

ORIGINAL ARTICLE

마이크로버블 장치를 이용한 제지공정 소성로 배기 오염물질 처리

정재억 · 정용준*

부산가톨릭대학교 환경공학과

Treatment of Exhaust Pollutants from a Lime Kiln of Paper-mill with Micro-bubble System

Jae-Ouk Jung, Yong-Jun Jung*

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

This work was performed to develop a dip injection wet scrubber (DIWS) system with chlorine dioxide as the oxidant. The exhaust pollutants from a lime kiln of paper-mill were introduced to the system. When NaClO_3 was used to oxidize NO into NO_2 , the oxidation was unsatisfactory and the combination of HNO_3 or H_2SO_4 was required for 100% oxidation. ClO_2 is recommended to oxidize NO and SO_2 effectively. With the combination of 1st stage of DIWS and ClO_2 , 57.1% of NO_x and 98% of SO_2 were effectively removed. In the case of 2nd stage of DIWS and ClO_2 , 93.5% of NO_x and 99% of SO_2 were removed. The ClO_2 +DIWS process was superior to the ClO_2 +Scrubber process in terms of investment, running cost and NO_x removal efficiency.

Key words : Mirco-bubble system, Paper-mill, Exhaust pollutants, Chlorine dioxide

1. 서론

펄프·제지산업은 내수 중심으로 일반 경기 동향에 따라 종이수요가 크게 좌우되고, 생산규모에 비해 제조원가에서 에너지 비용이 약 10~15%를 차지하는 다소비형 산업구조를 나타내며, 일반적으로 GDP 수준에 비례하여 성장하는 특징이 있어 원료 및 제품의 수송 비용이 높다(Cheon et al., 2019). 특히 공정에 사용하는 스팀 생산을 위해 화석연료와 폐지를 재활용하는 과정에서 발생하는 부산물인 폐합성수지 등을 연료로 사용함으로써 발생하는 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)을 제어하기

위해 대단위 시설투자가 지속적으로 필요한 환경산업이다(Cho, 2009).

펄프는 제조방법에 따라 다양한 종류가 있으나 국내에 적용되는 펄프는 화학펄프와 기계펄프로 구분한다. 화학펄프의 경우 증해약품과 증기를 이용하여 목재칩에서 분리한 섬유소를 종이제품의 원료인 펄프로 만드는 공정이며, 목재칩에서 분리된 리그닌과 증해약품으로 구성된 흑액은 연소가능한 수준까지 증발, 농축하여 회수 보일러의 원료로 활용되어 에너지를 생산하고 있는데, 이 과정에서 다량의 대기오염물질을 배출하고 있다. 또한 석회소성 과정 중 발생하는 황화합물은 세정시설에서

Received 10 September, 2020; Revised 18 October, 2020;

Accepted 3 November, 2020

*Corresponding author: Yong-Jun Jung, Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0625
E-mail : yjjung@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

약품에 의해 흡수되어 증해약품으로 재사용하고 먼지는 방지시설을 거쳐 대기로 배출되는데, 방지시설에서 포집된 먼지의 주성분은 탄산칼슘과 생석회이며 석회소성로에 재투입된다.

다양한 산화제 중 염소보다 강한 산화력을 지니고 있는 이산화염소(ClO_2)는 광범위한 pH 범위에서 효과적이고, 염소와 달리 물에서 가수분해하지 않으며, 그 자신이 가스 형태로 용존하여 직접 반응을 한다(Chant et al., 2000; Shim et al., 2018). 특히 환경친화적이면서 펄프의 수율과 품질면에서 효율이 보다 높은 표백 약품으로도 사용되고 있다(Yoon et al., 2003).

이산화염소를 기능성 산화제로 이용하여 배가스중 NO를 산화시켜 SO_2 와 동시에 제거하는 방법을 실제 보일러의 배가스에 적용하는 실증 실험을 수행한 결과 산화제 공급물비에 비례하여 NO 제거율이 60% 정도로 상승되었다(Lee et al., 2005).

습식집진기로 불리는 스크러버는 함진가스에 세정액을 분사시키거나 세정액에 함진가스를 분산시킬 때 생성되는 액적, 액막, 기포 등에 의해서 배기가스에 함유된 분진을 분리, 포집시키는 장치로서 약취처리까지 가능하여 환경분야에 광범위하게 적용되고 있다(Chung et al., 2017; Park et al., 2019).

마이크로버블은 산소, 공기, 오존과 함께 50 μm 이하의 작은 물방울로 처리하는 방법으로 부력이 작아 수중 체류시간이 길고 표면적이 크며 마이크로버블이 파괴되면서 생성되는 하이드록실 라디칼의 강력한 산화력은 다양한 환경분야에 응용되고 있는 실정이다(Jang et al., 2017). 마이크로버블을 이용한 응용 사례로는 송풍기를 이용하여 유해가스를 집진기 하부의 물속으로 강제유도시킨 뒤 수중에서 생성된 마이크로버블로 음식물쓰레기 발생 복합 약취(Kim et al., 2015a), 철강산업 공정의 산세조 발생 염화수소 제거(Kim et al., 2015b) 및 광산배수의 중금속을 처리(Jung and Jung, 2017)할 수 있는 침액식 스크러버(DIWS, Dip Injection Wet Scrubber)시스템이 개발되었다.

중·소형 선박의 배가스 내 황산화물 및 질소산화물의 동시저감을 위한 습식 스크러버의 처리효율에 관한 연구에서 질소산화물은 농도 100 ppm 이하로 약 90% 이상 제거, 황산화물은 100%의 높은 처리효율을 보고하였다(Choi et al., 2017).

이에 본 연구에서는 현재까지 국내에서 실증 연구된 사례가 없었던 화학펄프 생산시설 중 석회소성로에서 배출되는 황산화물과 질소산화물의 동시 처리 공정을 검토하였다. 질소산화물의 경우 오염물질의 대부분을 차지하는 NO를 NO_2 로 산화시키기 위한 산화제가 필요함에 따라 NaClO_3 와 ClO_2 산화제의 성능을 평가한 후, 스크러버 및 DIWS 장치와의 결합에 의한 처리 성능을 중점적으로 검토하면서 경제성까지 고찰하였다. 본 연구는 pilot 테스트에 사용된 설비 용량이 600 Nm^3/hr 로서 실제 현장을 대상으로 운전한 결과를 제시함에 따라 향후 유사 연구 또는 다른 공정으로도 응용할 수 있는 사례를 소개하는 데 목적이 있다.

2. 재료 및 실험방법

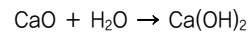
2.1. 재료 및 실험 장치

본 연구에 사용된 크라프트 펄프 공정의 전체 흐름도를 Fig. 1(a)에 표시하였다. 펄프제조공정은 목재 주입 후 증해약품을 이용해 목재칩을 고온·고압의 압력 용기인 증해기에서 증해함으로써 섬유질과 섬유질을 결속시키는 리그닌을 약화시킨 다음, 세척공정, 정선공정, 표백공정 및 건조공정을 거치면 펄프 제품이 완성되게 된다. 특히 증해과정에서 가성화공정을 거치게 되면서 석회 찌꺼기가 발생하게 됨에 따라 석회소성로를 사용하게 되는데, 여기서 황산화물, 질소산화물, 먼지 및 약취가 발생하게 된다.

처리 설비는 크게 4단으로 구성한 후 ClO_2 와 화학약품 주입 탱크를 각각 연결하였다.

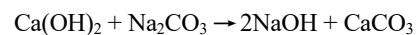
석회소성로는 크라프트 펄프 공정 중 약품회수 목적으로 운영되는 가성화공정에서 이송되어진 석회 찌꺼기를 생석회로 소성시켜 가성화공정으로 재공급해주는 과정을 반복하는데 이용되며 약품회수 과정으로는 다음과 같다(Moon et al., 2018).

- (1) 생석회(CaO)가 물과 반응하여 Ca(OH)_2 가 생성



- (2) Ca(OH)_2 가 용융무기물(Na_2CO_3)과 반응하여

NaOH 생성



- (3) CaCO_3 는 석회소성로에서 CaO 생성

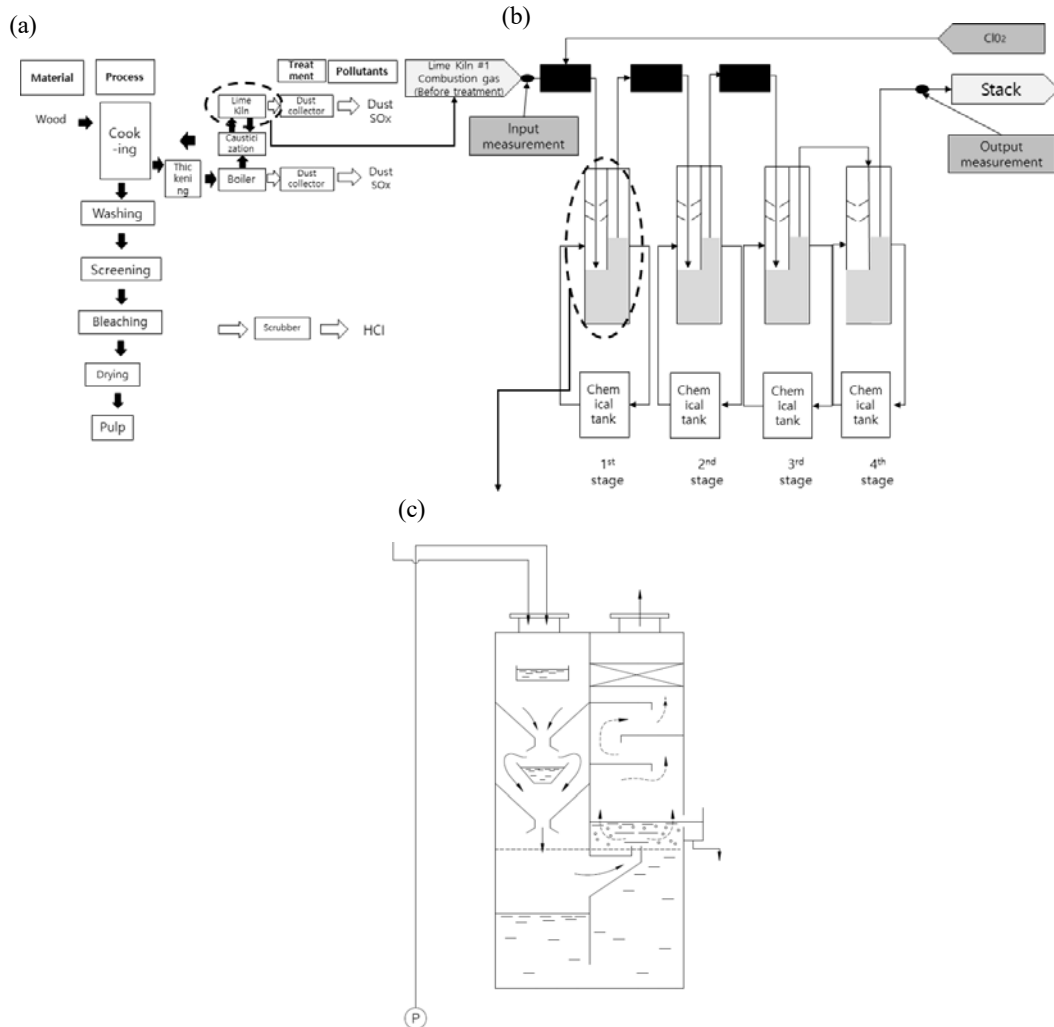


Fig. 1. (a) Layout of paper-mill production line, (b) treatment process of lime kiln and (c) the enlarged diagram of DIWS.

석회소성로 배출가스 처리를 위한 DIWS 장치 구성도를 Fig. 1(b)에 표시하였다. 처리 대상 가스에 함유된 미세분진 및 미세분진 기인 질소산화물과 황산화물에 산화제를 포함하는 산화제 수용액을 스프레이형태로 분무하여 가스에 포함된 일산화질소와 이산화황을 각각 이산화질소와 삼산화황으로 산화시키는 산화제 분무장치를 포함하고 있다.

Fig. 1(c)는 DIWS 장치의 세부 모식도를 제시한 것이다. 석회소성로에서 배출된 가스를 송풍기의 흡입압력을

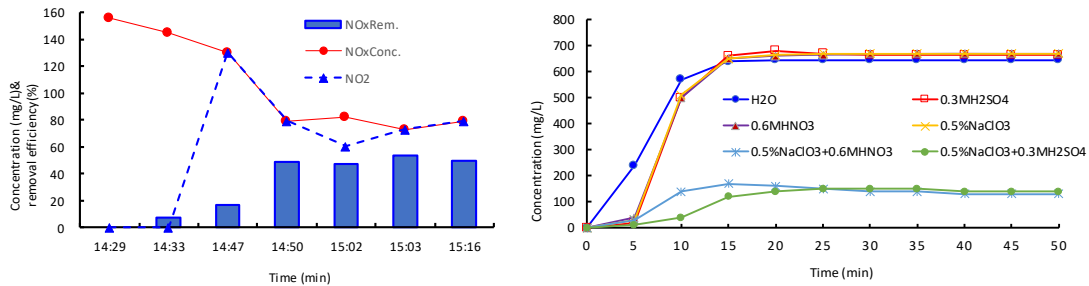
활용하여 물속으로 유도한 다음 수중에서 공기를 특수 설계된 세립분산 장치를 통하여 고속으로 분사할 경우 방해판과 강제로 직각 충돌하게 되어 배출가스내의 오염물질은 마이크로버블화 된 후, 장치내 물속에서 세립 및 분산되어 반응조내를 회전유영하면서 오염물질이 제거된 후 맑은 공기로 배출되는 원리로 되어 있다(Kim et al., 2015).

2.2. 실험 방법

석회소성로에서 배출되는 배기가스는 먼지, SOx,

Table 1. Exhaust concentration of lime kiln

Pollutants		Exhaust concentration			Unit
		Max.	Min.	Average	
NOx	This study	183.4	86.1	112.0	ppm
	SEMS 2016	89.2	71.5	78.9	
SOx	This study	13.3	1.7	6.4	ppm
	SEMS 2016	21.6	10.3	15.2	

**Fig. 2.** (a) NOx removal with NaClO₃ and (b) the profiles of NOx concentration depending on different kind of oxidants.

NOx등이 주요 오염원이며, 본 연구에서는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 DIWS 장치 유입부와 유출부의 오염원 농도를 측정하였다. DIWS 장치는 배기능력 10 m³/min(가로: 1,200 mm × 세로: 700 mm × 높이: 2,300 mm), 반응조내 순환수 용량 800 L, 송풍기 동력 3.7 kW, 토출압력 5 m로 구성하였고(Jung and Jung, 2016), 장치 유입 전의 석회소성로 배기가스의 농도는 Table 1에 표시한 바와 같다.

화학펄프(크라프트펄프) 제조시설 중 석회소성로의 일반적인 대기오염물질 배출량은 Table 1과 같은데, 문헌 연구(SEMS, 2016) 결과와 비교할 때 NOx 농도는 전체적으로 높고, SOx 농도는 낮은 것으로 분석되었다.

석회소성로에서 배출된 오염원들은 NaClO₃와 ClO₂ 등의 산화제가 교대로 유입되면서 DIWS장치와 스크러버 장치를 통한 제거 성능을 평가하였다. 가스 공급부 전단 및 후단에 가스 분석기(Testo 350XLK, NO/NO₂/SO₂ analyzer)를 설치하여 가스를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. NaClO₃에 의한 NOx 제거

NO를 습식 스크러빙하기 위해서는 NO₂ 및 수증기와

반응시켜 N₂O₃, HNO₂, N₂O₄ 등의 물과 반응하는 중간생성물을 생성하여야 하므로 NO 전체 또는 일부를 NO₂로 산화시키는 공정이 필수적이다(Kwang and Hwang, 2018).

용해도가 낮은 NO를 용해도가 높은 다른 NOx의 형태로 산화시키기 위해 ClO₂보다 보관과 이동 등의 안전성이 높고, ClO₂의 제조 원료인 NaClO₃를 산화제로 사용하여 NOx제거 성능을 평가하였다.

Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 초기 유입 NO의 농도는 156 ppm이었고, 20분이 경과한 이후로는 72.9 ppm까지 산화되어 더 이상의 제거가 진행되지 않은 상태에서 약 50%의 NOx 제거율을 유지하였다.

NaClO₃를 NO 산화제로 단독 사용한 효과가 약하여 산화력 증가를 위한 방안으로 H₂SO₄나 HNO₃를 혼합하여 반응시켜 ClO₂ 생성을 통한 NO를 NO₂로 산화시킨 결과를 Fig.2(b)에 제시하였다.

0.3M H₂SO₄와 0.6M HNO₃를 0.5% NaClO₃와 혼합 사용했을 경우 100%의 NO 산화율을 나타냈는데, 이는 HCl과 H₂SO₄를 산화제로 pH를 5로 조절하여 NO 산화반응을 관찰한 연구(Kim et al., 2015)에서도 100%의 산화율을 구한 결과와 같았다.

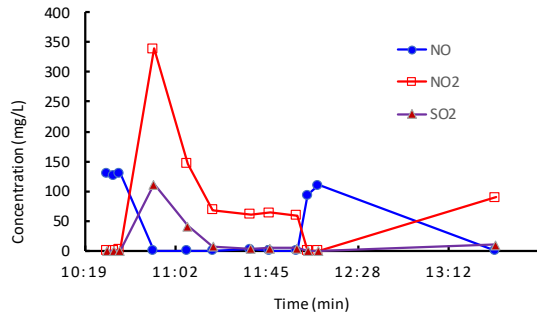


Fig. 3. Profiles of NO, NO₂ and SO₂ with ClO₂ oxidation time.

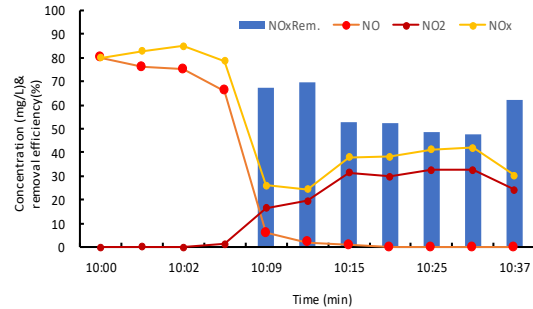


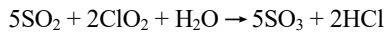
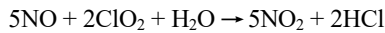
Fig. 4. Relationship between NO_x removal and the profiles of NO, NO₂, NO_x concentration.

SO₂는 헨리법칙 상수가 1.2 kmol/m³·atm(25℃)으로 높아 습식 스크리빙에 유리하지만, NO_x중의 90%이상을 차지하는 NO는 매우 낮아 잘 제거되지 않으므로 산화제를 이용하여 NO₂로 산화시킨 후 최종적으로 NO_x를 저감하는 연구들이 일반적으로 진행되고 있다 (Yamamoto et al., 2016, Yoon et al., 2016).

이상과 같이 석회소성로 배기가스 처리를 위해 NaClO₃ 단독으로 사용할 경우는 NO를 NO₂로 산화시키기 위한 산화력이 부족함에 따라 HNO₃나 H₂SO₄와 같은 산화제의 혼합 사용이 필요한 것으로 판단된다.

3.2. ClO₂에 의한 NO_x, SO_x 제거

ClO₂의 산화력은 광범위한 pH 범위에서 효과적이고, 물에서 가수분해하지 않으며 자신이 가스 형태로 용존하여 직접 반응을 할 뿐만 아니라 주로 산화반응에 의한 반응을 할 만큼 우수한 산화제로 이용되고 있다(Shim et al., 2018). ClO₂에 의한 NO와 SO₂의 산화반응은 다음 식과 같다.



ClO₂ 6,000 ppm 수용액을 연소가스에 미스트 형태로 분사하여 NO, NO₂와 SO₂의 농도 변화를 측정된 결과를 Fig. 3에 제시하였다.

유입 NO 농도는 130 ppm이었으나, ClO₂를 과량으로 투입하자 340 ppm까지 증가하였는데, 이는 공기중의 N₂ 가스가 과량으로 산화된 원인으로 분석되었다. 이후 ClO₂를 적정량이 투입하였을 때는 60 ppm으로 안정된

상태를 나타내어 NO_x 제거율이 55% 정도로 관찰되었다.

유입 가스중의 SO₂ 농도는 검출되지 않았으나, ClO₂를 과량으로 투입했을 때는 NO₂ 농도의 증가와 함께 SO₂ 농도도 112 ppm까지 증가한 후, ClO₂를 적정량으로 투입하였을 때 5 ppm으로 소량 증가한 것으로 분석되었다. Jin(Jin et al., 2003)등의 연구에서도 ClO₂가 SO₂와 NO에 대한 산화반응에 참여하고 있다는 것을 보고하였다.

본 연구 대상 시설인 제지공정의 특성상 ClO₂를 제조하는 시설이 구비되어 있으므로, 석회소성로에서 배출되는 SO_x와 NO_x 및 부가적인 배출가스 오염물질 처리를 위한 산화제로는 ClO₂가 적합한 것으로 판단되었다.

3.3. DIWS 1단 입구에 ClO₂ 분사

석회소성로에서 유출되는 배기가스를 건식집진기가 없는 조건에서 1단의 DIWS 장치로 직접 주입하여 처리한 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 전체 4단의 DIWS 장치에서 1단은 ClO₂와 NaOH 처리가 병행되고, 2~4단 DIWS 장치에서는 NaOH 처리만 진행하였다.

6,000 ppm의 ClO₂가 제 1산화제 분무장치를 통해서 분사되었을 경우 평균 유입 NO_x 농도는 34.3 ppm 57.1%의 NO_x 제거율을 나타냈고, 평균 유입 SO₂ 농도는 50 ppm, 유출 지점에서 1 ppm을 유지하여 98%의 제거율을 나타냈다.

석회소성로 배출가스 중 CaCO₃가 15,000 mg/Nm³ 농도로 포함되어 있어 ClO₂와 NaOH의약품사용량 증가가 예상됨에 따른 현장 운영비의 증가 또한 예상되어 추가 대책이 필요한 것으로 나타났다.

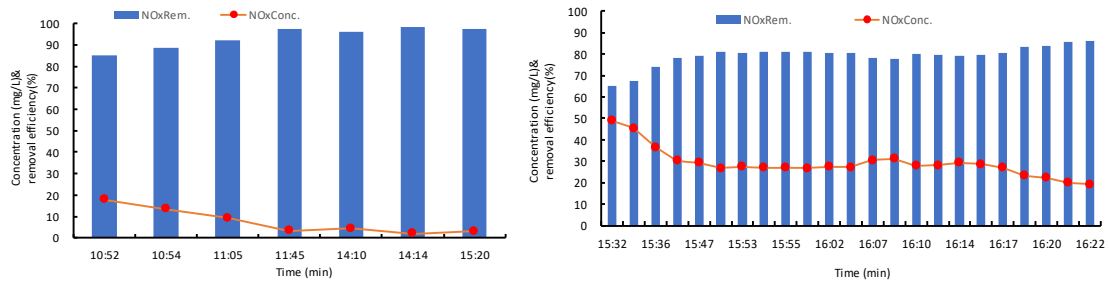


Fig. 5. (a) Relationship between NOx concentration and NOx removal at the concentration of ClO₂ 6,000 ppm (b) ClO₂ 3,000 ppm.

Table 2. Comparison of ClO₂+scrubber and ClO₂+DIWS

Item		ClO ₂ +scrubber	ClO ₂ +DIWS
Running cost	Capital (million won)	2,848	2,754
	100%O ₂ (million won/year)	81.0	-
	ClO ₂ (million won/year)	-	49.0
	Power (million won/year)	135.0	85.0
	Subtotal	216.0	134.0
NOx removal	Input (ppm)	140	140
	Output (ppm)	42	35
	Removal(%)	70	75

3.4. DIWS 2단 입구에 ClO₂ 분사

석회소성로에서 유출되는 배기가스를 처리하기 위해 건식집진기를 통과하여 2단의 DIWS 장치로 유입된 가스의 처리 결과를 Fig.5에 제시하였다. 전체 4단의 DIWS 장치에서 1단은 먼지 제거 및 스팀가열만 하였고, 2단에 ClO₂와 NaOH 처리를 3~4단에서는 NaOH처리만 진행하였다.

Fig.5(a)는 DIWS 장치 2단에 ClO₂ 6,000 ppm을 투입하여 5시간 연속 제거 성능을 평가한 것이다. 평균 유입 NOx 농도는 7.7 ppm, 최대 처리에서 17.8 ppm을 유지하여 평균 93.5%의 NOx 제거율을 나타냈고, 평균 유입 SO₂ 농도는 60 ppm, 유출 지점에서 1 ppm을 유지하여 99%의 제거율을 나타냈다.

석회소성로에서 발생하는 CO₂, SO₂, H₂S 및 불순물 등 연소 혼합가스의 조건 변화로 NOx의 제거율이 낮아진 사례 보고(Zhao et al., 2016; Kang and Hwang, 2018)와 같이 본 연구에서도 NOx의 농도 변화에 의한 영향과 배기가스내의 혼합 가스에 의한 영향 등으로

NOx의 제거율이 84.9~98.2%로 변화가 나타났다. 본 연구에서는 소량의 황화합물과 NaOH를 동시에 주입했을 경우 NOx 제거율이 98% 이상 급증하는 것으로 나타났다.

Fig.5(b)는 악취에 의한 영향을 최대한 제거한 상태에서 ClO₂를 3,000 ppm으로 희석하여 처리한 결과를 제시한 것이다. 평균 유입 NOx 농도는 140 ppm, 최대 처리에서 19 ppm을 유지하여 86%의 NOx 제거율을 나타냈다.

3.5. ClO₂+Scrubber과 ClO₂+DIWS 공정 비교

에너지 다소비형 산업구조인 펄프-제지산업에서 석회소성로 배출 NOx와 SOx 오염가스를 처리하기 위한 공정 검토가 지속되고 있다.

Table 2에 ClO₂+스크러버와 ClO₂+DIWS 공정의 경제성과 NOx 제거율을 비교하였다.

ClO₂를 산화제로 한 스크러버 공정에서는 장치 내부로 배기가스를 통과시켜 액상의 약품을 분사하여 오염물질을 제거하였다. ClO₂를 산화제로 한 DIWS 공정에서는

배기가스를 통과시켜 분산장치에서 미세공기방울로 오염물질을 제거하는 공정으로, 마이크로 버블이 약품과의 접촉면적을 매우 크게 형성하여 가스의 용해성과 반응성이 스크러버 보다 높은 것으로 판단된다.

ClO₂결합 DIWS 공정은 ClO₂결합 스크러버 공정과 비교하여 투자비와 연간 운영비는 각각 9,400만원과 8,200만원 경제적이었고, NO_x 의 제거효율은 5% 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 화학펄프 생산시설 중 석회소성로에서 배출되는 황산화물과 질소산화물의 산화를 위한 산화제 선정과 최적의 산화제와 DIWS 공정 결합에 의한 처리 가능성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 석회소성로 배기가스를 NaClO₃ 단독으로 처리할 경우 NO를 NO₂로 산화시키기 부족하였으나, HNO₃나 H₂SO₄와 같은 산화제와의 혼합사용에서 100% 산화되었다.

2) ClO₂는 NO_x제거율이 55%, 0 ppm의 유입가스 농도에서 5 ppm의 SO₂ 농도를 나타낼 만큼 산화제로서 적합한 것으로 나타났다.

3) DIWS 1단 입구에 ClO₂를 주입했을 때 NO_x는 57.1%, SO₂는 98%의 제거율을 나타냈고, DIWS 2단 입구에 ClO₂를 주입했을 경우 NO_x는 93.5%, SO₂는 99%의 제거율을 나타냈다.

4) ClO₂+DIWS공정은 ClO₂+스크러버 공정에 비해 투자비와 운영비는 경제적이고, NO_x제거율은 5% 높게 나타났다.

REFERENCES

Chang, C. Y., Hsieh, Y. H., Hsu, S. S., Hu, P. Y., Wang, K. H., 2000, The formation of disinfection by-products in water treated with chlorine dioxide, *J.Hazard.Mater.*, 79(1-2), 89-102.

Cho, J. H., 2009, Environmental features and actions of pulp & paper industry, *J. Kor. TAPPI*, 41(3), 13-21.

Choi, J. S., Kim, J. G., Park, B. H., Lee, J. Y., 2017, Study on wet scrubber for SO_x/NO_x treatment in ship flue gas, *J. Kor. Oil Chem. Soc.*, 34(1), 183-188.

Chung, G. H., Im, M. S., Kim, Y. S., Kim, D. H., 2017,

Development of a scrubber wastewater cleaning system to improve odor removal efficiency, *Clean Tech.*, 23(1), 34-41.

Jang, J. K., Jin, Y. J., Kang, S. W., Kim, T. Y., Paek, Y., Sung, J. H., Kim, Y. H., 2017, Simultaneous removal of organic pollutants, nitrogen, and phosphorus from livestock wastewater by microbubble-oxygen in a single reactor, *J. Kor. Soc. Env. Eng.*, 39(11), 599-606.

Jin, D. S., Park, B. L., Kim, H. D., Cho, H. D., Park, Y. S., Deshwal, B. R., Lee, H. K., 2003, Study on ions concentration of reaction solution and secondary pollutants in the simultaneous removal of SO₂-NO_x using NaClO₂, *Theories and Applications of Chem. Eng.*, 9(2), 2344-2347.

Jung, J. O., Jung, Y. J., 2016, Industrial wastewater treatment containing high concentration of ammonia with low energy micro-bubble reactor, *J.Wet.Res.*, 18(3), 286-291.

Jung, Y. J., Jung, J. O., 2017, The treatment properties of heavy metals in acid mine drainage with micro-bubble and UV/H₂O₂ oxidation process, *J. Env. Sci. Int.*, 26(3), 303-309.

Kang, M. S., Hwang, J. H., 2018, Effect of SO₂ concentration on NO_x removal efficiency in NaOH-based wet scrubbing, *J. Kor. Soc. Atoms. Environ.*, 34(5), 659-667.

Kim, Y. J., Jung, J. O., Jung, Y. J., 2015(a), Complex mal-odor treatment of foodwaste with micro-bubble generated from enhanced wet scrubber, *J. Env. Sci. Int.*, 24(1), 73-79.

Kim, Y. J., Jung, J. O., Jung, Y. J., 2015(b), Hydrochloric acid gas removal from iron and steel industry using micro-bubbles of a dip injection wet scrubber system, *J. Wet. Res.*, 17(1), 75-79.

Lee, H. G., Moon, S. H., Choi, W. G., Cho, H. D., Park, B. R., 2005, Development of simultaneous control technology of SO_x and NO_x using functional oxidizing agents and ACFs, Final report, MOTIE.

Moon, E. S., Park, S. H., Lee, J. H., Won, J. M., 2018, Preparation and evaluation of papermaking pigments using kraft pulping process by-products, *J. Kor. TAPPI*, 50(6), 63-71.

NIER-GP2019-080.

Park, H. G., Oh, C. H., Kim, D. H., Park, S. J., 2019, A Study on the efficiency of pollution control using the

- scrubber with a spiral filter and a cyclone system for decreasing particulate matter and odor inducing compounds, *J. Odor Indoor Environ.*, 18(2), 112-120.
- SEMS, Stack Emission Management System, 2016.
- Shim, S. J., Oh, H. K., Eom, J. Y., Jung, H. S., Han, I. S., 2018, Optimizing dose of chlorine dioxide for oxidation of manganese in water treatment, *J. Kor. Soc. Urb. Env.*, 18(2), 225-232.
- Yamamoto, Y., Yamamoto, H., Takada, D., Kuroki, T., Fujishima, H., Okubo, M., 2016, Simultaneous removal of NO_x and SO_x from flue gas of a glass melting furnace using a combined ozone injection and semi-dry chemical process, *Ozone: Science Engineering*, 38(3), 211-218.
- Yoon, B. H., Hwang, B. H., Kim, S. J., Choi, K. H., 2003, Interaction of oxygen and chlorine dioxide in pulp bleaching(I), *J.Kor.TAPPI*, 35(3), 74-78.
- Yoon, H. J., Park, H. W., Park, D. W, 2016, Simultaneous oxidation and adsorption of NO_x and SO₂ in an integrated O₃ oxidation/wet atomizing system, *Energy Fuels*, 30(4), 3289-3297.
- Zhao, Y., Hao, R., Yuan, B., Jiang, J., 2016, Simultaneous removal of SO₂, NO and Hg⁰ through an integrative process utilizing a cost-effective complex oxidant, *J.Haz.Mater.*, 301(15), 74-83.

-
- Doctor's course. Jae-Ouk Jung
Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan
kimjungp@naver.com
 - Professor. Yong-Jun Jung
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan
yjjung@cup.ac.kr