

## 부착슬립효과를 모사하기 위한 해석기법의 개발

### Development of an Analytic Algorithm to Simulate Bond-Slip Effect

곽 효 경\*

Kwak, Hyo Gyoung

#### Abstract

This paper deals with the development of an efficient algorithm which can consider the bond-slip effect in numerical analysis of reinforced concrete structures. Unlike the classical bond-link or bond-zone element using double nodes, the proposed model is considering the bond-slip effect without taking double nodes by incorporation of the equivalent steel stiffness. Moreover after calculation of nodal displacements, the deformation of steel at each node can be found out through the back-substitution technique from first up to final steel element using a governing equation constructed based on the equilibrium at each node of steel and the compatibility condition between steel and concrete.

#### 요 지

본 논문은 철근콘크리트 구조물의 해석시 부착슬립의 효과를 효율적으로 고려하기 위한 새로운 알고리즘의 개발에 관한 것으로 2중절점을 사용해야 하는 기존의 고전적인 부착요소와는 달리 부착슬립 효과를 고려한 철근의 등가강성을 산정하므로써 2중절점의 고려없이 부착슬립 효과를 고려할 수 있도록 도모하였다. 또한 콘크리트 변위를 산정한 후 철근의 각 절점에서 힘과 변위의 평형관계와 철근과 콘크리트 사이의 관계식을 이용하여 구성된 관계식을 토대로 철근요소의 각 절점변위와 부재력을 첫번째 철근요소부터 역으로 산정하는 반복해석 과정을 통해 최종 결정하게 된다.

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 성질이 전혀 다른 여러 재료의 복합체로 구성되어 있으며 시간에 따라 재료의 성질이 변화하고 하중이 증가함에 따라 균열의 발생에 의한 비선형 거동이 현저히 나타나는 등 그 거동이 복잡하므로 하중에 따른 구조적인 거동을 정확히

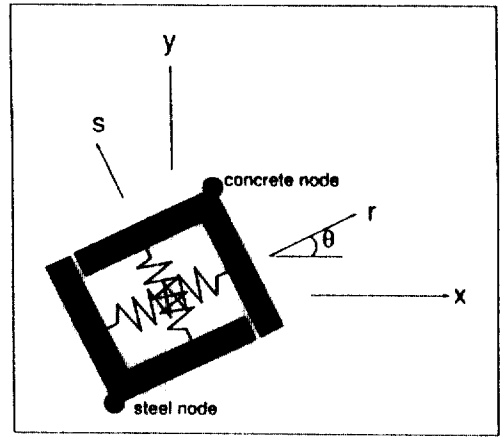
파악하고 이를 설계에 효과적으로 고려하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 구조물의 거동이 복잡한 관계로 많은 실험적 연구가 진행되고 있으며 근자에는 콘크리트 재료성질이 명확히 밝혀지고 관련 해석기법이 개발됨에 따라 유한요소법에 의한 해석적 연구가 활발히 이루어지고 있다. 한편 수치 해석을 함에 있어 구조물의 거동을 지배하는 콘크리트의 균열, 철근과 콘크리트의 부착파괴 거동 및 전단파괴에 의한 역학적 거동 등 많은 영역에서

\* 정희원, 삼성건설(주) 기술연구소, 선임연구원

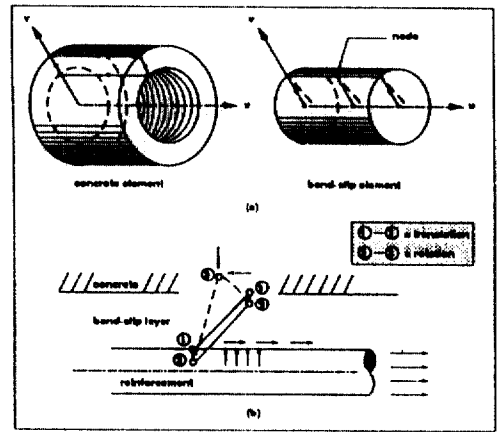
활발한 연구가 진행되고 있으나 아직 체계적인 이론과 역학적 관계가 정립되어 있지 않은 것도 사실이며 수치해석을 수행할 경우 이들의 효과를 일방적으로 무시하거나 단순화 시킴으로써 보다 정확한 결과를 얻기 힘들고 경우에 따라서는 실제 거동과 다른 해석결과가 나타나기도 한다. 특히 보-기둥 접합부나 전단벽, 철근콘크리트 판넬 등 전단에 의한 부착과파 영향이 상대적으로 크게 나타나는 부재의 경우 인장경화효과(tension-stiffening effect)가 휨부재와는 다른 거동을 보이며 이의 효과를 콘크리트에 고려할 지라도 구조물의 종류와 하중조건에 따라서도 다르게 나타나는 등 많은 문제를 내포하고 있었던 것도 사실이다.<sup>(1)</sup>

따라서 부착슬립의 영향이 지배적인 구조물의 해석시에는 이의 효과를 고려하기 위해 부착슬립 모델을 채택하고 있는데 현재까지 널리 사용하고 있는 방법으로는 인접한 두 절점의 상대적인 변위 차에 의해 부착슬립을 모사하는 Bond-link요소<sup>(2)</sup>와 콘크리트와 철근 사이를 미소길이의 부착슬립 영역으로 모사하고 이 영역에서 부착슬립이 발생한다고 가정하는 Bond-zone요소<sup>(3)</sup>의 두가지로 크게 대변할 수 있다(그림 1 참조). 그러나 기존의 모델들은 모두 부착슬립을 모사하기 위해 철근과 콘크리트의 인접면에 2중절점(double nodes)을 사용하여 그 상대적인 변형을 모사하는 관계로 구조물을 유한요소로 모델링할 경우 절점의 수가 크게 증가하게 되며 해석을 위한 입력데이터의 구성시 복잡성이 가중되어 진다. 특히 자유도의 갯수와 밀접한 관계를 유지하는 동적해석의 경우와 입력데이터의 정확성이 요구되는 3차원 요소의 사용시에는 부착슬립의 효과를 고려하기가 거의 불가능하게 되는 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 부착슬립을 고려한 해석시 유발되는 2중절점에 의한 문제점을 극복하고 수치해석시 보다 효율성을 기하기 위해 2중절점을 고려하지 않고도 부착슬립 효과를 효율적으로 고려할 수 있는 새로운 기법을 소개하고 예제해석을 통해 제안된 해석모델의 정확성을 검증하고자 한다. 본 연구에서 제안하고 있는 방법은 기본적으로 콘크리트 변위와 철근 변위를 표현하는 가상의 이중절점에 의한 bond-link요소와 철근사이의 상호관계를 이용한 구성방정식으로부터 철근의 변형량을 응축(condensa-



(a) bond-link 요소



(b) bond-zone 요소

그림 1. 부착요소

tion) 시킴으로써 실제 구조물의 거동해석 시에는 이중절점을 고려하지 않고 단지 등가의 철근강성을 고려하며 계산된 콘크리트의 변위량과 철근 양단의 경계조건으로부터 별도로 구성된 구성방정식을 통해 순차적으로 각 철근의 변형을 산정하는 방법으로 그 자세한 과정은 본문에서 언급하고 있다.<sup>(1)</sup>

## 2. 부착슬립을 고려한 철근요소

철근은 축방향으로 힘과 변형이 발생한다는 가정에 트러스 요소를 사용하여 모델링하였으며 철근이 항복한 이후에는 Von-Mises의 항복관계식에 따른 소성-변형경화 재료로 거동한다고 가정하였다. 특히 철근의 반복하중에 대한 거동을 모사함에 있어서 초기 항복상태 및 대변형 상태에서 강재의

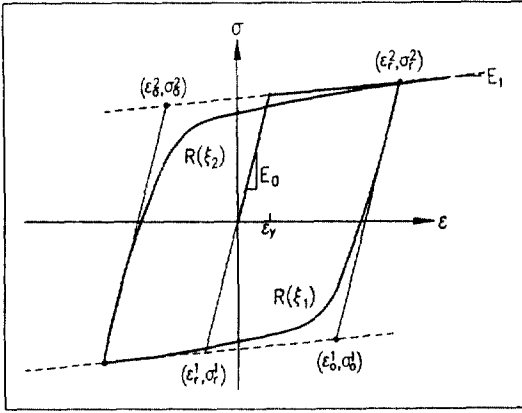


그림 2. 철근의 응력-변형률 이력곡선

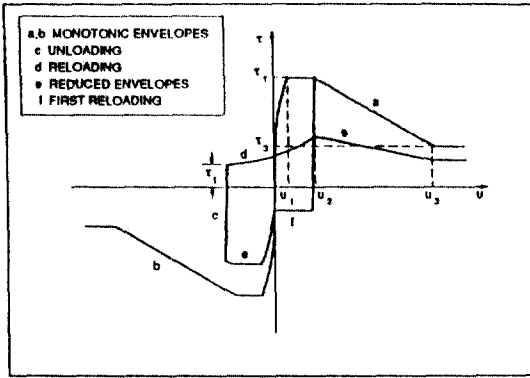


그림 3. 부착응력-슬립의 이력곡선

거동을 잘 묘사하고 있는 Menegotto와 Pinto<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 관계식을 사용하였다(그림 2 참조). 한편 부착슬립을 묘사하기 위해 사용한 모델은 기본적으로 Bond-link 요소에 토대를 두고 있으며 부착슬립과 부착응력 사이의 관계식은 많은 실험을 바탕으로 Eligehausen<sup>(5)</sup> 등에 의해 제안되고 초기의 부착슬립 거동을 수정한 Zulfikar와 Filippou<sup>(6)</sup>에 의해 수정, 개선된 모델을 사용하였다(그림 3 참조). 각 모델의 기본 관계식은 아래와 같으며 보다 자세한 사항은 참고문헌<sup>(1)</sup>에 언급되어 있다.

$$\sigma^o = b \cdot \epsilon^o + \frac{(1-b) \cdot \epsilon^o}{(1 + \epsilon^{oR})^{1/R}} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon^o = (\epsilon - \epsilon_r) / (\epsilon_0 - \epsilon_r)$ ,  $\sigma^o = (\sigma - \sigma_r) / (\sigma_0 - \sigma_r)$ ,  $b$  = 변형경화 계수( $E_0/E_1$ ),  $R$  = Bauschinger effect와 응력이력을 묘사하기 위한 재료상수( $R = R_0 - a_1 \zeta / a_2$

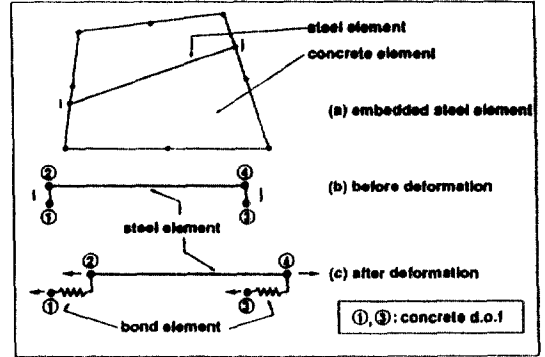


그림 4. 부착슬립을 포함한 철근의 이상화

+  $\zeta$ ),  $a_1, a_2$  = 재료상수로 본 연구에서는  $R_0, a_1, a_2$ 의 값을 실험을 통해 산정된 20, 18.5, 0.15로 각각 가정하였다.  $\zeta$  = 변형이력을 나타내는 매개변수로  $\epsilon_0 - \epsilon_r$ 과 항복변형률의 비로 표현한다.

$$\tau = \tau_1 \cdot \left( \frac{u}{u_1} \right)^a, \quad (u \leq u_1) \quad (2)$$

위의 식에서  $a$ 는 0.4의 값을 갖으며 그밖의 곡선부 거동에 관한 사항을 참고로 언급하면 그림 3에서 곡선부  $d$ 는 4차의 함수로 정의하고 하중이 반복됨에 따라 부착파괴의 정도를 묘사해야 하는데(그림 3의 곡선  $e$ ) 이를 위해 부착슬립 거동시의 초기 에너지( $E_0$ )와 소비된 에너지( $E$ )의 비에 의한 손실계수(damage parameter;  $d$ )를 정의하여 이 변수에 의해 곡선부  $a$ 를 감소시키게 된다. 즉,  $\tau_1(N\text{-cycle}) = \tau_1(1 - d)$ ,  $d = 1 - \text{EXP}(-1.2(E/E_0)^{1.1})$

언급된 각 재료모델을 토대로 임의의 콘크리트 요소에 포함된 철근을 분리하면 그림 4와 같고 이 그림에서 보듯이 가상절점 2와 4는 철근의 변형을, 가상절점 1과 3은 콘크리트의 변형을 각각 묘사한다고 가정된 후 부착슬립과 철근으로 구성된 절점의 구성방정식을 콘크리트의 변형과 철근의 변형에 대한 관계식으로 정리하면 식 (3)으로 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_3 \\ P_2 \\ P_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{bi} & 0 & -k_{bi} & 0 \\ 0 & k_{bj} & 0 & -k_{bj} \\ -k_{bi} & 0 & k_s + k_{bi} & -k_s \\ 0 & -k_{bj} & -k_s & k_s + k_{bj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_3 \\ d_2 \\ d_4 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

또는

$$\begin{Bmatrix} P_c \\ P_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{cc} & K_{cs} \\ K_{cs} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_c \\ d_s \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $k_s = AE/L$ ,  $k_b = E_b A = E_b m r d_b L / 2b$ ,  $E_b$  = 부착관계의 기율기,  $m$  = 철근의 갯수,  $b$  = 단면의 폭,  $d_b$  = 철근의 직경을 각각 의미한다.<sup>(8)</sup> 특히 하나의 철근을 모사할 경우 임의의 철근 한 절점에서의 부착슬립은 철근요소의 반에 의해 모사되며 한 절점에는 하나의 bond-link 요소에 의해 모사된다고 가정하면  $k_{bi} = E_b m r d_b L / 2$ 로 표시할 수 있다.

한편 유한요소의 해석을 통해 콘크리트의 변형은 알 수 있는 값이므로 철근의 변형에 관련된 항을 Condensation시킨 후 이를 콘크리트에 관련된 항으로 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P_c^*\} = [K_{cc}^*] \cdot \{d_c\} \quad (5)$$

여기서

$$\{P_c^*\} = \{P_c\} - [K_{cs}] \cdot [K_{ss}]^{-1} \cdot \{P_s\} \quad (6)$$

$$[K_{cc}^*] = [K_{cc}] - [K_{cs}] \cdot [K_{ss}]^{-1} \cdot [K_{cs}] \quad (7)$$

$$[K_{cc}^*] = \frac{K_s \cdot k_{bi} \cdot k_{bj}}{k_s \cdot (k_{bi} + k_{bj}) + k_{bi} \cdot k_{bj}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = [K_{eq}]_s \quad (8)$$

위의 식 (8)에서 보듯이 부착슬립의 효과가 고려될 경우 철근의 등가 강성이 감소하는 경향을 나타내며 부착강성이 무한대로 가정되는 완전부착의 경우 기존의 철근강성과 동일한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 부착슬립효과를 고려한 유한요소의 해석시 각 철근의 강성은 식 (8)로 표현하게 되며 이를 절점좌표계로 치환한 후 유한요소의 절점으로 환산하여 콘크리트 요소 내의 최종적인 등가 철근강도행렬을 구성하게 된다.

### 3. 해석과정

먼저 기본적인 해석과정은 부착슬립을 고려하지 않은 완전부착 상태에서의 비선형 유한요소 해석과정과 동일하므로 본 논문에서는 임의의 하중에 의해 각 절점의 콘크리트 변형이 산정된 후 다음의 반복해석 여부를 판단하기 위한 철근의 내부 등가하중을 산정함에 있어서 선행되는 각 철근의 절점변위와 부착슬립의 산정과정을 설명하고자 한다.

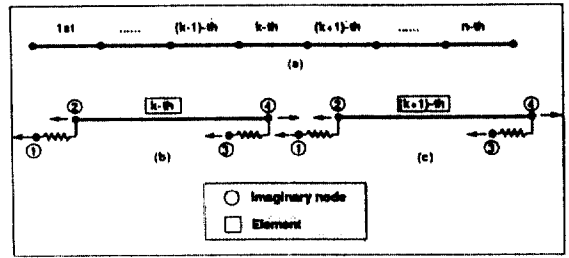


그림 5. 철근의 구성

부재의 길이방향으로 배근된 철근이 분할된 콘크리트 요소에 의해  $n$ 개의 철근요소로 결합되어 있다고 가정하면 임의의  $k$ -번째 철근의 관계식은 식 (4)를 토대로 다음과 같이 정리할 수 있다(그림 5 참조).

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_4 \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} k_s + k_{bi} & -k_s \\ -k_s & k_s + k_{bj} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_2 \\ \Delta d_4 \end{Bmatrix}^k - \begin{Bmatrix} k_{bi} \cdot \Delta d_1 \\ k_{bj} \cdot \Delta d_3 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

위의 관계식을 절점4의 힘과 변위에 대한 관계식으로 재 정리하면 다음의 관계식 (10)으로 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_4 \\ \Delta d_4 \end{Bmatrix}^k = [Q]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^k - [R]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서

$$[Q]^k = \frac{1}{k_s} \begin{bmatrix} -(k_s + k_{bj}) & k_s \cdot (k_{bi} \cdot k_{bj}) + k_{bi} \cdot k_{bj} \\ -1 & k_s + k_{bi} \end{bmatrix}^k$$

$$[R]^k = \begin{bmatrix} k_{bi} \cdot \frac{k_s + k_{bj}}{k_s} & k_{bj} \\ \frac{k_{bi}}{k_s} & 0 \end{bmatrix}^k$$

또한 인접한 두 철근요소의 연결점에서의 평형관계와 변위의 상관관계로부터 식 (11)의 관계식을 얻을 수 있으며 여기에 식 (10)의 관계를 대입하여 정리하면 식 (12)의 관계식으로 재 정리되고 이를 철근의 양단을 모사하는 최초의 철근요소  $i$ 단과 마지막 철근요소의  $j$ 단에 대한 관계식으로 계속해서 확장하면 임의의 콘크리트 요소에 의해 분할되어  $n$ 개로 구성된 철근의 양끝단(첫번째 요소의  $i$ 단과  $n$ 번째 요소의  $j$ 단)을 모사하는 관계식과 이 양단까지의 힘의 전달매체를 나타내는 각 절점에서의 콘크리트 변위

량의 항들으로써 표현되는 식(14)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^{k+1} = \begin{Bmatrix} -\Delta P_4 \\ \delta d_4 \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_4 \\ \Delta d_4 \end{Bmatrix}^k = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_4 \\ \Delta d_4 \end{Bmatrix}^k \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^{k+1} = [\bar{Q}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^k - [\bar{R}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^k \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^{k+1} &= [\bar{Q}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^k - [\bar{R}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^k \\ &= [\bar{Q}]^k \cdot [\bar{Q}]^{k-1} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^{k-1} \\ &\quad - [\bar{Q}]^k \cdot [\bar{R}]^{k-1} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^{k-1} - [\bar{R}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^k \\ &= [\bar{Q}]^k \cdot [\bar{Q}]^{k-1} \dots [\bar{Q}]^1 \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^1 \\ &\quad - [\bar{Q}]^k \cdot [\bar{Q}]^{k-1} \dots [\bar{Q}]^2 \cdot [\bar{R}]^1 \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^1 \\ &\quad - \dots - [\bar{R}]^k \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^k \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta P_4 \\ \Delta d_4 \end{Bmatrix}^n &= [Q]^n \cdot [\bar{Q}]^{n-1} \dots [\bar{Q}]^1 \cdot \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix}^1 \\ &\quad - [Q]^n \cdot [\bar{Q}]^{n-1} \dots [\bar{Q}]^2 \cdot [\bar{R}]^1 \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^1 \\ &\quad - \dots - [\bar{R}]^n \cdot \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_3 \end{Bmatrix}^n \quad (14) \end{aligned}$$

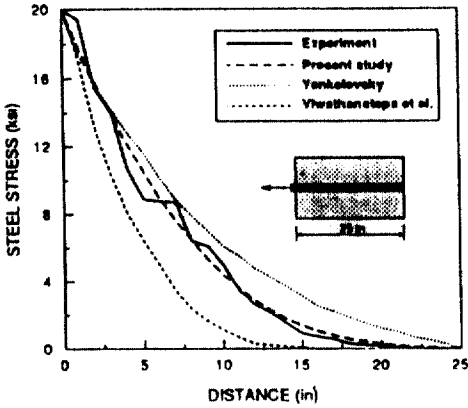
여기서  $[\bar{Q}]^k = [S][Q]^k$ ,  $[\bar{R}]^k = [S][R]^k$ 을 각각 의미한다.

즉 각 절점의 콘크리트 변형은 기존의 비선형 유한요소해석을 통해 알고 있는 값이므로 철근 양 끝단의 두 힘의 성분과 두 변형성분인 4개의 미지수 가운데 두개의 미지수를 알 경우 이 관계식을 이용하여 철근요소의 한쪽 끝단에 관한 정보를 얻을 수 있으며 식 (10)의 관계식으로부터 순차적으로 첫번째 철근요소부터 마지막 철근요소에 이르는 각 요소의 절점에서의 변위와, 부착슬립 및 철근의 부재력을 산정하게 된다. 특히 주어진 콘크리트의 변형량으로부터 철근의 거동을 산정할 시 부착 및 철근의 강성은 앞의 하중단계에서 얻어진 값을 기초로 한 것으로 만약 가정된 철근과 부착의 관계에 대한 강성이 변화할 경우 반복해석을 통해 최종적인 철근거동을 계산하게 된다.<sup>(1)</sup>

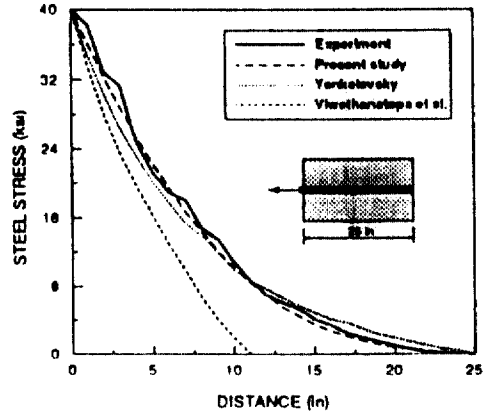
#### 4. 수치예제

본 연구에서 개발된 알고리즘의 검증에 위해 프레임 구조의 대표적 부분인 보-기둥 접합부 영역에서 횡하중과 철근정착에 따른 거동을 분석할 목적으로 Viwatanatepa 등<sup>(9)</sup>에 의해 실험되고 수치해석 모델의 검증시 널리 이용되는 시험결과를 예제로 사용하였다. 본 예제해석을 위해 사용한 첫번째 시험체는 #8의 철근이 중앙에 배근된 폭이 25 in(63.5 cm)이고 정착길이가 철근직경의 25배인 시험체로 한쪽 끝에서 단조중가 인발(Pull-out) 하중이 작용하는 시편(A1)이고 두번째 시험체는 동일한 단면과 철근 배근에서 Push-Pull 하중이 양단에서 반복적으로 작용하는 시편(A2)이다. A1과 A2 예제의 재료상수는 실험에 의해 얻어진 값으로 콘크리트 압축강도는 각각 4700 psi(330 kg/cm<sup>2</sup>), 4740 ksi(333 kg/cm<sup>2</sup>), 철근의 항복강도는 68 ksi(4780 kg/cm<sup>2</sup>), 항복변형률은 0.23%이며, 변형경화 탄성계수는 411 ksi(28893 kg/cm<sup>2</sup>)을 사용하였다. 또한 부착슬립의 관계를 정의 하기 위해 사용한 상수는 본 예제의 실험을 통해 산정된  $u_1 = 0.02756$  in(0.07 cm),  $u_2 = 0.07874$  in(0.2 cm),  $u_3 = 0.2756$  in(0.7 cm),  $\tau_1 = 2350$  psi(165 kg/cm<sup>2</sup>),  $\tau_3 = 870$  psi(61 kg/cm<sup>2</sup>)의 값을 각각 사용하였다 (그림 3 참조). 그밖에 부재 양 끝단의 부착 파괴 거동은 중앙부와 차이가 있으나 수치해석상의 편의를 위해 모두 동일한 부착거동을 갖는다고 가정하였으며 나아가 콘크리트의 변형은 본 예제의 경우 그 영향이 상대적으로 작고 콘크리트와 철근 사이의 파괴는 부착슬립 거동에 의해 충분히 모사되며 나아가 개발된 알고리즘의 검증을 위한 단순화와 기존 연구결과와의 동일한 경계조건을 위해 예제해석시 이를 무시하였다. 또한 해석모델의 검증을 위해 철근요소는 길이방향으로 동일한 길이(1 in)의 25개를 사용하였으며 하중단계는 반복해석시 3 ksi(211 kg/cm<sup>2</sup>) 간격으로 증감시켰다.

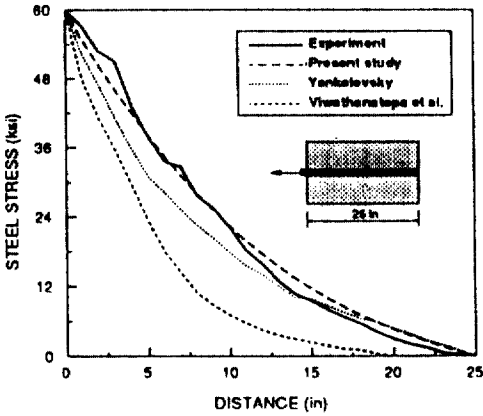
먼저 단조중가 인발(Pull-out) 하중에 대한 예제 해석 결과와 기존의 다른 연구결과를 검토해 보면 본 연구에 의한 결과가 실험치와 잘 일치하는 거동을 보이며 기존의 연구에서 고려하지 못했던 철근항복 이후의 거동에 있어서도 상대적으로 다르게 거동하는 부재의 끝단을 수치해석상의 편의를 위해 중앙부와 동일한 거동을 한다고 가정한 차이에 의해



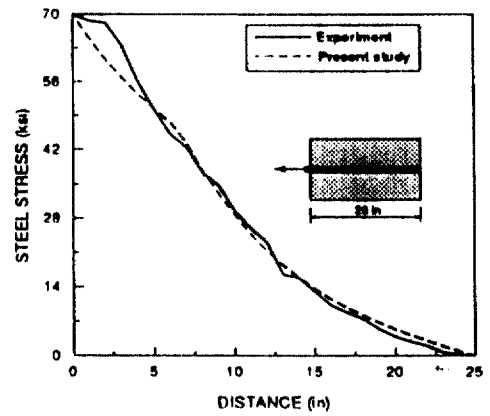
(a) End Stress=20 ksi



(b) End Stress=40 ksi



(c) End Stress=60 ksi



(d) End Stress=70 ksi

그림 6. 단조증가 하중에 의한 거동(1 in=2.54 cm, 1 ksi=70.3 kg/cm<sup>2</sup>)

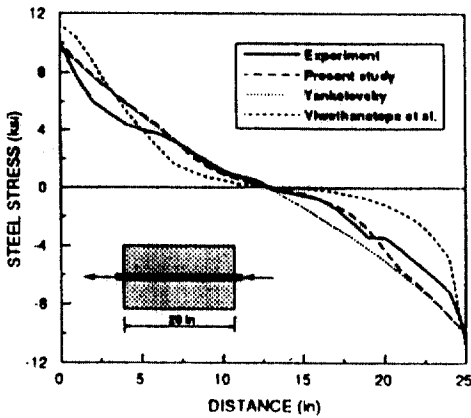
하중이 작용하는 지점에서 약간의 차이가 나는 것 이외에 부재의 전 구간에서 좋은 결과를 주고 있음을 알 수 있다(그림 6 참조).

한편 반복해석에 의한 거동을 살펴보면 기존의 연구결과 보다 상당히 개선된 결과를 보이고 있음을 알 수 있다(그림 7 참조). 그러나 전체적인 거동을 살펴보면 철근의 항복전과 철근의 항복후 부착슬립이 급격하게 일어나서 구조물의 불안정성이 심한 대변형의 경우에 있어서도 안정된 결과를 주고 있지만 대변형의 경우 실험치와 다소 차이를 가지고 있음을 볼 수 있다(그림 8, 9 참조). 이는 예제해석의 경우 하중조절 방법을 사용한 반면 실험은 변위조절 방법을 사용하였으며 과도한 부착슬립이 발생할 경우 실제 거동은 부재의 양 끝단에서 중앙부와 다소 다른 부착거동을 보이나 수치해석의 편의상 “전

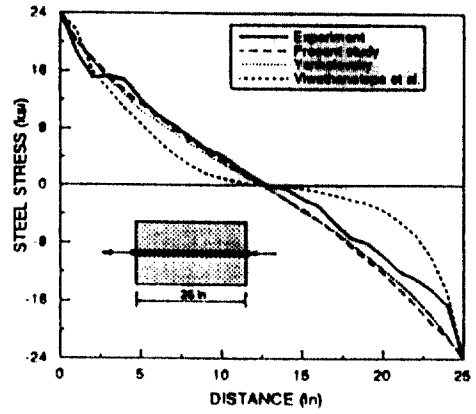
부재영역에 걸쳐 동일한 영항의 부착슬립 거동을 나타낸다”는 정확성이 다소 결여되는 가정의 사용에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 궁극적으로 대변형 반복해석시에도 효율적으로 사용할 수 있으며 안정적인 해석결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

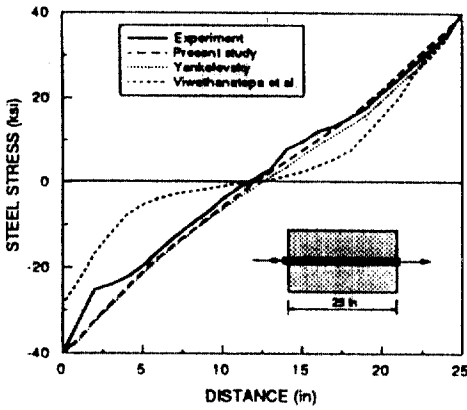
본 연구를 통해 철근콘크리트 구조물의 유한요소 해석시 2중절점에 의한 상대적 변형량에 의해 철근과 콘크리트 사이의 부착관계를 표현하는 고전적인 bond-link 요소나 bond-zone 요소와는 달리 2중절점을 사용하지 않고 이를 효과적으로 모사할 수 있는 모델을 제시하였으며 예제해석을 통해 단조증가 하중과 대변형-반복하중 상태에서 제안된 모델의



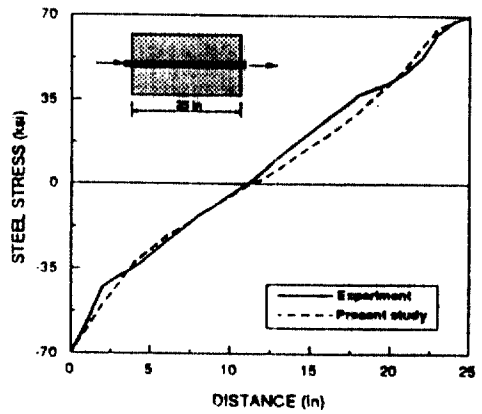
(a) First Cycle



(b) Fourth Cycle

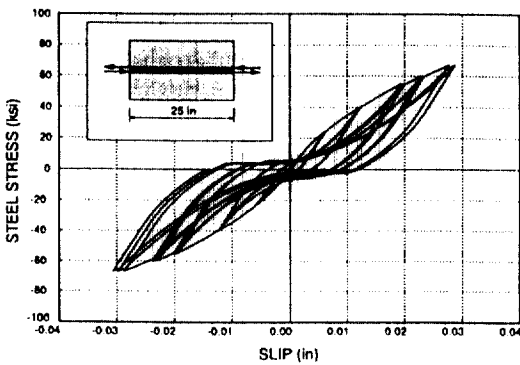


(c) Seventh Cycle

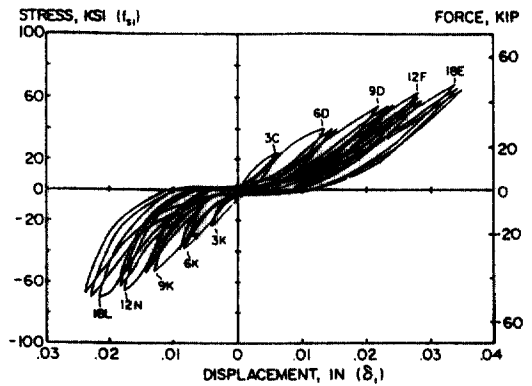


(d) First Post-Yield Cycle

그림 7. 반복하중에 의한 거동(1 in=2.54 cm, 1 ksi=70.3 kg/cm<sup>2</sup>)



(a) 수치해석 결과



(b) 실험 결과

그림 8. 반복하중에 따른 부착슬립 이력곡선(철근의 항복전)(1 in=2.54 cm, 1 ksi=70.3 kg/cm<sup>2</sup>)

효율성과 정확성을 보였다. 특히 본 연구에서 제안한 해석모델에 의한 결과가 대변형 상태에서 안정된

결과를 주는 반면 기존의 2중절점에 의한 Vivatana-tepa 등에 의해 제안된 해석 알고리즘은 마찰슬립

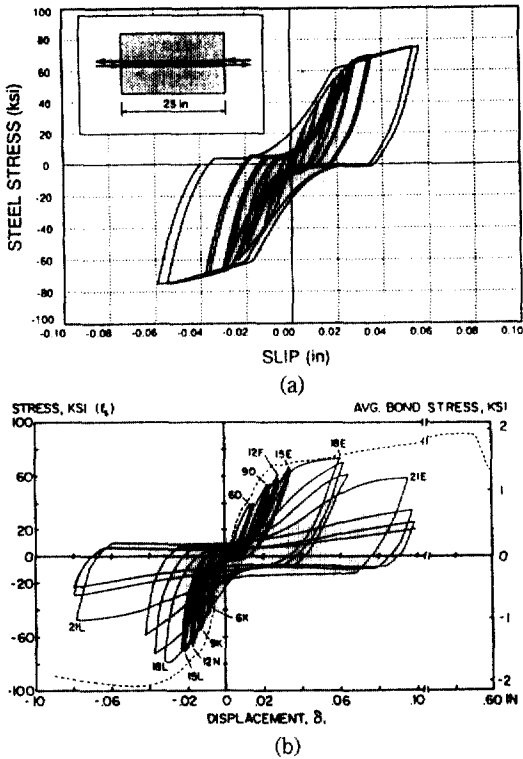


그림 9. 반복하중에 따른 부착슬립 이력곡선(철근의 항복후)(1 in = 2.54 cm, 1 ksi = 70.3 kg/cm<sup>2</sup>)  
(a) 수치해석 결과, (b) 실험 결과

영역에서 불안정성을 초래하며 철근의 항복 후 대변형이 증가함에 따라 수치해석 결과가 발산하는 현상이 나타난다. 제안된 모델은 프리스트레스트 콘크리트 구조물을 비롯한 다양한 구조물의 부착효과 고찰시 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며 특히 자유도의 수와 관련한 비선형 동적해석, 구조물의 거동시 부착파괴 거동이 현저하게 나타나는 보-기둥 접합부 등의 해석과 구조물의 모델링상의 어려움으로 부착슬립 효과를 고려하지 못하는 경우에 특히 효과적으로 사용될 것으로 판단된다. 그러나 대변형 거동시 마찰슬립(friction slip)이 철근의 표면을 따른 전 영역에서 동시에 발생할 경우 수치적인 불안정성이 나타나므로 이를 극복하기 위해 이 영역에서는 하중단계를 작게 잡아야 하는 문제점이 있다. 따라서 이를 극복할 수 있는 새로운 해석기법이 추가될 경우 보다 안정적으로 수치해석에 이용될 수 있다.

1. Kwak, H.G. and Filippou, F.C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads", *Report No. UCB/SEMM-90/14*, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, 1990.
2. Ngo, D. and Scordelis, A.C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams", *Journal of ACI*, Vol. 64, No. 3, 1967, pp. 152-163.
3. de Groot, A.K., Kusters, G.M.A. and Monnier, T., "Numerical Modeling of Bond-Slip Behavior", Heron, *Concrete Mechanics*, Vol. 26, No. 1B, 1981.
4. Menegotto, M. and Pinto, P., "Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-linear Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending", *IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, Final Report, Lisbon, 1973.
5. Eligehausen, R., Popov, E.P. and Bertero, V.V., "Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations", *Report No. UCB/EERC 83-23*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
6. Zulfikar, N. and Filippou, F.C., "Models of Critical Regions in Reinforced Concrete Frames under Seismic Excitations", *Report No. UCB/EERC-90/06*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1990.
7. Filippou, F.C., Popov, E.P. and Bertero, V.V., "Effect of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints", *Report No. UCB/EERC-83/19*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
8. ASCE Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, *State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, ASCE Special Publication, 1982.
9. Viathanatepa, S., Popov, E.P. and Bertero, V.V., "Effects of Generalized Loadings on Bond of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks", *Report No. UCB/EERC-79/22*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1979.
10. Yankelevsky, D.Z., "New Finite Element for



Bond-Slip Analysis", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 7, 1985, pp. 1533-

1542.

(接受: 1993. 10. 18)