

## G+R 타입 소각연소로의 연소 및 열유동 특성평가 연구

신동훈<sup>†</sup> · 황정호<sup>\*</sup> · 백익현<sup>\*\*</sup> · 정상순<sup>\*\*</sup>

### An Evaluation Study on Combustion and Thermal Flow Characteristics of G+R Type Incinerator

Donghoon Shin, Junggho Hwang, Ikhyun Baek, Sangsoon Jung

#### ABSTRACT

The present study discusses about the combustion and thermal flow characteristics of a G+R type incinerator, which is under construction for MAPO Incineration system, to evaluate the effects of various operating and design parameters. A bed combustion model is developed to simulate the waste bed combustion on the stoker. The effects of waste composition and primary air distribution are estimated. The results of the waste bed combustion model is applied to CFD(computational fluid dynamics) simulation, which simulates the detail of the thermal flow in the combustion chamber. The effects of bypass damper opening ratio, primary air distribution, and secondary air jet configuration are discussed.

**Key Words** : G+R type incinerator, Solid Waste, Bed Combustion, Combustional Fluid Dynamics, Bypass Damper, Secondary Air Jet

#### 기 호 설 명

G+R: Grate + Rotary Kiln

#### 1. 서 론

소각에 의한 폐기물 처리방식은 국내에서 이미 정착단계를 넘어서 발전과정에 있다. 그간 국내 산업체, 학교, 연구소등의 노력의 결과로 대부분의 국내 대형 도시폐기물 소각로들은 정상적으로 운전되고 있으며 소각로 산업계의 공학적 이해수준도 상당히 진보하여 다양한 측면에서 발전을 거듭하고 있다. 그러나, 지난 수년간 소각로에서 발생하는 공해물질, 특히 다이옥신에 대한 논란은 사회적 물의를 일으킨 바 있으며 아직도 일부 소각장 및 신설 소각장에서는 이 문제로 인하여

반목과 갈등을 겪고 있는 것이 안타까운 현실이다. 또한, 산성가스, 중금속, 바닥재 및 비산재등 공해물질 규제가 점차 강화되고 있는 실정이며, 이에 소각로 산업과 관련된 많은 기업체, 지자체, 연구소등은 해결책 마련에 부심하고 있다.

폐기물 소각로가 사회적 관심을 갖게 되면서부터 국내외 산학연은 저공해 소각로 개발을 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 특히, 연소실에서의 연소현상 최적화를 통한 공해물질 발생최소화 및 소각공정 개발에 의한 공해물질 저감에 많은 연구 결과들이 발표되었으며 상당한 발전을 이뤄왔다 [1].

본 연구의 연구대상이며 현재 서울 마포구 상암동에 2005년 준공예정으로 건설중인 총 처리량 750 톤/일 규모의 도시 폐기물 소각로의 기술제휴선은 Babcock & Wilcox Volund ApS 사이며, 도입된 기술은 새로운 개념인 화격자와 킬른을 조합한 것으로, 폐기물 연소후 잔류하는 바닥재

<sup>†</sup> 연세대학교 CT연구단  
서울시 서대문구 신촌동 134 기계공학부 A485호  
Email: dhshin@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-2821

<sup>\*</sup> 연세대학교 기계공학부

<sup>\*\*</sup> 한라산업개발주식회사 폐기물 사업부

의 위해성을 최소화하는 기술이다. 이 기술의 특징은 화격자 이후 킬른에 투입되는 바닥재가 고온의 킬른 분위기에서 중금속등의 유해물질이 용융된 안전물질에 흡수되어, 매립처분하거나 재활용시에 공해를 발생시키지 않도록 하는 특징을 갖는다.

외국선진기술의 오랜 기간동안 축적된 노하우는 일반적으로 신뢰할 만하지만 때때로 국내 폐기물의 특수성, 사회적 분위기 등의 변수를 적절하게 고려치 못한 설계 및 운전으로 문제를 야기하고, 또다시 사회적인 문제로 확산되는 것을 종종 경험한 바 있다. 이는, 선진기술에 문제점이 있다기 보다는 선진기술을 도입하는 과정에서 고려치 못한 국내의 특수상황에 대한 배려가 부족하고, 또한, 기술계휴선에서 그들만의 기술적 노하우를 전수하는 것을 꺼리는 경향이 강한 것으로부터 발생한다고 할 수 있다.

이상과 같은 배경에서 본 연구는 현재 서울시 상암동에 건설중인 마포소각로를 대상으로 운영시 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하는 것을 기본 목적으로 하며, 연소로의 열유동 최적화를 달성할 수 있는 설계 및 운전조건 도출을 세부 목적으로 한다. 특히, 1,2차 공기주입의 효과 및 바이패스 댐퍼의 영향을 파악하고, 최상의 운전조건을 유지하기 위한 설계 및 운전인자 도출을 수행하고, 효율향상을 위한 설계 및 운전 개선안을 제시하는 것이 주요내용이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 마포 소각로 설계사양

마포소각로는 처리량 250 톤/일급 G+R 소각로 3기로 구성되어 있는데, 각 소각로의 연소실은 그림 1에 나타난 바와 같이 화격자식 연소실과 로타리킬른, 바이패스로 구성되어 있으며 폐기물 호퍼에서 폐기물이 투입되어 연소되고, 연소가스는 바이패스와 킬른으로 배분되어 배출되며, 보일러에서 연소가스의 폐열을 회수하는 방식이다. 투입되는 폐기물은 표 1과 같이 발열량 1900~2750 kcal/kg의 범위조건을 대상으로 하며, 연소공기는 화격자 공기비를 1, 전체 공기비를 폐기물 조건에 따라 1.6~1.9 범위로 설계하였다[2].

폐기물층이 연소되는 화격자는 길이 2.5m, 폭 3m의 5개의 전진식 화격자로 구성되어 있으며 각 화격자단별로 공기투입량을 제어하여 화격자상 폐기물 연소를 제어한다. 또한, 2차연소공기 주입노즐을 연소실 천정에 3곳, 후벽면에 1곳, 킬른 입구하단부에 1곳 등 5곳에서 각각 2개의 노즐을 이용하여 2차공기를 주입한다.

연소실에서 발생하는 연소가스는 로타리 킬른과 바이패스의 두 통로로 나뉘어 배출되는데, 바이

패스 댐퍼의 개도를 변경하여 두 통로의 연소가스 유입비율을 조절한다.

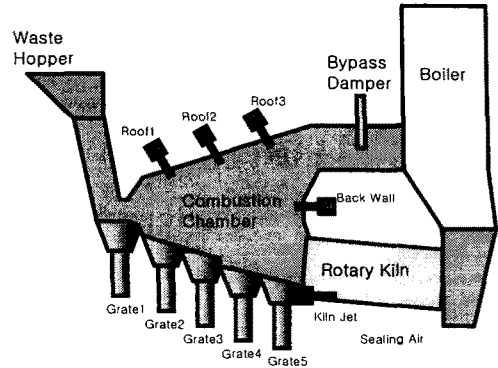


그림 1 마포소각로 연소실 구조

		단위	설계	양질	기준	저질
삼성분	수분	(w%)	36.3%	42.5%	44.5%	49.5%
	회분	(w%)	17.2%	15.3%	13.5%	12.4%
	가연분	(w%)	46.5%	42.0%	41.9%	38.0%
계			100%	100%	100%	100%
가연분 조성	C	(w%)	29.5%	26.3%	25.6%	21.6%
	H	(w%)	3.8%	3.80%	3.42%	2.82%
	O	(w%)	12.2%	10.9%	11.9%	12.5%
	N	(w%)	0.34%	0.43%	0.41%	0.44%
	S	(w%)	0.27%	0.27%	0.26%	0.22%
	Cl	(w%)	0.30%	0.30%	0.30%	0.33%
발열량	kcal/kg		2750	2500	2200	1900
투입량	t/d		250	250	275	250
총공기비			1.9	1.77	1.6	1.6
화격자공기비			1	1	1	1

표 1 연료 및 연소공기 설계조건

### 2.2 화격자 폐기물 층연소 모델

폐기물이 연소실에 투입되어 화격자상에서 연소하는 과정에서 가스상과 고체상의 반응이 그림 2에 나타난 바와 같이 복잡하게 발생하게 된다. 폐기물 입자는 성상과 형태가 매우 불규칙하며, 또한 전도, 대류, 복사에 의한 열전달 현상과, 수분증발, 탈휘발, 좌 연소, 휘발분 연소 등의 연소 과정을 거치게 된다. 이러한 복잡한 물리 화학적 현상은 Shin과 Choi[3]가 개발한 화격자 층연소 모델을 이용하여 해석하였다.

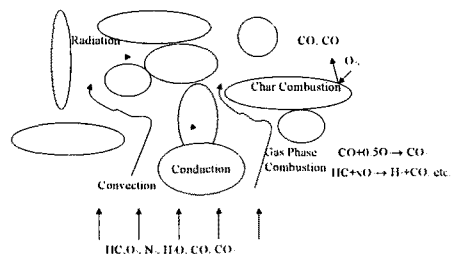


그림 2 폐기물 층내 연소반응 개념도

다음 표는 폐기물층 연소해석을 위한 운전조건을 나타내었다.

인자	내용
폐기물 성상	설계, 양질, 기준, 저질
폐기물 물리적 특성	평균 입자직경: 5 cm 회분 진밀도: 1000 kg/m <sup>3</sup> 초기 다공도: 50% 거시적 다공도: 32%
폐기물 이송속도	10m/hr
화격자별 1차 공기 주입비율	Case 1: 20%:20%:20%:20%:20% Case 2: 5%:20%:40%:25%:10% Case 3: 10%:15%:30%:30%:15%
복사열유속	연소로 평균온도로부터 계산

표 2 폐기물 화격자상 연소해석 조건

### 2.3 연소 및 열유동 전산해석

CFD를 이용한 연소 및 열유동 해석은 실제현상에 근접한 모사가 가능한 유용한 도구이지만, 복잡한 물리화학적 현상들에 대한 고도의 전공지식을 필요로 하며 계산모델 제작에 많은 노력을 기울여야 하는 어려운 점이 있다. 최근, CFD 프로그램들이 범용화되고 상용화되면서 전문적인 지식이 부족한 상태에서도 결과를 낼 수 있는 수준이 되었지만, 현상에 대한 이해, 정확한 모델제작, 해석결과의 진위여부 판단 및 적절한 활용에는 전공지식을 충분히 이해하고 있는 전문인이 수행해야 할 필요가 있다.

본 연구에서 CFD를 댐퍼의 개도와 1, 2차공기의 영향력을 판단하는데 활용하였다. 한편, CFD 해석 대상을 기준 폐기물 조건으로 하였으며 다음과 같은 세가지 항목을 평가하였다.

- 1) 1차 공기 배분비율의 영향 평가: 기본 운전 조건에서 바이패스 댐퍼개도를 100%로 설정하고, 1차공기의 배분비율을 표2에 나타난 Case 1,2,3을 적용하여 변화를 살펴봄으로서 적절한 1차 공기 배분비율을 예측함을 목적으로 함.
- 2) 바이패스 댐퍼개도의 영향 평가: 1차공기 영향평가의 결과중 양호한 조건인 Case 3을 선택하고, 바이패스댐퍼의 개도를 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 변화시켜가며, 바이패스 댐퍼와 킬른의 온도, 유량, 공해물질 농도등을 예측함을 목적으로 함.
- 3) 2차공기 제트 주입사양의 영향 평가: 댐퍼개도를 100%로 고정된 상태에서 2차공기 노즐별 유량비를 표3과 같이 변경한 경우를 해석하여 연소 성능향상에 2차공기가 미치는 영향을 평가함을 목적으로 함.

이상의 세가지 내용을 수행하기 위하여 사용된 코드는 FLUENT 6.0 이며 제작된 격자는 다음 그림과 같다.

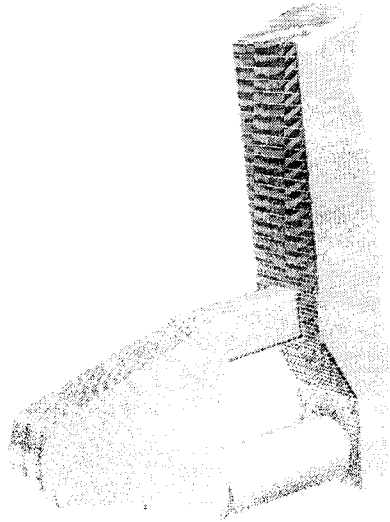


그림 3 FLUENT 계산 격자

위치	2차공기노즐		2차공기노즐 유속(m/s)	
	직경(mm)	개수	기준	변경
Roof 1	125	2	33.6	54.2
Roof 2	125	2	54.2	33.6
Roof 3	89	2	33.6	33.6
Back Wall	89	2	6.8	6.8
Kiln	15	2	27.3	27.3

표 3 2차공기 노즐사양

항목	사용모델
난류	RNG k-e
복사	DTRM
연소	methane-air 2 step reaction Arrhenius/eddy-breakup

표 4 해석에 사용한 CFD 모델[4]

## 3. 연구결과

### 3.1 화격자층 폐기물 연소특성

다음 그림들은 기준 폐기물, 공기조건 1의 경우를 해석한 결과이다. 그림 4는 폐기물층내 온도 분포를 보여주는데, 균일하게 공기를 주입한 결과 붉은색으로 나타난 화염대가 거의 일정한 속도로 폐기물층 내부를 하강하면서 연소가 발생하는 것을 알 수 있다. 화염은 화격자위치 9.5m에서 화격자에 닿는데 그림 5의 고체반응 중간생성물인 최의 분포를 보면, 화염대 상부에 완전연소되지 못한 최가 남아있다가 화염이 바닥까지 전파된 후에 주입되는 산소와 만나서 반응을 완료하는 것이 화격자 위치 11m까지 진행됨을 보여준다.

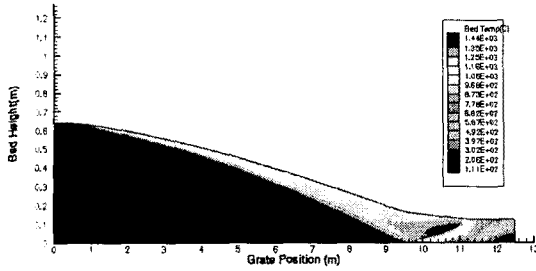


그림 4 폐기물 층내 온도 분포(기준, 공기조건 1)

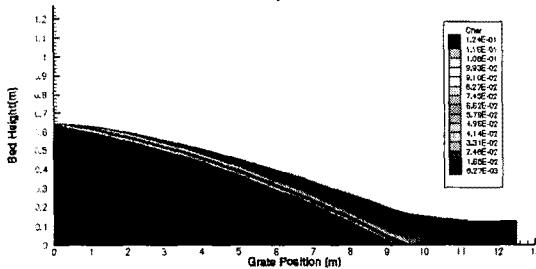


그림 5 폐기물 층내 화질량 분포(기준, 공기조건 1)

다음 그림들은 화격자상단에서 발생한 연소가스의 화학종 농도, 가스온도 및 가스 유속을 보여 준다. 그림 6의 산소농도를 보면 grate 2위치인 2m지점 이후에는 산소농도가 0이 되고, 그에 따라 불완전 연소생성물인 CO의 농도가 높아지게 된다. 화염대가 폐기물층 내를 화격자에 닿는 8.5m 이후에는 화염대 위에서 미처 연소하지 못한 화가 다시 연소하여 CO의 농도가 잠시 높아지다가 연소가 끝난 후에 CO농도는 줄어들고 산소농도는 다시 증가하게 된다. 그림 7의 폐기물층 상단 발생가스 온도를 보면 화격자 위치 10m 이후에 갑자기 온도가 상승하게 되는데 이는 폐기물층 화염대가 화격자에 닿으면서 폐기물 층내의 수분을 모두 증발시킨 이후이기 때문에 수분증발을 위한 에너지 소모가 사라진 연유로 발생하는 현상으로서, 실제 소각로에서도 화격자 후단부 화염종료시점에서 강한 화염이 관측되는 것이 이와 같은 이유에서 발생하는 것이다.

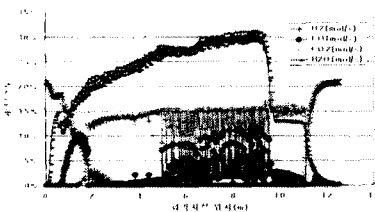


그림 6 폐기물층 상단 화학종 농도 분포(기준, 공기조건 1)

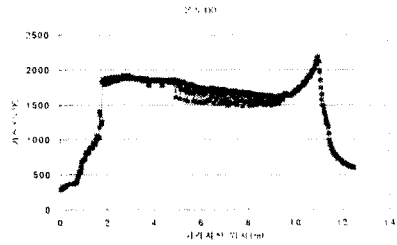


그림 7 폐기물층 상단 화학종 농도 분포(기준, 공기조건 1)

### 3.2 연소실내 열유동 특성

#### 3.2.1 1차공기의 영향

1차공기는 폐기물의 화격자연소를 진행시키는 중요한 인자이다. 한편, CFD 해석에서는 화격자 연소특성이 고려된 경계조건이 입력되어야 하는데, 앞절에서 나타났듯이 1차공기 배분비율이 중요한 인자이다. 본 연구에서는 기준폐기물 조건에서 공기주입방식을 3가지로 변경시켰을 때 열유동 형태를 평가하여 최적의 연소특성을 가진 1차공기 주입방식을 선택하고자 한다.

##### 1) 공기주입 1

공기주입 1은 화격자 전영역에 동일한 공기량을 주입하는 경우로서 해석결과는 다음 그림들과 같다. 다음 그림의 속도벡터를 보면 붉은 화살표로 표시된 바와 같이 Roof2의 2차공기제트를 중심으로 열유동 형태가 형성되는데, grate1부터 grate3까지에서 발생하는 가스들은 위로 상승하여 Roof2의 노즐과 합류하여 다시 Back Wall 방향으로 움직이고, BackWall에 충돌한 가스는 아래로 이동하여 킬른쪽으로 빠져나가는 형태를 보여준다. 즉, 킬른으로 배출되는 가스의 비율이 높은 것을 알 수 있다.

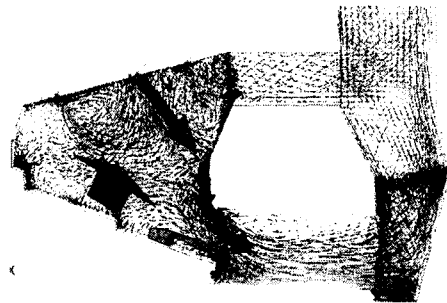


그림 8 속도벡터 (공기조건 1)

다음 그림의 제트침투형태를 보면 각 위치별로 두개의 노즐에서 분사된 공기는 연소로 중앙에서 합류하여 하나의 제트처럼 거동하는 것을 알 수 있다. 이는 제트간 거리가 짧은 것에서 연유한 것인데, 이와 같은 경우 제트의 침투거리가 높아져 연소로 성능과 밀접한 혼합효율을 증가시킬

수 있는 장점이 있는 반면, 과도한 경우, 열유동을 한쪽으로 치우치게 하여 불안정한 결과를 초래할 수 있으므로 설계 및 운전시 유의해야 한다 [5].

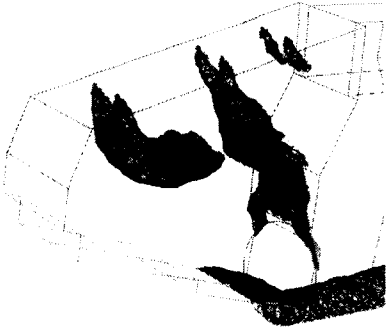


그림 9 2차공기제트의 침투형태 (공기조건 1)

다음 그림의 온도분포 및 CO 농도분포는 가스상 연소가 킬른내부에서 활발하게 진행되는 것을 보여준다. 한편, 킬른내부온도가 과도하게 상승하여 킬른 재질의 손상등이 우려되는 열유동 형태로 판단된다.

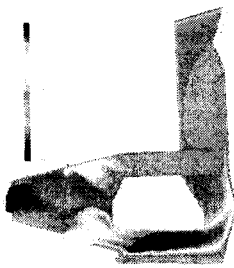


그림 10 온도분포 (공기조건 1)



그림 11 CO 분포 (공기조건 1)

2) 공기조건 2

공기조건 2의 경우는 화격자 중앙부위에 공기주입을 집중한 경우로서 grate2와 grate3에서 발생한 가스의 유속이 높아 위로 상승하여 2차공기와 혼합할 가능성이 높을 것이 기대되는 조건이다. 다음 그림의 속도벡터도와 2차공기 침투형태를 보면 이러한 예상을 확인할 수 있다. grate2,3에서 발생한 가스는 공기조건 1에 비해 높은 속도로 위로 상승하고 Roof 2의 공기제트와 만나서 Backwall로 이동하는 과정은 동일하지만 Backwall에 충돌한 후에 비교적 균등하게 킬른 파 댐퍼로 유량이 나뉘어져 이동하는 것을 볼 수 있다.



그림 12 속도벡터 (공기조건 2)



그림 13 2차공기 제트의 침투형태 (공기조건 2)

다음 그림은 온도와 CO 농도를 보여주는데, 온도의 경우, 공기조건 1과는 크게 다른 형태로서, 킬른보다 바이패스 댐퍼쪽이 더 높은 것을 볼 수 있다. 또한, CO 농도역시 연소로 내에서 대부분 제거되는 결과를 보여준다. CO 농도의 경우 연소로 천정의 농도가 더 높은 결과를 보여주는데, 이는 화격자에서 생성된 CO가 연소로 벽면을 타고 상승한 후에 천정까지 이르러 2차공기와 혼합되어 파괴되는 현상에 의해 나타난 것이다. 이를 그림 16의 3차원 CO농도 분포도에서 확인할 수 있다.

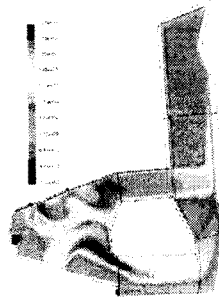


그림 14 온도분포 (공기조건 2)



그림 15 CO분포 (공기조건 2)

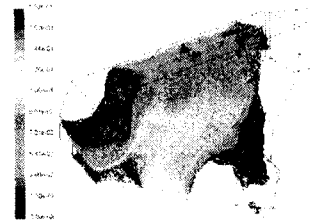


그림 16 3차원 CO 농도분포(공기조건 2)

3) 공기조건 3

다음 그림에 나타난 공기조건 3의 결과들은 공기조건 1과 공기조건 2의 중간형태를 보여주고 있다.

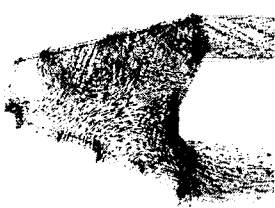


그림 17 속도벡터도 (공기조건 3)



그림 18 2차 공기 침투형태 (공기조건 3)

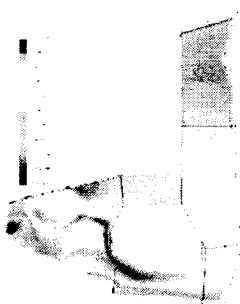


그림 19 온도 분포 (공기조건 3)

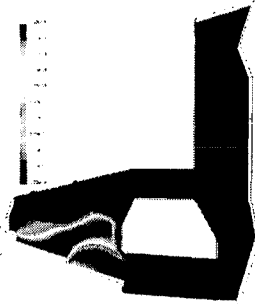


그림 20 CO 분포 (공기조건 3)

3.2.2 바이패스 댐퍼의 영향 분석

마포소각로에서 바이패스 댐퍼는 연소로내 열유동 특성을 제어하여 킬른의 온도를 일정하게 유지하는 방안으로 설치된 시설이지만, 댐퍼의 개도가 연소로내 열유동장에 미치는 영향이 제대로 파악되어 있지 않다. 본 연구의 핵심 내용중의 하나가 바이패스 댐퍼의 영향을 파악하는 것에 있다.

다음 그림은 바이패스 댐퍼의 개도가 50%인 경우의 해석결과를 예로서 보여준다. 그림 21의 속도벡터도를 보면 댐퍼의 영향으로 킬른쪽으로 빠져나가는 유속이 증가하는 것을 알 수 있으며, 그림 22의 온도분포에서는 댐퍼개도 100%와 비교하여 바이패스 온도가 저하한 반면, 킬른쪽 온도는 증가한 것을 알 수 있다. 이로부터 댐퍼개도를 이용하여 킬른의 온도를 제어할 수 있음을 알 수 있다.



그림 21 속도벡터 (댐퍼개도 50%)

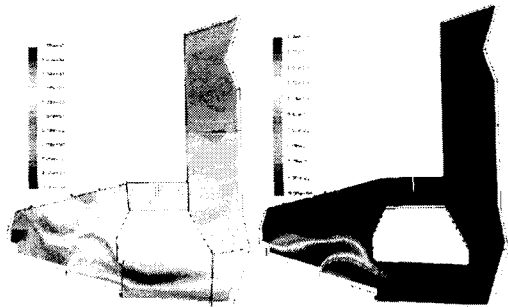


그림 22 온도분포 (댐퍼개도 50%)

그림 23 CO 분포 (댐퍼개도 50%)

다음 그림은 댐퍼개도에 따른 댐퍼패스의 질량유량비율을 보여준다. 댐퍼개도가 0%일때는 당연히 질량유량비율이 0%가 되며, 댐퍼개도를 높일수록 비례하여 증가하다 100% 연 경우에 대략 36%정도의 유량이 바이패스로 배출되고, 나머지는 킬른쪽으로 배출되는 것으로 나타났다.

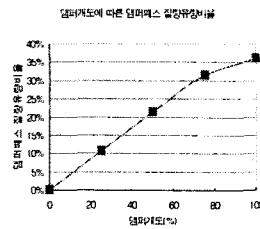


그림 24 댐퍼개도에 따른 댐퍼패스 질량유량 비율

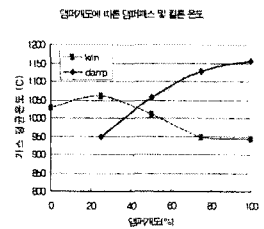


그림 25 댐퍼개도에 따른 댐퍼패스 및 킬른 온도 변화

3.2.3 2차 공기 제트의 영향 분석

2차 공기는 연소로내 혼합을 증진시키고 열유동 형태를 제어하는 중요한 인자이다. 기존의 Roof 2에 가장 높은 유속(54.2 m/s)으로 주입하는 방식은 자칫, 킬른쪽으로 주유동을 유도할 수 있어서, 킬른의 온도상승에 의한 재질손상문제를 발생시킬 수 있으며, 불완전 연소로 인하여 CO 배출량을 증가시킬 수 있는 소지가 있다. 따라서, Roof 1의 유량을 높이고(54.2 m/s) Roof 2의 유량을 감소시키면(33.6 m/s) Roof 1 노즐 근처에서 주유동이 생성되고 또한, Roof 2에 비해 공기 제트가 연소가스와 혼합될 수 있는 가능성이 높을 것으로 예상된다.

Roof1의 유속을 54.2m/s로, Roof2의 유속을 33.6m/s으로 설정하여 해석한 결과가 다음 그림들이다. Roof 1에서 출발하는 제트가 Back wall 하단부에 충돌하고 그 이후 킬른으로 빠져나가는 형태를 보여준다. 이와 같은 유동형태는 그림 28에 나타난 바와 같이 킬른의 온도를 낮추는 효과

가 있다. 또한, 그림 29에 나타난 바와 같이 연소실내 가스연소를 증진시켜 CO 농도를 급격하게 줄이는 효과가 있다. 이러한 특징은, 2차공기제트의 유량조절로 킬른의 온도를 제어할 수 있음을 보여주는 결과이다.

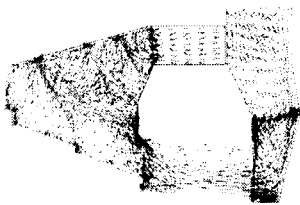


그림 26 속도벡터도  
(Roof1과 Roof2의  
유량변경)

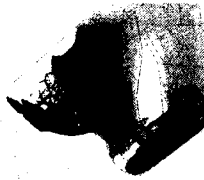


그림 27 2차공기  
제트의 침투형태  
(Roof1과 Roof2의  
유량변경)

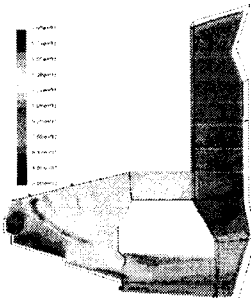


그림 28 온도분포도  
(Roof1과 Roof2의  
유량변경)



그림 29 CO 분포  
(Roof1과 Roof2의  
유량변경)

#### 4. 결 론

이상, 마포 소각로 G+R 타입 연소실을 폐기물층연소 모델과 CFD를 이용한 해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 1차공기의 분배비율이 열유동 형태에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 또한 이를 통한 킬른 온도 제어가능성을 확인할 수 있었지만, 1차공기는 폐기물 연소에 직접적인 영향을 미치므로 폐기물 연소가 안정적으로 진행될 수 있는 범위내에서 검토되어야 한다.
- 2) 댐퍼의 개도는 킬른의 온도제어에 활용할 수 있으며 최대 100℃의 온도제어효과를 기대할 수 있다.
- 3) 2차공기 유량분배비율의 제어를 통해 킬른의 온도를 제어할 수 있는 것을 추가로 발견하였으며 CO 해석 결과를 분석한 결과, 2차공기 설계변경을 통해 연소성능의 추가 향상을 기대할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 과학재단의 2002년 산학협력연구지원사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] “폐기물 소각기술-다이옥신 저감을 위한 설계/건설/운영,” 제2회 산학협동 공개강좌, 1999년 1월 26-27일, 한국과학기술원
- [2] “마포자원회수시설 건설사업 기본설계보고서,” 서울특별시, 2001. 8
- [3] D. Shin and S. Choi., “The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed,” *Combust. Flame*, Vol. 121, pp. 167-180, 2000
- [4] FLUENT 6.0 User's Guide, FLUENT Inc.
- [5] S. Kim, D. Shin and S. Choi, “Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Design by Flow Simulation,” *Combust. Flame*, Vol. 106, P.241-251, 1996