

# 초고성능 시멘트 복합체의 압축강도에 대한 강섬유 보강 효과

## The Effect of Steel-Fiber Reinforcement on the Compressive Strength of Ultra High Performance Cementitious Composites(UHPCC)

강 수 태<sup>1)</sup>\*      박 정 준<sup>2)</sup>      류 금 성<sup>2)</sup>      김 성 욱<sup>3)</sup>  
Kang, Su Tae      Park, Jung Jun      Ryu, Gum Sung      Kim, Sung Wook

### Abstract

This research dealt with the effect of steel-fiber reinforcement on the compressive strength of ultra high performance cementitious composites (UHPCC) and compared with that in normal steel-fiber reinforced concrete(SFRC). With wide range of compressive strength of UHPCC, experiments on the fiber reinforcement effect confirmed that the compressive strength in UHPCC is also improved by adding fibers as in normal SFRC. The experimental results were compared with previous researches about reinforcement effect by adding fibers, which are limited within 100MPa compressive strength. The comparison revealed the linear relationship between  $f'_{cf} - f'_c$  and  $RI$  regardless of the magnitude of compressive strength, from which a general equation to express the effect of fiber reinforcement, applicable to various SFRC's with wide range of compressive strength including UHPCC.

**Keywords** : Fiber reinforcement, Compressive strength, High performance, High Strength, Steel fiber

### 1. 서론

현재 콘크리트 기술의 발전은 고전적 개념의 고강도를 넘어서 초고강도를 발현하며 콘크리트의 고강도화에 가장 큰 장애가 되고 있는 취성거동 문제를 동시에 해결하는 초고성능 콘크리트의 개발에까지 이르렀다(Richard et al. 1995). 입경 1mm 이하 입자들로 구성되며 일반적으로 RPC(reactive powder concrete)라고 일컬어지는 매트릭스에 취성거동을 보완하기 위하여 강섬유가 보강된 초고성능 시멘트 복합체(Ultra High Performance Cementitious Composites, 이하 UHPCC)는 매우 높은 강도를 나타냄과 동시에 인성 및 내구성 측면에서도 우수한 성능을 발휘한다(Bonneau et al. 1997). UHPCC의 역학적 특성을 살펴보면 압축강도는 약 200 MPa 전후의 값을 나타내며, 직접인장강도의 경우는 평균적으로 약 12에서 16 MPa, 휨인장강도는 평균 30에서 40 MPa의 값을 가진다.

강도와 인성 측면에서 탁월한 성능을 보이는 UHPCC

의 활용분야를 다변화하고 효율적으로 구조물에 활용하기 위해서는 무엇보다도 재료의 특성을 제대로 규명할 필요가 있으며, 특히 강섬유의 보강 정도에 따른 압축/인장 강도 및 압축/인장거동(응력-변형률 관계)의 변화를 정확히 파악할 필요가 있다. 물론 섬유보강에 따른 성능향상 효과는 대부분 인장강도의 향상과 인성 증대에 초점이 맞춰져 있으며, 일반적으로 강섬유보강 콘크리트에서 섬유의 혼입률, 형상비(섬유직경에 대한 길이의 비)가 클수록 인장거동이 향상되는 것으로 알려져 있다. 강섬유보강 콘크리트에서 섬유보강효과에 관한 대부분의 연구가 이와 같은 내용을 주로 다루고 있다(Shah et al. 1971, Mangat 1976, Hannant 1978, Fanella et al. 1985, Ezeldin et al. 1992, Jianming et al. 1997, Nataraja et al. 1999, Song et al. 2004, Yazici et al. 2007). 하지만 UHPCC를 적용한 구조 부재의 단면력을 평가하는 경우와 같이 UHPCC의 압축강도 및 압축응력-변형률 관계에 관한 결과 또한 필요로 하는 경우가 많으며, 이 때 UHPCC의 압축강도 및 압축거동에 대한 강섬유 보강효

1) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 수석연구원  
2) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 전임연구원  
3) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구위원

\* corresponding author : alphard@kict.re.kr 011-9933-9958

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

과를 명확히 파악해 둘 필요가 있다. 한편 섬유보강 효과를 극대화하면서 동시에 경제적인 섬유보강 복합체의 배합구성을 위해서도 강섬유의 보강효과에 관한 선행연구가 반드시 필요하다. 사실 현재까지 강섬유보강 콘크리트에서 압축강도 또는 거동에 대한 섬유보강효과에 관한 연구가 없었던 것은 아니다. 오래 전부터 다수의 연구자들이 이와 관련한 연구들을 수행하였으며, 섬유보강효과를 정량적으로 표현하기도 하였다. 하지만 이들 기존 연구들의 대부분이 최대 약 100MPa 정도 압축강도의 고강도 콘크리트 또는 모르타르에 국한된 연구결과로서, 압축강도가 200MPa에까지 이르는 UHPCC에서도 잘 일치하는지 여부는 아직 확인된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 UHPCC 매트릭스의 강도, 강섬유의 혼입률 및 형상비의 영향을 고려하여 UHPCC의 압축강도에 미치는 강섬유 보강효과에 관한 연구를 수행하였으며, 일반 강섬유보강 콘크리트에서의 경향과 비교검토를 실시하였다.

## 2. 강섬유보강과 압축강도 관계에 관한 기존연구의 고찰

강섬유보강 콘크리트에 관한 연구가 시작됨과 동시에 가장 큰 관심 중의 하나는 섬유보강이 강도에 얼마나 영향을 미치는가에 있었다. 압축강도에 관해서도 많은 연구가 이루어졌으며, 그 결과를 살펴보면 압축강도와 거의 관련성이 없다는 연구결과도 있지만(Hsu et al. 1994), 대부분 약간의 강도향상 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Fanella et al. 1985, Ezeldin et al. 1992, Nataraja et al. 1999, Song et al. 2004, Yazici et al. 2007). 그리고 압축강도에 대한 섬유보강효과는 섬유 혼입률 및 섬유 형상과 밀접한 관련이 있다.

강섬유보강 콘크리트에 대한 섬유보강효과에 관한 기존연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Fanella et al.(1985)은 모르타르의 압축강도가 50-70MPa인 경우에 대해, 인장강도 620-829MPa인 직선형 강섬유를 섬유혼입률 1-3%, 형상비 47에서 100까지 변화시켜 수행한 압축실험 결과를 바탕으로 섬유보강효과를 다음과 같이 섬유보강지수( $RI$ )의 함수로 제시하였다. 여기서 형상비는 섬유 직경에 대한 길이의 비를 의미한다.

$$RI = V_f(l_f/d_f) \quad (1)$$

$$f'_{cf} = f'_c + 1.9(RI) \quad (2)$$

$$\epsilon_{of} = 0.0041(f'_{cf}/f'_c) + 0.00079(RI) \quad (3)$$

위 식에서  $V_f$ 는 섬유혼입률을 나타내고,  $l_f$ 와  $d_f$ 는 각각 섬유의 길이와 직경을 의미한다. 그리고,  $f'_c$ 와  $f'_{cf}$ 는 각각 모르타르와 섬유보강 모르타르의 압축강도를 말하며,  $\epsilon_{of}$ 는 피크점에서의 변형률을 나타낸다.

Ezeldin et al.(1992)은 압축강도 35-85MPa의 콘크리트에 대해 변돌형의 후크형 강섬유를 사용할 때, 섬유형상비 60인 경우와 100인 경우에 대해 압축거동에서의 섬유보강 효과에 관한 연구에서 다음과 같은 관계식을 제안한 바 있다.

$$f'_{cf} = f'_c + 3.51(RI^*) \quad (4)$$

$$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.000443(RI^*) \quad (5)$$

위 식에서  $\epsilon_o$ 은 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트에 대한 피크점에서의 변형률을 의미한다.  $RI^*$ 는 부피비로 나타낸 섬유혼입률  $V_f$  대신 질량비로 나타낸 섬유혼입률  $W_f$ 를 적용하여 계산한 섬유보강지수를 의미한다. 일반적으로 강섬유보강 콘크리트에 대해  $W_f \approx 3V_f$ 의 관계가 성립하다.

그리고 Nataraja et al.(1999)은 50MPa 이하의 섬유보강 콘크리트에 대해 파상형(crimped) 강섬유를 사용하였을 때, 형상비와 압축강도와의 관계에 관한 연구를 통해 다음과 같은 관계식을 제시하였다. 아래 식에서도 질량비로 나타낸 섬유혼입률  $W_f$ 를 적용한  $RI^*$ 를 사용하였다.

$$f'_{cf} = f'_c + 2.1604(RI^*) \quad (6)$$

$$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0006(RI^*) \quad (7)$$

여기서  $\epsilon_o$ 은 일반콘크리트에 대해 통상 적용되는 값인 0.002를 나타낸다.

Song et al.(2004)의 연구에서는 압축강도 80-100MPa 범위의 고강도 콘크리트에 대해 변돌형의 형상비 64의 후크형 강섬유를 사용하였으며, 섬유혼입률 0에서 2%까지의 압축실험을 통해 1.5%까지 섬유보강효과가 증가하고, 2.0%에서는 오히려 약간 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 다음과 같이 섬유

혼입률의 함수로서 압축강도를 제안하였다.

$$f'_{cf} = 85 + 15.12 V_f - 4.71 V_f^2 \quad (8)$$

Yazici et al.(2007)은 압축강도가 49에서 60MPa 범위의 콘크리트에 대해 변형률의 후크형 강섬유를 사용하였으며, 형상비 45, 65, 80의 세 가지와 섬유혼입률 0에서 1.5%까지 변화시켰을 때 압축강도의 변화를 파악하였으며, 다음과 같은 형태의 압축강도에 대한 섬유보강효과식을 제시하였다.

$$f'_{cf} = 50.4869 + 0.0434(l_f/d_f) + 1.9667 V_f(\%) \quad (9)$$

Beaudoin(1990)은 압축거동에 대해 여러 연구자들에 의해 수행된 연구결과들을 바탕으로 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f'_c = f'_c(1 + 0.125 V_f) \quad (10)$$

반면, Hsu et al.(1994)은 압축강도 범위는 60MPa에서 90MPa 범위의 콘크리트에서 변형률, 형상비 60의 후크형 강섬유를 각각 0, 0.5, 0.75, 1.0%의 섬유혼입률로 변화시켰을 때 인성, 압축강도, 피크점에서의 변형률, 초기탄성계수 등의 압축거동 특성값과 압축응력-변형률 관계에 관한 연구에서 압축강도의 변화는 거의 없다고 밝힌 바 있다.

이상과 같이 지금까지 연구결과들을 종합적으로 살펴볼 때, 보편적으로 압축강도에 대한 강섬유보강 효과가 얼마만큼은 있는 것으로 받아들여지고 있으며, 섬유보강 효과는 섬유의 혼입률과 섬유의 형상비와 밀접한 관련이 있고, 섬유혼입률과 형상비를 함께 고려한 섬유보강지수의 함수로도 많이 표현되고 있는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 사용재료

##### 3.1.1 시멘트 및 실리카폼

본 연구의 실험에서는 결합재로 시멘트와 실리카폼을 사용하였으며, 시멘트는 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였다. 실리카폼은 UHPCC 제조 시 반드시 필요한 재료로서, 시멘트 입자 사이의 공극을 메우는 역할을 하고 입자가 완벽한 구형이므로 다른 입자들 사이에서 윤활작용을 하여 유동성을 향상시키며 1차 수화생성물인 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 포졸란 반응을 통해 2차 수화생성물 CSH 겔을 형성하여 재료의 밀도를 향상시켜 강도와 내구성을 크게 증대시키는 역할을 한다. 시멘트와 실리카폼의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다.

##### 3.1.2 골재

잔골재는 밀도 2.62g/cm<sup>3</sup>, 평균입경이 0.5mm이하의 모래를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다.

##### 3.1.3 고성능감수제

낮은 물결합재비에서도 충분한 유동성을 확보하기 위해서는 고성능 감수제의 사용이 필수적이다. 본 연구에서 사용한 고성능 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제(밀도 1.01g/cm<sup>3</sup>, 암갈색)를 사용하였다.

##### 3.1.4 충전재

충전재(filler)는 시멘트의 수화반응을 활성화하고 구성 입자들 사이의 공극을 메움으로써 밀도를 향상시킬 뿐만 아니라, 일정 조건하에 화학적으로 포졸란 반응을 일으키는 등 강도향상에 도움이 되는 재료이다. 따라서 UHPCC 제조 시에 일반적으로 사용되고 있다. 본 연구에서 사용한 충전재는 입자의 평균입경이 4 $\mu$ m와 10 $\mu$ m 정도인 석영질 미분말을 사용하였다. 4 $\mu$ m 충전재는 압축강도 200MPa의 UHPCC에 사용하였으며, 10 $\mu$ m 충전재는 낮

Table 1 Physical & chemical properties of cement and silica fume

| Item        | Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g) | density (g/cm <sup>3</sup> ) | I.g.loss (%) | Chemical Composition(%) |                                |                                |       |      |                 |
|-------------|--|------------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
|             |  |                              |              | SiO <sub>2</sub>        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> |
| Cement      | 3,413                                      | 3.15                         | 1.40         | 21.01                   | 6.40                           | 3.12                           | 61.33 | 3.02 | 2.3             |
| Silica Fume | 200,000                                    | 2.10                         | 1.50         | 96.00                   | 0.25                           | 0.12                           | 0.38  | 0.1  | -               |

Table 2 Chemical composition of filler

| Item   | lg.loss (%) | Chemical Composition(%)        |        |        |                                |                  |
|--------|-------------|--------------------------------|--------|--------|--------------------------------|------------------|
|        |             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO    | CaO    | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> |
| Filler | 0.01        | 0.06 0.5                       | < 0.02 | < 0.02 | 0.01 ~ 0.07                    | 99.3 ~ 99.8      |

Table 3 Mix Proportion of cementitious composites(ratio in weight)

| Water/Binder (w/b) | cement | silica fume | filler | sand | superplasticizer |
|--------------------|--------|-------------|--------|------|------------------|
| 0.2                | 1      | 0.25        | 0.3    | 1.1  | 0.018            |
| 0.3                |        |             |        |      |                  |
| 0.4                |        |             |        |      |                  |

은 압축강도 범위의 UHPCC에 사용되었다. SiO<sub>2</sub> 98% 이상, 밀도 2.60 g/cm<sup>3</sup>의 충전재를 사용하였으며, 화학적 구성은 Table 2와 같다.

### 3.1.5 강섬유

강섬유는 인장응력 및 휨응력이 작용할 때 인성향상을 목적으로 사용되며, 고탄성용 강섬유(밀도 7.5g/cm<sup>3</sup>, 길이 13mm, 직경 0.2mm, 형상비 65, 인장강도 2,500MPa)를 콘크리트 체적비로 혼입하여 사용하였다. 부분적으로 섬유유형의 형상비를 다르게 적용한 실험에서는 일반적으로 SFRC에 많이 사용되는  $\phi$  0.5×30mm 또는  $\phi$  0.7×35mm의 강섬유를 혼입하여 사용하였다.

### 3.2 실험계획

섬유의 혼입이 UHPCC의 압축거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 물결합재비, 섬유혼입률, 섬유형상비 및 양생조건을 실험변수로 하여 세 번의 시리즈에 걸쳐 실험을 실시하였다. UHPCC 매트릭스의 배합은 Table 3과 같으며, 물결합재비 0.2, 0.3, 0.4 세 가지 경우에 대해 시멘트, 실리카폼, 충전재, 모래 및 고성능감수제의 중량비를 시멘트를 기준으로 나타내었다. Table 3에서 'Binder'는 시멘트와 실리카폼을 합친 결합재를 의미한다. 첫 번째 시리즈 실험에서는 물결합재비를 0.3으로 고정하고 섬유혼입률과 섬유형상비에 따른 압축강도의 변화를 살펴보았다. 섬유혼입률을 부피비로 0에서 5%까지 변화시켰으며, 형상비는 55에서 63까지 고려하였다. 두 번째 시리즈에서는 물결합재비 0.2, 0.3, 0.4에 대해 섬유를 혼입하지 않은 경우와 섬유를 3% 혼입한 경우를 비교하였다. 그리고 세 번째 시리즈에서는 물결합재비 0.2에 대해 섬유혼입률의 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. UHPCC에 대해 다양한 압축강도 범위에서의 섬유보

강효과를 살펴보기 위해 첫 번째와 두 번째 시리즈는 압축강도 50MPa에서 130MPa까지의 폭넓은 압축강도 범위를 포함하고 있으며, 세 번째 시리즈에서는 발현 가능한 최대압축강도를 기준으로 고려하였다.

실험체는  $\phi$  100×200mm의 크기의 원주형 공시체로 제작하여 채령 28일에 압축강도를 측정하였다. Series 1과 Series 2의 실험체는 20℃ 수중에서 28일 동안 양생을 실시하였으며, Series 3의 실험체는 90℃ 고온에서 48시간 증기양생 후 채령 28일까지 20℃ 수중에서 양생을 실시하였다.

### 3.3 실험결과

실험결과는 Table 4에서 Table 6과 같다. Table 4는 물결합재비 0.3에 대해 섬유의 혼입률과 형상비 변화에 대한 실험결과이고, Table 5는 물결합재비의 변화와 섬유의 유무에 따른 실험결과를 나타낸 것이다. 그리고, Table 6은 물결합재비 0.2에 대해 고온 증기양생을 실시한 경우, 섬유혼입률에 따른 압축강도 실험결과이다. Table 4-6에서  $f'_c$ 은 섬유가 보강되지 않은 매트릭스의 평균압축강도를 의미하고,  $f'_{cf}$ 는 섬유가 보강되었을 경우에 압축강도를 의미한다.  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $f'_{cf}/f'_c$ 은 동일한 배합에 대해 섬유가 혼입되지 않은 경우와 혼입된 경우를 비교하기 위하여 도입한 값들이다.

실험결과를 살펴보면, 우선 Table 5와 Table 6에서 동일한 물결합재비 0.2에 대해 동일하게 섬유보강을 했음에도 강도의 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 충전재의 입경과 양생온도에 따른 영향으로 볼 수 있다. 강수태 등(2008)은 충전재의 입경이 UHPCC의 압축강도와 유동성에 미치는 영향에 관한 연구에서 4 $\mu$ m 입경의 충전재를 사용할 경우 10 $\mu$ m 입경의 충전재를 사용했을 때보다 강도가 약 20% 정도 증가하는 것을 보였다. 또한

Table 4 The variables and test results(for Series 1)

| No. | w/b   | Fiber parameters |                 |                 | Experimental results            |                        |                |
|-----|-------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|------------------------|----------------|
|     |       | $V_f$ (%)        | $A_r(=l_f/d_f)$ | $RI$            | Comp. strength, $f'_{cf}$ (MPa) | $f'_{cf} - f'_c$ (MPa) | $f'_{cf}/f'_c$ |
| 1   | 0.3   | 0                | -               | 0               | 79.54                           | 0                      | 1.00           |
|     |       |                  |                 |                 | 83.25                           |                        |                |
|     |       |                  |                 |                 | 85.88                           |                        |                |
| 2   |       | 1                | 65              | 0.65            | 84.23                           | 1.34                   | 1.01           |
|     |       |                  |                 |                 | 86.46                           | 3.57                   | 1.04           |
|     |       |                  |                 |                 | 82.39                           | -0.50                  | 0.99           |
| 3   |       | 2                |                 | 1.30            | 91.20                           | 8.31                   | 1.10           |
|     |       |                  |                 |                 | 92.50                           | 9.61                   | 1.12           |
|     |       |                  |                 |                 | 92.76                           | 9.87                   | 1.12           |
| 4   |       | 3                |                 | 1.95            | 92.12                           | 9.23                   | 1.11           |
|     | 96.39 |                  |                 |                 | 13.5                            | 1.16                   |                |
|     | 97.11 |                  |                 |                 | 14.22                           | 1.17                   |                |
| 5   | 5     | 3.25             |                 | 112.89          | 30.00                           | 1.36                   |                |
|     |       |                  | 112.81          | 29.92           | 1.36                            |                        |                |
|     |       |                  | 111.72          | 28.83           | 1.35                            |                        |                |
| 6   | 0.3   | 3                | 1.65            | 55*             | 9.87                            | 1.12                   |                |
|     |       |                  |                 | *65(1%)+50(2%)  | 90.04                           | 7.15                   | 1.09           |
|     |       |                  |                 | 83.18           | 0.29                            | 1.00                   |                |
| 7   |       | 3                | 1.80            | 60†             | 84.84                           | 1.95                   | 1.02           |
|     |       |                  |                 | †65(2%)+50(1%)  | 88.68                           | 5.79                   | 1.07           |
|     |       |                  |                 | 86.30           | 3.41                            | 1.04                   |                |
| 8   |       | 3                | 1.85            | 61.5‡           | 91.90                           | 9.01                   | 1.11           |
|     |       |                  |                 | ‡65(1%)+60(2%)  | 93.92                           | 11.03                  | 1.13           |
|     |       |                  |                 | 95.76           | 12.87                           | 1.16                   |                |
| 9   |       | 3                | 1.89            | 63**            | 90.15                           | 7.26                   | 1.09           |
|     |       |                  |                 | **65(2%)+60(1%) | 92.16                           | 9.27                   | 1.11           |
|     |       |                  |                 | 92.98           | 10.09                           | 1.12                   |                |

Table 5 The variables and test results(for Series 2)

| No. | w/b | Fiber parameters |                 |       | Experimental results            |                        |                |
|-----|-----|------------------|-----------------|-------|---------------------------------|------------------------|----------------|
|     |     | $V_f$ (%)        | $A_r(=l_f/d_f)$ | $RI$  | Comp. strength, $f'_{cf}$ (MPa) | $f'_{cf} - f'_c$ (MPa) | $f'_{cf}/f'_c$ |
| 1   | 0.2 | -                | -               | 0     | 120.06                          | 0                      | 1.00           |
|     |     |                  |                 |       | 109.81                          |                        |                |
|     |     |                  |                 |       | 116.87                          |                        |                |
| 2   |     | 3                | 65 (=13/0.2)    | 1.95  | 125.12                          | 13.54                  | 1.12           |
|     |     |                  |                 |       | 121.36                          | 9.78                   | 1.09           |
|     |     |                  |                 |       | 126.34                          | 14.76                  | 1.13           |
| 3   | 0   | -                |                 | 0     | 78.63                           | 0                      | 1.00           |
|     |     |                  |                 |       | 81.53                           |                        |                |
|     |     |                  |                 |       | 81.90                           |                        |                |
| 4   | 3   | 65               | 1.95            | 80.89 | 2.64                            | 1.03                   |                |
|     |     |                  |                 | 97.05 | 18.80                           | 1.24                   |                |
|     |     |                  |                 | 97.05 | 18.80                           | 1.24                   |                |
| 5   | 0.4 |                  | -               | 0     | 48.25                           | 0                      | 1.00           |
|     |     |                  |                 |       | 55.42                           |                        |                |
|     |     |                  |                 |       | 50.98                           |                        |                |
| 6   |     | 3                | 65              | 1.95  | 62.17                           | 10.62                  | 1.21           |
|     |     |                  |                 |       | 69.91                           | 18.36                  | 1.36           |
|     |     |                  |                 |       | 76.29                           | 24.74                  | 1.48           |

Table 6 The variables and test results(for Series 3)

| No. | w/b | Fiber parameters |                 |       | Experimental results            |                        |                |
|-----|-----|------------------|-----------------|-------|---------------------------------|------------------------|----------------|
|     |     | $V_f$ (%)        | $A_f(=l_f/d_f)$ | $RI$  | Comp. strength, $f'_{cf}$ (MPa) | $f'_{cf} - f'_c$ (MPa) | $f'_{cf}/f'_c$ |
| 1   | 0.2 | 0                | -               | 0     | 207.2                           | 0                      | 0              |
|     |     |                  |                 |       | 201.8                           |                        |                |
|     |     |                  |                 |       | 210.9                           |                        |                |
| 2   |     | 1                | 65              | 0.65  | 204.3                           | -2.3                   | 0.98           |
|     |     |                  |                 |       | 209.2                           | 2.5                    | 1.01           |
|     |     |                  |                 |       | 201.1                           | -5.5                   | 0.97           |
| 3   | 2   | 1.30             |                 | 219.1 | 12.4                            | 1.06                   |                |
|     |     |                  |                 | 222.9 | 16.2                            | 1.08                   |                |
|     |     |                  |                 | 218.1 | 11.4                            | 1.05                   |                |
| 4   | 3   | 1.95             | 213.5           | 6.8   | 1.03                            |                        |                |
|     |     |                  | 217.2           | 10.5  | 1.05                            |                        |                |
|     |     |                  | 211.8           | 5.1   | 1.02                            |                        |                |
| 5   | 4   | 2.60             | 225.9           | 19.2  | 1.09                            |                        |                |
|     |     |                  | 229.5           | 22.8  | 1.11                            |                        |                |
|     |     |                  | 214.4           | 7.7   | 1.04                            |                        |                |
| 6   | 5   | 3.25             | 231.4           | 24.7  | 1.12                            |                        |                |
|     |     |                  | 235.1           | 28.4  | 1.14                            |                        |                |
|     |     |                  | 222.1           | 15.4  | 1.07                            |                        |                |

양생온도도 압축강도에 상당히 영향을 미친다. 일반적으로 콘크리트에서 온도는 강도의 발현속도에 영향을 미칠 뿐, 최종적인 발현 압축강도에는 영향을 미치지 않지만, UHPCC에서는 고온양생으로 인해 반응성을 가진 실리카 폼이나 충전재와 시멘트 1차 수화 생성물 사이의 포졸란 반응이 더욱 활성화되어 UHPCC 내 미세구조를 매우 향상시키게 되고 압축강도의 차이로 나타나게 된다 (Richard et al. 1995).

모든 배합에 대해 동일한 매트릭스 구성에 대해 섬유를 혼입하게 되면 압축강도가 향상되는 경향을 일관되게 확인할 수 있었다. 실험체의 파괴형상은 가력방향에 거의 수직하게 파괴면이 형성되어 있었으며, 일반적으로 압축 거동이 인장에 의한 파괴 메커니즘에 의해 설명됨을 상기할 때 섬유혼입에 따른 압축강도의 증가는 균열면에 존재하는 섬유의 브리징 효과로 인해 인장강도 및 인성이 향상되는 것과 동일한 메커니즘으로 설명할 수 있다.

세 시리즈에 걸친 실험결과로부터 UHPCC의 압축강도에 강섬유 보강에 따른 강도 향상을 정량적으로 평가하고, 일반 강섬유보강 콘크리트에서의 경향과 비교분석을 실시하였다.

#### 4. 결과분석

섬유의 혼입으로 압축강도가 향상되는 경향을 나타낸 본 연구의 실험결과로부터, 기존의 연구들에서와 마찬가지로 섬유혼입이 압축강도에 미치는 영향은 혼입률과 형상비를 모두 고려하여 나타낸 섬유보강지수( $RI = V_f(l_f/d_f)$ )를 이용하여 분석하는 것이 타당하다고 판단하였다. 압축강도의 향상효과와 섬유보강지수와 관계는 두 가지 분석방법으로 접근해 보았다. 첫 번째 방법은  $f'_{cf}/f'_c$ 와  $RI$ 와의 관계로 나타낸 것이고, 다른 한 가지 방법은  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $RI$ 의 관계로 나타낸 것이다. 전자는 매트릭스의 압축강도와 비교할 때 일정비율만큼 압축강도의 향상효과가 있는지 여부를 확인할 수 있으며, 후자는 압축강도의 크기와는 상관없이 일정크기만큼 압축강도의 향상효과가 있는지 여부를 확인할 수 있다.

Table 7은 강섬유보강 콘크리트의 섬유보강효과와 관련하여 다른 연구자들에 의해 수행된 다양한 압축강도 범위의 실험결과들을 표로 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 1과 Fig. 2는 Table 7의 연구결과들과 본 연구에서의 실험결과를 포함하여 섬유보강효과를 분석한 결과이다. Fig. 1은  $f'_{cf}/f'_c$ 와  $RI$ 와의 관계로 나타낸 것이고, Fig. 2는  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $RI$ 의 관계를 나타낸 것이다.

Table 7 Referred experimental results of other studies for comparison

| Reference              | Fiber parameters |           |            |                  |       | Experimental results            |                        |                |
|------------------------|------------------|-----------|------------|------------------|-------|---------------------------------|------------------------|----------------|
|                        | shape            | $V_f$ (%) | $l_f$ (mm) | $A_r (=l_f/d_f)$ | $RI$  | Comp. strength, $f'_{cf}$ (MPa) | $f'_{cf} - f'_c$ (MPa) | $f'_{cf}/f'_c$ |
| Ezeldin et al. (1992)  | hooked           | 0         | -          | -                | 0     | 35.88                           | 0                      | 1.00           |
|                        |                  | 0.38      | 50         | 100              | 38    | 40.02                           | 4.14                   | 1.12           |
|                        |                  | 0.57      | 50         | 100              | 57    | 46.23                           | 10.35                  | 1.29           |
|                        |                  | 0.76      | 50         | 100              | 76    | 46.92                           | 11.04                  | 1.31           |
|                        |                  | 0.38      | 30         | 60               | 22.8  | 40.71                           | 4.83                   | 1.13           |
|                        |                  | 0.57      | 30         | 60               | 34.2  | 40.71                           | 4.83                   | 1.13           |
|                        |                  | 0.76      | 30         | 60               | 45.6  | 37.95                           | 2.07                   | 1.06           |
|                        |                  | 0.38      | 60         | 75               | 28.5  | 47.61                           | 11.73                  | 1.32           |
|                        |                  | 0.57      | 60         | 75               | 42.75 | 44.85                           | 8.97                   | 1.25           |
| Nataraja et al. (1999) | crimped          | 0         | -          | -                | 0     | 29.42                           | 0                      | 1.00           |
|                        |                  | 0.5       | 27.5       | 55               | 27.5  | 36.03                           | 6.61                   | 1.22           |
|                        |                  | 0.75      | 27.5       | 55               | 41.25 | 33.48                           | 4.06                   | 1.14           |
|                        |                  | 1         | 27.5       | 55               | 55    | 38.45                           | 9.03                   | 1.31           |
|                        |                  | 0.5       | 41         | 82               | 41    | 32.83                           | 3.41                   | 1.12           |
|                        |                  | 0.75      | 41         | 82               | 61.5  | 36.31                           | 6.89                   | 1.23           |
|                        |                  | 1         | 41         | 82               | 82    | 34.70                           | 5.28                   | 1.18           |
|                        |                  | 0         | -          | -                | 0     | 43.01                           | 0                      | 1.00           |
|                        |                  | 0.5       | 27.5       | 55               | 27.5  | 45.84                           | 2.83                   | 1.07           |
|                        |                  | 0.75      | 27.5       | 55               | 41.25 | 41.59                           | -1.42                  | 0.97           |
|                        |                  | 1         | 27.5       | 55               | 55    | 46.97                           | 3.96                   | 1.09           |
|                        |                  | 0.5       | 41         | 82               | 41    | 45.65                           | 2.64                   | 1.06           |
|                        |                  | 0.75      | 41         | 82               | 61.5  | 46.12                           | 3.11                   | 1.07           |
| 1                      | 41               | 82        | 82         | 49.23            | 6.22  | 1.14                            |                        |                |
| Song et al. (2004)     | hooked           | 0         | -          | -                | 0     | 85.0                            | 0                      | 1.00           |
|                        |                  | 0.5       | 35         | 64               | 32    | 91.0                            | 6                      | 1.07           |
|                        |                  | 1         | 35         | 64               | 64    | 95.6                            | 10.6                   | 1.12           |
|                        |                  | 1.5       | 35         | 64               | 96    | 98.0                            | 13                     | 1.15           |
|                        |                  | 2         | 35         | 64               | 128   | 96.0                            | 11                     | 1.13           |
| Yazici et al. (2009)   | hooked           | 0         | -          | -                | 0     | 49.1                            | 0                      | 1.00           |
|                        |                  | 0.5       | 30         | 45               | 22.5  | 50.8                            | 1.7                    | 1.03           |
|                        |                  | 1         | 30         | 45               | 45    | 53.7                            | 4.6                    | 1.09           |
|                        |                  | 1.5       | 30         | 45               | 67.5  | 57.7                            | 8.6                    | 1.18           |
|                        |                  | 0.5       | 60         | 65               | 32.5  | 53.5                            | 4.4                    | 1.09           |
|                        |                  | 1         | 60         | 65               | 65    | 58.3                            | 9.2                    | 1.19           |
|                        |                  | 1.5       | 60         | 65               | 97.5  | 56.4                            | 7.3                    | 1.15           |
|                        |                  | 0.5       | 60         | 80               | 40    | 56.0                            | 6.9                    | 1.14           |
|                        |                  | 1         | 60         | 80               | 80    | 58.3                            | 9.2                    | 1.19           |
| 1.5                    | 60               | 80        | 120        | 52.1             | 3     | 1.06                            |                        |                |

Fig. 1을 살펴보면 100MPa 이하의 일반 콘크리트에 대해 실험한 기존 연구자들의 결과는 섬유보강에 따른  $f'_{cf}/f'_c$ 로 나타낸 강도향상 효과가 크게 나타났으며, 반면 UHPCC에서는 강도향상 효과가 상대적으로 작게 나타났

다. 기존 연구에서의 실험결과 중 Song et al.(2004)는 80~100MPa의 고강도 콘크리트에 관한 것으로 가장 큰 값의 압축강도 결과를 나타내는데, 실험결과를 살펴보면  $f'_{cf}/f'_c$  강도향상 효과가 다른 연구결과들에 비해 작으

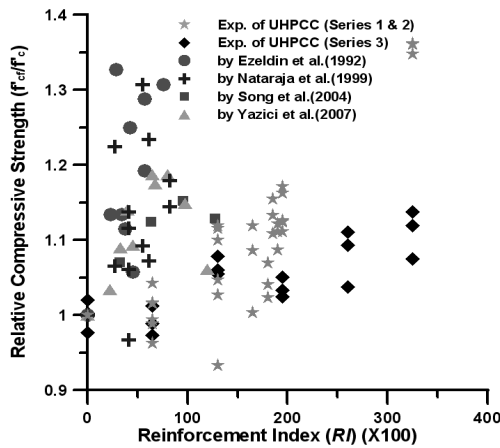


Fig. 1  $f'_{cf}/f'_c$  versus  $RI$  relationship

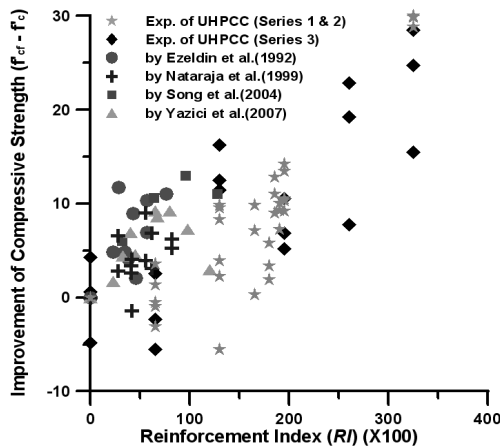


Fig. 2  $f'_{cf} - f'_c$  versus  $RI$  relationship

며, 오히려 100MPa 범위 UHPCC의 실험결과에 가까운 것을 알 수 있다. 그리고 UHPCC에서도 강도가 높을수록  $f'_{cf}/f'_c$ 가 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 1로부터 압축강도가 높을수록  $RI$ 에 따른  $f'_{cf}/f'_c$  강도향상 효과가 적어진다는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 2는  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $RI$ 의 관계로서 모든 범위의 압축 강도에 대해 압축강도에 관계없이  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $RI$ 이 일정한 선형관계를 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서  $f'_{cf} - f'_c = A(RI)$  형태로 압축강도에 대한 섬유보강 효과를 정의한다면 UHPCC를 포함하는 모든 압축강도 범위의 강섬유보강 콘크리트에 대해 적용이 가능한 포괄적 관계식을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 회귀분석을 통해 구한 관계식은 다음과 같다.

$$f'_{cf} - f'_c = 7.8(RI) \quad \text{or} \quad f'_{cf} = f'_c + 7.8(RI)$$

## 5. 결론

본 연구에서는 UHPCC 매트릭스의 강도, 강섬유의 혼입률 및 형상비의 영향을 고려하여 UHPCC의 압축강도에 미치는 강섬유 보강효과에 관한 연구를 수행하였으며, 일반 강섬유보강 콘크리트에서의 경향과 비교검토를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다양한 크기의 압축강도에 대해 UHPCC에서의 섬유보강효과에 관한 실험을 수행한 결과, 일반 섬유보강 콘크리트에서처럼 섬유보강에 따른 압축강도의 향상을 확인할 수 있었으며, 섬유보강지수( $RI$ )로 표현된 섬유보강 정도가 증가할수록 압축강도가 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 실험결과는 압축강도 100MPa 이하를 대상으로 하는 일반 강섬유보강 콘크리트에 관한 기존 연구결과들과 비교분석을 실시하였다. 그 결과 모든 범위의 압축강도에 대해 압축강도에 관계없이  $f'_{cf} - f'_c$ 와  $RI$ 이 일정한 선형관계를 가지는 것을 규명하였다.
- 3) 압축강도가 200MPa 이상까지 나타나는 UHPCC를 포함하는 광범위한 압축강도의 강섬유보강 콘크리트에 대해 적용이 가능한 포괄적 압축강도와 섬유보강효과의 관계식을 도출하였다.
- 4) 본 연구를 통해 얻은 UHPCC의 압축강도와 섬유보강지수와의 관계는 섬유보강에 따른 UHPCC의 압축강도를 예측하고, 적용 부재의 단면력을 산정하거나 최적화된 섬유보강을 결정하는데 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 고성능/다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술 개발(과제번호: 05-CCT-D11)에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 강수태, 박정준, 류금성, 김성욱, "충전재의 입경 크기가 초고성능 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향", 대한토목학회논문집, 28권, 4A호, 2008, pp. 573-580.
2. Beaudoin, J. J., Handbook of Fiber-Reinforced Concrete. Principles, Properties, Developments and Applications ,



- 
- 1990
3. Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. and Aitcin, P. C., "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes", *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 4, 1997, pp. 286~290.
  4. Ezeldin, S. and Balaguru, P. N., "Normal- and High-strength Fiber-reinforced Concrete under Compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 4, 1992, pp. 415-429.
  5. Fanella, D. A. and Naaman, A. E., "Stress-strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 475-483.
  6. Hannant, D. J., *Fiber Cements and Fibre Concrete*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 1978, pp. 219.
  7. Hsu, L. S. and Hsu, C. T., "Stress-strain Behavior of Steel-fiber High-strength Concrete under Compression", *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 4, 1994, pp. 448-447.
  8. Jianming G., Wei S. and Keiji M., "Mechanical Properties of Steel Fiber-reinforced, High-strength, Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, 1997, pp. 307-313.
  9. Mangat, P. S., "Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 1976, pp. 245-252.
  10. Nataraja, M. C., Dhang, N. and Gupta, A. P., "Stress-strain Curve for Steel-fiber Reinforced Concrete under Compression", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, pp. 383-390.
  11. Richard, P. and Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1501~1511.
  12. Shah, S. P. and Rangan, V. B., "Fiber Reinforced Concrete Properties", *Journal of American Concrete Institute*, Vol. 68, 1971, pp. 126-135.
  13. Song, P. S. and Hwang, S., "Mechanical Properties of High-strength Steel Fiber-reinforced Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 18, 2004, pp. 669-673.
  14. Yazici, S., Inan, G. and Tabak, V., "Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 2007, pp. 1250-1253.

(접수일자 : 2010년 3월 4일)  
(심사완료일자 : 2010년 5월 20일)

---

## 요 지

본 연구에서는 초고성능 시멘트 복합체(Ultra High Performance Cementitious Composites, UHPCC)의 압축강도에 미치는 강섬유 보강효과에 관한 연구를 수행하였으며, 일반 강섬유보강 콘크리트에서의 경향과 비교·검토를 실시하였다. 다양한 크기의 압축강도에 대해 UHPCC에서의 섬유보강효과에 관한 실험을 수행한 결과, 일반 섬유보강 콘크리트에서처럼 섬유보강에 따른 압축강도의 향상을 확인할 수 있었다. 실험결과는 압축강도 100MPa 이하를 대상으로 하는 일반 강섬유보강 콘크리트에 관한 기존 연구결과들과 비교분석을 실시하였다. 그 결과 모든 범위의 압축강도에 대해 압축강도에 관계없이  $f'_{cf}-f'_c$ 와  $RI$ 이 일정한 선형관계를 가지는 것을 규명하였으며, UHPCC를 포함하는 광범위한 압축강도의 강섬유보강 콘크리트에 대해 적용이 가능한 포괄적 섬유보강효과의 관계식을 도출하였다.

**핵심 용어** : 섬유보강, 압축강도, 고성능, 고강도, 강섬유

---