

Fly Ash 를 이용한 댐 콘크리트의 기본 물성에 관한 연구

Basic Properties of Dam Concrete using Fly Ash

송영철*
Song, Young-Chul

우상균**
Woo, Sang-Kyun

방기성***
Pang, Gi-Sung

정원섭****
Jeoung, Won-Seoup

ABSTRACT

The purpose of this study is to provide the optimum mix design of fly ash concrete to be placed at the concrete face rockfill dam for pumped storage power plants. The basic performance tests including compressive strength, modulus of elasticity, unit weight, coefficient of thermal expansion, shrinkage, adiabatic temperature rise and analysis of thermal stress were conducted for fly ash concrete. From this study, the fly ash concrete represented the better results in the aspects of basic performance and economy than ordinary portland cement concrete. Especially the concrete mix design containing 15% of fly ash is recommended to be applied in the construction of the concrete face rockfill dam for pumped storage power plants.

1. 서론

댐은 영구 구조물이므로 그의 중요성을 감안할 때 설계 및 시공에 있어서 강도에서 내구성으로의 개념 전환이 필요하다. 특히 양수 댐의 경우 급격한 수위 변동, 동결융해, 투수 및 균열 등으로 인하여 콘크리트의 내구성이 저하되므로 이에 대한 대책 수립이 요구된다.

일반적으로 콘크리트 구조물에 있어서 내구성의 저하는 장기적으로 발생하며 설계, 시공, 재료, 유지 관리 및 환경 등의 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 시공 중에 결함을 인지하기는 어렵다.

국내의 경우 기존 콘크리트의 내구성을 향상시킬 수 있는 Fly Ash 콘크리트에 대한 기본 역학적 연구는 수행되었지만, 실질적인 Fly Ash 의 활용은 선진국에 비해 아직까지는 저조한 실정이다. 반면 외국의 경우 Fly Ash 콘크리트에 대한 기초연구는 물론 실 구조물에 대한 적용연구가 매우 활발하며, 특히 영국의 경우 Fly Ash 의 혼입율을 40~60% 정도까지 사용하고 있다.

콘크리트 표면 차수벽 석괴 댐(Concrete Face Rockfill Dam)은 국내 지질구조상 댐 건설의 주요 구성재료인 암석이 풍부하여 재료의 확보가 용이하며, 댐 축조에 계절의 영향을 적게 받아 시공 기간이 짧고, 우수에 대한 안정성이 좋아 댐 건설에 가장 유리한 구조물이라고 판단된다. 본 연구에서는 댐 구조물의 구조적 중요성을 감안하여 CFRD 의 표면 차수벽 재료로 사용되는 콘크리트에 Fly Ash 를 혼입한 후, 이에 대한 콘크리트의 역학적 특성을 규명하고, 댐 콘크리트의 기본 물성과 경제성을 모두 향상시킬 수 있는 최적의 Fly Ash 콘크리트를 개발하여 활용하고자 한다.

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

**** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

2. 실험 내용

2.1 개요

본 연구의 효율적인 수행을 위하여 실험항목은 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 단위중량, 열팽창, 건조수축, 단열온도 상승 실험 및 온도응력 해석 등으로 구분하였으며, 각 실험항목에 대하여 4 Type의 콘크리트 배합(Fly Ash 혼입율 0, 10, 15, 20%)에 재령별(7, 28, 91일)로 각각 3개의 공시체를 만들어 실험을 수행하였다. 각각의 실험결과를 비교·분석하여 댐 콘크리트의 기본 물성과 경제성을 모두 향상시킬 수 있는 Fly Ash 콘크리트의 최적 배합비를 도출하였다.

2.2 실험재료

2.2.1 시멘트

시멘트는 한국공업규격(KS L 5201)에 적합한 국내 D社에서 생산된 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학적 조성은 <표 1>과 같다.

표 1 시멘트의 물리적, 화학적 조성

구분	비중 (S.G)	분말도 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig.Loss (%)
시멘트	3.15	2,900	21.1	6.5	2.9	62.5	3.3	2.2	1.0

2.2.2 잔골재 및 굵은 골재

잔골재 및 굵은 골재는 경남 산청군 단성면 소남리에서 생산되는 강모래 및 강자갈을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 <표 2>와 같다.

표 2 골재의 물리적 성질

종 류	최대치수 (mm)	조립율 (F.M)	비중 (S.G)	흡수율 (%)	단위중량 (kg/m ³)	마모율 (%)	안정성 (%)
잔골재	-	2.847	2.623	1.619	1.737	-	4.97
굵은 골재	25	-	2.729	1.407	1.770	22.4	4.39

2.2.3 Fly Ash

본 연구에 사용된 Fly Ash 는 삼천포에서 생산으로 된 제품으로써, 한국공업규격(KS L 5405)에 적합한 것이며, 그 물리적 성질은 <표 3>과 같다.

표 3 Fly Ash 의 물리적 성질

구 분	강열감량 (%)	단위수량비 (%)	분말도 (cm ² /g)	비중 S.G	SiO ₂ (%)	습분 (%)
KS 기준	5이하	102이하	2,400이상	1.95이상	45이상	1이하
삼천포산 Fly Ash	3.58	101	3,964	2.25	55	0.18

2.2.4 혼화제

본 실험에서는 콘크리트 배합시 목표 슬럼프(Slump)와 공기량을 확보하기 위하여 국내 D社에서 생산되는 표준형 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

2.3 실험방법

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합에 대하여 Fly Ash 를 0, 10, 15, 20% 로 혼입하고, 관련 규격에 따라 기본 물성 실험을 수행하였다. 본 연구에 활용된 콘크리트 배합비는 <표 4>와 같다.

표 4. OPC(Ordinary Portland Cement) 배합표

σ_{28} (kg/cm ²)	Max. Size (mm)	Slump (cm)	Air(%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	S (kg/m ³)	G(kg/m ³)		AD (g/m ³)
									25mm	40mm	
210	25	6±1.5	4±1.5	159	326	48.8	43	783	1085	-	489

2.3.1 압축강도

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 압축강도의 특성을 분석하기 위하여, KS F 2405 에 따라 실험을 수행하였다.

2.3.2 탄성계수

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 탄성계수 특성을 분석하기 위하여, KS F 2403 에 따라 실험을 수행하였다. 측정은 공시체에 Compressometer 와 Extensometer 를 설치하여 KS F 2438 에 따라 수행하였다.

2.3.3 단위중량

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 단위중량 특성을 분석하기 위하여, KS F 2409 에 따라 실험을 수행하였다. 콘크리트의 단위중량은 용기 속의 시료의 중량을 용기의 용적으로 나누어 계산한다.

2.3.4 열팽창

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 열팽창 특성을 분석하기 위하여, CRD C 39 에 따라 실험을 수행하였다. 열팽창 계수는 제작된 15(cm)×30(cm) 표준 공시체를 표준 양생실(23.0±1.7℃)에서 상대습도 100% 로 시험 1시간 전 까지 습윤양생 시킨 후, CRD C 39 규정에 따라 측정하였다.

2.3.5 건조수축

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 건조수축 특성을 분석하기 위하여, 10(cm)×10(cm)×28.5(cm) 규격의 사각형 몰드(Mold)를 제작하고, ASTM C 157 에 따라 실험을 수행하였다. 몰드는 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 설치하여 제작하였으며, 탈영후 표준 양생실(23.0±1.7℃)에서 상대습도 100% 로 습윤양생 시킨 후, 항온 항습실로 운반하여 23±1.7℃ 의 온도차와 50±4% 의 상대습도 조건으로 보관하였다. 공시체는 자동계측장비인 TDS 601을 이용하여 측정 주기별로 건조수축량을 측정하였다.

2.3.6 단열온도 상승

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 콘크리트의 수화열로 인한 내부의 온도 상승량을 파악하여 콘크리트의 단열온도 상승에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 일본 MARUI & Co., LTD 의 단열온도 상승 시험기(Concrete Calorimeter)를 이용하여 실험을 수행하였으며, 측정은 타설 직후 30분 간격으로 약 14일간 측정하였다.

2.3.7 온도응력 해석

양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 혼입율에 따른 표면 차수벽의 수화열에 의한 내부의 온도상승 형상과 온도응력에 의한 균열발생 가능성을 분석하였다. 온도응력해석은 전력연구원에서 개발한 수화열 해석 프로그램(HYDCON)을 이용하여 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

Fly Ash 혼입율 및 재령별 압축강도 실험 결과는 <그림 1>에 나타내었다. 실험 결과 재령 7일의 경우 OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비하여 비교적 높은 강도 특성을 나타냈으나, 재령이 증가할수록 Fly Ash 콘크리트가 OPC 에 비하여 상대적으로 높은 강도를 나타내었다. 본 실험에서는 Fly Ash 를 10% 혼입했을 때 가장 높은 강도를 얻을 수 있었다.

3.2 탄성계수

Fly Ash 혼입율에 따른 재령별 탄성계수 실험 결과는 <그림 2>에 나타내었다. 실험결과 초기 재령에서 탄성계수는 Fly Ash 15%를 혼입한 경우가 다른 배합에 비하여 높게 나타난 반면, 20%를 혼입하였을 경우가 가장 낮게 나타났다. 재령 28일의 경우 탄성계수는 OPC 가 다른 배합에 비하여 높은 특성을 나타내었으며, 특히 Fly Ash 15%를 혼입한 경우 초기 재령에서 뿐만 아니라 장기 재령에서도 탄성계수가 높게 나타났다. 탄성계수는 변형에 대한 저항성을 나타내는 기준으로써 탄성계수가 크다는 것은 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 의미한다. 그러므로 본 실험에서는 Fly Ash 를 15% 혼입한 경우가 다른 배합에 비하여 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 알 수 있었다.

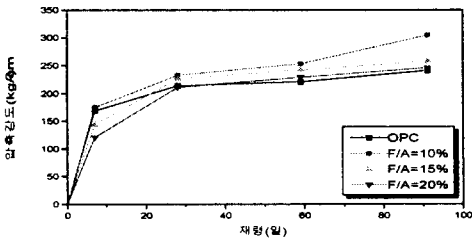


그림 1 Fly Ash 혼입율 및 재령에 따른 압축강도 실험결과

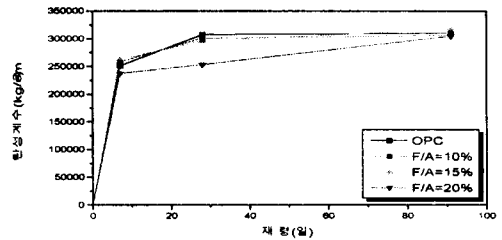


그림 2 Fly Ash 혼입율 및 재령에 따른 탄성계수 측정결과

3.3 단위중량

Fly Ash 혼입율에 따른 단위중량 실험결과는 <표 5>에 나타내었다. <표 5>에서 보는 바와 같이 단위중량의 경우 OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비하여 비교적 높은 값을 나타내며, Fly Ash 콘크리트는 혼입율에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

표 5 Fly Ash 혼입율에 따른 콘크리트의 단위중량 측정 결과

TYPE	OPC	F/A=10%	F/A=15%	F/A=20%
단위중량(t/m³)	2.333	2.281	2.298	2.277

3.4 열팽창

Fly Ash 혼입율에 따른 열팽창 계수 실험결과는 <그림 3>에 나타내었다. 열팽창계수의 경우 초기 재령에서는 OPC 가 가장 낮게 나타났으며, 재령이 증가할수록 Fly Ash 콘크리트가 낮은 경향을 나타내었다. 특히 Fly Ash 를 20% 혼입한 경우 장기 재령에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

3.5 건조수축

Fly Ash 혼입율에 따른 건조수축 실험결과는 <그림 4>에 나타내었다. 본 실험의 경우 건조수축은 <그림 4>에서 보는 바와 같이 Fly Ash 콘크리트가 OPC 에 비하여 단기 및 장기 재령에서 모두 낮게 나타났다. 특히 Fly Ash 20%를 혼입한 경우의 건조수축은 다른 Fly Ash 콘크리트에 비해 단기 및 장기 재령에서 모두 낮게 나타났다.

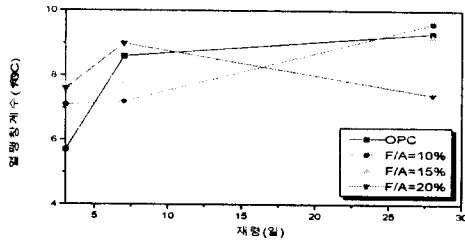


그림 3 Fly Ash 혼입율 및 재령별 열팽창 계수 측정결과

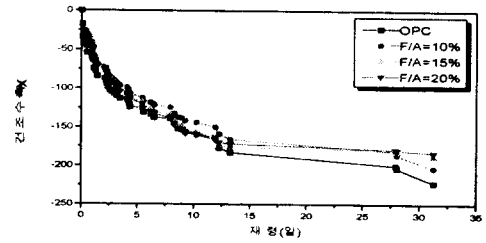


그림 4 Fly Ash 혼입율 및 재령별 건조수축 측정결과

3.6 단열온도 상승

Fly Ash 혼입율에 따른 단열온도 상승 실험 결과는 <그림 5> 및 <그림 6>에 나타내었다.

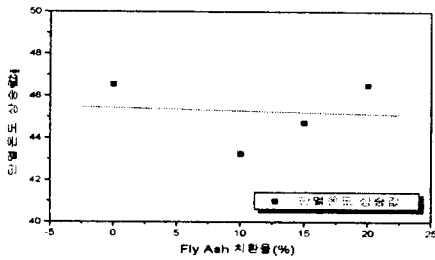


그림 5 Fly Ash 혼입율에 따른 단열온도 상승 실험 결과

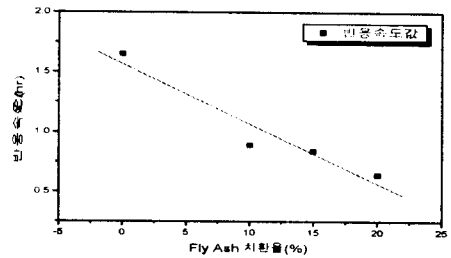


그림 6 Fly Ash 혼입율에 따른 반응속도 실험 결과

<그림 5>는 Fly Ash 혼입율에 따른 단열온도 상승값의 변화를 나타낸 것으로, 본 실험의 경우 Fly Ash 혼입율에 따라 콘크리트의 단열온도 상승값이 10%까지는 감소하다 15%부터 증가하는 것으로 나타났다. 한편 <그림 6>은 Fly Ash 혼입율에 따른 반응속도의 변화를 나타낸 것이며, Fly Ash 혼입율에 따라 반응속도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 시멘트 대체 결합재로 사용된 Fly Ash가 수화반응을 일시적으로 억제하거나 지연시킴으로써 반응속도를 저하시키는 것이며, 이 경향은 Fly Ash 혼입율이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

3.7 온도응력 해석

<그림 7>은 양수 댐 표면 차수벽(Face Slab)의 형상 및 온도응력 해석을 위한 Mesh 구성도를 나타낸 것이며, 해석 결과는 <그림 8> ~ <그림 10>에 나타내었다.

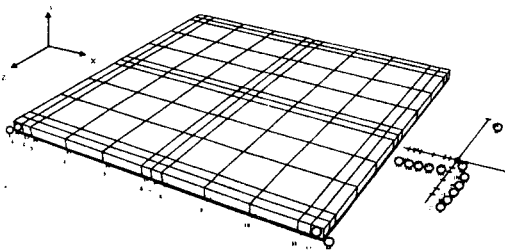


그림 7 표면 차수벽의 Mesh 구성도

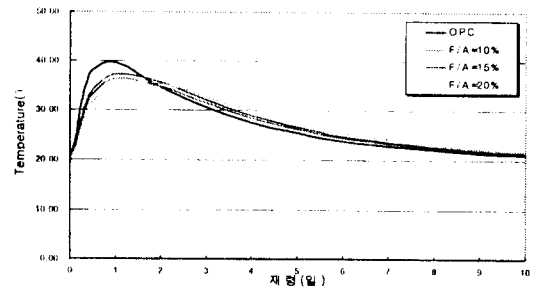


그림 8 Fly Ash 혼입율에 따른 중앙부에서의 온도분포(절점번호 254)

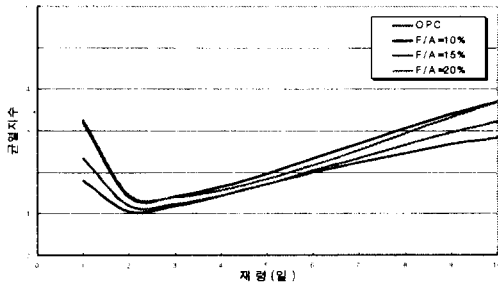


그림 9 Fly Ash 혼입율에 따른 X방향 균열지수
(요소번호163)

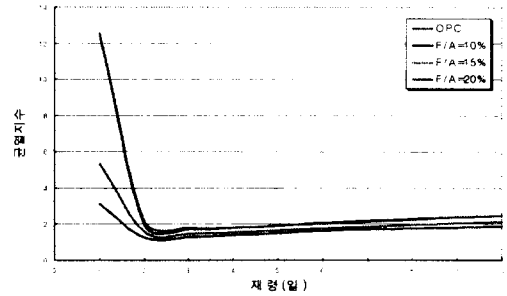


그림 10 Fly Ash 혼입율에 따른 Z방향 균열지수
(요소번호163)

4. 결론

본 연구에서는 양수 댐 표면 차수벽에 시공예정인 콘크리트에 무기 혼화재인 Fly Ash 를 0, 10, 15, 20% 혼입하여 기본 물성 실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압축강도 실험결과, 재령 7일의 경우 OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비하여 비교적 높은 강도특성을 나타냈으나, 재령이 증가할수록 Fly Ash 콘크리트가 OPC 에 비하여 상대적으로 높은 강도를 나타내었다. 본 실험에서는 Fly Ash 를 10% 혼입했을 때 가장 높은 강도를 얻을 수 있었다.
- (2) 초기 재령에서 탄성계수는 Fly Ash 15% 를 혼입한 경우가 다른 배합에 비하여 높게 나타났다. 특히 Fly Ash 15% 를 혼입한 경우 초기 재령에서 뿐만 아니라 장기 재령에서도 탄성계수가 높게 나타났다. 탄성계수는 변형에 대한 저항성을 나타내는 기준으로써 탄성계수가 크다는 것은 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 의미한다. 그러므로 본 실험에서는 Fly Ash 를 15% 혼입한 경우가 다른 배합에 비하여 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 단위중량의 경우 OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비하여 비교적 높은 값을 나타내었으며, Fly Ash 콘크리트는 혼입율에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.
- (4) 열팽창계수의 경우 초기 재령에서는 OPC 가 가장 낮게 나타났으며, 재령이 증가할수록 Fly Ash 콘크리트가 낮은 경향을 나타내었다. 특히 Fly Ash 를 20% 혼입한 경우 장기 재령에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 본 실험을 통하여 Fly Ash 는 콘크리트의 열팽창계수에 많은 영향을 미치며, 그 혼입율에 따라 경향이 다르게 나타남을 알 수 있었다.
- (5) 건조수축은 Fly Ash 콘크리트가 OPC 에 비하여 단기 및 장기 재령에서 모두 낮게 나타났다. 특히 Fly Ash 20% 를 혼입한 경우의 건조수축은 다른 Fly Ash 콘크리트에 비해 단기 및 장기 재령에서 가장 낮게 나타났다. 양수 댐 표면 차수벽은 시공 중 초기 재령에서 건조수축에 의해 균열이 발생 할 가능성이 가장 높다. 따라서 균열에 대한 저항성과 경제성을 향상시키기 위해서는 Fly Ash 를 혼입한 배합을 선정하여 시공에 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.
- (6) 단열온도 상승 실험 결과, Fly Ash 혼입율에 따라 콘크리트의 단열온도 상승값이 10% 까지는 감소하다 15% 부터 증가하는 것으로 나타났다. 한편 반응속도는 Fly Ash 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 시멘트 대체 결합재로 사용된 Fly Ash 가 수화반응을 일시적으로 억제하거나 지연시킴으로써 반응속도를 저하시키는 것이며, 이 경향은 Fly Ash 혼입율이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.
- (7) 온도균열 지수는 값이 작을수록 균열 발생 가능성이 커짐을 의미한다. 온도응력 해석 결과, OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비해서 상대적으로 균열지수값이 작게 나타나며, 특히 Fly Ash 를 10% 혼입한 콘크리트의 균열지수가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 온도응력 해석을 통하여 OPC 가 Fly Ash 콘크리트에 비해서 균열발생 가능성이 상대적으로 높으며, 특히 Fly Ash 를 10% 혼입 하였을 때 균열발생 가능성이 가장 작다는 것을 알 수 있었다.

이상의 연구결과를 통하여 Fly Ash 를 15% 혼입하였을 경우, 댐의 기본 물성 뿐만 아니라 경제성 측면에서 가장 우수한 연구결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. “콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 방안 연구”, 한국전력공사, 1998.
2. “콘크리트 혼화재로서 석탄회 이용방안 연구”, 한국전력공사, 1989.
3. “Procedure for Test of the Length Change of Hardened Concrete”, ASTM C 157, 1990.