



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

생활폐기물 열분해용융시설의 N₂O 배출계수 개발

Development of N₂O emission factor from municipal solid waste
pyrolysis-melting facility

2016년 8월

세종대학교 대학원
환경에너지융합학과
윤 현 기

생활폐기물 열분해용융시설의 N₂O 배출계수 개발

Development of N₂O emission factor from municipal solid waste
pyrolysis-melting facility

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2016년 8월

세종대학교 대학원
환경에너지융합학과
윤 현 기

윤현기의 석사학위논문을 인준함

2016년 8월

심사위원장 박성규 (인)

심사위원 조창상 (인)

심사위원 전의찬 (인)

국문초록

본 연구에서는 외열킬른형(R-21) 열분해용융시설의 N₂O배출계수를 개발하고 국내에 도입된 열분해용융기술 중 샤프트로 열분해용융시설의 N₂O배출계수와 비교하였다. 이를 위해 대상시설에서 N₂O 농도를 실시간 측정하여 배출계수를 개발하였다. N₂O농도는 광음향분광법(PAS)으로 실시간 측정기기(LSE-4405)를 이용하여 측정하였다. 측정기간은 2016년 3월에서 4월까지 총 2차례에 걸쳐 측정하였다. 배출계수는 ‘온실가스·에너지 목표관리제 지침’에서 제시하고 있는 굴뚝연속자동측정기에 의한 배출량 산정방법을 이용하여, 산정된 배출량을 측정기간의 소각량으로 나누어 배출계수를 개발하였다.

1차(3/29~3/31)측정결과 평균 N₂O 배출농도는 0.225ppm으로 나타났으며, 배출계수는 0.741 gN₂O/ton-waste로 나타났다. 2차(4/26~4/28) 평균 N₂O농도는 0.307ppm으로 나타났으며, 배출계수는 0.893 gN₂O/ton-waste로 나타났다. 전체 평균 농도는 0.267ppm으로 나타났으며, 배출계수는 0.829 gN₂O/ton-waste로 나타났다. 선행연구에서 개발한 샤프트로 열분해용융시설은 15.5 gN₂O/ton-waste로 본 연구의 배출계수의 약 18배인 것으로 나타났다. 이러한 차이는 두 시설의 평균 로내온도가 각각 1,320℃(R-21)과 992℃(샤프트로)로서 차이가 크게 나타났으며, 본 연구의 대상시설인 외열킬른형 열분해용융시설은 저산소에서 운전되는 반면 샤프트로 열분해용융시설은 순산소를 공급하여 열분해하고 있기 때문으로 추정된다. 즉, 본 연구와 선행연구의 N₂O 배출계수는 평균 로내온도와 순산소공급여부에 따라 차이가 나는 것으로 해석할 수 있다.

최근 신도시에 건설되는 폐기물처리시설은 열분해용융시설이 대부분이며, 2008년 이후로 꾸준히 시설수가 증가하고 있다. 하지만 열분해용융시설

의 배출계수는 개발사례가 거의 없다. 본 연구결과로 열분해용융시설에서 배출되는 온실가스 배출량 산정에 대한 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 온실가스, 외열킬른형(R-21), 샤프트로, 광음향분광법

<목 차>

제 1 장 서 론	1
제1절 연구의 배경 및 목적	1
제2절 연구의 내용 및 절차	3
제 2 장 이론적 고찰	5
제1절 국내 폐기물 발생·처리 현황	5
1. 국내 폐기물 발생 현황	5
2. 국내 폐기물 종류별 처리 현황	6
제2절 국내 생활폐기물 소각처리 방법	10
제3절 폐기물소각부문의 온실가스 배출	13
1. 폐기물소각 시설의 온실가스 배출 현황	13
2. 폐기물소각 시설의 온실가스 배출 특성	14
3. N ₂ O 농도 측정방법	15
제 3 장 연구방법	18
제1절 대상시설 선정 및 현장조사	18
제2절 N ₂ O 농도 측정 및 정도관리	20
1. N ₂ O 농도 측정	20
2. N ₂ O 연속측정기기 정도관리	23
제3절 N ₂ O 배출계수 개발 방법	26
제 4 장 연구 결과 및 고찰	27
제1절 대상시설 N ₂ O 농도 측정 결과	27

제2절 생활폐기물 열분해용융시설의 N ₂ O 배출계수 개발	31
제 5 장 결 론	36
참 고 문 헌	39
Abstract	42

표 목 차

<표 1> 폐기물소각방식별 세부기술	12
<표 2> 열분해용융시설의 성장분석 결과	19
<표 3> N ₂ O 농도 연속측정기기(LSE-4405)의 측정조건	22
<표 4> N ₂ O 농도분석의 반복성 평가	25
<표 5> PAS를 이용한 N ₂ O 농도 측정 결과	28
<표 6> N ₂ O 배출계수 개발 결과	32
<표 7> 생활폐기물 소각 시설 N ₂ O 배출계수	33
<표 8> 열분해용융기술별 공정 비교	35

그림 목 차

<그림 1> 연구흐름도	4
<그림 2> 연도별 폐기물종류별 발생량	5
<그림 3> 폐기물 처리방법별 현황	6
<그림 4> 국내 생활폐기물 처리방법별 처리량	7
<그림 5> 국내 사업장배출시설계 폐기물 처리방법별 처리량	8
<그림 6> 국내 건설폐기물 처리방법별 처리량	9
<그림 7> 연도별 폐기물소각부문 온실가스 배출량 추이	13
<그림 8> 대상시설 공정흐름도	19
<그림 9> 열분해용융시설 N ₂ O농도 표본채취 모식도	20
<그림 10> 연속측정 전경	21
<그림 11> N ₂ O 농도변화에 따른 PAS 응답	24
<그림 12> PAS방법의 직선성 평가	24
<그림 13> 1차 N ₂ O 농도 측정 결과(3/29~4/31)	29
<그림 14> 2차 N ₂ O 농도 측정 결과(4/26~4/28)	30

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

우리나라의 온실가스 총 배출량은 2013년 기준 694.5 백만tonCO₂eq이며, 이 중 폐기물분야에서 배출되는 온실가스 배출량은 1,500 만tonCO₂eq로 국가 온실가스 배출량의 2.2%를 차지하고 있다(온실가스종합정보센터, 2015). 폐기물분야의 온실가스 배출원은 소각, 매립, 하·폐수처리, 기타 등으로 구분하고 있으며, 2013년 기준 폐기물분야 온실가스 배출량 중 소각부문이 46.7% 로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 다음으로, 매립부문이 41.3%, 하·폐수처리부문이 10.0% 기타부문이 2%를 차지하고 있다(온실가스종합정보센터, 2013).

국내 폐기물소각 시설은 스토커, 유동상, 열분해용융, 고정상 등의 소각방식으로 구분하고 있다. 국내 폐기물소각 시설 현황은 2011년 기준 지방자치단체시설의 소각 시설 중 스토커방식이 131개소로 가장 많고, 그 다음으로 고정상방식이 18개소, 열분해용융이 15개소이다(한국환경공단, 2013). 1980년 후반 스토커소각 시설에서 소각 후에 배출되는 비산재, 바닥재가 별도의 처리 없이 매립이 가능하였다. 그러나 2000년 초반 매립장 부족으로 인해 자원순환형 시스템에 대한 관심이 고조되면서 열분해용융시설 수가 2008년 이후로 꾸준히 증가하고 있는 추세이다(환경부, 2013).

열분해용융시설은 1,300℃ 이상의 용융로에서 폐기물을 처리하여 다이옥신과 같은 유해물질의 완전분해가 가능하다. 또한 타 소각방식에 비해 소각가스를 적게 배출하여 주변시설의 피해를 최소화하는 장점을 갖고 있다.

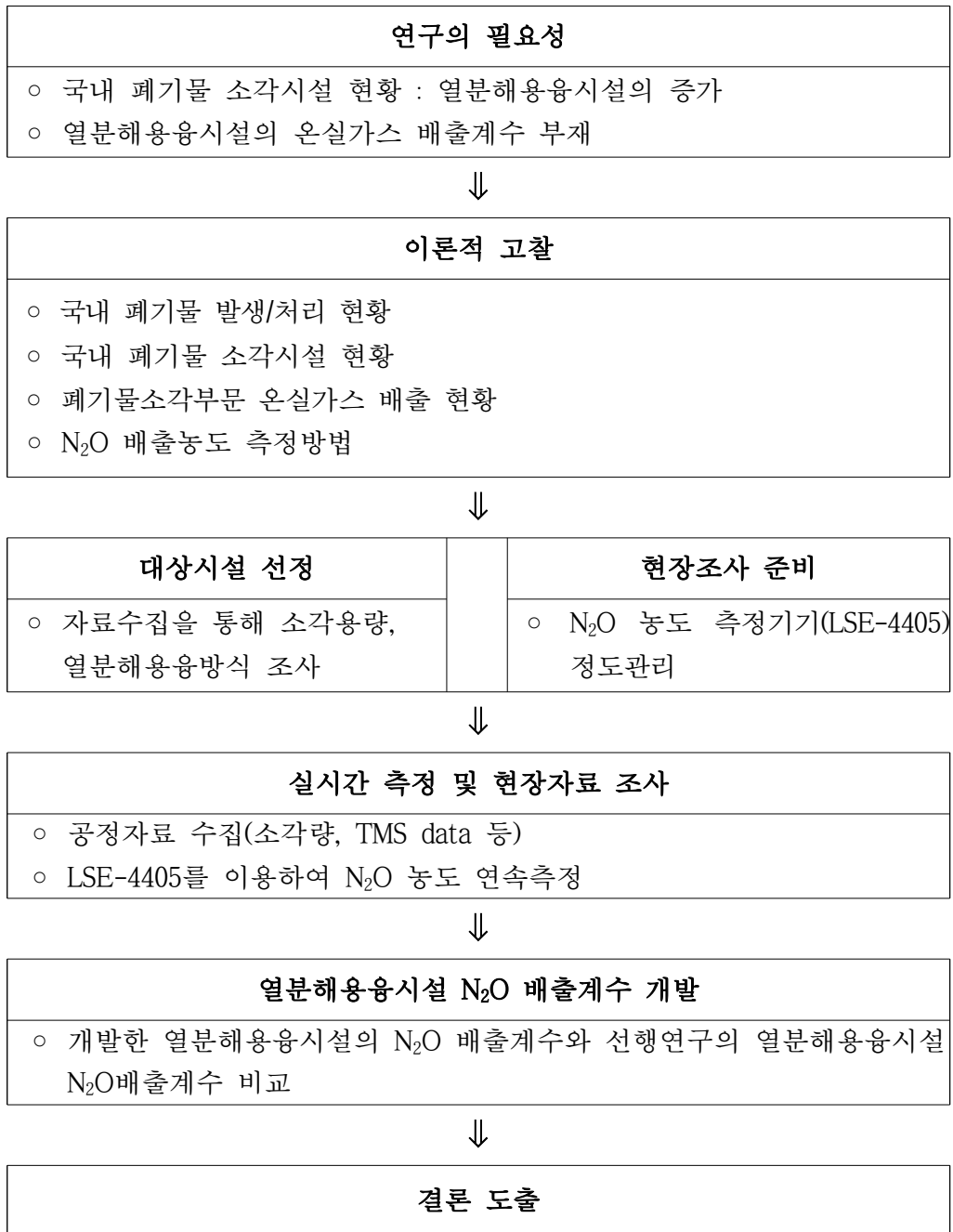
폐기물소각부문의 온실가스 배출량은 CO_2 , N_2O 를 대상으로 산정하고 있으며, 소각로가 고온상태이고 체류시간이 충분할 경우 CH_4 배출량이 거의 배출되지 않는 것으로 판단하여 온실가스 배출량 산정 시 제외하고 있다 (IPCC, 2001). 현재 폐기물소각부문에서 배출되는 온실가스 중 CO_2 에 대한 연구는 상당히 진행되고 있으나(김병순, 2011; 이해영, 2012; 임기교, 2012; 강성민, 2014.), N_2O 관련연구는 부족한 실정이다. 또한 폐기물소각 시설에서 배출되는 온실가스(CO_2 , N_2O)에 대한 연구는 스토커소각 시설에 대한 연구가 대부분이며, 열분해용융시설에 대한 연구는 미비한 편이다. 현재 국내 폐기물소각 시설은 스토커소각방식보다는 열분해용융시설을 선호하고 있으며, 최근 신도시에 건설되고 있는 폐기물처리시설은 열분해용융시설이 거의 대부분이다.

따라서, 본 연구에서는 열분해용융시설의 N_2O 배출량을 보다 정확하게 산정하기 위해 열분해용융시설 중 외열킬른형 열분해용융시설의 N_2O 배출계수를 개발하고자 한다. 이를 통해 현재 제시되어 있지 않은 생활폐기물 열분해용융시설의 국가 온실가스 배출계수를 개발하는데 도움이 되고자한다.

제2절 연구의 내용 및 절차

본 연구에서는 N_2O 측정기기인 LSE-4405(LSE-Monitors, Netherlands)를 이용하여, 광음향분광법(Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS)으로 N_2O 농도를 측정하였다. 측정한 N_2O 농도와 대상시설의 공정자료를 이용하여 ‘온실가스 에너지 목표관리제 지침’에서 제시하고 있는 배출량 산정식을 이용하여 N_2O 배출계수를 개발하였다. 연구는 총 4단계를 거쳐 진행되었으며, 배출계수 개발을 위한 연구 흐름도는 다음 <그림 1>과 같다.

1. 국내 폐기물 배출·처리 현황을 살펴보고, 폐기물소각 시설에서 발생하는 온실가스 배출량 산정방법에 대한 자료를 수집한다.
2. 공정원리에 따라 구분되는 열분해용융시설에 대하여 조사하고, 온실가스 배출계수 개발방법의 자료를 수집한다.
3. 대상시설을 선정하고 N_2O 측정기기(LSE-4405)의 정도관리(QA/QC)를 실시한다.
4. 대상시설의 N_2O 농도를 실시간으로 측정하여 농도 추이를 살펴보고, N_2O 배출계수를 개발한다. 개발한 배출계수와 선행연구의 배출계수를 비교하여 공정방식에 따른 배출계수를 고찰하고자 한다.



〈그림 1〉 연구흐름도

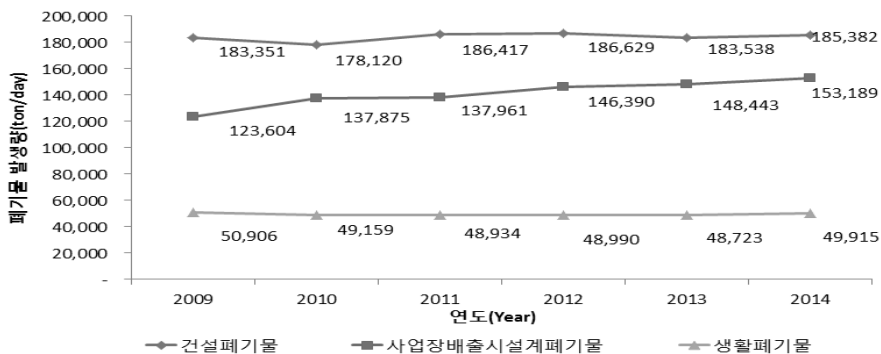
제2장 이론적 고찰

제1절 국내 폐기물 발생·처리 현황

1. 국내 폐기물 발생 현황

우리나라의 폐기물 발생량은 2014년 기준 388,486 ton/day로 전년 대비 약 2% 증가하였다. 생활폐기물의 경우 49,915 ton/day로 전년 대비 2% 증가하였으며, 사업장폐기물의 경우 153,189 ton/day로 전년대비 3.2% 증가하였고, 건설폐기물은 185,382 ton/day로 전년대비 1% 증가하였다.

<그림 2>에서 보는 바와 같이 생활폐기물은 2013년까지 감소하는 추이를 나타내다가 2014년에는 전년대비 2.4% 증가하였다. 사업장폐기물은 2010년부터 2014년까지 증가하고 있는 추세를 나타내고 있다. 건설폐기물의 경우 2011년 전년대비 4.7% 증가하였다.



출처 : 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(한국환경공단/환경부,2014)

<그림 2> 연도별 폐기물종류별 발생량

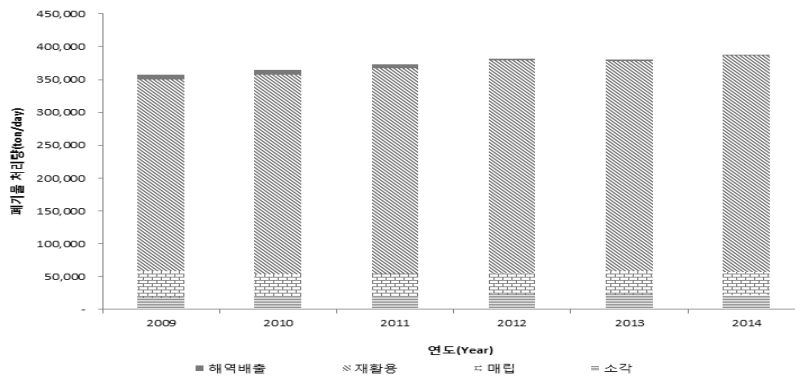
2. 국내 폐기물 종류별 처리 현황

국내 폐기물 처리방법은 재활용, 매립, 소각, 기타 해역배출로 구분하고 있다. <그림 3>와 같이 우리나라 2014년 기준 총 폐기물 처리량은 388,486 ton/day이며, 이 중 재활용이 329,268 ton/day로 가장 많았다. 그 다음으로는 매립방법이 35,375 ton/day, 소각율이 22,420 ton/day, 해역배출이 1,423 ton/day로 나타났다.

생활폐기물의 처리방법별 처리량은 2014년 기준으로 재활용율의 경우 59.0% 로 가장 많았으며 전년대비 0.1% 감소하였다. 소각율의 경우 25.3% 로 전년과 동일하였으며, 매립율의 경우 15.7% 로 전년대비 0.1% 증가하였다.

사업장배출시설계폐기물들의 처리방법별 처리량은 2014년을 기준으로 재활용율은 77.3% 로 전년대비 1.9% 증가하였으며, 소각율의 경우 5.7% 로 전년대비 0.6% 감소하였다. 매립율은 16.1% 로 전년대비 0.5% 감소하였다.

건설폐기물의 경우 2014년을 기준으로 재활용율은 97.9% 로 전년대비 0.4% 증가하였으며, 소각율은 0.5% 로 전년대비 0.2% 감소하였고, 매립율은 1.6% 로 0.2% 감소하였다.

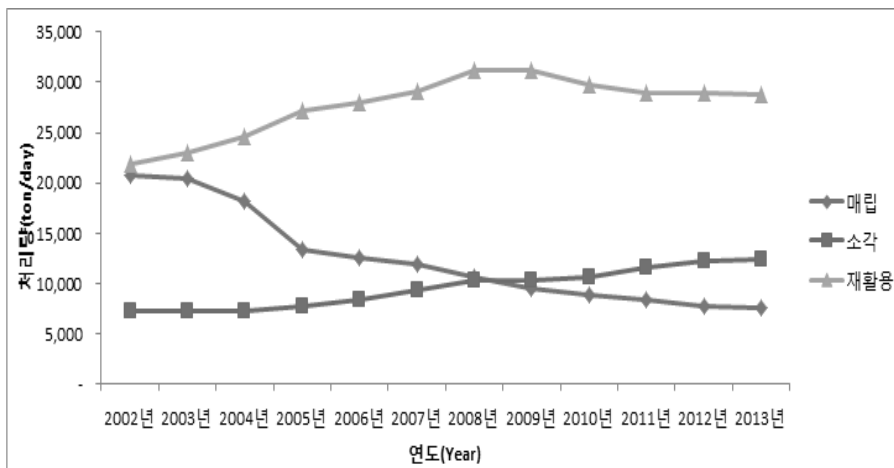


출처 : 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(한국환경공단/환경부,2014)

<그림 3> 폐기물 처리방법별 현황

가. 생활폐기물

생활폐기물의 총 처리량은 2013년 기준으로 총 48,728 ton/day로 나타났으며, 다음 <그림 4>에는 생활폐기물의 처리방법별로 추세를 나타냈다. 2002년 생활폐기물의 매립량은 20,724 ton/day로 꾸준히 감소하여 2013년에는 9,471 ton/day로 2002년 기준 63.3% 감소하였다. 소각처리량은 2002년에는 7,229 ton/day로 2013년까지 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 2009년에는 매립량보다 많이 나타났다. 2002년 재활용량은 21,949 ton/day로 2009년까지 증가하는 추세를 나타내다가 이후에는 감소하고 있다.

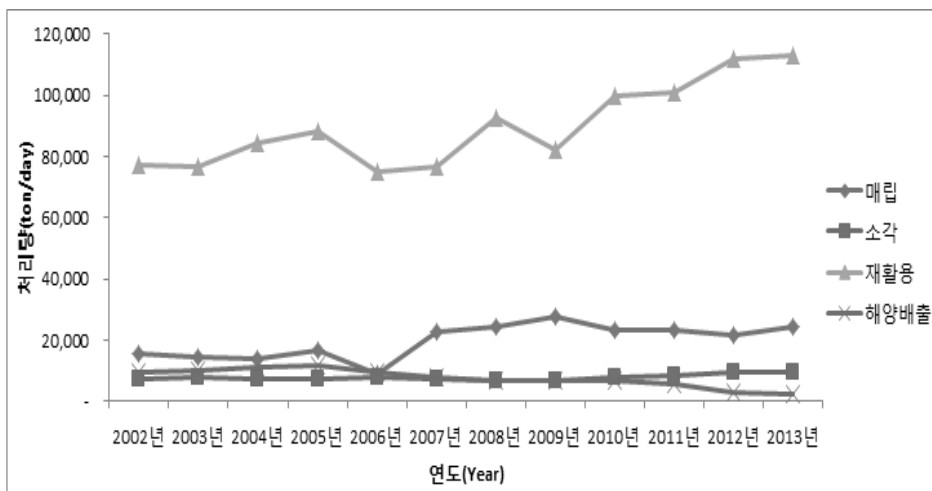


출처 : 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(한국환경공단/환경부,2014)

<그림 4> 국내 생활폐기물 처리방법별 처리량

나. 사업장배출시설계폐기물

사업장배출시설계폐기물의 총 처리량은 2013년 기준 149,815 ton/day로 나타났으며, <그림 5>에는 사업장배출시설계폐기물의 처리방법별 추세를 나타냈다. 매립량은 2006년 소폭 감소하는 추세를 나타내다가 2007년부터 증가하는 추세를 나타냈다. 이 후에는 2013년에는 24,629 ton/day로 2002년 기준 59.3% 증가하였다. 소각처리량의 경우 2002년 7,094 ton/day로 2013년까지 소폭 증가하는 추세를 나타내고 있다. 재활용처리량의 경우 2002년부터 2013년까지 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있다. 해양배출의 경우 2002년부터 2005년까지 증가하는 추세를 나타내다가 2006년부터는 꾸준히 감소하는 추세를 나타내고 있다.

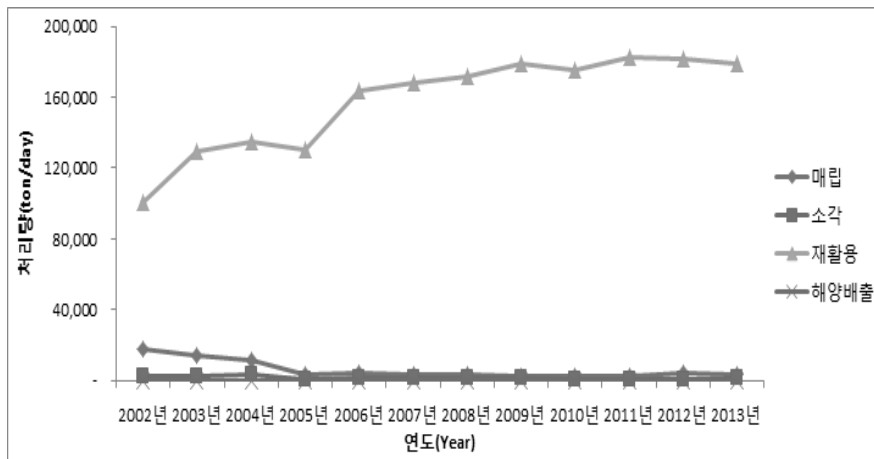


출처 : 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(한국환경공단/환경부,2014)

<그림 5> 국내 사업장배출시설계폐기물 처리방법별 처리량

다. 건설폐기물

건설폐기물의 처리량은 2013년 기준 183,538 ton/day로 나타났으며, <그림 6>에는 건설폐기물의 처리방법별 추세를 나타냈다. 건설폐기물의 매립량은 2005년 급격히 감소하는 추세를 나타내다가 2012년에는 소폭 증가하였다. 소각처리량의 경우 2004년 이후로 꾸준히 감소하는 추세를 나타냈다. 재활용방법의 경우 지속적으로 증가하는 추세를 나타내고 있다.



출처 : 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(한국환경공단/환경부,2014)

<그림 6> 국내 건설폐기물 처리방법별 처리량

제2절 국내 생활폐기물 소각처리 방법

국내 생활폐기물소각처리시설은 2011년 기준 지방자치단체를 대상으로 전국에 173개소 중 스토커방식이 131개소로 가장 많았으며 다음으로 고정상방식이 18개소, 열분해가스화가 15개소로 가장 많이 나타났다.(한국환경공단, 2013).

스토커소각방식은 화격자의 외형이나 구조에 따라서 구분이 가능하다. 스토커소각 시설에서 화격자는 가장 중요한 부분으로 로내에서 폐기물의 적절한 교반을 도우며 연소 중 공기와의 접촉을 극대화하는 역할을 한다. 교반효과가 클수록 연소효율이 높아지는 장점이 있지만, 배출되는 가스의 입자상 농도가 과도하게 증가하는 단점도 갖고 있다(김경매, 2014).

소각처리는 일정량의 폐기물을 호퍼를 이용하여 투입하고, 투입된 폐기물은 화격자 상부에 쌓이게 된다. 그 다음으로 원활한 폐기물 소각을 위해 화격자 하부에서 폐기물에 공기를 투입한다. 폐기물의 질이나 수분함량 따라서 발열량이 달라질 수 있기 때문에 연소보조장치를 이용해 보조연료를 적절히 투입한다(김경매, 2014).

열분해용융방식은 폐기물을 산소가 부족한 상태로 가열하여 물리·화학적으로 분해하고 잔재물 및 소각재를 1,300 ~ 1,700°C의 고온에서 녹이는 방식이다(이협회, 2002; 최상심 외, 2004; jeongwoo Lee et al, 2015).

열분해는 공기가 부족하거나 무산소 또는 저산소 상태에서 가열하여 가스, 액체, 고체의 연료를 생성하는 공정이다. 보통 유기물질을 산소가 부족한 상황에서 가열할 경우 열과괴현상과 응축작용으로 기체, 액체, 고체 상태로 분해가 가능하다. 일반적인 소각기술은 외열적인 발열반응이지만 열분해는 내열적인 흡열반응이다. 가스화는 탄소, 수소 등을 포함한 고체, 액체 원료에서 연료가스, 합성용 가스 등의 생성물을 제조하는 반응이다.

가스화 공정은 폐기물 열분해시 연료가스가 생성되는 것을 의미하며 열에 의한 증발이 아닌 화학적인 반응에 의해 발생하는 기체 전환 공정이다. 용융은 대상물질의 가열을 통해 유동이 가능한 상태로 전환하는 반응이며, 이를 통해 슬래그, 비산재를 생성한다. 또한 1,300 ~ 1,600°C 온도 범위에서 다이옥신 같은 유해물질을 파괴하여 기존의 소각 시설 보다 1/100~1/10 수준으로 오염물질을 배출하는 장점을 갖고 있다.

다음 <표 1>에서는 스토커소각방식과 열분해용융방식의 세부기술에 대해 나타냈으며, 스토커소각방식은 순송식, 역송식, 원통회전식으로 분류하여 소각세부기술 방식에 따른 특징을 나타냈다. 열분해용융방식의 경우 국내에 도입된 기술 중 외열킬른형, 샤프트로, 고온열분해, 플라즈마 열분해, 유동상식으로 구분하여 나타냈다.

본 연구의 대상시설에 적용된 열분해용융기술은 외열킬른형 열분해시스템 공정이다. 이 방식은 일정 크기 이하로 전처리된 폐기물을 킬른(kiln)형 드럼회전로에서 외부열원에 의해 무산소 또는 저산소 상태로 간접 가열(450°C)한다. 가열 후 생성된 열분해 가스 및 고형탄소를 1,300°C에서 용융하는 방식이다. 처리과정에서 탈염잔사만 고형화되어 매립처리되고 그 외에 모든 생성물을 별도의 처리없이 재활용이 가능하다. 소각잔재물의 형태가 용융슬래그로 감용화율이 1% 내외로 우수하며 생활폐기물, 사업장폐기물, 지정폐기물 등으로 폐기물종류가 광범위한 소각이다. 특정 폐기물을 제외한 모든 폐기물은 전처리 과정이 불필요하며, 다이옥신 같은 대유해물질의 배출이 타 소각방식에 비해 적다.

외열킬른형 열분해시스템(R-21)은 고온의 소각온도와 폐기물을 압축하고 외부열원 없이 폐기물이 가진 자체 에너지로 폐기물을 용융하여 슬래그로 배출하는 특징을 갖고 있다(최상심 외, 2004).

<표 1> 폐기물소각방식별 세부기술

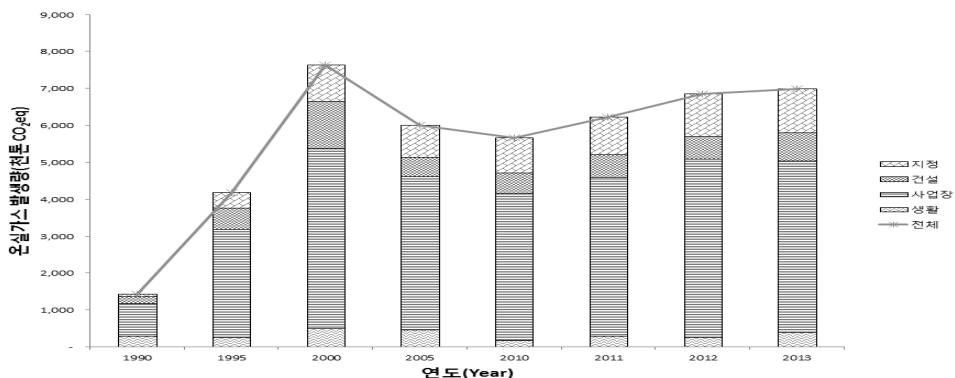
소각방식	세부기술	특징
스토커	순송식	스토커의 운동방향과 폐기물의 운동방향을 같게 하여 순차적으로 이동시켜 연소과정을 거치는 방식
	역송식	고정화격자와 구동화격자가 계단식으로 배열된 화격자로 구동화격자가 폐기물의 흐름방향과 반대방향으로 움직이는 특징을 갖고 있다.
	원통회전식	다수의 통기공을 가진 원통이 회전하고 그 위에 폐기물을 투입하는 방식
열분해용융	외열킬른형	열분해, 용융과정이 분리되어 있으며 저산소상태에서 열분해과정을 거치며 가스와 고형부산물을 분리, 로내온도 평균 1,300℃.
	샤프트로 가스화	샤프트로 내에서 열분해, 용융공정이 이루어지고 이로 인해 부지면적이 작음. 순산소 사용.
	고온열분해	폐기물을 압축하여 열분해과정과 용융과정이 분리되어 있으며 용융로 온도는 평균 2,000℃, 순산소를 사용.
	플라즈마 열분해	전력사용량이 타 설비에 비해 높으며, 보조연료 미사용
	유동상식	열분해, 용융 공정이 분리되어 있으며, 열분해로가 유동상인 특징을 갖고 있음. 유가금속을 산화하지 않고 회수가능

제3절 폐기물소각부문의 온실가스 배출

1. 폐기물소각 시설의 온실가스 배출 현황

우리나라의 폐기물소각부문 온실가스 배출량은 1990년에서 2001년까지 연평균 17% 증가하였다. 국내 폐기물소각부문의 온실가스는 CO₂와 N₂O를 대상으로 산정하고 있다. 폐기물소각부문에서 배출되는 온실가스는 폐기물 종류별로 구분하여 국가온실가스인벤토리에 보고하고 있다. <그림 7>에서 보는 바와 같이 2013년 기준 폐기물소각부문의 폐기물 종류별 온실가스 배출량은 사업장배출시설계폐기물의 경우 4,646 천tonCO₂eq로 가장 높았으며, 지정폐기물은 1,187 천tonCO₂eq, 건설폐기물은 766 천tonCO₂eq, 생활폐기물은 387 천tonCO₂eq로 가장 낮게 나타났다.

폐기물소각부문 온실가스 배출량은 제어가 가능한 고형, 액상폐기물의 연소 중 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O를 대상으로 산정하고 있다. 국내 폐기물소각부문 온실가스는 GPG 2000에 따라 CO₂와 N₂O를 대상으로 배출량을 산정하고 있으며, CH₄의 경우 소각 시설에서 배출되는 양이 미미할 경우 산정하지 않는다(IPCC, 2001)



출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(온실가스종합정보센터,2015)

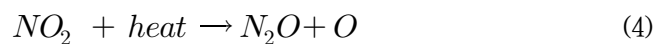
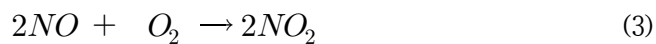
<그림 7> 연도별 폐기물소각부문 온실가스 배출량 추이

2. 폐기물소각 시설의 온실가스 배출 특성

국내에서 폐기물소각부문의 CO₂ 배출량 산정 시 정상비율, 화석탄소함량, 건조함량, 탄소함량 등의 매개변수를 고려하지만, N₂O의 경우 제시된 배출계수와 소각량을 곱하여 산정하고 있다.

N₂O는 녹는점 -90.90℃, 끓는점 -88.57℃, 비중 1.530의 특성을 갖고 있으며, 주된 발생원은 해조류, 삼림 등 광범위하게 발생한다(정문식, 2011). 농지에서 사용되는 화학비료 사용으로 발생하기도 하며 각종 산업시설이나 발전소, 자동차 등에서 인위적으로 발생하기도 한다. N₂O는 CO₂, CH₄ 다음으로 많이 배출되고 있으며, 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 CO₂보다 310배 높다.

연소 중 발생하는 NO_x와 N₂O는 연료의 성분 중 N을 산화시켜 발생하는 Fuel NO_x, 연소시 고온 상태의 공기의 N₂가 산화되어 발생하는 Thermal NO_x, 연소 시 발생하는 탄화수소에 의한 Prompt NO_x 등으로 구분된다(Wojtowicz, 1993) 연소시 N₂O 발생 과정은 식(1) ~ (4)과 같다.



또한, 폐기물소각 시설의 N_2O 배출농도는 운전조건과 보조연료의 종류에 따라서 상이하게 나타난다. 또한 NO_x 를 감소시키는 탈질공정에서 환원제로 암모니아를 사용할 경우 N_2O 의 발생 원인이 되기도 한다(김종민, 2012).

3. N_2O 농도 측정방법

N_2O 의 농도 측정방법은 광음향분광법(Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS), 가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC), 비분산적외선법(Non-Dispersive Infrared Method, NDIR) 등을 사용되고 있다. GC방법의 경우 소각가스를 포집하여 실험실에서 비연속적으로 분석하는 방법이며, 연속적인 측정방법으로는 PAS, NDIR 방식이 있다.

GC방법의 경우 굴뚝에서 소각가스를 포집하여 연구실에서 분석해야하는 번거로움이 있지만 광음향분광법(PAS)의 경우 실시간 농도측정이 가능하다. 보통 폐기물소각 시설은 야간출입이 불가능하며 측정값의 경우 보통 오후 시간에 측정한 데이터를 사용한다. 하지만 PAS방법의 경우 연속측정이 가능하여 24시간 측정이 가능하여 GC방법 보다는 측정데이터를 많이 확보할 수 있다. 다음은 N_2O 농도 측정방법 중 광음향분광법(PAS)과 가스크로마토그래피법(GC)에 대하여 설명하였다.

가. 광음향분광법

광음향효과(Photoacoustic Effect)는 광음향분광법(Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS)의 기본 이론이 되는 물리적인 현상으로 흡수매질에 일정한 주기로 변조된 빛이 입사되고 그 빛과 같은 주기의 음향 신호가 발생하여 맞닿은 물질과 기체층이 닿는 곳에서 발생하는 현상이다.(McClelland et al, 1996). 이 때 매질이 흡수한 광에너지에 의해 매질상태는 들뜬상태(excited state)로

전환되었다가 바닥상태(ground state)로 이완된다. 이때 발생하는 이완과정은 열적 전이과정에서 변조된 빛이 같은 진동수로 변조되면서 발생한 열이 일정부피의 셀(Cell)안에 기체의 온도를 높였다가 낮추는 온도변화에 의해 압력변화가 발생한다. 이러한 압력변화를 통해 발생한 음향 신호는 전기적인 신호로서 마이크로폰에 의해 검출된다. 마이크로폰은 기체 시료에 사용되고 액체나 고체 시료를 사용할 경우 압전검출기(Piezoelectric Transducer, PZT)를 사용한다.

광음향 신호의 발생 과정은 직접/간접 광음향 분광법으로 구분이 가능하다. 직접 광음향 발생(direct PA generation)으로 빛을 흡수한 물질이 탄성파로 전환되어 음향신호를 발생하는 것이며, 간접 광음향 발생(indirect PA generation)은 빛을 흡수한 물질과 인접한 매질에 열 전달현상이 발생하여 음향신호를 유발한다.

광음향 신호 검출방법은 접촉식/비접촉식으로 구분되며, 접촉식 방법은 매질에서 발생하는 신호를 마이크로폰 또는 압전검출기를 사용하여 수신하는 방법이다. 압전검출기는 열적 탄성과정(Termoelastic Process)과 열확산(heat diffusion)이 만들어내는 진동 방식을 인지하여 마이크로폰보다는 응답시간이 빠르고 감도가 높아 마이크로폰보다 펄스(pulse) 광음향분광법에 적합하다. 이와 반대로 비접촉식 방법은 대부분 광열 효과(photothermal effect)를 이용함으로써 시료 표면온도의 변화에 따른 기체압력과 굴절률의 변화를 통해 측정한다.

비접촉식 광음향 분광법은 다른 분광법과 비교할 경우 감도가 높고 기체의 이완시간을 측정하는데 많이 사용되고 있으며, 고출력 레이저 도입으로 감도와 측정 물질의 선택성이 높아 기체분석에 넓게 사용되고 있다(오현진, 2008). 고효율 레이저를 통해 높은 검출감도가 가능하며, 공기 중 대상물질의 검출한계가 ppb(10^{-9})미만인 극미량검출에도 사용되고 있다(V.Koskinen,

2006). 하지만 진동 또는 소음에 취약하며 진동이 강한 곳에서 사용할 경우 측정에 어려움이 있다(한국환경기술진흥원, 2003). 측정기기 주변 온도가 높을 경우 기기가 작동되지 않는 경우가 있다.

나. 가스크로마토그래피법(GC)

가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC)은 기체 흐름에 시료를 주입하여 시료 안에 있는 성분들을 분리하고 검출하여 정성분석, 정량분석을 수행하는 분석방법이다(김경렬, 1999). GC방법에서 사용하는 검출기는 분석대상물질의 종류, 농도 등의 특성에 따라서 검출기가 달라질 수 있다. 검출기의 검출한계는 낮고, 시료의 측정가능 농도범위가 큰 범위여도 동일한 응답신호를 나타내야 한다. 또한 잡음이 적고 응답시간이 짧고, 검출기 내에 시료가 차지하는 부피가 작아야한다. 검량(Calibration)이 간단할수록 유용한 검출기라고 할 수 있다. 현재 N_2O 농도는 주로 GC-ECD를 이용하여 분석하고 있다.

제3장 연구방법

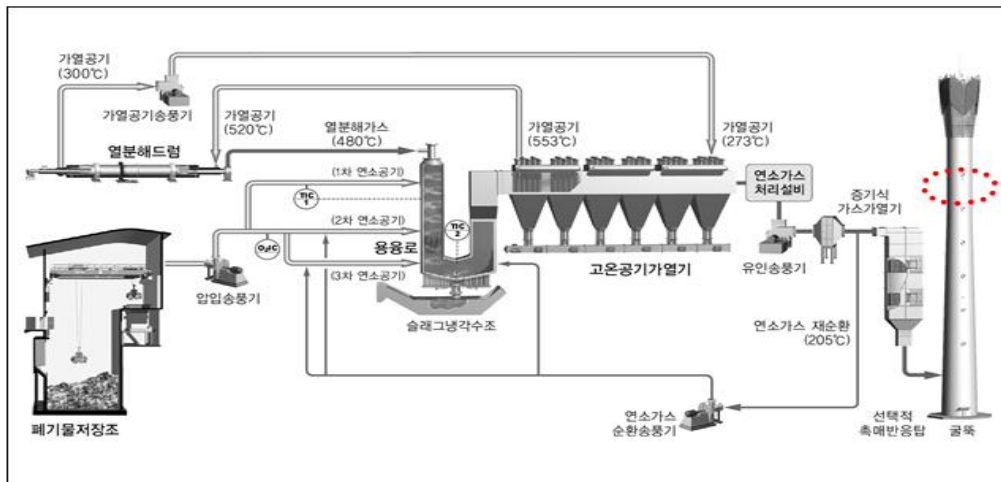
제1절 대상시설 선정 및 현장조사

본 연구 대상시설은 200 ton/day(100ton/day × 2)규모의 외열킬른형 열분해용융시설로서 24시간 폐기물을 소각하는 연속방식이다. 공정흐름도는 <그림 8>에서 보는 바와 같이 구성되어 있으며, 열분해용융설비는 열분해드럼, 용융로를 사용하고 있으며, 연소가스냉각설비는 고온 공기가열기와 폐열보일러를 사용하고 있다. 연소가스 처리공정은 1차 여과집진기, 반건식 반응탑(SDR), 2차 여과집진기, 가스가열기, 선택적 촉매반응탑(SCR)순서로 구성되어 있다. 연소가스 처리설비 중 SCR공정과 활성탄 투입공정을 통해 다이옥신 같은 유해성분을 분해하고 있다. 재처리의 경우 열분해 카본을 선별하여 생산하는 시스템을 구축하고 있으며, 철과 알루미늄 등을 선별하여 재활용하고 있다.

현장측정은 2016년 3월에서 4월까지 총 6회에 걸쳐 실시하였으며, 1차는 3월29일부터 3월31일까지 조사하였다. 2차는 4월26일부터 4월28일까지 측정하였다. 본 연구의 대상시설은 2016년 1월에서 3월까지 내부청소가 진행되어 현장조사가 불가능하였으며, N₂O 배출농도가 사계절 중 제일 높은 3월에서 5월에 측정하였다.

1~2차 측정일 평균 소각량은 86 ton/day으로 나타났으며, 성상분석의 경우 사업장 자료를 사용하였다. 성상분석의 물리적 조성은 6가지 성상으로 나타났으며, 다음 <표 2> 보는 바와 같이 건조 상태의 비율을 나타냈다. 3월의 경우 종이류와 플라스틱류의 함량이 높게 나타났고, 4월의 경우 플라

스틱함량과 불연물류의 함량이 높게 나타났다. 3월의 경우 섬유류와 종이류가 많이 투입되어 발열량이 증가할 것으로 판단되며, 4월의 경우 불연물과 음식물이 과다투입 되어 발열량이 감소될 것으로 판단된다.



출처 : 양주권자원회수시설 현황(양주시청, 2014)

<그림 8> 대상시설 공정흐름도

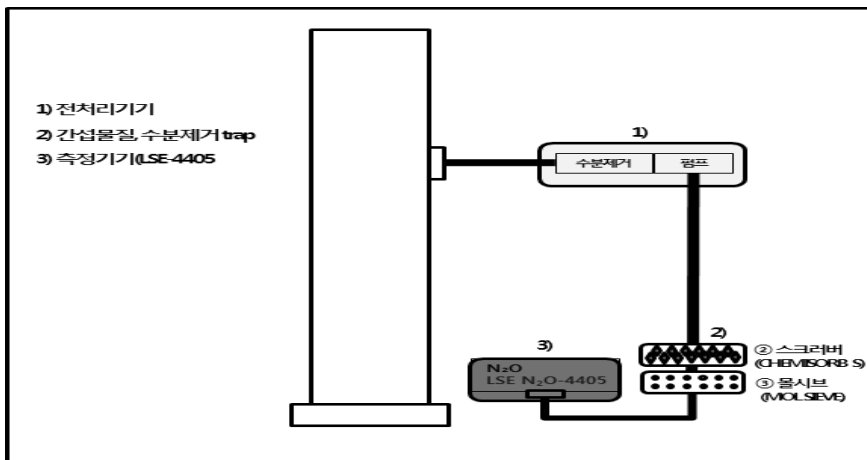
<표 2> 열분해용융시설의 정상분석 결과

구분	3/30		4/20	
	건조폐기물 무게(g)	물리적 조성(%)	건조폐기물 무게(g)	물리적 조성(%)
음식물	316.8	12.1	125.7	5.7
종이	965.7	37.0	384.2	17.3
플라스틱	691.6	26.5	795.8	35.8
섬유	368.3	14.1	129.4	5.8
목재	23.7	0.9	75.3	3.4
불연물	243.0	9.3	710.1	32.0
총 무게	2,609.0	100.0	2,220.5	100.0

제2절 N₂O 농도 측정 및 정도관리

1. N₂O 농도 측정

본 연구에서는 광음향분광법(PAS)를 이용하여 대상시설에서 배출되는 N₂O 농도를 측정하였으며, 측정방법은 <그림 9>에 모식도를 나타냈다. N₂O 연속측정기기(LSE-4405)는 기체온도, 기기주변 온도, 수분, 진동에 의해 측정이 중지되는 경우가 있으며, 일정 유량을 유지하여 측정기에 공급해야한다. 측정할 기체의 온도는 전처리장치를 이용하여 일정온도로 냉각시킨 후 수분 제거하여 1 liter/min의 유량으로 측정기에 공급하도록 하였으며, 유량 중 측정기에서 필요로 하는 유량을 제외하고 외부로 배출되도록 하였다. LSE-4405는 기기주변 온도가 높으면 측정이 중지되는 점을 감안하여 온도가 높은 측정공 근처에 비해 온도가 낮고 환기가 원활한 1층에 측정기를 위치시켰다. 전처리기에서 수분이 완벽하게 제거되지 않기 때문에 흡착제가 채워진 trap을 이용하여 수분과 간섭물질을 제거하였다. 다음 <그림 10>은 현장에서 측정한 전경을 나타냈다.



<그림 9> 열분해용융시설 N₂O농도 표본채취 모식도



〈그림 10〉 연속측정 전경

측정기기의 분석조건은 <표 3>와 같다. 시료의 유입유량은 80 mL/min으로 설정하였고, 측정 셀, 시료 온도는 각각 35℃, 5~25℃로 설정하였다. Scan Range는 1,277.847 ~ 1,279.548 cm^{-1} 로 설정하였다. 본 연구에서 사용되는 LSE-4405는 CO_2 , SO_2 같은 간섭물질과 H_2O 에 영향을 받는다. 이러한 N_2O 측정에 영향을 미치는 물질을 제거하기 위해 측정기기 전단에 두 개의 trap을 설치한다. 첫 번째는 Molecular Sieve(SIGMA ALDRICH, USA)가 채워진 trap을 설치하여 수분을 제거하고, 두 번째는 Chemisorb S(BETE, Belgium)이 채워진 trap을 설치하여 간섭물질에 대한 영향을 최소화한다.

<표 3> N₂O 농도 연속측정기기(LSE-4405)의 측정조건

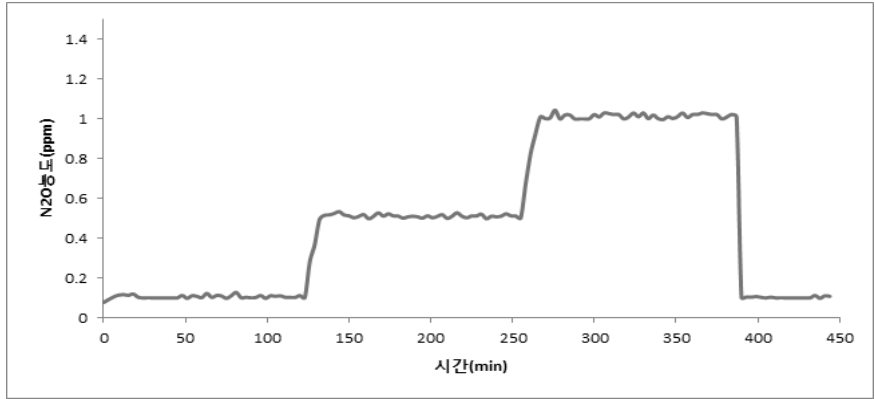
Analytical Condition	LSE N ₂ O-4405 Analyser
Sample Flow rate	80 mL/min
Sample Temperature	5 ~ 25°C
Pump Speed	42%
Tqcl Cycle scan	21 ~ 25°C
Current Through QCL	0.65A
Temperature measurement cell	35°C
Scan Range	1,277.847 ~ 1,279.548 cm ⁻¹

2. N₂O 연속측정기기 정도관리

본 연구에서의 측정방법은 광음향분광법이며, 측정기의 정도관리를 위해 농도변화에 따른 응답시간과 직선성, 반복성을 평가하였다. N₂O농도에 따른 반응속도 평가는 N₂O 표준가스(0.1, 0.5, 10ppm)의 농도변화에 따른 증가 응답시간과 감소 응답시간을 구분하여 측정하였다. 증가 응답시간의 경우 저농도에서 고농도로 변화할 경우 측정기기가 목표농도의 95%에 도달하는 시점까지의 시간을 기준으로 하였다. 감소 응답시간의 경우 고농도에서 저농도로 변화 시켰을 때 측정기기 목표농도의 5% 이내에 도달한 시점까지의 시간을 기준으로 하였다(사재환 외, 2008). 직선성의 경우 표준가스를 측정하여 확인하였다. 반복성의 경우 한 농도의 표준가스를 10번 측정하여 확인하였다.

가. PAS방법의 응답시간

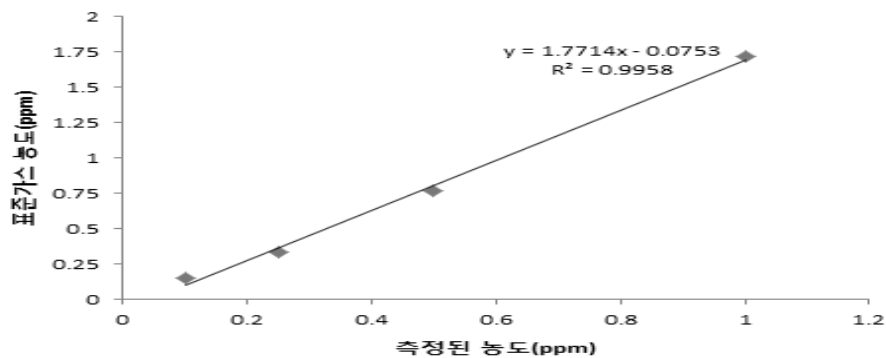
PAS방법은 연속으로 측정하는 방법이기 때문에 농도변화에 대한 반응이 예민할 필요가 있다. 따라서 표준가스 0.1, 0.5, 1ppm 농도변화에 따른 증가 응답시간과 감소 응답시간을 구분하여 분석하였다. 최초응답시간의 경우 3분 20초대를 나타냈으며 표준가스의 농도를 증가하였을 때 목표 농도까지 안정화되는데 7분 10초의 시간으로 확인되었다. 고농도에서 저농도로 반응할 경우 응답시간은 7분 정도 소요되었으며, 고농도에서 저농도와 저농도에서 고농도의 반응시간은 큰 차이를 나타내지 않았다. <그림 11>은 측정 농도에 따른 반응시간을 나타냈다.



<그림 11> N₂O 농도변화에 따른 PAS 응답시간

나. 직선성 평가

본 연구에서는 정도관리(QA/QC)를 위해 서로 다른 농도의 표준가스를 5회 이상 측정하였다. 표준가스의 농도는 각각 0.1, 0.25, 0.5, 1ppm 이며, 1ppm 을 제외한 모든 농도는 1ppm의 표준가스(Rigas, Korea)를 희석하여 측정하였다. 4개의 표준가스를 5회 반복 측정하고 검량선을 작성하여 직선성을 확인하였다. 확인 결과 <그림 12>와 같이 R²값이 0.99 이상을 나타냈다.



<그림 12> PAS방법의 직선성 평가

다. 반복성 평가

PAS방법의 반복성 평가는 <표 4>에서 보는 바와 같이 동일한 농도의 표준가스를 10회 측정하여 평가하였다. 측정결과, 평균 농도는 1.047ppm 으로 나타났으며, 표준편차의 경우 0.014, 상대표준편차는 1.31%를 나타냈으며, 표준가스의 농도 보다 평균 0.05ppm 높게 측정되었다.

PAS방법의 상대표준편차가 선행연구(M.GOMES DA SILVA, 2006)의 반복성 결과와 유사한 1% 로 나타났으며, ISO 1564에서 제시하고 있는 재현성 3% 보다 낮게 측정되어 우수한 반복성을 나타냈다.

<표 4> N₂O 농도분석의 반복성 평가

측정 횟수	N ₂ O 농도(ppm)
1	1.015
2	1.031
3	1.037
4	1.048
5	1.053
6	1.043
7	1.053
8	1.054
9	1.062
10	1.050
평균	1.04
표준편차	0.014
상대표준편차	1.31

제3절 N₂O 배출계수 개발 방법

본 연구에서의 N₂O 배출계수 개발방법을 위한 배출량 산정방법은 ‘온실가스·에너지 목표관리제 지침’에서 제시하고 있는 굴뚝연속자동측정기에 의한 배출량 산정방법을 적용하였다. 현재 굴뚝연속자동측정기에 의한 배출량 산정방법은 CO₂ 배출량에 대한 산정식만 제시하고 있어 이 식을 이용하여 N₂O 배출량을 산정하였다. 산정된 N₂O 배출량을 소각량으로 나누어 배출계수를 개발하였다.

열분해용융시설의 N₂O 배출계수를 개발하기 위해 N₂O 농도는 광음향분광법(PAS)를 이용하여 연속측정하고, 유량자료의 경우 Clean SYS data를 통해 수집하였다. 유량은 하루 30분 적산유량을 모두 더한 값을 기입하였다. 44/22.4 kg/m³은 N₂O의 분자량 44kg, 1mol당 기체 부피로 22.4 m³을 표기하였다. 소각량의 경우 사업장 자료를 사용하였으며 배출계수 산정식은 다음 식(5)와 같다.

$$Emission\ Factor_{N_2O} = [K \times C_{N_2O} \times Q_{day} \times 10^{-3}] / W \quad (5)$$

$Emission\ Factor_N$ = N₂O 배출계수(gN₂O/ton-waste)

C_{N_2O} = N₂O의 일 평균농도(ppm, 건연소가스 기준)

K = 44/22.4 kg/m³

Q_{day} = 30분 적산 유량(Sm³/day) (건연소가스 기준), ($\sum_{i=1}^{48} Q_i$ (i= 30분 단위 적산 유량))

W = 1일 소각량(ton-Waste/day)

제 4 장 연구 결과 및 고찰

제1절 대상시설의 N₂O 농도 측정 결과

본 연구에서는 실시간 측정기기를 이용하여 생활폐기물 열분해용융시설에서 배출되는 소각가스 중 N₂O 농도를 측정하였다. 측정기간은 2016년 3월부터 2016년 4월 까지 총 6회에 걸쳐 측정하였다. 측정결과는 0.013 ~ 0.733ppm 의 범위로 측정되었으며 평균 0.267ppm 으로 나타났다. 측정농도는 <표 5>에서 보는 바와 같다. 2차 측정기간 중 4월28일에 측정된 평균농도가 제일 높게 나타났으며, 3월29일에 측정된 평균농도가 제일 낮게 나타났다. <그림 13>과 <그림 14>에 1차, 2차 농도의 측정 결과를 나타냈다.

1차(3/29~3/31) 측정 전체 평균 농도는 0.224ppm 으로 나타났으며, 최대 0.394ppm, 최소 0.093으로 나타났다. 3월29일의 경우 평균 0.216ppm 으로 최대값이 0.394ppm, 최소값이 0.093ppm 으로 나타났으며, 표준편차는 0.073ppm 으로 나타났다. 3월30일 측정값의 경우 평균 0.222ppm 으로 최대값이 0.361ppm, 최소값이 0.103ppm 으로 나타났으며, 표준편차는 0.037ppm 으로 다소 낮게 나타났다. 3월31일 측정값의 경우 평균 0.231ppm 으로 최대값이 0.262ppm, 최소값이 0.134ppm 으로 나타났으며, 표준편차는 0.017ppm 으로 나타났다.

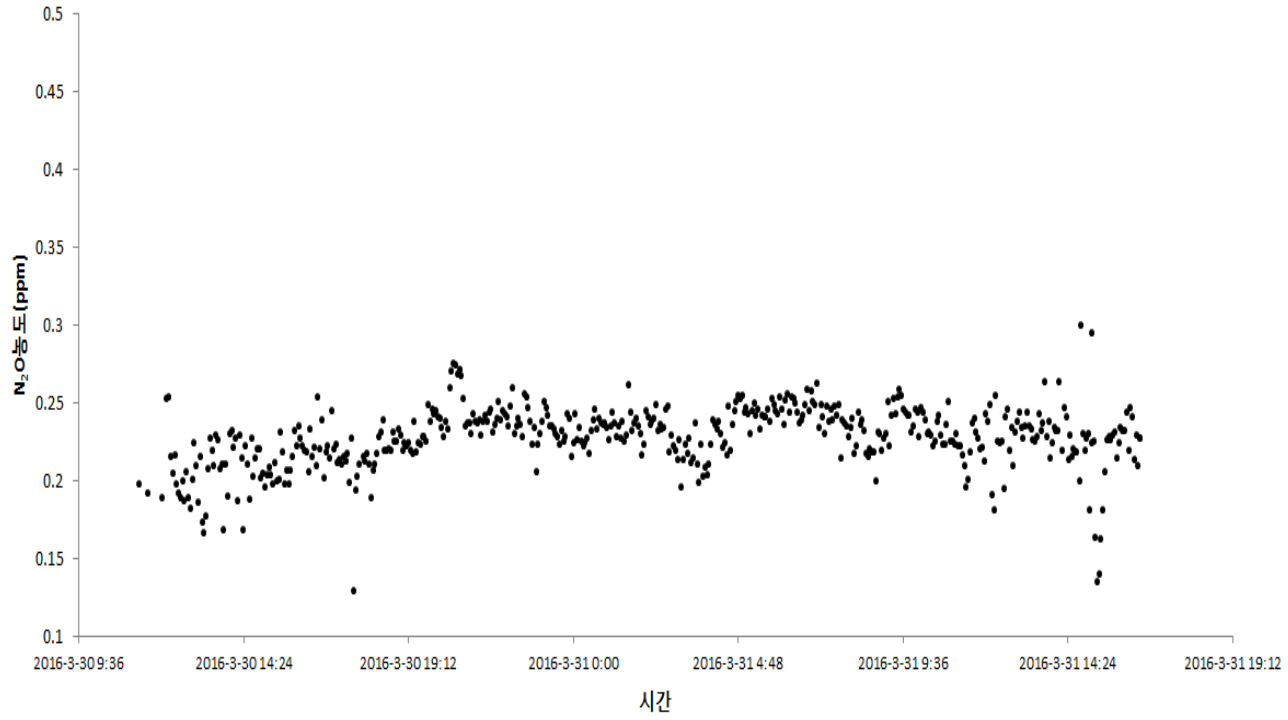
2차(4/26~4/29) 측정 전체 평균 농도는 0.302ppm 으로 최대값이 0.733ppm, 최소값이 0.013ppm 으로 나타났다. 4월 26일에 측정한 평균 농도는 0.259ppm 으로 최대값은 0.463ppm, 최소값은 0.037ppm 으로 나타났다. 표준편차의 경우 0.086ppm 으로 나타났다. 4월27일의 경우 평균 0.280ppm 으로 최대값이 0.733ppm으로 가장 높이 나타났으며, 최소값은 0.013ppm 으로 가장 낮은 값을

나타냈으며, 표준편차는 0.012ppm 으로 나타났다. 4월28일에 측정한 농도는 평균 0.368ppm 으로 최대값이 0.51ppm, 최소값이 0.111ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.043ppm으로 나타났다.

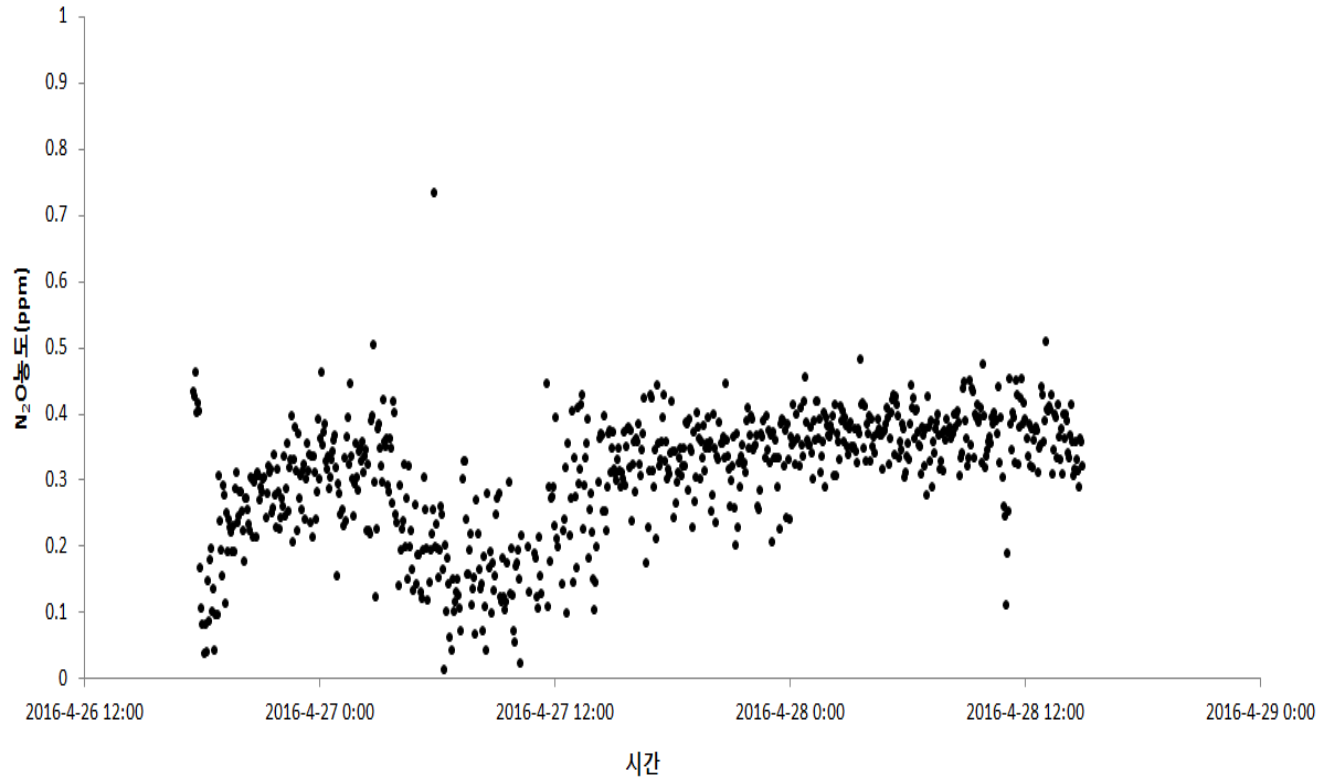
<표 5> PAS를 이용한 N₂O 농도 측정 결과

단위 : ppm

차수	날짜	평균	최대	최소	표준편차	상대표준 편차(%)
1차	3/29	0.216	0.394	0.093	0.073	33.65
	3/30	0.222	0.361	0.103	0.037	16.75
	3/31	0.231	0.262	0.134	0.017	7.47
	3/29~ 3/31	0.224	0.394	0.093	0.0391	17.38
2차	4/26	0.259	0.463	0.037	0.086	33.20
	4/27	0.280	0.733	0.013	0.012	4.63
	4/28	0.368	0.510	0.111	0.046	12.42
	4/26~ 4/28	0.302	0.733	0.013	0.093	30.31
전체		0.267	0.733	0.013	0.083	31.07



<그림 13> 1차 N₂O 농도 측정 결과(3/29~3/31)



<그림 14> 2차 N₂O 농도 측정 결과(4/26~4/28)

제2절 생활폐기물 열분해용융시설의 N₂O 배출계수 개발

본 연구의 대상시설에서 측정된 N₂O 농도는 0.013 ~ 0.733ppm의 범위로 평균 0.267ppm의 값을 나타냈다. 본 연구의 N₂O 배출계수 개발 결과는 0.829 gN₂O/ton-waste로 나타났다. 대상시설은 로내온도가 1,231 ~ 1,408°C로서 일반 스토커 소각 시설에 비해 평균온도가 높아 N₂O 농도가 낮은 것으로 판단된다. 다음 <표 6>은 측정된 1~2차 N₂O 농도와 사업장 공정자료를 나타냈다.

1차(3/29~3/31) 평균 N₂O농도는 0.225ppm으로 측정되었으며, N₂O배출계수는 0.741 gN₂O/ton-waste 산정되었다. 2차(4/26~4/28) 평균 N₂O농도는 0.307ppm으로 측정되었으며, N₂O배출계수는 0.893 gN₂O/ton-waste로 산정되었다. 전체 평균 N₂O 농도는 0.267ppm으로 배출계수는 0.829 gN₂O/ton-waste로 나타났다.

대상시설의 공정자료 중 폐기물소각량은 측정일 기준으로 평균 87 ton/day로 나타냈으며, 1차(3/29~3/31)의 평균 소각량은 86.7 ton/day, 2차(4/26~4/28)의 경우 86.3 ton/day로 거의 차이가 나타나지 않았다.

Clean SYS를 통해 확보한 유량의 경우 1차는 145,120 Sm³/day, 2차는 127,349 Sm³/day로 1차의 평균 유량이 2차의 유량보다 더 크게 나타났다. 로내온도는 1차(3/29~3/31)의 경우 평균 1,323°C이며, 최소 1,241°C에서 1,408°C의 온도분포를 나타냈다. 2차(4/26~4/28)의 경우 평균 1,316°C로 나타났으며, 최소 1,231°C에서 1,394°C 온도를 나타냈다.

평균적으로 온도는 1,230°C 이하로 내려가지 않는 것을 확인할 수 있으며, 유량이나 폐기물처리량 등의 자료도 큰 편차를 나타내지 않았다. 이를 통해 N₂O 배출계수 산정 시 N₂O 배출농도에 따라 차이 나는 것을 알 수 있다.

<표 6> N₂O 배출계수 개발 결과

측정일	평균 N ₂ O 농도 (ppm)	유량 (Sm ³ /day)	로내온도 (°C)	소각량 (ton-waste)	배출계수 (gN ₂ O/ton-waste)	
1차	3/29	0.216	144,387	1,315	85	0.725
	3/30	0.222	145,729	1,321	87	0.731
	3/31	0.231	145,245	1,332	88	0.749
	평균	0.225	145,120	1,323	87	0.741
2차	4/26	0.259	112,392	1,315	84	0.683
	4/27	0.28	139,892	1,325	88	0.876
	4/28	0.368	129,762	1,291	87	1.084
	평균	0.307	127,349	1,310	86	0.893
전체	0.267	136,235	1,316.5	87	0.829	

IPCC G/L 2006에서는 폐기물 소각방식 중 스토커, 유동상 소각방식의 N₂O배출계수를 제시하고 있으며, 연속식에 해당되는 배출계수이다. 현재 열분해용융시설의 N₂O배출계수는 제시하고 있지 않다.

<표 7>에서 보는 바와 같이 IPCC G/L 2006에서는 생활폐기물의 소각방식별 N₂O배출계수를 제시하고 있으며, 스토커소각방식의 경우 47 gN₂O/ton-waste, 유동상 방식의 경우 67 gN₂O/ton-waste의 값을 제시하고 있다.

선행연구에서 개발한 샤프트로 열분해용융시설의 N₂O배출계수는 15.5 gN₂O/ton-waste이며, 본 연구에서 개발한 외열킬른형 열분해시설의 N₂O배출계수 0.829 gN₂O/ton-waste이다. IPCC에서 제시하고 있는 생활폐기물소각 시설의 N₂O 배출계수와 선행연구와 본 연구의 N₂O배출계수를 비교했을 경우 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 소각기술마다 운전조건과 구조가 다르기 때문일 것으로 판단된다.

본 연구의 대상시설과 선행연구의 대상시설도 같은 열분해용융시설로 구분되어 있지만 본 연구에서 개발한 N₂O배출계수를 비교하였을 경우 값의 차이는 약 1/18 수준

인 것으로 나타났다. 이는 기술방식이 다르기 때문에 배출되는 농도수준이 다른 것으로 해석할 수 있다.

<표 7> 생활폐기물 소각 시설 N₂O 배출계수

구분	소각방식(연속식)	적용기술	배출계수(gN ₂ O/ ton-waste)
IPCC G/L 2006	스토커	-	47
	유동상	-	67
선행연구	열분해용융	샤프트로	15.5
본 연구	열분해용융	외열킬른형	0.808

본 연구에서 개발한 외열킬른형 열분해용융시설의 N₂O배출계수와 선행연구(Lee et al, 2015)에서 개발한 샤프트로 열분해용융시설의 N₂O배출계수를 비교하였을 경우 본 연구의 배출계수는 선행연구의 1/18배 수준인 것으로 나타났다. <표 8>와 같이 공정방법별로 비교하였을 경우 평균 로내온도는 본 연구의 대상시설이 300℃ 이상 높게 나타났으며, 유량의 경우 같은 수준을 타나냈다. 소각용량의 경우 본 연구의 대상시설은 200 ton/day(100 ton × 2), 선행연구의 대상시설은 300 ton/day(150 ton × 2)로 나타났으며, 실제 처리량은 측정 일을 기준으로 각각 86 ton/day, 106.8 ton/day로 큰 차이를 나타내지 않았다.

각 시설의 탈질시설은 본 연구의 대상시설의 경우 SCR(Selective Catalytic Reduction), 선행연구의 경우 SNCR(Selective Non-Catalytic Reduction)인 것으로 나타났다. 각 대상시설에서 제공한 폐기물처리량, 유량, 처리용량 등의 공정자료를 살펴보았을 경우 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. N₂O 배출농도는 로내온도, 탈질시설의 종류, 산소공급농도 등 여러요인에 따라서 달라질 수 있는

것으로 해석할 수 있다.

선행연구에 따르면 폐기물소각 시설에서 배출되는 N_2O 농도는 990 ~ 1,030°C 에서 최대로 생성되며, 1,030°C 이상에서는 감소하는 경향을 나타냈다(정문식, 2012). 또한 N_2O 농도는 소각 시 투입되는 O_2 농도에 따라서 변화가 있는 것으로 알려져 있다(김종민, 2011). O_2 농도가 낮을수록 NO_x 처리효율이 증가하고 N_2O 생성이 감소하는 것이 선행연구를 통해 확인되었다(이우찬 외, 2012). 또한 탈질시설 중 SNCR이 SCR보다 약 1.5배 N_2O 배출농도가 높게 나타나는 선행연구 결과도 있다(Mario Grosso, 2013; Sanwon Park et al, 2011)

본 연구의 대상시설은 저산소 열분해상태에서 폐기물을 열분해하며, 용융로 온도는 평균 1,300°C 에서 운전되고 있다. 선행연구(Lee et al, 2015)의 대상시설인 샤프트로 열분해용융시설의 경우 순산소 폐기물열분해용융시설이며 용융로 평균 로내온도가 992°C 이다. 순산소의 생산과 투입공정은 용융로에서 생성되는 열분해가스를 PSA산소/질소분리기를 이용하여 분리 후 용융로에 산소를 투입하는 특징을 갖고 있다.

샤프트로 열분해용융시설에서 배출되는 N_2O 농도는 평균 5.82ppm이며, 외열킬른형 열분해용융시설의 경우 0.267ppm으로 샤프트로의 1/18수준인 것으로 나타났다. 이는 선행연구(김종민, 2011; 정문식, 2012; 이우찬 외, 2012)에서 언급되었던 소각 시 투입되는 산소농도와 로내온도에 따라서 N_2O 농도가 상이하는 것으로 판단된다. 본 연구의 경우 열분해공정과 용융공정이 분리되어 있으며, 열분해공정에서 저산소로 운전 후에 열분해가스와 고형부산물로 분리되기 때문에 저산소와 고온을 유지하고 있다. 반면 샤프트로의 경우 열분해, 용융공정이 수직원통에서 같이 이루어지며 로내온도가 평균 992°C 이고 순산소를 투입하는 공정이기 때문에 N_2O 농도가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

<표 8> 열분해용융기술별 공정 비교

구분	본 연구(외열킬른형)	선행연구(샤프트로)
소각용량 (ton/day)	200 ton/day (100 ton × 2)	300 ton/day (150 ton × 2)
평균 소각량 (ton/day)	86.2	106.8
탈질시설 종류	SCR (Selective Catalytic Reduction)	SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction)
평균 로내온도(℃)	1,320	992
평균 30분 적산 유량(Sm ³)	2,902	3,414
산소투입 여부	저산소	PSA 산소/질소 분리기를 이용 한 순산소 투입
N ₂ O농도 (ppm)	0.267	5.82
배출계수 (gN ₂ O/ ton-waste)	0.829	15.5

제5장 결 론

본 연구에서는 PAS방법을 이용하여 외열킬른형 열분해용융시설의 N_2O 배출농도를 측정하였다. 이를 통해 대상시설의 N_2O 배출계수를 개발하고, 선행연구의 대상시설인 샤프트로 열분해용융시설의 배출계수와 비교하였다.

대상시설의 소각용량은 200 ton/day(100 ton/day \times 2)이며, 평균 소각량은 87 ton/day(2호기)로 나타났다. 열분해용융공정투입-열분해-용융공정을 거치며 폐기물 투입의 경우 폐기물을 일정크기로 파쇄되어 투입한다. 파쇄된 폐기물은 열분해공정에서 가스와 고형부산물로 구분되며 열분해가스는 용융, 공기가열기, 폐열보일러를 거쳐 대기오염 방지시설을 통과하여 굴뚝에서 배출되고, 고형부산물은 냉각처리 되어 외부로 배출된다.

본 연구는 2016년 3월부터 4월까지 2회 방문하여 N_2O 농도를 측정하였다. 굴뚝 측정공에 N_2O 연속측정기기인 LSE-4405를 설치하고 PAS방법을 이용하여 24시간 연속 측정하였다. 측정방법은 전처리기기(냉각, 펌프)를 이용하여, 배기가스의 수분을 제거하여 측정기기에 공급하고 전처리기기와 측정기기 사이에 흡착제가 채워진 trap을 설치하여 2단계에 걸쳐 수분을 제거하고, N_2O 농도를 측정하는데 방해가 되는 CO_2 등의 간섭물질을 제거하였다.

본 연구에서 측정된 열분해용융시설의 N_2O 배출농도는 평균 0.267ppm으로 나타났으며, 0.013 ~ 0.733ppm 범위의 배출농도 분포를 나타냈다. 외열킬른형 열분해용융시설의 N_2O 배출계수는 0.829 g N_2O /ton-Waste로 산정되었다. 그리고 본 연구에서 개발한 N_2O 배출계수와 선행연구에서 개발한 샤프트로 열분해용융시설의 N_2O 배출계수를 비교하였다. 비교결과, 본 연구에서 개발한 외열킬른형 열분해용융시설의 N_2O 배출계수는 선행연구에서 개발

한 샤프트로 열분해용융시설의 N_2O 배출계수에 1/18 수준인 것으로 나타났다. 두 시설은 국내에서 같은 열분해용융시설로 구분되고 있다. 하지만, 본 연구의 대상시설과는 다르게 하나의 공정에서 건조, 열분해, 용융공정이 이루어지는 설비구성이다. 또한 로내온도는 평균 $992^{\circ}C$ 를 유지하며 순산소를 투입하여 열분해, 용융공정이 이루어지며 탈질시설의 경우 SNCR이 설치되어있다. 일평균 소각처리량과 CleanSYS에서 모니터링하고 있는 유량자료를 살펴보면 두 시설 모두 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 이를 통해 로내온도와 산소투입여부, 탈질시설 종류에 따라 N_2O 배출농도가 상이하는 것으로 해석이 가능하다.

선행연구에 따르면 폐기물소각 시설에서 배출되는 N_2O 농도는 $990 \sim 1,030^{\circ}C$ 에서 최대로 생성되며 $1,030^{\circ}C$ 이상에서는 감소하는 경향을 나타내는 연구결과가 있다. 본 연구의 대상시설은 평균 $1,300^{\circ}C$ 의 로내온도를 유지하여 N_2O 농도가 낮게 나타나지만 선행연구의 대상시설은 $992^{\circ}C$ 를 유지하여 N_2O 농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. N_2O 농도는 소각 시 투입되는 O_2 농도에 따라서 변화가 있는 것으로 알려져 있는 연구결과도 있으며, O_2 농도가 낮을수록 NO_x 처리효율이 증가하고 N_2O 생성이 감소하는 것이 연구 결과가 있다. 본 연구의 대상시설과 선행연구의 대상시설을 비교하면 본 연구의 대상시설인 외열킬른형 시설은 저산소로 운전되는 반면 선행연구의 샤프트로 열분해용융시설은 순산소를 투입하여 공정이 이루어지고 있다. 이를 통해 순산소 투입되고 로내온도가 $990 \sim 1,030^{\circ}C$ 에서 운전될 경우 N_2O 농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 탈질시설 중 SNCR이 SCR보다 약 1.5배 N_2O 배출농도가 높게 나타나는 선행연구 결과를 살펴봤을 때 탈질시설의 종류에 따라서 N_2O 농도가 달라질 수 있는 것을 알 수 있다.

본 연구결과를 통해 국내 열분해용융시설은 적용기술에 따라 N_2O 배출농도가 다르다는 것을 알 수 있으며, 배출농도가 다르기 때문에 열분해용융시설의

N₂O 배출량은 기술별로 구분하여 산정할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 연구를 통해 국내 열분해용융시설에서 배출되는 온실가스 배출량을 보다 정확하게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 2가지의 열분해용융기술을 대상으로 비교하였지만, 추후에 국내에서 운영되고 있는 열분해용융시설의 적용기술별로 온실가스 배출특성 연구를 진행할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 연구는 추후에 폐기물소각부문의 온실가스 인벤토리 신뢰도를 향상시키는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

강소영, 2015, 온실가스 배출량 산정 방법에 따른 Wood Chip 연소시설의 N₂O 배출량 비교, 세종대학교, 석사학위논문

경기도보건환경연구원, 1999, 폐기물 소각방식의 비교분석 및 경기도 적용에 관한 연구

국립환경과학원, 2005, 열분해가스화 용융시스템의 구조 및 성능평가에 대한 연구(1)

김경매, 2014, Numerical Study on the NO_x Control in Municipal Solid Waste Incinerator by Spray of Food Wastewater, 호서대학교, 박사학위논문

김문현, 2013, 화력발전소용 V₂O₅/TiO₂계 촉매상에서 NH₃-SCR 탈질반응으로부터의 N₂O 생성, 공화학회, 51(2), p.159-163

김영란, 2004, 생활 폐기물 열분해/가스화 공정에서 생성된 Char의 특성에 따른 용융 Slag의 특성 평가 및 재활용성에 관한 연구, 연세대학교, 석사학위논문

김종민, 2011, Urea-SNCR 공정에서 NO_x 및 N₂O 생성 메커니즘 연구, 서울시립대학교, 석사학위논문

사재환, 윤석경, 노기환, 전의찬, 2008, 가스상 암모니아 측정을 위한 분석 방법별 특성 연구, 한국대기환경학회, 제24권 제1호, p.43-54

손지환, 2006, 생활폐기물 열분해 용융공정에서 다이옥신 등 대기유해물질 거동, 한국외국어대학교, 석사학위논문

양주시, 2010, 양주권자원화회수시설 현황

오현진, 2008, 광음향 분광법을 이용한 CO₂ 개질반응의 페롭스카이트 형 Lal-xNiO₃-1.5x 촉매 효과 연구, 연세대학교, 석사학위논문.

유영춘, 2007, 생활폐기물 열분해용융기술 적정 도입에 관한 연구, 연세대학교, 석사학위논문

이우찬, 김종민, 동종인, 이경원, 여상구, 현승민, 2012, Urea-SNCR 공정에서 산소농도에 따른 NO_x 저감과 N₂O 배출특성 연구, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, p124,

이정우, 2016, 폐기물 소각 시설의 Non-CO₂ 농도 예측모형 연구, 세종대학교, 박사학위논문

전병일, 2005, 열분해 용융 소각로에서 2차 공기 주입에 의한 체류시간 및 연소 특성에 관한 연구 -공기비의 변화에 따른 연소특성을 중심으로 -, 연세대학교, 석사학위논문

정문식, 2011, 첨가제를 이용한 Urea-SNCR 공정에서 N₂O 생성특성 연구, 서울시립대학교, 석사학위논문

최상심, 김석환, 김경래, 2004, 생활폐기물 열분해용융시설 동부 R-21, 제28회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 p314

편혁범, 2015, 폐기물 처리를 위한 플라즈마 가스화 용융 및 에너지회수 기술 동향 분석, 충남대학교, 석사학위논문

홍윤정, 2016, 연소시설의 온실가스 최적 시료채취 및 분석 설계 연구, 세종대학교, 박사학위논문

환경공단, 2015, 전국 폐기물 발생 및 처리현황(2014년도)

환경관리공단, 2006, 자원순환형 사회구축을 위한 생활폐기물의 적정처리기술

환경부, 2006, 유해폐기물 처리·처분기술:석면함유 유해폐기물 처리 열분해용융 기술 개발

환경부, 2007, 굴뚝원경감시체계 업무편람

환경부, 2007, 폐기물공정시험방법

환경부, 2015, 폐기물 소각 시설 온실가스 연속측정방법(Tier4) 시범운영

IPCC, 2006, 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste, Chapter 5: Incineration and Open Burning of Waste

Jeongwoo Lee, Kang,Seongmin, SeungjinKim, SoyoungKang, Seehyung Lee, Eui-ChanJeon, 2015, Development of Non-CO₂ emission factors from MSW pyrolysis melting treatment in Korea,

Mario Grosso, Lucia Rigamonti, 2013, Experimental assessment of N₂O emissions from waste Incineration: the role of NO_x control technology, DIIAR, Environmental section

Sangwon Park, Jun-Ho Choi, Jinwon Park 2011, The estimation of N₂O emissions from municipal solid waste incineration facilities: The Korea case, Waste Management, 31, pp. 1765-1771

V.Koskinen et al, 2006, Extremely sensitive trace gas analysis with modern photoacoustic spectroscopy, Vibrational Spectroscopy, 42, 239-242

Abstract

Development of N₂O emission factor from municipal solid waste pyrolysis-melting facility

Hyunki Yun

Department of Environment and Energy

The Graduate School

Sejong University

In this study we developed the N₂O emission factor of R-21 type thermal decomposition melting facility, and this was compared with the N₂O emission factor of thermal decomposition melting facility in the thermal decomposition melting technology of shaft that has been introduced into the country. In order to do this, the N₂O concentration was measured in real time from the subject facility, and we have developed an emission factor to calculate the emissions. N₂O concentration was measured using real time measurement instrument(LSE-4405). Photoacoustic spectroscopy(PAS) was used as the measurement method. For the measurement period, it was measured two times from March 2016 to April 2016. Continuous automatic measuring instrument of the chimney that is presented in "Guideline for greenhouse energy target management system" has been used as the method for calculating emissions. The calculated emission was divided by the throughput of the emissions measurement period to develop the throughput of the emissions measurement period to develop the emission factor.

The average N₂O emission concentration of the measurement results of the primary measurement(3/29 ~ 3/31) was 0.225ppm, and the emission factor was 0.741 gN₂O/ton-waste. The secondary(4/26 ~ 4/28) average N₂O concentration was 0.307ppm, and the emission factor was 0.893 gN₂O/ton-waste. Overall average concentration was 0.267ppm, and the emission factor was 0.829 gN₂O/ton-waste. Thermal decomposition melting facility in the shaft that was developed in prior studies was 15.5 gN₂O/ton-waste which is about 18 times the emission factor of the present study. These differences were assumed to be caused by the difference of the average furnace temperature (1,320°C for R-21 type and 992°C for the shaft), and also that R-21 type thermal decomposition melting facility that is the subject facility of the present study uses low oxygen for operating pyrolysis melting plant while the shaft supplies pure oxygen for thermal decomposition. Therefore it is interpreted that the difference between the N₂O emission factors of this study and previous studies, depends on the average furnace temperature and the if pure oxygen was supplied.

Waste treatment facilities recently built in new cities are almost all thermal decomposition melting facilities, and the number of facilities since 2008 has steadily increased. However there has been few developments for emission factor of thermal decomposition melting facilities. It is concluded that the present study can increase the accuracy of calculating greenhouse gas emissions from thermal decomposition melting facilities.

Keywords : Greenhouse Gas, R-21, Shaft, PAS(Photo-Acoustic Spectroscopy)