

초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도와 압축강도 사이의 상관관계에 관한 연구

Correlation Between Tensile Strength and Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete Reinforced with Steel Fiber

저자 (Authors)	배백일, 최현기, 최창식 Baek-Il Bae, Hyun-Ki Choi, Chang-Sik Choi
출처 (Source)	콘크리트학회 논문집 27(3) , 2015.6, 252-262(11 pages) Journal of the Korea Concrete Institute 27(3) , 2015.6, 252-262(11 pages)
발행처 (Publisher)	한국콘크리트학회 Korea Concrete Institute
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeld=NODE06366068
APA Style	배백일, 최현기, 최창식 (2015). 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도와 압축강도 사이의 상관관계에 관한 연구. 콘크리트학회 논문집, 27(3), 252-262
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.104.66.*** 2022/02/18 15:52 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.



초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도와 압축강도 사이의 상관관계에 관한 연구

배백일¹⁾ · 최현기^{2)*} · 최창식³⁾

¹⁾한양대학교 산업과학연구소 ²⁾경남대학교 소방방재공학과 ³⁾한양대학교 건축공학부

Correlation Between Tensile Strength and Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete Reinforced with Steel Fiber

Baek-II Bae,¹⁾ Hyun-Ki Choi,^{2)*} and Chang-Sik Choi³⁾

¹⁾Research Institute of Industrial, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

²⁾Dept of Fire and Disaster Prevention Engineering, KyungNam University, ChangWon, 631-701, Korea

³⁾Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

ABSTRACT Ultra-high strength concrete which have 100 MPa compressive strength or higher can be developed applying RPC(Reactive Powder Concrete). Preventing brittle failure under compression and tension, ultra-high strength concrete usually use the steel fibers as reinforcements. For the effective use of steel fiber reinforced ultra-high strength concrete, estimation of tensile strength is very important. However, there are insufficient research results are available with no relation between them. Therefore, in this study, correlation between compressive strength and tensile strength of ultra-high strength concrete was investigated by test and statistical analysis. According to test results, increasing tendency of tensile strength was also shown in the range of ultra-high strength. Evaluation of test results of this study and collected test results were carried out. Using 284 splitting test specimens and 265 flexural test specimens, equations suggested by previous researchers cannot be applied to ultra-high strength concrete. Therefore, using database and test results, regression analysis was carried out and we suggested new equation for splitting and flexural tensile strength of steel fiber reinforced ultra-high strength concrete.

Keywords : steel fiber reinforced ultra-high strength concrete, splitting strength, flexural strength, regression analysis

1. 서 론

콘크리트는 낮은 인장강도에 의해 인장응력하에서 쉽게 균열이 발생하는 재료로 알려져 있다. 이는 콘크리트가 보유한 낮은 인장강도에 의한 것으로 철근콘크리트 구조의 성립 이후 해당 문제를 해결하기 위한 많은 노력이 이어져왔다. 최근 콘크리트의 낮은 인장강도에 의해 발생하는 문제를 해결하기 위해 콘크리트의 인장강도를 증진시키고자하는 노력이 진행되고 있으며, 이는 매트릭스의 고강도화와 강섬유의 혼입을 통해 이루어지고 있다.

현행설계기준¹⁾에 의해 철근콘크리트 구조물을 설계할 때 콘크리트의 압축강도가 주요 설계 인자가 된다. 그러나 최근 콘크리트와 철근의 다양성 및 강도의 증가에 따

라 성능기반설계가 사용되면서 콘크리트의 압축강도 뿐만 아니라 다른 기계적 특성을 필요로 하는 경우가 많아지고 있는 추세이다. 특히 섬유가 혼입된 고강도 콘크리트를 사용할 때에는 이러한 성질들에 대한 평가가 필수적으로 수반되어야 한다. 일반적으로 성능기반설계에 사용되는 섬유로 보강된 고강도 콘크리트의 기계적 성질로는 인장강도와 응력-변형률 관계이다.

콘크리트의 인장강도는 일반적으로 직접인장시험, 쪼갬인장강도시험²⁾ 그리고 휨인장강도시험³⁾을 통해 결정한다. 그러나 직접인장강도시험은 시험방법의 다양성과 시험장치의 특수성 때문에 시험 결과의 분산이 큰 편이다. 이에 따라 철근콘크리트구조물의 설계에는 표준기판에서 정해놓은 쪼갬인장강도와 휨인장강도 시험법에 의거한 값을 사용한다. 또한 구조설계기준과 섬유보강콘크리트와 고강도콘크리트의 기 수행된 연구결과⁴⁾에 따르면 쪼갬인장강도와 휨인장강도는 콘크리트의 압축강도 제곱근 또는 세제곱근에 회기분석 등에 의해 결정된 계수를

*Corresponding author E-mail : chk7796@kyungnam.ac.kr

Received November 4, 2014, Revised January 7, 2015,

Accepted January 14, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

급하여 결정하는 것을 제안하고 있다.

그러나 해당 연구 결과들은 사용 가능한 명확한 강도의 제한이 있으므로 최근 성능기반설계기법을 사용하여 설계되는 초고강도 콘크리트 기계적 특성의 정의에는 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 섬유로 보강된 고강도 콘크리트의 설계에 적용하기 위해 현재 사용되고 있는 실험식들의 한계를 벗어나는 범주에서도 사용 가능한 기계적 특성 중 인장강도의 추정식을 도출하고자 한다.

2. 섬유보강 고강도 콘크리트의 인장강도

섬유보강콘크리트와 고강도콘크리트의 압축강도에 기반한 인장강도의 추정에 대한 기존 연구 결과를 분석하면 다음과 같다.

2.1 고강도콘크리트의 인장강도

고강도콘크리트의 쪼갬인장강도와 휨인장강도에 대한 추정식은 여러 연구자들에 의해 제안되었으며 Table 1과 2에 각각 정리하여 나타내었다.

콘크리트의 인장강도로 대변되는 두 지표는 모두 콘크리트 압축강도에 대한 지수함수 형태로 결정되는 것을

Table 1 Splitting strength estimation [MPa]

Researcher	Equation	Limitation
Carrasquillo ⁵⁾	$f_{sp} = 0.59f_c'^{0.5}$	$21 < f_c' < 83$
Mokhtarzadeh ⁶⁾	$f_{sp} = 0.32f_c'^{0.63}$	$60 < f_c' < 100$
Nihal Arıoglu ⁷⁾	$f_{sp} = 0.39f_c'^{0.63}$	$f_c' < 117$
M.F.M. Zain ⁸⁾	$f_{sp} = \frac{f_c'}{0.10(f_c') + 7.11}$	$41 < f_c' < 118$
Oluokun ⁹⁾	$f_{sp} = 0.21f_c'^{0.7}$	$f_c' < 62$
Ahmad ¹⁰⁾	$f_{sp} = 0.46f_c'^{0.55}$	$f_c' < 84$
ACI318-11 ¹¹⁾	$f_{sp} = 0.59f_c'^{0.5}$	$21 < f_c' < 83$
NZS3101 ¹²⁾	$f_{sp} = 0.36f_c'^{0.5}$	$25 < f_c' < 100$

f_{sp} : splitting strength of concrete(MPa)

f_c' : characteristic compressive strength of concrete(MPa)

Table 2 Flexural strength estimation [MPa]

Researcher	Equation	Limitation
Carrasquillo ⁵⁾	$f_r = 0.94f_c'^{0.5}$	$21 < f_c' < 83$
Burg ¹³⁾	$f_r = 1.03f_c'^{0.5}$	$69 < f_c' < 138$
Khayat ¹⁴⁾	$f_r = 0.23 + 0.12f_c' - 2.18 \times 10^{-4}(f_c')^2$	$45 < f_c' < 110$
Ahmad ¹⁰⁾	$f_r = 0.44f_c'^{2/3}$	$f_c' < 84$
ACI318-11 ¹¹⁾	$f_r = 0.62f_c'^{0.5}$	$21 < f_c' < 83$
NZS3101 ¹²⁾	$f_r = 0.60f_c'^{0.5}$	$25 < f_c' < 100$

f_r : modulus of rupture(MPa)

f_c' : compressive strength of concrete(MPa)

확인할 수 있으며 이 지수들은 0~1 사이의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 많이 사용되는 값은 1/2이나 2/3인 것으로 나타나고 있으나, 연구결과가 고강도 콘크리트를 반영해갈수록 지수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, ACI318-11에서 정의하고 있는 파괴계수는 KCI에서 제안하고 있는 계수와 같은 개념으로 도출되었으며 유사한 값이므로 국내 설계기준의 값을 대변하는 것으로 판단하였다.

2.2 섬유보강콘크리트의 인장강도

섬유보강콘크리트의 쪼갬인장강도와 휨인장강도에 대한 추정식 또한 여러 연구자들에 의해 제안되었으며 Table 3와 4에 각각 정리하여 나타내었다.

섬유로 보강되어 있지 않은 콘크리트와 달리 섬유로 보강된 콘크리트의 인장강도 추정을 위한 제안식들은 두 가지 형태로 분류되는 것을 확인할 수 있다. 강섬유로 보강되어 있지 않은, 일반적인 콘크리트와 같이 콘크리트의 압축강도만으로 정의하는 경우가 있으며, 강섬유의 영

Table 3 Splitting strength estimation

Researcher	Equation	Limitation
Narayannan ¹⁵⁾	$f_{spf} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F}$ $F = (L/D)\rho_f d_f$	-
Wafa ¹⁶⁾	$f_{spf} = 0.58\sqrt{f_c'} + 3.02V_f$	$f_c' < 100$
Song ¹⁷⁾	$f_{spf} = 0.63\sqrt{f_c'} + 3.01V_f - 0.02V_f^2$	$f_c' < 100$
Thomas ¹⁸⁾	$f_{spf} = 0.63\sqrt{f_c'} + 0.288RI\sqrt{f_c'} + 0.052RI$	$f_c' < 85$
Ramadoss ¹⁹⁾	$f_{spf} = 0.485f_c'^{0.56}$	-

f_{spf} : splitting strength of fiber reinforced concrete (MPa), f_{cuf} : cube strength of fiber concrete (MPa), F : fiber factor, L : length of the fiber (mm), D : diameter of the fiber (mm), ρ_f : volume fraction of fibers, d_f : bond factor

Table 4 Flexural strength estimation

Researcher	Equation	Limitation
Wafa ¹⁶⁾	$f_{rf} = 0.99\sqrt{f_c'} + 3.83V_f$ (150x150x530 prism) $f_{rf} = 1.03\sqrt{f_c'} + 5.56V_f$ (100x100x350 prism)	$f_c' < 100$
Song ¹⁷⁾	$f_{rf} = 0.69\sqrt{f_c'} + 3.43V_f + 0.32V_f^2$	$f_c' < 100$
Thomas ¹⁸⁾	$f_{rf} = 0.97\sqrt{f_c'} + 0.295RI\sqrt{f_c'} + 1.117RI$	$f_c' < 85$
Ramadoss ¹⁹⁾	$f_{rf} = 0.45f_c'^{0.67}$	-

f_{rf} : modulus of rupture of fiber reinforced concrete (MPa), f_{cuf} : cube strength of fiber concrete (MPa), f_c' : characteristic compressive strength of concrete (MPa), RI : Reinforcing Index ($V_f L/D$), L : length of the fiber (mm), D : diameter of the fiber (mm), V_f : volume fraction of fibers, d_f : bond factor

향을 반영하기 위한 새로운 변수를 적용하는 경우도 있다. 이 경우 콘크리트의 인장강도를 결정하는 요인은 섬유 응력전달능력이므로 섬유의 형태와 혼입량을 반영하기 위해 보강지수(RI : Reinforcing Index)를 사용하여 보강된 섬유의 양에 의거하여 인장강도를 결정하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 보강지수는 섬유의 혼입량과 섬유의 형상비를 반영한 지수로 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$RI = V_f L / D \quad (1)$$

여기서 V_f 는 섬유의 혼입량, L 은 섬유의 길이, D 는 섬유의 지름을 의미하며, 해당 보강지수는 무차원화되어 있는 값이다. 섬유의 보강량을 반영한 인장강도의 결정식 또한, 일반적인 콘크리트의 인장강도를 결정하기 위한 식과 같이 회기분석을 통해 결정되므로, 여러 연구자들에 의해 다양한 형태의 추정식이 제안되었다. 기존에 수행된 연구에 따르면 보강지수에 대한 1차 또는 2차식의 형태를 가지며 특수한 경우 지수함수의 형태로 섬유의 영향을 반영하게 된다. 그러나 섬유의 영향을 반영하는 추정식의 모든 경우 매트릭스의 인장강도에 대한 섬유 영향의 대수함수로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

3. 초고강도 강섬유보강콘크리트의 기계적 성질

고강도 콘크리트와 섬유보강콘크리트의 기계적 성질에 대한 기존 연구들의 검토 결과 명확한 강도 제한이 존재하고 있으며 해당 제한치를 벗어날 경우 큰 폭의 편차가 나타나게 될 것으로 예상된다.

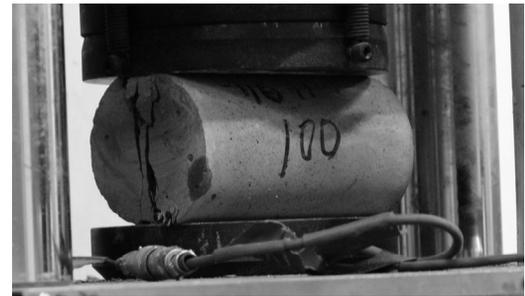
따라서 본 연구에서는 현재 설계기준 또는 연구결과에서 정하고 있는 강도 제한을 벗어났을 경우 기존 콘크리트 인장강도 추정식의 적합성을 평가하고, 100 MPa 이상에서의 초고강도 콘크리트의 특성을 반영한 추정식을 도출하기 위해 80~200 MPa 사이의 압축강도를 보유한 콘크리트의 압축 및 간접적 인장강도 시험을 수행하였다.

3.1 실험계획

기존 연구결과에 대한 검토로부터 도출된 결과에 따라 본 연구에서는 매트릭스의 압축강도와 섬유의 혼입량을 주요 변수로 설정하였다. 압축강도의 범위는 80, 100, 150, 200 MPa로 설정하였으며, 최근 초고강도 콘크리트의 제작에 빈번하게 적용되며 상용화에 이르고 있는 RPC의 개념을 적용하여 제작하였다. 섬유의 혼입량은 기존 연구결과²⁰⁾로 나타난 사용처별로 일반적으로 구분되는 섬유의 혼입량에 근거하여 0.5%, 1.0%, 2%의 부피비로 혼입하는 것으로 결정하였다. 각각의 배합별로 $\phi 100 \times 200$ (mm) 원주형 공시체를 압축시험용으로 세 개 제작하였으며, 쪼갬인장강도 시험을 위해 세 개를 추가 제작하였



(a) Compressive Strength Test



(b) Splitting Strength Test



(c) Flexural Strength Test

Fig. 1 Test Setup

Table 5 Material properties of steel fiber

Type	Yield strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Length (mm)	Diameter (mm)
Straight	2600	203	13	0.2

다. 또한 휨인장강도 시험을 위해 500x100x100 (mm) 직육면체 시험체를 세 개 제작하였다. 각 시험체의 시험은 각각 KS F 2405²¹⁾, KS F 2423 그리고 KS F 2408에 의해 수행되었다. 각 시험체의 설치 상황과 함께 일반적인 파괴 상황을 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 강섬유의 제원을 Table 5에 정리하여 나타내었으며, 사용된 콘크리트의 배합비를 매트릭스가 보유한 압축강도에 따라 Table 6에 정리하여 나타내었다. Table 6에 나타난 바와 같이 초고강도의 발현을 위해 매트릭스의 물-결합재비가 보통콘크리트에 비해 매우 낮은 상태이다. 이와 함께 강섬유의 혼입에 의해 발생할 수 있는 시공연도의 상실을 방지하기 위해 배합비에 나타난 바와 같은 초고성능감수제를 사용하였다.

Table 6 Mix proportion

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

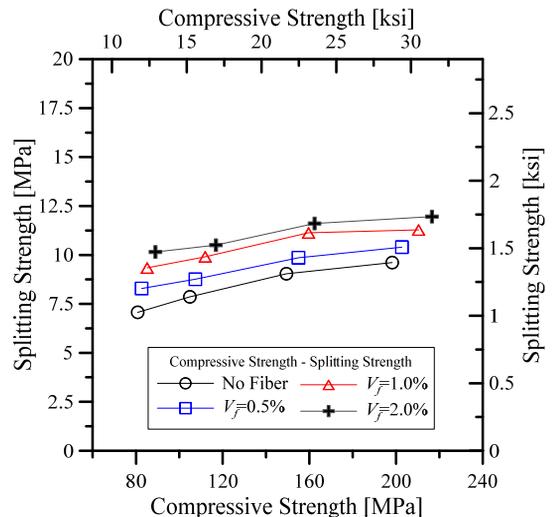
Table 7 Test Results(mean value)

ID	V_f [%]	E_c [MPa]	f_{co} [MPa]	f_{sp} [MPa]	f_r [MPa]
80-0	0	32,970	80.79	7.07	10.95
80-f0.5	0.5	30,597	82.60	8.29	12.54
80-f1.0	1.0	34,097	85.17	9.34	14.55
80-f2.0	2.0	34,768	89.01	10.15	16.23
100-f0	0	36,233	104.86	7.86	11.54
100-f0.5	0.5	34,376	107.39	8.76	13.51
100-f1.0	1.0	38,732	111.93	9.91	15.02
100-f2.0	2.0	38,099	116.92	10.50	16.50
150-0	0	42,023	149.40	9.04	13.97
150-f0.5	0.5	41,203	154.96	9.86	15.24
150-f1.0	1.0	42,365	159.60	11.13	17.24
150-f2.0	2.0	43,222	162.40	11.61	18.43
200-0	0	44,283	198.21	9.61	15.11
200-f0.5	0.5	45,019	202.70	10.4	16.24
200-f1.0	1.0	46,734	210.40	11.28	18.11
200-f2.0	2.0	49,515	216.52	11.96	19.04

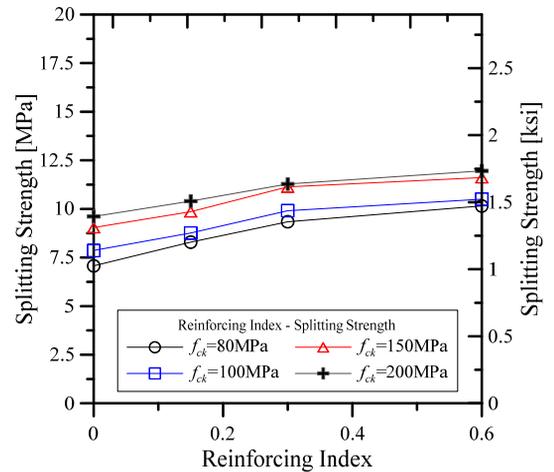
V_f : volume fraction of steel fiber (%), E_c : Elastic modulus (MPa), f_{co} : compressive strength of concrete (tested value, MPa), f_{sp} : splitting strength of concrete (MPa), f_r : flexural strength of concrete (MPa)

3.2 쪼갬인장강도

원주형 공시체를 사용하여 수행한 쪼갬인장강도 시험 결과를 Table 7에 압축강도 시험 결과와 함께 나타내었다. 강섬유로 보강되지 않은 시험체는 초기 균열의 발생과 함께 파괴에 이르는 것으로 나타났으나 강섬유로 보강되어 있을 경우 중앙부에 균열 발생 이후 균열이 확산되며 파괴에 이르는 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 섬유 혼입률이 높아지면서 더 확연히 나타났으나, 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 균열이 쉽게 확산되지 않는 것으로 나타났다.



(a) Effect of compressive strength



(b) Effect of Reinforcing Index

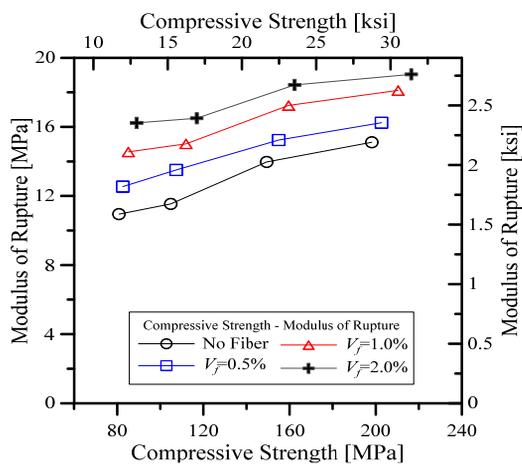
Fig. 2 Splitting Strength

콘크리트의 압축강도가 쪼갬인장강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 Fig. 2에 시험 결과로 나타난 콘크리트의 압축강도-쪼갬인장강도 관계를 나타내었다. 강섬유의 인장강도의 증진에 직접적인 영향을 주게되므로 강섬유의 혼입량을 고려하여 나타내었다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 초고강도 영역에서 큰 인장강도의 증진률을 보

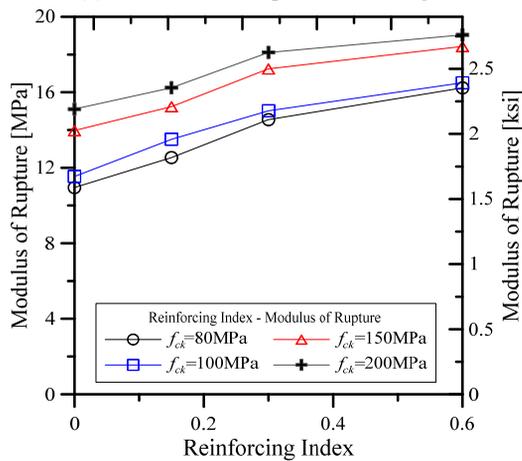
여주지 못하고 있다. 이는 압축강도가 높아질수록 인장강도의 증진률이 낮아진다는 기존의 연구결과 또는 추정식의 형태를 확장하여 볼 수 있는 가능성을 의미한다. 섬유유 보강량은 식 (1)에 나타난 바와 같이 섬유보강지수 RI를 사용하여 나타낼 수 있으며, 섬유보강지수 증가에 따른 쪼갠인장강도의 증진에 대해 Fig. 2(b)에 따로 나타내었다. 섬유보강지수가 0.3까지는 인장강도의 증진이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 섬유보강지수가 0.3이상일 경우 섬유의 보강이 선형적인 강도 증진에 영향을 미치는 정도가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 강섬유보강 초고강도콘크리트의 쪼갠인장강도를 결정함에 있어서 콘크리트의 압축강도는 기존의 방식과 같은 지수함수를 사용하고, 섬유보강량의 경우 1차함수 또는 지수함수의 형태로 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 휨인장강도

현행설계기준에 따르면 콘크리트의 휨인장강도는 쪼갠인장강도와는 달리 콘크리트 구조물의 설계에 있어서 직접적인 영향을 미치는 요소가 된다. 이를 위해 휨인장



(a) Effect of compressive strength



(b) Effect of Reinforcing Index

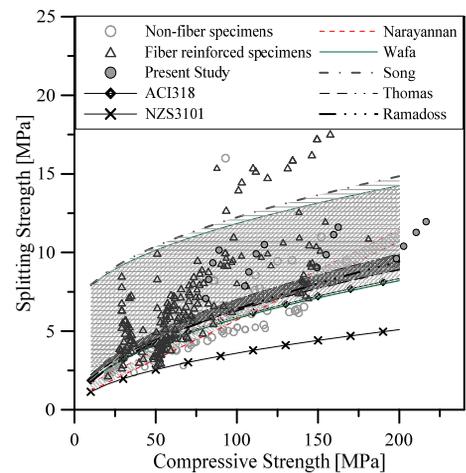
Fig. 3 Flexural Strength(Modulus of Rupture)

강도는 파괴계수로 표현되어 사용되고 있다. 섬유보강 초고강도 콘크리트의 파괴계수를 평가하기 위한 3점 휨 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 파괴계수 또한 쪼갠인장강도와 유사한 증진율을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. 강도의 절대량은 쪼갠인장강도에 대해 평균적으로 1.55배가 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트의 압축강도에 대해서는 쪼갠인장강도와 유사한 증진률을 보이고 있는 것으로 확인되었으나, Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 강섬유의 혼입률 증가에 따른 증진률은 쪼갠인장강도에 비해 더 큰 비율의 선형성을 보유한 것을 확인할 수 있었다. 이는 섬유의 분산성이 거푸집과 가까워짐에 따라 방향성을 가지게 되어 나타나는 현상으로 생각된다.²²⁾

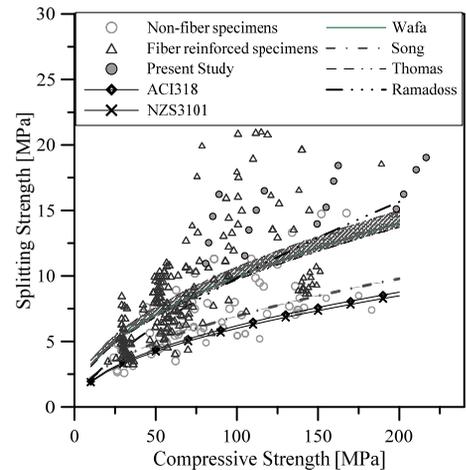
4. Database를 통한 인장강도의 추정

4.1 Database에 따른 기존 추정식의 신뢰성 평가

넓은 범위의 콘크리트 강도 영역에서 간단하게 사용 가능한 기계적 성질의 추정식과 응력-변형률 관계를 도출하기 위해 본 연구에서는 별도로 수행한 실험 결과와



(a) Splitting Strength



(b) Flexural Strength

Fig. 4 Tensile Strength according to the Compressive Strength

Table 8 Database

Researcher	f_{co} [MPa]	f_{sp} [MPa]	f_r [MPa]	V_f (%)	Fiber Type	RI	# of specimens	
							splitting	flexural
Vanderbilt ²³⁾	20~28	2.0~3.0	-	0	-	-	15	0
Sarsam ²⁴⁾	78~110	5.5~15.4	5.7~19.0	0~2.0	Straight	0~1.3	6	6
Ramirez ²⁵⁾	48~118	4.8~5.3	4.6~6.5	0	-	-	12	16
Pandor ²⁶⁾	54~75	2.8~5.0	-	0	-	-	10	0
Thomas ²⁷⁾	30~77	3.9~8.0	5.2~11.2	0~1.5	Hook	0~0.8	12	12
Voo ²⁸⁾	122~140	-	13.0~19.7	1~1.5	Straight	0.75~1.5	0	8
Mansur ²⁹⁾	20~34	2.1~3.6	3.5~4.6	0~1.0	Hook	0~0.6	6	6
Narayanan ³⁰⁾	36~80	2.4~9.5	-	0~3.0	Crimped	0.2~2.3	23	0
Oh ³¹⁾	25~100	-	3.7~16.1	0.4~2.0	Hook	0.3~1.6	0	32
Kwak ³²⁾	30~69	4.3~6.1	7.7~10.7	0~0.75	Hook	0~0.5	4	4
Mansur ³³⁾	26~37	3.0~7.3	2.7~5.3	0~3.0	Straight	0~1.6	21	21
Shende ³⁴⁾	42~57	2.9~4.5	7.2~10.8	0~3.0	Hook	0~2.3	30	30
Jijl ³⁵⁾	32~92	4.4~7.4	5.6~13.4	0~1.0	Crimped	0~0.8	16	16
Long ³⁶⁾	52~56	3.1~3.9	5.3~7.1	0~1.2	Straight, Hook	0~0.5	3	3
Dancygier ³⁷⁾	26~93	3.2~10.0	4.3~11.3	0~0.75	Hook	0~0.5	16	16
Ramadoss ³⁸⁾	42~74	3.9~8.5	4.0~8.5	0~1.5	Crimped	0~1.2	32	32
Al-Hassani ³⁹⁾	118~158	6.3~21.6	9.2~29.2	0~3.0	Straight	0~2.0	12	12
Khalil ⁴⁰⁾	132~151	6.2~10.4	7.4~10.7	0~1.0	Hook, Crimped	0~0.5	22	22
Ozyildirim ⁴¹⁾	213~234	20.3~24.5	-	6.0	Straight	4.5	6	-
Murthy ⁴²⁾	57~123	4~20.7	-	0~2.0	Straight	0~1.4	3	-
Graybeal ⁴³⁾	119~199	9.2~10.9	16.2~18.6	2.0	Straight	1.5	2	2
Meleka ⁴⁴⁾	67~139	5.0~12.0	6.1~30.3	0~0.5	Straight	0~0.08	18	18
Magureanu ⁴⁵⁾	102~181	6.9~20.4	7.0~22.3	0~2.0	Straight	0~1.25	4	4
Arunachalam ⁴⁶⁾	92~103	9.2~9.8	-	2.5	Straight	1.0	6	-
Tadros ⁴⁷⁾	98~119	5.4~7.6	7.1~11.3	-	-	-	5	5

f_{co} : compressive strength of concrete(tested value, MPa), f_{sp} : splitting strength of concrete(MPa), f_r : flexural strength of concrete(MPa), V_f : volume fraction of steel fiber(%), RI : reinforcing Index

Table 9 Statistical Evaluation : previously suggested equations (test value/estimated value)

Type	Researcher	Mean	Median	Standard Deviation	Variance	Coefficient of Variation	IAE	Fiber Effect
Splitting Strength	Carrasquillo ⁵⁾	1.29	1.18	0.48	0.23	0.37	31.32	Cannot Consider Fiber Effect
	Mokhtarzadeh ⁶⁾	1.36	1.24	0.45	0.21	0.33	31.92	
	Nihal Arıoglu ⁷⁾	1.11	1.02	0.37	0.14	0.33	26.44	
	M.F.M. Zain ⁸⁾	1.34	1.21	0.52	0.27	0.39	32.97	
	Oluokun ⁹⁾	1.53	1.43	0.49	0.24	0.32	36.70	
	Ahmad ¹⁰⁾	1.33	1.23	0.48	0.23	0.36	31.99	
	ACI318-11 ¹¹⁾	1.28	1.18	0.48	0.23	0.37	31.32	
	NZS3101 ¹²⁾	2.12	1.94	0.79	0.63	0.37	54.47	Considering Fiber
	Narayannan ¹⁵⁾	1.26	1.28	0.33	0.11	0.26	25.90	
	Wafa ¹⁶⁾	0.89	0.87	0.28	0.08	0.32	30.32	
	Song ¹⁷⁾	0.84	0.82	0.26	0.07	0.31	32.10	
	Thomas ¹⁸⁾	0.96	0.94	0.26	0.07	0.27	22.78	
	Ramadoss ¹⁹⁾	1.21	1.12	0.43	0.18	0.35	28.81	

Table 9 Statistical Evaluation : previously suggested equations (test value/estimated value) (Continue)

Type	Researcher	Mean	Median	Standard Deviation	Variance	Coefficient of Variation	IAE	Fiber Effect
Flexural Strength	Carrasquillo ⁵⁾	1.18	1.04	0.62	0.39	0.53	32.45	Cannot Consider Fiber Effect
	Burg ¹³⁾	1.08	0.94	0.57	0.32	0.53	31.99	
	Khayat ¹⁴⁾	1.28	1.17	0.99	0.98	0.78	32.26	
	Ahmad ¹⁰⁾	1.24	1.13	0.75	0.56	0.60	32.14	
	ACI318-11 ¹¹⁾	1.79	1.57	0.94	0.89	0.53	45.74	
	NZS3101 ¹²⁾	1.85	1.62	0.98	0.95	0.53	47.29	
	Wafa ¹⁶⁾	0.80	0.71	0.33	0.11	0.41	39.31	Considering Fiber
	Song ¹⁷⁾	1.04	0.95	0.44	0.19	0.42	31.97	
	Thomas ¹⁸⁾	0.91	0.83	0.38	0.15	0.42	29.67	
Ramadoss ¹⁹⁾	1.20	1.09	0.72	0.52	0.60	31.43		

함께 기 수행된 재료시험 결과들을 수집하여 추정식을 결정하는 데에 사용하였다. 수집된 시험 결과는 쪼갬인장강도 추정을 위한 시험체 284개, 휨인장강도 시험체 265개로 구성되어 있다. 콘크리트의 압축강도 범위는 20~134 MPa인 것으로 나타났으며 섬유 혼입량은 0~6%의 범위인 것으로 나타났다. 섬유의 종류는 강섬유로 한정하고 Straight, Hooked-end, Crimped로 구분하여 검토하였다. Table 8에 Database에 대한 정보를 요약하여 나타내었으며 Table 9에 기존 연구자들이 제안한 추정식들의 신뢰성에 대해 분석하여 나타내었다. 본 연구에서는 평균값, 표준편차, 분산, 변동계수 그리고 적분절대오차(Integral Absolute Error, IAE)를 통계지표로 사용되었다. 여기서 IAE는 다음 식을 통해 결정하였다.

$$IAE = \sum \frac{[(X_i - Y_i)^2]^{0.5}}{\sum X_i} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서 X_i 는 관측값, Y_i 는 추정값을 의미한다. 통계량 분석과 함께 추정치의 분산정도를 확인하기 위해 쪼갬인장강도와 휨인장강도의 발현 정도를 콘크리트의 압축강도에 의거하여 Fig. 4에 나타내었다. 압축강도의 고강도화가 진행됨에 따라 인장강도의 분산정도가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 강섬유 보강 콘크리트에 대한 기존 연구자들의 추정식을 Fig. 4에 실험결과와 함께 나타내었다. 고강도화에 따라 인장강도의 분산정도가 높아지는 것과 같이, 고강도 콘크리트에 대해서는 추정식의 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

특히, 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 초고강도 영역에서, 섬유의 보강정도를 고려하지 않은 추정식의 경우 모두 ACI에서 제시하는 설계를 위한 추정식과 같이 안전측의 추정을 하는 것으로 나타났다. 그러나 섬유의 보강을 고려한 추정식의 경우 불안전측의 추정값이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 콘크리트의 압축강도가 높아지면서 더 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수

있었다. 이는 기존의 추정식이 섬유의 보강효과를 너무 크게 고려하는 것으로 판단된다.

이러한 현상은 통계량에서도 확인할 수 있다. Table 9에서 평균값의 경우 섬유의 영향을 고려하지 않은 실험체는 모두 안전측의 추정을 하는 것으로 나타나고 있으나, 섬유의 영향을 고려한 추정식에 있어서는 Narayanan¹⁵⁾과 Ramadoss¹⁹⁾의 추정식을 제외하고는 모두 불안전측의 추정을 하고 있는 것으로 확인할 수 있다. 표준편차와 분산에 있어서는 섬유로 보강하지 않은 추정식이 더 낮은 값을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, IAE 값 또한 섬유의 보강효과를 고려한 식이 상대적으로 더 낮은 값을 보이며 높은 정확도를 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

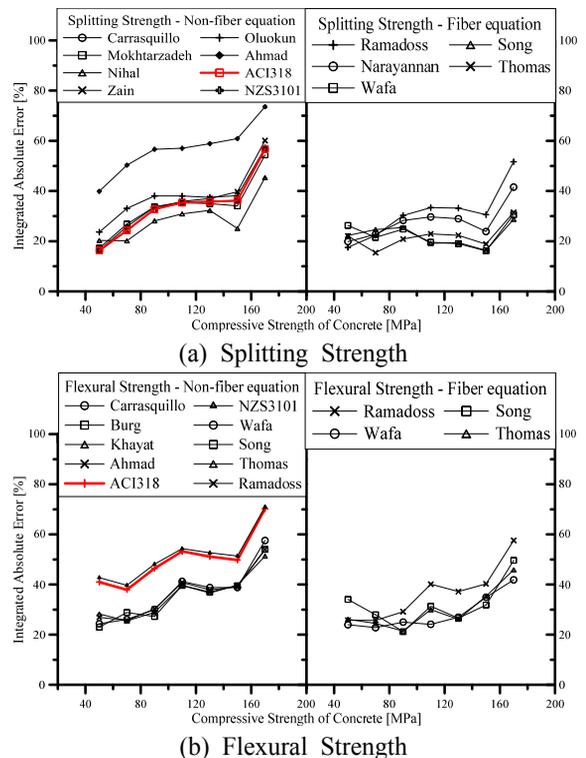


Fig. 5 IAE distribution with Compressive Strength

기존 추정식의 초고강도 섬유보강콘크리트에 대한 적합성을 검토하기 위해, 콘크리트의 압축강도에 의거하여 IAE를 검토하였다. 검토 대상은 Table 2와 4의 섬유보강 콘크리트에 대한 인장강도 추정식으로 정하였다. 검토 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 초고강도 콘크리트 영역에서 IAE 증가를 확인할 수 있었다.

섬유의 영향을 고려하지 않은 추정식의 경우 높은 IAE와 함께 높은 증가율을 보이고 있는 것을 확인할 수 있으며, 섬유의 영향을 보유한 경우 고강도화에 따른 유사한 증가경향이 나타나고 있으나 일반적으로 고강도 콘크리트로 간주되는 80 MPa 이하의 압축강도 영역에서는 상대적으로 낮은 IAE를 확인할 수 있었다. 이는 기존의 연구 결과가 100 MPa 이상의 초고강도 영역에서 수행된 실험 결과를 적용하지 않은 상태이기 때문인 것으로 판단된다. IAE는 오차의 절대량의 크기를 의미하는 것이므로, 평균값과 함께 검토해 본 결과, 콘크리트의 압축강도가 100 MPa 이상일 경우 현재까지 제시되어 있는 식은 사용이 어려울 것으로 판단된다.

4.2 쪼갬인장강도 및 휨인장강도의 비선형 회기분석

각 추정식들에 대한 통계치를 분석한 결과, 대부분의 추정식이 해당 추정식의 도출에 사용된 데이터의 범위를 벗어날 경우 큰 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 섬유의 영향을 반영하지 않을 경우 오차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 고강도 및 섬유의 보강효과를 동시에 반영할 수 있는, 압축강도를 기반으로 한 쪼갬인장강도 및 휨인장강도의 추정식을 수집한 데이터를 기반으로 한 비선형 회기분석을 통해 도출하였다.

비선형 회기분석을 통해 고강도 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트에 적용이 가능한 추정식의 도출을 위해서는 주요 독립변수의 결정과 함께 기본식의 형태를 결정해주어야 한다. 콘크리트의 인장강도에 대한 기존 추정식의 형태를 검토한 결과, 콘크리트 압축강도의 영향은 식 (3)에 나타난 바와 같이, 압축강도의 제곱근 또는 특정한 지수와 함께 특정 상수를 곱하여 결정할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

$$f_t = a(f_c')^b \quad (3)$$

여기서, f_{sp} 는 콘크리트의 쪼갬인장강도, f_c' 는 콘크리트의 압축강도이며, a 와 b 는 회기분석에 의해 도출되는 상수이다.

강섬유의 영향은 일반적으로 두 가지 경우로 분류된다. 섬유가 보강되지 않은 콘크리트 매트릭스의 강도에 대한 배율이 되는 경우와 섬유의 독립적인 강도 증가분이 더해지는 경우이다. 후자의 경우 섬유의 보강이 되어

Table 10 Results of Regression Analysis

ID	Splitting Strength			Flexural Strength		
	Mean	S.D	IAE	Mean	S.D	IAE
R1	$f_{sp} = 0.83f_{ck}^{0.47}$			$f_r = 1.75f_{ck}^{0.40}$		
	1.14	0.40	27.99	1.09	0.76	31.97
R2	$f_{sp} = 0.40f_{ck}^{0.70}$			$f_r = 0.32f_{ck}^{0.80}$		
	0.73	0.33	34.44	0.95	0.39	32.47
R3	$f_{spf} = 0.83f_{ck}^{0.47} \times \left(\frac{-2}{1+(RI/8)^{0.8}} + 3 \right)$			$f_{rf} = 1.75f_{ck}^{0.40} \times (1+0.35RI)$		
	0.99	0.28	20.14	1.01	0.31	28.76

f_t : tensile strength of concrete[MPa], f_{ck} : Compressive strength of concrete[MPa], RI : Reinforcing Index, S.D : Standard Deviation, IAE : Integrated Absolute Error(%)

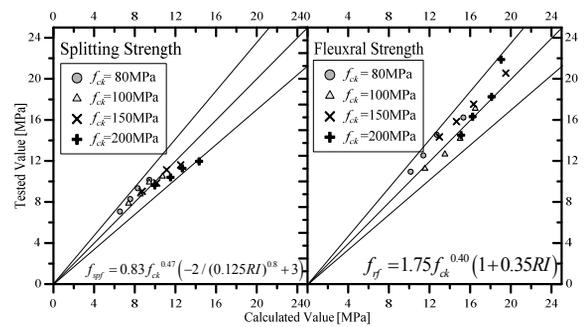


Fig. 6 Evaluation of Proposed Model

있지 않을 때에 보강효과가 없는 상태로 만들기가 어려우므로 본 연구에서는 고려하지 않기로 하였다.

이에 따라 섬유의 영향을 고려하기 위한 회기식의 형태는 다음 식 (4)와 같은 형태가 된다.

$$f_t = af_{ck}^b(c+dRI+eRI^2) \quad (4)$$

여기서, RI 는 식 (1)을 통해 결정되는 값이다. 기존의 추정식은 섬유의 부피비를 사용하는 경우가 많이 있었으나, 섬유의 형상비가 미치는 영향을 반영하기 위해 RI 를 사용하였다. 섬유의 보강량이 0일 경우 괄호 내의 값이 1이 되어야 하므로 괄호 안의 식에서 상수 c 는 1로 고정하여, 다항식의 형태로 회기분석을 수행하였다.

Table 10에 식 (3)과 (4)의 회기분석 결과를 나타내었다. 특히, 식 (3)을 사용한 회기분석은 강섬유를 보유하지 않은 경우와 강섬유를 보유한 경우로 나누어 평가하였다.

회기분석에 의해 도출된 회기식을 사용하여 쪼갬인장강도와 휨인장강도를 추정된 결과 기존 추정식에 비해 높은 정확도를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. Table 10의 R1과 R2의 경우 압축강도와 섬유의 영향을 별도로 고려하지 않아 높은 수준의 정확도를 기대하기

어려웠으나 콘크리트의 압축강도와 섬유 효과의 동시 고려한 R3식을 검토한 결과 기존 추정식에 비해 높은 수준의 정확도를 기대할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 추정식들이 섬유의 보강효과를 단순히 중첩함에 따라 발생하는 오차를 감소시키고 초고강도 콘크리트의 영향을 반영해주었기 때문인 것으로 판단된다. 다만 Fig. 6에 나타난 본 연구에서 수행된 실험 결과에서 보이는 바와 같이 200 MPa 급에서 쪼갬인장강도의 추정이 불안전측으로 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 200 MPa 급의 콘크리트 제작에 있어서는 steam curing, 매트릭스 구성요소의 차이 등과 같은 더욱 많은 변수가 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구 결과에서 제안된 추정식은 150 MPa 이하의 콘크리트에 대한 간접 인장강도 추정에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유로 보강된 초고강도 콘크리트의 압축강도와 인장강도 사이의 관계를 평가하기 위해 재료 시험을 수행하였으며, 기존 연구자들의 시험 결과 수직을 통해 기존 추정식들의 적합성 평가와 초고강도 영역에서 사용 가능한 인장강도 산정식을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초고강도 섬유보강콘크리트의 쪼갬인장강도 시험 결과 압축강도의 증가는 인장강도가 증가하는 직접적인 원인인 것으로 나타났으며, 인장강도의 증가 비율은 압축강도의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 섬유의 보강효과 또한 인장강도의 증진에 비례하는 것으로 나타나고 있으나, 그 증진률은 섬유보강량의 증가와 함께 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 초고강도 섬유보강콘크리트의 휨인장강도 시험 결과 쪼갬인장강도와 유사한 증진형태를 보이고 있었다. 그러나 평균적으로 1.55배의 높은 강도를 보유하고 있었으며, 섬유보강비에 대해서는 더 큰 기울기의 선형성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 기존 연구결과를 통해 수집한 쪼갬인장강도 및 휨인장강도 시험 결과를 기존 인장강도 추정식을 사용하여 평가해 본 결과, 섬유의 영향을 고려하지 않은 경우 하한치에 대한 추정을 안전하게 하는 것으로 나타났다. 반면 섬유의 영향을 고려한 경우 섬유의 보강효과를 과하게 간주하는 경향이 있음이 확인되었다.
- 4) 기존 추정식의 초고강도 영역에서의 사용에 대한 적합성 판단을 위해 통계분석을 수행한 결과, 섬유의 보강정도를 고려하는 추정식의 경우 100 MPa 미만에서는 사용하기에 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나, 100 MPa 이상의 압축강도 영역에서 오차의 크기가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 콘크리트의 압축강도가 100 MPa 이상일 경우 현재까지 제시되어 있는 식은 사용이 어려울 것으로 판단된다.

- 5) 본 연구에서 수행된 시험 결과와 수집된 시험 결과를 바탕으로 회기식을 도출하였다. 기존의 추정식보다 높은 정확도를 가지고 있는 것으로 나타나고 있으나, 150 MPa를 초과하는 콘크리트의 경우 배합비의 다양성과 양생방법의 다양성에 의해 그 정확도가 비교적 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 차후 초고강도 콘크리트에 대한 표준화된 배합방안이 도출되기 전까지는 배합비의 영향이나 양생조건 등을 고려할 수 있는 별도의 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

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, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, pp. 600.
2. KS F 2423, Standard test method for splitting strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2011, pp. 1-12.
3. KS F 2408, Standard test method for flexural strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2010, pp. 1-9.
4. ACI 363. Report on high strength concrete. Report ACI 363R-10, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute, 2010, pp. 1-65.
5. Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H. and Slate, F. O., "Properties of high strength concrete subjected to short-term load", *ACI Journal*, Vol.78, No.2, 1981, pp. 171-178.
6. Mokhtarzadeh, A. and French, C. "Mechanical Properties of High-Strength Concrete with Consideration for Precast Applications", *ACI Materials Journal*, Vol.97, No.2, Mar.-Apr., 2000, pp. 136-148.
7. Nihal Aruoglu, Z. Canan Girgin, and Ergin Aruoglu, "Evaluation of Ratio between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for Concretes up to 120 MPa and its Application in Strength Criterion", *ACI Materials Journal*, Vol.103, No.1, Jan.-Feb., 2006, pp. 18-24.
8. Zaina, M. F. M., Mahmudb, H. B. and Faizala, Ade Ilhama, M., "Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 2002, pp. 1251-1258.

9. Francis Oluokun, "Prediction of Concrete Tensile Strength from its Compressive Strength: an Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.3, May.-Jun. 1991, pp. 302-309.
10. Ahmad, S. H. and Saha, S. P., "Structural properties of high strength concrete and its applications for precast prestressed concrete", *PCI Journal*, Vol.30, No.6, 1985, pp. 97-123.
11. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2011, pp. 391.
12. NZS3101, NZS 3101:2006, Concrete Structures Standard, Standards New Zealand, Wellington, pp. 232.
13. Burg, R. G. and Ost, B. W., "Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes", RD 104-DIT, *Portland Cement Association*, 1992, pp. 55.
14. Khayat, K., Bickley, J. and Hooton, R. D., "High-strength concrete properties derived from compressive strength values", *Cement Concrete and Aggregates*, Vol.17, No.2, December, 1995, pp. 126-133.
15. 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.
16. Faisal, F. Wafa and Samir A. Ashour, "Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete", *ACI Material Journal*, Vol.89, No.48, 1992, pp. 449-455.
17. 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.
18. Job Thomas and Ananth Ramaswamy, "Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No.5, May, 2007. pp. 385-392.
19. Ramadoss, P. and Nagamani, K., "Tensile Strength and Durability Characteristics of High-Performance Fiber Reinforced Concrete", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol.33, No.2B, 2008, pp. 307-319.
20. Antoine, E. Naaman, "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, November 2003, pp. 241-252.
21. KS F 2405, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2010. pp. 1-16.
22. Gettu, R., Gardner, D. R., Saldivar, H. and Barragfin, B. E., "Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens", *Materials and Structures* 38, 2005, pp. 31-37.
23. M. Daniel Vanderbilt, Shear strength of continuous plates, *Journal of the Structural division, Proceedings of the ASCE*, May, 1972, pp. 961-973.
24. Kaiss F. Sarsam, Ihsan A.S. Al-Shaarbaf, 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.
25. J. A. Ramirez, Gerardo Aguilar, Shear Reinforcement Requirements for High-Strength Concrete Bridge Girders, Joint Transportation Research Project, Project No. C-36-56III, Purdue University, 2005, pp. 127.
26. 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.
27. 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.
28. Yen Lei Voo, Wai Keat Poon and Stephen J. Foster, Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh-Performance Concrete Beams without Stirrups, *Journal of Structural Engineering*, Vol.136, No.11, November 1, 2010, pp. 1393-1400.
29. By M. A. Mansur, M. ASCE, K. C. G. Ong, and P. Paramasivam, "Shear Strength of Fibrous Concrete Beams Without Stirrups", *Journal of Structural Engineering*, Vol.112, No.9, September, 1986. pp. 2066-2079.
30. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol.84, No. 3, May-June, 1987, pp. 216-227.
31. Oh, Y. H., "Evaluation of Flexural Strength for Normal and High Strength Concrete with Hooked Steel Fibers", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.4, August, 2008, pp. 531-539.
32. Kwak, Y. K., Eberhard, M. O., Kim, W. S. and Kim, J., "Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.4, July-August 2002, pp. 530-538.
33. Mansur, M. A. and Paramasivam, P., "Steel fibre reinforced concrete beams in pure torsion", *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.4, No.1, 1982, pp. 39-45.
34. Shende, A. M., Pande, A. M. and Gulfam Pathan, M., "Experimental Study on Steel Fiber Reinforced Concrete for M-40 Grade", *International Refereed Journal of Engineering and Science*, Vol.1, No.1, 2012, pp. 43-48.
35. van Jijl, G. P. A. G. and Zeranka, S., The impact of Rheology on the mechanical performance of steel fiber reinforced concrete, *HPFRCC 6*, 2012, pp. 59-66.
36. Nguyen Minh Long, Rovnak Marian, Investigation of Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete, The 3rd ACF International Conference – ACF/VCA 2008, pp. 854-861.
37. Avraham N. Dancygier, Amnon Katz, Uri Wexler, Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers, *Materials and Structures* Vol.43, 2010, pp. 839-856.
38. Ramadoss, P., "Modeling for the evaluation of strength and

- toughness of high performance fiber reinforced concrete”, *Journal of Engineering Science and Technology*, Taylor’s University, Vol.7, No.3, 2012, pp. 280-291.
39. Hisham M. Al-Hassani, Wasan Ismail Khalil and Lubna S. Danha, “Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete (RPC) with Various Steel Fiber and Silica Fume Contents”, *Eng. & Tech. Journal*, Vol.31, Part (A), No.16, 2013, pp. 3090-3108.
 40. Wasan, I. Khalil and Tayfur, Y. R., “Flexural Strength of Fibrous Ultra High Performance Reinforced Concrete Beams”, *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.8, No.3, MARCH 2013, pp. 200-214.
 41. Celik Ozyildirim, Evaluation of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, Virginia Center for Transportation Innovation and Research, FHWA/VCTIR 12-R1, 2011, pp. 20.
 42. A. Ramachandra Murthy, 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.
 43. Benjamin A. Graybeal, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-06-103, 2006, pp. 176.
 44. 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.
 45. Magureanu, C., Sosa, I., Negrutiu, C. and Heghes, B., Physical and mechanical properties of ultra high strength fiber reinforced cementitious composites, *Proceedings of FraMCoS-7*, May, 2010, pp. 23-28.
 46. Arunachalam. K. and Vigneshwari, M., “Experimental investigation on ultra high strength concrete containing mineral admixtures under different curing conditions”, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol.2, No.1, 2011, pp. 33-42.
 47. Maher, K., Tadros, George Morcouc, Application of Ultra-High Performance Concrete to Bridge Girders, University of Nebraska-Lincoln, SPR-P1(08)P310, 2009, pp. 76.

요 약 최근 RPC를 활용한 초고강도 콘크리트가 개발되면서 100 MPa 이상의 높은 압축강도를 보유한 콘크리트가 취성적 파괴의 방지 목적과 인장강도 증진을 위해 강섬유를 혼입하여 사용되고 있다. 따라서 인장강도의 결정이 중요하나, 현재 초고강도 콘크리트 영역에서의 인장강도 추정을 위한 연구결과가 산발적으로만 이루어지고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 80-200 MPa의 압축강도를 보유한 RPC의 재료 시험을 수행하여 압축강도와 인장강도의 상관관계를 검토하였다. 시험 결과 100 MPa 이상의 압축강도를 보유한 경우에도 보통강도 또는 고강도 콘크리트 영역에서의 변화 경향이 유지되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이에 기존 연구로부터 수집된, 쪼갬인장강도 원주형 공시체 시험 결과 284개와 265개의 파괴계수 시험 결과를 활용하여 기존의 추정식들을 평가하였다. 평가 결과 100 MPa 이상의 초고강도 콘크리트에서는 기존 추정식을 안전하게 사용하기 어려운 것을 확인하였으며, 100 MPa 이상의 초고강도 콘크리트에도 적용 가능한 회귀식을 도출하였다.

핵심용어 : 섬유보강 초고강도 콘크리트, 쪼갬인장강도, 힘인장강도, 회귀분석