

# 소성힌지가 기둥면에서 이동된 RC보의 이력거동 해석모델

Development of Hysteretic Analysis Model for RC beam  
with Relocated Plastic Hinge from Column Face

서수연\*      윤승조\*\*      이리형\*\*\*      권영준\*\*\*\*  
Seo, Soo-Yeon      Yoon, Seung-Joe      Lee, Li-Hyung      Kwon, Young-Joon

## Abstract

In this paper, an analytical model is proposed for analyzing the hysteretic behavior of RC beam with relocated plastic hinge region under load reversals. The plastic hinge is modeled not to be concentrated on a point but to be distributed on a finite size in beam. This is based on the assumption that the plastic hinge is formed over a certain region, in which the curvature varies. Tangential matrix is reformed using stiffness coefficients including variables such as the length and location of plastic hinge region. In order to construct the hysteretic rule of hinge, modified Takeda rule is also proposed on the base of regression analysis for the previous test results. Previous specimens are analyzed using the proposed model and the result is compared with test result. On the result of the comparison, it was shown that the hysteretic behavior of beams with different location of plastic hinge region could be predicted using the proposed analytical process

**keywords** : Analytical model, Relocated plastic hinge, Stiffness coefficients, Length and location of plastic hinge region, Modified Takeda rule

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

강한 기동-약한 보의 설계 개념을 만족시키며 내진 성능을 향상시킬 수 있는 방안으로 소성힌지부를 보 내측으로 이동시키는 배근방법은 효과적인 것으로 밝혀져 있다.<sup>1,7)</sup>

\* 정희원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

\*\* 정희원, 충주대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정희원, 한양대학교 건축공학부 교수

\*\*\*\* 한양대학교 대학원

E-mail : sooseo1@hanmail.net 011-9882-9805

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

즉, 소성힌지부를 보 내측으로 이동시킴으로써 접합면을 보호할 수 있으며, 이동된 소성힌지부를 전단보강하여 부재의 파괴를 확산시킴으로써 안정된 이력루프를 얻을 수 있는 것이다. 이에 ACI 기준의 특별조항에서는 지진설계에 관련하여 소성힌지부를 보 내측으로 이동시키는 배근방법을 권장하고 있다.

소성힌지부가 기둥면에 발생하는 경우에는 부재의 항복에 의해 형성된 소성힌지부가 보 내측으로 확산되는 양상을 보이지만, 보내부의 임의 위치에 소성힌지가 발생하는 경우에는 소성힌지부가 오히려 기둥면으로 확산되는 형태가 바람직한 것으로 밝혀졌다.<sup>1)</sup> 이와 같은 소성힌지의 확산은 소성힌지가 적정영역에 걸쳐서 발생하고 그 길이는 변하게 됨을 의미하는 것이다.

이상과 같은 거동에 대해서 실험적으로 그 특성이 규명되고 있으며 이에 부흥하여 이론적인 해석과정을 거쳐 부재의 이력거동을 예측할 수 있다면 현존하는 건물의 지진피해예측에 일조하게 됨은 당연하다. 이러한 해석적 연구의 하나로써, 소성힌지부의 유한한 영역을 고려하여 부재의 비탄성 이력특성을 묘사한 연구가 일부 연구자들<sup>3,4)</sup>에 의해 수행되었으나, 이들 연구의 경우에는 소성힌지가 접합면에 발생하는 경우를 대상으로 하고 있기 때문에 그렇지 않은 경우에 대해서는 그 거동특성을 제대로 묘사하는데 부족한 점이 많다. 특히, 김윤일의 실험연구<sup>1)</sup>에 의하면, 소성힌지가 보내측에서 형성되는 경우에는 다소 다른 이력거동을 보이는 것으로 나타나 이러한 이력특성을 비교적 정확하게 묘사할 수 있는 해석모델의 개발이 필요한 상황이다.

## 1.2 연구목적 및 방법

본 연구에서는 변단면 부재로 소성힌지를 이상화하는 모델링 방법으로 소성힌지가 이동되어 형성되는 부재의 비탄성 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 먼저 소성힌지의 비탄성 강성변화를 표현할 수 있는 방안을 제시하고, 둘째로 소성힌지가 이동되어 형성되는 부재에 적합한 수정강성매트릭스를 제시하고자 한다. 마지막으로 제시된 모델을 이용하여 기존의 실험결과와 비교함으로써 해석모델의 적합성을 평가하고자 한다.

## 2. 변단면 모델

### 2.1 부재의 모델링

소성화된 부재의 한 부분을 소성힌지로 모델링하는 방법은 Clough 등<sup>5)</sup>에 의해 제시된 이후, 현재까지 많은 모델들이 제시되어 왔다. 이러한 해석모델은 소성역의 확산에 따른 곡률의 변화와 길이의 가변성을 반영하지 못하기 때문에 Meyer 등<sup>3)</sup>에 의해 변단면 모델이 제시되었다. 이 방법은 Chung 등<sup>4)</sup>에 의해 확장되어 파괴 기준을 반영한 피해지표를 적용한 강도 및 강성저하 모델이 제시되었다.

그러나 상기의 연구는 소성힌지가 기둥면에 형성되는 경우를 대상으로 한 것으로서, 소성힌지부의 발생 위치에 따라 달리 나타나는 특성을 모델링하기 위해서는 적절한 수정이 요망된다.

Fig. 1은 소성힌지를 유한한 소성역으로 치환한 경우를 나타내는 것으로 Fig. 1(a)는 접합면에 소성힌지가 형성되는 경우를 나타내고, Fig. 1(b)는 소성역이 보 내부로 이동되어 형성되는 경우를 나타낸다. Fig. 1(b)와 같이 소성역이 이동되어 형성되는 경우에 있어서는 소성역의 발생위치에 따른 영향과 소성힌지 발생이후 소성화의 진행방향에 대한 고려가 필요하다. Fig. 1에서  $x_i$ 와  $x_j$ 는 소성역의 발생위치와 접합면 사이의 거리를 나타낸다.

### 2.2 소성역의 길이

접합면에 소성역이 형성되는 경우, 부재가 비탄성 거동을 하게 됨에 따라 소성역이 보내측으로 확산되므로, 소성역의 길이는 Fig. 1(a)과 같이 접합면의 모멘트와 항복모멘트의 함수로 표현되어 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이때의 소성역의 길이는 부재가 새로운 곡률(또는 모멘트)을 경험할 때 계산되며 최대 모멘트 이후 하중이 저하되더라도 감소하지 않고 일정한 값으로 남아 있는 것으로 간주된다.

그러나, 소성역이 보 내측으로 이동되어 발생하는 경우에는 소성역의 확산방향이 모멘트가 큰 접합부 쪽으로 진행되게 되므로 이때의 소성역 길이는 Fig.

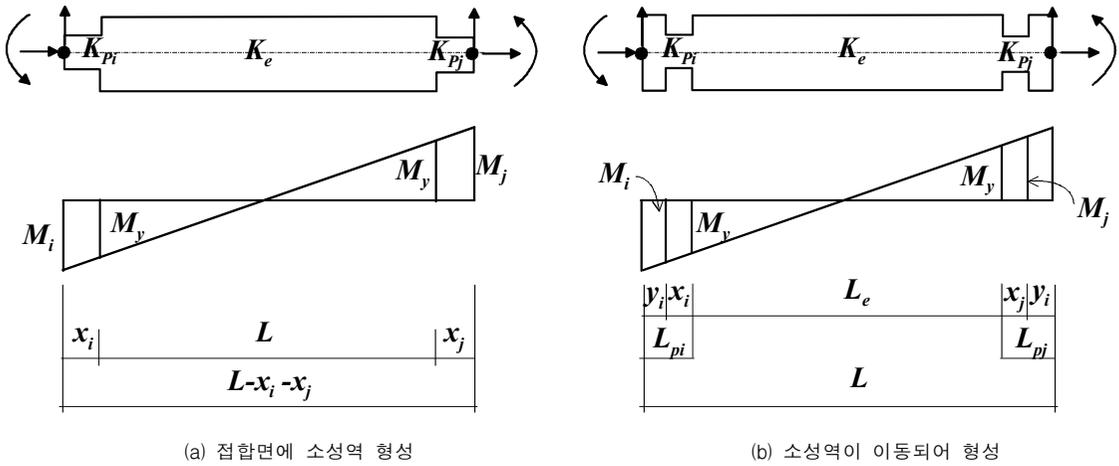


Fig. 1 변단면 모델

1(b)에 나타난 모멘트도에서 소성역의 모멘트, 항복모멘트, 그리고 탄성역의 길이함수로 표현될 수 있다.

$$x_i(x_j) = \frac{M_i - M_y}{M_i + M_j} L_e \quad (1)$$

$$x_i(x_j) = \frac{M_{Pi} - M_y}{2M_y} L_e \quad (2)$$

여기서,

$M_i, M_j$  = 기둥면에서의 모멘트,

$M_y$  = 부재의 항복모멘트,

$M_{Pi}$  = 이동된 소성면에서의 모멘트,

$L_e$  = 부재항복이 발생한 위치사이의 거리.

### 2.3 소성역의 강성

Fig. 1과 같은 변단면 부재에서 소성역의 강성은 각 단면에서 달리 나타나게 되므로 각각의 단면에 대하여 강성을 구해야 하지만 이렇게 하기에는 많은 시간과 노력이 소요되게 된다. 실제 소성역의 강성은 소성역의 길이에 대한 평균강성을 사용함으로써 비교적 쉽게 구해낼 수가 있다.<sup>3,4)</sup> 따라서 본 연구에서는 소성역의 강성을 소성역의 길이에 대한 평균강성으로 하

고 각 구간마다의 평균강성  $K_i$ 는 Meyer 등<sup>3,4)</sup>에 의한 방법과 동일하게 다음과 같이 산정하였다.

- 1) 탄성재하 또는 재하시의 강성(Fig. 2)

$$K_i = K_e \quad (3)$$

- 2) 비탄성 재하시 강성(Fig. 2)

$$K_i = K_2 \quad (4)$$

- 3) 비탄성 재하시 및 재하시 강성(Fig. 2)

$$K_i = K_p \quad (5)$$

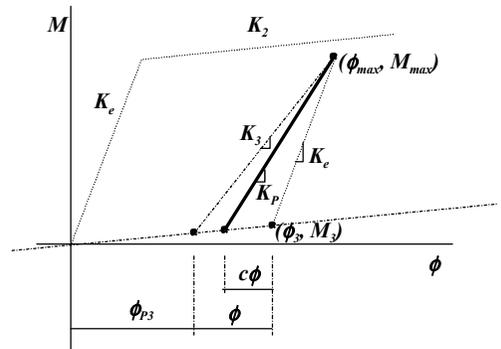


Fig. 2 비탄성 재하시의 평균강성

- 비탄성 재하시

$$K_P = \frac{M_{\max} - M_3 + c(M_3 - M_P)}{\frac{M_{\max}}{K_e} + c(\psi_3 - \psi_{\beta 3})} \quad (6)$$

여기서,

$c$ 는 실험을 통하여 얻어지는 계수로서  $c = 1$ 이면  $K_P = K_3$ ,  $c = 0$ 이면  $K_P = K_e$ 가 된다.

- 비탄성 재하시 강성(Fig. 3)

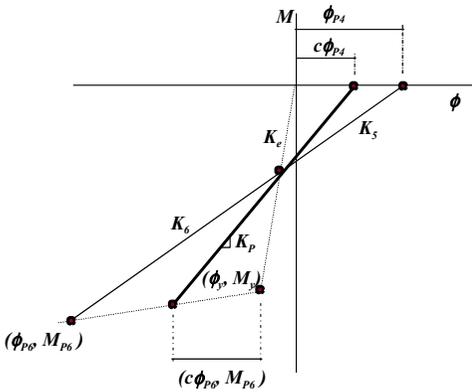


Fig. 3 비탄성 재하시의 평균강성

$$K_P = \frac{cM_{P\beta} + (1-c)M_y}{c(\psi_{P\beta} - \psi_{P4}) + (1-c)\psi_y} \quad (7)$$

## 2.4 강성 매트릭스

유한한 소성역을 갖는 모델에 대한 부재의 강성 매트릭스는 다음과 같다.

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & K_{14} & 0 & 0 \\ & K_{22} & K_{23} & 0 & K_{25} & K_{26} \\ & & K_{33} & 0 & K_{35} & K_{36} \\ & & & K_{44} & 0 & 0 \\ & Sym. & & & K_{55} & K_{56} \\ & & & & & K_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K_{11} = K_{44} = K_{14} = \frac{EA}{L} \quad (9)$$

Eq. (8)을 구성하는  $K_{33}$ ,  $K_{36}$ ,  $K_{66}$ 은 단위 모멘트를 부재길이에 따라 적분함으로써 구해질 수 있다. 부재의 연성계수는 Eq. (10)과 같으며 이때,  $\Delta$ 는 이동되어 소성힌지가 발생하는 경우를 나타내는 계수로서 Eq. (11)과 같다. Eq. (11)에서  $\alpha$ 가 바로 소성힌지의 발생위치에 따라 달라지는 값을 나타낸다. 따라서, 부재의 연성계수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 소성역이 접합면에 형성된 경우, 즉  $y_i$ ,  $y_j$ 가 "0" 일때는 Eq. (12)의 값들이 모두 "0"이 되지만,  $y_i$ ,  $y_j$ 가 임의의 값을 가질 경우에는 그에 비례하여 적정값을 가지게 된다.

$$f_{ii} = \frac{1}{3K_e L^2} A_1 \quad (10-a)$$

$$f_{jj} = \frac{1}{3K_e L^2} A_2 \quad (10-b)$$

$$f_{ij} = \frac{1}{3K_e L^2} A_3 \quad (10-c)$$

$$A_1 = (Q_i - 1)(x_j^3 + \alpha_1) - (Q_i - 1)[(L - x_i)^3 + \alpha_2] + QL^3 \quad (11-a)$$

$$A_2 = (Q_i - 1)(x_i^3 + \alpha_3) - (Q_i - 1)[(L - x_j)^3 + \alpha_4] + QL^3 \quad (11-b)$$

$$A_3 = (Q_j - 1)[x_j^2(1.5L - x_j) + \alpha_5] + (Q_i - 1)[x_i^2(1.5L - x_i) + \alpha_6] + \frac{L^2}{2} \quad (11-c)$$

여기서,

$$\alpha_1 = 3x_j y_j (x_j + y_j) \quad (12-a)$$

$$\alpha_2 = 3x_i y_i (2L - x_i + y_i) \quad (12-b)$$

$$\alpha_3 = 3x_i y_i (L - x_i + y_i) \quad (12-c)$$

$$\alpha_4 = 3x_j y_j (L - x_j - y_j) \quad (12-d)$$

$$\alpha_5 = 3x_i y_i (x_i + y_i) \quad (12-e)$$

$$\alpha_6 = 3x_j y_j (2L - x_j - y_j) \quad (12-f)$$

### 3. 소성힌지부의 이력규칙

본 연구에서 해석에 사용한 이력루프의 기본 규칙은 Fig. 4와 같이 Takeda 모델<sup>6)</sup>을 수정한 것으로서 크게 다음의 3부분으로 요약된다.

- 하중제하시의 강성 ( $K_3, K_4$ )
- 하중제하가 끝난뒤 재하시의 초기균열이 닫혀질 때까지의 강성 ( $K_5$ )
- 재하시 균열이 닫혀진 후의 강도저하 및 강성저하 ( $K_6, K_7$ )

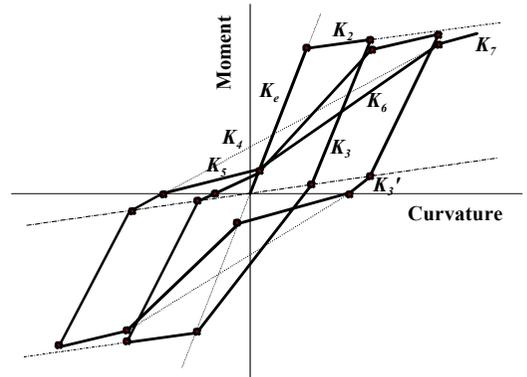


Fig. 4 소성힌지부의 이력규칙

본 연구에서 사용한 소성힌지부의 이력루프는 기존 연구자들의 실험결과 분석<sup>2)</sup>을 통하여 산정된 것으로서, 각 구간의 강성변화 특성을 나타내면 다음과 같다.

#### 3.1 제하시의 강성

부재가 Fig. 5와 같이 항복하중을 경험하고 난 이후 제하될 때의 강성은 해당 사이클의 연성비가 클수록 초기의 탄성강성에 비례하여 감소한다.<sup>1)</sup> 이는 비탄성 사이클의 최대변위가 증가함에 따라 콘크리트의 휨전단균열과 주근의 미끄러짐에 의한 균열이 확장됨으로써 부재단면의 저항능력이 저하되기 때문이다.

Takeda모델<sup>6)</sup>을 비롯한 여러 모델에서는 이 부분의 강성저하를 연성비에 비례하는 것으로 제안하고 있으며, 본 논문에서도 이를 연성비의 함수로 보아 Eq. (13)을 사용하며 이때의 계수는 0.33을 사용하였다.

$$K_3 = \left(\frac{1}{\mu}\right)^{\alpha} K_e \quad (13)$$

Fig. 5에서 하중제하가 끝날 무렵, 부재의 강성 ( $K_3'$ )은 급격히 완만해지게 되며 이러한 현상은 부재의 연성비가 클수록 그 정도가 크게 나타난다. 본 연구에서는 이 구간의 새로운 강성은 변형경화 강성을 원점에서 연장한 선과 제하강성이 만나는 점부터 시작되는 것으로 가정하고 이때의 강성은 다음과 같이 산정하였다.

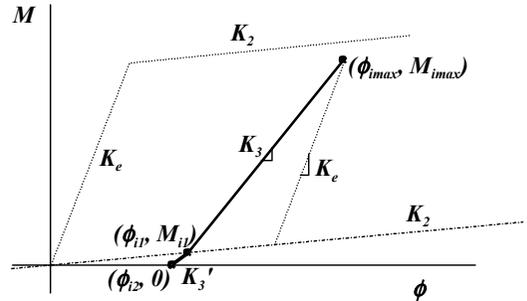


Fig. 5 제하시의 이력규칙

$$K_3' = \frac{M_{i1}}{\phi_{i1} - \phi_{i2}} \quad (14)$$

$$\phi_{i2} = 0.83 \phi_{imax} - 1.04 \quad (15)$$

#### 3.2 재하시의 강성

Fig. 6과 같이 하중이 반전되었을 때 이력루프상의 편칭 현상은 부재에 발생하는 전단응력도가 높을 때 두드러지게 나타난다. 이러한 하중반전 후 초기강성은 부재의 최대 전단응력도, 사이클 수 그리고 연성비에 따라 변하게 된다.<sup>1),2)</sup> 따라서, 본 연구에서도 이러한 상관관계를 고려한 김윤일<sup>1)</sup>에 의해 제시된 식을 사용한다. 하지만, 이 식을 이용하여 기존 실험체를 분석한 결과  $\beta$ 값의 계수는 0.025보다는 0.08이 적합한 것으로 나타났으며, 또한  $D_s$ 값의 계수도 보정이 필요한 것으로 나타났다.<sup>2)</sup> Eq. (16)은 수정된 식을 나타낸다.

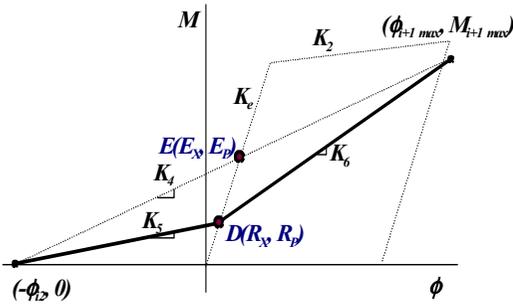


Fig. 6 하중반전후 재하시의 이력규칙

$$R_x = q \left[ \left( \frac{1}{\mu} \right)^\beta - k \right] E_x \quad (16-a)$$

$$R_p = q \left[ \left( \frac{1}{\mu} \right)^\beta + k \right] E_p \quad (16-b)$$

$$\beta = 0.08/n \quad (17)$$

$$\begin{aligned} q &= 0.4 & (D_s \leq 0.1) \\ &= 4 D_s & (0.1 < D_s \leq 0.25) \\ &= 1 & (D_s > 0.25) \end{aligned} \quad (18)$$

$$D_s = \frac{\sqrt{f'_c}}{v_m} \frac{\sqrt{v_s}}{\sqrt{v_m}} \quad (19)$$

여기서,  $k$ =소성힌지의 이동을 고려한 실험계수로서, 본 연구에서는 3.2를 사용,  $n$ =경험비탄성 싸이클 수,  $v_m$ =부재에 나타난 최대 전단응력도,  $v_s = A_v f_{vt} / bs$ 로서  $A_v$ =스터럽의 단면적,  $b$ =보폭,  $s$ =스터럽의 간격을 나타냄. 이상으로부터, Fig. 6과 같은 하중반전후 재하시의 강성( $K_5, K_6$ )은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$K_5 = \frac{R_p}{R_x + \psi_{i2}} \quad (20)$$

$$K_6 = \frac{M_{(i+1)max} - R_p}{\psi_{(i+1)max} - R_x} \quad (21)$$

### 3.3 강도저하

부재의 강도저하는 항복을 경험한 이후부터 나타나며 연성비에 비례하여 증가한다. 이때의 저하정도는 초기 모멘트-곡률 관계에서 구해지는 부재의 항복점과 파괴점을 잇는 선분과 변형경화 강성의 연장선과 이루는 차이에 비례하게 된다.<sup>2),4)</sup> 또한 부재의 강도저하량은 연성비에 비례하여 증가하며 동일 연성비일 경우에는 그 저하량이 싸이클 수의 지수함수에 비례하여 증가하는 것으로 고려될 수도 있다. 그러나 실제 반복하중시 강도저하는 단조가력시에 구해지는 강도저하 기울기를 따르게 되며 이는 항복이후 부재의 곡률연성비에 비례하여 증가하게 된다.

본 연구에서는 이상과 같은 특성으로 고려한 Chung<sup>4)</sup>에 의해 제시된 식을 사용하되, 실험상수 0.67을 도입하여 Eq. (22)와 같이 수정된 식을 적용한다.

$$\Delta M = 0.67 \frac{v_m}{\sqrt{f_{ck}}} (M_f - M_m) \left( \frac{\psi_i - \psi_y}{\psi_f - \psi_y} \right)^\omega \quad (22)$$

여기서,  $M_f, M_m$ =단조가력곡선에서 파괴시의 모멘트와 최대모멘트,  $\psi_i, \psi_y, \psi_f$ =단조가력곡선에서 항복시의 곡률, 파괴시의 곡률,  $i$  단계에서의 곡률을 나타냄. 또한, 김윤일<sup>1)</sup>의 실험결과로부터, 이전 싸이클에서 경험한 최대변위에 도달한 이후에, 변형경화강성과 유사한 기울기로 강성이 변하는 것으로 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 소성힌지가 이동된 실험체의 경우, 확연하게 나타남을 알 수 있다.

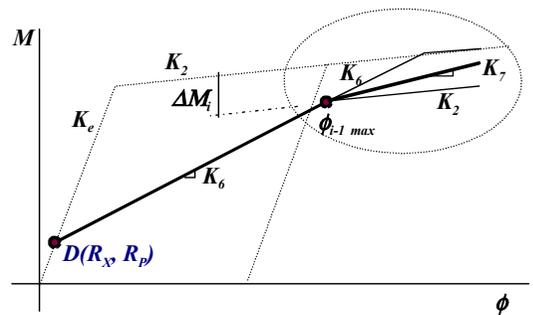


Fig. 7 재하시의 강도저하 및 강성변화

따라서, 이러한 특성을 반영하여  $K_2$ (변형경화 강성)보다는 크고,  $K_6$ (재하강성)보다는 작은  $K_7$ 강성을 도입하여 Eq. (23)에 나타내었다.

$$K_7 = \zeta K_6 \quad (23)$$

여기서,

$$\frac{K_2}{K_6} \leq \zeta \leq 1 \text{ 로서, 본 연구에서는 최소값을 적용.}$$

#### 4. 해석모델의 평가

##### 4.1 해석대상 실험체

해석대상 실험체는 김윤일<sup>1)</sup>에 의해 연구된 실험체로서, 소성힌지가 기둥면에 발생한 일반적인 실험체(C25), 소성힌지가 중간철근으로 보 내부로 이동되어 형성된 실험체(IM25, IM34)이다. 각 실험체는 모두 다 켈틸레버형 외부 기둥-보 접합부 실험체로서, 원형으로 실험되었다. 실험체에 도입된 변위하중은 연성비별 4사이클을 기본으로 하였으며, 부재가 완전히 파괴될 때까지 수행되었다. Table 1은 해석대상 실험체를 나타낸다.

Table 1 해석대상 실험체 일람

Specimen name	$a/d$	$v_m/\sqrt{f_{ck}}$	$D_s$	Location of plastic hinge
C25	2.57	5.05	0.27	Column face
IM25	2.57	5.30	0.16	1d from column face
IM34	2.57	3.98	0.26	1d from column face

#### 4.2 해석결과와 실험결과의 비교

각 실험체의 해석결과를 실험결과와 비교하여 나타내면 Fig. 9~Fig. 11과 같다. 실험결과와 해석결과의 비교에서 C25 실험체에서는 하중반전 후의 강성이 실험결과에 비하여 해석결과가 다소 높게 나타났지만 전반적으로 볼 때 실험결과와 해석결과가 잘 대응되고 있는 것을 알 수 있다. 모든 실험체에 대해서 실험결과와 해석결과의 에너지 소산면적의 차이는 20%이내로 나타났다.

#### 5. 결론

- 1) 소성힌지부를 유한한 소성역으로 치환하고 소성힌지부의 발생위치를 고려한 이력모델을 이용할 경우, 중간철근으로 소성힌지부가 보 내측으로 이동된 부재의 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

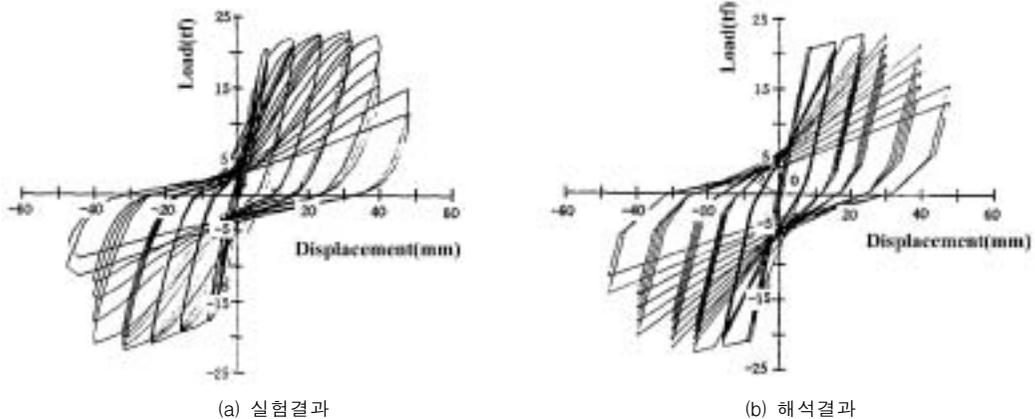
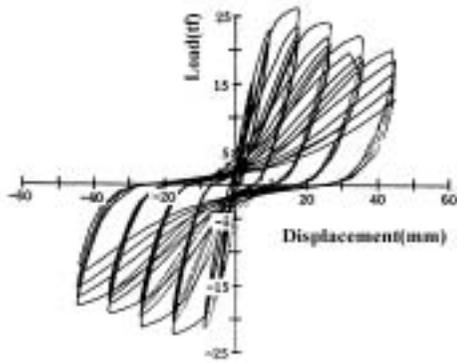
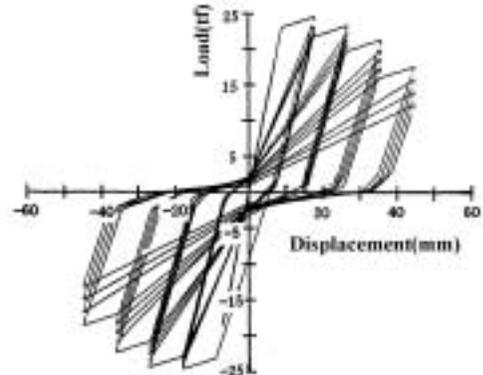


Fig. 9 C25 실험체의 해석결과 비교

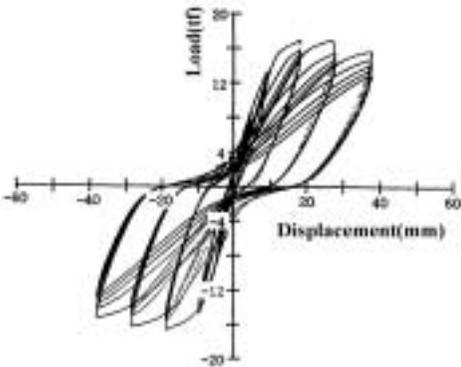


(a) 실험결과

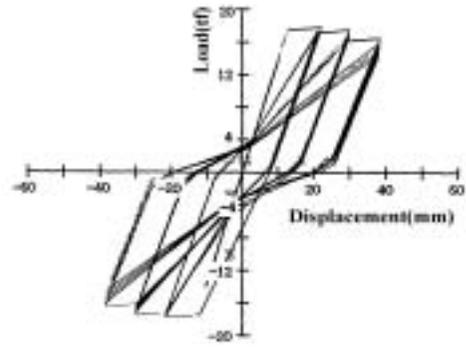


(b) 해석결과

Fig. 10 IM25 실험체의 해석결과 비교



(a) 실험결과



(b) 해석결과

Fig. 11 IM34 실험체의 해석결과 비교

- 2) 소성힌지부가 보내측에 형성된 경우, 이 힌지를 모멘트의 크기에 따라 기동면으로 확대되는 것으로 이상화함으로써 소성힌지의 발생위치와 확산을 고려한 강성매트릭스를 구축할 수 있다.
- 3) 보다 확장된 연구를 통하여 이동된 소성힌지를 보유한 골조건물의 비선형응답특성을 평가할 수 있는 해석모델의 구축이 필요한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 초대형구조시스템연구센터의 연구비 지원에 의한 연구의 일부

로서, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 김윤일, "반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 이력거동", 한양대 대학원 박사학위 논문, 1989. 12.
2. 서수연, "반복하중을 받는 철근콘크리트부재의 이력거동 해석", 한양대학교 석사학위논문, 1990. 6.
3. Meyer, C., Roufaiel, M., Analysis of Damaged Concrete Frames for Cyclic Loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, 1983, pp.207-2285. Clough, R. W., and Benuska, K. L., Nonlinear Earthquake Behavior of Tall Building, Journal of Engineering Mechanics

- 
- Division, ASCE, Vol.93, No.EM3, June, 1967, pp.129-148.
4. Chung, Y. S., Meyer, C., and Shinozuka, M., Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members Report No. NCEER 87-0022, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Columbia, New York, Oct. 1987.
  5. Clough, R. W., and Benuska, K. L., Nonlinear Earthquake Behavior of Tall Building, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.93, No.EM3, June, 1967, pp.129-148
  6. Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielson, N. N., "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes", Journal of Structural Engineering Division, ASCE, Vol.96, No.ST7, Dec. 1970, pp.2557-2573.
  7. Bahjat, A. A., Wight, G. K., "Experimental Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resistant Design of R/C Buildings", Report No. UMCE 85-11 Department of Civil Engineering, Univ. of Michigan Ann Arbor, MI, De. 1985.

(접수일자 : 2002년 6월 10일)