

# 고장력 인장봉으로 보강된 RC보의 휨거동에 관한 해석적 연구

## An Analytical Study on the Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with High Tension Bars

신 경 재<sup>1)</sup> · 김 병 준<sup>2)</sup>

*Shin, Kyung Jae*

*Kim, Byung Jun*

요 약 : 본 논문은 고장력 인장봉에 의해 보강된 RC보의 휨거동을 평가하기 위한 해석적 방법을 제시하고 있다. 본 연구에 대한 선행 실험 결과를 이용하였다. 실험 논문에서는 외부 강봉 보강의 이점에 대해서 소개하고 있다. 휨거동을 평가하기 위해 본 논문은 해석적 방법으로 단순누가산정의 방법을 제시하고 있다. 이 방법은 기본적으로 고장력 인장봉에 의해 보강된 RC보가 받는 전체하중은 강봉이 없는 RC보가 받는 하중과 강봉 자체가 받는 하중의 합과 같다고 가정한 것이다. 추가로 강봉에 의해 발생하는 축력과 강봉에 주어진 프리스트레스트에 대하여 고려를 하였다. 실험 결과와 이론해석의 결과값을 비교하여 단순누가산정 방법은 고장력 인장봉에 의해 보강된 RC보의 비선형 휨거동을 예측함에 있어서 비교적 정확한 상관관계를 보여주고 있다.

ABSTRACT : This paper presents an analytical method of evaluating the flexural behavior of RC (reinforced concrete) beams strengthened with high-strength bars. The former experimental results were used to compare with the analytical results. The experimental results also outline the advantages of externally strengthened method with high-strength bars. To evaluate the flexural behavior of RC beams strengthened with unbonded high-strength bars, this paper proposes a method involving a simple strength-summation method. This method basically assumes that the total strength of RC beams strengthened with high-strength bars is equal to the sum of the strengths of the RC beams and the high-strength bars. This analytical method also includes the effects of compressive force due to the tension from high-strength bars. A comparison of the analytical and experimental results leads to the conclusion that the simple strength-summation method can simulate the flexural behavior of RC beams strengthened with high-strength bars with a good level of accuracy.

핵심용어 : 외부포스트텐션, 고장력 강봉, 휨 거동, 단순누가산정

KEYWORDS : External Post-Tension, High Tension Bar, Flexural Behavior, Simple Summating Estimation

### 1. 서론

최근 건축물은 재건축하는 경우도 많지만, 경우에 따라서 기존의 건물을 재사용이 가능하도록 구조물을 보강하거나 설비시설만 재설치하는 등의 자원 및 에너지 절약적인 방향도 많이 요구되고 있다. 특히 구조물의 보강을 통해 건축물의 수명을 연장시키거나 또는 용도가 다른 건축물을 만들 수 있다. 국내에서는 이와 관련하여 구조물의 보수·보강에 관한 탄소 섬유시트 부착 및 철판 보강 공법이 대표적으로 시행되어 장

점도 많지만 부착의 신뢰성과 섬유시트의 박리에 따른 취성 파괴, 처짐이 발생한 구조물의 처짐 회복의 어려움 등의 단점이 있다. 이에 대한 대체공법으로 강선이나 고장력 강봉에 의한 외부 포스트 텐션 보강공법이 한 가지 대안으로 제시되고 있다(신경재 등, 2006a). 고장력 강봉에 의해 보강된 보의 경우 탄소섬유시트 부착공법 및 철판 보강공법에 비해 뚜렷한 휨성능 향상과 부가적으로 전단보강에 있어서도 장점이 있다(신경재 등, 2006a).

본 연구에서는 이전에 실시된 고장력 강봉에 의해 보강된

1) 정회원, 경북대학교 건축학부 교수, 공학박사(shin@knu.ac.kr)

2) 교신저자, 정회원, 경북대학교 건축학부 석사과정

(Tel : 053-950-5591, Fax : 053-950-6590, E-mail : qudwsl@knu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

RC보의 실험(신경재 등, 2006b)결과를 이용한 이론적 해석에 있어서 하나의 방법을 제안하고자 한다. 제시된 해석방법을 통하여 강봉으로 보강된 보의 균열 전부터 극한 강도까지의 휨거동을 예측하고 실험결과와 비교함으로써 강봉의 보강량에 따른 해석방법의 타당성 및 신뢰성을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 실험 개요

본 장은 기 실험된 실험결과(신경재 등, 2006 b)를 해석결과와 비교하기 위해 발췌한 내용이다. 고장력 인장봉에 긴장력을 도입하여 외부로 휨 보강한 철근콘크리트 보의 하중에 따른 휨 거동 특성을 평가하기 위하여, 가력스팬 6m의 실대형 시험체를 각 변수별로 계획하여 단순 지지보에 3등분 지점에 2점하중 가력하여 휨 성능 실험을 수행하였다. 보강 시험체는 보강재의 직경, 정착구 형상, 보강재의 보강깊이, 배치형상에 따라 총 9개의 시험체에 대하여 실험을 하였다. 강봉은 턴버클을 회전시킴으로써 소정의 긴장력을 얻는 방식으로 실험시 강봉에 도입된 초기 긴장력은 강봉의 재료실험에서 구한 항복응력의 30%를 도입하였다. 본 휨성능 실험을 통해 보강된 RC보의 휨특성을 파악하였고, 이 실험에 근거하여 이론해석을 진행하여 그 타당성을 검토한다.

표 1. 시험체 일람표

시험체 명	보강	보강 유형	보강깊이 (d <sub>p</sub> )	강봉직경	정착부 유형	
RC01	-	-	-	-	-	
T18U-H-P	Hi-bar	U	High (88cm)	φ18	Penetrated Pin	
T22U-H-P				φ22		
T28U-H-P				φ28		
T18V-H-R		V		φ18	Penetrated Bar	
T22V-H-R				φ22		
T28V-H-R				φ28		
T18U-L-P		U		Low (65cm)	φ18	Penetrated Pin
T22U-L-P					φ22	

T18U-H-P  
 — Anchor Type (P : Pin, R : Bar)  
 — Depth (H : High, L : Low)  
 — Arranged Type (U : U-Shape, V : V-Shape)  
 — Diameter (18 : φ18, 22 : φ22, 28 : φ28)

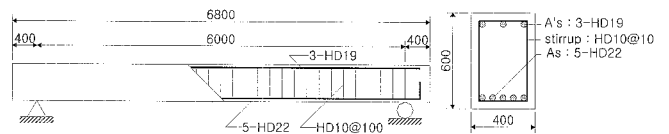


그림 1. 시험체 상세(RC)

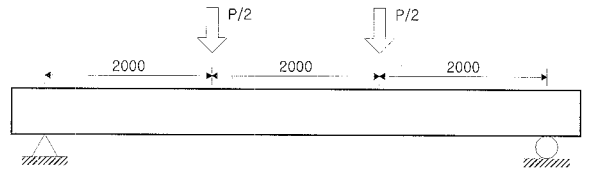
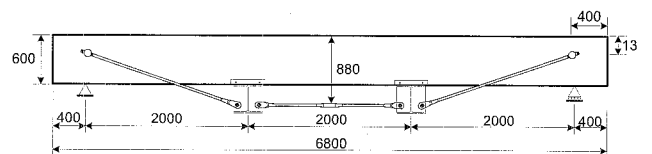
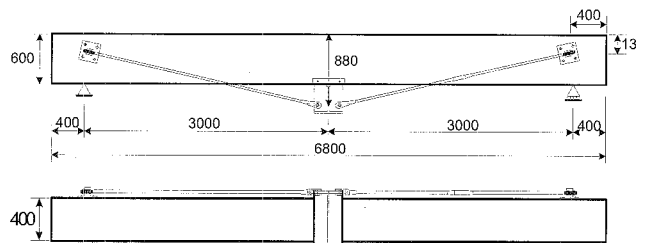


그림 2. 시험체 치수 및 가력 방법

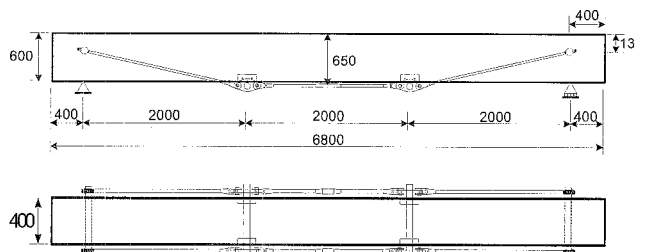
고장력강봉은 지름이 φ18, φ22 및 φ28인 3종류를 사용하였다. 강봉 보강 시험체의 경우에는 강봉의 배치 형상에 따라 그림 3과 같이 U, V형으로 보강 깊이에 따라 H, L형으로 구분하며 보의 앞과 뒤쪽에 하나씩 보강하는 형태로 하였다.



(a) U-H-P Type



(b) V-H-R Type



(c) U-L-P Type

그림 3. 시험체 상세(고장력 강봉 보강 유형)

시험체에 사용된 고장력 인장봉, 철근, 콘크리트 재료 실험 결과는 표 2와 같다.

표 2. 재료실험 결과

유형	직경 (mm)	항복응력 (MPa)	인장응력 (MPa)	연신률 (%)	항복비 (%)
Re-Bar (internal)	D19	405.5	619.4	21	65
	D22	443.1	605.2	20	73
Hi-Bar	φ18	588.4	739.8	15	79
	φ22	623.4	746.6	17	83
	φ28	541.2	686.8	14	78
Concrete	31.2MPa				

### 3. 이론 해석

#### 3.1 단순누가 거동해석

단순 누가 산정방식은 그림 4와 같이 전체하중(P)을 RC보가 받는 하중(P<sub>RC</sub>)과 강봉이 받는 하중(P<sub>HT</sub>)으로 나눠서 각각에 대해서 계산을 한 뒤 두 값을 합산하는 방법이다. RC보는 균열(Crack)강도①, 항복(Yield)강도②, 극한(Ultimate)강도③에서의 거동의 모습이 다르며 각각에 대하여 구할 수 있다. 이때 강봉의 항복여부는 RC보의 δ<sub>y</sub>를 기준으로 하여 A형은 강봉이 RC보 보다 먼저 항복하는 경우(④)이고 B형은 강봉이 RC보 보다 뒤늦게 항복하는 경우(⑤)이다. 이러한 강봉과 RC보의 각 지점에 대하여 동일 변위값에서의 하중값을 단순누가를 하여 강봉의 항복지점에 따라 그림 4의 A' 또는 B'의 하중-변위 그래프를 얻을 수 있다.

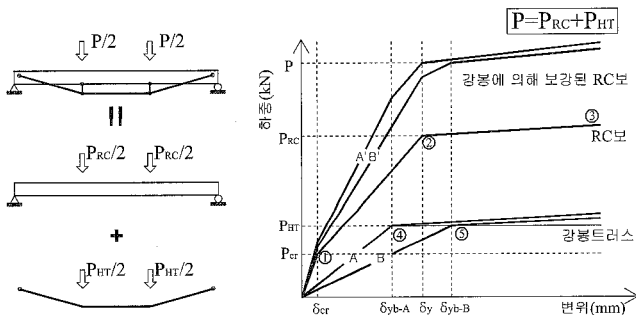


그림 4. 단순 누가 산정 개념

이러한 해석을 위한 가정 사항은 다음과 같다. 1) RC보가 하중을 받아 처짐이 발생할 때 동시에 강봉도 하중을 받아 동일한 처짐이 일어나는 것으로 본다. 2) 강봉과 철근은 탄소성거동을 하는 것으로 가정한다. 3) 강봉의 양 단부는 보에 의해 고정된 것으로 가정하되 보의 단부 회전이나 정착편의 탄성변형에 따른 정착부의 양 단부의 축방향 변위는 없는 것으로 가정한다. 단순누가산정 방법에 따른 전체적인 휨 거동 해석의 순서는 다음과 같이 진행한다.

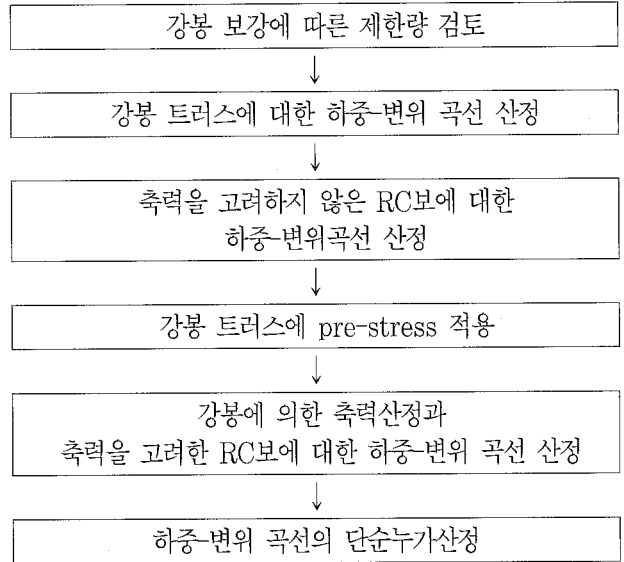


그림 5. 휨거동 해석 순서

#### 3.2 강봉의 보강량에 대한 검토

강봉에 의해 보강된 RC 부재가 극한상태에 도달할 때 콘크리트의 압축축이 먼저 파괴되는 취성파괴를 피하고, 인장축 보강재가 먼저 항복강도에 도달한 다음 연성을 발휘하는 연성파괴를 유도하기 위해 강봉의 보강량에 대한 검토를 한다.

##### 3.2.1 Pre-stress 강봉의 보강량 제한

Pre-stress 콘크리트 부재의 연성파괴를 유도하기 위해 최대 보강량을 콘크리트 구조 설계기준 및 해설(한국콘크리트학회, 2004)을 참고로 하면 식 (1)과 같다.

$$\omega_p + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega') = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p}(\rho \frac{f_y}{f_{ck}} - \rho' \frac{f_y}{f_{ck}}) \leq 0.36\beta_1 \quad (1)$$

- $f_{ps}$  : 공칭강도발휘시 pre-stress 보강재의 인장응력
- $\beta_1$  : 중립축거리에 대한 등가직사각형 응력분포의 깊이비
- $\rho_p$  : pre-stress 보강재비 ( $= A_{ps}/bd_p$ )
- $\omega$  : pre-stress 되지 않은 인장철근의 강제지수 ( $= \rho f_y/f_{ck}$ )
- $\omega'$  : 압축철근의 강제지수 ( $= \rho' f_y/f_{ck}$ )
- $\omega_p$  : pre-stress 보강재의 강제지수 ( $= \rho_p f_{ps}/f_{ck}$ )

##### 3.2.2 보강에 따른 축력검토

보강에 따라 발생하는 강봉에 의한 축력이 보의 P-M상관도(Macgregor 등, 2005)에서  $P_b$  (balanced failure point

: 축력에 의한 인장파괴가 일어나는 한계점)를 초과하지 않는지에 대한 검토가 이루어져 과보강에 의한 취성파괴가 일어나지 않는지 확인이 필요하다.

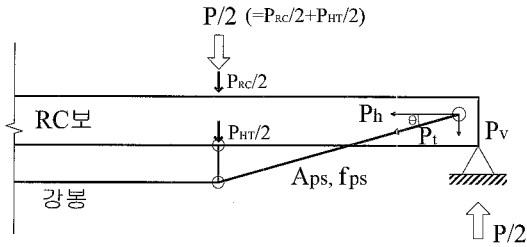


그림 6. 강봉에 의해 발생하는 축력

$$P_h = \left[ \frac{P_{HT}}{2} \times \frac{1}{\sin\theta} \right] \times \cos\theta \quad (2)$$

$$P_{hri} = A_{ps} \times f_{ps} \times \cos\theta \quad (3)$$

$$P_{h-max} = A_{ps} \times f_{py} \times \cos\theta$$

$$(\ast f_{ps} = f_{sc} + 70 + \frac{f_{ck}}{100\rho_p} \leq f_{py}) \quad (4)$$

- $P_h$  : 강봉에 의해 발생하는 축력
- $P_{HT}$  : 강봉 트러스에 작용하는 하중
- $P_{hri}$  : 공칭강도를 발휘할 때 강봉에 의한 축력
- $P_{h-max}$  : 강봉에 의한 최대축력
- $f_{ps}$  : 공칭강도를 발휘할 때 강봉 인장응력
- $f_{se}$  : 강봉 유효응력
- $f_{py}$  : 강봉 항복 응력
- $A_{ps}$  : 강봉 단면적

보강된 RC보에 하중이 가해질 때 강봉 트러스가 받는 하중이  $P_{HT}$  라면 힘의 분해에 따라 트러스에 의한 축력을 산정하면 식(2)와 같다. 그리고, 콘크리트 구조 설계기준 및 해설(한국콘크리트학회, 2004)을 참고로 하여 경간의 비가 35 이하인 경우 비 부착된 긴장재의 공칭강도 발휘시 강봉에 발생하는 인장응력을 산정하여 강봉에 의한 축력을 구하면 식(3)과 같다. 이때, 강봉에 의해 발생하는 최대 축력값은 강봉이 항복하는 지점, 즉  $f_{ps} = f_{py}$  일 때 발생하는 축력값으로 산정하여 이 값을 기준으로 과 보강에 대한 검토를 한다.

RC보에 대하여 축력이 작용하는 기둥부재로 가정하고 해석을 진행할 수 있으며 P-M 상관도를 작성한다.

실제 시험체에서는 강봉이 보의 양 좌우에 설치되므로 실제 최대축력은  $2P_{h-max}$  이고  $2P_{h-max} < \phi P_b$  를 확인하여 보강된 강봉에 의해 연성파괴에 도달하는지 검토한다.

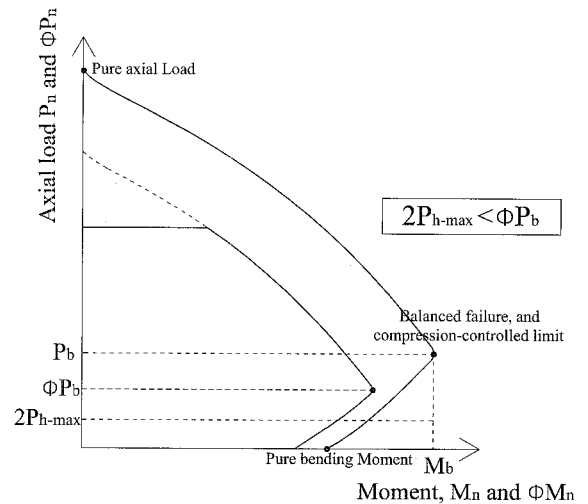


그림 7. RC보의 축력에 대한 P-M상관도

### 3.3 보강되어진 강봉에 대한 하중-변위 곡선 작성

RC보에 보강된 강봉에 대하여 RC보와는 별도로 강봉에 대해서만 하중과 처짐에 대한 관계를 찾는다. 이때 강봉은 그림 8과 같이 하나의 트러스 구조물로서 해석이 가능하다. 트러스 구조물의 해석은 가상일법에 근거하여 유도하며 식(5)~(9)와 같다.

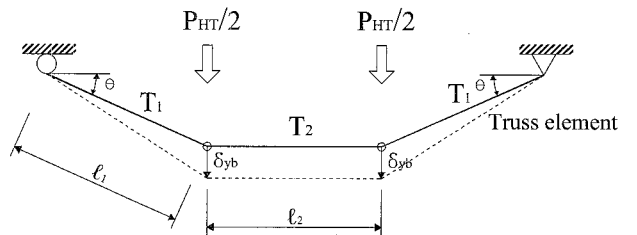


그림 8. 강봉 트러스 해석

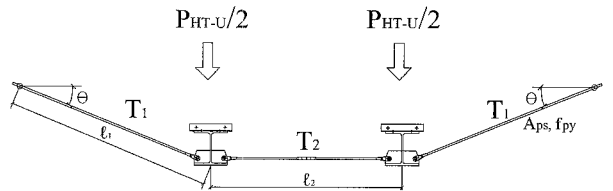


그림 9. U형 강봉 트러스

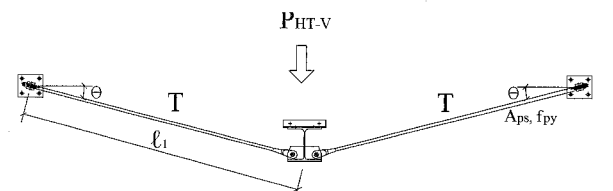


그림 10. V형 강봉 트러스

$$T_1 = \frac{P_{HT-U}}{2} \times \frac{1}{\sin\theta} = \frac{2EA_{ps} \sin\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \times \delta_{yb} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{P_{HT-U}}{2} \times \frac{\cos\theta}{\sin\theta} = \frac{2EA_{ps} \sin\theta \cos\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \times \delta_{yb} \quad (6)$$

$$P_{HT-U} = EA_{ps} \left[ \frac{4\sin^2\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \right] \times \delta_{yb} \quad (7)$$

위의 식을 근거로 하여 RC부분을 제외한 U형 강봉 트리스에 대한 하중-변위 곡선을 작성할 수 있다. V형 강봉 트리스의 경우  $\ell_2$  값을 0으로 하여 계산한다.

$$T = \frac{P_{HT-V}}{2} \times \frac{1}{\sin\theta} = \frac{EA_{ps} \sin\theta}{\ell_1} \times \delta_{yb} \quad (8)$$

$$P_{HT-V} = EA_{ps} \left[ \frac{4\sin^2\theta}{2\ell_1} \right] \times \delta_{yb} \quad (9)$$

$P_{HT-U}$  : U형 강봉 트리스에 작용하는 하중

$P_{HT-V}$  : V형 강봉 트리스에 작용하는 하중

$T_1$  : 강봉 트리스 경사부재의 축력

$T_2$  : 강봉 트리스 수평부재의 축력

$\delta_{yb}$  : 강봉의 중앙지점에서의 처짐

강봉 트리스는 탄소성 거동을 하는 구조물로 해석을 하여  $T_1$ 과  $T_2$ 에 대하여 항복점과 변형경화(hardening) 구간을 거친 뒤의 파괴점을 구하여 그림 11과 같이 하중-변위 곡선을 작성할 수 있다.

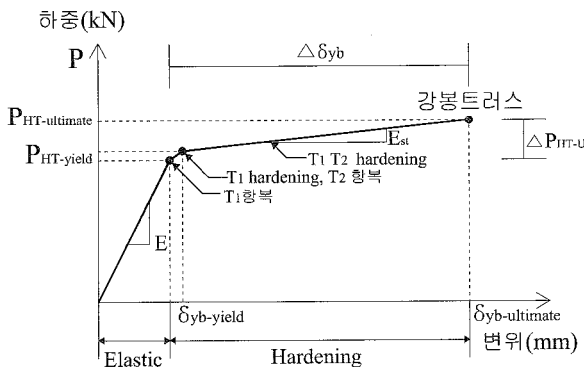


그림 11. 강봉 트리스의 변형경화구간에 대한 해석 (U형)

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= A_{ps} \Delta f_{pu} = \frac{\Delta P_{HT-U}}{2} \times \frac{1}{\sin\theta} \quad (10) \\ &= \frac{2E_{st} A_{ps} \sin\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \times \Delta \delta_{yb} \end{aligned}$$

$$\Delta T_2 = A_{ps} \Delta f_{pu} \cos\theta = \frac{\Delta P_{HT-U}}{2} \times \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \quad (11)$$

$$= \frac{2E_{st} A_{ps} \sin\theta \cos\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \times \Delta \delta_{yb}$$

$$\Delta P_{HT-U} = E_{st} A_{ps} \left[ \frac{4\sin^2\theta}{2\ell_1 + \ell_2 \cos^2\theta} \right] \times \Delta \delta_{yb} \quad (12)$$

$f_{pu}$  : U형 강봉 트리스에 작용하는 하중

$E_{st}$  : U형 강봉 트리스에 작용하는 하중

$\Delta P_{HT-U}$  : U형 강봉 트리스에 작용하는 하중  
(=  $P_{HT-ultimate} - P_{HT-yield}$ )

$\Delta \delta_{yb-U}$  : U형 강봉 트리스에 작용하는 하중  
(=  $\delta_{yb-ultimate} - \delta_{yb-yield}$ )

### 3.4 축력이 없는 경우의 RC보의 하중-변위 곡선

#### 3.4.1 RC보의 M- $\phi$ 곡선 작성

RC보의 M- $\phi$  (RC보의 하중에 따른 모멘트-곡률 상관관계)곡선을 작성한다. 이때 RC보의 균열지점, 항복지점, 극한강도지점에 대해서 각각  $M_{cr}$ ,  $M_y$ ,  $M_u$  와  $\phi_{cr}$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ 를 구하여 세 개의 직선으로 표현된다(Park등, 1970).

#### 3.4.2 M- $\phi$ 곡선으로부터 하중-변위 곡선 도출

기본적으로 하중 값(P)은 모멘트 값(M)으로부터 직접 도출하여 구하고 처짐( $\delta$ )값은 탄성하중 법에 의하여 구한다. 이때 세 지점(균열 강도, 항복강도, 극한강도)에 대하여 각각의 하중 값과 변위(처짐)값을 산정한다. 그림 12와 같은 보의 모델에 대하여 균열 지점에서의 RC보의 처짐값은 식 13과 같다.

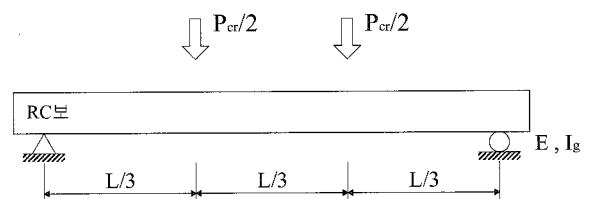


그림 12. RC보의 초기 모델

$$\delta_{cr} = \frac{23 \left( \frac{P_{cr}}{2} \right) L^3}{384 E I_g} = \frac{23 P_{cr} L^3}{768 E I_g} \quad (13)$$

그리고, 항복강도 지점에서의 RC보의 처짐값은 그림 13을 이용하여 구할 수 있다.

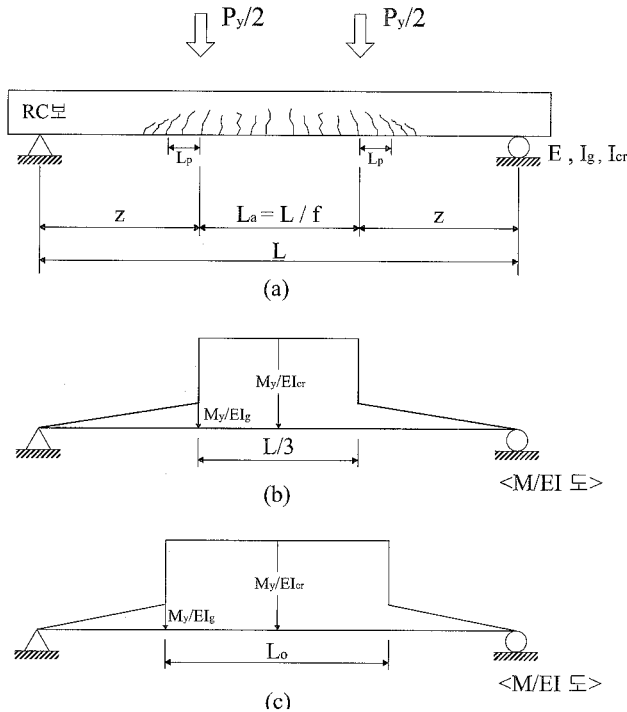


그림 13. RC보의 균열 후 모델

$$\delta_y = \left[ \frac{(L - L_0)^2}{12} \right] \times \frac{M_y}{EI_g} + \left[ \frac{L \cdot L_0}{4} - \frac{L_0^2}{8} \right] \times \frac{M_y}{EI_{cr}} \quad (14)$$

$$L_0 = L_a + 2L_p = \frac{L}{f} + 2L_p \quad (15)$$

$$(\ast L_p = 0.5d_p + 0.05z) \quad (16)$$

$L_p$  : 소성변형 길이

$\delta_{cr}$  : 균열지점에서의 처짐

$\delta_y$  : 항복지점에서의 처짐

$\delta_u$  : 최대하중지점에서의 처짐

$I_g$  : RC보의 전체 단면 2차모멘트

$I_{cr}$  : RC보의 균열 후 단면 2차모멘트

$\phi_u$  : 최대하중 지점에서의 곡률

RC보에 하중이 가해지는 경우 균열이 발생하고 난 뒤 중앙 부분에서의 균열이 크게 발생하고 단부 부분에서는 균열이 거의 발생하지 않는다(이는 단순보를 예로 든 경우이다). 이때 균열이 발생한 구간에 대해서는  $I_{cr}$  값을, 균열이 발생하지 않은 구간에 대해서는  $I_g$  값을 적용하여 탄성하중 법에 근거하여 RC보의 중앙지점에서의 처짐값( $\delta_y$ )을 산정한다.

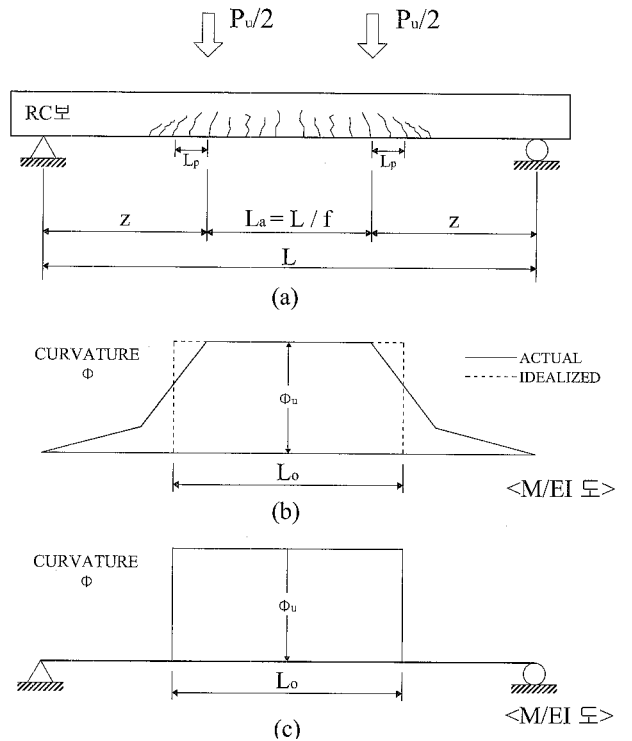


그림 14. Ultimate load point의 RC보 처짐

여기서  $L_0$ 는 소성변형길이를 의미한다. 소성변형길이는 RC보에 하중에 가해져 소성영역에 들어갔을 때 소성변형이 일어나는 구간을 의미한다. RC보의 항복강도 지점의 처짐값을 구할 때 그림 13(b)에서 보듯이 하중이 가려져지는 지점보다 조금 더 넓은 범위에서 균열이 발생하기 때문에 그림 13(c)에서처럼 소성변형길이 만큼의 영역에서 균열이 발생한다고 가정하고서 계산을 하여 보다 실제 실험값에 가까운 이론해석 결과값을 얻을 수 있다.

특히, RC보의 균열발생 이후와 소성영역에 대하여 아래의 그림 14 (Harajli, 1990)를 참고로 계산과정을 거쳐 처짐값을 구하도록 한다. RC보의 균열발생 이후의 처짐값은 그림 14(c)와 같은 M/EI 하중을 구한 뒤 탄성 하중법에 근거하여 해석을 한다. 이때  $L_0$ 는 등가 소성영역 길이로 정의할 수 있으며 이는 균열 발생구간에 대하여 등가면적으로 산정할 길이이다. 이때의 처짐값은 다음과 같다.

$$\delta_u = \frac{\phi_u \cdot L \cdot L_0}{4} - \frac{\phi_u \cdot L_0^2}{8} \quad (17)$$

### 3.5 강봉 트러스에 Pre-stress 적용

실험은 외부보강 강봉을 설치한 뒤 강봉의 허용응력의 30%에 해당되는 만큼의 긴장력을 미리주는 포스트텐션 보강 공법을 적용하였다. 즉, 강봉을 설치한 후 일정량의 인장력을

미리 부여하여 초기 강성을 크게 하였다. 이에 대한 도해적 해석은 다음과 같다.

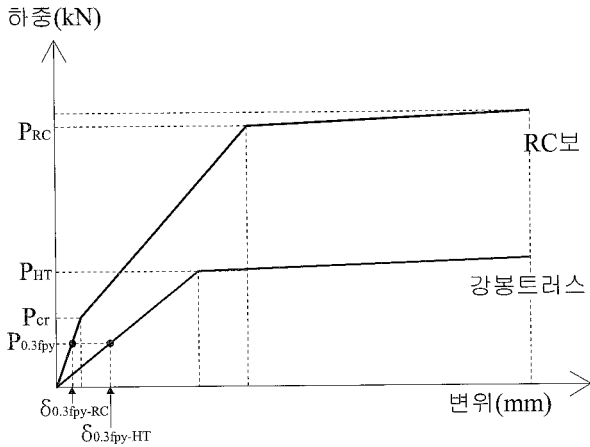


그림 15. Pre-stress 적용에 대한 도해적 해석(1)

① 그림 15와 같이 앞서 구한 RC보와 강봉 트러스에 대한 하중-변위 곡선을 하나의 좌표축에 나타낸다. ② 이때 강봉이 항복 변형률의 30%에 이를 때에 보강된 RC보에 가해지는 하중값을 구한다. 그때의 하중 값을  $P_{0.3fpy}$  라고 할 때, ③ 이때  $P_{0.3fpy}$ 의 하중을 받을 때 RC보의 처짐값을  $\delta_{0.3fpy-RC}$ 라 할 때 이 지점은 그림 16에서 보듯이 원점대칭 지점인  $O'(-\delta_{0.3fpy}, P_{0.3fpy-RC})$  지점을 구할 수 있다. ④ ③에서구한 지점  $O'$ 를 pre-stress를 받는 RC보의 새로운 원점이라 본다. 이는 강봉에 pre-stress를 주는 만큼 RC보는  $P_{0.3fpy}$ 에 해당되는 하중을 미리 받은 것으로 해석이 가능하다.

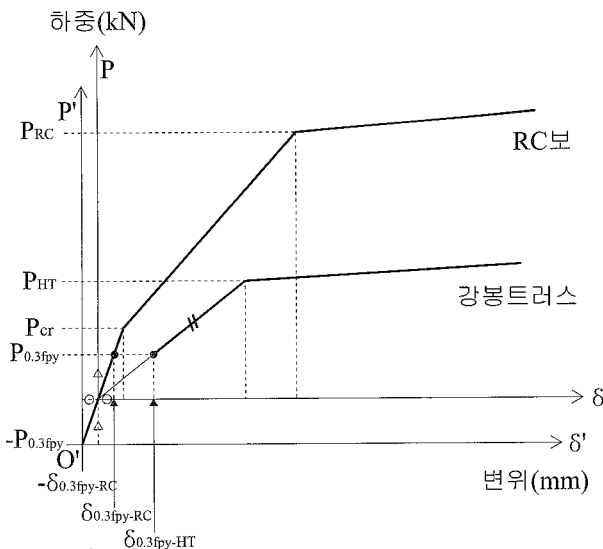


그림 16. Pre-stress 적용에 대한 도해적 해석(2)

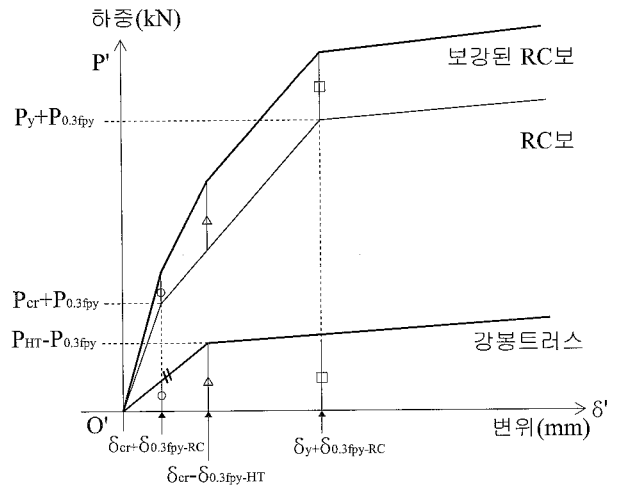


그림 17. Pre-stress 적용에 대한 도해적 해석(3)

⑤ 그리고, 강봉트러스는  $P_{0.3fpy}$ 의 하중을 받을 때  $\delta_{0.3fpy-HT}$ 의 처짐값을 갖는다. 이때, pre-stress를 받은 강봉은 이미 이에 해당하는 하중을 받아 변형이 생긴 것이기 때문에 강봉 트러스 곡선상의 점인  $(\delta_{0.3fpy-HT}, P_{0.3fpy})$ 를 ③에서 구한 새로운 원점  $O'$ 에 대응시켜 평행 이동시킨다. 이때, pre-stress를 받은 RC보의 하중-변위 곡선은 하중값은  $P_{0.3fpy}$ 만큼 증가하게 되고 변위 값은  $\delta_{0.3fpy-RC}$ 만큼 증가하게 된다. 그리고 강봉 트러스의 경우 하중 값은 미리 받은 인장력의 크기인  $P_{0.3fpy}$ 만큼 감소하게 되고 변위 값은  $\delta_{0.3fpy-HT}$ 만큼 감소하게 된다. 그리고, 이때  $P_{0.3fpy}$ 값은 강봉의 항복강도의 30%에 해당하는 변형률을 계산하여 구할 수 있다. 정리를 하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{0.3fpy} = [A_{ps} \times 0.3f_{py} \times \sin\theta \times 2] \times 2 \quad (18)$$

$$P_{ps-RC} = P_{RC} + P_{0.3fpy} \quad (19)$$

$$\delta_{ps-RC} = \delta_1 + \delta_{0.3fpy-RC} \quad (20)$$

$$P_{ps-HT} = P_{HT} - P_{0.3fpy} \quad (21)$$

$$\delta_{ps-HT} = \delta_{HT} - \delta_{0.3fpy-HT} \quad (22)$$

여기서,

$P_{0.3fpy}$  : 0.3 $\epsilon_{py}$ 일 때 외부에서 가해지는 하중

$\delta_{0.3fpy-RC}$  :  $P_{0.3fpy}$ 가력 시 RC보 중앙지점 처짐

$\delta_{0.3fpy-HT}$  :  $P_{0.3fpy}$ 가력 시 강봉 트러스의 중앙지점 처짐

$P_{ps-RC}$  : pre-stress를 적용한 RC보에 작용하는 하중

$P_{ps-HT}$  : pre-stress를 적용한 강봉트러스에 작용하는 하중

$\delta_{ps-RC}$  : pre-stress를 적용한 RC보의 중앙지점 처짐

$\delta_{ps-HT}$  : pre-stress를 적용한 강봉 트러스의 중앙지점 처짐

상기와 같은 방법으로 pre-stress 적용에 대한 해석을 진행하였고 그림 18과 같이 pre-stress를 적용하지 않은 경우와 비교하였다. pre-stress를 적용한 경우에는 균열발생 하중이 증가하였다. 균열 발생 후 사용하중(Service Load)에 대해서는 pre-stress를 준 경우가 그렇지 않은 경우에 비교해 처짐이 감소한다. 항복 후에는 두 경우 극한강도( $P_u$ )는 동일하게 나타난다.

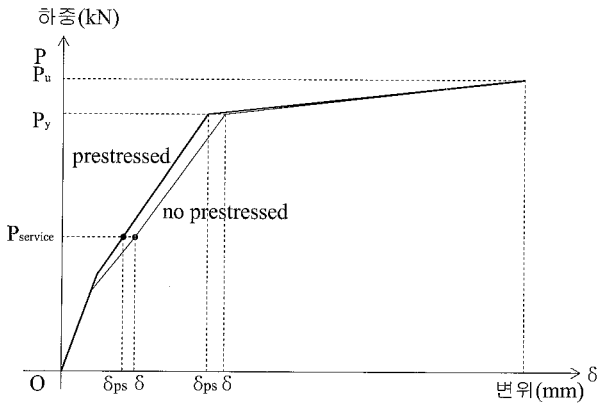


그림 18. Pre-stress 적용에 따른 하중-변위곡선

### 3.6 축력을 고려한 RC보의 하중-변위 곡선 산정

강봉에 의해 보강된 RC보는 연직방향으로 가해지는 하중과 함께 강봉에 의해 발생하는 축력도 동시에 받게 된다. 이 축력을 받기 때문에 강봉에 의해 보강된 RC보는 그림 19에서 보는 바와 같이  $\Delta M$  만큼의 추가 모멘트가 발생하게 되어 강도값은 증가하게 된다. 기본적인 해석 방향은 축력을 RC보 단면에 작용하는 인장력으로 산정하여 앞서 3.4절에서 구했던 것과 마찬가지로 진행하여 축력을 받는 RC보에 대한 모멘트-곡률 곡선과 하중-변위 곡선을 산정할 수 있다.

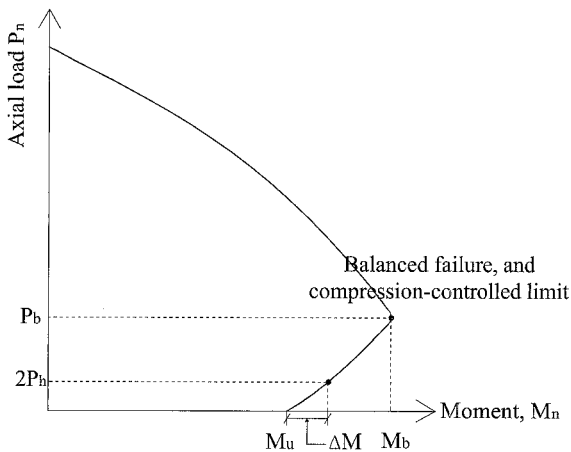


그림 19. RC보의 축력에 대한 P-M상관도,  $\Delta M$

### 3.6.1 극한강도 지점에서의 RC보의 모멘트-곡률

먼저 극한강도 지점에 대해서 계산을 진행한다. 극한 강도 지점에서의 강봉에 의한 RC보에 작용하는 축력을  $P_{h-ultimate}$ 라 할 때, 기본적으로 RC보가 극한강도에 도달하였을 때 강봉 트러스는 이미 항복한 것으로 가정하여 이론 해석을 진행한다. 따라서, 극한강도 지점에서의 강봉에 의한 축력  $P_{h-ultimate}$ 은 식(3)과 같이  $f_{ps} = f_{py}$ 이므로 앞서 구한 최대 축력  $P_{h-max}$ 와 같다. 실제로는 강봉이 RC보의 앞뒤에 한쌍이 보강되므로 극한 강도에서의 실제축력은  $2P_{h-ultimate}$ 가 된다.

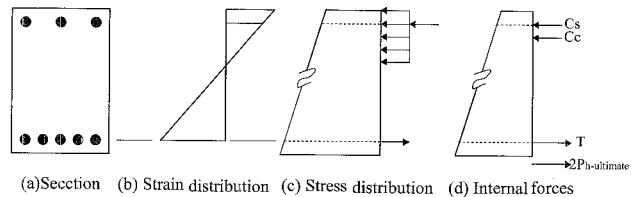


그림 20. 강봉 트러스에 의한 축력을 고려한 RC보 해석

RC보의 단면 등가응력(Macgregor 등, 2005)에 대해서 그림 20과 같이 기존의 인장철근의 응력에 축력  $2P_{h-ultimate}$ 가 추가 인장력으로 작용을 하기 때문이다. 이를 정리하여 식 (23)을 도출한다.

$$C_c + C_s = T + 2P_{h-ultimate} \quad (23)$$

$C_c$  : 콘크리트 압축력 ( $=0.85f_{ck}ab$ )

$C_s$  : 압축철근에 의한 압축력 ( $=A_s'f_y'$ )

$T$  : 인장철근에 의한 인장력 ( $=A_s f_y$ )

$P_{h-ultimate}$  : 강봉에 의한 축력 ( $=A_{ps}f_{py} \cos \theta$ )

3.4절에서와 마찬가지로 축력  $2P_{h-ultimate}$ 을 추가 인장력으로 보고서 RC보의 극한강도 지점에서의 모멘트, 곡률 값을 구할 수 있다. 그리고, 항복강도 지점과 균열지점에 대해서 모멘트, 곡률 값을 산정하도록 한다. 기본적인 풀이 방법은 RC보가 균열지점, 항복강도 지점에 도달하였을 때 강봉에 의해 발생하는 축력을 RC보의 인장철근량으로 환산하여 기존의 인장철근량에 더하여 계산을 해준다. 즉, 축력에 해당하는 만큼을 기존의 인장 철근량에 더하여 준다. 항복강도 지점에 대해서는 인장 철근비 값이  $\rho = (A_s + A_{s-y})/bd$ 가 되어 중립축 거리  $kd$ 값을 새로이 산정할 수 있고 이를 바탕으로 모멘트-곡률 값을 산정할 수 있다. 균열지점에 대해서는 인장철근의 최종단면적이  $A_s + A_{s-cr}$ 가 되어  $I_y$ 값이 축



력이 없을 때 보다 증가하게 되고 이 값으로부터 모멘트-곡률 값을 산정한다.

3.6.2 항복강도 지점에서의 RC보의 모멘트-곡률

항복강도 지점에서의 축력은 RC보의 인장철근이 최초로 항복할 때 (RC보의 모멘트-곡률 곡선의 항복강도 지점으로써 인장철근이 항복한 상태로 압축측의 콘크리트는 아직 항복하지 않은 상태) 강봉 또한 항복하는 것으로 가정한 뒤 축력을 산정하여 그 축력에 해당하는 만큼을 인장철근의 단면적으로 환산하여 모멘트-곡률 곡선을 재산정한 뒤 최종적으로 하중-변위 곡선을 산정하는 방향으로 해석을 한다. 즉, RC보가 항복할 때 강봉 또한 항복하는 것으로 가정하기 때문에 실제의 경우 RC보가 항복할 때 강봉이 항복하지 않는다면 그 하중 값은 더욱 크게 해석될 수 있다(실제 실험에서는 일부 시험체에서 RC보가 항복하였지만 강봉 트러스가 항복하지 않은 경우도 있었다. 이 부분에 대한 오차를 감안하여 이론해석을 진행하도록 한다).

$$2P_{h-yield} = 2[A_{ps} \times f_{py} \times \cos\theta] = A_{s-y}'' \times f_y \quad (24)$$

- $P_{h-yield}$  : RC보가 항복강도 지점에 도달했을 때 또는 강봉이 항복했을 때 강봉에 의해 발생하는 축력
- $f_y$  : 인장철근 항복강도
- $A_{s-y}''$  : 항복강도 지점에서의 축력의 인장철근 환산단면적

3.6.3 균열 지점에서의 RC보의 모멘트-곡률

RC보가 균열 지점에 도달했을 경우에는 그림 21에서 설명된 바와 같이 RC보의 균열 지점에서의 변위값( $\delta$ )과 같은 크기의 변위값에 해당되는 하중값(P)을 구하여 그 값을 강봉 트러스의 하중값으로 산정하여 강봉에 의해 작용하는 축력을 구하는 방향으로 한다.

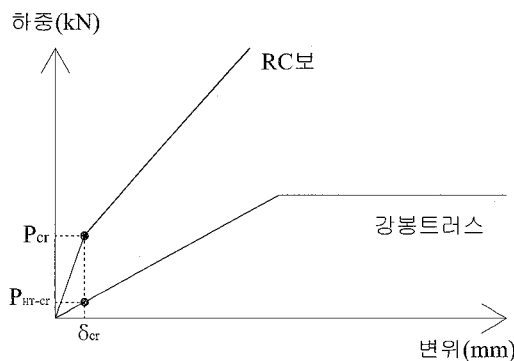


그림 21. 균열 지점에서의 강봉에 의한 축력산정

$$2P_{h-crack} = 2 \left[ \frac{P_{HT-cr}}{2} \times \frac{1}{\sin\theta} \times \cos\theta \right] = A_{s-cr}'' \times f_y \quad (25)$$

- $P_{h-crack}$  : 균열 지점에서의 강봉에 의해 발생하는 축력
- $P_{HT-cr}$  : 균열 지점에서의 강봉 트러스에 작용하는 하중
- $f_y$  : 인장철근 항복강도
- $A_{s-cr}''$  : 균열 지점에서의 축력의 인장철근 환산단면적

상기와 같이 축력이 있는 RC보에 대한 해석을 진행하여 모멘트-곡률 곡선과 하중-변위곡선을 도출하였다.

RC보의 축력을 고려한 뒤의 하중-변위 곡선은 그림 22와 같다. 그림 22와 같이 축력이 작용하는 RC보는 그렇지 않은 보의 경우와 비교를 해보았을 때 전체적으로 축력에 해당하는 만큼의 하중을 더 받는 것으로 나타난다. 그리고 항복강도 지점에서는 처짐값이 증가하였고 극한강도 지점에서는 처짐값이 감소하였다. 또한 초기강성은 유사한 반면에 균열 후 강성값과 항복후 강성값은 증가하였다. 따라서, 강봉에 의한 축력이 RC보에 작용을 하면 RC보는 보다 취성적인 성격을 갖는 것으로 나타난다.

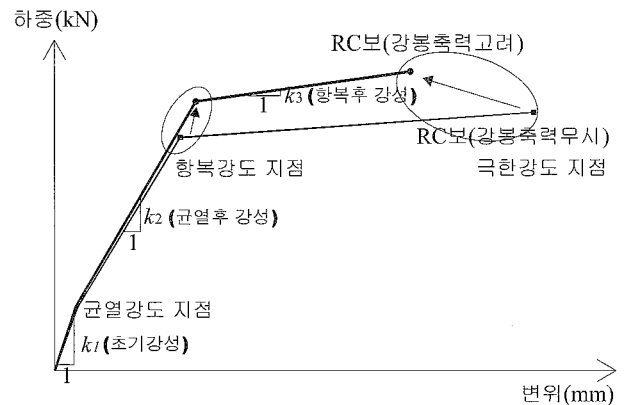


그림 22. 강봉에 의한 축력을 고려한 RC보의 하중-변위곡선

3.7 단순누가산정

단순누가 산정은 그림 4의 방법과 같이 RC보의 하중-변위 곡선과 강봉부분의 하중-변위 곡선을 각각 구한뒤 각 지점의 동일 변위값에 대하여 그에 대응하는 하중값을 더하여 준다.

시험체(신경재 등, 2006a ; 신경재 등, 2006b) 가운데서 보강되지 않은 기본 RC보(RC-01)와 강봉에 의해 보강된 총 8개의 시험체(T18 U-H-P, T22 U-H-P, T28 U-H-P, T18 V-H-R, T22 V-H-R, T28 V-H-R, T18 U-L-P, T22 U-L-P, T28 U-L-P)등 총 9개의 시험체에 대하여 실

험값과 이론값을 비교하였다.

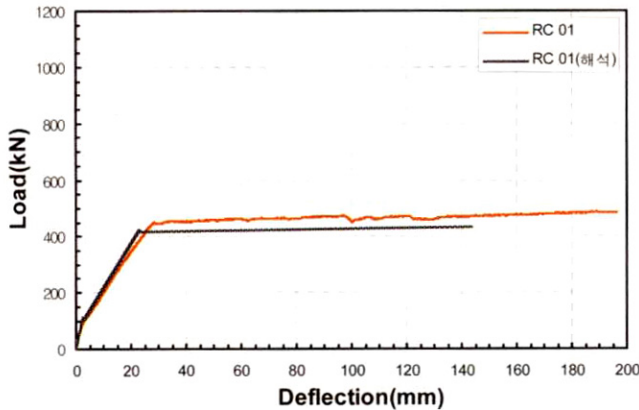


그림 23. RC-01 하중-변위 해석결과값 비교

그림 23은 무보강 시험체인 RC-01에 대하여 해석결과값을 비교한 것으로 초기강성 및 균열 후 강성이 유사하고 최대하중값은 다소 과소평가되는 경향이 있다. 그림 24는 U-H-P계열 시험체에 대하여 실험결과와 해석결과를 비교한 것으로써  $\phi 18$  강봉을 사용한 경우 강성값과 최대 하중값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 보강된 강봉의 직경이 커질수록 강성값과 최대하중값이 전반적으로 과대 평가되고 있으며, 특히  $\phi 28$  강봉으로 보강된 시험체의 경우 극한강도 값은 실험값에 대한 이론값의 비가 약 1.17배, 강성값은 1.9배 정도로 크게 평가되었다. (표 3 참조)

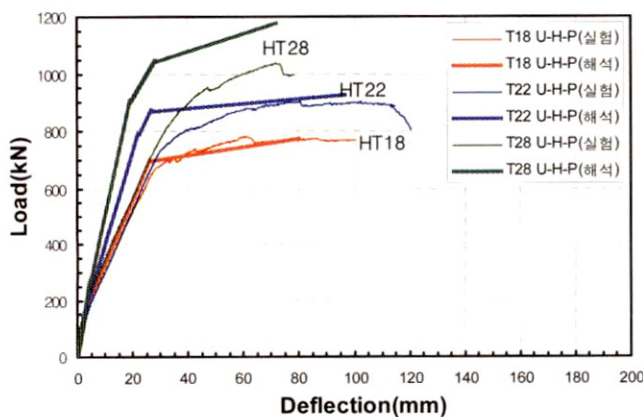


그림 24. U-H-P계열 하중-변위 해석결과값 비교

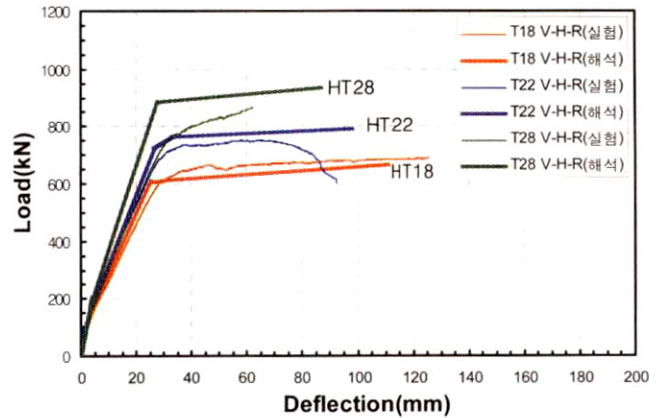


그림 25. V-H-R계열 하중-변위 해석결과값 비교

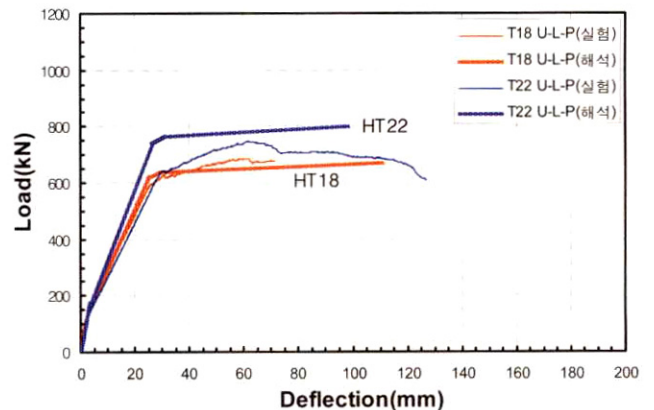


그림 26. U-L-P계열 하중-변위 해석결과값 비교

그림 25, 26은 각각 V-H-R계열과 U-L-P계열에 대한 해석결과로서 그림 24의 결과와 유사하게  $\phi 18$  강봉에 의해 보강된 시험체의 경우 휨거동이 거의 일치하며 보강된 강봉의 직경이 증가할수록 극한강도 값이 실험값에 대한 이론값의 비가 1.06~1.07배 정도 과대평가 되었다. (표 3 참조)

### 3.8 해석결과의 고찰

전체적으로 강봉의 직경이 작은 경우 비교적 정확한 예측이 가능한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 강봉의 직경이 증가할수록 이론 해석값은 실험값에 비교하여 하중값과 강성값에 있어서 과대평가 되고 있다. 그 가운데  $\phi 28$  강봉에 대해서는 강성 및 강도에 있어서 상당히 크게 해석되는 경향이 있으며, 특히 보강량이 가장 큰 U-H-P계열 시험체가 V-H-R, U-L-P계열 시험체보다 그 오차는 더욱 크게 나타났다.

강봉의 직경이 커질수록 해석 오차가 커지는 이유는 축력증강에 따른 정착부의 강성 저하가 원인인 것으로 추정된다. 본 연구에서는 강봉 정착부 또는 연결부의 변형을 무시하고 이

표 3. 실험결과값과 이론해석값 비교

시험체 명	하중 (kN)				비교 (극한강도) (4)/(3)	강성 (kN/mm) * (균열 후 강성값)		
	항복 강도		극한 강도			실험(5)	이론(6)	비교 (6)/(5)
	실험(1)	이론(2)	실험(3)	이론(4)				
RC 01	443.0	408.6	479.2	428.4	0.89	14.4	14.7	1.02
T18 U-H-P	665.4	686.1	767.3	762.4	0.99	21.1	21.6	1.02
T22 U-H-P	722.3	774.9	886.9	940.2	1.06	21.6	30.9	1.43
T28 U-H-P	804.6	886.9	1018.2	1191.7	1.17	22.1	42.1	1.9
T18 V-H-R	605.6	595.3	680.1	659.9	0.97	19.1	20.3	1.06
T22 V-H-R	676.2	705.6	738.9	783.0	1.06	22.5	23.0	1.02
T28 V-H-R	727.2	867.3	867.3	920.9	1.06	22.8	27.7	1.21
T18 U-L-P	588.0	608.4	676.2	663.6	0.98	20.1	20.8	1.03
T22 U-L-P	634.1	724.9	735.0	790.3	1.07	18.6	23.5	1.26

\* 강성값 정의, 그림 22 참조

론해석을 하였다. 그러나, Cairns & Rafeeqi(2003)의 실험적연구에 따르면 단부 정착부의 멍에(yoke)의 강성저하로 인한 문제점을 제기하고 있다. 정착부 강성저하의 주된 이유는 관통핀의 휨변형과 관통핀과 정착구멍사이의 콘크리트 지압응력에 따른 콘크리트의 국부변형에 의한 것으로 추정된다. 즉, 강봉의 직경이 증가하면 멍에에 발생하는 하중이 증가하게 되고 멍에 역할을 하는 관통핀은 국부적으로 모멘트에 의해 저항하게 되므로 강성 저하의 가능성이 있고 강성 저하는 강봉 전체의 강성저하로 귀결된다. 인용된 실험결과에서 확인할 수 있듯이 강봉 직경의 차이로 인한 강성의 변화는 크게 나타나지 않고 있다. 따라서 관통핀에 의한 강성저하로 인한 이론치의 과대평가의 가능성이 있다. 비교를 위해 인용된 실험적인 연구에서는 관통핀에 대한 강성평가를 위한 측정이 실시되지 않았다. 따라서, 강봉의 직경이 증가할 경우에 정착부의 변형을 특히 관통핀의 휨 변형에 의한 강성저하를 고려하여야 될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

고장력 인장봉에 의해 보강된 RC보의 휨거동 해석의 한 방법으로서 단순누가산정 방식을 시도하였다. 실험결과와 이론해석을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1)  $\phi 18$  강봉으로 보강된 시험체의 경우 강성 및 극한강도 값도값의 실험값에 대하여 이론값이 약 1.02~1.03배로 비교적 정확한 반면에 강봉직경이 커지는 경우에는 강성값이 실험결과값에 비교해 약 1.2배 과대 평가 되는 경향이 있으며, 특히 U-H-P계열 보강 시험

체의 경우 강성값이 최대 1.9배로 과대평가되었다. 극한 강도에 있어서는 실험결과값에 대비하여  $\phi 18$  강봉의 경우 0.97~0.99배,  $\phi 22$  강봉의 경우 1.06배 그리고  $\phi 28$  강봉의 경우 최대 1.17 배로 나타났다. 정착부 변형의 영향을 고려하지 않아 이에 따라 강봉의 직경이 커질수록 과대평가되는 경향이 있는 것으로 판단된다.

- (2) 이론해석 결과 보강량이 커질수록, 즉 V형보다는 U형이 L형보다는 H형계열 시험체 일수록 그 해석 오차가 커지는 경향을 확인할 수 있다. 해석결과값 비교시 U-H-P보강 시험체의 경우 극한강도 값은 약 1.17배, V-H-R, U-L-P계열 시험체는 약 1.07배로 평가 되었다.
- (3) RC보와 강봉 트러스에 대하여 개별적으로 계산을 하는 과정에 있어 강봉에 의해 발생하는 축력과 강봉에 미리 인장력을 주는 pre-stress에 대한 고려를 하여 해석의 오차를 줄일 수 있다.
- (4) 강봉의 직경이 증가할 경우에는 정착부 관통핀의 휨변형이 고려되어야 한다.

#### 감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업(과제번호: 03산학연 A06-01) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참 고 문 헌

신경재, 광명근, 허병욱, 나정민, 오영석 (2006a). 고장력 인

- 장봉 으로 보강된 RC보의 휨거동에 관한 실험적 연구(1), 한국콘크리트학회 논문집, 제18권, 제4호, pp. 527-534.
- 신경재, 곽명근, 배규웅, 오영석, 문정호 (2006b). 고장력 인장봉 으로 보강된 RC보의 휨거동에 관한 실험적 연구(2), 한국콘크리트학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 603-610.
- 신경재, 김남형 (2005). 외부포스트텐션 시스템용 정착부의 실험적 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 제21권, 제12호, pp. 51-60.
- 한국콘크리트학회 (2004), 콘크리트구조설계 기준 및 해설.
- Cairns, J. and Rafeeqi, S. F. A. (2003) Strengthening reinforced concrete beams with external unbonded bars: experimental investigation, Proceedings of institution of Civil Engineers Structures & Buildings 156, pp.27-37.
- Harajli, M. H. (1990) Effect of span-to-depth ratio on the ultimate steel stress in unbonded prestressed concrete members, ACI Structure Journal, Vol.87, No.3, pp.305-312.
- Macgregor, J. G., and Weight, J. K. (2005) Reinforced Concrete Mechanics and Design, forth-edition, Pearson Prentice Hall Press.
- Park, R., and Paulay, T. (1975) Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Interscience Press.
- (접수일자 : 2007. 1. 15 / 심사일 2007. 2. 12 / 심사완료일 2007. 5. 15)