Journal of Environmental Science International
34(6); 349~357; June 2025
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.6.349

ORIGINAL ARTICLE

이산화티탄 광촉매 기반 UV (Ultraviolet) 광원별 아황산가스 제거율 비교

이상훈* · **류태욱**[1)]
계명대학교 환경공학과, [1)]계명문화대학교 소방환경안전과

Comparison of SO_2 Gas Removal Efficiencies by UV (Ultraviolet) Light Sources Based on TiO_2 Photocatalysis

Sang-Hun Lee*, **Tae-Uk Ryu**[1)]
Department of Environmental Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea
[1)]Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University, Daegu 42601, Korea

Abstract

This study investigated the removal efficiency of sulfur dioxide (SO_2) gas through photocatalysis based on UV-C (Ultraviolet C) light sources. The key factors included the effects of UV-C light source types, the presence of a TiO_2 photocatalyst, and variations in SO_2 inlet concentrations on SO_2 removal efficiency. The UV-C light sources were chosen as a commercial 10 W mercury lamp (referred to as A), and two low-power UV-C LEDs (0.01 W and 0.07 W, referred to as B1 and B2, respectively), aiming at promoting energy savings in the photocatalysis. As a result, compared with preliminary photocatalysis without TiO_2 catalyst, the main reaction using the coated TiO_2 photocatalyst significantly improved SO_2 removal across all the light sources, ranked as A 〉 B2 〉 B1. However, both B1 and B2, despite significantly lower light power than A, were able to achieve comparable removal efficiency with reaction durations 3 ~ 5 times longer than those of A. This suggests the feasibility of using low-power light sources when reasonably longer reaction duration would be acceptable. Additionally, increase of inlet SO_2 concentrations from 150 up to 450 or 600 ppm LED to reduction in overall removal efficiency.

key words : Photocatalysis, TiO_2, UV-C (Ultraviolet C), SO_2 gas

1. 서 론

전 세계적으로 산업 발전 및 도시화로 인한 에너지 소비 증가로 석탄 등 화석연료 사용량이 증가하고 있다. 또한, 고유가의 대안으로 많은 국내외 화력발전에 저렴한 저품위 석탄을 연료로 채택하고 있다. 그러나 저품위 석탄은 다량의 이산화탄소 배출과 더불어(Moon et al., 2009), 배출 가스 중 포함된 먼지, 중금속, 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등의 다양한 오염물질이 문제시 되고 있다. 특히, 황산화물과 질소산화물은 대기오염물질의 주 발생 원인으로 알려져 있다(Akyurtlu and Akyurtlu 2001). 특히, 황산화물 중 이산화황(SO_2)은 인체의 호흡기에 악영향을 미치며, 초미세먼지($PM_{2.5}$)나 O_3 등을 생성시키는 전구물질로서 다양한 오염 및 피해를 유발한다(Kim, 2006; Cheng and Zhang, 2018; EPA, 2025). 따라서, 화력발전을 비롯한 전세계 다양한 저품위 석탄 사용처에서 아황산가스(SO_2) 배출 저감에 큰 노력을 기울이고 있다. 기존 아황산가스 저감 연구는 배기가스에서 발생하는 아황산가스를 보다 효율적으로 처리할 수 있는 기술 개발에 중점을 두고 진행되고 있다. 이는 기존 설비에 장비를 추가하여 별도의 탈황설비 없이 운영할 수 있는 성능 향상

Received 26 May, 2025; **Revised** 15 June, 2025;
Accepted 16 June, 2025
***Corresponding author** : Sang-Hun Lee, Department of Environmental Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea
Phone : +82-53-580-5912
E-mail : shlee73@kmu.ac.kr

방안을 포함하고 있다(Youn and Kim, 2000; Akyurtlu and Akyurtlu 2001).

또한, 기상용화된 배연탈황공정(Flue gas desulfurization, FGD)의 처리 효율을 개선시키기 위한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 방안은 여전히 높은 처리 비용, 2차 오염물질 배출 등에 의해 실용화 실적이 미미하며, 이를 보완할 수 있는 새로운 방안이 요구되고 있다(Ye et al., 2014). 이에, 고도산화공법(Advanced oxidation process, AOP)이 대안 기술로 주목받고 있으며, 이 중에는 자외선(Ultraviolet, UV)을 이용한 기술도 포함된다. 자외선은 대기 중 산소 분자를 분해하고 O·radical을 생성시킬 수 있다. 이러한 라디칼은 그 자체로도 강력한 산화제일 뿐만 아니라 산소 분자와 반응하여 강력한 산화제인 오존을 생성한다. 또한 특정 기체 환경에서 다시 광분해 과정을 통해 OH·radical 등과 같은 활성 화학종을 생성시키기도 한다. 여기에 대기 중 수분에 의해 추가적인 radical 반응도 발생될 수 있다. 상기 메커니즘에 의한 아황산가스 제거반응은 다음 식(1) ~ (8)과 같다(Lee, 2000).

$$O_2 + hv \rightarrow 2O\cdot \quad \cdots\cdots (1)$$
$$O\cdot + O_2 \rightarrow O_3 \quad \cdots\cdots (2)$$
$$O_3 + hv \rightarrow O_2 + O\cdot \quad \cdots\cdots (3)$$
$$O + H_2O \rightarrow 2OH\cdot \quad \cdots\cdots (4)$$
$$SO_2 + OH\cdot \rightarrow HSO_3 \quad \cdots\cdots (5)$$
$$HSO_3 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2\cdot \quad \cdots\cdots (6)$$
$$HSO_3 + OH\cdot \rightarrow H_2SO_4 \quad \cdots\cdots (7)$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \quad \cdots\cdots (8)$$

특히 이산화티탄(TiO_2)은 자외선을 에너지원으로 하는 반영구적인 불균일계 촉매반응이다. 이황화몰리브덴(MoS_2)와 황화카드뮴(Cds) 같은 금속 황화물은 광부식이 발생하고 산화아연(ZnO)은 산에 취약하는 등 안정도가 떨어진다. 반면 이산화티탄은 광부식에 강하고 무독성에 저렴하여 경제적으로 생성할 수 있으며, 친환경적인 AOP 공법으로 인정받고 있다(Henderson, 2002; Diebold, 2003). 이산화티탄 광촉매는 자외선을 받으면 공기 중의 산소나 수분과 반응하여 전자/정공 및 강력한 산화력을 가진 OH·radical과 과산소 이온 등을 생성한다. 이에 관련된 반응 메커니즘은 다음 식(9) ~ (12)와 같다.(Jeon et al., 2000; Lim, 2015; Seo, 2016)

$$TiO_2 + hv \rightarrow e^- + hole^+ \quad \cdots\cdots (9)$$
$$hole^+ + H_2O \rightarrow OH\cdot + H^+ \quad \cdots\cdots (10)$$
$$e^- + O_2 \rightarrow O_2^-\cdot \rightarrow O\cdot \quad \cdots\cdots (11)$$
$$O\cdot + O_2 \rightarrow O_3 \quad \cdots\cdots (12)$$

광촉매는 자외선 광에너지를 band-gap 에너지 이상 흡수 후 생성하는 전자-정공 전하쌍이 반응물질의 산화, 환원 전위와 반응하여 아황산가스의 광화학반응에 영향을 미친다(Jeon et al., 2000; Lee et al., 2011). 대기 중 수분과 산소가 존재할 경우 광촉매 반응에 의해 생성된 radical은 아황산가스를 산화시켜 H_2SO_4를 생성시킨다. 이에 관련된 아황산가스 제거반응 메커니즘은 식(13) ~ (19)와 같다고 추정된다(Lee, 2000; Sorokin, 2010; Xu et al., 2014).

$$SO_2 + O\cdot \rightarrow SO_3 \quad \cdots\cdots (13)$$
$$SO_2 + OH\cdot \rightarrow HSO_3 \quad \cdots\cdots (14)$$
$$SO_2 + HO_2 \rightarrow SO_3 + OH\cdot \quad \cdots\cdots (15)$$
$$SO_2 + O_3 \rightarrow SO_3 + O_2 \quad \cdots\cdots (16)$$
$$HSO_3 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2\cdot \quad \cdots\cdots (17)$$
$$HSO_3 + OH\cdot \rightarrow H_2SO_4 \quad \cdots\cdots (18)$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_{4(q)} \quad \cdots\cdots (19)$$

자외선 기반 탈황설비는 자외선을 활용하여 상기 산화반응을 유도하여 아황산가스 가스를 처리한다. 이는 전자빔이나 플라스마와 같은 고비용의 설비나 고에너지가 필요하지 않으며, 2차 오염 및 유해 부산물을 발생하지 않아 친환경적인 대안 기술로 주목을 받고 있다. 다만, 자외선 광원으로 흔히 사용되는 수은램프는 사용 시 램프에서 발생되는 열로 인해 주변 온도를 불필요하게 상승시키고 램프의 수명 단축 및 에너지 소비 효율 저감 등의 단점이 보이고 있다. 이에, 본 연구에서는 자외선 수은램프의 대안으로 저출력 UV-C LED (Light-emitting diode) 광원 및 이산화티탄 광촉매를 이용하여 아황산가스의 제거를 시도하였다. 이를 위해 UV-C

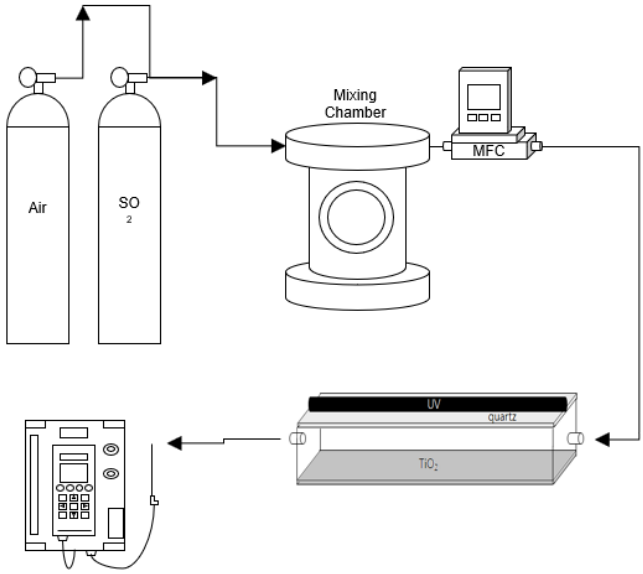

Fig. 1. A schematic diagram of the photocatalytic reactor for SO_2 gas removal by UV-C light.

광원, 이산화티탄 광촉매 유무 및 아황산가스의 초기농도에 따른 아황산가스 제거율 변동을 비교하였다. 또한, 광원의 출력 대비 아황산가스의 제거 효율 및 가용성도 논의하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 반응기

본 연구에서는 먼저 이산화티탄 광촉매 없이 반응기에 3종류의 UV-C 광원을 이용하여 회분식 반응기 내 아황산가스를 제거하는 예비실험을 진행하였다. 그리고, 이후 광촉매를 반응기 하부에 코팅하여 동일한 방식으로 본 실험을 진행하였다. 여기서 반응기는 4 L 용량 및 광원에서의 조사거리를 100 mm로 맞춰 제작하였다. UV-C의 투과율을 높이기 위해 반응기 내 자외선 투과면에 석영판을 사용하였다. UV-C 광원을 반응기 상단에 설치하여, 광원이 반응기 혹은 촉매에 조사되는 빛의 투과방향을 한 방향으로 제한하였다. 반응기 내로 들어오는 외부의 빛을 차단하기 위하여 반응기 주변에 암막커튼으로 덮었다. 반응온도 및 습도는 각각 22.7±0.1℃ 및 48±2% R.H. 범위 내로 유지하였다. 3가지의 UV-C 광원은 (A) UV-C 수은램프(Sankyo Denki Co., Ltd., Japan)는 253.7 nm의 중심파장 및 10 W의 출력을 사용하였으며; (B1) UV-C LED (Ericsong Company Limited, Korea)는 275 nm의 중심파장 및 0.01 W의 출력 그리고 (B2)는 (B1)과 중심파장은 동일 하지만 0.07 W의 출력을 사용하였다. 참고로 (A) 광원은 상용제품인 반면 (B1)와 (B2) 광원은 주문 제작한 것인데, 후자의 경우 LED 광원의 장시간 조사 시 발열로 인한 파손 방지를 위해 광원 부근에 알루미늄 방열판을 부착하였다.

2.2. 아황산가스 제거성능 실험 및 분석 방법

반응 전 반응기 내부의 잔류 가스 제거를 위해 헬륨(He) 가스를 주입하였다. 예비실험에서는 아황산가스 2000 ppm을 mixing chamber 내에서 공기와 혼합하여 아황산가스 150 ppm으로 희석하였다. 이 때, 공기+아황산가스 혼합기체의 유량과 혼합비율은 질량유량 제어기를 이용해 조절하였다. 광화학반응은 총 120 min. 까지 진행하였으며, 각 반응에서 30 min., 60 min., 90 min., 120 min. 시점에 반응기에서 시료를 채취하여 아황산가스 농도를 분석하였다. 아황산가스의 제거효율(Removal efficiency: RE)은 [(유입농도-유출농도)/유입농도(%)]로 평가하였다. 본 실험에서는 상기 예비 실험과 동일한 조건에서 광촉매인 이산화티탄 분

말(Daegusa, P-25)을 추가하여 실험하였다. 이산화티탄 분말은 반응기 내부 표면에 딥 코팅(Dip coating)방식으로 고정화하였다. 딥 코팅은 반응기 하부 내부 표면에 이산화티탄 0.083 g/cm^{2}을 300 mL의 증류수에 분산시켜 균일하게 바른 후 40℃에서 24시간 동안 건조시켜 부착한 것이다. 이산화티탄 광촉매를 Dip coating 시킨 상태에서 아황산가스의 초기 유입농도는 150, 300, 600 ppm으로 다양하게 하여 UV-C 광원을 조사하여 아황산가스 제거효율을 평가하였다. 전술된 광화학 반응기 및 아황산가스 제거흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

아황산가스 농도의 측정을 위해 휴대용 연소가스 분석기(Testo, Testo-350 xl, Germany)를 사용하였다. 분석기의 아황산가스 농도 측정범위는 0 ~ 5000 ppm, 정확도는 ±5 ppm이며, 가스 시료 채취는 분석기에 장착된 Probe를 통해 이루어지며, 채취에서 측정완료까지의 소요시간은 0.5 min.이다. 반응 및 측정 온도는 22.7±0.1℃이며 습도는 48±2%로 고정하였다. 이러한 측정을 광화학반응 개시 후 매 30 min.마다 실시하였다.

3. 결 과

우선 UV-C 광원의 성능 평가를 위해 A type과 B1 type 및 B2 type을 사용하여 아황산가스를 제거하는 예비실험을 진행하였다. 그 결과, Fig. 2에 보인 바와 같이, 120 min. 광화학 반응에 의해 A type은 41% 이상, B1 type은 22%, B2 type은 33%의 제거효율을 나타내었다. B1-B2의 LED 제거효율이 A type에 비해서는 낮았으며 B2 type이 B1 보다는 높은 제거율을 보였다. 고출력 광원을 보유한 A type의 경우 모든 반응시간에서 가장 높은 제거효율을 보였으며 특히 반응초기(t 〈 60 min.)에 시간 당 제거 효율이 급격하게 상승하였다. 그러나, 반응시간 60 min. 이후에는 이러한 상승률이 급격히 둔화되어 제거효율이 36% ~ 40% 범위에서 비교적 일정하였다. 따라서, A type에 대한 반응시간 대비 제거효율은 2차 함수의 비선형 곡선을 따르는 것으로 보인다. 반면, B1-B2 types의 경우 전반적으로 반응시간에 따른 제거효율이 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 즉, 이들의 반응시간 대비 제거효율은 보다 선형에 가깝다. 또한, 상대적으로 고출력 광원이 포함된 B2의 선형 기울기가 B1 대비 약 1.6배 높았다. 이를 종합해 보면 광원의 출력이 높을수록 아황산가스 제거에 필요한 광화학 반응이 신속히 진행되어 제거효율이 빨리 증가하는 것으로 판단된다.

실험 결과는 Fig. 3 ~ 5로 나타낸 바와 같이 유입농도 별로 약간의 차이를 보였다. 구체적으로, 유입농도 150 ppm 하에서는 광원 A type의 경우 60 min. 반응 후 아황산가스가 98% 이상 제거되었다. 반면, B1-B2 types은 반응 60 min. 후에도 50%를 하회하였으며, 120 min. 반응 시 각각 59% 및 80%였다. 유입농도 600 ppm 조건에서는 A type의 경우 60 min. 반응 후 86%, 120 min. 반응 후 95%의 제거효율을 보였다. B1 type은 60 min. 및 120 min. 반응에 각각 33% 및 약 48% 정도였으며 B2 type은 60 min. 및 120 min.의 반응시간에서 각각 37% 및 75%의 제거효율이 나타났다. 아황산가스 투입농도가 증가할수록 제거효율이 다소 감소하는 경향을 보였지만 그 차이가 전반적으로는 매우 크지는 않았다. 광원별 반응시간에 따른 제거효율의 경향을 보면, A type의 경우(Fig. 3) 모든 유입농도 조건하에서 반응 초기 제거효율의 급격한 증가 및 반응 후기에는 제거효율의 정체 혹은 매우 완만한 증가로 묘사된다. 이 경우, 반응시간 대비 제거효율은 2차 혹은 3차 함수 형태의 비선형 곡선으로 근사되었다. 유입농도 150 ppm의 경우 다른 유입농도에 비해 확연히 높은 제거효율을 보였으나, 반면, 유입농도 300 ppm과 600 ppm 하에서는 전자의 경우가 제거효율이 약간 높았지만 그 차이가 크지는 않았다. 한편, 유입 농도 300 ppm 및 600 ppm의 경우 (Fig. 4와 Fig. 5 참조), 반응시간에 따른 제거효율이 일정하게 증가하는 양상을 보였다. 즉, 반응 초기에는 A type 대비 제거효율의 증가가 완만하였으나 이러한 증가 추세가 반응 후기까지 지속되었다. 반응시간 대비 제거효율 곡선의 형태는 직선에 가까운 2차 함수 비선형 곡선를 보였으며, 이러한 선형 곡선에 근사한 형태는 B1 대비 B2 type에서 보다 현저하였다. 유입농도 별 제거효율의 차이는 크지 않았으며 이는 B2 type의 반응초기에서 유입농도 별 유사한 제거효율이 뚜렷하였다. B2 type에서의 초기(t 〈 1 min.) 제거효율은 B1과 차이가 적어 보이나, 반응 후기에는 B1 type의 경우, 제거효율의 증가세가 다소 감소하는 경향이 관측되나, B2 type은 대체로 초기의 증가세가 유지되고 있어 보인다. 참고로 전술된 회귀식 및 결정계수를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. The regression equations to describe the temporal variation of SO_2 gas removals in this study

	Light sources	Regression equations	Coefficient of determination
Preliminary experiment	A	$RE(\%) = -0.0038\ t^2 + 0.7892\ t$	〉99%
	B1	$RE(\%) = 0.1776\ t + 1.9073$	〉96%
	B2	$RE(\%) = 0.2878\ t$	〉99%
Main experiment (150 ppm inlet)	A	$RE(\%) = 0.0001\ t^3 - 0.0386\ t^2 + 3.4541\ t$	100%
	B1	$RE(\%) = -0.0032\ t^2 + 0.8818\ t$	〉95%
	B2	$RE(\%) = -0.0009\ t^2 + 0.8125\ t$	〉97%
Main experiment (300 ppm inlet)	A	$RE(\%) = 0.0001\ t^3 - 0.0281\ t^2 + 2.7696\ t$	100%
	B1	$RE(\%) = -0.002\ t^2 + 0.6874\ t$	〉95%
	B2	$RE(\%) = 0.7129\ t$	〉97%
Main experiment (600 ppm inlet)	A	$RE(\%) = 0.00007\ t^3 - 0.0216\ t^2 + 2.439\ t$	〉99%
	B1	$RE(\%) = -0.0011\ t^2 + 0.5423\ t$	〉96%
	B2	$RE(\%) = 0.6328\ t$	〉99%

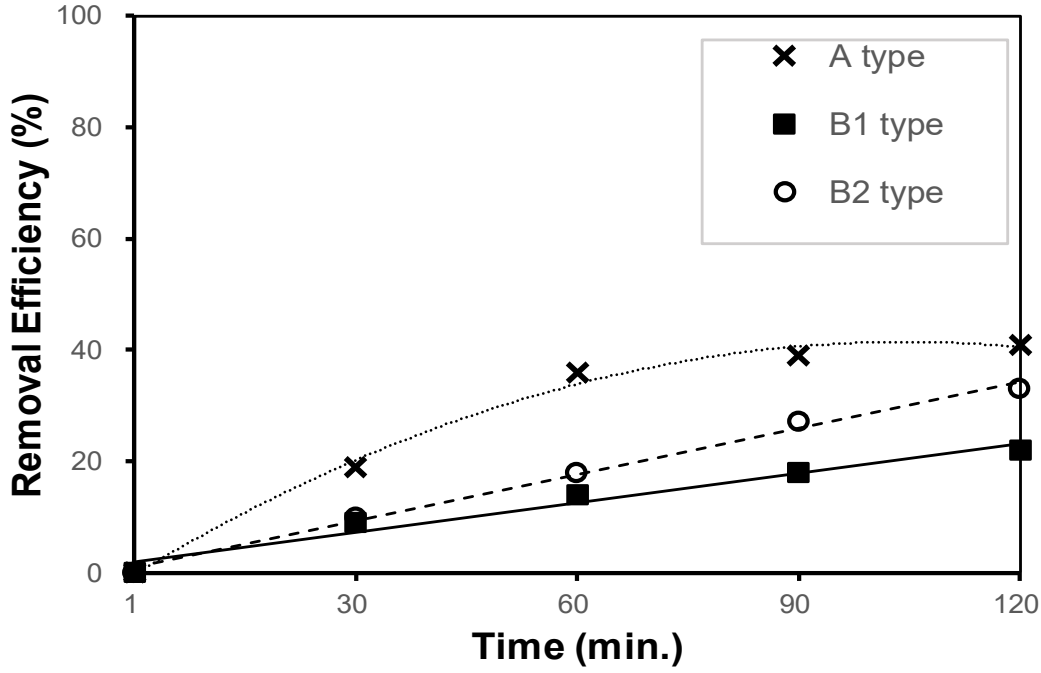

Fig. 2. SO_2 removal by UV-C lights in the preliminary experiment with the inlet SO_2 concentration of 150 ppm (A type: 10 W UV-C Hg lamp; B1 type: 0.01 W UV-C LED; B2 type: 0.07 W UV-C LED); the three curves describe the regression equations for A type (the short dashed line), B1 type (the solid line), and B2 type (the long dashed line).

4. 고 찰

본 연구에서는 고출력인 A type 광원(10 W)의 제거효과가 상대적으로 우수하지만 저출력의 B2 type (0.07 W)의 제거효율도 양호하여, 향후 적정 출력에 따른 에너지 저감과 적정 제거효율을 도모하는 공정최적화도 고민할 필요가 있을 것이다. 체류시간 증가에 따른 Han and Chang(2008)의 연구에 따르면 UV-C 광원 출력을 변동시켜(15, 30, 45 W) 40 ~ 45 ppm 수준의 벤젠 가스성분을 처리한 결과 벤젠 제거율이 약 10%에서 15% 정도까지 약간 증가하는데 그쳤다. 이런 결과는 Wang et al.(2003)의 연구에서 지나치게 강한 자외선 광도는 전자쌍 형성 및 전자 전달 속도의 증가보다 전자와 정공 간의 재결합 속도를 더 빨리 증가시켜 오히려 전체적인 광효율을 감소시킨다고 지적하였다. 반면, 본 연구와 기존 연구에서 관측된 바와 같이 제한된 단시간 체류시간 동안 높은 제거효율을 기대하기 위해서는 어느 정도 고출력의 광원을 사용하는 것이 적절해 보인다 (Jeon et al., 2000).

예비 실험 결과를 나타낸 Fig. 2에서의 광원별 데이터를 회귀곡선으로 나타내보면 A 광원은 2차 곡선으로 근사되는 반면(RE(%) = -0.0038 t^2 + 0.7892 t; R^2 〉 99%), B1 (RE(%) = 0.1776 t + 1.9073; R^2 〉 96%)과 B2 (RE(%) = 0.2878 t; R^2 〉 99%)는 1차식으로 근사된다. 이 때 목표 제거율을 20%로 가정하여 각 광원별 반응기가 해당 목표 제거율을 달성하는데 필요한 반응시간을 계산하면 A 광원은 약 30 min., B1 광원은 102 min., 그리고 B2 광원은 약 69 min.이 소요된다. 가장 고출력(10 W)인 A 광원과 이보다 출력이 1/143나 적은 B2 광원(0.07 W)이나 1/1000나 적은 B1 광원(0.01 W)의 필요 반응시간 비가 각각 2.4 및 3.4배 정도에 불과하였다. 즉, 반응시간을 여유롭게 둘 수 있다면 (이산화티탄 촉매가 없을 경우) A 광원보다 저출력인 B1이나 B2 후자의 광원을 적용하는 것이 보다 효율적일 수 있다.

한편, 이산화티탄 촉매를 포함한 본 실험에서(Fig. 3 ~ 5 참조)는 아황산가스 유입농도를 예비 실험 때와 같은 150 ppm으로 하였을 때, 광원별 회귀식은 1-3차식으로 묘사되었다. 제거율 20% 달성에 필요한 반응시간이 A 광원(RE(%) = 0.0001 t^3 − 0.0386 t^2 + 3.4541 t; R^2 = 100%)은 약 6 min. 그리고 B1 광원(RE(%) = -0.0032 t^2 + 0.8818 t ; R^2 〉 95%) 및 B2 광원(RE(%) = -0.0009 t^2 + 0.8125 t ; R^2 〉 97%)은 약 25 min. 정도로 약 4배의 차이가 났다. 참고로, 해당 유입농도에서 예비 및 본 실험 결과를 비교하면, 코팅된 이산화티탄 촉매에 의해 목표 제거율 20%에 필요한 반응시간이 2.8 ~ 5배 정도나 단축되었으며 특히 고출력인 A 광원에서의 단축 효과가 가장 컸다. 목표 제거율을 60%로 지정하였을 경우에도 A 광원의 경우 필요 반응시간은 약 23 min.에 불과한데 반해 B1은 약 123 min., B2는 약 81 min.이 필요하여 4 ~ 5배의 차이를 보였다. 또한, 유입 농도가 600 ppm으로 증가되었을 경우에는, 목표 제거율이 20%였을 때 A 광원(RE(%) = 0.00007 t^3 − 0.0216 t^2 + 2.439 t; R^2 〉 99%)은 약 9 min.의 반응시간이 필요하였으나, B1 광원(RE(%) = -0.0011 t^2 + 0.5423 t ; R^2 〉 95%)은 약 40 min., B2 광원(RE(%) = 0.6328 t ; R^2 〉 99%)은 약 32 min.이 소요되어 3 ~ 5배의 차이를 보였다. 목표 제거율을 60%로 하였을 때도 A 광원이 약 33 min.이 필요한 반면, B1광원이 약 168 min., 그리고 B2 광원이 약 95 min.이 소요되여 약 3 ~ 5배의 반응시간 차이를 보였다. 이상의 결과를 보면, 코팅된 이산화티탄 촉매에 의해 아황산가스의 광화학적 제거시간을 크게 단축시킬 수 있었으며, 목표제거율이 20%나 60%의 경우에는 광원별 반응시간의 비는 유사하였다. 이는 광원의 출력을 저하시켜도 아황산가스의 반응시간을 적절히 늘리면 서로 유사한 제거효율 거동을 얻을 수 있다는 점을 암시한다. 단, 이러한 추정은 본 연구에서 제시한 실험 및 관측 조건에 기반하였으므로, 해당 조건과 다른 경우에는 추가 실험 및 분석이 필요하다.

마지막으로 향후에는 이산화티탄 코팅 면적이나 재질, 광원에서의 조사거리 등에 따른 아황산가스 제거효율의 변화를 관측할 필요가 있을 것으로 보인다. 또한 반응기 내 수분의 영향도 있을 것으로 보이는데 Youn and Kim(2000)의 연구에 따르면, 광화학반응기 내 수분 주입시 아황산가스의 제거효율이 증가한다고 보고하였다. 이는 아황산가스가 수용성이고 수분에 의해 쉽게 생성되는 OH·라디칼의 영향이 아황산가스의 광화학적 제거에 큰 역할을 하기 때문이라고 하였다. 더불어, 향후 본 연구의 반응기 내 수분의 주입 또는 공기 내 수분의 함량에 따른 아황산가스 제거의 변동도 규명되어야 할 것으로 본다.

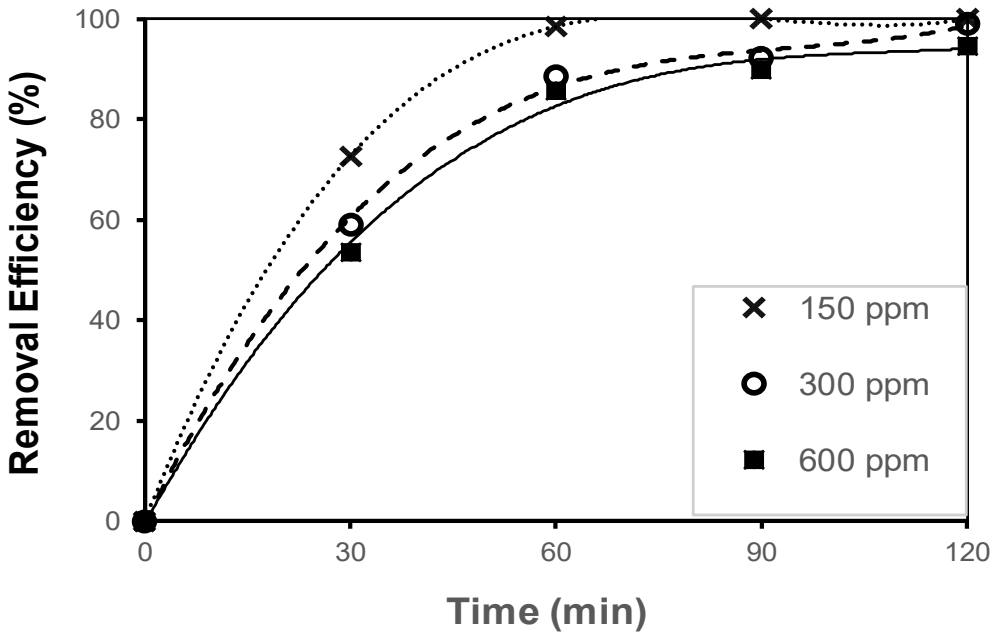

Fig. 3. The effect of initial SO_2 concentrations on SO_2 removal using photocatalysis with A type UV-C light source (10 W mercury lamp) and TiO_2 catalyst; the three curves describe the regression equations for the inlet concentration of 150 ppm (the short dashed line), 300 ppm (the long dashed line), and 600 ppm (the solid dashed line).

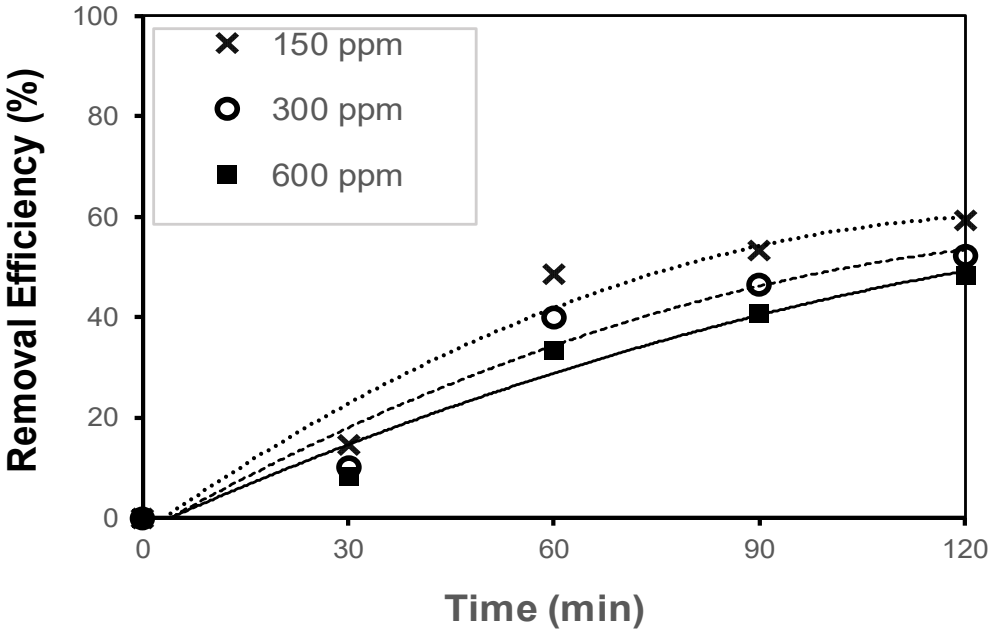

Fig. 4. The effect of initial SO_2 concentrations on SO_2 removal using photocatalysis with B1 type UV-C light source (0.01 W LED) and TiO_2 catalyst; the three curves describe the regression equations for the inlet concentration of 150 ppm (the short dashed line), 300 ppm (the long dashed line), and 600 ppm (the solid dashed line).

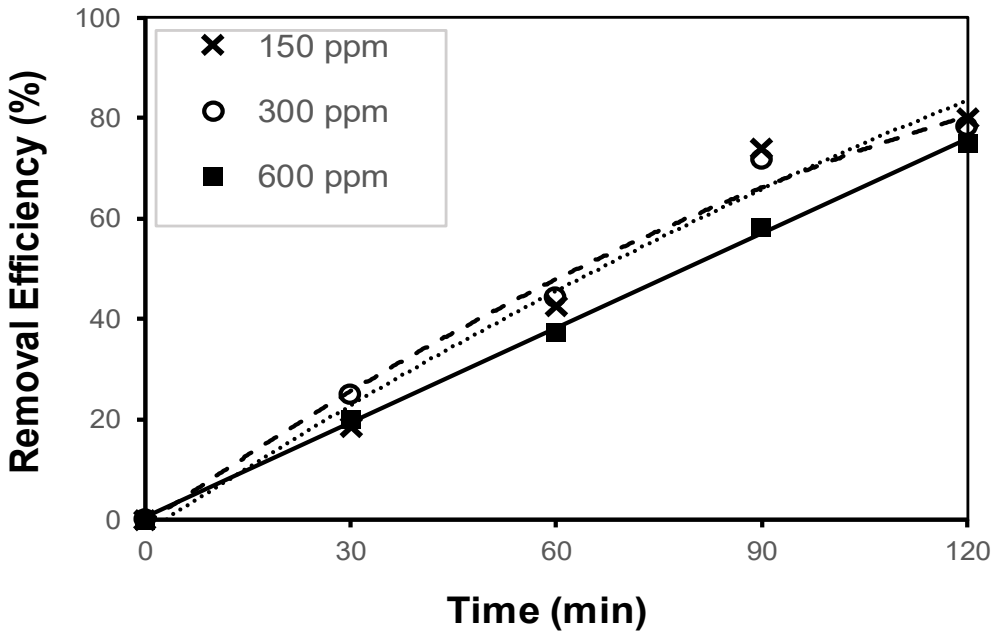

Fig. 5. The effect of initial SO_2 concentrations on SO_2 removal using photocatalysis with B2 type UV-C light source (0.07 W LED) and TiO_2 catalyst; the three curves describe the regression equations for the inlet concentration of 150 ppm (the short dashed line), 300 ppm (the long dashed line), and 600 ppm (the solid dashed line).

5. 결 론

본 연구에서는 AOP 응용 기술인 자외선 광원을 활용하여 아황산가스 제거효율을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 광원, 이산화티탄 광촉매 유무 및 아황산가스 유입농도의 변화에 따라 아황산가스 제거율의 변화를 관찰하고자 하였다. 광화학 반응을 유발시키기 위하여 UV-C 광원을 이용하였는데, 기존의 상용 UV-C 수은램프의 경우 작동시 고출력에 따른 과다 에너지 소비 등의 문제를 지니고 있어 대안으로 저출력 UV-C LED 2 종류를 이용하여 제거율을 비교하였다. 우선 이산화티탄 촉매가 없는 회분식 반응기에서 광원별 아황산가스 제거율의 차이를 관측한 결과, A 〉 B2 〉 B1 광원 순으로 제거효율이 높았다. 고출력 광원을 보유한 A 광원의 경우 모든 반응시간에서 가장 높은 제거효율을 보여 광원의 출력이 높을수록 아황산가스 제거효율이 빨리 증가하였다. 그러나, 가장 고출력(10 W)인 A 광원 대비 이보다 출력이 훨씬 적은 B2 광원(0.07 W)이나 B1 광원(0.01 W)을 이용하여도 20% 제거효율에 필요한 반응시간이 대략 2 ~ 4배 정도에 불과하였다. 이는 광원의 출력을 상당히 저하시켜도 반응시간을 적절히 늘리면 제거 효율을 유지시킬 수 있음을 암시한다. 한편, 본 실험에서는 이산화티탄 광촉매의 효과로 인한 아황산가스 제거효율이 모든 광원에 대해서 최대 4배까지 향상되었음을 확인하였다. 이 경우에도 A 광원 〉 B2 광원 〉 B1 광원 순으로 제거효율이 가장 높게 나타났으며 예비 실험 대비 A 광원의 제거효율 상승이 컸다. 특이한 점은 목표 제거율을 변동하여도 소요 반응시간의 광원 간 비율은 유사하였다. 이는 광원의 출력을 저하시켜도 아황산가스의 반응시간을 적절히 늘리면 서로 유사한 제거효율 거동을 얻을 수 있다는 점을 암시한다. 또한, 아황산가스 유입농도를 150 ppm에서 300 ppm 및 600 ppm으로 증가시킬 경우 모든 광원에서 제거율은 다소 하락하였지만 광원별 및 반응시간별로 비교적 유사한 제거거동을 보였다.

REFERENCES

Akyurtlu, A., Akyurtlu., J. F., 2001, Investigation of mixed metal sorbent/catalysts for the simultaneous removal of sulfur and nitrogen oxides, Final Tech. Rep., FG22-96PC96216-10, Hampton University, Hampton, USA.

Cheng, G., Zhang, C., 2018, Desulfurization and denitrification technologies of coal-fired flue gas, Pol. J. Environ. Stud., 27, 481-489.

Diebold, U., 2003, The surface science of titanium dioxide, Surf. Sci. Rep., 48, 53-229.

Environmental Protection Agency (EPA), 2025, Sulfur Dioxide (SO_2) Pollution, www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics.

Han, C. S., Chang, H. S., 2008, A Study on the operational variables of the UV-TiO_2 based photocatalytic air cleaning system, J. Korea Soc. Environ. Eng., 30, 293-301.

Henderson, M. A., 2002, The interaction of water with solid surfaces: Fundamental aspects revisited, Surf. Sci. Rep., 46, 1-308.

Jeon, M. S., Cho, M. S., Joo, H. K., Lee, T. K., Lee, H., 2000, Simultaneous treatment SO_2 and NOx using TiO_2/UV system, J. Korean Inst. Chem. Eng., 38, 536-540.

Kim, Y. P., 2006, Air pollution in Seoul caused by aerosols, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22, 535-553.

Lee, G. D., Woo, I. S., Hwang, M. H., Lee, I. B., Kim, K. J., Park, H. Y., 2011, A Study of air freshing by UV lamp and TiO_2 catalyst, Proceedings of the Safety Management and Science Conference, 205-227.

Lee, H. S., 2000, A Study on the removal of SO_x by Vacuum Ultraviolet, Masters Thesis, Kwangwoon University, Seoul, Republic of Korea.

Lim, J. H., 2015, Photocatalytic oxidation study by using sol-gel TiO_2 media, Masters Thesis, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea.

Moon, S. H., Kim, Y. W., Woo, I. S., Lee, S. J., 2009, An Experimental study on the fry drying of low-rank coal with a high moisture content, J. Energy Eng., 18, 213-220.

Sorokin, A., 2010, One conceivable mechanism of UV-light induced SO_2 Oxidation to H_2SO_4, Atmos. Chem. Phys., 10, 3141-3145.

Seo, D. I., 2016, A Study on the degradation reaction of dye with UV-or visible light-TiO_2, Masters Thesis, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.

Wang, W., Chiang, L. W., Ku, Y., 2003, Decomposition of benzene in air streams by UV/TiO_2 process, J. Hazard. Mater., 101, 133-146.

Xu, J., Li, C., Liu, P., He, D., Wang, J., Zhang, Q., 2014, Photolysis of low concentration H_2S under UV/VUV irradiation emitted from high requency discharge electrodeless lamps, Chemosphere, 109, 202-207.

Ye, J. h., Shang, J., Li, Q., Xu, W., Liu, J., Feng, X., Zhu, T., 2014, The use of vacuum ultraviolet irradiation to oxidize SO_2 and NO_x for simultaneous desulfurization and denitrification, J. Hazard. Mater., 271, 89- 97.

Youn, H. M., Kim, H. T., 2000, A Study on the photo-chemical reactor for the SO_2 removal using ultraviolet radiation, J. Korean Ind. Eng. Chem., 11, 861-866.

• Associate Professor. Sang-Hun Lee
Department of Environmental Engineering, Keimyung University
shlee73@kmu.ac.kr

• Endowed-chair professor. Tae-Uk Ryu
Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University
ryutw11@gmail.com