

# 강재 보강에 따른 기존 학교건축물의 내진성능에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Aseismic Performance Existing School Buildings due to the Steel Reinforcement

이 호\*                      박성무\*\*                      권영욱\*\*\*                      변상민\*\*\*\*  
Lee, Ho                      Park, Sung-Moo                      Kwon, Young-Wook                      Byeon, Sang-Min

### Abstract

The core aim of this paper is to empirically scrutinize a strength characteristic and ductility of the beam-column frame of reinforced with steel subjected to the cyclic lateral load. First and foremost, I the author embarks upon making four prototypes vis-à-vis this research. Through this endeavour, the author has analysed cyclic behavior, fracture shape, ductility and energy dissipation of the normal beam-column frame and a beam-column frame of reinforced with steel. In addition, the survey has revealed the exact stress transfer path and the destructive mechanism in order to how much a beam-column frame of reinforced with steel has resistance to earthquake regarding all types of building, as well as school construction. To get the correct data, the author has compared the normal beam-column frame and three types of the beam-column frame of reinforced with steel following these works, the characteristic of cyclic behavior, destructive mechanism, ductility, and Energy dissipation of normal beam-column frame and a beam-column frame of reinforced with steel have been examined clearly.

*Keywords : Lateral load, Braced frame, Ductility, Energy dissipation, Hysteretic behavior, Strength, Fracture shape*

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 개요 및 목적

지진하중은 순간적이며 사전에 예측하기 매우 어려운 자연현상으로 상대적으로 자중이 큰 콘크리트 구조물에서는 풍하중보다는 작용하는 힘이 크다는 점에서 크게 고려할 대상이라 판단된다.

중국의 경우 2008년 5월 쓰촨성의 성도 청두에서 북쪽으로 92km 떨어진 원촨지역에서 지진규모 8.0의 강진이 발생하여 사망자 4만 75명, 실종자 3만 2천 361명, 부상자 24만 7천 645명 이재민 5백만 명, 피해 건물 5백 36만 채가 붕괴 되었고, 2천100만 채가 파손되었다. 또한, 2013년 4월 중국 쓰촨성에서 다

시 지진규모 7.0의 강진이 발생하여 사망자 200여 명, 부상자 1만 5000명, 건물 2만여채가 붕괴되었다.

우리나라의 경우 대형규모 지진은 없었으나 1996년 12월 규모 4.5의 영월 지진, 2004년 5월 규모 5.2의 울진지진 및 2007년 1월 규모 4.8의 오대산 지진, 2013년에 들어서 현재까지 총 6회의 중소규모의 잦은 출현으로 보아 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아니며 표준도면으로 내진설계가 적용되지 않은 대부분의 건축물들이 대규모 지진이 발생 시 붕괴될 수 있는 위험에 처해있다.

특히, 학교건물과 국가시설인 공공 건축물에서 큰 피해가 발생할 수 있다. 2009년 교육과학기술부에서 실시한 학교시설 내진보강 우선도 조사에서 국내 대다수의 학교가 내진성능이 낮은 것으로 평가받은 사실은 현재 국내 학교건축물의 위험성을 나타내고 있다. 이 조사에 따르면 지진 발생 시 초·중·고 학교건축물의 50%이상이 대규모피해를 받을 것으로 보고되고 있다. 또한 소방방재청에서 제공한 2011년도 전국 학교시설 내진보강 실적에 따르면 학교시설 20,131동 대상으로 2010년 한해동안 82동의 내진보강이 되었으며 전국 학교건물의 내진율은 21.3%에 불과하다. 따라서 학교건물의 내진보강연구가 시급하다.

\* 주저자, 경북대학교, 융복합시스템공학부 교수  
Kyungpook National Univ. School of Convergence & Fusion System Engineering  
\*\* 교신저자, 영남대학교, 건축학부 교수  
Yeungnam Univ. School of Architecture  
E-mail : smpark@yu.ac.kr Tel : 053-810-2428  
\*\*\* (주) SNS구조안전기술원 대표이사  
\*\*\*\* 경북대학교, 융복합시스템공학부 외래강사  
Kyungpook National Univ. School of Convergence & Fusion System Engineering

학교건물에 있어서 비탄성해석 및 비선형 정적해석을 통한 내진성능 평가에 따른 보강연구<sup>1)</sup>에서도 강축(X방향)에 대한 Steel Damper 및 Oil Damper 보강에 따른 내진성능향상에 대한 내용이 언급이 되었지만, 약축(Y방향)에 대한 보강은 연구에서 크게 언급이 되어 있지 않은 실정이었다. 또한, 내진설계되지 않은 기존 철근콘크리트 골조구조물의 내진성능 보강효과<sup>2)</sup>에서 제시한 와이어 보강, 표준형 시멘트벽돌 보강, 강재보강 중 조적벽체와 강재보강이 가장 높은 에너지 소산능력을 보유하고 있음을 보여주었다.

우리나라 대부분의 학교건축물은 지진력에 저항하는 횡력저항시스템으로 철근콘크리트 모멘트 연성골조로 되어 있다. 본 연구에서는 이를 반영하여 4가지 Type의 실험체를 제작하였다. 첫째는, 보와 기둥만이 있는 일반 기본형 골조이며 나머지 실험체는 일반 기본형 골조 내부에 강재로 보강한 형태로 제작하였다. 실험체의 보강방법으로는 Type-2 역V형 가새골조, Type-3 V형 가새골조, 마지막으로 Type-4 모서리 보강 가새골조로 이루어져있다. 위의 4가지 실험체의 실험결과를 토대로 기본형 골조와 나머지 철골가새로 보강된 골조의 내력 및 파괴형상을 비교하고, 보강된 요소들이 얼마만큼의 내진성능에 영향을 미치는지 구조물의 연성 및 에너지 소산을 검토하였다.

본 연구에서는 4가지 Type에서의 차이점을 비교 분석하여 시공성, 경제성 및 미관성을 만족할 수 있도록 학교건축물의 학급과 학급 사이의 단변방향에 대한 내진보강방안을 검토하는데 목적이 있다.

### 1.2. 기존연구에 대한 동향<sup>2)</sup>

<Table 1> Specimens designed in existing research

실험체명	보강재료	비고
E-N	-	내진설계 안된 기준실험체
E-W	16mm와이어보강	비강재계열
E-B	표준형 시멘트벽돌	
E-X	c -100×50×5×7.5	강재계열
E-K	c -100×50×5×7.5	
E-H	2×6t철판 모서리보강	

<Table 1>은 기존의 유사한 내용의 실험연구에서 설계된 실험체를 나타낸다. 본 연구와 유사한 기존연구를 살펴보면 현존하는 경찰청청사 표준설계도에 의거하여 설계된 기준실험체 1개와 골조 내

부에 5가지의 방법으로 보강된 시험체 5개를 MTS 500kN용량의 유압식 Actuator를 사용하여 3단계까지는 예상 초기항복변위( $\Delta y$ )인 3.22mm의 1/2인 1.61mm씩, 4단계부터는  $\Delta y$ 인 3.22mm씩 증가하며 가력한다. 실험은 총 14단계까지 진행되었다. 이를 통해 최대내력 및 강성과 에너지소산능력을 비교분석하여 내진성능을 평가하였다.

이에 따른 결과 및 본 연구와의 비교분석은 “3.5. 기존 연구과의 비교분석”에서 다룰 것이며, 기존연구에서도 지진에 대한 위험성을 통하여 내진보강방법을 강구하는 데 목표를 두고 있다.

## 2. 실험계획

### 2.1. 하중계획

접합부 실험체에 대한 횡하중 가력은 최상부의 최대변위를 일정한 이력으로 제어하는 반복-횡력 실험을 실시하였다. KBC2009<sup>6)</sup>에서 제시하는 내진등급에 따른 허용층간변위의 경우 <Table 2>과 같다.

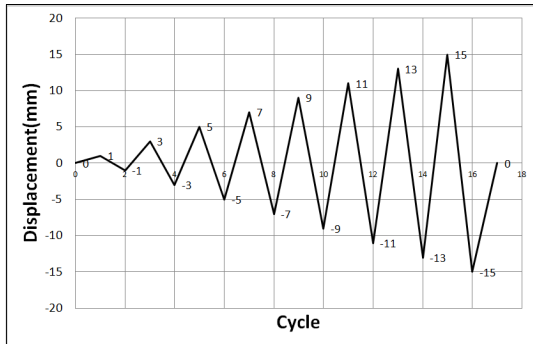
<Table 2> Allowable relative story displacement

	Seismic rated		
	S	I	II
$\Delta_a$	$0.010h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.020h_{sx}$

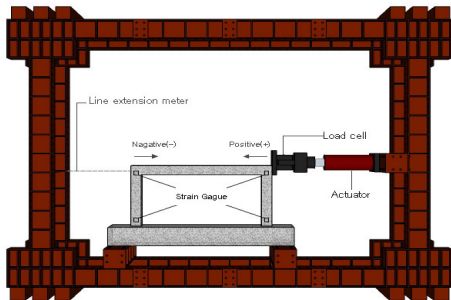
학교 건물의 경우 내진등급 I에 해당되므로 실험체의 높이를 고려하여 허용층간변위를 15mm로 제한하였다. 기둥에 가해지는 축력 없이 최상부 최대 횡변위를 제어하는 방식으로 <Fig. 1>과 같이 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 9mm, 11mm, 13mm, 15mm 총 8단계로 실시하였으며 가력 사이클 당 1회 반복-횡력을 가하여 실시하였다. 또한, 실험체가 단면이 작아  $\pm 15$ mm에서 최대내력이 발생하지 않는 경우 실험체의 최대내력 및 연성능력을 비교하기 위해 실험체가 파괴될 때 까지 횡변위를 가력하였다. 실험 시 상부고정하중이 포함되어야 정확한 실험데이터를 얻을 수 있으나, 실험실 사정상 상부하중에 대한 고려를 할 수 없었고, 실험체의 형상비(1/2)를 고려하여 결과 값에 큰 차이가 없을 것으로 판단되어 상부고정하중은 고려하지 않았다.

<Fig. 1>은 실험에 사용된 가력 사이클이다. (+)변위는 Actuator로 전방으로 가력하는 방향이고 (-)변위는 Actuator를 후방으로 당길 때의 방향이다.

<Fig. 2>는 실험모델의 설치개요이다.



<Fig. 1> Lateral loading history



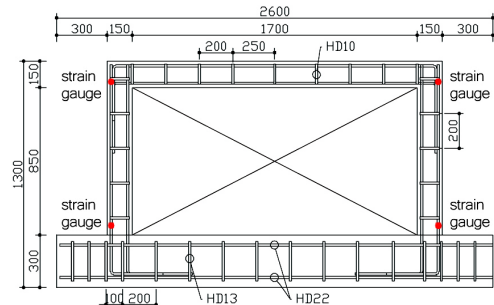
<Fig. 2> Test setup of specimen

## 2.2. 실험체

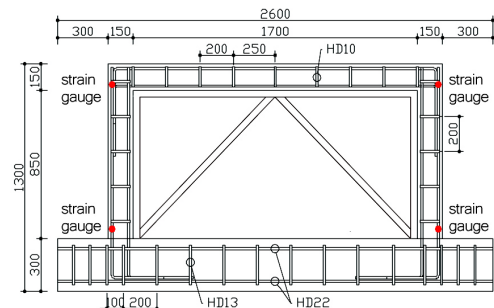
실험체의 기둥 및 보의 단면은 150mm×150mm로 실험모델 설계 전 실제 학교건축물의 보-기둥골조 모델을 조사하여 학교건축물과 비율(형상비 1/2)이 같도록 축소시켜 제작하였다. 실제 학교건축물의 조사 결과 대부분 스패 7.2m에 층간높이는 3.6m로 조사되었다. 이 조사결과를 토대로 실험모델은 <Fig. 3>~<Fig. 6>과 같이 일반적인 기본형 골조(Type-1)과 역V형 가새골조(Type-2), V형 가새골조(Type-3), 마지막으로 모서리 보강 가새골조(Type-4) 총 4가지 모델의 내력 및 연성능력, 에너지소산을 비교하여 분석하고자 한다. <Table 3>은 내부 강제보강형태에 따른 실험체 분류이다.

<Table 3> Test specimens

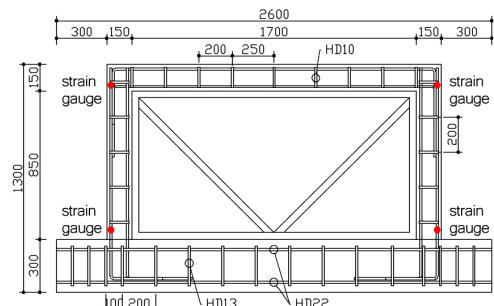
Model Type	Test specimen
Type-1	Beam-Column Frame
Type-2	Chevron Braced Frame
Type-3	'V' shape Braced Frames
Type-4	Reinforced Corners Braced Frame



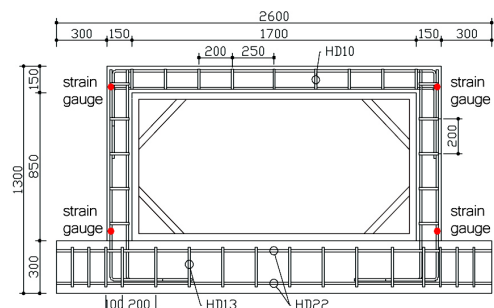
<Fig. 3> Details of specimen (Type-1)



<Fig. 4> Details of specimen (Type-2)



<Fig. 5> Details of specimen (Type-3)



<Fig. 6> Details of specimen (Type-4)

## 2.3. 실험계측

본 실험에서 실험체의 가장 중요한 거동은 일반 기본형 골조와 역V형 가새골조, V형 가새골조, 모서리 보강 가새골조의 기둥 상부와 하부의 층간변위에 따른 거동이므로 이곳에 작용하는 부재력을 계측함과 동시에 이 부분에서의 변형률을 정확히 계측하는 것이 무엇보다 중요하다.

<Fig. 3> ~ <Fig. 6>은 스트레인 게이지의 위치 및 철근배근 상세를 나타내고 있다. 기둥주근의 상·하부에 스트레인 게이지를 부착하여 반복-횡력에 대한 기둥철근의 변형률을 계측하기 위해 게이지를 부착하였다. 콘크리트 타설 중에 발생하는 손상을 감안하여 한 부위에 2개씩 총 8개를 부착하였다.

## 2.4. 재료 특성

### 2.4.1. 콘크리트

실험체에 사용된 콘크리트는 1종 보통콘크리트 로, 굵은 골재의 최대치수를 25mm로 하고 시공연도를 높이기 위해 콘크리트용 고로슬래그미분말을 25%(KSF 2563)를 사용하였으며, 슬럼프 값은 80mm로 하였고, 보-기둥 및 기초의 콘크리트 배합표는 <Table 5>로 동일한 배합비율을 갖는다. 콘크리트의 설계기준강도는 24MPa인 레디믹스콘크리트를 사용하였고, KS F 2403에 따라 제작한 공시체는 대기양생과 수중양생 2가지로 실험하여 비교하였다. <Table 4>은 표준공시체 압축강도 실험에 대한 결과표이다.

<Table 4> Strength tests of concrete specimens

cured Method	Test specimens	Strength criteria(MPa)	Compressive strength(MPa)	Mean (MPa)
Air cured	D1	24.00	26.23	25.32
	D2		24.19	
	D3		25.55	
Water cured	W1		31.02	30.50
	W2		30.78	
	W3		29.71	

<Table 5> Mixed design of concrete

Classification	W/C (%)	S/A (%)	Unit Quantity (m <sup>3</sup> )	Cement (m <sup>3</sup> )	Sand (m <sup>3</sup> )	gravel (m <sup>3</sup> )	Slump (mm)	Admixture (%)
Concrete	53	46	0.103	0.242	0.838	1.011	80	25

### 2.4.2. 철근 및 보강철골

전체 실험모델의 기초 주근은 HD22를 사용하였고, 보와 기둥은 주근은 HD10을 사용하였으며, 스테럽 및 후프철근은 HD10을 사용하였다. 실험체에 사용된 철근 및 배근간격에 대한 상세내용<sup>5)</sup>은 <Table 8>과 같다. 보강 철골은 <Table 7>에서 제시된 SS400강재를 사용하였으며 <Table 6>는 철근 및 철골의 재료적 특성이다. 철골보강 상세도는 위의 <Fig. 3>~<Fig. 6>과 같다.

<Table 6> Physical properties of reinforcement

Test specimens	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Yield ratio ( $\sigma_y/\sigma_t$ )
HD22	501.23	632.95	0.79
HD22	514.24	654.43	0.79
HD22	504.43	633.66	0.80
Mean	506.63	640.35	0.79
HD13	514.13	624.16	0.82
HD13	523.13	647.66	0.81
HD13	574.19	677.51	0.85
Mean	537.15	649.78	0.83
HD10	608.86	724.13	0.84
HD10	605.71	722.67	0.83
HD10	576.54	702.74	0.82
Mean	597.04	716.51	0.83
Frame1	334.65	445.42	0.75
Frame2	328.37	432.21	0.76
Frame3	321.25	458.38	0.70
Mean	328.09	421.97	0.74
Brace1	324.50	436.70	0.74
Brace2	333.40	448.32	0.74
Brace3	362.73	492.12	0.74
Mean	355.24	454.55	0.74

<Table 7> Details of reinforcement steel

	Type-2	Type-3	Type-4
Frame	□ - 75×40×5×7(SS400)		
Brace	L - 40×40×5(SS400)		

<Table 8> Details of reinforcement arrangement

Test specimens	Main bar		Stirrup				
	Base	Col' & Beam	Col'	Beam		Base	
				Side	Center	Side	Center
Type-1	10-HD22	4-HD10	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @250	HD13 @100	HD13 @200
Type-2	10-HD22	4-HD10	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @250	HD13 @100	HD13 @200
Type-3	10-HD22	4-HD10	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @250	HD13 @100	HD13 @200
Type-4	10-HD22	4-HD10	HD10 @200	HD10 @200	HD10 @250	HD13 @100	HD13 @200

### 2.4.3. 에폭시

기본형 골조에 외부 프레임 접합 시 앵커볼트를 사용하는 경우 기존 건축물에 손상을 주기 때문에 손상을 미연에 방지하기 위해 보강철골과 콘크리트 접합면 사이에 앵커볼트 대신 에폭시를 사용하여 접합하였다. 에폭시는 석재용 에폭시 G-5050의 주제와 경화제를 1대1 비율로 혼합하여 사용하였다. 에폭시에 대한 재료적 특성은 <Table 9>과 같다.

<Table 9> Physical properties of epoxy

Mixed ratio	Task hours	Curing time	purpose
1:1	30~40 (Minute, 25°C)	8~12Hour	Stone, Concrete, etc.

### 3. 실험결과 및 분석

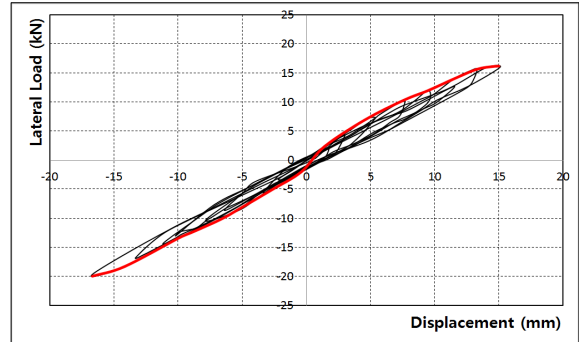
#### 3.1. 실험체의 거동특성

<Table 10>는 허용층간변위에서의 최대내력을 나타낸 표이다.

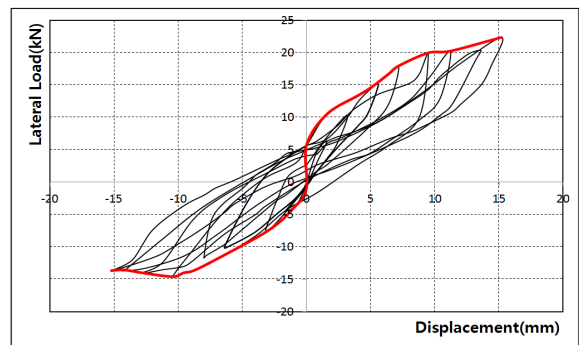
<Table 10> Strength analysis at maximum allowable drift

specimens	Maximum strength(kN)		Displacement(mm)	
	Positive(+)	Negative(-)	Positive(+)	Negative(-)
Type-1	7.67	8.00	15.21	15.20
Type-2	10.34	8.34	15.31	15.12
Type-3	16.34	20.34	14.71	16.15
Type-4	19.34	18.67	15.23	15.21

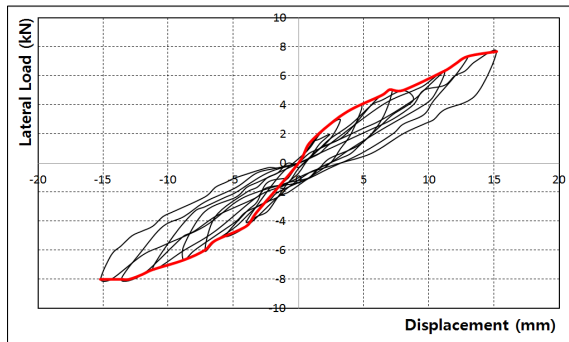
<Table 10>에서 (+)방향과 (-)방향의 내력의 차이가 발생하는 이유는 Actuator로 가력 시 기초부의 유격이 발생하여 Sliding 현상이 발생한 것으로 판단된다. <Fig. 7> ~ <Fig. 10>은 반복-횡력에 의한 하중-변위 포락선이다.



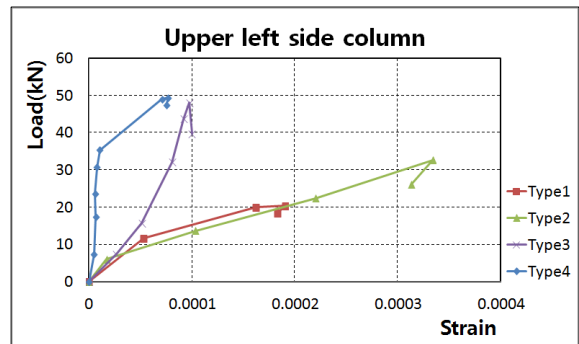
<Fig. 9> Load-displacement hysteresis loops (Type-3)



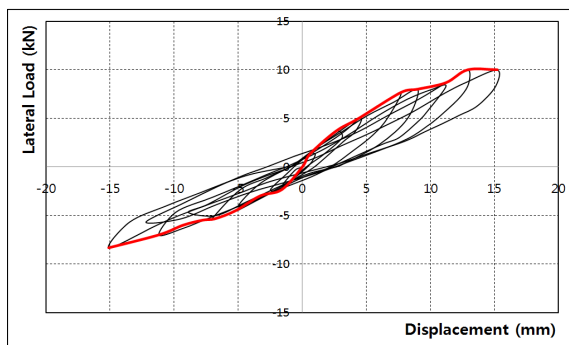
<Fig. 10> Load-displacement hysteresis loops (Type-4)



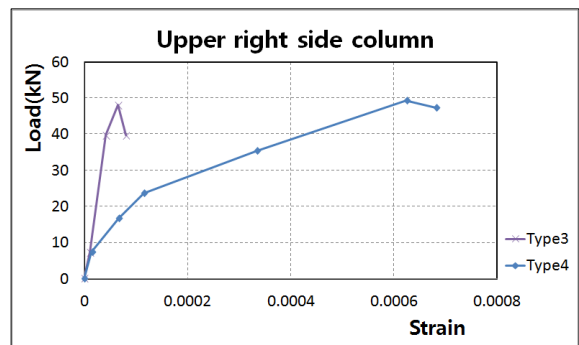
<Fig. 7> Load-displacement hysteresis loops (Type-1)



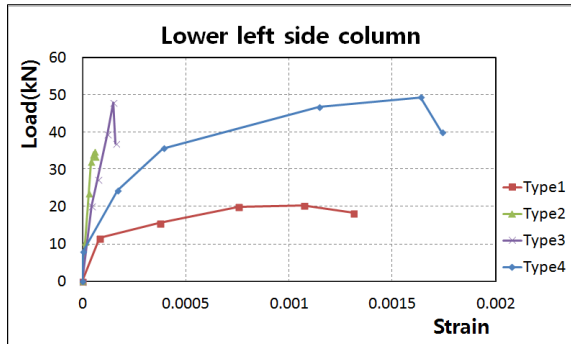
<Fig. 11> Load-strain curve



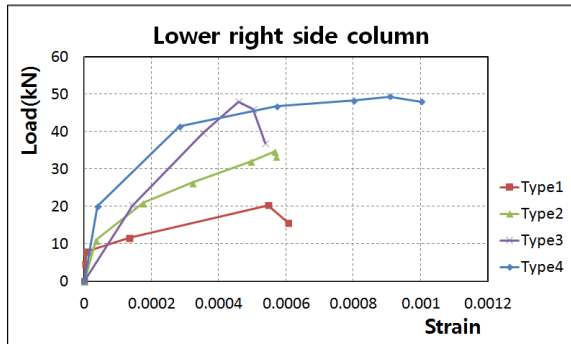
<Fig. 8> Load-displacement hysteresis loops (Type-2)



<Fig. 12> Load-strain curve



<Fig. 13> Load-strain curve



<Fig. 14> Load-strain curve

<Fig. 11> ~ <Fig. 14>은 실험체의 기둥에 부착한 스트레인 게이지에서 분석한 하중-변형률 관계에 대한 포락선이다. 골조상단의 경우 하중-변형률 포락선에서 연성적인 거동을 비교할 수 없었고, 골조하단의 경우에 연성적인 거동을 비교할 수 있었다. 하중-변형률 곡선에서 나타난 것과 같이 모서리 보강 가새 골조가 가장 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

### 3.2. 실험체의 파괴양상

#### 3.2.1. 허용충간변위에서의 파괴양상

<Table 11> Details of main crack (Type-1)

주기	파괴양상
-3mm	우측 기둥하부 150mm지점 및 250mm지점 수평방향균열발생
+5mm	좌측기둥하부 130mm지점 수평방향균열발생 우측기둥상부 200mm지점 수평방향균열발생 보 우측단부 150mm지점 연직방향균열발생
-5mm	-3mm주기의 균열 증가
+7mm	좌측기둥하부 330mm지점 수평방향균열발생
-7mm	좌측기둥하부 280mm지점 수평방향균열발생 우측기둥하부 30mm지점 수평방향균열발생
+9mm	우측기둥하부 130mm지점 수평방향균열발생 좌측기둥상부 100mm지점 수평방향균열발생
-9mm	-7mm주기의 균열 증가
-11mm	좌측기둥중양부 대각선균열발생
±13mm	기존 균열 증가

<Table 12> Details of main crack (Type-2)

주기	파괴양상
-3mm	우측기둥하부 170mm 지점 수평방향균열발생
+5mm	-3mm주기의 우측기둥하부 균열 증가
-5mm	우측기둥하부 10mm 지점 수평방향균열발생 좌측기둥하부 10mm 지점 수평방향균열발생
+7mm	-5mm주기의 좌측기둥하부 균열 증가
-7mm	좌측기둥하부 10mm 지점 수평방향균열발생
-9mm	역V형 가새 중앙 접합부 상부 보 중심부 균열발생
-11mm	-9mm주기의 균열 증가 -5mm주기의 우측기둥하부 균열증가
+13mm	-9mm주기의 균열 증가
±15mm	기존 균열 증가

<Table 13> Details of main crack (Type-3)

주기	파괴양상
-1mm	우측기둥하부 190mm지점 수평방향균열발생
+3mm	우측기둥하부 150mm지점 수평방향균열발생
-3mm	-1mm주기의 균열 증가 좌측기둥중양부 수평방향균열발생
+5mm	+3mm주기의 균열 증가
-5mm	보 우측단부 ¼지점 연직방향균열발생
-7mm	좌측기둥하부 130mm지점 수평방향균열발생
+9mm	우측기둥하부 10mm지점 수평방향균열발생
±15mm	좌측 보기둥접합부 연직방향균열발생 및 기존 균열 증가

<Table 14> Details of main crack (Type-4)

주기	파괴양상
-1mm	우측기둥하부 5mm지점 수평방향균열발생 좌측기둥하부 200mm지점 수평방향균열발생
-3mm	좌측기둥하부 5mm지점 수평방향균열발생 좌측기둥하부 330mm지점 수평방향균열발생 좌측기둥중양부 수평방향균열발생 우측 보단부 ¼지점 연직방향균열 발생
-5mm	-3mm주기의 보 단부 균열 증가 우측기둥하부 80mm지점 균열 증가 좌측기둥 기존 균열 증가
-7mm	-3mm주기의 보 단부 균열 증가
+9mm	양측기둥하부 10mm지점 수평방향균열발생
-9mm	-5mm주기의 보 단부 및 우측기둥하부 균열 증가 가새 축력에 의한 좌측기둥중양부 국부적 수평방향균열발생
+11mm	가새 축력에 의한 우측기둥중양부 국부적 수평방향균열발생 좌측 보단부 ¼지점 연직방향균열발생 좌측 보상부 휨균열 발생
-11mm	기존 균열 증가 우측기둥하부 150mm지점 수평방향균열발생
+13mm	우측기둥중양부 +11mm주기의 균열 증가 +11mm주기의 보 단부 균열 증가
-13mm	좌측기둥하부 200mm지점 수평방향균열증가
±15mm	기존 균열 증가

〈Table 15〉 Crack patterns at maximum allowable drift

Type-1	
좌측상단	우측상단
좌측하단	우측하단
Type-2	
좌측상단	중앙 보상단
좌측하단	우측하단
Type-3	
좌측상단	우측상단
좌측하단	우측하단
Type-4	
좌측상단	우측상단
좌측하단	우측하단

### 3.2.2. 최대내력에서의 파괴양상

최대 가력사이클 ( $\pm 15\text{mm}$ )에서 모든 실험체는 파괴되지 않았다. 그로 인해 최대 내력을 비교하기 위해 실험체의 파괴 시까지 최대로 층간변위를 가력하였다.

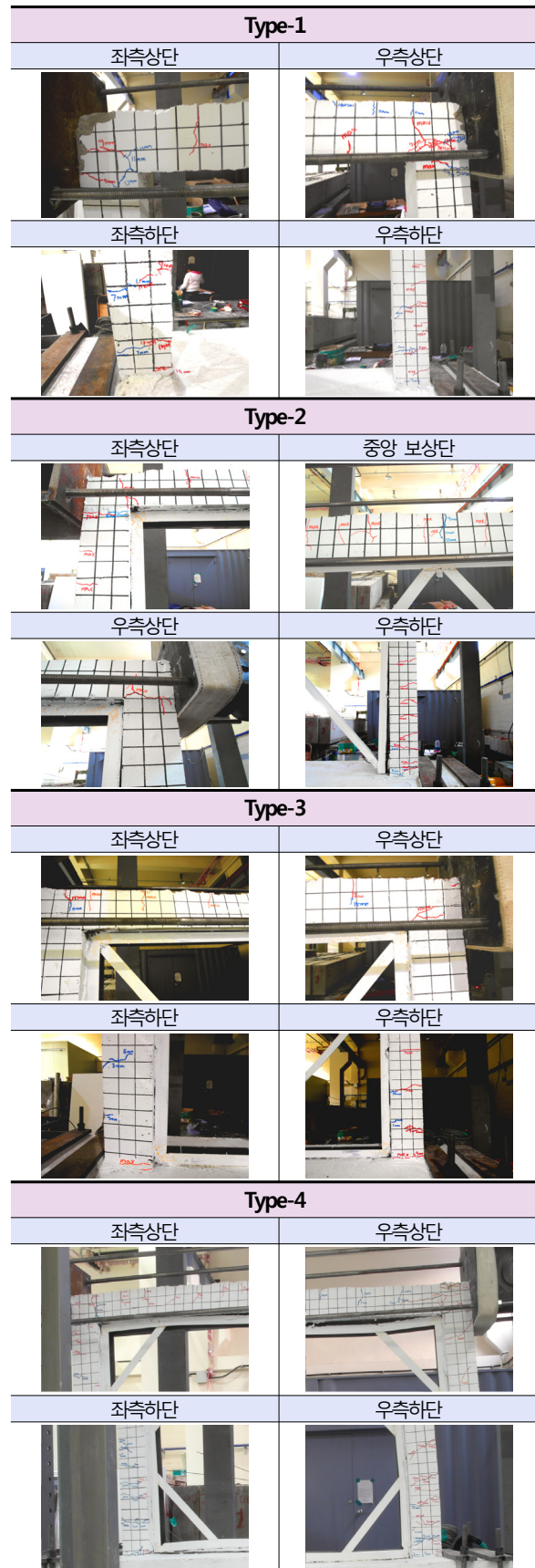
1) 기본형 실험체의 최종 파괴는 최대층간변위  $152.70\text{mm}$ 에서  $20.34\text{kN}$ 의 내력시점에서 발생하였다. 구조물의 파괴 시까지 최대 층간변위를 가력한 결과 구조물의 기둥 하부에서 중심부까지 기둥방향의 연직방향으로 균열이 발생한 것으로 나타났고, 접합부에서 파괴되는 양상을 보였다.

2) 역V형 가새골조 실험체의 최종 파괴는 최대층간변위  $197.2\text{mm}$ 에서  $34.68\text{kN}$ 의 내력시점에서 발생하였다. 구조물의 파괴시까지 최대 층간변위를 가력한 결과 구조물의 상부 보 방향의 연직방향으로 균열이 고르게 발생한 것으로 나타났다. 이는 횡력 작용 시 횡방향 강재의 좌굴이 발생하여 보의 중심부에서 좌측부분으로 균열이 고르게 발생한 것으로 사료된다. 또한, 보 중앙부 상단에 균열이 크게 발생하였다. 이는 횡력 가력 시 가새에 의해 상대적으로 압축력이 발생하여 보 중앙부에 부모멘트에 의한 휨균열이 발생한 것으로 판단된다.

3) V형 가새골조 실험체의 최종 파괴는 최대층간변위  $59.70\text{mm}$ 에서  $48.02\text{kN}$ 의 내력시점에서 발생하였다. 구조물의 파괴 시까지 최대층간변위를 가력한 결과 구조물의 기둥 하부에서 중심부까지 기둥방향의 연직방향으로 균열이 고르게 발생하였고, 접합부의 균열이 증가하였으며, 보 상부에 휨균열이 발생하였다. 가새의 저항으로 기둥의 단부에 발생하는 응력이 기둥전체로 분산되면서 기둥 전체에 균열이 고르게 발생한 것으로 사료되고, 상대적으로 보에 부모멘트가 발생하여 보에 휨균열이 발생한 것으로 사료된다.

4) 모서리 보강 실험체의 최종 파괴는 최대층간변위  $112.80\text{mm}$ 에서  $49.36\text{kN}$ 의 내력시점에서 발생하였다. 구조물의 파괴 시까지 최대층간변위를 가력한 결과 구조물의 기둥과 보 전체에 기둥방향의 연직방향으로 균열이 고르게 발생하였고, 접합부의 균열이 증가하였다. 이는 최대층간변위가 과대하게 발생하는 경우 내부 강재의 변형(좌굴)으로 인해 상대적으로 보에 부모멘트가 발생하여 보 상부에 휨균열이 발생한 것으로 사료된다.

<Table 16> Crack patterns at maximum strength



### 3.3. 실험체별 내력비교분석

#### 3.3.1. 허용층간변위에서의 내력 비교 분석

<Table 17>는 허용층간변위에서 전체 실험모델에 대한 강도 비교표이다. 내력을 비교한 결과 기본형 골조와 역V형 가새골조의 내력을 비교한 결과 역V형 가새골조가 약 119% 높은 것으로 나타났다. V형 가새골조와 기본형 골조와 비교 시 약 234% 높은 것으로 나타났다. 모서리 보강 가새골조의 내력은 기본형 골조와 비교 시 약 243% 높은 것으로 나타났다.

역V형 가새골조는 내력이 크게 향상되지는 않았다. 이는 내부 보강 프레임 중 하부의 프레임을 설치하지 않아 내부 보강 프레임이 일체로 거동하지 못하여 V형 가새골조 보다 내력이 낮은 것으로 사료된다.

<Table 17> Strength comparative analysis of allow drift

Specimen	Load(kN)		Displacement(mm)		Average load (kN)	Ratio (%)
	Positive (+)	Negative (-)	Positive (+)	Negative (-)		
Type-1	7.67	8.00	15.21	15.20	7.835	100
Type-2	10.34	8.34	15.31	15.12	9.340	119
Type-3	16.34	20.34	14.71	16.15	18.34	234
Type-4	19.34	18.67	15.23	15.21	19.01	243

#### 3.3.2. 최대변위에서의 내력 비교 분석

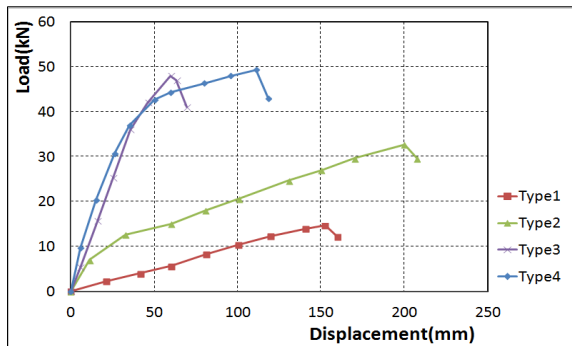
아래의 <Table 18>은 최대층간변위에 대한 최대 내력을 비교분석한 표이다. 표에서 볼 수 있듯이 역V형 가새골조의 경우 약 171%의 내력증진효과가 나타났고, V형 가새골조의 경우 약 236%의 내력증진효과를 볼 수 있었으며, 모서리 보강 가새골조의 경우 약 243%의 내력증진효과를 볼 수 있었다.

<Table 18> Maximum strength comparative analysis of maximum displacement

Specimen	Displacement(mm)	Load(kN)	Ratio(%)
Type-1	152.7	20.34	100
Type-2	197.2	34.68	171
Type-3	59.7	48.02	236
Type-4	112.8	49.36	243



역V형 가새골조와 V형 가새골조의 내력 비교 시 대등할 것으로 판단하였으나, V형 가새골조가 역V형 가새골조에 비해 97%정도 내력이 크게 나타났다. 이는 외부 프레임 중 하부 프레임이 없어 내부 보강프레임이 일체로 거동하지 못한 것으로 사료된다. 최대 변위에서는 모서리 보강 가새골조와 V형 가새골조가 가장 높은 내력을 발휘 하는 것으로 나타났다. <Fig. 15>는 최대층간변위에서의 최대내력을 나타낸 포락선이다.



<Fig. 15> Load-displacement curve of maximum strength

### 3.4. 실험체의 내진성능 비교분석

#### 3.4.1 내부 보강에 따른 연성 비교 분석

Type1과 같은 기본골조에 가새 보강형태에 따른 실험체의 연성지수를 정리하여 <Table 19>에 나타내었다. 이 연구에서는 연성지수를 정방향 가력을 기준으로 산정하여 강재 보강에 따른 연성능력을 비교하였다. 여기서 연성이란 부재가 최대 하중 이후 하중의 큰 저하 없이 변형할 수 있는 능력을 의미한다. 이 연구에서는 여러 연구자들에 의하여 사용된 다음 식 (1)을 이용하여 연성을 산정하였다<sup>3)</sup>. 부재의 단면이 작아 실험 시 허용층간변위에서 항복이 발생되지 않았다. 구조물의 항복점을 알아보기 위해 허용층간변위 이후 항복점까지 정방향으로 횡력을 가력하여 연성을 평가하였다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{80}}{\Delta_y} \quad \text{식 (1)}$$

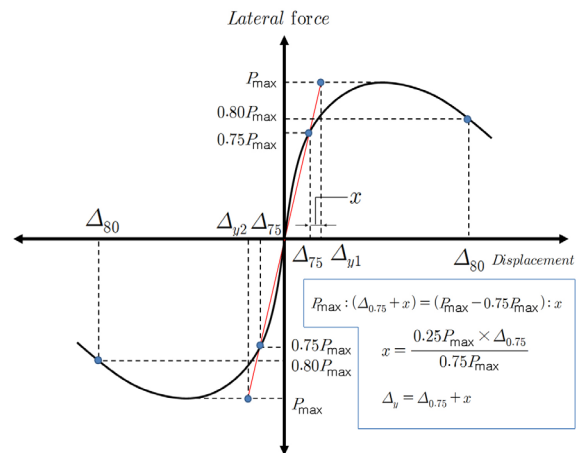
여기서  $\Delta_{80}$ 은 <Fig. 16>에 나타난 바와 같이 하중-변위 이력곡선에서 최대하중 이후 최대하중의 80%

에 해당하는 극한 시 변위,  $\Delta_y$ 는 최대하중의 75%에 접선과 최대하중이 교차하는 지점에 해당하는 항복 시 변위이다. 이 연구에서 항복변위  $\Delta_y$ 는 <Fig. 16>에서 제시한 비례식을 이용하여 산정하였다.

Type-1에 비해 Type-2와 Type-3은 연성능력은 75%와 98%로 떨어지는 것을 볼 수 있으나, Type-4의 경우 163%정도 연성능력이 증진된 것을 알 수 있었다.

<Table 19> Ductility analytical results of tested specimens

Ductility		Specimens			
		Type-1	Type-2	Type-3	Type-4
$\Delta_y$ (mm)	Positive(+)	119.2	181.07	47.47	46.93
$\Delta_{80}$ (mm)	Positive(+)	183.5	207.7	71.1	117.6
$\mu_{\Delta}$	Positive(+)	1.53	1.15	1.50	2.50
Ratio(%)		100	75	98	163



<Fig. 16> Definition of ductility

#### 3.4.2. 에너지 소산능력 비교 분석

에너지 소산능력은 철근콘크리트 구조물의 변형 성능을 평가하는데 있어서 연성능력과 함께 매우 중요한 평가방법이다. 따라서 이 연구는 <Table 20>에 나타난 바와 같이 에너지 소산능력은 실험체의 하중-변위 이력곡선을 통해 각 사이클별로 단조화 그래프를 작성하여 면적의 총합을 누적하여 나타내었다<sup>4)</sup>.

Type2의 경우 일반 Type1에 비해 약 127%의 에너지 소산능력이 향상되었고, Type3의 경우 약 125%의 에너지 소산능력이 향상되었다. Type4의 경우 약 355%의 에너지 소산능력이 향상되었다.

이는 일반 기본형 골조에 비해 강재의 보강에 따라 효과적인 에너지 소산효과를 볼 수 있음을 뜻한다.

<Table 20> Energy dissipation analytical results of tested specimens cycle

Specimens Cycle(mm)	Energy dissipation (N·mm)			
	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4
1	1,731.4	1,597.0	4,330.1	2,977.39
3	6,918.0	6,255.6	11,953.0	19,969.6
5	15,813.3	13,490.0	19,368.7	60,435.5
7	20,951.9	29,491.1	30,996.7	84,617.3
9	28,650.1	29,405.7	41,346.1	15,3160.0
11	32,162.0	50,441.0	35,190.3	107,928.9
13	38,333.3	58,773.8	45,188.5	135,878.6
15	50,127.1	56,856.4	55,156.8	125,521.7
total	194,700	246,300	243,500	690,500
Ratio(%)	100	127	125	355

### 3.5. 기존 연구와의 비교<sup>2)</sup>

#### 3.5.1. 최대내력비교

<Table 21> Maximum strength and ratio of existing research

Type	Maximum strength(tf)		Maximum strength ratio	
	Positive (+)	Negative (-)	Positive (+)	Negative (-)
E-N	8.51	6.97	1	1
E-W	11.45	12.25	1.34	1.75
E-B	21.08	-	2.47	-
E-X	18.9	20.4	2.22	2.92
E-K	12.43	10.57	1.46	1.52
E-H	9.57	9.48	1.12	1.36

<Table 21>은 “1.2. 기존연구에 대한 동향”에서 언급한 연구의 최대내력 및 최대내력비를 나타낸다. 이를 통해 보강시험체의 기준시험체에 따른 내력보강능력을 볼 수 있으며 내력비에 따르면 조적보강시험체(E-B)가 (+)방향에서 기준시험체보다 247% 로 가장 우수한 내력능력을 보였으며, X형 가새보강 시험체(E-X)가 222%로 그에 못지 않은 내력을 보였다.

본 연구에서는 조적보강시험체는 비교하지 않았으나 Type4가 최대변위에서 243%의 내력효과를 보였는데 이는 기존연구에서의 모서리 헌치 보강시험체(E-H)와 비슷한 형태를 띠고 있으나 기존연구에서의 모서리 헌치 보강시험체(E-H)보다 Type4가

골조프레임보강이 전체적으로 되어 일체거동을 통해 내력이 보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

#### 3.5.2. 에너지 소산능력 비교

<Table 22>은 “1.2. 기존연구에 대한 동향”에서 언급한 연구의 에너지소산능력을 나타낸다. 기존 연구에서의 실험은 14단계까지 진행되었으나 시험체 별로 소성거동이 다른관계로 초기에너지 소산력과 실험종료시까지 에너지 소산능력을 나누어 비교하였다.

<Table 22> Energy dissipation analytical results of tested specimens cycle

Specimens Cycle	Energy dissipation ratio(%)					
	E-N	E-W	E-B	E-X	E-K	E-H
Ratio to step5(%)	100	200	400	380	250	230
Ratio after step5(%)	100	200	-	180	160	190

에너지소산능력을 기준시험체를 100%로 비교하였을 때 초기 에너지소산능력은 E-B시험체가 조적벽의 파괴로 가장 많은 에너지를 소산시켰고, 강재 계열 보강시험체들은 단계별로 급격한 변화없이 지속적으로 에너지 소산량을 상승시켰다. 실험종료시까지 에너지소산능력을 비교해 보면 E-W, E-H, E-X, E-K시험체의 순으로 에너지 소산능력이 우수한 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 실험체와 비교하였을 때 Type4와 비슷한 형태의 E-H실험체가 꽤 우수한 에너지 소산능력을 나타내고 있음을 알 수 있으며, Type4가 355%의 에너지 소산능력이 향상함을 보았을 때 Type4가 적절한 보강방법으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서 기본형인 기본형 골조에 내부철골로 보강한 경우 보강효과를 알아보기 위해서 4개의 실험체를 제작하여 반복-횡력 실험을 수행하였고, 실험체의 하중-변위 관계, 파괴형상, 하중-변형률 관계 및 구조물의 연성, 에너지소산을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 허용층간변위에서 기본형 골조와 역V형가새골조, V형 가새골조, 모서리 보강 가새골조의 내력을 비교한 결과 각각 119%, 234%, 243%의 내력증진 효과를 나타냈다.

2) 최대변위에서 기본형 골조와 역V형가새골조, V형 가새골조, 모서리 보강 가새골조의 내력을 비교한 결과 각각 171%, 236%, 243%의 내력증진 효과를 나타냈다. 역V형 가새골조와 V형 가새골조의 경우 대등한 보강효과가 나올 것으로 예상하였으나, 역V형 가새골조의 하부 보강프레임을 설치하지 않아 보강가새가 일체로 거동하지 못하여 내력이 적게 나타난 것으로 판단된다.

3) 실험체의 연성능력을 비교한 결과 기본형골조에 비해 역V형 가새골조, V형 가새골조의 경우 각각 75%와 98%로 연성이 감소하거나 대등하였고, 모서리 보강 가새골조의 경우 연성이 163% 증가된 것을 알 수 있었다.

4) 실험체별 에너지 소산능력을 비교한 결과 기본형 골조와 역V형 가새골조, V형 가새골조, 모서리 보강 가새골조의 경우 각각 127%, 125%, 355%상승하였다.

5) 실험체 4개를 분석한 결과 내력검토, 연성능력 및 에너지 소산능력을 비교 시 모서리 보강 가새골조가 내진성능 보강공법으로 적절한 것으로 판단된다.

### 감사의글

이 논문은 2011년 한국연구재단의 지원을 받은 기초연구사업(NBF-2011-0023261) 및 2011학년도 영남대학교 학술연구조성비로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 이호, 권영욱, 김홍도, “학교건물에 있어서 비탄성해석 및 비선형 정적해석을 통한 내진성능 평가에 따른 보강연구”, 한국공간구조학회, Vol.12, No.2, pp.55-63, 2012.06.
2. 정란, 박태원, 이수곤, “내진설계되지 않은 기존 철근콘크리트 골조구조물의 내진성능 보강효과”, 대한건축학회, Vol.20, No.9, pp.37-44, 2004.09.
3. 김종근, 한범석, 신성우, “축력비와 횡보강근 형상을 고려한 초고강도 RC 띠철근 기둥의 연성능력평가”, 대한건축학회지 제25권 제1호 통권 제243호 pp. 3-11, 2009.01.
4. 엄태성, 박홍근, “철근콘크리트 휨재에 대한 에너지 소산능력 산정식의 개발”, 콘크리트학회논문집 제 14 권 제6호 통권 72호 pp.989-1000, 2002.12.
5. 건축표준시방서, 대한건축학회, 2006.
6. 건축구조기준, 국토교통부, 2009.

(접 수 일 자 : 2013년 06월 18일)

(심사완료일자 : 2013년 07월 19일)

(게재확정일자 : 2013년 08월 16일)