

# 손상된 철근콘크리트 기둥의 Aramid봉과 SRF 보강공법에 따른 내진성능연구

## An Seismic Performance Study according to Reinforcement Method of Aramid Rods and SRF of Damaged RC Column

오 해 철\*  
Oh, HaeCheol

이 기 학\*\*  
Lee, Kihak

### Abstract

This paper has proposed a reinforcing method for damaged RC columns with SRF sheets and Aramid rods. In order to verify the effectiveness and performance, two original columns and two reinforced columns with SRF sheets and Aramid rods were developed and tested under lateral cyclic displacement and a constant axial load. The test showed that the improvement of energy dissipation capacity was increased in terms of strength and ductility. In addition, an analytical modeling of the standard specimens was proposed using Response-2000 and ZeusNL program. The results of analytical and experimental studies for two standard columns were compared in terms of loading-displacement curve and energy dissipation capacity based on the nonlinear static analysis.

*Keywords : SRF, Aramid rods, Loading-displacement curve, Energy dissipation capacity*

## 1. 서론

최근 해외에 2008년 중국 쓰촨성 지진 및 2011년 동일본 지진으로 경제적 피해가 발생하였으며, 국내에도 지진발생 가능성 때문에 내진설계가 강화되는 추세로 정책이 입안되고 있다. 국내의 소규모 건축물에는 내진설계가 고려되지 않아 지진이 발생하는 경우 진단보강이 부족한 기둥에서 응력의 집중으로 손상을 입을 수 있으며 건물의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 국내의 내진설계규정은 1988년 최초로 제정되고 KBC2005부터 3층 이상, 연면적 1,000 이상의 소규모 건축물에 내진설계가 적용되었으며, 현재는 KBC2009가 개정되었다<sup>1)</sup>.

기존 연구로는 RC기둥에 스틸밴드로 긴장력을 도입하여 기둥을 보강하는 연구가 국내외에 많이 이루어지고 있다<sup>2)</sup>.

그리고 카본섬유를 이용한 CFRP의 내진 보강방법도 사용되고 있으며, CFRP복합체를 이용한 철근콘크리트 보-기둥 연결부분 보강에 대한 실험 및 해석 연구가 진행되었다<sup>3)</sup>. 이 외에도 내진성능을 강화하기 위하여 SRF sheets와 Aramid 봉의 사용으로 보강하는 방법에 대해 연구를 진행되고 있으며, SRF sheets의 보강은 구조물에 연성과 인성 그리고 휨에 대해 저항하도록 하여 취성과파괴가 일어나지 않도록 하는 역할을 하며, Aramid rods는 높은 인장강도와 탄성계수로 RC구조물에 보강하여 휨강도를 보완하는 역할을 가진다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 SRF sheets와 Aramid 봉을 이용하여 횡하중으로 철근콘크리트 기둥의 단부에 손상을 입은 곳에 보강하여 충분한 내진성능을 발휘하는지에 대한 실험연구를 진행하였다. 그리고 비선형해석프로그램인 ZeusNL로 기존 기둥 실험체를 모델링하여 비선형정적해석을 통해 실험체의 성능을 분석하였다.

\* 정회원, 세종대학교 건축공학과, 석사과정  
College of Architecture, Sejong University  
\*\* 교신저자, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
College of Architecture, Sejong University  
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-4331  
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

## 2. 기존 기둥 실험체와 보강 기둥 실험체의 실험

### 2.1 재료 특성

#### 2.1.1 콘크리트 및 철근

본 실험체에 사용된 콘크리트에 대한 압축강도를 측정하기 위해 제작된 3개의 원형공시체를 제작하여 시험하였다. 공시체의 7일과 28일 평균압축강도는 각각 24.5MPa과 32.6MPa이다. 그리고 철근에 대한 인장강도 시험을 각 3번씩 수행하였다. 실험체에 사용된 콘크리트의 설계기준강도와 시험강도는 <Table 1>에 정리하였다.

<Table 1> Test results of steel bars and concrete

	Longitudinal bar (D19)		Stirrup (D10)		Concrete $f_c$ (MPa)
	$f_t$ (MPa)	E (GPa)	$f_t$ (MPa)	E (GPa)	
Design	400.0	200.0	400.0	200.0	27.0
Experiment	484.7	190.9	528.3	183.7	32.6
Difference (%)	21.2	-4.6	32.1	-8.2	20.0

#### 2.1.2 SRF sheets와 Aramid 봉

본 실험에서 사용된 SRF sheet는 콘크리트 기둥에 대한 대표적인 내진보강재료이다. 이와 같은 재료를 사용하여 보강함으로써 전단강도 및 변형능력, 기둥부재의 축성능의 향상을 기대할 수 있다. SRF 보강방법은 Shunichi Igarashi에 의해 개발되었다<sup>5)</sup>. 그리고 실험체 보강으로 사용된 Aramid 봉은 PC강선 가닥과 일반 철근보다 탄성계수가 낮고 콘크리트와의 부착강도가 높아 횡구속 효과를 더 기대할 수 있다. 그리고 실험에서 사용된 Aramid 봉과 SRF sheets의 특성은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Properties of reinforcement material

	Ultimate tensile strength	Modulus of Elasticity (MPa)	Fracture strain (%)
Aramid rod	1,400 (MPa)	76,100	1.83
SRF sheet	1,000 (N/mm)	4,000	10.0

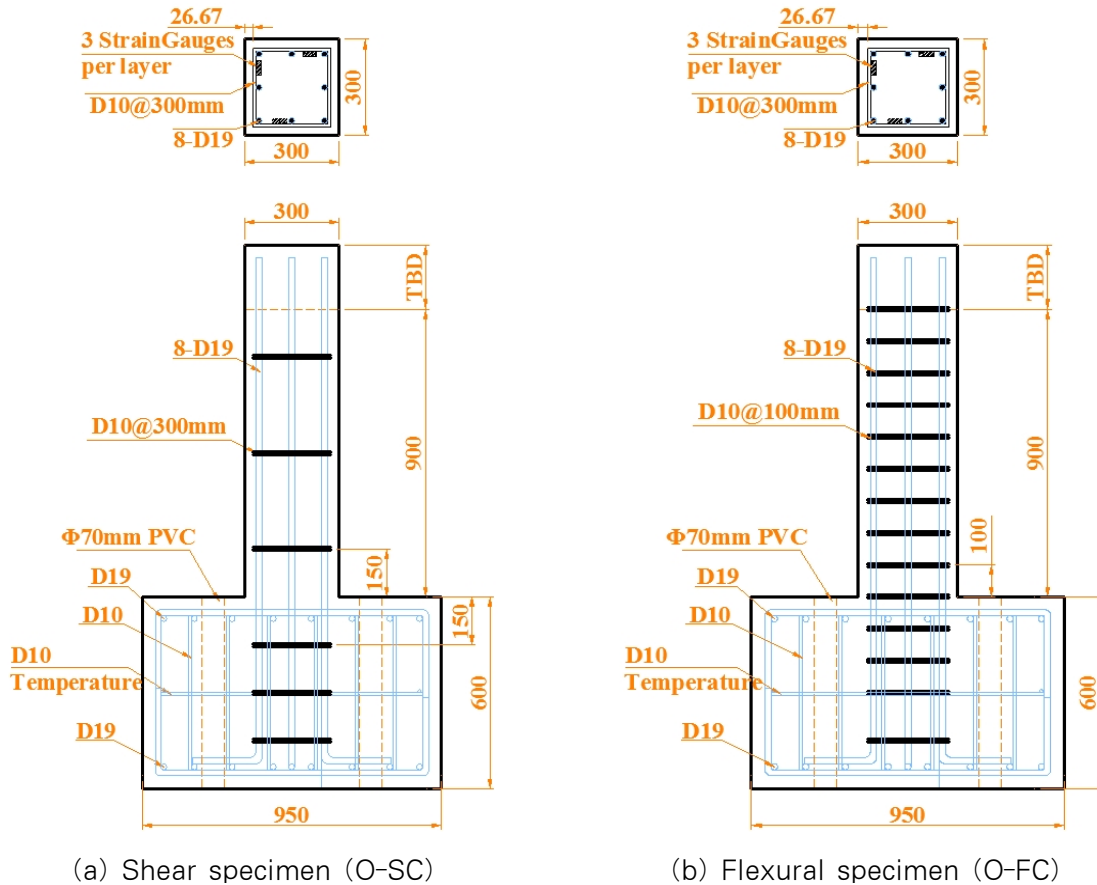
### 2.2 기존 기둥 실험체와 보강 기둥 실험체의 특성

#### 2.2.1 기존 기둥 실험체

본 논문에서는 기존 기둥 실험체로 스티럽 간격을 변수로 두어 2개의 실험체가 제작되었으며, 이를 통해 스티럽 간격에 따른 파괴모드를 보기 위해 실험을 하였다. 첫 번째 실험체는 횡하중을 가하였을 경우 전단 파괴모드를 보기위해 제작되었으며, 실험체는 (Original-Shear Control)O-SC로 명하였다. 그리고 두 번째 실험체는 휨 파괴모드를 보기위해 제작되었으며, 실험체는 (Original Flexural Control)O-FC로 명하였다. 모든 기둥들은 300mm x 300mm에 높이 900mm로 제작하였으며, 길이방향으로 8가닥의 주철근(D19)을 배근하였다. 기둥의 길이방향 철근비( $\rho$ )는 2.55%로 하였다. 전단 실험체(O-SC)에 300mm 간격으로 스티럽(D10)을 실험체에 배근하였고, 첫 번째 띠 보강재는 ACI318-11 기준에 따라 슬래브 또는 기초표면에서 150mm 간격을 두어 시공하였다<sup>6)</sup>.

두 실험체에 대해 전단강도를 예측하기 위하여 ACI318-11의 설계 기준식을 적용하여 계산하였으며, 휨 실험체(O-FC)와 전단 실험체(O-SC)의 공칭강도는 각각 221.20kN과 126.42kN으로 나왔다.

휨 실험체(O-FC)와 전단 실험체(O-SC)의 길이방향 보강 세부 사항은 정확히 동일하다. 하지만, 휨 실험체(O-FC)의 띠 간격은 전단 실험체(O-SC)의 띠 간격의 1/3으로 하였다. 각 실험체에 대한 특성은 <Table 3>에 정리하였으며, 도식화하였다<Fig. 1>.



〈Fig. 1〉 Reinforcement details and strain gauge layout for two specimens



〈Fig. 2〉 Aramid rods and SRF sheets installations in the column specimens

### 2.2.2 보강 실험체

복합 설계가 이루어지는 실험체는 횡하중을 받아 콘크리트의 피복탈락으로 인하여 철근이 노출되는 손상을 입은 기둥에 SRF sheets와 Aramid 봉을 보강하는 것으로 휨 실험체(O-FC)의 보강 방법은 다

음 절차 순으로 보강작업이 되었다<Fig. 2>. 첫째, 길이방향으로 노출되어 있는 주방향 철근을 덮고 있는 콘크리트를 치핑 해머에 의해 제거하였다. 둘째, 횡방향 변형률을 측정하기 위해 스테럽에 스트레인게이지를 부착하였다. 셋째, 8개의 Aramid 봉

을 기초콘크리트에 30mm 삽입시켜 종방향 철근과 묶어 기둥 주변에 설치하였다. 넷째, 시멘트 모르타르를 기둥 주변으로 마감작업을 하였으며 28일 동안 양생시켰다. 마지막으로, 폴리에스테르 접착제를 사용하여 휨 실험체(O-FC)에 SRF sheets를 복합 설계된 실험체명은 R-SA라 명하였다. 전단 실험체(O-SC)의 보강 기술은 휨 실험체(O-FC)와 유사하지만, 하나 다른 점은 Aramid 봉을 설치하지 않았는데, 이 실험체명은 R-S로 명하였다.

<Table 3> Mechanical properties of specimens

Specimen names	O-FC	O-SC
Failure mode	Flexure	Shear
Section (D×W)	300×300mm	300×300mm
Clear cover	26.67mm	26.67mm
Longitudinal bar	8-D19	8-D19
Volumetric $\rho_L$	2.55%	2.55%
Stirrup	D10@100mm	D10@300mm
Volumetric $\rho_s$	1.20%	0.40%
Axial load ( $0.1f_{ck}A_g$ )	243kN	243kN
Height (H)	900mm	900mm
Aspect ratio (H/D)	3.0	3.0

### 2.2.3 실험 구성 및 계측

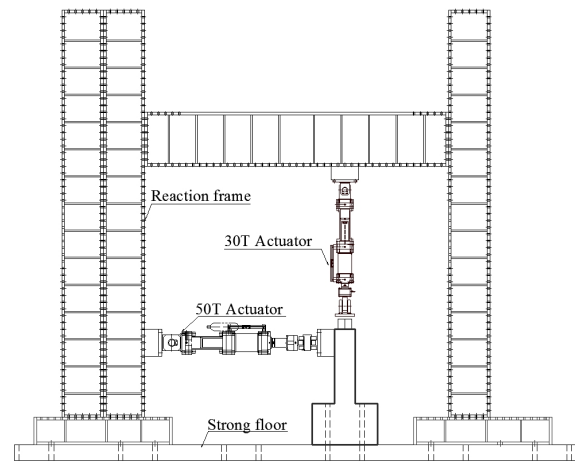
본 연구의 실험을 위해 골조 및 액추에이터를 설치하였다<Fig. 3>. 축 방향 액추에이터는 기둥 상부에 축 하중을 적용하기 위해 사용되었다. 실험 중 실험체의 미끄러짐 또는 과도한 회전을 방지하기 위해 실험실의 바닥에 고정된 사각형의 콘크리트 기초 블록에 고정하였다.

휨 방향과 축 방향 변형률을 측정하기 위해, LVDT를 사용하였다. 실험에서는 가력은 드리프트 비에 의한 변위에 의해 제어되며, 드리프트 비는 0.25%부터 10.00%까지 동일 변위에 반복 검증 가력하였다<Fig. 4>. 그리고 243kN의 일정한 축 방향으로 가력한 상태에서 횡하중을 적용하였다.

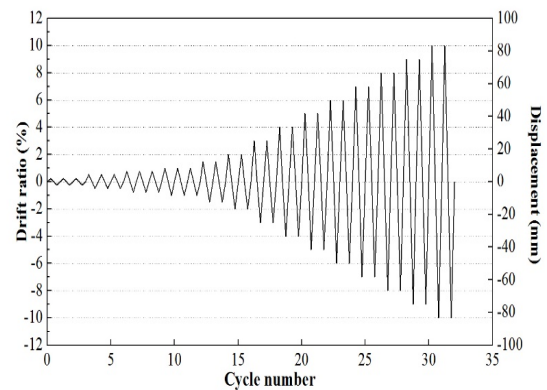
## 3. 기둥 실험 결과

### 3.1 이력 성능 곡선

전단 실험체(O-SC)와 휨 실험체(O-FC)에 대한 하중-변위 이력곡선은 나타났다(Fig. 5). 그리고 최대 전단하중( $V_{max}$ ), 최대모멘트( $M_{max}$ ), 최대변위( $\Delta_{max}$ ), 변위연성( $\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} = \mu_\Delta$ ), 최대변위비( $\theta_u$ )에 대한 결과값을 <Table 4>에 정리하였다. 항복변위와 최대변위( $\Delta_{max}$ )는 각각 최대전단하중( $V_{max}$ )의 75% 지점과 80%에서 떨어지는 지점으로 하였다. 그리고 전단하중이 최대하중의 80% 수준으로 떨어지면 실험을 종료하였다.



<Fig. 3> The test setup for experiment



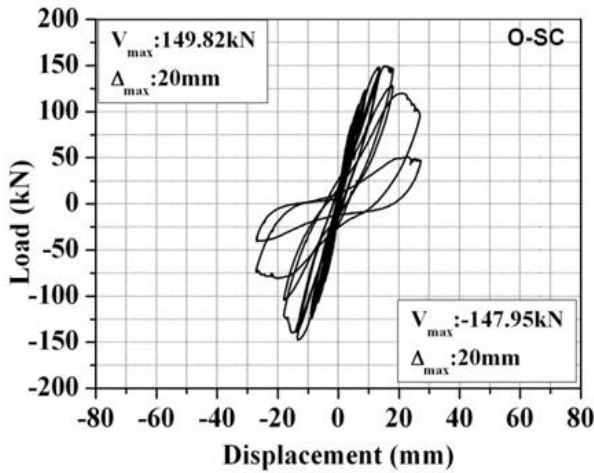
<Fig. 4> Loading history

<Fig. 5> (a)와 (b)에 따르면, 실험체 O-SC와 O-FC의 강도는 띠 보강재 간격과 상관없이 150kN의 강도를 보여주었다. 그러나 휨 실험체(O-FC)는 띠 보강재 300mm 간격을 둔 전단 실험체(O-SC)보다 더 큰 변형 능력을 보여주었다. 이를 통해 휨 실험체(O-FC)는 전단 실험체(O-SC)보다 더 안정적인

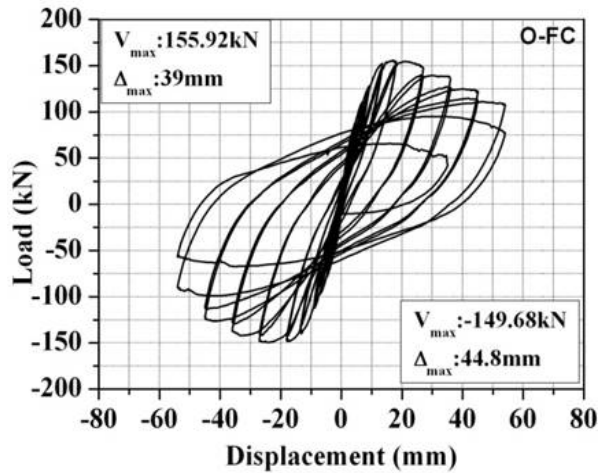
고 더 큰 면적의 이력곡선을 보여주어 많은 에너지 소산이 이루어진 것을 알 수 있다. <Fig. 5> (c)와 (d)에 따르면, 실험체 R-S는 실험체 R-SA보다 현저히 낮은 강도 능력을 보여주었지만, 최대강도 이후 실험체 R-SA는 강성이 실험체 R-S에 비해 크게 나왔으며, 이를 통해 실험체 R-S의 연성능력이 더 우수함을 확인하였다. 두 실험체에 SRF sheets를 감싸기 전에 실험체 R-SA에는 Aramid 봉을 시공하였기 때문에 강도가 향상된 것으로 간주되지만, 변형 능력에 대해서는 Aramid 봉과 상관없이 실험체 R-S에서 더 향상된 것으로 보였다. 따라서, 복합 설계한 후에 전단 실험체(O-SC)는 휨 실험체(O-FC)보다 우수한 변형 능력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

<Table 4> Experiment results of four specimens

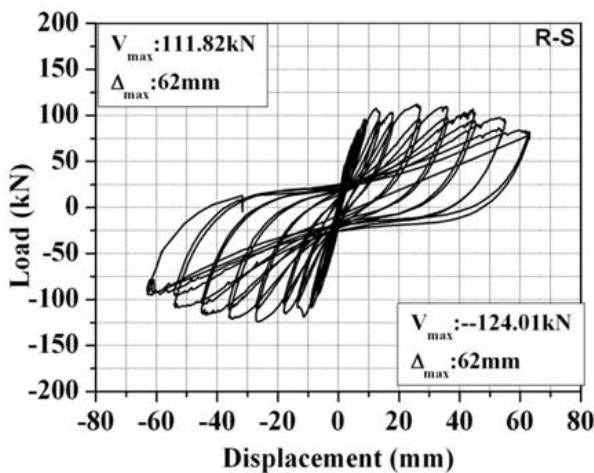
Specimen		$V_{max}$ kN	$M_{max}$ kN-m	$\Delta_{max}$ mm	$\mu_{\Delta}$ -	$\theta_u$ %
O-SC	+	149.8	134.8	20	2.0	2.2
	-	148.0	133.2	20	2.0	2.2
O-FC	+	155.9	140.3	39	3.9	4.3
	-	149.7	134.7	44.8	4.5	5.0
R-S	+	111.8	100.6	62	6.2	6.9
	-	124.0	111.6	62	6.2	6.9
R-SA	+	137.1	123.4	39.6	4.0	4.4
	-	149.8	134.8	38	3.8	4.2



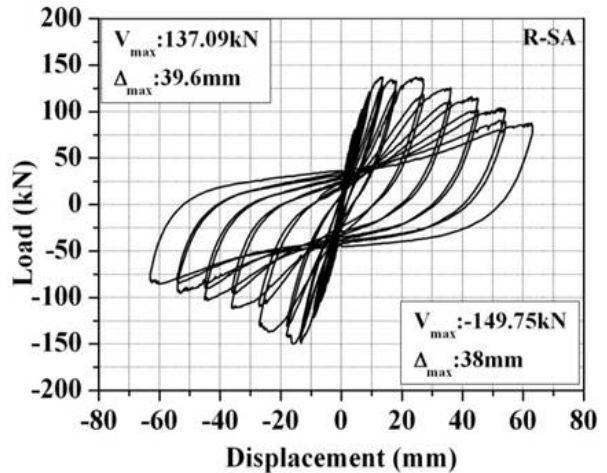
(a) Specimen O-SC



(b) Specimen O-FC



(c) Specimen R-S



(d) Specimen R-SA

<Fig. 5> The hysteretic load-displacement of four specimens

모든 실험체의 강도 변화를 확인하기 위해 하중-변위 이력곡선으로부터 최대강도 지점을 이은 곡선을 표현하였다(Fig. 6). 비록 실험체 R-S의 강도는 전단 실험체(O-SC)의 강도보다 낮은 것으로 보이지만, 실험체 R-S는 전단 실험체(O-SC)보다 나은 횡변위를 보여줌으로써 더 큰 연성 능력을 통해 내진 거동이 좋아졌음을 보여주었다(Fig. 6 (b)). 휨 실험체(O-FC)와 실험체 R-SA의 경우에 강도가 유사한 결과를 보여주었지만, 기존에 횡하중으로 인해 손상을 입은 휨 실험체(O-FC)에 Aramid 봉과 SRF sheets의 보강으로 실험체 R-SA의 변형 능력이 휨 실험체(O-FC)의 변형 능력과 유사해졌음을 확인하였다. 이는 Aramid 봉과 SRF sheets를 감싸서 보강하는 방법을 통해서 강도와 변형 능력을 향상됨을 알 수 있었으며 함께 사용하는 것이 효과적인 내진설계임을 알 수 있었다.

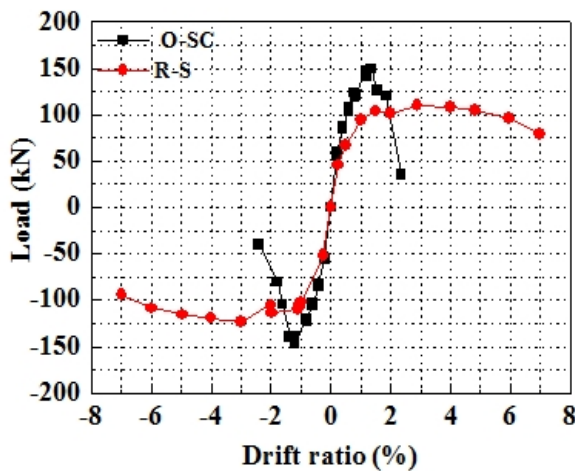
### 3.2 에너지 소산능력

에너지 소산이란, 변형 능력을 통해 입력된 에너지가 소산되는 물리적양을 기록한 것으로, 실험체의 내진 성능을 평가할 수 있는 척도가 된다. 각 실험체에 대한 이력곡선의 면적을 산정하여 에너지 소산능력을 계산하였으며, 에너지 소산능력에 대한 데이터는 <Table 5>에 정리하였다.

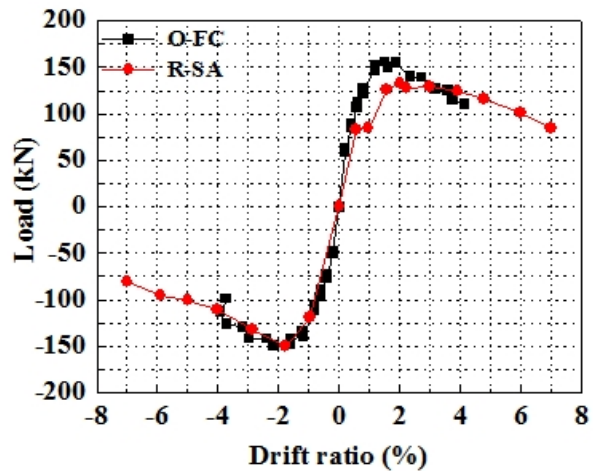
<Table 5> Cumulated dissipated energy for four specimens

Specimen	O-SC	O-FC	R-S	R-SA
Failure Type	Shear	Flexura I	Shear	Flexura I
Energy Dissipation (kN-mm)	11,051	68,940	46,752	56,752

모든 실험체는 변위 2%지점까지는 비슷한 소산 에너지를 보였지만 이후 모든 실험체의 소산에너지 양상이 다르게 보였다. 휨 실험체(O-FC)는 가장 큰 소산에너지능력을 보여주었으며, 전단 실험체(O-SC)는 변위 3%지점에서 실험체의 전단파괴로 인해 실험이 종료되었다. 실험체 R-S의 소산에너지 능력은 전단 실험체(O-SC)의 소산에너지능력보다 4 배 좋은 것으로 나타났다. 따라서 전단파괴가 일어난 기둥에 SRF sheets를 감싸는 보강방법을 시행함으로써 소산에너지능력이 현저하게 향상되었음을 알 수 있었다. 그리고 휨 실험체(O-FC)와 실험체 R-SA의 소산에너지능력은 상대적으로 약 17.68% 떨어지는 것으로 나왔다. 따라서 SRF 보강방법은 휨 실험체에 비해 조기에 전단파괴가 일어난 SC 실험체에서 더 큰 효율적 보강 성능을 발휘한다는 것을 알 수 있다.



(a) The envelope curves of O-SC & R-S



(b) The envelope curves of O-FC & R-SA

<Fig. 6> The envelope curves of four specimens



## 4. 기둥 해석 모델링

### 4.1 프로그램

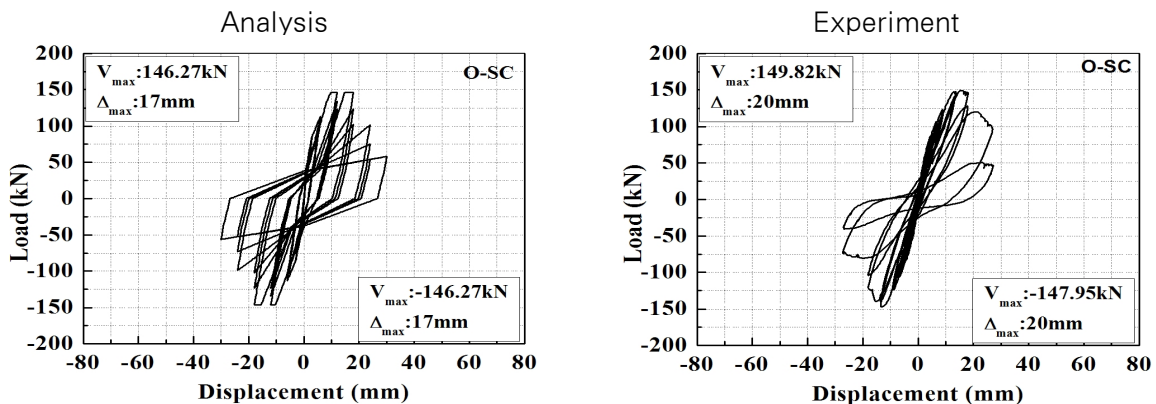
본 연구에서는 비선형해석프로그램인 ZeusNL을 이용하여 전단 실험체(O-SC)와 휨 실험체(O-FC)를 모델링 분석하였다. 전단 변형을 고려하여, 기둥에 비탄성 기둥 요소와 병렬로 전단 스프링을 사용하여 모델링하였다. 전단 스프링의 기본 곡선은 균열, 항복, 극한상태에 대해 설명하기 위해 4선형 대칭 관계로 정의하였다. Response 2000(Bentz 2000)은 기본 곡선을 정의하기 위해 사용하였다. Response 2000은 Modified Compression Field Theory를 이용한 RC부재에 대한 비탄성 해석 프로그램이다<sup>7)</sup>.

콘크리트 재료는 Kent and Park 모델에 적용된 콘크리트를 사용하여 구속 및 비구속 콘크리트를 모델링하였다<sup>8)</sup>.

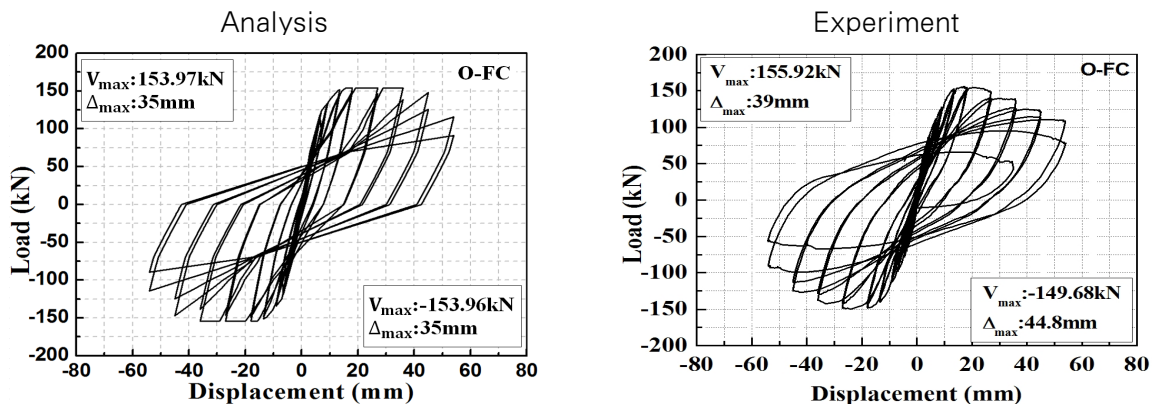
### 4.2 실험과 해석 비교분석

실험 및 해석 비교분석에 대해서 전단 실험체(O-SC)에 대한 실험 및 해석 하중-변위 이력곡선을 비교한 그림이다<Fig. 7 (a)>. 비록 정가력 기준 해석에서 최대강도가 146.27kN으로 실험 최대강도 149.82kN보다 낮은 최대강도를 보여주고 해석 최대 변위 17mm, 실험 최대변위 20mm로 약 3mm 정도의 변위차를 보여주지만 강도 및 강성저하에 관해서는 10% 이내의 해석결과를 보여주었다.

휨 실험체(O-FC)에 대한 실험 및 해석 하중-변위 이력곡선을 비교한 그림이다<Fig. 7 (b)>. 비록 정가력 기준 해석에서 최대강도가 153.97kN으로 실험 최대강도 155.92kN보다 낮은 최대강도를 보여주지만 전단 실험체(O-SC)와 마찬가지로 강도 및 강성저하와 실험체 변형에 관해서는 10% 이내로 비교적 비슷한 하중-변위 이력곡선을 보여주었다.



(a) Load-displacement for specimen O-SC (Shear failure)



(b) Load-displacement for specimen O-FC (Flexural failure)

<Fig. 7> Comparison for specimen O-SC and O-FC

휨 실험체(O-FC)는 전단 실험체(O-SC)에 비해 우수한 횡 변위 성능을 가진 것으로 확인되었다. SRF 보강방법으로 보강한 후, 실험체 R-S의 횡 변위 성능은 전단 실험체(O-SC)보다 더 컸다. 그러나 실험체 R-SA의 Aramid 봉과 SRF 보강방법의 효과는 실험체 R-S의 SRF 보강방법과 비교해 다른 결과를 보여주었다. 기둥을 복합 설계한 후, 에너지소산능력은 O-SC실험체 대비 R-S실험체에서 현저하게 향상되었다. 그러나 O-FC실험체의 경우에는 복합설계를 한 R-SA실험체와 비교해서 에너지소산능력이 약 17.68% 떨어지는 것으로 나왔다.

## 5. 결론

본 연구는 SRF sheets와 Aramid 봉을 이용한 보강 전후의 기둥의 내진 거동을 조사한 것이다.

1. O-FC실험체는 O-SC실험체에 비해 좁은 스테럽 간격 때문에 콘크리트의 구속과 주철근의 좌굴 방지효과로 우수한 횡 변위 성능을 가진 것으로 확인되었다. 그리고 R-SA는 Aramid 봉과 SRF 보강방법을 통해 기둥의 급격한 강도 발생이 생긴 취성적 전단파괴 모드에서 충분한 변형 능력을 가진 연성적 전단파괴를 보여주었다.

2. 기존 기둥 실험체를 복합 설계한 후, 에너지소산능력은 O-SC실험체 대비 R-S실험체에서 크게 향상되었다. 그러나 O-FC실험체의 경우에는 복합설계를 한 R-SA실험체와 비교해서 약 17.68%의 에너지소산능력이 떨어짐을 보여주었다. 따라서 본 논문에서 제시하는 보강방법은 휨 실험체에 전단파괴가 발생한 전단 실험체에 더 효율적인 것을 것으로 사료된다.

3. 해석을 통해 실험을 진행한 기존 기둥 실험체와 비교를 하였으며, 전단 실험체(O-SC)와 휨 실험체(O-FC)에 대해서 최대강도 및 최대변위의 큰 차이를 보이지 않았으며, 강성에서 또한 10% 이내의 해석결과를 보여주었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단(2011-0010384)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. KBC2009, "Building code requirements for structural concrete and commentary", Architectural Institute of Korea, 2009
2. Choi, S.W., Kim, Y., Park, H.S. "Multi-objective seismic retrofit method for using FRP jackets in shear-critical reinforced concrete frames", Compos Part B., 56, pp.207-216, 2014
3. Le, T.K., Lee, K., Lee, D., Woo, S. "Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites", Composites Part B, Vol. 134 No.8, pp.1288-99, 2010
4. Toshimi Kabeyasawa, Shun Ichi Igarashi, YouSok Kim. "Shaking table test of reinforced concrete frames for verification of seismic strengthening with polyester sheet", 13 WCEE Cabada, 2004
5. Shunichi Igarachi: SRF (in Japanese), Structural Quality Assurance, Inc, ISBN4-902105-00-4, 2003
6. ACI 318-11, Building code requirements for structural concrete (ACI318-11) and commentary (ACI318R-11), American concrete Institute, 2011
7. Vecchio, F. J and Michael P. Collins. "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", ACI Strut. T., 83(2), pp.219-231, 1986
8. Kent D C, Park R. "Flexural members with confined concrete", J. Struct. Div. ST7, 97, pp.1969-1990, 1971

■ Received : December 05, 2015

■ Revised : December 12, 2015

■ Accepted : December 12, 2015