

질화규소 세라믹볼의 구름피로수명

최인혁* · 박창남* · 최현진** · 이준근** · 신동우***

*FAG한화베어링(주), **한국과학기술연구원 복합기능세라믹스센터

***경상대학교 재료공학부, 첨단소재연구소

Rolling Fatigue Life of Silicon Nitride Ceramic Balls

In-Hyuk Choi*, Chang-Nam Park*, Heon-Jin Choi**, June-Gunn Lee**, Dong-Woo Shin***

*FAG Hanwha Bearings Corp.

**Multifunctional Ceramics Research Center, Korea Institute of Science and Technology

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

Abstract - The rolling fatigue lives (RFL) of five kinds of silicon nitride balls were investigated. Four kinds of Si_3N_4 balls were fabricated using different raw materials, sintering aids and sintering conditions. Commercially available Si_3N_4 ball was also studied for comparison. All the balls were finished up to the dimensional accuracy of Grade 10 defined in KS B 2001 (Steel Balls for Ball Bearings) with a size of 9.525mm. RFL tests were then conducted under the initial theoretical maximum contact stress 6.38 GPa and the spindle speed 10,000 rpm. Gear oil was provided by oiled race as lubricant. The results of RFL test indicated the prerequisite conditions for the long rolling life of Si_3N_4 ball : (1) the high density, (2) microstructures consisted of small uniformly distributed grains, (3) little glassy phase in grainboundary, and (4) little crystalline phase and secondary phase that induces residual thermal stress due to the differences of thermal expansion coefficient with Si_3N_4 phase.

1. 서 론

탄화규소, 알루미늄, 지르코니아, 질화규소로 대표되는 엔지니어링 세라믹스는 내열성, 내식성, 내마모성 등이 우수하여, 종래의 금속재료로는 견딜 수 없는 가혹한 환경에서도 사용 가능한 구조용 재료로 산업계의 여러 분야에서 활발한 응용이 진행되고 있다. 한편, 대부분의 회전체를 지지하는 구름베어링은 산업 기기에 있어서 없어서는 안되는 필수 불가결한 기계요소로, 최근 산업의 발

전과 더불어 사용환경이 매우 가혹해짐에 따라 보다 높은 신뢰성이 요구되어 지고 있다. 따라서 종래의 베어링 소재로 사용되고 있는 고탄소크롬베어링강, 또는 기타 특수강으로 적용이 곤란한 고속, 고온 및 특수 환경에 대응하기 위하여 첨단 소재로 각광을 받고 있는 질화규소 세라믹스로 구름베어링을 제작하여 적용하는 사례가 증가하고 있다[1-3].

일반적으로 구름베어링용 재료로 사용되기 위해서는 높은 접촉하중 하에서도 파손되

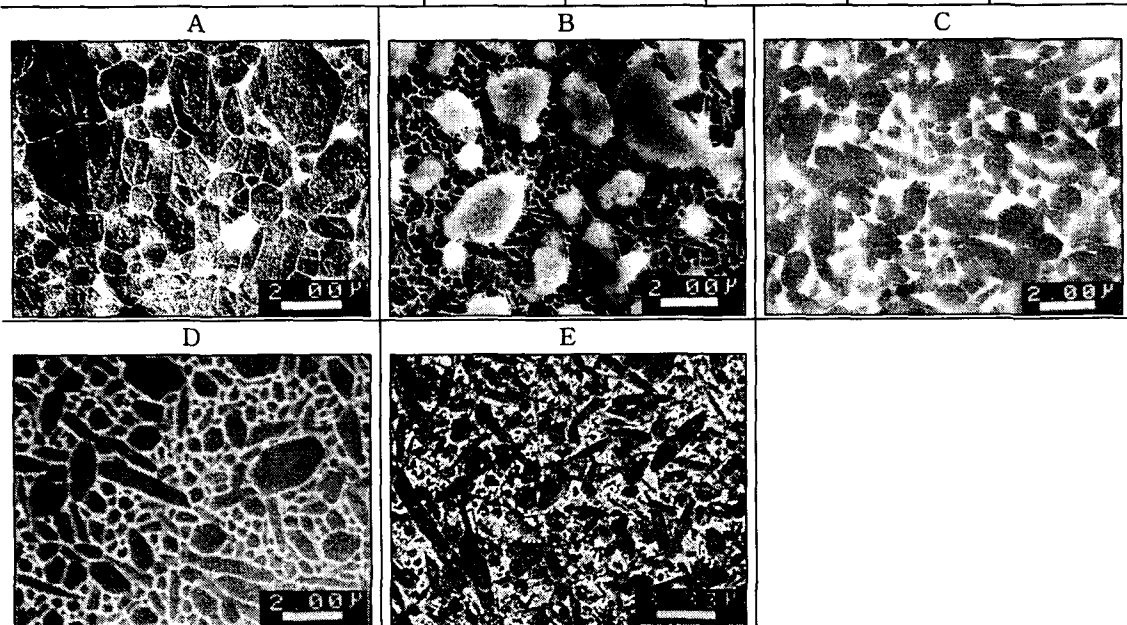
지 않는 내하중능력을 가져야 한다. 또한, 내마모성이 우수하고 구름피로수명의 산포가 작아서 신뢰성이 높아야 한다. 질화규소 세라믹스는 밀도, 강도, 내열성 등의 기계적·물리적성질 및 구름피로수명의 신뢰성 관점에서 구름베어링용 소재로 가장 적합한 세라믹스로 알려져 있다[4].

본 연구에서는 세라믹베어링의 용도별 특성화를 위해 네 종류의 질화규소 소재를

개발하여 구름베어링용 볼로 정밀가공한 후, 4-볼시험기를 이용하여 구름피로수명(rolling fatigue life, RFL) 및 마모특성에 대하여 조사하였다. 그리고 그 결과를 현재 상업적으로 판매되고 있는 질화규소볼 1종의 결과와 비교하면서 질화규소 소결체의 물성과 구름피로수명과의 관계를 검토하였다.

Table 1. Summary of specimens

		A	B	C	D	E
Material composition	Base	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄ TiN	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
	Additive (wt%)	Y ₂ O ₃ (4) Al ₂ O ₃ (2)	Y ₂ O ₃ (4) Al ₂ O ₃ (2)	Yb ₂ O ₃ (15.4) SiO ₂ (2.5)	Y ₂ O ₃ (4) Al ₂ O ₃ (2)	MgO (1)
Sintering process		GPS	GPS	GPS	GPS	HIP
Porosity (area %)		2.27	< 0.1	0.31	< 0.1	< 0.1
Hardness (Hv, GPa)		13.79	9.31	18.10	18.84	14.94
Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})		4.01	6.22	6.19	6.65	5.69
Flexural strength (MPa)		530	681	785	672	800



2. 실험방법

2-1. 시편

본 연구에 사용된 시편의 종류 및 특성을 Table 1에 나타내었다. 각 시편은 다음과 같은 목적으로 선택하였다. 시편 A는 저급 질화규소 분말로부터 제조한 것이다. 이것은 일반적으로 질화규소 볼의 제품화에서 문제가 되는 질화규소 분말의 가격문제를 해결하기 위해 선택하였다. 시편 B는 높은 인성과 R-curve 거동을 나타내는 Si_3N_4 -TiN 복합체이며[5], 이 복합체가 구름베어링용 볼로 응용이 가능한가를 검토하기 위해 선택하였다. 시편 C는 고온용 질화규소 소재로 개발된 재료이며[6], 이 재료 또한 구름베어링 볼로 응용이 가능한가를 시험하기 위해 선택하였다. 시편 D는 가장 일반적인 Al_2O_3 와 Y_2O_3 를 소결 첨가제로 사용한 질화규소 소재이다. 시편 E는 이번 실험결과를 비교하기 위해 상업적으로 판매되는 구름베어링용 질화규소 볼(Saint-Gobain/Norton Industrial Ceramics Co.)로 MgO를 소결 첨가제로 하여, 열간 정수압 소결에 의해 제조한 것이다.

A, B, C, D 각 조성을 구형 몰드를 이용하여 일축가압하여 구형으로 성형하고, 138 MPa의 압력으로 정수압 성형한 후, 가스압 소결법에 의해 소결체를 제조하였다. 각각의 소결체는 KS B 2001(볼베어링용 강구)에 준하여 등급10을 만족하는 9.525 mm 볼로 제작하였으며, 시편 E도 등급10을 만족하는 9.525 mm볼을 사용하였다.

2-2. RFL 실험장치 및 실험조건

본 연구에 사용된 4-볼시험기는 CAMERON-PLINT사 제품으로 시험기의 개략도를 Fig 1.에 나타내었고, 시험볼이 장착되는 부위의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 스피들에 끼워

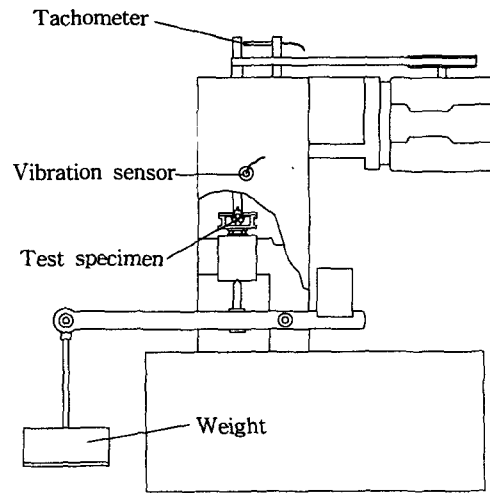


Fig. 1. Schematic of the 4-ball tester

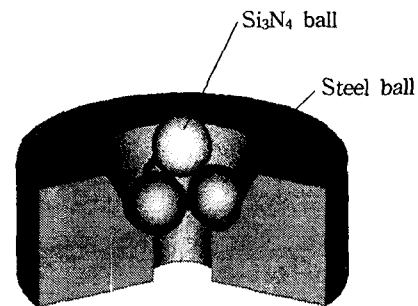


Fig. 2. Cross-sectional view of the test part

져 회전하는 상부의 볼이 세라믹 시험볼이며, 하부의 궤도륜에 위치한 세 개의 볼은 등급10의 강구를 사용하였다. 실험중에 볼의 파손이 발생하면 시험기 외벽에 붙어있는 진동센서에 의해 이상 진동이 감지되어 실험이 정지되며, 정지시까지의 시간을 시험볼의 수명으로 하였다. 하부의 강구가 파손되었을 경우에는 강구를 교환하여 실험을 계속 진행하였으며, 상부볼과 하부볼의 반복접촉횟수가 4.1×10^7 cycle 이상이 되면 실험을 종료

하였다.

시험볼에 가하는 하중은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하중추에 의해 주어지며 본 시험에서 인가한 하중은 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 6.38 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 10,000회전시에 발생하는 반복접촉횟수는 22,500 cycle이 된다. 윤활은 하부볼이 놓여지는 궤도륜에 기어오일을 주입하여 윤활이 되도록 하였다. 이상의 실험조건을 Table 2.에 요약하였다.

Table 2. Conditions of rolling fatigue life test

Load (kgf)	100
Spindle speed (rpm)	10,000
Lubricant	Gear oil 80W/90
Max. contact stress (GPa)	6.38
Initial contact circle radius (mm)	0.173

3. 결과 및 고찰

3-1. 시편의 수명 및 파손형태

5종의 세라믹볼을 4-볼시험기에 의해 수명시험한 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 파손품의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에 나타나 있듯이 시편 A는 모든 시편이 짧은 수명값을 나타내었으며, 시편 B와 C는 수명의 산포가 광범위하였고, 특히 B 시편은

수명의 산포가 매우 컸다. 시편 D와 E는 10개의 모든 시편이 반복접촉횟수 4.1×10^7 cycle이내에서 파손이 발생하지 않았다.

시편 A는 시험시작후 짧은 시간내에 모든 시편(시편 10개)이 접촉부에서 심한 구름마모가 발생하는 형태로 파손되었다. 시편 A의 짧은 구름수명은 Table 1에서 나타내었듯이 다른 시편에 비해 높은 기공율에 그 원인이 있다. 이같은 기공은 외부로부터 응력을 받았을 때 응력이 집중되어 균열의 출발점으로 작용하여 구름수명에 결정적인 영향을 준다[7]. 또 다른 원인으로서는 주로 큰 입자로 구성된 시편 A의 미세구조 때문인 것으로 판단된다. 즉, 외부에서 하중이 가해질 때 큰 입자는 입계결함의 요인이 되며, 이 때문에 입자크기 증가에 따라 내하중 능력이 감소할 수 있다. 따라서 시편 A의 짧은 수명은 기공과 큰 입자들로 이루어진 미세구조 때문인 것으로 판단된다. 이밖에 일반적으로 저가 분말로 제조한 질화규소에서 균열의 원인으로 작용하는 Fe 불순물의 영향[8]도 배제할 수 없다.

시편 B는 수명의 산포가 매우 컸으며, 파손품(시편 10개중 6개)은 시편 A와는 달리 구름접촉에 의한 표면의 마모가 없이 모두 박리(Spalling)의 형태로 파손되었다. 이같은 박리파손은 구름접촉부에서 접촉응력에 의한 미세균열의 발생, 성장, 집적에 의해 일어나게 된다[7]. 시편 B의 경우 소결 첨가제가 적기 때문에 입계유리상이 적고, 입계의 결정상이 거의 없으며, Table 1에 나타난 바와 같이 표면의 기공도 적으므로 시편 A와는 다른 파손기구에 의해 박리의 형태로 파손이 발생한 것으로 보인다. 시편 B가 조기 파손된 원인의 하나로 소재내의 결함으로 작용하는 큰 TiN입자를 들 수가 있다. 시편 B는 소결중 일부 TiN입자가 성장하면서 큰

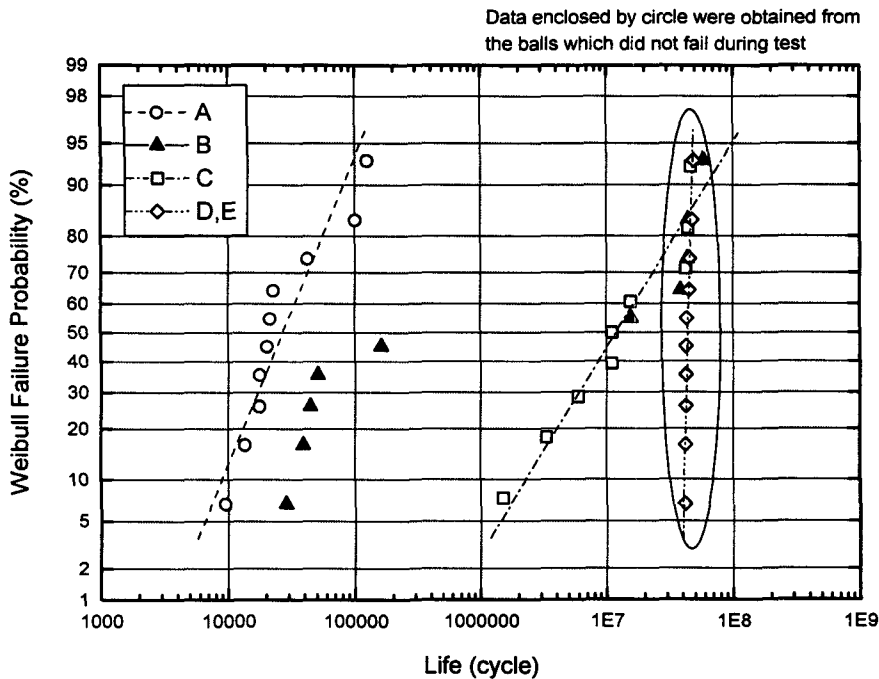


Fig. 3. Weibull distribution of rolling fatigue life of various Si_3N_4 ball

입자를 형성하며[9], 이같은 큰 입자들은 접촉응력 하에서 입계결합의 요인이 되므로, 균열을 발생시켜 박리형태의 조기파손이 발생한 것으로 판단된다. 또 다른 조기파손의 원인으로 질화규소와 TiN의 열팽창 계수 차이에 의한 응력의 발생을 고려할 수 있다. 즉 질화규소는 약 $3.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 열팽창계수를 갖고 TiN은 약 $5.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 열팽창계수를 갖는다. 이같은 열팽창계수의 차이는 소결후 냉각중 열팽창계수 차이에 의한 잔류응력을 발생시키며, 이 잔류응력으로 인하여 낮은 외부응력에도 균열이 발생하고[5], 이러한 균열의 성장 및 집적에 의해 박리에 의한 조기파손이 발생한 것으로 판단된다.

시편 C의 수명 산포도 양호하지 못하였다. 시편 C의 파손품(시편 9개중 6개)은 모두가 시편 A와 같은 표면마모가 발생하였고,

표면마모와 spalling이 함께 발생한 파손품도 있었다. 그러나 시편 C는 시편 A와는 달리 초기에 파손된 제품은 없었다. 시편 C의 파손과 수명 산포를 설명할 수 있는 가장 유력한 것으로는 기공, 입계 유리상 및 입계 결정상을 들 수 있다. 시편 C는 일반적으로 높은 소결온도를 요구하는 조성이다. 이 때문에 시편에 기공이 남아있고, 기공이 남아있는 부분이 접촉하는 경우와 기공이 없는 부분이 접촉하는 경우에 따라 균열의 발생이 결정되면서 수명의 산포가 크게 나타날 수 있다. 또한 시편 C는 입계유리상이 12 vol.%로 다른 시편에 비해 입계유리상의 양이 상대적으로 많고, 이러한 입계 유리상은 Hertzian 접촉 조건과 같은 RFL 시험조건에서는 결함으로 간주할 수 있다[7]. 또한, 시편 C의 입계에는 질화규소와 열팽창 계수가

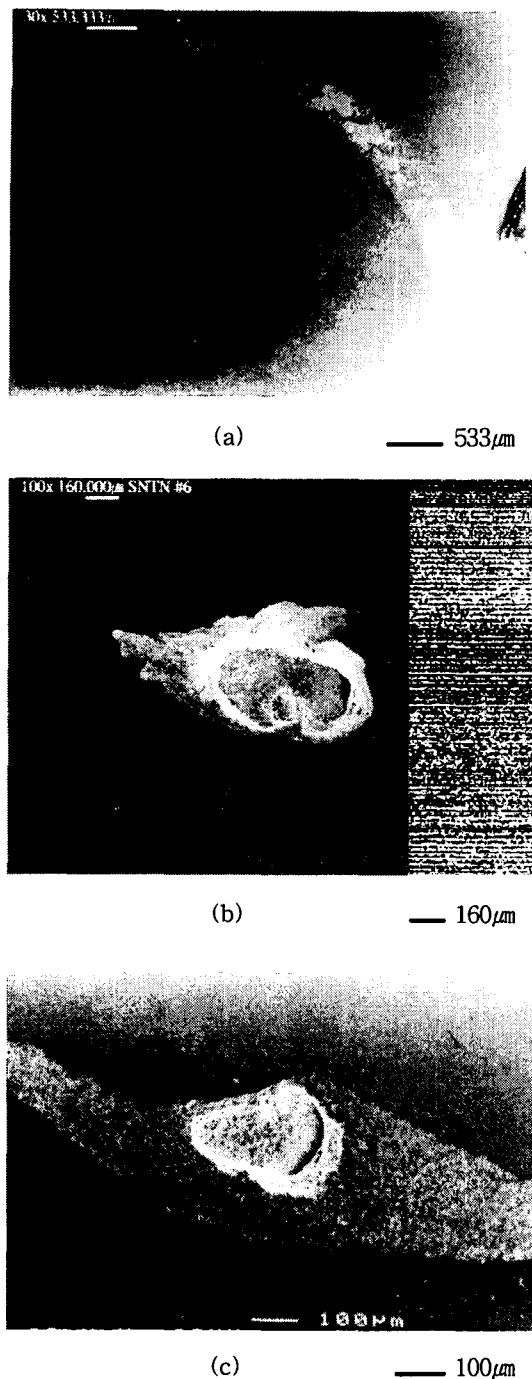


Fig. 4. SEM micrographs showing
 (a) the wear track in the specimen A
 (b) the spalling in the specimen B
 (c) the both wear track and spalling in the specimen C

다른 $Yb_2Si_2O_7$ 이나 $Yb_4Si_2N_2O_7$ 결정상이 생성되며[10], 이 결정상들은 질화규소와 열팽창계수 차이에 따른 잔류응력을 발생시킨다. 이로 인하여 낮은 외부응력에서 미세균열이 생성된다[5]. 따라서 시편 C는 기공 및 결함과 같은 것으로 간주할 수 있는 입계 유리상과 미세균열을 일으킬 수 있는 입계 결정상이 있기 때문에 수명의 산포가 넓어진 것으로 판단된다.

시편 D와 E는 모든 시편이 반복접촉횟수 4.1×10^7 cycle이내에서 파손이 발생하지 않았다. 각 시편은 구름접촉에 의한 미미한 손상이 관찰되었으나, 심한 마모나 박리와 같은 파손은 발생하지 않았다. 이같은 결과는 앞에서 검토한 시편 A, B, C에서 수명에 영향을 주는 요인들이 없었기 때문인 것으로 보인다. 즉, 시편 A, B, C의 실험결과 질화규소 소결체에서 긴 피로수명을 기대할 수 있는 미세구조의 조건은, 첫째 치밀화가 완전히 일어나서 기공이 없으며, 둘째 입자크기가 작고 균일한 미세구조를 가져야 하며, 셋째 입계유리상과 입계결정상이 작거나 없고, 넷째 2차상에 의한 잔류응력이 없어야 한다. 시편 D와 E는 이 조건들을 충족시키고 있다. 즉, 시편 D는 높은 소결밀도를 갖고, 소결 첨가제 양이 작기 때문에 입계유리상의 양이 적으며, 입계 결정상이 거의 없고, 질화규소 입자와 다른 열팽창 계수를 갖는 2차상도 없다. 또 작은 입자들로 구성된 균일한 미세구조를 갖고 있다. 이같은 조건은 시편 E도 충족하고 있기 때문에 파손이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

3-2. 시편의 수명 및 기계적 물성과의 관계

질화규소볼이 갖는 기계적인 물성과 수명과의 관계를 조사하기 위해 Fig. 3에 나타

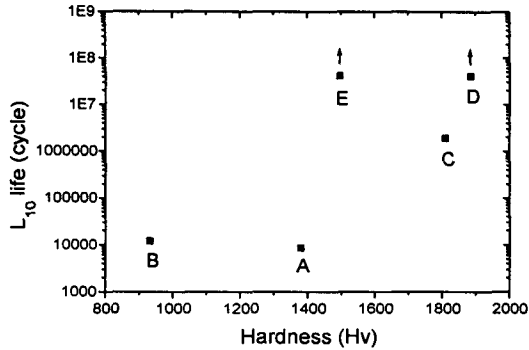


Fig. 5. Relation between hardness and L_{10} life in various Si_3N_4 ball

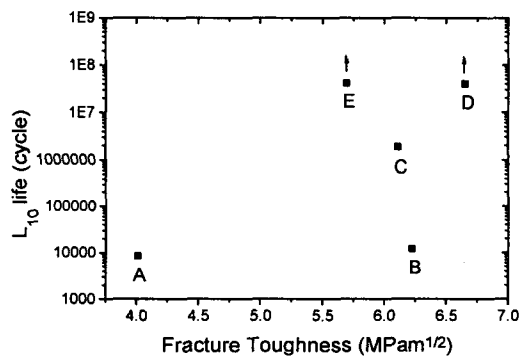


Fig. 6. Relation between fracture toughness and L_{10} life in various Si_3N_4 ball

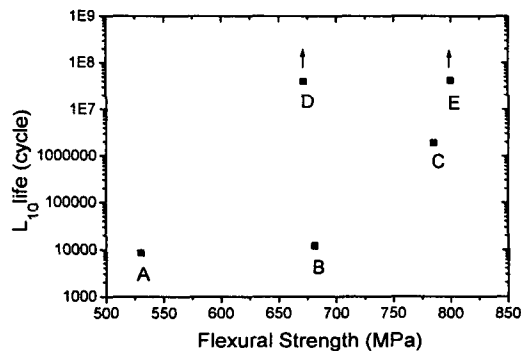


Fig. 7. Relation between flexural strength and L_{10} life in various Si_3N_4 ball

난 세라믹볼의 수명값에서 90%의 신뢰성을 갖는 L_{10} 수명값을 구하고, 시험편 각각의 경도값, 파괴인성값 및 굴곡강도값과의 관계를 Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7에 나타난 바와 같이 시험편의 구름수명과 기계적 물성과는 무관한 양상을 보였다. 이것은 앞서 정성적으로 고찰한 시험편의 수명에 영향을 미치는 여러가지 요인(소재결합, 미세구조, 입계유리상, 입계결정상, 2차상의 존재 등)이 세라믹스 재료의 기계적 물성에 완전히 반영되어 표현되지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 이것은 경도나 파괴인성 또는 굴곡강도값이 실제 RFL 시험조건에서 수명에 영향을 주는 여러 가지 요인을 포함한 대표적인 변수가 되지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 RFL 수명과 기계적 물성을 연관시키기 위해선 보다 시험의 물성을 광범위하게 반영할 수 있는 새로운 방법이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

원료 및 제조공정을 달리하여 제작한 세라믹볼을 4-볼시험기로 구름수명시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 높은 기공율과 조대한 입자를 가진 질화규소볼의 구름수명은 매우 열악하였으며, 표면이 심하게 마모되는 파손 형태를 나타냈다.

2. 열팽창계수가 다른 2차상을 함유하는 질화규소볼은 박리의 형태로 파손이 되었으며, 구름수명의 산포가 매우 컸다. 또한 과도한 양의 입계유리상 및 입계결정상을 갖는 질화규소볼의 구름수명도 산포가 컸으며 표면이 마모되는 파손형태를 나타냈다.

3. 기공이 없고 2차상이 없으며, 입계상이 적고, 또한 균일하고 작은 입자의 미세구

조를 갖는 질화규소불이 높은 구름피로수명 값을 나타냈다.

4. 질화규소 소재의 경도값, 파괴인성값 및 굴곡장도값은 구름수명에 영향을 미치는 결합, 미세구조, 2차상 및 입계상 등의 요인을 충분히 포함하지 못하였으며, 이러한 측정값과 질화규소불의 구름수명은 무관한 양상을 나타냈다.

References

1. 竹林博明, 唯根 勉, 吉岡武雄, “セラミックス 玉軸受の高溫における運轉性能(第1報)”, *トライボロジスト*, 38, 10 (1993) 935.
2. 吉岡武雄, 藤田清志, 竹林博明, 唯根 勉, “セラミックス 玉軸受の高溫における運轉性能(第2報)”, *トライボロジスト*, 38, 12 (1993) 1077.
3. 竹林博明, “應用事例 - ころがり軸受”, *トライボロジスト*, 34, 2 (1989) 119.
4. 六角和夫, “窒化硅素轉がり軸受,” *窒化硅素セラミックス2*, pp.219-238, 内田老鶴圃, 1990.
5. Heon-Jin Choi, Kyeong-Sik Cho, June-Gunn Lee, Young-Wook Kim, “R-Curve Behavior of Silicon Nitride-Titanium Nitride Composites” *J. Am. Ceram. Soc.* 80, 10, 2681 (1997).
6. M. K. Cinibulk and G. Thomas, “Strength and Creep Behavior of Rare-Earth Disilicate-Silicon Nitride Composites,” *J. Am. Ceram. Soc.* 75 (1992) 2050.
7. G. Glide, P. J. Huang, J. J. Swab, C. Hubbard and T. V. Hynes, “Evaluation of Silicon Nitride Contact Fatigue,” 6th Inter. Symp. Ceram. Mat. Comp. Eng. (1997) pp. 802-807.
8. F.F. Lange, “Reaction of Iron with Si_3N_4 Materials to Produce Surface Pitting,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 61(5-6) 270-71 (1978).
9. Heon-Jin Choi, Young-Wook Kim, June-Gunn Lee, Soo W Lee and Soon Kil jung, “Fabrication and Characterization of Electrical Discharge Machinable Si_3N_4 -TiN Composites,” *Kor. J. Ceram.*, 1 [2] 101-105 (1995).
10. Heon-Jin Choi, June-Gunn Lee, Young-Wook Kim, “High Temperature Strength and Oxidation Behaviour of Hot-Pressed Silicon Nitride-Disilicate Ceramics”, *J. Mat. Sci.* 32, 1937, (1997).