

# 고강도 콘크리트 인장부재의 인장강화효과와 균열거동

## Tension Stiffening Effect and Crack Behavior of Tension Members Using High Strength Concrete

김지상<sup>1\*</sup> · 박찬혁<sup>2</sup>Jee-Sang Kim<sup>1\*</sup> · Chan Hyuk Park<sup>2</sup>

(Received January 25, 2018 / Revised March 1, 2018 / Accepted March 2, 2018)

The verification of serviceability of concrete structures requires more informations on the composite behaviors between concrete and reinforcement. Among them, the investigation of crack widths and spacings is based on the tension stiffening effects. In this paper, the tension stiffening effects of high strength concrete members with compressive strength of 80 and 100MPa are investigated experimentally. It was found that the current design code which is based on the tests of normal strength concrete may not describe the tension stiffening effects in high strength concrete correctly. The coefficient that can appropriately reflect the tension stiffening effects in the high strength concrete was proposed. Also, the crack spacing was investigated through the cracking behaviors and the crack width according to the difference of the strains in steel and concrete was estimated. The results of this paper may be used to examine the tension stiffening effects of high strength concrete members.

**키워드 :** 인장강화효과, 고강도 콘크리트, 인장부재, 피복두께

**Keywords :** Tension stiffening effect, High strength concrete, Tension member, Cover thickness

### 1. 서론

철근콘크리트 부재에서 철근과 콘크리트의 재료 성능은 상호 합성 작용에 의하여 재료 자체의 성능과 크게 다르게 나타난다. 콘크리트는 철근과 주변 콘크리트에 의하여 구속되거나 연화되면 응력-변형을 관계가 현저하게 변화하며, 콘크리트 내부에 묻혀 있는 철근은 인장강화효과(tension stiffening effect)에 의하여 철근 자체의 응력-변형을 관계와 다르게 된다. 일반적으로 강도설계법에 따라 철근콘크리트 부재를 설계할 때 인장영역의 콘크리트 역할은 무시하고 힘의 평형 조건만을 고려한다. 실제 철근 콘크리트 구조물의 성능을 평가하여 구조물의 설계 및 해석에 반영하기 위해서는 합성 거동에 관한 기초적인 현상을 거시재료적 관점에서 힘의 평형조건뿐만 아니라 변형적합조건도 고려해야 할 필요성이 점차 증가되고 있다(Kim 2014).

철근으로 보강된 콘크리트 인장부재에 균열이 발생하면 두 재료의 강성 차이에 의해 균열 면에서 응력의 재분배가 이루어진다.

균열이 발생한 지점에서는 작용하중에 의한 모든 인장력을 철근이 부담하지만, 하중이 증가함에 따라 균열이 계속적으로 형성되면서 균열 단면 사이에서의 콘크리트는 부착에 의해 철근으로부터 전달 되는 인장력의 일부를 부담하게 된다. 이와 같이 균열 단면 사이의 콘크리트에 의해 철근의 강성이 증가하거나 변형을 또는 응력이 감소하는 현상을 인장강화효과라 한다(CEB-FIP 1991). 이는 강성 및 유효단면 2차 모멘트 등에 영향을 주며, 균열폭 및 처짐과 같은 사용한계상태(serviceability limits states)에서의 사용 성능 요구 조건을 검토하는 등 균열 단면 사이에서 인장력을 부담하는 콘크리트의 성능을 평가하는 데 고려하여야 하는 중요한 요소라고 할 수 있다(Kim et al, 2001).

Fig. 1은 인장강화효과의 개념을 보여 주는 것으로, 균열 형성 단계 ①에서는 새로운 균열이 발생한 후에 원래의 인장력이 감소하기 때문에 수직 방향의 인장력은 증가하지 않는다. 이 단계에서 최대균열 폭은 인장력이 균열 하중  $N_c$ 에 도달할 때마다 얻어진다.

\* Corresponding author E-mail: zskim@skuniv.ac.kr

<sup>1</sup>서경대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Seokyeong University, Seoul, 02713, Korea)

<sup>2</sup>(주)이디시엠 (EDCM Engineering Co., Ltd., Anyang, 14057, Korea)

충분한 균열이 형성되면 균열 사이에서 콘크리트의 인장강도 ( $f_{dm}$ )에 더 이상 도달할 수 없으므로 새로운 균열이 나타나지 않게 된다. 이는 콘크리트의 인장강도는 철근과 콘크리트의 부착강도에 의존하는데 충분한 균열이 형성되었을 때는 부착력이 거의 사라지기 때문에  $f_{dm}$ 에 도달하기 어렵다. 이것이 Fig. 1의 균열 안정화 단계 ③의 시작이다. 이 단계에서는 새로운 균열이 형성되지 않지만 기존에 형성된 균열의 폭이 넓어진다. 마지막으로 철근은 단계 ⑤에서 항복하기 시작한다. 이 모델의 경우, 선 ②는 수평 균열력  $N_r = A_c f_{dm} (1 + \alpha_c \rho_{s,cf})$ 으로 가정되었다.  $N_r$ 은 균열이 발생할 때의 인장균열하중이고  $A_c$ 는 콘크리트의 단면적,  $f_{dm}$ 은 콘크리트의 인장강도,  $\alpha_c$ 는 단면의 압축합력을 계산하는데 필요한 계수,  $\rho_{s,cf}$ 는 유효인장철근비를 각각 나타낸다. 여기서, 말하는 인장강화효과는 균열 후 ③의 단계를 말하는 것이고 주변콘크리트에 의해 철근의 변형률이 감소하는 현상이다. Fib Model Code 2010(fib 2013)에서는 직접인장실험 결과를 바탕으로 인장강화효과를 Fig. 1에 보인 철근의 평균변형률 함수로 정의하고 있는데, 이 식은 보통강도 콘크리트를 기준으로 하고 있으며, 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \sigma_{sr}}{E_s} - \eta \epsilon_{sh} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{sm}$ 은 콘크리트와 철근의 미끄러짐이 일어나는 구간에서 철근의 평균변형률,  $\epsilon_{cm}$ 은 같은 구간에서 콘크리트의 평균변형률,  $\epsilon_{sh}$ 는 콘크리트의 수축변형률,  $\sigma_s$ 는 균열에서의 철근의 응력,  $\sigma_{sr}$ 은 균열생성단계에서 균열위치에서의 철근의 응력,  $E_s$ 는 철근의

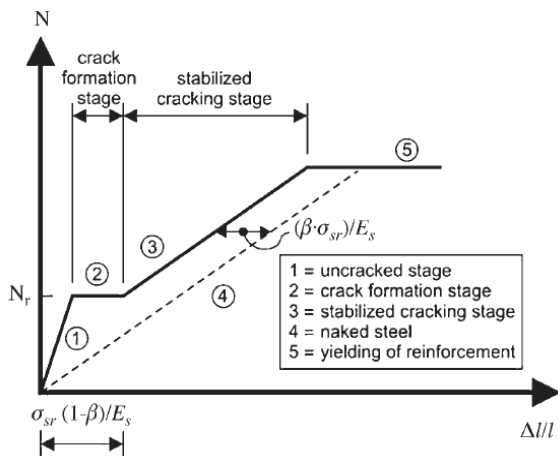


Fig. 1. Simplified load-strain relation for a centrally reinforced member subjected to tension(fib, 2013)

탄성계수(MPa),  $\beta$ 는 하중형태에 따라 결정되는 실험상수,  $\eta$ 는 하중 형태와 지점 조건에 따른 휨모멘트도의 형태에 따른 값이다.

이 연구는 고강도 콘크리트를 사용한 직접인장부재의 인장강화 현상 특성을 실험적으로 파악하기 위하여, 철근 지름에 대한 피복두께비와 콘크리트의 압축강도를 변수로 하여 실험체를 제작하고 직접인장실험을 수행하였다. 이 실험으로 구한 결과를 이용하여 콘크리트 압축강도 수준별로 피복두께비에 따른 인장강화효과를 파악하였으며, 이를 바탕으로 인장강화계수를 수정하고 균열거동에 따른 균열간격을 파악하여 균열간격의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 실험 개요

이 연구에서 제작한 시험체는 축 방향으로 하중이 가해지는 직접 인장 부재로 700mm의 길이를 가지며 보강재로 시험체의 중심에 위치시킨 항복강도 420MPa의 D13 철근을 사용하였다. 시험체의 단면적은 모든 경우 10,000mm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하였으며, 철근지름에 대한 피복두께의 비율( $c/d_b$ )을 1.5에서 3.5 사이에서 0.5씩 변화하도록 하였다. 실험 결과의 분석은 동일한 변수에 대하여 각각 3개 실험체를 제작하여 그 평균값을 이용하였다. 콘크리트의 목표압축강도는 80MPa(SC80)와 100MPa(SC100)로 설정하였으며, 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 표준 시험체를 이용한 압축 강도 시험 결과 SC80은 82.4MPa, SC100은 103.5MPa로 각각 측정되었다. 또한 보통강도콘크리트 (NC30)의 결과를 이용하여 고강도 콘크리트의 결과와 비교하였는데, 보통강도 콘크리트의 물시멘트비는 48%, 잔골재율은 40.9%이다. Table 1은 SC80 과 SC100 시험체를 제작하는 데 사용한 재료 배합을 정리한 것이다.

Table 1. Mix proportions

	SC80	SC100
W/B	0.225	0.2
S/A	0.42	0.42
Water content(kg/m <sup>3</sup> )	150	165
Cement content(kg/m <sup>3</sup> )	466	577
Blast Furnace Slag(kg/m <sup>3</sup> )	133	165
Fly Ash(kg/m <sup>3</sup> )	66.7	0
Sand(kg/m <sup>3</sup> )	647	570
Aggregates(kg/m <sup>3</sup> )	898	792
Plasticizer(kg/m <sup>3</sup> )	6.667	18.15

## 2.1 실험절차

하중 재하는 3,000kN 용량의 UTM을 이용하여 변위제어방식을 적용하였으며 Fig. 2와 같이 철근과 상부의 프레임 고정시키고 하부의 프레임과 고정된 철근의 변위를 LVDT로 측정하였다. 이를 통해 철근 변형량을 측정하고 그 평균값을 이용하여 하중-변형률 관계를 조사하였다. 각 하중에 따른 균열을 기록하여 균열거동을 파악하고 부재에 따른 균열간격을 파악하였다.



Fig. 2. Experimental setup

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 파괴양상

강도별 피복두께의 영향을 확인하기 위하여 실험에서 측정된 하중-변형률 관계를 우리나라 도로교설계기준(한계상태설계법)(KIBSE 2015)에서 규정한 방법과 동일한 개념인 CEB-FIB Model Code 90(MC90)(CEB-FIP 1991)에서 제안한 인장강화 효과 산정식과 비교하였는데, Fig. 3은 SC80에 대한 결과를 정리한 것이다. 피복두께비( $c/d_b$ )가 상대적으로 낮은 1.5와 2인 경우에는 콘크리트의 압축강도가 높아졌음에도 불구하고 기존 일반강도 콘크리트와 같이 쪼갬균열이 먼저 발생하여 MC90에서 제안한 값에 못 미치는 것을 확인할 수 있다. 반면에 피복두께와 철근비( $c/d_b$ )가 충분히 확보된 2.5 이상인 부재에서는 MC90의 값을 상회하는 실험결과가 도출되었다. 따라서, 피복두께비가 달라짐에 따라 강도 콘크리트를 사용하는 경우 인장강화 계수의 수정이 필요하다고 판단된다.

또한 철근 지름의 영향을 파악하기 위하여 동일한 피복두께비( $c/d_b$ )에 대하여 D19를 사용한 기존의 실험결과(Kim et al. 2001)와 비교한 것을 Fig. 4에 정리하였다. D19철근을 사용한 실험체의 단면적은 D13철근을 사용한 실험체의 단면적과 동일한 철근비

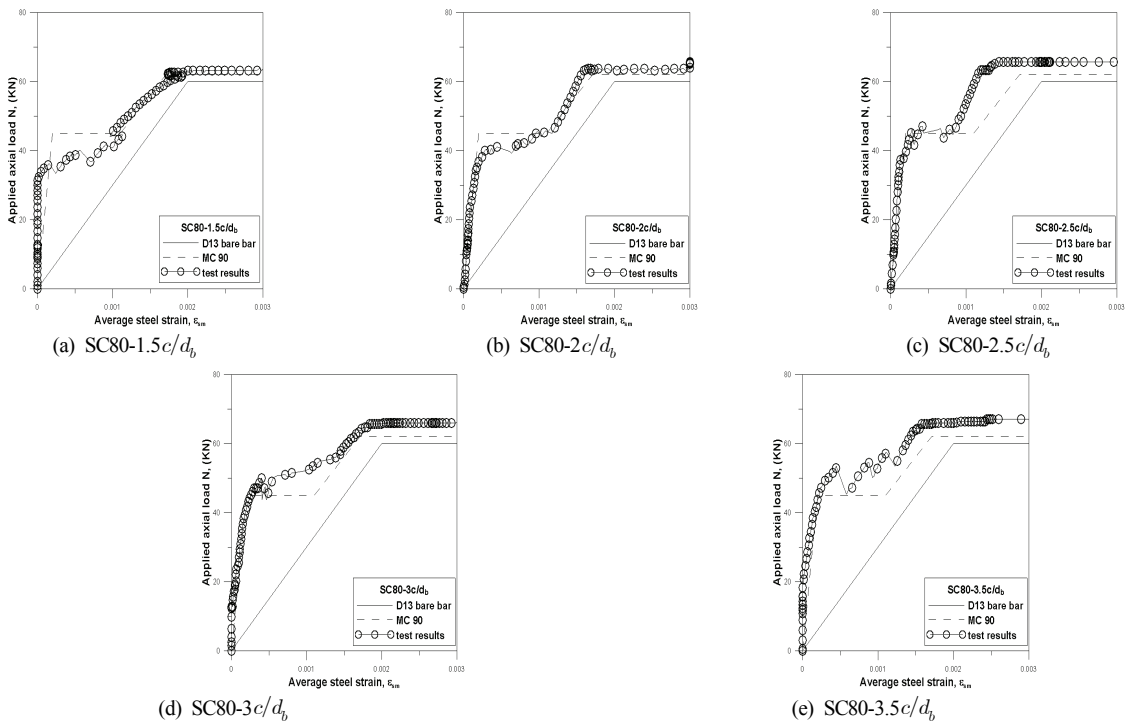


Fig. 3. Comparison between SC80 test results and MC90 by cover thickness

$\rho_b = 0.0124$ 를 사용하였으나 철근의 단면적이 다르기 때문에 실험체의 단면적은  $A_c = 23,000mm^2$ 이 되었다. D19를 사용한 실험체의 경우는 피복이 두꺼운 경우에도 쪼갬균열이 횡방향균열하중과 비슷하게 발생하여 인장강화효과가 감소되어, 철근의 지름 또한 인장강화 효과에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트 강도의 증가, 철근지름의 감소, 부착강도의 증가가 미끌림량의 감소를 가져오므로 작은 지름의 철근이 쪼갬균열에 저항하는데 보다 유리하다는 것을 의미한다(Lee et al. 2011).

SC100에 대한 실험결과를 정리한 것이 Fig. 5인데, SC80의 결과와 비슷한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 피복두께비

가 낮은 1.5와 2의 경우에는 설계기준에 따른 예상 균열발생 하중보다 작은 값에서 균열이 나타났으며, 피복두께비가 2.5 이상인 시험체에서도 설계기준보다 낮은 값에서 균열이 발생하였으나, 균열이 발생한 이후에는 설계기준보다 높은 인장강화효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 첫 균열이 발생하고 난 후 고강도 콘크리트일수록 부착응력의 증가에 따른 부착전달길이( $l_d$ )가 증가하여 응력재분배 능력이 높아지고 있다는 것을 의미한다.

### 3.2 보통강도 콘크리트와의 균열발생하중 비교

일반강도 콘크리트(NC30)와 고강도 콘크리트(SC80)의 균열발생 하중을 비교하여 고강도 콘크리트의 균열저항성을 확인하기 위하여, 압축강도별로 예상되는 횡방향균열 발생하중을 비교하여 정리한 것이 Table 2와 Fig. 6이며, Fig. 7에 콘크리트의 압축강도별 발생하중의 종류와 첫 번째 균열이 발생하는 시점을 나타냈다.

콘크리트 압축강도에 따른 균열발생하중은 NC30의 경우 28KN, SC80의 경우 45KN이다. Table 3과 Fig. 7에 예상되는 균열 발생하중과 실제 발생하는 균열 발생하중의 비를 나타냈다.

보통강도 콘크리트는 예상되는 횡방향균열하중( $N_{tr}$ )에 못 미치는 결과가 나타났고, 고강도 콘크리트는 피복두께비( $c/d_b$ )가 1.5 및 2인 경우에는 쪼갬균열이 먼저 발생하여 예상되는 횡방향균

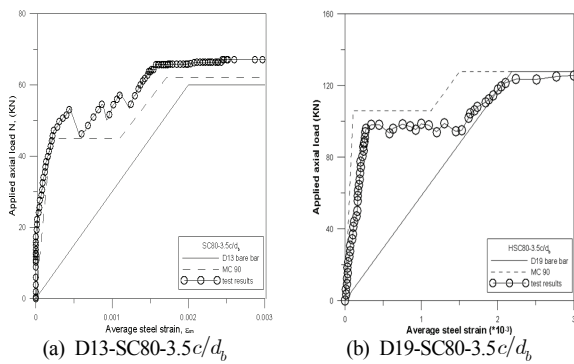


Fig. 4. Comparison of high strength concrete by diameter

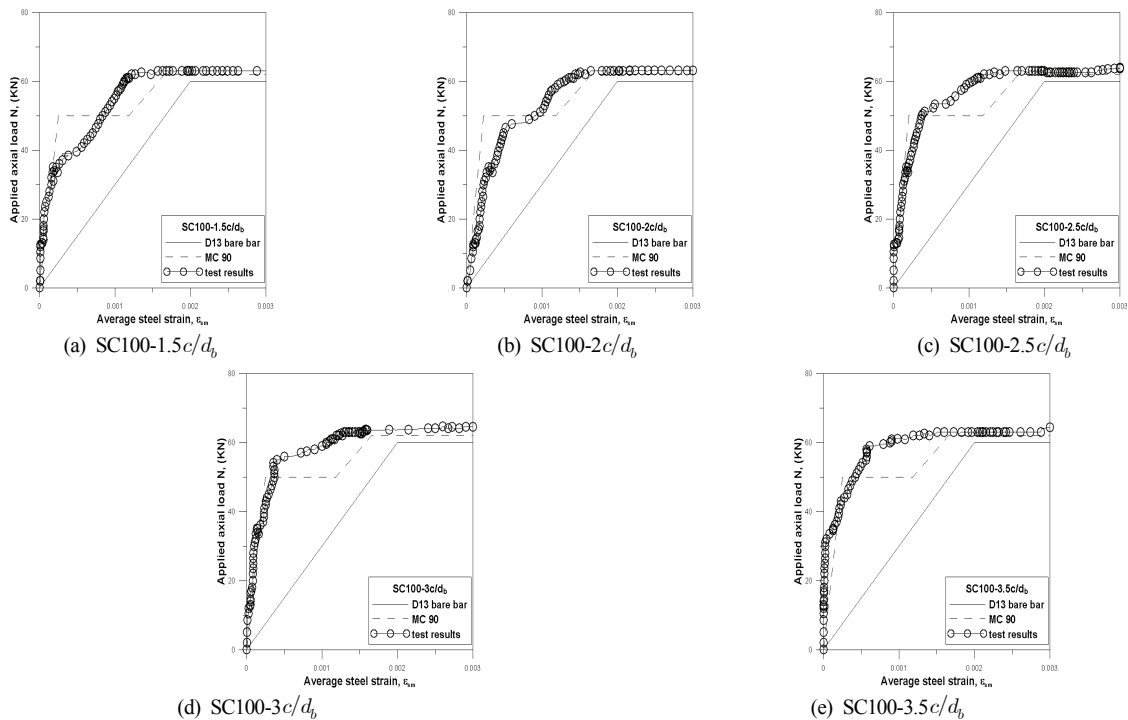


Fig. 5. Comparison between SC100 test results and MC90 by cover thickness

Table 2. Transverse cracking loads

$c/d_b$	Transverse cracking Loads, $N_{tr}$ (KN)	
	NC30	SC80
1.5	-	34
2	14	37
2.5	19	42.5
3	17	47
3.5	24	46

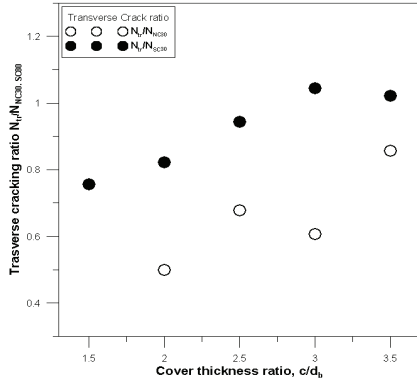


Fig. 6. Comparison of transverse cracking load ratio

열발생하중에 못 미치는 결과가 나타났지만 피복두께( $c/d_b$ )가 2.5 이상인 경우에는 쪼갬균열보다 횡방향균열이 먼저 발생하여 예상되는 횡방향균열발생하중과 비슷한 결과가 나타났다. D13 철근을 이용한 고강도 콘크리트는 피복두께가 충분히 확보되면 인장강화 효과를 감소시키는 요인인 쪼갬균열발생하중( $N_{sp}$ )을 방지할 수 있음을 확인하였으며, 이때 쪼갬균열발생하중( $N_{sp}$ )이 피복두께비가 높아짐에 따라 높아지는 것은 고강도 콘크리트와 일반강도 콘크리트에서 유사한 경향을 보이고 있다.

### 3.3 고강도콘크리트의 균열간격

이 연구에서 균열간격은 인장철근이 배치된 중앙면을 기준으로 실험체의 길이를 발생한 횡방향균열의 개수를 나눈 값으로 나타냈고 최대 및 최소균열간격은 실험체의 발생한 균열간격 중에 최댓값과 최솟값을 직접 측정하였다. Table 4에 고강도 콘크리트 부재의 강도에 따른 평균, 최대 및 최소균열간격을 나타냈다.

#### 3.3.1 평균균열간격

피복두께비에 따라 일반강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 평균균열간격을 측정하였는데, 고강도 콘크리트와 일반강도 콘크리트 실험체에서 모두 피복두께비가 증가함에 따라 평균균열간격이

Table 3. Transverse cracking load ratios

$c/d_b$	Transverse cracking Loads, $N_{tr}$ (ratio)	
	NC30	SC80
1.5	-	0.75
2	0.5	0.82
2.5	0.68	0.94
3	0.61	1.04
3.5	0.85	1.02

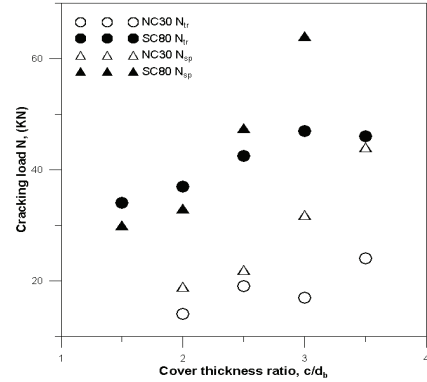


Fig. 7. Comparison of cracking load

Table 4. Crack spacing of SC80, SC100

$c/d_b$	Crack spacing of SC80(mm)		
	$s_{r,m}$	$s_{r,max}$	$s_{r,min}$
1.5	121	189	55
2	135	203	86
2.5	161	200	75
3	157.5	220	72.5
3.5	172.5	217.5	100

$c/d_b$	Crack spacing of SC100(mm)		
	$s_{r,m}$	$s_{r,max}$	$s_{r,min}$
1.5	135	190	90
2	138	197	100
2.5	162.5	207.5	112
3	203.5	220	150
3.5	210	235	140

증가하는 경향을 보였다. 또한, 고강도 콘크리트에서 일반강도 콘크리트에 비해 균열간격이 커짐을 알 수 있었는데, 이는 압축강도가 증가함에 따라 콘크리트의 인장강도가 증가하여 균열발생하중이 높아짐에 부착응력이 전달길이( $l_t$ )에 도달하는 구간이 길어짐에서 비롯된 것으로 판단된다.

현행설계기준에서 규정하고 있는 평균균열간격 계산식 및

Broms(1965)의 제안식과 측정된 평균균열간격을 Fig. 8에 비교하였는데, 보통강도 콘크리트 및 고강도 콘크리트 모두 설계기준의 식이 충분히 안전측의 값을 나타내고 있음을 확인하였다. 다만, 고강도 콘크리트에 직접 적용하기에는 편차가 큰 것으로 판단되므로 이에 대한 별도의 검토를 수행하였다.

### 3.3.2 최대균열간격

평균균열간격과 같이 피복두께비에 따라 고강도 콘크리트와 일반강도 콘크리트 인장부재의 최대균열간격에 대해서 측정을 하고 현행설계 기준과 비교하여 Fig. 9에 정리하였다. 평균균열간격의 경우와 유사하게 피복두께비가 증가할수록 최대균열간격도 증가함을 보였다. 또한 고강도 콘크리트와 일반강도 콘크리트의 피복두께비( $c/d_b$ )에 따른 균열간격은 고강도 콘크리트가 높게 나타나고 있다.

MC90과 EC-Part II 설계기준의 최대균열 계산식은 피복두께를 고려하지 않고 있기 때문에 일정한 결과값을 나타내고 있는데, 측정된 결과값보다 크게 값을 예측하는 것으로 나타났다. 이와는

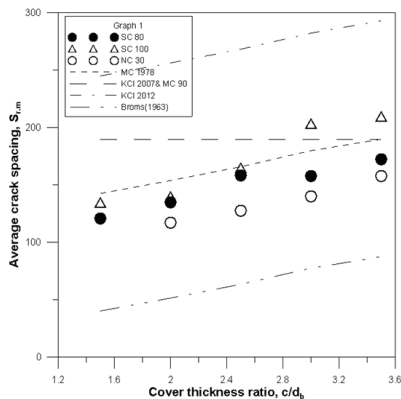


Fig. 8. Comparison of cracking spacing

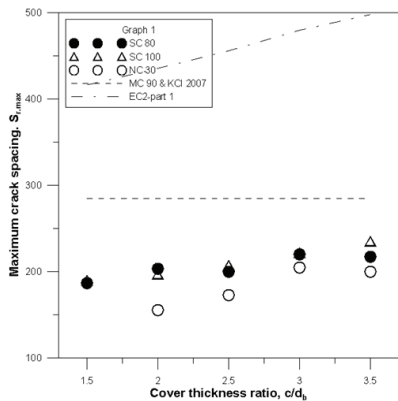


Fig. 9. Comparison of maximum crack spacing

다르게 피복두께의 영향을 고려하고 있는 EC-Part I의 규정은 피복두께가 두꺼워질수록 최대균열간격이 증가하는 경향은 일치하지만, 실험결과보다 상당히 높게 예측하고 있음을 확인할 수 있다(Eurocode2 2004).

## 4. 인장강화계수 수정 및 균열간격 상관관계

### 4.1 인장강화계수

MC90에서 인장강화계수는 0.4의 고정된 값이나 이 연구의 실험결과는 피복두께비( $c/d_b$ )에 따라 인장강화효과가 다르게 나타나고 있다. 피복두께비( $c/d_b$ )가 충분히 확보되지 못한 1.5와 2의 부재의 실험결과는 0.4에 미치지 못하는 값이 나타났고 피복두께가 충분히 확보된 2.5 이상의 시험체에서는 0.4를 넘는 결과가 나타났다. 이는 현행설계기준과 실험값이 차이가 있고 D13 철근을 사용한 고강도 콘크리트의 특성을 반영하는  $\beta_t$ 의 적절한 수정이 필요함을 의미한다.

고강도 콘크리트의 직접인장실험을 통해 측정된 콘크리트에 매입된 철근의 변형률과 작용하중의 비를 이용하여 피복두께에 따라 고강도 콘크리트의 인장강화효과를 파악하기 위한 인장강화계수  $\beta_t$ 를 분석하였다. 피복두께비에 따른 처음 균열이 발생하는 하중을 파악하고 균열하중 이후부터 철근 항복강도까지 작용하중 증가에 따라 계산된 인장강화계수를 실험체 별로 산술평균하여 대푯값을 설정하여 나타냈다. 이에 대해 예시로 SC80의 피복두께( $c/d_b$ )가 3.5인 값을 Fig. 10에 나타냈다.

이 값들에 대해서 피복두께비를 고려하여 회귀분석을 실시하고 MC90의 규정을 따라서 선형 인장강화효과 모델에 적용할 수 있는 다음과 같은 상관관계를 갖는 인장강화계수를 산정하는 식 (2)를 얻었다.

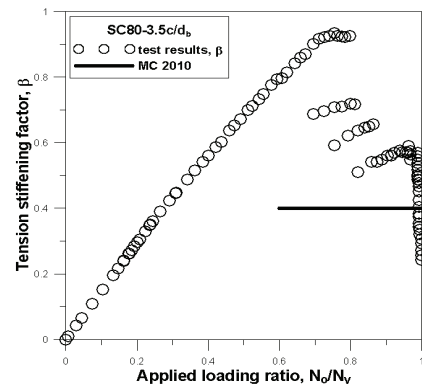


Fig. 10. Comparison of design criteria and tension stiffening factor

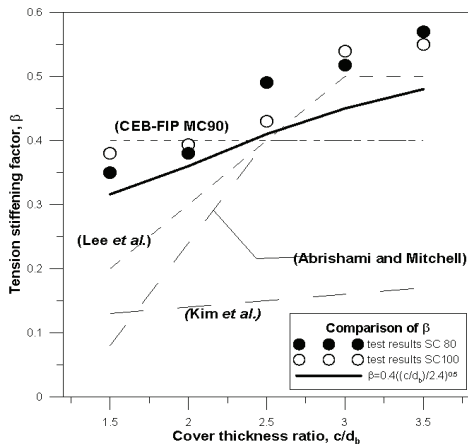


Fig. 11. Comparison of  $\beta_t$  with design criteria and proposed equation

$$\beta_t = 0.4 \left( \frac{c/d_b}{2.4} \right)^{0.5} \quad (2)$$

이 식을 통해서 피복두께비를 변수로 하는 고강도 콘크리트의 인장강화계수를 얻을 수 있었고 수정된 계수값과 실제 측정값을 비교하였을 때, 큰 차이가 나고 있지 않음을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 피복두께비와 인장강화계수의 관계를 기존의 연구결과와 비교하여 정리한 것이다.

피복두께비가 1.5부터 3.5까지의 범위에 대하여 제안된 고강도 콘크리트의 인장강화계수  $\beta_t$ 는 SC80과 SC100의 실험값들과 유사한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 D19 철근을 사용한 고강도 콘크리트의 인장강화 계수값을 비교했을 때 D13 철근을 사용했을 때보다 높은 값이 나타났다. 이는 고강도 콘크리트는 철근의 지름이 작을수록 높은 부착응력을 갖고 그에 따른 쪼갬균열이 늦게 발생하기 때문에 판단된다(Lee et al. 2011).

## 4.2 균열간격 상관관계

고강도 콘크리트의 인장부재의 직접인장 실험에서 발생한(Fig. 12 참조) 횡방향균열 간격을 측정하고 그 자료를 바탕으로 평균균열간격  $s_{r,m}$ 으로부터 최대균열간격  $s_{r,max}$  및 최소균열간격  $s_{r,min}$ 을 예측할 수 있는 상관관계를 나타냈다.

보통콘크리트 인장부재의 실험으로부터 제안한 균열간격은 Broms(1965)의 경우 식 (3)과 같다.

$$s_{r,max}/s_{r,min} = 2.0 \quad (3)$$

또한 Rizkalla and Hwang(1989)의 연구에서는 최대균열간격과



Fig. 12. Appearance of cracking occurrence

최소균열간격의 상관관계를 식 (4) 및 (5)로 제안하였다.

$$s_{r,max} = 1.34s_{r,m} \quad (4)$$

$$s_{r,min} = 0.7s_{r,m} \quad (5)$$

### 4.2.1 고강도 콘크리트 인장부재의 균열간격 상관관계

고강도 콘크리트 인장부재의 직접인장실험을 통하여 첫 번째 횡방향균열 발생 후부터 철근의 항복강도까지 하중 구간에서 측정된 평균균열간격과 최대 및 최소균열간격의 상관관계를 Fig. 13에 정리하였다. 이에 대한 분산을 확인하였는데, Rizkalla and Hwang(1989)의 의해 제안된 식의 분산과 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다.

Fig. 13에 보인대로 평균균열간격에 대한 최대균열간격과 최소균열간격의 상관관계를 SC80에 대하여 식 (6), (7)에, SC100에 대하여 식 (8), (9)에 각각 정리하였다.

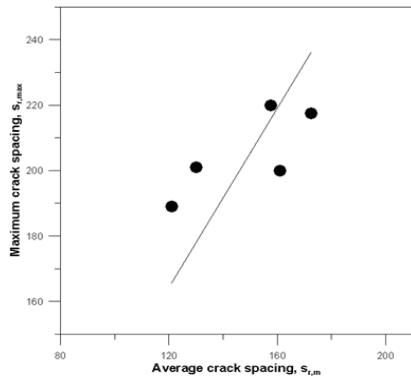
$$s_{r,max} = 1.37s_{r,m} \quad (6)$$

$$s_{r,min} = 0.52s_{r,m} \quad (7)$$

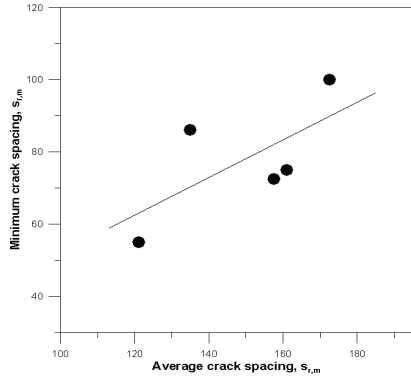
$$s_{r,max} = 1.21s_{r,m} \quad (8)$$

$$s_{r,min} = 0.69s_{r,m} \quad (9)$$

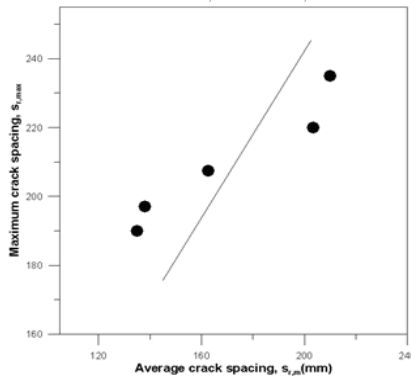
또한 Fig. 14를 통해 일반강도 콘크리트의 최대균열에 대한 평균균열간격의 상관관계를 도해하여 고강도콘크리트의 최대균열 상관관계와 비교하였다. 이를 확인하면 최대균열간격과 평균균열간격의 값은 고강도 콘크리트의 비례 작게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 평균균열간격을 이용하여 최대균열간격을 예측할 수 있는 상관관계 모델은 NC30과 SC80에서는 비슷한 기울기가 나타나 어느 정도 일치하는 상관관계가 나타나고 있다. SC100에서는 상대적으로 더 낮은 기울기가 나타나고 있는데 이는 고강도 콘크리트에서는 강도가 높아지면서 평균균열간격과 최대균열간격의 차이가 줄어들고 있음을 파악할 수 있다.



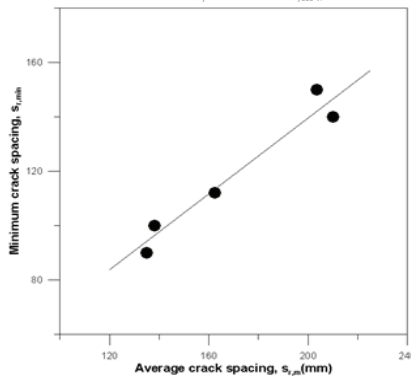
(a) Correlation of  $s_{r,m}$  with  $s_{r,max}$  SC80



(b) Correlation of  $s_{r,m}$  with  $s_{r,min}$  SC80



(c) Correlation of  $s_{r,m}$  with  $s_{r,max}$  SC100



(d) Correlation of  $s_{r,m}$  with  $s_{r,min}$  SC100

Fig. 13. Correlation of  $s_{r,m}$  with  $s_{r,min}$ ,  $s_{r,max}$  SC80, SC100

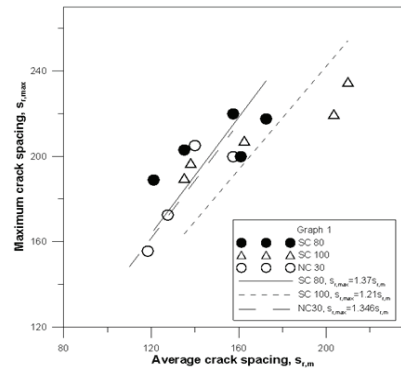


Fig. 14. Comparison of SC80, SC100 and NC30 correlation

#### 4.2.2 균열간격 검증

평균균열간격으로부터 최대균열간격을 예측하여 실험결과와 비교한 결과를 보면, 직접인장실험을 통해 측정된 평균균열간격과 최대균열간격 사이에는 비교적 일정한 관계가 있음을 확인할 수 있다. 그리고 이 연구에서 제안하는 평균균열간격과 최대균열간격의 상관관계 모델을 이용하여 최대균열간격을 예측한 결과, 피복 두께의 변화에 따라 다소간의 차이는 발생하지만 최대균열간격의 예측값은 비교적 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

이 논문은 고강도 콘크리트 구조 부재의 인장강화효과를 파악하기 위하여 콘크리트의 압축강도 및 철근의 지름에 대한 피복두께의 비를 변수로 하여 직접인장실험을 수행하였다. 현행 설계기준과 기존 연구의 다른 산정식을 비교하였고 추가된 변수에 따른 새로운 제안식을 산정하였다. 또한 고강도 콘크리트의 균열간격을 측정하고 고강도 콘크리트의 균열간격의 상관관계를 파악하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고강도 콘크리트 인장부재의 횡방향균열 발생 하중은 콘크리트의 압축강도가 증가함에 비례하여 증가한다. 또한 피복두께비의 증가에 따라서 균열 발생하중이 높아진다.
2. 고강도 콘크리트의 경우 일반 콘크리트와 같이 피복두께가 충분히 확보되지 못하면 쪼갬균열이 발생하기 때문에 피복두께가 2.5 이상으로 충분히 확보되면 인장강화효과가 비교적 크게 증가하였다.
3. 기존의 D19 철근을 사용한 고강도 콘크리트 인장부재와 D13을 사용한 고강도 콘크리트 인장부재를 비교하였고 D13을 사용한 콘크리트 인장부재가 뚜렷하게 인장강화효과가 나타남을 확인하였다.



4. CEB FIP MC 2010의 인장강화효과 규정을 이용하여 고강도 콘크리트 인장부재의 인장강화효과를 좀 더 정확하게 예측하기 위해서 피복두께비 변화에 따른 특성을 반영할 수 있도록 새로운 인장강화 계수를 도입한 인장강화효과 모델을 제안하였다.
5. 고강도 콘크리트 인장부재의 균열간격은 피복두께비가 커질수록 증가하였고, 고강도 콘크리트 인장부재가 일반강도 콘크리트에 비해 평균균열간격 및 최대균열간격이 높게 나타남을 알 수 있었다.
6. 고강도 콘크리트 인장부재의 균열간격에 대해서 평균균열간격을 활용해 최대 및 최소균열간격을 예측할 수 있는 상관관계 모델을 제안하였다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업(17SCIP-C120791-02)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

Abrishami, H.H., Mitchell, D. (1996). Influence of splitting cracks on tension stiffening, *ACI Structural Journal*, **93(6)**, 703-710.  
 ACI Committee 224. (1986). Cracking of concrete members in direct tension, *ACI Journal*, **83(4)**.  
 Broms, B.B., Lutz, L.A. (1965). Effect of arrangement of reinforcement on crack width and spacing of reinforced concrete members, *ACI Journal*, **62(11)**, 1395-1420.

CEB-FIP. CEB-FIP model code 1990(1991), Comite Euro International Du Beton, Paris, 87-109.  
 Eurocode 2. (2004). Design of Concrete Structures Part 1-1: general Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardisation, Brussels.  
 Eurocode 2. (2005). Design of Concrete Structures Part 2: Concrete Bridges - Design and Detailing Rules, European Committee for Standardisation, Brussels.  
 Fib. (2013). Fib Model code 2010. First Complete Draft - Volume 2, Féd Ration Internationale Du béton, Switzerland, 137-140.  
 Korea Institute of Bridge and Structural Engineers(KIBSE). (2015). Korea Highway Bridge Design Code, Construction Information Press, Seoul, 5-127-5-130 [in Korean].  
 Kim, W. (2014). Limit State Design of Concrete Structures, DongHwa Technology Publishing Co., Seoul, 90-91 [in Korean].  
 Kim, W., Lee, K.Y., Yeom, H.S. (2001). A study on the bonding characteristics and crack behavior of high strength concrete tension member(1)-to the center of tension stiffening effect, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, **21(5-a)**, 687-697 [in Korean].  
 Lee, K.Y., Kim, M.J., Kim, W., Lee, H.M. (2011). Tension stiffening effect considering cover thickness in reinforced concrete tension members, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(6)**, [in Korean].  
 Lee, M.S., Seo, T.S., No, Y.S. (2011). Experimental study on bond strength of high strength concrete flexural member under crack stabilization, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure*, **27(9)**, 37-44 [in Korean].  
 Rizkalla, S.H., Hwang, L.S. (1986). Crack prediction for members in uniaxial tension, *ACI Journal*, **81(6)**, 572-579.

### 고강도 콘크리트 인장부재의 인장강화효과와 균열거동

콘크리트 구조물의 사용성능을 검증하기 위하여 콘크리트와 철근의 상호 합성 작용에 대한 많은 정보가 필요한데, 균열폭 및 균열간격의 평가는 두 재료의 상호작용인 인장강화효과에 근거하여 이루어진다. 이 논문에서는 압축강도 80MPa 및 100MPa의 고강도 콘크리트에 D13 철근을 사용한 인장부재를 제작하여 직접인장실험을 진행하였다. 이를 통해 고강도 콘크리트의 인장강화 효과를 파악하였고 보통강도 콘크리트의 실험결과에 근거한 현행설계기준의 인장강화효과 평가가 부적절함을 확인하였다. 실험결과에 근거하여 고강도 콘크리트 콘크리트의 특성을 적절하게 반영할 수 있는 실험계수를 산정하였다. 또한 균열거동을 통해서 균열간격을 파악하고 이를 통해 고강도 콘크리트의 인장강화효과에 따른 철근변형률과 콘크리트 변형률 차이에 따른 균열폭을 확인하였다. 이 연구의 결과는 향후 고강도 콘크리트 부재의 인장강화 효과를 연구하는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.