

가스화 용융로의 운전성능 예측기법에 관한 연구

이민도* · 최상민**

A Study of Operation Performance Prediction Method for the Gasification Melting Furnace

Mindo Lee*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

Social interest and request about low pollution waste treatment process are growing and gasification melting method, as a new technology concept, is risen. The necessity of engineering analysis to determine design standards and operation condition is required. In this study, the objective and function of components and operation process of various gasification melting furnaces such as shaft type, fluidized bed and Rotary Kiln type gasification melting furnace are reviewed and the design standard and operation range of gasification melting furnace are determined by inspecting the change of output and operation condition with input condition change.

Key Words : Gasification melting, Pyrolysis melting, Heat and mass balance

1. 서 론

근래에 환경에 관한 관심이 증가하면서 폐기물의 저공해 처리방안에 대한 사회적인 요구가 커지고 있으며 이에 대한 국제적인 규제도 강화되고 있는 실정이다. 도시 폐기물 처리방안에 있어 기존의 소각로를 대체할 만한 신기술 개념으로 알려지고 있는 열분해(가스화) 용융방식에 관한 관심이 증대되고 있다. 해외 업체를 중심으로 하여 몇몇 형태의 가스화/용융설비가 상용화 되어 있으며 국내에서도 경남 양산에 가스화 용융방식의 폐기물 처리시설이 건설 중에 있다. 가스화 용융방식이란 기존의 소각로를 이용한 대량소각 방식의 연소과정을 가스화과정과 불연물의 용융 그리고 탈휘발 또는 가스화된 연료의 연소과정으

로 분할하는 폐기물 처리방식으로 볼 수 있다. 그러나 현재 이 가스화 용융방식에 대한 뚜렷한 공학적 분석 및 접근이 없는 상태이며 가스화/용융 설비의 설계인자에 관한 분석 방법 및 가스화 용융방식별 구성설비의 기능 및 역할에 대한 구체화 그리고 입력조건 및 운전조건의 변화에 따른 설비의 운전상황 변화 및 출력변화에 대한 특성을 평가할 만한 충분한 고찰이 없는 상황이다.

본 연구에서는 쉘프트식 일체형 가스화 방식 (Shaft type Gasifier/Melter), 유동상식 가스화 및 선화연소 용융방식 (Fluidized Bed type Gasifier and Cyclone Combustor), 그리고 로터리 킬른식 가스화로 및 연소실 일체형 용융방식 (Rotary Kiln type Gasifier and combined Combustor/Melter type)의 세가지 방식의 가스화 용융방식을 대상으로 연구를 진행하였으며, 이들 가스화 용융설비에 대해 각각의 구성요소를 이루는 설비의 기능 및 역할을 고찰하고 가스화 용융방식간 공통점 및 차이점을 설명하였다. 그리고 앞서 기술한 세가지 방식의 가스화 용융설비에 대해 열역학적 평형상태에 대한 열분해가스

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, 042-869-3030, smchoi@kaist.ac.kr

조성 및 비율을 예측하고 얻어진 데이터에 대해 각 설비별 열 및 물질 정산을 수행하였다. 이와 같은 과정을 통해 각 공정단계별 특징적 요소에 대한 고찰과 함께 열 및 물질 현상을 규명하였다. 특히, 셰프트식(Shaft type)의 가스화 용융설비에 대해 폐기물의 성상 및 투입량과 같은 입력조건의 변화에 따른 운전조건 및 출력의 변화에 대해 열 및 물질정산분석을 통해 확인함으로써 가스화 용융설비의 설계 및 운전범위에 대한 기준을 제시하였다.

2. 대상 설비

2.1 셰프트식 일체형 가스화 용융로

Fig. 1은 Shaft식 가스화 용융로의 폐기물 처리 운전과정을 나타낸 개념도이다. 주요 설비 요소는 폐기물의 탈휘발 또는 가스화가 이루어지고 동시에 로의 저부에서 불연물의 용융작용이 발생하는 가스화/용융로와 이곳에서 형성된 가스화 연료의 본격적인 가스연소가 이루어지는 가스연소실로 이루어져 있다. 즉, 폐기물은 가스화/용융로의 상부로 투입되어 가스화 및 용융을 거쳐 다음단인 가스연소실로 이송되어 가스연소가 발생하며 이후 발생한 고온의 연소가스는 폐열 보일러에서 냉각되며 증기를 생산하여 발전 및 지역 난방시스템 구동에 이용되며 이후 석회 슬러리(slurry)로도 불리는 milky lime을 미세한 입자로 형태로 분무하여 연소가스로부터 산성가스 및 다이옥신/퓨란등의 오염물질을 제거하는 흡수기를 통과하게 되고 집진설비를 거쳐 외부로 배출되게 된다. 폐열보일러, 흡수기, 집진기 그리고 stack(연돌)을 포함한 폐가스의 후처리설비는 종래 폐기물의 주요 처리방식인 대규모 소각방식(소각로)의 그것과 매우 유사한 형태로 구성되어있음을 확인할 수 있다.

Shaft 방식의 가스화/용융로의 주요한 특징을 살펴보면 다른 방식의 가스화 용융설비와 달리 폐기물과 함께 고온환원분위기 형성을 위한 부가연료인 코크스와 용융물내 염기도 조정 및 산성가스 중화 목적으로 석회석이 장입된다. 이와 같은 요소는 제철용 고로(용광로)가 갖는 주요한 공정상의 특징이며 동일한 요소가 가스화/용융기술에 적용되었음을 확인할 수 있다. Fig. 4에 Shaft식의 가스화 용융로의 설비규모 및 각 영역별 기능을 도시하였다. 코크스, 석회석의 장입물과 함께 로의 상부를 통해 주입되는 폐기물은 용융로의 저부로 자유낙하하며 300-400℃ 온도범위를 갖는 건조, 예열대를 지나고 300-1000℃ 영역에서 탈휘발, 가스화 과정을 겪고 이후 연소가

이루어지며 로의 저부에 이르러 연소 및 용융과정을 겪는다. 이때, 로의 열분해 가스화대에서 250-800℃ 온도 범위를 갖는 열분해 가스가 형성되며 로의 하단부에 위치한 투입구를 통해 연소용 공기 및 고온형성을 위한 산소부화공기가 공급되어지는데 이때 가스화/용융로에는 공연비가 1.5 이상으로 결정되는 기존의 스토키식 소각로와는 달리 공연비를 1로 설정하게 된다. 이는 소각로의 경우 완전연소를 목적으로 하여 충분한 양의 공기를 투입하는데 반해 용융로는 가스화와 불연물 용융이 그 주요 목적임에 기인한다. 폐기물과 함께 투입된 코크스는 산화하여 1700℃ 이상의 고온 분위기를 형성하게 되고 이 과정에서 코크스와 폐기물중 탄소성분은 고정탄소 Bed층을 형성하여 고체연소반응이 발생하는데 이는 안정된 Melting Zone의 역할을 담당한다고 볼 수 있다. Char의 용융반응으로 환원분위기가 형성된 상태에서 slag이나 금속류와 같은 불연물은 용융과정을 거치게 되고 그 용융물은 로의 저부를 통해 외부로 배출되어진다. 이 용융물은 고형화되어 건설자재와 같은 형태로 재활용 된다. 앞서 기술한 가스화/용융로에서 발생한 열분해 가스는 다음 설비인 연소실로 이송되어진다. 연소실은 가스와 연소용 공기의 혼합을 극대화 하기위해 열분해 가스와 연소용 공기를 분할 투입하여 선회류 연소형태를 이룬다. 그와 함께 혼합효과를 증진시키고 과잉공기비를 낮게 유지함으로써 가스발생량을 감소시켜 로내 온도분포를 균일화하고 NOx 발생을 억제하기 위한 목적으로 폐열보일러를 통과한 연소가스의 일부를 재순환시켜 연소실에 투입한다.

2.2 유동상식 가스화 및 선회연소 용융로

Fig. 2는 유동상식(Fluidized Bed type) 가스화/용융설비의 폐기물 처리 운전과정을 나타낸 개념도이다. 주요 구성설비는 가스화 과정을 통한 열분해가스의 생산을 전담하는 유동상식의 가스화로와 가스화 연료의 연소 및 비산재의 용융작용이 이루어지는 연소/용융로로 이루어져 있다. 유동상식 가스화로/용융로는 로의 하부로부터 0.3정도의 공연비를 갖는 연소용 공기가 유입되는 유동상방식의 가스화로에서 유동사의 선회운동에 의해 550-630℃의 온도대에서 가스화과정을 거친 후 로의 저부를 통해 불연물 및 금속류를 배출하고 발생된 열분해 가스와 비산재를 다음단인 용융/연소로로 이송하게 된다. 가스연소/용융로는 가스화된 연료에 대해 연소용공기와 함께 각각 4개의 주입구로 분할 투입하여 연소의 효율성을 증대하고 방사상으로 배치하여 가스의 혼합력을 극대화한 선회류방식의 구조를

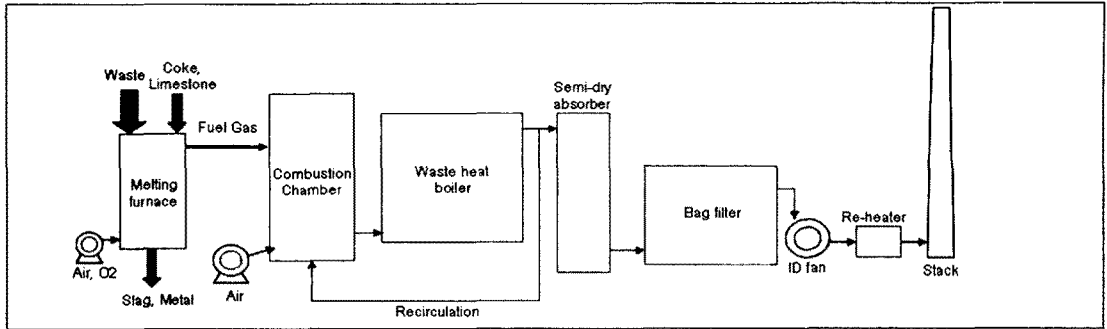


Fig. 1 Flow Process of the Shaft type Gasification Melting Furnace

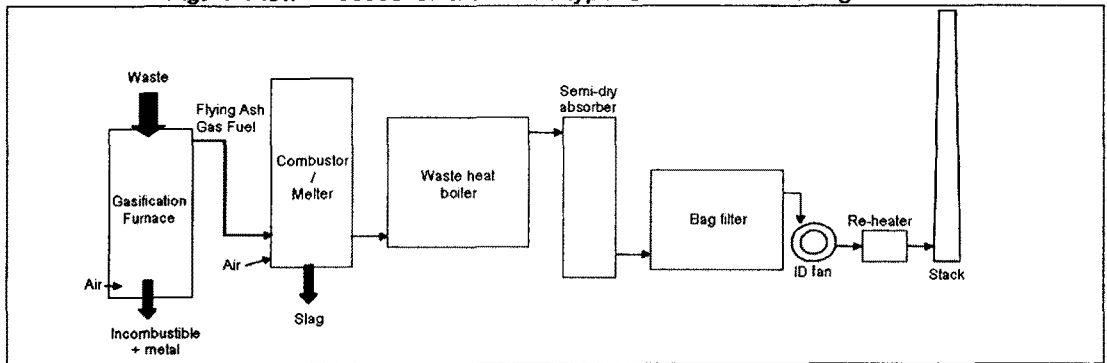


Fig. 2 Flow Process of the Fluidized Bed type Gasification Melting Furnace

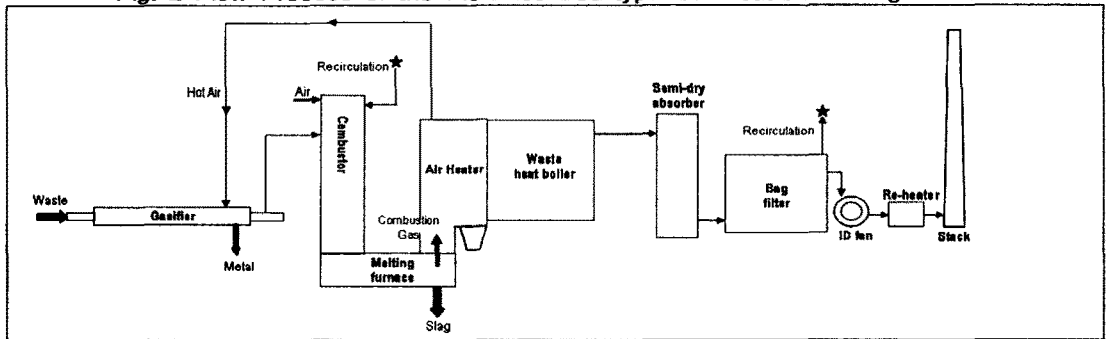


Fig. 3 Flow Process of the Rotary Kiln type Gasification Melting Furnace

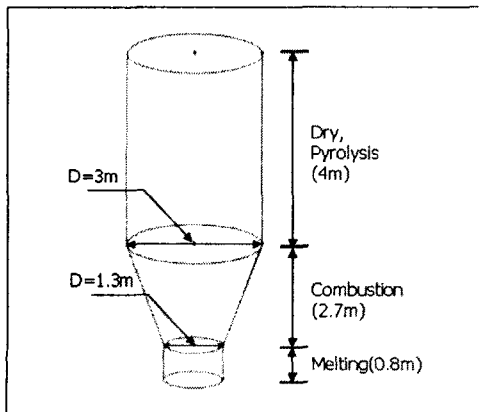


Fig. 4 Shaft type G/M

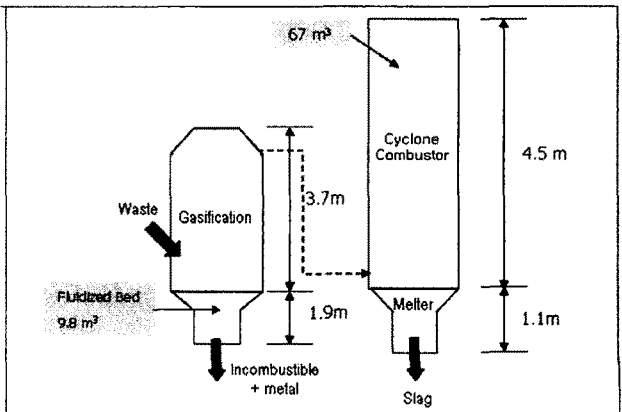


Fig. 5 Fluidized Bed type G/M

갖는 연소실에서 연소시키고 함께 이송된 비산재의 경우 1200℃ 이상의 온도에서 용융되어 용융슬래그를 얻는 방식으로 운전된다. 연소실에서 배출되는 연소가스에 대한 후처리 설비는 앞서 다룬 Fig. 1의 Shaft식 가스화/용융로와 유사한 형태를 갖는다. Fig. 5에 유동상식 가스화/용융로에 대한 설비규모 및 형태를 도시하였다.

2.3 로터리킬른식 가스화로 및 연소실일체형 용융로

Fig. 3은 로터리 킬른식 가스화/ 연소실 일체형 용융로의 폐기물 처리공정을 보이고 있다. Shaft식이 용융과 가스화과정을 거친 후 발생한 합성가스를 다음단인 연소실에서 완전 연소시키는 것에 비해 유동상식과 로터리킬른식의 가스화/용융로는 처음 단에서 폐기물에 대해 탈휘발 과정을 통한 합성가스의 형성만을 일으키고 다음설비에서 용융 및 가스연소 과정을 수행한다. 주요 설비는 가스화 및 불연물의 배출을 위한 가스화 드럼과 가스화된 연료의 연소 및 비산재의 용융을 위한 연소/용융로로 구성된다. 로터리킬른방식의 경우, 폐기물은 저속으로 회전하는 열분해드럼을 통해 이송되면서 450℃ 정도의 온도조건에서 비교적 장시간 동안 탈휘발 과정을 거치게 된다. 열분해 드럼으로부터 발생된 합성가스와 비산재는 다음단계인 가스연소/용융로에서 1200℃ 이상의 고온환경에서 용융 및 연소과정을 거치게 된다. 특히, 연소실에서 배출되는 고온의 배기가스는 열교환기를 통과하며 공기를 가열하고 이 고온의 공기는 열분해 드럼으로 공급, 순환되어 폐기물의 가스화에 필요한 열원의 역할을 담당하게 된다. 공기가열기를 통과한 연소가스의 일부는 폐열보일러를 통과한 후 재순환되어 연소실에 투입되어진다. 이후의 폐가스 후처리설비는 타 설비와 유사한 형태를 갖는다.

3. 해석방법 및 결과

3.1 합성가스 예측기법

투입되는 폐기물의 성상은 발열량에 따라 저질, 기준질, 고질폐기물로 분류하였으며 이를 Table. 1에 기술하였다. 앞서 다양한 종류의 가스화/용융설비에 대해 기술하였다. 각 설비는 폐기물의 탈휘발(가스화)이라는 공통적 기능을 수행하지만 각 설비별로 기능 및 운전특성상의 차이가 존재한다. 가스화 용융로의 해석, 최적의 운전조건 결정 및 열 및 물질정산을 통한 설계기준제시를 위해서는 다양한 운전조건 및 입력조건에 따른 합성

가스의 조성 및 발생량의 변화를 예측할 수 있는 방법이 요구되며 본 연구에서는 열역학적 평형상태, 즉 반응기내 모든 조건이 균일하다고 가정하고 열전달등의 외부조건을 무시한 단순화된 조건에서 생성가스의 조성 및 온도를 예측하였다. 이를 위해 상용코드의 평형상태 계산 프로그램을 사용하였다. 통상 열역학적 데이터는 단일물질에 대해서만 제공되며 폐기물과 같은 합성물질에 대한 데이터는 존재하지 않는다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 공업분석을 통해 폐기물을 모사할 수 있는 가상의 화학물질을 구성하고 이를 실제 존재하는 연료를 임의로 조합하여 완전연소식을 구성하였다. Table.2에 대표적으로 Shaft식 가스화 용융로의 예를 기술하였다.

Table. 1 폐기물의 공업분석결과

		고 질	기준질	저 질
공업 분석 (wt%)	C	28.67	25.22	20.75
	H	5.52	2.81	1.99
	O	23.18	10.82	7.39
	N	1.49	1.73	2.14
	S	0.27	0.37	0.3
	Cl	0.47	0.5	0.4
삼성분 분석 (wt%)	가연분	59.6	52.6	57
	수분	37.4	41.5	33
	회분	3	6	10
LHV (kcal/kg)		2700	2080	1600

Table. 2 폐기물과 코크스에 대한 화학모델

	C	H	O	N
Mass Frac.	0.646	0.061	0.236	0.038
Mole Frac.	0.404	0.46	0.111	0.02
Chemical Structure			CH _{1.138} O _{0.274}	
Molecular Weight			17.52	
LHV			21.96 MJ/kg-DAF&Coke	

* DAF : Dry & Ash Free

이와 같은 과정을 거쳐 아래와 같은 당량식을 결정하였다.

$CH_{1.138}O_{0.274} + 1.148O_2 \rightarrow CO_2 + 0.569H_2O$ 이를 실제 연료를 조합하여 모사하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

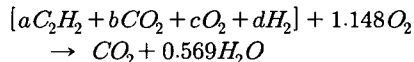


Fig. 7에 평형계산 프로그램을 통한 합성가스 조성 예측에 관한 계산결과를 나타내었다.

3.2 가스화 용융로간 비교분석

합성가스 예측 결과를 대입하여 앞서 다룬 세가지 방식의 가스화 용융로에 대해 기능상, 공정상의 유사점과 상이점을 분석하고 공통설계인자를 고찰하였다. 특히, 가스화라는 공통요소에 대해 가스화에 필요한 열량을 계산함으로써 각 설비간 공통설계인자를 도출하였다.

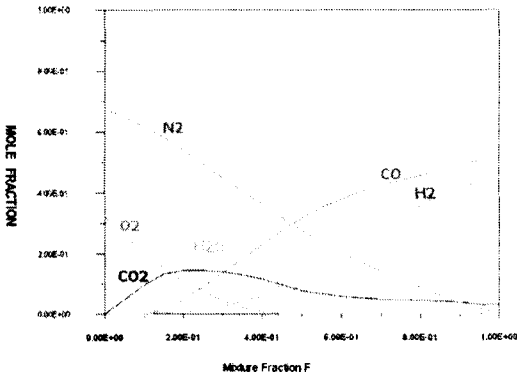


Fig. 7 합성가스 조성 분석 결과

Table. 3 가스화/용융설비 비교

		Shaft식	유동상식	로터리 킬른	단 위
1st Comp.	기능	용융, 가스화	가스화	가스화	-
	열량	10019.05	5379.12	3632.98	Mcal/hr
	로체적	39.2	9.8	127.6	m ³
	체적열부하	255.59	548.89	28.47	Mcal/hr-m ³
	가스화시간	0.8	0.3	2.0	Hr
	용융열 제외열량	8672.85	5379.12	3632.98	Mcal/hr
2nd Comp.	기능	가스연소	용융	용융	-
	열량	10516.38	8546.14	13026.07	Mcal/hr
	로체적	110.2	67.0	125.8	m ³
	체적열부하	95.43	127.55	103.55	Mcal/hr-m ³
	용융열 제외열량	10516.38	7647.71	12276.13	Mcal/hr
	용융열제외 체적열부하	95.43	114.14	97.58	Mcal/hr-m ³

Table. 3에 의하면, shaft식의 경우, 첫 번째 설비에서 용융과 가스화가 동시에 이루어지지만 타 설비들의 경우, 가스화만이 일어나므로 shaft식의 입력열량에서 용융에 필요한 열량을 제외한 즉,

열분해에 사용되는 단위 체적당의 열량만을 고려하여 다른 설비와 비교하고 총 열분해에 소요되는 시간을 곱해 단위면적당의 총 가스화 열량을 구하면, shaft식과 유동상식의 경우 유사한 값을 갖는 것으로 보이나 로터리킬른 방식의 경우, 매우 큰 가스화로의 체적으로 인해 다른 설비와의 공통적 요소를 갖지 못하고 있다. 이 설비의 over design 여부를 평가하는 것도 의미 있는 연구주제가 될 수 있을 것이라 판단되어진다. 두 번째 설비요소에 있어서 유동상식과 로터리킬른식의 경우 slag의 용융공정을 포함하므로 용융에 필요한 열량을 제외한 값에 대한 체적열부하를 비교하면 다양한 형태의 설비에 대해 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

3.3 운전조건 변화 예측기법

3.3.1 연구 방법

본 연구에서는 Shaft식의 가스화/용융설비에 대해 폐기물의 성상변화에 따른 입력조건 변화에 대한 운전조건 및 출력의 변화에 대해 열 및 물질정산분석을 통해 확인하였다. Fig. 8에 Shaft식의 가스화 용융설비에 투입되는 폐기물 성상별 DAF(Dry & Ash Free)상태의 유기물 함량을 도시하였다. 열 및 물질정산은 폐기물중 포함된 탄소원소의 질량과 열분해가스의 조성 예측에 의해 결정된 CO와 CO₂의 질량을 고려하여 이를 형성하는데 필요한 산소의 양을 계산하고 이를 폐기물내 포함된 산소량과 비교하여 연소공기 형태로 공급할 산소량을 계산하였다. Fig. 8에서 고질의 폐기물의 경우, 자체에 포함하고 있는 산소의 양이 많아 공급해야할 연소공기의 양이 감소하고 그 결과 Fig. 9에서와 같이 총 열분해 가스의 양이 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

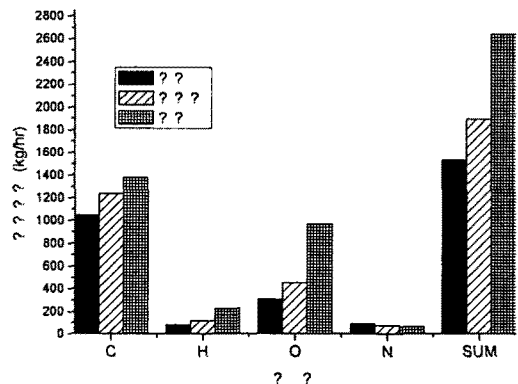


Fig. 8 폐기물 성상별 유기물 함유량(DAF)

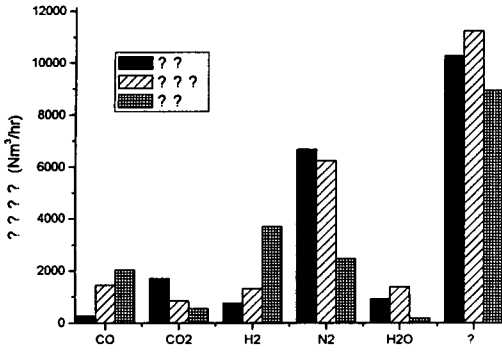


Fig. 9 열분해가스 조성 및 체적유량

3.3.2 연소실 공급공기량에 따른 변화

연소실 공급공기량과 재순환 연소가스량 측면에서 기준폐기물처리 상황과 동일한 운전조건을 저질, 기준질, 고질 폐기물에 대해 적용했을 때의 각 설비별 열부하를 Figure. 10에, 연소실 출구에서의 가스조성 및 발생량에 대해 Figure. 11에 각각 나타내었다.

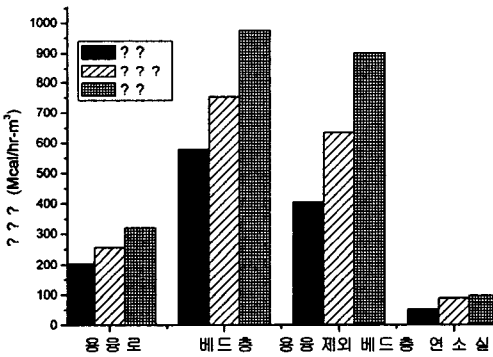


Fig. 10 폐기물 성상별 열부하

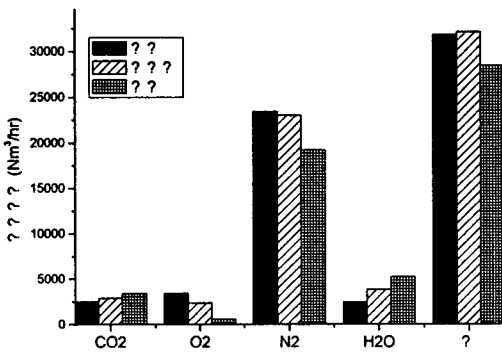


Fig. 11 연소실 출구 연소가스 조성 및 발생량

이 결과에서 폐기물의 고질 폐기물의 투입시 설비에 걸리는 열부하가 커지고 폐기물이 포함하고 있는 산소의 양이 증가함에 따라 공급공기의 양은 감소되어 연소실을 통과하는 최종 연소가스의 양은 감소하는 것을 알 수 있다. 또, 연소실에 용융로부터 공급된 열분해가스의 조성 및 유량에 맞춰 동일한 온도수준(950℃)을 유지할 수 있는 연소공기 및 재순환공기의 투입량에 대해서는 Fig. 12와 같은 연소가스 배출양상을 보였다.

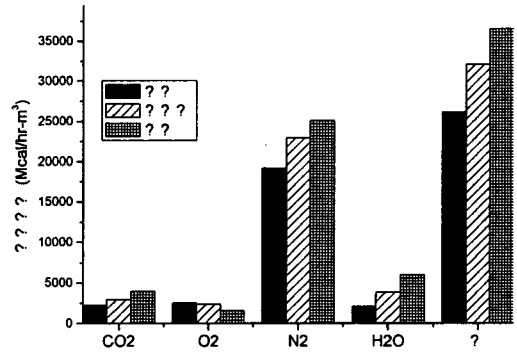


Fig. 12 연소실 출구 연소가스 조성 및 발생량

Fig. 12에서 저질과 고질 폐기물 사이의 연소가스 발생량에 대해 성분별 또는 총발생량에 있어 차이가 발생함에 따라 설비의 운전조건이 변화됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 보완하기 위해서는 열분해가스, 연소용 공급공기, 재순환공기의 효율적 혼합에 의한 연소효율 증진을 통한 고질 폐기물에 대한 공급공기 및 재순환가스의 공급량을 감소시킴으로써 열부하 감소 및 연소가스 발생량을 기준 폐기물 수준으로 조절하는 연구가 필요할 것이다. 이를 위해 CFD기법을 이용한 Mixing효과 증진을 위한 적절한 연소실 형상결정에 관한 연구가 요구된다.

4. 결론

본 연구를 통해 셰프트식(Shaft type), 유동상식(Fluidized Bed type), 그리고 로터리킬른방식(Rotary Kiln type)의 세가지 방식의 가스화/용융로의 폐기물 처리 공정에 대한 전반적 검토와 함께 그 유사점 및 차이점에 대해 고찰하였다. 그리고 앞서 기술한 세가지 방식의 가스화/용융설비에 대해 열역학적 평형상태에 대한 열분해가스 조성 및 비율을 예측하고 얻어진 데이터에 대해 각 설비별 열 및 물질 정산을 수행하여 얻어진 결과를 바탕으로 각 설비별 체적 열부하 및

열분해열량을 비교함으로써 설계요소 측면의 공통요소도 도출할 수 있었다. 또한, 각 방식별 구성설비의 기능 및 역할에 대한 구체화와 함께 특히 Shaft식 가스화/용융설비에 대해 폐기물 성상이라는 입력조건의 변화에 따른 설비의 운전상황 변화 및 출력변화에 대한 특성을 관찰하고 그 가변범위를 예측하였다. 이와 같은 입력조건의 변화에 따른 운전조건 및 출력조건의 변화효과를 감소시킬 수 있는 방법으로써 최적의 연소실 형상 및 운전조건 도출에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Yang, W., "A Study on prediction of operating conditions of MSWI by process simulation", 1997
- [2] Shin, D. H., "A study on design optimization of stoker type municipal waste incinerator for low emission", 1998
- [3] Choi, J. H., "Combustion characteristics of solid waste fuel in a bubbling fluidized bed"
- [4] KAIST Thermal Engineering Lab., 1999, "Low Pollution Waste Incineration", 2002
- [5] Peter Richard Austin, Hiroshi Nogama, Jun-ichiro Yagi, "A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace", ISIJ International, Vol. 37, No. 5, pp.458-467
- [6] Kim, J. H. , Lee, J. K, Kang, K. H., "Process development of manufacturing synthetic gas and recycling raw material from combustible wastes by gasification", 2003, pp.190-195
- [7] KAIST Thermal Engineering. Lab., "Numerical Simulation of Thermal Flow in a Fluidized Bed Combustor", appendix 3, 2000
- [8] Yun, Y. S., Joo., J. S., "Gasification/melting process development for treating combustible wastes : 5 ton/day-class ", 2002
- [9] Dong-Bu construction company, "Design Report of Yang-San Resource Recovery Plant", 2003
- [10] POSCO construction company, "Design Report of Yang-San Resource Recovery Plant", 2004
- [11] Hyosung-Ebara, "Design Report of Yang-San Resource Recovery Plant", 2003
- [12] 이승엽, "내부순환유동층 반응기에서의 폐타이어 가스화 특성 연구", 한국과학기술원 석사논문, 2000