

감압유탕공정을 이용한 유기성슬러지의 연료화

박상숙* · 강화영†

*순천대학교 토목·환경공학부 · 한영대학 토목·환경과

(2006년 7월 24일 접수, 2006년 12월 26일 채택)

Production of Solid Fuel from Organic Waste Sludge by Vacuum Frying

Sang-Sook Park* · Hwa-Young Kang†

*Division of Civil and Environmental Engineering, Suncheon National University

Department of Civil and Environment, Hanyeong Technical College

ABSTRACT : It was tried to utilize organic waste sludge from wastewater treatment plant as a starting material to produce a solid fuel by vacuum frying. The effects of decompression levels, frying time and temperature on the calorific value and moisture of vacuum fried sludge were systematically investigated. Dewatered raw sludge used in this study had a moisture of 81.1% and calorific value of 2,930 kcal/kg. Based on the experimental observation, it was identified that the decompression level and frying time have the greatest influence on the calorific value of vacuum fried sludge. Moistures of the fried sludge at 180°C for 25 min in 760 mmHg, 684 mmHg and 630 mmHg were 32.4%, 14.2% and 11.6%, respectively. Calorific values of the vacuum fried sludge at 140°C for 15 min and 25 min were 5,400 kcal/kg and 5,540 kcal/kg in 684 mmHg and 5,520 kcal/kg and 5,660 kcal/kg in 630 mmHg, respectively.

Key Words : Solid Fuel, Vacuum Frying, Organic Waste Sludge, Calorific Value

요약 : 폐수처리장에서 발생하는 유기성 폐슬러지를 고체 연료로 전환하고자 하였다. 감압유탕처리된 슬러지의 발열량과 수분함량에 대한 감압의 정도와 유탕 시간 및 온도의 영향을 조사하였다. 본 연구에 사용된 탈수슬러지의 수분함량과 발열량은 각각 81.1%와 2,930 kcal/kg를 나타냈다. 실험 결과 감압 정도와 유탕 시간은 감압유탕처리된 슬러지의 발열량 값에 가장 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다. 760 mmHg, 684 mmHg 그리고 630 mmHg 상태에서 180°C로 25분간 유탕처리된 슬러지의 수분 함량은 각각 32.4%, 14.2% 그리고 11.6%로 나타났다. 684 mmHg 상태에서 140°C로 15분과 25분간 감압유탕처리된 슬러지의 발열량은 각각 5,400 kcal/kg 와 5,540 kcal/kg을 나타냈으며, 630 mmHg에서 유탕처리된 슬러지는 5,520 kcal/kg과 5,660 kcal/kg의 발열량을 나타냈다.

주제어 : 고체연료, 감압유탕, 유기성폐슬러지, 발열량

1. 서론

하·폐수처리장에서 발생하는 폐슬러지는 그 특성상 대부분이 유기성 성분으로 구성되어 있어서 방치할 경우 쉽게 부패하여 악취 및 환경오염의 원인이 되므로 이를 효과적으로 처리하는 것은 중요한 환경문제 중의 하나로 대두되고 있다. 2003년 7월을 기점으로 폐슬러지의 주요 처리·처분 방법 중 하나로 이용되던 유기성 폐슬러지의 직매립이 금지되면서 이를 효율적이며 경제적으로 처리·처분할 수 있는 새로운 대안의 모색이 활발하게 진행되고 있다.

특히, 슬러지에 함유된 유기물은 에너지원으로 활용가능성이 높기 때문에 이들 에너지의 회수 기술에 많은 비용과 노력이 투자되고 있다.^{1~4)} 그러나 슬러지를 에너지원으로 활용하기 위해서는 슬러지에 함유된 수분을 효율적 및 경제적으로 제거하는 것이 중요한데, 기존의 방법으로는 높은 에너지

비용이 소요되는 단점이 있다. 최근 이러한 문제점을 해결할 수 있는 기술의 하나로 식품의 건조에 이용되는 감압유탕건조법을 유기성 폐기물의 탈수에 적용하는 것이 관심의 대상이 되고 있다.

식품에 이용되던 감압유탕건조법을 폐기물에 적용하기 시작한 것은 1960년대에 농·수·축산폐기물의 재이용방법으로 개발되어 이용되었다. 유탕법에 대한 국내의 연구는 거의 이루어지지 않았지만 일본에서는 가축분뇨, 잔반, 하수슬러지 등 다양한 재료를 감압유탕으로 처리하여 가축사료 또는 퇴비로 재이용하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{5,7~9)}

Takashima 등¹³⁾은 탈수슬러지를 폐식용유로 유탕처리할 경우 슬러지의 중금속(Cd, Cr, Cu, No, Pb 및 Zn) 함량 변화에 관한 연구에서, 유탕 처리 후 슬러지의 중금속 함량이 2-24%까지 감소하였다고 발표하였다. 그리고 이러한 결과는 중금속 종류에 따라 건조슬러지에 함유된 중금속의 함량이 폐식용유보다 15-100배 높기 때문에 유탕처리 후 슬러지에 남아 있는 오일에 의해 중금속이 희석되었기 때문이라고 설명하였다.

감압유탕건조법은 식품의 제조 및 건조방법 중 튀김(Fry-

† Corresponding author
E-mail: khy9792@hanmail.net
Tel: 061-650-4038

Fax: 061-650-4020

ing)에 사용되는 유지의 특성을 이용하여 개발된 처리방법으로 오일을 열매체로 하여 여기에 슬러지를 넣고 가온하여 원료중의 수분을 탈수시키는 방법이다. 오일을 열매체로 이용하는 이유는 가열된 오일이 슬러지에 함유된 수분과 급격히 치환되므로 비교적 빠르고 양호하게 함유수분을 탈수시키기 때문이다.

일반적으로 튀김에 이용되는 식용유의 온도는 160~180℃ 정도로서 100℃에서 끓는점을 가진 수분은 슬러지로부터 쉽게 증발되나 물의 끓는점 보다 매우 높기 때문에 에너지 소비가 많은 단점이 있다. 그러나 감압 상태에서 유탕 처리할 경우 시료 중에 함유된 수분의 비점이 낮아지고 약 90℃ 전후에서 수분이 증발하기 시작하면서 수분과 기름의 치환작용이 일어나 시료의 심부에까지 기름이 침투해 수분을 신속하게 증발시킬 수 있을 뿐만 아니라 감압으로 인한 비점저하로 기름의 온도를 낮게 설정할 수 있게 되어 기름의 열 변성을 방지할 수 있는 효과가 있는 것으로 알려졌다.^{5,6)}

따라서 슬러지의 유탕 처리시 물의 끓는점을 낮추고 증발 효율을 높이기 위해서는 감압상태를 유지하는 것이 필요하다. 이러한 방법은 식품가공 분야에서 일찍부터 적용되어 왔으며 진공 fry법, 감압유탕건조법, 저온저압 fry법, 감압 fry건조법, 유온탈수법 등 다양한 명칭으로 불려져 왔다.^{7~11)}

국내에서는 전 등¹²⁾이 유기성 슬러지의 유온탈수처리에 관한 연구에서 60 mmHg 감압 하에서 식품폐수 슬러지를 유온탈수 했을 때, 각 유온탈수 시간(20, 40, 60분)에 대한 함유율은 유온이 90℃일 때는 14.7%, 10.5% 및 8.6%이었고, 유온이 120℃일 때는 12.0%, 9.3% 및 7.8%이었다고 발표하였다.

본 연구는 폐수처리장에서 발생하는 탈수 케익을 대상으로 식품의 가공에 이용되고 있는 유탕법을 이용하여 슬러지의 수분을 탈수하고, 여기서 얻어진 유탕슬러지의 발열량 분석을 통하여 연료로서 활용할 수 있는 적정 유탕 처리 조건을 제시하는 데 목적이 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

탈수슬러지 케익은 S시 하수종말처리장에서 발생된 것을 이용하였다. 탈수슬러지의 성상은 Table 1에 나타난 바와 같이 수분함량 81.1%, 가연성 유기물 11.3% 그리고 회분 8.6%로 구성되었으며, 열량계로 측정된 건조 슬러지의 고위발열량은 2,930 kcal/kg으로 나타났다. 감압유탕공정에 열전달 매체로 사용된 오일은 자동차 정비소에서 수거된 폐오일로서, 사용하기 전에 #100 체로 걸러서 함유되어 있는 불순물을 제거하였으며, 오일의 발열량은 7,321 kcal/kg으로 나타났다.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 오일치환 장치는 Fig. 1과 같은 형태로 구성되었으며, 50 g의 슬러지를 1 L의 오일에 충분히 침적시킨 후 유탕 처리하였다. 실험 장치에는 감압을 위한 펌프와 감압 상태를 확인하기 위한 압력계를 설치하였고, 가열온도

Table 1. Basic analysis of dewatered sludge from wastewater treatment plant

Proximate analysis			Density (g/cm ³)	Heat of combustion (cal/g)	Ultimate analysis(wt %)					
Moisture (wt%)	Combustible material(%)	Ash (%)			C	H	N	O	S	Cl
81.1	11.3	7.6	1.083	2,930	53.68	6.32	8.43	28.61	2.83	0.13

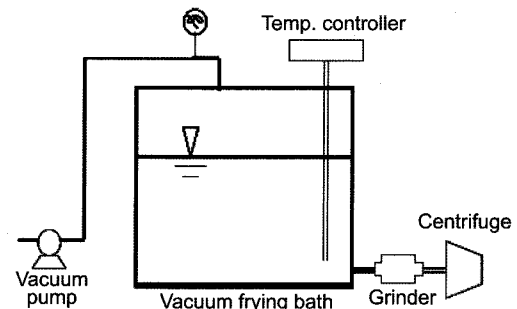


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

의 설정에 따라 자동 조절이 가능하도록 구성하였다.

유탕 슬러지의 수분함량은 다상탄소/수소/수분 분석기(LECO, RC-412)를 이용하여 측정하였다. 감압조건은 각각 760 mmHg, 684 mmHg 및 630 mmHg로 설정하였고, 온도는 180, 160 및 140℃의 3가지 조건에서 수행하였다. 각 감압조건에서 가열온도별 유탕시간은 1, 5, 10, 15, 20 및 30 min으로 설정하였다. 유탕이 종료되면 발열량 측정조건을 일정하게 하기 위해 2,500 rpm에서 원심분리한 후 봄베형 열량계(Shimadzu CA-4PJ)를 이용하여 발열량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감압유탕 슬러지의 수분함량

유탕에 의한 슬러지의 탈수는 뜨겁게 가열된 오일속에서 물이 증발하는 과정을 통하여 진행된다. 이때 오일은 열을 전달하는 열매체의 역할을 하며 수분이 함유된 슬러지를 물의 비등점 이상으로 가열하게 된다. 순수한 물의 끓는 온도는 100℃이므로 슬러지의 온도가 여기에 이르게 되면 물이 증발하게 된다. 그러나 감압조건에서 물의 끓는점은 잘 알려진 바와 같이 100℃ 이하로 내려간다. 따라서 감압상태에서 유탕공정을 실시하면 100℃ 이하의 낮은 온도에서 슬러지의 수분을 비등케하여 증발시킬 수 있다.

본 실험에 사용된 감압조건은 760 mmHg, 684 mmHg 및 630 mmHg이며 각 조건에서 물이 끓는 온도는 실험결과 100℃, 97℃ 그리고 95℃ 정도로 나타났다. 유탕 온도는 180℃를 유지하였으며, 탈수슬러지의 초기 함유율은 81.1%였다. Fig. 2는 각 실험 조건에서 감압유탕처리한 슬러지의 수분함량 변화를 보여주고 있다. Fig. 2에서 760 mmHg에서 5분 유탕하였을 때 슬러지의 함유율은 64.2%로 감소한 반면, 684 mmHg와 630 mmHg의 경우는 각각 54.3% 및 43.2%로 크게 저하하였으며 25분간 유탕 처리한 슬러지의 함유율은 각각 32.4%, 14.2% 및 11.6%로 나타났다.

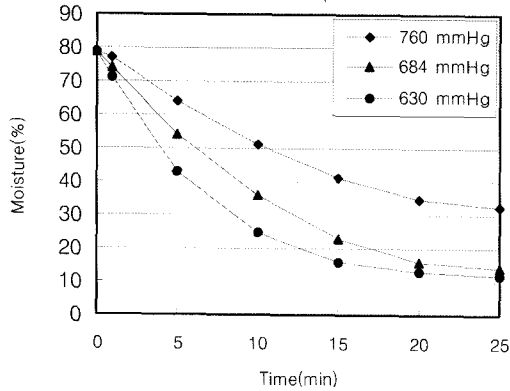


Fig. 2. Moisture content of vacuum fried sludge according to decompression at 180°C.

이러한 경향은 슬러지의 수분이 유탕공정 초기의 5분 이내에 빠르게 감소한 후 유탕이 진행됨에 따라 탈수 속도가 다소 저하되는 것을 나타낸다. 특히 감압의 정도가 클수록 유탕초기에 수분함량의 감소가 더욱 빠르게 진행된 후 수분의 감소경향이 저하되는 경향을 보여 주었다. 이것은 유기성 슬러지에 존재하는 수분 중 쉽게 분리되는 간극수 등이 유탕 초기에 증발을 통하여 빠르게 제거되고, 그 이후에 슬러지 내부에 결합되어 있는 모관결합수 또는 제거가 어려운 내부수 등이 증발되는 과정을 거치기 때문으로 판단된다. 특히 감압을 하게 되면 슬러지 내부에 위치한 모관결합수나 내부수 등이 오일을 통해 전달되는 높은 온도에 의해 기화되기 전에 이미 액체 내에 용존 되어 있던 기체가 석출되면서 팽창되어 세포막을 파괴하거나 모관결합수를 방출하는 기계적인 작용이 발생하며, 이는 유탕 초기에 함수량을 큰 폭으로 저하시키는 이유가 된다.

3.2. 유탕온도에 따른 슬러지의 발열량

폐수처리장의 슬러지 케익은 약 80% 정도의 함수율을 가지며 이를 건조기에서 105°C로 충분히 건조하여 열량을 측정된 결과 2,930 kcal/kg으로 나타났다. 감압유탕법의 열전달 매체로 사용한 폐오일의 열량은 7,321 kcal/kg으로 유탕처리에 의해 폐슬러지 내의 수분과 치환되면 폐슬러지의 열량은 치환된 오일의 양에 비례하여 상승하게 된다.

Fig. 3은 상압(760 mmHg)에서 온도별 유탕시간에 따른 폐슬러지의 열량을 측정된 결과이다. 그림으로부터 폐슬러지의 유탕처리 시간이 증가 할수록 폐슬러지의 발열량도 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 유탕시간이 경과할수록 슬러지의 수분이 증발하면서 오일과 치환되어 전체의 발열량이 증가하기 때문이다. 그러나 유탕온도를 180°C로 유지하는 경우 15분 이후에는 오히려 열량이 감소하는 형태를 나타내었는데, 이는 높은 온도로 인하여 초기에 빠른 속도로 수분과 오일이 치환되지만, 유탕 시간이 길어지면 고온으로 인한 슬러지에 함유된 유기물의 일부가 휘발·손실되었기 때문으로 판단된다. 실제로 180°C에서 유탕시간을 길게 하면 연기와 함께 냄새의 발생을 감지할 수 있다. 온도를 140°C로 하였을 경우는 초기에 증발되지 않은 다량의 수분으로 인하여 발열

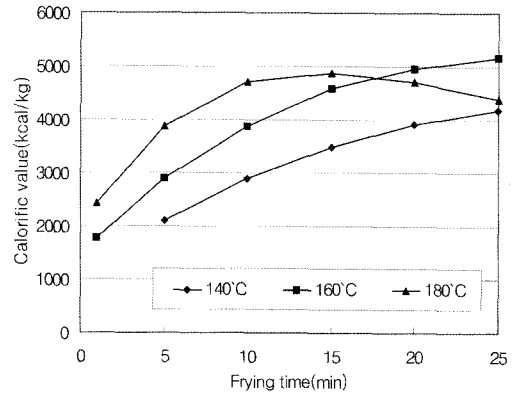


Fig. 3. Calorific value of fried sludge according to frying time and temperature at 760 mmHg.

량이 측정되지 않았으며 이후 유탕시간에 따라 발열량이 완만하게 증가하는 경향을 보였다.

3.3. 감압 정도에 따른 슬러지의 발열량

유탕처리한 슬러지의 발열량에 미치는 감압 정도의 영향을 파악하기 위하여 140°C의 낮은 온도에서 3가지의 압력 조건에서 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서 684 mmHg와 630 mmHg의 감압에 대한 발열량을 비교하면 감압의 정도가 높을수록 발열량이 초기에 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 15분간 유탕 처리한 슬러지의 발열량은 각각 5,400 kcal/kg 및 5,520 kcal/kg으로 나타났으며, 25분간 유탕 처리한 슬러지의 경우 발열량은 각각 5,540 kcal/kg 및 5,660 kcal/kg으로 소폭 증가하였다. 따라서 경제성과 유탕효율을 고려할 때 15분 정도의 유탕시간이 적당한 것으로 판단된다. 그러나 상압에서는 감압의 경우와는 달리 낮은 온도 때문에 탈수 및 오일치환 정도가 느리게 진행되어 25분이 경과하여도 슬러지의 발열량은 계속 증가하고 있음을 볼 수 있다.

3.4. 유탕공정 오일의 온도변화

슬러지에 함유된 수분은 증발하는 데 에너지가 필요하다. 따라서 슬러지를 오일에 넣어 유탕하게 되면 수분이 증발하

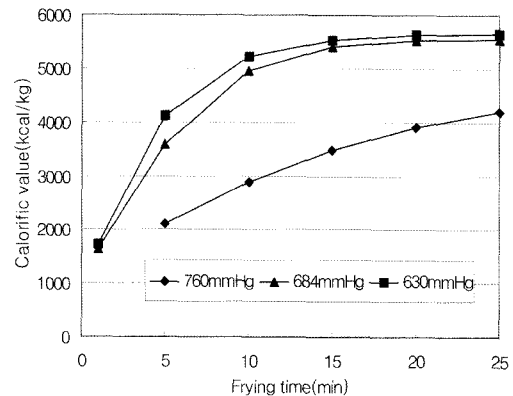


Fig. 4. Calorific value of fried sludge according to decompression level at 140°C.

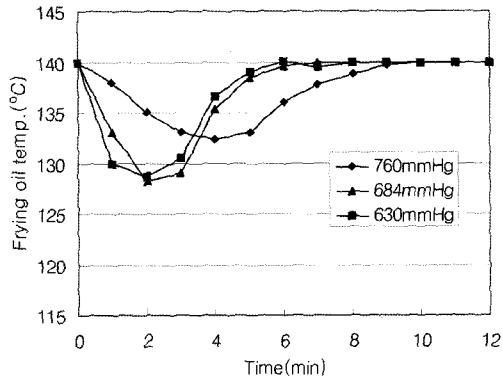


Fig. 5. Variation of frying oil temperature according to de-compression level and frying time at 140°C.

면서 오일의 온도가 저하된다. 슬러지의 유탕처리시 감압의 정도에 따른 오일온도 변화를 파악하기 위해 유탕반응기에 1 L의 폐오일을 넣어 140°C까지 가열한 후 함수율 81.1%의 탈수슬러지 50 g을 넣고 시간별 오일의 온도변화를 측정하였다. Fig. 5에 제시된 결과에서 상압(760 mmHg)의 경우 감압에 비해 수분의 증발속도가 느리기 때문에 온도저하가 상대적으로 적게 나타나고 있는 반면 수분이 지속적으로 증발하기 때문에 온도의 회복시간이 확대되는 현상을 보이고 있다. 감압의 경우 감압 정도가 클수록 빠른 속도로 오일의 온도가 저하되는 특징을 나타냈다. 이는 감압으로 인하여 물의 증발온도가 낮아지게 되므로 고온에서 가열하는 효과와 유사한 것으로 파악된다.

3.5. 슬러지의 TGA-DTA 분석

TGA 분석(thermogravimetric analysis)과 DTA(Differential thermal analysis)분석은 주어진 온도 이력에 따라 노내 상황을 설정하고, 이에 따른 시료의 질량 감소를 측정하여 고체연료의 연소 특성을 파악하는 분석 방법이다. 시료는 크

기에 따른 영향을 최소화하기 위해 75 μm 이하로 미분쇄하여 사용하였다.

Fig. 6과 7은 각각 건조된 폐슬러지와 684 mmHg에서 140°C로 20분간 감압유탕처리한 슬러지의 열중량 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 온도상승에 따른 질량 변화를 나타내는 TGA 분석결과로부터 열분해는 200°C 부근에서 시작되어 500°C 부근에서 종료됨을 알 수 있다. 이를 크게 두 단계로 나눌 수 있는데 대체로 350°C 이하에서 나타나는 첫 단계에서는 가스상 물질의 탈착과 지방족 탄화수소 및 방향족 탄화수소의 증발에 의한 열분해가 일어나는 것으로 보이며 400°C 이상에서는 거대 분자의 분해 및 차르의 연소가 일어나는 것으로 판단된다.

열중량 분석결과 폐슬러지의 중량 감소는 51.5%인데 반해 유탕처리한 슬러지의 중량 감소는 70.4%로 상대적으로 매우 큰 중량 감소를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 유탕처리한 슬러지의 경우 유탕처리를 통해 슬러지 내에 함유된 수분이 발열량이 매우 높은 오일(7,321 kcal/kg)로 치환됨으로서 연소특성이 향상되었기 때문으로 판단된다. DTA 분석 결과는 시간변화에 따른 온도 차이를 온도함수로 나타낸 것이다. DTA 분석을 통해 슬러지 내의 유기물질 및 탄소가 열과 반응하여 연소되는 것으로 판단할 수 있는 발열반응은 250~350°C에서 일어났음을 알 수 있었다.

4. 결론

폐수처리장에서 발생하는 유기성 폐슬러지를 감압유탕법을 이용하여 처리한 후, 수분과 발열량 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 감압유탕법을 이용한 슬러지의 탈수는 유탕초기에 빠른 속도로 진행되며, 감압상태에서 이러한 효과가 더욱 현저

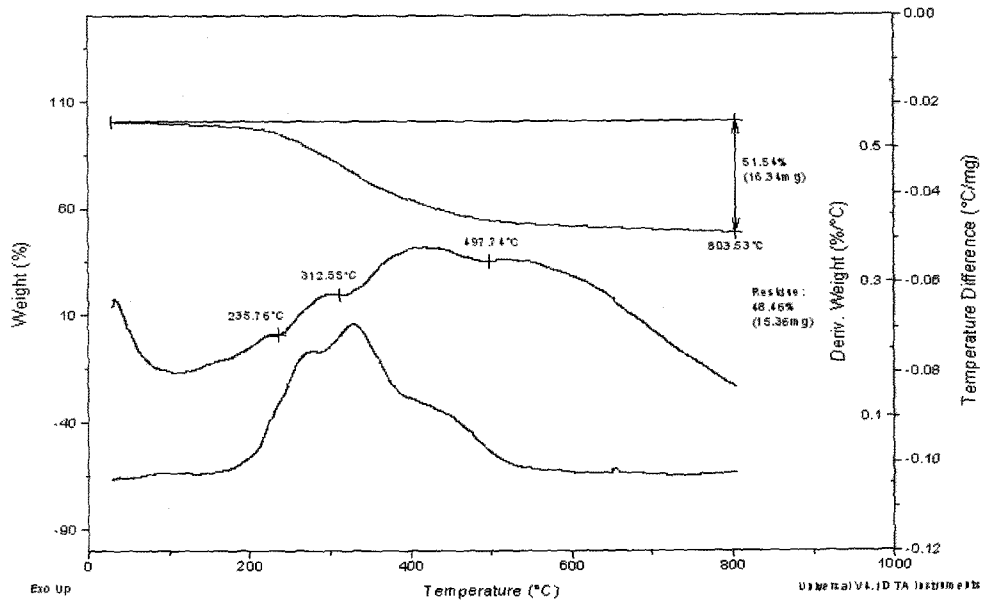


Fig. 6. TGA-DTA of raw dried waste sludge.

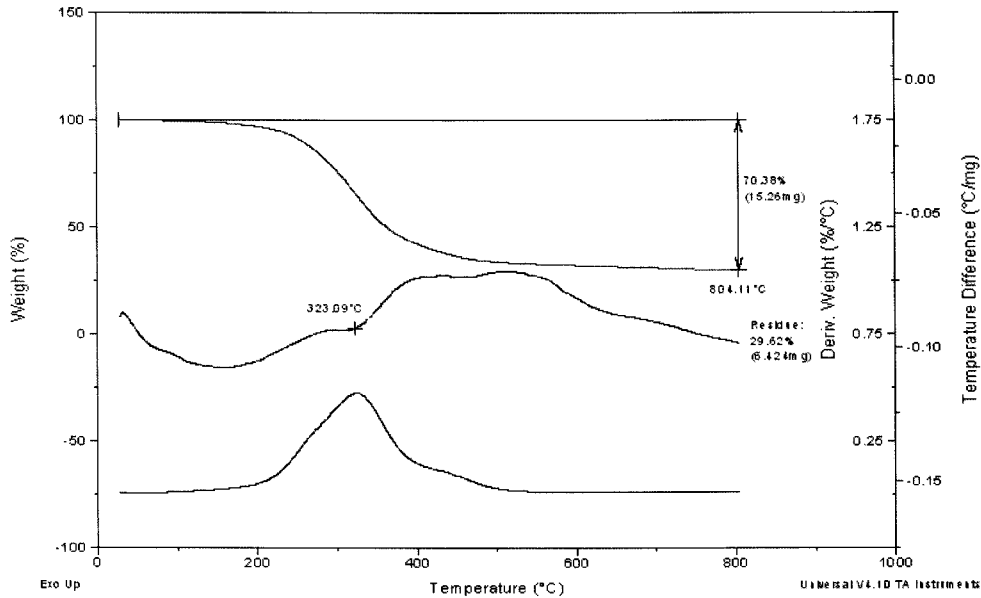


Fig. 7. TGA-DTA of vacuum fried sludge.

하여 180℃에서 760 mmHg로 5분간 유탕하였을 때 슬러지의 함수율은 81.1%에서 64.2%로 감소한 반면, 684 mmHg와 630 mmHg의 경우는 각각 54.3% 및 43.2%로 크게 저하되었으며 25분간 유탕한 슬러지의 함수율은 감압 정도에 따라 각각 32.4%, 14.2% 및 11.6%로 나타났다.

2) 슬러지의 유탕처리시 감압의 정도가 커질수록 초기의 온도저하가 크게 발생되고 있어 감압으로 인한 증발효과가 크게 작용하고 있음을 알 수 있었으며, 상압에서 180℃로 15분 이상 유탕 처리할 경우 슬러지에 함유된 유기물의 일부 소실로 인해 오히려 발열량이 약간 감소하였다.

3) 684 mmHg와 630 mmHg의 감압상태에서 140℃로 15분간 유탕 처리한 슬러지의 발열량은 각각 5,400 kcal/kg 및 5,520 kcal/kg으로 나타났으며, 25분간 유탕 처리할 경우 각각 5,540 kcal/kg 및 5,660 kcal/kg으로 소폭 증가하였다. 따라서 경제성과 유탕효율을 고려할 때 684 mmHg에서 140℃로 15분 정도 유탕처리하는 것이 가장 적정 조건임을 알 수 있으며, 이러한 조건에서 유탕 처리된 슬러지는 고체연료로 충분히 재활용 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

사 사

본 논문은 교육인적자원부·산업자원부·노동부의 출연금으로 수행한 순천대학교 광주·전남·제주권 산학협력중심대학육성사업단 2005년 2차년도 기술개발과제 지원사업으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Tanaka, K., "Present and Future Status of Sewage Sludge Treatment and Disposal in Japan," *Waste Water Pacific*

Rim News(1991).
 2. U. S. EPA., "Sludge Management Practices in the U. S.," *Biocycle*, 2(3), p. 46(1991).
 3. Garvey, D., "Treatment and Disposal of Sewage Sludge, Proc. of Sludge 2000, Sewage Sludge Use and Disposal," Robinson College, Cambridge(1992).
 4. U.S. EPA, 40CFR Parts 503, "Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge Rule," *Federal Register*, 58(32), 9247~9420(1993).
 5. 中園修三, "汚泥から蛋白料, 窒素肥料を製造する方法," *特許公報*, 56-52544
 6. 장성호, "유온감압탈수법에 의한 하수슬러지의 처리에 관한 연구," 동아대학교 박사학위논문(1995).
 7. 小谷明司, "壓力フイ乾燥法の現状と今後(上)," *油脂*, 40(11), pp. 82~88(1987).
 8. 小谷明司, "壓力フイ乾燥法の現状と今後(下)," *油脂*, 40(12), pp. 71~81(1987).
 9. 小谷明司, "壓力フライ法けよる乾燥食品の製造," *フットケミカル*, pp. 72~78(1987).
 10. 연윤열, 조승용, 이철, "감압유탕건조방법이 고구마다이스의 물리적 특성에 미치는 영향," *자연자원 논집*, pp. 137~149(1994).
 11. 이철, 조승용, "감압유탕 건조당근의 흡수특성 및 품질에 미치는 텍스트린의 영향," *한국식품과학회지*, 23(2), 241~247(1991).
 12. 전기일, 박현진, 석철원, "유기성슬러지의 유온탈수처리," *산업과학기술연구소보 창간호*, pp. 131~141(1994).
 13. Takashima, M. and Matsui, S., *Proceedings of the 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference-ASIAN WATER-QUAL '99*, 2, pp. 993~998(1999).