

탄화규소-강 미끄럼에서의 마모특성

장복기 · 김윤주*

전남대학교 무기재료공학과

* 동신대학교 세라믹공학과

(1996년 8월 12일 접수)

A Tribological Study of SiC-Steel Couples

Pok-Kie Chang and Yun Ju Kim*

Dept. of Inorg. Mat. Eng., Chonnam Natl. Univ.

*Dept. of Ceramic Eng., Dongshun Univ.

(Received August 12, 1996)

요 약

건조 및 다습한 대기의 무윤활 또는 액체 윤활, 미끄럼 속도 그리고 온도 등 여러 조건 하에서 SiC-강 미끄럼 시 SiC가 나타내는 마모거동에 대하여 조사하였다. 또 SiC의 제조공정이 SiC 마모에 미치는 영향도 미끄럼 속도를 달리하면서 고찰하였다. 무윤활 미끄럼 시 대기 습도는 일종의 윤활제 역할을 하며, 특히 대기가 매우 건조한 조건 하에서 미끄럼 속도는 마모에 큰 영향을 미친다. 그리고 SiC의 제조공정 및 재료표면의 거칠기는 미끄럼 속도의 크기 여하에 따라 상이한 마모거동을 초래한다. 특히 온도는 마모를 심화시키는 요인이어서 윤활 미끄럼 조건 하에서도 마모를 크게 가속한다.

ABSTRACT

The wear behavior of SiC in SiC-steel sliding couple was investigated under various wear test conditions, such as solid state sliding-dry and wet air atmosphere-or lubricated sliding, sliding velocity and atmosphere temperature. The effect of SiC fabrication process on the SiC wear rate was also studied under varying sliding velocities. Humidity of air plays a lubricating role in the solid state sliding, while the wear behavior is largely influenced by the sliding velocity, especially if the atmosphere is extremely dry. The fabrication process of SiC and the surface roughness result in different wear rate depending on the magnitude of sliding velocity. High temperature is, among others, the most deteriorating factor of wear, thus being strongly wear-accelerating even under boundary lubrication.

Key words : Tribology, SiC-steel, Wear conditions, Fabrication process, Boundary lubrication

1. 서 론

구조 세라믹스의 내마모(tribological) 용도가 기대되면서¹⁻⁶⁾ 이와 관련한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 따라서 SiC 경우만 보더라도 내마모재료로서 SiC-세라믹(SiC-SiC, SiC-Al₂O₃, SiC-TiC 등등) 및 SiC-금속(SiC-steel, SiC-Al 등) 조합간의 고체 및 액체윤활 시의 마모 특성에 관한 연구, 온도 및 미끄럼속도, 가압하중 그리고 분위기 가스등 미끄럼조건에의 영향이나, 재료의 파괴인성 또는 제조방법이 미치는 영향등에 관한 연구들을 많이 접할 수 있다. 또한 윤활제(첨가제)의 영향이나 마모

map에 관하여 연구되고 있으며, 대부분의 연구들은 나뭇대로 마모기구(마모분, 산화 및 열수화학적 반응의 영향/부식 등)를 규명하고 있다.⁹⁻¹⁵⁾

그러나 구조 세라믹스의 마찰 마모 실험연구는 주로 동종의 재료 조합에 대하여 이루어지며, 세라믹-금속의 조합, 그 중에서도 SiC-강(steel) 재료간의 연구는 희귀한 편이다. 그리고 후자의 경우에 대하여 Tamita *et al.*¹⁰⁾은 윤활하에 있어서 강의 표면에 형성된 반응층 및 윤활 첨가제의 영향들을 연구하였다.

본 실험에서는 제조방법이 다른 두종류의 SiC와 강 사이의 미끄럼에 있어서 무윤활 뿐만 아니라 윤활 미끄

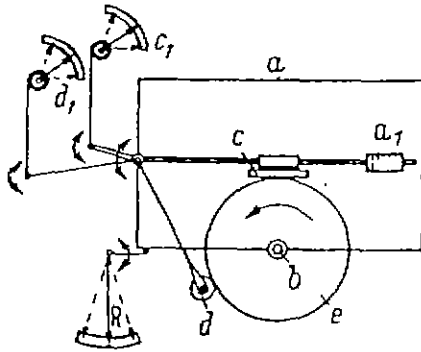


Fig. 1. Schematic diagram of spindle type wear-testing machine.
 a: scale beam, a₁: load through level, b: revolving axis, c: SiC plane probe, c₁: wearing out of c and e, d-d': wear of e, e: steel disk, R: friction force between c and e

럼에 대하여, 그리고 분위기 상대습도의 영향등 SiC-강 조합의 경우에 있어서 아직 실험되지 않은 부분들에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

마찰 마모 시험은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 몰레형 마모시험기(Spindel-Verschleißprüfmaschine, MAN)로 수행하였다. 평면의 시편(c)은 회전하는 원반(e)과 임의의 하중(a₁) 조건 하에서 접하고, 이때 생성되는 마찰력은 측정기 R에 표기된다. 그리고 마모의 진행에 따른 원반의 직경 감소가 d₁에 나타나고, c₁에서는(시편+원반)의 마모를 읽는다. a는 천칭대(틀)이고 b는 원반 e와 천칭대를 위한 회전축이다.

마모시험은 1) 공기 중에서 재료 조합간의 직접 무운 활과 2) 자동차 엔진 폐유의 윤활하에서 이루어졌다. 1)의 경우 하중(a₁= F_N) 10N 그리고 온도는 실온(23°C)이다. 2) 윤활 미끄럼에서는 윤활제로 5,000 Km 주행 게솔린 엔진 폐오일을 사용하였으며 하중은 100N 그리고 윤활제 온도는 각각 150°C와 250°C로 고정하였다.

시편으로는 SiSiC(Silit SK 308, SIGRI사 제품)와 SSiC(재결정법에 의한, Norton사의 NC-435))를 사용하였고, 회전원반은 JIS SK5 steel(직경 5 cm, 두께 6 mm)로서 원반의 끝은 반경 3 mm의 반원으로 되어있다. 시편 표면은 약 2 μm의 다이아몬드 paste로 최종 연마하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 무윤활 미끄럼

우선 실온의 공기중에서 상대습도가 SiSiC-steel 간의

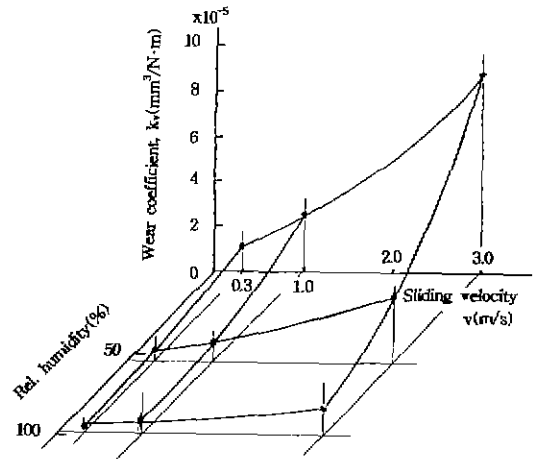


Fig. 2. Volumetric wear coefficient k_v of SiSiC as a function of the sliding velocity at different relative humidity.

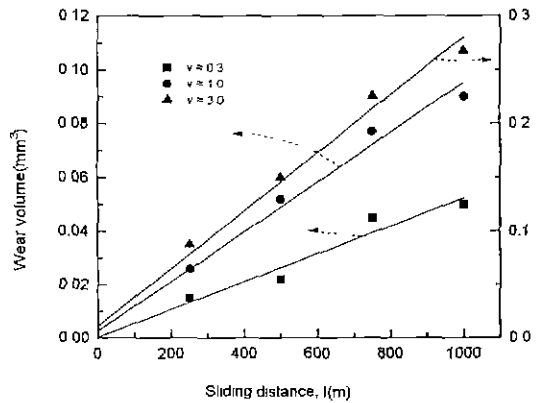


Fig. 3. Wear volume W_v of SiSiC versus sliding distance at different sliding velocity.

마모에 미치는 영향을 실험하여 SiSiC의 마모 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에는 미끄럼속도의 영향도 동시에 나타내었다. 재료의 마모특성을 나타내는 개념으로서 비마모량(k)을 사용하는데 이는 접동거리(s:m) 및 가압하중(F_N:N)당 마모량 W(W_v: 체적마모량, mm³)으로 표시된다⁴⁾:

$$k_v = W_v / s \cdot F_N$$

Fig. 2에서 보는 것처럼 비마모량은 상대습도가 낮을수록 그리고 동시에 미끄럼 속도가 클수록 늘어나게 된다. 습도가 98%일 때는 미끄럼속도의 영향이 별로 없으며, 또 미끄럼속도가 매우 느릴 때는 습도의 영향 역시 거의 없다. 미끄럼속도가 3 m/s때도 습도가 56%인

경우는 0% 습도 경우에 비하여 마모가 현저히 적게 일어난다. 결국 - 특히 미끄럼속도가 큰 조건 하에서 - 습도는 일종의 윤활제 역할을 한다고 볼 수 있다. 일중

의 윤활제로서의 물(또는 수증기)은 마찰(계수)을 저하시켜서 결과적으로 마모를 감소시키는 효과를 가져온다 ("3.2. 윤활 미끄럼" 참조).

본 연구실험에서는 "pin/ball-on-disk"⁵⁾에서와 마찬가지로 마모시간이 경과함에 따라 미끄럼재료 간의 접촉면이 점차 커지면서 단위 접촉면 당 하중 $P(N/cm^2)$ 은 실제로 점차 감소하게된다. Fig. 3에는 이러한 현상의 영향을 공기중의 습도 56% 및 실온 조건 하에서 실험한 결과가 도시되어있다. 우선, Fig. 2에서처럼, 미끄럼속도가 될수록 일정 미끄럼거리 동안의 마모량이 증가하고 있다. 그리고 하중 P 가 점차 감소하는 동안의 미끄럼거리:마모량의 관계는 일반적으로 직선적임을 볼 수 있다.

Fig. 4에 SiC의 제조공정이 서로 다른, 즉 SSiC 및 SiSiC의 비마모량-미끄럼속도 관계를 도시하였다(실온 및 습도 56% 조건). 본 그림의 자료는 하중 $F_N=10N$ 그리고 미끄럼거리(s) 1,000 m에 대한 결과이다. $v=0.3(m/s)$ 을 전환점으로 미끄럼속도가 이보다 느린 조건에서는 비마모량이 미끄럼속도의 영향을 일반적으로 받지 않으나, $v>0.3$ 에서는 비마모량은 미끄럼속도에 비례하여 연속적으로 증가한다. 또 SSiC와 SiSiC를 비교하면, $v\leq 1.0$ 일 경우 SiSiC의 비마모량이 SSiC보다 크나 점동속도가 빠른 조건($v=3.0$)에서는 두 경우가 거

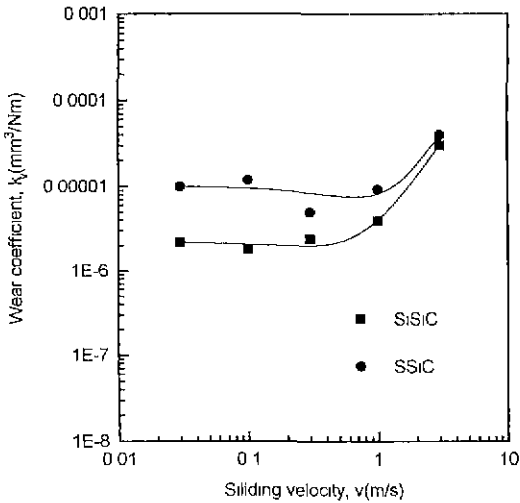


Fig. 4. Volumetric wear coefficient k_v of SiSiC and SSiC as a function of the sliding velocity at 23°C and 56% RH.

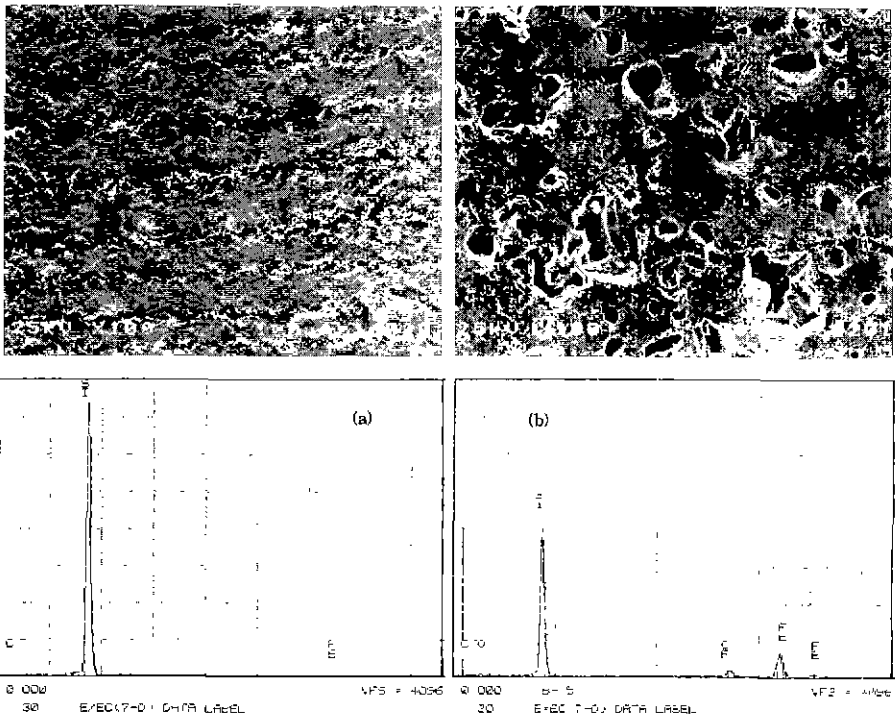


Fig. 5. SEM micrographs and EDS analysis of (a) SiSiC and (b) SSiC at sliding velocity $v=1.0$ m/s.

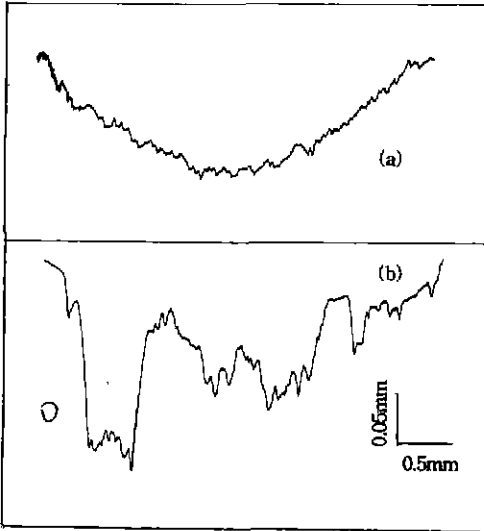


Fig. 6. Profilograms of wear scars on (a) SiSiC and (b) SSiC at sliding velocity $v=1.0$ m/s.

의 일치한다. 그리고 이러한, 미끄럼속도의 크기에 따른 마모저동의 차이는 각각 SSiC와 SiSiC의 비마모량이 단순히 이들 재료의 종류 내지 제조공정 상의 차이에 따라 결과한 것이 아님을 보여준다.

미끄럼속도가 작은 $v=0.3$ (m/s) 때의 SSiC 및 SiSiC 마모면에 대한 SEM/EDS 및 마모면의 거칠기와 상대 재료인 강 표면의 광학현미경(LM) 분석을 수행하였다(Figs. 5-7). Fig. 5의 SEM 결과를 보면, SSiC는 매우 큰 기공들을 함유하고 있으며 이러한 미세구조는 마모면 거칠기(Fig. 6)에서도 나타난다. 그리고 이러한 기공이 큰 다공성 SSiC에서는 경도가 상대적으로 낮은 강이 - 치밀구조를 갖는 SiSiC에서보다 - 더욱 쉽게 마모될 것으로 사료되는 바, 이는 실험적으로도 확인되었다. Fig. 5의 EDS 결과는 이러한 사실을 뒷받침하는 데, SSiC 마모면에 상대 재료인 강의 Fe 및 Cr 성분(debris)이 흡착되어 있음을 보여주고, 또 Fig. 7의 LM에서도 마찬가지로 상대 재료가 SSiC인 경우, 강 표면에 흡착된 마모분의 량(면적 및 색깔의 질기)이 현저하게 많음을 알 수 있다. 즉, SiC와 강의 표면에 각각 마모분이 흡착되어 제3의 층을 형성하고있는 바, 이 마모분 층은 SiSiC보다 SSiC 경우에 더 잘 발달되어있다. 그리고 일반적으로 이러한 마모분 층은 일종의 "베어링"으로서 자기윤활작용(self-lubrication), 즉 미끄럼면에서의 마찰력을 약화시켜 마모를 감소시키는 역할을 한다고 알려져있다.^{4,5,13,14)} 결국 미끄럼속도가 작은 조건($v \leq 1.0$)에서 SSiC가 SiSiC보다 덜 마모되는 이유는 자기윤활작용을하는 마모분 층이 상대적으로 잘 발

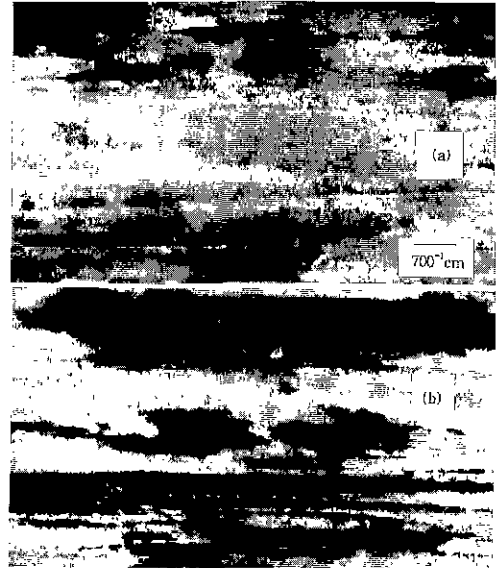


Fig. 7. Wear scar of steel disc as wear couple of (a) SiSiC and (b) SSiC, respectively.

달된 때문으로 사료된다.

한편, 마모분 층(형성)은 하중, 접동거리, 온도, 재료 표면의 거칠기 및 마찰특성, 윤활(첨가)제 등 많은 조건에 따라 좌우되며,¹⁰⁻¹⁵⁾ 마모분층의 구조(morphology)까지도 마찰계수 및 마모저동에 커다란 영향을 미친다고 한다. 이러한 관점에서 고려할 때, 접동속도가 큰 조건($v > 3.0$ m/s)에서 기공이 큰 다공성의 미세구조를 갖는 SSiC가 - $v \leq 1.0$ 경우와 반대로 - 오히려 심하게 마모되는 이유는 자기윤활 역할을 하는 마모분 층의, 매우 큰 접동속도에 기인한 감소 내지 일시적인 소멸에 따른 것이라 추측된다. 즉, 매우 큰 미끄럼속도에 따른 큰 진동 충격과 기공이 큰 다공성의 구조 - 미끄럼속도가 매우 클 시에는 이러한 다공성 구조가 마모분 층의 형성 발달에 오히려 역기여할 것으로 보임 - 등등의 원인으로 말미암아 마모분 흡착층이 잘 형성될 수 없거나 혹은 일단 발달됐다가도 쉽게 박리할 수 있을 것으로 보인다(그리고 한 시험적인 실험에 의하면, 상대 재료로서 다이아몬드(휠)를 사용할 경우 미끄럼속도의 고저에 관계 없이 SSiC는 SiSiC보다 현저히 심하게 마모되는데, 이는 SSiC의 기공이 큰 다공성 때문으로 사료된다). 여하튼 Fig. 4의 실험으로 보아 제조공정의 상이에 따른 재료의 미세구조 자체가 역시 마모현상에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

하중 F_N 하에서 서로 접하는 재료간의 접촉면에서 발생하는 마찰저항(마찰력) F_R 은 다음의 Coulomb 식으로 표시된다:

$$F_R = f F_N.$$

여기서 f 는 마찰계수이며 재료, 마찰 표면(거칠기, 윤활) 및 미끄럼속도 등에 따라 좌우된다. 일정 하중의 조건 하에서 마찰계수가 큰 값을 나타내면, 이는 곧 그 계의 마찰력이 크다는 의미이며 미끄럼운동을 위하여 큰 에너지를 필요로 하게 된다. 따라서 미끄럼운동을 하는 일정 계에있어서 그의 마찰계수가 낮은 값을 갖도록 조치가 바람직하다. SiSiC의 23°C 고상접동 시 f - v 관계를 Fig. 9에 -윤활미끄럼 시와 비교적으로- 도시하였다. Fig. 4의 비마모량(k_v)과 비교하면, f 와 k_v 사이에 직접적인 관계를 확인하기 힘들며, 한편 미끄럼속도가 큰 $v=3.0$ 경우의 심한 마모는 f 에 관계 없이 빠른 미끄럼속도로 인한 것이라 사료된다.

3.2. 윤활 미끄럼

Fig. 8에 150°C에서의 SiSiC 및 SSiC의 비마모량과 250°C 시의 SiSiC 비마모량을 나타내었다. 그리고 실온의 습도 98% 조건 하 SiSiC 비마모량(Fig. 2 참조)도 비교를 위하여 함께 도시하였다.

우선 SiSiC에 있어서 온도의 영향을 고찰하면, 미끄럼속도에 관계 없이 온도상승(150→250°C)과 더불어 비마모량이 크게 증가하고있다. 즉, 250°C 경우의 비마모량은 150°C 때보다 약 10배 정도 더 크게 나타나고있다. 한편, 동일 고온조건 하에서 미끄럼속도(v)가 비마모량(k_v)에 미치는 영향을 보면, k_v 는 v 에 따라 근소하게나마 동반증가 추세를 보이다가 $v=1.0$ (m/s)을 전환점으

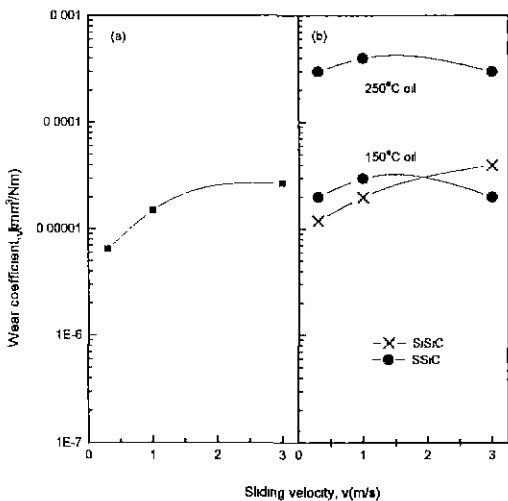


Fig. 8. Volumetric wear coefficient k_v as a function of the sliding velocity in (a) air with 98% RH and (b) boundary lubrication.

로 오히려 감소한다. 이러한 경향은 상온의 무윤활(Fig. 4) 때와 반대되는 현상이다.

SiSiC와 SSiC의 마모는 $v \leq 1.0$ 조건 하에서는 전자의 경우 더 심하지만, 미끄럼속도가 큰 $v=3.0$ 에서는 역으로 전자가 보다 큰 k_v 값을 나타낸다. 이러한, 고속($v=3.0$)의 미끄럼으로 말미암은 경향은 무윤활 때(Fig. 4)와 매우 유사하다.

고온(150°C) 윤활미끄럼 시의 k_v 는 실온의 습도 98% 무윤활($v=3.0$ m/s) 때의 k_v 와 대동소이하며, 무윤활 때와 비교하여 고온 윤활미끄럼 하에서는 v 의 k_v 에 미치는 영향이 상대적으로 약하다.

Fig. 9에 도시한, 미끄럼속도에 따른 SiSiC의 무윤활(습도 56%의 실온, $F_N=10N$) 및 150°C 윤활미끄럼($F_N=100N$) 때의 마찰계수(f)를 보면, 두 조건 간의 f 차이가 대단히 큼을 알 수 있다. 그리고 무윤활(건조) 미끄럼의 Coulomb 식($f=F_R/F_N$)에서 f 는 미끄럼속도와 무관한 데, Fig. 9의 실험결과로는 f - v 관계가 일정치 않다. 한편 액체 윤활에 관한 Newton의 $F_R=\eta(dv/dy)S$ - η 는 윤활체의 점도, y 는 층의 두께 그리고 S 는 접촉면적 - 식에 따르면 f 는, 무윤활 때와 달리, 미끄럼면적 및 η 에 영향을 미치는 온도 뿐만 아니라 미끄럼속도에 의존한다. Fig. 9의 150°C 시 윤활미끄럼을 보면, $v \leq 0.3$ (m/s) 범위에서는 f 는 변화하지 않으나 $v > 0.3$ 부터서는 v 증가와 더불어 큰 값을 갖는다.

윤활미끄럼 시 마모면이 나타내는 거침정도는 Fig. 10에서 보는 것처럼 무윤활 때와 비교하여 상대적으로 매우 매끄럽다. 무윤활(Fig. 6.(a)) 때 R_{max} (DIN)가 29 μm 의 값을 나타낸 것과는 대조적으로 윤활(폐유)미끄럼 시는 R_{max} 값이 13 μm 에 불과하다. 그리고 윤활미끄럼을 하는 SiC-강 두 접촉면 사이에는 우선 윤활제(폐유)가 제 3층으로서 존재하면서 강 표면에 마모분 층이 형성되는

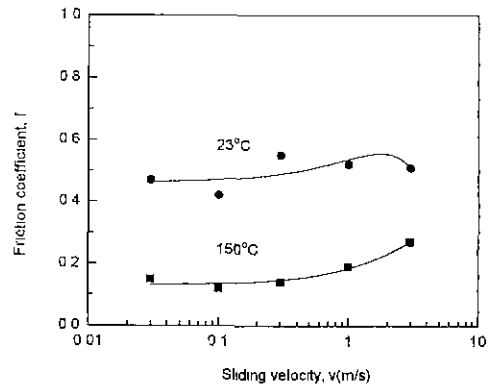


Fig. 9. Friction coefficient of SiSiC versus sliding velocity in 23°C air with 98% RH and 150°C boundary lubrication

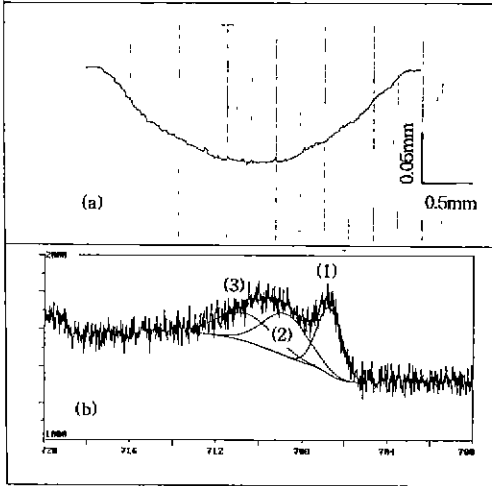


Fig. 10. Profilogram (a) and ESCA graph (b) of SiSiC wear scar under boundary lubrication at 150°C (1) & (2): Fe, and (3): Fe₂O₃.

정도도 무윤활 시(Fig. 7(a) 참고)보다 훨씬 약하다. 그러나 여전히 강(Fe)의 마모분이 SiC 표면에 이등 흡착되며, 동시에 SiC(및 Fe) 마모분이 강표면에 층을 형성한다. 전자의 경우를 - 무윤활 시의 EDS 분석(Fig. 5(a) 참조) 때와 달리 -, ESCA 법으로 분석하여 Fig. 10에 도시하였는 바, Fe는 상당량 금속 산화물 상태로 존재한다.

4. 결 론

본 연구실험의 결과로부터 다음 사실을 확인할 수 있다.

1. 분위기 습도는 - 특히 포화상태에 근접할 때 - 일종의 윤활제로서 작용하여, 미끄럼 속도가 큰 조건 하에서 비마모량을 크게 저하시킨다.
2. 제조방법에 따른 미세구조의 변화는 마모거동에 영향을 미치는 바, 미끄럼 속도가 저속일 때 ($v < 3.0$ m/s) 다공성인 SSiC 표면에는 강 마모분층의 형성 발달이 보다 촉진되어 SSiC는 SiSiC보다 덜 마모된다.
3. 미끄럼 속도는, 특히 고속일수록 그리고 동시에 분위기 습도가 건조한 조건일수록, 심한 마모를 초래한다.
4. 액체윤활 미끄럼에서 분위기 온도가 높으면 보다 심하게 마모되는 바, 이는 주로 온도 상승에 따른 윤활제의 점도저하 및 이로 인한 마모분 층(두께)의 변화 때문이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 전남대학교 1995년도 자동차공학 학술연구

비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. P.J. Gualtieri, "Ceramic materials in vehicles-Why and where?," *Interceram*, 1987(2), 32-35(1987).
2. L.M. Sheppard, "Advances in automotive ceramics-Automotive performance accelerates with ceramics," *Ceram Bull.*, **69**(6), 1011-1021(1990).
3. C.F. Lewis and M. Hunt, "Automotive materials for changing times-Ceramics for engine performance," *ME*, 1990(5), 20-23(1990).
4. 정종인, "Graphite복합 Ceramics의 摩擦摩耗 特性에 관한 研究," 박사학위논문, 전남대학교, 1995.
5. 김인섭, 이병하, "Si-SiC-Graphite 복합재료의 기계적 특성과 마찰 마모 특성," *요업학회지*, **32**(6), 643-652(1995).
6. W. Bunk and H. Hausner, "Ceramic materials and components for engines," *Proc. 2. Intern. Symp.(Lübeck-Travemünde, FRG, April 14-17, 1986)*, Verlag Deutsche Keram. Gesellschaft(1986).
7. R. Kochendorfer, "Konstruktion mit Keramik - Keramische Bauteile," *Seminar des VDI-Bildungswerkes, Berlin/Germany*(1991).
8. C.H. Bates, M.R. Foley, G.A. Rossi, G.J. Sundberg and F.J. Wu, "Joining of non-oxide ceramics for high-temperature applications," *Ceram. Bull.*, **69**(3), 350-356(1990).
9. M. Takatsu, H. Kamiya, K. Kubota and K. Seki, "Effect of shding condition on wear mechanism of SiC Consideration of wear map," *J. Ceram. Soc. Jap.*, **98**(9), 964-970(1990).
10. Y. Tanita, T. Mine and K. Nakajima, "Tribological reaction generated on ceramic-steel couples under boundary lubrication," *J. Tribology/ASME Trans.*, **112**(10), 637-642(1990).
11. P. Boch, F. Platon and G. Kapelski, "Tribological and interfacial phenomena in Al₂O₃/SiC and SiC/SiC couples at high temperature," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **5**(4), 223-228(1989).
12. M. Woydt, J. Kadoorit, H. Hausner and K.H. Habig, "Development of engineering ceramics according to tribological considerations," *Ceram Forum Int./Ber. DKG*, **67**(4) 123-130(1990).
13. J.A. Yeomans and H. Arbabi, "Microstructural investigation of cylindrical wear debris," *Br. Ceram. Trans. J.*, **89**(4), 144-145(1990).
14. J. Denape and J. Lamon, "Sliding friction of ceramics: Mechanical action of the wear debris," *J. Mat. Sci.*, **25**(8), 3592-3604(1990).
15. S. Kitaoka, T. Tsuji, T. Katoh, Y. Yamaguchi and K. Kashiwagi, "Tribological characteristics of SiC ceramics in high-temperature and high-pressure water," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(7), 1851-1856(1994)