

하수슬러지의 에너지 자원화를 위한 마이크로파 건조특성 분석

Analysis of the Drying Characteristic of Wastewater Sludge by Microwave to Make Energy Resources

이 성 민¹⁾ · 이 윤 식[†]

Lee, Seongmin · Lee, Yoonsik

ABSTRACT : Wastewater sludge had normally filled up in land before revising the law of waste material management in 2003, which does not permit landfill of organic sludge in Korea. After the law, most sludge has been littered in the ocean up to now. However, due to the London Convention 96 Protocol, littering sludge in the ocean will also be prohibited after 2011. This Protocol makes countries find out new methods to treat wastewater sludge. There is no exception in Korea too. Many researchers have urgently try to find out better ways to treat sludge. One of ways is to make sludge recycle energy and the success of it depends on drying method. Specifically, it really depends how to make sludge dry ecologic friendly and economic efficiently. Therefore, wastewater sludge produced in Youngdong was analyzed to make it energy resources in this study. The sludge was tested to analyze the drying and chemical characteristics of it by irradiating microwave. In the result, it is sure that the sludge has little heavy metals as like as others in country side. High calories, 3370 Kcal, shows that it has good potential to be recycle energy. Moreover, weight deduction of the sludge vs. time shows long S-curve and has same deduction ratio. Specifically, S-curve can be divided by three sections based on the curvature points. There are steady state reduction ratio of weight and approximately 80% of weight duction in the second section. This results can be used to estimate the amount of sludge reduction in the full-scale microwave dryer. Drying capacity of microwave shows approximately 1.0 kg/kw/hr. It makes sure that sludge recycle energy has the potential of economic efficiency too.

Keywords : Wastewater sludge, Microwave, Recycle energy, Drying process, Energy resources

요 지 : 하수를 정화하는 과정에서 발생하는 슬러지는 과거 주로 매립되어 왔으나, 2003년 유기성 슬러지의 매립금지라는 폐기물관리법이 개정됨에 따라 최근에는 주로 해양투기 되어왔다. 그러나 ‘런던협약 96의정서’에 의해 2011년부터 해양투기도 금지될 예정이어서, 세계 각국은 슬러지의 다양한 처리방법에 대해 노력하고 있다. 우리나라도 예외 없이, 하수슬러지의 합리적인 처리방법을 찾기 위해 현재 많은 전문가들이 노력하고 있으며, 그중 하나가 재생 에너지화이다. 슬러지의 재생 에너지화의 성패는 친환경적이고 경제적인 건조방법에 달려 있다 해도 과언이 아니다. 따라서 본 연구에서는 영동군에서 발생하고 있는 하수슬러지를 재생에너지화 하기 위해, 슬러지의 화학적 특성을 분석하여 에너지화 가능성을 검토하고, 마이크로파를 물과 슬러지에 각각 조사하여 슬러지의 건조 특성과 효율성 등을 분석하였다. 그 결과, 영동군하수 슬러지는 중금속 성분이 매우 적고 열량이 3,370kcal/kg 이상으로 재생 에너지화하기에 적합함을 확인하였다. 또한, 마이크로파에 의한 슬러지 건조 특성을 분석한 결과, 슬러지 중량 대비 시간의 곡선은 투입 슬러지 량에 관계없이 늘어난 S자 형태의 거동특성을 보임은 물론 그 기울기가 일정함을 확인하였다. 또한, S 곡선을 변곡점 기준으로 세 영역으로 나눌 경우 두 번째 영역에서 건조가 가장 많이 일정하게 발생하며, 전체 건조량의 약 80% 이상임도 확인하였다. 본 결과는 향후 마이크로파를 이용한 full-scale 건조공정에서 투입 슬러지 대비 슬러지 건조량을 예측하는데 적용할 수 있다. 또한 본 실험 결과에 의하면, 마이크로파에 의한 건조능력이 약 1.0kg/kW 이상을 보이고 있어 경제성도 갖고 있음을 확인하였다.

주요어 : 하수슬러지, 마이크로파, 재생에너지, 건조공정, 에너지자원

1. 서 론

산업이 발달함으로 인구와 에너지가 도시로 집중하여 많은 생활기반시설이 도시에 만들어지고 있다. 이 중 대표적인 것이 하수처리시설인데, 하수처리시설은 물을 깨끗하게 처리함과 동시에 최종산물로 새로운 오염물질인 하수슬러지를 다량 배출한다. 이러한 하수슬러지 발생량은 2007년

말 기준으로 약 7,631톤/일 정도이고, 현재 수질개선 및 환경오염 방지를 위한 하수처리장의 신설 및 확장 계획이 전국적으로 수립되어 있어서, 향후 하수슬러지의 발생량은 더욱더 증가될 것으로 예상된다(환경부, 2008).

슬러지는 과거 매립에 의존해 왔으나, 폐기물관리법 시행규칙의 개정에 따라 2003년 7월부터 하수종말처리시설로부터 발생하는 유기성 슬러지의 직매립이 금지되어 최근까

1) 정희원, 영동대학교 토목환경공학과 부교수

† 비희원, 용진환경(주) 연구개발팀 과장(E-mail : yncqlee@gmail.com)

지는 해양투기 방식으로 처리하여왔다. 그러나 ‘런던협약 96의정서’에 의해 2011년부터는 해양투기도 금지될 예정(환경부, 2007)이므로, 하수슬러지의 처리 대책이 전 세계적으로 시급하게 필요한 실정이 되었다.

사실 슬러지 처리 방법은 소각, 부숙화, 고형화, 퇴비화 등 다양하게 있으나, 이들 중 소각을 제외한 대부분의 처리 방법은 슬러지 처리가 성공하더라도 그 처리과정에서 발생한 부산물에 대한 사용이 너무 많은 환경적 제약이 따르기에 활성화되고 있지 않다. 이들 중 소각처리가 슬러지 감량화 및 위생적 처리라는 점에서 가장 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 소각방법은 하수슬러지의 자원화 방향이 아니라는 점과 고비용이 들며 환경오염 주범인 다이옥신 배출 등으로 인해 소각장 입지선정에 따른 민원발생의 소지가 커서 이 또한 쉽게 도입하기 어려운 실정이다.

슬러지 처리의 어려움과 해양투기 금지라는 제약이 슬러지를 자원화 하는 쪽으로 연구자들의 관심을 증가시켜 최근에는 슬러지 처리에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 한국건설기술연구원에서는 하수슬러지 고형물의 일일복토재 활용성 연구(한국건설기술연구원, 2004), 건양대학교에서는 하수슬러지를 이용한 고형연료 제조 기술을 연구하였고(안양규, 2009), 고등기술연구원에서는 하수슬러지의 감량화 및 에너지화가 가능한 비증발형 열가수분해 연속처리기술을 연구하였다(최창식, 2009).

위와 같이 기존 하수슬러지에 관한 연구들은 하수슬러지의 연료화 및 자원화 등에 초점을 맞추고 있으나, 그 연구의 성패는 경제적이고 환경적인 건조 공정을 어떻게 제시하느냐에 달려있음은 부인할 수 없는 사실이다. 즉, 새로운 건조 공정의 개발 없이는 하수슬러지의 연료화도 자원화도 요원하다는 것이다.

따라서 효율적인 건조를 통해 슬러지의 부피감소와 이에 따른 처리단가 절감과 슬러지 재활용에 필요한 적절한 함수비의 조절능력은 슬러지 자원화에 큰 도움이 되리라 믿는다. 최근 정부도 기후변화 대응과 새로운 에너지원 확보를 위해 저탄소녹색성장을 선도해 나갈 정책을 펴고 있기에, 슬러지 처리 분야에서 슬러지를 효율적으로 건조할 수 있는 장치의 개발은 매우 시급한 실정이 되었다.

2. 하수슬러지

2.1 일반

슬러지는 부유성 고형물질과 용존성 물질의 혼합체로 이루어진 오염물질이 고액 분리 후 침전되어 생긴 것으로 수분함량이 95% 미만이거나 고형물질이 5% 이상인 것으로

폐기물관리법에 명시하고 있다. 국내 하·폐수 처리장의 대부분은 활성슬러지와 같은 생물학적 처리를 주요 공정으로 채용하고 있으며 유기물이 세포로 전환되는 과정에서 60~90%의 세포상 유기물과 약 96~99%의 수분을 함유하고 있는 생물고형물이 발생하고 있다.

수처리 과정에서 발생하는 슬러지는 폐수의 성상이 매우 다양하므로 발생원에 따라 슬러지의 특성은 다르게 나타난다. 폐수처리장에서 생성되는 슬러지를 가장 효율적으로 처리하려면, 취급하고자 하는 고형물질과 슬러지의 특성을 파악하는 것이 가장 중요하다. 슬러지의 특성은 고형물질과 슬러지의 발생원, 슬러지가 보관된 시간 및 슬러지의 처리 형태에 따라 달라진다.

탈수공정을 거쳐 나오는 하수슬러지(탈수케이크)는 보통 80% 이상의 많은 수분을 포함하며, 독특한 냄새가 나고 진한 색상을 띠며 점도가 높다. 또한 하수슬러지는 많은 유기물과 각종 미생물을 포함하고 있어서 방치할 경우 부패되어 악취를 내며, 공중위생에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 하수처리장에서 산업폐수가 유입될 경우에는 각종 중금속 등 유해물질과 특히 최근 들어서는 PCB, dioxin, 염화유기용매 등이 우려할 정도의 높은 농도로 포함될 수 있어서 처리처분이 더욱 곤란한 실정이다.

2.2 수분 특성

슬러지 내 수분은 슬러지 입자구조에 따라 크게 자유수와 결합수로 구분된다. 자유수는 다시 플록구조에 따라 구조 내에 존재하는 공극수(interstitial water)와 고형물과 아무런 상관관계를 갖지 않는 자유수(free water)로 구분되며, 결합수는 입자표면과의 관계에 따라 표면의 영향을 받는 표면수(surface water)와 세포내 수분 혹은 수화물에 의한 부착수(bound water)로 세분된다. 이러한 수분특성은 결합에너지의 차이에 기인한다. 그림 1은 슬러지에 포함되어있는 수

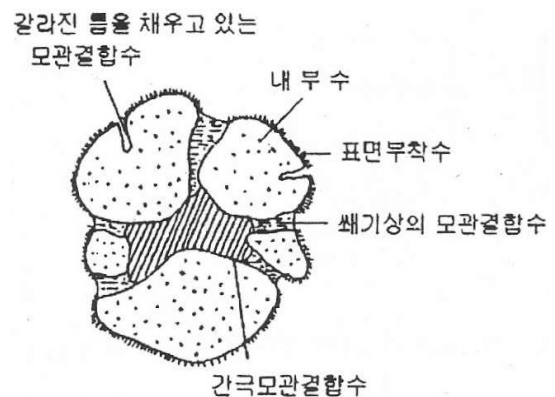


그림 1. 슬러지 부착 수분의 결합 형태(환경관리공단, 2005a)

분의 결합상태를 보여주고 있다.

문용택 등(2001)에 의하면, 고형물 표면에 완전하게 고착된 표면수는 3nm범위로 존재하며 그 효과가 자유수에 파악될 수 있다고 하였다. 또한 점도도 20~30배 정도로 입자 상호관계에 영향이 있다고 제시하였다. 한편, 기계적 압착에 의한 수분의 제거는 고형입자와 결합력이 낮은 형태의 수분부터 이루어지며 물리·화학적으로 결합되어 그 결합에너지가 높아질수록 제거되기 어려워진다. 따라서 슬러지에서 가장 쉽게 제거되는 물은 배수, 농축, 기계적 탈수를 통해 제거되는 자유수이며 공극수는 충분한 기계적 에너지로 플록구조가 파괴되어 압축되는 경우 자유수로 전환되어 제거된다. 표면수와 결합수는 기계적 탈수공정으로는 제거가 힘들어 열적, 화학적 전처리를 필요로 하기 때문에 탈수 공정에서 주관심대상이 된다. 일반적으로 표면수와 결합수를 기계적 탈수의 이론적 한계라 한다.

2.3 배출현황

슬러지는 함수비가 80% 이상으로 매우 높고 약 98%의 유동성이 있어 처리상의 많은 어려움이 있으나, 미생물의 잔해로서 슬러지 내에는 유기물 및 각종 미량원소, 질소 성분 등을 포함하고 있어 유용한 자원으로서 이용이 가능하다. 또한 그 처리 방법에 따라 성상이 다양하므로 이용할 수 있는 범위가 넓으며 환경과 에너지 관리 차원에서도 재이용-재활용이 꼭 필요한 유가 자원이다. 국내에서 발생하는 슬러지는 2007년 말 기준으로 전국에서 가동 중인 공공하수처리시설에서 발생하는 1일 평균 하수 슬러지 양과 2011년 공공하수처리시설의 신·증설에 따라 발생 예정인 1일 평균 하수슬러지 발생량은 표 1과 같다.

한편 슬러지 처리 방법에 있어서는, 2003년 7월1일 이후 육상 직 매립이 금지됨에 따라 국내 처리 방법이 처리비용이 저렴한 해양투기방식으로 대부분 처리되고 있음을 표 2는 보여주고 있다.

표 1. 하수슬러지 발생현황 및 전망(환경부, 2008)

구분	2007년 현황	2011년 전망
처리장 수(시설용량)	347(23,735천m ³ /일)	460(25,146천m ³ /일)
슬러지 발생량(톤/일)	7,631	10,259

표 2. 2007년도 하수슬러지 처리현황(환경부, 2008)

구분	계	처리			
		육상매립	소각	재활용	해양배출
물량(톤/일)	7,631	164	829	1,411	5,227
비율(%)	100	2.1	10.9	18.5	68.5

3. 마이크로파

3.1 일반

세계 2차 대전 중 마이크로파에 의한 가열현상이 발견된 이후 1953년경 미국의 L사가 영업장의 식품가열용 마이크로파 오븐을 최초로 개발 및 발매한 것을 시작으로 마이크로파 가열이 산업분야에 활발하게 응용되기 시작 되었다. 이 장치는 1960년에 일본에 수출되어 가정용 전자레인지로 개발되면서 일본의 기술수준이 급격히 높아지기 시작하였으며, 현재 핵심부품인 마그네트론(magnetron)의 세계 시장의 대부분을 일본이 장악하고 있다. 그러므로 일본에서는 이미 1960년경부터 마이크로파 가열방식을 산업 전 분야에 응용하기위한 연구가 활발히 진행되어 현재 매우 다양한 목적으로 응용되고 있다. 특히 1980년경부터 마이크로파 발생장치, 전송부품 등은 표준화작업이 시작되어 현재는 전 세계적으로 이용되고 있다.

우리나라에서도 1993년 D사에서 국내 최초로 마이크로파 가열을 이용한 천연고무 가열기가 개발에 성공하였고, 2000년에 J사에서 마이크로파 가열을 이용한 고무가열기가 국산화되었다. 현재 생산되고 있는 가정용 전자레인지의 국산화율이 100%에 육박할 정도로 많은 기술적 진보를 하였으나 산업용의 경우 일부 산업분야에서 제한적으로 이용되고 있는 실정이다. 즉, 마이크로파 가열의 산업분야 응용은 에너지 절약을 당연히 유도함에도 불구하고 현재 국내에는 그 보급정도가 매우 미미하다. 그러므로 각 산업분야별로 기존의 직접가열 방식에 의한 도출된 문제점을 종합하여 결과를 분석하면 마이크로파 가열을 접목시키기 위한 방법의 구성에서 일부설계인자는 표준화가 가능할 것으로 예측되며 이는 개발비용의 절약, 개발기간의 단축, 신뢰성의 확보 등 매우 유리한 개발의 부가가치를 얻으리라 기대된다.

3.2 가열원리

고주파 가열에 사용되는 ISM주파수(frequency for industrial, scientific and medical)는 13.56MHz, 27.12MHz, 433.9MHz, 900MHz, 2.45GHz가 있다. 또한 초고주파 영역에서 915MHz, 2.45GHz, 5.8GHz, 22.125GHz 등이 있는데 이 중에서 2.45 GHz는 다른 주파수 보다 온도에 따른 유전특성치(dielectric property)의 변화가 적어 많이 이용되고 있다. 또한, 마이크

로파는 레이더나 통신에도 사용되며 혼선이나 잡음 등의 방해를 막기 위해 사용 주파수를 국제적으로 정해 놓고 있다. 일본에서 농업용에 할당된 마이크로파 가열용의 주파수는 2,450MHz, 5,800MHz와 22,125MHz 이다. 그러나 2,450MHz 이외에는 큰 출력용 마이크로파 전자관을 만들기 어렵고 고가이기 때문에 마이크로파 가열에는 2,450MHz 만이 사용되고 있다.

마이크로파의 가열원리는 유전체를 마이크로파의 전계 속에 놓을 경우 전파에너지가 유전체의 내부에서 열로 바뀌는 원리를 이용하는 것이다. 유전체를 구성하는 분자는 일반적으로 +, -의 전하를 띤 전기적인 분자이다. 전기적으로 극성을 갖는 유전체에 마이크로파가 조사되면 +, - 전하가 일렬로 배열된다. 마이크로파의 진폭은 0에서부터 최대값을 나타낸 후 다시 감소하여 0을 거쳐 최소값을 갖게 된다.

이때 분자의 배열은 진폭의 변화에 따라 변하게 되고 결과적으로 분자의 지속적인 회전에 의해 각 분자간의 마찰이 있게 되고 순간적으로 일정하게 열이 발생하게 된다. 즉 마이크로파가 물질에 흡수되면 물질 내부의 분자에 작용하여 그 에너지

전이(transition)가 분자의 회전 형태로 나타나고 이 회전에 의한 마찰열 때문에 물질이 가열된다. 전통적인 방법에서는 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)에 의해서 가열되지만 microwave 가열은 물질자체에서 발생하는 열로 가열되므로 에너지 손실이 거의 없고 매우 짧은 시간에 가열되며 가열의 균일성이 좋고 열효율이 높은 장점을 가지고 있다.

그러나 마이크로파의 이런 가열 특성에도 불구하고 마이크로파를 이용하여 슬러지를 건조할 경우 나타나는 건조특성과 효율성에 대한 연구는 아직 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 영동군 하수슬러지의 성분을 분석하고 가정용과 상업용 마이크로웨이브를 이용하여 물과 하수슬러지를 가열 건조하여 건조 효율성을 비교 검토해 보았다.

4. 영동 하수슬러지 분석

4.1 일반적인 특성

현재 영동군 공공하수처리시설에서 발생하는 하수 슬러



사진 1. 영동군 공공하수처리시설 생물반응조



사진 2. 슬러지 원심탈수기

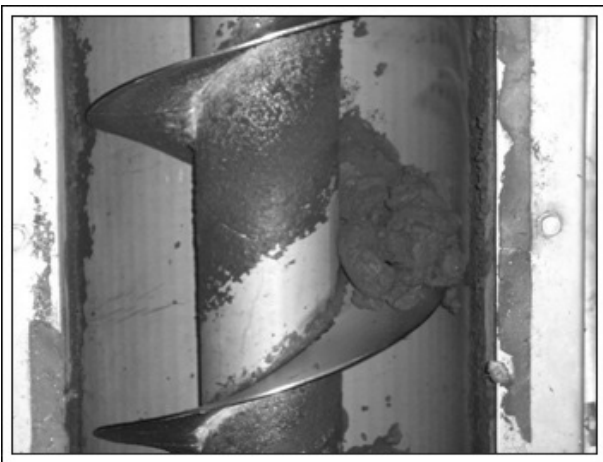


사진 3. 탈수케익 스크류 콘베이어



사진 4. 탈수케익(하수 슬러지)

지는 전량 녹생토 재활용업체에 처리하고 있으나, 녹생토 사업이 사양화 추세이며, 향후 반입을 중지할시 마땅한 대책을 강구해 놓지 못한 실정이다. 사진 1~4는 영동군 공공하수처리시설의 부산물로 발생되고 있는 슬러지 처리현황과 탈수케이크의 모습이다.

현재 영동군 공공하수종말처리시설에서 생물학적 수처리 공정을 거쳐 매일 발생하는 하수 슬러지량은 약 4ton/일이며, 톤당 폐기물처리비용은 5만5천원이 소요되고 있다. 발생하는 하수 슬러지의 함수율은 약 82%이며, 유기물 함량은 약 70~80%로 타 처리장에 비해 높은 수준이다.

4.2 성분 분석 결과

우리나라 공공하수처리시설별 하수슬러지의 중금속 분석은 표 3과 같이 크게 농촌형과 도시형, 공단형으로 분류시킬 수 있다.

영동군 공공하수처리시설의 하수슬러지의 중금속 분석 결과는 표 4와 같고, 폐기물 시험법에 따른 용출시험 결과는 표 5와 같으며, 영동군 하수슬러지 발열량을 측정하여 국내·외 석탄 발열량과 비교하여 표 6에 나타내었다.

표 4 결과를 보면, 영동군 하수슬러지는 비료원료 기준에 아연(Zn)만이 기준 이상으로 나타나고 있으나, 부속토 원료

표 3. 공공하수처리시설별 중금속 분석결과(환경관리공단, 2005)

[단위 : mg/kg wet soild]

항목	농촌형			도시형				공단형			비고
Cd	1.3	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0	5.3	11.4	5.3	
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10	ND	ND	
Cr	8.40	11.0	30.3	12.4	104	7.8	50.5	925	1,114	1,245	
Cu	80.9	115	343	158	326	56.0	201	1,625	2,700	507	
Fe	5,700	5,300	9,900	3,900	7,700	4,500	7,100	59,600	24,000	49,100	
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Pb	36.1	29.7	42.6	44.3	59.9	42.2	59.4	480	190	267	
Zn	1,000	1,000	3,400	1,300	1,600	1,600	1,500	6,700	3,700	10,800	
CN	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	

표 4. 영동군 공공하수처리시설 하수슬러지 성분분석(중금속) 결과(2008.03.28)

[단위 : mg/kg-dry base]

항목	검사결과	비료원료기준	부속토 가. 기준
유기물	81.9	25% 이상	25% 이상
Cd	1.9	5 이하	5 이하
As	2.6	50 이하	50 이하
Cr	21.9	300 이하	300 이하
Cu	134.8	500 이하	500 이하
Hg	0.4	2 이하	2 이하
Pb	0.0	150 이하	150 이하
Zn	1159.6	900 이하	-
Ni	14.9	50 이하	-

결과치는 건조물로서의 함량 임

표 5. 영동군 공공하수처리시설 하수슬러지 폐기물 검사결과(2009.06.29)

[단위 : mg/L]

항목	기준	검사결과	비고
Pb	3	ND	용출시험
Cu	3	0.010	"
Cd	0.3	ND	"
As	1.5	ND	"
CN	1	ND	"
Cr+6	1.5	ND	"
Hg	0.005	ND	"
유기인	1	ND	"
트리클로로에틸렌	0.3	ND	"
테트라클로로에틸렌	0.1	ND	"
기름성분	5%	0.02%	함량시험

표 6. 영동하수슬러지와 석탄의 발열량 비교

구분	고정탄소(%)	회분(%)	휘발분(%)	수분(%)	발열량(kcal/kg)
영동 하수슬러지	3.0	7.9	24.8	64.4	3370.0
석탄(A)	62.0	23.0	12.9	2.2	5989.5
석탄(B)	59.8	34.4	2.3	0.6	4196.9
석탄(C)	53.6	38.7	6.4	1.4	4110.9

기준에는 적합하며, 우리나라 공공하수처리시설별 하수슬러지의 중금속 분석결과 분류와 비교해 보면 농촌형 분류에 속하는 것을 알 수 있다.

또한 표 5와 표 6에 의하면 영동군 하수슬러지는 폐기물 실험 검사결과에서 배출 기준에 양호한 것으로 나타났으며, 3370.0kcal/kg의 발열량을 갖고 있어서 자원으로의 가치도 충분이 있는 것으로 나타났다.

5. 마이크로파의 슬러지 건조 효율 분석

5.1 일반

본 연구에 사용된 슬러지는 영동 공공하수처리시설에서 채취한 슬러지로 고분자 응집제를 첨가하여 탈수한 슬러지 케이크이다. 슬러지의 화학적 성질은 시성분석(proximate analysis)으로 조사하였으며, 시성분석은 “Standard Methods”에 따라 분석하였다. 다음 표 7은 본 연구에서 시료로 사용한 하수슬러지 케이크의 조성을 나타낸 것이다.

본 연구에 사용한 마이크로파 슬러지 건조 실험 장치는

표 7. 영동군 하수슬러지 케이크의 수분 및 유기물 조성

Moisture content	85.79%
Total solids	14.21%
Volatile solids*	64.04%
Fixed solids	32.96%

*Ignition Loss at 600°C

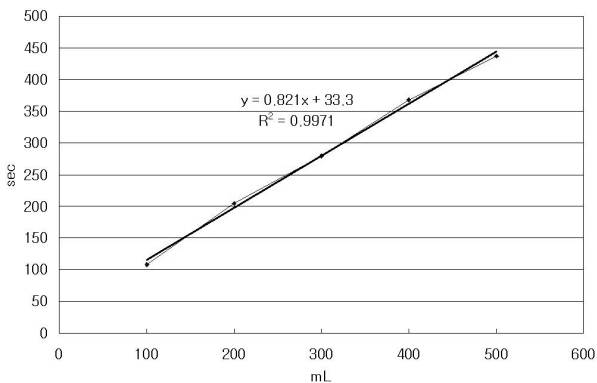


그림 2. 용량별 끓는 시점(0.7kW)

고주파출력 0.7kW와 1.7kW인 국내 상용 마이크로웨이브를 사용하였다. 슬러지 건조장치의 cavity에 슬러지를 담은 pyrex beaker, 또는 pyrex 접시와 teflon plate를 넣고, 이것을 저울에 올리고 가열하여 슬러지 함수율이 10%이하가 될 때까지 시간에 따른 질량의 변화를 측정하였다.

분석 방법으로는, 고주파 출력 0.7kW와 1.7kW의 마이크로웨이브에 100mL, 200mL, 300mL, 500mL의 물을 가열 건조하여 끓기 시작하는 시간을 측정하였고, 시간별로 무게를 측정하여 비교하였다. 슬러지의 경우도 물과 마찬가지로 100g, 300g, 500g, 800g의 슬러지를 가열 건조하여 시간별로 무게를 측정하여 함수율과 비교하여 건조 효율을 검토하였다.

5.2 수분 건조 실험 결과

마이크로파를 이용하여 물을 가열 증발시켜 일반적인 건조 능력을 실험하기 위해, 물을 각 용량별로 1L 비커에 담아 가열하여 끓는 시점을 조사하였고, 각각 용량을 달리하여 시간당 증발량을 측정하였다. 끓는 시점은 용량이 늘어남에 따라 일정하게 비례함을 보였으며 그 결과는 각각 그림 2와 그림 3과 같다.

또한, 물을 각각 용량별로 가열하여 무게변화와 시간당 증발량을 비교한 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

고주파 출력 0.7kW인 마이크로파로 물을 용량별로 가열한 결과, 끓는 시점은 다르나 그 이후에는 용량에 관계없이 일정한 증발량을 보여주고 있으며, 그림 5에 나타난 바와

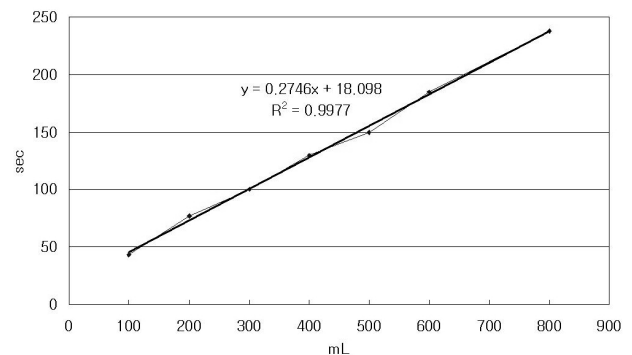


그림 3. 용량별 끓는 시점(1.7kW)

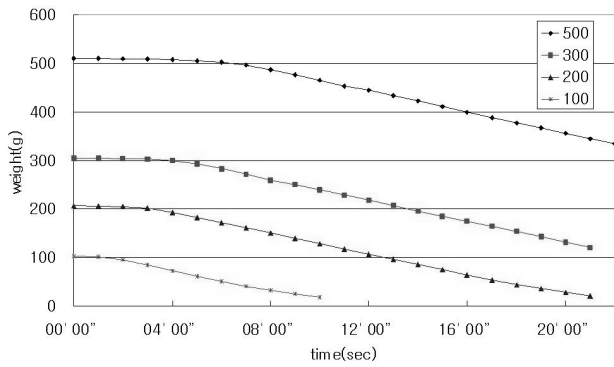


그림 4. 마이크로파 조사 시간에 따른 무게변화(water, 0.7kW)

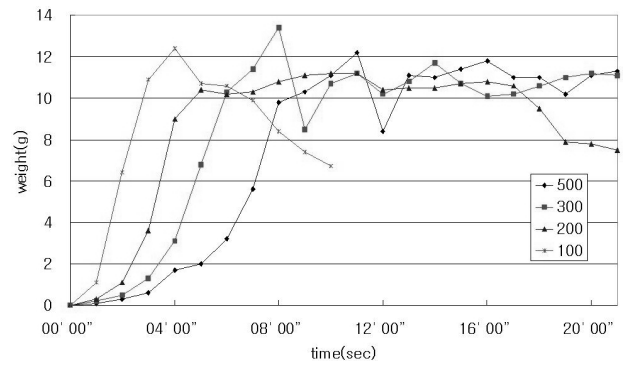


그림 5. 마이크로파 조사 시간에 따른 증발량 변화(water, 0.7kW)

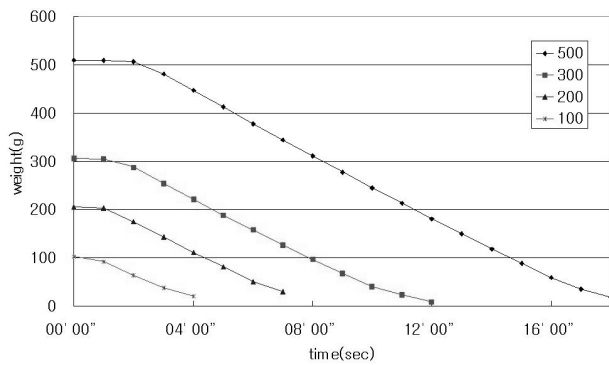


그림 6. 마이크로파 조사 시간에 따른 무게변화(water, 1.7kW)

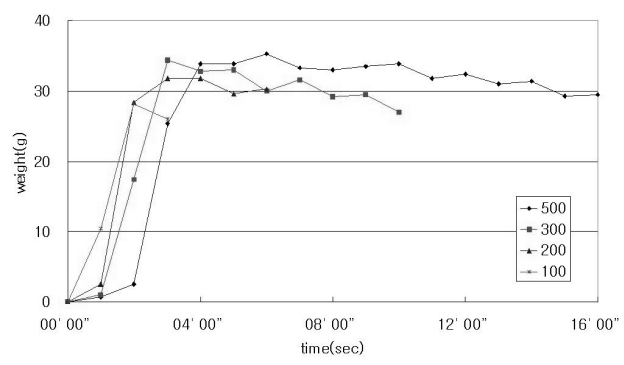


그림 7. 마이크로파 조사 시간에 따른 증발량 변화(water, 1.7kW)



사진 5. 마이크로파(전자레인지) 건조실험 결과

같이 평균 약 10.8g/min으로 증발이 발생하고 있음이 밝혀졌다.

고주파 출력 1.7kW 마이크로파로 물을 가열하였을 때에는, 물의 끓는 시점은 짧아졌으나 끓는 시점 이후로는 0.7kW의 결과와 같이 용량에 관계없이 일정하게 증발되는 모습을 보여주고 있으며, 그림 7에서 나타난 바와 같이 평균 약 30.55g/min으로 증발되었다.

5.3 하수슬러지 건조 실험

영동군 하수슬러지를 마이크로파로 건조하였을 때 나타나는 하수슬러지의 건조 특성을 파악하기 위하여 0.7kW와 1.7kW 출력의 마이크로파를 이용하여 일정량의 슬러지를

시간대별로 건조하였다. 사진 5는 150g의 슬러지를 0.7kW 마이크로웨이브로 건조한 사진으로 건조 전, 5분 건조 후, 10분 건조 후의 모습을 보여주고 있다.

마이크로파(0.7kW)를 이용하여 영동군 하수슬러지를 가열 건조하여 무게변화와 함수율을 시간대별로 나타낸 결과는 그림 8과 같다.

하수슬러지도 물과 비교해 볼 때 비슷한 건조곡선의 형태를 보여주고 있다. 일정시간 이후 투입량과 관계없이 일정하게 증발되는 결과를 보여주고 있으며, 그림 9에서 보는 바와 같이 평균 약 11.39g/min으로 증발되고 있음을 알 수 있다.

마이크로파 출력 1.7kW를 이용하여 슬러지를 건조한 결과 그림 10과 같이 나타났다. 1.7kW 마이크로파를 이용한 슬러지 건조도 마찬가지로 일정시간 이후 투입량과 관계없이

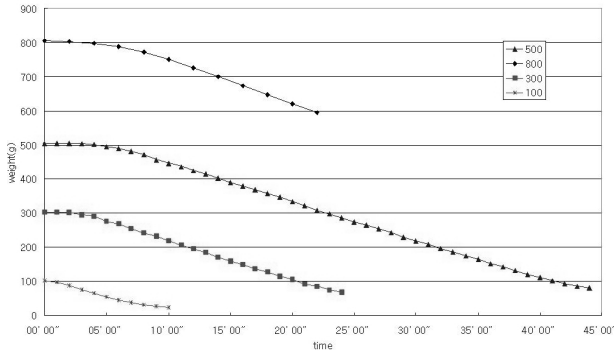


그림 8. 마이크로파 조사 시간에 따른 무게변화(sludge, 0.7kW)

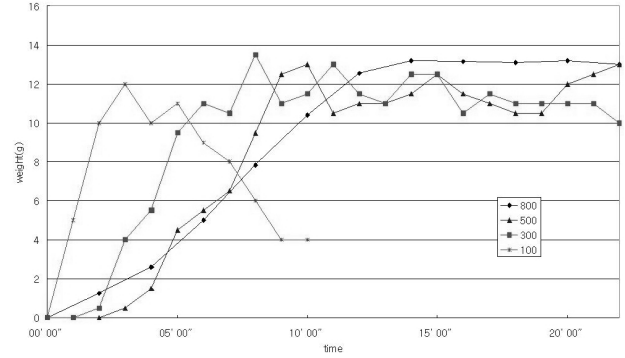


그림 9. 마이크로파 조사 시간에 따른 증발량 변화(sludge, 0.7kW)

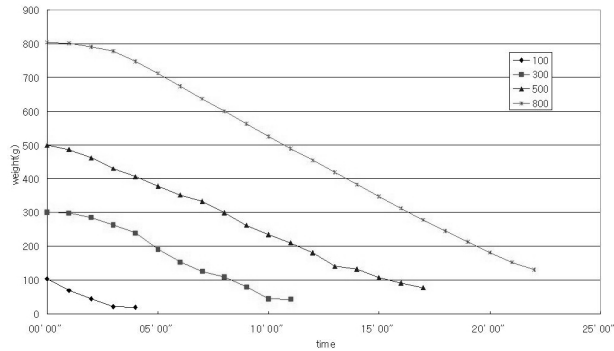


그림 10. 마이크로파 조사 시간에 따른 무게변화(sludge, 1.7kW)

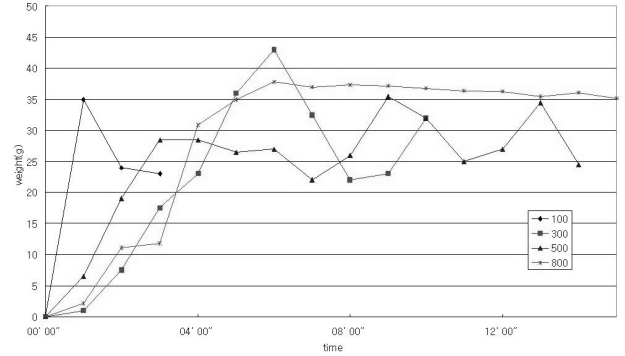


그림 11. 마이크로파 조사 시간에 따른 증발량 변화(sludge, 1.7kW)

일정하게 증발되는 결과를 보여주고 있으며, 그림 11에서와 같이 평균 약 30.68g/min으로 증발되고 있음을 알 수 있다.

5.4 마이크로파를 이용한 슬러지의 건조특성 및 경제성 분석

마이크로파를 이용하여 영동군 하수슬러지의 건조 특성을 비교해 본 결과, 슬러지 투입 중량 대비 시간 곡선은 투입량에 관계없이 늘어진 S자 형태의 거동특성을 보임은 물론 그 기울기가 그림 12에 보이는 바와 같이 일정한 것으로 나타났다. 늘어진 S 곡선은 변곡점을 기준으로 세 영역으로 나눌 수 있으며, 제 I 영역에서는 건조량이 점증적으로 증가하는 모습을 보이고, 제 II 영역에서는 건조량이 일정한 비율로 발생하며, 전체 건조량의 약 80% 이상이 본 영역에서 발생하고 있음을 보인다. 또한 제 III 영역에서는 건조량이 점증적으로 감소하며 함수율은 약 20% 이하인 영역이다.

수분의 증발속도는 건조 대상 슬러지의 투입용량 보다 마이크로파의 출력과 관계가 큰 것으로 나타났다. 즉, 투입한 슬러지의 양에 관계없이 마이크로파 건조기에 투입한 슬러지가 비등점을 지날 경우 0.7kW 마이크로파 건조기는 약 11.39g/min를 그리고 1.7kW인 마이크로파 건조기는 약 30.68g/min의 일정한 증발 속도를 각각 유지함을 보였다. 본 결과를 같은 효율의 1kW 출력 마이크로파 건조기

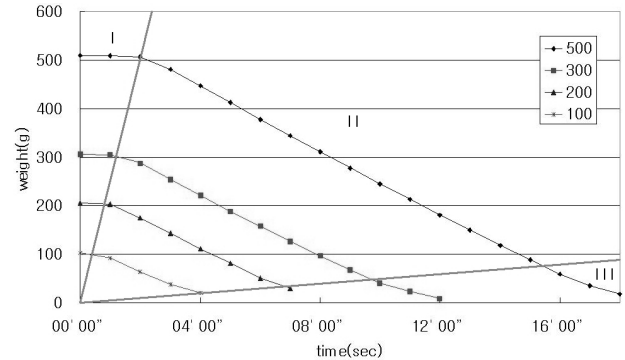


그림 12. 마이크로파 건조 곡선의 특성 구역

능력으로 환산할 경우, 시간당 각각 976g과 1,083g의 수분 증발능력이 되며, 그 평균값은 약 1,030g/hr 이다. 본 값은 투입 슬러지의 함수율을 약 80%로 계산 할 경우 1,288g의 슬러지를 1kW 출력의 마이크로파 건조기로 1시간에 함수율 0%으로 만들 수 있다는 의미이기도 하다.

영동군 공공하수처리시설에서는 현재 하루 약 5톤의 하수슬러지가 발생하고 있으며, 산업용 전기값으로 1kW/hr에 약 55원을 지불하고 있으며, 슬러지 처리 비용으로 약 55,000원/ton을 사용하고 있다. 따라서 1kW 마이크로파 건조기로 슬러지 1,288g을 1시간 건조시킬 수 있다면, 슬러지의 처리비용을 약 43,000원/ton 이하로 줄일 수 있다는 결론을 얻는다. 이같은 현재 영동군 공공하수처리시설에서 사용하는 비용의 약 78%

에 해당되기에 투입 에너지 대비 경제적 효율성을 갖고 있는 것으로 판단된다. 더욱이, 건조 후 발생하는 최종 건조 슬러지를 재생에너지화 하기위해 함수율을 0% 보다 크게 할 경우 슬러지 처리용량은 늘어나게 되고 그에 따른 처리비용은 급격하게 줄어들어 그 경제적 효율성은 더욱 크리라 판단된다.

또한, 건조량의 약 80%를 차지하는 제 II 영역에서 발생한 증발속도만 감안할 경우는 마이크로파에 의한 슬러지 건조가 약 1,300g/kW 이상도 가능한 것으로 나타났다. 이는 같은 방법으로 환산할 경우, 1kW로 1시간동안 함수율 약 80%의 슬러지 약 1,625g 을 함수율 0%로 만들 수 있다는 의미이다. 따라서 초기 영역인 제 I 영역의 효율을 높일 경우 대용량 마이크로파 슬러지 전용 건조기의 개발도 가능하리라 판단된다.

6. 결론 및 제언

영동군 하수 슬러지의 일반 특성을 분석해 본 결과, 하수 슬러지의 성상은 다른 지역과 비교해 볼 때 농촌형 하수슬러지 성상으로 중금속의 함량이 적고 유기물 함량이 높아 부숙도 원료기준을 충족하고 있으며, 발열량도 3,370Kcal로 에너지 자원으로의 가치를 충분히 갖고 있음을 확인하였다.

또한, 본 연구에서는 마이크로파를 이용하여 영동군 하수슬러지를 건조시켜 자원화 할 수 있는지를 검토하기위해 물과 함께 마이크로파에 대한 응답특성을 비교 분석해 다음과 같은 결과들을 얻었다.

- (1) 마이크로파 조사시 슬러지 증량 대비 시간 곡선은 투입 슬러지 량에 관계없이 늘어진 S자 형태의 거동특성을 보인다.
- (2) 늘어진 S 곡선은 두 변곡점들을 기준으로 세 영역으로 나눌 수 있으며 다음과 같은 건조 특성이 있다.
 - a. 제 I 영역에서는 건조량이 점증적으로 증가하는 모습을 보인다.
 - b. 제 II 영역에서는 건조량이 일정한 비율로 발생하며, 전체 건조량의 약 80% 이상이 본 영역에서 발생한다.
 - c. 제 III 영역에서는 건조량이 점증적으로 감소함을 보였으며 함수율은 약 20% 이하인 영역이다.
- (3) 투입 슬러지나 물의 양에 관계없이 늘어진 S 곡선의 기울기는 그림 12에 보이는 바와 같이 영역에 관계없이 일정한 감소율을 갖는다.

한편, 슬러지의 건조속도는 투입용량 보다 마이크로파의 출력과 상관관계가 있으며, 그 경제성 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 0.7kW와 1.7kW인 마이크로파의 슬러지 건조속도는 슬러지가 비등점을 지나면서 각각 약 11.39g/min과 30.68

g/min을 유지한다.

- (2) 1.0kW 출력 마이크로파 건조기로 환산할 경우 시간당 약 1,288g의 슬러지를 함수율 0%로 처리할 수 있는 능력이다.
- (3) 영동군 공공하수처리시설에서는 현재 슬러지 처리 비용으로 약 55,000원/ton을 사용하고 있으나, 본 연구의 결과를 적용할 경우 슬러지의 처리비용이 43,000원/ton 이하로 줄어들 수 있음을 알았다.
- (4) 특히, 건조량의 약 80%를 차지하는 제 II 영역에서 발생한 증발속도만 감안할 경우 마이크로파에 의한 건조가 약 1,300g/kW 이상도 가능하여 제 I 영역의 효율을 높일 경우 경제적인 대용량 마이크로파 슬러지 전용 건조기의 개발도 가능하리라 판단된다.
- (5) 또한, 최종 건조 슬러지의 활용방법에 따라 그 함수율을 조정할 경우 즉, 최종단계의 함수율을 0% 보다 크게 할 경우 슬러지 처리용량은 늘어나게 되고 그에 따른 처리비용은 급격하게 줄어들 것이라 판단된다.

본 연구 결과들은 향후 마이크로파를 이용한 full-scale 마이크로파 건조공정에서 투입 슬러지 대비 슬러지 건조량을 예측하는데 기초자료로 적용할 수 있으리라 판단된다. 환경문제는 더 이상 한나라만의 문제가 아니다. 범지구적인 문제로 세계 각국이 촉각을 곤두세우고 있는 문제이며, “런던협약”, “교토의정서” 등 지구환경을 지키기 위한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 따라서 경제적이고 효율적인 재활용 방안을 찾아 슬러지 처리 대책을 세워 2011년 다가올 슬러지처리 대란에 미리 대비할 수 있도록 해야 한다.

참고 문헌

1. 문용택, 김정현 (2001), 모세관흡입시간과 여과시간에 의한 정수장 슬러지의 탈수 특성 비교 연구, *상하수도학회*, Vol. 15, No. 2, pp. 115~122.
2. 안양규 (2009), 하수슬러지 고형연료화 및 열분해 소각을 통한 에너지 회수 기술, *2009 하수슬러지 자원화 및 에너지화 관련 기술설명회*, 한국상하수도협회, pp. 99~124.
3. 최창식 (2009), 하수슬러지의 감량화 및 에너지화가 가능한 비증발형 열가수분해 연속처리기술, *2009 하수슬러지 자원화 및 에너지화 관련 기술설명회*, 한국상하수도협회, pp. 133~162.
4. 한국건설기술연구원 (2004), *하수슬러지 고형물의 일일복토재 활용성 연구*, VC-000-DZ500, 한국건설기술연구원, pp. 1~77.
5. 환경관리공단 (2005a), *하수슬러지 처리 및 자원화 방안*, pp. 102.
6. 환경관리공단 (2005b), *하수슬러지 처리 및 자원화 방안*, pp. 73.
7. 환경부 (2007), *하수슬러지관리 종합대책*, pp. 1.
8. 환경부 (2008), *하수슬러지관리 종합대책(수정)*, pp. 4.

(접수일: 2009. 9. 3 심사일: 2009. 9. 17 심사완료일: 2009. 10. 26)