

## Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and its application to the lightweight-concretes

Kangduk Kim and Seunggu Kang<sup>†</sup>

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

(Received September 26, 2008)

(Accepted October 6, 2008)

**Abstract** The artificial lightweight aggregate (ALA) was manufactured in a rotary kiln at 1125 °C using green body formed by pelletizing the batch powder composing of coal bottom ash (CBA) produced from power plant, clay and dredged soil (DS). The TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) results showed that the dissolution concentration of heavy metal ions of ALA fabricated in this study was below the limitation defined by the enforcement regulations of wastes management law in Korea. The ALA containing 60~70 wt% CBA had a bulk density of 1.45~1.49 and a water absorption of 17.2~18.5 %. The impact values for oven-dry state and saturated-surface dry state of ALA were  $27.4 \pm 1.3$  and  $23.4 \pm 2.6$  % respectively. The 28-days compressive strength of concrete made with various ALA was 22.7~27.8 N/mm<sup>2</sup>. The slump of concrete with ALA containing CBA 60 and 70 wt% were 7.9 and 14.3 cm respectively. The unit weight of concrete made with any ALA fabricated in this study was satisfied with the standard specifications of lightweight concrete for the civil engineering and construction presented by Korea as below 1.84 ton/m<sup>3</sup>.

**Key words** Artificial lightweight aggregates, Coal bottom ash, Dredged soil, Lightweight concrete, Impact value

## 석탄 바닥재를 이용한 인공경량골재의 제조 및 경량 콘크리트에 적용

김강덕, 강승구<sup>†</sup>

경기대학교 재료공학과, 수원, 443-760

(2008년 9월 26일 접수)

(2008년 10월 6일 심사완료)

**요 약** 화력발전소에서 발생하는 석탄 바닥재(Coal bottom ash)를 준설토(Dredged soil) 및 적점토(Clay)와 혼합하여 조립기(Pelletizer)로 성형 후, 이를 로타리 킬른에서 1125°C에서 소성하여 인공경량골재를 제조했다. 제조된 인공경량골재에 대한 중금속 용출 실험(TCLP) 결과, 폐기물 관리법 시행규칙의 중금속 검출량 기준치 이하로 나타났다. 바닥재가 60~70 wt% 첨가된 인공경량골재는 부피비중 1.45~1.49, 흡수율 17.2~18.5%의 값을 나타냈으며, 골재충격시험결과 건조 상태와 표건 상태의 충격값이 각각  $27.4 \pm 1.3$  및  $23.4 \pm 2.6$  %를 나타내었다. 인공경량골재를 이용하여 제조된 콘크리트 공시체의 28일 압축강도는 첨가된 골재종류에 따라 22.7~27.8 N/mm<sup>2</sup>이었다. 바닥재가 60 및 70% 첨가된 골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프 값은 각각 7.9와 14.3 cm를 나타내었고, 단위용적질량은 골재조성에 상관없이 1.84 ton/m<sup>3</sup> 이하를 나타내어 토목 건축공사 표준시방서에 제시된 경량콘크리트 특성을 만족하였다.

### 1. 서 론

석탄을 이용한 전력생산 후 발생하는 석탄재의 발생량은 전국적으로 연간 수 백만톤에 이르고 있으며, 그중에서 바닥재는 약 20%를 차지하고 있다. 또한 2004년도 기준으로 전국에서 발생하는 준설토의 양은 약 6천만 m<sup>3</sup>을 초과하는 것으로 나타났다[1, 2].

바닥재의 경우 물성이 열악하여 단순한 잔골재 대체제나, 시멘트에 첨가하는 수준의 연구가 진행되거나, 미분화 처리공정을 통해 경량기포콘크리트의 원료로 활용하는 연구가 수행중이다[3-5]. 준설토는 해양투기 시 준설토에 포함된 오염물질 및 중금속들이 주변 환경에 따라 다시 활발한 반응성을 나타내는 위험성을 가지고 있으나, 현재 뚜렷한 처리 방법이 없이 주로 안벽이나 호안의 뒷채움재로 재활용하기 위한 경량혼합토로의 적용 연구가 진행중이다[6-8].

본 연구에서는 화력발전소에서 발생하는 석탄 바닥재, 준설토 작업 시 발생된 준설토 그리고 적점토를 혼합하여

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

인공경량골재를 제조하고 그 물성을 평가하였다. 인공경량골재를 이용한 경량 콘크리트 공시체를 제조하여 압축강도 및 단위용적질량, 슬럼프값 등을 측정하여 구조용 경량 콘크리트 판넬과 같은 고부가가치 콘크리트 제품의 적용가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 석탄 바닥재와 준설토는 ‘I’시 화력발전소에서 발생한 폐부산물을 사용하였으며 적점토는 일반 점토벽돌 제조에 쓰이는 원료를 사용하였다.

각 원료는 입도를 균일하게 제어하기 위해 Pin mill을 이용하여 100 μm 이하로 분쇄하여 사용하였다. 분쇄된 원료를 무게비율로 3종류 조성의 배치를 준비하였다 (Table 1). 각 배치 분말을 건식 혼합 후, 조립기를 이용하여 지름 6~8 mm의 구형 골재를 제조하였다. 제조된 성형체를 열풍건조기에서 110°C/48 hr 조건으로 건조 후, Rotary kiln에서 1125°C의 온도로 15분 소성하였다. 인

Table 1  
Composition of artificial lightweight aggregates (wt%)

Specimen I.D.	Component		
	B/A	Clay	D/S
DS15	70	15	15
DS20	60	20	20
DS30	70	-	30

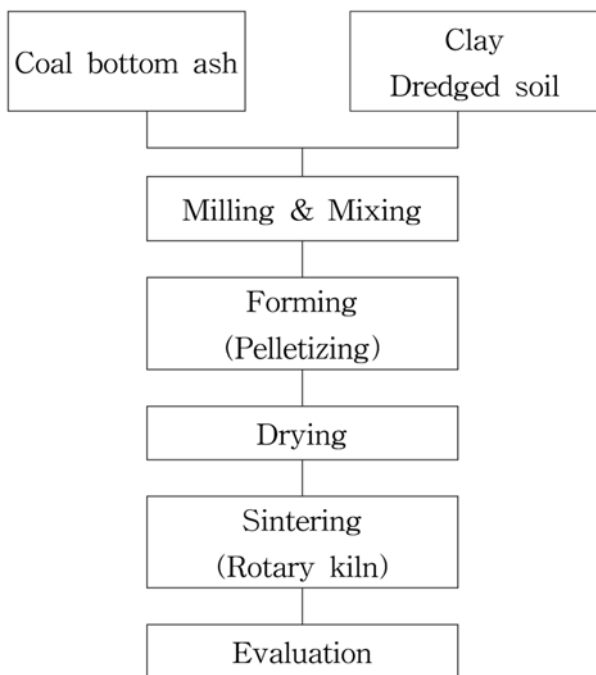


Fig. 1. Flow chart of manufacturing procedure for artificial lightweight aggregates.

공경량골재 원료 배합비와 실험공정 flow chart를 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

각 원료의 화학조성은 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 원료의 결정상 분석과 열적특성 분석은 XRD(RINT-8100H/PC, Rigaku, Japan)와 TG/DTA(STA 409 C/CD, Netzsch Co., Germany)를 각각 사용하였다. 준설토내의 중금속 양이온과 음이온 측정을 위하여 ICP(OPTIMA 4300DV, Perkin-Elme, USA)와 IC(Advanced Metrom, Switzerland)분석을 수행하였다. 또한 제조된 인공경량골재의 유해물질 용출량을 분석하기 위하여 TCLP시험을 수행하였다. 인공경량골재의 비중/흡수율 측정은 KS F 2503의 실험방법을 사용하였다. 골재 충격시험은 KS F 2581의 방법을 사용하였으며, 골재 충격값은 규격에 의하여 충격에 의한 골재의 세립분양을 전체 시료의 백분율로 규정하고, 기건 상태와 표건 상태에서의 충격 저항성의 두 종류로 구분하여 다음과 같이 규정하였다.

$$\text{기건 상태 시료의 충격값, } I_d = \frac{D_2}{D_1} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

여기서  $D_1$  = 건조 상태 시료의 초기질량(g),  $D_2$  = 충격실험 후 2.5 mm 체를 통과하는 시료의 질량(g)이다.

$$\text{표건 상태 시료의 충격값, } I_s = \frac{15m}{n} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

여기서  $m$  = 충격 파쇄율(%),  $n$  = 시료에 가해진 충격 횟수이며, 충격 파쇄율( $m$ )은 다음 식으로 계산된다.

$$\text{충격 파쇄율, } m(\%) = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (3)$$

여기서  $S_1$  = 표건 상태에서 충격 실험 후 측정된 시료의 건조 질량(g),  $S_2$  = 표건 상태에서 충격 실험 후 2.5 mm 체를 통과하는 시료의 건조 질량(g)이다.

소성체 절단면의 미세구조는 광학현미경(DCS-105, Sometech Vision, Korea)을 사용하여 관찰하였다. 바닥재를 이용하여 제조된 인공경량골재의 콘크리트용 골재로서의 타당성을 평가하기 위하여 콘크리트 공시체를 제조하고, 공시체의 슬럼프, 기건 비중, 압축강도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

각 원료의 화학조성분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 준설토의 경우  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 각각 70.7 및 14.4 wt% 존재한다. 또한 알칼리 산화물( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )과 알칼리토류 산화물( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ )이 점토에 비해 약 1.5배 많이 존

Table 2  
Chemical composition of raw materials (wt%)

	lg. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	C
B/A	4.07	45.58	18.60	8.08	2.17	0.78	0.18	0.51	1.33	0.33	0.24	0.01	0.05	18.06
Clay	11.03	57.86	19.08	7.07	0.20	1.04	0.09	2.54	0.92	-	0.17	-	0.22	-
D/S	4.08	70.71	14.38	3.82	0.79	0.18	2.51	2.70	0.80	-	0.03	-	-	-

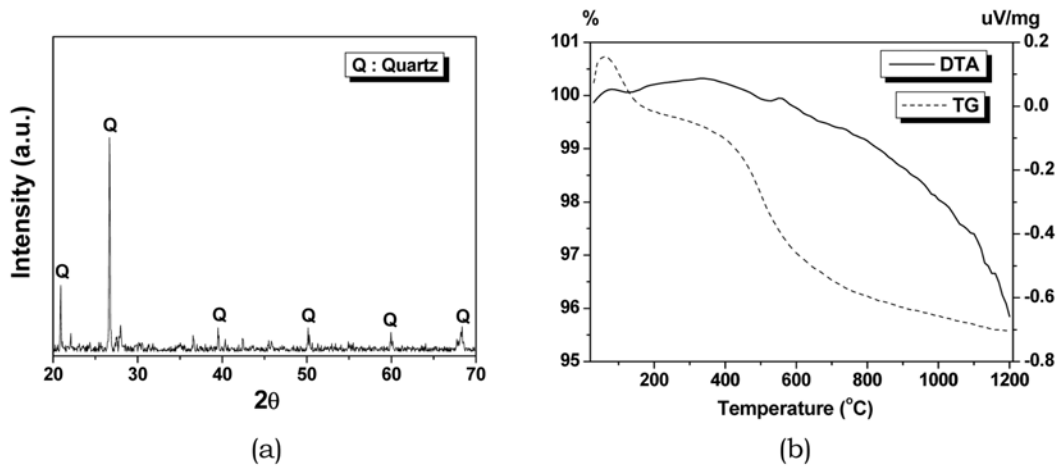


Fig. 2. XRD pattern (a) and TG/DTA curve (b) of dredged soil.

Table 3  
ICP and IC analysis of dredged soil (mg/L)

	Cd	Mn	Cr	Pb	As	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>
D/S	<0.005	0.54	0.009	0.256	0.090	971.90	50.10	<0.5

재하는 것을 확인할 수 있다. 준설토는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분이 낮고 1, 2족 산화물 성분을 많이 포함하고 있어 점토만 이용하여 제조된 골재보다 낮은 온도에서 소결이 가능할 것으로 예상된다.

준설토의 결정상과 열적특성을 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. XRD 분석결과, 준설토는 Quartz(SiO<sub>2</sub>)를 주 결정상으로 갖고 있다. TG/DTA 분석결과, 400°C~800°C 사이에서 약 3%의 무게감량을 나타내며, 550°C 부근에서 약한 발열피크를 갖는다. 이는 준설토 내부에 존재하는 휘발성 유기물의 분해로 인한 무게감량과 발열피크 때문으로 판단된다. 바닥재와 적점토에 대한 상세한 분석은 Kim 등의 논문에 나와 있다[9].

준설토에 대한 ICP 및 IC 분석을 행하고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 준설토의 경우 ICP 분석결과 Cd, Mn, Cr, Pb, As의 모든 중금속이 1 ppm이하로 검출되어 점토 대체원료로 재활용하기에 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 IC 분석결과 준설토의 Cl<sup>-</sup> 성분이 587 ppm으로 높게 검출되었다. 준설토의 높은 Cl<sup>-</sup> 함량은 준설토의 매립위치가 발전소내부의 바닷가 옆에 위치하고 있어 장시간 바닷물에 노출된 영향에 기인한 것으로

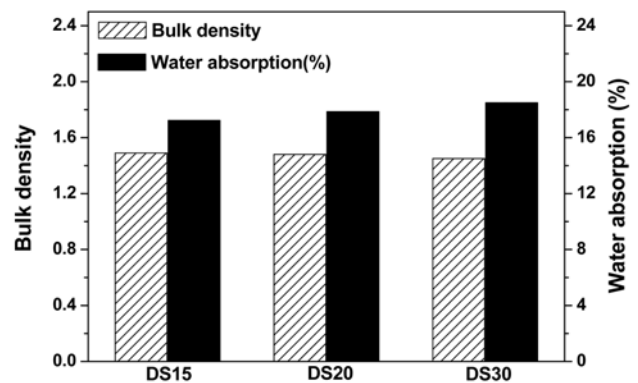


Fig. 3. Bulk density and water absorption of artificial lightweight aggregates sintered at 1125°C for 15 min in rotary kiln.

판단된다.

Fig. 3는 로타리 킬른에서 1125°C에서 15분간 소성된 인공경량골재의 비중 및 흡수율을 나타낸 그래프이다. 소성된 골재는 조성에 상관없이 1.45~1.49의 낮은 비중을 나타내었으며 흡수율은 17.2~18.5%를 나타내었다. 바닥재에 30 wt%의 준설토가 첨가된 DS30 인공경량골재의 경우, 적점토와 준설토가 각각 15 wt% 첨가된 DS15 인공경량골재보다 비중은 0.04 낮고, 흡수율은 1.3% 증가하였다. 이는 준설토가 적점토에 비해 용제성분으로 작용하는 알칼리 및 알칼리토류 산화물들이 더 많이 포함하고 있어 소성 시 골재 표면에 액상을 많이 생성하기 때문이다. 즉 시편 표면에 생성된 점성거동의 액상은 골

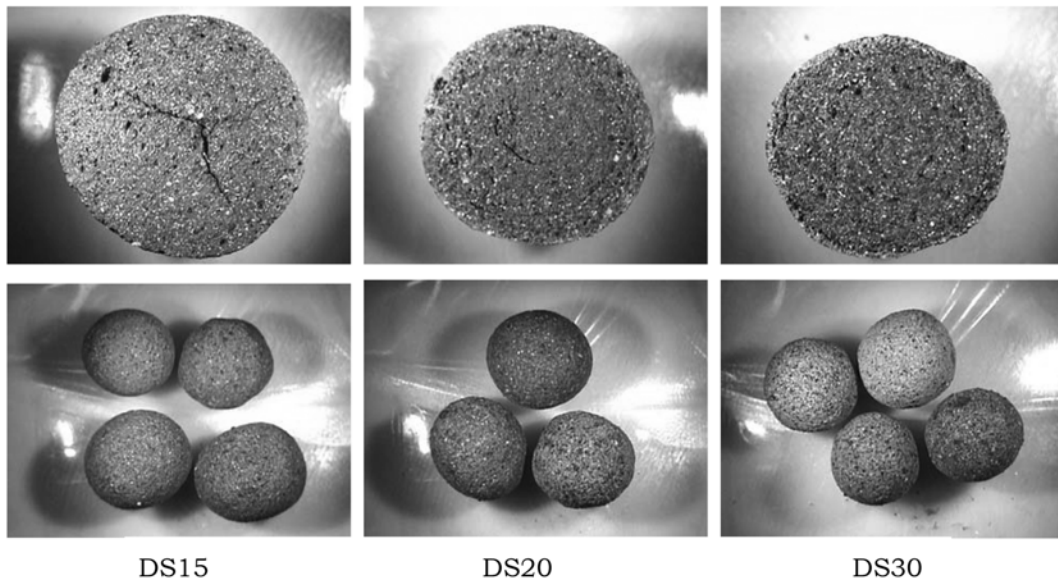


Fig. 4. Optical microscopy photographs of artificial lightweight aggregates sintered at 1125°C for 15 min in rotary kiln.

재내부에서 발생하는 가스가 외부로 방출되는 것을 차단 함으로써 시편의 미세구조를 다공성으로 만든다.

배합비 변화에 따른 골재 소성체의 절단면을 광학현미경으로 관찰하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 골재 내부에 미세한 크기의 기공이 균일하게 형성되었으며 외부에 얇은 shell이 관찰되었다. 골재 내부와 외부에서 관찰되는 검은 점들은 바닥재의 미연탄소 성분들이 소성시간 동안 완전히 연소되지 못하고 남아있는 것이다. 본 실험에 사용한 바닥재의 경우 C의 함량이 약 18% 이므로 향후 충분한 하소 및 소성시간 제어를 통해 C를 충분히 연소시킴으로써 미연탄소를 제거할 필요가 있다고 사료된다.

TCLP법을 이용하여 인공경량골재에 대한 중금속 용출 실험을 행한 결과(Table 4)를 보면, 폐기물 관리법 시행규칙 기준으로 Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, As 의 6가지 중금속이 전혀 검출되지 않았으며, 따라서 바닥재를 이용한 인공경량골재의 사용이 환경적으로 안전한 것으로 판단

된다.

인공경량골재의 충격시험결과를 Table 5에 나타내었다. 바닥재가 첨가된 인공경량골재는 기건 상태 충격값이 26.2~28.7%를 나타냈으며, 표건 상태 충격값의 경우 충격횟수 10회일 경우 24.3~26.0%을 나타내었다. 이러한 값들은 일반 쇄석 골재의 기건 상태 충격값 14.8%보다 1.8배 높고, 표건 상태 충격값 14.7%보다 1.6배 높은

Table 4  
TCLP\* test of artificial lightweight aggregates (ppm)

	Pb	Cd	Cr	Cu	Hg	As
Limit**	3.0	0.3	1.5	3.0	0.005	1.5
DS15	-	-	-	-	-	-
DS20	-	-	-	-	-	-
DS30	-	-	-	-	-	-

\*Toxicity characteristic leaching procedure.

\*\*Defined by waste management law enforcement regulations in Korea.

Table 5  
Impacting test of artificial lightweight aggregate

Specimen I.D.	Oven-dried state	Saturated-surface dry state		
	Impact value (%)	Number of impact	Impact crushing rate (%)	Impact value (%)
DS15	27.6	10	16.2	24.3
		15	23.0	23.0
DS20	28.7	10	17.3	26.0
		15	23.6	23.6
DS30	26.2	10	16.8	25.2
		15	20.8	20.8
Commercial crushed aggregate	14.8	10	9.8	14.7
		15	12.4	12.4

Table 6  
Mix proportions and physical properties of concrete

Mix. No.	S/A* (%)	W/C** (%)	Materials (kg/m <sup>3</sup> )					28-day strength <sup>†</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Slump (cm)	Unit weight of concrete (ton/m <sup>3</sup> )
			Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Binder (%)			
Commercial crushed aggregate	47	55	173	315	827	936	0.5	27.8	13.0	2.65
DS15	47	55	173	315	827	613	0.5	22.7	14.3	1.80
DS20	47	55	173	315	827	628	0.5	23.4	7.9	1.82
DS30	47	55	173	315	827	621	0.5	23.8	-	1.84

\*S/A = Sand percentage among total aggregates.

\*\*W/C = Water to cement ratio.

†Compressive strength.

것으로 인공경량골재의 충격에 대한 저항성이 일반 쇄석 골재보다 약하다는 것을 확인 할 수 있다.

예비 실험을 통해 도출된 최적 콘크리트 배합비를 기초로 하여 골재별로 콘크리트 공시체를 제조하고, 이들 배합비 별 공시체의 슬럼프, 기건비중, 압축강도를 분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. 배합인자는 W/C(물/시멘트 비) 55%, S/A(전체 골재량 중 모래의 비율) 47%로 하고, 단위 수량 및 단위 시멘트량은 각각 173, 315 kg/m<sup>3</sup>로 선정하였으며, 여기에 혼화제로서 유동화제를 0.5% 사용하여 인공경량골재 콘크리트 배합을 수행하였다. DS15 인공경량골재를 사용한 콘크리트 공시체의 슬럼프 값은 14.3 cm로 일반 골재를 사용한 콘크리트 공시체의 슬럼프 값 13 cm보다 더 높게 나타났다. 그러나 DS20 인공경량골재를 이용한 콘크리트 공시체의 경우 슬럼프 값이 7 cm로 일반 골재가 사용된 공시체보다 낮게 나타났다. 일반적으로 구형의 골재는 쇄석형 골재보다 슬럼프 값이 높으며, 유동성 증가로 인한 콘크리트의 작업성이 우수하고, 단위수량 감소에 따른 강도 증진효과가 있다[11]. 본 실험에서는 바닥재의 첨가량이 높은 인공경량골재를 사용한 공시체의 슬럼프 값이 증가하고, 준설토의 첨가량이 높은 인공경량골재를 사용한 공시체가 낮은 슬럼프 값을 나타내고 있다. 이는 골재의 입형 외에 골재의 표면 상태에 기인한 것으로 판단되며 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

인공경량콘크리트 공시체의 재령 28일 압축강도 분석 결과, 설계강도 24 N/mm<sup>2</sup>보다 약간 낮은 강도를 나타내었다. 이는 인공경량골재의 표면에 형성된 유리질의 매끄러운 표면이 그 원인으로, 거친 표면의 일반 골재보다 낮은 응력에서 균열을 형성하기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 표면이 완전히 매끄러운 골재의 경우, 부순 굵은 골재와 같이 표면이 매우 거친 경우보다 콘크리트의 강도를 10% 정도 감소시키는 것으로 알려져 있다[11].

대한건축학회 건축공사표준시방서에는 경량콘크리트의

정의를 기건 단위용적중량이 2.0 ton/m<sup>3</sup> 이하인 콘크리트로 정의하고 있으며, 한국콘크리트학회에서는 경량콘크리트의 설계기준 강도와 기건 단위용적중량이 각각 240 kgf/cm<sup>2</sup> 이하, 1.4~2.0 ton/m<sup>3</sup>의 범위로 규정하고 있다[11, 12]. 본 실험에서 설계강도 240 kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 제작된 인공경량골재 콘크리트 공시체의 기건 단위 용적중량이 1.8~1.84 ton/m<sup>3</sup>의 범위에 분포하여 건축공사표준시방서 및 토목공사표준시방서에서 규정하고 있는 경량콘크리트의 규정값을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

석탄바닥재와 준설토, 적점토를 혼합하여 비중 1.5 이하, 흡수율 17~18%의 인공경량골재를 제조하였다. 바닥재 첨가량 증가와 골재의 균일한 물성확보를 위하여 100 μm 이하로 제어하였다. 소성골재의 충격시험결과 일반 쇄석 골재보다 기건 상태 충격값이 1.8배 높고, 표건 상태 충격값이 1.6배 높아 포장 콘크리트용 골재로 사용하기에는 경도가 약한 것으로 나타났다. 소성골재 TCLP 용출시험에서 Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, As의 6가지 중금속이 전혀 검출되지 않아 바닥재 및 준설토를 재활용 하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 인공경량골재를 이용한 콘크리트 공시체 시험결과에서는 설계강도 24 N/mm<sup>2</sup>에는 약간 낮은 22~23 N/mm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타냈으나, 슬럼프 특성이 우수하고 기건 단위용적중량이 1.8~1.84 ton/m<sup>3</sup>로 낮아 강도특성만 보강한다면 구조용 경량 콘크리트 구조물에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21C 프론티어 사업, 자원재활용 기술개발 사업단의 연구비지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] Y.I. Koh, H.T. Kim and J.H. Noh, "Consideration on utilization of coal ash mixed with fine particle as drain materials for soft ground", Kor. Geo-Enviro. Soc. Workshop (2005) 69.
- [ 2 ] G.L. Yoon, C.W. Lee and W.S. Jeong, "Korean environmental standards for beneficial use of dredged materials", J. of the Korean Geotechnical Soc. 24(5) (2008) 5.
- [ 3 ] F. Canpolat, K. Yilmaz and M.M. Kse, "Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production", Cem. & Conc. Res. 34 (2004) 731.
- [ 4 ] Ö. Özkan, I. Yuksel and Ö. Muratoglu, "Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag", Waste Management 27 (2007) 161.
- [ 5 ] C. Kang, K.W. Kang, E.G. Kawg and G.C. Jung, "Site application of the light weight foamed concrete partition wall using bottom ash", Proceeding of Architectural Institute of Kor. 25(1) (2005) 369.
- [ 6 ] S.J. Park, J.D. Lim and S.H. Park, "Study of monitoring for change of marine environment by dumping dredged materials", J. of the Kor. Soc. Marin Enviro. & Safety (2007) 15.
- [ 7 ] Y.T. Kim, Y.K. Kwon and H.J. Kim, "Comparison of compressive behavior characteristics between un-reinforced and reinforced lightweight soils for recycling of dredged soils", J. of Ocean Eng. & Tech. 19(6) (2005) 44.
- [ 8 ] S.S. Kim, B.I. Kim, S.J. Han and H.Y. Shin, "Strength characteristics of light-weighted soils mixed with EPS and dredged soils", J. of Kor. Soc. for Railway 5(2) (2002) 61.
- [ 9 ] K.D. Kim and S.G. Kang, "Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and clay", J. Kor. Cry. Growth & Cry. Tech. 17(6) (2007) 277.
- [10] KS F 2581; Testing method for determination of aggregates impacting value-Method of test for production control of aggregates, Korean Standards Association (2003).
- [11] Korea concrete institute, "New Concrete Engineering" Kimundang, Korea (2007)
- [12] Architectural Institute of Korea, "Standard specification of building construction", Kimundang, Korea (2006).