

# 촉매필터를 이용한 먼지 및 HVOC 제거 특성 연구

정순관<sup>†</sup> · 박영옥

한국에너지기술연구원 Zero Emission 연구센터  
(2007년 10월 25일 접수, 2007년 12월 12일 채택)

## Study of Catalytic Filter on the Removal of Dust and HVOC

Soon Kwan Jeong<sup>†</sup> and Young Ok Park

Zero Emission Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea  
(Received October 25, 2007; accepted December 12, 2007)

촉매와 필터가 결합된 촉매필터는 먼지와 가스상 물질을 동시에 제거할 수 있으며 이로 인해 운영비와 설치공간의 감소가 가능한 다기능 반응시스템으로 다양한 환경분야에 적용이 가능하다. 본 연구는 실험실 규모 반응시스템에서 촉매필터를 이용한 먼지와 할로겐 휘발성 유기화합물(halogenated volatile organic compound, 1,2-dichlorobenzene) 제거 연구를 수행하였다. 촉매필터는 저온활성이 우수한 매그린사의 WO<sub>3</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> 촉매와 250 °C 이하에서 사용 가능한 P-84를 이용하여 제조하였다. 온도, 면속도, 먼지농도와 같은 다양한 변수조절을 통한 촉매필터의 촉매활성과 먼지제거 효율을 평가하였다. 촉매활성은 온도와 촉매 담지량에 따라 증가하였다. 먼지제거효율은 면속도에 가장 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 시간에 따른 필터의 차압변화 평가 결과 virgin 필터의 경우 탈진간격은 급격한 감소를 보였으며, 잔류압력감소는 거의 변하지 않았다. 촉매필터의 경우 전단에 고착된 나노섬유의 미끄럼 특성에 의하여 차압증가폭이 낮게 나타났다. 촉매필터는 1 m/min, 210 °C에서 99.98% 이상의 탈진효율과 90% 이상의 1,2-DCB 제거 효율을 나타냈다.

Catalytic filter is capable of performing shallow bed dust filtration plus a catalytic reaction, promoted by a catalyst deposited in its inner structure. Such a feature may allow potential cost and space reduction in several environmental applications. Dust filtration and halogenated volatile organic compound (1,2-dichlorobenzene) destruction were carried out in a lab-scale reactor. WO<sub>3</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> supplied by MaGreen, which showed high catalytic activity at low temperature, was used as a catalyst. P-84 that can be operated under 250 °C was used as a felt. The catalytic activity and filtration efficiency of catalytic filters were investigated under the operating conditions, including temperature, face velocity, and dust concentration. The catalytic activity of catalytic filter increased with increasing temperature and the amount of catalyst loaded. The test results showed that the filtration efficiency was primarily affected by the face velocity. Pressure drop variations as a function of time were investigated for a variety of conditions. In case of virgin filter, a dramatic decrease in the pulse interval and a slightly increase in the base line pressure drop were observed. A relatively slow pressure drop build-up was recorded for the catalytic filter due to smooth and slippery surface characteristics of nanofiber. The catalytic filter indicated that high filtration efficiency over 99.98% and high catalytic activity over 90% at 1 m/min and 210 °C.

**Keywords:** catalytic filter, dust, halogenated volatile organic compound, nanofiber

### 1. 서 론

경제 활동의 증가로 인한 각종 산업·생활·특정 폐기물의 양은 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 폐기물을 처리하는데 있어 가장 간편한 방법으로 매립을 들 수 있으나 침출수, 토양오염 등 2차 오염의 문제점이 있다. 또한 한국, 일본, 유럽과 같은 인구과밀지역에서는 매립지 부족으로 인하여 다른 형태로의 적절한 처리법을 필요로 한다. 국내에서도 폐기물의 부피감량 측면에서 가장 효과적인 소각방법에 관심을 갖게 되었으며, 생활폐기물의 경우 소각에 의한 처리는 1999년 10.3%에서 2005년 16.0%로 증가하였으며 2011년에는 23%로 확대할 계획이다[1]. 소각기술은 기존 화석연료의 연소과정에 대한 많은 기술이 축적된 상태로 이를

폐기물 분야에 확장 적용하였기 때문에 큰 기술적 어려움이 없는 것으로 평가되나 소각시 생성되는 먼지 및 다이옥신의 폐해로 인하여 가동 중인 소각 시스템의 운전 및 신규건설에 많은 어려움이 따르고 있다.

소각시설에서 발생하는 대기오염물을 처리하는 방법은 먼지의 경우 전기집진기 및 여과집진기가 운영되고 있으며, 다이옥신의 경우 활성탄에 의한 흡착 방법, SCR (Selective Catalytic Reduction) 촉매를 이용한 촉매산화 방법 등이 이용되고 있다. 이러한 개별공정을 통한 대기오염물 제어는 규제치를 만족하는 수준이나 에너지 절약, 설치 공간의 축소, 설치비 및 조업비용의 절감 등을 위한 새로운 형태의 반응기를 개발하는 많은 연구가 진행 중이다. 여러 개의 반응기를 통한 대기오염물 제거를 하나의 다기능 반응기를 통하여 얻을 수 있다면 상기에서 언급한 다양한 장점을 얻을 수 있으며 이러한 다기능 반응기 중의 하나가 촉매 필터이다.

<sup>†</sup> 교신저자 (e-mail: jeongs@kier.re.kr)

촉매필터를 이용한 분진 및 다이옥신 동시 제거 상용화 공정 중 가장 성공적인 곳은 벨기에에 있는 IVRO 도시 쓰레기 소각로에 설치된 공정이다. 이 소각로는 1976년에 설치되어 시간당 3.2~4 ton의 쓰레기 처리 용량을 가지고 있으며 전체공정은 보일러-전기집진기-건식석회공정-백화우스의 공정으로 설치되어 있다. 1996년 벨기에에서 다이옥신 및 퓨란류의 규제가 강화되면서 초기에는 200~230 °C 온도영역에서 활성탄을 주입하는 공정을 택하였으나, 상기온도에서는 장치 후단에 있는 여과포의 화재 위험이 존재한다. 따라서 화재와 이로 인한 조업중단을 막기 위한 새로운 대안이 촉매 필터를 이용한 먼지 및 다이옥신 동시 제거이다. 이 곳에 사용된 촉매필터는 미국 GORE-TEX사의 REMEDIA™ 촉매 필터 시스템으로 전단에 e-PTFE 멤브레인 층을 설치하여 먼지를 제거하며 촉매층은 e-PTFE 섬유에 촉매를 고착시킨 후 니들펀칭(Needle punching)한 제품을 사용하였으며, 먼지제거효율 99.95% 다이옥신제거효율 99% 이상의 결과를 얻었다[2].

휘발성 유기화합물의 제거에 사용되는 촉매 필터는 부직포 혹은 세라믹 필터 모두 사용될 수 있으나 현재까지 연구된 결과들은 주로 세라믹 필터를 사용한 경우가 주류를 이루고 있다. Saracco와 Specchia는[3]  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 필터에  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층을 일명 "nitrate-urea method"를 통하여 적층시킨 후 활성금속인 Pt는 담지법에 의해 첨가하는 방법으로 촉매필터를 제조하였으며 나프탈렌, 프로필렌, 프로판, 메탄에 대한 제거 실험을 수행하였다. 여러 반응물 중 고정충반응기에서 유사한 촉매를 통한 나프탈렌 제거 실험을 수행한 Carno 등의[4] 결과와 비교하면 다음과 같다. Carno 등은 고정충반응기를 이용하여 공간 속도 20000 hr<sup>-1</sup> 조건에서 light-off 온도는 150 °C로 나타났으며, 200 °C에서 90%보다 낮은 전환율을 보였다. 그러나 촉매필터를 사용할 경우 공간속도로 환산하면 43000 hr<sup>-1</sup> 나타내었으나 light-off 온도는 150 °C 이하로 나타났으며, 200 °C에서도 96%의 높은 전환율을 얻었다. 이러한 결과는 촉매필터의 작은 기공크기로 인한 기-고 접촉효율이 우수하기 때문으로 사료되나 실 공정에서 압력손실의 영향으로 사용하기 어려운 고정충반응기보다 더 많은 압력손실을 유발하는 촉매필터의 반응효율이 약간 증가한 것으로 촉매필터가 더 우수한 시스템이라고 판단하기는 어렵다. 따라서 반응 효율 외에 반응시스템에 부하되는 압력손실의 영향을 동시에 파악하는 연구가 동시에 진행되어야 한다고 본다. 석탄화력발전소에서 발생하는 먼지 및 질소산화물 동시제거 연구는 미국 DOE 지원으로 North Dakota 대학, Owens-Corning Fibergalss사(OCF), Raytheon 엔지니어링사가 공동으로 수행하였으며 NOx 전환율 80%, 집진 효율은 99.96%의 효율을 얻었다[5].

이러한 촉매필터 개발에서 가장 중요한 개발 분야는 저온활성 촉매와 저압력 손실 필터개발이다. 기존에 개발된 다이옥신 제거 촉매는 주로 질소산화물을 제거하기 위한 SCR용 촉매를 이용하였으나 이의 최적 반응온도가 250 °C 이상으로 촉매필터에 사용되는 부직포의 내열온도를 초과한 것으로 실 공정에서의 사용이 불가능하다. 따라서 poly imide 계열의 부직포의 연속사용 가능 온도인 230 °C 이하의 온도에서 우수한 활성을 보이는 다이옥신 제거 촉매 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 촉매의 산화가 조절을 통한 저온활성이 우수한 (주)매그린의 촉매를 사용하였다[6]. 기존의 여과포는 먼지 집진 후 탈착시 먼지의 유리율이 낮아 여과포에 부하되는 초기압력손실이 지속적으로 증가하며, 이는 잦은 탈진을 유발하게 된다. 따라서 초기압력손실을 작게 유지할 수 있는 촉매개발이 요구된다.

본 논문에서는 poly imide 계열의 상용 부직포에 저온 활성 촉매의 담지 및 전기방사법으로 제조한 나노섬유[7] 부착을 통한 촉매필터 제조와 제조된 촉매필터를 이용한 먼지 및 HVOC (Halogenated Volatile Or-

ganic Compound)에 대한 동시 제거 특성을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 촉매필터 제조

본 연구에 사용된 촉매는 상용화 되어 있는 매그린사의 다이옥신 제거 촉매를 사용하였다. 이 촉매는 WO<sub>3</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>를 기본으로 저온활성을 증진시키기 위하여 촉매의 산화가를 다양론적으로 조절한 촉매이다. 촉매필터의 제조에 사용되는 기존의 촉매 담지방법인 dipping, spray, CVD, PVD 방법은 촉매가 필터 표면에만 담지되기 때문에 가스상물질 제거효율이 감소하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 필터의 내부까지 촉매가 충전되도록 진공-담지법을 이용하였다. 이 방법은 장치의 상단에 촉매와 바인더를 mixing한 슬러지 상태의 촉매용액을 일정량 채우고 하단의 vacuum pump를 이용하여 물리적으로 촉매가 필터를 통과하여 내부까지 침투하도록 하였으며 필터 위에 400 mesh screen을 얹어서 촉매가 필터에 고르게 담지되도록 하였다.

촉매를 담지시키기 위해 사용된 바인더로는 Ludox AS 40을 사용하였다. Ludox는 미국 그레이스사에서 생산하고 (주)유니켈에서 판매하는 매우 작은 실리카 입자로 된 수용성 콜로이드 실리카로 콜로이드의 특성으로 인해 Ludox의 입자들은 특이하게 큰 표면적을 구성하고 있는데 이로 인해 독특한 특성과 폭넓은 용도를 가지고 있다. 이 중에서 특히 Ludox AS는 콜로이드 용액의 안정화를 위해 일반적으로 사용되는 Sodium Hydroxide 대신 Ammonium Hydroxide를 사용하기 때문에 초고온 용도나 촉매용도 같이 Sodium이 적합하지 않는 곳에 사용하는 바인더이다.

촉매가 담지된 필터는 공기중에서 일단 건조시킨 후 oven에 넣어 수분을 증발시켰으며, 이때 담지된 촉매가 조각나는 것을 방지하기 위해 최초 2 °C/min으로 온도를 증가시키며 80 °C에서 3 h 동안 수분을 충분히 건조시킨 후 다시 2 °C/min으로 230 °C까지 올려서 3 h 동안 소성시켰다. 더 많은 촉매를 담지하기 위해서는 코팅의 횟수를 증가시켜야만 하는데 그러기 위해 촉매필터를 oven에서 80 °C로 수분을 건조시킨 후 다시 촉매용액을 만들어 담지과정을 반복하여 마지막에 230 °C에서 소성시켰다.

### 2.2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 촉매필터의 먼지 및 1,2-dicWorobenzene (1,2-DCB) 동시 처리를 위한 두 종류의 반응기를 제작하여 실험하였다. 1,2-DCB 제거효율 평가를 위한 장치는 다음 Figure 1과 같다. 반응장치는 크게 가스 주입부, 반응부, 분석부의 세부분으로 나뉘어져 있다. 반응기에 공급되는 가스는 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>의 각 실린더로부터 MFC (Mass Flow Controller, Brooks Co.)를 사용하여 유량을 공급하였으며, 1,2-DCB는 질소가스를 운송가스로 하여 일정온도에서 기화시켜 사용하였다. 가스 공급관은 전체에 걸쳐 스테인레스 관으로 제조하였으며, 1,2-DCB의 유로 내 흡착을 방지하기 위하여 heating band를 통하여 150 °C로 일정하게 유지하였다. 반응기는 내경 55 mm, 길이 90 cm의 수평형 반응기로서 온도조절은 촉매필터 전단에 설치된 K-type 열전대를 이용한 PID 온도제어기를 이용하여 조절하였다. 반응물의 전환율은 gas chromatography (HP-6890N)를 이용하였으며, 검출기는 염소화합물의 분석이 용이한 전자포획검출기(ECD : Electron Capture Detector, HP)를 사용하였다.

먼지 및 1,2-DCB 동시 처리용 반응장치는 먼지 및 가스 주입부, 탈진 시스템을 갖춘 집진부, 제어부 및 측정부로 구성되어 있다. 가스 주입은 1,2-DCB 평가용 장치와 동일하게 MFC를 이용하여 주입하였으며, 먼지 주입은 Topas 사의 solid disperser (SAG 410)를 이용하여 원하는 농도로 조절하여 주입하였다. 이때 사용된 먼지는 석탄화력발전소에서 배출

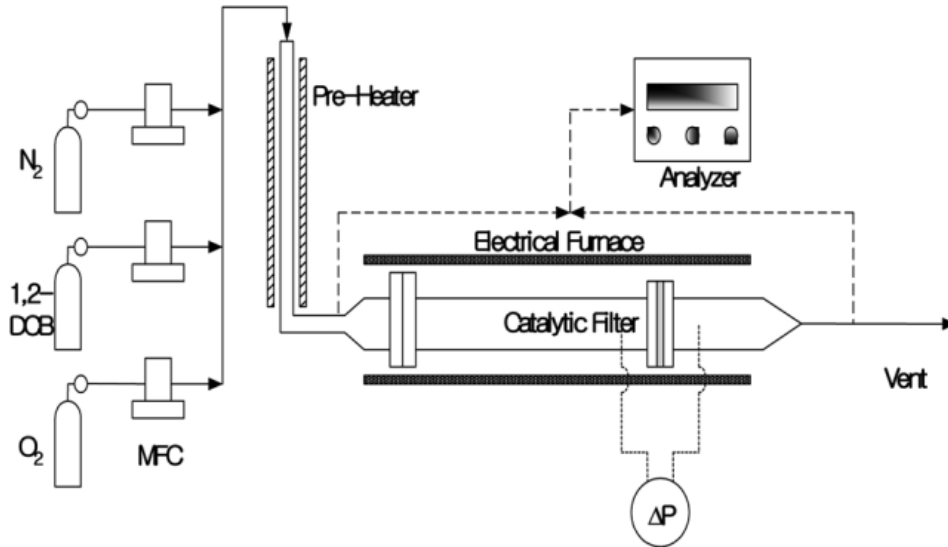


Figure 1. Experimental apparatus for the removal of 1,2-DCB.

된 먼지를 포집한 것으로 주성분은 Si, Al이며 평균입자 크기는  $2.65 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 주 반응기는 공급된 유체와 먼지가 충분히 혼합될 수 있도록 높이 3.5 m, 내경 319 mm의 스테인레스 스틸(sus 316)로 구성되어 있으며, 촉매필터가 설치된 부분은 주 반응기와 수직인 형태로 설치되어 있으며 내경은 129 mm이다. 모든 실험과정에서 필터부의 선속도를 주반응기의 선속도보다 2배 크게 유지함으로써 원하는 농도의 먼지가 필터부로 유입되도록 하였다.

집진 및 탈진 시스템은 실시간으로 압력감소를 측정하는 차압계와 reverse pulse jet 시스템으로 구성되어 있다. 필터 전후단에 부하되는 압력 감소가 미리 설정해 놓은 값(본 연구에서는  $100 \text{ mmH}_2\text{O}$ )에 도달할 경우 제어부에서 solenoid 밸브를 개방함으로써 탈진이 일어나게 된다 (pressure :  $2 \text{ kg/cm}^2$ , pulsing time : 50 ms) 1,2-DCB 제거 효율은 상기의 GC를 이용하였으며, 집진 효율은  $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$  영역의 입자분석에 우수한 성능을 보이는 TSI사의 입도분석기(aerodynamic particle sizer 3010)를 사용하였다. 제어부에서는 시간에 따른 차압 자료를 받아 설정해 놓은 최고 차압에 도달할 경우 탈진을 하는 것과 동시에 시간에 따른 차압의 변화, pulsing interval time, residual pressure drop, 1,2-DCB 및 먼지제거효율을 실시간으로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 촉매필터특성

촉매필터를 이용한 먼지 및 HVOC 제거시 장기간의 사용에 따른 많은 탈진 과정이 수행된다. 따라서 고착된 촉매가 여과포와 강하게 결합될 수 있도록 하여야 하며 본 연구에서는 화학적 바인더를 사용하였다. 또한 사용된 바인더가 촉매 활성점을 막아 촉매활성이 감소하는 것을 최소로 할 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 바인더를 대상으로 촉매필터 제조 및 활성 시험을 수행하였으며, 이러한 바인더 중 Si 계열의 바인더가 우수한 촉매 고착 및 가장 낮은 촉매활성 저하를 보여 촉매필터 제조시 사용한 바인더로 채택하였다.

상기 바인더를 이용하여 제조한 촉매필터의 촉매 고착력을 평가한 자료는 Figure 2와 같다. 실험 조건은 먼속도  $1 \text{ m/min}$ , 탈진압력  $2$

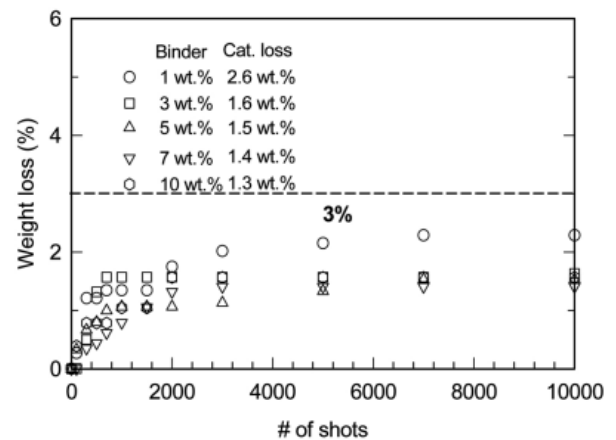


Figure 2. The results of adhesion test of catalytic filter (pulsing pressure:  $2 \text{ kg/cm}^2$ , pulsing interval: 5 sec).

$\text{kg/cm}^2$ , 탈진시간 50 ms, 탈진간격 5 sec로 하여 일정회수의 탈진 후 각 필터의 무게를 측정하는 방법으로 수행하였다. 일반적으로 bag 필터를 사용하는 집진시스템의 경우 탈진 압력이 약  $5 \sim 7 \text{ kg/cm}^2$ 를 나타내나 이는 bag 필터(직경 156 mm, 길이 3000 mm) 전체에 부하되는 압력이며, 본 연구에서는 직경 129 mm의 필터에  $2 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력이 바로 전달됨에 따라 상기 조건이 실공정보다 가혹한 조건임을 알 수 있다. 결과에서 나타난 것과 같이 바인더의 양이 증가함에 따라 고착된 촉매가 탈리되는 양이 감소하였다. 또한 초기 탈진시 상대적으로 결합력이 약한 촉매의 손실이 많고 약 1000회 이상 탈진할 경우 바인더 양이 1 wt.%인 것을 제외하면 더 이상의 촉매 탈리 현상이 일어나지 않았다. 촉매필터의 경우 10000회 탈진할 경우에도 탈리되는 촉매의 양은 2.6%보다 낮은 값을 보였으며 이는 촉매와 필터가 강하게 고착되어 있음을 의미한다.

촉매필터의 사용에 있어 중요한 조인자 중의 하나가 촉매필터에 부하되는 압력손실이다. 초기압력손실이 높을 경우 작업장의 조건에 따라 미리 설정된 최대 압력손실에 빠르게 도달하게 되며 이는 잦은 탈진을 유발한다. 결국 촉매필터의 내구성을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 또

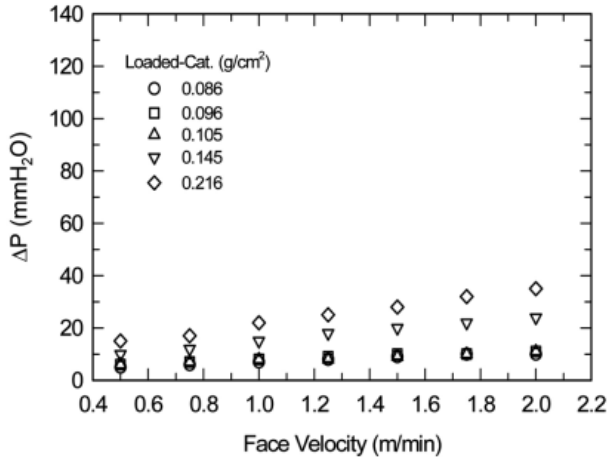


Figure 3. Effect of catalyst loaded on the fiber and face velocity on pressure drop build-up.

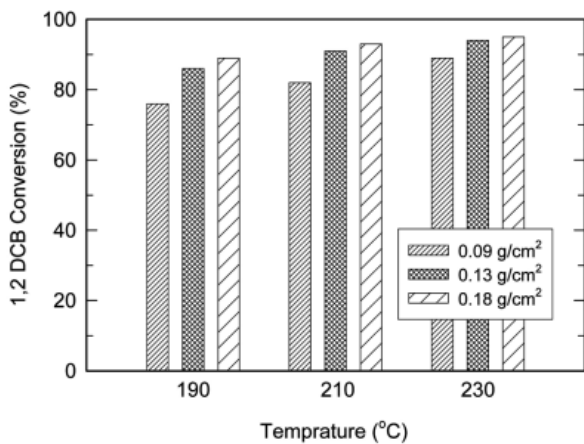


Figure 4. Effect of temperature and the amount of catalyst loading on the removal efficiency of 1,2-DCB (1,2-DCB: 16 ppm, V<sub>f</sub>: 1 m/min).

한 전체적인 운영비의 증가를 가져온다. 촉매필터에 고착된 촉매량을 달리한 필터의 face velocity에 따른 압력손실을 측정하였으며 이에 대한 결과는 Figure 3과 같다. 그림에서와 같이 face velocity와 촉매담지량이 증가함에 따라 압력손실이 증가함을 알 수 있다. 촉매필터에 고착된 촉매의 양이 많거나 일부분에 집중되어 있을 경우 face velocity의 증가에 따라 압력손실은 지수함수적으로 증가한다. 그러나 본 연구에서 제조한 촉매필터의 경우 선형적인 압력손실 증가를 보이고 있다. 이것은 촉매가 필터의 단섬유에 고르게 고착되어 있다는 것을 반증하는 자료이다.

### 3.2. 1,2-Dichlorobenzene 제거

촉매필터를 이용한 1,2-DCB 제거 효율에 가장 큰 영향을 미치는 중요 변수는 촉매 담지량과 반응온도이다. 다음 Figure 4는 이러한 변수에 대한 1,2-DCB 제거효율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 온도와 촉매담지량이 증가할수록 반응효율이 증가함을 알 수 있다. 반응효율은 고정층 반응기에서의 결과에 비해 약 7~8% 낮은 값을 보이고 있다. 그러나 촉매필터의 두께가 2.3 mm로 작아 촉매와 반응물과의 표면적인 기-고 접촉시간을 비교해 보면 촉매필터의 경우가 약 1/10로 작게 나타난다. 그럼에도 불구하고 전체온도 범위에서 80% 이상의 우수한 전환율을 보였다. 이는 촉매필터의 모재인 필터(P-84)의 랜덤한 경로 구성으로 표면적

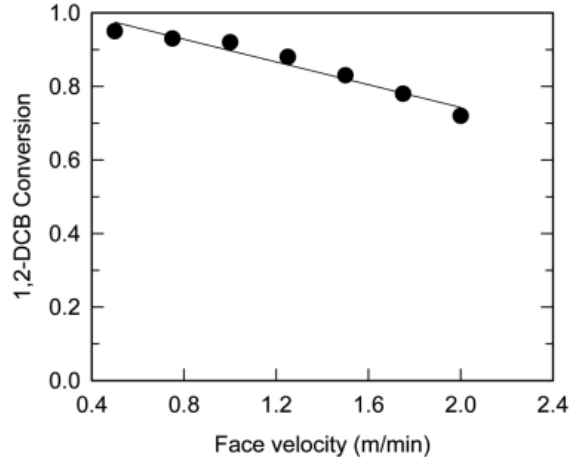


Figure 5. Effect of face velocity on 1,2-DCB removal efficiency of catalytic filter at 210 °C.

인 기-고 접촉시간보다 실제 기-고 접촉시간이 크다는 것을 의미하며, 반응물이 미세한 이동경로들 통해 촉매와 접촉하므로 외부물질전달 저항이 존재하지 않기 때문으로 사료된다.

촉매필터는 촉매의 부피를 기준으로 한 공간속도를 고려하는 다른 반응시스템과는 달리 필터면에 부하되는 유체의 면속도를 기준으로 한다. 동일조건에서 면속도를 크게 할 수 있는 것은 주어진 반응시스템에서 사용되는 필터의 양이 작다는 것을 의미한다. 따라서 가능한 조건에서 면속도를 크게 하는 것이 유리하나 큰 면속도는 압력손실의 증가를 가져오기 때문에 최적 면속도가 존재한다. 현재 상용화되어 있는 공정의 면속도는 대부분 0.6~1.0 m/min로 조업되고 있으며, 촉매필터 분야에서 가장 선도적인 연구를 수행하고 있는 GORE 사의 경우 약 0.6 m/min의 면속도에서 조업을 하고 있다. Figure 5는 210 °C, 촉매 담지량 0.18 g/cm<sup>2</sup>인 조건에서 면속도에 따른 1,2-DCB 전환율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 면속도가 증가함에 따라 선형적으로 전환율이 감소함을 알 수 있다. 이는 면속도가 증가할수록 상대적인 기-고 접촉시간이 감소함에 따라 나타나는 현상이다. 상기의 결과와 Figure 3의 압력손실을 고려해 보면 면속도를 작게 하는 것이 높은 전환율을 얻을 수 있으나 많은 필터가 필요하고 이에 따른 bag house의 크기 역시 증가한다. 이것은 촉매필터의 장점 중의 하나인 설치공간의 축소에 배치되는 결과이다. 본 연구결과에서는 1,2-DCB 전환율 90% 이상, 압력손실 20 mmH<sub>2</sub>O 이하인 1 m/min의 면속도가 최적조건으로 판단되며 향후 연구는 이러한 면속도를 기준으로 수행하였다.

### 3.3. 먼지제거특성

필터를 이용한 먼지 제거는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼지의 여과가 진행되는 동안 필터 위에 고체상의 입자가 계속 쌓여 분진층이 형성되고 형성된 분진층은 또 다른 입자와 고정층을 이룸으로써 추가적인 여과기능을 수행한다. 일정한 정도의 여과가 진행됨에 따라 필터의 고유 특성을 넘어 오히려 분진층이 여과 공정 전체를 지배하는 분진여과(dust cake filtration)효과가 나타난다. 분진층은 궁극적인 분진 여과 성능을 좌우하며 필터의 구조, 분진의 특성(크기, 형태, 입자간의 상호작용), 여과 운전조건(여과속도, 분진농도, 여과온도) 등에 의해 영향을 받는다. 특히 필터의 표면구조나 기공크기는 여과 초기 단계의 분진층의 구조를 결정하며, 초기 분진층은 여과가 진행됨에 따라 뒤이은 분진층 형성 및 여과 메커니즘에 영향을 끼치므로 궁극적으로는 처음 필터의 구조가 분진여과 과정

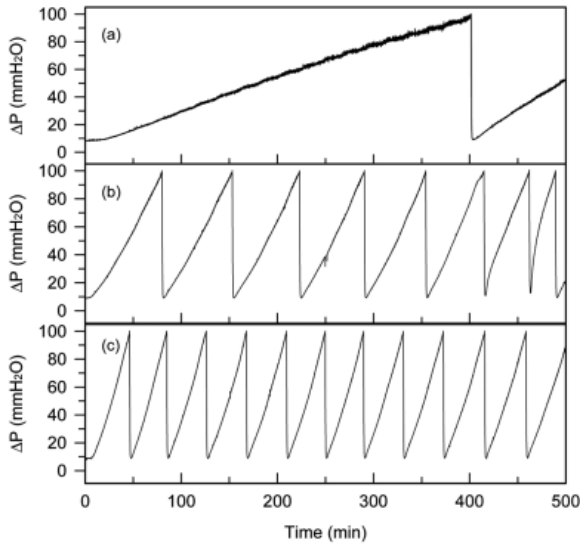


Figure 6. The change of pressure drop build-up of virgin filter as a function of time (temp. : 210 °C,  $V_f$  : 1.0 m/min, dust conc. ( $\text{g}/\text{Nm}^3$ ) : (a) 10, (b) 20, (c) 30).

을 지배하는 요인이 된다[8,9]. 본 연구에서는 촉매필터의 여과특성을 파악하기 위하여 먼지 제거 시 시간에 따른 압력변화, cleaning time interval, residual pressure drop을 virgin 필터와 2종류의 촉매필터에(촉매 + 필터, 나노섬유 + 촉매 + 필터) 대하여 먼지 농도 및 여과속도를 달리하여 측정하였다.

다음 Figure 6은 virgin 필터에 대한 시간에 따른 압력손실 변화를 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 최대 압력손실을 100 mmH<sub>2</sub>O로 하였으며, 실험 측정시간은 500 min으로 하였다. virgin 필터의 초기 압력손실은 여과속도 1 m/min에서 약 7~9 mmH<sub>2</sub>O로 나타났으며 시간에 따라 압력손실이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 투입되는 먼지 농도를 증가시키기에 따라 최대 압력손실에 도달하는 시간이 급격히 감소하여 잦은 탈진을 수행하였다. 배가스에 함유된 분진 농도는 분진층의 형성속도 및 분진층의 형성구조와 관련하여 분진층의 모세관 분포 및 공극률에도 영향을 준다. 따라서 분진농도가 증가함에 따라 필터 표면에 생성되는 분진층의 속도가 증가하고 필터 표면에 생성된 분진층이 계속해서 유입되는 분진에 의해 밀도가 증가하는 현상을 보인 것으로 사료된다. 즉 유입되는 분진의 양이 많을수록 분진간의 인력에 의해 가교를 형성하며 이는 압력손실을 빠르게 증가시키는 요인으로 작용한다.

탈진 후 필터에 존재하는 잔류압력손실도 필터의 성능을 평가하는 기준 중 하나이다. 잔류압력손실이 작다는 것은 먼지 여과시 필터 내부에 침투하여 탈진시 유리되지 않는 먼지양이 작다는 것을 의미하며 이것은 장기간 사용에 있어 필터의 수명이 증대되는 효과를 가져온다. 잔류 압력손실의 경우 시간에 따라 약간 증가하는 경향을 보였으나 먼지 농도의 변화에 대해서는 상관관계가 나타나지 않았다.

다음 Figure 7은 상용필터에 촉매만(P-84 + 촉매) 담지시켜 상기와 동일한 실험을 한 결과이다. 촉매가 담지됨에 따라 필터의 기공이 상대적으로 감소하여 virgin 필터보다 설정해 놓은 최고 압력에 도달하는 시간이 빠르며 탈진 주기도 잦음을 알 수 있다. Figure 8은 동일한 실험조건에서 상기 Figure 7의 촉매필터 전단에 나노섬유를 부착한 필터에 대한 시간에 따른 압력손실의 변화를 나타낸 그림이다. 촉매필터의 초기 압력감소는 약 25~30 mmH<sub>2</sub>O 정도로 virgin 필터보다 약 3~4배 크게 나타난다. 따라서 동일한 최대 압력손실에 도달하는 시간은 촉매필터가 더

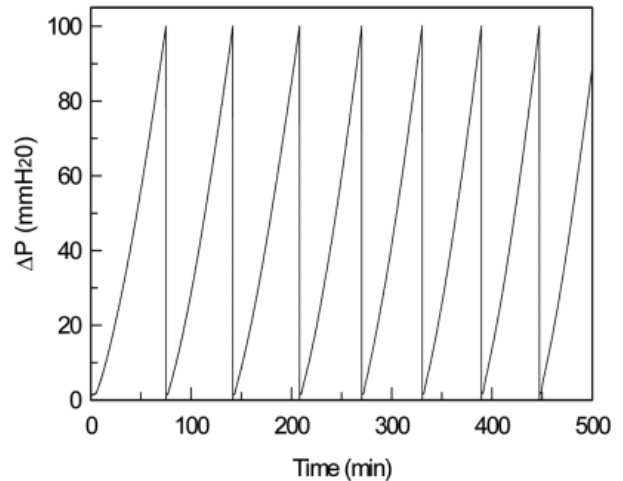


Figure 7. The change of pressure drop build-up of catalytic filter (filter + catalyst) as a function of time (temp. : 210 °C,  $V_f$  : 1.0 m/min, dust conc. 20  $\text{g}/\text{Nm}^3$ ).

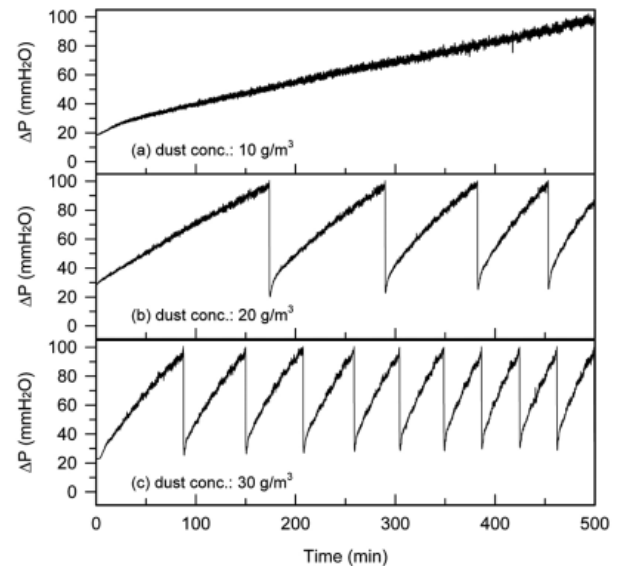


Figure 8. The change of pressure drop build-up of catalytic filter (nano-fiber + filter + catalyst) as a function of time (temp. : 210 °C,  $V_f$  : 1.0 m/min).

작게 나타날 것으로 예측할 수 있다. 그러나 결과에서와 같이 최대 압력손실인 100 mmH<sub>2</sub>O에 도달하는 시간은 촉매필터의 경우가 더 긴 것으로 나타났다.

이것은 촉매필터의 표면 구조에 기인한 것으로 촉매필터 전단에 설치된 멤브레인의 특성상 먼지를 잘 미끄러뜨리며 이는 분진층이 생성되는 현상을 저해한다. 즉 분진층이 형성된 후 이 분진층이 시간에 따라 더 dense해지는 것에 의해 압력감소가 증가하나 촉매필터의 경우 생성된 분진층들이 떨어져나가기 쉬워 virgin 필터보다 낮은 압력손실 값을 보이는 것으로 예측된다.

Figure 9는 위의 세 가지 필터에 대한 먼지 제거 효율을 나타낸 것이다. 집진효율은 촉매필터 (나노섬유 + 촉매 + 필터) > virgin 필터 > 촉매필터 (촉매 + 필터) > virgin 필터순으로 나타났다. virgin 필터가 가장 낮은 집진효율을 보일 것으로 예상되었으나 촉매만 담지한 경우가 가장

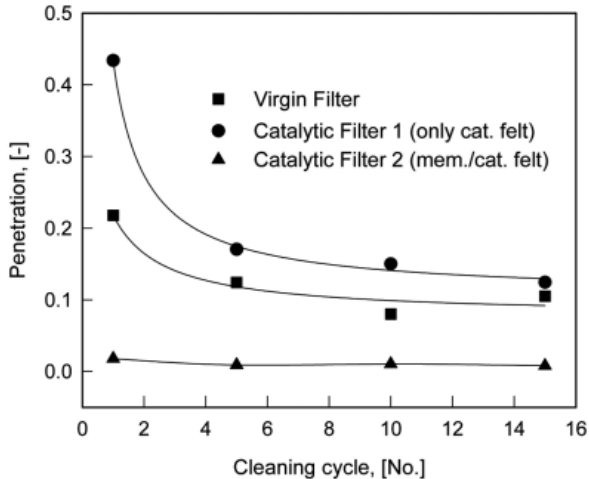


Figure 9. Dust removal efficiency of filters.

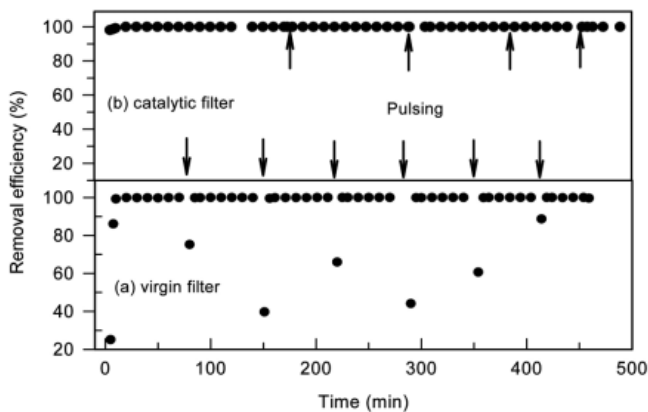


Figure 10. The change of dust removal efficiency as a function of time (temp: 210 °C, dust: 20 g/Nm<sup>3</sup>).

낮은 집진효율을 보였다. 촉매와 필터만이 존재하는 촉매필터의 경우 초기압력감소 값이 크고, 주어진 최대압력감소값까지 도달하는 시간이 짧아 충분한 분진층을 형성하지 못하기 때문에 사료된다. 나노섬유로 전단에 멤브레인 층을 형성한 경우 99.98% 이상의 가장 우수한 집진효율을 보였다. 따라서 먼지에 의한 촉매의 피독 방지와 집진 효율을 증대를 위해서는 전단에 반드시 먼지를 제거할 수 있는 멤브레인층을 두어야 하며 이는 Figure 8과 같이 탈진간격의 증가를 부가적으로 얻을 수 있다.

각 공정에서 설정해 놓은 최대 압력손실에 도달하면 필터 표면에 부착된 먼지층을 제거하기 위하여 reverse pulse jet에 의한 탈진 작업을 수행하게 된다. 탈진압력 및 cleaning 시간은 사용되는 필터의 재질, 제거되는 입자의 특성에 따라 달라지나 통상 5~7 kg/cm<sup>2</sup>를 사용한다. 이러한 고압가스에 의한 탈진시 먼지층의 탈진 외에 필터 기공의 확장 및 필터 전단에 큰 압력차가 존재한다. 따라서 탈진 후에 부유되어 있는 분진과 유입되는 분진이 빠른 속도로 필터를 통과하게 되며, 이에 따라 탈진 후 먼지 제거 효율이 급격히 감소하게 된다. 본 연구에서는 virgin 필터와 촉매

필터에 대하여 시간에 따른 집진 효율을 실시간으로 측정하였으며, 탈진의 영향을 알아보기 위하여 각 탈진이 수행된 후 5 sec 후에 집진효율을 측정하였다. 이에 대한 결과는 Figure 10과 같다. Virgin 필터의 경우 상기에서 언급한 것과 같이 탈진 후에 급격한 집진효율 감소를 보이고 있다. 촉매필터의 경우는 탈진에 의한 집진효율 감소는 보이지 않고 있다. 이는 촉매필터 전단에 부착된 멤브레인이 많은 작은 기공을 가지고 있으며, 필터에 비해 신축성이 뛰어나 탈진시 기공의 팽창이 virgin 필터보다 작고 팽창 후 수축이 빠르기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

소각로에서 발생하는 먼지 및 HVOC를 동시에 제거하기 위한 저온 나노촉매 담지 나노섬유 촉매필터 개발에 관한 연구를 수행하였으며, 촉매 담지량, 반응온도, 면속도, 먼지농도 등 다양한 변수 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 진공-담지방법을 이용하여 촉매가 필터내부에 고르게 분포될 수 있도록 제조하였으며, 10000회의 탈진 시험결과 촉매 탈리량이 3% 이하로 낮게 나타났다. 촉매필터 전반에 부하되는 압력 감소는 촉매담지량과 면속도 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 1,2-DCB 전환율은 온도가 증가하고 촉매담지량이 증가할수록 증가하였으나, 고정층 시험 결과보다는 약 6~7% 작게 나타났다. 촉매필터의 두께는 2 mm 전후로 촉매반응에 필요한 기-고 접촉시간이 고정층 반응기에 비해 1/10로 작음에도 불구하고 거의 유사한 전환율을 보인 것은 촉매필터의 우수한 물질전달 효과 때문으로 판단된다. 전단에 나노섬유가 부착된 촉매필터의 경우 나노섬유의 미끄럼특성에 의해 압력감소 생성 시간이 감소하였으며, 탈진시 집진효율의 변화가 나타나지 않았다. 본 연구에서 제조된 촉매필터는 여과속도 1 m/min, 온도 210 °C 이상에서 90% 이상의 1,2-DCB 제거 효율과 99.98% 이상의 높은 집진효율을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

1. Environmental White Book of 2007 Published by MOE, Ministry of Environment (2007).
2. J. L. Bonte, K. J. Fritsky, M. A. Plinke, and M. Wilken, *Waste Management*, **22**, 421 (2002).
3. G. Saracco and V. Specchia, *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 897 (2000).
4. J. Carno, M. Berg, and S. Jaras, *Fuel*, **75**, 959 (1996).
5. G. F. Weber, G. E. Duhan, D. L. Laudal, S. R. Ness, and G. L. Schelkoph, DOE Report, DE-AC22-90PC90361, Aug. (1994).
6. J. Y. Lee, Ph. D. Dissertation, Korea University, Seoul, Korea (2003).
7. H. S. Park and Y. O. Park, *Korean J. of Chem. Eng.*, **22**, 165 (2005).
8. G. Saracco and M. Laura, *Ind. & Res. Chem. Eng.*, **34**, 1471 (1995).
9. S. H. Lee, K. M. Lee, and Y. M. Jo, *J. Korean Soc. for Atm. Environ.* **20**, 371 (2004).