

폐유를 이용한 하수슬러지 유증 건조 연구

신미수 · 김혜숙 · 홍지은 · 장동순[†] · 엄태인*

충남대학교 환경공학과 · *한밭대학교 환경공학과

(2007년 11월 7일 접수, 2008년 6월 23일 채택)

A Study for Drying of Sewage Sludge through Immersion Frying Using Used Oil

Mi-Soo Shin · Hey-Suk Kim · Ji-Eun Hong · Dong-Soon Jang[†] · Tae-In Ohm*

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

*Department of Environmental Engineering, Hanbat National University

ABSTRACT : Considering the severe regulation associated with sludge treatment such as direct landfill and ocean dumping, there is no doubt in that an advanced study for the proper treatment of sludge is urgently needed in near future. As one of viable method for sludge treatment, fry-drying of sludge by waste oil has been investigated in this study. The fundamental mechanism of this drying method lies in the phenomenon of rapid moisture escape in the sludge pore toward oil media. This is caused by the severe pressure gradient formed by the rapid oil heating between sludge and oil. As part of research effort of fry-drying using waste oil, a series of basic study has been made experimentally to obtain typical drying curves as function of important parameters such as drying temperature, drying time, oil type and geometrical shape of sludge formed. Based on this study, a number of useful conclusion can be drawn as following. The fry-drying method by oil immersion was found quite effective in the removal efficiency of sludge moisture, in general, the moisture content decreases significantly after 10 minutes and the whole moisture content was less than 5% after 14 minutes regardless of the drying temperature. The increase of oil temperature up to 140°C favors significantly for the removal of moisture but there was no visible difference above 140°C. As expected, the decrease of diameter in sludge was efficient in drying due to the increased surface area per unit volume. Further, the effect of oil property by the change of oil type was noted. To be specific, for the case of engine oil the efficiency was found to be remarkably delayed in moisture evaporation compared with that of vegetable oil due to the increased viscosity of engine oil. It produced a result of increasing the evaporation of moisture largely relatively high in the drying temperature over 140°C compared with the drying temperature 120°C drying temperature as the drying time passed. Accordingly, the drying temperature is considered desirable as keeping over 140°C regardless of a sort of used oil.

Key Words : Sewage Sludge, Fry-Drying, Moisture Content, Waste Oil

요약 : 유기성 슬러지의 직접 매립 금지와 가까운 장래에 해양투기가 금지될 전망이므로 발생하는 슬러지의 적절한 처리에 대한 발전된 기술의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 슬러지 건조기술 중 하나인 폐유를 활용하여 하수슬러지를 유증 건조시키는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이 공정의 기본 원리는 오일을 가열함으로써 형성되는 급격한 압력변화에 의해 슬러지 공극을 통하여 수분이 빠르게 증발하도록 하는 것이다. 일련의 건조 실험 결과, 건조온도, 건조시간, 오일종류, 슬러지 형상 등 중요한 실험변수에 따른 건조곡선이 얻어졌다. 건조 오일로 폐식용유를 사용한 경우 건조시간에 따른 수분함유량 변화는 건조시간 10분이 지나면서 현저히 감소하기 시작하여 14분 이후에는 건조온도에 관계없이 수분함유량이 5% 이내로 감소하였다. 유증 건조 온도는 120°C에 비해 140°C 이상에서 수분 증발이 급격히 증가한 것으로 나타났다. 그러나 140°C 이상에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 슬러지 직경이 감소할수록 효율적으로 건조되는 것으로 나타났는데 이는 단위체적당 표면적의 증가에 기인하는 것이다. 오일 종류의 변화에 따른 영향을 살펴보면 폐 엔진오일을 사용한 경우 점도가 증가함에 따라 폐식용유에 비하여 수분 증발이 현저히 지체되는 현상이 나타났다. 그러나 건조온도 140°C 이상에서는 120°C에 비하여 건조시간이 경과함에 따라 수분 증발이 비교적 크게 증가하는 결과를 나타내었다. 그러므로 폐오일의 종류에 관계없이 건조온도는 140°C 이상으로 유지하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

주제어 : 하수 슬러지, 유증 건조, 수분함유량

1. 서론

하수 처리공정에서 발생하는 슬러지는 지속적으로 증가하고 있는 추세이며 국내외적으로 슬러지나 유기성 폐기

물의 직접 매립이나 해양투기가 어려워질 전망이다. 이에 슬러지의 육상처리 및 자원화 계획을 수립하여 소각, 용융, 재사용, 퇴비화와 같은 합리적이며 환경 친화적인 처리공정들에 대한 체계적인 연구의 필요성이 높아지고 있다.

본 연구는 음식물 조리나 튀김 후 재활용 되는 폐유 및 폐 엔진오일을 이용하여 슬러지 처리의 핵심인 건조공정에 적용하고자 하는 연구로써 높은 수분제거 효율을 달성

[†] Corresponding author

E-mail: p_dsjang@cun.ac.kr

Tel: 042-821-6677

Fax: 042-823-8362

및 기존의 건조공정의 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.^{1,2)}

일반적인 건조공정에 사용되는 건조기들은 간접 가열식 건조기의 경우 고온집성 슬러지에 대해서는 적용이 어려운 단점을 갖고 있고, 직접 가열식 건조기의 경우 악취발생에 대한 처리 문제 등이 있다. 이에 폐유를 이용한 슬러지 fry-drying 기술은 슬러지 열건조 기술의 대안으로 고려될 수 있다. 도시 하수슬러지와 땅콩기름으로 수행된 첫 실현 가능성의 연구는 유증건조공정을 이용하여 몇 분 안에 매우 낮은 수분함유량에 이르고, 그 기름은 건조 고형물에 흡착되는 것을 보여주었다. 튀김공정은 오래된 공정으로, 1970년대에는 주로 음식산업의 주도로 행해졌다. 실험은 가열된 기름에 담그고 대류에 의해 초기 가열한 후 건조대상물 표면에서 건조된 표면이 생성되기 시작하는 것을 보이는 음식물 실험을 통해 알려져 있다. 튀김 공정 동안 열은 대류로 물질 외부 표면에서 공급되고 전도로 고체 물질의 표면을 통해 중앙영역까지 공급된다. 그 결과 물은 표면/중앙 사이에서 증발되고 외부표면으로 흐른다. 이러한 전달과정에 더하여 기름 흡착, 미생물 사멸 등의 물리화학적 반응이 일어난다. 최근 튀김공정이 건조에 가능성이 있는 단위공정으로서 다양한 산업공정에 적용될 수 있다는 것이 인식되고 있다.

유증 건조 기술의 주요 메커니즘을 살펴보면 물에 비해 비열이 작은 폐유의 높은 온도와 폐유증기의 높은 활동성은 슬러지 수분의 온도 증가와 수증기의 증발 현상에 의해 내부압력을 증가시킨다. 이 결과 슬러지 내부의 수분과 외부 증기와의 물질전달 통로 역할을 하는 내부 기공의 구조가 극대화한다. 따라서 증가된 수증기의 압력과 배출 통로의 확대는 수증기를 외부로 배출시키고 이에 일시적으로 형성되는 슬러지 내부의 음압(negative pressure)은 오일증기의 내부 유입을 순조롭게 하여 흡수/흡착 과정을 돕는 작용을 한다.

유증건조 과정에서 일어나는 대류열전달 계수는 전형적인 건조과정에서 일어나는 대류 열전달 계수(h)의 10배에 육박하여 2,500 W/m²K에 이른다. 또한 건조 특성 곡선도 감율 건조 기간 후에 다시 아주 높은 최대값을 가지는 특이한 양상을 보이는 것으로 보고되고 있다.^{5,6)}

본 연구에서 착안하고 있는 연구의 주안점은 수분과 오일의 대체 기전에 영향을 미치는 제반 중요변수에 따라 슬러지 건조에 미치는 영향을 조직적으로 연구 검토하고자 하는 것이다. 아래에 슬러지 처리에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상 되는 주요 운전변수를 나타내었다.

- 슬러지 변수 : 함수율, 기공도, 기공의 크기 및 분포, 슬러지 형상 및 크기, 밀도, 비열, 응집성, 휘발특성
- 폐유 변수 : 폐유의 성질, 비열, 증기압, 비등점, 점성 등
- 운전 및 장치 변수 : 처리량, 운전온도 등

Fig. 1은 일정시간 유증건조 후 수분함량이 감소하고 또 한 수분이 차지하던 일부를 폐유가 대체하는 것을 나타낸

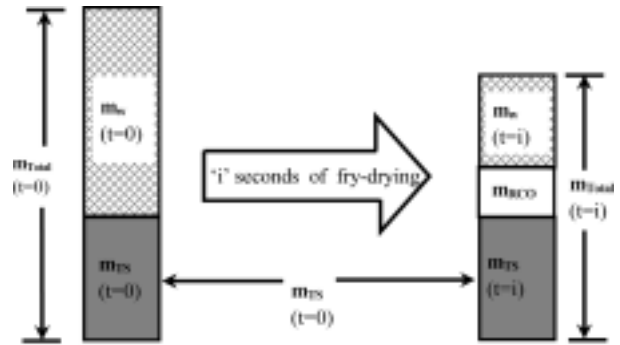


Fig. 1. Schematic diagram of the mass composition change from dewatered to fry-dried sludge.

그림이다. 건조공정은 시간에 따른 시료의 수분함량 변화를 보여주는 건조곡선으로 나타내고 dry basis의 용어로 표현되나 유증건조 공정에서는 기름의 질량이 계산되어 일반적인 수분함량의 정의와 차이가 있다.

$$X_{ab} = \frac{\text{수분질량(g)}}{\text{슬러지질량} + \text{oil 질량}}$$

최종 유증건조 후의 슬러지는 쉽게 제어되고 기존의 공기 건조된 슬러지보다 더 높은 발열량을 가진다고 보고되고 있다. 공정의 경제적 부담을 감소시키기 위해서 슬러지 튀김용 기름으로 재활용된 요리기름(RCO) 이용을 제안하였고 그 결과는 건조 동력학적으로 민감하지 않은 결과로 나타났다.³⁾

본 연구는 유증 건조에 대한 기초연구로서 음식물 조리나 튀김 후 재활용 되는 폐유 및 자동차에서 배출되는 폐엔진오일을 이용하여 슬러지 처리의 핵심인 건조공정에 적용하여 기름의 종류, 유증 건조온도, 슬러지 질량, 건조 시간, 슬러지 형상 등 다양한 운전변수에 따른 수분제거 효율을 산정하였다.

2. 연구 방법

건조실험에 사용한 하수슬러지는 계절에 따라 함수율과 원소조성이 변화하므로 실험 전에 시료를 채취하여 함수율과 주요성분을 분석하였다. 하수슬러지의 함수율은 공정시험방법에 의해 105~110℃에서 4시간 건조시킨 후 황산데시케이터 안에서 방냉하여 건조 전·후의 중량차이로부터 계산하였으며 이와 같이 측정된 함수율은 건조기의 성능을 평가하는 자료로 사용하였다. 유기화합물의 주요 성분인 탄소, 수소, 질소, 황, 및 산소는 자동원소분석기(Element Analyzer 1010)를 사용하여 정성, 정량 분석하여 함수율에 따른 발열량을 계산하였다. 건조 슬러지는 현재 토지 개량제 및 복토제등으로 사용을 제한하고 있는데 하수 슬러지의 경우 중금속 때문에 재이용 분야가 한정되고 있어 ICP-MASS에 의해 건조 하수 슬러지의 중금속을 분석하였다.

실험은 기름 20리터 용량과 전기소모량 17w/hr이고 LPG

가스를 열원으로 사용하는 통상적인 가스튀김기구로 수행하였다. 슬러지의 유실을 막고 튀김기구에 슬러지가 뜨지 않고 잠길수 있게 하고, 또한 일정시간 튀긴 후에는 끌어 올릴 수 있는 개폐형 금속질 구형망에 넣어서 실험을 수행하였다. 슬러지 양은 각각 10 g, 30 g, 50 g으로 변화를 주어 수행하였으며, 각 실험은 20 L유조에 담그고 4분에서 16분까지 1~2분단위로 변화를 주어 튀긴 시간별 함수량을 측정하였다. 또한 가열온도는 120~160℃로 변화를 주어 수행하였다. 기름의 종류는 깨끗한 식용유와 폐식용유 및 폐 엔진오일을 사용하였으며, 슬러지 형상은 밀도가 일정한 원통형으로 만들어 직경 변화에 따른 함수율 변화를 살펴보고자 하였다.

실험에 사용된 폐유는 일반 치킨집에서 사용한 폐식용유와 일반 카센타에서 얻을 수 있는 폐 엔진오일을 활용하였다. Fig. 2에 유증건조에 사용된 실험 장치를 나타내었다.



Fig. 2. Experimental set-up.

3. 연구결과 및 토론

Table 1과 2는 하수슬러지 유증 건조 전후의 원소분석과 중금속 분석 결과를 나타낸 것이다. 유증 건조시 수분이 증발되면서 상대적으로 C, H의 비율이 높아지고, 수분이 빠져나간 곳을 대부분 폐유가 대신하면서 상대적으로 발열량이 높아진 것으로 나타났다. 또한 중금속 함유량은 micro wave를 이용하여 전체 시료를 녹여서 용출하여 분석하였으며 유해 중금속 함유량은 유증 건조 후 대체로 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 건조 공정 중에 폐유 속으로 일부 빠져나간 것으로 판단된다.

Fig. 3에 탈수 슬러지와 유증 건조시킨 후의 슬러지의 실험사진을 나타내었다. 결과에 나타나 있듯이 수분이 증

Table 2. The analysis of heavy metal of sewage sludge

| | As | Cd | Cu | Pb | Hg | Cr | Cr ⁶⁺ | |
|-------------------|------|------|--------|--------|----|-------|------------------|--------------|
| before fry-drying | 5.76 | 1.86 | 454.53 | 154.33 | ND | 70.50 | 7.21 | Conc (mg/kg) |
| after fry-drying | 3.85 | 1.31 | 303.81 | 109.01 | ND | 52.21 | 5.23 | Conc (mg/kg) |



(a) before fry-drying (b) after fry-drying
Fig. 3. Experimental result.

발하면서 부피가 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 대부분의 실험 조건은 슬러지량은 10 g을 기준으로 하였으며 슬러지 건조온도는 120℃를 기준으로 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 폐 식용유를 사용한 경우 슬러지 건조온도 120℃ 일 때 유증 건조 시간에 따른 수분함유량을 나타낸 것이다. 결과에 나타나 있듯이 건조시간 4분에서는 약 47% 수분함유량을 나타내다가 시간이 경과함에 따라 수분함량이 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히 10분이 지나면서 10% 이내를 나타내다가 14분 이상에서는 3% 이내로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 유증 건조 공정 중 발생하는 화학변화를 단계별로 나눠보면 1단계는 초기온도에서 건조대상물질의 표면이 가열되는 시기로 주로 폐유에서 슬러지로 대류에 의한 열전달과 표면에서 슬러지 안쪽으로 전도에 의한 열전달이 발생하는 시기로 시간이 매우 짧으며 수분증발이 거의 발생하지 않는다. 2단계는 슬러지 표면에서 자유수가 증발하는 시기로 표면이 crust화 되는 시기이며, 3단계는 유증건조 공정 중 가장 긴 시간을 차지하는 과정으로 수분이 감소하면서 슬러지의 중심부분에 존재하는 수분의 온도가 끓는점에 도달하는 시기로 수분증발이 활발히 일어나는 시기이다. 결과에서 보면 건조공정 중 1, 2단계를 거쳐 3단계의 반응이 어느 정도 마무리 되는 시간이 약 12~16분 정도인 것으로 판단된다. 에너지 비용을 고려해 볼 때 건조시간은 건조 오일의 종류에 따라 다소의 차이는 있겠지만 12~16분 정도의 범위에서 선택하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 오일 종류에 따른 수분 증발량 결과를 나타낸 것이다. 실험 조건은 슬러지량 10 g에 대하여 건조온도를 120℃로 적용한 것으로, 오일의 종류는 신선한 식용유와 폐식용유, 폐 엔진오일을 사용하였다. 결과를 살펴보면 신선한 식용유와 폐식용유의 경우 건조시간에 따른 수분 함유량에 큰 차이를 나타내고 있지 않았지만, 폐 엔진오일의 경우 점도가 매우 크므로 그에 따라 수분 증발이 지체되는 것

Table 1. Ultimate analysis of dehydrated sewage sludge

| Location | Element (wt. %) | C | H | O | N | S | Ash | Water | Low calorific value (kcal/kg) ²⁾ |
|----------------------|-----------------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|---|
| Daejon ¹⁾ | Wet | 5.92 | 0.84 | 2.93 | 0.86 | 0.21 | 10.24 | 79 | 127.14 |
| | Base | 45.24 | 8.52 | 13.92 | 4.70 | 0.58 | 24.56 | 4.73 | 5512.04 |

¹⁾ analyzed in August, 2007, ²⁾ calculated from Dulong formula

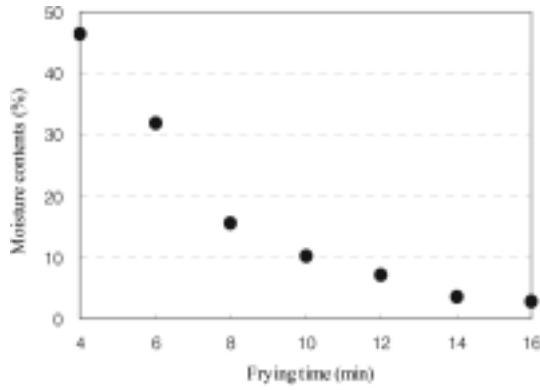


Fig. 4. Moisture content(%) with fry-drying time. (T = 120°C, sludge amount = 10 g, oil: used cooking oil)

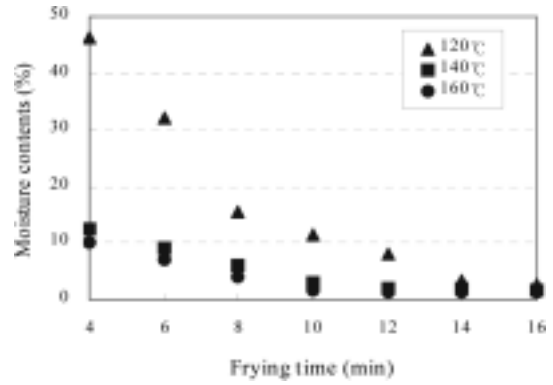


Fig. 6. Moisture content(%) with frying temp. (sludge amount = 10 g, oil : used cooking oil)

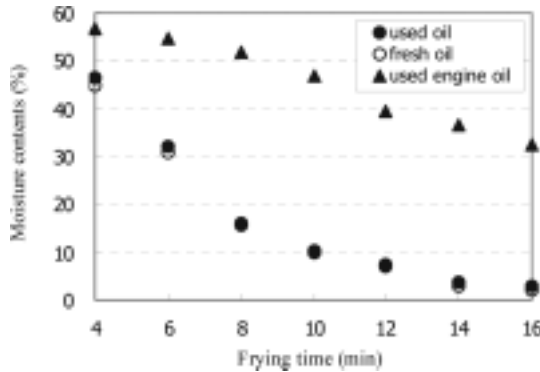


Fig. 5. Moisture content(%) with oil type. (T = 120°C, sludge amount = 10 g)

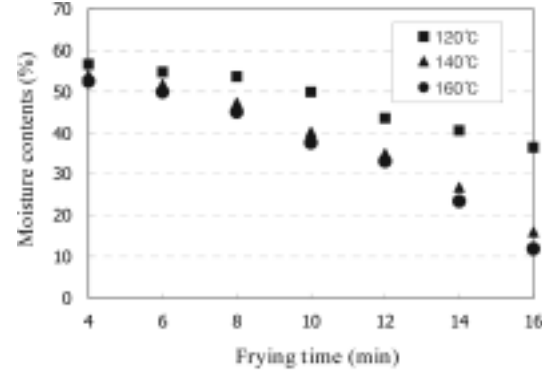


Fig. 7. Moisture content(%) with frying temp. (sludge amount = 10 g, oil : used engine oil)

을 볼 수 있으며 건조시간 10분이 지나면서 수분증발이 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 결과로 부터 폐유의 물리 화학적 특성에 따라서 건조효율이 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

건조온도는 일반적인 건조공정과 기름 온도가 중요시 되는 튀김의 경우에서 중요한 변수가 된다. Fig. 6은 폐식용유를 사용한 경우 건조온도를 각각 120°C, 140°C, 160°C로 변화시킨 경우 건조시간에 따른 수분 건조곡선을 나타낸 것이다. 결과에 나타나 있듯이 건조온도 120°C인 경우 유증 건조 초반에는 수분함유량이 30~40% 이상으로 높은 반면, 140°C와 160°C의 경우 유증 건조 초반부터 수분함유량이 120°C에 비해서 현저히 낮았으며, 8분 이후에는 5% 이내로 수분 제거효율이 높게 나타났다. 건조온도 140°C와 160°C는 비슷한 양상을 나타내었으며, 140°C 이상에서는 수분 건조곡선이 큰 차이 없이 비슷한 양상을 나타내는 것으로 판단된다. 결과로부터 유증 건조온도는 140°C 이상이 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 폐 엔진오일을 사용한 경우 건조온도를 각각 120°C, 140°C, 160°C로 변화시킨 경우 건조시간에 따른 수분 건조곡선을 나타낸 것이다. 건조온도 120°C인 경우 건조시간이 증가해도 수분 제거효율이 서서히 증가하는 결과를 나타냈으며 건조시간 16분이 지나도 수분 함량이 36% 정도로 비교적 높게 나타났다. 140°C와 160°C의 경우 8분

이 지나면서 수분 제거효율이 가파르게 상승하는 결과를 나타내고 있다. 폐 엔진오일의 경우에도 유증 건조 온도는 140°C 이상이 바람직한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 폐식용유를 사용한 경우 슬러지의 양 변화에 따른 수분 함유량을 나타낸 것이다. 건조온도는 가시적인 변화를 관찰하고자 120°C로 수행하였다. 슬러지 양이 적을 때 수분 증발량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 질량만 변화시킨 경우 수분 증발량 면에서 큰 차이를 나타내지 않고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 슬러지가 날개의 입자형태로 존재하므로 슬러지 중앙에서 표면까지 수분이 빠져나오는 시간에는 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

슬러지 양에 따른 수분 증발량을 좀 더 가시적으로 확인해 보고자 슬러지를 밀도를 동일하게 하여 일정한 형태, 즉 원통형으로 만들어서 슬러지 직경에 변화를 주었다. Fig. 9에 원통형으로 직경을 변화시켜 만든 슬러지의 자료사진을 나타내었다. Fig. 10은 폐식용유를 사용한 경우 슬러지 직경변화에 따른 수분 건조곡선을 나타낸 것인데, 직경이 커질수록 슬러지 내부로부터 표면까지 수분이 통과하는 경로도 길어지면서 수분증발량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 폐 엔진오일을 사용한 경우 슬러지 직경변화에 따른 수분 건조곡선을 나타낸 것인데 폐식용유의 결과와 마찬가지로 직경이 증가함에 따라 수분증발량이 감소하는

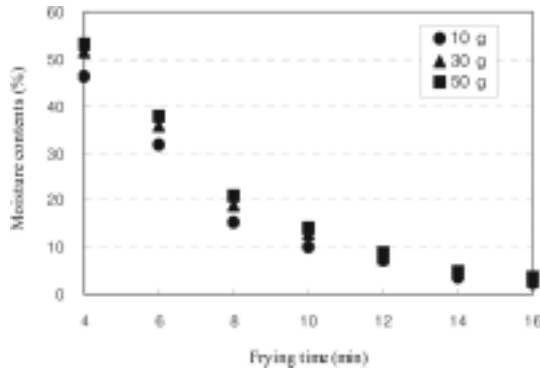


Fig. 8. Moisture content(%) with amount of sludge. (T=120°C, oil type : used cooking oil)

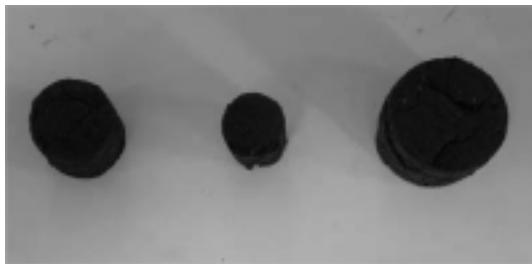


Fig. 9. Geometry of sludge.

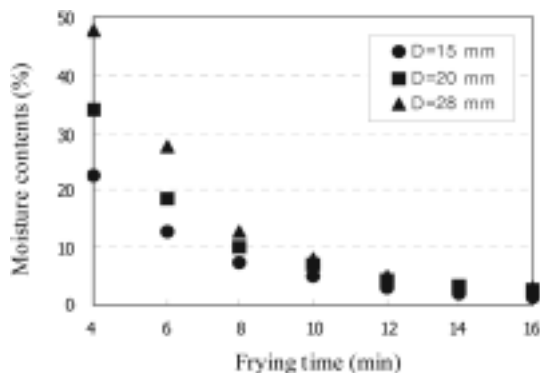


Fig. 10. Moisture content(%) with sludge diameter. (T=120°C, oil type : used cooking oil)

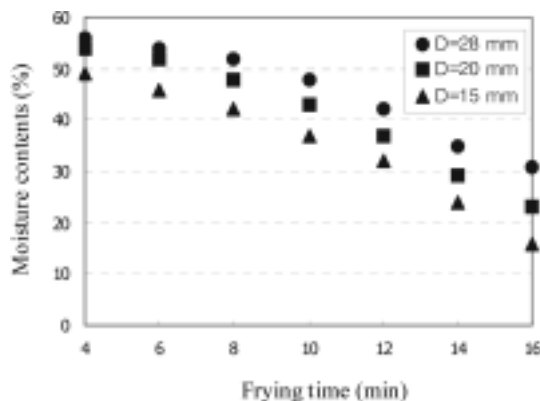


Fig. 11. Moisture content(%) with sludge diameter. (T=120°C, oil type : used engine oil)

것을 가지적으로 확인할 수 있었으며, 폐식용유에 비하여

점도가 현저히 증가함에 따라 수분 증발이 현저히 지체되는 현상이 나타났다.

4. 결론

본 연구는 자동차나 선박 및 산업체 등에서 발생하는 폐유나 음식물 조리나 튀김 후 재활용 되는 폐유를 이용하여 슬러지 처리의 핵심인 건조공정에 적용하고자 하는 기초 연구로써 이론적, 실험적 연구가 수행되었다.

다양한 변수 연구 결과 슬러지의 유증건조 시간은 건조 온도에 따라 차이는 있지만 폐 식용유를 사용한 경우 보통 12분 이상에서 수분 함유량이 10% 이내로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 유증 건조 온도가 140°C 이상 일 때는 6분부터 수분 함유량이 5%로 이내로 수분제거에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 또한 슬러지의 지름이 증가함에 따라 수분 증발이 감소하는 것으로 나타났다.

폐 엔진오일을 사용한 경우 점도가 증가함에 따라 폐식용유에 비하여 수분 증발이 현저히 지체되는 현상이 나타났다. 그러나 건조온도 140°C 이상에서는 120°C에 비하여 건조시간이 경과함에 따라 수분 증발이 급격히 증가하는 결과를 나타내었다. 그러므로 폐오일의 종류에 관계없이 건조온도는 140°C 이상으로 유지하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

결과에서 유증 건조 공정은 높은 수분제거 효율을 달성할 수 있고, 향후 수분과 기름의 함량사이의 상관관계를 좀 더 세부적으로 연구해야겠지만, 기존의 슬러지 건조공정의 단점을 보완할 수 있고 슬러지의 새로운 건조공정으로 충분히 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Dermibas, A., "Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals," *Energy Conversion and Management*, **42**, 1357~1378(2001).
2. Gamble, M. H., Rice, P., and Selman, J. D., "Relationship Between Oil Uptake and Moisture Loss During Frying of Potato Slices from c.v. Record U.K. Tuber," *International Journal of Food Science and Technology*, **22**, 233~241(1987).
3. Daniela P. da Silva, Victor R., Osvaldir P.T., "Drying of sewage sludge through immersion frying," 14th IDS Symposium, vol. B, 1005~1012(2004).
4. Kopp, J. and Ditchl, N., "Prediction of Full-scale Dewatering Results by Determining the Water Distribution of Sewage Sludge," *Water Sci. Technol.*, **42**(9), 141~149

- (2000).
5. Mittelman(Ashkenazi), N., Mizrahi, Sh., and Berk, Z, Heat and Mass Transfer in Frying, chap.12 in “Engineering and Food,” McKenna, B.M.(ed), Elsevier Applied Science Publishers(1984).
 6. Niessen, W., “Combustion and Incineration Processes,” Applications in Environmental Engineering, 2nd edition, Marcel Dekker Inc.,(1995).