

α -Sialon/SiC Whisker 복합재료의 기계적 물성 및 마모 특성 연구

이병하 · 김인섭 · 이경희

명지대학교 공과대학 무기재료공학과

(1993년 6월 1일 접수)

Mechanical and Tribological Properties of α -Sialon/SiC Whisker Composites

Byoung-Ha Lee, In-Seop Kim and Kyung-Hee Lee

Dep. Inorg. Mat., Myong Ji Univ.

(Received June 1, 1993)

요 약

최근, 내마모성 기계구조용 세라믹스중 고경도, 고강도, 고인성, 고내식성을 나타내는 α -Sialon 세라믹스는 우수한 점동재료로 인정되고 있다. 본 연구에서는 α -Sialon($x=0.4$) 기지(matrix)에 2차상으로 SiC whisker를 분산 강화시켜 파괴인성과 내마모성을 향상시킨 복합재료를 제조하고자 하였다. α -Sialon/SiC whisker 복합재료 시편은 1780~1800°C 에서 3~5시간 동안 질소 분위기에서 소결한 후 1730°C 에서 1시간 동안 1757 Kg/cm² 질소압력으로 HIPing하여 얻었다. SiC whisker 첨가 함량이 증가할수록 상대밀도는 감소하여 경도값은 저하하였지만 파괴인성과 곡강도 및 마모특성은 향상되었다. 그러나, 15 vol% SiC whisker 첨가조성에서는 소결밀도 저하로 기계적 물성값은 저하되었으나 마모특성은 향상된 결과를 나타내었다.

ABSTRACT

Sialon ceramics are presently seen as promising materials with high hardness, strength, fracture toughness and corrosion resistance for friction and wear applications. The objective of present work is to improve of mechanical properties and wear resistance of α -Sialon($x=0.4$) by addition of SiC whisker. α -Sialon($x=0.4$)/SiC whisker composites were obtained by hot-isostatic pressing at 1730°C for 1 hour under 1757 Kg/cm² N₂ pressure after pressureless sintering the mixture of Si₃N₄, Y₂O₃, AlN at 1780~1800°C for 3~5 hours in N₂ atmosphere. As the amount of SiC whisker content increased, relative density and hardness were decreased, however fracture toughness, bending strength and tribological properties were improved. Tribological properties of α -Sialon/15 vol% SiC whisker composite were improved in spite of its low mechanical properties.

1. 서 론

세라믹스를 기계 부품으로 적용하는 경우 점동부(sliding part)에는 필히 마찰 마모현상이 일어나 기계의 효율 및 수명에 직접 관계 되기 때문에 세라믹스 마찰 마모 특성 평가 및 내마모성 재료 개발은 매우 중요하다. 특히, 기계구조용 파인 세라믹스가 자동차 엔진 부품, 절삭공구, 메카니컬 셀, 다이스, 노즐 등 내마모성이 요구되는 세라믹 부품들에의 응용이 실용화 됨에 따라 중요한 특성으로 부각되게 되었다.

기계 구조용 세라믹스중 Si₃N₄, SiC, Al₂O₃, PSZ 등은

마찰 마모 특성의 기초 자료인 마찰계수, 마모량의 측정이 부분적으로 이루어져 있으나 아직도 기계적 물성과 미세구조 변화의 연계성 등이 명확하게 확립되어 있지 않다¹⁾. 어떤 재료의 마찰 마모 특성치는 원료의 특성, 제조공정 특성, 평가시료 준비 조건, 및 측정조건등에 이르기 까지 복합적으로 관계된다. 또한, 다른 종류의 특성치와 달리 오히려 마모특성 평가시의 측정조건 즉, 회전속도, 하중, 시간, 온도, 습도, 진공도, 윤활유, 유체 및 측정방법등에 많은 영향을 받는다고 알려져 있다²⁾. 그래서 마찰 마모 시험은 어디까지나 사용상태의 시뮬레이션(simulation)에 지나지 않으며 실제의 내마모성

부재의 최종적인 평가는 실제 상황에서 행하는 것이 무난하다.

α -Sialon은 1977년 Mitomo 등이 Si_3N_4 - Y_2O_3 - Al_2O_3 계 소결에 관한 연구 과정에서 발견하였는데²⁾, α -Sialon은 입계에 액상이 용이하게 형성되는 소결조제를 질화규소 단위격자내에 고용되므로 입계의 잔류 유리상이 적어 내식성, 내열충격성, 고온강도, 내마모성, 경도 등이 우수한 특성을 가지게 되므로 비철금속용치구(저압주조기 용 스톱, 금속 박판 압연 롤 등), 다이스(열간 압출 다이스, 열간 주조 다이스 등), 엔진부품(블베어링, 로커아암침 등), 절삭공구등 많은 분야에 유망한 재료이다. 그러나 내마모성 측정의 어려움점 때문에 Sialon 세라믹스의 내마모성에 관한 체계적인 연구가 부족한 실정이며 더우기 내마모성을 향상시키기 위해 whisker 복합재료의 연구는 거의 없는 실정이다. 그래서, 본 연구에서는 α -Sialon matrix에 섬유상의 SiC whisker를 2차상으로 분산 강화시켜 그 기계적 물성과 마찰 마모 특성에 미치는 영향, 각 측정 조건에 따른 마찰계수, 비 마모량 및 미세구조를 연구하였다.

2. 실험방법

2.1. 원료 및 화학조성

Yttrium을 고용한 α -Sialon(Y - α Sialon)을 Y_2O_3 와 AlN의 고용비가 1 : 9일 때 다음식(4-1.5X) $Si_3N_4 + X/2 (Y_2O_3 + 9AlN) = Y_x(Si_{12-4.5x}, Al_{1.5x})(O_{1.5x}, N_{10-1.5x})$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 X값은 금속 고용량을 나타낸다³⁾. 본 연구에서는 질소분위기 상압소결(pressureless sintering)을 행하기 위해서 3.43 wt% Y_2O_3 를 과량(excess)첨가하고 SiC whisker를 0, 5, 10, 15 vol% 첨가한 조성을 실험 대상으로 삼았다. Table 1에 α -Sialon($x=0.4$)/SiC whisker 복합재료 제조를 위한 출발원료의 화학 조성을 나타내었다.

본 실험에 사용한 Si_3N_4 분말은 UBE사 E-10 grade 이며 AlN 분말은 Hermann C. Starck사의 D grade, Y_2O_3 분말은 Hermann C. Starck사의 fine grade, SiC whisker

는 Tokai Carbon사의 Tokawhisker grade로 aspect ratio가 10~40이었다.

2.2. 시편제조

시편은 3가지 종류를 제작하였다. 첫째는 물성특성용 시편으로 30×50×10 mm 크기로 소결한 후 강도측정용 3×4×40 mm 크기로 절단하였으며, 둘째는 마찰 마모 시험용 pin 시편 $\phi 5 \times 8$ mm, 셋째는 마찰 마모 시험용 disk 시편 $\phi 60 \times 10$ mm이다.

여기서 첫째, 둘째 시편은 α -sialon($x=0.4$)+SiC whisker(0, 5, 10, 15 vol%) 복합재료로 그 제조 공정 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다.

다시 서술하면 Table 1의 각 조성별로 무게를 측정하여 Si_3N_4 pot내에, Si_3N_4 ball media로 isopropyl alcohol에서 40시간 ball milling을 한 후 SiC whisker의 균일

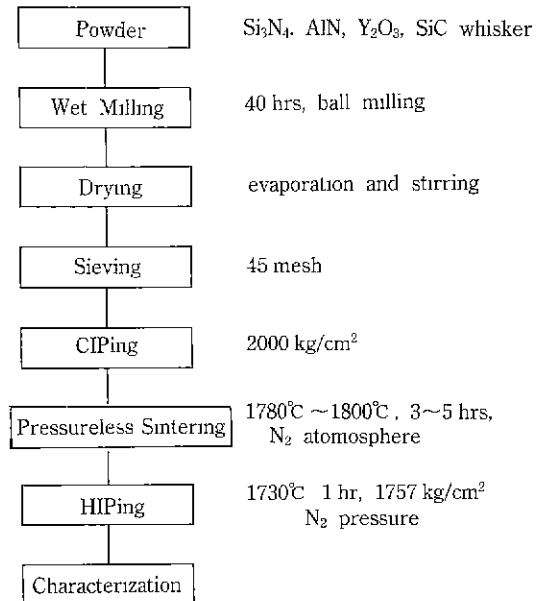


Fig. 1. Experimental flow chart of Sialon/SiC whisker composites.

Table 1. The Chemical Composition of Starting Materials

Nominal composition α -Sialon($x=0.4$)	Si_3N_4 (wt%)	AlN(wt%)	Y_2O_3 (wt%)	SiC whisker (wt%)
α -Sialon	77.0	11.9	11.1	0
α -Sialon/5 vol% SiC whisker	73.3	11.3	10.5	4.8
α -Sialon/10 vol% SiC whisker	69.9	10.8	9.9	9.7
α -Sialon/15 vol% SiC whisker	65.9	10.2	9.4	14.6

분산을 돕기 위하여 1시간 동안 초음파를 가하였다. 또한 80°C 에서 stirring을 하면서 건조를 행한 후 45 mesh sieve로 과립화하여 1000 kg/cm² 압력으로 일축 프레스 성형하였다. 그리고 나서 2000 kg/cm² 압력으로 CIP를 행하여 성형밀도(green density)를 향상시켜 1780~1800 °C 온도에서 3~5시간 동안 N₂ 분위기에서 열처리를 행하였다.

소결방법은 흑연 도가니에 BN을 칠하고 Si₃N₄의 열분해를^{5,7)} 억제하기 위해 Si₃N₄ 분말로 분말짜기(packing) 하였으며, α -sialon(x=0.4) 조성은 1780°C 3시간, α -sialon(x=0.4)/5 vol% SiC whisker 조성은 1800°C 3시간, α -sialon(x=0.4)/10 vol% SiC whisker 조성과 α -sialon(x=0.4)/15 vol% SiC whisker 조성은 1800°C 5시간 5 kg/cm² 질소 분위기압으로 열처리하였다. 소결과정 중 1000°C 까지는 공기를 제거시키기 위하여 10⁻² torr 진공상태를 유지하였으며 1000°C 이상에서 질소 gas로 치환하여 불활성 분위기로 유지하였으므로 P_{NO2}는 과량이었으며 P_{O2}는 Al₂O₃, Y₂O₃ 및 Si₃N₄ 분말표면의 SiO₂ 중의 산소가 주어진다. 또한 고 치밀화를 위하여 1730 °C 에서 1시간 동안 1750 Kg/cm² 질소 압력으로 HIP-Ping을 하여 물성을 측정하기 위한 시편으로 삼았다. 본 연구에서는 glass encapsulation 기술이 없어 graphite crucible내에 BN을 칠하여 외부의 영향을 최소화하는 post-HIP법으로 처리하였다. pin 시편은 한면을 grinding으로 평면을 만든 후 6 μ m diamond paste로 polishing을 하여 미찰 마모 특성 측정용 시편으로 사용하였다.

Disk 시편은 pin-on-disk type 마모 시험기에서의 pin의 상대 재료(mating material)로 본 연구에서는 소결밀도 3.7 g/cm³, 인성 3.4 MPa m^{1/2}, 경도 11.2 GPa, 곡강도 342 MPa인 Al₂O₃를 선정하여 grinding으로 평면을 만든 후 6 μ m diamond paste로 polishing을 하여 사용하였다.

2.3. 기계적 물성 측정

소결체의 밀도(bulk density)는 KS L3114에 따라 측정하였고 상대밀도(relative density)는 부피밀도와 이론밀도와의 백분율로 정하였으며, 이론밀도는 Si₃N₄, AlN, Y₂O₃, SiC whisker의 각각의 이론밀도를 이용하여 각 조성의 출발원료 함량을 기준으로 mixed-rule로 계산한 계산밀도를 사용하였고, 측정값은 조건당 3개의 시편을 측정후 평균값으로 하였다.

소결된 시편을 절단한 후 평면 연마기를 사용하여 MOR 시편을 제작하여 각 모서리를 45° 각도로 가공

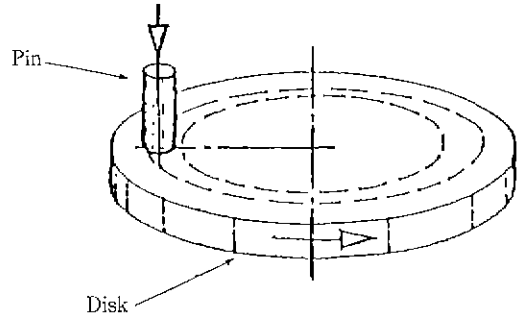


Fig. 2. Schematic diagram of pin-on-disk type wear tester.

하였다. 강도 측정은 MTS 810을 사용하여 각 조건당 4개의 시편을 cross head speed 0.5 mm/min이고 span 거리는 25 mm의 조건으로 파괴 하중을 구한 뒤 3점 곡강도를 계산하여 평균하였다.

곡강도 측정후의 시편을 예폭시 수지로 mounting한 후 최종 0.5 μ m diamond paste로 충분히 polishing을 한 시편을 Vickers 경도 시험기로 10 kg의 하중으로 15초 동안 유지하여 측정후 경도와 파괴인성값은 A.G. Evans와 E.A. Charies의 식에¹⁾ 대입하여 구하였으며 1개 시편을 각 4회 측정하여 평균값을 구하였다. 소결체의 미세구조 관찰 시편은 곡강도 시험에서 얻은 시편의 파단면을 용융 NaOH에서 40초간 etching한 다음 주사 전자 현미경으로 관찰하였다

2.4. 마찰 마모 특성 측정

본 연구에서는 ORIENTEC 사의 pin-on-disk type¹⁾ 마찰 마모 시험기(Model EFM-III-F)를 사용하였다. 가압방식은 회전 handle 가압이며 회전 torque는 load sell로 측정되며 접동속도(sliding speed)는 400 cm/sec 까지 측정이 가능한 측정장비를 사용하였다. pin-on-disk type 마찰 마모 시험기의 개념 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는 α -sialon/SiC 복합재료를 pin 시료로 사용하였으며 disk시료는 Al₂O₃를 사용 하였다. 본 실험에서 사용한 pin은 ϕ 5×8(mm) 크기이며 disk는 ϕ 60×10(mm) 크기였으며 접동면은 연삭(grinding) 후 6 μ m diamond paste에서 polishing한 후 시편으로 사용하였다.

Fig. 2는 pin-on-disk type 마모 측정시 pin과 disk의 구성을 나타낸 것이다. 즉, 회전하는 disk 시료에 pin형상의 시료를 일정하중을 가한 상태에서 마찰력을 측정후 마찰계수는 pin 3개를 1조건으로 구하였다.

Table 2. Properties of Post HIPed α -Sialon(x=0.4)/SiC Whisker Composites

Nominal Composition	Properties	Relative Density(%)	Hardness Hv(GPa)	Fracture Toughness (MPa m ^{1/2})	Flexural Strength(MPa)
α -Sialon		99.8	20.0	5.0±0.3	694±20
α -Sialon/5 vol% SiC whisker		99.7	19.8	5.7±0.5	732±25
α -Sialon/10 vol% SiC whisker		97.1	19.0	6.2±0.5	784±26
α -Sialon/15 vol% SiC whisker		93.9	14.9	—	618±38

3. 결과 및 고찰

3.1. 기계적 물성 평가

3.1.1. 상대밀도

α -sialon은 소결과 분해가 거의 동시에 일어나므로 치밀한 소결체를 얻기 어렵다. 치밀한 소결체를 제조하기 위해서는 조성의 엄밀한 제어와 출발원료 중의 산소량과 소결과정 중의 열분해에 따르는 분해 반응의 억제 등 엄밀한 제어가 필요하다^{5,6)}. 또한 섬유상의 SiC whisker를 2차상으로 강화시키는 복합재료 제조시 균일 혼합 방법이 매우 중요하다.

Table 2에 α -sialon(x=0.4) 및 α -sialon(x=0.4)에 SiC whisker를 5, 10, 15 vol% 첨가한 조성의 소결체 상대 밀도 값을 나타내었다. SiC whisker 함량이 증가됨에 따라 치밀도가 저하되었으며 15 vol% 첨가시는 이론밀도의 93.9% 정도의 낮은 상대밀도를 나타내었는데, 그 이유는 15 vol% SiC whisker 첨가시 치밀도가 충분히 이루어질 수 있기에는 소결조제 역할을 하는 Y_2O_3 함량이 9.4 wt% 첨가로는 부족한 것으로 생각된다.

3.1.2. 경도

α -sialon은 입계의 소결 조제를 Si_3N_4 에 고용하므로 입계 유리상과 같은 제2상이 소량 존재하여 이방성이 적은 입자들로 구성된 입계 결합력이 강한 물질이므로 경도는 입계 결합력의 한 척도로서 α -sialon의 경우 값이 우수한 것이 특징이다^{3,8,9)}.

Table 2에 α -sialon(x=0.4) 및 α -sialon(x=0.4)에 SiC whisker를 5, 10, 15 vol% 첨가한 조성의 소결체에 대한 경도값을 나타내었다. α -sialon 소결체의 경우 경도는 밀도에 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. SiC whisker 첨가 함량이 증가할수록 α -sialon양은 상대적으로 감소하며 치밀도가 억제되어 경도가 감소한다고 생각된다.

3.1.3. 파괴인성

α -sialon은 주상의 β 입자가 많을수록 강력한 교차조직이 형성되므로 균열전파 경로가 편향되어 높은 인성 값을 갖는다¹⁰⁾. Fig. 3은 α -sialon(x=0.4) 조성의 소결체

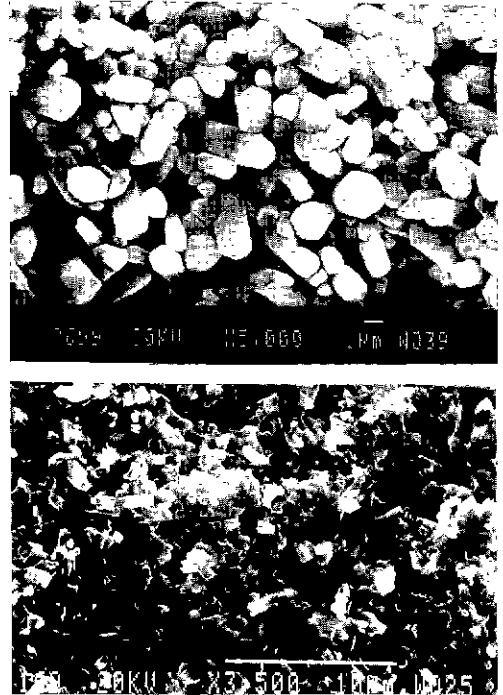


Fig. 3. SEM photograph of etching surface of α -Sialon(x=0.4) and surface of α -Sialon(x=0.4)/10 vol% SiC whisker composite.

파단면의 etching 후의 미세구조를 나타내는데 대부분이 구상의 α 상이며 일부 주상의 β 입자가 존재하는 것을 나타내고 있다.

Table 2에 α -sialon(x=0.4) 및 α -sialon(x=0.4)에 SiC whisker를 5, 10, 15 vol% 첨가한 조성의 소결체에 대한 파괴 인성 측정값을 나타내었다. 본 연구에서는 α -sialon에 SiC whisker를 첨가한 이유중 하나는 α -sialon의 낮은 인성값을 향상시킬 수 있지 않겠느냐는 점과 SiC의 양호한 내마모 특성을 복합화시키자는 데 있었다.

SiC whisker첨가함량이 증가될수록 파괴인성 값이 증가됨을 알 수 있으며 10 vol% SiC whisker 첨가시

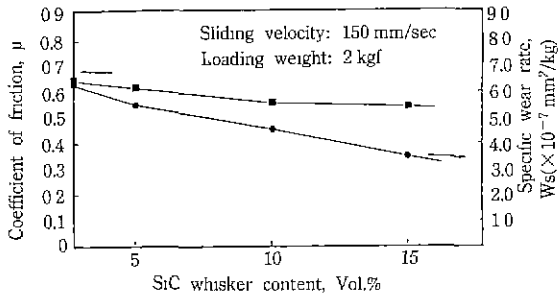


Fig. 4. Influence of SiC whisker content on friction and specific wear rate of α -Sialon/SiC whisker composite on Al_2O_3 disk in air.

K_{IC} 값이 $6.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 15 vol% SiC whisker 첨가 조성에서의 $K_{IC}=6.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 값은 소결밀도가 낮은 상태에서의 많은 pore들로 인해 crack 전파가 차단되어 부정확한 측정치로 생각된다.

3.1.4. 곡강도

취성재료의 강도는 재료 고유의 물성인 파괴인성 및 재료 내부나 표면에 존재하는 결함의 크기에 의하여 지배되고 최악 결함설에 의해 가장 약한 결함을 하고있는 부위의 강도에 의하여 결정되므로 우수한 기계적 강도를 나타내는 소결체는 치밀하고 균일한 미세구조를 가져야 하며 결함이 없어야 한다¹⁰⁾. Table 2에 α -sialon(x=0.4) 및 α -sialon(x=0.4)에 SiC whisker를 5, 10, 15 vol% 첨가한 조성의 소결체에 대한 곡강도 값을 나타내었다. SiC whisker 함량이 증가 할수록 곡강도값도 증가하다가 15 vol% SiC whisker함량에서는 소결밀도도 저하로 낮은 강도값을 나타내었다. 이것은 파괴인성 값의 경향과 비슷하였다.

3.2. 마모 특성 평가

3.2.1. SiC whisker 함량에 따른 마찰 마모

마찰 마모를 수치적으로 표현하기 위해서는 마찰계수 (coefficient of friction)와 비 마모량(specific wear rate)이 잘 이용된다. 즉, 고체표면상을 어떤 물체가 하중 P로 점동(sliding)하고 있다고 할 때 운동방향과 역방향으로 마찰력 F가 생긴다면 마찰계수 μ 는 $\mu=F/P$ 식으로 정의된다. 또한 마모량을 W(체적으로 표시됨), 점동거리 X라 하면 단위 점동거리, 단위 하중에 대한 마모량의 비를 비마모량(specific were rate) $W_s=W/X\cdot P$ 식으로 정의된다¹¹⁾. 즉 점동에 의하여 물체의 질량이 연속적으로 제거 되는 현상을 마모라 부른다.

Fig. 4는 α -sialon(X=0.4) 및 α -sialon(X=0.4)에 5, 10, 15 vol% SiC whisker 첨가한 조성의 소결체 pin 시료와

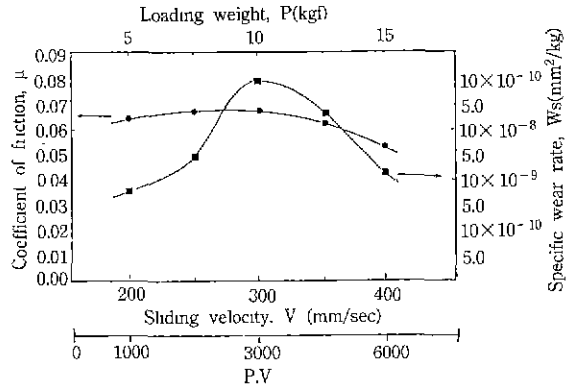


Fig. 5. Influence of P·V on friction coefficient and specific wear rate of α -Sialon/10 vol% SiC whisker composite on Al_2O_3 disk in oil lubricant.

Al_2O_3 disk 시료와의 마모시험을 공기중에서 점동속도 150 mm/sec 하중 2 kgf의 일정한 조건에서 행한 결과를 나타낸 것이다.

SiC whisker 함량이 0, 5, 10, 15 vol%로 증가한 시편일수록 마찰계수는 0.64, 0.61, 0.56, 0.54로 감소하였으며 비마모량도 6.33, 5.44, 4.55, $3.58 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 로 감소하였다. Table 2의 기계적 물성측정치와 연관을 시켜보면 일견 상관관계가 있는 것처럼 보이지만 그렇지 않음을 알 수 있다. 즉, Fig. 4의 마찰마모 특성치로는 기계적 물성치가 낮은 조성인 15 vol% SiC whisker 첨가조성이 가장 양호한 마모특성을 나타낸다는 점이다.

이 이유는 세라믹 재료중 가장 마모 특성이 양호한 것이 SiC이므로 SiC whisker의 함량이 증가될 만큼 향상되리라 추정할 수 있다. 또한 15 vol% SiC whisker 첨가된 조성의 경우 소결 밀도가 약 94% 정도인데 이때 소결체 내부에 존재하는 pore가 마찰마모 특성 향상에 기여하였다고 생각된다. 이것은 pore들이 fluid/lubricant reservoir의 역할을 하며 boundary lubrication에 도움을 주었다고 생각된다^{11,12)}.

3.2.2. P·V값에 따른 마찰 마모 특성

마찰 마모 특성인 마찰계수와 비 마모량을 하중(P)과 회전속도(V)와의 곱(P·V)의 변수를 나타내어 그 점동 재료의 사용 한계적 조건을 찾는 데 많이 사용된다.

Fig 5에 α -sialon(x=0.4)/10 vol% SiC whisker 복합재료의 마찰계수와 비마모량을 윤활유 Bath내에서 회전속도와 하중의 곱인 P·V값으로 나타내었다. 즉, P·V값이 증가함에 따라 마찰계수는 P·V=3000 kgf·mm/sec 까지는 거의 일정하나 그 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 P·V=3000 kgf·mm/sec 이상에서는 회전속도의 증가로 미세 진동이 일어나 절대

접동거리가 단축된 데서 기인된다고 생각된다. 또한 비마모량은 $P \cdot V = 3000 \text{ kgf} \cdot \text{mm}/\text{sec}$ 에서 급격히 증가되며 그 이상의 값에서는 급격히 감소함을 알 수 있는데 이 이유는 진동으로 인한 절대 접동거리의 단축에 기인된다고 생각된다. 즉, $P \cdot V = 3000 \text{ kgf} \cdot \text{mm}/\text{sec}$ 가 α -sialon ($x=0.4$)/10 vol% SiC whisker 복합재료와 Al_2O_3 가 윤활유 존재하에서의 접동시 사용한계적 값이 된다.

4. 결 론

(1) α -sialon($x=0.4$)에 SiC whisker 첨가량이 증가됨에 따라 치밀화가 억제되어 상대밀도값이 저하되므로 경도 값도 저하되었다.

(2) α -sialon($x=0.4$)에 SiC whisker를 10 vol%까지 첨가하는 상대밀도 저하에 따른 영향보다 SiC whisker의 강화 기구에 의해 파괴인성 $6.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 곡강도 784 MPa로 향상되었다.

(3) Al_2O_3 를 상대 재료로 상온에서 접동속도 150 mm/sec 하중 2 kgf조건으로 SiC whisker 첨가량 변화에 따른 α -sialon 마모 시험을 pin-on-disk형 마모시험기에서 행한 결과 SiC whisker 함량이 증가할수록 마찰계수 0.54, 비 마모량 $3.58 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 까지 감소되었다.

(4) α -sialon($x=0.4$)/10 vol% SiC whisker 조성과 상대재료 Al_2O_3 와의 윤활유 조건에서 마모시험을 접동 속도와 하중의 변화에 따라 마모시험을 행한 결과 사용한계적 $P \cdot V$ 값이 3000 kgf·mm/sec 정도였다.

REFERENCES

1. 西田俊彦, 安田榮一, "세라믹스력의 力學的 特性評價," 日刊工業新聞社 (1986).
2. M. Mitomo, "Sintering of Si_3N_4 with Al_2O_3 and Y_2O_3 ," *Yogyo-Kyokai-shi*, **85**, 408 (1977).
3. K. Ishizawa, N. Ayuzawa, A. Shiranito, M. Tari, M. Uchida, and M. Mitomo, "Some Properties of α -sialon Ceramic," *Ceramic Materials and Components for Engines*, Ed. by W. Bunk and H. Haysner, 511 (1986).
4. A.G. Evans and E.A. Charies, "Fracture Toughness Determination by Indentation," *J. Am. Ceram. Soc.*, **59**, 371 (1976).
5. M. Mitomo and O. Fukunaka, "The Stability of α -sialon at High Temperature," *Yogyo-Kyokai-shi*, **89**, 631 (1981).
6. K.H. Jack and W.I. Wilson, "Ceramic Based on the Si-Al-O-N and Related System," *Nature(London), Phy. Sic.*, **238**, 28 (1972).
7. N. Hirotsaki and A. Okada, "Effect of N_2 Gas Pressure on Sintering of α and β -sialon," *Yogyo-Kyokai-shi*, **95**, 235 (1972).
8. K. Ishizawa, N. Ayuzawa, A. Shiranito, M. Takai, M. Uchida, and M. Mitomo, "Properties of α -sialon Ceramic," *Yogyo-Kyokai-Shi*, **94**, 183 (1986).
9. H. Tanaka, M. Mitomo, and M. Tustsumi, "Strength of Hot Pressed α -sialon," *Yogyo-Kyokai-Shi*, **90**, 406 (1982).
10. F.F. Lange, "Fabrication and Properties of Dense Polyp phase Silicon Nitride," *J Am. Ceram. Bull.*, **62**(12), 1369 (1983).
11. Lashway, R.W., Seshadri, S.G., and Srinivasan M., "Various Forms of Silicon Carbide and Their Effects on Seal Performance," STLE 1983 Annual Meeting Preprint 83-AM-4B-1
12. Heinrich, J., Rosenfelder, O., Benker, W., and Schelter, H., "Aspects of Material and Design of Optimized Silicon Carbide Seal Rings," *Lubr. Eng.*, **47**, 5, PP. 367-372 (1991).

1. 西田俊彦, 安田榮一, "세라믹스력의 力學的 特性評價,"