

플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Properties of High Volume Fly Ash Concrete

최 세 진^{*} 장 증 호^{*} 최 성 우^{*}
Choi, Se Jin Jang, Jong Ho Choi, Sung Woo
최 희 용^{**} 박 선 규^{**} 김 무 한^{***}
Choi, Hee Yong Park, Sun Gyu Kim, Moo-Han

ABSTRACT

Generally, it is indicated that concrete using fly ash as a part of cement content has lower early strength, and faster carbonation velocity. To improve these problems and provide useful information for high volume fly ash concrete, the properties of concrete - those include slump, bleeding, setting time, compressive strength and carbonation depth etc.- which contained large amount of fly ash as a part of fine aggregate were investigated experimentally.

According to test results, it was found that the compressive strength of the concrete increased in early age as well as in long term age with the increase of the fly ash content. And the carbonation depth of concrete using fly ash as a part of fine aggregate was lower than that of plain concrete(FA 0kg/m³).

1. 서론

최근, 산업이 발전함에 따라 전력 사용량이 증가되고 계속적인 전력수요에 대처하기 위하여 화력발전소의 건설이 계획·진행되고 있는 실정이며, 이러한 석탄 사용량 증가에 따라 발생하는 석탄회의 양은 2010년경에는 600만 톤에 이를 것으로 예상하고 있다.¹⁾²⁾ 석탄회는 일부가 시멘트·콘크리트분야에서 이용되는 것을 제외하고 대부분을 매립 처분시키고 있으나, 환경보전이나 자원을 유효하게 이용한다는 관점에서 대량으로 유효하게 활용하는 방안마련이 요구되고 있다.

선진국의 경우, 플라이애시 발생량의 약 50~60% 정도를 유효하게 재활용하고 있으며, 특히 최근들어 HVFAC(High Volume Fly Ash Concrete)라는 개념으로 플라이애시를 콘크리트에 대량 사용하는 연구가 구미 및 일본 등지에서 활발히 이루어지고 있다.³⁾⁴⁾

본 연구는 플라이애시를 콘크리트에 대량 사용하기 위한 연구의 일환으로, 플라이애시를 결합재의 일부로 치환(內割)하지 않고, 초기강도 및 내구성 향상을 위하여 잔골재의 일부로 치환(外割)하는 방법을 선택하여 슬럼프,

*정회원, 충남대학교 대학원 석사과정

**정회원, 충남대학교 대학원 박사과정

***정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

표 1 실험계획 및 배합

기호	W/C (%)	단위수량 (kg/m ³)	목표슬럼프 (cm)	SP제첨가율	단위중량 (kg/m ³)				측정항목	
					C	FA	S	G	굳지않은 콘크리트	경화콘크리트(1, 4, 8주)
Plain	60	180	18±2.5	소정의첨가율	300	0	740	1102	· 비빔온도 · 공기량 · 단위용적중량 · 슬럼프(경시변화) · 블리딩 · 응결시간	· 압축강도 · 단위용적중량 · 초음파속도 · 동탄성계수 · 중성화깊이(4주)
FA 60						60	667	1102		
FA150						150	559	1102		
FA214						214	482	1102		
FA300						300	379	1102		
FA420						420	234	1102		

주] C:시멘트, FA:플라이애시, S: 잔골재, G: 굵은골재

블리딩, 응결시간, 압축강도 및 중성화 등의 공학적특성을 비교·검토함으로써 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 실용화를 위한 참고자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1과 같이 콘크리트의 물시멘트비를 보통강도 수준의 0.60으로 고정하고 플라이애시량을 증가시켜 가며 실험을 행하였다. 즉, 단위시멘트량 300kg/m³ 및 단위수량 185kg/m³을 고정하고, 단위석탄회량을 60, 150, 214, 300, 420kg/m³로 증가시킨 배합을 선정한 후, 공기량, 단위용적중량, 슬럼프, 블리딩, 응결시간, 압축강도 및 중성화깊이 등을 측정하였다.

2.2 사용재료 및 비빔방법

본 연구에 사용된 재료는 표 2에서 보는 바와 같이, 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트, 골재의 경우 최대 치수 5mm의 제염사 및 19mm의 부순자갈, 고성능감수제는 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였다. 또한, 플라이애시는 분말도 3,610cm²/g의 보령産을 사용하였다. 그림 1은 골재의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

또한, 콘크리트의 비빔은 100리터 강제식 팬타입믹서를 사용하여 시멘트, 잔골재, 플라이애시를 투입, 건비빔을 30초 행한 후, 굵은골재와 물 및 고성능감수제

표 2 사용재료의 물리적 특성

사용 재료	물리적 특성
시멘트	1종보통 포틀랜드시멘트, 비중 3.15, 분말도 3,200(cm ² /g)
플라이애시	보령産, 비중 2.13, 강열감량 : 4.0% 분말도 3,610(cm ² /g)
잔골재	제염사, 입경 5mm, 조립율 3.04, 비중 2.56
굵은골재	부순자갈, 입경 19mm 조립율 6.50, 비중 2.65
고성능감수제	나프탈렌계, 비중 1.10±0.005

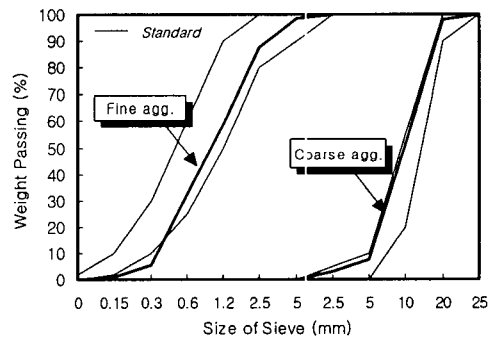


그림 1. 골재의 입도분포곡선

표 3 콘크리트의 시험결과

기호	W/C (%)	단위 수량 (kg/m ³)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	SP제 첨가량 (kg/m ³)	응결시간 (시:분)		압축강도 (kgf/cm ²)				중성화 깊이 (mm)
						초결	종결	3일	7일	28일	56일	
Plain	60	180	4.5	18.0	1.20	5:20	7:00	177	222	301	322	0.688
FA 60			1.0	19.5	1.44	6:00	7:50	218	279	396	465	0.656
FA150			1.0	20.0	0.68	7:40	10:20	216	280	453	504	0.550
FA214			1.5	20.0	2.06	9:00	11:30	243	321	517	543	0.534
FA300			2.0	20.5	4.8	19:40	22:20	273	329	577	657	0.412
FA420			1.2	22.5	12.24	-	-	246	383	708	803	0.344

를 투입하고 1분 30초간 비비는 분할투입방법을 사용하였다.

2.3 시험방법

콘크리트 시험은 각각 KS규준에 준하여 실시하였으며, 중성화시험의 경우 4×4×16cm의 모르타르용 공시체를 제작하여 4주간 수중양생을 행한 후, 상대습도 60±5%, 온도 20±2℃의 기중에서 1주간 정치하여 기건시켰다. 촉진중성화시험은 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%, 탄산가스농도 5±0.2%의 시험기내에서 28일간 실시하였으며, 중성화깊이는 1% 페놀프탈레인용액을 사용하여 중성화깊이를 측정하였다.

3. 실험결과

표 3은 콘크리트의 시험결과를 나타낸 것이다.

3.1 굳지않은 콘크리트의 실험결과

3.1.1 슬럼프의 변화

그림 2는 슬럼프 및 고성능감수제 첨가량의 변화를 나타낸 것으로서, 목표 슬럼프 18±2.5cm를 만족시키기 위

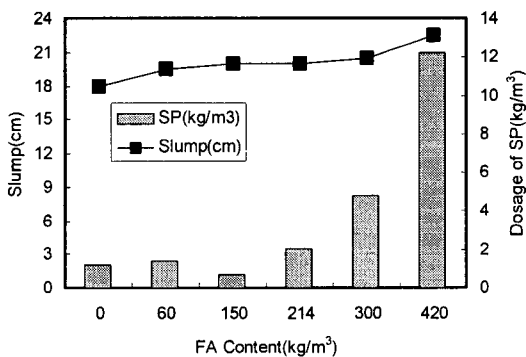


그림 2. 슬럼프 및 SP제 첨가량의 변화

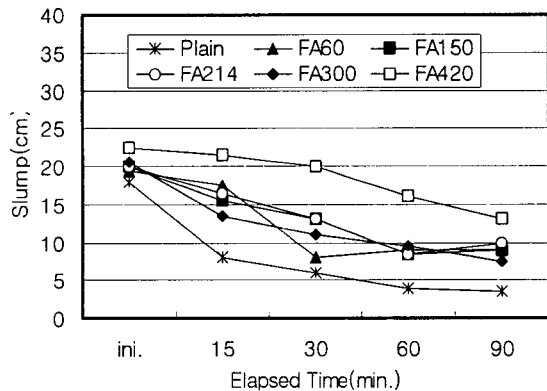


그림 3. 슬럼프의 경시변화

한 고성능감수제 첨가량을 살펴보면 단위 플라이애시량 $214\text{kg}/\text{m}^3$ 까지는 $0.7\sim 2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 유사하게 나타났으나, $300\text{kg}/\text{m}^3$ 을 넘을 경우 목표 슬럼프치를 만족하기 위하여 상대적으로 많은 양의 고성능감수제를 요하는 것으로 나타났다. 이는 단위 플라이애시량의 증가로 인한 분체량의 증가때문인 것으로 판단되며, 특히 단위 플라이애시량이 $420\text{kg}/\text{m}^3$ 을 초과할 경우의 목시관찰결과 점성이 과다하게 증가하여 비빔이 어려운 것으로 나타났다.

또한, 슬럼프의 경시에 따른 변화를 나타낸 그림 3에서 보는 바와 같이, 플라이애시를 대체한 모든 배합에서 슬럼프의 경시변화가 플레인콘크리트(FA $0\text{kg}/\text{m}^3$)에 비해 적은 것으로 나타났는데, 이는 고성능감수제 첨가율의 영향과 비빔초기에 물을 흡수했던 플라이애시가 교반시에 흡수한 물을 방출했기 때문으로⁷⁾ 사료된다.

3.1.2 블리딩 및 응결시간의 변화

그림 4는 단위 플라이애시량에 따른 블리딩량의 변화를 나타낸 것으로서, 플라이애시량이 증가함에 따라 블리딩량이 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한, 플라이애시를 대체하지 않은 플레인콘크리트와 비교할 경우, 단위 플라이애시량에 따라 블리딩량의 변화가 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 단위 플라이애시량이 상대적으로 다량인 FA300과 FA420의 경우에는 거의 블리딩이 나타나지 않은 반면, FA60~FA214까지는 경시 30분에서 경시 90분 이후에 블리딩량이 Plain보다 다소 크게 나타났다. 일반적으로, 플라이애시를 시멘트에 대하여 치환하는 경우 플라이애시를 사용함에 따라 블리딩이 감소하는 것으로 알려져 있으나⁴⁾⁸⁾, 잔골재의 일부로 대체한 본 실험의 경우에는 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 5는 단위 플라이애시량에 따른 콘크리트의 관입저항치 변화를 나타낸 것으로서, FA60~FA300으로 단위 플라이애시량이 증가함에 따라 초결($35\text{kgf}/\text{cm}^2$) 및 종결($280\text{kgf}/\text{cm}^2$) 도달시간이 다소 느리게 나타나고 있으나, 플라이애시를 시멘트에 대하여 대체한 콘크리트의 응결시간이 플라이애시 대체량의 증가에 따라 급격히 지연된다는 기존 연구결과⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾와 본 연구에 사용한 플라이애시량이 다량인 점을 고려하면 양호한 수준으로 판단된다.

그러나, FA300의 경우에는 초결 도달시간이 19시간 정도가 소요되며 상당히 느리게 나타났는데, 이는 목표 슬럼프치인 $18\pm 2.5\text{cm}$ 를 만족시키기 위한 고성능감수제 첨가량이 많았기 때문으로 판단되며, 특히, FA420의 경우에는 응결지연 현상으로 인해 응결시간의 측정이 곤란하였다.

3.2 경화콘크리트의 실험결과

3.2.1 압축강도의 변화

그림 6은 재령 3일에서의 압축강도 발현치를 나타낸 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 플라이애시 치환량이 증가함에 따라 높은 압축강도를 발현하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 플라이애시의 공극충진 현상 등에 기인한 것으로¹¹⁾ 사료되며, 따라서 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 초기강도 저하문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 플라이애시를 사용한 모든 배합에서 $216\sim 273\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 수준으로 Plain 콘크리트와 비교해 높은

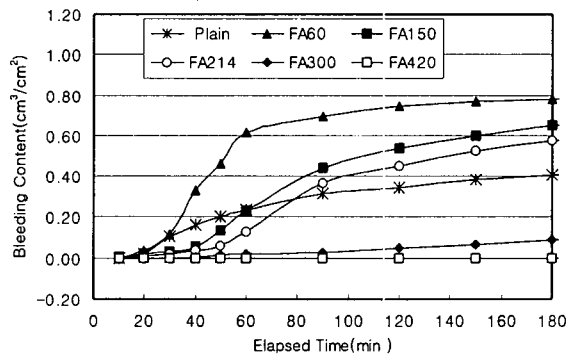


그림 4. 단위 플라이애시량에 따른 블리딩량의 변화

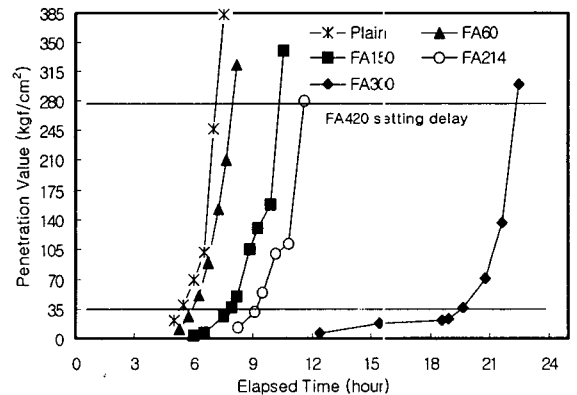


그림 5. 단위 플라이애시량에 따른 응결시간의 변화

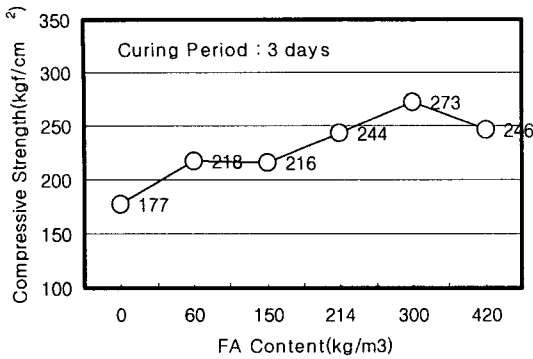


그림 6. 재령 3일에서의 압축강도의 변화

강도를 발현하였다.

또한, 단위 플라이애시량에 따른 재령별 압축강도의 변화를 나타낸 그림 7에서 보는 바와같이, 모든 재령에 있어서 플라이애시량이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 포졸란반응이 이루어지는 장기재령일수록 현저하여 재령 56일에 FA 300 및 FA 420의 경우 650kgf/cm^2 및 803kgf/cm^2 수준으로서 320kgf/cm^2 를 나타낸 Plain보다 2배 이상의 압축강도를 발현하고 있음을 알 수 있다.

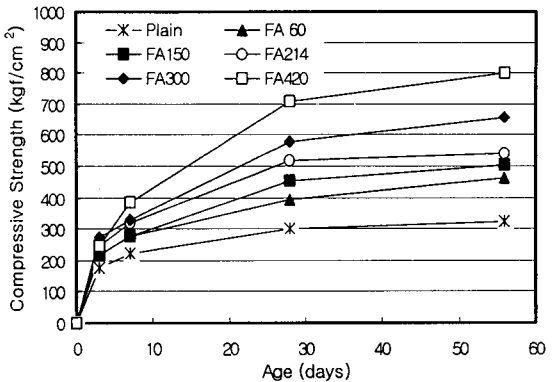


그림 7. 재령에 따른 압축강도의 변화

3.2.2 중성화의 검토

그림 8은 단위 플라이애시량에 따른 중성화 깊이를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 단위 플라이애시량이 증가함에 따라 중성화 깊이가 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 시멘트에 대하여 플라이애시를 대체하게 되면 Ca(OH)_2 의 소비로 인한 자기중성화 현상으로 인해 중성화깊이가 증가하는 것으로 알려져 있으나⁸⁾, 본 연구에서는 잔골재에 대한 치환으로 인한 조직의 치밀화로 그러한 경향은 나타나지 않았다.

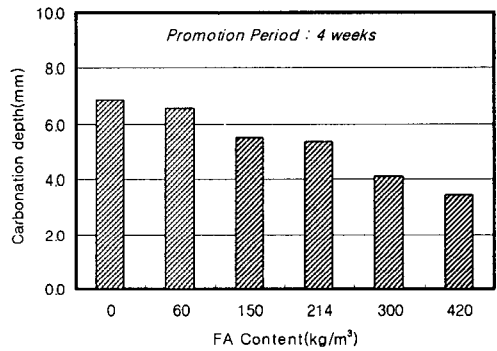


그림 8. 중성화깊이의 변화

또한, 그림 9는 재령 4주에서의 압축강도와 촉진중성화 시험에 의한 중성화깊이의 관계를 나타낸 것으로 선형관계로서 0.95이상의 상당히 높은 상관성을 확인할 수 있다.

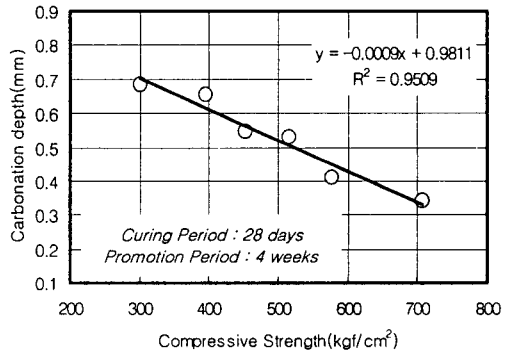


그림 9. 중성화깊이와 압축강도의 관계

4. 결론

플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 특성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 목표 슬럼프를 만족시키기 위한 고성능감수제 첨가량은 단위 플라이애시량 214kg/m^3 까지는 $0.7\sim 2.0\text{kg/m}^3$ 으로 유사하게 나타났으나, 300kg/m^3 을 넘을 경우 목표 슬럼프치를 만족하기 위하여 상대적으로 많은 양의 고성능감수제가 첨가되었으며, 특히 단위 플라이애시량 420kg/m^3 에서는 과도한 점성으로 인해

비빔이 곤란하였다.

- (2) 응결시간의 경우, FA60~FA300으로 단위 플라이애시량이 증가함에 따라 초결(35kgf/cm²) 및 종결(280kgf/cm²) 도달시간이 다소 느리게 나타났으나, FA214까지는 Plain과 비교하여 큰 차이는 보이지 않았다.
- (3) 재령 3일에서의 압축강도를 살펴본 결과, 플라이애시를 사용한 모든 배합에서 216~273kgf/cm²의 수준으로 Plain 콘크리트와 비교해 높은 강도를 발현함으로써, 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 초기강도 저하문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 이러한 경향은 포졸란반응이 이루어지는 장기재령일수록 현저하여 재령 56일에 FA 300 및 FA 420의 경우 650kgf/cm² 및 803kgf/cm² 수준으로서 320kgf/cm²를 나타낸 Plain보다 2배 이상의 압축강도를 발현하였다.
- (4) 중성화시험 결과, 잔골재에 대한 치환으로 인한 조직의 치밀화 현상으로 단위 플라이애시량이 증가함에 따라 중성화 깊이가 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구결과, 플라이애시를 콘크리트산업에 대량 활용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으며, 금후 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 각종 내구성에 관한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 차동원 외 ; 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능콘크리트 국제워크숍, 1999.10
2. 이상수 ; 플라이애시를 사용한 콘크리트의 공학적특성 및 그 현장적용성에 관한 연구, 충남대 박사학위, 2000. 2
3. 松藤 泰典ほか; 石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, pp.437~454, 1999.9
4. A. Bilodeau and V.M. Malhotra ; High-Volume Fly Ash System, International Workshop on high performance concrete utilizing supplementary cementitious materials, pp.43~64, 1999.10
5. K.Wesche ; Fly Ash in Concrete - Properties and Performance, Report of Technical Committee 67-FAB use of Fly Ash in Building, RILEM, 1991
6. Standards Association of Australia ; Supplementary Cementitious Materials for Use with Portland Cement, AS 3582.1, 1991
7. 山田有一ほか ; 石炭灰の有効利用に関する研究, 東京電力技術研究所報告書, pp.82~132, 1985.4
8. Use of Fly Ash in Concrete(ACI Committee 226) ; ACI Materials Journal, Vol.84 No.5, pp.381~409, 1987
9. 한국수자원공사 ; 수로터널 라이닝시 요구되는 콘크리트의 물적특성에 관한 연구, 1998
10. 이진용 외 ; 플라이애시 함유량이 콘크리트의 특성에 미치는 영향, 고성능콘크리트 국제 워크숍, pp.271~285, 1999
11. 黄光律ほか2; フライアッシュを大量使用したコンクリートの微細組織と圧縮強度, 日本建築学会構造系論文集, 第517号, pp11~16, 1999.3
12. 김무한 외 ; 플라이애시 품질에 따른 고유동콘크리트의 유동특성 및 공학적특성에 관한 실험적연구, 대한건축학회 대전·충남지부 논문집, 15권1호, pp.157~162, 1998
13. 김무한 외 ; 플라이애시를 사용한 고강도 콘크리트의 시공성 및 공학적특성에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제14권 제1호, pp.579~584, 1994