

# 콘크리트의 기건 단위질량을 고려한 인장강도 예측모델 제안

## A Proposal of Tensile Strength Prediction Models Considering Unit Weight of Concrete

심재일<sup>1)\*</sup>

양근혁<sup>2)</sup>

Sim, Jae Il

Yang, Keun Hyeok

### Abstract

The present study evaluates the validity of different equations specified in code provisions and proposed by the existing researchers to predict the concrete tensile capacities (direct tensile strength, splitting tensile strength and modulus of rupture) using a comprehensible database including 361 lightweight concrete (LWC), 1,335 normal-weight concrete (NWC) and 221 heavy-weight concrete (HWC) specimens. Most of the equations express the concrete tensile strengths as a function of its compressive strength based on the limited NWC concrete test data. However, the present database shows that the concrete tensile capacities are significantly affected by its unit weight as well. As a result, the inconsistency between experiments and predictions by the different models increases when the concrete unit weight is below 2,100 kg/m<sup>3</sup> and concrete compressive strength is above 50 MPa. On the other hand, new models proposed by the present study considering the concrete unit weight predict the tensile strengths of concrete with more accuracy.

**Keywords** : Unit weight, Tensile strength, Compressive strength, Database

### 1. 서론

콘크리트는 주로 압축에 저항하는 재료이며, 부재설계 시에는 일반적으로 콘크리트의 인장강도를 무시하고 있다. 그러나 콘크리트의 인장강도는 구조물에서 부재의 균열 강도를 산정하는 중요한 요소이다. 콘크리트의 균열은 일반적으로 작용하중에 의해 발생하는데, 댐과 같은 메스 콘크리트의 내구성 설계를 위해서 균열 강도를 예측하는 것이 매우 중요하다(Zain et al., 2002). 또한 콘크리트의 전단 부재 설계에서 사인장 균열이나 순수 휨 부재 설계, 또는 콘크리트 구조물의 처짐 및 균열해석 등과 같은 사용성 설계에서 콘크리트의 정확한 인장강도의 예측은 구조물의 내구연한을 결정하는 중요한 변수이다(홍건호, 2003). 특히 콘크리트 구조물에서 발생한 균열의 원인을 평가하기 위해서 재료의 인장강도에 대한 정확한 정보는 중요하다.

콘크리트의 인장강도는 직접법(direct tensile test)과 간접법에 의해 실험될 수 있다. 직접법은 콘크리트 공시체에 직접적으로 인장하중을 도입하는 방법이며, 간접법

은 원주형 공시체를 가로로 얹힌 상태에서 하중을 가하는 쪼갬 인장 실험법과 무근 콘크리트 보를 제작하여 보의 파괴계수를 평가하는 휨 인장 실험으로 구별된다. 직접법은 실험방법이 어렵고 결과의 편차도 크기 때문에 일반적으로 간접법에 의한 쪼갬강도를 콘크리트의 인장강도로 사용하고 있다. 또한 콘크리트의 휨 부재의 처짐 및 균열과 같은 사용성의 해석에는 휨 인장시험에 의해 콘크리트의 인장강도를 평가하고 있다(Zheng et al., 2004). 이와 같이 실험의 편리성과 결과의 정확성을 위해 다양한 인장 실험방법에 따라 콘크리트의 인장강도가 평가되고 있지만 그들의 상관관계 규명에 대한 연구의 부족으로, 실제적인 콘크리트의 인장강도를 예측하여 해석 및 설계에 적용하는 데는 어려움이 있다.

홍건호(2003)는 보통중량 콘크리트의 직접인장실험 후 시험체 파단면을 분석하여 골재와 페이스트 계면에서 파괴됨을 보였다. 그러나 Sim et al.(2012)은 경량 콘크리트의 인장시험을 통하여 골재의 파괴로 인해 전체적인 인장저항성능이 보통중량 콘크리트보다 낮음을 지적하였다. 이와 같이 경량 콘크리트의 인장강도는 보통중량 콘

1) 학생회원, 경기대학교 건축공학과 박사수료, 교신저자

2) 정회원, 경기대학교 플랜트건축공학과 교수

\* Corresponding author : jisim@kgu.ac.kr 031-249-9702

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

크리트와 달리 경량골재의 강도에 영향을 받는다. 경량골재의 강도는 콘크리트의 기건 단위질량이 클수록 크다(김성철 등, 2011). 그러므로 콘크리트의 인장강도는 동일한 압축강도에서 콘크리트의 기건 단위질량에 큰 영향을 받는다. 이에 설계기준들(ACI 318, 2011; CEB-FIP, 1990; EC2, 2004)에서는 수정계수를 제시하여 경량 콘크리트에서는 콘크리트의 기건 단위질량( $\rho_c$ )에 따라 인장강도를 감소하여 사용하도록 하고 있지만, 수정계수의 안정성에 대한 의문이 많다. 또한 기존 연구자들의 제안 모델들(Carniero and Barcellos, 1953; Li and Ansari, 2000; Zheng et al., 2001; Slate et al., 1986; Zhang and Gjorv, 1991)은 콘크리트의 기건 단위질량을 고려하지 않고 있다. 이에 콘크리트의 기건 단위질량을 고려한 보다 정확한 인장강도 예측모델이 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 기건 단위질량을 고려하여 콘크리트 인장강도를 평가하는데 있다. 이를 위해 총 1,917개의 콘크리트 실험결과(경량 361개, 보통중량 1,335개, 고중량 221개)를 포함하는 데이터베이스(양근혁, 2010)를 이용하였다. 데이터베이스(database, DB)를 이용하여 콘크리트의 인장강도에 대한 설계기준(ACI 318, 2011; CEB-FIP, 1999; EC2, 2004; NZS 3101, 2006) 및 기존 연구자들의 제안모델(Carniero and Barcellos, 1953; Li and

Ansari, 2000; Zheng et al., 2001; Slate et al., 1986; Zhang and Gjorv, 1991)들의 보수성과 타당성을 평가하였다. 또한 DB의 비선형 회귀분석을 통하여 콘크리트 기건 단위질량을 고려한 인장강도 평가모델 및 직접 인장강도, 쪼갬 인장강도 및 파괴계수 사이의 상관관계를 확인하였다.

## 2. 데이터베이스(DB) 구축 및 분석

양근혁(2010)에 의해 구축된 DB에서 압축강도 및 인장강도(직접 인장강도, 쪼갬 인장강도 및 파괴계수)의 분포를 Table 1에 나타내었다. DB에서 정보가 제공되지 않은 실험체들의 기건 단위질량 ( $\rho_c$ )은 제시된 배합표를 기반으로 ACI 318-11(2011)에 제시된 Eq. (1)에 의해 산정하였다.

$$\rho_c = 1.2B + S + G + 50 \quad (1)$$

여기서,  $B$ 는 단위결합재량( $\text{kg/m}^3$ ),  $S$ 는 잔골재의 질량( $\text{kg/m}^3$ ),  $G$ 는 굵은골재의 질량( $\text{kg/m}^3$ )을 나타낸다. DB에서 콘크리트의 종류는 기건 단위질량에 따라 다음과 같이 4가지로 구별하여 나타내었다 (ACI 213R-03, 2003).

(1)  $\rho_c < 1700 \text{ kg/m}^3$  : 전경량 콘크리트

Table 1 Distribution of main parameters in the database.

	Range	10.7~30	30~50	50~80	80~100	100~130	130~166.8	Total
	$f_{ck}$ (MPa)	ALWC	37	58	15	4	0	0
SLWC		106	98	29	4	10	0	247
NWC		203	411	410	171	132	8	1335
HWC		28	88	57	16	27	5	221
Range		0.34~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3	3~3.57	Total
$f_t$ (MPa)	ALWC	32	4	0	0	0	0	36
	SLWC	4	13	1	0	0	0	18
	NWC	0	2	12	18	36	17	85
	HWC	0	0	0	0	0	0	0
	Range	1.03~2	2~3	3~4	4~5	5~7	7~9.67	Total
$f_{sp}$ (MPa)	ALWC	29	47	27	10	1	0	114
	SLWC	18	155	39	22	2	0	236
	NWC	60	237	351	257	284	8	1197
	HWC	1	43	74	42	27	2	189
	Range	0.77~3	3~6	6~8	8~10	10~12	12~15.3	Total
$f_r$ (MPa)	ALWC	36	14	6	0	0	0	56
	SLWC	18	65	16	5	4	0	108
	NWC	10	112	95	84	67	9	377
	HWC	1	16	4	13	12	10	56
	Range	0.77~3	3~6	6~8	8~10	10~12	12~15.3	Total

- (all-lightweight concrete, ALWC)  
 (2)  $1700 \leq \rho_c < 2000 \text{ kg/m}^3$  : 모래경량 콘크리트  
 (sand-lightweight concrete, SLWC)  
 (3)  $2240 \leq \rho_c < 2480 \text{ kg/m}^3$  : 보통중량 콘크리트  
 (normal-weight concrete, NWC)  
 (4)  $\rho_c \geq 2480 \text{ kg/m}^3$  : 고중량 콘크리트  
 (heavy-weight concrete, HWC)

구축된 DB의 압축강도의 범위는 Table 1에 나타낸 바와 같이 10.7~166.8 MPa이며 ALWC 144개, SLWC 247개, NWC 1,335개 및 HWC 221개로 총 1,917개의 데이터를 수집하였다. 이중에 유효한 직접 인장강도, 쪼갬 인장강도 및 파괴계수의 데이터는 각각 139개, 1,736개 및 597개이다. DB의 직접 인장강도는 NWC에서 1~3.57 MPa 범위로 고르게 분포하고 있었지만 ALWC와 SLWC에서는 각각 0.34~1.5 MPa, 0.34~2 MPa 범위로 NWC보다 낮은 수준에 있었다. 또한 HWC에서의 직접 인장강도에 대한 실험결과는 존재하지 않았다. DB의 쪼갬 인장강도는 콘크리트의 종류에 관계없이 모든 범위에서 실험값을 갖고 있었다. ALWC와 SLWC는 쪼갬 인장강도 4 MPa 이하인 데이터가 90% 이상이지만, NWC와 HWC는 각각 54%와 62%였다. DB의 파괴계수는 0.77~15.3 MPa 범위에 있었다. 파괴계수에 대한 유

효데이터 중 경량 콘크리트(lightweight concrete, LWC)는 27.5%이며, NWC와 HWC는 각각 63.1%와 9.4%였다.

### 3. 인장강도에 대한 설계기준 및 제안모델

콘크리트의 인장강도에 대한 설계기준 및 기존 연구자의 제안모델에 대한 요약을 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 ACI 318-11(2011), CEB-FIP(1999) 및 EC2(2004)의 설계기준들은 NWC의 인장강도에 대한 기준을 제시하고 있으며, LWC에서는 NWC의 인장강도 값에 수정계수( $\lambda$ )를 곱하여 사용하도록 제시하고 있다. 이 수정계수에 대해 ACI 318-11(2011)에서는 콘크리트의 종류에 따라 ALWC는 0.75, SLWC는 0.85를 사용하고 있다. 그러나 쪼갬 인장강도가 주어진 경우에는 압축강도의 제곱근 대신  $1.76f_{sp}$ 를 사용하고 있다.

한편, CEB-FIP와 EC2에서는 콘크리트의 인장강도를 콘크리트의 기건 단위질량의 함수로 제시하고 있다. 그러나 기존 연구자들(Carniero and Barcellos, 1953; Li and Ansari, 2000; Zheng et al., 2001; Slate et al., 1986; Zhang and Gjrv, 1991)은 콘크리트의 기건 단위질량을 고려하지 않고 NWC 또는 SLWC에 기반한 실험결과의 비선형 회귀분석을 통해 콘크리트의 인장강도의 제안모델을 제시하고 있다.

Table 2 Summary of prediction equations for the tensile strength of concrete.

Tension strength		Direct tensile strength, $f_t$ (MPa)	Splitting tensile strength, $f_{sp}$ (MPa)	Modulus of rupture, $f_r$ (MPa)
Code	ACI 318	-	-	$f_r = 0.62\lambda_1\sqrt{f_{ck}}$
	CEB-FIP	$f_t = 2.12\lambda \times \ln\left(1 + \frac{f_{ck} + 8}{f_{ck0}}\right)$	$f_{sp} = \frac{f_t}{0.9}$	$f_r = \frac{1 + 1.5(h_b/h_0)^{0.7}}{1.5(h_b/h_0)^{0.7}}\lambda f_t$
	EC2	① $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ $f_t = 0.30\lambda \times (f_{ck})^{2/3}$ ② $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$ $f_t = 2.12\lambda \times \ln\left(1 + \frac{f_{ck} + 8}{f_{ck0}}\right)$	$f_{sp} = \frac{f_t}{0.9}$	-
	NZS 3101	$f_t = 0.67\sqrt{f_{ck} + 8}$	-	$f_t = 0.6\sqrt{f_{ck} + 8}$
Researcher	Li and Ansari	$f_t = 0.506\sqrt{f_{ck}}$	-	-
	Zheng et al.	$f_t = 0.47\sqrt{f_{ck}}$	-	-
	Carniero and Barcellos	-	$f_{sp} = 0.272f_{ck}^{0.71}$	-
	Slate et al.*	-	$f_{sp} = 0.41\sqrt{f_{ck}}$	$f_r = 0.35\sqrt{f_{ck}}$
	Zhang et al.*	-	$f_{sp} = 0.23f_{ck}^{2/3}$	$f_r = 0.73\sqrt{f_{ck}}$

Note  $\lambda_1$ =modification factor reflecting the reduced mechanical properties of lightweight concrete in ACI 318-11,

$\lambda = 0.4 + 0.6(\rho_c/2200)$  modification factor in CEB-FIP and EC2,  $f_{ck}$ = compressive strength of concrete(MPa),  $f_{ck0} = 10 \text{ MPa}$ ,

$h_b$ = height of specimen, and  $h_0 = 100 \text{ mm}$ .

\* sand-lightweight concrete based prediction model.

### 3.1 직접 인장강도 ( $f_t$ )

직접 인장실험에 대한 세계적인 표준방법은 마련되지 않았지만, 유럽(RILEM, 1975)과 뉴질랜드(NZA 3101, 2006)에서는 자체적인 직접 인장강도 평가방법을 도입하고 있다. 또한 기존 연구자들(Li and Ansari, 2000; Zheng et al., 2001)도 콘크리트의 직접 인장강도의 특성을 분석하기 위해 효과적인 실험방법을 개발하여 사용하고 있다. 그러나 다양한 실험방법에 의해 평가된 콘크리트의 직접 인장강도는 표준편차가 크고 실험 성공률이 낮아 그 실험결과의 신뢰성에 대한 의문이 제기되고 있다.

콘크리트의 압축강도와 설계기준 및 제안모델의 의해 예측된 직접 인장강도( $(f_t)_{Pre.}$ )의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. CEB-FIP(1999)와 EC2(2004)는 압축강도 50 MPa 초과에서 동일한 기준을 적용하고 있지만 압축강도 50 MPa 이하에서는 EC2(2004)가 CEB-FIP(1999)보다 낮게 직접 인장강도를 예측하고 있으며, 압축강도가 낮을수록 그 경향은 뚜렷하였다. 또한 콘크리트의 기건 단위질량이 감소하면 직접 인장강도 역시 감소하여 그 경향은 압축강도가 증가할수록 뚜렷하였다. NZA 3101(2006)은 다른 설계기준(CEB-FIP, 1999; EC2, 2004) 및 제안모델(Li and Ansari, 2000; Zheng et al., 2001)보다 동일한 강도에서 직접 인장강도를 높게 예측하고 있으며, 압축강도가 증가할수록 그 차이가 컸다. NWC의 실험결과로부터 예측된 Li and Ansari(2000)과 Zheng et al.(2001)의 직접 인장강도 예측값은 CEB-FIP(1999) 및 EC2(2004)보다 낮았으며, 그 경향은 압축강도가 증가함에 따라 감소하였다.

콘크리트의 기건 단위질량과 직접 인장강도의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 콘크리트의 직접 인장강도는 콘크리트의 기건 단위질량과 압축강도가 증가할수록 증가하였으며, 그 영향은 압축강도보다 기건 단위질량이 컸다. 이에 구축된 DB를 이용하여 비선형 회귀분석으로부터 콘크리트의 기건 단위질량이 고려된 직접 인장강도를 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$f_t = 1.23 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^3 f_{ck}^{0.2} \quad r^2 = 0.92 \quad (2)$$

여기서,  $\rho_0$ 는 기준 콘크리트의 기건 단위질량으로 CEB-FIP(1999)에 따라  $2,200 \text{ kg/m}^3$ 으로 결정하였다. Eq. (2)와 설계기준 및 기존 제안모델을 비교하기 위해 기건

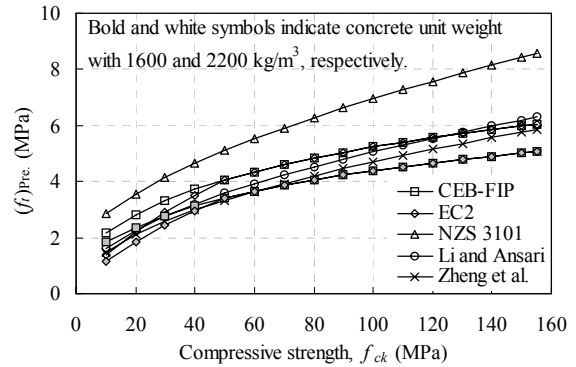


Fig. 1 Relationship between  $(f_t)_{Pre.}$  and  $f_{ck}$ .

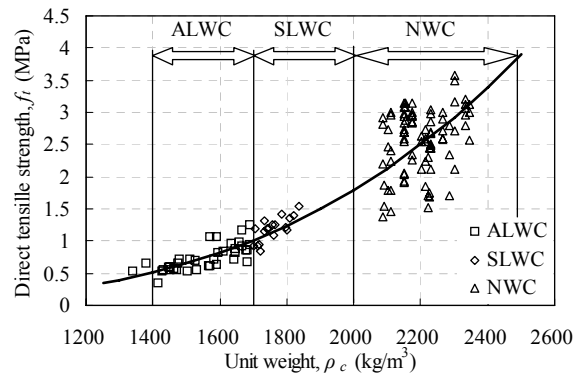


Fig. 2 Relationship between  $f_t$  and  $\rho_c$ .

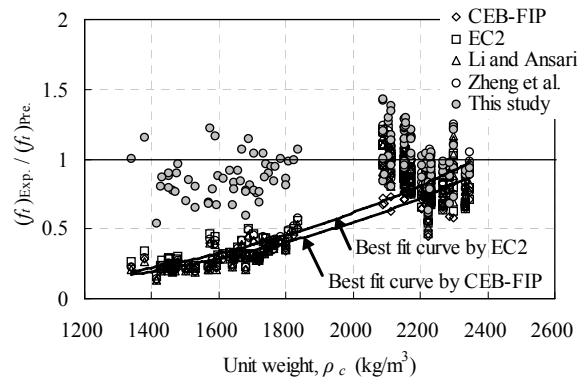


Fig. 3 Relationship between  $(f_t)_{Exp.} / (f_t)_{Pre.}$  and  $\rho_c$

단위질량에 따른 실험값과 해석값의 비를 Fig. 3에 나타내었다. Eq. (2)를 제외한 모든 예측값은 기건 단위질량  $2,100 \text{ kg/m}^3$  이하에서 실험결과를 약 2배 이상 과대평가하였다. 이에 설계기준의 안전성이 의심되며, 수정계수에 대한 안전성의 평가가 필요할 것으로 판단된다. 설계기준 및 제안모델들의 평균, 표준편차, 변동계수 및 오차계수를 나타낸 Table 3을 보면, Eq. (2)는 평균 0.97, 표

Table 3 Statistical comparisons of experiments and predictions by different models including the present approach.

Tension properties		Statistical values	Code			Researcher		This study	
			CEB-FIP	EC2	NZS 3101	Li and Ansari	Zheng et al.		
$f_t$	ALWC	$\gamma_{cs,m}$	0.26	0.30	0.17	0.26	0.28	0.85	
		$\gamma_{cs,s}$	0.065	0.074	0.047	0.069	0.074	0.160	
		$\gamma_{cs,v}$	0.247	0.251	0.268	0.268	0.268	0.189	
	SLWC	$\gamma_{cs,m}$	0.37	0.39	0.26	0.38	0.41	0.91	
		$\gamma_{cs,s}$	0.063	0.077	0.047	0.072	0.077	0.113	
		$\gamma_{cs,v}$	0.171	0.195	0.182	0.190	0.190	0.125	
	NWC	$\gamma_{cs,m}$	0.74	0.85	0.59	0.89	0.96	1.03	
		$\gamma_{cs,s}$	0.099	0.158	0.078	0.123	0.132	0.176	
		$\gamma_{cs,v}$	0.134	0.185	0.131	0.138	0.138	0.171	
	Total	$\gamma_{cs,m}$	0.57	0.65	0.44	0.66	0.71	0.97	
		$\gamma_{cs,s}$	0.237	0.290	0.204	0.309	0.332	0.184	
		$\gamma_{cs,v}$	0.416	0.447	0.462	0.469	0.469	0.190	
$e_{cf}$		0.792	0.682	1.363	0.720	0.639	0.184		
Tension properties		Statistical values	Code			Researcher		This study	
			CEB-FIP	EC2	Carniero and Barcellos	Slate et al.	Zhang et al.		
$f_{sp}$	ALWC	$\gamma_{cs,m}$	1.11	1.34	0.68	1.61	1.58	1.42	
		$\gamma_{cs,s}$	0.288	0.386	0.209	0.441	0.479	0.361	
		$\gamma_{cs,v}$	0.258	0.287	0.309	0.274	0.303	0.254	
	SLWC	$\gamma_{cs,m}$	1.14	1.27	0.70	1.65	1.63	1.44	
		$\gamma_{cs,s}$	0.252	0.293	0.182	0.386	0.417	0.310	
		$\gamma_{cs,v}$	0.220	0.230	0.261	0.233	0.256	0.215	
	NWC	$\gamma_{cs,m}$	0.90	0.83	0.51	1.24	1.19	1.08	
		$\gamma_{cs,s}$	0.286	0.332	0.222	0.474	0.508	0.380	
		$\gamma_{cs,v}$	0.317	0.398	0.435	0.382	0.425	0.351	
	HWC	$\gamma_{cs,m}$	0.93	0.74	0.54	1.30	1.25	1.11	
		$\gamma_{cs,s}$	0.226	0.208	0.180	0.392	0.414	0.304	
		$\gamma_{cs,v}$	0.243	0.282	0.336	0.301	0.330	0.274	
	Total	$\gamma_{cs,m}$	0.95	0.92	0.55	1.33	1.29	1.16	
		$\gamma_{cs,s}$	0.291	0.373	0.224	0.479	0.512	0.388	
		$\gamma_{cs,v}$	0.305	0.407	0.407	0.360	0.399	0.336	
		$e_{cf}$	0.329	0.564	1.428	0.338	0.366	0.321	
	Tension properties		Statistical values	Code			Researcher		This study
				ACI 318	CEB-FIP	NZS 3101	Slate et al.	Zhang et al.	
$f_r$	ALWC	$\gamma_{cs,m}$	0.90	0.59	0.62	1.19	0.57	0.62	
		$\gamma_{cs,s}$	0.583	0.361	0.376	0.774	0.371	0.379	
		$\gamma_{cs,v}$	0.648	0.611	0.611	0.648	0.648	0.609	
	SLWC	$\gamma_{cs,m}$	1.39	0.98	1.02	2.10	1.01	1.01	
		$\gamma_{cs,s}$	0.446	0.320	0.334	0.671	0.322	0.328	
		$\gamma_{cs,v}$	0.320	0.328	0.328	0.320	0.320	0.326	
	NWC	$\gamma_{cs,m}$	1.52	1.02	1.06	2.69	1.29	1.02	
		$\gamma_{cs,s}$	0.292	0.198	0.206	0.518	0.248	0.198	
		$\gamma_{cs,v}$	0.193	0.195	0.195	0.193	0.193	0.194	
	HWC	$\gamma_{cs,m}$	1.67	0.98	1.02	2.96	1.42	0.98	
		$\gamma_{cs,s}$	0.318	0.226	0.236	0.563	0.270	0.231	
		$\gamma_{cs,v}$	0.190	0.231	0.231	0.190	0.190	0.237	
	Total	$\gamma_{cs,m}$	1.45	0.97	1.01	2.47	1.18	0.98	
		$\gamma_{cs,s}$	0.408	0.273	0.285	0.752	0.360	0.275	
		$\gamma_{cs,v}$	0.281	0.283	0.283	0.305	0.305	0.281	
$e_{cf}$		0.443	0.073	0.149	0.245	0.073	0.092		

$\gamma_{cs,m}$ ,  $\gamma_{cs,s}$ ,  $\gamma_{cs,v}$  are mean, standard deviation, and coefficient of variation of the ratio  $(f_t(d)_{Exp}/f_t(d)_{Pre.})$ , respectively.

$e_{cf} (= \frac{1}{f_t(d)_M} \Sigma \left[ \frac{(f_t(d)_{Exp.} - f_t(d)_{Pre.})^2}{n} \right]^{1/2})$  = error coefficient, where  $f_t(d)_M$  is the mean of the measured tensile strength and  $n$  is the number of measured points.

준편차 0.184, 변동계수 0.190 및 오차계수 0.184로 CEB-FIP(1999) 및 EC2(2004)보다 실험결과를 잘 예측함을 알 수 있다. 특히, Eq. (2)의 오차계수는 CEB-FIP(1999)의 11%, EC2(2004)의 23%로 매우 낮았다.

### 3.2 쪼갬 인장강도 ( $f_{sp}$ )

콘크리트의 쪼갬 인장강도는 원주 공시체를 이용하여 평가되고 있으며, 이 방법은 ASTM과 RILEM 및 KS 규준에서 채택되어 사용되고 있다. 쪼갬 인장시험은 직접인장시험보다 간편하기 때문에 많은 연구자들(Zheng et al., 2001, Slate et al., 1986, Zhang et al., 1991)은 콘크리트의 쪼갬 인장실험을 통해 콘크리트의 인장강도를 평가하였다. 또한 쪼갬 인장강도는 직접 인장강도에 비해 분산정도가 상대적으로 작고 콘크리트의 압축강도에 대한 뚜렷한 영향을 보이기 때문에 압축강도의 함수로써 제시되고 있다(김지상, 신정호, 2009). 그러나 CEB-FIP(1999)와 EC2(2004)에서는 쪼갬 인장강도를 별도로 제시하지 않고 직접 인장강도를 0.9로 나누어 나타내고 있다.

콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도의 예측값( $(f_{sp})_{Pre.}$ )을 Fig. 4에 나타내었다. 동일한 그림의 CEB-FIP(1999)와 EC2(2004)의 콘크리트 기건 단위질량은 보통중량 콘크리트에서 일반적으로 사용되는  $2,200 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하였다. CEB-FIP(1999)와 EC2(2004)의 쪼갬 인장강도 제안값은 압축강도 100 MPa 이하에서 실험결과를 과대평가하고 있었다. 특히 압축강도 50 MPa 이하에서 EC2(2004)는 Table 2에 나타낸 바와 같이 별도의 식을 사용하여 쪼갬 인장강도를 CEB-FIP(1999)보다 더 낮게 예측하고 있었지만 실험결과보다 컸다. NWC에 근거

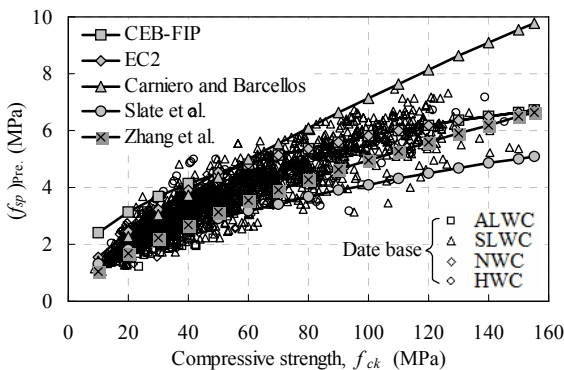


Fig. 4 Relationship between  $f_{sp}$  and  $f_{ck}$ .

한 Camiero and Barcellos(1953)는 모든 강도 영역에서 쪼갬 인장강도를 과대평가하고 있었다. 또한 Slate et al.(1986)과 Zhang et al.(1991)은 압축강도 20 MPa 이하에서는 실험결과를 잘 예측하였지만 압축강도가 증가함에 따라 실험결과를 과소평가하였다. 이는 Slate et al.(1986)과 Zhang et al.(1991)의 제안모델이 SLWC의 실험결과에 근거하고 있기 때문이다.

콘크리트의 쪼갬 인장강도에 대한 상관관계 분석결과 쪼갬 인장강도는 콘크리트의 기건 단위질량보다는 압축강도에 큰 영향을 받았다. 이에 콘크리트의 압축강도와 기건 단위질량을 주요변수로 비선형 회귀분석을 수행한 결과 Eq. (3)과 같은 콘크리트의 기건 단위질량을 고려한 쪼갬 인장강도 예측식을 얻을 수 있었다.

$$f_{sp} = 0.3 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{0.1} f_{ck}^{0.6} \quad r^2 = 0.91 \quad (3)$$

Eq. (3)은 Table 3에 나타낸 바와 같이 평균 1.16, 표준편차 0.388, 변동계수 0.336 및 오차계수 0.321로 실험결과를 설계기준 및 제안 모델들보다 잘 예측하였다.

### 3.3 파괴계수

콘크리트의 파괴계수는 일반적으로 3등분점 휨 시험법에 의해 평가된다. CEB-FIP(1999)에서는 ACI 318-11(2011) 및 NZS 3101(2006)과 달리 실험체의 크기효과를 고려하고 있다. 그러나 DB에는 파괴계수 실험체의 단면에 대한 정보가 누락되어 있어 모든 실험체의 단면을 CEB-FIP(1999)의 기존 시험체 높이인 150 mm로 가정하였다. Slate et al.(1986)과 Zhang et al.(1991)은 콘크리트 압축강도의 제곱근의 함수로써 파괴계수를 제

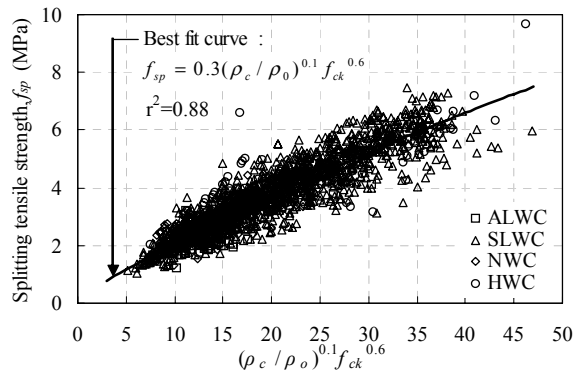


Fig. 5 Relationship between  $f_{sp}$  and  $(\rho_c / \rho_0)^{0.1} f_{ck}^{0.6}$ .

시하였다.

콘크리트의 압축강도와 파괴계수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 그림에 설계기준 및 제안모델에 의한 예측값을 함께 나타내었다. 콘크리트의 파괴계수는 압축강도가 증가할수록 증가하였으며, 동일한 압축강도에서는 LWC가 NWC 및 HWC보다 낮았다. ACI 318-11(2011)과 NZA 3101(2006)의 예측값은 시험결과를 과소평가하고 있었으며, 그 경향은 압축강도가 증가할수록 증가하였다. CEB-FIP(1999)의 예측값은 압축강도 50 MPa 이하에서는 실험결과를 과대평가하고 있었지만 50 MPa 이상에서는 과소평가하였다. 이는 CEB-FIP(1999)의 파괴계수 예측에 있어서 정확한 시험체의 단면크기를 반영하지 않았기 때문에 나타나는 오차로 생각될 수 있지만, 고강도 영역에서 파괴계수가 너무 낮게 예측되고 있다. SLWC의 실험결과에 근거한 Slate et al.(1986)과 Zhang et al.(1991)의 예측값은 LWC의 실험값을 과대평가하고 있었다.

압축강도와 기건 단위질량을 주요변수로 DB로부터 비선형 회귀분석한 결과 콘크리트의 파괴계수를 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$f_r = 0.5 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{0.7} f_{ck}^{0.7} \quad r^2 = 0.88 \quad (4)$$

Eq. (4)는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 LWC에서 실험결과를 조금 과대평가하고는 있지만 NWC와 HWC에서는 실험결과를 잘 예측하고 있었다. 특히, Eq. (4)는 Table 3에 나타낸 바와 같이 NWC 및 HWC에서 각각 1.02 및 0.98로 설계기준(ACI 318-11, 2011; CEB-FIP,

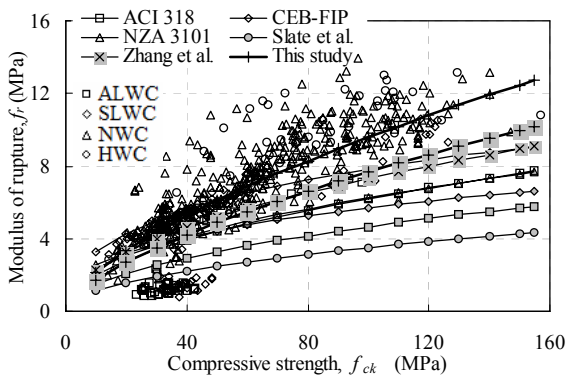


Fig. 6 Relationship between  $f_{sp}$  and  $f_{ck}$ . (Bold and white symbols indicate concrete unit weight with 1,600 and 2,200 kg/m<sup>3</sup>, respectively.)

1999; NZA 3101, 2006) 및 다른 제안모델(Slate et al., 1986; Zhang et al., 1991)보다 실험결과를 잘 예측하였다. 그러나 Eq. (4)에서 콘크리트의 기건 단위질량을 고려했음에도 불구하고 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 압축강도 20~50 MPa 영역의 LWC에서 실험결과를 과대평가하였다. 이에 향후 LWC에서 압축강도 20~50 MPa 영역의 연구결과들을 지속적으로 추가하여 Eq. (4)에 대한 안정성 검토에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.4 인장강도들의 상관성

콘크리트의 인장강도들의 상관성이 단순히 예측모델들의 수학적비로 결정하게 되면 수학적 예측에 따른 오차가 너무 크게 발생한다. 이에 본 연구에서는 비선형 회귀분석을 통해 각각의 인장강도 특성들의 상관성을 분석하였다.

CEB-FIP(1999)와 EC2(2004)는 콘크리트의 직접인장강도를 쪼갬 인장강도의 90%라고 제시하고 있다. 그러나 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 콘크리트의  $f_t/f_{sp}$ 는 콘크리트의 기건 단위질량의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히, 콘크리트의 기건 단위질량 2,100 kg/m<sup>3</sup> 이하에서는  $f_t/f_{sp}$ 가 0.9 이하에 있었으며, 기건 단위질량이 감소함에 따라  $f_t/f_{sp}$ 는 감소하였다. 이에 콘크리트의  $f_t/f_{sp}$ 를 기건 단위질량의 함수로 제시하기 위해, 이를 변수로 비선형 회귀분석을 수행하였으며, 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$f_t = 1.0 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{2.75} f_{sp} \quad (5)$$

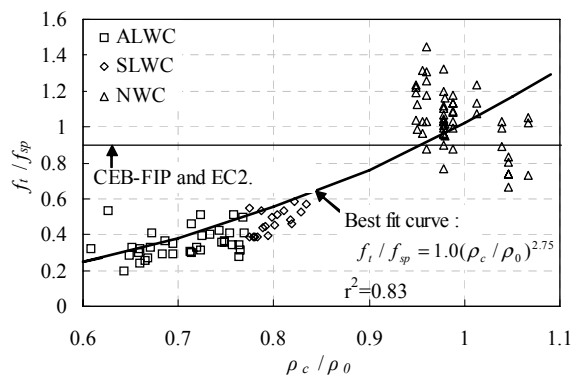


Fig. 7 Relationship between  $f_t/f_{sp}$  and  $\rho_c/\rho_0$ .

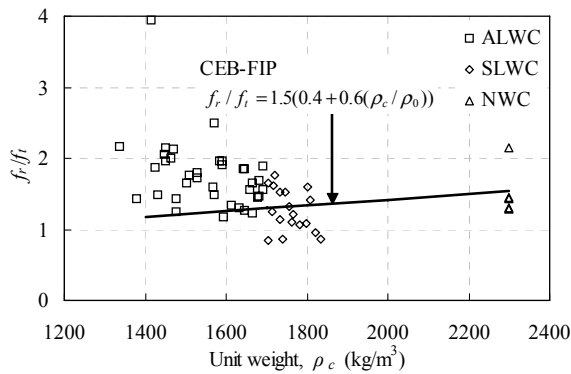


Fig. 8 Relationship between  $f_r/f_t$  and  $\rho_c$ .

콘크리트의 기건 단위질량에 대한  $f_r/f_t$ 의 관계를 Fig. 8에, 콘크리트의 기건 단위질량에 대한  $f_r/f_{sp}$ 의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 각각의 그림에는 CEB-FIP(1999)와 ACI 318-11(2011)에서 제시하는 예측모델을 함께 나타내었다. 일반적으로 파괴계수는 직접 인장강도 또는 쪼갠 인장강도보다 높은 수준에 있었지만, LWC에서는 쪼갠 인장강도가 파괴계수보다 높았다. CEB-FIP(1999)와 ACI 318-11(2011)의 예측모델은 실험결과를 유사하게 예측하고 있었지만 그 정확성은 매우 낮았다. 또한 실험값은 넓은 범위로 분산되어 있어 일정한 경향을 찾을 수 없었다. 이로 인해 현재의 DB를 기준으로 파괴계수와 직접 및 쪼갠 인장강도의 관계에 대한 뚜렷한 경향을 찾기는 어려우며, 추가적인 연구를 위해 더 많은 실험데이터들이 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

총 1,917(LWC 391개, NWC 1,335개 및 HWC 221개)개의 실험결과를 포함하는 데이터베이스를 이용하여 콘크리트 기건 단위질량이 인장강도(쪼갠 인장강도, 직접 인장강도 및 파괴계수)에 미치는 영향을 평가하고 기건 단위질량을 고려한 새로운 예측모델들을 제시하였다. 실험결과들의 회귀분석 및 기존 모델들의 타당성에 대한 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 콘크리트의 인장강도에 대한 기건 단위질량의 영향은 직접 인장과 파괴계수에서는 중요하게 나타났지만 쪼갠인장에서는 매우 작았다.
- (2) 콘크리트의 직접 인장강도에 대한 설계기준 및 기존 연구자들의 제안모델은 기건 단위질량 2,100

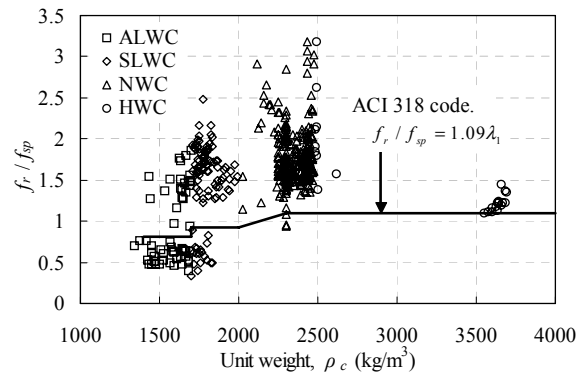


Fig. 9 Relationship between  $f_r/f_{sp}$  and  $\rho_c$ .

- kg/m<sup>3</sup> 이하인 LWC의 실험값을 2배 이상 과대평가하였다. 이에 콘크리트의 기건 단위질량을 고려한 새로운 직접 인장강도 예측모델이 제시되었다.
- (3) 콘크리트의 쪼갠 인장강도는 기건 단위질량보다는 압축강도에 현저한 영향을 받았다.
- (4) 콘크리트의 파괴계수에 대한 설계기준 및 기존 연구자들의 제안모델은 압축강도 50 MPa 이상에서 실험결과를 과소평가하였으며, 기건 단위질량을 고려한 콘크리트의 파괴계수는  $(\rho_c/\rho_0)^{0.7}$ 과  $f_{ck}^{0.7}$ 의 함수로 예측될 수 있었다.
- (5) 콘크리트의  $f_t/f_{sp}$ 은 CEB-FIP의 제시모델과 달리 콘크리트의 기건 단위질량을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$f_t/f_{sp} = 1.0 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{2.75}$$

- (6) 콘크리트의 파괴계수와 직접 인장강도 및 쪼갠 인장강도의 상관관계는 매우 낮았는데, 이를 보완하기 위해서는 신뢰할만한 실험 데이터들의 추가 수집이 필요하다고 판단되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0067189, 2011-0028983).

#### 참고문헌

1. 김성철, 박기찬, 최형욱, "인공경량골재의 입도에 따른 고강도 경량콘크리트의 강도변화에 대한 실험적 연구", 한국구조물진단학회지, vol. 15, No. 5, 2011, pp.209-217.



2. 김지상, 신정호, “통계적 분산을 고려한 콘크리트의 역학적 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, vol. 21, No. 6, 2009, pp.789-796.
3. 양근혁, 크기효과를 고려한 구조용 경량 콘크리트의 역학적 특성 평가모델 개발, 경기대학교, 2010.
4. 콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 서울, 2007, pp.95-96.
5. 홍건호, “콘크리트 직접인장강도의 세장비 효과”, 한국콘크리트학회 논문집, vol. 15, No. 2, 2003, pp.246-253.
6. ACI 213R-03, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2003.
7. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11)”, American Concrete Institute, 2011.
8. Carniero, F. B. and Barcellos, A., “Tensile Strength of Concretes”, RILEM Bulletin (Paris), No. 13, 1953, pp.97-123.
9. Comita Euro-International du Beton (CEB-FIP), Structural Concrete : Textbook on Behaviour, Design and Performance, International Federation for Structural Concrete (fib), 1999.
10. Li, Q. and Ansari, F., “High-Strength Concrete in Uniaxial Tension”, ACI Materials Journal, vol. 97, No. 1, 2000, pp.49-57.
11. New Zealand Standard. Concrete structures standard. NZS 3101:2006. The design of concrete structures, Wellington, 2006, New Zealand.
12. RILEM CPC7 Recommendation, Direct tension of concrete specimens, 1975.
13. Sim J. I., Yang, K. H., Kim, H. Y. and Choi, B. J., “Size and Shape Effects on Compressive Strength of Lightweight Concrete”, Cement and Concrete Research, Under Review for Publication, 2012.
14. Slate, F. O., Nilson, A. H. and Martinez, S., “Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete”, ACI Journal, vol. 83, No. 4, 1986, pp.606-613.
15. The European Standard EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2 : Design of Concrete Structures, British Standards Institution, 2004. pp.27-37.
16. Zain, M. F. M., Mahmud, H. B., Ilham, A. and Faizal, M., “Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete”, Cement and Concrete Research, vol. 32, No. 8, 2002, pp.1251-1258.
17. Zhang, M. H. and Gjorv, O. E., “Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete”, ACI Materials Journal, vol. 88, No. 3, 1991, pp.240-247.
18. Zheng, A., Kwan, A. K. H. and Lee, P. K. K., “Direct Tension Test of Concrete”, ACI Materials Journal, vol. 98, No. 1, 2001, pp.63-71.

(접수일자 : 2012년 2월 20일)

(수정일자 : 2012년 5월 10일)

(심사완료일자 : 2012년 6월 11일)

## 요 지

본 연구에서는 경량 콘크리트에 대한 361개, 보통중량 콘크리트에 대한 1,335개 및 고중량 콘크리트에 대한 221개의 데이터를 이용하여 콘크리트의 인장강도 (직접인장강도, 쪼갬인장강도 및 파괴계수)에 대한 설계기준과 기존 연구자들의 제안모델의 안정성을 평가하였다. 콘크리트 인장강도 예측을 위한 대부분의 제안 식들은 보통중량 콘크리트의 실험결과를 이용하여 압축강도의 함수로서 제시되었다. 하지만 데이터베이스의 분석은 콘크리트 인장강도는 기건 단위질량에 의해서도 중요한 영향을 받음을 보여 준다. 이에 따라, 콘크리트 인장강도에 대한 기준 및 제안모델들은 기건 단위질량 2,100 kg/m<sup>3</sup> 이하, 압축강도 50 MPa 이상에서는 실험결과와의 불일치가 증가하였다. 한편, 본 연구에서 콘크리트 기건 단위질량을 고려하여 제시된 콘크리트 인장강도 예측 모델들은 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

**핵심 용어** : 기건 단위질량, 인장강도, 압축강도, 데이터베이스