

# SRC 합성교각의 비탄성거동에 대한 유한요소해석 Finite Element Analysis of Inelastic Behavior of SRC Composite Piers

심창수\*                      한정훈\*\*                      박창규\*\*\*                      정영수\*\*\*\*  
Shim, Chang Su              Han, Jung Hoon              Park, Chang Kyu              Chung, Young Soo

## ABSTRACT

In the design of bridge piers in seismic area, the ductility requirement is one of the most important design criteria. In order to enhance the seismic performance of RC columns, it is necessary to make the ductility of columns larger by covering RC columns with steel tubes or confining RC columns by arranging transverse reinforcement such as hoop ties closely. Concrete encased composite columns can be utilized for bridge piers especially in seismic area. In this paper, finite element analyses are performed to study the nonlinear behavior of concrete encased composite columns with single core steel or multiple steel elements under static and quasi-static loads. The cross-sections of these specimens are composed of concrete-encased H-shaped structural steel columns and a concrete-encased circular tube with partial in-filled concrete. Test parameters were the amount of the transverse reinforcement, encased steel member, and loading axis. Through the comparison between FE analyses and test results, adequate material models for confined concrete and unconfined concrete are investigated. After getting the proper analysis models for composite columns, several parameters are considered to suggest design considerations on the details of composite piers.

## 1. 서론

우리나라는 중·약진 지역으로 분류되어 최근에 교량의 하부 구조, 특히 교각 설계에서 철근 배근 등에 어려움을 겪어왔다. 또한, 건설 입지가 이전에 비해서 훨씬 난해하게 변해 가는데 산악이나 해상과 같은 지역, 도심지와 같은 좁은 공간에서의 시공 등이 대표적인 사례이다. 교량의 규모가 커질수록 하부구조의 설계가 전체 교량의 경제성을 좌우하게 된다. 기존의 현장타설 RC 교각

\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수  
\*\* 비회원 · 중앙대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 건설환경연구소 공학박사  
\*\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수

에 대한 대안의 하나로 강재매입형 합성기둥(Concrete Encased Composite Column)이 선택될 수 있다. 축력 및 휨에 대한 높은 강성과 강도를 확보할 수 있고 요구되는 성능기준에서 중요한 연성의 확보가 용이하다.

Sherif El-Tawil, Gregory G. Deierlein (1999)<sup>1)</sup>은 ACI318, AISC-LRFD, AISC 내진 규정의 강재매입형 합성기둥 설계 기준을 검토하고, 콘크리트의 응력-변형률 속성에 따른 강도와 구속효과를 변수로 하여, 강재와 콘크리트의 비선형성을 평가하였다. 전단면에 대한 구조용 강재비의 함수, 콘크리트의 공칭 강도, 그리고 횡방향철근에 의한 콘크리트의 구속 효과에 따른 실험체의 강도와 연성도를 평가하였다. 설계 기준에 따른 강재매입형 합성기둥의 강도 평가를 위한 필요조건들의 차이와 규정의 한계를 확립하기 위한 범위의 제안을 주로 기술하였다. 콘크리트 강도에 차이를 둔 실험체의 경우, 고강도 콘크리트( $f_c' = 110MPa$ )가 내진 규정을 만족하는 연성도를 확보하기 위해서는 더 많은 횡방향철근의 사용을 필요로 하는 것으로 보고되었다. S. A. Mirza, E. A. Lacroix (2004)<sup>2)</sup>에서는 설계기준 절차로 계산된 강도를 갖는 기존 논문을 이용하여 사각형 강재매입형 합성기둥 실험체 150개에 대해서 강도를 비교하였다. 설계기준은 ACI318-02, AISC-LRFD, 그리고 Eurocode4 등이다. 기둥은 순수 압축, 휨-압축, 순수 휨을 받도록 양단을 고정하거나 핀으로 연결하였다. 분석에 필요한 정보와 자료는 공개된 시험 데이터만을 사용하였고, 보통 콘크리트의 압축 강도는 17-56MPa의 범위를 갖도록 제한하였다. 콘크리트 강도, 편심비, 세장비, 구조용 강재지수(structural steel ratio), 그리고 횡방향철근비를 주요 변수로 하였다. 이번 비교는 각 기준에 의한 계산법의 신뢰성을 평가하는 중요한 기회가 되었고, ACI318-02의 개선을 위한 권고 사항도 기술하였다.

이상의 강재매입형 합성기둥에 관한 많은 실험 및 해석 연구를 감안하여 기존 RC 교각의 1~2% 정도의 주철근비와 내진 규정에 따른 여러 내진 성능을 확보해야 하는 실정에 대해서 기존의 RC 교각과는 다른 적절한 상세가 필요하며, 합성 작용 확보를 위한 콘크리트와 강재 부착면의 거동 규명이 필요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강재매입형 합성기둥 실험체에 반복하중을 재하하여 내진성능을 평가하도록 하였다. 기둥의 내진성능은 연성도, 에너지소산, 그리고 강도 감소 분석을 통해 평가하였다. 또한, 다형강매입 합성기둥 실험체를 설계하여 강재의 구조적 장점을 최대한 활용할 수 있도록 하였다. 그리고 강재매입형 합성기둥의 비선형모델을 구축하여 다양한 변수 분석을 진행할 수 있도록 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 사용하여 실험값과의 비교를 통해 비선형모델을 검증하도록 하였다.

## 2. SRC 합성 기둥의 준정적 실험

### 2.1 실험체

SRC 합성 기둥 실험체는 총 8개를 제작하였다. H형강을 매입한 실험체 3개와 원형강관을 매입한 실험체 2개를 제작하였고, 강재의 구조적 장점을 최대한 이용하기 위하여 다수(4개)의 강재를 매입한 실험체 3개를 제작하였다. 그림 1에 실험체의 설계단면을 나타내었다. 콘크리트의 설계강도는 23.5MPa 철근은 SD30을 사용하였고, 강재는 강종 SS400을 사용하였다. 그러나 실제 콘크리트 압축강도시험 결과 콘크리트의 강도는 설계강도 보다 큰 값을 보였다. 단면의 중앙에 강재를 매입한 실험체는 주철근을 포함한 강재비 1.63%를 유지하여 현재 설계되고 있는 RC교각 수준의

주철근비를 갖도록 설계하였고, 다수의 형강을 매입한 실험체는 부재의 여건상 다소 높은 3.8%의 강재비를 갖도록 설계하였다. 또 도로교 설계기준의 횡방향 철근비에 따른 내진 실험체 5개와 비내진 실험체 3개를 제작하여, SRC기둥에서 강재의 구속효과로 인한 최소 횡방향 철근비(면적)를 평가하였다. 매입강재의 형상 및 배치구조를 변수로 하여 교각에 적합한 SRC기둥의 강재 형상 및 강재의 배치 형태를 결정하도록 하였다. 표 1에 실험체의 변수들을 정리하였다.

국부변형률을 측정하기 위하여 각 실험체의 강재 및 주철근, 그리고 횡방향 철근에 게이지를 부착하였으며, 기초-기둥 접합부에서 250mm 위치에 콘크리트 게이지를 부착하였다.

표 1. 실험체명과 변수

실험종류	실험체명	구조용 강재 (mm)	강재+주철근비 (%)	띠철근비 (%)	실험변수
Quasi-static	QSHS-BA	125×125	1.63	D10-1.06	H형 강재 기준 실험체
	QSHS-SR	125×125	1.63	D10-0.53	H형 강재 약축
	QSHS-SR,WA	125×125	1.63	D10-0.53	횡방향철근 감소 H형 강재 약축
	QSCT-BA	D=139.8,t=4.8	1.77	D10-1.06	원형 강관 기준 실험체
	QSCT-SR	D=139.8,t=4.8	1.77	D10-0.53	횡방향철근 감소
	QMHS-BA	100×100	3.8	D10-1.06	다형강 매입 기준 실험체
	QMCT-BA	D=210.6,t=5.3	3.8	D10-1.06	다강관 매입 기준 실험체
	QMHS-HS	100×100	3.8	D10-1.06	다형강 매입 기준 실험체 잡고리 철근

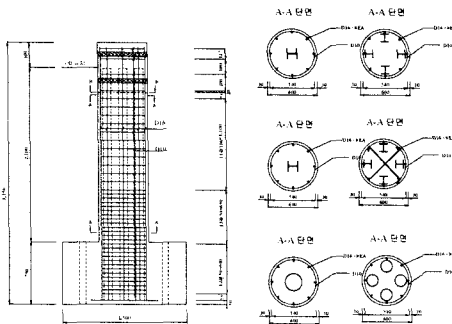


그림 1. 실험체 단면

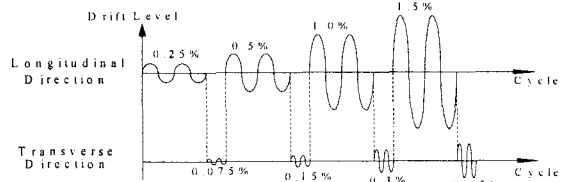


그림 2. 변위 제어

## 2.2 실험 결과

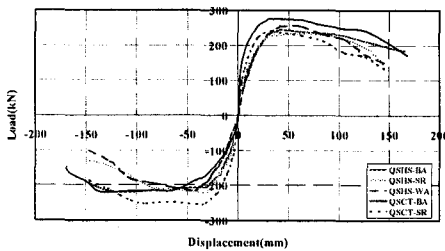
제작된 8개의 실험체는  $0.1f_{ck}A_g = 670kN$  크기의 축하중을 재하한 상태로  $\pm 300mm$ 의 변위를 갖는 actuator를 이용하여 변위제어로 실험을 진행하였다. 실험체가 갖는 극한하중의 75% 수준으로 하중이 감소할 때까지 Drift Level을 증가시키면서 실험체의 변위를 제어하였다. 그림 2는 변위 제어의 Drift Level 진행 과정을 보여준다.

그림 3은 각 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 보듯이 단형강을 매입한 실험체의 경우, 강관을 매입한 실험체가 비슷한 단면적을 갖는 H형강 매입 실험체 보다 큰 극한강도를 보여주고 있다. 실험체의 내진 성능을 평가하는 기준인 연성능력 역시 H형강을 매입한 실험

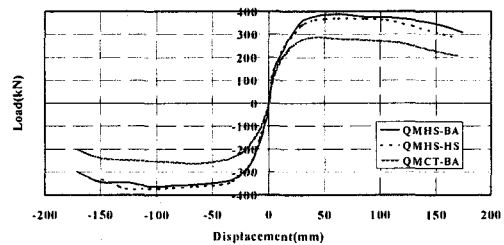
험체보다는 강관을 매입한 실험체가 우수한 성능을 보였으며, QSHS-WA를 제외하고는 도로교설계기준의 요구연성도 5를 만족하고 있다. 하지만 비내진 실험체(50%한정연성실험체)의 횡방향 철근비에 따른 RC교각의 연성도 역시 요구연성도 5 내외의 값을 보이고 있기 때문에, 합성교각의 설계에서 횡방향 철근의 감소 여부는 보다 많은 실험 후 판단해야 하고, 현 상황에서는 RC교각 수준의 횡방향 철근비를 유지해야 할 것으로 판단된다. 그림 3(b)는 다형강 매입 실험체의 하중-변위 곡선을 비교하였다. 내진규정을 만족하도록 설계된 다형강 매입 실험체는 모두 6이상의 연성도를 나타냈다. 또한, 단형강 매입 강재의 강재기여도(0.16)보다 큰 강재기여도(0.35)로 더 높은 극한강도를 보이고 있다. 하지만, 원형강관을 다수 매입한 QMCT-BA 실험체의 경우 QMHS-BA(H형강 다수 매입) 극한강도의 75% 수준의 강도를 보여주고 있는데, 이는 소성 힌지 구간의 강관과 콘크리트의 합성문제와 심부 콘크리트를 구속시켜주는 역할이 미비한 것으로 판단되어 이에 대한 향후 검토가 좀 더 이루어질 예정이다. 그림 4는 강관의 좌굴위치와 심부콘크리트 파쇄 위치가 일치함을 보여준다. 또 H형강재의 부착면적 보다 적은 원형강관의 부착면적이 합성작용을 유지할 수 있는 부착응력을 확보하지 못한 것도 그 원인으로 판단된다. 강관의 경우, 심부 콘크리트의 파쇄와 합성작용 확보를 위한 상세가 요구된다.

### 2.3 변위연성도 분석

단일형강을 매입한 실험체의 경우, 실험체의 내진 성능을 평가하는 기준인 연성능력 역시 H형강을 매입한 실험체보다는 강관을 매입한 실험체가 우수한 성능을 보였으며, QSHS-WA를 제외하고는 도로교설계기준의 요구연성도 5를 만족하고 있다. 하지만 한정연성 실험체(내진 실험체의 50%)의 횡방향 철근비에 따른 RC교각의 연성도 역시 요구연성도 5를 약간 넘는 값을 보이고 있기 때문에 합성교각의 설계에서 횡방향철근의 감소 여부는 보다 많은 실험 후 판단해야 하고, 현 상황에서는 RC교각 수준의 횡방향 철근비를 유지해야 할 것으로 판단된다. 다형강매입 실험체의 경우, 내진규정을 만족하도록 설계된 다형강 매입 실험체는 모두 6이상의 연성도를 나타냈다. 표 3에는 변위 연성도를 정의하기 위한 실험체의 항복, 극한 값을 나타내었고, 그림 3에서는 하중-변위 곡선을 나타내었다.



(a) 단형강 매입실험체



(b) 다형강 매입실험체

그림 3. 하중-변위 곡선(Envelope Curve)

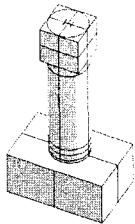
표 2. 실험체의 강도와 연성도

	Yield		Ultimate		Displacement Ductility
	Load (kN)	Displacement (mm)	Load (kN)	Displacement (mm)	
QSHS-BA	209.60	24.73	208.21	131.64	5.32
QSHS-SR	197.74	21.89	199.79	121.66	5.56
QSHS-WA	223.21	27.64	218.31	104.54	3.78
QSCT-BA	227.29	13.49	234.40	130.67	9.69
QSCT-SR	206.93	16.43	206.47	88.73	5.40
QMHS-BA	339.47	26.05	329.78	159.89	6.14
QMHS-HS	316.48	24.28	314.02	145.45	6.00
QMCT-BA	244.59	20.41	245.32	134.76	6.60

### 3. 비선형 해석

#### 3.1 재료 모델링

모델의 기하학적인 구성을 실험체와 같은 차원을 갖도록 3-D 모델형식(model type)을 선택하였다. 콘크리트의 경우 원형 부분과 강재와의 접촉 부분 등 비교적 복잡한 단면 형상을 나타내야 하므로, 이를 표현하기 위하여 6절점(node) wedge element와 8절점 brick element를 혼합하여 사용하였다. 강재의 경우는 비교적 간단한 형상을 나타내므로 8절점 brick element를 사용하였다. 마지막으로 철근은 embedded reinforcements element를 사용하였다. 각 요소를 사용하여 재료의 기하 형상을 솔리드(solid)로 모델링하였다. 그 형상은 그림 4와 같다.



(1) 콘크리트



(2) H형강



(3) 원형강관



(4) 주철근과 횡방향철근

그림 4. 각 구조재료의 기하학적 형상

콘크리트 재료의 해석은 smeared cracking model과 D-P model을 사용하였고 강재 모델은 von-Mises를 사용하였다. 매입강재와 주변을 둘러싸고 있는 콘크리트 사이의 경계면이 최종적인 거동에 영향을 미치겠지만 현재의 해석모델에서는 완전부착으로 가정하였다.

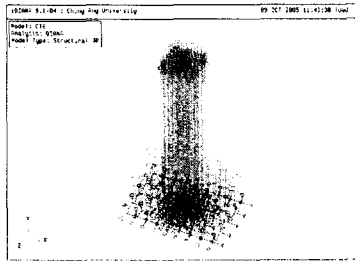
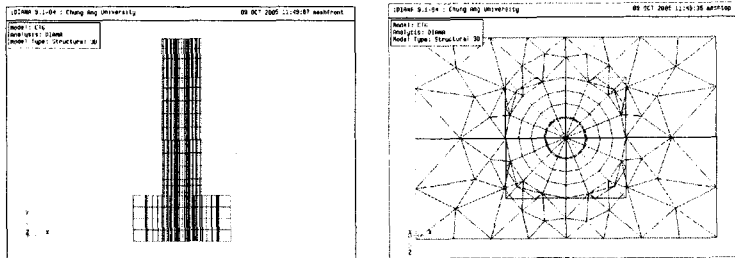


그림 5. 경계조건과 하중



(1) 정면

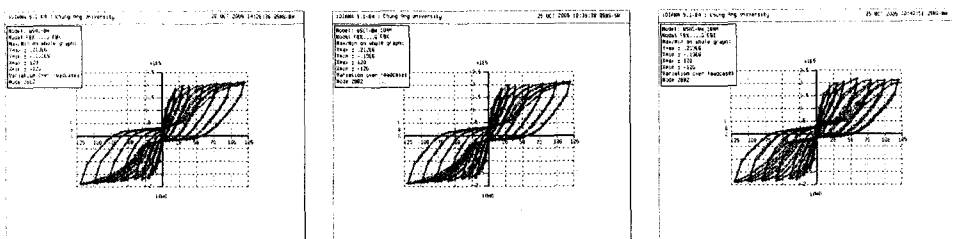
(2) 평면

그림 6. 해석모델

반복하중의 하중 단계에 따른 변위제어(displacement control)에서 변위는 5mm를 기준으로 최대 변위 60mm까지 진행시켰다. 이는 실제 실험체의 변위 제어와 같은 진행 단계를 보여준다.

### 3.2 해석 결과 및 비교

준정적 해석의 하중-이력 결과를 실험체별로 나열하였다. 해석모델명은 실험체 부재와 동일하며 단일형강매입 합성기둥에 대해서만 유한요소해석을 실시하였다.



(1) QSHS-BA

(2) QSHS-SR

(3) QSHS-WA

그림 7. Quasi-static test 해석결과

해석결과를 실험결과와 비교한 그래프를 그림 8에 나타내었다. 해석결과는 최대하중, 항복지점 등에서 실험값 보다 다소 과소평가하는 경향을 보였다. 이는 강관내부의 콘크리트 혹은 심부구속철근 내부의 콘크리트에 작용하는 구속효과의 고려가 부족하기 때문으로 판단된다. 또한 반복하중에 의한 강도 감소 효과를 제대로 구현하지 못하였는데 이는 반복하중재하시 심부 콘크리트 내부로 진전되는 손상에 대한 해석 모델 구현이 부족하기 때문으로 판단된다. 특히 강관을 매입한 실험체

의 경우 실험값과의 차이가 크게 발생하였다. 이는 실제 실험체 상에 발생하는 강관내의 콘크리트 강도 증가를 유한요소해석 상에서는 충분히 반영하지 못한 것으로 판단된다. 추후 구속 콘크리트를 고려한 재료모델 곡선의 반영 및 합성 효과의 모델링을 통해서 개선할 필요성이 있다.

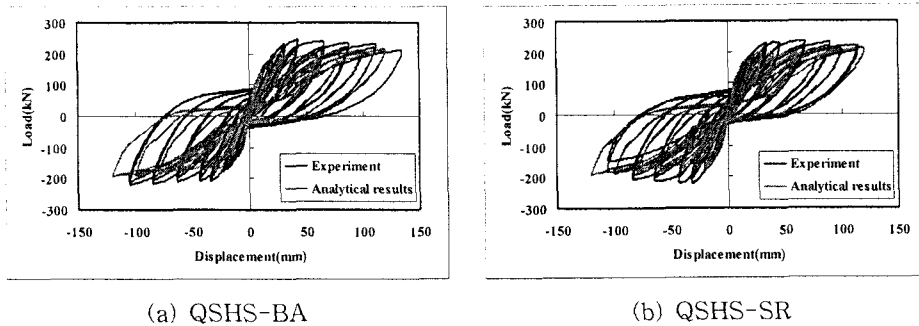


그림 8. 실험결과와 해석결과 비교

#### 4. 결 론

강재매입형 합성기둥에 대한 실험적 연구결과를 분석하기 위한 비선형 유한요소 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 단일 강재를 매입한 형태의 합성기둥은 원형강관을 매입한 실험체가 큰 모멘트 저항 능력과 연성을 보였다.
- 2) 유한요소해석 프로그램을 이용한 강재매입형 합성기둥의 해석결과와 실험결과를 거의 유사한 거동을 나타내었다.
- 3) 낮은 강재비를 갖는 SRC 합성기둥의 상세 설계는 현재 철근콘크리트 교각의 규정을 준용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. El-Tawil, S., Sanz-Picon, C. F., Deierlein, G. G., "Evaluation of ACI 318 and AISC (LRFD) Strength Provisions for Composit Beam-Columns", J. Construct. Steel Research, Vol. 34, 1995, pp.103~123.
2. Mirza, S. A., Lacroix, E. A., "Comparative strength analyses of concrete-encased steel composite columns", J. of Structural Engineering, Vol. 130, No. 12, 2004, pp.1941~1953.
3. El-Tawil, S., Deierlein, G. G., "Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Columns", Journal of Structural Engineering, 125, 1999, pp.1009-1019.