

## 자성에 의해 분리 가능한 메조포러스 카본의 소프트 주형 합성

박성수 · 하창식<sup>†</sup>

부산대학교 고분자공학과

(2017년 5월 3일 접수, 2017년 6월 23일 수정, 2017년 6월 23일 채택)

## Soft-template Synthesis of Magnetically Separable Mesoporous Carbon

Sung Soo Park, and Chang-Sik Ha<sup>†</sup>

Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University,  
Busan 46241, Republic of Korea

(Received May 3, 2017; Revised June 23, 2017; Accepted June 23, 2017)

**요약:** 본 연구에서는 잘 배열된 나노세공 구조와 자성체 나노입자를 포함하는 메조포러스 카본(Carbonized Ni-FDU-15)을 합성하였다. Carbonized Ni-FDU-15는 구조형성 주형으로 트리블록 공중합체(F127)를 이용하고, 카본 세공벽 형성 물질로 resol 전구체를 사용하며 질산 니켈(nickel(II) nitrate)을 금속이온 원으로 사용하여 증발유도 자기조립(Evaporation-Induced Self-Assembly, EISA)과 직접 탄화 과정을 거쳐서 합성되었다. 메조포러스 카본은 잘 배열된 이차원적 육방체 구조(2D-hexagonal structure)를 가진다. 한편, 세공벽 내 자성체 나노입자는 니켈(Ni) 금속과 니켈 산화물(NiO)이 생성되었다. 나노입자의 크기는 약 37 nm이었다. 그리고 Carbonized Ni-FDU-15의 표면적, 세공크기, 세공 부피는 각각 558 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>, 22.5 Å 그리고 0.5 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>이었다. Carbonized Ni-FDU-15는 외부에서 자력을 가하였을 때 자력이 가해지는 방향으로 이동함을 확인하였다. 이러한 자성체 담지 메조포러스 카본 물질은 흡착/분리, 자기 저장 매체, 자성 유체(ferrofluid), 자기 공명 영상(MRI) 및 약물 타겟팅 등의 광범위한 응용 분야에 높은 응용성을 가질 것으로 기대된다.

**Abstract:** In this study, we synthesized mesoporous carbon (Carbonized Ni-FDU-15) containing nanoporous structures and magnetic nanoparticles. Carbonized Ni-FDU-15 was synthesized via evaporation-induced self-assembly (EISA) and direct carbonization by using a triblock copolymer (F127) as a structure-directing agent, a resol precursor as a carbon-pore wall forming material, and nickel (II) nitrate as a metal ion source. The mesoporous carbon has a well-ordered two-dimensional hexagonal structure. Meanwhile, nickel (Ni) metal and nickel oxide (NiO) were produced in the magnetic nanoparticles in the pore wall. The size of the nanoparticles was about 37 nm. The surface area, pore size and pore volume of Carbonized Ni-FDU-15 were 558 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>, 22.5 Å and 0.5 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>, respectively. Carbonized Ni-FDU-15 was found to move in the direction of magnetic force when magnetic force was externally applied. The magnetic nanoparticle-bearing mesoporous carbons are expected to have high applicability in a wide variety of applications such as adsorption/separation, magnetic storage media, ferrofluid, magnetic resonance imaging (MRI) and drug targeting, etc.

**Keywords:** Soft-template synthesis, Mesoporous carbon, Magnetic nanoparticle, Ni/NiO nanoparticle

### 1. 서 론

메조포러스 카본(mesoporous carbon) 물질은 균일한 기공 구조, 높은 표면적 뿐만 아니라 독특한 물리 및 화학적 특성으로 인해 현대 과학의 많은 응용분야에서 매우 높은 관심을 받고 있다. 열 안정성, 화학적 안정성, 저밀도, 생체 적합성 및 특정 표면 특성과 같은 다

양한 특성을 제공한다. 이러한 특징을 가진 메조포러스 카본 물질은 흡착/분리[1], 촉매 지지체[2], 에너지 저장/전환[3], 생물의학[4] 등 다양한 분야에서 높은 응용성을 가진다.

특히, 카본 물질은 표면의 소수성 때문에 소수성 분자인 휴믹산(humic acid), 덱스트린(dextrin), 시토크롬 C (cytochrome C) 및 히스티딘(histidine)과 같은 생체 물질, 페놀(phenol)과 염료(dyes) 같은 유기 오염 물질을 흡착하는데 유용하다[5]. 그러나 카본 분말은 용액

<sup>†</sup> Corresponding author: Chang-Sik Ha (csha@pusan.ac.kr)

에서 분리하기가 어렵고 2 차 오염을 일으킬 수 있다. 카본 분리를 위한 일반적인 접근법은 여과 또는 원심 분리 과정을 거치며, 이는 다소 복잡하고 많은 비용이 요구된다[6].

따라서, 메조포러스 카본 물질이 자성 나노입자와 복합소재로 제조되면, 외부 자기장으로 쉽게 분리할 수 있으며, 이는 여과 또는 원심분리 공정보다 대규모 적용에 보다 편리할 것이다[6]. 또한 자성 소재는 자기 저장 매체[7], 자성 유체(ferrofluid)[8], 자기 공명 영상(MRI)[9] 및 약물 타겟팅[10] 등의 광범위한 응용 분야로 인해 많은 관심을 받고 있다.

전통적인 방법에서, 자성 나노 입자가 함유된 메조포러스 카본은 퍼퍼릴 알코올, 수크로오스 등의 탄소 원과 Fe, Co, Ni 등의 금속 원료를 하드 주형(hard template)인 메조포러스 실리카 세공에 침투시킨 후, 열중합, 탄화, 그리고 HF 또는 NaOH 용액으로 실리카 주형을 제거하는 과정을 거쳐서 얻어졌다[11].

Schüth와 공동 연구자들은[12] 메조포러스 실리카를 하드 주형으로 사용하여 나노 미터 두께의 카본벽에 그래프트(graft)된 자성 나노입자를 갖는 메조포러스 카본 물질을 합성하였다.

최근에, Zheng과 공동 연구자들은[13]  $Fe_3O_4$ 를 하드 주형과 폴리도파민(polydopamine)을 탄소원으로 사용하고 탄화 과정과  $Fe_3O_4$ 의 자가 희생 (self-sacrificial) 과정을 거쳐서 할로우 메조포러스 카본(hollow mesoporous carbon) 자성체를 합성하였다. 그리고 복잡한 생체 시료로부터 저농도의 펩티드(peptide) 물질의 흡착, 분리에 대한 응용 가능성을 보여주었다. 한편, 메조포러스 카본 자성체( $Fe_3O_4@C$ )는 Wei와 공동 연구자들에[14] 의해 폴리스티렌 그래프트된 폴리도파민 코팅 자성 나노입자를 탄화시켜서 합성되었다. 그리고 이러한 자성체 물질은 수증의 클로로페놀(chlorophenol)을 제거하는데 유용함을 보여주었다.

그러나, 위에서 언급한 이전의 연구들은 하드 주형과 다단계의 합성 방법을 이용함에 따라 합성 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 든다.

최근에 세 그룹의 연구팀은[1,15,16]  $\gamma-Fe_2O_3$ 나 iron carbide ( $Fe_3C$ )가 포함된 메조포러스 카본 자성체 물질을 합성하였다. Watanabe와 공동 연구자들은[15] 탄소원으로 카르복시메틸 셀룰로즈(carboxymethyl cellulose, CMC)와 자성 나노입자 형성원으로 질산 철(iron(III) nitrate)을 사용하고 탄화과정을 거쳐서  $\gamma-Fe_2O_3$ 가 포함된 메조포러스 카본 자성체 물질을 합성하였다. 그리고 방사성 원소( $^{134}Cs$ 와  $^{137}Cs$ )를 제거하기 위한 흡착제로의 높은 응용 가능성을 보고하였다. 또한, Fukumi와 공동 연구자들은[16] Watanabe와 공동 연구자들이[15] 보고한 유사한 방법을 사용하여  $\gamma-Fe_2O_3$  나노입

자가 포함된 메조포러스 카본 자성체 물질을 합성하였다. 그리고 진한 황산용액을 처리하여  $Fe_2(SO_4)_3/\gamma-Fe_2O_3$  나노입자가 포함된 메조포러스 카본 자성체 물질을 합성하고 셀룰로즈로부터 글루코스(glucose) 생성을 위한 화학반응에 촉매제로 응용 가능성이 높음을 보고하였다.

Zhu와 공동연구자들은[1] 면직물에 질산철 용액을 적시고 건조와 탄화 과정을 거쳐서 iron carbide ( $Fe_3C$ )가 포함된 메조포러스 카본 자성체 물질을 합성하였다. 그리고 염료(methylene blue, methyl orange)와 중금속( $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Pb^{2+}$ )의 선택적 흡착을 위한 흡착소재로의 응용 가능성을 보고하였다.

위에서 설명한 세 그룹에[1,15,16] 의해 합성된 iron기반 메조포러스 카본 자성체 물질은 비록 메조포어(mesopore)를 가지기는 하지만 낮은 표면적  $35\sim 410\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 과 낮은 세공부피  $0.06\sim 0.22\text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ , 그리고 무질서한 세공 배열을 가진다.

Zhao와 공동 연구자들은[17] 소프트 주형(soft template)으로 트리블럭 공중합체(F127)를 사용하고 카본 세공벽 구성원으로 resol 전구체와 금속 이온원( $Fe(C_6H_5O_7)$ )을 포함하는 반응 용액으로부터 자기 조립과 직접 탄화 과정을 거쳐서 자성 골격을 갖고 육방체 구조의 세공 배열을 가지는 메조포러스 카본 물질( $\gamma-Fe_2O_3$ /mesoporous carbon)을 합성하였다.

최근에 본 연구팀은 트리블럭 공중합체를 구조형성 주형, resol 전구체를 카본 세공벽 형성 물질로 사용하고 질산철을 금속이온 원으로 사용하여 직접 탄화과정을 거친 다음, 마그네타이트( $Fe_3O_4$ )가 담지되고 잘 배열된 세공구조 (2D-육방체 구조)를 가지는 메조포러스 카본 물질을 합성하였다. 그리고 페닐알라닌(phenylalanine)과 아이부프로펜(ibuprofen)에 대한 우수한 흡착성능을 보고하였다[18,19].

앞서 기술한 바와 같이, 대부분 자성나노입자/메조포러스 카본 복합체는 철 산화물(iron oxide) 자성나노입자를 포함한다.

니켈 금속 나노입자는 전자(electronics), 자기력(magnetism), 에너지 기술(energy technology), 바이오메디신(biomedicine), 촉매반응(catalysis) 등의 분야에서 매우 높은 응용 가능성을 가진다.[20] 한편, 니켈 산화물(NiO) 역시, 촉매 반응(catalysis), 배터리(battery), 슈퍼커패시터(supercapacitor), 전기변색(electrochromic), 센서(sensor) 등의 분야에서 매우 높은 응용 가능성을 가진다.[20]

니켈 금속 또는 니켈 산화물 나노입자가 포함된 메조포러스 카본 물질은 소수의 연구 그룹에 의해서만 보고되었다.

Zhao와 공동 연구자들은  $\gamma-Fe_2O_3$ 가 담지된 메조포

리스 카본 물질 합성과 유사한 방법으로 트리블릭 공중합체(F127)를 나노구조 형성 주형으로 사용하고 resol 전구체, 실리카원으로 테트라에톡시실란(tetraethoxysilane) 그리고 금속 이온원{Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O}을 포함하는 반응 용액을 사용하여 니켈 금속 나노입자가 포함된 메조포러스 카본 물질을 합성하였다. 그리고 수중에 존재하는 염료 제거를 위한 흡착소재로의 응용 가능성을 보고하였다[6].

Vallet-Regí와 공동 연구자들은[21] 구조 형성 주형으로 트리블릭 공중합체(F127), 카본 전구체로 레조시놀-포름알데히드 고분자(resorcinol-formaldehyde (RF) polymer) 그리고 니켈금속원으로 질산 니켈(Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O)을 사용하고 50 °C 에서 수화열 반응(hydrothermal reaction)과 탄화 과정을 거쳐서 니켈 금속 나노입자가 담지된 메조포러스 카본을 합성하였다. 그리고 수용액 내 염료(Alizarine Yellow R)의 제거를 위한 흡착소재로의 응용성을 보고하였다.

최근에, Son과 공동 연구자들은[22] 니켈 금속 나노폼(nanoform)과 메조포러스 카본의 복합체를 합성하였다. 먼저, 그들은 니켈 아세테이트(nickel acetate)와 글리세롤(glycerol) 혼합 용액을 280 °C에서 가열하여 니켈 금속 나노폼(nanoform)을 합성하였다. 그리고 phenol-formaldehyde (PF) resole을 니켈 금속 나노폼에 가한 후 탄화 과정을 거쳐서 니켈 금속 나노폼(nanoform)/메조포러스 카본 복합체를 합성하였다. 그 복합체는 슈퍼 커패시터(super capacitor)로의 높은 응용 가능성을 보여 주었다.

본 연구에서는 구조형성 주형으로 트리블릭 공중합체(F127)를 이용하고, 카본 세공벽 형성 물질로 resol 전구체를 사용하며 질산 니켈(nickel(II) nitrate)을 금속 이온 원으로 사용하여 증발유도 자기조립(Evaporation-Induced Self-Assembly, EISA)과 직접 탄화과정을 거친 다음, 니켈(Ni) 금속과 니켈 산화물(NiO)이 담지되고 잘 배열된 세공구조 (2D-육방체 구조)를 가지는 메조포러스 카본 물질을 합성하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

트리블릭 공중합체(F127, PEO<sub>106</sub>PPO<sub>70</sub>PEO<sub>106</sub>), 질산 니켈{nickel(II) nitrate hexahydrate, Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 99%), 에탄올(99%)은 Sigma-Aldrich로부터 구매하였다. 페놀 (99%)과 포름알데히드 용액(37%)은 Yakuri Pure Chemicals Co., Ltd.로부터 구매하였다. 수산화소듐(97%)은 Junsei Chemical Co., Ltd.로부터 구매하였다. 염산(35%)은 Matsunoen Chemicals Co., Ltd.로부터 구매하였다. 모든 시약은 별도의 정제없이 사용하였다.

### 2.2. 특성결정

NBR 저각 엑스선 산란 결과는 포항 가속기 연구소(PAL, POSTECH, Korea)에서 얻었다[Co-K $\alpha$  {K = 1.608 Å radiation, energy range of 4~16 keV (energy resolution : DE/E = 5 × 10<sup>-4</sup>, photon flux : 10<sup>10</sup>~10<sup>11</sup> ph./s, beam size : < 1 mm<sup>2</sup>)}, the scan range 0.0027 nm<sup>-1</sup> < q < 2.7508 nm<sup>-1</sup>]. X선 회절(XRD) 패턴은 Ni-filtered Cu-K $\alpha$  radiation ( $\lambda$  = 1.541 Å)을 이용하여 Rigaku Miniflex diffractometer (40 kV, 30 mA)로 측정하였다. 투과 전자 현미경(TEM) 관찰은 JEOL2010으로 수행하였다. 시료 용액을 탄소박막을 입힌 구리 격자판 위에 위치시키고 200 kV의 구동전압으로 분석하였다. 질소 흡착/탈착 등온곡선은 Nova 4000e를 이용하여 -196 °C에서 얻었다. 시료의 표면적은 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 방법을 이용하여 흡착곡선으로부터 얻었다. 세공크기의 분포도는 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 방법을 이용하여 흡착곡선으로부터 얻었다.

### 2.3. 합성방법

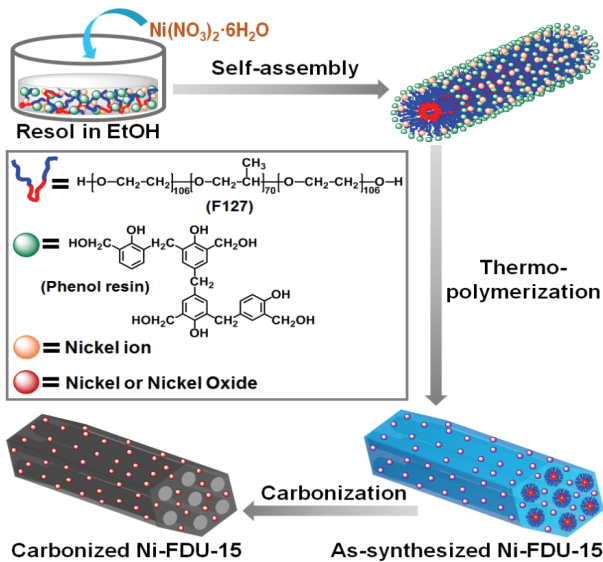
#### 2.3.1 레졸(Resol) 합성

페놀, 포름알데히드, 수산화소듐, 증류수를 섞고 완전히 녹인다. 이때 반응물의 몰 조성비는 1 페놀 : 2 포름알데히드 : 0.1 수산화소듐 : 6.54 증류수이다. 이 혼합물을 교반하면서 75 °C에서 1 시간 동안 가열한다. 그리고 실온으로 식힌 다음, 1 M 염산 수용액을 사용하여 용액의 산도를 중성으로 만든다. 시료 내 물은 감압 방법을 이용하여 제거한다. 얻어진 레졸을 에탄올에 다시 녹여서 20 wt% 용액을 제조한다.

#### 2.3.1 메조포러스 니켈 (또는 니켈 산화물)/카본 {Ni (또는 NiO/carbon)} 나노복합체 합성

주형으로 트리블릭 공중합체(F127) 1 g을 20 g 에탄올에 녹인다. 완전히 녹인 후, 질산 니켈(Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O)을 녹인다(Ni/레졸의 비 = 1 wt%). 그리고 증발유도 자기조립(Evaporation-Induced Self-Assembly, EISA) 방법을 이용하여 나노구조화된 트리블릭 공중합체-polymer resin-질산니켈 복합체를 합성한다. 구체적으로, 반응용액을 유리용기에 얇은 두께로 분산시킨다(약 2 mm 이하 두께로). 그리고 실온에서 약 5 시간 건조시킨 후, 100 °C에서 24 시간 동안 가열한다(형성된 시료명은 'As-synthesized Ni-FDU-15'라고 칭한다). 유리용기 위에 형성된 얇은 막 형태의 시료를 긁어내어 아르곤(Ar) 기체 하 900 °C에서 탄화시킨다(기체유속: 약 60 mLmin<sup>-1</sup>, 온도 상승속도 : 1 °Cmin<sup>-1</sup> (< 600 °C), 5 °Cmin<sup>-1</sup> (> 600 °C), 형성된 시료명은 'Carbonized Ni-FDU-15'라고 칭한다).

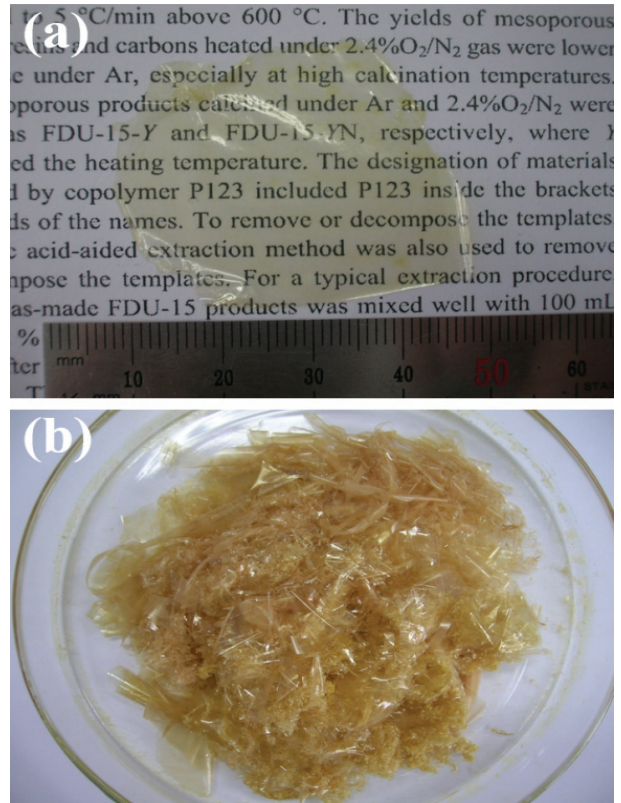
### 3. 결과 및 고찰



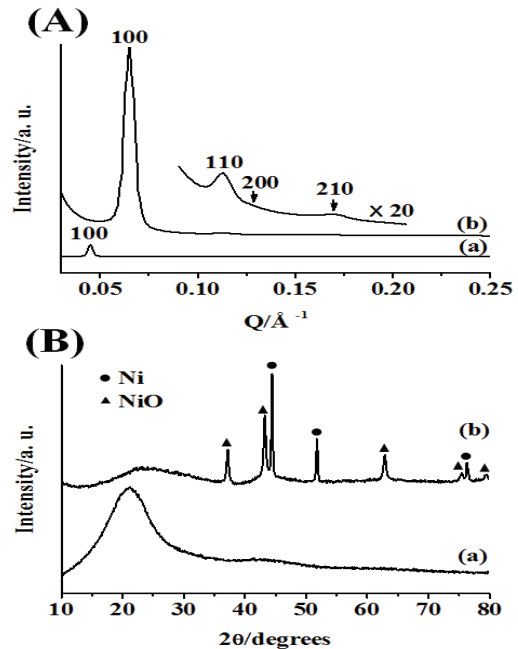
**Scheme 1.** Schematic illustration of the synthesis of Carbonized Ni-FDU-15.

Scheme 1은 니켈 금속(Ni) 또는 니켈 산화물(NiO) 나노입자가 담지된 메조포러스 카본(FDU-15)의 합성을 보여주는 개략도이다. 먼저, 구조 형성 주형으로 트리블럭 공중합체(F127), 세공벽 형성 물질로 레졸(resol) 그리고 금속이온원으로 질산 니켈( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )을 포함하는 에탄올 용액을 제조한다. 그리고 전구체들의 자기조립(self-assembly) 과정과 열중합 과정을 거친 다음, 900 °C에서 탄화시키면 니켈 금속 또는 니켈 산화물 나노입자가 담지된 메조포러스 카본(Carbonized Ni-FDU-15)이 얻어진다. 탄화 과정에서 주형으로 사용된 트리블럭 공중합체(F127)는 열분해되고 레졸(resol)은 탄화되어 세공벽을 형성한다. 또한 니켈 이온은 니켈 금속 또는 니켈 산화물로 생성된다.

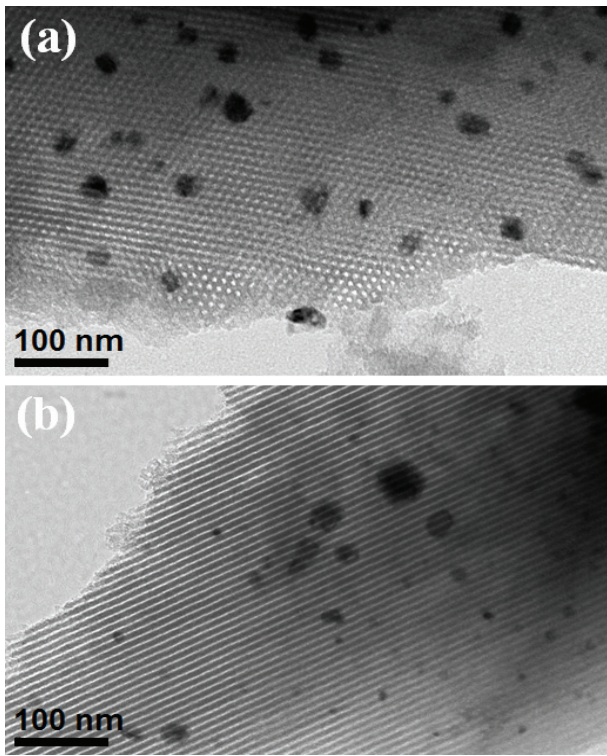
Figure 1은 합성한 As-synthesized Ni-FDU-15의 사진을 보여준다. 합성방법에서 설명한 바와 같이, 유기 용기에 반응 용액을 고르게 분산시켜서 건조한다. 그리고 시료를 유리 용기에서 박리시키면 시료는 얇은 막의 형태로 수득된다. Figure 1에서 보여주는 시료의 두께는 약 50  $\mu\text{m}$ 이고 분산하는 반응 용액의 양에 따라 시료 두께는 조절할 수 있다. 하지만, 과다한 양의 반응 용액을 사용할 경우 나노구조형성에 영향을 미칠 수 있다. 반응 용액의 건조 동안 전구체들은 자기조립과정을 거쳐서 나노구조를 형성하게 된다. 따라서, 과량의 반응 용액을 반응용기에 분산하여 건조할 경우 전구체들의 자기조립이 용매의 증발속도에 영향을 받아 나노구조형성이 저해될 수 있다.



**Figure 1.** Optical photos of As-synthesized Ni-FDU-15; (a) a film morphology and (b) a collection of film samples.

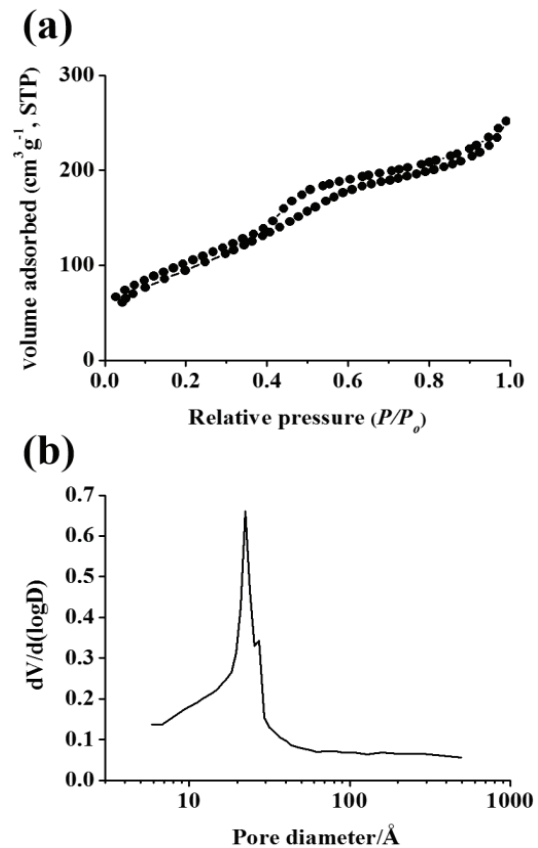


**Figure 2.** SAXS (A) and XRD (B) patterns of (a) As-synthesized and (b) Carbonized Ni-FDU-15 treated at 900 °C.



**Figure 3.** TEM images of Carbonized Ni-FDU-15 treated at 900 °C viewed along the (100) (a) and (110) (b) directions, respectively.

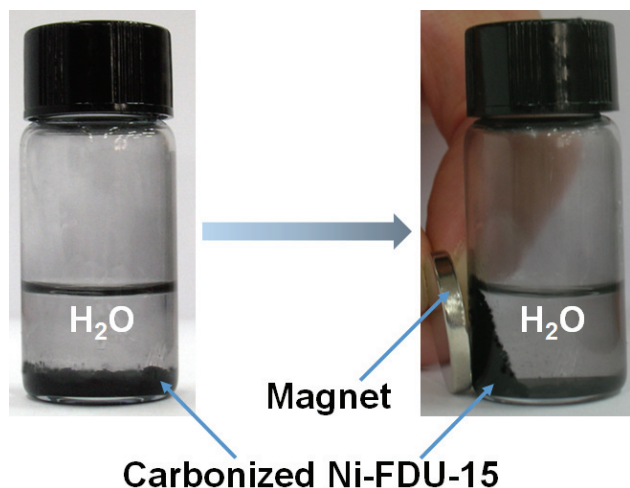
Figure 2는 As-synthesized Ni-FDU-15와 Carbonized Ni-FDU-15의 (a) 저각 엑스선 산란(SAXS)과 (b) 엑스선 회절(XRD) 패턴을 보여준다. Figure 2A(a)에서 보여주는 것처럼, As-synthesized Ni-FDU-15는  $q = 0.045 \text{ \AA}^{-1}$ 에서 낮은 세기를 가지는 하나의 피크를 보여주었다. 이러한 결과는 밀도가 낮은 고분자 레진(polymer resin)을 가지는 세공벽과 구조형성 주형으로 사용된 트리블럭 공중합체가 채워진 세공 사이의 낮은 대비(contrast) 효과에 기인한다.[24] 반면, As-synthesized Ni-FDU-15를 900 °C에서 탄화시킨 시료(Carbonized Ni-FDU-15)는  $q=0.065, 0.11, 0.13, 0.17 \text{ \AA}^{-1}$ 에서 잘 분리된 피크들을 보여주었다.(Figure 2A(b)) 이러한 피크들은 잘 배열된 이차원적 육방체 구조(p6mm) 내 (100), (110), (200) 그리고 (210) 결정격자면에 의해서 나타난다.[23] 그리고 Carbonized Ni-FDU-15의  $d_{100}$ 값은 96.6 Å까지 감소하였다. 이러한 결과는 고온에서 탄화 과정을 거치면서 나노세공벽의 수축에 기인한다.[23] 한편, 900 °C에서 탄화 후, 엑스선 회절 패턴은  $2\theta = 10 \sim 80^\circ$  범위에서 메조포러스 카본 내에 형성된 니켈 중 나노입자와 관련한 피크들을 보여주었다.(Figure 2B(b)) 이 결과는 시료 내에 니켈 금 (Ni)과 니켈 산화 (NiO) 종이 형성되었음을 보여준다.[6,21]



**Figure 4.** N<sub>2</sub> sorption isotherm curve (a) and pore size distribution (b) of Carbonized Ni-FDU-15 treated at 900 °C

Figure 3은 Carbonized Ni-FDU-15의 투과전자현미경 (TEM) 사진을 보여준다. 이 사진들은 전형적인 잘 배열된 이차원적 육방체 구(p6mm)를 나타낸다[23]. Figure 3(a)와 3(b)는 각각 (100)과 (110) 결정 격자를 따라 관찰하였을 때의 투과전자현미경 사진이다. 이러한 투과전자현미경 관찰 결과는 Figure 2A(b)에서 보여주는 Carbonized Ni-FDU-15에 대한 SAXS 패턴의 결과와 잘 일치하였다. 그리고 메조포러스 카본 내에 니켈 금속(Ni)과 니켈 산화 (NiO) 중 나노입자가 잘 분산되어 있음을 보여주었다. 투과전자현미경 사진으로부터 얻어진 나노입자의 크기는 약 37 nm이었다.

Figure 4는 Carbonized Ni-FDU-15의 질소 흡착/탈착 등온선 (a)과 세공 크기 분포도 (b)를 보여준다. 질소 흡착/탈착 등온선은 나노세공을 가지는 시료에서 보여주는 전형적인 타입IV의 모양을 보여주었다. 질소 흡착 곡선을 이용하고 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 방법으로 구한 Carbonized Ni-FDU-15의 표면적은 558 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> 이었다. Figure 4(b)에서 보여주는 바와 같이, Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 방법을 이용하여 구한 세공크기는



**Figure 5.** Optical photos before and after separation of Carbonized Ni-FDU-15 treated at 900 °C in aqueous solution by a magnet.

좁은 분포도를 보여주었다. 이러한 결과는 시료 내 균일한 크기의 나노세공이 형성되었음을 나타낸다. 나노세공의 평균 크기는 22.5 Å이었고 세공 부피는  $0.5 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ 이었다.

Figure 5는 Carbonized Ni-FDU-15의 수용액 내에서 외부 자력에 의한 영향을 보여주는 사진들이다. 자석을 이용하여 외부에서 자력을 가하였을 때 시료는 자력이 가해지는 방향으로 이동하였다. 따라서, 본 연구에서 합성한 자성체가 담지된 메조포러스 카본 물질은 외부 자력에 의한 물리·화학적 응용 분야에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

구조 형성 주형으로 트리블럭 공중합체(F127), 세공벽 형성 물질로 레졸(resol) 그리고 금속이온원으로 질산 니켈( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )을 사용하고 증발유도 자기조립(Evaporation-Induced Self-Assembly, EISA)과 직접탄화과정을 거쳐서 자성체가 담지된 메조포러스 카본 물질(Carbonized Ni-FDU-15)을 합성하였다. Carbonized Ni-FDU-15는 잘 배열된 이차원적 육방체 구조(2D-hexagonal structure)를 가지고 세공벽 내에는 니켈(Ni) 금속과 니켈 산화물(NiO) 나노입자가 생성되었다. Carbonized Ni-FDU-15는 높은 표면적( $558 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ )과 균일한 세공크기(22.5 Å)를 가지고 외부에서 자력을 가하였을 때 자력이 가해지는 방향으로 쉽게 이동하였다. 현재, 니켈 기반 자성체 나노입자가 포함된 메조포러스 카본에 대한 연구는 소수 그룹에 의해서만 보고되었다. 한편, 본 연구에서 니켈(Ni) 금속과 니켈 산화물

(NiO) 나노입자가 포함된 메조포러스 카본 물질을 최초로 보고한다. 이러한 Ni/NiO 나노입자가 담지된 메조포러스 카본 물질은 흡착/분리, 촉매, 에너지 저장/전환, 생물의학 등 다양한 분야에서 높은 응용성이 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부/한국연구재단의 핵심개인연구 (NRF-2014R1A2A1A11054584), 중견연구 (NRF-2017R1A2B3012961), BK 21 plus 프로그램 (21A2013800002)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. L. Chen, T. Ji, L. Mu, Y. Shi, L. Brisbin, Z. Guo, M. A. Khan, D. P. Young, and J. Zhu, *RSC Adv.*, **6**, 2259 (2016).
2. Z. Sun, B. Sun, M. Qiao, J. Wei, Q. Yue, C. Wang, Y. Deng, S. Kaliaguine, and D. Zhao, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 17653 (2012).
3. Y. Mao, H. Duan, B. Xu, L. Zhang, Y. Hu, C. Zhao, Z. Wang, L. Chen, and Y. Yang, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 7950 (2012).
4. M. Gisbert-Garzarán, M. Manzano, M. Vallet-Regí, *Bioengineering*, **4**(3), 1 (2017).
5. R. Ryoo, S. H. Joo, M. Kruk, and M. Jaroniec, *Adv. Mater.*, **13**, 677 (2001).
6. Y. Zhai, Y. Dou, X. Liu, S. S. Park, C.-S. Ha, and D. Zhao, *Carbon*, **49**, 545 (2011).
7. T. Hyeon, *Chem. Commun.*, **927**, 8 (2003).
8. S. Chikazumi, S. Taketomi, M. Ukita, M. Mizukami, H. Miyajima, M. Setogawa, and Y. Kurihara, *J. Magnet. Magnet. Mater.*, **65**, 245 (1987).
9. Z. Li, L. Wei, M. Y. Gao, and H. Lei, *Adv. Mater.*, **17**, 1001 (2005).
10. F. Dong, W. Guo, J.-H. Bae, S.-H. Kim, and C.-S. Ha, *Chem. Eur. J.*, **17**, 12802 (2011).
11. I. S. Park, M. Choi, T. W. Kim, and R. Ryoo, *J. Mater. Chem.*, **16**, 3409 (2006).
12. A. H. Lu, W. Schmidt, N. Matoussevitch, H. Bonnemann, B. Spliethoff, B. Tesche, E. Bill, W. Kiefer, and F. Schüth, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 4303 (2004).
13. G. Cheng, M.-D. Zhou, and S.-Y. Zheng, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 12719 (2014).
14. S. Xue, C. Wang, and Y. Wei, *RSC Adv.*, **7**, 11921 (2017).
15. D. Yamaguchi, K. Furukawa, M. Takasuga, and K.

- Watanabe, *Sci. Rep.*, **4**, Article No. 6053 (2014).
16. D. Yamaguchi, K. Watanabe, and S. Fukumi, *Sci. Rep.*, **6**, Article No. 20327 (2016).
  17. Y. Zhai, Y. Dou, X. Liu, B. Tu, and D. Zhao, *J. Mater. Chem.*, **19**, 3292 (2009).
  18. S. S. Park, D. Zhao, and C.-S. Ha, *Adv. Porous Mater.*, **1(4)**, 354 (2013).
  19. S. S. Park and C.-S. Ha, *J. Adhes. Interface*, **14(2)**, 82 (2013).
  20. M. I. Din and A. Rani, *Int. J. Anal. Chem.*, 2016, Article ID 3512145 (2016).
  21. A. García, A. Nieto, M. Vila, and M. Vallet-Regí, *Carbon*, **51**, 410 (2013).
  22. K. Lee, H. Song, K. H. Lee, S. H. Choi, J. H. Jang, K. Char, and J. G. Son, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 22516 (2016).
  23. Y. Meng, D. Gu, F. Zhang, Y. Shi, L. Cheng, D. Feng, Z. Wu, Z. Chen, Y. Wan, A. Stein, and D. Zhao, *Chem. Mater.*, **18**, 4447 (2006).
  24. S. S. Park, M. S. Moorthy, H.-J. Song, and C.-S. Ha, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **14(11)**, 8845 (2014).