



# 강섬유로 보강된 초고강도 콘크리트의 일축압축 상태에서의 기계적 특성

최현기<sup>1)</sup> · 배백일<sup>2)\*</sup> · 최창식<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>경남대학교 소방방재공학과 <sup>2)</sup>한양대학교 산업과학연구소 <sup>3)</sup>한양대학교 건축공학부

## Mechanical Characteristics of Ultra High Strength Concrete with Steel Fiber Under Uniaxial Compressive Stress

Hyun-Ki Choi,<sup>1)</sup> Baek-Il Bae,<sup>2)\*</sup> and Chang-Sik Choi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept of Fire and Disaster Prevention Engineering, KyungNam University, ChangWon, 51767, Korea

<sup>2)</sup>Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

<sup>3)</sup>Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

**ABSTRACT** Design of fiber reinforced ultra-high strength concrete members should be verified with analytical or experimental methods for safety. Members with compressive strength larger than limitation of current design code usually be designed with analytical verification using stress-strain relation of concrete and reinforcements. For this purpose, mechanical characteristics of steel fiber reinforced ultra-high strength concrete were defined under uniaxial compression. Mix proportions of test specimens were based on reactive powder concrete and straight steel fibers were mixed with different volume fraction. Compressive strength of matrix were distributed from 80 MPa to 200 MPa. Effect of fiber inclusion were investigated : increase of compressive strength of concrete, elastic modulus and strain corresponding to peak stress. For the wide range application of investigation, previously tested test specimens were collected and used for investigation and estimation equation. Based on the investigation and evaluation of previous research results and estimation equation of mechanical characteristics of concrete, regression equations were suggested.

**Keywords** : steel fiber reinforced ultra high strength concrete, compressive stress, elastic modulus, strain corresponding to peak stress, regression analysis

### 1. 서 론

콘크리트의 압축강도는 현행설계기준<sup>1)</sup>에 의해 철근콘크리트 구조물을 설계할 때 주요 설계 변수이다. 그러나 최근 콘크리트와 철근의 다양성 및 강도의 증가에 따라 성능기반설계가 사용되면서 콘크리트의 압축강도뿐만 아니라 다른 기계적 특성이 주요 설계변수가 되는 경우가 발생한다. 특히, 섬유가 혼입된 고강도 콘크리트를 사용할 때에는 이러한 성질들에 대한 평가가 필수적으로 수반되어야 한다. 일반적으로 성능기반설계에 사용되는 섬유 보강 고강도 콘크리트의 기계적 성질은 콘크리트의 인장강도와 응력-변형률 관계이다.

기존 연구 결과<sup>2-11)</sup>를 통해 도출되고 현재 다방면으로 사용중인 응력-변형률 모델은 실용식으로, 실험을 통해 결

정되는 계수를 기반으로 구축되었다. 이는 모델의 구축에 사용된 재료 시험 조건에 따라 사용 가능한 명확한 강도의 제한이 있으므로 최근 성능기반설계기법을 사용하여 설계되는 초고강도 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트의 기계적 특성 정의에는 사용하기 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 섬유로 보강된 고강도 콘크리트의 설계에 적용하기 위해, 현재 사용되고 있는 실험식들의 한계를 벗어나도 사용 가능한 응력-변형률 관계의 기반이 될 수 있는 기계적 특성의 추정식을 도출하고자 한다.

### 2. 섬유보강 고강도 콘크리트의 기계적 특성

콘크리트는 압축강도가 높아질수록 탄성영역이 넓어지며 최대강도 발현 이후의 하중지지능력 감소가 급격하게 이루어진다는 것은 일반적으로 잘 알려진 사항이다. 고강도 콘크리트의 이러한 특징은 최대강도 발현시 변형률의 크기와 상승 및 하강곡선의 형태로 나타나며 이 변수들 또한 콘크리트의 압축강도 시험 결과에 대한 분석을 통해 결정된다.

\*Corresponding author E-mail : reise101@gmail.com  
 Received January 13, 2015, Revised March 10, 2015,  
 Accepted May 26, 2015  
 ©2015 by Korea Concrete Institute

현재 제안되어 있는 응력-변형률 관계들<sup>2-11)</sup>은 크게 두 가지 연구 결과에 기인하여 수정 제안되어 왔다. Popovics<sup>2)</sup>는 탄성계수의 감소 비율을 통한 응력-변형률 관계를 정의했으며, 아래 식 (1)을 사용하여 콘크리트의 응력-변형률 관계를 정의하였다. 또한 Sargin<sup>3)</sup>은 콘크리트의 구성 요소 및 강도의 변화에 있어서의 구간 상에서의 성질을 반영할 수 있는 식을 제안하였다.

$$\frac{f_c}{f_{ck}} = \frac{\beta(\epsilon/\epsilon_0)}{\beta - 1 + (\epsilon/\epsilon_0)^\beta} \quad (1)$$

$$\frac{f_c}{f_{ck}} = \frac{A(\epsilon/\epsilon_0) + B(\epsilon/\epsilon_0)^2}{1 + C(\epsilon/\epsilon_0) + D(\epsilon/\epsilon_0)^2} \quad (2)$$

여기서,  $f_c$ 는 콘크리트에 작용하는 응력,  $f_{ck}$ 은 콘크리트의 압축강도,  $\epsilon$ 은 압축변형률,  $\epsilon_0$ 는 최대응력 발현시의 변형률 그리고  $\beta$ 는 곡선의 기울기 및 형태를 결정하는 계수 그리고  $A \sim D$ 는 경계조건에 의해 결정되는 계수이다.

Graybeal<sup>11)</sup>에 의해 제안된 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계식은 기존의 응력-변형률 관계와는 다른 형태를 보유하고 있다. 높은 선형성을 반영할 수 있도록 1차식의 형태에 최대 응력 근처에서의 응력 증진률 감소 현상이 나타날 수 있는 식을 제안하였다.

기존 연구 결과를 살펴본 결과 압축응력 하에서의 콘크리트의 응력-변형률 관계를 정의하기 위해서는 우선적으로 기계적 특성의 정의가 필요하다는 것을 확인할 수 있으며, 그 종류로는 콘크리트의 최대 강도, 탄성계수, 최대강도시의 변형률로 정리할 수 있으며 일반적인 특징은 다음과 같다. 탄성계수는 콘크리트를 적용하는 구조물의 설계에 중요한 설계 변수가 되며, 응력-변형률 관계를 결

정하는 데에도 큰 영향을 미치는 변수이다. 탄성계수는 매트릭스의 강도가 증가하면서 같이 증가하는 경향이 있으며 매트릭스의 압축강도의 제곱근 또는 세제곱근에 비례하여 증가한다. 일반적으로  $\epsilon_0$ 로 정의되는 최대응력 발현시 변형률은 보통강도 콘크리트의 경우 0.002 또는 0.0022로 고정되어 사용되었다. 그러나 고강도 콘크리트의 경우 압축시험 수행시 0.002를 초과하는 값을 가지는 것으로 보고되고 있으며 이를 반영한 최대응력 발현시 변형률의 결정식들이 지속적으로 제시되어 왔다.

강섬유의 혼입은 콘크리트의 인장강도를 증진시키기 위한 목적으로 사용되나 압축시의 기계적 특성 또한 변화시킨다. 일반적으로 강섬유의 혼입은 압축강도의 증가와 최대응력발현시의 변형률 증가, 탄성계수의 증가 그리고 하강곡선의 형태 변화를 야기한다.

섬유의 보강효과는 매트릭스가 단독으로 보유한 탄성계수에 대한 섬유보강효과에 대수합 또는 배율으로 이루어진다. 콘크리트의 압축강도 및 강섬유의 보강효과에 따른 최대응력 발현시의 변형률 추정식을 Table 1에 정리하여 나타내었으며 탄성계수 추정식을 Table 2에 정리하여 나타내었다. 섬유의 혼입에 따른 기계적 특성 변화를 반영한 응력-변형률 관계의 추정식들에 대해 검토해보면, 기존에 도출되어 있던 섬유로 보강되어 있지 않은 콘크리트의 기계적 특성을 추정하기 위한 추정식에 섬유의 영향을 반영하여 정의하는 것을 확인할 수 있었다.

다만 현재까지 조사된 바에 따르면 100 MPa을 초과하는 압축강도를 보유한 섬유보강콘크리트에 대한 연구는 일반강도 콘크리트에 비해 절대적으로 수량이 부족한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 섬유보강콘크리트의 압축응력 하에서의 기계적 특성을 검토하기 위해 초고강도 섬유보강 콘

**Table 1** Strain at Peak Stress [MPa]

Researcher	Equation	Limitation [MPa]
Collins <sup>6)</sup>	$\epsilon_0 = \frac{f_{ck}}{E_c} \frac{n}{n-1}, n = 0.8 + \frac{f_{ck}}{17}, E_c = 3320f_{ck}^{0.5} + 6900$	$f_{ck} < 110$
Wee <sup>7)</sup>	$\epsilon_0 = 780(f_{ck})^{0.25}/10^6$	$f_{ck} < 120$
Ros <sup>12)</sup>	$\epsilon_0 = (0.0546 + 0.003713f_{ck}) \times 10^{-2}$	$f_{ck} < 43$
Shah-Fafits <sup>13)</sup>	$\epsilon_0 = 1.491 \times 10^{-5} f_{ck} + 0.00195$	$f_{ck} < 66$
De Nicolo <sup>14)</sup>	$\epsilon_0 = 0.00076 + [(0.626f_{ck} - 4.33) \times 10^{-7}]^{0.5}$	$f_{ck} \leq 90MPa$
CEB-fip 228 <sup>9)</sup>	$\epsilon_0 = 0.7(f_{ck})^{0.31}/1000$	$f_{ck} < 100$
EC2 <sup>15)</sup>	$\epsilon_0 = (2.0 + 0.085(f_{ck} - 50)^{0.53})10^{-3}$ , for $f_{ck} \geq 50MPa$ otherwise $\epsilon_0 = 0.002$	$f_{ck} \leq 90MPa$
Soroushian <sup>16)</sup>	$\epsilon_{of} = 0.0007RI + 0.0021, RI = V_f L_f / D_f$	-
Nataraja <sup>17)</sup>	$\epsilon_{of} = \epsilon_0 + 0.0006(RI), \epsilon_0 = 0.002, RI = W_f L_f / D_f$	$f'_c < 50$
Dhaka <sup>18)</sup>	$\epsilon_{of} = \epsilon_0 + 2000\alpha_c V_f^2, \epsilon_0 = 0.002, \alpha_f = 1.0(Flat), \alpha_f = 2.4(Hooked)$	$f'_c < 40$

$0E_c$  : secant elastic modulus of concrete at  $0.45f_{ck}$ (MPa),  $\epsilon_0$  : strain corresponding to peak stress(normal concrete),  $f_{ck}$  : compressive strength of concrete(MPa),  $RI$  : reinforcing index,  $D_f$  : diameter of steel fiber(mm),  $L_f$  : length of steel fiber(mm),  $V_f$  : volume fraction of steel fiber,  $W_f$  : weight fraction of steel fiber

**Table 2** Modulus of Elasticity [MPa]

Researcher	Equation	Limitation
KCI2007 <sup>19)</sup>	$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}}$ , $E_c = 0.077w_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ , $f_{cu} = f_{ck} + 8$	did not specified but $\sqrt{f_{ck}}$ cannot exceed 8.4 MPa
KCI2012 <sup>1)</sup>	$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}}$ , $E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ , $f_{cu} = f_{ck} + \Delta f$ $\Delta f = 4$ when $f_{ck} \leq 40$ MPa, $\Delta f = 6$ when $f_{ck} \geq 60$ MPa	
ACI318-11 <sup>20)</sup>	$E_c = 4,700 \sqrt{f_{ck}}$ (normal weight concrete), $E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f_{ck}}$	
CEB-fip 228 <sup>9)</sup>	$E_{ci} = E_{co} [(f_{ck} + \Delta f)/f_{cmo}]^{1/3}$ MPa, $\Delta f = 8$ MPa, $f_{cmo} = 10$ MPa, $E_{ci} = E_{co} [f_{cu}/f_{cao}]^{0.3}$ MPa, $E_{co} = 22$ GPa	$f_{ck} \leq 90$ MPa
Martinez <sup>21)</sup>	$E_c = 3,320 \sqrt{f_{ck}} + 6,900$ MPa	$21$ MPa < $f_{ck}$ < $83$ MPa
Cook <sup>22)</sup>	$E_c = 3.385 \times 10^{-5} w_c^{2.55} (f_{ck})^{0.315}$ MPa	
Ahmad & Shah <sup>23)</sup>	$E_c = 3.385 \times 10^{-5} w_c^{2.5} (f_{ck})^{0.325}$ MPa	$f_{ck} < 84$ MPa
Graybeal <sup>11)</sup>	$E_c = 3,840 \sqrt{f_{ck}}$ MPa	$f_{ck} < 200$ MPa
Gao <sup>24)</sup>	$E_{cF} = E_c(1 + 0.173(RI))$ MPa	$70$ MPa < $f_{ck}$ < $85$ MPa
Padmarajaiah <sup>25)</sup>	$E_{cF} = E_c + 2440.2(RI)$ MPa	$f_{ck} < 69$ MPa

$E_c$  : secant elastic modulus of concrete at  $0.45f_{ck}$ (MPa),  $w_c$  : unit weight of concrete(kg/m<sup>3</sup>),  $f_{ck}$  : compressive strength of concrete(MPa),  $RI$  : reinforcing index,  $D_f$  : diameter of steel fiber(mm),  $L_f$  : length of steel fiber(mm),  $V_f$  : volume fraction of steel fiber,  $W_f$  : weight fraction of steel fiber

**Table 3** Mix proportion

ID	w/b	Weight (kg/m <sup>3</sup> )							$f_{ck}$ [MPa]
		Cement	Water	Silica Fume	Sand	Filler	Steel Fiber	Super-Plasticizer	
80-0 and f series	0.30	780	255	60	1097	114	0, 37, 74, 147	0.5	80
100-0 and f series	0.25	809	222	80	1052	162	0, 37, 74, 147	1	100
150-0 and f series	0.20	820	190	112	918	186	0, 37, 74, 147	1.04	150
200-0 and f series	0.17	830	176	207	912	246	0, 37, 74, 147	1.08	200

크리트의 재료 시험을 수행하였다. 또한 기존 연구 결과와 본 연구에서 수행된 시험 결과를 사용한 통계적 분석과 회귀분석을 통해 압축응력 하에서 초고강도 섬유보강 콘크리트의 기계적 특성을 정의할 수 있는 추정식과 응력-변형률 관계를 도출하였다.

### 3. 초고강도 강섬유보강콘크리트의 압축시험

고강도 콘크리트와 섬유보강콘크리트의 기계적 성질에 대한 기존 연구들의 검토 결과, 각 추정식별로 적용 가능한 강도 제한이 존재하고 있으며 이 강도 제한을 벗어날 경우 불안전측 추정에 의한 구조설계상의 문제점이 있을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 현행 설계기준에 제시되어 있는 강도 제한을 초과해서도 안전측으로 기계적 특성을 추정 가능한 식의 도출을 위해 80~200 MPa 사이의 압축강도를 보유한 콘크리트로 제작된 원주형 공시체의 압축 시험을 수행하였다. 기존 추정식 또는 설계 범위의 콘크리트 강도와 연계성의 확보를 위해 기존 시험 결과를 수집하여 비교 및 검토하였다. 본 연구에서 검토한 기계적 특성은 압축응력 하에서의 응력-변형률 관계를 정의하는 주요 기계적 특성인

탄성계수, 최대강도 발현비율, 최대강도 발현시의 변형률로 한정하였다.

### 3.1 실험계획

콘크리트의 기계적 특성에 대한 기존 문헌의 분석 결과, 응력-변형률 관계를 정의하는 주요 기계적 특성들은 콘크리트의 압축강도 및 섬유의 혼입량과 형태에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서도 매트릭스의 압축강도와 섬유의 혼입량을 주요 변수로 연구를 수행하였다. 매트릭스의 압축강도의 범위는 80~200 MPa로 설정하였으며, RPC (Reactive Powder Concrete)로 매트릭스의 배합비를 결정하였다. 수화반응의 극대화를 위해 90°C의 증기를 통해 양생한 이후 시험시까지 수중양생을 실시하였다. 섬유의 혼입량은 섬유의 혼입 이후 유동성의 확보와 함께 구조성능의 증진을 확보할 수 있는 0.5~2%의 부피비로 혼입하였다. 이에 따라 시험 대상 재료는 KS L 5111<sup>26)</sup>에 따른 플로테이블을 활용한 시험 결과 225 mm 이상으로 충분한 유동성을 확보하였다. 각각의 배합별로  $\phi 100 \times 200$  (mm) 원주형 공시체를 다섯 개 제작하였으며, 가력은 KS F 2405<sup>27)</sup>에 의해 수행되었다.



Fig 1 Test setup

Table 4 Test Results (mean value)

ID	$V_f$ [%]	$E_c$ [MPa]	$f_{co}$ [MPa]	$\epsilon_{co}$ [‰]
C80-0	0	32,970	80.79	3.16
C80-f0.5	0.5	33,597	82.60	3.55
C80-f1.0	1.0	34,097	85.17	3.64
C80-f2.0	2.0	34,768	89.01	4.04
C100-f0	0	36,233	104.86	3.39
C100-f0.5	0.5	37,376	107.39	3.71
C100-f1.0	1.0	38,732	111.93	3.95
C100-f2.0	2.0	38,099	116.92	4.09
C150-0	0	42,023	149.40	3.97
C150-f0.5	0.5	41,203	154.96	4.47
C150-f1.0	1.0	42,365	159.60	4.77
C150-f2.0	2.0	43,222	162.40	4.79
C200-0	0	45,512	198.21	4.87
C200-f0.5	0.5	45,019	202.70	4.97
C200-f1.0	1.0	46,734	210.40	5.26
C200-f2.0	2.0	47,515	216.52	5.39

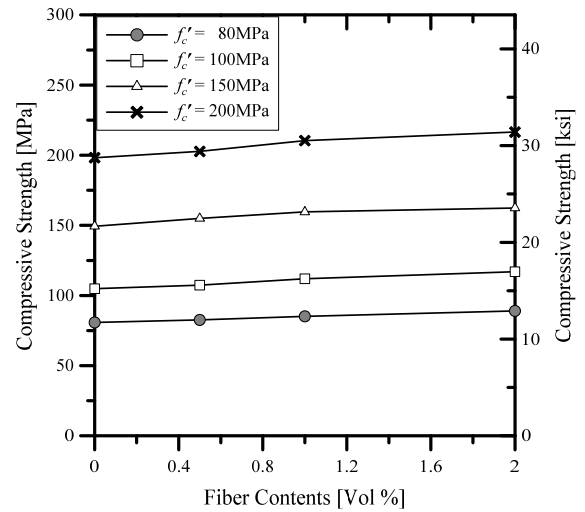
$V_f$  : volume fraction of steel fiber (%),  $E_c$  : Elastic modulus (MPa),  $f_{co}$  : compressive strength of concrete (tested value, MPa),  $\epsilon_{co}$  : strain corresponding peak stress

시험체의 변형률 측정은 compressor meter를 사용하여 수행되었으며 시험체의 설치 상황은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 시험에 사용된 배합은 Table 3에 나타내었다.

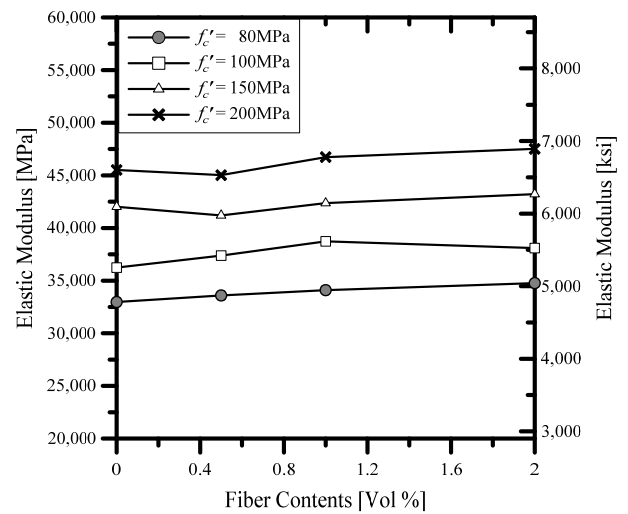
### 3.2 기계적 성질에 대한 실험 결과

콘크리트의 응력-변형률 곡선을 정의하는데 일반적으로 사용되는 탄성계수, 최대강도, 최대강도 발현시 변형률에 대한 시험 결과를 Table 4에 나타내었다.

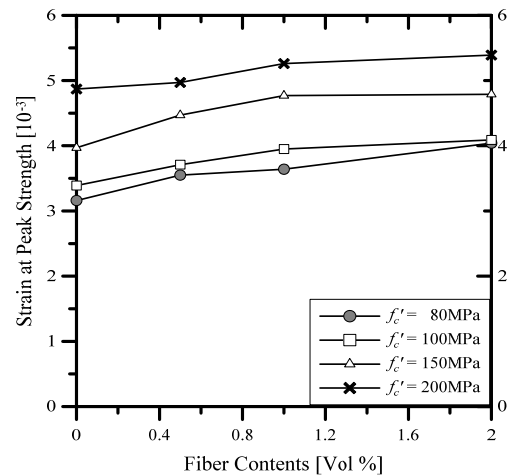
실험 결과로 취득되는 값은 각 시험체들의 평균값을 사용한 것이며 각 시험 결과의 평균값에 대한 상대 오차



(a) Compressive Strength



(b) Elastic modulus



(c) Strain at peak strength

Fig. 2 Change of Mechanical Characteristics according to the Fiber Contents

는 10% 미만인 것으로 나타났다. 시험 결과 섬유유 보강은 변형 능력에 관련된 지표에 대해 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 2에 섬유유 보강량에 따라 변형률에 관련된 주요 지표의 변화 경향을 나타내었다.



Fig. 3 Failure Pattern of Steel Fiber Reinforced Ultra-High Strength Concrete and Ultra-High Strength Concrete

강도에 관련된 지표에 대해, 강섬유의 영향은 2%의 부피비가 보강될 경우 80, 100, 150, 200 MPa 급의 매트릭스에 대해 각각 10.2%, 11.5%, 8.7%, 9.2%의 최대강도 증진률을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 변형률에 관련된 주요 지표 중 하나인 최대응력 발현시 변형률은 각각의 매트릭스에 대해 27.8%, 23.5%, 20.6%, 10.6%의 증진률로 강도의 증진률에 비해 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 3의 파괴 형태에서 나타나는 바와 같이 공시체 축 방향 균열을 구속함에 따라 나타나는 현상으로 판단된다. 이 현상은 세로 방향의 쪼개짐 균열을 유발시키는 공시체 축의 수직 방향으로 발생하는 팽창력에 강섬유가 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 1축 압축응력 하에서도 강섬유는 매트릭스의 변형능력을 증진시키는 역할을 수행하고 있다고 할 수 있다.

섬유의 보강효과는 모든 압축강도 영역에서 최대응력의 크기와 최대응력 발현시의 변형률을 상승시키는 역할을 하는 것으로 나타났다. 다만 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 경우, 섬유의 보강에 따른 변형능력의 상승폭이 80 MPa 급의 매트릭스가 보유한 변형능력의 상승폭에는 미치지 못하다. 즉, 압축강도의 증진은 변형능력의 상승폭을 감소시키는 것으로 정리할 수 있다.

#### 4. 초고강도 섬유보강콘크리트의 기계적 성질의 추정

넓은 범위의 콘크리트 강도 영역에서 간단하게 사용 가능한 응력-변형률 관계를 도출하기 위해 본 연구에서는 수행한 실험결과와 함께 기존에 수행된 재료시험 결과들을 수집하여<sup>28-41)</sup> 주요 변수의 추정식을 결정하는 데에 사용하였다. 수집된 데이터의 수는 압축강도 상승률 287개, 최대응력 발현시 변형률의 크기 126개, 탄성계수에 대한 시험체 1478개로 구성되어 있다. 본 연구에서 섬

유의 보강 효과는 섬유의 형상비를 반영하기 위한 섬유 보강지수(RI : Reinforcing Index)를 사용하여 나타내었다. 섬유 보강지수는 다음 식 (3)에 의해 결정되는 값으로, 섬유의 형상비, 섬유 단부 형상, 섬유의 보강량을 주요 변수로 사용한다.

$$RI = V_f L_f d_f / D_f \quad (3)$$

여기서,  $V_f$ 는 강섬유의 혼입률(부피비),  $L_f$ 는 사용된 강섬유의 길이,  $D_f$ 는 사용된 강섬유의 지름 그리고  $d_f$ 는 섬유의 단부 형상에 따른 보정계수로, 본 연구에서는 기존 문헌<sup>41)</sup>에서 제시하는 바와 같이 섬유 형태에 따른 보강 효과의 상대적 보정을 위해 직선형 섬유에 대해서는 1, 후크형에 대해서는 2.0, 클립프 형에 대해서는 1.5로 사용하였다.

#### 4.1 초고강도 콘크리트 매트릭스의 기계적 성질

섬유보강콘크리트의 탄성계수 및 최대응력 발현시의 변형률은 보강되지 않은 매트릭스에 대한 다량의 시험 결과를 기반으로 결정된다. 따라서 탄성계수와 최대응력

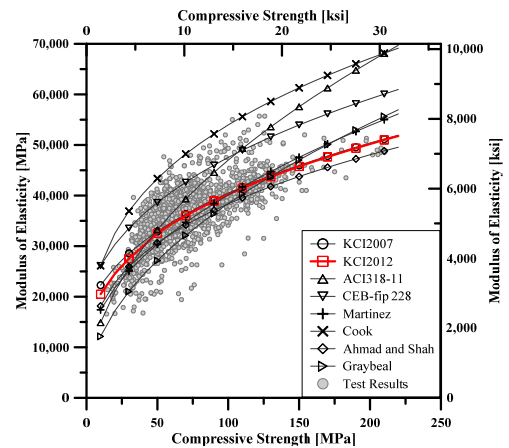


Fig. 4 Relation between compressive strength of concrete and Elastic modulus

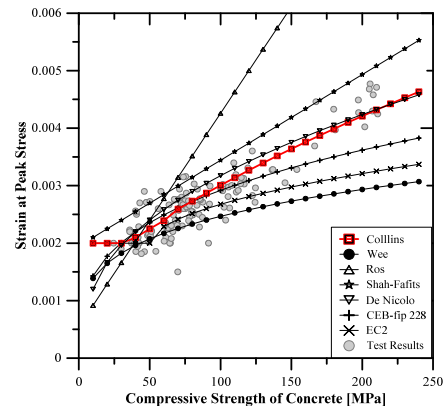


Fig. 5 Relation between compressive strength of concrete and strain at peak stress

발현시의 변형률의 예측식의 정확도는 식의 도출에 사용된 시험체의 강도 범위에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서 수행한 재료시험 결과와 수집한 기존연구<sup>27)~41)</sup>의 재료시험 결과로 도출된 탄성계수와 최대응력시 변형률의 분포를 Fig. 4와 5에 각각 콘크리트의 압축강도에 따라 나타내었다. 기존에 제안된 추정식을 동시에 나타내었으며, Table 5와 6에는 추정식들이 보유한 통계지표들을 계산하여 정리하였다.

Fig. 4와 Table 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 탄성계수의 추정에 대해서는 정확도에 있어서 현행설계기준이 가장 높은 것으로 나타났다. KCI 2012<sup>1)</sup>에서 제시하고 있는 추정식은 최저의 표준편차를 보이지는 않았으나, 평균, 변동계수 IAE (Integrated Absolute Error)에 대해서는 가장 낮은 값을 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 탄성계수의 추정식은 일반강도와 고강도 사이에서 각각 과소, 과대평가되는 경향이 있었으나, 현행설계기준<sup>1)</sup>이 개정되면서 보통강도 및 고강도 콘크리트 모두에 대해 상대적으로 안전한 추정을 할 수 있도록 제시하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 초고강도 콘크리트를 사용할 경우에도 탄성계수의 추정은 현행설계기준에서 제시하는 추정식을 사용하여도 큰 문제는 없을

것으로 판단된다.

응력-변형률 관계의 정의에 있어서 최대응력 발현시 변형률의 크기는 주요 경계조건이 되므로 이에 대해서도 검토하였다. 기존의 응력-변형률 관계에 대한 연구에서 드러난 바와 같이 콘크리트의 최대응력 발현시 변형률은 일반적으로 0.002를 사용하고 있으나 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 콘크리트의 압축강도에 비례하여 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 기존의 추정식 중 콘크리트의 압축강도에 대한 지수함수의 형태로 이루어진 추정식의 경우 압축강도가 높아짐에 따라 과소평가 하게 되는 것을 확인할 수 있었다. Table 6을 통해 연구에 사용된 콘크리트의 압축강도 범위가 넓을수록 정확도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Collins<sup>6)</sup>가 제시한 추정식이 가장 낮은 IAE와 평균값을 가지고 있는 것으로 보아 고강도 매트릭스의 최대응력 발현시 변형률의 크기는 Collins<sup>6)</sup>의 모델을 활용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. Table 1에 나타난 Collins<sup>6)</sup>의 추정식은 탄성계수의 영향을 반영하고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 연구를 통해 탄성계수의 정확도는 현행설계기준<sup>1)</sup>에서 제시한 추정식이 가장 높은 정확도를 가지는 바, Collins<sup>6)</sup>의 추정식에 현행설계기준의 탄성계수 추정식을 적용하였다. 그 결과 IAE는 8.67%로 낮아졌으며, 추정치에 대한 실험값의 비의 평균은 1.02로 안전측에서의 추정이 가능한 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서 섬유로 보강되어 있지 않은 매트릭스의 최대응력 발현시 변형률의 크기는 현행설계기준의 탄성계수 추정식을 반영한 Collins<sup>6)</sup>의 식으로 설정하였다.

**Table 5** Statistical Evaluation of previously suggested equations for Modulus of Elasticity

Researcher	Mean	SD	CV	IAE
KCI2007 <sup>16)</sup>	0.99	0.12	0.12	8.52
KCI2012 <sup>1)</sup>	1.01	0.12	0.12	8.42
ACI318-11 <sup>17)</sup>	0.93	0.13	0.14	13.72
CEB-fip 228 <sup>9)</sup>	0.83	0.10	0.12	20.65
Martinez <sup>18)</sup>	1.05	0.13	0.12	9.45
Cook <sup>19)</sup>	0.75	0.09	0.12	32.44
Ahmad & Shah <sup>20)</sup>	1.07	0.12	0.12	9.83
Graybeal <sup>11)</sup>	1.14	0.16	0.14	13.54

SD : Standard Deviation, CV : Coefficient of Variation, IAE : Integrated Absolute Error(%)

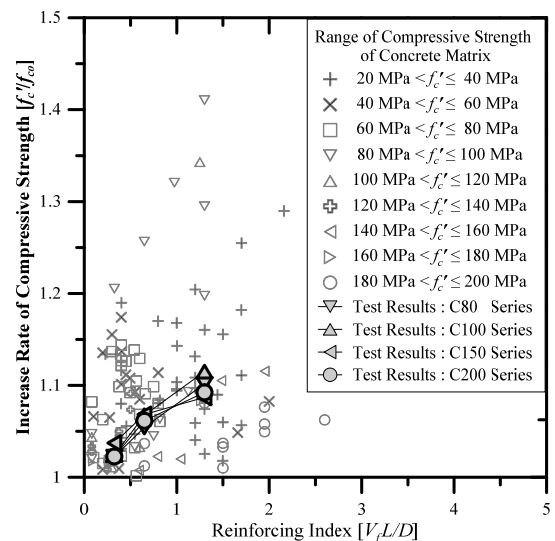
**Table 6** Statistical Evaluation of previously suggested equations for Strain at peak stress

Researcher	Mean	SD	CV	IAE (%)
Collins <sup>6)</sup>	0.99	0.12	0.12	8.74
Wee <sup>7)</sup>	1.16	0.17	0.15	16.37
Ros <sup>12)</sup>	0.78	0.19	0.25	42.05
Shah-Fafits <sup>13)</sup>	0.84	0.09	0.11	19.49
De Nicolo <sup>14)</sup>	0.93	0.11	0.12	11.58
CEB-fip 228 <sup>9)</sup>	0.99	0.13	0.13	10.56
EC2 <sup>15)</sup>	1.09	0.15	0.14	12.52

SD : Standard Deviation, CV : Coefficient of Variation, IAE : Integrated Absolute Error(%)

#### 4.2 섬유보강량에 따른 압축강도 상승률

기존 시험 결과<sup>28-42)</sup>와 본 연구의 수행을 통해 도출된 강섬유의 보강에 따른 강도의 상승률을 Fig. 6에 나타내



**Fig. 6** Compressive Strength Increase Rate according to Reinforcing Index

었다. 강도의 상승률은 섬유가 보강되지 않은 시험체의 압축강도에 대한 섬유가 보강된 시험체의 압축강도의 비로 정의하였다. 섬유의 보강에 의한 압축강도 증진률은 평균 9.7%로 나타나고 있었으나 같은 크기의 압축강도를 보유하고 있을 경우 섬유의 보강량이 증가함에 따라 증진률이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 매트릭스의 압축강도의 영향을 검토하기 위해 매트릭스의 압축강도에 따라 구분한 결과 압축강도가 증가할수록 섬유의 증가에 따른 강도의 증진 비율이 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났으나 분산의 정도가 큰 관계로 명확한 상관관계를 이끌어 내는 것은 어려운 것으로 나타났다. 특히 이러한 낮은 상관관계는 매트릭스의 압축강도가 증가하면서 감소하는 특징을 보였다. 본 연구를 통한 실험 결과는 모든 압축강도 영역에서 유사한 강도 증진률을 나타내는 것으로 나타났으며, 최대 10%의 강도 증진률을 보이는 것으로 확인되었다.

### 4.3 섬유보강량에 따른 최대응력 발현시의 변형률

최대응력 발현시의 변형률의 변화에 대한 섬유의 영향을 기존 연구 결과<sup>28-41)</sup> 및 본 연구의 결과를 활용하여 Fig. 7에 나타내었다. 최대응력 발현시의 변형률은 섬유의 보강에 따른 압축강도 증진률과는 다르게 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 시험 결과를 Fig. 7에 기존 시험 결과와 함께 나타내었다. 시험 결과 80 MPa의 압축강도를 보유한 매트릭스가 사용되었을 경우 높은 변형률의 증진률을 보였으나, 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 매트릭스가 사용될 경우 증진률이 감소했음을 확인하였다. 이 현상은 200 MPa급의 압축강도를 보유한 시험체에서 특히 크게 나타났다.

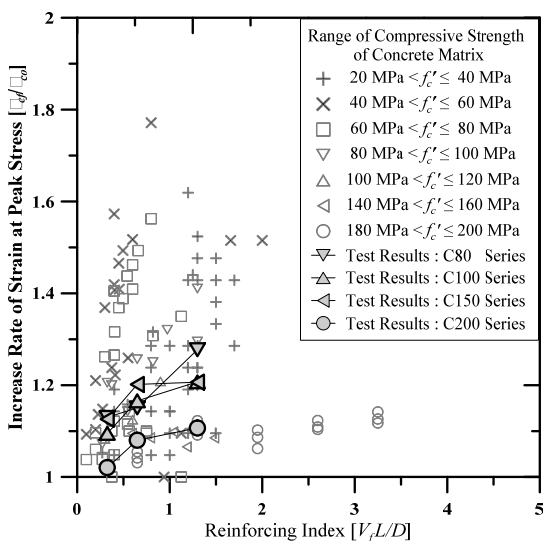


Fig. 7 Strain at Peak Stress Increase Rate according to Reinforcing Index

### 4.3 섬유보강량에 따른 탄성계수

콘크리트는 고강도를 달성하기 위해 구성재료의 균질화 및 각 재료 강도사이의 균질화를 이루게 된다. 이에 따라 탄성계수가 다르게 발현되며, 일반적으로 고강도화에 따라 탄성계수는 증가하는 경향을 보인다. 초고강도 섬유보강 콘크리트의 탄성계수 발현 경향을 검토하기 위해 본 연구에서 수행된 시험 결과와 기존 연구 결과<sup>28-41)</sup>로부터 수집된 시험 결과를 바탕으로 탄성계수를 검토하였다. 탄성계수의 섬유보강지수에 대한 분포 경향은 Fig. 8에 나타내었다. 탄성계수는 변형률과 강도의 영향을 동시에 받는 지표가 되므로 강도의 증진률 및 변형률의 증진률과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 매트릭스의 압축강도가 증가하면서 섬유보강지수에 따른 탄성계수 증진률의 감소가 나타났다. 그러나 증진률의 평균치는 6.5%로 강도의 증진률이나 변형률의 증진률에 비해 낮은 증진률을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행된 시험 결과 또한 이와 유사한 경향을 나타내었다. 80 MPa급의 C80 시험군은 높은 증진률을 보이고 있었으나 100MPa의 압축강도 이상을 보유한 나머지 시험군은 낮은 증진률이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 기존의 시험 결과와도 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.4 섬유보강효과를 반영한 섬유보강 초고강도 콘크리트의 기계적 특성의 추정식

수집된 기존 압축시험 결과<sup>28-41)</sup>와 본 연구에서 수행된 시험 결과를 통한 섬유의 보강에 따른 증진량에 대해 20 MPa의 압축강도 단위로 구분하여 Fig. 9에 나타내었다. 증진률의 크기는 각 범위 내의 실험체의 증진률을 기반으로 선형 회기분석한 결과이다. 회기분석은 다음 식 (4)

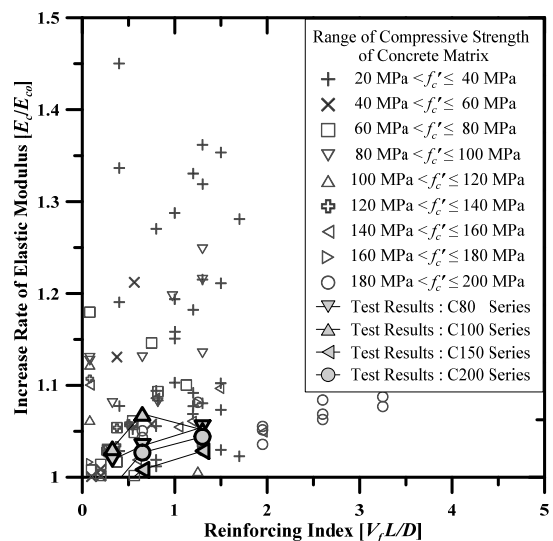


Fig. 8 Elastic Modulus Increase Rate according to Reinforcing Index

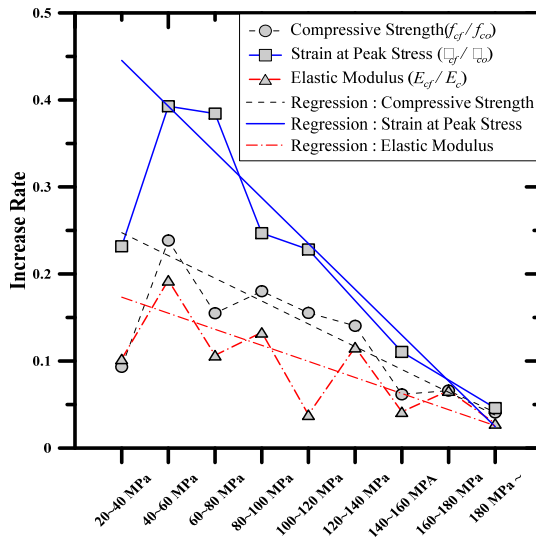


Fig. 9 Change of Mechanical Characteristic Increase Rate according to Compressive Strength of Concrete

를 기반으로 수행하였다.

$$\frac{k_{cf}}{k_{co}} = 1 + RI \times \alpha \quad (4)$$

여기서,  $k_{cf}$ 는 섬유로 보강되었을 경우 콘크리트의 기계적 특성,  $k_{co}$ 는 섬유가 제외된 매트릭스의 기계적 특성,  $RI$ 는 식 (3)을 통해 설명된 섬유보강지수를 의미하며  $\alpha$ 는 증진률을 의미한다. 콘크리트의 압축강도가 상승함에 따라 섬유의 보강에 따른 증진률은 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트의 압축강도, 최대강도 발현시 변형률, 탄성계수에 대한 콘크리트의 압축강도에 영향을 받는 증진률의 크기는 회기분석 결과 다음 식 (5)를 통해 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\frac{k_{cf}}{k_{co}} = 1 + RI \times (a_1 - b_1 \times f_{ck}) \quad (5)$$

여기서,  $a_1$ 과  $b_1$ 은 회기분석 계수로 압축강도 증진률에 대해서는 각각 0.29, 0.0013으로 결정되었으며, 최대응력 발현시 변형률의 증진률에 대해서는 각각 0.52, 0.0026으로, 탄성계수에 대해서는 각각 0.20, 0.00092로 결정되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 강섬유로 보강된 초고강도 콘크리트의 압축응력 하에서의 특성 평가를 위한 재료 시험을 수행하였으며, 기존 연구자들의 시험 결과 수집을 통해 기존 추정식들의 적합성 평가와 초고강도 영역에서 사용 가능한 추정식들을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 섬유보강 초고강도콘크리트의 압축 시험 결과 섬유로 보강되지 않은 매트릭스는 폭발적 파괴가 발생하였으나, 섬유로 보강된 경우 폭발적 파괴에 따른 부피 상실은 나타나지 않았다. 섬유의 보강효과는 압축력에 의해 유발되는 수직 팽창력에 저항하는 것으로 나타나는 것으로 판단된다.
- 2) 시험 결과 강섬유의 보강은 매트릭스가 보유한 압축강도에 관계없이 선형적 증가 추세를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 최대강도와 탄성계수는 섬유의 보강량에 큰 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었으나, 최대강도 발현시 변형률은 상대적으로 큰 증진률을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 매트릭스의 기계적 특성은 탄성계수의 경우 현행 설계기준이 제안하고 있는 할선탄성계수 추정식, 최대응력 발현시 변형률은 Collins의 식이 높은 정확도로 추정하고 있는 것으로 평가되었으며, 초고강도 영역에서도 사용이 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 섬유의 영향을 반영하기 위해 기존 시험 결과를 활용하여 회기분석을 수행하였다. 시험 결과 및 기존 연구 결과의 분석에서 나타난 바와 같이 섬유의 보강효과는 섬유보강지수( $RI$ )에 기반하여 나타내었다.
- 5) 시험 결과의 분석을 통해 특정 강도 수준의 매트릭스에 대해 해당 기계적 특성은 섬유보강지수에 비례하여 증가하게 되는 것이 확인되어 선형 회기분석을 수행하였으며 모든 기계적 특성이 같은 형태의 식을 사용하며 각각 다른 계수만 사용할 수 있도록 추정식의 형태를 결정하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부, 교육부)의 재원과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2014R1A1A1005444, NRF-2013R1A1A2010717).

## References

1. Korea Concrete Institute, Concrete Design Code and Commentary, Kimoonang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, pp.600.
2. Popovics, S., A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, No.5, 1973, pp.583-599.
3. Sargin, M., Stress-Strain Relationship for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections, Study 4, Solid Mechanics Division; University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1971, pp.167.
4. Tomaszewicz, A., Betongens Arbejdsdiagram, SINTEF, STF65, A84065, Trondheim, 1984.
5. Carreira, D. J. and Chu, K. D., Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression, ACI Journal, Proc. Vol.82,



- No.6, 1985, pp.797-804.
6. Collins, M. P., Mitchell, D., and MacGregor, J. G., Structural Design Considerations for High-Strength Concrete, *Concrete International : Design and Construction*, Vol.15, No.5, 1993, pp.27-34.
  7. Wee, T. H., Chin, M. S., and Mansur, M. A., Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.8, No.2, 1996, pp.70-76.
  8. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression, *ACI Journal Proceedings*, Vol.75, No.1978, pp.603-611.
  9. Comité Euro-International du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte. High Performance Concrete—Recommended Extensions to the Model Code 90, Research Needs. CEB, Bulletin d'Information 228. Lausanne, 1995, pp.60.
  10. Attard, M. M. and Setunge, S., Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.5, 1996, pp.432-442.
  11. Benjamin, A., Graybeal, Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.104, No.2, 2007, pp.146-152.
  12. Ros, M., Material-technological foundation and problems of reinforced concrete (Eidgenössische Materialprüfungs und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen and Gewerbe), Bericht No.162, Zurich, Switzerland, 1950. pp.314.
  13. Fafitis, A. and Shah, S. P., Predictions of ultimate behavior of confined columns subjected to large deformations, *Ibid* 82, No.4, 1985, pp.423-433.
  14. De Nocolo, B., Pani, L., and Pozzo, E., Strain of concrete at peak compressive stress for a wide range of compressive strengths, *Materials and Structures*, Vol.27, 1994, pp.206-210.
  15. European Committee for Standardization (CEN), Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings. Eurocode 2, Brussels, Belgium. 2004, pp.225.
  16. Soroushian, P. and Lee, C. H., Constitutive Modeling of Steel Fiber Reinforced Concrete under direct Tension and Compression. *Fibre Reinforced Cements and Concretes : Recent Developments*. Proceedings of an International Conference held at The University of Wales, Collige of Cardiff, School of Engineering, United Kingdom, Sep, 18-20, 1989.
  17. Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P., Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement and Concrete Composites*, Vol.21, No.5-6, 1 December 1999, pp.383-390.
  18. Dhakal, R. P., Wang, C., and Mander, J. B., Behavior of steel fibre reinforced concrete in compression. Nanjing: International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering, Nov 2005.
  19. Korea Concrete Institute, Concrete Design Code and Commentary, Kimoonang Publishing Company, Seoul, Korea, 2007, pp.523.
  20. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2011, pp.391.
  21. Salvador Martinez, Arthur H. Nilson, and Floyd O. Slate, Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns, *ACI Journal*, 1984, Vol.81, No.5, pp.431-442.
  22. Cook, J. E., 10,000 PSI Concrete. *Concrete International: Design and Construction*, Oct.989, Vol.11, No.10, pp.67-75.
  23. Ahmad, Shuaib H. and Shah, Surendra P., Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete, *Proceedings, ASCE*, Vol.108, ST4, Apr. 1982, pp.728-742.
  24. Gao, J., Sun, W., and Morino, K., Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength light weight concrete., *Cement Concrete Composite*, Vol.19, pp.307-313.
  25. Padmarajaiah, S. K., Influence of fibers on the behavior of high strength concrete in fully/partially prestressed beams : an experimental and analytical study, Ph.D. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India. 1999.
  26. KS L 5111, Flow table for use in tests of hydraulic cement, Korean Agency for Technology and Standards, 2007. pp.1-5.
  27. KS F 2405, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2010. pp.1-16.
  28. Perera, S. V. T. J., Mutsuyoshi, H., and Asamoto, S., Properties of High-Strength Concrete, Proc. of 12th International Summer Symposium of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Funabashi-Japan, 2010.
  29. Kaiss, F. Sarsam, Ihsan, A. S., Al-Shaarbaif, Maha, M. S., Ridha, Experimental Investigation of Shear-Critical Reactive Powder Concrete Beams without Web Reinforcement, *Eng. & Tech. Journal*, Vol.30, No.17, 2012, pp.2999-3022.
  30. Dawood Abdulhai Pandor, Behavior of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams in shear, Thesis of Master of Science, Massachusetts institute of technology, Feb, 1994, pp.124.
  31. Job Thomas and Ananth Ramaswamy, Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No.5, May 1, 2007, pp.385-392.
  32. Kang, S. T. and Ryu, G. S., The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC), *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, February, 2011, pp.67-75.
  33. Bhargava, P., Sharma, U. K., and Kaushil, K., Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.14, No.1, 2006, pp.109-21.
  34. Ou, Y. C., Tsai, M. S., Liu, K. Y., and Chang, K. C., Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index, *Journal of Materials in Civil*

- Engineering, Vol.24, No.2, February 1, 2012, pp.207-215.
35. A. Samer Ezeldin, Perumalsamy N. Balaguru, Normal- and High-Strength Fiber Reinforced Concrete under Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.4, November, 1992., pp.415-429.
  36. Jo, B. W., Shon, Y. H., and Kim, Y. J., The Evaluation of Elastic Modulus for Steel Fiber Reinforced Concrete, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol.37, No.2, 2001, pp.152D161. Translated from Defektoskopiya, No.2, 2001, pp.87D96.
  37. Obata Kazuhiro, Sugano Shunsuke, Araki Hideo, Kitakaze Nobu, Murakami Yuichi, Shirai Kazuyoshi, and Kimura Hideki, An experimental study on the compressive properties of the super-high strength concrete, Architectural Institute of Japan, China Branch, Research report collection, Vol.25, March, 2002, pp.329-332.
  38. Ramachandra Murthy, A., Nagesh R. Iyer, and B. K. Raghu Prasad, Evaluation of mechanical properties for high strength and ultrahigh strength concretes, Advances in Concrete Construction, Vol.1, No.4, 2013, pp.341-358.
  39. Nageh, N., Meleka, Alaa A. Bashandy, Mohamed A. Arab, Ultra High Strength Concrete Using Economical Materials, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.3, No.2, June 2013, pp.393-402.
  40. Moldovan, D. and Măgureanu, C., Stress-Strain Diagram For High Strength Concrete Elements In Flexure, Proc. 3rd Int. Conference, Advanced Composite Materials Engineering, CONMAT 2010, 27-29 October 2010, Brasov, Romania, Transilvania University Press of Brasov, pp.137-142.
  41. Wasan, I. Khalil and Tayfur Y. R., Flexural Strength of Fibrous Ultra High Performance Reinforced Concrete Beams, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.8, No.3, MARCH 2013, pp.200-21431.
  42. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement, ACI Structural Journal, Vol.84, No.3, 1987, pp.216-227.

**요 약** 최근 개발중인 초고강도 또는 강섬유보강 초고강도 콘크리트는 현행 설계기준으로 설계할 경우 그 안전성에 대해 별도의 실험 또는 해석적 증명이 필요하다. 이를 위한 철근콘크리트 부재의 상세 해석에는 응력-변형률 관계의 정의가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 현행 설계기준의 제한 범위를 벗어나는 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 압축응력하에서의 기계적 특성을 정의하였다. 80~200 MPa의 압축강도를 보유한 분체 콘크리트 매트릭스에 강섬유를 혼입하였으며, 섬유의 보강량에 따른 압축강도의 증진률에 대해 분석하고 압축강도에 따른 탄성계수와 최대응력 발현시의 변형률에 대해 조사 분석하였다. 넓은 콘크리트 압축강도 범위내에서 사용성 확보를 위해 기존 연구결과로부터 수집된 압축강도 증진률, 탄성계수, 최대응력 발현시 변형률의 크기에 대한 결과를 활용하여 기존 추정식의 평가를 수행하였다. 또한, 강섬유가 보강되어 있지 않은 매트릭스에 대한 기존 추정식 중 정확도가 높은 식을 기반으로, 강섬유의 영향을 반영할 수 있는 새로운 추정식을 위한 계수를 도출하였다.

**핵심용어** : 강섬유보강 초고강도 콘크리트, 압축응력, 탄성계수, 최대강도시 변형률, 회기분석