

구름접촉시 세라믹의 거시적 마모특성

金石三* · 加藤康司** · 堀切川一男**

*慶北大學校 工科大学 機械工學科

**東北大學 工學部 機械工學科

Macroscopic Wear Characteristics of Ceramics under the Rolling Contact

Seock-Sam Kim*, Kohji Kato** and Kazuo Hokkirigawa**

*Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kyungpook National University

**Department of Mechanical Engineering, Tohoku University

Abstract—The wear tests of ceramic materials in dry rolling contact were carried out at room temperature to investigate their macroscopic wear characteristics. Both point contact and line contact were adapted in the wear tests of them. Ceramic materials used in these tests were silicon nitride, silicon carbide, cermet of TiN and TiC, titania, and alumina. The wear test of the bearing steel was carried out to compare to the wear test results of the ceramic materials.

The results showed that the wear rate of silicon nitride was smaller than any other ceramic materials and bearing steel. In the steady wear, the wear volume of ceramic materials increases linearly with the rolling distance. It was also found from the experimental results that fracture toughness and surface roughness dominate the wear process of ceramic materials in dry rolling contact.

1. 서 론

최근 개발되고 있는 세라믹은 금속에 비해서 여러가지 특성을 가지고 있다. 즉 밀도가 적고, 종탄성계수가 크고, 경도가 높고, 내열성과 내식성이 뛰어나며 열팽창계수가 적다. 이와같은 특성을 이용해서 종래에는 금속으로서는 사용 불가능했던 가혹한 환경조건에서 세라믹을 활용하려고 하는 경향이 점차 고조되어가고 있다 [1,2]. 특히 구름접촉부재로서 세라믹이 강하게 요구되는 것은 가스터빈에의 응용이다. 가스터빈 입구와 같이 고속(DN=400만)·고온(500°C)·경량화가 요구되는 회전부위에서의 세라믹 베어링의 응용인 것이다 [3-7]. 또한 우주산업이나 반도체 생산라인에서와 같이 진공상태에서나 고도의 청결성을 요구하는 곳에서도 세라믹 베어링의 사용이 기대되는 것이다[8,9].

세라믹 베어링에 관한 연구는 1961년도 NASA의 Zaretsky 등[10]이 Pyroceram ball을 사용하여 피로

수명실험을 실시한 이래, Taylor[11], Parker 등[12]이 알루미늄을 고온조건하에서의 베어링 재료로서 사용 가능여부를 실험하였다. 한편, Dalal 등[13]은 윤활조건하에서 질화규소가 베어링 재료로서 사용 가능하다는 것을 보였다. Hamburg 등[14], Miner 등[15], Bhushan 등[16]은 실제의 가스터빈엔진에 질화규소 베어링을 설계제작하여 성능시험을 수행하여 상당히 향상된 수명시간을 나타냈다. 이상의 질화규소를 중심으로한 세라믹 베어링에 관한 연구는 윤활 상태에서의 피로수명에 관한 성능평가가 주된 내용이었다. 그러나 LSI 생산라인이나 진공기기 등과 같이 높은 청결성을 요구하는 곳에서는 무윤활상태로서 세라믹의 응용이 기대된다. 또한 현재 개발되고 있는 여러가지 종류의 세라믹에 대한 마모특성과 그 마모기구에 관한 정확한 규명이 시급한 과제인 것이다.

이와같은 공업적 요구에 따라 본 논문에서는 세라믹 재료중에서 기계구조용 세라믹으로서 가장 유망시되는

실화규소(Si_3N_4), 서어멧, 탄화규소(SiC), 티타니아(TiO_2), 알루미늄(Al_2O_3)의 다섯 종류의 세라믹을 무윤활상태하에서 구름접촉상태로 하여 마찰·마모실험을 수행하였다. 실험조건으로서는 구름접촉의 실제 응용을 고려하여 점접촉상태와 선접촉상태의 두 가지 경우로 하였으며, 세라믹재료의 구름접촉하에서의 마모기구의 규명에 목적을 두었다. 본 논문에서는 우선 본 실험결과중에서 거시적 마모특성을 보고하고자 한다.

2. 실험

2-1. 시험편의 형상과 재료

Fig.1은 본 실험에 사용된 시험편의 형상과 크기를 나타낸 것이다. Fig.1(a)는 상부시험편을 폭면, 하부시험편을 원통상으로 하여 점접촉용 시험편을 나타낸 것이다. Fig.1(b)는 상부시험편과 하부시험편을 동일하게 원통상으로 하여 선접촉용으로 한 것이다. 시험편의 치수는 내경을 16 mm로 하고, 외경을 점접촉용을 30 mm, 선접촉용을 29 mm로 하였다. 시험편의 폭은 8 mm이다. 선접촉용 상부시험편의 폭은 마모량을 측정하기 위해서 4 mm로 하였다. 시험편재료로서는 질화규소, 서어멧, 탄화규소, 티타니아, 알루미늄 등 다섯 종류의 세라믹을 사용했다. 점접촉의 경우는 세라믹의 마모특성을 비교하기 위해서 현재 베어링재료로서 많이 사용되고 있는 베어링강(SUJ2)을 사용했다. 세라믹재료는 모두 상압소결법으로 제작되어 연마가공하였다. 또 베어링강도 열처리를 실시하여 경도를 높였다. 이들 시험편재료의 물리적·기계적 성질을 Table 1에 나타냈다. Table 1의 세라믹의 파괴 인성치는 Marshall 등[17, 18]에 의해서 제안된 다음식을 사용해서 비커스 경도계로부터 구하였다.

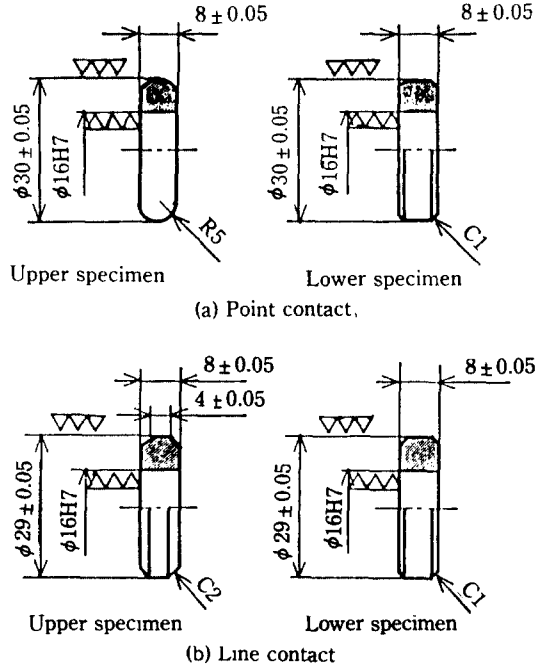


Fig. 1. Shape and size of specimens.

$$K_{1c} = 0.013 (E/H)^{1/2} \cdot P \cdot C_R^{-3/2}$$

여기서 E , H , P 는 각각 세라믹의 종탄성계수, 비커스경도 및 하중이며, C_R 은 비커스압자의 하중 P 로 인해서 발생된 래디얼균열(Radial crack)의 길이이다.

2-2. 실험장치 및 실험방법

Fig.2에 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타냈다. 본 실험장치는 기어의 변환으로 하부시험편의 속도변환이 가능하지만 본 실험에서는 상하의 두 시험편 사이의 미끄럼을 없애기 위해서 상부와 하부 시험편

Table 1. Mechanical and physical properties of specimens

Materials	Si_3N_4	Cermet	SiC	TiO_2	Al_2O_3	SUJ2
Surface roughness R_{max} , μm	2.1	1.7	1.7	1.9	2.8	1.1
Vickers hardness, Kg/mm^2	1532	1426	2541	591	1783	848
Bending strength, GPa	0.49	1.47	0.49	0.15	0.30	—
Elastic modulus, GPa	294	441	392	167	343	190
Poisson's ratio	0.27	0.21	0.16	0.26	0.25	0.28
Fracture toughness, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	5.2	10.2	4.2	2.8	4.0	45.0
Density, g/cm^3	3.2	6.0	3.1	3.3	3.8	7.8
Coefficient of thermal expansion (40-400 °C), $10^{-6}/^\circ\text{C}$	3.7	7.4	3.6	8.4	7.1	12.3
Thermal conductivity (20 °C), $\text{Cal}\cdot\text{cm/cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$	0.03	0.04	0.16	—	0.06	0.13

을 일정한 회전속도 800 rpm 으로 하였다. 시험편의 회전수는 적산회전수로 다섯자리까지 지시가 가능하고, 미리 예정된 시험시간만큼 설정하여 실험을 수행할 수 있다.

부하하중은 점접촉의 경우는 392 N 과 980 N 으로 하

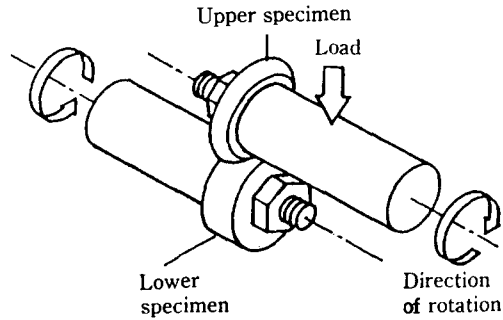


Fig. 2. Schematic diagram of rolling tester.

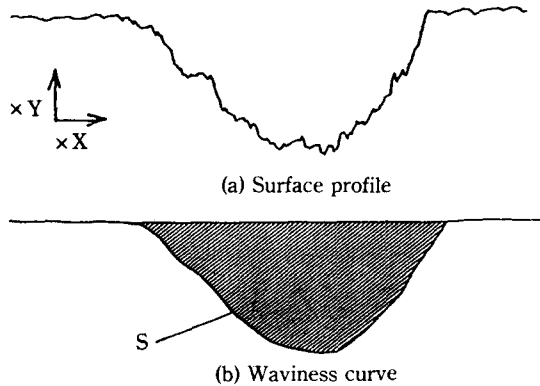


Fig. 3. Surface profile and waviness curve of wear track.

Table 2. Experimental conditions in rolling contact

(a) Point contact

Materials	Speed rpm	Load N	Hertzian contact ellipse		Hertz stress	
			Semimajor, μm	Seminor, μm	Max., GPa	Mean, GPa
Si ₃ N ₄	800	392	372	148	3.40	2.26
		980	505	201	4.61	3.07
Cermet	800	392	329	131	4.36	2.91
		980	446	177	5.92	3.95
SiC	800	392	344	137	3.98	2.65
		980	467	186	5.40	3.60
TiO ₂	800	392	451	179	2.32	1.55
		980	612	243	3.15	2.10
Al ₂ O ₃	800	392	355	141	3.74	2.49
		980	482	192	5.07	3.38
SUJ2	800	392	433	172	2.52	1.68
		980	587	234	3.41	2.28

였고, 선접촉의 경우는 980 N 과 1960 N 으로 하였다. Table 2 에는 본 실험에 사용된 점접촉과 선접촉의 경우의 실험조건을 나타냈다. Table 2 에는 Hertz 접촉부의 크기를 계산하고 Hertz stress 도 계산하여 나타냈다. 마모량의 측정은 미리 설정된 회전수까지 마모실험을 실시한 후에 단면곡선을 profilometer 를 사용하여 구하였다. Fig.3 에 그 예를 나타냈다. 이와같이 하여 얻어진 단면곡선으로부터 planimeter 로서 마모면의 면적을 구하여 마모량을 산출하였다. 모든 실험은 무윤활상태하에서 상온·대기중에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마모진행곡선

Fig.4 는 Al₂O₃-Al₂O₃, TiO₂-TiO₂, SiC-SiC, Cermet-Cermet, Si₃N₄-Si₃N₄ 및 SUJ2-SUJ2 의 동일시험편끼리의 조합으로 하중 392N 으로서 점접촉 상태에서 마찰거리(회전수) 증가에 따른 마모량의 변화를 나타내는 마모진행곡선이다. Fig.4 에서 알 수 있는 바와 같이 무윤활 구름마찰하에서 다섯 종류의 세라믹 가운데 질화규소가 내마모성이 양호하며, 서어멧, 탄화규소, 티타니아, 알루미늄의 순으로 나타나고 있다. 베어링강과 비교하면 탄화규소, 티타니아, 알루미늄은 베어링강보다 내마모성이 떨어진다. Fig.5 는 점접촉의 경우로서 하중이 980 N 에 대한 마모진행곡선이다. 이 경우에는 알루미늄은 파괴되어 실험이 불가능하였다. Fig.5 에서도 Fig.4 에서와 같은 경향을 보이고 있으며 내마모성의 순서는 하중의 증가에도 변화가 없음을 알

(b) Line contact

Materials	Speed	Load	Semi-contact-width	Hertz stree	
	rpm		μm	Max.,GPa	Mean,GPa
Si ₃ N ₄	800	980	122	1.28	1.01
		1960	172	1.82	1.43
Cermet	800	980	95	1.51	1.19
		1960	134	2.13	1.68
SiC	800	980	102	1.41	1.11
		1960	144	1.99	1.56
TiO ₂	800	980	152	0.94	0.74
		1960	216	1.33	1.04
Al ₂ O ₃	800	980	107	1.34	1.06
		1960	151	1.90	1.49

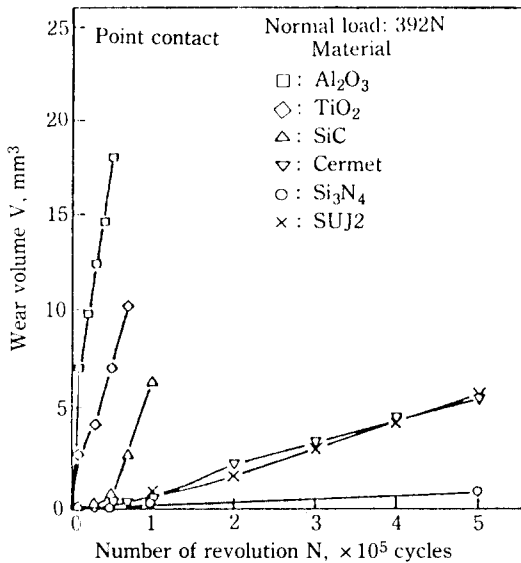


Fig. 4. Wear volume-number of revolution relationships in point contact under the load of 392N.

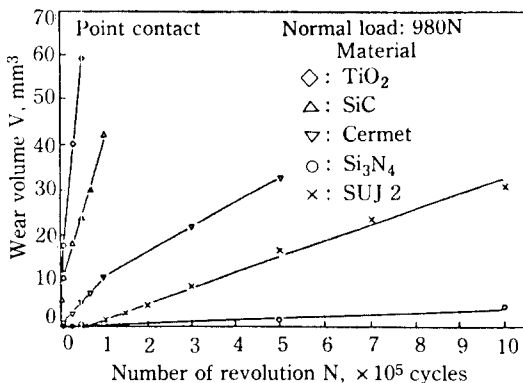


Fig. 5. Wear volume-number of revolution relationships in point contact under the road of 980N.

수 있다. 서어멧은 고하중에서는 베어링강에 비해서 내마모성이 떨어진다. 그러나 질화규소는 베어링강에 비해서 내마모성이 우수하다. 또한 알루미늄, 티타니아, 탄화규소, 서어멧은 초기 마모과정에서 마모율이 높은 반면에 질화규소는 10⁵회전까지는 마모율이 대단히 적은 것을 알 수 있다. 그러나 10⁴~10⁵회전 후에는 각각의 세라믹재료들은 마모진행곡선이 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.6 과 Fig.7 도 상기 다섯 종류의 세라믹에 대해서 동일 재료끼리의 조합으로 선접촉 상태에서 하중 980N 과 1960N 에 대해서 실험하여 구한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. Fig.6 의 하중 980 N 의 선접촉의 경우는 TiO₂-TiO₂는 4×10⁵회전까지는 거의 마모가 발생하지 않다가, 그 이후는 마모량이 회전수의 증가와 함께 직선적으로 증가하고 있다. 알루미늄, 탄화규소, 서어멧은 점접촉 상태에서의 마모경향과 같다. 특히 알루미늄의 경우는 점접촉하의 하중 980N 의 때와 마찬가지로 선접촉하의 하중 1960N 의 경우도 실험개시후 곧 파괴되었다.

3-2. 정상마모상태에서의 마모계수와 비마모량

Fig.4 에서 Fig.7 까지의 각 세라믹의 마모진행곡선에서 회전수의 증가와 더불어 마모량이 직선적으로 증가하고 있는 부분을 정상상태의 마모로 간주하여 비마모량 W_s(마모량/하중·마찰거리)와 마모계수 K(마모량·경도/하중·마찰거리)를 구하였다. 그 결과를 Table 3 에 나타냈다.

Table 3 으로부터 질화규소의 비마모량과 마모계수가 점접촉의 경우와 선접촉의 경우 모두 10⁻⁸과 10⁻⁷ 오-더를 갖는 것을 알 수 있다. 점접촉의 경우는 하중의 증가에 의하여 다소 비마모량과 마모계수가 증가하

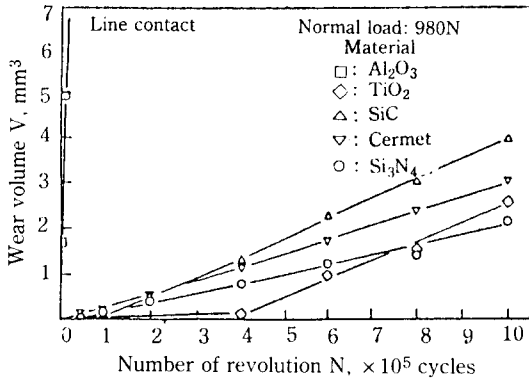


Fig. 6. Wear volume-number of revolution relationships in line contact under the load of 980N.

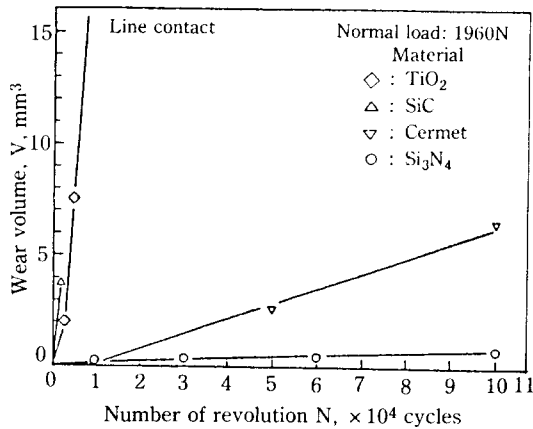


Fig. 7. Wear volume-number of revolution relationships in line contact under the load of 1960N.

고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 선접촉의 경우 탄화규소는 하중 980N과 1960N에 있어서 비마모량은 400배, 마모계수는 200배 정도 증가하고 있다. 이것은 세라믹의 마모기구가 크게 변화하고 있는 것을 보여주고 있다. 또한 하중 980N의 경우 점접촉과 선접촉의 비마모량을 비교하면 선접촉의 경우가 비마모량이 적은 것을 알 수 있다.

3-3. 마모율과 마모면의 표면거칠기와의 관계

Fig.8 및 Fig.9는 하중 392N과 하중 980N의 경우의 점접촉상태에 대하여 마모면의 최대 높이거칠기 R_{max} 와 마찰거리(회전수 N)의 관계를 나타낸 것이다.

마모면의 표면거칠기의 측정은 시험편의 원주를 90° 간격으로 4개소로 등분하여 표시를 해서 각 부분에 대해서 표면거칠기를 측정하여 평균값을 구하여 그 마모면의 표면거칠기로 정하였다. Fig.8에서 보이는 바와

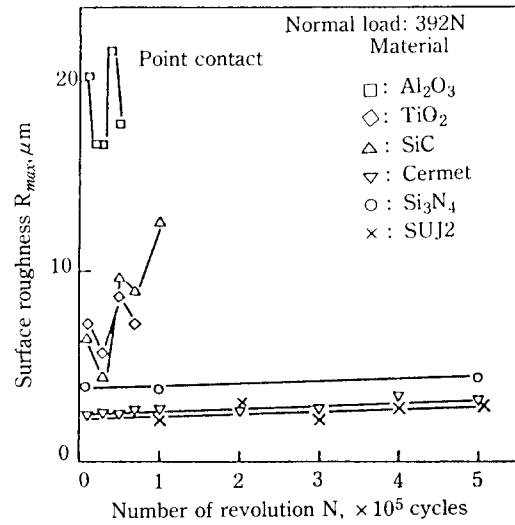


Fig. 8. The changes of surface roughness in point contact under the load of 392N.

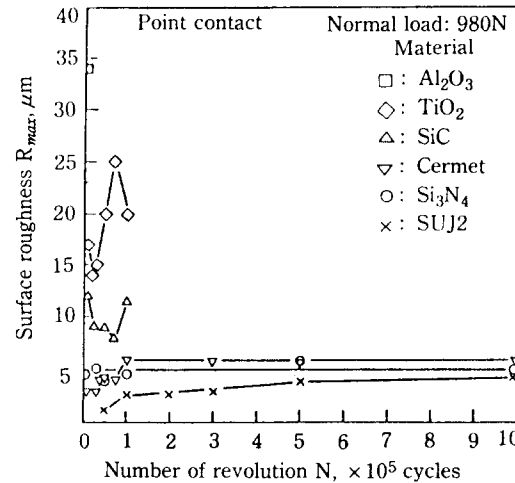


Fig. 9. The changes of surface roughness in point contact under the load of 980N.

같이 마모율이 가장 적었던 질화규소와 서어멧은 마모면의 표면거칠기가 2~4 $\mu m R_{max}$ 로서 거의 일정한 값을 유지하면서 마모가 진행되는 것을 알 수가 있다. 그러나 티타니아와 탄화규소의 마모면은 회전수의 증가와 더불어 표면거칠기가 증가하며, 알루미늄은 16~22 $\mu m R_{max}$ 로서 아주 큰 표면거칠기의 값을 나타내고 있다. 이것은 알루미늄, 티타니아, 탄화규소의 심한 마모현상은 재료표면의 대규모적인 취성파괴에 기인되는 것으로 판단된다. Table 4에는 정상마모상태에 대해서 각각의 세라믹의 마모면의 표면거칠기의 평균치를 점접촉과

Table 3. Specific wear rate and wear coefficient in steady wear

(a) Point contact

Materials	Specific wear rate		Wear coefficient	
	ws, mm ³ /m·N		K	
	392N	980N	392N	980N
Si ₃ N ₄	4.0×10 ⁻⁸	4.7×10 ⁻⁸	6.0×10 ⁻⁷	7.0×10 ⁻⁷
Cermet	3.1×10 ⁻⁷	5.9×10 ⁻⁷	4.3×10 ⁻⁶	8.3×10 ⁻⁶
SiC	2.9×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻⁶	7.3×10 ⁻⁵	9.9×10 ⁻⁵
TiO ₂	4.1×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	7.7×10 ⁻⁵
Al ₂ O ₃	7.6×10 ⁻⁶	8.9×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻³
SUJ2	3.1×10 ⁻⁷	3.1×10 ⁻⁷	2.5×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶

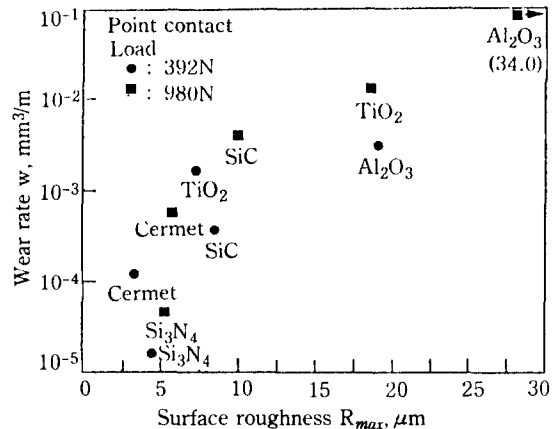
(b) Line contact

Materials	Specific wear rate		Wear coefficient	
	ws, mm ³ /m·N		K	
	980N	1960N	980N	1960N
Si ₃ N ₄	2.48×10 ⁻⁸	5.81×10 ⁻⁸	3.72×10 ⁻⁷	4.36×10 ⁻⁷
Cermet	3.61×10 ⁻⁸	7.94×10 ⁻⁷	5.04×10 ⁻⁷	5.55×10 ⁻⁶
SiC	4.89×10 ⁻⁸	2.10×10 ⁻⁵	1.22×10 ⁻⁶	2.61×10 ⁻⁴
TiO ₂	4.55×10 ⁻⁸	3.07×10 ⁻⁵	2.64×10 ⁻⁷	8.89×10 ⁻⁵
Al ₂ O ₃	2.22×10 ⁻⁵	—	3.89×10 ⁻⁴	—

Table 4. Mean value of surface roughness in steady wear (R_{max} , μm)

Material	Point contact		Line contact	
	392N	980N	980N	1960N
Si ₃ N ₄	4.5	5.3	2.5	4.2
Cermet	3.3	5.8	2.1	3.5
SiC	8.5	9.9	2.0	22.8
TiO ₂	7.2	18.6	4.7	18.4
Al ₂ O ₃	19.1	34.0	25.0	—
SUJ2	2.6	3.7	—	—

선접촉에 있어서 구한 것을 정리하였다. 베어링강보다는 세라믹의 마모면 표면거칠기가 크다는 것을 알 수가 있다. 이것은 금속의 마모기구는 소성변형이 주된 것이나 세라믹은 취성파괴로서 마모가 진행되는 것으로 생각된다. Table 4에서 마모량이 많았던 세라믹이 마모면의 표면거칠기도 상당히 크다는 것을 알 수 있다. Table 3의 마모율과 Table 4의 마모면의 표면거칠기의 값과의 관계를 알아보기 위하여 Fig.10과 Fig.11에 그 관계를 도시하였다. Fig.10은 점접촉의 경우로서 하중 392 N과 980 N에 대해서 마모면의 표면거칠기와 마모율을 도시하였고, Fig.11에는 선접촉의 경우로서 하중 980 N과 1960 N에 대해서 마모면의 표면거칠기와 마모율을 나타낸 것이다. Fig.10과 Fig.11에

**Fig. 10.** Relationship between wear rate and surface roughness in point contact.

서 알 수 있는 바와 같이 마모면의 표면거칠기의 증가와 마모율의 증가에는 상당한 상관관계를 나타내고 있다. 즉 마모면의 표면거칠기란 다음단계의 접촉에서 마모입자가 형성되는 면으로서 생각할 때, 표면거칠기란 파괴역학적 견지에서 표면균열에 상당하는 값으로 생각될 수 있을 것으로 사료된다. 특히 세라믹 재료는 취성 재료이기 때문에 마모면의 표면거칠기는 표면결함의 크기로 대응될 것으로 생각되며 이에 대한 자세한 보고는

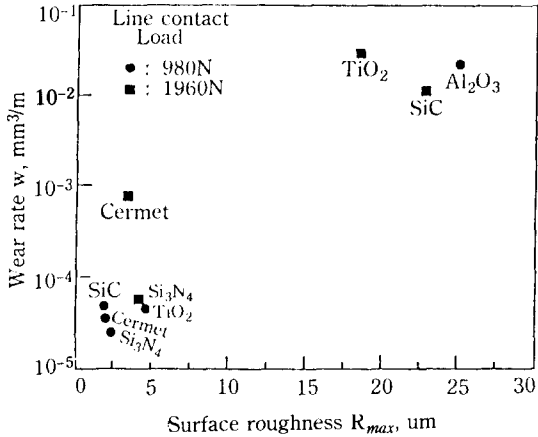


Fig. 11. Relationship between wear rate and surface roughness in line contact.

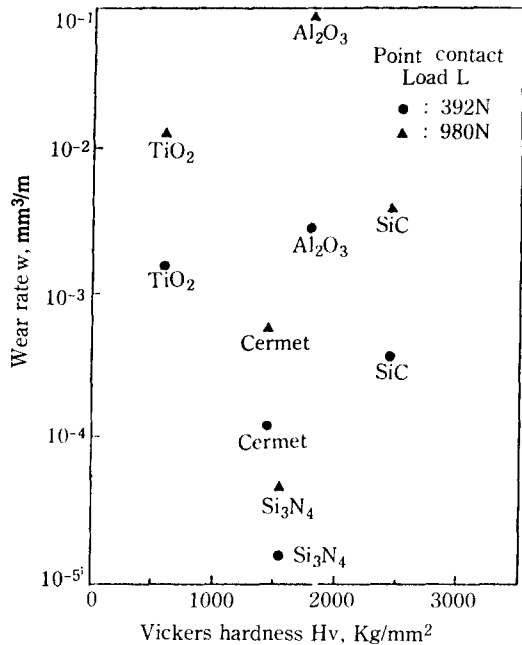


Fig. 12. Relationship between wear rate and hardness in point contact.

다음에 하고자 한다.

3-4. 마모율과 재료특성치와의 관계

Fig.12는 세라믹의 경도와 마모율과의 관계를 나타낸 것이다. 탄화규소의 경우는 질화규소보다도 경도가 높으나 마모율은 질화규소보다도 크다. 일반적으로 금속의 경우는 경도가 클수록 마모율이 적어지는 관계를 나타내고 있으나 세라믹의 경우는 그와 같은 관계를 말

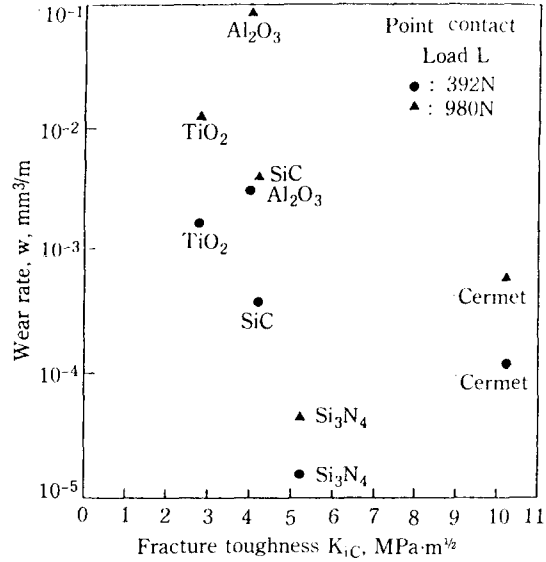


Fig. 13. Relationship between wear rate and fracture toughness in point contact.

할 수 없다. 이것은 금속과 세라믹의 마모기구가 다르다는 것을 의미한다.

Fig.13은 세라믹의 마모율과 파괴인성치와의 관계를 나타낸 것이다. 서어벳은 세라믹과 금속과의 복합된 복합재료인 것을 고려한다면 세라믹은 파괴인성치가 클수록 내마모성이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 구름접촉하에서의 세라믹의 마모기구는 세라믹의 취성파괴가 주된 기구인 것을 알 수 있으며, 파괴인성치가 세라믹의 마모기구에 중요한 인자임을 의미한다.

5. 결 론

무윤활하에서 구조용 세라믹으로 유망시되는 다섯 종류의 세라믹을 시험편재료로 하여 점접촉과 선접촉상태로 하여 구름마찰·마모실험을 수행하였다. 모든 실험을 상온·대기중에서 실시하고 거시적 마모특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 사용된 다섯 종류의 세라믹에 있어서 마모량은 정상마모에서는 직선적으로 증가한다.
2. 본 실험에서 사용된 다섯 종류의 세라믹과 베어링강의 마모계수의 크기순서는 다음과 같다.

$$Si_3N_4 < SUJ2 < Cermet < SiC < TiO_2 < Al_2O_3$$

3. 세라믹의 마모는 마모면의 표면거칠기의 크기와 파괴인성치에 크게 의존한다.

REFERENCES

1. 山本 登, “ファイインセラミックスの現状と將來”, 日本機械學會誌, 第 88 卷, 第 796號, pp.22~28, 1985.
2. 巖左美喜男, “ファイインセラミックスの摺動特性とその測定法”, 機械の研究, 第 37卷, 第 12號, pp 45~52, 1985.
3. Van Reuth, E.C., “The Advanced Research Projects Agency’s Gas Turbines Program”, Proceedings of the Second Army Materials Technology Conference, pp. 1-5, 1973.
4. McLean, A.F., “Ceramics in Smal Vehicular Gas Turbines”, Proceedings of the Second Army Materials Technology Conference, pp. 9-36, 1973.
5. Bratton, R.J. and Holden, A.N., “Ceramics in Gas Turbines for Electric Power Generation”, Proceedings of the Second Army Materials Technology Conference, pp. 37-62, 1973.
6. Arwas, E.B., McGrew, J.M. and Win, L.W., “New Bearing Concepts for Gas Turbines”, ASE Paper 720739, pp. 2203-2221, 1972.
7. 藤原孝誌, “ころがり軸受材料としてのセラミックス”, 潤滑, 第27卷, 第4號, pp.224~228, 1982.
8. 上垣外修己, 高橋秀郎, “ファイインセラミックスの精密工業への利用”, 精密工學會誌, 第52卷, 第3號, pp.1-6, 1986.
9. 竹林博明, 小松通泰, “セラミック轉がり軸受”, 機械設計, 第29卷, 第9號, pp.84-91, 1985.
10. Zaretsky, E.V. and Anderson, W.J., “Rolling-Contact Fatigue Studies with Four Tool Steels and a Crystallized Glass Ceramic”, Trans. ASME, Series D, Vol. 83, pp. 603-612, 1961.
11. Taylor, K.M., Sibley, L.B. and Lawrence, J.C., “Development of Ceramic Rolling Contact Bearing of High Temperature Use”, Wear, Vol. 6, pp. 226-240, 1963.
12. Parker, R.J., Grisaffe, S.J. and Zaretsky, E.V., “Rolling-Contact Studies with Four Refractory Materials to 2000°F”, ASLE Trans., Vol. 8, pp. 208-216, 1965.
13. Dalal, H.M., Chiu, Y.P. and Rabinowicz, E., “Evaluation of Hot Pressed Silicon Nitride as a Rolling Bearing Material”, ASLE Trans., Vol. 18, No. 3, pp. 211—221, 1975.
14. Hamburg, G., Cowley, P. and Valori, R., “Operation of an All-Ceramic Mainshaft Roller Bearing in a J-402 Gas-Turbine Engine”, Lubrication Engineering, Vol. 37, No. 7, pp. 407-415.
15. Miner, J.R., Grace, W.A. and Valori, R., “A Demonstration of High-Speed Gas Turbine Bearing Using Silicon Nitride Rolling Elements”, Lubrication Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 462-464, 473-478, 1981.
16. Bhushan, B. and Sibley, L.B., “Silicon Nitride Rolling Bearings for Extreme Operating Conditions”, ASLE. Trans., Vol. 25, No. 4, pp. 417-428, 1982.
17. Marshall, D.B., Lawn, B.R. and Evans, A.G., “Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 65, No. 11, pp. 561-566, 1982.
18. Lawn, B.R., Evans, A.G. and Marshall, D.B., “Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 63, No. 9-10, pp. 574-581, 1980.