

폐 산업용 촉매를 이용한 휘발성유기화합물의 제거  
— Pt 계 촉매의 전처리 효과 —

Removing Volatile Organic Compound using the Waste  
Industrial Catalyst

— The effect of pretreatment on Pt-based catalyst —

김 상 채\* · 서 성 규<sup>1)</sup>

목포대학교 환경교육과, <sup>1)</sup>여수대학교 건설환경공학부  
(2002년 2월 7일 접수, 2002년 6월 10일 채택)

Sang Chai Kim\* and Seong Gyu Seo<sup>1)</sup>

Dept. of Env. Edu., Mokpo National University

<sup>1)</sup>Dept. of Civil & Env. Eng., Yosu National University

(Received 7 February 2002; accepted 10 June 2002)

Abstract

The catalytic combustion of benzene, toluene and xylene over Pt-based catalyst was investigated in a fixed bed flow reactor system with atmospheric pressure to recycle the waste industrial catalyst for the processes of removing volatile organic compounds. According to the pretreatment condition, the properties of the waste Pt-based catalyst were characterized by XRD (X-ray diffraction) and BET (Brunauer-Emmett-Teller). In the case of air pretreatment, 200°C was found to be optimal, and increasing pretreatment temperature resulted in the reduction of the catalytic activity. When Pt-based catalyst pretreated at 200°C by air was retreated by hydrogen, the catalytic activity increased by increasing treatment temperature. In the case of HNO<sub>3</sub> aqueous solution pretreatment, the catalytic activity decreased by increasing the concentration of HNO<sub>3</sub> aqueous solution. The catalytic activity was seen to observe the following sequence : benzene > toluene > xylene.

**Key words** : waste industrial catalyst, pretreatment, volatile organic compounds, catalytic combustion

1. 서 론

휘발성유기화합물 (volatile organic compounds: 이하 VOCs라 한다)은 상온, 상압에서 Reid vapor

Pressure가 10.3 kPa 이상인 탄화수소 물질로서 여러 형태로 대기 중이나 수질중에 존재한다(환경부, 1997). 최근에 대기환경오염의 주요지표로 사용되고 있으며, ground level ozone과 광화학스모그 생성의 원인물질 그리고 지구온난화와 성층권 오존층 파괴 물질로서 환경 및 건강에 악영향을 초래하는 VOCs의 배출규제가 미국과 유럽과 같은 선진국을 중심

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)61-450-2781, E-mail : gikim@intra.mokpo.ac.kr

으로 강화되고 있는 실정이다. 그 일례로서 미국의 대기정화법개정안(Clean Air Act Amendments: CAAA, 1990)에서는 189종의 VOCs 물질을 규제 대상으로 지정하였으며 대기 중의 오존농도감소(오존에 관한 규정)와 건강피해저감(유해대기오염물질 규정)의 2가지 차원에서 대기질관리정책의 주요 수단으로 이용하고 있다. 우리나라에서는 1999년부터 대기환경보전법 제8조 2항 규정에 의하여 대기환경 규제지역내(석유화학 정제업, 자동차 제조업, 주유소, 자동차 정비업소, 세탁시설, 기타제조업 등) VOCs를 규제토록 하고 있다(환경부, 1999).

VOCs(악취) 배출업소에서 사용하고 있는 대표적인 VOCs(악취)제어 기술로는 흡착법, 직접연소법 그리고 촉매연소법이 있다. 흡착법은 흡착질의 교체 주기가 빈번하며 2차오염물이 발생한다. 직접연소법은 연료의 사용량이 많아 처리비용이 높으며 질소산화물이 많이 발생한다. 이중에서도 촉매연소법은 부분산화물의 생성량이 작으며, 낮은 반응온도(200~400°C)에서 운전이 될 수 있으므로 NO<sub>x</sub>의 발생량이 적고 연간운전비가 적게 든다(Cordi *et al.*, 1997; EPA report, 1995). 또한 적용규모범위가 넓고 system이 compact하여 설비확장이 용이하며 폐열의 활용이 가능한 장점이 있다. 촉매연소법에 사용되는 촉매는 보통 귀금속 담지촉매(Pt, Pd)계, 귀금속과 금속산화물 혼합촉매계 그리고 금속산화물 촉매계로 대별할 수 있으나 주로 귀금속을 포함한 촉매계가 사용되고 있다.

화학관련공장의 많은 업소가 각 공정중 여러 종류의 촉매를 사용하고 있으며 일정시간 경과후에 활성이 감소하면 폐촉매로서 폐기하고 있다. 이들 폐촉매는 VOCs제거에 효과적인 것으로 알려진 귀금속계와 금속산화물계 촉매가 주류를 이루고 있다. 폐촉매는 원래의 활성이 완전하게 손실된 것은 아니고 공정의 목적 수율에 도달하지 못하면 폐기되기 때문에 적절한 처리를 하여 촉매연소공정에 적용하여 재 사용하면 VOCs제거 효율을 높일 수 있다. 아직까지 산업용 폐촉매를 재생하여 VOCs 제거공정의 촉매로 사용한 연구는 보고된 바 없다. 산업용 폐촉매는 수집하기 쉽고 생산공정을 위하여 일정한 조건에서 운전되었기 때문에 비교적 낮은 경비의 재생공정으로도 충분히 VOCs 제거공정에 활용할 수 있는 촉매로 재생할 수 있을 것으로 예

상된다. 그리고 폐기물을 재활용한다는 관점에서 환경적, 경제적인 측면에서도 유의할 것이 예상되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 석유화학공업에서 발생된 Pt계 촉매를 VOCs(BTX) 제거를 위한 촉매연소공정에 사용하기 위하여 폐촉매의 재생방법에 따른 촉매의 VOCs 제거 효과를 검토하였으며 이에 따른 촉매의 특성을 XRD(X-ray diffractometer)와 BET(Brunauer-Emmett-Teller)에 의한 기기분석을 통하여 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 촉매

촉매는 석유화학공업에서 공정의 목적 수율에 도달하지 못하여 폐기된 상업용 Pt계 촉매로서 표 1에 사용전 촉매의 특성을 정리하였다.

촉매의 활성감소는 피독, 소결, 활성물질의 소실 그리고 탄소침적 등에 의하여 발생한다(Angelidis *et al.*, 1998; Burch *et al.*, 1995). 촉매에 침적된 탄소 성분은 일반적으로 고온에서 수소 수증기 산소 및 이산화탄소로 처리하여 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 그리고 CO 등으로 가스화시켜 제거한다(Carrazza *et al.*, 1988; Ellingham and Garrett, 1984). 본 실험에서는 폐촉매에 침적된 탄소를 제거하기 위하여 일차적으로 공기를 사용하여 200~400°C의 온도범위에서 전처리를 실시하였다. 또한 공기로 전처리한 폐촉매를 수소를 사용하여 이차적으로 200~400°C의 온도범위에서 처리하였다. 산처리한 촉매를 제조하기 위하여 0.1~0.4 N 농도의 질산 수용액을 제조하여 질산 수용액 30 ml에 폐촉매와 함께 마개가 달린 50 ml 시험관에 넣고 shaker(KMC-8480SF, Vision Scientific Co., Korea)의 속도를 10으로 하여 12시간 동안 처리하였다. 산처리된 폐촉매는 탈이온수로 pH 7이 될 때까지 세척하고 120°C의 건조기(MOV-212, SANYO Elec-

Table 1. The basic properties of the waste Pt-based catalyst.

| Catalyst                          | Shape  | Size (mm) | Bulk density (kg/l) | Pt content (%) |
|-----------------------------------|--------|-----------|---------------------|----------------|
| Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Pellet | 3.1 × 3.1 | 0.77                | 0.3            |

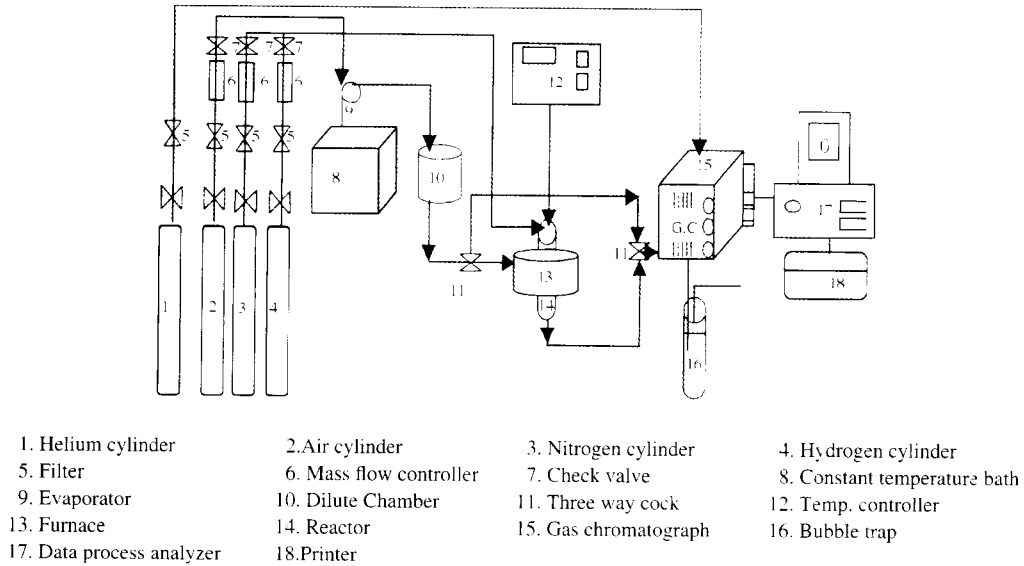


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

tric Co., Japan)에서 하루동안 건조하여 사용하였다.

2.2 실험장치 및 방법

반응실험은 그림 1과 같은 통상의 고정층 상압유통식 반응장치를 사용하였다. 실험에서 산화제로 사용한 공기, purge 가스로 사용한 질소는 고순도가스를 사용하였고 유량조절기 (UNIT CO. LTD)로 유량을 조절하였으며 유량조절기 전후에 filter와 check valve를 설치하였다.

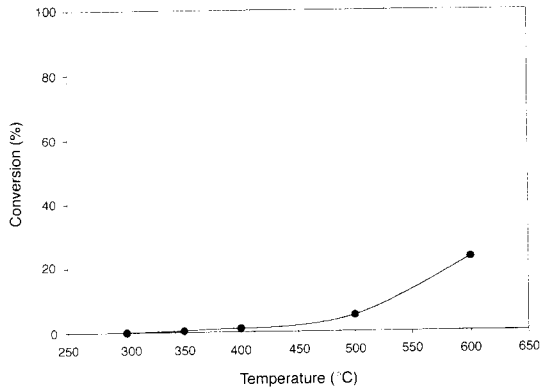
벤젠 (Fisher chemical), 톨루엔 (Fisher chemical) 그리고 자일렌 (Fisher chemical)은 저온항온조 (Fisher Scientific, USA)내에 설치된 증발관을 통하여 공기에 의한 동반 증발로 반응기에 공급되도록 하였으며, 반응물인 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 농도는 항온조의 온도를 변화시키고 또한 공기희석관을 설치하여 조절하였으며 VOCs의 흡착을 방지하기 위하여 희석관을 80~90°C로 가열하였다. 반응기는 고정층반응기로서 내경이 1.2cm, 길이가 35cm인 Y자형의 석영관을 이용하였으며 Raschig ring 상의 석영층상에 1g의 촉매를 충전하였다. 반응온도는 촉매층의 중심부에 설치된 열전대 (chromel-alumel)와 PID 온도조절기를 이용하여 120~300°C 범위에서 조절되었다. 폐촉매는 60 cc/min의 공기로 1시간

동안 200~400°C 범위에서 전처리하여 사용하였다. 또한 60 cc/min의 수소로 1시간 동안 200~400°C 범위에서 처리하였고, 처리후에 질소를 통과 시키면서 반응온도까지 냉각시켰다. 증발관에서 GC (Gas chromatograph)에 이르는 각 연결관은 반응물과 생성물의 응축을 방지하기 위하여 열선으로 감아 120°C를 유지하였다. 반응물과 생성물의 분석은 GC (GC-14A, Shimadzu, Japan)와 data 분석시스템을 이용하였다. 분석컬럼은 5% bentone-34, 5% DNP/simalite (60~80 mesh, 3 mm Φ×3 m)와 Porapak Q (50~80 mesh, 3 mm Φ×3 m) 및 Molecular sieve 5A (60~80 mesh, 3 mm Φ×3 m)를 사용하였다.

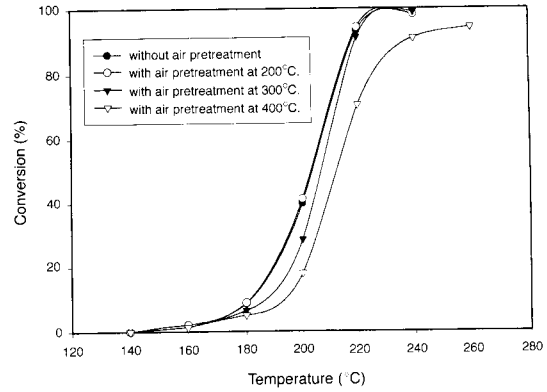
촉매의 구조적특성은 X-선회절분석 (XRD, Geigerflex, Rigaku), 표면적은 BET표면적측정장치 (AVSA, ASAP2000, Micromeritics)로 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

Pt계 폐촉매에 의한 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 완전산화반응에 대한 촉매의 활성을 비교하기 위하여 상압유통식 반응장치를 이용하여 반응온도; 140~260°C, 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌 농도; 200~1200 ppm, 공간속도 (space velo-



**Fig. 2. Toluene conversion without catalyst as a function of reaction temperature.**  
**Reaction condition:**  
 toluene concentration = 600 ppm  
 total flow rate = 60 cc/min.



**Fig. 3. Toluene conversion over Pt-based catalyst as a function of reaction temperature.**  
**Reaction condition:**  
 pretreatment time = 1 hr  
 catalyst weight = 1.0 g  
 toluene concentration = 600 ppm  
 total flow rate = 60 cc/min.

city); 5000 hr<sup>-1</sup>의 조건에서 실험을 진행하였으며 VOCs의 전환율(X)은 다음과 같이 정의하여 정리하였다.

$$\text{Conversion (X)} = \frac{\text{반응한 VOCs의 몰수}}{\text{공급한 VOCs의 몰수}} \times 100 (\%)$$

### 3. 1 Blank 실험

본 실험을 실시하기 전에 석영반응기와 Rasching ring 그리고 석영솥이 반응에 영향을 미칠 수 있으므로 반응기에 촉매를 충전시키지 않고 Rasching ring과 석영솥을 채운 상태에서 실험을 한 결과를 그림 2에 나타내었다. 반응온도 300°C까지는 전혀 반응이 일어나지 않았고 500°C에서는 5% 이하의 톨루엔 전환율을 나타내었으며, 반응온도 600°C에서는 20% 정도의 전환율을 보여주었다. 이는 석영 반응기와 Rasching ring 그리고 석영솥에 의한 불균일계반응과 균일계반응에 의한 결과로 생각된다. 따라서 본 실험은 280°C 이하에서 수행되므로 석영 반응기와 Rasching ring 그리고 석영솥에 의한 불균일계 반응과 열분해 반응에 의한 균일계 반응을 배제할 수 있었다.

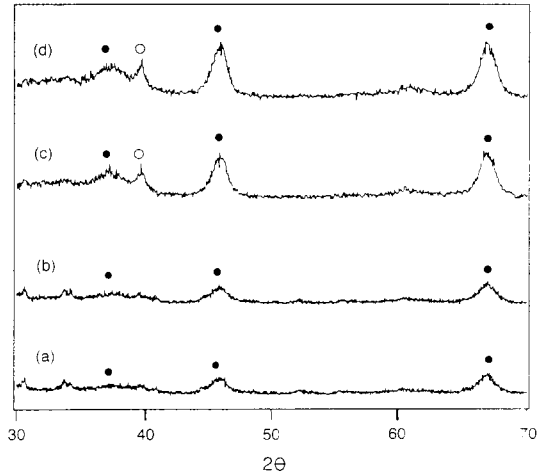
### 3. 2 공기 전처리의 영향

그림 3에 Pt계 폐촉매를 전처리하지 않을 때와

**Table 2. BET surface area.**

| Catalyst          | Pretreatment temperature with air for 1 hr. (°C) | BET surface area (m <sup>2</sup> /g) |
|-------------------|--|--------------------------------------|
| Pt-based catalyst | without pretreatment                             | 108.2                                |
|                   | 200  | 109.3                                |
|                   | 300  | 105.1                                |
|                   | 400  | 96.5                                 |

200~400°C의 온도범위에서 공기로 전처리 할때의 전처리온도에 따른 톨루엔의 전환율을 반응온도 140~260°C 범위에서 나타내었다. 공기로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 반응온도 200°C에서 39.8%의 전환율을 나타내었다. 200°C, 300°C 그리고 400°C의 온도에서 전처리한 Pt계 폐촉매의 전환율은 각각 41.2%, 28.4% 그리고 17.9%의 전환율을 나타내었다. 반응온도 220°C에서는 공기로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 93.2%의 전환율을 나타내었으며, 200°C, 300°C 그리고 400°C의 온도에서 전처리한 Pt계 폐촉매의 전환율은 각각 94.3%, 91.3% 그리고 70.5%의 전환율을 나타내었다. 따라서 전처리 온도가 증가함에 따라 전환율은 오히려 감소하였으며 200°C가 최적의 전처리온도임을 알 수 있었다. 표 2와 그림 4에 이들 촉매의 BET 표면적 측정결과와 XRD 분석결과를 나타내었다. 200°C에서 전처

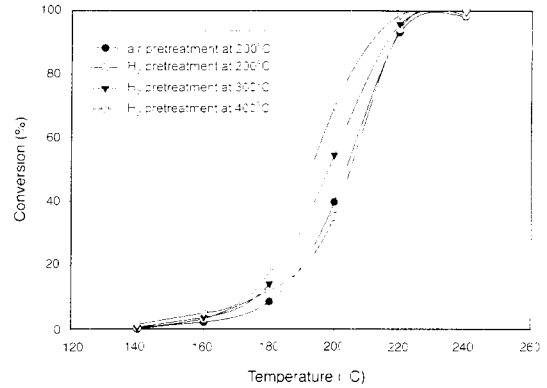


**Fig. 4. XRD patterns measured for catalysts according to air pretreatment temperature.**  
 ● :  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ○ : Pt  
 (a) Without air pretreatment (b) 200°C  
 (c) 300°C (d) 400°C

리한 Pt 계 폐촉매의 BET 표면적이 전처리 하지 않은 Pt 계 폐촉매보다 약간 컸으나 그 차이는 미미하였고 전처리 온도가 증가함에 따라 BET 표면적이 감소함을 알 수 있었다. 또한 그림 4의 XRD 분석결과에서 전처리 온도가 증가함에 따라  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  결정상과 Pt 결정상의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있었다.  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  결정상의 성장은 BET 표면적의 감소를 가져오며 Pt 결정상의 증가는  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  상에 Pt 입자 크기의 증가와 함께 분산도를 감소시켰을 것으로 판단된다. 따라서 전처리 온도 증가에 따른 반응 활성감소는 BET 표면적의 감소와 Pt의 분산도 감소와 관련이 있는 것으로 생각된다.

**3. 3 수소 전처리의 영향**

그림 5에 Pt계 폐촉매를 200°C에서 공기로 전처리한 촉매와 200°C에서 공기로 전처리한 촉매를 200~400°C의 온도범위에서 수소로 처리할 때의 처리온도에 따른 톨루엔의 전환율을 반응온도 140~240°C 범위에서 나타내었다. 수소로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 반응온도 200°C에서 41.2%의 전환율을 나타내었다. 200°C, 300°C 그리고 400°C의 온도에서 전처리한 Pt계 폐촉매의 전환율은 각

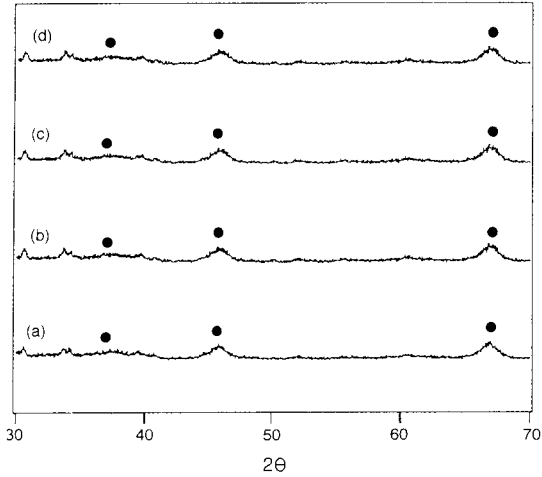


**Fig. 5. Toluene conversion over Pt-based catalyst as a function of reaction temperature.**  
 Reaction condition:  
 pretreatment time = 1 hr  
 catalyst weight 1.0 g  
 toluene concentration = 600 ppm  
 total flow rate = 60 cc/min

**Table 3. BET surface area.**

| Catalyst          | Pretreatment temperature with hydrogen for 1 hr. (°C) | BET surface area (m <sup>2</sup> /g) |
|-------------------|---|--------------------------------------|
| Pt-based catalyst | without pretreatment                                  | 109.3                                |
|                   | 200   | 109.1                                |
|                   | 300   | 108.3                                |
|                   | 400   | 108.9                                |

각 35.3%, 54.4% 그리고 69.9%의 전환율을 나타내었다. 반응온도 220°C에서는 수소로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 94.3%의 전환율을 나타내었으며, 200°C, 300°C 그리고 400°C의 온도에서 전처리한 Pt계 폐촉매의 전환율은 각각 94.1%, 95.8% 그리고 98.6%의 전환율을 나타내었다. 따라서 수소 전처리 온도가 증가함에 따라 전환율은 증가하였으며 전처리 실험범위내에서 400°C가 최적의 처리온도임을 알 수 있었다. 표 3과 그림 6에 이들 촉매의 BET 표면적 측정결과와 XRD 분석결과를 나타내었다. 200°C에서 공기로 전처리한 촉매와 200°C에서 공기로 전처리한 촉매를 200~400°C의 온도범위에서 수소로 처리 할 때의 BET 표면적은 전처리 온도가 증가하여도 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 그림 6

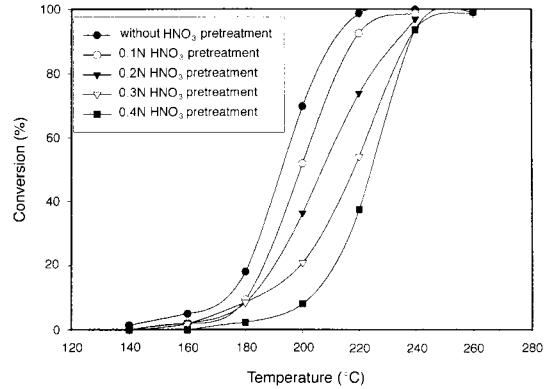


**Fig. 6. XRD patterns measured for catalysts according to H<sub>2</sub> pretreatment temperature.**  
 ● : γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 (a) with H<sub>2</sub> pretreatment (b) 200°C  
 (c) 300°C (d) 400°C

의 XRD 분석결과에서 수소 전처리 온도가 증가함에 따라 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정상과 Pt 결정상의 크기에 큰 변화가 없었으므로 수소로 전처리 할 때는 처리온도가 증가하여도 공기로 전처리 할 때와는 달리 촉매의 응결현상이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 수소로 전처리 시는 환원분위기에 기인한 유효 활성점의 증가에 의하여 반응활성이 증가하는 것으로 판단된다.

**3. 4 질산수용액처리의 영향**

이미 저자들은 (서성규 등, 2000) 자동차 폐촉매의 산처리에 따른 활성변화를 고찰하여 산처리가 폐촉매에 부착되어 있는 탄소 뿐만 아니라 표면의 불순물을 제거함으로써 비표면적이 상대적으로 증가하여 반응활성이 증가하고 최적의 산은 질산임을 보고하였다. 따라서 질산의 농도를 0.1N~0.4N로 변화시키면서 질산수용액에 의한 전처리 효과를 조사하였다. 그림 7에 농도별 질산수용액으로 처리한 후 200°C에서 공기로 전처리하고 400°C에서 수소로 처리한 촉매의 전화율을 나타내었다. 질산으로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 반응온도 200°C에서 69.9%의 전화율을 나타내었다. 0.1N, 0.2N, 0.3N 그

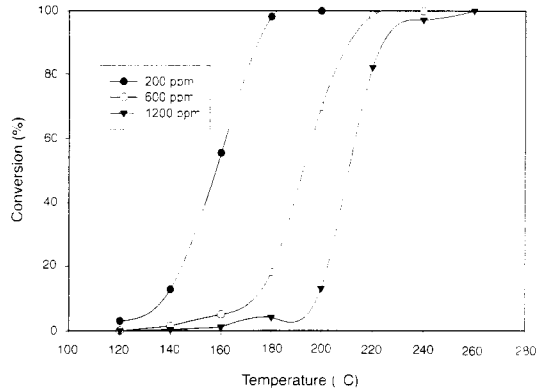


**Fig. 7. Toluene conversion over Pt-based catalyst as a function of reaction temperature.**  
**Reaction condition:**  
 catalyst weight = 1.0 g  
 toluene concentration = 600 ppm  
 total flow rate = 60 cc/min.

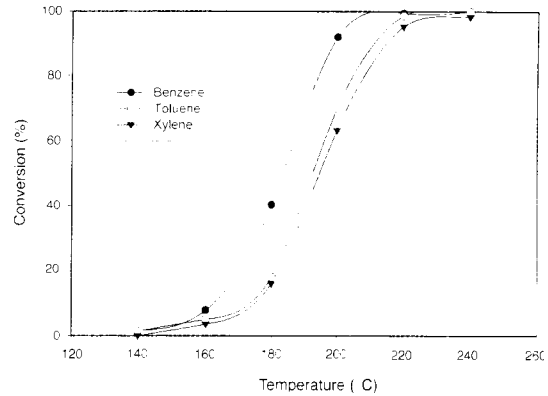
리고 0.4N 질산 수용액으로 전처리한 Pt계 폐촉매의 전화율은 각각 51.9%, 36.3%, 20.9% 그리고 8.1%의 전화율을 나타내었다. 반응온도 220°C에서는 수소로 전처리하지 않은 Pt계 폐촉매는 98.6%의 전화율을 나타내었으며, 0.1N, 0.2N, 0.3N 그리고 0.4N 질산 수용액으로 전처리한 Pt계 폐촉매의 전화율은 각각 92.6%, 73.8%, 54.0% 그리고 37.4%의 전화율을 나타내었다. 이러한 결과는 전보(서성규 등, 2000)와는 달리 질산수용액으로 처리하지 않은 촉매의 활성이 가장 우수하였고 처리 질산수용액의 농도가 증가할수록 촉매의 활성은 감소함을 알 수 있었다. 이러한 활성감소는 처리 질산수용액의 농도가 증가할수록 강산에 의한 촉매 활성점의 손실에 기인한 것으로 판단된다.

**3. 5 반응물 농도의 영향**

그림 8에 200°C에서 공기로 전처리한 후 400°C의 온도에서 수소로 처리한 Pt계 폐촉매의 반응온도 200~260°C 범위에서 톨루엔의 농도변화(200 ppm, 600 ppm, 1200 ppm)에 따른 전화율을 나타내었다. 톨루엔 농도가 200 ppm일 때 반응온도 200°C에서 전화율은 100%이었고 600 ppm일 때는 반응온도 240°C에서 전화율은 99.9%이었고 1200 ppm일 때는 반응온도 260°C에서 99.8%이었다. 톨루엔 농



**Fig. 8.** Toluene conversion over Pt-based catalyst as a function of reaction temperature.  
**Reaction condition:**  
 catalyst weight = 1.0 g  
 total flow rate = 60 cc/min.



**Fig. 9.** BTX conversion over Pt-based catalyst as a function of reaction temperature.  
**Reaction condition:**  
 catalyst weight = 1.0 g  
 BTX concentration = 600 ppm  
 total flow rate = 60 cc/min.

도가 증가함에 따라 톨루엔의 완전산화에 필요한 반응온도가 약 20~40°C씩 증가하여 결과적으로 반응활성이 감소하였다. 이러한 활성감소는 Vesper 등(1999)이 지적한 바와 같이 VOCs의 촉매산화반응에서 나타나는 일반적인 현상으로 생각된다.

**3.6 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 반응성**

그림 9에 200°C에서 공기로 전처리한 후 400°C의 온도에서 수소로 처리한 Pt계 폐촉매의 반응온도에 따른 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 전환율을 나타내었다. Barrisi and Baldi(1994)는 Pt계 촉매상에서 메틸기가 있는 방향족 화합물이 벤젠 보다 산화되기 어렵다고 보고하였으나, Beker and Forster(1998)는 벤젠(9.24 eV)에 비하여 톨루엔(8.82 eV)과 자일렌(8.56 eV)은 메틸기에 기인한 더 낮은 이온화포텐셜에너지 때문에 반응활성이 높다는 상반된 결과를 보고하였다. 본 연구에서는 반응온도 200°C에서 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 전환율은 각각 92.1%, 69.9% 그리고 63.1%이었고 220°C에서는 각각 99.4%, 98.6% 그리고 98.3%로서 반응물에 따른 활성순서는 벤젠>톨루엔>자일렌임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과는 Barrisi and Baldi(1994)의 결과와 일치함을 알 수 있었다.

**4. 결 론**

Pt계 폐촉매를 이용하여 대표적인 VOCs 중 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌을 제거하기 위한 전처리 조건을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 공기로 전처리시 최적 전처리 온도는 200°C이었으며 전처리 온도가 증가함에 따라 Pt계 폐촉매의 표면적과 Pt 분산도의 감소로 활성은 감소하였다. 200°C에서 전처리한 Pt계 폐촉매를 수소로 처리하는 처리 온도가 증가함에 따라 활성은 증가하였고 400°C가 최적의 처리온도로 나타났다.
2. 질산 수용액으로 전처리하는 질산 수용액 농도가 0.1N에서 0.4N로 증가함에 따라 활성은 감소하였으며 산에 의한 전처리효과는 관찰되지 않았다.
3. 반응물의 농도가 증가함에 따라 활성은 감소하였으며, 반응물에 따른 활성순서는 벤젠>톨루엔>자일렌이었고 메틸기가 있는 방향족 화합물이 산화되기 어려웠다.

따라서 Pt계 폐촉매를 공기와 수소로 처리하여 VOCs 제거 촉매산화공정에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 목포대학교 기성회 연구비와 산학연 중소기업기술지원센터 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

서성규, 문정선, 박남국, 김상채, 정채훈 (2000) VOCs 연소를 위한 자동차 폐촉매의 전처리 효과, 한국대기환경학회지, 16 (2), 191-197.

환경부 (1997) 대기환경보전법.

환경부 (1999) 고시 제1999-45호.

EPA-456/R-95-003, USA, 1995.

Angelidis, T.N., M.M. Koutlemani, S.A. Sklavunos, Ch.B. Lioutas, A. Voulgaropoulos, V.G. Papadakis, and H. Emons (1998) Causes of Deactivation and an Effort to Regenerate a Commercial Spent Three-Way Catalyst, *Studies in Surface Science and Catalysis*, 116, 155-164.

Barresi, A.A. and G. Baldi (1994) Deep Catalytic Oxidation of Aromatic Hydrocarbon Mixtures: Reciprocal Inhibition Effects and Kinetics, *Ind. Eng. Chem.*

*Res.*, 33, 2964-2974.

Becker, L. and H. Forster (1998) Oxidative Decomposition of Benzene and Its Methyl Derivatives Catalyzed by Copper and Palladium Ion-Exchanged Y-type Zeolites, *Appl.Catal. B: Environmental* 17, 43-49.

Burch, R.F., F.J. Urbano, and P.K. Loader (1995) Methane Combustion over Palladium Catalysts-The Effect of Carbon Dioxide and Water on Activity, *Applied Catal. A: General*, 1 (1), 173-184.

Carrazza, J., J.J. Chludzinski, H. Heinemann, G.A. Somorjai, and T.K. Baker (1988) Controlled Atmosphere Electron Microscopy Study of the Gasification of Graphite by Water, Hydrogen and Oxygen Catalyzed by a Nickel/Potassium Mixture, *J. Catal.*, 110, 74-81.

Cordi, E.M., P.J. O'Neill, J.L., and Falconer (1997) Transient Oxidation of Volatile Organic Compounds on a CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst, *Appl. Catal. B: Environmental* 14, 23-36.

Ellingham, R.E. and J. Garrett (1984) *Applied Industrial Catalysis*, Edited by G.E. Leach, Academic Press, New York, 25.

Veser, G., M. Ziauddin, and L.D. Schmidt (1999) Ignition in Alkane Oxidation on Noble-Metal Catalysts, *Catal. Today*, 47, 219-228.