

Study on Manufacturing Characteristics of Carbonated lightweight Aggregate using Sewage Sludge

하수슬러지를 이용한 탄화경량골재의 제조 특성 연구

Yeong-Seok Yoo*

유영석*

한국건설기술연구원

Abstract : In this study, the carbonized aggregate of light weight and high mechanical strength using sewage sludge was evaluated with changing carbonation variables of temperature, detention time and feed condition. Porosity and mechanical strength was simultaneously increased according to increase of carbonization temperature unexpectedly. Carbonization detention time above 1 hour nearly affect on the porosity, but mainly on mechanical strength of the carbonized aggregate in case of clay addition. On 900 °C, porosity and mechanical strength was increased rapidly, but above 1000 °C, porosity began to decrease. Clay addition was very effective on increase of mechanical strength following much loss in porosity. The carbonized aggregate manufactured at 900 °C adding 30 % clay in sewage sludge was higher a little in porosity and 3 times in mechanical strength than those at 700 °C not adding clay. Consequently, in manufacturing the carbonized aggregate having simultaneously high porosity and mechanical strength, it is desirable to have operational condition of 900 ~ 1000 °C temperature and 1 hour time, and clay addition within 30 % for further higher mechanical strength.

Key words : Sewage sludge, Carbonized lightweight aggregate, Carbonization, Light weight aggregate

주제어 : 하수슬러지, 탄화경량골재, 탄화, 경량골재

1. 서론

우리나라의 하수슬러지 발생량은 하수보급을의 확대에 따라 꾸준히 증가되어 현재 460여개 하수처리장에서 1일 약 1만톤 정도가 배출되는 것으로 나타났다. 정부에서는 2007년도에 직매립을 금지시킨 바 있으며, 2012년부터 런던협약에 따라 해양투기가 금지됨에 따라 육상처리 기반을 마련하고 70 % 이상을 재활용할 계획이다. 2013년 현재 전국 98개 지자체에서 고화, 건조연료화,

소각, 부숙화, 탄화공정을 적용한 114개 하수슬러지 처리시설이 운영되고 있으며, 고화 및 부숙화를 제외하면 하수슬러지로부터 에너지를 회수하는 기술이다(Min. of Environ, 2013). 그러나 에너지 회수 기술은 연소 과정에서 대기 오염물질을 배출하고, 최종적으로 소각재를 발생시키므로 환경친화적인 처리방식이라고 할 수 없다. 한편, 우리나라의 하수슬러지는 일부의 신도시 지역을 제외하고 대부분 합류식 하수관거 보급지역으로 하는 하수 발생특성으로 인하여 하수내로 토사의 유입이 많아 하수슬러지 내에 무기물 함량이 높은 것이 특징이다. 이에 따라 하수슬러지는 70 ~ 80 %에 이르는 수분함량과 함께 높은 무기물 함량으

* Received 28 October 2013, revised 03 December 2013, accepted 05 December 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-31-910-0298 Fax : +82-31-910-0291 E-mail : ysyoo@kict.re.kr

로 인하여 낮은 저위발열량을 갖고 있으며, 에너지 회수효율이 떨어지게 된다.

탄화는 유기물을 무산소 상태에서 높은 온도에서 열분해시킴으로써 H₂, CO, CH₄ 등 가연성 합성가스를 발생시키고, 고정탄소를 남기게 되며 발생가스를 자체에너지원으로 활용할 수 있는 친환경 기술이다(White et al, 2011)(Wei et al, 2012)(Cao et al, 2006). 이러한 탄화기술을 이용하여 하수슬러지로부터 합성가스 및 고정탄소를 회수하는 에너지 활용에 대한 연구 및 국내 설치사례가 있다(Rhee, 2012)(Rhee, 2010). 또한 하수슬러지의 탄화물은 다공성 및 흡착성으로 토양개량제로 사용할 수도 있으며, 활성화 과정을 통하여 활성탄으로 제조하여 보다 고급용도의 수처리 여재로 활용할 수도 있다(Liu, 2010)(Li, 2011)(Wen, 2011)(Smith, 2009). 그러나 하수슬러지 활성탄은 제조비용이 많이 들지만 기존 활성탄에 비하여 성능이 떨어지기 때문에 저급용도로 밖에 사용할 수 없어 대량 사용처의 발굴이 중요하다.

경량골재는 자연적으로 생산되지 않기 때문에 질석, 퍼얼라이트, 팽창점토 및 혈암 등을 열가공하여 얻어지는 고가의 제품이며, 단열재, 흡음재, 경량콘크리트 등 다양한 용도로 활용할 수 있다. 이와 같이 경량골재는 열을 가해서 생산되는 인공 제품이기 때문에 하수슬러지, 정수슬러지, 소각재, 석탄회, 폐유리, 폐플라스틱 등 폐자원의 처리와 동시에 제품을 제조코자 하는 많은 연구들이 수행되었다(Kang, 2012)(Lee, 2012)(Kim, 2000)(Wei, 2011)(Hwang, 2012). 이러한 연구들은 고온에서 유기물 열분해 과정을 통하여 발생하는 가스를 발포제로 활용하고, 무기물질을 경량골재의 구조체로 활용하는 기술들이다. 그러나 하수슬러지를 활용한 경량골재 제조는 가스화 발포에 요구되는 유기물의 양보다 하수 슬러지 내에

유기물 함량이 높으므로 다량의 무기질 구조보조제를 필요로 한다(Tuan, 2013)(Xu, 2013).

본 연구에서는 하수슬러지를 이용하여 가벼우면서 높은 기계적 강도를 갖는 탄화 경량골재 제조의 최적조건을 도출하고자, 무산소 조건에서 탄화온도 및 탄화시간의 제조조건과 그리고 점토첨가의 원료조건을 변화시켜 탄화경량골재를 제조하고, 그 특성을 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료

재료는 경기도 I시의 하수 처리장에서 수집된 하수슬러지와 일라이트성 점토를 구입하여 사용하였다. 하수슬러지의 성상은 폐기물 공정시험법에 의하여 삼성분과 Bomb calorimeter에 의하여 발열량을 분석을 하였으며, 함수율 77 %, 유기물 함량 50 %, 발열량 2,492 kcal/kg으로 함수율 및 무기물함량이 높고 발열량이 낮은 것이 특징이다. 한편, 무기성분은 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer, ZSX100e Rigaku)로 분석하였으며, Table 1과 같이 실리카(SiO₂)성분이 약 31 %로 높고, 알루미늄(Al₂O₃), 석회(CaO), 인산(P₂O₅)의 성분도 10 % 이상 함유하고 있었다. 그밖에 K, Mg, Na, Ca, Ti 등의 산화물이 검출되었다. 하수 슬러지의 광물상은 XRD(X-ray Diffraction Analysis, PANalytical X'Pert PRO)로 분석하였으며, Fig.1과 같이Quartz(α -SiO₂)가 주성분이며, 그 외 Kaolin, Albite 등이 혼재되어 있었다.

본 실험에서 사용된 점토는 XRF 분석결과 Table 2와 같이 SiO₂가 62 % 이상으로 대부분을 차지하고 있고, Al₂O₃가 27 %정도이며, 나머지 미량 원소로 구성되어 있었다. Fig. 1의 XRD에 의한 광물상 분석에서 주성분은 Quartz, Mul-

Table 1. Constituents of sewage sludge(wt %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cl
31.19	17.10	7.23	12.0	1.75	2.60	0.64	1.75	14.14	0.81	0.25

Table 2. Constituents of clay(wt %)

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	V ₂ O ₅	others
0.154	1.03	26.7	62.2	2.66	0.162	1.11	5.51	0.126	0.348

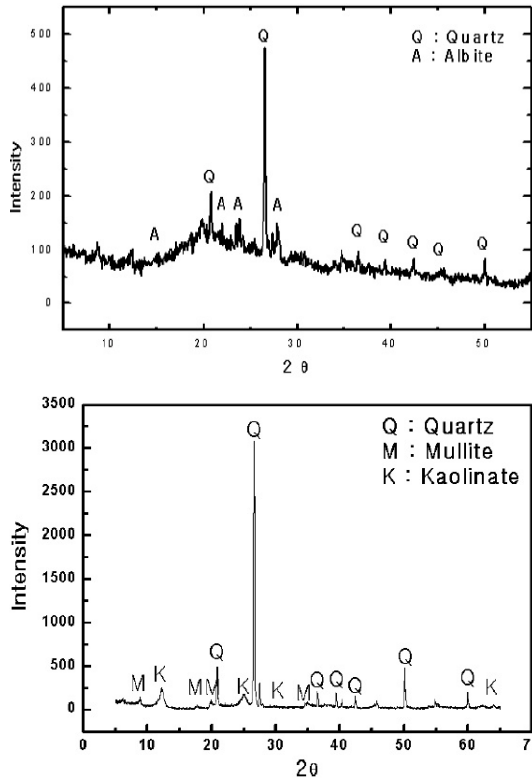


Fig. 1. XRD Graph of sewage sludge(left) and clay(right)

lite, Kaolinite 로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 입도 분석(Particle Size Analysis, Malvern Instruments Ltd, Mastersizer 2000) 결과 평균 200 μm 의 미세 입자로 구성되어 있으며, 열 분석(TG-DTA, STA409PC, Germany) 결과 500 ~ 600 °C에서 유기물의 열분해에 의한 중량감소가 이루어지며, 1000 °C 내외에서 용융점이 형성됨을 알 수 있었다.

2.2 탄화경량골재의 제조방법

탄화경량골재는 Fig. 2과 같이 혼합 및 사출, 성형, 건조, 소성, 냉각/건조의 단계를 거쳐 제조되었다. 혼합은 하수슬러지 단독 혹은 점토와 하수슬러지의 완전혼합을 유도하면서 사출기의

적정함수율 60 % 맞출 수 있도록 하였으며, 하수슬러지 건조는 자체 제작된 건조기에서 80 °C에서 건조하였다. 성형은 시간당 50 kg을 처리할 수 있고, 스크류 압출방식에 의하여 일정한 강도를 낼 수 있는 제환기를 구입하여 Ø10 mm 크기의 성형체를 제조하도록 하였다. 습윤 성형체의 건조는 그 과정 중에 균열을 방지하기 위하여 자연 건조방식을 채택하였으며, 함수율 10 %이내가 되도록 하였다. 탄화 열처리는 질소를 일정량 주입하여 무산소 분위기를 조성하고, 10 °C/분의 속도로 승온토록 하고 프로그래머블 콘트롤러에 의하여 설정온도에서 설정유지시간 동안 탄화 소성로에서 소성되도록 하였다. 소성된 탄화경량골재는 소성조건 후에 로 내에서 꺼내어 공기 중에서 냉각되도록 하였다.

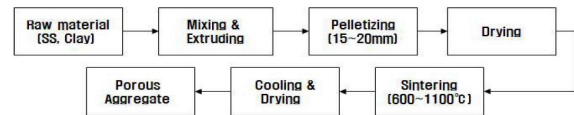


Fig. 2. Manufacturing process of carbonized lightweight aggregate

2.3 실험 및 분석방법

2.3.1 실험방법

실험은 100 % 하수슬러지만을 사용한 원료와 하수슬러지/점토의 일정한 비율을 원료를 사용하여 탄화온도 500 ~ 1100 °C 및 탄화시간 0.5 ~ 3시간의 소성조건을 변화시켜 탄화경량골재를 제조하고, 다공성 및 강도와 관련한 다양한 인자들에 대하여 분석하였다.

2.3.2 분석방법

비표면적은 105 °C 건조기에서 건조시킨 시편의 무게를 측정한 후 200 °C의 질소 분위기에서 완전히 탈기한 후 분석온도 77 K에서 질

소를 사용하여 비표면적을 측정하였으며, 측정 시 BET(Brunauer, Emmertt and Teller)식을 이용하였다. 기계적 강도는 UTM을 이용하여 KS F 2346에 따라 측정하였으며, 이 시험방법은 실제 흡의 대한 강도 실험으로써 공극 사이를 이동하는 물의 이동을 허용하지 않는 상태에서 압력을 가해 공시체가 파괴될 때의 주응력 차를 측정하여야 하지만 실제 실험에서 제조한 골재는 기공을 가지고 있기 때문에 골재의 형태가 깨어질 때의 압축강도를 측정하였다. 입자의 밀도는 기포가 발생하지 않을 때까지 가열하여 파라핀을 함침시킨 후 수중 무게로 측정하였으며, 산정식으로부터 기공률 및 개기공률을 산정하였다. 겉보기 밀도 및 흡수율은 KS F 2503에 따라 측정하였다. 기공분포는 Hg porosimeter (pore-sizer 9320, Micromeritics)를 이용하여 압력은 0.75 psi부터 30,000 psi까지 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탄화경량골재의 제조특성

본 절에서는 100 % 하수슬러지 원료만을 사용하여 제조된 탄화경량골재의 제조특성에 대하여 논하고자 하였다. Fig. 3은 탄화온도에 따른 기공률(porosity)과 개기공률(open porosity)을 나타내고 있다. 기공률은 다공질 물질 전체부피에서 공극이 차지하는 비율이며, 개기공률은 외부로 연결되어 외부 유체의 흐름이 가능한 부피의 비율이다. 탄화 시간은 1시간으로 일정하게 하고 탄화온도를 변화시켜 기공률을 구하였다. 기공률은 탄화온도의 증가에 따라 급격하게 증가하며, 900 °C ~ 1050 °C 탄화온도에서 정점을 이루고 1050 °C에서 감소하는 것으로 나타났다. 500 °C 탄화온도에 비하여 900 °C 탄화온도에서 기공률이 약 4 배정도 커지고, 1050 °C 탄화온도에서의 기공률은 600 °C 탄화온도에서 기공률과 유사한 수준으로 급격히 떨어졌다. 이와 같은 현상은 탄화온도의 지배를 받는 유기물의 열

분해가 일정온도까지 활발히 일어나다가 일정온도 이상에서 무기물의 소결온도인 1000 °C 이상에서 무기물의 용융 및 소결현상에 의한 조직의 치밀화 영향에 의한 것으로 판단된다. 이에 따라 탄화에 의한 경량화는 탄화온도에 따라 증가하는 기공률의 최대치 범위인 900 °C ~ 1050 °C에서 적정온도를 찾아야 하며, 1050 °C 이상에서 운전하지 않는 것이 바람직하다고 판단된다.

개기공률은 탄화온도에 따른 기공률의 변화추세와 유사한 패턴을 나타내었고, 1050 °C 탄화온도에서 보다 급하게 감소되었다. 그러나 기공률의 개기공 비율인 개기공률/기공률의 비율은 온도의 증가에 따라 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 온도증가에 따라 기공률이 많아지지만 이에 상응하여 열분해 가스량도 많아지고 기공의 깊이도 깊어지기 때문에 가스의 응축액 및 불순물에 의하여 미세 기공들이 부분적인 폐쇄되는 영향으로 판단된다.

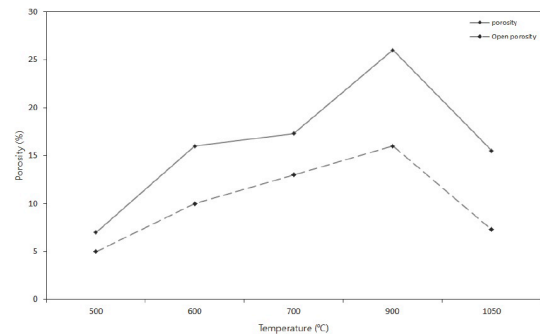


Fig. 3. Porosity according to temperature

Fig. 4는 탄화온도에 따른 기공분포를 나타내고 있는데 탄화온도 변화 영역에 걸쳐서 기공의 대부분이 30 ~ 100 Å의 중간세공(Mesopore) 크기로 구성되어 있었다. 탄화온도의 증가에 따라 미세기공의 양이 증가하지만 보다 큰 기공의 양도 증가하여 분포하는 것으로 나타났으며, 평균세공의 크기는 탄화온도가 변화될 지라도 약 39 Å 내외로 거의 일정하였다. 이것은 탄화온도의 증가에 따라 재료의 내부로 세공이 더욱 발달하게 되어 기공률은 크게 되지만 세공크기는

별 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 3에서 기공률이 탄화온도 1050 °C에서 급격히 떨어진 것과 달리 900 °C와 1000 °C에서 기공의 부피 및 양이 지속적으로 증가하는 것으로 보아 다공성 관점에서 탄화의 최적온도는 900 ~ 1000 °C인 것으로 판단된다. 또한 900 °C 탄화온도까지 온도증가에 따라 기공율이 증가하는 것은 완전 건조된 성형체를 소성하므로 성형모양이 변하지 않은 상태에서 휘발성 물질들이 지속적으로 고정탄화로 전환되는 과정에 기인한다고 판단된다(Kwon, 2012). 1050 °C 탄화온도에서 급격히 다공성이 떨어지는 것은 고정탄소의 부분적인 결정화에 따른 조직의 치밀화에 의한 것으로 판단된다(Lee, 2013)

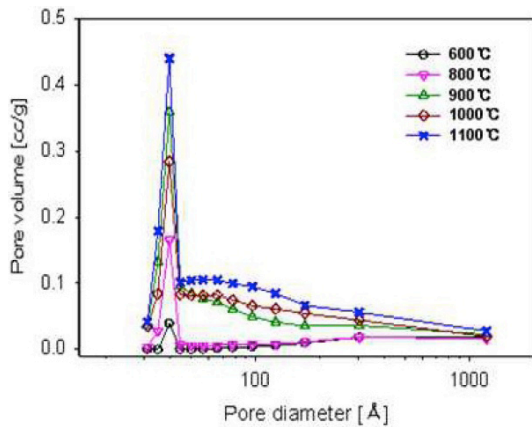


Fig. 4. Pore distribution according to temperature

한편 탄화 경량골재의 물리적 특성을 살펴보면 Table 3과 같이 겉보기 밀도가 1.0 내외로 경량성을 갖으며, 21 ~ 30 %의 흡수율을 갖는 것으로 나타났다. 여기서 흡수율은 기공율의 변화 패턴과 같이 탄화온도 변화에 따라 그 편차가 크게 나타났으나, 겉보기 밀도는 600 ~ 800 °C에서 비슷한 수치를 나타내었다. 이것은 겉보기 밀도의 주요 측정요소인 입자와 입자사이의 공극률의 비중이 크기 때문이다. 한편, 소성온도가 1,000 °C 이상에서는 용융현상에 의하여 밀도가 증가하고, 흡수율은 급격히 떨어지는 것으로 나타났다.

Table 3. Density and water absorption according to temperature

Temp.	Density (cm ³ /g)	Water absorption (%)
600 °C	0.91	21.92
800 °C	0.92	29.04
900 °C	0.91	30.45
1,000 °C	0.92	30.59
1,100 °C	1.08	24.73

탄화시간의 영향을 알아보기 위하여 탄화 시간을 0.5 시간, 1 시간, 2시간, 3시간으로 하고, 탄화온도를 500 ~ 900 °C까지 변화시켜 탄화경량골재를 제조하여 그 비표면적 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 탄화온도의 증가에 따라 비표면적이 확연하게 증가되고 있으나, 같은 탄화 온도대에서 탄화시간에 따른 변화폭이 미미한 한 것으로 나타났다. 이것은 탄화온도에 따라 열분해가스량이 일정하며, 일정시간 후에 열분해가 더 이상 일어나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 다공성 측면에서 탄화온도가 중요한 인자이며, 탄화시간은 30분 이상이면 충분하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 탄화경량골재는 경량성과 기계적 강도를 동시에 갖추어야 하기 때문에 강도에 미치는 다른 인자들도 고려하여야 한다.

탄화온도에 따른 기계적 강도는 Fig. 6와 같이 탄화경량골재의 압축강도를 측정하여 나타내었다. 탄화온도의 증가에 따라 강도가 증가하고, 탄화온도 1000 °C에서의 압축강도는 탄화온도 600 °C의 강도에 비하여 2배 상승하고, 900 ~ 1000 °C에서 압축강도가 낮은 탄화온도에서 변화에 비하여 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 100 % 하수슬러지만으로 경량성과 강도를 동시에 갖는 탄화경량골재를 제조코자 한다면 탄화온도 900 ~ 1000 °C에서 소성해야 할 것이다. 한편, 이러한 탄화온도범위에서 압축강도는 1.5 kg/cm² 이하로 낮고, 탄화온도 900 °C 이상에서 급격한 강도증가가 무기물의 소결에 기인한 것이므로 고강도의 경량골재로 활용코자 할 경우 구조보강재로 무기질을 첨가하여 소성하는 것이 바람직하다고 판단된다.

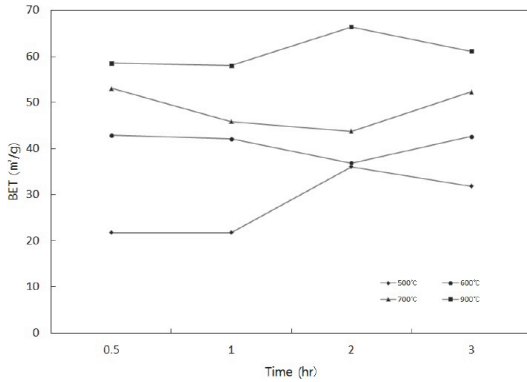


Fig. 5. BET according to carbonization time

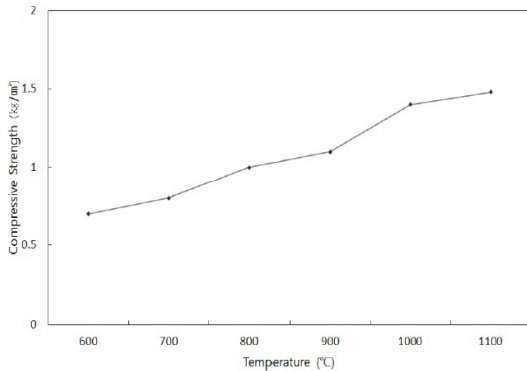


Fig. 6. Compressive strength according to temperature

3.2 점토 첨가의 영향

구조보강재로 점토를 첨가하여 강도를 갖춘 경량 탄화골재를 제조에 따른 적정 첨가량 및 탄화조건을 알아보기 위하여 점토 첨가량 0 ~ 100 % 범위에서 변화시키고, 탄화온도 및 탄화시간을 각각 500 ~ 900 °C 및 1 ~ 3시간으로 하여 탄화경량골재를 제조하여 다공성과 기계적 강도를 분석하고자 하였다. Fig. 7은 점토량 및 탄화온도에 따른 비표면적의 변화인데, 점토첨가량의 증가에 따라 급격하게 비표면적 값이 떨어지는 것을 알 수 있다. 특히 높은 탄화온도 영역에서 점토첨가량 증가에 따른 하강기울기가 낮은 탄화 온도대에 비하여 훨씬 가파른 것으로 나타났다. 이것은 높은 탄화온도에서 비표면적 값이 높지만 점토량이 많아질수록 높은 온도에서 점토의 소결에 의한 다공성 감소와 낮은 다공성

물질인 점토에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 점토를 30 % 첨가하여 900 °C에서 소성한 탄화경량골재가 700 °C 이하에서 100 % 하수슬러지만을 사용한 소성한 탄화경량골재 보다 다공성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 강도향상을 위하여 점토를 첨가할 지라도 900 °C의 높은 탄화온도에서 소성하는 것이 다공성과 강도측면에서 바람직하다는 것을 암시하고 있다.

Fig. 8에서 압축강도는 예상대로 점토첨가량의 증가 및 탄화온도에 증가에 따라 증가하며, 특히 탄화온도 900 °C에서 압축강도는 점토첨가량이 많아질수록 그 보다 낮은 탄화 온도대에 비하여 증폭이 커지는 것으로 나타났다. 또한 탄화시간에 의한 압축강도의 영향은 탄화시간이 길어질수록 압축강도가 증가하고 있으며, 탄화시간 900 °C 및 탄화시간 1시간의 압축강도와 탄화온도 700 °C 및 탄화시간 3시간의 압축강도와 비슷하게 나타났다. 다공성과 압축강도를 고려

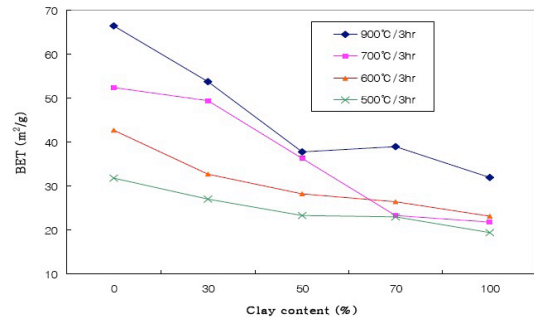


Fig. 7. BET according to clay addition

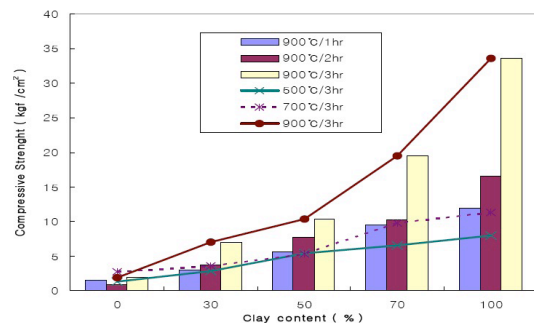


Fig. 8. Compressive strength according to clay addition

하면 탄화온도는 900 °C, 탄화시간은 1시간으로 소성하고, 보다 높은 강도가 요구된다면 같은 소성조건에서 30 % 이내의 점토를 첨가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결론

하수슬러지를 이용하여 가벼우면서 높은 강도를 갖는 탄화 경량골재의 최적조건을 얻고자 다양한 원료 및 탄화조건을 변화시켜 탄화경량골재를 제조하고, 그 특성을 분석하여 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 탄화온도를 상승시키면 1000 °C 탄화온도까지 BET, 기공률, 개기공률 등 다공성 지표들이 증가하며, 600 °C/1시간에서 20 % 내외의 흡수율이 최대 30 % 내외에 이르게 된다. 한편, 다공성 측면에서 탄화온도가 탄화의 주요인자이며, 탄화시간은 30 분이상이면 충분한 것으로 나타났다.
- 2) 기계적 강도는 탄화온도의 상승에 따라 증가하며, 특히 900 °C이후에 급격히 증가하나 1000 °C 이상에서 증가폭이 감소되는 것으로 나타났으며, 압축강도가 600 °C/1시간의 0.7 kg/cm²에 900 °C/1시간의 1.5 kg/cm²로 2배 이상 상승하였다.
- 3) 하수슬러지를 이용하여 탄화경량골재를 제조할 경우 우수한 다공성과 기계적 강도를 동시에 갖게 하기 위해서는 900 ~ 1000 °C의 탄화온도와 1시간의 탄화시간이 적절한 것으로 판단된다.
- 4) 점토를 첨가하면 다공성과 기계적 강도는 상반되게 크게 감소하고, 증가하는 것으로 나타났다. 탄화온도 증가에 따른 기계적 강도 증가폭보다 점토 첨가에 의한 증가폭이 훨씬 크기 때문에 일정 기계적 강도수준 이상의 탄화경량골재를 제조코자 한다면 점토첨가가 바람직하다고 판단된다.
- 5) 30 % 점토를 첨가하여 900 °C/1시간 탄화조건에서 제조된 탄화골재가 100 % 하

수슬러지만으로 700 °C/1시간 소성조건에서 제조된 탄화경량골재에 비하여 다공성도 다 우수하고, 기계적 강도는 3배 이상 높은 것으로 나타났다.

- 6) 종합적으로 다공성과 기계적 강도가 우수한 탄화경량골재를 제조하기 위해서는 900 ~ 1000 °C의 탄화온도 및 1시간의 탄화시간이 적정하며, 보다 높은 기계적 강도가 요구된다면 30 % 이내의 점토를 첨가하고 탄화시간을 증가시키는 것이 바람직하다. 추후 연속공정 구성, 펠렛타이징 방법, 승온 및 냉각온도 및 속도, 첨가재의 종류 등 현장적 연구와 더불어 흑연 결정화 및 고정탄화화 정도에 따른 다공성 및 강도에 대한 특성연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2013-0325)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Kwon S.M., Kwon G. J., Jang J. H., Kim N. H. (2012) Characteristics of charcoal in different carbonization temperatures, *Journal of Forest Science*, 28(4), pp. 263-267

Cao Y., Wang Y., Riley J.T., Pan W.P. (2006) A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas, *Fuel Processing Technology*, 87(4), pp. 343-353

Hwang C.L., Le Bui A.T., Lin K.L., Lo C.T. (2012) Manufacture and performance of light-weight aggregate from municipal solid waste incinerator fly ash and reservoir sediment for self-consolidating light-weight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 34(10), pp. 1159-1166

Kang M.A., Kang S.G., Lee G.G., Kim Y.T. (2012) Fabrication of Artificial Light-weight Aggregates of Uniform Bloating Proper-

- ties Using a Temperature-raising Sintering Method, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 49(2), pp. 161~166
- Kim D.S., Park J.H., Park B.B., Rho J.S. (2000) Sintering Properties of Artificial Lightweight Aggregate(ALA) made with Coal Fly Ash and Waste Glass Wool, *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, 17(3), pp. 252~260
- Li W.H., Yue Q.Y., Gao B.Y., Wang X.J., Qi Y.F., Zhao Y.Q., Li Y.J. (2011), Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment *Desalination*, 278(1), pp. 179-185
- Liu C., Tang Z., Chen Y., Su S., Jiang W. (2010) Characterization of mesoporous activated carbons prepared by pyrolysis of sewage sludge with pyrolusite Original Research Article, *Bioresource Technology*, 101(3), pp. 1097-1101
- Lee K.G. (2012) Bloating mechanism of artificial lightweight aggregate with reject ash, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 22(3)
- Min. of Environ. (2013), 2012 Status Report generation and treatment of sewage sludge
- Rhee S.W. (2012) A Study on the Reaction Kinetics of Sewage Sludge in Carbonization Process, *Korea Society of Waste Management*, 29(1), pp. 86~92
- Rhee S.W., Park H.S. (2010) An Effect of Sewage Sludge Content on Energy Characteristics of Carbonization Residue of Waste Biomass, *Korea Society of Waste Management*, 27(7), pp. 617~624
- Smith K.M., Fowler G.D., Pullket S., Graham N.J.D. (2009) Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications, *Water Research*, 43(10), pp. 2569-2594
- Tuan B.L., Hwang C.L., Lin K.L., Chen Y.Y., Young M.P. (2013) Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 334-339
- Wei X., Qiang Lu, Sui X., Wang Z., Zhang Y. (2012) Characterization of the water-insoluble pyrolytic cellulose from cellulose pyrolysis oil, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, pp. 49-54
- Wei Y.L., Lin C.Y., Ko K.W., Wang H. P. (2011) Preparation of low water-sorption lightweight aggregates from harbor sediment added with waste glass, *Marine Pollution Bulletin*, 63(5-12), 2011, pp. 135-140
- Wen Q., Li C., Cai Z., Zhang W., Gao H., Chen L., Zeng G., Shu X., Zhao Y. (2011) Study on activated carbon derived from sewage sludge for adsorption of gaseous formaldehyde, *Bioresource Technology*, 102(2), pp. 942-947
- White E. White, Catallo W.J., Legendre B.L. (2011) Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(1), pp. 1-33
- Xu G., Liu M., Li G. (2013) Stabilization of heavy metals in lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment, *Journal of Hazardous Materials*, 260, pp. 74-81
- Yi E., Lee C., Kim Y., Rhyim Y. (2013) Pore structure and characteristics of hollow spherical carbon foam according to carbonization temperature and re-immersion treatment, *Kor. J. Mater. Res.*, 23(1), pp. 24-30