[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 15, No. 1 (2005)

Cu-TiB_2 복합재료의 마모거동에 관한 연구

김정남† · 최종운* · 강계명*
서울산업대학교 산업대학원 재료공학과
*서울산업대학교 신소재공학과

A Study on the Wear Behavior of the Cu-TiB_2 Composites

Jung-Nam Kim†, Jong-Un Choi* and Kae-Myung Kang*
Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Industry and Engineering
*Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

(2004년 11월 29일 받음, 2005년 1월 6일 최종수정본 받음)

Abstract The titanium diboride(TiB_2) has high strength(750MPa), high melting point (3225°C) and 10% IACS electrical conductivity. On this account, the dispersion hardening Cu-TiB_2 composites(MMCs) are a promising candidate for applications as electrical contact materials. MMCs for electrical contact materials can reduce material cost and resource consumption caused by wear, due to its good mechanical and electrical property. In this study, we attempt to prepare MMCs with various volume fraction and particle size of TiB_2 by means of hot extruded and cold drawn process. Dry sliding wear tests were performed on a pin-on-disk type wear tester, sliding against SM45C under the different applied loads. After wear testing, the microstructures of the worn surfaces were observed by SEM and the microhardnesses of the subsurface zone were measured.

Key words wear, Cu-TiB_2 composites, worn surface, subsurface zone.

1. 서 론

구리(Cu)는 높은 전기전도도, 열전도도 특성을 지니고 있어 열전재료 및 전기재료로 사용되어 지고 있으나, 고부하가 걸리는 전기 접점재료로는 낮은 강도 특성과 고온 산화로 인하여 그 사용범위에 제약을 받고 있다. 이에 구리와 동등 내지는 높은 전기적, 열적 특성을 지니면서 기계적 성질이 우수한 복합재료에 관한 연구가 주목을 받게 되었다.[1-4]

이들 복합재료로는 Cu-Al_2O_3계[5], Cu-Nb계[6], Cu-Fe계[7], Cu-Ag계[8], Cu-W계[2] 등이 있으며, 주로 복합재료의 기계적 성질과 전기적 성질에 미치는 첨가제의 영향에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이 중 Al_2O_3는 강도와 creep 저항성을 향상시키나 전기적 성질이 저하되는 것으로 보고되고 있고,[9,10] W은 W분말의 편석에 기인한 균일 혼합상 제조의 어려움과 전기적 성질의 저하가 보고되고 있다.[11] 이에 따라 이들 문제점을 보완하는 강화상으로 TiB_2에 관한 연구가 주목을 받게 되었다.[12,13]

한편 고부하 접점재료의 경우에서는 전기적, 기계적 성질 뿐만 아니라, 우수한 내마모성이 요구되나 접점재료의 마모특성에 관한 연구는 마모감량 측정에 국한된 단편적 연구에 불과한 실정이다. 따라서 고부하가 요구되는 다양한 마모 조건에 따른 재료의 미세구조 해석과 이에 미치는 소성유동현상에 관한 조직학적 연구 및 마모거동에 미치는 마모표면하 subsurface 영역의 소성유동 해석에 관한 연구는 고부하 전기 접점재료의 실용화에 매우 중요하게 되었다.

본 연구에서는 전기 접점재료 중에서 전차선(trolley wire)으로 활용이 기대되는 분산강화형 Cu-TiB_2 복합재료를 열간압출법으로 제조하여[14], TiB_2 부피 분율 변화와 입도 변화에 따른 복합재료의 마모거동을 조사하고자 하였다. 마모거동 해석은 마모표면과 마모표면하 subsurface zone의 소성유동현상을 마모횡단면의 조직관찰, 마모탈락편의 현미경 관찰을 통하여 조직학적으로 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

내마모성 실험은 Pin on disk방식의 High frequency friction machine(PLINT사 TE77)을 사용하여 행하였다. 마모실험시 3.5 Hz의 일정 sliding 속도하에서 마모거리는 80 m로 유지하였고, 접촉하중을 20~80 N으로 20 N씩 변화시켜 시험하였다. 마모시험편은 TiB_2 입도와 부피 분율이 각기 다른 Cu-TiB_2 복합재료와 전차선용 Cu소재를

†E-Mail : jnkim93@krri.re.kr

ϕ6 mm, l 10 mm의 원통형으로 제작하여 실험에 사용하였다. 이때 상대시험편은 SM45C로서, 50×60×20(t)mm의 판형으로 가공하여 홀더에 고정하였다. 이들 실험에 사용된 각각의 Cu-TiB_2 복합재료와 전차선용 Cu 재료의 성분 원소와 물성치를 Table 1에 나타내었다. 마모실험을 수행하기에 앞서 주시험편과 상대시험편의 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 Emery paper 1,000번까지 연마 후, 알콜로 세척, 건조하였고 마모실험은 상온 대기중에서 건식 마모시험하여 각 시험편의 마찰계수와 마모 감량을 조사하였다. 마모감량은 실험전·후 시험편의 무게를 자동지시 정밀천평을 사용하여 10^{-3} gram까지 측정하여 계산하였다. 접촉하중 변화에 따른 각각의 마모시험편의 마모표면과 마모표면하 subsurface zone의 조직 및 채취된 각각의 마모탈락편(wear debris)을 SEM으로 관찰하였고, 마모탈락편의 EDX 성분 분석도 행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Cu-TiB_2 복합재료와 전차선용 Cu의 하중변화에 따른 마모감량과 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서 알수 있듯이 TiB_2 입자로 강화된 복합재료가 전차선용 Cu에 비하여 전 하중영역에 걸쳐 적은 마모감량과 낮은 마찰계수를 보이고 있다. 즉 No.7의 전차선용 Cu는 접촉하중이 증가함에 따라 마모감량과 마찰계수가 급격히 증가하는 것으로, 20 N에서 약 10 mg 마모감량과 0.23 마찰계수, 80 N에서는 75 mg의 마모감량과 0.525 마찰계수를 나타내었다. 반면, TiB_2 복합재료의 경우 TiB_2 함량과 입도 크기에 따라 20 N에서는 4~13 mg의 마모감량과 0.17~0.19의 마찰계수, 80 N에서는 32~59 mg의 마모감량과 0.37~0.46의 마찰계수로서, 전차선용 Cu에 비해 마모감량은 약 20~25% 정도 감소되었고, 마찰계수는 약 14~22% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 특히 TiB_2가 10 μm, 5 vol%의 No.3 시험편의 경우는 80 N에서 32 mg의 마모감량을 보여 가장 우수한 내마모 특성을 지니고 있음을 알 수 있었다.

한편, TiB_2 입도 변화에 따른 마모감량의 변화는 전반적으로 TiB_2 입도의 영향보다는 부피 분율의 영향이 큰 것으로 조사되었다. 즉 40 N 이하의 접촉하중에서는 10 μm의 Cu-TiB_2의 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 60N과 80N의 경우, 마모감량의 변화는 최대 80N, No.3의 경우를 제외하고는 입도크기가 10 μm와 20 μm TiB_2 복합재료가 모두 비슷한 마모감량을 가지는 것으로 조사되었다. 이는 Alpas 등[15,16]의 복합재료의 강화상 부피 분율과 입도 크기가 증가하면 마모감량이 감소된다는 연구

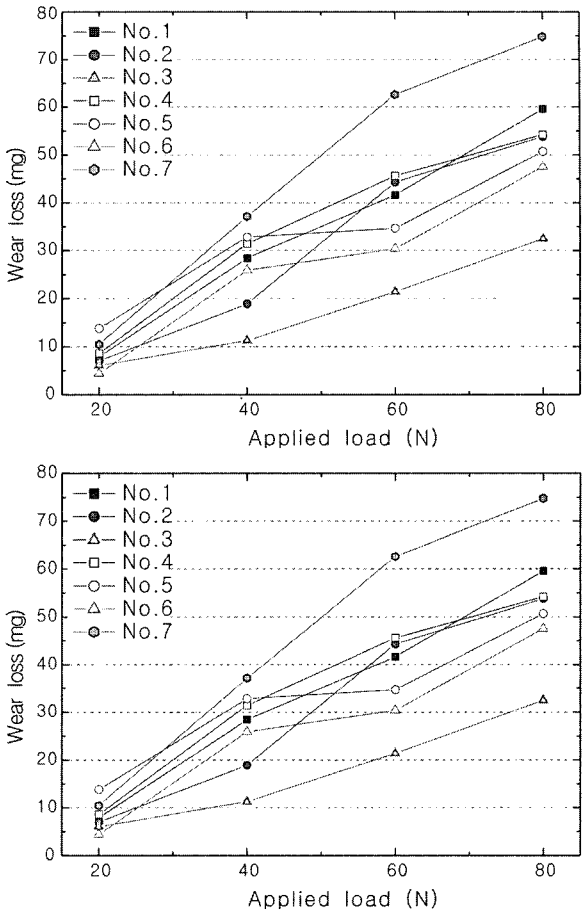

Fig. 1. Wear losses and friction coefficients with the variation of applied loads.

Table 1. Mechanical and electrical properties of wear specimens.

Specimen	Cu (Vol%)	TiB_2 (Vol%)	TiB_2 particle size (μm)	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	66.8	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	61.4	126	77.0
No.7(Trolley wire)	99.99	-	-	-	-	97.5

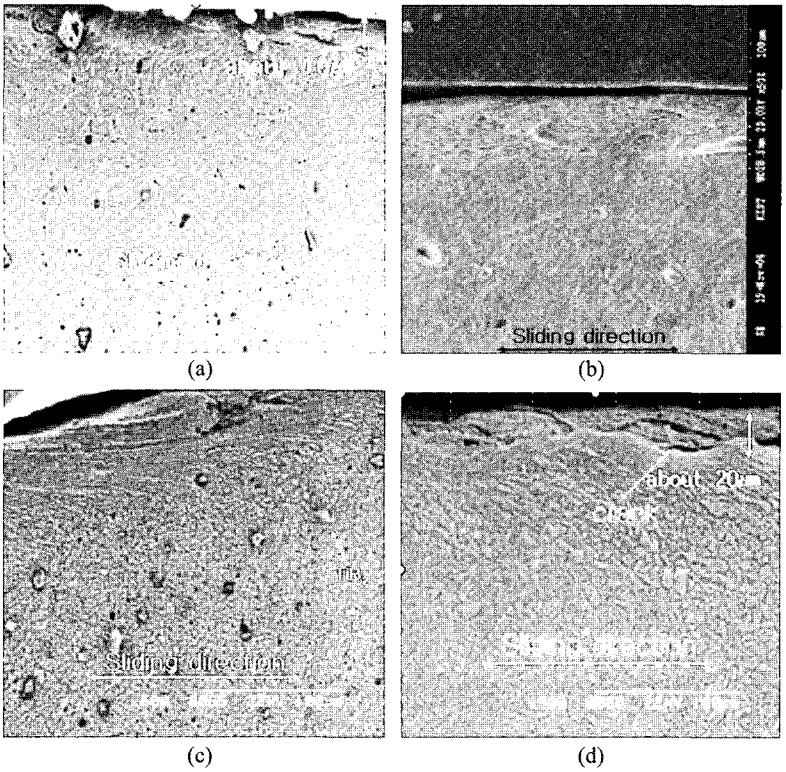

Fig. 2. SEM micrographs of transverse cross-section of No.3 specimen according to applied loads (×500); (a) 20N, (b) 40N, (c) 60N and (d) 80N.

결과와는 다소 상이한 현상으로 나타났다. 이는 앞서 저자들이 연구한[14] Cu-TiB_2 복합재료의 기계적 성질과 Table 1의 경도변화에서도 볼 수 있듯이 10 μm에서 경도값이 20 μm보다 큰 경도값으로 조사되었고, Fig. 2의 마모표면하 조직관찰에서 볼 수 있듯이 TiB_2 부피 분율의 영향이 TiB_2 입도 영향보다 마모표면하 subsurface zone의 소성유동에 큰 저항성을 가짐을 알 수 있었다. 또한 마찰계수의 변화에서도 마모감량과 비슷한 경향을 보여, TiB_2 내마모성에 미치는 제 2상은 입도와 부피 분율의 복합적 영향으로 사료된다. 이와 같이 TiB_2의 부피 분율이 높을수록 마모감량이 낮아지는 이유는 TiB_2에 의한 경도의 향상에 의해 내마모성이 부여되며, 기지금속의 소성유동을 억제하여 기계적 파괴 및 응착에 의한 마모를 저하시켰기 때문이라고 생각된다.

Fig. 2는 접촉하중의 변화에 따른 시험편의 마모횡단면의 조직관찰 사진으로, 20 N의 하중에서는 약 5~10 μm 내외의 표면경화층을 관찰할 수 있었으며, 하중이 증가할수록 소성유동층의 변화폭이 크게 되는 것으로 나타났다. 80 N의 경우 약 20~30 μm에서 소성유동에 의한 균열 생성으로 마모탈락편이 형성될 수 있는 균열이 발달된 것을 확인할 수 있었다. 이는 사진(d)의 마모감량과 연관시켜 볼 때, 소성유동층이 발생하는 영역의 크기 즉, 마모표면 아래 subsurface zone의 영역의 깊이와 관계하고 있음을 알 수 있었으며[17], 경도가 가장 큰 No.3의 경우 소성유동에 대한 저항이 크게 나타나 보다 깊은 subsurface zone에서 마모 균열이 성장된 것으로 생각된다. 소성유동에 따른 변형층 박리 마모는 마모표면에 작용하는 전단응력의 증가에 기인한 것으로서, subsurface zone 내의 소성변형층의 발달로서 나타나는 ductile shear mechanism으로 설명할 수 있다[18]. 이러한 조건에서는 마모표면으로부터 크게는 수십 μm 깊이에 균열을 생성시켜 하중이 증가함에 따라 마모표면과 평행하게 진행하다가 결국 마모표면과 만나는 순간 마모탈락편을 형성하게 된다. 따라서 본 실험의 subsurface zone의 관찰결과는 소성변형층이 접촉하중이 증가함에 따라 증가함을 보이고 있으며 subsurface zone의 소성변형층 증가는 모두 전단응력의 반복적 현상에 의한 가공경화의 축적으로, 이들 현상 역시 ductile shear mechanism으로 설명할 수 있다. 또한 사진(b)와 (c)에서 마모표면층에 WEA(white etched area)층이 관찰되여 이는 마모에 의한 마모표면에서 발생된 마찰열에 기인한 산화물로 생각되어 이를 마모탈락편의 EDX분석에서 재차 고찰하고자한다.

Fig. 3은 20 N과 80 N의 접촉하중에서 입도 크기가 10 μm인 복합재료의 TiB_2 부피 분율에 따른 마모표면을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 마모표면 균열의 발생 및 표면 조도는 접촉하중의 크기에 직접적으로 관계

하는 것임을 알 수 있다. 저하중에서 부분적인 소성변형 영역과 함께 연삭골(groove)들이 마모방향으로 형성되어 있어[19] 연삭마모와 응착마모가 혼합된 형태로 마모가 진행되고 있으며, 고하중으로 갈수록 마모탈락편(wear debris)의 탈락 흔적이 깊고 넓게 관찰되며 표면 조도도 상당히 격렬해짐을 알 수 있다. 이는 접촉하중 증가에 따라 마모감량이 증가한 현상을 잘 설명해준다. 또한 동일 하중에서 TiB_2 부피 분율이 낮은 복합재료의 마모면은 변형층 박리 마모와 가공경화가 상당량 진행된 판상 형태의 마모입자에 의한 균열이 동시에 발생된 것이 관찰되었다. 이는 고하중에서 강화입자가 가해진 하중을 지탱하지 못하고 마모표면 직하에서 파괴되며 입자에 의한 강화효과를 내지 못한 것에 기인한 것이라 사료된다. 반면, No.3 시험편의 마모표면은 강화상에 의해 패어진 연속적인 groove들과 함께 마모에 의해 경화된 판상형의 적층 부위가 관찰되어 고하중에서도 연삭마모와 변형층 박리 마모가 동시에 진행되고 있음을 알 수 있으며, 다소 변형층 박리 마모가 우세한 것으로 생각된다.

Fig. 4는 마모실험 후 복합재료의 마모표면에서 채취한 마모탈락편으로서, 20 N에서는 80~100 μm 정도의 크기를 나타냈으나, 80 N에서는 약 150~200 μm에 이르러 하중이 증가할수록 마모탈락편의 크기가 증가하였다. 또한 마모탈락편의 형상은 round형과 판상(flake-like) 이 혼합되어 있었고 고하중일수록 판상 형태로 발전되는 것으로 미루어, 앞서 제시한 ductile shear mechanism에 기인한 마모탈락현상을 확인할 수 있었다. 한편 앞서 WEA층의 확인과 표면층의 마모현상 전이조사를 위하여 마모탈락편의 EDX 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

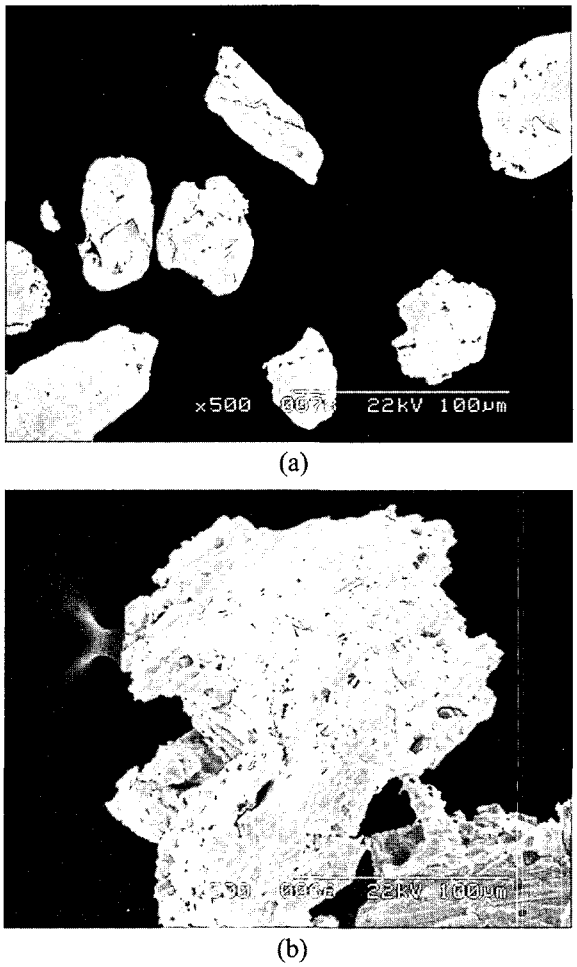

Fig. 4. SEM micrographs of wear debris of No.3 specimen (×500); (a) 20 N and (b) 80 N.

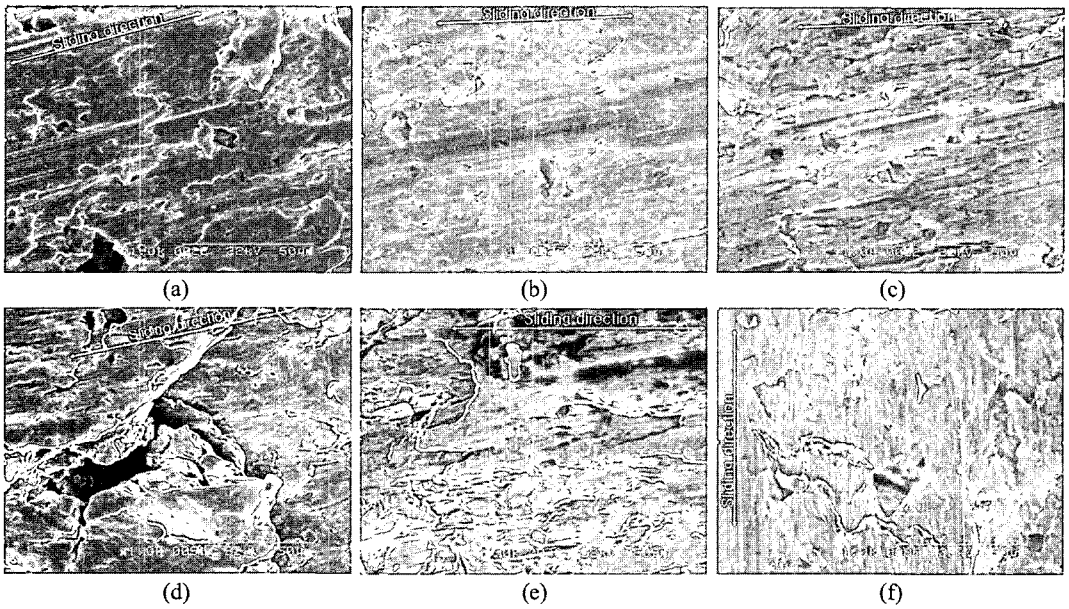

Fig. 3. SEM micrographs of worn surfaces (×1,000); (a) No.1, 20 N (b) No.2, 20 N (c) No.3, 20 N (d) No.1, 80 N (e) No.2, 80 N (f) No.3, 80 N.

Fig. 5는 No.3 시험편의 하중변화에 대한 마모실험 후의 마모탈락편에 대한 EDX 분석 결과를 나타내고 있다. 강화상의 원소인 B는 분석 결과 그 양이 미미하여 나타내지는 못했지만, 하중이 증가할수록 강화상의 원소인 Ti와 기지원소인 Cu가 증가하고 있는 반면, O는 감소하는 것으로 나타났고, 저하중일수록 Fe가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이들 결과로부터 저하중의 경우 마찰계수 결과에서 알 수 있었듯이, 초기 연삭마모후 표면조도 감소와 접촉하중에 따라 융착마모로 전환되어 상대 시험편의 Fe 원소가 마모탈락편에 융착된 것으로 생각된다. 또한 O의 감소현상은 융착마모가 40 N 이하 저하중에서 발달된 것으로 생각할 수 있고, 따라서 저하중에서 발생한 마모탈락편은 마모표면에 형성된 산화물층으로부터 떨어져 나온 것으로 추측된다. 그러나 고하중의 경우 격렬한 소성유동에 따른 subsurface zone내 미소균열의 합체에 의한 판상 박리로 모재로부터 직접 떨어져 나온 것으로 급격한 마모가 일어난 것으로 생각된다. 이 같은 결과는 하중이 증가할수록 기지조직으로부터 TiB_2 입자의 이탈이 증가하면서 강화 효과에 의한 기지의 변형 억제효과가 감소되고 이에 마모감량이 증가하는 현상을 잘 설명해준다. 또한, 마모탈락편에서 Ti의 peak는 복합재료의 기지내에 미세하게 분산되어 있던 TiB_2가 마모실험에 의한 마모표면 아래의 영역의 금속유동, 소성변형, 가공경화의 연속적인 결과로[20], 이로 인하여 마모표면에서 이들 TiB_2가 분리되거나, 복합재료 내에 고용되어 있던 것이 나타난 것으로 생각되어 진다. 이들 TiB_2 입자와 부피 분율에 따른 내마모성은 기지조직과의 정합성이 주요인자로서, 본 연구의 경우 TiB_2 입자와 Cu 기지조직과 정합구조를 유지하면서 TiB_2 입자의 크기와 분포가 미세하고 균일할수록 외부 접촉응력으로 유발되는 전위증식, 이에 따른 강화현상과 소성변형에 의한 미소공동 발생과 합체가 마모 탈락편 형성으로 이어져 이를 복합재료의 마모기구로 설명할 수 있다.

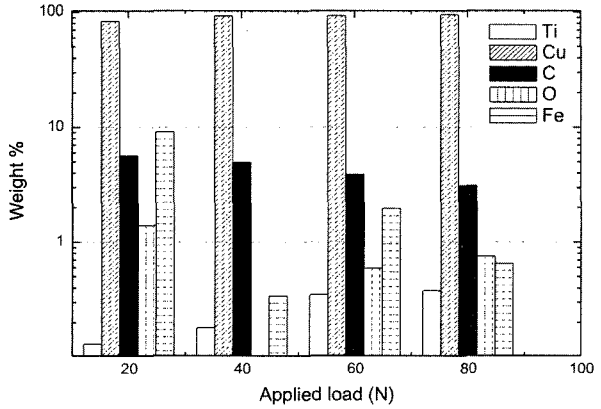

Fig. 5. EDX analysis on wear debris of No.3 specimen at applied loads

4. 결 론

입도 크기와 부피 분율 변화에 따른 Cu-TiB_2 복합재료의 마모거동은 TiB_2 입도의 영향보다는 부피 분율의 영향이 큰 것으로 조사되었다. 특히 10 μm, 5 vol%의 No.3 시험편에서 가장 우수한 내마모 특성을 지니고 있음을 알 수 있었고, 이는 적당한 크기의 입도와 균일분포에 기인한 소성유동저항성 증가가 내마모성을 향상 시킨 것으로 생각된다. 또한 40 N 이하의 저하중에서는 융착마모거동이 주요 마모기구였으며, 이를 마모탈락편의 EDX Fe 분석 결과로부터 알 수 있었다. 80N의 고하중에서는 소성변형층의 박리현상이 주도하는 소성유동에 의한 마모현상으로서, 마모표면하 subsurface zone의 가공경화 영역에서 미세공공과 미소균열이 발생하고, 접촉하중이 증가할수록 이들 결함이 합체, 성장하여 결국 마모탈락편으로 진행되는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Y. J. Kwon, M. Kobashi, T. Choh and N. Kanetake, J. Japan Inst.Metals., **65**(4), 273 (2001).
2. J. S. Lee, N. J. Kim, J. Y. Jung, E. S. Lee and S. A., Scripta Materialia, **39**(8), 1063 (1998).
3. Q. Xu, X. Zhang, J. Han, X. He and V. L. Kvanin, Materials letters, **57**, 4439 (2003).
4. V. Y. Gertsman, R. Birringer, R. Z. Valiev and H. Glieter, Scripta metall. matter, **30**(2), 229 (1994).
5. S. Liang, L. Fang and Z. Fan, Mater. Sci. Engng. A, **374**, 27 (2004).
6. S. I. Hong and M. A. Hill, Scripta Mater., **44**, 2509 (2001)
7. J. S. Song and S. I. Hong, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **40**, 1062 (2002).
8. Z. Q. Li and T. B. Chen, Materails Characterization, **49**, 67 (2002).
9. V. Y. Gertsman, R. Birringer, R. Z. Valiev and H. Glieter, Scripta metall. matter, **30**(2), 229 (1994).
10. R. Z. Valiev, E. V. Kozlov, Yu. F. Ivanov, J. Lian, A. A. Nazarov and B. Baudelet, Acta metall. mater., **42**(7), 2467 (1994).
11. A. B Lebedev, Yu. A. Burenkov, A. E. Romanov, V. I. Kopylov, V. P. Filonenko and V. G. Gryaznov, Mater. Sci. Engng. A, **203**(1-2), 165 (1995).
12. E. Maire, D. S. Wilkinson, J. D. Embury and R. Fougeres, Acta Mater., **45**(12), 5261 (1997).
13. J. Gurland, Acta Metall., **20**(5), 735 (1972).
14. K. M. Kang and J. U. Choi, Kor. J. Mater. Res., **14**(1), 74 (2004).
15. A. T. Alpas, Metall., Trans., **25A**, 969 (1994).
16. P. H. Shipway, A. R. kennedy and A. J. Wilkes, Wear, **216**, 160 (1998).
17. K. M. Kang and J. T. Song, Wear, **140**, 119 (1990).
18. N. P. Suh, Wear, **25**, 111 (1973).
19. J. P. Tu, W. Rong, S. Y. Guo and Y. Z. Yang, Wear, **255**, 832 (2003).
20. K. M. Kang and S. J. Kim, Kor. J. Mater. Res., **3**(1), 58 (1993).