

활성탄 및 광촉매 복합시스템을 이용한 도장공정 배기가스 내 VOC 의 처리

이 찬* · 차상원* · 이태규** · 김관엽***

* 수원대학교 기계공학과, 환경청정기술연구센터

** 나노팩, *** 대한도장플랜트

Treatment of the VOC in the Exhaust Gas from Painting Process by Using Activated Carbon and Photocatalytic Hybrid System

Chan Lee*, Sang Won Cha*, Tae Kyu Lee**, Kwan Yup Kim***

* Department of Mechanical Engineering, University of Suwon,
Center for Environmental and Clean Technology

** Nanopac, *** Daehan Coating Plant

1. 서론

도장(coating)은 모든 산업의 공통적이며 필수적인 공정으로서, 제품의 품질 및 외양을 결정하는데 매우 중요한 효과를 가져다준다. 많은 산업적 수요에 의해 산업 현장에서 많은 도장작업이 이루어지고 있으나, 도장 시 사용되는 대부분의 도료는 다량의 유기화합물을 포함하고 있는 관계로, 도장부스에서 배출되는 배기가스 내에는 상당한 양의 휘발성 유기화합물(VOC: volatile organic compound)이 포함되어 있는 실정이다. 최근의 조사에 따르면, 국내 전체 VOC 발생량 중 약 40% 가 도장 공정에서 발생하는 것으로 나타나고 있다[1]. 이러한 이유로, 최근 들어 강화되는 환경규제와 환경친화적 설비에 대한 사회적 관심은 도장부스 및 배기가스 후처리 설비에도 VOC 저감을 위한 여러 가지 설계 개념 도입 및 운전 조건의 최적화를 요구하고 있다[1,2].

Fig. 1에서 보여 지듯이, 기존의 도장 공정은 도장부스에서 발생된 VOC 는 도장부스 후방에 위치한 와류실 및 eliminator를 거치며 습식 세정 공정을 거치게 되며, 도장부스로부터 배출되는 배기가스는 활성탄 탑을 거친 후 대기 중으로 방출된다. 그러나 이러한 기존의 도장공정은 다양한 종류의 VOC 화학종들을 모두 효과적으로 처리하는데 한계가 있으며, VOC 제거효율도 비교적 낮게 나타난다. 그러므로, 본 연구는 기존의 도장공정 배기가스 처리시스템의 VOC 저감성능 개선을 위하여 활성탄과 광촉매 기술이 복합된 VOC 처리 시스템을 제안하였고, 실증시험 설비를 이용하여 본 시스템의 VOC 처리 효과 및 제거 효율을 검토하였다. 시험 결과로부터, 본 처리 시스템이 기존의 활성탄 흡착기술에 비해 훨씬 높은 VOC 제거 효율과 다양한 VOC 화학종에 대한 우수한 처리 효과를 보여주었다.

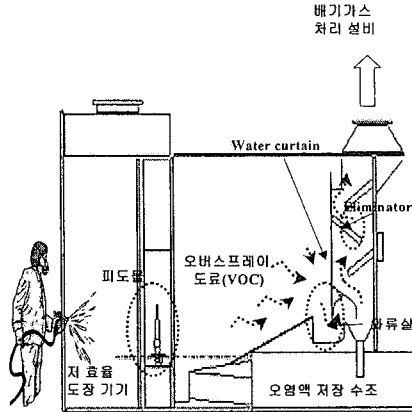


Fig. 1 VOC formation and exhaust gas from paint booth

2. 도장 부스 및 VOC 처리 시스템의 설계

본 연구는 VOC 저감형 도장설비의 개발을 위한 도장 부스 및 배기가스 처리 설비들에 대한 공정 설계 개념을 Fig. 2 와 같은 연속적인 공정 흐름형태로 구성하였다.

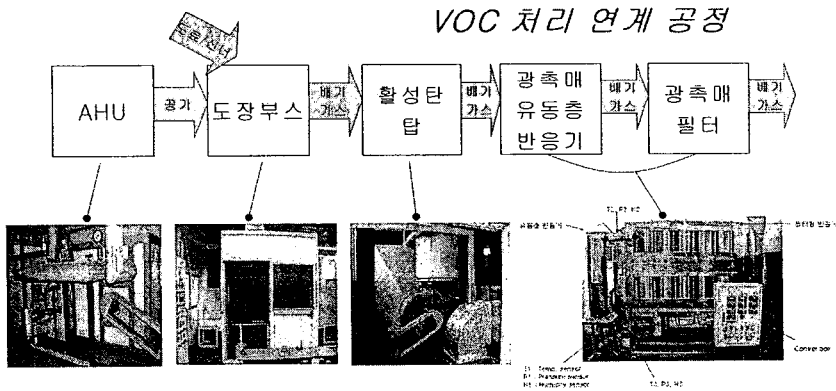


Fig. 2 Process design concept of VOC treatment system

그림에서 보여 지듯이, 본 연구에서는 도장공정의 배기가스 중 VOC의 처리를 위해 도장 부스, 활성탄 탱, 광촉매 시스템의 연계공정을 고려하였다. 본 시스템의 실증 시험을 위해서, 본 연구에서는 120 CMM 용량의 파이프트 급(pilot scale) 시험 설비에 대한 기본 설계를 수행하였고, 기본 설계 결과를 바탕으로 AHU, 도장 booth 및 활성탄 탱과 같은 일부의 설비를 자체 제작하였고, 광촉매 시스템은 유동층반응기/필터 복합시스템으로 구성, 제작하였다. 본 시스템의 기본 설계 결과를 요약하면 다음과 같다.

도장 부스는 벤투리형 액체 도장실 형태를 기본으로 강제 급, 배기형으로 설계하였고, 도장부스 설계 단면풍속은 0.5 m/s 로 설정하였다. 또한 도장 부스의 와류실과 격판 구조의 eliminator는 전산유체역학적 방법을 이용하여 설계, 분석하였다[3].

본 연구에서, 활성탄 탑은 고정층(fixed-bed) 방식으로 설계하였고, 활성탄 탑의 설계과정은 Cooper 와 Alley 가 제시한 방법[4]을 따랐다. 그리고 본 연구의 활성탄 탑 설계요구사항은 다음과 같으며,

1. 처리용량 : 120 CMM
2. VOC 배기가스 농도(설계값) : 100 ppm
3. 흡착제 종류 : activated carbon 4-10 mesh

또한 본 연구에서는 도장부스 배기가스 중의 VOC를 toluene 이 대표한다고 가정하였고, 활성탄 탑 처리가스의 공탑 속도(superficial velocity)를 0.6 m/s 로 설계하였다. 활성탄 탑 설계에 대한 상세한 내용은 참고문헌[3]에 기술되어 있다.

본 연구의 광촉매 시스템은 유동층 반응기와 필터로 구성하였다. 광촉매 유동층 반응기는 SiO₂ support 물질에 TiO₂ 코팅을 한 담체를 사용하였고, 유동층 반응기의 주요 설계 사양 및 특징은 다음과 같다.

1. 유동층 담체: 실리카/TiO₂, 크기(2.3 mm), 중량(15 kg)
2. 유동층의 최소 유동화 속도 : 1.5 m/sec
3. 광촉매 유동층 반응기 램프 사양
 - Black Light Blue (UV-A lamp)
 - 사용 개수: 4 EA

Wattage(W)	Lamp current(A)	Ultraviolet output(W)	Average useful life(hr)
40	0.420	7.8	5,000

광촉매 필터는 유동층 반응기 후방에 설치하였고, 최대 80개의 honeycomb 필터가 설치 가능 하도록 시스템을 구성하였으며 필터 표면에 광촉매를 코팅하였다. 광촉매 필터 램프는 black light blue (UV-A lamp @ 40 W) 로서 10개의 램프를 사용하였다. 광촉매 시스템 설계에 대한 상세한 내용은 참고문헌[3]에 기술되어 있다.

3. 실증 시험 설비를 통한 VOC 처리 성능 평가

앞서 언급한 설계사양을 가지고 제작된 도장부스-활성탄 탑-광촉매 시스템의 연계 실증 시험설비에 대해, 실제 도장 작업과 동일한 조건하에서, 도장부스로부터 배출되는 배기가스를 테프론 백에 채취하여 배기가스 중의 VOC 성분들을 수원대학교 환경청정기술연구센터 분석실의 G/C(Gas Chromatography)를 이용하여 수차례 분석하였다.

본 시험에 있어서 도장부스의 환기량은 120 m³/min 으로 고정하였고, 도장 부스 내에서 도료는 스프레이 건(spray gun)으로부터 분무되며, 스프레이 건 도료의 양은 기어펌프에 의해 조절이 가능하다. 즉 기어펌프를 통해 도장 부스내 분무되는 도료의 양(또는 VOC 농도)을 가변적으로 조정 할 수 있다.

본 연구의 배기가스 측정 실험 시 도장부스에서 사용된 도료는 서로 다른 조성을 가지는 3종의 유성 에나멜 도료 및 신너(thinner)등을 사용하였으며, 이를 통해 서로 다른 도료로부터 발생하는 VOC 의 저감효과를 평가, 비교하였다. 또한 광촉매 시스템의 경우 광촉매 유

동층 반응기+필터를 사용하는 경우와 광촉매 필터만을 사용하는 경우에 대한 VOC 저감 효과를 비교, 분석하여, 향후 이루어질 광촉매시스템의 도장설비 실용화 적용에 대비하였다.

배기가스 측정은 도장부스 후방(활성탄 탑 입구), 활성탄 탑 출구(광촉매 유동층 반응기 입구), 광촉매 유동층 반응기 출구(광촉매 필터 입구) 및 광촉매 필터 출구의 4개 지점에서 수행하였으며, 배기가스는 흡입펌프를 사용하여 백(bag)에 채취한 후 수원대학교 환경청정기술연구센터 분석실의 G/C를 이용하여 분석하였다. 서로 다른 도료를 이용한 경우의 배기가스 내 VOC 측정된 결과, 배기가스에 포함되는 VOC 성분들은 toluene, xylene, ethyl benzene, methyl acetate, ethyl acetate, methyl isobutyl ketone, acetone, 2-butane 등이 관찰되었고, 이러한 VOC 성분들의 종류 및 비율은 사용 도료의 종류에 따라 달라질 수 있다.

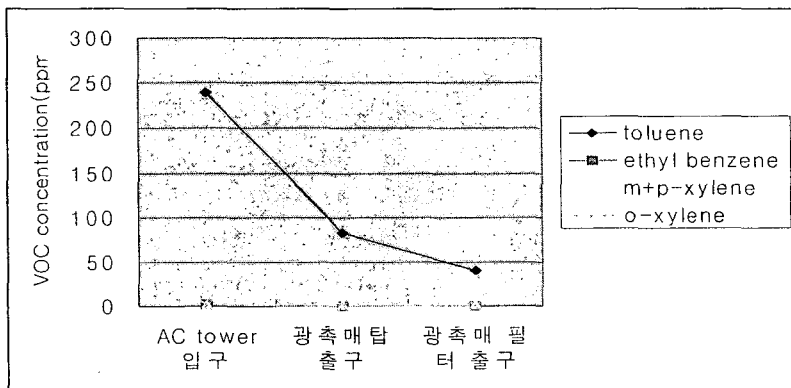


Fig. 3 VOC reduction of thinner exhaust gas through activated carbon tower and photocatalytic system with fluidized bed and filters

Fig. 3 은 도료를 혼합하지 않고 신너(thinner)만을 도장부스에서 분무한 경우를 보여주고 있으며, 어떤 종류의 VOC 성분도 활성탄 탑과 광촉매를 거치며 매우 잘 제거됨을 볼 수 있으며, 잘 분해 되지 않는 방향족 화합물인 toluene의 저감효율도 최고 84% 까지 유박함을 알 수 있다.

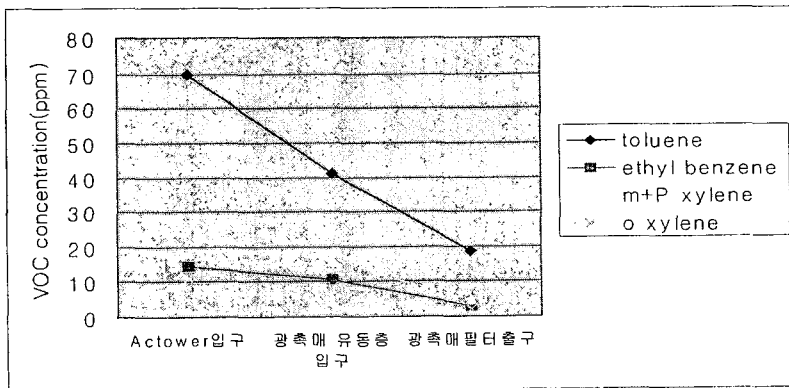


Fig. 4 VOC reduction of high concentration exhaust gas through activated carbon tower and photocatalytic system with fluidized bed and filters

Fig. 4 는 에나멜도료와 신너를 혼합한 경우 도장부스에서 배출되는 배기가스 내 VOC의 조성을 보여주고 있으며, 이때 도료의 분무량이 도장부스의 급기량에 비해 비교적 적게 유지되는 경우이다(저농도 가스). 이 경우에도 VOC 의 주성분은 주로 toluene 임을 알 수 있으며, 본 연구의 배기가스 후처리 계통을 거치며 VOC 가 도장부스 출구에 비해 약 20-25% 수준으로 줄어드는 것을 알 수 있다(저감효율 75-80%). 또한 본 배기가스 후처리 계통에서 활성탄 탑의 경우 VOC 저감효율이 toluene 의 경우 73% 인 반면, 다른 VOC 성분들은 20-30% 수준으로 매우 낮은 수준이다. 그러나 광촉매 시스템의 경우 VOC 저감효율이 55% 수준이나, 오히려 다른 VOC 성분들은 70-75% 에 이르는 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과들로부터, 도장작업에서 발생하는 다양한 종류의 VOC 성분들을 동시에 제거하는데 있어, 본 연구에서 제안한 활성탄 탑+광촉매 복합시스템이 서로 상호보완적 기능을 가지고 매우 효과적으로 작동함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 광촉매 유동층 반응기를 사용하지 않고 활성탄 탑 출구의 배기가스를 바로 광촉매 필터에 연결한 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이, toluene 및 다른 VOC 성분들이 활성탄 탑 과 광촉매 필터를 거치며 약 65-70% 가량 줄어드는 결과를 볼 수 있으며, 이러한 실험결과는 전체 VOC 저감효율은 다소 감소하지만 압력손실이 많이 걸리는 광촉매 유동층 반응기를 도장설비의 현장조건에 따라 생략하여도 무방함을 보여준다.

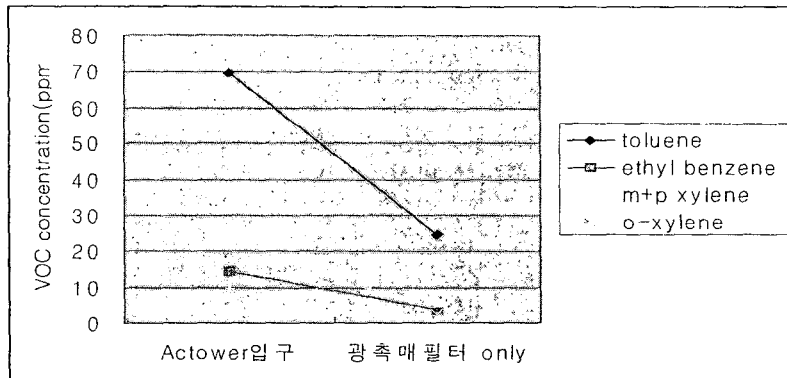


Fig. 5 VOC reduction of high concentration exhaust gas through activated carbon tower and photocatalytic system with filters only

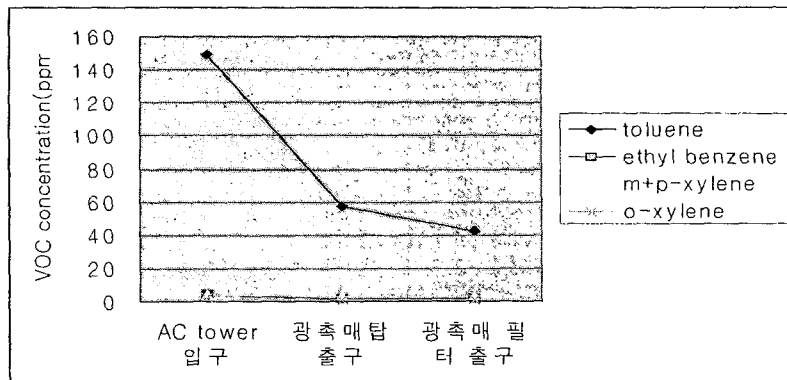


Fig. 6 VOC reduction of low concentration exhaust gas through activated carbon tower and photocatalytic system

Fig. 6 는 앞서의 Figs. 4, 5 에 비해 가스 중 VOC 포함량이 최대 2배가량 많은 고농도 가스의 경우에 대한 실험결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 고농도임에도 불구하고 본 시스템의 toluene을 포함하는 모든 VOC 성분들에 대한 저감효과가 현저함을 알 수 있다. 그러나 고농도 가스의 경우 VOC 저감효율은 60-73% 수준으로 유지된다. 이러한 현상은 가스 중에 도료가 많이 포함되어 VOC 농도가 증가할수록, 도료 중에 있는 고형분도 배기가스 중에 많이 포함되게 되고 이로 인해 순수 증기(vapor)상태에 비해 흡착(adsorption) 및 광촉매 반응에 의한 VOC 저감효과가 다소 둔화되는 것으로 생각된다. 그러나 실제 도장부스 조업 조건에서는 도장부스 출구 배기가스 중의 VOC 농도가 100 ppm 정도로 유지되므로, 고농도 가스에서의 이러한 VOC 저감효과와 둔화는 실제 현장에서는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 앞서의 경우들과는 달리 좀더 다양한 VOC 성분을 가지는 우레탄 도료에 대한 실험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보여 지듯이, 배기가스 중의 VOC 성분이 toluene, benzene, xylene 이외에 2-propanone(acetone), methyl acetate, 2-butanone, ethyl acetate, tetrahydrofuran, methyl isobutyl ketone 같은 다양한 유기화합물 성분이 관찰되었다. 그리고 VOC 주성분도 앞서의 에나멜 도료와는 달리 methyl acetate, toluene, ethyl acetate 순으로 나타나고 있다. 그림에서 보여지듯이, 각 VOC 성분들에 대한 저감효율도 60-100 % 수준으로 매우 높게 유지되었고, 이러한 결과는 우레탄 도료의 각 VOC 성분들에 대해서도 활성탄 탑의 흡착반응과 광촉매 반응이 상호보완적으로 효과적인 작용을 한 결과로 판단된다.

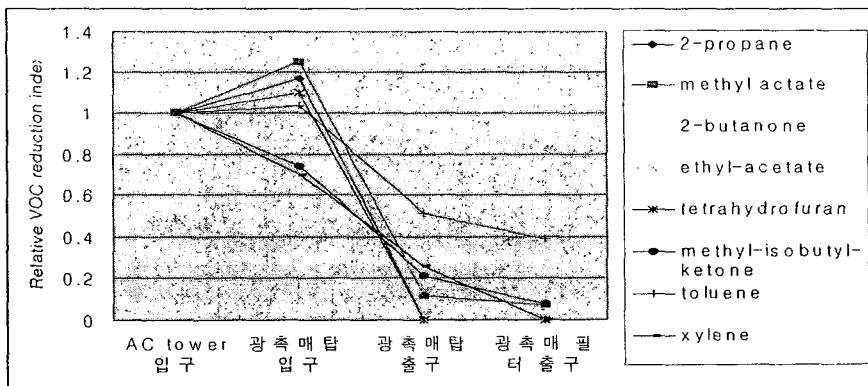


Fig. 7 VOC reduction of exhaust gas through activated carbon tower and photocatalytic system

앞서의 신너, 에나멜도료 및 우레탄 도료 실험결과들을 바탕으로 도장부스 내 발생 가능한 VOC 성분들에 대한 제거 효율들을 요약하였다. Table 1 에서 볼 수 있듯이, 2-propanone, 2-butanone, tetrahydrofuran, methyl isobutyl ketone, xylene 등은 그 배출량이 비교적 소량이므로 90%에서 100% 까지의 높은 VOC 제거 효율을 나타내었고, 또한 배출량이 상대적으로 많은 methyl acetate는 그 배출량에 비해서도 94%의 높은 제거율을 보인다. 또한 앞서의 결과들과 유사하게, toluene은 방향족 벤젠고리화합물로서 다른 물질에 비해 상대적으로 낮은 처리효율을 나타내고 있다. Table 1 에서 보여 지듯이, 도장공정 내 배기가스 처리효율은, VOC 성분에 따라 다소 차이는 있으나 대략적으로 75-100 % 범위에