

니코틴 광분해를 위한 산화티타늄 코팅 건축자재 활용

조완근[†] · 전희동*

경북대학교 환경공학과 · *포항산업과학연구원 환경에너지센터

(2005년 7월 14일 접수, 2006년 2월 27일 채택)

Application of TiO₂-Coated Construction Materials for Nicotine Photo-decomposition

Wan-Kuen Jo[†] · Hee-Dong Chun*

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

*Environment and Energy Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology

ABSTRACT : The current study evaluated the technical feasibility of the application of TiO₂ photocatalysis for the removal of nicotine which has well known as a representative material of environmental tobacco smoke(ETS). Four different preliminary experiments were performed for the evaluation of nicotine removal using photocatalyst-coated construction materials. The photocatalytic removal of nicotine was investigated for five parameters: dry condition of coating tiles, type of coating sol, number of coatings, relative humidity(RH), and input concentrations. Prior to performing the parameter tests, adsorption of nicotine onto the current experimental system was surveyed. All the variables tested in the present study exhibited to influence the photocatalytic decomposition of Nicotine. A dry condition of high temperature and short dry period presented higher photocatalytic oxidation(PCO) efficiency compared to that of low temperature and long dry period. ST-KO3 sol showed higher decomposition efficiency than E-T Sol. The PCO efficiency increased as the number of coating increased. High humidity and low input concentrations exhibited higher PCO efficiency. Consequently, it is noted that the five parameters tested in the present study should be considered for the application of photocatalyst-coated construction materials in cleaning nicotine in ETS.

Key Words : Construction Material, ETS, Nicotine, Parameter, Photocatalytic-coated

요약 : 본 연구의 목적은 환경담배연기를 대표하는 주요 오염물질 중에 하나인 니코틴의 분해를 위해서 산화티타늄 광촉매를 적용할 수 있는지 여부에 대하여 기술적 평가하는 것이다. 광촉매로 코팅된 건축자재를 이용하여 니코틴을 분해하는 정도를 평가하기 위하여 네 개의 기초 실험을 수행하였다. 니코틴의 광촉매 분해와 관련된 다음의 다섯 변수를 조사하였다: 코팅 타일의 건조조건, 코팅 용액의 종류, 코팅횟수, 상대습도, 그리고 초기농도. 변수 시험에 앞서, 실험장치에 대한 니코틴의 흡착 여부를 평가하였다. 본 연구에서 조사된 변수 모두가 니코틴의 광산화분해능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 낮은 온도와 긴 건조시간 조건과 비교할 때, 높은 온도와 짧은 건조시간 조건에서 건조된 타일에서 보다 높은 니코틴 분해효율을 나타내었다. ST-KO3 용로 코팅된 타일이 E-T 용로 코팅된 타일 보다 높은 분해효율을 나타내었다. 코팅횟수가 증가할수록 광산화분해가 잘 일어났다. 높은 상대습도와 낮은 유입농도 조건에서 광산화분해가 잘 일어났다. 결과적으로, 환경담배연기에 포함된 니코틴을 광촉매로 코팅된 건축자재를 적용할 때에는 본 연구에서 평가된 다섯 가지 변수가 모두 고려되어야함이 제안되었다.

주제어 : 건축자재, 환경담배연기, 니코틴, 변수, 광촉매 코팅

1. 서론

환경담배연기(environmental tobacco smoke: ETS)가 많은 유해오염물질을 포함하고 있기 때문에 공중보건적 차원에서 깊은 관심을 받고 있다.¹⁻⁴⁾ ETS는 담배가 연소되는 동안 자체에서 발생하는 연기인 부류연(sidestream smoke)과 주류연(mainstream smoke)으로 미국 환경보호국(U.S. environmental protection agency)⁴⁾과 미국 환경 및 산업보건국(U.S. environmental and occupational health authorities)⁵⁾에 의해 인간에게 암을 유발시키는 발암물질로 분류되고 있다. 이러

한 건강 위해성과 관련한 ETS 함유 오염물질 중에서 니코틴이 대표적으로 관심을 받는 오염물질이다.⁵⁾ 특히, 니코틴은 실내공기오염과 관련하여 최근 노출 잠재력이 매우 높은 오염물질로 간주되고 있다.^{6,7)} 따라서, 니코틴을 포함한 ETS에 함유된 다양한 유해물질 노출로 인한 건강 위해성을 줄이기 위한 방법들이 연구되고 있다. 이들 유해 오염물질을 제어하기 위한 방법으로서 현실적으로 가장 많은 주목을 받는 것이 광촉매산화법이다.⁸⁻¹²⁾

TiO₂ 광촉매산화법이 가지는 두 가지의 기능은 환경오염물질 분해능과 자정기능이다.¹³⁻¹⁵⁾ 환경오염물질 분해능은 TiO₂ 광촉매에 태양에너지(혹은 UV)를 조사하게 되면 여러 가지 경로를 거쳐 강력한 산화력을 가지는 수산 라디칼기가 생성되는 데에 기인한다. 또한 자정기능은 TiO₂ 광촉매를

[†]Corresponding author
E-mail: wkjo@knu.ac.kr
Tel: 053-950-6584

Fax: 053-950-6579

코팅한 재료의 표면이 초친수성을 띄게 됨에 따라 표면에 붙어 있는 먼지, 기름 또는 점액 등이 빗물에 의해 쉽게 씻겨져 내려 인위적인 청소 등을 하지 않더라도 재료의 표면이 항상 깨끗하게 유지된다. 이러한 특성에 의해 광촉매를 코팅한 재료는 환경을 정화할 수 있을 뿐 아니라 항상 깨끗한 외관을 유지할 수 있으므로 특히 건축분야에 그 용도가 광범위하게 응용될 수 있을 것으로 여겨지고 있다. 건축자재로서 이러한 기능성 재료가 이용된다면 대기오염의 완화, 실내 공기오염 제거, 유지관리 비용 절감, 건축물의 수명 연장 등 그 효과가 엄청날 것이다.

1980년대 후반부터 미국, 유럽, 호주 등에서 환경분야의 새로운 미래기술로서 본격적으로 연구되기 시작한 광촉매 관련 기술은 초기에는 광촉매의 강력한 산화력을 이용한 환경오염물질 처리기술 개발에 초점이 맞추어져 왔으나^{16,17)} 1990년대 후반 광촉매(특히 TiO₂)를 코팅한 재료 표면의 초친수성이 발견되면서 일본을 중심으로 각종 기능성 재료(특히 건축자재)개발이 대단히 활발하게 진행되고 있다.⁸⁾ 특히 일본의 TOTO 사는 2000년대 중반 광촉매를 이용한 기능성 재료의 시장이 세계적으로 수 조원에 달할 것으로 보고 다양한 재료개발에 엄청난 노력을 하고 있다. 현재 일부 기능성제품을 시판하고는 있으나 아직까지는 본격적으로 상업화를 하고 있지는 못한 형편이다. 우리나라에서도 많은 사람들이 광촉매에 대한 연구를 하고 있으나 대부분 환경오염물질 처리 기술로서 연구 중이며 기능성 재료로서의 연구는 선진국 특히 일본에 크게 뒤쳐져 있다. 따라서 본 연구의 궁극적 목표는 자동차로 인한 도로상의 오염공기를 분해시키기 위하여 건물 외벽에 광촉매 기술을 적용하고, 동시에 실내 공기 정화를 위해서 건물 내벽의 건축자재에 광촉매 기술을 적용할 수 있는지를 평가하는 것이다. 이러한 연구목표를 달성하기 위하여 일차적으로 제작 반응장치를 고안·제작하고 이를 이용하여 광촉매로 코팅된 건축자재인 타일의 니코틴에 대한 광촉매 분해능을 연구·평가하기 위해서 광촉매 반응시 주요 인자인 코팅타일의 건조조건, 코팅 졸(coating sol)의 종류, 코팅횟수, 습도 및 오염농도의 다섯 인자를 조사하였다. 나아가, 니코틴의 광촉매 분해능 시험을 위한 표준 또는 보편화된 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 광촉매 분해능 평가 실험을 수행하기 전에 니코틴의 광촉매 분해능 시험방법을 확립하기 위하여 예비실험이 먼저 수행되었다.

2. 재료 및 연구 방법

2.1. 예비 실험

니코틴의 광촉매 분해능 시험을 위해서 단계별로 네 가지 예비실험을 수행하였다. 첫 번째 실험에서 시료 주입부 가열을 통한 반응장치 내 니코틴의 기상 농도를 제조하는 실험을 수행하였다. 그러나 이 실험에서는 액상 니코틴이 시료 주입부에서 기화되지 못하거나 또는 액상 그대로 반응장치 내로 주입되어지는 문제점이 발생하였다. 두 번째 실험을 위하여 순간 증발 장치를 이용한 반응장치 내 니코틴 기상 농

도를 제조하였으나, 순간 증발 장치 내에서 기화되었던 니코틴이 반응장치 내로 유입되기 전에 다시 액상으로 응축되는 문제점이 발생하였다. 세 번째로 흡광광도계(UV-VIS Spectrophotometer; HP8452A)을 이용한 액상 니코틴의 광촉매 분해능 평가 실험을 수행하였다. 그러나 이 실험에서도 코팅타일 표면 위에 적정된 액상 니코틴을 채취하여 흡광도를 측정해 본 결과 시간 경과에 따라 흡광도가 더 높아지는 문제점이 발생하였다. 마지막으로, 적정된 액상 니코틴의 질량을 GC로 분석하여 광촉매 분해능을 평가하는 실험을 수행하였다. 반응장치 내의 코팅타일 표면 위에 액상 니코틴을 적정한 후 UV를 조사한 후 시간 경과에 따른 코팅타일 표면 위의 액상 니코틴의 질량을 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)를 이용하여 분석한 결과 시간 경과에 따라 광촉매 분해 작용으로 인해 니코틴의 질량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 니코틴의 질량 감소 원인이 시간 경과에 따른 코팅타일 표면의 니코틴 흡착 영향 가능성도 있기 때문에, 이를 확인하기 위해 코팅타일 표면 위에 적정된 액상 니코틴에 UV를 조사하지 않았을 때 시간 경과에 따른 코팅타일의 니코틴 흡착 여부를 확인하였으나, 코팅타일에 니코틴의 흡착은 없는 것으로 나타났다. 따라서, 니코틴의 광촉매 분해능 평가를 위해서 이 방법이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

2.2. 실험 고안

니코틴의 타일 흡착 여부를 확인하는 실험과 코팅타일의 영향을 배제한 UV에 의한 니코틴의 분해 여부를 확인하기 위한 실험을 우선적으로 수행하였다. 먼저 각각의 실험에 이용되는 광촉매로 코팅된 타일 두 개를 반응장치 내에 두고, UV 램프와 팬을 모두 끈 상태에서 주사기를 이용하여 액상 니코틴을 각각의 코팅타일 표면 위에 적정한 후 2시간 동안 계획된 시간(0.5, 2 h)에 코팅타일을 하나씩 꺼내어 코팅타일 표면 위의 액상 니코틴을 채취한 후 GC로 질량을 분석하여 시간 경과에 따른 코팅타일 표면의 니코틴 흡착 여부를 평가하였다. 이어서, 코팅타일의 영향을 배제한 UV에 의한 니코틴 분해 실험을 수행하였다. 반응장치 내에서 광촉매로 코팅되지 않은 타일 두 개를 반응장치 내에 두고, UV 램프와 팬을 모두 끈 상태에서 주사기를 이용하여 액상 니코틴을 각각의 타일 표면 위에 적정한 후 2시간 동안 계획된 시간(0.5, 2 h)에 타일을 하나씩 꺼내어 타일 표면 위의 액상 니코틴을 채취한 후 GC로 질량을 분석하여 UV에 의한 니코틴의 분해 여부를 확인하였다.

2.3. 실험절차

니코틴의 타일 흡착 여부 및 UV에 의한 니코틴의 분해 여부 확인 실험 후에 광촉매 분해능 실험을 수행하였다. UV 램프는 켜고 팬만 끈 상태에서 액상 니코틴을 각각의 코팅타일 표면 위에 적정한 후 2시간 동안 계획된 시간(0.5, 2 h)에 코팅타일을 하나씩 꺼내어 코팅타일 표면 위의 액상 니코틴을 채취한 후 GC로 질량을 분석하여 시간 경과에 따른

광촉매 분해능을 평가하였다. 코팅타일의 건조조건, 코팅질의 종류, 코팅횟수, 램프 종류, 습도 및 오염농도의 다섯 인자에 대한 광촉매 분해능을 평가하였다. ST-K03 졸로 1회 코팅된 타일, 검정 빛 램프(SANKYO DENKI, F40T10BLB)를 사용하였으며, UV 강도는 3.7 mW/cm²이고 최소는 1.1 mW/cm²이었다. 액상 니코틴 적정을 위하여, 마이크로실린저를 이용하여 적정량의 액상 니코틴 표준시약(순도 98%, Aldrich, Milwaukee, WI)을 타일표면에 떨어뜨린 후에 타일을 비스듬히 놓여서 니코틴이 가능한 한 고르게 타일에 접촉되도록 노력하였다. 졸을 타일에 코팅하기 위해서 포항산업과학연구원에서 개발한 극미립자 코팅기를 이용하였다. 본 코팅기는 극미립자(20 nm 이하) 졸을 타일 표면상 코팅면이 투명하고 균일하게 코팅할 수 있는 것으로 알려져 있다. 코팅된 졸의 건조는 본 연구에서 제시한 다양한 건조 온도와 건조 시간에서 이루어졌다.

ST-K03 졸로 1회 코팅한 후 150℃에서 30분간 건조시킨 코팅타일 네 개를 반응장치 내에 두고 UV 램프만 켜고 팬은 끈 상태에서 각각의 코팅타일 표면 위에 액상 니코틴 10 µL를 적정하였다. 액상 니코틴 적정 후 8시간 동안, 계획된 시간(0.5, 2, 4, 8 h)에 코팅타일을 하나씩 꺼내어 코팅타일 표면 위의 액상 니코틴을 용출액(ethyl acetate + triethylamine (0.5%)) 3 mL를 이용하여 용출시킨 다음 흡광도를 측정하였다.

한편, UV가 니코틴의 흡광도에 미치는 영향을 확인하기 위해 ST-K03 졸로 1회 코팅되어 150℃에서 30분간 건조시킨 두 개의 코팅타일 표면 위에 액상 니코틴 10 µL를 각각 적정한 후 하나는 반응장치 내에서 UV를 조사하였으며, 다른 하나는 UV가 없는 밀폐된 오븐 안에 둔 후 2시간이 경과한 후 각각의 코팅타일 표면 위의 액상 니코틴을 용출액 3 mL를 이용하여 용출시킨 흡광도를 측정하였다.

2.4. 광촉매 분해인자에 따른 분해능 평가

코팅타일의 건조조건에 따른 분해능 평가 실험을 위하여 두 가지 건조 조건이 이용되었다(Table 1). 450℃에서 5분간 건조시킨 코팅타일(ST-K03 졸로 1회 코팅)과 150℃에서 30분간 건조시킨 코팅타일을 이용하여 평균상대습도 63%에서 니코틴 10 mg에 대한 분해능을 조사하였다. 니코틴 10 mg 주입과 평균상대습도 65% 조건에서 코팅 질 종류에(ST-K03 졸과 E-T So)(Table 2) 따른 분해능 평가를 수행하였다. 두 종류의 타일 코팅횟수는 모두 1회이며 건조조건은 150℃, 30분이었다. 코팅횟수에 따른 분해능 평가를 위해서 타일의 표면을 E-T 졸로 1, 3 및 5회로 코팅횟수를 달리하여 150℃에서 30분간 건조시켰고, 니코틴 주입량은 10 mg이고 평균상대습도는 62%로 유지되었다. 습도에 따른 분해능 평가를 위해서 평균상대습도는 21% 및 44%의 두 가지 조건, 니코틴 주입량 1 mg, ST-K03 졸, 450℃ 및 5분 건조 조건을 이용하였다. 니코틴 량에 따른 평가를 위해서 니코틴 1 mg 및 10 mg의 두 가지 량을 이용하였다. 니코틴 1 mg을 이용한

실험에서는 평균상대습도가 44%이고 니코틴 10 mg을 이용한 실험에서는 평균상대습도가 57%이었으며, ST-K03 졸로 1회 코팅시켜 450℃에서 5분간 건조시킨 코팅타일을 이용하였다.

2.5. 시료 채취 및 측정방법

코팅타일 표면 위에 적정된 액상 니코틴을 용출액을 이용하여 시료를 채취하였다. 적정된 액상 니코틴 1 µL에 상당하는 니코틴 1 mg을 용출시키기 위해서 용출액 1 mL를 사용하였고, 액상 니코틴 10 µL에 상당하는 니코틴 10 mg을 용출시키기 위해서는 용출액 10 mL를 사용하였다. 채취된 시료용액 중에서 1 µL를 모세관 컬럼(capillary column: J & W Scientific, 60 m×0.53 mm inside diameter)과 불꽃 이온화 검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 장치된 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC: SIMAZU GC-17A)에 직접 주입하여 분석하였다. GC의 온도 프로그래밍을 위해서 항온조의 초기 온도는 100℃에서 5분간 유지한 후, 10℃/min으로 온도가 상승되어 250℃에서 1분간 유지되고, 다시 15℃/min으로 온도가 상승되어 최종 온도 290℃에서 2분간 유지되었다.

Table 1. Characteristics of a coating sol(ST-K03).

Solid (wt %)	binder (wt %)	TiO ₂ (wt %)	Solvent	pH	Tile dry condition	Number of coating
10/11.7	5.0	5.0	Alcohol(35%) /Water	1.5	150℃/30min / 450℃/5min	1 / 1, 3, 5

Table 2. Solid content of ST-K03 Sol and E-T Sol after dry for 4 hours at 105℃

Coating sol	Volume (mL)	Weight before dry(g)	Weight after dry(g)	Solid content(%)	TiO ₂ /binder
ST-K03	10	9.2	1.2085	13.2	50:50
E-T	10	10.2	0.5724	5.6	50:50

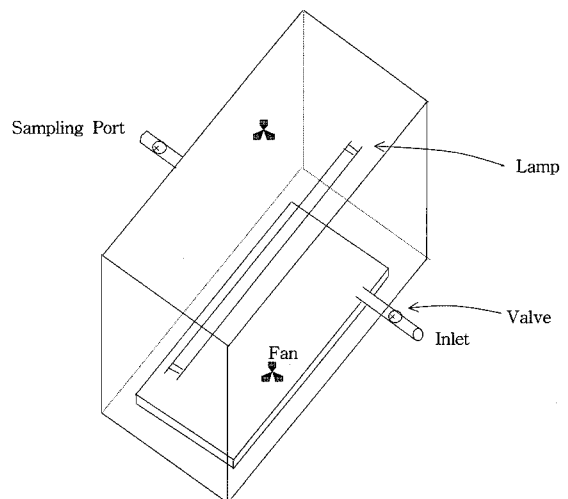


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염물질의 농도 평형상태(타일의 흡착 여부) 및 UV에 의한 분해능

오염물질의 농도 평형상태(타일의 흡착 여부) 및 UV에 의한 오염물질의 분해능 평가를 위해서 우선 반응장치 내 UV 램프에서 나오는 UV를 광촉매 코팅타일에 조사시키면서 고순도 공기를 시험장치로 통과시켜서 시험장치를 12시간 정도 정화시킨 후, 반응 장치 오염 여부를 확인하였다. 니코틴 1 mg 및 10 mg에 대한 타일의 흡착 여부 평가 결과를 Table 3에 나타내었다. 각각의 코팅타일 표면 위에 니코틴 10 mg에 상당하는 액상 니코틴 10 µL를 적정한 후 2시간 동안 정해진 시료 채취시간대에 시료를 채취하여 분석한 결과, 각각의 코팅타일의 니코틴 흡착은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 니코틴 1 mg에 상당하는 액상 니코틴 1 µL를 코팅 타일에 적정한 후 2시간 동안 정해진 시료 채취시간대에 시료를 채취하여 분석한 결과, 0.5시간까지는 코팅타일의 니코틴 흡착은 거의 없었으나 2시간이 경과하였을 때에는 니코틴이 코팅타일 표면에 조금 흡착되는 것으로 나타났다. 따라서, 니코틴 1 mg에 대한 광촉매 분해능 평가에서는 0.5시간대의 시료만 채취·분석하여 분해율을 계산하였다.

Table 3. Mass conversion of nicotine according to UV light irradiation and tile adsorption tests at two different input nicotine mass(1 and 10 mg)

Input mass(mg)	Tile type	Dry condition	Number of coating time	Sampling time (hr)	Equilibrium mass(mg)	UV lamp							
1	ST-K03	450°C/5 min	1	0	1.00	Off							
				0.5	0.99								
				2	0.74								
			10	150°C/30 min	3		0	10.0					
							0.5	7.2					
							2	8.3					
							0	10.0					
							0.5	11.7					
							2	8.8					
			1	E-T Sol	450°C/ 5 min		5	0	10.0				
								0.5	11.7				
								2	9.2				
							1	Blank	-	-	0	1.00	On
											0.5	1.10	
											2	0.62	
10	Blank	-	-	0	10.0								
				0.5	10.7								
				2	9.7								

코팅 되지 않은 타일(blank tile)을 이용하여 UV에 의한 니코틴의 분해 여부를 평가한 결과도 Table 3에 나타내었다. 타일 표면 위에 니코틴 10 mg에 상당하는 액상 니코틴 10 µL를 적정한 후 2시간 경과에 따른 니코틴의 질량을 분석해 본 결과 질량감소는 거의 없었다. 그러나 니코틴 1 mg에 상당하는 액상 니코틴 1 µL를 타일에 적정한 후 2시간 경과에 따른 니코틴의 질량을 분석해 본 결과 0.5시간대까지는 질량 감소가 거의 없었으나 2시간대에서는 질량이 조금 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 이 결과는 타일의 흡착 여부 평가 결과와 비슷한 양상으로 UV에 의해 니코틴이 분해된 것이 아니라 단순한 타일의 니코틴 흡착에 의한 결과로 보여진다. 따라서 니코틴 1 mg을 제외한 10 mg에 대한 각 코팅 타일의 흡착 영향과 UV에 의한 니코틴의 분해는 거의 없는 것으로 평가되었다.

3.2. 광촉매 분해인자에 따른 분해능

니코틴에 대한 광촉매 분해능을 연구·평가하기 위해서 광촉매 반응시 주요 인자인 코팅타일의 건조조건, 코팅 졸의 종류, 코팅횟수, 습도 및 오염농도의 다섯 인자를 조사하였다. ST-K03 졸 코팅타일의 건조조건에 따른 니코틴의 분해능 평가 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 450°C에서 5분간 건조시킨 코팅타일의 2시간 경과에 따른 니코틴 10 mg의 분해율은 60.6%, 150°C에서 30분간 건조시킨 코팅타일의 분해율은 50.3%로 나타났다. 결과적으로, 니코틴의 광촉매 분해능은 낮은 온도에서 건조시킨 코팅타일보다 상대적으로 높은 온도에서 건조시킨 코팅타일에서 더 큰 것으로 나타났고, 동일한 코팅 재질이라도 건조 조건이 분해능에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 높은 건조온도에서 졸의 활성도 높아지기 때문인 것으로 추정된다.

코팅졸의 종류에 따른 니코틴의 분해능 평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다. ST-K03 졸 코팅타일의 2시간 경과에 따른 니코틴 10 mg의 분해율은 50.3%, E-T 졸 코팅타일에서는 40.6%로서, ST-K03 졸 코팅타일의 니코틴 분해능이 E-T 졸 코팅타일보다 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 Table 2에 나타난 바와 같이 ST-K03 졸과 E-T 졸을 105°C에서 4시간 이상 건조 후 고형분 함량을 비교해 보았을 때, ST-K03 졸의

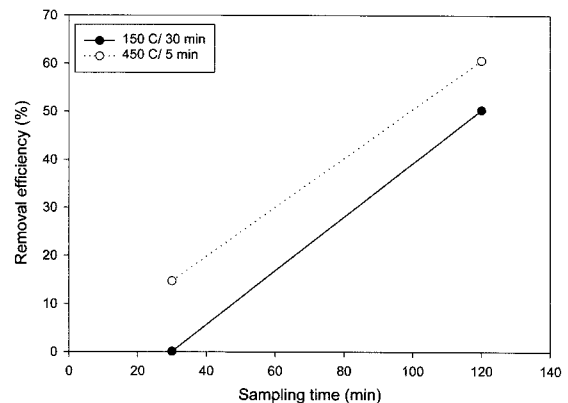


Fig. 2. Nicotine removal efficiency(%) according to tile dry condition.

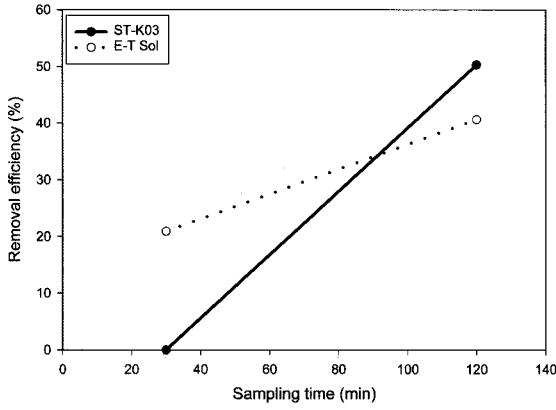


Fig. 3. Nicotine removal efficiency(%) according to coating sol.

고형분 함량이 13.2%, E-T 졸의 경우가 5.6%인 것을 고려해 본다면 E-T 졸 코팅타일의 오염물질 분해능이 ST-K03 졸 코팅타일보다 더 높은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 동일한 코팅 재질이 니코틴 분해에 주요한 인자로 작용하는 것을 의미한다.

E-T 졸 코팅타일의 코팅횟수를 1회, 3회 및 5회로 달리한 코팅횟수에 따른 니코틴의 분해능 평가 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 광촉매 분해능 실험 2시간 경과 후의 니코틴 10 mg의 1회 코팅타일에 대한 분해율은 40.6%이었으며, 3회 코팅타일에 대한 분해율은 53.6%, 5회 코팅타일에 대한 분해율은 60.7%로 나타났다. 이 실험 결과로 보아, 니코틴 10 mg에 대한 E-T 졸 코팅타일의 광촉매 분해능은 코팅타일의 코팅 량이 증가할수록 더 높은 것으로 평가된다. 이러한 결과는 Obee¹³⁾가 포름알데히드와 톨루엔을 이용하여 광촉매 양에 따른 분해능 실험에서 확인한 결과와 일치한다. Obee¹³⁾의 연구 결과에 따르면, 촉매 양이 많을수록 오염물질의 흡착 활동도(adsorption activity)가 증가하기 때문에 이러한 경향이 나타난 것으로 이해된다.

ST-K03 졸 코팅타일을 이용한 상대습도에 따른 니코틴의 분해능 평가 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 평균상대습도 21%에서 0.5시간 경과에 따른 니코틴 1 mg의 분해율은 21%이며, 평균상대습도 44%에서는 분해율이 38.2%로 나타났다. 이

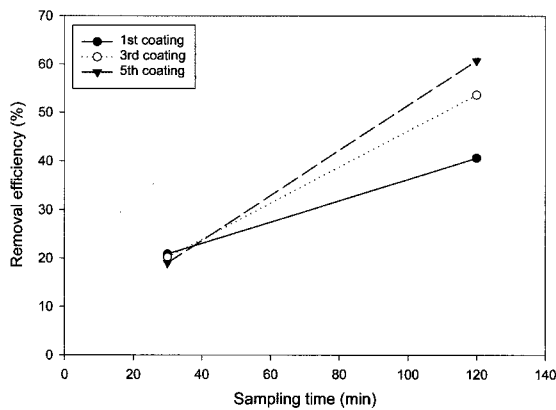


Fig. 4. Nicotine removal efficiency(%) according to the number of coating.

와 같은 결과는 평균상대습도 21%보다 상대적으로 높은 습도조건인 평균상대습도 44%에서 OH 라디칼의 생성이 더 용이하므로, 니코틴의 광촉매 산화 반응도 높은 습도조건에서 더 많이 일어나서 니코틴의 분해율이 낮은 습도조건보다 상대적으로 높은 습도조건에서 더 높은 것으로 보여진다. 이러한 결과는 낮은 습도(RH 8%)와 높은 톨루엔 농도(2130 ppb) 조건에서 광촉매 분해효율이 습도 감소에 따라 떨어지는 것으로 보고한 Obee와 Brown 연구¹¹⁾와 대조된다. 이러한 이전 연구는 분해효율의 감소가 습도 감소에 따른 촉매 표면의 수산기 라디칼 농도의 감소 때문으로 추정하고 있다. 또한, 이 연구는 높은 습도(RH>80%)와 높은 톨루엔 농도(8000 ppb) 조건에서 습도가 증가함에 따라 분해효율도 증가하는 것으로 보고하였다. 그러나, 이 연구는 다소 낮은 습도와 낮은 톨루엔 농도(500 ppb)에서는 습도가 증가함에 따라 오히려 분해효율은 감소하는 것으로도 보고하였다. 이 연구에서는 실험에서 얻은 일련의 결과를 이용하여 습도에 대한 분해효율은 촉매 표면상에서 물 분자와 오염물질간의 경쟁적 흡착의 결과에 따라 달라지는 것으로 설명하고 있다. 이와는 달리, 본 연구 결과는 물 분자와 오염물질간의 흡착 경쟁 또는 수산기 라디칼 농도 어떤 것도 분해효율에 복합적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구와 선진연구 사이의 이러한 차이는, Obee와 Brown 연구¹¹⁾에서 지적된 바와 같이, 분해효율이 RH와 유입농도의 복합작용에 따라 달라지기 때문으로 이해된다.

Fig. 5는 ST-K03 졸 코팅타일을 이용한 니코틴 량에 따른 분해능 평가 결과도 보여준다. 평균상대습도 44%에서 0.5 시간 경과에 따른 니코틴 1 mg의 분해율은 38.2%이며, 비슷한 상대습도조건인 57%에서 니코틴 10 mg에 대한 분해율은 14.7%로서, 니코틴 량이 많을 때보다 상대적으로 적은 량일 때 광촉매 분해능이 더 잘 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 니코틴 량이 많은 10 mg보다 상대적으로 적은 량인 1 mg이 코팅타일 표면과의 접촉이 더 용이하여 광촉매 분해능 반응이 더 많이 일어난 것으로 보여진다. 이러한 결과는 이러한 결과는 Jacoby 등¹²⁾이 보고한 벤젠의 광촉매 분해능이 저농도일 때가 고농도 일 때보다 높게 나타난다는 결과와 일치한다.

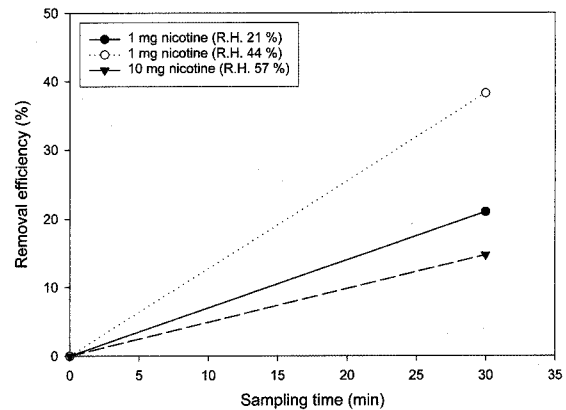


Fig. 5. Nicotine removal efficiency(%) according to relative humidity and input mass.

4. 요약 및 결론

니코틴의 광촉매 분해능 시험을 위해서 단계별로 네 가지 예비 실험을 수행하였다. 니코틴 분해능 평가를 위한 예비실험에서 시료 주입구 가열을 통한 반응 장치 내 니코틴 기상 농도 제조 실험, 순간 증발 장치를 이용한 반응장치 내 니코틴 기상 농도 제조실험, 액상 니코틴 적정을 이용한 광촉매 분해능 평가실험 모두 니코틴의 광촉매 분해능을 평가 시험에 부적합한 것으로 나타났다. 그러나, 적정된 액상 니코틴의 질량을 GC로 분석하여 광촉매 분해능을 평가하는 실험에서 코팅타일 표면 위에 적정된 액상 니코틴의 질량을 GC를 이용하여 분석해 본 결과 시간 경과에 따라 광촉매 분해작용으로 인해 니코틴의 질량이 감소하였고 코팅타일 표면에 니코틴의 흡착 또한 없는 것으로 판단되었다. 따라서, 적정된 액상 니코틴의 질량을 GC로 분석하는 방법이 니코틴의 광촉매 분해능 평가를 위하여 적절한 것으로 나타났다.

코팅 타일의 건조조건, 코팅 졸의 종류, 코팅 횟수, 습도 및 오염농도의 다섯 인자 모두가 니코틴의 광촉매 분해능에 영향을 미치는 주요 인자임이 확인되었다. 코팅타일의 건조조건에 따른 니코틴의 분해능은 낮은 온도-긴 시간의 건조조건보다 높은 온도-짧은 시간의 건조조건이 우수한 것으로 나타났다. 코팅된 코팅졸에 따른 분해능의 경우, E-T 졸 코팅타일이 ST-K03 졸 코팅타일보다 더 우수한 것으로 추정되었다. 코팅횟수에 따른 니코틴의 분해능 평가에서는 타일의 코팅횟수가 니코틴 분해능에 비례적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 습도의 경우 낮은 상대습도 보다 상대적으로 높은 상대습도에서 니코틴의 분해능이 높게 나타났다. 니코틴 량은 적을수록 분해가 잘 되는 것으로 나타났다. 한편, 이러한 인자들의 니코틴 분해능 영향에 대한 시험을 위하여 본 연구에 이용된 실험값들은 각 인자별로 최대 세 개로서, 본 연구는 니코틴의 광촉매 분해에 대한 정량적 평가 보다는 정성적 평가에 가깝다. 따라서, 본 연구 결과가 장래 니코틴의 광촉매 분해에 대한 정량적 평가를 위한 주요 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2004-2005년도 건설기술연구개발사업 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Repace, J. L. and Lowrey, A. H., "Indoor air pollution, tobacco smoke, and public health," *Science*, **208**, 464~472(1980).
2. National Research Council, Environmental Tobacco Smoke: Measuring Exposure and Assessing Health Effects, National Academy Press, Washington DC, pp. 337(1986).

3. Wald, N. J., Nanchahal, K., Thompson, S. G., and Cuckle, H. S., "Does breathing other people's tobacco smoke cause lung cancer?" *Brit. Med. J.*, **293**, 1217~1222 (1986).
4. U.S. Environmental Protection Agency, Respiratory Health Effects of Passive Smoking: Lung Cancer and Other Disorders. EPA 600/690/006B(1992).
5. National Institute for Occupational Safety and Health, Environmental Tobacco Smoke in the Workplace. Current Intelligence Bulletin 54, NIOSH(1991).
6. Tancrede, M., Wilson, R., Zeise, L., and Crouch, E. A. C., "The carcinogenic risk of some organic vapors indoors: a theoretical survey," *Atmos. Environ.*, **21**, 2187 (1987).
7. U.S. Environmental Protection Agency, Cancer Risk from Outdoor Exposure to Air Toxics, EPA-450/1-90-004a(1990).
8. 다게우찌 고우지, 무라사와 사다오, 이부스키 다카시, 김영도 옮김, 광촉매의 세계: 환경정화의 결정적인 수단, 대영사(1998).
9. Yano, H. and Shoda, M., "Selection and substantiation of an organic solvent removal apparatus at a print shop by comparative experiments using the activated carbon adsorption and catalytic oxidation methods," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **49**, 324~331(1999).
10. Peral, J. and Ollis, D. F., "Heterogeneous photocatalytic oxidation of gas-phase organics for air purification, acetone, 1-butanol, butyraldehyde, formaldehyde and m-xylene oxidation," *J. Catal.*, **136**, 554~565(1992).
11. Obee, T. N. and Brown, R. T., "TiO₂ photocatalysis for indoor air applications: effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,3-butadiene," *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 1223~1231(1995).
12. Jacoby, W. A., Blake, D. M., Fennell, J. A., Boulter, J. E., Vargo, L. M., George, M. C., and Dolberg, S. K., "Heterogeneous photocatalysis for control of volatile organic compounds in indoor air," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **46**, 891~898(1996).
13. Obee, T. N., "Photooxidation of sub-parts-per-million toluene and formaldehyde levels on titania using a glass-plate reactor," *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 3578~3584 (1996).
14. Anderson, M. A., Zeltner, W. A., Fu, X., Tompkins, D. T., and Reindl, D. N., Photocatalytic degradation of formaldehyde and other VOCs in indoor air, Center for Indoor Air Research Currents, December, 1, 4(1996).
15. Vorontsov, A. V., Savinov, E. N., Barannik, G. B., Troitsky, V. N., and Parmon, V. B., "Quantitative studies on the heterogeneous gas-phase photooxidation of CO

- and simple VOCs by air over TiO₂,” *Cat. Today*, **39**, 207~218(1997).
16. Fu, X., Zeltner, W. A., and Anderson, M. A., “The gas-phase photocatalytic mineralization of benzene on porous titania-based catalysts,” *Appl. Catal.*, B **6**, 209~224(1995).
17. Blanco, J., Avila, P., Bahamonde, A., Alvarez, E., Sánchez, B., and Romero, M., “Photocatalytic destruction of toluene and xylene at gas phase on a titania based monolithic catalyst,” *Catal Today*, **29**, 437~442(1996).