

# 지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위 연성도 평가

## Displacement Ductility Evaluation of Earthquake Experienced RC Bridge Piers with 2.5 Aspect Ratio

정 영 수<sup>\*</sup>                      박 창 규<sup>\*\*</sup>                      이 은 희<sup>\*\*\*</sup>  
Chung, Young Soo              Park, Chang Kyu              Lee, Eun Hee

### 국문요약

1992년 내진규정 도입이전에 설계시공된 공용중의 철근콘크리트 교각은 대체로 소성힌지구간에 겹침이음 시공되었다. 본연구는 형상비 2.5의 철근콘크리트 교각실험체의 내진 연성도 평가를 위한 실험적 연구이다. 실험에 사용된 6기의 실험체는 횡방향 구속력, 주철근의 겹침이음 그리고 섬유보강을 변수로 가지고 있다. 이 실험체는 한국도로공사가 개발한 인공지진동을 사용하여 유사동적실험을 수행하여 지진이력을 주었으며, 유사동적실험 후에는 일정한 축력,  $P=0.1f_{ck}A_g$ 을 유지하면서 변위제어방식으로 유사정적실험을 실시하여 잔류내진성능을 평가하였다. 실험 결과 소성힌지구간에 겹침이음 된 RC 교각이 낮은 연성에서 파괴에 도달하였다. 이는 주철근 겹침이음이 주철근의 충분한 연성발달을 저하시킨 결과라 할 수 있다. 또한, 섬유보강된 실험체는 휨강성과 변위연성도의 현저한 개선능력을 보였다.

**주요어** : 내진성능, 지진이력 철근콘크리트 교각, 섬유보강, 유사동적실험, 유사정적실험

### ABSTRACT

For the construction of RC bridge piers the implementation of 1992 seismic provisions, longitudinal steels were practically lap-spliced in the plastic hinge region. Experimental investigation was conducted ductility of evaluate the seismic earthquake-experienced reinforced concrete columns with 2.5 aspect ratio. Six test specimens were made with test parameters: confinement ratios, lap splices, and retrofitting FRP materials. They were damaged under series of artificial earthquakes that could be compatible in Korean peninsula. Directly after the pseudo-dynamic test, damaged columns were retested under inelastic reversal cyclic loading simultaneously under a constant axial load,  $P=0.1f_{ck}A_g$ . Residual seismic performance of damaged columns was evaluated and compared to that of the corresponding original columns. Test results show that RC bridge piers with lap-spliced longitudinal steels appeared to fail at low ductility. This was due to the debonding of the lap splice, which resulted from insufficient development of the longitudinal steels. The specimens externally wrapped with composite FRP straps in the potential plastic hinge region indicated significant improvement both in flexural strength and displacement ductility.

**Key words** : seismic performance, damaged RC bridge piers, retrofitted with fiber sheet pseudo-dynamic test, quasi-static test

## 1. 서 론

우리나라는 지난 1978년부터 현재에 이르기까지 진도 4.0 이상, 진도(JMA) III이상의 지진이 총 21회 발생하였고, 지난해에는 총 45회의 지진이 발생하여 한 해 지진발생 회수에서 역대 최다를 기록한 것으로 조사되고 있다. 이는 지진 관측망이 조밀해지고 장비가 현대화되어 지진 관측이 용이한 이유도 있지만, 최근 10년사이 지진 발생이 꾸준히 증가하고 있다고 기상청은 밝히고 있다. 이러한 현상은 비록 우리나라가 환태평양 판의 내부지역에 위치하고 있지만 계속되는 중·소규모의 지진 및 발생가능한 대규모의 지진 등에 의한 피해가능성을 예시하고 있다.

1992년 내진설계 도입이후 강진지역의 규정을 적용한 현 내진설계 규정은 과도한 심부구속철근의 사용으로 시공상의 어려움 등 많은 문제점을 야기시키고 있다. 이에 우리나라에 적합한 내진설계 규정을 정립하기 위한 실험적 연구가 정영수<sup>(1)</sup>, 이재훈<sup>(2)</sup> 등에 의해서 진행되어 왔다. 정영수<sup>(1)</sup> 등은 현재 사

용중인 고속도로상의 교각에 대한 제원과 형태를 분석하고 띠철근 형태등을 조사하였다. 이를 토대로 띠철근 간격, 및 주철근의 겹침이음량, 하중재하회수, 파괴유형등의 변수를 가진 실험체를 제작하여 유사정적 및 유사동적 실험을 수행하였으며, 연구결과 주철근의 겹침이음이 없는 경우, 현행 횡방향 철근에 대한 규정의 30%만으로도 Eurocode-8에서 제시하고 있는 한정연성을 만족하는 것으로 나타났다. 이재훈<sup>(2)</sup> 등은 원형 및 사각형 단면 실험체에 대해 횡방향철근량, 보강띠철근의 영향, 축력비등을 다양한 실험변수로 한 휨거동 철근콘크리트 교각실험체의 내진성능을 평가하였으며, 현행 도로교설계기준의 내진설계규정은 철근콘크리트교각이 과도한 내진성능을 갖고 있는 것으로 분석하였다. 한편, 현행 내진설계규정 이전에 시공된 공용중의 비내진 설계된 교각의 내진성능을 파악하고 성능개선을 위한 적절한 보수·보강법을 제시하기 위한 연구 역시 활발히 시도되고 있다. 정영수<sup>(3)</sup> 등은 원형실험체에 대해 유사동적 및 유사정적 실험을 수행하였으며, 도로교설계기준<sup>(4)</sup>에서 요구하는 변위연성도 5를 만족하지 못하는 공용중인 비내진 설계된 휨실험체에 섬유보강법을 적용하여 8.0이상의 변위연성도를 확보할 수 있음을 밝히었다. 김재관<sup>(5)</sup> 등은 주철근겹침이음이 있는 공용중의 교각에서의 강판보강효과를 연구하기 위해 휨거동

\* 중앙대학교 토목공학과 교수(대표저자 : chung47@cau.ac.kr)

\*\* 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 4. 28 / 심사종료일 : 2003. 5. 26)

실험체를 제작하여 유사정적 실험을 수행하였으며, 강판보강을 한 경우 연성도와 휨강도 향상에 효과를 보인다고 보고되고 있다.

교량의 파괴모드는 크게 세 가지로 휨파괴, 휨전단파괴, 전단파괴로 분류된다. 선행연구결과<sup>(1),(6),(7)</sup> 형상비 3.5이상의 실험체는 최종적으로 휨파괴 모드를 보이는 것으로 나타났으며 형상비 1.8 실험체는 전단 파괴모드를 나타냈다. 따라서 본 연구에서는 상사비가 대략 2~4정도의 형상비 2.5인 휨전단 거동실험체를 설계하여 제작하였으며, 비내진실험체, 비내진 주철근 50%겹침이음 실험체, 한정연성실험체, 탄소, 아라미드, 유리섬유 보강실험체 각각 1기씩 총 6기를 제작하여 휨전단 거동을 갖는 교각의 내진성능을 살펴보고자 하였다. 1단계 실험에서는 공용중 교량이 이미 여러차례 중·약진을 경험한 상태를 모사하기 위하여, 내진 규정의 재현주기에 따른 PGA값들을 갖는 인공지진동을 이용하여 유사동적 실험을 수행하였다. 실험 2단계는 유사정적실험을 변위제어형식으로 파괴시까지 실시하여 각 변수들이 구조물의 연성능력에 미치는 영향을 평가하였다. 1단계의 유사동적 실험으로 초기 휨균열이 발생하였고 교각이 항복상태에 이르는 손상이 유도되었으며, 2단계에서 이와 같이 손상된 교각의 연성도 평가 결과 주철근 겹침이음이 있는 실험체의 연성능력이 겹침이음이 없는 실험체에 비하여 현저한 저하를 나타내어 주철근 겹침이음에 관한 규정마련이 필요함을 확인하였다. 그리고 모든 실험변수는 동일하나 지진이력을 경험하지 않은 즉, 유사동적이력을 경험하지 않은 실험체<sup>(8)</sup>와 유사동적이력을 경험한 본 연구 실험체의 결과와 비교한 바, 겹침이음이 있는 실험체의 경우 강성비가 19%~21%정도 적게 나타난 것을 확인하였다. 또한, 정영수<sup>(6)</sup>는 형상비가 4.0인 주철근 겹침이음이 없는 비내진 실험체의 경우 휨파괴가 나타난 반면, 본 연구에서의 형상비가 2.5인 주철근 겹침이음이 없는 비내진실험체의 경우, 휨거동 후 최종적으로 전단파괴가 나타났으며, 비내진실험체보다 횡방향철근량을 증가시킨 한정연성 실험체의 경우에는 휨거동으로 파괴되는 차이를 나타냈다.

2. 실험계획

2.1 재료의 특성

교각 시험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수

표 1 시험체 배합설계표

굵은골재 최대치수(mm)	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위질량(kg/m <sup>3</sup> )						28일강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
				물	시멘트	굵은골재	잔골재	Fly ash	AE.	
25	46.4	4.1	14	178	365	816	934	19	1.92	264

표 2 보강섬유의 물리적 특성

Classification	Tensile Strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Thickness(mm)
Glass Fiber(TYFO SEH 51)	5,600	252,000	2.0	1.3
Aramid Fiber(K-49)	21,000	1,100,000	2.6	0.193
Carbon fiber(SK-N300)	35,500	2,350,000	1.5	0.167

25mm 골재의 레디믹스트 콘크리트를 사용하고 철근은 SD30 인 D16의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 SD30 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도는 그림 1과 같이 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 D16은 3,500kgf/cm<sup>2</sup>과 D10은 3,400kgf/cm<sup>2</sup>의 평균항복강도를 얻었다. 타설한 콘크리트의 압축강도는 264kgf/cm<sup>2</sup>를 얻었다. 표 1은 콘크리트의 배합표이다.

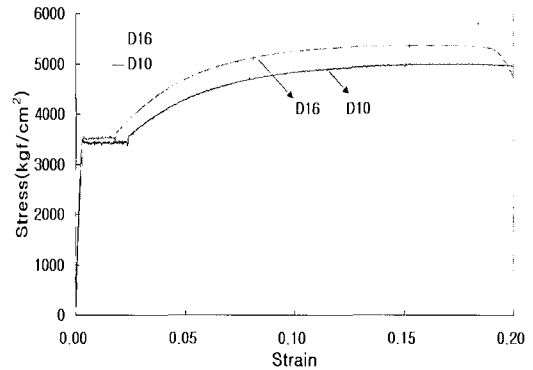


그림 1 철근의 인장강도

2.2 보강설계

주철근 50%겹침이음된 비내진교각 실험체 3기의 내진성능향상을 위하여 소성힌지구간에 유리섬유, 아라미드섬유, 탄소섬유로 보강하였으며 이들의 물리적 특성은 다음 표 2와 같다. 보강은 내진실험체와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있는 섬유보강설계법을 이용하여 Priestly<sup>(9)</sup>가 제안한 식인  $t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004) D f_{cc}'}{f_{uj} \epsilon_{uj}}$  을 사용하였다. 여기서,  $t_j$ 는 보강섬유두께,  $\epsilon_{cu}$ 는 구속콘크리트의 극한변형률, D는 단면의 직경,  $f_{cc}'$ 는 구속콘크리트의 항복강도,  $f_{uj}$  및  $\epsilon_{uj}$ 는 보강섬유의 극한응력 및 극한변형률을 나타낸다. 유리, 아라미드 및 탄소 섬유의 보강 소요두께는 각각 1.42mm, 0.397mm 및 0.388mm 이었으나, 규격제품인 이유로 모든 경우 2장을 사용하여 보강하였다. 특히 휨-전단 거동의 특성을 감안하여 기초상부에서 기둥의 중앙부까지 75cm 구간을 섬유로 둘러 감았다.

2.3 실험체 제작

실험체는 기둥단면지름 60cm, 기둥높이 1.5m(Aspect Ratio =2.5)인 휨전단파괴모드로 설계되었다. 공용중인 비내진 교각

의 내진성능을 조사하기 위하여 내진설계 도입 이전의 비내진설계법으로 제작된 실험체 1기, 비내진 설계교각의 주철근겹침이음을 변수로 실험체 1기를 제작하였다. 또한 겹침이음된 비내진실험체에 각각 탄소, 아라미드, 유리 섬유를 사용하여 보강한 실험체 3기를 제작하여 보강한 비내진 교각의 내진성능향상 정도를 평가하고자 하였다. 그리고, 한정연성개념을 도입한 실험체를 1기를 제작하여 중진 지역에 적합한 내진 규정을 연구하였다. 그림 2는 실험체 상세, 표 3은 실험변수를 보여주고 있다.

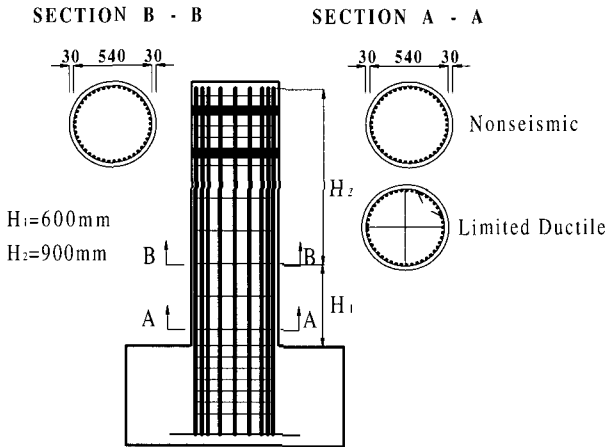


그림 2 실험체의 제원

### 3. 실험개요

기둥상부에  $0.1A_g f_{ck}$ 에 해당하는 67.8tonf의 일정한 축하중이 기둥상부에 작용하도록 유압기를 사용하여 재하 하였으며, 횡방향 하중은 100tonf 용량의 Hydraulic Actuator를 이용하여 가력하였다.

#### 3.1 계측장비

실험체의 주철근, 띠철근, 연결철근에 변형률게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였고, 실험체의 횡방향 변위를 측정하기 위하여 실험체의 중앙부와 횡방향 가력위치에 변위계를 설치하였다. 그리고 기초부의 들림 및 밀림을 측정하기 위하여 상면, 측면에 변위계를 설치하였으며, 경사계를

측면에 부착하여 실험체의 곡률을 측정하였다.

### 3.2 실험방법

본 연구는 1단계로 유사동적하중을 통한 손상평가실험, 그리고 손상된 실험체에 대한 내진성능평가를 위한 2단계실험을 다음과 같이 수행하였다.

#### - I 단계 : 유사동적실험

공용중인 교각의 경험한 지진이력을 모사하기 위하여, 도로교설계기준에서 규정하고 있는 지진구역 I에서의 재현주기 200년의 0.0803g, 재현주기 500년의 0.11g, 재현주기 1000년의 0.154g 그리고 2000년의 0.22g의 PGA를 갖는 일련의 인공지반운동을 연속적으로 가력한 유사동적 실험을 수행하여 교각실험체의 손상을 평가하였다. 수치적분은 Explicit Newmarks  $\beta$  method<sup>(10)</sup>을 이용하였으며, 인공지반운동은 중진 지역인 우리나라의 실정에 맞추어 그림 3의 유효지속 시간 24초, 지배진동수 1.7Hz(지배주기: 0.59sec)인 도로공사 인공지진 데이터<sup>(11)</sup>를 입력지진파로 채택하였다.

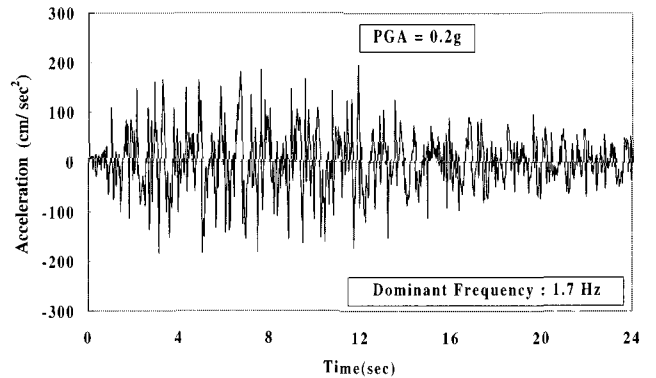


그림 3 인공지진데이터

#### - II 단계 : 유사정적실험

그림 4와 같이 Drift Level은 초기에는 0.25%이후 0.5%씩 증가시켜 거동을 상세하게 관측하고 3%이후는 1.0%씩 증가 시켰다. 변위제어는 각각의 Drift Level마다 2 Cycle씩 반복재하하여 파괴시까지 거동을 관측하였다.

표 3 실험변수 및 시험체명

분류	실험체명	횡방향 철근 배근간격		축력 (tonf)	종방향 철근비(%)	보강
		간격(cm)	철근비(%)			
		PHR/NPHR*				
비내진	0%Lap	DN-SP00-R0	23/23	0.23	$\frac{P}{f_{ck} A_g} = 0.1$ (67.8)	1.54
	50%Lap	DN-SP50-R0				
		DN-SP50-RG				
		DN-SP50-RA				
	DN-SP50-RC					
한정연성	0%Lap	DL-SP00-R0	8.2 / 10	0.86		유리(SEH-51) 아라미드(K-49) 탄소(SK-N300)

\* PHR : Plastic Hinge Region, NPHR : Non-plastic Hinge Region

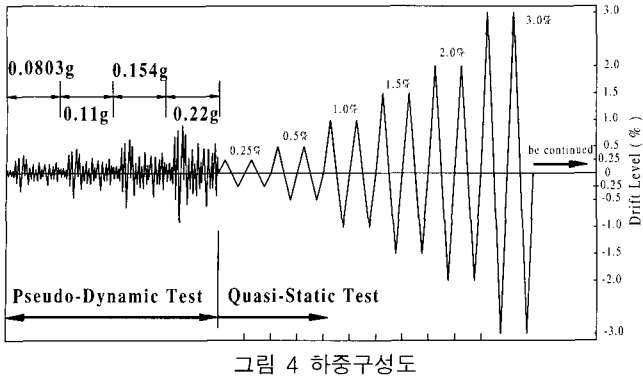


그림 4 하중구성도

4. 실험결과

4.1 유사동적실험

유사동적실험에 의한 교각의 내진성능분석은 실험체들의 파괴형상, 하중변위, 에너지분석 및 이력감쇠분석 등에 의한 방법이 있으며, 본 연구에서는 소산에너지와 잔류변형으로 실험체의 손상정도를 평가하였다.

4.1.1 파괴형상

섬유로 둘러싸여 있어 초기 균열모습을 관측할 수 없었던

보강 실험체를 제외하고 비내진실험체(DN-SP00-R0), 한정연성실험체(DL-SP00-R0) 그리고 겹침이음실험체(DN-SP50-R0)가 하중단계 0.0803g에서 기초 상단으로부터 각각 37cm, 40cm, 38cm 지점에 최초 균열을 나타내었다. 표 4는 유사동적실험시 발생한 최대 변위와 하중의 분석 결과를 나타낸 것이다. 유사동적실험시 각 실험체들의 최대변위와 하중이 모두 표 6의 항복점에는 이르지 않았으나 실험 초기부터 미세한 균열이 다수 발생하여 항복상태에 근접한 손상이 유도되었다.

4.1.2 하중변위 분석

유사동적실험결과 PGA 0.22g까지 모든 실험체가 횡방향 구속력과 주철근의 겹침이음의 실험 변수에 미소한 영향을 받으며 큰 강성의 저하 없이 거동하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 그림 5(d)~(f)는 섬유로 보강한 실험체들의 모두 유사한 이력곡선을 보여주고 있다.

또한 보강한 세 실험체(DN-SP50-RA,RC,RG)가 보강하지 않은 실험체(DN-SP50-R0)보다 최대 변위에서 각각 47%, 21% 그리고 35% 높은 횡방향 하중을 기록하였다.

4.1.3 누적소산에너지

구조물 또는 어떤 부재의 총 에너지량에 있어서 지진응답에

표 4 유사동적실험의 결과

실험체명	초기균열		유사동적실험	
	P.G.A	위치(cm)	최대하중(tonf)	최대변위(cm)
DN-SP00-R0	0.0803g	37	23.04	7.33
DL-SP00-R0	0.0803g	40	23.04	7.64
DN-SP50-R0	0.0803g	38	22.13	7.65
DN-SP50-RA	-	-	32.50	8.33
DN-SP50-RC	-	-	26.77	8.1
DN-SP50-RG	-	-	29.80	8.98

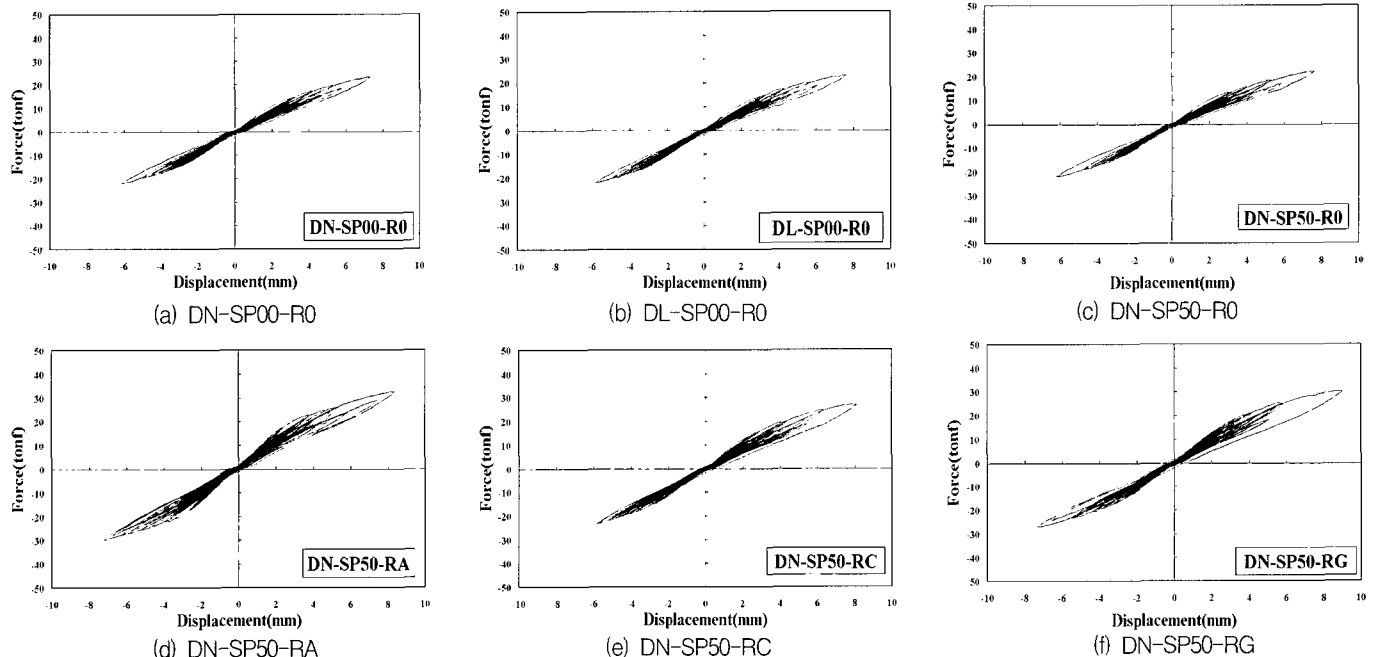


그림 5 하중-변위 이력곡선

의한 변위이력으로부터 실제로 소산되는 에너지를 계산하고 총 입력 에너지량과 비교하여 에너지 흡수능력을 분석하였다. 입력에너지 및 소산에너지는 그림 6과 같이 정의하였다.

그림 7에 나타난 바와 같이 유사동적실험시 보강이 되지 않은 3개의 실험체는 횡방향 철근비와는 관계없이 입력 및 소산에너지가 유사한 값을 보이고 있으며, 주철근 겹침이 있는 실험체의 경우에는 다소 적은 값을 나타내었으나 거의 유사한 값을 보이고 있다. 그리고 보강된 실험체들은 보강되지 않은 실험체들에 비하여 입력 및 소산에너지가 크게 나타났다. 그러나 유사동적실험에 의한 소산에너지 결과는 대체로 누적입력에너지에 비하여 약 16% 정도였다. 이는 RC 재료의 특성상 탄성범위에서도 다소의 소산에너지가 발생되고 있음을 의미하며, 초기 입력지진력인 0.0803g에서의 미세균열발생과도 관계가 깊음을 알 수 있다.

4.1.4 잔류변형

구조물이 외력을 받게 되면, 탄성한도내에서는 입력에너지와 탄성변형에너지가 같게되어 즉, 소산에너지가 없으므로 외력이 제거되면 변형은 없게 된다. 그러나 탄성한도가 넘으면 구조물은 에너지를 소산시키면서 영구변형이 발생되

며 이로 인하여 잔류변형이 남게 된다. 본 실험에서는 교각의 잔류변형을 조사하기 위하여 그림 8과 같이 하중단계별 잔류변형을 조사하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 유사동적 실험에서 주철근 50% 겹침이 있는 실험체(DN-SP50-R0)의 경우 잔류변위 증가가 다른 실험체들에 비하여 커서 0.22g에서 가장 큰 잔류변형을 보였다. 그러나 이들 값은 매우 미미한 값이며 실험체들의 잔류변위도 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 실험변수에 관계없이 모든 실험체가 0.22g까지는 탄성거동에 가까운 응답을 보였으며, 2~4정도의 상사비, 과다설계기준 등에 의한 것으로 해석 될 수도 있다. 그러나 기존의 연구결과<sup>(12)</sup> 형상비 3.76의 실험체에 PGA 0.2g의 한국도로공사 인공지진력과 0.36g인 Kaihokus등 입력지진력을 실험변수로 하여 실험을 수행한 결과 한국도로공사 인공지진력을 이용한 실험체의 경우 0.7g~0.9g에서 주철근 파단이 일어나 파괴되는 반면에 Kaihokus 지진력을 이용한 실험체의 경우 0.22g에서 주철근 파단이 일어나는 큰 차이를 나타내어 지진과의 특성에 따라 구조물이 입는 Damage의 차이가 큰 것으로 나타나고 있다. 또한 현장시공품질 등을 감안하면 실제 교각의 내진성능은 실험에 의한 결과보다 성능이 저하될 수 있으리라 사료된다.

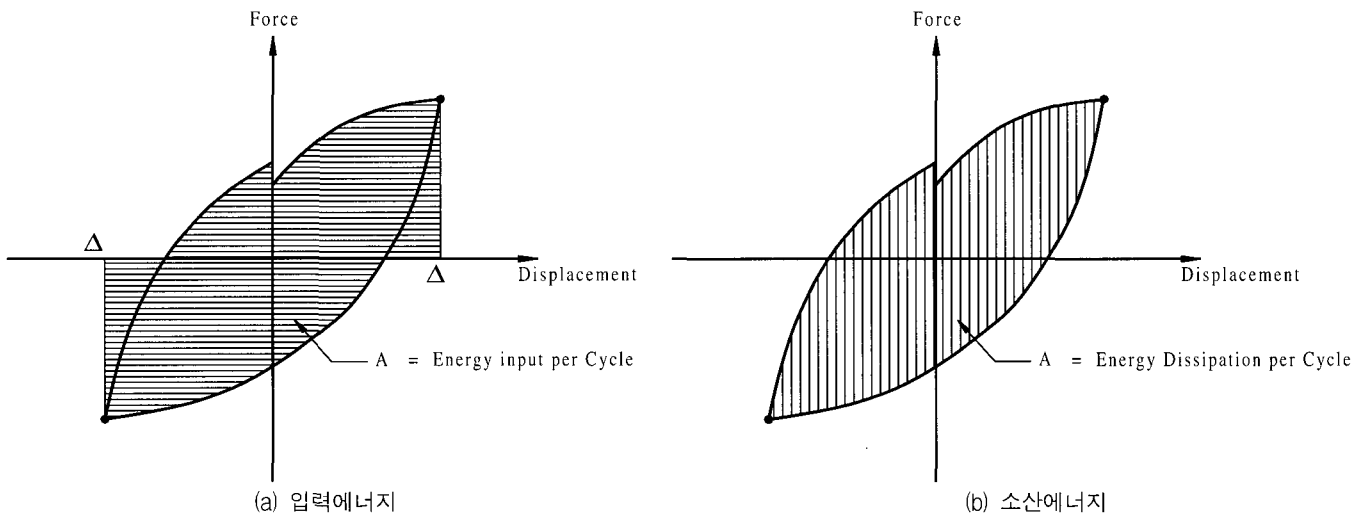


그림 6 입력 및 소산에너지의 정의

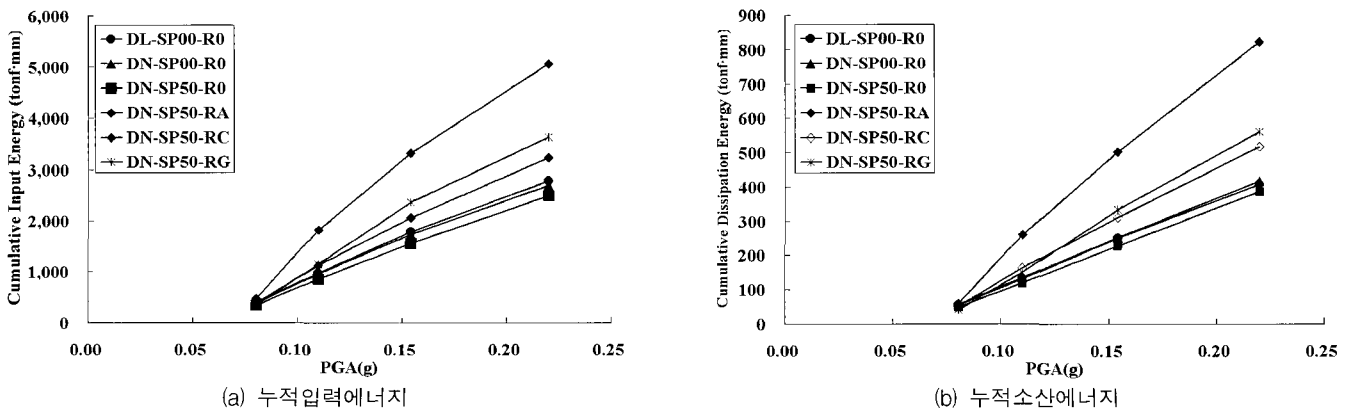


그림 7 누적 입력 · 소산에너지

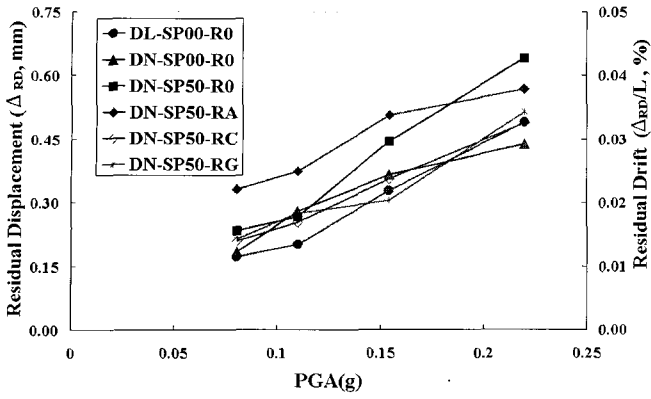


그림 8 잔류변형

## 4.2 유사정적실험

실험체들의 파괴형상분석과 하중변위분석, 변형에너지 내진 성능에 따른 각각의 연성도를 평가하였으며, 정영수<sup>(6)</sup>에서의 손상입지 않은 실험체와 비교하여 내진 성능을 평가하였고 하중단계별의 잔류변형을 조사하였다.

### 4.2.1 하중변위 이력 및 파괴형상

유사동적실험으로 손상받은 실험체에 실시한 유사정적 실험결과를 그림 9(a)~(f)에 나타내었다. 그림 9(a)와 (b)에서 횡방향 구속력에 따른 연성의 증가를, 그림 9(a)와 (c)는 비내진설계된 50% 겹침이음된 실험체(DN-SP50-R0)보다 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)가 높은 연성을 가지고 있음을 나타내고 있다. 그리고, 보강하지 않은 겹침이음 실험체의 결과인 그림 9(c)와 보강실험체들의 결과인

그림 9(d), (e), (f)로부터 보강재로 인한 연성의 증가를 확인할 수 있다.

각 실험체별 파괴 양상은 비내진실험체(DN-SP00-R0)의 경우 Drift level 1.5%에 최초 수직균열이 발생하여 Drift level 4.0%에서, 기초상단으로부터 20cm지점까지 넓은 분포로 피복이 탈락하였다. 또 Drift level 1.0%부터 꾸준히 발생한 측면의 경사균열은 Drift level 5.0%에 이르러 기둥높이 110cm 까지 발달하여 주철근의 파단없이 휨-전단파괴를 일으켰다. 이에 반해 비내진 50% 겹침이음된 실험체(DN-SP50-R0)는 Drift level 1.5%에서 최초 수직균열의 발생과 함께 Drift level 2.0%에서 주철근의 슬립으로 인한 강도저하를 보였으며, Drift level 3.0%에서 43cm의 피복탈락, 5.0%때 주철근 파단 현상이 나타났다. 비내진실험체(DN-SP00-R0)의 휨-전단파괴와는 달리 겹침이음된 실험체(DN-SP50-R0)는 겹침이음부 철근의 슬립에 의한 휨파괴를 일으켰다. 한정 연성실험체의 경우 Drift level 2.0%에서 수직균열이 발생하여 극한시 32cm까지 피복이 탈락하였고 7.0%에서 주철근 파단 현상이 나타났다. 보강된 실험체(DN-SP50-RA, RC, RG)는 섬유로 둘러쌓여 정확한 균열 현상은 알 수 없었으나 실험 전 매끄럽던 섬유면이 횡방향 하중의 증가에 따라 울퉁불퉁해지면서 요란한 섬유파단 소리를 내었고, 이와 함께 실험체 표면에 섬유균열이 나타났다. 또 극한 상태인 Drift level 5.0%에서는 기초와 기둥접합부의 섬유가 파단되었고, 아라미드, 탄소, 유리섬유가 각각 6.0%, 7.0%, 7.0%에서 주철근 파단현상을 나타내었다. 그림 10에 각 실험체의 균열형상을 나타내었고, 표 5에 파괴형상을 정리하였다.

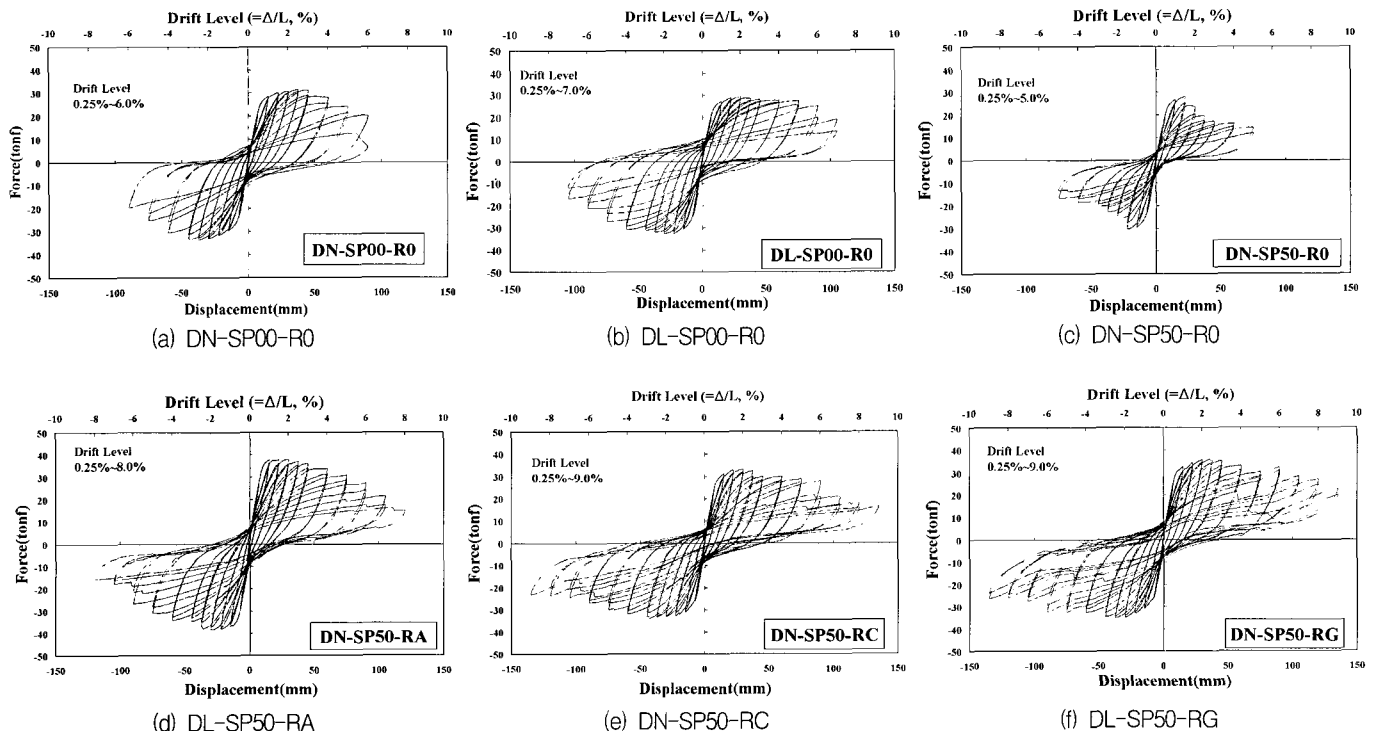


그림 9 하중-변위 이력곡선

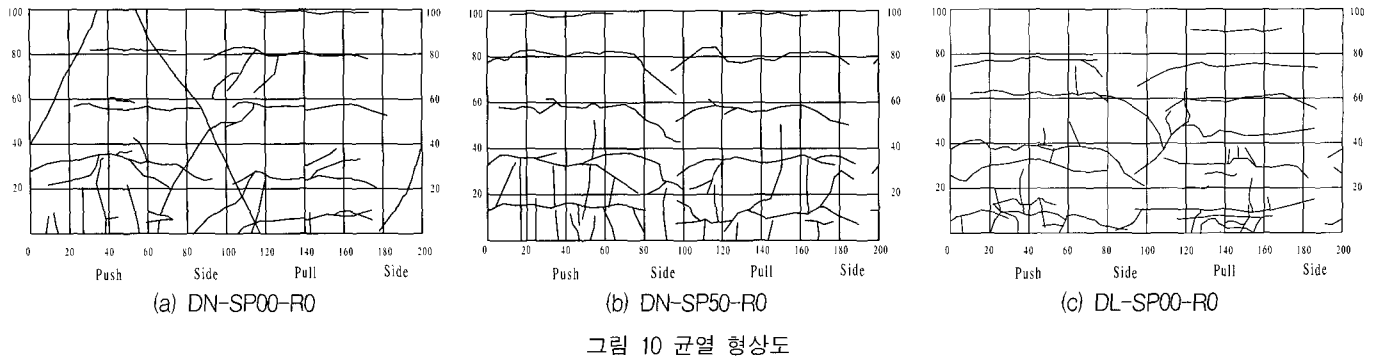


그림 10 균열 형상도

표 5 유사정적실험의 파괴형상 분석

실험체명	관찰현상	수직균열 (Drift Level)	콘크리트 피복 파괴범위(cm)	주철근파단		파괴형상
				Drift	위치(cm)	
DN-SP00-R0		1.5%	37	-	-	휨-전단
DL-SP00-R0		2.0%	32	7%	8	휨파괴
DN-SP50-R0		1.5%	38	5%	7	슬립-휨파괴
DN-SP50-RA		-	26	7%	5	
DN-SP50-RC		-	21	6%	5	
DN-SP50-RG		-	22	7%	6	

4.2.2 변위연성도

구조형식, 기둥길이, 기둥의 구속조건에 따른 구조물의 연성을 나타내는 변위연성도는 항복변위에 대한 극한변위의 비( $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$ )로 정의된다. 변위연성도의 경우, 하중-변위의 관계에서 항복점이 뚜렷하지 않기 때문에 항복변위를 결정하기 위해 여러 연구자들이 다양하게 정의를 하였는데 이중 그림 11와 같이 하중-변위 곡선상에서 최대 횡력  $V_{max}$  을

지나는 수평선과 원점에서  $V_{max}$  의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 결정하는 방법을 사용하였으며 극한변위는  $0.85 V_{max}$  때의 변위로 정의하였다.

그림 12의 하중변위 포락곡선과 표 6의 변위연성도를 통해서 횡방향철근비, 겹침이음의 유무 그리고 보강설계의 유무에 따른 내진성능의 차이를 나타내고 있다. 횡방향철근비의 증가에 따라 비내진실험체의 3.7배, 내진실험체의 0.6배에 해당하는 0.86%의 횡방향 철근비를 가진 한정연성실험체가 횡방향 철근비 0.23%의 비내진실험체(DN-SP00-R0)에 비해 39.4%의 극한 변위가 증가하여 48.9% 큰 변위연성을 보여주고 있다. 겹침이음 유무에 따라 50%겹침이음시험체(DN-SP50-R0)는 22mm~37mm까지의 변위에서 급격한 하중감소를 보이는 반면, 겹침이음 없는 비내진실험체(DN-SP00-R0)는 37cm~89cm까지의 넓은 변위에서 하중이 서서히 감소해 1.5배의 변위연성도 증가를 보였다. 또한, 보강설계의 유무에 따라 보강한 겹침이음실험체가 보강하지 않은 실험체에 비해 1.8~2.4의 변위연성도의 증가를 보이며, 변위연성도 9.08의 한정연성실험체와 유사한 연성능력 발휘하고 있음을 보여주고 있다.

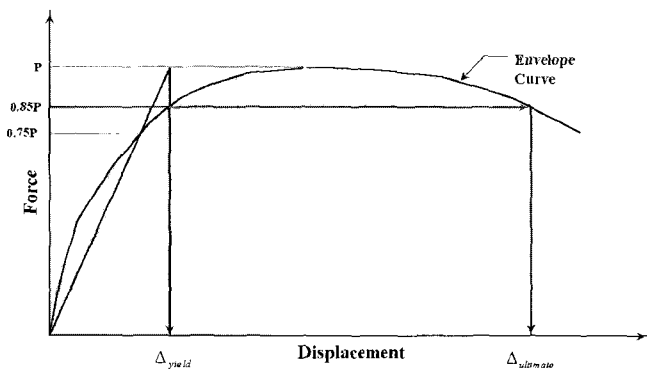


그림 11 변위연성도

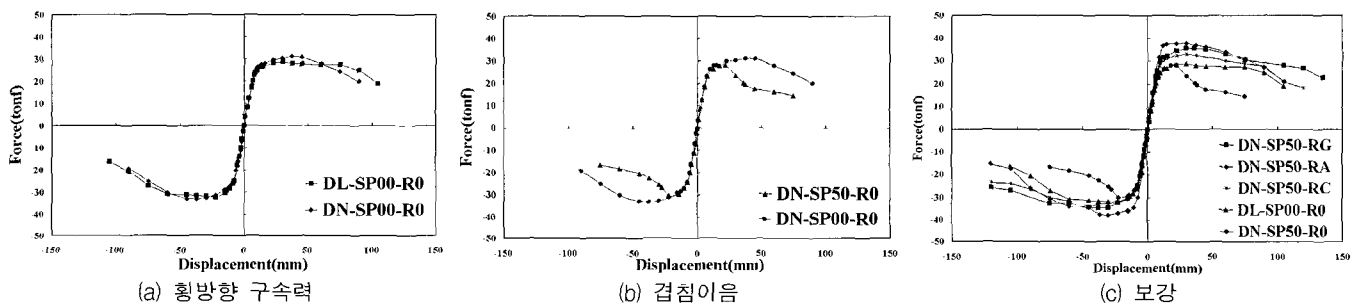


그림 12 하중-변위 포락곡선

표 6 변위연성도

실험체명	항복		극한		변위연성도
	하중(tonf)	변위(mm)	하중(tonf)	변위(mm)	
DN-SP00-R0	26.58	10.82	26.57	66.00	6.10
DL-SP00-R0	24.81	10.13	24.51	92.00	9.08
DN-SP50-R0	24.18	9.82	30.00	24.08	2.45
DN-SP50-RA	34.35	9.50	32.22	70.00	7.37
DN-SP50-RC	30.91	11.19	30.56	74.93	6.70
DN-SP50-RG	28.94	10.65	28.21	88.00	8.26

4.2.3 변형에너지 연성도

변형에너지를 그림 13과 같이 극한, 항복시까지 포락곡선 상의 면적을 극한에너지, 항복에너지라 하고, 항복에너지에 대한 극한에너지의 비( $\mu_E = E_u/E_y$ )를 변형에너지 연성도라 정의하고 있다. 분석결과 표 7에서 나타난 것처럼 각 실험체들의 항복에너지는 150~180(tonf·mm)로 유사한 값을 보였다. 때문에 비내진시험체(DN-SP00-R0)비해 748(tonf·mm)의 극한에너지 증가를 보인 한정연성실험체(DL-SP00-R0)가

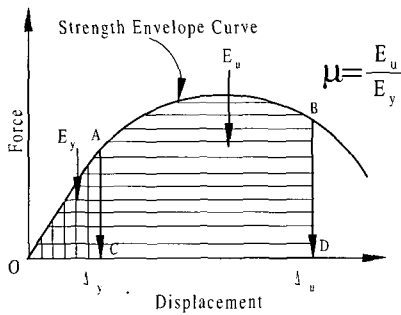


그림 13 변형에너지

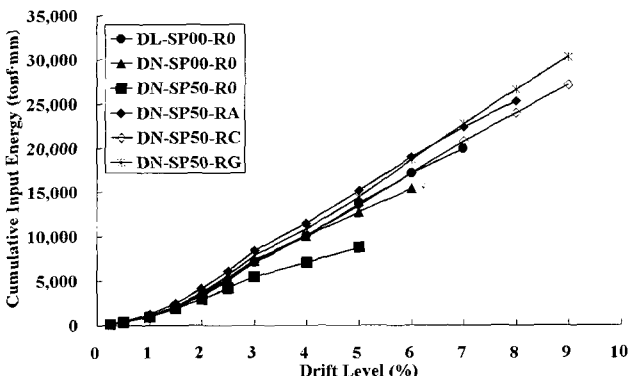
약 1.5배의 변형에너지연성도 증가를 보이고 있으며, 겹침이 음실험체의 보강효과는 각 보강재 별로 아라미드, 탄소, 유리 섬유가 각각 11.49, 13.56, 10.27로 나타났고, 비내진 겹침이 음실험체(DN-SP50-R0)에 비해서는 약 3~4배의 연성도 증가를 가져와 주철근 겹침이 음된 실험체의 경우에도 섬유로 보강할 경우 충분한 성능을 향상 시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

4.2.4 소산에너지

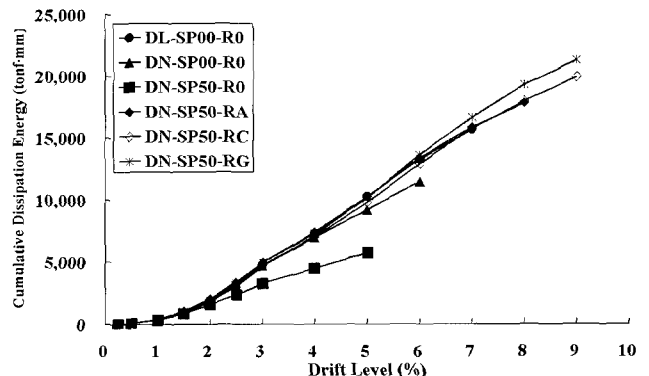
그림 14와 같이 Drift Level 1.5%까지는 모든 실험체가 입력(Input energy) 및 소산에너지(Dissipation energy) 모두가 유사하였으며, 겹침이 음된 실험체(DN-SP50-R0)의 경우 주철근이 겹침이 음된 부분에서 슬립이 발생되어 저항력이 크게 떨어져 Drift Level 2.0%부터 입력 및 소산에너지가 나머지 실험체들에 비하여 저하되었다. 주철근 겹침이 음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 Drift Level 4%까지 한정연성실험체(DL-SP00-R0)와 유사한 값을 보이다가, 그 후 차이를 나타내기 시작하였으며 6%에서 전단파괴되었다. 그리

표 7 변형에너지 연성도

실험체명	항복에너지(tonf·mm)	극한에너지(tonf·mm)	변형에너지 연성도
DN-SP00-R0	167.34	1648.38	9.85
DL-SP00-R0	159.88	2395.09	14.98
DN-SP50-R0	153.77	507.22	3.29
DN-SP50-RA	177.48	2039.61	11.49
DN-SP50-RC	160.11	2171.89	13.56
DN-SP50-RG	176.70	1895.04	10.72



(a) 누적입력에너지



(b) 누적소산에너지

그림 14 누적 입력·소산에너지



고 보강된 실험체들은 보강 섬유의 종류에 관계없이 한정연성실험체와 유사한 값을 보이고 있다. 이는 주철근에 겹침이음이 있으나 보강으로 인하여 에너지소산능력이 한정연성실험체와 유사한 것으로 판단된다.

#### 4.2.5 잔류변위

그림 15과 같이 주철근 겹침이음이 있는 실험체(DN-SP50-R0)는 2.5%부터 잔류변위가 증가하지 않았다. 이는 Drift Level 2.0%부터 입력 및 소산에너지가 나머지 실험체들에 비하여 저하된 에너지 분석결과와 일치하는 것으로 주철근 겹침이음의 슬립으로 인해 소성힌지가 일찍 발생된 연유로 판단된다. 또한 극한 변위에 해당하는 Drift Level 5~6% 이후에는 잔류변위가 오히려 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 파괴에 도달된 것으로 판단된다. 반면에 비내진 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 6%에서 전단파괴가 발생하여 잔류변위 감소현상이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

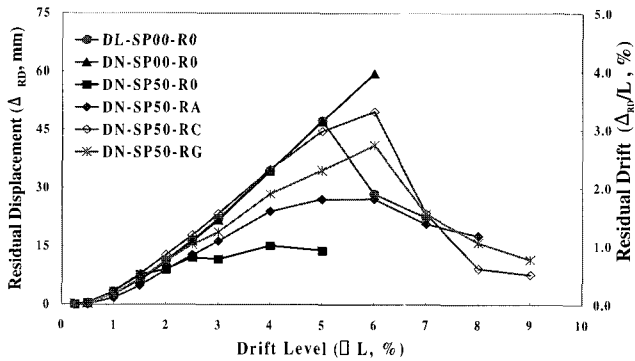


그림 15 잔류변위

#### 4.2.6 강성감소

유사동적실험을 통해 손상을 입은 실험체와 손상을 입지

않은 실험체의 강성의 변화 추이를 알아보기 위하여 각 단계의 강성 감소정도를 각 단계별 강성을 항복시 강성으로 나누어 정영수<sup>(6)</sup>의 N-SP00-R0, N-SP50-R0, N-SP00-RG과 비교하여 나타내었다. 비교 결과 손상을 입은 실험체의 강성감소율이 손상입지 않은 실험체의 강성감소율 보다 더 크게 감소하였다.

특히 겹침이음이 있는 실험체의 강성감소율이 17~21%로 겹침이음 없는 실험체의 강성감소율이 7~10%에 비하여 손상후 강성감소율이 크게 나타나 주철근 겹침이음이 있는 실험체가 지진이력의 손상을 크게 받는 것으로 나타났다.

### 4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

#### 1. 유사동적실험을 통한 손상평가 :

1) 파괴형상분석을 통해 실험체가 항복상태에 근접한 손상이 유도되었음을 알 수 있었으며, 하중변위곡선과 에너지분석을 통해 횡방향 구속력, 주철근의 겹침이음, 보강재등의 실험 변수에 따른 내진성능차이는 매우 미소함을 알 수 있었다. 그러나 보강된 실험체들은 나머지 보강되지 않은 실험체들에 비하여 최대변위에서 45% 높은 횡방향 하중을 기록했고 입력 및 소산에너지 또한 크게 나타났다.

#### 2. 손상된 실험체에 유사정적실험 평가 :

1) 변위연성도 평가결과 현행 내진규정의 60%에 해당하는 0.64의 횡방향 철근비를 가진 한정연성실험체는 도로교설계기준에서 규정하고 있는 단주교각의 요구연성도 5를 만족하였으며, 비내진50% 겹침이음 실험체

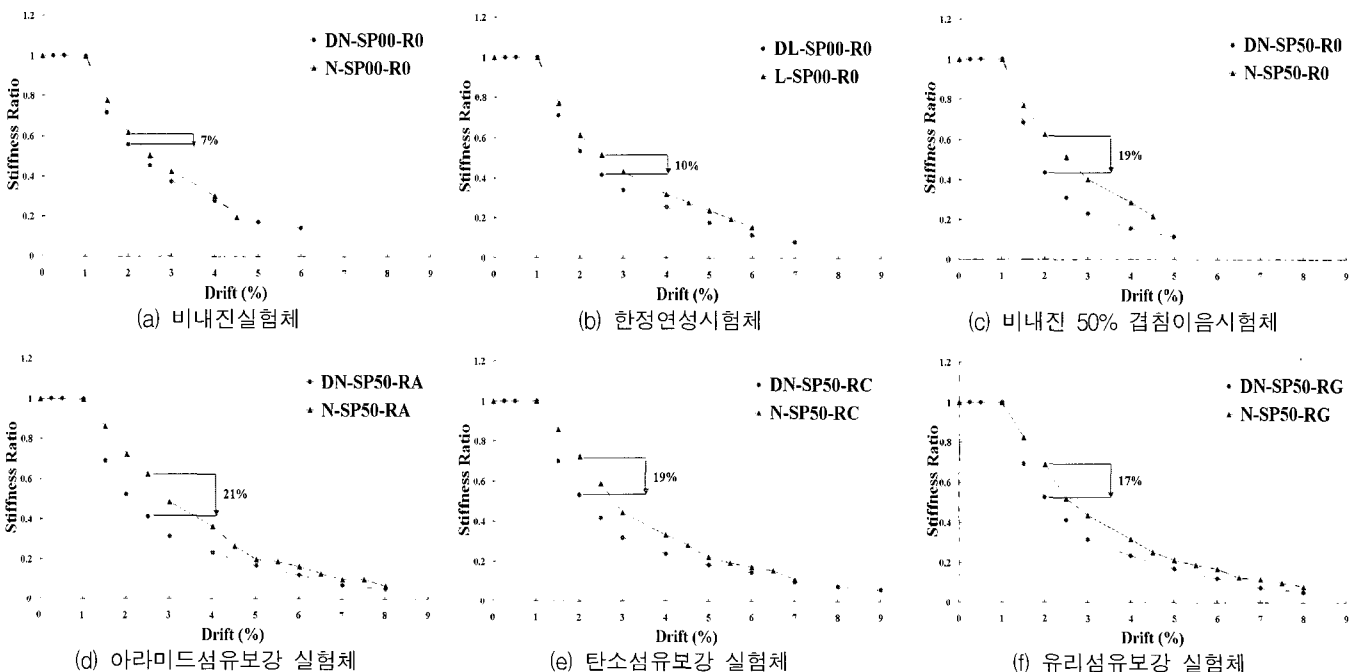


그림 16 강성감소

(DN-SP50-R0)의 변위연성도가 2.45로 요구연성도에 미치지 못하였으나 이를 유리, 아라미드, 탄소섬유로 보강한 경우 보강재의 종류에 관계없이 7~8까지 연성도가 증대되어 요구연성도를 만족하였다.

- 2) 변형에너지분석 결과 역시 섬유 보강된 실험체가 비내진 겹침이음시험체(DN-SP50-R0)에 비해서 약 3~4배의 변형에너지연성도 증가를 가져와 보강재의 종류에 관계없이 섬유를 이용한 내진보강 방안이 효과적인 방법임을 알 수 있었다.
- 3) 누적소산에너지 분석결과 겹침이음된 실험체(DN-SP50-R0)의 경우는 Drift Level 2.0%부터 입력 및 소산에너지가 나머지 실험체들에 비하여 떨어졌으나, 주철근 겹침이음 없는 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 Drift Level 4%까지 한정연성실험체(DL-SP00-R0)와 동일한 값을 보여 주철근 겹침이음이 연성저하의 주요한 변수임을 알 수 있었다.
- 4) 겹침이음이 있는 실험체의 강성감소율이 17~21%로 겹침이음 없는 실험체의 강성감소율이 7~10%에 비하여 손상후 강성감소율이 크게 나타나 주철근 겹침이음이 있는 실험체가 지진이력의 손상을 크게 받는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년도 중앙대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험체 제작에 협조해주신 (주)콘크리닉, (주)리폼시스템, (주)SK케미칼에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 정영수, "고속도로 기존 교량의 유형별 내진성능평가를 위한 실험적 연구", 보고서, 한국도로공사 도로연구소,

- 2001, p. 397.
2. 이재훈, 권영봉, "고강도콘크리트를 이용한 철근콘크리트 기둥과 합성 기둥의 거동 및 해석," 보고서, 한국도로공사 도로연구소, 도로연 99-47-28, 1999.
3. 정영수, 박종협, 이강균, 한기훈, "단일주 원형 RC교각의 내진거동에 관한 준정적실험", 한국지진공학회지 제3권 2호, 1999, pp. 55-65.
4. 건설교통부, 한국도로교설계기준.
5. 김재관, "기존교량의 내진성평가 및 보강방안", 보고서, 건설교통부&시설안전기술공단, BR-99-R-48, 1999.
6. 정영수, 이재형, "Seismic performance and Retrofit of Circular Bridge Piers with Spliced Longitudinal Steel," 한국콘크리트학회, Vol. 14, No. 3, 2002, pp. 130-137.
7. 정영수의, "교각의 심부구속방법에 관한 실험 연구", 보고서, 한국도로공사, 2002.
8. 정영수, 송호진, 김용곤, 이은희, "섬유보강된 횡전단 RC 교각의 내진성능 평가", 2002년도 춘계 학술 발표회 논문집, 지진공학회, 2002, pp. 195-202.
9. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, INC, p. 744.
10. Shing, P. B. and Mahin, S. S., "Pseudo-dynamic test method for seismic performance evaluation: theory and implementation," Report No. UCB/EERC-84/01, 1984.
11. 한국도로공사, 고속도로교량의 내진설계지침
12. 박종협, "유사동적실험에 의한 원형 철근콘크리트교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 중앙대학교, 2001, pp. 141.
13. 조창빈, 서진환, 장승필, "강합성교각의 내진성능평가 Part II: 유사동적실험 및 잔류내진성능 평가", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 2002, pp. 21-28.
14. 이대형, 정영수 "원형 철근콘크리트 교각의 강성 및 강도감소지수 결정", 한국지진공학회, 제4권, 제2호, 2000, pp. 73-81.