유성구불밀을 이용한 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 계 서스펜션준비와 서스펜션 플라즈마용사를 이용한 $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 코팅증착과 특성

권창섭^{a,b} · 이성민^a · 오윤석^a · 김형태^a · 장병국^c · 김성원^{a,*}

^a한국세라믹기술원 엔지니어링세라믹센터, ^b인하대학교 신소재공학부

^c물질 · 재료연구기구 (NIMS) 선진고온재료유닛

Preparation of Suspension in $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ System via Planetary Mill and Characteristics of $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Coatings Fabricated via Suspension Plasma Spray

Chang-Sup Kwon^{a,b}, Sung-Min Lee^a, Yoon-Suk Oh^a, Hyung-Tae Kim^a,
Byung-Koog Jang^c, and Seongwon Kim^{a,*}

^aEngineering Ceramic Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology,
Icheon Gyeonggi-do 467-843, Korea

^bSchool of Materials Science and Engineering, In-Ha University, Incheon, Korea

^cHigh Temperature Materials Unit, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

(Received November 20, 2013; Accepted December 16, 2013)

Abstract Lanthanum/gadolinium zirconate coatings are deposited via suspension plasma spray with suspensions fabricated by a planetary mill and compared with hot-pressed samples via solid-state reaction. With increase in processing time of the planetary mill, the mean size and BET surface area change rapidly in the case of lanthanum oxide powder. By using suspensions of planetary-milled mixture between lanthanum or gadolinium oxide and nano zirconia, dense thick coatings with fully-developed pyrochlore phases are obtained. The possibilities of these SPS-prepared coatings for TBC application are also discussed.

Keywords: Thermal barrier coatings, Suspension plasma spray, Rare-earth zirconate, Pyrochlore, Microstructure

1. 서 론

발전용 혹은 항공용 가스터빈 엔진의 고온부에 적용되는 초합금계 금속부품을 고온가스로부터 보호하는 열차폐 코팅(Thermal barrier coatings)은 엔진의 효율을 높이기 위해 가스터빈 작동온도를 높이는 방향으로 발전해 왔다[1-5]. 현재 산업적으로 가장 널리 이용되고 있는 6~8 wt.% Y_2O_3 (3.4~4.5 mol% Y_2O_3)로 안정화된 지르코니아(yttria-stabilized zirconia) 용사코팅은 1200°C 이상의 고온 적용시에 상전이나 고온내구성 저하 등의 제한이 있어 이를 소재[6]와 공정[7]의 관점에서 개선하고자 하는 노력이

있다.

열차폐코팅소재로서 갖추어야 할 요구조건으로 (1) 고용점, (2) 상온에서 작동온도까지 상안정성, (3) 저열전도성, (4) 화학적 안정성, (5) 금속기판과의 열팽창 적합성, (6) 기공상태가 고온에서 유지되도록 하는 낮은 소결성등 [8, 9]이 있다. 이러한 요구조건에 부합하는 후보소재로 희토류 산화물이 첨가된 지르코니아[10], 희토류 산화물 지르코네이트[8, 9, 11, 12]와 그외 다양한 산화물[13-16]이 있다. 이중 희토류 산화물 지르코네이트계 소재는 주로 파이로클로어(pyrochlore) 혹은 플루오라이트 (fluorite) 결정 구조를 지니는데 금속 양이온에 따른 넓은 조성영역과 결

*Corresponding Author : Seongwon Kim, TEL: +82-31-645-1452, FAX: +82-31-645-1492, E-mail: woods3@kicet.re.kr

합구조에 의한 저열전도성뿐 아니라 녹는점까지 단일상으로 존재하는 장점을 지닌다.

기존의 플라즈마용사 코팅으로 증착된 열차폐코팅의 구조는 플라즈마에서 용융된 액적 (splat)의 벽돌쌓기와 같아 고온내구성에 있어서는 취약하다[7]. 고온내구성의 관점에서 전자빔 물리증착법(electron beam physical vapor deposition, EB-PVD)으로 증착된 코팅이 주상정 구조(columnar structure)로 열팽창 변형에 대한 적응성(strain compliance)이 뛰어나 고온싸이클링에서 우수한 내구성을 나타낸다[2-4]. 최근에 용사기술을 기반으로 EB-PVD로 증착된 미세구조와 유사한 코팅을 구현하거나 고온내구성을 향상시키는 방법으로 기존의 용사코팅에 비해 열용량을 많이 사용하거나 코팅 후 열처리를 통한 치밀한 수직 균열(dense vertical crack)구조의 도입[17], 서스펜션 용사(suspension plasma spray)[18]를 이용한 주상형 구조 증착이나 수직균열 도입, 모재와 열팽창이 비슷한 코팅층 위에 열전도 특성이 향상된 층을 배치하는 세라믹 이중층(double ceramic layer) [19] 코팅법 등이 있다.

본 연구에서는 파이로클로어 상을 지니는 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 산화물에 대한 (1) 유성구 불밀후 분말, (2) 고온가압소결한 시험편, (3) 서스펜션 용사법으로 코팅한 시험편에 대한 상형성 거동을 살펴보았다. 또한 유성구 불밀시간에 따른 입자크기의 변화를 살피기 위하여 주사전자 현미경(scanning electron microscope)과 입도분석기(laser scattering particle size distribution analyzer), 비표면적 측정기(specific surface area analyzer)를 이용하여 입자크기의 변화를 확인하고 서스펜션 용사코팅 후에 코팅층 단면 미세구조를 관찰하여 열차폐코팅용 소재로서 적용가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 La_2O_3 (Kojundo Chemical Lab. Co., LTD, 99.9%, 10 μm), Gd_2O_3 (Kojundo Chemical Lab. Co., LTD, 99.9%, 2~3 μm), ZrO_2 (US Research nanomaterials Inc, 99%,

40 μm), ZrO_2 (Kojundo Chemical Lab. Co., LTD, 98%, 5 μm)의 산화물 분말을 사용하여 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 복합산화물을 코팅으로 증착하고 소결체로 제조한 시편과 비교하였다.

우선 유성구 불밀의 분쇄효과를 살피기 위하여 La_2O_3 , Gd_2O_3 각 분말을 지르코니아 볼 ($\phi 1$ mm)과 에탄올을 혼합매질로 사용하여 1 시간에서 6 시간 동안 300 RPM의 속도로 분쇄한 후 입도분석기(Laser scattering particle size distribution analyzer, LA-950V2, HORIBA, Japan)와 비표면적측정기(Surface area analyzer, TristarII3020, Micromeritics, USA)를 이용하여 유성구불밀 시간에 따른 입자크기와 비표면적 변화를 관찰하였다. 또한 분쇄된 각 분말에 대해서 주사전자현미경(Scanning electron microscope, JSM-6390, JEOL, Japan)을 통하여 크기변화를 관찰하였다.

La_2O_3 , Gd_2O_3 , 나노 크기 ZrO_2 각각의 분말을 표 1 나타낸 조성이 되도록 칭량하고 직경 1 mm 지르코니아 볼과 IPA(Isopropyl alcohol)를 혼합매질로 사용하고 분말대비 0.5 wt.%의 분산제를 첨가하여 유성구 불밀을 이용해 6 시간 습식혼합 후 혼합이 완료된 슬러리가 침전되지 않도록 마그네틱 바를 이용하여 교반시키며 건조하였고 이후 80°C 오븐에서 24 시간동안 항량 건조시킨 후 알루미늄 유발을 이용하여 분쇄하여 혼합분말을 제조하였다. 제조된 분말을 에탄올 대비 1:9 비율로 희석한 후 24 시간 불밀하고 10 μm 체를 사용해 체거름하여 액상의 혼합 슬러리를 제조하였다.

제조된 슬러리를 서스펜션 용사(Axial III plasma spray system, Northwest Mettech Corp., Canada)로 증착하였다. 사용된 슬러리는 공급관을 통해 플라즈마 토치까지 공급되고 내열금속기판을 장착한 지그를 1200 RPM의 속도로 회전시키면서 기판과 토치와의 간격을 75 mm 이격시킨 상태에서 로봇팔의 상하반복을 통해 220 [A], 111.65 [kW] 코팅 조건에서 150 pass 예열공정을 거친 후 동일한 방법으로 슬러리를 공급하면서 코팅하였다.

서스펜션 용사로 증착된 코팅의 상형성을 고온가압소결로 제조된 동일한 조성의 시편과 비교하였다. La_2O_3 ,

Table 1. Compositions of rare-earth oxides used in this study

#	Materials	Molecular weight (g/mol)	Molar ratio	Content (wt%)	Batch (g)	Total (g)
1	$La_2Zr_2O_7$	La_2O_3	325.8	1.00	56.9	28.47
		ZrO_2	123.2	2.00	43.1	21.53
2	$(La_{0.5}Gd_{0.5})_2Zr_2O_7$	La_2O_3	325.8	0.50	27.6	13.79
		Gd_2O_3	362.5	0.50	30.7	15.35
		ZrO_2	123.2	2.00	41.7	20.86
3	$Gd_2Zr_2O_7$	Gd_2O_3	362.5	1.00	59.5	29.77
		ZrO_2	123.2	2.00	40.5	20.23

Gd_2O_3 , 마이크로 크기 ZrO_2 분말을 $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{ZrO}_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 조성에 따라 칭량하고 분산제와 IPA 혼합매질로 사용하여 24 시간 볼밀한 후 교반하면서 건조하고 건조된 분말을 알루미늄 유발을 사용해 분쇄하여 1400°C 에서 2 시간 하소처리하였다. 하소된 분말은 알루미늄 유발을 사용하여 분쇄하고 체거름하여 조립화시켜 혼합분말을 제조하였다. 제조된 분말은 직경 30 mm 흑연 몰드에 장입시킨 후 고온가압소결로에 넣어 Ar분위기에서 1700°C 까지 승온하여 30 MPa의 압력으로 1 시간 고온가압소결하여 비교시험편을 제조하였다.

제조된 시험편의 상형성을 분석하기 위하여 고출력 X-선 회절기(X-ray diffractometer D/max-2500/PC, Rigaku, Japan)를 이용하여 40 kV, 200 mA의 조건에서 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 스캔 속도로 $20\sim 70^\circ$ 까지 회절 패턴을 관찰하였다. 또한 주사전자현미경(Scanning electron microscope, JSM-6390, JEOL, Japan)을 통하여 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유성구 볼밀을 적용한 서스펜션 준비

기존의 플라즈마 용사와는 달리 최근에는 용액상태의 슬러리를 이용한 열용사코팅 기술이 많이 개발[7, 18]되고 있으며, 이로 인해 나노구조의 코팅 또한 발전하고 있다. 코팅구조는 나노크기의 서스펜션을 사용하여 비교적 치밀하고 용사조건에 따라서는 열내구성이 향상되는 것으로 알려진 수직분리(vertical separation)가 있는 코팅층을 구현할 수 있다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 나노 ZrO_2 , La_2O_3 , Gd_2O_3 세 가지 분말에 대한 고배율 전자 현미경 사진이다. ZrO_2 의 경우 분말의 응집으로 인해 실질적인 입자 크기의 확인이 어려웠으며 Gd_2O_3 분말에 비해 La_2O_3 분말의 입자크기가 작은 것으로 나타났다.

그림 2는 서스펜션 준비와 코팅에 대한 공정도이다. 우선 서스펜션 준비에서 유성구 볼밀을 이용해 분쇄효과를 살폈다. 상용분말의 입자 크기가 수 μm 이고, 분말 혼합과 별도의 분쇄가 요구되어지기 때문에 유성구 볼밀을 통한 분말 크기를 감소효과를 향상시키기 위하여 1 mm 지르코니아 볼을 사용하였으며, 슬러리 제조를 위해 유성구 볼밀 후 건조한 혼합분말을 알코올을 용매로 사용하여 볼밀을 통해 회석하고 서스펜션 용사법을 통해 코팅하였다. 열차폐코팅에서 사용되는 분말은 기본적으로 강도가 강한 지르코니아를 상당부분 포함하고 있어 그 자체로는 밀링을 통한 입자크기 감소를 얻는데 제한적이다. 따라서 지르코니아 원료는 상용에서 경제적으로 구할 수 있는 가장 작은 크기(40 nm)의 분말을 구하고 비교적 밀링이 용이한

Fig. 1. Scanning electron micrographs of starting powders of (a) nano size ZrO_2 , (b) La_2O_3 , and (c) Gd_2O_3 .

다른 산화물 분말은 유성구 볼밀을 적용해 1, 2, 4, 6 시간 밀링하여 입자크기를 살폈다. 그림 3에서 1, 2, 4, 6 시간 유성구 볼밀을 적용한 La_2O_3 와 Gd_2O_3 분말에 대한 밀링시간에 따른 입자크기의 변화를 관찰하였고, 표 2에서 입도분석을 이용하여 입자크기 변화를 수치화하였다. 미세구조 분석결과, 밀링시간에 따라 분말 크기가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 입도분석 결과에서도 마찬가지로 유성구 볼밀의 시간이 증가할수록 입자크기가 감소하며, 특히 1 시간에서 4 시간 볼밀 구간에서의 입자크기의 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 표 3은 입도분석과 동일 조건의 분말의 비표면적을 관찰한 결과이다. 비표면적은 단위질량의 고체 표면적으로 정의되며 일반적으로 입자크기가 작을수록 비표면적이 증가하게 되는데 분말의 응집체가 형성된 경우에는 입도분석만으로는 평균입자크기 변화를 평가하기 어려워 비표면적과 입도를 함께 분석한다. La_2O_3 와 Gd_2O_3 분말의 경우 밀링시간이 증가할수록 비표면적이 증가하였으며, 이는 미세 입자의 양이 증가하

Fig. 2. A processing flowchart of suspension plasma spray.

는 것을 반영한다.

3.2. 서스펜션 용사를 이용한 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ 코팅증착과 특성

본 연구에서는 나노크기의 지르코니아와 유성구 불밀을 이용하여 원료 산화물의 분쇄 및 혼합이 최적화되도록 준비하고 이를 서스펜션 용사를 이용하여 코팅으로 증착한 후 이를 상형성의 관점에서 동일한 조성의 소결체와 비교하였다.

그림 4, 5는 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 조성을 6 시간 유성구 불밀 후 건조한 혼합분말과 24 시간 불밀 후 1700°C 에서 30 MPa의 압력으로 1 시간 고온가압소결한 치밀화된 시험편에 대한 상형성 거동이다. 유성구 불밀 후 건조한 분말의 경우 각 산화물의 결정상이 혼재되어 나타났으며 혼합분말의 입도변화를 관찰할 수는 없었다. 3.1 절에서 논의한 La_2O_3 와 Gd_2O_3 분말 각각의 분쇄효과로 미루어 유성구 불밀에 의해서 분쇄/혼합을 기대할 수는 있었으나 기계적 합금과 같은 상형성 거동은 관찰할 수 없었다. 고온가압소결한 시험편의 경우 모든 조성에서 완전한 파이로클로어 상이 나타났으며, 그림에서 보는 바와 같이 (400)과 (440) 회절 피크 사이에 나타나는 (331), (511) 등의 파이로클로어 상에만 나타나는 초격자 피크들이 관찰되었다. 준비한 희토류 산화물 지르코네이트계 소재는 주

Fig. 3. SEM micrographs of milled powders of (a) La_2O_3 , (b) Gd_2O_3 after planetary milling for 1 hr, 2 hrs, 4 hrs, and 6 hrs.

Table 2. Size change of La_2O_3 and Gd_2O_3 powders with planetary milling time

#	Material	Mill time (h)	Mean size (μm)
1	La_2O_3	1	2.725
		2	2.050
		4	1.580
		6	0.930
2	Gd_2O_3	1	3.330
		2	3.010
		4	1.957
		6	1.372

로 파이로클로어 혹은 플루오라이트 결정구조를 지니는데 결정구조는 유사하지만 파이로클로어 구조의 경우 양이온의 규칙적인 배열과 특정위치에 산소 공극의 존재가 플루오라이트 구조와 비교하여 가장 큰 차이점이다. 본 연구에서 고온가압소결로 제조한 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 시험편의 경우에는 조성에 관계없이 파이로클로어 구

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ samples after planetary milling for 6 hrs.

Table 3. Specific surface area change with planetary milling time for La_2O_3 and Gd_2O_3 powders

#	Material	Time(h)	BET Surface Area (m^2/g)
1	La_2O_3	1	8.79
		2	10.79
		4	16.57
		6	17.77
2	Gd_2O_3	1	0.79
		2	4.83
		4	5.20
		6	7.16

조를 지녔으나 Gd 양이 증가함에 따라 격자상수가 감소하는 쪽으로 회절 피크가 이동하였다.

그림 6은 파이로클로어와 플루오라이트 결정구조의 개략도이다[6]. $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 에서 생성되는 파이로클로어 결정구조를 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 를 예로 들어 설명하면 La^{3+} 양이온은 결정학적 특정위치, 16c 자리 (0, 0, 0) (A 자리)를, Zr^{4+} 양이온은 16d 자리 (1/2, 1/2, 1/2) (B 자리)를 차지하며, (001) 면에서 [110] 방향과 [-110] 방향으로 번갈아 가면서 A, B의 양이온이 일렬로 배열되어 있는 규칙 격자(ordered structure) 갖는다. 산소이온의 경우에는 두 개의 48f 자리

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ samples after hot pressing at 1700°C (P indicates a 'pyrochlore' phase).

(x, 1/8, 1/8)와 8b 자리 (3/8, 3/8, 3/8)에 존재하며, 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 본래적인 점결함 (point defect)이 존재한다. 양이온의 규칙적 배열과 특정위치의 산소 공극에 의해서 단위포 내에 초격자 (superlattice)가 존재하고 이는 X-선 회절에서 부가적인 피크를 나타내게 된다. 또한, 희토류 산화물 지르코네이트의 경우 희토류 원소의 크기에 따라서 파이로클로어나 플루오라이트 구조를 가지게 되는데 예를 들어 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 의 경우에는 주로 파이로클로어 구조를 나타내지만 특정한 열처리 조건에서는 플루오라이트 구조를 나타내기도 한다[6].

그림 7은 $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 조성을 6 시간 동안 유성구 불밀 후 건조하여 다시 24 시간 불밀을 통해 제조된 슬러리를 사용하여 서스펜션 용사법으로 증착한 시험편의 코팅층 단면 미세구조와 X-선 회절 패턴 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 조성에서 파이로클로어 상이 나타났으며 조성에 따라서는 회절피크의 폭이 증가한 것으로 드러났다. 미세구조 관찰결과 코팅 자체는 상당히 치밀한 구조를 얻을 수 있었으며, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 이 관찰

Fig. 6. (a) A 1/8 unit cell of the $A_2B_2O_7$ -type pyrochlore structure that can be adopted by low thermal conductivity rare-earth zirconates (A = rare earth element, B = Zr), indicating lattice sites and the unoccupied oxygen position. (b) The defect fluorite structure that can be induced in heavier rare-earth zirconates or by heat treatment of pyrochlore-type $Gd_2Zr_2O_7$ and shows similar thermal conductivities to the pyrochlores[6].

되어 고온내구성 향상에 기여할 것으로 생각된다. 열차폐 코팅 내부에 존재하는 기공과 같은 결함(defect)은 열차폐 코팅의 열전도도와 고온내구성에 영향을 준다[7]. 예를 들어 전자빔 물리증착법으로 증착된 코팅은 깃털형상(feathery structure)과 주상정 구조의 수직분리(vertical separation)를 지니고 있어 금속 모재와 세라믹 코팅 간의 열팽창차이가 존재함에도 고온 내구성이 우수하여 항공용 엔진과 같이 열부하의 변화가 극심한 시스템에 적용된다[2-4]. 용사법을 기반으로 하는 증착법은 플라즈마 화염으로부터 액적(splat)이 형성되어 기판에 증착되는 기구로 벽돌쌓기구조(brick wall structure)를 지니 열응력이 주어졌을 때 내구성이 상대적으로 취약하다. 용사 코팅의 고온내구성을 향상시키기 위하여 분말의 입도 및 구조와 플라즈마 용사조건의 조절로 함께 응용되는 액적의 크기와 가하

Fig. 7. X-ray diffraction patterns and scanning electron micrographs of (a) $La_2Zr_2O_7$, (b) $(La_{0.5}Gd_{0.5})_2Zr_2O_7$, and (c) $Gd_2Zr_2O_7$ samples after suspension plasma spray.

는 열용량을 증가시켜 코팅의 수직분리를 공정 중에 도입하는 치밀한 수직균열(dense vertical crack) 구조가 최근 활발히 연구되고 있다[7, 17]. 서스펜션 용사법의 경우에는 분무건조한 과립 대신 액상의 원료를 사용하여 증착하는 방식으로 기본적으로는 치밀하고 표면조도가 향상된 코팅을 얻을 수 있으나 플라즈마 에너지를 증가시키면 수직균열이나 깃털구조를 지니는 코팅도 증착할 수 있는 것으로 알려져 있다[7, 18]. 본 연구에서는 용사조건은 일정하게 유지하면서 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$)에 대해서 서스펜션 용사법을 적용한 결과로 조성에 따라서 수직균열 구조가 관찰되기도 하였으나 이는 조성뿐만 아니라 본드코트의 표면조도에도 영향을 받는 것으로 사료되어 추후연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ ($x=0.0, 0.5, 1.0$) 산화물을 유성구 불밀로 준비한 슬러리를 서스펜션 용사법으로 증착한 코팅시험편에 대한 상형성 거동을 살폈다. 특히 고온가압소결로 제조하여 완전치밀화된 $(La_{1-x}Gd_x)_2Zr_2O_7$ 산화물 시험편을 기준시험편으로 상형성을 비교하였다. La_2O_3 ,

Gd_2O_3 은 유성구 불밀을 통해 상당한 입자크기의 감소를 확인하였다. 다만 나노 ZrO_2 , La_2O_3 , Gd_2O_3 분말을 유성구 불밀을 이용하여 서스펜션을 제조한 경우에 분쇄, 혼합효과 외에 기계적 합금화와 같은 추가적인 반응은 관찰할 수 없었다. 유성구 불밀로 제조한 슬러리를 서스펜션 용사법으로 $(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 증착한 코팅은 고온가압소결한 시험편의 경우와 같이 파이로클로어 상으로 조성과 서스펜션의 특성에 따라 회절 피크의 폭이 증가하는 것으로 나타났다. 본드코트 표면 조도와 같은 증착조건에 따라 치밀한 수직크랙이 관찰되었으며 이는 추후연구를 필요로 하지만 서스펜션 용사법으로 증착된 열차폐코팅의 잠재적 가능성을 보여주었다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통자원부의 전략적 핵심소재 기술개발사업과 한국세라믹기술원 정책연구사업의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. R. Clarke, M. Oechsner and N. P. Padture: Mater. Res. Soc. Bull., **37** (2012) 891.
- [2] D. R. Clarke and C. G. Levi: Annu. Rev. Mater. Res., **33** (2003) 383.
- [3] G. Carlos and C. G. Levi: Curr. Opin. Solid. State. Mater. Sci., **8** (2004) 77.
- [4] U. Schulz, B. Saruhan, K. Frischer and C. Leyens: J. Appl. Ceram. Techol., **1** (2004) 302.
- [5] R. Rajendran: Cont. Eng. Fail. Anal., **26** (2012) 355.
- [6] W. Pan, S. R. Phillpot, C. Wan, A. Chernatynskiy and Z. Qu: Mater. Res. Soc. Bull., **37** (2012) 917.
- [7] S. Sampath, U. Schulz, M.O. Jarligo and S. Kuroda: Mater. Res. Soc. Bull., **37** (2012) 903.
- [8] X.Q. Cao, R. Vassen and D. Stoever: J. Euro. Ceram. Soc., **24** (2004) 1.
- [9] J. Wu, X. Z. Wei, N. P. Padture, P. G. Klemens, M. Gell, E. Garcia, P. Miranzo and M. I. Osendi: J. Am. Ceram. Soc., **85** (2002) 3031.
- [10] M. N. Rahaman, J. R. Gross, R. E. Dutton and H. Wang: Acta. Mater., **54** (2006) 1615.
- [11] S. Kim, S. M. Lee, Y. S. Oh, H. T. Kim and B. K. Jang: J. Korean Powder Metall. Inst., **18** (2011) 568 (Korean).
- [12] C. S. Kwon, S. M. Lee, Y. S. Oh, H. T. Kim, B. K. Jang and S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **19** (2012) 429 (Korean).
- [13] M. R. Winter and D. R. Clarke: J. Am. Ceram. Soc., **90** (2007) 533.
- [14] X. Cao, R. Vassen, W. Fischer, F. Tietz, W. Jungen and D. Stöver: Adv. Mater., **15** (2003) 1438.
- [15] Z. Qu, T. D. Sparks, W. Pan and D. R. Clarke: Acta Mater., **59** (2011) 3841-3850.
- [16] M. O. Jarligo, D. E. Mack, G. Mauer, R. Vaßen and D. Stover: J. Therm. Spray Technol., **19** (2010) 303.
- [17] H. B. Guo, R. Vaßen and D. Stöver: Surf. Coat. Technol., **186** (2004) 353.
- [18] H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani, R. Vassen and D. Stoever: J. Therm. Spray. Technol., **17** (2008) 115.
- [19] X. Cao, R. Vassen, R. Tietz, F. Tietz and D. Stoever: J. Eur. Ceram. Soc., **26** (2006) 247.