

# 마이크로웨이브 가열 하수 슬러지 고온 열분해에 의한 바이오 연료 에너지 생산 Production of Biofuel Energy by High Temperature Pyrolysis of Sewage Sludge Using Microwave Heating

정벼리 · 전영남<sup>†</sup>

Byeo Ri Jeong · Young Nam Chun<sup>†</sup>

조선대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chosun University

(Received August 18, 2016; Revised January 16, 2017; Accepted January 23, 2017)

**Abstract** : The recent gradual increase in the energy demand is mostly met by fossil fuel, but the research on and development of new alternative energy sources is drawing much attention due to the limited fossil fuel supply and the greenhouse gas problem. This paper assesses the feasibility of producing fuel energy from a dewatered sewage sludge by microwave-induced pyrolysis with sludge char and graphite receptor. Both receptors produced gas, char, and tar in order from product amount. The gas produced for the sludge char receptor contained mainly hydrogen and methane with a small amount of light hydrocarbons. The graphite receptor generated higher gravimetric tar and generated higher light tar. Through the results, the product gas from the microwave processes of wet sewage sludge might be possible as a fuel energy. But the product gas has to be removed the condensable PAH tars.

**Key Words** : Wet Sludge, Energy Conversion, Product Gas, Sludge Char, Heat Receptor

**요약** : 현재까지 에너지의 지속적인 요구는 대부분 화석연료에 의해 충족되고 있다. 하지만 화석연료의 한계성과 온실가스 발생 등의 환경문제로 인해 새로운 대체에너지 연구 개발에 대한 관심이 크다. 탈수 하수 슬러지를 연료 에너지로 전환하기 위해 슬러지 촉와 흑연의 두 가지 열수용체를 적용한 경우 마이크로웨이브 열분해 특성을 파악하였다. 두 수용체 모두 열분해 생성물 발생량은 가스, 슬러지 촉 그리고 타르 순으로 생성되었다. 열분해의 경우 생성가스의 조성분은 수소와 메탄이고 일부 경질 탄화수소 등이 포함되었다. 흑연 수용체의 경우 중질타르가 다량 발생되었고, 많은 양의 경질탄화수소가 발생되었다. 이 상의 실험결과로 볼 때 탈수 하수 슬러지의 마이크로웨이브 열분해에 의해 생성된 가스를 연료로 이용이 가능하지만, 가스 중에 함유된 응축성 PAH 타르를 처리해야 한다.

**주제어** : 탈수 슬러지, 에너지 전환, 생성가스, 슬러지 촉, 열 수용체

## 1. 서론

산업의 규모와 인구 증가로 인해 폐수처리시설에서 발생되는 하수슬러지는 꾸준히 증가되고 있지만, 주된 처리방법이었던 해양투기가 2012년부터 금지되어 매립과 소각처리 그리고 건조 후 석탄 화력발전소, 시멘트 공장 등에 사용되고 있는 실정이다. 그러나 매립처리는 중금속 등 오염물질에 의한 토양오염문제, 소각처리는 연소과정에서 발생되는 다이옥신 등 유해물질의 배출, 건조처리 후 연료화는 건조과정 중 발생하는 악취 등의 오염물 발생과 열풍건조 비용이 많이 소요된다.

하수 슬러지는 대부분의 유기폐기물과 같이 많은 양의 휘발성물질을 포함하고 있어 높은 잠재력을 가진 새로운 에너지원으로 인식되고 있다.<sup>1)</sup> 그러므로 하수처리과정에서 생성되는 슬러지를 적절하게 처리를 한다면 유용한 자원이 될 수 있으며, 이를 위해서는 새로운 형태의 에너지 및 자원화 처리기술의 개발이 필요하다.

이러한 기술 중의 하나가 유기성 슬러지 폐기물의 에너지 자원화를 위한 열 · 화학적 처리(thermo-chemical treatment)

인 열분해 방법이다. 열분해는 공기나 산화제가 없는 상태에서 슬러지에 열을 가하여 처리하는 방식으로 가스와 오일, 그리고 탄소 고형물인 촉(char)를 만들어낸다. 열분해기술은 에너지회수과정에서 기존의 방법보다 낮은 농도의 NOx 과 SOx를 배출하고 소각처럼 산화성 분위기에서 발생하는 독성 유기성물질이 거의 발생되지 않는다는 점에서 관심을 끌고 있다. 또한, 열분해 시 유기성 에너지를 80%를 회수하는 동안 슬러지 폐기물 부피와 질량을 각각 80% 이상 감소시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다.<sup>2,3)</sup>

열분해가 상기에 언급된 바와 같이 많은 장점을 갖고 있지만, 하수 슬러지의 낮은 열 전도성(heat conductivity)은 많은 가열시간을 필요로 하며 이로 인해 에너지 사용량이 많이 발생된다. 또한, 슬러지 가열 시 전기로, 가스 열풍 히터 등과 같은 외부 열원에 의해 가열될 경우 열전도나 대류과정에서 많은 손실을 가져올 수 있는 문제가 있다.

이러한 문제를 보완하기 위해 최근 슬러지 내부 물질분자를 진동시켜 가열하는 마이크로웨이브 열분해 방식이 새로운 기술로 인식되고 있다. 마이크로웨이브는 장점은 몇 시간이 걸리는 다른 가열방법과 달리 원하는 높은 온도까지 오

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: yuchun@chosun.ac.kr Tel: 062-230-7156 Fax: 062-232-2474

르는데 짧은 소요시간과 높은 에너지 효율에 있다. 경제적인 관점에서 마이크로웨이브(200°C/min)와 기존의 가열방법(50°C/min)을 비교해 볼 때 마이크로웨이브 열분해가 훨씬 경제적인임을 알 수 있다.<sup>3,4)</sup>

하지만 마이크로웨이브 유전체 가열(dielectric heating) 열분해의 경우 하수 슬러지는 낮은 유전체 특성 때문에 충분한 마이크로파 흡수가 어려워 열분해에 필요한 온도를 달성하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 슬러지에 열수용체(heat receptor)를 혼합하여 마이크로웨이브에 의한 고온 열분해가 가능하게 하며 어떠한 수용체를 선택하느냐에 따라 마이크로웨이브 열분해 특성과 생성물 등에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 탈수 하수 슬러지를 고온 마이크로웨이브 열분해하여 바이오가스연료 에너지 전환을 위한 가능성에 대해 연구하였다. 이를 위해 두 종류의 수용체에 대해 마이크로웨이브 열분해 시 가스, 타르, 슬러지 찌꺼기(char) 생성에 대한 특성을 규명하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험장치

마이크로웨이브 열분해 실험을 위한 장치는 Fig. 1과 같이 마이크로웨이브 반응기(Microwave Reactor, MWR), 가스 공급라인, 가스/타르 샘플링 및 분석라인으로 구성되었다.

MWR은 마이크로웨이브 유전체 가열 열분해 실험을 위해 자체 설계·제작하였다. MWR은 상업용 전자오븐과 같이 직사각형 형태로 벽면에 2,450 MHz의 1 kW 마그네트론(LG magnetron, 2M246)이 탑재되어 있는 다중모드 캐비티(multiple mode cavity) 방식이다. 그 중심부위에 수직으로

석영관(직경 40 mm, 길이 320 mm)이 설치되었다. 석영관 내부에 슬러지 시료 바스켓(sample basket)이 별도로 상하가 변 되도록 하여 시료의 반응기 내로 유입과 배출이 가능하도록 하였다. 열분해 시 특정온도로 설정할 수 있으며 반응기 내 열전대(thermocouple: k-type, 직경 2 mm)와 연결된 컨트롤러에 의해 미세 제어된다. 또한, 데이터로거(data logger: Model Hydra data logger 2625A, Fluke, USA)에 의해 시료 내부의 온도변화를 연속적으로 모니터링 하였다.

가스공급라인은 운반가스(carrier gas)인 아르곤(Ar)의 공급장치는 유량계인 MFC (M3030V, Linetech, Korea)와 그 컨트롤러(FM-30VE, Korea)로 구성되었다.

가스/타르 샘플링 및 분석라인은 열분해시 생성되는 가스와 타르를 포집하는 라인과 분석할 수 있는 장치들로 구성되었다. 포집라인은 타르 포집용 임핀저(impinger)가 들어있는 항온조와 칠러(ECS-30SS, Eyla Co., Japan)에 의해 냉각되는 냉각조(cooling bath), 습식 가스미터(W-NK-1A, Shinagawa, Japan), GC (gas chromatography) 보호를 위한 활성탄필터와 목화필터로 구성되었다. 타르 흡수액으로 사용된 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, 99.9%) 100 mL씩 채운 4개의 임핀저는 첫 번째 항온조에 담겨 20°C 이하를 유지하였다. 남은 2개의 임핀저 중 1개는 이소프로필 알코올 100 mL를 채우고 1개는 공병으로 설치하여 두 번째 냉각조에 담겨 20°C 이하를 유지하였다. 타르 분석을 위한 GC-FID (GC-14B, Shimadzu, Japan), 증발기(Model N-1000-SW, Eyla, Japan)와 가스 분석을 위한 GC-TCD (CP-4900, Varian, Netherlands)로 구성되었다.

### 2.2. 실험 및 분석방법

마이크로웨이브 열분해 실험은 수분함량이 82%인 탈수 슬러지(dewatered sludge) 시료 10 g과 마이크로웨이브를 잘

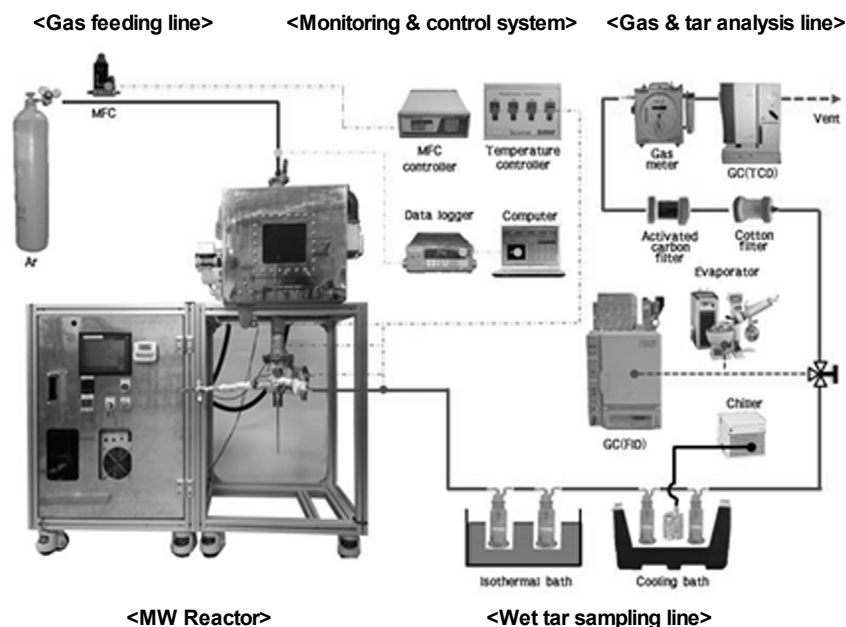


Fig. 1. Schematics of the microwave pyrolysis test rig.

흡수하는 열 수용체(heat receptor) 5 g을 혼합해서 사용하였다. 열 수용체 탄화물은 MWR에서 열분해과정 중 생성된 슬러지 찌꺼기(char)와 이에 대한 비교를 위해 상용 흑연(graphite)이 사용되었다. 생성된 가스를 운반하기 위해 아르곤 1 L/min의 유량을 지속적으로 MWR로 공급하였다.

열분해 실험은 1 kW의 전력으로 초기시동 후 온도가 상온에서 선형적으로 증가하여 최종온도에서 일정시간 유지하도록 하였다. 생성가스 샘플링은 실험의 시작과 동시에 타르 분석용 흡수병과 가스 포집용 테트라 백에 각각 50분간 포집을 진행하여 타르와 각각의 가스성분을 분석하였다. 슬러지 찌꺼기 타르와 가스의 포집 후에도 운반가스를 지속적으로 흘려보내며 노내 온도가 20°C가 될 때까지 반응기 내에 유지시켰다.

반응기로부터 발생된 생성가스 중 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, 탄화수소 등은 GC-TCD에 의해 분석되었다. H<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 가스는 molecular sieve 5A (80/100 mesh)에 의해 분석되었고 CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>는 PoraPlot-Q 컬럼에 의해 해석되었다.

생성된 타르를 측정하기 위한 습식 샘플링 방법 및 타르 분석법은 Biomass Technology Groups (BTGs)에서 제시한 방법을 이용하였다.<sup>5)</sup> 습식 샘플링은 실험 시 발생된 타르를 포집하여 GC-FID를 이용한 경질타르 분석과 중량 측정을 통한 중량타르(gravimetric tar)를 측정하였다. 경질타르는 벤젠고리가 1부터 4링으로 구성된 대표 물질로서 치환기를 가지지 않는 방향족 화합물인 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 피렌을 분석하였다.<sup>6)</sup>

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 하수 슬러지 특성

본 연구에서는 하수처리장의 탈수 슬러지를 열풍건조 없이 직접 마이크로웨이브 가열 건조-열분해 특성을 파악하고자 하였다. 실험에 사용된 탈수 슬러지 시료의 특성을 파악하기 위해 개략분석(Thermolyne Co., Type48000 Furnace/Hansung Co., HS2140 Electronic Balance)과 원소분석(ThermoFinnigan Co., EA2000/EA1112)을 수행하였다. Table 1은 슬러지 시료의 4가지 성분, 원소분석 성분의 특성을 나타내었다.

개략분석에서 볼 수 있듯이 원심분리기에 의해 탈수된 슬러지는 수분함량이 약 82%로 많은 부분을 차지하고 있으며, 수분을 제외한 상태에서 휘발분이 약 62%로 가스화시

Table 1. Selected chemical characteristics of the sewage sludge

Proximate analysis (wt%)				Ultimate analysis <sup>a,b</sup> (wt%)					HHV <sup>a</sup> (MJ/kg)	
M	A <sup>a</sup>	VM <sup>a</sup>	FC <sup>a</sup>	C	H	N	S	O		
Sludge	82.0	31.9	62.1	6.0	30.2	5.6	4.4	1.2	26.4	13.6

M: moisture; A: ash; VM: volatile matter; FC: fixed carbon

<sup>a</sup>Dry basis; <sup>b</sup>Ashfreebasis; <sup>c</sup>calculatedbydifference

Table 2. Trace element composition and main inorganic element composition of the sewage sludge

Inductively coupled plasma spectrometer (ppm)											
Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Cd	Co	Hg		
55.0	440	10450	220	55	55	770	-	-	-		
Energy dispersive X-Ray fluorescence spectrometer analysis (wt, %)											
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	BaO	CuO	MnO
30.7	20.8	20.7	8.4	8.3	7.2	2.1	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1

생성가스의 주된 성분이다. 그리고 원소분석에서 보면 탄소가 약 30%로 다량 있으며, 수소가 일부 가연성분으로 존재한다. 원소분석 결과를 바탕으로 듀롱식(Dulong equation)을 이용하여 발열량을 계산하였으며 13.6 MJ/kg이었다.

탈수 슬러지의 무기원소 분석을 위해 ICP spectrometer (Agilent Technologies Co., 720 I CP-OES)를 통해 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn 성분들을 측정하였으며, 무기산화물 분석을 위해 X-ray fluorescence (XRF) Spectrometer (Shimadzu Co., ED-720)를 통해 Al, Si, Fe, Mn 등을 측정하였다(Table 2).

#### 3.2. 탈수 슬러지의 열적 특성

열중량분석기(NETZSCH, STA 409PC)를 이용한 비등온 열중량 분석(Thermo-gravimetric Analysis)은 특정한 반응조건하에 일정 승온 속도로 열을 가하여 비교적 넓은 온도범위에서 시료의 분해거동을 파악할 수 있는 분석방법이다. 시료를 105°C에서 6시간 동안 건조하여 전처리한 후 분석기기를 이용하여 10°C/min의 승온 속도로 상온에서 1,000°C까지 온도를 상승시켜 분석을 실시하였다. 열중량 분석을 실시한 결과를 TGA (Thermo-Gravimetric Analysis)곡선과 DTA (Derived Thermogravimetric Analysis) 곡선으로 Fig. 2에 나타내었다. TGA와 DTA곡선에 나타난 탈수 하수 슬러지는 100°C 이상이 되면서 다량의 부착수분들이 증발한 후

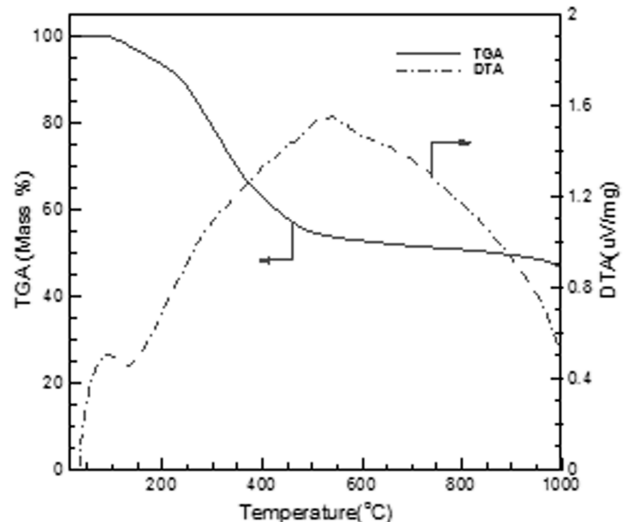


Fig. 2. TGA and DTA curves for the sewage sludge during MW pyrolysis.

250°C 전후에서 슬러지 내의 수분과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 열적 분해(thermal decomposition)되면서 중량감소가 급격히 일어났으며, 이 구간에서 황 성분이 처음으로 분리되기 시작한다. 1차 중량감소후 약 250°C부터 약 550°C까지 2차 감소가 일어났는데 이 과정에서 지방족 탄화수소 및 방향족 탄화수소, 가스상 물질의 탈착, 유기산이나 질소와 같은 물질들이 열분해가 이루어지는 구간이다. 550°C 이후로는 온도가 증가하여도 중량변화는 크지 않다는 것을 알 수 있는데, 이 구간에서는 오일 내의 가스 탄화수소 체인이 끊기는 반면에 방향족화합물이 형성되었다. 그리고 600°C 이상에서는 올레핀(olefin) 이성질체와 고 비등점 방향족화합물이 형성되는 것으로 보고 있다.<sup>7,8)</sup>

### 3.3. 마이크로웨이브 열분해 생성물 특성

#### 3.3.1. 열분해 온도 변화특성

탈수 슬러지에 슬러지 칩 또는 흑연을 열 수용체로 하여 마이크로웨이브 열분해를 진행하는 동안 시간 경과에 대한 슬러지 시료 내부 온도변화를 측정하여 Fig. 3에 나타내었다.

슬러지 시료가 단위시간 당 가열되는 정도를 나타내는 가열율(heating rate)과 시료가 가열됨에 따라 온도가 증가 후, 최종적으로 유지되는 열분해 온도인 최종 열분해 온도를 파악할 수 있다. 최종 열분해 온도는 마이크로웨이브 수용체의 유전성질(dielectric property)에 따라 달라지며, 가열율은 수용체의 화학성분과 물리적 구조(physical structure)에 따라 달라진다.<sup>9)</sup>

슬러지 칩 수용체의 경우는 가열율이 80°C/min이고 최종 열분해 온도는 1,000°C이다. 수용체 흑연은 슬러지 칩에 비해 상대적으로 온도증가율이 160°C/min로 큰 편이나 최종 열분해 온도는 800°C로 작은 값을 보였다.

#### 3.3.2. 열분해 생성물과 발열량

탈수 슬러지가 열분해되면 열분해 생성가스(product gas), 칩(char), 타르(tar)가 생성이 된다. Fig. 4는 수용체 종류에

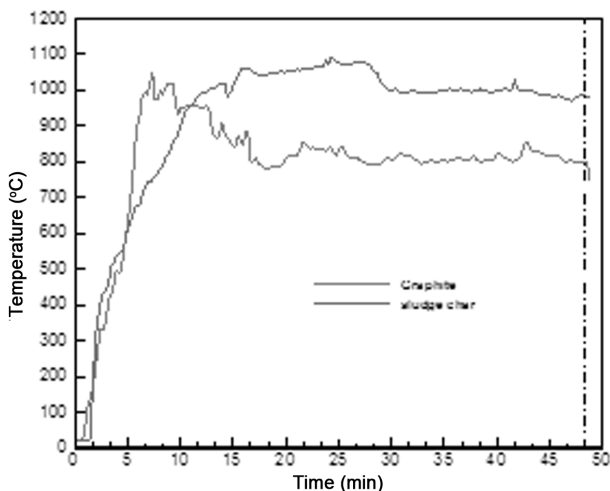


Fig. 3. Temperature evolution during microwave pyrolysis of sludge.

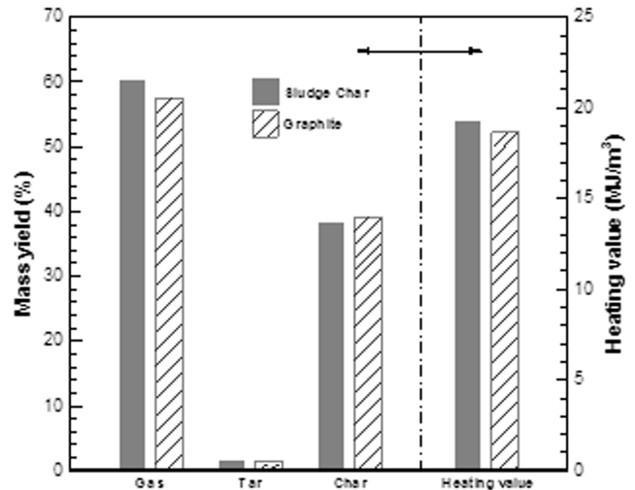


Fig. 4. Yields of the pyrolysis products and heating value.

따른 열분해 생성물의 수율(yield)과 생성가스의 고위발열량을 나타내었다.

수용체의 종류에 따라 차이를 보이나 두 경우 모두 생성 가스량이 제일 크고 탄소잔류물인 칩 그리고 중질탄화수소인 타르 순이다. 슬러지 칩 수용체의 경우는 흑연의 경우와 비교할 때 상대적으로 가스 생성량이 많고 칩와 타르의 발생량은 작다.

슬러지 열분해에서 가열율은 슬러지 내 유기물 등의 분해 1차 반응(primary reaction)에 영향을 미치며, 반응기 열분해 온도는 타르 중 중질 탄화수소계 생성물의 분해에 의한 가스 생성 2차 반응(secondary reaction)에 영향을 미친다.<sup>10)</sup>

1차 반응에 영향을 미치는 가열율은 수용체 슬러지 칩의 경우가 흑연에 비해 작으나 Fig. 2의 TGA곡선 설명에서 알 수 있듯이 대부분의 지방족 탄화수소, 방향족 탄화수소, 가스상물질의 탈착 등에 의한 생성물이 600°C 이하에서 이루어지는데 이 온도 구간의 경우 거의 두 수용체의 가열율이 거의 일정하여 큰 차이를 보이지 않았다.

그러나 2차 반응에 크게 영향을 미치는 반응기내의 열분해온도는 슬러지 칩 수용체가 높아 타르의 크래킹반응이 우선하여 생성물이 경질가스로의 전환이 잘 이루어지므로 가스 발생량이 많다. 하지만 상대적으로 열분해 온도가 낮은 흑연의 경우는 교차결합(cross-link) 응축반응에 의해 고체생성이 증대되어 칩의 양이 크다.<sup>3)</sup>

가스의 발열량은 열분해 시 생성된 경질가스의 농도와 고위발열량으로 계산한 값이다. 슬러지 칩 수용체의 경우 19.31 MJ/m<sup>3</sup>으로 흑연은 18.67 MJ/m<sup>3</sup>보다 높게 나타났다.

#### 3.3.3. 열분해 생성가스 특성

마이크로웨이브 가열 열분해 시 생성된 주요 가스의 농도를 Fig. 5에 나타내었다.

두 수용체 모두 가연성 가스는 수소(H<sub>2</sub>)농도가 가장 높고 메탄(CH<sub>4</sub>)과 경질 탄화수소(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)가 생성되었다. 그 외에 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 일산화탄소(CO) 일부가

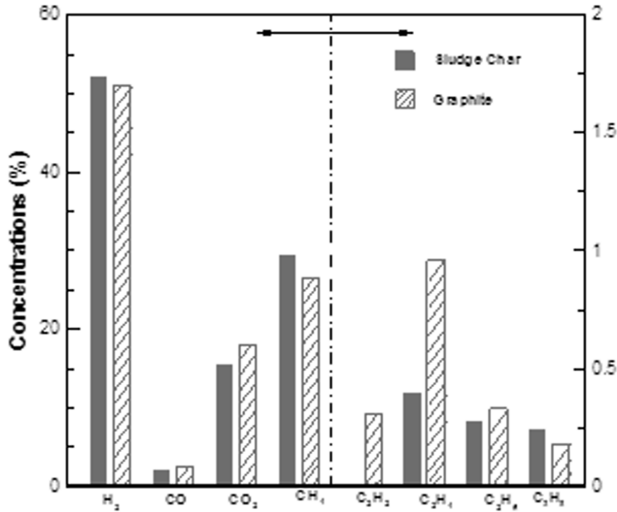
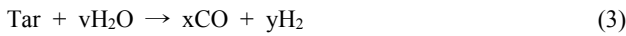


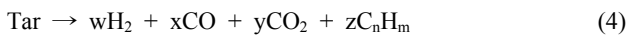
Fig. 5. Composition of the product gases.

발생되었다.

탈수 슬러지 수분은 대부분 낮은 온도에서 증발되지만 샘플 내부에 존재하는 일부 수분은 높은 온도까지 그대로 존재하며 이를 제거하기 위해서는 더 높은 에너지를 필요로 한다. 따라서 이들의 일부는 슬러지 샘플 내에서 고온까지 존재하며 다음과 같은 흡열 가스화 반응(식 (1)), 물-가스전이반응(식 (2)), 타르 가스화 반응(식 (3))이 진행되게 된다. 이로 인해 다량의 H<sub>2</sub>가 생성되었고 CO와 CO<sub>2</sub>도 증가하게 되었다.



그리고 슬러지 열분해과정 중에 생성된 휘발분 중 중질 탄화수소는 타르 크래킹 반응(식 (4))에 의해 비응축성 경질가스로 전환되어 경질가스와 탄화수소로 전환된다.



가스의 생성은 마이크로웨이브 열분해 조건, 슬러지 성상, 수용체 종류 등에 따라 상기에 언급된 주요 반응에 의해 경쟁적으로 반응하여 그 생성량이 결정된다. 특히, Fig. 5에서 높은 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>의 농도와 낮은 CO를 보이는 것은 다음 메탄화반응(식 (5))과 물-가스 전이반응(식 (2))이 우선하는 조건이기 때문이다.



슬러지 촉 수용체의 경우 최대 열분해 온도가 흑연에 비해 높아 고온에서 일부 잔류수분에 의한 가스화반응(식 (1),

(3))과 물전이반응(식 (2))이 우선하여 수소의 양이 상대적으로 크다. 그러나 흑연 수용체의 경우 탄소함량이 많아 탄소를 주체로 하여 생성되는 경질탄화수소가 많이 생성되었다. 그러나 두 수용체에 대한 생성가스 농도의 차이는 크지 않고 개연성도 확연히 보이지 않았으며 표기된 데이터는 3~5번 동일 실험을 수행하여 평균값을 취한 것이다.

### 3.3.4. 열분해 타르 생성물 특성

Fig. 6은 중량타르(gravimetric tar)와 대표 경질타르(light tar)인 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 피렌의 농도를 나타낸 것이다.

중량타르는 슬러지 중에 함유된 유기성분이 휘발한 중질 탄화수소의 집합체인 총 타르(total tar)로 흑연 수용체 경우가 슬러지 촉 수용체에 비해 큰 값을 보였다. 이는 Fig. 3의 설명에서 언급되었듯이 가열율이 높아 중질 유기성 휘발분이 많이 발생되기 때문이다.

그러나 경질타르의 경우는 중량타르와 상반되게 슬러지 촉 수용체가 큰 값을 보이는데, 이는 흑연보다 열분해 온도가 상대적으로 높아 타르 크래킹 반응(식 (4)) 등에 의해 중질타르가 경질타르로 많이 전환되기 때문이다. 슬러지 내 금속성분(칼슘, 나트륨, 칼륨, 철)은 수증기와 CO<sub>2</sub>가스화 반응 그리고 타르 크래킹 등의 반응을 촉진시키는 물질이다.<sup>11)</sup>

Light PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)는 tar 벤젠 고리가 2개 이상의 타르(대표 타르: 나프탈렌)이며, heavy PAH는 벤젠고리가 4 이상의 aromatic hydrocarbon이다. 이들은 모두 condensable tar (light PAH tar)가 다량 포함된 가스를 연료 등으로 사용할 경우 가스이송, 장치손상 등의 문제가 발생되며, 특히 엔진연료로 사용될 경우 응축성 타르가 1,027 mg/m<sup>3</sup> 이내이어야 한다.<sup>6)</sup> 그러나 light aromatic tar인 벤젠은 비응축성으로 타르이긴 하지만 상기에 언급된 응축성 타르와 달리 에너지원으로 활용될 수 있고 이로 인해 가스의 발열량이 높아진다.

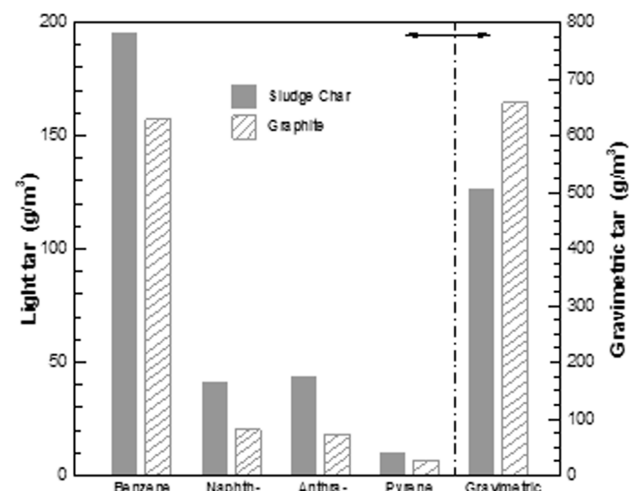


Fig. 6. Selected light tars and gravimetric tar.

## 4. 결론

탈수 하수 슬러지를 마이크로웨이브 건조-열분해 특성을 파악하기 위해 실험실 규모의 실험을 수행하였다.

탈수 슬러지를 고온 마이크로웨이브 열분해하여 바이오 가스연료 에너지 전환을 위한 가능성에 대해 연구하였다. 이를 위해 슬러지 촉와 흑연 수용체에 대해 마이크로웨이브 열분해 시 가스, 타르, 슬러지 촉 생성에 대한 특성을 규명하였다.

마이크로웨이브 열분해 시 두 가지 수용체 모두 가스 발생량이 제일 많고 그 다음 잔류물인 슬러지 촉 그리고 일부 타르가 생성되었다. 슬러지 촉 수용체의 경우 가스 생성량이 더 많고 잔류물 촉는 적게 발생되었다.

열분해 시 가연성 생성가스는 주로 수소와 메탄이 생성되었고 일부 경질탄화수소(THC: C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)가 포함되었다. 이 현상은 슬러지 촉 수용체에서 더 두드러졌다.

중량타르는 흑연 수용체의 경우가 슬러지 촉 수용체에 비해 큰 값을 보인 반면, 경질타르의 경우는 슬러지 촉 수용체가 큰 값을 나타내었다.

## Acknowledgement

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A-2A03003044).

**KSEE**

## References

1. Menéndez, J. A., Dominguez, A., Inguanzo, M. and Pis, J. J., "Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **74**(1), 406-412(2005).
2. Gasco, G., Blanco, C. G., Guerrero, F. and Mendez Lazaro, A. M., "The influence of organic matter on sewage sludge pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **74**(1-2), 413-420(2005).
3. Zuo, W., Tian, Y. and Ren, N., "The important role of microwave receptors in bio-fuel production by microwave-induced pyrolysis of sewage sludge," *Waste Manage.*, **31**(6), 1321-1326(2011).
4. Menendez, J. A., Dominguez, A., Inguanzo, M. and Pis, J. J., "Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **71**(2), 657-667(2004).
5. Phuphuakrat, T., Namioka, T., Yoshikawa, K., "Tar removal from biomass pyrolysis gas in two-step function of decomposition and adsorption," *Appl. Energy*, **87**, 2203-2011(2010).
6. Chun, Y. N., "Carbonization-Activation of Sewage Sludge for Producing High Quality Gas and Sludge Char," Doctoral Dissertation, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology(2012).
7. January, B. B., Jurand, D. B. and Beata, M., "Research on Possibilities of Sewage Sludge Utilisation in the Process of Pyrolysis," *Thermal Solid Waste Utilisation in Regular and Ind. Facilities*, **58**, 103-111(2000).
8. Zhao, X., Zhang, J., Song, Z., Liu, H., Li, L. and Ma, C., "Microwave pyrolysis of straw bale and energy balance analysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **92**(1), 43-49(2011).
9. Bilali, L., Benchanaa, M., El harfi, K., Mokhlisse, A. and Ourzourhit, A., "A detailed study of the microwave pyrolysis of the Moroccan (Youssoufia) rock phosphate," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **73**, 1-15(2005).
10. Chun, Y. N., Lim, M. S. and Jo, D. Y., "Study on Characteristics of Produce Gas and Tar by Pyrolysis for RPF," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **32**(3), 269-275(2015).
11. Aznar, M., Anselmo, M. S., Manyà, J. J. and Murillo, M. B., "Experimental Study Examining the Evolution of Nitrogen Compounds during the Gasification of Dried Sewage Sludge," *Energy & Fuels*, **23**, 3236-3245(2009).