

# 플라이애쉬 콘크리트의 내구성

## Durability of Fly Ash Concrete

오 병 환\*

김 광 수\*\*

장 승 업\*\*

김 진 춘\*\*\*

최 룡\*\*\*\*

Oh, Byung Hwan

Kim, Kwang Soo

Jang, Seung Yup

Kim, Jin Choon

Choi, Rhong

### ABSTRACT

Increased costs for cement have favoured the use of supplementary cementing materials in concrete. The use of fly ash in concrete has increased in the past few years. Concrete have been selected for use as a construction material in aggressive environment. The use of fly ash as concrete material has a role, and an understanding of its effect on concrete durability is essential to its correct and economical application

In this study, durability tests including permeability, freezing and thawing resistance for Korean fly ash concrete are conducted. The durability characteristics of fly ash concrete are discussed.

### 1. 서론

우리나라는 급속한 산업화와 더불어 전력수요가 꾸준히 증가하여 왔고 그에 따라 화력발전소를 다수 건설하여 국가 발전에 큰 기여를 하여왔다. 그에 따라 산업부산물인 대량의 석탄회가 발생되어 왔는데 현재 3백만톤 이상이 생산되고 있고 2000년대에는 약 500만톤의 석탄회가 발생할 것으로 예상되고 있다. 이러한 많은 양의 석탄회는 상당 부분이 매립에 의하여 처리되고 있으며 이러한 현실은 환경적 측면이나 경제적 측면에서 바람직하지 않다고 할 것이다. 이러한 측면에서 석탄회를 가장 유용하게 활용할 수 있는 콘크리트 분야에 대한 연구개발은 큰 의의를 갖는다고 할 수 있다.

플라이애쉬 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해서 경제성이 높으며 워커빌리티, 내구성, 수밀성 등을 증진시키고 장기강도의 증진효과가 있는 등 고성능 콘크리트의 개발에 유용하게 적용될 수 있는 재료이다. 그러나 플라이애쉬를 사용함으로써 변화되는 콘크리트의 제반 성질은 매우 복잡할뿐더러 사용탄의 종류, 생산된 발전소 등 여러 가지 조건에 따라 일정하지도 않으므로 세심한 주의를 요한다.

특히 해안 및 해양 구조물, 지하구조물 등이 최근들어 활발하게 건설되고 있고 노후 구조물의 증가에 따라 콘크리트의 내구성은 중요하게 인식되고 있으며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 따라 플라이애쉬 콘크리트의 내구특성에 대한 연구도 다양하게 진행되어 왔는데 본 연구에서는 투수성과 내부식성, 그리고 플라이애쉬 콘크리트의 동결융해 저항성 등에 대한 실험과 분석을 실시하며 특히 보통 콘크리트와의 비교, 분석을 통하여 플라이애쉬 콘크리트의 내구특성을 규명하고자 한다.

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 쌍용양회(주) 중앙연구소 선임연구원

\*\*\*\* 쌍용양회(주) 중앙연구소 소장, 공학박사

## 2. 플라이애쉬와 시멘트의 특성분석 및 실험변수

### 2.1 플라이애쉬와 시멘트의 특성분석

본 연구에서 적용된 플라이애쉬는 서울대학교 공동기기원의 X선 형광분석기를 이용하여 화학적 특성들을 분석하였다. XRF (X-ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 위하여 적용된 기종은 Shimadzu XRF-1700이며 Rh target을 사용하여 X선을 주사하여 분석하였다. 시편제작은 950℃의 온도에서 ignite시킨 시료 1.3g과 용제 (Li2B507) 6.5g을 혼합하여 유리 시편을 제작하였다. 성분분석에 앞서 LOI(Loss on Ignition) 분석과 물리적 특성분석을 실시하였는데 그 결과는 표 1, 2와 같다.

표 1 플라이애쉬에 대한 LOI 분석결과

구 분	L O I			평 균
시료 1	4.4	3.9	4.6	4.3
시료 2	4.1	3.8	4.2	4.0

표 2 플라이애쉬의 물리적 특성

진비중	평균입경 ( $\mu\text{m}$ )	45 $\mu$ 잔사 (%)	90 $\mu$ 잔사 (%)	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
2.27	22.5	21.8	6.3	3400

이러한 플라이애쉬와 본 연구에 적용된 시멘트에 대한 성분 분석을 실시한 결과는 표 3과 같으며 더불어 시멘트에 대해서도 각각 주요 성분에 대한 분석을 실시하였다.

표 3 플라이애쉬와 시멘트의 성분분석 결과

성 분 (%)		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
플라이 애쉬	시료 1	58.75	16.73	6.17	4.55	1.06	0.99	-	-
	시료 2	62.46	12.55	7.85	3.84	0.96	1.03	-	-
시멘트		21.5	8.09	3.14	61.6	2.6	0.82	0.17	2.13

### 2.2 실험변수

압축강도는 240 Kg/cm<sup>2</sup> 와 450 Kg/cm<sup>2</sup>의 보통강도와 고강도 콘크리트로 배합설계하였으며 결합재의 양에서 각각 0%, 10%, 20%를 플라이애쉬로 대체하여 강도발현 및 제반 역학적 특성에 대하여 고찰한다. 보통강도 콘크리트의 경우 슬럼프는 5-12cm의 값을 원칙으로 하였으며 공기연행(AE)제의 양은 4-7%의 공기량을 확보할 수 있도록 예비배합을 통하여 결정하였다. 고강도 콘크리트의 경우 굵은 골재 최대치수 19mm의 굵은 골재를 사용하고 슬럼프가 최대 18cm까지 되도록 배합하였는데 배합설계 결과는 표 4, 5와 같다.

표 4 보통강도 콘크리트 배합표

W/C (%)	단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> )				
	물	결합재	잔골재	굵은골재	유동화제
45.0	158	351	681	1144	0.527

표 5 고강도 콘크리트 배합표

W/C (%)	단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> )				
	물	결합재	잔골재	굵은골재	유동화제
35.0	158	450	789	970	4.5

### 3. 내구성 분석 실험 및 결과

#### 3.1 내투수성 실험

염소이온 투과시험은 ASTM C1202과 AASHTOT259의 방법에 의거하여 수행하였다. 28일 수중양생한 직경 10cm의 콘크리트 시편을 길이가 5cm가 되도록 절단한 다음 실험을 수행하기 전까지 상대습도 95%이상을 유지시킨다. 실험시 시편은 Applied Voltage Cell에 고정시키고 그림 1과 같이 회로 구성을 한다.

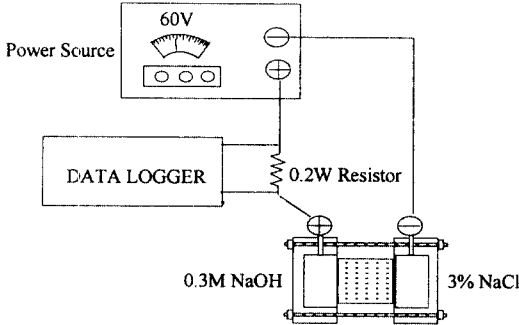


그림 1 염소이온의 투과시험 장치도

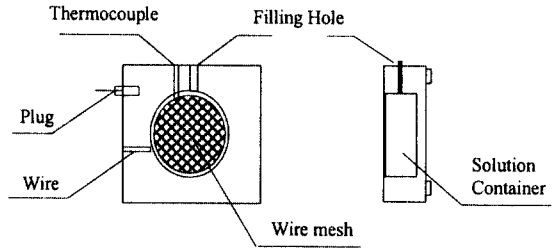


그림 2 Applied Voltage Cell의 단면도

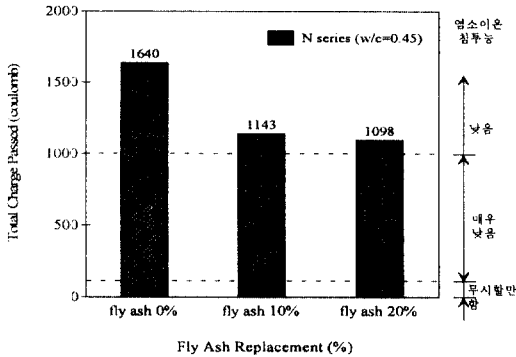


그림 3 보통강도 콘크리트의 내투수성 측정결과

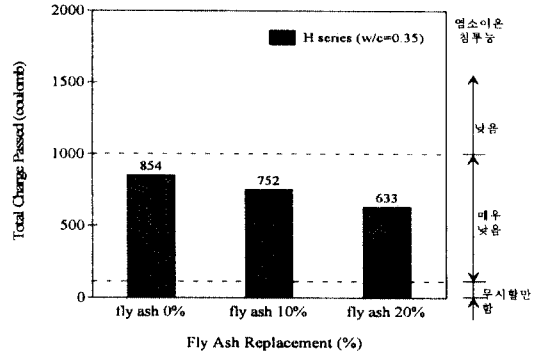


그림 4 고강도 콘크리트의 내투수성 측정결과

보통강도 콘크리트에 있어서 플라이애쉬 함량에 따른 콘크리트의 염소이온 침투시험에 대한 측정 결과는 그림 3에 제시되어 있다. 이 경우에 있어서 측정된 전하량이 낮을수록 콘크리트의 염소이온 침투 저항성이 높게 되며 우수한 내구성을 갖게 된다. 통과 전하량에 대한 측정결과 본 연구에서 제시된 배합은 우수한 내구성을 갖는 것으로 관찰되고 있으며 ASTM에서 제시된 기준에 의하면 낮은 침투성을 보이고 있다. 특히 플라이애쉬 함량이 높아질수록 염소이온의 침투에 대한 저항성이 증대되어 대체율 20%인 경우에 있어서는 매우 낮은 수준의 침투성에 근접하고 있어 플라이애쉬 콘크리트의 우수한 내구성능을 입증하고 있다.

그림 4는 고강도 콘크리트에 대한 염소이온 침투시험의 결과를 나타내고 있는데 보통 콘크리트와 플라이애쉬 콘크리트에 있어서 모두 우수한 침투 저항성을 보이고 있다. 특히 ASTM의 분류 기준에

의하면 보통 콘크리트는 물론, 플라이애쉬 콘크리트의 경우에 있어서도 플라이애쉬의 함량에 관계없이 매우 낮은 염소이온 침투성을 보이고 있어 아주 우수한 내구성을 갖는 콘크리트 배합임을 알 수 있다.

또한 보통강도 콘크리트의 결과와 마찬가지로 고강도 콘크리트에 있어서도 플라이애쉬의 함량이 증가할수록 염소이온의 침투에 대한 저항성이 증가하고 있어 콘크리트에 대한 플라이애쉬의 첨가가 내구성 증진에 큰 기여를 하고 있음이 관찰되고 있다. 이러한 결과들에서 플라이애쉬 콘크리트를 고강도는 물론 고내구성을 갖춘 우수한 성능의 콘크리트로 발전시킬 수 있음을 알 수 있다.

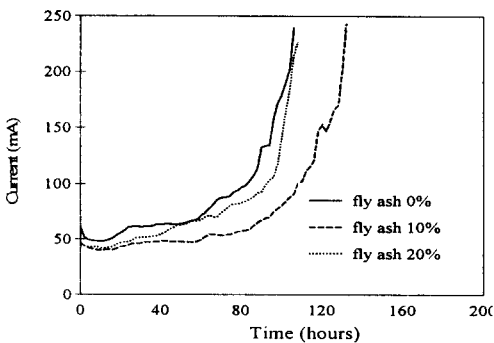
### 3.2 내부식성 실험

철근 부식 실험은 5% NaCl 용액에 철근을 매설한 시편을 침지하여 20V 직류전원 공급 장치의 (+)극은 철근에 (-)극은 NaCl 용액에 연결하여 직류회로를 구성한다. 콘크리트 시편의 높이는 16cm이고 5% NaCl 용액에 침지한 높이는 13cm이다. 양극과 음극의 전위차는 염소이온의 침투를 촉진시킬 뿐만 아니라 철근 부식 역시 촉진시키는 작용을 한다.

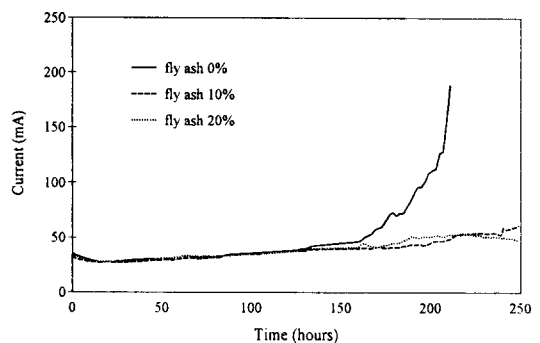
시편의 부식 측정 방법은 철근의 부식으로 인한 팽창압으로 균열이 생겨 콘크리트의 균열 사이로 전해질이 침투해 전류량이 크게 증가하게 된다. 이러한 시점을 측정하기 위한 장치로 각 시편마다 10 Ω의 저항을 연결하여 저항에 걸리는 전압을 측정하여 전류로 환산한다. 직류전압의 측정은 Data Logger를 이용하여 30분마다 측정한다. 부식에 의해 균열이 생기면 급격한 전압의 상승이 이루어지게 되는데 균열이 생긴 시편은 회로에서 제거하고 균열의 발생 상황을 검토한다.

시간에 따른 전류의 계산 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 약 100 시간의 측정결과 보통 콘크리트는 철근의 부식으로 인하여 균열이 발생하고 급격한 전압상승이 관찰되고 있다. 물론 플라이애쉬 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해서 우수한 내부식성을 보이고 있으며 플라이애쉬의 첨가가 콘크리트의 내부식성을 비롯한 내구성을 증진시키게 된다.

고강도 콘크리트에 있어서의 플라이애쉬 함량에 따른 콘크리트의 내부식성 측정결과는 그림 8에 나타나 있다. 보통강도 콘크리트의 경우와 마찬가지로 플라이애쉬의 첨가는 콘크리트의 내부식성을 증진시키고 있다.



(a) 보통강도 콘크리트



(b) 고강도 콘크리트

그림 5 플라이애쉬 콘크리트의 내부식성 실험결과

### 3.3 동결융해 저항특성 분석

콘크리트의 동결융해 저항성능은 공기량에 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 배합시에 측정을 실시하여 동결융해 저항성능을 평가하게 된다. 그러나 경화된 콘크리트에 있어서의 평가를 위하여 가장 유용한 방법중의 하나는 공극조직의 분석을 통한 간격계수의 측정이라 할 것이다. 이러한 경화된 콘크리트의 분석을 위하여 화상분석은 적절하게 활용될 수 있는데 그 원리는 광학 현미경이나 특정 촬영장치등 텔레비전 카메라와 전자현미경등의 화상입력장치로 촬영하고 그 화상의 면적, 길이, 형상등의 화상처리장치로 정량적인 해석을 수행한 후 출력하게 된다.

플라이애쉬 콘크리트의 공극조직에 대한 측정실험은 포인트 카운트법과 선형횡단법을 써서 실시할 수 있는데 본 연구에 있어서는 측정치의 일관된 분석을 위하여 포인트 카운트법에 의한 측정치로서 분석한다. 본 연구에 적용된 화상처리장치의 구성은 그림 6과 같다.

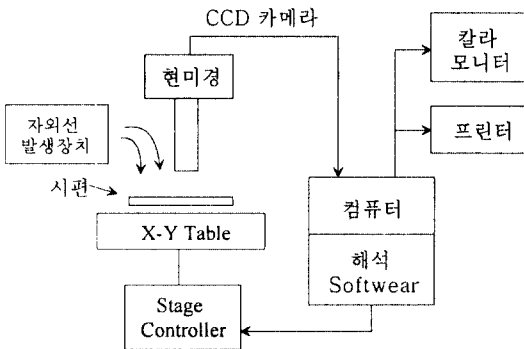
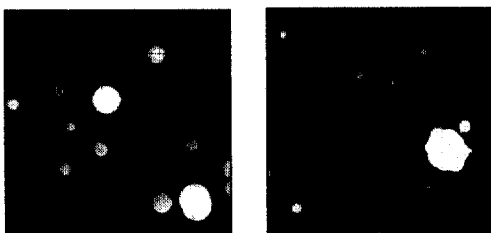


그림 6 화상처리장치 구성체계

일반적으로 굳은 콘크리트의 공기량이 적절한지 여부는 ASTM C 457-90에 규정되어 있는 간격계수(Spacing Factor,  $\bar{L}$ )의 측정에 의해 판단하는 것이 일반적이다. 간격계수는 굳은 콘크리트에 있어서 일정 체적내의 모든 기포 크기가 일정하다는 가정하에서 계산되는 것으로 기포사이의 최대 거리를 나타내는 지표가 된다. 간격계수는 인치(in)나 밀리미터(mm)의 길이단위로 표시되는데 동결융해 작용에 대하여 적절한 저항성을 갖기 위해서는  $200\mu\text{m}(0.008\text{in})$  이하의 값을 가져야 하는 것으로 알려져 있다.

본 장비에 의해 화상처리를 할 경우 콘크리트 시편에 대해 다소 번거로운 사전처리를 하여야 한다. 즉 적절한 크기로 시편을 자른 후 공극내를 형광염료를 첨가한 충전제로 염색하여야 한다. 이렇게 공극속에만 형광물질을 충전시킨후 시료면에 자외선을 비추면 기포 조직만이 발광케되고 이때의 휘도 분포를 일정 범위의 두가지 영역으로 구분하여 화상처리를 하게 된다.

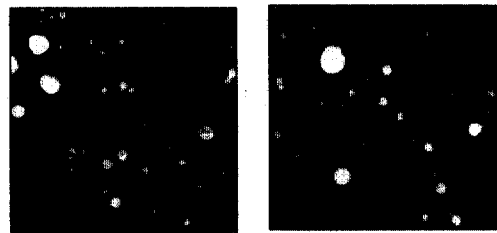
이러한 과정을 거치면 공극과 관련된 다양한 결과들을 얻을 수 있는데 이를 통하여 간격계수등을 계산할 수 있고 내구성 평가에 적절히 활용할 수 있다.



(a) 플라이애쉬 0% (b) 플라이애쉬 20%

그림 7 콘크리트의 공극조직 분포

(공기연행제 비적용)



(a) 플라이애쉬 0% (b) 플라이애쉬 20%

그림 8 콘크리트의 공극조직 분포

(공기연행제 적용)

그림 7는 공기연행제를 적용하지 않은 콘크리트의 공극조직 분포특성을 보여주고 있다. 물론 이러한 경우에 있어서는 굳지 않은 상태에 있어서 플라이애쉬를 20%첨가한 콘크리트의 공기량이 다소 작게 측정되고 있으며 굳은 콘크리트의 공극조직 분석에서도 마찬가지로 내구성이 떨어지는 것으로 관찰되었다. 또한 그림 8은 공기연행제를 적용한 콘크리트의 공극조직 특성을 보여주고 있다. 플라이애쉬를 20% 첨가한 경우 AE제의 사용량이 다소 증대되기는 하지만 굳은 콘크리트의 화상분석 결과 우수한 동결융해저항성을 가지는 것으로 나타났다. 특히 동일 배합에 대한 내구성 지수를 측정한 결과 공기연행제를 적용한 경우에 있어서 플라이애쉬 콘크리트가 100%에 가깝게 나타나고 있어 우수한 내구성을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

한국산 플라이애쉬를 적용한 콘크리트의 내구성을 분석한 결과 콘크리트의 내투수성은 보통 콘크리트에 비해서 플라이애쉬함량이 증가할수록 증진된다. 특히 보통강도 콘크리트의 경우 플라이애쉬 함량이 20%일 때 통과 전하량이 1098Coulombs으로서 ASTM의 기준에 따르면 낮은 염소이온 침투성을 보이고 있다. 플라이애쉬 함량이 증가할수록 철근에 대한 콘크리트의 내부식성은 증가하며 특히 고강도 콘크리트의 경우에 있어 플라이애쉬가 적용된 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 아주 우수한 내부식성을 보이고 있다. 동결융해 시험을 통하여 내구성 지수를 계산한 결과 공기연행을 한 보통강도 콘크리트의 경우에 플라이애쉬를 대체하지 않은 보통 콘크리트는 내구성 지수가 28.4로 나타난 반면 플라이애쉬 함량이 10%, 20%인 플라이애쉬 콘크리트의 내구성 지수는 각각 78.4, 102.1로서 아주 우수한 동결융해 저항성을 나타내고 있다.

결국 플라이애쉬 콘크리트는 보통 콘크리트와 다소 다른 특징들을 보여주고 있는데 특히 내구성에 있어서는 우수한 성능을 보여주고 있어 향후 고성능 콘크리트의 제조에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. 한국전력공사, 한국계면공학연구소, "석탄회 활용 국제 워크숍", 1996년 8월
2. 서울대학교, 쌍용양회(주), "고함량 플라이애쉬 콘크리트의 개발 및 실용화 연구(Ⅰ)", 1997년
3. A. M. Neville, "Properties of Concrete", 4th Edition, Longman, 1995
4. V. Sivasundaram and V. M. Malhotra, "Fly Ash in Concrete," CANMET, Canada, 1987
5. M. Alasali, V. Sivasundaram and V. M. Malhotra, "Fly Ash in Concrete," CANMET MSL 94-15 (IR), Canada, 1992
6. The Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Electric Power Research Institute, May 3-8, Istanbul, Turkey, 1992
7. P. K. Mehta Symposium on Durability of Concrete, edited by Kamal H. Khayat, Pierre-Claude Aitcin, May 23, Nice, France, 1994
8. Proceedings of the CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, July 31-August 5, Montebello, Quebec, Canada, 1983