

플라이애시를 사용한 콘크리트의 특성

The Use of Fly Ash in Concrete



왕소용 Xiao-Yong Wang
강원대학교 건축공학과 부교수
E-mail: wxbrave@kangwon.ac.kr

1. 서론

플라이애시는 포틀랜드 시멘트 또는 콘크리트 생산에 있어 보조 혼화재(SCM)로 사용되고 있다. 플라이애시는 포틀랜드 시멘트와 함께 사용될 때 수화반응 또는 포졸란 반응 그리고 두 가지 모두가 반응하는 메커니즘으로 경화 콘크리트의 특성에 기여한다. 이와 같이, SCM에는 포졸란과 수화반응 재료가 모두 포함된다. 포졸란은 그 자체로 시멘트 성질이 소량이거나 전혀 없는 규산염 또는 규산염 물질로 정의되지만, 미세하게 나누어진 형태와 습기가 있는 상태로 보통의 온도에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 화학적으로 반응하여 시멘트 성질을 가진 화합물을 형성한다. 이러한 포졸란에는 플라이애시, 실리카 흙, 석회질 점토와 세일 등 다양한 천연 포졸란, 화산재등이 있으며 콘크리트 혼화재로 주로 사용된다.

콘크리트에서 플라이애시를 혼화재서 사용할 수 있는 가능성은 오래 전부터 알려져 왔으나 실제 적용이 시작된 것은 1900년대 중반이 되었으며 지난 50년 동안 콘크리트제조에서 플라이애시의 사용은 많이 증가하였으며 2005년 미국에서 사용된 콘크리트와 콘크리트 2차제품 및 그라우트의 사용량은 약 1,500만 톤이 사용되었다.

플라이애시는 시멘트 재료 성분의 질량에 의해 15%에서 25%까지의 수준으로 콘크리트에서 사용되어 왔다. 실제 사용되는 양은 적용되는 콘크리트의 종류와 플라이애시의 특성, 규격 한계, 지리적 위치와 기후에 따라 크게 달라진다. 플라이애시는 수화열을 제어하기 위해 대규모 구조물(예: 기초 및 댐)에 더 높은 수준(30%~50%)이 사용되었

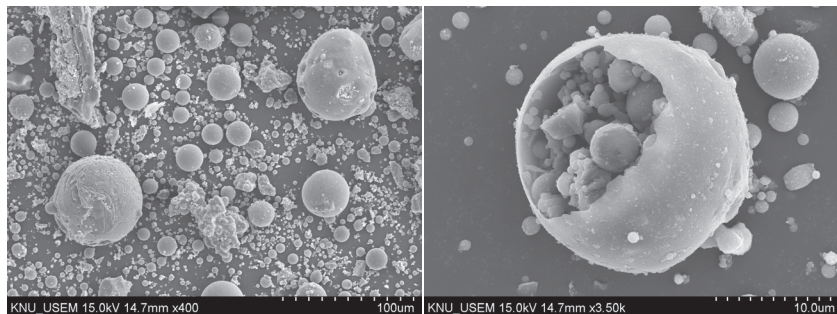


그림 1. 분석대상 콘크리트의 환경영향 저감 경향도

다. 최근 수십 년 동안 높은 용량(40%~60%)을 구조적 용도에 사용할 수 있다는 연구 결과가 나와 우수한 역학적 특성과 내구성을 가진 콘크리트가 개발되기도 하였다.

콘크리트 제조시 플라이애시의 사용량을 증가시키는 것은 장점만 있는 반면에 단점도 있다. 단점으로는 압축강도 늦게 발휘되며 초기 재령에서의 낮은 강도로 인하여 건설 속도의 지연으로 이어질 수 있다. 이러한 단점들은 특히 저온에서의 문제점이 두드러지게 나타난다. 또한, 콘크리트의 내구성 탄산화 저항성과 관련하여 취약한 특성이 있다.

따라서 플라이애시는 콘크리트 혼화제로 사용될시 최적의 사용량을 고려하여야 하며, 이는 건설 공사기간에 큰 영향을 미치지 않아야 한다. 한도 경화된 콘크리트 한하여 내구성능에 영향을 미치지 않으면서 기술적, 환경적, 경제적 이점을 극대화 시켜야 한다. 또한 플라이애시의 최적 사용량에 대해서는 많은 매개변수가 있으며 사용목적에 따라서 최적의 사용량을 결정해야 한다.

본문에서는 콘크리트의 저준위부터 매우 높은 수치의 플라이애시 사용과 관련된 이슈를 논의하며, 콘크리트 혼화제로서 사용시 콘크리트의 품질 또는 건설공정에 영향을 미치지 않는 플라이애시의 사용지침을 제공하고자 한다. 아래 [표 1]은 플라이애시의 사용량 수준으로써 저준위, 중간 수준, 고준위 및 매우 높은 수준의 플라이애시의 사용 범위에 대해 나타낸 표이다.

2. 플라이애시의 특성

플라이애시는 발전소에서 분쇄된 석탄을 태우고 남는 부산

물이다. 구체적으로는, 연도 가스에 의해 보일러의 연소 구역에서 운반된 다음 기계 또는 정전기 분리기에 의해 수집되는 미연소 잔류물이다. 이 잔류물 중 더 무겁고 연소되지 않은 물질은 용광로 바닥에 떨어지며 바닥재라고 불린다. 이 물질은 일반적으로 콘크리트의 시멘트 재료로 사용하기에 적합하지 않지만 콘크리트 석재 블록 제조에 사용된다.

플라이애시는 포졸란 물질이다. 다양한 양의 CaO을 함유한 정교하게 구분된 아모르푸스 알루미노실리케이트로 포틀랜드 시멘트와 물을 섞으면 포틀랜드 시멘트의 수화 작용으로 방출되는 $Ca(OH)_2$ 과 반응하여 다양한 Calcium-Silicate-Hydrates(C-S-H)와 Calcium-Aluminum-Hydrates(C-A-H)를 생산하게 된다. 이러한 포졸란 반응은 시멘트 Binder상(C-S-H)의 양을 증가시키고, Calcium-Aluminum-Hydrates를 적게 증가시켜 장기강도를 향상시키기 때문에 콘크리트 혼화제로 사용시 장기강도발현에 유리한 특징을 가지고 있다. 또한 이러한 수화반응 메커니즘은 콘크리트의 내구성을 향상시킨다. 콘크리트 내 플라이애시의 특성과 포졸란 반응에 대한 자세한 정보는 ACI 위원회 232 보고서를 통해 확인할 수 있다.

콘크리트에서 플라이애시의 특성은 물리적, 광물학적, 화학적 특성에 의해 영향을 받는다. 광물학 및 화학 성분은 석탄의 구성에 크게 의존하고 있으며, 국내 및 해외 석탄(안트라카이트, 서브비트미늄, 라이그나이트)은 여러 발전소에서 연소되기 때문에, 플라이애시의 성질은 발전소의 설비 및 기계장치에 따라 품질은 변할 수 있으며 연소 조건에 따라서도 플라이애시 특성에 많은 영향을 미칠 수 있다.

해외에서의 가장 널리 사용되고 있는 플라이애시 규격은 ASTM C618 표준 규격 또는 콘크리트에서 사용할 수 있는 계

[표 1] 플라이애시의 용량 수준

총 시멘트 재료의 질량별 플라이애시 %	분류
<15	낮은
15~30	중간
30~50	높은
>50	매우 높은

산된 천연 포졸란이다. 이 규격은 [표 2]에 기술된 바와 같이 플라이애시를 원산지와 구성원에 기초하여 두 개의 등급으로 나눈다.

라이그나이트 또는 아비트 석탄에서 생성된 많은 플라이애시는 클래스 F의 화학적 요구 조건을 충족해야하며($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$) F등급 플라이애시라고도 한다.

알칼리(Na_2O 와 K_2O), 탄소(일반적으로 LOI로 측정됨), 황산염(SO_3) 등의 다른 화합물도 플라이애시의 성능에 소량의 영향을 줄 수 있지만 플라이애시내 CaO 함량은 콘크리트에서 플라이애시가 어떻게 반응할지를 보여주는 가장 중요한 요소이다. 저칼슘 플라이애시(< 8% CaO)는 무연탄이나 유연탄에서 항상 생산되며, 주로 결정 석영, 멀라이트, 헤마타이트, 자석 등을 가진 알루미늄 규산염으로 구성되어 있다. 이러한 결정상들은 근본적으로 콘크리트에 불활성 상태이며 시멘트 수화반응을 형성하기 위해 알칼리 또는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 원천을 필요로 하기에 저칼슘 플라이애시는 활발한 포졸란 반응과 수화반응이 원활하지 않다. 그러나 고칼슘 플라이애시(> 20% CaO)는 리그나이트 또는 저비중 석탄에서 생성될 수 있으며 저칼슘 플라이애시에서 발견되는 것 외에 CaO-alumino silicate와 다양한 결정상들로 구성되어 있다. [표 2]의 C등급 플라이애시는 저칼슘 플라이애시에 비해 반응성이 빠르고, CaO성분으로 인해 포졸란 반응과 수화작용이 모두 가능하다. 이들은 시멘트와 같은 수성 제품의 형성으로 인해 물과 섞이면 반응하고 경화가 발생된다. 플라이애시의 CaO 함량이 충분히 높으면 플라이애시를 시멘트 부원료 또는 콘크리트용 혼화재로 사용이 가능하다.

플라이애시는 수화열의 감소, 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창 제어, 황산염 침투에 대한 내구성 측면에서 플라이애시가 얼마나 효과적일지 예측하는 데도 CaO함량이 유용하게 활용된다.

[표 2] 플라이애시용 ASTM 규격

등급	ASTM C 618에 대한 설명	화학 물질 요구 사항
F	일반적으로 무연탄 또는 유연탄을 태워서 생성되는 플라이애시는 본 문서에 명시된 이 등급에 대한 해당 요건을 충족한다. 이 종류의 플라이애시는 포졸란 반응의 특성을 가지고 있다.	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
C	일반적으로 본 문서에 명시된 이 등급의 해당 요건을 충족하는 리그나이트 또는 아비트 석탄에서 생산되는 플라이애시. 이 부류의 플라이애시는 포졸란 반응을 가진 것 외에도, 약간의 시멘트 성질을 가지고 있다. 참고: 일부 C급 플라이애시는 10% 이상의 라임 함유량을 포함할 수 있다.	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$

<그림 2>는 미국의 110개의 발전소에 생성되는 플라이애시의 CaO함량의 분포를 나타낸 그림이다. 미국의 110개의 발전소에서 발생하는 플라이애시의 CaO의 함량은 대부분이 30% 이하이며 20~30%의 CaO함량을 포함하는 플라이애시가 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다.<그림 3>은 산화칼슘 함량과 산화물의 합($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)의 관계를 나타낸 그림이다. CSA F형 또는 CH형을 충족하는 모든 플라이애시는 ASTM C618에 의해 F등급과 C등급으로 분류된다.

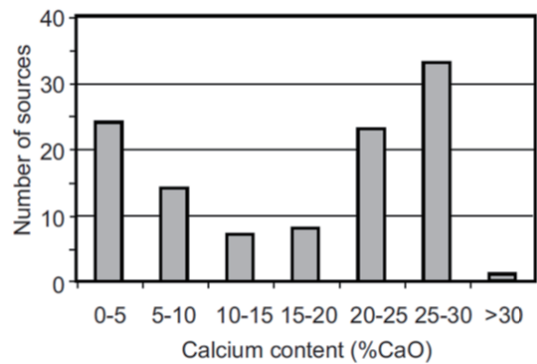


그림 2. CaO 함량에 의한 복미 플라이애시 110개 분포(Thomas 2002).

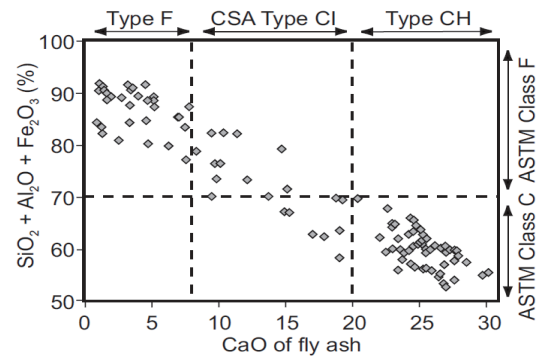


그림 3. 110 개의 복미 플라이애시에 대한 산화칼슘 함량과 산화물의 합($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)의 관계¹⁾

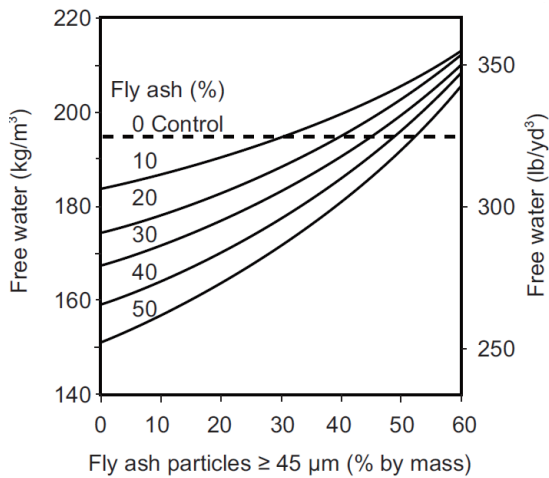


그림 4. 플라이애시 입도에 따른 배합수량의 영향 (Owens 1979).

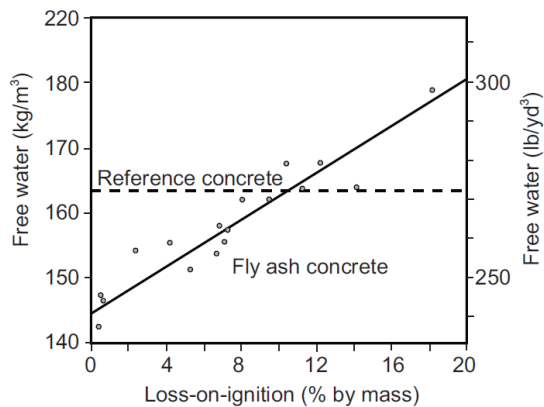


그림 5. 플라이애시가 배합 수량에 미치는 영향 (Sturup 1983)

3. 플라이애시가 굳지않은 콘크리트의 특성에 미치는 영향

3.1 작업성

〈그림 4, 5〉는 플라이애시의 입도 및 사용에 따른 콘크리트 배합 수량의 특성에 대해 나타낸 그림이다. 고밀도와 저탄소 함량을 가진 양질의 플라이애시를 사용하면 콘크리트의 배합 수량이 감소된다, 따라서 플라이애시를 사용하면 동일한 작업성을 가진 콘크리트에 비해 낮은 배합수량으로 콘크리트를 생산할 수 있다. 정확한 배합수의 감소량은 플라이애시와 혼합물

및 다른 변수(골재의 상태)의 성격에 따라 변화되지만 평균적인 수치는 플라이애시를 10% 사용한 콘크리트에서는 3%의 배합수를 감소 시켜하는 것으로 나타났다.^{2,3)}

3.2 수화열

시멘트와 물과 반응시 발생하는 수화열에 저감에 대한 연구는 오랫동안 연구되어져 왔으며 그중 대표적이며 사용화된 연구는 플라이애시를 혼화제로 사용하여 수화열을 저감시키는 방법이다. 최초의 실시된 현장 실험 중 하나는 1950년 경 미국의 북부 온타리오에 오토 홀텐 댐 건설 당시 온타리오 하이드로에 의해 수행되었다. 3.7×4.3×11.0m(12×14×36ft) 크기의 댐의 수화열저감 방법은 크게 2가지 방법으로 구성되었다. 첫 번째 방법으로는 포틀랜드 시멘트의 305kg/m³(514 lb/yd³)의 콘크리트를 사용하여 시멘트 사용량을 낮추는 방법으로 구성되었고, 두 번째 방법으로는 시멘트사용량은 동일하지만 시멘트 사용량 대비 30%를 F등급 플라이애시로 대체시키는 방법으로 구성 되었다. 이러한 연구 결과 플라이애시를 사용하면 콘크리트의 내부의 온도가 47°C에서 32°C로 감소하는 결과를 나타내었다.

4. 플라이애시가 경화콘크리트의 특성에 미치는 영향

4.1 압축강도

〈그림 6〉는 포틀랜드 시멘트 사용량 대비 저칼슘(F급) 플라이애시의 동일한 질량으로 치환하고 w/cm를 일정하게 고정하여 압축강도에 발현에 대한 플라이애시 효과를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타나듯이 플라이애시 치환량이 증가함에 따라 초기 재령의 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 장기강도의 발현은 개선되는 것으로 나타났으며, 또한 계속하여 재령이 증가할수록 플라이애시를 치환한 콘크리트의 장기강도는 충분한 양생이 제공되는 조건에서 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도와 유사하게 나타났다.

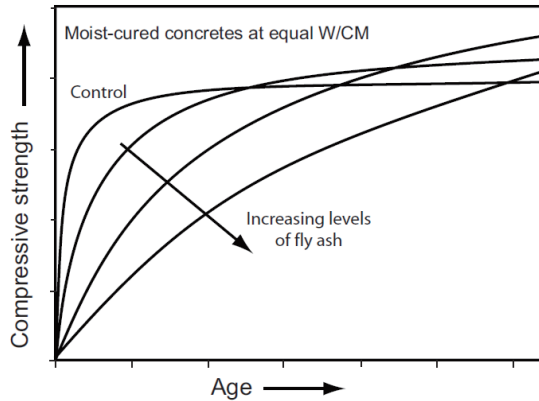


그림 6. 플라이애시가 콘크리트의 압축 강도발달에 미치는 영향

콘크리트 배합 설계시 기준 압축강도는 재령28일의 강도가 기준이 된다. 이는 사용 중인 시멘트와 플라이애시의 혼합과 물/시멘트비(w/cm)를 선택하여 배합설계를 실시한다. 필요한 w/cm는 플라이애시 치환량, 시멘트계 재료들의 구성, 재령에 따른 필요강도에 의해 배합설계를 실시한다. 예를 들어 재령28일 또는 초기재령에서 높은 강도가 필요한 경우와, 높은 플라이애시를 치환하고자 할 때 w/cm는 낮게 설정하여 배합설계를 실시하여야 한다.

콘크리트의 초기강도발현의 속도는 온도의 영향을 많이 받고 있다. 특히 플라이애시를 치환한 콘크리트는 플라이애시의 포졸란 반응으로 인하여 특히 온도에 관해 민감하다. <그림 7>은 온도에 따른 플라이애시를 시멘트 사용량 대비 30% 치환한 콘크리트와 치환하지 않은 콘크리트에 대한 양생온도에 따른 압축강도를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타나듯이 고온 양생법은 모든 재령에서 28일까지 플라이애시를 치환한 콘크리트의 강도를 증가시켰으며, 그 효과는 재령 초기에서 가장 크게 나타났다.

4.2 기타 역학적 특성

인장강도, 휨강도 및 탄성계수와와의 관계 및 콘크리트의 압

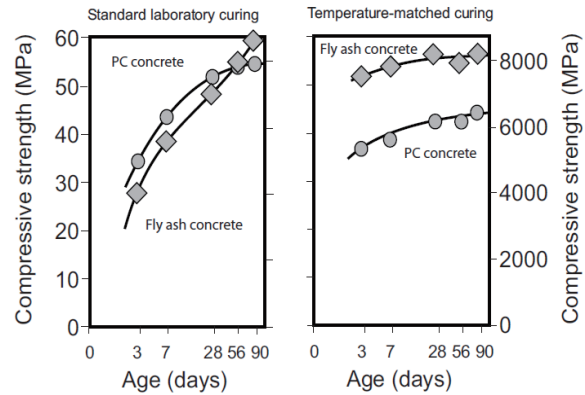


그림 7. 표준 실험실 및 고온 양생에 따른 콘크리트 정방형 100 mm(4인치)의 강도 개발⁴⁾

축강도 관계는 시멘트 대비 플라이애시의 치환량에 따라 의해 크게 영향을 받지 않는다. Malhotra와 Mehta⁵⁾는 플라이애시를 사용한 콘크리트의 페이스트 부분과 골재 사이의 천이대 영역에서 포졸란 반응이 발생되어 콘크리트의 장기강도, 휨강도, 인장강도가 크게 개선될 수 있음을 시사했다. 또한 플라이애시 사용량이 증가하면 할수록 콘크리트의 탄성계수가 증가될 수 있다고 하였다.

경화된 콘크리트의 역학적 특성과 내구성은 플라이애시에 영향을 받는다. 플라이애시가 이러한 특성에 영향을 미치는 정도는 플라이애시의 수준과 구성뿐만 아니라 콘크리트 혼화재료의 성분의 구성과 비율, 콘크리트의 종류와 크기, 양생조건에 등 다른 매개변수에 따라 달라질 수 있다.

5. 맺음말

플라이애시의 최적 사용량은 콘크리트 혼화재, 양생조건(특히 온도에 따라) 달라진다. 따라서 최적의 플라이애시 함량은 콘크리트의 목적에 따라 달라질 수 있다. 특히 동절기 건설공사에서 플라이애시를 사용한 콘크리트의 양생법(온도 조건)을 고려하여야 한다.

참고문헌

1. Thomas, M.D.A., Wilson, M.L. Supplementary Cementing Materials for Use in Concrete, CD038, PCA, Skokie, IL, 2002.
2. Owens, P.L., "Fly Ash and Its Usage in Concrete." Concrete Magazine, July, 1979, pages 22 to 26.
3. Sturup, V.R., Hooton, R.D., Clendenning, T.G. 1983. "Durability of fly ash concrete." In Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Volume 1, Ed. V.M. Malhotra, ACI SP-79, American Concrete Institute, Detroit, pp. 71-86.
4. Bamforth, P.B., "In-Situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using Either Fly Ash or Ground-Granulated Blastfurnace Slag on the Performance of Mass Concrete," Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 69, September, 1980, pages 777 to 800.
5. Malhotra, V.M. and Mehta, P.K., High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2005, 124 pages.

담당 편집위원 : 민태범(성신양회(주))

●● 학회지 광고 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다.

저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 귀사를 홍보할 수 있는 한국건설순환자원학회지 광고의 많은 이용 부탁드립니다.

- 아 래 -

1. 광고 게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표지 2	80만원	간지	70만원
표지 3	70만원	내지(전면)	50만원
표지 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택

본 학회의 특별회원사가 게재하는 광고 또는 년2회 이상 광고 게재 시 상기 광고 게재료의 10%를 할인해 드립니다.

3. 문의

한국건설순환자원학회 사무국(Tel.02-552-4728, E-mail : rcr@rcr.or.kr)