# CFRD 표면 차수벽 콘크리트의 기본 물성 및 균열 제어 특성에 관한 실험 연구

# An Experimental Study on the Basic Properties and the Control Properties of Crack for Face Slab Concrete in CFRD

우 상 균* 송 영 철** 원 종 필*** 윤 영 수****
Woo, Sang-Kyun Song, Young-Chul Won, Jong Pil Yoon, Young Soo

ABSTRACT

The purpose of this study is to provide the optimum mix design of concrete to be placed at the face slab concrete in CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam) for pumped storage power plants. The basic performance tests including compressive strength, modulus of elasticity, flexural strength and the control properties of crack including plastic shrinkage, drying shrinkage were conducted for concrete using fly ash and polypropylene fiber. From this study, the fly ash concrete represented the better results in the aspects of basic performance, control properties of crack and economy than ordinary portland cement concrete. Especially the concrete mix design containing 20% of fly ash is recommended to be applied in the construction of the face slab concrete in CFRD 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 매우 어렵다.

콘크리트 표면 차수벽형 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, 침투류에 대한 안정성이 좋아 댐 건설에 가장 유리한 구조물이라고 판단된다.

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
*** 정회원, 건국대학교 농공학과 조교수
**** 정회원, 고려대학교 토목·환경공학과 교수

본 연구에서는 댐 구조물의 구조적 중요성을 감안하여 CFRD 의 표면 차수벽 재료로 사용되는 콘크리트에 Fly Ash 및 Polypropylene 섬유를 혼입한 후, 이에 대한 콘크리트의 기본 물성 및 균열 제어 특성을 규명하고, 댐 콘크리트의 기본 물성과 경제성을 모두 향상시킬 수 있는 최적의 콘크리트를 개발하여 활용하고자 한다.

## 2. 실험 내용

### 2.1 개요

본 연구의 효율적인 수행을 위하여 실험은 기본 물성(압축강도, 탄성계수, 휨강도) 실험과 균열 제어 특성(소성수축, 건조수축) 실험 2가지로 구분하였으며, 각 실험항목에 대하여 8 Type의 콘크리트 배합(Fly Ash 치환율 0, 15, 20, 25%, Polypropylene 섬유 혼입율 0, 0.1%)에 각각 3개의 공시체를 만들어 실험을 수행하였다. 각각의 실험결과를 비교·분석하여 댐 콘크리트의 기본 물성, 균열 제어 특성 및 경제성을 모두 향상시킬 수 있는 콘크리트의 최적 배합비를 도출하였다.

### 2.2 실험재료

#### 2.2.1 시멘트

시멘트는 한국공업규격(KS L 5201)에 적합한 국내 H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 ($cm^2/g$) | $SiO_2$ (%) | $Al_2O_3$ (%) | $Fe_2O_3$ (%) | 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 강원도 인제군 기린면 진동리 및 양양군 양양읍 연창리에서 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 | - | 2.762 | 2.581 | 1.6 | 1.737 | - | 0.78 |
| 굵은 골재 | 40 | - | 2.691 | 0.6 | 1.770 | 17.5 | 0.64 |

#### 2.2.3 Fly Ash

본 연구에 사용된 Fly Ash 는 보령에서 생산된 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 규준 | 5이하 | 102이하 | 2,400이상 | 1.95이상 | 45이상 | 1이하 |
| 보령산 Fly Ash | 3.50 | 100 | 3,850 | 2.30 | 58 | 0.20 |

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 시공 예정인 콘크리트 배합에 대하여 Fly Ash 는 0, 15, 20, 25%, Polypropylene 섬유는 0, 0.1% 로 각각 혼입하고, 관련 규정에 따라 기본 물성 및 균열 제어 특성 실험을 수행하였다. 본 연구에 활용된 콘크리트 배합표는 표 4 와 같다.

표 4 OPC(Ordinary Portland Cement) 배합표

| $\sigma_{28}$ ($kg/cm^2$) | Max. Size (mm) | Slump (cm) | Air(%) | W ($kg/m^3$) | C ($kg/m^3$) | W/C (%) | S/A (%) | S ($kg/m^3$) | G ($kg/m^3$) | PP 섬유 ($kg/m^3$) | AD ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 240 | 40 | 5±1.5 | 5±1.5 | 172 | 325 | 53 | 43 | 754 | 1044 | - | 0.975 |

2.3.1 압축강도

양수 댐 표면 차수벽에 시공 예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 및 Polypropylene 섬유 혼입율에 따른 압축강도의 특성을 분석하기 위하여, KS F 2405 에 따라 실험을 수행하였다.

2.3.2 탄성계수

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

2.3.3 휨강도

양수 댐 표면 차수벽에 시공 예정인 콘크리트 배합의 Fly Ash 및 Polypropylene 섬유 혼입율에 따른 휨강도 특성을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 각 변수에 따라 15×15×55(cm) 공시체를 제작하여 KS F 2408 에 따라 실험을 수행하였다.

2.3.4 소성수축 균열

콘크리트의 소성수축 균열제어 특성을 측정하기 위한 기존의 실험방법은 콘크리트 내에 발생되는 구속응력을 실제 콘크리트 타설시 구속조건과 형상, 재료 및 환경적 변화에 영향을 받도록 구속조건을 제공하여 소성수축 균열의 발생과정을 관찰하는 것이다. 본 연구에서는 댐 콘크리트의 소성수축 균열 제어 특성을 평가하기 위하여 기존 연구에서 사용된 실험방법에 따라 실험을 수행하였다(그림 1 참조). 실험은 28℃의 온도와 35%의 상대습도에서 콘크리트 표면에 4~4.6m/s의 바람을 24시간 동안 작용시키면서 균열 면적을 관찰하였다.

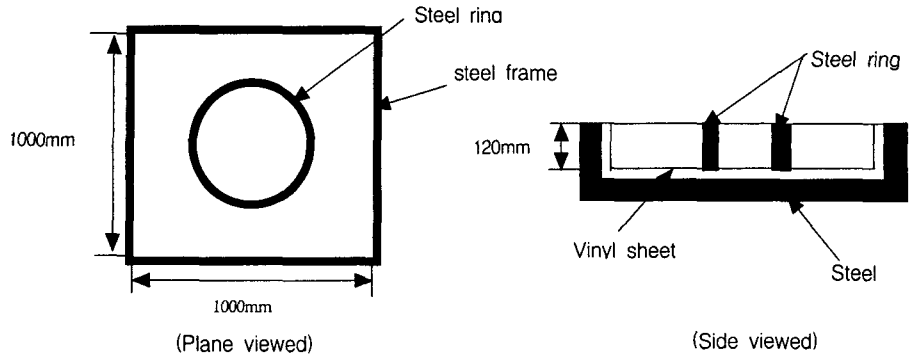


그림 1 소성수축 균열 실험장치

2.3.5 건조수축 균열

댐 콘크리트의 건조수축 균열에 대한 저항성 평가를 위해, 국내·외에서 많은 연구자들이 사용하였던 그림 2 와 같은 실험 시편을 제작하여 콘크리트 타설 후 28℃의 온도와 상대습도 45%를 유지하면서 42 일간 균열의 발생과 균열 폭의 성장을 관찰하였다.

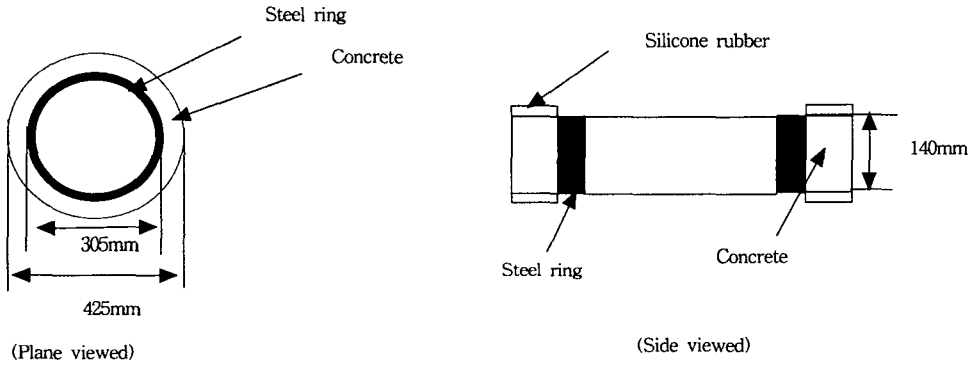


그림 2 건조수축 균열 실험장치

## 3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

Fly Ash 첨가량 및 Polypropylene 섬유의 사용여부에 따른 압축강도 실험결과는 그림 3 과 같다. 실험결과 Fly Ash의 치환율이 15%일 때 가장 우수한 결과를 보여주었다. 또한 Polypropylene 섬유 보강 콘크리트가 보통 콘크리트보다 압축강도가 약간 우수함을 보여주었으나, 그 차이는 크지 않았다.

3.2 탄성계수

Fly Ash 첨가량 및 Polypropylene 섬유의 사용여부에 따른 탄성계수 실험결과는 그림 4 와 같다. 실험결과 Fly Ash 를 첨가하였을 때의 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수와 비교하여 약간 큰 결과를 보여주었으나, 그 차이는 크지 않았다. Polypropylene 섬유의 첨가에 따른 탄성계수의 실험 결과는 Polypropylene 섬유의 사용에 따라 탄성계수가 약간 증가하는 경향을 보여주었다.

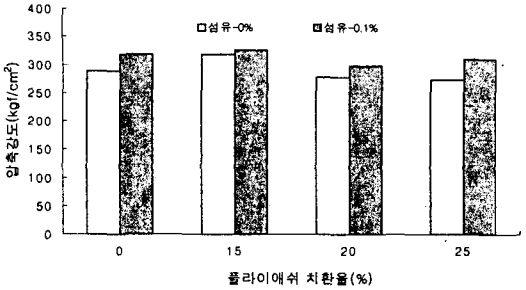


그림 3 압축강도 실험결과

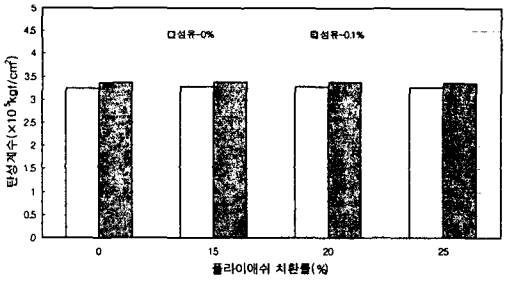


그림 4 탄성계수 실험결과

3.3 휨강도

Fly Ash 첨가량 및 Polypropylene 섬유의 사용여부에 따른 휨강도 실험결과는 그림 5 와 같다. 휨강도 실험결과 Fly Ash 의 치환율이 20% 일 때 가장 우수한 결과를 보여주었다. 또한 Polypropylene 섬유보강 콘크리트가 보통 콘크리트보다 휨강도가 약간 우수함을 보여주었으나, 그 차이는 크지 않았다.

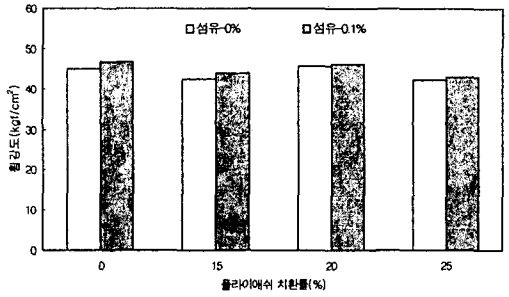


그림 5 휨강도 실험결과

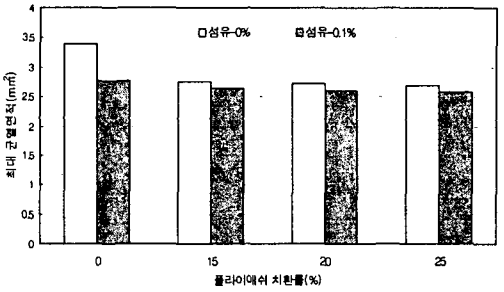


그림 6 소성수축 균열 실험결과

3.4 소성수축 균열

Fly Ash 첨가량 및 Polypropylene 섬유의 사용여부에 따른 소성수축 균열 실험결과는 그림 6 과 같다. 실험 결과 Fly Ash의 첨가량이 증가할수록 균열 최대 면적이 감소하는 경향을 보여주었다. Fly Ash 치환율 15%와 20%에서 가장 우수한 균열제어 특성을 보여주었으며, Polypropylene 섬유를 첨가한 콘크리트가 Polypropylene 섬유를 첨가하지 않은 콘크리트에 비해 더 우수한 균열제어 특성을 보여주었다.

3.5 건조수축 균열

건조수축 균열 실험결과는 그림 7 과 같다. 실험결과 Fly Ash 치환율이 증가할수록 균열의 최대 폭은 감소하는 경향을 보여주었으며, Polypropylene 섬유의 첨가에 따른 건조수축 균열의 폭은 감소하는 경향을 보여주었다.

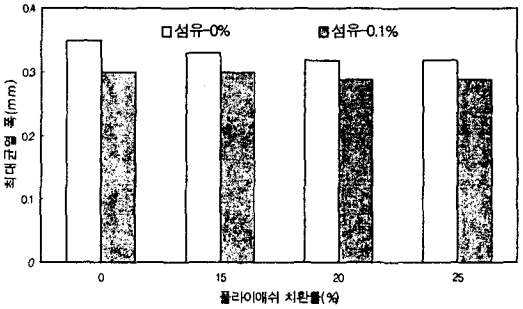


그림 7 건조수축 균열 실험결과

## 4. 결론

본 연구에서는 양수 댐 표면 차수벽에 시공 예정인 콘크리트에 무기 혼화재인 Fly Ash 는 0, 15, 20, 25%, Polypropylene 섬유는 0, 0.1% 혼입한 후 기본 물성 및 균열 제어 특성 실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 압축강도 실험결과 Fly Ash 치환율이 15% 일 때 가장 우수한 결과를 보여주었다. 또한 보통 콘크리트보다는 Polypropylene 섬유를 첨가한 콘크리트의 압축강도가 약간 크게 나타났으나, 그 차이는 크지 않았다.

(2) 휨강도 실험결과 Fly Ash 의 치환율이 20%인 콘크리트가 가장 우수한 결과를 보여주었다. 또한 Polypropylene 섬유를 첨가한 콘크리트가 보통 콘크리트보다 모두 휨강도가 크게 나타났으나, 그 차이는 크지 않았다.

(3) 소성수축 균열 실험결과 Fly Ash 의 치환율이 증가할수록 최대 균열 면적이 감소하는 경향을 보여주었다. 그러나 Fly Ash 의 치환율이 15% 이상이 되면 그 감소 폭은 크지 않았다. 또한 Fly Ash 치환율이 0%인 콘크리트에서는 Polypropylene 섬유의 첨가가 콘크리트의 균열제어에 우수한 효과를 보여주었다. 그러나 Fly Ash 치환율이 15% 이상이 되면 Polypropylene 섬유의 첨가는 소성수축 균열의 제어에 큰 효과를 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Fly Ash 의 치환율이 증가할수록 콘크리트에 발생하는 수화열을 제어 할 뿐만 아니라, 콘크리트 내부의 미세 공극을 Fly Ash 가 채워줌으로써 콘크리트를 밀실하게 만들어 주기 때문이다.

(4) 건조수축 실험결과 Fly Ash 의 첨가는 건조수축 균열제어에 큰 효과가 없는 것으로 나타났으며, Polypropylene 섬유의 첨가 역시 건조수축 균열 제어에 큰 효과를 발휘하지 못하였다. 이러한 현상은 굵은 골재의 최대치수를 40mm인 골재를 사용함으로써 상대적으로 25mm의 골재를 사용할 때 보다 시멘트 페이스트와의 부착계면이 감소하여 보다 우수한 균열 제어 효과가 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 연구결과를 통하여 Fly Ash 는 20%, Polypropylene 섬유는 혼입하지 않은 경우, 댐의 기본 물성 뿐만 아니라 경제성 측면에서 가장 우수한 연구결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. "콘크리트 혼화재로서 석탄회 이용방안 연구", 한국전력공사, 1989.
2. "댐 차수벽용 콘크리트의 균열 및 동결융해 저항성 향상 연구", 전력연구원, 2001.