

## 진공 상온 분사 공정으로 제조된 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 필름의 광 투과도에 미치는 미세조직 특성의 영향

김진영<sup>1</sup> · 박형권<sup>1</sup> · 남진수<sup>2</sup> · 손경수<sup>2</sup> · 임영태<sup>2</sup> · 이재욱<sup>2</sup> · 정봉근<sup>3</sup> · 이창희<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 신소재공학부

<sup>2</sup>LG전자 MC연구소 MT실

<sup>3</sup>서강대학교 기계공학부

### Effect of Microstructural Features on Optical Transmittance Mechanism in Vacuum Kinetic Sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3$ Film

Jinyoung Kim<sup>1</sup>, Hyungkwon Park<sup>1</sup>, Jin-su Nam<sup>2</sup>, Kyung Soo Son<sup>2</sup>, Young Tae Im<sup>2</sup>, Jae Wook Lee<sup>2</sup>, Bong Geun Chung<sup>3</sup> and Changhee Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Materials Science & Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

<sup>2</sup>MT Department of MC R&D Center, LG Electronics 08517, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 04107, Republic of Korea

**Abstract:** Glass materials have been applied in various industrial fields. Research on improvement of mechanical properties has consistently been performed due to this material's intrinsically vulnerable characteristics. Surface modification is considered as the promising method to supplement the weakness; especially, ceramics are thought of as appropriate materials for film materials because of their outstanding mechanical properties and their chemical stability. However, unfortunately, the optical transmittance of ceramic materials is poor, and can rather restrict this material's utilization in glass. In this regard, the optical transmittance mechanism of vacuum kinetic sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film was investigated. To control and analyze the film's optical property, the gas flow rate, as a main process variable, was controlled; then, post heat-treatment was performed. Consequently, the film's optical property was determined by three microstructural factors. That is, crystallite size, defects (including lattice distortion), and amorphous phase, generated during particle deposition, were found to strongly affect the transmittance.

(Received April 8, 2015)

**Keywords:** glass, coating, optical property, UV-vis spectrometer, vacuum kinetic spray

## 1. 서 론

유리는 현재 건축, 자동차, 용기, 섬유, 전자기기 산업 전반의 다양한 분야에 적용되고 있는 소재이며 특히, 디스플레이 산업의 경우 스마트폰, 태블릿 PC 등의 전자기기산업이 발전함에 따라 수요가 급속도로 증가하고 있는 추세이다. 하지만 유리는 소재의 특성상 기계적 특성이 떨어지기 때문에, 유리를 강화시켜 그 활용도를 높이기 위한 연구가 지속적으로 이루어져오고 있다.

유리를 강화하는 방법에는 크게 열 강화(tempering) 및 이

온 교환법 (ion exchange process) 등으로 대표되는 유리 자체의 기계적 특성 강화 방법과 유리 표면에 기계적 특성이 뛰어난 다른 물질을 코팅하여 표면을 강화하는 방법으로 나눌 수 있다 [1]. 강화 유리의 경우 보다 뛰어난 기계적 특성을 보이지만, 유리 몸체 전체가 강화되기 때문에 상대적으로 공정 단가가 높다 [2]. 따라서 다른 기계적 특성이 우수한 소재를 강화가 필요한 부분에 선택적으로 육성하여 강화할 수 있다면 기존의 생성된 유리 소재를 그대로 활용할 수 있으므로 응용성이 높을 뿐만 아니라 강화에 소모되는 재료를 줄일 수 있고, 특정 부위만 강화 공정에 적용하면 되므로 강화에 소모되는 공정 단가 감소를 기대할 수 있다.

세라믹 소재는 고경도, 내마모성 등의 우수한 기계적 특성

\*Corresponding Author: Changhee Lee

[Tel: +82-2-2220-0388, E-mail: chlee@hanyang.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

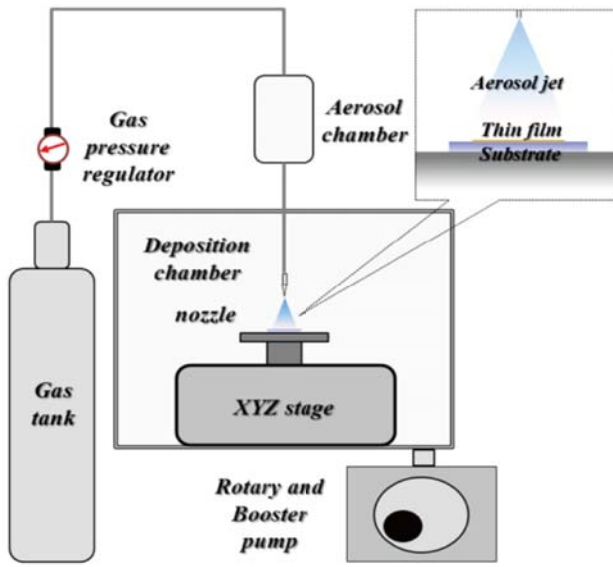


Fig. 1. Schematic illustration of the vacuum kinetic spray system.

Table 1. Vacuum kinetic spraying parameters.

Powder material	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Substrate	Soda-lime glass
Nozzle type	Slit nozzle
Carrier gas	He
Gas pressure	0.6 MPa
Consumption of carrier gas	2 - 18 L/min
Starting deposition pressure	$6.0 \times 10^{-2}$ Torr
Standoff distance	10 mm
Gun traverse speed	1.0 mm/s

을 지니면서 화학적 안정성을 가지고 있기 때문에 유리의 취약한 기계적 특성을 보완해줄 수 있는 적합한 재료로 평가되고 있다. 하지만 세라믹 소재는 취성이 크기 때문에 제품의 가공 및 성형이 어려울 뿐만 아니라, 높은 용점을 갖기 때문에 대부분의 제조공정이 고온 공정에서 이루어진다. 따라서 현재 유리 기판 상에 세라믹 필름을 육성하는 것은 기술적으로 상당히 제한적이다.

진공 상온 분사 (vacuum kinetic spray) 공정은 에어로졸 데포지션 (aerosol deposition)이라고도 불리는 공정으로 1990년대 후반, 일본의 Jun Akedo 박사가 고안해낸 기술로 현재까지 활발하게 연구가 진행되고 있는 차세대 세라믹 코팅 기술이다 [3,4]. 진공 상온 분사 공정은 서브 마이크론 크기의 세라믹 분말이 극심한 소성 및 파괴를 일으키면서 나노

결정립 구조의 치밀한 코팅층을 형성시키는 공정으로, 성막 속도가 빠르고, 공정이 상온에서 이루어진다. 따라서 유리 소재 상에 세라믹 필름 제조를 통한 유리 표면개질 기술에 적합한 공정으로 기대할 수 있다. 하지만 일반적으로 진공 상온 분사 공정으로 제조된 세라믹 필름의 경우 투과도가 떨어지는 특성을 보이는데, 이러한 특성은 세라믹 필름이 적용된 유리 소재의 활용도를 떨어뜨릴 수 있으며, 오히려 적용을 제한시킬 우려가 있다.

현재까지 진공 상온 분사 공정을 이용한 세라믹 필름의 광 투과도와 관련된 선행연구를 살펴보면, 대부분 공정 변수, 특히 입자의 속도를 제어하는 가스유량 변화에 따른 투과도 변화 및 열처리 조건에 따른 투과도 변화에 관한 연구결과가 보고되고 있다 [5,6]. 그러므로 이러한 연구결과를 통해 세라믹 필름의 투과도를 제어할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있다. 하지만 현재까지 진공 상온 분사로 제조된 세라믹 필름의 투과도 변화에 대한 정확한 원인 규명은 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 진공 상온 분사 공정을 이용하여 유리 기판 상에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅을 실시하였으며, 필름의 광학적 특성을 변화시키기 위하여 주요 공정 변수인 가스유량 변화 및 후열처리 공정을 실시하였다. 결과적으로 진공 상온 분사 공정으로 제조된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필름은 미세구조적 특징에 따른 광 투과도 변화를 확인할 수 있었다.

## 2. 실험 방법

원료 분말은 99.8% purity와 평균 0.3  $\mu\text{m}$ 의 입도를 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (AL-160SG-3, Showa Denko, Japan)을 사용하였고, 기판은 76 x 26 x 1 mm<sup>3</sup> 크기의 일반적으로 사용되는 소다 석회 유리(soda lime glass)를 사용하였다. 입자들 간의 응집 (agglomeration)을 방지하고 분말 입자의 에어로졸화를 향상시켜 적층 효율을 높이기 위해 코팅 실시 전 분말을 100°C의 드라이 오븐에서 수 시간 건조시켰다. 또한, ultrasonic을 이용하여 유리 기판 상에 광 투과도에 영향을 줄 수 있는 오염 물질을 제거하였다.

코팅에 사용된 진공 상온 분사 공정 장비는 그림 1을 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서 실시된 진공 상온 분사 공정의 공정 조건을 표 1에 나타내었으며, 자세한 공정조건은 다음과 같다. 가스 및 입자의 속도를 변화시키기 위해 가스 유량을 주요 변수로 하여 2~18 L/min으로 변화시키며 실험을 진행하였다. 또한, 넓은 범위의 입자 속도 제어가 가능한 헬륨을 공정 가스로 선택하였으며, 0.6 MPa로 가스 압력을 고정

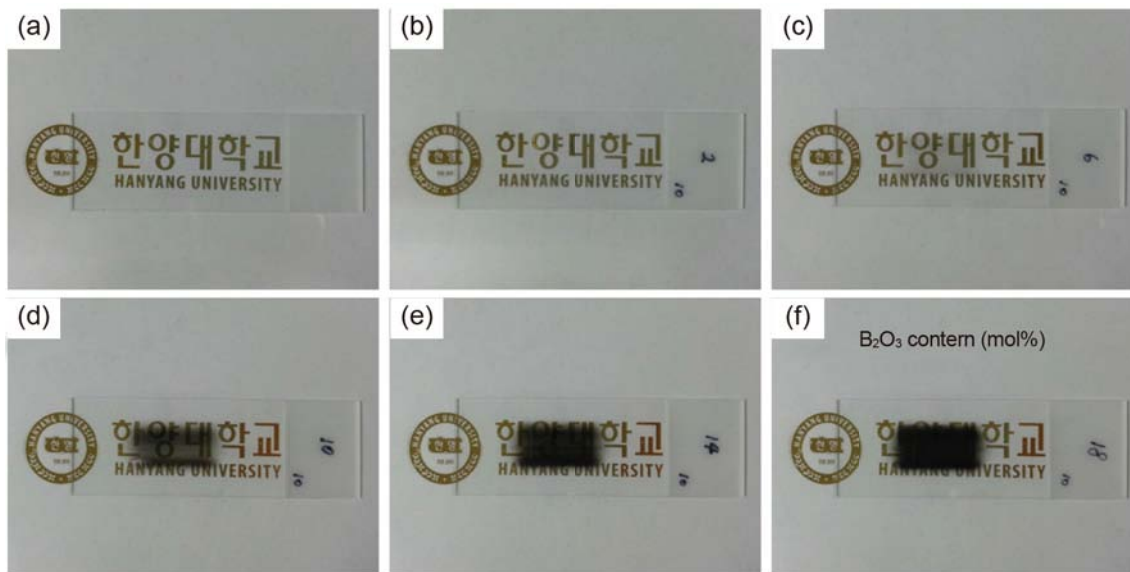


Fig. 2. Image of (a) bare glass and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating samples using different gas flow rate at (b) 2, (c) 6, (d) 10, (e) 14, and (f) 18 L/min.

하였다. 노즐은 convergent-barrel 형태의 입구 5.0 x 0.4 mm<sup>2</sup> 인 슬릿 (slit) 노즐을 사용하여 5.0 x 20.0 mm<sup>2</sup>의 면적을 코팅하였으며, 노즐과 기판과의 거리는 10 mm, 기판의 이동 속도는 1 mm/s 로 각각 고정하였다. 데포지션 챔버 내의 압력이 6.0 x 10<sup>-2</sup> Torr 일 때 적층을 시작하여 같은 면적 당 10 pass 코팅을 실시하였다.

본 연구에서는 광 투과도 제어를 위하여 추가적인 후열처리 공정을 진행하였으며, 후열처리는 박스 로(box furnaces) 400 °C의 air 분위기에서 10 분, 30 분 동안 진행하였다. 후열처리를 하지 않은 시편, 10 분 후열처리 시편, 30 분 후열처리 시편은 각각 As-coated, HT\_1, HT\_2 라고 명명하였다.

진공 상온 분사 공정을 통해 적층된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층의 광 투과도와 두께는 각각 UV-Vis spectrophotometer (Biochrom, Libra S70, England)와 surface profiler (Alpha-step 500, KLA-Tencor Co., USA)를 사용하여 측정하였으며, 코팅 내 미세구조의 결정도 변화 및 회복에 관한 분석을 위하여 HR-XRD (Rigaku, SmartLab, Japan)을 이용하여 XRD패턴을 측정 후 JCPDS 카드와 비교하여 분석을 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 수송가스의 유량 변화에 따라 유리기판 위에 육성된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층의 사진을 보여주고 있다. 그림 2(a)는 코팅층이 없는 보통의 유리 기판이며, 그림 2(b-f)는 각각 가스

유량이 2, 6, 10, 14, 18 L/min일 때 제조된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필름을 나타내고 있다. 그림 2(b)를 통하여 알 수 있듯이 2 L/min의 유량을 사용하여 제조한 필름의 경우에는 육안으로 구별이 되지 않을 정도로 투명한 막이 형성되었다. 하지만 유량이 6 L/min 이상부터는 유량에 비례하여 코팅층이 점점 어둡고 선명하게 형성되는 것을 그림 2(c-f)를 통해 확인할 수 있는데, 가스유량에 따라 필름의 투과도와 색감이 변하는 원인은 진공 상온 분사 공정의 적층 기구와 관련이 있는 것으로 사료된다 [5]. 진공 상온 분사 공정은 진공상태의 데포지션 챔버와 에어로졸 챔버 사이의 압력 차이에 따른 수송 가스의 가속으로 인해 분말이 고속으로 기판에 충돌하면서 분쇄되며, 분쇄된 입자의 표면에너지와 입자가 갖고 있던 일부 운동에너지가 파편 간의 결합과 관계가 있는 것으로 알려져 있다 [3]. 챔버 간의 압력 차이는 항상 동일하게 형성되므로 입자의 속도는 가스 유량이 결정하게 되는데 [3,7], 가스 유량이 증가할수록 입자가 가지는 운동에너지가 커져서 충돌 시 입자의 분쇄가 더욱 잘 일어나게 된다[8]. 결과적으로 더 작은 사이즈의 나노 결정립을 갖는 코팅층이 형성되기 때문에 전체적인 결정립계의 분율이 증가하여 빛이 투과할 때 빛 산란율이 증가하게 되므로 광 투과도를 저하시키는 것으로 사료된다 [9,10]. 또한, 초음속으로 가속된 입자가 이미 적층된 나노 결정립의 필름 상에 충돌을 일으키며 필름 육성이 되므로 필름 내부에 격자 변형의 발생 및 결합이 생성된다 [8,11,12]. 이러한 결합 및 격자 변형은 빛이 통과할 때 산란을 일으켜 코팅층의

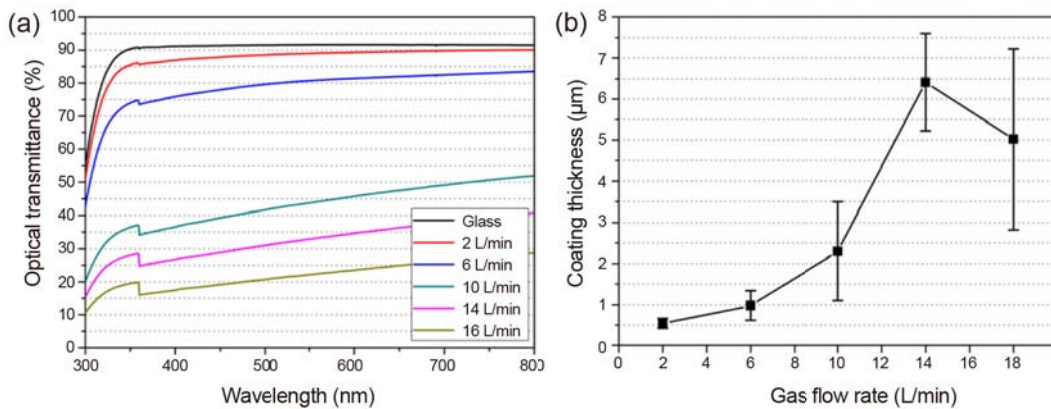


Fig. 3. (a) Optical transmittance (b) Coating thickness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films using different gas flow rate.

광 투과도 저하를 야기하는 것으로 사료된다 [9].

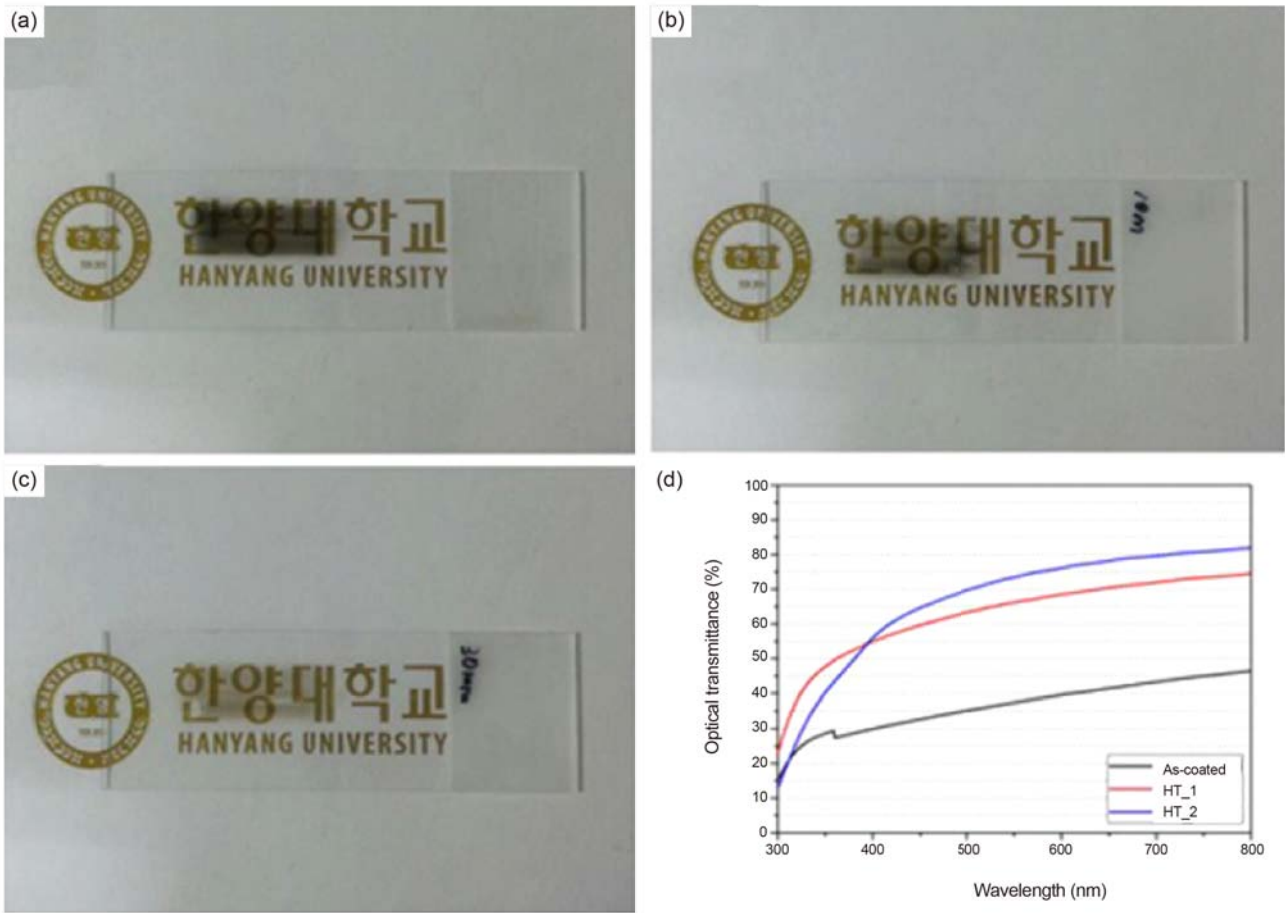
마지막으로 비정질화에 따른 투과도 저하를 생각해볼 수 있다. 진공 상온 분사 공정에서는 초음속으로 세라믹 입자가 충돌하여 부분적으로 미세구조의 비정질화가 진행된다고 보고되고 있다 [8,11]. 광학적 밴드갭을 고려해보면, 광학적 밴드갭보다 큰 에너지를 갖는 광자는 물질에 흡수되어 전자를 여기시키는데 사용되지만 광학적 밴드갭보다 작은 에너지를 갖는 광자는 흡수되지 않고 그대로 통과된다 [13]. 따라서 광학적 밴드갭이 큰 물질일수록 높은 광 투과도를 나타낸다고 할 수 있다. 비정질상으로 이루어진 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필름의 경우 3.00 eV 이하의 광학적 밴드갭을 가지는 반면, 완벽한 결정구조를 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필름은 그보다 높은 광학적 밴드갭을 가지고 있다 [14]. 가시광선 영역의 빛이 가지는 에너지의 범위는 약 1.55 ~ 3.26 eV 이므로 비정질상의 경우 일부 파장대의 빛 에너지는 필름을 통과하지 못하고 흡수되지만 필름의 격자가 잘 정렬된 구조의 경우에는 광자가 흡수되지 않고 통과하게 된다. 즉, 가스 유량을 증가시킬 경우, 입자의 속도 역시 점차적으로 증가하게 되고, 결과적으로 입자의 충돌에너지가 증가하게 되어 코팅층 내에 비정질상의 분율이 증가하게 된다 [7,12]. 따라서 이 높아진 비정질상 분율로 인하여 가시광선이 흡수될 확률이 증가하게 되므로, 상대적으로 투과율은 감소하게 된다.

그림 3(a)와 (b)는 각각 가스 유량 변화에 따른 광 투과도와 코팅층의 변화를 나타내고 있다. 그림 3(a)를 살펴보면 2에서 18 L/min으로 증가함에 따라 인간의 눈이 가장 민감한 파장인 550 nm를 기준으로 투과율은 89%에서 22%로 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다 [6,15]. 광 투과도는 일반적으로 두께가 두꺼울수록 감소되기 때문에 이러한 결과는 그

림 3(b)를 통해 확인할 수 있듯이 가스유량 2에서 14 L/min로 증가되면서 두께가 0.5에서 6.5 μm로 증가되고 이에 따라 광 투과도가 저하되는 것을 통해 알 수 있다 [16]. 하지만 18 L/min의 가스유량에서는 코팅 두께가 줄어들지만 오히려 광 투과도가 함께 감소되는 현상을 볼 수 있다. 이는 필름의 두께 이외에도 광 투과도에 영향을 미치는 요소가 있다는 사실을 의미한다.

그림 4(a)는 10 L/min의 가스 유량으로 적층한 후 아무런 후처리를 하지 않은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필름이며, 그림 4(b)와 (c)는 그림 4(a)와 동일한 조건으로 형성된 필름을 400 °C에서 각각 10 분과 30 분간 열처리한 결과이다. 그림 4(d)는 각 As-coated, HT\_1, HT\_2에 대한 광 투과도 특성평가 실험결과이다. 550 nm 파장을 기준으로 As-coated 필름의 투과율은 약 38%인 반면, 열처리를 진행한 HT\_1, HT\_2 필름은 각각 66%, 74%로 투과율이 향상되었음을 알 수 있다.

열처리에 의한 광 투과도 증가 원인은 크게 3가지로 생각해볼 수 있다. 첫째, 결정립 성장에 따른 계면의 감소이다. 앞에서 언급하였듯이 진공 상온 분사 공정은 필름 성막 과정 중에 입자가 빠른 속도로 충돌하여 분쇄되면서 극심한 변형을 동반한다 [8,11]. 결과적으로 약 5 ~ 30 nm의 나노 크기 결정립으로 이루어진 코팅층이 관찰된다 [3,4]. 이러한 나노 크기의 결정립에서는 grain boundary, triple line junction, quadratic node 등의 결정립 계면의 부피 분율이 높기 때문에 에너지적으로 높은 상태에 있다. 뿐만 아니라, 입자 파괴가 적층의 주 기구이기 때문에 코팅층 내에서는 다양한 결함과 격자 변형 역시 관찰된다고 보고되고 있다 [12]. 이러한 요소들은 제조된 필름의 저장된 에너지(stored energy)를 높이기 때문에, 결과적으로 이러한 에너지를 방출하려는 구동력



**Fig. 4.** Picture of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: (a) as-coated, heat-treated at 400 °C for (b) 10, (c) 30 min, and (d) optical transmittance of each Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film.

(driving force)이 커진다. 따라서 400 °C의 비교적 낮은 열처리 온도에서도 결정립 성장과 결함의 회복이 이루어진 것으로 판단된다 [6].

그림 5는 As-coated, HT\_1 및 HT\_2에 대한 HR-XRD 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 결정도 크기(crystallite size)는 HR-XRD 결과 피크와 Eq. 1에 나타난 Scherrer 방정식을 이용하여 구할 수 있다 [10,17].

$$\tau = (K\lambda)/(\beta\cos\theta). \quad (\text{Eq.1})$$

$\tau$ 는 결정립 크기를 나타내며,  $\lambda$ 는 X-ray의 파장 길이(Cu 타겟을 사용하였으므로  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ),  $\beta$ 는 FWHM (full width at half maximum),  $\theta$ 는 bragg's angle 을 나타낸다. (113) 면의 주요 피크를 통하여 계산된 As-coated, HT\_1, HT\_2의 결정립 크기는 각각 4.47 nm, 5.50 nm, 8.29 nm이다.

따라서 열처리가 진행될수록 결정립이 성장하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 입자간 계면의 면적이 감소하게 되고, 필름을 통과하는 빛 산란이 감소하게 되어 투과율이 증가하는 것으로 판단된다. 이러한 미세 결정도 크기는 추가적인 TEM 관찰을 통해 확인해 볼 필요가 있다.

둘째로는 앞서 언급하였던 결함 회복에 따른 투과율 향상이다. 일반적으로 진공 상온 분사 공정을 통해 육성된 필름의 경우, 그림 5에 나타난 바와 같이 XRD 피크의 broadening과 shift가 나타나는 것이 특징이다. 피크의 broadening의 경우 작은 결정립으로 이루어진 다결정립(poly crystal)에서 쉽게 관찰할 수 있으며, 진공 상온 분사 공정에서도 쉽게 관찰된다 [3,18]. 또한, 피크의 shift는 보통 격자가 변형된 구조에서 관찰되며, 결함이 많고 격자의 변형이 심한 진공 상온 분사 필름에서도 나타난다[8,18]. JCPDS 카드 85-1337에 따르면 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (113) 면의 표준 피크는 43.80°이다. 하지만 Fig. 5의

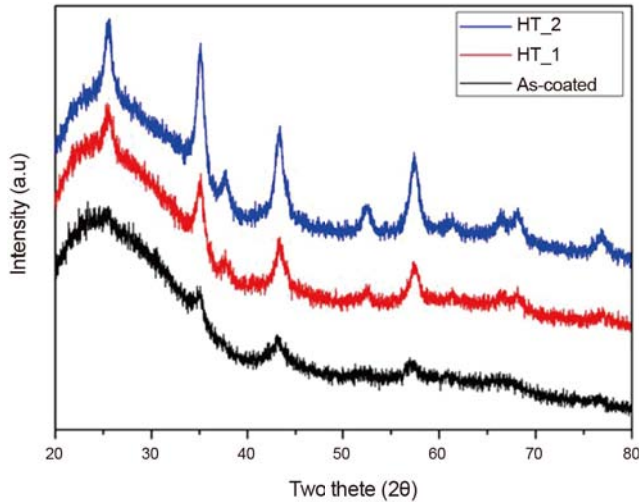


Fig. 5. HR-XRD measurement of as-coated and heat-treated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films.

Table 2. XRD peak position of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  for (113) plane

Standard	43.80°
As-coated	42.98°
HT_1	43.21°
HT_2	43.39°

R-XRD 패턴에서  $43^\circ$  부근의 (113) 면의 피크가 기준 (standard) 상태와 비교하여 미세하게 왼쪽으로 shift한 것을 확인할 수 있으며 이는 표 2에 자세하게 나타내었다. 즉, 기준 상태의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 피크 위치는  $43.80^\circ$ 이지만 코팅층의 피크 위치는  $42.98^\circ$ 로 이동하였다.

이어서 열처리를 진행한 코팅층의 피크 위치를 보면 HT\_1의 경우  $43.21^\circ$ , HT\_2의 경우  $43.39^\circ$ 로 조금씩 원래 위치로 되돌아오는 것을 알 수 있다. 이는 열처리에 의한 회복으로 인해 코팅층 내의 격자 변형 및 결함이 회복되는 것을 의미한다. 따라서 빛 산란에 기여하는 격자 변형 및 결함의 감소로 인해 산란되는 정도가 줄어 투과율이 증가하는 것으로 판단된다.

마지막으로 코팅층 내의 비정질상의 결정화를 생각해볼 수 있다. 앞서 서술한 광학적 밴드갭과 투과율의 관계에서 비정질상의 결정화가 투과율의 증가에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 일반적으로 극심한 외부응력에서 결정립은 점차 작아지고, 일부는 붕괴되어 비정질화가 진행될 수 있다 [8,19]. 이렇게 생성된 비정질상은 결정상보다 에너지적으로 높은 상태에 있으므로, 충분한 에너지가 주어지면 다시 결정

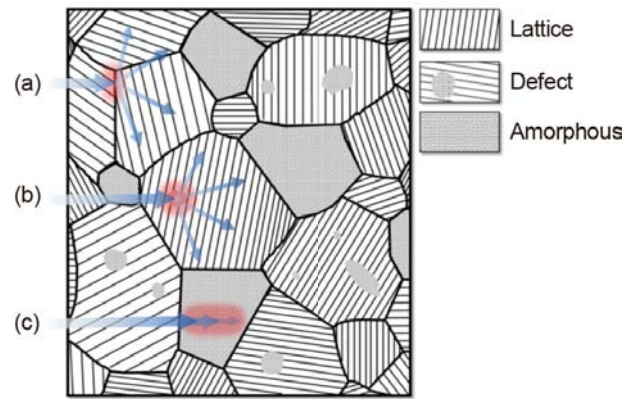


Fig. 6. Schematic image of coating layer microstructure and light scattering and/or absorption mechanism; (a) grain boundary (b) defect (or lattice strain) and (c) amorphous phase.

을 갖는 구조로 변태하여 안정화를 진행하려고 한다. 이러한 비정질상의 결정화가 진행되는 온도는 성분에 따라 상당히 다양할 뿐만 아니라, 내포된 응력 상태에 따라 달라진다 [20]. 진공 상온 분사 공정으로 제조된 필름은 상당히 극심한 응력 상태에서 비정질화가 이루어졌기 때문에  $400^\circ\text{C}$ 의 비교적 낮은 온도에서도 비정질상의 결정화가 이루어질 수 있을 것으로 판단되며 [6,20,21], 이러한 상전이에 의한 비정질상의 감소로 가시광선의 흡수율이 떨어져 투과도가 회복되는 것으로 생각된다.

본 연구에서는 유리 기판 상에 세라믹 필름 형성시의 광 투과도가 변화하는 메커니즘을 필름의 미세구조적 관점에서 분석을 진행하였다. 일반적으로 필름의 두께에 따라 광 투과도는 감소가 되지만, 항상 비례하게 감소하지 않는 것으로 보아 두께뿐 아니라 미세구조에 의해서도 광 투과도가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 진공 상온 분사 공정으로 제조된 필름의 광 투과도에 영향을 미치는 미세구조적 특징은 총 3가지로 판단되며 그림 6을 통해 도식화하였다. 그림 6(a), (b)와 (c)는 각각 결정립계, 결함과 격자변형 및 비정질상에 의하여 빛의 투과가 저해되는 것을 나타내고 있다. 가스 유량이 증가할수록 결정립계의 분율이 증가하며, 열처리에 의한 결정립 성장은 결정립계의 분율을 감소시킨다 [6,10]. 따라서 그림 6(a)에 나타난 결정립계에 의한 빛의 산란 현상이 영향을 받게 된다 [9]. 결함 및 격자변형의 경우도 결정립계와 유사하게 가스유량과 열처리에 따라 변화하며 빛의 산란에 영향을 주며 이는 그림 6(b)와 같이 나타날 수 있다 [9]. 비정질상에 의한 영향을 빛의 산란보다는 광학적 밴드갭 에너지에 의한 일부 파장의 흡수라고 볼 수 있다 [13]. 따라서 그림 6(c)

와 같이 빛은 필름 내에 존재하는 비정질상을 지나면서 일부 또는 전체가 흡수되어 투과도가 줄어드는 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 진공 상온 분사 공정에 의해 제조된 필름은 미세구조적 특징에 의해 광 투과도는 변화될 수 있으며, 이는 미세구조를 제어하여 응용 목적에 적합한 광 투과도 제어가 가능함을 의미한다. 따라서 추후 필름 미세구조 제어 연구를 통하여 유리에 기계적 및 기능적 특성을 부여함과 동시에 투과도를 제어할 수 있는 토대를 마련하여 보다 다양한 산업분야로의 응용을 기대할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 진공 상온 분사 공정으로 제조된 세라믹 필름의 광 투과도 변화 메커니즘에 대한 연구를 진행하였다. 먼저, 광 투과도 메커니즘에 대한 분석을 위하여 유리 기판 상에 수송가스 유량 변화에 따라  $Al_2O_3$  필름을 제작하였으며, 후에  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 필름의 열처리를 진행하였다. 이를 통해 진공 상온 분사 공정으로 제조된  $Al_2O_3$  필름은 다음과 같은 3가지의 메커니즘에 의하여 투과도가 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 첫째는 결정립계에 의한 영향이다. 필름 내의 결정립 크기가 줄어들수록, 결정립계의 면적이 증가하여 빛이 산란되는 정도가 증가하게 되고 이에 따라 투과도가 감소하게 된다. 둘째, 광 투과도는 코팅층 내의 격자 변형과 결함에 의하여 변화한다. 진공 상온 분사 공정에서는 입자의 충돌/변형/파괴에 의하여 코팅층이 육성되는데, 이 과정에서 결함 및 격자 변형이 동반하게 된다. 그에 따라 필름 내에 형성된 결함과 격자의 변형은 빛을 산란시킴으로써 투과도를 감소시키게 되며, 이는 열처리에 의한 회복에 의하여 투과도가 향상된 것을 통해 확인할 수 있다. 마지막으로 비정질상의 영향을 들 수 있다. 코팅층 형성 과정에서 발생하는 극심한 전단변형은 비정질 상을 형성시키며, 이 비정질상의 광학적 밴드갭은 약  $2.6\sim 2.9\text{ eV}$ 이며, 이는 가시광선 밴드갭 에너지의 범위인 약  $1.5\sim 3.0\text{ eV}$ 와 중첩되므로 가시광선 중 일부는 흡수되어 투과하지 못하게 된다. 따라서 필름 내의 비정질상의 분율에 따라 광 투과도는 영향을 받게 된다.

#### 감사의 글

본 연구는 LG전자 산학과제 지원으로 수행되었습니다 (과제번호: C2014016674).

#### REFERENCES

1. C.-K. Lee and I.-S. Kim, *J. Korean Ceram. Soc.* **24**, 335 (1987).
2. R. Gy, *Mater. Sci. Eng. B* **149**, 159 (2008).
3. J. Akedo, *J. Therm. Spray Technol.* **17**, 181 (2008).
4. J. Akedo, *J. Am. Ceram. Soc.* **89**, 1834 (2006).
5. J. Akedo and M. Lebedev, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 5528 (2001).
6. M. Schubert, J. Exner and R. Moos, *Materials* **7**, 5633 (2014).
7. K. Naoe, M. Nishiki and A. Yumoto, *J. Therm. Spray Technol.* **22**, 1267 (2013).
8. H. Park, J. Kwon, I. Lee and C. Lee, *Scr. Mater.* **100**, 44 (2015).
9. A. Ikesue, Y. L. Aung, T. Taira, T. Kamimura, K. Yoshida and G. L. Messing, *Annu. Rev. Mater. Res.* **36**, 397 (2006).
10. Y.-J. Lee, S.-B. Heo, H.-M. Lee, Y.-S. Kim and D. Kim, *J. Korean Soc. Heat treat.* **25**, 244 (2012).
11. F. Cao, H. Park, G. Bae, J. Heo, C. Lee and J. Akedo, *J. Am. Ceram. Soc.* **96**, 40 (2013).
12. F. Cao, H. Park, J. Heo, J. Kwon and C. Lee, *J. Therm. Spray Technol.* **22**, 1109 (2013).
13. D. Mardare, M. Tasca, M. Delibas and G. Rusu, *Appl. Surf. Sci.* **156**, 200-206 (2000).
14. V. Rose and R. Franchy, *J. Appl. Phys.* **105**, 07C902 (2009).
15. E. M. C. Fortunato, P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Gonçalves, A. n. J. S. Marques, R. F. P. Martins and L. M. N. Pereira, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2541 (2004).
16. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering*, Wiley (2013).
17. I. Kim, G. Nam, C. Lee, D. Kim, H. Choi, Y. Kim, J. Kim, J. Kim, J. Son and J. Leem, *Korean J. Met. Mater.* **53**, 432 (2015).
18. Z. Yao, C. Wang, Y. Li, H.-K. Kim and N.-Y. Kim, *Nano. Res. Lett.* **9**, 1 (2014).
19. D.-W. Lee, H.-J. Kim, Y.-H. Kim, Y.-H. Yun and S.-M. Nam, *J. Am. Ceram. Soc.* **94**, 3131 (2011).
20. S. Han, L. Zhao, Q. Jiang and J. Lian, *Sci. Rep.* **2**, 493 (2012).
21. R. T. Qu, Z. Q. Liu, R. F. Wang and Z. F. Zhang, *J. Alloy. Compd.* **637**, 44 (2015).
22. J. Li Vage and C. Mazieres, *J. Am. Ceram. Soc.* **51**, 349 (1968).