

## B<sub>4</sub>C의 첨가에 따른 동계소결합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구

정동윤 · 김기열\* · 조정환\*

육군사관학교  
\*대우중공업 중앙연구소

## A Study on the Frictional Characteristics of B<sub>4</sub>C Added Cu Base Sintered Friction Materials

D. Y. Chung , K. Y. Kim\*, J. W. Cho\*

Korea Military Academy  
\*Central R & D Center, Daewoo Heavy Ind. Co.

**Abstract**—Examined in this paper, is the effect of B<sub>4</sub>C addition on the frictional characteristics of Cu-Sn based sintered friction materials. For the specimens 1wt%, 2wt% and 4wt% of B<sub>4</sub>C were added into the reference material. A pin-on-disk type friction tester was used to measure the friction torque with respect to the surface temperature and sliding distance. Wear mechanism of each specimen is analyzed in the view point of the oxide film formation. The specimen containing 4wt% of B<sub>4</sub>C showed stable friction and low wear since the oxide film was sustained up to higher surface temperature ranges.

**Key words**—B<sub>4</sub>C, Frictional Characteristic, Sliding Distance, Surface Temperature, Oxide Film.

### 1. 서 론

동계 소결마찰재는 유기계 마찰재에 비하여 고온에서의 내열성, 내소부성 및 내마모성이 좋다. 또한 열의 양도체로서 상대재료의 열부하를 감소시키며 열이력 후 마찰계수가 떨어지는 페이드 현상도 적다. 따라서 고속전철이나 항공기와 같이 열부하가 크게 발생하는 제동장치용 마찰재로서는 동계 소결마찰재가 적합하다. 마찰재는 10여종의 성분으로 된 복합재료이나 기능상으로 분류할 때는 기지 금속과 마찰조절제 그리고 고체 윤활제로 이루어져 있다. 그중에 마찰조절제는 소량이 포함되지만 마찰특성에 매우 큰 영향을 미치므로 그 성분과 양 그리고 형상등을 결정하는 것이 대단히 중요하다. 일반적으로 많이 사용되는 세라믹 계열의 마찰조절제로는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO, glass fiber, 알루미늄나 단섬유 등이 있으며 이에 대한 연구결과가 국내외에서 발표된 바 있다[1-3]. 그러나 실용화

되어있는 마찰재 중에는 B<sub>4</sub>C를 마찰조절제로 사용하고 있으나[4] 이 성분의 첨가에 따른 영향에 대해서는 문헌적으로 발표된 바 없다. 경질입자인 B<sub>4</sub>C는 능면체 결정을 이루고 있으며 파괴강도가 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 세라믹 재료에 비하여 3-4배 높으므로 우수한 연마제로 사용되기도 한다[5] 더우기 고온에서의 특성이 양호하므로 고속전철의 마찰재 성분으로서의 양호한 조건을 갖추고 있다. 따라서 본 연구에서는 B<sub>4</sub>C 첨가량의 변화에 따른 동계소결 마찰재의 마찰특성으로서 마찰계수, 마모량 및 상대면의 공격성 등의 변화를 실제적 실험조건 등을 부여하여 살펴 보았다.

### 2. 실 험

#### 2-1. 시험 시편

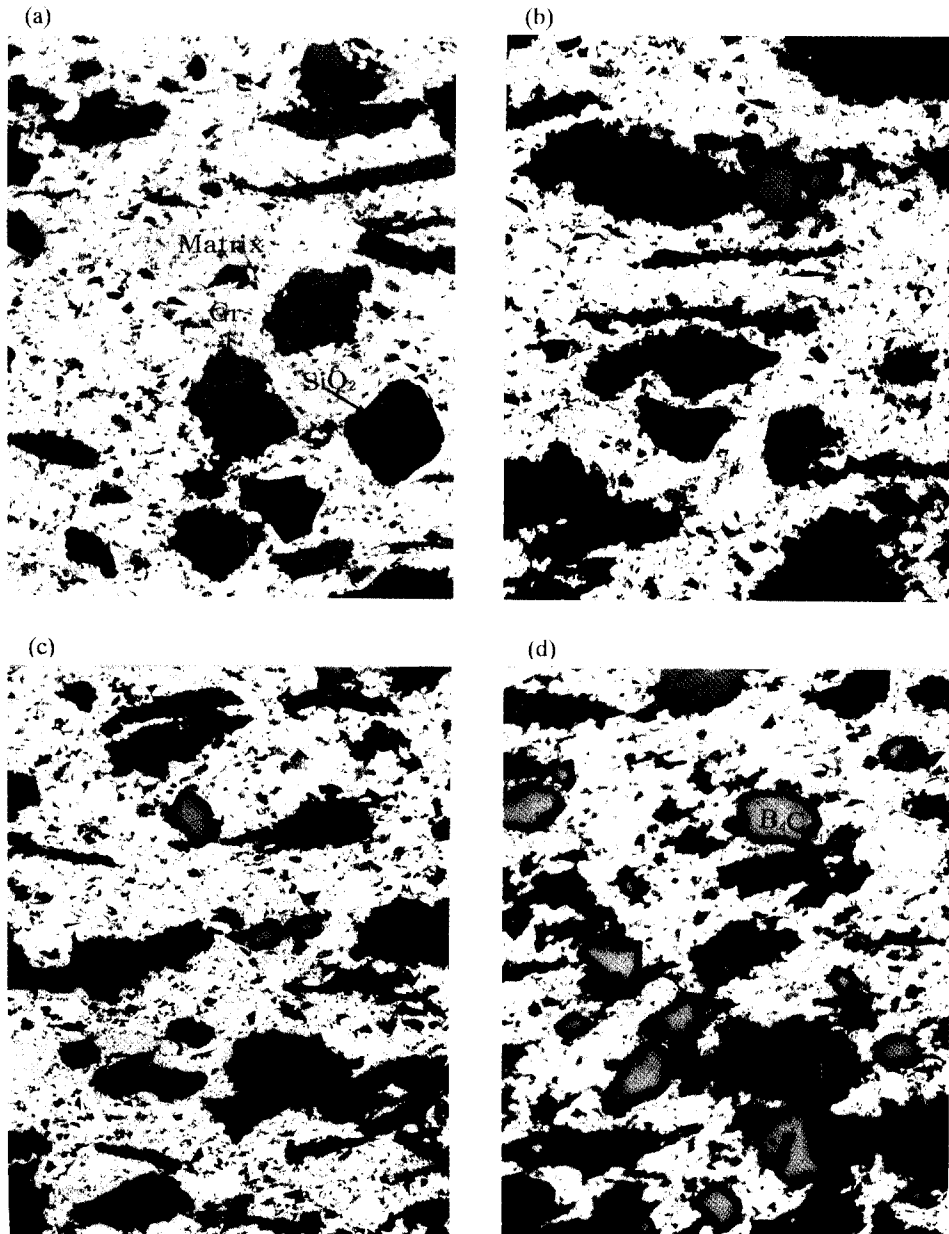
마찰 시편으로서 시험에 사용된 소결재의 성분은 Table 1과 같다. 즉 청동기지에 마찰조절제로 Mo, Fe,

**Table 1. Compositions of the specimens (wt%)**

Specimen	Matrix	Friction Modifier	Lubricant	B <sub>4</sub> C
A	70	20	10	0
B	69	20	10	1
C	67	20	10	2
D	66	20	10	4

**Table 2. Physical properties of the specimens**

Specimens	A	B	C	D
밀도(g/cm <sup>3</sup> )	5.7	5.58	5.55	5.34
기공율(%)	5-7	7	5-7	7-8



**Fig. 1. Microstructures of each specimen. (a) 0 wt% (b) 1 wt% (c) 2 wt% (d) 4 wt% of B<sub>4</sub>C addition.**

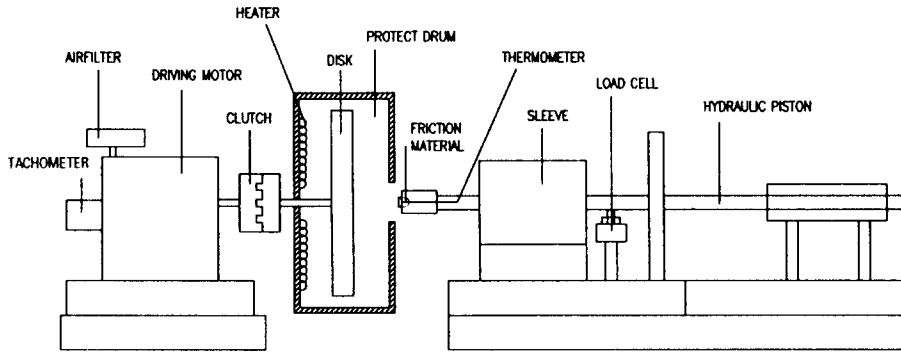


Fig. 2. Schematic diagram of friction test rig.

Ni, SiO<sub>2</sub> 등이 첨가되었으며, 고체 윤활제로는 Pb, Graphite 등이 첨가되었다. 경질입자는 적은 함유량에 의해서도 마찰계수에 많은 영향을 미치며 특히 소모품인 마찰재에 비하여 상대적으로 영구 부품인 상대 디스크의 마모를 많이 일으킨다. 따라서 본 연구에서는 B<sub>4</sub>C를 첨가하지 않은 시편 A를 기준 시편으로 하여, 시편 B는 1 wt%, 시편 C는 2 wt%, 그리고 시편 D는 4 wt%의 B<sub>4</sub>C를 첨가시켰다. 각 성분 분말들은 편석이 생기지 않도록 혼합한 후 두께 4 mm, 외경 40 mm인 디스크형 압분체로 3.4ton/cm<sup>2</sup>의 압력으로 성형하였다. 그 후 810°C, 환원 분위기에서 2시간 동안 가압소결을 실시하였다. Fig. 1은 소결 후 각 시편의 미세 조직사진을 나타내고 있으며 첨가된 B<sub>4</sub>C가 고르게 분포되어 있다. 이들 시편의 소결조건과 물성은 Table 2와 같다. 시편의 크기는 3 cm×3 cm인 정사각형으로 제작하여 사용하였다.

## 2-2. 마찰 시험기 및 시험방법

중하중용 마찰재는 매우 극심한 사용 조건에서 작동하므로 비록 실험실에서 모의실험을 행할지라도 가능한 한 사용조건과 유사한 실험 조건을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서 사용한 마찰시험기는 pin-on-disk 형의 정속식 시험기로서 Fig. 2에 나타난 바와 같으며 접촉면의 평형을 유지하기 위하여 회전 디스크의 접촉표면 좌우측에 2개의 시편을 설치하였다. 시편에 가해진 수직하중은 1078N이고 마찰 속도는 16 m/s로 하였다. 시험은 6단계로 진행되었는데 1, 2단계는 외부 열원이 없이 순수 마찰에 의하여 접촉온도가 상승한 것이다. 한편 3, 4단계에서는 외부 열원에 의하여 분위기 온도를 350°C로, 5, 6단계에서

는 분위기 온도를 450°C로 상승시켜서 온도에 따른 마찰특성을 총 마찰거리 37.7 km 동안 비교하였다. 매 단계는 1000회전씩 5회의 반복시험으로 이루어졌으며 매 회마다 2분씩의 휴지시간을 두었다. 시험중 마찰계수는 1000회전 동안의 평균치로 측정하였으며 정상상태의 마찰계수를 측정하기 위하여 초기 300회전까지의 마찰계수는 제외시켰다. 마모량의 측정은 매 단계마다 시험이 끝난 후 시편의 초기치에 대한 무게차를 측정하고 밀도와 단면적으로 나누어서 환산한 두께의 차로 비교하였다.

상대면에 대한 공격성을 비교하기 위하여 새로운 디스크에 대한 시험을 한 후 표면조도계로 디스크의 기준면과 마찰면에 대한 상대 거칠기를 측정하였다. 접촉온도는 시편의 접촉면으로부터 2 mm 후면에 열전대를 삽입하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 마찰계수와 마모량의 변화

Fig. 3은 마찰거리의 증가에 대한 마찰계수와 접촉 온도의 변화를 나타냈으며, Fig. 4는 누적 마모 두께를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 기준재료로 제작한 시편 A는 각 구간 별로 안정된 마찰계수를 나타내고 있으나, 외부 열원이 없이 자체 마찰열에 의하여 접촉온도가 약 200°C까지 도달하는 1-2 단계에서는 마찰계수가 약 0.37 정도를 유지하다가 외부 열원에 의하여 분위기가 350°C로 상승된 3단계 구간(마찰거리 13.8 km)에서부터 접촉면의 온도 상승(250°C→320°C)과 함께 마찰계수도 평균 0.30 정도로 낮아졌다. 반면에, Fig. 4에서와 같이 마모량은 상대적

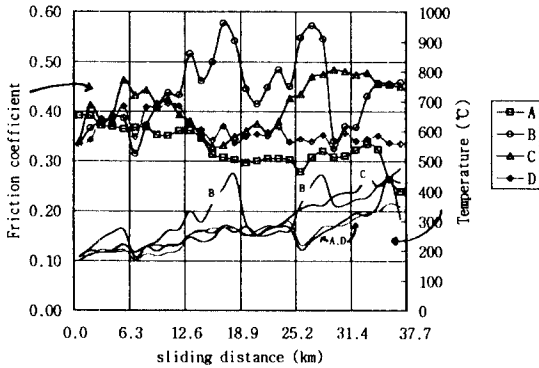


Fig. 3. Sliding distance versus friction coefficient and temperature.

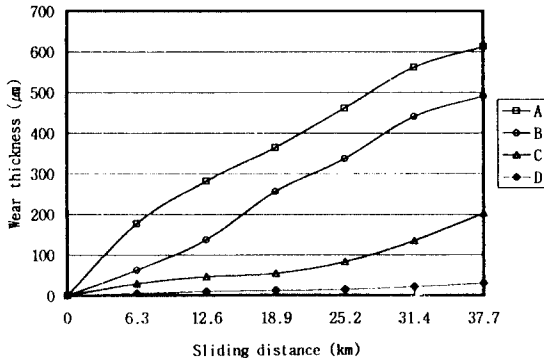


Fig. 4. Sliding distance versus accumulated wear thickness.

으로 매우 높게 나타났다. 즉 중하중용 마찰재로서 요구되는 마찰계수의 수준과 안정성을 저온 영역에서는 만족시켰으나 고온영역에서의 마찰계수와 마모율은 그렇지 못하다[6].

따라서 본 연구에서는 경질입자인 B<sub>4</sub>C를 첨가함으로써 마모량을 낮추고자 하였다. 그 결과 B<sub>4</sub>C가 1 wt% 첨가된 시편 B는 기준재료인 시편 A에 비하여 마모량은 다소 낮아졌으나, 마찰계수는 매우 불안정하게 증가되었음을 보여주고 있다. 한편 B<sub>4</sub>C가 2 wt% 첨가된 시편 C는 마모량이 상당히 낮아졌으나 (Fig. 4), 마찰계수는 여전히 불안정하게 나타나고 있다 (Fig. 3). 특히 시편 B는 3단계 구간에서 부터, 그리고 시편 C는 분위기 온도를 450°C로 올린 5단계 구간 (마찰거리 26.4 km)부터 마찰계수가 불안정하게 나타나기 시작했으며 이는 다음 절에서 분석할 표면 산화막의 생성 및 파괴와 관련이 있는 것으로 보여진다.

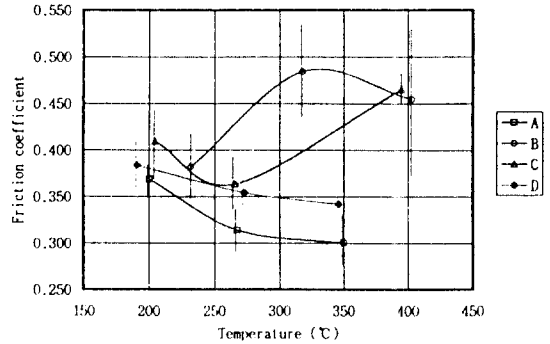


Fig. 5. Surface temperature of specimens versus friction coefficient.

그러나 B<sub>4</sub>C가 4wt% 첨가된 시편 D는 외부 열원에 의한 고온 영역에서 기준재료에 비하여 더 안정된 마찰계수를 나타내고 있으며, 마모량도 기준시편(613 μm)에 비하여 30 μm로 획기적으로 감소하였다. Fig. 5는 시편 접촉면의 온도에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 시편 B와 C는 접촉온도가 증가함에 따라 마찰계수가 큰 진폭을 가지며 불안정하게 증가되었으며, 시편 D는 기준 재료로 제작한 시편 A에 비하여 더욱 안정된 결과를 보이고 있다.

### 3-2. 마찰표면의 분석

각 시편에 따른 마찰계수와 마모량의 변화를 분석하기 위하여 6단계까지의 마찰시험이 끝난 시편의 접촉면을 관찰하였다. Fig. 6은 각 시편의 마찰표면을 SEM으로 촬영한 것이다. Table 3은 마찰표면의 구성 성분들을 알아보기 위한 EDS시험을 3회 실시한 평균 결과를 나타내고 있다. Table 3에 의하면 시편 A의 표면에서는 Cu가 약 41% 그리고 Fe가 평균 30% 정도로 나타났다. Fe의 양은 시편 제작시 첨가시킨 양에 비하여 훨씬 많이 검출된 것으로 이는 Fe가 디스크로부터 시편의 마찰표면으로 전이되어 Fig. 6(a)와 같이 산화막을 형성했기 때문인 것으로 보인다. 이러한 산화막이 시편 A에 있어서 비교적 낮고 안정된 마찰계수를 나타내게 된 원인이 된 것이다. 그런데 앞에서 언급한 바와 같이 낮고 안정된 마찰계수에도 불구하고 높은 마모량을 나타내게 된 것은 마찰면의 형상과 접촉온도로 보아 Fe 산화막의 안정적 생성과 탈락이 반복되었던 것으로 보이며 또한 상대적으로 경질입자의 양이 적은 때문인 것으로 생각된다. α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 450°C 이하에서 생성되며, 450°C 이상 600°C 이하의

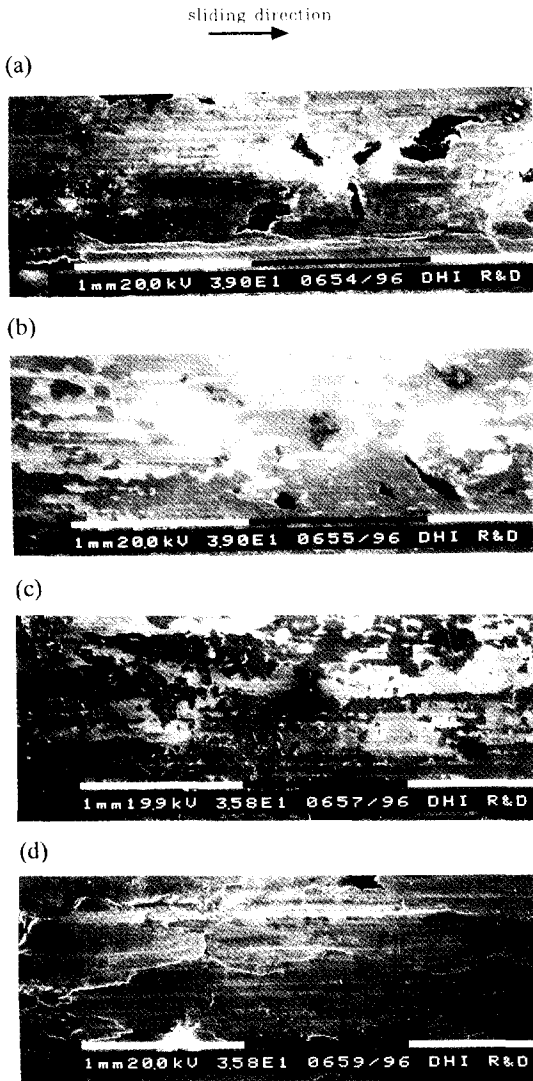


Fig. 6. SEM micrograph of worn surfaces. specimens (a) A (b) B (c) C (d) D.

온도 영역에서는  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 가 함께 생성되어 금속간 직접마찰을 방지하고 표면을 보호하므로 정상 마모를 일으키는 것으로 알려져 있다[7-10].

한편 B, C가 1 wt%와 2 wt%씩 각각 첨가된 시편 B와 C의 표면은 서로 비슷한 경향을 보이고 있으나 기준 시편(A)와는 전혀 다른 현상을 나타내고 있다. 우선 Table 3에 나타난 바와 같이 시편 B는 Cu가 약 80%로 매우 높게 나타난 반면에 Fe는 시편 제작시의 첨가량과 비슷한 수준인 약 7% 정도로 떨어졌으며,

Table 3. EDS analysis of the worn surfaces

	A	B	C	D
Si K	2.7	2.7	1.65	1.89
Mo I	6.39	3.71	2.49	4.2
Sn I	8.75	3.52	1.04	1.76
Fe K	29.85	7.36	4.06	49.9
Ni K	11.31	2.08	2.54	2.43
Cu K	41.1	80.63	88.22	39.82

시편 C의 경우도 Cu가 약 90% 그리고 Fe가 약 4% 정도로 시편 B와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이와같이 두 시편 간의 유사한 현상은 Fig. 6(b),(c)에서도 잘 나타나 있다. 즉 시편 B와 시편 C의 표면은 기지에서 소성변형된 Cu가 넓게 덮혀 있으며 육안관찰에 의하면 붉은 빛을 띄고 있어서 마찰열에 의해 Cu가 산화된 것을 알 수 있었다. 이것은 마찰계수 및 접촉온도와 밀접한 관계가 있는 것으로써 온도의 상승에 의해 기지합금의 항복강도가 낮아지면서 Cu가 용융상태에 가까운 형태로 소성유동(smearing)을 한 것이다. Fig. 7(a)는 Fig. 6(c)에 나타난 용융상태의 소성유동(smearing) 흔적을 확대하여 보여주고 있다. 또한 시편 B와 C의 최종 마찰표면의 상태가 동일하게 나타나는 것은 Fig. 3에서 보듯이 두 시편의 마찰계수가 6단계에서 마지막 3000회전동안 동일한 값을 나타내고 있으며 접촉온도도 비슷한 값을 나타내는 것으로 보아 타당하다고 하겠다. 분위기를 온도를 350°C로 올린 3단계부터 마찰계수가 급격히 상승과 하강을 반복한 것은 접촉온도의 상승에 따른 Fe 산화막과 Cu 산화막의 생성 및 파괴로 설명될 수 있다. 즉 마모속도가 산화반응 속도보다 빠르므로 산화물의 생성은 극히 적고, 그로인한 상대 금속간의 직접접촉과 응착에 의해 마찰계수가 상승하게 된다[11]. 그러므로 시편 B의 경우는 표면의 접촉온도가 증가함에 따라 생성되어 있던 Fe 산화층이 파괴되면서 동시에 마찰계수가 급격히 상승하고, 상승된 온도에 의해 Cu 산화막이 생성되므로 마찰계수와 접촉온도가 떨어지는 것이다. Cu의 산화물 생성 온도는 Fe에 비하여 더 높은 것으로 알려져 있다[3,12]. Fig. 7(b)는 마찰거리 18 km에서 시편 B의 마찰표면을 관찰한 결과로서 Fe 산화막이 심하게 떨어져 나간 것을 확인할 수 있었으며 산화막의 파괴가 미세 크랙에 의해 진행되었음을 보여주고 있다. 이상과 같은 현상을 확인하기 위하여 시편 B 및 C에 대한 반복시험 결과 마찰계수

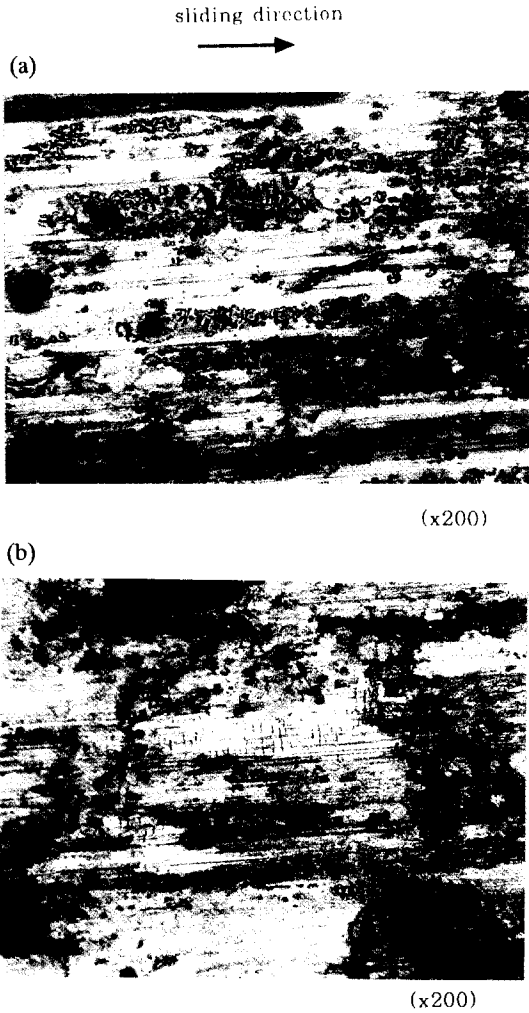


Fig. 7. Worn surfaces of the specimens. (a) Micrograph of specimen C (Cu smeared on the surface) (b) Worn oxide film and micro cracks on the surface of specimen B.

및 접촉온도의 변화에 대한 재현성이 확인되었다.

그러나 시편 D의 경우는 Table 3에서 Cu가 약 40%로 기지합금에 첨가된 양과 비슷하게 나타난 반면에 Fe는 약 50% 정도로 많이 나타났다. B<sub>4</sub>C를 4 wt% 첨가한 경우 경질마모입자에 의한 계면청소로 인하여 접촉면의 온도 상승을 Fig. 3에 나타난 바와 같이 시편 A와 같은 수준으로 유지함으로써 Fe 산화막의 파괴시기를 더 고온 영역으로 늦추게 된 것으로 생각된다. 마모량의 급격한 감소는 이러한 산화막의 생성과 아울러 B<sub>4</sub>C에 의한 기지강화효과에 기인한 것으로

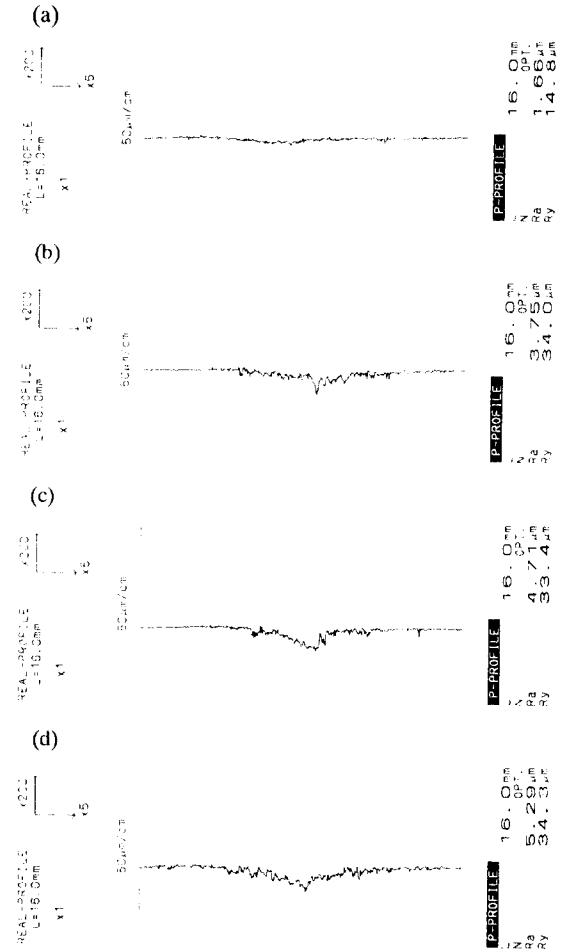


Fig. 8. Surface profile of each counter-disk. Specimens (a) A (b) B (c) C (d) D.

볼 수 있다.

### 3-4. 상대면의 공격성

경질입자의 첨가에 따른 기지 강화 효과는 상대면인 디스크의 마모를 촉진한다는 양면성을 가지고 있다. 그림 8은 축소 시편과 디스크를 이용하여 30,000회전 후의 디스크 표면 거칠기를 측정된 결과로서 상대면에 대한 공격성을 알 수 있다. 마모량이 가장 큰 시편 A의 경우 디스크의 거칠기가 가장 양호하고, 따라서 Ra 와 Ry 값이 B<sub>4</sub>C를 첨가한 다른 시편들과 비교하여 가장 낮게 나타났다. 그러나 시편 B와 C 및 D는 다소의 차이는 있으나 비슷한 결과를 보이고 있다. 이것은 앞 절에서 언급한 바와 같이 시편 D의 표면에 Fe 산화

막이 늦게 생성됨으로 인하여 디스크면이 상대적으로 고온영역에서도 보호받은 때문으로 보인다.

#### 4. 결 론

이상의 시험조건에서  $B_4C$ 의 첨가에 따른 동계 소결 마찰재의 마찰특성 변화를 알아보기 위하여 정속식 pin-on-disk형 시험기를 이용한 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)  $B_4C$ 의 첨가량이 증가함에 따라 Fe 산화막이 파괴되는 온도영역이 고온으로 이동함을 확인하였다. 이것은  $B_4C$  입자가 마찰면의 퇴적물을 활발히 제거함으로써 접촉온도의 급격한 상승을 방지하기 때문인 것으로 판단된다.

(2)  $B_4C$ 를 1-2 wt%를 첨가할 경우 사용온도 영역에서 Fe 산화막이 파괴되어 마찰계수의 급격한 변화가 발생되었다.

(3)  $B_4C$ 를 4 wt% 첨가한 시편의 마모량이 가장 낮게 나타났다. 이것은 Fe 산화막이 고온 영역에서도 잘 보존되었기 때문이다.

(4)  $B_4C$ 를 첨가한 시편이 상대 디스크를 더 공격하는 것으로 나타났으나 첨가량에 따른 큰 차이는 발견되지 않았다.

#### 참 고 문 헌

1. A.T. Alpas and J. Zhang, "Sliding and Abrasive Wear Behavior of an Aluminum (2014)-SiC Particle Reinforced Composite," Script. Met., Vol. 24, pp.931-935, 1990.
2. 이상로, 허무영, "알루미늄 단섬유 및 입자강화 알루미늄 청동기지 복합재의 마모특성," 한국윤활학회지, 10권 3호, pp.39-46, 1994.
3. 최준호, 허무영, "알루미늄 단섬유 보강 청동기지 복합재의 상온 및 고온 마모," 한국윤활학회지, 11권 4호, pp.45-52, 1995.
4. M. Eudier and H. Yousef, "Friction Mechanisms of Antifriction Products," MPR January, pp.15-19, 1988.
5. B. Bhushan and B. K. Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, p. 4.53, 1991.
6. 정동윤, 김재곤, "고속전철용 제동마찰재 개발," 자동차공학회지, 16권 5호, pp.41-46, 1994.
7. Hosung Kong, Eui-Sung Yoon and Oh Kwan Kwon, "Self-Formation of Protective Oxide Films at Dry Sliding Mild Steel Surfaces under a Medium Vacuum," Wear, Vol. 181-183, pp.325-333, 1995.
8. T.F.J. Quinn, "Review of Oxidational Wear Part I: The Origins of Oxidational Wear," Tribology International, 16, pp.257-271, 1983.
9. T.F.J. Quinn, "Review of Oxidational Wear Part II: Recent Developments and Future Trends in Oxidational Wear Research," Tribology International, 16, pp.305- 315, 1983.
10. T.F.J. Quinn and W.O. Winer, "The Thermal Aspects of Oxidational Wear," Wear, Vol. 94, pp.67-80, 1984.
11. 박홍식, 전태욱, 김동호, "플라스틱 성형용 KP-4M강의 마멸특성 및 이의 기구에 관한 연구," 한국윤활학회지, 12권 1호, pp.22-28, 1996.
12. David R. Gaskell, Introduction to Metallurgical Thermodynamics, McGraw-Hill pp.585-586, 1973.