

Influence of Subsurface Layer on the Indentation Damage Behavior of YSZ Thermal Barrier Coating Layers Deposited by Electron Beam Physical Vapor Deposition

Yong Suk Heo, Sang Hyun Park, In Sub Han*, Sang Kuk Woo*, Yeon Gil Jung**, Ungyu Paik***, and Kee Sung Lee[†]

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Convergence Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

**School of Nano & Advanced Materials Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

***Division of Advanced Materials Science Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received August 18, 2008; Revised September 2, 2008; Accepted September 3, 2008)

전자 빔 물리적 증착(EB-PVD)법으로 코팅된 YSZ 열차폐층의 압흔손상 거동에 대한 하부층의 영향

허용석 · 박상현 · 한인섭* · 우상국* · 정연길** · 백운규*** · 이기성[†]

국민대학교 기계자동차공학부

*한국에너지기술연구원 융복합재료연구센터

**창원대학교 나노신소재공학부

***한양대학교 신소재공학부

(2008년 8월 18일 접수 ; 2008년 9월 2일 수정 ; 2008년 9월 3일 승인)

ABSTRACT

The thermal barrier coating must withstand erosion when subjected to flowing gas and should also maintain good stability and mechanical properties while it must also protect the turbine component from high temperature, hot corrosion, creep, and oxidation during operation. In this study we investigated the influence of subsurface layer, Al₂O₃ or NiCrCoAlY bond coat layer, on the indentation damage behavior of YSZ thermal barrier coating layers deposited by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). The bond coat is deposited using different process such as air plasma spray (APS) or spray of high velocity oxygen fuel (HVOF) and the thickness is varied. Hertzian indentation technique is used to induce micro damages on the coated layer. The stress-strain behaviors are characterized by results of the indentation tests.

Key words : Thermal barrier coating, Indentation, Ytria stabilized zirconia, Subsurface

1. 서 론

열차폐코팅(Thermal Barrier Coatings, TBC)은 열전도도가 낮고 기계적 특성이 우수한 세라믹 재료를 금속 등 내열합금 위에 적용하여 금속의 모재를 보호할 수 있는 매우 유용한 방법이다.¹⁾ 특히 가스터빈용 회전 날(blade), 버킷(bucket), 연소기(combustion liner) 등에 적용되고 있는 세라믹재료의 열차폐 효과는 사용연료를 감소시켜 시스템의 에너지 효율을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 현재 열차폐코팅에 널리 사용되고 있는 소재는 이트리아가 첨가된 부분 안정화 지르코니아 소재(YSZ, Ytria Stabilized Zirconia)로서 낮은 열전도율, 높은 열팽창계수 및 열

충격 저항성과 우수한 기계적 특성 등을 가지고 있다. 이러한 YSZ의 성질들은 가스터빈 블레이드의 금속 모재로의 열전달을 감소시키며, 터빈시스템 운행 시 고온 열화에 의한 파손을 미연에 방지시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

열차폐 코팅기술은 물리적 증착법(Physical Vapor Deposition), 화학적 증착법(Chemical Vapor Deposition) 등의 여러 방법도 활용되고 있지만, 일반적으로 플라즈마를 열원으로 세라믹 분말을 용융, 가속, 코팅시키는 플라즈마 용사(plasma spray)법이 널리 사용되고 있다. 플라즈마 용사코팅 중에서도 가장 경제적이면서도 일반적인 방법은 대기 플라즈마 용사(APS, Air plasma spray) 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 대기 플라즈마 용사법으로 YSZ 코팅을 수행할 경우 분말의 급격한 용융 및 기계적 분무시의 불균일성 등에 기인하여 기공 및 불균일하게 용융된 고상입자에 기인해 발생하는 경계(splat boundaries)가

[†]Corresponding author : Kee Sung Lee

E-mail : keeslee@kookmin.ac.kr

Tel : +82-2-910-4834 Fax : +82-2-910-4839

잔존하여 열적/기계적 특성을 감소시키는 원인이 되고 있다. 최근 들어서는 이러한 대기 플라즈마 용사의 단점을 극복하기 위해 고온화염용사(HVOF)법, 진공 중에서 플라즈마를 용사하는 진공플라즈마 용사(VPS, Vapor Plasma Spray)법, 저압 상태에서 플라즈마를 용사하는 감압 플라즈마 용사(LPPS, Low Pressure Plasma Spray)법도 이용이 검토되고 있으며 특히 전자 빔 물리적 증착 (EB-PVD, Electron Beam Physical Vapor Deposition)법이 항공기 엔진 등에의 적용을 위해 사용되고 있다. 이 방법은 전자 빔을 활용하여 코팅시키고자 하는 물질을 용융, 휘발시키는 방법으로, 고속증착이 가능하며 나노입자의 물질이 강한 결합력으로 기판에 증착된다고 알려져 있다. 대기 플라즈마 용사에 의한 코팅 방법은 코팅면이 층상구조(laminar structure)인 반면에, 전자 빔 물리적 증착법은 독특한 주상구조(column structure)로 성장하여 주상 내부 혹은 계면의 나노 기공 및 틈새에 기인하여 열적 특성 및 기계적 특성이 탁월한 효과를 기대할 수 있으며 특히 우수한 변형저항성(strain tolerance)으로 인해 코팅층의 수명을 증가시킬 수 있다.²⁾ 현재 가스터빈은 1300°C 이상에서 운행이 되고 있으며 그 사용온도는 계속 증가추세에 있어서 YSZ의 내구성의 향상을 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

YSZ열차폐층은 일반적으로 가스터빈 소재로 많이 사용되는 Ni계 초내열합금 위에 이루어지는데 이들의 열팽창 계수 차이가 커서 코팅시 결함이 발생한다. 따라서 두 층간의 열팽창계수 차이를 감소시키기 위해 열차폐 재와 기재 상 사이에 중간코팅층(Bond Coat)을 코팅하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 중간코팅층이 존재한다고 하더라도 고온에서 장시간 운전할 경우 외부의 산소이온이 하부의 금속층 방향으로 전도가 일어나 중간코팅층 위층에서 산화반응을 일으키고 열적으로 불안정하게 성장하는 산화층(TGO, thermally grown oxide)이 형성되며, 이에 기인하여 일어나는 계면박리가 열차폐층을 파손하는 기구를 지배하는 것으로 알려지고 있다.³⁾ 이러한 TGO층은 중간코팅층의 Al, Ni 등이 확산되어 형성되는 산화물층인 것으로 보고되고 있으며, YSZ 코팅층에 가까이 위치하는 TGO층은 Al₂O₃성분이 많은 층인 것으로 보고되고 있다. 한편 열차폐층이 도포된 가스터빈 부품의 운전시 외부미립자에 의한 충돌 및 마모에 기인한 파손도 빈번히 발생하는 것으로 보고되고 있으며,⁴⁾ 시스템의 진동 등으로 반복하중에 의한 피로응력이 걸리게 된다.⁵⁾

본 연구에서는 YSZ코팅층 위에 외부미립자 등의 충돌에 기인한 손상거동에 있어서 하부층(subsurface)에 대한 영향을 고찰하고자 하였다. 특히 TGO층의 주요성분이 되고 있는 Al₂O₃ 층 또는 NiCrCoAlY의 중간코팅층 등의 하부층이 존재할 경우, 외부의 하중에 의한 열차폐 층의 손상거동을 헤르츠인 압입시험(Hertzian indentation)⁶⁻¹⁰⁾을 이

용하여 고찰하였다. Hertzian indentation기법은 상대적으로 탄성계수와 경도가 높은 압입자의 접촉하중에 의해 재료의 손상을 유발하여 재료의 특성을 평가하는 방법으로서, 열차폐 코팅층의 마모 및 손상거동을 평가하는 방법의 하나로 이용되고 있어 본 연구에서 이러한 기법을 평가 방법으로 활용하였다.⁸⁻¹³⁾ 이 때 중간코팅층을 대기 플라즈마 용사 또는 고온화염용사의 서로 다른 방법으로 코팅하여 중간코팅층의 코팅방법의 영향을 고찰하였고, 중간코팅층의 두께를 변화시켜 두께의 영향을 살펴보았다.

2. 실험 방법

2.1. 열차폐코팅 구조체의 제작

본 연구에서 사용한 기재(substrate) 중 하나로서 Ni계 초내열합금(GTD-111, General Electric Co., USA)을 사용하였다. 직육면체의 열처리 된 초내열합금 판으로부터 방전가공에 의해 직경 1 인치의 원형 기재를 제작하였다. 제작된 기재를 다이아몬드로 1 μm까지 경면 연마(polishing)하였다. 다른 기재(substrate)로서 알루미나(Al₂O₃) 상용기판(Alumina substrate, purity 96%, M.W.F.I., Korea)을 사용하였다. 알루미나 기재 역시 다이아몬드로 1 μm까지 경면 연마(polishing)하였다.

Ni계 초내열합금 기재 위에 대기플라즈마 용사기(써머텍코리아(주) 보유장비, APS, Korea) 또는 고온화염분사기(써머텍코리아(주) 보유장비, HVOF, Korea)를 이용하여 평균 두께 80 또는 280 μm의 두께로 중간코팅층 분말(Co-Ni-Cr-Al-Y alloy, AMDRY 4195, Sulzer Metco Co., Switzerland)을 용사코팅하였다.

Ni 초내열합금 위에 서로 다른 방법으로 중간코팅층이 증착된 소재와 경면연마된 알루미나(Al₂O₃) 기재에 이트리아(Y₂O₃)가 첨가된 지르코니아(Yttria Stabilized Zirconia, YSZ)를 전자 빔 물리적 증착(EB-PVD)장비를 이용하여 코팅하였다.¹¹⁾ YSZ 코팅을 위한 타겟 잉곳(target ingot)으로서 8 wt% Y₂O₃가 첨가된 ZrO₂ 분말(TZY-4.5, Terio, Japan)을 약 100 kgf/cm²의 압력으로 일축가압 성형하여 타겟(target)물질을 제조하였다. 제조한 YSZ 압분체를 Cu 도가니 내에 장착한 후 챔버 내의 진공도를 0.001 torr 이

Table 1. Experimental Parameters of EB-PVD Process

Controlled Parameters	Deposition Condition
Subsurface Temp	900°C
Target Source	8 wt% - YSZ
Vacuum	<0.001 Torr
Gas Flow	O ₂ gas: 5 cc/min
Deposition Time	<25 min
Generating Power	3.75 KW

하로 유지하면서 약 3.75 kW의 전력으로 전자 빔을 발생시켜 타겟 잉곳이 용융될 때까지 도가니와 기관총 간을 셔터(shutter)로 차단하면서 예비가열하였다. 타겟 잉곳이 용융된 후 셔터를 열고 산소기체를 약 5 cm³/min의 유량으로 흘려주면서 충분히 산화된 YSZ가 각 하부층위에 증착되도록 하였다. 전자 빔 물리적 증착 시의 코팅 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 이 때 중간코팅층 소재와 경면연마된 Al₂O₃ 기재의 온도는 모두 900°C로 고정하였다.

2.2. 열차폐코팅 구조체의 평가

서로 다른 하부층을 갖는 소재에 전자 빔 물리적 증착법으로 코팅된 YSZ의 표면 미세구조를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, Philips, XL-30, Netherlands)으로 관찰하였다. 현미경 사진으로부터 각 입자의 평균크기는 선형측정(linear intercept method)법을 이용하여 구하였다.

서로 다른 소재(Al₂O₃ 또는 NiCoCrAlY), 다른 중간코팅층의 코팅방법(대기플라즈마 용사 또는 고온화염용사), 또는 중간코팅층 소재의 서로 다른 두께(80 또는 280 μm)를 갖는 하부층을 각각 준비하고, 동일한 조건에서 증착된 YSZ 열차폐 코팅층의 손상거동을 평가하였다. 서로 다르게 준비된 하부층에 따른 열차폐층의 외부 하중으로부터의 손상 거동을 평가하기 위해 Fig. 1의 모식도에 나타낸 바와 같은 헤르쯔안 압흔시험을 수행하였으며, 압흔 시험을 수행하기에 앞서 전자 빔 물리적 증착법에 의해 증착된 YSZ 코팅층 표면을 15 mA의 조건으로 10분간 금으로 코팅하였다. 구형압자로서 반경 r=3.18 mm의 초경재질의 구형 볼(J & L Industrial Supply Co., Livonia, MI, USA)을 만능시험기(Instron 5567, USA)에 장착하여 압입하였다. 압입하중 P는 초기에는 최저 5 N부터 하중간격을 5 N씩 증가시키다가 50 N부터는 10 N, 100 N부터는 25 N, 300 N부터는 50 N, 500 N부터는 시편이 파괴될 때까지 250 N의 간격으로 각각 증가시켜 서로 다른 하중으로 압입하였다. 이 때, 전자 빔 물리적 증착법으로 증착된 열차폐 코팅층을 경면연마하지 않고 코팅된 상태 그

대로의 표면에 구형압자를 압입하였으며, 압입을 가하는 속도는 0.2 mm/min의 일정한 속도로 시험기의 cross-head를 조정하였다. 압입 후 광학현미경을 이용하여 시편에 형성된 손상영역을 관찰하였으며, 손상영역의 직경 2a를 측정하여 각 하중에서의 압흔 응력(indentation stress, GPa)과 압흔 변형률(indentation strain)을 다음 식 (1)과 (2)에 의해 구한 후, 각 열차폐코팅 구조체의 압흔 응력-변형률 곡선을 구하였다.

$$\text{Indentation stress, } p_o = P/\pi a^2 \tag{1}$$

$$\text{Indentation strain, } a/r \tag{2}$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Al₂O₃ 위에 열차폐 코팅된 YSZ 및 서로 다른

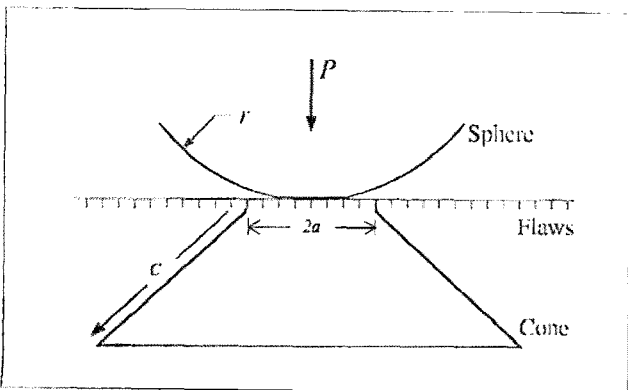


Fig. 1. Schematic diagrams of Hertzian indentation.

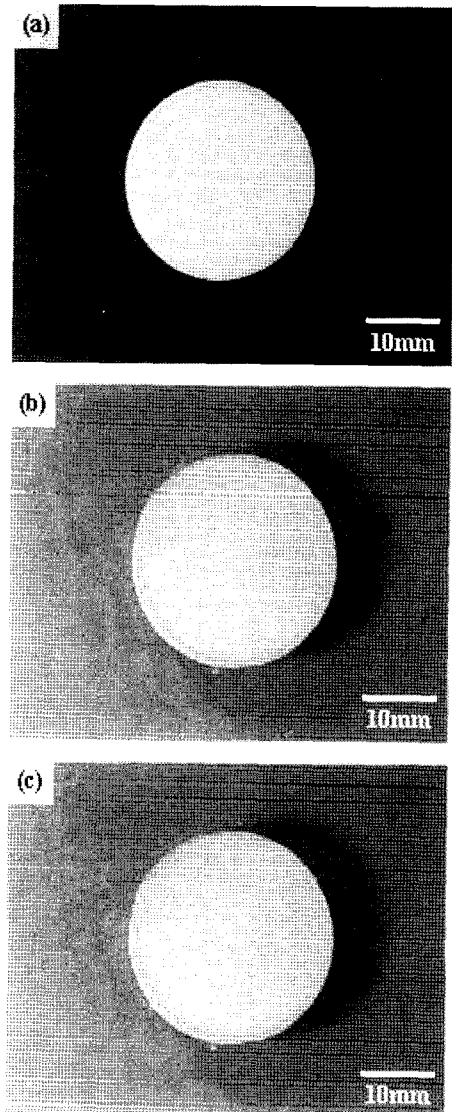


Fig. 2. Morphology of (a) YSZ/Al₂O₃ system (b) YSZ/NiCoCrAlY layered system by APS and (c) YSZ/NiCoCrAlY layered system by HVOF.

중간코팅층(Bond Coat)의 코팅방법, 즉 대기플라즈마 용사(APS) 또는 고온화염용사(HVOF)법으로 코팅된 NiCoCrAlY 위에 YSZ이 코팅된 구조체들의 외관사진을 나타낸다. 전반적으로 균열이나 큰 결함없이 균일한 코팅이 이루어졌음을 알 수 있다. 일반적으로 YSZ의 열차폐 층의 열팽창계수는 $10\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도이며, $14\sim 16\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 열팽창계수를 갖는 중간코팅층과의 열적 불일치(thermal mismatch)에 의해 압축응력에 의한 계면박리(buckling)가 일어날 수 있으며, 대기 중에서의 플라즈마 용사로는 많은 기공과 개재물, 녹지않은 분말의 응집체, 기타 순간적인 냉각에 기인한 균열 등이 발생될 수 있으나, 본 연구에서 전자 빔 물리적 증착법으로 증착된 열차폐 코팅층은 균열없는 층을 얻을 수 있었다.

900°C 로 유지한 Al_2O_3 또는 NiCoCrAlY 중간코팅층 소

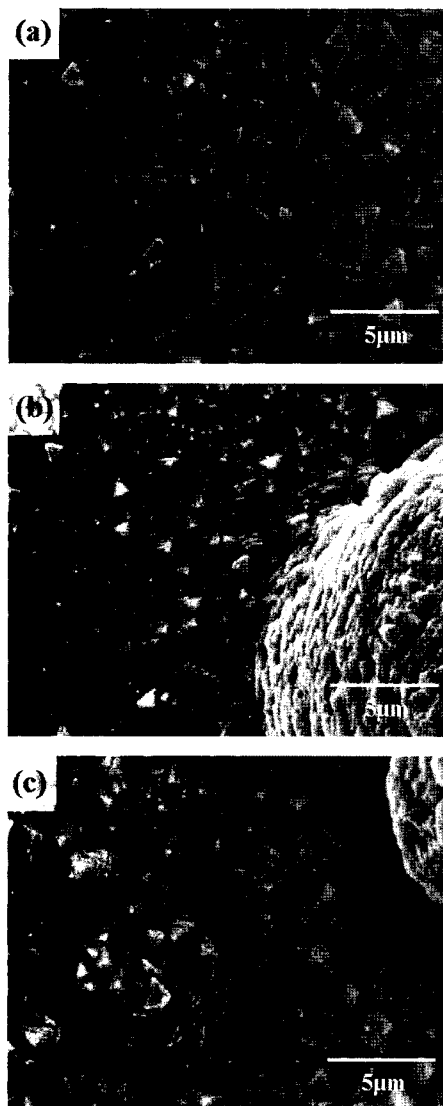


Fig. 3. SEM images showing the top view of (a) YSZ/ Al_2O_3 layered system; (b) YSZ/NiCoCrAlY layered system by APS; (c) YSZ/NiCoCrAlY layered system by HVOF.

재 위에 전자 빔(electron beam)에 의해 용융된 잉곳이 증발하여 증착된 열차폐 코팅층의 표면 미세구조 사진을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)는 Al_2O_3 소재 위에 전자 빔 물리적 증착법으로 증착된 YSZ의 표면을, (b)와 (c)는 각각 대기플라즈마 용사와 고온화염용사법으로 미리 증착된 NiCoCrAlY 중간코팅층 위에 전자 빔 물리적 증착법으로 증착된 YSZ의 표면을 관찰한 결과이다. 증착된 열차폐 코팅층은 모두 평균 약 $1\mu\text{m}$ 전후의 입자크기를 갖는 삼각형 형상의 입자들로 구성되어있음을 관찰할 수 있다. 이러한 YSZ의 미세구조는 열차폐층 증착시의 기판 유지온도에 의존하며, 삼각형 구조는 (111) 방향으로 입자들이 우선배향되면서 형성되는데 기인함을 이전 논문에서 밝힌 바 있다.¹²⁾ Fig. 3의 (b), (c)에서 증착층의 일부 입자들이 응집된 것처럼 보이는 이유는 Al_2O_3 의 경우는 경면연마를 한 상태에서 YSZ을 증착한 반면, NiCoCrAlY 중간코팅층 소재의 경우는 경면 연마하지 않고 YSZ을 증착하였기 때문에 증착이 일어나는 면의 표면조도(surface roughness)가 서로 다른데 기인하기 때문이며, 이를 제외하고는 미세구조간 상호 차이는 없는 것으로 생각된다.

앞에서 관찰한 미세구조 사진들에 있어서 입자들의 평균 크기를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 고온화염 용사로 중간코팅층을 코팅한 소재 위에 증착된 YSZ의 입자크기가 다소 큰 것으로 나타났으나, 이는 표면조도가 커서 평탄하지 않은 면에 증착된데 기인하는 것으로 생각되며 전반적으로 표준편차 범위 내에서 평균 입자크기의 차이는 크지 않은 것으로 생각된다. 특히 하부층의 표면이 평탄하지 않음에도 불구하고 균일한 크기의 삼각형 입자로 구성된 열차폐 코팅층이 형성되었다. 즉 증착하고자 하는 소재의 온도를 균일하게 유지할 경우, 하부층의 소재나 두께, 코팅방법에 의한 밀도차가 미세구조의 차이를 유발하지는 않은 것으로 판단할 수 있으며, 열차폐 코

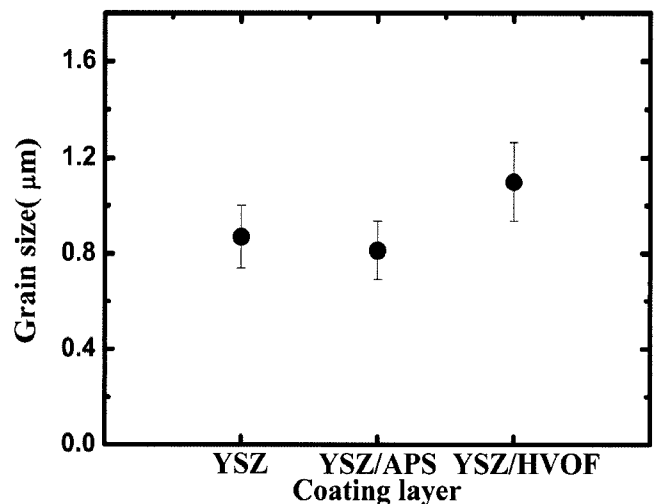


Fig. 4. Characterization results on the average grain size of YSZ top-coat layer.

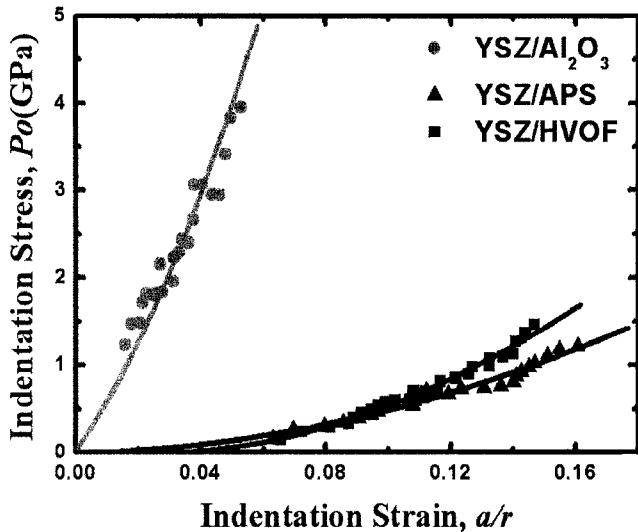


Fig. 5. The behavior of indentation stress-strain curves according to substrate material and coating method.

팅층의 미세구조를 좌우하는 것은 잉곳이 용융, 증발 및 증착될 때의 챔버 내에서의 위치와 기판온도, 분위기 등이 좌우할 것으로 생각된다. 한편 본 연구에서 전자 빔 물리적 증착법으로 증착한 세가지 종류의 소재들의 측면은 기존의 논문¹²⁾에서 관찰, 보고한 주사전자현미경 사진과 크게 다르지 않기 때문에 본고에서는 제시하지 않았다. 즉 모든 종류의 열차폐 코팅층은 그 하부층의 소재나 증착방법, 두께에 관계없이 전자 빔 물리적 증착법의 장점인 주상구조(columnar)가 잘 형성되었다.

Fig. 5는 헤르찌안 압흔시험을 주어진 하중에서 행한 후 형성된 손상영역(damage zone)의 직경을 측정된 후 식 (1), (2)에서와 같이 가해진 하중, 초경 구의 반경으로부터 압흔 응력(indentation stress)과 변형률(indentation strain)을 계산한 후에 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

YSZ 열차폐 코팅층의 미세구조는 하부층에 영향을 받지 않은 Fig. 3 및 Fig. 4에서의 결과와 달리 Fig. 5의 그래프에서와 같이 압흔 응력-압흔 변형을 거동은 하부층의 영향에 크게 의존하였다. 즉 탄성이 크고 항복강도가 높은 Al_2O_3 가 하부층에 존재할 경우 동일한 하중을 가하였을 때의 국부적인 변형률(압흔 변형률)은 상대적으로 가장 작음을 알 수 있다. 반면 상대적으로 항복강도가 작은 NiCoCrAlY가 하부층에 존재할 경우에는 동일한 응력에서 상대적으로 큰 손상영역이 형성되었다. 또한 고온화염 용사법으로 코팅한 중간코팅층이 존재할 경우 대기 플라즈마 용사된 경우보다 상대적으로 그 변형률이 작았는데, 이는 고속화염용사법이 대기 플라즈마 용사법보다 상대적으로 치밀한 코팅층을 형성할 수 있기 때문으로, 기공율의 감소가 탄성계수의 향상과 접촉저항성의 증가를 가져온 것으로 판단된다.¹³⁾

Fig. 6은 Al_2O_3 가 하부층에 존재할 경우 반경 3.18 mm

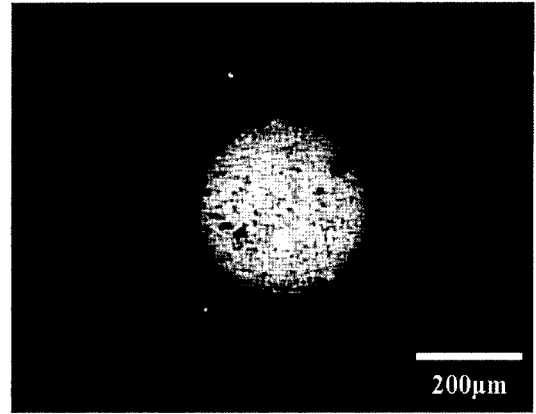


Fig. 6. Contact damages of YSZ/ Al_2O_3 layered system pressed by 350 N using WC sphere $r=3.18$ mm.

의 초경 구를 350 N의 하중 하에서 압입한 후 YSZ 열차폐 코팅층에 형성된 손상영역(damage zone)을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 이러한 손상영역은 대표적인 그림으로서, 서로 다른 소재(Al_2O_3 또는 NiCoCrAlY), 중간코팅층의 코팅방법(대기플라즈마 용사 또는 고온화염용사), 중간코팅층 소재의 두께(80 또는 280 μm)를 갖는 하부층의 종류에 관계없이 Fig. 5의 모든 데이터에 대해 그 크기만 다를 뿐 모두 동일한 종류의 손상영역이 관찰되었다. 즉 파괴가 일어나기 전까지는 링(ring) 형태의 균열(crack)이나 방사성 균열(radial crack)없이 모두 손상영역만 관찰되었다. 본 연구자는 전자 빔 물리적 증착법에 의해 YSZ를 증착할 때 기판온도를 변화시킴으로써 입자의 크기를 변화시키고, 입자의 크기가 증가할수록 전단응력에 의한 shear fault에서 마이크로 균열이 발생하고 이에 의해 손상영역의 크기가 증가할 수 있음을 보고한 바 있다^{11,12)}. 이러한 손상영역은 마이크로 균열에 의해 형성되는 것으로 앞선 문헌에서 보고되었으며,¹⁰⁻¹²⁾ 본 연구에서 전자 빔 물리적 증착법으로 증착된 YSZ 열차폐 코팅층의 압입시에도 균열 보다는 주상구조의 입자에 형성되는 전단응력(shear stress)에 기인한 국부적인 변형(deformation)과 이로 인한 마이크로 크기의 균열(microcrack)로 구성된 손상영역(damage zone)이 관찰되었다.

한편 중간코팅층 소재가 하부층에 존재할 경우 그 두께에 대한 압흔응력-변형을 거동을 Hertzian indentation기법을 이용하여 주어진 하중에서 행한 후 역시 식 (1), (2)에서와 같이 가해진 하중, 초경 구의 반경으로부터 압흔 응력(indentation stress)과 압흔 변형률(indentation strain)을 계산한 후에 그 결과를 그래프로 Fig. 7에 나타내었다. 그 그래프에서와 같이 중간코팅층 소재의 두께가 작을수록 상대적으로 치밀하여 탄성계수와 항복강도가 상대적으로 보다 높은 Ni 초내열합금의 영향으로 보다 탄성적인 거동을 나타내었다. 이러한 결과는 열차폐 코팅 이전의 중간코팅층을 코팅할 때의 두께제어가 열차폐 코팅층이 가스

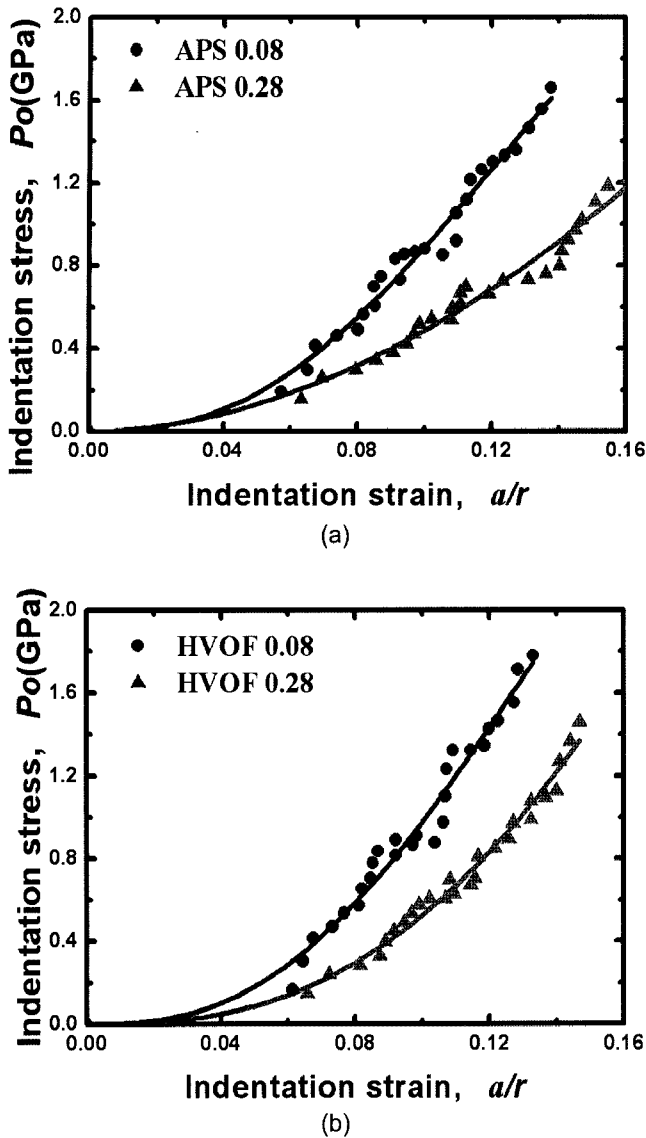


Fig. 7. The behavior of indentation stress-strain curves according to substrate layer thickness. Effect of layer thickness coated (a) by APS and (b) by HVOF.

내에 포함된 미립자 등의 충돌로 손상(damage)을 입을 때 영향을 주므로 정밀히 제어하여야'한다는 것을 의미하는 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

4. 결 론

열차폐 코팅층은 가스터빈 작동 도중 부품들의 고온에서의 부식, 크립, 산화도 방지 되어야 하지만 가스에 노출될 때 접촉에 의한 손상, 충격, 마모에 견디 우수한 내구성을 유지하여야 한다. 본 연구에서는 전자 빔 물리적 증착법으로 코팅된 YSZ 열차폐층의 압흔손상 거동에 대한 하부층, 즉 Al_2O_3 층 또는 NiCrCoAlY의 중간코팅층의 영향을 고찰하였다.

하부층 중 중간코팅층은 대기 플라즈마 용사 또는 고

속화염 용사의 서로 다른 코팅방법으로 코팅하였으며, 이때 두께를 80 또는 280 μm 으로 변화시켜 두께의 영향을 고찰하였다. YSZ 코팅층은 Al_2O_3 소재 및 중간코팅층 소재에 관계없이 전자 빔 물리적 증착법을 이용하여 동일한 조건 하에서 증착하였다. 증착된 열차폐 코팅층에 Hertzian indentation을 이용하여 압입 및 손상을 가하여 얻어진 압흔응력-변형을 곡선을 비교, 평가하였다.

그 결과 전자 빔 물리적 증착법을 이용하여 본 연구에서 증착한 YSZ 코팅층의 미세구조는 하부층에 영향을 받지 않고 모두 비슷한 평균입자크기의 구조를 갖는 것으로 분석되었고, 하부층의 종류에 관계없이 전단응력에 의한 국부적인 변형이 일어난 손상영역 만이 관찰되어 매크로한 다양한 종류의 균열의 개시를 지연시키거나 억제시키는 것으로 나타났다. 반면, 압흔 응력-변형을 거동은 기계적 성질이 서로 다른 하부층의 종류에 의해 큰 영향을 받았으며, 따라서 손상저항성이 높은 구조체를 위해서는 하부층의 소재나 코팅방법, 하부 중간코팅층의 두께를 제어하는 것이 필요함을 제시할 수 있었다.

Acknowledgments

이 논문은 지식경제부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업 및 서울시 산학연 협력사업의 지원(No. 10583)에 의해 작성되었습니다.

REFERENCES

1. J. R. Nicholls, K. J. Lawson, A. Johnstone, and D.S Rickerby, "Methods to Reduce the Thermal Conductivity of EB-PVD TBCs," *Surf. Coat. Tech.*, **150-151** 383-91 (2002).
2. W. Beele, G. Marijnissen, and A. van Lieshout, "The Evolution of Thermal Barrier Coatings - Status and Upcoming Solutions for Today's Key Issues," *Surf. Coat. Tech.*, **120-121** 61-7 (1999).
3. J. Toscano, R. Vaåen, A. Gil, M. Subanovic, D. Naumenko, L. Singheriser, and W. J. Quadackers, "Parameters Affecting TGO Growth and Adherence on MCrAlY Bond Coats for TBC's," *Surf. Coat. Tech.*, **201** 3906-10 (2006).
4. S. Krämer, S. Faulhaber, M. Chambers, D. R. Clarke, C. G. Levi, J. W. Hutchinson, and A. G. Evans, "Mechanisms of Cracking and Delamination within Thick Thermal Barrier Systems in Aero-Engines Subject to Calcium-Magnesium-Alumino-Silicate(CMAS) Penetration," *Mater. Sci. and Eng.*, **A490** 26-35 (2008).
5. N. G. bychkov, V. P. Lukash, Y. A. Nozhnitsky, A. V. Perchin, and A. D. Rekin, "Investigations of Thermomechanical Fatigue for Optimization of Design and Production Process Solutions for Gas-Turbine Engine Parts," *International Journal of Fatigue.*, **30** 305-12 (2008).
6. K. S. Lee, S. K. Lee, and D. K. Kim, "A Study on the Coating Fracture in Silicon Nitride Bilayer : I. Effect of Elastic/

- Plastic Mismatch(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **34** [12] 1268-74 (1997).
7. K. S. Lee, S. K. Lee, and D. K. Kim, "A study on the Coating Fracture in Silicon Nitride Bilayer : II. Effect of Coating Thickness(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35** [1] 48-54 (1997).
 8. B. R. Lawn, "Indentation of Ceramic with Spheres: A Century after Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** [8] 1997-94 (1998).
 9. B. R. Lawn and T. R. Wilshaw, "Indentation Fracture : Principles and Applications," *J. Mater. Sci.*, **10** [6] 1977-94 (1975).
 10. F.B. Abudaia, J.T. Evans, and B.A. Shaw, "Spherical Indentation Fatigue Cracking," *Mater. Sci. and Eng.*, **A391** 181-87 (2005).
 11. S. K. Kim, T. W. Kim, C. Kin, T. H. Shin, I. S. Han, S. K. Woo, and K. S. Lee, "Indentation of YSZ/ Al_2O_3 Layered Systems Prepared by Nano-Coating(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [1] 43-9 (2005).
 12. S.H. Park, S.K. Kim, T.W. Kim, U. Paik, and K.S. Lee, "Indentation on YSZ Thermal Barrier Coating Layers Deposited by Electron Beam PVD," *Philosophical Magazine*, **86** 5453-63 (2006).
 13. J. Y. Kwon, J. H. Lee, H. C. Kim, K. S. Lee, U. Paik, and Y. G. Jung, "Effect of Thermal Fatigue on Mechanical Characteristic and Contact Damage of Zirconia Based Thermal Barrier Coatings with HVOF-Sprayed Bond Coat," *Mater. Sci. and Eng.*, **A429** 173-80 (2006).