

철근 콘크리트 부재의 부착거동에 관한 해석모델

A Theoretical Model for the Bond Behavior of Reinforced Concrete Members

오 병 환*

Oh, Byung Hwan

요 약

철근 콘크리트 부재의 부착거동은 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동을 규명하는데 매우 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 이러한 철근 콘크리트의 부착거동을 서술할 수 있는 이론모델을 유도하여 제시하였다. 본 해석모델은 철근 콘크리트 부재의 위치에 따라 달라지는 국부 부착응력과 부착슬립의 관계를 잘 나타내주고 있으며, 이에 대한 실험결과를 잘 설명하고 있음을 보여주고 있다. 본 부착해석모델은 철근콘크리트 구조물의 좀더 정확한 해석과 설계를 가능케 할 것으로 사료된다.

Abstract

The bond behavior of reinforced concrete members is an important factor to clarify the mechanical behavior of reinforced concrete structures. A theoretical model to analyze the bond behavior is proposed in the present study. The model describes well the local bond stress-bond slip relations which are different at different locations along the member, and shows good agreement with experimental data. The present model allows more realistic analysis and design of reinforced concrete structures.

1. 序論

철근 콘크리트가 하중의 작용에 대하여 충분한 강도와 강성을 가지는 구조재료로서의 구실을 다하기 위해서는 콘크리트와 철근이 각각 충분한 강도를 가지는 것이 필요할 뿐만 아니라, 이 양자 사이의 부착강도가 충분해야 하고, 또 인장축 콘크리트에 균열이 발생된 상태에서도 철근이 콘크리트와 항상 일체적으로 작용할 수 있도록

설계 시공되어야 한다.

철근 콘크리트 구조부재의 다양한 거동중에서도 콘크리트와 철근사이의 부착강도를 통한 철근으로부터 콘크리트로의 힘의 전달은 균열의 전파현상과 함께 중요한 연구과제로 지적되어 왔다.

철근 콘크리트 부재의 부착면에서의 특성은 콘크리트 단면에서 발생하는 균열의 폭, 균열간격 그리고 인장증강현상(tension stiffening), 부착면의 거칠기, 부재의 강도

* 성회원, 서울대학교 토목공학과 교수

등에 의해 결정 되어진다. 특히 최근에 이르러 철근 콘크리트 구조물에 대한 유한요소해석의 광범위한 이용과 함께 부착응력(bond stress)과 부착슬립(bond slip)에 대한 보다 정량적인 연구결과가 요구되어 지고 있다.

유한요소해석에서 부착면에 대한 모형화(modelling)는 부착응력과 부착슬립의 관계로 귀착되어 지며 부착응력과 부착슬립의 관계는 콘크리트의 구성방정식과 유사한 양상을 보인다.

부착응력은 콘크리트 구조물에서 균열이 발생한 후에 철근응력의 재분배에 따른 철근변형도의 변화에 기인되며 두 재료의 부착면을 따라 작용하는 전단응력으로 정의할 수 있고, 콘크리트와 철근의 화학적 접착력, 마찰, 또는 이형철근의 경우 철근마다 사이의 맞물림작용 등에 의하여 콘크리트에 전달된다. 이러한 부착면에서의 부착거동은 균열면에서의 거리에 따라 변하게 되며, 국부 부착거동에 대한 연구는 평균적 의미의 부착거동에 비해 철근 콘크리트 부재의 역학적 거동을 규명하는데 더 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 부착거동을 규명하기 위하여 이론적인 모델을 유도하고, 균열면에서의 거리에 따른 국부 부착응력과 부착슬립의 관계를 해석할 수 있는 해석 모델의 제안을 그 주목적으로 하며, 이론적 해석모델결과와 실험결과를 비교분석하고자 한다.

2. 부착거동에 대한 이론모델 유도

2.1 부착의 역학적 거동 및 극한부착강도

콘크리트에 매몰되어 있는 이형철근에 인장하중이 작용하면, 그 부착면에서의 응력분포는 매우 불규칙하고 복잡하기 때문에, 수학적인 모델링(modelling)이나 단순한 실험을 통하여 모든 현상들을 정확하게 파악하기는 어렵다.

그림 1에서와 같이 철근의 종단부착면에서 인장하중 P가 작용하면, 콘크리트에는 저항응력 f가 발생하고 f의 응력성분은 U와 f_r 이 될 것이다. 철근과 종방향의 응력성분 U는 철근과 콘크리트의 부착면에서의 국부 부착응력이라고 볼 수 있으며, 횡방향의 원주응력(radial stress) f_r 은 철근으로부터 콘크리트로 향하는 횡방향 응력성분이다. 원주응력 f_r 은 콘크리트에 접선인장응력(circumferential stress) f_θ 를 유발시키며, 이때의 응력상태는 f_r 의 내압을 받는 중공 파이프에서 발생하는 후프텐션

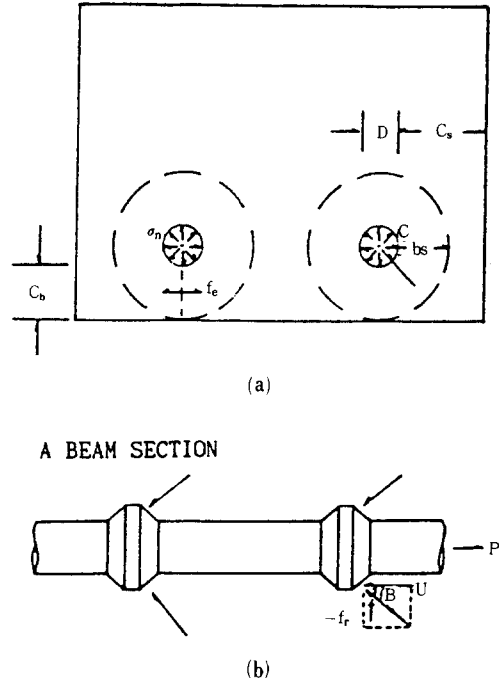


그림 1. 부착면에서의 역학적 거동

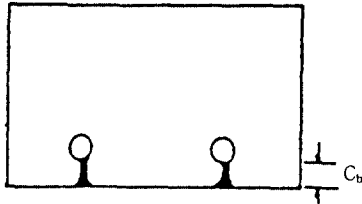
(hoop tension)과 근사적으로 동일하다고 볼 수 있다.

이 밖에 콘크리트의 접선인장응력은 아래와 같은 원인으로도 발생된다.

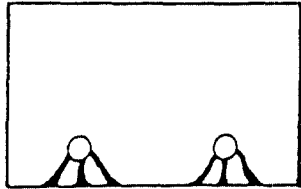
- 1) 전단력의 영향으로 발생하는 철근과 연직방향의 dowel force
- 2) 휨에 의해 철근이 콘크리트 피복을 외측으로 밀어 내도록 작용하는 힘
- 3) 콘크리트의 건조수축

이러한 원인으로 발생하는 접선응력이 부착면에서 극한값에 이르면 종방향의 splitting crack이 발생하게 되며, 이러한 splitting crack이 부재의 정착단까지 전파되면 구조물은 결국 붕괴하게 될 것이다. 이러한 종류의 부착 파괴를 splitting failure라 한다. 이 밖에도 부착면에서 균열의 발생없이 콘크리트가 분리되거나 또는 인발되는 형태의 부착파괴가 있는데, 이러한 파괴형태를 부착슬립 파괴(bond-slip failure)라 한다.

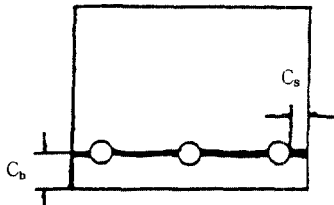
splitting failure에 대한 형태는 그림 2에 잘 나타나 있는 바, 콘크리트의 덮개가 얇은 휨부재에서는 splitting failure가 주된 파괴형태가 되기 때문에, 이에 대한 문제는 더욱 심각하다. 그림 2에서 보면 splitting failure는, 바닥 또는 옆면에 관계없이 콘크리트 덮개가 얇은 쪽을



(a) INITIAL CRACKS FOR SPECIMEN WITH THIN BOTTOM COVER



(b) CRACK PATTERN FOR SPECIMEN WITH THIN BOTTOM COVER AT FAILURE



(c) CRACK PATTERN FOR SPECIMEN WITH HEAVY BOTTOM COVER AND THIN SIDE COVER

그림 2. Splitting Failure의 형태

향하여 균열이 발생함으로써 유발된다.

그림 3은 dowel force에 의해 발생하는 splitting failure를 나타내고 있으며, 실제 구조물에서는 위의 현상들이 조합되어 나타나게 된다.

이렇게 부재가 부착파괴에 도달할 때의 응력을 극한부착응력(ultimate bond stress)이라 하며, 이때의 콘크리트 강도를 극한 부착강도라 한다.

극한 부착강도는 실제 부착에 관한 설계에 있어서 중요한 설계기준이 되기 때문에 많은 사람들의 관심사가 되어 왔다. 그러나 부착파괴는 부재의 폭, dowel force, 철근의 갯수와 간격, 콘크리트 피복두께, 휨과 전단의 상호작용 등에 의해 영향을 받게 되고 이 밖에도 콘크리트강도, 스테럽, 부착길이 등 많은 요소와 관련된 복잡한 현상이므로, 이론적 또는 실험적으로 극한 부착강도를 구하는 것은 매우 어려운 일이다.

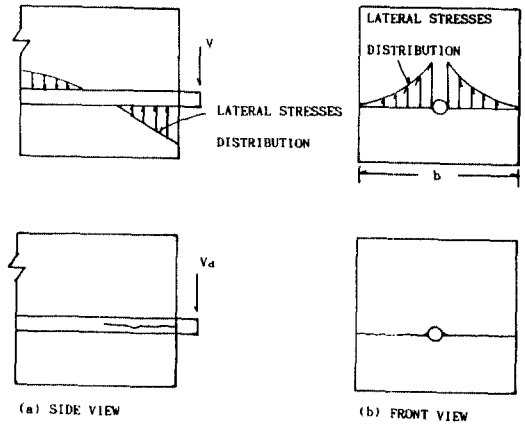


그림 3. Dowel Force에 의한 splitting Failure

본 연구에서는 여러 연구자들의 극한 부착강도에 대한 기존의 실험자료를 비교분석하여 극한 부착강도의 평균값을 구한 바, 약 5.7N/mm²이었다.

본 연구자가 수행한 실험에서는 극한하중까지 도달하지 않았으며, 8ton 하중에서 구해진 실험의 최대 부착응력은 평균적인 극한 부착강도의 85%~90%정도의 값을 가진다.

부착면에서의 부착거동을 모델하기 위하여, 본 연구에서는 철근으로부터 응력이 콘크리트로 확산된다는 응력확산개념을 이용하여 철근과 콘크리트의 응력을 예측하고, 국부부착응력과 슬립관계, 인장증강현상(tension stiffening), 전체 신장률(total elongation)을 계산할 수 있는 모델을 유도하였다.

단면마다 변화해 가는 복잡한 국부부착응력을 예측하기 위하여 본 해석에서는 다음과 같은 2차식을 부착응력분포로 가정하였다.

$$U = U_{\max} [1 - (1 - 4x/L)^2] \quad (1)$$

위에서 U_{\max} 는 U_{ult} 에 도달하기전 각 하중단계마다 존재하는 부재내의 최대 부착응력을 의미한다.

Shah는 자유단의 철근응력 f_{s0} 와 U_{\max} 의 관계를 식 (2)와 같이 실험적으로 결정하였다.

$$U_{\max} = 0.034f_{s0} - 4.95 \times 10^{-4}f_{s0}^2 \quad (2)$$

(2)식에서 극한 부착강도를 구하면, $f_{s0} = 343\text{N/mm}^2$ 일 때 최대값 $U_{\text{ult}} = 5.8\text{N/mm}^2$ 를 가진다. 이값은 본 연구자가 수행한 실험²³⁾에서 추정하여 구한 평균 극한부착강도와 근사

한 값을 보이고 있으며 또한 실험에서 구한 U_{max} 와 잘 일치하므로 식 (2)를 식 (1)에 적용시켜, 본 모델에 사용하기로 한다.

2.2 부착면에서의 평형조건과 응력계산

철근 콘크리트 휨부재가 순수휨을 받는 경우, 인장측 단면의 휨응력이 파괴계수를 초월하게 되면 균열이 발생하게 된다.

균열이 발생하기 전의 철근응력은 균일하게 분포하게 되며 부착응력은 무시할 수 있다. 균열이 발생하면 균열에 인접한 단면의 콘크리트 응력은 0으로 떨어지게 되나, 콘크리트와 부착되어 있는 철근은 계속적으로 인장하중을 부담하게 된다. 따라서 균열 단면에서의 콘크리트 응력은 0이지만 균열과 균열사이에서는 철근과 부착면에서의 콘크리트 응력이 그림 4와 같이 중심으로 향할수록 점차 증가한다. 또한 균열 발생면에서의 철근응력의 급격한 증가는, 철근의 인장변형을 유발시키고 결과적으로 철근과 콘크리트의 부착면에서 슬립을 발생시키게 된다.

본 장에서는 이러한 현상들을 모델할 수 있는 이론모델을 유도하여 부착면에서 철근과 콘크리트의 응력을 산정하고, 국부슬립, 전체 신장률 등을 계산하여, 본 실험결과와 비교하고자 한다.

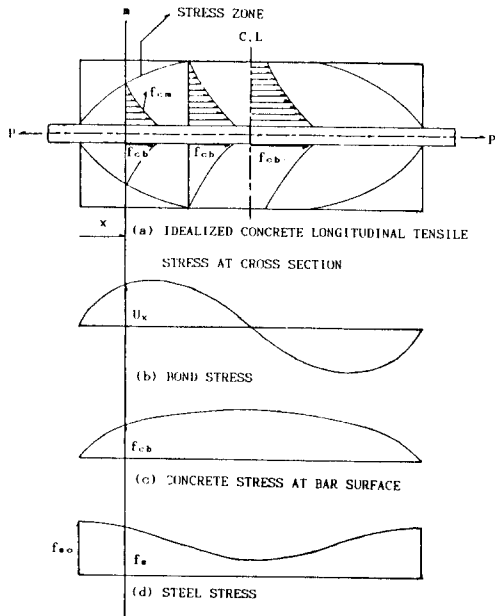


그림 4. 시편내의 응력분포

본 해석모델을 단순화 하기위해 다음과 같이 가정한 다.

1) 부착응력은 포물선의 형태로 가정한다.[식 (1), (2)참조]

2) 본 이론의 계산과정에서 철근의 공칭주장, 공칭단면적, 공칭직경을 사용키로 하며 단면에 대한 철근마디영향은 고려치 않는다.

3) 이차균열(secondary crack)의 영향을 무시한다.

4) 부재단면에서 횡방향으로 존재하는 콘크리트의 인장응력은 2차식의 형태로 분포한다.

그림 4에서 보면, 단부에서 x만큼 떨어진 콘크리트의 인장응력의 합은 같은 구간내 부착응력의 합과 같다. 그러므로 T_c 를 mm단면에서 콘크리트 인장응력의 합이라 하면, $T_c = \sum_0^x \int_0^x U_x dx$ 이다.

mm단면에서 평형조건식은 다음과 같다.

$$f_{s0} A_s = f_s A_s + T_c \quad (3)$$

위의 식에서 f_s 를 구하면,

$$f_s = (f_{s0} A_s - \sum_0^x \int_0^x U_x dx) / A_s \quad (4)$$

과 같다. 따라서 철근의 변형도 ϵ_s 는 f_s 를 E_s 로 나누어서 구할 수 있다.

Venkateswarlu & Gesund⁶⁾는 그들이 수행한 유한요소 해석결과에서, 그림 4와 같이 횡방향 인장응력 f_{cm} 은 mm단면에서 근사적인 2차식의 분포를 보이고 있음을 밝혔다. 따라서 가정 4)에 의해 그림 4의 mm단면에서 콘크리트의 인장응력의 총합은, 그림 5의 응력분포를 철근의 중심선을 축으로 하여 회전시킨, 2차곡면을 갖는 중공 원추형의 이상화된 응력체적(idealized stress volume)과 같다.

그림 5에서 새로운 좌표계 m, n축을 설정하고 이상화된 응력체적을 구해보면 다음과 같다.

콘크리트의 횡방향 응력분포를 계수a를 갖는 2차식으로 가정하면 철근 중심으로부터 m'만큼 떨어진 지점의 콘크리트 인장응력 f_{cm} 은 식 (5)와 같다.

$$f_{cm} = am^2 \quad (5)$$

그림 5에서,

$$m' = B - m \quad (6)$$

식 (5)로부터,

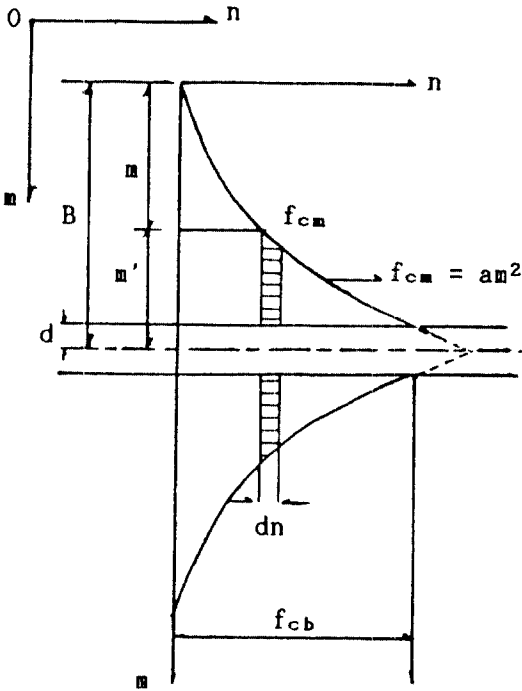


그림 5. 단면 m에서 이상화된 콘크리트의 종방향 인장응력분포

$$m = \sqrt{f_{cm}/a} \quad (7)$$

이 성립한다.

그림 5에서 dn구간의 면적을 ds라 하면,

$$ds = \pi m'^2 - \pi d^2 \quad (8)$$

식 (6)을 식 (8)에 대입하면,

$$ds = \pi[(B - \sqrt{f_{cm}/a})^2 - d^2] \quad (9)$$

dn구간의 체적을 dv라 하면,

$$dv = ds \cdot dn \quad (10)$$

이 성립하므로, 식 (10)을 0에서 $a(B-d)^2$ 구간까지 적분하면,

$$\int_0^{a(B-d)^2} dv = \pi \int_0^{a(B-d)^2} [(B - \sqrt{f_{cm}/a})^2 - d^2] dn \quad (11)$$

과 같다.

식 (11)를 적분하여 정리하면,

$$V = (\pi a/6)(B-d)^2[B^2 + 2Bd - 3d^2] \quad (12)$$

이고, V는 mm단면에서 콘크리트의 인장응력의 합이므로 $V = T_c$ 가 된다. 따라서 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\sum_0^x U_x dx = (\pi a/6)(B-d)^2 [B^2 + 2Bd - 3d^2] \quad (13)$$

위의 식을 B에 관하여 정리하면,

$$B^4 - (6d^2)B^2 + (8d^3)B - [3d^4 + 6 \int_0^x \sum_0^x U_x dx / (\pi a)] = 0 \quad (14)$$

과 같다.

식 (14)는 4차 방정식으로 미지수가 a와 B 두개이므로 정해를 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 a값을 가정하고 전산기에 의해 B의 값을 양의 값중에서 최소치로 구한다. 이때 B값은 시편의 폭 D(철근 중심으로부터 연단까지의 거리)보다 큰 경우와 작은 경우를 나누어 생각해야 한다.

그림 6은 B가 D를 초과했을 때 D를 초과하여 존재하는 응력의 체적이 시편의 폭 D구간에서 일정하게 분포한다고 본 개념도로서, $B < D$ 인 경우에는 $f_{cb} = a(B-d)^2$ 이 되며 $B > D$ 인 경우에는 시편밖으로 존재하는 가상적인 인장응력을 시편폭 D내에 균일하게 분포하는 인장응력으로 환산하여 f'_{cb} 를 계산한다.

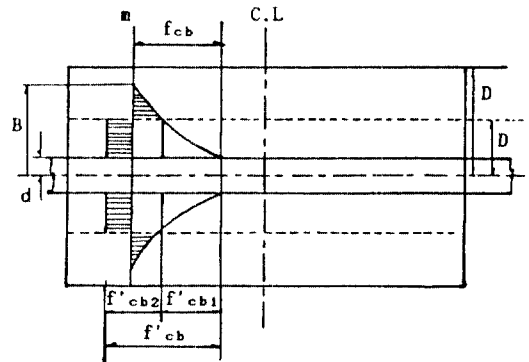


그림 6. 응력환산 개념도

따라서 f'_{cb} 는 다음과 같은 절차에 의해 구할 수 있다.

D를 반지름으로 하는 중공 원추형의 체적을 V_1 이라고 하고 그 나머지 체적을 V_2 라 하면 전체 응력 체적, V는 V_1 과 V_2 의 합이 된다. 식 (5)로부터,

$$f'_{cb1} = a(D-d)^2 \quad (15)$$

가 되며, V_1 은 식 (11)에서와 같은 형태로,

$$\int_0^{aD-d'} dv = \int_0^{aD-d'} [D - \sqrt{f_{cm}/a} - d^2] dn \quad (16)$$

에 의해 구한다.

따라서, $V_2 = V - V_1$ 에 의해,

$$V_2 = \sum_0^x \int_0^x U_x dx - \pi \int_0^{aD-d'} [(D - \sqrt{f_{cm}/a})^2 - d^2] dn \quad (17)$$

이 성립하고, 그림 6에 의해 $V_2 = \pi(D^2 - d^2)f'_{cb2}$ 가 성립하므로 f'_{cb2} 는,

$$f'_{cb2} = V_2 / [\pi(D^2 - d^2)] \quad (18)$$

에 의해 구한다. 그리고 f'_{cb} 는,

$$f'_{cb} = f'_{cb1} + f'_{cb2} \quad (19)$$

에 의해 구한다.

부착면에서 콘크리트의 변형도를 ϵ_c 라 하면, $B < D$ 인 경우 $\epsilon_c = f_{cb}/E_c$ 이며, $B > D$ 인 경우 $\epsilon_c = f'_{cb}/E_c$ 이다.

2.3 국부 부착응력-부착슬립관계 도출

슬립 S 는 임의의 부착면에서 철근과 콘크리트의 상대변

위이므로, 식 (20)과 같이 정의할 수 있다.

$$S = \int_x^{1/2} (\epsilon_s - \epsilon_c) dx \quad (20)$$

따라서 2.2절에서 정의된 ϵ_s 와 ϵ_c 를 식 (20)에 대입하면 부착면에서의 이론적인 슬립량이 계산된다.

한편 시편내의 철근의 전체 신장률(total elongation) T_L 은 식 (21)와 같이 계산할 수 있다.

$$T_L = \int_0^l \epsilon_s dx \quad (21)$$

3. 본 이론과 실험결과의 비교

이상에서 부착거동에 대한 일차원적 해석모델을 유도하였으며, 이론모델에 의한 결과를 본 연구자의 실험결과^{22, 23}와 비교하였다.

그림 7은 식 (21)를 이용하여 얻은 해석적 결과와 본 연구자의 실험적 결과를 비교한 것이다.

그림 8은 식 (4)를 이용하여 얻은 철근변형도의 분포에 대한 해석적 결과와 본 연구자의 실험적 결과를 비교한 것이다.

그림 9는 식 (20)을 이용하여 얻은 해석적 결과와 본 연구자의 실험적 결과를 비교한 것이다.

식 (20)에서 a 값은 0.1에서 2까지 변화시키면서 계산하

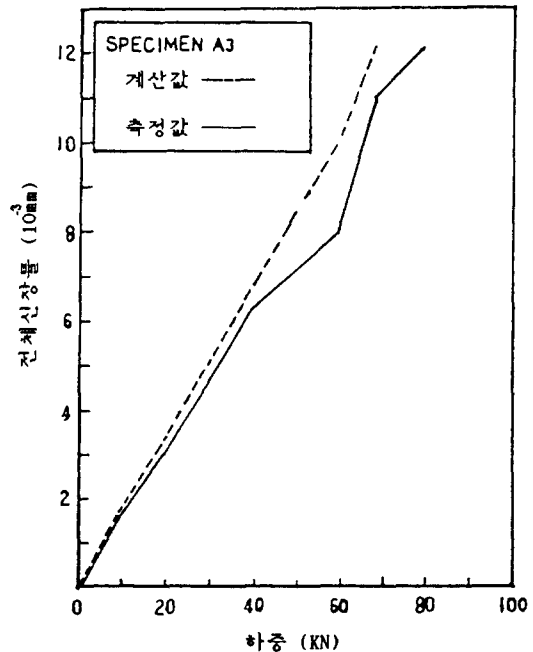
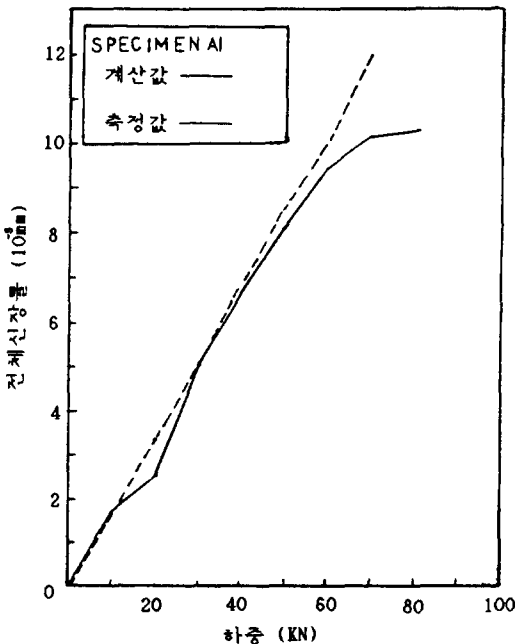


그림 7. 전체신장률에 대한 실험값과 이론값의 비교

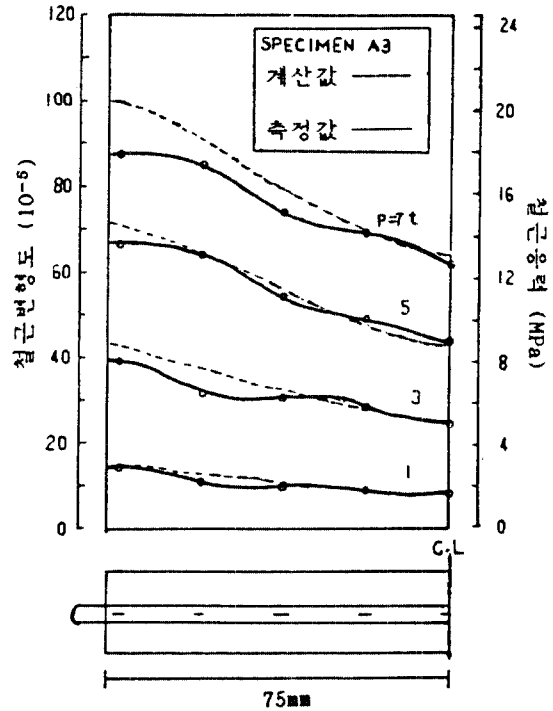
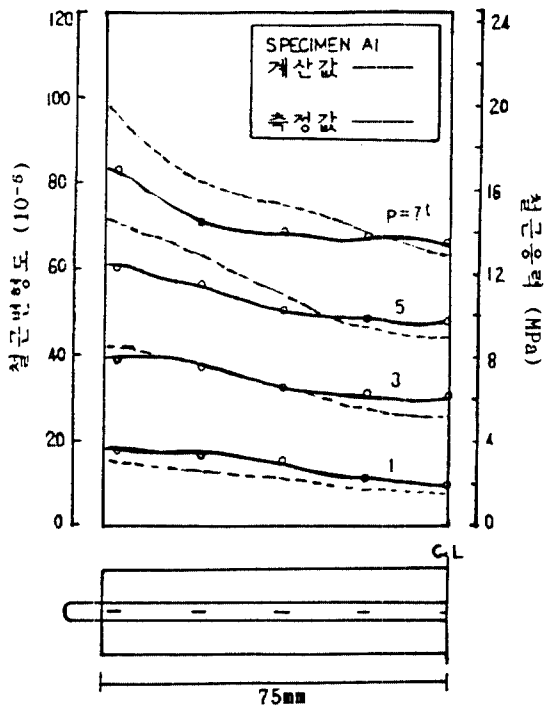


그림 8. 철근변형도에 대한 실험값과 이론값의 비교

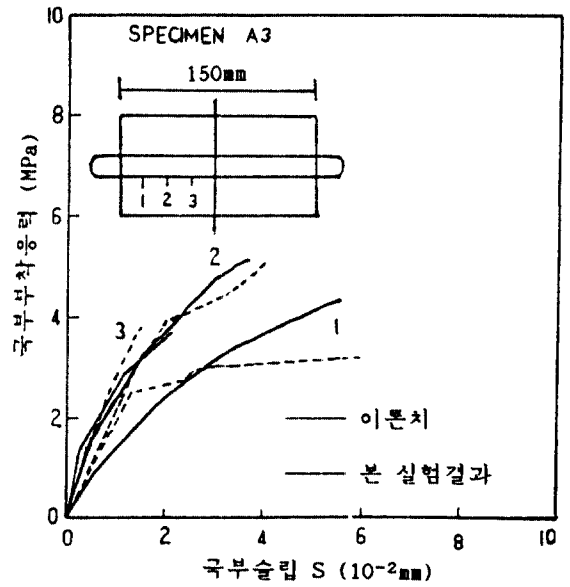
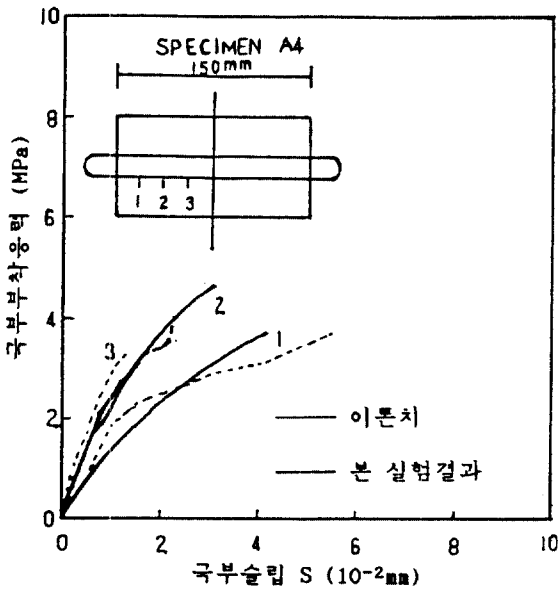


그림 9. 부차응력-슬립에 대한 실험값과 이론값의 비교

였는데, 계수 a값이 변화해도 슬립량에는 큰 영향을 미치지 못하였으며, 본 해석에서는 a값이 0.5에서 1사이를 가질 때 실험결과와 가장 근사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

4. 평균 부착응력-부착슬립 관계식

그림 10은 지금까지 평균적 의미의 부착응력과 슬립과의 관계를 연구한 기존의 실험자료들을 함께 비교한 것으로, 실험자에 따라 시편의 특성이 다르고 실험조건이 다르므로 각각의 실험자료는 심한 편차를 보이고 있다.

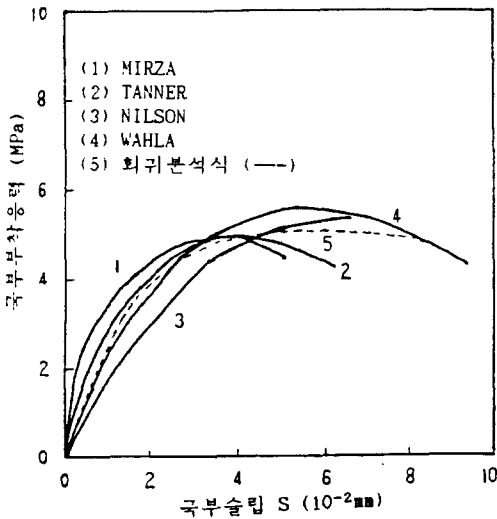


그림 10. 각종 실험자료의 비교 및 회귀분석식

본 연구에서는 기존 실험자료들을 근거로 「IMSL」의 회귀분석 프로그램을 이용하여 여러경우를 잘 만족시킬 수 있는 다음 식을 제안하였다.

$$U = 3.127S - 0.748S^2 + 0.082S^3 - 0.003S^4 \quad (22)$$

여기에서, U의 단위는 N/mm^2 , S의 단위는 $0.01mm$ 이다.

식 (22)의 초기 접선계수(부착강성, K)는 $313MPa/mm$ 로서, Mirza가 제안한 식의 부착강성 $K = 526MPa/mm$ 에 비해 작은 값이다. 이는 그림 10에서 보듯이, Mirza의 실험자료가 타 실험자료보다 슬립에 대한 초기 강성을 과도하게 크게 나타내고 있음을 보여주고 있다.

5. 종합 검토분석

앞의 2, 3장에서는 부착거동에 대한 이론모델을 유도하

여 국부 부착응력과 부착슬립의 관계에 대한 본 연구자의 실험결과²²⁾와 비교하였으며, 4장에서는 평균적인 의미의 부착응력과 부착슬립의 관계에 대한 식을 제안하였다.

그림 11은 본 연구의 이론적 해석결과를 회귀분석식 (22)와 비교한 것으로, 식 (22)는 시편 반단면의 중심부근에서의 이론적 해석결과와 근사한 분포를 보이고 있으며, 평균적 의미의 회귀분석식이 국부 부착응력-부착슬립 관계에서 시편 반단면의 중심에서와 유사한 것이 특이할 만한 사항으로 사료된다.

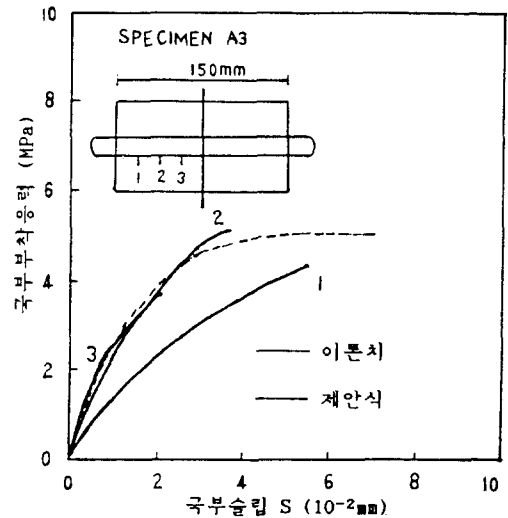


그림 11. 회귀분석식과 본 이론과의 비교

그림 12는 평균적 의미의 부착응력-부착슬립 관계식을 본 연구자가 수행한 부착거동에 대한 실험결과와 비교한 것으로 위의 그림 11에서와 마찬가지로 시편 반단면의 중앙지점에서 근사한 양상을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 유도한 부착거동에 대한 이론모델이 국부 부착응력-부착슬립 관계를 비교적 잘 설명하고 있으며, 또한 평균적 의미의 부착응력-부착슬립 관계식인 실험자료 회귀분석식이 전반적인 부착거동을 잘 설명하고 있다고 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 철근 콘크리트 부재의 부착거동을 규명하기 위하여 이론적 해석모델을 유도하여 제시하였으며, 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이론적 해석을 통하여 부착면의 철근응력, 콘크리트 응력, 국부슬립 등을 계산할 수 있는 해석모델을 정립하

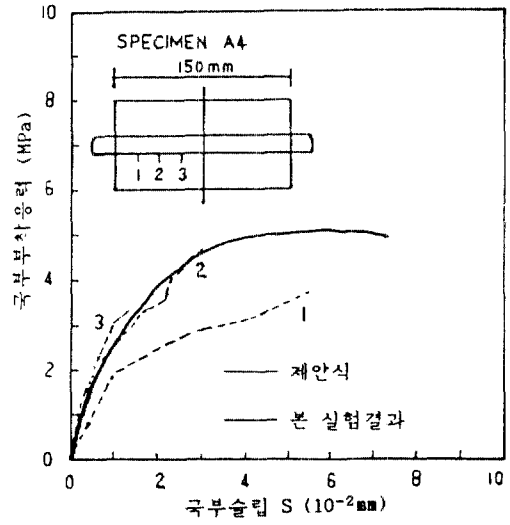
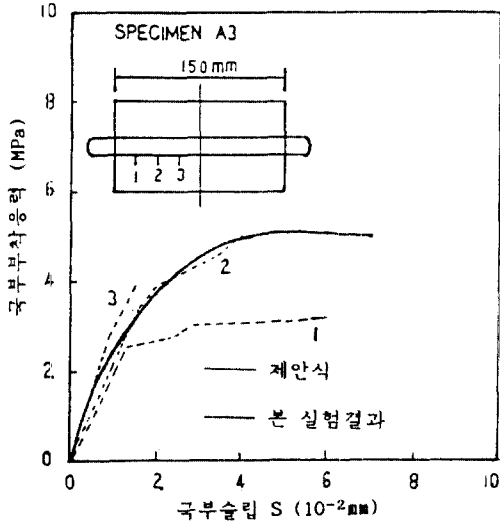


그림 12. 회귀분석식과 실험자료의 비교

였다.

2) 본 이론 모델의 결과를 부착거동 실험자료와 비교 분석한 결과 비교적 만족스러운 결과를 얻었으며, 본 모델은 철근콘크리트 구조물의 비선형해석에 유용한 토대를 제공하는 것으로 사료된다.

3) 지금까지 발표된 부착-슬립에 관한 실험자료들을 회귀분석하여 평균적인 의미의 부착응력-슬립 관계식을 제안하였으며, 이를 본 연구자의 실험자료와 비교해 본 결과, 시편 단면의 중앙에서의 부착-슬립 관계와 근접하고 있음을 알 수 있었고, 이론적 해석 결과 역시 시편 단면의 중앙에서 가장 근접함을 알 수 있었다.

7. 참고문헌

1. Kemp, E.L., and Wilhelm, W.J., "Investigation of the parameters influencing bond cracking," ACI Journal, Vol.76, Jan., 1979, pp.47-71.
2. Mirza, S.M., and Houde, J., "Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete," ACI Journal, Vol. 76, Jan., 1979, pp.19-47.
3. Bazant, Z.P., and Oh, Byung H., "Spacing of cracks in reinforced concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.9, Sept., 1983, pp. 2066-2085.
4. Bazant, Z.P., and Oh, Byung H., "Crack spacing in reinforced concrete Approximate solution," Journal

of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.9, Sept., 1983, pp.2207-2215.

5. Schupach, M., and Mizuma, K., "Bond properties of high strength low carbon bars with drawn-in helical deformation for use in pretensioning and as special normal reinforcement," ACI Journal, Vol.76, Feb., 1979, pp.249-275.
6. Morita, S., and Kaku, T., "Splitting bond failures of large deformed reinforcing bars," ACI Journal, Vol.76, Jan., 1979, pp.93-109.
7. Ferguson, P.M., and Thomson, N., "Development length of high strength reinforcing bars in bond," ACI Journal, Vol.59, July, 1962, pp.887-923.
8. A. Losberg, A., and Olsson, P.A., "Bond failure of deformed reinforcing bars based on the longitudinal splitting effect of the bars," ACI Journal, Vol.76, Jan., 1979, pp.5-19.
9. Thampson, M.A., Jirsa, J.O., Breen, J.E., and Meinheit, D.F., "Behavior of multiple lap splices in wide sections," ACI Journal, Vol.76, Feb., 1979, pp.227-248.
10. Chung, H.W., "Epoxy repair of bond in reinforced concrete members," ACI Journal, Vol.78, Jan.-Feb., 1981, pp.79-85.
11. Edwards, A.D., and Yannopoulos, P.J., "Local bond stress to slip relationships for hot rolled deformed bars and mild steel plain bars," ACI Journal, Vol.76, March,

- 1979, pp.405-421.
12. Clark, C.R., and Johnston, D.W., "Early loading effects on bond strength," *ACI Journal*, Vol.80, Nov.-Dec., 1983, pp.532-539.
 13. Jiang, D.H., Shah, S.P., and Andonian, A.T., "Study of tensile forces by bond," *ACI Journal*, Vol.81, May-June, 1984, pp.251-259.
 14. Kemp, E.L., "Bond in reinforced concrete: Behavior and design criteria," *ACI Journal*, Vol.83, Jan.-Feb., 1986, pp.50-57.
 15. Nilson, A.H., "Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method," *ACI Journal*, Vol.65, Sept., 1968, pp.757-968.
 16. Venkateswarlu, B., and Gesund, H., "Cracking and bond slip in concrete beams," *Journal of structural division, ASCE*, Vol.98, No.stll, Dec., 1972, pp.1663-2685.
 17. Somayaji, S., and Shah, S.P., "Bond stress versus slip relationship and cracking response of tension members," *ACI Journal*, Vol.78, May-June, 1981, pp.217-225.
 18. Lutz, L.A., and Gergely, P., "Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete," *ACI Journal*, Vol. 64, Nov., 1967, pp.711-721.
 19. Yukimasa Goto, "Cracks formed in concrete around deformed tension bars," *ACI Journal*, Vol.68, April, 1971, pp.244-251.
 20. Ngo, D., and Scordelis, A.C., "Finite element analysis of reinforced concrete beams," *ACI Journal*, Vol.64, March, 1967, pp.152-163.
 21. Nilson, A.H., "Internal Measurement of bond slip," *ACI Journal*, Vol.69, July, 1972, pp.439-441.
 22. 오병환, 이성로, 방기성, "철근 콘크리트 부재의 부착거동에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회, 춘계학술발표회 개요집, 1990. 5.
 23. 오병환, 강영진, 이성로, 방기성, "철근콘크리트 부재의 부착특성에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지, 제2권4호, 1990. 12, pp.99-107

(접수일자 : 1991. 2. 10)