

# 수직원통식 박막 건조방식에 의한 하수슬러지의 저위발열량 특성 Characteristics of Low Calorific Value of Sewage Sludge by Drying Method

모종근\* · 이광성\*\*† · 정한식\*\*\*

Jounggun Mo\*, Kwangsung Lee\*\*† and Hanshik Chung\*\*\*

(Received 01 August 2017, Revision received 29 September 2017, Accepted 29 September 2017)

**Abstract:** In this study, the water content and the low calorific value of the dried sludge are analyzed by using a vertical cylinder type indirect heating type dryer for evaluation of energy source value. The vertical cylindrical thin film dryer was an Okadora Pilot Plant, and the dryer was indirect heating vertical thin film type. The internal standard consisted of 500 mm in diameter and 700 mm in height.

In the drying experiment, 10 kg of dehydrated sewage sludge was added to the dryer and the total amount of the sludge was adjusted to 27 times by variable of the time, the number of revolutions and the steam temperature. The results of analysis of the 27th experiment component of the dried product showed that the average low calorific value of about 11.2 MJ/kg and the water content of 6%. This is satisfy the fuel use standard of the thermal power plant of the sludge.

**Key Words :** Sewage Sludge, Low Calorific Value, Dry Sludge

## 1. 서 론

전 세계적으로 산업화의 영향으로 인구가 급격하게 증가(1985년 45.8억에서 2015년 73.3억 명으로 약 60% 증가)하였고, 국내의 경우도 경제발전으로 인하여 인구가 급격하게 증가(1985년 4,045만 명에서 2015년 5,107만 명으로 약 26%)하여 인구의 증가와 산업화에 따른 자원의 무분별한 사용으로 자원이 고갈되고 있다. 특히 식습관과 산업의 변화에 따른 물의 사용량은 인구증가율의

약 2배가 증가하면서 세계적인 물 부족 현상이 발생하고 있다. 한번 사용하고 하천이나 바다로 버리는 시스템에서 이제는 하수를 처리하여 물을 재이용하는 방안과 하수에서 발생한 찌꺼기를 에너지화하여 사용하고 환경의 파손을 최소화하는 방안이 필연적으로 대두되고 있다. 환경문제는 우리 삶의 질과 연관시키면서 모든 분야에서 가장 근본적인 문제로 인식되기 시작하였다<sup>1,2)</sup>.

하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출을 규제하는 런던협약 '96의정서 발효에 따른 기존의

\*\*† 이광성(교신저자) : 경상대학교 에너지기계공학과  
E-mail : lks815@naver.com, Tel : 055-772-9110

\*모종근 : 국방기술품질원

\*\*\*정한식 : 경상대학교 에너지기계공학과, 해양산업연구소

\*\*† Kwangsung Lee(corresponding author) : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

E-mail : lks815@naver.com, Tel : 055-772-9110

\*Jounggun Mo : Defense Agency for Technology and Quality.

\*\*\*Hanshik Chung : Department of Energy and Mechanical Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University.

하수슬러지를 가장 편하고 저렴하게 처리가 가능한 것으로 인식되어 온 해양배출에 대한 대안이 필요하다. 하수슬러지의 처리기술과 방법에 대한 관심이 증대되어 단순한 폐기물의 처리가 아닌 유기물인 하수슬러지를 에너지화 하기 위한 정책 및 공법이 지속적으로 진행되고 있다.

유기물인 하수와 폐수슬러지의 처리처분기술은 정수처리에 집중되어 다른 처리기술의 발전 및 기술개발보다는 늦게 시작되었다. 그러나 인구의 증가 및 식습관의 변화에 따른 수질오염의 악화로 하수처리장의 건설이 본격화되면서, 발생하는 슬러지가 또 다른 오염원 문제로 인식되어 유기성 슬러지의 처리처분 기술은 다각도로 발전하여 왔다. 박상우 외(2010) ‘탄화에 의한 하수슬러지의 연료개질 특성’<sup>3)</sup>과 Fenfen Zhu 외(2012) ‘하수 슬러지 열 건조 효율 연구’<sup>4)</sup> 및 이윤경 외(2013) ‘반탄화를 이용한 하수슬러지 연료화에 관한 연구’<sup>5)</sup> 등 최근에 들어와 다양한 재이용 기술의 연구개발이 국내외에서 활발하게 진행되고 있다<sup>6)</sup>.

2015년 말 기준으로 전국에 가동 중인 공공하수처리시설은 500 m<sup>3</sup>/day 이상은 625개소이고 시설용량은 25,143,620 m<sup>3</sup>/day(500 m<sup>3</sup>/day 미만 3,282개소이며, 시설용량은 254,736 m<sup>3</sup>/day)이며, 하수처리장에서 하루 평균 10,526 ton의 하수슬러지가 발생하고 있다. 이 중 재활용(연료화, 비료화, 기타)은 5,997 ton/day 57%이며, 소각(1,971 ton/day 18.7%), 매립 (1,442 ton/day 13.7%), 건조(903 ton/day 8.6%) 순으로 처리되고 있고, 슬러지의 발생량은 매년 평균 약 14%(2002~2015년) 지속적으로 증가하고 있다<sup>7)</sup>.

비용적으로 가장 저렴한 해양투기가 2010년 까지 가장 높게 형성되다가 슬러지의 해양투기로 인한 해양의 적조의 증가, 해양 저질에 중금속의 축적 및 해양생물체 내에 유해물질 농축에 의한 국민건강이 우려되어 정부에서는 2011년 해양투기 전면금지 억제정책을 실행하고 있다<sup>8,9)</sup>.

따라서 유기성폐기물의 감량 및 슬러지의 중금속 등 오염물질 농도에 따라 등급별 처리 방안을 강구하고 자원화를 위한 처리 방안이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 많이 연구되고 있는 탄화

및 반탄화를 이용한 재활용 방안 대신 적은 부지에 설치가 가능하고 운전 중 화재에 안전한 수직원통형 박막 간접 가열 건조기를 이용하여 건조슬러지의 함수율 및 저위발열량을 분석하여 연료의 에너지원으로서 가치여부를 평가하고자 한다.

## 2. 하수슬러지의 건조처리 원리

### 2.1 건조이론

대기 중으로 수분을 증발시킴으로써 수분을 감소시키는 일종의 단위조작으로 기계적인 건조 장치에서 보조 열은 증발 능력을 증가시키고 증발에 필요한 잠열을 제공하여 젖은 슬러지의 수분을 효과적으로 제거하는 것이다.

평형상태에서 질량 변환 방정식은 식 (1)<sup>10)</sup>과 같다.

$$W = k_y (H_s - H_a) A \quad (1)$$

$W$  = 증발열, (kg/h)

$k_y$  = 가스 상의 물질 전달 계수, (kg/m<sup>2</sup>·h)/ΔH(습도 차)

$H_s$  = 공기와 슬러지의 경계면에서 공기의 포화 습도, 수증기(kg)/건조증기(kg)

$H_a$  = 건조공기의 습도, 수증기(kg)/건조증기(kg)

$A$  = 노출된 슬러지의 표면적, (m<sup>2</sup>)

### 2.2 건조원리

하수슬러지 내의 수분은 Free water, Interstitial water, Surface water, Bound water 등으로 구분된다. Free water는 슬러지 표면에 존재하고 수분 중 대부분을 차지하며, Interstitial water는 슬러지 내의 분자와 분자 사이에 존재하고, Surface water는 슬러지 분자 표면에 막으로 되어 있으며, Bound water는 슬러지 분자에 화학적으로 결합되어 존재하고 있다. 슬러지 내의 수분결합상태는 위와 같이 4가지로 구분할 수 있으며, 건조과정에서의 수분 이동현상은 Fig. 1과 같다<sup>11)</sup>.

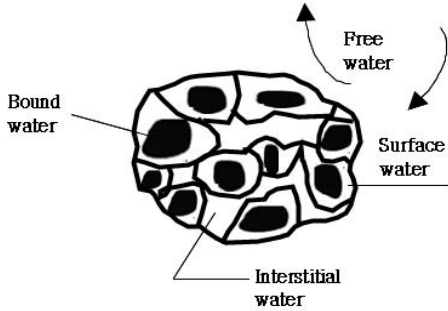


Fig. 1 Water distribution sewage sludge

### 3. 하수슬러지 건조실험

#### 3.1 시료

본 연구의 실험조건에 사용된 대상 슬러지는 J 하수처리장에서 발생한 탈수된 하수슬러지로 시료의 특성은 Table 1과 같이 나타내었다. 시험은 약 300 kg 이상 시료를 채취하여 10 kg씩 Table 2와 같이 27회에 걸쳐 실험을 하였다.

Table 1 Sewage sludge component analysis

Division	Number of experiments			
	Primary	Secondary	Third	Fourth
Moisture(%)	85.2	87.6	79.9	75.7
Ash(%)	5.2	4.1	7.5	11.1
Combustible matter(%)	9.6	8.3	12.6	13.2
Low heating value(MJ/kg)	-0.046	-0.347	0.747	0.793

#### 3.2 실험장치 및 방법

본 연구의 건조실험에 사용된 수직원통형박막 건조기는 오카도라의 Pilot Plant(모델명 SD500B) 설비를 이용하였으며, 건조기는 사이클론방식으로 내부규격은 직경 500 mm와 높이 700 mm 원통형으로 구성되었다. Fig. 2는 간접가열 수직원통형 건조기의 계략도로 열원은 보일러를 이용하여 증기를 공급하고 증기가 내부의 하수슬러지의 수분을 증발시켜 건조하는 방식이다.

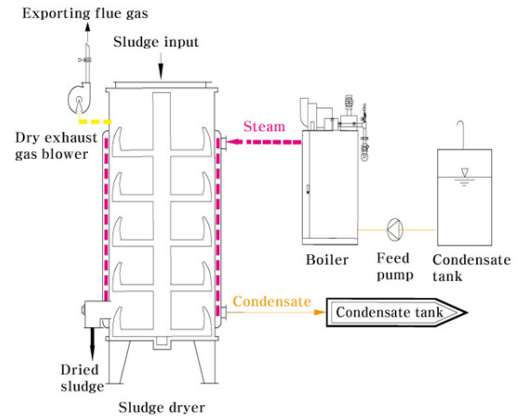


Fig. 2 Schematic diagram of dry testing system

Table 2 Sewage sludge drying test conditions

No.	Revolutions per minute [Hz]	Steam temperature [°C]	Drying time [min]
1	60	133	60
2	60	133	70
3	60	123	80
4	60	123	60
5	60	123	70
6	60	143	80
7	60	143	60
8	60	143	70
9	50	123	80
10	50	123	60
11	50	123	70
12	50	133	80
13	50	133	60
14	50	133	70
15	50	143	80
16	50	143	60
17	50	143	70
18	55	123	80
19	55	123	60
20	55	123	70
21	55	133	80
22	55	133	60
23	55	133	70
24	55	143	80
25	55	143	60
26	55	143	70
27	60	133	80

※ Motor sayang : 4극 1,750 rpm

### 3.2.1 실험조건

실험조건은 Table 2와 같이 탈수된 하수슬러지 10 kg을 수직원통형박막건조기에 투입하여 시간(60, 70, 80 min), 회전수(50, 55, 60 Hz), 증기온도(123, 133, 143 °C)의 변수를 주어 총 27회에 걸쳐 실험을 수행하였고, 정확한 실험결과를 위하여 성분 분석은 전문연구기관(경남과학기술대학교)에 의뢰하여 성분 분석을 도출하였다.

### 3.2.2 성분분석방법

원소분석기(Flash 2000, 오차범위 ±0.3%)와 수분 측정기(MX-50, 오차범위 ±0.1%)로 측정하였다.

발열량 분석<sup>12)</sup>으로 건조슬러지발열량(Hd)은 함량으로 건조된 시료를 연소시켜 발생한 열량을 열량계(Parr6400, 오차범위 ±0.1%)로 측정하였고, 고위발열량(Hh)과 저위발열량(Hl)은 식 (2)와 (3)으로 계산하였다.

$$Hh(\text{MJ/kg}) = Hd \times (100 - w) / 100 \quad (2)$$

$$Hl(\text{MJ/kg}) = Hh \times 600 (9h + w) / 100 \quad (3)$$

h : 원소분석에 의한 수소의 조성비(%)

w : 제시시료 중에 함유된 수분의 함량(%)

Fig. 3는 수직원통 구조로 원심력에 의해 하수슬러지가 원통 내벽에 박막상태로 밀착되어 빠른 속도로 수분 증발을 유도하며 가열, 접촉 탈락을 반복하는 간접 가열 수직원통 박막건조의 원리를 설명하고 있다.

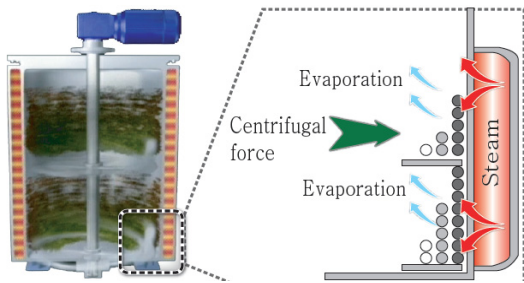





Fig. 3 Dryer conceptual principles of sewage sludge<sup>13)</sup>

Table 3는 하수슬러지의 건조과정을 나타내고 있으며 함수율 약 80%(Table 1)의 하수슬러지를 건조기에 투입하여 30분 정도 건조 시 약 20~50 mm 원형을 형성하며, 건조조건에 따라 60~80 min 건조 시 10 mm 이하의 건조물이 생성된다.

Table 3 Sewage sludge dryer process

Time (min)	Sludge condition	
0		Dryer sludge input (10 kg)
30		Multiple large lumps formed
80		Nearly complete drying

## 4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 경상남도 J시의 하수슬러지를 간접 가열 수직원통 박막방식에 의해 건조하여 화력발전소의 연료의 적합성을 분석하고, 건조효율 향상을 위한 건조기 회전속도(50, 55, 60 Hz), 건조시간(60, 70, 80 min), 증기온도(123, 133, 143 °C) 총 9가지의 실험조건을 주고 간접가열 수직원통형 박막방식의 최적 건조 조건을 확인하고자 하였다.

27회 실험분석 결과, 하수슬러지 10 kg을 건조기에 투입하여 1.17~2.85 kg의 건조슬러지를 생산하고 평균 2.21 kg으로 약 77.84%로 감량되었다.

Fig. 4~6은 건조물의 실험조건별 함수율을 분석하였으며, Fig. 4의 건조기의 회전속도별 분석결과 평균 50 Hz는 5.1%(최고 7.65, 최저 2.15%), 55 Hz는 7.5%(최고 16.33, 최저 2.12%), 60 Hz는 3.9%(최고 6.81, 최저 3.22%)의 함수율을 나타내었다. 회전속도에 따른 함수율 저감 성능은 회전속도가 가장 빠른 60 Hz가 높은 것으로 분석되었지만 55 Hz보다 50 Hz의 회전속도가 더 효과적인 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 건조시간별 분석결과 평균 60분은 8.1%(최고 16.3, 최저 4.1%), 70분은 5.1%(최고 8.7, 최저 2.6%), 80분은 3.8%(최고 5.1, 최저 2.1%)의 함수율을 나타내었다. 건조시간이 길수록 함수율 저감 성능은 높아지지만, 60~70분에서 3% 저감 효과에 비하여 70~80분은 1.3%로 저감 효과가 낮아 에너지 사용량을 고려하여 건조시간 조절(함수율 10% 이하)이 필요한 것으로 확인되었다.

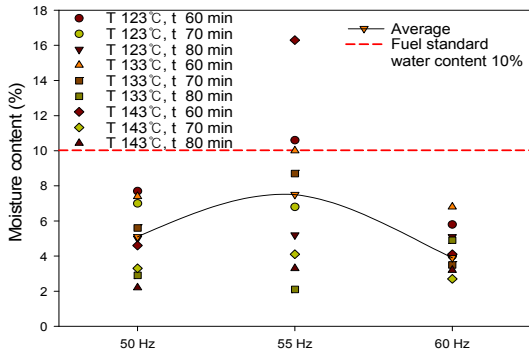


Fig. 4 Analysis of moisture content by variation of rotor speed of dryer

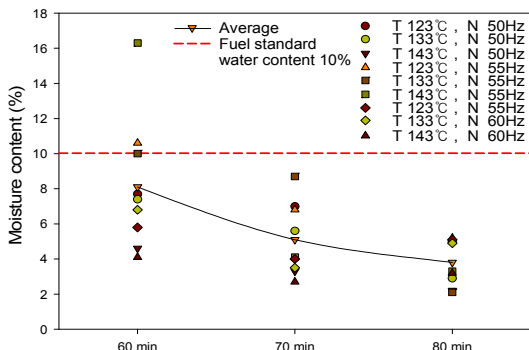


Fig. 5 Analysis of moisture content by drying time

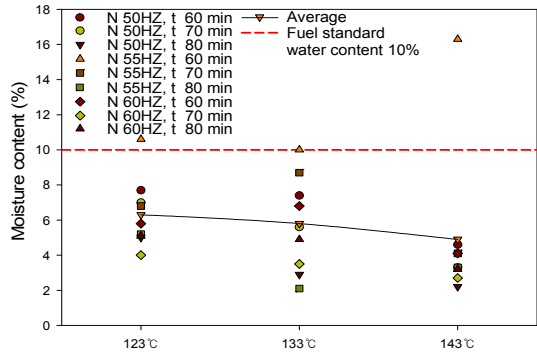


Fig. 6 Analysis of moisture content by drying vapor temperature

Fig. 6은 건조기 증기온도별 분석 결과, 평균 123°C는 6.3%(최고 10.5, 최저 3.9%), 133°C는 5.8%(최고 10.2, 최저 2.1%), 143°C는 4.9%(최고 2.1, 최저 16.3%)의 함수율을 나타내었다. 증기온도가 높을수록 함수율 저감 성능은 높아지지만, 123~143°C는 1.4% 저감 효과를 나타내 증기온도에 따른 함수율 저감 효과는 작은 것으로 확인되었다. 화력발전소 연료사용기준 중 함수율 10%를 대부분 만족하는 것으로 분석되었으며, 실험조건별 함수율을 평균 분석 결과, 건조시간(4.3%), 회전속도(3.6%), 증기온도(1.4%) 순으로 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 7~9는 건조물의 실험조건별 저위발열량을 분석하였으며, Fig. 7은 건조기의 회전속도별 분석결과, 50 Hz는 13.15 MJ/kg(시간 80분, 온도 143 °C), 55 Hz는 12.97 MJ/kg(시간 80분, 온도 133 °C), 60 Hz는 12.5 MJ/kg(시간 70분, 온도 143 °C) 최고치를 나타냈으나, 각각 평균은 50 Hz는 11.69 MJ/kg, 55 Hz는 10.63 MJ/kg, 60 Hz는 12.06 MJ/kg의 저위발열량을 나타내어 회전속도에 따른 저위발열량 성능은 회전속도가 가장 빠른 60 Hz가 높은 것으로 분석되었다. 하지만 55 Hz보다 50 Hz가 더 효과적인 것으로 확인되었고, 50 Hz와 60 Hz는 0.37 MJ/kg 차이가 작아 고속회전으로 운전 시 규사 등으로 마모가 높은 하수처리장은 50 Hz로 운영하는 것이 효과적인 것으로 분석되었다.

Fig. 4와 Fig. 7에서 27회 실험결과를 분석하면 함수율이 낮을수록 저위발열량을 증가하여 밀집

한 관련이 있음을 확인하였고, 평균 저위발열량 약 11.22 MJ/kg과 수분함유량 6%로 슬러지의 화력발전소 연료사용 기준(저위발열 8.3736 MJ/kg 이상, 수분함유량 10% 이하)을 충족하는 것을 확인하였다. 회전속도 55 Hz에서 특별히 나쁜 값을 나타내는 것은 슬러지를 운반하는 역할을 수행하는 내부 회전 핀의 폭 및 길이가 60 Hz를 기본으로 설계되어 있어 발생한 것으로 판단되어, 향후 각 회전속도별로 내부 핀의 폭 및 길이에 대한 별도의 연구가 필요한 것으로 검토되었다.

Fig. 8은 건조시간별 분석 결과, 평균 60분은 10.28 MJ/kg, 70분은 11.6 MJ/kg, 80분은 12.18의 저위발열량을 나타내어 건조시간이 길수록 성능은 높아지지만, 60~70분에서 1.36 MJ/kg 효과에 비하여 70~80분은 0.59 MJ/kg으로 효과가 낮게 확인되었다.

Fig. 9는 건조기 증기온도별 분석 결과, 평균 123℃는 10.96 MJ/kg, 133℃는 11.38 MJ/kg, 143℃는 11.72 MJ/kg의 저위발열량을 나타내어 증기온도가 높을수록 성능은 높아지지만 133~143℃는 0.3 MJ/kg 차이로 작아 증기온도에 따른 효과는 작은 것으로 확인되었다. 화력발전소 연료사용기준중 저위발열량 8.3736 MJ/kg 이상은 27회 실험중 26번 기준을 충족하였고, 건조시간이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 건조기의 회전속도를 변수로 주어 평균 건조한 제품과 석탄하고 연료기준 값 8.3736 MJ/kg과 비교분석한 결과를 나타내고 있다. 실험

결과 모두 기준 이상의 값으로 나왔으며, 건조기 회전속도를 55 Hz로 운전 시 평균 저위발열량이 조금 낮게 나옴을 알 수 있다.

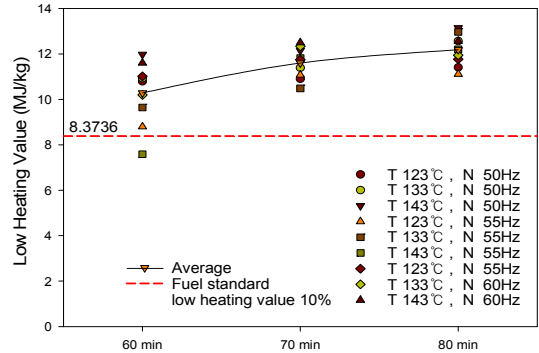


Fig. 8 Analysis of low heating value according to drying time of dryer

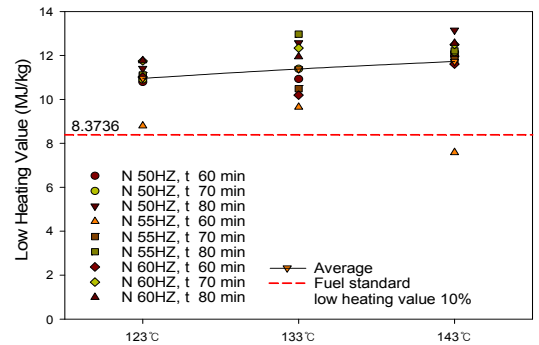


Fig. 9 Analysis of low heating value according to drying vapor temperature

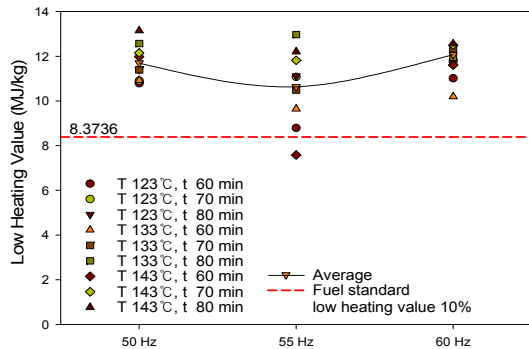


Fig. 7 Analysis of low heating value of dry sludge according to change of rotating speed of dryer

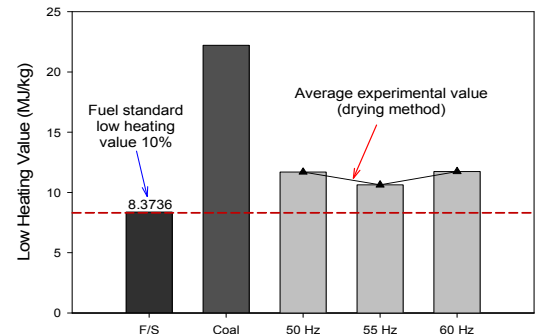


Fig. 10 Comparison of low heating value for coal and drying products by different rotating speed of dryer

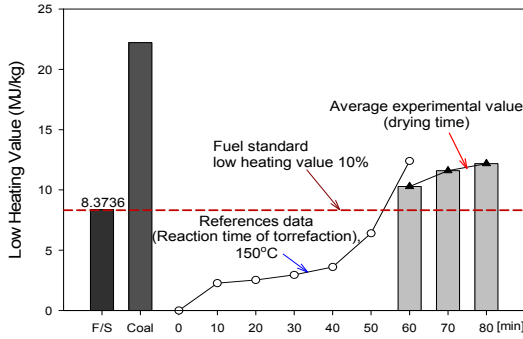


Fig. 11 Comparison for low heating value of coal, references data and drying products according to drying time

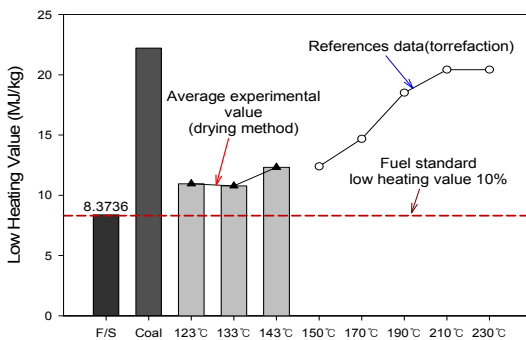


Fig. 12 Comparison for low heating value of coal, references data and drying products according to drying vapor temperature

Fig. 11은 이윤경 외 ‘반탄화를 이용한 하수슬러지 연료화에 관한 연구’<sup>5)</sup> 참고문헌과 저위발열량을 비교분석한 결과, 150℃ 반응시간과 유사하게 시간이 지나갈수록 저위발열량이 증가함을 알 수 있다. 80 min으로 건조한 제품이 가장 높게 저위발열량이 나왔다.

Fig. 12는 참고문헌의 반응온도에 따라 저위발열량이 상승하는 것처럼 본 실험의 온도와 비교하였을 때 낮은 온도이지만 저위발열량 기준 이상으로 결과가 나왔다.

## 5. 결 론

본 연구에서 J시의 하수슬러지를 수직원통형

박막 건조기로 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하수슬러지의 운반효율 및 사용방법을 검증하기 위한 27회의 감량화 확인 결과, 10 kg 투입하여 평균 2.21 kg으로 약 77.84% 가능한 것을 확인하였다.

2) 하수슬러지 10 kg을 수직원통식 박막건조방식으로 회전속도 50 Hz와 60 Hz에서는 60분 이상, 55 Hz에서는 70분 이상 건조하였을 때 함수율 10% 이하의 건조물을 만들 수 있는 것으로 확인되었다.

3) J시의 하수슬러지를 수직원통식 박막건조방식으로 건조 시 회전속도 50 Hz과 55 Hz보다 함수율이 평균 2.4% 낮고, 저위발열량이 평균 1.06 MJ/kg 높은 것으로 확인되어 전기에너지 투입량 등을 고려할 때 회전속도 50 Hz 운전하는 것이 효과적인 것으로 확인되었다.

4) 건조품의 27회 실험 성분분석 결과, 평균 저위발열량이 약 11.22 MJ/kg과 수분함유량 6%로 슬러지의 화력발전소 연료사용기준(저위발열 8.3736 MJ/kg 이상, 수분함유량 10% 이하)을 충족하여 화력발전소 연료로 적합함을 확인되었다.

5) J시의 하수슬러지를 수직원통식 박막건조방식으로 건조 시 회전속도, 건조시간, 증기온도 등의 변화에 따른 함수율 감소 및 저위발열량 실험 결과 건조시간이 가장 크고, 건조기회전속도, 증기온도 순으로 실험에 많은 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

6) J시의 하수슬러지를 수직원통식 박막건조방식으로 건조 시 회전속도 50 Hz는 건조시간 80분, 증기온도 143℃, 회전속도 55 Hz는 건조시간 80분, 증기온도 133℃, 회전속도 60 Hz는 건조시간 80분, 증기온도 143℃에서 효과가 가장 좋은 것으로 확인되었으며, 고속회전으로 인한 마모 및 전기 사용량 등에 의한 유지관리 측면에서는 건조 시 회전속도 50 Hz, 건조시간 70분 이상, 증기온도 133℃ 이상으로 운전하는 것이 효율적인 것으로 확인되었다.



## References

1. T. S. Kim, Y. H. Chol, Y. W. Lee and K. Choi, 2006, "Analysis of a inner flow of ANDRICH type dryer", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 54-61.
2. T. S. Kim, Y. K. Kim, Y. H. Choi, Y. W. Lee and K. Choi, 2005, "Numerical Analysis of the inner Flow of a 3-pass Rotary Dryer", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 51-57.
3. S. W. Park and C. H. Jang, 2010, "Fuel Reforming Characteristics of Sewage Sludge by Carbonization", Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 27, No. 8, pp. 674-680.
4. F. Zhu, Z. Zhang, H. Jiang and L. Zhao, 2012, "The Study of Sewage Sludge Thermo-Drying Efficiency", Procedia Environmental Sciences, Vol. 16, pp. 363-367.
5. Y. K. Lee and D. W. Pak, 2013, "A study on the fuel of sewage sludge by torrefaction process", Journal of Energy Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 355-361.
6. J. M. Lee, D. H. Moon and J. H Kim, 2000, "Characteristics and chemical characteristics of garbage brought to the landfill in the metropolitan area", Journal of the Korean Waste Society, Vol. 17, No. 3, pp. 366-369.
7. Korea Environment Corporation, 2017, "Sewage Statistics", [www.hasudoinfo.or.kr/stat/statView.do?year=2015&page=01](http://www.hasudoinfo.or.kr/stat/statView.do?year=2015&page=01).
8. H. S. Yun, 1994, "Waste treatment technology", assimilation technology trade, pp. 17-37.
9. S. B. Jeong, 2011, "Experimental Study of Carbonization for Raw Sewage Sludge", Ph. D. Dissertation, Wonkwang University.
10. S. W. Park and C. H. Jang, 2004, "Carbonization Treatment for Waste Incineration", Institute for Environmental Management, Advanced Environmental Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 110-120.
11. 2013, "Ministry of Environment", Waste Resource Energy Business Practice Vol. 2, p. 264.
12. 2013, "Metropolitan area landfill management corporation Preparation and Characterization of Carbides Using Organic Waste", 2013-11-006-01, p. 46.
13. Hyosung Ebara Engineering, 2011, "Jinju Sewage Sludge Treatment Facility Completion Report, Environmental Management Corporation", p. 42.