

FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 거동 평가방법에 관한 연구

최소영¹, 최명성², 김일순¹, 양은익^{3*}

A Study on the Evaluation Method to Flexural-bonding Behavior of FRP-Rebar Concrete Member

So-Yoeng Choi¹, Myoung-Sung Choi², Il-Sun Kim¹, Eun-Ik Yang^{3*}

Abstract: FRP has been proposed to replace the steel as a reinforcement in the concrete structures for addressing the corrosion issue. However, FRP-Rebar does not behave in the same manner as steel because the properties of FRP are different. For example, FRP-Rebar has a high tensile strength, low stiffness, and linear elastic behavior which results in a difference bonding mechanism to transfer the load between the reinforcement and the surrounding concrete. Therefore, bonding behavior between FRP-Rebar and concrete has to be investigated using the bonding test. So, Pull-out test has been used to estimate bond behavior because it is simple. However, the results of pull-out test have a difference with flexural-bonding behavior of FRP-Rebar concrete member. So, it is needed to evaluate the real flexural-bonding behavior. In this study, the evaluation method to flexural-bonding behavior of FRP-Rebar concrete member was reviewed and compared. It was found that the most accurate evaluation method for the flexural-bonding behavior of FRP-Rebar concrete member was splice beam test, however, the size and length of specimen have to increase than other test method and the design and analysis of splice beam is complex. Meanwhile, characteristics of concrete could be reflected by using arched beam test, unlike hinged beam test which is based on the ignored change of moment arm length in equilibrium equation. However, the possibility of shear failure exists before the flexural-bonding failure occur.

Keywords: Flexural-bonding behavior, FRP reinforced concrete member, Lap splice, Bond strength

1. 서 론

현재 사용되는 콘크리트 구조물은 콘크리트와 철근의 조합으로 구성되며, 철근-콘크리트 부재에서 콘크리트는 압축을, 철근은 인장 및 전단 등에 대응하게 된다. 그러나 철근의 부식과 같이 치명적인 결함이 발생할 경우, 콘크리트 구조물의 급격한 성능 저하를 수반하기 때문에 철근의 부식을 방지할 수 있는 구조물의 설계가 필요하다. 따라서 많은 연구자들은 철근 부식 저감을 위한 콘크리트의 내구성 향상에 관한 연구(Yoon et al., 2020) 혹은 부식으로부터 안전한 철근 대체재 개발을 위한 연구 및 기술 개발을 추진해왔다(Oh et al., 2016). 그 결과, 부식으로부터 완전히 차단된 신소재인 FRP가 철근을 대체할 수 있도록 연구와 기술 개발이 진행되고 있다(Hwang et al., 2017; Nanni et al., 2001; Alkhrdaji et al., 1999; Nanni et al.,

1997). 미국, 캐나다 등에 의해 FRP를 철근 대체재로 사용할 수 있도록 FRP 관련 구조 설계기준이 제정되었으며(ACI, 2006; CSA, 2002; JSCE, 1997), 우리나라 역시, 2000년대 초반부터 한국형 FRP의 개발이 진행되어 FRP 보강근 콘크리트 구조설계 지침을 제정하기에 이르렀다(KCI, 2019). 특히, FRP는 염해에 대한 완전한 저항성을 확보하고 철근에 비해 높은 인장강도를 갖기 때문에 구조물의 경량화가 가능하지만, 낮은 탄성계수와 높은 변형률로 인한 선형 거동을 보이지 않기 때문에 콘크리트의 인장보강근으로 적용될 경우, 콘크리트 역시 유사 취성 거동으로 유도할 수 있는 단점이 보고되고 있다(Choi, 2009).

한편, 현재 제정된 FRP 콘크리트 구조 설계 지침은 FRP와 콘크리트의 완전 부착을 전제로 하고 있으나, 실제 구조물에서의 FRP와 콘크리트의 부착은 콘크리트 구조물에 작용하는 외력의 형태에 영향을 받으므로 설계기준에서 가정하는 전제 조건과는 상이하다. 특히, 대부분의 선행 연구는 FRP의 부착 거동을 FRP와 콘크리트의 완전 부착을 가정하고 각각 부담하는 하중의 형태를 제한하기 때문에 직접 인발 실험을 통해 부착 특성을 평가하고 있다. 이 실험 방법은 콘크리트와 FRP 보강근의 부착 거동을 비교적 쉽게 평가할 수 있으며, 실험시 소요되는 비용이 저렴하고 FRP 종류별 특성 비교가 가능하기 때문이다. 그러나 콘크리트에는 압축응력이, 보강근에는 인

¹정희원, 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수, 공학박사

²정희원, 단국대학교, 토목환경공학과 조교수

³정희원, 강릉원주대학교, 토목공학과 정교수, 교신저자

*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Department of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University, Gangneung, 25457, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

장응력만 발생함을 전제로 하므로 실제 구조물에서 발생하는 반력에 의한 횡구속력이 정착 구간에 직접 작용하는 것을 고려하지 못한다(Oragun et al., 1997; Chun and Choi, 2010). 따라서 실제 구조물에서의 부착 거동을 모사할 수 없으므로, 현재 ACI 318과 ACI 440에서는 직접 인발 실험을 통해 얻은 부착 강도를 구조물 설계에 반영하지 않고 있다(ACI, 2003; ACI, 2008).

한편, 힘을 받는 콘크리트 부재의 휨-부착 특성을 평가할 수 있는 실험 방법은 종류가 다양하고 실험 규격이 없더라도 FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 특성을 간접적으로 평가할 수 있는 실험방법이 존재되어 있다. 따라서 사용하는 FRP의 특성을 고려한 FRP-콘크리트 부재의 휨-부착 거동을 평가할 수 있는 연구가 진행될 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 FRP를 보강근으로 적용한 콘크리트 부재의 휨-부착 거동을 평가할 수 있는 다양한 실험 방법과 특징을 검토하여 연구자의 사용 목적에 적합한 FRP-콘크리트 부재의 휨-부착 평가법을 제안하고자 한다.

2. FRP-콘크리트의 부착 메커니즘

FRP를 보강근으로 적용한 콘크리트 구조물의 설계시 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도가 충분히 발현됨을 기본 전제로 하여(Choi et al., 2011), FRP의 부착 강도를 결정하고 설계에 반영하도록 제시하고 있다. 그러나 FRP는 철근과 달리 인장강도와 제조사에 따른 표면의 형태(모래분사형, 나선형 등)가 다르다. 따라서 FRP의 부착 거동은 재료 자체의 화학적 조성에 의한 점착, 표면 형상에 따른 마찰 및 기계적 상호작용에 영향을 받는다. 뿐만아니라, 콘크리트에 발생하는 크리프와 건조수축, 온도 변화에 의한 수분 확산으로 인한 FRP의 팽창도 휨-부착에 영향을 줄 수 있다(Jung et al., 2011).

Fig. 1에는 FRP와 콘크리트의 부착 응력 메커니즘을 나타내었다. 콘크리트와 FRP 사이에 응력 전달은 Fig. 1(a)과 같이 FRP와 콘크리트의 화학적 접착력에 의존하나 점차 외부하중

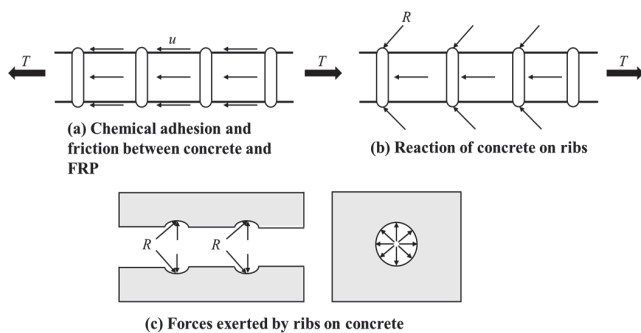


Fig. 1 Bond force transfer mechanisms (Tang and Cheng, 2020)

이 증가할수록 Fig. 1(b)에 나타난 표면 사이의 마찰력과 Fig. 1(c)에 나타난 기계적 특성(지압)에 의존하게 된다(Tang and Cheng, 2020; ACI, 2003; Lutz and Gergely, 1967).

한편, 인장을 받는 콘크리트의 부착 거동을 표현하기 위하여 Fig. 2에는 보강근을 콘크리트에 매립하여 양방향으로 직접 인장력을 가할 때 발생하는 응력의 흐름 상태를 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 외력 증가에 따라 발생한 균열 간격 사이에서의 보강근 응력은 최소가 되지만 균열 단면에서는 최대가 된다. 이와 반대로 콘크리트의 응력은 균열 단면에서는 0, 균열 사이에서는 최대가 되며, 부착 응력은 균열 단면과 균열 사이의 중앙점에서는 0이 되지만, 균열 사이에서는 응력 곡선의 기울기(df_s/dx)로 표현할 수 있다(Lee, 2011).

이와 다르게, Fig. 3에 나타난 콘크리트 부재는 휨모멘트에 의한 하단부의 휨인장 균열이 발생하며, 균열 단면에서 콘크리트의 인장력이 없으므로 보강근의 응력은 최대가 되며, 균열 사이에서는 보강근의 응력이 감소하게 된다. 그러므로 부

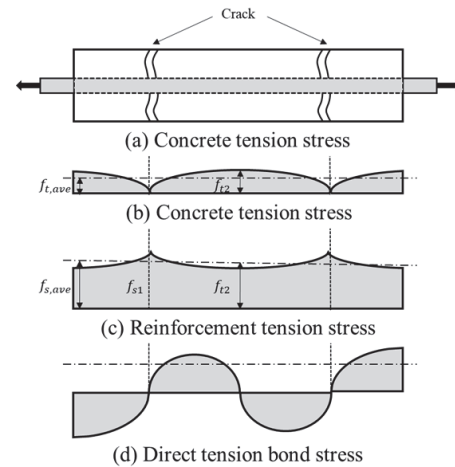


Fig. 2 Distribution of bond stress by direct tension (Lee, 2011)

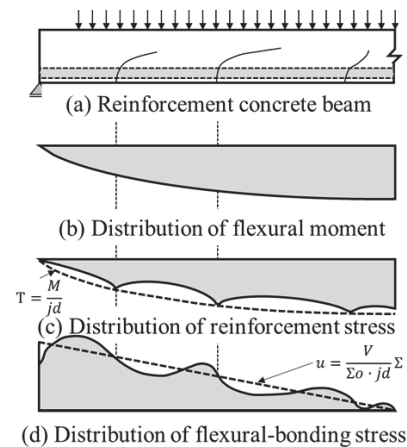


Fig. 3 Distribution of bond stress by flexural tension (Lee, 2011)

착 응력은 휨모멘트(를 유발하는 전단력)가 증가함에 따라 부재의 중심으로 갈수록 증가하므로 보강근 응력에 따라 변화하는 것을 알 수 있다(Lee, 2011).

한편, FRP를 보강근으로 사용한 경우, 부착 파괴의 형태는 뿔힘 파괴, 활렬파괴, FRP 보강근의 수평 전단파괴 혹은 층간 분리 및 보강근 표면변형 압착파괴, 콘크리트 및 보강근 표면 변형에 의한 혼합파괴의 크게 다섯 가지 형태의 파괴가 발생할 수 있다(Oh et al., 2014). 또한, 부착 파괴는 하중의 형태(단조 및 반복)에 따라 역시 영향을 받으므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

3. FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨 부착 거동 평가법

직접 인장에 의한 부착과 휨-부착에 의한 보강근의 부착 메커니즘이 상이하기 때문에 휨을 받는 부재는 휨-부착을 평가할 필요가 있다. 그러므로 휨-부착 평가방법을 비교, 검토하였으며 시험 규격에 따른 시험체의 형상, 크기, 사용 재료의 강도와 보강재의 직경 범위에 관한 내용은 Table 1에 나타내었다.

3.1 부착시험 규격에 따른 콘크리트 부재의 휨-부착 거동 평가법

3.1.1 보-단부 시험체 실험 (Beam-end Specimen Test)

보-단부 시험체는 직육면체의 콘크리트 블록 하단에 보강근

을 함께 매립하여 제작하며, 시험체의 크기는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 식 (1), (2), (3)을 이용하여 결정한다(ASTM, 2015).

$$\text{폭: } d_b + 200 \pm 13 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\text{높이: } d_b + C_b + l_e \pm 60 \text{ mm} \quad (2)$$

$$\text{길이: } 600 \pm 25 \text{ mm} \quad (3)$$

이때 단위는 mm 이고 d_b 는 실험에 사용된 보강근의 공칭 직경을, C_b 는 콘크리트의 피복 두께, l_e 는 보강근의 매립 길이

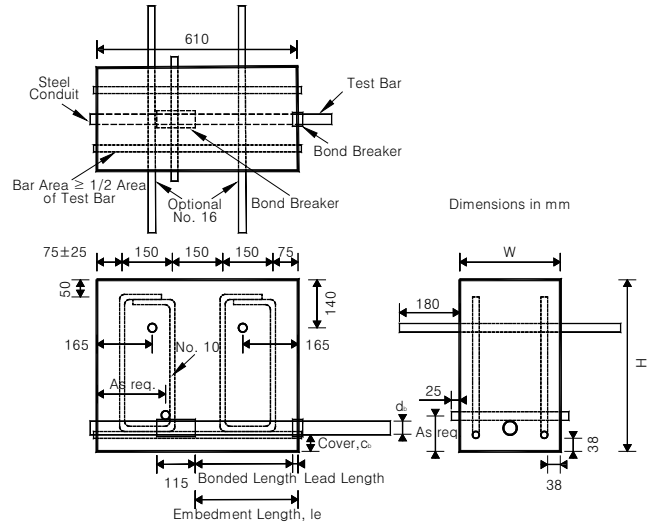


Fig. 4 Schematic of Beam-end test specimen (ASTM, 2015)

Table 1 Comparison of properties for test variables

Method	Beam-end	Hinged beam		Arched Beam	
		Type A($\varnothing < 16$)	Type B($\varnothing \geq 16$)		
Diameter of reinforcement [\varnothing , mm]	w/ Specific requirements	< 32		w/ Specific requirements	
Bond length [mm]	< 300	10 \varnothing		40 $\varnothing \pm 50$	
Anchorage length [mm]	None	175		200	
Transverse(Auxiliary) reinforcement [ea]	4	7($\varnothing 6$)	11($\varnothing 10$)	None	
Specimen Size [mm]	Width (b)	$\varnothing + 200 \pm 13$	100	150	20 \varnothing
	Height (h)	$\geq \varnothing + C_b + l_e^1 + 60$	180	240	200
	Span length (L_{span})	-	650	1,100	80 $\varnothing \pm 100$ + Diameter of arch in beam
	Total length (L)	600 \pm 25	800	1,260	$L_{span} + 100$
Concrete cover [C_b , mm]	38	50		15 to 30	
Compressive strength of Concrete [MPa]	31 to 38	25 \pm 5 or 50 \pm 5		w/ Specific requirements	
Spacing of the loads [mm]	$\geq 0.9l_e$	150	200	200	
Loading condition	Cycling loading (according to bond strength)		Monotonic loading		
Curing condition	w/ Specific requirements	Temperature ($^{\circ}$ C)		20 \pm 2	
		Humidity (%)		55 \pm 5	

¹ l_e : Embedment length

를 뜻한다.

또한, 휨 및 전단파괴보다 부착에 지배적인 영향을 받을 수 있도록 시험체 내부에는 시험체 측면에 평행한 4개의 폐쇄 스티럽과 보강근에 평행한 2개의 휨철근으로 보강하여, 보강근에는 비부착 구간을 확보하고 콘크리트 표면에서의 콘 형태의 인발 파괴를 방지하도록 한다.

ASTM A 944에 의거하여 제작된 시험체는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 시험체에 설치된 보강근의 인장력을 가하여 콘크리트 하부 측면에는 압축력이 발생할 수 있도록 하중을 가력해야 한다. 이때 시작 후 3분 이내에 시험체의 파손이 발생하지 않아야 하며, 분당 최대 부착강도의 10~33% 도달할 만큼의 속도로 가력하고 최소 10단계 이상의 반복 가력을 수행하여 변위 및 하중값을 취득해야 한다.

3.1.2 힌지가 있는 부재 실험(Hinged Beam test)

힌지가 있는 부재의 형상은 직육면체의 콘크리트 블록 2개에 하단부에는 보강근을, 상단부 중앙에는 힌지로 연결하며 Fig. 6과 같다. 시험체의 크기는 보강근의 공칭 직경에 영향을 받으며, 특히 보강근 공칭 직경이 16 mm를 전후하여 콘크리트 블록의 두께 및 길이, 보강근의 매립 길이, 하중 가력 지점의 간격 및 중앙부에 설치되는 힌지의 크기도 영향을 받는다

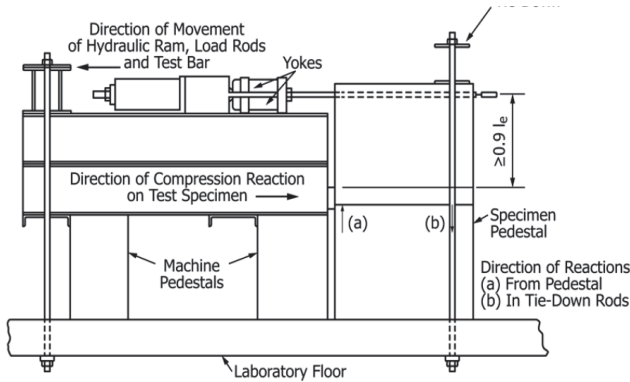


Fig. 5 Schematic of test apparatus (ASTM, 2015)

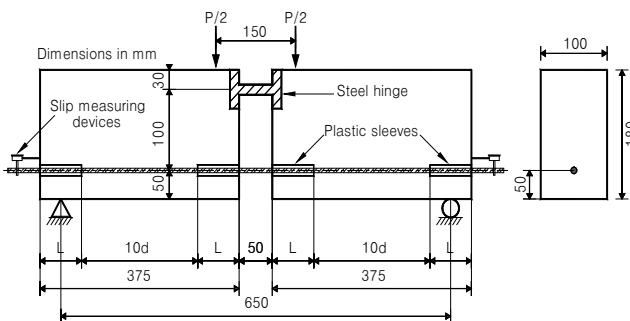


Fig. 6 Schematic of hinged beam (RILEM, 1973; BSI, 2005)

(RILEM, 1973; BSI, 2005).

한편, 시험체에 가하는 하중은 시험체 중앙부에 발생하는 응력을 다음 식 (4), (5)를 이용하여 보강근에 발생하는 응력이 0 MPa, 80 MPa, 160 MPa, 240 MPa 등에 도달 할 수 있도록 계산된 하중으로 가력하며, 다음 하중 단계까지는 약 30분 내에 도달할 수 있도록 해야 한다. 또한, 도달한 하중은 슬립의 안정화에 필요한 시간 혹은 최대 2분 동안 일정하게 유지하며, 본 실험은 시험체의 부착 파괴가 발생할 때까지 지속해야 한다.

$$P = \frac{A\sigma_a}{1.25} \quad (4)$$

$$P = \frac{A\sigma_a}{1.50} \quad (5)$$

식(4)의 경우는 보강근의 공칭 직경이 16 mm 미만일 때 적용할 수 있으며 식(5)의 경우는 보강근의 공칭 직경이 16 mm 이상일 때 적용한다. 이때, A는 보강근의 공칭 단면적, σ_a 는 보강근에 발생하는 응력이다.

3.1.3 아치가 있는 부재 실험 (Arched Beam Test)

아치가 있는 부재는 콘크리트 부재 중앙에 아치를 두어 콘크리트 부재의 응력 집중에 의한 급격한 파단을 방지하고자 하였다(BSI, 2000). 시험체의 크기는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 높이 200mm이며 폭과 길이는 사용한 보강근 직경에 의해 변화한다.

부재 중앙에 있는 아치의 직경은 200~300 mm, 양 끝단 시험체 외부에 노출된 보강근의 길이는 최소 150 mm이다. 지점에서의 구속 효과와 부착 길이에 대한 영향을 감소시키기 위하여 지점 부근에서의 보강근의 비부착구간은 100 mm를 포함하지만, 횡방향 보강근은 설치하지 않는다. 한편, 제작된 시험체의 양생 조건은 온도 20 ± 2 °C와 습도 $55 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 14일간 실시하며, 아치가 있는 부재를 이용한 실험 시, 부재 중앙의 처짐을 측정하여 일정한 처짐 비율에 도달하도록 하중을 가력하여 약 5분 내에 부재의 파단이 발생할 수 있도록 해야 한다.

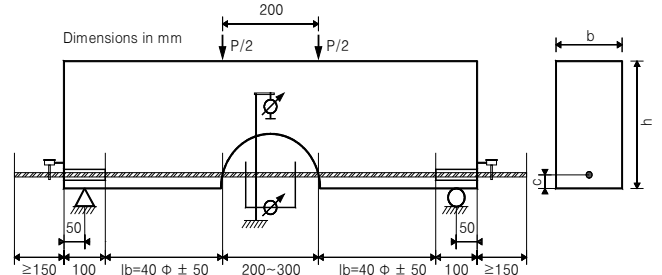


Fig. 7 Schematic of arched beam test specimen (BSI, 2000)

3.2 부착실험 규격을 이용하지 않는 콘크리트 부재의 힘-부착 거동 평가법

ACI 408 Committee와 ACI 440 Committee에 따르면, 보강근과 콘크리트의 부착은 휨거동을 결정하는 핵심 요소이므로 실제 구조거동을 평가하고 정착 및 겹침이음 설계를 위한 실험이 필요하다고 주장하였다(ACI, 2003; ACI, 2007; Rteil et al., 2011). 따라서 콘크리트 부재를 제작하여 힘-부착을 평가할 수 있는 실험 방법에 관하여 검토하였다.

3.2.1 노치가 있는 부재 시험(Beam with Notch Test)

노치가 있는 부재 시험체의 형상은 단순보의 형태와 매우 유사하나, 보강근의 비부착 구간과 노치가 존재한다. Fig. 8에 보인 바와 같이, 부재의 전단 경간에서는 부착 구간을 확보하고, 순수 휨구간 및 지점에서의 보강근의 구속효과를 최소화하기 위하여 지점에서 비부착 구간을 확보해야 한다. 또한, 이 실험에서는 설계기준에 따라 결정된 보강근의 부착 길이를 충분히 확보할 수 있는 시험체의 크기를 확보해야 하고 콘크리트 부재 인장단에 휨 쪼갬 파괴를 유도할 수 있도록 4점 재하 방식을 적용해야 한다(Mazin et al., 2018; Hamad et al., 2005).

3.2.2 겹침이음이 있는 부재 시험(Splice Beam Test)

겹침이음이 있는 부재 시험은 현재 보강근의 정착 및 이음 길이 확보를 위해 일반적으로 설계하여 수행하는 실험 방법으로, 인장보강근의 겹침이음 구간이 콘크리트 부재의 순수 휨 구간내에 있도록 설계한 시험체이다.

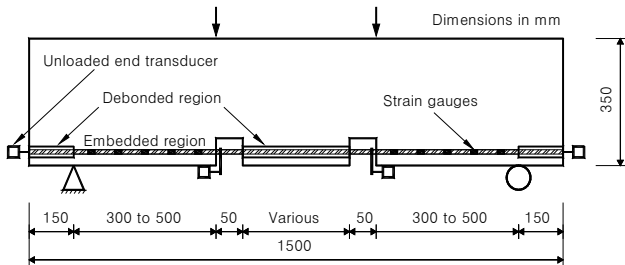


Fig. 8 Schematic of beam anchorage test specimen (Noël and Parvizi, 2020)

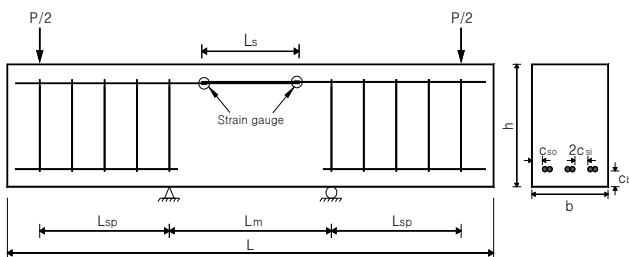


Fig. 9 Schematic of lap splice beam test specimen (Choi et al, 2012)

앞서 3.2.1장에 기술한 바와 같이 노치가 있는 부재 시험체와 마찬가지로 시험체 크기에 대한 규격은 별도로 없으나, 하중 가력점 사이에서는 응력이 급변하는 구간이기 때문에 이음부 끝단과 하중 가력점 사이는 부재의 높이를 상회하는 간격을 확보해야 예상보다 낮은 하중에서의 이음부 파괴를 방지할 수 있다. 또한, 전단 경간의 길이가 짧을 경우, 이음부 파괴가 아닌 전단파괴가 발생할 우려가 있으므로 전단 경간의 길이는 부재의 높이의 2배 이상이어야 하며, 순수 휨구간은 전단 경간의 길이와 부재 높이의 2배를 합한 값보다 큰 구간을 확보할 수 있어야 한다.

한편, Fig. 9와 같이, 겹침이음이 있는 부재의 실험은 시험체의 급격한 파단으로 인한 안전사고 방지, 균열 관측의 편의성을 확보하기 위하여 부재의 인장연단을 상단에 압축연단을 하단에 두고 실험을 수행할 수 있다(Choi et al., 2012). 또한, 노치가 있는 부재 시험체의 실험 방법과 마찬가지로 하중 가력 속도 및 재하 방법, 시험체의 크기 등은 임의로 설정할 수 있다.

4. FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 힘 부착 실험에 대한 검토

4.1 실험 규격에 의한 힘-부착 실험에 대한 검토

4.1.1 보-단부 시험체 실험 (Beam-end Specimen Test)

이 실험은 외부에 노출된 철근에 인장력을 가하여 콘크리트 단면에는 휨-모멘트에 의한 압축력이 발생할 수 있도록 설계되었으며, 시험체의 크기는 사용되는 보강근의 직경에 따라 변화하고, 이로 인해 보강근의 사용량이 부착강도에 미치는 영향도 확인할 수 있다. 또한, 콘크리트가 휨을 받는 중에서의 보강근의 표면형태에 따른 부착 특성과 보강근의 부착 강도를 직접 평가할 수 있는 장점이 있다(ACI, 2003). 따라서 새롭게 개발되는 보강근의 재료적인 특성에 따른 부착 상태를 직접 평가할 수 있다 (Darwin and Graham, 1993).

한편, 실험 규격에도 기술된 바와 같이, 본 실험을 통해 얻어진 부착 강도는 보강근을 사용하는 콘크리트 부재의 설계에 직접적으로 적용할 수 없다. 이는 동일한 부착 구간을 가진 정착 및 겹침 이음 부재의 실험을 통해 얻은 값 보다 큰 값을 가지며, 실제 보강근의 부착 강도보다 높게 평가되기 때문이다. 따라서 보강근의 종류에 따른 특성 비교에만 적용하도록 제한되어 있다 (ASTM, 2015). 또한, 시험체에 하중이 가해질 때 콘크리트 단면에서 발생하는 압축력에 대한 반력의 영향과 인장 영역에서의 프라이 거동에 의한 응력 발생을 반영하지 못하므로 실제 구조물 보다 높은 부착 강도를 제공할 우려가 있다(Chun et al., 2008).

4.1.2 힌지가 있는 부재 실험(Hinged Beam test)

이 실험 방법은 인장 보강근에 작용되는 응력을 쉽게 결정하기 위하여 내부 모멘트 팔길이를 미리 결정한 것으로, 가력하중에 의해 발생한 휨모멘트는 보강근의 인장력과 모멘트 팔길이의 곱으로 표현되는 평형방정식을 기반으로 한다. 그러나, 실제 구조물에서는 콘크리트에서 부담하는 압축력으로 인한 내부 모멘트 팔길이(j)를 반영하지 못하기 때문에 실제 구조물에서의 발현되는 부착강도를 결정하기에는 다소 무리가 있다.

Okelo은 힌지가 있는 부재와 직접 인발 시험체를 이용하여 FRP 보강근과 철근의 부착강도를 평가하는 연구를 수행하였다. 그 결과, FRP 보강근 종류의 관계없이 부착강도는 철근에 비해 낮으며 특히, CFRP의 경우 약 85% 수준으로 낮게 평가됨을 확인하였다. 또한, 파괴 패턴의 경우, 사용되는 콘크리트의 압축강도, 보강근의 직경 및 부착길이에 따라 영향을 받는 것을 확인하였으며, 힌지가 있는 부재의 경우, 부착길이가 길고 콘크리트의 압축강도가 높을 경우, 콘크리트의 파괴(휨), 쪼갬파괴 및 전단파괴가 수반되었다. FRP 보강근 직경이 증가함에 따라 평균 부착 강도는 감소하였으며, 전단 경간비(a/d)를 변화시킬 경우, 인발 실험에서 얻어진 부착 강도와 동등한 수준을 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서, 힌지가 있는 부재의 경우, 콘크리트의 압축파괴, 전단파괴 등 구조 거동에 따른 휨-부착 양상에 따라 영향을 받으므로 직접 인발 시험체보다 실제 구조물의 부착 거동을 잘 표현할 수 있음을 주장하였다(Okelo, 2007; Okelo and Yuan, 2005).

한편, CFRP와 같이 보강근의 인장강도가 매우 우수할 경우, 보강근의 항복 이전에 콘크리트의 압축연단에서의 압괴로 인한 부재의 파단이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 경우, 보강근의 부착 강도를 측정할 수 없는 단점이 있다.

4.1.3 아치가 있는 부재 실험 (Arched Beam Test)

아치가 있는 부재를 이용한 휨-부착 실험은 힌지가 있는 부재 실험과 달리 모멘트 팔길이에 변화에 의한 콘크리트의 특성을 반영할 수 있다. 아치가 있는 부재를 이용한 휨 부착에 관한 연구 결과에 따르면, 보강근의 부착길이에 따라 시험체의 파괴 모드가 변화하였으며, 완전 부착에 의한 쪼갬파괴가 발생할 수 있도록 충분한 부착 길이를 확보해야 함을 확인하였다. 또한, ACI 440R-03에 의한 부착응력 산정식은 콘크리트의 영향을 배제한 평형방정식을 기반으로 하므로 아치가 있는 부재 실험 과정에서 측정된 보강근의 변형률을 이용하여 결정된 부착응력은 비부착 경계 구간에서는 균열 이전까지는 ACI 440R-03을 이용하여 계산된 부착 응력과 거의 유사하나, 균열 발생 이후에는 값의 차이가 발생함을 확인하였다. 이는 평형 방정식을 기반으로 하는 ACI 440R-03의 부착응력 계산식은 균열 이후 콘크리트의 영향을 고려하지 못하기 때문이

므로, 휨을 받는 부재의 부착 거동은 보강근의 변형률을 이용하여 계산된 부착응력을 통해 평가해야 실제 구조물에서 발생하는 부착응력과 유사함을 주장하였다(Oh, et al 2014; Oh, et al 2011). 또한, 실험 규격과 달리 반복하중을 가력할 경우, 일정 응력수준에 의한 피로부착 수명과의 차이가 발생할 수 있으며, 파괴형태 또한 변화될 수 있기 때문에 반복하중에 의한 누적손상기법을 적용하여 휨 부착 및 피로에 의한 콘크리트 부재의 거동을 함께 평가할 수 있음을 확인하였다(Oh et al., 2014). 한편, 본 실험 규격에는 횡방향보강근(전단 철근)을 배근하지 않기 때문에 휨-부착에 의한 파괴 이전에 전단파괴가 발생할 수 있으므로 이를 주의해야 한다.

4.2 실험 규격이 없는 휨-부착 평가에 대한 검토

4.2.1 노치가 있는 부재 시험(Anchorage Beam Test)

노치가 있는 부재를 이용한 실험 방법은 앞서 기술한 바와 같이 하중 가력 조건, 시험체의 크기 및 보강근의 직경, 콘크리트의 압축강도 및 스테럽의 설치 여부를 연구자가 임의로 조정할 수 있기 때문에 콘크리트 부재의 구조 거동을 직관적으로 확인할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 노치가 있는 부재는 휨 균열 및 기존 설계식을 통해 산정된 부착길이를 갖는 보강근을 이용하여 실험을 수행할 수 있으며, 반력으로 인해 보강근 표면에 증가된 응력 집중이 있으므로 겹침이음이 있는 부재의 실험에서 얻어진 부착강도에 비해 과대평가될 수 있는 단점이 있다(ACI, 2003; Parvizi, 2019). 한편, 이 실험 방법에 따라 부재의 거동을 평가하게 되면, 상대적으로 낮은 인장강도 수준에서의 쪼갬파괴와 달리 높은 인장강도를 갖는 보강근을 사용할 경우 뿔힘파괴가 발생할 수 있으므로, 쪼갬 파괴를 유도하는 단면해석이 필요하다(Harajli and Abouniaj, 2010; Noël and Parvizi, 2020).

4.2.2 겹침이음이 있는 부재 시험(Splice Beam Test)

겹침이음이 있는 부재를 이용할 경우, 노치가 있는 부재를 이용한 실험 방법과 마찬가지로 실제 구조물의 휨-부착 거동을 가장 정확하게 재현할 수 있는 것으로 알려져 있다(ACI, 2003; ACI, 2007; Chun and Choi, 2010; Noël and Parvizi, 2020). 또한, 현재 FRP 보강근 구조설계 지침에 따라 겹침 이음 길이를 결정하면, FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 휨 부착에 대한 안정성을 확보했다고 평가한다.

겹침이음이 있는 부재를 이용한 실험은 이음부 파괴를 유도할 수 있도록 단면설계가 진행되어야 하므로 휨 및 전단에 대한 안정성 확보가 필수적이며 새롭게 개발되는 FRP가 구조적 특성에 영향을 미치는 점을 고려하기 위해서는 콘크리트 부재의 휨 및 전단에 대한 검토가 선행되어야 한다. 그러나, 높은 인장응력을 갖는 FRP 보강근의 특성으로 인해 겹침이음이 있는

부재의 인장파괴가 발생할 수 있도록 단면 설계를 수행하고 겹침이음에 있는 부재의 보강근의 부착 거동은 보강근의 설치 위치(최외곽 혹은 부재 정중앙)에 영향을 받으므로 반드시 3가닥 이상의 겹침 이음이 필요하다. 따라서, 이를 고려한다면 겹침 이음이 있는 부재의 단면 크기의 증가는 필수적이므로 제작 및 실험 비용과 실험의 난이도가 증가하는 단점이 있다(Chun and Choi, 2010). 또한, 겹침이음은 반드시 순수 휨구간 내에 실시해야 하고 이음구간에서 보강근의 파괴가 발생할 수 있도록 단면설계가 요구되며 실험 후 보강근의 인장력을 결정하여 평균 부착강도를 산정하고 비선형 단면해석 수행이 필요하다.

5. 결 론

이 연구는 FRP를 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 거동을 평가할 수 있는 실험 방법과 선형 연구 결과를 비교, 검토하였으며, 이 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

실험 규격 여부와 관계없이 FRP-콘크리트 부재의 휨-부착을 평가할 경우, 겹침이음이 있는 부재를 이용하여 평가하는 것이 구조 거동 및 실제 구조물의 거동과 가장 유사하므로 휨-부착에 대한 구조 거동을 가장 정확하게 평가할 수 있다. 그러나 연구자의 연구 경험을 기반으로 한 단면설계, 실험 수행 및 비선형 단면해석이 요구되며, 보강근의 인장파괴를 유도하기 위해 단면 및 지간이 확대되는 단점이 있다.

실험 규격을 이용하여 FRP-콘크리트 부재의 휨-부착 거동을 평가할 경우, 아치가 있는 부재를 이용한 실험 방법은 콘크리트의 영향을 고려하므로 실제 구조물에서의 휨-부착 거동에 대한 재현성이 우수하다. 그러나 높은 인장강도를 갖는 FRP를 사용하면 보강근의 항복 이전에 부재의 파괴가 발생할 수 있으므로, 전단 및 휨 파괴를 방지할 수 있는 추가적인 방안을 적용하여 휨-부착 특성을 평가해야 한다.

FRP의 표면 형상과 물리적 특성에 의한 휨-부착 거동은 보단부 실험을 적용하여 평가하는 것이 경제적이고 실험이 간단하나, 실제 구조물에서 발생하는 보강근의 부착강도에 비해 과대하게 평가하는 경향이 있으며, 이 실험을 통해 얻어진 부착강도를 구조물 설계에 직접 반영하지 못하는 단점이 있다.

본 연구를 통해 다양한 FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 성능 평가법의 종류 및 특징을 검토하였으며, 연구수행 단계에 따른 적합한 휨-부착 거동 평가법을 선택할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CFRP-C163392-01).

References

1. Yoon, Y. S., Kim, T. H., and Kwon, J. S. (2020), Evaluation of Chloride Diffusion Behavior and Analysis of Probabilistic Service Life in Long Term Aged GGBFS Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 24(3), 47-56 (in Korean).
2. Oh, K. S., Park, K. T., Kwon, J. S. (2016), Evaluation of Anti-Corrosion Performance of FRP Hybrid Bar with Notch in GGBFS Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(4), 51-58 (in Korean).
3. Hwang, C. S., Park, J. S., Park, K. T., and Kwon, J. S. (2017), Mechanical Performance Evaluation of RC Beams with FRP Hybrid Bars under Cyclic Loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 21(1), 9-14 (in Korean).
4. Nanni, A., Micelli, F., and La-Tegola, A. (2001), Durability of GFRP Bars Subjected to Aggressive Environment, *Proceeding of 22nd International SAMPLE Europe Conference*, Paris, 431-443.
5. Alkhrdaji, T., Nanni, A., Chen, G., and Barker, M. (1999), Upgrading the transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP, *Concrete International*, 21(10), 37-41.
6. Nanni, A., Nenninger, J., Ash, K., and Liu, J. (1997), Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement, *Structural Engineering and Mechanics*, ACI, 5(4), 339-354.
7. ACI Committee 440 (2006), Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Michigan.
8. CSA Group (2002), Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-02), Canadian Standard Association, Canada, 2002
9. JSCE Research Subcommittee on continuous Fiber Reinforcing Materials (1997), Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, 1997.
10. KCI Committee 112 (2019), FRP reinforcement structural design guidelines (KCI PM112.1-19), Korea Concrete Institute, Seoul (in Korean).
11. Choi, D. U., Chun, S. C., and Ha, S.S. (2009), Splice Length of GFRP Rebars Based on Flexural Tests of Unconfined RC Members, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 21(1), 65-74 (in Korean).
12. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E. (1977), A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, *Journal Proceedings*, ACI, 74(3), 114-122.
13. Chun, S. C., and Choi, D. U. (2010), Development and Splice Lengths of FRP Bars with Splitting Failures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 22(4), 519-525 (in Korean).
14. ACI Committee 318 (2008), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-08), American Concrete Institute, Michigan, 465.
15. ACI Committee 408 (2003), Bond and development of straight reinforcing bars intension (ACI 408R-03), American Concrete Institute, Michigan, 6-9.
16. Choi, Y.C., Park, K.S., Choi, C.S., and Choi, H.K. (2011), Bond

- Properties of GFRP Rebar in Fiber Reinforced Concrete (Engineered Cementitious Composite), *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 23(6), 809-815 (in Korean).
17. Jung, W. T., Park, Y. H., and Park, J. S. (2011), An Experimental Study on Bond Characteristics of FRP Reinforcements with Various Surface-type, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 31(4A), 279-286.
 18. Tang, C.W., and Chen, C. K. (2020), Modeling Local Bond Stress-Slip Relationships of Reinforcing Bars Embedded in Concrete with Different Strengths, *Materials*, 13(17), 3701.
 19. Lutz, L. A., and Gergely, P. (1967), Mechanics of Bond and Slip of Deformed Reinforcement, *ACI Journal Proceedings* 64(11), 711-721.
 20. Lee, J. Y. (2011), Reinforced Concrete Structures, DongHwa Technology Publishing Co., Paju, 332-335 (in Korean).
 21. Oh, H. S, Kang, T. S., and Oh, K.C. (2014), A Flexural Bonding Characteristic of GFRP Rebar Embedded in Concrete Beam Under Cyclic Loading, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, 14(4), 51-57 (in Korean).
 22. ASTM (2015), Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens (A944-15R), ASTM International, PA.
 23. RILEM (1973), Bond Test for Reinforcing Steel: 1-beam test (7-II-28D), Tentative Recommendations, *RILEM Journal Materials and Structures*, 6(32), 96-105.
 24. British Standards Institution (BSI) (2005), Steel for the Reinforcement of Concrete-Weldable Reinforcing Steel-Bar, Coil and Decoiled Product-Specification (BS 4449), British Standards Institution, London, 16-22.
 25. British Standards Institution (BSI) (2000), Determination of the bond behaviour between reinforcing steel and autoclaved aerated concrete by the beam test - Part 1: Short term test (BS EN 12269-1), British Standards Institution, London, 1-9.
 26. ACI Committee 440 (2007), Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-07), American Concrete Institute, Michigan, 19-21.
 27. Rteil, A., Soudki, K. and Topper, T. (2011), Mechanics of bond under repeated loading, *Construction and Building Materials*. 25 (6), 2822-2827.
 25. Noël, M. and Parvizi, M. (2020), Bond-Stress Distribution of GFRP-Reinforced Concrete Beams Containing Seawater, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 24(4), 04020035.
 28. Mazin M. Sarhan, Muhammad N.S. Hadi, and Lip H. Teh (2018), Bond behaviour of steel plate reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 189, 751-756
 29. Hamad, B.S., Ali, A.Y.H. and Harajli, M.H. (2005), Effect of fiber-reinforced polymer confinement on bond strength of reinforcement in beam anchorage specimens, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 9(1), 44-51.
 30. Choi, D. U., Chun, S. C., and Ha, S.S.(2012), Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete, *Engineering Structures*, 34, 303-313.
 31. Darwin, D., and Graham, E. K. (1993), Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 90(6), 646-657.
 32. Chun, S. C., Choi, D. U., Ha, S.S., and Oh, B. H.(2008), Prying Action of Spliced Reinforcements in Tension, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, 20(1), KCI, 1085-1088.
 33. Okelo, R. (2007), Realistic Bond Strength of FRP Rebars in NSC from Beam Specimens, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, 20(3), 133-140.
 35. Okelo, R., and Yuan, R. L. (2005), Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 9(3), 203-213.
 36. Oh, H. S, Sim, J. S., Kang, T. S., and Kwon, H. W. (2011), An Experimental Study on the Flexural Bonding Characteristic of a Concrete Beam Reinforced with a GFRP Rebar, *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, 15(7), 1245-1251.
 37. Harajli, M., and Abouniaj, M. (2010), Bond Performance of GFRP Bars in Tension: Experimental Evaluation and Assessment of ACI 440 Guidelines, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 14(6), 659-668.

Received : 09/02/2021
 Revised : 10/04/2021
 Accepted : 10/15/2021

요 지 : FRP 보강근은 철근-콘크리트 부재의 부식 문제를 해결하기 위해 제안되어왔으나, FRP는 높은 인장강도, 낮은 연성 및 선형 탄성 거동으로 인해 하중이 전달될 때 콘크리트와 보강재 사이의 부착 메커니즘이 다르다. 그러므로, FRP-Rebar와 콘크리트 사이의 부착 거동은 주의 깊게 검토해야 한다. 이를 위해 직접 인발 실험이 간단하게 부착 거동을 평가할 수 있으므로 사용됐으나, 직접인발의 실험 결과는 실제 FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 거동과 다르다. 그러므로 실제 휨-부착 거동을 평가할 방안이 필요하다. 본 연구에서는 FRP를 보강근으로 사용한 콘크리트 부재의 휨-부착 거동에 대한 평가방법을 검토하고 비교하였다. 그 결과, 겹침이음이 있는 부재의 실험 방법이 실제 휨-부착 특성을 잘 반영할 수 있으나 다른 실험방법보다 시험체의 단면 및 시간이 커야 하고 시험체의 설계 및 해석이 복잡하다. 한편, 아치가 있는 부재 실험은 모멘트 팔길이의 변화를 무시하는 평형 방정식을 기반으로 한 힌지가 있는 부재 실험과 달리 콘크리트의 영향을 반영할 수 있으나, 휨-부착에 의한 파괴 이전에 전단파괴의 우려가 있다.

핵심용어 : 휨-부착 거동, FRP 보강 콘크리트 부재, 겹침 이음, 부착 강도
