

# 비부착 긴장재의 응력산정을 위한 극한강도 설계식의 평가

## Evaluation of Ultimate Strength Design Equations for Stress Calculation of Unbonded Tendons



임재형\*

Lim, Jae-Hyung



문정호\*\*

Moon, Jeong-Ho



이리형\*\*\*

Lee, Li-Hyung

### ABSTRACT

The present study is to investigate the possibility of overestimation or underestimation when the ACI Code equations are used to evaluate the unbonded tendon stress. An experimental program was planned with 6 beams which were divided into two groups. Each group consisted of 3 beams to check the possibility of overestimation or underestimation of unbonded tendon stress. The experimental results were also compared with various design equations including the one proposed by Moon and Lim. It was proven that the ACI Code equations may overestimate or underestimate the unbonded tendon stress in certain cases.

Keywords : ACI Code equations, overestimation or underestimation of tendon stress, prestressed concrete, unbonded tendon

\* 정회원, (주) ALT 구조 이사

\*\* 정회원, 한남대학교 건축공학과 조교수

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 응력은 콘크리트와 긴장재가 부착되어 있지 않았기 때문에 부재 전체길이의 변형을 고려한 적합조건의 해석으로 평가되어야 한다. 현재까지 이러한 해석개념에 근거한 많은 연구가 진행되었으나, 그 연구결과에 의하면 비부착 긴장재의 극한응력을 평가하는 현행의 ACI 규준식<sup>(5)</sup>은 수정될 필요가 있다고 강조하고 있다. 하지만, 대부분의 현재까지의 연구는 ACI 규준식의 수정에 대한 목표만을 위하여 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수를 찾아내고 이러한 변수를 고려한 설계식을 제안하고 있을 뿐이다. 즉, ACI 규준에 의하여 비부착 긴장재의 응력을 평가함에 있어서 설계식으로써의 타당성을 검증하는 차원에서 비부착 긴장재의 응력을 부정확하게 예측할 수 있다는 상세한 연구는 미미한 상태이다.

그러나, 기존연구 결과와 ACI 규준식에 대한 분석을 통하여 ACI 규준식이 특정한 조건에서 비부착 긴장재의 응력을 부정확하게 예측할 가능성이 있다는 사실을 알 수 있었다. 즉, ACI 규준식은 기존의 식들에 비하여 간단하게 비부착 긴장재의 응력을 예측하여 설계에 반영할 수 있다는 장점이 있지만, 현재 고려하고 있지 않은 변수나 고려하고 있는 변수의 조합에 의한 특정한 구간에서는 비부착 긴장재의 응력을 상당히 과소평가 하거나 과대평가 할 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 본 연구자들이 제안한 설계식<sup>(2)(6)</sup>의 타당성을 검증하는 차원에서 기존 연구에서 실험된 실험결과를 분석하고, 중요변수들의 조합에 의한 해석적 연구를 실시하였다. 그리고 ACI 규준식의 과대, 과소평가의 가능성을 분석하여 ACI 규준식의 문제점을 제시하고자 하였다. 또한 실험을 실시하여 그 타당성을 검증하는 것을 본 연구의 목적으로 하였다.

## 2. ACI 규준식과 Moon/Lim의 설계식

비부착 긴장재의 응력을 평가하는 ACI 규준식은 식(1)과 같으며, 기존연구의 실험결과에 의한

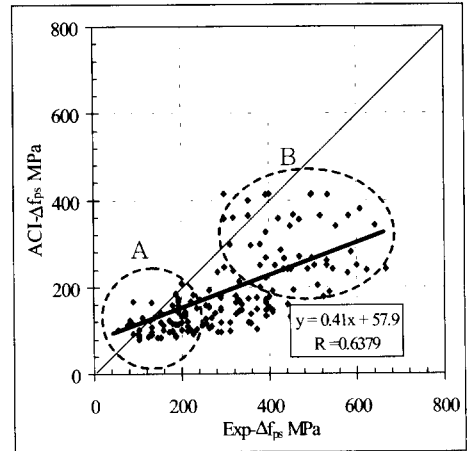


Fig. 1(a) Comparison of predicted  $\Delta f_{ps}$  by ACI code equation

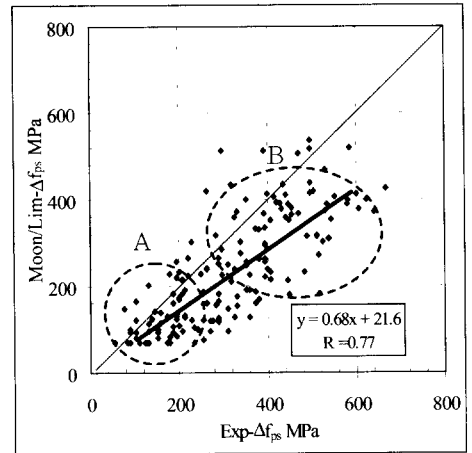


Fig. 1(b) Comparison of predicted  $\Delta f_{ps}$  by Moon/Lim's design equation

분석결과를 Fig.1(a)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 비부착 긴장재의 응력을 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있는데, 이는 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 일반철근 양과 작용하중의 형태, 스패/춤 비의 효과 등이 적절하게 고려되지 않았기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

$$f_{ps} = f_{se} + 69 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \text{ MPa for } \frac{L}{d_p} \leq 35 \quad (1a)$$

$$f_{ps} = f_{se} + 69 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \text{ MPa for } \frac{L}{d_p} > 35 \quad (1b)$$

이와 같이 ACI 규준이 본 연구자들에 의한 분석결과에서와 같이 비부착 긴장재의 응력을 매우

과소평가하고 있으므로 비부착 긴장재의 응력을 보다 더 적절하게 평가하기 위하여 ACI 규준식의 추가적인 수정이 필요하였다. 이에 본 연구자들은 이전의 연구<sup>(2)(6)</sup>에서 식(2)와 같은 새로운 설계식을 제안(이하 Moon/Lim의 설계식이라 함) 하였으며, 긴장재의 응력증가량에 대한 식(2)의 결과는 Fig. 1(b)에서 기존연구의 실험결과와 비교하였다.

$$f_{ps} = 70 + 0.8f_{se} + \frac{1}{15} \frac{(A_s' - A_s)f_y}{A_{ps}} + 6.5\sqrt{\frac{d_s}{d_p} \frac{f_c'}{\rho_p} \left( \frac{1}{f} + \frac{d_p}{L} \right)} \text{ MPa} \quad (2)$$

여기서, 작용하중의 형태에 대한 계수  $f$ 는 1점 집중하중이면  $f=10$ , 2점 집중하중 또는 등분포하중이면  $f=3$ 을 사용한다.

Fig. 1(a)의 ACI 규준에 의한 비교에서 알 수 있듯이 긴장재의 응력증가량이 적게 발생하는 구간(A)에서는 안전율이 적게 포함된 상태로 실험결과에 근접하게 혹은 약간 과대하게 예측되고 있는 부분도 있지만, 긴장재의 응력증가량이 많이 발생하는 구간(B)에서는 ACI 규준이 과소평가되는 양상을 나타내고 있다. 전반적으로 긴장재의 응력증가량을 예측하는데, 긴장재의 응력증가량의 많고 적음에 관계없이 ACI 규준은 거의 동일한 긴장재의 응력증가량을 예측하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 예측값의 평균값을 대표하는 굵은선

이 가로축과 이루는 각이  $45^\circ$ 보다 훨씬 작게 나타남을 의미한다. 그러나 Fig. 1(b)의 Moon/Lim의 설계식(식 2)에 의한 비교에서 알 수 있듯이, 긴장재의 응력증가량이 증가함에 따라 실험결과와 예측결과의 차이는 일정한 비율에 의해 형성되고 있음을 알 수 있다. 즉, 예측값의 평균값을 대표하는 굵은선이 가로축과 이루는 각에서 ACI 규준식에 의한 결과보다 훨씬 크게 나타남을 의미하며, 완전한 상호관계를 나타내는 선과 일정한 간격을 유지하며 평행에 가깝게 그려지고 있음을 의미한다. 또한, Table 1에 나타낸 바와 같이, 기존연구의 실험결과를 긴장재 응력증가량이 적은 구간( $\Delta f_{ps} \leq 250\text{MPa}$ )과 긴장재 응력증가량이 많은 구간( $\Delta f_{ps} > 250\text{MPa}$ )으로 구분하여 기존의 설계식들과 ACI 규준식을 분석한 결과, ACI 규준식에 의한 결과는 긴장재의 응력증가량이 많은 구간(Fig. 1의 B구간)에서 비부착 긴장재의 응력을 다른 설계식들보다도 과소평가하고 있음을 알 수 있었다.

이때 Fig. 1에 나타낸 A구간에 존재하는 실험체는 주로 유효프리스트레스가 크고, 작용하중의 형태가 1점 집중하중인 실험체들이었고, B구간에 존재하는 실험체들은 유효프리스트레스가 작고 작용하중의 형태가 2점 집중하중 또는 4점 집중하중(등분포하중)인 실험체들이 대부분이었다.

ACI 규준에서는 최대철근비에 대한 규정으로 보강지수  $\omega_p$  또는  $\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')$ 가  $0.36\beta_1$

Table 1 Comparison of tendon stress increases

Tendon stress increase	Reinforcing Index <sup>1</sup>		(Predict value/Experimental value) <sub>average</sub>							
			Compatibility <sup>2</sup>		ACI <sup>3</sup>		AASHTO <sup>3</sup>		Moon/Lim <sup>2</sup>	
	$\omega_p$	$\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$
$\Delta f_{ps} \leq 250\text{MPa}$	0.15	0.21	1.05	1.28	0.96		0.95	0.73	0.98	0.87
$\Delta f_{ps} > 250\text{MPa}$	0.11	0.16	1.00	1.03	0.86		0.92	0.74	0.92	0.76

\*1 : Reference 5    \*2 : Reference 2    \*3 : Reference 7

Table 2 Comparison of tendon stress increases with respect to reinforcing index

Reinforcing Index <sup>1</sup>	$\omega_p$	$\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')$	(Predict value/Experimental value) <sub>average</sub>							
			Compatibility <sup>2</sup>		ACI <sup>3</sup>		AASHTO <sup>3</sup>		Moon/Lim <sup>2</sup>	
			$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$
$\omega \leq 0.36\beta_1$	0.15	0.15	1.04	1.20	0.87		0.95	0.85	0.93	0.74
$\omega > 0.36\beta_1$	0.37	0.37	0.99	0.98	0.91		0.93	0.67	0.91	0.61

\*1 : Reference 5    \*2 : Reference 2    \*3 : Reference 7

를 초과하지 않도록 하고 있다. 대부분의 기존연구의 실험체는 보강지수가 약  $0.2\beta_1$ 으로 최대철근비  $0.36\beta_1$ 보다 작은 구간의 실험체들이었으며, 보강지수가  $0.36\beta_1$ 에 근접하는 실험체는 소수의 실험체들이었다. 그러나 본 연구에서는 보강지수가 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 보강지수  $0.36\beta_1$ 을 경계로 긴장재 응력증가량을 비교하였다. 그 결과, Table 2에 의한 결과만으로 단정하기는 어렵지만, ACI 규준은 보강지수가  $0.36\beta_1$ 에 근접할 경우, 비부착 긴장재의 응력을 실제보다 과대평가할 가능성이 있다고 사료된다. 따라서 식(1)과 식(2)의 비교, Fig. 1, Table 1, Table 2, 기존연구 결과의 비교분석<sup>(1)(3)</sup>에 의하면, 유효프리스트레스의 크기, 일반철근 양, 작용하중의 형태, 스패/춤 비, 보강지수 등의 변화에 따라 ACI 규준에 의한 비부착 긴장재의 응력의 예측결과를 경우에 따라 부적절할 것으로 사료된다.

따라서 ACI 규준으로 정확하게 해석하기 어려운 구간에서 적용 가능한 실험변수를 선정·조합하여 실험을 실시하였고, 이를 토대로 ACI 규준식의 과소평가와 과대평가의 가능성에 대하여 분석하였다. 또한 본 연구에서는 Moon/Lim의 설계식의 타당성을 검증하고자 하였다.

### 3. 실험변수의 결정

변수별 해석적 연구<sup>(3)</sup>결과와 실험연구<sup>(4)</sup>에 의한 변수별 분석에 의하면, 유효프리스트레스의 크기가 크거나 긴장재 양과 일반철근 양이 많을수록 긴장재의 응력증가량이 적어지는 현상을 나타내고 있다. 또한 작용하중의 형태가 1점 집중하중일 경우가 2점 집중하중 또는 등분포하중의 경우보다 긴장재의 응력증가량이 적게 나타났다. 특히 변수별 실험연구의 결과를 분석하면, 1점 집중하중이 작용하는 실험체의 경우에서 ACI 규준에 의한 비부착 긴장재의 응력증가량이 기존의 설계식에 의한 결과보다 더 크게 나타나고 있기 때문에 1점 집중하중이 작용하는 경우에는 ACI 규준식에 의한 결과는 과대평가의 가능성이 있을 것으로 사료된다. 그리고 스패/춤 비의 효과에 대한 연구결과에서도 스패/춤 비가 클 경우에 긴장

재의 응력변화에 대한 효과는 미미하게 나타났고, 스패/춤 비가 작은 경우에는 스패/춤 비의 효과는 크게 나타났다. 그러나 이상의 변수들과는 반대로 콘크리트 강도가 증가할 때 긴장재의 응력증가량은 증가하는 것으로 나타났으며, 보강지수의 경우 ACI 규준의 최대값인  $0.36\beta_1$ 에 근접할수록 ACI 규준은 비부착 긴장재의 응력을 과대평가할 가능성이 있는 것으로 나타났다.


따라서 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 상기의 변수별 효과의 특징을 고려하여 Table 3에 나타난 바와 같이 ACI 규준이 비부착 긴장재의 응력을 과대평가할 가능성이 있는 H-계열 실험체와 과소평가할 가능성이 있는 I-계열 실험체를 제작하였다. 이들 실험체에 대해서 실험을 수행하기 전에 비선형 해석방법인 변형도 적합조건에 의한 해석<sup>(2)</sup>을 실시하였고, 그 결과를 기존의 설계식과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 가로축은 변형도 적합조건에 의한 해석결과이고 세로축은 범례에 나타난 설계식에 의한 결과이다. 범례에서 ACI는 ACI 318-95 규준<sup>(5)</sup>에 의한 결과이고, AASHTO는 AASHTO LRFD 규준<sup>(7)</sup>에 의한 결과이며, Moon/Lim은 본 연구자들이 제안한 설계식<sup>(2)(6)</sup>에 의한 결과이다. Fig. 2에 로 표시한 결과에서 알 수 있듯이, ACI 규준은 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 많은 변수의 조합방법에 따라 비부착 긴장재의 응력을 과대평가하거나 과소평가할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

Table 3 Specimens list for analysis

Specimens	Loading type	$f_{se}$	$\rho_p$	$\rho_s$	Reinforcing index	L/d <sub>p</sub>
H-1	1-point	0.7f <sub>pu</sub>	0.0034	0.0041	0.15	17.5
H-2			0.0029	0.0032	0.12	19.7
H-3			0.0022	0.0024	0.09	22.5
I-1	2-point	0.5f <sub>pu</sub>	0.0022	0.0024	0.06	17.5
I-2			0.0029	0.0032	0.10	19.7
I-3			0.0034	0.0041	0.15	22.5

\* NOTE : b x D = 20 x 30 cm

Span = 400 cm

Tendon profile = Straight

f<sub>pu</sub> = 1860 MPa Grade

f<sub>y</sub> = 420 MPa Grade

f<sub>c</sub>' = 60 MPa

Φ6 = 0.1982 cm<sup>2</sup> (3-wire strand)

D8 = 0.50 cm<sup>2</sup> (Deformed bar)

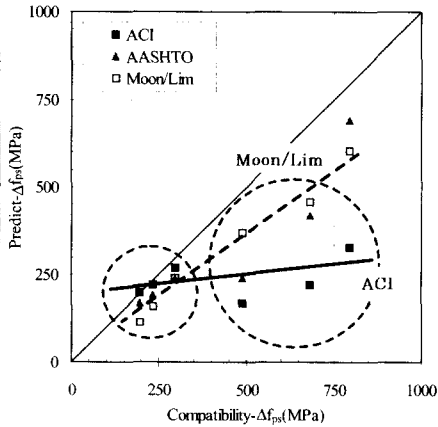


Fig. 2  $\Delta f_{DS}$  predicted by existing design equation versus strain compatibility

## 4. 실험

### 4.1. 실험체 개요 및 재료

실험체는 총 6개로 구성되어 있으며, 사용변수는 유효프리스트레스와 콘크리트 강도, 긴장재 양, 인장철근 양, 스펠/축 비와 작용하중의 형태 등의 조합변수이다. 실험체의 상세는 변형도 적합 조건에 의한 해석과 ACI 규준에 의한 해석, AASHTO LRFD 규준에 의한 해석, Moon/Lim의 설계식에 의한 계산결과를 분석하여 결정하였다. 비부착 긴장재의 응력증가량을 과대평가 할 가능성이 있는 대표적인 실험체(H-1) 상세를 Fig. 3(a)에 나타내었으며, 과소평가할 가능성이 있는 대표적인 실험체(I-1) 상세를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

실험체 제작에 사용된 긴장재는 1가닥의 지름이 2.9mm인 2중 3연선(Low relaxation 3-wire strand)이며, 긴장재의 인장강도는 약 1860MPa Grade이고, 철근은 고강도철근으로 주근이 D8이며, 전단보강근은 D6이다. 콘크리트는 슬럼프 10cm이고, 설계기준강도 60MPa의 조건에 따라 PC공장내의 기계식 자동믹서에서 배합하였다. 그러나 콘크리트를 타설하고 양생한 후의 콘크리트 강도에서 H-계열 실험체에서는 38.4MPa였으며, I-계열 실험체에서는 45.5MPa였다. 이는 등

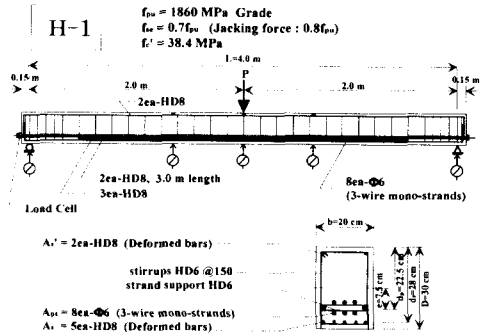


Fig. 3(a) Detail of H-series specimens (H-1)

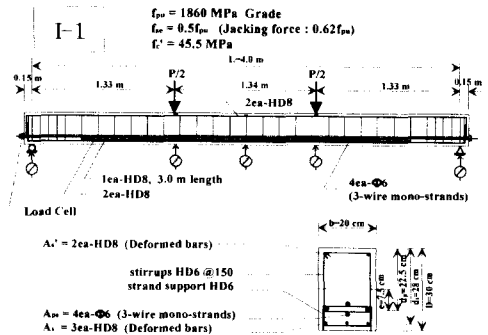


Fig. 3(b) Detail of I-series specimens (I-1)

절기였기 때문에 콘크리트 양생의 문제로 인한 결과였으며, 후에 논의하겠지만 비부착 긴장재의 응력을 과대평가 할 가능성이 있는 H-계열 실험체에 영향을 미쳤다.

### 4.2. 실험방법

실험은 단순지지되어 있는 보의 상부에서 1000kN 용량의 복동식 오일잭으로 하중을 가하고, 오일잭에 부착되어 있는 1000kN 용량의 로드셀로 하중의 크기를 측정하였다.

하중의 가력은 계획된 가력하중의 이력에 따라 실시하였다. 실험체 및 유효프리스트레스의 안정화를 도모하기 위하여 예측된 초기 균열하중의 60%에 해당하는 하중으로 초기에 2회 반복가력하였고, 이후 초기균열하중, 항복하중 순서로 반복가력 하였다. 항복하중이후에는 변위제어 방식으로 중앙부 변위의 양이 25mm, 50mm, 75mm, 100mm 일때로 1회씩 순차적인 반복가력을 실시하였다. 실험의 종료는 최대하중이후 가력하중이

감소될 때와 긴장재의 응력이 항복하중이상이면 긴장재 파단의 위험이 있으므로, 하중의 가력을 중단하고 실험을 종료하였다. 그리고 이때의 하중을 최대하중으로 하였으며, 긴장재의 극한응력은 최대하중에 도달될 때로 하였고, 실험체의 양단에 설치된 로드셀에 의해 측정하였다.

### 4.3 실험결과 및 고찰

#### 4.3.1 최종파괴 형태

Fig. 4에 나타낸 최종파괴 상태에서 알 수 있듯이 대부분의 실험체들에서 초기균열의 발생위치는 최대 모멘트가 발생하는 중앙부에서 인장철근의 위치까지 수직균열인 미세균열로 나타났으며, 점증적으로 하중이 증가하면서 항복하중에 도달할 때까지 좌우로 일정한 간격의 수직 휨균열이 지지부로 확산되는 양상을 보였다. 항복하중 이후에는 휨균열의 확산범위가 소성힌지로 가정된 범위에서 중단되고 기존에 발생된 균열과 균열사이에 새로운 균열이 발생하였다. 그리고, 최대 휨모멘트 구간에서 균열의 폭이 증가되면서 압축측 콘크리트 연단까지 휨균열이 진행되었다.

H-계열의 실험체에서는 최종파괴가 압축측 콘크리트의 연단에서 압괴에 의해 파괴되었으며, 균열이 발생된 범위도 I-계열의 실험체보다 비교적 짧게 나타나 있다. 그러나, I-계열의 실험체에서는 전형적인 휨파괴의 형태로 인장측에서의 인장파괴에 의해 최종파괴된 것으로 나타났으며, 균열의 확산범위도 H-계열의 실험체보다도 넓게 나타나고 있다. H-1 실험체에서는 긴장재와 인장철근이 과다하게 배근되어 있기 때문에 1점 집중하중이 작용함에도 불구하고 균열의 발생범위가 H-2와 H-3 실험체보다도 넓게 나타나고 있으며, 2점 집중하중이 작용하는 실험체에서와 비슷한 길이로 나타나 있다.

현행의 ACI 규준에서는 비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 균열발생을 제어할 목적으로 일반철근의 최소량을 전체단면의 0.2%로 규정하고 있는데, 일반적으로 최소철근비의 규정을 만족한 경우에는 대부분 작용하중의 형태에 따라 균열의 발생범위와 최종파괴의 형태가 다르게 나타난다. 그러나 본 연구의 실험

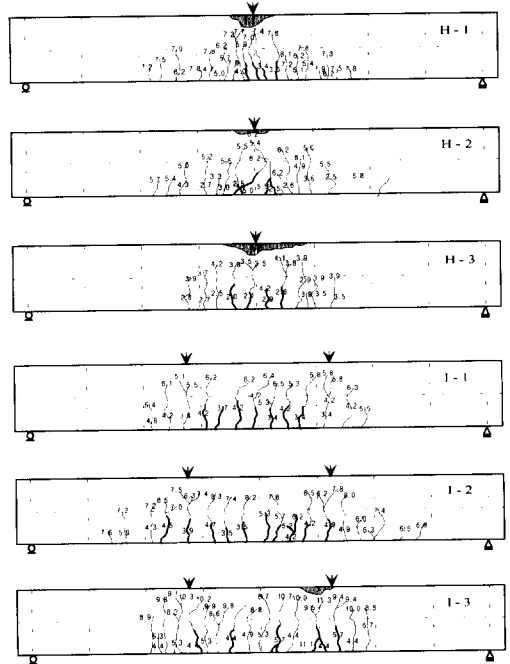


Fig. 4 Crack & failure patterns

결과에서는 긴장재의 양과 인장철근의 양이 많이 배근될 경우, 작용하중의 형태에 따라서 균열의 발생범위가 크게 달라지지 않았다. 따라서 일반철근이 많이 배근되었을 때 균열의 발생범위, 즉 소성힌지 길이는 작용하중의 형태와 함께 보강재의 양에 따라 영향을 받는 것으로 사료된다.

#### 4.3.2 하중-긴장재의 응력증가량 곡선

본 연구에서 실험된 실험체에 대한 하중-긴장재의 응력증가량 곡선을 Fig. 5(a)~Fig. 5(f)에 나타내었다. 여기서 긴장재의 응력은 실험체의 양단에 설치된 로드셀 값의 평균으로 하였다. 그럼에서 알 수 있듯이, 모든 실험체에 대한 하중-긴장재의 응력증가량 곡선은 하중-변위 곡선과 비슷한 양상을 나타내고 있는데, 초기균열이 발생한 이후 항복하중에 도달할 때까지 긴장재의 응력변화는 거의 나타나지 않았으나, 항복하중 이후에는 긴장재의 응력변화가 하중의 증가량 비율보다 급격히 증가하는 양상을 나타내고 있다. 즉 일반철근이 항복한 이후에 대부분 긴장재의 응력증가가 발생하고 있다. 이는 일반철근이 항복하기 이전에는 긴장재의 유효프리스트레스와 인장철근

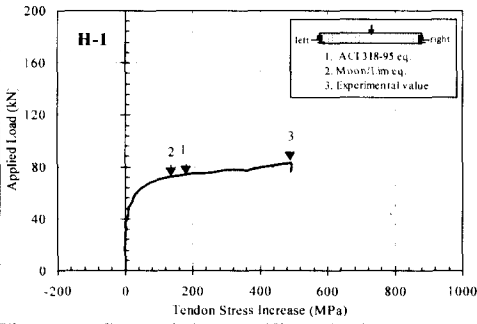


Fig. 5(a) Applied load-tendon stress increase curve of H-1 specimen

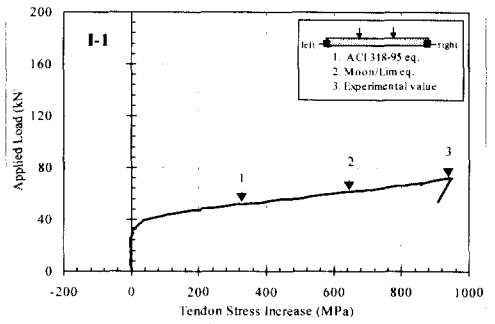


Fig. 5(d) Applied load-tendon stress increase curve of I-1 specimen

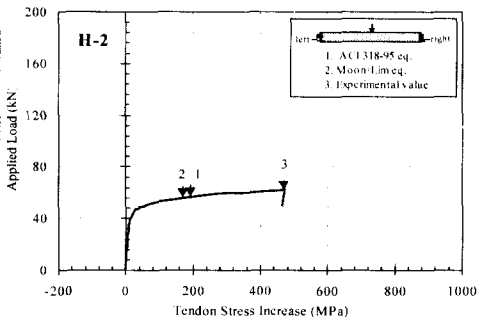


Fig. 5(b) Applied load-tendon stress increase curve of H-2 specimen

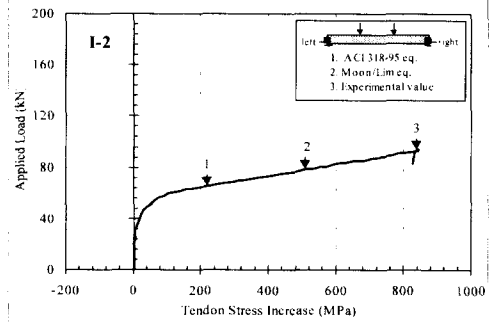


Fig. 5(e) Applied load-tendon stress increase curve of I-2 specimen

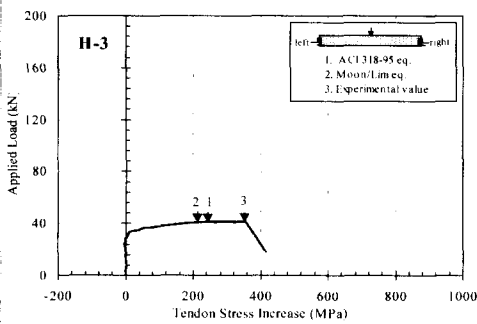


Fig. 5(c) Applied load-tendon stress increase curve of H-3 specimen

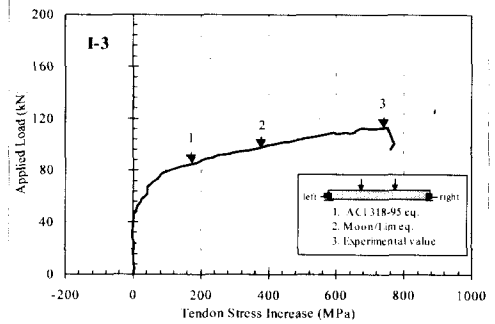


Fig. 5(f) Applied load-tendon stress increase curve of I-3 specimen

이 부재의 인장응력을 부담하고 있었으나, 인장철근이 항복한 이후 추가적인 하중의 증가는 긴장재가 부담하게 되었기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 또한, 그림에서는 실험에 의해 측정된 긴장재의 응력증가량과 ACI 규준에 의한 긴장재의 응력증가량, Moon/Lim의 설계식(식 2)에 의한 긴장재의 응력증가량을 나타내는 위치를 ▼로 표시하고 있다. 여기서 실험에 의해 측정된 긴장재

의 응력증가량은 실험체가 극한하중에 도달되었을 때의 값이다.

Fig. 5(a)~Fig. 5(c)의 H-계열 실험체에서 알 수 있듯이, ACI 규준에 의한 비부착 긴장재의 응력이 실험값보다 과대평가하지 못하고 있는데, 이는 변형도 적합조건에 의한 해석(Fig. 2참조)에서는 콘크리트의 강도가 60MPa였고, 실험에서는 38.4MPa였기 때문에 ACI 규준식에 의한

비부착 긴장재의 응력은 다소 해석결과보다 적게 평가된 것으로 판단된다. 그리고 ACI 규준이 비부착 긴장재의 응력을 과대평가할 수 있는 가능성에 대한 보다 상세한 연구는 현재 진행중에 있다. 그런데 H-3 실험체에서와 같이 긴장재의 위치가 중립축에 근접하고 일반철근 양이 적게 배근된 경우 ACI 규준식에 의한 결과는 실험값에 근접하는 결과를 나타내고 있어 과대평가의 가능성을 보이고 있다.

Fig. 5(d)~Fig. 5(f)의 I-계열 실험체의 경우, ACI 규준에 의한 비부착 긴장재의 응력이 실험값에 비하여 매우 과소평가되고 있는데, 이는 유효프리스트레스의 크기가 작고 긴장재의 응력증가량이 큰 구간의 실험체였으며, 콘크리트 강도가 변형도 적합조건에 의한 해석에서 가정한 값보다 적게 평가되었기 때문에 나타난 결과인 것으로 사료된다. 따라서 ACI 규준에 의한 비부착 긴장재의 응력은 상기에서와 같은 특정한 조건에서 과소평가될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

#### 4.3.3 기존연구의 설계식과 비교

비부착 긴장재의 응력을 평가할 수 있는 기존 설계식에 의한 결과와도 비교하기 위하여 Table 4에  $f_{ps}$ 와  $\Delta f_{ps}$ 로 구분하여 나타내었다. 표의 주기에 사용된 ① Experiment는 실험에 의한 결과, ② Moon/Lim은 본 연구자들의 설계식<sup>(2)(6)</sup>에 의한 결과, ③ ACI 318-95는 ACI 318-95 규준<sup>(5)</sup>에 의한 결과, ④ AASHTO LRFD는 AASHTO LRFD 규준<sup>(7)</sup>에 의한 결과, ⑤ Harajli/Kanj는 Harajli/Kanj의 설계식<sup>(8)</sup>에 의한 결과, ⑥ Chakrabarti는 Chakrabarti의 설

계식<sup>(9)</sup>에 의한 결과이다.

Table 4에서 알 수 있듯이 실험결과에 대한 예측결과의 비에서 Moon/Lim의 설계식에 의한 결과가 ACI 규준식에 의한 결과보다 일정한 비율의 안전율을 가지고 예측하고 있음을 알 수 있다. 그리고 ACI 규준식에 의한 결과에서 과대평가의 가능성이 있는 H-계열의 실험체는 실험결과의 약 88%정도로 예측하고 있으나, 과소평가의 가능성이 있는 실험체는 실험결과의 약 65%정도로 예측하고 있는 것으로 나타나 있다. 따라서 ACI 규준은 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수의 조합형태에 따라 일정한 안전율에 의해 긴장재의 응력을 예측하지 못할 수 있다고 사료된다.

그리고,  $\Delta f_{ps}$ 의 비교에서 알 수 있듯이, Chakrabarti의 설계식에 의한 결과에서 H-3 실험체에 대한 결과가 실험값을 12% 정도 상회하는 값으로 예측하고 있으므로 Chakrabarti의 설계식에 의해 비부착 긴장재의 응력을 예측할 때, 유효프리스트레스가 크고 1점 집중하중이 작용하며, 긴장재의 위치가 중립축에 근접한 부재에서는 과대평가의 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 Moon/Lim의 설계식으로 비부착 긴장재의 응력증가량을 평가하면, 유효프리스트레스가 크고 1점 집중하중이 작용하며 긴장재의 위치가 인장철근의 위치에 근접하게 배치되어 있고 긴장재의 양과 인장철근의 양이 과다하게 배근된 H-1 실험체의 결과에서와 같이 실험값의 18% 정도로 낮게 예측하는 경우도 있다. 이는 1점 집중하중이 작용함에도 불구하고 긴장재와 인장철근이 많이 배근되어 최종파괴에서 소성현저 길이의 영역

Table 4 Comparison of  $f_{ps}$  and  $\Delta f_{ps}$  with design equations (unit:MPa)

Specimens	(1)		$f_{ps}$						$\Delta f_{ps}$			
	$f_{ps}$	$\Delta f_{ps}$	(2) (1)	(3) (1)	(4) (1)	(5) (1)	(6) (1)	(2) (1)	(3) (1)	(4) (1)	(5) (1)	(6) (1)
H-1	1791.4	495.4	0.77	0.82	0.82	0.87	0.89	0.18	0.36	0.34	0.53	0.59
H-2	1766.6	470.7	0.81	0.85	0.84	0.89	0.92	0.29	0.42	0.40	0.60	0.69
H-3	1657.7	356.9	0.91	0.93	0.93	0.97	1.03	0.58	0.67	0.66	0.87	1.12
I-1	1816.1	921.1	0.83	0.67	0.94	0.74	0.72	0.67	0.36	0.88	0.48	0.45
I-2	1761.7	842.4	0.79	0.65	0.78	0.73	0.75	0.55	0.26	0.54	0.42	0.48
I-3	1667.7	753.2	0.78	0.65	0.71	9.71	0.72	0.50	0.23	0.35	0.35	0.38

\* Note : (1)=Experiment (2)=Moon/Lim (3)=ACI 318-95  
(4)=AASHTO LRFD (5)=Harajli/Kanj (6)=Chakrabarti



이 Moon/Lim의 설계식에서 가정된 것과 같이 짧게 형성되지 않고 2점 집중하중 및 등분포하중이 작용한 부재에서와 같이 소성힌지 길이가 길게 형성되었기 때문으로 사료된다. 따라서, 유효프리스트레스 크기가 크고 1점 집중하중이 작용하며 긴장재와 인장철근이 많이 배근된 단면에 대해서 추가적으로 종합적인 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 4.3.4 ACI 기준식의 평가

실험결과로 얻어진  $\Delta f_{ps}$ 를 설계식에 의한 값과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 가로축은 실험값이고 세로축은 설계식(ACI 기준식과 Moon/Lim의 설계식)에 의한 예측값이다. 그림에 의하면, ACI 기준식은 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 중요변수의 영향을 일관성 있게 평가하고 있지 못하다는 사실을 알 수 있다.

그림에서 H-계열의 실험체는 유효프리스트레스가  $0.7f_{pu}$ 로 크고, 1점 집중하중이 작용할 때, 긴장재의 위치의 변화 즉, 스패/츄 비를 변화시킨 실험체들로서 ACI 기준식은 기존연구의 실험결과들의 비교(Fig. 1(a))에서도 나타났듯이 비부착 긴장재의 응력증가량이 적게 발생하는 부재들에서 비교적 정확하게  $\Delta f_{ps}$ 를 평가하고 있다. 그리고, 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 몇몇 중요변수들을 포함하고 있지 않기 때문에 실험결과에 의한 비부착 긴장재의 응력증가량이 변화함에도 불구하고  $\Delta f_{ps}$ 를 일정한 양으로 예측하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 실험결과에서는 변형도 적합조건에 의한 해석연구에서와 같이 ACI 기준식이 비부착 긴장재의 응력을 과대평가하지는 않는 것으로 나타났다. 이는 동절기에 실험을 수행하였기 때문에 콘크리트 강도가 해석에서 가장한 값보다 적게 평가되었고, 보강지수가 상대적으로 크지 않은 실험체였으며, 실험결과에서도 긴장재의 응력증가량이 250 MPa 이상으로 많이 발생하였기 때문이다. 따라서 ACI 기준식에 의한 비부착 긴장재의 응력을 과대평가할 가능성에 대해서는 향후의 연구(현재 진행중)에서 보완하여 실험을 수행한 후 상세한 분석을 하기로 하였다.

I-계열 실험체는 유효프리스트레스가  $0.5f_{pu}$ 로

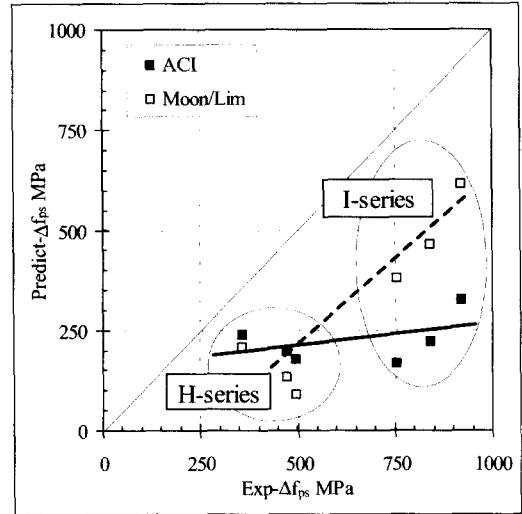


Fig. 6 Comparison of  $\Delta f_{ps}$  for evaluation of ACI code

작고, 2점 집중하중이 작용하며, 긴장재의 위치의 변화 즉, 스패/츄 비를 변화시킨 실험체들로서 ACI 기준식이 비부착 긴장재의 극한응력을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 즉, ACI 기준식은 비부착 긴장재의 응력증가량이 큰 부재에서  $\Delta f_{ps}$ 를 매우 과소평가하고 있다. 따라서 유효프리스트레스가 작고 2점 집중하중이 작용하는 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력은 ACI 기준식이 과소평가하고 있다고 사료된다.

## 5. 결 론

긴장재의 응력에 영향을 미칠 수 있는 변수들의 조합에 의하여 현행의 ACI 기준식이 비부착 긴장재의 응력을 과대평가하거나 과소평가할 가능성이 있는 실험체를 제작하고, 실험을 실시하였다. 분석결과에 의하면 현행의 ACI 기준식은 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수들의 조합조건에 따라 비부착 긴장재의 예측응력을 과대 혹은 과소평가할 가능성이 있다는 사실을 알았다. 특히 긴장재의 응력증가량이 크게 나타날 수 있는 경우에는 현행의 ACI 기준식이 비부착 긴장재의 응력을 매우 과소평가하고 있으며, 긴장재의 응력증가량이 매우 작게 나타나는 경우에는 실험값에 매우 근접하게 예측함을 알 수 있었다. 그러나 본 연구자들이 제안하고 있는 설계식에 의한 결과는

긴장재의 응력증가량이 작거나 크거나에 무관하게 일정한 안전율을 가지고 비부착 긴장재의 응력을 적절하게 예측하고 있는 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 금호건설기술연구소와 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와의 공동연구결과의 일부분임.

## 참고문헌

1. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에 관한 연구(I) -기존연구 및 ACI 기준식의 고찰-", 한국콘크리트학회 논문집 제9권 4호, 1997. 8, pp 167-176.
2. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에 관한 연구(II) -변형도 적합조건을 이용한 설계식의 제안-", 한국콘크리트학회 논문집 제9권 5호 1997. 10, pp 105-114.
3. 임재형, 이리형, "비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 변수별 효과에 관한 해석적 연구", 대한건축학회 논문집 제13권 10호 1997. 10, pp 291-300.
4. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구", 한국콘크리트학회 논문집 제11권 1호, 1999. 2, pp 209-219.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1995, 369 pp.
6. Lee, L.-H., Moon, J.-H., and Lim, J.-H., "Proposed methodology for computing of unbonded tendon stress at flexural failure," ACI Structural Journal, 1999. (accepted for publication).
7. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specification, SI unit 1st Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.
8. Harajli, M. H., and Kanj, M. Y., "Ultimate flexural strength of concrete members prestressed with unbonded tendons," ACI Journal, Vol. 88, No. 6, 1991, pp 663-673.
9. Chakrabarti, P. R., "Ultimate stress for unbonded post-tensioning tendons in partially prestressed beams," ACI Journal, Nov.-Dec., 1995, pp 689-697.
10. Moon, J.-H., and Burns, N. H., "Flexural behavior of members with unbonded tendons. II : application," J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol. 123, No. 8, Aug., 1997, pp 1095-1101.

## 요 약

본 연구는 현행 ACI 기준식으로 비부착 긴장재의 응력을 평가할 때 과소 혹은 과대평가할 가능성이 있는 경우에 대한 내용이다. 본 연구자들에 의해 발표된 일련의 연구결과<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>에 의하면 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 많은 변수들의 조합형태에 따라서 현행의 ACI 기준식은 비부착 긴장재의 응력을 과소 또는 과대평가할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수들의 조합형태에 따라서 과소평가의 가능성이 있는 실험체 3개와 과대평가의 가능성이 있는 실험체 3개로 총 6개의 실험체를 제작하고 실험을 실시하였다. 실험결과에서는 현행의 ACI 기준식이 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수들의 조합조건에 따라서 비부착 긴장재의 예측응력을 과대 혹은 과소평가할 가능성이 있다는 사실을 알았다. 특히 긴장재의 응력증가량이 크게 나타날 수 있는 경우에는 현행의 ACI 기준식이 비부착 긴장재의 응력을 매우 과소평가하였다.

(접수일자 : 1999.2.8)