

# 섬유보강 원형 RC교각의 내진성능 평가를 위한 유사동적실험

## Pseudo Dynamic Test for the Seismic Performance Evaluation of Circular RC Bridge Piers Retrofitted with Fibers

정 영 수\*  
Chung, Young Soo

박 종 협\*\*  
Park, Jong Heob

박 희 상\*\*\*  
Park, Hee Sang

### 국문요약

본 연구의 목적은 유사동적실험에 의한 섬유보강 원형 RC교각의 내진성능평가를 위한 연구로서 수원시에 위치한 내진교량인 하갈교를 대상으로 하였고, 도로교표준시방서의 내진설계규정이 적용되지 않은 비내진교각시험체 2본 및 내진성능향상을 위한 섬유보강시험체 4본, 즉 총 6본에 대하여 유사동적실험을 수행하였다. 보강공법으로는 유리 및 탄소섬유 보강공법을 사용하였으며, 실험변수로는 입력지진동, 섬유보강유무로 하였다. 그리고 내진성능평가 방법은 입력 및 소산에너지, 변위연성도가 분석되었다. 본 실험의 결과 유리섬유로 보강된 비내진시험체의 변위연성도는 KHC인공지진파에 대하여 7.7~9.0 정도의 값으로서 충분한 내진성능을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

주요어 : 유사동적실험, RC교각, 보강, 입력지진파, 내진성능, 연성도

### ABSTRACT

The objective of this experimental research is to assess the seismic performance of circular RC bridge pier specimens retrofitted with fibers which were designed as a prototype of Hagal bridge in the city of Suwon, Korea. Pseudo dynamic test has been done for two nonseismic test specimens which were nonseismic designed by the related provision of the Highway Design Specification, and four nonseismic specimens retrofitted with fibers in the plastic hinge region. Glass and carbon fiber sheets were used for the seismic capacity enhancement of circular test specimens. Important test parameters were load patterns and retrofitting scheme. The seismic behavior has been analyzed through the input and output dissipation energy, and displacement ductility. Approximate 7.7~9.0 displacement ductility was observed for nonseismic test specimens retrofitted with fibers subjected to KHC artificial earthquakes. It is concluded that these retrofitting test specimens could have sufficient seismic capacity in the region of moderate seismic zone.

Key words : pseudo dynamic test, RC bridge pier, retrofit, input ground motion, seismic performance, ductility

## 1. 서 론

우리나라는 활성단층으로부터 떨어져 있지만, 최근의 연이은 국내외의 지진 즉 1996년 영월지진, 1997년 경주지진, 1995년 일본고베(Kobe)지진, 1999년 터키키 이즈미(Izmit)지진, 1999년 대만 지진(Chi-Chi)지진 등으로 인하여 지진에 대한 국민적 관심이 고조되고 있다. 또한 많은 역사지진기록이나 최근의 한반도 지진활동으로부터 우리나라는 중·약진 지역으로 분류되고 있으며, 더 이상 지진의 위협으로부터 안전한 지역이 아니라는 인식이 확산되고 있다. 우리나라도 뒤늦게나마 1992년에 처음으로 도로교시방서에 내진설계 규정을 도입하여 시행하고 있으나, 1992년 내진설계기준이 제정되기 이전에 설계·시공된 수많은 기존 교량에 대한 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구는 아직 체계적으로 이루어지지 않은 실정이다. 따라서, 중약진지역으로 분류되고 있는 국내 지진특성을 감안하여 사회기반시설의 하나인 교량의 RC교각에 대한 내진성능 향상 및 보수보강기법에 관한

연구는 시급한 실정이라 할 수 있다. 본 연구는 실제의 입력지진동을 이용하여 유사동적실험(pseudo dynamic test) 방법으로 1992년 도로교 시방서 내진설계규정이 도입되기 이전의 규정에 따라 설계된 비내진 교각시험체의 내진성능을 평가하고 유리섬유 혹은 탄소섬유 등으로 보강된 비내진 교각시험체의 내진성능향상 및 보강효과를 평가하기 위한 실험적 연구이다.

## 2. RC교각실험

### 2.1 재료의 물리적 특성

콘크리트는 목표압축강도 240kgf/cm<sup>2</sup>로 최대골재치수 13mm 골재의 레미콘을 사용하였으며 철근은 SD40을 사용하였다. 기동콘크리트의 압축강도는 261kgf/cm<sup>2</sup>이었다. Table 1은 콘크리트 배합설계표를 보여주고 있으며, 철근은 KS D 3504에 의한 SD40인 D10의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 D6을 사용하였으며 KS B 0820에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하여 각각 평균항복강도 4,700kgf/cm<sup>2</sup>과 4,400kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 얻었다.

비내진설계된 교각시험체의 내진성능 향상을 위하여 기둥의 소성힌지 구간에 유리섬유, 탄소섬유로 각각 보강하였

\* 중앙대학교 건설대학 토목공학과, 교수(대표지자 : chung47@cau.ac.kr)

\*\* 중앙대학교 대학원 토목공학과, 박사수료

\*\*\* 중앙대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Mix proportions and compressive strength of specimen

W/C (%)	Air content (%)	Slump (cm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )
			Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	A.E.	
48.5	5.5	18	182	316	840	903	0.98	261

다. 유리섬유는 설계파단 인장강도가 각각 5,600kgf/cm<sup>2</sup>, 5,000kgf/cm<sup>2</sup>이 되는 TYFO SEH51 및 CAFGL1000제품을 사용하였으며, 탄소섬유는 인장강도 35,500kgf/cm<sup>2</sup>의 SK-N300 제품을 사용하였다. 각각의 물리적 특성은 Table 2에서 보이고 있다.

2.2 교각시험체설계

본 연구에서는 경기도 수원시에 위치한 하갈교를 1/3.4축 소모델로 하여 도로교표준시방서의 비내진 설계규정에 따라 시험체를 제작하였다. Fig. 1에 보여주는 바와 같이 비내진 교각 시험체의 횡방향 철근 간격은 전구간 125mm이며, 이는 하갈교를 대상 모델로 하여 최대 수평력에 대한 전단검토로서 최소전단철근량 규정에 의해 설계를 하였다. 내진설계 교량인 하갈교의 구속철근비는 0.00826로서, Fig. 2의 섬유보강설계는 이와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있도록 Priestley가 제시하고 있는 섬유보강설계방법<sup>(4)</sup>을 이용하여 식 (1)과 같이 보강설계를 하였다.

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{ug} \epsilon_{ug}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{sh}}{f_{cc}} \quad (2)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (3)$$

식 (1)에서,  $t_j$ 는 섬유보강설계두께,  $\epsilon_{cu}$ 는 구속콘크리트의 극한변형률,  $D$ 는 단면의 직경,  $f'_{cc}$ 는 구속콘크리트의 항복강도,  $f_{ug}$  및  $\epsilon_{ug}$ 는 보강재료의 극한응력 및 극한변형률을 나타낸다. 구속콘크리트의 극한변형률 및 구속콘크리트의 항복강도는 식 (2) 및 (3)에 의해 각각 계산되며 여기서  $\rho_{sh}$ 는 횡방향구속철근비를,  $f_{yh}$  및  $\epsilon_{sh}$ 는 횡방향구속철근의 항복강도 및 극한변형율을,  $f'_l$  및  $f'_c$ 는 단면형상에 따른 유효구속응력 및 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 위의 계산과정에 의해 기존 비내진설계 교각에 대하여 계산해 본 결과 요구되는 보강섬유의 두께는 TYFO SEH51제품은 1.382mm, CAFGL1000제품은 1.548mm, SK-N300탄소섬유는 보강두께가

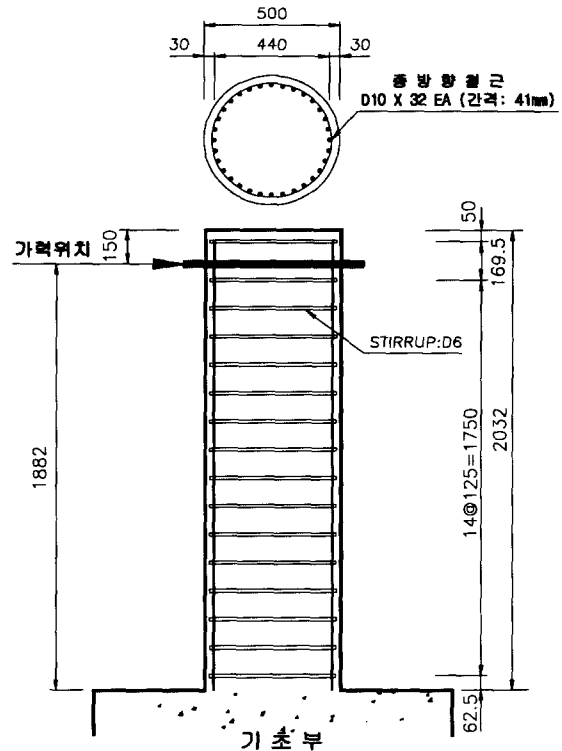


Fig. 1 Nonseismic design specimen

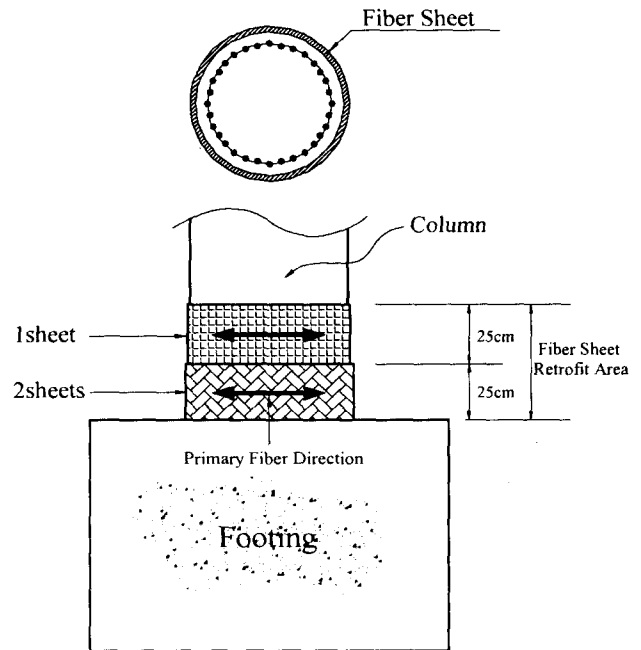


Fig. 2 Retrofitting design specimen

Table 2 Physical property of retrofitting material

Classification	Tensile strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Thickness(mm)
Foreign glass fibers(SEH51)	5,600	252,000	2.0	1.3
Domestic glass fibers(CAFGL1000)	5,000	250,000	2.0	1.0
Carbon fibers(SK-N300)	35,500	2,350,000	1.5	0.167

0.290mm로 나타나 2장으로 보강설계를 하였다. 1999년 정영수 등의 실험결과<sup>(2),(3)</sup>들을 참조하여 볼 때 기동과괴시 소성힌지구간의 아래부분(D/2구간)에서 파괴현상이 나타났고 그 위부분(D구간)에서는 균열이 진전됨을 보이고 있다. 따라서 유리섬유보강의 경우 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 소성힌지 아래구간(50cm 중 25cm)에는 2장을 횡으로 감싸고, 소성힌지 위구간(25cm)에는 횡으로 1장을 감싸는 방법으로 비내진 설계 교각을 보강하였다.

### 2.3 유사동적실험

유사동적실험기법<sup>(5)</sup>은 동적 수치해석방법과 마찬가지로 구조물의 관성 및 감쇠특성뿐 아니라 지진하중을 컴퓨터에서 수치적으로 고려한다. 즉 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 관성, 감쇠력, 지진하중은 input data로 유사동적 control program에 반영되고, 다만 복원력은 실험에 의해서 계측된 값을 이용하여 동적지배미분방정식을 수치적분기법에 의해 매 시간단계마다 수치적으로 계산하면서 실험을 진행시켜 나가는 방법이다. 본 연구의 유사동적실험을 위해 사용된 수치적분방법은 explicit Newmark  $\beta$  method이며<sup>(5),(6)</sup> 아래의 Photo 1에 보이는 바와 같이 횡방향의 지진하중은 1,000kN hydraulic actuator를 이용하여 가력하였으며, 정확한 축방향력 재하를 위하여 축방향력이 초기설정값의 5%이내로 작용토록 하는 hydraulic axial force controller를 이용하여 재하하였다. Photo 1은 실험체의 실험장치도를 보여 주고 있다.

### 2.4 상사법칙

유사동적 실험은 준정적 실험의 실험장치 및 기법과 동적 지배 미분 방정식을 수치적으로 계산하는 기법을 병용한 실험 기법으로 실구조물(prototype)과 실험체(specimen)와의 상사비 및 상사법칙이 중요하다.<sup>(9),(11)</sup> 따라서 동적유사성을 고려하기 위해 내진1등급 교량으로 설계된 수원시 하갈교를 prototype으로 하여 1/3.4축소모델로 Table 3과 같이 상사법

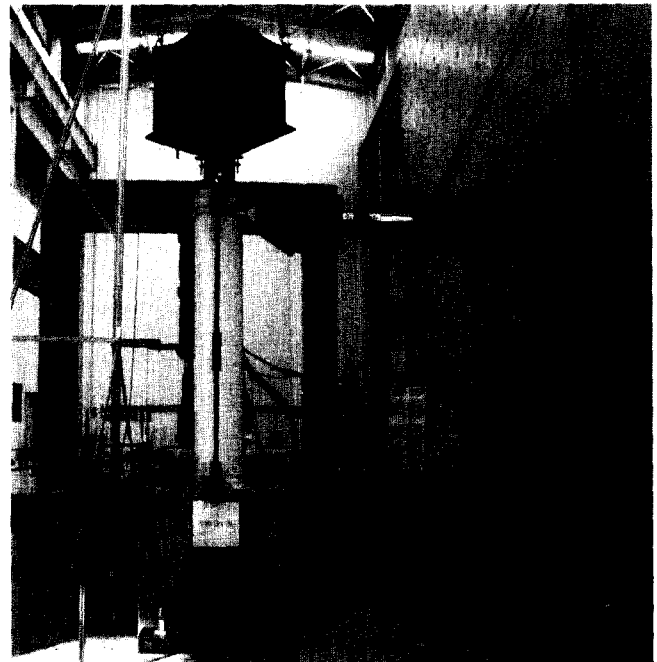


Photo 1 Test setup

칙을 적용하였으며, 상사법칙이 적용된 input data는 Table 4에 보여 주고 있다.

Table 3 Scale factor

Quality	Dimension	Scale factor
Length	L	(S)
Mass	M	(S <sup>3</sup> )
Time	T	S
Stress	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	1
Velocity	LT <sup>-1</sup>	1
Acceleration	LT <sup>-2</sup>	1/S
Force	MLT <sup>-2</sup>	(S <sup>2</sup> )
Stiffness	MT <sup>-2</sup>	S
Damping	MT <sup>-1</sup>	S <sup>2</sup>
Natural frequency	T <sup>-1</sup>	1/S

Table 4 Input data

Quantity	Prototype	Specimen
Length	6.4m	1.882m
Diameter	1.7m	0.5m
Force	497.916tonf	43.07tonf
Mass	1,616.11kg	41.118kg
Time	0.01sec	0.00294sec
Acceleration	0.154g	0.5236g
Stiffness	110,259kgf/cm	32,429kgf/cm

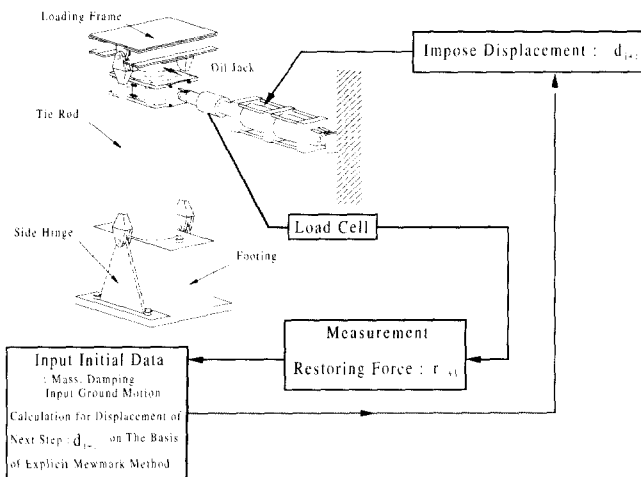


Fig. 3 Scheme of pseudo dynamic test

### 2.5 입력지진동

본 연구에서는 KHC(Korea highway corporation)인공지진파(한국도로공사작성)와 Kaihokus인공지진파(일본건설성토목연구소작성)를 입력지진파로 구분하여 유사동적실험을

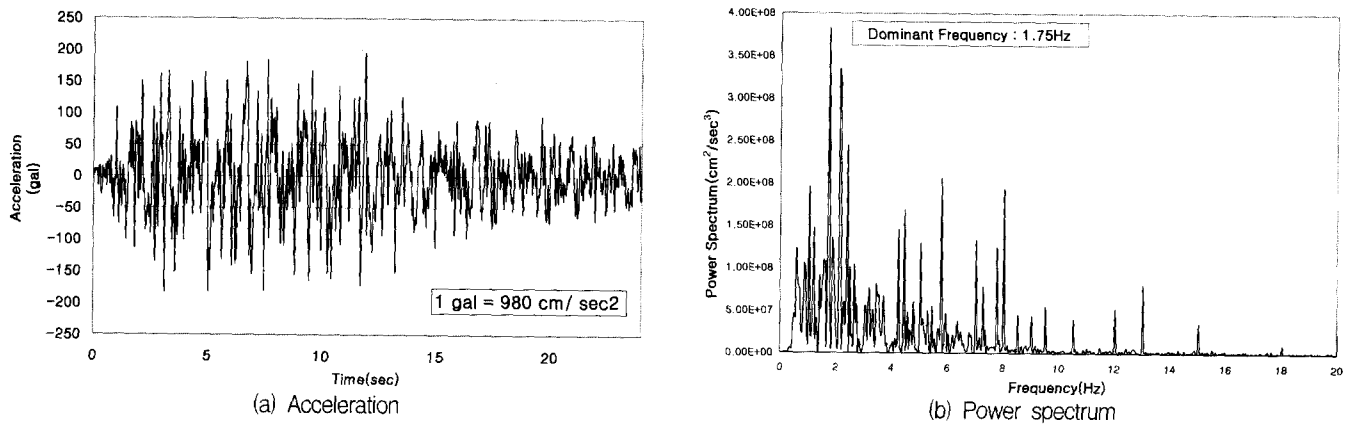


Fig. 4 KHC artificial earthquake

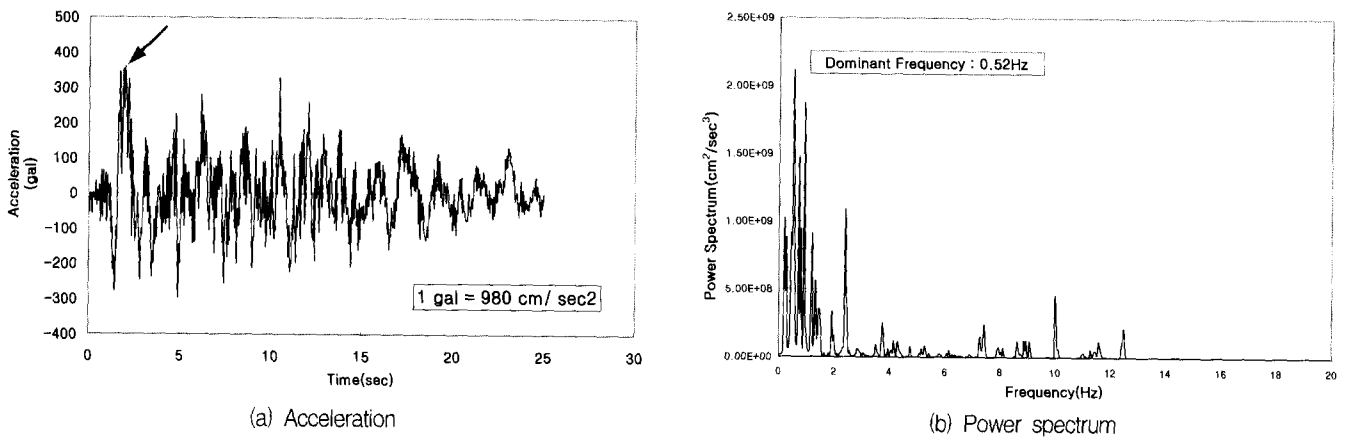


Fig. 5 Kaihokus artificial earthquake

수행하였다. KHC인공지진파는 토질조건에 있어서 암반 또는 경질의 토층이며 지속시간은 24초이다. PGA(peak ground acceleration)는 0.2g이며 아래의 Fig. 4는 인공지진파형 및 power spectrum을 보여 주고 있다. Kaihokus인공지진파는 지진시 보유 수평내력 조사용으로서 경암 조건에 해당한다. PGA는 0.36g이며 Fig. 5에 인공지진파형 및 power spectrum을 보여 주고 있다. power spectrum 분석에서 KHC인공지진파는 지배주기가 1.75Hz이며 Kaihokus인공지진파는 0.52Hz로 나타났다.

2.6 실험계획

본 연구에 사용된 실험체는 총 6本으로서 입력지진파의 load pattern, 보강섬유종류 및 보강유무를 실험변수로 하여 유사동적실험을 수행하였다. Table 5는 load pattern을, Table 6은 실험계획 및 실험체명을 보여주고 있다. 본 실험의 대상모델인 경기도 수원시 하갈교의 특성을 고려하여 현행 도로교표준시방서의 지진구역(I)에서의 구역계수 0.11, 재현 주기 500년의 위험도계수 1.0, 지반계수(경암지반) 1.0을 선택하여 load pattern의 초기값 0.154g를 결정하였다.<sup>(1)</sup> 그 이후는 failure state를 보일 때까지 0.10g씩 증가시켜 적용시켰으며, 축방향력은 하갈교의 상부구조물에 대해 상사법칙이 적용된 43.01tonf를 작용시켰다. Table 6의 시험체명에서 NS는 기존 비내진설계, FT는 TYFO SEH-51 유리섬유보강, DT는 CAFGL1000 유리섬유보강, CF는 SK-N300 탄소섬유보강을

나타내며, LP1은 load pattern 1, LP2는 load pattern 2를 나타낸다.

Table 5 Load pattern

Load pattern	Input ground motion	
	Sequence	PGA
LP1 (KHC artificial earthquake)	1	0.154g
	2	0.220g
	3	0.300g
	4	0.400g
	5	0.500g
	6	0.600g
	7	0.700g
LP2 (Kaihokus artificial earthquake)	1	0.154g
	2	0.220g
	3	0.260g
	4	0.300g

Table 6 Specimen designation

Specimen designation		Remark
Nonseismic	NS-LP1	Axial force 43.01tonf
TYFO SEH51 glass fiber	FT-LP1	
CAFGL1000 glass fiber	DT-LP1	
Nonseismic	NS-LP2	
TYFO SEH51 glass fiber	FT-LP2	
SK-N300 carbon fiber	CF-LP2	
Total 6 specimens		

### 2.7 실험계측

Hydraulic actuator의 재하에 의해 발생하는 횡방향 변위를 측정하기 위해 actuator 반대편과 기둥의 중간지점에 LVDT를 각각 1개를 설치하였으며, 또한 예상하지 못한 하중재하 직각방향으로의 기초부의 변위(들림)와 기초부의 이동(sliding)을 조사하기 위하여 LVDT를 각각 1개씩 Fig. 6과 같이 설치하였다. 소성힌지 구간에서의 철근변형을 파악하기 위하여 실험체의 주철근에는 6개의 strain gauge를 부착하고, 띠철근에는 actuator 가력방향 및 직각방향에 strain gauge를 부착하여 철근변형을 조사하였으며 측정된 DATA는 dynamic data acquisition system(EDX-1500A)을 통하여 저장하였다.

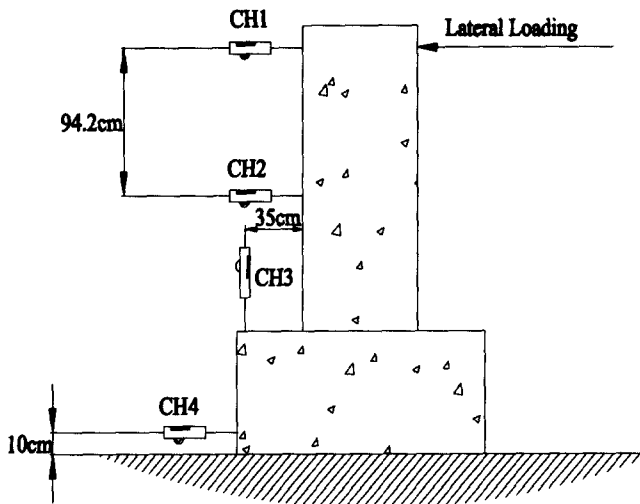


Fig. 6 LVDT setup

## 3. 실험 결과 분석

### 3.1 시간-변위 및 하중-변위 이력곡선

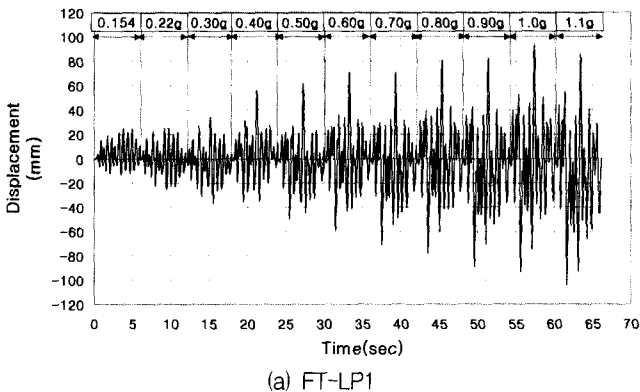
변위 이력곡선 분석을 위해 사용된 변위값은 explicit Newmark  $\beta$  방법에 의해 수치적으로 계산된 control displacement를 이용하였으며, Fig. 7은 control displacement를 이용하여 분석한 각 load pattern에 대한 유리섬유보강 시험체의 전형적인 변위 이력곡선을 보여 주고 있다. Control displacement와 실험에 의해서 직접 측정되어진 복원력값을 가지고 하중-변위

위 이력곡선을 분석하였으며 Fig. 8은 각 시험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 보여 주고 있다.

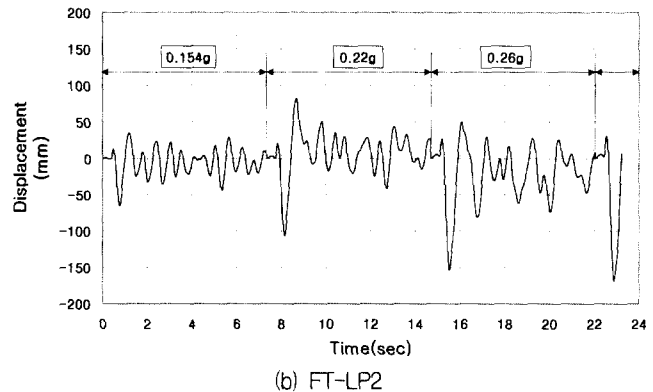
각 실험체의 파괴 현상을 살펴보면 기존 비내진실험체는 균열발생, 피복박리, 횡방향철근 혹은 주철근 좌굴, 최종적으로 주철근이 파단하는 파괴 메카니즘을 보였고, Table 7 및 Table 8에 보인 바와 같이 KHC인공지진파를 입력하중으로 작용시켰을 경우 0.70g에서 최종 파괴 현상을 보이는 반면에 Kaihokus인공지진파인 경우는 0.154g의 낮은 PGA에서 최종 파괴 현상을 보였다. 이는 Fig. 5(a)에서 화살표로 나타낸 바와 같이 Kaihokus인공지진파는 개시 후 약 2초 부근에서 일방향으로 편중된 큰 PGA가 집중적으로 작용하여 이 부근에서 과도한 응답변위를 유발하기 때문인 것으로 사료된다. 섬유보강시험체의 경우는 무보강부근의 균열발생, 보강부분의 균열발생, 섬유일부파단 및 피복박리, 최종적으로 섬유가 심각한 파단현상을 보이면서 주철근이 좌굴하는 파괴 메카니즘을 보였으며, KHC인공지진파에 대해서 0.90g~1.0g까지 견디어 우수한 내진성능을 보여 주었다. Table 7은 각 시험체의 하중단계에 따른 파괴메카니즘을 보여주고 있다.

### 3.2 변위연성도

교각의 내진성능은 일반적으로 소성변형 능력의 크기로 표현되는 변위연성도 ( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ )를 기준으로 평가할 수 있으며,  $\Delta_u$ 는 극한변위를,  $\Delta_y$ 는 항복변위를 나타낸다.<sup>(7),(10)</sup> 변위연성도에 의해서 교각의 연성능력을 평가하기 위해서는 항복 및 극한변위의 산정이 중요한 요소이다. 극한변위는 Fig. 9에서 보는 것처럼 strength envelope상에서 strength가  $0.85V_{max}$  이하로 drop되지 않았음에도 불구하고 소성힌지구간의 주철근이 파단에 도달하였을 때는 주철근파단시점까지 경험한 최대변위를 극한변위로 정의하였고(Fig. 9(a)), 주철근이 파단에 도달하지 않았는데도 불구하고 strength가  $0.85V_{max}$  이하로 저하되었을 때는  $0.85V_{max}$  까지 경험한 최대변위를 극한변위로 정의하였다(Fig. 9(b)). 또한 항복변위는 Fig. 10에서 정의한 방법에 따라 하중-변위곡선 상에서 설계모멘트  $M_n$ 에 해당하는 횡력  $V_i$ 를 지나는 수평선과 원점에서 설계모멘트강도의 75%에 해당하는 횡력( $0.75V_i$ )을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 정의 하였다.



(a) FT-LP1



(b) FT-LP2

Fig. 7 Typical time-displacement history of retrofitted specimen

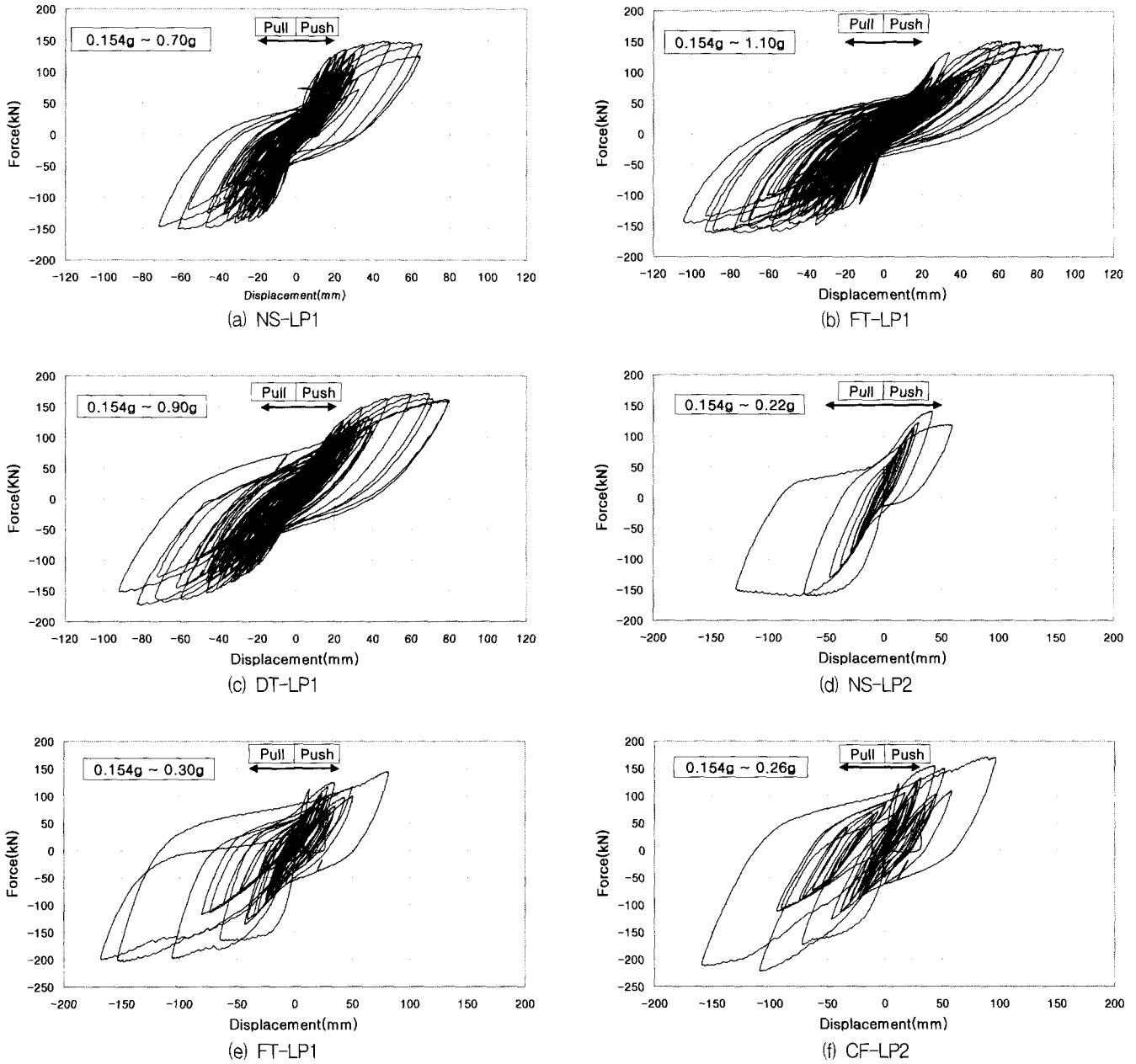


Fig. 8 Restoring force-displacement hysteresis curve

Table 7 Failure mechanism of nonseismic specimen

Specimen	Cracking	Spalling of cover concrete	Buckling of confinement or longitudinal steel	Fracture of longitudinal steel
NS-LP1	0.154g	0.50g	0.60g	0.70g
NS-LP2	0.154g	0.154g	0.154g	0.154g

Table 8 Failure mechanism of retrofitted specimen

Specimen	Cracking of non-retrofitting region	Cracking of retrofitting region	Fracture of fiber sheet and spalling of cover concrete	Fracture of confinement or longitudinal steel
FT-LP1	0.50g	0.60g	0.90g	1.0g
DT-LP1	0.40g	0.50g	0.80g	0.90g
FT-LP2	0.154g	0.22g	0.26g	0.26g
CF-LP2	0.154g	0.22g	0.26g	0.26g

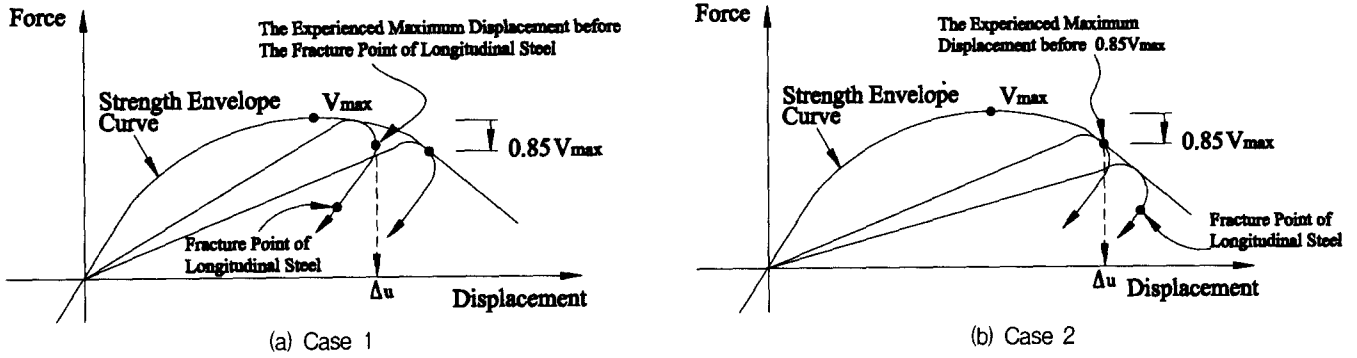


Fig. 9 Definition of ultimate displacement

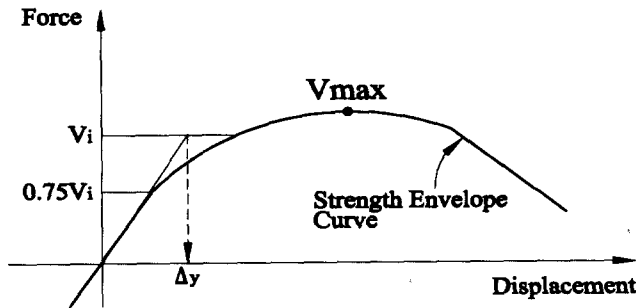


Fig. 10 Definition of yield displacement

Fig. 9에서 정의한 극한변위( $\Delta_u$ )와 Fig. 10에서 정의한 항복변위( $\Delta_y$ )에 따라 변위연성도( $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$ ) 및 비내진교각시험체의 변위연성도를 각 실험체에 대해 일반화시킨 변위연성도(normalized displacement ductility)를 분석해 본 결과 Table 9에서 보여주는 바와 같이 TYFO SEH-51 유리섬유보강실험체는 기존비내진실험체에 비해 1.42~1.53배 정도의 변위연성능력의 차이를 보여주고 있으며, SK-N300 탄소섬유보강실험체는 1.51배, CAFGL 1000 유리섬유보강실험체는 1.23배의 변위연성능력의 차이를 보여주고 있다. 따라서 기존비내진실험체도 중앙진지역의 KHC인공지진파에 대해서 어느 정도의 연성능력을 갖고 있는 것으로 판단되며, 섬유보강 RC교각 시험체는 충분한 연성능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 에너지분석

구조물의 축적 에너지 흡수 혹은 소산능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중의 하나이다. 따라서 에너지 소산능력의 척도로서 축적입력에너지(cumulative input energy)

및 축적소산에너지(cumulative dissipation energy)를 분석하였으며, 축적입력에너지  $E_{inp}$ 는 Fig. 11에서 보여 주는 바와 같이 주어진 변위진폭까지 실험체를 변형시키는데 필요한 actuator가 한 축적 일이며 또한 축적소산에너지는 Fig. 12에서 보여 주는 바와 같이 하중-변위 이력곡선 내부면적의 합으로 정의되었다. 축적 입력에너지와 소산에너지는 다음의 식 (4), (5)와 같이 정의된다.

$$\text{Input energy, } E_{inp} = [+ \Delta E_{inp}] + [- \Delta E_{inp}] \quad (4)$$

$$\text{Cumulative input energy, } E_{cum} = \Sigma E_{inp} \quad (5)$$

Fig. 14 및 Fig. 15에서 보는 바와 같이 기존비내진실험체에 비해 섬유보강된 실험체는 66%~326% 정도의 축적입력에너지(cumulative input energy) 향상능력을 보여 주었고, 축적소산에너지(cumulative dissipation energy)는 86%~520% 정도의 향상능력을 보이고 있다.

변위연성도와 유사한 개념으로 다음과 같이 정의되는 에너지연성도  $\mu_E = E_u/E_y$ 를 분석해 보았으며, 여기서  $E_u$ 는 Fig. 13에서 보이는 바와 같이  $\triangle OAC + \square ABCD$ 면적으로 파괴상태까지의 흡수에너지를 나타내며,  $E_y$ 는  $\triangle OAC$ 면적으로 계산되는 항복상태까지의 흡수에너지를 나타낸다. 비내진설계된 교각의 에너지연성도를 각 실험체에 대해 일반화시킨 에너지연성도(normalized energy ductility)를 Table 10에 보여 주고 있다. 비내진실험체에 비해 유리 및 탄소섬유보강실험체는 1.25~1.57배 정도의 에너지연성능력의 향상을 보여주고 있으며, 이는 Table 9의 normalized displacement

Table 9 Displacement ductility

Specimen	Yield displacement $\Delta_y$	Ultimate displacement $\Delta_u$	Displacement ductility $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$	Normalized displacement ductility
NS-LP1	11.66	73.34	6.26	1.00
FT-LP1	10.41	93.30	8.96	1.42
DT-LP1	11.92	92.07	7.72	1.23
NS-LP2	16.45	111.35	6.77	1.00
FT-LP2	14.87	153.60	10.33	1.53
CF-LP2	14.70	150.28	10.22	1.51

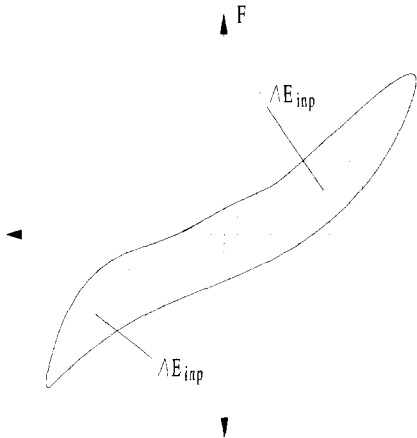


Fig. 11 Definition of input energy

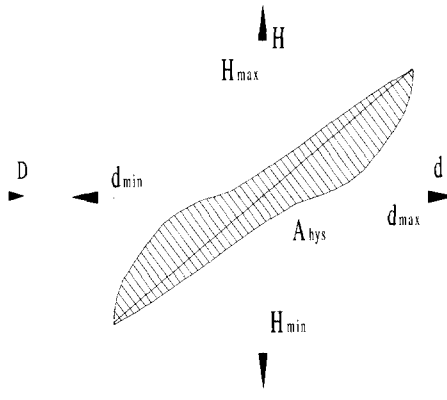


Fig. 12 Definition of dissipation energy

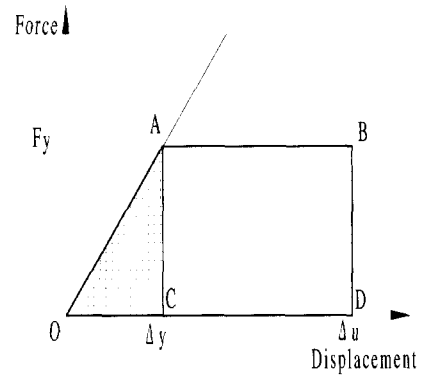


Fig. 13 Definition of energy ductility

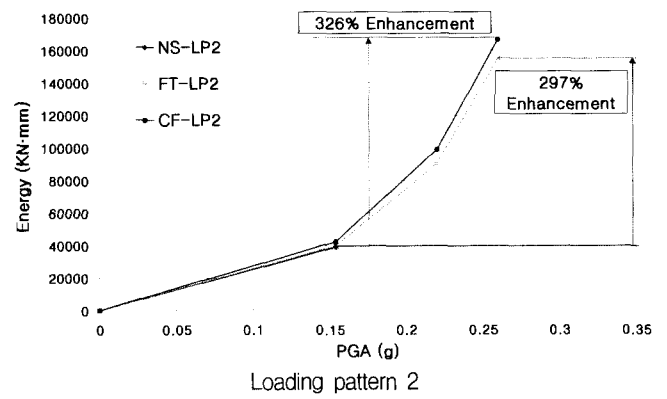
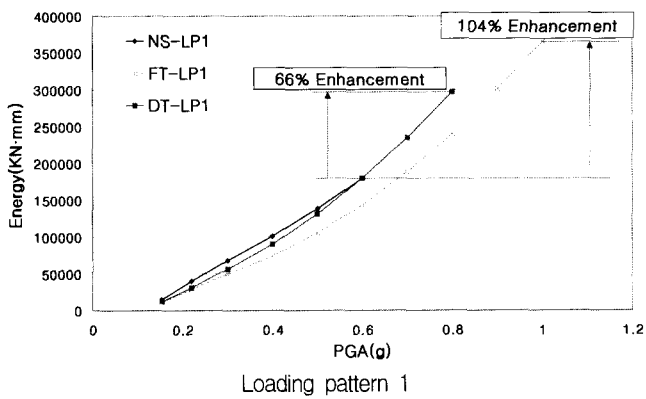


Fig. 14 Cumulative input energy

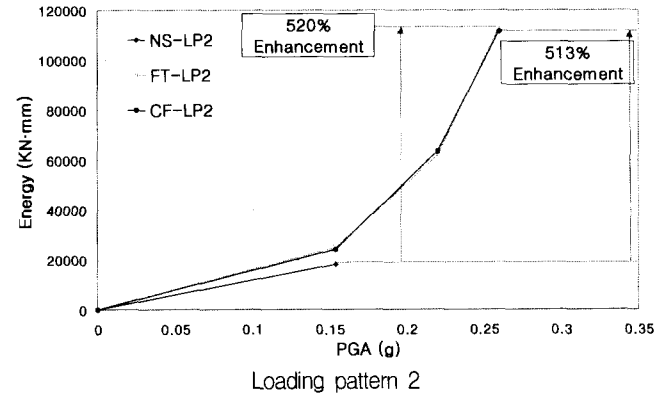
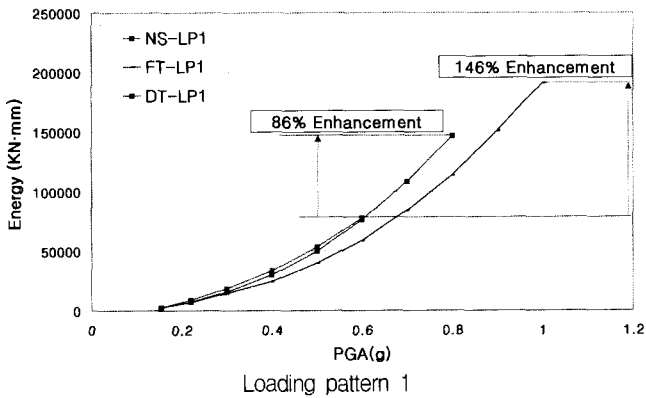


Fig. 15 Cumulative dissipation energy

Table 10 Energy ductility

Specimen	Yield absorption capacity $E_y(\text{KN} \cdot \text{mm})$	Ultimate absorption capacity $E_u(\text{N} \cdot \text{mm})$	Energy ductility ( $\mu_E = E_u/E_y$ )	Normalized energy ductility
NS-LP1	782.57	9065.31	11.58	1
FT-LP1	775.10	13118.58	16.92	1.46
DT-LP1	881.89	12741.61	14.45	1.25
NS-LP2	1259.64	15798.51	12.54	1
FT-LP2	1505.77	29601.92	19.66	1.57
CF-LP2	1543.21	30009.58	19.45	1.55



ductility의 결과와 유사한 결과를 보여 주고 있다.

#### 4. 결 론

본 실험 연구는 RC교각의 내진성능평가 및 향상을 위해서 경기도 수원시 국도상에 위치한 하갈교를 1/3.4 축소모델로 하여 총 6본의 시험체에 대해 유사동적실험(pseudo dynamic test)을 수행하였다. 설계내용에 따라 비내진설계된 실험체와 섬유보강된 실험체를 제작하여, KHC인공지진파와 Kaihokus인공지진파를 입력하여 실험을 수행하였으며 이에 따른 본 실험 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 유사동적 실험결과로 나타난 RC 교각시험체의 소성힌지부는 기둥의 지름이하의 위치이며 대부분의 실험체가 기둥지름의 1/2이하의 위치에서 파괴가 발생되었다.
- ② 섬유보강실험체는 기존 비내진설계된 실험체에 비해 1.23~1.53배 정도의 변위연성능력의 향상을 보여주고 있으며 cumulative input energy는 66%~326%, cumulative dissipation energy는 86%~520% 정도의 에너지 연성능력향상을 보여 주었다.
- ③ 기존 비내진설계된 실험체의 경우 KHC인공지진파에 대해 0.70g, Kaihokus인공지진파에 대해서는 0.154g에서도 파괴현상을 보였으며 섬유보강실험체는 Kaihokus인공지진파에 대해서는 0.26g, KHC인공지진파에 대해서는 0.80g~0.90g까지 파괴현상을 나타내었다. 이는 Fig. 5에서 화살표로 나타낸 바와 같이 Kaihokus인공지진파는 개시 후 약 2초 부근에서 일방향으로 편중된 큰 PGA가 집중적으로 작용하여 이 부근에서 과도한 응답변위를 유발하여 에너지소산을 크게 발생시키고, KHC인공지진파는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Kaihokus인공지진파처럼 PGA의 일방향 편중현상에 의해 그 부근에서 과도한 응답변위를 유발하는것과는 달리 마치 fatigue실험처럼 일정한 cyclic pattern으로 지진파가 작용하기 때문인 것으로 판단된다.
- ④ KHC인공지진파에 대해서는 보강실험체는 우수한 내진성능을 보였으며 비내진설계된 실험체도 어느 정도의 내진성능을 가지고 있는 것으로 나타났으며, Kaihokus인공지진파에 대해서는 기존 비내진설계된 실험체는 0.154g에서 파괴되어 내진성능을 나타내지 못하였으며, 섬유보강실험체는 0.26g까지 견디어 현행도로교시방서 규정의 내진1등급교량 설계시의 PGA값인 0.154g를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

- ⑤ 비내진설계된 기존의 교각도 정밀한 섬유보강이 이루어진다면 중약진지역에서 충분한 연성능력을 발휘할 수 있으리라 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부(과제번호:970003-4), 한국지진공학센터(과제번호:1997G0402), 현대건설기술연구소 및 콘크리닉(주) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국도로교시방서, 건설교통부, 1996.
2. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험", 한국지진공학회는 문집, 제3권, 제2호(통권 제10호), 1999. 6, pp. 41-53.
3. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험", 한국지진공학회는문집, 제3권, 제2호(통권 제10호), 1999. 6, pp. 55-65.
4. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc.
5. Shing, P. B. and Mahin, S. A., "Pseudo-dynamic test method for seismic performance evaluation: theory and implementation," *Report No. UCB/EERC-84/01*, 1984.
6. Thewalt, C. R. and Mahin, S. A., "Hybrid solution techniques for generalized pseudo-dynamic testing," *Report No. UCB/EERC-87/09*, 1987.
7. Wipf, T. J., Klaiber, F. W., and Russo, F. M., "Evaluation of seismic retrofit methods for reinforced concrete bridges columns," *NCEER-97-0016*, 1997.
8. Mario, R. and Park, R., "Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, 1994. 3-4.
9. 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曹英滋, 宇佐美勉, "相似則を考慮したイブリッド地震應答實驗手法に 關する考察," 土木學會論文集, No. 507/I-30, pp. 179-190, 1995. 1.
10. 辛左賢二, 小林和夫, 村山州雄, 吉澤義男 "大型 RC 橋脚模型試驗体による塑性變形舉動に關する實驗的研究," 土木學會論文集, No. 538/V-31, pp. 47-56, 1996. 5.
11. 宇佐美勉, 才塚邦宏, 木曹英滋, 伊藤義人, "ハイブリッド地震應答實驗による鋼製橋脚の 強震時舉動," 土木學會論文集, No. 519/I-32, pp. 101-113, 1995. 7.