대한설비공학회 2008 하계학술발표대회 논문집 pp. 1237 ~ 1242

08-S-204

열분해 가스화 용융시스템에서 용융슬래그의 폐열 활용

이 호 석, 성 상 철, 오 명 도†

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, † 서울시립대학교 기계정보공학과

Waste Heat Utilization of Melted slags at Pyrolysis, Gasification and Melting System

Ho-Seok Lee, Sang-Chul Sung, Myung-Do Oh†

Graduate school of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

† *Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea*

ABSTRACT : A study on waste heat utilization of melted slags at pyorlysis, gasification and melting system was performed. Researchers studied heat balance of substances that flow and flow out to the system which is consisted of melting furnace, combustion chamber, and waste heat boiler, then they calculated melting slags' quantity of heat by the first law of thermodynamics. If they use water cursh pit outflow which is gotten by quenching of melting slag as a energy for heating and cooling system, steam of waste heat boiler would be delivered to a steam turbine, making energy, then they will get 67,671,000 won of profit a year. It will take 3 years to repossess the cost that they invested for building it. And, if we predict durability of trash burner is 20 years, we will get approximately 1,150,407,000 won of profits in 17 years without the period when we repossess the building costs.

Key Words : Thermal balance(열정산), Waste heat (폐열), Heating and cooling system (냉난방 시스템), Payback period(회수기간)

1. 서 론

급속한 산업화와 대도시의 인구증가에 따른 생활 및 산업 쓰레기 등 각종 폐기물의 발생이 급증하고 있다. 환경부에서는 2011년까지의 폐기물 관리목표와 정책방향을 제시한 '제2차 국가폐기물관리종합계획 수정계획'을 수립·확정하였다. 각 부문별 주요 추진계획을 보면 먼저 폐기물자원화 부문에서는 단순 매립·소각되는 폐기물을 최소화하고 폐기물 재활용과 자원·에너지회수를 극대화하기 위해 전처리시설 설치를 확대할 계획이다.

오늘날 국내 특성상 매립을 위한 공간 확보의 어려움과 강화되는 환경규제로 인해 주요한 폐기물 처리방식이 기존의 대량소각방식에서 신기술인 직접용융자원화 방식으로 전환될 것으로 예상된다. 또한 정부는 매립 등의 처리방식에서 폐기물을 자원화 할 수 있는 자원 순환형 폐기물 관리체계를 구축하기 위한 연구개발 및 기술의 도입을 추진하고 있으며, 사업장폐기물, 생활폐기물 및 슬러지를 포함한 가연성폐기물에 대하여 단순 소각 보다 환경친화형 기술인 열분해 가스화 용융기술의 적용을 적극적으로 검토하고 있다.

현재 많은 열분해 가스화 용융방식에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다. Lee et al.[(1)]은 열분해

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2210-2756; Fax: +82-2-2248-5110
E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

가스화 용융방식에 따른 열정산 분석을 통한 가스화 용융설비의 설계 및 운전범위에 대한 기주에 대한 연구를 수행하였다. Kim et al[2]은 열분해 산물인 촤(Char)의 특성을 살펴보고 이에 맞춰 알맞은 용융 조건을 알아본 후 용융 후 생성된 슬래그에 대한 1차적인 재활용성 결과에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Kim et al[3]은 50톤 일급 폐기물 가스화 용융시스템에 대하여 에너지 이용 효율 향상을 위한 공정 개선 방안 연구를 수행하였다.

그러나 아직까지는 용융슬래그의 폐열을 이용하는 방안에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 열분해 가스화 용융시스템인 고양시 환경에너지시설의 주요설비 용융로와 연소실, 폐열보일러의 물질 열정산을 통해 용융슬래그의 폐열을 이용하는 방안과 이때 사용가능한 에너지량을 추정해 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 에너지 평형

고양시 환경에너지시설의 주요설비 용융로와 연소실, 폐열보일러 시스템의 열정산을 위해 에너지 보존법칙을 사용하였다. 이는 어떤 종류의 과정이나 계에도 모두 적용할 수 있으며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{IN} - E_{OUT} = \triangle E_{system} \qquad (1)$$

여기서, E_{IN}은 계로 들어온 총 에너지, E_{OUT}은 계로 부터 나간 총 에너지, $\triangle E_{system}$은 계의 총 에너지 변화를 나타낸다.

2.2 이론 습연소가스량

시스템에서 나가는 열량 중 폐열보일러 출구에서 연소가스의 열량을 구하기 위해서는 연소가스의 양을 알아야 한다. 이때 연소가스의 양은 이론 습연소량 공식(G_s)을 사용하여 계산할 수 있다. 이론 습연소가스량은 연소 후 그 양이 무시할 정도로 작은 아황산가스와 염화수소를 제외하고 이산화탄소, 산소, 질소, 증기의 양을 기초[4]로 하며, 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$G_S = 1.867C + 1.244(9H + W) \qquad (2)$$
$$+ (AR - 0.21)A_0 + 0.8N$$

여기서, C, H, O, S는 폐기물 원소분석결과 각각 탄소, 수소, 산소, 황성분의 건량기준 질량 퍼센트(kg/kg), H와 W는 각각 수소와 수분의 습량기준 질량 퍼센트(kg/kg)를 나타낸다. A_0은 이론 공기량, AR은 과잉공기비를 나타내며, 단위는 Nm^3/kg이다. 이론공기량과 과잉공기비는 각각 식 (3), (4)로 표현되며, 이론공기량은 연료가 완전 연소하는데 필요한 가장 적은 공기량이며, 과잉공기비는 실제 연소에 필요한 실제 공기량을 이론공기량으로 나눈 값이 된다.

$$A_0 = \frac{1}{0.21}\times\left\{\frac{22.4}{12}\times C + \frac{11.2}{2}\times(H - \frac{O}{8}) + \frac{22.4}{32}\times S\right\} \qquad (3)$$
$$= 4.762\times\left\{1.876\times C + 5.6\times(H - \frac{O}{8}) + 0.7\times S\right\}$$

$$AR = \frac{A_t}{A_0} \qquad (4)$$

여기서, C, H, O, S는 각각 탄소, 수소, 산소, 황성분의 건량기준 질량 퍼센트(kg/kg), A_t는 실제 연소에 필요한 실제 공기량을 나타낸다.

3. 연구대상 및 연구방법

3.1 연구대상

본 연구에서 열정산과 용융슬래그의 폐열 활용 연구가 수행된 시설은 고양시 환경에너지시설로 고양시 일산동구 백석동에 위치해 있고 현재 시공 중에 있다.

Table 1은 고양시 환경에너지시설의 설비 자료이다. 고양시 환경에너지시설은 열분해 용융시설 150톤/일의 규모인 열분해 용융로 2기와 연소실 2기로 이루어지며, 하루 300톤의 폐기물을 처리하여 시간당 6,000 kW의 전력과 30Gcal의 열을 생산하여 에너지 회수 및 이용을 할 수 있다. 또한 인체에 무해한 고품질의 슬래그를 생산하여 재활용하는데 기여하여 환경부하를 저감하는 기

능을 수행하는 자원 순환형 시설이다.

3.2 연구방법

Fig. 1은 용융로, 연소실, 폐열보일러로 구성된 고양시 환경에너지시설의 주요설비로 유·출입되는 물질 열량을 표시한 것이다. 주요설비로 유입되는 열량은 폐기물, 코크스, 압입공기, 연소공기, 폐기물침출수, 요소수, 재 순환가스가 있고, 유출되는 열량으로는 폐열보일러출구에서의 연소가스, 폐열보일러에 의해 회수되는 열량, 용융슬래그가 있다. 폐기물, 코크스, 압입공기, 연소공기, 폐기물침출수, 요소수의 열량은 유입되는 물질의 양과 온도, 비열을 사용하여 계산하고, 폐열보일러에 의해 회수되는 열량은 연소실 출구와 폐열보일러의 출구의 온도 차이를 이용하여 계산을 수행하였다. 폐열보일러출구에서 연소가스는 이론 습연소가스량 공식을 사용하여 연소가스의 양을 계산한 후 이때의 온도와 그 온도에서의 가스비열을 이용하여 계산하였다. 용융슬래그는 각각 유·출입되는 다른 물질들의 열량을 계산한 후 에너지 보존법칙을 이용하여 추정하였다. 단, 이때 주요설비는 열손실이 없다고 가정하였다.

회수되지 않는 폐열보일러출구에서 연소가스와 용융슬래그의 에너지 중 일부를 회수할 수 있는지 평가하였고, 이 중 회수 가능한 용융슬래그의 에너지를 추정하고 활용방안을 연구하였다. 사용가능한 에너지량은 Fig 2와 같이 용융슬래그를 수냉 처리할 때 이용되는 수쇄수의 냉각탑으로부터 일정한 온도범위를 위해 버려지는 열량으로 계산하여 구하였다.

그리고 본 연구에서 제시한 활용방안의 타당성을 검증하기 위해 초기투자비용과 기존설비투자비용을 비교분석하여 투자비회수기간에 대해서 검토하였다.

Table 1 Target facility outline

Outline	
Type	Shaft type
Pyrolysis Melting Furnace	150ton/day X 2 units
Pyrolysis Gas Combustion Chamber	150ton/day X 2 units
Waste Heat Boiler	35ton/hr X 2 units (25kg/cm^3 · G)
Steam Turbine Generator	6,000kW (Rated capacity)
Combustion Gas Treatment Facility	SNCR, SEMI-DRY REACTOR, BAG FILTER, STEAM GAS HEATER
STACK	diameter 1.1m, height 100m

4. 결과 및 고찰

4.1 용융슬래그의 열량 추정

Table 2는 고양시 환경에너지시설의 주요설비로 유·출입되는 물질의 열량을 계산한 결과이

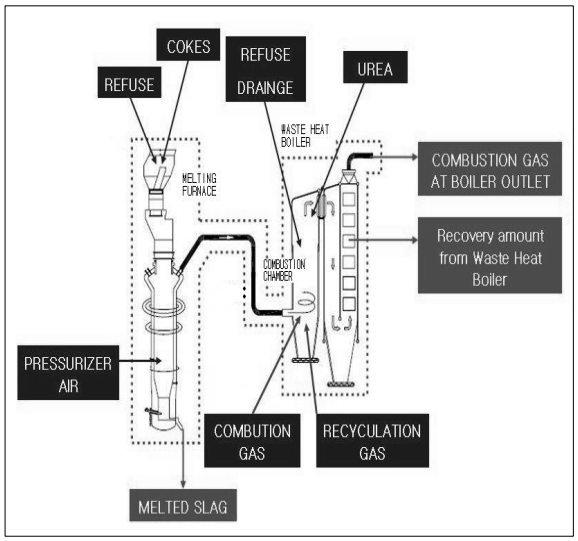


Fig 1 Heat of substances of flow-in and flow-out to the system

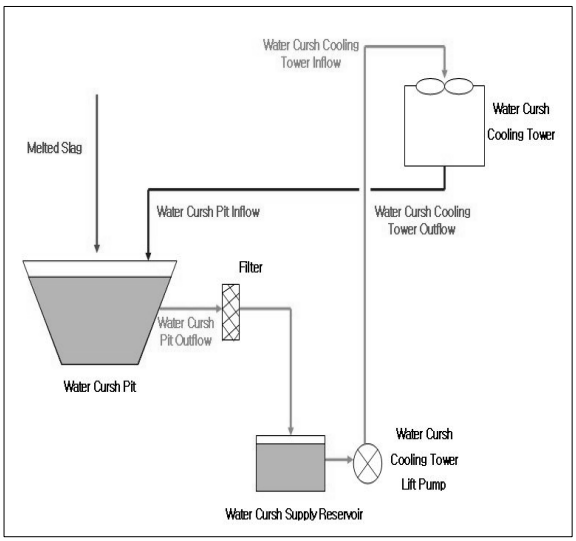


Fig. 2 Schematic diagrams of the water cursh system

Table 2 Heat balance at melting furnace, combustion chamber and waste heat boiler

unit: *kcal/hr*

	Substances	Refuses		
		High	Medium	Low
Input heat	Refuse	21,875,000	18,125,000	13,125,000
	Cokes	812,500	2,034,500	2,034,500
	Pressurizer Air	83,030	83,030	83,030
	Recirculation gas	1,475,386	1,125,089	450,861
	Combustion Air	430,441	388,108	289,602
	Refuse Drainge	3,932	3,932	3,932
	Urea	1,594	1,461	1.196
	Total	**24,729,087**	**21,808,402**	**16,034,285**
Output heat	Combustion Gas at Boiler outlet	4,490,208	3,884,521	2,423,006
	Recovery amount from Waste Boiler	18,966,829	16,397,294	10,147,320
	Melted slag	1,319,734	1,568,672	3,498,939
	Total	**24,729,087**	**21,808,402**	**16,034,285**

다.

고양시 환경에너지시설 주요설비의 유·출입되는 물질 열정산과 에너지 보존법칙을 이용하여 계산된 용융슬래그의 열량은 고질, 기준, 저질 각각에 대하여 1,139,734 *kcal*, 1,568,672 *kcal*, 3,498,939 *kcal* 로 나타났다.

연소가스의 열량과 폐열보일러에 의해 회수되는 열량은 고질 > 기준 > 저질 순으로 계산되었지만, 용융슬래그는 이와 반대로 저질 > 기준 > 고질 순임을 알 수 있다. 이는 저질쓰레기는 가연분이 많이 포함되지 않아 연소실출구에서 배출된 연소가스의 양이 적기 때문으로 판단된다.

4.2 폐열 활용방안과 사용가능 에너지량

시스템에서 나가는 열량 중 폐열보일러출구에서 연소가스와 용융슬래그의 폐열을 활용한다면 연구대상의 효과적인 에너지 회수가 가능할 것으로 생각된다.

우선 폐열보일러출구의 연소가스는 200℃ 고온의 가스로 그 열량이 상당히 높은 에너지를 가지고 있으나 열량의 일부를 회수하여 연소가스의 온도를 낮출 경우 산성가스 제거설비인 반건식 반응탑의 운영조건이 달라져 산성가스의 효과적인 제거가 사실상 어려워지게 되므로 연소가스 열량 회수는 불가능할 것으로 판단된다.

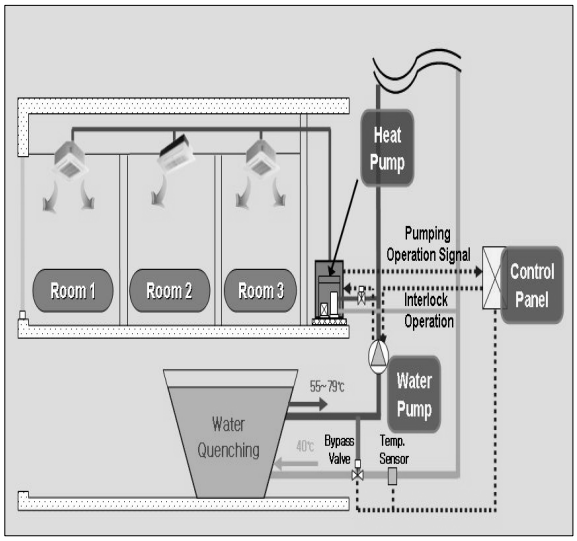
고질, 기준, 저질 각각에 대하여 시스템에서 나가는 총 열량의 5 %, 7 %, 22 % 의 열량을 가지는 용융슬래그는 건축 토목자재로 사용되기 위해 에너지 회수없이 수냉 처리된다. 용융슬래그를 수냉 처리할 경우 발생하는 수쇄수의 높은 온도를 이용하여 용융스래그의 에너지를 회수할 수 있을 것으로 생각된다. 이 방안은 기존의 설비를 크게 바꾸지 않으면서 용융슬래그의 에너지를 회수할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, Fig. 2와 같이 수냉 처리 후 발생하는 고온의 수쇄조 유출수가 냉각탑에 의해 공랭될 때 버려지는 에너지를 수냉식 냉난방 시스템의 에너지원으로 사용할 수 있을 것이다.

이때 수냉식 냉난방 시스템은 냉각탑과 보일러를 열원으로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 지열, 건물의 폐수와 같은 미활용열원의 사용이 가능하여 이를 응용한 에너지 절약 설계가 가능한 시스템으로 이 시스템을 적용 시 용융슬래그의 폐열을 냉난방 열원으로 사용할 수 있다.

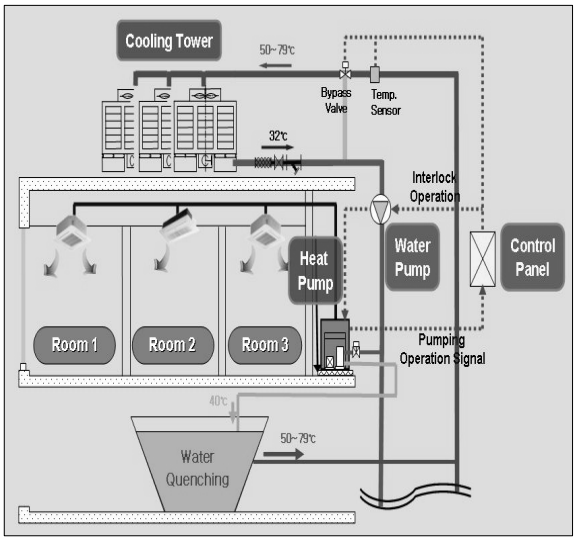
Fig. 3 (a)는 수냉식 냉난방 시스템에서 겨울철 난방의 경우 55~79℃정도의 수쇄조 유출수와 냉매가 히트펌프를 통해 열교환함으로써 실내는 난방되고 수쇄조 유출수를 40℃로 낮춰서 다시 수쇄조로 유입된다.

Fig. 3 (b)와 같이 냉방의 경우, 55~79℃의 고온의 수쇄조 유출수를 냉각탑을 통과시켜 32℃까지 낮춘 후 히트펌프를 통해 냉매와 열교환함으로써 실내는 냉방되고, 이 때 수쇄조 유출수는 40℃로 높아져 수쇄조로 다시 유입된다.

이때 사용가능한 에너지량은 고질, 기준, 저질



(a) Heating



(b) Cooling

Fig. 3 Heating and cooling system by using the waste heat of melted slag

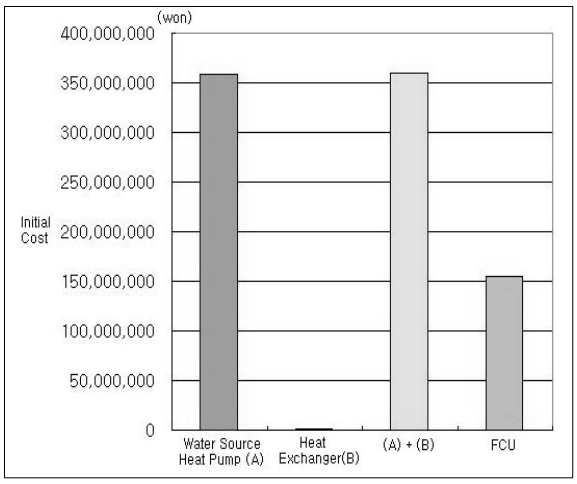


Fig. 4 Comparison of the initial cost

각각에 대하여 용융로 1기당 277,367 $kcal/hr$, 329,118 $kcal/hr$, 724,421 $kcal/hr$로 계산되었다.

4.3 적용 타당성 검증

위 시스템의 타당성 검증을 위해 용융슬래그의 폐열을 이용한 수냉식 냉난방시스템의 적용 전후 초기투자비용과 추가 매전 비용을 분석하여 경제성을 평가를 수행하였다.

기존 설비의 초기투자비용은 기존 냉난방 설비인 수냉식 팬코일 유니트(FCU)의 설치비용로 고려하였고, 수냉식 냉난방 시스템의 초기투자비용의 경우 환경에너지시설 관리동의 연면적(1675 m^2)을 기준으로 7.5kW 수냉식 실외기 약 20대의 설치비용으로 고려하였다. 수냉식 냉난방 시스템을 설치할 경우 환경에너지시설에 온수를 공급하지 못하기 때문에 별도의 열교환기를 추가 설치하여야 한다. 이에 따라 수냉식 냉난방 시스템을 설치하기 위해 추가적인 비용은 수냉식 실외기 20대의 초기투자비용과 온수를 제공할 수 있는 열교환기의 비용의 합에 기존 설비의 초기투자비용의 차로 구하였다.

Table 3 Revenue and payback period

Electric power cost	66won / kW
Electric power production per hour	142.4 kWh
Operating hours	20 hours/day
Running days	360 day/year
Revenue	67,671,000 won
Difference of Initial investment cost	205,103,000 won
Payback period	3.03 years

Fig. 4는 각각의 초기투자비용을 도식화한 것이며, 기존 설비와 수냉식 냉난방 시스템의 초기투자비용은 각각 154,430,076원, 359,200,000원으로 2배 이상의 차이가 나는 것을 알 수 있다.

추가되는 초기투자비용의 회수 가능한 기간을 구하기 위해 수냉식 냉난방 시스템을 적용시 기존 설비의 열원인 증기로 전력을 생산하여 매전할 경우 얻어지는 수익을 계산하였다.

Table 3은 매전 단가 증가율과 유지운영비를 고려하지 않고 회수 기간을 계산한 결과이다. 연간 67,671,000원의 매전 수익이 생기며, 수냉식 냉난방 시스템을 위한 추가되는 초기투자비용인 205,103,000원을 회수할 수 있는 기간은 3.03년으로 이 설비는 경제성인 것으로 생각된다. 그리고 일반적인 열분해 소각로의 수명이 20년이므로, 용융슬래그에 의해 절약되는 에너지는 회수기간을 제외하고 약 17년 정도(연간 67,671,000원)로 약 1,150,407,000원의 경제적 가치가 있을 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 고양시 환경에너지시설의 사용가능한 용융슬래그의 열량을 계산하고 사용가능한 에너지의 가치를 분석하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 쓰레기 성분 분석 결과를 반영하여 계산된 용융슬래그의 열량은 고질, 기준, 저질 각각에 대하여 용융로 1기당 1,319,734 *kcal/hr*, 1,568,672 *kcal/hr*, 3,498,939*kcal/hr*이다.

(2) 용융슬래그의 폐열을 회수하기 위한 방법으로 용융슬래그를 수냉 처리할 때 발생하는 수쇄수의 높은 온도를 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 가열된 수쇄수로부터 회수할 수 있는 에너지를 수냉식 냉난방 시스템의 에너지원으로 적용할 수 있으며, 이때 사용가능한 에너지량은 고질, 기준, 저질 각각에 대하여 용융로 1기당 277,367 *kcal/hr*, 329,118 *kcal/hr*, 724,421 *kcal/hr*이다.

(3) 본 연구대상에 수냉식 냉난방 시스템을 설치하기 위해 추가되는 비용은 205,103,000원이고 수냉식 냉난방 시스템 적용할 경우 매전 수익은 연간 67,671,000원으로 추가되는 초기투자비용 회수기간은 약 3년이 소요될 것으로 판단된다. 일반적인 열분해 소각로의 수명이 20년이므로, 용융슬래그에 의해 절약되는 에너지는 회수기간을 제외한 약 17년 정도(연간 67,671,000원)로 약 1,150,407,000원의 경제적 가치가 있을 것으로 추정된다.

참고문헌

1. Lee. M. D., 2005, Design Analysis of Gasification Melting Furnaces, MS thesis KAIST

2. Kim. Y. L., Joung. H. T., Seo. Y. C., Kim. S. J., Kim. W. H., 2006, A study on the Characteristics of Melted slag of Char Generated from Gasification of MSW, Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 23, No. 6, pp. 493-501

3. Kim. S. H., Yoo. Y. D., Lee. H. H., 2004, A Study of the Process Improvement of the Waste Gasifier & Melting System for raising the Energy Efficiency, Proceeding of the KOSEE 2004 Spring annual conference, pp. 165-170

4. Park. J. K., 2001, The Design, Construction and Characteristics of Operation of Pyro-Decomposition Incinerator for High Polymer Industrial Waste to Energy, MS thesis, Pusan University