

## Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모거동에 따른 미세조직 관찰

이태우·강계명<sup>†</sup>

서울산업대학교 신소재공학과

## Observation on the Microstructures of Cu-TiB<sub>2</sub> Composites with Wear Behavior

Tae-Woo Lee and Kae-Myung Kang<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

(2006년 7월 25일 접수, 2006년 8월 14일 최종수정본 접수)

**Abstract** The dispersion hardened Cu-TiB<sub>2</sub> composites are a promising candidate for applications as electrical contact materials. The Cu-TiB<sub>2</sub> composites for electrical contact materials can reduce material cost and resource consumption caused by wear, due to their good mechanical and electrical properties. In this study, we investigated the wear phenomenon for Cu-TiB<sub>2</sub> composites fabricated with hot extrusion, by varying particle sizes and volume fractions of TiB<sub>2</sub>. The wear tests were performed under the dry sliding condition with a fixed total sliding distance of 40 m. The contact loads at a constant speed of 3.5 Hz were 20, 40, 60, and 80 N. The friction coefficients and wear losses were measured during wear tests. Worn surfaces and wear debris after wear tests were investigated using the scanning electron microscope and the optical microscope. The microstructures of interface between Cu matrix and TiB<sub>2</sub> particle before and after wear tests were studied by the transmission electron microscope.

**Key words** Wear, Cu-TiB<sub>2</sub> composites, wear debris, microstructure.

### 1. 서 론

최근 전기접점재료는 다양한 사용조건과 고부하 및 고접촉저 점접촉수의 증가에 따른 가혹한 환경에서 사용되고 있다. 이에 따라 전기접점재료는 기존의 재료에 비하여 우수한 전기전도도와 열전도도 및 뛰어난 내아크성을 감지하며 우수한 내마모성의 고부하 전기접점재료가 요구되게 되었다. 실제로 각종 전기접점재료의 수명은 강도적인 파괴보다는 오히려 마모에 기인한 성능저하와 형상변화에 의하여 결정되고 있다.<sup>1,3)</sup>

접촉하중과 상대재와의 마찰, 윤활특성 및 접촉상태 등을 수반하여 일어나는 복합적인 재료 열화 현상인 마모에 접점재료의 성능이 좌우되기 때문이다.<sup>4)</sup> 그러나 전기접점재료의 마모연구는 마모상량과 마찰계수에 대한 현상학적 연구와 응력부가 조건에 따른 역학적 마모거동에 식이 주를 이루어 왔다. 고부하 전기접점재료인 제 2상 첨가 복합재료연구에서 제 2상에 기인하는 전기접점재료의 기계적, 전기적 성질변화와 함께 이들 제 2상의 조직 내 거동에 관한 마모해석이 고부하 전기접점재료의 열화기구 연구대상으로 부가되고 있다.<sup>5-7)</sup>

제 2상 첨가의 전기접점용 복합재료는 제 2상 첨가 물질에 따른 각각의 복합재료에 관한 연구로서, 이들 연구에서 제 2상으로 TiB<sub>2</sub> 입자 강화된 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료는 전기적성질과 기계적성질 및 내마모성이 우수한 것으로 보고되고 있고, 앞서 저자들은 이들 연구결과를 보고한 바 있다.<sup>8,9)</sup> 그러나 이들 TiB<sub>2</sub> 복합재료의 연구는 주로 TiB<sub>2</sub>입자의 입도와 조성이 물성에 미치는 연구와 TiB<sub>2</sub> 복합재료의 TiB<sub>2</sub> 공정에 관한 연구 및 접착재료로서의 내마모성에 관한 마모상량, 마찰계수 및 마모표면조직의 연구에 국한되고 있다. 따라서 고부하 전기접점재료의 적용을 목표로 하는 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모현상에 관한 마모표면거칠기와 미세조직관찰 및 첨가물질과 기지조직 간 계면특성의 미세조직관찰은 제 2상이 미치는 복합재료의 마모거동 해석에 중요한 연구대상이 되고 있다.

본 연구에서는 앞서 연구 보고한<sup>8,9)</sup> Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 TiB<sub>2</sub> 입도와 부피분율을 가진 탈리한 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료를 전식접촉 비끄럼 마모시험하여 마모표면의 미세거칠기와 마모탈리현의 관계 및 마모시험 전·후 TiB<sub>2</sub> 입자와 Cu기지 조직간 미세조직을 관찰하여 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모거동을 해석하고자 하였다. 마모시험은 20~80 N의 접촉하중과 일정 마모거리의 마모조건하에서 Pin-on-disk형 전식마모시험하였고, 마모시험후 SIS를 이용하여

<sup>†</sup>E-Mail : littbird@snut.ac.kr

표면거칠기를 측정하였고, OM으로 마모탈락분을 관찰 조사하였다. 또한 TEM을 이용하여 마모시험 전·후의 Cu 기지와 TiB<sub>2</sub>입자간 계면의 조직 관찰을 통해 마모거동에 따른 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 미세조직 변화를 조사하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험의 Cu-TiB<sub>2</sub> 분산강화형 복합재료는 순도와 입도가 각각 99.9%, 10  $\mu\text{m}$ 의 Cu 분말과 99.9%, 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub>분말을 사용하였다. 이때 각각의 TiB<sub>2</sub> 입도에서 열간압출법과 냉간인발법으로 제작된 부피분율 1, 3, 5 vol.%로 변화시킨 Cu-TiB<sub>2</sub> 분산강화형 복합재료를 준비하였다. 마모시험은 상온 대기 분위기하에서 Pin-on-disk형 건식마모시험을 Print사 TE 77 마모시험기로 마모시험하였다. 마모시험 시 3.5 Hz의 일정 속도 하에서 40 m의 마모거리에서, 접촉하중이 20~80 N으로 20N씩 각기 달리하여 시험하였다. 사용된 마모시험편은 직경( $\phi$ )과 길이( $l$ )가 각각 6, 12 mm의 원기둥형으로 마모시험편을 제작하여 마모시험에 사용하였고, 상대시험편은 인칭동(Cu-7~9%Sn alloy)으로, 38 $\times$ 58 $\times$ 4(t)mm의 관형으로 가공하여 홀더에 고정하였다. 마모시험을 수행하기에 앞서 주시험편과 상대시험편의 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 Emery paper 1,000번까지 연마 후 알콜로 마모표면을 세척, 건조하여 시험에 사용하였다. 마모시험 후, 각각의 마모시험편의 마찰계수와 마모감량을 조사하였고, 접촉하중 변화에 따른 각 마모시험편의 마모표면과 마모탈

락편(wear debris)을 SIS와 OM으로 관찰, 조사하였다. SIS관찰은 SIS-1000 3D surface profiler system을 사용하여 50배의 배율에서 마모표면을 관찰하였고, 표면거칠기값(Ra)은 50배의 배율로 관찰한 마모표면을 5회 측정 한 평균값으로 Ra 값을 정하였다. 마모탈락편 관찰은 각각의 마모시험시 수거된 마모탈락분을 알코올로 세척, 건조시켜 광학현미경(OM)으로 탈락편의 크기와 형상을 관찰, 조사하였다. 또한 마모시험 전, 후의 Cu 기지조직과 TiB<sub>2</sub> 입자간 계면 조직관찰은 Jeol사 2010 200 KV TEM을 사용하여 미세조직을 관찰, 조사하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 미끄럼 건식 마모시험 후 마모표면을 SIS-1000을 사용하여 마모표면과 표면거칠기(Ra)를 관찰 조사한 결과, TiB<sub>2</sub>의 부피분율에 관계없이 하중이 증가할수록 마모표면은 거칠어졌으며, Ra 값은 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 1은 Cu-5 vol% TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모표면 SIS 관찰결과로서, Ra 값은 10, 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 입도에서 각각 1.941~4.333  $\mu\text{m}$ 와 1.768~4.722  $\mu\text{m}$ 로 조사되었다. Fig. 1의 사진(a)와 (e)는 최소 하중 20 N 하에서 관찰된 두 종의 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모표면 SIS 사진으로, Ra 값은 TiB<sub>2</sub> 입도가 10  $\mu\text{m}$ 에서 1.941  $\mu\text{m}$ 로, TiB<sub>2</sub> 입도가 20  $\mu\text{m}$ 에서 1.768  $\mu\text{m}$ 로 각각 조사되었다. 사진에서 볼 수 있듯이 Ra 값은 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 입도가 저하중 마모에서 큰 값을 가지나, 고하중에서는 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 입도에서 Ra 값이 큰 것으로 조사되었고, 마모표면도 거

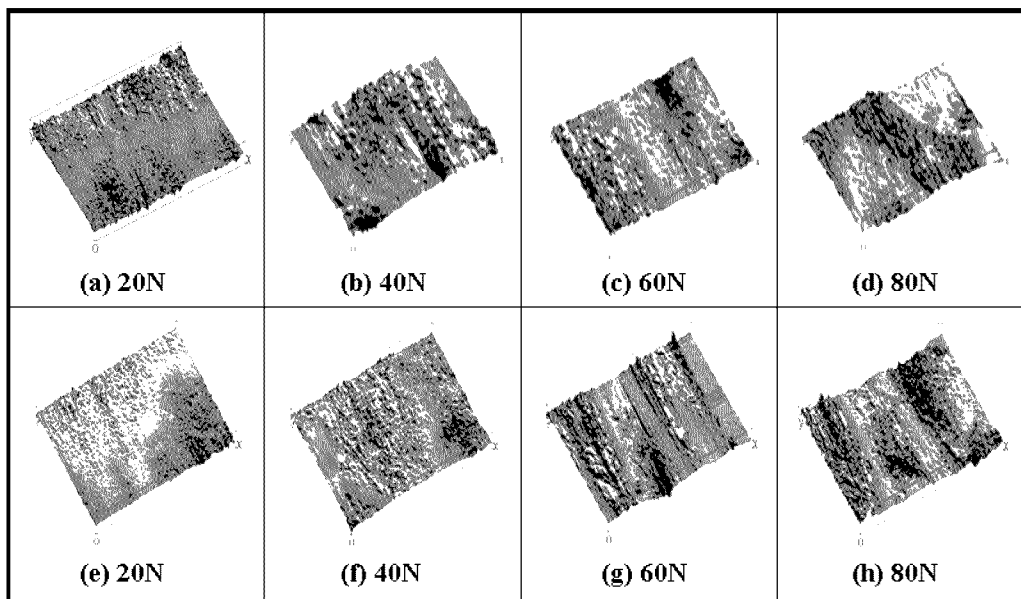


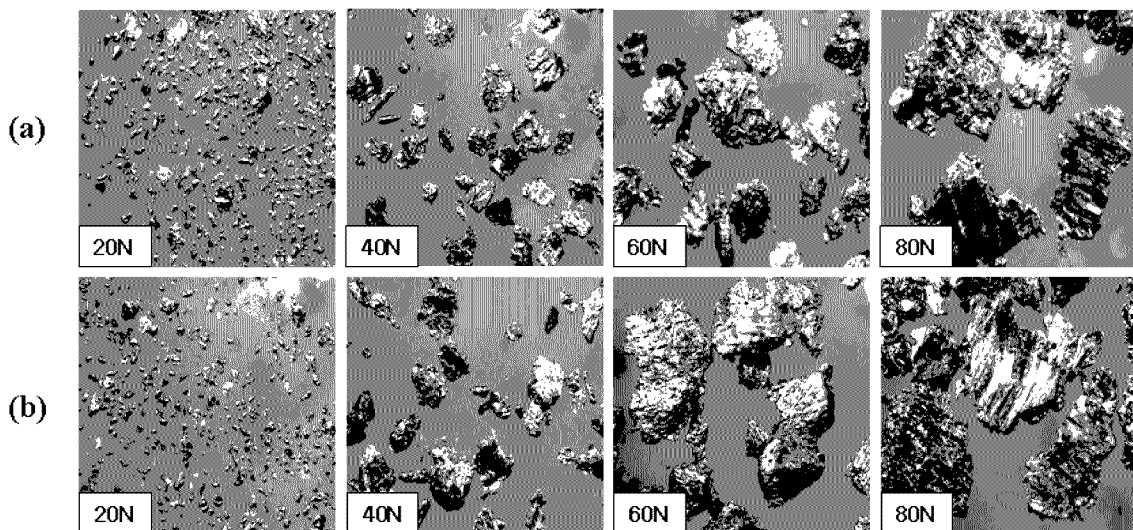
Fig. 1. SIS (surface profiler system) analysis of worn surfaces with wear loads in Cu-5 vol%, TiB<sub>2</sub> composites (X50). (a) Ra=1.941  $\mu\text{m}$ , (b) Ra=2.826  $\mu\text{m}$ , (c) Ra=3.579  $\mu\text{m}$ , (d) Ra=4.333  $\mu\text{m}$ ; 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub>, (e) Ra=1.768  $\mu\text{m}$ , (f) Ra=3.587  $\mu\text{m}$ , (g) Ra=3.957  $\mu\text{m}$  and (h) Ra=4.722  $\mu\text{m}$ ; 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub>

철어지는 것을 볼 수 있다. 이는 저하중에서는 강화상에 의한 복합재료의 경도증가가 내마모성으로 나타나 기지 금속의 소성유동현상을 억제하고 초기마모과정인 연삭마모가 주 마모기구로 있다. 따라서 저하중의 경우 입도가 큰 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료가 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료에 비하여 Ra 값이 작게 조사되었으며, 마모표면사진에서도 거칠기가 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 고하중의 경우 상대적으로 TiB<sub>2</sub> 입자가 큰 20  $\mu\text{m}$ 에서 분산강화효과가 10  $\mu\text{m}$  경우에 비하여 떨어짐으로서 마모표면의 subsurface zone의 발달과 전단응력으로 소성유동층이 형성되어 마모표면에서 활주 방향으로 큰 마모탈락편이 발생한다. 또한 마모표면의 조도 역시 증가하는 것을 Fig. 1의 사진 (c)와 (g) 및 사진(d)와 (h)에서 이를 관찰할 수 있다.<sup>10)</sup> Alpas<sup>11)</sup>의 연구에서도 복합재료내 강화상의 입도의 영향이 마모감량에 주요 인자로 설명하고 있다.

환언하면, 저하중인 20N에서는 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 마모기구가 연삭마모 양상으로 마모표면이 마모방향으로 평행하게 벗겨지는 마모양상으로 마모홈으로 보이는 부분이 잘 관찰된다. 이 같은 연삭마모는 TiB<sub>2</sub> 입자가 마모표면 직하에서 하중을 잘 지탱하여 변형층의 박리 마모가 발생하지 않고, 마모표면에서 반복 마모하중에 의해 잘게 부서진 TiB<sub>2</sub> 입자에 의한 연삭 작용에 의한 것으로 생각된다. 비록 기지의 변형이 발생하지만, 강화상이 파괴되지 않고 마모하중을 잘 지탱하여 연삭마모가 일어난다. 즉, 마모탈락편 관찰에서 볼 수 있겠지만, SIS 관찰 사진 (a)와 (e)에서는 마모탈락편이 flake형으로, 사진 (d)와 (h)에서 block형과 round형의 마모탈락편이 발생할 것으로 예상할 수 있다. 이는 다음의 마모탈락편 관찰을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 2는 TiB<sub>2</sub>가 5 vol% 첨가된 10, 20  $\mu\text{m}$ 입도에서 하중변화에 따라 관찰한 마모탈락편의 사진이다. 사진 (a)는 Cu-5 vol%, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료를 20N에서 마모시험한 마모탈락편의 형상으로 거의 대부분이 flake형을 띠고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 하중이 60N에서부터 block형의 마모탈락편으로 탈락편의 입자 변화를 사진(c)에서 볼 수 있다. 특히 80N에서는 round형의 큰 마모탈락편도 관찰되었다. 즉, 하중이 증가할수록 마모탈락편의 크기가 증가하고, 형상도 하중 증가와 함께 천이되는 것을 볼 수 있다. 이를 마찰계수 변화와 마모탈락편의 크기 및 형상의 관계를 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 마모탈락편 크기와 마찰계수의 관계에서 볼 수 있듯이 마찰계수가 증가함에 따라 마모탈락편의 크기는 증가하고, 마모탈락편의 형상도 큰 입자의 block형과 round형으로 빠르게 천이되는 것을 알 수 있다. 사진 (a)는 Cu-5 vol%, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료 분석결과로 마모탈락편의 평균크기는 138  $\mu\text{m}$ 이고, 마모탈락편의 형상은 하중 20N에서 flake형이 85%, block형과 round형이 15%, 40N에서는 flake형이 5%, block형이 75%, round형이 20%, 60N에서는 block형이 65% 이상이고, round형 32%, flake형은 3%로 조사되었다. 하중 80N에서는 round형과 block형이 각각 50%씩 관찰되었고, flake형은 1% 미만으로 나타났다. 사진(b)의 Cu-5 vol%, 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료 분석결과도 유사한 경향을 보였다. 이로부터 하중 증가에 따라 가공경화된 층의 박리현상으로 생각되는 큰 입자의 round형이 증가하는 것을 알 수 있었다. flake형의 마모탈락편은 주로 초기 마모과정인 연삭마모에서 나타나는 현상으로서 flake형으로부터 block형, round형으로



**Fig. 2.** OM micrographs of wear debris in Cu-TiB<sub>2</sub> composites ( $\times 100$ ). (a) Cu-5 vol.%, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> and (b) Cu-5 vol.%, 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub>

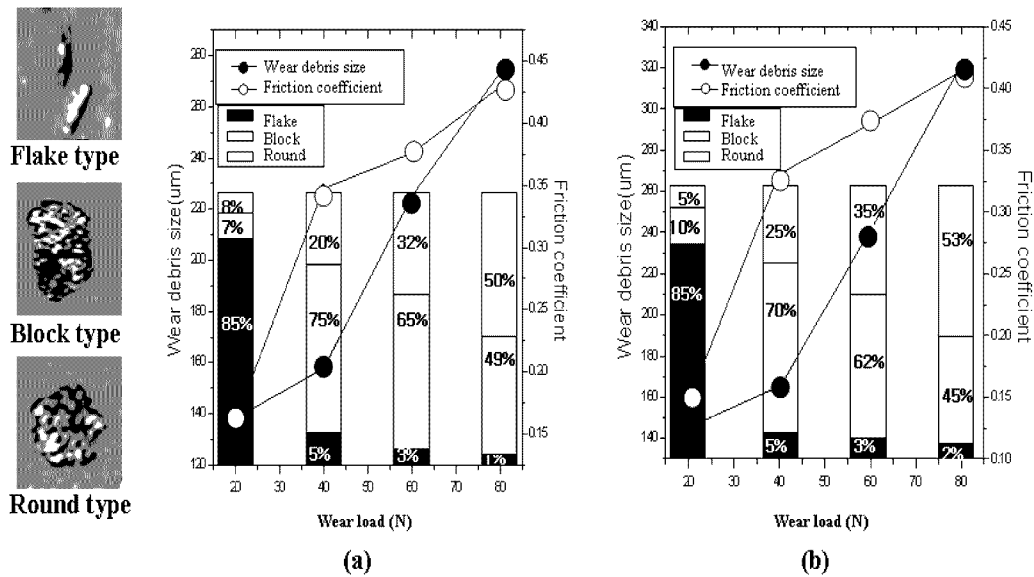


Fig. 3. Wear debris and Friction coefficients with wear loads. (a) Cu-5 vol.%, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> composites and (b) Cu-5 vol.%, 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> composites

천이하는 마모과정을 확인할 수 있으며, 본 저자들이 관찰한 subsurface zone의 천이거동과 일치하는 결과를 확인할 수 있다.<sup>8)</sup> 또한 Alpas<sup>11)</sup>와 Zhang<sup>12)</sup>의 마모기구 천이가 마찰열에 기인한 마모표면의 온도가 특정온도이상으로 올라갈 때 마모기구 천이가 발생하는 것으로 보고하고 있다. 본 실험에서는 마모표면의 온도변화를 직접 조사하지는 못하였으나, 마모천이과정에서 연삭마모에서 응착마모로의 천이현상은 마모표면의 마찰열에 의한 결과임을 쉽게 생각할 수 있게 한다. 또한 하중의 증가가 마모표면하 소성유동현상으로 나타나 가공경화층과 가공경화되지 않은 층간의 층분리에 의한 박리현상으로서,<sup>13)</sup> 앞서 저자들이 보고한 바 있는 마모표면하 관찰결과와도 합치되는 현상임을 알 수 있다.

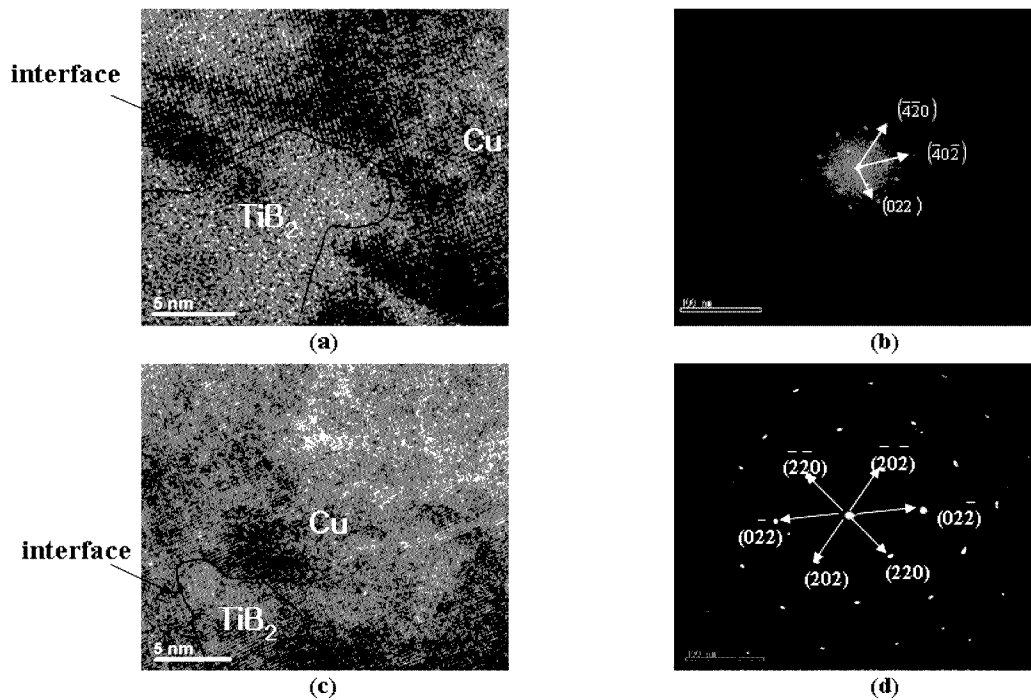
Fig. 4는 마모시험 전·후의 5 vol.% 10  $\mu\text{m}$  Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재료의 Cu기지와 TiB<sub>2</sub>입자간 계면 조직을 관찰한 TEM 사진이다. 사진 (a)는 마모시험전 Cu기지와 TiB<sub>2</sub>입자간 계면을 관찰한 TEM 조직사진으로서 Cu와 TiB<sub>2</sub>입자간 정합구조를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나 마모시험후 TEM관찰 사진인 사진(c)에서는 Cu기지와 TiB<sub>2</sub>입자가 부정합구조를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 이들 각각의 미세조직 결정구조를 해석한 결과, Cu기지와 TiB<sub>2</sub>입자간 계면에서 Cu쪽 계면이 마모시험전 전형적인 FCC 구조임을 사진(b)를 통해 확인할 수 있다. 그러나 마모시험후 사진(d)에서 볼 수 있듯이 TiB<sub>2</sub>입자의 영향에 의한 Cu기지 조직이 소성변형되어 소성변형 에너지가 변형유기된 Twin 구조임을 과 면으로 확인할 수 있다. 이들 TEM 관찰로부터 정합·부정합 구조의 천이는 명확하게 밝히지는 못하였으나, 마모현상에 따른 마모표면하

조직의 소성유동 즉, 가공경화에 따른 기지조직과 TiB<sub>2</sub>강화상간 계면에서 전위밀도의 증가가 마모표면하 조직의 강화기구임을 확인할 수 있다.<sup>14,15)</sup>

또한 본 실험에서 부분적으로 subgrain 결정입이 관찰되었으나, 주로 변형유기된 Twin 구조형태를 띠는 것으로 SADP 상분석 결과로 확인할 수 있었다. 이는 Liu<sup>16)</sup>의 Cu-Cr 복합재료의 변형에 대한 계면의 TEM 조직 관찰에서 높은 변형에너지를 받아 전위밀도가 계면에서 상대적으로 높게 나타났으며, Cr의 구속에 기인한 기지조직의 소성변형 정도를 크게 하여 전위구조 재배치로 subgrain 구조의 관찰결과를 보고하고 있다. 결론적으로 소성유동층의 가공경화현상에 대한 TiB<sub>2</sub>입자의 저항성이 내마모성 향상에 기여함을 확인할 수 있으며, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료가 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 복합재료에 비하여 마모거동에서 미세한 TiB<sub>2</sub>입자에 의한 소성변형 저항성이 균일하게 분포되어 내마모성이 우수한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

TiB<sub>2</sub> 입자의 입도와 부피분율을 각각 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ 와 1, 3, 5 vol.%로 달리하여 제조한 Cu-TiB<sub>2</sub> 분산강화형 복합재료의 마모거동 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 마모표면의 SIS 시험결과, 10  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> 입도의 복합재료의 Ra 값은 20N에서 80N의 마모하중에서 각각 1.941~4.333  $\mu\text{m}$ , 1.768~4.722  $\mu\text{m}$ 로 변화하였고, 20  $\mu\text{m}$ 에서 Ra 값이 10  $\mu\text{m}$  Ra 값보다 고하중으로 갈수록 크게 증가하였다. 이는 마모탈락편의 크기와 형상과 TiB<sub>2</sub> 입자의 입도에 기인한 복합재료의 조직저항성에 따



**Fig. 4.** TEM micrographs of interface between Cu and TiB<sub>2</sub> in Cu-5vol.%, 10  $\mu\text{m}$  TiB<sub>2</sub> composites at 0N and 80N wear loads. (a) Interface image, (b) [122]axis SADP image at interface of Cu side (before wear test), (c) Interface image and (d) [110]axis SADP image at interface of Cu side (after wear test)

큰 마모의 천이현상에 밀접한 관계를 가지는 것으로 생각된다. 또한 하중의 증가는 마모탈락편의 형상이 flake 형에서 block형, round형으로 변화하는 것으로 조사되었고, Cu와 TiB<sub>2</sub> 입자계면의 TEM 조직관찰에서 마모표면하 전위밀도의 증가가 마모표면층의 가공경화로 나타나는 결과임을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. S. C. Tjong and K. C. Lau, *Materials Science and Engineering*, **A282**, 183 (2000).
2. Y. Hiraoka, H. Hanado and T. Inoue, *Refractory Metals & Hard Materials*, **22**, 87 (2004).
3. L. Lu, L. B. Wang, B. Z. Ding and K. Lu, *Materials Science and Engineering*, **A286**, 125 (2000).
4. K. L. Johnson, *Wear*, **190**, 162 (1995).
5. X. L. Kong, Y. B. Liu and L. J. Qiao, *Wear*, **256**, 747 (2004).
6. G. Straffelini, L. Maines, M. Pellizzari and P. Scardi, *Wear*, **259**, 506 (2005).
7. Q. Xu, X. Zhang, J. Han, X. He and V. L. Kvanin, *Materials Letters*, **57**, 4439 (2003).
8. J. N. Kim, J. U. Choi and K. M. Kang, *Korea Journal of Materials Research*, **15**(1), 61 (2005).
9. T. W. Lee, K. M. Kang and J. U. Choi, *Korean J. of Materials research*, **15**(12), 824 (2005).
10. S. C. Tjong and K. C. Lau, *Materials Letters*, **41**, 153 (1999).
11. A. T. Alpas, *Metall., Trans.*, **25A**, pp.969 (1994).
12. Z. F. Zhang, L. C. Zhang and Y. W. Mai, *J. Mater. Sci.*, **30**, 1967 (1995).
13. K. M. Kang, J. T. Song, *Wear*, **140**, 119 (1990).
14. K. Han and K. Yu-Zhang, *Scripta Materialia*, **50**, 781 (2004).
15. W. Wang, Z. Fu, H. Wang and R. Yuan, *Journal of the European Ceramic Society*, **22**, 1045 (2002).
16. J-L. Liu, E-D. Wang, Z-Y. Liu, L-X. Hu and W-B. Fang, *Materials Science and Engineering* **A382**, 301 (2004).