

# 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 탄성계수 및 인장강도 평가

## An Evaluation of Elasticity Modulus and Tensile Strength of Ultra High Performance Concrete

류금성<sup>1</sup> · 유성원<sup>2\*</sup>Gum-Sung Ryu<sup>1</sup> · Sung-Won Yoo<sup>2\*</sup>

(Received September 10, 2015 / Revised September 25, 2015 / Accepted September 28, 2015)

Recently, for UHPC (Ultra High Performance Concrete) which is researched actively, as the tensile strength is absolutely influenced on the content of steel fiber, in this paper, experiments of compressive strength, elasticity modulus and tensile strength were performed according to compressive strength and content of steel fiber as variables. By the test results, compressive strength, elasticity modulus and tensile strength are proportioned and have a good correlation and according to content of steel fiber, compressive and tensile strength are also proportioned and have a good correlation. In case of elasticity modulus, the difference between test and present design code is not large, so it is possible to adapt to present design code. On the other hand, in case of tensile strength, as there is no specification of present design code, new prediction equation is proposed by using nonlinear regression analysis and the proposed equation have a good correlation to test results.

**키워드** : UHPC, 인장강도, 탄성계수, 섬유혼입률**Keywords** : UHPC, Tensile strength, Elasticity modulus, Content of steel fiber

### 1. 서론

최근에는 일반 콘크리트의 낮은 인장강도, 취성 등의 단점을 극복하기 위해 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 (Ultra High Performance Concrete : UHPC)의 적용이 증가하고 있다. 또한 최근에 요구되는 콘크리트는 구조물의 장대화 및 대형화로 인하여 고강도, 고성능 및 고내구성 등의 성능을 요구하고 있다. 이러한 이유로 압축강도가 120~180MPa 수준의 초강도 콘크리트에 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트에 대한 연구(John and George 2010; Kang and Ryu 2011)가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 이러한 UHPC는 콘크리트의 처짐, 휨강도 및 균열 이후의 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있으며, UHPC의 인장강도는 압축강도에 영향을 받는 동시에 강섬유 혼입량에 절대적으로 영향을 받는 것으로 보고되어지고(John and

George 2010; Kang and Ryu 2011) 있으나, 이들 연구 결과는 UHPC의 압축강도가 180MPa인 경우에 대해서만 수행되어진 이유로 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 강섬유 혼입량에 대한 관계가 구체적이지 못한 실정이다.

이러한 기존 연구의 결과를 참고하면 다양한 압축강도 및 강섬유 혼입량에 의한 탄성계수 및 인장강도의 평가가 부족한 이유로 본 논문에서는 압축강도, 강섬유량 등을 변수로 하여 실험을 수행한 후, 그 결과를 분석하였다.

### 2. 실험계획

#### 2.1 실험변수

실험변수는 UHPC의 압축강도 3 수준(120, 150 및 180MPa), 강섬유 혼입률 3수준(콘크리트 부피의 1.0, 1.5 및 2.0%)이며 사용된

\* Corresponding author E-mail: imysw@woosuk.ac.kr

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, Goyang 411-712, Korea)<sup>2</sup>우석대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jinchon 355-803, Korea)

Table 1. Mix proportion of UHPC

ID	W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					steel fiber	
		W	Premix binder	S	P	A	19.5 (mm)	16.3 (mm)
120	23	221	1,259	847	17.7	0.7	78	-
150	20	197	1,288	866	24.4	0.9	78	39
180	20	197	1,270	866	18.1	0.5	78	39
							78	78

W: water, S : sand,  
 P: plasticizer, A: antifoaming agent  
 Premix binder: cement, zirconium, blast furnace slag, filler, expansion agent, reduction agent of shrinkage



Photo 1. Compressive strength and elasticity modulus test

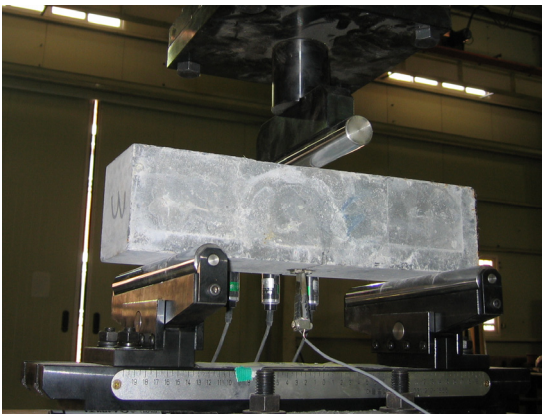


Photo 2. Flexural tensile test by 3 point loading

UHPC의 배합은 Table 1에 나타내었으며, 측정항목은 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등이며, 실험 전경은 Photo 1과 2에 나타내었다.

한편, 인장강도의 경우, 직접인장강도를 측정하여야 하나, 실험의 어려움 등의 이유로 AFGC (2002)에서 제안한 방법 즉, 노치를 낸 시편의 3점 재하 휨인장 실험을 통해 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 이로부터 인장응력-CMOD 관계를

산정하는 방법으로 인장강도를 산정하였다.

## 2.2 실험 방법

UHPC의 압축강도, 탄성계수는 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 제작하여 4kN/sec의 재하속도로 실험을 수행하였으며, 압축강도 실험을 수행할 때 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 압축응력-변형을 관계 곡선을 획득하였으며 이로부터 압축강도와 탄성계수를 산정하였다. 또한, 휨인장 실험의 경우, Photo 2와 같이 노치(notch)를 갖는 시편을 제작하여 3점 재하법에 의해 실험을 수행하였다. 공시체는 100mm X 100mm X 400mm의 크기이며, 노치는 지간 중앙에 10mm 깊이로 내었다. 하중은 4kN/sec의 속도로 재하하였으며, 노치의 균열개구변위(CMOD)를 측정한 후, 이로부터 하중-CMOD 곡선을 획득하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 실험 결과

공시체는 재령 28일에 대한 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도 실험 시 구해지는 응력-변형을 곡선에서 압축강도 및 탄성계수를 산정하였다. 실험에서 구해진 압축강도( $f_c'$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 및 인장강도( $f_t'$ )는 Table 2에 나타내었다.

### 3.2 압축강도-탄성계수 관계

실험 결과 중, UHPC의 압축강도와 탄성계수 관계를 Fig. 1에 나타내었으며, UHPC의 탄성계수는 약 35~50GPa 범위의 값을 가지며, 압축강도와 탄성계수는 상당한 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

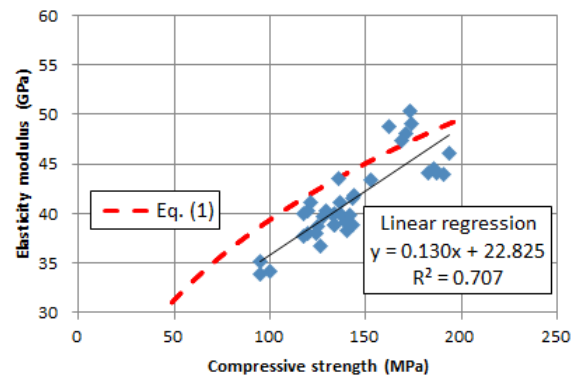


Fig. 1. Compressive strength-elasticity modulus relationship of UHPC

Table 2. Test results of strength and elasticity modulus

	$f_c'$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$f_t'$ (MPa)	content of steel fiber (%)
120f-1.0	135.6	43.6	10.39	1.0
120f-1.0	95.1	35.2	-	1.0
120f-1.0	129.7	40.3	10.05	1.0
120f-1.0	119.5	38.0	8.50	1.0
120f-1.0	128.0	39.7	-	1.0
120f-1.0	95.2	34.0	4.55	1.0
120f-1.0	132.7	39.8	7.48	1.0
120f-1.0	133.9	38.9	-	1.0
120f-1.0	121.6	41.1	6.33	1.0
120f-1.0	141.8	39.9	-	1.0
120f-1.0	134.0	38.9	7.36	1.0
120f-1.0	99.8	34.2	5.08	1.0
120f-1.0	137.2	39.8	-	1.0
120f-1.0	140.6	38.3	-	1.0
120f-1.0	126.5	36.7	6.57	1.0
120f-1.0	120.0	40.3	6.06	1.0
120f-1.0	133.5	40.1	-	1.0
120f-1.0	139.4	39.2	-	1.0
120f-1.0	143.2	41.6	-	1.0
120f-1.0	136.9	41.1	7.85	1.0
120f-1.0	144.2	41.9	-	1.0
120f-1.0	117.9	40.0	6.29	1.0
120f-1.0	124.7	38.7	-	1.0
150f-1.5	171.0	48.1	10.59	1.5
150f-1.5	162.6	48.8	-	1.5
150f-1.5	174.3	49.0	11.24	1.5
150f-1.5	168.7	47.4	-	1.5
150f-1.5	117.6	37.8	-	1.5
150f-1.5	173.5	50.4	-	1.5
150f-1.5	143.4	38.9	9.57	1.5
150f-1.5	124.2	37.9	9.38	1.5
150f-1.5	152.4	43.4	-	1.5
180f-1.5	187.0	44.1	11.70	1.5
180f-1.5	185.4	44.6	13.50	1.5
180f-1.5	193.6	46.1	14.70	1.5
180f-2.0	183.0	44.1	16.30	2.0
180f-2.0	190.9	44.0	17.50	2.0

### 3.3 압축강도-인장강도 관계

UHPC의 압축강도와 인장강도 관계를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 UHPC의 인장강도는 약 5.0~17.0MPa 범위의 값을 가지며, 압축강도와 인장강도 역시 비례관계의 상당

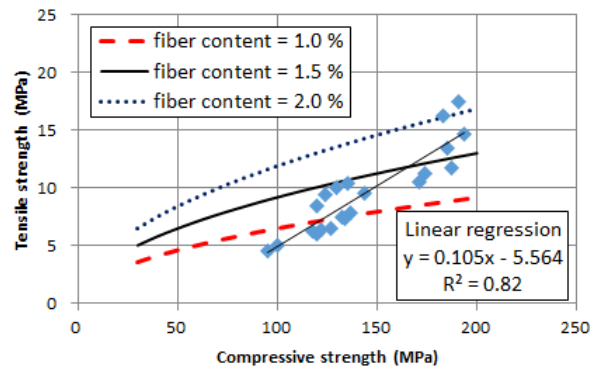


Fig. 2. Compressive strength-tensile strength relationship of UHPC

한 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

### 3.4 강섬유량 효과

UHPC에 혼입된 강섬유량의 효과를 분석하기 위하여 섬유혼입량에 따른 압축강도와 탄성계수간의 관계를 Fig. 3에, 압축강도와 인장강도 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이

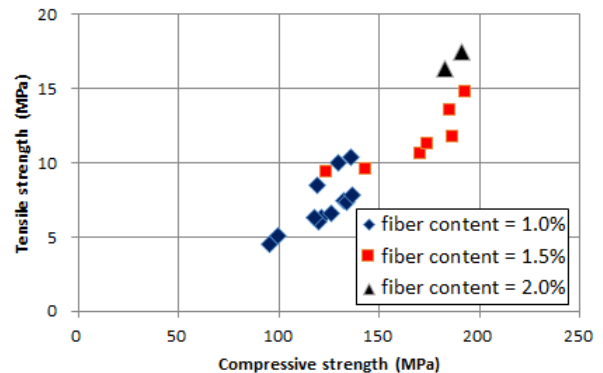


Fig. 3. Compressive strength-elasticity modulus relationship of UHPC according to fiber content

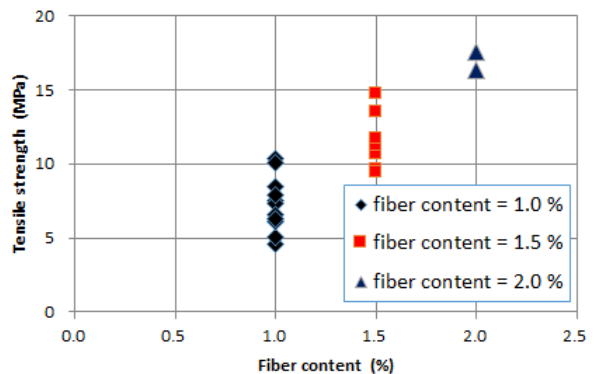


Fig. 4. Fiber content-tensile strength relationship

UHPC에 섬유혼입률이 1.5%까지는 섬유를 많이 혼입하면 할수록 탄성계수가 어느 정도 증가함을 알 수 있었으나, 섬유를 2.0% 혼입하면 탄성계수는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

Table 3. Comparison between test results and code equation

	f <sub>c</sub> ' (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)			test/ Eq. (1)	test/ Eq. in Fig. 1
		test	Eq. (1)	Eq. in Fig. 1		
120f-1.0	135.6	43.6	43.7	40.5	1.00	1.08
120f-1.0	95.1	35.2	38.8	35.2	0.91	1.00
120f-1.0	129.7	40.3	43.0	39.7	0.94	1.01
120f-1.0	119.5	38.0	41.9	38.4	0.91	0.99
120f-1.0	128.0	39.7	42.8	39.5	0.93	1.01
120f-1.0	95.2	34.0	38.8	35.2	0.87	0.96
120f-1.0	132.7	39.8	43.4	40.1	0.92	0.99
120f-1.0	133.9	38.9	43.5	40.2	0.89	0.97
120f-1.0	121.6	41.1	42.1	38.6	0.98	1.06
120f-1.0	141.8	39.9	44.3	41.3	0.90	0.97
120f-1.0	134.0	38.9	43.5	40.2	0.89	0.97
120f-1.0	99.8	34.2	39.4	35.8	0.87	0.96
120f-1.0	137.2	39.8	43.8	40.7	0.91	0.98
120f-1.0	140.6	38.3	44.2	41.1	0.87	0.93
120f-1.0	126.5	36.7	42.7	39.3	0.86	0.93
120f-1.0	120.0	40.3	41.9	38.4	0.96	1.05
120f-1.0	133.5	40.1	43.4	40.2	0.92	1.00
120f-1.0	139.4	39.2	44.1	40.9	0.89	0.96
120f-1.0	143.2	41.6	44.5	41.4	0.94	1.00
120f-1.0	136.9	41.1	43.8	40.6	0.94	1.01
120f-1.0	144.2	41.9	44.6	41.6	0.94	1.01
120f-1.0	117.9	40.0	41.7	38.2	0.96	1.05
120f-1.0	124.7	38.7	42.5	39	0.91	0.99
150f-1.5	171.0	48.1	47.2	45.1	1.02	1.07
150f-1.5	162.6	48.8	46.4	44	1.05	1.11
150f-1.5	174.3	49.0	47.5	45.5	1.03	1.08
150f-1.5	168.7	47.4	47.0	44.8	1.01	1.06
150f-1.5	117.6	37.8	41.6	38.1	0.91	0.99
150f-1.5	173.5	50.4	47.4	45.4	1.06	1.11
150f-1.5	143.4	38.9	44.5	41.5	0.87	0.94
150f-1.5	124.2	37.9	42.4	39	0.89	0.97
150f-1.5	152.4	43.4	45.4	42.6	0.96	1.02
180f-1.5	187.0	44.1	48.6	47.1	0.91	0.94
180f-1.5	185.4	44.6	48.5	46.9	0.92	0.95
180f-1.5	193.6	46.1	49.2	48	0.94	0.96
180f-2.0	183.0	44.1	48.3	46.6	0.91	0.95
180f-2.0	190.9	44.0	48.9	47.6	0.90	0.92

한편 섬유혼입률에 따른 압축강도와 인장강도의 관계는 비례관계의 상당한 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

#### 4. 설계식 및 제안식과의 비교

##### 4.1 탄성계수

콘크리트구조기준(2012)에서 제시하고 있는 탄성계수 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f'_c} \tag{1}$$

여기서, f<sub>c</sub>'는 압축강도(MPa)이다.

실험결과 및 식 (1)에서 구해진 탄성계수 비교 결과를 Table 3, Fig. 1 및 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과와 현행 국내 설계기준 식인 식 (1)의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났으며, 실험결과와 식 (1)과의 비율은 평균 0.93 정도로 나타났다. 식 (1)은 설계기준에서 약 70MPa까지만 적용하는 것으로 규정되었음에도 불구하고 실험결과와 유사한 값을 나타내므로 식 (1)을 준용하여도 UHPC 탄성계수 평가에는 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 또한 Fig. 1의 회귀식에 의한 계산결과 역시 참고용으로 병기하였다.

##### 4.2 인장강도

인장강도의 경우, 현행 설계기준에서 제시되지 않은 이유로 본 논문에서는 통계프로그램인 SPSS를 이용하여 비선형 회귀분석을 실시하여 그 결과를 식 (2)에 나타내었다.

$$f'_t = 0.549(0.178 + F) \sqrt{f'_c} \quad (R^2 = 0.857) \tag{2}$$

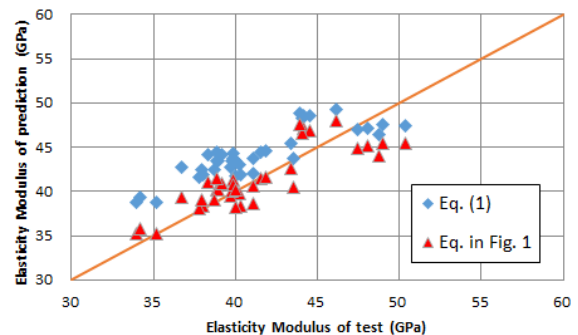


Fig. 5. Comparison between test results and proposed equation of elasticity modulus

Table 4. Comparison between test results and proposed equation

	$f_c'$ (MPa)	$f_t'$ (MPa)		test/ Eq. (2)
		test	Eq. (2)	
120f-1.0	135.6	10.39	7.53	1.38
120f-1.0	129.7	10.05	7.37	1.36
120f-1.0	119.5	8.50	7.07	1.20
120f-1.0	95.2	4.55	6.31	0.72
120f-1.0	132.7	7.48	7.45	1.00
120f-1.0	121.6	6.33	7.13	0.89
120f-1.0	134.0	7.36	7.49	0.98
120f-1.0	99.8	5.08	6.46	0.79
120f-1.0	126.5	6.57	7.27	0.9
120f-1.0	120.0	6.06	7.08	0.86
120f-1.0	136.9	7.85	7.57	1.04
120f-1.0	117.9	6.29	7.02	0.9
150f-1.5	171.0	10.59	12.05	0.88
150f-1.5	174.3	11.24	12.16	0.92
150f-1.5	143.4	9.57	11.03	0.87
150f-1.5	124.2	9.38	10.27	0.91
180f-1.5	187.0	11.70	12.6	0.93
180f-1.5	185.4	13.5	12.54	1.08
180f-1.5	193.6	14.7	12.82	1.15
180f-2.0	183.0	16.30	16.18	1.01
180f-2.0	190.9	17.5	16.52	1.06

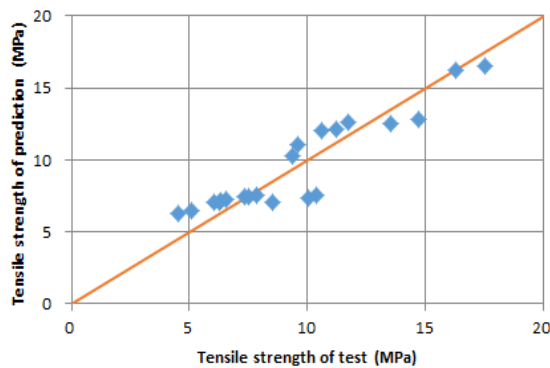


Fig. 6. Comparison between test results and proposed equation of tensile strength

여기서,  $f_t'$ 는 UHPC의 인장강도(MPa),  $F$ 는 섬유혼입률(%) 및  $R^2$ 은 상관계수이다.

제안된 식 (2)에 의해서 계산된 결과와 실험결과를 비교하여 Table 4와 Fig. 2 및 Fig. 6에 나타내었으며, 제안식의 상관계수가 0.857로 나타나, 매우 좋은 상관성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Table 3의 실험결과와 제안식 결과간의 비율 평균이 약 0.99로 나타났다.

## 5. 결론

최근에 활발히 연구되어지고 있는 UHPC의 경우, 강섬유 혼입량에 의해서 인장강도가 절대적으로 영향을 받는 이유로 본 논문에서는 압축강도, 강섬유량 등을 변수로 하여 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등을 실험적으로 구한 후, 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 압축강도가 증가할수록 탄성계수 및 인장강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 섬유혼입률에 따른 압축강도와 인장강도의 관계 역시는 비례관계의 상관성을 가지는 것으로 나타났다.
2. 탄성계수의 경우, 실험결과와 현행 국내 설계기준 식의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타나, 기존의 설계기준 식을 준용하여도 UHPC 탄성계수 평가에는 큰 문제가 없을 것으로 예상된다.
3. 인장강도의 경우, 현행 설계기준에서 제시되지 않은 이유로 비선형 회귀분석을 실시하여 섬유혼입률을 고려한 인장강도 식을 제안하였으며, 제안된 식은 좋은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

## References

Association Française du Génie Civil (AFGC). (2002). Bétons Fibrés Ultra-Hautes Performances, Association Française du Génie Civil, SETRA, France, 24–56.

John, H., George, S. (2010). The Implementation of Full Depth UHPC Waffle Bridge Deck Panels, Federal Highway Administration Highways for Life Technology Partnerships Program, New York, 9–12.

Kang, S.T., Ryu, G.S. (2011). The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC), Journal of Korea Concrete Institute, **23(1)**, 67–75 [in Korean].

Ministry of Land, Transport Affairs. (2012). Concrete Structural Design Code, 4th rev. Seoul, Korea Concrete Institute, 425.

### 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 탄성계수 및 인장강도 평가

최근에 활발히 연구되어지고 있는 UHPC의 경우, 강섬유 혼입량에 의해서 인장강도가 절대적으로 영향을 받는 이유로 본 논문에서는 압축강도, 강섬유량 등을 변수로 하여 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등을 실험적으로 구한 후, 그 결과를 분석하였다. 실험결과에 의하면, 압축강도와 탄성계수 및 인장강도는 비례관계로 상당한 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 섬유혼입률에 따른 압축강도와 인장강도의 관계 역시 비례관계의 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 탄성계수의 경우, 실험결과와 현행 국내 설계기준 식의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타나, 기존의 설계기준 식을 준용하여도 UHPC 탄성계수 평가에는 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 한편 인장강도의 경우, 현행 설계기준에서 제시되지 않은 이유로 비선형 회귀분석을 실시하여 섬유혼입률을 고려한 인장강도 식을 제안하였으며, 제안된 식은 좋은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.