



## AlSiMg/TiC 복합 용사피막 : 마모 특성(Ⅱ)

양병모\* · 변응선\*\* · 박경채\*

\*경북대학교 금속공학과

\*\*한국기계연구원 표면기술연구부

### Thermal Sprayed AlSiMg/TiC Composite Coatings : Wear Characteristic (Ⅱ)

Byeong Mo Yang\*, Eung Sun Byon\*\* and Kyeong Chae Park\*

\*Departments of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

\*\*Dept. of Surface Engineering, Korea Institute of Machinery and Metals, Changwon 641-010, Korea

#### Abstract

The wear behavior of thermal sprayed AlSiMg-40TiC composite coatings were studied as a function of load and sliding velocity under unlubricated conditions. Experiments were performed using a block-on-ring(WC-6wt%Co, Hv 1500) type. The tests were carried out at various load(3~125.5N) and sliding velocity(0.5~2.0m/s). Three wear rate regions were observed in the AlSiMg-40TiC composite coatings. The wear rate in region I at low load (less than 8N) were less than  $1 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$ . Low wear rates in region I resulted from the load-bearing capacity of TiC particles. The transition from region I to II occurred when the applied load exceeded the fracture and pull-out strength of the particles. The TiC fractured particles trapped between the specimen and the counterface acted as third-body abrasive wear. The subsurface layer worn surface in region II was composed of the mechanically mixed layer (MML). The wear rate increase abruptly above a critical load (region III). The high wear rate in region III was induced by frictional temperature and involves massive surface damage.

(Received July 24, 2000)

Key Words : Wear mechanism, Al-base composite, TiC, Mechanically mixed layer

#### 1. 서 론

세라믹 강화 복합 Al합금은 무게가 가벼우면서도 세라믹 강화에 의해 내마모성이 우수하여, 내마모성이 우수하면서 경량의 소재가 요구되는 운송 기기의 부품 재료로 사용이 증가하고 있다. 따라서 세라믹 강화 복합 Al합금에 대한 마찰이나 마모특성 연구를 통한 마모기구를 이해하는 것이 매우 중요하다.

세라믹 강화 복합 Al합금의 마찰 및 마모거동은 기지재료와 강화재료의 성질에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 지금까지 세라믹 강화 복합 Al합금에 대한 마찰 및 마모특성은 여러 기지재료(순수 Al

에서 상용 Al합금까지)에 다양한 강화재료( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, TiC,  $\text{B}_4\text{C}$  등)의 첨가량을 변화시켜 제조한 복합 재료에 대해서 많은 연구가 이루어 졌다<sup>1~15)</sup>. 그렇지만 이들 복합재료들은 주로 주조법이나 분말법으로 제조된 것으로, 최근 새로운 세라믹 강화 복합재료의 제조 방법으로 연구되고 있는 용사에 의해 제조된 복합 용사 피막에 대한 마찰 및 마모거동에 대한 연구는 거의 이루어지지 못한 편이다. 따라서 용사에 의해 제조된 세라믹 강화 복합 Al합금 피막에 대한 마찰과 마모거동에 대한 이해가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 AlSiMg/40TiC 복합용사피막에 대하여 마모속도와 마모하중을 변화시켜 마모시험을 행하고, 그 시험을 통하여 마모거동을 규명하였다.

## 2. 실험방법

마모시험은 Al-13Si-3Mg/40TiC 용사피막과 상대 재료로 초경(WC-6wt%Co, Hv 1500) 디스크를 사용하여 마모하중(3~125.5N)과 마모속도(0.5~2m/s)를 변화시켜 시험하였다. 마모율은 마모방향으로 생성된 마모흔적의 길이를 광학현미경으로 측정 한 후 식(1)로 계산하였다. 얻어진 결과는 상용 프로그램인 Origin(Microcal software社)을 이용하여 3차원 적으로 정리하였다. 이때 gridding method는 correlation을 사용하였으며 gridding parameter는 search radius : 2, smoothness : 0.8로 하였다.

$$\text{Volumetric wear rate (mm}^3/\text{m)} = B (b^3/8rL) \quad (1)$$

$r$  : radius of rotor (mm)     $B$  : thickness of rotor (mm)  
 $b$  : wear trace (mm)         $L$  : wear distance (m)

마모 표면의 관찰은 주사전자현미경(SEM)을 이용하였으며, 성분조사는 EDX를 이용하였다. 그리고, 마모 표면 아래층(subsurface)의 성분분석과 균열발생 여부를 관찰하기 위하여 시편전체를 hot mounting 한 후 마모 표면의 중심부까지 polishing하여 주사전자현미경과 EDX를 이용하여 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 마모하중의 변화에 따른 마모율의 변화

Fig. 1은 AlSiMg-40TiC 용사피막에 대해서 마모 하중을 변화시켜 마모시험 한 결과를 나타낸 것이다. 마모하중의 변화에 따른 마모율의 변화는 세 개의 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 이러한 세 개의 영역은 먼저, 저 하중 범위에서  $1 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$  이하의 낮은 마모율을 보이는 영역 I과 영역 I에 비해서 하중의 증가에 따른 마모율의 증가가 둔화된 영역 II, 그리고 마모하중 100N 이상의 고 하중에서 급격하게 마모율이 증가하는 영역 III으로 나눌 수 있다. 여기서 영역 II의 직선은 통계학의 추정회귀직선법을 이용하여 구하였다. 이러한 세 영역은 세라믹 강화 복합 Al합금에서 나타나는 일반적인 마모거동이다. 이와 달리 일반 금속의 경우는 영역 I이 없이 영역 II와 영역 III의 두 영역으로 나타나는 것으로 보고되고 있다. Al합금의 경우는 영역 II에서 영역 III로의 천이 하중도 세라믹 강화 복합 Al합금에 비교해서 낮은 하중에서 천이가 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>5)</sup>

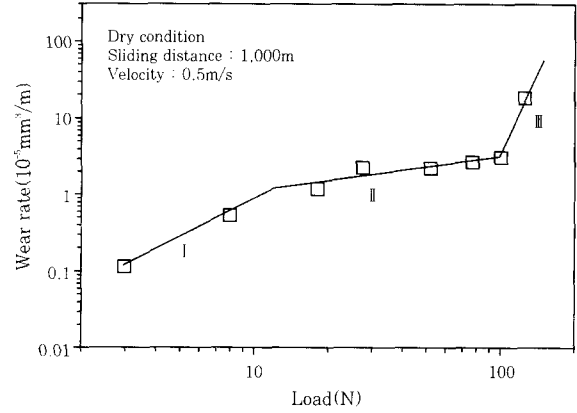


Fig. 1 Variation of wear rate with load for AlSiMg-40TiC plasma sprayed coatings.

#### 3.1.1 영역 I의 마모거동

Fig. 2의 마모하중 3N에서 마모시험 한 마모 표면을 관찰한 사진에서 TiC 입자가 돌출되어 있는 것은 연질의 기지가 마모되면서 경질의 TiC 입자가 돌출된 것으로 판단된다. 즉, 영역 I의 낮은 마모율은 TiC 경질입자가 마모하중을 지지하여 기지를 보호하기 때문으로 판단된다. 그러나 마모하중 8N의 경우, 마모 표면의 일부에 막이 형성된 것을 볼 수 있다. 이러한 막은 Fig. 3의 EDX 면 분석한 결과, W과 Co로 이루어진 것으로 상대재료인 초경 디스크에서 유입된 것임을 알 수 있다. 따라서 막의 형성은, 돌출된 TiC 입자에 의해 상대재료인 초경 디스크의 표면이 마모되는 second-body 연삭마모(abrasive wear)가 일어나고, 이렇게 연삭마모 된 미세 마모입자들이 마모하중에 의해 AlSiMg-40TiC 용사피막의 마모 표면에 적층되어 막을 형성한 것으로 판단된다. TiC 입자에 의해 초경이 연삭 되는 것은 초경(1500Hv)에 비해 TiC(3000Hv)의 경도가 훨씬 크기 때문으로 생각된다. 영역 I에서 발생하는 마모의 모식도를 Fig. 4에 나타내었다.

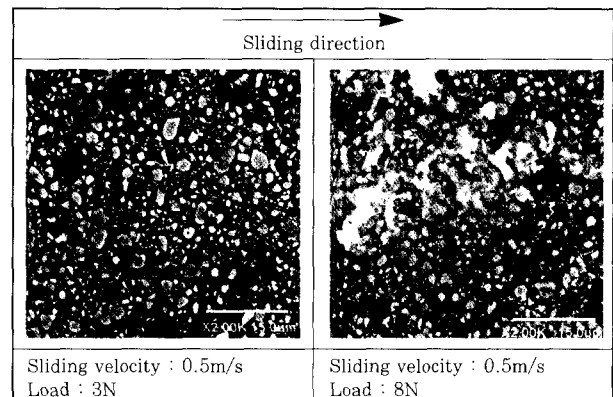


Fig. 2 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region I.

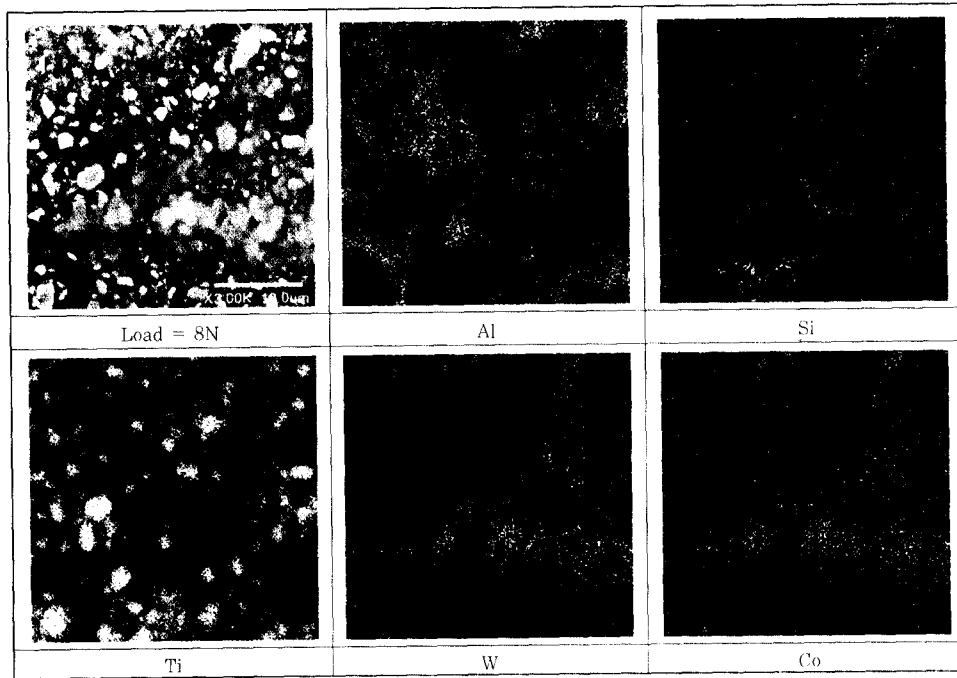


Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region I and EDX mapping.

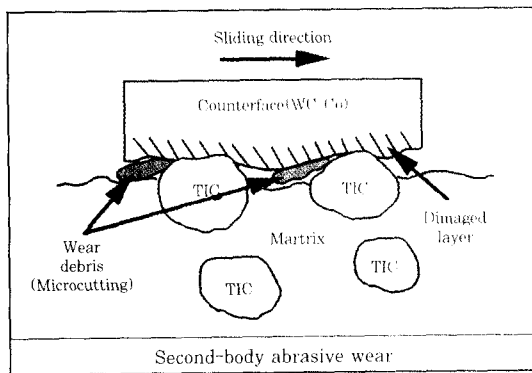


Fig. 4 Schematic illustrations of wear mechanism of AlSiMg-40TiC coatings in region I.

3.1.2 영역 II의 마모거동

Fig. 5에서 보는 것처럼, 영역 II에서는 마모하중이 TiC 입자의 파괴강도 이상으로 증가함에 따라, 기지를 보호하던 TiC 입자가 파괴되거나 접촉면에 가해지는 전단응력에 의해 기지에서 탈락되어 AlSiMg 기지는 더 이상 보호받지 못하고 상대재료와 직접 접촉하게 된다. 이때 발생하는 마모는 파괴되거나 탈락된 TiC 입자의 일부가 마모 접촉면에 끼어서 상대재료와 시험재를 마모시키는 third-body 연삭마모(abrasive wear)와 연질의 기지와 상대재료가 접촉하여 연질의 기지재가 마모되는 응착마모(adhesiv wear)가 복합적으로 일어나게 된다. 이렇게 연삭마모와 응착마모에 의해서 발생된 마멸입자들은 마찰열과 마모하중에 의

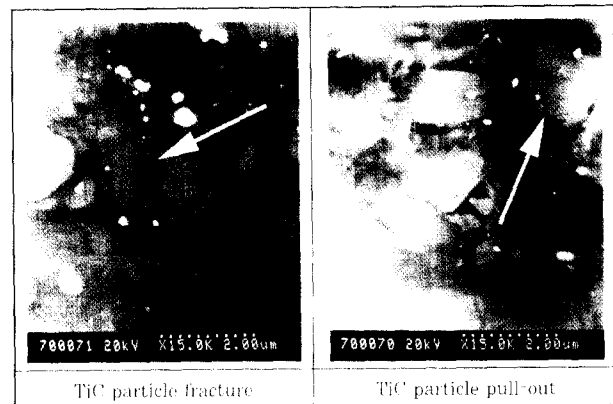


Fig. 5 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region II (27.5N, 0.5m/s).

해 마모 표면에 적층되어 기계적 혼합층(MML : mechanically mixed layer)을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 MML이 시험편을 보호함에 따라, 영역 II에서 마모하중의 증가에 따른 마모율의 증가정도가 달라지게 되는 것으로 판단된다. MML은 마모하중이 증가함에 따라 그 층의 두께도 증가하는 경향을 보이고 있으며, Fig. 6에서 보는 것처럼 낮은 하중(27.5N)의 경우는 MML이 박리되는 형태로 마모가 진행되다가, 하중이 증가하여 MML의 두께가 증가할 경우에는 상대재료에 의해 MML이 마모되는 second-body 연삭마모(abrasive wear) 형태로 마모가 일어나는 것으

로 판단된다. 이것은, 기존의 연구에서 MML의 두께가 두꺼울 경우에도 마모는 박리되는 형태로 마모가 일어나는 것과는 다른 마모형태를 보여주고 있다. Fig. 7은 52N의 마모하중에서 시험한 시편의 단면을 관찰한 것으로 상대재와 기지재의 마모입자들이 혼합되어 층을 이루고 있는 MML이 형성된 것을 보여주고 있다. 이 MML은 W, Co와 Si으로 이루진 것을 알 수 있는데, 특이한 것은 기지재 중에는 Si만이 검출되는 것이다. 이러한 MML의 형성과정과 특성에 관한 것은 더 많은 연구가 이루어져 할 것으로 생각된다. Fig. 8은 영역 II에서 일어나는 마모거동을 모식도로 나타낸 것이다.

### 3.1.3 영역 III의 마모거동

영역 II에서 하중이 증가하여 임계 하중에 이르게 되면 마모율이 급격하게 증가하여 영역 III으로 바뀌게 된다. 영역 III에서의 마모 표면은 지금까지와 달리 Fig. 9의 마모 표면 사진에서 보는 것처럼 크게 변형된 것을 관찰할 수 있다. 또한 이 마모 표면을 EDX 선 분석한 Fig. 10의 결과를 보면 영역 II에서의 마모 표면과 달리 상대재료의 성분이 관찰되지 않고 있다. 이것으로 영역 III에서는 MML이 형성되지 않음을 확인할 수 있다. Zhang과 Alpas, Singh과 Alpas<sup>5, 8, 16)</sup>는 Al합금과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화 알루미늄합금에 대한 마모거동에 관한 연구에서, 영역 II에서 영역 III으로의 전이는 접

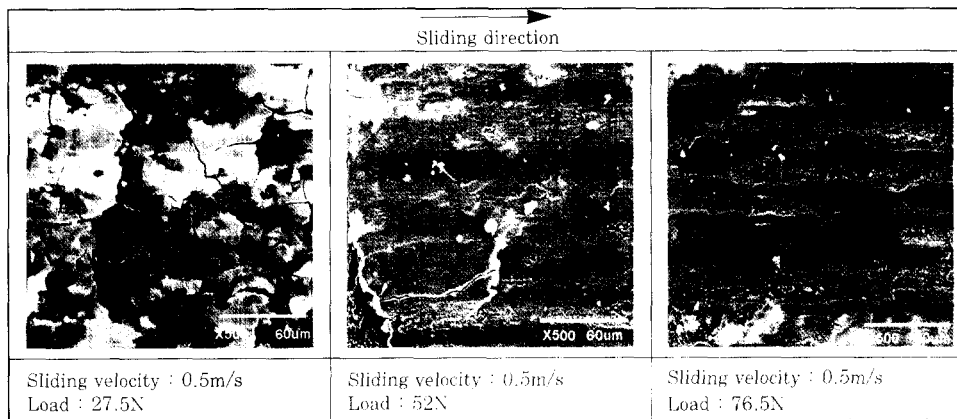


Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region II.

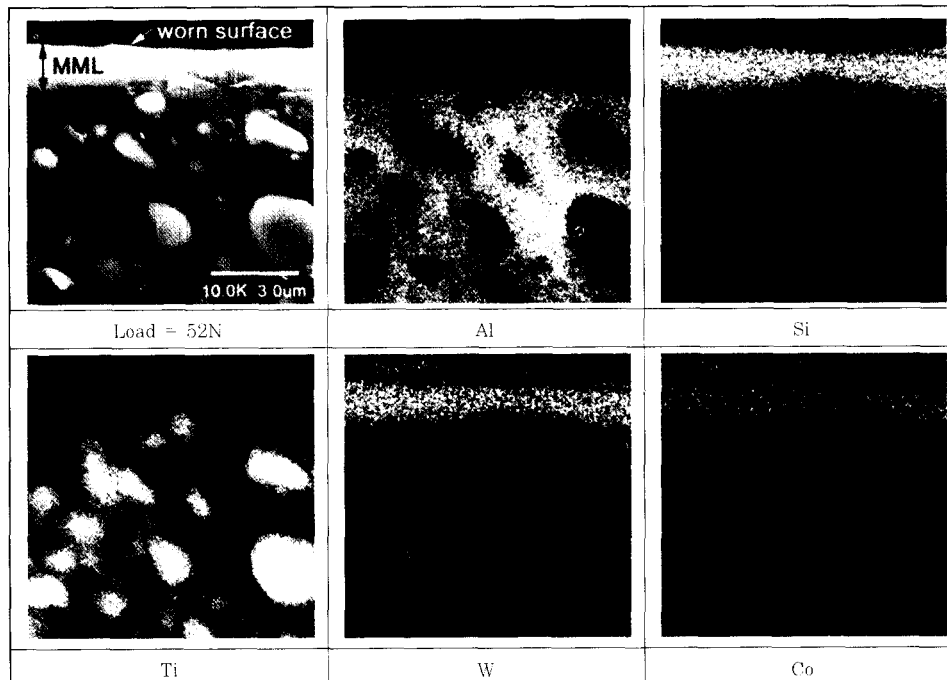


Fig. 7 SEM micrographs of longitudinal cross-section of worn surface on AlSiMg-40TiC coatings and EDX mapping.

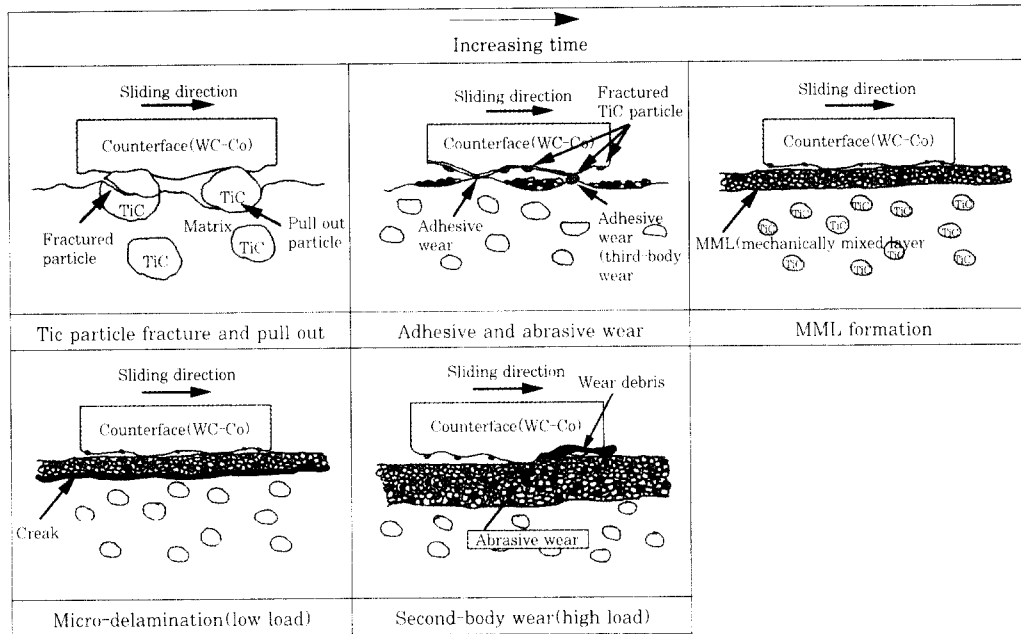


Fig. 8 Schematic illustrations of wear mechanism of AlSiMg-40TiC coatings in region II.

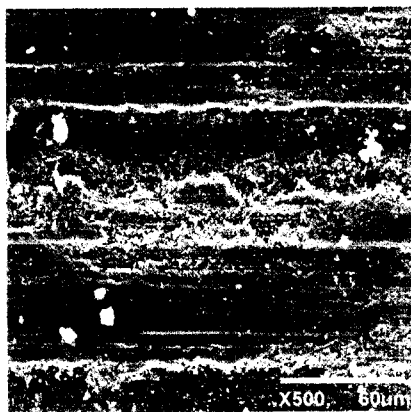


Fig. 9 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region III (125.5N, 0.5m/s).

측면의 온도가  $T/T_m = 0.4 \sim 0.5$  ( $T_m$  : 용점)에 도달했을 때 천이가 발생한다고 제안하였다. 또한 마모시험 장치에 시험편을 냉각시키는 장치를 부착했을 때 천이하중이 크게 증가한 결과도 보고하였다. 이와 같이 영역 III으로의 천이는 마찰열이 큰 요인이 되는 것으로 판단된다. 따라서 영역 III에서는 큰 하중으로 인해 마모 표면에 마찰열이 심하게 발생되고, 이러한 마찰열은 마모 표면층을 약하게 만든다. 이렇게 마찰열에 의해 약해진 표면층에 표면층을 소성 변형시킬 수 있을 정도의 큰 마모하중이 가해지면 표면층은 크게 소성 변형되면서 부서져 마모율이 급격하게 증가하게 되는 것으로 판단된다. 따라서 상대재료나 시험재료의 미세한 마멸입자의 응착에 의해 형성되는 MML은 형

성되지 못한 것으로 생각된다.

Fig. 11은 영역 III에서 일어나는 마모거동을 그림으로 나타낸 것이다.

### 3.2 마모속도와 마모하중 변화에 따른 마모율의 변화

마모속도의 변화에 따른 마모율의 변화를 알아보기 위하여 마모하중(3~125N)과 마모속도(0.5~2m/s)를 변화시켜 마모 시험하였다. 이렇게 얻어진 결과는 Fig. 12에 3차원적으로 나타내었다.

마모속도 변화에 따른 마모율의 변화를 보면, 낮은 하중(3~25N)에서는 마모속도가 느린 경우가 빠른 경우에 비해서 더 큰 마모율을 보이고 있는 것은 시험편의 접촉면에 가해지는 접촉하중이 회전속도가 느릴 경우가 빠른 경우보다 실 접촉하중이 더 크기 때문으로 판단된다. 또한 TiC 강화입자의 파괴나 탈락이 일어나는 하중에서는 탈락이나 파괴된 입자들이 마모 접촉면에 끼는 정도가 회전속도가 빠른 경우보다는 느린 경우가 더 크기 때문으로 생각된다. 그러나 하중이 60N이상으로 증가하게 되면 반대로 마모 속도가 빠른 경우가 더 큰 마모율을 보이고 있다. 이것은 앞서 언급했듯이 큰 마모 하중과 빠른 마모 속도로 두 재료가 마찰하게 되면 접촉면에 높은 마찰열이 발생되고, 이 마찰열로 인해 마모 표면층이 약화되고 약해진 표면층에 가해지는 높은 하중에 의해 표면층이 파괴되면서 마모율이 높게 나타난 것으로 생각된다.

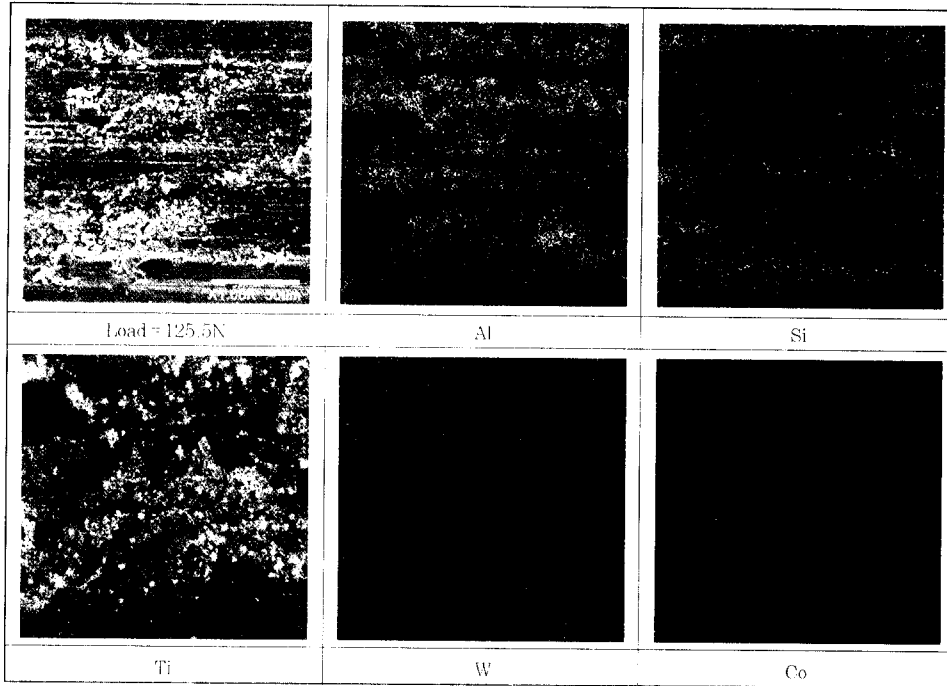


Fig. 10 SEM micrographs of worn surfaces of AlSiMg-40TiC coatings in region III and EDX mapping

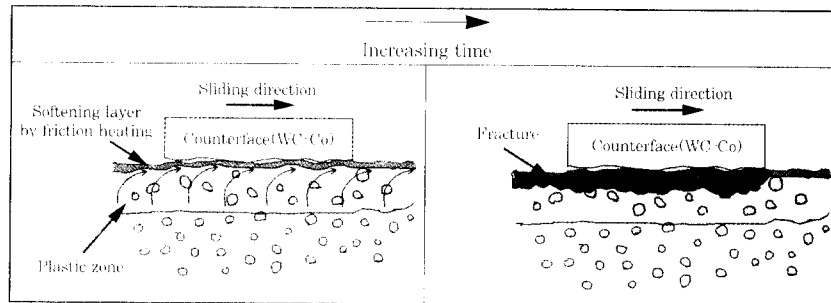


Fig. 11 Schematic illustrations of wear mechanism of AlSiMg-40TiC coatings in region III.

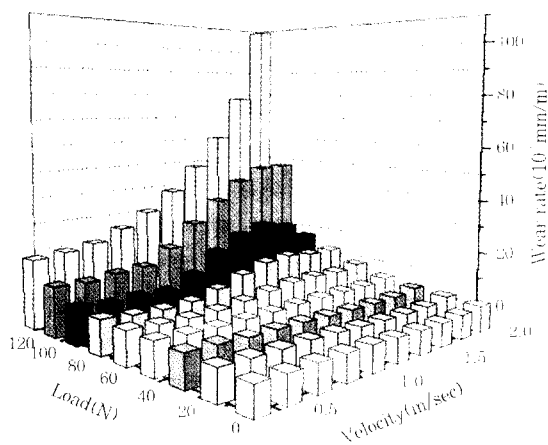


Fig. 12 Variation of wear rate with load and sliding velocity for AlSiMg-40TiC coatings.

#### 4. 결 론

AlSiMg-40TiC 복합 용사피막을 초경(WC-6wt%Co, Hv1500) 디스크를 사용하는 block on disk 방식의 마모시험 장치로 마모하중(3~125.5N)과 마모속도(0.5~2m/s)를 변화시켜 마모시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마모속도를 0.5m/s로 일정하게 하고 마모하중을 변화시켜 마모시험 한 결과 마모하중의 변화에 따른 마모율의 변화를 log scale로 나타내면 세 영역으로 나타났다.

2. 낮은 마모하중에서 나타나는 영역 I의 마모율은 연질의 지지층이 마모되면서 돌출된 경질의 TiC 입자가 기지를 보호함으로써 아주 적은 값을 보였다. 이때

돌출 된 경질의 TiC 입자에 의한 상대재료인 초경 디스크가 마모되는 second-body 연삭마모가 일어나게 된다.

3. 마모하중의 증가에 따른 마모율의 증가가 둔화되는 중간하중 구간의 영역 Ⅱ에서는 마모하중이 증가함에 따라 기지를 보호하던 TiC 입자가 파괴되거나 탈락된다. 이렇게 파괴되거나 탈락한 일부 TiC입자가 마모 접촉면에 끼어서 상대재료인 초경과 시험편을 마모시키는 third-body 연삭마모와 기지와 디스크간의 응착마모가 동시에 일어난다. 이러한 마모에 의해 발생된 미세한 마모입자들이 접촉면에 적층되어 MML을 형성한다. 이러한 MML이 시험편을 보호하여 마모율의 증가가 둔화되었다. MML의 두께가 얇을 경우엔 MML이 박리되면서 마모가 일어나지만, MML의 두께가 두꺼운 마모하중이 큰 경우엔 디스크에 의해 MML이 마모되는 second-body 연삭마모가 일어났다.

4. 마모율이 급격하게 증가하는 높은 마모하중의 영역 Ⅲ에서는 높은 하중으로 인해서 마모면에서 마찰열이 많이 발생되고, 이러한 마찰열은 마모 표면층을 약화시키게 된다. 이렇게 약화된 표면층은 높은 마모하중에 의해서 소성변형 되면서 파괴되어 마모율이 급격하게 증가하였다.

5. 마모속도와 마모하중의 변화에 따른 마모율의 변화는 낮은 마모하중에서는 마모속도가 느릴 때가 빠를 때보다 마모율이 크고, 큰 마모하중에서는 마모속도가 빠를 때가 느릴 때보다 마모율이 크다. 낮은 마모하중에서 마모속도가 느릴 때 마모율이 큰 이유는 마모속도가 느릴 때가 접촉면에 가해지는 접촉하중이 더 크고, 또한 접촉면에 마모입자가 끼일 경우가 크기 때문이다. 그리고, 큰 마모하중에서 마모속도가 빠를 때 마모율이 큰 이유는 마찰열에 의한 영향으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1 B. N. Pramila Bai, M. Narayan and M. K. Surappa: Dry Sliding Wear of Al Alloy 2024-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Metal Matrix Composites, *Wear* 181(1995), pp.563-570
- 2 T. Alpas and J. Zhang: Wear Rate Transitions in Cast Aluminum-Silicon alloys Reinforced with Si Particle, *Scripta Metall Mater.* 26(1992), pp.505-509
3. M. Roy, B. Venkataraman, V. V. Bhanuprasad, Y. R. Mahajan and G. Sundararajan: The Effect of Particulate Reinforcement on the Sliding Wear Behavior of Aluminum Matrix Composites, *Metall. Trans. A*, 23A(1992), pp. 2833-2847
- 4 A. Wang and H. J. Rack: Transition Wear Behavior of SiC-Particulate and SiC-Whisker Reinforced 7091 Al Metal Matrix Composites, *Materials Science and Engineering, A*, A147(1991), pp.211-224
5. J. Zhang and A. T. Alpas: Wear Regimes and Transitions in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate-Reinforced Aluminum Alloys, *Materials Science and Engineering, A*, A161, (1993), pp.273-284
6. S. Economou, M. De Bonte, J. P. Celis, R. W. Smith and E. Lugscheider: Processing, Structure and Tribological Behaviour of TiC-Reinforced Plasma Sprayed Coatings, *Wear*, 220(1998), pp.34-50
7. W. Ames and A. T. Alpas: Wear Mechanisms in Hybrid Composites of Graphite-20 Pct SiC in A356 Aluminum Alloy (Al-7Pct Si-0.3Pct Mg), *Metallurgical and Materials Transaction, A*, 26A(1995), pp.85-98
8. J. Singh and A. T. Alpas: High-Temperature Wear and Deformation Processes in Metal Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transaction A*, 27A(1996), pp.3135-3148
9. Yoshiro Iwai, Hidetomo Yoneda, Tomomi Honda: Sliding Wear Behavior of SiC Whisker-Reinforced Aluminum Composite, *Wear*, 181-183(1995), pp.594-602
10. S. Wilson, A. T. Alpas: Effect of Temperature on the Sliding Wear Performance of Al Alloy and Al Matrix Composites, *Wear*, 196(1996), pp.270-278
11. B. Venkataraman and G. Sundararajan: The Sliding Wear Behaviour of Al-SiC Particulate Composites, *Acta Mater.*, 44-2(1996), pp.451-460
12. Zhenfang Zhang, Liangchi Zhang, Yiu-Wing Mai: The Running-in Wear of a Steel/SiCp-Al Composite System, *Wear*, 194(1996), pp.38-43
13. X. T. Li and K. N. Tandon: Amorphization and Precipitation within the Amorphous Layer Induced by Dry Sliding Wear of an Al-Si/SiCp Composite Material, *Acta Mater.*, 44-9(1996), pp.3611-3624
14. R. K. Galgali, H. S. Ray, and A. K. Chakrabarti: Wear characteristics of TiC Reinforced Cast Iron composites, *Materials Sci. and Tech.*, 14(1998), pp.810-815
15. C. S. Oh, Y. G. Lee and H. Y. Ra: Wear Properties of 7075 Al Alloy/SiCp Composite (Ⅱ) : Formation and Properties of Mechanically Mixed Layer, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 137(1999), pp.186-194
16. J. Zhang and A. T. Alpas: Transition between Mild and Sever Wear in Aluminum Alloy, *Acta Mater.*, 45-2(1997), pp. 513-528