

## APS법에 의한 경사기능성 지르코니아 열장벽 피막의 열충격 및 고온내마모 특성에 관한 연구

한주철, 박만호, 송요승  
 변응선\*, 노병호\*, 이구현\*, 권식철\*

한국항공대학교 항공재료공학과  
 \*한국기계연구원

## A Study in the High Temperature Wear and Thermal Shock Resistance of the Functional Gradient Thermal Barrier Coating by Air Plasma Spray with $ZrO_2$

J. C. Han, M. H. Park, and Y. S. Song  
 E. S. Byun\*, B. H. Lo\*, K. H. Lee\* and S. C. Kweon\*

Dept. of Material Engineering, Hankuk Aviation University, Koyang, Kyungki, Korea  
 \* Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Kyungnam, Korea

### Abstract

The Thermal Barrier Coating(TBC) to improve the heat barrier and wear resistant property in high temperature of the aircraft engine and the automobile engine has usually the two layer structure. One is a ceramic top layer for heat insulation and the other is a metal bond layer to facilitate the bond strength between the top ceramic layer and the substrate. But, the coated layers should be peeled off because of the accumulation of the thermal stress by the difference of the thermal expansion coefficient between metal and ceramics in a heat cyclic environment. In this study, the intermediate layer by plasma spray process was introduced to reduce the thermal stress. The powders of plasma spray coating were the Yttria Stabilized Zirconia(YSZ), the Magnesia Stabilized Zirconia(MSZ) and NiCrAlY. The intermediate layer was sprayed with the powders of the partially stabilized zirconia with 50wt% NiCrAlY between the ceramics top coat and the bond coat for the purpose of the alleviation of heat expansion coefficient. The high temperature wear and thermal shock test were executed. The high temperature wear resistance of the YSZ TBC is better than that of the MSZ TBC. The wear resistance tends to decrease according to increasing the temperature between 400°C to 600°C. The thermal shock life of the 3 layers TBC with YSZ top coating was the most outstanding thermal shock resistance. This means that the intermediate layer should play an important role to alleviate the difference of the thermal expansion coefficients between metallic layer and ceramics layer.

## 1. 서 론

Thermal Spraying법은 항공기용 가스터빈의 Compressor Fan, Disk Mid-Span 등의 내마모 증대, Turbine Vane과 Blade의 산화방지, Combustion Chamber, Fuel Vaporizer, Airofoil, Reheat Gutter, Nozzle Guide Vane Platform 등의 열장벽 기능을 위해 사용되어, 항공기의 엔진부품 개발에서 중요한 역할을 담당하고 있다<sup>1)</sup>. 이중 열장벽은 가스터빈의 효율을 높여 항공기의 출력 및 성능을 향상시키고 연료비 부담을 경감시키려는 항공산업계의 관심과 우주선의 단열피막 개발의 필요성에 따라 1970년대부터 미 항공우주국을 시초로 꾸준하고 활발한 연구가 지속되었다.

Thermal Spraying은 사용되는 열원과 분사방식에 따라 Flame Spraying, Arc Wire Spraying, High Velocity Oxygen Fuel, Plasma Spraying으로 분류할 수 있다. 이중 Plasma Spraying은 구리양극과 텅스텐 음극 사이에 고압의 식류 아크를 일으켜 아르곤을 이온화 시킴으로써 형성된 플라즈마를 이용하여 분말상의 용사 분말재를 용융상태로 만들어 높은 운동에너지로 모재위에 충돌시켜 보호피막을 형성하는 코팅법으로 작업분위기에 따라 APS(Air Plasma Spraying), ASPS(Argon-Shrouded Plasma Spraying), LPPS(Low Pressure Plasma Spraying)으로 분류된다.

본 연구에서 사용된 APS의 경우 20,000℃의 높은 온도와 200~400m/s의 분말속도로 세라믹이나 cermet 등의 고용점을 가진 재료도 치밀하고 우수한 피막이 형성된다.

열장벽 보호피막은 가스터빈내 내열금속부품의 표면온도를 낮춤으로써 고온 분위기에서 발생할 수 있는 산화, 부식-마모 등 유해한 작용으로부터 부품을 보호하는 기능과 더불어 부품의 사용 온도를 높여 항공기 엔진의 효율을 높이고, 궁극적으로 제품의 수명과 성능을 향상시키는 기능을 한다. 열장벽피막의 가장 큰 문제점은 고온에서 급

속모재와 세라믹스 단열층(YSZ 혹은 MSZ)간의 열팽창계수 차이로 인한 계면간의 파괴가 주로 문제가 된다. 이를 보완하고자 세라믹스 단열층과 금속계 결합층(NiCrAlY) 사이에 결합층과 단열층성분을 단계적으로 혼합한 복합층(YSZ 혹은 MSZ+NiCrAlY)을 용사하여, 용사층의 깊이애 따라 점진적으로 열팽창계수를 조절하여주는 경사기능성 피막이 도입되었다. 기존의 복합층은 단열층분말과 결합층분말을 Plasma 열원내에서 혼합, 용융시켜 소재에 피복하는 공정이 일반적이다. 이때 용점이 낮은 결합층 분말이 먼저 용융되면서 용해열을 빼앗아감에 따라 용융이 불완전해진 단열층 성분은 각형 혹은 구형의 분말형태를 그대로 유지하고 있는 입자와 스플랫(splat)을 형성한 입자로 나뉘어지는 양상을 보이며<sup>2)</sup>, 혼합이 완전히 이루어지지 않아 단열층 성분구역과 결합층 성분구역이 확연히 분리되어 있어 기공발달, 내열충격성 저하, 계면에서의 크랙형성 등의 부작용이 지적되었다.

따라서, 본 연구에서는 경사 기능 보호피막의 기초연구로 YSZ/(YSZ-NiCrAlY)/NiCrAlY, MSZ/(MSZ-NiCrAlY)/NiCrAlY의, 3층 열장벽 피막(이하 YSZ 3층구조, MSZ 3층구조)과 YSZ/NiCrAlY, MSZ/NiCrAlY의, 2층 열장벽 피막(이하 YSZ 2층구조, MSZ 2층구조)을 APS법으로 제조하여 고온내마모성, 열충격성, 미세구조 등 물리적인 특성을 분석, 비교하여 3층 TBC의 고온물성 지식을 획득하고 궁극적으로 5층 및 11층의 TBC를 개발하기위한 기반 자료를 확보하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편제작 및 미세구조 분석

20×100×5(mm) 크기의 SUS304 및 알루미늄 모재를 grit blasting 한 후 결합층인 NiCrAlY (AMDRY 963)를 Plasma 용사하고, 그 위에 단

열층으로 YSZ(METCO 204NS), 혹은 MSZ (AMDRY 333)를 용사하여 2층 열장벽을 제조하였다. 3층 열장벽은 2층 열장벽의 기존 2층피막 외에 결합층과 단열층 사이에 단열층 성분인 YSZ 혹은 MSZ분말과 결합층 성분인 NiCrAlY분말을 50 : 50(wt%)으로 단순 혼합하여 용사한 복합층을 경사기능성 피막으로 도입시켜 제조하였다.

제조된 시편의 단면 미세구조를 광학 현미경, 주사 전자 현미경(Hitachi S2400)으로 관찰 및 분석하고 각층의 단면 미세경도 및 기공도를 측정하였다. 각각의 경도는 7회 측정후 최대, 최소값을 버리고 잔여값을 평균해 산출하였다.

## 2.2 고온내마모 시험

SUS와 알루미늄 보재위에 용사하여 제조한 2층, 3층 구조의 시편을 20×40×5(mm) 크기로 가공하여 고온 마모 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 1와 같다. 시험기는 왕복식 Ball-on-Plate Type으로 상세한 구조를 Fig. 2에 도시하였고, 시험온도는 지르코니아의 이론 변태온도와 시험기의 사용온도, 보재의 용융점을 고려하여 SUS 보재의 시편은 400, 600, 800도에서, 알루미늄 보재의 경우 400도에서만 시험을 수행하였다. 상대재인 불은 삼화제도에서 제조된 10φ지르코니아 불을 사용하였으며, 불 Holder에 전달되는 수평하중

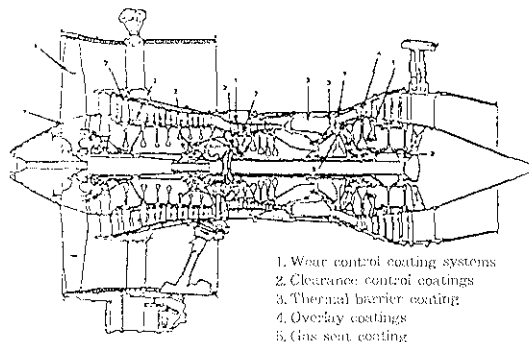


Fig. 1 Applications of thermally sprayed coatings in a typical aero engine.

Table 1 The conditions of wear test.

수직 Load	950g 중
왕복 Counts	12000회(600m)
Test Speed	3.125m/min
Lubricant 사용 여부	사용없음
Ball	Zirconia Ball (상온 경도1500Hv)
시험온도	400, 600, 800도

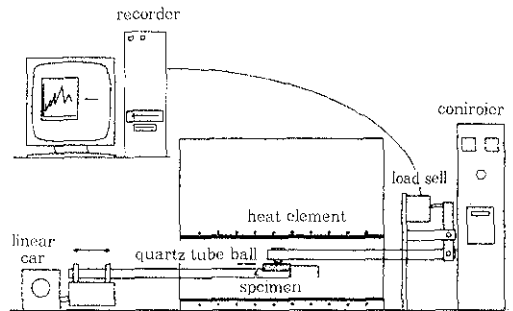


Fig. 2 Schematic diagram of wear tester. A specimen is moved by linear motor and the ball on that scratch the specimen. Horizontal load is recorded to P.C by load cell.

을 Load Cell로 측정하여 마모 Flow Pattern을 조사하였다. 각 열장벽층의 내마모 성능 분석은 마모시험후 시편과 불의 시험 전후 질량변화를 측정하여 실시하였고, 마모흔과 시편의 단면을 광학 현미경 및 전자현미경으로 분석하였다.

## 2.3 열충격 시험

20mm×20mm×5mm의 크기로 가공한 4가지 종류의(YSZ 3층, 2층, MSZ 3층, 2층)의 용사시편을 머플로를 이용하여 1000℃와 600℃의 온도조건에서 열충격 시험을 실시하였다. 열충격 시험은 KSD8333(한국산업규격 세라믹스 용사 시험방법)의 시험법을 참고하여, 각각의 온도의 로안에서 10분간 유지후 수냉을 실시하고, 완전 건조 후 로에 재장입하는 과정을 반복하였다.

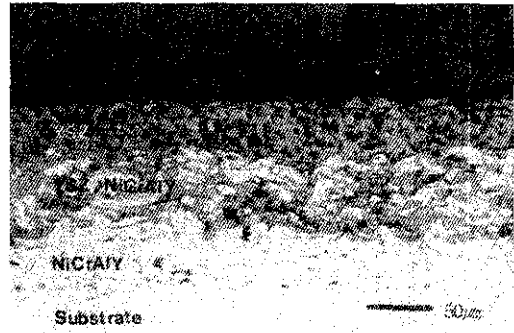
열충격 사이클은 1,000℃의 경우 파괴 발생여부에 관계없이 60사이클을 최대 하였고, 600℃에서 실시한 열충격 시험은 그 변화가 미미하다고 판단되어 100사이클까지 실험을 실시하였다. 시험의 수명은 피막의 약 20-30%가 파괴되는 시점으로 하였다. 실험 도중, 육안으로 코팅층에 눈에 띄는 변화가 발생하였음이 감지될 경우, 실제현미경(Amjeon Micro Multi Vision, Mitsubishi colour video printer CP-10U)으로 표면층의 크랙저동과 박리에 관해 정밀 관찰 하였다. SEM 및 광학현미경 열충격 시험의 단면 관찰은 코팅층에 큰 변화가 일어난 18사이클, 38사이클의 시험, 그리고 피막의 파괴가 일어나거나 제한 사이클에 도달한 시험을 채취하여 실시하였다.

### 3. 결 과

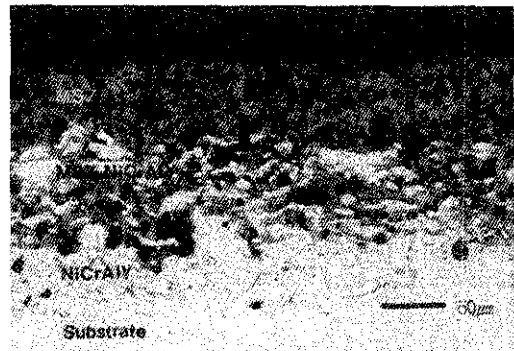
#### 3.1 용사층 분석

모든 용사조건에 걸쳐 용사층의 총 두께는 150 $\mu$ m에서 200 $\mu$ m 사이로, YSZ 3층구조의 시험을 택하여 표면조도를 측정해 본 결과 평균 6 $\mu$ m이르렀으며, 모든 용사조건에 걸쳐 이러한 양상이 이어졌다. 용사직후의 YSZ 3층구조와 MSZ 3층구조의 단면 광학 현미경 관찰 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 각각의 용사층의 단열층 미세구조를 비교, 분석하여 보면 MSZ열장벽의 경우 기공면에서 상대적으로 열악하다는 것을 알수있다. YSZ피막의 경우 7~8%내외의 기공도를 나타내었으며 MSZ피막은 10%이상 특히 3층구조는 13%의 기공도를 보였다.

YSZ 2층, 3층구조, MSZ 2층, 3층구조의 각각의 층에 대한 경도 시험결과를 Fig. 4에 나타내었다. YSZ 2층구조 단열층과 3층구조의 단열층 및 복합층 내 YSZ 모두 500~600Hv의 균일한 경도를 보였으며, MSZ 열장벽의 경우 복합층 내 MSZ 영역에서는 490.89Hv를 나타내었으나, 2층 및 3층구조의 단열층에서는 250Hv 내외로 큰 편차를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 3 Cross-sectional photographs of as-sprayed thermal barrier gradient coatings. MSZ 3 layer has many pores and unmolten powders exist in composite layer of YSZ 3 layer.

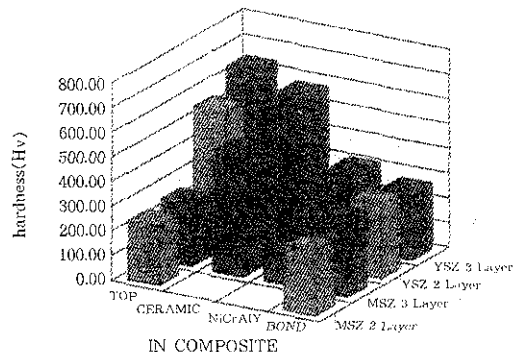


Fig. 4 Micro vickers hardness of TBCs.

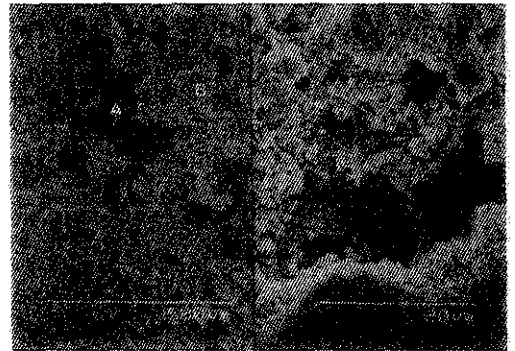
### 3.2 고온내마모 시험

고온내마모 시험 결과에 따른 마모 시편과 불의 질량 감소량을 Table 2에 나타내었다. 전반적으로 시편의 마모량은 400°C와 600°C에서 실시한 마모 시험에서 거의 비슷하거나 600°C의 마모량이 다소 높은 양상을 보였으나, 800°C에서 마모량은 급격히 감소했다. 마모시험 결과에 의하면 마모 상대재인 지르코니아 불은 400°C와 600°C사이에서 이미 강도를 잃기 시작하여 800°C에서는 강도의 상당 부분을 상실한 것으로 보인다. 이러한 불의 강도 저하에도 불구하고 600°C에서 나타난 미세한 마모량의 증가는 400°C에 비해 600°C에서의 내마모성이 그만큼 떨어졌다는 간접적인 증거라 할 수 있겠다. 800°C의 내마모성에 대하여는 불의 마모량이 너무 커 그 경향을 단정하기가 어려웠다.

마모시험 후 마모흔을 광학 현미경이나 SEM으로 관찰한 결과(Fig. 5 a), b), 대부분 움푹마모



(a)



(b)

Table 2 The weight loss of specimens by high temperature wear test.

			$\Delta W_s(g)$	$\Delta W_n(g)$	$\Delta W_s : \Delta W_n$
YSZ 3층	SUS	400°C	0.0049	0.0003	16.33 : 1
		600°C	0.0035	0.0016	2.18 : 1
		800°C	0.0013	0.1274	0.01 : 1
YSZ 2층	SUS	400°C	0.0025	0.0027	0.926 : 1
		400°C	0.0096	0.0008	12.00 : 1
		600°C	0.0109	0.0064	1.7 : 1
MSZ 3층	SUS	800°C	0.0019	0.1183	0.16 : 1
		400°C	0.0155	0.0006	25.83 : 1
		400°C	0.0341	0.0003	13.66 : 1
MSZ 2층	SUS	600°C	0.0345	0.0059	5.84 : 1
		800°C	0.0326	0.0732	0.445 : 1
		400°C	0.0178	0.0004	44.5 : 1
MSZ 2층	SUS	400°C	0.0361	0.0002	180.5 : 1
		600°C	0.0388	0.0004	97.00 : 1
		800°C	0.305	0.0514	0.593 : 1
	AI	400°C	0.0025	0.0001	25.00 : 1

Fig. 5 SEM images of wear scar of TBCs.

a) YSZ 3 layer at 800°C ( $\times 100$  &  $\times 2000$ )

b) MSZ 3 layer at 800°C ( $\times 100$  &  $\times 2000$ )

거동속 보였음을 알 수 있다. 움푹된 부분들은 대개 모재 방향으로의 수직균열을 포함하고 있다.

마모시험중 측정된 수평 하중의 변화 Flow를 Fig. 6에 제시하였다.

### 3.3 열충격 시험

각 용사층의 열충격 실험 결과를 제시한 Table 3에서 알 수 있듯이 코팅층의 열충격 수명은 실험 온도, 사용재료, 코팅층의 형태와 많은 관련이 있음을 알 수 있다. 열충격 실험결과 YSZ 3층구조가 가장 좋은 열충격 성질을 가지고 있었지만, MSZ 3층구조는 2층구조에 비해 오히려 열충격 특성이

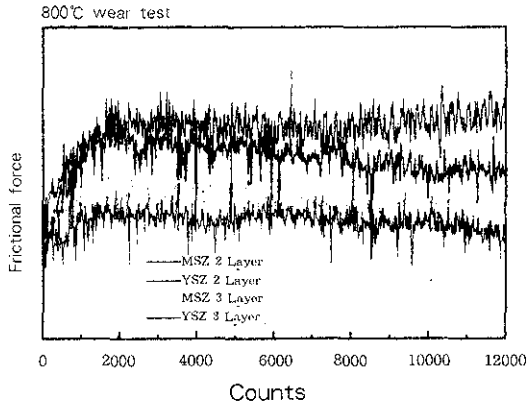


Fig. 6 Horizontal load variations of YSZ 3 layer TBCs in wear testing

Table 3 The results of thermal shock test. YSZ 3 layer has the most thermal shock resistance.

실험온도 용사층	1000°C	600°C
MSZ 2층 구조	49 Cycle	파괴 발생안함
YSZ 2층 구조	56 Cycle	"
MSZ 3층 구조	41 Cycle	"
YSZ 3층 구조	파괴 발생안함	"

저하되고 있는 것을 볼 수 있다.

1,000°C에서 열충격 시험을 실시한지 18사이클 만에 MSZ 2층구조의 모서리 부분에서 미세한 파괴가 발생하였다. 파괴된 부위를 실체 현미경으로 관찰한 결과 시편의 모서리에 평행하게 크랙이 발달했고, 모든 시편에 걸쳐 굽적굽직한 선형 크랙들 사이에 미세 크랙들이 발생함에 따라 크랙의 형태가 선형에서 방사형으로 변화해 나가고 있었다. 이런 점으로 보아 크랙은 이전에 발생했던 것으로 사료된다. 시편 중앙에는 아직 크랙이 발달하지 않았다. 18사이클 열충격 시험을 한 YSZ 3층구조 시편의 단면 광학현미경 관찰결과를 나타낸 Fig. 7에서 보이듯이 18사이클 열충격만에 복

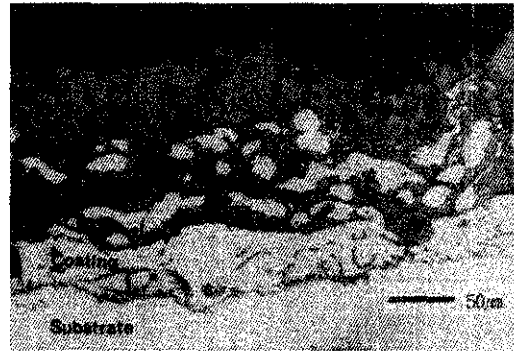


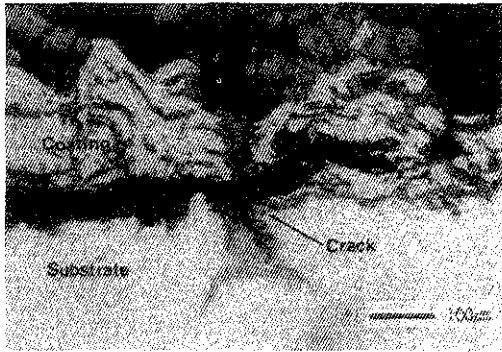
Fig 7 Cross-sectional photograph of 18 cycles thermal-shock tested YSZ 3 layer TBC.

합층에서 모재에 평행하게 크랙이 발달하고 있으며, 이는 기공들에서 부터 시작되고 있음을 알 수 있다.

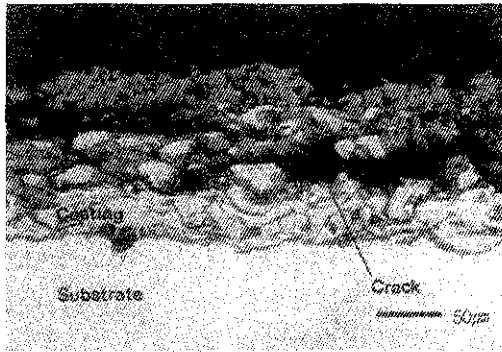
김형준, 권영욱이 접합금속의 산화와 세라믹층의 소결이 미치는 열피로 특성에의 영향을 언급한 바 있다. 기공면에서 YSZ 3층구조보다 열악했던 MSZ 3층구조의 경우 거의 모든 층 내부의 Splat 사이의 결합층과 모재사이에 산화층이 심각해지기 시작하였으며 단열층이 서서히 깨져 나가는 현상을 나타냈다. MSZ, YSZ 두 열장벽 모두 기공이 상당히 커져갔다. 이는 고온에서 세라믹층의 부분적인 소결에 의한 영향이라 사료되며 열충격 시험 후에 세라믹층의 경도가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8 a), b)에 파괴가 발생한 YSZ 2층, 3층구조의 단면 광학현미경 관찰결과를 나타내었다. 2층구조는 접합층과 모재 사이의 계면에서도 이미 파괴가 일어나고 있으며, 특히 박리가 발생한 접합층의 바로 아래 부분의 모재가 산화가 되면서 크랙이 형성되고 있는 것을 볼 수 있다.

600°C에서 실시한 열충격 시험의 경우 60사이클 까지 모든 시편에서 변화를 관찰할수 없었으며, 100사이클까지 시험을 하자 시편 모서리에 약간의 크랙이 발생하는 결과를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig 8 Cross-sectional photographs of the last cycle thermal-shock tested TBCs.  
 a) Cross-sectional photograph of 56 cycles thermal-shock tested YSZ 2 layer TBC.  
 b) Cross-sectional photograph of 60 cycles thermal-shock tested YSZ 3 layer TBC.

## 4. 고찰

### 4.1 용사층 분석

대부분의 용사층이 상당히 높은 기공율을 가지고 있었으며, MSZ 3층구조의 단열층 및 복합층의 기공이 MSZ 2층구조의 기공보다 훨씬 열악한 것이 관찰되었다. Fig. 3의 미세구조 관찰 결과와 Fig. 4의 미세경도 측정결과를 비교해 볼 때 MSZ 3층 구조의 단면 미세경도가 상당히 열악하게 나타난 원인은 단열층 영역에 보다 많이 존재하는 기공들 때문일 것으로 판단되며, 실제로 MSZ열장

벽의 단열층 경도 측정시 내부의 기공 때문에 압흔이 제 형상을 이루지 못할 정도였다. 반면 복합층의 MSZ영역에서 높은 경도 값을 나타내는 이유는 용접이 낮은 NiCrAlY의 용융된 입자에 의해 어느정도 기공제어가 이루어져 높은 경도를 유지할 수 있었던 것으로 사료된다. 따라서 MSZ열장벽의 경우 기공제어 여부가 기계적 물성에 상당한 영향을 미친다고 판단되며 실제 용융시 무전해도금 혹은 화학 치밀화법 등의 방법으로 기공을 감소시키는 후처리<sup>3)</sup>가 필요할 것으로 보인다.

### 4.2 마모시험

일반적으로 마모시험 결과 나타난 800°C에서의 마모량이 감소하는 현상은 마모 상대재인 불에서 원인을 찾을 수 있으리라 사료된다. 본 연구에서 사용한 불은 10φ 지르코니아 불로서, 소결온도를 낮추고 제조를 용이하게 하기위해 SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 유리질이 첨가된 것으로 판명되었다. 지르코니아 불 제조에 첨가된 유리질은 도자기의 유약처럼 소결시 각 결정립 사이에 용융 분산되어 결정립과 결정립을 접착하는 역할을 하게되며, 따라서 보다 낮은 온도에서 세라믹스를 소결하게 해준다<sup>4)</sup>. 이러한 경우 상온에서는 강도를 유지하지만 고온에서는 유리질의 점도가 떨어져 결정립간의 결합력이 저하되어 급격한 강도의 손실을 가져올 수 있다.

YSZ열장벽이 MSZ열장벽보다 내마모 물성이 우수한 것은 ΔWeight(시편) : ΔWeight(불) 자료를 통해 극명히 드러난다고 할 수 있다. MSZ열장벽 자체가 YSZ열장벽에 비해 손색이 있기도 하지만 무엇보다도 MSZ열장벽 내에 비교적 많이 분포되어 있는 기공의 영향이 컸던 것으로 사료된다. 이러한 기공들은 마모시험중 균열의 핵으로 작용하여 용사층간으로 크랙을 전파시키고, 결국 용사층의 박리를 발생시키게 된다. 모든 피막에서 마모는 응착마모의 거동을 보여주었다.

Fig. 5 b) A의 점개 응착된 부분들은 마찰시

발생되는 마찰열에 의해 다른 부위보다 쉽게 산화되었기 때문으로 보이며 수직균열을 포함하고 있음이 쉽게 확인된다. T. Zhao나 M. Boss의 연구에서도 이와 유사한 마모거동을 보이는데 이때의 마모기구구는 코팅층내 기공이나 계재된 산화물 등에서 시작한 코팅층 사이의 균열이 연속적인 반복하중에 의한 표면피로에 의해 수평방향으로 전파하게 되며 이어지는 수직균열의 형성으로 피막의 박리가 발생한다고 밝혀진 바 있다<sup>5-7)</sup>. Fig. 5 a) 백색 삼각형으로 지시한 부분의 마모흔은 이러한 마모기구 잘 나타내주고있다. Fig. 6의 선도에서 시편에 걸리는 수평 하중을 붙이 가하는 수직 하중으로 나누면 마찰계수가 나온다. 수직 하중값은 일정하므로 수평 하중의 변화 선도는 곧 마모시험 중 시편 마찰부의 마찰계수의 변화를 의미할 수 있다. K. Kato에 따르면 세라믹스는 금속에 비해 표면의 산화층이나 오염층이 마찰감소에 효과적인 역할을 한다고 한다<sup>8)</sup>. 선도에서 전체적으로 나타나는 초기마찰의 점진적인 증가는 마찰에 의해 표면오염이 천천히 제거되었음을 나타낸다. 여기서 제거된다는 말의 의미는 세라믹스의 불활성 때문에 고온 및 마모 환경에서 발생하는 오염물의 재생성보다 오염물의 제거가 빨리 일어난다는 것을 뜻한다.

#### 4.3 열충격 시험

Fig. 7, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 열충격 시험을 거치면서 2층구조의 경우 계면에서 파괴가 발생하는 것과는 달리, 3층구조의 경우 열충격 파괴는 복합층에서 발생했다. 일반적으로 다층구조의 열장벽 용사층은 세라믹-금속의 물리적 결합이 있는 층간 계면이 취약한 부위로 예상되지만, 3층구조의 경우 열팽창계수의 차에 의해 발생하는 열응력에 의해 파괴가 발생한 위치는 각 층간의 계면이라기 보다는 복합층이다. 열응력에 직접적으로 영향을 받는 계면에서 파괴가 발생하지 않는 이유는

2층구조 보다는 3층구조의 경우 결합층과 단열층 사이 계면의 기하학적인 형태가 복잡하고, 복합층과 단열층에 기공과 균열이 많이 존재하며, 단열층이 취약하여 크랙이 쉽게 전달되기 때문에 사료된다. 또한 열충격 시험을 거치면서 기공과 크랙이 많은 복합층에 산화물까지 가세하게 되어 복합층이 기계적, 열적으로 열악한 지역이 되고, 결국 파괴가 발생하는 장소로 된다고 사료된다.

일반적으로 부식환경에서는 MSZ가 단열층인 열장벽 층이 수명이 좋은 것으로 보고되고 있으나, 본 연구에서는 MSZ열장벽이 YSZ열장벽보다 열충격 거동에서 취약한 현상을 보였다. 이것은 MSZ열장벽이 YSZ열장벽보다 기공면에서 훨씬 열악한 것에서 가장 큰 이유를 찾을 수 있을 것이며, 또한 열충격이 실행된 1,000℃에서는 결합층의 용사분말로 쓰이는 NiCrAlY층의 Al원소가 YSZ층의  $Y_2O_3$ 와 반응하여 고온에서 입자간 결합력을 높여주는 역할<sup>9)</sup>을 하기 때문으로 사료된다.

MSZ 2층구조보다 MSZ 3층구조의 열충격 특성이 낮은 이유는 MSZ 3층 구조의 단열층 용사시 파우더의 Feeding 이상등으로 인해 MSZ단열층 형성에 이상이 생겨 단열층의 밀도가 예상외로 낮아졌고, 이러한 과다 기공 구조는 열충격 실험시 열이 직접적으로 복합층과 결합층에 전달되어 이들의 물리적 성능을 약화시키고, 결국 열충격 거동이 2층구조보다 취약해지는 결과를 가져 왔다고 사료된다.

## 5. 결 론

ASP로 제조한 YSZ/(YSZ-NiCrAlY)/NiCrAlY, MSZ/(MSZ-NiCrAlY)/NiCrAlY 3층 열장벽과 YSZ/NiCrAlY, MSZ/NiCrAlY 2층 열장벽의 고온 내마모성, 열충격성, 미세구조 등 물리적인 특성에 관해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



1) YSZ 3층 용사층이 경도와 기공도에서 가장 우수한 성질을 나타내며 MSZ용사층의 경우 기공도가 높아 경도 또한 저조하였다.

2) 고온 내마모 시험 결과, YSZ용사층이 MSZ용사층 보다 내마모 성능이 우수한 것으로 나타났고 400℃에서 600℃로 온도가 증가한 경우 대부분 용사층에서 내마모성이 저하되는 경향을 보였다. 모든 시험 조건에서 응착마모 거동을 나타내었다.

3) 코팅층의 열충격 수명은 YSZ 3층구조가 가장 우수한 결과를 나타내었고 MSZ 3층구조의 경우 오히려 2층구조보다 수명이 짧게 나타났다. 이는 용사과정에서 야기된 기공생성수 차이에 의한 내부 응력 때문으로 사료된다.

## 6. 후 기

본 연구는 한국과학재단 과제번호 총괄과제95-0200-04-02-3의 제3세부과제로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. T. N. Rhys-Jones Surface and Coatings Technology 1990 402-415
2. R. Mcpherson Surface and Coatings Technology 1989 173-181
3. Y. Hamano, J. I. Mueller, R. C. Bradt Ceramics international 15 1989 7-13
4. W. D. Kingery 반도체출판사 '세라믹스 총론' 1992 604-655
5. T. Zhaohe, D. Caunxian, Y. Dongsheng Wear 155 1992 309-316
6. M. Boas Wear 126 1988 197-210
7. Kenneth Holmberg 56 Surface and Coatings Technology 1992 1-10
8. K. Kato Wear 136 1990 117-133
9. Yokota, J.Z.Chen, D.Bernard, S.Usmani, C. C.Berndt and H.Herman Proceedings of ITSC'95, Kobe (May, 1995)