

## 주조용 알루미늄합금의 $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$ 용사층에 대한 마멸특성 평가

채영훈 · 김석삼\*

경북대학교 기계공학과 대학원, \*경북대학교 기계공학부

### Evaluation of Wear Characteristics for $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$ Sprayed on Casted Aluminum Alloy

Young-Hun Chae and Seock Sam Kim\*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, 702-701

\*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, 702-701

**Abstract**—The wear behavior of  $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$  deposited on casted aluminum alloy (ASTM A356) by APS (Air Plasma Spray) against SiC ball has been investigated in this work. Wear tests were carried out at room temperature. The friction coefficient of  $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$  coating is lower than that of pure  $Al_2O_3$  coating (APS).  $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$  coating indicated the existence of the optimal coating thickness. It is found that voids and pores of coating surface resulted in the generation of cracks, and the cohesive of splats and the porosity of surface play a role in wear characteristics. It is suggested that the mismatch of thermal expansion of substrate and coating play an important role in wear performance. Tension and compression under thermo-mechanical stress may be occurred by the mismatch between thermal expansion of substrate and coating. The crack propagation above interface is observed in SEM.

**Key words**—plasma spray, wear, thermal expansion coefficient, thermo-mechanical stresses, residual stress.

#### 1. 서 론

세라믹 재료는 내마멸성, 내부식성 및 고온에서의 내산화성 때문에 특수한 기계부품에 적용이 되고 있으나, 기계가공의 난삭으로 인한 생산가액 상승과 특유의 취성때문에 기계부품에 대하여 널리 적용되지 못하고 있었다. 그러나 최근에 세라믹코팅이 가격, 생산성 및 품질측면에서 타당성을 가짐으로 기계부품등에 많이 적용되고 있다. 세라믹 코팅방법중 하나인 플라즈마 코팅은 코팅재료, 가공물의 형상 및 크기 등의 제약이 적어 많이 응용되고 있다. 내마멸성이 요구되어지는 표면에 세라믹을 코팅시킴으로써 내마멸성을 부여하여, 우주항공, 선박엔진, 강부품류 및 발전기 등에 응용되고 있다[1-3,21].

플라즈마 코팅재료중 널리 적용되고 있는  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ , WC-Co,  $TiO_2$  등이 연구의 대상이 되고 있다.  $Al_2O_3$  기지에 다른 세라믹을 첨가하여 파괴인성치 및 내

마멸성 개선한 연구 결과가 보고되었으며, 특히  $TiO_2$  첨가에 따른 기공율, 파괴인성치 및 내마멸성의 변화를 연구보고 되었다[4-6]. 트라보시스템에서 접촉형상에 따른 코팅의 특성을 조사하기 위하여, 플라즈마 코팅한  $Al_2O_3$ 에 선형접촉과 conformal 접촉(실린더와 피스톤링간의 접촉 등의 형태)에 따른 미끄럼마멸 특성을 보고되었다. 실제적인 상황에서는 선형접촉보다 conformal접촉이 많이 이용되며, 여기서 실험적으로 conformal접촉의 경우 내마멸특성이 보고되었다[3]. 또한 플라즈마 코팅에서 첨가물의 종류와 비율 변화에 따른 마찰 및 마멸특성에 대한 연구가 보고되고 있다[7]. 많은 연구자에 의해 플라즈마 코팅의 마멸기구 현상을 보고하고 있으며, 소성변형, 응착마멸, 취성파괴 및 연삭마멸 등이 플라즈마 코팅에서 주된 마멸기구로 작용되고 있다[4-6,8,20].

플라즈마 코팅의 마멸특성은 코팅의 미세조직의 형상에 많은 영향을 받고 있다. 플라즈마 코팅의 특성상 모재와

코팅간의 접착강도보다 스플레이트(splats)간의 부착성에 대한 연구 평가가 진행되고 있다. 따라서 용사조건에 따라 코팅의 미세구조조인인 스플레이트의 형상은 변화하며, 이에 따른 기계적인 특성에 대하여 연구되고 있다. 스플레이트의 형상이 스플레이트간의 접착력과 기공률의 관계를 가지고 있으며, 내마멸성에 영향을 준다. 이것은 플라즈마 용사시 용융된 입자들을 상온 또는 강제 냉각으로 인한 수축과 응고로 인해 코팅 내부에 압축잔류응력이 존재한다[9]. 이러한 잔류응력은 박리의 원인이며 코팅두께의 제한 요소로서 중요한 코팅의 특성이다.

일반 구조용 강재를 모재로 한 플라즈마 코팅에 대한 연구는 보고되고 있다. 모재를 강재로 하여 실험한 보고에 의하면, 경도가 큰 모재일수록 코팅의 내마멸성을 향상시킨다[10,21]. 플라즈마 코팅의 응용을 위하여 다양한 재료의 적합성을 검토해야 한다. 실제적인 기계부품의 재료는 강재 뿐만 아니라 알루미늄합금 등이 사용된다. 알루미늄 합금을 모재로 하여 플라즈마 코팅이 트라이볼로지 현상 규명에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

알루미늄을 기지로 한 플라즈마 코팅의 연구에 따르면  $Al_2O_3$ 에  $TiO_2$ 를 첨가되면 내마멸성이 향상되는 결과를 실험적으로 입증하였다[11]. 특히,  $TiO_2$ 를 첨가한  $Al_2O_3$  코팅의 내마멸성 증대가 보고되고 있으며,  $TiO_2$ 가 30~40 wt% 정도의 배합비일 때, 최대의 내마멸성을 가지고 있다. 이러한 결과를 이용하여, 본 실험에서는 알루미늄합금에 대한 플라즈마코팅 특성과 마멸특성을 연구자 한다. 따라서, 본 연구는 구조용 알루미늄합금 ASTM A356에 플라즈마 용사법으로  $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$ 를 용사하여, 모재의 영향과 코팅 두께 및 하중에 따른 마멸특성 및 마멸면의 마멸기구를 SEM을 이용하여 규명하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치 및 방법

마찰·마멸시험기(TOYO BALDWIN Co., EFM-3-E)를 이용하여 데이터는 컴퓨터로 입력하였다. 본 실험에서는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 회전하는 원판위에 볼을 얹어 일정한 하중으로 가압하는 전형적인 볼 온 디스크형(ball on disk type)의 마찰·마멸실험을 수행하였다.

실험과정은 초음파세척, 건조, 마찰·마멸실험, 초음파세척, 건조 및 표면거칠기측정 순으로 행하였다. 무윤활상태에서 50 N 및 100 N의 하중과  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 속도로 실험하였다. 원판의 트랙(track)부의 직경은 10 mm로

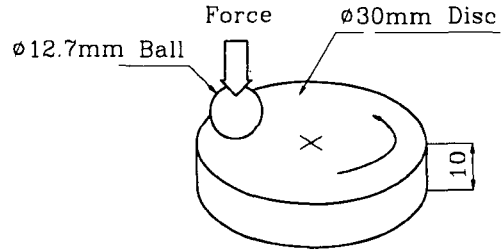


Fig. 1. Schematic illustration of ball on disk type wear test.

실험을 하였으며, 표면거칠기 측정장치(Mitutoyo Surf-500)를 사용하여 마멸부피를 계산하였다.

### 2-2. 시험편

로(furnace)에서  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ 의 코팅분말을 작은 입자로 용융시켜 부수어서 제작하였으며, 코팅 분말은 15~45  $\mu\text{m}$  정도의 불규칙한 입상(grain shape)을 가진다. 60 wt%( $Al_2O_3$ ), 40 wt%( $TiO_2$ )로 균일하게 혼합하여  $Al_2O_3$ -40% $TiO_2$ 의 분말을 준비하였다. Table 1과 같은 조건으로 용사(Hexa Plasma)하였으며, 용사한 뒤 상온에서 냉각시켰다. 코팅내부의 기공율을 5% 이하로 작업하기 위하여 용사조건을 조절하였다.

실험에 사용된 모재는 구조용알루미늄합금 ASTM A356이며, 화학적 조성은 Table 2와 같다. 시험편을 1차 연삭하여 형상 및 크기를 갈게 하고, 연마지를 #600 Cw, #800 Cw, #1000 Cw, #1500 Cw 및 #2000 Cw

Table 1. The plasma spraying parameters for Hexa plasma

Parameter	$Al_2O_3$ -40% $TiO_2$
Current [A]	500
Primary gas [l/min]	250 ( $N_2$ )
Secondary gas [l/min]	100 ( $H_2$ )
Powder carrier gas [l/min]	13 (Ar)
Powder inlet position	internal
Feed rate [g/min]	60
Stand-off distance [mm]	160

Table 2. Chemical composition(wt,%) of casting aluminum alloy

Chemical element	Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
ASTM A356	95 more	0.25	7.0	0.35	0.35	0.55	0.35

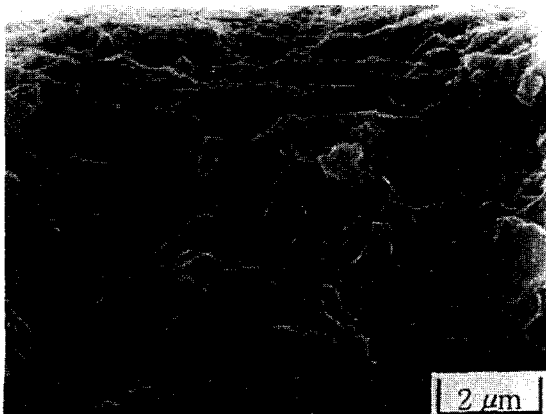
**Table 3. Mechanical properties of specimens**

	Vickers hardness, GPa	Thermal expansion coefficient, °C <sup>-1</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40%TiO <sub>2</sub>	8.50	7.0×10 <sup>-6</sup>
ASTM A356	0.93	17×10 <sup>-6</sup>
SiC	28	-

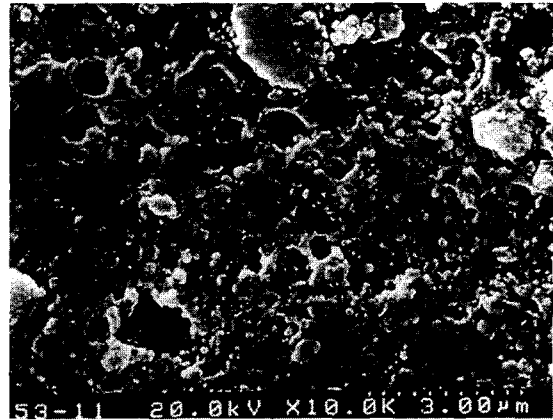
순으로 물을 분해서 가공하였으며, 시험편의 표면조도는 1 μmRmax로 연마하였다. 모든 시험편은 가공전후의 표면조도를 기준길이 8 mm로 하여 비교가 될 수 있도록 하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 하부시험편은 직경 30 mm, 두께 10 mm의 원판으로 하였다. 코팅전 시험편에 조도를 부여하기 위하여 샌드의 입도 #60, 노즐압력 3.06 kPa, 노즐직경 10 mm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 샌드블라스트(sand blasting)를 하였다. 이때 모재조도는 30 μmRmax로 측정되었다. 코팅후 표면의 열린기공(open pore)제거를 위하여 에폭시실링(epoxy sealing)을 하였으며, 실험을 위한 코팅표면은 표면조도 0.1 μmRmax로 연마(polishing)하였다.

Fig. 2는 용사표면의 전형적인 형상을 보이고 있다. 순수한 알루미늄을 용사한 구조와는 다른 형상이며, TiO<sub>2</sub>의 첨가로 인하여 스프레이트 경계의 파괴인성치를 향상시키는 원인이 된 것이다[11]. hole's pattern 결함을 미세조직으로 Fig. 3에 나타내었다. 주상조직(columnar grain)이 표면수직으로 형성하게 되며, 또한 용사 후 냉각과정에서 발생하는 응고수축으로 코팅 내부에 압축잔류응력이 발생하게 되었다[12].

상부시험편은 Fig. 1과 같이 상대적으로 마멸이 되지 않는 직경이 12.7 mm의 탄화규소(SiC)볼을 선택하였다.



**Fig. 2. Microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating.**



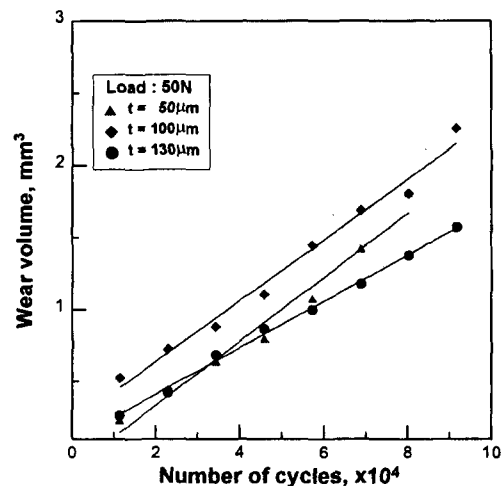
**Fig. 3. SEM photograph of hole's pattern in coating.**

시험편들의 기계적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

### 3. 실험결과

Fig. 4는 하중 50 N에서의 코팅의 두께를 달리한 마멸곡선을 나타내고 있다. 마멸량은 왕복수에 따라 선형적으로 증가하며, 코팅두께에 따라 기울기의 감소함이 나타난다.

Fig. 5는 100N의 하중에서의 마멸곡선이다. 코팅두께 300 μm에서의 마멸특성은 170 μm과 250 μm 두께와 달리 낮은 마멸률을 보이고 있다. Fig. 6는 마멸률에 대한 곡선으로서 300 μm에서 마멸률이 낮아지는 현



**Fig. 4. Variation of wear volume for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating under 50 N.**

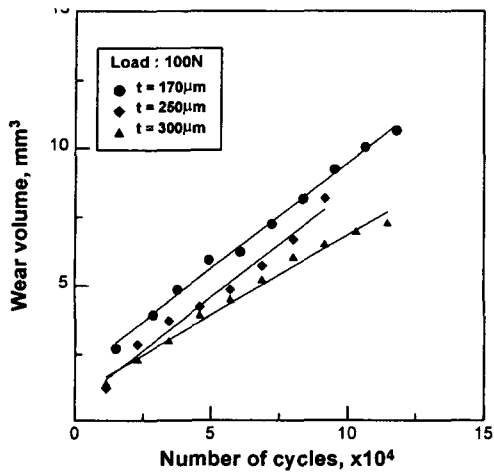


Fig. 5. Variation of wear volume for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating under 100 N.

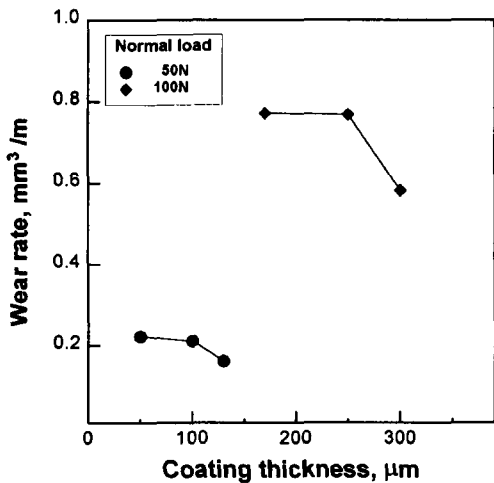


Fig. 6. Variation of wear rate for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating.

상이 나타나고 있다. 이것은 적합한 코팅두께를 나타내는 것으로 250 µm까지는 마멸률의 변화가 거의 동일한 마멸현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 특정한 두께가 모재의 소성변형을 저지하는 효과이다. 또한 플라즈마 용사에서 300 µm의 코팅두께가 적합한 코팅두께로 많이 적용되고 있으며, 이는 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 이러한 현상을 좀 더 이해하기 위하여 미세적인 관찰이 필요하다. 따라서 SEM을 이용하여 마멸기구를 관찰하고자 한다. Fig. 7은 수직하중 50 N, 50 µm의 코팅두께에서 마멸실험후의 사진이다. 마멸트랙의 중앙부에서 마멸이 진행됨을 나타내고 있으며, 마멸입자 탈락과 스프레

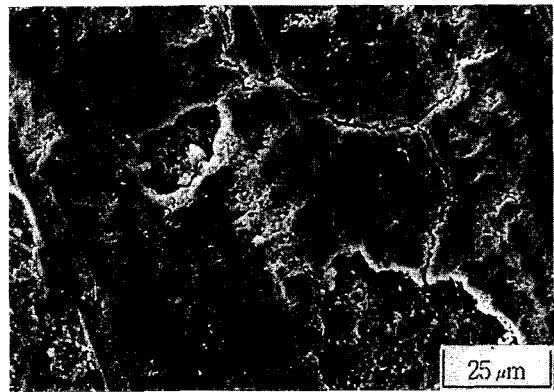


Fig. 7. SEM photograph of worn surface in wear track.

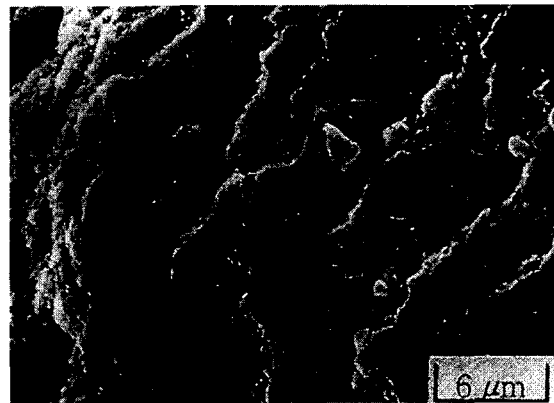


Fig. 8. SEM photograph of wear track.

트간의 균열이 보인다. 또한 소성유동과 미세 망상균열 (fine network cracking)이 보인다. 세라믹의 소성변형과 연삭마멸이 나타나고 있다. 이것은 세라믹의 전형적인 마멸현상과 잘 일치하고 있다[4-14,20]. Fig. 8은 마멸트랙에서 striation 마멸현상이 나타난다. 이것은 표면에 접선의 마찰력으로 인한 leading edge에서 발생한 강한 인장응력으로 나타나는 현상이다.

Fig. 9는 마멸실험중에 결합부인 열린기공(open pore)의 사진이다. 접촉면의 강한 인장력과 압축력이 작용되었는 것이 나타나고 있다. 스프레트가 받는 인장력은 미세 망상 균열발생 및 성장의 원인으로 작용된다.

#### 4. 고 찰

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> 용사층의 마멸특성은 많은 연구자의 마멸현상과 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 좀더 자세한 모재의 영향을 고려하기 위하여 코팅의 기계적인

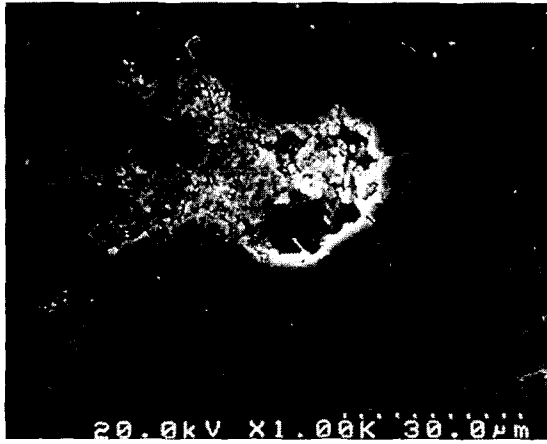


Fig. 9. SEM photograph of crack initiation in wear track.

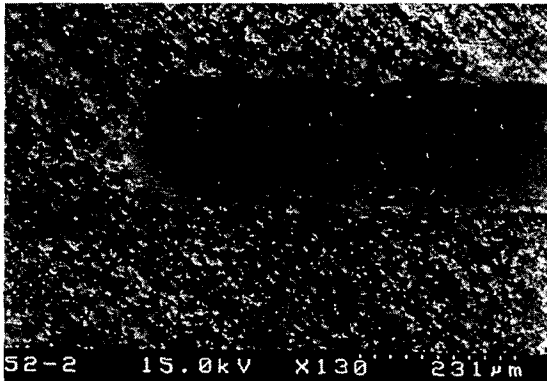


Fig. 10. SEM photograph of scratch test failure.

특성과 열적인 영향을 고려하고자 한다. 코팅의 경도는 연삭마멸의 저항성과 잔류응력에 관계를 가지고 있으며, 코팅의 소성변형 저항성이 마멸특성에 매우 중요한 역할을 하고 있다[9,10]. 또한 용사층의 잔류응력발생은 내부적인 부착강도와 모재와의 접착성에 영향을 준다[15]. 예를 들면, 코팅의 파괴, 스폐링(spalling) 또는 모재로부터의 박리 등이다. 이러한 코팅내부의 잔류응력은 코팅 적용시 코팅의 두께조절이 중요한 요소로 작용된다.

상대 미끄럼 운동하는 접촉부에서는 열적인 영향을 고려해야 된다. 또한 본 실험에서도 열적인 영향을 배제시킬 수 없다. 따라서 재료의 열적인 요소중 코팅재 및 모재의 열팽창계수를 비교하여, 잔류응력을 고려하고자 한다. 또한 굽기시험법으로 가시적인 압축잔류응력의 존재를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10은 굽기시험(scratch test)에서 흔적으로써 표면에 강한 인장응력이 작용하여

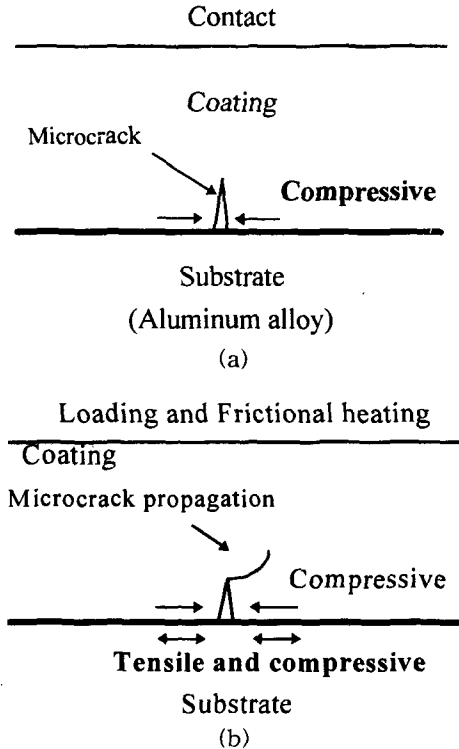


Fig. 11. Schematic illustration of wear process. (a) cracking in subsurface, (b) crack propagation by thermo-mechanical stress

미끄럼방향의 수직균열이 보이며, 가장자리에 스폐레이션(spallation)현상이 나타나므로 압축잔류응력이 존재함을 확인할 수 있다[16]. 이것은 용사내부에 압축잔류응력 존재를 보이고 있다. 또한 열팽창계수에 대한 수치적해석은 많은 저자에 의하여 보고 된 바 있으며, 이러한 해석결과들에 의하면 코팅 표면결합, 모재와 코팅사이의 결합, 코팅내부의 결합 중 코팅파괴에 중요한 역할을 하는 것은 코팅내부에 존재하는 균열이며, 이 균열은 코팅수명에 가장 많이 영향을 준다[17-19]. 따라서 모재와 코팅간의 열응력과 열팽창계수로 발생한 응력이 존재할 것이다. 또한 코팅공정에서 발생한 코팅 내부에 결함이 존재할 것이다. 이러한 점을 고려하여 마멸기구를 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 이것은 코팅 후에 강제 냉각으로 발생하는 내부 압축잔류응력이 존재한다. 수직하중과 마찰열을 고려하면, 수직하중하에서는 코팅에 수직으로 굽힘응력을 받는다. 이때 응력확대계수에서 인장 및 전단모드가 지배적이며, 마찰열이 모재로 전달됨에 따라 모재와 코팅의 열팽창계수의 부적합으로 인장과 압축이 반복되어 균

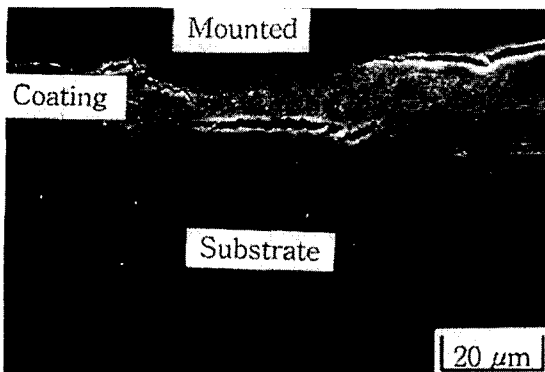


Fig. 12. SEM photograph of crack propagation by thermo-mechanical stress.

열은 인장모드가 지배할 것이다. 그러나 마찰력에 의한 표면전단을 고려하면, 파괴모드는 복합적인 형태로 균열 전파될 것이다[17]. Fig. 12는 코팅에서 발생한 균열이 진전하여 표면으로 진전하는 사진이다. 이것은 열팽창계수의 부적합으로 기인된 것을 입증하는 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서 주조용 알루미늄합금 ASTM A356위에  $Al_2O_3$ -40%TiO<sub>2</sub>를 용사하여 마멸특성을 연구하였다. 코팅의 마멸 특성은 내마멸성을 위한 최적의 코팅두께의 존재하고 있었으며, 하중 100 N조건에서는 300 μm의 코팅 두께가 최적의 코팅두께로 나타났으며, 소성유동, 균열전파, 연삭마멸이 주된 마멸기구의 역할을 하였다. 또한 수직하중 및 마찰열에 의한 코팅내부의 균열전파 모델을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

- Nicoll, A. R., 1990, "Plasma Spraying: Materials, Applications and Systems for Industrial Coatings," *Meeting H. School Technike*, Gijon, Spain, November.
- Cuetos, J. M., Fernandez, E., Vijande, R., 1993, "Plasma-sprayed coating treated with lasers: tribological behaviour of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Wear*, 169, pp. 173-179.
- Fernandez, J. E., Rodriguez, R., Wang, Y., Vijande, R., Rincon, A., 1995, "Sliding wear of a plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating," *Wear*, 181-183, pp. 417-425.
- Wang, Y., Jin, Y., Wen, S., 1988, "The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed coating at 450°C," *Wear*, 128, pp.267-276.
- Wang, Y., Jin, Y., Wen, S., 1988, "The analysis of the chemical structure and properties of ceramic surface films in friction using SEM, AES and Micro-region X-ray diffraction," *Wear*, 128, pp.277-290.
- Wang, Y., Jin, Y., Wen, S., 1989, "The inspection of sliding surface and subsurface of plasma-sprayed using scanning acoustic microscopy," *Wear*, 134, pp. 399-411.
- Wei, J., Xue, Q., 1993, "Effects of additives on friction and wear behaviour of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating," *Wear*, 160, pp. 61-65.
- Vijande-Diaz, R., Belzunce, J., Fernandez, E., Rincon, A., Perez, M. C., 1991, "Wear and microstructure in fine ceramic coatings," *Wear*, 148, pp. 331-233.
- Bull, A. J., Kingswell, R., Scott, K. T., 1996, "The sliding wear of plasma sprayed alumina," *Surface and Coating Technology*, 82, pp. 218-225.
- Rickerby, D. S. and Burnett, P. J., "Correlation of process and system parameters with structure and properties of physically vapour-deposited hard coating," *Thin Solid Films*, 157 (1988) 195-222.
- Niemi, K. J., Vuoristo, P. M. J. and Mantyla, T. A., "Properties of alumina based coating deposited by plasma and high velocity combustion processes," *Proc. 5th National Thermal Spray Conf.*, Thermal Spray Research and Applications, ASM International, Anaheim, CA, 1993, p.469 -473.
- Vijande, R., Belzunce, J., Fernandez, E., Rincon, A. and Perez, M. C., "Wear and microstructure in fine ceramic coatings," *Wear*, 148 (1991) 221-233.
- Safai, S., "A microstructural investigation of plasma sprayed metal and oxide coatings," *Doctoral Thesis*, State University of New York, Stone Brook, May 1979.
- Barbezat, G., Nicol, A. R., Jin, Y. S., Wang, Y. and Sheng, X. Y., "Abrasive wear performance of Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-25%NiCr coatings by plasma spray and CDS detonation spray," *Tribology transactions*, 38 (1995) 4, 845-850.
- McPherson, R., "A review of micro-structure and properties of plasma sprayed ceramic coatings," *Surface and Coating Technology*, 39/40 (1989) 173-181.
- Nicoll, R., "Plasma Spraying: Materials, Applications and Systems for Industrial Coatings," *Meeting H. School Technike*, Gijon, Spain, November, 1990.
- Oliveira, S. A. G. and Bower, A. F., "An analysis of fracture and delamination in thin coatings subjected to contact loading," *Wear*, 198 (1996) 15-32.
- Gupta, P. K. and Walowit, J. A., "Contact stress between an elastic cylinder and layered elastic solid," *ASME J. Lubr. Technol.* 94 (1974) 250-257.
- Leroy, J. M and Villechaise, B., "Stress determination in elastic coating and substrate under both normal and tangential loads in Dowson, D., Taylor, C. M. and Godet, M. (eds.), *Mechanics of Coatings*, Elsevier, New York, 1990, pp. 195-201.

20. 채영훈, 임정일, 박준목, 김석삼, “플라즈마 코팅한 주조용 알루미늄합금의 마찰 및 마멸 특성,” 대한기계학회 논문집(A), 제21권 제5호, pp. 791-799, 1997.
21. 김석삼, 서창민, 류춘무, 박준목, “TiN 코팅된 고속도강과 합금공구강의 마멸거동,” 대한기계학회논문집, 제19권, 제3호, pp.705-712, 1995.