

## Deposition uniformity of 7 wt% YSZ as a thermal barrier coating with different configurational arrangement for turbine blade shape mock-up by electron beam physical vapor deposition

Yoon-Suk Oh<sup>†</sup>, Jung-Min Chae, Ho-lim Ryu, Yoon-Soo Han, Jong-Kee An\*, Myung-Sook Son\* and Hong-Kyu Kim\*\*

*Engineering Ceramic Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303 Korea*

*\*Gas Turbine Development Team, Aerospace R&D Center, Hanwha Aerospace, Pangyo 13488 Korea*

*\*\*Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea*

(Received November 18, 2019)

(Revised December 3, 2019)

(Accepted December 6, 2019)

**Abstract** Electron beam physical vapor deposition (EBPVD) is a conventional method to fabricate thermal barrier coating (TBC) of high temperature airfoil engine parts, such as blade etc. for its high temperature structural stability from the nature of columnar growth behavior. For the high quality of TBC by EBPVD, the structural factors, such as growth behavior, thickness uniformity and so on, should be managed to obtain the coating which satisfied the required specifications of usable level of mechanical and thermal properties. In this study, the growth behavior and structure variations of 7YSZ (7 wt% yttria stabilized zirconia) coatings with different configurational deposition parameters for the specimens which have turbine blade shape mock-up were investigated. Growth behavior of coatings were studied by comparing computational modeling of evaporation behavior with actual deposition process using e-beam source.

**Key words** Thermal barrier coatings, YSZ, EBPVD, Growth behavior, Configurational arrangement

## 터빈블레이드 형상 mock-up의 기하학적 배치조건에 따른 전자빔 물리기상증착 방법으로 제조된 7 wt% YSZ 열차폐 코팅의 코팅 균일성

오윤석<sup>†</sup>, 채정민, 류호림, 한윤수, 안종기\*, 손명숙\*, 김홍규\*\*

한국세라믹기술원 엔지니어링세라믹센터, 이천, 17303

\*한화에어로스페이스 항공우주연구소 가스터빈개발팀, 판교, 13488

\*\*국방과학연구소, 대전, 34186

(2019년 11월 18일 접수)

(2019년 12월 3일 심사완료)

(2019년 12월 6일 게재확정)

**요약** 전자빔 물리기상증착기술(EBPVD)은 주상형 성장거동과 같이 고온에서의 구조 안정성에 기여할 수 있는 특성으로 인해 터빈블레이드 등과 같은 항공기 엔진 고온부품의 열차폐 코팅(TBC) 제조기술로 개발되어 상용화된 기술이다. 전자빔 증착으로 열-기계적 특성이 상용화 가능한 수준에 만족하는 고품질 열차폐 코팅제조를 위해서는 성장거동, 균일두께형성 등과 같은 구조적 요소의 제어가 반드시 수반되어야 한다. 본 연구에서는 실험형상에 근사한 터빈 블레이드 mock-up에 대한 기하학적 코팅인자 조건에 따른 7YSZ(7 wt% 이트리아 안정화 지르코니아) 열차폐 코팅의 성장거동과 구조변화를 고찰하였으며, 전산모사 기법을 활용한 기하학적 코팅인자 조건에 따른 코팅성장거동 모델링을 수행하여 실제 코팅결과와 비교하였다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: ysoh30@kicet.re.kr

## 1. 서 론

항공기 엔진부품의 고온작동영역에 적용되어 내열급속으로 제조된 고온부품들의 성능과 수명의 요구수준을 확보하기 위한 보호코팅으로서 세라믹 소재기반의 열차폐 코팅기술이 개발되어 왔다. 항공용 엔진의 경우, 발전용 터빈과 다르게 급속가열과 냉각이 반복되는 작동환경으로서 보다 높은 소재의 열피로 내구성능이 요구된다. 이와 같은 열피로 내구성능은 열변형성과 직접적인 연관이 있으며, 코팅이 적용된 부품의 경우 특히 수평방향으로의 응력집중에 대한 높은 저항성을 갖는 구조가 필요하게 된다. 이와 같은 고온 열피로 저항성 구조를 형성할 수 있는 코팅기술로서 전자빔을 이용한 물리기상증착 기술이 개발되었다. 전자빔 물리기상증착 기술은 코팅의 재료가 되는 세라믹 물질에 고출력의 전자빔을 인가하여 높은 진공중에서 재료의 증발을 통해 기판 표면에 코팅을 제조하는 방식이다. 이때 형성되는 코팅은 증발된 입자가 기체상태로 기판에 도달하여 코팅화되는 과정이며, 입자화된 코팅소재의 진공중에서의 흐름과 기판의 표면 온도와 함께, 기판의 조도 및 기하학적 장착방식 등 형상 인자에 의해 코팅구조의 형성이 영향 받게 된다[1-3]. 전자빔 코팅 기술은 진공증착방식 특성으로 인한 주상 성장 기반 구조를 갖는다. 이러한 주상정 간에 틈새 형성으로 인한 열전도성은 내부와 외부에 존재하는 나노 크기의 기공의 형성으로 인해 열전도도가 감소하는 방향으로 진행될 수 있으며, 이러한 틈새로 인해 수평방향의 변형 저항성이 증가하는 것으로 보고되었다[4-6]. 특히 복잡한 형상의 기판의 경우 코팅의 두께, 구조 등 물리적 특성의 균일도는 상대적으로 단순한 형상의 기판에 비해 코팅이 적용되는 위치별로 보다 높은 편차를 나타내게 된다. 그러나 블레이드 등과 같이 터빈부품으로서 실제 사용되는 경우는 대부분 복잡한 형상을 갖고 있으며, 이때 적용하는 코팅의 성능이 극대화 되기 위해서는 보다 균일한 코팅 구조, 두께 등의 물리적 특성을 확보하는 것이 필수적이다[7-10].

Schulz 등은 전자빔 증착법을 이용하여 주상성장된 코팅입자 형상에 따른 열내구 성능을 비교하였다. 주상형의 결정립 폭에 따라 열내구성이 다르게 나타나며, 이때 최적의 결정립 형상과 크기가 존재한다고 보고하였다. 또한 이렇게 서로 다른 결정립 크기 및 형상은 탑코팅의 탄성계수와의 관련이 있으며 이는 궁극적으로 고온내구성에 영향을 줄수 있는 것으로 보고하였다[11]. 또한 Schulz[12]와 Renteria[13] 등은 이와 같은 결정립 폭은 시료의 기하학적 배치와 회전조건 등에 직접적인 영향을 받으며 특히 입내 및 입계기공의 형상 및 분포변화에 기여하는 바가 크므로 이를 통해 열전도도 및 고온치밀화 저항성이 변화된다고 보고 하였으며, 기하학적 시료의

배치 조건에 따라서는 상형성 거동에도 영향을 주는 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 7YSZ(7 wt% yttria stabilized zirconia) 소재를 활용하여 항공용 터빈엔진 블레이드의 형상의 mock-up에 대해 전자빔 증착 기술을 이용하여 열차폐 코팅을 제조하였다. 이때 코팅용 재료 증발원의 위치 및 크기를 고정하고, 복수의 mock-up 시료를 일정한 조건으로 배열하여 동시에 증착을 시도함으로써 시료의 기하학적 증착조건에 차이에 따른 코팅구조 변화 및 두께 균일성 등을 살펴보았으며, 또한 전자빔 증발증착 이론적 증착거동과, 전산모사기법을 추가적으로 적용하여 실제 실험결과와의 비교를 통하여 향후 이와 같은 터빈부품의 양산을 고려한 복수개 시료의 건전한 코팅조건을 확보하기 위한 코팅공정 설계에 대한 의견을 제시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 기하학적 배치 조건에 따른 코팅 전산 모델링

진공챔버 내 배치조건이 서로 다른 코팅시료의 두께형성 거동의 경우 분자운동 및 회전 모듈을 구비한 COMSOL 상용 소프트웨어(FEM Software: COMSOL 4.4a)를 사용하여 유한 요소법으로 터빈 블레이드 표면의 YSZ 코팅층의 두께를 계산하였다. 3차원 모델은 실제 증착 장비와 동일한 크기의 챔버조건으로 설정하여 챔버, 코팅 소스(잉곳, 여기서는 8YSZ) 및 근사 형상 블레이드의 세 가지 요소로 구성하여 진행하였다(Fig. 1 참조). 잉곳의 표면분해로부터 제공된 입자는 진공 상태에서 챔버를 통해 블레이드의 표면에 도달하여 코팅층으로 형성된다. 블레이드는 잉곳 표면을 기준으로 하여 기울어진 상태로 회전하므로 블레이드 표면의 코팅층의 두께가 변화된다. 잉곳의 상부 표면은 2,750°C로 설정되었으며, 이는 YSZ의 용점에 근사한 값이며, 이 때 증기압은 18.98 Pa로 설정하였다. 코팅챔버 진공은  $10^{-4}$  torr로 설정하였으며, 코팅이 진행되는 동안 근사 형상 블레이드는 0°, 30° 기울어지고 회전은 1,15 rpm으로 변화되는 조건을 설정하였다. 5개의 근사 형상 블레이드를 동시에 장착하는 조건으로, 이들 사이의 코팅 균일성을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 분해 요소의 수는 100,000개 이상으로 진행하였으며, 대부분의 미세 원소는 근사형상의 블레이드 표면에 집중되어 코팅이 형성되는 조건으로 설정하였습니다. 코팅형성에 대한 계산은 시간 의존적 방식으로 진행되었고, 계산 결과는 0.5 sec에 한 번씩 저장되었으며, 1 min의 코팅 시간에 대해 계산을 수행하였다. 시료 회전 및 자유 분자 유동 제어는 Direct PARDISO Solver를 사용하여 수행하였다. 계산에 활용된 장치는 PRECISIONT7610

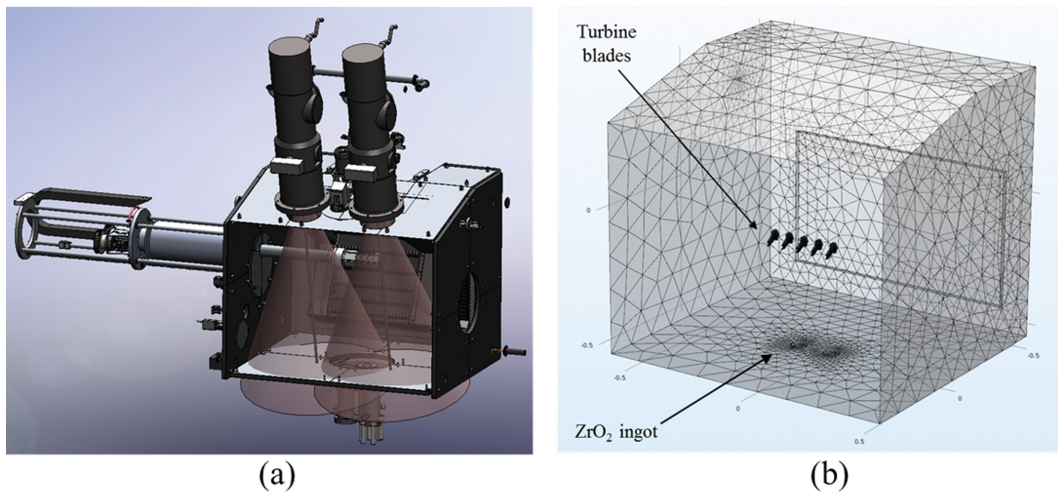


Fig. 1. (a) CAD image of EBPVD equipment for thermal barrier coating, and (b) their simulation model.

Table 1  
Computational calculation condition

	Detail information
FEM Software	COMSOL 4.4a
Physics	- Rotating Machinery, Laminar Flow : Revolutions per time, 1, 15 rpm : Pressure in chamber, $10^{-4}$ torr - Free Molecular Flow : Vapor pressure of 8YSZ, $1.874 \times 10^{-4}$ atm : Evaporation temperature of 8YSZ ( $2,750^{\circ}\text{C}$ )
Mesh	- Type of mesh: Free tetragonal - Number of element: 76,543
Study	Time dependent: range (0, 1/120, 1) min
Calculation time	Around 2 hours

(DELL hardware, CPU 2.67 GHz, 192 GB RAM)가 활용되었다. 세부적인 모델링 조건에 대하여는 Table 1에 도시하였다.

## 2.2. Turbine blade 형상 mock-up 코팅품 제조 및 분석

진공 주조법으로 제조된 Ni 기반 초합금(CM247 LC)으로 만든 터빈 블레이드 형상 mock-up(한국 로스트 왁스, 대한민국)이 코팅 대상물로서 사용되었다. 7 wt%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  안정화  $\text{ZrO}_2$ (7YSZ, 생고백, 프랑스)소재는 주괴(ingot)의 형태로 탑코팅 제조를 위해 준비되었다. 세라믹 탑코팅은 Fig. 5에 도시된 바와 같은 챔버 내 장착조건하에서 전자빔 증착법에 의해 제조되었다. 니켈 알루미늄이드(NiAl, Ni aluminide) 본드 코트는 약  $50 \mu\text{m}$  두께로 화학적기상증착방법(CVD, Chemical vapor deposition, 씨마텍 코리아, 대한민국)에 의해 준비되었다. 세라믹 탑코팅을 제조하기 위해 준비된 코팅 대상물(터빈 블레이드 형상 mock-up)은 맞춤형 지그장치에 설치하고 필요

한 진공 상태를 확보하였다. 코팅 대상물은  $850\sim 900^{\circ}\text{C}$  진후로 가열되었고 이는 고밀도 전자빔 방사에 의한 주괴(ingot)의 가열로부터 야기되었으며 증착 공정이 완료될 때까지 유지되었다. 이때 기판의 온도는 열전대(k-type)를 코팅소스(ingot)와 mock-up 시료와 동일한 거리의 중앙부(Fig. 6, 2번과 3번 시료 사이)와 외곽부(Fig. 6, 3번과 4번 시료 사이) 위치에 각각 장착하여 측정하였다. 전자빔 물리기상증착(EBPVD, Electron beam physical vapor deposition) 공정은 약 20 kW 전자빔 전력 및 증발원(ingot)을 기준으로 코팅 대상물의 회전(5 rpm) 및 기울임( $15^{\circ}$ ) 조건으로  $9.5 \times 10^{-5}\sim 2 \times 10^{-4}$  torr의 진공 하에서 약  $1.2\sim 1.5 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 증착속도로 수행되었다. 공정 중에는 10 sccm의 조건으로  $\text{O}_2$  분위기를 조성하였으며, (Mass flow Controller)를 이용하여 유량을 제어하고, 증발입자와 mock-up 시료 사이에 개스투입구(nozzle)를 설치하여 시료표면에 산소 분위기를 형성하고자 하였다. 코팅 조건에 대한 상세한 내용은 Table 2에 나타내었다. 탑코팅은 터빈 블레이드 형상 mock-up의 장착 위치 및

Table 2  
Deposition condition for top coat

	Detail information
Coating temperature	850~900°C
E-beam power	~20 kW
O <sub>2</sub> flow	10 sccm
Vacuum level	$9.5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ torr
Coating time	25, 35 min
Rotation & Tilt	5 rpm & 15°

움직임 조건에 따라 30~55 μm 범위의 코팅 두께로 제조되었다(코팅시간 20~35 min). 제조된 코팅 시료의 상 형성 거동은 5°/min의 스캔 속도로 40 kV, 200 mA, Cu-Kα 조건에서 XRD(RINT-2500HF, Rigaku, 일본)를 이용하여

분석하였으며, 각 조건에 대한 코팅 시편의 미세 구조 형성을 조사하기 위해, 다이아몬드 커터를 이용하여 시편 절단 후 1 μm 다이아몬드 현탁액으로 연마하여 에탄올에서 30분 동안 초음파 세척을 거쳐 12시간 동안 건조시켰다. 시편의 미세구조 및 조성은 SEM(JSM-6701F, ZEOL Co., Ltd., Japan)을 통하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

Figure 2에 전산모사에 의한 코팅 위치별 막두께 변화에 대한 모델링을 수행하기 위한 시편 및 챔버 조건을 도시하였다. 챔버의 크기 및 형상은 실제 코팅실험에 사

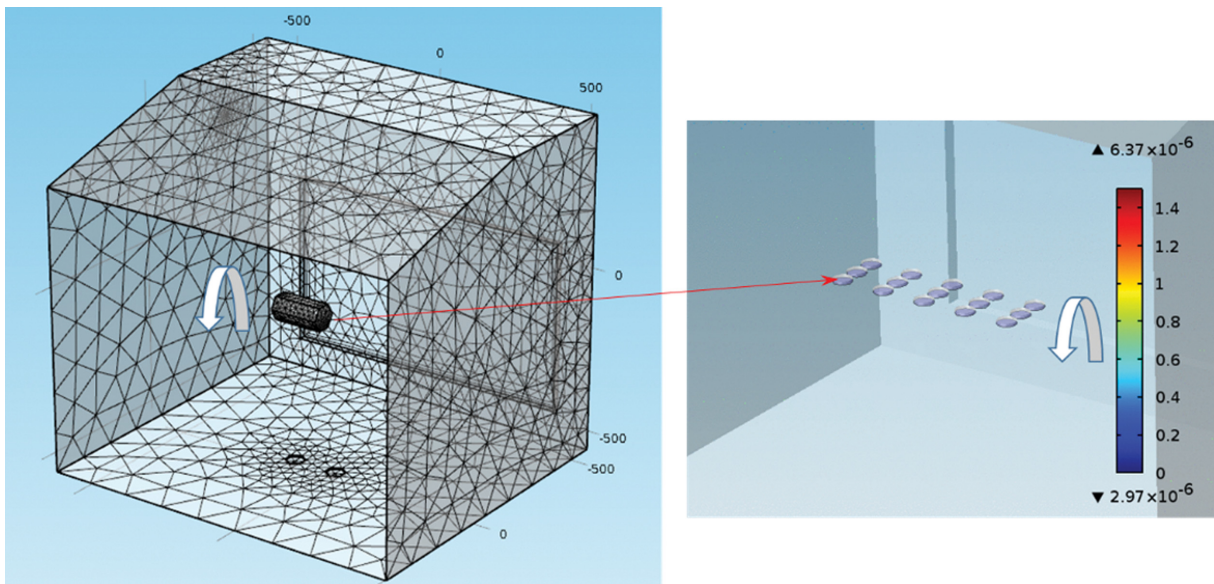


Fig. 2. Modelling of configurational positions of coated specimens for e-beam evaporation.

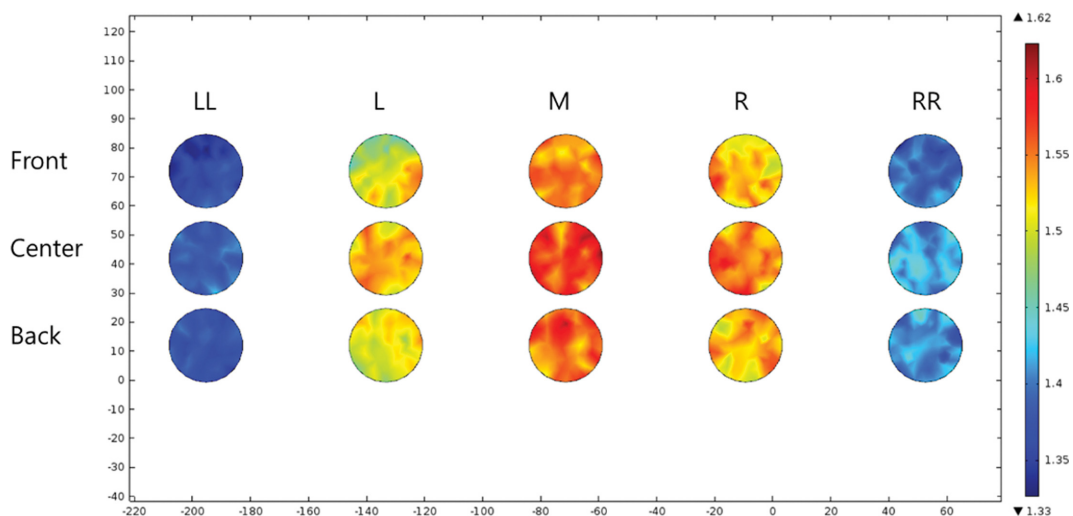


Fig. 3. Modelling of film thickness distribution of coated specimens with different position.

Table 3  
Deposition modelling of thickness distribution for coupon shape specimens with different position in chamber (refer Fig. 3)

	LL	L	M	R	RR
Front	1.33	1.51	1.56	1.53	1.36
Center	1.36	1.53	1.61	1.55	1.42
Back	1.34	1.52	1.57	1.53	1.41

용된 장비의 크기와 형상 설계를 바탕으로 설정하였으며, 내부에 쿠폰형상의 시료가 길이 방향으로 5개, 폭방향으로 3개씩 배치되는 회전형 지그가 장착되도록 하고(쿠폰시편 간 간격 30 mm), 챔버하부에 도시된 코팅원료(주괴, 잉곳(ingot))의 증발증착 시 작동조건에 따라 시료위치별 두께의 분포 변화를 모사하였다. 이때 2개로 도시된 잉곳은 5개의 시료 중 3번째의 하단 중앙에 위치한 1개의 잉곳만 사용되도록 설정하고 쿠폰형의 시료들은 1 rpm의 속도로 회전하도록 설정하였다. Figure 3에서 Fig. 2에 도시된 챔버조건과 Table 1에 설정된 모델링 조건으로 계산된 시료별 코팅두께 분포를 도시하였다. 각 시료의 폭방향 위치에 따른 두께 편차는 거의 없는 것으로 나타났다. 길이 방향에 따른 위치 별 시료들 중 가장 왼쪽에 위치한 시편(LL)들과 가장 오른쪽에 위치한 시편들(RR)의 경우 1.3~1.4 μm 정도의 두께로 계산된 반면, 중앙부의 왼쪽과 오른쪽에 위치한 시편들(L, R)의 경우 1.45~1.55 μm 정도의 두께 계산값을 보였다. 또한 가장 중앙부에 위치한 시료들(M)의 경우는 가장 두꺼운 두께 계산값 결과(1.55~1.65 μm)를 보였다. 가장

얇게 코팅된 계산값과 가장 두껍게 계산된 코팅두께의 편차는 약 15 % 정도로 나타났으며, 중앙부와 인접한 위치와의 두께 편차는 약 10 % 정도로 계산되었다.

Figure 4는 터빈블레이드 형상의 mock-up 들에 대한 코팅공정의 챔버조건을 나타내고 있다. 이때 1개의 잉곳이 총 4개의 mock-up 들이 위치한 길이방향 기준으로 중앙 하단에 위치하도록 하였으며, mock-up 들간의 간격은 위의 쿠폰시료에서와 마찬가지로 30 mm로 설정하였다. 이와 같은 조건은 mock-up 들에 대해 실제 코팅이 이루어지는 경우 간섭을 피할 수 있는 최소한의 간격으로 설정된 것이다. 코팅 계산을 위한 모델링 조건은 Table 1과 같다. Figure 5에서는 mock-up들이 잉곳 위치에 대해 기울어져서 회전 시에 두께 균일성을 모사한 결과이다. 푸른색에서 붉은색으로 변화될수록 코팅의 두께가 두꺼워 지는 것으로 표시되었다. 잉곳표면과 수평을 이루는 경우(0°)와 30°의 기울임 각을 갖는 경우(mock-up 시료 끝단이 하향기울임)로 나누어 계산한 결과, 일정한 각도로 기울어진 상태로 코팅 공정이 이루어지는 경우에서 개별 mock-up의 각 영역에서의 두께 균일도가 높은 것으로 계산되었으며, 특히 오목한 부위에서의 두께 균일도가 기울임 조건에서 높아짐을 알 수 있었다(오목한 영역에서의 극부 위치별 색도차이 감소). 이와 같은 결과는 ‘Line of sight(입자 직진성)’의 특성을 갖는 전자빔 증착에서 mock-up의 볼록한 부분(suction area)과 오목한 부분(pressure area)의 중앙부가 잉곳과 마주보는 상태(180°)를 제외한 경우는 시료의 굴곡정도에 따라 회전 시 흡착되는 입자의 양이 부위별로 달라지게 된

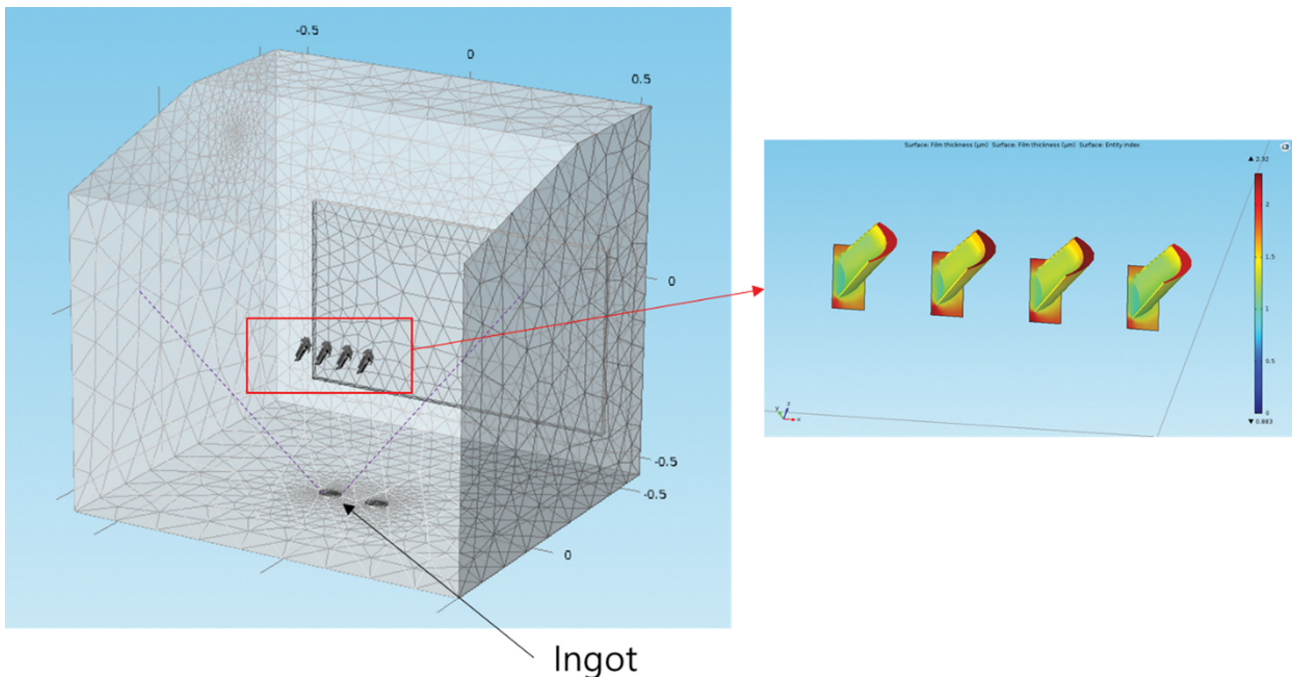


Fig. 4. Modelling of configurational positions of turbine blade shape mock-up for e-beam evaporation.

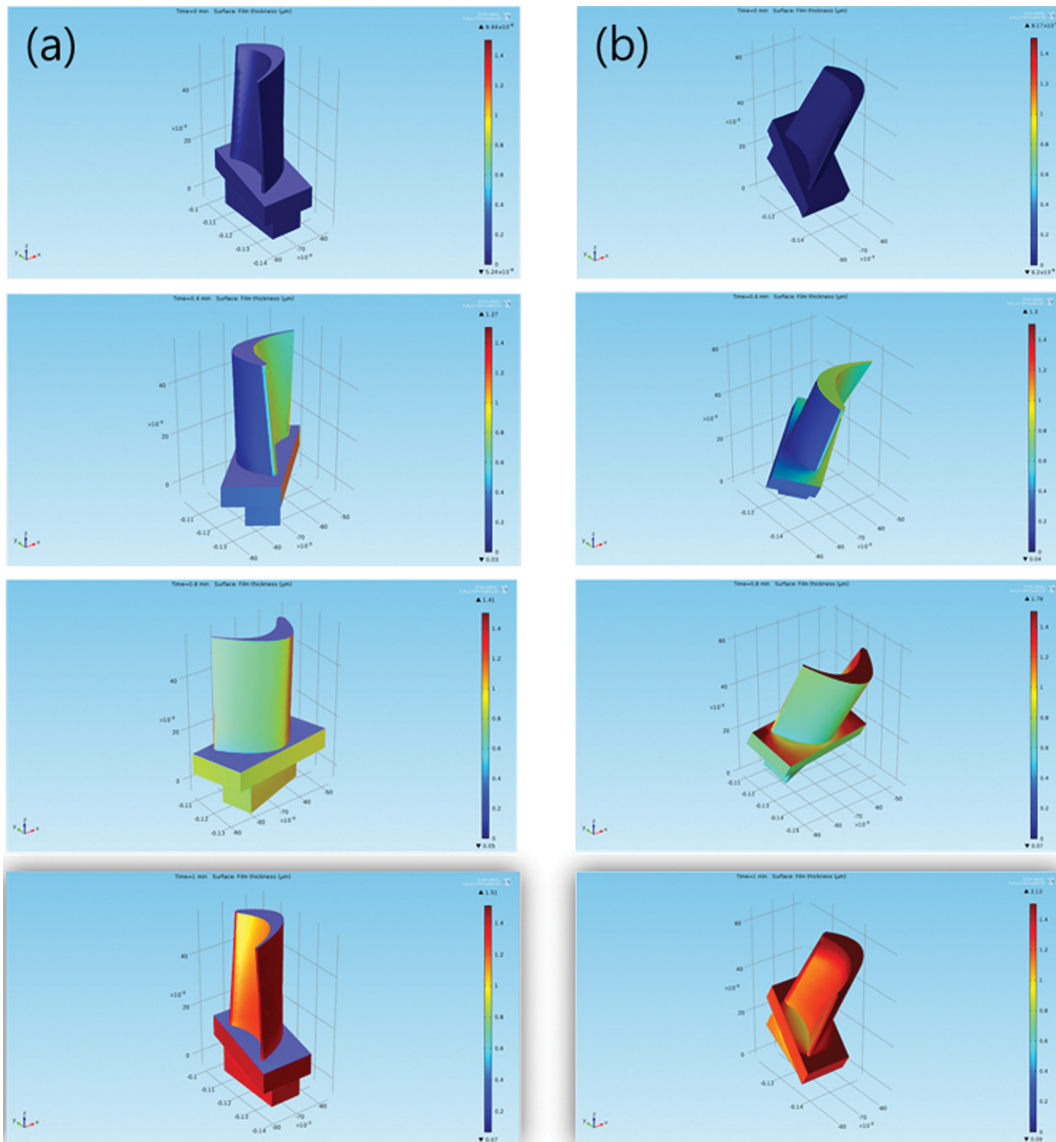


Fig. 5. Modelling of film thickness difference for coated turbine blade shape mock-up with different tilt condition; (a) 0° (parallel) and (b) 30° to the evaporation source (ingot).

다. 특히 오목한 부분의 경우 굴곡진 형상에 의해 증착 입자 이동이 간섭되어 볼록한 부분에 비해 증착도가 커질 수 있다. 따라서 회전 시 시료의 기울임 조건은 특히 오목한 부분에 대하여 잉곳으로부터 발생된 코팅입자가 시료표면으로 이동/흡착되는 거동이 보다 원활이 일어날 수 있는 조건을 제공할 수 있으며, 이에 따라 기울임이 적용되지 않은 경우에 비해 전반적인 증착 균일도가 상대적으로 높아지는 것으로 예측되었다.

Figure 6에서는 터빈블레이드 형상 mock-up에 대한 실제 코팅 적용시험을 위한 챔버 배치 모습이다. 4개의 mock-up을 일렬로 배열하고(mock-up간 간격 30 mm, 전산모사 실험과 동일조건), 길이 방향의 배열에서 중앙 하단에 코팅 소스(잉곳)를 배치하였다. 이때 mock-up들의 위치로부터 잉곳까지의 거리는 300 mm(수직거리)로 배

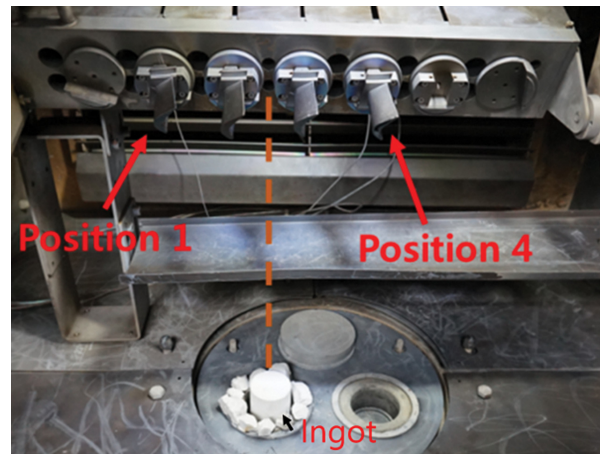


Fig. 6. Configurational positions of turbine blade shape mock-up for e-beam evaporation above coating source (ingot).

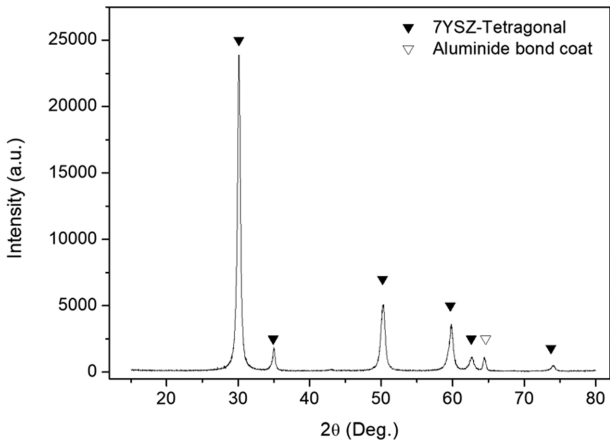


Fig. 7. XRD pattern of 8YSZ coating on the turbine blade shape mock-up.

치 하였다(Fig. 6 내 점선부분). Figure 7에서는 제조된 코팅의 상형성 거동을 확인하였다. 탑 코트인 7YSZ의 전형적인 정방정상(tetragonal phase)의 성장거동을 보이고 있으며, 본드코트인 니켈 알루미늄이드로부터 기인한 피크( $2\theta = 64.6^\circ$ )도 관찰되고 있다. Figure 8에 도시된 결과에서는 그림 내 우상단에 보이는 터빈블레이드 형상 mock-up의 위치에 따른 코팅두께 분포를 나타내었다. 볼록한 부위(1~3번 위치)에서는 약  $30\ \mu\text{m}$  수준의 두께로 코팅되었음이 측정되었고, 오목한 부위(7, 9번 위치)에서는 상대적으로 낮은 두께 수준(약  $27\ \mu\text{m}$ )이 측정되었다. 이와 같은 결과는 ‘Line of sight’의 특성 및 증착 시 회전 조건에 의해 발생하는 ‘Shadow effect’의 차이로 인한 것으로 해석된다. 즉, 잉곳으로부터 증발된 입자가 굴곡 형상(contour)을 갖는 기관 표면에 도달하는 과정에서 기관의 회전조건에 의해 위치별로 입자의 흡착수준이 달라지기 때문인 것으로 해석할 수 있다[14]. Figure 9에서 터빈블레이드 형상 mock-up에 증착된 코팅의 단면 미세구조를 나타내었다. Figure 9(a)와 (b)에서 각각 볼록한 영역(3번 위치)과 오목한 영역(7)의 단면구조를 나

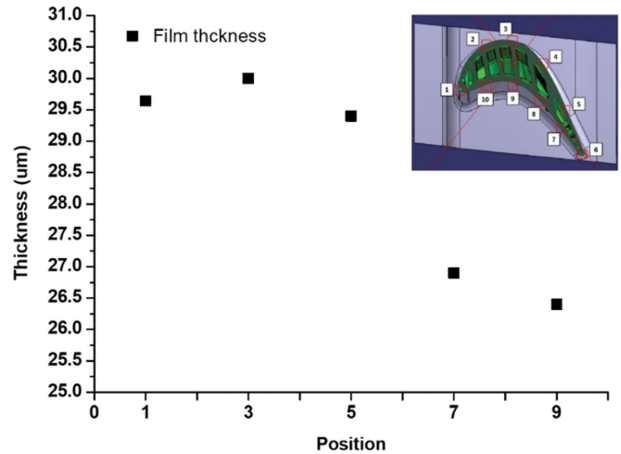


Fig. 8. Film thickness difference for coated turbine blade shape mock-up at position 4.

타내었다. 두 코팅의 경우 약  $3\ \mu\text{m}$  정도의 두께차이를 나타내고 있음이 관찰되며, 전형적인 주상성장 구조를 나타내고 있다. 전자빔 증착에서의 주상성장 거동은 전자빔에 의해 기화된 입자가 기관 표면에 도달되는 플럭스(flux)의 차이에 의해 불균일한 입자확산이 유도되어 생성된 핵이 경쟁적으로 성장하는 과정으로 인해 주상형의 결정립 성장이 일어나게 된다고 알려져 있다. 또한 기관의 형상, 표면상태, 회전조건, 기관 온도와 같은 공정조건에 의해서 주상 결정립의 크기 및 형상이 영향을 받는 것으로 보고되고 있다[15,16]. Figure 9(a)와 (b)의 경우 서로 다른 기관형상 조건이나, 회전과 기울임 등 공정조건 제어로 인해 주상성장의 양상은 유사하게 나타난 것으로 추정해 볼 수 있다.

Figure 10에서는 Fig. 6의 배치조건에서 코팅시간을 늘려(25 min → 35 min) 증착두께 차이 분포를 크게 하여 각 터빈블레이드 형상 mock-up의 챔버 내 배치별 두께 형성 거동을 분석하고자 하였다. 앞서 Fig. 8에서의 측정결과와 유사하게 개별 터빈블레이드 형상 mock-up의 각 부위별 코팅 두께는 볼록한 부위(1~5번 위치)에서 오

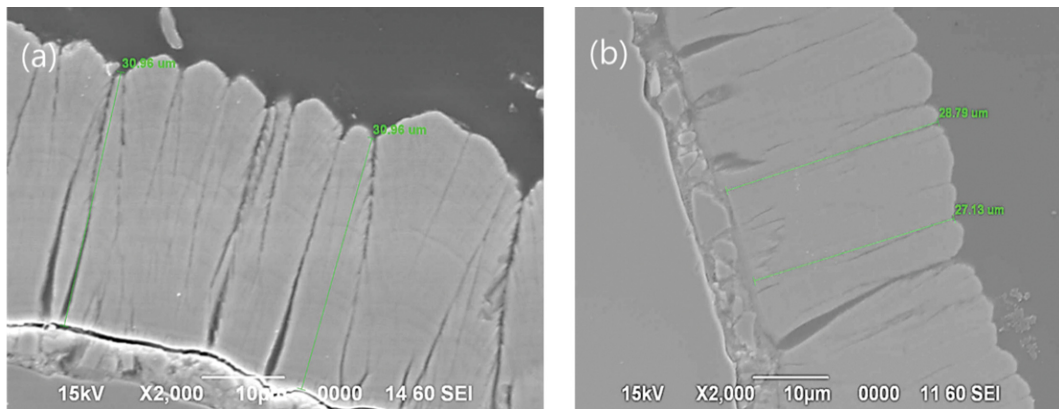


Fig. 9. Cross sectional microstructure of coating on turbine blade mock-up; (a) Position 3 and (b) Position 7.

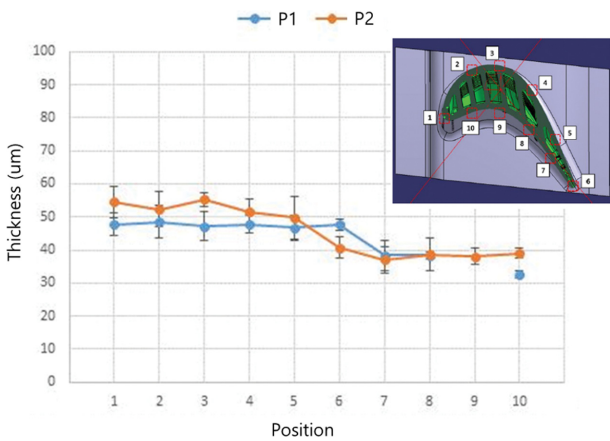


Fig. 10. Film thickness difference for coated turbine blade shape mock-up at position 1 (P1) and 2 (P2).

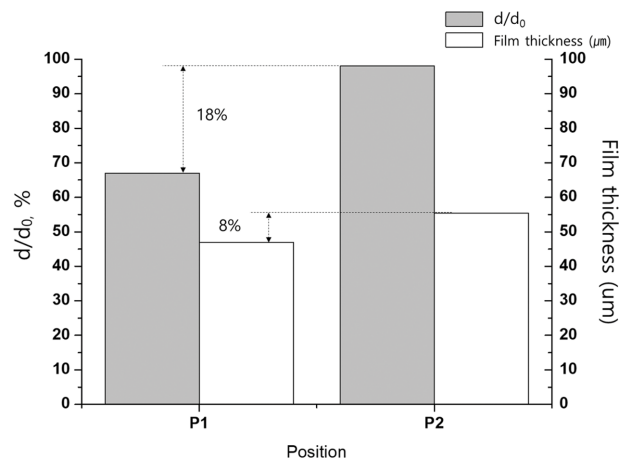


Fig. 12. Film thickness difference based on the coated turbine blade shape mock-up position.

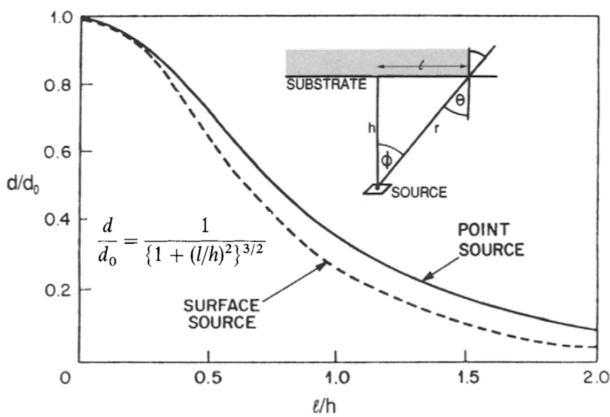


Fig. 11. Theoretical film thickness uniformity during e-beam evaporation [17].

목한 부위(6~10번 위치)보다 높은 증착두께 분포를 보였으며, 또한 Fig. 3에서 전산 모델링의 결과에서와 같이, 챔버 내 배치된 터빈블레이드 형상 mock-up이 잉곳위치와 수직인 위치의 상부에 놓여진 포인트로부터 멀어질수록 증착두께가 감소하는 경향을 보였다(P1 < P2). Figure 11은 전자빔 증착 시 증발원(잉곳)과 수직인 위치까지의 거리(h) 및 수직인 위치로부터 평행하게 떨어져 배열된 위치까지의 거리(t)의 함수로 증착두께(d)의 편차를 이론적으로 계산하는 방식을 나타낸 그림이다[17]. Knudsen theory 및 동역학 이론을 참고하면, 증발 입자의 흐름은 cosine 법칙을 따르며(아래 식 1), 특히 증발원이 포인트가 아닌 일정한 면적을 갖는 경우 반원의 분포에서 cosine 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다[17].

$$d = \frac{\bar{M}_e \cos\theta \cos\phi}{\pi r^2} = \frac{\bar{M}_e h}{\pi r^2 r} = \frac{\bar{M}_e h^2}{\pi \rho (h^2 + t^2)} \quad (1)$$

$$\cos\theta = \cos\phi = h/r, d_0 = \bar{M}_e / \pi r h^2$$

증착두께 d는 위의 식을 따르며 이때 d<sub>0</sub>는 증발원과

수직인 위치에서의 증착두께(가장 두껍게 증착되는 위치)를 나타낸다. 증발원을 점(point)로 상정한 경우와 면적을 가진 경우(surface)로 구분하여 계산하였을 때, 증발원에 수직인 위치로부터 멀어졌을 때 감소되는 증착두께의 차이가 나타남을 보이고 있으며, 본 실험에서는 55φ의 면적을 갖는 증발원(잉곳)을 사용하였으므로 면적을 가진 경우의 이론적 계산 거동에 근사하여 비교하고자 하였다. Figure 12에서 실제 코팅된 터빈블레이드 형상 mock-up의 챔버 내 배치에 따른 증착두께 편차를 Fig. 11에서의 이론식에 따라 계산한 결과를 나타내었다. 이론적 계산에서는 P1과 P2의 경우에서 18%의 두께 차이가 계산되어지나, 실제의 경우는 약 8% 정도의 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과는 평판형의 기관을 전제로 계산된 이론식의 경우 전자빔 증착 시 발생하는 ‘Line of sight’ 및 ‘Shadow effect’의 적용에 의해 적은 기관간 간격에서도 두께 차이가 비교적 크게 나타난 것으로 생각되며, 실제 굴곡진 표면 형상을 갖는 터빈블레이드 형상 mock-up의 경우 증발원에 대해 기울어진 조건에서 회전속도를 제어함으로써 개별 터빈블레이드 형상 mock-up의 위치별 및 챔버 내 배열 조건에 따른 증착두께 편차를 최소화할 수 있는 것으로 해석될 수 있으며, 본 연구에서 수행된 전산 모델링의 경우도 비교적 실제 실험결과에 유사한 예측 결과를 나타낸 것을 알 수 있었다(P1, P2간 두께편차: 실제 약 8%, 계산결과 약 10% 수준).

#### 4. 결 론

전자빔 물리기상증착법으로 7 wt% 이트리아 안정화 지르코니아 소재를 이용하여 터빈블레이드 형상 mock-up에 대한 열차폐코팅 균일증착 실험을 수행하였다. 먼저 실제 코팅챔버 내 터빈블레이드 형상 mock-up들

의 기하학적 배치와 공정인자 조건을 설정하여 전산모사법에 의해 증착 거동을 모델링하였다. 이후 동일한 조건의 챔버 구성을 통해 실제 코팅을 수행하여 모델링 계산 결과와 비교하고, 전자빔을 이용한 이론적 증발증착 거동과 기관형상 및 배치 조건에 따른 실제 증착과의 편차 발생에 대하여 고찰하였다.

전산모사에 의해 계산된 모델링 결과 증발원(잉곳)과 수직인 위치의 상부로부터 수평방향으로 멀어질수록 증착 두께가 감소되는 결과가 나타났으며, 이는 실제 터빈 블레이드 형상 mock-up의 증착과 유사한 거동을 보였다.

터빈블레이드 형상 mock-up의 경우, 증발원에 수직인 상부에 위치할 경우와 인접한 경우의 차이는, 이론식의 경우 약 18%의 편차로 계산되었으나, 실제 코팅의 경우는 약 8% 정도의 편차를 보였다.

이와 같은 결과는, 평판과 같이 단순 형상의 기관이 아닌 굴곡을 갖는 표면 형상을 가지며, 기관의 회전, 기울임 등 기하학적 공정 요소가 적용된 터빈블레이드 형상 mock-up의 실제 코팅은 이론적인 증발증착과 다른 거동을 보일 수 있음을 시사하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 'Line of sight'와 'Shadow effect' 등 전형적인 전자빔 증발증착 거동에서 복수개의 코팅 대상물의 형상과 챔버 내 기하학적 배치 조건에 따라 증착두께 편차를 감소시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 국방과학연구소와 한화에어로스페이스 주관의 선도형 사업의 연구지원으로 수행되었습니다.

## References

- [ 1 ] R.T. Wu, M. Osawa, T. Yokokawa, K. Kawagishi and H. Harada, "Degradation mechanisms of an advanced jet engine service-retired TBC component", *J. of Solid Mechanics and Materials Engineering* 4 (2010) 119.
- [ 2 ] R.A. Miller, "Thermal barrier coatings for aircraft engines history and directions", *J. Therm. Spray Technol.* 6 (1997) 35.
- [ 3 ] E. Lugscheider, C. Barimani and G. Döpper, "Ceramic thermal barrier coatings deposited with the electron beam-physical vapour deposition technique", *Surf. Coat. Technol.* 98 (1998) 1221.
- [ 4 ] U. Schulz, K. Fritscher and M. Peters, "EB-PVD  $Y_2O_3$ - and  $CeO_2Y_2O_3$ -stabilized zirconia thermal barrier coatings—crystal habit and phase composition", *Surf. Coat. Technol.* 82 (1996) 259.
- [ 5 ] U. Schulz, "Phase transformation in EB-PVD yttria partially stabilized zirconia thermal barrier coatings during annealing", *J. Am. Ceram. Soc.* 83 (2000) 904.
- [ 6 ] J.R. Nicholls, K.J. Lawson, A. Johnstone and D.S. Rickerty, "Methods to reduce the thermal conductivity of EB-PVD TBCs", *Surf. Coat. Technol.* 151-152 (2002) 383.
- [ 7 ] J. Singh and D.E. Wolfe, "Architecture of thermal barrier coatings produced by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD)", *J. Mater. Sci.* 37 (2002) 3261.
- [ 8 ] B.K. Jang and H. Matsubara, "Influence of rotation speed on microstructure and thermal conductivity of nanoporous zirconia layers fabricated by EB-PVD", *Scr. Mater.* 52 (2005) 553.
- [ 9 ] M. Matsumoto, K. Wada, N. Yamaguchi, T. Kato and H. Matsubara, "Effects of substrate rotation speed during deposition on the thermal cycle life of thermal barrier coatings fabricated by electron beam physical vapor deposition", *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) 3507.
- [ 10 ] K. Wada, N. Yamaguchi and H. Matsubara, "Effect of substrate rotation on texture evolution in  $ZrO_2$ -4 mol.%  $Y_2O_3$  layers fabricated by EB-PVD", *Surf. Coat. Technol.* 191 (2005) 367.
- [ 11 ] U. Schulz, K. Fritscher, C. Leyens and M. Peters, "Influence of processing on microstructure and performance of electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) thermal barrier coatings", *J. Eng. Gas Turbines Power* 124 (2002) 229.
- [ 12 ] U. Schulz, S.G. Terry and C.G. Levi, "Microstructure and texture of EB-PVD TBCs grown under different rotation modes", *Mater. Sci. Eng. A360* (2003) 3199.
- [ 13 ] A. Flores Renteria, B. Saruhan, U. Schulz, H.-J. Raetzler-Scheibe, J. Haug and A. Wiedenmann, "Effect of morphology on thermal conductivity of EB-PVD PYSZ TBCs", *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 2611.
- [ 14 ] U. Schulz, S.G. Terry and C.G. Levi, "Microstructure and texture of EB-PVD TBCs grown under different rotation modes", *Mater. Sci. Eng. A360* (2003) 319.
- [ 15 ] Y. Tamarin, "Protective Coatings for Turbine Blades", 1<sup>st</sup> ed., Y. Tamarin, Ed. (ASM International, Ohio, 2002) p. 161.
- [ 16 ] U. Schulz, H.J. Raetzler-Scheibe, B. Saruhan and A.F. Renteria, "Thermal conductivity issues of EB-PVD thermal barrier coatings," *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 38 (2007) 659.
- [ 17 ] M. Ohring, "Materials Science of Thin Films", 2<sup>nd</sup> ed. (Academic Press, San Diego, 2002) p. 106.