

제조 조건에 따른 구조체용 소성 경량골재의 품질 특성

Quality Properties Sintering Lightweight Aggregate for Structural Concrete according to manufacturing Condition

고 대 형^{*} 김 재 신^{*} 김 상 운^{**} 문 경 주^{***} 소 양 섭^{****}
Ko, Dae Hyoun Kim, Jae Shin Kim, Sang-Woon Mun, Gyoung Ju Soh, Yang Seob

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate qualities of lightweight aggregate for structural concrete according to mixing proportions, pelletizer condition, sintering condition and to choose the suitable main and sub material. Main material used paper sludge ash(PSA) and sub material used clay, fly-ash and paper sludge. The aggregates are sintered after granulating at the various condition. As the result of test, quality difference of aggregate showed clear according to the mixing proportions and sintering conditions. It was possible to manufacture lightweight aggregate for structural concrete that dry specific gravity was ranged about 0.9 to 1.4 also the test results of the aggregates showed same physical properties compared with abroad product as 10% granules crushing value from 5 to 10% and absorption percentage from 10 to 20%.

1. 서 론

본 연구는 제지 슬러지 소각재(Paper Sludge Ash, 이하 PSA)의 보다 근본적이고 장기적인 처리방안으로 PSA를 고부가 자원으로서의 개발과 대량으로 처리할 수 있는 기술로서 인공경량골재에 관한 연구를 시작하게 되었다. 소성공정을 통한 인공경량골재의 제조는 에너지 비용이 큰 단점이 있으나, 콘크리트의 경량화를 이룰 수 있으므로 구조물의 고정하중을 줄일 수 있어 구조물의 고층화, 대형화가 가능한 장점이 있다. 본 논고에서는 적합한 주,부원료를 선정하여 그에 따른 다양한 배합비, 성형조건, 소성조건에 따른 품질을 평가함으로써 구조체용 인공경량골재의 제조 기술을 확보하고자 하였다.

2. 실험방법 및 계획

2.1 원료선정

PSA는 화학성분상 인공경량골재의 발포기준에 부적합할 뿐만 아니라 가소성이 부족하여 성형성이 매우 불량

* 정회원, 전북대 건축공학과, 석사과정
** 정회원, 충남대 재료공학과 공학석사
*** 정회원, 전북대 건축공학과 박사과정
**** 정회원, 전북대 건축·도시공학부 교수, 공업기술연구소

하므로 적절한 부원료의 첨가가 필수적이다. 따라서 본 실험에서는 부원료로 점토, 플라이애쉬 등을 첨가하여 이러한 성질을 개선하고자 하였으며 기포발생제로 Hematite(Fe_2O_3) 및 제지 슬러지를 첨가하였다. 이는 경제성을 고려하여 쉽게 구할 수 있고 비교적 원료의 전처리가 쉬운 원료를 선정하였다. PSA는 P사 전주공장의 슬러지 소각로에서 배출되는 것을 수집하여 그대로 사용하였으며 점토는 익산 적벽돌 제조업체에서 사용하는 것으로 피상으로 산출되므로 균일한 혼합을 위하여 건조기에 1일간 건조 후 분쇄하여 사용하였다. 제지 슬러지는 P사 장항공장 Sludge를 사용하였는데 Fiber가 강하게 응집되어 있는 상태이어서 균일한 혼합이 곤란하여 건조기에서 2일간 충분히 건조한 후 분쇄하여 Fiber의 길이를 최대 1mm이하로 조절하여 사용하였다. 플라이애쉬는 보령화력발전소에서 배출되는 것을 정제하지 않은 상태에서 사용하였다. Hematite는 공업용 산화철을 가공하지 않고 사용하였다.

2.2. 배합

본 실험에서는 경량골재의 원료로 적합한 화학적 조성범위에 대해서는 이미 C.M.Riley에 의해 제시된 점토계 광물의 발포에 적합한 화학조성범위를¹⁾ 기준으로 근접한 조성이 되도록 조합하였다.

2.3. 성형

인공경량골재 제조 시 일반적인 성형방법에는 Extrusion type, Mixer type, Drum type, Disk type 등의 여러 형태가 있으나²⁾ 본 실험에서는 Disk type을 사용하였다. Disk type 성형기는 회전하는 Disk에 원료를 공급하면서 수분을 분무하여 성형하는 방식으로 본 실험에서 사용한 장비의 사양은 Table1과 같다.

Table 1 Function of disk type pelletizer

Disk diameter (cm)	Damper height (cm)	RPM	Slop (°)	물분사량 (ℓ/min)	원료 투입량 (kg/min)	생산량 (kg/hr)
80	10~15	5~40	35~55	0~2	0~5	100~200

Table 2 Function of rotary kiln

내경 (cm)	길이 (cm)	길이/내경	용적 (m ³)	Slop (°)	RPM	체류시간 (min)	사용 연료
35	3000	8.6	0.29	0~3.5	0~10	5~30	LPG

2.4. 소성

본 실험에서는 LPG를 열원으로 이용한 직화식 Rotary Kiln을 사용하였으며 장비의 사양과 구성은 Table2와 같다. 인공경량골재 제조시에 직화식으로 하는 것이 유리한 이유는 Air/Gas비를 조절하여 노내의 분위기를 제어할 수 있으므로 골재의 표면에 산화피막을 형성시켜 응착현상을 방지할 수 있기 때문이다.³⁾

2.5. 골재물성시험

제조된 골재의 물성은 비중, 흡수율, 단위용적중량, 파쇄시험을 KS 규격에 의거하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원료 특성 및 배합비

고온에서 일어나는 골재의 팽창은 원료의 점성에 좌우되며 원료의 점성을 결정하는 인자는 화학조성이다. Table3은 실험에 사용된 주,부원료의 화학조성을 XRF를 이용하여 분석한 결과이다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 PSA는 Al_2O_3 가 비교적 많기 때문에 다른 용체를 고려하지 않는다면 연화점이 비교적 높을 것으로 예상되고⁴⁾ 또한 고온에서 급격한 점성변화를 유발시키는 성분인 CaO, MgO 성분이 20%이상 함유되어 있기 때문에 고온에서 급격하게 용융될 가능성이 있다⁵⁾. 따라서 이러한 조성상의 단점을 보완하기 위해서는 점토 등의 부원료를 일정량 첨가하여 화학성분비를 경량골재화 적정범위로 조정하여야 한다. PSA에 부원료를 첨가한 후의 화학조성을 조합한 결과를 Table4에 나타내었다. 부원료를 첨가하여 화학조성을 개선하였음에도 이상적인 조성과는 약간 차

Table 3 Chemical composition of raw materials

	화 학 성 분 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
PSA	40.20	27.35	0.80	16.30	8.89	0.59	0.73	4.52
익산점토	64.67	16.89	5.99	0.16	0.89	2.19	0.20	7.52
제지슬러지 (장항)	19.20	11.94	0.50	12.54	8.97	0.11	0.08	45.00
제지슬러지 (전주)	18.09	12.38	0.36	6.12	4.00	0.14	0.33	55.0
플라이애쉬	45.45	30.39	4.26	0.67	0.80	3.94	0.19	11.84

Table 4 Chemical composition ratio according to mix proportion

	Ideal	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8
PSA		60	50	50	50	40	40	30	30
익산점토		40	50	40	30	30	20	40	30
장항슬러지				10	20	-	-	-	-
전주슬러지						10	10	-	-
플라이애쉬						20	20	30	40
SiO ₂	60~70	49.99	52.44	47.89	43.34	46.78	44.86	51.56	49.64
Al ₂ O ₃	15~25	23.26	22.20	21.70	21.20	23.66	25.01	24.12	25.47
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.2~0.4	0.51	0.47	0.51	0.54	0.52	0.56	0.51	0.55
Fe ₂ O ₃	5~10	2.88	3.40	2.85	2.30	3.01	2.84	3.91	3.74
CaO		9.85	8.24	9.48	10.71	7.60	7.65	5.16	5.21
MgO	0~5	5.69	4.89	5.70	6.51	4.47	4.46	3.26	3.25
K ₂ O		0.23	1.39	1.39	0.97	1.71	1.89	2.24	2.41
Na ₂ O	3~4	0.52	0.47	0.45	0.44	0.43	0.43	0.36	0.36
L.O.I	-	5.72	6.02	5.72	13.52	10.93	11.36	7.92	8.35

Table 5 Particle size of materials

	평균입자크기(μm)	최대입자크기(μm)	비표면적(cm ² /g)
PSA	23.61	600	1,880
익산점토	11.61	180	3,400
플라이애쉬	13.87	164	3,500

3.3 소성

소성은 성형골재를 소결과 동시에 팽창시키는 공정으로 인공경량골재 제조공정에서 가장 중요한 공정이다. 소성온도는 산화, 또는 환원분위기에 따라 변하며 골재의 응축을 방지하고 적정하게 팽창되는 온도는

이가 있는 것으로 나타났으며 특히 모든 배합에서 Al₂O₃/SiO₂의 비가 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로 Al₂O₃/SiO₂의 비가 크면 용융온도가 높고 점성이 크지만⁵⁾ 본 실험의 배합에서는 용제로 작용하는 알카리토류인 CaO, MgO의 양이 많기 때문에 용융점과 점성을 낮추는 역할을 할 것으로 기대되었다. 고온에서 적절한 발포가 일어나기 위해서는 원료의 내부로부터 가스가 발생되어야 하는데⁶⁾ PSA에 있어서는 이러한 Gas 발생성분인 Fe₂O₃, 유기물 등이 매우 부족하다. 본 실험에서는 유기성 슬러지 및 Fe₂O₃를 첨가하여 이러한 성질을 개선하고자 하였다. 일반적으로 Fe₂O₃는 분해온도가 1390℃로 매우 고온이지만⁴⁾ O₂가 부족한 환원분위기에서는 분해온도가 급격히 낮아져서 용제의 역할을 하며 CO₂ 가스를 방출시키는 것으로 알려져 있다.¹⁾

Table5의 입도분석결과를 보면 PSA는 평균입도가 23.6 μm로 비교적 크기 때문에 입자의 크기에 의한 소결성의 증진이나 성형강도의 향상을 기대하기는 곤란하여 입도가 PSA에 비해 작은 점토 및 플라이애쉬를 첨가하여 소결성과 성형강도의 향상을 달성하고자 하였다.

3.2 성형

본 실험의 기준배합은 PSA와 점토를 50:50을 기준으로 성형 조건 실험을 실시하였다. 성형시의 함수율은 매우 중요한 인자이며 본 장비에서는 원료 투입량이 1.31kg/min일때 물 분사량은 0.44kg/min이 적당하였으며 이 때의 함수율은 24.9%이었다. 만일 이보다 물 분사량이 많을 경우에는 성형골재끼리 달라붙는 Caking 현상이 발생하였으며 물 분사량보다 원료의 투입량이 많을 경우에는 분말형태로 배출되거나 매우 약한 강도의 골재가 성형되었다. 본 실험에서는 각각의 입도를 얻기 위하여 Table6과 같이 성형변수를 조정하였다.

성형변수를 적절히 조절함으로써 크기가 3~20mm인 골재를 제조할 수 있었으며 RPM을 빠르게 할수록, Slope를 크게 할수록 골재의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 원료의 배합의 변화에 대한 실험은 수행하지 못하였으므로 향후 배합을 변경할 경우가 부분에 대한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 생각되었다.

Table 6 Size of aggregates according to slop and RPM of disk

골재입경 (mm)	성형조건			Dia/Depth
	RPM	Slop(°)	물고형분비 (%)	
5±2	25	50	24.9	5.7
10±3	15	45		
15±5	10	35		

3.3.1 노내 분위기

골재의 발포온도는 노내 분위기에 의해서 변화한다. 일반적으로 산소의 농도가 작아지면 금속의 산화수가 작아져 골재가 용융하기 쉬운상태로 되고 Hematite의 분해가 촉진되어 발포에 유리한 조건이 된다. 그러나 이러한 환원분위기 상태는 골재의 점성을 급격하게 낮춰서 융착현상을 일으킬 우려가 있어 본 실험에서는 환원분위기에서 조성하지 않고 과량의 Air를 투입하여 산화피막을 형성시킴과 동시에 골재내부에서의 환원분위기 조성에 의한 발포를 유도하였다. 본 실험에서 가스의 양은 Flow-meter를 설치하여 직접측정이 가능하였으나 Burner의 Blower를 통해서 유입되는 Air의 양은 직접 측정이 불가능하였다. 따라서 Air와 Propane의 혼합 가스를 포집하여 Gas-chromatography를 이용하여 Air와 Propane 가스의 혼합비를 구하여 Air의 양을 간접적으로 측정하였다. 식(1)은 Propane gas의 이론 연소 식이고 공기중의 산소는 약 20%이므로 Propane 가스 1 liter의 연소에 필요한 공기의 양은 화학양론적으로 볼 때 20 liter이다. Fig.1에서의 보

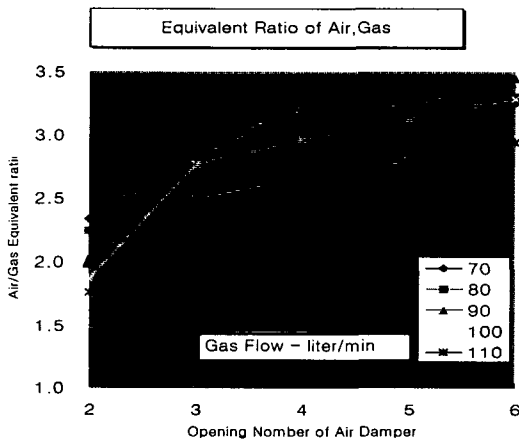
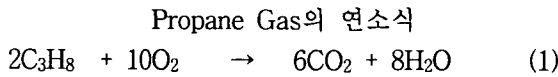


Fig. 1 Air/Gas equivalent ratio

편적인 실험조건인 Air No 4-Gas flow 110liter/min, Air No 3-Gas 90 liter/min, Air 2-Gas 70 liter/min일 때 노내의 최고 온도는 1200~1250℃이고 이 범위에서의 당량비는 2.0~3.0인 것을 알 수 있다. 이 결과는 화학양론적인 Air/Gas비에 비하여 Air가 매우 과량으로 유입되는 조건에서 골재를 제조하고 있다는 것을 알 수 있었으며 본 실험에서의 원료가 융착현상이 발생하기 용이한 원료임에도 융착하지 않고 제조되는 것은 과량의 Air가 투입되기 때문에 골재표면에 두꺼운 산화피막이 형성되어 융착현상이 방지되는 것으로 생각되었다.

3.3.4 투입량 및 체류시간

원료의 투입량은 Kiln의 생산성과 직결될 뿐만 아니라 인공경량골재를 제조하는 경우 노내의 분위기와도 깊은 관계가 있다. 골재는 노내 전체의 분위기에 영향을 받지만 특히 인접한 부근의 분위기에 직접적으로 영향을 받기 때문에 원료의 투입량이 많으면 Kiln내에서 골재에 묻혀 있을 확률이 높아서 산소를 공급받을 기회가 적어지므로 자연히 환원분위기가 형성된다. Rotary Kiln에서 원료의 투입량은 노내 체적의 8~12%를 투입하는 것이 일반적이다. 따라서 본 실험에서 원료의 투입량은 위의 기준을 따랐으며 본 연구실 Rotary Kiln의 경우 Slope에 따라서 골재가 Kiln에서 체류하는 시간과 노내 용적의 8%를 채우기 위해 투입되어야 할 원료의 투입속도를 그림 11에 나타냈으며 Kiln의 Slope가 1~3.5°로 증가할수록 체류시간은 14.3~4.1min으로 감소하고 원료의 투입 속도는 1.16~4.05kg/min으로 투입해야 하는 것을 나타내고 있다. 본 실험결과 Kiln의 Slope는

1150~1200℃가 적절하였다. 노내의 분위기는 Air/Propane ratio, Kiln내 원료의 양, 원료내의 유기성 혼입물의 양 등에 의해 결정되는데 실험 결과 Air/Propane ratio는 당량비로 2~3인 Air 과잉상태가 적절하였으며 Kiln내 원료의 양은 노내 체적의 8~10%가 적절하였다.

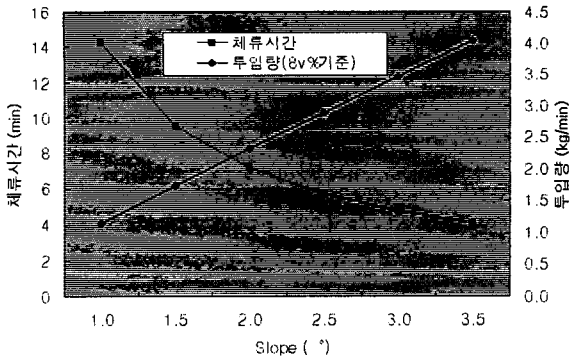


Fig. 2 Condition to supply 8% of volume in Kiln

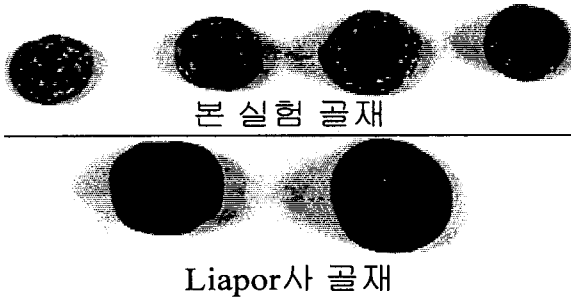


Fig. 3 Oxide webbing formed on the surface of aggregates

2.5~3.5° 일 때가 가장 적정하였으며 이 때 Kiln 내부용적의 8%를 채우기 위하여 원료의 투입량은 2~4 kg/min으로 하였다.

3.4 골재 물성 평가

본 실험에서는 외국에서 시판되고 있는 골재와 비교하기 위하여 독일 Lipor사의 골재를 일부 입수하여 직접 물성을 측정, 비교하였다. 골재를 소성할 때 산화, 환원분위기를 조절하여 표면에 있는 탄질물을 산화시키면 안정한 상으로 전이되어 내부에 비하여 내화도가 높은 산화피막이 형성되게 된다. 반면 산화피막에 의해서 고립된 내부는 환원성분위기가 형성되어 용융 온도가 낮아져 발포하게 되는 것이다. 이러한 방법은 노내의 분위기에 매우 세심한 주의를 기울여야 하고 원료의 화학조성중에 용제성분이 너무 많은 경우 분위기 조절만으로는 용착을 방지할 수 없는 경우도 있다. Fig.2는 본 실험 골재와 Lipor사 골재의 표면에 형성된 산화피막을 보여주는 그림으로 위의 4개의 골재는 산화피막의 두께의 변화를 보여 주기 위한 것으로 이러한 산화피막의 두께는 원료의 화학조성뿐만 아니라 노내의 분위기 및 열이

력에 따라 조절이 가능하다. 산화피막은 골재의 용착을 방지하기 위해서 필수적이지만 너무 두껍게 되면 발포하게 될 부분이 적어지기 때문에 골재의 비중이 증가하는 단점이 있으므로 가능하면 피막의 두께를 얇고 균일하게 형성시키는 것이 중요하다. 실험결과 절건비중이 다소 높은 1.3~1.4인 골재가 제조되었으나 점토의 함량을 60%, Hematite를 3%로 첨가하고 기존에 비해 체류시간을 줄여서(5min이하) 소성대로 더욱 신속히 진입시킨 결과 절건비중 0.9의 골재의 제조가 가능하였다.

Table 6 Preparing condition and test results of lightweight aggregates for structural concrete

	배합비					소성조건					골재물성		
	PSA	Clay	F/A	Sludge	Fe ₂ O ₃	Temp (°C)	Slope (°)	RPM	Air/gas equivalent ratio	Feed (kg/min)	절건 비중	흡수율 (%)	파쇄 강도 (ton)
L1	독일 Lipor사 골재										0.97	14.1	10.7
L2											1.07	13.8	11.4
L3											1.22	12.3	12.9
PA1	50	50	-	-	-	1185	1.0	6	1.7	2.38	1.34	11.9	11.6
PA2-a	40	20	30	10	2						1.37	15.9	10.9
PA2-b											1.39	18.8	7.9
PA3	50	30	-	10	2	1165	1.0	6	2.7	2.38	1.28	11.5	12.8
PA4	50	30	20	-	0.5	1200	2.5		2.2		1.25	17.1	7.7
PA5	30	40	30	-	1	1145	1.0	1.3	1.33	13.7	12.6		
PA6-a											1.33	15.5	13.3
PA6-b	30	40	30	-	2	1180	2.5	6	3.5	2.38	1.43	13.5	16.0
PA6-c											1.45	11.4	15.6
PA6-d											1.44	11.2	12.8
PA7-a											1.37	13.2	15.6
PA7-b	30	40	30	-	3	1150	2.5	6	2.6	2.38	1.37	13.2	16.5
PA7-c											1.39	13.4	13.6
PA7-d											1.24	14.7	15.0
PA8-a	30	50	20	-	2	1150	2.5	6	2.6	2.38	1.43	12.5	17.5
PA8-b											1.09	18.7	11.4
PA8-a	40	60	-	-	3	1170	3.5	6	1.7	2.38	0.90	18.5	6.7
PA8-b						1190							

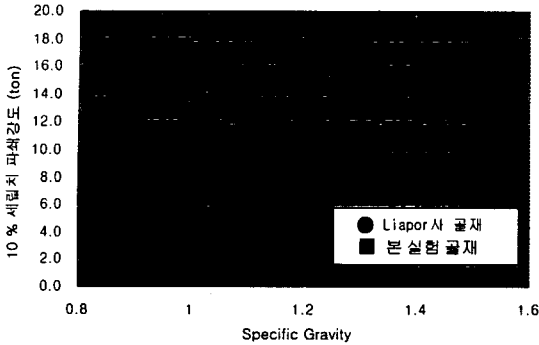


Fig 4 Strength of lightweight aggregates for construal concrete according to specific gravity

4. 결론

PSA의 적절처리 방안으로 제시된 구조용 인공 경량골재 제조를 위해 PSA를 주원료로 하고 점토, 플라이애쉬, 장항 Sludge를 부원료로 첨가하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조용 인공경량골재의 제조를 위한 적정 배합비는 PSA 30~50%, 점토 30~60%, 플라이애쉬 0~30%, 장항 Sludge 0~10%, Hematite 1~3%이었다.

2) Disk type으로 성형할 경우에 적정함수율은 25%이었으며 골재의 입도는 Disk의 Slope와 RPM으로 조절

가능하며 골재의 입도를 작게 하기 위해서는 Slope를 높이고 RPM을 빠르게 하면 가능하다.

3) 노내의 분위기는 Air/Gas비, 원료의 투입량 등에 의해서 결정되며 일반적으로 환원성분위기에서는 발포에 유리하나 융착현상이 발생할 우려가 있어 Air/Gas 당량비가 2~3인 안정적인 산화분위기에서 작업해야 한다. 목표하는 비중의 골재를 제조하기 위해서는 소성 변수들을 적절히 조합하는 것이 중요하였다. 노내의 분위기에 따라서 적정 발포온도가 달라지며 동일한 배합비에서도 매우 다른 양상을 보이나 대략적으로 1180~1250℃가 적정 소성발포 온도이다. 융착현상을 방지하기 위해서는 산화피막을 형성시켜야 하나 너무 두껍게 되면 경량화에 불리할 뿐만 아니라 표면균열이 깊게 되어 비중상승, 강도저하 및 흡수율 상승의 요인이 된다.

4) PSA를 주원료로 하여 제조된 구조용 경량골재의 물성은 절건비중이 0.9~1.4로 비교적 넓은 범위의 골재 제조가 가능하였으며 10% 세립치 파쇄강도 5~15ton, 흡수율 10~20%로 외국제품에 비해서도 거의 동등한 물성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Charles M.Riley, "Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays", Minnesota Geological Survey, Summary Report No.5, July 1950.
2. Andrew Short and William Kinniburgh, "lightweight Concrete", Applied Science publishers LTD in London, 1978.
3. (주)금강 중앙연구소, "경량골재 개발 및 경량콘크리트 실용화 연구" 중간보고서, 1996
4. G.V.Samsonov, "The Oxide Handbook", Pelenum Publishing Corporation, 1982.
5. W.D.Kingery, "Introduction to Ceramics", by John Wiley & Sons, Inc, 1976.
6. 永井影一郎, "新しい工業材料の科學", 金原出版株式會社, 1967.
7. 한국전력공사, "석탄회 이용가치와 재활용 기술", 성진사, 1994.
8. 이준근, "세라믹스의 소결", 반도출판사, 1991.
9. Industrial and Extractive Waste Branch Office of Solid Waste, "Lightweight Aggregate Production and Air Pollution Control Wastes", RCRA Docket No. F-96-PH4A-S0005, 1995.12
10. Wolfgang Pietsch, "Successfully Use Agglomeration for Size Enlargement", Chemical Engineering Process, 1996.