

# 진동대 실험을 통한 원형 합성 기둥의 내진 성능 평가

## Seismic performance evaluation of circular composite columns by shaking table test

심창수<sup>1)</sup> · 정영수<sup>2)</sup> · 박지호<sup>3)</sup> · 박창영<sup>4)</sup>

Shim, Chang-Su · Chung, Young-Soo · Park, Ji-Ho · Park, Chang-Young

**국문 요약** >> 합성 교각의 설계에서 요구 내진성능을 만족하기 위한 철근 상세 규정이 명확하지 않은 측면이 있다. 합성 교각은 단면치수를 감소시키고 지진하중하에서 기둥의 연성을 개선하기 위해 제안되었다. 이 논문에서는 400mm 직경을 가진 단일 강재를 콘크리트에 매입한 합성기둥 부재를 5기 제작하여 합성기둥의 내진성능을 연구하였다. 진동대 실험과 유사동적 실험이 수행되었는데 근단층지반운동을 고려한 축소모형의 구조적 거동이 평가되었다. 실험 변수는 횡철근의 간격, 주철근의 겹침이음, 매입 강재 단면으로 설정하였다. 진동대 실험에 의해 평가된 변위연성도가 유사동적 실험에 비해 적게 나타났고 한정연성설계, 주철근의 겹침 이음 50%를 가진 부재가 기준 부재에 비해서 낮은 연성도를 보였다. 강재비는 극한강도에 영향을 미치고 겹침이음과 횡철근 비의 감소는 변위능력을 감소시켰다. 합성 교각의 상세에 따른 에너지 소산능력의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

**주요어** 합성교각, 내진성능, 진동대 실험, 근단층지반 운동

**ABSTRACT** >> For the design of composite bridge piers, detail requirements for the reinforcements is not clear to satisfy the required seismic performance. Composite bridge piers were suggested to reduce the sectional dimensions and to enhance the ductility of the columns under earthquake loadings. In this paper, five specimens of concrete encased composite columns of 400mm diameter with single core steel were fabricated to investigate the seismic performance of the composite columns. Shaking table tests and a Pseudo-Dynamic test were carried out and structural behavior of small-scaled models considering near-fault motions was evaluated. Test parameters were the pace of the transverse reinforcement, lap splice of longitudinal reinforcement and encased steel member sections. The displacement ductility from shaking table tests was lower than that from the pseudo-dynamic test. Limited ductile design and 50% lap splice of longitudinal reinforcement reduced the displacement ductility. Steel ratio showed significant effect on the ultimate strength. Lap splice and low transverse reinforcements reduced the displacement capacity. The energy dissipation capacity of composite columns did not show significant difference according to details.

**Key words** Composite piers, Seismic performance, Shaking table test, Near fault motion

### 1. 서론

강재매입형 합성교각은 강재와 콘크리트의 합성효과를 활용하고 각각의 재료가 가진 장점을 활용하기 위해 유용한 하부구조 설계 대안이 될 수 있다. 현재까지 주로 건축구조에 강재비가 높은 단면으로 많이 활용되었지만 최근에 토목

분야에서 경전철 등 작은 단면을 요구하거나 모멘트가 크게 발생하는 구간에 대해 활용이 증가하고 있다. 그러나, 적용하는 상세 및 단면 배치가 교각단면의 상당부분을 상대적으로 큰 강재 단면을 단일 부재로 매입하는 형태여서 구조 효율성이 떨어지고 경제적이지 못한 경우가 발생하고 있다. 교량의 하부구조와 같이 상대적으로 큰 단면에는 강재비가 낮아서 기존의 철근 콘크리트 교각에 배근되는 축방향 철근비 정도의 수준으로 설계되어야 경제성을 확보할 수 있을 것이다.<sup>(1)</sup>

낮은 강재비를 갖는 합성교각은 그림 1과 같이 단일 강재 혹은 복수의 강재를 모멘트 효과가 크도록 외측에 배치하는 것이 효율적이다. 다만, 내진 거동에서 중요한 극한강도 이후의 연성 거동을 확보하기 위해서는 심부 구간의 콘크리트

<sup>1)</sup> 중앙대학교 토목공학과 교수  
(대표저자: csshim@cau.ac.kr)

<sup>2)</sup> 중앙대학교 토목공학과 교수

<sup>3)</sup> 중앙대학교 토목공학과 석사과정

<sup>4)</sup> 중앙대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

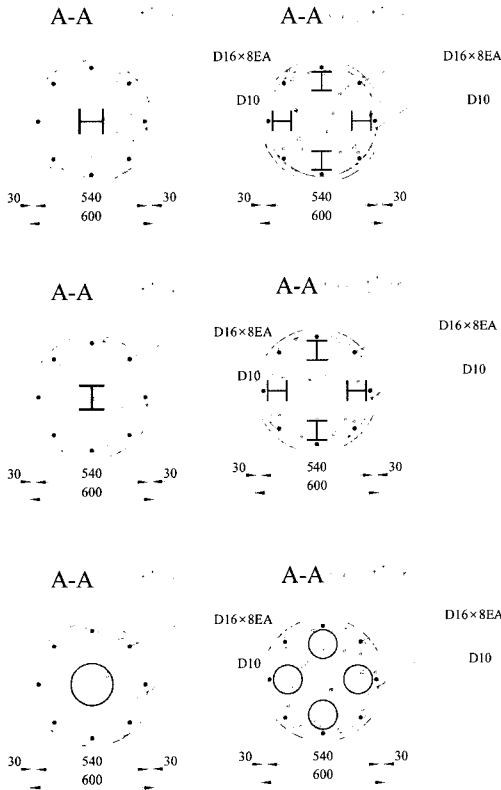
(논문접수일 : 2007. 9. 10 / 심사종료일 : 2007. 10. 2)

의 구속이 중요한데 매입된 강재로 인해서 응력의 교란이 발생할 수 있어서 상재에 대한 검토가 요구된다. 매입 강재로 인해 증가되는 연성 효과와 응력교란에 따른 연성 감소 효과를 검토하고 효율적으로 보완될 수 있는 배치 및 매입 강재의 단면, 합성 효과 확보 여부 등을 결정하여야 한다. 이를 위해 낮은 강재비를 갖는 합성기둥에 대한 실험적 연

구 및 적절한 적용 설계기준에 대한 연구는 국내에서 이루어졌다.<sup>(2)</sup> 실험적 검토를 통해서 낮은 강재비의 합성기둥에 대한 적정 강도의 평가는 콘크리트 설계기준을 기반으로 하는 것이 적절함을 보였다.

합성교각의 장점은 급속시공을 위한 적절한 연결 상재의 도출이 용이하고 내진 성능에서 요구하는 변위연성도 및 에너지 소산능력을 효율적으로 확보할 수 있다는 것이다. 강재매입형 합성교각의 사용으로 심부구속철근량을 줄일 수 있는 가능성을 고려할 수 있게 되는데 이러한 심부구속철근은 주철근의 좌굴을 방지하고 교각 전체의 전단파괴를 방지하여 연성을 확보하게 된다. 철근콘크리트 교각에 대해서 각국의 설계기준은 소성한지 구간에서 심부구속철근량에 대한 규정을 명시하고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 강재매입형 합성교각에 대해서는 심부구속철근량에 대한 규정이 명확하지 않고 기준에 수행된 준정적실험에서 철근 콘크리트 교각의 규정을 준용할 수 있다는 정도의 결론을 도출하였다.<sup>(2)</sup>

이 논문에서는 낮은 강재비를 갖는 강재매입형 합성교각에 대하여 진동대 실험 및 유사동적 실험을 수행하여 철근 겹이음, 횡철근 배근, 강재비의 효과가 내진 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 축소모형의 한계로 인하여 단일강재 매입형에 대한 실험만 수행하였다.



〈그림 1〉 강재매입형 합성교각 단면

## 2. 국내 및 국외의 내진규정 분석

원형 철근콘크리트 교각에 대하여 주요 각국의 내진규정에서 정하고 있는 심부구속철근량의 산정식을 표 1에 비교

〈표 1〉 설계 기준별 심부구속철근 산정식

Design Code	Required Volumetric ratio of transverse steel
도로교 설계기준 (2005) <sup>(3)</sup> AASHTO (2004) <sup>(4)</sup> ACI 318-05 (2005) <sup>(5)</sup>	$\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y}, \quad 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \right]$
ATC-32 (1996) <sup>(6)</sup>	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{re}}{f_{yc}} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_c}{f_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_l - 0.01) \quad \text{for } H/D \leq 4$ $\rho_s = \text{Max} \left[ 0.16 \frac{f_{re}}{f_{yc}} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_l - 0.01), \quad 0.0002n_b \right] \quad \text{for } H/D > 4$
Caltrans <sup>(7)</sup>	$\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}, \quad 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \right] \quad \text{for } D \leq 900 \text{ mm}$ $\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}, \quad 0.12 \frac{f'_c}{f_y} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \right] \quad \text{for } D > 900 \text{ mm}$
Eurocode 8 (1996) <sup>(8)</sup>	$\rho_w = \omega_{w,d,c} \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$ $\omega_{w,d,c} = 1.4 \times \left\{ 1.74 \frac{A_c}{A_{\alpha}} (0.009\mu_c + 0.17)\eta_k - 0.07 \right\} \geq \omega_{w,\min}$
NZS 3101 (1995) <sup>(9)</sup>	$\rho_s = \text{Max} \left[ 1.4 \times \left[ \frac{\{(\varnothing_u/\varnothing_y) - 33\rho_l m + 22\}}{111} \frac{A_g}{A_c} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{N^*}{\varnothing f'_c A_g} \right] - 0.0084, \quad \frac{A_{st}}{110d} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b} \right]$

정리하였다. 도로교설계기준, AASHTO, ACI318-05 기준은 콘크리트 압축강도, 심부구속철근의 항복강도와 심부단면적 비율 변수로만 구성되어 있다. ATC-32는 심부단면적 비율을 제외한 반면 축하중비와 주철근비를 고려하고 있다. 축방향 철근비는 하한기준인 1.0%와 상한기준인 4%를 기준으로 축방향 철근비가 증가할수록 심부구속철근비가 증가하도록 하였다. 이는 축방향 철근비가 증가하면 교각의 연성이 감소한다는 것을 의미하며, 축방향 철근비 증가로 인한 연성저하를 방지하기 위해 축방향 철근비를 변수로 두고 있는 것이다. ACT-32의 심부구속 철근산정식은 곡률연성도가 최소 13을 확보하도록 하기 위한 산정식이며 응답수정계수 적용에 의한 변위연성이 확보되는 것으로 간주하고 있다. 그 외의 Caltrans, Eurocode 8, 그리고 NZS 3101는 콘크리트 압축강도, 심부구속철근의 항복강도, 심부단면적 비율 그리고 축하중비 모두를 고려하고 있으며, 특히 Eurocode-8 그리고 NZS 3101는 추가적으로 요구곡률연성도를 변수로 채택하고 있으며, 식 (1)과 같이 Eurocode-8에서는 요구곡률연성도 13을 기준으로 하는 완전연성(Ductile)과 7을 사용하는 한정연성(Limited Ductile)로 규정되어 있다.(EC-8, 2002)

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) \frac{L_p}{L} (1 - 0.5 \frac{L_p}{L}) \quad (1)$$

여기서,  $L_p = 0.08L + 0.022f_y d_b$  (mm, MPa)

( $\mu_{\Delta}$ : 변위연성도,  $\mu_{\phi}$ : 곡률연성도,  $L_p$ : 소성힌지구간의 길이,  $L$ : 교각의 길이,  $f_y$ : 횡철근의 항복강도,  $d_b$ : 횡철근의 직경)

NZS 3101는 추가적으로 축방향 철근비와 축방향 철근의 항복강도로 구성되어 있다. 도로교설계기준 등과 Eurocode 8의 설계식은 콘크리트와 심부구속철근의 재료강도만을 사용하나, 축하중비는 ATC-32에서만 적용하고 있다. 특히 NZS 3101는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 조건으로 주철근에 대한 변수를 사용하고 있다.

### 3. 실험계획

#### 3.1 실험부재

합성기둥은 내진 1등급으로 설계시공된 길이 60m의 2경간을 상부구조로 가지는 높이 6.4m 교각의 교량을 대상모델로 하여 1/4.25의 축척계수를 적용하여 설계하였다. 상사모델 해석형 기법은 실교각과 실험체 모델을 상사라고 하고 실교각을 실험체 모델의 S배로 해서 기초상사비를 생각한다. 응답계산을 실험체 모델측에서 행하고 실교각의 응답은 실험 종료후 상사법칙을 고려해서 환산해 구하는 방법으로

본 실험의 상사법칙은 실험체의 기준은 가속도로 하였고, 그 외의 변수들은 표 2에 나타난 바와 같다.

축소 실험체는 단면지름 400mm, 높이 1,400mm인 형상비 3.5의 5기를 제작하였다. 실험체는 현행내진 규정의 50% 심부구속철근비를 갖도록 설계된 한정연성실험체 1기, 내진 실험체 4기에 0, 50% 주철근 겹침이음의 변수와 강재비 1.68%, 2.45%를 변수로 하였고, 실험의 방법을 진동대실험과 유사동적실험으로 구분하였다. 그림 2는 실험체 제원을 나타내었고, 표 3에 주요 실험변수를 정리하였다.

### 3.2 재료성질

교각 실험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은 골재 최대치수 9mm 골재의 레디믹스트 콘크리트를 사용하였다. 배합표는 표 4에 나타내었으며, 3개의 원주형 공시체  $\phi 100 \times 200$  3개의 압축강도 실험을 통해 28MPa를 얻었다. 철근은 SD30인 D10의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 SD30 D6을 사용하였다. 횡철근의 경우 500MPa의 D6 철근을 열처리 하여 320MPa까지 강도를 감소시켜 사용하였다. 철근의 인장 실험 결과는 그림 3에 그래프로 나타내었다.

## 4. 실험방법 및 검증

### 4.1 진동대 제원 및 실험장치

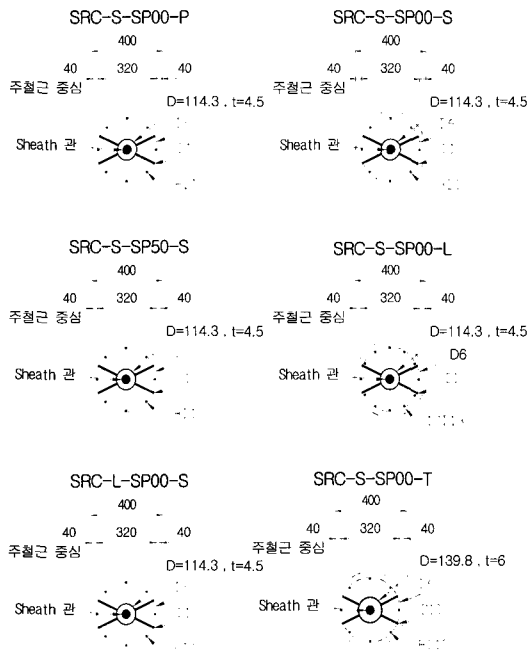
실험에 사용된 진동대는 일축방향 진동대로서 크기는 5.0m×3.0m이고 테이블 위에 올릴 수 있는 실험체의 최대중량이 300kN, 최대가속도 1.0g까지 재현 가능하다. 진동대의 최대 속도는 50m/s, 좌우의 최대 변위는 ±100mm 이다.

축방향 하중을 위해 대상구조물의 상부 사하중의 1/4.25 축소 축하중이 296kN이므로 실험체의 상부에 프리스트레스를 도입하여  $0.1 \cdot f_{ck} \cdot Ag$ 에 해당하는 296kN의 축력으로

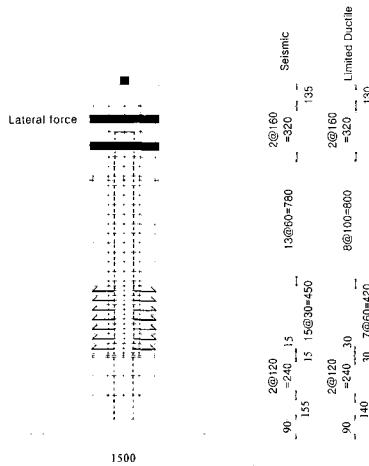
〈표 2〉 Scale Factor

Unit	Pseudo	Reno / CAU	Berkeley
L	S	S	S
A	$\frac{1}{S}$	1	1
T	S	$\sqrt{\frac{W_i \cdot S}{P}}$	$\sqrt{S}$
Area	$S^2$	$S^2$	$S^2$
K (stiffness)	S	S	S
Stress	1	1	1
Force	$S^2$	$S^2$	$S^2$
Mass	$S^3$	$S^2$	$S^2$

\* S=4.25,  $W_i$ =weight of the inertial system  
P=applied axial force on the column



(a) 단면 상세도

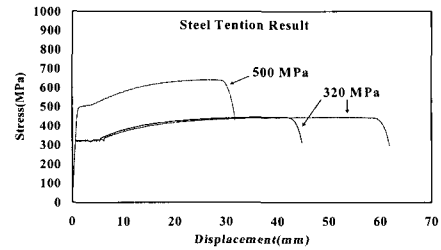


(b) 실험체 철근배근도

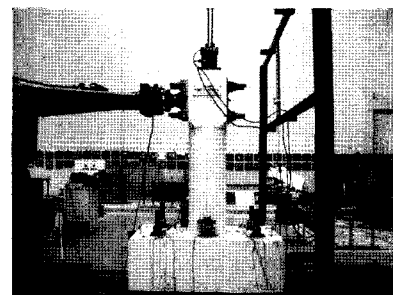
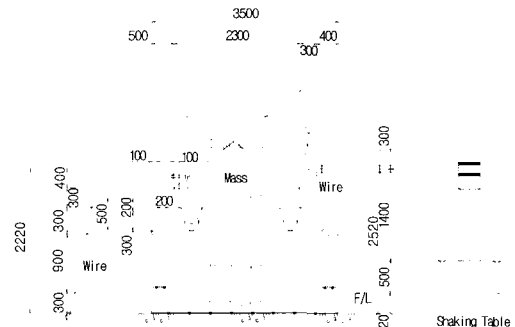
<그림 2> 실험체의 재원

재하하였고, 횡하중 하중을 재현을 위해 296kN 무게의 콘크리트 블럭을 실험체와 연결하였다.

질량을 외부에 설치하는 장치는 마찰의 영향을 최소화하기 위해 베어링시스템과 구리스 도포를 병행하였다. 질량 프레임과 교각의 연결은 강봉을 이용하였고 힌지 조건이 되도록 하였다. 그림 4에 실험 셋업을 나타내었다.



<그림 3> 철근 인장 실험



<그림 4> 실험 셋업

<표 3> 실험체 명과 변수

실험 종류	실험체명	구조용강재(mm)	강재+주철근비(%)	띠철근비(%)	축하중(kN)	실험변수
Shaking Table	SRC-S-SP00-S	D=114.3, t=4.5	1.68	D6-1.22	296	기준 실험체
	SRC-L-SP00-S	D=114.3, t=4.5	1.68	D6-0.61	296	한정연성 설계 실험체
	SRC-S-SP50-S	D=114.3, t=4.5	1.68	D6-1.22	296	주철근 겹침이음 실험체
	SRC-S-SP00-T	D=139.8, t=6.0	2.45	D6-1.22	296	강재비 증가 실험체
Pseudo-Dynamic	SRC-S-SP00-P	D=114.3, t=4.5	1.68	D6-1.22	296	Pseudo 실험체

<표 4> 배합표

굵은 골재 최대치수(mm)	물-시멘트비(%)	슬럼프(mm)	단위질량(kg/m <sup>3</sup> )					설계기준강도(MPa)
			물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제	
8	39.5	120	145	420	516	739	2.1	24

<표 5> 콘크리트 압축강도 실험결과

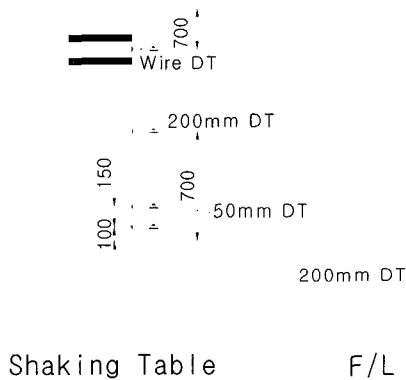
공시체	1	2	3	평균
압축강도(MPa)	32.44	24.96	26.2	28.0

4.2 실험방법

교각의 내진 거동에 대한 실험에서 주로 지반 운동을 원역지진 지반가속도(far field ground motion, FFGM)에 대해서 이루어져 왔지만 최근에 근단층운동(near fault ground motion, 이후 NFGM)의 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에 발생한 몇 개의 강진의 경우(Northridge(1994), Hyogoken Nanbu(1995), Kocaeli(1999), Duzce(1999), Chi-Chi(1999)) 단층 근처 지역에서의 지반운동에서의 특징적인 모습들을 보여주었다. 이러한 운동은 밀집된 도심지역에서 발생할 경우에 심각한 손상을 유발함을 명확하게 보여주고 있다(Phan 2005).<sup>(10)</sup>

최근에 국내에서도 근단층지반운동에 대한 모델링이 수행되었는데<sup>(11)</sup> 근단층 지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 갖고 있고 NFGM은 일반적으로 진앙거리가 약 10km 이내인 지역에서 관측되는 지진지반운동을 말한다. NFGM은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 앞서 언급한 지진들에서 관측되었다. 이 논문에서는 국내에서 수행된 근단층지반운동에 대한 모델링에서 도출된 지반운동을 이용하였다.

본 실험에서의 지반운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 결과를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높이면서 파괴에 이르도록 설정하였다.



(a) 변위

(b) 변형률

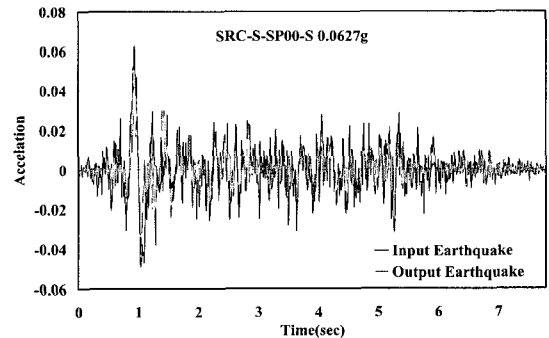
〈그림 5〉 변위와 변형률 측정 위치

4.3 계측 방법

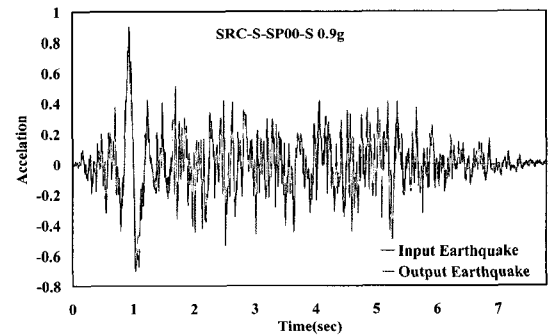
축방향 하중 측정을 위해서는 실험체에 프리스트레스를 도입할 때, 로드셀을 설치하여 축방향의 하중 측정을 할 수 있도록 하고, 횡방향 하중 측정을 위해서는 실험체와 질량블록 사이에 양방향으로 측정할 수 있는 로드셀을 설치하여 횡방향의 하중을 측정할 수 있도록 하였다. 실험체의 곡률연성도 측정에 필요한 곡률 측정을 위해 기초부와 실험체의 이음부에서 상부로 100mm, 250mm 떨어진 곳에 변위계를 설치하였고, 700mm, 1400mm 높이에 와이어 변위계를 설치하여 각 위치에서의 변위를 측정하였다. 진동대의 정확한 지진파 재현을 검토하기 위하여 진동대와 연결된 철물과 실험체 상부, 질량블록에 가속도계를 설치하였다. 특히 진동의 움직임을 좀 더 명확히 검토하기 위하여 진동대와 철물 사이에도 변위계를 설치하였다.

4.4 지진파 검증

실험에 있어서 진동대가 실제 입력한 NFGM을 얼마나 잘 재현해 내는 것이 중요한 요인 중의 하나였다. 그래서 지진파의 재현 여부를 확인하기 위하여 진동대 바닥에 가속도계를 설치하여 입력지진과 재현지진의 유사성을 검증하는 것이 필요하였다. 그림 6에서는 입력된 지진파와 진동대의



(a) 0.0627g



(b) 0.9g

〈그림 6〉 지진파의 가속도비교

바닥에 설치한 가속도계를 통해 0.0627g와 0.9g에서 측정된 결과값을 비교하여 그래프로 도시하였는데 상당히 잘 일치하였다. 그래서 그림 7에 나타낸 바와 같이 입력지진과 가속도계를 통해 측정된 지진파의 진동수를 비교해 보았다. 낮은 가속도(0.0627g)에서는 노이즈의 영향으로 인하여 약간의 차이가 생겼지만, 높은 가속도(0.9g)에서는 거의 일치하는 것을 보여주었다.

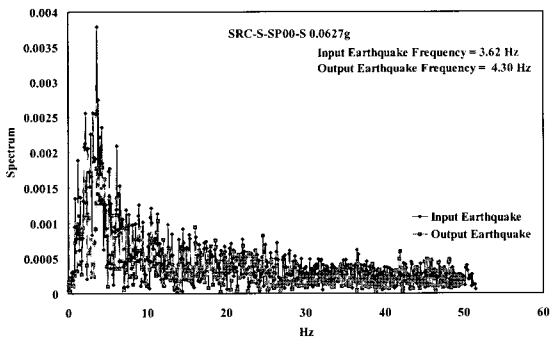
4.5 마찰력 평가

질량 블록을 위해 제작된 프레임은 마찰을 최소화하기 위해서 베어링 및 표면 처리를 하였지만 이에 대한 검증이 필요하였다. 따라서, 각각의 실험부재는 질량 블록을 연결한 상태에서의 가진 등을 통해서 교각의 하단에서 측정된 가속도 센서의 결과 값에 중량의 크기(296kN)를 곱하여 로드셀을 통해 측정된 하중 값과 비교하였다. 그림 8에서 이러한 결과를 나타내었는데 마찰계수 값이 0.01로 상당히 마찰력이 작은 것을 알 수 있었다.

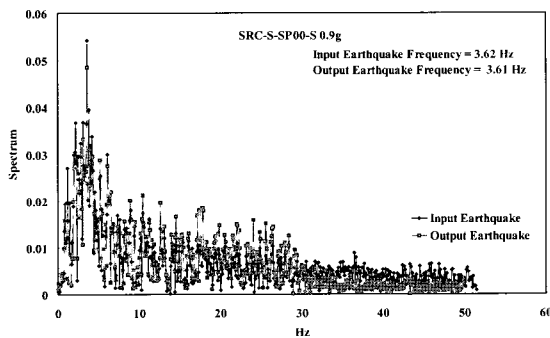
5. 실험 결과

5.1 극한 거동

실험을 통해 측정된 교각 상단의 상대 횡변위와 로드셀에



(a) 0.0627g



(b) 0.9g

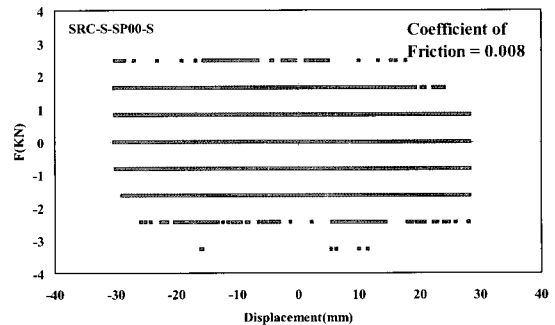
〈그림 7〉 지진파의 FFT비교

서 측정된 횡력을 이용하여 하중-변위 이력을 도시하였다. NFGM의 0.9g에서도 교각이 충분한 손상을 일으키지 않아서 교각이 가진 고유진동수를 가정하여 Sine Wave로 파괴를 유도하였다. 표 6에 실험에서 구한 하중-변위 이력으로부터 최대 횡력과 최대 상대변위를 정리하였다. 기준부재의 최대하중에서의 변위가 주철근 겹침이음 부재 혹은 한정연성 설계 부재에 비해서 상당히 높게 나타났다. 강재비를 증가시킨 부재인 SRC-S-SP00 -T 부재의 극한강도가 기준실험체에 비해 23.6% 증가되는 것을 확인하였다.

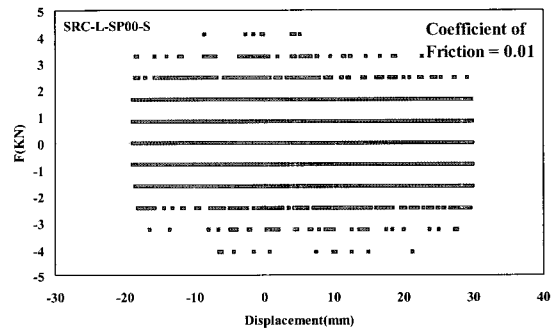
파괴모드를 보면 횡철근비를 축소한 경우에 심부콘크리트의 손상이 심하게 나타났고 주철근 겹침이음 부재는 피복탈락 구간이 넓게 분포되었다. 강재비를 높인 부재의 상태가 가장 양호하게 나타났다.

5.2 내진 성능 평가

각각의 가속도에서의 하중-변위 이력 곡선의 secant stiffness를 통하여 강성감소의 변화를 관찰할 수 있었고, 모든 부재



(a) SRC-S-SP00-S



(b) SRC-L-SP00-S

〈그림 8〉 정적 실험을 통한 마찰계수 값

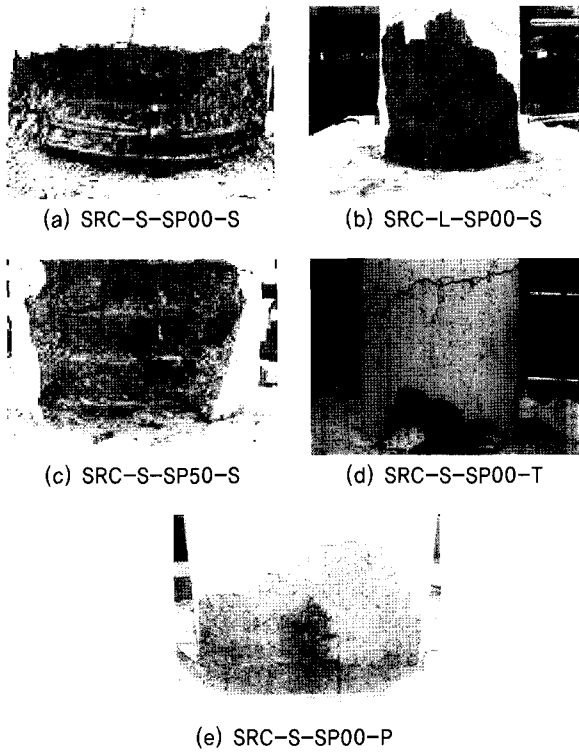
〈표 6〉 최대하중과 변위

실험체 명	최대 하중(kN)	최대하중에서의 변위(mm)
SRC-S-SP00-S	106.56	83.488
SRC-S-SP50-S	115.58	36.756
SRC-L-SP00-S	123.77	39.320
SRC-S-SP00-T	131.15	64.580
SRC-S-SP00-P	102.76	28.375

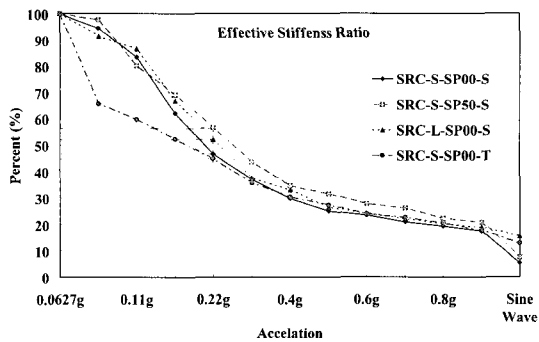
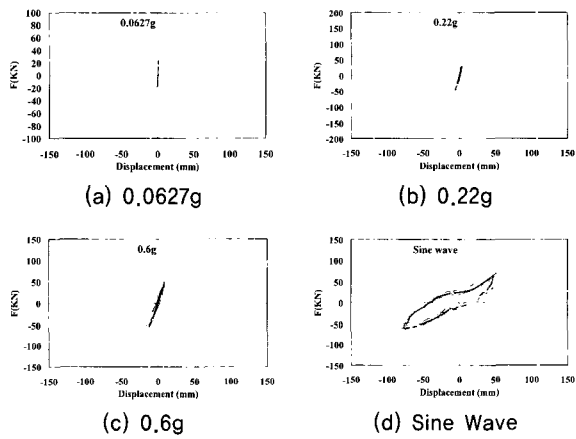
가 유사하게 가속도 0.22g를 가력한 후에 초기 강성의 50% 수준으로 휨강성이 감소함을 확인할 수 있었다. 그림 10에서 각 가속도에 따른 하중-변위 이력곡선을 나타내어 강성

의 변화를 나타낼 수 있도록 하였다.

그림 11에서는 각 실험체의 하중-변위 이력 곡선을 도시하였고, 그림 12에서 포락선을 이용하여 변수에 따른 거동

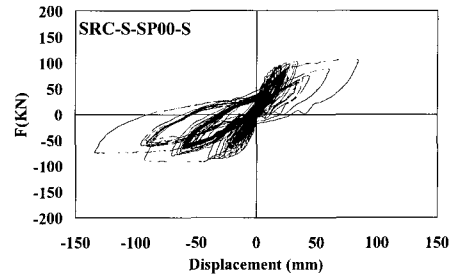


〈그림 9〉 실험체 파괴 사진

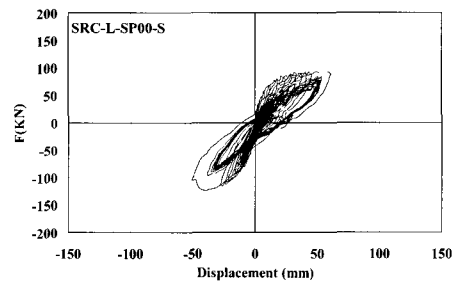


(e) 강성비 변화곡선

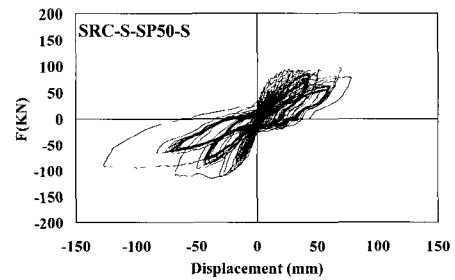
〈그림 10〉 가속도 단계별 강성변화 곡선



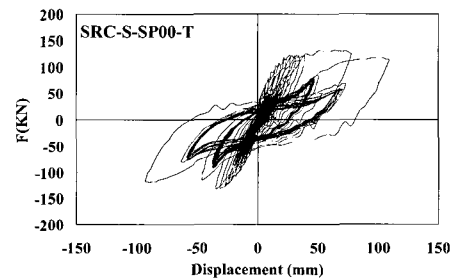
(a) SRC-S-SP00-S



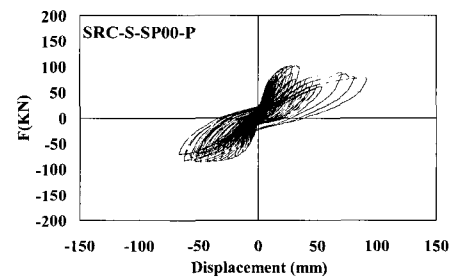
(b) SRC-L-SP00-S



(c) SRC-S-SP50-S

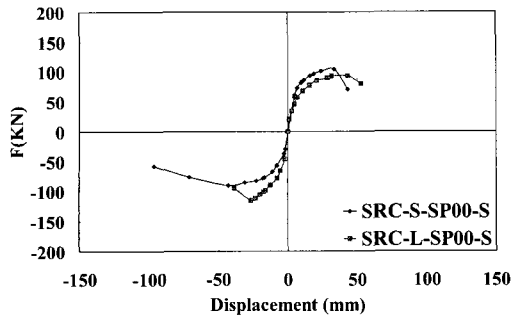


(d) SRC-S-SP00-T

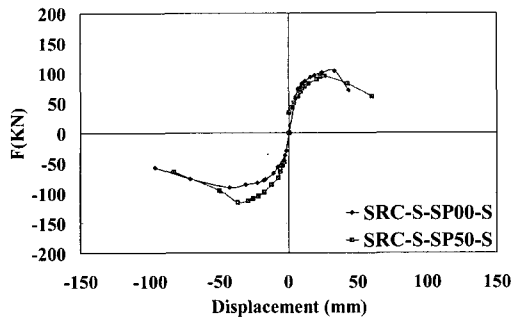


(e) SRC-S-SP00-P

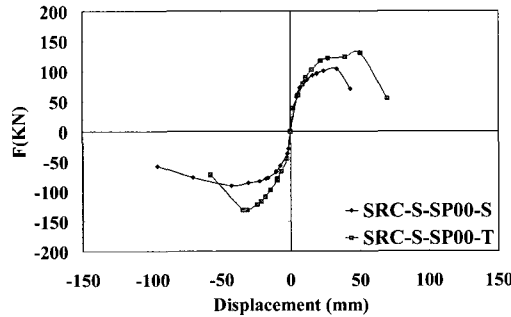
〈그림 11〉 하중-변위 이력곡선



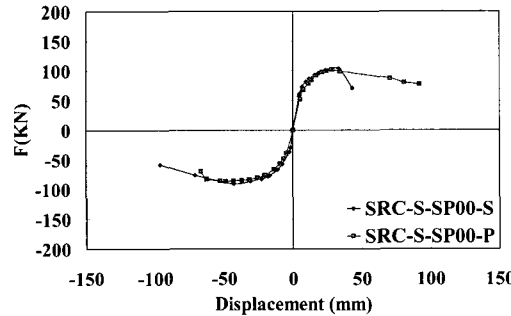
(a) SRC-L-SP00-S



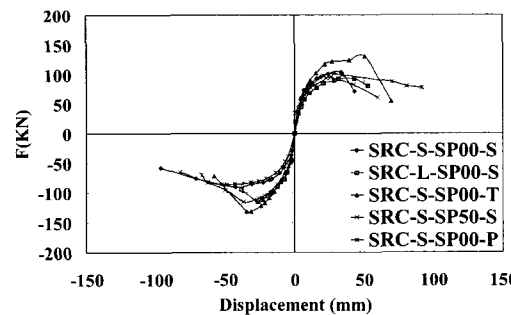
(b) SRC-S-SP50-S



(c) SRC-S-SP00-T



(d) SRC-S-SP00-P



(e) 전체

〈그림 12〉 포락곡선

을 비교하였다. 내진 설계된 기준 실험체와 한정연성으로 설계된 실험체를 비교한 결과 항복하중의 크기는 7.5% 작았고, 항복하중에서의 변위의 크기는 16.7% 더 작게 나타났다. 주철근의 겹침이음에 대한 실험체의 결과를 통해서 0% 겹침이음된 실험체가 50% 겹침이음 된 실험체보다 항복하중의 크기는 7.5% 작았고, 항복하중에서의 변위는 13.3% 작게 발생하였다. 강재비를 증가시킨 실험체의 경우 기준 실험체보다 항복하중이 크기는 19.8% 더 컸고, 항복하중에서의 변위는 25% 더 크게 발생하였다.

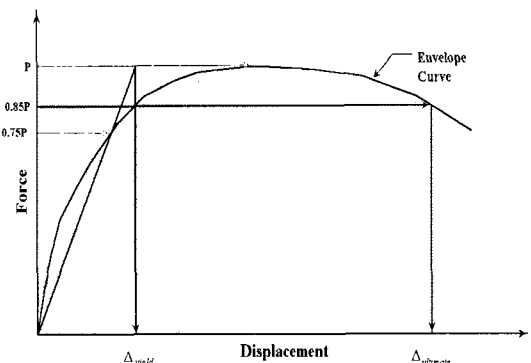
변위연성도( $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$ ) 계산을 위한 항복점 및 극한점의 정의를 그림 13에 나타내었다. 항복점은 하중-변위 및 모멘트-곡률 포락곡선 상에서  $V_{max}$  ( $M_{max}$ )를 지나는 수평선과 원점에서  $0.75 V_{max}$  ( $0.75 M_{max}$ )점을 통과하는 직선과의 교점에 해당하는 변위를 항복점으로 정의하였다. 또한 최대 하중 이후  $0.85 V_{max}$  ( $0.85 M_{max}$ )되는 변위를 극한점으로 정의하였다.<sup>(12)</sup>

표 7은 극한 하중에서의 변위를 항복 하중에서의 변위로 나누어 변위 연성도를 각 실험체 별로 정리하였다. 한정연성 설계된 실험체는 기준 실험체보다 연성도가 25% 감소하였고, 겹침이음을 한 실험체는 23.5%, 강재비를 증가시킨 실험체는 33% 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

그림 14는 각 실험체의 누적 에너지 소산 능력을 그래프로 나타낸 것이다. 각 실험체의 변수 조건들이 에너지 소산 능력에 약간의 영향을 미치고 있다는 것은 알 수 있었고, 기준 실험체에 비하여 13%정도 소산 능력이 크게 나타났다. 그리고 실험방법에 있어서는 진동대 실험의 경우가 유사동적 실험에 비하여 에너지 소산능력이 47% 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

### 5.3 국부거동

철근 및 매입강재에 부착된 변형률 게이지의 측정값을 통해 각 실험 변수에 따른 철근 및 강재의 변형률을 비교한 그

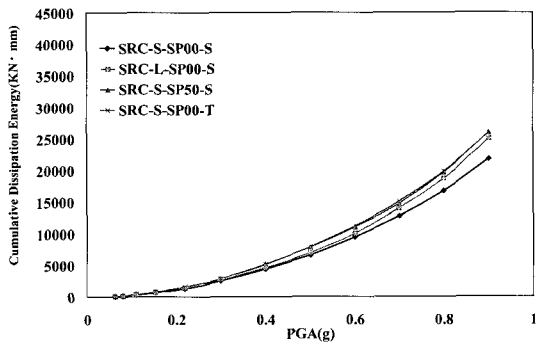


〈그림 13〉 항복 및 극한 정의

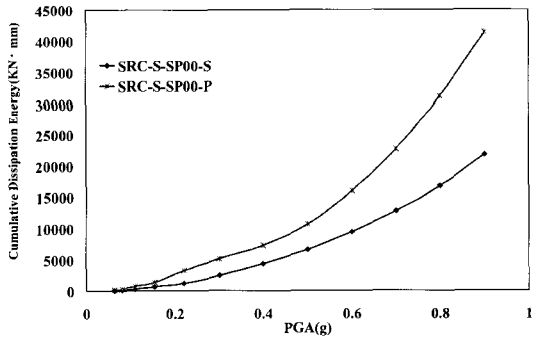


〈표 7〉 실험체의 변위 연성도

실험체명	항복하중(kN)	항복하중에서의 변위(mm)	극한 하중(kN)	극한 하중에서의 변위(mm)	변위 연성도
SRC-S-SP00-S	79.92	12.38	90.58	37.29	4.51
	-68.24	-15.23	-77.34	-68.84	
SRC-L-SP00-S	70.08	15.84	79.43	53.44	3.37
	-86.69	-14.60	-98.24	-36.54	
SRC-S-SP50-S	72.54	12.30	82.21	42.41	3.45
	-86.68	-17.02	-98.24	-48.44	
SRC-S-SP00-T	97.74	18.34	110.78	55.39	3.02
	-98.36	-20.10	-111.48	-42.42	
SRC-S-SP00-P	76.52	14.30	86.72	71.39	4.99



(a) 변수에 따른 누적 에너지 소산 능력



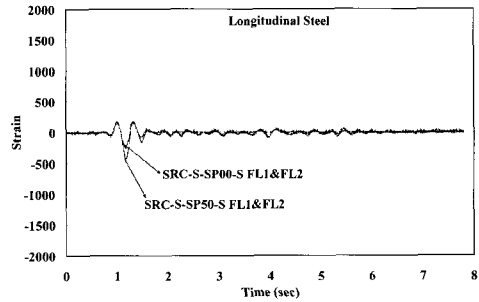
(b) 실험방법에 따른 누적 에너지 소산 능력

〈그림 14〉 누적 에너지 소산 능력

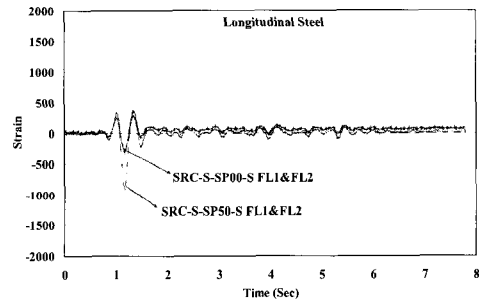
래프를 그림 15에서 그림 17까지 도시하였다.

주철근의 겹침이음에 변수를 둔 실험체와 기준 실험체의 주철근 게이지의 측정값을 비교한 결과 아주 작은 가속도 수준(0.0803g)에서는 변형률이 거의 비슷하게 나타났지만, 0.11g의 최대응답에서는 0% 겹침이음 된 실험체에 비해 50% 겹침이음 된 실험체가 2배정도 크게 변형률이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 0.11g 이후에는 그 이상의 변형률의 차이를 보였고, 0.22g에 이르러서는 50% 겹침이음 된 실험체의 최하단부에 부착된 게이지의 변형률이 철근의 항복 변형률을 넘어서게 되었다.

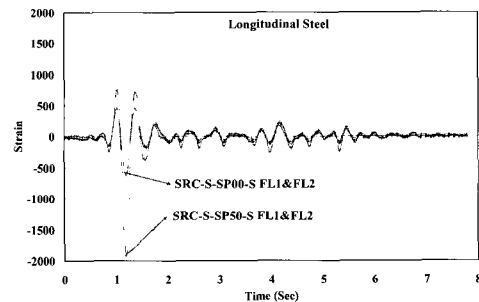
내진 설계된 실험체와 한정연성으로 설계된 실험체에서는 횡방향 철근에 부착된 게이지를 통해 변형률을 비교해



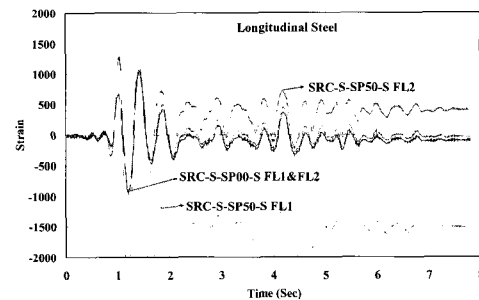
(a) 0.0803g



(b) 0.11g

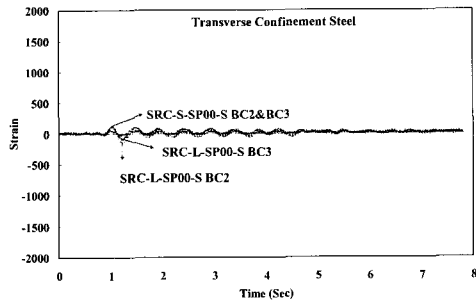


(c) 0.154g

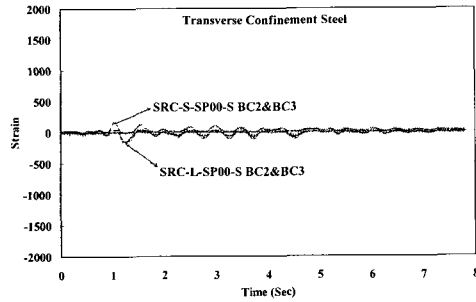


(d) 0.22g

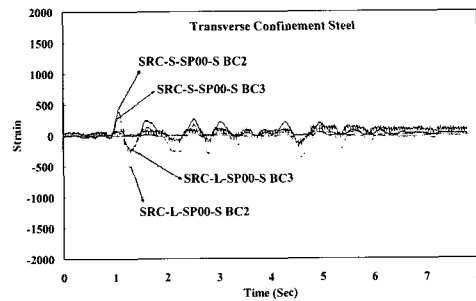
〈그림 15〉 주철근 변형률



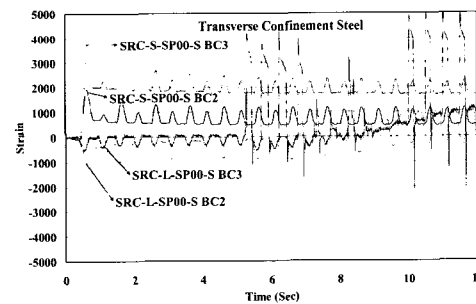
(a) 0.3g



(b) 0.5g

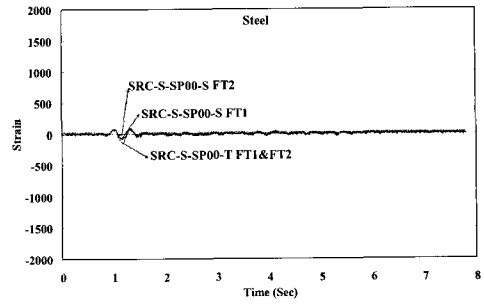


(c) 0.9g

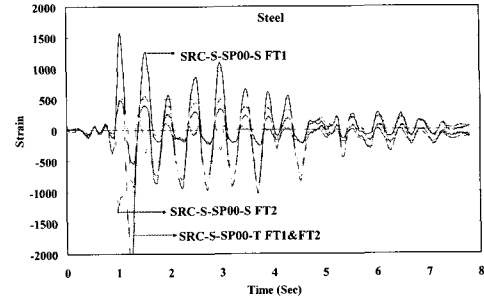


(d) Sine Wave

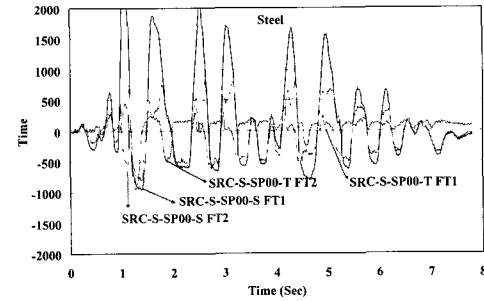
〈그림 16〉 횡철근 변형률



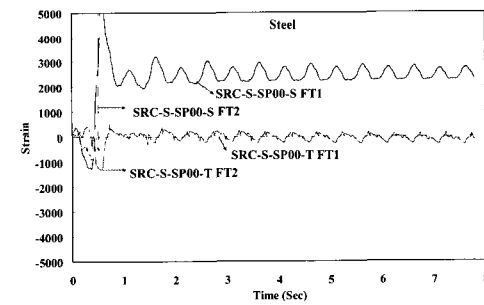
(a) 0.0803g



(b) 0.4g



(c) 0.9g



(d) Sine Wave

〈그림 17〉 강재 변형률

보았다. 0.5g 이전에는 내진 설계된 실험체와 한정연성으로 설계된 실험체의 변형률의 차이를 구분하기 힘들었지만, 0.9g에서는 한정 연성으로 설계된 실험체가 내진 설계된 실험체보다 36% 더 크게 변형률이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 공진에 가까운 Sine Wave 2 Hz에서는 내진 설계된 실험체와 한정 연성으로 설계된 실험체 모두 철근의 항복 변형률을 넘어섰다.

강재비가 증가된 실험체에서는 강재에 부착된 측정 계이저를 통해서 강재의 변형률을 측정하였다. 강재비가 증가된

실험체의 경우는 기준 실험체에 비하여 강재의 변형률이 0.4g 이전에는 비슷하게 나타났지만, 0.4g 이후에는 강재비가 증가된 실험체가 기준 실험체에 비하여 50% 이상 변형률이 작게 발생하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 형상비 3.5를 가지는 한정연성실험체와 주철근 겹침이음 50%, 강재비가 증가되어 있는 내진 실험체의

극한거동과 내진 성능평가, 국부 거동을 평가하기 위하여 실험이 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 극한 거동에 있어서 강재비가 증가된 실험체가 가장 큰 최대하중이 측정되었고, 기준 실험체에 비하여 23.6% 크게 나타났다. 또한, 주철근 겹침이음 50% 된 실험체와 한정연성으로 설계된 실험체의 경우는 최대하중에서의 변위의 크기가 기준 실험체에 비하여 54% 작게 나타났다.
- (2) 누적 에너지 소산 능력에 있어서는 유사동적 실험을 통해 얻은 동일한 상세의 내진 실험체에 대해서는 진동대 실험이 47% 떨어지는 것을 확인 할 수 있었고 주철근 50% 겹침이음된 실험체, 한정연성 설계된 실험체, 강재비가 증가된 실험체 모두 기준 실험체에 비해 에너지 소산능력이 13% 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 내진 거동에 있어서는 모든 실험체가 0.22g부근에서 초기 강성의 50%수준으로 휨강성이 감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 강재비가 증가된 실험체, 겹침이음 50% 실험체, 한정연성으로 설계된 실험체 모두 변위연성도가 3에서 3.5사이로 변위 연성도 5에는 못 미치는 것을 확인 할 수 있었다.
- (4) 국부거동에서는 강재비를 증가한 실험체를 제외한 나머지 실험체에서는 변수별 영향을 받아 주철근 겹침이음 50% 실험체는 주철근의 변형률이 크게 나타났고, 한정연성 된 실험체의 경우는 횡철근의 변형률이 더 크게 나타남을 확인 할 수 있었다.

실험방법에 따른 변위연성도의 차이는 좀 더 면밀한 비교 검토가 필요하고 향후 요구 내진성능의 검증을 어떻게 하는 것이 바람직한가에 대한 기준을 세우는데 좋은 자료가 될 것으로 기대된다. 지반운동을 근단층지반운동으로 한 것의 영향을 추가적으로 평가할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 심창수, 정영수, 민진, 정인근, 한정훈, "SRC합성교각의 설계에 대한 고찰", 한국 콘크리트학회 2005 봄학술 발표회 논문집, Vol. 17, No. 1, 2005, pp. 439-442
2. 한정훈, 박창규, 심창수, 정영수, "준정적 실험에 의한 SRC 합성교각의 내진성능 평가", 한국 지진공학회 논문집, 통권 50호, Vol. 10, No. 4, 2006, pp. 85-94
3. 도로교설계기준 한국도로교통협회, 건설교통부, 2005.
4. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2004 SI unit Edition.
5. ACI Committee 318 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05). American Concrete Institute, 2005.
6. ATC-32 Improved Seismic Design Criteria for California Bridge Provisional Recommendations. Applied Technology Council, 1996, pp.8-1~8-58.
7. Caltrans Bridge Design Specification, California Department of Transportation. 2004, pp. 107-118.
8. Eurocode 8. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 2. Bridges. European Committee for Standardization; 2002.
9. New Zealand Standard, "Concrete Structures Standard : Part 1-The Design of Concrete Structures", NZS 3101, 1995.
10. Phan, Vu T., "Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns", Thesis, University of Nevada, Reno, August 2005.
11. 김정환, 김재관, "안정대륙권역의 중규모지진에 의한 근단층지반운동의 모델링", 한국 지진공학회 논문집, 제 10권, 제3호, 2006, pp. 101-111.
12. Paulay T. and Priestley M.J.N Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley & Sons, INC., 1992, pp. 744.