

가스터빈용 저열전도성 세라믹스 열차폐코팅 소재

글 _ 김성원, 오윤석, 이성민, 김형태
한국세라믹기술원 이천분원 엔지니어링세라믹센터

1. 서언 (가스터빈용 열차폐코팅)

열차폐코팅(thermal barrier coatings)은 가스터빈의 금속부품 표면에 증착되어 고온가스로부터 금속부품을 보호하기 위한 세라믹코팅으로 가스터빈 엔진이 더 높은 온도에서 작동할 수 있도록 한다. 가스터빈은 압축기를 통해 공기를 압축하여 다양한 화석연료의 연소를 통해 압력과 온도가 높아진 가스가 터빈에 유입되면서 단열팽창 과정 하에서 팽창됨에 따라 유체에너지를 기계에너지로 전환하는 회전형 열기관으로 항공기와 발전소에 주로 사용된다. 특히 발전소에 사용되는 가스터빈의 경우 열병합발전과 같은 복합발전에 대부분 적용되며 국내에 대단위 복합발전소가 설치된 1990년대 초 이후에 급격히

증가하여 2008년말 기준으로 전체 발전량의 4분의 1 수준인 1700만 kW의 설비용량을 보유하고 있으며 GE, Siemens-Westinghouse, Alstom, MHI 등 다양한 기종으로 150 MW 이상의 대용량 가스터빈이 지속적으로 증가하고 있다.

가스터빈의 작동온도는 항공기 출력 및 발전 효율과 직접적인 관련이 있으며 최고 가동온도는 폭발연소가스가 접촉하는 부품의 내열온도(터빈입구온도 : turbine inlet temperature)에 의존하므로 작동온도를 높이는 것이 가스터빈의 주요한 개발방향이다. 가스터빈의 작동온도를 높이기 위해서 내열금속 소재, 열차폐코팅, 가스터빈 부품설계의 세 분야에서 개발이 이루어지고 있다. Ni-계 초합금소재의 개발에 있어서는 다결정소재에서 일방향응

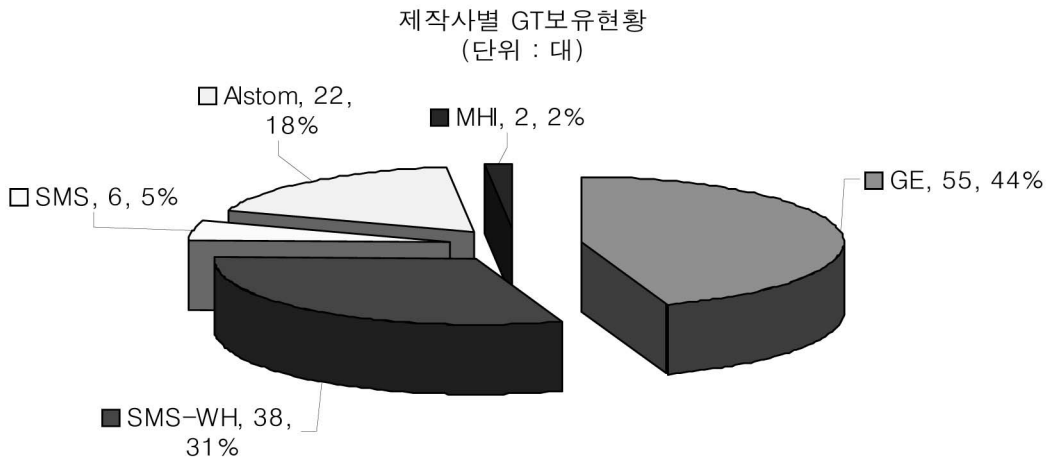


Fig. 1. 발전용 가스터빈의 제작사별 시장점유현황 (2008년말 기준).

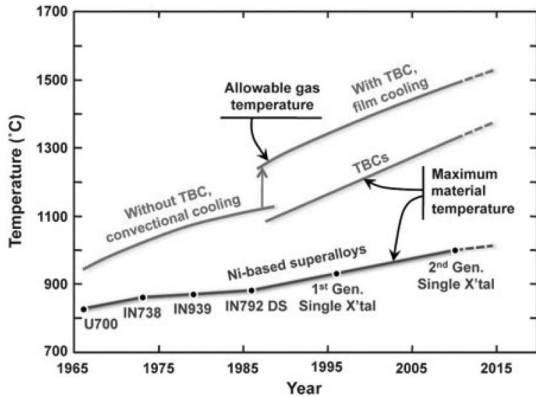


Fig. 2. Ni-계 초합금과 열차폐코팅 소재의 발달과 가스터빈의 작동온도¹⁾.

고(directional solidification) 및 단결정소재의 적용을 통해서 크립특성 등의 고온물성을 향상시키는 방향으로 개발되고 있으며 모재금속의 한계를 지르코니아와 같은 저열전도성 세라믹 열차폐코팅을 적용하여 극복하며 최근에는 블레이드 등의 부품표면에 공냉을 적용할 수 있도록 설계하여 작동온도를 극대화하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.

Fig. 3은 발전용 가스터빈, 터빈블레이드와 열차폐코팅의 구조이다. 열차폐코팅이라고 하면 일반적으로 초합금 모재위에 증착된 금속재 본드코트와 세라믹 탑코트 및 둘 사이의 TGO(thermally grown oxide)층을 포함하여 이른다. 특히 본드코트는 금속모재와 세라믹코팅 간의 열응력을 완화하고 구성에 포함된 알루미늄이 가스터빈 가동 중에 알루미늄의 TGO를 형성해 확산억제층으로

Table 1. 열차폐코팅 관련소재의 물성

특성	소재	IN737 초합금 (모재)	NiCoCrAlY (본드코트)	8YSZ (용시증착)
열팽창계수 (K ⁻¹)		16 × 10 ⁻⁶	17.5 × 10 ⁻⁶	10.7 × 10 ⁻⁶
탄성계수 (GPa)		197	86	40
푸아송비		0.3	0.3	0.22

작용하여 고온에서 금속 소재의 산화를 방지하게 된다.

본고에서는 고효율 가스터빈에 사용되는 세라믹 열차폐코팅의 특징을 저열전도성 세라믹 소재와 코팅증착 방법의 두 가지 측면에서 살펴보고자 한다. 저열전도성 세라믹의 경우 현재 가장 널리 사용되는 이트리아 안정화 지르코니아(yttria-stabilized zirconia, YSZ)의 특징과 한계 및 이를 대체하기 위해 연구되고 있는 저열전도성 산화물계 세라믹 소재를 소개하고 코팅증착방법의 경우 최근에 개발된 전자빔 증착법 외 여러 가지 증착방법의 특징과 증착된 코팅의 특성을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 저열전도성 세라믹스

현재까지 상용 열차폐코팅으로 사용되는 세라믹 소재는 YSZ로 고용점, 저열전도도, 화학적 안정성, 금속모재와의 낮은 열팽창차이 등 열차폐코팅 소재로서의 요구조건을 만족한다. 그런데, 가장 널리 사용되는 6~8wt% Y₂O₃(혹은 3.4~4.5 mol% Y₂O₃)가 첨가된 YSZ의 경우, 고온에서 준안정의 정방정상(tetragonal-prime phase)이 안정상의 정방정과 입방정(cubic)상으로 분리되며 냉각시

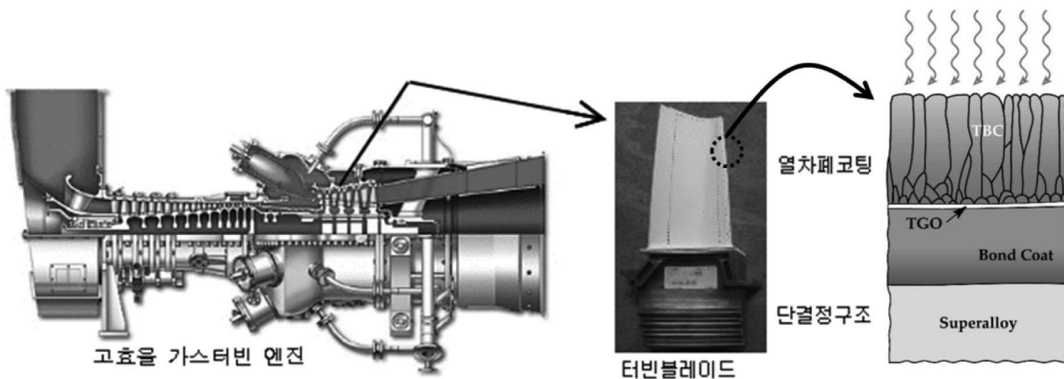


Fig. 3. 발전용 가스터빈, 터빈블레이드, 열차폐코팅 구조²⁾.

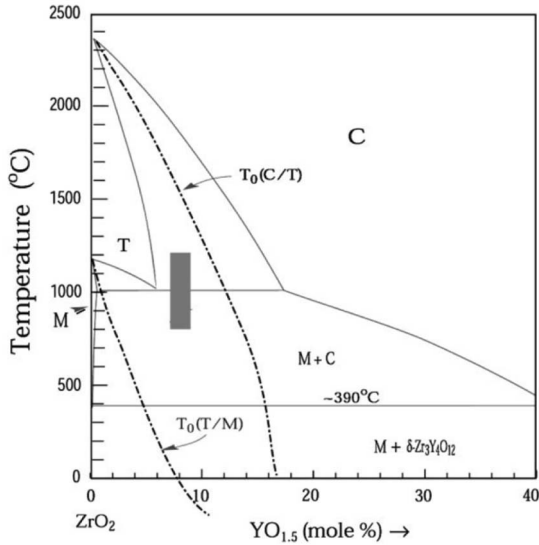


Fig. 4. ZrO₂-YO_{1.5} 상평형도 일부²⁾.

에 정방정상이 단사정(monoclinic)상으로 전이되어 이에 따르는 부피변화로 코팅층에 균열이 야기되는 문제로 사용온도가 ~1200°C 정도로 제한된다.

최근에 가스터빈을 더 가혹한 온도조건에서 작동하기 위하여 YSZ 외의 열차폐용 소재를 탐색하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 1300°C 이상의 고온에서 작동할 수 있는 가스터빈을 위한 차세대 열차폐코팅용 소재로서 갖추어야 할 요구조건으로는 (1) 높은 녹는점, (2) 낮은 열전도도, (3) 금속 모재와의 변형적응성(strain compliance)을 위한 높은 열팽창계수, (4) 가스터빈 작동온도까지 상변태가 없고, (5) 가스터빈 분위기에서 유입되는 여러 산화물과의 화학적 안정성, (6) 기공상태가 고온에서 유지되도록 하는 낮은 소결성 등이 있다. 이러한 열차폐코팅의 조건은 조성설계로 제어하는 소재 본래의 특성과 증착공정의 특성에 의해서 결정되는 코팅의 특성 양쪽으로 변화시킬 수 있다. 예를 들어 고온에서 금속모재와의 변형적응성은 열차폐코팅 소재의 열팽창계수를 금속모재와 유사하게 하여 향상시킬 수도 있지만 열차폐코팅의 구조를 금속모재와 수평방향으로는 열린 형태로 증착하여 향상시키는 것도 가능하다. 또한 열전도도를 제외한 나머지 조건들은 고온과 저온에 반복적으로 노출되는 열차폐코팅의 열내구성과 관련이 있고 열전도도는 금

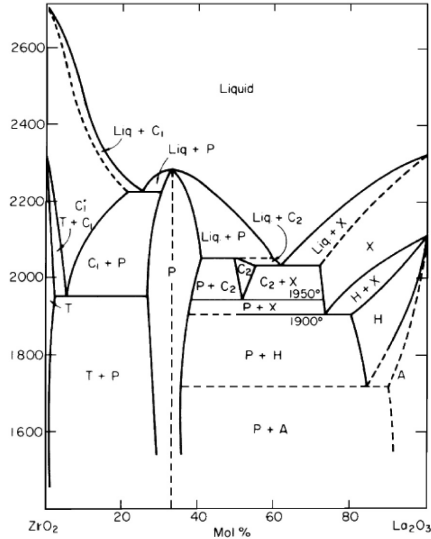


Fig. 5. La₂O₃-ZrO₂ 계 상평형도³⁾.

속모재를 고온으로부터 보호하는 열차폐코팅 본연의 역할과 관련이 있다.

전기절연체 세라믹스의 열전도는 주로 온도구배하의 포논(phonon)이동에 의해서 일어난다. 포논에 의한 열전도도는 결정구조내의 원자수와 위치 등에 의해서 변화하는 포논의 평균자유행로와 평균속도에 의해서 결정되는데 특정화합물의 단위부피당 원자수가 줄수록, 결합이 약하고 방향성이 적을수록, 원자간에 광범위한 무질서도가 존재할수록 포논산란이 일어나 열전도가 줄어드는 것으로 알려져 있다. 또한, 열전도도의 온도의존성은 포논산란의 기여가 다름을 보여주는데 일반적으로 세라믹스의 열전도도에서 나타나는 1/T 의존성은 음클랩 과정(Umklapp process)으로 알려져 있는 본래의 열전도(intrinsic thermal conduction)를 나타내며, 온도의존성이 거의 없는 경우에는 구조 내의 결함에 의한 포논산란을 나타낸다. 다결정 구조의 포논산란을 일으키는 결함으로는 기공, 입계, 점결함 등이 있다. 요약하면, 세라믹스의 열전도도를 결정하는데는 해당 세라믹스의 결정구조와 단위결정을 구성하는 원자 및 결합의 분포가 중요한 요인이 된다. 최근 YSZ를 대체하는 저열전도성 세라믹스로 플루오라이트(fluorite, 형석) 혹은 파이로클로어(pyrochlore) 구조의 지르코네이트(zirconate)계 산화물에

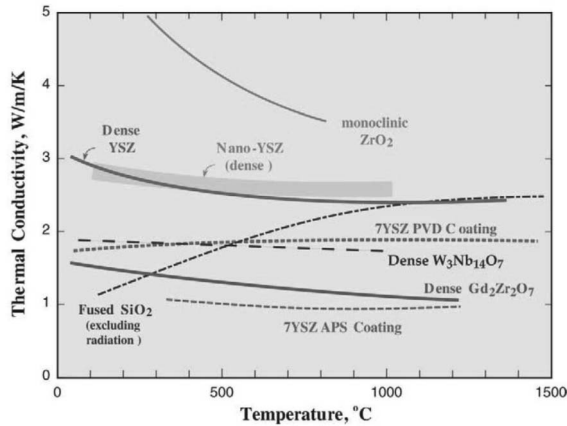


Fig. 6. 여러 가지 저열전도성 세라믹스의 열전도도⁴⁾.

대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 파이로클로어 상을 지니는 지르코네이트계 세라믹스의 두드러진 장점은 열차폐코팅 적용시 고온사이클 중에 상변화가 없다는 것이다(Fig. 5).

파이로클로어 구조는 플루오라이트 구조와 유사한 결정구조로 파이로클로어와 플루오라이트 상은 각각 F_{d3m} (#227)과 F_{m3m} (#225) 공간군을 지니는 입방정구조이며 $A_2B_2O_7$, AO_2 의 화학일반식으로 표현된다. Fig. 7에 플루오라이트와 파이로클로어 결정구조의 개략도를 보였다.

플루오라이트 구조의 경우 단위포 내에 금속 양이온으로 이루어진 8개의 사면체 위치(tetrahedral site, 8a 위치)가 모두 산소 이온으로 채워져 있는 반면, 파이로클로어 구조에서는 그 중 하나가 빈 산소공극(oxygen vacancy)

이 존재한다. $La_2Zr_2O_7$ 를 예로 들어 설명하면, La^{3+} 양이온은 결정학적 특정위치, 16d 자리 (1/2, 1/2, 1/2) (A 자리)를, Zr^{4+} 양이온은 16c 자리 (0, 0, 0) (B 자리)를 차지한다. 즉 (001) 면에서 [110] 방향과 [-110] 방향으로 번갈아 가면서 A, B의 양이온이 일렬로 배열되어 있는 정렬구조(ordered structure)이다. 산소이온의 경우에는 두 개의 48f 자리 ($x, 1/8, 1/8$)와 8b 자리 ($3/8, 3/8, 3/8$)를 차지한다. 48f 자리의 산소 음이온의 위치는 원래 위치 $x=0.375$ 에서 B 자리 양이온이 완벽한 팔면체를 이루는 경우에 $x=0.3125$ 로 이동하게 된다. 이러한 산소 음이온 위치와 격자상수는 A, B 양이온의 상대적인 크기로 결정되며 특히 비어있는 산소 음이온 자리인 8a 자리에 의하여 결정내부에 점결함(point defect)이 존재하며 파이로클로어 구조의 산화물이 낮은 열전도도를 지니는 것은 결정구조 내의 점결함에 의한 포논산란(phonon scattering)에 의한 것으로 알려져 있다. $A_2B_2O_7$ 의 화학식으로 표현되는 산화물의 경우에 A, B 위치에 존재하는 금속 양이온의 상대적인 이온 반경에 의하여 파이로클로어나 플루오라이트 중 안정한 상이 결정되므로, 상당히 광범위한 조성영역에 대해서 파이로클로어 구조를 지니는 산화물을 발견할 수 있고 조성에 의한 열전도도를 계산할 수 있다.

파이로클로어 구조에서 양이온의 규칙적 배열과 특정 위치의 산소 공극에 의해서 단위포 내에 초격자(superlattice)가 존재하고 이는 X-선 회절에서 부가적인 피크로

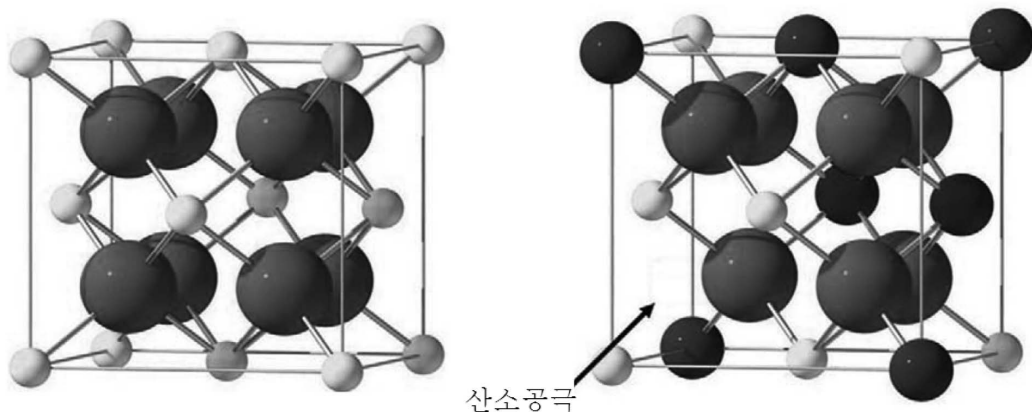


Fig. 7. 플루오라이트(fluorite)와 파이로클로어(pyrochlore)의 결정구조⁴⁾.

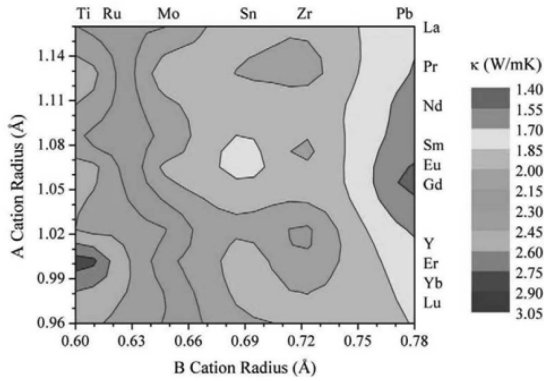


Fig. 8. $A_2B_2O_7$ 파이로클로어의 A, B 이온반경에 따른 열전도도⁶⁾.

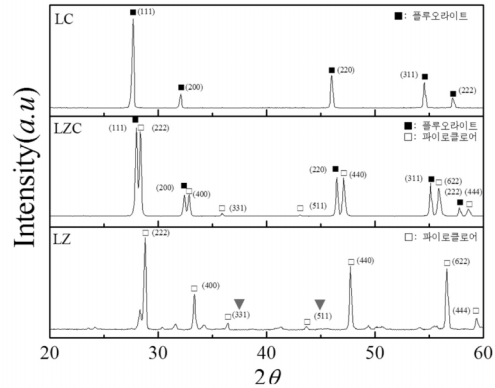


Fig. 9. 1600°C에서 2시간 열처리한 $La_2(Zr_xCe_{1-x})_2O_7$ 산화물의 X-선 회절패턴⁶⁾.

나타난다. Fig. 9는 $La_2(Zr_xCe_{1-x})Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 산화물에 대한 열처리 후의 X-선 회절패턴이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 (400)과 (440) 회절 피크 사이에 나타나는 (331), (511) 등의 회절피크가 플루오라이트 상과 비교하여 파이로클로어 상에만 나타나는 초격자 피크들이다. 또한 $A_2B_2O_7$ 의 화학식을 갖는 지르코네이트계 산화물의 경우 A, B 위치에 두 가지 이상의 원소를 사용하면 조성에 따라 파이로클로어와 플루오라이트가 함께 존재하는 영역(Fig. 9의 LZC)이 존재하고 이러한 조성영역의 경우에는 파이로클로어와 플루오라이트 입자간의 입계로 인해 추가적인 포논산란과 열전도도 감소를 기대할 수 있다.

3. 코팅공정

열차폐코팅은 1980년대 미국 GE 등에서 저열전도성 세라믹(YSZ 등)을 플라즈마 용사법(plasma spray)으로 밀착코팅을 적용한 1세대 코팅으로부터 시작되었다. 용사법으로 증착된 코팅은 기본적으로 분말의 액적(splat)이 쌓인 형태(Fig. 10)를 지니므로 10-30% 정도의 기공과 상당한 양의 계면이 존재하게 되며 소결체에 비해 약 20% 정도 감소된 열전도도를 나타낸다. 반면에 열차폐 코팅의 주요 요건인 열싸이클 중의 변형적응성(strain compliance), 특히 코팅면에 수평인 방향으로의 적응성은 다소 떨어지게 된다. 따라서, 최근에 연구되고 있는 2세대 코팅은 열전도도 특성의 개선보다는 열내구성을 향상시키는 방향에 집중되어 있다. 열내구성을 향상시키는 방법은 전자빔 증착법(electron beam evaporation)을 적용하거나 용사법을 변경하여 수평방향의 열변형적응성이 향상되도록 하는 두 가지 접근이 있다. 또한, 작동온도를 보다 향상시키기 위해 내산화성이 우수하고, 고온 기계적 안정성이 보장되고, 열전도도를 보다 낮출 수 있는 나노/복합구조 등 새로운 미세구조의 설계와 강한 밀착력을 보장하는 새로운 기술과 생산단가를 낮출 수 있는 저가 공정의 개발도 이루어지고 있다.

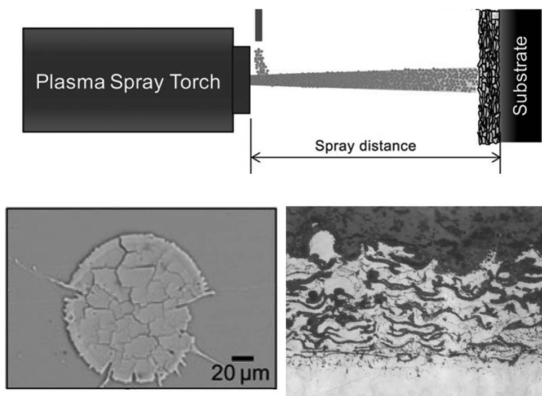


Fig. 10. 플라즈마 용사법과 증착된 열차폐코팅의 구조²⁷⁾.

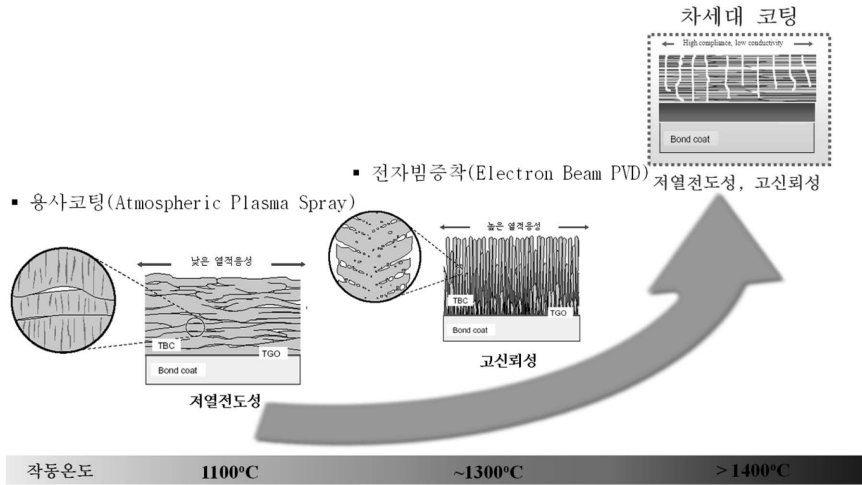


Fig. 11. 열차폐코팅 증착방법의 개발전략.

3.1. 전자빔 증착법

전자빔 증착법은 높은 에너지의 가속전자로 증착하고자 하는 세라믹소재의 표면을 스캔하여 용탕을 만들고 진공 중에 해당소재의 증기압이 높아져 기판에 증착되는 방식이다. 기상으로부터의 증착이면서 표면확산, 선택적 결정성장 등의 영향으로 열변형적응성이 높은 주상구조(columnar microstructure)의 열차폐코팅을 얻게 된다. 이러한 주상구조는 증착공정의 변수에 따라 다양하게 변화시킬 수 있다. 주상과 주상 사이의 간극은 기상증착과정 중에 이미 형성된 주상에 의해 가려지는 효과로 형성

되는데 주상이 자라는 방향, 용탕의 방향, 기관모재의 회전방향 및 속도 등에 의해 제어가 가능하다. 또한 개개의 주상이 자라면서 그 내부에 미세한 주상이 자라게 되어 미시적으로는 깃털구조(feather-like structure)를 지니게 되고 이러한 구조내에는 기판과 평행하거나 수직인 방향으로의 나노기공들이 분포하게 되어 열변형적응성뿐만 아니라 열전도특성의 향상도 가져온다.

한국세라믹기술원에서는 2009년부터 소재원천기술개발사업의 일환으로 저열전도성 세라믹 소재 및 1400°C 이상의 작동환경에서 사용가능한 열차폐코팅 기술을 개

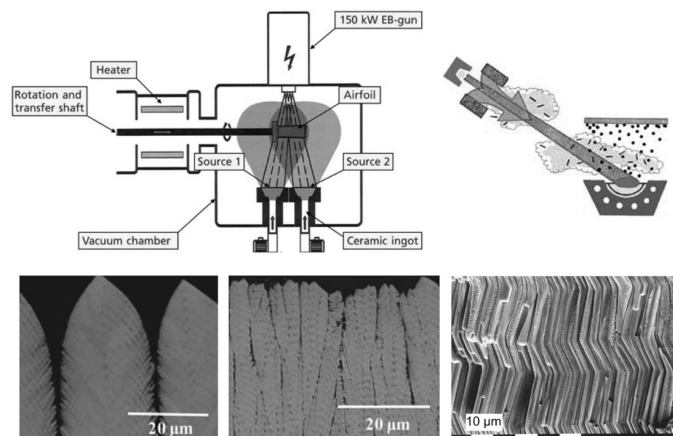


Fig. 12. 전자빔 증착법과 증착된 열차폐코팅의 구조^{7,9)}.

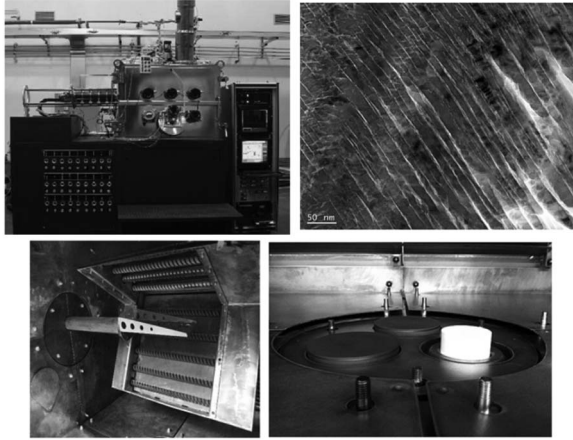


Fig. 13. 국내개발 100kW급 전자빔 증착장비와 증착된 코팅의 미세구조 (한국세라믹기술원).

발하고 있으며, 특히 전자빔 증착기술이 핵심기술로 개발되고 있다. 열차폐 코팅 기술의 핵심은 궁극적으로 1400 °C 이상에서 작동가능한 가스터빈의 블레이드, 로터 등 코팅부품제조를 위한 것이며, 이를 위해 고온환경에서의 열/화학적 안정성이 높은 세라믹으로 나노기공이 포함된 주상형 구조를 형성하는 복합조성 세라믹 보호막을 제조하기 위한 전자빔 기상증착기술을 개발하는 것이다. 이와 같은 전자빔 증착법은 항공기 엔진에 적용되는 열차폐코팅의 경우 군사용 기술의 핵심이며 선진국에서도 핵심기술로 분류하고 있어 대외수출이 금지되어 있는 기술이며, 국내에서는 라이선스 생산을 하고 있지만 열차폐코팅부분은 EL 품목으로 분류되어 있으며 제조 자체와 생산기술의 대외 유출이 통제되고 있는 상황이다.

국내기술로 개발되어 현재 세라믹기술원에 보유하고 있는 전자빔 증착장치는 300 mm 급의 터빈블레이드에 열차폐코팅을 시험생산 할 수 있는 규모로 제작되었으며, 최대 100 kW (실사용 70 kW)의 전력을 사용하여 5 μm/min의 고속으로 세라믹소재를 용해/증발·증착할 수 있는 공정능력을 보유하고 있다. 특히 진공상태에서 900°C 이상을 유지할 수 있도록 설계되어 증착의 효율성과 코팅막의 품질향상에 기여할 수 있는 요소를 갖추고 있다.

3.2. 변경된 용사법

용사법으로 증착된 코팅은 열로 용해된 액적이 기판모

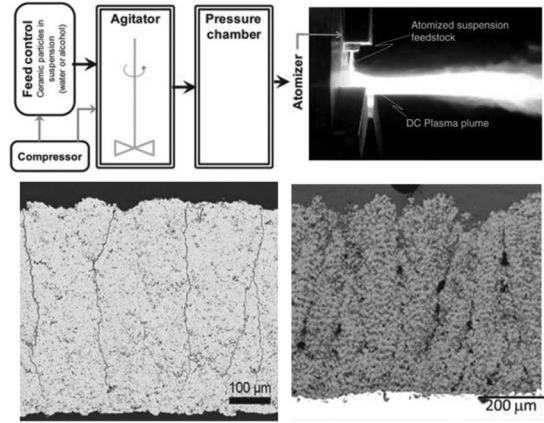


Fig. 14. Suspension plasma spray법과 증착된 코팅의 미세구조 ㄱ.

재 위에 쌓이는 구조로 열전도도 특성은 양호하지만 열변형적응성, 열내구성과 같은 기계적 특성에 한계를 지니고 있다. 산업계에서는 복잡한 형상에 적용이 가능하며 전자빔 증착법에 비해 대면적 증착이나 양산에 적합한 용사법을 선호하는데 최근 전자빔 증착법의 장점을 취해 열내구성이 향상된 코팅을 용사를 통해 증착하고자 하는 노력이 활발히 이루어지고 있다.

용사된 YSZ 액적이 모체에 접촉하는 순간 급냉(10^8 K/s)이 진행되어 용사코팅 내부에 수많은 미세균열이 존재한다. YSZ의 열팽창계수가 약 10^{-5} K^{-1} 수준이고 증착과정 중의 온도강하가 대략 2000 K라면 증착된 층의 변형은 대략 2×10^{-2} 정도로 대부분의 세라믹스가 파괴되는 변형량 이상이다. 만약 플라즈마 용사의 온도가 급격히 증가하면 미시적 균열에서 거시적 균열(dense vertical crack 혹은 segmentation crack)로 바뀌게 되는데 이러한 거시적 균열은 액적의 퍼짐성, 급냉속도, 공정/기판 온도 등에 의해서 변화되며 열내구성을 확실히 향상시킨다.

기존 용사는 플라즈마 화염에 과립의 분말을 공급하는 형태로 유동성을 지니게 하고 충격량으로 증착이 되므로 증착가능한 분말의 최소 입자크기가 존재하고 이는 용사공정의 확장성을 저해한다. 예를 들어 용사법으로는 나노구조의 코팅이나 10 μm 이하의 층을 증착하는 것은 어렵다. 분말을 대신하여 서스펜션이나 용액을 코팅원료로 하는 용사코팅의 경우에는 플라즈마로 이동하는 액적

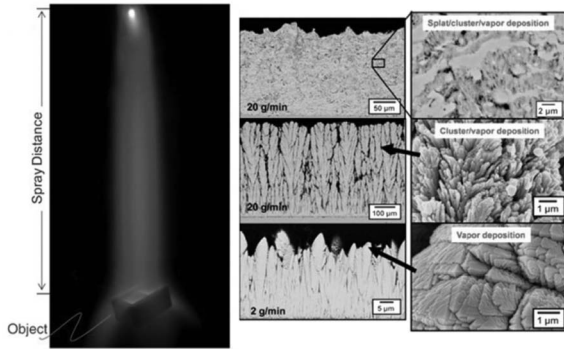


Fig. 15. PSPVD법과 증착된 코팅의 미세구조.

의 질량이 작아 기존용사보다 짧은 화염을 사용하는데 이를 통해 개개의 액적이 충분한 열에너지를 가지고 기판표면에 도달하며 일체화되어 최종적으로 수직균열을 지니는 형태의 코팅을 얻게 된다. 기존의 용사와 달리 코팅원료가 가스가 아닌 액체를 통해 이동하므로 증착되는 기구가 다소 복잡하나 공정조건에 따라 다양한 미세구조를 지니는 코팅을 얻을 수 있다.

최근에 연구되는 용사법에서 진공 물리적 증착법(vacuum physical vapor deposition)에 가장 근사하게 개발되고 있는 것이 PSPVD(plasma spray physical vapor deposition)법으로 본래 대면적에 균일한 박막을 얻을 수 있는 VLPPS(very low pressure plasma spray)에서 시작되어 고온의 기판에 PVD와 유사하면서 속도가 매우 높게 증착할 수 있는 용사법이다. 조건에 따라서 전자빔 증착법과 유사한 미세구조를 얻을 수 있으며 용사법의 장점인 복잡형상의 기판에 열내구성이 높은 열차폐코팅을 얻을 수 있어 최근 상용화에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

4. 결론

본고에서 간략하게나마 저열전도성 세라믹스와 코팅 증착방법의 두 가지 측면에서 고효율 가스터빈에 사용되는 세라믹 열차폐코팅의 특징을 소개하였다. 열차폐코팅의 연구에 있어서 열팽창계수, 열전도도 등의 열물리특

성, 열싸이클링 중의 열내구성과 CMAS(CaMgAlSi)와 같은 불순물과의 반응성 등에 대한 평가도 중요한 분야이므로 기회가 닿는다면 다음에 소개했으면 한다.

2011년 일본의 후쿠시마 원전사태와 국내의 9·15 블랙아웃 및 최근의 전력부족 상황과 맞물려 온실가스배출을 감축하면서도 지속가능한 발전자원에 대한 관심이 증가되고 있어 국내외 발전용량의 30% 정도를 담당하는 복합화력발전 분야에서 가스터빈의 고온화를 통한 발전 효율과 출력향상은 이 분야의 메가트렌드라 할 수 있고 열차폐코팅은 이를 달성하기 위한 필수요소라 하겠다. 나아가, 국내 항공우주분야의 경우에도 군수용 고정의 항공기엔진, 회전익 항공기엔진과 민수용 항공기엔진의 가스터빈을 국산화하기 위해 열차폐코팅 기술은 반드시 내재화해야 할 기술이다. 저열전도성 세라믹스 조성설계, 다양한 코팅공정, 열물리적 특성 및 열내구성 평가 등 엔지니어링세라믹스의 여러 연구분야를 아우르는 열차폐코팅에 대한 연구가 국내에서 더욱 활성화되기를 기대하면서 글을 마친다.

참고문헌

1. D. R. Clarke, M. Oechsner, and N. Padture, *MRS Bulletin*, **37** 891-898 (2012).
2. D. R. Clarke and C. G. Levi, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **33** 383-417 (2003).
3. X.Q. Cao, R. Vassen, and D. Stoeber, *J. Euro. Ceram. Soc.*, **24** 1-10 (2004).
4. D. R. Clarke and S. R. Phillpot, *Materials Today*, 22-29 (2005).
5. P. K. Schelling, S. R. Phillpot, and R. W. Grimes, *Philos. Mag. Lett.*, **84** 127-37 (2004).
6. K.-H. Kwak, B.-C. Shim, S.-M. Lee, Y.-S. Oh, H.-T. Kim, B.-K. Jang, and S. Kim, *Mater. Lett.*, **65** 2937-40 (2011).
7. S. Sampath, U. Schulz, M. O. Jarligo, and S. Kuroda, *MRS Bulletin*, **37** 903-10 (2012).
8. J. Singh and D. E. Wolfe, *J. Mater. Sci.*, **40** 1-6 (2005).
9. U. Schulz, B. Saruhan, K. Fritscher, and Christoph Leyens, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **1** 302-15 (2004).

●● 김성원



- 2006년 서울대학교 재료공학부 박사
- 2006년~2007년 일리노이주립대학(UIUC) 재료공학과 박사후연구원
- 2008년~현재 한국세라믹기술원 선임연구원

●● 오윤석



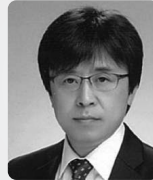
- 2000년 고려대학교 재료공학과 박사
- 2001년~2004년 SE plasma 선임연구원
- 2004년~2007년 울리콘발저스코팅코리아 연구소장
- 2007년~현재 한국세라믹기술원 선임연구원

●● 이성민



- 1999년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 1999년~2001년 (주)대구텍 선임연구원
- 2001년~현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 김형태



- 1997년 한양대학교 무기재료공학과 박사
- 1995년~1997년 시지엔지니어링 연구원
- 1997년~현재 한국세라믹기술원 수석연구원