

외부구속자켓의 구속비와 강도비에 따른 콘크리트 부착거동의 특성

최은수* · 정춘성**

Choi, Eunsoo*, Jung, Chunsung**

Characteristics of Bond Behavior According to Confinement and Stiffness Ratios of External Confining Jackets

ABSTRACT

This study analyzes the characteristics of bond behavior of concrete, which is confined by external jackets such as shape memory alloy (SMA) and steel, according to confinement and stiffness ratios of the external jackets. For this purpose, SMA wires with 1.0 mm diameter and steel plates with 1.0 and 1.5 thickness are used to induce difference on confinement and stiffness ratios and, then, bond strength and behavior are analyzed considering the two factors. When external jackets are used for the concrete cylinders, bond strengths of specimens increase and their bond failures are transferred from splitting failure to pull-out failure and, thus, the external jackets show confining effect. Bond strength of concrete increase with increasing confinement and stiffness ratios of the external jackets. However, maximal circumferential strains decrease linearly with increasing the two values.

Key words : Bond strength, Confinement ratio, Stiffness ratio, Bond failure, Circumferential strain

초 록

이 연구에서는 형상기억합금과 강재로 구속된 콘크리트의 부착응력을 외부자켓의 구속비 및 강도비를 이용하여 분석하였다. 이를 위해서 직경 1.0 mm 형상기억합금 와이어와 두께 1.0 mm와 1.5 mm 강판을 사용하여, 구속비 및 강도비의 차이를 유발하여 각 변수의 차이에 따른 부착강도 및 부착거동을 분석하였다. 외부자켓 구속에 의해서 콘크리트의 부착강도는 증가하였으며, 파괴형태도 쪼갬파괴에서 뽑힘파괴로 전환되어 구속효과가 있음을 알 수 있었다. 콘크리트 부착강도는 구속비와 강도비가 증가함에 따라 증가하는 현상을 보이지만, 특정 시점부터는 부착강도가 거의 증가하지 않고 일정한 값을 나타내는 결과를 보였다. 그러나 강도비의 증가에 따라 발생하는 원주방향 최대 변형율은 거의 선형적으로 감소하는 결과를 보였다.

검색어 : 부착강도, 구속비, 강도비, 부착파괴, 원주 변형율

1. 서론

보강철근과 콘크리트의 부착은 지진의 공격에 노출되는 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 기둥의 중요한 요소 중의 하나이다. 부착거동 또는 부착파괴의 형태에 따라 RC 기둥의 휨강도 및 연성거동에 큰 영향을 미치기 때문이다. 특히, RC 기둥 하단부, 즉 기초와의 연결부에서 철근의 겹침이음(lap-splice)이 있는 경우 겹침부분의 부착강도가 충분하지 않아 부착파괴가 쪼갬파괴(splitting failure)를 나타내며, 이러한 경우 RC 기둥의 연성도가 충분하지 않아 지진에 의해서 구조물이 심각한 손상 또는 붕괴에 이를 수 있다(Choi et al., 2012; Choi et al., 2013). 보강철근과 콘크리트의 부착에서 쪼갬파괴가 발생하는 것은 콘크리트에 의해서 제공되는

* 정회원 · 교신저자 · 홍익대학교, 토목공학과, 부교수 (Corresponding Author · Hongik University · eunsochoi@hongik.ac.kr)

** 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (civiljcs@gmail.com)

Received October 21, 2013/ revised October 31, 2013/ accepted November 11, 2013

구속압력(confining pressure)이 작기 때문인데, 이를 크게 하기 위해서는 콘크리트 두께를 증가시키거나 외부자켓(external jacket)을 이용하여 추가적인 구속압력을 제공해야 한다(Lundgren, 2000). 이미 시공된 RC 기둥의 콘크리트 두께를 증가시키는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 구속압력을 증가시키기 위해서 주로 외부자켓을 사용한다. RC 기둥의 외부자켓은 여러 가지 기능을 하지만, 부착강도를 증가시켜 쪼갬파괴를 뽑힘파괴(pull-out failure)로 전환하게 하여 철근 겹침부에서 철근의 발생응력을 증가시키며, 기둥 전체의 휨강도를 증가시키는 역할을 한다.

콘크리트 및 RC 기둥의 외부자켓은 주로 강과 FRP (Fiber Reinforced Polymer)를 이용하여 왔다(Pantelides et al., 2004; Pantelides et al., 2007; Priestley et al., 1996). 강자켓은 분리된 강관을 용접하여 기둥 주변에 설치하고 강관과 콘크리트 표면의 틈을 그라우팅 채움으로 자켓을 완성하는 기법을 사용하였다. 그라우팅은 현장에서 수행하기 어려운 작업이며, 최근에는 그라우팅이 필요 없는 강자켓 기법이 개발되어 성능이 실험적으로 검증되었다(Choi et al., 2006). 그라우팅이 필요 없는 강자켓 기법을 이용하여 콘크리트 부착 실험이 수행되었으며, 새로운 강자켓 기법이 부착강도를 증진시키는 것을 실험적으로 증명하였다. 또한, 최근 스마트 재료로 부착되고 있는 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)을 이용한 콘크리트 외부자켓 기법을 개발하였다(Choi et al., 2010; Andrawes et al., 2010). 형상기억합금의 형상기억효과(shape memory effect)를 이용하여 SMA 와이어 또는 케이블로 콘크리트를 구속하는 기법은 그라우팅 또는 접착제가 필요 없으며, SMA에 발생하는 회복응력(recovery stress)에 의한 와이어 조임으로 와이어를 콘크리트 표면에 부착시킨다. SMA 와이어를 이용하여 콘크리트를 구속하고, 부착강도의 증진 및 부착거동에 대한 실험 및 분석이 수행되어, 부착강도 증진효과를 증명하였다(Choi et al., 2011).

이 연구에서는 강과 형상기억합금에 의해 구속된 콘크리트의 부착거동 및 부착강도를 구속 재료의 특성에 따라 설명하고, 외부자켓의 구속비(confinement ratio) 및 강도비(stiffness ratio)가 콘크리트의 부착거동 및 부착강도와의 상관성을 분석하고자 하며, 기존의 연구결과를 활용하여 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 시편

2.1 재료 특성

이 연구에서는 외부자켓으로 강과 형상기억합금(SMA)을 사용하였다. 두 가지 재료를 사용한 이유는 재료의 탄성계수가 상이하므로 분석하고자 하는 구속비 및 강도비를 더 다양하게 확보할 수 있기 때문이다. 이 연구에서 사용한 SMA는 Ni_{47.4}Ti_{37.86}Nb_{14.69} (wt.%)이며, 일반적으로 사용되는 이원합금인 NiTi에 Nb요소를

첨가한 삼원합금이다. NiTiNb가 NiTi에 비해 좋은 점은 변태 온도를 크게 할 수 있다는 점이다(Park et al., 2011). 이는 외부환경에 노출되는 구조물에 대한 SMA의 적용에서 매우 중요한 요소이다. 이 연구에서는 직경 1.0 mm의 와이어를 사용했으며, 직경 1.07 mm 와이어를 열간인발로 제작한 후, 냉간인발로 1.0 mm 와이어로 제작하였다. 이 과정에서 12.7%의 면적감소가 발생하였으며, 길이방향으로 약 4.7%의 변형율이 도입된 것이 선행연구의 실험을 통해서 밝혀졌다(Choi et al., 2011). NiTiNb SMA 와이어에 기변형율(prestrain)을 도입하는 이유는 마텐사이트 상태가 시작되는 온도 M_s와 오스테나이트가 시작되는 온도 A_s의 차이를 크게 하기 위해서다. Table 1에는 변형을 도입 전후 SMA의 변태온도가 나타나 있다. 두 온도차이 A_s-M_s를 온도이력(temperature hysteresis)이라 하며, 기변형 도입에 의해서 온도이력이 24.2℃에서 122.5℃로 증가하였다. 특히, NiTiNb SMA가 변형을 도입에 의해서 A_s 온도가 -9.5℃에서 104.9℃로 증가한 것이 매우 중요하다. 형상기억효과를 통해서 회복응력을 얻기 위해서는 SMA에 기변형을 도입하고 구속상태에서 A_s 이상의 온도로 가열하여 변태를 유발해야 한다. 즉, SMA는 변형상태에 있어야 형상기억효과를 얻을 수 있다. 그런데 A_s의 온도가 -9.5℃라면 변형을 도입한 후 상온에 노출되면 상온이 대부분 A_s 온도 보다 높기 때문에 보관 중에 변형을 회복하여 형상기억효과를 기대할 수 없다. 이러한 경우는 냉장 보관해야 하며, 또한 설치 중에도 온도가 상승하는 것을 방지해야

Table 1. Variation of Temperature Hysteresis of Prestrained NiTiNb SMA

Prestrain (%)	M _s (°C)	A _s (°C)	A _s -M _s (°C)
Non	-33.7	-9.5	24.2
4.7	-17.6	104.9	122.5

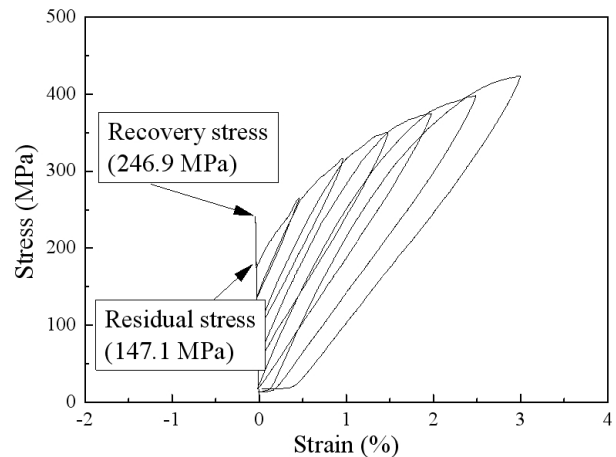


Fig. 1. Tensile Behavior of the NiTiNb SMA wire Under Residual Stress (Choi et al., 2011)

하는데 이는 현실적으로 불가능하다. 그러나 A_s 온도가 104.9°C 가 되면 변형된 SMA가 상온에서 변태 없이 보관이 가능하므로 보관에 주의할 필요가 없으며, 안정적으로 설치가 가능하다. 변태를 유발할 시점에서 가열하여 형상기억효과를 통해서 회복응력을 얻을 수 있다.

NiTiNb SMA 와이어를 구속상태에서 온도를 200°C 로 상승시켜 발생한 회복응력과 상온(20°C)으로 냉각시켰을 때 남아 있는 잔류응력(residual stress)이 246.9 MPa 및 147.1 MPa 로 측정되었다. 또한, 잔류응력 상태에서 인장거동이 Fig. 1에 나타나 있으며, 인장변형 후 하중을 제거하면 변형율은 회복하지만 잔류응력이 감소하는 현상이 관찰되었다. 강은 스테인레스 스틸을 이용하였으며, 항복강도가 280 MPa 로 측정되었으며, 탄성계수는 200 GPa 이다.

2.2 시 편

사용된 시편은 $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (DxL) 크기의 콘크리트 실린더의 중앙에 D22 이형철근이 매립된 형태로 제작되었다. 콘크리트의 압축강도는 30 MPa 로 측정되었다. 철근의 길이는 260 mm 이며, 200 mm 매립 길이 중, 양단의 25 mm 는 기름종이로 감아서 부착이 발생하지 않도록 하였다. 이는 양단에서 응력집중을 회피하기 위한 것이다. 콘크리트 양생이 끝난 후, 위에서 설명한 NiTiNb SMA 와이어를 이용해서 시편의 외부에 자켓을 설치하였다. SMA 와이어 보강의 경우 와이어 중심간 간격이 1.0 mm 로 와이어 사이에 틈이 없도록 설치하였다. SMA 와이어를 이용하여 콘크리트에 외부자켓하는 방법과 구속압력을 제공하는 방법은 선행연구에 자세히 설명되어 있다(Choi et al., 2010). 여기서 간단히

설명하면, 기변형 SMA 와이어를 콘크리트 표면에 감아서 고정된 후, 히팅자켓을 이용하여 SMA 와이어의 온도를 오스테나이트 변태가 완료되는 온도인 A_f 이상으로 가열하면, 변태에 의해서 회복응력이 발생하며 와이어를 콘크리트 표면에 강하게 부착시킨다.

강판의 경우에는, 1.0 mm 와 1.5 mm 두께의 강판을 이용하여 외부자켓을 설치하였다. 강판의 크기는 $324\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 이며, 넓이가 콘크리트 실린더의 원주길이 보다 10 mm 더 크게 제작된 것은 강판의 끝 부분을 겹쳐서 용접하기 위한 것이다. 강판을 콘크리트 표면에 부착하는 기법도 선행연구에 자세히 설명되어 있으며, 여기서는 간단히 설명하도록 하겠다(Lee et al., 2012). 절단된 강판을 직경이 콘크리트 실린더보다 약간 크게 굽혀서 원통형으로 만든 후, 강판을 실린더에 부착한 후, 클램프와 스틸밴드를 이용하여 강판에 압력을 가하여 콘크리트 표면에 밀착한 후, 용접을 통해서 자켓팅을 완성한다. Fig. 2에는 세 종류의 시편 모습이 나타나 있으며, Fig. 3에는 D22 철근의 모양과 리브의 치수가 나타나 있다. 네 종류의 시편을 각각 2개씩 제작하여 총 8개의 시편을 제작하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험방법

부착강도를 측정을 위해서 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 밀어내기(push-out) 실험을 수행하였다. 돌출된 철근위에 하중을 가하여 밀어내는 방식이다. 시편은 강프레임에 의해서 지지되어 있으며, 상판 중앙에는 25 mm 크기의 원형 구멍이 있다. 철근의 변위(slip) 및 콘크리트의 원주 변형율(circumferential strain)을 측정하기

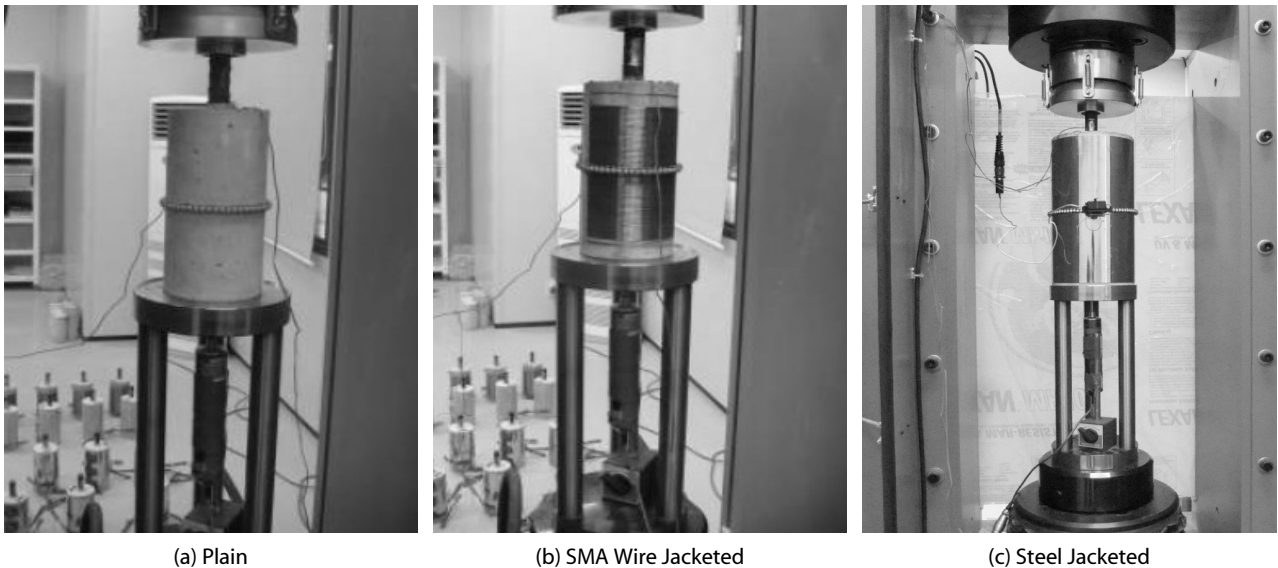


Fig. 2. Specimens and Test Set-Up

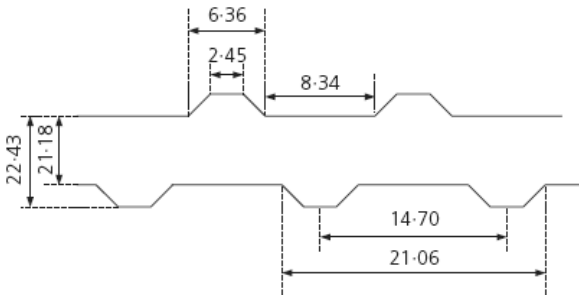


Fig. 3. Shape and Dimension of a D22 Deformed Steel Bar (unit : mm)

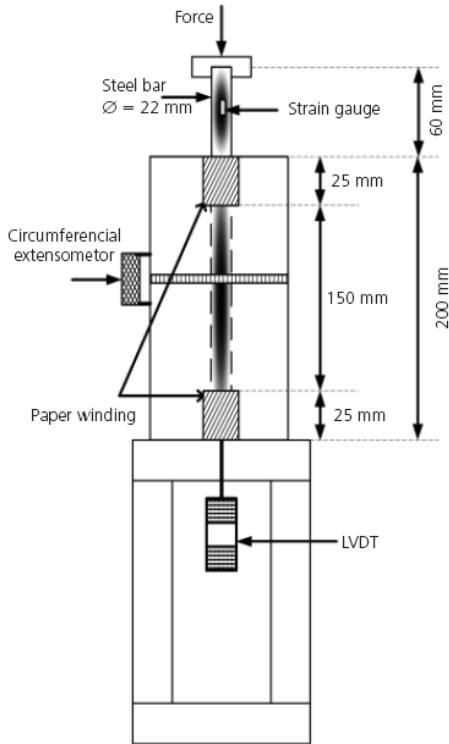


Fig. 4. Test Set-Up of Push-Out Tests

위해서 강프레임 내부에 변위변환계를 설치하고, 상판의 원형 구멍을 통해서 철근과 접촉하도록 했으며, 콘크리트 실린더의 중앙에 extensometer를 설치하여 원주 변형을 측정하였다. 원주 변형율은 측정된 변형을 실린더의 원주로 나누어 계산되었으며, 원주 변형율은 쪼개짐 변형률과 응력을 계산하는데 사용된다. 실험은 변위제어로 수행되었으며, 자켓이 없는 시편은 0.5 mm/min. 및 1.0 mm/min.으로 각각 1개씩 실험을 수행하였고, 자켓으로 구속된 시편은 1.0 mm/min.와 2.0 mm/min.으로 실험을 수행하였다. 철근의 변위가 22 mm 가 될 때까지 변위를 증가시켰으며, 이는 철근의 리브의 시작에서 다음 리브의 끝까지의 거리가 21.06 mm인 것에 바탕을 두고 리브가 완전히 빠져나올 때까지 실험을 수행한 것이다.

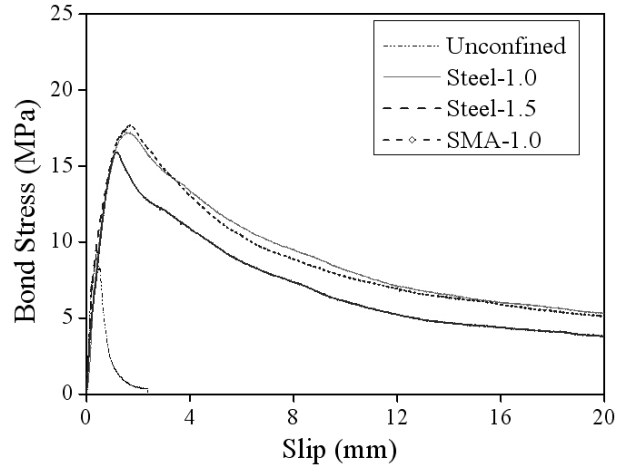


Fig. 5. Bond Stress-Slip Relationship

Table 2. Bond Strengths and Corresponding Slips for Specimens

Specimen	Unconfined		SMA-1.0		Steel-1.0		Steel-1.5	
Loading speed (mm/min.)	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Bond strength (MPa)	9.51	10.8	13.1	15.9	17.2	16.4	17.7	17.6
Slip (mm)	0.406	0.589	1.41	1.19	1.55	1.29	1.72	1.43

3.2 실험결과

실험결과는 구속비와 강도비에 따른 부착거동을 파악하기 위해서 철근에 발생하는 부착응력과 콘크리트에 발생하는 원주 변형율을 철근변위와 함께 분석하였다.

3.2.1 부착응력

철근의 부착응력(bond stress; τ_b)을 계산하기 위해서 매립된 철근 전 길이(L_b)에 걸쳐 동일한 부착응력이 발생하는 것으로 가정하였다. 따라서 여기서 제시하는 부착응력은 철근 길이에서 발생하는 평균 부착응력에 해당한다. 철근에 작용하는 힘(F)과 발생하는 부착응력 사이의 평형을 이용하면 다음과 같은 공식을 얻을 수 있다.

$$F = \tau_b \pi d_b L_b \quad (1)$$

여기서, d_b 는 철근의 지름으로 22.2 mm를 사용하였다. Eq. (1)를 이용하여 계산된 부착응력과 측정된 변위와의 곡선이 Fig. 5에 나타나 있으며, 부착강도와 이에 해당하는 변위가 Table 2에 정리되어 있다.

비구속 시편의 평균 부착강도(bond strength)는 10.2 MPa로

나타났으며, SMA-1.0 시편은 14.5 MPa로 나타났다. 강제 구속 시편의 경우 Steel-1.0과 Steel-1.5 시편의 평균 부착강도는 16.8 및 17.7 MPa로 나타났다. 각 시편에서 가력속도의 차이가 부착강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 구속 시편은 비구속 시편에 비해 부착강도가 월등히 증가하는 것을 볼 수 있다. SMA-1.0 시편은 비구속 시편에 비해 부착강도가 42.2% 증가하였으며, Steel-1.0과 Steel-1.5 시편은 각각 64.7 및 73.5% 증가하는 것으로 나타났다. Steel-1.5 시편은 Steel-1.0 시편에 비해 보강량을 50% 증가시켰지만, 부착강도의 증가효과는 5.4%에 불과했다.

부착강도에 상응하는 변위는 비구속 시편에서는 상대적으로 작지만, 구속 시편에서는 상당히 증가하는 것을 볼 수 있다. 비구속 시편은 쪼갬에 의해서 파괴가 되므로 콘크리트 인장균열이 파괴의 주요 원인이므로 작은 변위에서 부착강도가 발생한다. 그러나 구속 시편에서는 뽑힘에 의한 파괴가 발생하기 때문에 철근 리브사이 콘크리트의 전단파괴가 주요 원인이 되므로 부착강도 발현 변위가 증가하게 된다. 전체적으로 보면, 부착강도가 증가할수록 상응하는 변위가 증가하는 경향이 나타나고 있다.

3.2.2 원주 변형률

원주 변형률과 부착응력의 관계가 Fig. 6에 나타나 있으며, 부착강도에 상응하는 원주 변형률과 최대 원주 변형률이 Table

3에 정리되어 있다. Table 3에서 최대 원주 변형률에 상응하는 부착응력이 괄호안에 정리되어 있다. 비구속 시편은 부착강도에서 쪼갬균열(splitting cracking)이 발생하면서 부착응력이 감소하고, 균열이 열리면서 원주 변형률은 변위 증가에 따라 지속적으로 증가한다. 그러나 구속 시편의 경우, 부착강도에서 발생하는 원주 변형률은 대부분 최대 변형률에 비해 작다. 이것은 위에서 언급한 것과 같이 구속 시편은 뽑힘에 의해서 파괴가 발생하기 때문이다. 콘크리트에 전단파괴가 발생할 때 부착강도가 발생하며, 철근의 변위가 증가하면서 리브에 의해서 콘크리트의 원주 변형이 팽창하게 된 후, 리브가 완전히 통과하게 되면 다시 감소하게 되어, 최대 원주 변형률의 부착강도가 지난 위치에서 주로 발생한다.

Fig. 6의 곡선들을 살펴보면, 부착강도는 강도저하 현상이 발생한 후, 원주 변형이 급격히 증가하여 최대 변형률에 도달하기 전에 발생하는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 인장균열 변형률은 곡선변화 구간에 위치한다. 시편 SMA-1.0은 최대 원주 변형률이 부착강도에서 발생하는 원주 변형률의 두 배 이상으로 나타나고 있으며, 원주 변형률이 갑자기 증가하는 과정에서 부착강도가 일정하거나 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 SMA 와이어의 구속효과가 충분하지 않은 것을 보여주는 것으로, 기존의 연구에서 SMA-1.0 시편에는 눈으로 볼 수 있는 균열이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 것을 부분적인 뽑힘파괴(partial pull-out failure)라 부르며, 구속효과가 부족한 것을 의미한다. 그러나 Steel-1.0 시편에서는 부착강도 저하구간을 지나서도 부착응력이 증가하는 강도증가 현상을 보이고 있으며, 최대 원주 변형률과 부착강도의 원주 변형률의 차이는 SMA-1.0 시편에 비해서 현저히 적은 것을 Table 3를 통해서 알 수 있다.

이러한 강도증가 현상은 Steel-1.5 시편에서 더 확실하게 나타나고 있으며, 최대 원주 변형률과 부착강도 원주 변형률의 차이는 더욱 감소하고 있다. 따라서, Steel-1.0 및 1.5 시편들은 SMA-1.0 시편에 비해 구속효과가 우수함을 알 수 있으며, Steel-1.5 시편은 Steel-1.0 시편에 비해서도 구속효과가 우수함을 알 수 있다. 결론적으로, 구속효과가 더 좋은 경우 최대 원주 변형률이 감소하며, 인장균열 발생 구간을 지나서도 강도증가 현상이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

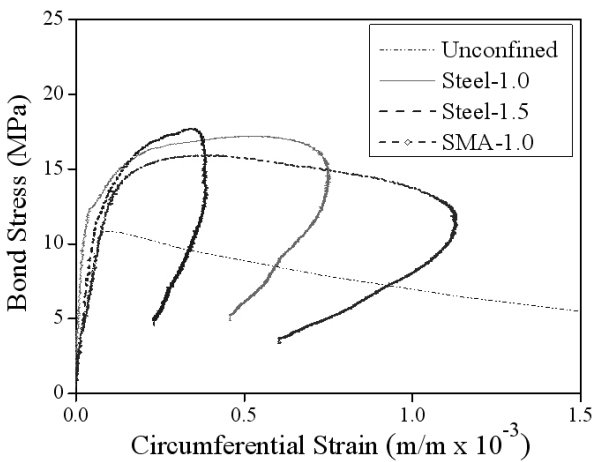


Fig. 6. Bond Stress-Circumferential Strain Relationship

Table 3. Circumferential Strains at Peak Bond Stress and Maximal Point

Specimen	Unconfined		SMA-1.0		Steel-1.0		Steel-1.5	
	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Loading speed (mm/min.)								
At peak (m/m x 10 ⁻³)	0.0764	0.102	0.634	0.423	0.491	0.334	0.357	0.274
Maximum (m/m x 10 ⁻³)	-	-	1.27 (10.3)	1.13 (11.6)	0.752 (13.8)	0.589 (13.5)	0.388 (15.7)	0.360 (15.8)

4. 구속비 및 강도비의 영향

구속비(confinement ratio, ρ_c)와 강도비(stiffness ratio, ρ_s)는 구속하는 외부재료의 성능 및 특성에 대한 콘크리트 재료의 특성을 비교하여 나타내는 무차원 수치로서 콘크리트 구속효과를 분석하는 데 주로 이용된다.

4.1 구속비의 영향

외부자켓에 의해 콘크리트에 작용하는 구속압력(f_l)을 비구속 콘크리트의 압축강도(f'_c)의 비로 나타낸 값을 구속비(ρ_c)라 하며 구속압력과 구속비는 다음과 같이 표현된다.

$$f_l = \frac{2f_j A_j}{sD} = \frac{2E_j \epsilon_j A_j}{sD} \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{f_l}{f'_c} \quad (3)$$

여기서, s 는 와이어 간격을 나타낸다. SMA 와이어 자켓의 경우 직경 1.0 mm 와이어를 틈 없이 감았기 때문에 중심간격이

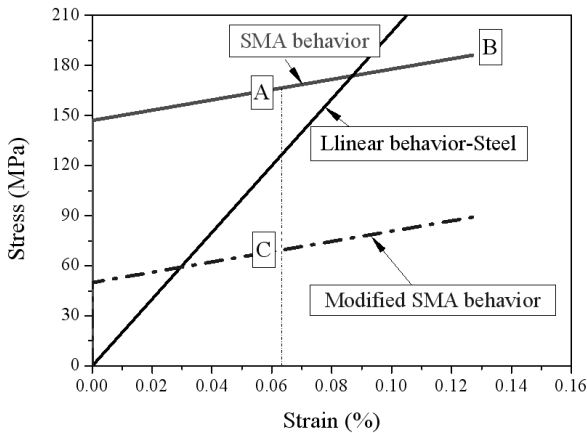


Fig. 7. Stress-Strain Behaviors of SMA Wire and Steel Jackets

1.0 mm이며, 강판자켓은 연속이므로 1.0 mm를 사용하면 된다. D 는 콘크리트 실린더의 직경을 나타낸다. f_j 와 A_j 는 자켓의 응력과 단면적을 나타낸다. 구속된 콘크리트의 압축실험에서 f_j 는 항복강도 또는 극한강도로 사용하며, 강재의 경우 압축강도에서 강이 항복하기 때문이다. 그러나 FRP (Fiber Reinforced Polymer)를 구속재료로 사용하는 경우 극한강도에 이르기 전에 콘크리트가 파괴되는 것으로 관찰되고 있다. 이러한 경우 극한강도 대신에 실제로 발생한 응력을 사용한다. 이 연구에서도 SMA 와이어 및 강판에 발생한 응력이 항복강도 또는 극한강도 보다 작기 때문에 실제로 자켓에 발생한 응력을 사용해야 한다. Eq. (2)의 두 번째 공식에서 재료의 탄성계수(E_j)와 부착강도에서 발생하는 자켓의 변형률(ϵ_j)을 이용해서 구속압력을 구할 수 있다. SMA 와이어의 거동은 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 잔류응력 하에서 추가로 인장력이 발생하므로 자켓의 응력을 계산할 때 잔류응력을 포함해서 해야 한다. Fig. 7에는 SMA-1.0 첫 번째 시편의 거동과 강판의 거동이 나타나 있으며, 'A'점은 부착강도에 해당하는 변형률이며, 'B'점은 최대 변형률을 나타낸다. 그림에서 SMA 와이어의 탄성계수는 30.8 GPa로 추정되었으며, 'A'점의 응력은 166.6 MPa로 계산되었다. 부착강도에서 강자켓의 변형률은 항복 변형률 보다 작기 때문에 Eq. (2)를 적용하여 발생 응력을 계산할 수 있다. Table 4에는 각 시편의 구속압력과 구속비가 계산되어 있다.

Fig. 8에는 Table 4에서 구한 구속비(ρ_c)와 부착강도(τ_b)를 그래프로 나타내었다. 강자켓의 경우 구속비가 증가하면 부착강도가 증가하다가, 일정 구속비 이상에서는 부착강도가 증가하지 않고 일정한 것으로 관찰되었다. 그러나 SMA 자켓의 경우, 구속비가 강자켓에 비해 크게 나타났으나 부착강도는 오히려 적게 발휘되고 있다. 이러한 오류는 SMA 와이어의 잔류응력이 과대평가되었기 때문인 것으로 판단된다. SMA 와이어의 잔류응력은 실험에 의해서 완전히 구속조건에서 측정되지만, 콘크리트 시편에 감는 것은 수작업으로 진행되었기 때문에, 와이어를 콘크리트 표면에 완전하게 밀착시키기 어렵다. 이러한 경우 온도를 상승시켜 SMA 와이어가 변태할 때 완전 구속상태가 아니므로 변형회복이 발생하며 발생하는 회복응력과 냉각 후 남아 있는 잔류응력은 실험에서

Table 4. Confining Pressure of External Jackets for Specimens

Specimen	SMA-1.0		Steel-1.0		Steel-1.5	
	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Loading speed (mm/min.)	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
ϵ_j (m/m x 10 ⁻³)	0.634	0.423	0.491	0.334	0.357	0.274
f_j (MPa)	166.9	160.1	98.2	66.8	71.4	54.8
A_j (mm ²)	0.785	0.785	1.0	1.0	1.5	1.5
f_l (MPa)	2.6	2.5	2.0	1.3	2.1	1.6
ρ_c	0.087	0.084	0.065	0.045	0.071	0.055
ρ_s	0.157	0.228	0.154	0.154	0.231	0.231

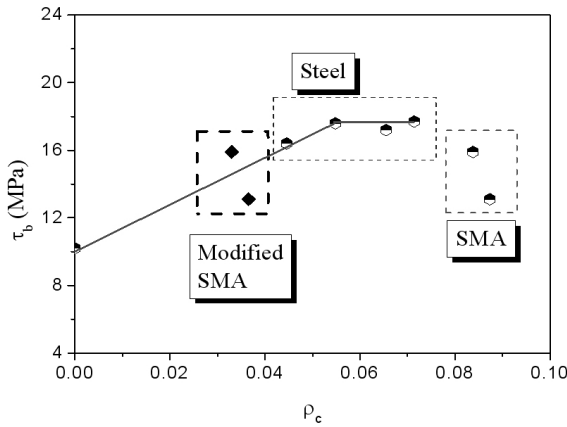


Fig. 8. Bond Stress as a Function of Confinement Ratio

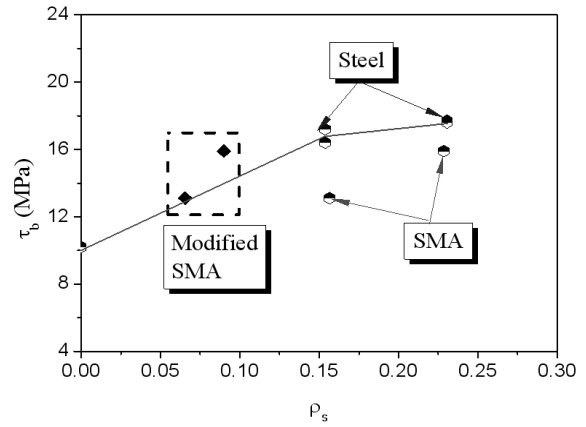


Fig. 9. Bond Stress as a Function of Stiffness Ratio

측정된 응력에 비해서 작게 된다. SMA 시편의 부착강도를 이용하여 역으로 SMA 와이어 자켓의 구속비를 강자켓 및 비구속 시편의 선형관계에 맞도록 추정하여 수정한 값이 Fig. 8에 ‘Modified SMA’로 나타나 있으며, 구속비와 부착강도의 경향에 일치하고 있다. 이 경우, 잔류응력은 약 50 MPa이며, 수정된 SMA 와이어 인장거동은 Fig. 7에 ‘Modified SMA behavior’로 나타나 있다. 부착강도에서 발생하는 SMA 와이어 응력은 ‘A’에서 ‘C’로 이동하게 되며, ‘C’점의 응력은 89.1 MPa 이다. 수정된 SMA 와이어의 응력을 사용하면 구속비에 따른 부착강도의 변화를 보다 명확하게 알 수 있다. SMA 와이어 자켓의 수정된 구속비는 0.033과 0.037인데 이 값은 충분한 구속을 제공하지 못하는 것이다. 이는 원주 변형율의 과다한 팽창과 육안으로 볼 수 있는 균열 발생에서 판단이 가능하다. 강자켓의 최소 구속비는 0.045이며, 이 때는 원주 변형율의 과다 팽창이 제한되었으며, 육안검측 가능 균열 발생이 없었으므로, 충분한 구속을 제공하고 있는 것으로 판단된다.

4.2 강도비의 영향

구속비를 이용하여 부착강도를 평가하는 방법은 구속압력을 알아야 하기 때문에 실험이 진행되지 않은 상태에서 추정이 불가능하다. 그러나 강도비는 순수하게 재료의 특성에 따라서 결정할 수 있기 때문에 부착강도를 추정할 때 구속비 보다 사용이 용이하다. Eq. (2)를 아래와 같이 다시 쓸 수 있으며, 변형율을 제외한 나머지 부분은 원주방향 구속압력에 대한 탄성계수와 같은 개념으로 사용될 수 있다. 강도비는 이 탄성계수를 콘크리트 탄성계수(E_c)로 나눈 비를 나타내며 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$f_l = \frac{2E_j A_j}{sD} \epsilon_j \quad (4)$$

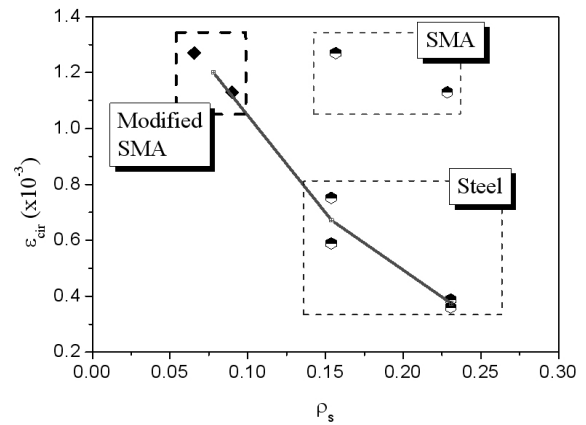


Fig. 10. Maximal Circumferential Strain vs. Stiffness Ratio

$$\rho_s = \frac{2E_j A_j}{sD} / E_c \quad (5)$$

여기서 콘크리트 탄성계수는 $4750 \sqrt{f'_{cw}}$ 를 사용하였으며, 이 연구에서는 26.0 GPa로 추정되었다(ACI 318M-02, 2002). Table 4에 각 시편의 추정된 강도비가 나타나 있으며, SMA 와이어는 부착강도 발현 시까지 거동이 이선형거동이므로 탄성계수를 유효 탄성계수를 이용하였다. 즉, ‘A’점의 응력을 변형율로 나눈 값을 탄성계수로 사용하였다. 또한, Table 3에 나타난 SMA 와이어 자켓의 강도비는 응력 수정 전의 값이며, 수정한 후의 강도비는 각각 0.66과 0.90이다. 강도비에 따른 부착강도가 Fig. 9에 나타나 있으며, SMA 와이어 응력의 수정 전후의 값을 이용하여 나타내었다. 강도비에 대해서도 구속강도는 일정 값까지는 증가하지만, 그 이상에서는 증가가 거의 이루어지지 않고 있으며, SMA 와이어의 발생응력을 수정한 경우 추세선과 거의 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. Figs. 8 and 9를 비교하면, 구속비를 이용한 것보다 강도비를 이용한 경우의 추세가 보다 더 명확함을 알 수 있다.

외부자켓의 강성은 콘크리트의 팽창에 미치는 영향이 크며, 최대 원주 변형율을 강도비와 Fig. 10에 나타내었다. 최대 원주 변형율은 강도비가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하고 있으며, 강자켓의 두께가 1.0 mm에서 1.5 mm로 증가할 때 부착강도의 증가는 미미하지만, 최대 원주 변형율은 거의 1/2로 감소하였다. 따라서 강도비의 증가는 초기에는 부착강도의 증가를 유발하지만, 특정한 한계를 지나면 증가가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그러나 강도비의 증가는 현저하게 최대 원주 변형율의 감소를 유발하며, 이러한 원주방향으로 콘크리트의 팽창을 강하게 구속하는 것이 부착강도 증가에 영향을 크게 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 구속시편의 부착강도가 이형철근 마다사이의 콘크리트 전단파괴에 의해서 결정되기 때문이다. 따라서 콘크리트의 균열과 미끄러짐에 의해서 파괴가 발생하는 것을 방지하고 콘크리트의 전단파괴를 발생시킬 수 있는 최소한의 외부구속이 최적의 외부구속이 될 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 형상기억합금과 강재로 구속된 콘크리트의 부착강도를 구속비와 강도비에 대해서 분석을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도는 일반적으로 구속비와 강도비가 증가할수록 증가하는 것으로 관찰되고 있지만, 부착강도는 각 변수에 대해서 증가하는 것에 한계가 있는 것을 관찰할 수 있었다. 구속비를 이용한 부착강도의 추정은 실험을 통해서 측정된 구속압력을 사용해야 하며, 실험에서 얻어지는 구속압력과 이로부터 계산되는 구속비는 측정의 오차 등이 반영되어 상당한 편차를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 그러나 강도비는 재료의 특성에 의해서 결정되는 것으로 실험결과와 상관없이 얻을 수 있는 값으로 부착강도와의 관계에서 편차가 상대적으로 적게 발생했다.

형상기억합금 와이어 자켓과 같이 강도비가 작은 경우 원주방향의 팽창이 크게 발생했으며, 부착강도 이후 원주방향 변형율이 증가하면서 부착응력이 감소하는 현상이 관찰되었다. 그러나 강자켓과 같이 강도비가 상대적으로 큰 경우, 원주방향 변형율이 증가하면서 부착응력이 증가하는 현상을 보였으며, 강도비가 증가할수록 이러한 현상은 증가하였다. 강도비와 원주방향 최대 변형율은 거의 선형적으로 감소하는 관계를 보여, 강도비의 증가가 콘크리트의 원주방향 팽창을 억제하는데 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 이러한 팽창억제가 부착강도의 증가에 크게 기여하는 것은 아닌 것으로 관찰되었다.

이 연구에서 제시한 강도비에 따른 부착강도의 특성 분석은 특정한 형상을 가진 철근콘크리트 구조에서 뿔뿔파괴가 발생하는 부착강도를 얻기 위한 최적의 구속량을 얻는데 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

References

- ACI Committee 318. (2002). Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-02), Michigan, American Concrete Institute.
- Andrawes, B., Shin, M. and Wierschem, N. (2010). "Active confining of reinforced concrete bridge columns using shape memory alloys." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 81-89.
- Choi, E., Chung, Y. S., Choi, D. H. and DesRoches, R. (2012). "Seismic protection of lap-spliced RC columns using SMA wire jackets." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64, No. 3, pp. 239-252.
- Choi, E., Chung, Y. S., Choi, J. H., Kim, H. T. and Lee, H. (2010). "The confining effectiveness of NiTiNb and NiTi SMA wire jackets for concrete." *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, 035024.
- Choi, E., Chung, Y. S., Kim, Y. W. and Kim, J. W. (2011). "Monotonic and cyclic bond behavior of confined concrete using NiTiNb SMA wires." *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, 075016.
- Choi, E., Chung, Y. S., Park, K. and Jeon, J. S. (2013). "Effect of steel wrapping jackets on the bond strength of concrete and the lateral performance of circular RC columns." *Engineering Structures*, Vol. 48, pp. 43-54.
- Choi, E., Park, J. Nam, T. H. and Yoon, S. J. (2006). "A new steel jacketing method for RC columns." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, pp. 787-796.
- Lee, H., Choi, E., Cho, S. C. and Park, T. (2012). "Bond and splitting behavior of reinforced concrete confined by steel jackets without grouting." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64, No. 3, pp. 225-237.
- Lundgren, K. (2000). "Pull-out tests of steel-encased specimens subjected to reversed cyclic loading." *Material and Structures*, Vol. 33, pp. 450-456.
- Pantelides, C. P., Alameddine, F., Sardo, T. and Imbsen, R. (2004). "Seismic retrofit of state stress bridge on Interstate 80." *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 333-342.
- Pantelides, C. P., Duffin, J. B. and Reaveley, L. D. (2007). "Seismic strengthening of reinforced concrete multicolumn bridge piers." *Earthquake Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 635-664.
- Park, J., Choi, E., Park, K. and Kim, H. T. (2011). "Comparison the cyclic behavior of concrete cylinders confined by shape memory alloy wire or steel jackets." *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, 094008.
- Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*, Wiley, New York, NY, US.