전차선용 Cu-TiB_2 복합재료의 마모거동에 관한 분석

The Analysis on Wear Behavior of Cu-TiB_2 Composite For Contact Wire

김정남* 이태우** 권성대*** 강계명**

Kim, Jung-Nam Lee, Tae-Woo Kwon, Sung-Tae Kang, Kae-Myung

ABSTRACT

The wear behavior and the mechanical property of Cu-TiB_2 composites were examined. Cu-TiB_2 composites were fabricated by hot extrusion and cold drawing with TiB_2 contents(1~5vol.%) and the size of TiB_2 particles(10㎛ and 20㎛). The pin-on-disk wear test was carried out under dry sliding wear conditions which loads varied with from 20N to 100N. At the time, counterpart wear material used SM45C. The experimental results showed that the friction coefficient and wear rate decreased with increasing the TiB_2 contents and decreasing the size of TiB_2 particle. Also, the depth of plastically deformed zone decreased with increasing the TiB_2 contents and decreasing the size of TiB_2 particle.

1. 서 론

전차선(contact wire)은 전동차의 pantograph와의 직접적인 접촉을 통하여 철도차량에 필요한 전류를 인입시켜주는 전류 도입선으로 전기전도도와 인장강도 및 내마모, 내열성, 내부식성 등의 확보가 필요하다.[1] 현재 사용되고 있는 전차선은 99.9 %의 순Cu로 97.5% IACS 이상의 우수한 전기전도도를 가지고 있다.[2] 그러나 최근 철도차량의 고속화에 대응하여 전차선의 장력 증가가 필요시 되고 있어 전차선의 인장강도를 비롯한 기계적 특성 향상이 요구되어지고 있다. 이에 Cu-Mg-Sn계 동합금, Cu-Ag계 동합금 등이 연구 또는 실용되어지고 있다.[1]

TiB_2는 고강도(750MPa), 고융점(3225℃) 및 우수한 전기전도도(10% IACS)를 지니고 있어, 이를 강화상으로 한 분산강화형 Cu-TiB_2 복합재료가 전차선 등의 전기 재료로 그 활용 가능성이 연구되고 있다.[3-5] TiB_2는 diamond, CBN(cubic boron nitride), B_4C 다음의 높은 경도를 나타내며, Ti와 boron의 독특한 전자 배열로 인해 전기 전도성이 우수한 물질로 알려져 있다. 또한 화학적으로 안정한 특성을 지니고 있으며 용융 금속에 대한 저항성이 우수하다.[6] 따라서, Cu-TiB_2 복합재료는 종래의 전기적 특성을 유지하면서 동시에 우수한 기계적 특성을 가져 전기 재료로 사용시 마모로 인하여 발생되는 사용 수명 단축을 감소시킬수 있으리라 기대된다.

본 연구에서는 Cu 분말과 TiB_2 분말을 열간 압출 공정에 따라 Cu-TiB2 복합재료를 제조하여, TiB_2 분말 함량 변화와 입도 변화에 따른 Cu-TiB_2 복합재료의 마모 특성을 조사하였다. 마모시험은 SM45C(87HRF)를 상대재로 하여 pin-on-disk 방식으로 시험하였으며, 20~100N의 하중변화와 2.5~4.5Hz의 sliding 속도변화를 주었다. 마모시험 후 SEM으로 마모표면을 관찰하였으며, 마모표면하의 subsurface zone의 경도 변화를 측정하여 마모기구를 해석하였다.

* 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비회원

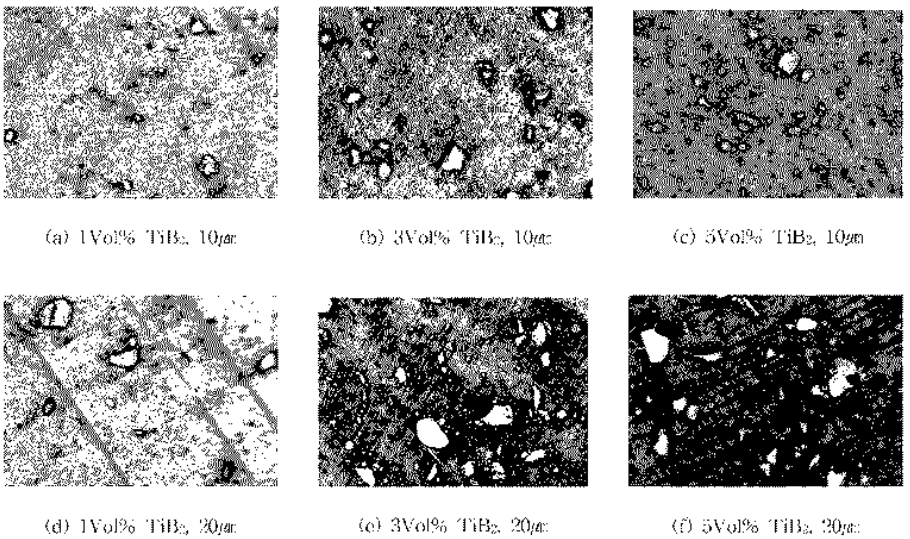
** 서울산업대학교 신소재공학과, 비회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2.시험방법

2-1.시험편 조직검사

Cu-TiB_2 복합재료 제조는 기지 조직으로 10㎛의 Cu분말과 10㎛와 20㎛의 TiB_2 분말을 강화상으로 하여 TiB_2 함량을 1, 3, 5Vol%로 변화시켜 열간 압출법으로 제조하였다.[7] Fig. 1은 Cu-TiB_2 복합재료 압출재의 미세조직을 나타낸 것으로, 백색의 TiB_2 입자가 Cu기지의 전층에 비교적 균일하게 분포되었다. 또한, TiB_2의 함량이 증가하여도 대체적으로 균일하게 분포된 것으로 나타났다.



(a) 1Vol% TiB_2, 10㎛ (b) 3Vol% TiB_2, 10㎛ (c) 5Vol% TiB_2, 10㎛

(d) 1Vol% TiB_2, 20㎛ (e) 3Vol% TiB_2, 20㎛ (f) 5Vol% TiB_2, 20㎛

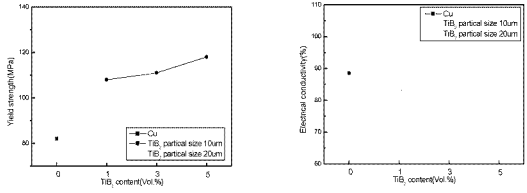
Fig. 1. Microstructure of Cu TiB_2 particle reinforced composite

2-2.기계적 및 전기적 물성 조사

이전 연구에서 조사한 TiB_2 분말 함량 및 입도에 따른 Cu-TiB_2 복합재료의 기계적 및 전기적 성능을 Table 1과 Fig.2에 나타내었다. 입도가 미세하고 함량이 증가할수록 항복강도와 경도가 증가하였다. 반면 전기전도도는 TiB_2 첨가량이 증가할수록 감소하였다. 이는 Cu기지 분말의 전기전도도가 약 88.5% IACS로서, 강화입자의 TiB_2가 10% IACS의 전기적 특성을 가진다고 해도, Cu기지내 자유전자의 이동을 방해하는 요소로 작용하기 때문에 TiB_2 첨가량이 증가할수록 전기전도도는 감소하게 된다. TiB_2 입자 크기가 20㎛인 것이 10㎛보다 전기전도도가 다소 높은데 이는 TiB_2의 평균입도가 커지면 기지와의 계면 분율이 작아서 자유전자의 이동경로가 증가하게 되므로 전기전도도가 증가하는 것으로 생각된다.[7]

Table 1. Mechanical and electrical properties with a variation of TiB_2 particle content

Specimen	Cu (Vol%)	TiB_2 (Vol%)	TiB_2 particle size (㎛)	Hardness (H_RF)	Yield strength (MPa)	Electric conductivity (%IACS)
No.1	99	1	10	54	108	83.3
No.2	97	3	10	60	111	77.8
No.3	95	5	10	69	118	74.5
No.4	99	1	20	52	114	83.5
No.5	97	3	20	57	121	79.5
No.6	95	5	20	61	126	77.0



(a) (b)

Fig. 2 The variation of properties with TiB2 content:
(a) The variation of electrical conductivity (b) The variation of yield strength

2-3.마모시험

TiB_2 분말 함량 및 입도에 따른 Cu-TiB_2 복합재료의 마모 시험을 SM45C(87HRF)를 상대재로 하여 pin-on-disk 방식으로 시험하였다. 마모거리 80m의 시험조건에서 20~100N 범위의 하중 변화 및 2.5~4.5Hz 범위의 속도 변화를 주었다. 마모시험을 수행하기에 앞서, 상대재와 주 시험편의 표면을 No. 1,000의 연마지로 연마하였으며, 아세톤으로 표면부를 세척하여 사용하였고 시험분위기는 상온, 건식분위기였다. 마모시험 후, 시험편의 시험편의 마모감량 조사는 시험전, 후의 무게차를 자동저시정밀저울을 사용하여 10^{-5}g까지 측정하였다.

2-4.SEM관찰 및 마모표면하 subsurface zone의 경도시험

시험전 각 시험편의 조직을 광학현미경으로 관찰하였고, 마모시험 후 SEM으로 마모 표면을 관찰하여 표면 손상 상태와 마모탈락분의 형태를 관찰하였다. 또한, 마모시험 후 시험편을 표면과 수직방향으로 절단하여 마모표면 아래의 subsurface zone의 미소 비커스 경도를 마모거리에 따라 측정하여 가공경화 현상의 발생유무를 조사하였다. 미소 비커스 경도시험 조건은 하중 200g, 하중 유지시간은 10초였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마모시험

Fig. 3는 TiB_2 분말 함량 및 입도에 따른 Cu-TiB_2 복합재료의 마모율과 마찰계수를 나타낸 것이다. 모든 시험편에서 하중이 증가함에 따라 마모율과 마찰계수가 증가하였고, 대략 0.22~0.45의 마찰계수를 보였다. sliding 속도가 증가할수록 다소 차이는 있으나 마모율과 마찰계수가 감소하는 경향을 보였으며, 그 범위는 대략 0.33~0.41이었다. 이는 일정 sliding속도 이상에서는 마모탈락편이 상대재와 주 시험편의 계면에서 고체 윤활제의 역할을 하는것으로 생각되어 진다.

또한 TiB_2의 함량이 증가할수록, 입도가 작을수록 마모율과 마찰계수가 낮았다. 이전 연구에서 TiB_2 함량이 증가할수록, 평균 입도가 작을수록 높은 항복강도 및 경도를 나타낸 것으로 보아서 강화상인 TiB_2의 첨가로 인한 기계적 물성 향상으로 마모 저항성 역시 높아진 것을 알 수 있다.

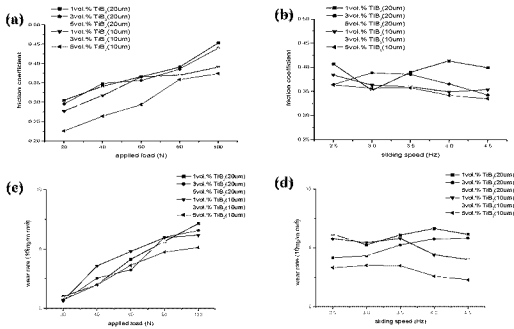


Fig. 3 Friction coefficients & Wear rates of Cu-TiB_2 composites
(a)(c) : a variation of applied load, (b)(d) : a variation of sliding speed

3.2 subsurface zone의 미소경도시험

마모표면 아래의 가공경화현상을 조사하기 위하여 마모시험 후의 시험편을 수직으로 절단하여 마모거리에 따른 미소비커스 경도를 측정하였다. Fig. 4 (a)는 20㎛, 5vol.% TiB_2의 함중변화에 따른 마모표면 아래의 경도 변화를 나타낸 것이다. 하중이 증가할수록, 경도 변화가 커지고 있음을 알 수 있다. (b)는 TiB_2의 함량 및 입도에 따른 경도변화를 나타낸 것이다. TiB_2의 함량이 많고, 입도가 작을수록 마모표면 아래의 경도 변화가 작아지고 있다. 10㎛, 5vol.% TiB_2는 Hv103~Hv92의 경도 변화를 나타내고 있고, 변화가 일어나는 표면하 깊이는 대략 50~100㎛ 범위였으며, 20㎛, 1vol.% TiB_2는 각각 Hv90~Hv73, 50~250㎛였다. 이러한 표면하 subsurface zone의 경도 변화를 마모 특성과 연관시켜 볼 때, 경도 변화가 일어나는 영역 즉, 마모표면에서의 소성유동에 의하여 가공경화가 발생하고 있음을 알 수 있으며 변화 영역의 깊이가 작을수록 마모율이 낮음을 알 수 있다.

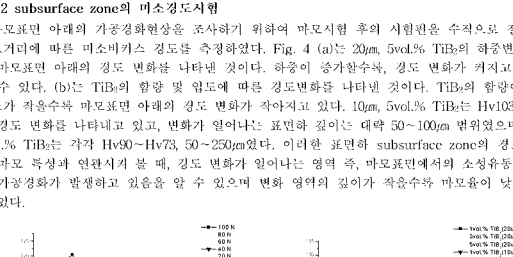


Fig. 4 Hardness as a function of depth below the wear surface:
(a) a variation of hardness with applied load, 20㎛, 5vol.%TiB_2, (b) a variation of hardness with Cu TiB_2 particle

3.3 마모표면 관찰

Fig.5는 1vol.% and 5vol.% TiB_2의 마모표면의 SEM 관찰 결과를 나타내고 있다. TiB_2의 함량 및 입도에 따라 마모 표면의 손상 정도가 상이하였다. TiB_2 입도가 클수록, 깊은 wear groove가 다수 관찰되고 있으며, flake형의 마모탈락분이 주류를 이루고 있으면서, 표면균열이 발생되었음이 관찰되었다. 또한, 마모탈락분의 적층현상도 관찰되었다(Fig. 5b). 반면에, TiB_2 입도가 작을수록 미세하고 좁은 scretch가 주류를 이루고 있었다(Fig. 5a,c). 본 연구에서 모든 시험편의 마모표면과 마모탈락분을 나타내지는 못했지만, sliding 속도가 증가할수록, 마모탈락분의 형태가 flake형에서 round형태로 변화하였다.

위의 관찰 결과를 subsurface zone의 미소경도 변화와 연관시켜 생각해 볼 때, 마모표면하에서 가공경화 현상이 일어났음을 다시 한번 확인할 수 있다. 즉, 마모표면에서 일어난 소성유동 때문에 subsurface zone은 가공경화의 영향을 받게 된다. 그 결과, 가공경화된 층과 가공경화의 영향을 받지 않은 층과의 계면에서 미소균열이 발생하는 것으로 생각된다.

이상과 같이 마모기구를 표면층의 가공경화와 미소균열의 발생으로 생각할 때 이들은 전위에 관계할 것이 분명하다. 따라서, 결국 마모표면의 subsurface에서의 전위의 발생과 분포, 이들의 상호작용, 축적 등과 관련되고 있음이 예상되어진다. Suh는 마모 기구를 이러한 전위론적 방법(delamination theory)으로 설명하고 있으나 아직 분명하게 규명되어지진 않았다.[5]

또한, 위의 가공경화 현상에 관하여 Marich 등은 합금원소의 첨가로 재료 자체의 항복강도를 증가시키면 가공경화층을 감소시킬 수 있다고 보고하고 있어 본 시험의 결과와도 일치하고 있다.[9]

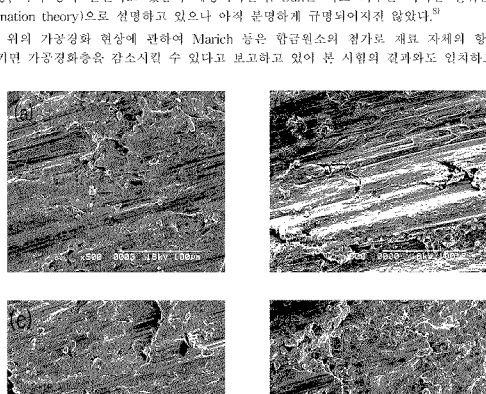


Fig. 5 SEM micrographs of worn surfaces at a sliding speed of 3.5Hz at an applied load 60N: (a) 1vol.%, 10㎛TiB$_2$, (b) 1vol.%, 20㎛TiB$_2$, (c) 5vol.%, 10㎛TiB$_2$, (d) 5vol.%, 20㎛TiB$_2$

4. 결론

1) TiB_2의 함량이 증가할수록, 입도가 작을수록 인장강도와 경도가 증가하였고, TiB_2의 함량이 증가할수록, 입도가 클수록 전기전도도는 감소하였다. Cu-TiB_2 복합재료의 이런 물성은 기존의 순 Cu 전차선에 비해 전기전도도는 떨어지나, 충분한 기계적 성질을 지닌 것으로 판단되어 향 후 전차선 소재로 활용될 수 있으리라 기대된다.

2) 하중이 증가함에 따라 마모율과 마찰계수가 증가하였고, sliding 속도가 증가할수록 다소 차이는 있으나 마모율과 마찰계수가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 일정 속도 이상에서는 마모탈락편이 고체 윤활제의 역할을 하는 것으로 생각되어 진다. 또한 TiB_2의 함량이 증가할수록, 입도가 작을수록 마모율과 마찰계수가 낮았다

3) 마모표면 아래의 가공경화 현상을 조사하기 위하여 마모시험 후의 시험편을 수직으로 절단하여 마모거리에 따른 미소비커스 경도를 측정한 결과, TiB_2의 함량이 많고, 입도가 작을수록 마모표면 아래의 경도 변화가 작았다.

4) 마모표면을 SEM으로 관찰한 결과, TiB_2 입도가 클수록, 깊은 wear groove가 다수 관찰되고 있으며, flake형의 마모탈락분이 주류를 이루고 있으면서, 표면균열이 발생되었음이 관찰되었다. 반면에, TiB_2 입도가 작을수록 미세하고 좁은 scretch가 주류를 이루고 있었다

5) 마모표면에서 일어난 소성유동 때문에 subsurface zone은 가공경화의 영향을 받게 되고 그 결과, 가공경화된 층과 가공경화의 영향을 받지 않은 층과의 계면에서 미소균열이 발생하는 것으로 생각된다. 이상과 같이 마모기구를 표면층의 가공경화와 미소균열의 발생으로 생각할 때 이들은 전위에 관계할 것이 분명하며, 결국 마모표면의 subsurface에서의 전위의 발생과 분포, 이들의 상호작용, 축적 등과 관련되고 있다고 생각되어 진다.

참 고 문 헌

1. 한광현 외 (1999), "고속전차선 시스템 개발", 보고서, pp.88
2. 철도용품 표준규격(KRS) 6145-3144사 (2003)
3. Jong-sang Lee (1988), Scripta Materialia, 39, 8, pp.1063-1069,
4. Tae-Hyeong Kim (1994), Journal of Korea Powder Metallurgy Institute, 1, 2, pp.174-180
5. Bo-Soo Kim (1994), Journal of Korea Powder Metallurgy Institute, 1, 2, 167-173
6. 윤재돈 (1995), "SiC/TiB_2 복합재료의 미세구조와 기계적 성질에 관한 연구", 석사학위논문, 한양대학교, pp.16-20
7. Kae-Myung Kang (2004), Jong-Un Choi, Korea Journal of Materials Research, 14(1), pp.74
8. N. P. Suh (1973), Wear, 25, pp.111
9. S.Marich, P.Curio (1978), ASTM.STP 644