시흥 스마트허브 산업단지내 소각로의 N_2O 발생량 조사와 저감방안 수립

최 상 현

시흥녹색환경지원센터

연구결과보고서

2018년도 연구개발사업에 따라 연구중인 “시흥 스마트허브 산업단지내 소각로의 N_2O 발생량 조사와 저감방안 수립”에 관한 연구의 최종 보고서를 붙임과 같이 제출 합니다.

붙임 : 최종 보고서 ( )부. 끝.

연 구 기 관 : ㈜금강씨엔티

연구책임자 : 최 상 현 (인)

연구기관장 : 민 윤 식 직인

시흥녹색환경지원센터장 귀하

제 출 문

시흥녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “시흥 스마트허브 산업단지내 소각로의 N_2O 발생량 조사와 저감방안 수립”에 관한 중간보고서로 제출합니다.

연구기관명 : ㈜금강씨엔티

연구책임자 : 최 상 현

연 구 원 : 박 재 홍, 최 용 관

시흥 스마트허브 산업단지내 소각로의 N_2O 발생량 조사와 저감방안 수립

최 상 현

시흥녹색환경지원센터

요 약 문

Ⅰ. 연구개요

본 연구과제는 시흥시 관내의 산업용 소각로를 보유하고 있는 온실가스 배출권 할당업체 중에서 대표적인 폐기물, 제지, 고형연료(SRF)를 연소하는 소각로를 대상으로 온실가스 중 N_2O의 배출특성 및 발생량을 조사하고, 사업장 고유 배출계수를 개발하고자 함. 또한 N_2O 배출량 저감방안에 대한 대응전략을 수립하여 온실가스 배출량 감축을 위한 대응전략 수립과 저감에 따른 경제성 평가에 연구를 수행함.

또한 시흥시 관내의 온실가스 배출권 할당업체는 2015년부터 온실가스 배출량에 대한 전략적 관리와 이에 따른 배출권의 전략적 구매가 필요한 상황이며, 이러한 해당 업체의 산업용 소각로에서 배출되는 N_2O 배출량을 조사하여 향후 N_2O를 포함에 따라 온실가스 배출권의 과부족량을 예측하고, 배출권을 초과하는 부분에 대한 비용효과적인 대응방안을 수립하고자 함.

Ⅱ. 연구의 필요성 및 목적

○ 폐기물 소각시 발생하는 N_2O는 CO_2 대비 지구온난화지수가 310배 높은 온실가스로 발생량에 비해 지구온난화에 미치는 영향이 큰 온실가스이며, 폐기물 처리 방식으로 소각이 차지하는 비율이 점차 증가하고 있어 향후 폐기물 부문 온실가스 저감을 위해서 소각부문에 대한 N_2O의 저감대책 마련이 중요할 것으로 사료됨.

○ 산업부분 및 발전부분의 경우 균질의 연료가 일정한 운전조건으로 연소되지만 폐기물소각부문은 다양한 성상의 폐기물이 소각되고, 소각방식에 따른 운전조건 및 기술적인 요소가 상이하여 N_2O 발생량을 정확히 산정하기 어려움.

○ 폐기물 소각시설은 배출계수를 이용하여 온실가스 배출량을 산정할 경우 폐기물 성상 변화가 커서 배출량 산정의 불확도가 높기 때문에 정확성 향상을 위해 최상위 배출량 산정방법인 연속측정방법(CEM)이 필요로 하고, 소각시설 배출 온실가스 중 CO_2 가스에만 연속측정방식에 의한 조사가 국한되어 CH_4, N_2O 등 함께 배출가능한 온실가스의 배출특성에 대한 조사·분석이 필요한 상황임.

○ 본 연구과제는 시흥시 관내의 산업용 소각로를 보유하고 있는 온실가스 배출권

할당업체 중에서 대표적인 폐기물, 제지, 고형연료(SRF)를 연소하는 소각로를 대상으로 온실가스 중 N_2O의 배출특성 및 발생량을 조사하고, 사업장 고유 배출계수를 개발하고자 함. 또한 N_2O 배출량 저감방안에 대한 대응전략을 수립하여 온실가스 배출량 감축을 위한 대응전략 수립과 저감에 따른 경제성 평가를 수행할 계획임.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

○ 주요연구내용

- 시흥스마트허브내 소각로 현황 및 N_2O 발생량 현장분석
- N_2O 저감기술 조사 및 저감설비 도입에 따른 경제성 평가

○ 연구방법 및 범위

- 조사대상 소각시설 기초현황 조사
- 온실가스 실측관련 국외 사례조사 및 국내 현황 분석
- N_2O 연속측정시스템 사전준비
- 소각시설 배출 온실가스 N_2O 연속측정
- 소각시설 N_2O 배출특성 분석 및 국내 최적 관리방안 수립
- 소각시설 대상 N_2O 실측방법에 대한 (Tier 4) 사업장 고유 배출계수 산정
- 사업장 고유 배출계수 개발

Ⅳ. 연구결과

○ 국내외 폐기물분야 소각시설의 온실가스 실측사례 및 온실가스 연속측정 및 측정주기 등 측정방법론에 대한 사례 조사 수행

○ N_2O 연속측정을 위한 대상 사업장의 소각로 운영현황 조사 수행

○ 대상 사업장의 소각로의 연소가스를 연속측정하기 위한 전처리 장비 및 분석장비 셋업

○ 대상 사업장의 소각로에서 배출되는 N_2O 배출농도를 연속측정하여 일일 발생량 및 폐기물별 N_2O 배출계수를 산정하여 기존 폐기물 소각분야의 N_2O 배출계수를 이용한 N_2O 발생량과 비교검토를 수행함.

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

○ 시흥시 관내 각 배출원의 온실가스 배출특성 및 배출량 현황 파악함으로서 온실가스 배출상황을 반영하는 보다 신뢰성 있는 온실가스 발생량 자료 확보 효과

○ 사업장별 온실가스배출량 산출에 활용함으로써, 온실가스 배출 규제에 대한 객관적이고 능동적인 대책수립에 기여.

○ 온실가스 배출량 감축에 대한자발적인 대처능력 확보 및 지속적인 경제성장 기대

○ 객관적이고 계량적인 옵션 분석결과를 기후변화협약 대응 전략 수립의 기초 자료로 활용 가능

○ 기후변화협약 관련 각종 시책의 사전 효과분석 및 신뢰성 향상

○ 에너지/환경정책, 특히 수요관리 및 기후변화협약 정책수립에 필요한 정보 제공

○ 배출권거래, CDM 등의 유연성체계 평가에 활용

목 차

목 차

제1장 서론 ····· 2

1. 연구의 필요성 ····· 2

2. 연구개발 목표 및 내용 ····· 7

3. 추진전략 ····· 8

제2장 국내외 기술현황 ····· 11

1. 국내의 관련기술 현황 ····· 11

2. 국외의 관련기술 현황 ····· 12

제3장 연구방법 ····· 14

1. 연구내용 ····· 14

2. N_2O 연속측정방법 ····· 14

3. N_2O 분석방법 ····· 17

4. 폐기물 소각시설 현황 ····· 17

제4장 연구결과 ····· 21

1. N_2O 연속측정 및 배출량 산정방법 ····· 21

2. 소각로별 N_2O 농도분석 ····· 21

3. 소각로별 N_2O 배출량 산정 ····· 27

4. 소각로별 N_2O 배출특성 ····· 29

5. 소각로 N_2O 배출 저감방안 ····· 33

6. 소각로 N_2O 저감에 따른 경제성 평가 ····· 35

제5장 연구결과의 활용계획 ····· 38

1. 기대효과 ····· 38

2. 향후 연구계획 및 사업성과 활용방안 ····· 38

제6장 참고문헌 ····· 41

1. 참고문헌 ····· 41

<표목차>

표 1. 폐기물 소각 분야 보고 대상 배출시설 및 온실가스 ····· 3

표 2. 온실가스 배출량 산정 방법 등급 기준 ····· 4

표 3. 2003년 주요 국가배출계수(CH_4, N_2O)의 불확도 특성 ····· 4

표 4. 폐기물소각 분야 Tier 1 N_2O 배출계수 ····· 6

표 5. 폐기물소각 분야 Tier 2 N_2O 배출계수 ····· 6

표 6. 연속측정 사업장의 소각로 운영현황 ····· 18

표 7. 도시고형폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 26

표 8. 산업폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 26

표 9. SRF 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 27

표 10. 도시고형폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 28

표 11. 산업폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 28

표 12. SRF 소각로 N_2O 연속측정결과 ····· 29

표 13. 도시고형 폐기물과 하수슬러지 소각량에 따른 N_2O 발생량 ····· 30

표 14. 도시고형 폐기물과 하수슬러지 오니의 화학성분 분석표 ····· 30

표 15. 소각로 N_2O 배출저감 방안 ····· 34

표 16. 소각시설별 N_2O 저감에 따른 경제적 효과분석 ····· 36

<그림목차>

그림 1. 우리나라의 온실가스 중기감축목표 ····· 2

그림 2. N_2O 시료 채취 방법 ····· 15

그림 3. 산업용 소각로 N_2O 현장실측 현장사진 ····· 16

그림 4. 연속측정 소각시설 전경 ····· 19

그림 5. 도시고형폐기물 소각로 N_2O 농도 연속측정결과 ····· 23

그림 6. 산업폐기물 소각로 N_2O 농도 연속측정결과 ····· 24

그림 7. 고형연료 소각로 N_2O 농도 연속측정결과 ····· 25

그림 8. 고형연료 소각로의 SNCR 가동전후 N_2O 발생농도 ····· 32

그림 9. 소각로 대기오염방지설비 계통도 ····· 35

제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성 ····· 2
2. 연구개발 목적 및 내용 ····· 7
3. 추진전략 ····· 8

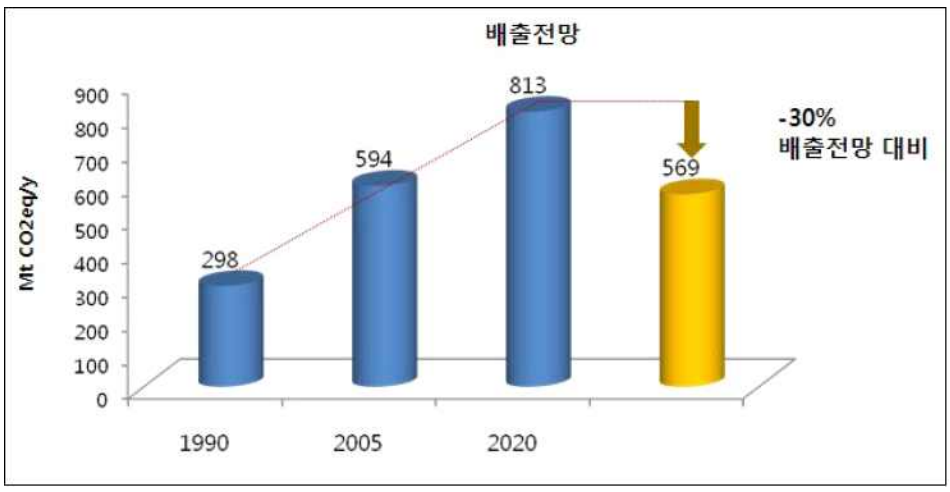
제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성

우리나라는 저탄소 녹색성장을 국가 비전으로 설정하고, 2020년까지 온실가스 배출전망(BAU) 대비 30 % 감축이라는 중기 국가 온실가스 감축목표를 발표하였으며, 또한 이를 달성하기 위해 '온실가스·에너지 목표관리제'를 2012년부터 도입하였다.

국내 폐기물부문의 온실가스 배출량은 2012년 기준 약 14.8 백만톤 CO_2eq.로서 우리나라 온실가스 총 배출량의 2.2 %를 차지하고 있으며, 이 중 소각부문이 45.9 %를 차지하고 있다. 이처럼 폐기물의 소각에 의해 처리량 증가로 인해 폐기물부문 온실가스 배출량은 증가하고 있으며, 1990년 대비 2012년에는 온실가스 배출량이 49.4 % 증가한 것으로 조사되었다.

현재까지는 폐기물 처리방법 중에서는 매립으로 인한 온실가스 배출량이 가장 큰 비중을 차지하고 있지만(매립: 67%, 소각: 28%, 하폐수: 5%) 국가 폐기물 관리정책에 의해 소각 비율이 점차 증가하는 추세이기 때문에 향후 소각부문으로부터의 온실가스 배출량의 정확한 산정이 필수적이며, 정밀한 온실가스 배출통계체제가 요구되고 있다.[1]



[그림 1] 우리나라의 온실가스 중기감축목표

2006 IPCC G/L에서는 소각시설에서 발생하는 온실가스로 CO_2, CH_4, N_2O를 제시하고 있으며, 이 중 폐기물 소각의 경우 국가별 산업구조, 생활 및 문화 특성 등의 차이에 따라 온실가스 배출 특성이 변화 할 수 있어 국가별 온실가스배출량의 신뢰성을 확보하기 위해서는 다양한 연구가 필요하지만 국내의 경우 폐기물소각장의 CO_2에 관한 연구 이외는 관련 연구가 부족한 실정이다.[2]

[표 1] 폐기물 소각 분야 보고 대상 배출시설 및 온실가스

<table>
<tr><td rowspan="6">시설
종류</td><td>소각보일러</td><td colspan="3">소각시켜 발생되는 열을 회수하여 보일러를 가동하고 이때 생산되는 증기나 열을 작업공정이나 난방 등에 재이용할 목적으로 보일러 등 열회수장치가 설치된 소각시설</td></tr>
<tr><td>특정폐기물
소각시설</td><td colspan="3" rowspan="2">특별히 고안된 폐쇄구조에서 특정폐기물을 연소시켜 그 양을 감소하든지 재이용할 수 있게 하는 시설</td></tr>
<tr><td>일반폐기물
소각시설</td></tr>
<tr><td>폐가스
소각시설</td><td colspan="3">제조공정 중에 발생되는 각종 휘발성유기물질이나 가연성 가스 또는 냄새가 심하게 나는 물질들을 모아 산화시키는 시설</td></tr>
<tr><td>적출물
소각시설</td><td colspan="3">의료법 규정에 의한 적출물을 처리하기 위한 시설</td></tr>
<tr><td>폐수
소각시설</td><td colspan="3">폐수 중에 휘발성 물질이나 농도가 높은 폐수를 소각처리하기 위한 시설</td></tr>
<tr><td rowspan="2">온실
가스</td><td>시설</td><td>CO_2</td><td>CH_4</td><td>N_2O</td></tr>
<tr><td>소각처리</td><td>Tier 1, 4</td><td>Tier 1</td><td>Tier 1</td></tr>
</table>

폐기물 소각시 발생하는 N_2O는 CO_2 대비 지구온난화지수가 310배 높은 온실가스로 N_2O 발생량에 비해 지구온난화에 미치는 영향이 큰 온실가스이며, 폐기물 처리방식으로 소각이 차지하는 비율이 점차 증가하고 있어 향후 폐기물 부문 온실가스 저감을 위해서 소각부문에 대한 N_2O의 저감대책 마련이 중요할 것으로 사료된다. 따라서, 효과적인 기후변화 대응을 위한 가장 첫 번째 단계는 무엇보다도 정확한 온실가스 배출량을 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

[표 2] 온실가스 배출량 산정 방법 등급 기준

분석 조건		배출계수	대상 온실가스
계산법	Tier 1	IPCC 기본계수	CO_2, CH_4, N_2O
	Tier 2	국가고유계수	CO_2
	Tier 3	사업장고유계수	CO_2
연속 측정법	Tier 4	연속 측정 자료 (배기가스 농도, 유량)	CO_2

[표 3] 2003년 주요 국가배출계수(CH_4, N_2O)의 불확도 특성

Country	95% confidence interval[1]	Distribution	2003 GHG inventory submission[2]		References
			Approach[3]	Emission factor[4]	
CH_4					
Austria	± 50	Normal	C, CS	CS	Winiwarter and Rypdal, 2001
Finland	-75 to +10	β	T1, T2, CS	CS, PS	Monni *et al.*, 2004
Norway	-50 to + 100	Lognormal	T2, CS	D, CS, PS	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 25	-	T2, CS	CS, PS	Van Amstel *et al.*, 2000
UK	± 50	Truncated normal	T2	D, C, CS	Baggott *et al.*, 2005
USA	Order of magnitude	-	T1	D, CS	EIA, 1999
N_2O					
Austria	± 20	Normal	C, CS	CS	Winiwarter and Rypdal, 2001
Finland	-75 to +10	Beta	T1, T2, CS	CS, PS	Monni *et al.*, 2004
Norway	-66 to + 200	Beta	T1, T2	D, CS	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 75	-	T1, CS	D, PS	Van Amstel *et al.*, 2000
UK	± 100 to 200	-	T2	D, C, CS	Baggott *et al.*, 2005
USA	-55 to + 200	-	T1	D, CS	EIA, 1999

[1] Data are given as upper and lower bounds of the 95 percent confidence interval, and expressed as percent relative to the mean value.

[2] The information in the columns is based on the 2003 National Greenhouse Gas Inventory submissions from Annex I Parties to the UNFCCC.

[3] Notation keys that specify the approach applied: T1 (IPCC Tier 1), T2 (IPCC Tier 2), T3 (IPCC Tier 3), C (CORINAIR), CS (Country-specific).

[4] Notation keys that specify the emission factor used: D (IPCC default), C (CORINAIR), CS (Country-specific), PS (Plant-Specific).

산업부분 및 발전부분의 경우는 균질의 연료가 일정한 운전조건으로 연소되어 온실가스의 발생량 산정이 쉬운 반면 폐기물소각부문은 다양한 성상의 폐기물이 소각되고, 소각방식에 따른 운전조건 및 기술적인 요소가 상이하여 N_2O 발생량을 정확히 산정하기 어려운 상황이다.

국내 온실가스·에너지 목표관리제의 고정연소 부문 온실가스 배출량산정 방법은 배출계수와 활동자료를 이용하는 계산법과 연속 측정을 통해 결정하는 측정법이 있으며, 계산법의 경우 온실가스 배출량 산정의 정확성을 높이기 위해 배출활동별, 시설규모별, 배출계수별 산정등급(Tier 1, 2, 3) 관리체계를 적용하고 있으며, 활동자료의 불확도는 적용 Tier에 따라 차등 관리하고 있다.

현재 IPCC에서 제시한 기본적인 배출계수 중에서 CO_2는 약 7%의 불확도를 나타내는 반면, CH_4와 N_2O는 각각 50~150% 및 수십에서 수백 %의 불확도를 나타내는 것으로 보고하고 있는데, 이와 같은 현상은 CH_4와 N_2O는 각각 운전조건과 이용설비의 특성에 영향을 많이 받아 배출계수는 매우 넓은 범위에서 존재하기 때문이다. 또한 N_2O 배출계수는 각각의 배출원 특성에 따라 IPCC 기본계수, 국가고유계수, 시설단위 사업장고유계수 등으로 구분하여 적용하고 있으며, 우리나라는 아직까지 연속 측정을 통한 온실가스 배출량 산정 방법은 CO_2의 경우만 적용되고 CH_4와 N_2O는 IPCCC 기본계수를 이용한 Tier 1 Method를 적용하여 배출량을 산정하고 있다. 이와 같이 Non-CO_2 배출량 산정은 현재까지 IPCC 기본배출계수를 이용한 Tier 1 Method를 적용하고 있지만 상대적으로 배출 농도 분포가 큰 Non-CO_2는 온실가스 배출량 산정 방법에 따라 배출량의 차이가 있을 것으로 예상되어진다.

따라서, 폐기물 소각시설은 배출계수를 이용하여 온실가스 배출량을 산정할 경우 폐기물 성상 변화가 커서 배출량 산정의 불확도가 높기 때문에 정확성 향상을 위해서는 최상위 배출량 산정방법인 연속측정방법(CEM)이 필요한 반면에 소각시설 배출 온실가스 중 CO_2에만 연속측정방식에 의한 측정이 시행되고 있어 향후 CH_4, N_2O 등에 대한 온실가스의 배출특성에 대한 조사 및 분석이 필요한 상황이다.

현재 국내 소각장에서 배출되는 CO_2가스는 국립환경과학원을 포함한 여러 기관 등에서 NDIR을 이용한 연속측정 방식으로 배출량을 산정하고 있지만, N_2O 또는 CH_4 가스는 대부분 Teddler bag을 이용하여 배출가스를 채취한 후 N_2O는 GC-ECD로 CH_4는 GC-FID 기기를 이용하여 분석한다. 또한 이들 분석기기는 packed column을 분리관으로 이용하고 있다. 하지만 국내에서 시행되고 있는 N_2O와 CH_4 가스 분석은 연속측정 방식이 아닌 샘플을 채취한 후 실험실에서 분석하는 방식이기 때문에 샘플주입량이 많고 분리능이 상대적으로 떨어지는 packed column은 정량분석에 있어서 오차가 클 것으로 예상된다.

■ 소각처리시설의 N_2O 배출량 산정식

$$N_2O\,Emissions = IW \times EF \times 10^{-3}$$

N_2O Emissions : 폐기물 소각에서의 N_2O 배출량(tN_2O)
IW : 총 폐기물 소각량(ton)
EF : 배출계수(kgN_2O/t-waste)

[표 4] 폐기물소각 분야 Tier 1 N_2O 배출계수

항목	배출계수 (gN_2O/t-waste)
생활폐기물	39.8
사업장폐기물(슬러지 제외)	113.19
사업장폐기물(슬러지)	408.41
건설폐기물	109.57
지정폐기물(슬러지 제외)	83.52
지정폐기물(슬러지)	408.41

출처 : 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축, 환경부, 2002

[표 5] 폐기물소각 분야 Tier 2 N_2O 배출계수

폐기물 형태	배출계수 (gN_2O/t-waste)
생활폐기물	52.1
사업장폐기물	129.7
하수슬러지	595.0

출처 : 국가온실가스 통계 관리위원회 심의/확정 배출계수, 2013

본 연구에서는 IPCC에서 제시한 방법으로 산정된 소각 부문 온실가스 배출량이 N_2O의 실제 측정치를 대표할 수 있는지 파악하기 위하여 시흥시 관내의 소각로를 대상으로 N_2O 연속측정방식으로 N_2O 배출농도와 배출량에 대한 조사를 수행하였다. 또한 현재 산업용 소각로에서 발생하는 온실가스 예상배출량 산정방식 대한 정확성을 확보하고, 향후 온실가스 배출량 산정과 온실가스 감축목표를 만족하기 위한 방안수립시 N_2O를 포함시켜 보다 효율적인 저감방안을 조사하였다.

2. 연구개발 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

■ 산업폐기물 소각로의 N_2O 배출특성 현장조사 및 배출량을 산정

■ 소각로의 N_2O 최적 저감방안수립 및 온실가스 관리정책 방안마련

나. 연차별 연구개발목표 및 내용

연구개발목표	연구개발 내용
산업폐기물 소각로의 N_2O 배출량 산정	■ 시흥스마트허브내 산업폐기물 소각로 현황분석 ■ 연구대상 소각로의 선정 및 운전특성 분석 ■ 대상 소각로의 N_2O 발생량 현장분석
N_2O 최적 저감방안수립 및 온실가스 관리정책 수립	■ 소각로에서의 N_2O 저감기술조사 - 해외사례 조사 등 ■ N_2O 배출량 대비 저감기술 도입에 따른 경제성 평가 ■ 온실가스 관리정책 방안마련

3. 추진전략

○ 조사대상 소각시설 기초현황 조사

시흥시 관내 소각시설의 대표적인 특성을 반영할 수 있는 사업장을 선정

대상 사업장의 소각방식, 소각대상 폐기물 종류, 폐기물 성상에 따른 배출특성 등 대상 사업장의 현황 조사

소각시설 현황 및 소각시설 운전방식, 기타 방지시설 현황 조사(용량, 소각방식, 과년도 소각량, 방지설비 등)

○ 온실가스 실측관련 국외 사례조사 및 국내 현황 분석

미국, 유럽 등의 CO_2, CH_4, N_2O 등 소각시설 배출구 온실가스 실측사례 조사

소각시설 배출구에서의 온실가스 연속측정 및 측정주기 등 측정방법론 사례 조사

온실가스 실측 관련 지침 및 가이드라인 등 관련 규정 조사

○ N_2O 연속측정시스템 사전준비

대상 사업장의 연소가스 측정지점에서 연소가스를 직접 채취하여 측정할 수 있도록 샘플링용 프루브 설치

수분 및 먼지제거를 위한 전처리장치와 연소가스 보온 및 이송배관 설치

분석기 설치 및 시운전 실시에 의한 정상운영 여부 확인

○ 소각시설 배출 온실가스 N_2O 연속측정

데이터 수집은 기본적으로 월 1회 측정을 기본으로 하되 해당 사업장 현황에 따라 조율하여 측정하여 측정데이터의 정확도를 확보

현장 연속측정시에는 측정기의 정상 가동여부 확인, 이상작동시 조치, 제로교정 및 스팬교정을 실시함.

○ 소각시설 N_2O 배출특성 분석 및 국내 최적 관리방안 수립

연속측정에 의한 N_2O 측정농도에 데이터를 확보하고, 해당 배출시설별 N_2O 배출특성 분석

배출권의 조달 계획 및 확보방안을 제시함

배출권의 과부족 범위를 분석하여 비용효과적인 온실가스 저감목표를 달성하기 위한 대응전략을 수립

○ 소각시설 대상 N_2O 실측방법에 대한 (Tier 4) 사업장 고유 배출계수 산정

온실가스 배출량 산정방법에 따른 각 사업장별, 배출구별 온실가스 배출량 산정 및 산정결과 비교·분석

소각시설별 N_2O 배출량 비교 및 변화추세 분석

○ 사업장 고유 배출계수 개발

사업장에서 실험·분석을 통해 개발·보고한 배출계수로서, 사업장 자체적으로 개발 적용한 배출계수를 말함.

소각장으로 유입되는 폐기물은 성상과 소각조건이 수시로 변하기 때문에 단시간 동안 측정된 온실가스 배출량은 정확도가 떨어질 수 있음.

폐기물 소각에 의해 발생되는 온실가스는 이산화탄소, 아산화질소, 메탄으로 알려져 있으며, 메탄의 경우는 고온에서 일정한 소각시간을 유지하는 현재 소각 조건에서는 발생량이 미비하여 소각에서의 메탄 발생량은 고려하지 않고 있음.

현재 소각시설에서는 CO_2 실측 농도를 바탕으로 CO_2 배출량을 산정하고 있으나 N_2O는 TMS 측정항목에 포함되어 있지 않음.

제 2 장 국내외 기술현황

1 국내의 관련기술의 현황 ····· 11
2 국외의 관련기술의 현황 ····· 12

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

1. 국내의 관련기술의 현황

폐기물의 소각부문에서 배출되는 CO_2, N_2O, CH_4는 지구온난화의 주요인으로 주목되는 온실가스로 정확한 배출량의 산정은 지구적 규모의 환경문제를 대처하기 위해 매우 중요하지만 최근까지는 CO_2에 대한 연구가 다수 진행되었으며, N_2O 관련 연구는 매우 부족한 실정이다.[3]

N_2O 가스의 배출원에서의 매시간 배출을 정확하게 실측한다는 것은 비용과 시간 측면에서 현실적으로 접근이 어려운 방법으로 현재는 각 배출원에서의 배출을 예측하여 배출량을 산정하여 보고하고 있다.

폐기물 소각분야에서 N_2O 배출량의 산정방법은 각 배출원에서 배출계수에 의한 배출량의 예측이 이루어지고 있으며, 정확한 배출량 산정방법을 위해 각 배출원에서 대표성을 지닐 수 있는 배출가스의 포집과 그 배출가스의 측정에 의한 실측치가 필요한 상황임.

2015년 파리협정 이후 각 국의 감축목표에 대한 측정·보고·검증 체제가 더욱 강화되고 국가 고유배출계수를 통한 배출량 산정이 중요시 됨에 따라 온실가스 배출시설에서의 현장측정을 통한 국가 고유 온실가스 배출계수 개발 및 검증 추진함.

현재 폐기물분야 배출원별(매립, 소각, 하폐수, 생물학적처리) 국가 온실가스 배출량을 산정하며, 산정된 배출량의 투명성 및 정확성 향상을 위하여 품질보증 및 품질관리(QA/QC) 연구가 일부 수행됨.

폐기물 소각 시 CH_4의 경우 불완전 연소, N_2O의 경우 상대적으로 낮은 연소온도(500~950℃) 조건에서 주로 배출되며, 온도, 체류시간, 공기비, 대기오염제어장치 유형, 폐기물의 질소함량 등의 요인에 따라 배출량이 달라지므로 N_2O 가스에 대한 정확한 배출량을 산정하기 위해 연속측정방법에 의한 배출량 산정에 대한 연구가 진행되고 있으며, 산정방식에 따라 발생량의 차이가 클 경우 이에 대한 보완방안의 수립이 필요할 것으로 예상됨.

2. 국외의 관련기술의 현황

해외 각국은 온실가스·에너지 목표관리 운영 등을 위하여 연속측정에 의한 배출량 산정방법을 적용하여 배출량 실측을 통한 체계적인 가이드라인을 마련하고, 온실가스 배출량 산정을 수행하고 있음.

현재 IPCC에서 제시하고 있는 기본배출계수를 적용한 온실가스 배출량 산정방법은 간접 배출량 산정 방법으로 연소 조건 변화에 유연하지 못하고, 배출량의 신뢰성 및 정확성에 대한 오차 발생 가능성을 내포하고 있기 때문에 연속측정에 의한 직접 배출량 산정 방법으로 운전 조건 변화에 유연하게 대응할 수 있고, 개별 사업장마다 연속적인 실측값의 확보가 가능하여 국가배출통계의 신뢰도를 향상시킬 수 있기 때문이다.[4]

미국의 온실가스 의무 보고 법령(Mandatory Reporting Rule, MRR)에서는 일정규모 이상의 고체 또는 폐기물 연소시설을 대상으로 실측을 통한 배출량 보고를 의무화하고 시료 채취 시 연속으로 24시간의 시료를 확보할 수 있어야 한다고 명기하고 있다.

하수슬러지와 같은 폐기물의 소각에서 발생되는 N_2O를 저감하는 위한 국내외의 개발기술은 아직 미미한 상태이며, 향후 대부분 소각 시설의 후단에 N_2O 저감 장치를 설치하는 것이 고려될 것으로 예상된다.[5]

제 3 장 연구방법

1. 연구내용 ····· 14
2. N_2O 연속측정방법 ····· 14
3. N_2O 분석방법 ····· 17
4. 폐기물 소각시설 현황 ····· 17

제 3 장 연구내용 및 방법

1. 연구내용

본 연구과제는 시흥시 관내의 산업용 소각로를 보유하고 있는 온실가스 배출권 할당업체 중에서 대표적인 폐기물, 제지, 고형연료(SRF)를 연소하는 소각로를 대상으로 온실가스 중 N_2O의 배출특성 및 발생량을 조사하고, 사업장 고유 배출계수를 산출하였다. 또한 N_2O 배출량 저감방안에 대한 대응전략을 수립하여 온실가스 배출량 감축을 위한 대응전략 수립과 저감에 따른 경제성 평가를 수행하였다.

N_2O 배출계수는 각각의 배출원 특성에 따라 IPCC 기본계수, 국가고유계수, 시설단위 사업장고유계수 등으로 구분하여 적용하고 있으며, 우리나라는 아직까지 연속 측정을 통한 온실가스 배출량 산정 방법은 CO_2의 경우만 적용되고 CH_4와 N_2O는 IPCCC 기본계수를 이용한 Tier 1 Method를 적용하여 배출량을 산정하고 있다. 따라서, Non-CO_2 배출량 산정은 현재까지 IPCC 기본배출계수를 이용한 Tier 1 Method를 적용하고 있지만, 상대적으로 배출 농도 분포가 큰 Non-CO_2는 온실가스 배출량 산정 방법에 따라 배출량의 차이가 있을 것으로 예상된다.

시흥시 관내의 온실가스 배출권 할당업체는 2015년부터 온실가스 배출량에 대한 전략적 관리와 이에 따른 배출권의 전략적 구매가 필요한 상황이며, 이러한 해당 업체의 산업용 소각로에서 배출되는 N_2O 배출량을 조사하여 향후 N_2O를 포함에 따라 온실가스 배출권의 과부족량을 예측하고, 배출권을 초과하는 부분에 대한 비용효과적인 대응방안을 조사하였다.

2. N_2O 연속측정방법

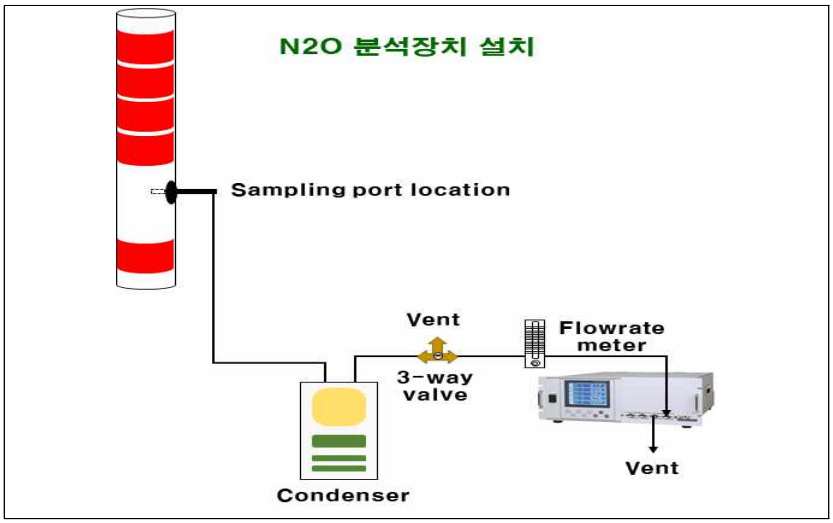
현재 국내 소각장에서 배출되는 CO_2가스는 국립환경과학원을 포함한 여러 기관 등에서 NDIR을 이 용한 연속측정 방식으로 배출량을 산정하고 있지만, N_2O 또는 CH_4 가스는 대부분 Teddler bag을 이용하여 배출가스를 채취한 후 N_2O는 GC-ECD로 CH_4는 GC-FID 기기를 이용하여 분석을 수행하고 있다.

이와 같은 N_2O 와 CH_4 가스 분석은 연속측정 방식이 아닌 샘플을 채취한 후 실험실에서 분석하는 방식이기 때문에 샘플주입량이 많고 분리능이 상대적으로 떨어지는 packed column은 정량분석에 있어서 오차가 크게 발생하고 있다.

본 연구과제에서 각 사업장별 시료채취는 [그림 2]에서 제시된 바와 같이 측정지점에서 일정한 유량으로 시료를 채취하여 연속측정기를 이용하여 N_2O 농도를 측정하였다.

N_2O의 측정 방법은 광음향분광법(Photo-acoustic Spectroscopy, PAS), 비분산 적외선법(Non-Dispersive Infrared Method, NDIR), 가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC) 등이 사용되고 있다. PAS, NDIR 방식은 주로 배출원에서 연속적으로 배출농도를 모니터링하기 위해 사용되고 있으며, GC방식은 배기가스를 채취하여 실험실에서 분석하는 비연속적 방식으로 사용되고 있다.[6]

[그림 3]은 산업용 소각시설에서 N_2O 가스에 대한 연속측정을 수행한 현장사진이다. 본 연구에서는 소각시설에서 배출되는 고온의 연소가스를 채취하기 위해 스테인레스 재질의 채취관을 사용하여 굴뚝에 장착한 후 시료 내의 수분을 제거하기 위해 냉각시스템을 통해 3℃ 이하로 냉각하여 수분을 제거한 후 시료를 채취하였다. 수분이 제거된 연소가스는 연속측정기로 연결하여 배기가스를 24시간 연속으로 N_2O 발생농도를 측정하였다. 이 때 시료채취 지점으로부터 냉각시스템까지 연소 배가스 중에 포함된 수분의 응축을 막기 위하여 발열체로 140℃까지 가열하면서 유입된 가스를 냉각시스템으로 연결하였으며, 연소배가스 중에 포함된 분진은 가스채취관 입구에 세라믹 여과기를 설치하여 제거하였다.



[그림 2] N_2O 시료 채취 방법

도시고형 폐기물 소각로

산업폐기물 소각로

SRF 소각로

[그림 3] 산업용 소각로 N_2O 현장실측 현장사진

가스 샘플링 유량은 진공펌프를 이용하여 조절하면서 분석용 가스시료를 채취하였으며, 소각로 후단에서 연속적인 N_2O 가스측정을 위하여 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 연속측정기를 연결하여 배출가스를 24시간 연속으로 측정하였다.

N_2O의 배출량은 연소 특성 및 조건, 기술적 요소, 그 이외에도 여러 요인에 영향을 받는 다고 알려져 있으며, 이러한 요인에 따라 N_2O 농도의 변화를 파악하기 위해 본 연구에서는 24시간 연속으로 최소 3회 이상 측정하여 배출량을 산정하였다.

3. N_2O 분석방법

실시간 가스측정기는 NDIR 방식을 측정기(FUJI ELECTRIC, Model ZKJ)를 이용하여 시료 유입 유량은 1L/min으로 조절하여 연속적으로 분석하였다. N_2O를 정량분석하기 위하여 가스분석기의 측정범위에 맞는 200ppm의 표준가스를 구입하여 검교정을 수행하였다.

배출가스 중 N_2O의 경우, 시료의 수분 제거는 가장 중요한 요인으로 작용하며, 이를 제거하기 위한 장치들은 필수적이다. 따라서 연속측정기 전단에 수분트랩을 설치하여 연소가스에서 응축된 수분을 먼저 제거한 후 저온동결트랩을 설치하여 연소가스 온도를 -40℃ 이하로 냉각하여 수분을 제거하였다. 또한 연속측정기에 유입되는 유량을 조절하기 위해서 진공펌프를 이용하여 가스측정을 수행하였다.

4. 폐기물 소각시설 현황

본 연구에서 연속측정을 통해 N_2O의 발생량을 조사한 소각시설은 시흥 스마트허브 산업단지 내의 소재한 온실가스 배출권 할당 대상업체의 폐기물 소각시설 중에서 도시고형폐기물, 산업폐기물(제지), 고형연료를 연소하는 소각시설을 대상으로 소각시설에서 발생하는 N_2O의 발생량을 조사하였다.

본 연구에서 연속측정을 수행한 소각시설은 각각 로타리킬른 회전식 소각로, 이동식 스토커 소각로, 유동층 소각로를 운영 중에 있으며, 소각로 후단의 연소가스 처리시설로는 반건식반응탑, 여과집진기, 선택적 촉매환원장치, 흡수탑 등을 운영 중에 있다.

소각시설에 대한 종류, 처리용량, 처리공정 등 소각시설에 대한 현황자료는 [표 6]에 정리하여 나타내었으며, [그림 4]는 N_2O 발생량을 조사한 소각시설의 전경사진이다.

[표 6] 연속측정 사업장의 소각로 운영현황

폐기물 종류	사업장폐기물 (도시고형폐기물, 하수슬러지)	산업폐기물 (폐합성수지류, 폐지류, 폐목재류)	고형연료 (SRF, Bio-SRF)
소각로 형식	로타리킬른 회전식 소각로	이동식 스토커	유동상
소각용량	100톤/일	100톤/일	144톤/일
일평균소각량	100톤/일	84톤/일	122톤/일
배가스 풍량	33,794 Sm^3/hr	48,453 Sm^3/hr	89,981Sm^3/hr
소각시설 처리공정	폐기물 보관장 - 폐기물 크레인 - R/K 소각로 - 폐열보일러 - 반건식반응탑(SDR) - 건식반응흡수탑 - 여과집진기 - 촉매반응탑(SCR) - 연돌	연소로-> 보일러-> 선택적비촉매환원장치(SNCR)-> 중력집진시설-> 반건식반응시설(SDR)-> 분말활성탄 및 분말 소석회 주입설비-> 여과집진시설(B/F)-> 흡수에의한시설(충전탑)	연소로-> 보일러-> 탈질시설(SNCR)-> 원심력집진시설-> 반건식반응시설(SDR)-> 분말활성탄 및 분말소석회 주입설비-> 여과집진시설(B/F)-> 탈질시설(SCR)
대기방지설비	반건식반응탑 95,220㎥/hr 건식반응 흡수탑 - 97,200㎥/hr 여과집진시설 99,600㎥/hr 촉매반응탑 93,420㎥/hr	SNCR 232,380 ㎥/hr 중력집진 98,700 ㎥/hr 반건식반응탑(SDR) 97,320 ㎥/hr 여과집진시설(B/F) 89,160 ㎥/hr 충전탑(스크러버) 86,160 ㎥/hr	SNCR 408,600 ㎥/hr 원심력집진 140,040 ㎥/hr 반건식반응탑(SDR) 136,920 ㎥/hr 여과집진시설(B/F) 126,180 ㎥/hr SCR 123,900 ㎥/hr

도시고형폐기물 소각로

산업폐기물 소각로

고형연료 소각로

[그림 4] 연속측정 소각시설 전경

제 4 장 연구결과

1. N_2O 연속측정 및 배출량 산정방법 ····· 21
2. 소각로별 N_2O 농도분석 ····· 21
3. 소각로별 N_2O 배출량 산정 ····· 27
4. 소각로별 N_2O 배출특성 ····· 29
5. 소각로별 N_2O 배출 저감방안 ····· 33
6. 소각로 N_2O 저감에 따른 경제성 평가 ····· 35

제 4 장 연구결과

1. N_2O 연속측정 및 배출량 산정방법

본 연구에서는 N_2O 분석은 EPA Method 18(US EPA, 2001)에 연속적인 시료 채취방법(Tier 4 Method)에 따른 온실가스 배출량 산정을 위해 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 연속측정기를 연결하여 배출가스를 연속적으로 측정하였다. N_2O 측정은 실시간으로 장시간 측정이 가능한 비분산 적외선분석장치를 이용하여 측정하였으며, N_2O 측정기기로 NDIR 분석기는 글로벌 시험인증기관인 독일 TÜV에서 승인되어 활용되어 신뢰성이 확보된 분석기기라 할 수 있다.

소각시설에서 채취된 배출가스의 N_2O의 농도를 연속측정분석기기를 이용하여 분석하였다. N_2O 농도는 24시간동안 연속으로 측정하였으며, 분당 1회 측정된 N_2O 농도 값을 이용하여 그 결과를 나타내었다.

N_2O 배출량의 산정방법은 '온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침'에서 제시하고 있는 연속 측정에 따른 배출량 산정식을 이용하여 아래 식 (2)에 의해 산정하였다.

$$E_{N_2O} = K \times N_{N_2O} \times Q \times 10^{-3}$$

E_{N_2O} : N_2O 배출량 $(g\,N_2O/day)$
N_{N_2O} : N_2O 평균농도 (ppm)
Q : 배기가스 유량 (Sm^3)
K : 변환계수 $(44/22.4(kg/m^3)$ (2)

2. 소각로별 N_2O 농도분석

소각로에서 배출되는 N_2O 농도 실측은 2018년 8월 27일부터 2018년 10월 25일까지 도시고형폐기물 소각로, 산업폐기물 소각로 그리고, 고형연료 소각로를 대상으로 비분산적외선분석기(Non-Dispersive Infrared Analyzer, NDIR)를 이용하여 각각 총 3회에 걸쳐 회당 24시간 동안 연속측정방법으로 시행하였으며, 폐기물 소각시설

의 연돌에서 1분 간격으로 N_2O 농도를 측정하였다.

도시고형폐기물 소각로에 대한 연속측정결과를 [그림 5]에 나타내었다. 도시고형폐기물의 경우 N_2O 평균농도는 1차 59.5ppm, 2차 53.8ppm, 3차 53.6ppm으로 측정되었으며, 1~3차까지 측정한 결과를 정리하여 [표 7]에 나타내었다. 도시고형폐기물에서 발생되는 N_2O의 평균농도는 55.6ppm, 표준편차는 3.47로 분석되었다.

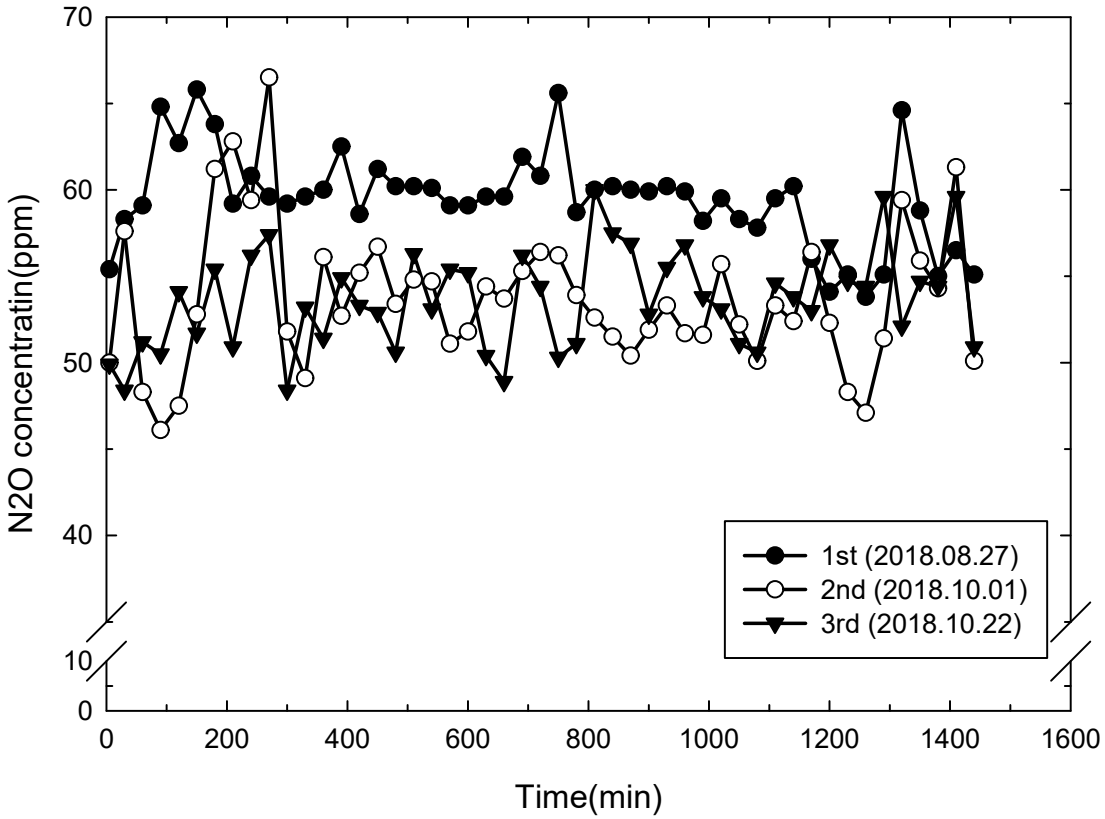
산업폐기물 소각로에 대한 연속측정결과를 [그림 6]에 나타내었다. 산업폐기물의 경우 N_2O 평균농도는 1차 96.2ppm, 2차 102.3ppm, 3차 101.1ppm으로 측정되었으며, 1~3차까지 측정한 결과를 정리하여 [표 8]에 나타내었다. 산업폐기물에서 발생되는 N_2O의 평균농도는 99.9ppm, 표준편차는 6.50로 분석되었다.

SRF 소각로에 대한 연속측정결과를 [그림 7]에 나타내었다. 고형연료(SRF)의 경우 N_2O 평균농도는 1차 114.8ppm, 2차 125.4ppm, 3차 134.7ppm으로 측정되었으며, 1~3차까지 측정한 결과를 정리하여 [표 9]에 나타내었다. SRF 소각로에서 발생되는 N_2O의 평균농도는 125.0ppm, 표준편차는 3.13로 분석되었다.

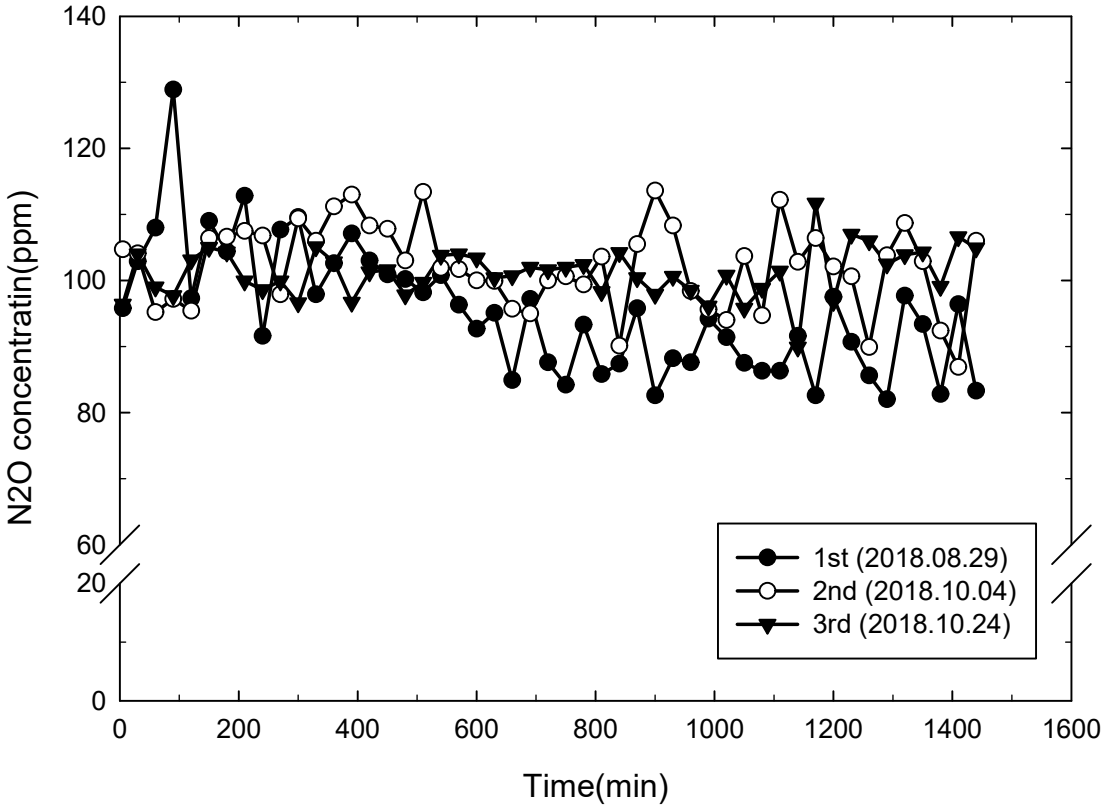
소각로에서 N_2O의 농도는 O_2가 부족하거나 로내 온도가 낮아지면서 불완전 연소로 인해 증가할 수 있으며, 소각로 운전온도가 950℃ 이상의 온도에서는 N_2O의 생성이 억제되는 것으로 알려진바 있다.[7] 국내 유동층 소각시설에서 하수슬러지를 소각할 경우 하수슬러지 내에 포함되어 있는 질소 성분이 N_2O로 전환되어 배출되며, 이때 발생농도는 200~300ppm으로 생활 폐기물의 소각시설에서 배출되는 N_2O 농도에 비해 4배 이상 높게 배출된다는 조사결과가 보고된 바 있다. 따라서, 폐기물의 소각에 의해 발생하는 N_2O의 양은 소각시설의 운전조건, 폐기물의 성상 등에 의해 소각시설별로 차이가 발생할 수 있어 소각시설별로 발생량에 대한 조사가 필요하다.

본 연구에서 측정한 소각시설의 N_2O 배출농도는 24시간 동안 일정한 범위 내의 농도분포를 보였으며, 소각시설별로 농도분포의 편차는 산업폐기물 소각로가 가장 크게 조사되었으며, 도시고형폐기물 소각로, 고형연료 소각로 순으로 발생농도의 편차가 작게 측정되었다. 산업폐기물 소각로의 N_2O 농도편차가 가장 크게 측정된 것은 산업폐기물 소각로에서 처리되는 폐기물의 종류가 폐합성수지류, 폐지류, 폐목재류로 폐기물의 종류와 성상이 다양하기 때문인 것으로 판단된다.

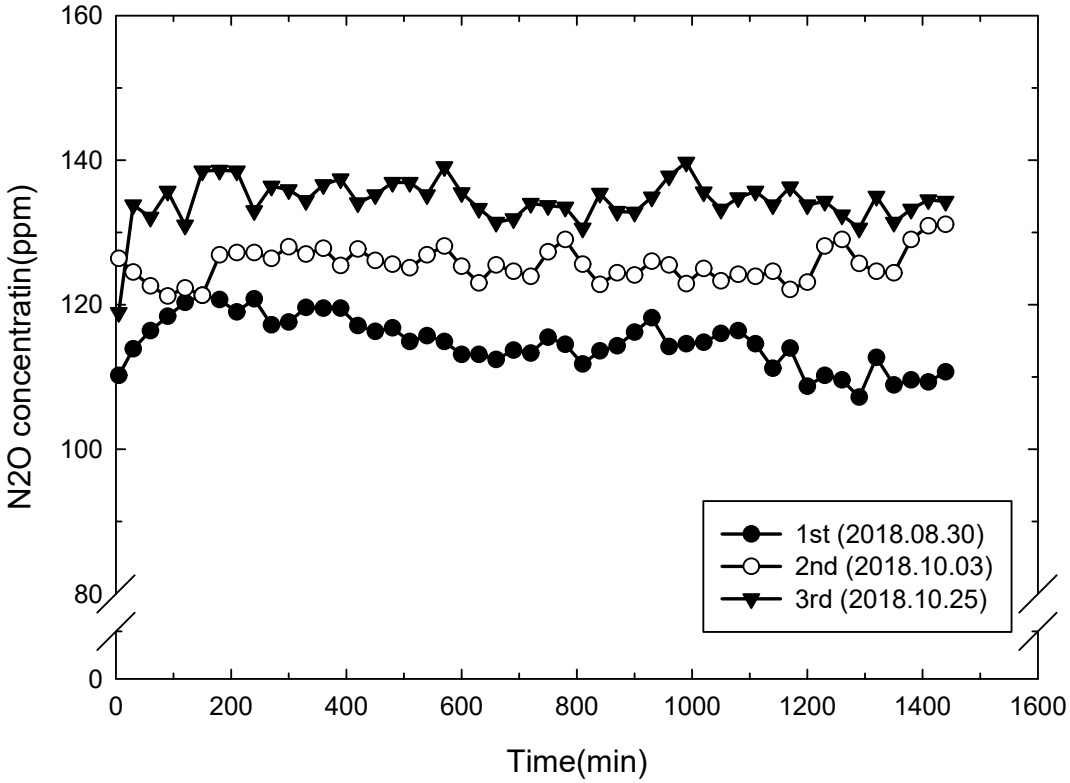
소각시설의 N_2O 평균 발생농도를 살펴보면 고형연료 소각로에서 발생농도가 125.0ppm으로 가장 높게 측정되었으며, 산업폐기물 소각로는 99.9ppm, 도시고형폐기물 소각로가 55.6ppm으로 측정되었다.



[그림 5] 도시고형폐기물 소각로 N_2O 농도 연속측정결과



[그림 6] 산업폐기물 소각로 N_2O 농도 연속측정결과



[그림 7] 고형연료 소각로 N_2O 농도 연속측정결과

[표 7] 도시고형폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
최소농도(ppm)	52.0	24.4	48.4	41.6
최대농도(ppm)	70.4	71.9	63.9	68.7
평균농도(ppm)	59.5	53.8	53.6	55.6
표준편차	2.75	4.51	3.16	3.47
풍량(Nm^3/hr)	38,660	37,572	35,779	37,337
로 온도(℃)	916.8	921.3	936,7	919.1
폐기물소각량 (ton/day)	98.6 (폐기물 85.1) (오니 13.5)	79.5 (폐기물 73.8) (오니 5.7)	100.4 (폐기물 80.2) (오니 20.2)	92.9 (폐기물 79.7) (오니 13.2)

[표 8] 산업폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
최소농도(ppm)	79.9	84.4	86.1	83.5
최대농도(ppm)	128.9	122.9	118.5	123.4
평균농도(ppm)	96.2	102.3	101.1	99.9
표준편차	9.21	6.35	3.94	6.50
풍량(Nm^3/hr)	19,928	18,651	20,019	19,533
로 온도(℃)	1,020.0	1,043.7	1,072.4	1,045.4
폐기물소각량 (ton/day)	88.4	90.7	91.3	90.1

[표 9] SRF 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
최소농도(ppm)	106.0	118.2	118.9	114.4
최대농도(ppm)	127.8	133.8	142.3	134.6
평균농도(ppm)	114.8	125.4	134.7	125.0
표준편차	3.90	2.69	2.79	3.13
풍량(Nm^3/hr)	58,949	47,973	50,054	52,325
로 온도(℃)	952.5	1045.1	1032.2	1,009.9
폐기물소각량 (ton/day)	137.2	111.0	147.4	131.9

3. 소각로별 N_2O 배출량 산정

Tier 4 Method에 따른 N_2O 배출량은 N_2O 분석장치에 의해 24시간 동안 연속 측정된 N_2O 농도와 TMS 데이터의 건식 유량을 이용하여 식 (2)에 적용하여 산정하였으며, 일일 폐기물 소각량을 이용하여 N_2O 배출계수를 산출하였다.

도시고형폐기물 소각로에서 배출되는 N_2O의 일일 배출량과 배출계수에 대하여 산정한 결과는 [표 10]에 정리하여 나타내었다. N_2O의 일일 배출량은 1차 108.44kg/day, 2차 95.29kg/day, 3차 90.41kg/day로 조사되었으며, 폐기물 소각량을 이용하여 산출된 N_2O 배출계수는 1차 1,100.11gN_2O/ton-waste, 2차 1,198.20gN_2O/ton-waste, 3차 900.08gN_2O/ton-waste으로 산출되었다.

산업폐기물 소각로에서 배출되는 N_2O의 일일 배출량과 배출량과 배출계수에 대하여 산정한 결과는 [표 11]에 정리하여 나타내었다. N_2O의 일일 배출량은 1차 90.42kg/day, 2차 89.90kg/day, 3차 95.43kg/day로 조사되었으며, 폐기물 소각량을 이용하여 산출된 N_2O 배출계수는 1차 1,022.81gN_2O/ton-waste, 2차 991.59gN_2O/ton-waste, 3차 1,045.47gN_2O/ton-waste으로 산출되었다.

고형연료인 SRF 소각로에서 배출되는 N_2O의 일일 배출량과 배출량과 배출계수에 대하여 산정한 결과는 [표 12]에 정리하여 나타내었다. N_2O의 일일 배출량은 1차 318.98kg/day, 2차 283.72kg/day, 3차 317.85kg/day로 조사되었으며, 폐기물 소각량을 이용하여 산출된 N_2O 배출계수는 1차 2,324.73gN_2O/ton-waste, 2차

2,555.65gN_2O/ton-waste, 3차 2,156.84gN_2O/ton-waste으로 산출되었다.

이와 같은 연속측정방법에 의해 산출된 폐기물 1톤당 N_2O 발생량은 폐기물 소각분야에서 N_2O 배출계수에 의해 산출된 N_2O 발생량에 비해 상당히 높은 것으로 조사되었으며, 이러한 결과는 최근 N_2O 배출계수로 산정된 N_2O 배출량보다 실제 소각에 의해 발생하는 N_2O 배출량이 크다는 연구결과와 유사하였다. 하수 슬러지를 유동상식 연소로를 이용하여 소각하는 경우는 N_2O의 발생농도가 200~300ppm 수준이며, 배출계수는 0.042~1.664kg-N_2O/ton-sewage sludge로 높은 것으로 알려져 있다.[8-10]

[표 10] 도시고형폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
풍량(Nm^3/hr)	38,660	37,572	35,779	37,337
로 온도(℃)	916.8	921.3	936,7	919.1
폐기물소각량 (ton/day)	98.6	79.5	100.4	92.9
일일발생량 (kg/day)	108.44	95.29	90.41	98.05
배출계수 (gN_2O/ton-waste)	1,100.11	1,198.20	900.08	1,066.13

[표 11] 산업폐기물 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
풍량(Nm^3/hr)	19,928	18,651	20,019	19,533
로 온도(℃)	1,020.0	1,043.7	1,072.4	1,045.4
폐기물소각량 (ton/day)	88.4	90.7	91.3	90.1
일일발생량 (kg/day)	90.42	89.90	95.43	91.92
배출계수 (gN_2O/ton-waste)	1,022.81	991.59	1,045.47	1,019.96

[표 12] SRF 소각로 N_2O 연속측정결과

	1차	2차	3차	평균
풍량(Nm^3/hr)	58,949	47,973	50,054	52,325
로 온도(℃)	952.5	1045.1	1032.2	1,009.9
폐기물소각량 (ton/day)	137.2	111.0	147.4	131.9
일일발생량 (kg/day)	318.98	283.72	317.85	306.85
배출계수 (gN_2O/ton-waste)	2,324.73	2,555.65	2,156.84	2,345.74

본 연구에서 현장측정으로 산출된 N_2O 배출계수는 IPCC에서 제시한 폐기물 중에서 N_2O 배출계수가 가장 높은 하수 슬러지를 포함한 사업장 폐기물의 배출계수 408.41g/ton에 비해 최소 2배 이상 높게 측정되었다.

4. 소각로별 N_2O 배출특성

도시고형 폐기물 소각로는 도시고형 폐기물 이외에 하수슬러지 오니를 함께 소각하고 있는 소각시설로 하수슬러지의 경우는 N_2O 발생계수가 가장 높은 것으로 알려져 있어 하수슬러지의 소각량과 소각비율에 따른 N_2O 발생특성을 조사하였다.

도시고형물 폐기물 소각로의 3차 측정일은 전체 폐기물 소각량 중 N_2O 배출계수가 가장 높은 것으로 보고되고 있는 하수슬러지 오니량의 비율 20.1%로 가장 높았으나 N_2O 발생농도는 53.6ppm으로 거의 유사하였으며, N_2O 발생량도 폐기물 1톤당 900.08g으로 1차와 2차의 발생량 보다 낮아 하수슬러지 오니의 소각량과 소각비율이 N_2O 발생농도와 발생량과의 상관관계를 찾을 수 없었다.

폐기물의 화학성분 중 질소는 소각공정에서 HCN으로 전환되어 N_2O를 발생할 수 있는 성분으로 작용하며, 소각로 운전조건에 따라 N_2O 또는 NOx로 전환되어 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 도시고형폐기물과 하수슬러지에 대한 화학성분을 분석을 시행하여 N_2O 발생량과 상관성을 조사하였다. 하수슬러지는 유기성 폐기물인 관계로 질소성분 함량이 8.3%로 도시고형폐기물에 비해 높게 측정되었다. 일반적으로 질소함량이 높은 폐기물을 연소할 경우 N_2O 발생량도 증가할 수 있지만 본 연구결과에서는 질소성분 함량이 높은 폐기물의 소각량의 증가에 따른 N_2O의 발생

농도 및 발생량의 증가를 확인할 수 없었다.[11]

[표 13] 도시고형 폐기물과 하수슬러지 소각량에 따른 N_2O 발생량

	1차	2차	3차	평균
N_2O 농도	59.5	53.8	53.6	55.6
폐기물소각량 (ton/day)	98.6 (폐기물 85.1) (오니 13.5)	79.5 (폐기물 73.8) (오니 5.7)	100.4 (폐기물 80.2) (오니 20.2)	92.9 (폐기물 79.7) (오니 13.2)
일일발생량 (kg/day)	108.44	95.29	90.41	98.05
배출계수 (gN_2O/ton-waste)	1,100.11	1,198.20	900.08	1,066.13

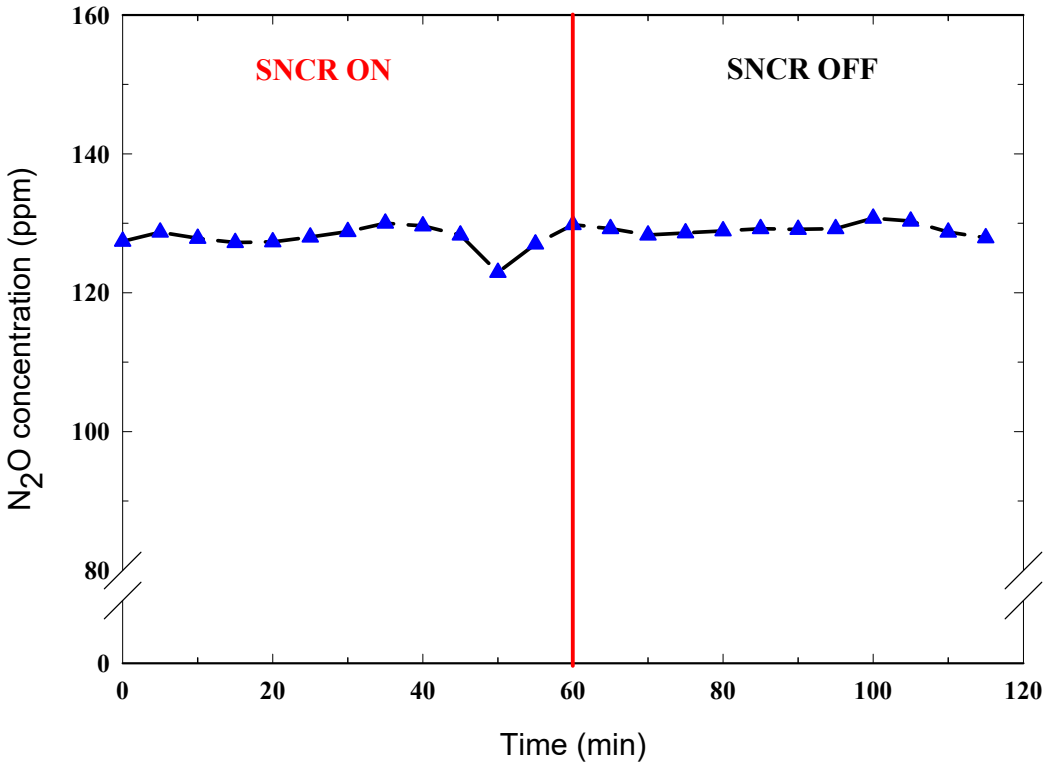
[표 14] 도시고형 폐기물과 하수슬러지 오니의 화학성분 분석표

성분		단위	도시고형폐기물	하수슬러지오니
화학원소 (dry basis)	C	%	56.2	56.4
	H	%	8.0	8.9
	O	%	33.6	25.2
	N	%	1.2	8.3
	S	%	0.1	1.1
	Cl	%	0.8	0.2
	Ash	%	12.4	40.7

또한 산업폐기물 소각로와 고형연료 소각로의 경우도 폐기물의 성상을 조사할 필요가 있으며, 소각로 후단 설비로 가동되고 있는 SNCR 설비에서 N_2O 발생여부도 조사할 필요가 있는 것으로 판단된다. 소각로 후단설비 중 SNCR은 질소산화물을 처리하기 위해 환원제로 암모니아 또는 우레아를 분사하여 N_2로 환원시키는 공정으로 반응온도는 870~1150℃로 알려져 있으며, 이러한 SNCR 반응공정이 1000℃ 이하에서는 N_2O가 발생하는 것으로 보고되고 있다.[12]

따라서, SNCR 설비가 N_2O 발생량에 미치는 영향성을 조사하기 위해 SNCR 설비의 가동 전·후의 N_2O 농도를 측정하여 [그림 8]에 나타내었다. SNCR 설비를 가동중 N_2O 평균농도는 127.8ppm이며, SNCR 설비의 가동을 중단한 경우 N_2O 평균농도는 129.2ppm으로 큰 차이를 찾을 수 없었다. 따라서, SNCR의 가동 여부에 따른 N_2O 발생량의 영향성도 높지 않은 것으로 조사되었다.

이와 같이 폐기물의 질소함량과 SNCR의 가동여부에 따른 N_2O 발생특성을 조사한 결과에서는 별다른 영향성을 찾을 수 없었으며, 결국 N_2O의 발생특성은 사업장별로 소각처리하는 폐기물의 성상과 연소로 운전조건에 의해 차이를 보이는 것으로 예상되어진다. 따라서, 산업용 소각로의 N_2O의 발생량을 정확히 산정하기 위해서는 IPCC에서 추전하는 연속측정에 의한 Tier 4 기준의 산출방식이 가장 정확한 것으로 판단되며, 사업장별로 TMS 장비를 이용하여 실시간으로 N_2O으 연속측정이 어려운 경우는 연속측정방법을 이용한 사업장 고유발생계수를 산출하고, 이를 이용한 N_2O 배출량 산정방식인 Tier 3 기준의 산출방법을 적용할 필요가 있다.



[그림 8] 고형연료 소각로의 SNCR 가동 전후 N_2O 발생농도

5. 소각로 N_2O 배출 저감방안

폐기물 소각에서 발생하는 N_2O를 저감하기 위한 국내외 개발기술은 아직 미비한 상태이며, 인위적인 N_2O 배출은 점점 증가하고 있기 때문에 향후 폐기물 소각에 의해 발생하는 온실가스 발생량을 줄이기 위해 소각시설의 후단에 N_2O 저감설비가 설치될 것으로 예상된다.[9] 현재까지 N_2O 저감기술은 질산 또는 카프로락탐 제조 공정에서 발생하는 N_2O 저감기술이 상용화되었지만 처리효율과 경제성 확보를 위한 촉매기술의 개발이 지속적으로 이루어지 있으며, 또한 소각시설의 운전조건에 도입이 가능한 촉매 및 추가 설비에 대한 검토도 필요한 상황이다. 현재까지 상용 N_2O 촉매는 대부분 500℃ 이상에서 운전이 가능하기 때문에 촉매반응온도까지 재가열하여야 하거나 추가 설비도입 및 이에 따른 공간확보의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 현재 상용화되어 있는 N_2O 저감기술에 대하여 조사하여 소각시설에 적용할 수 있는 가장 효과적인 저감방안에 대하여 조사를 수행하였다.

고정원에서 배출되는 N_2O 저감기술은 크게 열분해 기술과 선택적 촉매환원법으로 분류되어진다. 열분해 기술은 공정이 단순하고, 고농도의 N_2O가 발생하는 후단 설비로 적용이 가능한 기술이기 때문에 소각시설의 N_2O 저감기술로는 적용하기 어렵다. 일반적으로 선택적 촉매환원법이 N_2O 저감기술로 폭넓게 적용되고 있으며, 환원제의 종류에 따라 NH_3-SCR와 HC(Hydrocarbon)-SCR로 분류된다. 이 중 NH_3-SCR을 이용한 N_2O 저감 공정은 이미 상용화되어 사용되고 있는 기술로 암모니아를 환원제로 사용하기 때문에 NOx와 N_2O를 동시에 저감할 수 있는 장점을 갖는다.

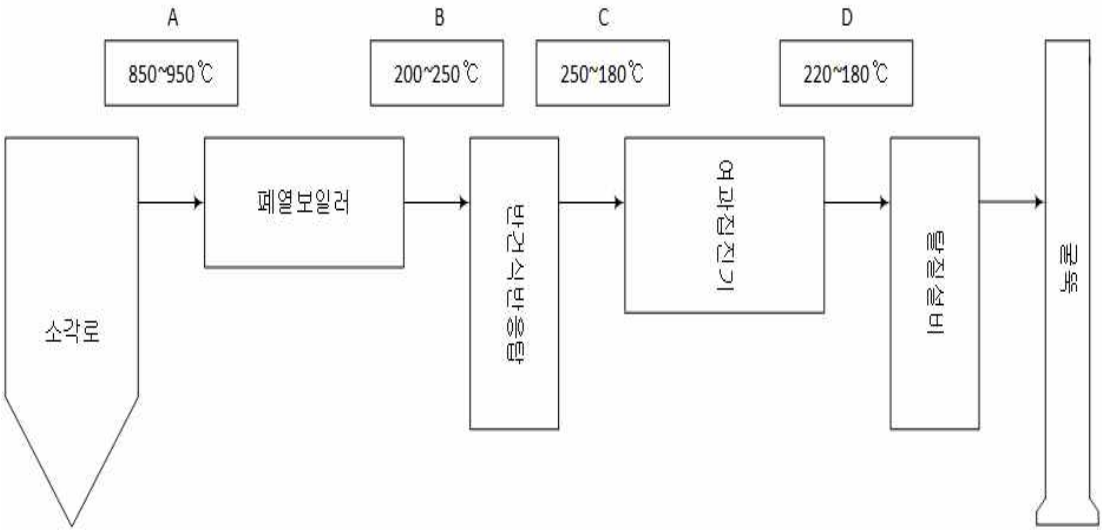
N_2O를 저감하는 촉매는 철 이온이 교환된 제올라이트 계열의 촉매가 500℃ 내외에서 100%의 N_2O 제거효율을 나타내었으나 제올라이트의 경우는 수열 안정성이 떨어지기 때문에 수분 함량이 높은 경우는 반응활성이 급격히 떨어지는 문제가 있는 것으로 알려져 있다[6]. 제올라이트 계열 중 Fe-ZSM5 촉매의 경우는 산소가 존재하는 경우에 촉매활성에 영향이 없으며, 0.5 vol%의 수분이 존재하는 경우도 500℃ 내외 반응온도에서도 100%에 가까운 전환율을 나타내는 것으로 조사되었다. 또한 수분농도가 증가하는 경우는 반응온도를 증가시켜서 높은 N_2O 전환율을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.

현재 대부분의 산업용 소각로의 대기오염방지시설은 [그림 9]와 같이 운영되고 있으며, 기존 설비와 함께 가동할 수 있도록 N_2O 저감설비를 도입할 수 있는 구간과 반응온도를 설정하는 것이 중요하다. 상용된 N_2O 저감촉매의 운전온도는 대부분 500℃ 이상으로 기존의 대기오염방지시설에 적용을 할 경우는 A구간에 신규 N_2O

저감설비를 도입하거나 D구간에 온도를 500℃ 내외로 재승온시켜서 N_2O와 NOx를 동시에 저감하는 방법이 검토될 수 있다. N_2O 저감설비를 D구간에 적용할 경우는 온도를 재승온시키는데 필요한 에너지 비용이 발생하기 때문에 제올라이트계 촉매의 경우는 850℃ 이상의 고온이 지속되어도 안정적으로 N_2O 저감효율이 나타내는 것으로 보고되고 있어 우선적으로 A구간에 신규 N_2O 저감설비를 도입하는 것을 우선적으로 검토할 필요가 있다. 현재까지 개발된 상용화기술과 연구개발결과를 바탕으로 소각로 N_2O 저감방안을 [표 15]에 나타내었으며, 이에 대한 실증평가를 통하여 폐기물 소각에서 발생하는 N_2O를 저감하기 위한 촉매에 대한 연구 및 효과적인 저감방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.[13]

[표 15] 소각로 N_2O 배출저감 방안

Catalyst	Reductant	GHSV(h-1)	반응온도(℃)	비고
Fe-ZSM5	C_3H_6	20,000	850	고온 N_2O 저감촉매
Fe-ZSM5	NH_3	20,000	400	NOx&N_2O 저감촉매



[그림 9] 소각로 대기오염방지설비 계통도

6. 소각로 N_2O 저감에 따른 경제성 평가

온실가스 감축을 위한 교토의정서 합의에 의해 의무적으로 할당받은 만큼의 탄소만 배출할 수 있도록 제한되어 있기 때문에 온실가스 감축목표를 초과한 배출량에 대하여 온실가스 배출권 거래시장이 새롭게 형성되었으며, 이로 인해 온실가스 감축목표를 초과달성할 경우는 CDM(Clean Development Mechanism)사업과 온실가스 배출권 거래제도를 통해 경제적인 이익도 발생하게 된다.

국내 탄소배출권 거래제도는 효율적 운영을 위해 배출권거래제 기본계획에 따라 525개 기업을 대상으로 배출권을 할당해 시행 중에 있으며, 탄소배출권거래시장은 2015년 139억 원, 2016년 906억 원, 2017년 8월말 기준으로 2,342억 원으로 꾸준히 증가하고 있다.

우리나라의 CDM 사업은 2005년 울산화학에서 에어컨용 냉매 HFC22 생산 과정에서 발생되는 온실가스인 HFC23을 열분해하여 소각하는 CDM 사업이 성공한 이후 2016년 6월 기준 등록을 완료한 CDM 사업은 총 91건으로 해외 국가에 비해 적은 편이지만 지구온난화지수가 높은 아산화질소와 육불화황 저감 사업들이 포함되어 있어 온실가스 저감효과가 높은 편이다.

현재 폐기물 소각설비의 대기오염물질 저감설비에는 N_2O 저감설비가 도입되어 있지 않으며, 탄소배출권 할당 기업 및 지자체 운영 소각설비에서 N_2O의 배출량을

저감할 경우 감축한 만큼의 탄소배출권을 판매하여 경제적 수익을 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 현장실측을 수행한 도시고형폐기물 소각시설의 경우는 탄소배출권 할당기관으로 2016년 3만 142tCO_2eq.의 탄소배출권을 할당받아 온실가스 감축사업을 시행 중에 있으며, 현재까지는 2차 연소 부생연료 사용량 감소, LNG 사용 확대 등으로 온실가스 배출량을 감축하였다. 향후 본 소각설비에 N_2O 저감설비를 도입할 경우 탄소배출량을 크게 감축할 수 있으며, 탄소배출 할당량을 초과하는 감축량에 대해서는 배출권 거래제도를 통해 경제적인 수익도 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서 현장실측을 수행한 소각시설에서 폐기물 및 SRF 소각으로 발생하는 N_2O를 저감설비를 도입하여 온실가스배출량을 저감하였을 경우 발생하는 경제성 평가를 탄소배출권 거래제도의 CO_2 거래단가를 활용하여 [표 16]에 나타내었다. 이 때 탄소배출권 거래단가는 25,000원/ton으로 하여 N_2O 저감에 따라 발생하는 이익을 산정한 결과 본 소각시설에서 N_2O를 저감할 경우 이산화탄소 배출저감으로 도시고형폐기물 소각로는 연간 약 2.8억원이며, 산업용 소각로와 SRF 소각로는 각각 2.6억원과 8.9억원의 경제적 효과가 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서, 소각시설에서 발생하는 N_2O를 저감하는 설비를 도입하여 운영할 경우 초기 투자비와 운영비를 CO_2 저감사업에 의해서 확보가 가능할 수 있다고 판단된다.

[표 16] 소각시설별 N_2O 저감에 따른 경제적 효과분석

	N_2O 배출량 (ton/yr)	CO_2 환산량 (ton/yr)	CO_2 거래단가 (원/ton)	N_2O 저감효과 (천원/yr)
도시고형폐기물 소각로	35.79	11,094.20	25,000	277,355
산업용 소각로	33.55	10,400.79	25,000	260,020
SRF 소각로	112.00	34,720.11	25,000	868,003

제 5 장 연구결과의 활용계획

1. 기대효과 ····· 38
2. 향후연구계획 및 사업성과 활용방안 ····· 38

제 5 장 연구결과의 활용계획

1. 기대효과

본 연구는 온실가스 대량 배출 사업장의 N_2O 배출특성을 실측함으로써 지구온난화에 대한 적절한 관리정책(안)을 도출하는데 그 목적을 두고 제안함. 본 과제의 수행을 통해 기대되는 성과는 다음과 같이 요약할 수 있음.

○ 온실가스 저감목표를 달성하기 위해 폐기물 소각부문에서 발생하는 온실가스의 배출량을 정확하게 파악할 필요가 있으며, 산업분야별 폐기물 종류에 따른 배출특성을 조사하여 온실가스 배출량을 예측함으로서 온실가스 배출량 할당업체의 저감목표 수립과 온실가스 거래제와 같은 자발적인 대처능력 확보가 가능하며, 지자체의 정책수립, 대응전략 등에 활용이 가능함.
○ 사업장별 배출원의 온실가스 배출특성 및 배출량 현황 파악함으로서 온실가스 배출상황을 반영하는 보다 신뢰성 있는 온실가스 발생량 자료확보 가능
○ 온실가스 배출량 감축목표 달성을 위한 사업장별 온실가스 배출량 산정에 활용함으로써 온실가스 배출 규제에 대한 객관적이고 능동적인 대책수립에 기여.
○ 온실가스 배출량 감축에 대한 자발적인 대처능력 확보 및 지속적인 경제성장 기대

2. 향후 연구계획 및 사업성과 활용방안

○ 시흥시 관내 각 배출원의 온실가스 배출특성 및 배출량 현황 파악함으로서 온실가스 배출상황을 반영하는 보다 신뢰성 있는 온실가스 발생량 자료 확보 효과
○ 사업장별 온실가스배출량 산출에 활용함으로써, 온실가스 배출 규제에 대한 객관적이고 능동적인 대책수립에 기여.
○ 온실가스 배출량 감축에 대한자발적인 대처능력 확보 및 지속적인 경제성장 기대
○ 객관적이고 계량적인 옵션 분석결과를 기후변화협약 대응 전략 수립의 기초 자료로 활용 가능
○ 기후변화협약 관련 각종 시책의 사전 효과분석 및 신뢰성 향상
○ 에너지/환경정책, 특히 수요관리 및 기후변화협약 정책수립에 필요한 정보 제공

○ 배출권거래, CDM 등의 유연성체계 평가에 활용

제 6 장 참 고 문 헌

1. 참고문헌 ····· 41

제 6 장 참고문헌

1. Kan SY, Hong JH, Lee SB, Han YJ, Estimation and Projection of Greenhouse Gas Emissions from Waste Incinerators in Korea, J. KSEE, 30(3), 250-256 (2008)

2. IPCC, 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

3. Yun H-K, Lee DK, Cho CS, Kang SM, Yoon YJ, Jeon YJ, Jeon EC, The Development of N_2O Emission Factor at Killn Type Pyrolysis Melting Facility, J. Climate Change Research, 8(3), 231-237 (2017)

4. Gwon YS, Lee JG, Chin BB, Son YR, Development of emission factor of greenhouse gas(CO_2) in stationary combustion facilities using continuous emission monitoring system. The 2007 Environmental Societies Joint Conference, pp 99-101 (2007)

5. Coq B, Mauvezin M, Delahay G, Butet JB, Kieger S, The simultaneous catalytic reduction of NO and N_2O by NH_3 using an Fe-zeolite-beta catalyst, Appl. Catal. B., 27(3), 193-198 (2000)

6. Kang SY, Kim SJ, Kang SM, Lee JW, Cho C-S, Sa J-H, Jeon E-C, A Study on N_2O Measurement Characteristics Using Photoacustic Spectroscopy(PAS), Sensors, 14, 14399-14410 (2014)

7. Svoboda K, Baxier D, Martine J, Nitrous oxide emissions waste incineration, Institute of Chemistry Slovak Academy of Sciences, 60(1), 78-90 (2006)

8. Shimizu T, Hasegawa M, Inagaki M, Effect of water vapor on reaction rates of limestonecatalyzed NH_3 oxidation and reduction of N_2O under fluidized bed combustion conditions, Energy Fuels, 14, 104-111 (2000)

9. Kim SJ, Kang SM, Kang SY, Lee, JW, Sa JH, Park SJ, Jeon EC,

Development of Greenhouse Gas Emission Factors from Sewage Sludge Incinerator, J. Climate Change Research, 5(3), 209-218 (2014)

10. L. D. Korving, C. Schilt, W. De Jong, “Reduction of nitrous oxide emission by a smaller air to fuel ratio in a large-scale sewage sludge fluidized bed combustor”, Waste Management and the Environment V, Transactions on Ecology and the Environment, Vol 140, WIT Press, pp. 43-55(2010).

11. 이승재 et al. "특별기획 2 : 하수슬러지 유동층 소각에서의 N_2O 온실가스 저감 기술". NICE (News & Information for Chemical Engineers), vol. 33, pp.679-684 (2015)

12. Crisanto M-C, Carlos E. R, Fernando H-R, Hans A, J., N_2O Formation in Selective Non-Catalytic NOx Reduction Processes, Environmental Protection, 2, 1095-1100 (2011)

13. Development of fluidization material and fluidized bed combustion process for suppressing N_2O emission (2014)