

# 전산유동해석을 통한 화장로의 에너지 효율개선 및 실증연구

원용태 · 이승목<sup>†</sup>

가톨릭관동대학교 환경공학과  
(2018년 11월 5일 접수, 2018년 11월 14일 심사, 2018년 12월 13일 채택)

## Energy Efficiency Improvement and Field Scale Study of Crematory using Computation Fluid Dynamics

Yong-Tae Won and Seung-Mok Lee<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Catholic Kwnadong University, Gangneung 25601, Korea  
(Received November 5, 2018; Revised November 14, 2018; Accepted December 13, 2018)

### 초 록

한국의 2016년 화장률은 82.7%로 1994년의 20.5%보다 4배나 높았다. 화장률이 점차 증가함에 따라 화장시설이 부족 해지면서 화장률이 높아질수록 화장시설의 증설이 요구되고 있으며, 또한 화장로의 장기간 작동에 따라 많은 양의 연료가 사용되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 화장로의 열효율 특성을 최적화하고, 증가하는 화장에 대한 요구에 대응하는 화장 시스템을 제안한다. 본 논문의 목적은 전산 유체 역학(computational fluid dynamics, CFD)을 사용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 열전달 계수를 포함한 열흐름 특성을 조사하는 것이다. CFD 모델은 화장시설에 대한 현장 실험으로 검증되었다. 시뮬레이션 결과, 주 연소에서 연료 소비가 거의 25% 감소하고 체류 시간이 증가했다. 시뮬레이션을 토대로 개량된 연소기, 열교환기, 2차 연소 공기 시스템, 내화 및 단열재를 사용하여 개선된 화장로를 구성하였다. 현장실험 결과 에너지 소비가 약 54.4%로 줄어들었으며 연소 시간이 거의 20 min 단축되었다.

### Abstract

The cremation rate of Korea in 2016 was 82.7% which is four times greater than 20.5% in 1994. As increasing the cremation rate gradually, it cause a shortage of cremation facilities resulting in building more cremation facilities to meet the increasing inquiries on cremation or a large amount of fuels for the longer operation of the crematory. In this study, the crematory system optimizing its thermal efficiency characteristics and also responding to increasing inquiries on cremation was proposed in order for solving such problems, In particular, the heat flow characteristics including a heat transfer coefficient by performing a simulation using computational fluid dynamics (CFD) was investigated. The CFD model was validated with on-site experiments for a cremation facility. As a result of the simulation, the fuel consumption decreased nearly 25% and residence time increased in the main combustor. Also, the improved crematory was constructed with an expanded combustor, heat exchanger, second combustion air system, refractory and insulation material. From on-site experiments, the energy consumption was saved to approximately 54.4%, while the burning time reduced nearly 20 minutes.

**Keywords:** Crematory, Energy efficiency, Computation fluid dynamics, Burning time, Fuel consumption

## 1. 서 론

오늘날 국내의 장묘문화는 매장보다는 화장을 선호하는 양상을 띠고 있다. 특히 좁은 국토면적에 의한 묘지 부족, 화장에 대한 사회적 인식 또한 급속히 변화하면서 화장수요가 급속히 증가하는 추세에 있으며 신규화장로 사업의 확대 필요성에 대한 국가적 관심이 점차 높아지고 있다. 보건복지가족부의 통계자료에 따르면 1994년 20.5%에

불과했던 전국 화장률은 꾸준히 증가하여 2016년 82.7%에 도달했다 [1]. 이러한 증가 추세로 인하여 늘어나는 화장률에 의한 화장시설의 과부하, 화장시설 부족 문제는 매년 더욱 증가할 것으로 예상된다. 그러나 기존 화장로 설비의 환경오염원 배출 인식에 따른 지역주민들의 님비현상 심화로 화장로 설비의 추가설치가 용이하지 않은 형편이다 [2]. 2017년 화장장은 전국 59개소(화장로 346기)가 운영되고 있으나 급격한 화장률의 증가로 인해 기존 화장시설의 처리능력이 턱없이 부족한 실정이다[1,3].

국내에 설치된 기존 화장로 설비의 경우 대부분이 서양의 캐비넷 방식과 달리 에너지소모가 큰 대차형 화장로로써, 화장 후 유골의 수습을 위해 대차를 로체 밖으로 반출하여 수급하는 방식이다. 화장로는 기본적으로 에너지원으로 LNG를 사용하여 버너로 피화장체를 연

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

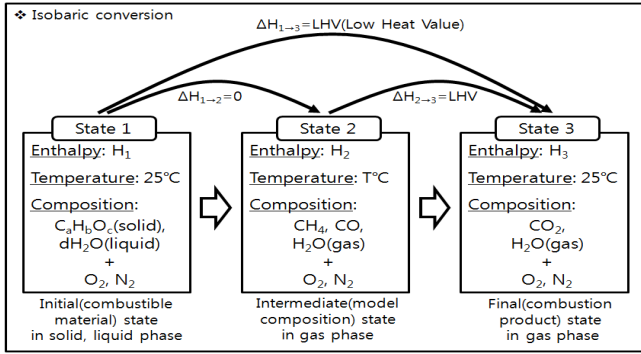


Figure 1. Phase change according to enthalpy flow.

소시키고 있으며, 이 과정에서 주연소로의 가스발생량은 초기 20 min 이내에 상대적으로 관 등이 쉽게 연소되면서 크게 증가하며, 이때 오염물질 및 열에너지의 발생량도 증가한다[4,5].

국내의 화장기술은 화장수요의 급증에 따라 확대 및 개발되어 왔으나, 대부분의 핵심기술은 해외 특히 일본의 화장기술을 모방하여 이루어졌고 일부 일본화장로 업체의 화장로 연소기술이 도입·적용되어 주로 오랜 기간 동안의 노하우를 바탕으로 한 연소기술 중심의 기술이 개발되어 적용되고 있다 국내에서 많은 설치실적과 경험이 축적되어 왔음에도 불구하고, 핵심기술이 뒤쳐진 이유는 설계·시공·운전경험의 기술 자료를 바탕으로 한 체계적인 연구개발 부족 및 국가적 규모의 지원이 부족하기 때문이다. 이에 따라 외국 기술에 종속되며 핵심 화장기술의 내재화로 연결되지 못하고 있는 실정이다[6].

따라서 급격히 증가하는 화장수요에 대응하고 화장로의 추가증설을 최소화할 수 있는 저에너지 부하 고속 화장로(이하 고속 화장로)를 개발하여 국내 실정에 맞는 화장로 설비의 설계안을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 또한 완전연소를 통한 오염물질 발생을 최소화시킬 수 있도록 적정 연소공기를 공급하는 로체 구조, 빠른 시간 내에 피화장체를 연소할 수 있는 광폭화염 형성 버너 및 버너운전기술을 적용한 화장로 설비를 실증한다. 실증시험을 통해 화장시간 및 에너지사용량, 운전조건 등을 측정·분석하고 기존 화장로시설을 대상으로 비교하여 국내 실정에 맞는 화장로 설계계획의 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 화장로시설의 선정 및 연구 절차

대표적인 화장로 방식으로 주연소실에서 사체(시신)를 버너의 직화 화염으로 전신을 연소시키는 구조로 되어 있으며, 대차를 사용함으로써 2차 연소실은 주연소실 상부에 위치하고 있다. 특징은 유족이 관의 출입을 확인할 수 있어 화장장의 대다수가 선택하고 있으며 회분식 반응기 형식의 비연속식 화장로로서 연소효율이 다소 떨어진다[7]. 최적의 연소조건을 실질적으로 파악하는 것이 불가능한 상황에서 개선된 화장로를 현장에 적용하기 어렵다. 이에 수치해석을 통해 주연소로와 재연소로의 구조를 개선하여 연소과정에서 충분한 체류시간 및 혼합, 균일한 온도분포가 주어지도록 화장로를 설계하고자 한다. 화장로 전산유체역학(CFD)의 목적은 다음과 같다.

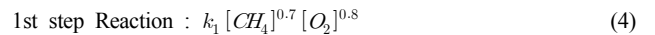
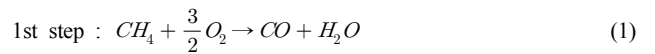
- (1) 기존 화장 주연소로의 연소 환경을 파악하고 문제점 도출 및 개선
- (2) 개선안으로 제시된 다양한 조건에 대하여 해석하고 최적 방안 도출

### (3) 최적방안으로 제시된 설비를 구축하고 이를 해석결과와 비교분석

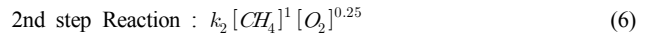
본 연구의 대상은 국내 A 화장로 시설 화장로이며, 현장측정 및 운전조건을 바탕으로 CFD 및 실증을 수행하였다. 고속 화장로에 대한 연구 절차는 ① 기존 설비에 대한 CFD, ② 개선안 도출, ③ 고속 화장로에 대한 CFD, ④ 고속 화장로의 실증시험으로 순으로 진행하였다.

### 2.2. 전산유체역학 연소해석

본 연구에서는 steady-state turbulent reacting flow에 널리 쓰이는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model이 적용되었다[8,9]. 화학반응 모델은 methane-air-2step reaction model이 화학반응모델로 사용되었으며, 화학반응을 난류에 적용시키기 위해 Finite-Rate/Eddy-Dissipation model이 사용되었다[10-12].



$$k_1 = (5.012E+11) T^0 \exp[-(2.0E+8)/RT] \quad (5)$$



$$k_2 = (2.239E+12) T^0 \exp[-(1.7E+8)/RT] \quad (7)$$

일반적으로 화장로, 소각로 같이 고상의 연소물질들을 대상으로 하는 연소로를 전산유체역학으로 해석할 때, 고상연료에서 발생하는 연소현상의 복잡성, 이를 표현하는 수학적 모델의 복잡성과 계산량 증가의 문제가 발생한다[13,14]. 따라서, 고상연료 내의 연소현상을 전산유체역학 계산 도메인에서 배제하는 방법인 고상연료를 기상연료로 전환하여 경계 조건을 설정하는 것이 일반적인 화장로, 폐기물 소각로 대상 전산유체역학 해석 방법이다. 본 연구에서는 소각대상물인 시체, 관, 부장품 같은 고상물질을 enthalpy가 동일한 가스상 물질(CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>O)로 변환시키는 기법을 개발하여 경계 조건을 설정을 하는데 사용하였다. 고상물질을 엔탈피가 동일한 가스상 물질로 변화시키기 위한 기본 개념을 Figure 1에 나타내었다.

1 bar, 상온(25 °C)의 고상연료와 실제 연소공기의 혼합물(State 1: 수분은 액상으로 존재)을 완전 연소하여 생성된 1 bar, 상온(25 °C)의 최종 연소생산물(state 3: 수분은 기상상으로 존재)의 엔탈피 차이는 고상연료의 저위발열량(lower heating value, LHV)이다. 여기에, State 1과 엔탈피 차이가 없고, State 3과는 LHV만큼 enthalpy 차이가 있는 1 bar, T °C의 기상상 연료와 실제 연소공기의 혼합물(State 2)을 각 element가 보존되도록 구할 수 있다. 이 State 2의 혼합물을 고상연료가 놓여있는 위치에서 경계조건으로 사용된다면, 고상연료 투입과 같은 질량, 에너지 투입을 유지하면서 고상연료 연소현상의 복잡성을 배제한 전산유체역학(CFD) 해석을 수행할 수 있다. 여기서, State 2의 기상상 연료 성분은 고상연료가 열분해되어 생성되는 가연분의 주요 성분으로 설정하는 것이 가장 옳은 방법이다. 그러나, 가연분의 주요 성분이 탄소수가 많은 고분자 물질일 경우 전산유체역학의 연소반응이 복잡해져 계산량이 크게 증가한다. 따라서 본 연구에서는 기상상 연료 성분을 CH<sub>4</sub>과 CO로 가정하였다. 또한, State 2 혼합물의 온도 T °C는 전산유체역학 계산 도메인에서 고상연료와 기상상 물질들의 inter-

Table 1. Element Composition of Body, Coffin, and Burial Goods

Composition (%)	Moisture	Combustible						Ash	Low Heat Value (kcal/kg)
		C	H	O	N	S	Cl		
	56.30	21.96	2.66	14.11	0.65	0.15	0.0	4.17	1,605.8

Table 2. Operation Condition of Crematory in a Facility

Operation condition		Existing crematory	Improved crematory
Burning time		approximately 1 hour	
Combustible	body, coffin, burial goods	85 kg/hr Air ratio 1.5	85 kg/hr Air ratio 1.5
	LNG (main burner)	40.19 Nm <sup>3</sup> /hr Air ratio 1.4	30.0 Nm <sup>3</sup> /hr Air ratio 1.1
	LNG (Axillary burner)	0.0 Nm <sup>3</sup> /hr Air ratio 1.4	0.0 Nm <sup>3</sup> /hr Air ratio 1.1
Air leak in Axillary burner and etcetera spot		0.3530405 kg/s	0.0 kg/s
Radiation loss on chamber wall		-22.2 kW	-24.5 kW

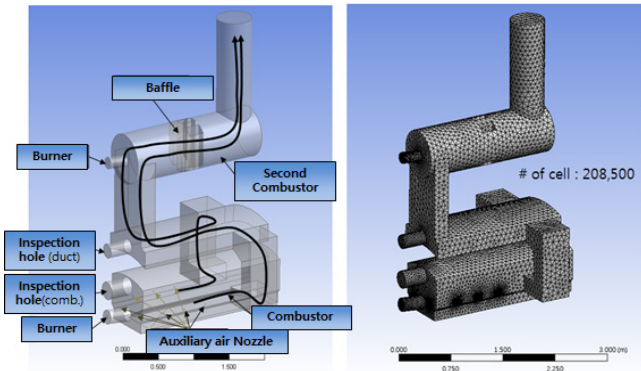


Figure 2. Geometry and mesh structure of existing crematory.

face에서 온도를 나타내고, 일반적으로 경험적 추측으로 구해진다.

State 2의 가스상 연료 성분을 CH<sub>4</sub>, CO로 가정하여 그 혼합물의 몰 분율을 구하는 계산방법을 아래에 나타내었다.

$$\text{Temperature: } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_a H_b O_c (\text{solid}) + d H_2 O (\text{liquid}) + m (O_2 + (79/21) N_2) \quad (8)$$

$$\text{Temperature: } T \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x CH_4 + y CO + z H_2 O (\text{gas}) + d H_2 O (\text{gas}) + n O_2 + (79/21) m N_2 \quad (9)$$

$$\text{Temperature: } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$(x + y) CO_2 + (2x + y) H_2 O (\text{gas}) + d H_2 O (\text{gas}) + (n - 2x - y/2) O_2 + (79/21) m N_2 \quad (10)$$

고상연료의 삼성분, 원소조성, 화장로의 공기비, 경험적 추측으로부터 a, b, c, d, m, T이 주어지고, 아래의 element 보존식 (11-13)과 enthalpy 보존식 (14)로 식 (15)를 만족하는 x, y, z, n을 찾는다.

$$C : a = x + y \quad (11)$$

$$H : b = 4x + 2z \quad (12)$$

$$O : c + 2m = y + z + 2n \quad (13)$$

$$\Delta H_{2 \rightarrow 3} = (T - 25^\circ\text{C}) x C_{p, CH_4} + y C_{p, CO} + (z + d) C_{p, H_2 O} + n C_{p, O_2} \quad (14)$$

$$+ (79/21) m C_{p, N_2} - [(x + y) h_{CO_2}^f + (2x + z + d) h_{H_2 O}^f - x h_{CH_4}^f + y h_{CO}^f + (z + d) h_{H_2 O}^f]$$

$$\min \left\{ \left( \frac{\Delta H_{2 \rightarrow 3} - LHV}{LHV} \right)^2 \right\}, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, n \geq 0, \quad (15)$$

### 2.3. 화장로 경계조건

현재 운전되고 있는 기존 화장로에서의 구조적 문제점을 해소할 수 있는 개선사항을 바탕으로 새로운 화장로를 설계한 후, CFD를 통해 비교·분석하였다. 분석결과를 기반으로 실증설비를 제작 시험함으로써 고속 화장로에 대한 검증은 수행하였다.

현재 운전되고 있는 피화장체의 원소조성을 Table 1에 나타내었으며, 기존/고속 화장로 모두 동일하게 적용하였다. 피화장체는 사체, 관, 부장품 여기서, 각 위치에서의 공기 leak량은 배가스량과 출구에서 산소농도로 물질, 열수지를 통하여 역으로 추정하였다.

화장로의 운전조건에는 화장로 구조 및 유량, 연료량 등의 변경사항을 반영하였으며, 운전시간을 1 h으로 동일하게 설정하였다. 기존/고속 화장로의 화장로 운전조건은 Table 2와 같다. 화장로에서 주연료로 사용하고 있는 LNG의 발열량은 에너지법 시행규칙(제5조 1항 관련)에 따라 9,420 kcal/Nm<sup>3</sup>으로 하였다. 또한 복사열손실은 연소로 및 덕트의 벽면으로의 방열손실을 나타내는 것으로 투입열량 및 해당구간의 부피를 고려하여 -24.5~-22.2 kW로 가정하였다.

### 2.4. 화장로 형상 및 격자구조

전산유체역학적으로 연소현상을 해석하기 위해서는 대상 화장로의 형상을 2D 또는 3D로 모델링하여, 그 모델링된 형상에 finite control volume (또는 cell)이 되는 메쉬를 입힌다. Figures 2, 3에 기존/고속 화장로를 모델링한 형상과 메쉬구조를 나타내었다.

기존 화장로는 사체가 화장되는 화장로본체(주연소로), 미연소분의 완전연소를 목적으로 하는 재연소로, 그리고 이를 연결하는 연결부로 구성되어있다. 특이한 점은 연결부의 체적이 상당히 컸다. 고속 화장로의 경우 기존 화장로에 비하여 형상을 단순화하고, 주연소로 및 재연소로의 용적을 확장하였고, 연결부를 축소시켰다. 기존/고속 화장로

Table 3. Partial Volume of Crematory in a Facility (unit: m<sup>3</sup>)

Classification	Main combustor	Second combustor	Combustion connector	Sum
Existing crematory	1.1264	0.8009	0.9041	2.8313
Improved crematory	2.1043	1.7863	0.6807	4.5714
Rate of change (%)	86.8	123.0	-24.7	61.5

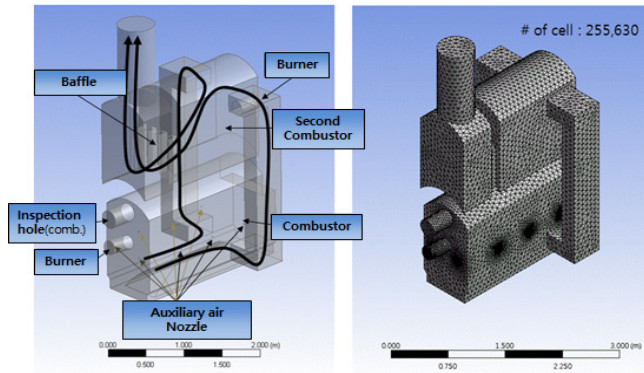


Figure 3. Geometry and mesh structure of improved crematory.

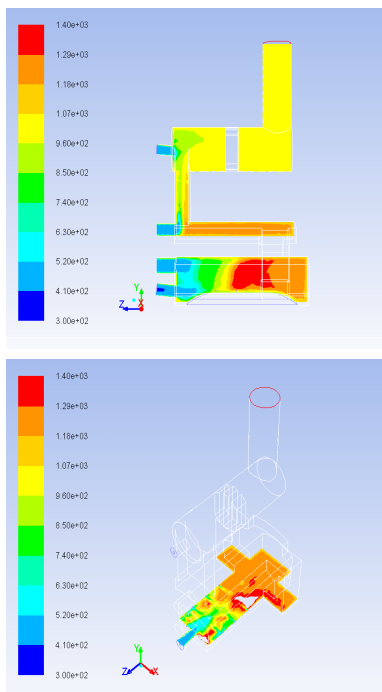


Figure 4. Temperature profile of existing crematory (unit: K).

의 각 부위의 체적은 Table 3에 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 기존 화장로의 CFD 연소해석 및 개선방안

기존 화장로 운전조건과 일치하는 경계조건 및 유체물성을 입력하여 전산유체역학 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 Figures 4~7에 나타내었다.

기존 화장로의 연소현상은 주버너에서 토출된 연료가 안정된 화염

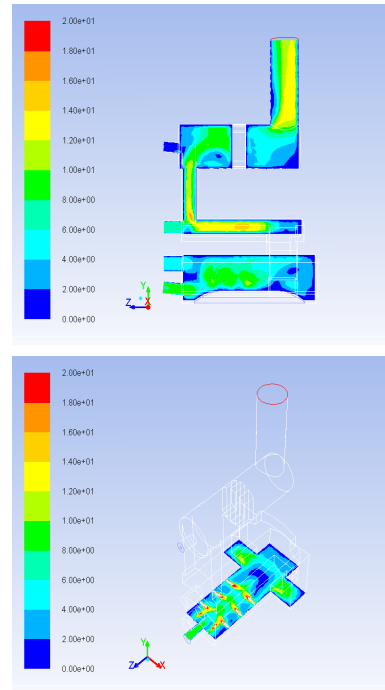


Figure 5. Velocity profile of existing crematory (unit: m/s).

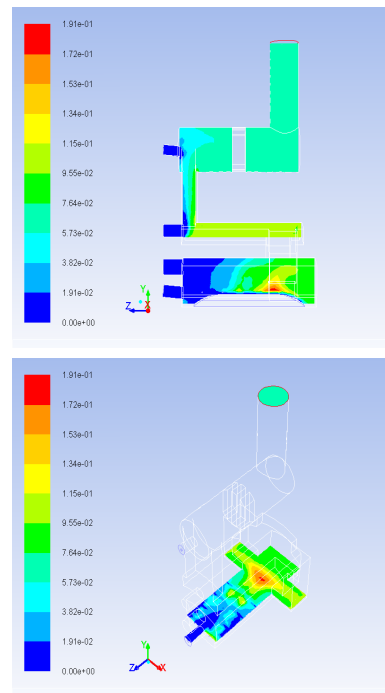


Figure 6. CO<sub>2</sub> mass fraction profile of existing crematory.

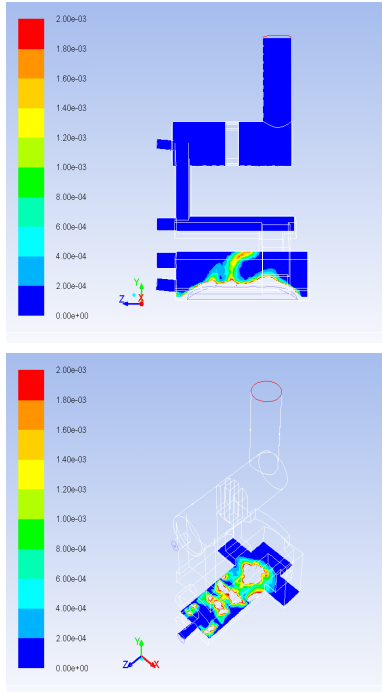


Figure 7. CO mass fraction profile of existing crematory.

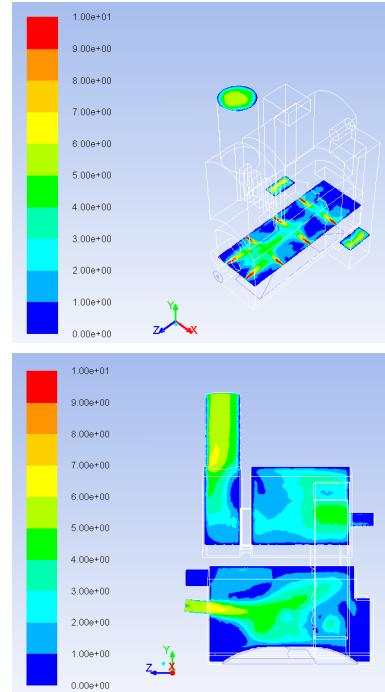


Figure 9. Velocity profile of improved crematory (unit: m/s).

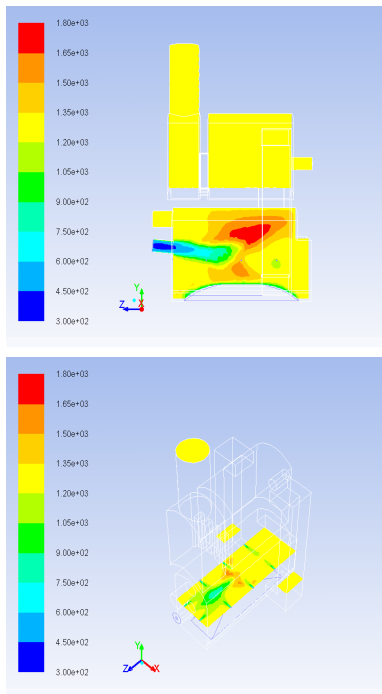


Figure 8. Temperature profile of improved crematory (unit: K).

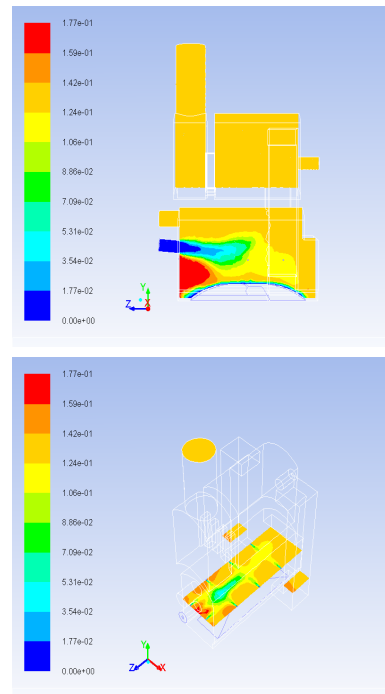


Figure 10. CO<sub>2</sub> mass fraction profile of improved crematory.

으로 형성되기 전에 관에 부딪혀 사체 앞부분은 연소가 충분히 일어나지 않는 것을 확인하였다. 이로 인해 전반적으로 주연소로의 온도가 낮고 후반부에서 연소가 발생하기 시작한다. 온도가 높은 주연소 영역이 주연소로 후반부와 재연소로가 연결된 통로까지 형성됨을 알 수 있다.

CFD 결과를 바탕으로 보았을 때, 연소실 내 유체의 체류시간이 짧

고 열손실이 많아 기존 화장로의 본체 체적 대비 연료가 과다하게 투입됨에도 긴 화장시간이 유지되고 있는 것으로 파악된다.

일반적으로 좋은 연소는 버너에서 토출된 연료가 버너 앞에서 안정된 화염을 형성하여 완전연소를 달성하고, 생성된 연소열을 최대한 연소로에 전달하는 것이다[15]. 그러나 기존 화장로에서 연소현상은, 주버너에서 토출된 연료가 안정된 화염으로 형성되기 전에 관에 부딪

Table 5. Comparison of Simulation Data

Classification		Existing crematory	Improved crematory
Flow rate (Nm <sup>3</sup> /hr)		1,924	742
Exhaust gas of main combustor	Residence time (sec)	2.1	10.2
	Outlet temperature (°C)	750.2	968.7
Average outlet concentration	O <sub>2</sub> (%)	12.96	4.54
	CO <sub>2</sub> (%)	4.40	8.73
	CO (ppm)	151	66
Volumetric heat release rate (MW/m <sup>3</sup> )		0.536	0.233

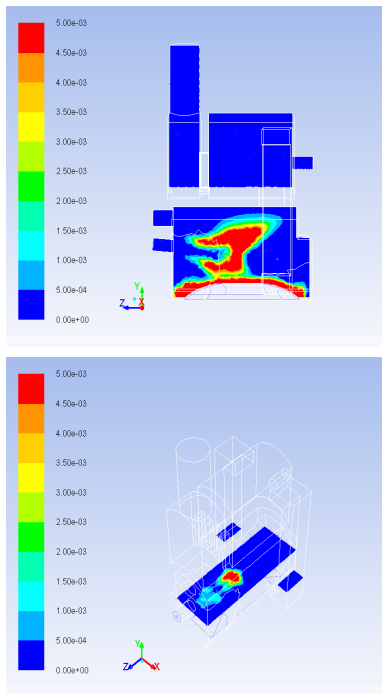


Figure 11. CO mass fraction profile of improved crematory.

혀, 사체 앞부분은 연소가 충분히 일어나지 않아 온도가 낮고 후반부에서 연소가 발생하기 시작한다. 그림에서 온도가 높은 주연소 영역이 1차 연소실 후반부에서 2차 연소실 연결된 통로까지 형성됨을 알 수 있다. 또한, 연소실 내의 CO뿐만 아니라 CO<sub>2</sub> 농도 자체가 낮게 나타났는데, 이는 연소영역이 제대로 형성되지 않음을 알 수 있다. 전반적으로 기존 화장로의 본체 체적 대비 연료 투입량 및 현열손실이 과다한 것으로 판단하였으며, 이와 같은 이유로 기존 화장로의 높은 연료사용량과 긴 화장시간이 유지되고 있는 것으로 파악된다. 실제 기존 운전되고 있는 화장로를 조사하여 본 결과 연료사용량은 약 35-45 Nm<sup>3</sup>/hr, 화장시간 약 1 h로 조사되었다. 이때 기존 화장로 본체 기준으로 연소실 열부하는 약 0.536 MW/m<sup>3</sup>이다.

기존 화장로를 전산유체역학으로 해석함으로써 다음과 같은 개선 사항을 도출할 수 있었다. 첫째, 주버너의 LNG 투입량 및 공기 Leak를 최대한 줄여 연소실 열부하를 감소시킨다. 둘째, 화장로 본체의 체적을 넓히고 폐열을 회수, 유입공기를 예열하여 열의 체류시간을 늘린다. 셋째, 관 하부에 보조연소공기를 주입하여 피화장체로의 연소공기 유입을 원활하게 한다.

### 3.2. 고속 화장로의 CFD 연소해석

기존 화장로의 운전조건과 일치하는 경계조건 및 유체물성을 입력하여 전산유체역학 시뮬레이션을 각각의 경우에 대해서 수행하였고, 그 결과를 Figures 8~11에 나타내었다.

고속 화장로의 CFD 결과, 주버너에서 토출되는 연료는 비교적 안정된 화염을 형성하였고, 노즐에서 토출되는 보조연소공기의 영향으로 연소로 상부와 하부에서 고온영역을 형성하였다. 사체 표면의 온도는 길이방향에 따라서 변화가 거의 없었다. 화염은 관 부근에서 최고온도(1,000 °C~1,300 °C)를 형성하며 이루어져 화장시간의 단축에 도움을 줄 수 있는 것으로 예상되었다.

로 내 유속의 분포도 피화장체 주변에서 가장 큰 속도를 유지하는 것으로 파악되었다. 배기가스 중 CO<sub>2</sub> 농도 프로파일을 살펴보면 재연소로 본체로 유입되기 전에 모든 연소는 완결되는 것처럼 보여, 화장로 본체는 연소를 위한 충분한 체류시간을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 주연소로 내에서 CO 농도가 높게 형성되었는데, 연소로 후반부터 CO<sub>2</sub> 농도가 증가함과 동시에 CO 농도가 급감하는 양상을 띠었다. 이는 연소과정에서 발생된 CO는 주연소로 내에서 바로 CO<sub>2</sub>로 산화되는 것으로 그만큼 연소성이 좋음을 의미한다. 이와 같은 해석결과로부터 연소실 형상이 연소실의 유동패턴, 특히 연소조건 형성에 아주 중요한 역할을 하는 인자임을 알 수 있다. 따라서 연료사용량이 기존 화장로보다 적은 30 Nm<sup>3</sup>/hr (연소실 열부하 : 0.233 MW/m<sup>3</sup>)으로도 비슷한 사체 연소시간을 달성할 것으로 판단된다. 다만 재연소로 출구와 후단설비의 연결 덕트에서 유체의 분포가 불균일하여 재연소로 출구에 분배기 설치가 더 필요한 것으로 분석되었다.

기존/고속 화장로의 CFD 결과를 비교하여 Table 5에 나타내었다. 고속 화장로의 CFD 결과를 살펴보면 기존 화장로보다 체류시간이 증가한 반면 연료사용량은 25% 절감하였음을 알 수 있다.

### 3.3. 고속 화장로의 실증

전산해석 결과를 토대로 연소로 확장 및 함께 적정 유량의 연소공기 주입으로 연소가스 유동 및 로 내 온도분포를 균일하게 만들 수 있도록 설계하였다. 또한, 고온의 화장로 배출가스의 폐열을 회수할 수 있도록 적정 열교환기를 적용하였다. 열교환기를 통과한 연소공기를 로 내에 주입하여 주연소로 출구온도를 단시간 내에 상승시켰다. 광폭화염 형성 버너를 적용 및 보조 연소공기를 피화장체에 충분히 공급함으로써 불완전연소를 방지하고 연소조건을 안정화하였다. 이와 같이 화장로를 설계하여 연료사용량 절감과 화장시간을 단축할 수 있도록 하였다.

실제 A 화장로에 실증설비를 제작, 설치하였고 최적의 운전조건을 도출한 후 고속 화장로에 대한 운전 데이터를 취득하였다. 실증시험은 각각 3회 이상 실시하여 기존 화장로와 고속 화장로의 시험결과를

Table 6. Comparison of On-site Experimental Data

Classification		Existing crematory	Improved crematory
Burning time (minute)		60	38
Combustible low heat value (kcal/burning time)	Body, coffin, burial goods	135,678	
	LNG (main burner)	383,394	205,356
Flow rate (Nm <sup>3</sup> /hr)		10,471	742
Exhaust gas of main combustor	Outlet temperature (°C)	600~1,100	800~1,000
	O <sub>2</sub> (%)	11.5	4.5
Average outlet concentration	CO <sub>2</sub> (%)	6.5	8.7
	CO (ppm)	111	14

평균하여 비교하였다. 시험결과는 Table 6에 나타내었다. 기존 화장로의 경우 연소버너의 화염이 불안정하여 주연소로 출구온도 변화가 심하고 CO 농도도 높게 나타났다. 반면에 개선화장로의 경우 CO 농도 및 주연소로 출구온도가 다소 안정화된 것을 알 수 있었다.

A 화장시설의 고속 화장로는 실증시험 중 로 내의 최적연소조건을 도출하여 적용, 화장시간 및 연료사용량을 최소화할 수 있었다. 결과적으로 화장시간은 38 min으로 20 min 이상 단축하였고 연료사용량은 21.8 Nm<sup>3</sup>/회로 기존 화장로 40.7 Nm<sup>3</sup>/회 보다 46.4%를 절감하였다.

#### 4. 결 론

기존 화장로의 운전결과 및 CFD 시뮬레이션 결과를 통해 개선사항을 도출하였고 일반적인 상업용 설비현장을 검토하여 개선 화장로의 설계안을 도출하였다. 연구결과 기존 화장로와 비교하여 CO 농도 감소 및 내부온도가 일정하게 형성되고 연소성이 향상되는 것을 확인하였다. 전반적으로 화장로 내부에서 연소가 안정적으로 일어나 연료사용량도 저감될 것으로 파악되었다. 실제 국내 A 화장시설에 실증설비를 적용하여 운전한 결과, 연료사용량 및 화장시간을 각각 46.4% 및 36.7%까지 저감할 수 있었다. 또한 본 연구결과에 따르면 연소로의 구조개선 이외에도 로 측·하부에 보조연소공기 주입 등의 연소공기 주입방법, 공기 유출의 최소화, 고온 내화/단열재의 적용, 적절한 화염길이를 갖는 버너의 설치, 폐열회수에 의한 연소공기 예열, 적정량의 연소공기 유입 등에 유의하고 고속 화장로 설계·운전에 반영하여야 한다.

본 연구를 통해 고속 화장로를 적용하여 운전함으로써 화장로시설의 효율을 극대화할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 이를 통하여 증가하는 화장수요 증가에 따른 화장로 신설비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 고속 화장로를 확대 적용하는 것뿐만 아니라 지역주민의 민원 및 주변 환경 대기오염 방지시설에 대한 추가 연구가 이루어져 기존 화장로 설비의 환경오염물질 배출에 대한 인식을 변화시킬 필요가 있다.

#### References

1. Ministry of Health and Welfare (MOHW), *The Cremation Rate of Korea in 2016*, Korea (2017).
2. Y. W. Seo, *A Study of Architecture Plan of a Cremation Facility according to the Changes of the Funeral Culture*, Masters Dissertation, Hong-Ik University, Seoul, Korea (2015).
3. C. S. Yang, *Facility Standard and Spatial Model Planning for the Crematory Facilities*, Masters Dissertation, Hong-Ik University, Seoul, Korea (2017).
4. 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).
5. H. K. Kim and Y. S. Kim, *A Study on the Spatial Configuration of Korean Crematorium*, Masters Dissertation, Hong-Ik University, Seoul, Korea (2012).
6. Y. T. Won, *Study on Combustion Characteristics and NOx Reduction Using Gas Burner in Cremation Incinerator*, Masters Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea (2007).
7. S. T. Kim, *A Small Power Generation Using Waste Heat of Crematory Facility*, Masters Dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (2016).
8. R. W. Pitz and J. W. Daily, Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward facing step, *AIAA J.*, **21**, 1565-1570 (1983).
9. C. Hirsch and B. Tartinville, Reynolds-Averaged Navier-Stokes modelling for industrial applications and some challenging issues, *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, **23**, 295-303 (2009).
10. C. K. Westbrook and F. L. Dryer, Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames, *Combust. Sci. Technol.*, **27**, 31-43 (1981).
11. A. Li and O. Deutschmann, Transient modeling of chemical vapor infiltration of methane using multi-step reaction and deposition models, *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 4976-4982 (2007).
12. C. Fureby, Large eddy simulation modelling of combustion for propulsion applications, *Philos. Trans.*, **367**, 2957-2969 (2009).
13. Y. Achawangkul, N. Maruyama, M. Hirota, C. Chaichana, and T. Sutabutr, Analysis of the biomass gasification-based shape of the crematory's secondary chamber by using computational fluid dynamics, *J. Eng.*, **4**, 17-23 (2014).
14. Y. Achawangkul, N. Maruyama, M. Hirota, C. Chaichana, M. Hirota, A. Nishimura, and P. Teeratitayangkul, CFD analysis of double-chambered crematories using biomass producer gas as a fuel source, *Int. J. Mod. Eng. Res.*, **3**, 3493-3499 (2013).
15. S. S. Badge, A. A. Bhole, and P. Kokil, Design and analysis of energy efficient crematorium for eco body burning, *Int. J. Emerg. Trends Technol.*, **3**, 4129-4133 (2016).