

TiO₂ 담지 세라믹 필터를 활용한 아세톤 제어에 관한 연구

Reduction of Gaseous Acetone by using TiO₂ Coated Woven Filters

윤정호 · 박덕신¹⁾ · 이주열¹⁾ · 조영민*
경희대학교 환경응용화학부, ¹⁾한국철도기술연구원
(2002년 10월 16일 접수, 2002년 12월 26일 채택)

Jung-ho Yun, Duck-shin Park¹⁾, Ju-yeol Lee¹⁾ and Young-min Jo*
Department of Environmental Science and Engineering, Kyunghee University
¹⁾*Korean Railroad Research Institute*

(Received 16 October 2002, accepted 26 December 2002)

Abstract

A new type of catalytic filters has been developed in this work. A porous photocatalytic filter was prepared by coating the titania (anatase phase) powder onto the woven metal mesh. The coating sol was prepared with unique cera-mic binder, and would assist drying condition and enhance the mechanical strength of the final ceramic filters. As a result of the test for acetone decomposition, it was found to be quite effective for the photocatalytic reaction as good as conventional glass reactors which were coated inside. The present filter type reactor is expected as one of plausible devices for the simultaneous treatment of gas-particulate materials.

Key words : Titania, Dip-coating, Photocatalytic filter, Simultaneous treatment, Acetone

1. 서 론

산업현장에서 배출되는 기상 유기화합물은 대개 유량이 크고, 농도가 낮기 때문에 기존의 제거기술로 처리하기에는 비경제적이다. 이에 광촉매를 이용한 고급산화공정 (Advanced Oxidation Process)은 기존에 이용되고 있는 흡착법, 고온 소각법에 비해 경제성, 다양한 적용가능성, 그리고 환경 친화적인 면에서 우수성이 인정되어 큰 주목을 받고 있다(하진욱, 2001). 특히 광촉매 산화공정은 별다른 장치, 시

설 없이 자외선 조사만으로 이용이 가능하므로 대상물질 (contaminated materials) 및 적용처에 따라 다양한 형태의 반응기가 제작되어 활발하게 연구개발되고 있다. 광촉매 반응기는 기본적으로 운전방식에 따라 연속식, 회분식으로 나뉘고, 처리대상물질의 상태 (phase)에 따라서도 다양하게 분류될 수 있다. 그러나 의심할 여지없이 광촉매 반응기의 분류에 있어서 가장 중요한 요소는 자외선 광원부와 광촉매 반응부의 위치를 고려한 광촉매 반응기의 형태에 있다. 반응기의 형태가 중요한 이유는 반응기의 운전 가능성 뿐만 아니라 반응효율을 결정짓는데 중요한 역할을 하기 때문이다 (Schiavello, 1997).

초기 광촉매 반응기는 광촉매 입자를 직접 반응

* Corresponding author
Tel : +82-(0)31-201-2485, E-mail : ymjo@khu.ac.kr

기 내에 투입한 것들로서 유동화 반응기 형태가 많았으나, 광촉매 재회수의 어려움으로 인하여 점차적으로 광촉매를 고정화시킨 형태로 연구개발 되어왔다. 가장 일반적인 반응기 형태로서, Alberici and Jardim(1997)은 실린더 형태의 pyrex 반응기 내벽에 광촉매를 코팅하였으며, 반응기 중앙에 자외선 램프를 장착한 annular plug flow 반응기를 제작하였다. 그 외 광촉매가 코팅된 honeycomb이나 optical fiber, glass fiber 등을 이용한 반응기 등이 연구 개발되고 있다(Choi *et al.*, 2001; You *et al.*, 2001; Sauer, 1994). 공통적으로 이들 반응기들은 지지체에 광촉매를 고정화한 것으로서, 유동화 반응기 형태에 비하여 운전이 용이하며, 광촉매를 재회수해야 하는 어려움이 없다. 그러나 기본적으로 광촉매의 고정화는 외력에 의해 쉽게 떨어지지 않을 만큼의 견고한 부착강도 확보와 광촉매 반응을 위한 충분한 표면적 제공을 동시에 만족시켜야 한다. 이는 광촉매와 지지체의 특성을 고려한 적절한 바인더(binder)의 개발을 필요로 한다.

본 연구에서는 가스상 물질 제거만을 목적으로 하는 기존의 기상 광촉매 반응기와 달리 필터 형태의 반응기를 제작함으로써, 가스상 물질뿐만 아니라 궁극적으로 mist, 분진 등의 입자상 물질까지 동시에 제거가 가능한 광촉매 반응기 제작을 목적으로 하였다. 광촉매 반응기에 장착되는 필터는 stainless steel mesh에 TiO₂ 광촉매를 코팅함으로써 준비하였다. 기체상 아세톤(C₃H₆O)을 선정하여, 필터형 광촉매 반응기의 성능을 평가하였다. 아세톤은 다양한 공정에서 폭넓게 사용되는 휘발성유기화합물 가운데 하나로서, 중간생성물(intermediate)을 거의 발생시키지 않고 분해가 이루어지기 때문에, 광촉매에 의한 분해효과를 명확하게 관찰할 수 있어 광촉매 반응의 기초 실험에 많이 이용되고 있다(Choi *et al.*, 2001).

2. 실험

2.1 필터 제작

본 연구에서 사용된 광촉매는 P-25 TiO₂ (Degussa co.)로서 80% 정도가 anatase 상이며, 제조시의 비표면적은 약 50 m²/g이고, 입자의 직경이 ~30 nm로 알

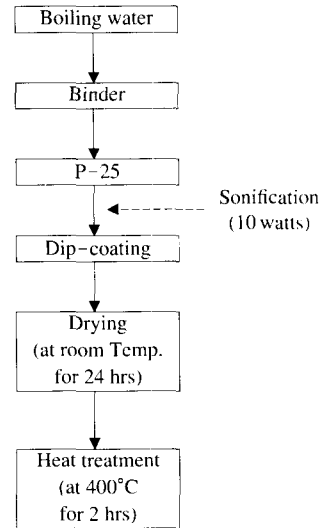


Fig. 1. Flow diagram of the filter preparation.

려져 있다. 촉매상 필터의 제조법은 그림 1과 같다. 수용액 상태에서의 P-25 입자는 입자간의 응집 현상으로 인하여 2.4 μm 정도로 측정 (Mastersizer-S, Malvern co.)되는데, 코팅용 슬러리 제조시 입자들의 원활한 분산을 위하여 초음파를 조사하였다. 바인더는 에폭시 계열의 유기물질과 Si 계열의 무기물질을 혼합하여 제조하였으며, 1.6~3.6 wt.% 정도 첨가하였다. 지지체는 stainless steel mesh (#100)를 이용하였으며, 코팅 전 지지체 표면에 부착된 이물질 제거를 위하여 산세척 작업을 수행하였다(Jo, 1996). 산세척한 지지체는 코팅용 슬러리에 1~3회 정도 반복 dip-coating을 실시한 후, 실온에서 24시간 건조시키고, 400°C에서 2시간 동안 열처리하였다.

2.2 광촉매 필터 특성

필터 샘플은 바인더의 첨가량과 코팅횟수에 따라 다양하게 제조하였다. 필터 코팅막의 두께, 입자의 크기 및 입자의 형상, 기공구조는 SEM을 이용하여 관찰하였다. 코팅막의 결정상(crystal phase)은 코팅용 슬러리를 상온에서 건조시키고 필터 제작시와 동일한 조건 하에서 열처리한 후, XRD를 이용하여 분석하였다. TiO₂ 광촉매의 코팅량(loading %)은 코팅 전, 후의 무게 측정을 통하여 결정하였다. 필터의 압력강하는 필터의 특성뿐 아니라 성능과 밀접한

관련이 있는데, 유속의 변화에 따른 필터차압을 측정하였다. 그리고 코팅막의 밀착력 평가는 대표적인

정성적 밀착력 측정법인 연필경도 실험을 이용하였다. 1H~5H의 경도를 갖는 연필심을 이용하여 필터의 코팅층을 스크래치해줌으로써 코팅층의 밀착력을 평가하는 방법이다.

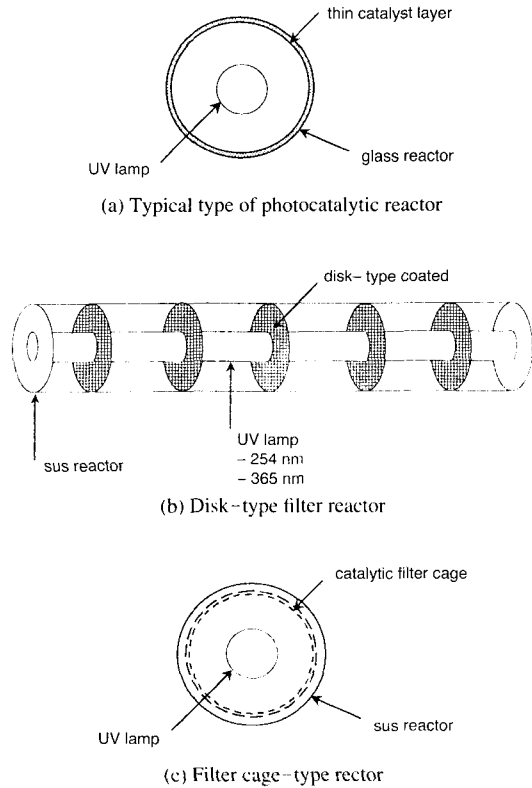


Fig. 2. Schematic description of photocatalytic reactors.

2.3 반응기

본 연구에 이용된 반응기는 기본적으로 annular plug flow 방식이며, 외관(outer shell)은 sus 재질의 tube(직경 40 mm × 길이 275 mm)로 되어 있다. 자외선 램프는 양끝의 teflon 지지대를 이용하여 반응기의 중앙에 고정시켰으며, 가스가 새어나가지 않도록 O-ring과 Schott (GL32, max 200°C)으로 밀폐시켰다. 광원은 16 W, 254 nm의 Germicidal lamp (G10T5L, Lighttech co.)와 8 W, 365 nm의 Black light blue lamp (TL 8W/05, Philips co.)를 사용하였다. 실험에서 사용한 반응기의 세부적인 형태는 그림 2와 같으며, 외관 내벽에 광촉매를 직접 코팅한 형태(그림 2(a))와 disk 형태로 제조한 필터(그림 2(b)), 그리고 cage 형태로 제조한 필터(그림 2(c))를 장착한 것들로, 모두 3가지이다. 특히, 광촉매 필터를 장착한 스테인레스 반응기(그림 2(b))의 내벽은 표면광택처리를 해 줌으로써, 반응기 내에서 자외선의 반사율을 높여, 광촉매 필터표면에 자외선이 원활하게 조사되도록 하였다.

2.4 실험 방법

본 연구에 적용한 광촉매 반응 시스템은 그림 3

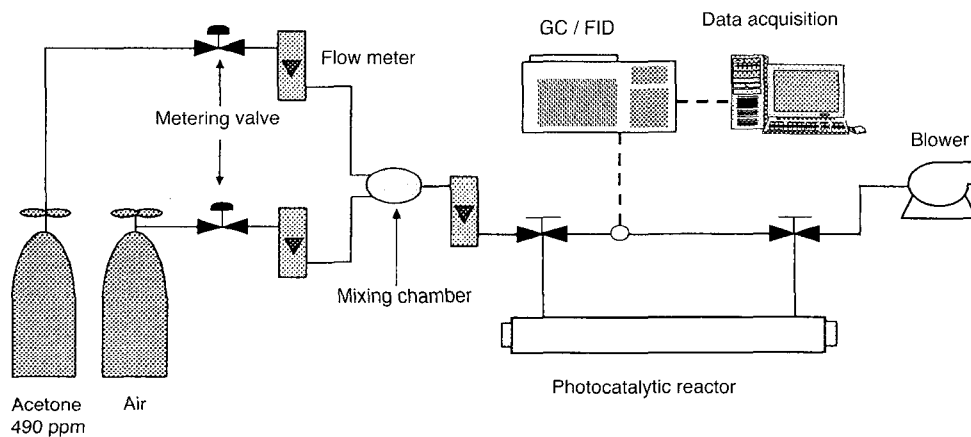


Fig. 3. Experimental set-up for the photocatalytic reaction of acetone decomposition.

Table 1. Experimental conditions for the reaction.

Experimental conditions	
flowrate (l/min)	1.2
temperature (°C)	40 ~ 60
light source (nm)	254, 365
reactor type	annular, disk, cage
gas concentration (ppm)	120, 245, 370

과 같다. 실험용 가스는 490 ppm으로 제조된 아세톤 표준가스 (air balance)를 air로 희석하여 사용하였으며, 가스의 유량은 metering valve (Parker co.)를 이용하여 조절하였다. 가스의 분석은 GC-FID (DS-6200, Donam co.)를 사용하였고, AT-5 capillary column (L: 25 m, ID: 0.25 mm, T: 0.2 μm, Alltech co.)을 장착하였다. 아세톤 가스는 mixing chamber를 통과시켜 농도가 일정하게 유지되도록 하였으며, 반응기의 주입부와 출구부 농도를 비교하여 아세톤 농도의 안정화 여부를 판단하였는데, 전체적으로 가스 주입 40분 경과 후에 일정하게 유지되었다. 아세톤 농도의 안정화를 확인한 후 자외선 램프를 작동시켰고, 반응 초기 20분간은 광촉매 반응이 급속히 일어나기 때문에 매 1분, 2분, 3분 간격으로 분석하였으며, 이후 5분, 10분 간격으로 분석하였다. 실험조건을 표 1에 요약하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 광촉매 필터의 특성

그림 4는 광촉매 필터의 표면을 SEM을 이용하여 관찰한 것이다. 관찰 결과 광촉매 입자들이 mesh의 wire 표면과 체눈 (aperture)부분에 고르게 코팅되어 있었으며, mesh의 체눈은 그림 5 (필터 단면, 필터의 두께)에서 볼 수 있는 바와 같이 광촉매 입자들이 충전된 고정층 상태를 이루고 있으므로 대상 가스가 충분히 반응할 수 있도록 접촉면적과 체류 시간을 제공해 줄 것으로 판단된다. 이때, TiO₂ 광촉매 코팅층의 두께는 70 μm였다. 코팅 슬러리를 열처리한 후 XRD 분석을 한 결과 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 상당한 양의 anatase와 약간의 rutile 상이 관찰되었다 (Poster *et al.*, 1999). 코팅용 슬러리의 성분 중 하나인 SiO₂는 극히 적은 양으로 존재하며, 비정질이므로 눈에 띄는 peak가 관찰되지 않

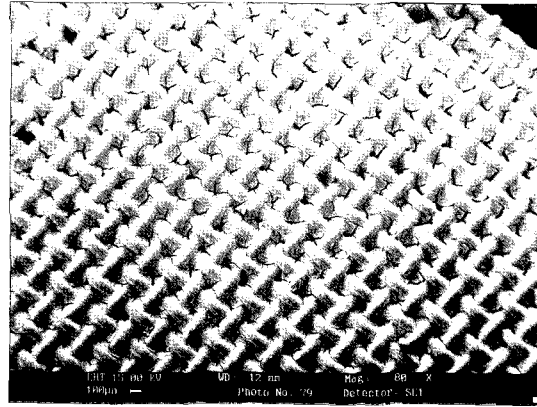


Fig. 4. SEM image of P-25 coated filter surface.

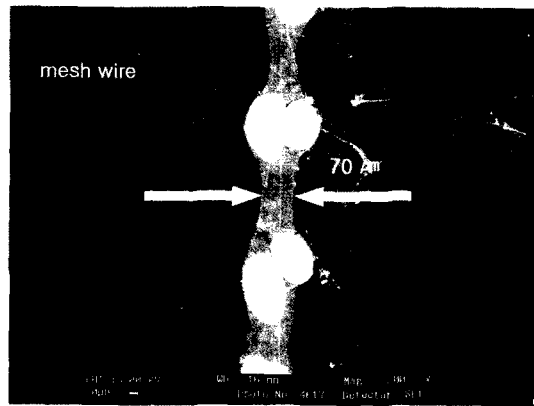


Fig. 5. Cross section of the filter medium.

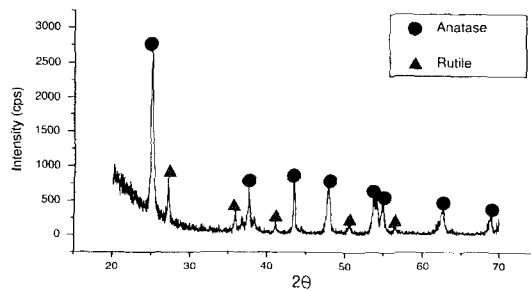


Fig. 6. XRD pattern of coating slurry.

았다. 따라서 코팅 보조제로 첨가된 실리카 성분은 특별한 화학적인 결합없이 광촉매 입자를 고정화시

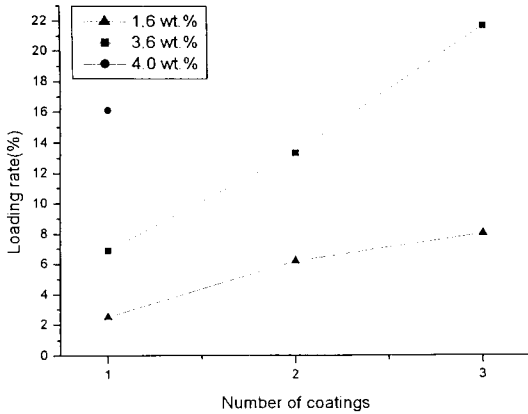


Fig. 7. TiO₂ loading with the number of coating times.

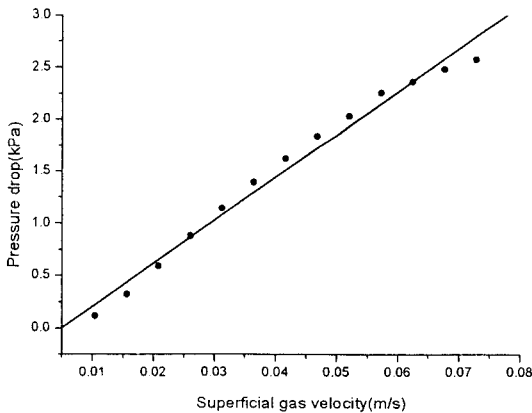


Fig. 8. Pressure drop of the completed filter with superficial gas velocity.

키기 위한 바인더의 역할만을 했을 것으로 판단된다 (조성민 등, 2000).

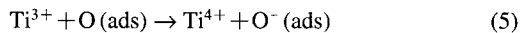
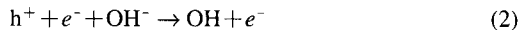
바인더의 첨가량과 코팅 횟수에 따른 TiO₂ 광촉매의 도포량 (loading %)은 바인더의 첨가량과 코팅 횟수에 비례하여 나타났다 (그림 7). 바인더를 1.6 wt.% 첨가했을 때, 도포량이 상대적으로 매우 적게 나타났으며, 4.0 wt.% 첨가했을 경우는 1회 코팅만으로도 지지체 표면에 과잉의 광촉매 분말이 잔존하였고, 자연 건조만으로도 균열이 발생하여 1회 이상 반복 코팅하는 것이 무의미하였다. 3.6 wt.%의 바인더를 첨가하였을 경우, 지지체의 단위무게 당 20% 이상의 도포량을 보였으며, 연필 경도 실험 결과 상

대적으로 우수한 코팅 상태 (5H)를 나타냈다. 그림 8은 유속 변화에 따른 필터의 압력강하를 측정하는 것으로서, 유속이 증가함에 따라 압력강하가 비례적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 샘플 필터가 입자층을 이루며, 다공성 구조를 갖는 필터임을 나타내는 결과로써, 가스 및 입자상 물질을 동시에 처리하는데 적합한 필터의 구조라고 판단된다.

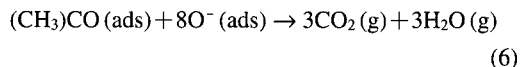
3. 2 광촉매 반응

3. 2. 1 반응기 형태에 따른 아세톤 광분해 전환율

본 연구에서 실험한 기상 아세톤은 광촉매 반응을 하게 될 경우, 완전 산화반응이 일어나게 되므로, 대부분 CO₂와 H₂O로 전환된다. 따라서 중간생성물이 거의 검출되지 않는 것으로 보고되고 있다 (Choi et al., 2001; Vorontsov et al., 1997). 여기서, 아세톤의 광촉매 산화반응은 다음과 같은 반응 경로를 거친다고 알려져 있다.



반응식 (6)에 의하면, 반응 물질 가운데 O⁻ (ads)는 흡착된 아세톤과 함께 대부분 반응할 수 있다.



여기서 점선의 화살표는 완전산화가 몇 단계에 걸쳐서 일어남을 의미한다. 그리고 물은 산소 분자와 달리 아세톤의 광산화 반응에 있어서 반작용역할을 하게 되는데, 이는 물이 아세톤과 경쟁적으로 광촉매에 흡착함으로써 광촉매 산화반응을 방해하기 때문이다 (Mazzawi et al., 2000). 또한 이상현 등 (2000)은 Degussa P-25 광촉매를 사용해서 산소의 공급 유무에 따른 아세톤 분해 반응실험을 하였는데, 산소 없이는 광촉매 반응이 진행되지 않는다는 결과를 얻었다. 마찬가지로, 위의 반응식 (6)에서도 알 수 있듯이 산소가 광촉매 산화반응에 영향을 미치는 중요한 인자임을 확인할 수 있다. 본 실험에서 사용한 아세톤 표준가스 (490 ppm)는 air balance로 제조된 것이므로, 별도의 산소 공급 없이도 광촉매

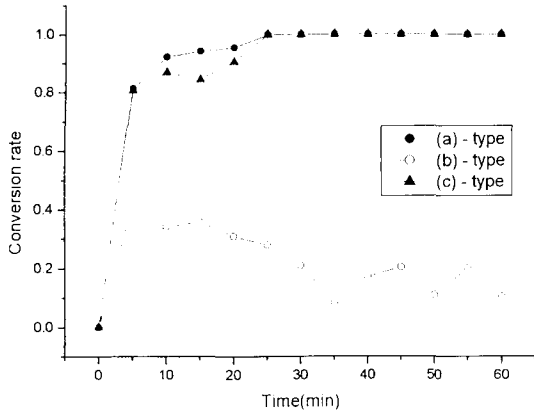


Fig. 9. Conversion rate of acetone depending on reactor type.

산화반응이 원활하게 일어나는 결과를 얻을 수 있었다.

그림 2에 도시한 바와 같이 다양한 반응기를 사용하여 아세톤 광분해 전환율을 고찰한 결과를 그림 9에 나타냈다. 반응기 내벽에 TiO₂ 광촉매를 코팅한 (a)-type의 반응기와 cage 형태의 광촉매 필터를 장착한 (c)-type의 경우 반응시작 20분 이후부터는 대부분의 아세톤이 분해되었다. 반면, disk 형태의 광촉매 필터를 장착한 (b)-type의 경우는 반응 초기에는 0.4 정도의 전환율을 보였으나, 이후 전환율이 현저하게 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같이 (b)-type의 반응기가 (a)-type과 (c)-type에 비하여 낮은 전환율을 나타내는 원인은 첫째, 다른 반응기들에 비해 코팅된 광촉매의 담지량이 적고, 대상가스와 필터와의 접촉면적이 작았기 때문으로 판단되며, 둘째로, 아세톤 가스가 과량 흡착됨으로써 촉매표면의 활성 영역이 오염(fouling)되었기 때문이라고 사료된다. (b)-type은 disk 형태의 광촉매 필터를 자외선 램프에 직접 끼워서 고정한 것인데, 이때 고정된 필터와 램프사이에서 생긴 약간의 틈으로 아세톤 가스가 순간, 집중적으로 통과됨으로써 필터의 가장자리 부분에 과량 흡착되어 광촉매 분해반응이 일어나기도 전에 광촉매 표면의 활성 영역을 점유하기 때문이다. 실제 실험에 있어서도 사용한 필터를 관찰한 결과 필터의 가장자리 부분이 황변(yellowing)되어 있었으며, 이를 통해 (b)-type

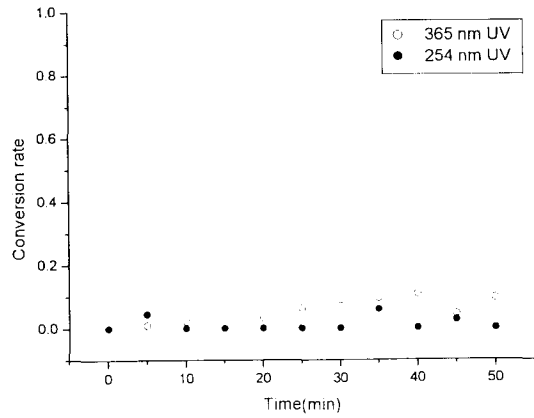


Fig. 10. Illumination of UV without TiO₂ coating.

필터의 deactivation이 촉매 활성 영역의 오염(fouling)에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

3.2.2 자외선 광원과 유입 농도에 따른 광촉매 필터의 아세톤 광분해 전환율

(a)-type의 반응기는 반응기 내벽에 광촉매가 코팅된 것으로서, 대부분의 기상 광촉매 반응기와 비슷하다. 따라서 기존의 기상 광촉매 반응기의 효율을 만족시키면서도 입자상 오염물질의 제거가 동시에 가능한 필터 구조의 (c)-type 광촉매 반응기에 대하여 집중적으로 실험하였다. 우선, blank 실험으로서 광촉매 필터를 장착하지 않은 상태에서 자외선만 조사하였을 때, 아세톤 245 ppm에 대한 광촉매 전환율을 측정된 결과, 광촉매 없이 자외선 조사만으로는 아세톤 분해가 거의 이루어지지 않음을 알 수 있었다(그림 10). 일부 연구결과에 의하면, 180 nm의 단파장 광원만을 사용하여 유해가스를 처리하는 시도가 있었으나, 본 연구에서는 고려하지 않았던 바, 지속적인 연구를 통하여 비교 검증하고자 한다.

그림 11과 그림 12는 아세톤의 유입 농도를 120, 245, 370 ppm으로 하였을 때, 254 nm 자외선과 365 nm 자외선에 대하여 광분해 전환율을 측정된 것으로, 254 nm Germicidal 자외선 램프를 사용하였을 경우, 반응 초기 10분 내에 급격하게 전환율이 증가하였으며, 20분 이후에 대부분의 아세톤이 분해되는 것을 관찰할 수 있었다. 120 ppm과 245 ppm 사이에

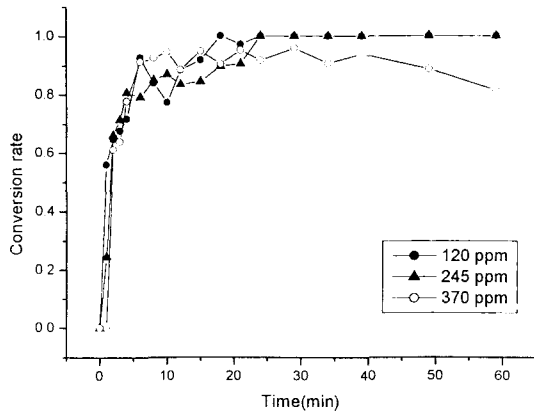


Fig. 11. Conversion of acetone as a function of inlet concentration (wave length: 254 nm).

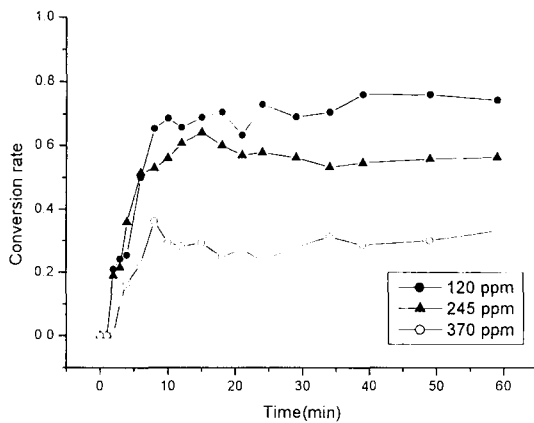


Fig. 12. Conversion of acetone as a function of inlet concentration (wave length: 365 nm).

서는 유입 농도에 따른 뚜렷한 광분해 전환율의 차이를 찾아볼 수 없었으나, 유입 농도가 370 ppm으로 고농도일 경우에 20분 이후부터 조금 감소하는 것을 볼 수 있었다(그림 11). 한편, 365 nm Black light blue 자외선 램프를 사용하였을 경우, 유입 농도에 따른 전환율의 뚜렷한 차이를 볼 수 있었는데, 20분 경과 후 안정화되었으며, 120 ppm의 경우 최고 전환율이 0.7 정도였고, 245 ppm과 370 ppm은 각각 0.5, 0.3 정도의 전환율을 나타내었다(그림 12). 실험 결과, 254 nm의 파장을 갖는 자외선 램프를 사용하였을 때가 365 nm 파장의 자외선 램프를 사용

했을때보다 더 높은 효율을 나타내었다. 이는 254 nm의 단파(短波)가 365 nm의 장파(長波)에 비하여 에너지 강도가 세기 때문에 광촉매에 광이 조사될 때, 더 많은 전자의 여기효과를 유발하여 광촉매 반응율을 높여주기 때문이다(이병규와 정혁용, 1999).

4. 결 론

본 연구를 통하여 가스상 및 입자상 오염물질 동시제거용 광촉매 필터의 제조와 그 적용성 여부를 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

광촉매 필터를 만들기 위하여 제조한 바인더는 유기첨가물과 무기첨가물을 혼합한 바인더로서 코팅용 슬러리 제조시 3.6 wt.%를 첨가하였을 때, 20%의 TiO₂ 광촉매가 담지되었으며, 이때 SEM 분석 및 밀착강도 실험 결과 최적의 코팅상태를 나타내었다. 또한 코팅용 슬러리의 XRD 분석 결과 대부분의 결정상이 anatase로 확인되어 바인더가 광촉매 반응에 별다른 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다. SEM에 의한 필터의 단면 및 표면 관찰결과 mesh의 체는 부분이 TiO₂ 광촉매 입자로 충전되어 있었는데, 이는 제조된 광촉매 필터가 입자층을 이루고 있는 다공성 필터임을 보여주는 결과로서, 가스상 및 입자상 오염물질의 동시제거에 있어 매우 적합한 필터 구조라고 판단된다. 유속과 필터의 압력강하가 비례관계에 있다는 실험결과(그림 8) 또한 이를 뒷받침해준다.

반응기 형태를 선정하고자 아세톤 광분해 실험을 실시하였던 바, 다른 반응기들과는 달리 disk 형태 반응기의 광분해 전환율은 반응시간이 경과함에 따라 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이는 다른 반응기들에 비하여 광촉매 담지량과 코팅면적이 상대적으로 적었을 뿐 아니라, 아세톤 가스가 필터 표면에 과량 흡착됨으로써 촉매표면의 활성 영역이 오염(fouling)되었기 때문이라고 사료된다.

가스상 및 입자상 오염물질을 동시제거하기 위해서는 광촉매 반응기에 필터의 개념이 포함되어야 하는데, 실험 결과 그 목적에 부합하는 가장 적합한 필터는 cage 형태(그림 2(c)) 광촉매 필터로서, 기존의 annular 형태의 광촉매 반응기(그림 2(a))의 효율을 그대로 구현하면서 전체적으로, bag-filter와 유

사한 분진여과개념을 내포하고 있어 가스상 및 입자상 오염물질의 동시제거에 적합할 것으로 사료된다. Cage 형태의 광촉매 필터 실험 결과 유입 농도가 낮을수록 램프의 파장이 작을수록 높은 전환율을 나타냈으며, 광촉매없이 자외선 조사만으로는 아세톤이 거의 분해되지 않는 것으로 나타났다.

본 연구는 가스상 및 입자상 물질 동시제거용 광촉매 필터 제조를 위한 선행 연구에 해당되며, 제조된 광촉매 필터는 광촉매 반응기로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 추후 입자상 물질 제거용으로서의 적용가능성 여부를 판단하기 위하여 미세 분진 실험을 추가적으로 실시할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R02-2000-00348)지원으로 연구되었으며, 실험실 및 기자재 사용을 협조해 주신 한국철도기술연구원 환경·재료팀에 감사드립니다.

참고 문헌

이병규, 정혁용(1999) 저온플라즈마와 UV를 이용한 휘발성유기화합물 제거연구 (I), 한국대기환경학회 추계학술논문집, 255-257.
 이상현, 차혜연, 강미숙, 정찬화(2000) *In-situ* FT-IR을 이용한 TiO₂ 광촉매 산화반응 메커니즘 규명, 화학공학의 이론과 응용, 6(2), 2697.
 조성민, 양재춘, 김현중, 설용건, 전명석, 이태규(2000) 다공성 Al₂O₃관에 고정된 TiO₂를 이용한 기상 아세

트 알데히드의 광촉매 분해, Hwahak Konghak, 38(5), 567-571.
 하진옥(2001) 광촉매 TiO₂를 이용한 고효율 공정기술, 공업화학 전망, 4(4), 38-43.
 Alberici, R.M. and W.F. Jardim (1997) Photocatalytic destruction of VOCs in the gas-phase using titanium dioxide, Applied cat. B: Envi., 14, 55-68.
 Choi, W.Y., J.Y. Ko, H.W. Park, and J.S. Chung (2001) Investigation on TiO₂-coated optical fiber for gas-phase photocatalytic oxidation of acetone, Applied cat. B: Envi., 31, 209-220.
 Jo, Y.M. (1996) Characterisation and utilisation of waste fly ash as hot gas cleaning filter, 71-72.
 Mazzawi, M., A.N. Finken, A.B. Nair, and V.H. Grassian (2000) Adsorption and photocatalytic oxidation of acetone on TiO₂: an in transmission FT-IR study, J. of Catalysis, 191, 138-146.
 Porter, J.F., Y.G. Li, and C.K. Chan (1999) The effect of calcination on the microstructural characteristics and photoreactivity of Degussa P-25 TiO₂, J. of Materials Science, 34, 1523-1531.
 Sauer, M.L. and D.F. Oills (1994) Acetone Oxidation in a photocatalytic monolith reactor, J. of catalysis, 149, 81-91.
 Schiavello, M. (1997) Heterogeneous photocatalytic reactors, Heterogeneous Photo-catalysis, 169-189.
 You, Y.S., K.H. Chung, J.H. Kim, and G. Seo (2001) Photocatalytic oxidation of toluene over TiO₂ catalysts supported on glass fiber, Korean J. Chem. Eng., 18(6), 924-929.
 Vorontsov, A.V., E.N. Savinov, G.B. Barannik, V.N. Troitsky, and V.N. Parmon (1997) Quantitative Studies on the heterogeneous gas-phase photooxidation of CO and simple VOCs by air over TiO₂, Catalysis Today, 39, 207-218.