



## 내부 구속 중공 RC 기둥의 거동 특성

한택희<sup>1)</sup> · 원덕희<sup>2)</sup> · 이규세<sup>3)</sup> · 강영종<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울메트로 기술연구소 <sup>2)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 <sup>3)</sup>선문대학교 토목공학과

## Behavior of Internally Confined Hollow RC Columns

Taek-Hee Han,<sup>1)\*</sup> Deok-Hee Won,<sup>2)</sup> Gyu-Sei Yi,<sup>3)</sup> and Young-Jong Kang<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>R&D Center, Seoul Metro, Seoul 137-819, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Engineering, Sunmoon University, Asan 336-708, Korea

**ABSTRACT** A nonlinear column model of an internally confined hollow (ICH) reinforced concrete (RC) column was suggested and a parametric study was performed. The suggested column model considered the confining effect and the material nonlinearity of concrete. To verify the suggested column model, its analysis results were compared with the test results from previous researchers and a quasi static test performed in this study. They showed that the suggested column model was reasonable and had acceptable accuracy. The results from parametric studies showed that the thickness of the internal tube, concrete strength, and the hollow ratio of the ICH RC column affected its behavior.

**Keywords :** column, composite, nonlinear, hollow, confining effect

### 1. 서 론

현재 철근콘크리트(reinforced concrete; RC) 기둥은 가장 널리 시공되고 있는 기둥이며, 자중의 감소 및 재료의 절감을 위해 중공 RC 기둥 또한 널리 시공되고 있다. 중공 RC 기둥은 효율적인 단면특성을 갖고 있으나, 외측 면의 콘크리트는 횡철근으로 구속되는 반면에, 중공면의 콘크리트에는 구속력이 제공되지 않기 때문에 중공면에서 취성파괴가 발생할 수 있다. 또한, 중공면 안쪽의 콘크리트에 대한 구속응력의 부재는 중공 RC 기둥내의 콘크리트를 2축 구속 상태로 만들게 된다. 구속된 콘크리트는 비구속된 콘크리트에 비해 향상된 강도와 연성을 발휘하기 때문에 지속적으로 연구되어 왔다. 많은 연구자들<sup>1-7)</sup>에 의해, 구속된 콘크리트의 단면에 따라 강도와 연성에 대해 여러 가지 서로 다른 해석 모델이 제시되었으며, 응력-변형률 관계에 대한 경험식도 큰 차이를 보이고 있다. 이후, Mander 등<sup>8)</sup>에 의해서 구형단면과 원형단면의 콘크리트에 모두 적용 가능한 응력-변형률 관계를 정의할 수 있는 통합모델이 제안되었다.

이러한 기존 연구들은 RC 기둥의 외측 면을 구속하는데 초점이 맞춰져 있으며, 중실 RC 기둥에 3축 구속력을 제공하는 데에는 효과적이다. 하지만, 중공 RC 기둥

내의 콘크리트는 2축 구속되어 있으므로 기존의 연구와 같이 구속력을 제공하는 것이 큰 효과를 발휘하지 못한다. 따라서 중공 RC 기둥 내의 콘크리트를 3축 구속하기 위해서는 기둥 안쪽 면으로부터 작용하는 구속력이 필요하다. 이러한 문제의 해결을 위해, 한택희 등<sup>9)</sup>은 Fig. 1 과 같이 중공 RC 기둥의 중공면에 강관을 삽입하여 콘크리트에 3축 구속응력을 제공하는 합성 기둥을 제안하고 내부구속효과를 실험적으로 검증하였으며, Mander 등<sup>8)</sup>이 제안한 콘크리트 통합 재료 모델을 이용하여 원형단면을 갖는 내부 구속 중공 RC 기둥(internally confined hollow RC column, 이하 'ICH RC 기둥'이라 함)의 파괴모드와 비선형 재료모델을 제안하였다.<sup>10)</sup> 이러한 연구를 통하여, ICH RC 기둥의 성능발휘를 위해서는 기둥의 파괴 시까지 콘크리트의 3축 구속 상태를 유지하는 것이 중요함이 확인되었다. 이후, 중공 RC 기둥의 콘크리트를 3축 구속하기 위해, 강관이나<sup>11)</sup> 파형강관<sup>12)</sup>을 기둥의 내부에 삽입하여 내부 구속력을 제공하는 ICH RC 기둥이 개발되고, 거동 특성에 대한 실험적 연구가 수행되었으며, 강관이 삽입된 ICH RC 기둥이 우수한 모멘트 저항 능력을 갖고 있음을 보여주었다. 이 연구에서는 한택희 등<sup>10)</sup>에 의해 제안된 콘크리트 재료 모델을 이용하여, ICH RC 기둥의 해석 모델을 개발하고 실험을 수행하였으며, 선행 연구자의 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 제안된 해석 모델을 검증하였다. 또한, 매개변수 연구를 통하여 강관의 두께와 콘크리트의 강도, 중공비 등이 ICH RC 기둥의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

\*Corresponding author E-mail: yjkang@korea.ac.kr

Received April 20, 2009, Revised May 28, 2009

Accepted August 18, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

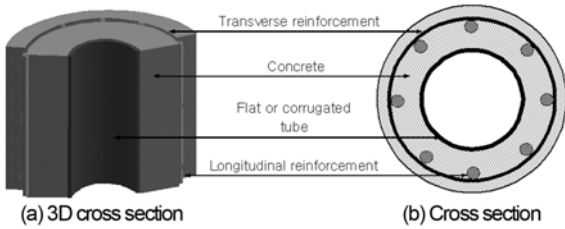


Fig. 1 Cross section of a circular ICH RC column

## 2. 재료 모델

### 2.1 ICH RC 기둥의 파괴 모드

#### 2.1.1 ICH RC 기둥 내의 평형방정식

중공 RC 기둥에 관이 삽입되어 내부 구속되면, 부재내의 콘크리트는 내부 관이나 외측 횡철근이 파괴되기 전까지는 3축 구속 상태로 존재하게 된다. 내부 구속 중공 RC 기둥에서 내부 관의 항복 또는 좌굴파괴와 외측 횡철근의 항복 파괴를 고려한다면 세 가지의 파괴 모드를 가정할 수 있다.<sup>10)</sup> 첫 번째 파괴모드는 횡철근의 항복 이전에 내부 관이 좌굴되거나 항복되어 파괴되는 경우이며, 두 번째 파괴모드는 내부 관의 파괴 이전에 횡철근이 먼저 항복하여 파괴되는 경우이다. 세 번째 파괴모드는 횡철근과 내부 관이 동시에 파괴되는 경우를 생각할 수 있다. 첫 번째 파괴모드에서 콘크리트는 내부 관의 파괴 전까지 완전히 구속된다. 하지만, 내부 관의 파괴 이후에는 내부의 관이 더 이상의 구속력을 제공하지 못하여 콘크리트는 2축 구속 상태가 되며, 이후 추가적인 하중에 의해 횡철근이 파괴되면서 기둥의 파괴가 이루어진다. 이는 중공 RC 기둥에서의 콘크리트와 같은 응력상태이다. Fig. 2는 콘크리트 부분에만 축하중을 받는 ICH RC 기둥의 자유물체도를 보여주며, 내부 관의 파괴 전과 후의 구속응력은 식 (1)과 같은 상태로 나타낼 수 있다.

$$f_{lc} \neq 0, f_{lr} \neq 0; \text{ 내부 관 파괴 이전} \quad (1a)$$

$$f_{lr} = 0, f_{lc} \neq 0; \text{ 내부 관 파괴 이후} \quad (1b)$$

두 번째 파괴모드에서, 콘크리트는 횡철근이 항복하여 부재가 파괴되기 전까지는 완전히 구속된다. 이러한 파괴 모드에서 부재의 파괴는 횡철근의 항복에 의해 결정된다. 횡철근의 파괴 이전까지 콘크리트는 완전히 구속되므로, 이 경우의 콘크리트는 중실 RC 기둥내의 콘크

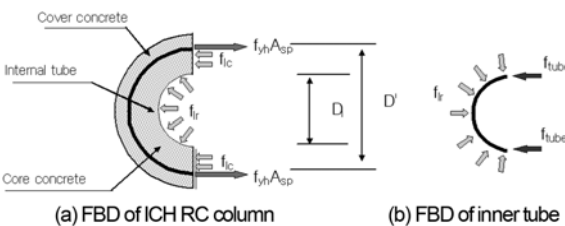


Fig. 2 Confining stress on concrete in an ICH RC column

리트와 동일한 거동을 보이게 된다. 이 경우에서의 구속응력은 식 (1a)와 같이 나타내어진다. 세 번째 파괴모드는 두 번째 파괴 모드와 동일하게 가정할 수 있다. 두 번째, 또는 동시에 세 번째의 파괴모드와 같이 내부 관의 파괴 이전에 횡철근이 파괴될 때의 평형방정식은 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 여기서  $f_c$ 는 콘크리트에 작용하는 구속응력,  $f_{yh}$ 는 횡철근의 항복 강도,  $f_{tube}$ 는 내부 관에 작용하는 응력,  $t$ 는 내부 관의 두께이다.

$$\{f_c(D' - D_i) + 2f_{tube}t\}s = 2f_{yh}A_{sp} \quad (2)$$

ICH RC 기둥의 첫 번째 파괴모드에서, 콘크리트는 내부 관이 파괴될 때까지 3축으로 구속되며, 내부 관의 파괴 이후에는 구속력을 제공하지 못한다고 가정한다. 따라서 내부 관의 파괴 이후에는 콘크리트는 2축 구속 상태가 된다. 두 번째 파괴 모드에서는, 횡철근의 항복파괴로 인해 더 이상의 구속응력을 제공하지 못하여, 기둥이 파괴되기 이전까지 콘크리트는 완전한 3축 구속 상태를 유지한다고 가정된다. 따라서 ICH RC 기둥의 전체 파괴는 횡철근의 항복에 의존한다. 세 번째 파괴모드는 두 번째 파괴모드와 유사한 양상을 보인다. 내부 관의 파괴 이전에는, Fig. 2(a) 및 식 (2)로부터 콘크리트에 작용하는 구속응력을 식 (3)과 같이 유도할 수 있다. Fig. 2(b)로부터, 내부 관에 작용하는 응력은 식 (4)와 같이 유도된다. 따라서 유도된 구속응력은 중실 RC 기둥에서의 구속응력과 동일한 값을 갖는다. 내부 관의 파괴 이후에 콘크리트는 2축 구속되며, 중공 RC 기둥에서와 같은 상태가 된다. 이 경우에, 원주방향의 구속응력( $f_{lc}$ )은 존재하나, 방사방향의 구속응력( $f_{lr}$ )은 존재하지 않는다고 가정된 식 (1b)를 적용하여, 식 (5)와 같이 유도된다.

$$f_l = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's} \quad (3)$$

$$f_{tube} = \frac{f_l D_i}{2t} \quad (4)$$

$$f_{lc} = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{(D' - D_i)s} \quad (5)$$

ICH RC 기둥에서 콘크리트에 작용하는 구속응력은 내부 관이 파괴되기 전까지는 중실 RC 부재에서 작용하는 구속응력과 동일하며, 내부 관이 파괴된 이후에는 내부 구속력이 존재하지 않게 되어, 중공 RC 부재에서의 구속응력과 같은 구속응력을 갖게 된다. 따라서 내부 관에 작용하는 응력을 산정하여, 내부 관의 파괴 유무를 판별함으로써 ICH RC 기둥의 파괴 모드를 예측할 수 있다. 식 (6)은 ICH RC 기둥의 파괴 모드를 판별할 수 있는 기준을 나타내고 있다. 이러한 식을 이용하여 ICH RC 기둥의 파괴 모드를 판별하기 위해서는 먼저 내부

관의 좌굴강도와 항복강도의 계산이 이루어져야 한다.

$$f_{tube} > f_{lim} = \text{smaller}(f_{yp}, f_{bk}) : \text{파괴 모드 1} \quad (6a)$$

$$f_{tube} < f_{lim} = \text{smaller}(f_{yp}, f_{bk}) : \text{파괴 모드 2} \quad (6b)$$

$$f_{tube} = f_{lim} = \text{smaller}(f_{yp}, f_{bk}) : \text{파괴 모드 3} \quad (6c)$$

### 2.1.2 내부 관의 항복 파괴 조건

관의 항복강도와 좌굴강도에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 관의 두께이므로, ICH RC 기둥의 내부 관 두께를 조절함으로써, 원하는 기둥의 파괴 모드를 유도할 수 있다. 내부 관의 항복 조건은 식 (3)과 (4)로부터 식 (7)과 같이 유도할 수 있다. 내부 관의 항복 이전에 횡철근의 파괴를 유도하기 위해서는, 내부 관에 작용하는 응력이 내부 관의 항복응력( $f_{yt}$ )보다 작아야 한다. 식 (7)과 같은 조건에 따라, 내부 관의 최소두께에 대한 요구조건은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 내부 관이 식 (8)의 조건을 만족한다면, 내부 관의 항복파괴 보다 횡철근의 항복이 먼저 발생한다.<sup>10)</sup>

$$f_{tube} = \frac{D_i \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s \cdot t} < f_{yt} \quad (7)$$

$$t > \frac{D_i \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s \cdot f_{yt}} = t_{yt} \quad (8)$$

### 2.1.3 내부 관의 좌굴 파괴 조건

ICH RC 기둥의 내부 관은 콘크리트에 의해 일방향으로 변위가 구속되어 있는 상태(unilaterally restrained)이다. 기존 연구에서는<sup>10)</sup> 내부 관의 좌굴 형상을 낮은 아치의 snap-through 좌굴 형상으로 가정하여 식 (9)와 같이 내부 관의 좌굴강도( $f_{bk}$ )를 산정하였으며, 식 (4)와 (9)를 적용하여( $f_{bk} > f_{tube}$ ), 내부 관의 조기 파괴를 방지하기 위한 내부 관의 최소두께에 대한 조건을 식 (10)과 같이 제안하였다. 파형관을 내부 관으로 사용하였을 때에는 Timoshenko와 Woinowsky-Krieger<sup>13)</sup>의 연구를 적용하여, 식 (11)과 같이 등가 두께( $t_{eq}$ )로 나타내었다.

$$f_{bk} = \frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} \quad (9)$$

$$t > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_{yh} A_{sp}}{D' E s}} = t_{bk} \quad (10)$$

$$t_{eq} = \sqrt[3]{6 \omega_f^2 t \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \left( \frac{\omega_f}{2 \omega_l} \right)^2} \right]} \quad (11)$$

### 2.1.4 응력-변형률 관계

Mander 등<sup>8)</sup>이 제안한 콘크리트 모델은 식 (12)와 같은 Popovics<sup>14)</sup>의 제안 모델에 기초하고 있으며, 이 모델은 일정 구속 압력에 기초하고 있으며, 이 모델에서의 종국 파괴는 횡철근이 극한변형률에 도달하여 파괴되는 시점이다.

$$f_c = \frac{f_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (12)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \quad (13)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (14)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (15)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{cc}} \quad [\text{MPa}] \quad (16)$$

3축 구속된 콘크리트에 대해서, 콘크리트의 최대 강도( $f_{cc}$ )는 식 (17)에 의해 계산되며,<sup>8)</sup> 2축 구속된 콘크리트의 최대 강도는 식 (18)에 의해 계산된다.<sup>10)</sup> 최대 강도를 발휘할 때의 변형률( $\varepsilon_{cc}$ )은 식 (19)에 의해 계산된다.<sup>8)</sup> 식 (19)에서  $\varepsilon_{co}$ 의 값으로는 0.002를 적용하였다. RC 기둥에서, 횡철근은 전체 콘크리트를 완전히 구속하지 못하므로, 콘크리트의 구속응력( $f$ )은 유효구속응력( $f'$ )으로 치환하여 계산하여야 한다. 이는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 감소계수( $k_e$ )의 값은 원형 후프철근의 값인 0.95를 적용하였다.<sup>8)</sup>

$$f_{cc} = f_{co} \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f_{co}}} - \frac{2 f'_l}{f_{co}} - 1.254 \right) \quad (17)$$

$$f_{cc} = -2.75 \frac{f_l'^2}{f_{co}} + 1.835 f'_l + f_{co} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

$$f'_l = k_e \cdot f_l \quad (20)$$

## 3. 기둥 모델

ICH RC 기둥의 거동을 예측하기 위하여, 앞에서 기술된 제안된 콘크리트 모델<sup>8,10)</sup>을 이용하여 기둥 해석 모델을 개발하였다. 개발된 해석 모델은 축력-모멘트 상관관계 해석 및 횡하중-횡변위 해석을 수행하도록 작성되었다. 이 해석 모델에서는 내부 관과 콘크리트가 완전 합성되었다고 가정되었으며, 기둥의 단면을 층별로 해석하

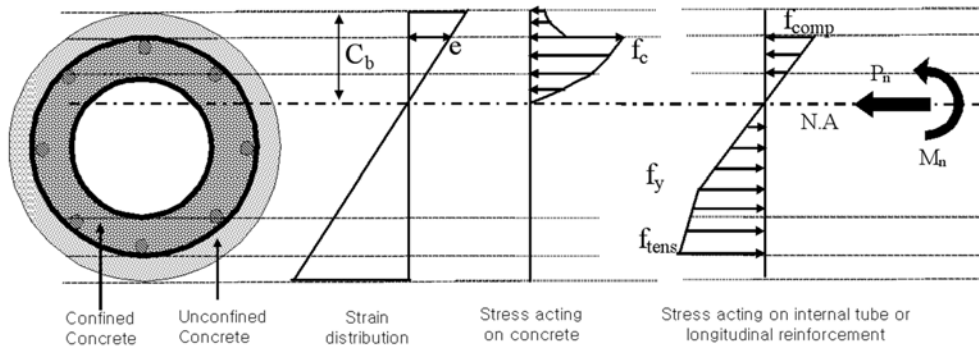


Fig. 3 Section analysis using strain compatibility and layer-by-layer approach

여 적분하는 방법인 단면해석(section-analysis)이 이용되었다.<sup>15)</sup> 해석 모델은 구속효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 두 가지 경우 및 내부 관이나 횡철근에 대해 적용되는 강재에 대해 비선형(nonlinear) 거동과 탄소성(elastoplastic) 거동을 모두 고려할 수 있도록 개발되었다.

Fig. 3에 이상화된 단면해석 개요를 나타내었으며, Figs. 4와 5는 적용된 콘크리트와 강재의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 강재의 응력-변형률 관계는 식 (21)과 같이 표현하였다. 해석은 Fig. 6과 같이 변형률 분포 단계에 따라 이루어진다. 각각의 변형률 분포 단계에서 콘크리트, 종방향 철근 및 내부 관에 작용하는 각각의 응력이 계

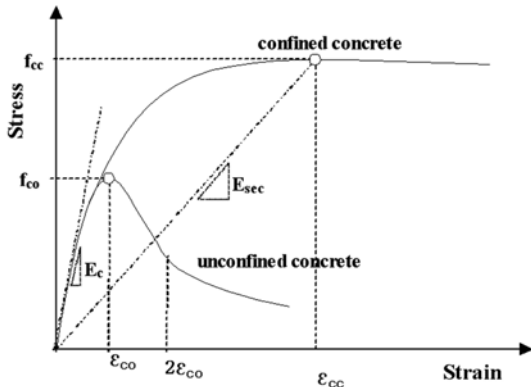


Fig. 4 Stress-strain relation of concrete

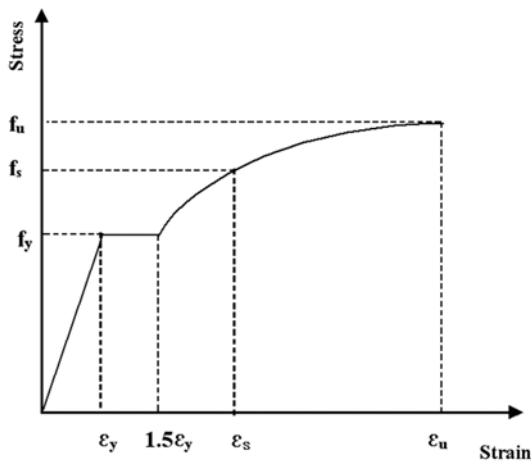


Fig. 5 Stress-strain relation of steel

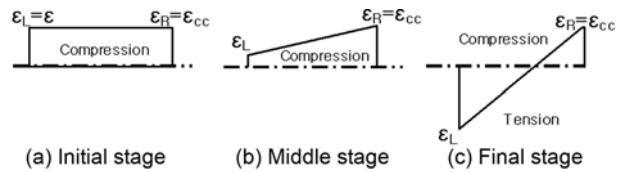


Fig. 6 Stages of strain distribution

산되며, 계산된 결과를 합산하여 식 (22)~(24)와 같이 해당하는 변형률 분포에서 기둥에 작용하는 축력(\$P\_j\$), 모멘트(\$M\_j\$) 및 곡률(\$\phi\_j\$)을 산출한다.

$$f_s = f_y + \frac{f_u - f_y}{\sqrt{\epsilon_u - 1.5\epsilon_y}} \sqrt{\epsilon_s - 1.5\epsilon_y} \quad (21)$$

$$P_j = P_j^{CC} + P_j^{CV} + P_j^R + P_j^T \quad (22)$$

$$M_j = M_j^{CC} + M_j^{CV} + M_j^R + M_j^T \quad (23)$$

$$\phi_j = \frac{\epsilon_{cc}}{C_{b,j}} \quad (24)$$

횡력과 횡변위는 각각의 변형률 분포 단계에서 계산된 모멘트와 곡률로부터 산출될 수 있다. 횡력의 경우에는 식 (25)와 같이 산출된다. 기둥의 높이에 따른 곡률의 분포는 Fig. 7에서와 같이, 소성힌지 부분은 각 변형률 분

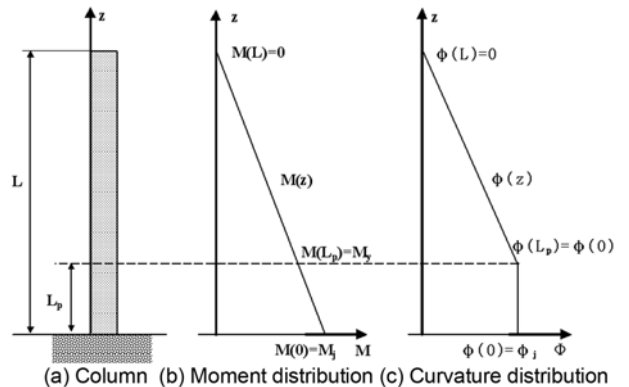


Fig. 7 Curvature distribution

포 단계에서 계산된 곡률( $\phi_j$ )을 유지하고 그 이후에는 선형으로 감소하여 기둥 최상단의 곡률은 0이 된다고 가정하였다. 기둥의 높이에 따른 곡률함수( $\phi(z)$ )는 식 (26)과 같이 표현된다. 소성힌지의 길이( $L_p$ )는 Fig. 7에서의 모멘트 분포를 가정하여, 항복모멘트( $M_j$ ) 이상의 모멘트가 작용하는 구간으로 설정하였다.

$$F_{L,j} = \frac{M_j}{L} \quad (25)$$

$$\phi(z) = \phi_j: \text{when } 0 \leq z \leq L_p \quad (26b)$$

$$\phi(z) = \phi_j + \frac{\phi_j}{L-L_p}(z-L_p) : \text{when } z > L_p \quad (26b)$$

곡률과 변위의 관계는 Fig. 8과 같이 가정하여 계산하였다. Fig. 8에서와 같이 기둥을 높이에 따라  $n$ 개의 요소로 분할하고, 각각의 요소의 길이를  $S_{j,i}$ 라 하고,  $i$ 번째 요소의 곡률에 의한 순수 회전각을  $\theta_{j,i}$ 라 정의하였다. 따라서  $i$ 번째 요소의 실제 회전각은 전단계의 회전각 값이 누적되어  $i$ 번째 요소까지의 누적 회전각이 되며, 이로부터 각각의 요소에 대한 변위  $\Delta_{j,i}$ 를 구할 수 있으며,  $j$ 번째 변형률 단계에서의 기둥 최상단의 변위( $\Delta_j$ )는 각 요소 변위의 합으로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면, 식 (27)과 (28)로 나타낼 수 있다. 또한 초기 축력을 응력으로 변환한 후, 이에 상응하는 초기 변형률을 갖도록 하는 방법으로 초기 축력의 영향을 고려하였다. 해석시, 횡철근, 종방향 철근 또는 콘크리트의 변형률 중 하나가 각각의 극한변형률에 도달하는 경우를 기둥 파괴로 판단하고, 해석을 종료하도록 하였다. 또한 피복 콘크리트의 경우, 콘크리트의 극한변형률을 초과하더라도 응력이 0이 되지 않고, 식 (12)의 재료 관계식을 따라 응력이 계산되도록 설정하였다.

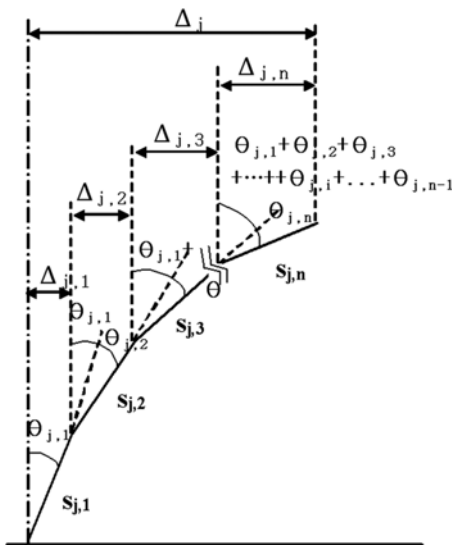


Fig. 8 Calculating method of displacement

$$\theta_{j,i} = \phi(z) \cdot S_{j,i} \quad (27)$$

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^n \Delta_{j,i} = \sum_{i=1}^n \left( S_{j,i} \sum_{k=1}^i \theta_{j,k} \right) \quad (28)$$

#### 4. 실험 및 해석 프로그램의 검증

개발된 ICH RC 기둥 해석 프로그램의 검증을 실시하였다. 검증 대상은 일반적인 중실 RC 기둥(solid RC), 일반 강관을 삽입한 중공 RC 기둥(ICH RC-ST), 파형강관을 삽입한 중공 RC 기둥(ICH RC-CT)과 강관이 아닌 PVC 관을 삽입한 중공 RC 기둥(ICH RC-PVC)의 네 가지 종류의 기둥에 대해 검증하였다. 이 중, Solid RC 기둥, ICH RC-ST 기둥, ICH RC-CT 기둥의 경우에는 기존 연구자의 실험 결과<sup>11,12)</sup>와 비교하여 검증하였으며, ICH RC-PVC 기둥의 경우에는 직접 실험을 수행하여, 결과를 비교하였다.

##### 4.1 검증 대상 기둥의 제원

이 연구에서 실험이 수행된 ICH-PVC 기둥의 경우, 기존 연구자<sup>11,12)</sup>의 실험에서 사용된 기둥 시험체와 동일한 제원을 갖도록 설계하고 동일한 하중조건에 실험을 수행하였다. 기존연구<sup>11,12)</sup>와 이 연구에서 실험된 시험체의 외경은 700 mm, 피복 콘크리트의 두께는 40 mm, 기초 상단으로부터 가력점까지의 높이는 2,650 mm이다. 직경 13 mm의 이형철근을 횡철근으로 사용하였으며, 소성힌지 구간에서는 66.7 mm의 간격으로 배근하여 1.334%의 횡철근을 가지며, 이는 콘크리트구조설계기준<sup>16)</sup>에서 제시하는 기준을 만족한다. 이외의 구간에서는 200 mm의 간격으로 배치하였다. 19 mm 직경의 이형철근을 1.33%의 철근비를 갖도록 하여 종방향 철근으로 사용하였으며, ICH RC기둥 시험체의 중공직경은 406.4 mm이다. 따라서 ICH RC 기둥 시험체에는 12개의 종방향 철근을 배근하였고, solid RC 기둥 시험체에는 16개의 종방향 철근을 배근하였다. 각각의 ICH RC 시험체에는 두께 9 mm의 일반 강관(ICH RC-ST), 두께 2 mm의 파형강관(ICH RC-CT), 두께 13 mm의 PVC관(ICH RC-PVC)이 삽입되었다. 파형강관의 경우 13 mm의 파고, 17.5 mm의 파경(wave radius)과 68 mm의 반주기(pitching wave)를 갖는다. 모든 시험체에 타설된 콘크리트의 28일 강도는 3개의 공시체에 대하여, 21.66 MPa, 21.23 MPa, 22.28 MPa로 측정되었으며, 평균값인 21.72 MPa를 적용하였다. Fig. 9는 검증 대상 기둥의 제원을 보여주며, 사용된 재료의 성질을 Table 1에 나타내었다.

내부 관의 최소 두께에 대한 식 (8)과 (10)에 의해 계산된 각 내부 관의 최소 요구 두께는, 일반 강관은(ICH RC-ST) 1.28 mm, 파형강관(ICH RC-CT)은 1.53 mm, PVC관(ICH RC-PVC)은 12.72 mm이다. 따라서 각 시험체는 모두 파괴모드 2를 가질 것으로 예측되었다. ICH RC-PVC

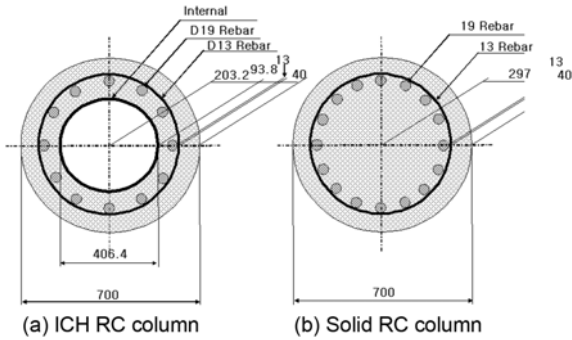


Fig. 9 Cross sectional dimension of designed column (mm)

Table 1 Material properties (unit : MPa)

	Yield strength	Ultimate strength	Modulus of elasticity
Longitudinal reinforcement	189.5	288.9	206,010
Transverse reinforcement	232.2	300.8	206,010
Flat steel tube <sup>(10)</sup>	378.2	588.6	206,010
Corrugated steel tube <sup>(11)</sup>	206.0	274.1	206,010
PVC tube	29.4	49.1	2,100

기둥은 예상되는 축강도의 10%인 534 kN의 일정 축력을 유지하면서 단계별로 drift level을 증가시키는 준적정 실험을 수행하였다. Fig. 10은 실험 시 적용된 하중재하 방법을 보여준다. ICH RC-PVC 기둥은 첫 번째 하중 사이클에서 front side(push 시 인장을 받는 면)에 5개의 수평균열이 발생하였고, rear side(push 시 압축을 받는 면)에도 마찬가지로 5개의 수평균열이 발생하였다. 이 후 추가적인 수평균열과 균열의 확대가 이루어 졌으며, drift level = ±3.0에서 피복 박리가 시작되었고, drift level = ±4.0에서부터 내측면의 콘크리트가 분리되는 듯 한 소리가 계속 발생하였다. 또한 drift level = ±5.0에서 피복 콘크리트 탈락이 시작되었으며, drift level = ±7.0에서 종방향 철근이 1개 파단되고, drift level = ±8.0과 drift level = ±9.0에서 종방향 철근이 각각 추가로 1개씩 파단되면서 실험이 종료되었다. Table 2에 실험 시 관찰된 사항을 정리하여 기록하였다.

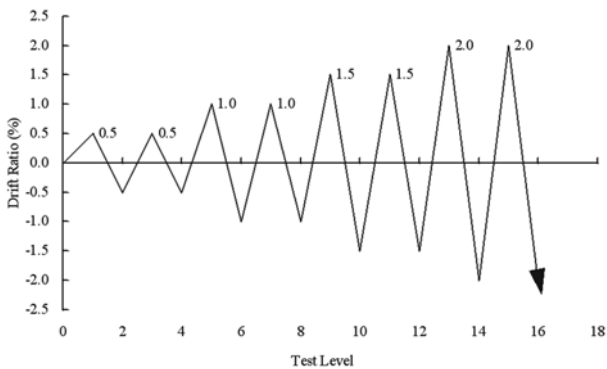


Fig. 10 Loading history

Table 2 Observations during column test

Test level	Drift ratio (%)	Observations
1	0.50	<b>Front side:</b> Horizontal cracks at 40, 90 cm <b>Left side:</b> Horizontal cracks at 30 cm <b>Right side:</b> Horizontal cracks at 40 cm
2	-0.50	<b>Rear side:</b> Horizontal cracks at 25, 40 cm <b>Left side:</b> Horizontal cracks at 60, 80 cm <b>Right side:</b> Horizontal cracks at 80 cm
3	1.00	<b>Front side:</b> Horizontal cracks at 120 cm. Propagation of the cracks. Diagonal cracks occurred.
4	-1.00	<b>Rear side:</b> Horizontal cracks at 120 cm. Propagation of the cracks.
5	1.50	<b>Front side:</b> Horizontal cracks at 10 cm. Propagation of the cracks.
6	-1.50	<b>Rear side:</b> Propagation of the cracks.
7	2.00	<b>Front side:</b> Horizontal cracks at 140 cm. Propagation of the cracks.
8	-2.00	<b>Rear side:</b> Propagation of the cracks.
9	3.00	<b>Front side:</b> Enlargement of the crack opening.
10	-3.00	<b>Rear side:</b> Enlargement of the crack opening. Spalling started.
11	4.00	<b>Front side:</b> Sound of decomposition of internal concrete.
12	-4.00	<b>Rear side:</b> Horizontal cracks at 20 cm. Propagation of the cracks.
13	5.00	<b>Front side:</b> Severe damage in the region of plastic hinge.
14	-5.00	<b>Rear side:</b> Severe damage in the region of plastic hinge. Spalling out of the cover concrete.
15	6.00	<b>Front side:</b> Propagation of the cracks. Crushing of cover concrete. Spalling out of the cover concrete.
16	-6.00	<b>Rear side:</b> Propagation of the cracks. Crushing of cover concrete. Spalling out of the cover concrete.
17	7.00	<b>Front side:</b> Propagation of the cracks. Crushing of cover concrete. Spalling out of the cover concrete.
18	-7.00	<b>Rear side:</b> Propagation of the cracks. Crushing of cover concrete. Failure of one longitudinal reinforcement
19	8.00	<b>Front side:</b> Propagation of the cracks. Crushing of cover concrete. Spalling out of the cover concrete.
20	-8.00	<b>Rear side:</b> Failure of one longitudinal reinforcement
21	9.00	<b>Front side:</b> Failure of one longitudinal reinforcement
22	-9.00	End of test

※Front side: pushing face  
Right side, left side: right and left faces of the pushing face

Fig. 11은 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우에, 개발 프로그램에 의해 해석된 각각의 기둥에 대한 축력-모멘트 상관도를 보여주며, Fig. 12는 ICH RC-PVC 기둥 시험체의 제작 및 실험, 실험 후의 파괴 장면을 보여준다.

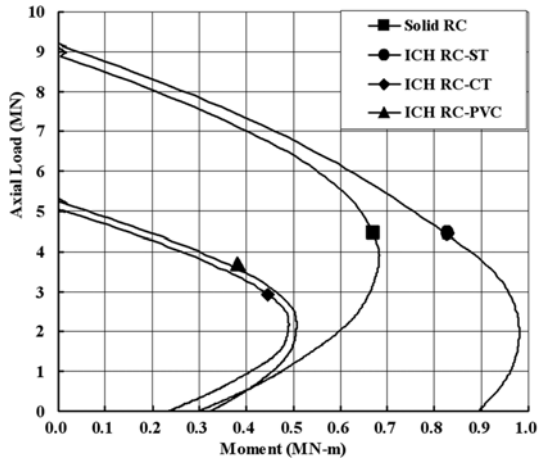


Fig. 11 Axial load-bending moment interaction curve

각 ICH RC 시험체는 모두 해석 결과에서 파괴모드 2를 가질 것으로 예측된 바와 같이, Fig. 13의 실험 결과에서도 항복 이후 구간에서 기둥의 최종 파괴 이전에 강도의 급격한 변화가 발생하지 않은 점을 고려할 때, 예측과 같이 모든 시험체가 파괴모드 2를 갖고 거동을 한 것으로 판단된다.

해석 결과에서, ICH RC-ST 기둥의 경우에는 삽입된 강관에 의해 휨강성이 크게 증가하여 solid RC 기둥보다 큰 휨모멘트에 저항하나, ICH RC-CT 기둥이나 ICH RC-PVC 기둥의 경우에는 삽입된 관의 두께가 얇고(ICH RC-CT), 재료의 탄성계수가 작아(ICH RC-PVC), 휨모멘트에 대한 저항성이 solid RC 기둥보다 작게 평가되었다. 각각의 기둥에 대한 실험 결과와 해석 결과를 Fig. 13과

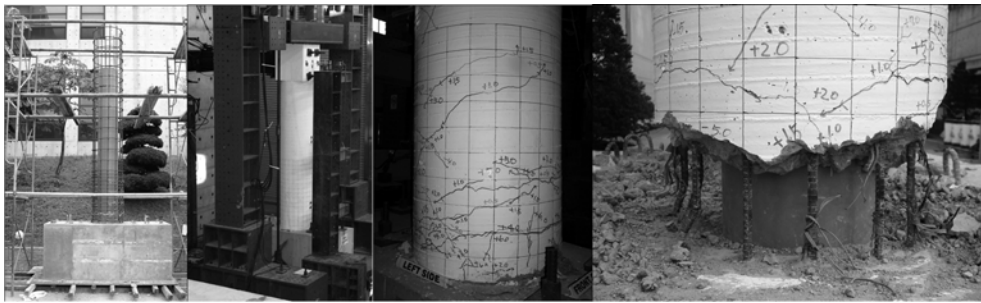


Fig. 12 Construction and test result of ICH RC-PVC column

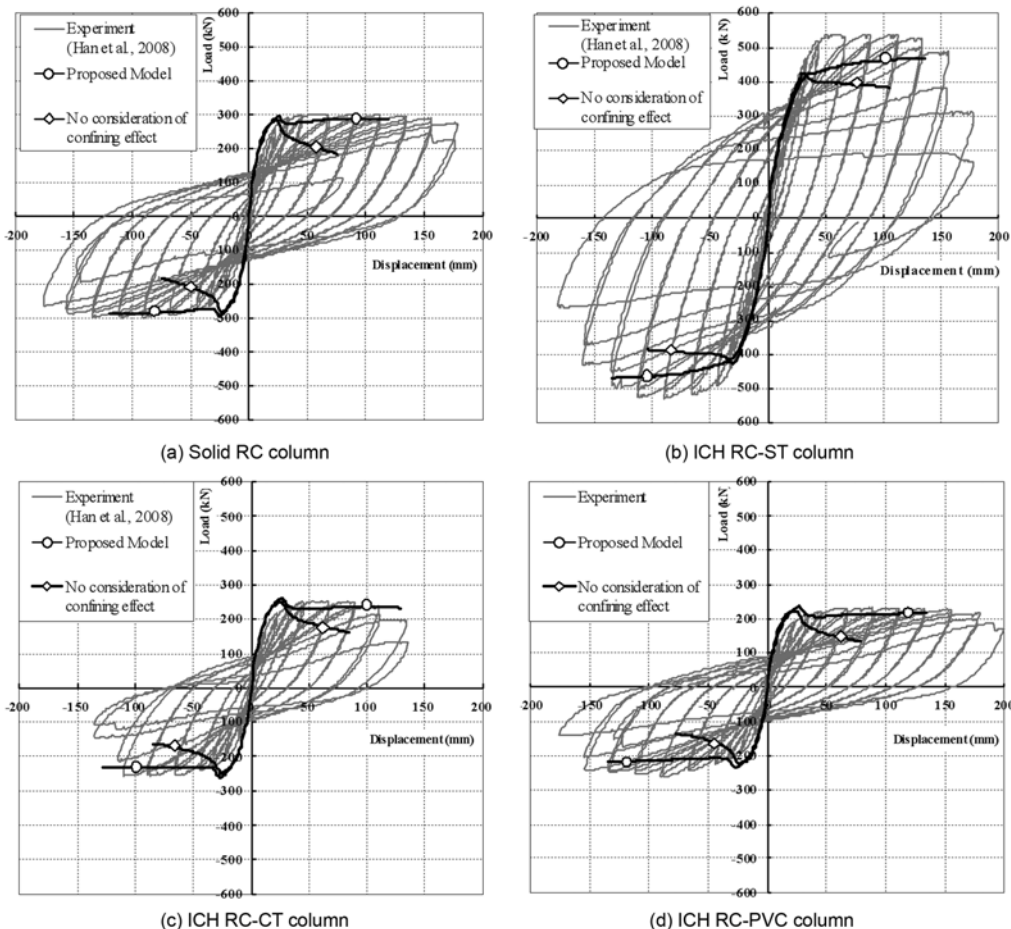


Fig. 13 Experimental and analytical results

Table 3에 나타내어 비교하였다. ICH RC-ST 기둥과 ICH RC PVC 기둥에 대해서는 각각 해석 결과가 실험 결과보다 강도를 각각 약 12%와 4% 작게 평가하는 결과를 보여 주었으며, ICH RC-CT, solid RC 기둥에 대해서는 각각 약 0.4%와 14% 크게 강도를 평가하였다. Fig. 13의 결과에서 나타난 바와 같이, 구속효과를 고려하지 않은 경우(no consideration of confining effect)에는 구속효과를 고려한 경우(proposed model)와 비교하였을 때, 기둥의 항복 이전에는 구속효과를 고려한 경우와 근사한 거동을 보이거나, 항복 이후에는 강도가 급격히 저하되는 경향을 보여, 구속효과를 고려한 경우나 실제 실험 결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 내부구속 중공 RC 기둥의 해석 시에는 반드시 콘크리트의 구속효과를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한 같은 직경과 중공비의 ICH RC 기둥이더라도 일반강관을 삽입한 ICH RC-ST 기둥이 PVC 관이 삽입된 ICH RC-PVC 기둥에 비해 약 2배 정도의 강도는 갖는 사실을 고려할 때, 삽입된 내부 강관의 종류에 따라 ICH RC 기둥의 거동이 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

기둥의 종국파괴가 발생하는 변위는 ICH RC-CT 기둥을 제외한 기둥에 대해, 해석 결과가 전체적으로 실험 결과보다 작게 평가되는 경향을 보여주었으며, Park<sup>17)</sup>에 의해 제안된 방법을 사용하여 각각의 실험체에 대한 극한변위를 계산하였을 경우에도 ICH RC-CT 기둥을 제외한 모든 실험체에 대해 해석 결과가 더 작은 값을 보여주었다.

Fig. 13에서 나타난 바와 같이, 콘크리트의 구속효과를 고려하지 않은 경우에는 고려한 경우보다 기둥의 강도와 최대변위가 작게 계산됨을 알 수 있다. 실험과 해석 결과에 따른 최대강도와 극한변위 값을 Table 3에 정리하였으며, 실험 결과와 해석 결과로부터 삽입된 내부 관의 종류에 따라 강도와 변위에 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 삽입된 3종류의 내부 관 모두, 내부 구속력을 충분히 제공하여 콘크리트를 3축 구속 상태로 만들어 주

고, 파괴모드 2를 유도하나, 각각의 기둥의 강성 차이에 의해 발생하는 것으로서 구속효과 이외에 부가적으로 기둥의 강성을 증가시키는 것으로 볼 수 있다. 따라서 외경의 확대 없이, 내부 강관의 강성을 조절하여 전체 기둥의 성능을 설계자의 의도에 따라 조절할 수 있음을 알 수 있다. 각각의 실험체에 대한 실험 결과와 해석 결과에 따라 계산된 에너지 연성도를 Table 4에 나타내었다. ICH RC-PVC 기둥의 경우, 극한에너지에 비해, 해석 결과의 항복에너지가 실험값보다 작게 계산되어, 실험 결과의 에너지 연성도 값보다 매우 큰 값을 가지나, 다른 실험체들의 에너지 연성도는 해석 결과와 실험 결과에 의해 계산된 값들이 근사한 값을 보이고 있다.

#### 4.2 매개변수 연구

개발된 해석프로그램을 이용하여 ICH RC 기둥에 대한 매개변수 연구를 수행하여, 각 매개변수에 따른 기둥의 거동 특성을 조사하였다. 매개변수로는 ICH RC 기둥의 거동에 영향을 주는 주요인자라고 생각되는 중공비, 내부 관의 두께, 콘크리트의 강도를 선정하여 해석을 수행하였다. 해석 대상 기둥의 제원과 재료의 성질을 Table 5에 정리하였다. 매개변수 연구에서는 초기축력은 작용하지 않는 것으로 가정하여 해석하였다. 내부강관의 두께를 변화시키는 경우(1~8 mm)에는 콘크리트의 강도와 중공비를 각각 25 MPa와 0.6으로 고정하여 해석을 수행하였으며, 중공비를 변화시키는 경우(0.5~0.7)에는 콘크리트의 강도와 내부강관의 두께를 25 MPa와 4 mm로 고정하여 해석을 수행하였다. 또한, 콘크리트의 강도를 변화시키는 경우(20~30 MPa)에는 중공비와 내부강관의 두께를 각각 0.6과 4 mm로 고정하여 해석을 수행하였다. Figs. 14~19는 매개변수 해석 결과를 보여준다.

Figs. 14와 15는 각각 내부강관의 두께변화에 따른 ICH RC 기둥의 축력-모멘트 상관도와 하중-변위 관계를 보여준다. 이 경우에 기둥을 파괴모드 2로 유도하기 위한

**Table 3** Maximum load and ultimate strength

Specimen	Maximum load (kN)			Ultimate displacement (mm)		
	Analysis	Experiment	Ratio (%)	Analysis	Experiment	Ratio (%)
ICH RC-ST	468.48	529.92	88.41	148.86	156.00	95.42
ICH RC-CT	261.09	229.10	113.96	141.11	129.00	109.39
ICH RC-PVC	235.87	246.00	95.88	146.90	157.00	93.57
Solid RC	296.09	294.83	100.43	119.49	176.78	67.59

**Table 4** Energy ductility ratio

Specimen	Experiment			Analysis		
	Ultimate energy (kN-m)	Yield energy (kN-m)	Ductility ratio	Ultimate energy (kN-m)	Yield energy (kN-m)	Ductility ratio
ICH RC-ST	70.65	8.986	7.86	61.40	8.03	7.65
ICH RC-CT	27.93	3.054	9.15	31.52	2.64	11.94
ICH RC-PVC	33.46	4.475	7.48	29.86	2.23	13.39
Solid RC	47.10	4.114	11.45	31.97	2.57	12.44



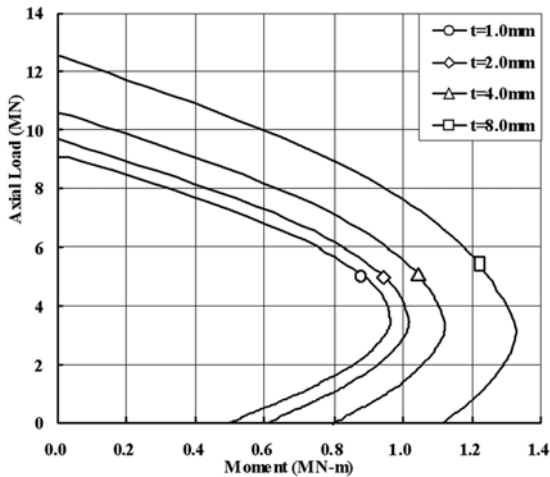
**Table 5** Geometry and material property

Geometric property		Material property	
Diameter of confined concrete	700 mm	Ultimate strength of internal tube	550 MPa
Height of column	4,000 mm	Ultimate strain of internal tube or reinforcement	0.16
Thickness of internal tube	1, 2, 4, 8 mm	Modulus of elasticity of internal tube or reinforcement	200,000 MPa
Diameter of longitudinal reinforcement	19 mm	Yield strength of internal tube	380 MPa
Diameter of hollow section	420, 490, 560 mm	Ultimate strength of longitudinal reinforcement	400 MPa
Thickness of cover concrete	40 mm	Yield strength of longitudinal reinforcement	300 MPa
Spacing of transverse reinforcement	150 mm	Yield strength of transverse reinforcement	300 MPa
Diameter of transverse reinforcement	12 mm	Strength of unconfined concrete	20, 25, 30 MPa

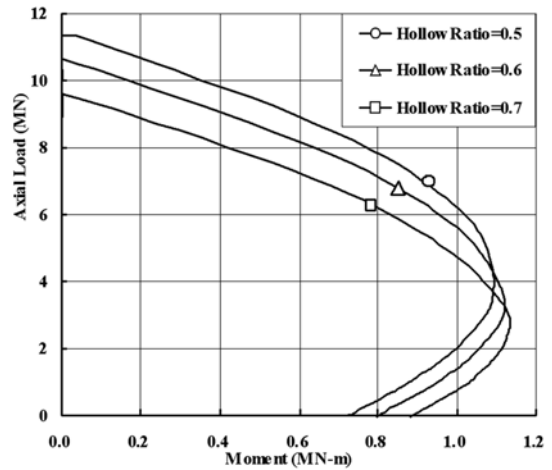
내부강관의 최소요구두께는 0.87 mm이며, 해석대상 기둥 모두 이 조건을 만족한다. Fig. 14에서와 같이, 동일한 중공비와 콘크리트 강도를 갖는 경우, 내부강관의 두께에 따라 기둥의 축강도와 모멘트 강도 모두 증가함을 알 수 있으며, 균형 상태에서의 축강도는 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15는 내부 강관의 두께가 증가함에 따라 기둥의 휨 저항력이 증가하는 경향을 보여주었다.

Figs. 16과 17은 중공비 변화에 따른 ICH RC-ST 기둥

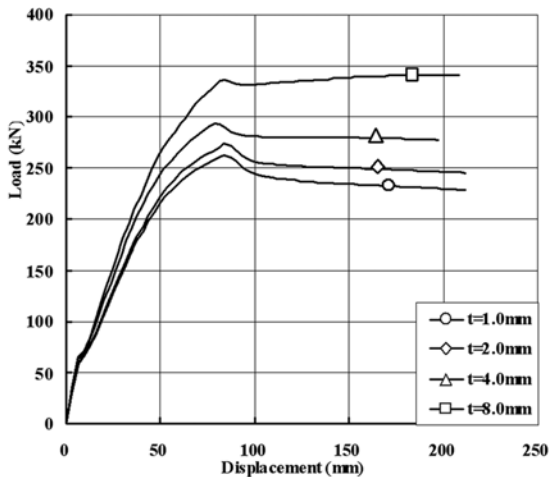
의 해석 결과이다. Fig. 16에서와 같이, ICH RC 기둥의 중공비가 증가함에 따라 축력에 주로 저항하는 콘크리트 부분의 면적이 감소하여, 기둥의 축강도가 저하된다. 하지만, 휨강도에 영향을 미치는 내부강관의 직경증가에 따라, 단면이차모멘트가 증가하여 휨강도가 증가하나, 증가율은 크지 않다. 이 경우에도 균형상태에서의 축강도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 감소율 또한 크다. Fig. 17에서와 같이, 중공비가 증가함에 따라 휨 저항력과 국한 변위가 모두 증가하였다. 하지만, 휨강도의 증가율이 크



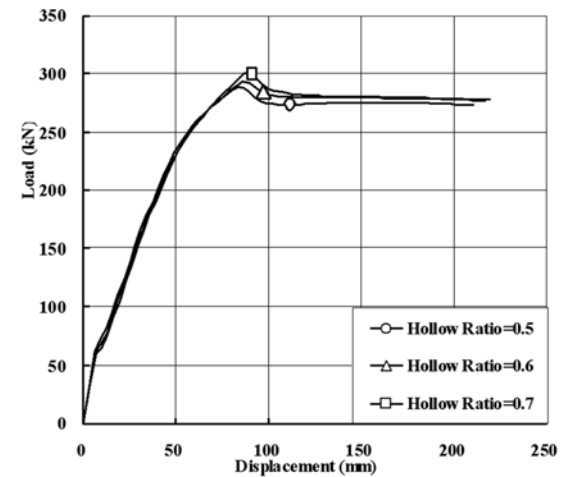
**Fig. 14** P-M interaction ( $D_i/D' = 0.6$ ,  $f_{co} = 25$  MPa)



**Fig. 16** P-M interaction ( $t = 4$  mm,  $f_{co} = 25$  MPa)



**Fig. 15** Load-displacement ( $D_i/D' = 0.6$ ,  $f_{co} = 25$  MPa)



**Fig. 17** Load-displacement ( $t = 4$  mm,  $f_{co} = 25$  MPa)

지 않기 때문에 횡 저항력의 증가율 또한 크지 않다.

Figs. 18과 19는 콘크리트 강도 변화에 따른 해석 결과를 보여준다. Fig. 18은 콘크리트 강도가 증가함에 따라 축강도와 모멘트 강도 모두 크게 증가함을 보여준다. 또한 Fig. 19에서와 같이, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 휨강도는 증가하나, 극한변위는 감소하는 경향을 보인다. Table 6에 해석대상 기둥의 평형상태에서의 축력과 모멘트 및 축력이 작용하지 않을 때의 공칭 모멘트, 모멘트가 작용하지 않을 때의 공칭 축강도를 나타내었다. 내부강관은 모멘트에 영향을 미치며, 콘크리트의 강도는 모멘트와 축력 모두에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

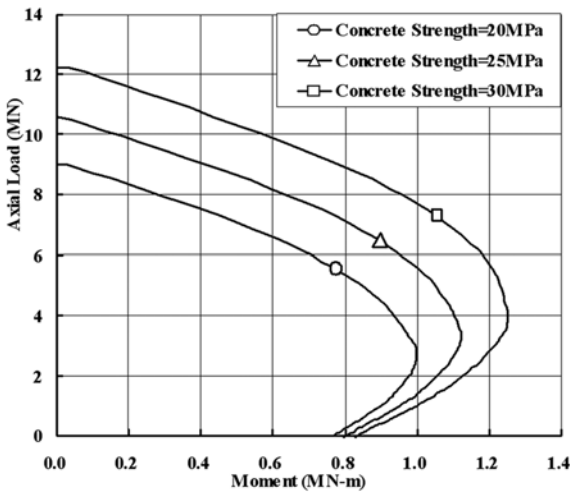


Fig. 18 P-M interaction ( $t = 4 \text{ mm}$ ,  $D_i/D' = 0.6$ )

Table 7은 해석대상 기둥에 대한 에너지 연성도와 변위 연성도를 보여준다. 강관의 두께나 중공비에 따라서는 연성도가 명확한 상관관계를 갖지 않으나, 콘크리트 강도의 증가에 따라 극한변위가 감소하고, 극한에너지의 증가에 비해 항복에너지의 증가율이 더 크게 나타남에 따라 연성도가 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 20은 ICH RC-ST 기둥에서 구성 재료에 따른 하중-변위 관계를 보여준다. 변위가 증가함에 따라 피복 콘크리트는 극한변형률을 초과하여 파괴되며, 하중에 대한 저항능력이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 종방향 철근과 내부강관은 콘크리트에 비해 하중 저항 기여도가 작으며,

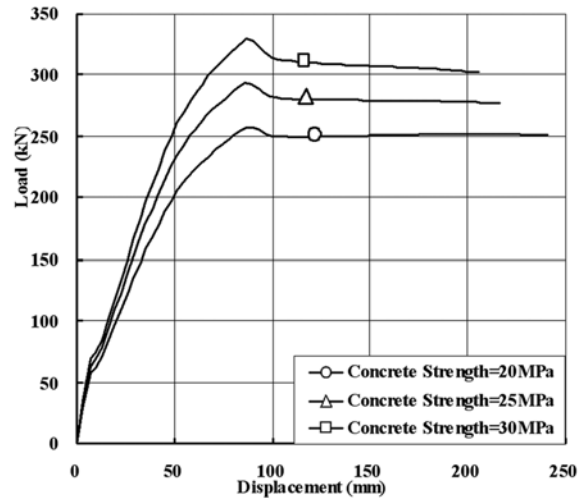


Fig. 19 Load-displacement curve ( $t = 4 \text{ mm}$ ,  $D_i/D' = 0.6$ )

Table 6 Balanced load and moment

Model			$P_0$ (kN)	$M_0$ (kN-m)	$P_b$ (kN)	$M_b$ (kN-m)	$e_b$ (mm)
$t$ (mm)	$D_i/D'$	$f_{co}$ (MPa)					
1	0.6	25	9071.713	492.752	3423.974	964.910	281.810
2	0.6	25	9671.123	604.365	3452.325	1017.192	294.640
4	0.5	25	11312.757	722.884	3963.936	1092.470	275.602
4	0.6	20	8983.534	763.738	2711.656	997.193	367.743
4	0.6	25	10631.032	795.734	3355.477	1121.679	334.283
4	0.6	30	12245.337	826.561	3901.992	1253.546	321.258
4	0.7	25	9596.202	882.718	2758.840	1133.943	411.022
8	0.6	25	12517.911	1114.721	3066.766	1328.241	433.108

Table 7 Energy and displacement ductility

Model			Energy ductility factor			Displacement ductility factor		
$t$ (mm)	$D_i/D'$	$f_{co}$ (MPa)	Yield energy (kN-m)	Ultimate energy (kN-m)	Ductility factor	Yield displ. (mm)	Ultimate displ. (mm)	Ductility factor
1	0.6	25	8.327	44.678	5.365	58.042	211.440	3.643
2	0.6	25	8.547	46.989	5.498	58.042	211.440	3.643
4	0.5	25	8.936	50.591	5.662	57.700	210.193	3.643
4	0.6	20	9.693	53.191	5.487	64.311	241.166	3.750
4	0.6	25	10.856	52.812	4.865	63.724	216.660	3.400
4	0.6	30	12.131	54.947	4.529	64.281	205.698	3.200
4	0.7	25	10.138	53.895	5.316	64.675	219.896	3.400
8	0.6	25	12.184	59.632	4.894	64.271	207.877	3.234

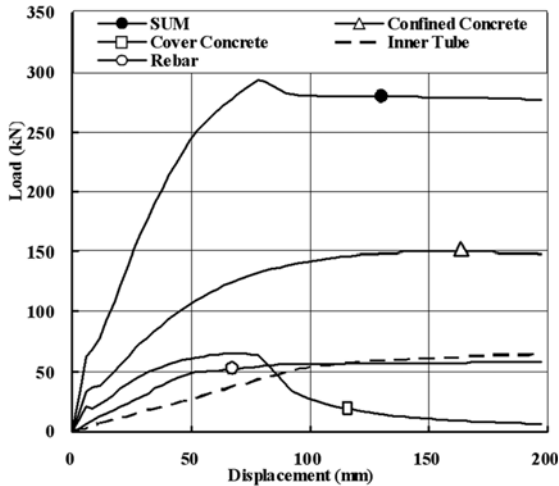


Fig. 20 Contribution of each component ( $t = 4 \text{ mm}$ ,  $D_i / D' = 0.6$ ,  $f_{co} = 25 \text{ MPa}$ )

구속 콘크리트의 저항력이 감소하면서 기둥의 파괴가 발생함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 내부 구속 중공(ICH, internally confined hollow) 기둥의 거동 특성을 분석하기 위해, 콘크리트의 구속효과를 고려하여 ICH RC 기둥의 비선형 해석 모델을 개발하고 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 기존의 연구에 의한 실험 결과 이외에도, PVC를 내부 관으로 적용하여 실험을 수행하였으며, PVC관도 강관과 같이 내부 관으로서 충분한 역할을 할 수 있음을 보여주었다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 매개변수 연구를 수행하였으며, 이 구의 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) ICH RC 기둥의 내부 관으로서, 강관 이외에도 PVC 관과 같은 다양한 재료의 관이 사용될 수 있다. 하지만, 삽입된 내부 관에 의한 기둥의 뚜렷한 성능 증진을 기대하기 위해서는 고강도 재료로 제작된 내부 관을 사용하는 것이 유리하다.
- 2) ICH RC 기둥에서 내부 관의 두께 변화는 기둥의 축강도와 모멘트 강도에 큰 영향을 준다. 내부 관의 두께가 증가함에 따라 축강도와 모멘트 강도는 증가하나, 기둥의 연성도에 미치는 영향은 크지 않다. 내부 관의 두께 변화로 기둥의 강도를 조절할 수 있다는 사실은 기둥 외경의 확대 없이 내부 관만으로 강도의 증진을 이룰 수 있음을 보여준다.
- 3) ICH RC 기둥에서 중공비의 증가는 모멘트 강도를 소량 증가시키나, 다량의 축강도 감소를 유발한다. 또한 중공비 증가에 따라 극한 변위가 증가하나 그 증가량은 크지 않다.
- 4) ICH RC 기둥에서 콘크리트의 강도 증가는 축강도와 모멘트 강도 모두를 크게 증가시킨다. 하지만, 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 극한변위는 감소하며, 연성도 또한 감소하는 경향을 보인다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(기초과학 분야: KRF-2007-357-D00245).

## 기호 색인

$A_{sp}$	횡철근의 단면적
$C_b$	중립축에서 인접 최외단까지의 거리
$C_{b,j}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 중립축에서 인접 최외단까지의 거리
$D'$	구속 콘크리트의 직경
$D_i$	중공면의 직경
$E$	탄성계수
$E_c$	비구속 콘크리트의 접선탄성계수
$e_b$	균형 편심
$F_{L,j}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서의 횡력
$f_{bk}$	내부 관의 좌굴강도
$f_c$	콘크리트에 작용하는 응력 또는 콘크리트의 강도
$f_{cc}$	구속콘크리트의 최대 강도
$f_{co}$	비구속 콘크리트 강도
$f_{comp}$	강재에 작용하는 압축응력
$f_i$	구속응력
$f_{ic}$	원주방향 구속응력
$f_{ir}$	방사방향 구속응력
$f_{lim}$	내부 관의 항복강도와 좌굴강도 중 작은 값
$f_s$	강재에 작용하는 응력
$f_{tens}$	강재에 작용하는 인장응력
$f_{tube}$	내부 관에 작용하는 응력
$f_u$	강재의 극한강도
$f_y$	강재의 항복강도
$f_{yh}$	횡철근의 항복강도
$f_{yt}$	내부 관의 항복강도
$f'_l$	유효 구속응력
$k_e$	유효 횡구속응력 감소계수
$L$	기둥의 높이
$L_p$	소성힌지의 길이
$M_0$	축하중이 작용하지 않는 상태에서의 기둥의 공칭모멘트
$M_b$	평형상태에서의 기둥의 공칭모멘트
$M_j$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서의 모멘트
$M_j^{cC}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 구속콘크리트에 작용하는 모멘트
$M_j^{cV}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 피복콘크리트에 작용하는 모멘트
$M_j^R$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 종철근에 작용하는 모멘트
$M_j^T$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 내부 관에 작용하는 모멘트
$M_n$	기둥의 중립축에 작용하는 모멘트
$M_y$	기둥의 항복 모멘트
$M(z)$	모멘트 함수
$n$	분할된 기둥의 요소 수
$P_0$	편심이 없는 경우의 공칭 축강도

$A_{sp}$	횡철근의 단면적
$P_b$	평형상태에서의 편심이 없는 경우의 공칭 축강도
$P_j$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서의 축하중
$P_j^{CC}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 구속콘크리트에 작용하는 축하중
$P_j^{CV}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 피복콘크리트에 작용하는 축하중
$P_j^R$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 종철근에 작용하는 축하중
$P_j^I$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 내부 관에 작용하는 축하중
$P_n$	기둥의 중립축에 작용하는 축하중
$S_{j,i}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 $i$ 번째 기둥요소의 길이
$s$	횡철근 간격
$t$	내부 관의 두께
$t_{bk}$	내부 관이 좌굴 파괴되지 않기 위한 최소 요구 두께
$t_{eq}$	파형 내부 관의 등가 두께
$t_{yr}$	내부 관이 항복 파괴되지 않기 위한 최소 요구 두께
$\omega_f$	파형의 파고
$\omega_l$	파형 반주기(pitching wave)
$z$	기둥 최하단으로부터의 거리
$\Delta_j$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 기둥 가력점의 변위
$\Delta_{j,i}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 $i$ 번째 기둥요소의 변위
$\varepsilon$	콘크리트의 축방향 변형률
$\varepsilon_{cc}$	구속 콘크리트의 최대 강도 때의 축방향 변형률
$\varepsilon_{co}$	비구속 콘크리트의 최대 강도 때의 축방향 변형률
$\varepsilon_L$	기둥 단면 좌단의 변형률
$\varepsilon_R$	기둥 단면 우단의 변형률
$\varepsilon_s$	강재의 변형률
$\varepsilon_u$	강재의 극한변형률
$\varepsilon_y$	강재의 항복변형률
$\theta_{j,i}$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 $i$ 번째 기둥요소의 순수 회전각
$\phi_j$	$j$ 번째 변형률 분포단계에서 기둥의 곡률
$\phi(z)$	곡률 함수

## 참고문헌

- Roy, H. E. H. and Sozen, M. A., "Ductility of Concrete, Proceedings of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete," *ASCE-ACI*, 1964, pp. 213~224.
- Leslie, P. D., "Ductility of Reinforced Concrete Bridge Piers," *M. E. Report*, University of Canterbury, New Zealand, 1974, pp. 32~54.
- Desayi, P., Iyengar, K. T. S. R., and Reddy, T. S., "Equations of Stress-Strain Curve of Concrete Confined in Circular Steel Spiral," *Materiaux et Constructions*, Vol. 11, No 5,

- 1978, pp. 339~345.
- Iyengar, K. T. S. R., Desayi, P., and Reddy, T. S., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 22, No. 72, 1970, pp. 173~184.
- Vallenas, J., Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Concrete Confined by Rectangular Hoop Subjected to Axial Loads, Report No. UCB/EERC-77/13," *Earthquake Eng. Research Center*, University of California, Berkeley, Aug. 1977, pp. 114~121.
- Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," *ASCE*, Vol. 106, No. 5, ST5, 1980, pp. 1079~1102.
- Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," *ACI Journal*, Vol. 79, No.1, 1982, pp. 13~27.
- Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R., "Seismic Design of Bridge Piers," *Research Report No. 84-2*, Univ. of Canterbury, New Zealand, 1984, pp. 47~95.
- 한택희, 김홍중, 김영중, 강영중, "원형 강관 삽입 중공 RC 기둥의 내부구속 효과 연구," *대한토목학회논문집*, 26권, 4호, 2006, pp. 565~575.
- 한택희, 한상윤, 강영중, "내부 구속 중공 철근 콘크리트 부재의 비선형 재료 모델 개발," *대한토목학회논문집*, 27권, 1A호, 2007, pp. 11~26.
- 한택희, 김정훈, 임남형, 강영중, "강합성 중공 기둥의 내진 성능," *한국강구조학회 논문집*, 20권, 2호, 2008, pp. 215~226.
- 한택희, 김종민, 강준석, 강영중, "파형강관 내부 구속 중공 철근콘크리트 기둥의 내진 성능," *한국방재학회 논문집*, 8권, 2호, 2008, pp. 192~200.
- Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, Singapore, 1959, pp. 364~369.
- Popovics, S., A, "Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, 1973, pp. 583~599.
- Kilpatrick, A. E. and Ranagan, B. V., "Deformation-Control Analysis of Composite Concrete Columns," *Research Report No. 3/97*, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia, Jul. 1997, pp. 76~89.
- (사)한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 서울, 2003, pp. 128~129.
- Park, R., "Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing," *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, Vol.8, 1988, pp. 605~616.

**요약** 내부 구속 중공 철근콘크리트(ICH RC, internally confined hollow reinforced concrete) 기둥의 비선형해석 모델을 제시하고 매개변수 연구를 수행하였다. 제안된 기둥 해석 모델은 콘크리트의 구속효과와 재료비선형을 고려하였으며, 해석 결과와 이 연구에서 수행된 ICH RC 기둥 실험 결과 및 선행 연구자들의 실험 결과를 비교하여, 해석 모델을 검증하였다. 검증 결과 제안된 기둥 해석 모델은 만족할 만한 결과를 보여주었으며, 매개변수 연구를 통하여 내부 강관의 두께, 콘크리트의 강도와 중공비에 따른 ICH RC 기둥의 거동 특성을 나타내었다.

**핵심용어** : 기둥, 합성, 비선형, 중공, 구속효과