

표면매립된 철계-형상기억합금 스트립으로 힘 보강된 RC보의 장기 휨거동

홍기남¹, 이수규^{2*}, 한상훈³, 강판승⁴

Long-term Flexural Behavior of RC Beams Strengthened in Flexure with NSM Fe-SMA Strips

Ki-Nam Hong¹, Sugyu Lee^{2*}, Sang-Hoon Han³, Panseung Kang⁴

Abstract: The long-term flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with an iron based-shape memory alloys (Fe-SMAs) by a near-surface mounted (NSM) method was evaluated. The pre-strained values of 2% and 4% and introduced prestressing force by an activation of a shape memory effect of the Fe-SMA strengthening material were considered as experimental variables. Deflections at the center of the RC beams were measured for six months after the 1 tonf concrete weight was loaded on the beam. Experimental results show that the deflections decreased because of the increased flexural stiffness of beams strengthened with the Fe-SMA strips. On the contrary, with increased pre-strained values, the deflection increased due to stiffness reduction of the strengthening material. It was confirmed that the specimens incorporating the prestressed force showed the deflection reduction of about 30%, compared to the ones without the prestressed force.

Keywords: Iron-based shape memory alloy, Near-surface mounted method, Long-term behavior, Shape memory effect, Pre-strain, Deflection

1. 서 론

철근콘크리트는 건설재료로 내구성, 내화성 등이 뛰어나 대부분의 토목구조물 시공에 사용되고 있다. 하지만, 철근콘크리트로 건설된 구조물의 내구력은 시간경과에 따른 노후화와 외부요인에 의한 손상으로 저하되게 된다. 이에 따른 해결책으로, 구조물 보강에 관한 많은 연구와 적용이 이루어지고 있다(Triantafyllou and Plevris, 1992; Chajes et al., 1994; Norris et al., 1997; Sim and Park, 2005; Chin et al., 2018).

외부에 강판을 부착하여 보강하는 강판보강공법과 섬유시트 보강하는 섬유보강공법은 구조물의 내구력을 복원시키고 강성을 증가시키는 대표적인 보강 공법이다(Loreto et al., 2013; Elsanadedy et al., 2013). 하지만, 강판보강공법의 경우 부식, 강판 자중에 의한 사하중 증가 및 취급의 어려움 등의 문제점을 나타내고 있으며, 섬유보강공법의 경우 부착재로 사용되는 에폭

시와 콘크리트 모체의 상이한 열팽창계수로 인한 계면의 부착력 저하 및 보강재 박리 등의 한계점을 가지고 있다. 또한 에폭시의 낮은 유리전이온도로 인해 낮은 내화성능을 가지고 있다(Kim, 2005; Park, 2003; Choi et al., 2010; Bilotta et al., 2015).

이들의 한계점을 보완하고자 시멘트계 모르타르를 부착재로 적용한 표면매립(Near Surface Mounted) 공법이 개발되어 구조물 보강분야에 적용되고 있다(De Lorenzis et al., 2002; El-Hacha and Rizkalla, 2004). 시멘트계 모르타르는 시멘트를 주요 구성요소로 개발된 부착재로 수지계 에폭시보다 높은 열전이온도와 콘크리트와의 일체거동으로 에폭시 수지의 단점을 보완할 수 있다. 이와 더불어 표면매립공법은 보강이 요구되는 콘크리트 인장부 최외단 피복에 흠을 성형한 후 보강재를 매립하는 공법으로 강판보강공법의 단점인 부식을 방지할 수 있고 섬유보강공법의 단점인 보강재 박리를 방지할 수 있다. 시멘트계 모르타르를 이용한 표면매립공법은 보강재의 종류 및 매립 흠의 제원을 변수로 연구되고 있다(El-Hacha and Rizkalla, 2004; El-Hacha and Gaafar, 2011).

그 중 하나로 철계-형상기억합금을 보강재로 활용한 연구들이 최근 국내·외에서 수행되고 있다. 형상기억합금은 가열 등의 외부 자극에 의해 사전에 기억된 특정한 형상으로 되돌아가려는 특징을 가진 합금이다. 대표적인 Ti-Ni계와 Cu계 형상기억합금은 이미 수십 년 전부터 우주 항공 산업 분야 및 의료기기 분야 등 다방면적으로 사용되고 있다(Miller and

¹정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

²정회원, 충북대학교 토목공학과 박사후연구원, 교신저자

³정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

⁴학생회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정

*Corresponding author: sugyulee@chungbuk.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

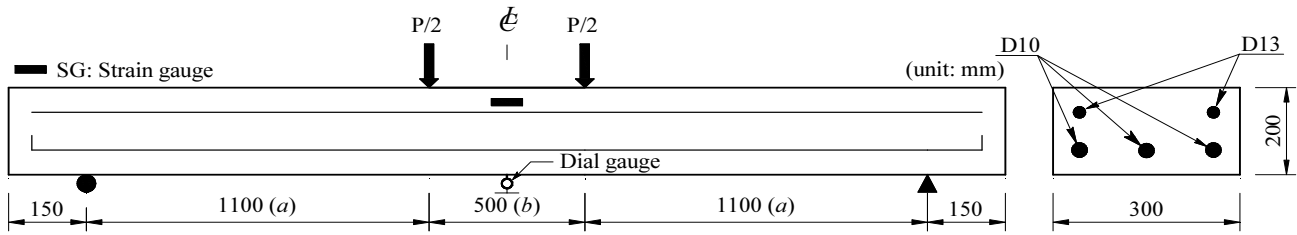


Fig. 1 Schematic of long-term test setup

Lagoudas, 2000). 하지만 이러한 형상기억합금은 비싼 원자재 가격 및 생산단가로 대규모의 토목구조물에 적용하기는 사실상 불가능하였다. 1982년 Sato에 의해 가공성이 우수하고 원재료 값이 Ti-Ni계 및 Cu계 형상기억합금보다 저렴한 철계-형상기억합금이 개발되면서 토목분야, 특히 제진 및 면진보강 분야에서 활발하게 연구 및 적용되고 있다(Sato et al., 1982; Lee et al., 2013).

철계-형상기억합금은 다른 종류의 형상기억합금과 같이 외부 가열에 의해 형상기억효과가 활성화된다. 이 활성화된 형상기억효과는 합금 자체에 변형을 발생시킨다. 이 변형을 외부에서 구속하면 철계-형상기억합금 내부에 회복응력이라 불리는 내부응력이 발생하게 된다. 이 회복응력은 철계-형상기억합금 전 길이에 걸쳐 고르게 압축응력으로 작용하게 되어 프리스트레스력으로 구조물에 전달될 수 있다.

NSM 보강재로 사용된 철계-형상기억합금은 흠 충전재에 의해 변위가 구속되며, 전력공급을 통한 전기저항가열로 회복응력을 발생시킨다. 이 회복응력은 주변 콘크리트에 압축응력으로 전달되어 콘크리트 인장부에 압축력을 가하게 된다. 즉, NSM 보강재로 사용된 철계-형상기억합금은 보강된 구조물이 강연선을 활용하는 프리스트레스 콘크리트와 동일한 메커니즘으로 거동하게 한다(El-Hacha et al., 2001).

이에 본 연구는 철계-형상기억합금을 NSM 보강재로 사용하여 보강된 RC 보의 휨성능을 장기적으로 평가하고자 한다. 보의 장기 휨거동은 철계-형상기억합금의 사전변형 및 형상기억효과 활성화에 의한 긴장력 도입여부를 변수로 보 중앙부의 처짐을 통해 분석되었다.

2. 실험개요

본 연구에서는 철계-형상기억합금을 표면매립공법으로 보강한 철근콘크리트 보의 초기 활성화 단계에서의 휨거동 및 6개월에 걸친 장기 휨거동을 평가하고자 실험을 계획하였다.

2.1 실험체 제원

본 연구에서는 총 7개의 보를 제작하였다. 보의 단면치수는

300mm × 200mm이며, 인장 및 압축부 콘크리트 피복두께는 모두 30mm로 동일하게 설정하였다. 보의 총 길이는 3,000mm이며, 순지간은 2,700mm으로 계획하였다. 모든 보에 SD400 등급의 D10 철근 3개를 인장철근으로 배근하였으며, 동일 등급의 D13 철근 2개를 압축철근으로 배근하였다. 보의 전단내력 검토결과, 모든 보의 전단내력이 충분한 것으로 확인되어 전단철근을 배근하지 않았다. 휨 실험체의 제원 및 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

28일간 양생기간을 거친 후 흠파기 장비를 사용하여 폭 15mm, 깊이 30mm 크기의 흠을 실험체의 인장부 하면에 종방향으로 형성하였다. 흠파기가 완료된 흠에 폭과 두께가 각각 20mm, 1.5mm인 철계-형상기억합금을 삽입하였다. 흠에 삽입된 철계-형상기억합금과 실험체 사이는 초속경 모르타르로 충전하였으며, 타설 후 28일간 기건양생을 실시하였다.

본 연구에서는 보강재의 사전변형량 및 철계-형상기억합금의 형상기억효과 활성화에 따른 프리스트레스 긴장력 도입 여부를 실험변수로 설정하였다. 실험변수를 정리하여 나타내면 Table 1과 같다. 실험체명은 Table 1에 나타난 것과 같이 사전변형(PS0: 사전변형 0%, PS2: 사전변형 2%, PS4: 사전변형 4%)과 형상기억효과 활성화에 따른 프리스트레스 긴장력 도입(N: 비활성화, P: 활성화)을 조합하여 명명하였다. 예를 들어, “PS2-P” 실험체는 2% 사전변형된 철계-형상기억합금으로 보강되었으며 형상기억효과 활성화에 의해 긴장력이 가해진 실험체를 의미한다.

Table 1 Test variables

Specimen ID	Strengthening material	Pre-strain (%)	Activation of Fe-SMA
Control	-	-	-
PS0-N	Fe-SMA	0	No
PS2-N	Fe-SMA	2	No
PS2-P	Fe-SMA	2	Yes
PS4-N	Fe-SMA	4	No
PS4-P	Fe-SMA	4	Yes

2.2 사용재료

본 연구를 위해 사용된 각 재료의 재료실험은 KS규정과 ASTM 규정에 맞추어 실시하였다. 콘크리트는 30.0MPa의 설계 압축강도를 갖는 레디믹스 콘크리트를 사용하였으며, 사용된 콘크리트의 배합설계를 Table 2에 나타내었다. 굵은 골재의 최대치수는 23mm이고, 잔골재율은 50.4%, 물-시멘트비는 42.3%이다.

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 155mm로 설정하였다. 단 위수량 감소 및 목표 슬럼프 확보를 위해 고성능 AE감수제를 혼입하였다. 압축강도 측정을 위해 실험체 타설 시 3개의 Ø100×200mm 실린더를 제작하였다. 재령 28일째 KS F 2405에 따라 측정된 이 콘크리트의 평균 압축강도는 33.4MPa이었다(KS, 2014). 또한 표면매립공법 충전재로 사용된 초속경 모르타르의 압축강도는 ASTM C1329에 따라 측정되었으며, 2시간에 25MPa, 3시간에 30MPa, 1일에 40MPa 및 28일 양생 시 80.5MPa의 강도를 발현하였다(ASTM, 2016).

Table 2 Mixture design of used concrete

W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad ^{a)}
42.3	50.4	155	164	388	954	908	3.1

a) Water-reducing admixture

Table 3에 철근 제조회사로부터 입수한 사용 철근의 역학 특성을 나타내었다. 인장철근으로 사용된 D10 철근의 탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 각각 200GPa, 480MPa, 585.4MPa이었다. D13 철근의 탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 각각 200GPa, 487MPa, 591.7MPa이었다.

Table 3 Mechanical properties of used steel rebars

Steel	E (GPa)	σ_{yield} (MPa)	$\sigma_{ult.}$ (MPa)	$\epsilon_{ult.}$ (mm/mm)
D10	200.0	480	585.4	0.0017
D13	200.0	487	591.7	0.0016

본 연구에서 보강재로 사용된 철계-형상기억합금은 스위스 R사에서 제조된 것으로 폭 100mm와 두께 1.5mm의 스트립 형상이었다. 인장실험을 위하여 폭 10mm, 길이 330mm로 스트립을 절단하였다. 절단 시 마찰에 의한 형상기억합금의 손상을 최소화하기 위해 물과 연마제를 이용하는 워터젯 커팅시스템을 사용하였다. Fig. 2는 인장실험으로부터 얻어진 철계-형상기억합금의 응력-변형을 관계를 나타낸다.

0.2% 율셋법으로 결정된 이 합금의 항복응력, 항복변형률 및 탄성계수는 각각 463MPa, 0.0055mm/mm 및 133.2GPa로 Table 4에 정리하여 나타내었다.

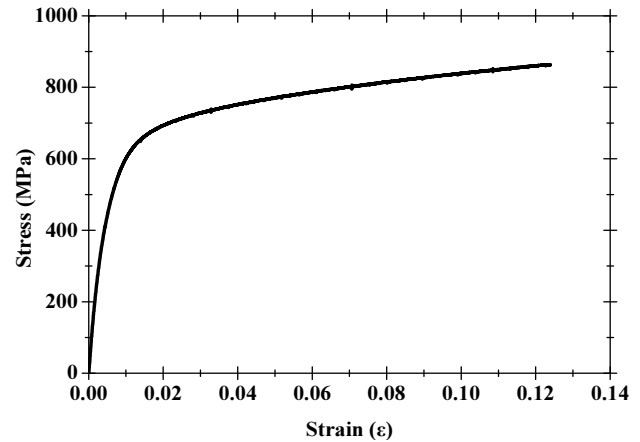
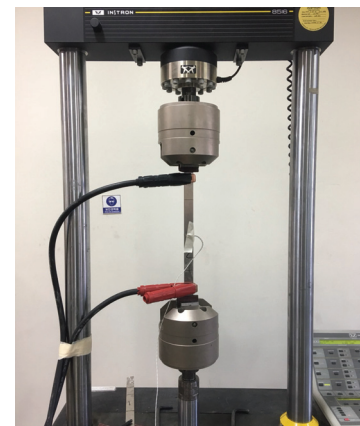


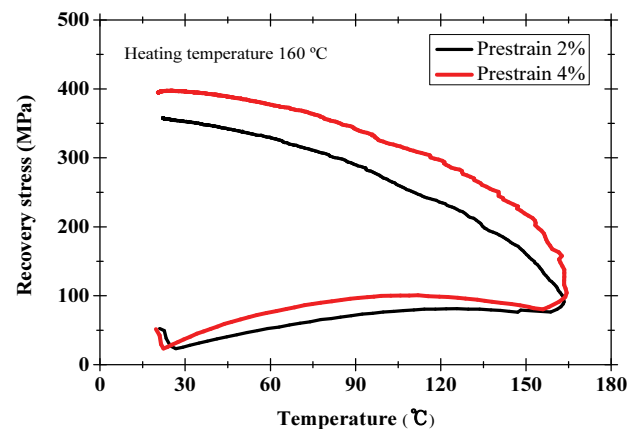
Fig. 2 Stress-strain curve of Fe-SMA

Table 4 Mechanical properties of Fe-SMA

E (GPa)	σ_{yield} (MPa)	ϵ_{yield} (mm/mm)	$\sigma_{ult.}$ (MPa)	$\epsilon_{ult.}$ (mm/mm)
133.2	463	0.0055	863	0.0124



(a) Recovery stress test setup



(b) Recovery stress-temperature curves

Fig. 3 Recovery stress test of Fe-SMA

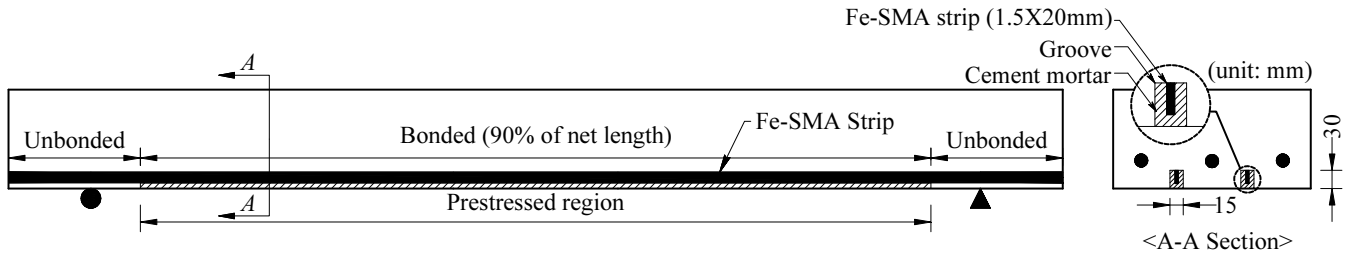


Fig. 4 Details of embedded Fe-SMA in concrete

Fig. 3(a)와 (b)는 가열온도에 따른 철계-형상기억합금의 회복응력 실험 장면과 회복응력-시간 곡선을 각각 나타낸다. 변위구속 조건을 모사하기 위하여 만능재료 시험기의 변위를 구속시키고 160°C인 목표온도에 도달할 때까지 전기저항 가열법으로 열을 가하였다. 이후 전력을 차단하고 상온까지 철계-형상기억합금 시편을 냉각시켰다. 냉각과정 중 형상기억 효과의 활성화와 합금의 열수축효과로 인하여 회복응력이 크게 증가하였다. 2%와 4% 사전변형을 가한 시편의 회복응력은 각각 354MPa과 396MPa로 나타났다.

2.3 실험체 제작

2.3.1 철계-형상기억합금의 사전변형

두께, 폭, 길이가 1.5mm, 20mm, 3,000mm로 절단된 철계-형상기억합금 보강재를 길이 대비 2%와 4%까지 사전변형시켰다. 철계-형상기억합금의 사전변형은 수평인장장치를 통해 실시하였다. 수평인장장치는 시편을 고정시키는 정착장치와 시편에 인장력을 가하는 유압시스템으로 구성되어 있다. 시편을 목표한 사전변형까지 3.0mm/min의 속도로 인장시킨 후 30초간 인장력을 유지하였다. 이후 시편의 잔류응력이 0이 될 때까지 동일한 속도로 인장력을 제거하였다.

2.3.2 철계-형상기억합금의 표면매립

철계-형상기억합금 보강재를 실험체 인장부 피복에 성형된 홈에 삽입하였다. 이후 실험체 모체와 형상기억합금 보강재가 완전 합성거동을 할 수 있도록 Fig. 4에 나타난 것과 같이 초속경 모르타르를 순지간의 90%인 2,430mm의 홈에 충전하였다.

2.3.3 상재하중 재하

인장부 홈에 충전한 초속경 모르타르를 1개월간 충분히 양생시킨 이후 실험체를 강제 프레임에 설치하고, 실험체 중앙에 약 1 tonf 중량의 콘크리트 추를 매달아 상재하중을 재하하였다. 본 실험에서 상재하중으로 재하된 추는 가로 1,000mm, 세로 1,080mm, 폭 300mm의 직사각형 콘크리트 블록이었다. 길이 1,200mm, 폭 100mm의 강제판을 이용하여 강제프레임에 거치된 실험체의 중앙에 하중블록을 매달았다.



Fig. 5 Activation of NSM Fe-SMA strips

2.4 실험 방법

2.4.1 철계형상기억합금의 활성화

상재하중을 재하시키고 2일 후에 실험체 인장부에 매립된 철계-형상기억합금의 긴장력 도입을 위해 전기저항가열로 합금의 형상기억효과를 활성화시켰다. 보강재에 전력을 공급하기 위하여 매립 전 철계-형상기억합금 보강재 양 끝단에 10mm 직경의 홈을 천공한 후 전력공급용 구리 클립을 연결하였다. 직렬로 연결된 전력 공급장치로 10A/mm²의 전력을 형상기억합금 보강재에 통과시켰다. Fig. 5는 전력공급장치로부터 전력을 전달하여 철계-형상기억합금을 활성화시키는 과정을 나타낸 사진이다. 전기저항열이 160°C에 도달할 때까지 23초간 전기를 통과시켰으며, 그 이후 전기를 차단하고 상온까지 보강재를 냉각시켰다. 철계-형상기억합금 보강재의 표면온도는 보강재 부착된 절연성 K-타입 열전대를 통해 측정되었다.

2.4.2 측정항목

강제 프레임 위에 거치된 실험체에 콘크리트 블록을 매달고 즉시치짐이 안정화된 2일 후에 철계-형상기억합금 보강재 활성화 작업을 수행하였다. 철계-형상기억합금의 활성화 과정에 발생된 실험체 중앙부의 치짐은 보 중앙하단에 설치된



Fig. 6 Long-term test setup

50mm 용량의 LVDT를 이용하여 측정되었다. 활성화 작업 이후에 실험체 중앙의 처짐은 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 다이얼 변위 측정기를 사용하여 측정하였다. 또한, 실험체 중앙부 인장철근과 상부콘크리트에 부착된 변형률 게이지를 이용하여 인장철근과 콘크리트의 변형률도 측정하였다.

중앙부 처짐, 인장철근 및 콘크리트 상부의 변형률은 데이터로거를 사용하여 상재하중 재하 초기부터 3시간까지는 1초 간격으로, 그 후 9시간까지는 5분 간격으로, 9시간부터 24시간까지는 1시간 간격으로 측정하였다. 그 후 3개월까지는 주당 두 번씩 측정하였으며, 6개월까지 주당 한 번씩 데이터를 측정하였다. 실험전경을 Fig. 6에 나타내었다.

3. 실험결과

철계-형상기억합금 보강재를 사용하여 보강한 보의 휨거동은 (1) 1 tonf의 상재하중 재하 직후 발생한 즉시처짐; (2) 철계-형상기억합금의 형상기억효과 활성화로 인한 처짐회복; (3) 6개월 후의 장기처짐으로 분석된다.

3.1 즉시처짐

상재하중에 의한 즉시처짐 결과를 Fig. 7과 Table 5에 나타내었다. 철계-형상기억합금으로 보강되지 않은 Control 보의 경우 5.1mm의 즉시처짐이 발생하였으며, 사전변형 증가에 따른 즉시처짐은 사전변형을 가하지 않은 보강재를 사용한 실험체(PS0-N)부터 2%와 4%사전변형을 가한 보강재를 사용한 실험체(PS2-N, PS4-N)까지 각각 1.78mm, 2.08mm, 2.49mm 발생하였다. Control에 비해 보강한 실험체는 50.78~65.1% 처짐 감소를 보였으며, 이는 보강재에 의한 휨성능 향상의 결과로 생각된다. 또한, 철계-형상기억합금 보강재의 사전변형이 증가할수록 즉시처짐은 16.8%와

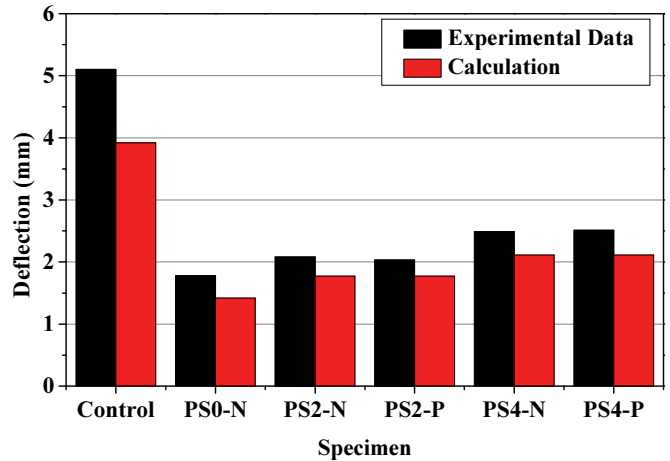


Fig. 7 Load-instant deflection on RC beams

39.9% 증가하는 경향을 보였다. 이는 사전변형 증가에 따른 철계-형상기억합금의 강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다(Yeon, 2018).

Table 5 Comparison of instant deflections

Specimen ID	$\Delta_{Cal.}$	Δ_{Test}	$\Delta_{Cal.}/\Delta_{Test}$
Control	3.92	5.10	0.77
PS0-N	1.42	1.78	0.80
PS2-N	1.77	2.08	0.85
PS2-P	1.77	2.03	0.87
PS4-N	2.11	2.49	0.85
PS4-P	2.11	2.51	0.84

콘크리트 탄성계수 E_c 와 유효단면2차모멘트 I_e 를 이용하여 실험체의 즉시처짐을 구하였다. 이를 수식으로 표현하면 아래 식 (1)~(3)과 같다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)}$$

여기서, M_{cr} , M_a 는 각각 균열 모멘트와 부재에 작용하는 최대 모멘트를 뜻하고, f_{ck} , f_r 및 y_t 는 콘크리트의 설계압축강도, 인장강도 및 중립축에서 인장연단까지의 거리를 나타낸다. I_g , I_{cr} 는 각각 비균열단면2차모멘트와 균열단면2차모멘트를 뜻한다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{ck} + 4} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{Pa}{48E_c I_e} (8a^2 + 12ab + 3b^2) \quad (3)$$

여기서, E_c , a , b 는 콘크리트의 활선탄성계수, 지점에서 하중 재하지점까지 거리 및 순수 휨 구간의 거리이다.

모든 실험체에서 이론값/실험값이 0.77~0.87로 이론식에 의한 값이 실험값에 비해 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 유효단면2차모멘트 산정이 적절하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 처짐복원

형상기억효과의 활성화로 인해 보강재에 도입된 긴장력에 의한 실험체 중앙부의 시간-처짐 이력곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 가열 초기에는 열팽창에 의한 하향처짐이 발생함을 Fig. 8을 통해서 확인할 수 있다. PS2-P와 PS4-P 실험체에서 각각 0.238mm, 0.251mm의 하향처짐이 발생하였다. 실험체의 열팽창에 의한 하향처짐은 보강재의 표면온도가 목표온도에 도달한 이후 전기를 차단하면서 천천히 회복되었으며, 3시간 이후에는 캠버효과로 인해 상향처짐이 발생하였다. 3시간 이후의 PS2-P와 PS4-P의 상향처짐은 각각 0.41mm와 0.467mm이었다.

철계-형상기억합금 보강재의 활성화로 인해 도입된 긴장력에 의한 상향처짐은 사전 연구로 수행된 회복응력 실험결과를 토대로 이론적으로 예측할 수 있다. 이론적인 상향처짐은 식 (4)~(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{sma} = \frac{M_{sma} l_o (l - l_o)}{4E_c I_g} + \frac{M_{sma} l_o^2}{8E_c I_g} \quad (4)$$

$$M_{sma} = P_{sma} e = A_{sma} \sigma_{rec} e \quad (5)$$

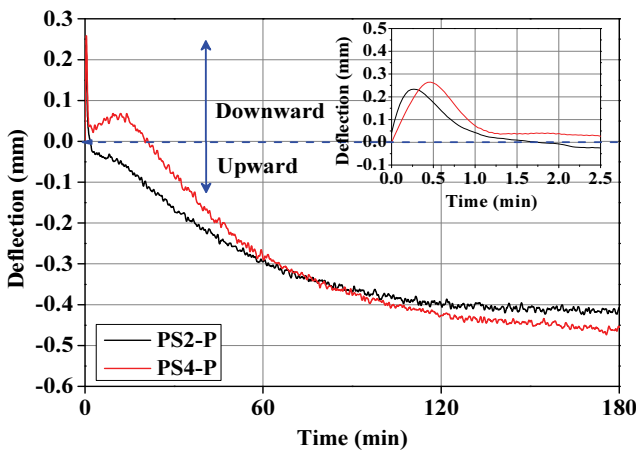


Fig. 8 Comparison of deflection-time curves during NSM Fe-SMA strips

여기서, l_o 는 Fig. 4에 나타난 철계-형상기억합금의 부착길이, l 은 실험체의 순지간, $E_c I_g$ 는 콘크리트 보의 휨 강성을 의미하며, σ_{rec} 는 Fig. 3에 나타난 보강재의 회복응력을 의미한다.

콘크리트 슬래브의 중립축부터 보강재 도심까지 거리인 편심, e 는 식 (6)~(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (6)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (7)$$

$$c = \frac{0.5bh^2 + (n-1)A_s d + (n-1)A'_s d'}{bh + (n-1)A_s + (n-1)A'_s} \quad (8)$$

$$e = d_{sma} - c \quad (9)$$

여기서, c 는 슬래브 실험체의 중립축, d_{sma} 는 슬래브 상단으로부터 철계-형상기억합금의 도심까지의 거리를 의미한다. 철계-형상기억합금은 단면적이 작아 중립축 계산에 큰 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않았다.

PS2-P 실험체의 상향처짐은 0.41mm이었으며, 식 (4)를 통해 산출한 상향처짐 0.43mm였다. PS4-P 실험체의 상향처짐은 0.451mm이었으며, 식 (4)을 통해 산출한 상향처짐 0.49mm으로 나타났다. 이론값/실험값은 PS2-P, PS4-P 실험체에서 각각 1.04와 1.08로 철계-형상기억합금의 회복응력이 철근콘크리트 부재에 적절하게 긴장력으로 전달됨을 확인할 수 있다.

3.3 장기처짐

시간에 따른 실험체의 장기 처짐곡선을 Fig. 9에 나타내었다. PS0-N 실험체에는 6개월 후 추가적으로 약 2.49mm의 처짐이 발생하였다. PS2-N와 PS4-N 실험체에는 6개월 후 추가적으로 각각 2.7mm, 3.49mm의 처짐이 발생하였다. 사전변형을 하지 않은 보강재와 비교하여 사전변형이 큰 보강재를 사용할수록 장기처짐이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 형상기억합금의 사전변형이 증가할수록 탄성계수가 감소하고, 응력이완이 크게 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 2%와 4%의 사전변형을 가지며, 전기저항으로 회복응력을 활성화시킨 보강재로 보강된 PS2-P와 PS4-P 실험체에는 6개월 이후 추가적으로 약 2.0mm, 2.16mm의 처짐이 발생하였다. 이는 PS2-N와 PS4-N에 비하여 각각 26%, 38% 감소한 값으로 프리스트레싱 효과에 기인한 것으로 생각된다. 또한, 본 실험을 통해 형상기억효과의 활성화를 통한 긴장력 도입이 형상기억합금의 릴랙세이션에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

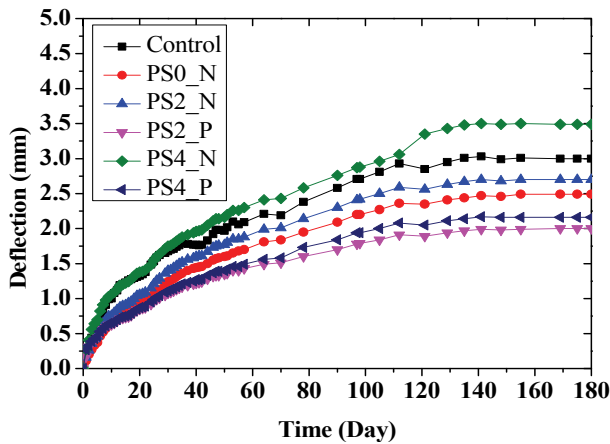


Fig. 9 Comparison of long-term deflection-time curves

4. 결론

본 연구에서는 철계-형상기억합금으로 휨 보강된 보에 대한 장기거동을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보강하지 않은 실험체와 보강된 실험체의 처짐을 비교했을 때, 철계-형상기억합금 보강재는 약 50~65%의 처짐을 감소시키며 휨 강성을 증가시키는 것으로 나타났다.
- 2) 철계-형상기억합금의 사전변형 증가에 따라 즉시처짐이 16.8%, 39.9% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 사전변형으로 인한 철계-형상기억합금의 강성감소가 원인인 것으로 생각된다.
- 3) 2%와 4% 사전변형된 철계-형상기억합금 보강재를 활성화한 실험체 이론처짐/실험처짐이 각각 1.04와 1.08로 철계-형상기억합금의 회복응력이 철근콘크리트 부재에 적절하게 긴장력으로 전달됨을 확인할 수 있다.
- 4) 2%와 4%의 사전변형을 가지며, 전기저항으로 회복응력을 활성화시킨 보강재로 보강된 실험체에는 6개월 이후 추가적으로 약 2.0mm, 2.16mm의 처짐이 발생하였다. 이는 활성화하지 않은 보강재를 사용한 실험체에 비해 각각 26%, 38% 감소한 값으로 프리스트레싱 효과에 기인한 것으로 생각된다.
- 5) 6개월 간의 장기재하 실험을 통해 형상기억효과의 활성화를 통한 긴장력 도입이 형상기억합금의 릴락세이션에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호-115171).

References

- ASTM C1329 / C1329M-16a, Standard Specification for Mortar Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E., and Pecce, M. (2015), Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*, 124, 163-175.
- Chajes, M. J., Thomson Jr, T. A., Januszka, T. F., and Finch Jr, W. W. (1994), Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. *Construction and Building Materials*, 8(3), 191-201.
- Chin, S. C., Tong, F. S., Doh, S. I., Gimbut, J., Foo, Y. K., and Siregar, J. P. (2018), Potential External Strengthening of Reinforced Concrete Beam Using Natural Fiber Composite Plate. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 878, pp. 41-48), Trans Tech Publications.
- Choi, H. T., West, J. S., and Soudki, K. A. (2010), Effect of partial unbonding on prestressed near-surface-mounted CFRP-strengthened concrete T-beams. *Journal of Composites for Construction*, 15(1), 93-102.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A., and La Tegola, A. (2002), A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33(8), 589-603.
- El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F. (2001), Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(2), 111-121.
- El-Hacha, R., and Gaafar, M. (2011), Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface-mounted CFRP bars. *PCI journal*, 56(4).
- El-Hacha, R., and Rizkalla, S. H. (2004), Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Structural Journal*, 101(5), 717-726.
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., and Al-Salloum, Y. A. (2013), Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar-Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40-55.
- Kim, H. J., and Kim, W. (2005), Premature Failure Load of Reinforced Concrete Beams with Flexural Strengthened by Steel Plates. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 9(1), 283-292.
- KS (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS F 2405, Korean Standard Institute, Korea (in Korean).
- Lee, W. J., Weber, B., Feltrin, G., Czaderski, C., Motavalli, M., and Leinenbach, C. (2013), Phase transformation behavior under uniaxial deformation of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 581, 1-7.
- Loreto, G., Leardini, L., Arboleda, D., and Nanni, A. (2013), Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), A4013003.
- Miller, D. A., and Lagoudas, D. C. (2001), Influence of cold work and heat treatment on the shape memory effect and plastic strain development of NiTi. *Materials Science and Engineering: A*, 308(1-2), 161-175.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1997), Shear and

- flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of structural engineering*, 123(7), 903-911.
- Park, J. Y. (2003), "Behavior characteristics and strengthening design of reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer plate," Ph.D. Thesis, Chungbuk University, Cheongju, Republic of Korea. 1-3.
- Sato, A., Chishima, E., Soma, K., and Mori, T. (1982), Shape memory effect in $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals. *Acta Metallurgica*, 30(6), 1177-1183.
- Sim, J., and Park, C. (2005), Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512.
- Triantafyllou, T. C., and Plevris, N. (1992), Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*, 25(4), 201-211.
- Yeon Y. (2017), Evaluation of Prestressing Effect for Fe-based Shape Memory Alloy, MS.c Thesis, Chungbuk National University

Received : 03/29/2018

Revised : 04/27/2018

Accepted : 04/30/2018

요 지 : 표면매립공법으로 매립한 철계-형상기억합금으로 보강한 보의 휨 거동을 장기 하중 재하실험을 통해 평가하였다. 철계-형상기억합금 길이대비 2%와 4%의 사전변형 및 형상기억효과 활성화에 의한 프리스트레스 하중 도입을 실험변수로 설정하였다. 1 tonf의 콘크리트 추를 보 중앙에 거치한 후 6개월간의 보 중앙부의 장기 처짐을 측정하였다. 실험결과, 철계-형상기억합금으로 보강한 보의 휨 강성이 증대되었으며, 사전변형이 증가할수록 보강재의 강성감소로 인한 처짐이 증가하는 것으로 나타났다. 프리스트레스 하중 도입에 따른 처짐을 비교했을 때, 프리스트레스 하중을 도입하지 않은 실험체에 비해, 프리스트레스 하중을 도입한 실험체는 약 30%의 처짐 감소 효과를 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철계-형상기억합금, 표면매립공법, 장기거동, 형상기억효과, 사전변형, 처짐
