

전산유체역학을 이용한 단일 송풍기가 적용된 공냉식 연소설비의 효율개선

김민철¹, 손병현², 이재정¹, 박흥석^{3*}

¹(주)유성 중앙연구소 ²한서대학교 인프라시스템학과, ³울산대학교 건설환경공학부

Enhancement of combustion efficiency of a air-cooled combustor system with single F.D. Fan Using CFD

Min-Choul Kim¹, Byung-Hyun Shon², Jae-Jeong Lee¹, Hung-Suck Park^{3*}

¹R&D Center, Yoosung Co.,Ltd.

²Department of Infrastructure System, Hanseo University

³Department of Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan

요약 본 연구는 multi fan 방식의 “공랭식 연소설비”의 공정관리상의 문제점을 single F.D. fan 으로 대체하여 개선시키기 위해 CFD 진행하였고, 연소로 내 유동조건 변화를 분석하여 문제점을 확인하였다. 이를 개선하기 위해 연소공기 주입구조를 변경하였고, 구조 변화에 따른 연소효율 개선을 수치해석으로 평가하였다. 또한 실제 연소설비에 수치해석 결과를 반영하여 구조개선을 한 후 개선 전·후의 연소효율을 실험적으로 측정하였다. 먼저 기존 Single F.D fan 이 적용된 연소설비에 대한 수치해석을 통해, 2개의 유로로 공급되는 연소공기가 각 유로의 마찰력 차이와 압력의 변화로 인해 연소로 내에서 공급비율이 불균질하게 되어 선회방식의 연소조건을 위한 축 형태의 난류형성이 어려움을 확인하였다. 이를 개선하기 위해서 연소로에 주입하는 공기 공급 방식을 두 가지로 나누어 수치해석을 하였다. 첫 번째 방식은 연소공기를 외벽에서 180 ~ 360° 회전 후 예열된 연소공기가 주입되는 구조에 대하여 검토하였고, 두 번째는 연소로 내에는 선회할 수 있는 베인(vane) 구조를 적용하여 연소로 밖에서 1차 열교환 후 연소로 내부에 접선방향으로 연소공기가 주입되는 구조에 대하여 검토하였다. 그 결과, single F.D. fan을 가진 공랭식 연소로에 선회방식으로 공기를 주입할 경우, 연소로 외벽의 냉각과 연소로 내부의 완전혼합 유지를 위해 이중 냉각벽을 가지는 덕트 구조를 적용하는 것이 연소조건을 최적화하는데 바람직한 것으로 나타났으며, 실제 운영중인 설비에 적용하여 개선 전·후의 연소효율을 비교한 결과 연소효율이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract This study investigated the enhanced combustion efficiency of an "air-cooled combustion system" with single F.D. fan, and performed a numerical analysis for the operation and design conditions to increase the combustion efficiency. The combustion efficiency in an actual combustor was compared before and after the structure modification. Numerical analysis for application of a single fan revealed the difficulty of forming a turbulence for circular combustion conditions. This is because the supply ratio of combustion air supplied into 2 flow paths becomes irregular in the combustion furnace due to a change in friction force and pressure in each flow path. Subsequently, two methods of supplying air into the combustion furnace were analyzed numerically to obtain the optimal combustion conditions of an air-cooled combustion system. The first method involved injecting the preheated combustion air after a 180~360 degree rotation from the outer wall, whereas in the second method, the combustion air was injected into the combustion furnace in a tangential direction after primary heat exchange outside the combustion furnace, by applying a rotatable vane structure in the combustion furnace. Results reveal that application of a single F.D. fan to the air injection into a rotatable combustion furnace is desirable for optimization of the combustion conditions for applying a duct structure having a dual cooling wall for the cooling of the outer wall of the combustion furnace, and for maintaining perfect mixing in the combustion furnace. We therefore confirmed enhanced combustion efficiency by comparing the actual combustion efficiency before and after structure modification.

Keywords : CFD, Combustor, Path lines, Temperature Distribution, Velocity Distribution

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21DPRB-C161883-01).

*Corresponding Author : Hung-Suck Park(Univ. of Ulsan)

email: parkhs@ulsan.ac.kr

Received March 11, 2021

Revised May 10, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

최근 폐기물을 고효율로 에너지화하여 신재생에너지 생산효율을 향상시키기 위한 다양한 기술개발과 연구들이 진행되고 있고, 생산된 에너지는 전기, 스팀 등으로 전환시켜 공단 내 에너지를 다소비하는 공정에 활용할 수 있도록 사용처 확보와 네트워크 연결 등 생태산업단지 구축을 위한 많은 활동들이 진행되고 있다[1,2].

폐기물을 에너지화하는 공정에서 이용하는 물질로는 폐기물 연료제품인 SRF (Solid Refuse Fuel), 자원재활용 대상인 ASR (Automobile Shredder Residue), 그리고 일반 사업장폐기물이 대상으로 사용되고 있으며, 이와 같은 폐기물 연료를 효과적으로 에너지화하기 위해서 연소설비 성능개선과 에너지 회수율 확보를 위한 연구도 지속적으로 진행되고 있다[3].

그리고, 폐기물 연료의 에너지화를 위해서는 관련법에 준하여 허가를 받도록 되어 있는데, ASR은 파쇄잔재물재활용업에 등록하여 에너지회수시설에서 에너지회수율을 60% 이상 만족시켜야 하고, 폐기물을 대상으로는 재활용업에 등록하여 소각열회수시설에서 75% 이상을 만족시켜야하는 등 높은 수준의 에너지회수효율을 확보하도록 법제화 되어 있다[4,5].

60% 이상의 높은 에너지회수효율을 확보하기 위해서 기존의 연소방식인 스토키, 로타리킬른, 유동상 방식과 다른 형태인 공랭식 연소설비 개발이 진행되고 있으며, 고품연료제품 전용사용시설, 전처리설비 그리고 폐기물 처리시설 등과 같은 다양한 공정에서 활용하기 위해 단위기술 개발이 진행되고 있는 실정이다[14,15].

특히, 공랭식 연소설비에서 사용되고 있는 연소공기 주입설비는 터보팬을 적용하여 동일한 유량으로 나눠 연소공기를 주입하는 방식으로 목적에 따라 F.D. fan(압입 송풍기)을 single 또는 multi type으로 사용할 수 있는데 최근에는 1대의 fan으로 연소공기를 분배하여 주입하는 single type을 적용하여 초기설치비와 운영비를 줄이고, 관리포인트를 최소화하기 위한 시도가 진행되고 있다. 구체적으로는 2대의 fan을 사용하여 연소공기를 주입하는 multi fan의 경우 조입 시 한쪽 fan의 유량만을 변경시키거나, 설비 내 복잡한 관리요소 증가로 인해 동일 유량을 양측면에 나누어 주입하지 못하는 경우가 발생되며, 이로 인해 연소로 내 선회류를 유지하기 어렵고 초기 설치 시에는 2대의 fan설치에 따른 공간 확보로 인해 연소설비의 투자비 증가와 유지관리 포인트 증가에 따른 작업부하 및 운영비 증가 등의 문제점이 있었다. 이

와 함께 기존에 이용되는 공랭식 연소방식은 외벽을 통해 유입된 연소공기가 반회전한 후 연소로 내부로 직접 유입되거나 연소로 내벽의 공기커튼을 형성한 후 유입되는 방식을 사용하였으나 이러한 연소로 외벽 공기냉각방식은 외부로 방열되는 출열을 충분히 회수하지 못해 설비외부에 열충격을 주게 되어 내구성을 저하시키거나 선회흐름을 방해하여 불완전연소를 일으키는 원인이 되기도 한다. 이런 경우 불완전연소로 인해 일산화탄소의 발생량이 증가되고 선회류로 인한 원심력이 줄어 입자상 물질이 후단으로 배출될 수 있어 대기오염배출기준을 만족시키기 어려워져 운전조건 확보에 문제점이 있었다 [6,7].

이와 같은 문제점을 극복하기 위해 연소로에서 single fan 적용이 검토되고 있으며, 이를 위한 설비개선과 운전조건 및 설계요소 도출이 요구되고 있고, 기존 설비의 개선이나 신규 pilot설비 및 실증설비설치를 통한 검증은 많은 시행착오와 비용이 소요되므로 전산모사를 통한 분석이 매우 효율적인 방법으로 제시되고 있다. 이러한 방법은 연소로내 가스의 유동을 다양한 조건에서 수치적으로 분석할 수 있어 다양한 분야에서 활용되고 있다[8,9].

따라서 본 연구에서는 연소설비의 운전효율을 향상시키기 위해 single fan이 적용된 연소설비를 대상으로 연소공기가 연소로 내부로 유입될 때 형성되는 선회류 및 연소공기 혼합여부를 파악하고, 연소공기 주입조건과 최적 연소조건을 유지할 수 있는 설계인자를 도출하여 고효율 연소로 설비의 개선 및 연소효율 향상에 활용하고자 한다.

2. 수치해석

연소란 가연물과 산소와의 반응으로 에너지를 얻는 방식으로 효율적 연소를 위해서는 매우 많은 인자들을 고려해야하므로, 실증설비 실험을 통해 연소조건을 고찰하고자 할 때에는 많은 시행착오와 연구기간이 필요하다. 따라서 전산유체역학을 이용한 모사분석은 실증설비 실험을 통한 유동해석보다 다양한 조건에서 결과를 예측할 수 있으며, 유동을 지배하는 방정식들을 충분히 적용하게 되면 많은 연소조건 변화를 규명할 수 있어 실험적으로 규명하기 어려운 부분까지 조건변화를 통해 결과를 예측할 수 있는 장점이 있다[10,11].

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 수치해석 프로그램인 FLUENT를 이용

하여 모사하였고, 수치해석에는 난류 방정식들의 이산화 방법으로 유한체적법(finite-volume method)을 사용하였다. 그리고 모든 수치해석은 상류차분 도식(upwind differencing scheme)을 이용하여 수행하였으며, 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 해의 수렴안정성이 높은 SIMPLE(Semi Implicit Method Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다.

또한 하향 이완법(under-relaxation)을 사용하여 수렴성을 높였으며, 반복 계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 잉여치(Residual ; R)를 체크하면서 잉여치가 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다 [10].

$$\max |\phi^{n+1} - \phi^n| \leq 10^{-3} \quad (1)$$

2.2 해석 모델 및 경계 조건

선회류 방식의 연소설비는 원통 형태이며, 연소로 내부에는 내화물과 단열재 없는 구조로 처리용량은 1.5 ton/hr이다. 로는 연료투입장치, 연소실, 배기통으로 구성되고, 연료투입장치는 연소실 하부에 위치하여 외부에서 연료가 정량적으로 주입될 수 있도록 설계하였다.

연소실 외벽은 이중구조로 되어 있어 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 송풍기를 통해 외부의 공기가 연소실 내통과 외통사이를 통과하면서 냉각효과를 가지고, 외부 공기는 통과하면서 예열되어 예열공기로서 연소실 내부로 주입된다.

주입위치는 1차 연소공기가 60%(Q의 50% + 10%) 수준으로 하단부에 연료와 접촉을 늘일 수 있도록 턴테이블과 만나는 바닥면에서 주로 선회하면서 혼합되도록 설계하고, 2차 연소공기는 40%(Q의 30% + 10%) 정도로 연소배가스의 완전연소를 위해 연소로 상단부에 투입하여 연소로 중심으로 연소공기가 난류혼합이 될 수 있도록 설계하여 적용하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 연소설비와 공기주입 뎀퍼의 입체도와 3차원 수치해석용 Grid와 3차원 모형을 구현하고 있으며, Control volume구성에 사용된 격자수는 1,127,682 cells이다.

본 연구에 사용된 시료는 고품질연료제품이며, 원소조성 및 특성은 Table 1과 같이 수분 1.54%, 회분 8.90%이었으며, 발열량은 7,240 kcal/kg을 적용하였다.

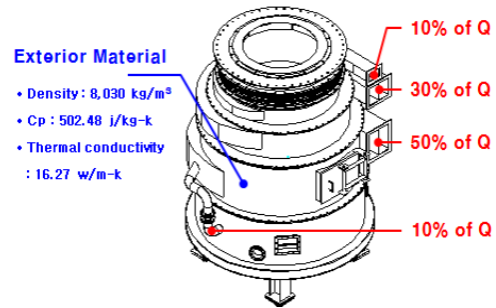


Fig. 1. Furnace materials & flow rate.

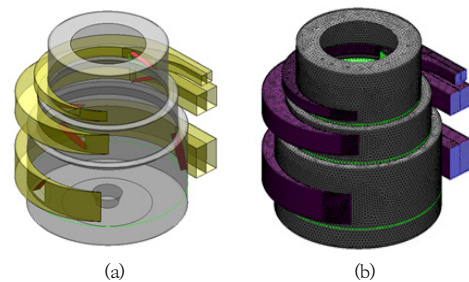


Fig. 2. Features of Single F.D fan type furnaces.
(a) Feature of Furnace (b) Grid Configuration

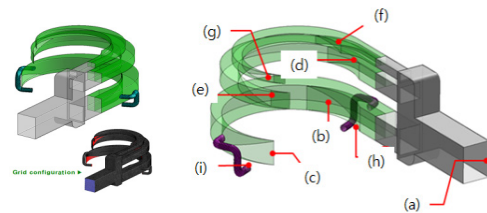


Fig. 3. Features of damper structure & grid configurations.

운전조건과 주입구별 연소공기 분배량은 Table 2, Table 3에서 정리한 바와 같이 연료투입량은 1.5 ton/hr, 연소공기 유량은 26,158 Sm³/hr, 연소용 공기는 크게 주연소용 공기로서 대상물의 건조, 연소조건인 향상을 위하여 예열하여 공급되는 1차 연소송기(Q의 50% + 10%), 불완전 연소물질의 완전연소, 연소로 출구 온도 과다 상승방지를 위해 주입되는 2차 연소공기(Q의 30% + 10%)로 구분하여 공기비 2.1로 설정하여 전산모사를 수행하였다.

Table 1. Characteristics of waste fuel(SRF)

Contents	Unit	SRF[13]	Sample
Shape & Size	mm	50 under (Dia) 100 under (Length) Pellet type	Accept
LHV	kcal/kg	over 3,500	7,240
Water	wt, %	10 under	1.54
Ash	wt, %	20 under	8.90
Cl	wt, %	2.0 under	1.00
S	wt, %	0.6 under	0.01
Metals	Hg	1.0 under	0.5
	Cd	5.0 under	4.3
	Pb	150 under	44.9
	As	13.0 under	N.D.

Table 2. Operating conditions

Item	Unit	Condition
SRF Feeding	ton/hr	1.5
Excess air ratio	-	2.1
Flow rate	Sm ³ /hr	26,158

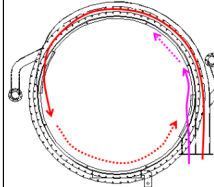
Table 3. Simulation results for the distribution of air flow rate per each injection pipes

No.	Flow rate (m ³ /hr)	Distribution (%)
a total	26,158	-
b lower section	8,366	32
c	4,122	16
d middle section	5,339	20
e	3,956	15
f upper section	2,009	8
g	1,008	4
h branch section	864	3
i	493	2

연소공기 주입부는 기존 구동하고 있는 형태인 Case1 과 2가지 형태로 개선된 Case 2, 3으로 구조 변경한 형태를 적용하였으며, Case 별로 제어체적을 수정하여 적용하였다.

설비를 최적화 운전하기 위한 설계를 목적으로 Table 4와 같이 연소공기주입부를 유입유로 형태에 따른 유동 특성을 해석하여 기류 균일도에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

Table 4. Case studies for the outer wall structure of combustor

Cases	Structural improvements	Conceptual diagram (exterior wall)
Case 1	- Conventional type - Inside entrance : direct inflow into the combustor. - Outside entrance : entered into the combustor after 180 degrees rotation.	
Case 2	- Improvement type-1 - Inside entrance : direct inflow into the combustor. - Outside entrance : entered into the combustor after 180 degrees rotation. - Additionally, installation of the inner wall	
Case 3	- Improvement type-2 - Inside entrance : direct inflow into the combustor. - Outside entrance : entered into the combustor after 180 degrees rotation. - Additionally, installation of the inner wall : Injection of air through the vane	

한 개의 F.D. fan을 적용하였을 때 연소공기의 분배에 따른 선회속도와 온도분포를 확인하기 위해서 먼저 기존설비의 경우를 Case 1로 두고 모사를 진행하였으며, 구조는 연소공기 주입부에서 공급되는 연소공기가 한 개의 층으로 설계된 외벽을 통해 유입되는 형태이다. 그리고 실증설비로 설계 적용이 가능하도록 두 가지의 경우로 구조를 개선하여 모사비교를 진행하였다. 첫 번째 개선형태인 Case 2는 외벽을 한 겹을 추가하여 2중벽에서 추가로 방열을 줄일 수 있도록 하되 공기 냉각구조를 첫 번째와 동일하게 하였고, 두 번째 형태인 Case 3은 2중벽에 슬릿을 추가하고, 이중벽 내에는 공기흐름 분산을 위해 베인을 넣어 2중 냉각 구조로서 공기 냉각을 연소로 내벽 접선면에서도 이루어지도록 설계하여 외벽냉각과 함께 연소공기를 충분히 예열하여 주입할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조개선에 따른 효율개선 효과

3.1.1 속도장 개선효과 비교

연소로 내에서 연소공기의 이송속도는 연소로 내 외벽 냉각효율과 연소공기 완전혼합효과 증대를 위해 단별로 최적의 속도가 유지되어야 한다. 특히 내벽 접선면을 빠른 속도로 선회하는 경우 냉각효과를 증대하고 클링커가 발생할 수 있는 원인을 제거할 뿐만 아니라 연소로 중심부에는 예열된 연소공기가 유입하는 효과를 가지게 되는 등 연소로 내에는 안정적인 운전조건을 확보할 수 있기 때문에 속도장의 분포를 확인하여 연소로 내 연소상태를 예측할 필요성이 있다.

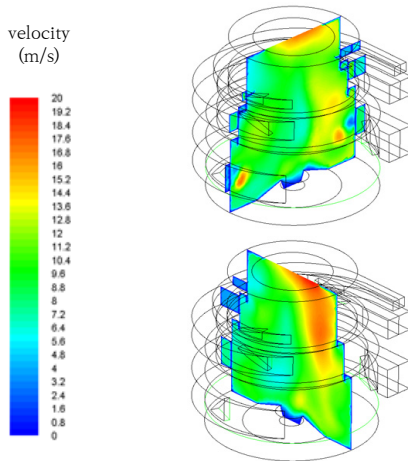


Fig. 4. Vertical velocity fields of combustor for Case 1.

이에 전산모사를 진행한 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 연소로 우측 1차 주입부에 연소공기가 25 ~ 200% 높은 량이 주입되어 국부적으로 높은 유속이 발생되고 있으며, 연소로 내에는 혼잡한 흐름이 나타나고 중심부에 유로가 생기지 않는 모습을 확인할 수 있다. 또한 복잡한 유로형성으로 원활한 선회류 형성이 되지 않을 뿐만 아니라 흐름간의 간섭이 발생되어 연소로 내 속도장이 불규칙한 형태로 형성되고 있음을 알 수 있다.

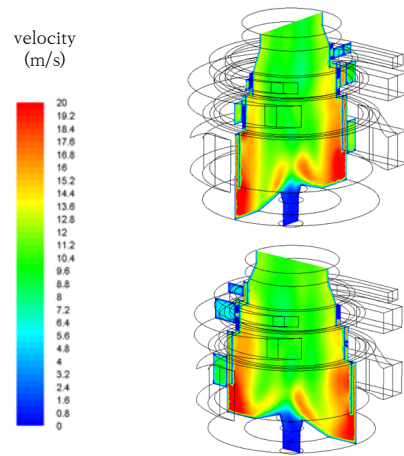


Fig. 5. Vertical velocity fields of combustor for Case 2.

Fig. 5에서는 Case 2의 모사결과를 나타내고 있으며, 연소로 내벽 접선면의 유속이 20 m/s 이상으로 유입된 후 중심으로 갈수록 8.4 m/s 로 줄어들고 있고, 연소공기 주입공간과 연소배가스가 배출되는 연소로 출구와의 유속분포가 구분되어져 외벽 접선면쪽의 연소공기 유입이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 유입연소공기가 중심부로 직접 이송되어 유속구간이 Fig. 6에 비해 넓은 구간을 형성하고 있다.

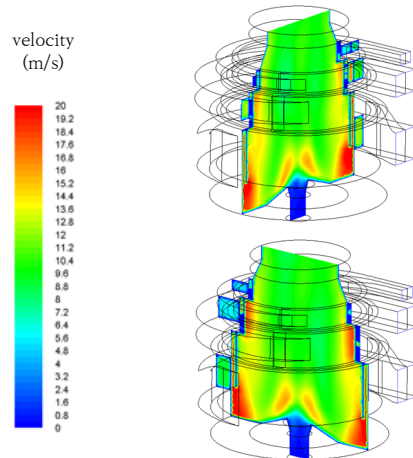


Fig. 6. Vertical velocity fields of combustor for Case 3.

Fig. 6에서는 Fig. 5와 유사한 형태로 접선면을 따라 형성된 유로에 의해 내벽 접선면의 유속이 높은 것으로 나타나고 있으며, 중심부에는 연소공기의 유속이 8 m/s에서 12 m/s로 형성되어 연소로 내벽 접선면을 따라 유속이 높게 나타나지만 중심으로 갈수록 유속이 안정화되는 형태를 나타내었다.

3.1.2 기류장 개선효과 비교

연소실에서 배가스와 연소공기가 만나 혼합되는 과정에서 기류흐름을 파악하기 위해 공기혼합형태, 기류의 흐름분석을 통한 흐름방해여부 그리고 선회기류의 안정성을 살펴보았으며, 단별로 수평의 기류장을 확인하여 연소로 상, 중, 하단에 형성된 선회기류가 각 단별로 미치는 영향을 확인하였다.

Fig. 7에서는 각 연소실별 진입유로가 연소공기 유입덕트에서 직접 연소로 중심부로 유입되는 구조로 되어있어 편류가 발생하여 유속이 지점별로 달라 선회조건을 형성하지 않고 우측하단부로 치우친 형상을 보이고 있다.

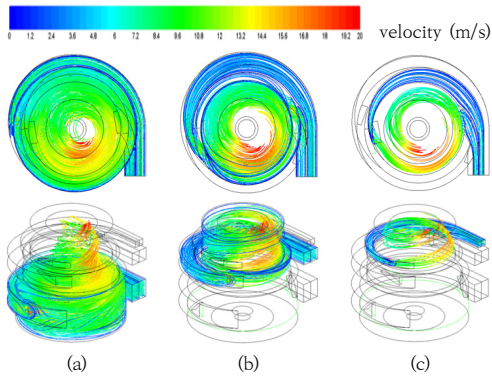


Fig. 7. Horizontal velocity fields & path lines of combustor for Case 1.
(a) lower section (b) middle section (c) upper section

또한 하단부에 형성된 유속은 8.4 m/s ~ 12 m/s로 형성되고 있지만 중심부에서는 상단부로 배출되는 부분이 13.2 m/s 이상으로 배출되고 있어 외벽에서 충분한 열교환을 하지 못하고 출구로 배출되거나 빠른 유속을 가지는 우측 연소공기와 만나 불균형한 형태로 혼합되는 형상을 보이고 있으며, 이로 인해 연소공기 혼합이 어려울 것으로 판단된다. 이런 경우 연소로 내 Turbulence가 형성되지 않아 연소분위기가 나빠져 연소효율을 떨어뜨릴 수 있으며, 온도장에도 영향을 주어 연소로 국부 과

열로 이어져 설비운영에 문제를 일으킬 수 있다.

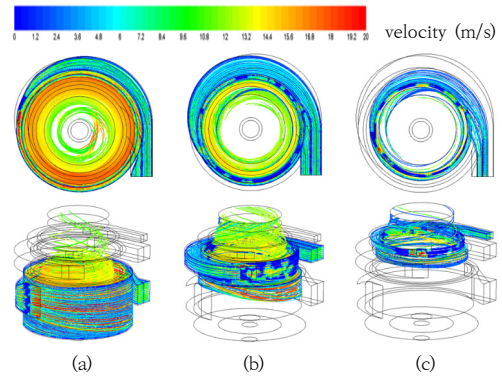


Fig. 8. Horizontal velocity fields & path lines of combustor for Case 2.
(a) lower section (b) middle section (c) upper section

Case 2와 Case 3을 적용한 경우에는 Case 1에 비해서 기류가 균일하게 형성되고 있고, 선회속도는 내벽 벽면쪽에서 중심부로 갈수록 유속이 낮아져 정상적인 선회흐름이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8 및 Fig. 9에서는 각 단별 선회속도와 선회류형성이 중심부에서 균형잡힌 형상을 가지고 있지만, Fig. 8에서는 연소공기가 중심부로 20 m/s 이상으로 유입됨에 따라 이러한 선회흐름의 영향으로 온도분포의 변화가 나타나는 것으로 보인다.

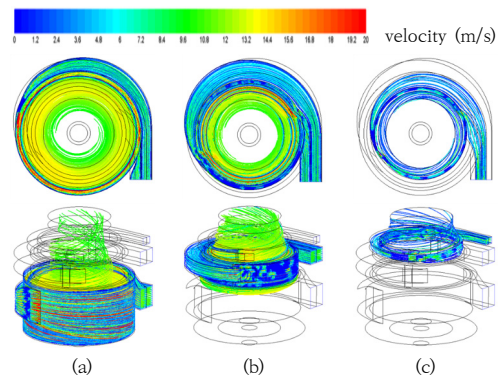


Fig. 9. Horizontal velocity fields & path lines of combustor for Case 3.
(a) lower section (b) middle section (c) upper section

Fig. 9에서는 연소로 주입부에서 외벽을 통해 180~360°를 선회한 후 연소로 벽면으로 연소공기가 유입되어

벽면에서의 유속은 13.2 ~ 14.4 m/s로 유지되는 것으로 나타났고, 유입되는 연소공기 흐름간 간섭이 적어 각 단별 기류 혼합이 원활해지고 기류별 간섭도 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 7의 유동장 형상과 비교 시 Fig. 9에서는 외벽 접선면을 충분히 선회한 후 연소로 출구 중심으로 토출되고 있어 사영역이 줄어들어 따른 체류시간을 확보하여 재연소 구간에서의 연소시간을 1초 이상 가지게 됨에 따라 연소로 내 일산화탄소 및 미연분 발생을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.3 온도장 개선효과 비교

일반적인 연소장치와 달리 공랭식 연소장치는 단열재 및 내화재를 사용하지 않고 단열, 냉각 및 예열효과를 제공하기 때문에 연소공기가 유입되는 유로 형태에 따른 연소로 내 온도분포를 전산모사하여 공랭효과와 영향을 확인하였다.

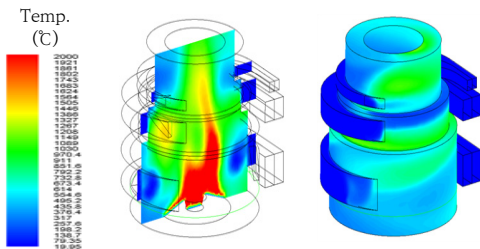


Fig. 10. Vertical temperature fields of combustor for Case 1.

Fig. 10에 나타난 온도장을 보면, Case 1의 경우 기류장과 속도장 결과와 마찬가지로 선회축이 이동하여 연소로 중심부 온도장이 제대로 형성되지 않고 있으며, 연소로 내부 화염온도가 중단부의 기류에 눌러 하단부에 화염이 집중되는 온도분포가 확인되었다. 또한 각 연소실 구역별로 형성된 선회류들이 충돌하고, 중간단에서 투입되는 연소공기는 하강기류를 형성하면서 하단부에서 형성된 선회류를 방해해 연소실 중단부, 상단부가 800℃까지 상승하여 외벽에 열부하를 주는 등 설비의 내구성에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

특히, 온도가 과열되는 경우에는 연소상태를 저하시켜 Clinker를 생성하게 되고, 국부과열로 설비내벽의 내구성을 저하시키는 등 안정적인 설비 운전제어가 불가능해 질 수 있어 이를 개선하기 위한 설계조건을 확립하여

연소조건을 균일하게 유지할 필요성이 있다.

Fig. 11에서는 이중으로 냉각 후 연소공기를 유입토록 하여 선회류 발달에 방해되지 않도록 하고, 각 연소실별로 하향 선회흐름을 형성시켜 연소기 하부로부터 상승하도록 개선한 결과, 선회류가 연소기 외벽으로부터 점진적으로 연소기 중심부로 집중되어 형성됨에 따라 화염이 수직으로 형성되어 온도분포를 균질하게 함으로써 외벽 열부하에 대한 공냉효과를 최적화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 연소공기 유입부에서 공급되는 연소공기가 내벽 전선면보다는 중심으로 향해 있어 온도장이 우측으로 기울어지게 됨에 따라 연소설비 외벽 냉각효과가 한쪽 측면부분에는 미치지 않을 우려가 있다.

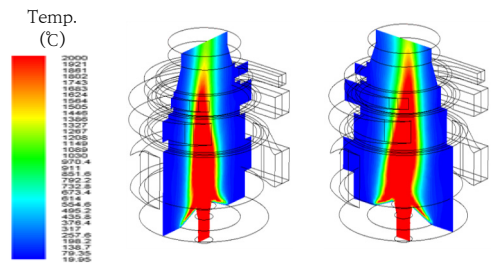


Fig. 11. Vertical temperature fields of combustor Case 2.

Case 3을 적용한 Fig. 12에서는 유입되는 연소공기가 2중으로 외벽을 냉각시키면서 연소로 내벽 접선방향으로 유입되는 경우로 연소공기가 연소로 내벽으로 유입되는 과정에서 접선면 유속이 높지만 접선면을 벗어난 후 유속이 13.2 ~ 14.4 m/s로 유지되면서 기류간의 간섭이 줄어들게 되어 속도장과 기류장에서의 흐름과 유사하게 온도장의 분포가 유지됨을 확인할 수 있었다.

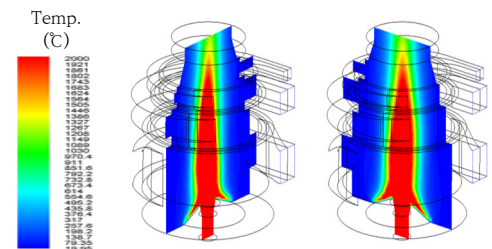


Fig. 12. Vertical temperature fields of combustor Case 3.

3.2 연소효율 개선효과

유동해석 결과를 토대로 Case 1에서 발생된 문제점을 확인하였고, 이를 극복하기 위해 연소로를 개선된 유동흐름을 보인 Case 3을 구조개선을 통해 1.5톤/시 규모의 실증연소로에 적용하여 실험을 수행하였다. 연소실험은 Table 2에 제시한 조건으로 연속운전 후 24시간이 지난 시점을 기준으로 안정적인 연소조건 상태에서 강열감량, 산소농도, CO농도 그리고 Dust 값을 측정하여 기존 운영되었던 Case 1과 비교하였고, 실증 설비에서의 운전시 연소효율 개선효과를 분석하여 Table 5에 제시하였다.

강열감량이 16.53%에서 3.45%까지 줄어들고, CO가 190.8 ppm 에서 36.8 ppm 그리고 Dust 농도가 16.7 mg/Sm³ 에서 5.25 mg/Sm³ 으로 저감되는 것으로 나타나, 설계구조 개선이 연소로 내 유동흐름을 개선하여 강열감량, CO 값을 저감시켜 연소효율 증가에 영향주고 있는 것으로 판단되며, 이를 통해 연소설비의 연소공기 주입구조 개선에 따른 연소효율 개선효과를 확인할 수 있었다.

Table 5. Combustion conditions of Case 1 & 3

Item	Case 1	Case 3	Remark
L.L. (%)	16.53	3.45	
O ₂ (%)	14.2	14.4	
CO	190.8	36.8	
Dust	16.7	5.25	

4. 결론

본 연구의 대상 설비인 공랭식 연소장치에서 연소공기 주입구조에 따른 속도장, 기류장 그리고 온도장에 대한 전산유체역학 모사와 실증실험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연소로 내 유입되는 연소공기의 유입속도는 최대 20 m/s 이상으로 나타났으며, 유입되는 연소공기의 방향과 내벽 접선면에서의 유속분포가 속도장을 안정화시키는데 영향을 미치게 되어 접선면에서의 공기유입구조의 영향이 설계시 중요한 인자로 확인되었다.
- 2) 연소공기 주입시 주입부에서 유입되는 연소공기간의 간섭이 기류흐름을 방해해 적절한 유속을 가지더라도 구조에 따라 기류흐름 충돌로 편류가 발생

될 수 있음을 확인하였고, 연소공기 주입구조 변경으로 로 내 기류를 안정화시켜 로 내 연소환경을 개선하고 체류시간을 1초 이상 확보할 수 있도록 해 일산화탄소와 입자상물질 이송을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 속도, 기류, 온도장에 대한 전산유체역학 모사를 진행한 결과, 속도장과 기류장에서 발생한 유체간의 간섭과 속도변화 차이로 인해 온도장이 한쪽 부분으로 치우치게 되고, 로내 온도편중이 발생해 설비의 안정적인 운전을 저해하는 것으로 나타나므로 연소공기는 접선면으로 주입되어 편류를 최소화할 수 있도록 개선되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 실제 설비에 CFD 모사결과를 반영하여 설계개선에 활용한 결과 연소분위기의 척도인 강열감량과 CO 농도가 기존 16.53%, 190.8 ppm에서 3.45%, 36.8 ppm 으로 저감되어 설계변경을 통한 연소효율 개선을 확인하였다.

References

- [1] S. K. Behera, E. R. Rene, M. C. Kim, H. S. Park, "Performance prediction of RPF-fired boiler using artificial neural networks", Int. J. Energy Res., DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3108>, 2013.
- [2] K. H. Kim, H. W. Kim, H. S. Park, "Energy Recovery Potential of Industrial Waste Generated from Ulsan Industrial Complexes", J. of Korean Society of Urban Environment, Vol.11, No.2, pp.223-229, Sep., 2011.
- [3] J. K. park, Y. C. Seo, J. S. Lee, H. M. Yoo, W. S. Yang, S. W. Park, B. H. Han, H. S. Choi, S. J. Cho, K. B. Lee, W. H. Kim, "Studies on Physicochemical Characteristics and Optimal Melting Condition of Automobile Shredder Residue in a Melting Furnace", J. of Korea Society of Waste Management. Vol.30, No.2, pp. 189-198, March 2013.
- [4] The Department of the Environment : Act on the Resource Circulation of Electrical and Electronic Equipment and Vehicles.(2014)
- [5] The Department of the Environment : Waste Control Act.(2014)
- [6] J. W. Lee, S. C. Kim, J. M. Yang, "Numerical Analyses for the Effect of Swirl on the Combustion Characteristics and Residence Time in the Pyrolysis Gas Combustor", J. Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol.17, No.4, pp. 480 ~ 488, 2000.
- [7] H. K. Kim, J. S. Chae, S. S. Park, H. S. Ahn, K. H. Kim, T. I. Ohm, "Numerical Calculations for Optimal Design of Combustor for Wastes Insulating Oil

Containing PCBs Using High Temperature Heat Sources", J. Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol.27, No. 2, pp. 122 ~ 129, 2010

- [8] M. C. Kim, J. J. Lee, G. W. Lee, J. W. Kim, B. H. Shon, "A Numerical Calculation for the Optimum Operation of Cyclone-based Combustion System", J. the Korea Academia-industrial cooperation Society, Vol.12, No.2, pp.1005-1012, 2011.
- [9] B. H. Shon, G. W. Lee, "Improvement of Working Surroundings in the Industrial Waste Incinerator", J. the Korea Academia-industrial cooperation Society, Vol.7, No.3, pp.431-439, 2006.
- [10] Y. J. Jung, "The Fundamental Study about Optimum Design of Natural Gravity Ventilator", Chang-Won University, a Master's thesis, 2001.
- [11] B. E., Launder and D. B. Spalding "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, No.2, pp. 269 ~ 289, 1974.
- [12] Y. O. Park, J. E. Son, "Emission Control Technology in Wastes Incineration(II)-Removal of Toxic Substances-", J. Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol.11, No.3, pp. 475 ~ 487, 1994.
- [13] Enforcement Rule on the Promotion of Saving and Recycling of Resources' attached Table7(relevant Article 20-3 (2), Amended by Jan 31, 2013.
- [14] Application method development for the optimum utilization of the waste resources produced in the industrial complex, MOLIT, 2011.
- [15] J. H. Lee, M. H. Jung, Y. H. Kwon, M. C. Kim, G. W. Lee, B. H. Shon, "Simulation of flue gas treatment section in RDF combustion process using Aspen Plus", Proceedings of the KAIS Spring Conference, pp.848-850, May., 2009.

김 민 철(Min-Choul Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 동아대학교 환경공학(공학사)
- 2005년 2월 : 부산대학교 환경공학(공학석사)
- 2011년 8월 : 울산대학교 건설환경공학부(공학박사 수료)
- 2005년 2월 ~ 현재 : ㈜ 유성 중앙연구소 수석연구원

<관심분야>

산업폐기물처리, 소각로 해석 및 설계, 매립기술

손 병 현(Byung-Hyun Shon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 인프라시스템학과 정교수

<관심분야>

대기오염제어, 폐기물처리, 이산화탄소 흡수

이 재 정(Jae-Jeong Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학사)
- 1998년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 부산대학교 환경공학과(공학박사)
- 2008년 2월 ~ 현재 : ㈜ 유성 중앙연구소 연구소장

<관심분야>

유해가스처리, 산업폐기물처리, 환경정책

박 흥 석(Hung-Suck Park)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울시립대학교 환경공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학석사)
- 1990년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 건설환경공학부 정교수

<관심분야>

산업폐기물 에너지 자원화, 생태산업단지, LCA