

Simultaneous Reduction of NO/SO₂ Gas Using Fe(II)EDTA Solution at Low Temperature Conditions and Analysis of Solution Regeneration Characteristics by Zn

저온조건에서 Fe(II)EDTA 용액을 이용한 NO/SO₂가스의 동시 저감 및 Zn에 의한 용액 재생 특성 분석

Jung Hoon Yoo¹, Kang-San Lee², Jun Su Park³, Hang Joo Shin⁴, Young-joo Lee⁵, Jongwon Choi⁶

유정훈¹, 이강산², 박준수³, 신항주⁴, 이영주⁵, 최종원⁶

¹ Doctor's Course, Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Korea, junghoon1991@kier.re.kr

² Doctor, Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Korea, ksiya@naver.com

³ Doctor's Course, Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Korea, junsu0622@kier.re.kr

⁴ Master's Course, Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Korea, tls232@kier.re.kr

⁵ Doctor, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Korea, lyj3380@kier.re.kr

⁶ Doctor, Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Korea, jwchoi@kier.re.kr

Corresponding author: Jongwon Choi

Abstract: In a combustion process using fossil fuels, harmful substances such as sulfur oxide(SO_x) and nitrogen oxide(NO_x) are emitted in a gas form. Among the harmful substances, about 95% of nitrogen oxides(NO_x) exist in the NO form, and most of sulfur oxides(SO_x) are composed of sulfur dioxide and sulfur trioxide. Sulfur oxide(SO_x) in gas is reduced in various ways due to its high solubility, but nitrogen oxide(NO_x) has low solubility and thus requires a separate treatment method. In this study, the simultaneous reduction characteristics of nitrogen oxide(NO_x) and sulfur oxide(SO_x) in exhaust gas were analyzed using Fe(II)EDTA solution to simultaneously reduce NO/SO₂ gas under low temperature conditions, and regenerative characteristics of the solution were analyzed using zinc(Zn) as a catalyst. In the simultaneous reduction experiment, the initial adsorption process according to the change in pH was analyzed, and the performance was analyzed in consideration of the NO adsorption amount. The regeneration experiment of the solution analyzed the adsorption performance according to the change in the molar concentration of zinc(Zn). It was sought to derive the optimal operating conditions for reducing sulfur oxide(SO_x) and nitrogen oxide(NO_x) simultaneously by analyzing the change in the molar concentration of pH and zinc(Zn) under low temperature conditions.

Keywords: Simultaneous Removal, Regeneration, Zn Powder, Desulfurization, Denitrification

Received: November 20, 2022; 1st Review Result: January 03, 2023; Accepted: February 28, 2023

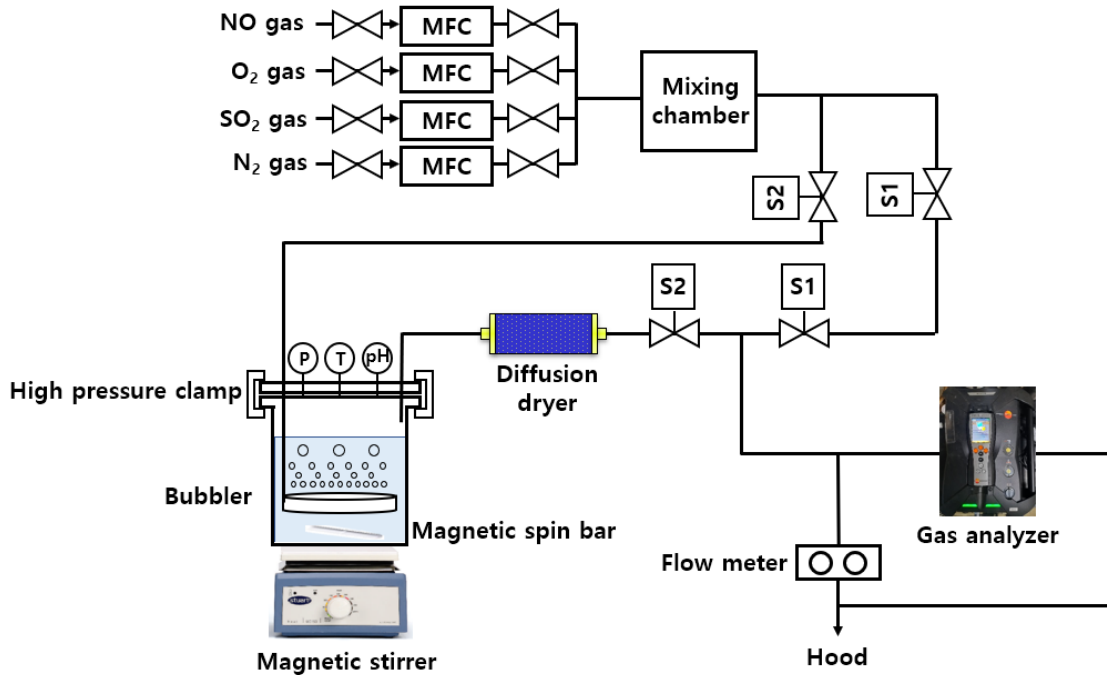
요약: 화석연료를 사용하는 연소 공정에서는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등과 같은 유해 물질이 가스 형태로 배출된다. 유해 물질 중 질소산화물(NO_x)은 약 95%가 NO 형태로 존재하며, 황산화물(SO_x)의 대부분은 이산화황과 삼산화황으로 구성된다. 가스내 황산화물(SO_x)은 용해도가 높아 다양한 방식으로 저감되나 질소산화물(NO_x)은 용해도가 낮아 별도의 처리 방식이 요구된다. 본 연구에서는 저온 조건에서 NO/SO₂ 가스의 동시 저감을 위해 Fe(II)EDTA 용액을 활용하여 배가스 내 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x)의 동시 저감 특성을 분석하였으며, 촉매로 아연(Zn)을 사용하여 용액의 재생 특성을 분석하였다. 동시 저감 실험은 pH 변화에 따른 초기 흡착 과정을 분석하였으며 NO 흡착량을 고려하여 성능을 분석하였다. 용액의 재생 실험은 아연(Zn)의 몰 농도 변화에 따른 흡착 성능을 분석하였다. 저온 조건에서 용액의 pH와 아연(Zn)의 몰 농도 변화 특성을 분석하여 실무 환경, 경제성, 효율 등을 고려한 최적의 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 동시 저감 운용 조건을 도출하고자 하였다.

핵심어: 동시저감, 재생, 아연분말, 탈황, 탈질

1. 서론

황(S)이 포함된 화석연료를 사용하는 연소 공정에서는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 미세먼지(PM) 등과 같은 유해 물질이 배가스로 배출된다. 황산화물(SO_x)의 대부분은 이산화황과 삼산화황으로 구성되어 있으며 대기의 수분과 반응하여 황산(H₂SO₄)을 생성한다. 일반적인 습식 스크러버의 이산화황(SO₂) 제거율은 약 95%이다[1]. 본 실험에서는 버블러(Bubbler)를 사용하여 용액 내에 작은 기포 형태로 가스를 공급해 주었으며, 혼합 가스 내에 포함된 이산화황(SO₂) 가스는 모든 실험 조건에서 100% 저감 효율을 달성하였다. 질소산화물(NO_x)은 약 95%의 일산화질소(NO) 가스와 약 5%의 이산화질소(NO₂) 가스로 구성된다. 질소산화물(NO_x) 저감을 위해 일반적으로 선택적 촉매환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)을 이용한다. 공정 간 촉매(Catalytic)는 일산화질소(NO)와 암모니아(NH₃)의 반응 속도를 증가시키고 N₂와 H₂O를 생성한다[2]. 질소산화물(NO_x) 저감 설비에서 촉매의 최적 반응 온도가 300°C 이상이기 때문에 연소설비의 열교환기 후단에 적용하여 사용한다. 그러나 이와 같은 설비는 먼지가 촉매 기공을 막고 배가스에 포함된 황산화물(SO_x)에 황 피독 되어 NO 전환 효율을 감소시킨다. 또한 황산화물(SO_x)이 암모니아(NH₃)와 반응하여 (NH₄)₂SO₄와 (NH₄)₂SO₃를 생성함으로써 2차 미세먼지를 발생시킨다[3]. 앞에서 언급된 문제점들을 해결하기 위하여 최근에는 금속킬레이트착화합물을 이용하여 질소산화물(NO_x)을 저감하는 기술이 연구되고 있다[4-6]. 금속킬레이트 착화합물 중 Fe(II)EDTA는 NO를 빠르게 흡착시켜 질소산화물(NO_x) 저감 효율을 높이고 저온에서 반응하여 Fe(II)EDTA-NO 화합물을 형성한다. 하지만 Fe(II)EDTA-NO 화합물은 NO를 흡착할 수 없기 때문에 공정의 효율 및 경제성을 고려하여 Fe(II)EDTA로 재생(환원)시켜 사용해야 한다. He et al.와 Suchecki et al.은 Fe, Al, Sn 그리고 Zn과 같은 금속 물질을 사용하여 용액을 재생하는 연구를 진행하였으며, 실험 결과 아연(Zn)을 환원제로 사용하는 재생 실험에서 가장 효율적인 결과를 도출하였다[7][8]. 따라서 본 연구에서는 저온 조건에서 배가스로 배출되는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)을 저감하기 위하여 용액의 pH와 환원제로 사용하는 아연(Zn)의 몰농도를 변화시키며 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법



[그림 1] NO/SO₂ 가스 동시 저감을 위한 흡착 및 재생 실험 장치 개략도

[Fig. 1] Schematic Diagram of Adsorption and Regeneration Experiment Device for Simultaneous Reduction of NO/SO₂ Gas

실험은 [그림 1]과 같이 증류수 1.5L가 담긴 비커에 Ferrous Sulfate Heptahydrate (FeSO₄·7H₂O, 99%, DAEJUNG CHEMICAL & METALS CO., LTD., South Korea)와 Na₂EDTA(99%, DAEJUNG CHEMICAL & METALS CO., LTD., South Korea)을 1:3 몰 비로 혼합하여 0.01몰의 Fe(II)EDTA 용액을 제조하였다. 산화를 방지하기 위하여 L-Arscorbic acid(99%, DAEJUNG CHEMICAL & METALS CO., LTD., South Korea)를 Fe(II)EDTA 기준 1:3 몰 비로 투입하였다. 제조된 용액에 NaOH(98%, SK chemical CO., LTD., South Korea)를 투입하여 pH를 3, 5, 7, 9로 조정하고, Magnetic stirrer를 사용하여 용액의 온도가 20°C가 유지될 수 있도록 하였다. 용액에 유입되는 가스의 총 유량은 3 LPM으로 N₂(99.99%), O₂(99.9%), NO(99.5%), SO₂(15%, N₂ balance gas) 가스를 각각의 MFC(Model 5850E, Brooks Instrument, USA)에 연결하여 일정한 유량으로 용액에 유입될 수 있도록 설계하였다. 유입되는 혼합 가스는 고압클램프로 고정해 일정한 압력으로 용액과 반응할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 유입되는 총 기체의 유량 3 LPM 중 N₂ 가스는 2.87 LPM, O₂ 가스는 0.12LPM(혼합 가스의 4%), NO 가스는 300ppm, SO₂ 가스는 600ppm로 설계하였다. 일정하게 유입되는 혼합 가스는 버블러를 통해 기포형태로 용액과 반응을 한 뒤 Diffusion dryer를 통과하며 수분을 제거해 측정 및 배출하였다. 배출가스는 가스(O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂ 등)를 초 단위로 측정할 수 있고, 동시에 유량과 가스 온도를 측정 가능한 가스분석기(Model 350K, Testo Inc., Germany)를 사용하였다. 본 연구에서는 NO 저감 효율이 80%에 도달하면 흡착 실험을 종료하고, 용액에 Zn(85%, SAMCHUN CHEMICALS CO., LTD., South Korea) 분말을 투입하여 흡착용액을 재생시켰다. 재생이 종료되면 다시 흡착과정과 재생과정을 반복하였으

며, NO 저감 효율이 80%에 도달하지 못하면 실험을 종료하였다. 재생과정에서 Zn 분말이 이온화되며 H⁺와 반응하여 재생 용액의 pH가 증가하는데, 이때 H₂SO₄(DUKSAN CO., LTD., South Korea)을 투입하여 실험 초기 pH로 맞추었다. He et al.의 연구에 따르면, Fe(II)EDTA-NO와 Zn반응의 이론적 당량비는 1:2.5이며 이 비율은 반응식(1)의 Zn이 Fe(II)EDTA-NO화합물만을 환원시키는 것만을 고려한 것이다. 재생과정에서 투입되는 Zn 분말의 양은 아래 식(2)와 실험 조건을 고려하여 결정하였다.



$$\lambda = \frac{2.5 Q_{gas} C_{NO} \eta_{ave} t_{80\%} \rho_{NO}}{MW_{NO}} \quad (2)$$

식 (2)의 Q_{gas}는 가스의 유량(LPM), C_{NO}는 혼합기체중 NO 가스의 농도(ppm), η_{ave}는 NO 가스 저감 효율의 평균(= $\frac{\eta_{max} + \eta_{80\%}}{2}$), t_{80%}는 NO 가스의 저감 효율이 80%에 도달하였을 때의 시간(min), ρ_{NO}는 NO 가스의 밀도(1.34/m³), MW_{NO}는 No 가스의 분자량(0.003001kg/mol)을 의미한다(단, $\frac{t_{80\%}}{dt} > 0$). NO 저감 효율(η)은 식 (3)를 통해 계산하였으며, Zn 분말에 의한 재생 효율 η_{R,n}은 식 (3)을 통해 계산하였다.

$$\eta = \frac{C_i - C_0}{C_i} \times 100(\%) \quad (3)$$

식 (3)의 C_i는 버블러 전단에서 측정된 가스의 농도(ppm)를 의미하고, C₀는 버블러 후단에서 측정된 가스의 농도(ppm)를 의미한다.

$$\eta_{R,n} = \frac{\eta_{MAX,n}}{\eta_{MAX,0}} \quad (4)$$

식 (4)의 η_{MAX,n}는 용액을 재생한 후 n번째 흡착과정에서 최대 NO 저감 효율, η_{MAX,0}는 초기 흡착과정에서의 최대 NO 저감 효율을 의미한다. 본 연구에서는 초기 용액의 pH에 따른 흡착 성능 실험과 Zn 투입량을 변화에 따른 재생 성능 실험을 진행하였다.

3. 실험 조건에 따른 성능 분석

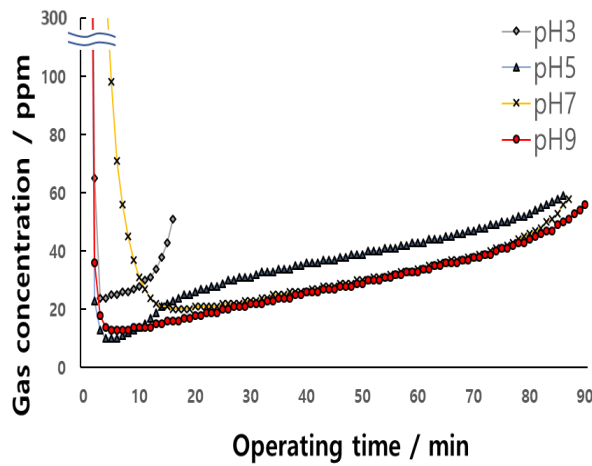
3.1 흡착 용액의 pH 변화에 따른 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂) 동시 저감 성능 분석

흡착 용액의 pH 변화에 따른 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂) 동시 저감 성능 분석을 위해 초기 용액의 pH를 3, 5, 7, 9로 설정한 후 밀폐된 용액에 NO 300ppm과 SO₂ 600ppm을 흘려주었다. Fe(II)EDTA 킬레이트 용액에서 흡착되지 못한 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂)의 측정데이터는 [표 1]과 [그림 2]로 정리하였으며 최대 흡착 효율, 흡착 시간, 흡착량을 비교하여 분석하였다. 이산화황(SO₂) 가스는 용해도가 높아 모든 pH 조건에서 100%에 가까운 저감 효율을 나타냈다. NO 가스의 최대 흡착 효율은 pH 5 용액에서 가장 높은 효율을 얻었고, 최대 흡착 지점 이후로 점차 흡착 효율이 감소함을

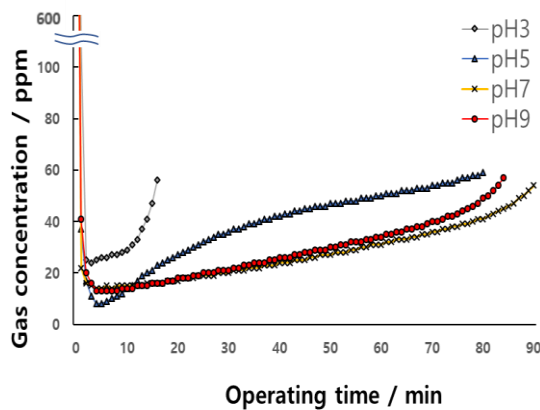
확인했다. 높은 pH의 용액일수록 흡착시간이 증가하는 경향을 보였으며 pH 5에서 흡착 시간이 급격히 증가하였고 pH 5 이상에서 pH가 증가할수록 흡착 시간의 증가 비율 감소했다. 흡착량은 주입된 가스에서 측정된 값을 뺀 값을 합하여 계산하였으며, 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\int_0^\alpha M - m(t)dt \quad (\text{단, } \left. \frac{dm(t)}{dt} \right|_{t=\alpha} > 0, m(\alpha) = 60) \quad (5)$$

식 (5)에서 M은 초기 가스 투입량(ppm), m(t)는 가스 측정량(ppm), α는 NO 가스의 저감 효율이 80%에 도달하였을 때의 시간(min)을 의미한다(단, $\left. \frac{dm(t)}{dt} \right|_{t=\alpha} > 0$). 흡착량 데이터는 가장 흡착량이 높은 조건을 기준으로 비교했으며 SO 가스의 흡착은 실험에 사용된 pH 변수 조건 중 pH 7 용액에서 가장 흡착량이 많았고 결괏값이 모두 최대 흡착량 대비 100%에 근접했다. NO 가스는 pH 9 조건에서 가장 흡착량이 많은 것을 확인하였다.



(a) NO



(b) SO₂

[그림 2] 흡착용액의 pH 변화에 따른 분당 NO/SO₂ 가스 측정량 (a) NO (b) SO₂

[Fig. 2] Measured Amount of NO/SO₂ Gas per Minute according to the pH Change of the Adsorption Solution (a) NO (b) SO₂

[표 1] 흡착용액의 pH 변화에 따른 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂)의 흡착 실험 결과

[Table 1] Adsorption Test Results of Nitrogen Monoxide (NO) and Sulfur Dioxide (SO₂) by pH Change of Adsorption Solution

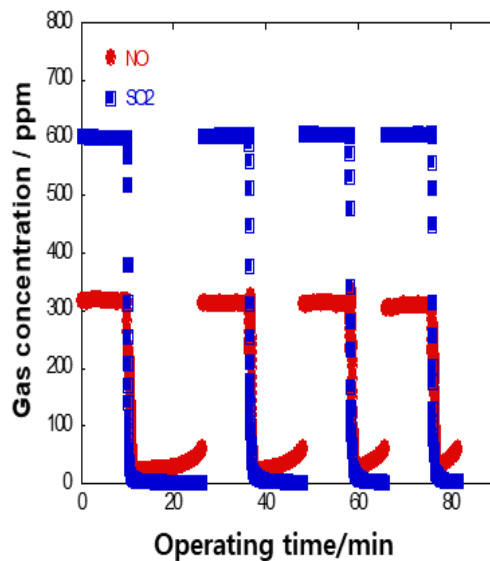
흡착 가스 종류	NO				SO ₂				
	pH	3	5	7	9	3	5	7	9
최대 흡착 효율(%)	92.41	96.66	93.36	95.67	99.67	100	100	100	100
흡착시간(min)	16.3	87.1	90.3	91.8	16.3	87.1	90.3	91.8	91.8
흡착량 (최대 흡착량 대비, %)	16.3	95.4	88.7	100	99	99	100	99	99

3.2 Zn 분말을 이용한 흡착 용액의 재생 성능 분석 (이론적 당량비, λ=3)

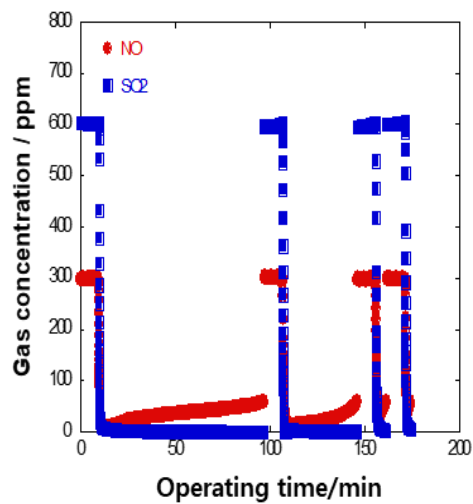
흡착된 용액에 Zn 분말을 이용하여 용액을 재생한 뒤 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂) 흡착 및 재생 실험을 반복 진행하였다. Fe(III)EDTA 환원, Fe(II)EDTA와의 반응에 따른 Zn(II)EDTA 생성, OH⁻와의 반응에 따른 Zn(OH)₂ 형성을 고려하여 Zn 투입량을 이론적 당량비(λ)의 3배로 선정하였다. 재생을 포함한 각 용액의 총흡착량은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{(\alpha_n - \alpha_{n-1}) < 5} \int_{\alpha_{n-1}}^{\alpha_n} M - m(t) dt \quad \left(\text{단, } \left. \frac{dm(t)}{dt} \right|_{t=\alpha_n} > 0, m(\alpha_n) = 60, m(\alpha_0) = M \right) \quad (6)$$

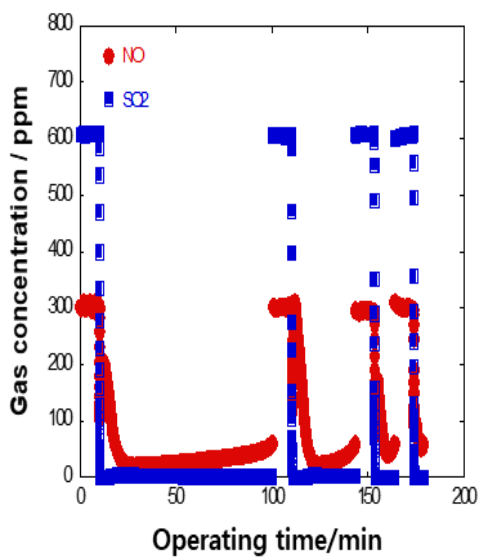
식 (6)의 α_n 는 식 (5)와 같이 NO 가스의 저감 효율이 80%에 도달하였을 때의 시간(min)을 의미한다(단, $\left. \frac{dm(t)}{dt} \right|_{t=\alpha} > 0$). 여기서 n=1은 초기 흡착을 의미하며, n>1은 재생 후 흡착을 의미하고, M(M=m(α₀))은 초기 가스 투입량(ppm), m(t)는 가스 측정량(ppm)이다. 흡착 및 재생 용액에 대한 일산화질소(NO)와 이산화황(SO₂)의 측정데이터는 [그림 3]에 도시하였으며, 흡착 및 재생 용액의 일산화질소(NO) 가스 흡착 성능 분석을 위해 [표 2], [표 3]으로 정리하였으며 n차 흡착 별 최대 흡착 효율, 흡착 시간, 흡착 횟수, 흡착량을 비교하여 분석하였다.



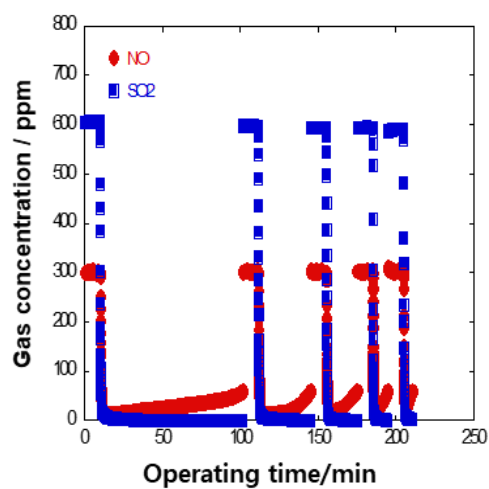
(a) pH 3



(b) pH 5



(c) pH 7



(d) pH 9

[그림 3] 흡착 및 재생 용액의 pH 변화에 따른 분당 NO/SO₂ 가스 측정량 (a) pH 3, (b) pH 5, (c) pH 7, (d) pH 9

[Fig. 3] Measurement of NO/SO₂ Gas per Minute according to pH Change in Adsorption and Regenerative Solutions (a) pH 3, (b) pH 5, (c) pH 7, (d) pH 9

[표 2] 흡착 및 재생 용액의 pH 변화에 따른 일산화질소(NO) 흡착 실험 결과
(a) 흡착 효율(%), (b) 흡착 시간(분)

[Table 2] Nitric Oxide (NO) Adsorption Experiment Results according to pH Change of Adsorption and Solution (a) Adsorption Efficiency(%), (b) Adsorption Time(min)

pH	흡착차수				
	1차	2차	3차	4차	5차
pH 3	92.41	92.31	90.35	89.29	-
pH 5	96.66	96.00	90.33	85.28	-
pH 7	93.36	92.33	86.05	82.21	-
pH 9	95.67	95.02	94.00	92.41	90.73

(a) adsorption efficiency(%)

pH	흡착차수				
	1차	2차	3차	4차	5차
pH 3	16.31	11.75	7.77	5.80	-
pH 5	87.05	39.23	5.52	2.88	-
pH 7	90.30	33.15	10.42	5.17	-
pH 9	91.78	33.78	19.77	9.78	5.53

(b) adsorption time(min)

일산화질소(NO) 흡착 실험 결과 재생효율의 최대치는 pH 5의 2차 흡착이었으며 3차 흡착 이후로는 pH 9 용액이 흡착에 유리한 것으로 확인되었다. 총 흡착 시간은 pH 3 용액이 41분으로 최소 흡착 시간을 나타내었고 최대 흡착 시간은 pH 9로 160분 동안 80% 이상의 흡착 효율을 유지하였다. pH 9 용액에서는 흡착 효율의 감소율이 낮아 흡착 용액이 5차까지 NO 가스를 흡착할 수 있었다.

[표 3] 흡착 및 재생 용액의 pH 변화에 따른 일산화질소(NO) 흡착 실험 결과(흡착량)

[Table 3] Nitric Oxide (NO) Adsorption Experiment Results according to pH Change of Adsorption and Solution (Adsorption Amount)

	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9
총 흡착량 (pH 9 최대 흡착량 대비, %)	30.11	82.53	79.20	100

최종적으로 유도된 식을 활용하여 총흡착량을 계산한 결과 pH 9의 흡착량이 가장 높았으며 이를 기준으로 계산했을 때 pH 5 조건이 다음으로 높은 흡착량을 보였고, pH 3은 30.11%로 최솟값을 보였다. 식 (7)과 같이 용액 속의 Fe(II)EDTA²⁻는 일산화질소(NO)와 결합하여 용액속에 Fe(II)EDTA-NO²⁻ 분자 형태로 녹기 때문에 직접적으로 흡착 효율 및 흡착 시간에 영향을 준다[8]. 산성 조건(pH<7)에서는 식 (8)과 같이 Fe(II)EDTA²⁻가 산성용액에 녹아 있는 수소이온(H⁺) 및 산소(O₂)와 반응하여 Fe(III)EDTA⁻로 산화되며 물이 생성되어 pH가 시간이 지남에 따라 중성에 가까워진다.



산성용액은 일산화질소(NO) 흡착이 진행됨에 따라 pH가 증가하였으며, [표 3]과 같이 pH 3 조건에서 최저 효율을 pH 9에서 최고 효율을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 저온 조건에서 Fe(II)EDTA 킬레이트 용액을 이용하여 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)을 동시 저감하는 실험을 진행하였다. 황산화물(SO_x)은 용액 내에 기포 형태로 투입되어 100%에 가까운 저감효율을 나타내었다. 저온 조건에서 배가스로 배출되는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)의 저감 성능을 분석하기 위하여 초기 용액의 pH에 변화를 주어 초기 흡착의 성능과 흡착 용액 재생에 사용하는 아연(Zn)을 투입하여 재생 후 흡착 성능을 분석하였다. 본 연구의 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 동시 저감 실험 결과는 다음과 같다.

1. Fe(II)EDTA 킬레이트 용액을 이용하여 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)을 동시 저감 실험 결과 NO 가스의 최대 흡착 효율은 pH 5 용액에서 가장 높은 효율을 얻었고 pH 9 용액에서 흡착량이 가장 많았다.
2. 재생에 필요한 아연의 이론적 당량비의 3배를 투입했을 때 재생효율의 최대치는 pH 5의 2차 흡착이었으며, 3차 흡착 이후로는 pH 9 용액이 흡착에 유리한 것으로 확인되었다. pH 9에서 용액은 총 5회 흡착 및 160분 정도의 흡착이 가능한 것으로 확인되었다(흡착 효율 80% 이상 유지).

산업현장에서 본 연구에 사용된 기술을 적용할 때 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 저감 효율만을 고려한다면 pH가 높을수록 유리하지만 장비 부식 및 재생을 위한 Zn 석출을 고려한다면 pH 5 조건에서 운전하는 것이 타당하다. 따라서 산업현장의 설치환경, Fe(II)EDTA 킬레이트 용액의 재생 가능 여부, 재생 가능 횟수, 산업 공정, 유지보수, 경제성 등을 고려하여 본 연구에 사용된 기술을 적용하여야 한다.

5. 감사의 글

본 연구는 2022년도 환경부의 재원으로 미세먼지 사각지대 관리 기술개발의 지원을 받아 수행한 연구 과제임. (과제번호 : 2020003060005)

References

- [1] Jang Du Hun, Study on integrated control system for the simultaneous removal of SO_x, Pm and NO_x in flue gas, Kyonggi University, Doctoral Dissertation, (2012)
- [2] Myung Sig Lee, A Study on the Modeling of Lifetime and Replacement Cycle Forecasting of De-NO_x SCR Catalyst, Seoul National University of Science and Technology, Doctoral Dissertation, (2018)
- [3] Y. Liang, X. Yao, L. Quin, W. Chen, J. Han, Simultaneous removal of SO₂ and NO_x from sintering flue gas using ammonia-Fe (II) EDTA combined with electrolytic regeneration, *Environment Protection Engineering*, (2018), Vol.44, No.2, pp.19-36.
DOI: <http://dx.doi.org/10.37190/epe180202>
- [4] F. He, X. Zhu, X. Chen, J. Ding, Performance, mechanism, and kinetics of NO removal by combined ascorbic acid and FeIIEDTA reaction systems, *Fuel*, (2021), Vol.284, 119070.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119070>
- [5] J. Peng, W. Yao, Z. Yang, Nitric Oxide Removal by Combined Ammonia and Fe (II) EDTA in a Packed Tower, *Journal of Environmental Engineering*, (2020), Vol.146, No.11, pp.04020125
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001807](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001807)
- [6] Y. G. Adewuyi, M. A. Khan, Nitric oxide removal from flue gas by combined persulfate and ferrous-EDTA solutions: Effects of persulfate and EDTA concentrations, temperature, pH and SO₂, *Chemical Engineering Journal*, (2016), Vol.304, pp.793-807.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.071>
- [7] T. T. Suchecki, B. Mathews, A. W. Augustyniak, H. Kumazawa, Applied kinetics aspects of ferric EDTA complex reduction with metal powder, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (2014), Vol.53, No.37, pp.14234-14240.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ie502100h>
- [8] F. He, X. Deng, M. Chen, Mechanism and kinetics of Fe (II) EDTANO reduction by iron powder under anaerobic condition, *Fuel*, (2016), Vol.186, pp.605-612.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.105>