

ORIGINAL ARTICLE

마이크로파 조사에 의한 SF₆ 분해시 Al₂O₃ 첨가의 영향

최 성 우*

계명대학교 환경과학과

Effect of Al₂O₃ Addition on SF₆ Decomposition by Microwave Irradiation

Sung-woo Choi*

Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

Abstract

Silicon carbide with aluminium oxide was used to remove the sulphur hexafluoride (SF₆) gas using microwave irradiation. The destruction and removal efficiencies (DREs) of SF₆ were studied as a function of various decomposition temperatures and microwave powers. The decomposition of SF₆ gas was analyzed using GC-TCD. XRD (X-ray powder diffraction) and XRF (X-ray Fluorescence Spectrometer) were used to characterize the properties of aluminum oxide. DREs of SF₆ were increased as the microwave powers were increased. Additive aluminium oxide on SiC increased the removal efficiencies and decreased the decomposition temperature. The XRD results show that the γ -Al₂O₃ was transformed to α -Al₂O₃ during SF₆ decomposition by microwave irradiation. It was found that the best material to control SF₆ was SiC with Al₂O₃ 30 wt% in consideration of microwave energy consumption and SF₆ decomposition rate.

Key words : SF₆, Microwave, SiC, Al₂O₃, Decomposition

1. 서론

SF₆를 비롯하여 CF₄, CHF₃, NF₃, C₂F₆ 등의 PFC (Perfluorocarbon)는 LCD, 반도체 및 전자산업공정에서 주요 발생된다. PFC중 SF₆은 지구온난화지수(GWP₁₀₀=23,900)가 가장 높은 온실가스로 대기 중 평균수명이 3200년이 되며 기후변화에 관한 정부 간 패널인 IPCC에서는 21세기 후반에 지구의 평균온도는 1.4~5.8℃, 해수면은 9~88 cm가 높아질 것이라 예측하면서 SF₆을 감축해야할 주요 온실가스 중의 하나로 지목하고 있다(Houghton 등, 2001). SF₆을 분해하

는 기술은 열분해, 순산소 연소기술, 플라즈마 분해, 촉매산화기술 등으로 나누어진다(Kwon 등, 2010). 소각 및 열분해법은 상업적으로 가장 많이 이용되는 방법이나 많은 에너지가 필요하며 분해산물의 제거를 위한 후처리 공정이 필요하다(Lee 등, 2012). Park 등(2012)은 현재 소량의 SF₆을 제거하는데 플라즈마를 이용한 분해 연구가 진행되나 과량 생성된 라디칼을 이차 반응으로 부산물이 많이 생성되고 높은 에너지를 사용함으로 플라즈마 장치의 내구성 등의 문제가 있다고 보고하였다. 또한 촉매분해법은 촉매 및 수증기를 이용하여 SF₆의 분해온도를 낮추고 분해산물을

Received 27 September, 2012; Revised 22 January, 2013;

Accepted 23 January, 2013

*Corresponding author : Sung-woo Choi, Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

Phone: +82-53-580-5245

E-mail: swchoi@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

간단한 후처리장치를 이용함으로 열분해나 플라즈마 공정의 대안으로 널리 연구되고 있으며 특히 고체상 촉매인 Al_2O_3 촉매가 가장 많이 연구되고 있다. Park 등(2012)은 $\gamma-Al_2O_3$ 촉매 상에 금속산화물을 담지 하여 가수분해에 의한 SF_6 을 촉매 분해하였으며 Lee 등(2009)은 $\gamma-Al_2O_3$ 촉매 상에서 가수분해와 산화반응에 의한 SF_6 의 분해 특성을 연구하였다. 또한 Xua 등(2007)은 CF_4 의 분해를 위해 $\gamma-Al_2O_3$ 을 개질화하고 안정성에 대해 보고하였다. 촉매분해와 더불어 마이크로파의 환경응용연구가 활발히 진행되고 있다. Choi 등(2009, 2011)은 Si로 개질화된 활성탄을 이용하여 마이크로파 조사에 따른 톨루엔 흡탈착연구를 진행하였으며 금속이 담지된 활성탄에 마이크로파를 조사하여 톨루엔 회수연구를 진행하였다. 또한 Cho 등(2001)과 Chang 등(2001)은 마이크로파 플라즈마와 촉매를 이용하여 VOCs 제거 연구 결과를 보고하였으며 Sun 등(2003)은 CF_4 분해 연구, Radou와 Hussain(2009)은 SF_6 분해 연구를 수행하였으며 Ryu 등(2012)은 육불화황의 분해 효율 향상을 위해 수소를 첨가한 연구를 실시하였다. 특히 SF_6 제거를 위해 연소, 열분해, 플라즈마를 이용하는 장치를 이용할 경우 공통적인 문제점은 에너지사용량이 매우 높으며 일부 공정에서는 연소에 의해 대기오염물질을 재 배출 한다는 점이다. 마이크로파는 에너지 사용량이 열분해에 이용되는 에너지 사용량에 비해 상대적으로 작으며 유전가열 시 사용되는 발열체를 이용하여 단 시간 내에 반응기의 내부온도를 $1000^\circ C$ 이상 올릴 수 있어 에너지 효율성이 매우 뛰어난 공정이다.

본 연구에서는 SF_6 의 분해반응을 위한 열원으로 마이크로파를 이용하였으며 촉매분해반응을 위해 산화알루미늄을 선정하였다. 마이크로파의 발열체인 실리콘카바이드와 산화알루미늄의 함량비를 10 wt%에서 50 wt%까지 제조하였으며 분해온도별 SF_6 의 제거효율을 분석하였다. 또한 산화알루미늄의 SF_6 분해에 미치는 영향을 평가하고 마이크로파 조사 전 후의 산화알루미늄의 특성분석을 위해 XRD(X-ray powder diffraction) 및 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

SF_6 의 연구재료는 마이크로파에 의한 유전가열을 유도하기 위한 SiC(Silicon Carbide:이하 SiC)와 혼합 촉매로 Al_2O_3 (Acros Organics, Belgium: 이하 Al_2O_3)을 사용하였다. SiC와 Al_2O_3 은 특정비율로 혼합하였으며 SiC중 Al_2O_3 의 함량은 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%, 50 wt%였다. 혼합촉매의 비율은 식(1)에 나타내었으며 SiC- $Al_2O_3(x)$ 라 명하였으며 여기서 x는 Al_2O_3 함량을 나타낸다.

$$\text{혼합촉매 (wt\%)} = \frac{Al_2O_3(g)}{SiC(g) + Al_2O_3(g)} \quad (1)$$

SiC와 SiC- Al_2O_3 은 사용 전 24시간 $100^\circ C$ 이상에서 하루 건조 후 SF_6 제거 실험을 실시하였다. SF_6 의 분해 효율은 DREs(Destruction and Removal Efficiencies)를 이용하였으며 식(2)을 사용하여 계산하였다. C_0 는 반응 전 SF_6 의 초기농도이며 C는 마이크로파 반응 후 농도이다.

$$DREs(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

SF_6 의 분해 실험은 GC-TCD(HP 6890A GC, Agilent)을 이용하여 농도를 분석하였다. 컬럼(GS-Carbonplot, Agilent)은 길이 30 m, 직경이 0.32 mm, 필름의 두께 3 μm 을 사용하였다. GC-TCD의 분석 조건으로 injector 온도를 $185^\circ C$, detector 온도를 $150^\circ C$, oven 온도를 $35^\circ C$ 를 유지하여 분석하였다. 또한 SiC- Al_2O_3 의 반응 전후 물성변화를 확인하기 위해 XRD(XDS 2000, Scintag)분석 및 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 실시하였다. Fig. 1은 SF_6 분해 실험 장치를 나타내었다. SF_6 가스의 유량을 조절하기 위하여 질량유량조절기를 사용하였으며 마이크로웨이브 오븐 안의 일자형 석영관은 내경이 4 cm 길이 15 cm를 사용하였다. 일자형 석영관에 SiC- Al_2O_3 을 넣고 3000 ppm SF_6 을 100 ml/min으로 흘려 분해 실험을 실시하였다. 마이크로파 가열장치는 2,450 MHz, 최대출력 1.2 kW의 마그네트론이 장착된 마이크로 발진관을 사용하였다. 마이크로파는 도파관을 통하여 반응기에 도입 되도록 하였으며 반응기 내부는 알루미늄을 사용하였

다. 특히 본 연구에서는 자동온도조절장치의 개념을 도입하였다. 분해온도를 일정하게 유지하기 위해 마이크로웨이브 시스템의 반응기내에 열전대를 설치하여 자동온도조절기와 연결하였다. 자동온도조절장치는 반응기내의 온도가 설정온도에 도달하면 마이크로파의 조사량을 자동으로 조절하여 설정한 온도를 유지하게 하였다.

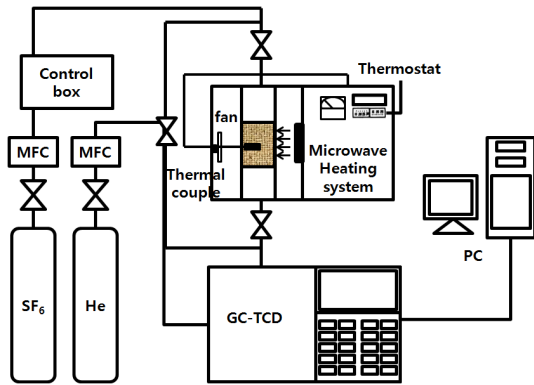


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for SF₆ decomposition.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산화알루미늄 함량 및 분해온도에 따른 SF₆ 분해

SF₆ 분해를 위한 산화알루미늄의 최적함량을 확인하기 위해 온도에 따른 SF₆ 분해 실험을 실시하였다. Fig. 2는 산화알루미늄 함량에 따른 분해온도별 SF₆의 분해효율을 보여준다. 분해온도를 일정하게 유지하기 위해 초기 마이크로파 조사량을 900 W를 사용하여

분해온도를 상승시켰으며 설정온도에 도달 시 마이크로파 조사량은 약 600 W 정도로 유지되었다. SiC의 경우 400℃에서 700℃까지는 분해반응이 없었으며 분해온도가 800℃ 이상에서 SF₆을 제거하기 시작하여 1100℃에서는 약 60%의 제거 효율을 보여주었다. SiC-Al₂O₃의 분해온도가 증가함에 따라 DREs가 증가하였으며 산화알루미늄 함량별 DREs 비교 시 SiC-Al₂O₃(10), SiC-Al₂O₃(50), SiC-Al₂O₃(40), SiC-Al₂O₃(20), SiC-Al₂O₃(30) 순으로 SF₆의 분해효율이 증가하였다. Table 1을 보면 산화알루미늄을 함유한 SiC의 경우 600℃부터 SF₆이 분해되기 시작하였으며 800℃에서는 SiC-Al₂O₃(10)을 제외하고는 대부분의 SiC-Al₂O₃이 97% 이상의 SF₆ 제거효율을 보여 주었다. 1100℃에서는 함량에 관계없이 SF₆이 완전 분해되었으며 1000℃에서는 SiC-Al₂O₃(10)을 제외하고 SF₆의 완전분해가 이루어졌다. 또한 산화알루미나 함량별 비교 시 SiC-Al₂O₃(30)이 700℃에서 96%, 800℃에서는 99%, 900℃ 이상에서는 SF₆을 완전 분해하여 본 연구에서 SF₆의 제거효율이 가장 좋은 물질임을 보여주었다. 분해온도별 SF₆의 DREs 평가 시 SiC를 단독 사용할 경우에는 1100℃ 이상의 고온에서 62%의 제거 효율을 보였다. Lee 등(2012)의 연구에서도 SF₆을 열 분해하기 위해선 1300℃ 이상이 필요하며 SF₆이 완전 분해되기 위해선 2000℃ 이상이 되어야 한다고 보고 하였다. Lee 등(2009)은 γ-Al₂O₃ 촉매 상에서 반응온도에 따른 SF₆ 전환율을 비교한 결과 SF₆이 100% 분해되는 온도는 700℃이었으며 산화반응보다는 가수 분해반응이 더욱 효과적임을 보여주었다.

Table 1. DREs of SF₆ on SiC and SiC-Al₂O₃ at different temperature

Component	Temperature (°C)						
	500	600	700	800	900	1000	1100
SiC	NR ¹⁾	NR	NR	NR	15.95	39.19	61.62
SiC-Al ₂ O ₃ (10)	NR	38.78	76.49	85.68	92.43	95.95	99.99
SiC-Al ₂ O ₃ (20)	NR	56.35	92.70	98.11	99.99	99.99	99.99
SiC-Al ₂ O ₃ (30)	NR	77.16	96.72	99.03	99.99	99.99	99.99
SiC-Al ₂ O ₃ (40)	NR	32.82	90.35	97.10	98.84	99.99	99.99
SiC-Al ₂ O ₃ (50)	NR	23.94	81.85	97.30	98.84	99.99	99.99

¹⁾NR: No Reaction

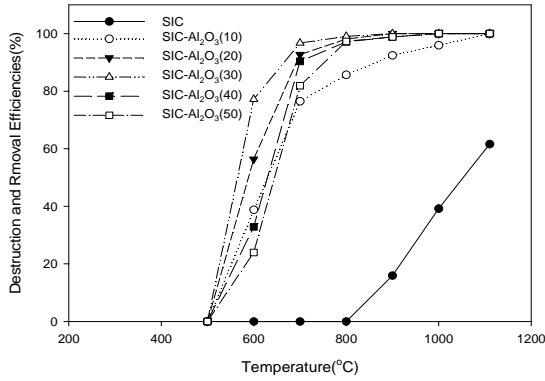


Fig. 2. DREs variation of SF₆ by various decomposition temperatures.

3.2. 마이크로파 조사에 따른 SiC-Al₂O₃(30)의 온도와 효율의 관계

마이크로파 조사에 따른 SiC와 SiC-Al₂O₃(30)의 온도증가율 및 SF₆ 제거효율을 비교하였다. Fig. 3(a) 과 (b)에서 SiC와 SiC-Al₂O₃의 온도증가율을 비교해 보면 500 W에서는 SiC에 비해 SiC-Al₂O₃의 온도증가율이 낮았으며 700 W에서는 SiC의 초기온도증가율은 높았으나 7분 후 부터는 거의 유사한 경향을 보여 주었다. 900 W에서는 SiC-Al₂O₃의 온도증가율이 낮았으며 6분대부터는 SiC에 비해 온도증가가 높았다. 따라서 SiC는 유전가열 발열체로 마이크로파를 흡수하여 반응기내의 온도가 빠르게 증가하며 산화알루미늄이 첨가된 SiC의 경우 온도상승효과가 SiC에 비해

상대적으로 낮았으나 12분 후에는 거의 유사하였다. 또한 마이크로파 조사에 따른 SF₆의 제거효율을 비교 시 SiC는 500 W에서는 제거효율이 없었으며 700 W에서는 40%, 900 W에서는 60%의 제거 효율을 보여 주었다. 또한 반응시작 시간이 700 W에서는 7분대, 900 W에서는 5분대로 감소하였다. 반면에 SiC-Al₂O₃은 500 W에서는 6분대, 700 W이상에서는 5분대로 반응시작 시간이 감소하였으며 SF₆제거 효율도 90% 이상 증가하였다. 분해온도와 분해효율간의 관계를 비교 시 SiC를 단독 사용한 경우 500 W에서는 분해효과가 없었으며 700 W에서는 약 6분대에서 SF₆의 분해가 시작되어 약 40%의 효율을 보여주었으며 900 W에서는 약 4분대에 분해가 시작되어 60%의 분해 효율을 보여 주었다. 또한 SiC-Al₂O₃의 경우 500 W에서는 6분대에서 분해가 시작되어 90%의 분해효율을 보여주었으며 700 W와 900 W에서는 4분과 5분대에 분해가 시작되어 12분 후 완전 분해됨을 보여주었다. 본 연구의 결과는 Park 등(2012)이 제시하였듯이 SF₆ 분해 시 분해온도가 매우 중요하여 분해기전은 차이가 있으나 산화알루미늄과 같은 물질을 첨가 시 분해온도를 700°C에서 900°C로 낮출 수 있다는 결과와 일치 하였다.

3.3. 마이크로파조사에 따른 산화알루미늄의 효과

마이크로파조사에 따른 SiC-Al₂O₃의 SF₆제거효율이 SiC를 단독으로 사용하였을 경우보다 매우 효과적이었다. 산화알루미늄의 첨가가 SF₆의 분해에 미치는

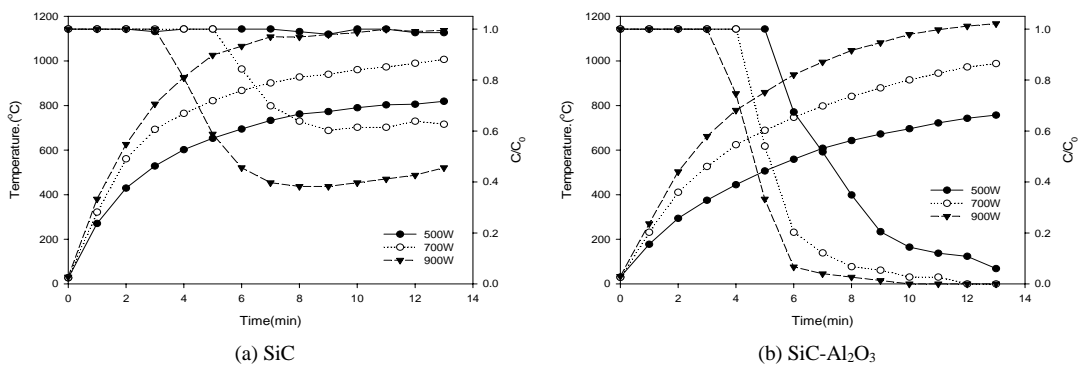


Fig. 3. Comparison of concentration vs reaction temperature by different microwave input energy.

영향을 평가하기 위해 SiC의 제거효율과 SiC에 산화알루미늄의 첨가에 따른 제거효율의 차이를 비교하였다. SiC와 SiC-Al₂O₃을 사용 시 시간대별 SF₆의 농도 차의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 농도 차이는 산화알루미늄이 SF₆제거에 미치는 영향으로 500 W의 경우 시간의 증가에 따라 37에서 97까지 증가하였으며 700 W에서는 초기에 85까지 증가하다 6분후 60으로 일정하게 유지되었으며 900 W는 700 W와 유사 경향을 보여주었으나 Al₂O₃의 영향은 상대적으로 작았다. 500 W 조사 시 산화알루미늄이 SF₆의 제거가 가장 큰 영향을 주었으며 900 W에서 상대적으로 가장 작았다. 첨가된 산화알루미늄의 함량과 마이크로파조사량은 SF₆의 분해효과에 많은 영향을 주는 것으로 사료된다. 또한 산화알루미늄의 함량 및 마이크로파 조사량이 SF₆의 반응속도에 미치는 영향을 평가하였다. Han (2010)은 SF₆가스의 열분해반응 특성 및 회수정제연구에서 SF₆ 분해반응의 반응차수를 연구한 결과 1차 반응임을 확인하였다. 즉 $\ln(C/C_0) = -kt$ 의 관계가 성립되며 본 연구에서도 반응을 1차로 가정하여 시간과 $\ln(C/C_0)$ 를 도시한 결과를 Fig. 5에 나타내었으며 모두 직선의 경향을 보여주어 1차 반응임을 확인하였다. SiC의 경우 500 W에서는 반응이 없었으며 700 W에서 k값이 0.07 s⁻¹, 900 W에서 K값이 0.13 s⁻¹로 증가하였다. 또한 SiC-Al₂O₃의 경우 500 W에서 0.322 s⁻¹, 700 W에서 0.45 s⁻¹, 900 W에서 0.54 s⁻¹로 마이크로파조사량이 증가함에 따라 반응계수도 증가하여 높은 에너지에서 빠른 반응속도를 보여주었다.

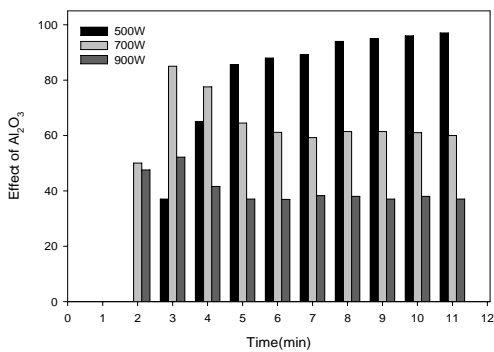


Fig. 4. Effect of Al₂O₃ addition by microwave input energy.

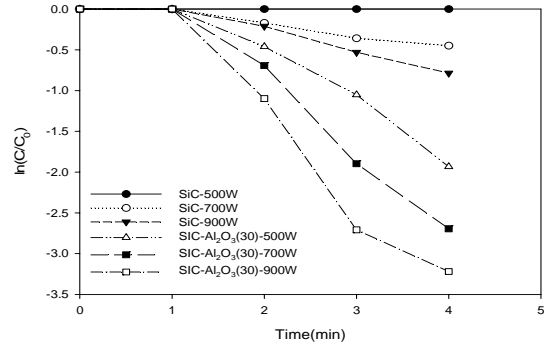


Fig. 5. SF₆ reaction rate on SiC and SiC-Al₂O₃ by different microwave input energy.

3.4. 마이크로파 조사에 따른 산화알루미늄의 물성분석

SF₆의 온도에 의한 직접분해는 비자발적 반응이며 SF₆은 열분해하여 S와 F₂를 발생시키며 깃슨 에너지가 898.165 kJ/mol로 매우 높다. 반면에 Xua 등(2007)은 Al₂O₃과 molecular sieve 13X 사용 시 깃슨 에너지가 낮아지며 SF₄의 직접적인 플루리네이션 기작은 SF₄가 1~2몰의 Al₂O₃과 반응하여 AlF₃과 SO₂ 및 SOF₂를 발생시키며 또한 생성된 SOF₂는 다시 Al₂O₃과 반응하여 AlF₃과 SO₂ 및 SO₂F₂를 발생시킨다고 하였다. 따라서 산화알루미늄의 반응 전후의 물성변화를 관찰하기 위해 XRF 분석을 실시한 결과 반응 전 산화알루미늄 중 Al₂O₃의 함량은 100%였으며 반응 후 산화알루미늄 중 Al₂O₃은 99.64%, SO₃은 0.35%, SiO₂가 미량 검출되어 Xua 등(2007)의 연구결과와 유사한 경향을 보여주었다. 또한 SF₆ 제거를 위한 반복 실험 시 반응 전 후의 산화알루미늄의 표면구조 변화를 XRD로 분석하여 Fig.6에 나타내었다. 반응 전 산화알루미늄은 γ -Al₂O₃의 결정구조를 가졌으며 마이크로파 조사에 따른 분해 반응 후 촉매의 결정구조는 α -Al₂O₃의 구조로 변화하였다. Park 등(2012)의 연구에서 금속산화물이 담지된 촉매상의 가수분해에 의한 SF₆ 분해에 대한 연구에서 보면 가수분해 후 γ -Al₂O₃의 결정구조가 α -Al₂O₃로 완전히 변화하였으며 본 연구에서도 분해기전의 차이는 있으나 유사한 XRD pattern을 보여주었으며 분해온도의 영향으로 산화알루미늄의 구조가 변한 것으로 사료된다.

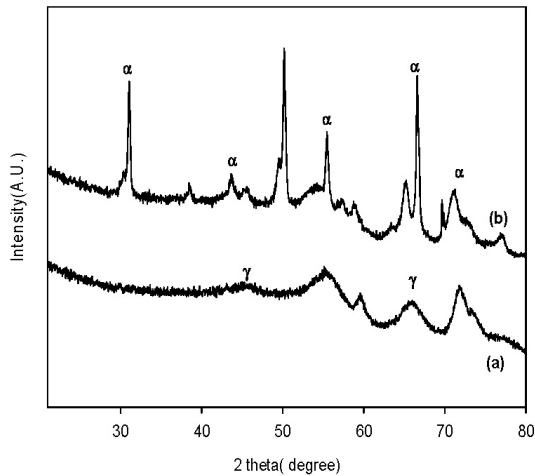


Fig. 6. XRD pattern of fresh Al_2O_3 (a) and reacted Al_2O_3 (b) at $800\text{ }^\circ\text{C}$.

4. 결론

본 연구는 마이크로파 조사 시 산화알루미늄이 SF_6 분해에 미치는 영향을 평가하기 위해 마이크로파 유전자열 발열체를 SiC로 하여 Al_2O_3 의 함량별 SF_6 의 분해효과 및 영향 정도를 비교 분석한 결과 SiC- Al_2O_3 (30)이 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 96%, $800\text{ }^\circ\text{C}$ 에서는 99%, $900\text{ }^\circ\text{C}$ 이상에서는 완전 분해하여 본 연구에서 SF_6 의 제거 효율이 가장 좋은 물질임을 보여 주었으며 분해 반응은 1차 반응임을 확인하였다. 또한 산화알루미늄의 반응 전후의 물성변화를 관찰한 결과 반응 후 산화알루미늄 중 Al_2O_3 은 99.64%, SO_3 은 0.35%로 SO_3 이 생성되었으며 XRD는 결과에서는 반응 전 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 결정구조가 반응 후 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 로 완전히 변화하여 마이크로파 조사에 따른 온도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구는 SF_6 을 제거하기 위해 열분해 열원으로 마이크로파를 사용하였다. 일반적으로 LNG등 연소법을 이용한 SF_6 제거 시 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 분해온도가 필요하나 본 연구에서는 SiC에 산화알루미늄을 첨가함으로써 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 동일 SF_6 의 제거효율을 얻어 에너지 측면에서 효과적이었으며 화석연료를 사용하지 않음으로 연소에 의한 CO_2 발생량이 상대적으로 적어 환경 친화적 SF_6 제어 기술임을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- Chang, Y. C., Carlisle, C. T., 2001, Microwave process for volatile organic compound abatement, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 36, 599-608.
- Cho, W. I., Baek, Y. S., Kim, Y. C., 2001, Manufacture of hydrogen and C2+ chemical from methane using microwave plasma and catalyst, *J. Kor. Inst. Gas*, 5(1), 15-20.
- Choi, S. W., Chu, H. J., 2011, Toluene desorption of modified activated carbon for microwave irradiation, *J. Environ. Sic.*, 20(2), 223-229.
- Han, H. J., 2010, Study on characteristic of SF_6 pyrolysis reaction and purification of SF_6 , Master Dissertation, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea
- Houghton, J. T., Ding, J. T., Griggs, D. J., Noguera, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Johnson, C. A., Maskell, K., 2001, IPCC Climate Change 2001: The scientific basis, intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Kim, S. W., Kim, J. B., Choi, S. W., 2009, A study on the characteristics of activated carbons supported metal by microwave irradiation, *J. Environ. Sic.*, 18(5), 501-508.
- Kwon, J. S., Choi, S. S., Yoon, M. S., Kim, S. I., 2010, Reduction technology trend of CCS and SF_6 , *KEITI*, 68-70.
- Lee, S. H., Park, N. K., Yoon, S. H., Chang, W. C., Lee, T. J., 2009, Catalytic decomposition of SF_6 by hydrolysis and oxidation over $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, *Clean Technol.*, 15(4), 273-276.
- Lee, Y. C., Jeon, J. K., 2012, A study on catalytic process in pilot plant for abatement of PFC emission, *Clean Technol.*, 18(2), 216-220.
- Park, H. G., Park, N. K., Lee, T. J., Chang, W. C., Kwon, W. T., 2012, Catalytic decomposition of SF_6 by hydrolysis over $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ supported metal oxide catalysts, *Clean Technol.*, 18(1), 83-88.
- Radoiu, M., Hussain, S., 2009, Microwave plasma

- removal of sulphur hexafluoride, J. Hazard. Mater., 164, 39-45.
- Ryu, J. Y., Kim, J. B., Choi, C. Y., Jang, S. H., Lee, S. J., 2012, A study on increase of sulfur hexafluoride (SF₆) destruction and removal efficiency by conditioning agent(H₂), J. Environ. Sic., 21(9), 1163-1169.
- Sun, J. W., Park, D. W., 2003, CF₄ decomposition by thermal plasma processing, Korean. J. Chem. Eng., 20(3), 476-481.
- Xua, X. F., Jeon, J. Y., Choi, M. H., Kim, H. Y., Choi, W. C., Park, Y. K., 2007, The modification and stability of γ -Al₂O₃ based catalysts for hydrolytic decomposition of CF₄, J. Mol. Catal A-Chem., 266(1-2), 131-138.