

마이크로웨이브에 의한 하수 슬러지 이산화탄소 가스화 특성

정벼리 · 윤수혁 · 전영남[†]
조선대학교 공과대학 환경공학과

Characteristics of Carbon Dioxide Gasification for Sewage Sludge in Microwave

BYEORI JEONG, SOOHYUK YOON, YOUNGNAM CHUN[†]

Department of Environmental Engineering, Chosun University
309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

Abstract >> A characteristics of microwave drying-gasification was analyzed for converting a dewatered sewage sludge generated a wastewater treatment plant. Gas (60%) was the largest component of the product of microwave gasification, followed by sludge char (33%) and tar (2%). The main components of the producer gas were hydrogen (33%) and carbon monoxide (40%), and there was some methane and hydrocarbons (C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈). Larger nitrogen and smaller oxygen amounts were generated. Gravimetric tar generated 414g/m³. This means a total tar which is a heavy hydrocarbons from the volatile organic substance in the sewage sludge. Selected light tars were benzene, anthracene, naphthalene, pyrene, showing lower concentrations as 2.62, 0.37, 0.49, 0.28 g/m³, respectively. Sludge char has larger meso pores which is a mean pore size of 50.85 Å and has high adsorptivity. An amount of adsorption was 228.71 cm³/g, showing higher quantity than acommercial adsorbers. This indicates that the gas obtained from the microwave gasification of wet sewage sludge can be used as fuel, but the heavy tar in the gas must be treated. Sludge char can be used as a tar reduction adsorbent in the process, and then burns as a solid fuel.

Key words : Microwave gasification(마이크로웨이브 가스화), Producer gas (생성가스), Light tar(경질 타르), sludge char(슬러지 찌), dewatered sludge (탈수 슬러지)

1. 서 론

현재 폐수처리시설에서 발생하는 하수 슬러지는 여러 가지 이유로 꾸준히 증가되고 있지만, 주된 처리방법이었던 해양투기가 2012년부터 금지되어 매립과 소각처리 그리고 건조 후 석탄 화력발전소, 시

멘트 공장 등에 사용되고 있는 실정이다. 그러나 매립처리는 중금속 등 오염물질에 의한 토양오염문제, 소각처리는 연소과정에서 발생하는 다이옥신 등 유해물질의 배출, 건조처리 후 연료화는 건조과정 중 발생하는 악취 등의 오염물 발생과 열풍건조 비용이 많이 들어간다.

하수 슬러지는 대부분의 유기폐기물과 같이 많은 양의 휘발성물질을 포함하고 있어 높은 잠재력을 가진 새로운 에너지원으로 인식되고 있다¹⁾. 그러므로

[†]Corresponding author : ynchun@chosun.ac.kr

Received : 2016.4.1 in revised form : 2016.4.18 Accepted : 2016.4.30

Copyright © 2016 KHNES

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 열화학적 처리(Thermo-Chemical Treatment)인 가스화 방법이다. 가스화는 공기가 일부 공급된 상태에서 부분 산화하거나 외부 열원이 공급된 상태에서 수증기, CO₂ 등 가스를 공급하여 가스화를 하게 된다. 이때, 생성된 가스연료 그리고 일부 잔류물을 만들어낸다. 가스화 기술은 기존의 방법보다 낮은 농도의 NO_x와 SO_x를 배출하고 소각처럼 산화성 분위기에서 발생하는 독성 유기성물질이 거의 발생하지 않는다는 점에서 관심을 끌고 있다. 또한, 가스화시 유기성에너지를 회수하는 동안 슬러지 폐기물 부피와 질량을 각각 80% 이상 감소시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다^{2,3)}.

가스화 기술은 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 열 손실을 가져올 수 있는 문제가 있다.

이러한 문제를 보완하기 위해 최근 슬러지 내부 물질분자를 진동시켜 가열하는 마이크로웨이브 열분해 방식이 새로운 기술로 인식되고 있다. 마이크로웨이브의 특징은 몇 시간이 걸리는 다른 가열방법과 달리 높은 설정 온도까지 오르는데 소요시간이 짧으며 에너지 효율이 높은 것이다. 경제적인 관점에서 마이크로웨이브(200℃/min)와 기존의 가열방법(50℃/min)을 비교해 볼 때 마이크로웨이브 열분해가 훨씬 경제적인임을 알 수 있다^{3,4)}.

본 연구에서는 슬러지 폐기물을 바이오매스-CCUS (CO₂ Capture, Utilization and Storage)기술 적용을

위한 새로운 형태의 마이크로웨이브 열적처리 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 마이크로웨이브 유전체가열 특성을 활용하여 탈수 하수 슬러지의 건조-가스화를 일체형으로 진행하는 에너지 전환 특성을 파악하였다. 가스화 실험의 경우는 연소 전 포집 기술로 이산화탄소 분리공정에서 포집된 것을 활용하는 측면에서 이산화탄소 가스화에 대한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

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

MWR은 마이크로웨이브 유전체 가열 가스화 실험을 위해 자체 설계·제작하였다. MWR은 상업용 전자오븐과 같이 직사각형 형태로 양쪽 벽면에 2450 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 내

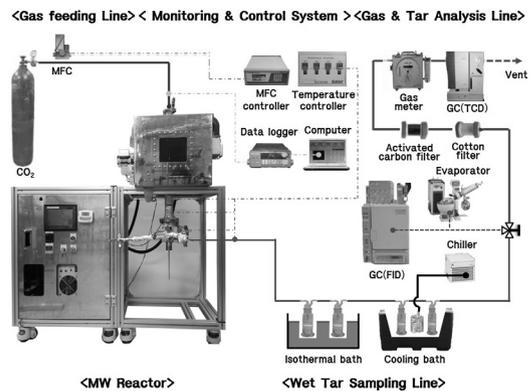


Fig. 1 Schematics of the microwave pyrolysis test rig

부에 슬러지 샘플 바스켓(sample basket)이 별도로 상하 가변 되도록 하여 샘플의 반응기 내로 유입과 배출이 가능 하도록 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 샘플 내부의 온도변화를 연속적으로 모니터링 하였다.

가스공급라인은 열분해 가스인 이산화탄소(CO₂)와 유량계인 MFC(M3030V, Linetech, Korea)와 컨트롤러(FM-30VE, Korea)로 구성되었다.

가스/타르 샘플링 및 분석라인은 열분해 시 생성되는 gas와 타르를 포집하는 라인과 분석할 수 있는 장치들로 구성되어있다. 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%)을 100 mL 씩 채운 2개의 임핀저는 첫 번째 항온조에 담아 20°C 이하를 유지하였다. 남은 2개의 임핀저 중 1개는 이소프로필알코올 100 mL를 채우고 1개는 공병으로 설치하여 두 번째 냉각조에 담아 -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, Netherland)로 구성되었다.

2.2 실험 및 분석방법

가스화 실험을 각각 마이크로웨이브 반응기(MW reactor)에서 수행하였다. 실험은 수분함량이 82%인 탈수슬러지(wet sludge) 샘플 10 g과 탄화물 5 g을 혼합해서 사용하였다. 탄화물로는 가스화 과정 중 생

성된 슬러지 찌꺼기(sludge char)가 사용되었으며, 가스화 가스인 CO₂의 유량을 1 L/min로 하여 지속적으로 공급하였다.

마이크로웨이브 실험은 1 kW의 전력으로 초기시동 후 온도가 상온에서 선형적으로 증가한 후 기준 설정온도 800°C에서 일정하게 유지되게 하였다. 실험 시작과 동시에 타르 분석용 흡수병과 가스 샘플용 포집 백(tedlar bag)에 각각 40분간 포집을 진행하여 타르와 각각의 가스성분을 분석하였다. 슬러지 찌꺼기 타르와 가스의 포집 후에도 운반가스를 지속적으로 흘려보내며 20°C가 될 때까지 반응기내에 유지시켰다.

반응기로부터 발생된 생성가스 중 H₂, CO, CO₂, 탄화수소 등은 GC-TCD에 의해 분석되었다. H₂, CO, O₂, N₂가스는 molecular sieve 5A (80/100 mesh)에 의해 분석되었고 CO₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈은 PoraPlot-Q 컬럼에 의해 해석되었다.

생성된 타르를 측정하기 위한 습식 샘플링 방법 및 타르 분석법은 Biomass Technology Groups (BTGs)에서 제시한 방법을 이용하였다⁵⁾. 습식 샘플링은 실험 시 발생된 타르를 포집하여 GC-FID를 이용한 경질타르 분석과 중량 측정을 통한 중량타르(gravimetric tar)를 측정하였다. 경질타르는 벤젠고리가 1링에서 4링으로 구성된 대표 물질로서 치환기를 가지지 않는 방향족 화합물인 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 피렌을 분석하였다⁶⁾.

탈수 슬러지 특성 파악하기 위하여 개략분석, 원소분석, ICP spectrometer, X-ray fluorescence (XRF) Spectrometer, 열중량분석을 하였다. 개략분석(Thermolyne Co., Type48000 Furnace/ Hansung Co., HS2140 Electronic Balance)과 원소분석(ThermoFinnigan Co., EA2000/EA1112)을 통해 수분, 재, 휘발분, 고정탄소 그리고 슬러지 원소 구성 비율을 파악하였다. ICP spectrometer (Agilent Technologies Co., 720 I CP-OES)를 통해 무기원소인 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn 성분들을 측정하였으며, X-ray fluorescence (XRF) Spectrometer

(Shimadzu Co., ED-720)를 통해 무기산화물을 측정하였다. 열중량분석기를 이용한 비등온 열중량 분석(Thermogravimetric Analysis)은 특정한 반응조건하에 일정 승온 속도로 열을 가하여 비교적 넓은 온도 범위에서 시료가 분해거동을 파악할 수 있는 분석방법이다. 시료를 105°C에서 6시간동안 건조하여 전처리한 후 분석기기(NETZSCH 사, STA 409PC)를 이용하여 Ar을 40mL/min 공급하여 10°C/min의 승온 속도로 상온에서 1,000°C까지 온도를 상승시켜 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 하수 슬러지 특성

본 연구에서는 하수처리장의 탈수슬러지를 열풍 건조 없이 직접 마이크로웨이브 가열 건조-열분해 특성을 파악 하고자 하였다. Table 1은 슬러지 샘플의 개략분석, 원소분석 성분의 특성을 나타내었다.

탈수 슬러지 개략분석(proximate analysis)에서 볼 수 있듯이 원심분리기에 의해 탈수된 슬러지는 수분 함량이 약 82%로 많은 부분을 차지하고 있으며, 수분을 제외한 상태에서 휘발분이 약 62%로 가스화 시 생성가스의 주된 성분이다. 그리고 원소분석에서 보면 탄소가 약 30%로 다량 있고 수소가 일부 가연성

분으로 존재한다. 원소분석 결과를 바탕으로 Dulong 식을 이용하여 발열량을 계산하였으며, 약 3,248 kcal/kg 이었다.

탈수슬러지의 무기원소 분석과 무기 산화물 분석에 대한 결과를 Table 2에 나타내었다.

3.2 탈수 슬러지의 열적 특성

열중량 분석을 실시한 결과를 TG (thermoravimetric) 곡선과 DTG(derived thermogravimetric) 곡선으로 Fig. 2에 나타내었다. TGA는 열중량분석으로 온도변

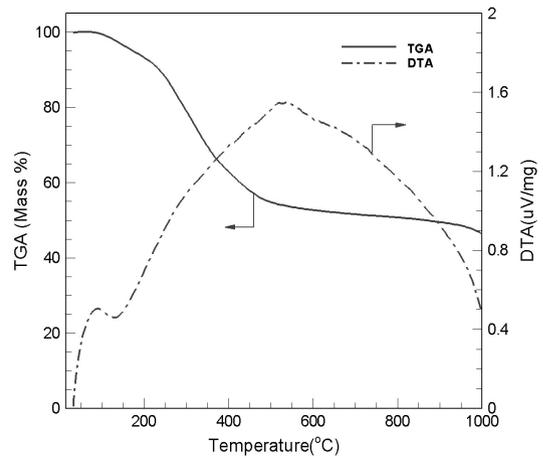


Fig. 2 TGA and DTA curves for the sewage sludge during MW pyrolysis

Table 1 Selected chemical characteristics of the sewage sludge

	Proximate analysis (wt%)				Ultimate analysis ^{a,b} (wt%)					
	M	A ^a	VM ^a	FC ^a	C	H	N	S	O	HHV ^a (kcal/kg)
Sludge	82.0	31.9	62.1	6.0	30.2	5.6	4.4	1.2	26.4	3,248

* ^a : Dry base. ^b : Ash free basis

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	55.0	55.0	770	-	-	-		
Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer Analysis (wt. %)											
Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	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

화에 따른 시료 질량변화를 나타낸다. DTA는 시차 열분석으로 시료와 기준물질을 하나의 가열로 내에서 가열시켜 시료와 불활성 기준물질간의 온도 차이를 열전쌍으로 측정한다.

TG와 DTG곡선에 나타난 하수 슬러지는 100°C 이상이 되면서 다량의 부착수분들이 증발하였고, 250°C 전후에서 슬러지 내의 수분과 CO₂가 분해되면서 중량감소가 급격히 일어났으며, 이 구간에서 황 성분이 처음으로 분리되기 시작한다. 1차 중량감소가 종료되고 약 250°C부터 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 형성된다. 또한 600°C 이상에서는 올레핀(olefin) 이성질체와 고비등점방향족화합물이 형성되는 것으로 보고 있다^{7,8)}.

3.3 탈수 슬러지의 가스화 특성

1) 가스화 생성물

마이크로웨이브 반응기(MWR: Microwave Reactor)에서 탈수 하수 슬러지의 열분해와 이산화탄소 가스화 과정에 대한 생성물 특성에 대한 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

마이크로웨이브 가스화 시 가스 발생량(60%)이 제일 많고 그 다음 잔류물인 슬러지 찌꺼기(38%), 그리고 일부 중질 탄화수소로 이루어진 타르(2%)가 생성되었다. 이러한 결과는 마이크로웨이브 가스화의 가스 발생량이 다소 많기는 하나 기존의 가열방식과 유사한 패턴을 보였다⁶⁾.

다량의 수분이 함유된 탈수 슬러지는 가스화가 진행되는 동안 일부 수분이 휘발성물질(volatile matter)과 아래와 같은 반응이 진행되며 고온일수록 더욱

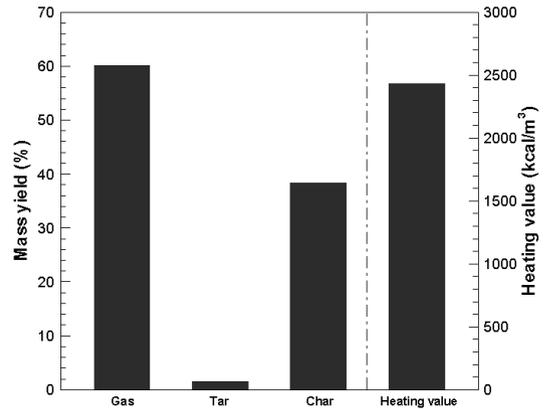
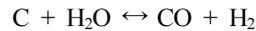


Fig. 3 Mass yield and heating value of sludge

활발히 진행되어 비응축성 경질가스의 발생량이 증가된다.

Steam gasification



$$\Delta H_{298K} = 132 \text{ kJmol}^{-1} \quad (1)$$

Water gas shift reaction



$$\Delta H_{298K} = -41.5 \text{ kJmol}^{-1} \quad (2)$$

Methane reforming



$$\Delta H_{298K} = 206.1 \text{ kJmol}^{-1} \quad (3)$$

Tar steam reforming



$$(4)$$

가스화 시 가스의 생성량을 증가시키려면 휘발성 물질을 다량으로 발생시키기 위해 높은 가열율(heating rate)과 상기 식들(1-4)의 2차 반응을 최대화하기 위한 고온(> 650°C)에서의 체류시간을 길게 유지해야 한다⁹⁾.

가스화 시 생성가스(producer gas)의 총 발열량은 생성가스 중 가스화 가스인 이산화탄소 농도를 제외한 상태에서 가연성가스의 각각에 대한 몰분율(mole

fraction)을 이용하여 Dulong 식에 의해 구했다. 그 계산 값은 2,431 kcal/m³으로 가스연료로서 사용 가능한 열량임을 알 수 있다.

2) 생성가스 특성

탈수 슬러지를 마이크로유전체 가열 고온 가스화 시 주로 발생하는 가연성 생성가스는 Fig. 4에서 보듯이 수소(33%)와 일산화탄소(40%)이고 일부 메탄과 탄화수소(THC: C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈)이다. 그리고 슬러지 내 함유된 질소와 산소(Table 1참조)로부터 발생된 다량의 질소와 약간의 산소가 생성되었다. 가스의 농도는 가스화 가스인 CO₂를 제외한 상태의 농도이다.

H₂와 CO 그리고 CO₂는 상기 식들(1-4)와 같이 탈수 슬러지에서 생성된 수증기에 의한 가스와 타르의 2차 반응에 생성되었다. 그리고 CO₂는 추가적으로 가스화 시 슬러지 촉 표면에서 일어나는 이상반응(heterogeneous reaction)인 식 (5)에 의해 생성되었다.

Boudouard reaction

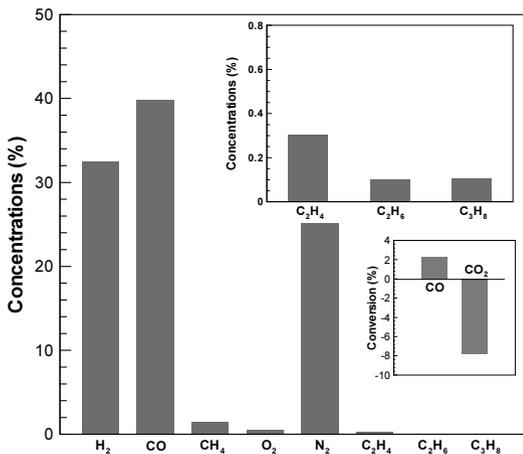
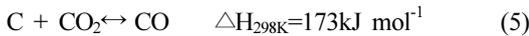
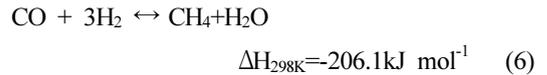


Fig. 4 Selected gas concentrations excluded gasificat ion gas (CO₂)

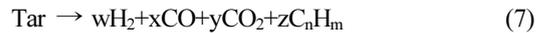
상기 Boudouard 반응의 활성화에너지는 열분해보다 가스화가 작다¹⁰. 즉, 이산화탄소의 낮은 활성화 에너지로 인해 일산화탄소 전환율(conversion rate)이 높아 2차 반응에서 수소생성보다 일산화탄소 발생량이 많은 것을 볼 수 있다. 주입한 이산화탄소에 의한 전환율은 -7.8%를 보이는데, 이는 자체 슬러지에서 발생하는 CO₂를 완전히 소모하고 추가적으로 가스화 가스인 CO₂가 소모되기 때문이다.

CH₄와 THC는 다음 균일반응(homogenous reaction) (식 6)과 타르 크래킹 반응(식 7)⁶에 의해 생성되었다.

Methanation reaction



Tar cracking



3) 슬러지 타르생성 특성

Fig. 5는 중량타르(gravimetric tar)와 대표 경질타르(light tar)의 농도를 나타낸 것이다. 그리고 각 경질타르 범위 내 타르의 합인 그룹 중량타르를 그림

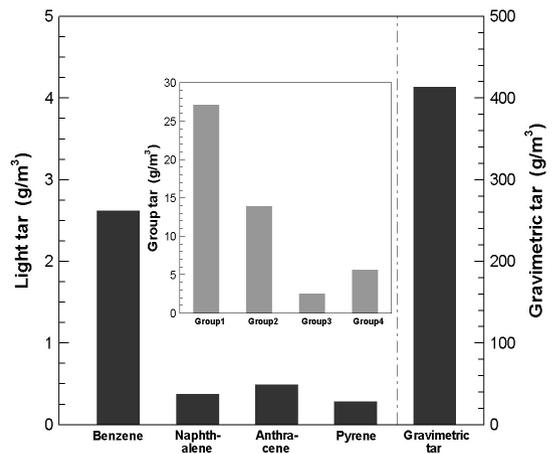


Fig. 5 The selected/group light tars and gravimetric tar

에 나타내었다.

중량타르는 슬러지 중에 함유된 유기성분이 휘발한 중질 탄화수소의 집합체인 총 타르로 414 g/m^3 로 상당한 양이 발생되었다. 이는 마이크로웨이브 에너지의 슬러지 내부 유전체 가열로 인한 급격한 고온이 형성되어 중질 휘발성분이 다량 생성되기 때문이다.

그러나 경질타르의 경우는 중질타르와 상반되게 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 피렌이 각각 2.62, 0.37, 0.49, 0.28 g/m^3 로 낮은 농도를 보이는데, 이는 무기 촉매가 함유된 슬러지에 존재하는 상태에서 타르 크래킹(식 7)과 타르 스팀 개질(식 4)에 의해 가스로 대부분 전환되기 때문이다. 슬러지 내 금속성분(칼슘, 나트륨, 칼륨, 철)은 수증기와 CO_2 가스화 반응 그리고 타르 크래킹 등의 반응을 촉진시키는 물질이다¹¹⁾.

경질 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)타르는 벤젠고리가 2개 이상의 타르(대표 타르 나프탈렌)이며, 중질 PAH는 벤젠고리가 4개 이상의 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon)이다. 이들은 모두 응축성 타르(light PAH tar)를 다량 포함한 가스로 연료 등으로 사용할 경우 가스이송, 장치손상 등의 문제가 발생되며, 특히 엔진연료로 사용될 경우 응축성 타르가 $1,027 \text{ mg/m}^3$ 이내이어야 한다⁶⁾. 그러나 경질타르인 벤젠과 그 그룹 타르는 비응축성으로 타르이긴 하지만 상기에 언급된 응축성 타르와 달리 에너지원으로 활용될 수 있고 이로 인해 가스의 발열량이 높아진다.

4) 슬러지 촉의 특성

일반적으로 가스화는 산화제인 공기, 수증기 등을 이용하여 가스 또는 액체연료를 얻고 탄소잔류물(carbon residue)을 거의 없게 하나 본 연구에서는 이산화탄소에 의한 소극적 가스화를 진행하여 생성가스와 탄소 잔류물을 동시에 생산하여 가스연료와 흡착제 등으로 활용할 수 있다. 열분해 또는 가스화 시 생성가스 중 응축성 PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) 경질타르 등이 발생되는 데, 이 때 슬러지

촉를 활용하여 흡착하여 가스를 정제한 후 고체연료로 사용하면 효과적이다⁶⁾.

흡착 시 중요한 요소는 기공이 어떻게 형성 되는가인데, 이는 슬러지나 수용체 성상과 가스화 조건에 따라 많은 영향을 미친다. 흡착제의 기공의 분류는 일반적으로 IUPAC 기준을 따르는데 미세직경(micropores; $< 20 \text{ \AA}$), 중규모 직경(mesopores; $20 \sim 500 \text{ \AA}$), 거대직경(macropores; $>500 \text{ \AA}$)으로 구분 된다¹²⁾.

본 연구의 마이크로웨이브 가스화 시 생성된 슬러지 촉는 평균기공직경(mean pore size)이 50.85 \AA , 비표면적(specific surface area)이 $35.86 \text{ m}^2/\text{g}$, 기공체적(pore volume)이 $0.22 \text{ cm}^3/\text{g}$, 흡착량(adsorption amount)이 $228.71 \text{ cm}^3/\text{g}$ 으로 나타내었다.

슬러지 촉는 중간세공(mesopore)의 기공크기를 나타내고 있으며, 기존의 상용 흡착제에 비해 평균직경(mean pore size)이 작고, 비표면적(specific surface area), 기공체적(pore volume), 흡착량(adsorption amount)은 큰 상태이다. 상대적으로 기공체적과 흡착량이 큰 것은 실제 운전 시 운전비용의 절감을 의미하므로 큰 장점중의 하나라 볼 수 있다.

일반적으로 흡착제로서 중간세공이 다량 함유된 슬러지 촉가 응축성 타르를 포함한 열분해/가스화 가스의 정화시 흡착능이 우수하다⁶⁾. 이는 가스 흡착 시 슬러지 촉에 응축성 타르뿐만 아니라 같이 주입되는 수증기가 흡착되었기 때문이다. 생성가스가 슬러지 촉에 도달하기 전 가스온도는 30°C 이하로 응축되었지만, 생성가스 중 포함된 일부 수증기는 완벽하게 제거되지 않은 상태로 흡착탑으로 유입된다. 이 경우 슬러지 촉는 기존의 활성탄(activated carbon), 합성 미세공 광물(synthetic porous cordierite) 등에 비해 슬러지 촉 표면의 친수성과 중간세공의 수분 흡착능의 우수성 때문에 응축성 타르의 흡착제로서 유리하다.

Fig. 6은 마이크로웨이브와 전기로 가스화 슬러지 촉의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 마이크로웨이브 가열은 기존의 외부 가열방식과 달리 마이크로웨이

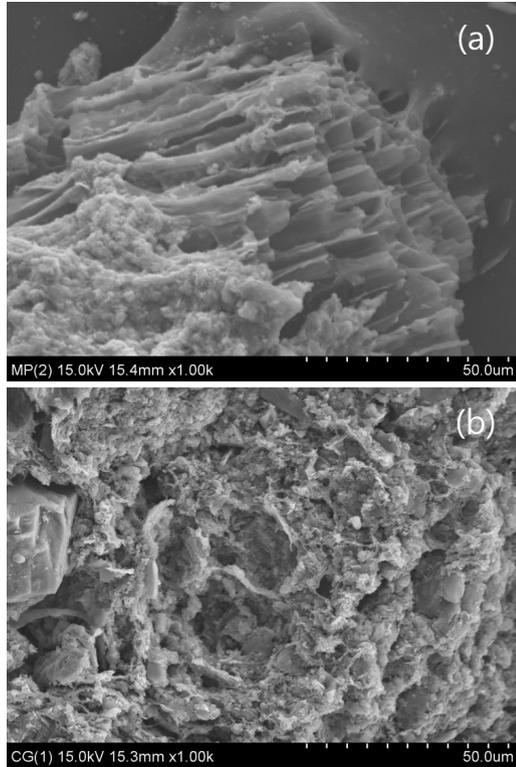


Fig. 6 SEM micrographs of the sludge char: (a) MW gasification, (b) EF gasification

브에너지가 슬러지 내부 열수용체로 흡수되어 전체 체적에 대한 가열(volumetric heating)이 이루어지므로 외부의 표면온도는 높지 않다. 따라서 슬러지 찌꺼기의 표면이 매끄러운 유리 같은 질감(vitreous-like texture)으로 되어 있으며 이로 인해 인체에 해로운 중금속이 안에 갇혀 있게 된다¹⁾. 기존의 가열방식인 전기로 가스화 슬러지 찌꺼기 표면에 다량의 기공이 형성되어 있어 표면구조가 확연히 다른 것을 알 수 있다.

4. 결 론

하수처리장 탈수 슬러지 폐기물을 열풍건조과정을 거치지 않고 직접 연료 에너지로 전환하기 위해 마이크로웨이브 건조-가스화 특성을 파악하였다.

마이크로웨이브 가스화 시 생성물은 가스, 슬러지

찌꺼기, 타르 순이며, 각각의 비율은 60%, 38%, 2%이었다. 가스화 생성가스로 가연성 가스를 생성하였으며, 수소 33%, 일산화탄소 40%가 생성되었다. 중량타르는 슬러지 중에 함유된 유기성분이 휘발한 중질 탄화수소의 집합체인 총 타르로 414 g/m³이 발생되었으며, 벤젠고리별 경질타르인 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 피렌의 농도는 각각 27.14, 13.93, 2.53, 5.63 g/m³를 보였다. 슬러지 찌꺼기 마이크로웨이브 가열특성에 의해 슬러지 찌꺼기 표면이 매끄러운 유리같은 질감으로 인해 인체에 해로운 중금속의 배출을 막을 수 있으며, 기존의 흡착제보다 우수한 흡착능을 나타내었다.

이상의 결과에 의해 탈수 하수 슬러지 마이크로웨이브 가스화에 의해 생성된 가스는 연료로 이용이 가능하다. 그러나 이용하기 전 가스 중에 함유된 응축성 타르와 중질타르 제거가 필요하며, 이 때 흡착능이 우수한 슬러지 찌꺼기 가스 정화공정에서 타르저감 흡착제로 사용하며, 흡착제는 고체연료로 활용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A2A03003044).

References

1. J. A. Menéndez, A. Domínguez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, "Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 74, No. 1, 2005, pp. 406-412.
2. G. Gascó, C. G. Blanco, F. Guerrero, and A. M. Méndez Lázaro, "The influence of organic matter on sewage sludge pyrolysis.", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 74, No. 1-2, 2005, pp. 413-420.

3. W. Zuo, Y. Tian, and N. Ren, "The important role of microwave receptors in bio-fuel production by microwave-induced pyrolysis of sewage sludge.", *Waste Management*, Vol. 31, No. 6, 2011, pp. 1321-1326.
4. J. A. Menéndez, A. Domínguez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, "Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction.", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 71, No. 2, 2004, pp. 657-667.
5. T. Phuphuakrat, T. Namioka, and K. Yoshikawa, "Tar removal from biomass pyrolysis gas in two-step function of decomposition and adsorption", *Applied Energy*, Vol. 87, 2010, pp. 2203-2211.
6. S. C. Kim, M. S. Lim, and Y. N. Chun, "Hydrogen-rich gas production from a biomass pyrolysis gas by using a plasmatron", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, 2013, pp. 14458-14466.
7. B. B. January, D. B. Jurand, and M. Beata, "Research on Possibilities of Sewage Sludge Utilisation in the Process of Pyrolysis", *Thermal Solid Waste Utilisation in Regular and Industrial Facilities*, Vol. 58, 2000, pp. 103-111.
8. Z. Xiqiang, Z. Jian, S. Zhanlong, L. Hongzhen, and L. Longzhi, and M. Chunyuan, "Microwave pyrolysis of straw bale and energy balance analysis", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 92, No. 1, 2011, pp. 43-49.
9. S. Lilly, and Z. Dong-Ke, "An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised bed", *Fuel*, Vol. 82, 2003, pp. 465-472.
10. A. Domínguez, Y. Fernández, B. Fidalogo, J. J. Pis, and J. A. Menéndez, "Bio-syngas production with low concentration of CO₂ and CH₄ from microwave induced pyrolysis of wet and dried sewage sludge", *Chemosphere*, Vol. 70, 2008, pp. 397-403.
11. M. Aznar, M. S. Anselmo, J. J. Manyà, and M. B. Murillo, "Experimental Study Examining the Evolution of Nitrogen Compounds during the Gasification of Dried Sewage Sludge", *Energy & Fuels*, Vol. 23, No. 6, 2009, pp. 3236-3245.
12. G. Q. Lu, "Effect of Pre-Drying on the Pore Structure Development of Sewage Sludge during Pyrolysis", *Environmental Technology*, Vol. 16, No. 5, 1995, pp. 495-499.