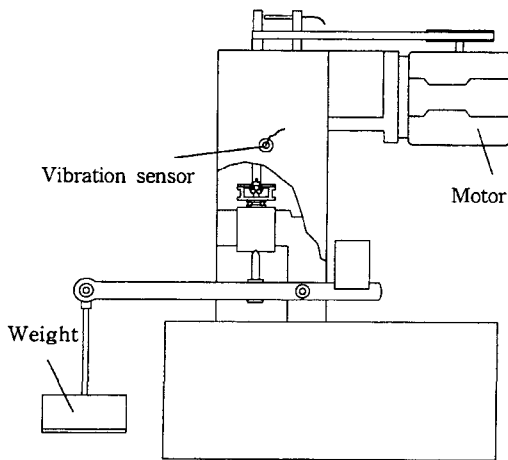


Fig. 1. Schematic of the 4-ball tester.

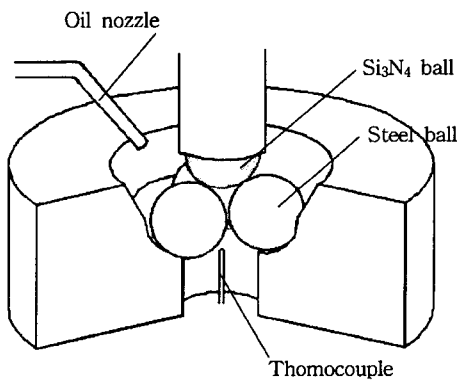


Fig. 2. Cutaway view of test part.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 스피들에 끼워져 회전하는 상부의 볼이 세라믹 시험볼이며, 하부의 웨드 룬에 위치한 세 개의 볼은 9.525 mm의 강구를 사용하였다. 실험중에 상부볼 또는 하부볼의 접촉부에 파손 및 과도한 변형이 발생하면 이상진동이 발생하고 이러한 이상 진동은 시험기 외벽에 붙어있는 진동센서에 의해 감지된다. 실험시 발생하는 진동값이 설정치 이상이 되면 실험이 정지되고, 이때까지 상부볼과 하부볼의 반복접촉횟수를 구름피로수명으로 하였다. 상부볼과 하부볼의 반복접촉횟수가 3.75×10^7 cycle 이상이 될 때까지 시험볼에 파손이 발생하지 않으면 실험을 종료하였다. 시험볼의 윤활은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 오일분무 윤활법으로 실시하였으며 분무되는 오일의 양은 0.014 cc/min로 하였다.

시험볼에 가하는 하중은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 하중추에 의해 주어지며 본 시험에서 인가한 하

Table 2. Formulas for minimum film thickness and lubrication film parameter

	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R} = 2.69 \frac{G^{0.53} U^{0.67}}{W^{0.067}} (1 - e^{-0.73k})$ $G = \alpha E', U = h_0 \mu / ER, W = \omega / E' R^2$
Oil film Thickness	<p>R Equivalent radius</p> <p>α Pressure coefficient of viscosity</p> <p>E Effective elastic modulus</p> <p>η_0 Viscosity at atmospheric pressure</p> <p>μ Entrainment velocity</p> <p>ω Force</p> <p>k Ellipticity ratio a/b,</p>
Lubrication film Parameter	$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$ <p>σ_1 RMS roughness of surface 1</p> <p>σ_2 RMS roughness of surface 2</p>

중은 980 N이었다. 이 하중값은 세라믹볼의 영율 및 포아송비를 각각 320 GPa, 0.26이라 하고, 강구의 영율 및 포아송비를 각각 210 GPa, 0.30이라 할 때 6.63 GPa의 최대접촉응력(Hertzian stress)을 야기하게 된다. 시험회전수는 10,000 rpm으로 이것은 세라믹볼이 끼워진 스피들의 속도이며, 세라믹볼의 회전에 의해 하부의 강구는 자전 및 공전을 하게 되므로써 세라믹볼이 10,000 회전시에 발생하는 반복접촉횟수는 22,500 cycle이 된다.

실험중에 상부볼과 하부볼 사이에 형성되는 유막의 두께는 Hamrock과 Dowson이 제안한 Table 2의 계산식[7]을 사용하여 계산하였으며, 이 값으로 유막 파라메타값(Λ)을 구하였다[8]. 유막파라메타값이 1보다 작은 상태는 두 접촉면이 상대운동을 할 때에 유막에 의해 떨어져 있지 않고 접촉이 발생한다는 것을 의미하며 이러한 상태에서 작동되는 접촉면은 표면의 손상이 발생하게 된다. 시험볼 사이에 형성되는 유막의 두께 및 유막파라메타값을 달리하기 위하여 윤활제는 40°C에서 10 cSt과 30 cSt의 점도값을 갖는 두가지 오일을 사용하였으며, 하부볼은 거칠기값이 0.01 μmRa 인 강구와 0.25 μmRa 인 강구를 사용하였다. 즉 0.01 μmRa 의 거칠기를 갖는 강구를 사용하고 30 cSt의 점도값을 갖는 오일로 윤활시키므로써 탄성 유체윤활조건이 되도록 하였으며, 0.25 μmRa 의 거칠기를 갖는 강구를 사용하고 10 cSt의 점도값을 갖는

Table 3. Conditions of rolling fatigue life test

	Case 1	Case 2
Roughness of steel ball (μm)	0.01	0.25
Viscosity of lubricant (cSt)	30	10
Lubricant film parameter (Λ)	8.9	0.2
Load (N)	980	
Spindle speed (rpm)	10,000	
Max. contact stress (GPa)	6.63	

오일로 윤활시키므로써 경계윤활조건이 되도록 하였다. 시편 A, B에 대하여 탄성유체윤활조건과 경계윤활조건하에서 각각의 구름피로수명을 실시하였다. 이상의 실험조건을 Table 3에 요약하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 시편의 수명 및 파손형태

2종의 시편 A, B를 탄성유체윤활조건과 경계윤활조건에서 실험한 결과를 Fig. 3에 각각 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 시편 A는 윤활조건에 상관없이 모든 시편이 반복접촉횟수 3.75×10^7 cycle 이내에서 파손이 발생하지 않았다. 시편 B는 탄성유체윤활조건에서 실험한 경우 모든 시편이 반복접촉횟수 3.75×10^7 cycle 이내에서 파손이 발생하지 않았

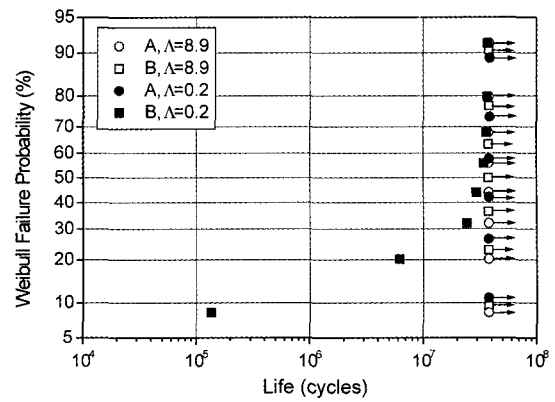


Fig. 3. Weibull distribution of rolling fatigue life.

으나 경계윤활조건에서는 구름피로수명의 산포가 컸다.

각각의 윤활조건에서 시험된 세라믹볼을 아세톤으로 초음파 세척하고 접촉부위를 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 동일 부위에 대하여 표면형상측정기로 접촉부위를 측정하였다. 표면형상측정기는 영국 Taylor Hobson사의 Form Talysurf를 사용하였으며 측정 결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 탄성유체윤활조건에서는 시편 A와 시편 B 모두 세라믹볼의 구름접촉부가 마모되거나 손상된 흔적을 관찰할 수 없었으며, 접촉부의 경계에 $0.1 \mu\text{m}$ 정도 높이의 돌출물이

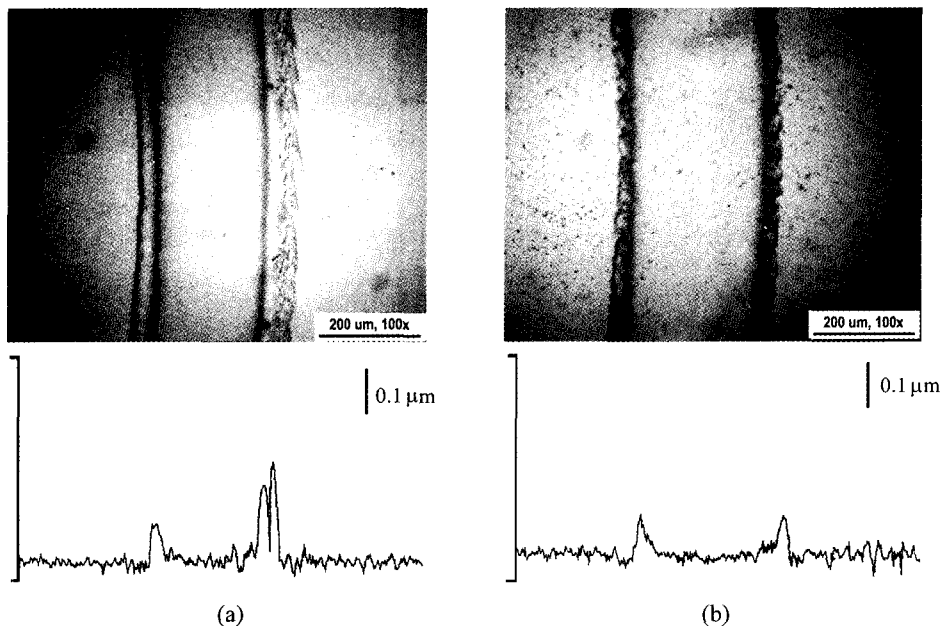


Fig. 4. Micrograph and rolling track profile of (a) specimen A and (b) specimen B tested under EHL condition.

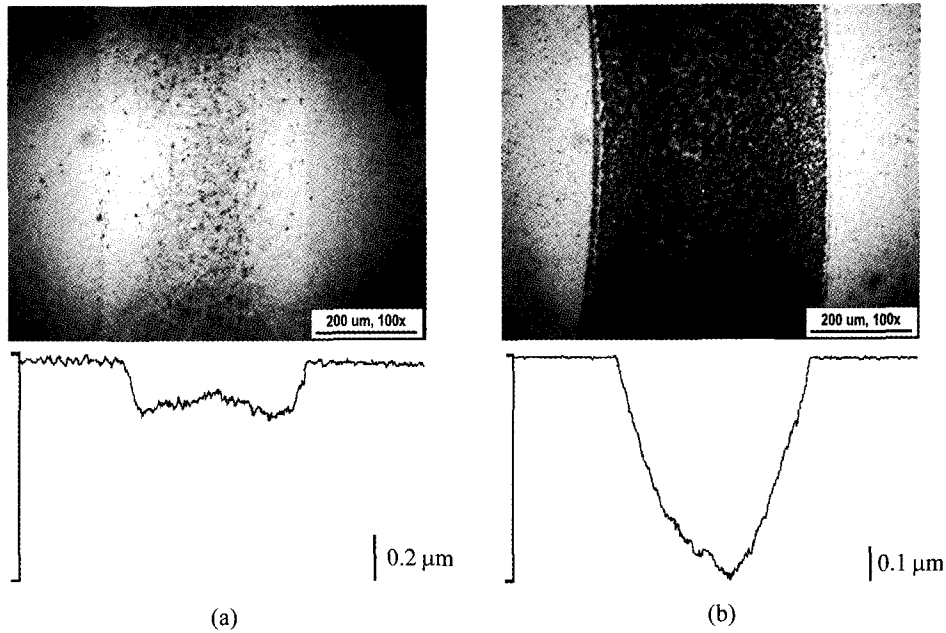


Fig. 5. Micrograph and rolling track profile of (a) specimen A and (b) specimen B tested under boundary lubrication condition.

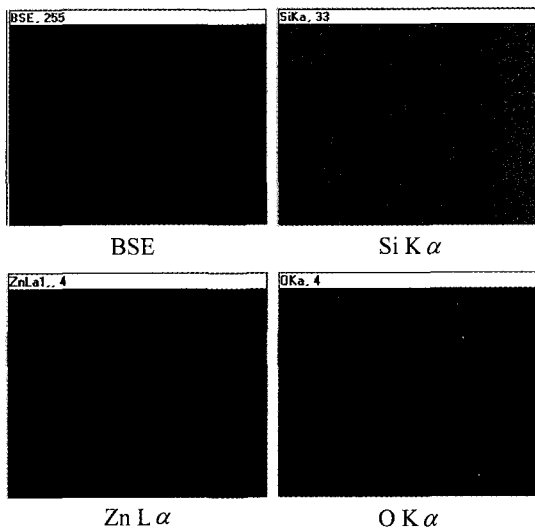


Fig. 6. EDS patterns of rolling track on specimen A tested under EHL condition.

형성되어 있는 것이 관찰되었다. 이러한 돌출부위의 분석을 위하여 EDS 분석을 실시하였으며, 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 돌출부위의 성분은 주로 Zn과 O로 이루어져 있었다. 따라서 이물질은 윤활유에 들어있는 첨가제 성분이

구름접촉시에 세라믹볼의 접촉부 경계에 응착되어 형성된 것으로 판단된다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 경계윤활조건에서는 시편 A와 시편 B의 마모특성이 상당한 차이를 나타내었다. 즉 시편 A의 구름접촉부위는 마모 깊이가 $0.2\ \mu\text{m}\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 정도였으며, 입자의 미소파괴에 의한 형태로 마모가 진행되었으나 그 양은 미미하였으며 실험기간 동안 이상진동이 발생하지 않고 정상적인 작동을 유지하였다. 그러나 시편 B의 구름접촉부위는 마모 깊이가 $5\ \mu\text{m}\sim 7\ \mu\text{m}$ 정도로 시편 A 보다 약 25배가 컸으며, 마모된 단면형상도 하부볼의 곡률형상이 드러나는 형태로 마모가 진행되었다. Fig. 7은 시편 B를 경계윤활상태에서 시험한 구름접촉부위를 SEM으로 관찰한 결과이며, 입자의 Pull-out과 미소파괴에 의해 마모가 진행됨을 알 수 있다. 이러한 시편 B의 과다 마모는 세라믹볼 자체의 형상변화 뿐만 아니라 하부에 놓여진 강구의 변형을 유발시킴으로써 이상진동이 발생하여 시험기의 작동을 멈추게 하였다. 따라서 경계윤활조건에서 시편 B의 구름피로수명 산포가 컸던 이유는 세라믹볼의 구름접촉부에서 과다한 마모가 발생하고 이로인한 강구의 변형 등으로 이상진동이 발생하는 시점이 시편에 따라 달랐기 때문인 것으로 판단된다.

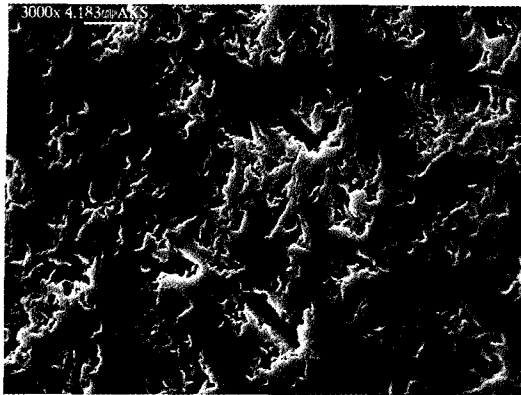


Fig. 7. SEM micrograph of rolling wear track on specimen B tested under boundary lubrication condition.

3-2. 경계윤활조건에서 구름마모와 시편의 기계적 물성과의 관계

Table 1에 나타난 바와 같이 시편 B의 인성값은 시편 A에 비하여 낮지 않고, 경도값도 큰 차이가 없으며 구름접촉시 파손의 원인이 되는 소재의 결함(기공, 조대입자 등)도 차이가 없었다. 그럼에도 불구하고, 경계윤활상태에서는 시편 A와 시편 B의 구름마모 특성이 상당한 차이를 나타내고 있다. 이것은 일반적으로 세라믹스 재료에서 측정하는 경도값과 인성값은 경계윤활상태에서 입자탈락이나 파쇄와 같이 미소파괴로 진행되는 구름마모에 대한 저항값으로 적절하게 표현할 수 없음을 의미한다. 즉 경계윤활하에서 입자의 탈락과 파쇄에 영향을 주는 인자는 주로 입자의 크기와 입계상의 양과 종류이며, 세라믹스 재료의 기계적물성을 측정하는 경도나 인성의 측정방법으로는 이러한 요인을 충분히 반영하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 경도측정시 인가하는 하중을 변화시키면서 인가시간을 5초로 하여 비커스경도를 측정하였으며 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 시편 B는 인가하중값에 따라 경도값의 변화가 거의 없었으나, 시편 A는 인가하중이 작아짐에 따라 경도값이 증가하여 200 g의 인가하중으로 측정시에는 시편 B의 경도값과는 차이가 현저하였다.

4. 결 론

원료 및 제조공정을 달리하여 제작한 2가지의 세

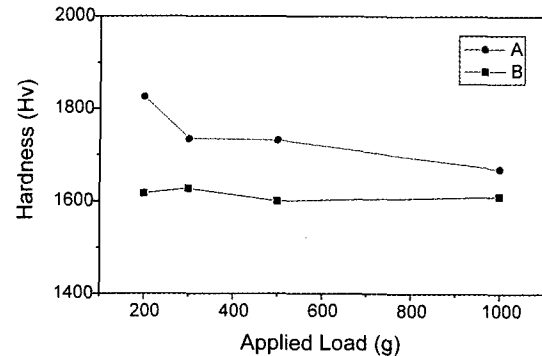


Fig. 8. Change of Hardness as a function of load.

라믹볼을 윤활조건을 달리하여 구름피로수명시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탄성유체윤활상태에서는 GPS나 HIP으로 제조된 두가지 세라믹볼 모두 파손이나 표면의 마모가 없었으며 양호한 구름피로수명값을 나타내었다.
2. 경계윤활상태에서는 입자가 크고 입계상이 많은 GPS로 제조된 세라믹볼이 구름접촉부가 심하게 마모되는 파손형태를 나타냈으며, 이로 인해 구름피로수명의 산포가 컸다.
3. 경계윤활상태에서 구름마모는 입자의 크기, 입계상의 양과 종류에 따라 마모형태가 다르게 나타났으며, 일반적으로 측정하는 경도값과 인성값은 이러한 요인을 반영하지 못하였다.

참고문헌

1. Y. Shoda, "Development of Hybrid Ceramic Ball Bearings for High-Speed Machine Tool Spindles," NSK Technical Journal No.650, pp.21-28, 1989.
2. L. burgmeier and M. Poursaba, "Ceramic Hybrid Bearings in Air-Cycle Machines," ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.118, pp.184-190, 1996.
3. 최인혁, 박창남, 최현진, 이준근, 신동우, "질화규소 세라믹볼의 구름피로수명," 한국윤활학회지, Vol.15, No.2, pp. 150-155, 1999.
4. J. W. Lucek, "Rolling Wear of Silicon Nitride Bearing Materials," Gas Turbine and Aeroengine Cong. and Expo. Preprint 90-GT-165, 1990.
5. G. T. Y. Wan, A. Babelli and E. Ioannides, "Increased Performance of Hybrid Bearings with Silicon Nitride Balls," Trib. Trans., Vol.40, No.4, pp.701-707, 1997.
6. C. P. Gazzara and D. R. Messier, "Determination of

- Phase Content of Si_3N_4 by X-Ray Diffraction Analysis," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol.56, No.9, pp.777-780, 1977.
7. B. Hamrock and D. Dowson, "Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts-PartIII-Fully Flooded Results," *ASME J. Lubr. Technol.* Vol. 99, pp.264-276, 1977.
8. T. Tallian, "On Competing Failure Modes in Rolling Contact," *ASLE Trans* Vol.10, No.4, pp.418-439, 1967.