

## 메조기공 세라믹 소재의 형성과 특성 분석

하태정<sup>1</sup>, 박형호<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 신소재공학과

### Preparation and Characterization of Mesoporous Ceramic Materials

Tae-Jung Ha<sup>1</sup> and Hyung-Ho Park<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received July 5, 2012; Revised July 20, 2012; Accepted July 23, 2012)

**Abstract:** Ordered mesoporous oxide films have been focused because of their low density, high interior specific surface area, and high thermal insulation. Specially, the ordered mesoporous oxide films prepared by self-assembly has many advantages due to easy process and high reproducibility. In this work, ordered mesoporous SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and TiO<sub>2</sub> films were synthesized by control of composition and processing parameter. Also, their structural, thermal, and mechanical properties were characterized variously. In conclusion, ordered mesoporous oxides will be one of core materials in new technology due to their excellent and unique properties.

**Keywords:** Ordered mesoporous oxide, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Pore structure, Heat transfer mechanism, Mixed surfactant

#### 1. 서론

기공체는 기공 크기에 따라 미세기공, 메조기공, 거대기공 구조체로 분류할 수 있다. 미세기공 구조체는 2 nm 이하의 기공으로 이루어진 구조체를 뜻하며, 거대기공 구조체는 50 nm 이상의 기공으로 이루어진 구조체를 뜻하며, 그 사이 영역을 메조기공 구조체라고 한다. 메조기공 구조체는 1990년대에 처음 개발된 이후로, 낮은 밀도, 높은 비표면적, 낮은 열전도도 등의 독특한 특성 때문에 계속적으로 연구되어 왔다. 이러한 특성 때문에 센서, 전자소자, 멤브레인, 저장소, 흡착제, 촉매 담체 등으로 활발히 연구, 개발되고 있다.

이와 같은 우수한 특성을 활용하기 위하여 본 연구에서는 메조기공 구조체를 다양한 응용 분야, 특히

단열박막으로의 적용가능성을 확인하기 위하여 여러 재료 및 구조로 형성하여 구조적 특성, 열적 특성, 기계적 특성을 분석하였다.

#### 2. 실험 방법

##### 2.1 규칙성 메조기공 실리카 박막

규칙성 메조기공 실리카 (SiO<sub>2</sub>) 박막을 형성하기 위해서 전구체로는 TEOS (Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>, Fluka, 98%), 용매로는 EtOH (Duksan, 99.9%), 계면활성제로는 Brij-76 block copolymer (C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>OH, Aldrich)를 사용하였다. 우선 Brij-76을 EtOH에 녹인 후, 물에 희석된 HCl를 첨가하고, 1시간 스테어링 후 TEOS를 첨가하였다. 30분 간 숙성을 한 후 3,000 rpm으로 30초 간 스핀 코팅하였다. 마지막으로 2시간

a. Corresponding author: [hhpark@yonsei.ac.kr](mailto:hhpark@yonsei.ac.kr)

동안 400°C, 산소 분위기에서 열처리하여 규칙성 메조기공 실리카 박막을 형성하였다.

**2.2 규칙성 메조기공 알루미늄 박막**

규칙성 메조기공 알루미늄 ( $Al_2O_3$ ) 박막을 형성하기 위해서 전구체로는 ASB ( $Al(OBu^s)_3$ , Aldrich, 97%), 용매로는 EtOH (Duksan, 99.9%), 계면활성제로는 Pluronic P-123 ( $EO_{20}PO_{70}EO_{20}$ , Aldrich)를 사용하였다. 우선 P-123을 EtOH에 녹인 후, 물에 희석된  $HNO_3$ 를 첨가하고, 1시간 스테어링 후 ASB를 첨가하였다. 6시간 동안 숙성을 한 후 3,000 rpm으로 30초 간 스핀코팅 하였다. 마지막으로 4시간 동안 400°C, 산소 분위기에서 열처리하여 규칙성 메조기공 알루미늄 박막을 형성하였다.

**2.3 규칙성 메조기공 타이타니아 박막**

개방형 메조기공 타이타니아 ( $TiO_2$ ) 박막을 형성하기 위해서 전구체로는 TTIP ( $Ti(OPr^i)_4$ , Aldrich, 97%), 용매로는 1-propanol (Duksan, 99.5%), 계면활성제로는 Pluronic P-123 ( $EO_{20}PO_{70}EO_{20}$ , Aldrich)를 사용하였다. 우선 P-123을 1-propanol에 녹인 후, HCl을 첨가하고, 1시간 스테어링 후 TTIP를 첨가하였다. 15분 동안 숙성을 한 후 3,000 rpm으로 30초 동안 스핀 코팅하였다. 마지막으로 450°C, 산소 분위기에서 열처리하여 규칙성 메조기공 타이타니아 박막을 형성하였다.

**2.4 혼합 계면활성제를 이용한 메조기공 실리카 박막**

혼합 계면활성제를 이용하여 메조기공 실리카 박막을 형성하기 위해서 전구체로는 TEOS, 용매로는 EtOH, 계면활성제로는 Brij-76과 P-123를 사용하였다. 우선 Brij-76와 P-123을 EtOH에 녹인 후, 물에 희석된 HCl를 첨가하고, 1시간 스테어링 후 TEOS를 첨가하였다. 30분 간 숙성을 한 후 3,000 rpm으로 30초 간 스핀 코팅하였다. 마지막으로 2시간 동안 40°C, 산소 분위기에서 열처리하여 규칙성 메조기공 실리카 박막을 형성하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 규칙성 메조기공 실리카 박막**

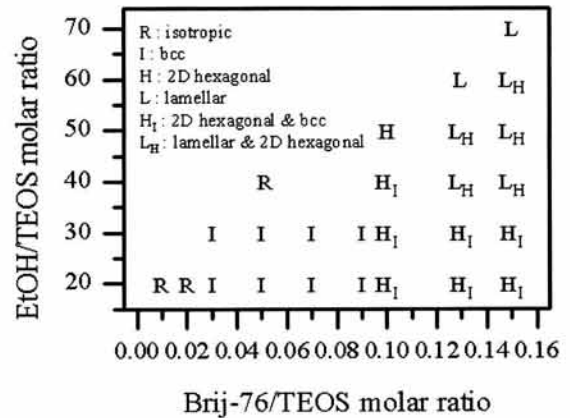


Fig. 1. Phase behavior of mesoporous silica film according to Brij-76/TEOS and EtOH/TEOS molar ratio [1].

규칙성 메조기공 실리카 박막은 실리카 전구체의 조성 변화뿐만 아니라 계면활성제, 용매, 촉매 등의 조성 변화로도 기공 구조를 제어할 수 있다. 그림 1은 계면활성제와 용매의 조성 변화에 따라 나타나는 규칙성 메조기공 실리카 박막의 기공 구조를 도식화한 것이다 [1]. Brij-76/TEOS의 조성비가 낮을 때는 불규칙적인 구조가 나타나지만, Brij-76/TEOS의 조성비가 늘어날수록 BCC (body-centered cubic) 구조, 2D hexagonal 구조, lamellar 구조로 변화된다 [2]. Brij-76/TEOS의 조성비가 큰 영역에서는 혼합상이 나타날 수 있는데, 용매의 조성을 높이면 단일상으로 제어할 수 있다. 여러 조성 변화에 의하여 기공 구조를 제어할 수 있으나 본 연구에서는 메조기공 박막의 단일 특성을 향상시키고자 하기 때문에 기공이 연결되어 있는 1차원 구조나 2차원 구조보다는 3차원 BCC 구조가 적합하다고 사료되었다.

규칙성 기공 구조인 BCC 구조를 가지는 메조기공 실리카 박막 중에서 가장 규칙적인 기공 구조를 가지는 0.05 Brij-76/TEOS 몰 비, 20 EtOH/TEOS 몰 비의 메조기공 실리카 박막의 미세구조를 투과전자현미경을 통하여 그림 2에 나타내었다 [1].

본 연구에서처럼 EISA (evaporation-induced self-assembly) 공정에 의한 메조기공 박막의 경우 계면활성제의 농도 변화에 의하여 기공률을 조절할 수 있다 [3]. 계면활성제의 농도가 높을 경우 계면활성제에 의하여 생성되는 마이셀의 농도 또한 높아지기 때문에 기공의 농도가 높아지게 된다.

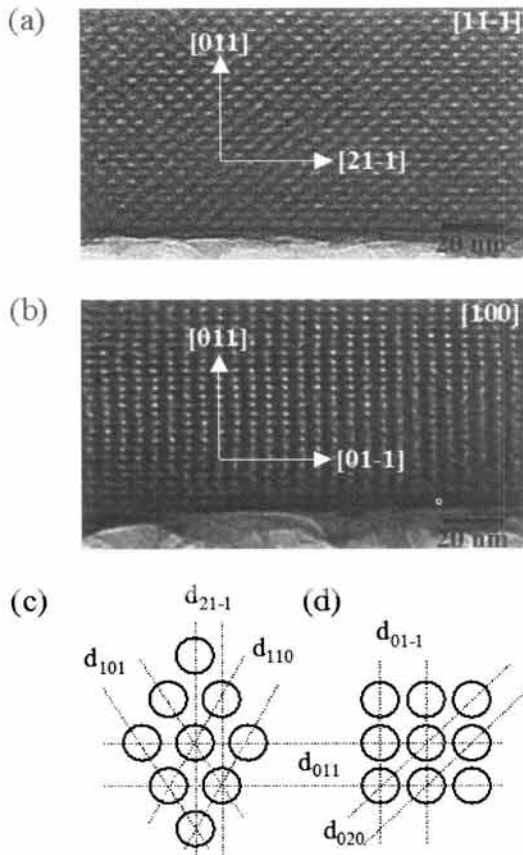


Fig. 2. TEM image of ordered mesoporous silica film with zone axis of (a) [11-1] and (b) [100] and ideal pore arrangement in BCC structure when zone axis is (c) [11-1] and (d) [100] [1].

BCC 구조가 나오는 영역에서 계면활성제의 농도를 조절해 본 결과, 일정 농도까지는 Brij-76/TEOS의 조성비에 따라 기공률이 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있었다. Brij-76/TEOS의 조성비 0.07 이상에서는 기공률의 증가가 둔화되는데 이는 너무 높은 기공률에서는 기공 구조의 붕괴가 일어나기 때문이다.

결국 기계적 강도의 하락이 일어나지 않을 정도의 계면활성제 농도 조절이 필요하다.

### 3.2 규칙성 메조기공 알루미나 박막

다음으로 단일용 규칙성 메조기공 박막을 알루미나를 재료로 하여 형성해 보았다. 재료적으로 실리카가 가장 낮은 열전도도를 가지는 산화물 중 하나이기는 하나, 고강도, 고온안정성 면에서는 알루미나가 뛰어

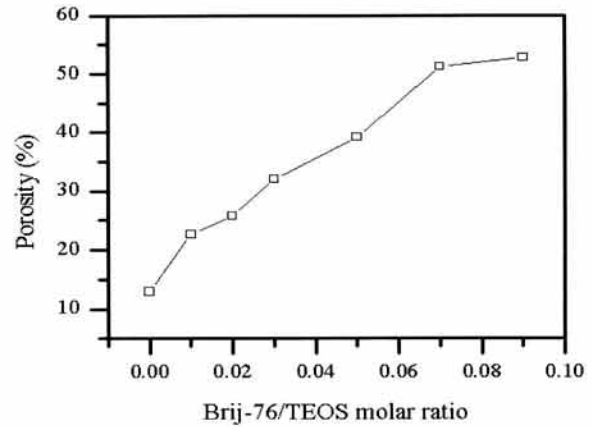


Fig. 3. Porosity variation of ordered mesoporous silica film as a function of Brij-76/TEOS molar ratio [3].

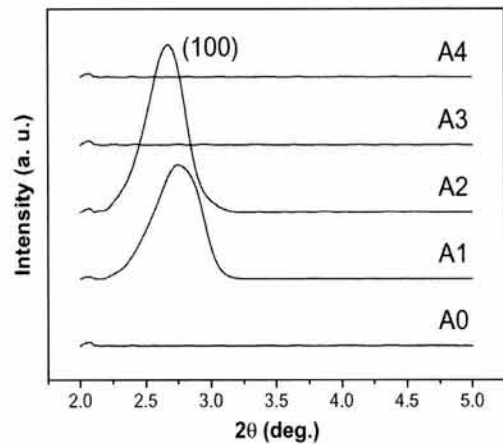


Fig. 4. XRD spectra of mesoporous alumina films for various P-123/ASB molar ratios; A0 (0), A1 (0.07), A2 (0.14), A3 (0.21), and A4 (0.28) [4].

나기 때문에 규칙성 메조기공 알루미나 박막 또한 형성 연구를 진행하였다 [4].

규칙성 메조기공  $Al_2O_3$  박막의 기공 구조 특성은 XRD와 BET 측정을 통하여 분석하였다. 그림 4에서 특정 조성에서 회절 피크가 나타난 것으로 보아 특정한 계면활성제 농도에서 규칙성 기공 구조가 형성됨을 알 수 있었다. P-123/ASB 조성비 0.14에서 가장 높은 회절 피크가 관찰되었고, 이때의 기공구조 면간 거리는 약 3.3 nm이었다. 알루미나의 경우도 계면활성제의 농도가 너무 높아지게 되면 기공 구조가 붕괴되어 규칙성이 무너짐을 알 수 있었다.

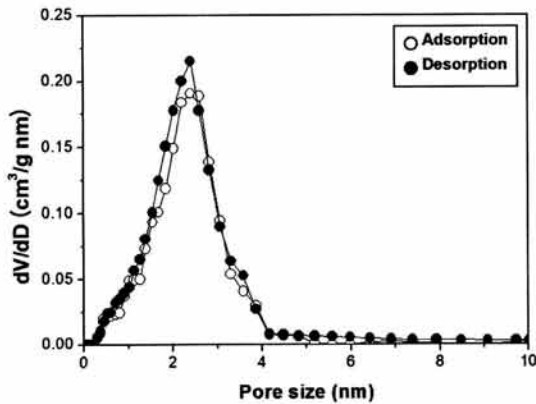


Fig. 5. Pore size distribution of ordered mesoporous alumina film with 0.14 P-123/ASB [5].

또한 기공 크기의 분포를 분석하기 위하여 P-123/ASB 조성비 0.14에 대하여 BET 측정을 하였고, 결과를 그림 5에 나타내었다 [5]. 기공 크기 분포도에서 매우 날카로운 피크가 관찰되어서 기공 크기가 매우 일정하다는 것을 알 수 있었고, 기공의 크기는 약 2.2 nm 임을 알 수 있었다.

그림 6에 3 ω method를 통하여 얻어진 메조기공 알루미늄 박막의 열전도도와 기공률을 도시하였다 [4].

P-123/ASB 조성비에 따라 기공률은 3~37%로 조절되었으며, 기공률이 증가함에 따라 열전도도는 10.5 W/m·K에서 0.36 W/m·K로 낮아지는 것을 관찰하였다. 이는 18 W/m·K의 열전도도를 가지는 벌크 알루미늄과 비교하였을 때 1/20 수준의 매우 낮은 값에 해당된다. 즉, 메조기공 구조체를 형성하면 단열 특성이 높아져서 단열층으로의 응용이 가능해진다는 것을 알 수 있었다.

기공률의 증가는 기계적 특성의 하락을 수반하게 되며, 이러한 기공체의 특성 때문에 기계적 강도의 저하에 대하여 분석하고자 탄성계수를 측정하였다. 그림 7에서 탄성계수는 기공률의 증가에 따라 선형적으로 감소하게 되지만 (P-123/ASB 조성비 0.07, 0.14, 0.21), 불규칙성 메조기공구조를 가지는 박막 (0.28) 보다 규칙성 메조기공구조를 가지는 박막의 기계적 강도가 확연히 높은 것을 관찰할 수 있었다 [6].

이는 외부에서 충격이 박막 내부로 들어올 때 규칙성 기공구조에서는 구조가 규칙적이기 때문에 충격을

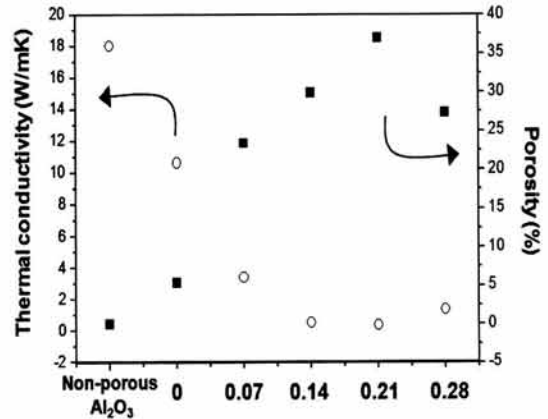


Fig. 6. The thermal conductivity (left) and porosity (right) of mesoporous alumina film for various surfactant molar ratios [4].

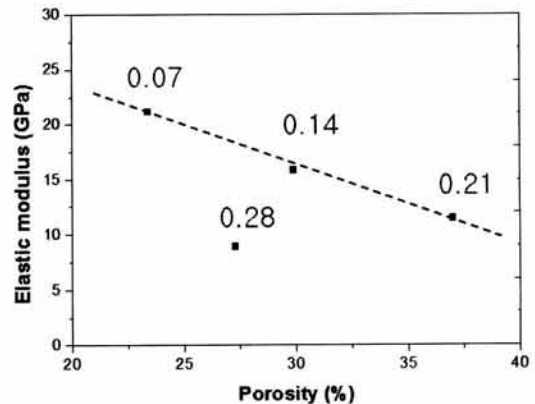


Fig. 7. Elastic modulus of mesoporous alumina film as a function of porosity [4].

모든 방향으로 똑같이 분산시킬 수 있지만, 불규칙성 기공구조에서는 충격을 모든 방향으로 똑같이 분산시킬 수 없기 때문에 어느 한 지점에 힘이 집중되어 파괴가 일어나기 때문이다 [7].

### 3.3 메조기공 타이타니아 박막의 열전달 연구

단열막을 실제로 응용하기 위해서는 단열박막 내에서 열이 어떻게 전달되고 기공의 역할은 어떻게 되는지 등에 대해서 파악할 필요성이 있다. 폐쇄형 메조기공 단열박막은 수 나노크기의 기공이 포논의 전달

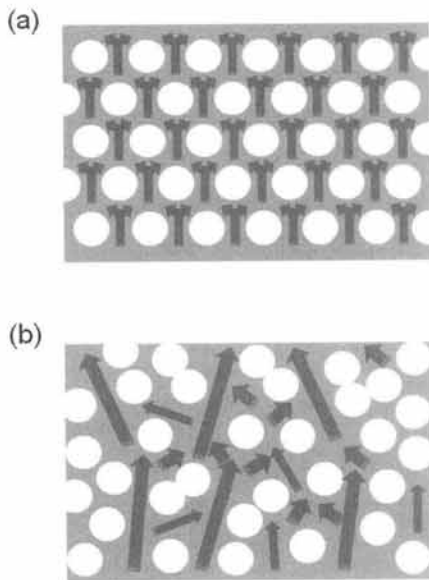


Fig. 8. Schematic diagrams of heat transfer in the (a) ordered and (b) disordered mesoporous films [8].

을 산란시켜서 열흐름을 감소시키는데, 기공의 분포에 따라서 포논 산란과 열흐름이 달라질 것으로 사료된다.

규칙성 메조기공 구조에서는 기공이 규칙적으로 분포하고 있어서 열흐름이 기공에 의해서 규칙적으로 산란되어 열흐름이 짧아진다. 하지만 불규칙성 메조기공 구조에서는 기공이 불규칙적으로 분포하고 있기 때문에 산란 또한 불규칙적으로 일어나서 긴 열흐름과 짧은 열흐름이 혼합되어 일어나게 된다. 따라서 열전도는 가장 긴 열흐름에 의해서 결정된다고 가정하고, 규칙성 메조기공 구조를 대표할 수 있는 짧은 열흐름을 가지는 모델과 불규칙성 메조기공 구조를 대표할 수 있는 긴 열흐름을 가지는 모델, 두 가지에 대하여 유한요소해석을 통한 시뮬레이션을 실시하였다 [9].

두 모델에서 열흐름이 어떻게 진행되는지 연구하기 위하여 heat flux vector 시뮬레이션을 실시하였다 [8]. 짧은 열흐름을 가지는 모델에서는 heat flux vector가 계속해서 기공에 의해서 산란되어 연속적인 열흐름을 이루지 못하고 짧은 열흐름만을 보였다. 긴 열흐름을 가지는 모델에서는 기공이 heat flux vector가 퍼지지 못하게 하는 barrier 역할만을 하여 heat flux로 이루어진 길이 형성되어 부분적으로 긴

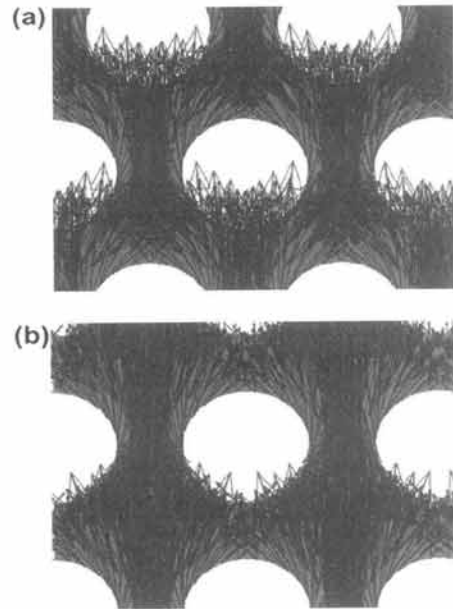


Fig. 9. The simulated heat flux vectors in the mesoporous TiO<sub>2</sub> films; (a) model with short heat transfer path and (b) model with long heat transfer path [8].

열흐름을 보이게 되었다 [10].

두 모델의 하부표면에 500℃의 열을 인가하였을 때 두 모델에서의 온도분포 시뮬레이션을 실시하였다. 열이 수직 방향으로 약 85 nm의 두께를 통과하여 상부표면에 이르렀을 때의 온도는 각각 348.1℃와 358.8℃로 기공분포에 따라서 10° 이상의 온도 차이가 발생하였다. 또한 이 결과를 실제 박막의 두께인 320 nm에 적용해보았을 때 각각 39.25℃와 45.57℃를 나타내었다. 초기 온도 (25℃)와의 차이는 14.25℃, 20.57℃로, 짧은 열흐름만을 가질 때 단열 효과가 약 45% 정도 향상된다는 것을 얻을 수 있었다. 이는 앞선 시뮬레이션 결과에서의 열흐름의 길이가 다른 것에 기인하는 것으로 보인다. Heat flux가 기공에 의해 많이 산란되어 열흐름이 짧아지기 때문에 먼 거리를 이동할 수 없게 되어 온도 분포가 낮아지게 되고 단열 효과가 더욱 커지는 것으로 사료된다 [8].

수행된 시뮬레이션이 타당한지 검증해보기 위해서 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교해보았다. 실험을 통하여 열전도도를 얻기 위하여 규칙성 기공 구조를 가지는 메조기공 타이타니아 박막과 불규칙성 기공 구조를 가지는 메조기공 타이타니아 박막을 각각

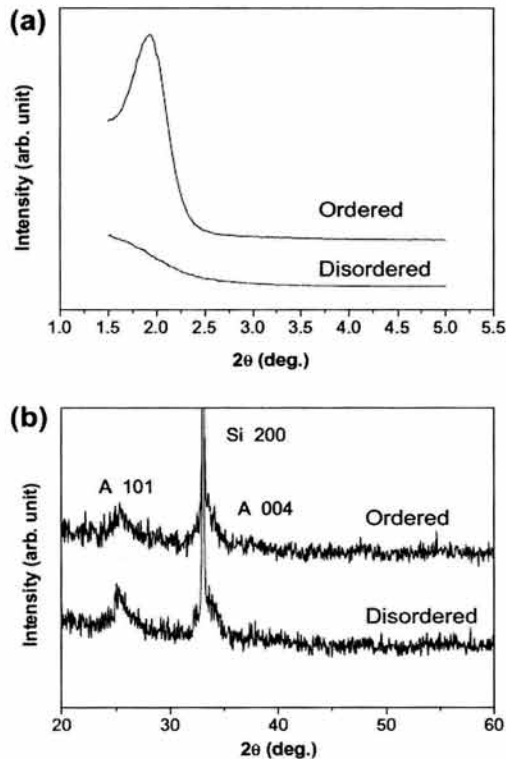


Fig. 10. XRD spectra of mesoporous  $\text{TiO}_2$  films with ordered and disordered pore structures in (a) low angle and (b) wide angle ranges [8].

Table 1. The porosities and thermal conductivities of the mesoporous  $\text{TiO}_2$  films with ordered and disordered pore structures [8].

Pore structure	Ordered	Disordered
Porosity (%)	35.6	35.2
Thermal conductivity (W/m K)	0.6	1.1

형성하고 특성 분석을 실시하였다 [8].

그림 10은 형성된 메조기공 타이타니아 박막의 XRD 패턴을 나타낸다. 이를 통하여 결정 구조는 동일하지만 기공 구조의 규칙성이 다른 메조기공 타이타니아 박막이 형성됨을 알 수 있다. 그림 11은 규칙성 메조기공 타이타니아 박막의 기공 구조를 스침각 소각산란 (GISAXS)와 투과전자현미경을 통하여 관찰한 결과이다. GISAXS 결과에서는 기공 구조가 2D hexagonal 구조를 가지는 것으로 나타났으며, 투과전

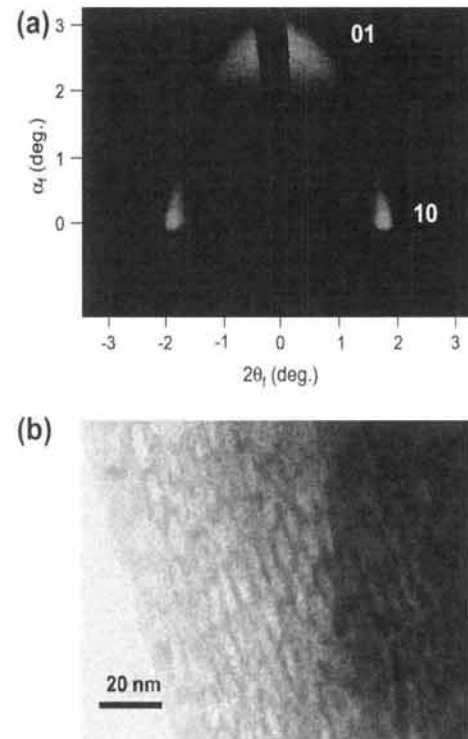


Fig. 11. (a) GISAXS pattern and (b) TEM image of an ordered mesoporous  $\text{TiO}_2$  film [8].

자현미경에서 얻은 미세 구조에서는 기공이 정렬되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 1은 실험적으로 얻은 폐쇄형 메조기공 타이타니아 박막의 기공률과 열전도도 결과값이다. 실험값에서 규칙성과 불규칙성 기공 구조를 갖는 메조기공 박막 둘 다 유사한 기공률을 보였으나 열전도도는 규칙성 기공 구조에서 더 낮은 값을 보였다. 이를 통해서 앞서 시뮬레이션된 결과와 일치함을 알 수 있다.

종합적으로 고찰해보면, 규칙성 기공구조에서는 heat flux가 기공에 의해서 계속적으로 산란되기 때문에 짧은 열흐름을 가질 수밖에 없게 되고 긴 열흐름을 가지는 불규칙성 기공구조보다 더 높은 단열 특성을 나타낸다는 결론을 얻을 수 있었다.

### 3.4 혼합 계면활성제를 이용한 메조기공 실리카 박막

지금까지 규칙성 메조기공 구조체에 대한 연구가 수 많이 이루어졌어도 거의 대부분이 단일 계면활성제를 이용하여 메조기공 구조체를 형성하여 왔다 [11,12].

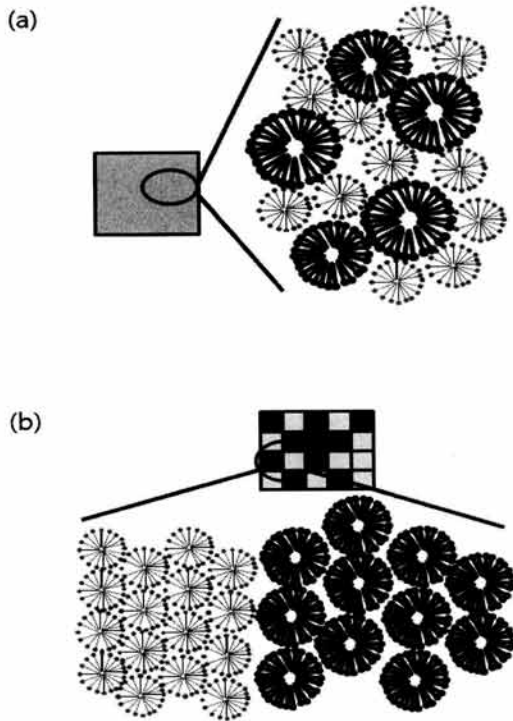


Fig. 12. Possible states of the structure of the micelles: (a) non-separated state and (b) separated state [15].

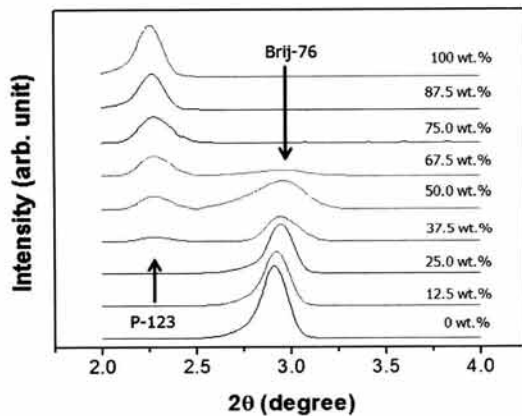


Fig. 13. XRD patterns of mesoporous silica film along the weight ratio of mixed surfactant (P-123/(Brij-76 + P-123)) [15].

사실 두 가지 이상의 계면활성제를 혼합하여 메조기공 구조체를 형성하면 어떠한 기공 구조를 가질지에 대해서 예상하는 것은 쉽지 않다 [13,14]. 만약 이

러한 시도에 의해서 새로운 기공 구조가 나타난다면 메조기공 구조체 분야는 새로운 응용 분야를 창조할 수 있을 것이다. 따라서 이 장에서는 Brij-76과 P-123라는 대표적인 계면활성제를 혼합하여 형성되는 기공 구조에 대하여 연구하고자 하였다 [15].

Brij-76과 P-123는 여러 측면에서 다른 특성을 가지고 있다. 그 중에서 분자량이 8배 정도 차이 나기 때문에 Brij-76는 P-123보다 짧은 소수성 체인을 가지고 있으며, 따라서 자가집합 시 더 작은 마이셀을 형성하게 된다. 두 계면활성제의 혼합 시 그림 12와 같이 두 가지 구조의 형성을 가정할 수 있다. 하나는 비분리 상태로써 Brij-76의 마이셀과 P-123의 마이셀이 등방성을 가지고 혼합되어 있는 상태를 뜻한다. 다른 하나는 분리 상태로써 Brij-76의 마이셀과 P-123의 마이셀이 혼합되지 않고 각각의 영역을 이루는 상태를 뜻한다. 규칙성 기공 구조를 얻기 위해서는 분리 상태가 형성되는 것이 유리하다. 이에 실제 혼합 계면활성제를 이용하여 메조기공 구조체를 형성하면 어떠한 상태가 되는지 알아보려고 하였다.

그림 13은 혼합 계면활성제의 질량비 (P-123/(Brij-76+P-123))에 따른 규칙성 메조기공 실리카 박막의 XRD 패턴을 나타낸다. 질량비가 0부터 25, 75부터 100 wt.%일 때는 하나의 회절 피크만이 나타났다. 0부터 25 wt.%일 때는 Brij-76에 의한 기공 구조, 75부터 100 wt.%일 때는 P-123에 의한 기공 구조로 사료된다.

중간 영역인 37.5부터 67.5 wt.% 영역에서는 두 개의 회절피크가 동시에 관찰되었다. 이것은 Brij-76와 P-123에 의한 기공 구조가 동시에 형성된 것을 뜻한다. 이 두 가지 기공 구조는 Brij-76와 P-123이 형성하는 마이셀의 크기가 다르기 때문에 XRD 패턴에서 명확하게 관찰되었다. 두 기공 구조의 동시 형성은 앞서 가정한 상태 중 분리 상태로 형성됨을 의미한다. 분리 상태가 형성되기 위해서는 임계 마이셀 농도(cmc)가 큰 차이를 가져야 한다. Brij-76의 cmc가 P-123의 cmc보다 매우 작기 때문에 (각각 0.002 g/L at 298 K, 0.045 g/L at 298 K) EISA 과정에서 Brij-76에 의한 기공 구조가 먼저 형성된 후 P-123에 의한 기공 구조가 순차적으로 형성되어서 분리 상태의 기공 구조가 가능하게 되는 것이다.

그림 14는 혼합 계면활성제의 질량비에 따른 규칙성 메조기공 실리카 박막의 기공률을 나타낸다. 기공률은 질량비가 0부터 50 wt.%까지 증가할수록 점점 감소하는 경향을 보이다가 50부터 100 wt.%로 갈수록

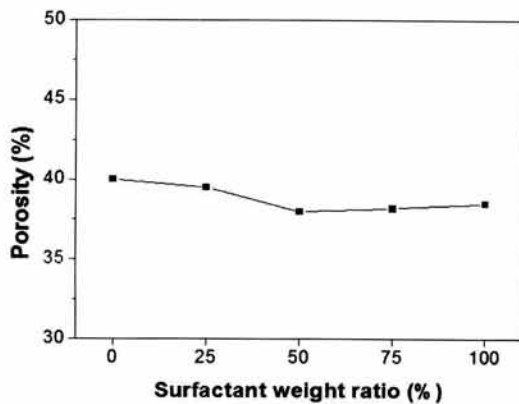


Fig. 14. Porosity of mesoporous silica film along the weight ratio of mixed surfactant (P-123/(Brij-76 + P-123)) [15].

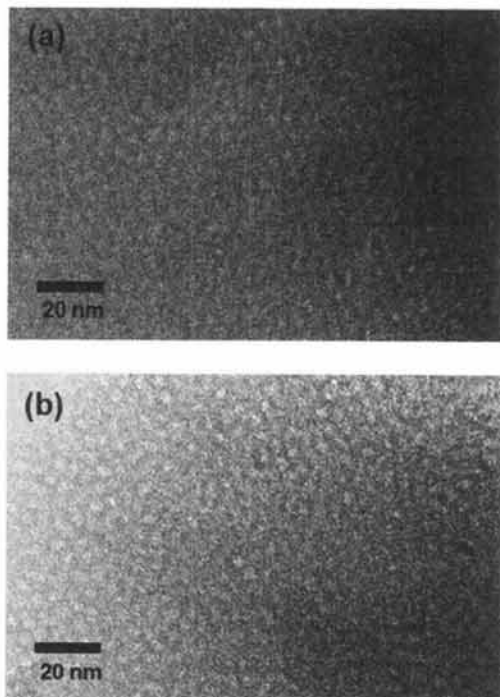


Fig. 15. Microstructures of mesoporous silica film with the composition of 50 wt.% (P-123/(Brij-76 + P-123)); (a) the domain formed by Brij-76 and (b) the domain formed by P-123 [15].

록 조금 증가하며 이것은 기공 구조 형성에 주로 기여하는 계면활성제가 아닌 소수 계면활성제는 기공률에 거의 기여를 못 한다는 것을 의미한다.

결국 소수 계면활성제는 그 양이 너무 적어서 자기들끼리 마이셀을 형성하기보다는 다수 계면활성제의 마이셀 형성을 방해하게 되는 것이다.

혼합 계면활성제에 의해 형성된 혼합 기공 구조를 확인하기 위하여 투과전자현미경 분석을 하였다. 그림 14는 질량비 50 wt.%일 때의 미세 구조를 나타낸 것이다. (a)는 높은 규칙성을 가지는 영역이고 (b)는 낮은 규칙성을 가지는 영역으로 관찰되었다. (a)에서의 기공 간 거리는 3.3 nm 였고, (b)에서의 기공 간 거리는 4.7 nm이었다. 그림 13의 XRD 패턴으로부터 얻은 기공 간 거리와 비교해봤을 때 높은 규칙성을 가지는 영역은 Brij-76, 낮은 규칙성을 가지는 영역은 P-123에 의해 형성된 기공 구조에 해당하게 된다.

본 연구에서 실제 형성을 통하여 혼합 계면활성제에 의한 메조기공 구조체는 분리 상태의 혼합 기공 구조를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 복합 기공 구조가 필요한 분야가 생기게 되면 본 연구가 좋은 초석이 될 수 있을 것이라 생각한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자가집합 과정을 이용하여 규칙성 메조기공 구조체를 형성하고, 그 특성에 대하여 분석하였다. 재료적인 측면에서는 실리카, 알루미늄, 타이타니아에 대하여 메조기공 구조체의 형성 기술을 확립하였으며, 구조적인 측면에서는 단일 기공 구조와 혼합 기공 구조에 대하여 형성 기술을 확립하고 그 구조적 특성에 대하여 살펴보았다. 더불어 메조기공 구조체에서의 열전달 연구를 통하여 메조기공 구조체의 응용 가능성을 높이고자 하였다. 메조기공 구조체에 대한 연구가 더욱 심화된다면 앞으로 다가올 신기술 사회에서 핵심기술이 될 것이라고 생각한다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발 사업(Grant No. K0004114) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] S. B. Jung, T. J. Ha, J. B. Seon, and H. H. Park,

- Micropor. Mesopor. Mat.*, 111, 188 (2008).
- [2] D. Zhao, Q. Huo, J. Feng, B. F. Chmelka, and G. D. Stucky, *J. Am. Chem. Soc.*, 120, 6024 (1998).
- [3] S. B. Jung, and H. H. Park, *Thin Solid Films*, 494, 320 (2006).
- [4] T. J. Ha, H. H. Park, E. S. Kang, S. Shin, and H. H. Cho, *J. Colloid Interface Sci.*, 345, 120 (2010).
- [5] T. J. Ha, H. H. Park, S. J. Yoon, and J. S. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, 256, 1073 (2009).
- [6] Q. Huo, D. I. Margolese, and G. D. Stucky, *Chem. Mater.*, 8, 1147 (1996).
- [7] R. A. Pai, R. Humayun, M. T. Schulberg, A. Sengupta, J. N. Sun, and J. J. Watkins, *Science*, 303, 507 (2004).
- [8] T. J. Ha, S. Y. Jung, J. H. Bae, H. L. Lee, H. W. Jang, S. J. Yoon, S. Shin, H. H. Cho, and H. H. Park, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 144, 191 (2011).
- [9] G. Ziegler and D. P. H. Hasselman, *J. Mater. Sci.*, 16, 495 (1981).
- [10] A. R. A. Khaled and K. Vafai, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46, 4989 (2003).
- [11] N. Igarashi, K. A. Koyano, Y. Tanaka, S. Nakata, K. Hashimoto, and T. Tatsumi, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 59, 43 (2003).
- [12] R. L. Putnam, N. Nakagawa, and K. M. McGrath, *Chem. Mat.*, 9, 2690 (1997).
- [13] D. Zhao, J. Feng, and Q. Huo, *Science*, 279, 548 (1998).
- [14] L. Chen, J. Xu, W. H. Zhang, J. D. Holmes, and M. A. Morris, *J. Colloid Interface Sci.*, 353, 169 (2011).
- [15] T. J. Ha, H. G. Im, S. J. Yoon, H. W. Jang, and H. H. Park, *J. Nanomater.*, 2011, 326472 (2011).