

# Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매상에서 수소 제조를 위한 메탄의 분해 반응에서 조촉매 Pt의 효과

서호준<sup>†</sup>

전남대학교 화공생명공학과  
(2023년 9월 28일 접수, 2023년 11월 1일 수정, 2023년 11월 16일 채택)

## Effect of Pt as a Promoter in Decomposition of CH<sub>4</sub> to Hydrogen over Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 Catalyst

Ho Joon Seo<sup>†</sup>

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea  
(Received September 28, 2023; Revised Accepted November 1, 2023; Accepted November 16, 2023)

### 초 록

고정층 상압 유통식 반응기를 사용하여 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41와 Fe(30)/MCM-41의 촉매상에서 메탄의 분해 반응을 수행하여 수소의 수율을 구하여 Pt의 효과를 조사하였다. XRD 분석으로 반응 전 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매에서 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Pt의 결정상이 나타났다. SEM, EDS 분석과 매핑 이미지로부터 촉매 표면에 Fe, Pt, Si, O의 나노 입자들이 균일하게 분포함을 알 수 있었다. XPS 분석으로 Pt<sup>0</sup>, Pt<sup>2+</sup>, Pt<sup>4+</sup>, Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> 등의 이온과 O<sup>2-</sup>, O<sup>-</sup>의 산소종이 존재함을 알 수 있었고, Fe(30)/MCM-41 촉매에 Pt를 1 wt% 첨가하면 촉매 표면상에서 Fe2p의 원자 백분율이 13.39%에서 16.14%로 증가하고 Pt4f는 1.51%이었다. 수소의 수율은 Fe(30)/MCM-41보다 3.2배 높았다. Pt로부터 Fe로 H<sub>2</sub>의 스페일오버(spillover) 효과로 Fe 입자의 환원을 증가시키고, Fe, Pt와 MCM-41의 적당한 상호작용으로 미세한 나노입자를 촉매 표면에 균일하게 분산을 증가시켜 수소수율을 향상시켰다.

### Abstract

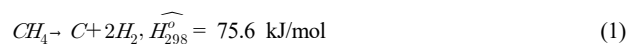
The effect of Pt was investigated to the catalytic methane decomposition of CH<sub>4</sub> to H<sub>2</sub> over Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 and Fe(30)/MCM-41 using a fixed bed flow reactor under atmosphere. The Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt crystal phase behavior of fresh Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 were obtained via XRD analysis. SEM, EDS analysis, and mapping were performed to show the uniformed distribution of nano particles such as Fe, Pt, Si, O on the catalyst surface. XPS results showed O<sup>2-</sup>, O<sup>-</sup> species and metal ions such as Pt<sup>0</sup>, Pt<sup>2+</sup>, Pt<sup>4+</sup>, Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> etc. When 1 wt% of Pt was added to Fe(30)/MCM-41, atomic percentage of Fe2p increased from 13.39% to 16.14%, and Pt4f was 1.51%. The yield of hydrogen over Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 was 3.2 times higher than Fe(30)/MCM-41. The spillover effect of H<sub>2</sub> from Pt to Fe increased the reduction of Fe particles and moderate interaction of Fe, Pt and MCM-41 increased the uniform dispersion of fine nanoparticles on the catalyst surface, and improved hydrogen yield.

**Keywords:** Methane decomposition, Hydrogen, Pt, Fe, MCM-41

## 1. 서 론

메탄의 분해반응은 천연가스의 주성분인 메탄으로부터 지구 온난화 가스의 배출 없이 CO<sub>x</sub>가 없는 청정 에너지원인 수소를 생산하고, 탄소나노 튜브 등의 유용한 탄소물질만 생산하는 유망한 방법으로 상당한 주목을 받고 있다[1]. 그러나 열역학적으로 식 (1)과 같이 흡열반

응이고 탄소가 촉매 표면에 침적하여 촉매를 빨리 불활성화 시킨다.



Pd, Pt, Ru, Rh 등의 귀금속이 촉매의 고활성과 안정성을 유지하는데 유용하나 메탄의 분해 반응용 촉매로 산업적으로 사용하기 위해서는 고비용이 들어간다. 낮은 비용으로 산업적으로 할 수 있는 방법은 8족 3d 전이 금속인 Fe, Co, Ni를 사용하는 것이 대안이다. Fe과 Co는 Fisher-Tropsch 공정에서 합성가스 즉, H<sub>2</sub>와 CO로부터 액체 탄화수소를 만드는 데 사용되는 잘 알려진 촉매이다[2]. 8족 3d 전이 금속 기반 촉매의 수명을 유지시키고 촉매 표면에 탄소의 침적을 예방하는 여

<sup>†</sup> Corresponding Author: Chonnam National University  
Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yeosu 59626, Republic of Korea  
Tel: +82-61-659-7294 e-mail: hjseo@jnu.ac.kr

러 전략들이 보고되고 있다[3].

Kutteri 등[4]은 바이메탈 촉매의 결정의 크기가 단일 금속 촉매의 결정의 크기 보다 더 작음을 XRD 분석으로 발견하였고, 그것은 활성점의 증가와 일치함을 보고하였다. Naikoo 등[5]은 메탄 열분해(TMD) 공정에서 니켈, 루테튬, 백금 기반 촉매가 탄소가 없는 수소를 만드는 데 가장 높은 활성도와 촉매 효율을 보여 주었다고 보고한 바가 있다. Pudukudy 등[6]은 메탄 촉매 분해반응에서 Ni/CeO<sub>2</sub>에 조촉매 Pt를 첨가하면 수소의 스피로버(spillover)로 NiO의 환원온도를 낮추고 금속-담체 상호 작용으로 촉매상에 미세 입자들이 균일하게 분포하여 촉매의 활성도와 안정성이 증가된다고 보고하였다. Karimi 등[7]은 수소 생산을 위한 메탄 분해 반응은 니켈 기반 촉매에 알칼리, 알칼리 토금속, 전이금속(Fe, Co, Cu), 귀금속(Pd, Pt), 희토류 금속(La) 등을 조촉매로 적당히 첨가하면 니켈 입자와 담체의 상호작용에 영향을 미쳐 촉매 활성을 증진시키고 촉매상에 탄소의 침적을 예방한다고 하였다. Shah 등[8]은 메탄의 촉매 분해 반응에서 알루미늄에 담지된 Fe-M (M = Pd, Mo, Ni)의 이원 촉매가 Fe, Pd, Mo, Ni가 담지된 단일 금속 촉매보다 훨씬 높은 활성을 나타내고, 비촉매 열분해에 비해 메탄의 분해 온도를 400~500 °C로 감소시켰다고 보고하였다.

본 연구에서는 메탄의 분해 반응에서 고효성과 안정된 촉매의 수명을 유지하는 촉매를 만들기 위해서 MCM-41에 Fe가 담지된 촉매에 1 wt%의 Pt를 첨가해서 수소의 수율에 미치는 영향을 연구하고자 한다. MCM-41은 중기공성 물질로서 탄소를 쉽게 침적시키는 미세 세공을 가진 ZSM-5 제올라이트보다 탄소 분해 반응 촉매의 담체로 장점을 가지고 있다. MCM-41은 균일한 육각형 배열의 2~50 nm 사이의 기공을 가지고 있고 두꺼운 벽과 높은 열 안정성의 물리적 특성 때문에 촉매의 담체, 흡착제 등에 널리 사용되고 있다[9]. 촉매는 XRD, XPS, SEM, EDS 등의 기기를 사용하여 특성화 하고, 촉매의 평가는 고정층 상압 유통식 반응기를 사용하여 메탄의 분해 반응을 수행하여 수소의 수율을 구하여 연구한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 촉매제조

Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매는 표준 담지법을 사용하여 다음과 같이 제조하였다. 괄호 안의 숫자는 담지된 무게 퍼센트를 나타낸다. Pt(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O와 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O를 각각 0.002 g과 0.295 g을 에탄올에 용해시킨 후 MCM-41 (Aldrich) 담체 0.1 g을 반응기에 넣고 5 h 동안 교반기로 균일하게 혼합하였다. 얻어진 침전물은 여과 후 100 °C의 건조기에서 24 h 동안 건조시켰다. 건조된 샘플은 전기로(Eyela, TMF-1000)에서 773 K에서 5시간의 소성 공정 과정을 거쳐 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매를 만든 후 150에서 200 메시로 분쇄하여 사용하였다.

### 2.2. 촉매 특성화

XRD는 페턴은 Panalytical Empyrean 3D 고분해능 X선 회절분석기(Cu K $\alpha$  방사선,  $\lambda = 1.5419 \text{ \AA}$ ; 40 kV, 30 mA)를 사용하여 얻었다. XPS 스펙트럼은 HP-X선 광전자분광분석기(Thermo Scientific K-Alpha+)를 사용하여  $1 \times 10^{-9}$  mbar 와 1.75 keV의 운전조건에서 Alk $\alpha$  X-선으로 얻었다. FESEM 이미지와 매핑 이미지는 Zeiss sigma 500 모델의 전계방사형 주사현미경을 사용하여 얻었고 촉매의 화학적 조성은 EDS 검출기로 분석하였다.

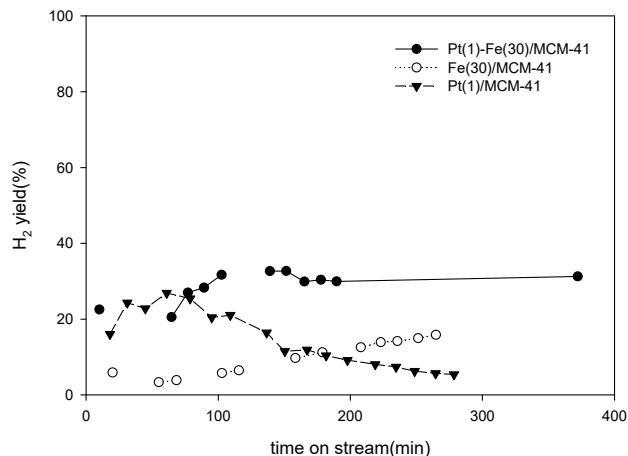


Figure 1. Yield of H<sub>2</sub> obtained in methane decomposition over Pt(1)-Fe(30)/MCM-41, Fe(30)/MCM-41, and Pt(1)/MCM-41 in the packed bed reactor: P = 1 atm, T = 700 °C, and GHSV = 4.2 × 10<sup>4</sup> mL CH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup> Cat. h<sup>-1</sup>

### 2.3. 촉매 활성도 실험

촉매반응은 고정층 상압 유통식 반응기를 사용하여 상압에서 수행된다. 내경이 10 mm인 석영반응기를 사용하여 반응기 내의 석영층 위에 0.05 g의 분말 촉매를 넣는다. 순수한 메탄을 973 K과 1 atm의 반응조건에서 GHSV, 4.2 × 10<sup>4</sup> mL CH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup> Cat. h<sup>-1</sup>로 반응기에 공급된다. 반응기의 온도는 K형 열전대를 반응기 내의 촉매상에 위치시키고 PID 제어기를 사용하여 원하는 온도를 ± 1 K의 범위 내에서 제어한다. 반응물의 조성은 각각의 실린더에 부착된 압력계를 사용하여 반응물을 퍼지한 후 질량유량계를 사용하여 제어한다. 생성물은 Molecular sieve 5 A의 컬럼을 GC (Shimadzu Co., Model 14B, 일본)에 연결하고 TCD로 분석한다. 촉매는 반응하기 전에 수소를 773 K에서 5시간 동안 20 mL/min의 유속으로 보내 환원시킨 후 283 K/min의 속도로 반응온도를 증가시켜 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 촉매의 활성도

Figure 1은 Fe(30)/MCM-41, Pt(1)/MCM-41, Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매의 반응시간에 대한 수소의 수율을 나타냈다. Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매의 수소의 수율이 Fe(30)/MCM-41 촉매의 수소의 수율보다 높음을 알 수 있다. Pt 조촉매를 Fe(30)/MCM-41 촉매에 1 wt% 첨가했을 때 3.2배의 높은 수소의 수율을 얻을 수 있었다. Pt(1)/MCM-41 촉매는 반응시간 1 h까지는 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매와 비슷한 수소 수율의 초기 활성도를 보였으나 그 이후로는 급격히 감소하였다. 그러나 Fe(30)/MCM-41 촉매에 Pt 조촉매를 1 wt% 첨가한 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매는 반응시간 6.2 h까지 평균 30.42%의 일정한 수소 수율의 촉매 활성도를 보였다. 이러한 현상은 Fe(30)/MCM-41 촉매에 Pt를 1 wt% 첨가함으로써 H<sub>2</sub>가 Pt로부터 Fe로 스피로버(spillover)됨으로서 나노 크기의 Fe 입자의 환원(Fe<sup>3+</sup> → Fe<sup>2+</sup> → Fe<sup>0</sup>)을 증가시키고, Fe, Pt와 MCM-41의 적당한 상호작용으로 미세한 Fe의 나노입자를 촉매 표면에 균일하게 분산시켜 3.2배의 높은 수소의 수율을 얻을 수 있는 것으로 사료된다[3]. 또한, Figure 4의 FESEM 분석 자료와도 일치한다.

3.2. 촉매의 특성화

Figure 2는 반응전 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41과 Fe(30)/MCM-41 촉매의 XRD의 패턴이다.  $2\theta = 5.97, 24.13, 33.10, 35.63, 40.83, 49.42, 53.98, 62.40, 63.99, 71.74, 75.44, 84.89, 88.48^\circ$ 에서 전형적인 육방정계  $Fe_2O_3$ 의 특성 피크와  $2\theta = 39.74, 46.22, 67.43, 81.22, 85.66^\circ$ 에서 Pt의 입방정계 특성 피크가 나타났다. 그러나  $PtO, PtO_2, FeO, Fe$ 의 금속의 결정상과 PtFe와 같은 이중 금속의 특성 피크는 나타나지 않았다.  $Fe_2O_3$ 와 Pt의 금속의 결정상만 나타났다. 이러한 현상은 Fe(30)/MCM-41 촉매에 1 wt%의 Pt를 첨가하면  $Fe_2O_3$  입자들의 환원을 쉽게 증가시키고, 적당한 금속-담체의 상호작용으로 Fe와 Pt의 상승효과가 나타나 미세한 나노 크기의 Fe 입자들을 촉매의 표면에 균일하게 분산시킨 것으로 사료된다[3]. 이러한 현상은 FESEM과 EDS의 분석 결과와도 일치한다.

Figure 3은 반응전 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41과 Fe(30)/MCM-41 촉매의 Pt4f, Fe2p, O1s, Si2p 핵심 전자 수준의 XPS의 스펙트라이다. Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매에서 Pt4f<sub>7/2</sub>의 특성피크가 71.28, 72.68, 74.68 eV에서 나타났고, Pt4f<sub>5/2</sub>의 특성피크가 74.88, 76.28, 78.08 eV에서 나타났다. 이 특성피크는 Pt<sup>0</sup>, Pt<sup>2+</sup>, Pt<sup>4+</sup>이었다. Fe2p<sub>3/2</sub>의 특성피크는 709.58, 710.78, 713.18 eV에서 나타났고, 그 특성피크는 각각 Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>이었다. Fe2p<sub>3/2</sub>의 Fe<sup>2+</sup> 위성피크가 719.18 eV에서 나타났다. Fe2p<sub>1/2</sub>의 특성피크는 722.68, 724.28, 726.78 eV에서 나타났고, 그 특성피크는 각각 Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>이었다. Fe2p<sub>1/2</sub>의 Fe<sup>2+</sup> 위성피크가

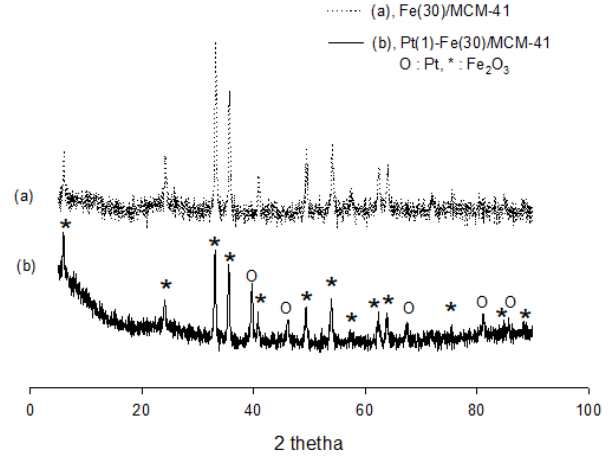


Figure 2. XRD patterns of (a), Fe(30)/MCM-41 and (b), Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 catalysts.

723.38 eV에서 나타났다. Pt(1)-Fe(30)/MCM-41의 Fe2p 강도가 Fe(30)/MCM-41보다 높게 나타났다. Fe2p<sub>3/2</sub>과 Fe2p<sub>1/2</sub>의 위성피크 존재로  $Fe_2O_3$ 과 FeO의 나노 입자가 혼합된 산화철임을 알 수 있었다 [10]. O1s의 특성피크는 529.88, 533.18 eV에서 나타났고, 그 특성피크는 각각 O<sup>2-</sup>, O<sup>-</sup>이었다. Pt(1)-Fe(30)/MCM-41의 O1s 강도가 Fe(30)/

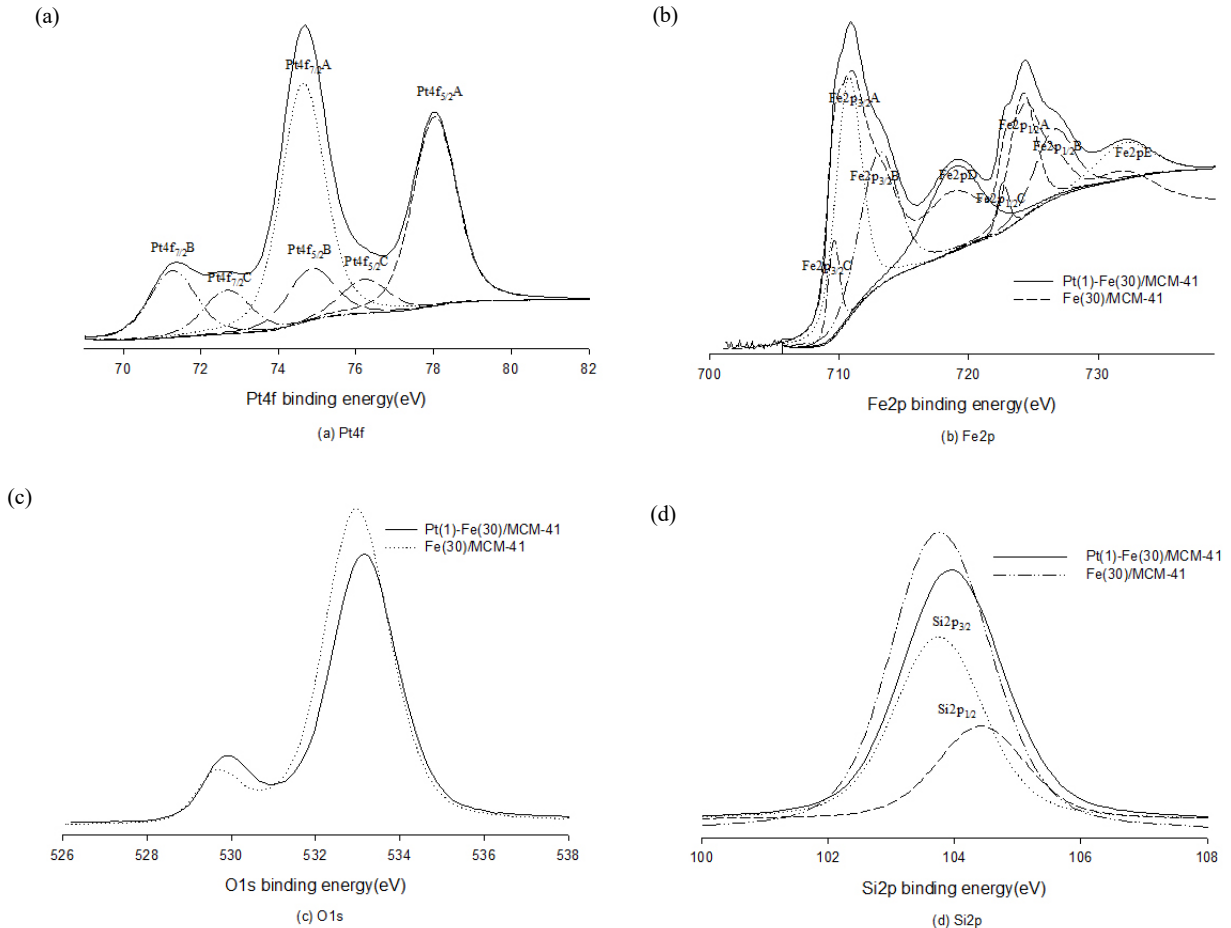


Figure 3. XPS spectra of (a) Pt4f, (b) Fe2p, (c) O1s, (d) Si2p core electron levels for fresh Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 and Fe(30)/MCM-41.

**Table 1. Atomic Percent of Core Electron Levels for Fresh Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 and Fe(30)/MCM-41 by XPS**

Fresh catalyst	Core electron levels	Atomic %
Pt(1)-Fe(30)/MCM-41	Pt4f	1.51
	Fe2p	16.14
	Si2p	82.34
Fe(30)/MCM-41	Fe2p	13.39
	Si2p	86.60

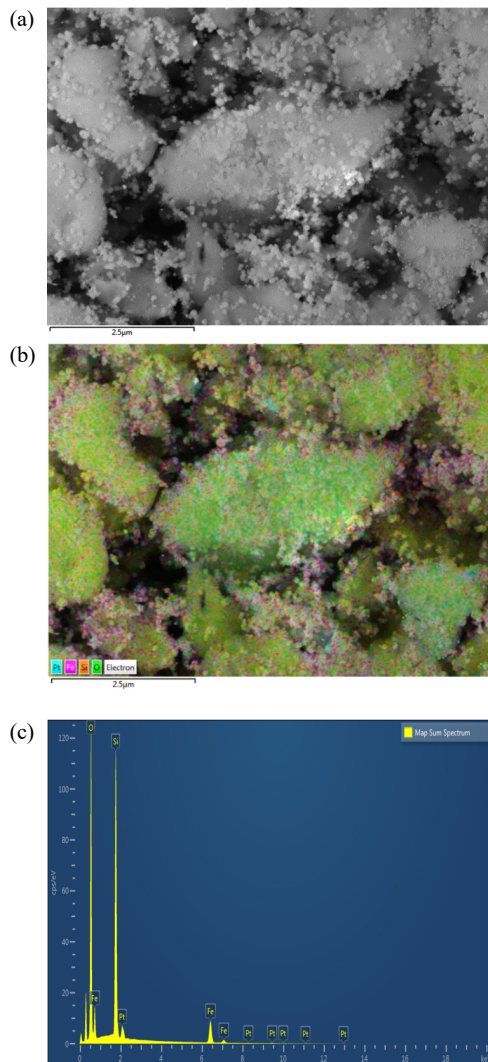
MCM-41보다 낮게 나타났다. Si<sub>2p<sub>3/2</sub></sub>과 Si<sub>2p<sub>1/2</sub></sub>의 특성피크는 각각 103.78, 104.38 eV에서 나타났고, 그 특성피크는 Si<sup>4+</sup>이었다. Pt(1)-Fe(30)/MCM-41의 Si2p 강도가 Fe(30)/MCM-41보다 낮게 나타났다. Table 1로부터 Fe(30)/MCM-41 촉매에 Pt를 1 wt% 첨가하면 촉매 표면상에서 원자 백분율이 Fe2p는 13.39%에서 16.14%로 증가하고 Si2p는 86.6%에서 82.34%로 감소함을 알 수 있었다. Pt4f는 1.51%이었다.

이러한 현상은 1 wt%의 Pt가 첨가되어 격자 산소와 결합하여 FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PtO, PtO<sub>2</sub>의 화합물을 만들고, Fe와 상승 효과로 전자적, 구조적으로 촉매에 영향을 미쳐 촉매 표면상에서 Fe2p의 원자 백분율이 증가 된 것으로 사료된다.

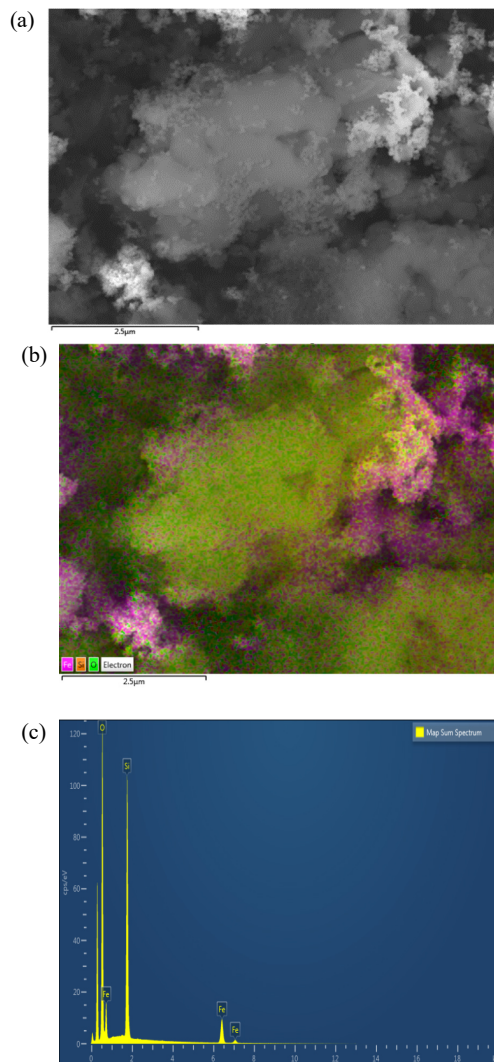
S. Damyanova 등[3]은 Ni/MCM-41에 Pd를 0.5 wt% 첨가하면 나노 크기의 작은 Ni 입자를 만들고 NiO 입자를 쉽게 환원시키며 촉매 표면에 니켈 입자의 분산을 향상시킨다고 보고하였다. S. Karimi 등 [7]은 촉매에 Pt가 존재함으로써 생성물인 H<sub>2</sub>의 Pt로부터 Ni로 뚜렷한 스페일오버(spillover) 효과로 Ni의 환원도와 담체상에 Ni의 분산을 촉진하고 입자 크기에 영향을 미친다고 하였다.

Figure 4에 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41와 Fe(30)/MCM-41 촉매의 FESEM 이미지, 매핑, EDS 특성피크들을 나타내었다. 촉매 표면에 Fe, Pt, Si, O의 나노 입자들이 존재함을 확인 할 수 있었고, Fe의 평균 입자의 크기는 Fe(30)/MCM-41 촉매는 약 58.5 nm이고 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매는 약 33.4 nm이었다. Fe(30)/MCM-41에 Pt를 1 wt% 첨가한 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매가 Fe(30)/MCM-41 촉매보다 촉매

A, Pt(1)-Fe(30)/MCM-41



B, Fe(30)/MCM-41



**Figure 4. A: FESEM (a) image (b) mapping (c) EDS characteristic peaks of fresh Pt(1)-Fe(30)/MCM-41, and B: FESEM (a) image (b) mapping (c) EDS characteristic peaks of fresh Fe(30)/MCM-41.**

표면상에 존재하는 입자의 크기가 1.8배 작고 구형의 입자들이 균일하게 분포함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

고정층 상압 유통식 반응기를 사용하여 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41와 Fe(30)/MCM-41의 촉매상에서 메탄의 분해 반응을 수행하여 수소의 수율을 얻었다. Pt 조촉매를 Fe(30)/MCM-41 촉매에 1 wt% 담지 했을 때 3.2배의 높은 수소의 수율을 얻을 수 있었다. XRD 분석으로 육방정계 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 결정상과 Pt의 입방정계 결정상이 나타났다. 그러나 PtO, PtO<sub>2</sub>, FeO, Fe의 금속의 결정상과 PtFe와 같은 이중 금속의 결정상은 나타나지 않았다. XPS 분석으로 Pt<sup>0</sup>, Pt<sup>2+</sup>, Pt<sup>4+</sup>, Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> 이온과 O<sup>2-</sup>, O<sup>-</sup>의 산소종이 존재함을 알 수 있었다. Fe(30)/MCM-41 촉매에 Pt를 1 wt% 첨가하면 촉매 표면상에서 Fe2p의 원자 백분율이 13.39%에서 16.14%로 증가했다. SEM, EDS 분석, 매핑 이미지로 촉매 표면에 Fe, Pt, Si, O의 나노 입자들이 균일하게 분포함을 알 수 있었고, Fe의 평균 입자의 크기는 Fe(30)/MCM-41 촉매는 약 58.5 nm이고 Pt(1)-Fe(30)/MCM-41 촉매는 약 33.4 nm이었다. Pt를 Fe(30)/MCM-41 촉매에 1 wt% 첨가함으로써 수소의 스페일오버(spillover) 효과로 Fe의 환원도를 증가시키고, Fe, Pt와 MCM-41의 적당한 상호작용으로 Fe와 Pt의 상승효과가 나타나 미세한 나노 크기의 Fe 입자들을 촉매의 표면상에 균일하게 분산시킨다.

#### References

1. H. F. Abbas and W. M. A. W. Daud, Hydrogen production by methane decomposition: A review, *Int. J. Hydrog. Energy*, **35**, 1160-1190 (2010).
2. Y. Yao, X. Liu, D. Hildebrandt, and D. Glasser, Fisher-Tropsch synthesis Using H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> syngas mixtures over an iron catalyst, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**, 11002-11012 (2011).
3. S. Damyanova, B. Pawelec, K. Arishtirova, J. L. G. Fierro, C. Sener, and T. Dogu, MCM-41 supported PdNi catalysts for dry re-

- forming of methane, *Appl. Catal. B Environ.*, **92**, 250-261 (2009).
4. D. A. Kutteri, I-W. Wang, A. Samanta, L. Li, and J. Hu, Methane decomposition to tip and base grown carbon nanotubes and CO<sub>x</sub>-free H<sub>2</sub> over mono- and bimetallic 3d transition metal catalysts, *Catal. Sci., Technol.*, **8**, 858-869 (2018).
5. G. A. Naikoo, F. Arshad, I. U. Hassan, M. A. Tabook, M. Z. Pedram, M. Mustaqeem, H. Tabassum, W. Ahmed, and M. Rezakazemi, Thermocatalytic hydrogen production through decomposition of methane - A review, *Front. Chem.*, **9**, 736801- 736824 (2021).
6. M. Pudukkudy, Z. Yaakob, Q. Jia, and M. S. Takriff, Catalytic decomposition of undiluted methane into hydrogen and Carbon nanotubes over Pt promoted Ni/CeO<sub>2</sub> catalysts, *New J. Chem.*, **42**, 14843-14856 (2018).
7. S. Karimi, F. Bibak, F. Meshkani, A. Rastegarpanah, J. Deng, Y. Liu, and H. Dai, Promotional roles of second metals in catalyzing methane decomposition over the Ni-based catalysts for hydrogen production: A critical review, *Int. J. Hydrog. Energy*, **46**, 20435-20480 (2021).
8. N. Shah, D. Panjala, and G. P. Huffman, Hydrogen production by catalytic decomposition of methane, *Energy Fuels*, **15**, 1528-1534 (2001).
9. X. S. Zhao, G. Q. Lu, and G. J. Millar, Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 2075-2090 (1996).
10. Q. Ai, Z. Yuan, R. Huang, C. Yang, G. Jiang, J. Xiong, Z. Huang, and S. Yuan, One-pot co-precipitation synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles embedded in 3D carbonaceous matrix as anode for lithium ion batteries, *J. Mater. Sci.*, **54**, 4212-4224 (2019).

#### Authors

Ho Joon Seo; Ph.D., Professor, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; hjseo@jnu.ac.kr