

# 마이크로웨이브 조사에 따른 산화알루미늄이 함유된 실리콘카바이드의 SF<sub>6</sub> 제거 Removal of SF<sub>6</sub> over Silicon Carbide with Aluminium Oxide by Microwave Irradiation

최 성 우  
Sung-woo Choi

계명대학교 환경과학과  
Department of Environmental Science, Keimyung University

(2012년 9월 24일 접수, 2013년 3월 18일 채택)

**Abstract :** SF<sub>6</sub> is the most important greenhouse gas with the highest GWP (global warming potential). The SF<sub>6</sub> decomposition study was performed with silicon carbide with aluminium oxide by microwave irradiation. DRE (Decomposition and Removal Efficiency) of SF<sub>6</sub> were evaluated by GC-TCD unit using 3,000 ppm SF<sub>6</sub> gas. DRE of SF<sub>6</sub> was increased by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents to 10~30 wt%, otherwise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of 40~50 wt% was decreased. DRE of SF<sub>6</sub> up to 99.99% have been achieved in SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20 wt%) and SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%) above 900°C. Also, the DRE of SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%) at 700°C showed 96.72%. In addition to consideration microwave input energy and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content, SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%) can be suggested the best material to control SF<sub>6</sub>. The results of this study suggest it is important to control content of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in SiC for decomposition of SF<sub>6</sub> with microwave energy.

**Key Words :** SF<sub>6</sub>, Microwave, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Thermal Decomposition

**요약 :** SF<sub>6</sub>는 지구온난화지수가 가장 높은 중요한 온실가스이다. 본 연구에서는 마이크로파 조사에 따른 산화알루미늄이 혼합된 실리콘카바이드의 SF<sub>6</sub> 제거실험을 실시하였다. DRE (Decomposition and Removal Efficiencies) 실험은 3,000 ppm의 SF<sub>6</sub>를 사용하여 GC-TCD를 통하여 분석하였다. 산화알루미늄의 함량이 10~30 wt%까지 SF<sub>6</sub>의 제거효율은 증가하였으나 산화알루미늄의 함량이 40~50 wt%에서 제거효율이 감소하였다. 특히 900°C 이상에서 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20 wt%)와 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%)는 99.99%의 SF<sub>6</sub> 제거효율을 보여주었으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%)가 700°C에서 96.72%의 제거효율을 보여주었다. 마이크로파 조사량과 산화알루미늄의 함량을 고려시 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%)가 SF<sub>6</sub> 제거에 가장 적절하였다. 본 연구의 결과로 마이크로파에 의한 SF<sub>6</sub> 제거시 SiC에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량 조절이 중요할 것으로 사료되어진다.

**주제어 :** 육불화황, 마이크로파, 실리콘카바이드, 산화알루미늄, 열분해

## 1. 서론

SF<sub>6</sub>는 대기 중 이산화탄소에 비해 1% 미만으로 매우 적지만 지구온난화지수가 이산화탄소에 비해 23,900배 높으며 대기 중 체류기간의 3200년으로 중요한 온실가스중 하나이다. SF<sub>6</sub>는 불활성 기체로 무색, 무취, 무해, 불연성을 특성을 가지며 열적으로 매우 안정한 물질이다. 주로 반도체 생산 공정의 식각(etching)가스로 이용되며 LCD 모니터제조 및 자동차 생산공정, 마그네슘 정련업계가 대표적인 발생원이다.<sup>1)</sup>

SF<sub>6</sub>를 제거하는 기술은 열분해기술과 촉매산화기술로 나누어진다.<sup>2)</sup> 열분해기술로는 전기 RTO (Regenerative Thermal Oxidation), 순산소 연소기술, 플라즈마 제거 등이 있다. RTO 방식은 초기 승온과 감온 및 히터 및 축열재의 수명단축의 문제가 있으며 순 산소 연소기술의 경우 후단에 HF를 처리하는 습건식 HF처리 장치가 필요하다. 촉매산화방식의 경우 반응 후 발생하는 HF, F<sub>2</sub>로 인해 촉매성능이 저하되고 2차 폐기물처리를 해야 하는 문제점이 있다. 현재 소량의 SF<sub>6</sub>를 제거하는데 플라즈마를 이용한 제거 연구<sup>3)</sup>가 진행되고 있으나 처리가스의 유량 증가 시 에너지투입량의 급격히 증가하

여 에너지 절감측면에 문제점을 가지고 있다. 또한 촉매산화 연구로는 금속산화물이 담지된 알루미늄 촉매를 사용하여 가수제거에 의한 SF<sub>6</sub> 및 CF<sub>4</sub> 제거하는 공정도 많이 연구되고 있다.<sup>4,5)</sup>

산업공정에서 SF<sub>6</sub>의 제거를 위해 소각 및 열분해 방법이 가장 많이 사용되나 SF<sub>6</sub>를 제거 처리하기 위해 1,000°C 이상의 고온이 필요하여 에너지 소비량 많은 단점이 있다. 이 등<sup>3)</sup>은 SF<sub>6</sub> 분해온도의 연구결과 1,000°C 이하에서는 거의 제거가 일어나지 않으며 완전 제거가 되기 위해선 2,000°C 이상의 온도가 필요하다고 보고하였다. 그러나 Padma 등<sup>6)</sup>에 따르면 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ThO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 세라믹산화물을 사용할 경우 SF<sub>6</sub> 분해온도를 700~900°C까지 낮출 수 있다고 보고하였다. 또한 마이크로파는 선택가열 및 급속가열이 가능하므로 유해가스 처리 및 마이크로파 플라즈마를 이용한 SF<sub>6</sub>의 제거 연구 등 환경 분야에 대한 응용 연구가 진행되고 있다.<sup>7,8)</sup> 본 연구에서는 SF<sub>6</sub>의 제거를 위해 세라믹산화물은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 선정하였으며 열원 공급을 위해 마이크로파 가열장치를 이용하였다. 특히 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 등과 같은 세라믹 재료는 상온에서 마이크로파를 투과시키며 임계온도 이상의 고온이 되면 마이

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

크로파와 결합하여 효과적으로 흡수 및 가열되기도 한다.<sup>9)</sup> 또한 SiC (Silicon Carbide)는 전기발열체로 마이크로파를 잘 흡수하여 가열특성이 매우 좋은 재료이다.<sup>10)</sup>

본 연구는 마이크로파를 열분해 에너지원으로 사용하였으며 마이크로파 발열체로는 SiC를 이용하였으며 촉매산화제로는 산화알루미늄을 선정하여 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량비를 10 wt%에서 50 wt%까지 제조하였다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량비, 마이크로파 조사에너지 및 분해온도에 따라 SF<sub>6</sub>의 제거특성을 GC-TCD를 사용하여 분석하였다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1. 연구재료

마이크로파 조사를 위한 발열체는 Silicon Carbide (LTS Inc., U.S.A: 이하 SiC)를 사용하였다. SiC는 인장강도가 강하고 일정한 도전성과 도열성을 갖고 있으며 높은 경도, 고내화성, 화학적 안정하여 마이크로파 유전가열의 재료로 많이 활용된다. 또한 SF<sub>6</sub>의 촉매적 활성반응을 유도하기 위해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Acros Organics, Belgium: 이하 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 사용하였다. SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 사용 전 24시간 100℃ 이상에서 하루 건조하고 실험을 실시하였다. 발열체인 SiC는 40 g으로 일정하게 사용하였으며 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 물리적 혼합을 위해 SiC - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x) = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(g) / [SiC(g) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(g) × 100]의 혼합비율식을 이용하였다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(x)는 혼합촉매를 의미하며 x는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량비로 10, 20, 30, 40, 50 wt%를 사용하였다.

### 2.2. 연구방법

SF<sub>6</sub>의 제거 실험은 GC-TCD (HP 6890A GC, Agilent)을 이용하여 분석하였다. 칼럼(GS-Carbonplot, Agilent)은 길이 30 m, 직경이 0.32 mm, 필름의 두께 3 μm를 사용하였으며, 분석 조건으로 injector 온도를 185℃, detector 온도를 150℃, oven 온도를 35℃를 유지하여 분석하였다. Fig. 1은 SF<sub>6</sub> 제거 실험

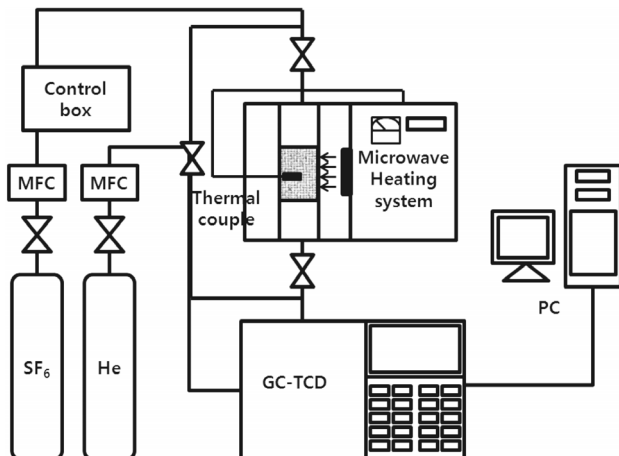


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for SF<sub>6</sub> decomposition.

장치를 나타내었다. 가스분배로부터 나오는 가스의 유량을 조절하기 위하여 MFC (Mass Flow Meter)를 사용하였으며 마이크로웨이브 오븐 안의 일자형 석영관은 내경이 4 cm 길이 15 cm를 사용하였다. 일자형 석영관에 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 넣고 3,000 ppm의 SF<sub>6</sub>를 100 mL/min으로 흘려 제거실험을 실시하였다. 마이크로파 가열장치는 2,450 MHz, 최대출력 1.2 kW의 마그네트론이 장착된 마이크로 발진관을 사용하였다. 마이크로파는 도파관을 통하여 반응기에 도입되도록 하였으며 반응기 내부는 알루미늄을 사용하였다.

SF<sub>6</sub>의 제거 및 제거효율은 DRE (Destruction and Removal Efficiencies)를 이용하여 계산하였다. DRE는 소각성능평가에 많이 활용되며<sup>11)</sup> 다음 식에 의해 계산하였다. 여기서 C<sub>SF<sub>6</sub>i</sub>는 SF<sub>6</sub>의 초기농도(3,000 ppm)이며 C<sub>SF<sub>6</sub>f</sub>는 마이크로파 반응 후 농도이다.

$$DRE(\%) = \left(1 - \frac{C_{SF_6f}}{C_{SF_6i}}\right) \times 100$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 마이크로파 조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 온도변화 특성

Fig. 2(a)는 마이크로파 조사에 따른 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 시간대별 온도변화이다. 마이크로파 조사량은 500, 700, 900 W를 사용하였다. SiC의 경우 5분까지는 급격하게 온도가 상승 후 완만한 증가 경향을 보여주었으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 마이크로파 조사에 따른 온도상승효과가 매우 적었다. SiC의 경우 마이크로파를 흡수하여 유전 가열되어 500 W에서 800℃ 이상, 700 W에서 1,000℃ 이상, 900 W에서 1,100℃ 이상으로 온도가 상승하였다. Fig. 2(b)~(d)는 함량별 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 마이크로파 조사별 온도변화를 보여준다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 온도증가는 SiC와 유사하였으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 10 wt%에서 40 wt%까지 온도증가의 차이는 크지 않았다. 이는 반응기내의 SiC의 양이 40 g으로 일정하여 마이크로파 조사에 의해 SiC가 골고루 유전 가열이 됨을 보여주었다. 반면에 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50)는 500 W에서 632℃, 700 W에서 746℃, 900 W에서는 874℃으로 온도가 낮아졌으며 과량의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 반응기내 온도 상승에 영향을 주는 것으로 나타났다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50)은 타 혼합물에 비해 200℃ 이상 낮아져 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 상대적인 증가는 SiC의 발열에 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 마이크로파조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 분당 온도증가율(dT/dt)를 나타내었다. 대부분의 물질이 초기 5분 내에 온도 증가율이 가장 높았으며 10분 후부터 일정하게 온도가 증가하였다. SiC 경우 분당 온도증가율이 가장 높았으며 마이크로파 조사량에 따라 더욱 증가하였다. 900 W 조사시 초기 1분대의 온도증가율을 비교해 보면 SiC는 분당 350℃였으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10)과 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20)는 303℃, SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)과 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40)은 240℃였으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50)은 130℃로 온도증가율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면에 15분

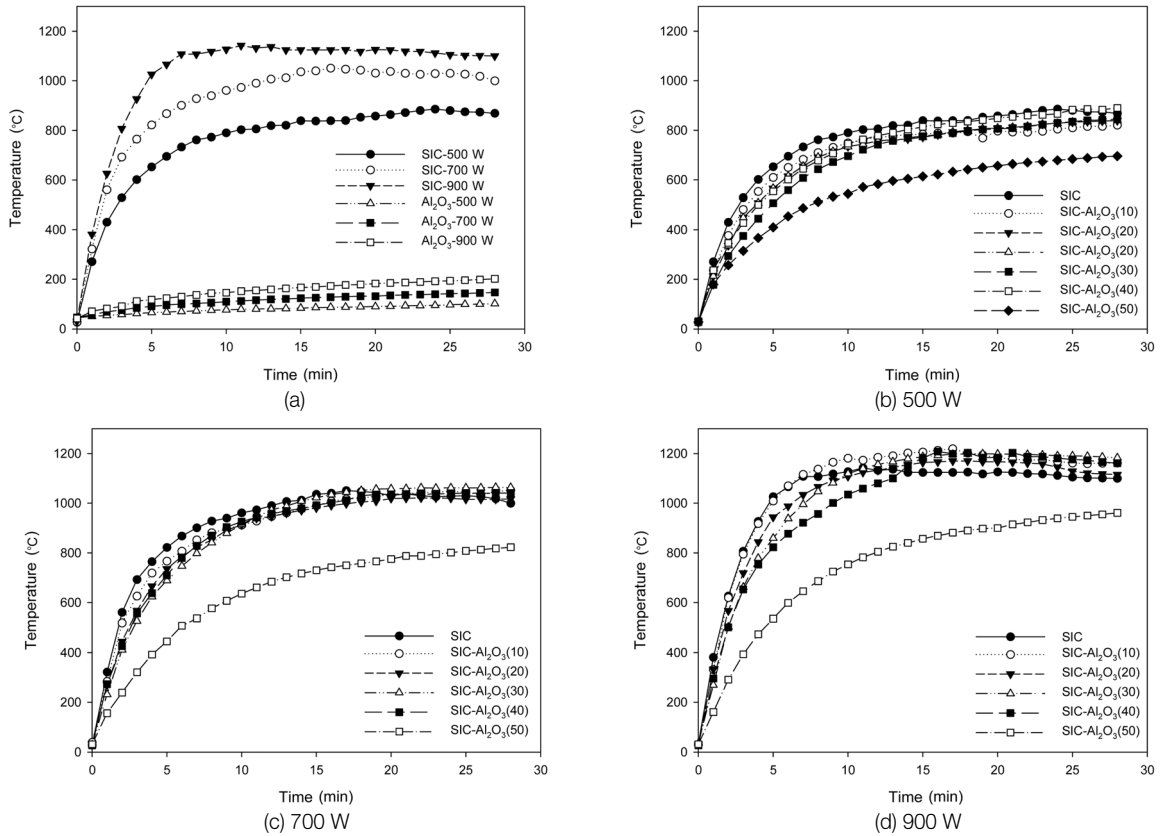


Fig. 2. Temperature variation of SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by microwave irradiation power.

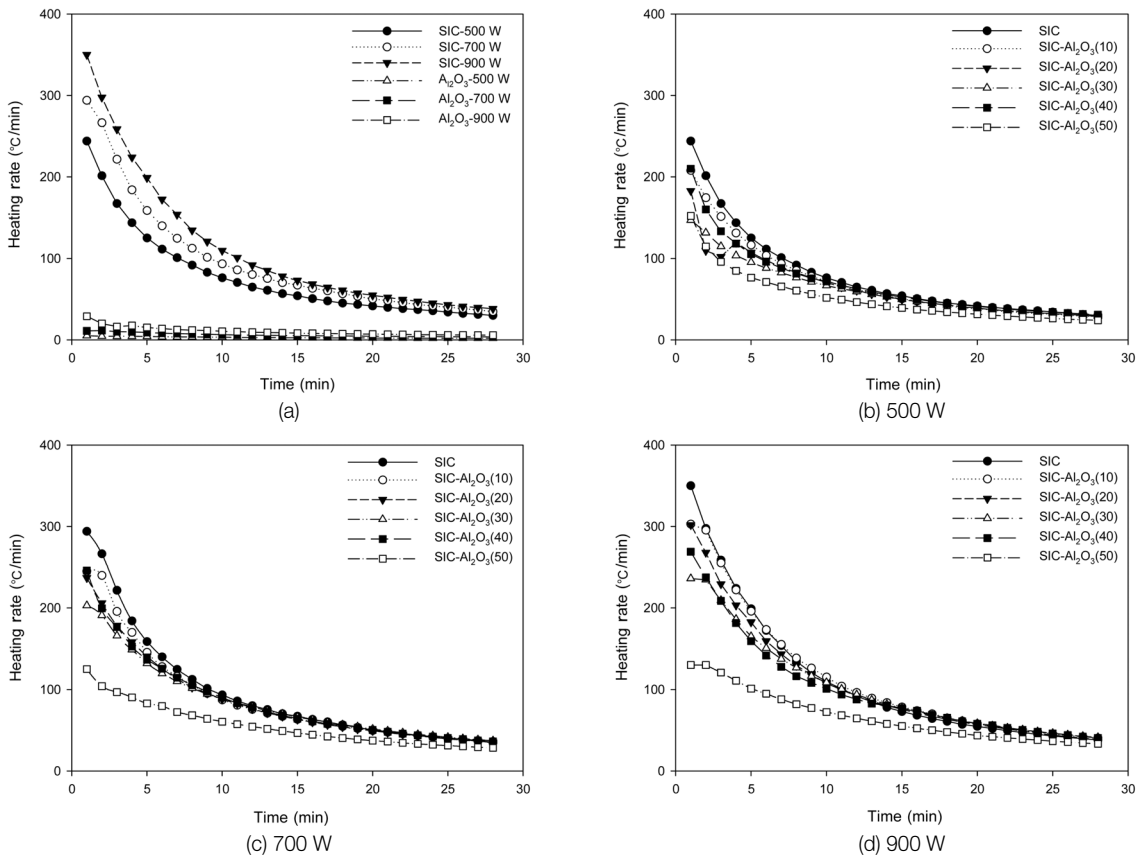


Fig. 3. Heating rate variation of SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by microwave irradiation power.

후 부터에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량, 마이크로파 조사량에 상관없이 30 °C/min에서 50 °C/min의 증가율을 보여주었다. 빠른 온도증가율은 향후 반응기내의 SF<sub>6</sub> 제거효율에 영향을 줄 것으로 사료된다.

### 3.2. 마이크로파 조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 SF<sub>6</sub> 제거 특성

마이크로파 조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 시간별 조사량별 SF<sub>6</sub>의 제거특성을 Fig. 4에 나타내었다. C<sub>0</sub>는 초기농도이며 C는 t시간 후의 SF<sub>6</sub> 농도이다. Fig. 4(a)는 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 제거 효율을 나타내었다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 마이크로파 조사에 상관없이 자체 제거효율은 없었다. SiC의 경우 500 W에서는 제거효율이 없었으며 700 W에서는 35%, 900 W에서는 55% 이상 증가하였다. 이는 SiC의 유전가열에 의한 열분해 현상으로 사료된다. 이 등<sup>5)</sup>의 연구에서 SF<sub>6</sub> 열소각은 1,000 °C 이하에서는 제거가 진행되지 않으며 1,300 °C 이상에서 급격한 열분해가 되며 95%가 분해되는 온도는 약 1,600 °C라고 보고하였다. 본 연구에서 SiC만을 사용하여 마이크로파를 조사했을 때 1,100 °C에는 약 60% 이상의 제거효율을 얻어 유사 경향을 보여주었다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 500 W에서는 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50)이 가장 낮았으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40)에서 가장 높은 제거 효율을 보여주었다. 700 W와 900 W에서도 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 SF<sub>6</sub> 제거 효율이 가장 높았으며 20분 후에는 99.99% 이상 제거됨을 보여주었다. SiC를 단독 사용하였을 경우 보다 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 사용이 SF<sub>6</sub> 제거에 보다 효과적임을 보여주었다. 또한 마이크로파 조사량이 증가함에 따른 SF<sub>6</sub>의 제거시

간을 살펴보면 500 W에서는 10~12 min, 700 W에서는 6~10 min, 900 W에서 6 min으로 단축되어 마이크로파 조사량에 비례하여 제거시간이 감소함을 확인하였다. 또한 700 W 이상에서 SiC만 사용하였을 때 제거효율은 35~50%였으나 동일조건에서 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 제거효율은 99.9% 이상 증가하였다. 따라서 SiC를 단독 사용하였을 경우보다 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 사용이 SF<sub>6</sub>제거에 보다 효과적임을 보여주었다. Padma 등<sup>6)</sup>이 보고하였듯이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 등 세라믹산화물을 사용할 경우 SF<sub>6</sub> 분해온도를 700~900 °C까지 낮출 수 있다했는데 본 연구에서도 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유시 700 °C 이상에서 제거가 시작되었다.

Fig. 5는 마이크로파 조사량에 따른 SiC와 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 DRE를 나타내었다. Fig. 5(a)는 마이크로파 조사량에 따른 제거물 질별 평균 DRE를 보여준다. 제거물질별 DRE는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 30%까지는 마이크로파 조사량에 비례하여 증가하나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 40% 이상에서는 DRE가 약간 감소하는 경향을 보여주었다. 또한 500 W보다 900 W에서 평균 DRE가 15%에서 50% 이상 증가함을 보여주었다. Fig. 5(b)~(d)는 마이크로파 조사에 따른 누적 DRE를 나타내었다. 마이크로파 조사량이 500 W에서 900 W로 증가시 누적 DRE가 줄어드는 현상을 보여주었다. 이는 마이크로파 조사량이 증가함에 따라 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 DRE가 거의 유사해짐을 나타낸다. 500 W에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 DRE에 크게 영향을 미치나 700 W 이상에서는 그 영향 정도가 적은 것으로 나타났다. 특히 700 W 이상에서 SiC의 DRE는 43%였으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량이 20~30% 일 경우에는 99.9%의 DRE를 보여주었으며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량

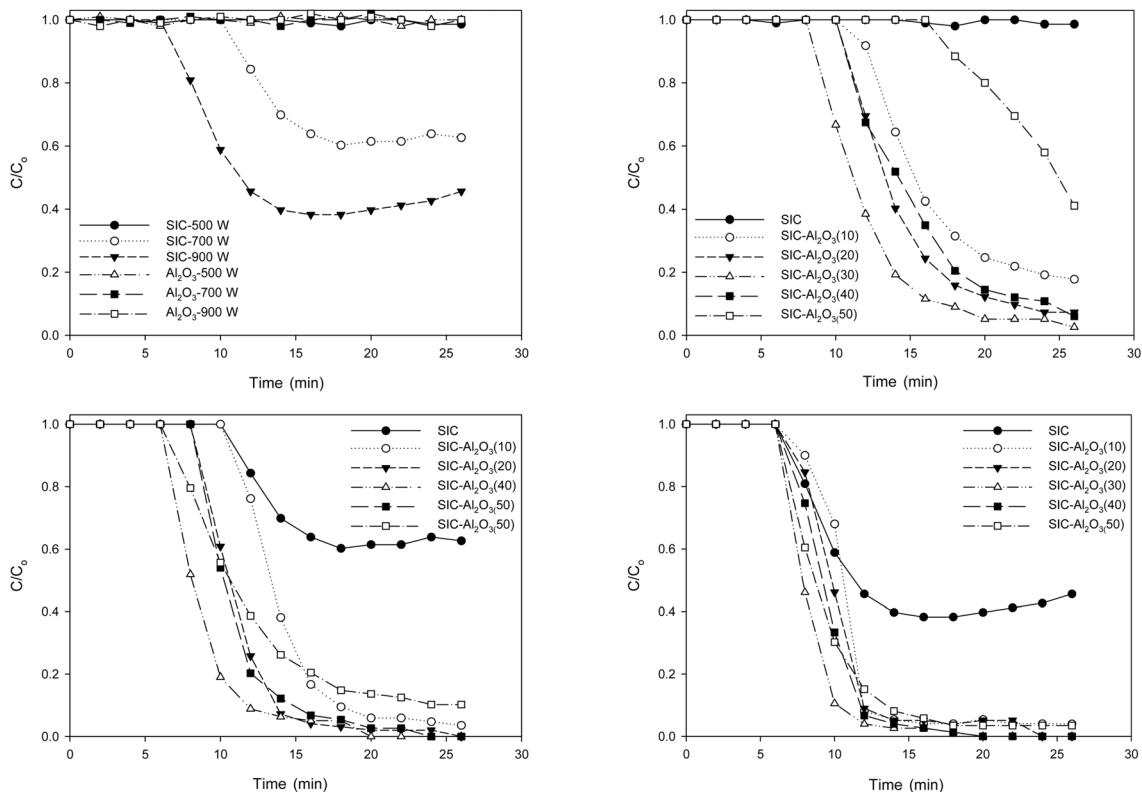


Fig. 4. Variation of SF<sub>6</sub> removal rate by different microwave irradiation power.

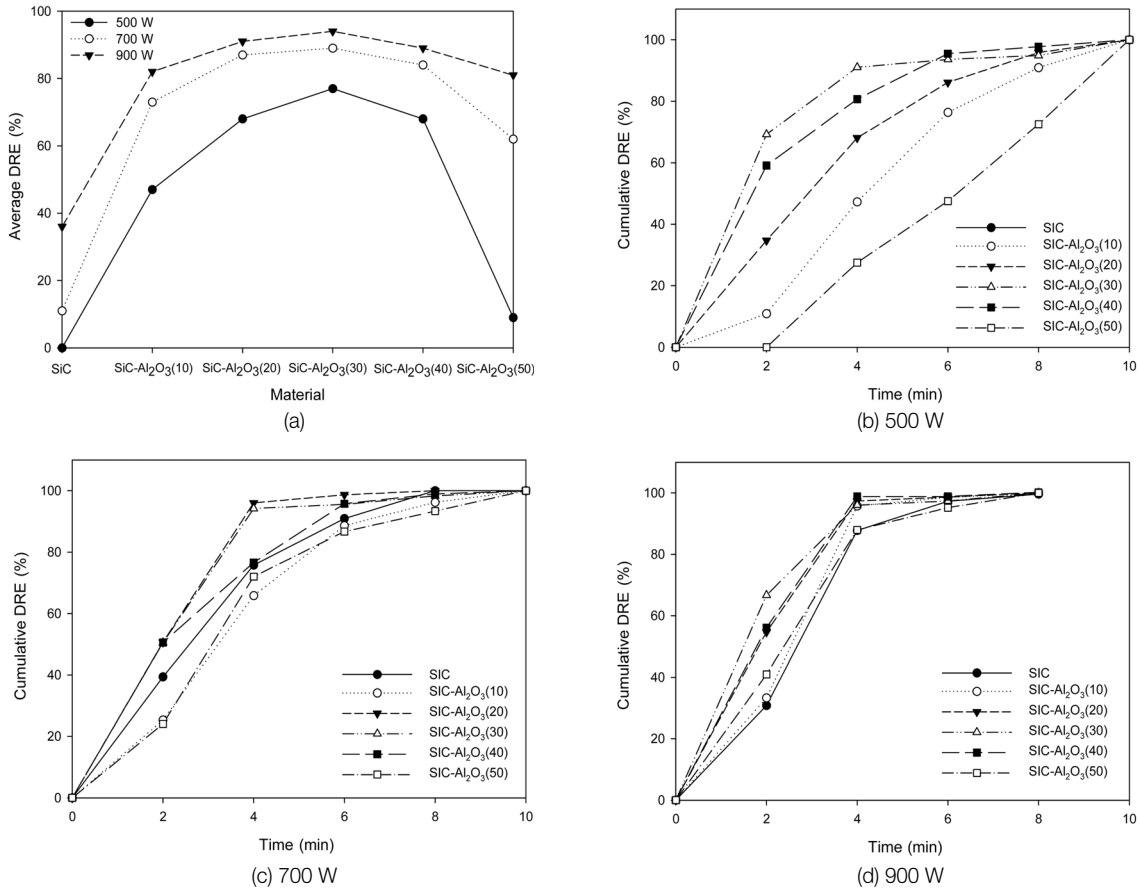


Fig. 5. Comparison of DRE by different microwave irradiation power.

이 40~50%인 SiC에서는 95%의 이상의 DRE를 보여주었다. 900 W에서는 DRE가 SiC를 제외하고는 대부분 95% 이상의 SF<sub>6</sub> 제거효율을 보여주었다. 마이크로파 조사량과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량별 실험을 실시한 결과 SF<sub>6</sub>의 제거조건은 마이크로파 조사량이 700 W 이상이고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 20~30 wt%일 때 DRE가 99.99%였으며 900 W 이상일 경우 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 20~50 wt%일 때 DRE는 99.99%였다. 따라서 에너지 효율성을 고려서 SF<sub>6</sub> 제거를 위한 가장 적합한 조건은 700 W의 마이크로파 조사량과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 20~30 wt%인 것으로 나타났다. 따라서 마이크로파에 의한 SF<sub>6</sub>의 제거효율은 SiC 단독사용시 1,100°C 이상의 높은 온도임에도 제거효율이 매우 낮으며 적정량의 촉매가 혼합된 SiC의 경우 SF<sub>6</sub>의 제거효율이 99.99%까지 증가하였다. 이 등<sup>12)</sup>의 연구에서도 반응온도가 증가될수록 SF<sub>6</sub>의 전환율이 증가되었으며 산화반응의 경우 973 K까지는 전환율이 낮았으나 973 K보다 높은 온도영역에서는 SF<sub>6</sub>의 전환율이 증가하다고 보고하였으며 이는 본 연구와도 유사한 결과를 보여주었다.

### 3.3 SF<sub>6</sub> 분해온도와 DRE의 관계

마이크로파 조사함에 따라 분해온도는 초기 5분에 급격히 증가하고 10분 이후로 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 따라서 마이크로파 조사에 따른 급격한 온도상승으로 분해온도와

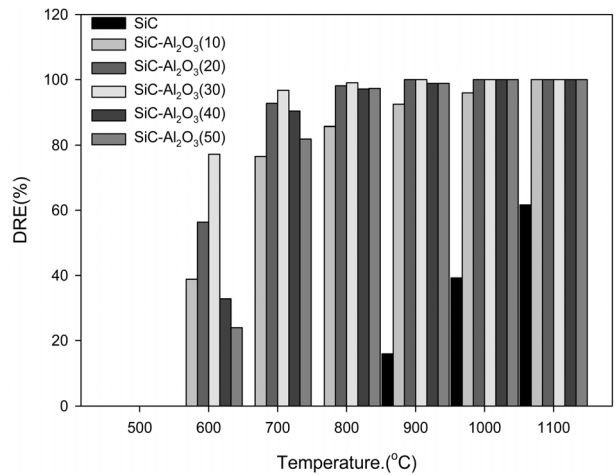


Fig. 6. DRE variation of SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by decomposition temperature.

DRE의 관계를 규명하기 어려웠다. 이를 위해 분해온도를 고정하여 온도별 DRE를 재분석하였으며 이 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보면 500°C에서는 반응이 전혀 일어나지 않았으며 600°C와 700°C에서는 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 77.1%, 96.7%로 DRE가 가장 높았다. 800°C과 900°C에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 20% 이상일 때 99.99%의 DRE를 가졌으며, 1,100°C 이상에서는 SiC를 제외하고 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 함량에 상관없이 99.99%의 DRE를 가졌다. SiC의 경우 800°C 이하에서는

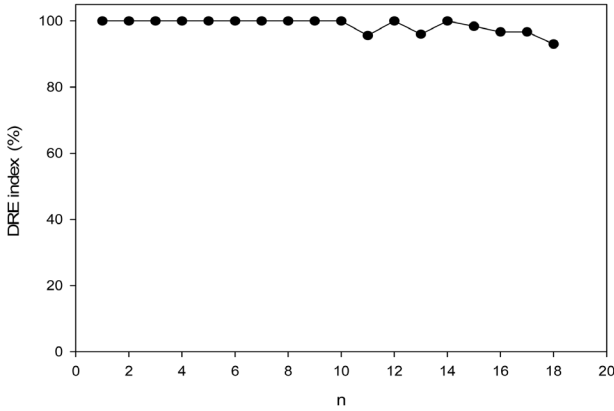


Fig. 7. Cyclic DRE on SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under 800°C reaction temperature.

SF<sub>6</sub>의 제거가 일어나지 않았으며 900°C에서 16%, 1,000°C에서 40%, 1,100°C에서 62%의 제거효율을 보여주었다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 500°C에서는 제거가 일어나지 않았으며 600°C에서 평균 46%, 700°C에서 88%, 800°C에서는 95%, 900°C에서는 98%, 1,000°C에서는 99% 이상의 제거효율을 보여주었다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량별로 비교 시 700°C에서 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 96.7%로 가장 높았으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20), SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40), SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50), SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10)순으로 높았다. 800°C에서도 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 가장 높은 DRE를 보여주었으며, 900°C에서는 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20)과 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 DRE가 99.99%였다. 1,000°C에서는 SiC와 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10)를 제외하고 1,100°C에서는 SiC를 제외하고 모두 99.99%의 SF<sub>6</sub> 제거효율을 보여주었다. 따라서 분해온도별 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량별 실험에서도 에너지효율성과 함량을 고려 시 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 가장 효과적인 물질임을 보여주었다. 또한 이 등<sup>5)</sup>은 상용업 촉매인 Co/ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 촉매를 사용 시 650°C에서 SF<sub>6</sub>의 전환율이 99% 이상 유지되었으나 본 연구에서는 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 800°C에서 99% 이상을 효율을 보여주어 분해온도를 낮추기 위해 촉매 개질화가 필요한 것으로 생각된다. 그러나 단순 열소각에서 99%의 SF<sub>6</sub> 제거를 위해 1,600°C 이상의 고온이 필요하나 본 연구에서는 분해온도가 800°C일 때 SF<sub>6</sub>의 제거효율이 2배 이상 증가하였다.

분해온도별 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량별 실험에서도 에너지효율성과 함량을 고려 시 SF<sub>6</sub>제거에 가장 적합한 물질인 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)을 대상으로 반복실험을 실시하였다. Fig. 7은 SF<sub>6</sub> 제거 반복 실험의 결과이며 분해온도 800°C에서 10회 반복하였다. SF<sub>6</sub> DRE index는 사용 전 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 재 사용 시 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 제거효율을 평가한 것으로 100%의 결과가 나오면 반복 사용 시 제거능의 손실이 없음을 의미한다. 실험결과 제거능은 약간의 증감을 확인하였으며 10회의 제거 반복 실험결과 평균 DRE는 99.99%로 나타났으나 11회 째부터 DRE가 약간 감소하여 95% 정도의 제거효율을 유지하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)은 반복적 제거실험에서도 95% 이상의 DRE를 가진 것으로 확인되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 SF<sub>6</sub>를 제거하기 위해 마이크로파를 열원으로 사용하고 SiC에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 함량별로 처리하여 마이크로파 조사량별, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량별, 분해온도별 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마이크로파 조사 시 SiC는 1,100°C까지 급격히 온도가 증가되었으나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 온도가 완만히 증가하였고 함량별 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 10%에서 40%까지는 1,100°C까지 급격한 온도증가 있었으나 함량별로 유의한 차이는 보이지 않았다. 또한 마이크로파 조사 후 15분까지 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량, 마이크로파 조사량에 상관없이 30 °C/min에서 50 °C/min의 증가율을 보여주었다.

2) 마이크로파 조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 SF<sub>6</sub> 제거 특성 비교 시 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 자체 제거효율은 없었으며 SiC의 경우 700 W에서는 35%, 900 W에서는 55% 이상 증가하였다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 700 W와 900 W에서도 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 SF<sub>6</sub>제거 효율이 가장 높았으며 15분 후에는 99.99% 이상 제거되었으며 마이크로파 조사량이 증가됨에 따라 제거시간이 단축됨을 보여주었다.

3) SF<sub>6</sub> 분해온도별 DRE를 비교한 결과 SiC의 경우 800°C 이하에서는 SF<sub>6</sub>의 제거가 일어나지 않았으며 1,100°C에서 62%의 제거효율을 보여주었다. SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 800°C에서는 95%, 900°C에서는 98%, 1,000°C에서는 99% 이상의 제거효율을 보여주었다. 또한 반복실험결과 SF<sub>6</sub>의 제거효율이 95% 이상유지 되었다.

따라서 마이크로파 조사량별, 분해온도별 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량별 SF<sub>6</sub> 제거실험에서 SiC를 단독 사용하였을 경우보다 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 사용이 SF<sub>6</sub> 제거에 보다 효과적임을 알 수 있었다. 마이크로파 에너지 효율성과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 고려 시 SF<sub>6</sub>의 제거를 위한 최적 조건은 마이크로파 조사량은 700 W, 분해온도는 700~800°C이었으며 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30)이 최적 물질임을 보여주었다. 본 연구는 마이크로파 조사에 따른 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 SF<sub>6</sub> 제거 효율을 평가하였으나 향후 상용화를 위한 SF<sub>6</sub> 농도별, 고유량 공간속도 실험 및 촉매안정성 및 표면분석 실험이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동 기술개발사업(C0040248)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

KSEE

## 참고문헌

1. Haughton, J. T., Meira Filho, L. G., Gallander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskel, K., Climate change 1995-the science of climate change, 1st ed., Cambridge University Press, New York, 121(1996).
2. Kwon, J. S., Choi, S. S., Yoon, M. S. and Kim, S. I., "Reduction technology trend of CCS and SF<sub>6</sub>," *KEITI*, 68~70 (2010).
3. Radoiu, M. and Hussain, S., "Microwave plasma removal of sulphur hexafluoride," *J. Hazard. Mater.*, **164**, 39~45(2009).
4. Park, H. G., Park, N. K., Lee, T. J., Chang, W. C. and Kwon, W. T., "Catalytic decomposition of SF<sub>6</sub> by hydrolysis over  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported metal oxide catalysts," *Clean Technol.*, **18** (1), 83~88(2012).
5. 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).
6. Padma, D. K. and Vasudeva Murthy, A. R., "Thermal decomposition of sulphur hexafluoride," *J. Fluorine. Chem.*, **5**, 181~184(1975).
7. Cho, W. I., Baek, Y. S. and Kim, Y. C., "Manufacture of hydrogen and C<sub>2</sub>+ chemical from methane using microwave plasma and catalyst," *J. Kor. Inst. Gas*, **5**(1), 15~20(2001).
8. Chang, Y. C. and Carlisle, C. T., "Microwave process for volatile organic compound abatement," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **36**, 599~608(2001).
9. Bertea, A. J. and Badot, J. C., "High temperature microwave heating in refractory material," *J. Microwave Power*, **11**, 315~320(1976).
10. Tinga W. R., "Fundamentals of microwave material interactions and sintering," *MRS symp. Proc.*, **124**, 33~44(1994).
11. Pandompatam, B., Liem, A. J., Frenette, R. and Wilson, M. A., "Effect of refractory on the thermal stability of SF<sub>6</sub>," *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **39**, 310~316(1989).
12. Lee, S. H., Park, N. K., Yoon, S. H., Chang, W. C. and Lee, T. J., "Catalytic decomposition of SF<sub>6</sub> by hydrolysis and oxidation over  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Clean Technol.*, **15**(4), 273~276(2009).