

제지 슬러지 소각재를 이용한 소성 경량골재의 제조

문경주^{1)*} · 김재신²⁾ · 소양섭¹⁾

¹⁾전북대학교 건축공학과 ²⁾한국전자재시험연구원

(2000년 11월 3일 원고접수, 2001년 3월 9일 심사완료)

Manufacturing of Sintered Lightweight Aggregate using Paper Mill Sludge Ash

Gyoung-Ju Mun^{1)*}, Jae-Shin Kim²⁾, and Yang-Seob Soh¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea

²⁾ KICM, Research-Development Division, Seoul, 137-073, Korea

(Received November 3, 2000, Revised March 9, 2001)

ABSTRACT

The purpose of this study was to manufacture sintered lightweight aggregate using paper sludge ash and to evaluate the qualities of the aggregate according to various mix proportions, conditions of pelletization and sintering. The paper sludge ash alone, due to its mineral and chemical compositions could not gain suitable expansion and strength. Hence, it was essential to add mineral additives such as clay, fly ash etc. The optimum mixing ratio range determined in this study is as follows ; paper sludge ash 30~50 %, clay 30~50 %, fly ash 0~40 %, paper sludge 0~10 % and hematite 2~3 % (for manufacturing lightweight aggregate both for non-structural and structural concrete).

It was possible to manufacture various lightweight aggregate whose dry specific gravity ranged about from 0.6 to 1.4 by using this optimum mixing ratio. From the test results of the qualities of aggregate, it showed that the 10 % granules crushing value test and water absorption percentage ranged about 5~10 ton and 10~20 %. Thus, it was favorably comparable to those of the imported aggregate. The manufactured lightweight aggregate could be used for structural concrete and non-structural concrete.

Keywords : paper sludge ash, clay, fly ash, lightweight aggregate, structural concrete, non-structural concrete.

1. 서 론

슬러지 소각재는 각종 산업에서 제조 공정 중 또는 최종 처리 후 발생하는 산업폐기물로서 그 배출량이 크게 증가하고 있는 추세에 있다. 이는 기존의 슬러지를 단순 매립하던 방식에서 소각을 통해 부피를 감소시켜 소각회로 최종처리하는 방식으로의 전환에 따른 것으로 보인다. 전북지방은 국내 최대 펄프·제지 공업지역이며 제지 슬러지 소각재(Paper Sludge Ash, 이하 PSA)의 대부분을 배출하고 있다. P제지사 전주공장의 경우 PSA발생량은 '96년초 연간 4만5천 ton이었으나 소각로 증설 이후 연간 6만톤 이상으로 급격한 증가를 보이고 있다. 동 회사에서는 PSA의 처리를 전량 사내매립에 의존하고 있었으나 사내 매립장이 포화될 것으로 예상되었고 위탁처리할 경우 처리비가 5만8천원/ton으로 연간 30억원 이상의 막대한 비용이 예상되었다¹⁾.

그러던 중 PSA가 시멘트 회사의 원료로 공급되게 되어

PSA처리에 대한 시급한 문제는 해결되었으나 현재에도 원거리 운반에 따른 비용(2만7천원/ton)이 소요되고 있으며 시멘트 원료로 사용되기에는 일부 물성에 제한을 받고 있어 아직 근본적인 대책이 수립되었다고는 볼 수 없다. 또한 P전주공장을 제외한 중소 제지공장의 경우에는 슬러지 소각로가 충분한 고온을 유지하지 못하여 불완전 연소로 인한 품질의 불안정성 때문에 시멘트 회사에서 반입을 꺼려하고 있어 이의 적절한 처리방안을 필요로 하고 있다.

PSA의 재활용에 대한 연구는 지금까지 비료, 경량단열벽돌, 타일 및 적벽돌 부원료, 시멘트 혼화제, 건축용 PVC제품의 충전재 등 다각적으로 검토하였으나 2차제품의 품질성능 저하, 처리량의 한계로 인하여 큰 실효를 거두지 못하였다²⁾. 따라서 본 연구에서는 PSA의 근본적이고 장기적인 처리를 위하여 부가가치가 있으며 대량 처리가 가능한 기술로서 인공경량골재를 제조하여 그 특성을 검토하였다.

본고에서는 인공경량골재의 제조기술 중 핵심이라고 할 수 있는 성형 및 소성공정의 제조조건을 확립하고 이에 의해 제조된 골재의 물성을 평가하여 PSA의 인공경량골재 적용가능성을 살펴보았다.

* Corresponding author

Tel : 063-270-3572 Fax : 063-270-3573

E-mail : mun7890@hanmail.net

2. 실험계획 및 장비

2.1 원료선정

PSA는 화학성분상으로 인공경량골재의 발포기준에 부적합할 뿐만 아니라 성형성이 불량하여 단독으로는 제조가 곤란하여 적절한 부원료의 첨가가 필수적이다. 본 실험에서는 부원료로 점토, 플라이애쉬 등을 첨가하여 성형성, 소결성을 개선하고자 하였으며 경량화를 위하여 산화철(Fe_2O_3) 및 제지슬러지를 첨가하였다.

PSA는 P사 전주공장의 슬러지 소각로에서 배출되는 것을 건조상태로 수집하여 전처리 공정 없이 사용하였다. 점토는 익산지역의 적벽돌 제조업체인 B사의 점토를 사용하였으며 타원료와의 균일한 혼합을 위하여 건조기에 1일간 건조 후 분쇄기를 이용하여 100 mesh(150 μ m) 이하로 분쇄하여 사용하였다. 제지슬러지는 P사 장항공장 슬러지를 사용하였으며 건조시 강하게 응집되는 현상이 있어 건조기에서 1일간 건조한 후 분쇄기를 이용하여 50 mesh(300 μ m) 이하로 분쇄하여 사용하였다. 플라이애쉬는 보령 화력발전소에서 배출되는 비정제 플라이애쉬를 사용하였으며 산화철은 건축용 안료로 이용되는 것을 사용하였다.

2.2 배합

배합비를 선정함에 있어서 고려되어야 할 사항은 원료의 화학성분, 성형성, 경계성, 작업성 등이다. 경량골재의 원료로 적합한 화학적 조성범위에 대해서는 이미 Riley C. M에 의해 제시된 바 있으며 점토계 광물의 발포에 적합한 화학조성범위를³⁾ 기준으로 이에 근접한 조성이 되도록 조합하였다.

2.3 성형

성형방법에는 여러 가지 방법이 있으나 인공경량골재의 경우 대량생산이 가능하고 입도의 조절이 간편한 방법을 선택해야 한다. 인공경량골재 제조시 성형방법에는 압출성형, 혼합성형, 드럼성형, 디스크 성형 등의 여러 형태가 있으나⁴⁾ 본 실험에서는 디스크 성형 방식의 성형기를 사용하였다.

디스크 방식의 성형기는 회전하는 디스크에 원료를 공급하면서 수분을 분무하여 성형하는 방식으로 본 실험에서 사용한 장비의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of disk type pelletizer

Disk diameter (cm)	Damper height (cm)	RPM	Slop (°)	Liquid spray (min)	Feed (kg/min)	Production (kg/hr)
80	10~15	5~40	35~55	0~2	0~5	100~200

2.4 소성

본 실험에서는 LPG를 열원으로 이용한 직화식 로터리 킬른을 사용하였으며 장비의 사양과 구성은 Table 2와 같다. 인공경량골재 제조시에 직화식으로 하는 것이 유리한 이유는 공기/가스비를 조절하여 노내의 분위기를 제어할 수 있으므로 골재의 표면에 산화피막을 형성시켜 융착현상을 방지할 수 있기 때문이다⁴⁾.

2.5 원료선정

제조된 골재의 물성은 비중, 흡수율, 과쇄시험을 KS 규격에 의거하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원료특성

3.1.1 화학성분

일반적으로 인공경량골재의 발포원리는 원료가 고온에서 일부 용융되어 적정한 점성을 갖게 됨과 동시에 원료 내부에서 가스가 발생되고 내부의 가스압이 원료의 점성보다 약간 클 때 발포팽창이 일어나게 된다. 따라서, 고온에서 일어나는 골재의 팽창은 원료의 점성에 좌우되며 원료의 점성을 결정하는 인자는 화학조성이다. Fig. 2는 Riley C. M의 발포에 적합한 화학조성범위를 나타낸 것으로 PSA 단독으로는 발포가 곤란한 조성이므로 점토 등의 부원료를 첨가하여 경량골재화 적용범위 내로 포함될 수

Table 2 Specification of rotary kiln

Diameter (cm)	Length (cm)	L/D	Volume (m ³)	Slop (°)	RPM	Sintering time (min)	Fuel
35	3000	8.6	0.29	0~3.5	0~10	5~30	LPG

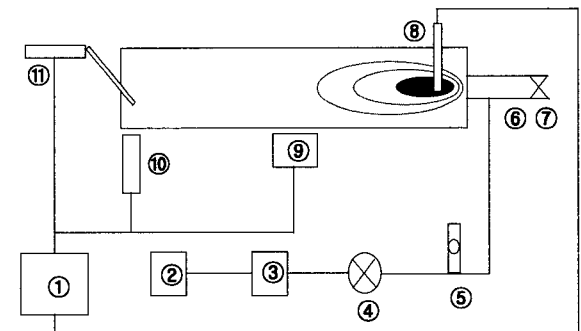


Fig. 1 Sintering system

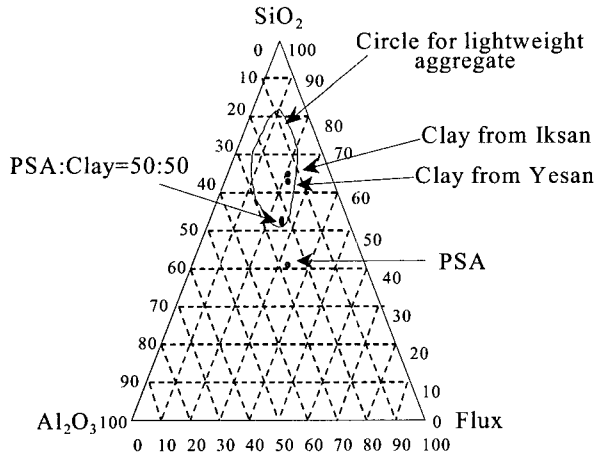


Fig. 2 Pertinent chemical composition of clay minerals and raw materials

있도록 하였다³⁾. PSA와 점토의 배합비를 50:50으로 하였을 때 경량골재화 적용범위 내에 포함되어 소성에 따른 발포가 예상되었다.

Table 3은 실험에 사용된 주, 부원료의 화학조성을 XRF를 이용하여 분석한 결과이다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 PSA는 Al_2O_3 가 비교적 많기 때문에 다른 용제를 고려하지 않는다면 연화점이 비교적 높을 것으로 예상되고⁵⁾, 또한 고온에서 급격한 점성변화를 유발시키는 성분인 CaO, MgO 성분이 20%이상 함유되어 있기 때문에 고온에서 급격하게 용융될 가능성이 있다⁶⁾. 따라서 이러한 조성상의 단점을 보완하기 위해서는 점토 등의 부원료를 일정량 첨가하여 화학성분비를 경량골재화 적용범위로 조정하여야 한다.

Table 4는 PSA에 부원료를 첨가한 후의 화학조성을 조합한 결과이다. 모든 배합에서 Al_2O_3/SiO_2 의 비가 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로 Al_2O_3/SiO_2 의 비가 크면 소지의 용융온도가 높고 점성이 크지만⁵⁾ 본 실험의 배합에서는 용제로 작용하는 알칼리토류인 CaO, MgO의 양이 많기 때문에 소지의 용융점과 점성을 낮추는 역할을 할 것으로 기대된다.

Table 3 Chemical composition of raw materials

Materials	Chemical composition(%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
Ideal	60~70	15~25	5~10	0~5		3~4		
PSA	40.20	27.35	0.80	16.30	8.89	0.59	0.73	4.52
Clay	64.67	16.89	5.99	0.16	0.89	2.19	0.20	7.52
Paper sludge	19.20	11.94	0.50	12.54	8.97	0.11	0.08	45.00
Fly ash	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

Materials	Ideal	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
PSA		60	50	50	50	30	30
Clay		40	50	40	30	40	30
Sludge				10	20	--	-
Fly ash						30	40
SiO ₂	60~70	49.99	52.44	47.89	43.34	51.56	49.64
Al ₂ O ₃	15~25	23.26	22.20	21.70	21.20	24.12	25.47
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.2~0.4	0.51	0.47	0.51	0.54	0.51	0.55
Fe ₂ O ₃	5~10	2.88	3.40	2.85	2.30	3.91	3.74
CaO	0~5	9.85	8.24	9.48	10.71	5.16	5.21
MgO		5.69	4.89	5.70	6.51	3.26	3.25
K ₂ O		0.23	1.39	1.39	0.97	2.24	2.41
Na ₂ O	3~4	0.52	0.47	0.45	0.44	0.36	0.36
L.O.I	-	5.72	6.02	5.72	13.52	7.92	8.35

3.1.2 입도

입자의 표면에너지는 소결의 구동력으로 작용하므로 입자의 크기가 작을수록 소결성은 우수해진다⁷⁾. 경량골재의 제조에 있어서도 입자가 작으면 가스가 발생하기 전에 표면에 치밀한 소결층을 형성하게 되어 발생하는 가스의 이탈을 막는데 중요한 역할을 한다. Table 5의 입도분석결과에 의하면 PSA는 평균입도가 23.6 μ m로 비교적 커서 PSA에 비해 작은 점토 및 플라이애쉬를 첨가하여 소결성 및 성형성을 개선하고자 하였다.

3.2 성형

본 실험의 배합은 PSA와 점토를 50:50을 기본으로 성형 조건 실험을 실시하였다. 성형시의 함수율은 매우 중요하며 본 장비에서는 원료 투입량이 1.31 kg/min일때 물 분사량은 0.44 kg/min이 적당하였으며 이 때의 함수율은 24.9%이었다. 만일 이보다 물 분사량이 많을 경우에는 성형골재끼리 달라붙는 응집 현상이 발생하였으며 물분사량보다 원료의 투입량이 많을 경우에는 분말형태로 배출되거나 매우 약한 강도의 골재가 성형되었다. 디스크 성형에 있어서 입도의 조절은 디스크의 기울기나 회전속도를 조절함으로써 가능하지만 세심한 주의를 기울이지 않으면 원하는 입도를 얻을 수 없었다. 본 실험에서는 각각의

Table 5 Particle size of materials

Materials	Average particle size(μ m)	Maximum particle size(μ m)	Blain (cm ² /g)
PSA	23.61	600	1,880
Clay	11.61	180	3,400
Fly ash	13.87	164	3,500

입도를 얻기 위하여 Table 6과 같이 성형변수를 조정하여 입경이 3~20 mm인 골재를 제조할 수 있었는데 디스크의 기울기 및 회전속도에 따른 성형골재의 입도결과를 Fig. 3에 나타내었다. 회전속도를 빠르게 할수록 또한 기울기를 크게 할수록 골재의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다.

성형골재의 강도측정은 철광업계에서 사용하는 방법인 18" Drop test를 사용하였으며 18" 높이에서 성형골재를

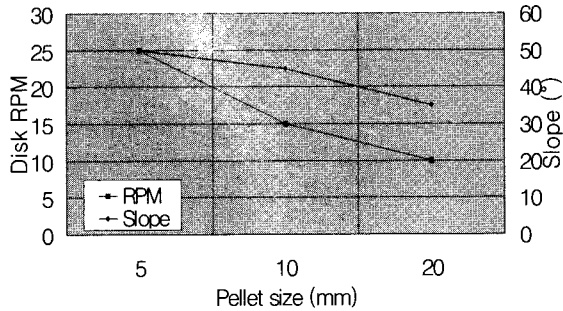


Fig. 3 Size of aggregate according to slope and RPM

Table 6 Size of aggregate according to slope and RPM of disk

Size (mm)	Condition			
	RPM	Slop(°)	W/S (%)	Dia/Depth
5±2	25	50	24.9	5.7
10±3	15	45		
15±5	10	35		

Table 7 Strength of adult forming aggregate (18" Drop test)

Forming aggregate size(mm)	10.4~7.9	7.9~5.6	5.6~4.5
Drop test(time)	20 ↑ (O · K)	20 ↑ (O · K)	20 ↑ (O · K)

20회 떨어뜨렸을 때 파손되지 않으면 컨베이어 이송이나 노내 투입시 낙하와 같은 후속공정에서 파손될 염려가 없다는 경험에 의하여 합격으로 판정하는 방법이다. 본 실험에서 성형된 골재를 입도별로 분리한 후 각각 떨어뜨렸을 때 Table 7과 같이 모두 이 기준에 합격하였다.

3.3 소성

소성은 성형골재를 소결과 동시에 팽창시키는 공정으로 인공경량골재 제조공정에서 가장 중요한 공정이다. 소성온도는 산화 또는 환원분위기에 따라 변하며 골재의 용착을 방지하고 적정하게 팽창되는 온도를 유지해야 하며, 노내의 분위기는 공기/가스 비율, 노내 원료의 양, 원료내의 유기성 혼입물의 양 등에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다.

3.3.1 노(kiln)내 온도분포

Fig. 4는 노 내부의 각 부위별 온도를 측정하기 위한 장치의 개략도이다.

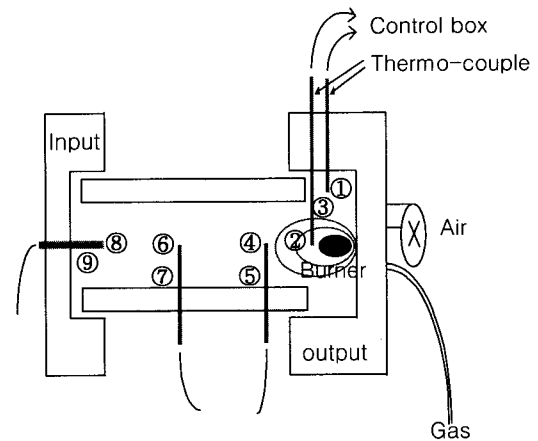


Fig. 4 Instrumentation to measure temperature in kiln

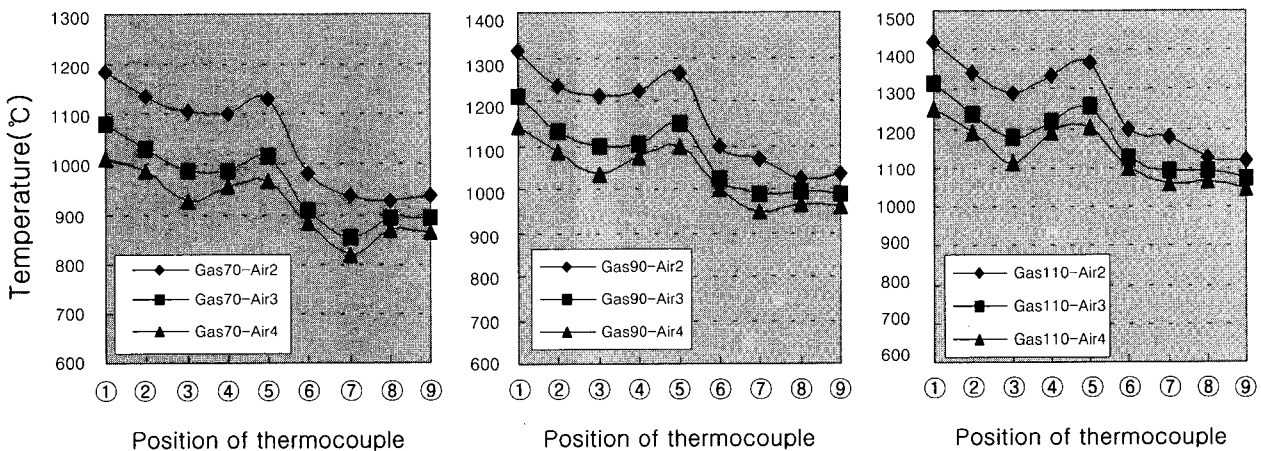


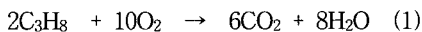
Fig. 5 Temperature curves determined in kiln

노내의 온도는 일반적으로 가스 투입량, 공기/가스비, 원료 투입량에 의해서 결정된다. 원료 투입량은 노내 용적의 8~12%로 일정하게 하였으며 공기/가스비를 조절하여 온도 및 분위기를 조절하였다. 이상과 같이 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 회전하는 로터리 킬른에서 가동중에 노 내부의 온도를 측정하기는 곤란하였으므로 노가 정지된 상태에서 공기, 가스량을 고정한 후 각각의 조건에서 충분한 시간동안 유지하여 노 내부의 온도가 평형상태가 되도록 한 후 R-type thermocouple을 이용하여 노내 각 부위의 온도를 측정하였다. 가스가 증가하면 노내의 온도가 높아지고 공기량이 일정량 이상이면 온도가 저하한다. 원료 배출구의 온도가 소성온도에 도달했을 때 원료 투입구의 온도가 900 °C 이상으로 예열대가 없이 직접 승온영역을 알 수 있다⁹⁾. 이 영역에서는 골재 내부에 존재하는 가스 발생물질의 이탈을 방지하기 위하여 급열을 해야 하는 영역이므로 소성영역으로의 신속한 진입이 필요하다. 본 연구실 로터리 킬른의 경우 소성대의 길이가 1 m 미만으로 매우 짧고, 원료의 투입량이 작아서 상대적으로 골재가 외부에 노출될 확률이 많아 표면산화가 일어나기 용이하기 때문에 환원성발포를 위해서는 체류시간을 줄여 소성대로 신속히 진입시키는 것이 골재의 발포에 유리하였다.

3.3.2 노내 분위기

골재의 발포온도는 노내 분위기에 의해서 변화한다. 일반적으로 산소의 농도가 작아지면 금속의 산화수가 작아져 골재가 용융하기 쉬운상태로 되고 Fe₂O₃의 분해가 촉진되어 발포에 유리한 조건이 된다. 그러나 이러한 환원분위기 상태는 골재의 점성을 급격하게 낮춰서 용착현상을 일으킬 우려가 있어 본 실험에서는 환원분위기에서 소성하지 않고 과량의 공기를 투입하여 산화피막을 형성시킴과 동시에 골재내부에서의 환원분위기 조성에 의한 발포를 유도하였다. 본 실험에서 가스의 양은 Flow-meter를 설치하여 직접측정이 가능하였으나 버너의 송풍기를 통해서 유입되는 공기의 양은 직접 측정이 불가능하였다. 따라서 공기와 프로판 가스의 혼합 가스를 포집하여 Gas-chromatography를 이용하여 공기와 Propane 가스의 혼합비를 구하여 공기의 양을 간접적으로 측정하였다.

Propane Gas의 연소식



식(1)은 Propane 가스의 이론 연소식이고 공기중의 산소는 약 20%이므로 Propane 가스 1 liter의 연소에 필요한 공기의 양은 화학양론적으로 볼 때 20 liter이다⁹⁾.

Fig. 5와 Fig. 6을 종합하여 보면 보편적인 실험조건인 Air No. 4-Gas flow 110 liter/min, Air No. 3-Gas 90 liter/min, Air No. 2-Gas 70 liter/min일 때 노내의 최고

온도는 1200~1250 °C이고 이 범위에서의 당량비는 2.0~3.0 이었다. 이 결과는 화학양론적인 공기/가스비에 비하여 공기가 매우 과량으로 유입되는 조건에서 골재를 제조하고 있다는 것을 알 수 있었으며 본 실험에서의 원료가 용착현상이 발생하기 용이한 원료임에도 용착하지 않고 제조되는 것은 과량의 공기가 투입되기 때문에 골재표면에 두꺼운 산화피막이 형성되어 용착현상이 방지되는 것으로 생각되었다.

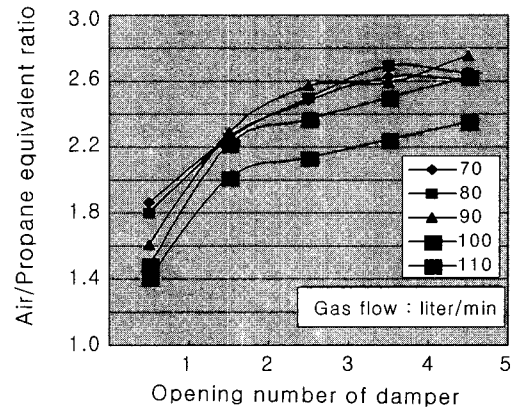


Fig. 6 Air/Gas equivalent ratio

3.3.3 투입량 및 체류시간

원료의 투입량은 노의 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 노내에서 골재에 묻혀 있을 확률이 높아져 산소를 공급받을 기회가 적어지므로 자연히 환원분위가 형성된다. 로터리 킬른에서 원료의 투입량은 노내 체적의 8~12%를 투입하는 것이 일반적이다⁹⁾.

따라서 본 실험에서 원료의 투입량은 위의 기준을 따랐으며 본 실험에 사용한 로터리 킬른의 경우 경사에 따라서 골재가 노에서 체류하는 시간과 노내 용적의 8%를 채우기 위해 투입되어야 할 원료의 투입속도를 Fig. 7에 나타내었다.

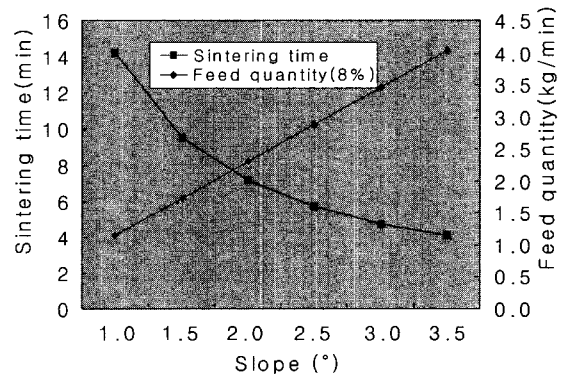


Fig. 7 Condition to supply 8% of volume in Kiln

노의 경사가 1~3.5° 로 증가할수록 체류시간은 14.3~4.1 min으로 감소하고 원료의 투입 속도는 1.16~4.05 kg/min으로 투입해야 하는 것을 나타내고 있다. 본 실험 결과 노의 경사가 2.5~3.5° 일 때가 가장 적정하였으며 이 때 노 내부용적의 8%를 채우기 위하여 원료의 투입량은 2~4 kg/min으로 하였다.

3.4 골재 물성 평가

본 실험에서는 KS시험방법에 의거하여 골재의 물성을 측정하였으며 외국에서 시판되고 있는 골재와 비교하기 위하여 독일 Liapor사 골재를 일부 입수하여 직접 물성을 측정, 비교하였다.

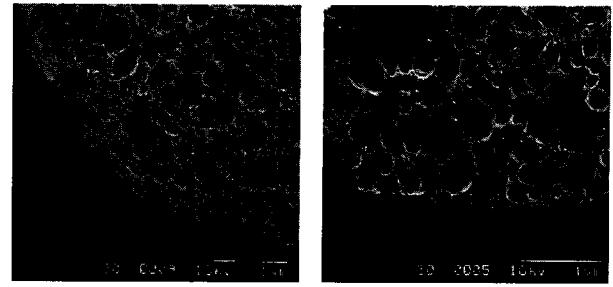
3.4.1 비구조체용 인공경량골재

비구조체용의 저비중골재를 제조하기 위해서는 소성온도를 높이거나 환원성 분위기에서 소성하여야 골재의 발포가 극대화된다. 그러나 이러한 조건은 용착현상이 발생하기 쉬운 조건이므로 적정한 온도와 분위기를 유지하여 용착현상을 방지하여야 한다. 만일 이러한 방법으로도 용착현상의 방지가 곤란한 경우에는 내화도가 높은 원료를 이용하여 표면을 코팅하여야 하는데 PSA는 발포온도에서 소지의 점성변화가 크기 때문에 소성온도를 높이거나 환원성분위기에서 소성할 경우 용착현상이 발생하여 골재표면에 Al_2O_3 플라이애쉬를 코팅하여 용착현상을 방지하였다.

1) Al_2O_3 코팅

Al_2O_3 를 2% 코팅하였을 때 용착현상을 효과적으로 피할 수 있었으며 충분히 발포하여 절건비중 0.6~1.0인 골재의 제조가 가능하였다. Fig. 8은 독일 Liapor사 골재와 본 실험 골재의 내부 미세구조를 비교한 것으로 모두 기공이 잘 발달해 있으며 기공의 크기가 본 실험 골재는 10~300 μm 로 Liapor사 제품에 비해 약간 크며 Liapor사 제품의 표면에 얇은 층이 형성된 반면 본 실험 제품은 층이 발견되지 않은 것을 알 수 있었다. 기공의 크기는 적정 열처리 온도가 높을수록 커지므로 본 실험 골재는 약간 높은 온도에서 열처리되었다고 볼 수 있다. 표면에 있는 얇은 층은 골재의 발포시에 용착을 방지하는 역할을 하는데 본 실험 골재의 경우 용착을 방지하기 위한 Al_2O_3 코팅층이 매우 얇기 때문인 것으로 생각되었다. Table 8, Fig. 9는 저비중골재가 제조된 소성조건 및 골재의 물성을 나타내었다.

슬러지를 10~20% 첨가하였을 경우 슬러지내의 용제성분에 의하여 과량의 액상이 발생하여 강도가 증가하고 흡수율이 낮아지는 효과가 있었다.



(a) Liapor Co.

(b) This sample

Fig. 8 Micro-structure of lightweight aggregate for non structural concrete

Table 8 Test results of lightweight aggregate coated by Al_2O_3 for non structural concrete

No.	Mix proportion(%)			Temperature (°C)	Dry specific gravity	Absorption (%)	Crushing strength (ton)
	PSA	Clay	Sludge				
LA1	Liapor Co.			-	0.52	24.4	2.1
LA2				-	0.74	15.7	3.2
LA3				-	0.97	14.1	10.7
PA1	50	40	10	1360	0.91	12.7	8.0
PA2	50	50	-	1360	0.87	16.5	4.6
PA3	50	50	-	1350	0.76	9.5	4.3
PA4	50	50	-	1350	0.59	12.0	3.7
PA5	50	30	20	1345	1.12	6.8	9.9
PA6	50	40	10	1345	0.66	9.2	6.4
PA7	50	50	-	1355	0.59	18.9	4.6

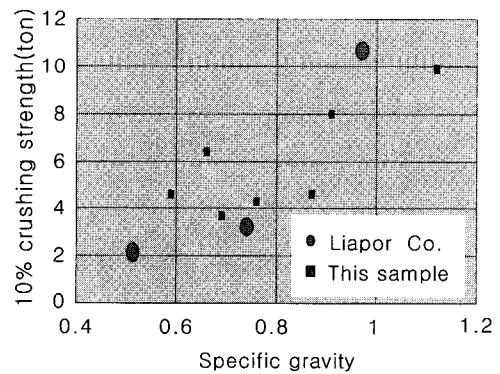


Fig. 9 Strength of lightweight aggregate coated by Al_2O_3 for non structural concrete according to specific gravity

2) 플라이애쉬 코팅

용착을 방지하기 위해 사용한 Al_2O_3 분말은 비교적 고가이기 때문에 폐기물의 일종인 플라이애쉬를 이용하여 용착방지 효과를 검토하였다. Table 9, Fig. 10에 골재가 제조된 소성조건 및 골재의 물성을 나타내었다. 플라이애쉬 코팅량은 2~4%, 소성온도는 1190~1300 °C, 체류시간은 7~14 min으로 하였다. 플라이애쉬의 코팅효과를 살펴보기 위하여 배합은 PSA : 점토 : 산화철 : B/C Oil = 50 : 50 : 2 : 1로 하였으며 플라이애쉬로 코팅한 골재의 경우 적

절한 소성조건에서 절건비중이 1.0~1.2인 범위에서 우수한 물성의 골재제조가 가능하였으며 이때 파쇄강도는 10~15 ton, 흡수율은 12~15 %로 Liapor사의 골재에 비해 거의 동등의 물성을 나타내었다. 그러나 코팅효과는 Al_2O_3 에 비하여 매우 저하되며 절건비중 0.9이하의 골재를 제조하기 위하여 소성온도를 높이면 용착현상이 발생하여 골재의 제조가 불가능하였다.

3.4.2 구조체용 인공경량골재

구조체용 골재는 비구조체용 골재에 비하여 소성시 약간만 발포시켜도 제조가 가능하기 때문에 용착현상이 발생할 염려가 적다. 따라서 표면에 코팅을 하지 않고 노내의 온도와 분위기를 조절하여 표면에 내화도가 높은 산화피막을 형성시켜 용착을 방지하면서 골재의 제조가 가능하였다. Table 10, Fig. 11은 구조체용 골재가 제조된 소성조건 및 골재의 물성을 나타내었다.

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 용융온도가 낮아져 발포하게 되는 것이다. 이러한 방법은 노내의 분위기에 매우 세심한 주의를 기울여야 하고 원료의 화학조성 중에 용제성분이 너무 많은 경우 분위기 조절만으로는 용착을 방지할 수 없는 경우도 있다. 산화피막의 두께는 원료의 화학조성뿐만 아니라 노내의

Table 9 Preparing condition and test results of light weight aggregate coated by fly ash for non structural concrete

No.	Sintering condition					Quality of aggregate		
	Temp (°C)	Slope (°)	RPM	Air (No.)	Feed (kg/min)	Dry specific gravity	Absorption (%)	Crushing strength (ton)
L3	Liapor Co.					0.97	14.1	10.7
L4						1.07	13.8	11.4
L5						1.22	12.3	12.9
PA8	1300	2.0	5	8.0	1.59	0.86	13.3	4.4
PA9	1305	2.0	6	8.0	1.59	1.01	12.0	9.9
PA10	1220	1.0	6	3.0	2.38	1.16	14.1	13.1
PA11	1225	0.5	6	3.0	2.38	1.47	15.1	12.0
PA12	1215	2.0	6	2.5	2.38	1.08	15.6	12.2
PA13	1215	2.0	6	2.5	2.38	1.06	14.5	10.6
PA14	1245	1.0	6	6.0	2.38	1.08	13.6	9.1
PA15	1245	1.0	6	6.0	0.23	1.44	13.7	9.2
PA16	1245	1.5	6	6.0	2.38	1.16	13.5	12.1
PA17	1245	2.0	6	6.0	2.38	1.21	16.4	13.5
PA18	1190	1.0	6	4.0	2.38	0.94	13.1	4.9
PA19	1190	1.5	6	4.0	2.38	1.10	14.4	12.8
PA20	1190	2.0	6	4.0	2.38	1.21	14.2	15.5
PA21	1210	2.0	6	4.0	0.23	1.35	18.3	12.0
PA22	1210	1.5	6	4.0	0.23	1.45	21.3	8.3

분위기 및 열이력에 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.

Fig. 12는 구조체용 인공경량골재의 단면 SEM사진으로 기공의 형태가 용융발포에 의한 것이 아니고 입자사이의 공극이 소결에 의해 기공으로 남은 형태인 것으로 판단된다. 절건비중이 다소 높은 1.3~1.4인 골재가 제조되었으나 점토의 함량을 60, 산화철을 3%로 첨가하고 체류시간을 5분이하로 소성대로 더욱 신속히 진입시킨 결과 절건비중 0.9인 골재의 제조가 가능하였다.

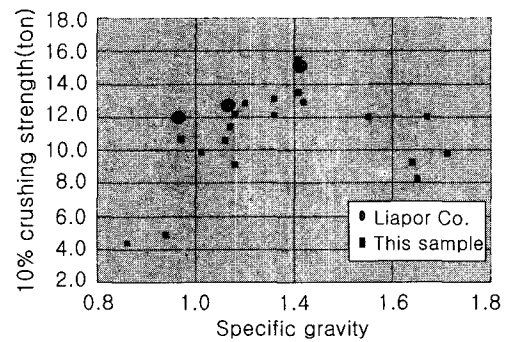


Fig. 10 Strength of lightweight aggregate coated by fly ash for non structural concrete according to specific gravity

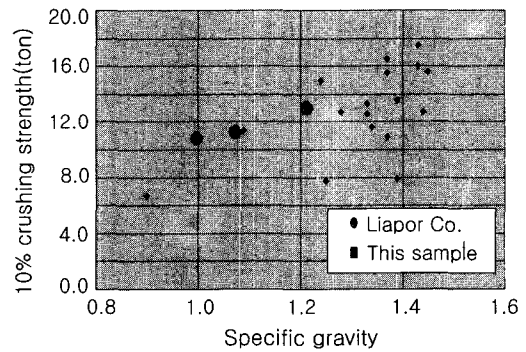


Fig. 11 Strength of lightweight aggregate for structural concrete according to specific gravity

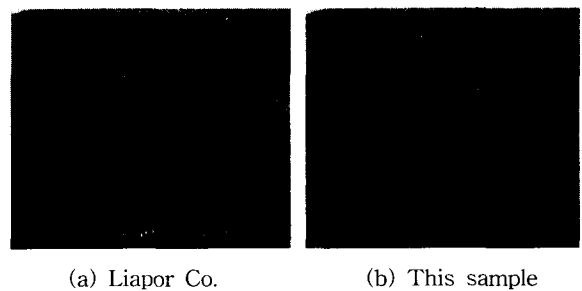


Fig. 12 Micro-structure of lightweight aggregate

Table 10 Preparing condition and test results of lightweight aggregates for structural concrete

No.	Mix proportion(%)					Sintering condition					Quality of aggregate		
	PSA	Clay	F/A	Sludge	Fe ₂ O ₃	Temp (°C)	Slope (°)	RPM	Air (No.)	Feed (kg/min)	Dry specific gravity	Absorption (%)	Crushing strength (ton)
PA23	50	50	-	-	-	1185	1.0	6	1.5	2.38	1.34	11.9	11.6
PA24	40	20	30	10	2						1.37	15.9	10.9
PA24-a											1.39	18.8	7.9
PA25	50	30	-	10	2	1165	1.0	6	3.0	2.38	1.28	11.5	12.8
PA26	50	30	20	-	0.5	1200	2.5		2.5		1.25	17.1	7.7
PA27	30	40	30	-	1	1145	1.0		1.0		1.33	13.7	12.6
PA28	30	40	30	-	2	1180	2.5	6	8.0	2.38	1.33	15.5	13.3
PA28-a											1.43	13.5	16.0
PA28-b											1.45	11.4	15.6
PA28-c											1.44	11.2	12.8
PA29	30	40	30	-	3	1150	2.5	6	3.5	2.38	1.37	13.2	15.6
PA29-a											1.37	13.2	16.5
PA29-b											1.39	13.4	13.6
PA30	30	50	20	-	2	1150	2.5	6	3.5	2.38	1.24	14.7	15.0
PA30-a											1.43	12.5	17.5
PA31	40	60	-	-	3	1170	3.5	6	2.0	2.38	1.09	18.7	11.4
PA32						1190					0.90	18.5	6.7

5. 결 론

PSA의 적절처리 방안으로 제시된 인공경량골재 제조를 위해 PSA를 주원료로 하고 점토, 플라이애쉬, 제지슬러지를 부원료로 첨가하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PSA는 단독으로는 인공경량골재의 원료로 부적합하여 점토, 플라이애쉬, 제지 슬러지 등의 부원료의 첨가가 필요하였으며 실험결과 적정 배합비는 PSA 30~50%, 점토 30~50%, 플라이애쉬 0~40%, 제지 슬러지 0~10%, 산화철 2~3%이었다.

2) 디스크 방식으로 성형할 경우에 적정 함수율은 25%이었으며 골재의 입도는 디스크의 기울기와 RPM으로 조절이 가능하며 골재의 입도를 작게 하기 위해서는 기울기를 높이고 RPM을 빠르게 하면 가능하다.

3) 코팅제의 종류 및 첨가량에 따라 저비중의 비구조체용 인공경량골재의 제조가 가능하였으며 PSA의 특성상 절건비중 0.8이하의 초경량골재를 제조하기 위해서는 코팅을 하는 것이 필수적이며 코팅제의 종류에 따라 제조 가능한 골재의 최저 절건비중은 Al₂O₃ 2% 코팅일 때 0.59, 플라이애쉬 2% 코팅일 때 0.81, 코팅하지 않은 경우 0.91이었다.

4) 구조체용 골재의 특성은 동일한 배합비 및 온도에서도 노내의 분위기 및 열이력에 따라 매우 다른 양상을 보이나 대략적으로 1180~1250 °C가 적정 소성발포온도이었

다. 융착현상을 방지하기 위해서는 산화피막을 형성시키는 것이 유리하나 너무 두껍게 되면 경량화에 불리할 뿐만 아니라 표면균열이 깊게 되어 비중상승, 강도저하 및 흡수율 상승의 요인이 된다. 노내의 분위기는 공기/가스비, 원료의 투입량 등에 의해서 결정되며 일반적으로 환원성분 위기에서는 발포에 유리하나 융착현상이 발생할 우려가 있으며 공기/가스 당량비가 2~3일 때 안정적인 제조가 가능하였다.

5) PSA를 주원료로한 골재의 물성은 절건비중이 0.6~1.4로 비교적 넓은 범위의 골재 제조가 가능하였으며 10% 세립치 파쇄강도 5~15 ton, 흡수율 10~20%로 비구조용 및 구조용 인공경량골재로 적합하였으며, 외국제품에 비해서도 거의 동등한 물성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 전북대학교 공업기술연구소의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국제지공업연합회, “제지산업 폐기물 발생 및 처리현황 보고서,” 1999. 9, pp.12~19.
2. 문경주, “제지 슬러지 소각회를 이용한 비소성 골재 제조 및 적용,” 전북대학교 건축공학과 석사학위 논문, pp.20~25.
3. Riley, C. M. “Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays,” Minnesota Geological Survey,

- Summary Report No.5, July, 1950. pp.121~128.
4. (주)금강 중앙연구소, “경량골재 개발 및 경량콘크리트 실용화 연구 중간보고서,” 1996. pp.34~42.
 5. Samsonov G. V., “*The Oxide Handbook*,” Pelenum Publishing Corporation, 1982. pp.68~82.
 6. Kingery W. D., “*Introduction to Ceramics*,” John Wiley & Sons, Inc., 1976. pp.25~47.
 7. Bykal, G., and Doven, A. G., “Utilization of Fly Ash by Pelletization Process ; Theory, Application Areas and Research Results,” *Resources Conservation and Recycling*, Vol.30, 2000, pp.59~77.
 8. 소양섭 외 3인, “성형장치에 따른 PSA 소성 경량골재의 품질,” 대한건축학회 학술발표논문집, 제20권 2호, 2000. 10, pp.387~390.
 9. 소양섭 외 2인, “제조 조건에 따른 구조체용 소성 경량골재의 품질 특성,” 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제12권 2호, 2000. 11, pp.339~344.

요 약

본 연구는 제지 슬러지 소각재의 보다 근본적이고 장기적인 처리방안으로 인공경량골재를 제조하여 고부가 자원으로서의 개발과 대량으로 처리할 수 있는 기술에 관한 연구이다. 따라서 배합비, 성형 및 소성조건을 달리하여 골재를 제조하고 이에 따른 골재의 물성을 평가하고자 하였다. 실험결과 제지 슬러지 소각재 단독으로는 인공경량골재의 원료로 부적합하여 점토, 플라이애쉬 등의 부원료의 첨가가 필요하였으며, 적정 배합비는 제지 슬러지 소각재 30~50%, 점토 30~50%, 플라이애쉬 0~40%, 제지 슬러지 0~10%, 산화철 2~3% 이었다. 또한 본 배합비를 이용하여 절건 비중이 약 0.6~1.4의 다양한 경량골재 제조가 가능하였다. 골재의 물성 시험 결과 10% 세립치 과쇄강도 및 흡수율은 5~10 ton 및 10~20%로 나타나 골재의 물성은 비구조용 및 구조용 인공경량골재로 적합하였으며, 외국제품에 비해서도 거의 동등한 물성을 나타내었다.

핵심용어 : 제지 슬러지 소각재, 점토, 플라이애쉬, 경량골재, 구조용, 비구조용