

플라이애쉬를 이용한 소성골재의 제조 및 특성에 관한 연구

An experimental study on the preparation and property of the sintering aggregate using fly ash

박 대 영* 김 도 수** 박 종 현*** 임 채 영*** 노 재 성****
Park, Dae Young Kim, Do Su Park, Jong Hyun Lim, Chae Young Rho, Jae Seong

ABSTRACT

Fusion temperature of fly ash was determined with wasted glass wool and borax using ash fusion determinator. 0.5wt% of bentonite and water glass used as binder. 50wt% of wasted glass wool added to fly ash, fusion temperature of fly ash was 1,156°C. Pellet was prepared, and then sintered at 1,000°C and 1,100°C. Water-absorption rate, specific gravity, porosity and pore structure of sintering aggregate was determined.

1. 서론

화력 발전소에서 미분쇄된 석탄을 고온에서 연소되고 난 후 남는 물질을 Ash라 하며 국내탄(무연탄)의 경우에는 26-50%, 석탄(유연탄)은 8-15% 정도의 Ash가 발생하며 연소 후 모이는 장소에 따라 Bottom Ash, Cinder Ash, Fly Ash 등으로 구분한다. 플라이애쉬는 배기가스가 대기로 배출되기 전 전기 집진기에 의해서 집진되어 집진기 하부 Hopper에 모이는 Ash를 말하며 입경은 탄종이나 연소 조건에 따라 다르나 보통 10-30 μ m로 발생하는 Ash의 75-80%를 차지한다.

유럽과 일본에서는 30여년 이상 계속적인 플라이 애쉬 이용기술개발과 각종 산업분야에 이용하여 최근에는 재활용률이 60% 이상이 되고 있다. 그러나 우리 나라는 97년 현재 320만 톤의 플라이애쉬가 발생하여 87만 톤을 재활용함으로써 약 27%를 재활용하였으며, 그 중에 시멘트·레미콘 분야에 90% 이상을 활용하였다.

국내 플라이애쉬의 이용률이 외국에 비하여 현저히 낮고, 매립되어 폐기되는 량이 많아 매립지 확보를 위한 경제적 부담뿐만 아니라 매립시 발생하는 분진에 의한 대기오염 및 토양, 수질오염 등의 간과할 수 없는 환경 공해를 유발하는 문제점을 동시에 갖고 있다.

* 충남대학교 대학원 석사과정

** 충남대학교 대학원 박사과정

*** 한전발전교육원 환경교수실 실장

**** 송학기업(주) 기술개발연구소 소장

***** 정희원, 충남대학교 정밀공업화학과 교수

이러한 실정에서 우리 나라는 주요 선진국의 플라이애쉬 자원화 이용 추세와 더불어 플라이 애쉬의 단순한 매립 방식에서 벗어나 국내 특수성에 부합되는 이용 기술을 개발할 필요성이 더욱 증대되고 있다. 그 동안 국내에서 진행되었던 플라이애쉬의 재활용 연구는 시멘트 혼화재료, 유가 금속의 회수, 파인 세라믹의 제조원료 및 ALC(Autoclaved Lightweight Concrete) 원료 등 다양한 분야가 연구되었으나 시멘트 혼화재료를 제외하고는 실질적인 활용이 진행되지 못하고 있으며 대량으로 발생하는 플라이 애쉬를 재활용하기에는 기술적으로 제한되어 있다. 이러한 연구 가운데 플라이애쉬를 인공경량골재의 원료로 이용하는 방안은 외국에서는 상당히 발전하였고 또한 제품화하여 생산하고 있다.

소성공정을 통한 인공경량골재의 제조는 에너지 비용이 큰 단점이 있으나, 콘크리트의 경량화를 이룰 수 있으므로 건축물의 고층화, 고품질화, 대형화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 경량콘크리트를 구조재료로 사용하면, 고층화에 따른 부재단면 확대를 경량화로 축소할 수 있으며, 이에 따른 기초비 절감효과를 볼 수 있고, 건축물의 경우 단열성능 향상에 따른 에너지 절약효과를 볼 수 있어 전체적으로 공사비 절감효과가 있다고 알려지고 있다. 그리고 인공경량골재를 사용함으로써 부족한 천연골재의 의존도를 저감시킬 수 있으므로 향후 골재수급에 대비할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 부재료 및 용제를 첨가하여 플라이애쉬의 용융온도를 측정하여 소성온도 저하 가능성을 확인하고 소성 골재를 제조하여 특성을 분석하고 골재로서의 가능성을 확인하였다.

2. 실험개요

일반적으로 플라이애쉬를 1,200~1,300℃로 가열하면 표면이 용융되면서 휘발 성분의 가스가 방출되어 다공성을 가지는 인공경량 골재가 만들어진다. 그러나 소성 온도가 높아 에너지 비용이 커지게 되므로 소성 온도를 적정 온도 이하로 낮출 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 소성 공정에 의한 인공경량골재 제조시에 에너지 비용을 절감시키고자 플라이애쉬에 용제(flux) 및 부재료를 첨가하여 소성 온도를 낮추고자 하였다.

2.1. 실험재료

플라이애쉬는 보령화력발전소에서 발생한 것으로 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 부재료로 B사에서 폐기물로 발생하는 유리섬유 폐재 및 공업용 붕사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)를 사용하였다. 점결제로는 H사의 벤토나이트와 공업용 3호품 물유리를 사용하였다. 유리섬유 폐재 및 벤토나이트의 화학 조성을 표 1에 나타내었다.

표 1 실험재료의 화학 조성

조성 (wt%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	B ₂ O ₃	TiO ₂	Ig loss
플라이애쉬	63.5	25.5	2.7	1.5	0.2	0.2	0.9	0.2	-	-	1.28
유리섬유 폐재	63.1	2.1	0.2	8.0	2.7	15.0	2.0	0.2	5.5	0.2	-
벤토나이트	62.0	17.6	2.2	2.4	2.0	2.7	0.7	-	-	-	6.7

2.2. 실험방법

용제의 첨가에 의한 소성온도 변화를 관찰하기 위하여 회용점로를 이용하여 플라이애쉬의 용융온도

를 측정하는 방법을 이용하였다.

용융온도 측정 장치는 LECO사의 AF 600 Ash Fusion Determinator를 사용하였고, 용융온도는 ASTM D 1857에 따라 측정하였다. 이때 시작온도는 538℃, 최종온도 1,550℃, 승온 속도는 8℃/min로 하였으며, 질소가스와 압축공기를 사용하여 산화성 분위기로 실험을 행하였다. 이때 유량은 3ℓ/min이었다.

결과 해석은 시료가 용융온도 측정 장치에서 승온 과정 중 그림 1과 같이 변화하는 높이와 두께의 비율에 따라 IDT(Initial Deformation Temperature), ST(Softening Temperature), HT(Hemispherical Temperature), FT(Fluid Temperature)로 구분하여 측정하였다.

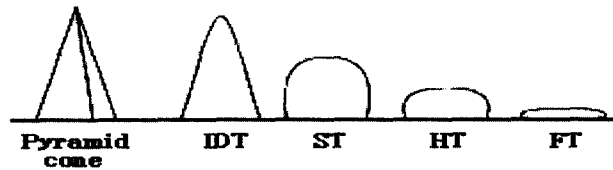


그림 1. 용융온도에 따른 cone의 변화

유리섬유 폐재는 플라이애쉬에 대하여 0, 20, 30, 50wt%를 첨가하였고, 용제로 사용된 붕사는 5wt%로 고정시켰으며, 벤토나이트와 물유리는 각각 0.5wt%를 첨가하였다.

용융온도 측정 결과 가장 낮게 나타난 배합비로 pellet을 제조하고 전기로에서 1,000℃ 및 1,100℃로 3분간 소성한 후 비중 및 흡수율을 측정하였으며, 파단면을 SEM 사진을 이용하여 기공구조 및 용융정도를 관찰하였으며, 기공율과 기공크기분포를 porosimeter로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 용융온도 변화

유리섬유 폐재의 첨가량에 따른 용융온도의 변화를 그림 2에 보여주었다.

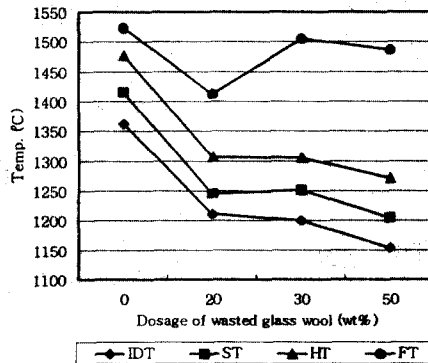


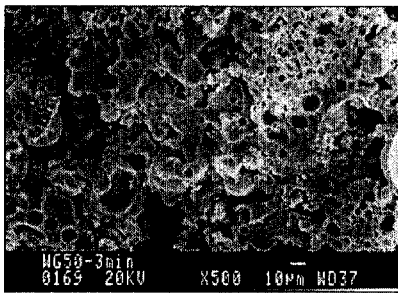
그림 2. 유리섬유 폐재의 첨가량에 따른 용융온도 변화

유리섬유 폐재의 첨가량이 증가함에 따라 용융온도가 저하됨을 관찰할 수 있었고, 50wt% 첨가시 IDT가 1,156℃로 플라이애쉬 단독보다 200℃ 정도 낮아진 것으로 나타났다. 용제로서 유리섬유 폐재를 첨가하면 Na₂O와 CaO 양이 증가하여 용융온도가 낮아진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 SiO₂의 용융온도는 1,600~1,700℃ 정도이나 Na₂O와 같은 염기성 산화물이 첨가되면 SiO₂와 결합이 용이하여 공융점(eutectic point)이 낮아지게 된다는 Knox 등의 보고와 일치하였다.

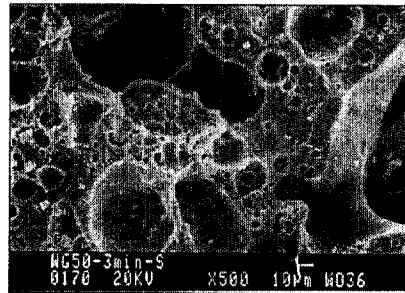
또한 SiO₂/Al₂O₃ 비는 플라이애쉬의 용융성 평가에 사용되는 한 지표로서, 일반적으로 이 비가 커질수록 용융온도는 낮아지는 것으로 알려져 있다. 따라서 SiO₂가 주성분인 유리섬유 폐재를 첨가하면 SiO₂/Al₂O₃ 비가 높아지게 되고 염기성 성분의 양도 증가하게 되어 용융온도가 낮아지는 것으로 사료된다.

3.2. 소성 골재의 특성

유리섬유 폐재를 플라이애쉬에 대하여 50wt% 첨가한 시료로 pellet을 제조하고 1,000℃와 1,100℃에서 각각 3분간 소성한 후 파쇄하여 파단면을 SEM으로 확인하였다. 각 온도와 시간에 따라 파단면의 내부와 외부를 관찰하였다.

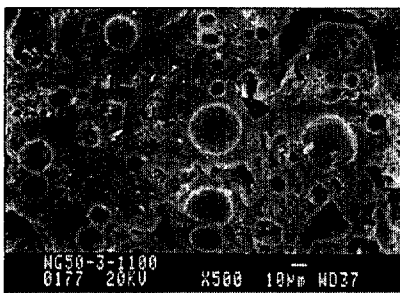


(a)파단면의 내부

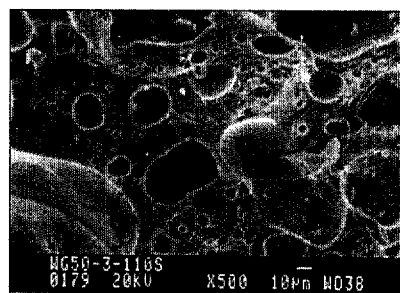


(b)파단면의 외부

소성온도 : 1,000℃



(c)파단면의 내부



(d)파단면의 외부

소성온도 : 1,100℃

그림 3. 1,000℃와 1,100℃에서 소성한 골재의 내부 구조

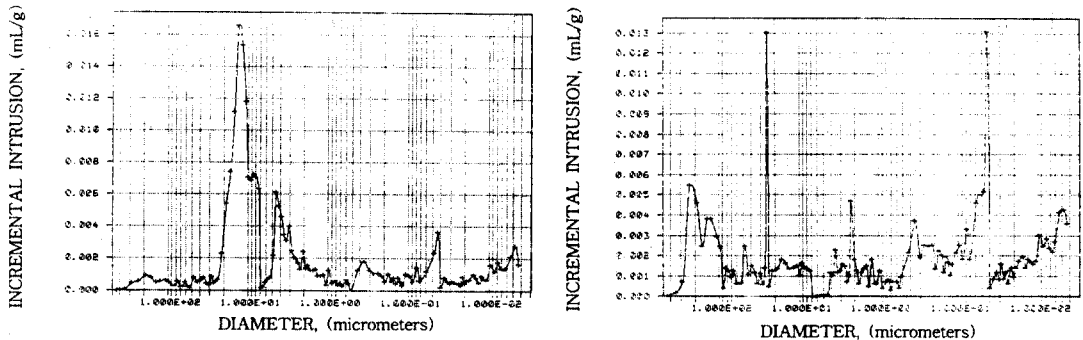
그림 3에 1,000℃와 1,100℃에서 3분간 소성한 골재의 내부 구조를 나타내었다. 1,000℃에서 소성한 골재의 외부는 용융상이 많이 관찰되지만 내부는 거의 관찰되지 않아 표면만이 소성된 것으로 사료된다. 1,100℃에서 소성한 골재는 내부와 외부 모두 용융상이 관찰되어 내부까지 소성이 진행되었다. 소성을 통한 플라이에쉬의 골재화는 골재의 표면만이 용융되어 유리질을 형성하면 소성에 필요한 에너지 절감뿐만 아니라 경량화를 이루기에도 용이하므로 본 연구를 통한 골재의 제조에 있어서는 1,000℃에서 소성하면 적합할 것으로 사료된다.

제조된 골재의 흡수율, 비중 및 총 기공 면적을 표 2에 나타내었다.

비중은 소성온도가 증가함에 따라 크게 나타났으며 흡수율은 반대의 결과를 나타내었다. 즉 SEM 사진으로 관찰한 결과로부터 소성온도가 증가하면 골재의 표면과 내부가 모두 용융되므로 조직이 치밀해져 거대기공이 미세기공으로 전이되고 수축현상도 일어나게 된다. 이 결과는 그림 4의 소성 온도에 따른 기공 크기의 변화에서도 확인할 수 있다. 따라서 소성 온도가 증가함에 따라 흡수율은 작아지게 되고 비중은 증가하는 결과를 보이게 된다. 거대기공이 미세기공으로 전이되므로 총 기공 면적이 증가하게 된다.

표 2. 소성 골재의 물리적 특성

소성온도(℃)	소성시간(분)	흡수율(%)	비중	총 기공 면적 (m ² /g)
1,000	3	15.75	1.36	13.01
1,100	3	6.54	1.44	25.55



(a) 소성온도 : 1,000℃

(b) 소성온도 : 1,100℃

그림 4. 소성온도에 따른 기공 크기 분포

4. 결론

플라이애쉬에 유리섬유 폐재 및 봉사와 점결제를 첨가하여 용융온도를 측정 한 후 pellet을 제조하고 소성시켜 소성골재를 제조하였다. 소성골재를 제조한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

4.1. 용융온도 변화

소성온도를 결정하기 위한 기초자료를 얻기 위하여 유리섬유 폐재의 첨가량에 따른 용융온도를 측정하였다. 플라이애쉬 단독의 용융온도(IDT)는 1,360℃로 나타났으나 유리섬유 폐재를 첨가할수록 용융온도는 저하하였으며 50wt%를 첨가하면 1,156℃까지 저하하였다. 따라서 유리섬유 폐재를 플라이애쉬에 첨가하면 소성골재의 제조시에 소성온도를 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

4.2. 골재의 특성

플라이애쉬에 유리섬유 폐재를 50wt% 첨가하여 pellet을 제조하고 1,000℃와 1,100℃에서 3분간 소성시켜 소성 골재를 만들고 특성분석을 행하였다. 1,000℃에서 소성한 골재의 파단면을 SEM으로 관찰한 결과 표면만 용융된 것을 확인하였고, 1,100℃에서는 표면과 내부 모두 용융상이 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 소성온도가 증가하면 흡수율은 감소하였으며 비중은 증가하였다. 이 결과는 기공크기 분포와 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 소성온도가 증가하면 골재의 표면과 내부가 용융되어 조직이 치밀해지고 거대기공이 미세기공으로 전이됨으로써 일어나게 된다. 이상의 결과로 유리섬유 폐재를 플라이애쉬에 첨가하면 소성온도를 1,000℃ 정도로 낮출 수 있어 소성비용을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 '97 공업기반기술개발사업(과제명 : 산업부산물을 이용한 구조용 인공경량골재의 제조) 관련 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. Min-Hong Zhang et. al. : Characteristics of Lightweight Aggregate for High-Strength Concrete, ACI Material Journal, Vol. 88, No. 2, March-April 1990.
2. J.M.J.M. Bijen : Manufacturing Process of artificial Lightweight Aggregate from Fly Ash. The International Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete, Vol. 8, No. 3, August 1986.
3. R. N. Swamy et. al. : The Microstructure of Lytag Aggregate, The International Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete, Vol. 3, No. 4, November, 1981.
4. 노재성 외 : 용제를 첨가한 석탄회용 용융온도 변화, 한국폐기물학회지, Vol. 15, No 3, pp 217-222, 1998.
5. 藤木英一, 輕量骨材, コンクリート工學, Vol. 34, No. 7, 1996. 7.