슬러지 연소 특성을 통한 신재생에너지의 안전성 연구

박경진* · 여재익**† · 윤희철***

On the Characteristics of Sludge Combustion for Developing Safe and Reusable Energy

Kyong-jin Park, Jai-ick Yoh and Hee-chul Yoon

ABSTRACT

A new and reusable energy source is water-treatment sludges. There is a significant need for understanding the characteristics of sludge combustion related to improving efficiency and ensuring the safety of this new energy source. Because sludges are composed of solids and gas mixture, the combustion of the mixture may become quite complex. Not only decomposition of conventional organic elements but also dust explosion may be important during the process of converting sludges into a new and safe form of energy. Sludge combustion mainly involves hydrogen, methane, hydro carbons, carbon, and organic particles. Dust explosion during the gasification stage may depend on the surrounding temperature and the composition of gases. The uncertainty in the explosive behavior of energetic source is noted in this work. We study the explosion characteristics of sludge combustion while the reusability of sewage sludges as a new form of energy is also investigated.

Key Words : sludge combustion, reusable energy, dust explosion

기 호 설 명

Ψ : Phase potential well depth	β_m : melting transition function
ψ : phase-field variable	β_v : vaporization transition function
Q_{hc}: enthalpy of reaction	Ω : rate of chemical reaction
Q_m, Q_v: heat of melting, evaporation	B_ψ : Phase evolution parameter

1. 서 론

국내에서 매일 발생하는 유기성 슬러지의 양은 7100톤에 달한다. 현재 대부분의 유기성 슬러지들을 해양에 투기 처리하고 있다. 하지만 환경오염 문제로 해양 투기는 점차 억제, 금지될 예정이다.

유기성 슬러지는 건조 시 약 3500㎉/㎏의 발열량을 가진 물질이고, 폐기물을 가공 연료로 사용하기 때문에 친 환경 '신재생 에너지'로 분류된다.

유기성 슬러지의 연소는 열분해를 통한 가스의 생성과정뿐 아니라 열분해 후 생성된 가스의 연소 과정에 대한 이해까지 필요하다. 또한 건조된 유기성 슬러지의 연소의 경우 분진 폭발에 대한 이해 역시 필요하다.

기존의 연구들은 주로 슬러지를 열분해 하는 과정에서 주어진 조건에 따른 열분해 특성을 연구하거나[1], 열분해 과정을 연구하거나, 열분해로 인해 발생하는 수소의 양을 연구하는 것에 그쳐왔다.

유기성 슬러지를 이용한 '신재생 에너지'의 연구는 그 발열량을 증대시켜 보다 효율적인 에너지

* 서울대학교 기계항공공학부
** 서울대학교 기계항공공학부
*** 포스코건설 기술연구소
† jjyoh@snu.ac.kr

원으로 사용하는 것을 주목적으로 한다. 하지만 그 과정에서 일어날 수 있는 여러 가지 안전사고에 대한 연구가 이루어 지지 않아 아직은 여러 가지로 미흡한 분야일 수밖에 없다.

안전사고에 대한 연구를 하기 위해서는 보다 명확한 슬러지 연소 전반에 대한 모델링이 필요하다. 따라서 기존의 연구들을 바탕으로 슬러지의 열분해를 비롯하여 연소 과정에 대한 모델을 제시하고 그 모델을 바탕으로 전반적인 연소 특성을 파악하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

본 연구에서는 기존의 논문에서 주어진 열분해 특성을 바탕으로 연소 과정을 특정 기체를 중심으로 모델링하였고, 그것을 바탕으로 연소 특성에 대하여 조사하였다.

2. 본 론

2.1 슬러지의 성분 모델링

2.1.1 일반적 슬러지 모델

슬러지는 발생하는 지역, 시간, 주요 발생원인 등에 따라 구성 성분이 매우 달라진다. 따라서 가장 정확한 것은 샘플을 직접 분석하여 그 성분을 조사하는 것이다. 하지만 현실적인 문제 때문에 기존에 조사되었던 논문을 바탕으로 연구를 진행하였다. 슬러지가 가지는 특성 때문에 하나의 논문을 바탕으로 성분을 추측하기 보다는 다양한 논문을 읽고 되도록 조건이 유사한 지역의 것을 바탕으로 모델링 하는 것이 좋다.

Component		Sludge 1	Sludge 2
Ash	wt% dry fuel	31.0	44.6
Carbon		30.9	29.0
Hydrogen		4.6	3.8
Nitrogen		4.5	3.1
Sulphur		1.1	0.80
Chlorine		0.1	0.17
Oxygen		26.5	17.56
SiO_2	wt% ash oxide	33.6	41.3
Al_2O_3		15.6	14.3
CaO		22.2	19.8
P_2O_5		16.7	8.7
Fe_2O_3		3.6	6.8
TiO_2		1.3	1.2
MgO		2.3	3.2
Pb	ppm dry fuel	211	369
Cd		2	5
Hg		< 2	< 20
Zn	ppm dry fuel	567	834
Ni		32	35
As		10	20
Cu		829	487
Co		3	6
Cr		62	227
HDT		1120	1200
HDT is hemisphere temperature			

Table 1. Comparison of Chemical composition of sewage sludge[2].

앞에서 언급한 것처럼 슬러지의 성분은 지역별로 다르기 때문에 위의 표를 참고하여 슬러지 성분을 결정하고 이것을 바탕으로 모델링 하겠다.

2.1.2 단순화 모델

위에서 구한 모델은 다양한 고체가 존재하는 것뿐만 아니라 다양한 종류의 기체가 존재한다. 하지만 그 양이 미세하여 전체적인 연소 특성을 해석함에 있어 영향을 거의 미치지 않는 것도 있을 뿐만 아니라 고체와 기체가 공존하기 때문에 해석함에 있어 어려움이 있다. 따라서 슬러지의 연소를 해석하기 위해서 전체를 계산하지 않고 큰 비중을 차지하는 성분을 바탕으로 한 단순화 모델이 필요하다.

또한 슬러지의 연소는 고체와 기체의 혼합이기 때문에 보다 단순화된 모델이 필요하다. 최종적으로는 동시에 해석을 할 필요가 있지만 계산의 편리를 위해 (1) 슬러지 고체의 열분해 (2) 열분해 기체의 연소의 두 단계로 나누어서 해석을 진행한다. 슬러지의 열분해는 주변 온도에 따라 발생하는 기체의 특성이 달라지는데 이것은 초기 건조 과정의 온도에 의해 결정된다. 이때 발생한 기체가 연소되면서 온도가 상승되고 이것은 나머지 슬러지의 열분해를 유발하게 된다. 본 연구에서는 모든 슬러지가 열분해 되어있다는 가정 하에 열분해 이후 생성된 기체의 연소만을 가정하여 연소 특성을 해석하였다.

2.2 단순화 모델링 기체의 연소

2.2.1 열분해 기체의 단순화 모델링

슬러지가 열분해 되는 경우 여러 가지 기체가 발생한다. 그 중에서 연소가 가능한 기체는 대략 19-23%정도 발생하며 주로 수소와 일산화탄소, 탄화수소, 메탄 등이 발생한다[3][4]. 물론 슬러지의 종류에 따라 각각의 비율이 다르지만 대표적인 하나의 모델을 정하고 그것에 따른 계산을 수행하였다[2]. 여기서도 다음과 같은 단계에 따라 다양한 모델을 만들어서 계산을 수행한다. (1) 몇

가지 대표적인 기체만으로 모델링 (2) 미량의 기체까지 포함한 기체 모델링 (3) 모든 기체 및 미세 분진까지 포함한 기체 모델링 등의 단계를 차례로 시도하여 계산을 수행한다. 본 연구는 (1)번 과정만을 고려하여 연구를 수행하였다.

2.2.2 열분해 기체의 연소 관계식

건조기 내부에서 일어나는 슬러지의 연소를 해석하기 위해서 본 연구에서는 단순화 모델을 사용하였다. 건조기에서 발생한 열에 의해서 슬러지는 몇 가지 기체로 열분해 되는데 이때 발생하는 기체들을 전부 포함한 화학식은 계산하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 계산을 수행하기 위해 모든 가연성 기체는 수소, 일산화탄소, 메탄으로 되어있다고 단순화 하여 계산을 수행한다. 또 앞에서 참조한 논문을 바탕으로 기체들의 비율을 2.3:1.5:1.2로 정한다.

$$2.3H_2 + 1.2CH_4 + 1.5CO + jO_2 + kN_2 \rightarrow \quad (1)$$
$$l\,H_2O + m\,CO_2 + nNO_x$$

위의 식은 가정을 바탕으로 작성된 화학반응식으로 이때 계수 j, k, l, m, n은 계산을 수행하는 과정에서 구할 수 있다. 본 계산을 수행하기 위해서 기존의 연구에서 이미 얻어진 화학반응 단계 식을 이용하여[5],[6] 계산을 수행한다.

또 이러한 가연성 기체의 경우는 단순 연소에서 끝나는 것이 아니라 폭발로 이어지기 때문에 이에 대한 해석도 병행하여야 한다.

따라서 연소 및 폭발을 해석하기 위해 아래의 식을 사용하였다[7].

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \quad (2)$$

$$u = 0 \quad (3)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho T\left(\beta_m' \frac{Q_m}{T_m} + \beta_v' \frac{Q_v}{T_v}\right)\frac{\partial \psi}{\partial t} + B_\psi \left(\frac{\partial \psi}{\partial t}\right)^2 + \rho Q_{hc} \Omega \quad (4)$$

$$B_\psi \frac{\partial \psi}{\partial t} = \rho \frac{1}{2} \Psi \frac{\partial}{\partial \psi}[((\psi)(\psi-1)(\psi-2))^2] - \rho\beta_m'(\psi)\frac{T-T_m}{T_m}Q_m - \rho\beta_v'(\psi)\frac{T-T_v}{T_v}Q_v \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \Omega_i \quad (6)$$

계산을 수행함에 있어, 건조기 내부에서는 전체의 밀도가 일정하고 속도가 없다고 가정하여 정적 발열 폭발과정으로 가정하였다. 그리고 건조과정이 고온에서 일어나기 때문에 열분해 과정에서 슬러지의 증발 및 기화가 일어나기 때문에 위의 모델링 식에 상변화 계수인 ψ (0: solid, 1: liquid, 2: gas)가 포함 되었다. 또한 화학종 방정식 ρ_i ($\Sigma_i^N \rho_i = \rho$)과 반응 엔탈피 Q_{hc} 항이 전체 방정식에 포함되어 있다. 반응률인 Ω는 익히 알려진 아레니우스 방정식을 따랐다. 상에 따라 달라지는 물질 변화 함수인 β_m, β_v는 참고문헌에 자세히 설명되어 있다.[7].

2.3 단순화 슬러지의 연소

2.3.1 슬러지의 단순화 모델링

단순화 슬러지의 연소는 기본적으로 위에서 해석을 진행하였던 단순화 기체의 연소를 바탕으로 해석을 한다. 단순화 기체의 경우와 유사하게 슬러지가 가지고 있는 수많은 성분을 모두 가정하고 해석을 하는 것은 어려움이 따르기 때문에 (1) 슬러지는 모두 탄소로만 구성되어있다고 가정하는 경우 (2) 타 조사에서 주어진 조성을 바탕으로 기타 중금속 및 유기성 성분을 포함하는 경우로 나누어 해석을 진행 하였다.

2.3.2 단순화 슬러지의 연소 모델링

단순화된 슬러지의 연소를 해석하는 과정은 고체와 기체의 혼합물에 대한 연소 해석이다. 따라서 그 과정이 매우 복잡하여 모델링 하는 것이 어렵다. 따라서 다음과 같은 가정을 바탕으로 해석을 진행한다.

(1) 슬러지는 건조과정에서 탄소를 제외한 모든 성분이 기체 상태로 존재한다.

(2) 슬러지의 열분해에 필요한 열은 모두 건조 과정에 흡수되었다.

(3) 연소 시 발생하는 열손실은 없다.

2.3.3 슬러지의 연소 모델링

슬러지 연소는 위의 모든 해석 과정을 바탕으로 하여 이루어진다. 지금까지의 해석에서 제외하고 계산을 하였던 각종 중금속 및 금속화합물, 유기성 물질이 연소하는 것까지를 모델링한다. 이러한 물질들은 그 양은 작지만 하나하나가 고에너지물질로 발열량에 중대한 영향을 끼친다. 따라서 슬러지의 연소 특성을 이해하고 나아가서 분진 폭발을 이해하는 데에 있어서 꼭 필요한 과정이라고 할 수 있다.

2.4 슬러지의 연소

슬러지를 '신재생 에너지'로 사용하려면 건조를

시켜야만 한다. 하지만 그 과정에서 열분해가 일어나고, 그때 발생하는 기체는 연소가 쉽게 일어나는 기체가 대부분이다. 게다가 건조 시 필연적으로 발생하는 미세 슬러지 입자는 분진 폭발이 일어나기에 알맞은 조건이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지 모델들을 바탕으로 연소가 발생하는 경우를 해석하였다. 이것을 바탕으로 슬러지를 '신재생 에너지'로 사용할 경우 발생하는 열량을 예측할 수 있고, 또 연소 해석을 바탕으로 효율을 증대시킬 수 있게 된다.

2.5 슬러지 연소의 안전성

분진 폭발은 특정종류의 미세 입자가 공기 중에 어느 밀도 이상 존재하는 경우에 한하여 발생한다. 우리가 '신재생 에너지'로 사용하고자 하는 유기성 슬러지의 경우 그 자체로 분진 폭발이 일어나기 쉬운 물질일 뿐만 아니라 열분해 시 발생하는 기체들은 쉽게 발화가 일어나는 것들이다. 이러한 점들이 슬러지를 건조 혹은 보관하는 과정에서 분진 폭발을 가능하게 하고 이것은 안전사고로 연결된다. 따라서 안전한 대체 에너지원으로 사용하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용해 주어야 한다.

슬러지의 분진 폭발은 주변의 기체가 발화가 되는 것이 주원인이라고 볼 수 있다. 따라서 분진 폭발을 막는 가장 좋은 방법은 주변 기체에 일정량의 질소를 첨가하여 발화를 막는 것이다. 위에서 제시하였던 기체의 연소는 어느 정도 이상의 밀도가 되어야 발화가 일어나거나 혹은 주변으로 전파가 쉽게 되어 연쇄 폭발을 일으킬 수 있게 된다. 따라서 이러한 일이 일어나는 것을 사전에 막으려면 불활성 기체인 질소를 첨가해서 전체적인 연소 가능 기체의 밀도를 낮춰주는 것이 필요하다. 이 때 필요한 질소의 양과 그때의 연소 특성은 다음에 계산을 할 예정이다.

3. 결 론

슬러지를 이용한 '신재생 에너지'는 차세대 친환경 대체 에너지이다. 하지만 모델링을 통한 수치해석이 거의 없어서 안전성 및 효율을 추측하는데 어려움이 많았다. 본 연구는 하나의 샘플을 바탕으로 슬러지의 성분을 결정하고 그것을 바탕으로 연소 특성 및 분진 폭발 가능성에 대하여 연구를 한다. 슬러지를 이용한 '신재생 에너지'는 그 자체만으로도 훌륭한 에너지원 이지만, 후처리를 통하여 보다 좋은 에너지원이 될 수 있다. 또한 분진 폭발 조건을 연구함으로써 앞으로 '신재생 에너지'의 안전성 확보를 할 뿐만 아니라 다른 분야로의 응용 또한 가능하게 된다. 본 연구를 함에 있어서 여러 가지 모델들을 사용하였는데 이것이 실제와는 차이가 나는 부분이 많았다. 앞으로는 조금 더 다양한 모델을 만들어서 보다 실제와 비슷한 경우의 해석을 수행하고자 한다.

후 기

이 연구는 포스코건설의 신재생에너지연구과제의 지원과 BK-21의 재정적 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

[1] M. Inguanzo, A. Dominguez, J.A. Menéndez, and C.G. Blanco, J.J. Pis, "On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 63, 2002, pp. 209-222.

[2] J. Werther , and T. Ogada, "Sewage sludge combustion," Progress in Energy and Combustion Science, 25, 1999, pp. 55-116.

[3] S. Yaman, Energy Conversion and Management 45, 2004, pp. 651-671.

[4] Adnan Midilli, Murat Dogru, Colin R. Howarth, Mike J. Ling, and Teoman Ayhan, "Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier," Energy Conversion and Management 42, 2001, pp. 157-172.

[5] Eugene P. Dougherty, and Herschel Rabitz, "Computational kinetics and sensitivity analysis of Hydrogen-oxygen combustion" Journal of Chemical Physics 72(12), 1980, pp. 6571-6585.

[6] A Massias, D Diamantis, E Mastorakos, and D. A. Goussis, "Global reduced mechanism for methane and hydrogen combustion with nitric oxide formation constructed with CSP data," Combustion Theory Modelling, 3, 1999, pp. 233-257.

[7] Jack Jai-ick Yoh, "Analysis of phase structure for energetic materials" J. Phys.: Cond. Matter, 18, 2006, pp. 8179-8193.