

철계 형상기억합금을 이용한 콘크리트 기둥의 전단보강 실험연구

Experimental Study on Shear Retrofitting of Concrete Columns Using Iron-Based Shape Memory Alloy

정동혁^{1)*} · 정세벽²⁾ · 최재희²⁾ · 김근오²⁾

Jung, Donghuk^{1)*} · Jeong, Saebyeok²⁾ · Choi, Jae-Hee²⁾ · Kim, Geunoh²⁾

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부 조교수, ²⁾고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

¹⁾Assistant Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, ²⁾Master's Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

/ A B S T R A C T /

The current study investigates the seismic performance of shear-dominant RC columns retrofitted with iron-based shape memory alloy (Fe SMA). Three RC columns with insufficient transverse reinforcement were designed and fabricated for lateral cyclic loading tests. Before testing, two specimens were externally confined with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets and self-prestressed Fe SMA strips. The test results showed that both CFRP and Fe SMA performed well in preventing severe shear failure exhibited by the unretrofitted control specimen. Furthermore, the two retrofitted specimens showed ductile flexural responses up to the drift ratios of $\pm 8\%$. In terms of damage control, however, the Fe SMA confinement was superior to CFRP confinement in that the spalling of concrete was much less and that the rupture of confinement did not occur.

Key words: Shear retrofitting, RC columns, Iron-based shape memory alloy, Carbon fiber reinforced polymer, Lateral cyclic loading tests

1. 서론

전 세계적으로 지진 활동이 빈번하게 발생함에 따라 더욱 안전하고 회복 탄력성을 갖춘 구조물을 위한 세계 각국의 내진설계 기준은 점차 강화되는 추세이다. 하지만, 기존에 지어진 많은 구조물은 현대의 내진설계 기준에 미치지 못하는 경우가 많으며 지진 발생 시 상당한 인명 손실과 함께 회복 불가능한 수준의 심각한 피해를 입을 수 있다. 특히, 1970년대 이전에 설계된 오래된 콘크리트 기둥은 부족한 횡방향 철근 및 부적절한 주철근의 겹침 이음 등의 취약한 내진상태를 가졌으며 이로 인한 낮은 전단강도와 휨연성도의 문제는 이미 잘 알려져 있다.

불충분한 횡방향 철근을 가진 콘크리트 기둥을 보강하기 위해 기둥 외부에서 압력을 가하는 구속 기법의 사용되고 있으며 일반적으로 수동구속(passive confinement)과 능동구속(active confinement)으로 나뉜다. 수

동구속의 경우 주로 강재나 섬유강화폴리머(fiber reinforced polymer, FRP) 재킷 등의 기법이 많이 사용됐다[1-9]. 하지만, 강재 재킷은 지중을 크게 증가시키며 시간에 따른 부식 발생 가능성이 있다. FRP 재킷은 FRP의 낮은 변형능력으로 인해 취성적 파괴가 발생할 수 있고 에폭시 레진을 사용한 습식공법의 특성 상 보강효과가 발현되기 까지 수일에 이르는 시간이 소요될 수 있다. 또한, 무엇보다 수동구속력은 구속된 콘크리트가 변형되어야만 적용 가능하다는 점에서 콘크리트의 손상이 필수적으로 발생하는 단점을 지닌다. 이에 반해 능동구속은 콘크리트의 변형 이전 미리 프리스트레싱을 통해 압력을 적용하는 방식으로 콘크리트의 변형, 즉 손상이 진행되기 전 구속 효과를 극대화시킬 수 있다는 장점이 있다. 선행 연구에서는 강연선 또는 FRP 등의 구속재에 물리적으로 프리스트레싱을 가하여 콘크리트의 압축 거동 및 콘크리트 기둥의 내진성능을 향상시키려는 시도가 이루어졌다[10-12]. 다만, 구속재에 강한 프리스트레싱을 가하기 위해서는 중장비 또는 상당한 노동력이 요구되어 현장 적용에는 어려움이 존재했다.

기존의 구속재를 이용한 능동구속 기법의 한계점을 극복하기 위해 새로운 재료를 활용한 연구 또한 진행되었다. 그중 형상기억합금(shape memory

*Corresponding author: Jung, Donghuk

E-mail: jungd@korea.ac.kr

(Received November 8, 2023; Revised November 29, 2023; Accepted November 30, 2023)

alloy, SMA)은 능동구속 적용을 위한 이상적인 대체재로 가능성을 인정받았으며, 콘크리트 기둥의 내진보수 및 보강에 관한 활발한 연구가 이루어졌다[13-15]. SMA의 대표적인 재료 특성은 형상기억효과로 이것은 큰 하중에 의해 잔류변형이 발생했을 때 가열을 통해 원래의 형상을 회복할 수 있는 특성이다. 만약 변형된 SMA의 형상회복을 물리적으로 제한한 후 열을 가할 시 재료 내부에 강한 응력이 발생하게 되고 이러한 회복 응력(recovery stress)을 이용하여 프리스트레싱을 가할 수 있다. 현재, 공학 전반에 걸쳐 니켈-티타늄(Ni-Ti) 계열 SMA가 가장 널리 활용되고 있다. 하지만, Ni-Ti SMA는 우수한 능동구속 성능이 실험적으로 증명되었음에도 불구하고 높은 재료 가격으로 인해 건설분야 내 현장 적용이 크게 제한적이며 주로 연구 개발 단계에 머물고 있는 상황이다. 반면, 이후에 개발된 철(Fe) 계열 SMA는 Ni-Ti SMA 대비 약 5~10%에 해당하는 저비용을 가지면서도 우수한 프리스트레싱 성능을 보여 최근 콘크리트 구조물 보강재로서 큰 가능성을 인정받고 있다. Hong et al.[16]에 따르면, Fe-Mn-Si 합금은 최대 450 MPa의 프리스트레싱 성능을 보였으며, 이는 570 MPa의 프리스트레싱이 적용 가능한 Ni-Ti-Nb 합금[15]에 비해 비용 대비 성능이 뛰어나다.

기존 연구에서 SMA 능동구속의 적용은 주로 콘크리트의 압축성능 향상을 통해 휨 지배 콘크리트 기둥의 연성도를 증대시키는데 집중해왔다. 반면 낮은 세장비를 가지는 전단 지배 콘크리트 기둥의 내진보강에 관한 연구는 매우 제한적으로 수행되었다. 기둥의 횡방향으로 적용된 SMA 프리스트레싱은 콘크리트 전단균열 제어와 추가적인 전단강도 제공을 통해, 지진 발생 시 콘크리트 기둥의 손상 저감 및 연성적인 거동을 이끌어내는데 매우 효과적일 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 Fe SMA에 대한 프리스트레싱 실험을 수행하여 능동구속 기법 적용을 위한 적절성을 평가하였다. 이어서 불충분한 전단강도를 가진 콘크리트 기둥을 대상으로 각각 탄소섬유강화폴리머(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)와 Fe SMA로 보강한 후 내진성능을 실험적으로 규명하였다. 이를 위해 세 개의 동일한 원형 단면 콘크리트 기둥을 반복가력실험에 사용하였고 각기 다른 보강상태 따른 구조적 거동 및 손상 상태를 비교·평가하였다.

2. 철계 형상기억합금의 재료거동

2.1 형상기억효과

SMA의 형상기억효과는 하중 또는 온도변화에 의한 결정구조의 상변화(phase transformation)와 밀접한 관련을 가진다. Fig. 1은 일반적인 SMA의 형상기억효과를 보여준다. 상온에서 austenite 상태의 SMA(상태 1)는 하중이 가해진 후 제거되었을 때 잔류변형을 가지며, 재료 내부에는 응력에 의해 유발된 martensite 상태가 생성된다(상태 2). 이때, 변형된 SMA가 A_s (austenite start temperature) 이상으로 가열되면 martensite에서 austenite으로 상변화가 일어나기 시작하고, A_f (austenite finish temperature) 이상의 온도에서 SMA는 완전한 austenite 상태를 이루며 원래의 형상을 회복한다(상태 3). 만약 SMA의 변형이 물리적으로 제한된(constrained) 상태에서 A_f 이상 가열될 경우, 재료 내부 회복응력에 의한 프리스트레싱 효과가 발생한다(상태 4).

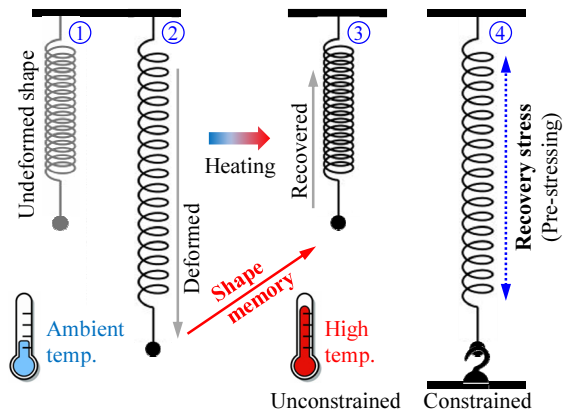


Fig. 1. Typical shape memory effect of SMA

2.2 프리스트레싱 실험

본 연구에는 Hong et al.[16]이 개발한 Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C 합금이 사용되었다. 기존 실험결과[17]에 따라 Fe SMA 시편에 최대 4% 사전변형을 적용한 후 양단을 고정(변형제어)하고 265°C의 열을 가해 회복응력을 측정하였다. Fig. 2는 만능재료시험기 및 비접촉 적외선 온도계를 사용한 실험세팅을 보여준다. Fe SMA 시편은 토치(torch)를 이용해 직접 가열되었다. 온도 변화에 따른 Fe SMA 시편의 응력 상태는 Fig. 3에 제시되었다. Fe SMA 시편은 가열 직후 초기에 열팽창 현상을 보이지만, 약 100°C의 온도에서 형상기억효과 발현에 따라 인장력이 발생하기 시작했다. Fe SMA 시편은 최대 온도 이후 냉각이 진행됨에 따라 열수축 현상이 발생하면서 내부 인장력이 더욱 증가하였으며, 약 28.9°C의 온도에서 최종적으로 360 MPa에 해당하는 회복응력(σ_r)을 기록하였다.

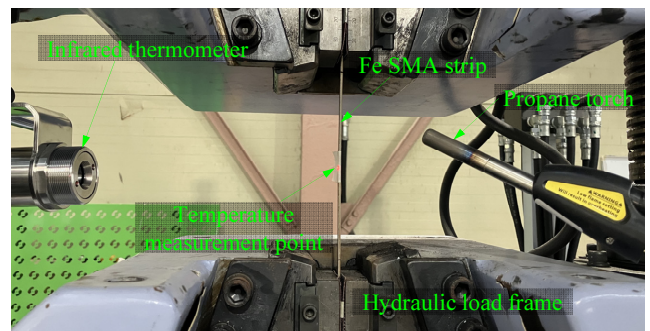


Fig. 2. Test setup for prestressing measurement

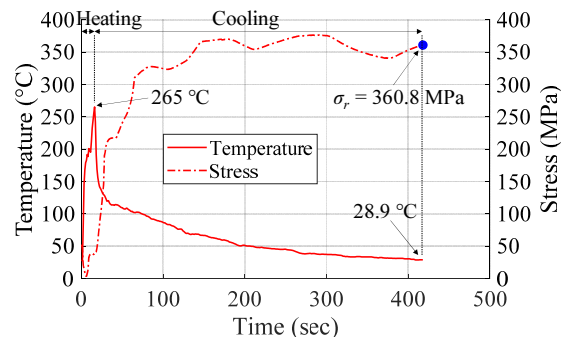


Fig. 3. Temperature-stress behavior

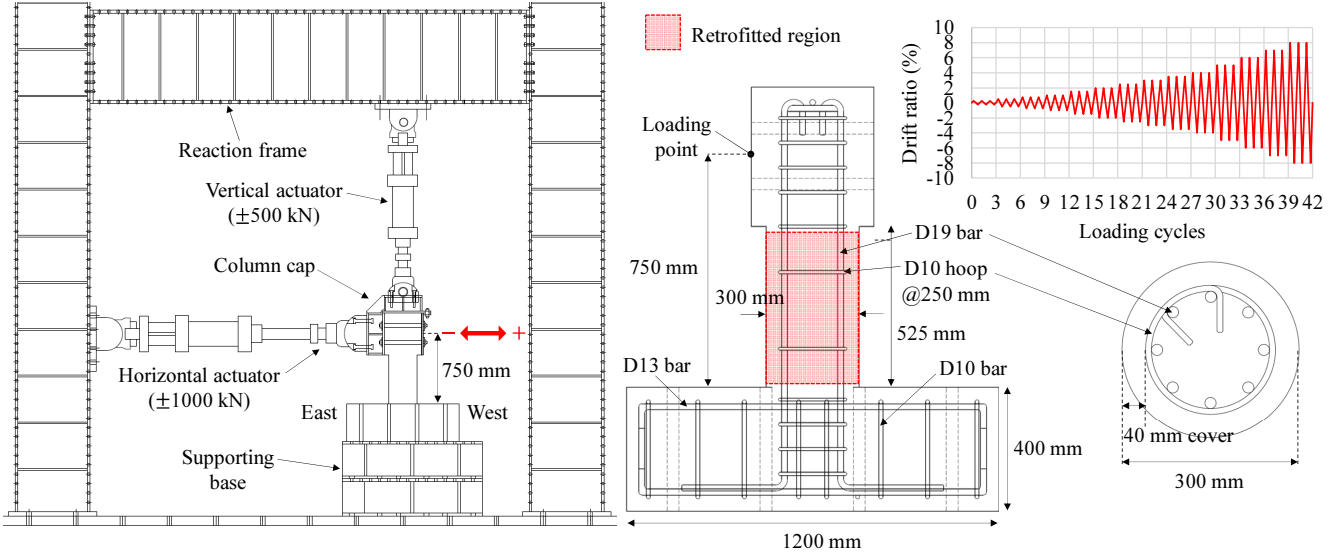


Fig. 4. Test setup and plan

3. 콘크리트 기둥의 반복가력실험

3.1 실험계획 및 전단보강

3.1.1 콘크리트 기둥의 설계 및 제작

Fe SMA의 능동구속에 기반한 콘크리트 기둥의 전단보강 효과를 평가하기 위해 정적 반복가력실험을 수행하였다. 캔틸레버 형태의 동일한 원형 콘크리트 기둥을 세 개 제작하였다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 콘크리트 기둥 실험체 도면을 보여준다. 실험체는 단면 직경(D)과 기초와 가력 중심부 사이 유효높이(h)가 각각 300 mm와 750 mm이며, 1:2.5의 형상비를 가진다. 단면 내 8개의 D19 주철근이 배치되었고, 횡방향 철근으로 D10 후프가 250 mm의 넓은 간격으로 배치되었는데 이것은 불충분한 전단강도를 반영하기 위한 목적이다. 주철근과 횡방향 철근의 항복강도는 각각 459 MPa, 431 MPa로 측정되었다. 콘크리트의 압축강도는 약 35 MPa로 측정되었다. 측정된 재료강도는 기둥 실험체의 전단강도로 사용되었다. 전단강도($V_n = V_c + V_s$)는 KDS 14 20 22[18]에서 제시된 식 (1)과 (2)를 이용해 계산하였으며, 전단강도 대비 요구 전단력의 비율(V_u/V_n)이 약 1.06이 되도록 설계되었다. 요구 전단력(V_u)의 산정을 위해 구조해석 프로그램인 OpenSees에서 기둥단면에 대한 휨해석(flexural analysis)를 수행하였으며, 단면의 휨 회복 시 발생한 전단력을 V_u 로 정했다.

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \sqrt{f'_c} (0.8D)^2 \quad (\text{MPa, mm}) \quad (1)$$

$$V_s = \frac{A_{vt} f_{yt} (0.8D)}{s} \quad (\text{MPa, mm}) \quad (2)$$

여기서, V_c 와 V_s 는 각각 콘크리트와 횡방향 철근에 의한 전단강도, N_u 는 기둥 축력, A_g 는 콘크리트 기둥 단면적, A_{vt} 와 s 는 전단철근의 단면적과 중심간격을 의미한다.

3.1.2 콘크리트 기둥의 전단보강

실험에 사용된 기둥 실험체는 각각 C-Ref, C-FRP, C-SMA로 명명되었다. C-Ref는 보강되지 않은 as-built 상태의 기둥이다. C-FRP는 기둥 몸체가 한 겹의 CFRP 시트로 보강되었으며, 이 때 사용된 CFRP 시트는 두께 (t_f) 0.11 mm, 탄성계수(E_f) 252 MPa, 극한인장강도(f_{fu}) 4,513 MPa, 극한인장변형률(ϵ_{fu}) 0.0179를 가졌다. CFRP 시트는 에폭시 레진을 통해 부착되었으며, 충분한 강도 발현을 위해 일주일의 양생 기간을 가졌다. CFRP 시트 적용에 따른 전단강도는 ACI 440.2R-17[19]에 제시된 식 (3)~(5)에 따라 계산되었다.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (0.8D)}{s_f} \quad (\text{MPa, mm}) \quad (3)$$

$$A_{fv} = (\pi/2) n t_f w_f \quad (\text{mm}) \quad (4)$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \quad (\text{MPa, mm}) \quad (5)$$

여기서, V_f 는 CFRP 시트에 의한 전단강도, n , t_f , s_f , w_f 는 각각 CFRP 시트의 겹수, 두께, 중심 간격, 너비를 뜻한다. w_f 는 내 CFRP 시트의 단면적, f_{fe} 와 ϵ_{fe} 는 CFRP 시트의 파단 시 유효 응력과 변형률을 각각 의미한다. ACI 440.2R-17[19]의 Section 11.4.1.1에 따라 ϵ_{fe} 는 0.4%로 설정되었다. CFRP의 강도감소계수(ψ_f) 0.95를 적용한 CFRP에 의한 전단강도($\psi_f V_f$)는 40.1 kN에 해당한다. C-SMA는 Fe SMA 스트립을 나선형으로 감싸서 보강을 수행했으며, C-FRP에 적용되었던 전단강도 향상 목표치 40 kN을 달성하기 위해 Fe SMA 스트립의 중심 간격을 35 mm로 유지하였다. 이를 위해 식 (6)과 (7)을 사용하였다.

$$V_{ps} = \frac{A_{ps} \sigma_r (0.8D)}{s_{ps}} \quad (\text{MPa, mm}) \quad (6)$$

Table 1. Details of shear retrofitting

Specimen	Confinement material	Confinement level	Shear strength (kN)			
			V_c	V_s	$\psi_r V_s$ or V_{ps}	V_n
C-Ref	-	-	89.9	59.1	n/a	149.0
C-FRP	CFRP sheet	1 ply	89.9	59.1	40.1	189.1
C-SMA	Fe SMA strips	35 mm pitch spacing	89.9	59.1	40.4	189.4

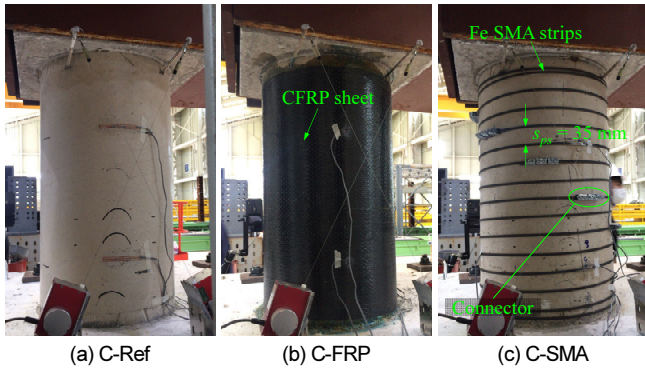


Fig. 5. RC columns after shear retrofitting

$$A_{ps} = (\pi/2)t_{ps}w_{ps} \text{ (MPa, mm)} \quad (7)$$

여기서, V_{ps} 는 Fe SMA 스트립에 의한 전단강도, A_{ps} , s_{ps} , t_{ps} , w_{ps} 는 각각 Fe SMA 스트립의 단면적, 중심 간격, 두께, 너비를 뜻한다. 전체 기둥 실험체의 전단강도는 Table 1에 정리되었으며, 각 기둥의 상태는 Fig. 5에서 보여진다.

또한, Fig. 4는 기둥의 반복하중실험에 사용된 실험세팅을 보여준다. 수평 및 수직하중을 위한 액츄에이터가 각각 설치되었으며, ACI 374.2R-13 [20]에 따른 변위 기반 하중 프로토콜도 함께 제시되었다. 기둥의 축방향 강도의 약 10%에 해당하는 255 kN의 수직하중이 적용되었다.

3.2 실험결과

3.2.1 콘크리트 기둥의 손상 상태

반복하중실험은 횡방향 하중이 최대치의 약 20% 이상 감소할 때까지 수행되었고, 각 실험체의 손상 상태는 면밀히 관찰되었다. C-Ref를 제외한 두 보강 기둥은 최대 ±8% 변위비에 해당하는 반복하중에서 안정적인 거동을 보였다. Fig. 6은 각 실험체의 후 최종 손상 상태를 비교하여 보여준다.

C-Ref는 0.75~1% 변위비에 도달했을 때 기초-기둥 경계에서 휨균열을 보이기 시작했다. 그 후, 1.5% 변위비에서 큰 대각선 균열이 발생하였으며, 변위비가 증가함에 따라 전단균열이 더욱 진행됐다. 2% 변위비에서 하단부 콘크리트 피복의 박락이 관찰되었고, 최종적으로 3% 변위비에서 중앙부 콘크리트 피복의 탈락과 함께 전단파괴가 발생하였다.

기둥 전 단면이 CFRP 시트로 보강되었던 C-FRP는 실험 중 손상 진행을 명확히 확인할 수 없었다. 안정적인 거동을 보이던 C-FRP가 +7% 변위비에 도달할 때 기둥 최하단부를 구속하던 CFRP 시트 파단이 발생했다. 그에 따라 구속 부위의 콘크리트 박락이 두드러지게 관찰되었으나, 손상은 콘

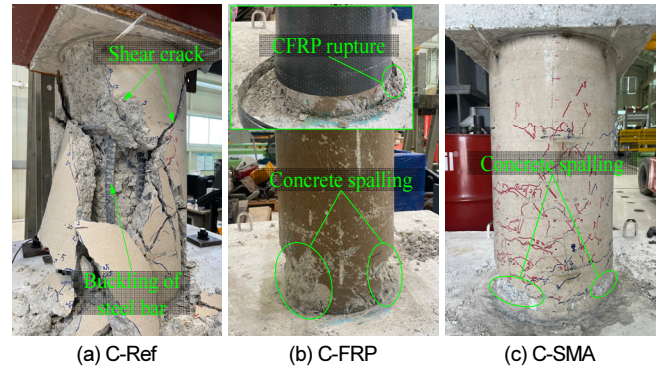


Fig. 6. Final damage states

크리트 피복에 국한되었다. 그 결과, ±8% 변위비에서도 전체적인 구조적 안전성이 유지되었다. Fig. 6(b)는 CFRP 시트 파단 당시의 사진과 CFRP 시트 제거 후 C-FRP의 손상 상태 사진을 함께 보여준다. C-Ref에서 발생했던 전단파괴는 효과적으로 방지되었고, 최종적으로 기둥 양쪽 하단부에서 휨에 의한 콘크리트 피복의 박락이 심각하게 진행되었음을 알 수 있다.

C-SMA의 초기 손상은 C-Ref와 유사하게 1% 변위비에서 기둥 하단부에서의 휨균열로 시작하였다. 약 2.5~3.5% 변위비에 도달했을 때 기둥 몸체 중앙부에서 다수의 미세한 균열이 발생하였지만, 큰 균열의 발달로는 이어지지 않았다. 변위비가 5~6%로 증가함에 따라 기둥 하단부, 특히 Fe SMA 스트립 사이 구속되지 않는 콘크리트의 박락이 발생하기 시작했다. 하지만, C-FRP에 비해 콘크리트 박락의 정도는 심각하지 않았다. Fe SMA 스트립이 제거된 C-SMA의 최종 손상 상태는 Fig. 6(c)에서 확인할 수 있다. Fe SMA 보강을 통해 C-Ref에서 발생하였던 전단파괴가 매우 효과적으로 방지되었으며, 기둥 중앙부에서 분산되어 발생했던 미세 전단균열이 더 이상 진행되지 않은 것을 알 수 있다. 또한, 연속적 거동을 보이는 Fe SMA 재료 특성으로 인해 C-FRP에서 관찰되었던 구속 재료의 손상 및 파단은 발생하지 않았다.

3.2.2 콘크리트 기둥의 이력거동

Fig. 7은 반복하중실험을 통해 얻은 각 기둥의 하중-변위비 이력곡선을 보여준다. 이와 함께 실험체 설계 시 고려되었던 KDS 14 20 22[18]에 따른 전단강도를 표시하였다. 추가적으로 ASCE 41-17[21]의 Section 10.4.2.3에서 제시된 전단강도도 동시에 나타냈다. 이것은 횡방향 변형에 따른 전단강도의 감소가 반영 가능하다는 장점이 있다. 각 기둥의 하중-변위비 곡선을 바탕으로 최대 하중(V_{max})과 해당 변위비(d_{max})를 구했으며, V_{max} 의 80%에 해당하는 지점을 극한상태로 정의하고 해당 변위비(d_u) 또한 구했다. 이외에 ACI 374.2R-13[20]의 Section 4.7에 따라 항복강도(V_r)와 해당 변위

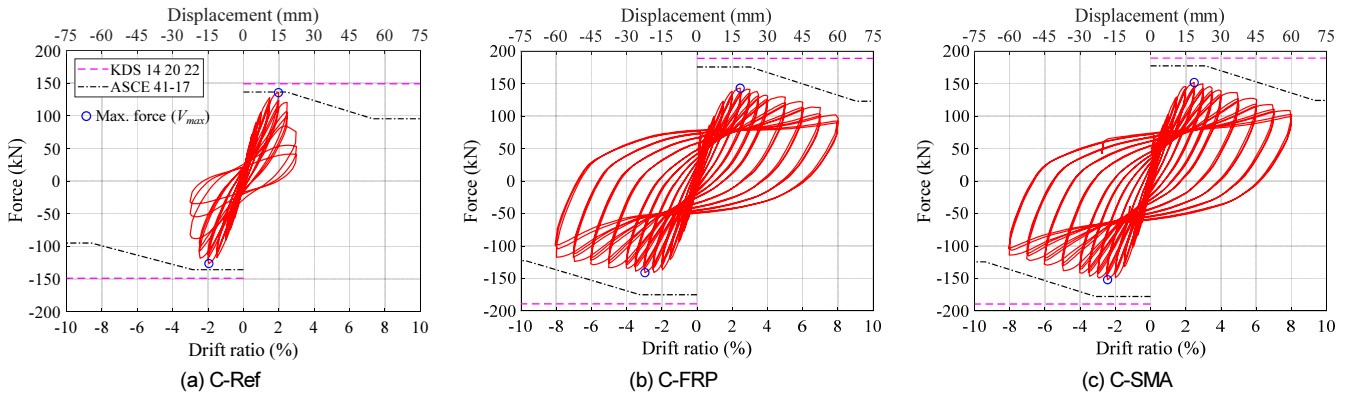


Fig. 7. Lateral cyclic responses

Table 2. Summary of test results

Specimen	V_{max} (kN)	V_y (kN)	d_{max} (%)	d_y (%)	d_u (%)	μ_d
C-Ref	131.3	115.8	1.99	1.33	2.69	2.0
C-FRP	142.3	125.0	2.74	1.57	7.43	4.7
C-SMA	152.1	134.8	2.49	1.56	6.84	4.4

비(d_y)를 구하였다. 이를 바탕으로 연성도($\mu_d = d_u/d_y$)를 계산하였고 관련 결과를 Table 2에 정리하였다.

C-Ref는 변위비 1.33%에서 항복한 후 변위비 2%에서 약 131 kN에 해당하는 최대 하중을 기록하였다. C-Ref의 심각한 전단파괴와 하중 저항능력의 상실을 고려하였을 때 실험체의 최대 하중이 실제 전단강도에 도달한 것으로 추측되며, 이때의 최대 하중은 KDS 14 20 22[18]와 ASCE 41-17[21]에 의한 전단강도의 각각 91%와 99%에 해당한다. KDS 14 20 22[18]의 전단강도 설계값이 실제 강도에 미치지 못한 결과는 실험 중 발생한 기둥 축력의 변동에 의한 것으로 추측된다. 수직 액츄에이터는 하중 제어(255 kN)로 축력을 적용하였지만 기둥 상부가 횡방향으로 이동함에 따라 계획보다 낮은 기둥 축력(N_u)이 가해졌고 이에 따라 V_c 또한 감소한 것으로 생각된다. C-Ref는 변위비 3%에서 하중 저항능력을 완전히 상실하였으며, 2.0의 연성도를 기록하였다.

C-FRP는 변위비 2.5~3%에서 최대 하중 142 kN을 기록하였고 C-Ref 대비 약 8.4%의 강도 향상을 보였다. C-FRP의 최대 하중은 ASCE 41-17[21]에 따른 전단강도의 약 81%에 해당하며, 전단파괴에 이르기 전 상당량의 여유 강도 확보를 통해 C-Ref에서 관찰됐던 전단 지배 거동이 효과적으로 휨 지배 거동으로 전환되었음을 알 수 있다. C-FRP는 연성도 4.7을 기록하며 C-Ref 대비 변형능력의 큰 향상을 보였다.

C-SMA는 세 실험체 중 가장 높은 최대 하중 152 kN을 기록하며 C-Ref 대비 15.8% 강도 향상을 보였다. 이때의 최대 하중은 ASCE 41-17[21] 전단강도의 약 86%에 해당한다. C-SMA는 C-FRP와 비교하여 상대적으로 낮은 연성도(4.4)를 기록하였지만, Fig. 7에서 나타나듯이 두 기둥 모두 연성적인 휨 지배 거동을 공통적으로 보였다. 한 가지 주목할 점은 Fig. 6에서 C-SMA는 C-FRP에 비해 훨씬 저감된 손상 상태를 보였지만, 두 기둥의 하중-변위비 곡선은 매우 유사하다는 점이다. C-FRP의 기둥 하단부 콘크리트 손상이 내부 코어까지는 이어지지 않아 심각한 구조적 파괴는 방지된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 세 기둥의 누적 에너지 소산량을 비교한다. C-Ref는 변위비 3%

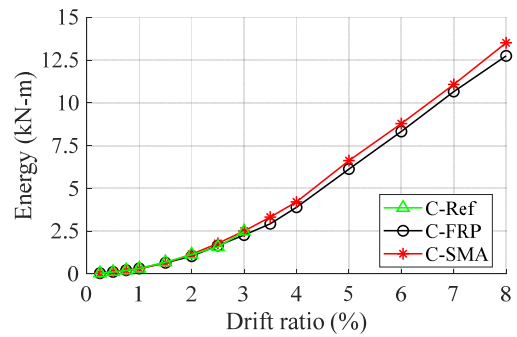


Fig. 8. Hysteretic energy dissipation

에서 취성적인 전단파괴로 인해 누적 에너지 소산량이 2.5 kN-m에 불과했다. 유사한 이력 거동을 보였던 C-FRP와 C-SMA는 경우 12.8~13.5 kN-m의 유사한 누적 에너지 소산량을 기록하였으며 이는 C-FRP 대비 5.1~5.4배에 해당하는 수치이다.

4. 결론

본 연구는 Fe SMA의 프리스트레싱 및 능동구속을 활용하여 콘크리트 기둥 전단보강을 수행하고 내진성능 및 손상저감 효과를 실험적으로 규명했다. Fe SMA 재료실험과 콘크리트 기둥 반복가력실험을 통해 CFRP 시트와 Fe SMA 스트립 구속의 보강 성능을 비교·평가하였다. 주요한 사항은 아래와 같다.

- 1) 본 실험에 사용된 Fe SMA는 약 260°C의 고온에서 360 MPa의 프리스트레싱 성능을 보였다. Ni-Ti SMA와 비교하여 비용 대 성능비가 우수하며, 특별한 중장비 없이 토치를 이용한 단순 가열을 통해 현장에서 손쉽게 프리스트레싱 적용이 가능할 것으로 예상된다.
- 2) CFRP와 Fe SMA 보강은 무보강 기둥(C-Ref)에서 발생한 심각한 전단

손상과 취성적 파괴를 효과적으로 방지할 수 있었다. 보강된 두 기둥 모두 $\pm 8\%$ 변위비에 해당하는 큰 횡방향 변형에도 연성적인 휨 지배 거동을 보였으며, 실험 종료 시점까지 뚜렷한 파괴를 보이지 않았다.

- 3) 보강된 두 기둥 모두 안정적인 성능을 보였지만, 손상 제어 측면에서 Fe SMA가 상대적으로 우수한 것으로 판단된다. 기둥 하부에서 발생한 콘크리트 피복 박락의 정도가 훨씬 경미했으며, 구속재의 손상 징후도 보이지 않았다.
- 4) 보강된 두 기둥의 손상 상태의 차이에도 불구하고 하중-변위 이력곡선은 매우 유사했다. 이는 실험 당시 콘크리트 손상이 내부 코어까지 이어지지 않았기 때문으로 생각된다. 하지만, 실제 상황에서 CFRP 파단 후 내부 코어까지 손상이 진행될 가능성을 배제할 수 없으며, 지진 발생 후 재료적·구조적 안전성 및 주요 구조재로서의 기능수행 능력을 고려했을 때 Fe SMA에 기반한 능동구속 기법이 보강 측면에서 더 유리한 것으로 판단된다.

본 연구는 원형 단면을 가진 콘크리트 기둥을 대상으로 전단보강 및 구 조 실험을 진행하였다. 하지만, 각형 단면에 대한 Fe SMA 보강법의 적용성 및 성능 또한 추후 필수적으로 평가되어야 할 것으로 생각된다. 더불어, 축력 유무 또는 크기 등을 반영한 다양한 하중 조건에서 Fe SMA 기반 능동구속 기법에 대한 실험적·해석적 연구도 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Hayashi T, Niwa H, Fukuhara M. Strengthening methods of the existing reinforced concrete buildings. In Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering; 1980 Sep;4:89-97.
2. Bett BJ, Klingner RE, Jirsa JO. Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns. Structural Journal. 1988 Sep;85(5):499-508.
3. Chai YH. Flexural retrofit of circular reinforced concrete bridge columns by steel jacketing. SSRP. 1991;91:06.
4. Chai YH. An analysis of the seismic characteristics of steel-jacketed circular bridge columns. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1996 Feb;25(2):149-161.
5. Kim HC, Hong WK, Lee HJ. The Flexural behavior of a square concrete filled carbon tube columns under the constant axial force with reversed cyclic lateral load. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2004;8(4):1-10.
6. Park JW, Hong YK, Hong GS. Flexural strength design equation of concrete filled steel tube (CFT) column reinforced by carbon fiber sheet. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2008;12(3):29-36.
7. Jeon JS, Lee DH. Aftershock fragility assessment of damaged RC

- bridge piers repaired with CFRP jackets under successive seismic events. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2018;22(5):271-280.
8. Shin J, Jeon JS, Kim J. Numerical column model for damaged non-ductile reinforced concrete frame repaired using FRP jacketing system. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2018;22(5):291-298.
9. Hwang H, Kim H, Oh K, Shin J. Seismic retrofit scheme of FRP column jacketing system for non-seismic RC building frame. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2023;27(6):293-301.
10. Saatcioglu M, Yalcin C. External prestressing concrete columns for improved seismic shear resistance. Journal of Structural Engineering. 2003 Aug;129(8):1057-1070.
11. Yamakawa T, Banazadeh M, Fujikawa S. Emergency retrofit of damaged RC columns right after seismic attack using pre-tensioned aramid fiber belts. In Proc., 1st Conf. on Applications of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures; c2004.
12. Nesheli KN, Meguro K. Seismic retrofitting of earthquake-damaged concrete columns by lateral pre-tensioning of FRP belts. In Proc., 8th US National Conf. on Earthquake Engineering; 2006 Apr 18. El Cerrito, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
13. Shin M, Andrawes B. Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys. Engineering Structures. 2010 Mar;32(3):656-664.
14. Shin M, Andrawes B. Lateral cyclic behavior of reinforced concrete columns retrofitted with shape memory spirals and FRP wraps. Journal of Structural Engineering. 2011 Nov;137(11):1282-1290.
15. Jung D, Wilcoski J, Andrawes B. Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals. Engineering structures. 2018 Apr;160:171-185.
16. Hong K, Lee S, Han S, Yeon Y. Evaluation of Fe-based shape memory alloy (Fe-SMA) as strengthening material for reinforced concrete structures. Applied Sciences. 2018 May;8(5):730.
17. Jeong S, Kim KH, Lee Y, Yoo D, Hong K, Jung D. Compressive behavior of concrete confined with iron-based shape memory alloy strips. Earthquakes and Structures. 2022 Nov;23(5):431-444.
18. Korea Concrete Institute. Design Code for Shear and Torsion of Concrete Structures (KDS 14 20 22). Korea Design Standard (KDS), Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korea; c2022.
19. American Concrete Institute Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17). American Concrete Institute; c2017.
20. American Concrete Institute Committee 374. Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads (ACI 374.2R-13). American Concrete Institute; c2013.
21. American Society of Civil Engineers. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-17). American Society of Civil Engineers; c2017.