

화력발전소 발생 플라이애쉬를 이용한 인공골재 제조

윤 수 중*

부산대학교 나노정보소재공학과

Fabrication of Lightweight Aggregates Using Fly Ash from Coal Burning Heat Power Plant

Su-Jong Yoon*

Department of Nanomaterials Engineering, Pusan National University, Miryang, 627-706, Korea

(Received March 6, 2006; Accepted April 3, 2006)

Abstract Recycling industrial wastes such as fly ash from a coal burning heat power plant and shell from an oyster farming were investigated to prevent environment contamination as well as to enhance the value of recycling materials. In this study, the lightweight aggregates and the red bricks were fabricated from fly ashes with other inorganic materials and wastes. The starting materials of the lightweight aggregate were fly ash powder and water glass, and the compacts of these materials were heat treated at 1100°C. The fabricated lightweight aggregates had low bulk density, 0.9-1.2 g/cm³, hence floated on the water and had the strength of 7.0-11.0 MPa and the modulus of 2900-3300 MPa which indicates it has enough strength as the aggregate. Another type of the lightweight aggregate was prepared from fly ashes, shell powders and clays. The bulk density, porosity, and compressive strength of these aggregates were 1.19-1.34 g/cm³, 18.3~56.1% and 5-12 MPa, respectively. The addition of a small amount of fly ash powder prevented hydration of the light weight aggregates. The red brick was also fabricated from the fly ash containing materials. It is suitable for the brick facing of a building as it has moderate strength and low water absorption rate.

Keywords : Fly ash, Shell, Recycling, Lightweight aggregate, Red brick

1. 서 론

천연골재로서의 자갈 및 모래의 원활한 공급의 어려움과 성능상의 요구에 의해서 각종 인공골재의 제조의 필요성이 대두하게 되었다. 근래 들어 모르타르나 콘크리트의 경량화의 요구에 부응하여 각종의 경량골재의 이용이 급증하고 있다. 천연적으로 존재하는 화산재 및 경석은 채가름, 기타 간단한 처리로 골재가 된다. 이와 비슷한 인공재에 팽창슬라그가 있다. 일반적으로 이것들은 경량이라고 해도 비교적 무겁고 입자의 표면에 개방기공이 많으므로 표면을 시멘트 유사물로써 코팅하는데, 이를 개량골재라고 한다. 비교적 가벼운데 비해서 강도가 큰 인공경량골재로

서 팽창혈압, 팽창점도, 팽창플라이애쉬류가 있는데 주로 구조용 콘크리트로서 이용된다. 또한 이것들보다 더욱 가벼운 인공골재로서 팽창비클라이트와 팽창퍼얼라이트를 들수 있는데, 이것들은 주로 단열용의 모르타, 플라스틱 및 콘크리트에 이용된다. 콘크리트의 압축강도는 대개의 경우 200~250 kg/cm² 정도인데 반하여 인공골재자체의 강도는 500~2000 kg/cm² 정도이다. 따라서 적당한 인공경량골재를 사용하면 일정한 시멘트량으로 콘크리트의 강도는 거의 저하되지 않고 비중을 감소시킬 수 있다. 콘크리트를 경량화하면 철근 기타 강재의 사용이 절약되며 기초도 간단하게 되므로 다소 고가인 인공경량골재라도 천연의 자갈 혹은 경석류와 치환해서 이용할

*Corresponding Author : [Tel : +82-55-350-5275; E-mail : yoonsj@pusan.ac.kr]

수 있다.

국내 플라이애쉬의 대부분은 석탄화력 발전소에서 발생되고 있다. 발전소에서 대량으로 소모된 석탄의 폐기물인 플라이애쉬는 그 처리에 있어 아직은 대부분을 매립에 의존하고 있어 이로 인한 환경오염이 심각하며 재활용 정도는 선진국에 비하여 매우 미미한 상태이다. 따라서 매립에 대한 환경오염과 매립지를 확보하는데 그 한계를 나타내고 있다. 그러나 최근에 자원의 재활용과 환경보전 차원에서 재활용의 필요성이 높아 가고 있다. 또 플라이애쉬의 발생량은 급격히 증가하고 있으며 연도별 국내 플라이애쉬의 발생량의 증가는 표 1^{1,2)}에 나타난 것처럼 2006년도에 5백만톤에 이를 것으로 예상되고 있다. 또한 현재 우리나라에서 굴양식업에서 부산물로 발생하는 굴 폐각은 해안지역에 그대로 야적되어 연안어장의 오염, 공유수면 관리상의 지장, 자연경관의 훼손 및 보건 위생상의 문제 등으로 중요한 환경문제를 야기하고 있다.^{3,6)}

따라서 본 연구에서는 산업 폐자원을 이용하여 기존의 콘크리트에 적용이 가능한 경량골재를 개발할 목적으로, 수산양식업의 폐각과 자동차의 폐유리, 화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬를 주원료로 사용하여 경량골재의 제조공정을 확립하고 그 물성을 평가함으로써 이의 응용가능성을 검토하였다. 또 플라이애쉬를 주로 하여 건축재료의 하나인 적벽돌, 경량화 골재등의 공업원료로 제조 활용함으로써 환경오염을 방지하고 폐자원을 재활용하여 경제적 부가 가치를 높일 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용한 플라이애쉬는 B화력발전소에서 발생된 것을 사용하였으며 폐각은 남해안 연안에서 발생하는 양식 굴껍질을 사용하였다. 수거된 플라이애쉬는 건조기를 이용하여 100°C에서 5시간 건조하여

표면의 수분을 제거하였다. 이때 건조된 분말의 열적 거동을 조사하기 위하여 승온속도를 10°C/min으로 하여 1200°C까지 TG/DTA를 사용하여 측정하였다. 그리고 폐각의 경우 존재하는 염분을 제거하기 위하여 수세한 다음 약 3~4일 동안 자연건조 시켰다.

수분이 제거된 플라이애쉬분말은 전기로를 이용하여 5°C/min의 승온속도로 900°C에서 2시간 하소처리를 하였다. 하소처리한 분말을 불밀을 이용하여 5시간 분쇄하고 200 mesh 체로 체가름을 한 후 가압성형기를 이용하여 250 Kg/cm²의 압력으로 성형하였다. 성형된 시편은 전기로를 이용하여 5°C/min의 승온속도로 1200°C에서 2시간 유지하며 열처리하여 적벽돌을 제조하였다.

그리고 경량골재 제조를 위해 건조된 폐각은 조분쇄한 후 불밀링 하였으며 미분쇄한 분말을 단독 혹은 점토, 플라이애쉬, 파쇄한 폐유리분말과 함께 표 2와 같은 비율로 혼합, 성형한 후 상자형로에서 임의의 온도에서 열처리한 다음 노냉시켰다. 부피밀도, 기공율 및 흡수율을 측정하기 위한 시편은 구형의 입자로 성형하여 건조한 후, 조성 및 열처리 조건을 달리하여 제조하였다. 각 조합물에 대한 열처리 조건을 표 3에 요약하였다. 시료 A, B, C에는 별도로 하소공정을 추가하여 그 물성도 조사하였다. 소성은 승온속도 5°C/min로 승온하여 1100°C 혹은 1200°C에서 10~180분 동안 임의로 유지함으로써 행하였다.

또 초경량골재를 제조하기 위하여 수분을 제거한 플라이애쉬를 분쇄기를 이용하여 분쇄한 후 체가름으로 분급하여 일정크기의 플라이애쉬 분말을 얻었다. 이 분말에 물과 물유리를 혼합하여 혼합분말을 만들고 플라이애쉬 분말을 중량비로 50-80%로, 물유리를 중량비 50-20%를 물과 함께 혼합기를 이용하여 혼합하였다. 혼합분말은 상온에서 1-5시간 동안, 숙성시킨 후 성형기를 이용하여 여러 가지 모양으로 성형하였다. 상기와 같이 성형된 제품은 50-150°C의 온도에서 건조기를 이용하여 2-24시간 동안, 건조하였다. 건조된 성형품은 1000-1200°C의 온도로 열처리하여 소결체를 획득하였다. 이상과 같은 공정을 그림 1에 나타내었다.

이렇게 제조된 적벽돌, 경량골재 및 초경량골재의 부피밀도, 겉보기 밀도, 겉보기 기공율 및 흡수율을 측정하기 위하여 아르키메데스법을 이용하였다. 또한 제조된 시편들의 기계적 성질을 조사하기 위하여 압

Table 1. Production of fly ashes in domestic (unit : 1000 ton)

Year		Year				
		1987	1989	1991	2001	2006
Coal						
Output	coal	652	783	871	4,382	5,060
	anthracite	1,090	1,063	1,284	600	382

Table 2. Mixing ratio of raw materials for the lightweight aggregates

Sample	Materials	Ratio (wt.%)
A	Shell powder	100
B	Shell powder	90
	clay	10
C	Shell powder	50
	clay	10
	glass powder	40
D	Shell powder	66
	clay ash	17
	glass powder	17
E	Shell powder	50
	fly ash	25
	glass powder	25
F	Shell powder	10
	fly ash	60
	glass powder	30

Table 3. Firing conditions for the preparation of the lightweight aggregates

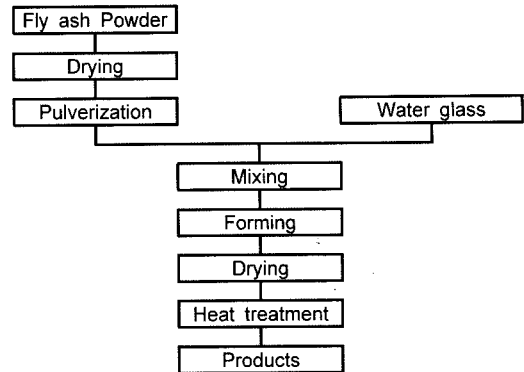
Sample	Heating rate (°C/min)	Dwell time (min)	Temp. (°C)	Calcination
A	5	180	1200	900°C, 30 min
B	5	180	1100	800°C, 120 min
C	5	120	1100	800°C, 120 min
D	5	30	1200	-
E	5	30	1100	-
F	5	10	1100	-

축실험을 행하였으며 이를 통하여 각 시편들의 압축강도 및 탄성계수를 조사하였다. 또한 제조된 시편의 미세구조를 관찰하기 위하여 시편을 절단하고 절단된 부분을 SEM을 사용하여 조사하였으며 입도분포는 BET를 사용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료

굴패각은 97% 이상이 CaCO_3 로 이루어져 있으며⁷⁾ 플라이애쉬의 주성분은 표 4와 같이 SiO_2 와 Al_2O_3 였다. 건조분말 경우 탄소의 함량이 44.6 wt%로 많은 양의 탄소를 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 5 wt% 이상의 Fe_2O_3 가 함유되어 있는데 이는 제조한 소결체의 전체적인 색도에 영향을 미칠 것으로 사료

**Fig. 1. Flow chart of lightweight aggregate preparation.**

된다.

그림 2는 플라이애쉬를 승온속도 10°C/min으로 하여 1200°C까지 측정된 TG/DTA 결과를 보여주고 있다. 승온에 따른 무게손실은 30.5%로 나타났으며 529°C와 660°C에서 두 개의 발열피크가 나타났다. 이 중 529°C에서의 발열피크는 플라이애쉬에 함유되어 있던 황의 연소에 의한 발열피크이며 660°C에서의 발열피크는 카본의 연소에 의한 것으로 판단된다. 이 열분석 결과로부터 플라이애쉬의 하소온도를 2차 발열피크의 끝부분의 온도인 900°C로 결정하였다. 이러한 조건에서 하소처리된 플라이애쉬의 조성은 탄소의 함량이 0.6 wt%로, 하소처리 전과 비교하여 크게 감소한 것을 알 수 있다. 이는 DTA 결과에서 예상한 것과 같이 함유되어 있던 탄소가 하소처리 중에 연소반응을 일으켜 소모되기 때문이다.

그림 3은 플라이애쉬를 건조기로 100°C에서 5시간 건조한 후 측정된 입도분석의 결과이다. 플라이애쉬 분말을 물을 용매로 하여 33°C의 온도에서 측정된 결과 10-30 μm의 입도분포와 1 μm 내외의 입도분포를 하고 있는 것으로 입도분포가 좁고 입경이 작은 미분말로 이루어져 있음을 알 수 있다.

3.2. 적벽돌 제조

표 5는 하소처리된 분말을 가압성형한 후 전기로에서 5°C/min의 승온속도로 1200°C에서 2시간 열처리하여 제조한 시편의 부피밀도, 겉보기밀도, 겉보기 기공율 및 흡수율을 측정된 결과이다. 평균 겉보기밀도는 2.0 g/cm³, 부피밀도 1.63 g/cm³, 기공율 10%, 흡수율은 6.3%로 나타났다. 따라서 플라이애쉬로 제

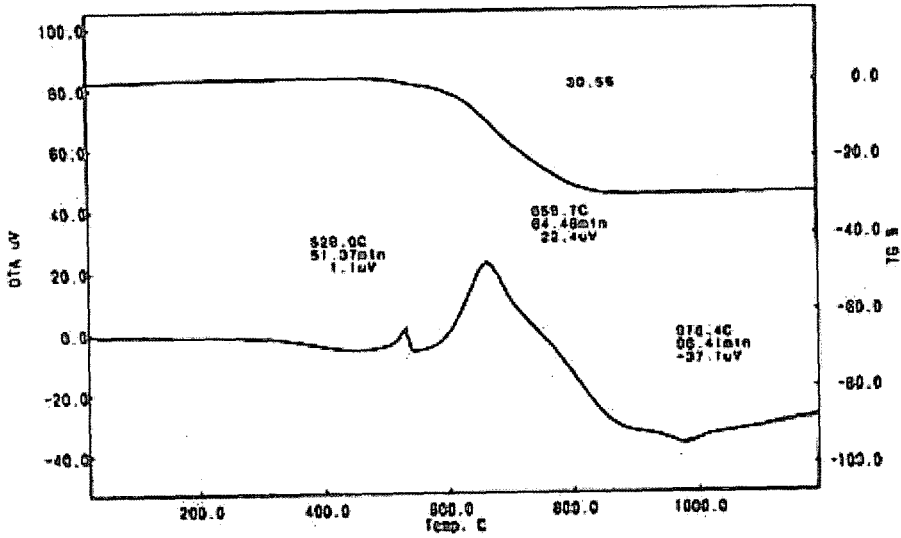


Fig. 2. TG/DTA curves of the fly ash.

Table 4. Chemical analysis results of the fly ash and the calcined fly ash

Sample	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	C	S
Dry	28.28	0.49	13.18	5.11	0.43	0.048	0.84	0.07	0.91	1.72	44.6	1.2
Calcination	56.91	0.80	24.84	9.53	0.97	0.063	1.41	0.13	1.86	3.10	0.60	0.15

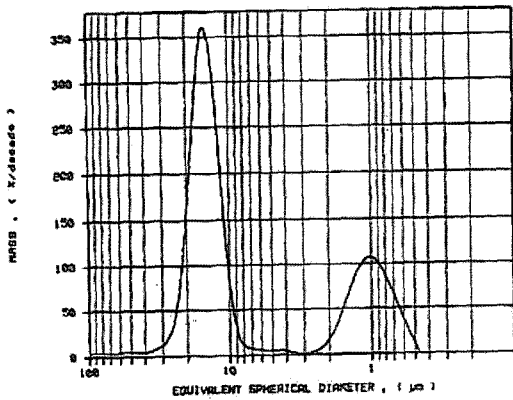


Fig. 3. Particle size distribution of the fly ash.

조된 적벽돌은 밀도가 비교적 낮고 흡수율도 낮은 것을 알 수 있다. 또한 압축실험을 통하여 얻은 적벽돌의 최대 압축응력은 138.7 MPa 이었고 탄성계수는 18528.5 MPa로 나타났다. 이와 같은 결과는 플라이애쉬를 이용하여 제조된 적벽돌이 건축용 외장재료의 활용에 충분한 압축강도를 가진다는 것을 나타낸다. 그림 4는 수소처리된 분말을 가압성형한 후 전기로에서 5°C/min의 승온속도로 1200°C에서 2시간 열

Table 5. Mechanical properties of the samples sintered at 1200°C

Property	Value
Bulk density (g/cm ³)	1.63
Apparent density (g/cm ³)	2.0
Apparent porosity (%)	10.0
Water absorption (%)	6.3

처리한 시편을 절단하여 절단부분의 미세구조를 관찰한 SEM측정 결과이다. 다수의 기공이 고루 분포되어 있고 구형의 미립자의 응집이 확인된다. 제조된 적벽돌은 전체적으로 붉은 색조를 띠고 있으며 이것은 분말 중에 함유되어 있는 Fe₂O₃의 영향으로 판단된다⁸⁾. 이상과 같은 결과에서 화력발전소의 폐기물인 플라이애쉬를 이용하여 건축재료의 하나인 저밀도의 적벽돌로 제조하면 경량화가 가능하며 파괴율도 비교적 높고 흡수율은 낮아 건축외장재료의 응용에 적합하다고 사료된다.

3.3. 경량골재 제조

폐각에 점토, 플라이애쉬 및 파쇄한 폐유리분말을

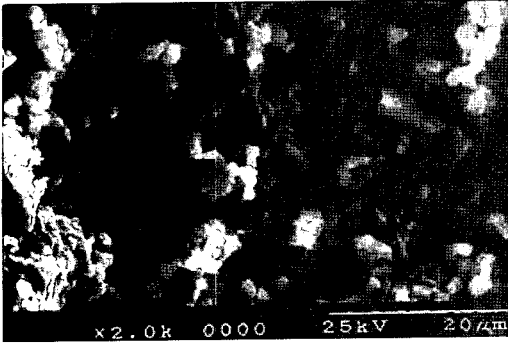


Fig. 4. SEM microphotograph of the red brick produced from fly ash.

Table 6. Physical properties of the batch compacts after firing

Sample	Bulk density (g/cm ³)	Apparent porosity (%)	Water absorption (%)
B	1.25±0.35	56.1±13.5	7.9±3.0
C	1.34±0.2	28.1±3.5	19.5±2.8
D	1.23±0.06	57.6±1.8	47.1±4.6
E	1.27±0.02	52.4±0.4	41.6±0.7
F	1.19±0.04	18.3±3.2	15.4±2.3

혼합하여 제조한 경량골재의 부피밀도, 기공율, 흡수율을 표 6에 요약하였다. 대체적으로 부피밀도 1.5 g/cm³이하의 범위에서 거의 비슷한 값을 갖는 소결체가 제조되었으나, 흡수율과 기공율은 조합비에 따라서 큰 차이를 나타내었다. 순수한 패각만을 사용한 시료 A의 경우는 수분에 대한 소화성이 나타났으며 패각분말과 점토를 사용한 시료 B, C의 경우는 기공율과 흡수율의 관점에서 양호하나 대기 중에 오랫동안 방치할 경우 이 역시 소화성으로 인하여 사용상에 문제가 있을 것으로 판단된다. 점토 대신 플라이애쉬를 사용한 D, E의 경우, 소화성의 문제가 야기되지 않았으나 기공율과 흡수율이 다소 크게 나타났다. 패각분말의 사용량을 10 wt% 정도로 이주 낮추고 플라이애쉬 60 wt%, 폐유리분말 30 wt%로한 경우 (F), 부피밀도 1.19 g/cm³, 기공율 18.3%, 흡수율 15.4%로써, 내소화성을 나타내었으며, 조합물중에서 제일 우수한 물성을 나타내었다. 기공율과 흡수율 측면에서 30 wt% 이하의 폐유리 사용이 바람직하였다. 시료 D, E, F 소결체 10개에 대한 평균 압축강도는 각각 5.1, 11.8, 10.6 MPa 이었다. 강도 측면에서는

Table 7. Mechanical properties of the lightweight aggregates prepared from fly ash

Property	Bulk density (g/cm ³)	Apparent porosity (%)	Water absorption (%)
	0.9 - 1.2	15.0 - 22.0	5.0 - 17.0

Table 8. Compression test results of the lightweight aggregates

Max. Load (KN)	Max. Stress (MPa)	YLD. Stress (MPa)	Modulus (MPa)
0.9 - 1.2	7.0 - 11.0	6.0 - 9.0	2900 - 3300

낮은 기공율을 함유하는 시료 F의 소결체에 비하여 부피밀도가 다소 높고 기공율이 큰 E의 경우가 약간 우세한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시편 내 입자간의 결합강도의 차이에서 기인한다고 할 수 있다. 시편 E의 경우 적당량의 미세 플라이애쉬 및 폐유리 입자가 소성에 의해서 패각입자와 강하게 결합되어 있기 때문에 기공율이 높음에도 불구하고 최대압축강도가 낮은 기공율을 가진 시편 F보다 높다고 사료된다. 전체적인 물성을 고려할 때 시편 F가 부피밀도, 기공율, 흡수율 및 강도에서 가장 바람직한 조합을 나타내는 것으로 판단되며 이 경우의 비표면적은 14.23 m²/g이었다.

3.4. 초경량골재 제조

상기 그림 1과 같은 공정으로 제조된 경량화 골재의 부피비중과 기공율 및 흡수율의 측정결과는 표 7과 같다. 이들의 부피비중은 0.9-1.2 g/cm³으로 매우 낮게 나타났으며 기공율은 15-22%, 흡수율은 5.0-17.0%였다. 이들의 특성은 사용한 물유리의 양과 열처리 온도 및 유지시간의 정도에 따라서 결정되었다. 플라이애쉬를 원료로 하여 제조된 경량화 골재의 압축실험 결과를 표 8에 나타내었으며 이때 최대응력은 7.0-11.0 Mpa, 탄성계수는 2900-3300 MPa 였다. 상기의 결과는 플라이애쉬를 원료로 하여 제조된 경량화 골재는 건축재료로서 충분한 특성을 가진다는 것을 나타낸다. 그림 5는 플라이애쉬를 원료로 하여 제조된 경량화 골재를 횡단면으로 절단한 후 연마한 시편의 전자현미경 측정결과를 나타내었다. 조대한 기공이 다수 존재하며 이들 기공의 대부분이 폐기공

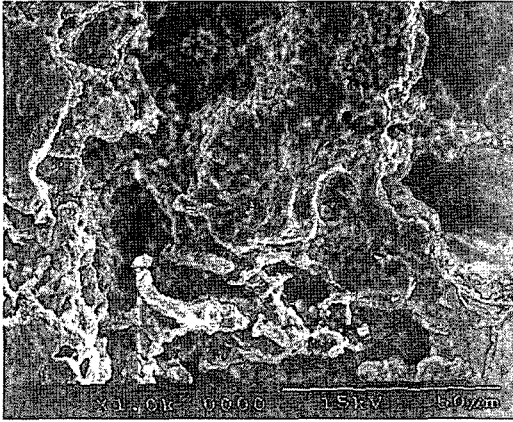


Fig. 5. SEM micrograph showing the fracture surface of the lightweight aggregate.

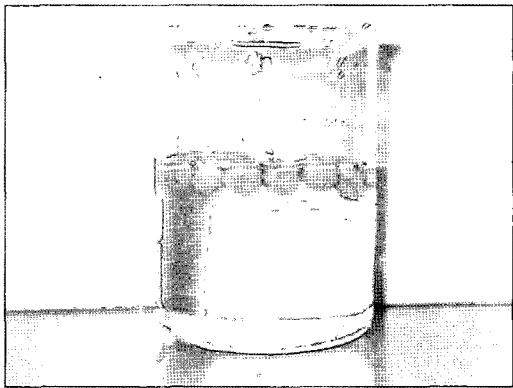


Fig. 6. Photograph of the lightweight aggregates prepared from fly ash powder.

으로 판단되며 이러한 폐기공의 존재가 제조된 경량화 골재의 부피밀도를 낮추고, 또한 그림 5에서 보이는 입자들 간의 강한 응집이 압축강도를 유지시키는 것으로 사료된다. 플라이애쉬를 원료로 하여 제조된 경량화 골재의 제품은 그림 6에 나타내었다. 사진에서와 같이 제조된 경량화 골재의 부피비중이 1 g/cm^3 이하로 물에 부유되는 현상을 볼 수 있다.

4. 결 론

화력 발전소에서 대규모로 발생하는 폐기물인 플라이애쉬와 수산양식업의 폐각을 주원료로 사용하여 건축재료의 하나인 적벽돌, 경량화 골재 등의 공업 원료로 제조 활용함으로써 환경오염을 방지하고 폐자원을 재활용하여 경제적 부가가치를 높일 수 있는 방안을 검토하였다. 폐각분말, 플라이애쉬, 폐유리분말을 각각 10, 60, 30 wt.% 조성으로 혼합한 소결체는 경량골재용으로서 적합한 조합물인 것으로 확인되었으며 또 플라이애쉬를 무기결합제와 혼합 성형하고 1100°C 부근의 온도에서 열처리하여 물에 부유하는 초경량골재를 제조할 수 있었다. 제조된 경량골재의 특성 중 부피비중은 $0.9\text{-}1.2 \text{ g/cm}^3$ 으로 기존 골재보다 매우 가볍게 나타났으며 기공율은 15.0-22.0%로 조사되었으며 흡수율은 5.0-17.0%로 나타났다. 또 경량골재의 탄성계수는 2900-3300 MPa 범위로 골재로서 사용하기에 충분한 강도값을 나타내었다. 그리고 플라이애쉬를 이용하여 건축재료의 하나인 적벽돌의 제조가 가능하였으며 이때 제조된 적벽돌은 밀도가 낮아 경량화가 가능하며 파괴율은 비교적 높고 흡수율은 낮아 건축외장재료의 응용에 적합하였다.

참고문헌

1. 한국전력공사 기술연구원, 성토재료로서의 플라이애쉬 이용방안 연구, 연구보고서, KRC-90H-J06 (1992) 462.
2. 오성원, “석탄회처리 현황과 대책”, 플라이애쉬활용 국제 워크숍, 한국전력공사, (재)한국계면공학연구소, 8 (1996) 3.
3. 황선치, 경성대학교 환경연구소보, 4 (1994) 71.
4. 문병현, 창원대학교 환경문제연구소보, 4 (1995) 129.
5. 성낙창, 한국환경위생학회지, 22 (1996) 97.
6. 김문평, 대한환경공학회지, 19 (1997) 81.
7. 류수착, 엄지영: 한국재료학회지, 12 (2002) 747.
8. 이종근, “무기재료 공업개론”, 반도출판사 (1994) 29.