

화장로 형상 최적화를 통한 에너지효율개선을 위한 실증연구

원용태 · 이승목[†]

가톨릭관동대학교 환경공학과
(2019년 6월 19일 접수, 2019년 6월 26일 심사, 2019년 8월 6일 채택)

Field Scale Study for Energy Efficiency Improvement of Crematory System by the Shape Optimization of Combustion Chamber

Yong-Tae Won and Seung-Mok Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung 25601, Korea
(Received June 19, 2019; Revised June 26, 2019; Accepted August 6, 2019)

초 록

본 연구는 국내 화장로 설비의 주류를 이루는 대차방식 화장로의 성능개선을 목표로 하였다. 주연소실 형상 변화를 통해 용적을 증대시키고, 버너연소제어 최적화를 통한 화장시간 단축 및 에너지 사용량 절감기술을 실증설비 기반으로 연구하였다. 1차적으로 열유동해석을 통해 최적화된 구조설계로 주연소실의 체적을 약 70% 증대시키므로 연소배가스의 체류시간이 증대되는 효과를 얻을 수 있었고, 이를 통해 설계한 파이로트 화장로를 제작하여 다양한 운전조건에서 연소거동을 실험하고 주연소실 형상별 최적의 운전방안을 도출하였다. 이렇게 도출된 결과를 반영하여 실증 화장로를 설계하고, P시 Y화장장에 설치하였다. 실증 화장로 조업을 통해 최적 연소조건을 도출할 수 있었고, 고온의 연소배가스의 체류시간 증대에 따른 에너지 효율의 증대효과로 기존대비 화장시간 및 연료사용량을 최소화할 수 있었다. 즉, 화장시간은 기존 화장로 조업대비 44.1% 단축된 38 min이었고, 연료사용량은 기존 화장로 대비 54.4% 절감된 21.8 Nm³이었다.

Abstract

The purpose of this study was to improve the performance of the bogie-type crematory, which is the mainstream of domestic crematory equipment. A field scale technology was investigated via increasing the volume by changing the shape of the furnace and reducing the cremation time and saving the energy usage through the optimization of burner combustion control. First, the optimized structural design through thermal flow analysis increases the volume of the main combustion chamber by about 70%, which increases the residence time of the combustion flue gas. A designed pilot crematory was then installed and the combustion behavior was tested under various operating conditions and the optimum operating plan was derived from for each furnace shape. Based on the results, the practically applicable crematory was designed and installed at Y crematorium in the P City. Optimal combustion conditions could be derived through operating the demonstration crematory furnace. The crematory time and fuel consumption could be minimized by increasing the energy efficiency by increasing the residence time of high temperature combustion flue gas. In other words, the crematory time and fuel consumption were 38 min and 21.8 Nm³, respectively which were shortened by 44.1 and 54.4% lower than that of the existing crematory, respectively.

Keywords: Crematory facility, Optimum combustion conditions, Low energy load, Crematory time, Fuel consumption

1. 서 론

우리나라의 화장시설은 보건복지부와 환경부에서 관리하고 있으며, 보건복지부에서는 장사 등에 관한 법률로 장사의 방법과 장사시설의 설치 조성 및 관리 등에 관하여 관리하고 있으며, 환경부에서는 대기

환경보전법으로 화장시설에서 배출되는 배출허용기준치를 적용 관리하고 있다.

현재 국내의 장사문화는 도시의 급격한 팽창으로 국토의 개발이 가속화 되고 있는 실정이며, 또한 핵가족화 및 인구의 급감 현상으로 우리나라 장사문화의 오랜 전통인 매장문화에서 화장문화로 급격히 변화하고 있는 현실이다.

2010년 1월 1일 이전에는 화장시설이 대기환경보전법에 배출시설로 포함되어 있지 않았다. 그래서 화장시설 배기관을 통하여 최종 배출되는 연소가스는 육안으로 확인되는 매연을 제거하는 설비뿐이었다. 그러다보니 일반 시민들의 입장에서는 화장시설의 노후화 및 유

[†] Corresponding Author: Catholic Kwandong University, Department of Environmental Engineering, Gangneung 25601, Korea
Tel: +82-33-649-7535 e-mail: leesm@cku.ac.kr

해가스 물질의 배출로 인하여 혐오시설이라는 인식이 강하게 자리 잡아왔다.

2010년 1월 1일 이후부터 화장시설이 대기환경보전법의 관리를 받기 시작하면서 최종 배기관에서 배출되는 매연, 먼지, 유해가스(질소산화물, 다이옥신류 등)를 제거할 수 있는 공해방지시설을 갖춘 화장로시설로 갖추어 감으로써 시민들로부터 점차 혐오시설이라는 이미지를 벗어나고 있다. 2018년 기준으로 전국 화장시설은 59곳 350기의 화장로가 운영되고 있다. 2017년 기준 우리나라 화장율은 84.6%로 꾸준한 증가추세를 보이고 있으며, 1993년도 화장율 19.1%에 비해 약 4.4배 상승했고, 전년도 화장률(2016년 82.7%)보다도 1.9% 증가하였다. 경북 울릉군이 98.6%로 전국 최고의 화장율을 나타내고 있으며, 충남 청양군이 48.8%로 최저를 기록하고 있다. 보건복지부에 따르면 전국 평균으로는 화장시설이 부족하지 않으나 인구가 밀집되어 있는 서울, 경기도, 광역시의 경우에는 아직도 화장시설이 부족한 것으로 나타나고 있다[1,2].

국내의 화장로시설 59곳 350기의 화장로는 대차방식의 화장로를 사용하고 있다. 대차방식의 화장로는 연소실의 바닥면을 외부와 내부를 이동할 수 있는 대차 설비가 위치하는 구조이다. 이러한 방식은 동양에서 사체를 엄숙히 여기는 관습에 따라서 선호하고 있는 실정이다. 이러한 대차방식의 화장로는 열손실이 많이 발생하는 단점이 있다. 화장로의 연소거동을 살펴보면 화장로시설은 사체를 연소하는 시간이 평균 60분 소요되는데 이러한 패턴이 하루 5회 정도 반복되는 단속운전의 연소 조건을 갖고 있다[3,4]. 화장로의 피연소 물체는 관(목재), 부장품(섬유 등), 사체로 크게 3가지로 분류할 수 있다. 연소초기에는 관과 부장품이 연소되며 이때 연소가스량은 최대로 발생되며 연소공기의 공급부족 시 불완전연소가 발생할 수 있다. 그리고 연소시간이 경과되면서 연소물이 소멸되는 바 연소가스량은 점차 줄어들고 버너연소에 의해 온도가 유지되면서 유골이 소성되는 연소패턴을 가지게 된다. 그러므로 초기 점화 15 min간 관 및 부장품의 연소가 진행되면서 연소량이 급증하게 되어 연소공기의 공급이 부족한 경우 불완전 연소와 함께 다량의 유해가스 또한 발생할 수 있다[5,6].

화장로에서 발생하는 주요 공해배출 유해물질은 먼지, 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소, 염화수소, 다이옥신류 등이다. 황산화물, 염화수소의 발생량은 미미한 수준이며[7,8], 가장 많이 발생하는 물질이 먼지와 질소산화물이다. 이러한 물질은 방지시설을 설치하여 제거함으로써 통상 환경부 배출허용기준 이내 조건으로 연소가스를 처리 대기로 배출하고 있다[9-13].

앞서 발표된 전산유동해석의 연구를 통하여 화장로 형상과 체적을 개선한 바 있으며, 이를 통해 유해물질의 발생을 억제할 뿐만 아니라 연소시간 단축과 에너지 절감을 확인할 수 있었다[14,15]. 본 연구에서는 앞선 논문에서 최적화시킨 실증 화장로설비를 구현하기 위해 1) 실증크기 pilot 설비를 통한 연구와 2) 실제 화장장 화장로를 설치한 실증연구를 하고자 하였다. 이를 통해 화장장에서 요구되는 화장시간을 단축하여 유족들에게 화장장에서 기다림의 시간을 최소화하고 에너지를 절감하며, 최소의 유해물질 배출로 청정한 화장시설을 국내 화장장에 공급하고, 화장로시설의 외국업체들과의 경쟁력을 높이고자 하였다.



Figure 1. The pilot crematory facility.

2. 연구내용 및 방법

2.1. Pilot 화장로 설비

2.1.1. Pilot 제작 및 구성

실제 화장장 개선화장로와 동일한 형상과 크기의 pilot 화장로 설비를 Figure 1과 같이 화장로 설비업체인 S사 음성공장에 제작 및 설치하였으며, 다양한 운전조건들을 적용하여 최적의 운전인자를 도출하고자 연소실험을 수행하였다.

Figure 1에 보여주는 pilot 화장로 설비는 실증크기의 주연소실과 배가스덕트 및 고온싸이크론, 폐열회수를 위한 가스냉각기, 백필터 여과집진기, 그리고 유인배풍기와 연돌로 구성되어있다. 개선화장로의 경우, 기존화장로 연소실과 대비하여 내부용적을 증대시키기 위하여 주연소로 연소실의 공간높이를 기존 설비보다 높여 제작함으로 기존화장로대비 용적율을 1.7배 정도 증대시켰다. 이를 통해 초기 부장품이나 목관 등 가연성 물질들의 연소단계에서 생성되는 과잉 가스량의 제어를 효율적으로 수행할 수 있었으며, 본 장치의 온도제어를 위한 주에너지원은 LPG 버너를 사용하였다. 또한, 로 내 연소가스의 체류시간을 연장시키고 에너지효율의 증대와 함께 연소시간을 단축시키기 위해 로 상부에 상단 덕트를 추가 설치하였다.

그리고 로 출구에 압력측정기를 설치하여 유인배풍기와 연동하여 로 내 압을 제어하고 모니터링 할 수 있게 하였다. 또한 로 내 관 받침대에 보조 연소공기를 추가 주입하여 초기단계 급격한 연소과정 중 발생하는 불완전 연소 가능성을 제거하였다.

한편, 화장로 연소실 후단에는 발생분진 제거를 위해 싸이크론 집진기를 설치하여 배출가스를 1차 처리하였고, 가스 냉각설비를 통해 배출가스를 냉각시켜 여과집진기로 공급하므로 여과포가 열화·손상되지 않게 보호하였다.

2.1.2. Pilot 화장로 실험방법

Pilot 화장로 설비를 활용하여 최적의 운전조건 및 설비 개선 요소들을 도출하고자 하였다. Pilot 화장로 설비의 주요 운전변수들은 로 내 압력, 상단 덕트 개방, 보조 연소공기주입, 버너 설정온도(850 °C로 설정), 버너 출력, 피화장체 시료(돈육, 뼈, 관) 무게, 로 확장(기존 로 대비 체적 30% 증대, 1.709 m³) 등이었다.

Pilot 화장로 연소성능 실험과정에서 온도측정은 Figure 2와 같이 구역별로 구분하여 온도분포를 관찰하였다. 또한, 산소농도, 대기오염물질(CO, NOx) 농도 및 연료 사용량(LPG 유량계 검침)을 측정하였다.

Pilot 화장로 설비의 운전 시퀀스는 기본적으로 다음과 같은 사전 설

Table 1. Pilot Operating Variables of High-speed Crematory Facility

| Turn | Experimental Items | Amount of sample ²⁾ (kg) | Top duct ³⁾ (Open) | Combustor pressure (mmAq) |
|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| - | Blank test (Fuel burning only) | - | ○ | -3.5 |
| - | Blank test (Fuel burning only) | - | ○ | -3.4 |
| 2 | Test at set pressure with existing furnace | 80 | ○ | -8.7 |
| 3 | Change of combustor pressure | " | ○ | -8.4 |
| 4 | Change of combustor pressure | " | ○ | -5.6 |
| 5 | Influence of top duct | " | × | -7.7 |
| 6 | Influence of top duct | " | ○ | -6.6 |
| 7 | Auxiliary air injection into the cradle | " | ○ | -7.4 |
| 8 ¹⁾ | Existing furnace operation | " | × | -8.7 |
| 9 | Restart after stopping operation (10 minutes) | " | ○ | -4.4 |
| 10 | Restart after stopping operation (25 minutes) | " | ○ | -4.5 |
| 11 | Auxiliary air injection into the cradle | " | ○ | -4.4 |
| 13 | Expansion of combustor volume | " | ○ | -3.7 |
| 14 | Expansion of combustor volume, sample 20 kg add | 100 | ○ | -3.7 |
| 15 | Expansion of combustor volume | 80 | ○ | -3.7 |
| 16 | Expansion of combustor volume | 85 | ○ | -3.5 |
| 17 | Expansion of combustor volume, increase/decrease burner output | 80 | ○ | -3.3 |
| 18 | Expansion of combustor volume, increase/decrease burner output | " | ○ | -3.2 |

1) Existing furnace, the rests are operated in pilot of high-speed crematory facility.
 2) Top duct: Outer diameter 140 mm (Inner diameter 125 mm) × 2 set.
 3) Sample: 15 kg (Pork, bone, wooden pipe etc).

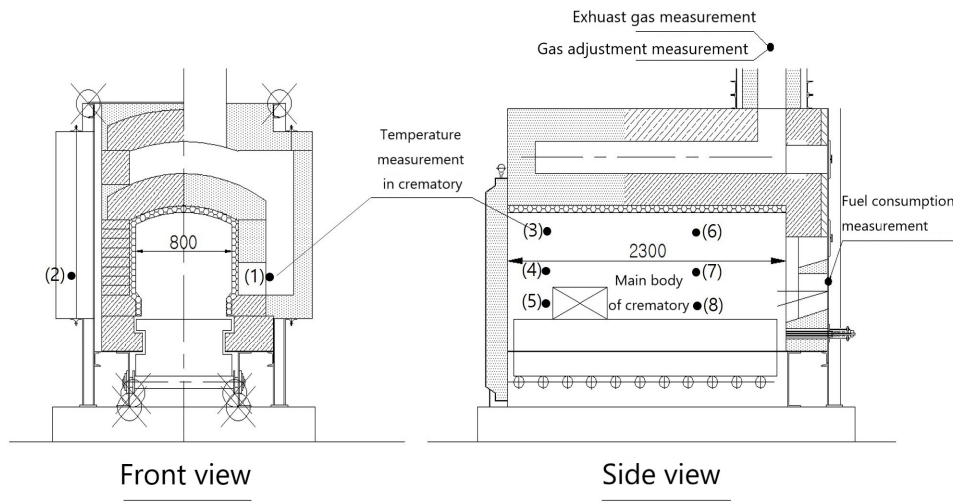


Figure 2. Locations for temperature and fuel consumption measurement.

정으로 진행하였으며, 1회 운전 시 다음의 단계를 거치도록 하였다.

- (1) 송풍설비 가동: 배풍기, 연소공기 공급 송풍기, 열교환 송풍기를 가동하여 로 내 공기의 순환 및 배가스 냉각을 원활히 함.
- (2) 버너점화/저출력: 배풍기 가동으로 설정, 로 내압에 도달하면 버너를 점화하여 연소를 시작하고 5 min간 저출력으로 운전(이때는 주로 관이 소각되는 단계임).
- (3) 버너 고출력: 점화 후 5 min이 넘어가면서 관내의 피화장체가 연소되기 시작하고 버너 출력을 상승시켜 설정온도 850 °C에 도달하게 화장운전을 하게 됨.

- (4) 버너 출력 감발: 설정온도 850 °C 부근에 도달하게 되면 버너 출력은 하강하게 되고 온도가 설정온도보다 낮아지게 되면 다시 버너 출력이 상승, 이처럼 온도 변화에 따라 출력을 반복하는 단계로 피화장체는 연소되어 대부분 재(ash)만 남아 있는 상태임.
- (5) 버너 소화: 유체가 탄화성분(검댕)이 남아있지 않고 전소하면 버너를 소화함.

Table 1과 같이 운전변수를 변경하면서 적정 운전조건을 도출코자 실험하였다. 연소 버너는 점화 후 5 min간 저출력, 이후 고출력 운전,

Table 2. Improved Items Applied to Field Scale Crematory

| Items | Goals | Applied technology | |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Total fuel consumption ¹⁾ | 210,000 kcal/each | • Changes of internal shape and volume in main combustion furnace, waste heat utilization | |
| Crematory time | Below 40 min/each | • Change to Main combustion furnace, waste heat utilization | |
| Outer wall temperature | External surface temperature + 40℃ | • Application of high efficiency eco-friendly thermal insulation material | |
| Combustion gas temperature | Over 850 ℃ | • Complete combustion in the main combustion furnace by control of combustion air volume | |
| Air pollutants | Dust | 10 mg/Sm ³ | • Optimization and supplementation of existing prevention facilities. • Minimization of unburned combustion products. • Application of low NOx burner. • Replacement of SCR catalyst and dioxin filter • Application of adsorbent for mercury removal |
| | CO | 20 ppm | |
| | HCl | 5 ppm | |
| | SOx | 5 ppm | |
| | NOx | 20 ppm | |
| | Dioxin | 0.01 ng-TEQ/Nm ³ | |
| | Hg | 0.1 µg/Sm ³ | |

1) Converted according to Enforcement Rule of Energy Law (9,420 kcal/Nm³)[5].

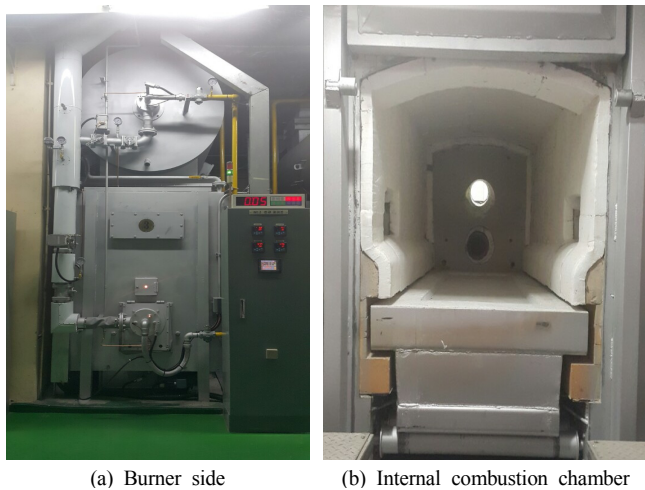


Figure 3. The crematory system used for field experiments in facilities in Y crematorium in P city.

온도에 따른 low-high 비례 제어를 하였다.

2.2. 실증 화장로 설비

2.2.1. 실증 화장로 제작 및 구성

Pilot 실험을 통해 도출된 설계자료 및 개선안을 바탕으로, P시 Y화장장에 실증 화장로 설비를 Figure 3과 같이 제작, 설치하였다. 실증 화장로 설비에서 에너지효율 향상과 함께 화장시간 단축 및 에너지저감, 그리고 환경오염원 저감을 위해 적용된 기술을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

화장로 실증설비는 전체적으로 연소가스의 고온상태 체류시간을 연장시키므로 미연소물들의 열분해를 촉진시키는 에너지효율의 증대, 연소시간을 감축코자 하였다. 또한 주연소실의 효과를 보완하기 위한 목적으로 재연소로의 용적 또한 증대시키고 편류 방지판의 위치 및 형상을 변경하여 로 내 유체가 적절히 혼합 체류되게 하였다. 이를 통해 불완전연소생성물(CO, soot 등)을 완전 분해하고 오염물질 배출을 최소화하였다.

2.2.2. 실증 화장로 실험 방법

실증실험 연구는 시운전 및 공로 실험(blank test)을 통해 주요 운전 변수를 도출하고 주연소로 연속시험으로 찾은 최적의 운전조건을 예비중합시험에 적용하여 최종 성능목표 달성여부를 검증하였다.

2.2.2.1. 공로 실험(blank test)

- ① 실시간 확인/기록: 로 내 출구 온도, 산소농도, 연료사용량
- ② 중점 확인사항: 연소공기 주입량의 균일성, 최적의 로 압력
- ③ 주연소로 출구 압력에 따른 유량변화
 - 압력: 0, -2, -3, -4, -5 mmH₂O
 - 버너 출력 0~100%, 상온
- ④ 연소공기 유량에 따른 산소농도 변화
 - 버너 출력에 따른 산소농도, 1 min당 연료사용량
 - 연소공기 주입율(공기비)은 3.5
 - 연소공기 주입 시 온도조절은 재연소로 후단 공기희석량에 의해 조절 가능
- ⑤ 주입공기의 온도 측정, 열교환기의 에너지효율 분석
 - 연소공기 유입온도: 약 150 ℃
 - 압력 및 공기비: 시료시험에서 도출한 최적조건
 - 공기주입 fan 출력 및 공기희석량에 따른 연소공기 유입온도 변화 확인

2.2.2.2. 연속 실험

- ① 실시간 확인/기록: 로 내 · 출구 온도, 산소농도, 연료사용량
- ② 중점 확인사항: 연소의 균일성, 시간대별 온도 및 O₂, CO 분포
- ③ 로 압력 및 연소공기는 공로 실험에서 도출된 최적값으로 설정
 - 압력 -3~-5 mmH₂O, 공기비 3.5 또는 4.0
 - 버너 출력 및 공기비에 따라 연소공기 주입량 변동
- ④ 버너 출력 및 시간에 따른 열용량 변화 → 최적 운전조건 확인

2.2.2.3. 예비중합시험

- ① 대기오염방지시설 연계실험
- ② 연료사용량, 화장시간 달성 연속실험
 - 목표 연료사용량 및 연소시간 달성 여부 확인

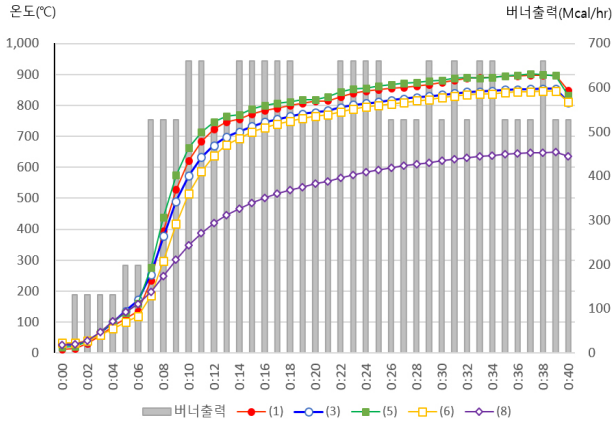


Figure 4. Burner output and internal temperature distribution during blank test operation (internal pressure: -3.4 mmH₂O).

- 시간대별 구간별 온도, 로 내 압력, 산소농도 등의 운전 data 기록
- ③ 대기오염물질 측정: 로 출구, 방지시설 후단
- SCR에 의한 NO_x 저감: 촉매교체
- 다이옥신 및 수은 저감: 다이옥신 필터 교체, 수은흡착제 적용

2.2.2.4. 실증설비 성능평가

- ① 성능시험 결과에 의한 최종평가
 - 총 연료사용량: 유량계에 의한 확인
 - 화장시간: 제어판넬에 나타나는 화장시간 확인
 - 로 출구온도: 실시간 온도 측정
 - 로 외벽온도: 로 외벽 5회 이상 온도측정
 - 대기오염물질: 대기오염공정시험법에 의거 측정·분석
- ② 방지시설에 의한 대기오염물질 저감 효과 분석 및 에너지 절감 효과 진단

실험항목은 크게 온도(측정장비: GL820-UM-851 (GRAPHTEC)), 산소 및 대기오염물질 농도(측정장비: Greenline MK2, MK6000 (EUROTRON))이며 실증설비의 실험방법은 기본적으로 pilot 실험 시 설정한 시퀀스대로 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Pilot 화장로

3.1.1. Pilot 화장로 주연소로 온도분포

로 온도는 화장로의 주연소로 구간별로 설치된 온도센서를 통해 모니터링되며, 데이터로거를 이용하여 실시간으로 측정·기록하였고, 동시에 로 내 압은 로 출구에 디지털 압력계를 설치하여 측정·기록하였다.

Pilot 화장로 로 내 온도분포를 측정한 결과는 다음과 같다(온도센서 위치는 Figure 2).

- ① 로 내압이 낮을수록 로 내 온도가 높아진다.
- ② 로 내 덕트 측 하단(온도센서 번호: 5)이 가장 온도가 높다.
- ③ 버너화염 인입부(온도센서 번호: 8)에서는 다른 구간에 비해 온도가 낮다.
- ④ 상단 덕트 개방 시 로 내부 온도가 비교적 고르게 분포된다.
- ⑤ 로 중간과 하단에 온도차이가 거의 없다(4, 7번 온도센서 제거). 또한, 버너 출력(Mcal/hr)에 따른 영향을 관찰하여 최적의 연소효율

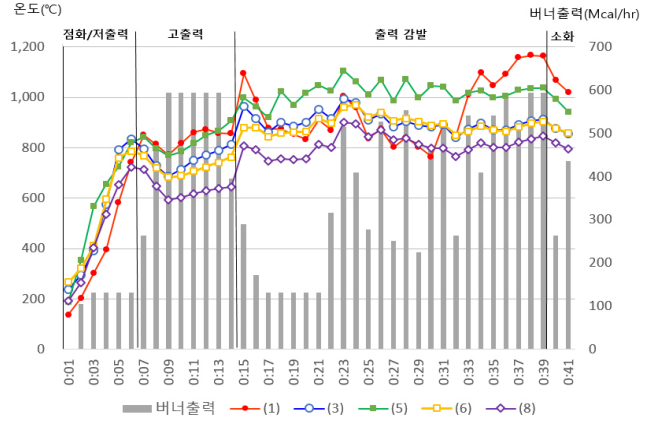


Figure 5. Burner output and internal temperature distribution during crematory operation (16~18 times) (internal pressure: -3.2 mmH₂O).

을 도출하고자 공로 실험을 수행하였다. 즉, 유체모사 시료(폐지)를 넣지 않고, 다른 pilot 실험에서와 동일한 조건으로 수행하였다. 설정온도(850 °C)까지 도달하는데 비교적 장시간 소요되었고, 로 내 열원인 화장체가 없기 때문에 버너 출력이 높게 유지되면서 LPG 공급량이 높게 유지됨을 알 수 있었다. 버너 출력에 따른 온도분포는 Figures 4와 5에 나타내었다.

로 내 온도분포(피화장체 연소) 결과는 화장시간의 경과에 따라 4 구간(점화/저출력, 고출력, 출력감발, 소화)으로 구분할 수 있다. 점화초기로부터 약 15 min 경과 시점(점화/저출력, 고출력 구간)까지는 가연성 물질로 관 및 피화장체가 연소되는 단계로 로 내 온도가 상승하게 되며, 로체를 축열 시키게 된다(점화~15 min). 이후로 출구온도가 설정온도에 가까워지면서 LPG 연소량은 줄어들게 되고(버너 출력 하강: 점화 15 min 이후), 이때 로 내 온도는 800~1,000 °C이고, 로 출구(1) 760~1,100 °C, 로 내 출구측 상단(3) 840~1,000 °C, 로 내 출구측 하단(5) 920~1,100 °C, 버너 측 상단(6) 840~970 °C, 버너 측 하단(8) 750~900 °C로 측정되었다.

3.1.2. Pilot 화장로 대기오염물질 및 산소농도 측정결과

Pilot 화장로 주연소로에서 배출되는 대기오염물질 및 산소농도를 측정하여 연소상태를 관찰하였고, 그 결과를 Figures 6과 7에 나타내었다. 이 수치들은 후단 배출가스 처리설비를 거치지 않은 주연소로 및 재연소로의 배출가스 조성에 대한 분석결과이다.

화장로 주연소로에 대한 공로 실험 시 산소농도는 점화초기(버너 저출력 조건)에서 19~20%이었으나, 로체가 축열된 이후 유체가 정상 화장되는 조건(버너 고출력)에서는 15.3%정도였으며, 평균 16.2%의 농도로서 이는 일반 공업로(산소농도 11~12%) 대비 과잉공기로 운전됨을 알 수 있었다.

NO_x 농도는 버너 출력으로 로 내 온도와 비례하여 지속적으로 증가하였고, LPG가 연소되는 공로조건에서 평균 40~60 ppm 정도 발생되었다. 한편, CO 농도는 점화 후 연소 유량을 증대시키는 과정에서 불안정 제어에 따라 약 40 ppm까지 상승하나 정상 제어조건에 도달한 이후 미량으로 배출되었다.

피화장체가 있는 pilot 화장로 운전 시 산소농도는 점화초기 저출력 구간에서 19%이었고 이후 15%까지 저하되었으며, 유체가 화장되는 조건(버너 고출력)에서는 9%까지 감소되었다가 피화장체가 완전히 화장 종료되는 후단에서는 15%까지 상승하였다. 평균적 산소농도는 약

Table 3. Experimental Results of Pilot Crematory Facility

| Items | | Existing facility | Top duct closing | Top duct open | Top duct open, auxiliary air injection | Top duct open, expansion into combustion |
|--|---------------------------------------|-------------------|------------------|---------------|--|--|
| Fuel consumption | Dead body, wooden pipe, etc (kg/each) | 80 | 80 | 81.7 | 80 | 80 |
| | LPG (Nm ³ /each) | 41.0 | 11.3 | 9.4 | 9.55 | 9.41 |
| | LPG (Mcal/each) | 902.0 | 248.1 | 207.4 | 210.1 | 207.0 |
| Exhaust gas flow rate (Nm ³ /min) | | 30.5 | 27.0 | 25.7 | 23 | 32.7 |
| Total exhaust gas volume (Nm ³ /each) | | 2,135 | 1,407 | 1,229 | 1,011 | 1,143 |
| Burning time (min/each) | | 70 | 50 | 47 | 40 | 35 |
| Excess air ratio | | 2.2 | 2.6 | 2.5 | 1.78 | 1.72 |
| Temperature distribution (°C) | Combustor exit (right) | 827 | 640 | 733 | 711 | 1,019 |
| | Combustor exit (left) | - | 788 | 880 | 806 | 802 |
| | In-combustor top of burner (3) | - | 731 | 850 | 748 | 896 |
| | In-combustor bottom of burner (5) | - | 612 | 700 | 659 | 912 |
| | In-combustor middle top (6) | - | 770 | 859 | 767 | 827 |
| | In-combustor middle bottom (8) | - | 830 | 949 | 899 | 1,013 |
| | Top of duct | 436 | 581 | 649 | 568 | 794.5 |
| | Final | 106 | 100 | 104 | 104 | 115 |
| Outlet average concentration | O ₂ (%) | 16.6 | 11.6 | 11.0 | 13.3 | 13.4 |
| | CO ₂ (%) | 3.2 | 6.9 | 7.3 | 6.0 | 4.3 |
| | H ₂ O (%) | 8.5 | 3.9 | 3.5 | 5.0 | 5.0 |
| | CO (ppm) | 337.7 | 78.9 | 103.9 | 157.6 | 120.1 |
| | NOx (ppm) | 70.3 | 119.9 | 148.7 | 163.3 | 167.5 |
| | SO ₂ (ppm) | 2.0 | 0.2 | 3.0 | 0.8 | 0.0 |

Remark: Numbers in parentheses indicate the temperature measurement point inside the furnace.

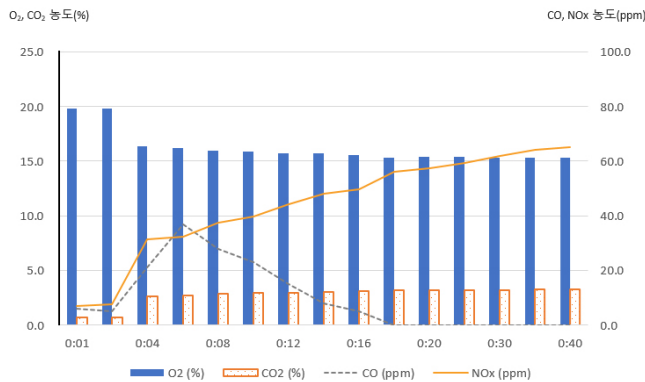


Figure 6. Oxygen and air pollutant concentration distribution during blank test operation (internal pressure: -3.4 mmH₂O).

14%이었다.

NOx 농도는 로 내 온도가 상승함에 따라 비례하여 증가하였고, 화장운전 말기에는 100~200 ppm 정도의 농도를 유지하였다. CO 농도는 버너 점화 후 관 및 부장품이 연소되는 초기에 1,000 ppm 이상 큰 폭으로 일시적으로 상승하는 거동을 보였으나 보조연소공기의 공급을 통해 불완전연소시간을 단축함으로써 CO 발생량을 줄일 수 있었다.

3.1.3. Pilot 화장로 성능평가 실험 결과분석

Pilot 화장로 설비의 성능평가를 위해 공로 실험을 포함해서 총 18

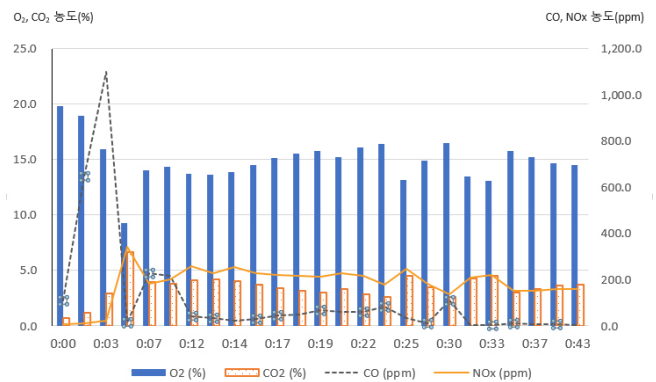


Figure 7. Oxygen and air pollutant concentration distribution during crematory operation (14~15 times) (internal pressure: -3.2 mmH₂O).

회 수행하였고, Table 3과 같이 상단 덕트의 open/close 및 로 내 압력을 조정하며 화장로 연소특성을 파악하였다. 온도제어와 환경오염물질(NOx 및 CO)을 제어하기 위한 주요 운전 변수는 유입공기량으로 로 내 압력을 과도하게 낮출 경우 현열 손실 증가로 로 내 온도유지가 어려우며 연료사용량 및 운전시간을 증가시키는 요인으로 작용하였다.

상단 덕트 개방효과의 경우 로 내 연소온도를 높게 유지시키고, 로 내 대류현상을 촉진시켜 열의 체류시간을 증가시키는 효과를 알 수 있었다. 또한, 유출구의 위치를 조정함으로써 로 내 온도분포를 균일하게 유지시킬 수 있었다. 운전 중지 시 급격히 로 내 온도가 하강되었

고 재가동 시에는 연료소모량이 증가하였다.

관 받침대로의 과잉의 보조공기 주입으로 인해 로 내 온도의 순간적 냉각효과로 국부적으로 불완전연소의 가능성을 관찰할 수 있었다. 따라서 관 받침대로 보조공기를 주입할 경우 열교환기를 거쳐 공기를 일정온도 이상으로 상승시킨 후 주입할 필요가 있었다. 이럴 경우, 관 받침대 사용으로 순간적 산소부족으로 인한 불완전연소 구간을 해소시킬 뿐만 아니라 연소시간이 단축되어 결과적으로 연소효율을 증대시켰다. 로 용적(1.05 → 1.79 m³, 13회차 이후)을 넓힌 결과, 점화 초기단계 가연성물질인 관 및 부장품 연소과정에서 발생하는 급격한 가스발생에 따른 일시적 불완전연소 현상을 근본적으로 해소할 수 있었다. 이에 따라 로 형상 및 크기에 맞는 로 내 적정 압력을 설정하였고, 로 내 압력 설정 시 산소농도 및 로 출구온도 등을 적정하게 고려할 수 있었다.

총 18회 pilot 화장으로 성능시험 중 주요 운전변수(상부 덕트 개방 유무 및 보조 연소공기 추가공급, 로 용적확장 등)의 영향을 요약한 결과를 Table 3에 나타내었다.

화장로 연료소비량의 경우, 기존 화장로의 경우는 41 Nm³-LPG/회로 매우 많은 양의 가스가 필요하였다. 그러나 개선된 화장로의 경우 상부 덕트를 개방하고, 필요시 보조연소 공기를 공급한 경우 9.4 Nm³-LPG 전후로 떨어짐을 보였다. 한편, 상부 덕트를 폐쇄한 경우 11.3 Nm³-LPG의 결과가 얻어졌다. 그리고 화장시간은 기존로의 경우 약 70 min이 소요된데 반하여, 조건별로 차이를 보이지만 상단 덕트 개방, 로 확장의 경우 가장 양호한 35 min으로 짧아진 결과가 얻어졌다. 이때 과잉공기비는 약 1.72배였고, 배출가스량은 증대됨을 확인할 수 있었다. 즉, 충분한 과잉의 연소공기 주입은 개선된 로 내에서 로 내 온도를 고온 조건으로 균일하게 만들뿐만 아니라, 연소효율을 극대화시켰다. 그래서 연료사용량을 저감시켰으며 가스흐름상 dead zone 발생을 최소화 시킴으로써 유체의 균일한 화장효과에 따른 화장시간을 단축시켰다.

Table 3에서 화장로 배출가스 중 NOx 및 CO 농도의 경우, 기존 화장로의 경우 NOx 농도는 낮은 값을 보인 반면, CO 농도는 상당히 높은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 개선화장로에서 주연소실의 연소가스 배출구의 조절에 따라 CO 농도는 낮아지고 NOx 농도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 우선 기존화장로의 경우, 주연소로 온도가 상대적으로 낮은 바 고온조건에서 발생하는 NOx 생성은 상대적으로 적은 수치를 보임을 알 수 있으나, 전반적으로 화장초기 급격한 화장연소 과정 중 연소공기의 부족으로 불안정연소가 일어나면서 CO 발생이 증대됨을 알 수 있으며, 상대적으로 개선화장로의 경우는 연소실의 용적을 증대시키고 추가적인 연소공기를 과잉으로 공급한 바, CO의 배출은 제어가 가능함을 확인할 수 있으며, 상대적으로 에너지 연소효율의 증대에 따른 높은 로 온도의 영향으로 NOx 발생량이 증대되는 경향을 보이며 대기배출허용기준을 초과하는 수치를 보여주나 이것은 통상 화장로 설비 후단의 방지장치를 통과하는 경우 제거될 수 있는 낮은 수치이다. 또한, 기존 설비 운전과정 중 점화 후 초기단계 발생 CO 및 NOx 수치와 비교할 경우 매우 낮은 수치로 화장로 버너운전 또한 안정된 상태로 운전됨을 알 수 있다. 기존 화장로의 수치는 P시 Y화장시설 현장 실측자료이며 배출가스 처리시설 후단의 배출가스 농도이다.

3.2. 실증 화장로 실험

3.2.1. 공로 실험을 통한 운전인자 도출

3.2.1.1. 로 내 압력

로 내 압력은 통풍설비에 의해서 형성되며, 로 내 연소가스를 적절

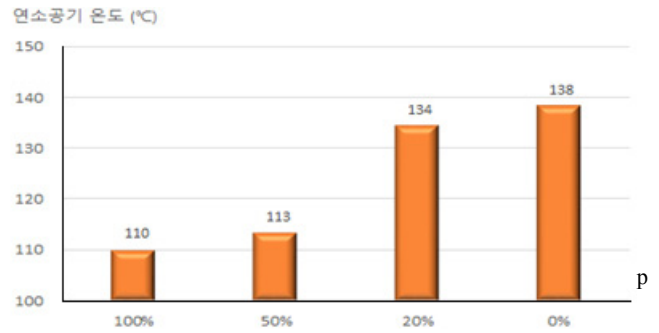


Figure 8. Combustion air temperature according to air mixing damper aperture ratio.

히 배출하여 최적의 연소 상태를 유지하기 위하여 적당한 압력을 설정하여야 한다. Pilot test 결과를 통해 로 내 압력이 낮을수록 로 내 과잉의 공기유입으로 인해 열체류시간 감소, 열손실이 증가함을 알 수 있었다. 이는 결과적으로 로 내 고온온도 유지가 어려워지고 열손실이 많은 만큼 에너지 소모량 및 연소시간을 증가시켰다.

또한, 최적의 로 내압 판단기준으로 화염의 형태(직선 방향, 관망구 등으로의 leak, 배출가스 중 산소 및 CO 농도 등을 활용할 수 있었다.

로 내 압력 설정은 버너 출력 540 Mcal/hr, 무부하 운전 시에 이루어졌으며, 육안 관찰, 산소농도를 측정하여 최적의 로 내 압력을 선정하였다. 연소공기량은 300 mmH₂O의 압력으로 주입되며, 이는 과잉공기비로 3.0~3.5의 수치이다. 로 내 압력은 -3~-5 mmH₂O, 산소농도 14.3~14.8%, 과잉공기비는 3.3 정도에서 연소성이 양호하였다.

3.2.1.2. 버너 출력

버너 출력에 따른 온도분포와 산소농도를 측정하여 최적의 버너 출력을 도출하였다. 버너 출력을 조정하여 불필요한 에너지손실을 줄이면서 연소시간을 단축시킬 수 있다. 기본적으로 발열량이 높을수록 연소속도가 빨라지지만 연료사용량을 줄이기 위해서는 피화장체의 자체 열량을 고려하여 시간대별로 버너 출력(연료공급)을 적정하게 유지 및 변화시켜야 한다.

Pilot test 시 도출한 최적 산소농도는 15~16%이며(과잉공기비 3.5), 이 범위 안에 들 수 있는 출력은 380, 450 Mcal/hr으로 판단된다. 반면에, 그 이상의 산소농도를 나타내면 공기과잉, 그 이하의 산소농도를 나타내면 연료과잉의 상태에 놓이게 된다. 이는 피화장체 연소 시 연소공기가 최고 25~26 Nm³/min 정도가 필요하게 되는데, 이때 주입되는 연료량이 많을수록 더 많은 산소량을 필요로 하게 되어 연소상태가 매우 불안정해질 수 있기 때문이다.

회분식 연소공정의 화장로 특성 상 연소공기는 일정량 이상으로 주입할 수는 없으며, 연소공기 주입량이 많아진다면 체류시간 저하로 완전혼합 연소는 더욱 어려워진다.

3.2.1.3. 연소공기 예열 온도

버너 출력 450,000 kcal/hr, 로 내 압력 -4 mmH₂O로 무부하 운전 시 연소공기 예열온도를 측정하였다. 공기혼합 댐퍼의 개구율에 따라 연소공기온도가 변화하고 있음을 확인하였다. 2차 열교환기 전단에 설치되어 있는 열교환기에 외부공기가 유입되어 예열과정을 거쳐 연소공기가 로 내에 주입된다. 공기혼합기는 재연소로에서 배출되는 배출가스에 외기를 혼합하는 냉각장치로 댐퍼를 폐쇄하면 외기와 혼합이 없어 배출가스의 열손실을 줄일 수 있다. 따라서 공기혼합 댐퍼

Table 4. The Temperature Distribution and Combustion Time according to Setting Internal Pressure as Main Combustor

| Setting internal pressure (mmH ₂ O) | In-combustor (burner, °C) | In-combustor (middle, °C) | Maincombustor (exit, °C) | Re-combustor (exit, °C) | Burning time (min) |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| -3 | 1,002 | 1,128 | 720 | 638 | 47 |
| -4 | 1,006 | 1,093 | 808 | 659 | 48 |
| -5 | 970 | 1,057 | 806 | 676 | 42 |
| -6 | 949 | 1,032 | 784 | 627 | 44 |

Table 5. The Temperature Distribution and Combustion Time according to Setting Temperature as Main Combustion Chamber

| Set Temperature (°C) | In-combustor (burner, °C) | In-combustor (middle, °C) | Main combustor (exit, °C) | Re-combustor (exit, °C) | Burning time (min) |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| 800 | 860 | 911 | 721 | 624 | 51 |
| 850 | 885 | 963 | 777 | 626 | 47 |
| 900 | 970 | 1,057 | 806 | 676 | 42 |

Table 6. Optimum Operating Conditions of Practically Applicable Crematory Facility

| Parameter | Optimum operating conditions |
|--|------------------------------|
| Burner maximum output | 450,000 kcal/hr |
| Internal pressure of combustion chamber | -4 or -5 mmH ₂ O |
| Burner low output hold time | 7 min |
| Set temperature as main combustion chamber | 900 °C |

를 폐쇄할 경우 실질적으로 폐열회수에 유리하다.

Figure 8에 공기혼합 챔퍼의 개구율에 따른 연소공기 온도를 나타내었다. 공기혼합 챔퍼를 100% 개방 시와 50% 개방 시, 비슷한 온도를 나타내고 있다. 폐쇄하였을 때 후단 온도가 매우 높아짐에 따라 여과 집진기의 열화 등 악영향을 줄 수 있다. 20% 개방 시와 폐쇄했을 때 유사한 온도를 보임에 따라 공기혼합 챔퍼의 개구율을 20%로 고정하고, 추후 배출가스 냉각온도를 관찰하였다.

3.2.2. 화장로 실증시험을 통한 최적 운전조건 도출

실제 화장로 실증설비의 가동시험을 통한 로 내부 및 출구온도를 측정하였고 연료사용량을 확인하였다. 주요 운전 변수들은 주연소로 온도, 로 내 압력, 버너 출력, 보조 연소공기 주입, 버너 low 출력 유지 시간이다.

3.2.2.1. 화장시간 단축을 위한 운전조건

로 내 압력에 따른 온도분포 및 화장시간을 Table 4에 나타내었으며, 이때 동일 실험조건은 주연소로 설정온도 900 °C, 최대 버너 출력 540,000 kcal/hr, 버너 low 출력 유지시간 5 min이었다. 로 내 압력 -3 mmH₂O일 때 관망구로 가스 누출, 로 내 온도변화가 크고 유체흐름이 원활하지 않았으며, 로 내 압력 -6 mmH₂O 경우 냉각속도가 비교적 빠르고 열 체류시간이 짧았다. 이를 통해 최적의 로 내 압력은 -4 또는 -5 mmH₂O임을 확인할 수 있었다.

또한, 설정온도에 따른 온도분포 및 화장시간을 Table 5에 나타내었으며, 이 때 동일 실험운전은 로 내 압력 -5 mmH₂O, 최대 버너 출력 540,000 kcal/hr, 버너 low 출력 유지시간 5 min이었다. 주연소로 온도는 900 °C 이하로 제한하였는데 그 이유는 로 내 온도가 과도하게 높

Table 7. Experimental Conditions of Burning Efficiency according to Auxiliary Combustion Air

| Auxiliary combustion air damper status | Burner maximum output (kcal/hr) | Internal pressure (mmH ₂ O) | Burning time (min) |
|--|---------------------------------|--|--------------------|
| Close | 540,000 | -5 | 50 |
| Open for 5 minutes | 450,000 | -5 | 52 |
| Open for the first 10 min | 450,000 | 4 | 45 |
| Open for the first 15 min | 450,000 | 4 | 41 |
| Open for the first 20 min | 450,000 | 4 | 36 |

아지면 열화에 의한 내화재 손상을 야기할 수 있으며, 로 수명이 단축될 수 있기 때문이다. 그러나 실제로는 로 내부 온도가 1,100~1,200 °C 이상 상승하기도 하였다.

3.2.2.2. 연소의 균일화를 위한 운전조건

실증 화장로의 최적운전조건은 아래 Table 6과 같이 도출되었다.

연소의 균일화를 위해서는 연소공기가 안정적으로 공급되어야하며, 재연소로 배출가스 중의 산소농도는 6% 이상 유지하는 것이 바람직하다.

화장로 운전 특성상 운전 초기 CO 농도가 매우 높다. 이는 운전 초기에 완전한 연소조건이 되지 못하고 있다는 것을 의미한다. 이러한 문제를 완화하기 위해 운전 초기에 보조연소공기를 주입하고 이에 따른 산소농도 및 대기오염물질 농도 변화를 측정·분석하였다. 운전조건은 로 내 압력 -4 mmH₂O 외 상기 최적운전조건과 동일하고, 보조연소공기는 연소공기챔퍼를 개방하여 주입하였다. 보조연소공기 주입에 따른 연소효율 실험조건은 Table 7과 같으며, 이 때 동일 실험운전은 주연소로 온도는 900 °C, 버너 low 출력 유지시간 7 min이었다. Figure 9에 대기오염물질 측정 결과를 나타내었다.

보조연소공기 주입에 의해 CO 농도가 상당부분 낮아지는 효과가 있었으며, 고농도 CO 배출구간이 축소되어 결과적으로 CO 배출량을 저감시킬 수 있었다. 보조연소공기를 주입하지 않을 경우 버너점화 후 25 min이 넘어서도 100 ppm 이상의 CO 농도를 나타내었고, 산소 농도는 거의 희박하였다. 한편, 보조연소공기를 5 min 또는 10 min간 주입하였을 경우에는 CO 농도저감 효과는 크지 않았다.

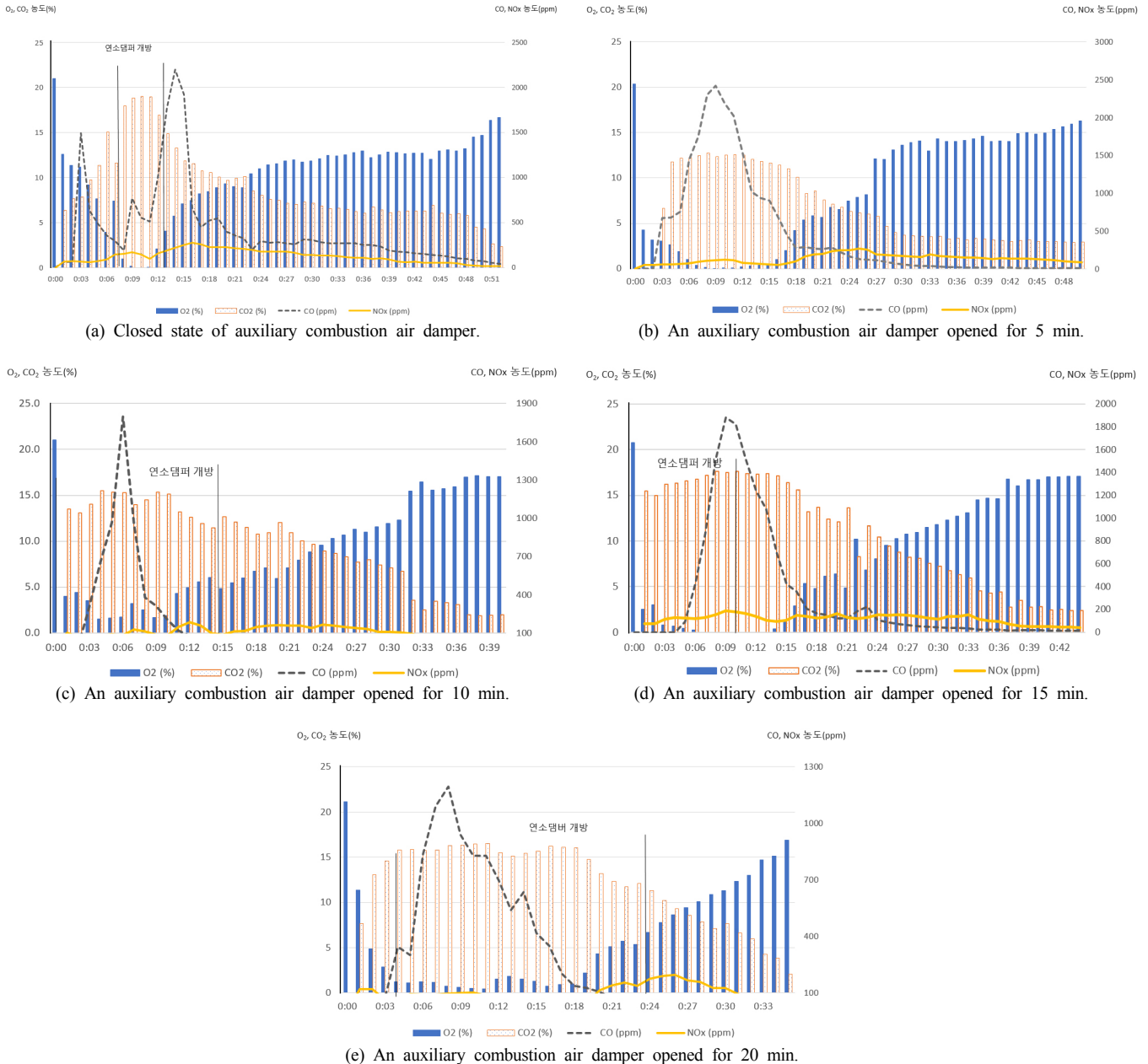


Figure 9. Air pollutant concentration changes with supplementary combustion air injection.

산소농도가 낮으면 연소공기가 그 만큼 부족하다는 의미이므로 피화장체가 급속도로 연소될 때 보조연소공기의 주입이 필요하다. 연소공기가 부족한 상태에서 추가로 연소공기를 주입하면 연소속도가 빨라지게 되는데 이는 피화장체의 연소부하가 급격히 증가하는 것으로 더 많은 산소를 필요로 하는 것이다. 특히, 버너 고출력 시 연료와 피화장체의 부하가 증가함으로써 연소에 필요한 산소요구량 또한 증가하게 된다.

점화 후 10 min 이상 보조연소공기를 주입하도록 하여 CO 등의 불완전연소생성물의 배출을 최대한 억제하였다. 대체적으로 연소공기 주입시간이 길수록 연소시간이 단축되는 경향이 있었다. 이때 주의해야 할 것은 주연소로의 출구온도를 모니터링하여 온도가 감소하는 것이 관찰되면, 연소 댐퍼를 닫아 과잉공기로 인한 열손실을 차단해야

한다. 피연소물이 거의 연소되면 발열량(로 내 유입열량)이 감소하여 온도가 하강하게 된다.

3.2.3. 실증설비의 성능시험 결과

연속 실증 실험을 수행하여 도출한 최적운전조건은 아래 Table 8과 같으며, 이 운전조건을 이용하여 성능시험을 진행하였고 목표성능을 모두 달성하였다.

한편, 대기오염물질은 CO 13.67 ppm, NOx 4.33 ppm, SOx 3.48 ppm 이었으며, 다이옥신 농도는 기준 0.01 ng-TEQ/Nm³보다 낮은 0.005 ng-TEQ/Sm³로 검출되었다. 기타 먼지, HCl, 수은 또한 기준 이하로 배출되었다. 그리고 SCR 설비에 의한 질소산화물의 저감율은 95.6% $\left(\left(1 - \frac{4.33}{98.8} \right) \times 100 \right)$ 이었다.

Table 8. Optimum Operating Conditions for Performance Test of Practically Applicable to Crematory Facility of Y Crematorium, Pusan

| Optimum operating item | Optimum operating conditions |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Burner maximum output | 450,000 kcal/hr |
| Internal combustor pressure | -4 or -5 mmH ₂ O |
| Burner low output hold time | 7 min |
| Set temperature as main combustor | 900 °C |
| Auxiliary combustion air damper open | The first 15~20 minutes |
| Top duct opening with main combustor | Yes |

Table 9. Comparison of Fuel Consumption and Combustion Time between Existing and Improved Crematory Facility

| Turn | Existing facility | | High-speed facility | |
|---------|-------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| | Time (min) | Fuel (Nm ³ /each) | Time (min) | Fuel (Nm ³ /each) |
| Average | 68 | 47.8 | 38 | 21.8 |
| 1st | 60 | 43.2 | 46 | 21.6 |
| 2nd | 74 | 52.2 | 37 | 23.6 |
| 3rd | 65 | 45.0 | 35 | 22.0 |
| 4th | 74 | 50.7 | 35 | 20.2 |

연료사용량 및 화장시간은 기존설비와 비교하여 Table 9에 나타나 있다.

화장시간은 68 min에서 38 min으로 30 min 단축되었으며, 이는 기존 화장로 대비 44.1% 단축된 결과이다. 또한, 연료사용량은 47.8에서 21.8 Nm³/회로 26 Nm³/회 절감되었으며, 이는 기존 화장로 대비 54.4% 절감된 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 저에너지 부하 화장로를 개발하였으며, 다음과 같은 기준으로 화장로를 설계·제작·시공·운전기술을 확보하였다. 피화장체의 연소 시 고형물의 완전연소를 위해 연소가스는 로 내 dead zone 생성 없이 고온의 균일한 흐름으로 유동하며, 이때 가스와 함께 배기 되는 고형물의 발생 없이 충분히 화장될 수 있도록 충분한 체류시간을 갖도록 설계하였다.

고온의 화장로 배출가스의 폐열을 회수할 수 있도록 적정 열교환기를 설계 적용하고, 버너 연소용 공기는 열교환기를 통해 배출가스 현열을 회수 연소공기로 적용함과 동시에 화장로의 운전온도를 단시간 내에 약 900 °C로 상승시켜 안정적으로 제어함으로써 화장시간을 단축시켰다. 화장의 진행에 따라 연소용 공기를 최대 heat consumption area에 충분히 공급함으로써 불안전 연소를 방지할 뿐만 아니라 로 내 온도분포를 균일하게 만들 수 있도록 조절함으로써 연료비 절감, 화장시간 단축 그리고 환경오염물질의 배출을 저감할 수 있었다.

결론적으로 실증 화장로에서 주요 운전변수들(주연소로 및 재연소

로 용적증대, 주연소로 상부 덕트 설치, 주연소로 버너용량 증대, 보조 연소공기 공급구 설치 등)의 최적값을 적용하면서 로 내의 최적 연소조건을 도출하였다. 이를 적용하여 화장시간 및 연료사용량을 최소화할 수 있었다. 즉, 화장시간은 기존 화장로 대비 44.1% 단축된 38 min이었고, 연료사용량은 기존 화장로 대비 54.4% 절감된 21.8 Nm³이었다.

References

1. Ministry of Health and Welfare (MOHW), *The Cremation Rate of Korea in 2018*, Korea (2019).
2. C. S. Yang, *Facility Standard and Spatial Model Planning for the Crematory Facilities*, Masters Dissertation, Hong-ik University, Seoul, Korea (2017).
3. K. H. Kim, H. Y. Jung, J. S. Park, O. J. Kwon, M. Y. Kim, J. I. Son, Y. H. Hong, S. W. Lee, and Y. L. Kim, Measures to prevent emissions of PCDDs/DFs from crematories in Korea, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(3), 279-289 (2013).
4. Y. T. Won, *Study on Combustion Characteristics and NOx Reduction Using Gas Burner in Cremation Incinerator*, Masters Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea (2007).
5. C. D. Junior, E. C. L. Muniz, and N. J. Cruz, Environment system: A new concept on cremation, *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.*, **6**, 363-380, (2007).
6. H. K. Kim and Y. S. Kim, *A Study on the Spatial Configuration of Korean Crematorium*, Masters Dissertation, Hong-ik University, Seoul, Korea (2012).
7. M. Mari and J. L. Domingo, Toxic emissions from crematories: A review, *Environ. Int.*, **36**, 131-137 (2010).
8. J. I. Dong, *Technological Feasibility Study for Eco-friendly Energy Saving by Crematory*, University of Seoul, Seoul, Korea (2014)
9. J. H. Kim, *Study to Establish Management Plans of Crematories*, Hanseo University, Chungnam, Korea (2007).
10. N. Takeda, M. Takaoka, T. Fujiwara, H. Takeyama, and S. Eguchi, Measures to prevent emissions of PCDDs/DFs and co-planar PCBs from crematories in Japan, *Chemosphere*, **43**, 763-771 (2001).
11. K. H. Kim, K. J. Bae, B. K. Choi, and S. H. Hong, Denitrification technology (SCR) trend and nanocatalyst, *Korea Ind. Chem. (KIC) News*, **10**(4), 45-59 (2007).
12. D. W. Koen and S. H. Hong, Selective catalytic reduction (SCR) technology trends for the nitrogen oxide removal of exhaust gas, *Korea Ind. Chem. (KIC) News*, **19**(5), 12-24 (2016).
13. M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanish, and R. Kitamura, Low-NOx combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace, *Energy Convers. Manag.*, **38**(10-13), 1353-1363 (1997).
14. Y. T. Won and S. M. Lee, Energy efficiency improvement and field scale study of crematory using computation fluid dynamics, *Appl. Chem. Eng.*, **30**(1), 95-101 (2019).
15. N. Takeda, M. Takaoka, T. Fujiwara, H. Takeyama, and S. Eguchi, PCDDs/DFs emissions from crematories in Japan, *Chemosphere*, **40**, 575-586 (2000).