

## PFC 배출 저감을 위한 파일럿 규모 촉매 공정 연구

이영춘, 전종기<sup>†\*</sup>

공주대학교 테크노전략대학원 화학신소재환경공학과  
331-717 충남 천안시 서북구 천안대로 1223-24  
<sup>†</sup>공주대학교 화학공학부  
331-717 충남 천안시 서북구 천안대로 1223-24

(2012년 6월 6일 접수; 2012년 6월 24일 수정본 접수; 2012년 6월 25일 채택)

### A Study on Catalytic Process in Pilot Plant for Abatement of PFC Emission

Young Chun Lee, and Jong-Ki Jeon<sup>†</sup>

Graduate School of Technology and Management, Kongju National University  
1223-24, Cheonandae-ro, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 331-717, Korea  
<sup>†</sup>Department of Chemical Engineering, Kongju National University  
1223-24, Cheonandae-ro, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 331-717, Korea

(Received for review June 6, 2012; Revision received June 24, 2012; Accepted June 25, 2012)

#### 요 약

본 연구의 목적은 30 L의 촉매가 장착된 파일럿 규모의 반응 시스템에서 상업용 촉매(Co/ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 PFC 분해 성능을 검증하는 것이다. 공간 속도(GHSV) 1,800 h<sup>-1</sup>의 조건에서 SF<sub>6</sub>의 농도를 증가시키면 T<sub>95</sub>가 증가하였는데 SF<sub>6</sub>의 농도가 1,000~10,000 ppm일 때 T<sub>95</sub>가 580~610 °C 범위로 나타났으며, 열 소각을 했을 때의 T<sub>95</sub>인 1600 °C보다 매우 낮은 온도임을 알 수 있다. 650 °C의 반응 온도 하에서 72시간 동안에 99% 이상의 SF<sub>6</sub>의 전환율이 유지되어 촉매의 안정성이 확보되었다. 또한 SF<sub>6</sub> 전환율을 99% 이상 유지하기 위해서는 GHSV를 2,000 h<sup>-1</sup> 이하인 조건에서 운전해야 함을 알 수 있었다. CF<sub>4</sub>의 분해 반응의 경우 T<sub>95</sub> 온도가 710 °C이었으며, SF<sub>6</sub>의 T<sub>95</sub> 온도보다 높은 온도가 필요함을 알 수 있었다.

**주제어** : 과불화화합물, 촉매, 파일럿 플랜트, SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>

**Abstract** : The objective of the present study was to evaluate catalytic performance of a commercial catalyst (Co/ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) for the decomposition of perfluorinated chemicals in a pilot scale reactor containing 30 L of catalysts. At a reaction condition of GHSV 1,800 h<sup>-1</sup>, T<sub>95</sub> of SF<sub>6</sub> was increased from 580 to 610 °C with increasing of SF<sub>6</sub> concentration from 1,000 to 10,000 ppm. T<sub>95</sub> of SF<sub>6</sub> in catalytic decomposition was much smaller than that of thermal decomposition (1,600 °C). The 99% conversion of SF<sub>6</sub> was maintained for 72 hours a reaction temperature of 650 °C. In order to maintain the SF<sub>6</sub> conversion more than 99%, it is necessary to operate at a reaction condition of GHSV less than 2,000 h<sup>-1</sup>. An operating temperature of 710 °C was required to achieve >95% destruction of the CF<sub>4</sub>, which was much higher than that of catalytic decomposition of SF<sub>6</sub>.

**Keywords** : PFC, Catalyst, Pilot plant, SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>

#### 1. 서 론

SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub> 및 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 등을 포함한 과불화화합물(Per Fluoro Compounds; PFC)들은 주로 반도체소자의 생산에 사용된다[1]. 반도체 공정 외에 PFC는 종래에 사용되던 클로로플루오로카본(chloro-fluorocarbon; CFC)을 대체하여 세정제, 에칭제, 용매, 반응원료 등의 목적으로 사용하거나 제조하는 공정 및 작업장에

서 배출되는 폐가스에도 포함될 수 있다. 과불화탄소의 사용 효율이 15 내지 60% 정도임을 감안할 때 나머지 과불화탄소는 그대로 대기 중에 방출되고 있는 실정이다. 사용 후 남은 과불화탄소를 극저온법으로 회수하여 재사용할 수 있으나, 고순도의 과불화탄소를 회수하기 위해서는 다른 성분들을 제거하기 위한 배출가스의 전처리가 요구되므로 다른 과불화탄소 분해처리 방법보다 회수 비용이 많이 든다는 단점이 있다[2].

과불화화합물(PFC)들이 배출되는 총 질량이 다른 온실가스에 비해 작을지라도 지구온난화 지수(Global Warning Potential; GWP)는 무시할 수 없다[3,4]. 과불화탄소는 화학적으로 매우

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jkjeon@kongju.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2012.18.2.216

안정하고 거의 독성이 없는 물질이지만 지구 온난화를 일으키는 주요 온실 가스로서, 대기 중에서 무려 10,000 내지 50,000년 동안 체류하면서 지표면의 온도를 상승시킨다. 과불화탄소의 지구온난화 지수는 이산화탄소 보다 6,000 내지 25,000배 정도이다. 따라서, PFC를 대기 중으로의 배출하는 것은 환경 보호를 위해 규제 대상이 되고 있고 앞으로도 그 규제가 더욱 강화될 전망이다.

반도체 공정이나 PFC를 다루는 공정 및 작업장에서 배출되는 폐가스에 포함된 PFC를 처리하기 위하여 직접 연소 및 열분해법, 플라즈마 분해법, 회수법, 촉매 분해법 등 여러 가지 제거방법들이 알려져 있으며, 각각의 기술마다 문제점을 갖고 있어 아직은 상업적 적용에 애로가 따르고 있는 실정이다[4,5]. 공업적으로는 연소 및 열분해 방법이 가장 선호되는 방법이지만 과불화탄소를 분해 처리하려면 1,000 °C 이상의 고온을 요구하여 많은 양의 에너지를 필요로 하므로 운전 비용이 많이 들고 분해산물에 HF, HCl 및 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등과 같은 유해물질이 포함되어 있어 후처리 공정을 거쳐야 한다는 단점이 있다. 플라즈마 분해법은 PFC를 포함하는 폐가스를 플라즈마 영역을 통과시켜 분해하는 기술로서, PFC 분해에는 효과적이나 높은 에너지 상태의 플라즈마를 사용하기 때문에 PFC의 무차별 분해에 의해 생성된 라디칼들의 이차 반응으로 다양한 종류의 부산물이 생성되는 문제점이 있다. 또한, 플라즈마를 안정적으로 장시간 발생시키기 위한 플라즈마 발생장치의 내구성 및 경제성에 있어서도 문제가 많다[4]. 회수법은 폐가스에 포함된 PFC 성분을 pressure swing adsorption 또는 분리막 등을 사용하여 분리한 다음 회수하는 방법으로서, PFC의 재활용이 가능하다는 측면에서 바람직하지만 반도체 공정에서와 같이 불규칙적으로 소량 배출되는 PFC를 처리하는 경우에 있어서는 경제성이 낮은 방법이다.

한편, 촉매분해법은 과불화탄소를 고체 촉매와 접촉시켜, 연소 및 열분해하는 것보다 낮은 온도에서 분해시키는 방법으로서, 분해 산물로서 HF와 이산화탄소만 배출되기 때문에 후처리 공정에서는 간단한 습식처리법으로 HF를 제거하면 되기 때문에 단기적인 관점에서는 과불화탄소 배출을 저감하는 기술로는 매우 바람직한 방법으로 알려져 있다[2]. 촉매 분해법은 촉매 및 수증기를 사용하여 PFC 분해가 500~800 °C의 저온에서 일어나게 유도함으로써 thermal NO<sub>x</sub>의 발생 및 장치 부식을 크게 낮출 수 있기 때문에 직접 분해법 및 플라즈마 분해법의 대안으로 널리 연구되어 왔다[6-10]. 그러나 500~800 °C의 운전조건은 촉매가 물리적 또는 화학적인 변화 없이 장시간 활성을 유지하기에는 여전히 높은 온도조건으로서 촉매의 내구성 확보가 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 즉, 부산물로 생성되는 HF와 수증기가 동시에 존재하는 500~800 °C의 반응 분위기 하에서 지속적으로 내구성을 갖는 촉매개발이 상업화의 관건이 되고 있다[4].

본 연구의 목적은 배출가스 처리 용량이 1 m<sup>3</sup>/min인 파일럿 규모의 반응 시스템에서 난분해성인 PFC를 촉매를 사용하여 800 °C 이하의 낮은 온도에서 분해하기 위한 상업용 촉매의 성능을 검증하는 것이다. 본 연구에서는 PFC 가스 중에서 SF<sub>6</sub>의 촉매 분해 반응에 대하여 반응물의 농도, 반응 온도, 및

공간 속도 등의 운전 조건이 분해 효율에 미치는 영향을 고찰하고, 장기 운전을 수행했다. 또한 CF<sub>4</sub>의 촉매 분해 성능을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 촉매

본 연구에 사용한 촉매는 상업용 촉매이며 제조 절차는 다음과 같이 문헌에 나타나 있다[11]. 먼저 19 L 반응기에 증류수 10 L를 추가하였다. Pseudoboehmite 3.0 kg을 반응기에 서서히 가하면서 교반기로 잘 섞어주었다. Zirconium oxynitrate 용액(20 wt% ZrO<sub>2</sub>) 0.788 kg을 가하였다. 질산을 사용하여 슬러리의 pH가 3.3을 유지하도록 조절하면서 4시간 동안 교반하였다. 그 후, 48시간 동안 숙성하였다. 생성된 젤을 110 °C의 오븐에서 건조시키고, 535 °C의 소성로에서 3시간 동안 소성시켰다. 이렇게 제조한 7.5% ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 BET 표면적은 195 m<sup>2</sup>/g이었다.

10% Co/7.5% ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 함침법에 의해 다음과 같이 제조되었다. 500 g의 7.5% ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 6/12 mesh 크기의 입자로 만들어서 사용하였다. 284 ml의 증류수에 210 g의 cobalt acetate와 130 g의 triethanolamine을 녹인 용액을 만들어서 ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 분사하였다. 건조 과정을 거친 후에 500 °C에서 2시간 동안 소성하여 Co 산화물로 전환하고, 700 °C에서 2시간 동안 추가로 소성하였다.

### 2.2. 과불화화합물 분해반응 파일럿 플랜트

Figure 1은 PFC 분해반응 파일럿 장치를 나타낸다. 반응물 도입부분은 반응물인 과불화화합물 및 산소를 공급할 수 있는 mass flow controller와 H<sub>2</sub>O를 공급할 수 있는 펌프로 구성되어 있다. 반응기로는 Hastelloy C 재질로 제작된 vertical cylinder 형태의 고정층 반응기를 사용하였다. 촉매 반응 후 반응기가 고온에서 부식될 가능성이 높기 때문에 반응기 하단에 냉각수를 Swirl 기법으로 도입하였다. 반응기에 8 × 16 mm

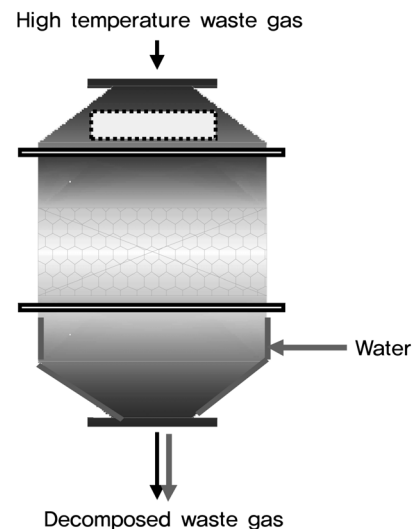


Figure 1. Reactor for catalytic decomposition of PFC.

크기의 촉매를 30 L 충전하였으며, 반응 온도는 약 650 °C이고 과불화화합물의 공간속도(Gas Hourly Space Velocity ; GHSV)는 1,500~2,000 h<sup>-1</sup>이었다.

반응기로부터 배출되는 분해 폐가스의 과불화화합물 농도는 FT-IR을 사용하였으며, 전환율(conversion)은 아래와 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{Conversion (\%)} = \frac{[(\text{Inlet 농도} \times \text{Inlet 유량}) - (\text{Outlet 농도} \times \text{Outlet 유량})]}{(\text{Inlet 유량} \times \text{Inlet 농도})} \times 100$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. SF<sub>6</sub> 열 소각

Figure 2는 SF<sub>6</sub>를 촉매를 사용하지 않고 공기의 존재 하에서 열 소각하였을 때의 실험 결과이다. 분해온도를 상승시키면서 SF<sub>6</sub>의 농도를 측정하고, 약 1000 °C 이하에서는 분해가 거의 진행되지 않음을 알 수 있었다. 1000 °C 이상에서 서서히 분해가 일어나기 시작하고 1300~1500 °C 구간에서 급격하게 분해가 진행된다. 95% 분해가 진행되는 온도(T<sub>95</sub>)는 약 1600 °C이고, 2000 °C가 되어야 완전히 분해가 된다.

#### 3.2. SF<sub>6</sub> 촉매분해

##### 3.2.1. SF<sub>6</sub> 농도의 영향

Light-off curve는 반응온도의 함수로서의 제거 효율을 나타내며, 일반적으로 반응기 내에서 촉매층의 조작 온도를 결정하기 위해 사용된다. 공정의 조작온도를 결정하기 위해 light-off curve를 사용할 때의 주의점은 프로세스와 해당되는 조건과 동일한 조건에서의 light-off curve를 사용해야 한다. T<sub>95</sub>는 95% 이상의 제거율을 달성하기 위해 요구되는 반응 온도를 나타낸다. 주어진 PFC에 대하여, T<sub>95</sub>는 농도와 체류 시간의 함수이다. 반응물의 체류시간이 증가하면(즉, 촉매의 사용량이 더 많으면) T<sub>95</sub>가 감소하며, 반면에 PFC의 농도가 증가하면 일반

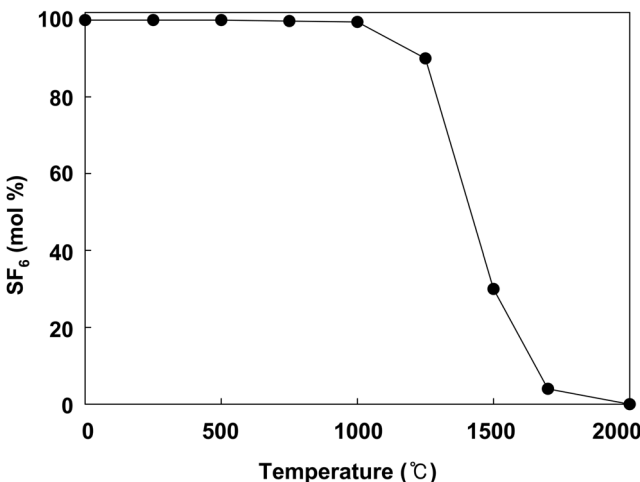


Figure 2. Thermal decomposition of SF<sub>6</sub>.

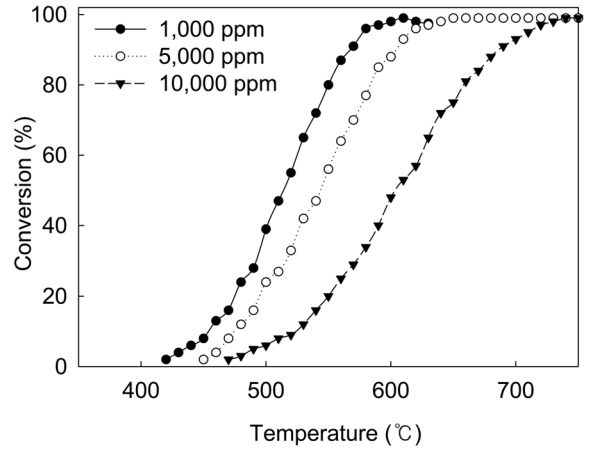


Figure 3. Effect of concentration on SF<sub>6</sub> light-off curve (Feed: 1 m<sup>3</sup>/min, H<sub>2</sub>O 6.1%, GHSV = 1,800 h<sup>-1</sup>).

적으로 T<sub>95</sub>가 증가한다. Figure 3은 촉매(직경 8 × 길이 16 mm) 30 L를 반응기에 충전하고, H<sub>2</sub>O 농도 6.1%, 공간 속도(GHSV) 1,800 h<sup>-1</sup>의 조건에서 SF<sub>6</sub>의 농도가 light-off curve에 미치는 영향을 나타낸 것이다. SF<sub>6</sub>의 농도가 1,000 ppm일 때, 반응 온도를 증가시키면서 SF<sub>6</sub>의 전환율을 측정하고, T<sub>95</sub>는 580 °C로 나타났다. SF<sub>6</sub>의 농도를 증가시키면 T<sub>95</sub>가 증가하였는데 SF<sub>6</sub>의 농도가 5,000 ppm인 경우는 620 °C가 되고, SF<sub>6</sub>의 농도가 10,000 ppm인 경우는 T<sub>95</sub>가 710 °C로 증가하였다. 즉, 촉매를 사용한 파일롯 테스트에서 SF<sub>6</sub>의 농도가 1,000~10,000 ppm일 때 T<sub>95</sub>가 580~710 °C 범위로 나타났는데 이 온도 범위는 촉매를 사용하지 않고 열 소각을 했을 때의 T<sub>95</sub>인 1,600 °C보다 매우 낮은 온도임을 알 수 있다.

##### 3.2.2. 촉매 분해 성능 재현성 실험 결과

Figure 4는 SF<sub>6</sub> 촉매 제거 효율의 재현성을 확인하기 위한

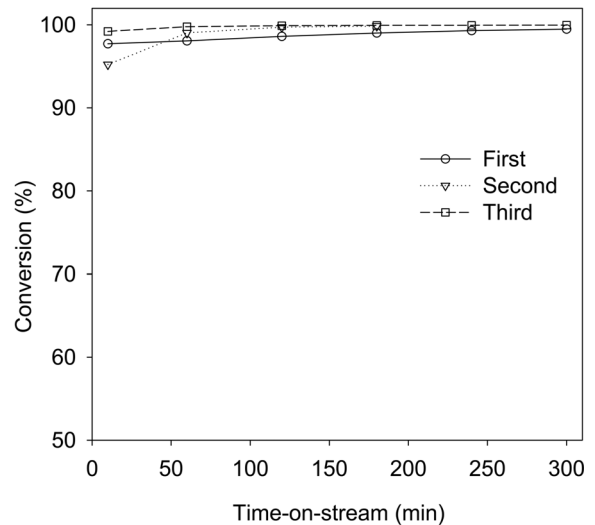
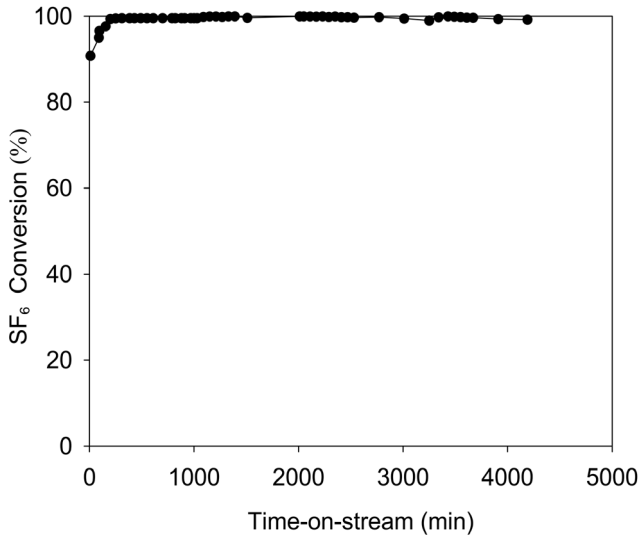


Figure 4. Experimental reproducibility of SF<sub>6</sub> conversion (Feed: 1 m<sup>3</sup>/min, H<sub>2</sub>O 6.1%, Temp.: 650 °C, SF<sub>6</sub> concentration: 1,500 ppm, GHSV: 2,000 h<sup>-1</sup>).



**Figure 5.** SF<sub>6</sub> conversion with time-on-stream (Feed: 1 m<sup>3</sup>/min, H<sub>2</sub>O 6.1%, Temp.: 650 °C, SF<sub>6</sub> concentration: 1,500 ppm, GHSV: 2,000 h<sup>-1</sup>).

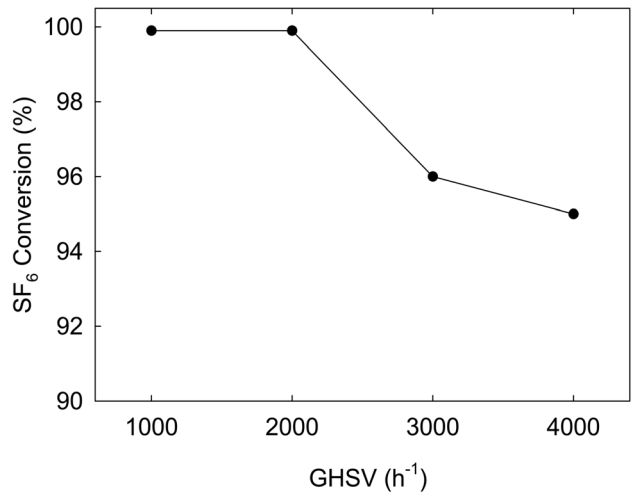
실험 결과이다. SF<sub>6</sub>의 농도가 1,500 ppm, GHSV는 2,000 h<sup>-1</sup>, time-on-stream 5 h인 조건에서 650 °C 이상에서 99% 이상의 SF<sub>6</sub> 전환율을 얻을 수 있었으며, 이 결과는 3 차례의 반복 실험을 통해서도 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구의 파일럿 규모에서의 촉매의 SF<sub>6</sub> 촉매 제거 효율에 대한 재현성이 확보되었음을 알 수 있었다.

### 3.2.3. 촉매 안정성 실험 결과

과불화화합물 제거 공정용 촉매의 선정에서, 촉매의 안정성과 피독 저항은 매우 중요한 인자이다. 촉매의 안정성은 오랜 기간 동안 높은 파괴 효율을 유지할 수 있는 촉매의 능력에 의존한다. SF<sub>6</sub> 농도가 1,500 ppm이고 수증기를 6.1% 함유한 feed를 1 m<sup>3</sup>/min의 유속(GHSV: 2,000 h<sup>-1</sup>)으로 투입하면서 650 °C의 반응 온도 하에 장시간 동안 촉매의 성능을 분석한 결과를 Figure 5에 나타냈다. 72시간의 연속 운전 결과, 99% 이상의 SF<sub>6</sub> 전환율이 유지됨을 알 수 있었다. 즉, 이 시간 동안에 촉매의 피독이 거의 발생하지 않으며 안정성이 확보되었음을 알 수 있었다.

### 3.2.4. 공간 속도의 영향

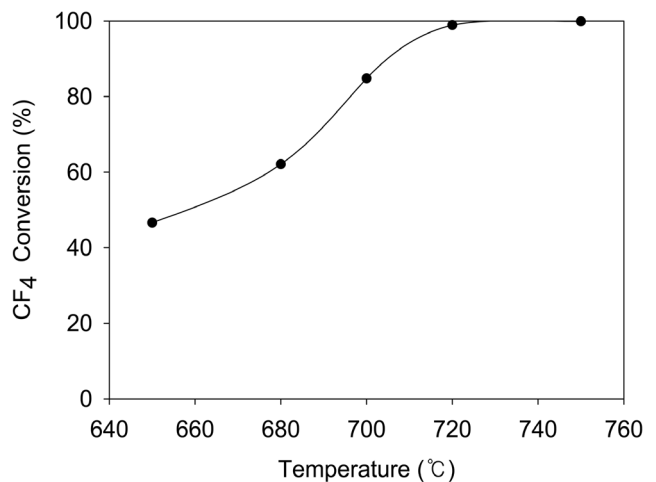
반응기에 촉매를 30 L 장착하고, 반응온도 650 °C에서 SF<sub>6</sub> 농도가 1,500 ppm이고 수증기를 6.1% 함유한 feed의 유량을 변화시키면서 TOS 5 h의 조건에서 SF<sub>6</sub> 전환율을 측정된 결과를 Figure 6에 나타냈다. GHSV가 2,000 h<sup>-1</sup> 이하인 조건에서는 SF<sub>6</sub> 전환율이 99.9% 이상이었지만, GHSV가 3,000 h<sup>-1</sup> 및 4,000 h<sup>-1</sup>인 조건에서는 SF<sub>6</sub> 전환율이 각각 96.0% 및 95.0%로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 650 °C의 반응 온도에서 SF<sub>6</sub> 전환율을 99.9% 이상 유지하기 위해서는 GHSV를 2,000 h<sup>-1</sup> 이하인 조건에서 운전해야 함을 알 수 있었다.



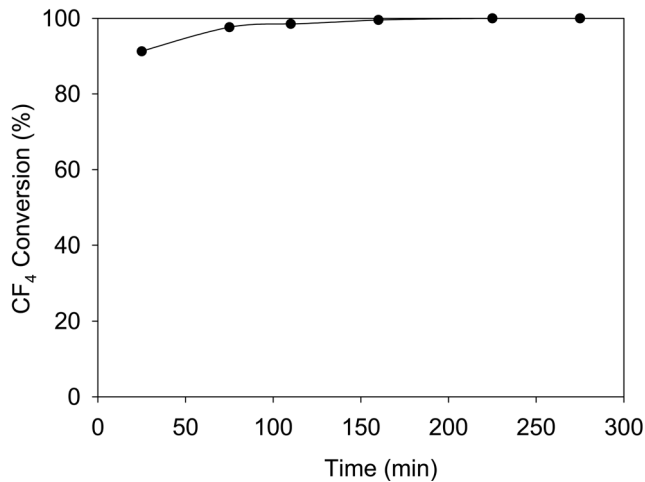
**Figure 6.** Effect of space velocity on SF<sub>6</sub> conversion (Catalyst: 30 L, Temp.: 650 °C, SF<sub>6</sub> concentration: 1,500 ppm, TOS 5 h).

### 3.3. CF<sub>4</sub> 촉매분해

본 연구에서 사용한 촉매의 과불화화합물 분해 성능을 파악하기 위하여 SF<sub>6</sub>와 더불어서 반응온도가 CF<sub>4</sub> 분해활성에 미치는 영향을 확인하였다. Figure 7은 Feed 유속 1 m<sup>3</sup>/min, CF<sub>4</sub> concentration 2,500 ppm, H<sub>2</sub>O 6.1%, TOS 30 min, GHSV = 2,000 h<sup>-1</sup>의 조건에서 반응온도가 CF<sub>4</sub> 분해활성에 미치는 영향을 조사한 결과이다. 주입된 CF<sub>4</sub>의 95%가 전환되는 점인 T<sub>95</sub> 온도는 710 °C 부근에서 나타났으며, 완전히 전환되는 온도는 730 °C 부근에서 나타났다. SF<sub>6</sub>의 경우는 유사한 조건에서의 T<sub>95</sub> 온도가 580~600 °C 범위로 나타나서, CF<sub>4</sub>의 T<sub>95</sub> 온도가 SF<sub>6</sub>의 T<sub>95</sub> 온도보다 약 110~130 °C 정도 높은 것을 알 수 있다. Brown 등의 결과에 의하면 CF<sub>4</sub>의 T<sub>95</sub> 온도가 SF<sub>6</sub>의 T<sub>95</sub> 온도보다 140 °C 정도 높게 나타났으며, 본 연구의 결과와 잘 부합함을 알 수 있다[3].



**Figure 7.** CF<sub>4</sub> light-off curve (Feed: 1 m<sup>3</sup>/min, CF<sub>4</sub> concentration 2,500 ppm, H<sub>2</sub>O 6.1%, Temp.: 720 °C, TOS 30 min, GHSV = 2,000 h<sup>-1</sup>).



**Figure 8.** CF<sub>4</sub> conversion with time-on-stream (Feed: 1 m<sup>3</sup>/min, CF<sub>4</sub> concentration 2,500 ppm, H<sub>2</sub>O 6.1%, GHSV = 2,000 h<sup>-1</sup>).

Figure 8에 Feed 유속 1 m<sup>3</sup>/min, CF<sub>4</sub> concentration 2,500 ppm, H<sub>2</sub>O 6.1%, Temp.: 720 °C, GHSV = 2,000 h<sup>-1</sup>의 조건에서 5시간의 연속 운전 결과를 나타냈다. 5시간 동안 99.5% 이상의 CF<sub>4</sub> 전환율이 유지되었으며, 이 시간 동안에 촉매의 파괴가 거의 발생하지 않았고 안정성이 유지됨을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

배출가스 1 m<sup>3</sup>/min를 처리할 수 있는 용량의 파일럿 규모 반응기(촉매 양 30 L)를 사용하여 상업용 촉매를 사용하여 과불화화합물의 촉매 분해 성능을 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, H<sub>2</sub>O 농도 6.1%, 공간 속도(GHSV) 1,800 h<sup>-1</sup>의 조건에서 SF<sub>6</sub>의 농도를 증가시키면 T<sub>95</sub>가 증가하였는데 SF<sub>6</sub>의 농도가 1,000~10,000 ppm일 때 T<sub>95</sub>가 580~610 °C 범위로 나타났으며, 열 소각을 했을 때의 T<sub>95</sub>인 1600 °C보다 매우 낮은 온도를 알 수 있다. 둘째, 650 °C의 반응 온도 하에서 72시간 동안에 99% 이상의 SF<sub>6</sub>의 전환율이 유지되어 촉매의 안정성이 확보되었다. 또한 SF<sub>6</sub> 전환율을 99.9% 이상 유지하기 위해서는 GHSV를 2,000 h<sup>-1</sup> 이하인 조건에서 운전해야 함을 알 수 있었다. 셋째, CF<sub>4</sub>의 분해 반응의 경우 T<sub>95</sub> 온도가 710 °C이었으며, SF<sub>6</sub>의 T<sub>95</sub> 온도보다 약 110~130 °C 정도 높은 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. Park, Y. K., "Waste Gas Treatment System for Semiconductor Process," Korea Research Institute of Chemical Technology, Report, July. 2004.
2. Choi, W., Yi, J., Lee, M. C., and Kim, P., "Composite Catalyst of Porous Alumina and Transition Metal for Perfluorocarbon Destruction and Process Fordeconstructing Perfluorocarbon Using the Same," Korea Patent Application No. 10-2003-0035665 (2003).
3. Brown, R. S., Rossin, J. A., and Thomas, C. J., "Catalytic Process for Control of PFC Emissions," Semiconductor International, 209-214 (2001).
4. Park, Y. K., Jeon, J., and Kim, H. Y., "Catalyst for Decomposition of Perfluoro-compound in Waste-gas and Method of Decomposition with Thereof," Korea Patent No. 10-0461758 (2004).
5. Han, S. H., Park, H. W., Kim, T. H., and Park, D. W., "Large Scale Treatment of Perfluorocompounds Using a Thermal Plasma Scrubber," *Clean Technol.*, **17**(3), 250-258 (2011).
6. El-Bahy, Z. M., Ohnishi, R., and Ichikawa, M., "Hydrolysis of CF<sub>4</sub> over Alumina-based Binary Metal Oxide Catalysts," *Appl. Catal. B: Environ.*, **40**, 81-91 (2003).
7. Tajima, M., Niwa, M., Fujii, Y., Koinuma, Y., Aizawa, R., Kushiyama, S., Kobayashi, S., Mizuno, K., and Ohuchi, H., "Decomposition of Chlorofluorocarbons in the Presence of Water over Zeolite Catalyst," *Appl. Catal. B: Environ.*, **9**, 167-177 (1996).
8. Kato, T., Mori, T., Ohyama, R., and Tamaki, J., *Greenhouse Gas Control Technologies*, Elsevier Science, Oxford, 2003, pp. 1803-1806.
9. Park, N. K., Park, H. G., Lee, T. J., Chang, W. C., and Kwon, W. T., "Hydrolysis and Oxidation on Supported Phosphate Catalyst for Decomposition of SF<sub>6</sub>," *Catal. Today*, **185**, 247-252 (2012).
10. Behitoshi, A., and Doraichi, K., "Reactive Agent and Process for Decomposing Nitrogen Fluoride," Korea Patent No. 10-0356305 (2002).
11. Rossin, J. A., "Catalyst Composition and Method of Controlling PFC and HFC Emissions," U.S. Patent No. 6,676,913 (2004).