



## 40~70 MPa 콘크리트에서의 철근 압축이음 길이

천성철<sup>1)\*</sup> · 이성호<sup>1)</sup> · 오보환<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(주)대우건설기술연구원 건축연구팀

# Compression Lap Splice Length in Concrete of Compressive Strength from 40 to 70 MPa

Sung-Chul Chun,<sup>1)\*</sup> Sung-Ho Lee,<sup>1)</sup> and Bohwan Oh<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Architectural Technology Research Team, Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C Co., Ltd., Suwon 440-210, Korea

**ABSTRACT** A compression lap splice becomes an important issue due to development of ultra-high strength concrete. Current design codes regarding compression lap splice do not utilize merits of the improved strength of ultra-high strength concrete. Especially, a compression lap splice can be calculated longer than a tension lap splice according to the codes because they do not consider effects of compressive strength of concrete and transverse reinforcement. This anomaly confuses engineers in practice. Design equation is proposed for compression lap splice in 40 to 70 MPa of compressive strength of concrete. The proposed equation is based on 51 specimens conducted by authors. Basic form of the equation includes main parameters which are derived from investigating test results. Through two-variable non-linear regression analysis of measured splice strengths, a strength equation of compression lap splices is then derived. A specified splice strength is defined using a 5% fractile coefficient and a lap length equation is constructed. By the proposed equation, the anomaly of lap lengths in tension and compression is got rid of. In addition, the equation has a reliability equivalent to those of the specified strengths of materials.

**Keywords :** compression lap splice, bond, end bearing, transverse reinforcement, specified splice strength

### 1. 서 론

초고강도콘크리트의 개발에 따라 철근 압축이음에 대한 연구 필요성이<sup>1)</sup> 높아지고 있다. 40여년 전의 연구를 바탕으로 한 현재의 압축이음 설계기준으로는 향상된 강도를 제대로 활용할 수 없다. 특히, Fig. 1과 같이 압축이음길이가 인장이음길이보다 길어지는 기현상(奇現象)이 발생되어, 실무의 혼란을 초래하기도 한다.

이러한 현상은 현행 설계기준에서 콘크리트 강도와 횡보강근의 영향을 고려하지 않기 때문이다. 본 연구에서는 저자들의 선행연구<sup>2,3)</sup>를 바탕으로 실험에서 사용된 강도범위인 40 MPa부터 70 MPa까지 콘크리트에 대한 압축이음길이를 제안하고자한다. 이를 위해, 먼저 현행 국내의 설계식을 분석하고 문제점과 해결방안을 모색하였다. 또한 실험 결과를 통해 도출된 압축이음의 영향인자들을 분석하여 이음강도식의 기본형을 만들었다. 실험 결과에 대한 회귀분석을 통해 이음강도 평가식을 마련하고, 최종적으로 설계기준에 사용될 수 있는 이음길이식

을 제안하였다. 더불어 제안된 식이 실무에서 원활히 적용될 수 있도록 구조세칙을 제시하고, 기존식과의 비교를 통해 제안식의 효용성을 검증하였다.

### 2. 설계기준과 선행연구 분석

대한민국,<sup>4)</sup> 미국,<sup>5)</sup> 캐나다,<sup>6)</sup> 뉴질랜드의<sup>7)</sup> 압축이음길이 산정식 기본형과 계수를 Table 1에 정리하였다. 이들 설계식은 PCA에서 수행된 11개의 기동실험에<sup>8)</sup> 근거하여 모두 동일한 형태를 취하고 있으며, 콘크리트 압축강도와 철근 순간격의 영향이 고려되지 않는다. 또한 뉴질랜드를 제외한 설계기준에서는 횡보강근의 영향도 고려하지 않고 있다. 뉴질랜드 기준에서는 횡보강근의 효과를 고려하여 스티럽 또는 나선철근이 식 (1)을 만족하는 경우 산정된 이음길이를 20% 줄일 수 있다.

$$\frac{A_{tr}}{s_{tr}} \geq \frac{A_b}{1000} \text{ for stirrups}$$

$$\frac{A_{tr}}{s_{tr}} \geq \frac{nA_b}{6000} \text{ for spiral reinforcement} \quad (1)$$

여기서,  $A_{tr}$ 은 간격  $s_{tr}$ (mm) 이내에서 조깅파괴면에 걸쳐

\*Corresponding author E-mail: bluebird@dwconst.co.kr

Received October 8, 2008, Revised April 10, 2009

Accepted April 28, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

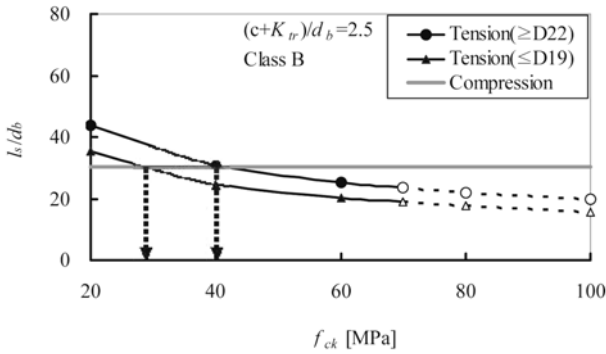


Fig. 1 Comparison of calculated lap lengths with varying concrete compressive strengths in case of  $(c + K_{tr})/d_b = 2.5$

Table 1 Summary of design equations for calculating lap lengths in compression

Codes	A	B	C	D
KCI	0.072	400	0.13	24
ACI	0.071	420	0.13	24
CSA	0.073	400	0.133	24
NZS	0.069	430	0.12	22
Equation	$l_s = A f_y d_b \quad \text{for } f_y \leq B \text{ MPa}$ $= (C f_y - D) d_b \quad \text{for } f_y > B \text{ MPa}$ <p>where <math>f_y</math> is a specified yield strength of bar (MPa) and <math>d_b</math> is a nominal diameter of bar (mm).</p>			

진 횡보강근량과 전체 횡보강근량을 이음되는 철근 수  $n$  으로 나눈값 중 작은 값( $\text{mm}^2$ )이고  $A_b$ 는 이음되는 철근의 단면적( $\text{mm}^2$ )이다.

CEB-FIP Model Code<sup>9)</sup>에서는 인장이음과 압축이음에 대해 동일한 기본식을 사용한다. 철근의 부분안전계수 (partial safety factor,  $\gamma_s$ )와 부착강도의 재료안전계수 (material safety factor,  $\eta$ )를 고려하고 원주 공시체( $\phi 150 \times 300$ ) 강도를 사용할 때, 압축이음길이는 식 (2)로 산정한다. *fib* 기준에서는 지름 32 mm 이상 철근의 부착강도에 식 (3)의 수정계수( $\eta_3$ )를 곱하여 이음길이를 증가시키도록 규정하고 있다. 그러나 이 규정은 압축이음에서 철근 지름의 효과에 대한 연구 결과가 아니라, 인장이음의 연구결과에 따른 것이다. *fib* 기준도 횡보강근의 효과를 이음길이 산정식에서 직접 반영하고 있지 않지만, Fig. 2의 상세규정을 두어 횡보강근 효과를 극대화하고 있다.

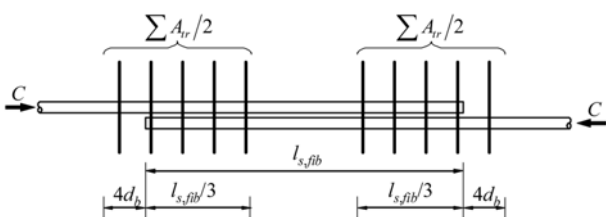


Fig. 2 Detailing of compression lap splice of *fib*<sup>9)</sup>

$$l_{s, fib} = \frac{f_{yk} d_b}{1.45 (f_{ck})^{2/3}} \quad \text{for } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$= \frac{f_{yk} d_b}{5.15 (f_{ck})^{1/3}} \quad \text{for } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\eta_3 = \frac{132 - d_b}{100} \quad (3)$$

여기서,  $f_{yk}$ 는 철근의 특성 강도(characteristic strength, MPa)로 부분안전계수가 고려된 값이다.

압축이음에 관한 기존연구는 3건이<sup>8,10)</sup> 조사되었으며, Cairns<sup>10)</sup> 이 3건의 실험 결과를 비선형 통계분석하여 식 (4)의 이음강도 예측식을 제안하였다. 식 (4)에서 철근 순간격은 실험 결과<sup>8,10)</sup> 이음강도에 영향을 주지 않는 것으로 나타나 제외되었으며, 콘크리트강도와 횡보강근의 영향이 모두 고려된 발전된 식이다. 그러나 식 (4)는 압축이음의 거동 특성을 반영하지 않고, Orangun 등의<sup>11)</sup> 인장이음 기본식을 그대로 이용한 것이다. 또한 설계기준강도로 변환을 위한 안전율을 제시하지 않고 있으며 횡보강근의 영향을 고려하지 않으면 현행 설계기준보다 더 긴 이음길이가 요구되기도 한다. 또한 이음길이와 이음강도의 관계를 선형으로 가정하여 이음길이가 매우 짧은 경우 이음강도를 매우 과도하게 평가할 우려가 있다.

$$f_{sc, C} = \left( 1.4 \frac{l_s}{d_b} + 29.4 + 0.32 \frac{A_{tr} f_{yt} l_s}{s_{tr} d_b n} \right) \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

여기서,  $A_{tr}$ 은 간격  $s_{tr}$ (mm)로 배근된 전체 횡보강근량( $\text{mm}^2$ ),  $n$ 은 동일 평면에서 예상과파면에 걸쳐진 이음된 철근 수,  $(A_{tr} f_{yt}) / (s_{tr} d_b n) \leq 6 \text{ MPa}$  이고,  $f_{yt}$ 는 횡보강근의 설계기준항복강도(MPa)이다.

현행 설계기준과 선행연구를 분석한 결과, 합리적인 압축이음길이 산정을 위해서는 콘크리트 압축강도, 철근순간격, 횡보강근의 영향을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 각 영향인자의 작용기구를 역학적으로 규명함으로써 압축이음 거동에 적합한 기본식의 선정이 필요하다.

### 3. 압축이음강도 기본식

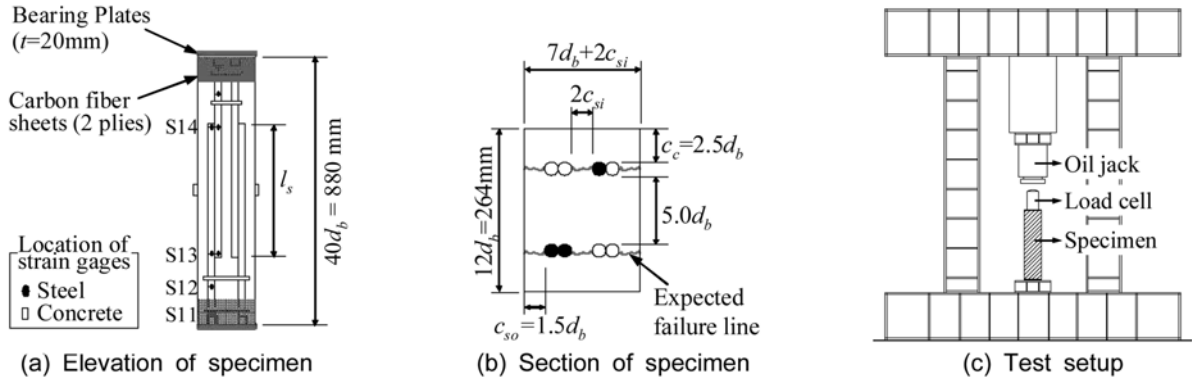
저자들이 수행한 설계강도 40, 60 MPa 콘크리트를 이용한 압축이음 실험 결과는 참고문헌 2와 3에 상세히 기술하였다. 실험변수와 실험체 상세 및 가력장치도는 Table 2와 Fig. 3과 같다. 본 장에서는 저자들이 수행한 총 76개의 실험체 중 이음과파된 51개 실험체의 결과를 토대로 압축이음강도 기본식을 도출하고자 한다.

#### 3.1 이음강도의 표현

인장이음길이는 실험에서 산정된 평균부착강도를<sup>11)</sup> 통

**Table 2** Summary of test matrix of references 2 and 3

Test series	Number of specimens	Concrete compressive strength $f_{ck}$ (MPa)	Normalized lap length $l_s/d_b$	Bar diameter $d_b$ (mm)	Transverse reinforcement index $(A_{tr})/(n_s d_b)$	Clear spacing index $c_{si}/d_b$
Unconfined tests	44	48.9 to 73.7	10, 15, 20	22, 29	-	0.75, 1.25, 1.50
Confined tests	32		10			



**Fig. 3** Details of specimen and test setup of unconfined splices<sup>2)</sup>

해 산정하고 있다. 이러한 방법은 정착과 이음에 관한 많은 연구에서 활용되고 있으며, FRP 보강근에도<sup>12)</sup> 적용되고 있다. ACI 408 위원회<sup>13)</sup>는 인장이음에 대해 평균부착강도 대신 힘(force) 단위의 인장강도로 표현하고 있는데 단면적으로 나눠 응력(stress) 단위의 이음강도로도 표현이 가능하다.

압축이음에서는 단부지압과 부착에 의해 이음강도가 발생되므로 단부지압을 포함한 평균부착강도는 압축이음의 특성을 제대로 반영하지 못한다. Carins는 이러한 평균부착강도의 문제를 극복하기 위해 식 (4)와 같이 철근에 발현된 강도(developed stress)로 이음강도를 표현하였다.<sup>10)</sup> 식 (4)는 이음에 의해 발현된 철근강도를 직접 산정하여 철근의 설계기준항복강도와 쉽게 비교가 가능하며, 설계자로 하여금 이음강도에 기여하는 변수를 직관적으로 인식하게 하는 효과가 있다. 그러나 식 (4)의 형태는 압축이음의 특성을 고려하여 구성된 것이 아니라, Orangun 등<sup>11)</sup>의 인장이음 평균부착강도 기본식을 이음강도로 변환한 것이다.

압축이음강도를 정확히 표현하기 위해서는 평균부착강도식 대신 식 (4)와 ACI 408 위원회 식과 같이 이음강도로 나타내며, 설계자가 설계기준항복강도와 쉽게 비교하기 위해 응력단위로 표현하는 것이 바람직하다. 또한 단부지압과 이음길이 구간의 부착의 기여를 쉽게 구분하기 위해 식 (5)와 같이 단부지압에 의한 이음강도  $f_{brg}$ (이하 지압강도)와 부착에 의한 이음강도  $f_b$ (이하 부착강도)의 합으로 표현하는 것이 타당하다.

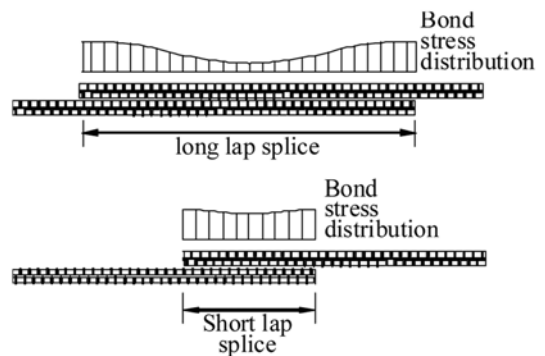
$$f_{sc} = f_{brg} + f_b \quad (5)$$

부착강도와 지압강도의 형태는 각 영향인자의 발현 특성에 따라 구성한다.

### 3.2 콘크리트 압축강도

저자들의 선행연구<sup>2,3)</sup>에 따르면 고강도콘크리트의 압축이음은 피복 콘크리트의 폭발적 탈락으로 파괴되므로 콘크리트의 인장강도에 지배를 받는다. 콘크리트 인장강도는 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 인장이음에서는 콘크리트 압축강도가 높아짐에 따라 Fig. 4와 같이 이음길이에 따른 표면 부착력의 분포가 균일하지 않기 때문에 압축강도의 1/4승을 사용하기도 한다.<sup>13,14)</sup>

압축강도를 제외한 모든 조건을 동일하게 한 실험체들을 비교한 선행연구에 따르면, 압축이음강도는 콘크리트 압축강도의 0.69승에 비례하였다.<sup>2)</sup> Fig. 5는 횡보강근이 없는 30개 실험체에 대해 콘크리트 강도에 따른 이음강도를 나타낸 그래프이다. 이음길이에 따른 차이를 제거하기 위해  $\sqrt{l_s/d_b}$ 로 이음강도를 표준화하였다. 콘크리트 압축강도가 0일 때 이음강도를 0으로 두고, 선형 회귀분석을 하면 콘크리트 강도가 낮을 때는 과소평가, 콘크리트 강도가 높을 때는 과대평가하였다. 콘크리트 압축강도의 지수를 미지수로 최적 회귀분석을 하면 콘크리트



**Fig. 4** Bond stress distribution over lap length<sup>14)</sup>

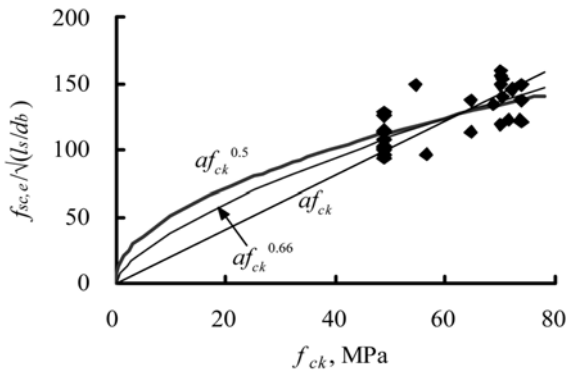


Fig. 5 Effect of concrete strength on splice strength

압축강도의 0.66승 이었다.

압축이음은 인장이음보다 이음길이가 짧아 Fig. 4의 현상이 인장이음에 비해 심하지 않다. 또한 이음강도에 큰 부분을 차지하는 지압에 대해 측면파열파괴에서는  $\sqrt{f_{ck}}$ ,<sup>4,5)</sup> 콘크리트구조설계기준의 지압에서는  $f_{ck}$ 를 사용한다. 회귀분석에서는 콘크리트 압축강도의 0.66승이 최적으로 나왔지만, 실험체 파괴가 측면파열파괴와 유사하므로 압축이음강도는  $\sqrt{f_{ck}}$ 로 표현하는 것이 실용적인 측면에서 타당하다.

### 3.3 이음길이

평균부착강도 개념을 사용하면 이음강도는 이음길이에 선형적으로 비례한다. 물론 평균부착강도는 이음길이에 따라 그 값이 달라지므로 Fig. 4와 같이 이음길이에 따른 부착응력의 분포 차이는 평균부착강도 산정에서 반영된다. 초고강도콘크리트에서는 Fig. 4의 현상이 심화되어 이를 표현하기 위해  $4\sqrt{f_{ck}}$  또는  $3\sqrt{f_{ck}}$ 을 이음강도 평가식에서 사용하고 있다.<sup>13)</sup>

총 51개의 압축이음 실험 결과<sup>2,3)</sup> 지압강도는 이음길이에 무관한 것으로 나타났다. 횡보강근이 없는 30개의 이음실험에서 지압강도는 평균  $16.4\sqrt{f_{ck}}$ 이었다.

이음길이가 길어짐에 따라 부착강도는 증가하였다. 이음길이의 효과를 표현하기 위해 횡보강근이 없는 30개 실험체에 대해 Fig. 6에서 3가지 회귀분석을 실시하였다. 이음강도와 지압강도는 콘크리트 압축강도의 제곱근으로 표준화하였다. 이음길이에 대해 선형과  $\sqrt{l_s/d_b}$ 를 기본형으로 회귀분석을 실시하였다.

첫 번째 선형분석은 매우 단순한 형태로 높은 절편(44.9)과 낮은 기울기로 이음길이가 증가하여도 이음강도가 크게 증가하지 않는 압축이음의 특성을 반영하고 있다. Cairns의 식 (4)도 같은 형태를 이용하고 있으며 이음길이를 변환하기 쉬운 장점이 있다. 그러나 이음길이가 짧은 경우 이음강도를 과도하게 평가할 우려가 있으며, 특히 지압강도를 수식에서 제대로 표현할 수 없는 단점이 있다. y절편은 회귀분석으로 산정된 상수일 뿐이며, 이음길이가 0일 때의 지압강도 또는 부착을 제외한

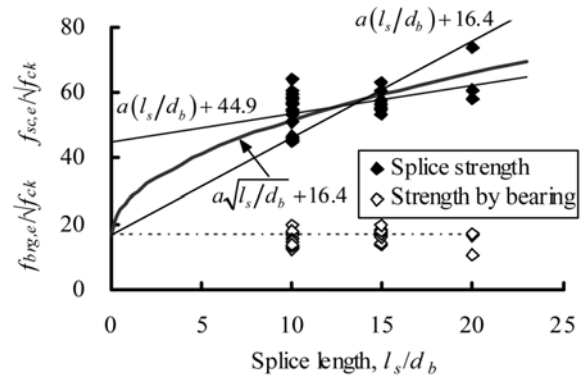


Fig. 6 Effect of lap length on bond contribution

순수 지압강도를 의미하지는 않는다. 실험에서 측정된 평균 지압강도  $16.4\sqrt{f_{ck}}$ 를 y절편으로 사용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 그러나 이 식은 이음길이가 길어질수록 이음강도를 과도하게 평가하므로 사용될 수 없다. 다음으로는  $\sqrt{l_s/d_b}$  형태에 y절편으로  $16.4\sqrt{f_{ck}}$ 를 사용한 경우이다. 실험 결과를 비교적 정확히 예측하면서 순수 지압강도를 반영할 수 있으므로 압축이음의 거동을 표현하기에 적합하다. 인장이음에서도 Fig. 4의 현상을 표현하기 위해 이음길이의 제곱근을 사용하기도 한다.<sup>14)</sup>

### 3.4 횡보강근

지압강도는 횡보강근을 이음 끝단에 배근된 경우에만 향상되었으며 이음구간에 배근된 횡보강근에는 영향을 받지 않았다.<sup>3)</sup> 횡보강근이 배근된 경우 평균 지압강도는  $18.2\sqrt{f_{ck}}$ 이다.<sup>3)</sup>

이음구간에 배근된 횡보강근은 부착강도를 향상시키는데, 다른 조건이 동일할 때 횡보강근량을 철근 지름과 이음간격으로 표준화한 횡보강근 지수(transverse reinforcement index,  $k_{tr}$ )에 거의 선형적으로 비례하였다.<sup>3)</sup>

### 3.5 철근 순간격

철근 순간격은 인장이음에서는 이음길이가 더불어 가장 큰 영향인자이다. 그러나 Cairns의 연구와<sup>10)</sup> 저자들의 실험<sup>2,3)</sup>에서 철근 순간격은 압축이음강도에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이에 대한 이론적 설명은 기존 연구에서 제시되지 않고 있는데, 철근 주변 콘크리트의 응력상태로 설명이 가능하다.

Fig. 7(a)는 순수 축력이 작용되는 이음이 있는 압축부재를 보여주고 있으며, 축방향 응력은  $f_c$ , 변형률은  $\epsilon_c$ 이다. 1방향 압축-1방향 인장을 동시에 받는 콘크리트는 압축응력이 커질수록 인장강도가 저하되며(또는 인장응력이 커질수록 압축강도는 저하되며), Fig. 7(b)와 같이 단순하게 모사할 수 있다.<sup>15)</sup> 철근 순간격과 이음강도의 관계는 Fig. 7(c)로 설명할 수 있다. 부착과 지압에 의해 발생하는 횡방향 인장응력은 철근면에서 최대가 되고, 순

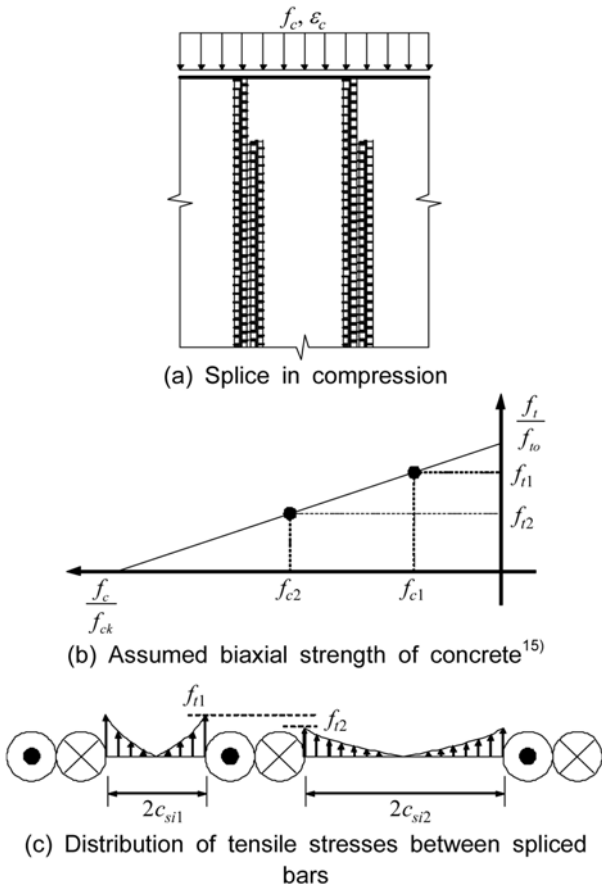


Fig. 7 Effect of clear spacing between spliced bars on splice strength

간격에서 삼각형 응력분포를 가정할 수 있다.<sup>16)</sup> 최대 횡방향 인장응력이 콘크리트 인장강도에 도달하면 철근 사이에 쪼갬파괴가 발생된다. 전 이음구간에 동일한 응력상태가 발생된다고 가정하면 철근의 이음강도는 식 (6)으로 표현된다.

$$f_{sc} = kc_{si}f_t \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 계수이며  $f_t$ 는 철근 순간격 사이 콘크리트의 인장강도이다.

식 (6)에서  $f_t$ 는 축방향 압축응력에 따라 변하는 값으로, 철근 순간격과 이음강도의 관계를 구하기 위해서는  $f_t$ 를 재료상수와 철근 순간격으로 치환해야한다.

이음강도는 철근이 받을 수 있는 최대 응력이 되므로, 이음이 없는 구간의 콘크리트 압축응력은 철근과 콘크리트의 탄성계수비를 이용하여 식 (7)과 같이 산정된다.

$$f_c = E_c \varepsilon_c = \frac{E_c}{E_s} f_{sc} \quad (7)$$

여기서,  $E_c$ 와  $E_s$ 는 각각 콘크리트와 철근의 탄성계수이며,  $\varepsilon_c$ 는 축방향 변형률이다.

만일 인장이음과 동일하게 압축이음에서도 철근 순간격에 비례하여 이음강도가 상승한다고 가정하면, 콘크리

트의 축방향 최대강도가 향상된다. 하지만 축방향 압축응력이 커지면 Fig. 7(b)와 같이 인장강도는 저하된다. Fig. 7(c)는 철근 순간격에 따른 콘크리트 인장응력의 변화를 보여주고 있다. 철근 순간격 사이 콘크리트의 인장강도에 따른 압축강도는 Fig. 7(b)의 관계에 따라 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_c = f_{ck} \left(1 - \frac{f_t}{f_{t0}}\right) \quad (8)$$

여기서,  $f_{t0}$ 는 콘크리트 1축 인장강도이며  $f_c$ 는  $f_{t0}$ 가 작용되는 방향의 직각으로 작용되는 압축응력이다.

식 (8)을 식 (7)에 대입한 후  $f_{sc}$ 를 정리하여 식 (6)에 대입하고  $f_t$ 에 대해 정리한 후 다시 식 (6)에 대입하면 철근 순간격만을 변수로 하여 이음강도를 구할 수 있다.

$$f_{sc} = \frac{kc_{si}}{kc_{si} + \frac{E_s f_{ck} E_c}{E_c f_{t0}}} \frac{E_s f_{ck}}{E_c} \quad (9)$$

식 (9)는 철근 순간격의 1/2인  $c_{si}$ 가 분자와 분모에 모두 존재하므로 철근 순간격이 증가해도 이음강도가 크게 변하지 않는다. 따라서 인장이음과 달리 압축이음에서는 축방향 압축응력의 존재로 인해 철근 순간격이 이음강도에 큰 영향을 주지 않게 된다. 철근 순간격을  $1.5d_b$ 에서  $3d_b$ 까지 변화시켜 실험한 결과 철근 순간격은 압축이음강도에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.<sup>2,3)</sup>

## 4. 이음강도 평가식

### 4.1 횡보강근이 없는 압축이음

3장의 분석을 통해 각 영향인자가 이음강도에 미치는 영향 및 강도발현 특성을 반영하여 압축이음강도 예측식을 제안하고자 한다. 압축이음강도는 콘크리트 압축강도의 제공근에 비례하며, 이음길이는 지압강도에는 무관하고 부착강도에만 제공근의 형태로 영향을 준다. 횡보강근이 없을 때 지압강도는 평균  $16.4\sqrt{f_{ck}}$ 로 계측되었으며, 철근 순간격은 압축이음강도의 영향인자에서 제외된다. 따라서 횡보강근이 없는 압축이음의 이음강도는 식 (5)에 상기 조건을 대입하여 식 (10)의 기본 형태로 표현될 수 있다. 횡보강근이 배근되지 않은 30개 실험 결과를 이용한 회귀분석을 통해 상수  $a$ 는 11.1로 결정되었다.

$$\begin{aligned} f_{sc} &= f_{brg} + f_b = a \sqrt{\frac{l_s}{d_b}} \sqrt{f_{ck}} + 16.4 \sqrt{f_{ck}} \\ &= \left(11.1 \sqrt{\frac{l_s}{d_b}} + 16.4\right) \sqrt{f_{ck}} \end{aligned} \quad (10)$$

30개 실험체의 계측된 강도와 식 (10)에 따라 예측된

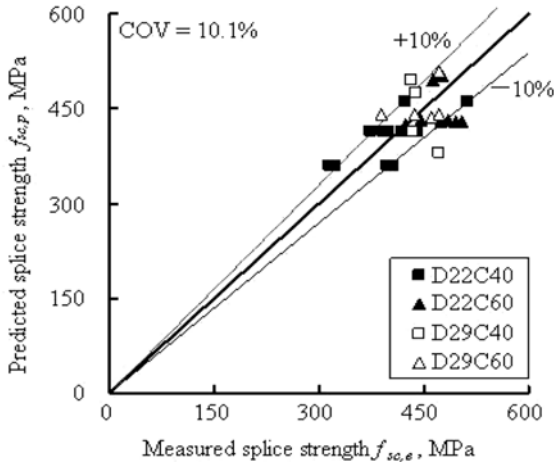


Fig. 8 Comparison of measured and predicted strengths of unconfined splices

강도를 Fig. 8에서 비교하였다. 철근 지름과 콘크리트 강도에 따라 편향되지 않게 고른 예측이 가능하였으며 [실험값]/[예측값] 비의 변동계수(coefficient of variation, COV)는 10.1%로 매우 양호하였다.

#### 4.2 횡보강근이 있는 압축이음

식 (10)에 횡보강근의 영향을 반영하여 횡보강근이 있는 압축이음 평가식을 만들 수 있다. 횡보강근이 이음 끝단에 배근된 경우 지압강도는 횡보강근량에 무관하게 평균  $18.2\sqrt{f_{ck}}$ 로 예측되었으며, 횡보강근지수 0.044이하에서 부착강도는 횡보강근량에 거의 선형적으로 비례하였다. 따라서 횡보강근이 있는 압축이음 강도는 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 횡보강근이 배근된 21개 실험 결과를 이용한 회귀분석을 통해 상수  $a$ 는 59.5로 결정되었다.

$$\begin{aligned}
 f_{sc} &= f_{brg} + f_b \\
 &= (11.1 + a\kappa_{tr})\sqrt{\frac{l_s}{d_b}}\sqrt{f_{ck}} + 18.2\sqrt{f_{ck}} \\
 &= \left[ (11.1 + 59.5\kappa_{tr})\sqrt{\frac{l_s}{d_b}} + 18.2 \right] \sqrt{f_{ck}} \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\kappa_{tr} = A_{tr} / (n_s d_b) \leq 0.044$ 로 횡보강근 지수이다.

21개 실험체의 예측된 강도와 식 (11)에 따라 예측된 강도를 Fig. 9에서 비교하였다. [실험값]/[예측값] 비의 변동계수는 7.5%로 횡보강근이 없는 압축이음보다 더 양호하였다.

### 5. 압축이음 설계식

#### 5.1 설계기준이음강도

콘크리트구조설계기준은 강도설계법을 채택하므로, 콘

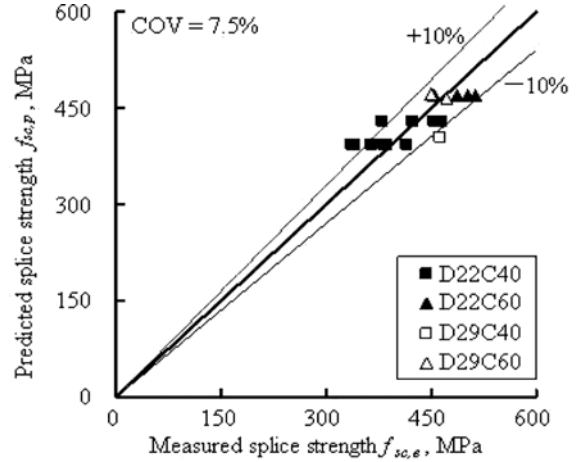


Fig. 9 Comparison of measured and predicted strengths of confined splices

크리트와 철근의 설계강도에 저감계수를 곱하지 않고 일정 수준의 신뢰성을 확보하는 설계기준강도를 사용하고 있다. 이음을 철근의 일부분으로 생각한다면, 철근의 설계기준항복강도와 동일한 수준의 신뢰성을 확보한 설계기준이음강도를 사용할 수 있다. Darwin 등<sup>17)</sup>은 인장이음의 강도저감계수를 확률론적 방법을 통해 제안하기도 하였다. 그러나 이러한 방법은 이음을 독립된 부재로 인식한 것으로, 강도설계법의 기본 개념과 상충되며 더욱이 이음이 적용되는 부재 별로 강도저감계수가 달라져야 하므로 비실용적이다.

인장이음에서는 실험에서 구한 평균 강도에 안전율 1.25를 사용하고 있으며,<sup>11)</sup> 압축이음에서는 특별한 배경을 제시하지 않고 있다.<sup>4,5)</sup> 철근의 설계기준항복강도는 각국의 표준에서 정한 규격강도를 그대로 사용하고 있는데, KS D 3504<sup>18)</sup>에서는 ISO 6935-2<sup>19)</sup>에 따라 5% 분위수(fractile, 실제 강도가 설계기준강도를 초과할 확률이 95%이며 이에 대한 신뢰성이 90%)에<sup>20)</sup> 근거하여 품질관리를 실시하고 있다. 따라서 5% 분위수에 근거한 설계기준이음강도를 산정하면 이음은 철근 모재와 동일하게 취급될 수 있다.

식 (10)과 (11)을 통합하여 하나의 이음강도식을 만든 후 총 51개 실험체 값과 비교하여 5% 분위수 계수  $n_{5\%}$ 를 산정하면 0.82가 되며 설계기준이음강도( $f_{sc,d}$ )는 식 (12)로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_{sc,d} &= n_{5\%} \left[ (11.1 + 59.5\kappa_{tr})\sqrt{\frac{l_s}{d_b}} + 16.4 + 1.8\delta \right] \sqrt{f_{ck}} \\
 &= 0.82 \left[ (11.1 + 59.5\kappa_{tr})\sqrt{\frac{l_s}{d_b}} + 16.4 + 1.8\delta \right] \sqrt{f_{ck}} \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서, 이음 끝단에 횡보강근이 배근된 경우  $\delta=1$ , 그렇지 않은 경우  $\delta=0$ 이다.

식 (12)는 강도설계법에서 사용하고 있는 재료의 설계 기준강도와 동일한 신뢰성 해석에 기반한 안전율을 채택하고 있다.

### 5.2 압축이음길이

이음과 정착설계는 강도보다는 길이로 표현하는 것이 실용적이다. 식 (12)를 철근의 설계기준항복강도( $f_y$ )와 같다고 놓으면 식 (13)과 같이 압축이음길이를 산정할 수 있다. 현행 설계기준의 압축이음길이 산정식이 일반강도 콘크리트에서 충분히 검증되었으며 인장이음길이보다 짧은 이음길이를 요구하므로, 현행 압축이음길이 산정식을 상한값으로 채택하였다.

$$\frac{l_s}{d_b} = \left[ \frac{\frac{f_y}{0.82\sqrt{f_{ck}}} - 16.4 - 1.8\delta}{11.1 + 59.5\kappa_{tr}} \right]^2 \leq 0.072f_y d_b \quad (13)$$

여기서, 상한값  $0.072f_y d_b$ 는  $f_y$ 가 400 MPa 이하인 경우이며,  $f_y$ 가 400MPa를 초과하는 경우( $0.13f_y - 24$ ) $d_b$ 를 사용한다.

### 5.3 구조세척

#### 5.3.1 콘크리트 압축강도

식 (13)의 바탕이 되는 실험체들에는 48.9~73.7 MPa 범위의 콘크리트 압축강도가 사용되었다. 따라서 40 MPa 이상 70 MPa 이하에만 식 (13)을 적용해야한다. 70 MPa 이상의 콘크리트 강도에서도 식 (13)이 적용가능하다고 예상되지만, 콘크리트 압축강도의 증가에 따른 취성적인 거동은 이음강도에 악영향을 줄 수 있으므로 실험을 통해 규명되어야한다.

#### 5.3.2 철근의 항복강도

실험체의 설계기준항복강도는 400 MPa이지만, 실제 항복강도는 D22철근은 513.5 MPa, D29철근은 471.4 MPa이었다. SD500 철근까지는 적용이 가능하다. 콘크리트는 강도에 무관하게 최대강도에 이르렀을 때의 변형률이 0.002 mm/mm정도이지만, 철근은 탄성계수가 일정하므로 항복강도에 비례하여 항복 변형률이 증가한다. 압축이음은 피복콘크리트의 응력 상태에 지배받으므로, 이음부에서 철근이 설계기준항복강도에 이르기 전에 피복콘크리트가 압축변형에 의해 먼저 파괴될 수 있다. 따라서 압축이음은 SD500까지만 적용하며 이를 초과하는 강도에서는 기계적이음을 사용해야한다.

#### 5.3.3 횡보강근의 배치

지압강도는 이음 끝단에 횡보강근이 배근된 경우에만

향상되므로 식 (13)에서  $1.8\delta$ 를 활용하려면 횡보강근을 정밀하게 배근해야한다. 또한 이음길이가  $16d_b$ 보다 짧은 경우에는 이음부에 1개의 횡보강근도 배치되지 않을 수 있으므로 식 (13)의  $\kappa_{tr}$ 산정에 주의해야한다.

## 6. 설계기준 및 기존 식과의 비교

제안된 압축이음길이를 현행 설계기준과 Cairns식에 따른 이음길이와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 콘크리트 구조설계기준에 따르면 콘크리트 압축강도 40 MPa 이상에서는  $(c + K_{tr})/d_b = 2.5$ 인 B급 인장이음이 압축이음에 비해 더 짧아지게 된다. 제안된 식 (13)을 콘크리트 압축강도 40~70 MPa구간에 적용하면 압축이음길이가 인장이음길이보다 짧아진다. 실제 현상에 부합되는 압축이음길이를 산정할 수 있다.

Cairns의 식 (4)는 평균강도로 콘크리트구조설계기준의 인장이음과 동일한 안전율 1.25를 적용하여 이음길이를 산정하였다. 횡보강근의 영향을 고려하지 않으면 70 MPa 이하 콘크리트에서 인장이음길이보다 길어지며, 횡보강근의 영향을 고려하면 매우 짧은 이음길이를 제안하고 있다. Cairns식은 변동계수와 같은 통계학적 상수값을 제공하지 않고 있어 논리적인 설계기준강도를 설정하기 어려우며 횡보강근의 영향을 과도하게 평가하고 있다. 특히 이음길이가 짧은 경우에는 이음구간에 횡보강근을 적절하게 배근하기 어렵기 때문에 횡보강근의 영향을 과도하게 평가할 경우 안전하지 않을 수 있다.

## 7. 결 론

초고강도콘크리트의 실용화에 따라 합리적인 압축이음길이 설계식이 요구되고 있다. 콘크리트 압축강도 40~70 MPa 범위의 압축이음 실험체 51개를 이용한 비선형 회귀분석을 통해 압축이음강도 평가식을 제안하였다. 또한 5% 분위수 개념을 통해 설계기준이음강도를 설정하고 압축이음길이 설계식을 도출하였다.

본 연구에서 제안된 압축이음길이 설계식을 이용하여 고강도콘크리트에서 압축이음길이가 인장이음길이보다 길어지는 이상 현상을 해소할 수 있다. 더불어 제안된

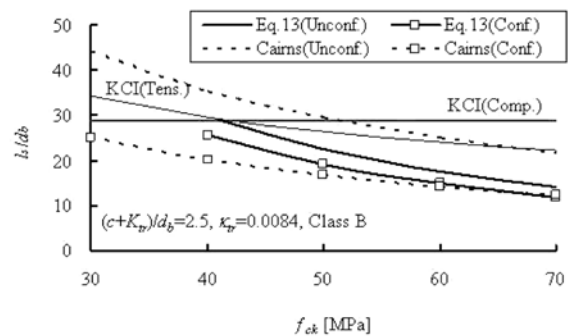


Fig. 10 Comparison of lap lengths

압축이음길이 설계식은 통계적 기법에 기반을 두어 재료 강도와 동일한 수준의 신뢰성을 확보할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업(Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. ACI, "Concrete Q&A-Splice Length Anomaly," *Concrete International*, Vol. 27, No. 10, 2005, 96 pp.
2. 천성철, 이성호, 오보환, "횡보강근이 없는 40, 60 MPa 콘크리트에서 철근 압축이음의 거동과 강도," 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 291~302.
3. 천성철, 이성호, 오보환, "횡보강근이 있는 40, 60 MPa 콘크리트에서 철근 압축이음의 거동과 강도," 콘크리트학회 논문집, 21권, 4호, 2009, pp. 389~400.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2008, 523 pp.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., USA, 2008, 465 pp.
6. CSA A23.3-04 "Design of Concrete Structures," Canadian Standard Associate, Ontario, Canada, 2004, 214 pp.
7. NZS 3101:2006, "Concrete Structures Standard," New Zealand Standard, Wellington, New Zealand, 2006.
8. Pfister, J. F. and Mattock, A. H., "High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 5: Lapped Splices in Concentrically Loaded Columns," *Journal, PCA Research and*

- Development Laboratories*, Vol. 5, No. 2, 1963, pp. 27~40.
9. Comité Euro-International du Béton, *CEB-FIP Model Code*, London, Thomas Telford, 1990, 437 pp.
10. Cairns, J., "Strength of Compression Splices: A Reevaluation of Test Data," *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 510~516.
11. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 74, No. 3, 1977, pp. 114~122.
12. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., USA, 2006, 44 pp.
13. ACI Committee 408, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., USA, 2003, 49 pp.
14. Canbay, E. and Frosch, R. J., "Bond Strength of Lap-Spliced Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, 2005, pp. 605~614.
15. Schlaich, J., Schäfer, K., and Jennewein, M., "Toward a Consistent Design of Structural Concrete," *PCI Journal*, Vol. 32, No. 3, 1987, pp. 74~150.
16. MacGregor, J. G. and Wight, J. K., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design 4th*. 2005, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall, 1132 pp.
17. Darwin, D., Idun, E. K., Zuo, J., and Tholen, M. L., "Reliability-Based Strength Reduction Factor for Bond," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, pp. 434~443.
18. KS D 3504 : 2007, "철근콘크리트용 봉강," 산업자원부 기술표준원, 2007, 20 pp.
19. "ISO 6935-2 Steel for the Reinforcement of Concrete-Part 2: Ribbed Bars-Second Edition," International Organization for Standardization, 2007, 20 pp.
20. Natrella, M. G., "Experimental Statistics," National Bureau of Standards Handbook 91, 1966.

**요약** 초고강도콘크리트의 개발에 따라 철근 압축이음에 대한 연구 필요성이 높아지고 있다. 40여년 전의 연구를 바탕으로 한 현재의 압축이음 설계기준으로는 향상된 강도를 제대로 활용할 수 없으며, 특히 압축이음길이가 인장이음길이보다 길어지는 기현상(奇現象)이 발생되어 실무의 혼란을 초래하기도 한다. 이러한 현상은 현행 설계기준에서 콘크리트 강도와 횡보강근의 영향을 고려하지 않기 때문이다. 본 연구에서는 51개 실험체의 결과를 바탕으로 40부터 70 MPa 까지 콘크리트에 대한 압축이음길이 설계식을 제안하였다. 실험 결과를 통해 도출된 압축이음의 영향 인자들을 분석하여 이음강도식의 기본형을 만들었다. 실험 결과에 대한 비선형 회귀분석을 통해 압축이음강도 평가식을 마련하고, 5% 분위수 개념을 통해 설계기준이음강도를 설정하고 압축이음길이 설계식을 도출하였다. 이 연구에서 제안된 압축이음길이 설계식을 이용하여 고강도콘크리트에서 압축이음길이가 인장이음길이보다 길어지는 이상 현상을 해소할 수 있다. 더불어 제안된 압축이음길이 설계식은 통계적 기법에 기반을 두어 재료강도와 동일한 수준의 신뢰성을 확보할 수 있다.

**핵심어** : 압축이음, 부착, 지압, 횡보강근, 설계기준이음강도