

# 防護 構造物에 鋼纖維補强 콘크리트의 適用

## Application of SFRC on the Protection Structure(SPIN TESTER)

이제방\*  
Lee, Jay Bang

이석홍\*\*  
Lee, Suck Hong

허택녕\*\*\*  
Huh, Taik Nyung

소양섭\*\*\*\*  
Soh, Yang Seob

---

### Abstract

The Spin Tester(High Speed Balancing and Overspeed Test Facility), which is designed for the quality control of turbine, generator, and rotors was supposed to be constructed with the use of Steel Fiber Reinforced Concrete(SFRC) for reducing the risk of accident while operation.

However, it was very difficult to place concrete due to there are two major concern in the SFRC work: one is existence of fiber ball due to inhomogeneous mixing, the other is the segregation of the concrete materials.

To avoid these possible problems, the S/a was controlled about 55% to reduce the segregation and the high range AE water reducing agent was used to maintain the slump over the value of 18cm. With these careful considerations, the SFRC work was done successfully by only using regular equipments like pump car and vibrator.

---

## 1. 서 론

현대중공업·중전기사업본부에서는 대형 발전기 및 터빈 엔진을 제작할 수 있는 공장을 신규로 건설함에 있어서, 생산 제품의 최종시험을 하는 설비인 Spin Tester(High Speed Balancing and Overspeed Test Facility)를 제작하게 되었다.(사진 1, 사진 2 참조) 이 시험기를 통해서 각종 터빈(turbine), 발전기(generator), 로타(rotor) 등의 설계 및 제작에 대한 안정성 확인과 품질에 대한 확실한 보증을 할 수 있게 된다. 그런데 이 시험기에서 가장 안정성이 요구되는 진공터널(vacuum tunnel)은 약 500톤의 내부 철제 라이너(steel liner)와 그 바깥부분을 두께 2.5m의 강섬유보강콘크

---

\* 정회원, 고창기능 대학 전임강사

\*\* 정회원, 기술연구소, 공학박사

\*\*\* 정회원, 창원대 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 정회원, 전북대 건축공학과 교수

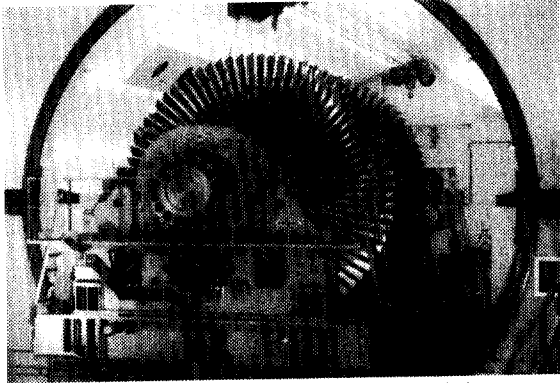


사진 1 SPIN TESTER에 Rotor 진입광경

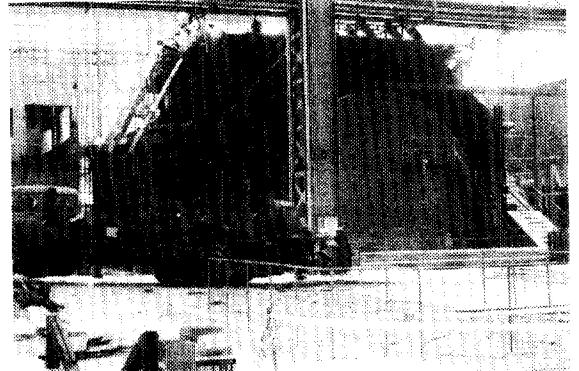


사진 2 SPIN TESTER의 진공터널 외곽 SFRC 타설 장면

리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : SFRC)로 보강하여 원심력에 의한 로타 파손시 대외적인 손상을 방지하도록 설계되었다. 그리고 터널의 최외곽부는 외부의 충격으로부터 보호하기 위하여 철재 영구거푸집(steel plate)으로 마감하게 되어있다.

한편 SFRC는 섬유 보강효과로 인성이 현저히 증가되고, 내충격성은 에너지 흡수량으로 산정할 경우 혼입율이  $V_f = 0.5\%$ 일 때는 약 50배,  $V_f = 1\%$ 일 때는 약 100배에 이른다고 알려져 있다. SFRC의 이러한 특성을 이용하여 각종 방호구조물(防護構造物)에도 응용되고 있다.

그러나 SFRC는 섬유의 혼입율에 따라 시공성이 나빠지고, 특히 섬유가 분산되지 못하고 한데 엉키는 섬유응집현상(fiber ball) 등이 발생되어 그 사용상에 세심한 주의가 요구된다. 그리고 SFRC는 많은 연구 및 실험에 의해 배치플랜트에서 믹서로 교반하거나 현장에서 애지데이터 트럭에서 타설 전에 혼입하여 교반하는 것이 가능한 것으로 보고되고 있으나, 국내 레미콘 업계에서는 SFRC를 사용할 경우 믹서 또는 애지데이터 트럭의 드럼에 많은 손상을 유발하고, 일반 콘크리트에 비해 많은 주의가 필요하고, 수량이 적고 한시적으로 특수주문 생산한다는 점 등의 이유로 실제 생산하는 것을 꺼리고 있는 형편이다.

## 2. 연구목적 및 범위

현대중공업에서 제작하는 Spin Tester의 진공터널은 방호구조물 중에서도 특이한 형태로 원통형의 안 밖을 강판으로 영구거푸집화 하고 그 사이를 SFRC로 타설하게 되어있다. 그런데 그 단면은 두께가 약 2.5m이고, 단면내부는 진동 및 파괴에 대비하여 원형철근으로 촘촘히 배근되어 일반 콘크리트로도 타설하기가 매우 어려운 형태이다.(사진 3 참조) 더욱이 외부거푸집이 강판으로 일체화되어서 콘크리트가 한 번 타설되면 그 내부를 확인할 수가 없게 되어 있다. 이런 시공여건 때문에 콘크리트 내부에서 재

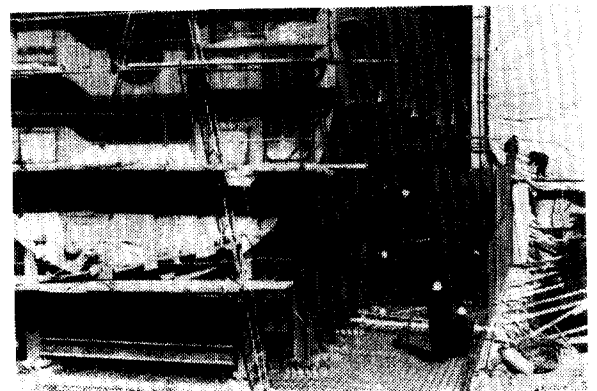


사진 3 SPIN TESTER의 진공터널 외곽 철근배근 장면

료분리나 섬유몽침에 의한 시공불량 등이 생기지 않도록 하는 것이 가장 큰 문제로 제기되었다.

따라서 본 연구는 작업성이 우수하고 품질이 좋은 SFRC를 생산하고, 타설이 어려운 단면에서도 일 반시공장비-펌프카, 진동다짐기- 만으로도 시공할 수 있도록 일괄적인 품질관리를 하는 것을 그 목적 으로 하였고, 설계조건에 맞는 SFRC를 시공하기 위한 최적배합비를 도출하는 것에 주안점을 두고 수 행하였다.

### 3. SFRC의 배합설계

#### 3.1 설계조건

진공터널에 사용되는 SFRC는 Spin Tester의 기기설비 납품업체인 독일의 Carl Schenck사에서 설계한 것으로 설계기준강도는  $270\text{kg/cm}^2$  이다. 또한 모든 콘크리트의 품질을 독일규격(DIN)으로 규정하였기 때문에 국내실정에 맞도록 조정할 필요가 있었으며, 그럴 경우 국내에서 일반적으로 사용 되는  $10 \times 20\text{cm}$ 의 원주공시체의 압축강도로 환산하면 설계기준강도는 약  $230\text{kg/cm}^2$ 가 된다. 본 연 구에서는 원주공시체를 기준으로 하여 설계기준강도를  $230\text{kg/cm}^2$ 로 하여 배합설계에 적용하였다.

한편 콘크리트의 압축강도 및 작업성을 향상시키기 위하여 고성능 감수제를 이용하기로 하였고, 실 제 콘크리트 공사시 납품하게 될 레미콘 공장에서 사용하고 있는 품질관리 상태를 그대로 적용하기로 하였으며, 따라서 모든 품질시험 및 배합시험도 레미콘 공장의 시험실에서 진행하여 가능한 한 시공조 건과 동일한 상태가 될 수 있도록 하였다.

#### 3.2 사용재료

##### 3.2.1 시멘트

콘크리트 공사에 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트로서(한라시멘트) 그 물성은 표 1과 같다.

표 1 시멘트의 시험성과표

| 응결시간<br>(길모아침) |            | 압축강도( $\text{kg/cm}^2$ ) |     |     | 분말도<br>비표면적<br>( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 오토클레이<br>브안정도<br>(%) | 화학성분       |                        |             | 신선도 |
|----------------|------------|--------------------------|-----|-----|---|----------------------|------------|------------------------|-------------|-----|
| 초결<br>(분)      | 종결<br>(시간) | 3일                       | 7일  | 28일 |   |                      | MgO<br>(%) | SO <sub>3</sub><br>(%) | 강열감량<br>(%) |     |
| 222            | 6:21       | 213                      | 268 | 344 | 3,297                                     | 0.26                 | 3.85       | 2.38                   | 0.96        | 양호  |

##### 3.2.2 골재

레미콘 공장에서 사용하는 잔골재는 100% 해사로서 그 중에서 약 70%는 경북 울진산 해사를 사용 하였고, 입도보정을 위해서 약 30%는 전남 목포사를 혼용하였다. 또한 레미콘 공장에는 스프링 쿨러 에 의한 제염설비를 갖추고 있어서 잔골재의 염분함유량을 기준치 이하로 관리하였다. 한편 잔골재의 입도는 전체적으로 잔입도 많은 것으로 나타났으며 배합을 조정할 때 보통 배합비보다 잔골재율이 조 금씩 높아져야 될 것으로 예상되었다.

굵은골재는 현장인근에 있는 석산에서 채취된 쇄석을 사용하였으며 굵은골재 최대치수가 25mm인 것을 이용하기로 하였다. 처음에는 타설부위의 배근상태가 매우 촘촘하였고, 섬유몽침현상이나 재료

분리의 발생에 대한 우려 때문에 19mm를 이용하는 것을 고려하였으나 재료비의 단가상승 및 레미콘 공장의 생산여건상 어려운 점 등이 제기되어 25mm를 사용하기로 하였다.

### 3.2.3 강섬유

강섬유는 설계에서 지정한 갈고리(hook)가 있는 다발형태(bundle type)의 강섬유(Dramix ZC60/.80, Belgium)를 사용하였다. (사진 4 참조) 이 제품은 에너지 흡수능력이 뛰어나고, SFRC가 연성거동(인성이 좋아짐)을 하기 때문에 충격에 대한 저항성이 극도로 증진된다. 또한 양 끝부분이 갈고리 모양으로 되어 있어서 직선형의 강섬유보다 인발에 대한 저항성이 더 뛰어나다고 알려져 있다. 이러한 이유로 고속회전을 하는 진공터널 외곽 방호 구조물의 설계에 반영된 것으로 판단된다.

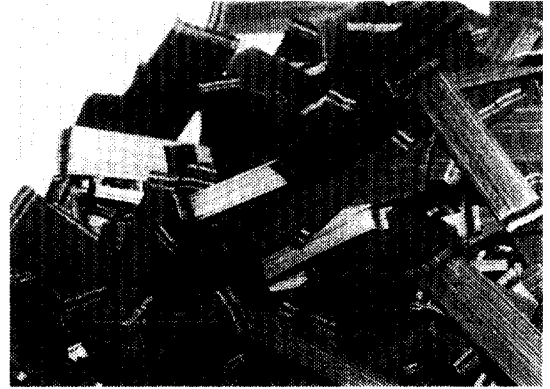


사진 4 강섬유(Steel Fiber)

### 3.2.4 혼화제

공사에 사용될 SFRC는 작업성 뿐만 아니라 강도를 증진시키는 것이 필요하기 때문에 사용하는 화학 혼화제 역시 유동성의 증진 뿐만 아니라 감수효과를 병행할 수 있는 것이어야 한다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 레미콘 공장에서 사용하고 있는 여러 혼화제 중에서 가장 적합하다고 판단되는 고성능 AF 감수제(Phoenix-R#1, J사)를 선정하였다.

### 3.2.5 배합수

배합수는 레미콘 공장에서 사용하고 있는 응용이 가능한 지하수를 이용하였다.

## 3.3 배합실험

### 3.3.1 배합비 선정

- 1) 배합강도 결정 : 실 공사에 납품하게 될 레미콘 공장의 품질관리 상태는 보통정도(변동계수 12~16%)인 것으로 판단되었기 때문에 배합강도를 결정하기 위한 할증계수를 1.3으로 설정하였다. 그와같이 해서 SFRC의 배합강도를  $300\text{kg/cm}^2$ 로 결정하였다.
- 2) 슬럼프 : 보통 슬럼프는 타설면의 모양이나 크기, 철근의 배근상태에 따라 결정된다. 그러나 최근에는 거의 대부분의 현장에서 펌프카에 의한 타설이 일반화 되어 있기 때문에 기존의 시방규정에서와 같이 부위별로 또는 다짐조건별로 구분하여 적용하기는 어렵다고 판단 되었다. 그래서 본 연구에서는 타설부위에 관계없이 펌핑이 용이하도록 목표 슬럼프를 18cm로 정하였다.
- 3) 공기량 : Spin Tester는 공장 내에 설치되고, 동해를 받는 지역도 아니었기 때문에 본 연구에서는 공기량의 범위를 3% 이상에서 관리하기로 하였다.
- 4) 굵은골재 최대치수 : 25mm
- 5) 물/시멘트 비, 단위수량의 결정 : 레미콘 공장의 기존 배합설계 실적으로부터 압축강도  $350\text{kg/cm}^2$ , 슬럼프 18cm를 만족시키기 위한 시멘트량은 대략  $500\text{kg/m}^3$  정도인 것을 알 수 있

었다. 이 경우 AE제 이외에는 다른 혼화제를 사용하지 않았던 경우이었다. 본 연구에서는 고성능 AE 감수제를 사용하기 때문에 기존의 배합비보다 단위 시멘트량을 더 낮출 수 있다고 판단되었으며, 그에 따라서 단위 시멘트량은 400kg/m<sup>3</sup>을 목표로하고 시멘트량을 최소화 할 수 있는 배합비를 구하는 방향으로 배합설계를 진행하였다.

6) 잔골재율 : SFRC에서는 강섬유가 서로 뭉치지 않게하고, 펌핑시 유도 호스에서 막히지 않게 하기 위해서는 잔골재율이 높아지는 것이 일반적이다. 더구나 실제 공사에 사용될 잔골재는 잔입도가 많은 부분을 차지하고 있었기 때문에 보통의 경우보다 더 높은 잔골재율이 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 잔골재율은 50%~60% 안에서 구하도록 하였다.

### 3.3.2 시험배합

위와같은 배합비 선정과정을 통하여 여러번의 시험배합을 수행하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 그리고 최종적으로 표 2에서 모든 성능을 만족하고 안정적으로 품질관리가 가능한 것으로 나타난 RSF-01 Type의 배합비를 시공배합비로 선정하였다.

표 2 SFRC의 시험 배합표

| TYPE   | 시멘트량<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | W/C  | S/a  | 단위중량(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |       |     |      | 공기량<br>(%) | 슬럼프<br>(cm) | 압축강도(kg/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|--------|------------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|-------|-----|------|------------|-------------|---------------------------|-----|-----|
|        |                              |      |      | 물                        | 시멘트 | 잔골재 | 굵은골재  | 강섬유 | 혼화제  |            |             | 3일                        | 7일  | 28일 |
| RSF-01 | 400                          | 0.50 | 0.55 | 200                      | 400 | 888 | 735   | 50  | 6    | 1.7        | 18          | 135                       | 196 | 344 |
| RSF-02 | 400                          | 0.45 | 0.45 | 180                      | 400 | 767 | 948   | 50  | 6    | 1.3        | 10          | 258                       | 328 | 374 |
| RSF-03 | 400                          | 0.46 | 0.42 | 184                      | 400 | 711 | 994   | 50  | 6    | 1.1        | 14          | 237                       | 317 | 399 |
| RSF-04 | 350                          | 0.50 | 0.42 | 175                      | 350 | 738 | 1,031 | 50  | 5.25 | 1.0        | 5           | 225                       | 299 | 338 |
| RSF-05 | 350                          | 0.55 | 0.45 | 193                      | 350 | 770 | 952   | 50  | 5.25 | 1.0        | 12          | 189                       | 239 | 328 |
| RSF-06 | 370                          | 0.57 | 0.53 | 210                      | 370 | 875 | 786   | 50  | 5.55 | 2.5        | 19          | 181                       | 286 | 337 |

## 4. SFRC의 시공

SFRC가 타설될 진공터널의 방호외곽은 내 외부가 강판으로 영구거푸집 형태로 설치되기 때문에 콘크리트이 시공상황을 확인할 수가 없어서 작업성이 좋아야 하고 시공시 충분히 채워질 수 있도록 주의해야 한다. 더구나 타설부위는 원형철근이 매우 조밀하게 배근되어 있기 때문에 시공하기가 어려울 뿐만 아니라 섬유뭉침현상(fiber ball)이 발생할 경우 콘크리트 내부에 공동이 형성될 수가 있다. 따라

표 3 SPIN TESTER의 SFRC 공사현황

| 설비구분      | 구성부위 | 타설공종   | 공사일시     | 타설물량<br>(m <sup>3</sup> ) | SFRC의 품질시험 성과 |            |                           |     |     |
|-----------|------|--------|----------|---------------------------|---------------|------------|---------------------------|-----|-----|
|           |      |        |          |                           | 슬럼프<br>(cm)   | 공기량<br>(%) | 압축강도(kg/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|           |      |        |          |                           |               |            | 3일                        | 7일  | 28일 |
| 대형<br>시험기 | 진공터널 | 외곽 제2층 | 96/03/21 | 430                       | 17            | 3.0        | 184                       | 261 | 359 |
|           |      | 외곽 제3층 | 96/04/04 | 355                       | 19            | 3.8        | 167                       | 233 | 340 |
|           |      | 외곽 제4층 | 96/05/03 | 600                       | 18            | 3.2        | 174                       | 242 | 354 |

서 SFRC의 시공계획은 기본적으로 재료분리가 생기지 않는 범위내에서 가능한 한 물계 배합하는 것을 목표로 하였고, 시공장비는 펌프카와 진동다짐기만을 사용하는 것으로 하였다. 진공터널의 외곽 방호용 콘크리트 공사는 총 4층으로 나누어 타설하였으며, 그 중에서 SFRC는 1층을 제외한 3개의 층에 총 1,385m<sup>3</sup>를 타설하였으며 그 내용은 표 3과 같다.

시공결과 목표 슬럼프를 18cm 이상으로 하여 일반콘크리트와 동일한 방법으로 타설하는 것이 가능하였으며, 섬유뭉침현상(fiber ball)도 거의 발생하지 않았다.

## 5. 결 론

발전기나 터빈엔진의 고속 회전시험 장치인 SPIN TESTER는 시험 중 사고에 대비하기 위해 진공터널(vacuum tunnel)의 외곽 부위가 SFRC에 의한 방호구조물로 설계되었고, 이를 설계조건대로 시공하기 위해 타설여건을 고려한 SFRC의 배합설계, 제조 및 시공 등 일괄적인 품질관리를 수행하여 성공적으로 시공하였으며, 그 결과를 정리하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 타설부위의 단면이 협소하고 철근이 조밀한 부분에서 SFRC를 시공하기 위한 콘크리트의 배합은 잔골재율을 55%로 하고, 슬럼프를 18cm 이상으로 관리함으로써 재료분리를 막고 유동성을 확보하여 일반콘크리트와 같은 방법으로 시공할 수 있었다.
- 2) SFRC에서 문제가 되는 섬유뭉침현상(fiber ball)을 제거하기 위해서 본 연구에서는 컨베이어 벨트를 이용하여 강섬유를 골재와 동시에 계량하고, 분산하여 운반하는 시스템을 적용하여 최소화 할 수 있었다.
- 3) SFRC의 제조 및 타설은 일반 레미콘 공장에서 가동하는 설비를 이용하여 충분히 생산할 수 있으며, 타설역시 펌프카에 의해 특별한 장치없이 시공이 가능하다. 다만 제조시에는 섬유를 분산하여 배합하는 것이 필요하고 믹서의 교반시간은 약 2분 이상으로 하는 것이 좋으며, 섬유의 혼입은 애지데이터 트럭으로 현장에서 타 설직전에 하는 방법보다는 배치플랜트의 믹서에서 충분히 교반하는 것이 균질한 배합을 만드는데 더욱 효과적인 것으로 판단되었다.