

A study on the characteristics of ecological lightweight aggregates containing reject ash from the power plant

Yootaek Kim[†] and Yugwang Ryu

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received June 22, 2010)

(Revised July 27, 2010)

(Accepted July 30, 2010)

Abstract To effectively utilize resources of reject ash and dredged soil, globular shape-formed artificial lightweight aggregate were manufactured in 8~10 mm size. Starting materials were changed various grading and composition, sintered at 1050~1250°C. The specific gravity, water absorbance of artificial lightweight aggregates were measured on the basis of the KS. In this study could make a prediction about application of bloating mechanism by ferrous materials and alkali/alkali-earth oxide at high temperature.

Key words Ecological lightweight aggregates, Reject ash, Power plant, Dredged soil, Bloating, Ferrous materials

화력발전소 잔사회 입도에 따른 에코인공골재의 특성에 관한 연구

김유탉[†], 류유광

경기대학교 재료공학과, 수원, 443-760

(2010년 6월 22일 접수)

(2010년 7월 27일 심사완료)

(2010년 7월 30일 게재확정)

요 약 잔사회와 준설토를 효과적으로 자원화하기 위하여 8~10 mm 크기의 구형 인공 골재를 성형하였다. 출발원료는 입도 및 조성을 변화시켰으며 1050~1250°C 범위에서 소결하였다. 제조된 골재는 KS에 의거하여 골재의 밀도와 흡수율 시험을 진행하였다. 잔사회와 준설토는 고온에서 철 함유 물질과 알칼리/알칼리토 산화물에 의한 발포 기구가 적용됨을 예측할 수 있었다.

1. 서 론

국내 화력발전소에서 석탄을 이용한 전력 생산 후 발생되는 석탄재의 발생량은 2007년 한 해에 600만 톤이었으며, 그중 400만 톤은 재활용되었다. 2010년에는 석탄사용량이 늘어나 년 간 700만 톤 이상의 석탄재가 발생할 것으로 예상된다. 2007년에는 200만여 톤이 매립됐으나, 2010년에는 발생량이 100만여 톤 이상 증가하기 때문에 250만여 톤 가량이 매립될 것으로 추정된다. 특히 최근 건설되고 있는 민간 기업들의 열병합발전소마다 비용이 저렴한 석탄을 연료로 사용할 계획이어서 앞으로 석탄재 발생량은 더욱 늘어날 것으로 보인다. 반해,

시멘트나 레미콘 원료로 사용되는 석탄재의 재활용은 한계가 있기 때문에 특별한 대책이 마련되지 않는 한 발전사들의 매립 양과 비용은 더욱 늘어날 수밖에 없다. 구미와 일본의 경우 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 효과적으로 처리하기 위해 친환경적으로 처리하여 안정한 인공 경량 골재를 생산하는 연구가 진행되고 있으며, 이러한 연구결과가 경제적인 경쟁을 갖추게 되면 폐기물을 합리적으로 처분함과 동시에 유용한 자원으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 점토 또는 점토를 주성분으로 하는 재질의 원료를 기본 원료로 하여 성형된 골재를 소성할 때 골재의 중앙 부분에 검은색을 띠는 블랙코어(black core)는 골재 내에 함유된 탄소의 불완전한 산화에 의한 것이라 알려져 왔다[1]. 이 블랙코어는 재료 내에 포함된 미연탄소 및 유기물질 등이 산소와의 불완전한 연소로 골재내부에서 불완전한 산화가 일어나 형성되며, 이것이 골재 외곽부터 진행된 산소와의 반응이 이루어진

[†]Corresponding author
Tel: +82-31-249-9774
Fax: +82-31-244-6300
E-mail: ytkim@kgu.ac.kr

부분과 구분되어 블랙코어의 경계가 생기게 된다[1-3]. 인공경량골재는 이러한 블랙코어 현상을 이용하여 골재 내부의 다기공화를 유도하고, 골재 내부에 생성된 기포가 외부로 방출되지 못하고 내부에 갇혀 발포되게 하는 골재 표면의 유리화를 진행시키는 것이 골재의 경량화를 이루는 주요한 요소이다[4].

본 연구에서는 화력발전 후 대부분 폐기되는 폐석탄회 중 잔사회(Reject Ash)와 회 처리장에 적치된 준설토(Dredged Soil)의 물리 화학적 특성을 분석하여 골재 생산 시 점토 대체로의 가능성을 고찰하였다. 또한 잔사회와 준설토의 입도에 따라 골재를 성형함으로써 소성 후 원료의 입도에 따른 인공경량골재의 물성 변화를 평가하였다.

2. 실험방법

본 실험은 국내 화력발전소에서 발생하는 잔사회와 회 처리장에 적치된 준설토를 원료로 사용하였다. 잔사회의 경우 체가름 하지 않은 상태의 원료와 140 mesh 이하로 체가름 한 원료 2가지를 사용하였고, 준설토는 핀밀(pin mill)을 이용하여 분쇄한 후 체가름 하지 않은 원료와 140 mesh 이하와 200 mesh 이하로 체가름 한 원료를 이용하여 지름 8~10 mm 크기의 구형 골재를 조립기를 이용해 성형하였다. 성형된 골재는 열풍건조기에서 $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 조건에서 24시간 건조 하였다. 본 실험에 사용된 원료의 종류 및 입도에 따른 시편 준비사항을 Table 1에 나타내었다. 또한 Table 1의 시편 준비 사항을 기본으로 하여 잔사회와 준설토의 배합비를 변화하였다. 각 골재의 소성은 $1100\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 에서 직접 시편을 전기로

내에 투입하여 10분 동안 소성과정을 거친 후 공기 중에서 냉각하였다. 각 원료의 화학조성 분석과 열적특성을 분석하기 위하여 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)와 TG/DTA(STA 409 C/CD, Netzsch Co., Germany)를 이용하였다. 광학현미경을 이용하여 골재의 표면 및 형태를 관찰하였으며 SEM(JSM-6500F, JEOL)을 이용하여 골재 표면과 내부의 미세구조를 분석하였다. 또한 소성된 인공경량골재는 KS F 2503(굵은 골재의 비중 및 흡수율 시험방법)에 따라 부피비중 및 흡수율을 측정하였다. 측정 개수는 조건별로 7개의 시편을 이용하여 평균을 내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료 특성

본 연구에 사용된 석탄회의 잔사회와 준설토에 대한 화학 성분은 Table 2에 나타내었다. 잔사회는 국내 유연탄 화력발전소에서 배출되는 비산회를 정제 후 발생한 잔류물을 사용하였고, 준설토는 발전소 회 처리장에 적치되었던 것으로 가소성이 일반 적점토 보다 우수하였다. 잔사회는 주성분이 SiO_2 와 Al_2O_3 로 각각 66.06 wt%와 21.05 wt%가 존재하고, Fe_2O_3 는 3.28 wt% 존재하며, 준설토는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 각각 70.07, 14.38, 3.82 wt%로 나타났다. 이는 일반적으로 인공경량골재에 사용되는 바닥재(Bottom Ash)의 SiO_2 와 Al_2O_3 의 양이 45.54, 18.59 wt%인 것을 감안하면 비교적 높은 SiO_2 와 Al_2O_3 를 함유하고 있음을 알 수 있다. 바닥재의 경우 미연탄 소량이 18 wt% 정도로 높는데 비해 잔사회와 준설토는

Table 1
Conditions of the starting materials

Series	Condition
A	Reject Ash (Raw) + pin mill Dredged Soil
B	Reject Ash (Raw) + under 140 mesh pin mill Dredged Soil
C	Reject Ash (Raw) + under 200 mesh pin mill Dredged Soil
D	Reject Ash (under 140 mesh under) + pin mill Dredged Soil
E	Reject Ash (under 140 mesh) + under 140 mesh pin mill Dredged Soil
F	Reject Ash (under 140 mesh) + under 200 mesh pin mill Dredged Soil

Table 2
XRF data of chemical compositions of raw materials (wt%)

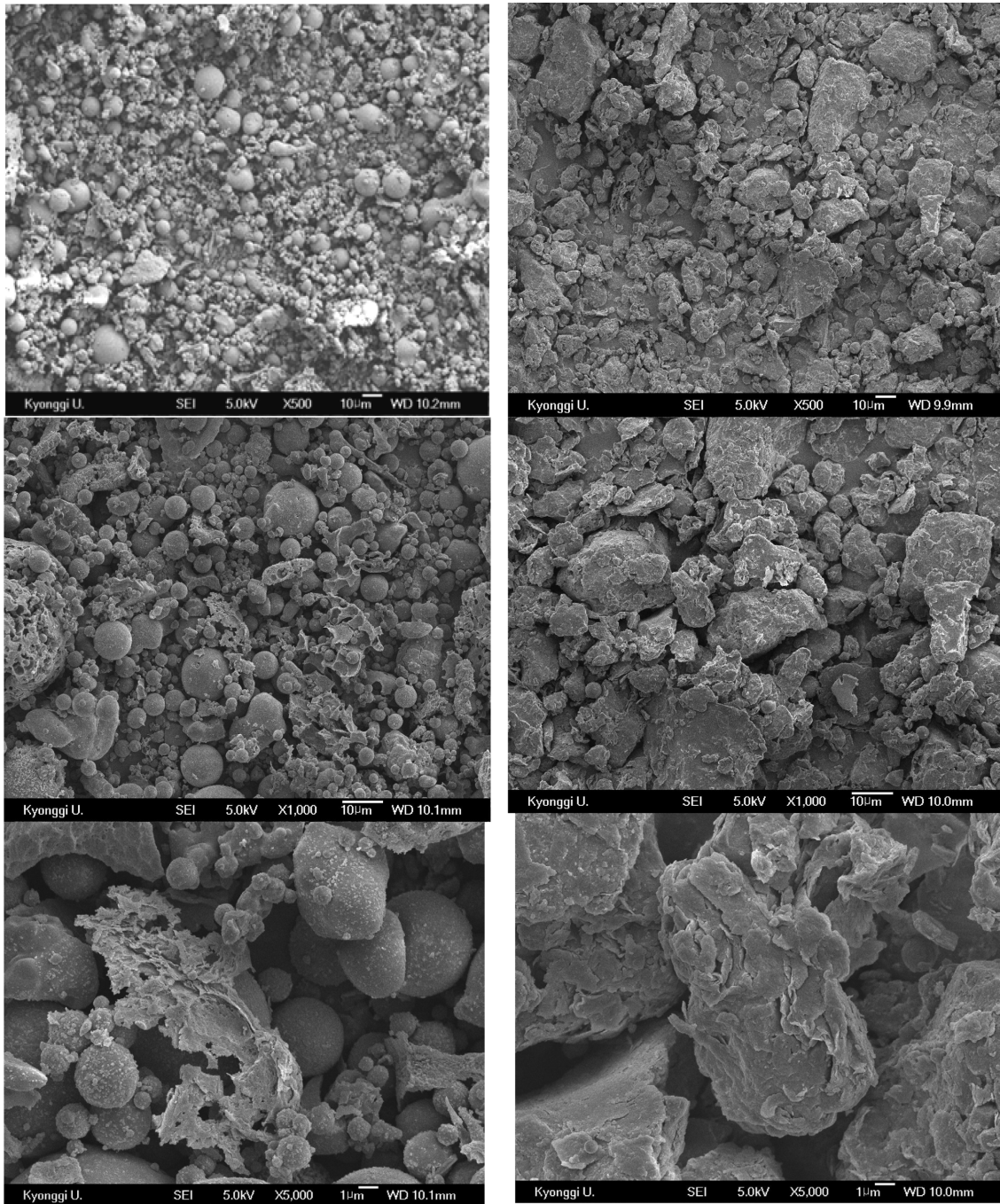
	Ig loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	ZrO_2	P_2O_5	C
RA	5.31	66.06	21.05	3.28	1.24	0.56	0.32	0.57	1.12	0.05	0.43	
DS	4.08	70.07	14.38	3.82	0.79	0.18	2.51	2.70	0.80	-	0.03	
BA	4.07	45.54	18.59	8.07	2.17	0.78	0.18	0.51	1.33	0.33	0.24	18.06

RA: Reject Ash; DS: Dredged Soil; BA: Bottom Ash

미연탄소는 거의 존재하고 있지 않다. 또한 Fe_2O_3 함유량도 잔사회와 준설토 함량보다 2배 이상 높다. 따라서 준설토와 잔사회는 바닥재보다 발포가 어려울 것이라 판단되며, 또한 잔사회와 준설토는 바닥재와는 달리 미연탄소에 의한 블랙코어 형성과 발포 효과는 기대하기 어렵다.

Fig. 1은 화력발전소에서 배출되는 비산회 중 플라이 애쉬(Fly Ash)와 석탄회를 정제 후 발생된 잔사회에 대

한 주사전자현미경 사진을 나타내었다. 콘크리트 혼화제로 사용되는 플라이 애쉬는 입도가 $1\mu m$ 이하로 매우 작고 비교적 균질한 반면 잔사회는 플라이 애쉬에 비하여 입도가 거칠고 분포 또한 불균일하다. 따라서 콘크리트 혼화제로는 사용이 어렵고 별도의 처리를 거쳐 2차 제품으로 사용되어야 함을 알 수 있다. Fig. 2는 준설토의 열적특성을 분석한 결과이다. 준설토는 $100\sim 150^\circ C$ 와 $500\sim 550^\circ C$ 부근에서 급격한 무게감소를 보이며, $1200^\circ C$



(a)

(b)

Fig. 1. SEM images of (a) Reject Ash and (b) Dredged soil.

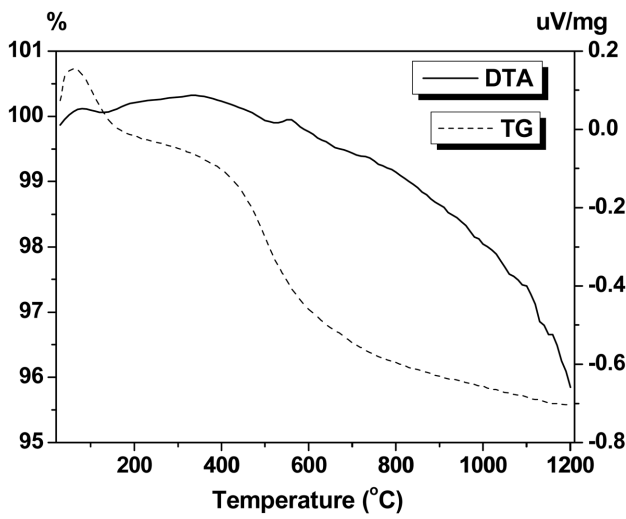


Fig. 2. TG/DTA data of Dredged soil.

까지 약 4%의 무게감량을 나타내고 있다. 또한 200°C 부근과 550°C 부근에서 DTA 곡선의 변곡점이 보이는데 이는 결정수와 흡착수의 이탈과 준설토 내부에 존재하는 휘발성 유기물의 분해에 기인한 것으로 판단된다.

3.2. 인공경량 골재의 소성특성

입도분리를 하지 않은 잔사회와 준설토의 조성 비율과 온도에 따른 골재의 변화를 관찰하기 위하여 소성 골재를 다이아몬드 컷터로 절단한 후 캠스코프(camscope)로 접사관찰 하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 골재 단면을 비교 관찰해보면 대부분의 골재 내부에 블랙코어(black core)가 관찰된다. 온도가 올라 갈수록 블랙코어 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나면서 골재 내부의 기공 크

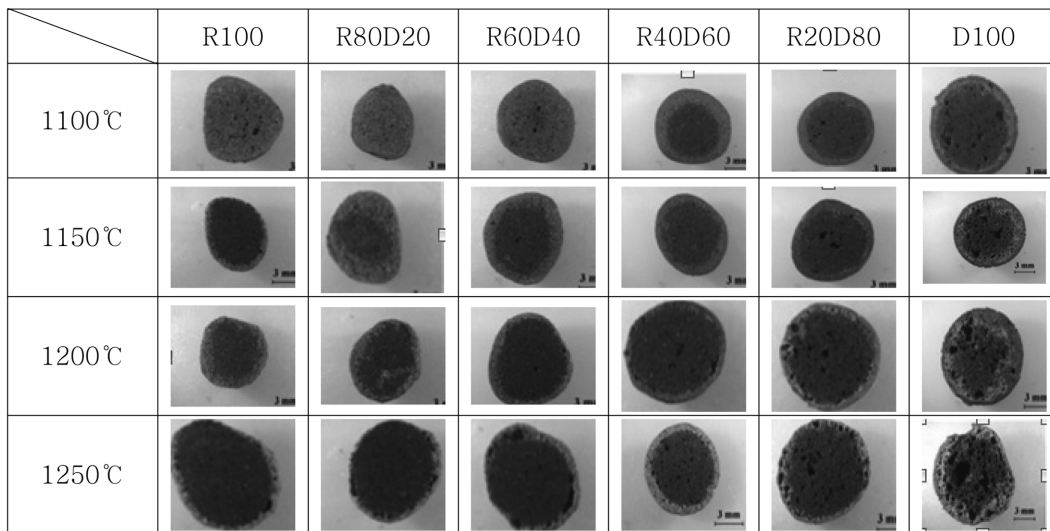


Fig. 3. Properties of cross-sectional view by composition and sintering temperature.

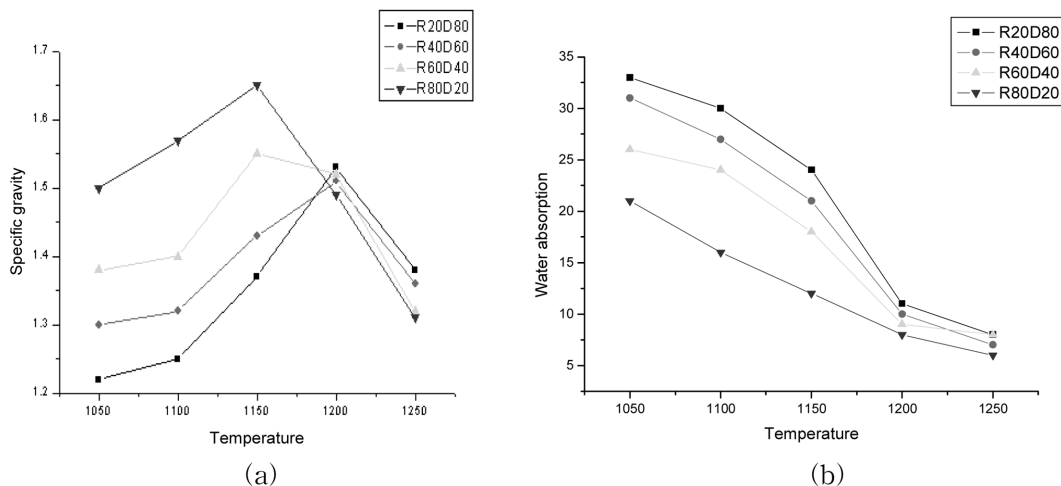


Fig. 4. Comparison by sintering temperature (a) specific gravity and (b) water absorbance.

기가 커지는 경향을 보이는데, 이는 비교적 저온인 1100°C 이하의 온도에서는 결정수와 흡착수의 이탈과 휘발성 유기물의 분해, 그리고 미연탄소에 의한 블랙코어 형성과 발포기구가 작용되지만, 1150°C 이상으로 온도가 상승함에 따라 골재내의 Fe_2O_3 가 Fe_3O_4 로 환원되며 O_2 가스가 생성되는 발포기구가 같이 작용하여, 작은 기공들이 합쳐지고 또한 발포가스의 팽창에 기인한 것으로 사료된다. 1200°C에서는 골재의 조성에 따라 다소간의 차이는 있지만 전반적으로 본격적인 골재 팽창이 시작된 것을 관찰할 수 있다. 준설토의 양이 증가함에 따라 블랙코어 형성이 증가하며 발포 또한 용이하게 진행되어짐을 알 수 있다. 이는 준설토에 함유된 알칼리/알칼리토 산화물인 Na_2O , K_2O 의 함량이 잔사회 보다 높아 발포에 영향을 준 것으로 판단된다. Fig. 4는 잔사회와 준설토의 배합비 변화에 따른 비중과 흡수율 변화를 나타낸 것이다. 1150°C까지는 각각의 열처리 온도에서 준설토의 함량이 많으면 비중은 낮아지고 흡수율은 높아지는 경향을 보인다. 이는 골재 단면 관찰에서 알 수 있듯이 준설토 함량이 높으면 블랙코어 면적비의 증가로 인해 골재 내부의 기공이 증가하여 인공경량 골재의 비중이 감소하고, 흡수율은 증가되어지는 것으로 사료된다. 1200°C 이상으로 소성온도가 증가되면 잔사회 함량이 높은 샘플은 비중이 낮아지는 경향이 보이는데, 이는 골재 외벽의 유리질 형성이 촉진되어 골재 내부에 잔류된 기포들이 외부로 빠져나가지 못하고 남아 비중을 낮추는 것으로 사료된다. 일반적으로 블랙코어 부분은 다공질로 이루어져 있어 블랙코어 면적비가 작을수록 골재의 강도 증진에도 영향을 미칠 것으로 사료되어진다. 따라서 강도를 요구하는 구조 분야에는 블랙코어 형성이 적게 되고 비중이 증가하며 흡수율이 감소하게 되는 잔사회 함량이 높은 골재 조성으로 1150°C 부근의 소성온도를 선택하는 것이 타당하며, 반대로 경량화가 요구되는 비구조용 분야에는 준설토 함량이 낮은 조성으로 1200°C 부근의 소성온도를 선택하는 것이 좋다고 판단된다. 소성온도가 1250°C 부근에서는 과도한 내부 발포로 인하여 골재의 형태가 유지되기 어려워지는 것으로 생각된다.

3.3. 입도에 따른 인공경량골재의 소성 특성

입도에 따른 인공경량골재의 물성 변화를 알아보기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 다양한 조건으로 원료를 준비한 후, 잔사회와 준설토 비율을 변화하여 골재를 성형하고 성형된 각 조건의 골재들을 각각 1050°C, 1100°C 및 1150°C로 소성하였다. 소성된 시편의 비중과 흡수율을 Fig. 5~7에 각각 나타내었다. 준설토 함량이 30 wt% 이하인 경우 모든 소성온도에서 입도분리하지 않은 잔사회를 첨가한 골재가 대체적으로 비중이 높고

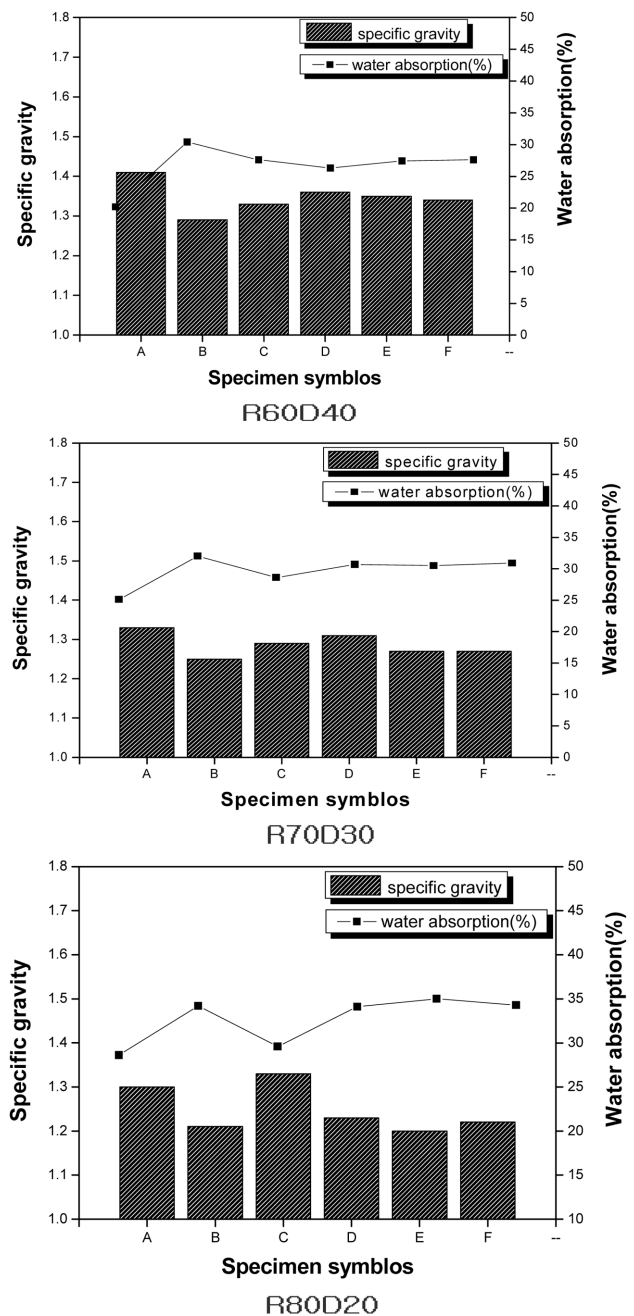


Fig. 5. Comparison of specific gravity and water absorptance by conditions of starting material, sintered sample at 1050°C.

흡수율은 낮은 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 1의 SEM 관찰에서 알 수 있듯이 잔사회는 거친 입자와 고운 입자의 조합으로 이루어져 있어 입도 분리하지 않은 상태의 준설토가 입도 분리한 상태 보다 잔사회와의 접촉 기회를 더 많이 제공받아 비중이 증가하고 흡수율이 낮은 것으로 판단된다. 입도 분리하지 않은 상태의 잔사회에 입도 분리한 준설토의 입도 분리에 따른 효과는 140 mesh로 입도 분리한 준설토를 첨가하는 것이 200 mesh로 분리한 준설토를 첨가하는 것 보다 비중을 낮추는데 더 효과

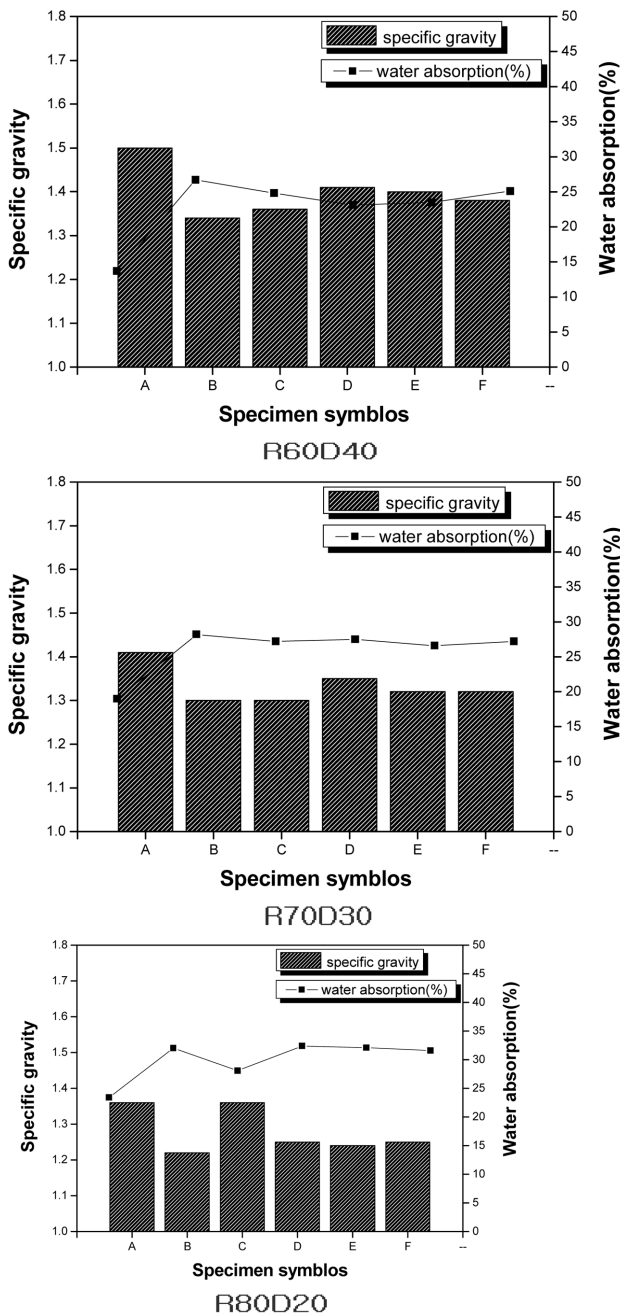


Fig. 6. Comparison of specific gravity and water absorbance by conditions of starting material, sintered sample at 1100°C.

적임을 알 수 있다. 따라서 에코인공경량골재 제조 시 입도 분리하지 않은 잔사회에 140 mesh로 입도 분리한 상태의 준설토를 적용하는 것이 골재의 비중을 낮추는데 유용하게 적용될 수 있다. 준설토 함량이 40 wt%인 경우 입도 분리 되지 않은 잔사회에 입도 분리된 준설토를 적용하는 것이 골재의 비중을 낮추는데 유용하게 적용되어지나, 140 mesh로 입도 분리된 잔사회에 준설토를 첨가하는 경우는 준설토의 입도 분리 효과가 크지 않음을 관찰할 수 있다.

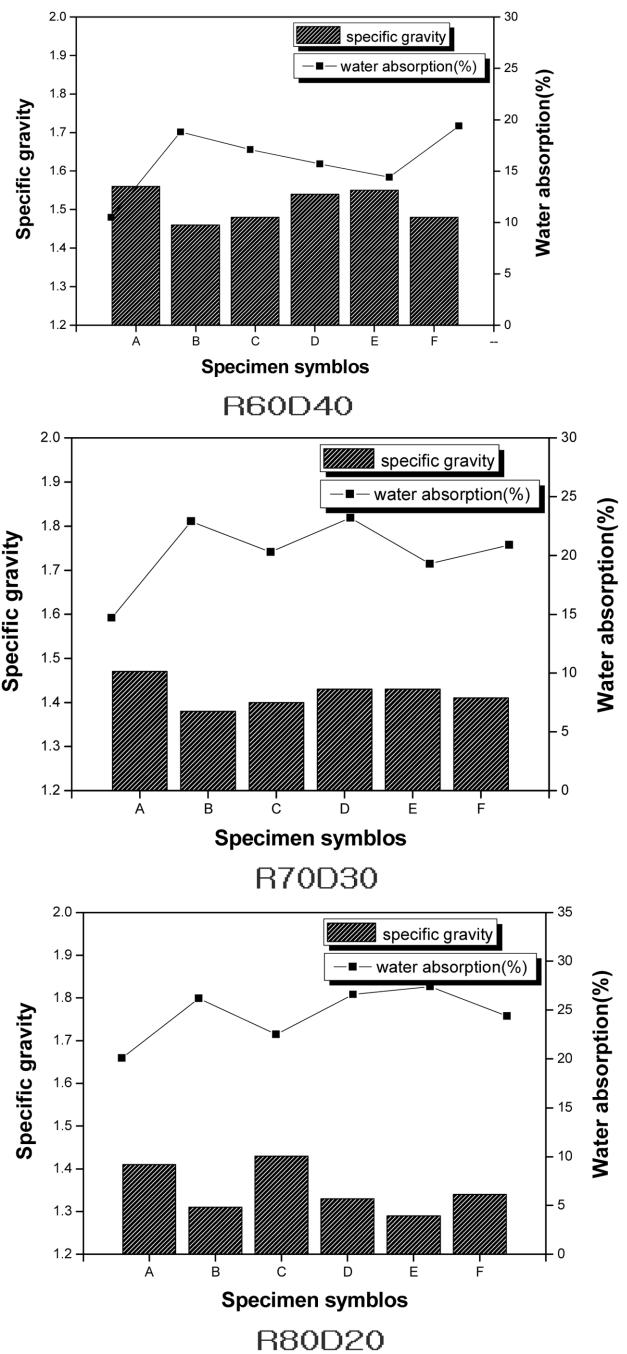


Fig. 7. Comparison of specific gravity and water absorbance by conditions of starting material, sintered sample at 1150°C.

4. 결 론

본 연구는 화력발전 후 대부분 폐기되는 폐석탄회 중 잔사회와 매립된 석탄회 준설시 발생하는 준설토의 물리 화학적 특성을 분석하고, 잔사회와 준설토의 입도에 따라 골재를 성형함으로써 소성 후 원료의 입도에 따른 인공경량골재의 물성 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 잔사회와 준설토는 인공경량골재에 주로 사용되는 바닥재 보다 높은 SiO_2 와 Al_2O_3 를 함유하고 있으며, 특히 바닥재의 경우 미연탄소량이 18% 정도로 높는데 비해 잔사회와 준설토는 미연탄소는 거의 존재하고 있지 않고 Fe_2O_3 함유량도 2배 이상 낮아, 바닥재보다 미연탄소에 의한 블랙코어 형성과 발포 효과 보다 비교적 고온에서 진행되는 철 함유 물질과 알칼리/알칼리토 산화물에 의한 발포 기구가 적용됨을 예측할 수 있다.

2) 1150°C 까지는 준설토의 함량이 많으면 비중은 낮아지고 흡수율은 높아지는 경향을 보인다. 이는 준설토의 함량이 높으면 블랙코어 면적비의 증가로 인해 골재 내부의 기공이 증가하여 인공경량 골재의 비중이 감소하고, 흡수율은 증가되어지는 것으로 사료된다. 1200°C 이상으로 소성온도가 증가되면 잔사회 함량이 높은 샘플은 비중이 낮아지는 경향을 보이는데, 이는 골재 외벽의 유리질 형성이 촉진되어 골재 내부에 잔류된 기포들이 외부로 빠져나가지 못하고 남아 비중을 낮추는 것으로 사료된다.

3) 준설토의 비중이 30 wt% 이하인 경우 모든 소성온도에서 입도 분리하지 않은 잔사회를 첨가한 골재가 대체적으로 비중이 높고 흡수율은 낮아지며, 준설토 함량이 40 wt%인 경우 입도 분리 되지 않은 잔사회에 입도 분리된 준설토를 적용하는 것이 골재의 비중을 낮추는데 유용하게 적용되어지나, 140 mesh로 입도 분리된 잔사회에 준설토를 첨가하는 경우는 준설토의 입도 분리 효과가 크지 않음을 관찰할 수 있다.

4) 이러한 결과를 바탕으로 준설토와 바닥재를 이용한 인공경량골재 제조는 입도 분리하지 않은 잔사회와 140 mesh로 입도 분리한 준설토와 혼합하여 사용하는 것이 낮은 비중을 갖는 인공경량골재를 만드는 것이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 경기대학교 학술연구비(일반연구 과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] A. Escardino, A. Barba, A. Blasco and F. Negre, "Oxidation of black core during firing of ceramic ware; 4 Relationship between effective diffusivity of oxygen through oxidised layer and properties characterising its porous structure", J. Br. Ceram. Trans. 94(3) (1995) 103.
- [2] Jon Pacini, "Bloating and black firing", Laguna Clay Co, Jan. (1999) 3.
- [3] F. Negre, A. Barba, J.L. Amoros and A. Escardino, "Oxidation of black coring during the firing of ceramic ware; 2. process kinetics", Br. Ceram. Trans. J. 91 (1992) 5.
- [4] A. Barba, F. Negre, M.J. Orts and A. Escardino, "Oxidation of black coring during the firing of ceramic ware; 3 influence of the thickness of the piece and the composition of black core", Br. Ceram. Trans. J. 91 (1992) 36.
- [5] Y.T. Kim, Y.W. Ryu and C.S. Jang, "A study on the black core formation of artificial lightweight aggregates at various sintering atmospheres", J. Kor. Crystal Technology 19 (2009) 318.
- [6] S. Bethanis, C.R. Cheeseman and C.J. Sollar, "Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash", Ceramics International 28 (2002) 881.
- [7] Y.L. Wei and Y.Y. Lin, "Role of Fe compounds in light aggregate formation from a reservoir sediment", Hazardous Materials. 171 (2009) 111.