

# 저급탄화수소 수증기 개질에 의한 수소 제조용 니켈계 촉매개발

김대현\*, 이상득, 이병권, 김명준, 홍석인, 문동주\*\*

## Development of Ni-based Catalyst for Hydrogen Production with Steam Reforming of Light Hydrocarbon

Dae Hyun Kim\*, Sang Deuk Lee, Byung Gwon Lee, Myung Jun Kim, Suk In Hong and Dong Ju Moon\*\*

### Abstract

Steam reforming of LPG was investigated over spc-Ni/MgAl catalyst in a temperature range of 600~850°C, feed molar ratio of H<sub>2</sub>O/C=1.0~3.0, space velocity of 10,000~90,000 h<sup>-1</sup> and at atmospheric pressure. spc-Ni/MgAl catalyst was prepared by a co-precipitation method, whereas Ni/MgO and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were prepared by an incipient wetness method. The characteristics of catalysts were analyzed by N<sub>2</sub> Physisorption, CO chemisorption, XRD, TOF-SIMS, SEM and TEM techniques. The Ni/MgO and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were deactivated by the formation of carbon. However, the spc-Ni/MgAl catalyst showed higher conversion and H<sub>2</sub> selectivity than the other catalysts, even though carbon was formed on the surface of the catalyst during the reaction under the tested reaction conditions.

### Key words

Hydrotalcite(하이드로탈사이트), Ni catalyst(니켈촉매), Steam reforming(수증기개질)

(접수일 2008. 11. 14, 수정일 2008. 12. 17, 게재확정일 2008. 12. 19)

\* 한국과학기술연구원

■ E-mail : dhjs0318@kist.re.kr ■ Tel : (02)958-5862 ■ Fax : (02)958-5809

\*\* 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터

■ E-mail : djmoon@kist.re.kr ■ Tel : (02)958-5867 ■ Fax : (02)958-5809

## 1. 서론

1970년대 오일쇼크에 의해 화석연료 고갈의 위험성이 알려지면서, 선진국을 중심으로 대체연료 개발의 필요성이 대두되기 시작하였고, 1992년 채택된 UN 기후변화협약(UNFCCC) 이후 지구 온난화 가스로 알려진 CO<sub>2</sub>에 대한 규제가 본격화되면서 환경문제의 해결방안으로 대체에너지 기술 개발은 관심을 받게 되었다. 수소는 반도체 공정, 석유화학 공정, 암모니

아 및 비료의 생산 공정 등에 주로 사용되었으나, 최근에는 수소 이용 기술로서 연료전지 자동차의 동력원 및 전기를 발전하는데 사용되는 연료전지의 연구개발이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 고이즈미 총리는 2002년 의회연설을 통해 연료전지는 수소 사회의 문을 여는 열쇠이며, 향후 3년 내 자동차 및 가정용 연료전지를 실용화 하겠다는 의지를 표명하였으며,<sup>(2)</sup> 또한 부시대통령은 2003년 국정연설에서 향후 5년간 수소 연료전지 및 연료전지 자동차에 12억불을 투

자하여 연료전지 및 연료전지 자동차 분야에서 세계를 리드할 수 있는 핵심 기술을 개발하겠다고 발표한 이후, 수소 연료전지 분야는 무한 경쟁시대가 도래하게 되었다.<sup>(3)</sup> 이 외에 독일, 스페인, 아이슬란드, 캐나다 등 전 세계에서 수소에너지 시스템 개발을 위한 정부 주도의 다양한 연구 및 실증 프로그램이 경쟁적으로 진행되고 있다.<sup>(4,5)</sup> 국내에서도 다가올 수소경제(hydrogen economy) 사회로의 진입을 위한 핵심 기반기술로서 수소 스테이션(hydrogen station) 개발에 대한 연구가 지경부와 교과부의 주도아래 활발히 진행되고 있다. 이처럼 수소에너지의 활용을 극대화하기 위해서는 수소 스테이션과 같은 인프라의 구축이 선행되어야 하며 이에 대한 집중적인 연구가 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 수소 스테이션에 필요한 LPG SR 용 촉매 개발을 위해 Ni-계 하이드로 탈사이트계 촉매를 공침법으로 제조하고 LPG SR을 수행하여 촉매의 활성을 조사하였다.<sup>(6~8)</sup>

## 2. 실험

### 2.1 촉매 제조

$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ,  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Al_2O_3$  그리고 MgO는 약 98~99%(Aldrich and High Pure Chemical Co.)의 순도로 추가적인 정제과정을 거치지 않고 그대로 사용하였다. 촉매 제조 전체과정에서는 증류수를 사용하였다. 본 실험에서는 99.5% 순도의 프로판과 부탄은 덕양 가스(주)로부터 공급받아 사용하였다. Ni/MgAl 촉매는 공침법을 이용하여 제조하였다.<sup>(9)</sup> Al(III) 질산 수용액을 탄산 소듐 수용액에 격렬히 교반하며 적가하면 흰색 power가 발생하는데 1시간정도 시간이 흐르면 모두 사라진다. 이 흰색 powder가 모두 사라진 후에 Mg(II)와 Ni(II) 질산 수용액을 각각 적가하고 1시간동안 교반한다. 이후에 수산화 소듐 수용액으로 pH를 10으로 맞추면 연한 녹색 powder가 형성되며 이 용액을 60°C에서 8시간 동안 aging 한다. Aging한 용액을 상온으로 식히고 용액의 pH가 중성이 될 때까지 씻어준 후 과하고 60°C에서 12시간 동안 건조한다. 이 건조된 녹색 powder가 하이드로탈사이트 구조를 가지며 촉매로 사용하기 위해 850°C에서 5시간 동안 소성하면 고체상전이를 통해 Ni/MgAl 촉매

가 완성된다. 이 촉매를 잘게 부수어 80/100 mesh 채로 거른 후 일정량을 취해 반응에 사용하였다.

### 2.2 촉매 특성분석

제조된 촉매의 표면적은 질소의 물리흡착분석기[Quanta-chrome Co., Autosorb-1C]를 사용하여 측정하였다. 활성금속의 표면적은 CO 화학흡착법을 이용하는 화학 흡착분석기[Micromeritics Co., Autochem II]를 사용하여 측정하였다. 제조된 촉매의 반응 전 후 TPR(Temperature programmed reduction)은 5 vol%  $H_2/Ar$  가스, 10°C/min의 승온속도로 흡착분석기를 이용하여 측정하였고, X-ray 회절 분석은 대기압, 상온에서 XRD [Shimadzu Co., XRD-6000]를 사용하여 얻었다.

### 2.3 LPG 수증기 개질반응

LPG 수증기 개질반응은 고정층 반응 시스템에서 수행하였다. 반응전에 니켈계 촉매는 750°C에서 3~4시간동안 수소기체로 환원시켰다. 미반응  $H_2O$ 는 cold trap에서 제거한 후 on-line으로 연결된 GC(HP 6890 Series II, TCD)를 사용하여 반응 가스를 분석하였다. 반응 가스 분석용 GC column으로는 carbosphere를 사용하였고 GC/MS(HP 5890 Series/MS detector)는 HP-FFAP capillary column를 장착하여  $C_2 \sim C_4$  올레핀 화합물의 존재 여부를 파악하였다. 모든 반응은 반응온도 600~800°C, 공간속도 20,000h<sup>-1</sup>, 수증기/탄소 비율 1~3인 조건에서 수행되었다.

## 3. 결과 및 토의

본 연구에서 제조된 Ni/MgAl 촉매는 hydrotalcite 구조를 이용하여 고체결정상의 상전이를 통해 제조된 촉매로 높은 표면적과 활성금속인 니켈이 고분산되는 장점을 가진다.<sup>(7)</sup> 제조된 촉매의 물리화학적 특성은 표 1에 정리하였다. 촉매에 담지된 Ni 금속의 양은 ICP/AES를 통해 결정하였고, BET 표면적은  $N_2$ -물리흡착법을 통해 측정하였다. 상용 구 ICI 메탄 수증기 개질용 촉매, 함침법으로 제조된 Ni/ $Al_2O_3$  및 Ni/MgO 촉매보다 본 연구에서 제조된 Ni/MgAl 촉매가 높은 표면적으

로 지남을 확인할 수 있었다. 또한 CO-화확흡착법으로 측정 한 활성금속의 표면적도 다른 촉매들보다 높게 나타났다.

그림 1은 공간속도 20,000h<sup>-1</sup>, 수증기/탄소 = 2.0, 반응온도 800°C의 반응조건하에서 수행한 LPG 수증기 개질반응에

Table 1. 제조된 촉매의 물리화학적 특성

촉매	Ni담지량 <sup>a</sup> (wt%)	표면적 <sup>b</sup> (m <sup>2</sup> /g)	전체기공 부피(cc/g)	평균기공 지름(Å)	활성금속 표면적 <sup>c</sup> (m <sup>2</sup> /g)
Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.96	91.3	0.211	92.4	7.46
Ni/MgO	11.96	39.0	0.537	551.3	3.62
Ni/MgAl	20.0	197.7	0.273	101.4	13.68
ICI	21.97	13.78	0.082	228.8	1.45

a : determined by ICP/AES  
 b : measured by Quntachrome Co.  
 c : performed by Micromeritics Co.

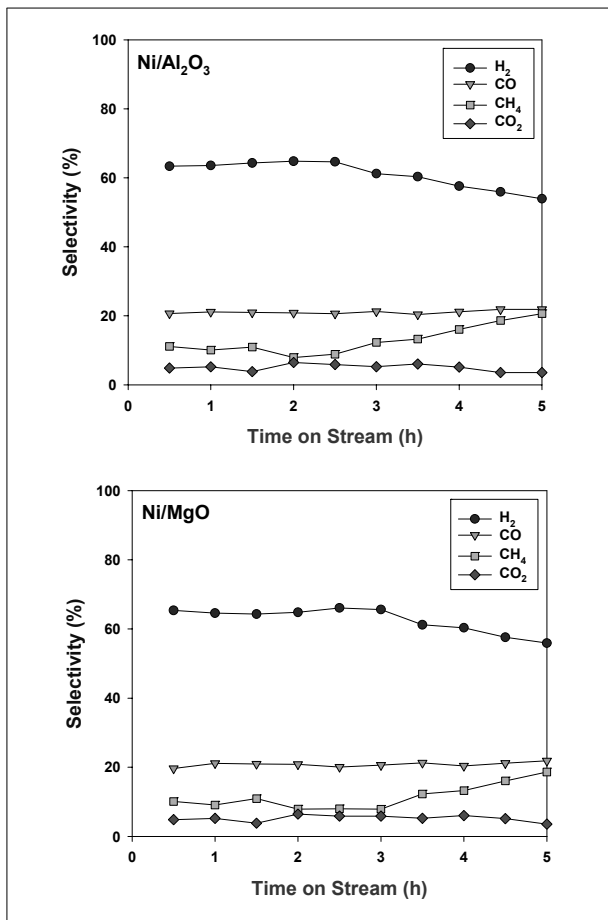


Fig. 1 The effect of time on stream on the selectivity in LPG SR over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni/MgO catalysts (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C = 2.0, Temp. 800°C).

대한 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Ni/MgO의 시간에 따른 촉매의 활성저하를 나타낸 그래프이다. LPG의 전환율은 100% 이므로 생성물의 선택도를 통해 촉매의 활성을 판단하였다. Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 2시간의 반응 경과 후 수소의 선택도가 감소하기 시작하였으나, Ni/MgO 촉매는 3시간이 지나야 수소의 선택도가 감소함을 알 수 있었다. 두 반응 모두 반응활성이 감소하기 시작하면서부터 반응기의 압력이 상승하기 시작하여 5시간 경과 후에는 반응을 중단하였다.

일반적으로 함침법으로 제조된 니켈계 촉매상에서 탄화수소 개질반응을 진행할 경우 다양한 형태의 탄소가 형성되며, 그 중에 휘스커(whisker) 탄소는 탄화수소의 수증기 개질 반응에서 주로 형성되는 탄소침적으로 기계적 강도가 우수해서 촉매를 부수며 이 과정에서 압력강하 등의 문제점이 발생하

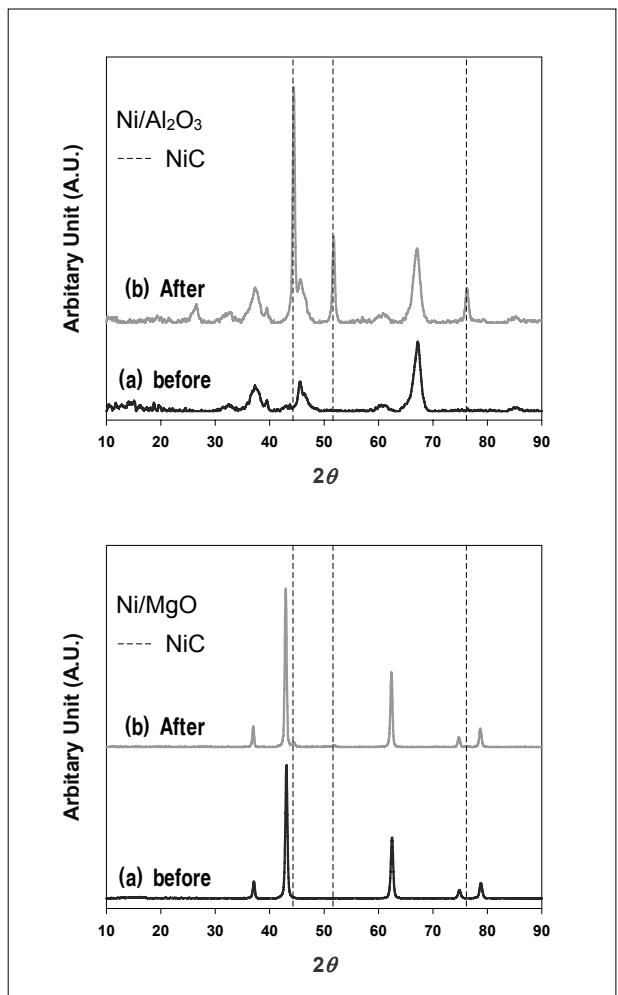


Fig. 2 XRD patterns of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni/MgO catalysts before and after the rxn for 5h (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C = 2.0, Temp. 800°C).

게 된다. 그림 2는 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Ni/MgO 촉매의 LPG 수증기 개질 반응 전 후의 XRD pattern을 나타낸다. Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매 상에 LPG 수증기 개질반응을 진행 시킨 후 촉매 표면에 다량의 탄소가 침적됨을 확인하였으며, XRD pattern에서도 Ni-C peak가 높은 intensity로 나타남을 확인하였다. 그러나 Ni/MgO 촉매상에서는 반응 후에 Ni-C peak가 나타나지 않았다. 이는 Ni과 Mg가 강한 상호작용을 통해 solid solution이 형성함으로써 휘스커 탄소의 생성을 억제한 것으로 판단된다.

기존의 촉매제조 방법인 함침법으로 제조된 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Ni/MgO 촉매의 활성을 비교한 결과 Ni/MgO 촉매 활성이 본 실험의 반응조건하에서는 보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 따라서, Ni/MgO 촉매와 본 연구에서 제조된 Ni/MgAl 촉매 그리고 상용 ICI 촉매의 활성을 비교하였다. 그림 3은 본 연구에서 제조된 Ni/MgAl 촉매의 반응전 XRD pattern을 나타낸다.

촉매 제조 방법에 따라 제조한 후 형성된 녹색의 powder를 60°C에서 12시간동안 건조한 뒤 형성된 구조 (a)는 전형적인 hydrotalcite 결정이 형성되었음을 나타내고 있으며, 이 촉매를 소성할 후 나타나는 구조 (b)는 고체결정상의 상전이에 의해 발생한 전형적인 Mg-Ni-O 결정구조임을 확인하였다.

그림 4는 Ni/MgAl 촉매 및 Ni/MgO 수증기 개질 촉매 상에서 LPG 수증기 개질에 대한 온도영향을 나타낸 그래프이다. LPG 수증기 개질 반응은 반응온도 600~850°C, 수증기/탄소 비율 2 그리고 공간속도 20,000h<sup>-1</sup>인 조건에서 수행하였다. 모든 촉매상에서 LPG의 전환율은 100%를 나타내었고, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>,

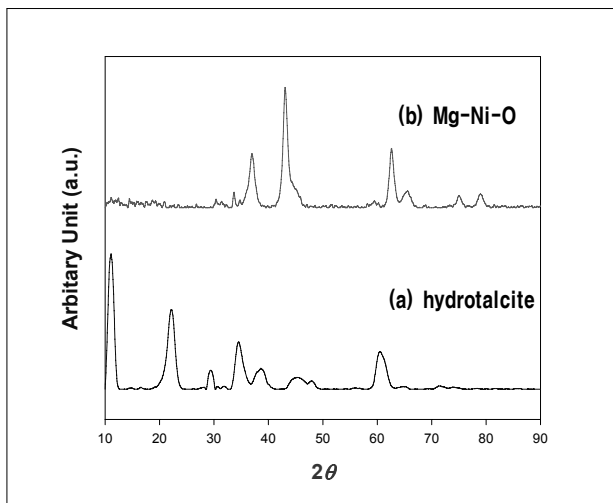


Fig. 3 XRD patterns of Ni/MgAl, (a) after dry, (b) after calcination.

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>와 같은 C<sub>2+</sub> 조성을 갖는 물질은 생성가스에서 전혀 관측되지 않았다. 그러나 소량의 메탄(CH<sub>4</sub>) 생성은 반응물의 열분해 혹은 생성된 탄소의 메탄화 반응에 의해 발생한 것으로 판단된다. Ni/MgO와 Ni/MgAl 촉매상에서 수행한 반응 결과에 따르면 수소 및 이산화탄소의 출구농도는 온도가 증가함에 따라 서서히 증가하였으나, 메탄과 일산화탄소의 출구농도는 서서히 감소하였다. 특히 수소의 출구 농도는 제조된 Ni/MgAl 촉매상에서 모든 온도 범위에서 Ni/MgO보다 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 함침법으로 제조된 Ni/MgO 촉매보다 공침법으로 제조된 Ni/MgAl 촉매가 LPG 수증기 개질에 대한 활성이 높음을 나타내는 것으로 판단된다.

그림 5는 공간속도 = 20,000h<sup>-1</sup>, 반응온도 800°C 조건에

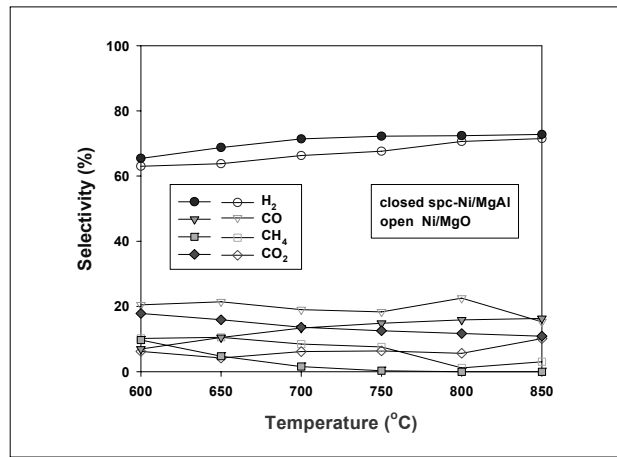


Fig. 4 The effect of temperature on the selectivity in LPG SR over Ni/MgAl and Ni/MgO catalysts (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C = 2.0).

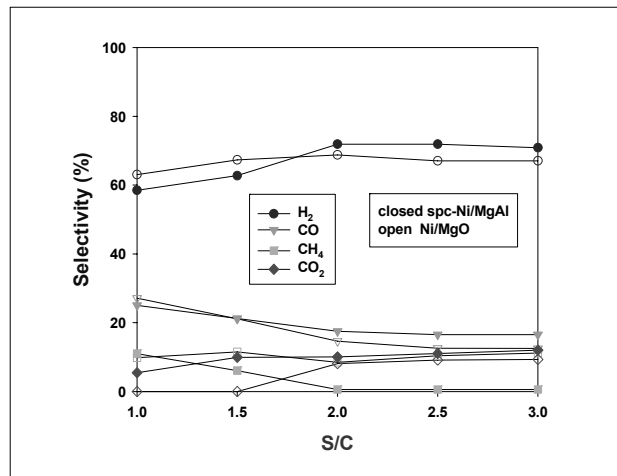


Fig. 5 The effect of S/C on the selectivity in LPG SR over Ni/MgAl and Ni/MgO catalysts (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, temperature = 800°C).

서 Ni/MgAl 촉매와 Ni/MgO 촉매상에서 수행한 LPG 수증기 개질 반응의 수증기/탄소 비율 효과를 나타낸 것이다. 수증기/탄소 비율이 2.0보다 높을 경우에는 Ni/MgAl 촉매의 수소 선택도가 Ni/MgO 보다 높게 나타났으며 2.0보다 낮을 경우에는 Ni/MgO 상에서 수소 선택도가 높게 나타났다.

일반적으로 개질반응을 수행할 경우에는 수증기를 생성하기 위한 장치 비용 절감 차원에서 수증기/탄소의 비율이 낮은 영역에서 활성이 좋은 촉매를 찾기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나, 열역학적으로 수증기/탄소 비율이 2.0 보다 낮을 경우에는 CO 혹은 CH<sub>4</sub>의 열분해에 의한 탄소형성이 우세하게 발생하기 때문에 수소 선택도가 좋다고 하더라도 장기 운전 성능이 우수하지 못한 단점이 있다.

그림 6은 본 실험에서 사용된 Ni계 촉매의 TPR profile을 나타낸 것이다. 순수한 NiO의 수소에 의한 환원 온도는 약 455°C에서 발생하였다. Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 환원온도는 약 830°C 근처에서 발생하였고, Ni/MgO 촉매는 전 측정범위 온도내에서 특별한 환원 peak를 나타내지 않았다. Ni/MgAl 촉매의 경우는 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 낮은 800°C에서 수소에 의한 환원이 발생하였다. XRD 상에서는 Mg-Ni-O solid solution이 형성됨이 나타나는 것으로 미루어 Ni/MgAl 촉매는 Ni-Mg 간 강한 상호작용에 의해 활성금속의 sintering에 의한 촉매의 비활성화를 억제되고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 의해 Ni의 환원이 원활히 발생하기 때문에 촉매의 활성이 Ni/MgO보다 높아지는 것으로 판단된다.

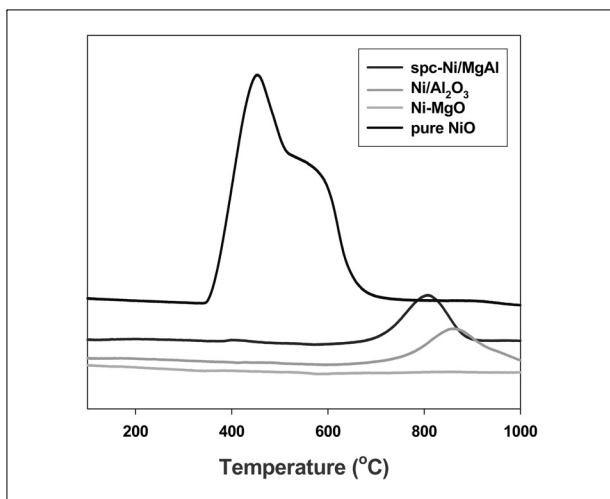


Fig. 6 The TPR profiles of prepared Ni-based catalysts (Heating rate : 5°C/min, Reducing gas : 5 vol% H<sub>2</sub>/Ar balance).

그림 7은 Ni/MgO 및 Ni/MgAl 수증기 개질 촉매상에서 LPG 수증기 개질에 대한 공간속도의 영향을 나타낸 그래프이다. 수증기/탄소 = 2, 반응온도 = 800°C에서 공간속도의 영향을 관찰한 결과 Ni/MgO 촉매의 경우 공간속도가 30,000h<sup>-1</sup>까지는 활성이 잘 유지되었으나 보다 높은 공간속도에서는 활성이 낮아지는 경향을 나타내었다. 반면에 Ni/MgAl 촉매의 경우 공간속도가 70,000h<sup>-1</sup> 까지 높아져도 촉매의 활성이 그대로 유지되었으며 80,000h<sup>-1</sup> 이상의 공간속도에서 서서히 활성이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8은 Ni/MgAl 및 상용 ICI 메탄 수증기 개질 촉매상에서 LPG 수증기 개질에 대한 온도의 영향을 나타낸 그래프이다. 수증기/탄소 = 2, 공간속도 = 20,000h<sup>-1</sup>에서 온도의 영

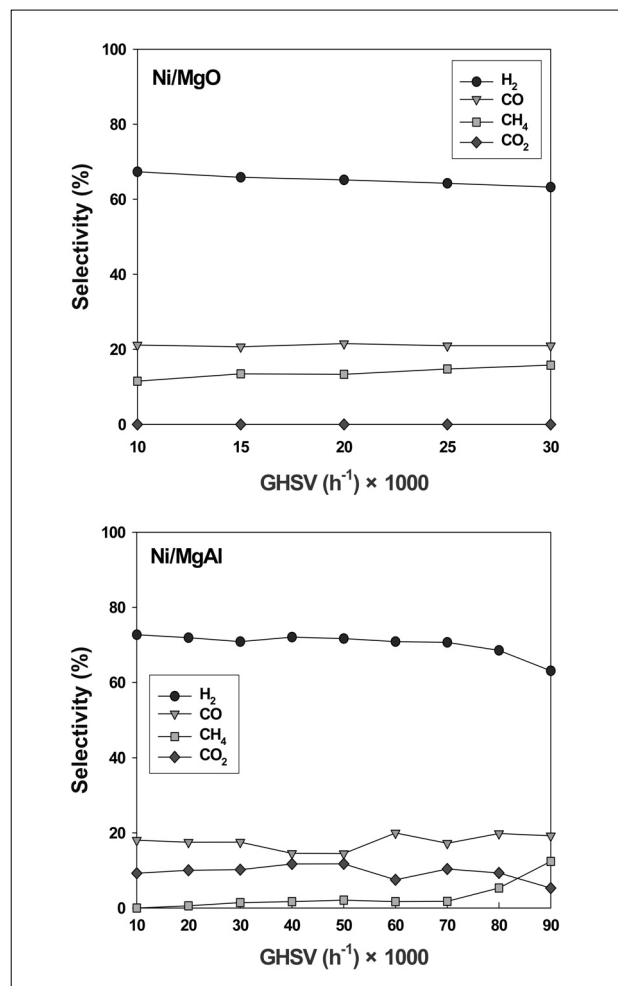


Fig. 7 The effect of GHSV on the selectivity in LPG SR over Ni/MgO and Ni/MgAl catalyst (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C =2.0).

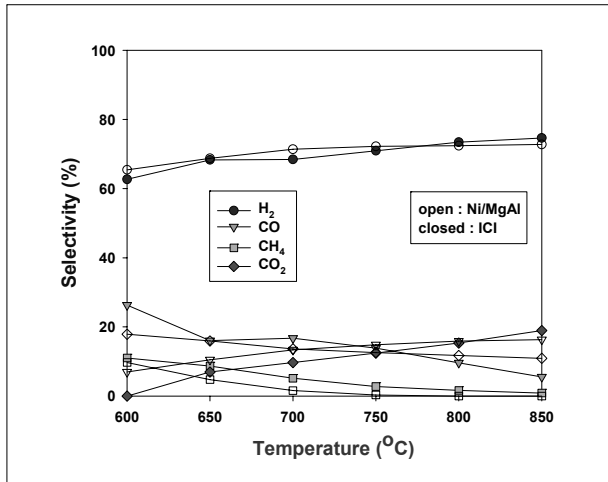


Fig. 8 The effect of temperature on the selectivity in LPG SR over ICI and Ni/MgAl catalysts (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C = 2.0).

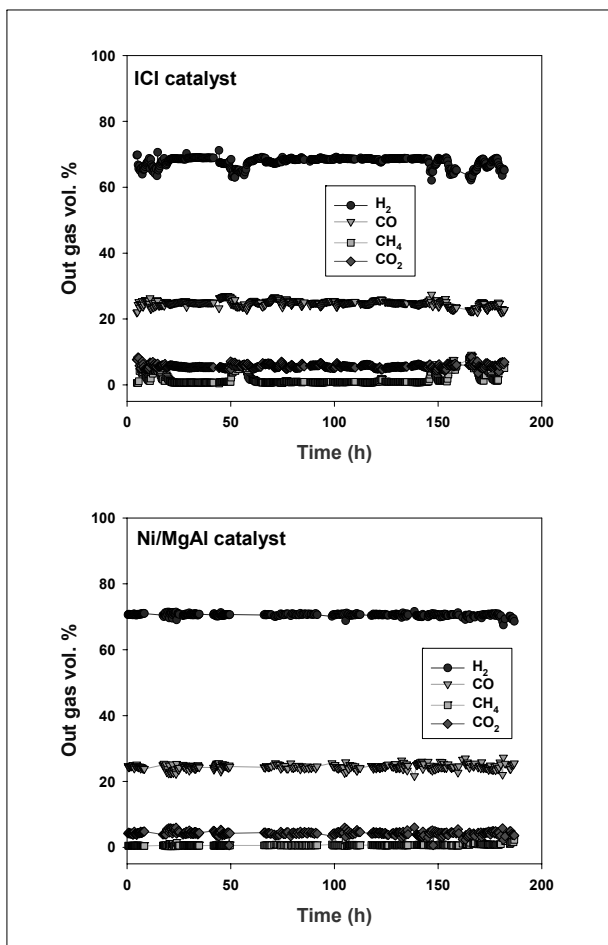


Fig. 9 Out gas volume (%) with SR of LPG over ICI CH<sub>4</sub> SR and Ni/MgAl catalyst for 186h (S/C = 2.0, GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, temp. = 800°C).

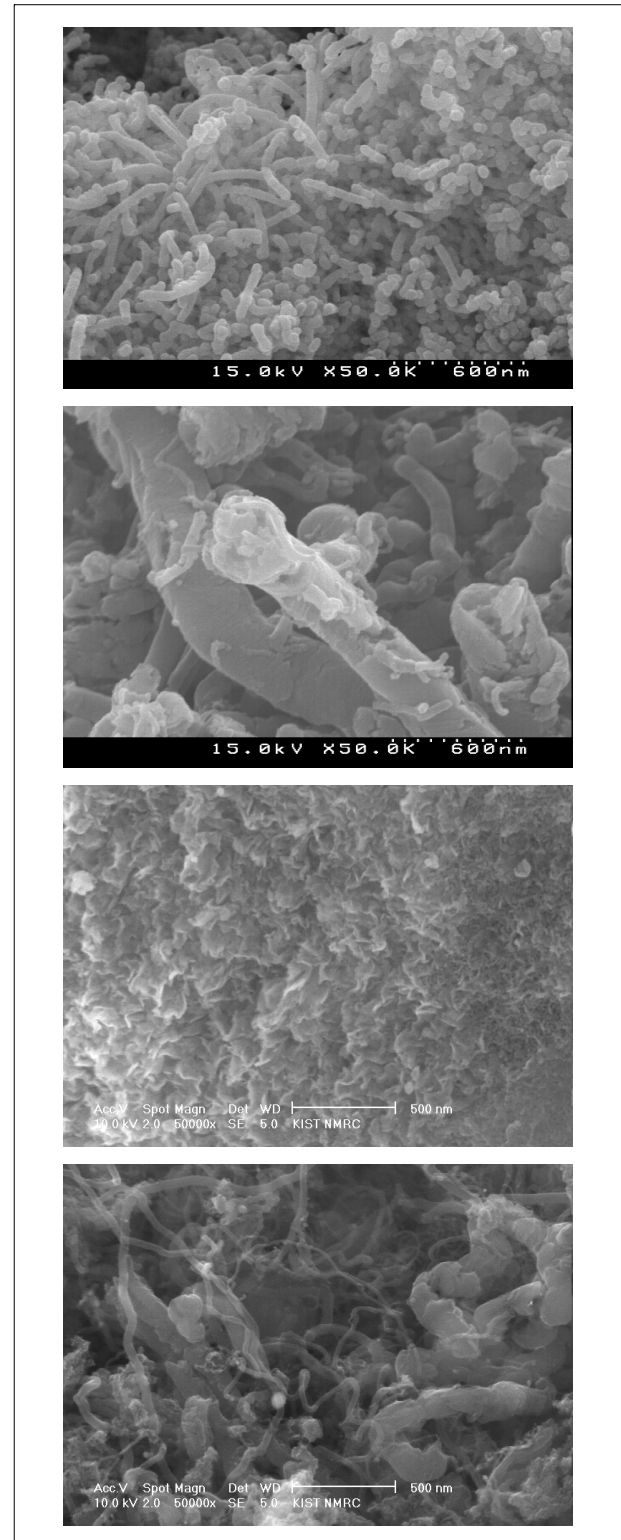


Fig. 10 SEM images of (a) ICI and (b) Ni/MgAl catalysts before and after the rxn for 186h (GHSV = 20,000 h<sup>-1</sup>, S/C = 2.0, Temp. 800°C).

향을 관찰한 결과 Ni/MgAl 촉매와 상용 ICI 메탄 수증기 개질 촉매의 수소 선택도는 본 연구에서 수행한 반응조건하에서는 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다.

이는 본 연구에서 제조된 촉매의 활성이 상용촉매의 활성과 유사할 정도로 높음을 의미하는 것으로 상용 ICI 메탄 수증기 개질촉매와 Ni/MgAl 촉매의 장기운전 성능을 비교하였다.

그림 9는 Ni/MgAl 및 상용 ICI 메탄 수증기 개질 촉매상에서 LPG 수증기 개질에 대한 장기운전에 대한 촉매의 활성을 나타낸 그래프이다. 수증기/탄소 = 2, 공간속도 =  $20,000\text{h}^{-1}$ , 반응온도 =  $800^\circ\text{C}$ 에서 두 촉매의 활성을 비교한 결과 ICI 촉매는 150시간 이후부터는 생성가스 농도의 불규칙성이 심해짐과 동시에 반응기의 압력이 급격히 상승하여 186시간 이후에는 반응을 중단하였다. 반면에 Ni/MgAl 촉매상에서 수행된 LPG 수증기 개질반응은 동일한 반응조건하에서 186 반응 동안 생성가스의 농도가 일정하게 유지됨을 확인하였다. 두 촉매의 시간당 생성된 탄소의 양은 ICI 촉매의 경우  $0.0012\text{g/h}$  이었으나 Ni/MgAl 촉매는  $0.0002\text{g/h}$ 로 ICI 촉매상에서 약 6배 더 많은 탄소가 시간당 생성되었다.

그림 10은 ICI와 Ni/MgAl 촉매상에 LPG 수증기 개질반응을 186시간동안 진행한 후의 SEM 사진이다. 반응 전 Ni/MgAl 촉매는 높은 BET 표면적을 나타내는 egg-shell 형태를 잘 나타내며, 반응후두 촉매 표면에 모두 filamentous 탄소가 생성됨을 확인하였다. 그러나 Ni/MgAl 촉매의 경우 시간당 탄소 생성량을 ICI 촉매보다 억제함으로써 LPG 수증기 개질 반응 활성을 보다 안정적으로 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Ni/MgAl 촉매 및 귀금속을 소량 담지한 Ni/MgAl 촉매상에서 LPG SR을 수행하여 수소 스테이션에 대한 적용 가능성을 조사하였다. 공침법으로 제조된 Ni/MgAl 촉매는 기존 함침법으로 제조된 Ni/MgO 촉매와 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉

매보다 BET 표면적과 활성금속 표면적이 높게 나타났으며 활성도 우수함을 확인하였다. 또한 Ni/MgAl 촉매는 상용 ICI CH<sub>4</sub> 수증기 개질촉매 보다도 장기운전 성능이 우수하였다. 그러나 Ni/MgAl 촉매의 경우 활성금속의 sintering에 의한 촉매활성 저하는 억제할 수 있었으나 반응 중 탄소침적에 대한 문제는 완벽하게 해결하지 못하였다. 이 문제를 해결하기 위하여 현재 귀금속이 소량 첨가된 Ni/MgAl 촉매를 제조하였고, 그 활성에 대한 연구를 진행 중에 있다.

#### References

- [1] 2003 Annual Progress Report, "Hydrogen, Fuel cells, and Infrastructure technologies program", U.S. DOE, (2003).
- [2] <http://www.enea.or.jp/WE-NET/>
- [3] <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/>
- [4] <http://www.clean-air.org>, <http://www.gov.mb.ca>, <http://www.hydrogenus.com>, <http://www.hydrogen.org>
- [5] <http://www.nrel.gov>, <http://www.fuel-cell-bus-club.com>, <http://hfcletter.com>
- [6] D.J. Moon, D.H. Kim, J.S. Kang, J.W. Ryu, B.G. Lee, Y.S. Yoon and B.S. Kwak, Korea patent No. 10-2005-00992 (2005).
- [7] D.H. Kim, J.S. Kang, Y.J. Lee, N.K. P, Y.C. Kim, S.I. Hong and D.J. Moon, 2008, "Steam reforming of n-hexadecane over noble metal-modified Ni-based catalysts", Catal. Today, Vol. 136, pp. 228-234
- [8] D.J. Moon, D.H. Kim, J.S. Kang, J.W. Ryu, B.G. Lee, Y.S. Yoon, B.S. Kwak, Korea Patent 10-2005-00,992 (2005).
- [9] K. Takihira, T. Shishido, P. Wang, T. Kosaka and K. Takaki, 2004, "Autothermal reforming of CH<sub>4</sub> over supported Ni catalysts prepared from Mg-Al hydrotalcite-like anionic clay", J. Catal. Vol. 221, pp. 43-54.

### 김 대 현



1997년 고려대학교 화학과 이학사  
1999년 고려대학교 소재화학과 이학석사  
2001년 고려대학교 화학과 이학박사 수료

현재 한국과학기술연구원, 고려대학교 화공생명공학과 학연 박사과정  
(E-mail : dhjs0318@kist.re.kr)

### 이 상 득



1976년 서울대학교 화학공학 공학사  
1986년 KAIST 화학공학 공학석사  
1994년 KAIST 화학공학 공학박사

현재 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 책임연구원  
(E-mail : sdlee@kist.re.kr)

### 이 병 권



1980년 서울대학교 화학공학 공학사  
1982년 서울대학교 화학공학 공학석사  
1989년 The Univ. of Akron (미국) 화학공학과 공학박사

현재 한국과학기술연구원 환경공정연구부 부장, 청정에너지 연구센터 책임연구원  
(E-mail : bglee@kist.re.kr)

### 김 명 준



1980년 연세대학교 화학공학과 공학사  
1982년 한국과학기술원 화학공학과 공학석사  
1992년 Northwestern대학교 화학공학과 공학박사

현재 SK에너지(주) 기술원 CRD연구소 수석연구원  
(E-mail : zephyr1@skenergy.com)

### 홍 석 인



1968년 고려대학교 화학공학과 공학사  
1973년 고려대학교 공업화학과 공학석사  
1977년 고려대학교 공업화학과 공학박사

현재 고려대학교 화공생명공학과 교수  
(E-mail : sihong@korea.ac.kr)

### 문 동 주



1985년 전남대학교 화학공학과 공학사  
1987년 전남대학교 화학공학과 공학석사  
1998년 고려대학교 화학공학과 공학박사

현재 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 책임연구원  
(E-mail : djmoon@kist.re.kr)