

광촉매 반응기 설계를 위한 기초 연구

A Fundamental Study for a Photocatalytic Reactor Design

손건석*, 윤승원**, 고성혁**, 김대중**, 송재원**, 이귀영*
Geon Seog Son, Seung Won Yun, Seong Hyuk Ko, Dae Jung Kim, Jae Won Song, Kwi Young Lee

ABSTRACT

Because UV wavelength lights can activate photocatalysts, plasma is used as a light source of a photocatalytic reactor. Even though plasma has good intensity for photo reaction, substrate of catalyst coating was limited by the geometry of plasma generator. Usually bead type substrate was used for a pack bed type reactor. Honeycomb monolith type substrate was used with UV lamps instead plasma, due to the light penetration the honeycomb monolith length was too short to show good activity. In this study a photocatalytic reactor, which is using a honeycomb monolith substrate, was investigated with plasma as an activation light source. As a parametric study the effects of following factors on plasma generation and power consumption are examined; supply voltage, substrate length, environment condition, catalyst loading and ratio. Using the test results, the practicality test was done with simulated synthetic gases representing bad smells and automotive exhaust gases.

주요기술용어 : Non-thermal plasma(저온 플라즈마), Photocatalyst(광촉매), Ceramic monolith honeycomb substrate(벌집형 세라믹 담체), Reactor(반응기)

Nomenclature

AC : alternative current
CB : conduction band
cpsi : Cell per square inch
D : diameter
DBD : dielectric barrier discharge
eV : electron voltage
FID : flame ionized detector
GC : gas chromatography
HCs : hydrocarbons
Hz : hertz
hr : hour

ICCD : intensified charge-coupled device
kV : kilo voltage
L : length
L/min : flow rate in liter/minute
MFC : mass flow controller
ID : identity
PFPD : pulsed flame photometric detector
UV : ultra violet
VB : valence band
VOC : volatile organic compounds
wt% : weight percentage

1. 서론

강화되는 배기 규제 만족을 위해서는 냉시동

* 회원, 고등기술연구원

** 회원, (주) 네오포텍

배기 저감이 필수적이거나 촉매가 일정 온도 이상 도달해야 정화반응이 발생하는 현 삼원촉매 시스템으로는 그 한계가 있어 규제 만족에 어려움이 있다. 이러한 정화지연 문제점을 해결하기 위해 제안된 광촉매 정화반응 시스템¹⁾은 플라즈마를 광원으로 하여 광촉매를 엔진 시동과 동시에 활성화하여 정화지연 시간 없이 정화가 가능하다. 광촉매를 이용한 미연 탄화수소 정화 반응에 관한 연구 결과에 의하면 광촉매에 의한 프로판의 정화반응은 900°C 수열열화 후에도 65% 이상의 정화율을 보이며, 이보다 낮은 온도에서 열화하는 경우 95% 이상의 정화율을 보였다.²⁾ 프로판이 광촉매 상에 흡착되기 매우 어려운 물질이며, 광반응이 표면 반응임을 감안하면 실제 배기에 존재하는 미연 탄화수소의 정화율은 이보다 매우 높을 것으로 판단할 수 있다. 또한 플라즈마 발생 실험에서 광촉매를 담지한 세라믹 벌집형 담체 상에서 플라즈마는 촉매 단면뿐만 아니라 셀 통로 안에서도 균일하게 발생한다.³⁾ 따라서 플라즈마를 광촉매 활성화원으로 사용하는 광촉매 정화 시스템은 자동차 배기 정화 및 기타 대기 환경 오염원 제거에 우수한 기능을 보일 것으로 판단되나 이에 대한 선행 연구가 부족하여 아직까지 설계를 위한 기초적인 연구가 체계적으로 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 광촉매를 담지한 세라믹 벌집형 담체를 이용한 광촉매 정화 시스템의 기초 연구로 설계 인자가 플라즈마 발생 및 전력 소모에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 연구 결과 중 최선의 조합으로 광촉매 반응기를 제작하고 대표적 미연 탄화수소 및 악취 성분에 대한 정화 반응을 수행하였다.

2. 실험

2.1 광촉매 샘플

선행 연구 결과⁴⁾에 따라, 테구사 P25 TiO₂를 기준 촉매 S0로 사용하였으며, 내구성을 강화하기 위해 물성을 변화한 TiO₂를 S0*로 하였다. S0* 재료는 S0 재료에 비해 수열 내구성은 크게 향상되

었으나 반응성은 감소하였다. 따라서 이들을 조합하여 사용하였으며 이들의 담지비가 광 활성화에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 중간층으로 γ -알루미나를 20wt% 사용하여 담체에 대한 광촉매의 접착력을 유지하였다. 세라믹 담체로는 지름 93mm(D93), 400cpsl 셀 밀도를 갖는 벌집형 담체와 지름 55mm(D55), 100cpsl 셀 밀도를 갖는 벌집형 담체를 사용하였다.

2.2 광 반응기

광촉매가 담지된 세라믹 벌집형 담체의 광반응 및 활성도를 평가하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 담체 양단에 전극이 위치하였으며 전기 에너지는 60Hz, 220V AC 일반 전원을 사용한 상용 고전압 변압기를 사용하였다. 변압기의 최대 전압은 18kV이다. 전체 시스템에서 소모되는 전력을 측정하기 위해 벽 전원에서 전력측정기를 이용하여 소모량을 측정하였으며, 반응기에서 소모하는 전력량 및 파형을 구하기 위해 고전압용 전압 측정기 및 전류 측정기를 반응기 배선에 연결하였다. 반응기에서 발생하는 플라즈마 광을 측정하기 위해 UV 필터를 장착한 ICCD 장치를 반응기 전단에 위치하였으며, 반응기로 공급하는 가스 농도 및 유량은 MFC로 조절하였다. MFC에 의해 조절된 가스는 혼합 장치와 수분 공급 장치를 통과하여 반응기로 유입된다. 상기 과정에서 발생한 모든 데이터는 PC에 저장하였다.

2.3 평가 조건

Fig. 1과 같은 반응기에서 플라즈마 발생에 미치는 주요 인자 및 이들이 미치는 영향을 평가하기 위해 Table 1과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 광촉매 재료가 미치는 영향을 평가하기 위해 S0와 S0* 촉매의 담지 비율을 1/7~7/1까지 변화시켜 가며 플라즈마 발생을 조사하였다. 세라믹 벌집형 담체의 길이 변화가 미치는 영향을 평가하기 위해 15mm(L15)부터 10mm 간격으로 75mm(L75)까지 담체 길이를 변화시켜 가며 플라즈

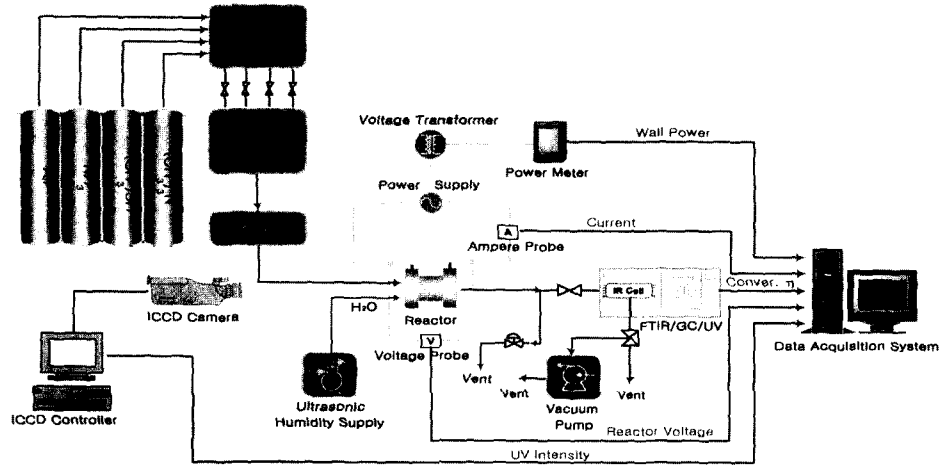


Fig. 1 Schematic diagram of the test equipment

Table 1 Summary of the parametric test conditions

Test items	Fixed test conditions	Variable test conditions
Catalyst loading ratio	Substrate length = 35mm Substrate cell density = 400cps Supply voltage = 18kV Environment conditions = air with H ₂ O Loading weight = 100	Loading ratio of S ₀ /S ₀ */γ -Al ₂ O ₃ ; S ₀ : 1~7 S ₀ * : 7~1 γ -Al ₂ O ₃ : 2
Substrate length	Substrate cell density = 400cps Supply voltage = 18kV Environment conditions = air with H ₂ O Loading weight = 100 Loading ratio (S ₀ /S ₀ */γ -Al ₂ O ₃) = 3/5/2	Substrate length; 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75mm
Supply voltage	Substrate length = 35mm Substrate cell density = 400cps Environment conditions = air with H ₂ O Loading weight = 100 Loading ratio (S ₀ /S ₀ */γ -Al ₂ O ₃) = 3/5/2	Supply voltage; 9.0, 9.8, 10.6, 11.4, 12.2, 13.0, 14.8, 15.6, 16.4, 17.2, 18.0kV
Environmental conditions	Substrate length = 35 mm Substrate cell density = 400cps Supply voltage = 18kV Loading weight = 100 Loading ratio (S ₀ /S ₀ */γ -Al ₂ O ₃) = 3/5/2	Environment conditions; air with H ₂ O air only N ₂ only no air and H ₂ O
Catalyst loading weight	Substrate length = 35mm Supply voltage = 18kV Substrate cell density = 400cps Environment conditions = air with H ₂ O Loading ratio (S ₀ /S ₀ */γ -Al ₂ O ₃) = 3/5/2	Loading weight; W50, W100, W150, W200

마 발생을 조사하였다. 반응기 양단 전극에 걸리는 전압 효과를 관찰하기 위해 양단 전극 차를 9kV에서 18kV까지 0.8kV 간격으로 변화시켰다. 광촉매 담체의 재생 조건을 평가하기 위해 반응기로 유입되는 유체의 수분과 가스 조성을 변화시켜 가며 플라즈마 발생 및 전력 소모를 측정하였다. 광촉매 담지량이 플라즈마 발생에 미치는 영향 평가를 위해 W50부터 W200까지 W50의 간격으로 담지하였다. 여기서 W100은 촉매가 담체 표면에 100 μ m 두께로 담지 되기에 가장 적당한 중량을 의미한다.

2.4 광 반응기 실용성 평가

본 팀에서 제안한 광반응기의 실용성 평가를 위해 대표적인 악취 성분 제거 및 미연 탄화수소 성분 정화 실험을 수행하였다. 광반응기에 사용한 담체는 D55, L35, 100psi이다. 대표적인 미연 탄화수소 중으로는 프로판, 프로펜, 톨루엔을 사용하였으며, 악취 가스로는 메틸메르캅탄, 트리메틸아민, 암모니아 가스를 사용하였다. 미연 탄화수소 종의 농도 분석은 FTIR을 이용하였다 메틸메르캅탄과 트리메틸아민은 각각 PFPD와 FID가 장착된 GC를 이용하였다. 암모니아 가스는 UV기를 이용하여 측정하였다. 정화 반응시 소모된 전력은 벽 전압과 반응기 전원에서 각각 측정하여 가스 농도 데이터와 함께 PC에 저장하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 환경 조건이 미치는 영향

Fig. 2는 반응기로 유입되는 가스의 종류에 따른 전력 소모 곡선을 시간에 따라 나타낸다. 실험 조건은 실험실 내 압축공기를 직접 반응기에 공급하고, 수분은 가습장치를 이용하여 일정하게 공급되도록 하였다. 반응기로 가스가 유입되지 않는, 정체된 경우에는 초기 수십 초 동안 전력 소모가 증가하며 플라즈마 발생이 이루어지거나 최대 전력 값 이후 급격하게 감소하기 시작하여 30Watt 정도에서 유지된다. 이 때 플라즈마 발생

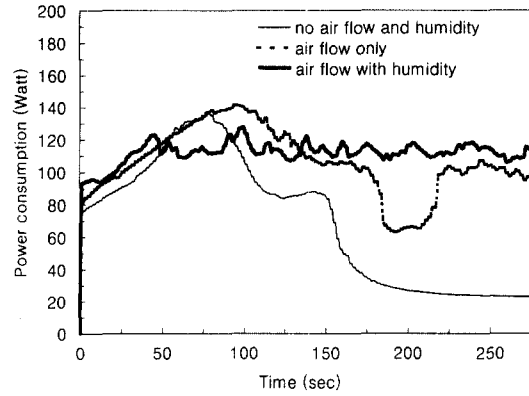
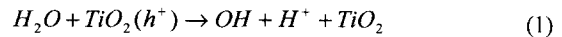


Fig. 2 Power consumption profiles according to environment conditions

도 소모되는 전력량에 비례하여 증가하다가 감소한다. 실험실 공기만을 공급한 경우, 정체된 경우보다 플라즈마 발생이 안정적이거나 역시 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 실험실 공기에 수분을 인위적으로 첨가한 경우, 전력 소모가 시간 경과와 상관없이 안정적이며 지속적으로 이루어짐을 알 수 있다. 99.999% 고순도 질소가스만을 공급한 경우, 플라즈마 발생보다는 아크 방전(arc discharge)이 매우 심하게 발생하여 실험이 불가능하였다.

상기 결과는 광촉매 상에서 발생하는 플라즈마를 안정적이며 효과적으로 발생, 유지하기 위해서는 반응기 환경 조건이 매우 중요하며, 특히 수분이 가장 중요한 역할을 하는 것으로 판단할 수 있다. 수분이 플라즈마 유지에 효과적인 이유는 크게 2가지를 고려할 수 있다. 첫째, 다음의 식에 나타난 바와 같이 광촉매의 재생과 밀접한 관계가 있기 때문이다.



광 또는 고전압에 의해 여기된 광촉매는 전자를 내어놓고 자신은 정공을 가진 채 불안정한 상태로 존재한다. 이러한 상태에서는 추가적인 전자 방출이 어려워 담체가 충분히 긴 경우 더 이상 플라즈마 발생에 도움을 주지 못한다. 수분이 존재하는 경우 식(1)과 같이 수분으로부터 전자를

받아 원래 상태로 복귀하고 다시 전자를 방출할 수 있게 되어 플라즈마 발생에 참여한다. 이러한 과정이 반복되면서 광촉매가 담지된 세라믹 벌집형 담체에 플라즈마 발생이 지속되는 것으로 볼 수 있다. 둘째, 수분 첨가가 담체의 정전용량(capacitance)을 증가시켜 플라즈마 발생이 지속되는 것으로 볼 수 있다.

3.2 광촉매 담지비 효과

광촉매 S0와 S0* 사이의 최적 담지비를 결정하기 위해 이들을 Table 2와 같이 담지하였다. Fig. 3은 각 담지비에 따라 소모된 전력과 발생한 플라즈마 내의 UV 강도를 나타낸다. 전력과 UV 강도는 각각 최대치를 기준 값으로 한 상대 값으로 표시하였다. D1, D2 샘플의 경우 상대적으로 현

Table 2 Sample name according to loading ratio

Sample ID	Loading ratio, wt%		
	S0	S0*	γ -Al ₂ O ₃
D1	10	70	20
D2	20	60	20
D3	30	50	20
D4	40	40	20
D5	50	30	20
D6	60	20	20
D7	70	10	20

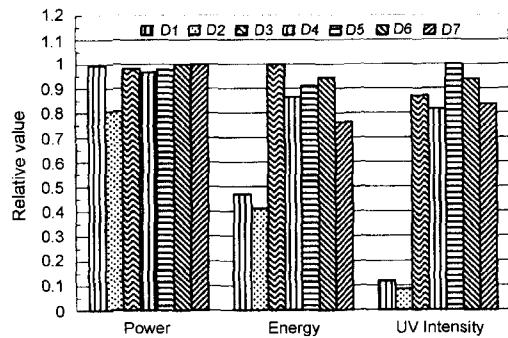


Fig. 3 Photocatalysts loading ratio effects on power consumption and UV light Intensity

저히 낮은 UV 강도를 보이는 것은 두 종이 광촉매가 갖는 특성차에서 기인한 것으로 플라즈마 발생에 있어 상호간의 일정비를 유지해야 함을 알 수 있다. 또한 D5 담지비에서 가장 강한 UV 강도를 나타냈으나 소모된 전력은 최대치보다 낮았다. 이는 소모된 전력 대비 발생하는 UV 강도를 최대화할 수 있는 최적의 담지비가 존재함을 의미한다.

3.3 광촉매 담지량 효과

Fig. 4는 광촉매 담지량에 따른 전력 소모와 플라즈마 내 UV 강도 관계를 나타낸다. 담지량이 증가함에 따라 전력소모는 점차 증가하며 UV 강도도 W150까지는 함께 비례하여 증가한다. W200의 경우, 소모된 전력에 비해 발생한 UV 강도는 크게 줄어들어 W100보다도 낮은 강도를 나타낸다. 이는 광촉매 층이 필요 이상으로 두꺼워지며 담지된 광촉매가 플라즈마 발생에 관여하기보다는 일종의 저항 역할³⁾을 하여 전기 에너지를 열 에너지로 전환하여 소비한 것으로 판단되며, 이는 고찰부분에서 다시 언급하였다. Fig. 4는 UV 강도를 최대화하기 위해서는 광촉매 담지량도 매우 중요하며 최적의 담지량이 있음을 의미한다.

3.3 담체 효과

Fig. 5는 담체 길이에 따른 반응기 인입 전압과 소모 전력 사이의 관계를 나타낸다. 선행 연구³⁾

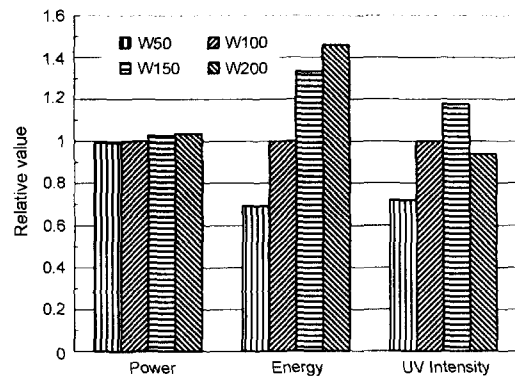


Fig. 4 Catalyst coating weight effects

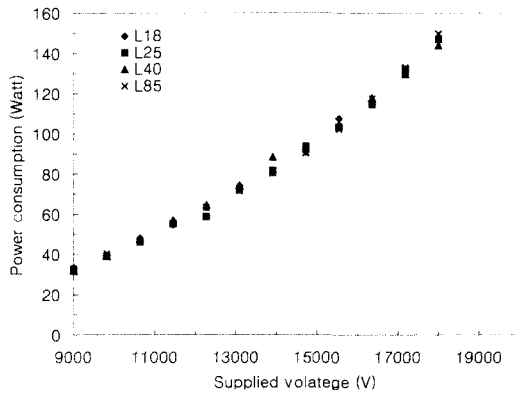


Fig. 5 Relation between power consumption and supply voltage

에 의하면 광촉매가 담지된 광반응기는 전기적으로 저항이므로 담체 길이가 증가하면 저항이 증가하여 소모되는 전력도 증가하여야 하나

그림에서 알 수 있듯이 길이에 상관없이 인입 전압과 밀접한 관계가 있어 순수 열 저항이 아닌 것으로 판단된다. 즉, 소모된 전력이 열로 변환되기보다는 빛으로 전환되면서 일반적인 저항의 개념을 벗어나는 것으로 보여진다. Fig. 6은 담체 길이에 따른 전력 소모와 플라즈마 내 UV 강도를 나타낸다. 전력소모는 길이에 비해 큰 차이가 없으나 UV 강도는 길이와 특정한 관계를 가지지는 않으나 L35, L65에서 가장 강한 값을 나타낸다. 상기 결과를 이해할만한 실험적 자료는 얻지

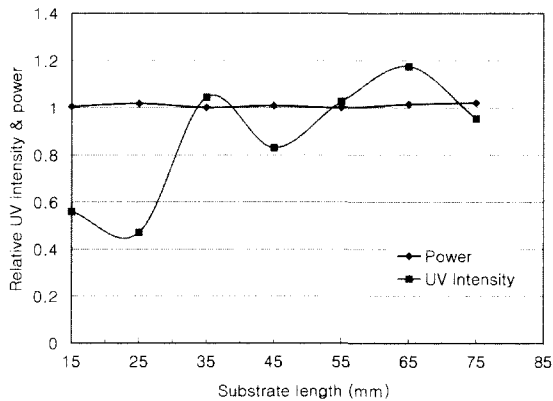


Fig. 6 Substrate length effects on UV intensity and power consumption

못하여 더 이상의 고찰은 불가능하며, 향후 지속적으로 이를 해결하기 위한 연구가 진행되어져야 할 것으로 보인다.

3.5 반응기 인입 전압 효과

Fig. 7은 반응기 인입 전압에 따른 전력 소모와 플라즈마 내 UV 강도 관계를 나타낸다. 인입 전압이 16.4kV까지 상승하면서 전력 소모도 증가하고 UV 강도도 증가하나 그 이후에는 전력 소모는 계속 증가하나 UV 강도는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 인입 전압이 어느 경계 값을 초과하기 전에는 전기 에너지의 빛 에너지로의 전환율이 열 에너지로의 전환율보다 높아 전력 소모 증가량과 비례하여 UV 강도도 증가하지만 경계 값을 초과하는 경우, 열 에너지로의 전환율이 상승하여 전력 소모는 증가하나 UV 강도는 감소하기 때문일 것이다. 인입 전압의 경계값은 광촉매 종류, 담지량 등에 의해 결정되는 것으로 보여진다.

3.6 고찰

지금까지의 연구 결과를 종합하면 다음과 같다. 첫째, 광촉매가 담지된 반응기는 저항체이나 일반적인 저항체의 경향을 따르지는 않는다. 둘째, 광촉매가 담지된 반응기의 저항은 공급되는 가스에 수분이 없다면 시간에 변하여 결국 감소한다. 셋째, 반응기에서 발생한 플라즈마를 유지

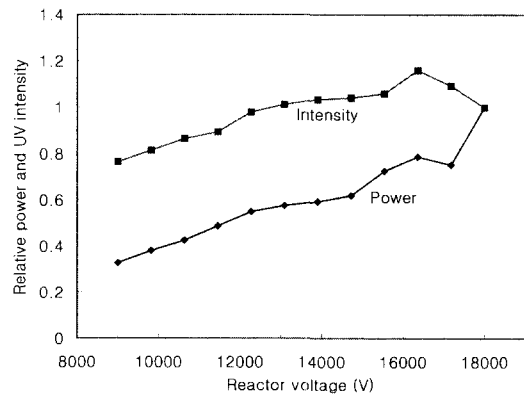


Fig. 7 Supply voltage effects on power consumption and UV intensity

하기 위한 가장 중요한 인자는 수분이다. 여기서 수분은 광촉매가 전자를 계속하여 방출할 수 있도록 광촉매를 재생하는 역할을 한다. 넷째, 낮은 전력 소모로 강한 UV 강도를 얻기 위한 최적의 조건으로 담체 길이, 촉매 담지비, 담지량 및 인입 전압 조건 등이 존재한다.

전력 소모는 전력공급기와 반응기에서 주로 일어나며 본 고찰에서는 반응기에 국한한다. 반응기에서의 전력 소모는 크게 두 가지 형태인 것으로 가정할 수 있다. 첫째는 저항인 담체를 가열하는데 소모되는 열 손실이다. 둘째는 광촉매 상에서 발생하는 플라즈마에서 소모되는 빛 손실이다. 여기서, 본 연구는 발생하는 플라즈마를 이용하므로 빛 에너지를 전환이 클수록 유리하므로 더 이상 손실로 언급하지 않는다. 담체를 가열하는데 소모된 열 에너지의 측정은 용이하지 않다. 실험 중에는 고전압이 담체 양단에 걸리므로 급속인 열전대를 이용하기 어렵고 IR를 이용한 비접촉식 측정도 플라즈마 광에서 나오는 IR 변화로 인해 측정에 오차가 발생한다. 따라서 담체가 가열되면서 열전달에 의해 공급 가스로 전달된 열 손실은 무시하고 공급하는 가스 양을 항상 일정하게 유지한 상태에서 담체의 온도 상승에 기여한 열 에너지만을 고려해 보았다. 담체를 가열하는데 소모된 열량은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$E_{loss} = m_{subt} \times C_{p_{subt}} \times \Delta T_{subt} \quad (2)$$

여기서, m_{subt} 는 담체 중량, $C_{p_{subt}}$ 는 정압열계수, ΔT_{subt} 는 담체의 온도 변화이다. 이를 무차원화하기 위해 식(3)을 도입하였다.

$$EF_{loss} = E_{loss} / E_{reactor} \quad (3)$$

여기서, EF_{loss} 는 에너지 손실 계수를, E_{loss} 는 담체에서 열 에너지로 손실된 에너지를, $E_{reactor}$ 는 반응기 전체에서 손실된 에너지를 의미한다. Fig. 8은 전력 소모와 UV 강도 사이에 가장 큰 차이를 보인 두 가지 경우에 대해 담체 온도 변화를 측정하여 식(2)와 (3)으로 계산한 EF_{loss} 의 상대 값을

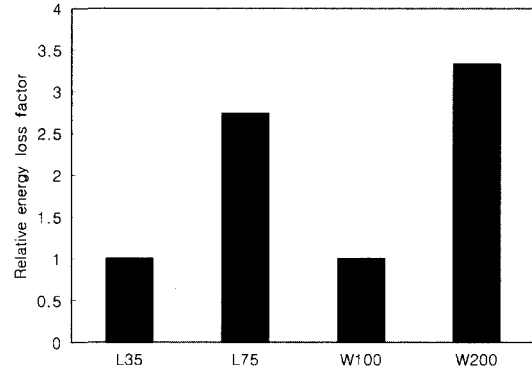


Fig. 8 Relative energy loss factor

나타낸다. 각각 작은 값을 기준으로 하여 변화 폭을 알 수 있도록 상대 값으로 표현하였다. 담체 길이가 35mm인 경우와 75mm인 경우를 비교하면 약 2.75배 정도 L75인 경우에서 열 에너지로의 전환에 의한 손실이 크게 발생하였음을 알 수 있다. 다음으로 담지량 W100인 경우와 W200인 경우를 비교하면 W100에 비해 W200의 경우가 약 3.25배 정도 열 손실이 많이 발생하고 있다. L75와 W200의 두 경우 모두, 기준 경우에 비해 전력 소모는 많지만 UV광은 약하게 발생하였으며(Fig. 4, 5 참고) 이는 빛 에너지로의 전환보다 열 에너지로의 전환이 많음을 의미한다. 따라서 앞 절에서 언급한 실험 결과 중 전력 소모는 계속하여 증가하나 UV 광 강도가 증가하다 감소하는 영역이 공급된 전기 에너지가 빛 에너지로의 전환에서 열 에너지로의 전환이 보다 많이 발생하는 경계임을 알 수 있다.

3.7 실용성 평가

Table 3은 광촉매 반응기의 실용성을 평가하기 위해 수행한 각 가스 성분의 유입 농도와 분석 장비 및 정확도를 나타낸다. 각 평가시 벽 전원에서 전력소모는 150Watt였으며, 반응기에서의 전력 소모는 75Watt이었다. 각 성분 정화 반응시 공간 속도는 20,000l/hr이었다. 악취에 해당하는 메틸메르캅탄, 트리메틸아민은 99.6% 이상의 높은 정확도를 보였고, 암모니아는 이보다 낮은 98.5

Table 3 Practicability test results with representative gases of bad smells and automotive exhaust

Gas	Inlet conc., ppm	Detector	Conversion, %
CH ₃ SH	1.0	GC/PFPD	99.6
TMA	27.0	GC/FID	99.7
NH ₃	20.0	UV	98.5
C ₆ H ₅ CH ₃	500.0	FTIR	100.0
C ₃ H ₆	500.0	FTIR	100.0
C ₃ H ₈	500.0	FTIR	59.7

% 정도의 정화율을 보였다. 이는 암모니아가 촉매 표면에 흡착되거나 온도 상승에 따른 탈착 속도가 다른 가스보다 빠르기 때문인 것으로 판단된다. 자동차 배기 가스 성분의 대표종인 톨루엔과 프로펜은 각각 100% 정화율을 보였으나 프로판의 경우 59.7% 정도의 효율을 보였다. 이는 프로판이 광촉매 상에 흡착되기 어려운 분자 구조를 가지고 있어 표면 반응인 광반응이 효율적으로 작용하지 못한 것으로 보인다. 이를 향상하기 위한 방법으로 선행 연구 결과²⁾를 바탕으로 조촉매를 선정, 첨가하여 추가 실험할 예정이다.

4. 결론

광촉매를 담지한 세라믹 벌집형 담체를 이용한 광촉매 정화 시스템의 기초 연구로 설계 인자가 플라즈마 발생 및 전력 소모에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 연구 결과 중 최선의 조합으로 광촉매 반응기를 제작하고 대표적 미연 탄화수소 및 악취 성분에 대한 정화 반응을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 세라믹 벌집형 담체에 담지된 광촉매 상에서 발생한 플라즈마 내의 UV 강도는 광촉매 재료, 담지비, 담지량, 반응기 인입 전압에 따라 영향을 받는다.

2) 상기 영향을 미치는 인자의 최적 조합에 따라 UV 광 강도가 결정될 수 있으나, 소모된 전기 에너지가 빛 에너지로의 전환이 열 에너지로의 전환보다 우수하도록 최적의 플라즈마 발생 조건을 이해하고 예측하기 위해서는 보다 많은 기초 연구가 필요하다.

3) 공급 가스 내의 수분이 플라즈마 발생을 유지하는데 결정적인 역할을 하며, 이는 공급된 수분이 광촉매의 정공에 전자를 제공하여 광촉매를 재생하기 때문이다.

4) 세라믹 벌집형 담체를 이용한 광촉매 반응기의 정화 실험에서 대표적인 악취 성분과 탄화수소 종을 매우 효율적으로 정화하여 그 실용성을 입증하였다.

후 기

본 연구의 일부는 G7 차세대자동차기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 손건석, 고성혁, 김대중, 이귀영, "광촉매를 이용한 탄화수소 저감연구," 한국자동차공학 회논문집, 제8권 제5호, pp.47-53, 2000.
- 2) G. S. Son, S. H. Ko, D. J. Kim, S. W. Yun, K. Y. Lee, "Evaluation of Additive Catalyst Effects and durability of Photocatalysts," 第16回内燃機關 シンポジウムガン 講演論文集, pp.157-162, 2000.
- 3) 손건석, 윤승원, 고성혁, 김대중, 송재원, 이귀영, "세라믹 벌집형 담체를 사용한 광촉매 반응기의 플라즈마 생성에 관한 연구," 한국자동차 공학회 춘계학술대회논문집, pp.170-176, 2001.
- 4) G. S. Son, S. H. Ko, K. Y. Lee, "Additive Catalyst for an Automotive Photocatalyst System," Int. J. of Auto. Tech. Vol.1, No.2, pp.89-94, 2000.