

## 증기가압형 처리공정을 이용한 유기성 폐기물의 건조처리 및 고형연료화

박세준\*, 최영찬\*\*<sup>†</sup>, 최인규\*\*\*

\*(주)세화테크, \*\*한국에너지기술연구원, \*\*\*씨에프산업

## Dehydration and RDF Production of Organic Wastes with Pressurized Hydrothermal Treatment Process

SEJOON PARK\*, YOUNGCHAN CHOI\*\*<sup>†</sup>, INKYU CHOI\*\*\*

\*SEWHIA TECH, INC., Naju Jeonnam 520-814, Korea

\*\*Korea Institute of Energy Research Center, Daejeon 305-343, Korea

\*\*\*CF INDUSTRIAL CO., Haman Gyungnam 637-833, Korea

### ABSTRACT

This paper investigates the dehydration and RDF (Refuse Derived Fuel) production of organic wastes, livestock manure and sewerage sludge with pressurized hydrothermal treatment process. The renewable technology for the organic wastes must involve short treatment time required, reusable energy source, anti-odor and viruses, low cost for the treatment, and well-fertilization. The pressurized hydrothermal treatment process promotes to evaporate moisture in the waste after being shortly treated in a reactor, which uses steam and heat supplied by an external boiler. By the pressurized steam, the cell walls of the waste break and effectively release the internal moisture. Then, the dried waste can be mixed with waste vinyls to produce RDF with a higher heating value as high as 6,700 kcal/kg.

**KEY WORDS** : Renewable energy(재생 에너지), Organic wastes(유기성 폐기물), Hydrothermal pre-treatment process(증기열 전처리 공정), RDF(refuse derived fuel; 폐기물 고형연료)

### 1. 서 론

타 바이오매스와 마찬가지로 건조처리 되지 않은 유기성 폐기물은 함수율이 높아 에너지 자원으로서는 활용은 비경제적이다. 함수율과 가용에너지

간의 상관관계는 함수율이 적을수록 이용할 수 있는 에너지는 높아진다는 것이다(Fig. 1). 열화학적 프로세스에 의한 에너지 전환 방법에서, 유기성 폐기물이 가지는 화학 에너지보다 폐기물에 포함되어 있는 수분의 증발에 필요한 에너지가 훨씬 크기 때문이다. 따라서 고함수의 유기성 폐기물 자원화를 위해서는 최소의 비용으로 함수율을 저감하여 가용 에너지를 증가 시키는 것이 필수적이라 할 수 있다.

<sup>†</sup>Corresponding author : youngchan@kier.re.kr

[ 접수일 : 2009.9.5 수정일 : 2009.10.22 게재확정일 : 2009.10.23 ]

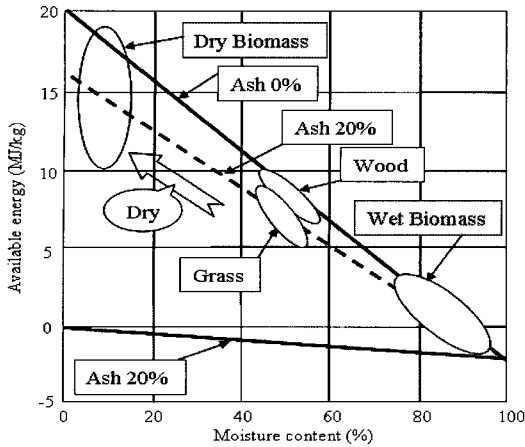


Fig. 1 Interrelation between moisture content and available energy.

하지만 유기성 폐기물(슬러지)의 탈수가 어렵다는 사실은 많은 연구를 통해 잘 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 유기성 폐기물 내에 존재하는 수분은 물리적 상태에 따라 자유수(free water)와 결합수(bound water)로 나뉜다. 결합수는 다시 간극수, 간극모간수, 표면부착수, 입상 결합수로 이루어져 있으며, 슬러지 입자를 형성하고 있는 세포의 세포액 또는 화학적 결합에 의해 형성된다. 기계적 탈수에 의해 제거 가능한 수분은 자유수와 간극수이며, 표면수와 결합수는 기계적 탈수에 의해 제거가 불가능한 것으로 알려져 있다. 결합수를 제거하기 위해서는 보다 많은 에너지가 필요하지만 완전하게 제거하는 것은 불가능하며, 이 결합수가 수분 제거 효율을 떨어뜨리는 가장 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 기계적으로 탈수된 슬러지 내의 함수율을 낮추기 위해서는 피건조물을 가열하여 내부수를 탈수시키는 공정이 필수적이라 하겠다. 현재 유기성 폐기물을 가열하여 건조하는 방식은 다양한 방법으로 시도되고 있으며, 그 방법으로는 크게 간접 가열방식의 전도건조(conduction drying)와 직접 가열방식인 대류건조(convection drying)로 분류할 수 있다<sup>1,3-8)</sup>.

본 논문에서는 직접 가열방식인 증기가압형 처리공정을 이용하여 하수슬러지나 축분과 같은 환경적 오염 부하가 큰 유기성 폐기물의 건조처리와 회수된 고형분을 이용한 에너지자원화기술에 대하여 제안하였다.

Table 1 Component analysis of organic wastes

시료명		하수슬러지	축분
분석항목	수분(M)	81.71	77.98
	휘발분(VM)	10.31	13.40
	회분(Ash)	7.26	7.88
	고정탄소(FC)	0.72	0.74
공업분석 (wt%)	탄소(C)	28.94	33.83
	수소(H)	5.01	5.00
	질소(N)	3.97	3.73
	산소(O)	59.63	55.65
	황(S)	1.73	1.05
원소분석 (wt%)			
고위발열량(kcal/kg)		2,900	3,520

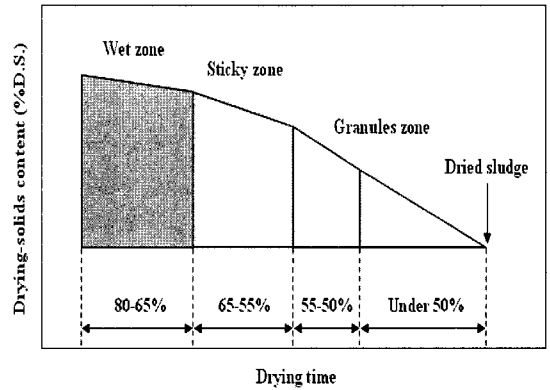


Fig. 2 Characteristic of organic wastes by moisture content<sup>11)</sup>.

## 2. 유기성 폐기물의 특성

유기성 폐기물의 높은 수분함량과 점착성은 자원화를 어렵게 하는 주요 요인이 된다. 하수슬러지의 경우 81% 이상의 높은 수분함량을 갖고 있으며, 10% 정도의 휘발분, 7% 정도의 회분으로 구성되어 있다. 이러한 높은 수분함량으로 인하여 2,900kcal/kg의 낮은 발열량 값을 나타내기 때문에 에너지자원으로써의 이용을 위해서는 저함수율의 에너지집약화(건조) 공정이 요구된다. 또한 축분의 경우 하수슬러지와 비슷하게 77% 이상의 높은 함수율을 나타내었고 회분, 수소, 질소, 및 황 함량 등이 거의 유사 하였으며 하수슬러지보다는 약간 높은 휘발분 및 탄소함량으로 인하여 3,520kcal/kg의 발열량 값을 가지고 있다

(Table 1). 그러나 이 또한 연료로서 적용하기에는 낮은 열량값 및 높은 함수율로 인하여 막대한 에너지 소비가 예상되므로 탈수, 건조 공정이 필요하다.

일반적으로 유기성 폐기물 건조과정은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 유동성 단계, 점착성 단계, 입자화 단계의 3단계를 거치면서 건조가 진행된다. 유동성 단계는 함수율 80~65%의 곤죽(paste)상태에 있으며, 점착성 단계는 함수율 55~50%로서 작은 덩어리로 쪼개지면서 함수율 50%의 점성이 강한 반고체 상태이고, 입자 상태로 변화되어 건조가 진행된다. 각 형식의 폐기물 건조기의 선택은 건조대상 폐기물의 성상과 건조 조건에 따라 건조기내의 피건조물 이동, 공급, 배출의 난이성 등에 대한 사전검토가 필요하며, 다양한 운전 변수들을 고려하여 선택하여야 할 것이다<sup>7,8)</sup>.

### 3. 증기가압형 처리공정

증기가압형 처리공정을 이용한 유기성 폐기물의 건조방식은 다양한 건조 방식 중에서 대류에 의한 직접 건조 방식에 해당한다. 기존의 열풍이나 연소가스에 의해 건조열이 공급되던 것과 달리 증기의 열을 건조 매체로 사용하고 압력을 높여주어 피 건조물을 건조하는 방식으로, 단순 열풍 건조에 비교하여 건조 속도가 단축되어 에너지를 절감할 수 있는 친환경적인 공정이다. 증기열(hydrothermal) 건조와는 달리

열풍 건조에서는 공기 속의 증발된 수분이 건조 공기 자체를 습윤하게 만들어 피건조물의 상태에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있고, 또한 증기열과 열풍은 비엔탈피, 비열, 점도, 열전도도와 같은 물리적 성질에도 차이가 있는데 증기열의 비열이 열풍보다 크고 이는 건조속도를 더 빠르게 만드는 원인이 된다<sup>9,10)</sup>.

Mujumdar<sup>14)</sup>는 열풍 건조 과정에서 4,000~5,000 kJ/kg의 에너지가 소비되지만 증기열 공정을 이용함으로써 1,000~1,500kJ/kg 정도의 에너지를 절약할 수 있다고 발표한바 있다<sup>11)</sup>. 또한 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이, 열풍과 증기열에서 물의 증발 속도(=물질 흐름 속도)가 같아지는 역전온도(약 170~200℃ 사이) 이상에서는 증기열이 열풍보다 피건조물의 수분 증발을 촉진한다고 J.P. Schwartze et al.<sup>12,13)</sup> 등이 밝혔다. 마지막으로 Yoshikawa<sup>14,15)</sup> 연구팀은 본 공정을 이용하여 하수슬러지를 건조하는 실험을 진행하였고, 기존의 열풍 건조 공정에 비해 약 70%의 에너지를 절감할 수 있다고 밝힌바 있다(Fig. 4). 따라서 증기열을 이용한 유기성 폐기물의 건조 공정이 열풍을 대체로 한 건조 공정보다 에너지 효율이 높으며 건조시간도 단축시키는 효과를 가지고 있다고 할 수 있다.

증기가압형 처리공정을 이용한 유기성 폐기물 전처리공정도를 Fig. 5에 나타내었다. 본 시스템은 크게 스팀공급부, 건조처리부, 고액분리 처리부, 운전제어 및 분석부 등으로 나누어진다. 본 전처리공정은 반응

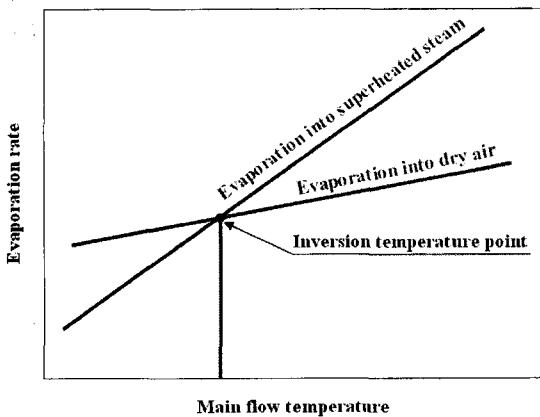


Fig. 3 Comparison of evaporation rate at air process and hydrothermal process with inversion temperature<sup>16)</sup>.

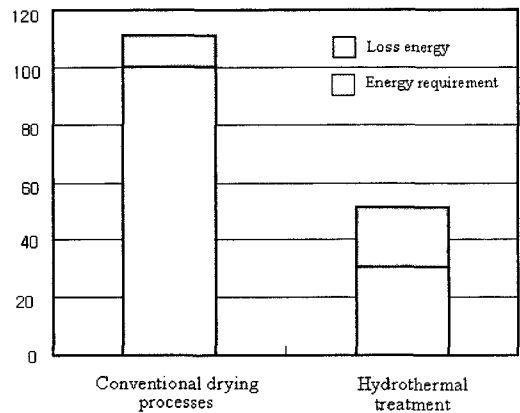


Fig. 4 Comparison of energy requirement with conventional drying process<sup>17)</sup>.

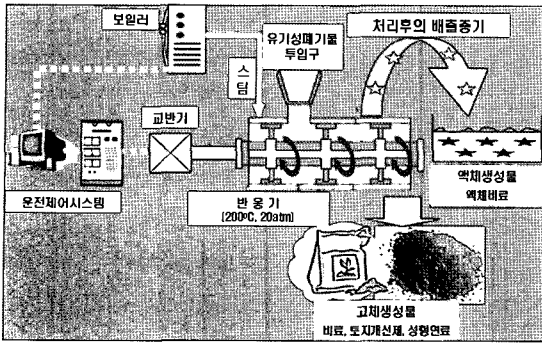


Fig. 5 Schematic of pressurized hydrothermal pre-treatment process.

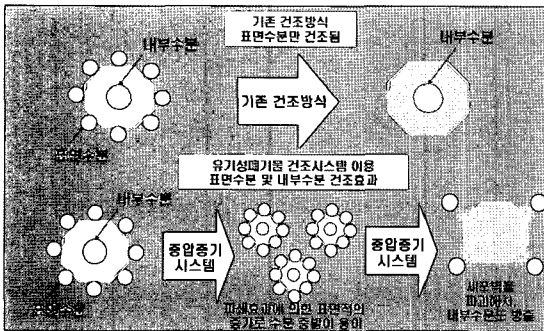


Fig. 6 Mechanism for dehydration characteristic of organic waste using pressurized hydrothermal process.

기 안에 유기성 폐기물을 채운 후 반응기 안의 온도 및 압력을 고압 스팀 보일러를 이용하여 약 200°C, 20atm으로 유지하여 약 30~50분간 처리한 후 배출하여 액체와 고체를 분리하여 처리한다. 외부에 위치한 보일러에서 생성된 증압수증기를 반응기 내부에 공급함으로써 이에 의한 고함수 유기성 폐기물의 파쇄효과와 수분증발을 위한 표면적의 증가효과, 그리고 세포벽을 파괴하여 자연 상태에서는 배출될 수 없는 내부수의 건조를 촉진하게 된다(Fig. 6).

## 4. 실험장치 및 방법

### 4.1 열중량 분석(TGA) 실험

유기성 폐기물 건조 실험에 사용되는 하수슬러지 및 축산분뇨에 대한 연료로서의 특성을 파악하기 위하여 TGA(SETARAM TG/DTA 92-18) 분

석기를 이용하였다. 초기 TGA basket 내 시료의 무게는 평균 19~20mg을 충전하였으며, 이러한 범위에서 시료무게에 대한 변수는 TGA결과에 영향을 주지 않았다. 사용된 저울과 온도측정의 정밀도는 0.01mg과 0.01°C까지 측정이 가능하다. 승온속도 및 질소, 공기의 유량은 모든 실험조건에서 동일하게 15°C/min, 100ml/min으로 고정하였다. 또한 시료의 무게변화는 전자식 저울과 컴퓨터를 이용하여 2.6초의 일정한 시간 간격으로 측정하면서 data를 저장하였다. 유기성 폐기물의 발화온도 및 열분해 특성을 측정하기 위하여 일정량의 시료를 15°C/min의 승온속도로 1,400°C까지 공기 또는 질소를 주입하며 실험을 진행하였다.

### 4.2 유기성 폐기물 건조실험

하수슬러지와 축분을 G시의 하수처리장과 축산농가에서 중간처리 없이 수거하여 건조실험을 실시하였다. 축분 147kg을 반응기에 투입 후 보일러에서 공급되는 스팀(21kg/cm<sup>2</sup>, 213°C)을 감압밸브를 이용하여 스팀의 압력 및 온도를 1kg/cm<sup>2</sup>, 100°C로 전환하여 건조시스템 처리 장치 자켓으로 공급한다. 건조시스템 처리 장치 자켓에서 발생하는 응축수는 스팀트랩을 이용하여 배출한다. 건조시스템 처리 장치 자켓으로 공급되는 스팀에 의해 건조시스템 처리 장치안의 온도를 약 100°C로 유지한다. 스팀 유량조절밸브를 이용하여 보일러에서 공급되는 스팀(21kg/cm<sup>2</sup>, 213°C)을 건조시스템 처리 장치로 공급하여 압력 및 온도를 19kg/cm<sup>2</sup>, 205°C로 조절한다. 건조시스템 처리 장치의 압력 및 온도가 19kg/cm<sup>2</sup>, 205°C에 도달하면 보일러에서 스팀(21kg/cm<sup>2</sup>, 213°C)을 자동으로 공급할 수 있도록 스팀 유량조절밸브를 조절하여 일정 시간(20분 이상)을 유지한다. 스팀 배출구를 열어 건조시스템 처리 장치의 내부 압력을 상압으로 조절한다. 슬러리 배출구를 이용하여 건조 처리된 슬러리를 배출하게 된다.

운전을 위한 반응 압력 및 온도 측정의 위치로는 Fig. 7의 모니터링 화면에서 보여주는 바와 같이 투입되는 스팀의 압력(TE-1000) 및 온도(PT-1000), 반응

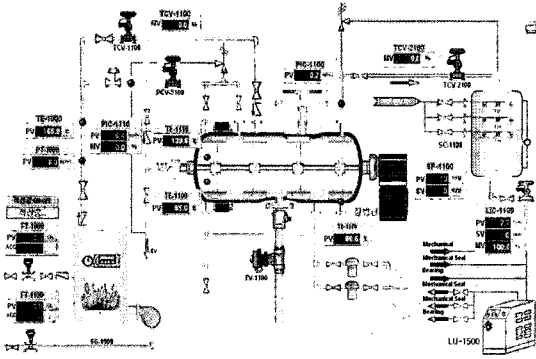


Fig. 7 Control parameters of pressurized hydrothermal treatment process.

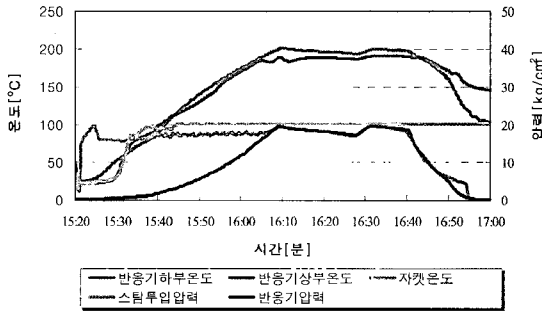


Fig. 8 Variation of temperature and pressure of reactor.

기 내부의 상부온도(TE-1110) 및 하부온도(TE-1100), 자켓의 온도(TE-1120), 그리고 반응기 내부의 압력(PIC-1100) 등이 있으며, 본 건조실험 시 측정된 상기 값들의 경시변화는 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

### 4.3 고흥연료화 실험

건조처리 후 회수된 축분의 고흥분을 시료로 사용하여 폐비닐과 혼합한 고흥연료를 제조하였으며, 제조 장치는 ring dies type으로 50kg/h, 37kW의 용량 및 규격을 가지는 장치를 사용하였다. 에너지 자원으로써의 이용(형태, 생산, 발열량 등)을 감안하여 폐비닐의 혼합 비율을 달리 하였으며, 그 혼합 비율은 각각 5%, 10%, 25%로 설정하여 발열량을 평가하였다.

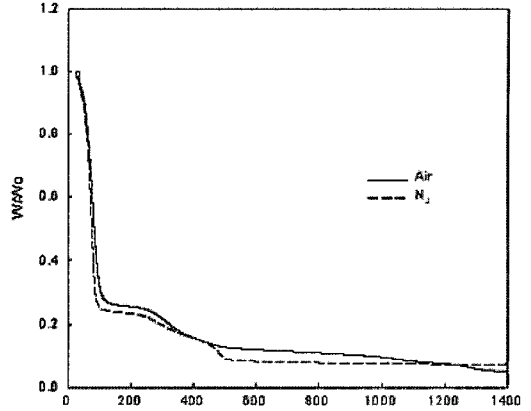


Fig. 9 TGA results of sewage sludge (before dehydration).

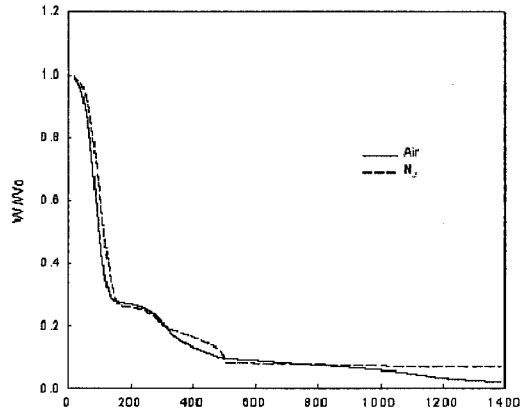


Fig. 10 TGA results of livestock manure (before dehydration).

## 5. 결과 및 고찰

하수슬러지 및 축분의 TGA 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. 앞서 유기성 폐기물의 성분 특성 (Table 1)에서 알 수 있듯이 건조 전 두 종류의 유기성 폐기물의 경우 대부분 수분 및 휘발분으로 구성되어 있기 때문에 연소 및 열분해 경향이 거의 동일한 형태를 보였다. 초기 100°C까지는 수분 증발로 인하여 70% 이상의 무게감량이 발생하였으며, 200°C부터 500°C까지 10% 이상의 휘발분의 연소 또는 열분해로 인한 무게감량을 보였다. 연소 또는 열분해 반응 이후 8% 정도의 회분으로 인한 잔류물이 남았음을 확인할 수 있었다.

Table 2 Component analysis of liquefied livestock manure by dehydration treatment

시료명	항목	공정규격 (가축분뇨발효비료액)	분석 결과
축분 (액분)	주 성 분	질소전량(%)	0.3%이상
		비소(mg/kg)	5mg/kg이하
	유 해 성 분	카드뮴(mg/kg)	0.5mg/kg이하
		수은(mg/kg)	0.2mg/kg이하
		납(mg/kg)	15mg/kg이하
		크롬(mg/kg)	30mg/kg이하
		구리(mg/kg)	50mg/kg이하
		니켈(mg/kg)	5mg/kg이하
		아연(mg/kg)	130mg/kg이하
	기 타 성 분	수분(%)	95%이상
		염분(%)	0.3%이하
		인산전량(%)	0.17
		가리전량(%)	0.29
		석회전량(%)	0.02
		고토전량(%)	0.14
		나트륨(%)	0.074
		고형물(%)	3.6

Table 3 Caloric value of respective RDFs by waste vinyls mixture ratio

No	시료명	고위발열량 (kcal/kg)
1	축산분뇨+폐비닐(95/5)	5,904
2	축산분뇨+폐비닐(90/10)	5,333
3	축산분뇨+폐비닐(75/25)	<b>6,706</b>
4	축산분뇨(건조후 고체)	4,324

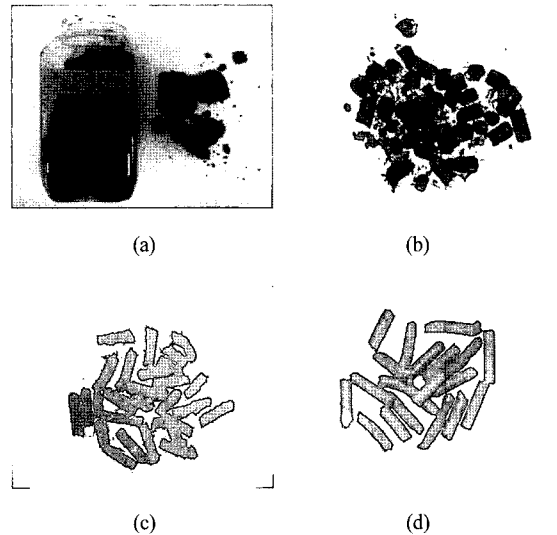


Fig. 11 Respective RDF shapes by waste vinyls mixture ratio ; (a) treated solid content, (b) 5%, (c) 10%, (d) 25%.

반응기 내에서 숙성 상태를 30분 동안 유지시킨 후 회수된 시료는 탈수기를 이용하여 탈수한 후 무게를 측정하였으며, 약 17.5kg의 고형분과 약 135.6kg의 액분이 회수되었다. 따라서 증기압형 전처리공정에 의해 건조 처리된 축산분뇨 고형분의 경우 147kg의 무게가 처리 직후 약 17.5kg으로 약 88%의 무게 감량이 이루어졌으며, 자연건조 상태에서 24시간이 경과한 후에는 약 8.8kg로 약 94%의 무게 감량이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 위와 같은 방법으로 하수슬러지를 처리하였으며 처리 직후에는 80%, 24시간 자연건조 후에는 87%의 무게 감량이 이루어졌다. 건조처리 후 고형분 회수율은 축분이 6%, 하수슬러지가 13%를 나타내었으며, 같은 조건에서는 축분이 하수슬러지보다 무게감량이 큰 것으로 나타났다. 이 결과는 하수슬러지의 함수율이 축분의 함수율보다 큰 반면 휘발분은 적기 때문이라고 사료된다.

본 공정을 거쳐 회수된 액비의 활용여부 평가하기

위하여 축분 액비의 성분분석을 실시하였고 그 결과표를 Table 2에 제시하였다. 분석결과 모든항목에서 가축분뇨발효비료액의 공정규격을 만족하였다.

축분의 건조처리 후 회수된 고형물(연료화 전)은 Fig. 11의 (a)에 나타내었으며, 이를 원료로 하여 제조된 고형 연료의 형태를 살펴보면 25%의 폐비닐을 혼합하였을 때(d) 연료의 부스러짐이 가장 적어 우드 펠렛과 같이 연료의 생산, 운반 및 보관에 용이함을 확인하였다. 발열량에 있어서도 6,706kcal/kg으로서 축분 단독 고위발열량 4,324kcal/kg 보다 약 55% 가량 이상 높은 발열량을 나타내었으며, 다른 비율로 혼합 가공한 경우와 비교하여 가장 양호한 결과를 보여주었다(Table 3).

## 6. 결 론

반응기 내부에 증압수증기를 공급하는 증기가압 건조 및 고형 연료화 장치를 이용한 고함수 유기성 폐기물 처리와 폐비닐 혼합 고형연료 제조실험을 진행하여 다음과 같은 결론 및 향후 연구방향 등을 도출할 수 있었다.

- 1) 유기성 폐기물의 열중량분석을 실시한 결과 열분해 반응 이후 8% 정도의 회분으로 인한 잔류물이 남았음을 확인하였다.
- 2) 증기가압형 처리공정에 의해 처리된 축분 및 하수 슬러지는 24시간 자연건조 후 각각 94%, 87%의 무게 감량을 보였으며, 고형연료화를 위한 고형분 회수율은 각각 약 6%, 13% 수준으로 평가된다.
- 3) 본 공정에 의해 회수된 축분액비의 성분분석 결과 모든 항목에서 가축분뇨발효비료액의 공정규격을 만족하여 비료로서의 활용이 가능하다.
- 4) 개발된 건조 및 고형연료화 공정은 폐비닐과 혼합하여 6,000kcal/kg 이상의 발열량을 갖는 고형 연료 생산이 가능하므로 환경오염 부하의 저감과 폐기물의 에너지자원화를 동시에 충족시킬 수 있는 친환경 에너지기술로 평가된다. 고형 연료는 대단위 화력발전이나 분산형 열병합발전의 연료, 비닐 하우스나 대단위 가축 사육시설 등의 기름보일러 대체에너지원으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

본 처리공정의 향후 연구는 최소의 비용으로 유기성 폐기물의 가용에너지를 극대화시키기 위함이다. 이를 위하여 다양한 유기성 폐기물을 재료로 하여 반응기의 처리 온도 및 압력에 따른 폐기물 유형별 최적 건조 조건 탐색과 처리 후 함수율 특성을 분석하는 연구가 수행될 필요가 있다.

## 후 기

본 논문은 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행된 연구결과임.

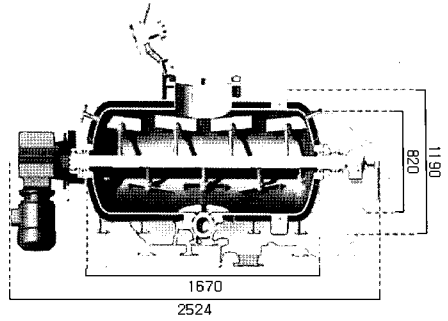
## 참 고 문 헌

- 1) N. Katsiris et al., "Bound water content of biological sludges in relation to filtration and

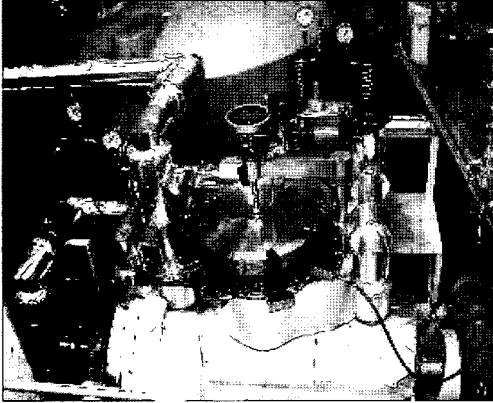
- dewatering", *Water Res.* 21(11), 1987, pp. 1319-1327.
- 2) K.R. Tsang et al., P. A., "Moisture Distribution in Sludge", *Water Sci. Tech.*, Vol. 22, No. 12, 1990, pp. 135-142.
- 3) P.A. Vesilind, "The role of water in sludge dewatering", *Water Environ. Res.* 66(1), 1994, pp. 4-11.
- 4) Neyens, E. et al. J., "A Review of Thermal Sludge Pre-treatment Process to Improve Dewaterability", *Journal of Hazardous Materials*, No. B98, 2003, pp. 51-67.
- 5) J.A. Muller, "Prospects and problems of sludge pre-treatment processes", *Water Sci. Tech.* 44(10), 2001, pp. 121-128.
- 6) Moller, U. K., *Water Binding in Sludge Characteristics and Behaviour*, NATO ASI Series E, Appl. Sci., No. 66, 1967, pp.182-194.
- 7) Lowe, P., "Development in the Thermal Drying of Sewage", *Sludge, J. CIWEM*, 1995, pp. 306-316.
- 8) 전원표, "회전건조기에서 고함수율 유기성 슬러지 입자의 건조특성 연구", 호서대 박사학위 논문, 2001.
- 9) Van Deventer, H. C. et al., "Industrial Superheated Steam Drying", TNO-report, R2004/239, 2004.
- 10) 김옥신 외, "과열 증기 이용 친환경 건조기술", *한국화학공학회논문지*, Vol. 46, No. 2, 2008, pp. 258-273.
- 11) Mujumdar, A. S., in A. S. Mujumdar (Ed.), "Handbook of Industrial Drying", Ch. 35, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY (1995).
- 12) J.P. Schwartze et al., "The evaporation of water into air of different humidities and the inversion temperature phenomenon", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 2000, pp. 1791-1800.
- 13) E.P. Volchkov et al., "Finding the inversion temperature for water evaporation into an air-steam mixture", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 2007, pp. 2101-2106.
- 14) K. Yoshikawa, "폐기물 처리기술 개발 및 정책동향", 한·일 국제세미나 발표자료, 2007.

- 15) Marisamy Muthuraman et al., "Characteristics of co-combustion and kinetic study on hydrothermally treated municipal solid waste with different rank coals: A thermogravimetric analysis", Applied Energy, 2009.

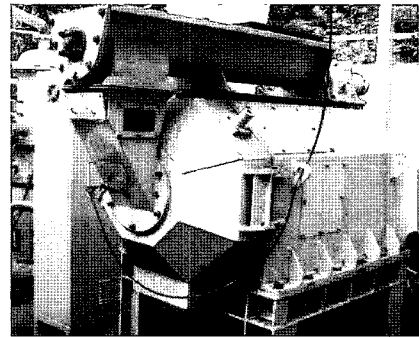
부 록



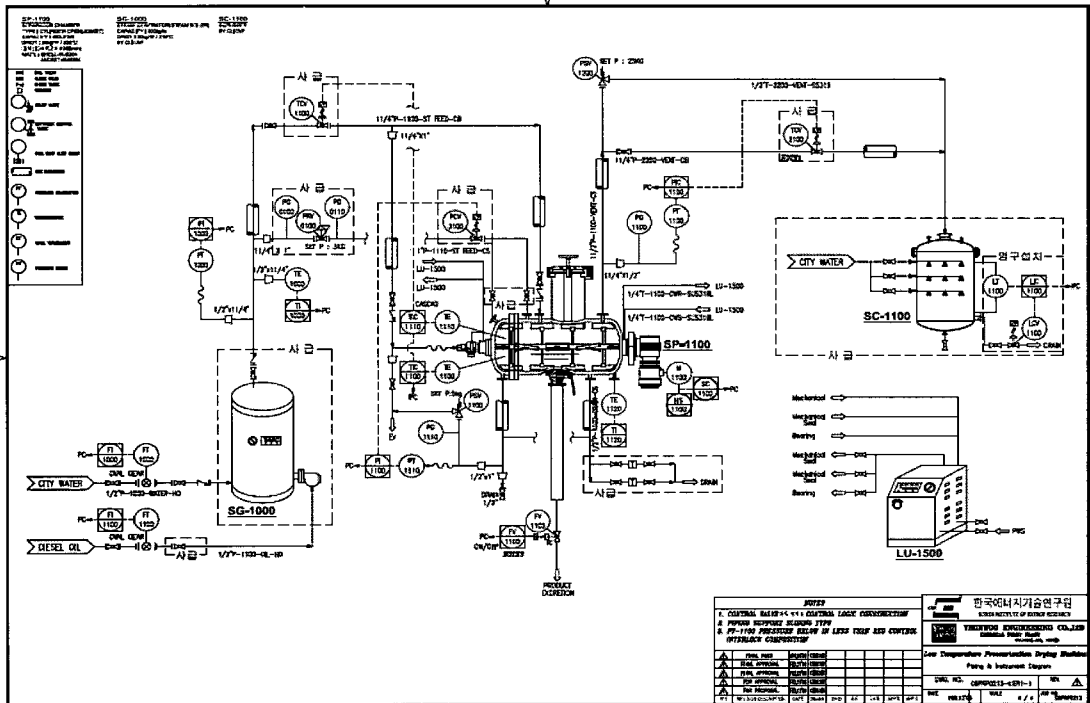
반응기 내부 투시도 및 치수



2m³/D급 증기가압형 반응기



고형연료(RDF) 제조 장치



증기가압형 건조처리시스템 P&ID