

마이크로파를 이용한 황산세륨으로 개질화 된 SiC/Al₂O₃ 촉매의 CF₄ 분해 특성 Decomposition Characteristics of CF₄ by SiC/Al₂O₃ Modified with Cerium Sulfate Using Microwave System

최 성 우
Sung-Woo Choi

계명대학교 환경과학과

Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University

(Received November 13, 2015; Revised December 8, 2015; Accepted December 16, 2015)

Abstract : Alumina-based catalysts with different Ce loadings were studied in the decomposition of CF₄ using microwave heating system. Heating material of microwave system used Silicon Carbide. The crystallographic phases of catalysts were investigated by XRD and decomposition rates of CF₄ were examined by GC-TCD. The catalysts of 10 wt% Ce modified Al₂O₃ showed higher CF₄ decomposition rate than un-modified Al₂O₃ for 500 °C reaction temperature. The k value of catalysts shows the order of Ce(20)/Al₂O₃ = Ce(0)/Al₂O₃ < Ce(5)/Al₂O₃ < Ce(10)/Al₂O₃. XRD patterns of Ce(0)/Al₂O₃ were no difference before and after the reaction and showed Al₂O₃ phases. With the increase in Ce loadings, CeO₂, AlF₃ of XRD peaks was observed. The results was indicated that Ce modified Al₂O₃ than un-modified Al₂O₃ was decreased reaction temperature to 200 °C with same decomposition rate. Also the appropriated cerium sulfate loadings on Al₂O₃ were 5~10 wt%.

Key Words : CF₄, Catalytic, Microwave, Thermal Decomposition, Cerium Oxide

요약 : 마이크로파 열분해 시스템을 이용하여 Ce 담지량이 다른 알루미나 촉매의 CF₄ 분해에 대한 연구를 실시하였다. 마이크로파 발열체로는 실리콘카바이드를 사용하였다. 각 촉매의 결정상은 XRD로 관찰하였으며 CF₄의 분해율은 GC-TCD를 사용하였다. 500 °C 반응온도에서 10 wt% Ce로 개질화한 알루미나가 개질화하지 않은 알루미나에 비해 CF₄ 분해율이 높았다. 반응속도상수 k값은 Ce(20)/Al₂O₃ = Ce(0)/Al₂O₃ < Ce(5)/Al₂O₃ < Ce(10)/Al₂O₃ 순이었다. XRD 패턴은 Ce(0)/Al₂O₃에서는 반응 전후의 차이가 나타나지 않았으며 Al₂O₃의 결정구조만 관찰되었다. 반면에 Ce를 담지한 촉매에서는 산화알루미늄과 황산세륨의 혼합형으로 나타났다. 본 연구의 결과 Ce를 담지한 Al₂O₃촉매는 Ce를 담지하지 않은 촉매에 비해 동일한 분해율을 가지면서 반응온도를 200 °C 정도를 낮출 수 있음을 보여주었다. 또한 cerium sulfate의 적정비율은 5~10 wt%임을 보여주었다.

주제어 : 사불화탄소, 촉매, 마이크로파, 열분해, 황산세륨

1. 서론

CF₄는 반도체공정 및 세정공정에서 광범위하게 사용되는 물질로 적외선을 강하게 흡수하고 대기 중 체류시간이 길며 지구온난화에 영향을 줌으로 효과적인 제거가 필요하다.¹⁾ CF₄는 PFC (perfluorocompounds) 중의 하나이며 전통적인 제어 기술로는 분해가 매우 어려운 물질이다. PFC를 제거하기 위한 방법으로는 연소법, 촉매를 활용한 방법 등으로 구분할 수 있으나 PFC의 C-F결합에너지는 약 543 kJ/mol로 그 결합력이 강해 화학적으로 분해하는 것은 매우 어렵다고 알려져 있다.²⁾

PFC의 처리방식으로는 직접연소, 플라즈마 분해법, 촉매 분해법 등 다양한 제거방법의 연구가 진행 중이다. 연소를 통한 기술로는 CF₄를 분해하는데 고온을 요구하여 운전비용이 크고 분해산물에 유해물질이 포함되어 후처리공정이 필요하다. 플라즈마 분해법은 PFC를 포함한 배기가스를 플라즈마 반응기에 통과시켜 분해하는 기술이다. 산소와 헬륨 가스를 첨가한 플라즈마를 이용하여 CF₄ 가스를 처리하였으며³⁾ 워터젯 플라즈마를 이용한 CF₄의 분해는 전반적으로

효과적이나 플라즈마의 안정한 상태로 유지하기 어려워 다소 효율이 떨어진다고 보고하였다.⁴⁾

촉매를 이용한 연구로는 Takita 등⁵⁾은 희토류 금속의 일종인 인화알루미늄을 이용하여 937 K에서 가수분해를 이용하여 CF₄를 분해하였다. 가수분해에 의한 CF₄ 제거 시 ZnO, NiO와 같은 금속산화물을 알루미나에 첨가함으로써 알루미나의 촉매 안정도를 높일 수 있다고 보고하였다. 국내에서도 금속산화물이 담지된 알루미나 촉매 상에서 가수분해를 이용하여 SF₆을 제거하는 연구가 수행되었으며,⁶⁾ Lee와 Jeon⁷⁾은 PFC배출 저감을 위한 파일럿 규모 촉매 공정연구도 진행되었다. 최근에는 CF₄를 제거하기 위해 마이크로파를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. Kim 등⁸⁾은 산소와 헬륨가스를 첨가한 플라즈마를 이용하여 CF₄가스를 처리하였으며 수소를 이용한 소각이나 아크 또는 RF와 같은 고온 플라즈마를 이용한 PFC 가스 분해 연구가 진행되었다.⁹⁾ Choi¹⁰⁾는 마이크로파 조사에 의한 SF₆ 분해시 알루미나의 첨가 영향에 대해 보고하였다. 또한 Han¹¹⁾은 SF₆가스의 열분해반응 특성연구에서 SF₆ 분해반응의 반응차수를 연구한 결과 1차 반응임을 확인하였다. PFC중 SF₆의 분해 반응에

† Corresponding author E-mail: swchoi@kmu.ac.kr Tel: 053-580-5245 Fax: 053-850-5385

대한 연구는 활발히 진행되고 있는 편이나 C-F 결합에너지가 높아 분해가 어려운 CF₄에 대한 연구는 소수의 연구자에 의해 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 희토류 계열의 금속산화물인 Ce을 산화알루미늄에 담지하고 일정비로 혼합된 촉매를 사용하여 CF₄를 제거하고자 하였다. 개질화 된 촉매는 함량비를 달리하였으며 마이크로파 시스템에 의한 조사 전후의 농도를 평가하기 위해 GC-TCD를 이용하였다. 또한 촉매분해의 변화된 특성을 알아보기 위해 XRD 분석을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1. 촉매제조

본 연구에서는 마이크로파의 유전가열을 이용하기 위해서 발열체인 SiC (Silicon Carbide, SiC)와 금속산화물인 CeO₂ (Cerium sulfate, Ce) 그리고 산화알루미늄(Acros Organics, Belgium, Al₂O₃)을 연구재료로 사용하였다. CeO₂는 전구체인 황산세이세륨(GFS Chemicals Inc.)을 구매하여 제조하였다. CF₄ 분해를 위한 촉매로 가장 많이 이용되는 Al₂O₃을 기반으로 그들의 표면에 금속산화물인 희토류 계열을 담지하기 위하여 담지법으로 촉매를 제조하였다. Ce 담지율은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$Ce(x) wt/Al_2O_3(%) = \frac{Ce}{Ce + Al_2O_3} \times 100 \quad (1)$$

계산된 Ce의 양을 증류수 100 mL와 함께 30 분간 교반한 후 Al₂O₃와 증류수 50 mL를 다시 10분간 교반시켰다. 교반되어 나온 촉매를 120°C에서 하루 동안 건조시켜 700°C에서 5시간 소성하여 촉매를 제조하였다. 개질화 된 촉매는 Ce(x)/Al₂O₃라 지칭하였으며, x는 Ce의 함량을 나타낸다. 즉 Ce(5)/Al₂O₃는 Ce비율이 5 wt%로 Al₂O₃에 담지되었음을 나타낸다. 개질화된 Ce(x)/Al₂O₃와 SiC의 Ce 비율이 30 wt%로 단순 물리적 혼합비로 사용하였다. 실험 전 재료는 Ce(x)/Al₂O₃와 SiC를 24시간 동안 건조시킨 후 실험

에 사용하였다. CF₄의 농도를 분석하기 위해 GC-TCD (HP 6890A GC, Agilent)를 이용하였다. 칼럼(GS Carbonplot, Agilent)은 길이 30 m, 직경이 0.32 mm 필름의 두께 3 um을 사용하였으며, 분석조건으로 injector 온도를 185°C, detector 온도를 150°C, 오븐온도를 35°C로 유지하여 분석하였다. 반응 전후 촉매의 결정구조 변화를 살펴보기 위하여 XRD (X-ray Diffractometer, XDS 2000, Scintag) 분석을 수행하였다. 전압과 전류는 40 kV, 25 mA이고, 2θ는 15~80°의 범위에서 측정하였다.

2.2. 실험장치

Fig. 1은 마이크로파를 이용한 CF₄의 열분해 실험장치를 나타내었다. CF₄의 가스유량을 조절하기 위하여 질량유량계 (Mass flow controller)를 사용하였으며 반응기 안의 재질은 석영으로 구성된 둥근 관의 길이가 150 mm, 직경이 40 mm를 사용하였다. 석영관에 촉매제를 둥근 관의 중심부에 고정시켜 넣고 약 3,000 ppm의 CF₄/N₂하여 6,000 mL/hr으로 CF₄를 일정하게 흐르게 하여 분해실험을 하였다. 마이크로파 시스템 장치는 주파수가 2.45 GHz인 마그네트론(Magnetron)이 장착된 발진관을 사용하였으며 마이크로파는 도파관을 통하여 반응기에 주입되도록 하였고 반응기의 내·외부 벽에는 알루미늄을 사용하였다. 초기출력을 900 W로 조사 후 설정온도에 도달 시 반응온도를 자동적으로 유지하게 하였다. CF₄의 DRE (Destruction and Removal Efficiency)는 식 (2)로 정의하여 계산하였다.

$$DRE(%) = \left(\frac{CF_{4_{input}} - CF_{4_{output}}}{CF_{4_{input}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 마이크로파 열분해 시스템의 분해온도 및 CF₄의 열분해 평가

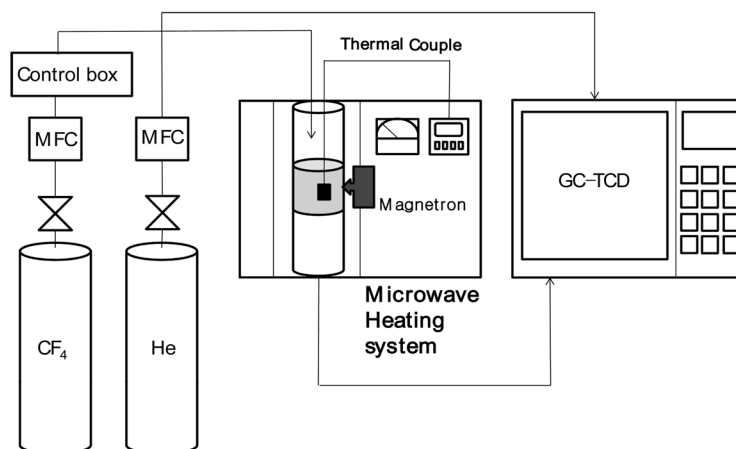


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for CF₄ decomposition.

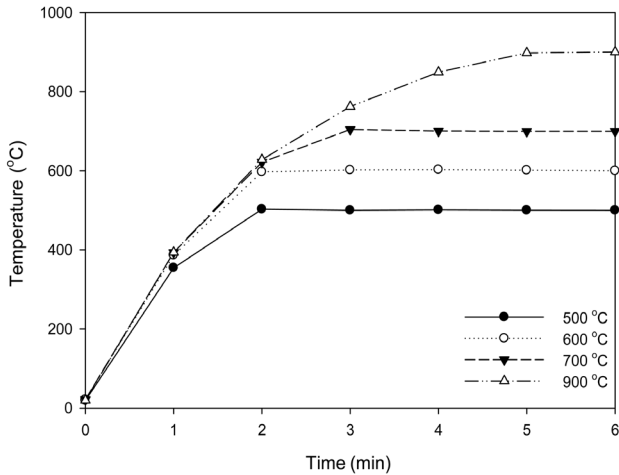


Fig. 2. Variation of reaction temperature by microwave system.

CF₄의 열분해 및 촉매반응을 위한 열원으로 마이크로파 시스템을 사용하였다. 마이크로파는 초기 출력을 900 W로 조사 후 설정온도에 도달 시 자동적으로 분해온도를 유지하게 설계하였다. 분해온도는 500~900°C로 설정하였으며 마이크로파 조사에 의한 반응기내 발열체의 평균 온도 증가율을 Fig. 2에 나타내었다. 분해온도별 온도상승율은 500°C에서 250°C/min, 600°C는 240°C/min, 700°C는 233°C/min 그리고 900°C에서는 180°C/min이었다. 즉 분해온도가 높을

수록 온도상승율이 낮아지는 경향을 보였으며 설정된 분해온도에 도달하는 시간은 최소 2 min에서 최대 5 min이 걸렸다. 따라서 발열체로 SiC를 사용하고 발열체에 마이크로파를 조사시 효율적으로 온도를 상승시킬 수 있음을 보여 주었다.

Fig. 3은 분해온도에 따른 Ce 함량별 CF₄와 CO₂의 농도 변화를 나타내었다. Ce 함량에 관계없이 CF₄가 분해를 시작함에 따라 CO₂가 발생함을 알 수 있었다. CF₄ 분해 시 부산물로 CO₂와 F₂가 발생되며 CF₄의 분해율을 CO₂ 전환율로 보고한 바 있다.¹²⁾ 본 연구에서도 Ce 함량에 관계없이 CF₄가 분해를 시작함에 따라 CO₂가 발생함을 알 수 있었다. Fig. 2(a)는 Ce(0)/Al₂O₃의 분해온도에 따른 CF₄의 감소율과 CO₂의 증가율을 농도비로 보여주었다. 900°C에서의 CF₄의 분해된 농도비는 0.85로 나타났고 CO₂의 발생량은 0.45였다. 분해온도가 낮아짐에 따라 CF₄의 감소율과 비례하여 상대적으로 CO₂의 증가율은 낮았다. 특히 500°C에서는 거의 분해가 되지 않아 CO₂발생은 제로였다. Fig. 2(b)~(d)는 Ce 5 wt%, 10 wt% 및 20 wt%를 담지한 촉매의 CF₄와 CO₂의 농도비를 나타내었다. Ce(5)/Al₂O₃와 Ce(10)/Al₂O₃의 분해온도가 600°C 이상에서 CF₄의 감소율은 거의 유사하게 나타났다. 500°C에서 Ce(0)/Al₂O₃보다 감소율이 더 높은 것은 Ce(5)/Al₂O₃와 Ce(10)/Al₂O₃였다. 반면 Ce(20)/Al₂O₃는 CF₄의 감소율은 전 온도범위에서 Ce(0)/Al₂O₃와 유사하

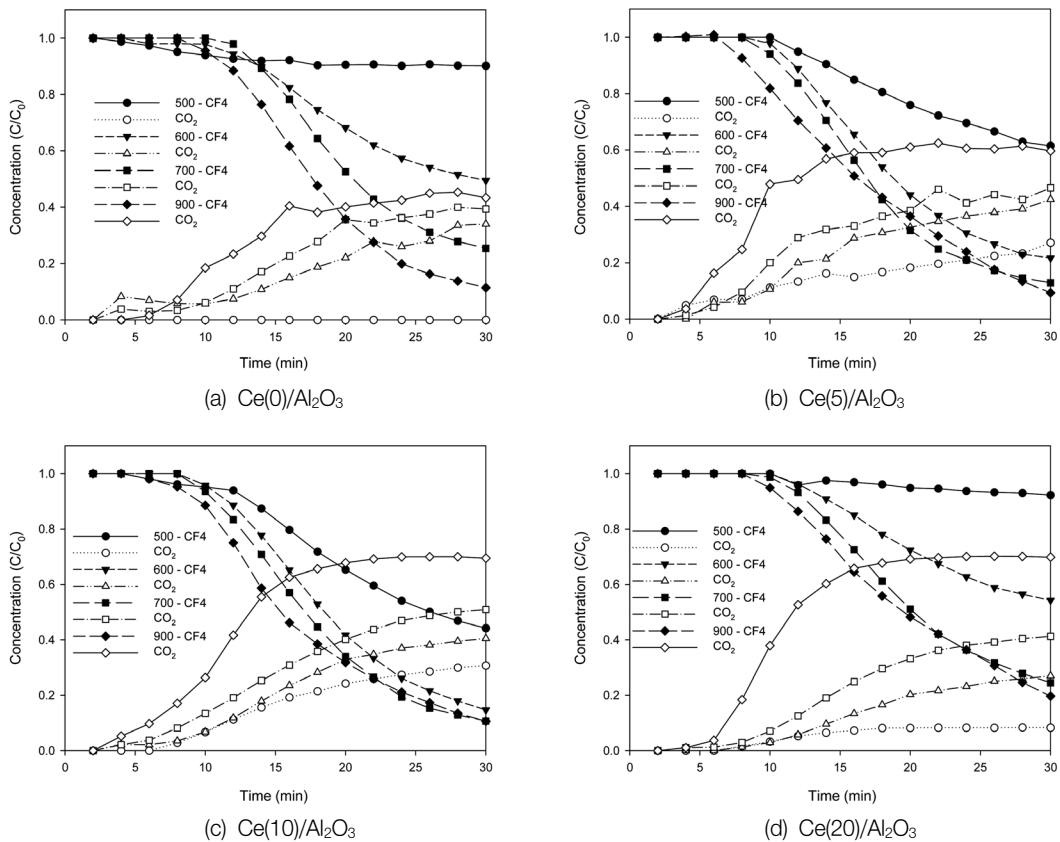


Fig. 3. Concentration variation of CF₄ and CO₂ by Ce-loaded aluminum oxide catalysts at the reaction temperatures between 500°C and 900°C.

게 나타났으며 20% 이상 과량으로 담지된 경우 CF₄의 농도 비가 현저히 낮은 것으로 나타났다. CF₄ 가스를 분해하기 위해 알루미나를 전구체로 cerium sulfate를 담지한 촉매를 사용한 결과 분해온도를 낮출 수 있어 Ce의 담지가 효과적이라고 보고하였다.¹²⁾ 그러나 과량의 cerium sulfate의 담지는 CF₄의 DRE를 낮게 하여 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 El-Bahy 등¹³⁾은 알루미나에 5 wt% 금속산화물을 담지하여 CF₄의 가수분해 연구 결과 Ga, Zn, Ni, Sn, Ce 및 Zr 산화물촉매의 CF₄ 분해율이 90% 이상이라고 보고하였다. 본 연구의 결과에서도 산화물촉매인 Ce 5 wt%와 Ce 10 wt%를 담지한 촉매에서는 500°C에서 분해가 시작되었으며 Ce 20 wt% 담지된 촉매에서는 분해효율이 매우 떨어져 CF₄를 분해하는 최적의 Ce 담지량은 5~10 wt%가 가장 적합하였다.

3.2. Ce 함량 및 반응온도와 DRE 관계

Fig. 4는 Ce 함량과 반응온도에 따른 DRE를 나타내었다. Fig. 4(a)는 반응온도에 따른 DRE변화로 500°C에서는 Ce(10)/Al₂O₃가 54.5%로 DRE가 가장 높았으며, Ce(0)/Al₂O₃와 Ce(20)/Al₂O₃는 낮게 나타났다. 600°C에서 700°C도 마찬가지로 Ce(10)/Al₂O₃가 83.7% 및 88.3%로 가장 높은 DRE를 가졌다. 900°C의 고온에서는 Ce(0)/Al₂O₃, Ce(5)/Al₂O₃ 및 Ce(10)/Al₂O₃는 DRE가 90%로 거의 유사하게 나타나 cerium sulfate의 담지에 따라 효과가 매우 미비하였다. 더욱이 cerium sulfate를 과량으로 담지한 Ce(20)/Al₂O₃는 다른 촉매에 비해 5% 낮은 DRE를 나타내었다. Fig. 4(b)는 Ce 담지량에 따른 DRE의 변화를 촉매별로 비교하여 나타내었다. Ce를 담지하지 않은 촉매에서는 500°C에서 가장 낮은 9.8%의 DRE를 보였고 900°C에서 가장 높은 87.4%의 DRE를 나타냈다. 특히 Ce를 10% 담지한 촉매인 Ce(10)/Al₂O₃는 500°C에서 Ce를 담지하지 않은 촉매인 Ce(0)/Al₂O₃보다 6배 정도 높은 DRE를 나타냈고 600°C에서는 DRE가 Ce 0% 보다 2배 높았다.

반면에 반응온도가 700°C에서는 Ce(10)/Al₂O₃보다 Ce(0)/Al₂O₃의 DRE가 약간 높았으며 900°C에서는 Ce 0%와 Ce 10%가 비슷한 DRE를 보였다. 이는 Ce를 담지한 촉매의 경우 500~600°C의 온도에서는 효과적이거나 900°C 이상에서는 CF₄가 열분해에 의해 제거됨으로 촉매효과가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. Ce 담지한 촉매와 담지하지 않은 촉매간의 DRE 비교시 Ce 0%는 900°C에서 87.4%였으나 Ce 10%를 담지한 촉매는 700°C에서 88.3%로 Ce를 담지한 촉매가 동일한 DRE를 가지면서 반응온도를 200°C 이상 낮출 수 있음을 확인하였다.

일반적으로 CF₄는 CF₃와 CF₂로 분해하여 산소와 결합 후 COF를 발생시키고 최종적으로 COF + O → CO₂ + F로 전환된다고 보고하였다.¹⁾ CF₄의 분해반응을 반응속도식에 기초로 하여 반응물질의 농도변화를 계산하였다. 분해 반응을 1차 반응으로 가정한다면 $-dC/dt = k \cdot C$ 에서 $\ln(C/C_0) = -k \cdot t$ 의 관계로 성립되며, C는 초기농도이고 C₁는 t시간 후의 농도이고, k는 반응속도상수이다. 이를 바탕으로 CF₄ 열분해 반응에 따른 반응상수 값 k를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)를 보면 분해온도가 증가함에 따라 반응상수 k값도 증가하였다. Ce(5)/Al₂O₃와 Ce(10)/Al₂O₃는 반응상수가 0.0177 sec⁻¹, 0.0187 sec⁻¹로 높게 나타났으며 Ce(0)/Al₂O₃와 Ce(20)/Al₂O₃는 반응상수가 낮게 나타났다. 500°C에서는 k값이 Ce의 함량이 Ce(0) = Ce(20) < Ce(5) < Ce(10) 순으로 증가하였고 분해온도가 상승됨에 따라 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 반면 900°C에서는 Ce(20)/Al₂O₃가 0.0136 sec⁻¹로 나머지 촉매의 k값보다 낮게 나타났다. 분해온도별 k값을 Fig. 5(b)를 통해 비교해보면 500°C에서는 낮으며 900°C에서는 높은 값을 나타내었다. 따라서 Ce 함량과 분해온도를 고려시 900°C에서 Ce를 10 wt% 담지한 촉매가 CF₄를 가장 효과적으로 제거하는 것으로 나타났으나 고온의 반응온도에 기인하여 Ce담지촉매의 CH₄의 분해반응 효과가 적은 것으로 사료된다.

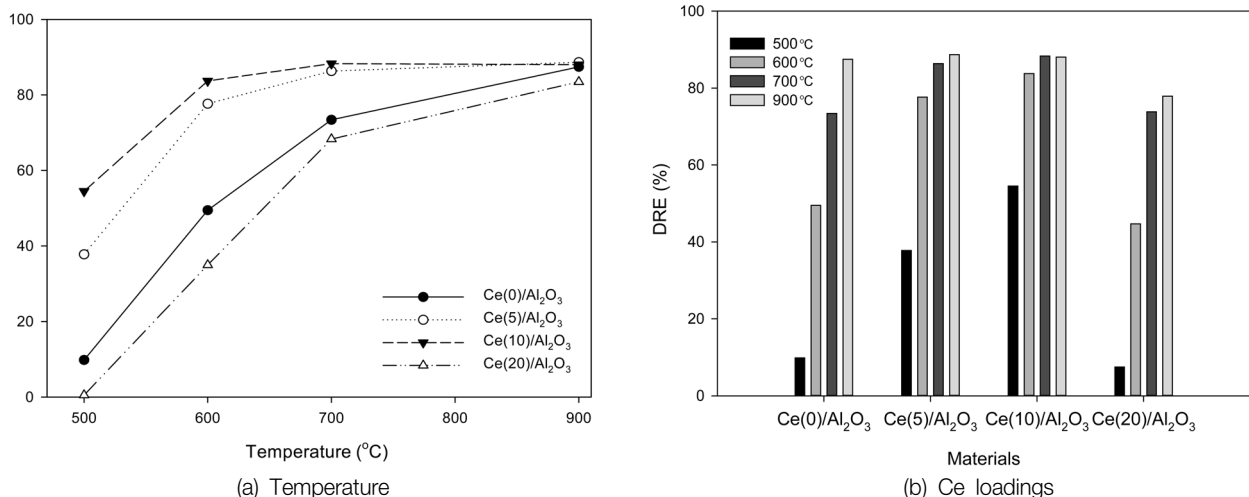


Fig. 4. Destruction and removal efficiency of CF₄ on Ce-loaded aluminum oxide catalysts at reaction temperatures between 500°C and 900°C.

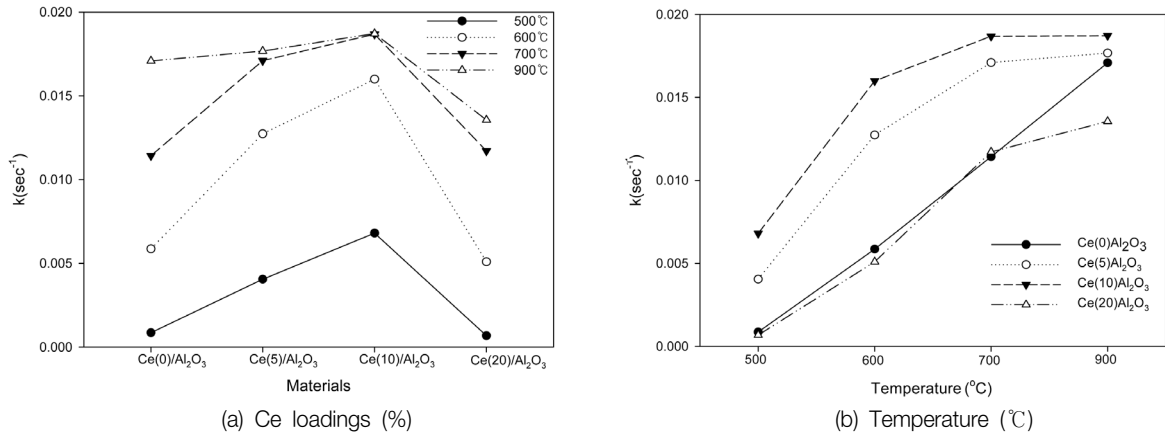


Fig. 5. Comparison of k on Ce-loaded aluminum oxide catalysts at the reaction temperatures between 500°C and 900°C.

3.3. 촉매의 특성 평가

Ce 함량에 따른 촉매의 결정성과 Ce의 담지 효과를 알아보기 위하여 마이크로파 열분해 반응 전후의 XRD 특성을 살펴보았다. Fig. 6(a)는 반응 전 촉매의 XRD 패턴이며, Fig. 6(b)는 반응 후 XRD 패턴을 나타내었다. Fig. 6에서 (1)의 XRD 결과는 Ce를 담지하지 않은 Ce(0)/Al₂O₃로 반응 전후에 XRD패턴의 차이가 나타나지 않았으며 반응 전후 Al₂O₃의 결정구조만 관찰되었다. 이는 500°C의 반응온도에서는 CF₄가 제거되기 어려움을 보여준다. 반면에 Ce를 담지한 Al₂O₃촉매인 Ce(5)/Al₂O₃와 Ce(10)/Al₂O₃는 CeO₂의 결정구조가 관찰되었으며 Ce의 담지가 매우 잘되었음을 보여주며 반응 후 촉매에서는 AlF₃의 결정구조가 관찰되어 500°C의 낮은 반응온도에서도 CF₄의 분해반응이 잘 이루어졌음을 보여준다. 특히 Fan¹⁴⁾은 CF₄의 분해를 위해 산화알루미늄이 첨가될 경우 3몰의 CO₂와 4몰의 AlF₃가 발생한다고 보고하여 본 연구와 결과와 일치함을 보여주었다. 또한 Ce를 담지한 촉매를 만들기 위해 cerium sulfate를 전구물질로 사용하여 CeO₂의 결정구조는 관찰되었으나 sulfate 화합물을 검출되지 않았다. 이는 Song 등¹²⁾의 산화알루미늄에 Ce를 담지하여 CF₄분해 반응을 연구한 결과와 유사한 XRD 패턴을 보여 주었다. 반면에 Ce를 과량 담지한 Ce(20)/Al₂O₃에

서는 반응 후 AlF₃의 결정구조가 관찰되지 않아 DRE이 매우 감소하는 것으로 나타났다.

반응 전후의 XRD 패턴을 관찰한 결과 Ce이 담지되지 않은 촉매에서는 반응 전 후의 차이가 나타나지 않았으며 반면에 Ce를 담지한 촉매에서는 Al₂O₃와 CeO₂의 혼합형으로 나타났으며 과량으로 Ce를 담지한 촉매는 담지과정에서 촉매의 뭉침현상으로 인해 담지효과가 매우 미비하였다. 반응 전후의 XRD패턴의 결과는 CF₄의 DRE 결과와 일치하며 CeO₂의 담지를 위한 적정비율은 5~10 wt%임을 보여주었다.

4. 결론

본 연구는 C-F 결합에너지가 높아 분해가 어려운 CF₄를 대상으로 분해 반응온도를 낮추기 위해 희토류 계열의 금속산화물인 CeO₂을 산화알루미늄에 담지하고 일정비로 혼합된 촉매를 사용하여 CF₄를 제거하고자 하였다. 제조된 촉매는 함량비를 달리하였으며 마이크로파 시스템에 의한 조사 전·후의 농도변화와 촉매분해의 변화된 특성을 분석하기 위해 XRD를 실시하였다. 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

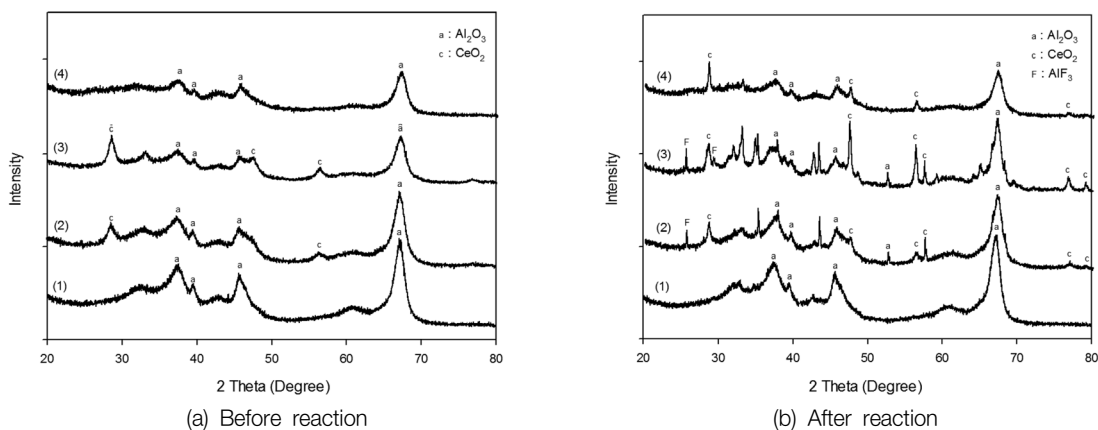


Fig. 6. XRD patterns of (1) Ce(0)/Al₂O₃ (2) Ce(5)/Al₂O₃ (3) Ce(10)/Al₂O₃ (4) Ce(20)/Al₂O₃ catalysts as before and after reaction at 500°C.

1) Ce(10)/Al₂O₃는 Ce(0)/Al₂O₃보다 500℃에서는 6배 정도 높은 DRE를 나타냈고 600℃에서는 DRE가 2배 높았다. 이는 Ce를 담지한 촉매의 경우 500~600℃의 온도에서는 효과적이거나 900℃ 이상에서는 CF₄가 열분해에 의해 제거됨으로 촉매효과가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. Ce 담지한 촉매와 담지하지 않은 촉매간의 DRE 비교시 Ce(0)/Al₂O₃는 900℃에서 87.4%였으나 Ce(10)/Al₂O₃는 700℃에서 88.3%로 Ce를 담지한 촉매가 동일한 DRE를 가지면서 반응온도를 200℃ 이상 낮출 수 있음을 확인하였다.

2) 마이크로파 열분해에 따른 반응속도상수 k를 비교한 결과 500℃에서는 k값이 Ce의 함량이 Ce(20)/Al₂O₃ < Ce(5)/Al₂O₃ < Ce(0)/Al₂O₃ < Ce(10)/Al₂O₃ 순으로 증가하였고 분해 온도가 상승됨에 따라 k값은 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

3) XRD 패턴은 Ce(0)/Al₂O₃에서는 반응 전 후의 차이가 나타나지 않았으며 Al₂O₃의 결정구조만 관찰되었다. 반면에 Ce를 담지한 촉매에서는 알루미늄옥사이드와 세륨옥사이드의 혼합형으로 나타났으며 과량으로 Ce를 담지한 촉매인 Ce(5)/Al₂O₃와 Ce(10)/Al₂O₃에서는 반응 전 Al₂O₃와 CeO₂의 결정구조가 관찰되었으며 반응 후 Al₂O₃와 CeO₂외에 AlF₃의 결정구조가 관찰되었다.

4) Ce을 담지한 Al₂O₃촉매는 Ce을 담지하지 않은 촉매에 비해 분해 반응 온도를 200℃ 정도를 낮출 수 있음을 보여 주었다. 또한 cerium sulfate의 적정비율은 5~10%임을 보여 주었다.

KSEE

References

1. Kuroki, T., Mine, J., Odahara, M., Okubo, T., Yamamoto, T. and Saeki, N., "CF₄ decomposition of flue gas from semiconductor process using inductively coupled plasma," *IEEE Trans. Indust. Appl.*, **41**, 221~228(2005).
2. Hannus, I., "Adsorption and transformation of halogenated hydrocarbons over zeolites," *Appl. Catal. A.*, **189**, 263~276 (1999).
3. Kim, K. T., Kim, Y. H., Cha, M. S., Song, Y. H., Kim, S. J. and Ryu, J. I., "Decomposition Characteristics of PFCs for Various Plasma Discharge Methods in Dielectric Barrier Discharge," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**(5), 65~70 (2004).
4. Lee, C. H. and Chun, Y. N., "Effects of Operating Parameters on Tetrafluoromethane Destruction by a Waterjet Gliding Arc Plasma," *Appl. Chem. Eng.*, **22**(1), 31~36(2011).
5. Takita, Y., Ninomiya, M., Miyake, H., Wakamatsu, H., Yoshinaga, Y. and Ishihara, T., "Catalytic decomposition of perfluorocarbons Part II. Decomposition of CF₄ over AlPO₄-rare earth phosphate catalysts," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **1**, 4501~4504(1999).
6. Park, H. G., Park, N. K., Lee, T. J., Chang, W. C. and Kwon, W. T., "Catalytic decomposition of SF₆ by hydrolysis over γ-Al₂O₃ supported metal oxide catalysts," *Clean Technol.*, **18**(1), 83~88(2012).
7. Lee, Y. C. and Jeon, J. K., "A study on catalytic process in pilot plant for abatement of PFC emission," *Clean Technol.*, **18**(2), 216~220(2012).
8. Kim, K. T., Kim, Y. H., Cha, M. S., Song, Y. H., Kim, S. J. and Ryu, J. I., "Decomposition characteristics of PFCs for various plasma discharge methods in dielectric barrier discharge," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**(5), 625~632 (2004).
9. Song, C. H., Park, D. W. and Shin, P. K., "Decomposition characteristics of perfluorocompounds (PFCs) gas through gliding arc plasma with hydrogen gas," *J. KIIEE*, **25**(4), 65~70(2011).
10. Choi, S. W., "Effect of Al₂O₃ addition on SF₆ decomposition by microwave irradiation," *J. Environ. Sic.*, **22**(1), 83~89 (2013).
11. Han, H. J., "Study on characteristic of SF₆ pyrolysis reaction and purification of SF₆, Master Dissertation, Seoul National University of Technology," Seoul, Korea(2010).
12. Song, J. Y., Chung, S. H., Kim, M. S., Seo, m. G., Lee, T. H., Lee, K. Y. and Kim, J. S., "The catalytic Decomposition of CF₄ over Ce/Al₂O₃ Modified by a cerium sulfate precursor," *J. Mol. Catal. A-Chem.*, **370**, 50~55(2013).
13. El-Bahy, Z. M., Ohnishi, R. and Ichikawa, M., "Hydrolysis of CF₄ over alumina-based binary metal oxide catalysts," *Appl. Catal. B: Environ.*, **40**, 81~91(2003).
14. Fan J., Xu, X. F. and Niu, X. J., "Decomposition of CF₄ over Al₂O₃-Based metal oxides," *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **24**(7), 1271~1276(2008).