

설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 비선형 유한요소해석

Nonlinear Finite Element Analysis of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns Based on Design Variables

천주현¹⁾ · 이승진²⁾ · 이병주³⁾ · 이재훈⁴⁾ · 신현목⁵⁾

Cheon, Ju Hyun · Lee, Seung Jin · Lee, Byung Ju · Lee, Jae Hoon · Shin, Hyun Mock

국문 요약 >> 현재까지 축적된 많은 연구결과와 설계기준을 바탕으로 일반적인 중실단면을 갖는 철근콘크리트 교각의 경우 큰 어려움 없이 내진설계가 수행되고 있지만, 중공원형 철근 콘크리트 교각의 경우 실험 및 해석상의 어려움으로 인하여 국내·외적으로 심부구속철근 상세에 대한 명확한 설계기준과 함께 이에 대한 합리적인 구속 모델 및 내진 성능평가 방안 등은 아직까지 미비한 실정이다. 본 연구에서는 주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진거동 특성을 파악하고, 이를 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 결과와의 비교·분석을 바탕으로 보다 경제적이고 합리적인 설계방안 마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

주요어 중공원형 철근콘크리트 교각, 횡방향 구속효과, 비선형 유한요소해석, 내진성능 평가

ABSTRACT >> The seismic design of solid reinforced concrete bridge columns has been committed to, based on accumulated research and design specifications. The rational confinement model and seismic performance evaluation, however, are insufficient because of the lack of domestic and foreign design specifications about the experimental and analytical difficulties in the case of circular hollow reinforced concrete columns. In this paper, the seismic behavior of circular hollow reinforced concrete columns and its dependence on design variables are understood and explained. These research results can be used to derive the rational and economical design specifications for circular hollow sectional columns based on the result from the nonlinear analysis program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology).

Key words Circular hollow reinforced concrete column, Lateral confining effect, Nonlinear FEM analysis, Seismic performance evaluation

1. 서론

우리나라에서 1992년에 도로교설계기준에 내진설계규정을 제정할 때, 국내에 축적된 연구결과가 미미한 현실을 고려하여 미국 AASHTO 설계기준을 기본으로 한 설계기준이 제정되었다. AASHTO 설계기준의 대부분은 강진지진구역에 대한 내진설계규정이며, 우리나라와 같은 중진지역에

대한 내진설계규정은 충분히 규정되어 있지는 않다. 이러한 강진지역의 설계규정을 여과 없이 국내 현장에 적용했을 때 실무에서는 과도한 횡구속 철근량으로 인해 시공에 많은 어려움을 겪었다. 이러한 문제점을 해결하고 합리적인 내진설계 방안을 제시하기 위한 노력으로, 지난 10여 년간 한국지진공학회연구센터(KEERC)의 연구 등 많은 연구 성과가 있었으나, 중실 단면을 갖는 교각에 대한 연구 성과가 대부분이었다.

오늘날 교량이 장대화 되고 교각의 높이가 높아짐에 따라 발생하는 자중증가에 의해 발생하는 과도한 설계 지진력의 감소, 사용재료의 경감 및 수화열 억제와 같은 경제적·구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에 중공단면을 갖는 교각이 널리 설계·시공되고 있으며, 일반적으로 이에 대한 내진설계는 중실 교각으로 치환하여 설계기준에 제시되어 있는 심부구속 철근량을 계산하여 설계를 수행하고 있

¹⁾ 성균관대학교, 박사과정
²⁾ 정회원·성균관대학교, 석사과정
³⁾ 한국도로교통연구원, 책임연구원
⁴⁾ 정회원·영남대학교, 정교수
⁵⁾ 정회원·성균관대학교, 정교수
(교신저자: hmshin@skku.edu)

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 10. 19 / 수정일 1차: 2010. 12. 13, 2차: 2010. 12. 16 / 게재확정일 : 2010. 12. 17)

는 실정이다. 이 경우 안전측인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단되나 경제성 및 합리성을 고려하는 경우 이러한 방법은 바람직한 방법이라고 볼 수는 없다.

현재까지 국내·외의 경우 많은 연구자⁽¹⁻⁶⁾에 의하여 중공 단면을 갖는 철근콘크리트 교각에 대한 강도 및 연성 능력 평가와 같은 내진 거동 특성 분석과 함께 중공 단면에서의 횡방향 철근에 의한 합리적인 심부 구속 효과 모델을 제시하기 위한 실험적·해석적 연구가 진행되어 왔지만 일부 제한적인 변수 하에서의 실험을 수행하였으며, 이에 대한 결과도 대부분 정방형 단면을 갖는 중공철근콘크리트 교각에 대한 것으로서 아직까지 심부구속철근에 따른 합리적인 구속 모델을 적용한 신뢰도 높은 해석적 방법 및 내진 성능평가 방안은 아직까지 미비한 실정이다.

이를 위하여, 이 연구에서는 그 동안 Kim 등⁽⁷⁻¹⁰⁾ 등에 의하여 개발된 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 신뢰성 있는 중공원형 철근콘크리트교각 실험체에 적용하여 주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진거동 특성을 파악하고 향후, 보다 경제적이고 합리적인 설계방안 마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

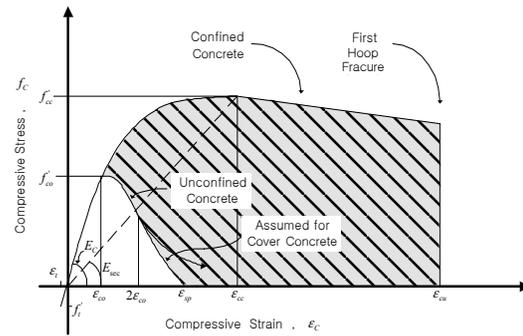
2. 비선형 유한요소해석 프로그램

2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 극한 강도 및 연성 능력과 같은 내진거동 특성을 합리적으로 예측하기 위한 본 연구에서, 저지⁽⁷⁻¹⁰⁾ 등에 의하여 그 동안 개발된 철근과 콘크리트의 비선형성을 고려하기 위한 재료 모델과 횡방향 구속효과를 고려하기 위한 그림 1에서와 같은 Mander(1998) et al.⁽¹¹⁾이 제안한 모델을 사용하였다. 유효구속응력, f'_l 은 식 (1)과 같이 정의되며 유효구속계수 k_e 는 식 (2)과 같다. 여기에, 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서의 단면 강성의 급변에 따른 철근의 정착슬립과 접합면에서의 미끄러짐, 및 접합면의 관입등의 국부적인 불연속 변위를 고려하기 위한 경계면 요소(Interface Element)등을 적용하였다. 본 연구에서도 실험 및 해석 결과를 바탕으로 중공 원형 단면을 갖는 철근콘크리트 교각에 대한 보다 합리적인 횡방향 구속 효과 방안 마련을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

$$f'_l = k_e f_c \tag{1}$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \tag{2}$$



〈그림 1〉 횡방향 구속효과 모델 (Mander et al.⁽¹¹⁾)

2D or 3D Spring Element	4 nodes PSC Shell Element	2D or 3D Flexibility-Based Fiber Beam-column Element	4 nodes Elastic Shell Element
Joint Element	RCAHEST		4 nodes RC Shell Element
Reinforcing or Prestressing Bar Element	Interface Element	RC Plane Stress Element	2D Elasto-plastic Plane Stress Element

〈그림 2〉 Element Library

여기서, A_e 는 콘크리트 심부의 유효단면적, A_{cc} 는 횡방향철근에 의해서 구속된 콘크리트의 단면적이다.

2.2 비선형 유한요소해석 프로그램

주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진거동 특성을 파악하기 위하여 아래의 그림 2와 같은 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)을 사용한다. 비선형 유한요소 해석 프로그램 RCAHEST⁽⁷⁻¹⁰⁾은 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹²⁾에 이식하여 모듈화된 프로그램으로서, 철근콘크리트 구조물의 역학적 거동 즉, 탄성, 비탄성, 극한 영역 등 전 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계, 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력 추적 등과 같은 해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

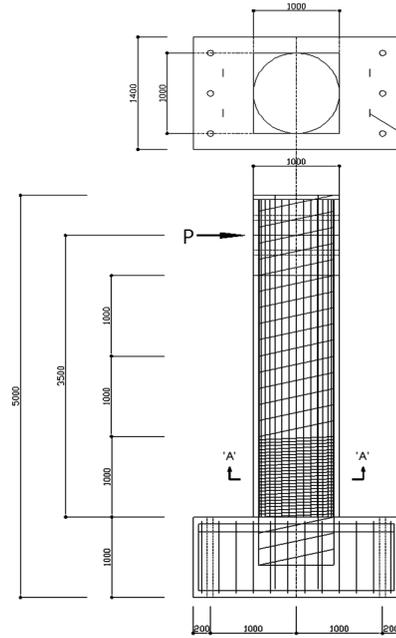
3. 검증 대상 실험체

3.1 중공원형 철근콘크리트 교각

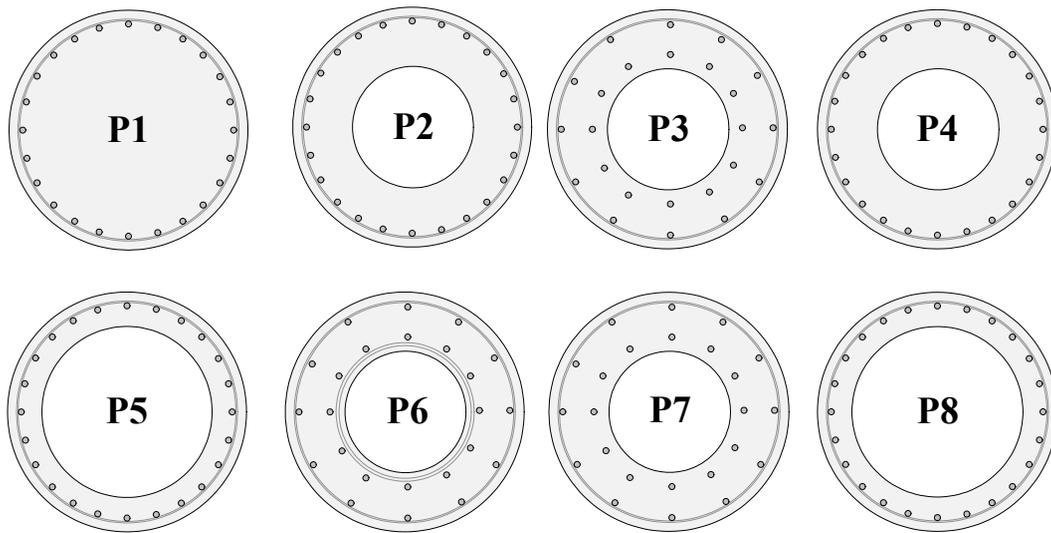
중공원형 철근 콘크리트 교각의 내진거동 특성을 규명하고 합리적인 설계기준안 마련을 위한 기초 자료를 제시하기

위해 기존의 연구결과⁽¹⁻⁶⁾를 바탕으로 단면의 내측과 외측 지름에 따른 중공비(D/D), 종방향철근비, 소성힌지 구간에서의 횡방향 구속철근의 배근 간격과 함께 축력비를 변수로 선정하여 아래의 그림 3 및 4에서와 같은 단면 상세를 갖는 총 8기의 중실 및 중공 철근콘크리트 교각 실물 축소모형 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험체 구성은 단면 직경 1000mm인 중실단면 교각실험체 1기와 이와 동일한 외경을 갖고 있으면서 내경이 모든 실험체의 형상비는 3.5로 동일하다. 단면설계는 도로교설계기준(2005)⁽¹³⁾의 교량 교각에 대한 단면상세 규정을 기초로 제작하였다.

표 1의 각 실험체에 대한 재료물성에서와 같이 교각의 휨 파괴 거동을 유도하기 위하여 종방향철근 양은 실제 설계 및 시공되는 약 1%~2%수준으로 계획하였으며, 중실단면은 중공단면과 유사한 단면력을 유지하도록 철근비 0.08로 설계하여 중실단면과의 내진거동차이를 비교·분석하고자 한다. 또한, 종방향철근 배근상세의 경우 대부분의 실무 설계



〈그림 3〉 실험체 형상(Unit : mm)



〈그림 4〉 실험체 단면 형상

〈표 1〉 실험체 재료 물성

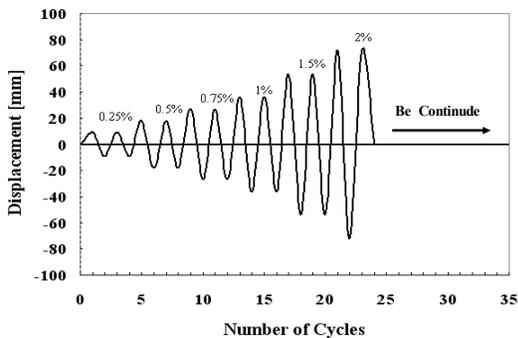
실험체	중공비 (내경/외경)	f _{ck} (MPa)	철근배열		철근량				축하중 P _u (kN)	축력비 P _u /f _{ck} A _g
			종방향-D19 (f _y -499MPa)	횡방향-D13 (f _y -495MPa)	종방향철근		횡방향철근			
					철근비	단면적 (mm ²)	철근비	간격 (mm)		
P1	0	32.5	1열(24EA)	외측	0.0083	6,876	0.012	40	1,650	0.065
P2	0.5 (500/1000)		1열(24EA)	외측	0.0117	6,876	0.012	40	1,650	0.086
P3			2열(28EA)	외측	0.0136	8,022	0.012	40	1,650	0.086
P4			1열(24EA)	외측	0.0117	6,876	0.006	80	1,650	0.086
P5			0.75 (750/1000)	1열(24EA)	외측	0.0200	6,876	0.012	40	1,650
P6	0.5 (500/1000)		2열(28EA)	외측 내측	0.0136	8,022	0.006 0.006	80 80	1,650	0.150
P7			2열(28EA)	외측	0.0136	8,022	0.006	80	1,650	0.086
P8	0.75 (750/1000)		1열(14EA)	외측	0.0117	4,011	0.012	40	1,650	0.086

에서 중공단면 교각의 경우 2열 이상의 종방향철근이 배근되는 것을 고려하여, 동일한 중공비에 유사한 단면력이 발휘되도록 종방향철근을 1열과 2열 배근으로 실험체를 구성하였으며, 횡방향철근 배치의 경우 종방향철근의 배열 상세에 따라 외측과 내측에 균등하게 배근하는 경우와 외측에만 배근하는 경우를 각각 변수로 채택하여, 이러한 주요 설계 변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 연성도와 함께 극한거동 특성에 대한 비교·분석을 수행하고자 한다. 축력은 실제 교량 교각 구조물이 받는 하중과 유사하도록 고려하여 단면의 축강도($A_g \cdot f_{ck}$)의 10%이내로 결정하였다.

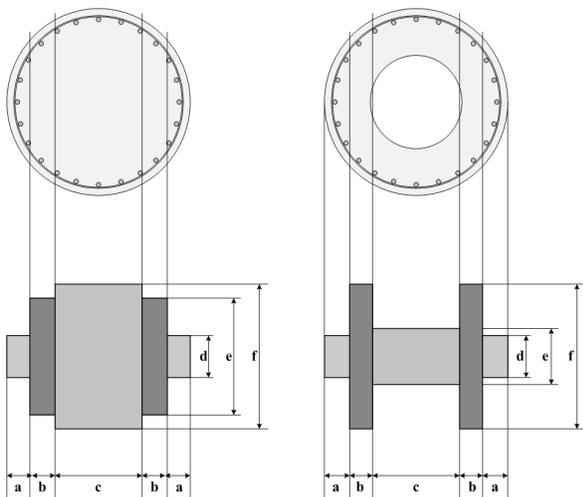
하중재하는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 동안 구조물의 비탄성 거동을 평가하기 위해 그림 3에 나타낸 것처럼 변위제어 방식으로 Drift Level은 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 2.5\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 3.5\%$, $\pm 4.0\%$...로 2회 반복 진행하는 준정적 실험(Quasi-static Test)을 수행하였다.

3.2 비선형 유한요소해석

그림 6에서와 같이 원형 단면을 갖는 교각의 실제거동과 유사하도록 단면 환산 전·후에 있어서 철근과 콘크리트의



〈그림 5〉 횡하중 시나리오

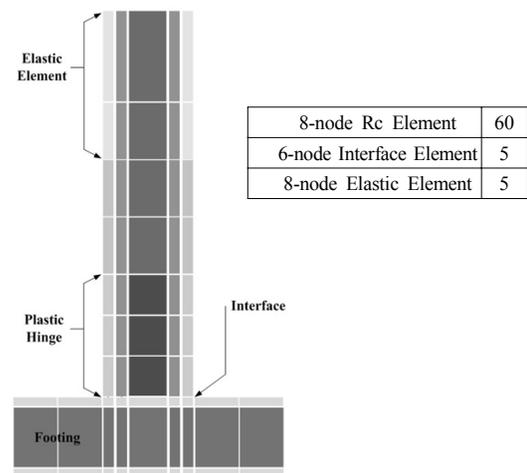


〈그림 6〉 대상 실험체의 등가환산단면

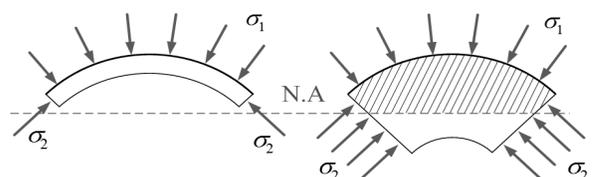
단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트에 대하여 수렴 반복 계산을 통한 오차가 최소가 되는 단면을 선택하여 대상 실험체를 2차원 평면요소로 변환한 후, 실험에서와 동일한 하중 이력을 재하하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 7에 검증 대상 실험체에 대하여 비선형 유한요소 해석을 수행하기 위하여 요소의 분할된 형상을 나타내었다. 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하 되는 부위에는 콘크리트의 국부적인 파괴를 방지하기 위하여 총 2개의 탄성체 요소를 사용하였다. 소성힌지 영역에서는 철근의 항복 후 소성거동특성을 좀 더 명확히 묘사하기 위하여 더 작은 요소의 크기로 분할하여, 총 67개의 요소와 총 236개의 절점으로 모델링하였다.

Zahn et al.⁽¹⁾의 연구는 중공단면 두께가 비교적 얇다 (Thin Wall)라고 가정하여 그림 8에서와 같이 3축 응력 보다는 2축 응력 상태로 고려하였으나, 그림 9에서와 같이 중립축이 중공 단면 내부에 있는 경우에는 2축 응력상태보다는 3축응력 상태로 보는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이에, 본 연구에서는 Mander et al.⁽¹¹⁾의 3축 응력 상태에서의 식(2)와 같은 제안식을 인용하되 중공비에 따라 횡구속 효과를 저감시키는 아래의 식(3)을 적용하였다.

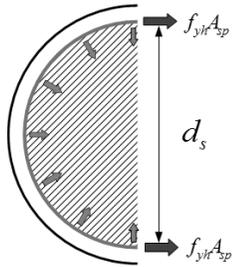
$$k_e = k_{e1} \times k_{e2} \tag{3}$$



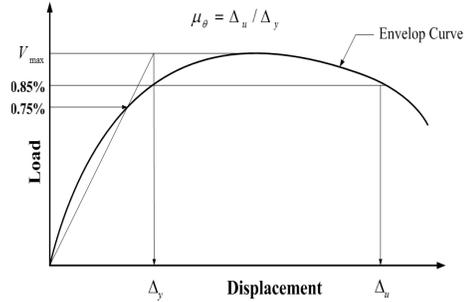
〈그림 7〉 비선형 유한요소해석을 위한 유한요소 모델링



〈그림 8〉 콘크리트 2축 응력 상태 〈그림 9〉 콘크리트 3축 응력 상태



〈그림 10〉 콘크리트에 작용하는 구속 응력



〈그림 11〉 항복 및 극한 정의

여기서, $0 \leq \frac{D_i}{D} \leq 0.5$ 의 경우, $k_{e_2} = 1$

$$0.5 < \frac{D_i}{D} < 1 \text{의 경우, } k_{e_2} = 2(1 - \frac{D_i}{D})$$

이며, k_{e_1} 은 중실단면에서 계산되는 유효구속효과 계수, k_{e_2} 는 중공비(D_i/D)를 고려한 수정계수로 각각 정의한다.

Mander et al.⁽¹¹⁾이 제안한 식에서는 중실 단면에서 구속된 심부 콘크리트 체적에 대한 횡방향 철근 체적비 ρ_s 를 아래의 식 (4)에서와 같이 계산한다. 본 연구에서의 연구 결과를 바탕으로 중공 단면을 갖는 실험체의 경우에도 그림 9에서와 같이 콘크리트에 작용하는 3축 구속 응력 상태를 고려하여 중실 단면에 대한 경우와 같이 적용하였다.

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{d_s s} \tag{4}$$

여기서, A_{sp} 는 횡방향 철근 단면적, d_s 는 횡방향철근 중심사이의 거리, s 는 나선 또는 원형 후프 사이의 중심간격

4. 해석 결과와의 비교·분석

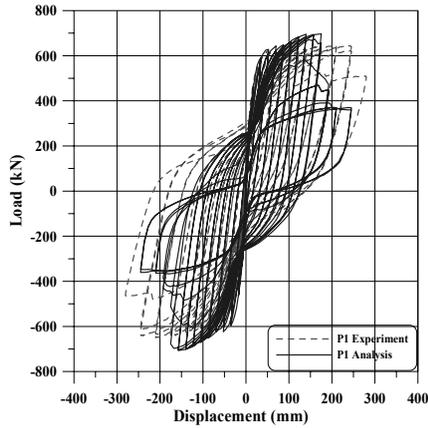
4.1 하중-변위 비교·분석

변위연성도($\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$) 계산을 위한 항복점 및 극한점의 정의를 그림 11에 나타내었다. 하중-변위 포락곡선 상에서 $0.75V_{max}$ 을 지나는 수평선과 원점에서 $0.75V_{max}$ 점을 통과하는 직선과의 교점에 해당하는 변위를 항복점으로, 최대하중 이후 $0.85V_{max}$ 되는 변위를 극한점으로 각각 정의하였다.

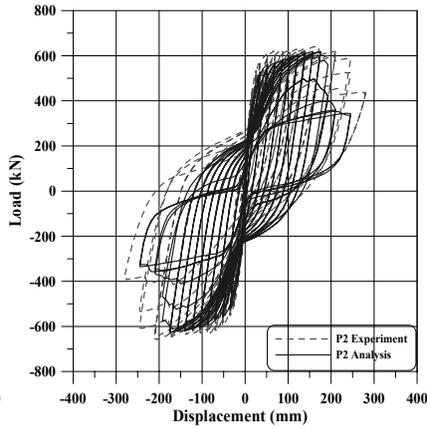
실험결과 모든 실험체는 기둥의 소성힌지영역 위치에서 초기 휨균열 발생 되었고, 중공비 0.5인 P2, P3, P4, P6, P7 실험체는 중실단면의 P1 실험체와 동일하게 초기 휨균열 이후 콘크리트 압쇄, 피복탈락, 종방향철근 항복, 콘크리트 압축파괴, 종방향철근 파단의 순서로 파괴가 진행되는 전형적인 휨파괴 모드를 보였다. 모든 실험체에서 횡방향철근은 피복콘크리트 탈락 이후 심부콘크리트를 구속하는 횡구속

력을 발휘하는 것으로 나타났다. 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 해석과 실험으로부터의 하중-변위 관계를 중실 단면을 갖는 P1 실험체와 중공비 0.5를 갖는 P2, P3, P4, P6, P7 실험체에 대하여 아래의 그림 12~17에 각각 비교하여 나타내었다. 해석결과 주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각 실험체에 대한 실험으로부터의 초기 강성 및 철근의 항복에 따른 강도 감소와 같은 극한 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 알 수 있으며, 표 1에서와 같이 중실 및 중공비 0.5를 갖는 실험체의 경우 극한 강도와 변위 연성도에 대한 평균과 변동계수는 각각 1.06과 5.0% 및 1.27과 14.0%로서, 해석 결과에 대한 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한, 실험에서와 같이 중공비 0.5를 갖는 실험체들의 경우 설계 변수에 따른 파괴 시까지의 극한 거동 특성은 중실 단면을 갖는 실험체와 유사하게 나타났으며, 이는 일반적인 배근 상세를 갖는 중공비 0.5인 중공원형 철근콘크리트 교각은 중실 교각과 유사한 소요 성능을 확보하고 있음을 알 수 있다.

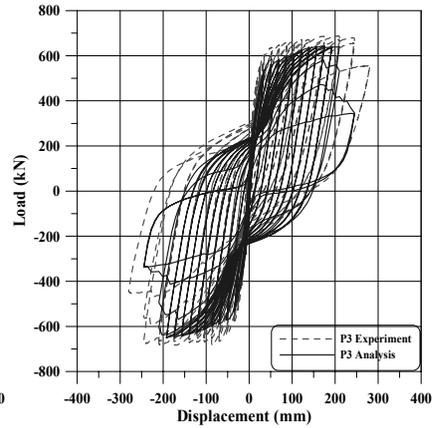
중공비 0.75를 갖는 P5, P8 실험체는 중실 및 중공비 0.5를 갖는 실험체와 달리 기둥의 소성힌지영역 위치에서 초기 휨균열 이후 콘크리트 압쇄, 수직전단균열, 피복탈락, 콘크리트 압축파괴의 순서로 파괴가 진행되었고 최종파괴 모드는 콘크리트 압축파괴인 취성파괴모드로 나타났으며, 종방향철근의 파단 혹은 횡방향철근의 파단은 발생하지 않았다. 해석과 실험으로부터의 하중-변위 관계를 그림 18과 19에 각각 비교하여 나타내었다. 해석결과 중공비 0.75를 갖는 P5 실험체의 경우, 극한 하중은 표 1에서와 0.98 정도로서 비교적 적절히 평가하고 있으나 변위 연성도의 경우 실험결과에 비하여 약 25% 정도 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. P8 실험체의 경우, P5 실험체에서와 같이 극한하중은 1.10 정도로서 비교적 적절히 평가하고 있으나 변위 연성도를 16% 정도 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이는, 상대적으로 큰 중공비를 갖는 P5 및 P8 실험체의 경우 압축력에 저항하는 단면응력과 파괴에 도달하는 변위가 크기 때문



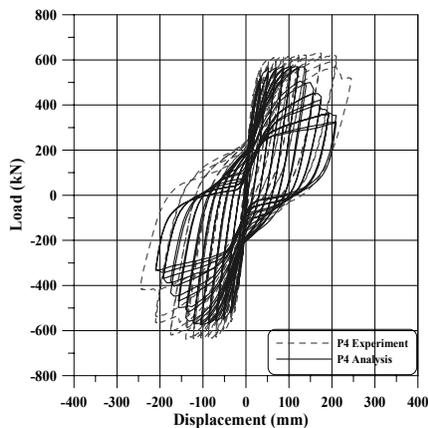
〈그림 12〉 P1 실험체 하중-변위 곡선



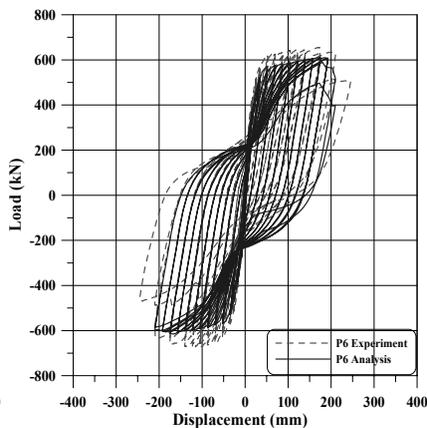
〈그림 13〉 P2 실험체 하중-변위 곡선



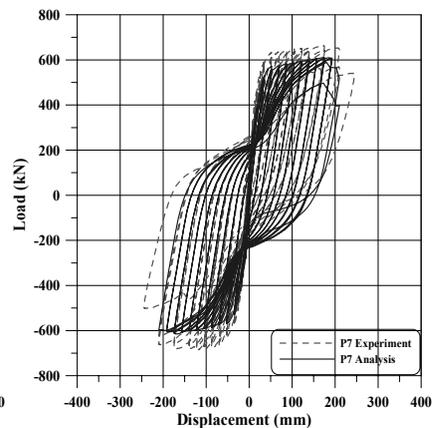
〈그림 14〉 P3 실험체 하중-변위 곡선



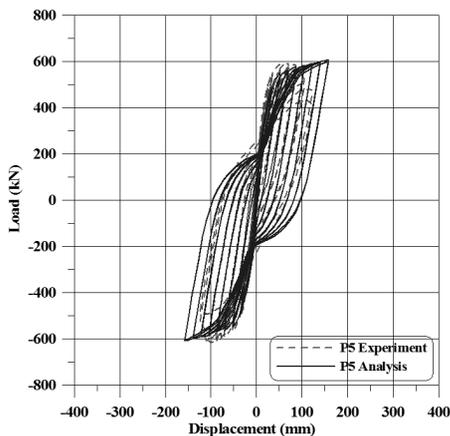
〈그림 15〉 P4 실험체 하중-변위 곡선



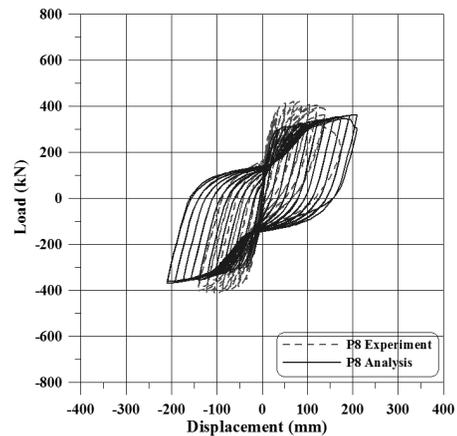
〈그림 16〉 P6 실험체 하중-변위 곡선



〈그림 17〉 P7 실험체 하중-변위 곡선



〈그림 18〉 P5 실험체 하중-변위 곡선



〈그림 19〉 P8 실험체 하중-변위 곡선

인 것으로 판단되며, 이러한 결과를 바탕으로 추후 연구를 수행하여 이와 같은 중공원형 철근콘크리트 교각에 대한 보다 합리적인 횡방향 구속효과 모델의 제시와 함께 보다 신뢰성 있는 해석적 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다.

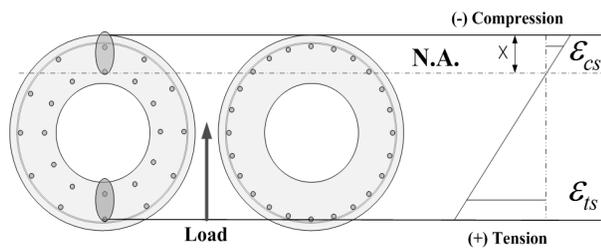
4.2 파괴시 중립축 위치

Zahn 등⁽¹⁾의 연구결과에서와 같이, 반복하중을 받는 중

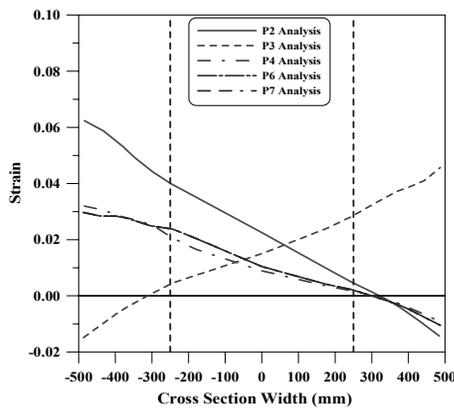
공단면 철근콘크리트 교각은 일반적인 중실단면을 갖는 철근콘크리트 교각과는 달리 파괴시 중립축의 위치에 따라 그 거동 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는, 그림 8, 그림 9 및 그림 20에서와 같이 파괴시 중립축이 중공 단면내부에 있는 경우 중실교각과 동일하게 중립축을 기준으로 압축과 인장력이 단면에 나타나며, 이와는 달리 중립축이 중공내부에 있는 경우, 중립축을 기준으로 단면전체가 압축력

〈표 2〉 실험 및 해석으로부터의 극한강도 및 변위 연성도

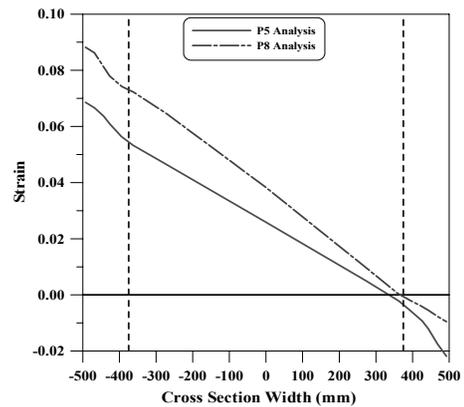
Specimens	Ultimate Strength			Displacement Ductility		
	Experiment (kN)	Analysis (kN)	Exp./Ana.	Experiment ($\mu=\Delta u/\Delta y$)	Analysis ($\mu=\Delta u/\Delta y$)	Exp./Ana.
P1	646.42	697.06	0.96	8.0	5.0	1.59
P2	642.32	618.90	1.04	7.4	5.3	1.39
P3	687.97	643.78	1.08	6.9	5.7	1.22
P4	631.38	571.67	1.08	6.0	5.1	1.18
P6	655.68	611.34	1.10	6.6	5.9	1.12
P7	663.89	611.34	1.10	6.7	5.9	1.14
Mean			1.06			1.27
S.T.D			0.05			0.18
C.O.V			0.05			0.14
P5	595.47	610.57	0.98	3.7	4.9	0.75
P8	420.98	382.01	1.10	4.6	5.5	0.84
Mean			1.04			0.80
S.T.D			0.08			0.06
C.O.V			0.08			0.08



〈그림 20〉 파괴시 중립축 위치



〈그림 21〉 중공비 0.5 실험체의 파괴시 중립축 위치



〈그림 22〉 중공비 0.75 실험체의 파괴시 중립축 위치

〈표 3〉 실험으로부터 예측한 파괴시 중립축 위치

실험체	단면치수		X_{test} (mm)	파괴시 중립축위치
	D_i/D	D_t		
P1	0.00	500	164	단면내부
P2	0.50	250	161	단면내부
P3	0.50	250	142	단면내부
P4	0.50	250	152	단면내부
P5	0.75	125	173	중공내부
P6	0.50	250	160	단면내부
P7	0.50	250	161	단면내부
P8	0.75	125	204	중공내부

을 받게 되어 상대적으로 취성적인 파괴거동을 보일 수 있기 때문이다.

그림 21과 22에 중공비 0.5와 중공비 0.75를 갖는 실험체 대하여 비선형 유한요소해석을 통한 파괴시 기둥 하단부의 각 가우스 적분점에서의 변형률을 각각 비교하여 나타내었다. 그림 21과 그림 22에서와 같이 파괴시 중립축의 위치는 중공비 0.5를 갖는 실험체의 경우 모두 중공 단면내부에

위치하고 있으며, 중공비 0.75를 갖는 실험체의 경우는 모두 중공내부에 위치하는 것으로 나타났다. 이는, 표 3에서와 같이 실험에서 파괴시 인장철근과 압축철근의 변형률 결과를 바탕으로 예측한 중립축의 위치(X_{test} : 최외측으로부터 파괴시 중립축까지의 거리)와 같음을 알 수 있다.

5. 결론

주요 설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진거동 특성 규명을 위한 총 8기의 중실 및 중공단면 교각 대한 내진성능 실험 결과를 바탕으로 비선형 유한요소해석을 통한 결과와의 비교 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 실험과 해석 결과로부터 중공비 0.5를 갖는 실험체들의 경우 중실 단면을 갖는 철근콘크리트 교각과 유사한 파괴 모드와 소요 성능을 확보하고 있으나, 중공비 0.75를 갖는 실험체들의 경우 중실 단면을 갖는 실험체와 달리 최종적인 파괴는 콘크리트 압축파괴로 인한 취성파괴모드로 나타났으며, 종방향철근과 횡방향철근의 파단은 발생하지 않았다. 설계와 시공시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
2. 중실단면을 갖는 실험체와 주요 설계변수에 따른 중공비 0.5를 갖는 실험체 및 중공비 0.75를 갖는 실험체에 대한 실험과 비선형 유한요소해석으로부터의 극한 강도 비와 이에 대한 변동 계수는 각각 1.06, 5.0% 및 1.04, 8.0% 정도로서, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)를 통한 해석 결과가 중공원형 철근콘크리트 교각의 극한강도를 비교적 적절히 예측하고 있음을 확인 할 수 있다.
3. 중실단면을 갖는 실험체와 중공비 0.5를 갖는 실험체에 대한 실험과 해석으로부터의 변위 연성도와 변동 계수는 각각 1.27, 14.0% 정도로서, 해석 결과가 비교적 보수적으로 평가하고 있으나, 중공비 0.75를 갖는 실험체의 경우에는 0.80과 8.0% 정도로서 과대평가 하고 있음을 알 수 있다.
4. 비선형 유한요소해석 결과를 통한 파괴시 중립축의 위치는 중공비 0.5를 갖는 실험체의 경우 중공단면 내부에, 중공비 0.75인 단면의 중공내부에 존재하는 것으로 나타났으며 이는 실험에서의 결과와 같음을 알 수 있다.
5. 추후 연구를 통하여, 상대적으로 큰 중공비와 압축력을 받는 중공철근콘크리트 교각에 대한 심부구속철근에 따른 보다 합리적인 구속 효과 모델을 적용한 신뢰도 높은 해석적 방안 마련이 필요할 것으로 판단되며, 이러한 결과들은 향후, 보다 합리적인 설계와 시공 방안 마련을 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국도로교통 연구원의 “중공원형 콘크리트 교각 연성도와 설계변수 상관관계 검증 실험연구”의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Zahn, F.A., Park, R., and Priestley, M. J. N., “Flexural strength and ductility of circular hollow reinforced concrete columns without confinement on inside face,” *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, 156-166, 1990.
2. Yeh, Y.-K., Mo, Y.L., and Yang, C. Y., “Seismic performance of rectangular hollow bridge columns,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 1, 60-68, 2002.
3. Mo, Y.L., Wong, D.C., and Maekawa, K., “Seismic performance of hollow bridge columns,” *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, 337-348, 2003.
4. Whittaker, D., Park, R., and Carr, A.J., “Experimental tests on hollow circular concrete columns for use in offshore concrete platforms,” *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, 213-244, 1987.
5. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, “원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험,” 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제2호, 41-53, 1999.
6. 선창호, 김익현, “횡방향철근이 감소된 중공사각단면 교각의 내진거동 특성,” 한국지진공학회 논문집, 제13권, 제3호, 51-65, 2009.
7. 김태훈, 유영화, 신현목, “등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석,” 대한토목학회 논문집, 제20권, 제5-A호, 2000.
8. Kim, T.H., Lee, K.M., Chung, Y.S., and Shin, H.M., “Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns,” *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 576-592, 2005.
9. Kim, T.H., Lee, K.M., Yoon, C.Y., and Shin, H.M., “Inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge piers under earthquake. I: theory and formulation,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 9, 1199-1207, 2003.
10. Kim, T.H., Kim, Y.J., and Shin, H.M., “Seismic performance assessment of reinforced concrete bridge columns under variable axial load,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 59, No. 2, 87-96, 2007.
11. Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R., “Theoretical stress-strain model for confined concrete,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, 1804-1826, 1988.
12. Taylor, R. L., *A finite Element Analysis Program, Version 7.2, Feap Users Manual*, Vol. 1 and Vol. 2, 2000.
13. 건설교통부제정, 도로교 설계기준, 2000.