

이형 GFRP 보강근의 기본정착길이에 대한 연구

A Study on the Basic Development Length of GFRP Rebar With Ribs

문도영*

Moon, Do Young

Abstract

GFRP rebar with ribs resemble those of deformed steel rebar was developed in 2005. It was reported that ribs of the GFRP rebar were sheared off due to the lower shear strength of polymer. In this study, the basic development length of the GFRP rebar was investigated through pull-out tests, models specified in ACI440.1R-03 and -06, and empirical model derived by Cosenza *et al.* (2002). As a results of pull-out tests, the critical embedment length, which is defined as the length when failure mode is changed from pull-out to bar fracture, was 20 times of bar diameter for GFRP rebar and was 15 times for steel rebar. It is believed that the basic development of the GFRP rebar is 21 times of bar diameter, which is determined from the application of average bond strength into the model equation specified in ACI440.1R-03. Compared to the model equation in ACI440.1R-06, that in ACI440.1R-03 is recommendable for design purpose. The Cosenza *et al.*'s model underestimates the basic development length of the GFRP rebar.

Keywords : Deformed GFRP rebar, Basic development length, Pullout-test

요 지

국내에서 개발된 이형 GFRP 보강근은 표면에 구축된 이형의 전단강도가 콘크리트의 전단강도 보다 상대적으로 작아 이형철근과 달리 이형 자체가 전단파괴되는 파괴모드를 보이는 것으로 확인된바 있다. 본 논문에서는 이형을 갖는 GFRP 보강근의 기본정착길이를 인발실험과 설계모델식과 해석적 엄밀식을 통해 고찰하였다. 실험결과, 동일조건하에서 파괴모드가 변화되는 임계정착길이가 이형철근은 직경의 15배, 이형 GFRP 보강근은 20배인 것으로 나타났다. 또한 실험결과를 ACI440.1R-03 설계모델식에 적용하여 분석한 결과, 충분한 횡구속이 수반된 경우 직경 9 mm의 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이는 직경의 21배인 것으로 나타났다. 반면, ACI440.1R-06에 제시된 기본정착길이 모델은 실험결과에 비하여 너무 과대한 기본정착길이를 요구하는 것으로 나타났다. Cosenza 등(2002)의 모델은 실험결과에 비하여 더 적은 기본정착길이를 요구하므로, 설계목적의 사용은 제한적인 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 이형 GFRP 보강근, 기본정착길이, 인발시험

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물을 설계함에 있어서 가장 기본적인 검토사항은 보강근의 정착길이이다. 이는 철근콘크리트 구조가 요구된 성능을 발휘하기 위해서 콘크리트와 보강근과의 부착성능이 매우 중요하기 때문이다.

한편, FRP(Fiber Reinforced Polymer) 보강근은 최근 기존 철근을 대신함으로써, 철근 콘크리트 구조물의 부식으로 인한 문제를 개선할 수 있는 재료로서 국내외적으로 각광받고 있으며, 다양한 표면형태를 지닌 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 및 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 보강근이 개발되고 있다. 이때, FRP 보강근의 다양한 표면형태의 설치목적은 콘크리트와의 부착성능을 개선하기 위함이다. 그간의 연구결과에 의하면, FRP 보강근의

평균부착강도는 외부성형재료인 폴리머 재료의 낮은 전단강도 특성 때문에 기존 철근보다 작은 것으로 보고되고 있으며, 작은 탄성계수로 동일한 하중에도 철근보다 큰 전단변형이 발생하는 것으로 나타났다[Achillides 등(2004), Al-zahrani 등(1999), Bakis 등(1998), Marval 등(2003), Moon (2008), Okelo 등(2005), Zhang 등(2002)].

일반 철근 콘크리트구조물의 부착파괴의 형태는 보강근 뽑힘파괴(Pull-out failure)와 콘크리트의 할렬인장에 의한 파괴(Splitting failure)로 나눌 수 있다. 하중의 전달이 원활할 정도로 충분히 문힘길이가 확보되어 있지만 스티럽과 같은 횡구속철근이나 충분한 피복이 확보되지 않은 경우 콘크리트의 인장파괴에 의한 파괴가 발생한다. 한편, 이형철근의 뽑힘파괴는 문힘길이가 매우 부족한 경우에도 발생할 수 있지만, 일반적인 파괴형태는 문힘길이가 충분할 뿐 아니라 횡구

*정회원 · 경성대학교 토목공학과 전임강사 (E-mail : dymoon@ks.ac.kr)

속이 충분할 때, 이형 리브간 콘크리트의 압괴에 의하여 파괴가 되며, 가장 이상적인 파괴형태이다. 그러나, GFRP 보강근의 경우에는 고려해야 할 파괴모드가 한 경우 더 있다. 그것은 충분한 문힘길이와 횡구속하에서 콘크리트의 전단파괴가 아닌, GFRP 보강근의 표면에 구축된 표면구조가 전단 파괴되어 보강근이 뽑혀 나오는 경우이다. 따라서 이와 같은 경우 이형철근에 비해서 상대적으로 콘크리트 압축강도의 영향은 크지 않다. 또한 이러한 파괴는 외부에 철근의 리브(ribs)와 유사한 돌출된 이형을 가지고 있는 GFRP 보강근(이후 이형 GFRP 보강근이라 함)에서 발생하는 것으로 보고되고 있다[Achillides 등(2004)]. Wambeke 등(2006)은 그간 발표된 GFRP 보강근의 정착길이와 관련된 실험논문들을 문힘길, 보강근 표면 종류, 보강근의 위치 등에 따라 분석하였으며, 충분한 문힘길이와 충분한 덮개(횡적 구속)가 있음에도 불구하고, 보강근의 인장응력이 인장강도에 미치지 못하고 파괴되는 9개의 실험결과에 대하여 제시한바 있다. 또한 Achillides 등(2006)은 이형 GFRP 보강근의 경우 이형의 상부는 콘크리트와의 부착성능에 기여하지 못하고 파괴되는 부분이 있음을 보고하였으며, Moon 등(2009)은 이를 “유효 리브 높이”라고 명하고 해석적, 실험적으로 규명한바 있다. 이상과 같이 GFRP 보강근의 부착파괴기구는 철근과 달리 표면형태, 물성에 따라 매우 다양하고 복잡하기 때문에 정착길이의 결정이 난해한 것이 사실이다.

미국 콘크리트학회의 440.1R-03에서는 기존의 이형철근의 정착길이 모델식에 계수를 기존 연구자들의 실험적 연구결과에 기반하여 확장·수정 제시하고 있다[ACI440.1R-03(2003)]. 이 기본정착길이 모델식은 인발력과 저항력간의 평형방정식에 근거하며, 단순하고 명백하다. 그러나, 2003년 제시된 모델식은 설계를 위해서는 다소 부족함이 지적되었다. 그것은 콘크리트 압축강도에 대한 영향이 배제되어 있을 뿐 아니라 FRP 보강 휨부재의 설계파괴모드인 콘크리트 압괴파괴모드의 특징을 잘 고려하지 못하고 있기 때문이다. 즉, FRP로 휨 보강된 구조의 경우 보강근의 취성재료특성상 콘크리트의 압괴파괴모드로 설계토록하고 있는데, 이와 같은 경우 보강근의 인장응력이 설계강도 보다 크게 못 미치는 경우도 발생하기 때문이다. 따라서, ACI440.1R-06에서는 FRP 보강근의 정착길이 예측모델을 Wambeke 등(2006)의 분석결과에 기초하여 수정하였으며, 설계 후 부착임계단면(Bond critical sections)에서의 주 보강근의 인장응력상태를 설계강도 등과 비교, 검토하도록 전면적인 수정을 가하였다

[ACI 440.1R-06(2006)]. 그러나, ACI 440.1R-06의 정착길이 모델식은 Wambeke 등(2006)이 그들의 논문에서 제시한 바와 같이 충분한 정착길이와 덮개의 확보에도 불구하고, 표면이형의 전단성능 부족에 인한 파괴가 발생할 수 있는 보강근에 대해서는 그 설계결과를 보장할 수 없다. 한편, Cosenza 등(2002)은 FRP 보강근의 실험에 근거한 수정된 BEP 부착모델을 보강근의 부착구성방정식에 도입한 해석적 기본정착길이모델을 제안한 바 있다. 이 모델은 실험으로부터 도출된 부착응력과 슬립모델을 그대로 반영할 수 있기 때문에 전술한 바와 같은 이형의 전단파괴에 대한 고려가 가능할 수 있다.

문도영 등(2006)이 개발한 GFRP 보강근은 초단섬유와 에폭시의 혼합물로 구축된 표면이형을 가지고 있으며, 부착성능 검토를 위한 pull-out 실험결과(문도영 등 2005), 표면이형이 전단파괴되어 보강근이 뽑혀 나오는 것으로 확인된바 있다. 따라서, 이와 같은 표면이형의 전단파괴특징을 갖는 GFRP 보강근의 정착길이를 실험적, 이론적으로 고찰하고 기존의 모델식 등과 비교·고찰하는 것은 이형 GFRP 보강근의 부착성능을 이해하는데 매우 큰 의미가 있다.

본 논문에서는 문도영 등(2006)이 개발한 바 있는 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이를 결정하기 위한 실험적 연구로서, GFRP 보강근과 철근이 매입된 실험체의 Pull-out 실험을 통해 개발된 보강근의 표면에 구축된 이형의 부착성능을 평가하였다. 또한, 이론적 연구로서, 전술한 ACI 440.1R-03과 -06의 설계모델을 적용하여 개발된 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이를 고찰·비교함으로써, ACI 440 위원회의 정착길이모델 개정의 배경을 함께 고찰하였다. 또한 Cosenza 등(2002년)이 제시한 수정된 BEP 부착모델에 근거한 기본정착길이 모델식을 이용하여 상기한 이형GFRP 보강근의 기본정착길이를 비교, 평가하였다. 마지막으로, 이와 같은 비교, 고찰에 근거하여 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이를 결정하였다.

2. Pull-out 실험 및 결과

본 장에서는 이형 GFRP 보강근이 콘크리트와의 적절한 부착성능을 발휘하기 위한 임계문힘길이를 Pull-out 실험을 통해 규명하고, 부착파괴 특성을 규정하였다. 또한 평균부착강도와 분산치를 제공함으로써, 이후의 3장 및 4장의 분석을 위한 기초자료를 제시하였다.

표 1. 사용된 GFRP 보강근과 이형철근의 역학적 물성치

Rebars	공칭직경 (mm, d_n)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	체적비(%)	
					섬유	레진 매트릭스
GFRP 보강근	9.00	-	841±24	50.0	58	42 (Epoxy)
이형철근	9.53	458	660	200.0	-	-

표 2. 콘크리트 배합강도 및 일축압축강도

슬럼프 (mm)	공기량 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	혼입량 (kg/m ³)				설계강도 (MPa)	28일 압축강도 (MPa)
				물	시멘트	잔골재	굵은골재		
150	5.0	44	49.3	179	408	821	846	28	32.7

2.1 실험체 및 실험방법

본 실험에서 사용된 이형 GFRP 보강근은 철근과 유사한 리브형태의 이형이 보강근 표면에 프레스공정에 의하여 구축된 형태를 가지고 있으며, 외형적인 특징과 형태는 문도영 등(2006)에서 확인할 수 있다. 이형철근의 경우 일반적인 SD40 이형철근을 사용하였다. 이형철근 및 GFRP 보강근의 물성치는 표 1과 같다. 특히, 이형 GFRP 보강근의 인장강도는 본 연구를 위하여 직접 인장강도 실험을 통해 결정된 것으로서, 제시된 바와 같다.

실험체의 형태와 제원은 그림 1과 같으며, 두 개의 콘크리트블록에 이형 GFRP 보강근과 이형철근을 매입하여 제작하였으며, 구근이 형성된 블록은 하중가력장치에, 다른 블록은 실험실의 바닥면에 고정하는 방식을 사용하였다. 보강근의 덮개는 직경의 약 8배로 콘크리트의 할렬파괴가 발생하지 않도록 충분히 확보하였다. 또한 실험 중 매입된 보강근의 하중가력단과 자유단 변위를 LVDT를 이용하여 측정하였다(그림 2 참조). 사용된 콘크리트의 배합비 및 28일 압축강도 결과는 표 2에 나타내었다.

2.2 실험개요

부착파괴모드가 변화되는 보강근의 임계문힘길이를 결정하

기 위한 실험은 2단계로 진행되었다. 우선, 1차 실험에서는 보강근 공칭직경($d_n=9$ mm)의 5배, 10배, 15배, 20배의 4가지 문힘길이에 대하여 실험한 후, 파괴모드가 바뀌는 구간에 대하여 문힘길이를 직경의 1배씩 증가시킨 실험체를 추가적으로 제작하여 실험하였다.

1차 실험을 위하여 다음의 표 3과 같이 총 20개의 실험체가 제작되었다. 12개의 실험체는 GFRP 보강근이 매입된 실험체로, 문힘길이를 4가지로 달리하였다. 따라서 동일한 조건의 실험체가 3개로서, 실험의 정확성을 확보하고자 하였다. 한편, 8개의 실험체는 이형철근이 매입된 실험체로서, 각 실험체당 2개의 동일한 실험체를 제작하였다.

2.3 1차 실험결과

표 3은 1차 실험결과 도출된 파괴모드, 평균최대하중과 평균부착강도 및 평균인장강도를 나타내고 있다. 보강근의 평균부착강도는 식 (1), 평균인장강도는 식 (2)로부터 각각 결정되었다.

이형 GFRP 보강근의 경우 문힘길이($l_e < 20d_n$)가 보강근 직경의 20배 미만(l_e)인 모든 실험체는 그림 3(b)와 같이 보강근이 콘크리트 블록으로부터 뽑히면서 Pull-out 파괴되는 것으로 나타났다. 주목할 것은 보강근의 표면은 문도영 등

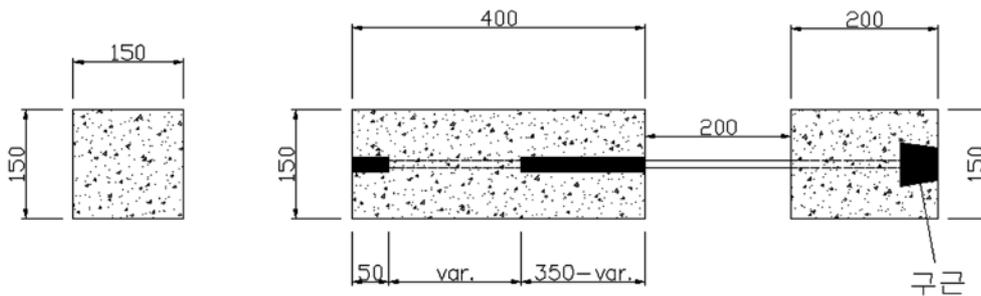


그림 1. Pull-out 실험체(단위 : mm)

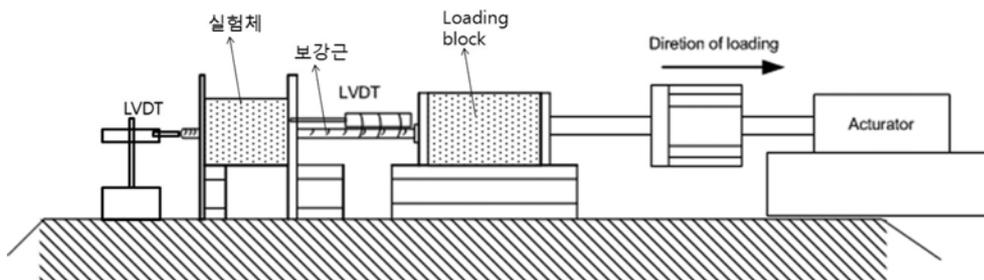
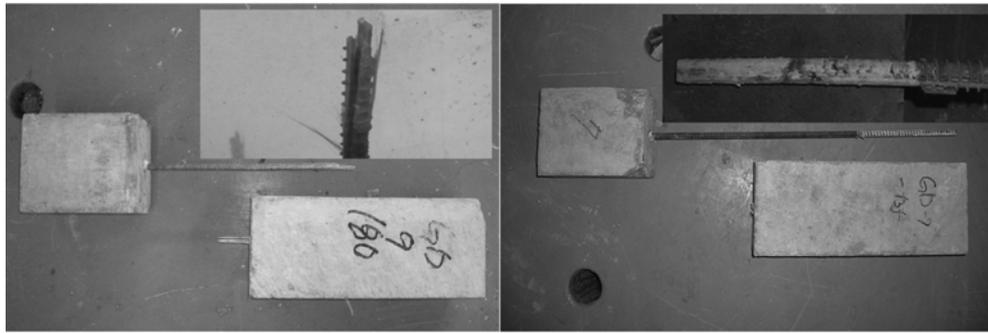


그림 2. Pull-out 실험의 모식도

표 3. 1차 Pull-out 실험결과

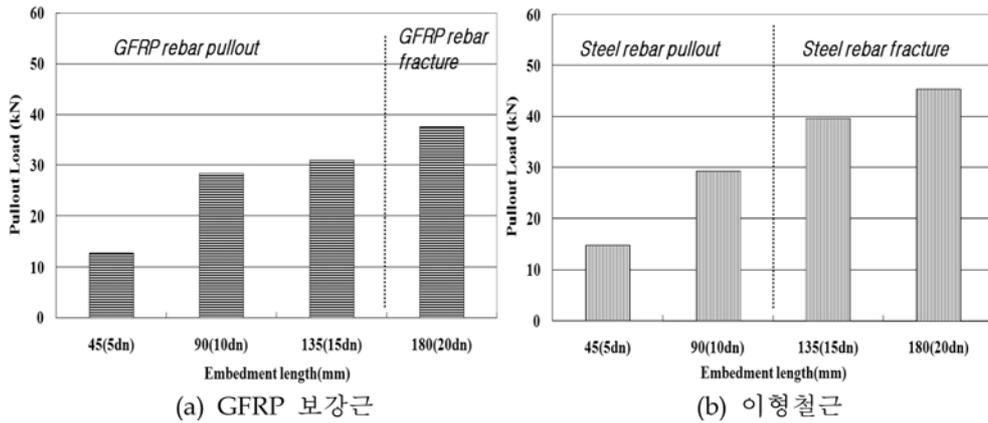
보강근의 종류	문힘길이 (mm, l_e)	파괴모드	평균최대하중 (kN, P_{max})	평균최대 부착강도 (MPa, τ_{max})	평균인장강도 (MPa, P_{max})
GFRP 보강근	45 ($=5d_n$)	뽑힘파괴	12.81	10.1	201
	90 ($=10d_n$)	뽑힘파괴	28.45	9.2	369
	135 ($=15d_n$)	뽑힘파괴	30.10	7.9	473
	180 ($=20d_n$)	보강근 인장파괴	37.66	-	591
이형철근	45 ($=5d_n$)	뽑힘파괴	14.90	11.1	-
	90 ($=10d_n$)	뽑힘파괴	29.34	10.9	-
	135 ($=15d_n$)	보강근 인장파괴	39.65	-	556
	180 ($=20d_n$)	보강근 인장파괴	45.41	-	637



(a) GFRP 보강근 인장파괴

(b) GFRP 보강근 뽑힘파괴

그림 3. 파괴모드



(a) GFRP 보강근

(b) 이형철근

그림 4. 길이에 따른 파괴모드 변화

(2005)에 제시된 바와 같이 표면의 이형이 전단부착파괴 되고, 잔여물이 보강근의 표면과 콘크리트 블록내에 남아 있는 것이 확인되었다. 이형 철근의 경우에는 묻힘길이가 철근 직경의 15배 이상($l_e \geq 15d_n$)일 때, 철근이 항복하면서 과도한 변형과 함께 인장파괴 되는 것으로 나타났다.

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi d_n l_e} \quad (1)$$

$$f_{\max} = \frac{4P_{\max}}{\pi d_n^2} \quad (2)$$

그림 4의 점선은 파괴모드가 변화되는 부분을 표시하고 있다. 그림과 같이 이형철근의 경우 동일한 묻힘길이에 불구 하고, 직경의 약 15배정도의 묻힘길이가 확보되면, 이형철근의 응력이 항복강도에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 반면, GFRP 보강근의 묻힘길이가 20배인 경우에 보강근이 인장파괴되는 것을 확인하였다. 따라서, GFRP 보강근의 임계묻힘 길이를 실험적으로 규명하기 위하여 2차 실험으로서, 묻힘 길이가 150 mm(≒17d_n), 160 mm(≒18d_n), 170 mm(≒19d_n)인 9개의 실험체를 추가로 제작하여 실험을 수행하였다. 콘크리트 강도 등 모든 조건은 동일하게 하였다.

실험결과에 따르면, 식 (2)로부터 산출된 실험체 파괴시 GFRP 보강근의 응력은 135 mm의 경우 약 473 MPa로 극한강도에 56%에 불과하다. 즉, Pull-out 실험에서 GFRP 보강근의 극한강도에 56%에 해당하는 응력만이 발생하였는데, 표면에 구축된 이형이 이를 견디지 못하고 파괴되었다는 점을 주목하여야 한다. 또한 45 mm와 90 mm의 묻힘길이를 갖는 경우 이형 GFRP보강근이 거의 유사한 부착강도를

나타내지만, 10d_n 이상 묻힘길이가 증가한 경우 급격한 부착 강도의 감소가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향으로부터 보강근의 표면에 작용하는 부착(전단)응력의 분포가 묻힘길이에 대하여 비선형적인 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

2.4 2차 실험결과

표 4는 추가로 수행된 이형 GFRP 보강근의 실험결과를 나타내고 있다. 본 배치의 압축강도 검토를 위한 공시체 일축압축강도를 수행하였으며, 실험결과는 32.0 MPa로 1차 실험체 제작을 위한 콘크리트와 거의 유사한 것으로 나타났다.

제시된 모든 결과 값은 3개 실험체의 평균값을 나타내고 있다. 모든 실험체는 GFRP 보강근이 콘크리트블록으로부터 빠져나오는 Pull-out 파괴모드에 의하여 파괴되었다. 따라서 GFRP 보강근의 임계묻힘 길이는 170 mm(19d_n)~180 mm(20d_n)인 것으로 판단할 수 있다. 반면, 이형철근의 경우는 1차 실험결과에 제시하였듯이 90 mm(10d_n)~135 mm(15d_n)인 것으로 나타났다.

실험체의 파괴시 이형 GFRP 보강근의 인장응력(표 4의 평균인장강도 참조)상태를 살펴보면, GFRP 보강근의 극한강도에 68%에 해당하는 응력이 발생하였을 때, 보강근 표면에 형성된 이형이 이를 견디지 못하고 파괴되었다. 이는 1장의 서론에서도 서술한바와 같이 본 보강근의 파괴특성이 폴리머로 구성된 이형의 전단파괴이며, 이는 보강근의 표면관찰 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 따라서, 본 이형 GFRP 보강근의 파괴특성과 파괴하중 및 부착강도 등은 Wambeke 등(2006)과 Achillides 등(2004)이 제시한 특수한 경우에 해

표 4. 2차 Pull-out 실험결과

보강근	문힘길이 (mm)	파괴모드	평균최대하중 (kN)	평균최대부착강도 (MPa)	평균인장강도 (MPa)
GFRP	150 (≒ 17d _n)	Rebar pullout	29.53	7.0	464 (55%)*
	160 (≒ 18d _n)	Rebar pullout	31.88	7.0	501 (60%)
	170 (≒ 19d _n)	Rebar pullout	36.26	7.5	569 (68%)

*()안의 값은 GFRP 보강근의 인장강도에 대한 비를 나타내고 있음.

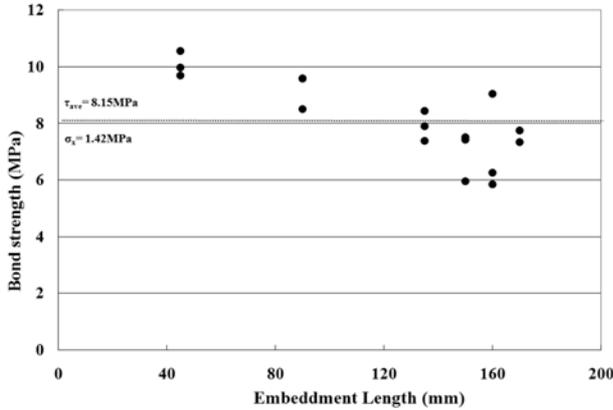


그림 5. 평균부착강도

당됨으로, 본 보강근의 정착길이 결정을 위해서는 이와 같은 이형 GFRP 보강근의 파괴특성을 고려한 면밀한 비교, 고찰이 필요함을 알 수 있다.

2.5 GFRP 보강근의 평균부착강도

1차 및 2차 Pull-out 실험결과로부터 문힘길이에 따른 보강근의 부착강도를 그림 5에 나타내었다. 본 실험에 사용된 보강근의 평균부착강도는 8.15 MPa이었으며, 표준편차는 1.42 MPa인 것으로 나타났다.

3. 실험결과에 근거한 기본정착길이 고찰

3.1 기본정착길이

GFRP 보강근의 기본정착길이는 보강근의 인장강도가 보강근의 설계강도(f_{fu})에 도달할 수 있을 만큼 충분한 문힘길이를 의미한다. 따라서 ACI440.1R-03에서는 다음의 식 (3)과 같이 인발력과 저항력의 평형방정식을 근거로하여 기본정착길이(l_{bf})를 정의하고 있다. 여기서 A_f 는 보강근의 면적을, f_{fu} 는 설계강도를, n 는 부착강도를 의미한다. 결국, GFRP 보강근의 정착길이는 보강근의 설계인장강도에 비례하며, 부착강도에 반비례 관계에 있다. ACI440.1R-03에서는 GFRP 보강근의 부착강도를 실험에 의하여 산정한 후 식 (3)에 의하여 기본정착길이를 산정하도록 하고 있으며, 이는 평형방정식으로부터 구하는 것이므로 단순하고 명백하다. 단지, 실험자료가 없는 경우 타 연구자의 실험결과를 근거로하여 식 (4)와 같이 산정하도록 하고 있다. 따라서 ACI440.1R-03에서는 직경 9 mm GFRP 보강근의 부착강도를 약 5.9 MPa로 평가하고 있음을 알 수 있다.

$$l_{bf} = \frac{A_f f_{fu}}{\pi d_n \tau} = \frac{d_n f_{fu}}{\pi \tau} \quad (3)$$

$$l_{bf} = \frac{d_n f_{fu}}{18.5} \quad (4)$$

한편, ACI440.1R-06에는 기본정착길이산정식이 크게 바뀌었다. 이와 같은 수정이 2003년 정착길이 모델식의 오류나 부정확성을 의미하는 것은 아니며, 03기준은 명백한 해석적 평형방정식에 근거를 두었으나, 2006년에는 설계 편의를 위해, 방대한 실험자료에 근거한 실험회귀식에 근거한 새로운 모델식을 제시하였다. 또한 2006년에는 이와 같은 수정의 근거로서, GFRP 보강 시험체의 설계파괴모드가 압축지배 파괴이므로 GFRP 보강근의 응력이 설계강도까지 발현되지 않는다는 것을 배경으로 하였다.

ACI440.1R-06에서는 Wambek(2006)등이 수행한 실험결과와 회귀분석결과를 근거로 주어진 보강근의 길이(l_e), 덮개(C) 및 콘크리트의 강도(f_{ck})에 따른 보강근의 발현강도를 산정할 수 있는 식 (5)와 같은 예측식을 제안하고, 그 결과가 보강근의 설계강도를 초과하는지를 검토하도록 하고 있으며, 식 (5)로부터 기본정착길이식을 유도하면 식 (6)과 같다.

$$f_{fe} = 0.083 \sqrt{f_{ck}} \left(13.6 \frac{l_e}{d_n} + \frac{C}{d_n} + \frac{l_e}{d_n} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (5)$$

$$l_{bf} = \frac{\frac{f_{fe}}{0.0083 \sqrt{f_{ck}}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_n}} d_n \quad (6)$$

다음의 표 5는 이형 GFRP 보강근의 설계강도(f_{fu})를 표 1에 제시된 GFRP 보강근의 인장강도 841 MPa에 0.8을 곱한 673 MPa로 설정하고, 이때 기본정착길이를 ACI440.1R-03 및 -06에 근거하여 산정하여 비교하였다. 실험결과로부터 획득한 모든 실험체의 평균부착강도(=8.15 MPa, 그림 5 참조)를 식 (3)에 적용하여 평가하였을 때, 기본정착길이는 186 mm로 보강근 직경에 약 21배에 해당하는 것으로 나타났다. 2장에 제시된 실험결과 도출된 임계문힘길이가 19d_n~20d_n이었음을 감안할 때, 식 (3)의 해석결과가 아주 근소하게 크지만, 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 충분한 횡구속(덮개와 스티럽 등)하에서 9 mm 직경의 이형 GFRP 보강근의 정착길이 결정에 ACI440.1R-03의 평형방정식에 근거한 정착길이 모델식이 매우 유효함을 의미한다. 그러나 식 (4)에서는 전술한 바와 같이 9 mm 직경 GFRP 보강근의 평균부착강도를 5.9 MPa로 충분히 보수적으로 평가하게 함으로써, 약 36배의 정착길이가 필요한 것으로 평가하고 있다. 따라서, 본 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이 결정시 본 설계모델식을 적용함으로써 충분한 안전도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 2006년 수정된 ACI440.1R-06 모델식에 근거하여 평가하면, 약 50배로 실험결과보다 2배 이상 상회하는 것으

표 5. 기본정착길이 비교

보강근의 종류	문합길이 (mm, l_e)	평균최대 부착강도 (MPa, τ_{max})	기본정착길이							
			[ACI440.1R-03]				[ACI440.1R-06]			
			식 (3)				식 (4)		식 (6)	
			부착강도별		전체 평균 부착강도별					
mm	l_{bf}/d_n	mm	l_{bf}/d_n	mm	l_{bf}/d_n	mm	l_f/d_n			
GFRP 보강근 ($d_n=9$ mm)	45	10.1	150	17	186	21	327	36	449	50
	90	9.2	165	18						
	135	7.9	191	21						
	150	7.0	216	24						
	160	7.0	216	24						
	170	7.5	202	22						

로 나타났다. 이는 2006년 수정된 모델이 본 실험과 달리 휨부착실험에 근거하였음을 감안한다면 이와 같은 보수적인 평가는 당연하다고 하겠으나, 덮개가 보강근 직경의 약 8배로 충분한 횡구속이 되어 있음을 감안한다면 그 정도가 너무 과하다. 즉, ACI440.1R-06 모델식은 본 이형 GFRP 보강근의 정착길이를 너무 보수적으로 평가함으로써, 이를 따르게 된다면, 과도한 기본정착길이가 요구된다.

이상의 결과로부터, 본 실험에서 사용된 이형 GFRP 보강근은 인장성능보강재로서 사용함에 충분한 부착강도를 보유하고 있음을 ACI440.1R-03 기준으로부터 확인할 수 있다. 또한, FRP 보강근의 정착길이 모델식은 해석적 평형방정식에 근거한 ACI440.1R-03 보다 실험식에 근거한 ACI440.1R-06의 기준이 과도하게 보수적임을 확인할 수 있다. 그러나, 이는 본 논문에서 사용된 이형 GFRP 보강근의 설계강도(673 MPa)의 발현을 기준으로 하였을 때이며, GFRP 보강 구조체의 설계개념상 기본 휨설계 파괴모드가 압괴이므로, 구조체 내에서 GFRP 보강근에 발현되는 인장응력이 설계인장강도보다 크게 못미치기 때문에 설계강도를 달리하였을 때, 그 변화추세를 비교, 고찰해볼 필요가 있다.

그림 6에서는 식 (3), (4) 및 (6)에 이형 GFRP 보강근의 설계인장강도를 달리하였을 때, 기본정착길이의 변화를 나타내고 있다. 실험결과와 비교하기 위하여 표 3 및 4의 평균 인장강도에 해당하는 보강근의 정착길이를 비교하였다. 그림

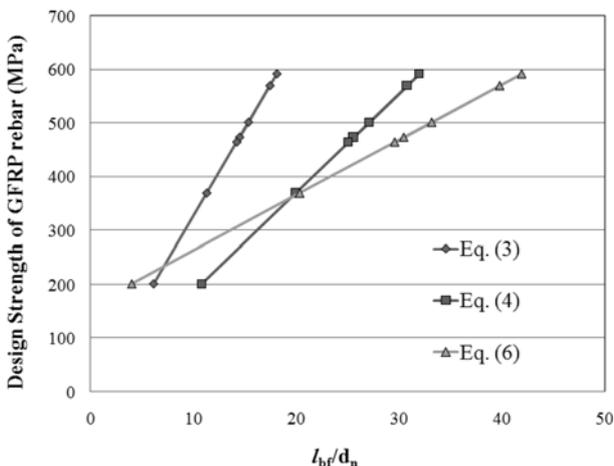


그림 6. 보강근의 설계인장강도에 따른 정착길이변화

과 같이 ACI440.1R-06의 모델식이 약 350 MPa 이후에서는 인장강도 증가에 따라 큰 기본정착길이를 요구하고 있음을 확인할 수 있다. 이때, 약 350 MPa은 본 이형 GFRP 보강근 설계강도의 절반에 불과하다. 결론적으로 ACI 4401R-06의 정착길이모델식은 휨부착실험결과를 회귀분석한 식에 근거하기 때문에, 덮개 등의 영향이 반영된다는 측면에서 볼 때 실제 설계에서는 유용한 것은 사실이지만, 설계강도 발현에 필요한 기본정착길이를 너무 과도하게 평가하는 문제가 있다.

4. Cosenza 등(2002)의 이론식에 근거한 기본정착 길이 고찰

4.1 이론개요

Cosenza 등(1997)은 Eligehausen 등(1983)이 제안한 철근의 부착모델을 FRP에 적합토록 수정된 BEP 부착모델(일명 수정된 BEP 부착모델)을 제시하였으며, 이에 기초한 FRP 보강근의 해석적 기본정착길이 모델을 제안하였다.

Cosenza 등(2002)은 부착에 대한 식 (7)과 같은 구성방정식에서 $\tau(x)$ 에 본인이 제안한 바 있는 식 (8)과 같은 수정된 BEP 부착모델식을 대입하고, 슬립량(s)에 따른 2차 미분방정식의 해로부터 식 (9)와 같은 FRP 보강근의 기본정착길이 모델을 제시하였다. 이때, 식 (8)과 (9)에 사용된 매개변수 τ_m , s_m 그리고 p 는 수정된 BEP 부착모델에서 사용된 계수로서 인발실험 또는 보 실험을 통해 획득되는 값이며, 상세한 도식적 설명은 그림 7에 제시된바와 같다.

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{4}{Ed_n} \tau(x) = 0 \tag{7}$$

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha \quad (s \leq s_m)$$

$$\tau(s) = \tau_m \left(1 + p - p \frac{s}{s_m} \right) \quad (s_m < s \leq s_u) \tag{8}$$

$$l = l_m \left(\frac{f}{f_1} \right)^{(1-\alpha)/(1+\alpha)} \quad (l < l_m)$$

$$l = l_m \left\{ 1 + \frac{(1-\alpha)^2}{\sqrt{2p(1+\alpha)}} \left[\arcsin \frac{A_{r2}}{\sqrt{A_{rmax}}} - \arcsin \sqrt{1 - \frac{d_n f}{8EA_{MAX}}} \right] \right\} \quad (l_m < l < l_u) \tag{9}$$

여기서, τ , s 는 각각 평균부착응력과 슬립량을 나타낸다. f 와 f_1 은 FRP 보강근의 축방향 응력을 의미하며, 특히, f_1 은 슬립량 s 가 s_m 에 도달했을때의 응력으로 다음의 식 (10)과 같이 계산된다. 또한 l_m 은 문힘길이의 상한치로서, 보강근의 축방향응력이 f_1 일때의 문힘길이를 의미하며, 식 (11)과 같이 구할 수 있다. A_{r2} , A_{rmax} 는 각각 계수로써, 식 (12)와 같다.

$$\sigma_1 = \sigma(s_m) = \sqrt{\frac{8E\tau_m s_m}{d_n(1+\alpha)}} \quad (10)$$

$$l_m = \sqrt{\frac{Ed_n s_m(1+\alpha)}{2\tau_m(1+\alpha)^2}} \quad (11)$$

$$A_{r2} = \frac{\tau_m s_m}{2p}, \quad A_{rmax} = \frac{\tau_m s_m}{1+\alpha} + \frac{\tau_m s_m}{2p} \quad (12)$$

4.2 비교분석

상기 그림 7에 제시된 그래프의 계수를 획득하기 위하여 2장에 제시된 실험 중 1차실험에서 문힘길이가 135 mm인 3개의 부착강도-변위관계를 분석하였으며, 분석결과는 표 6 및 그림 8과 같다. 3개의 실험이 수행되었지만, 1개의 실험체는 자유단 변위계측 잘못으로 삭제하였다.

그림 9는 Cosenza 등(2002)이 제안한 해석적 정착길이 모델에 근거하여 계산된 본 GFRP 보강근의 문힘길이비(l_e/l_d)

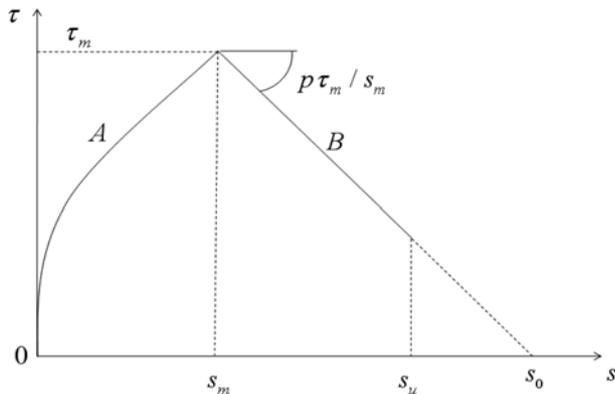


그림 7. 수정 BEP 모델의 부착강도와 슬립량의 관계

표 6. 수정된 BEP 모델의 계수

FRP rebar	α	p	τ_m (MPa)	s_m (mm)
specimen 1	0.28	0.21	9.22	0.215
specimen 2	0.23	0.26	7.27	0.285
평균	0.25	0.24	8.25	0.25

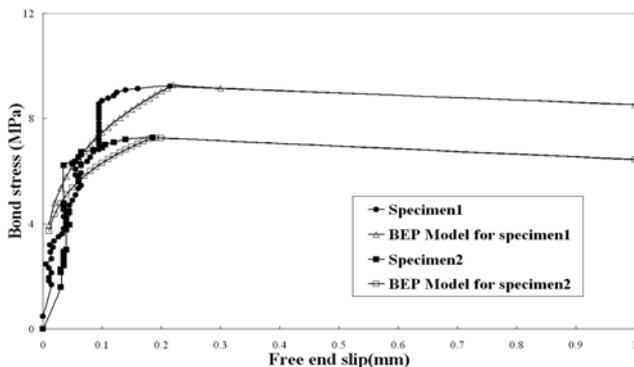


그림 8. GFRP 보강근의 실험결과에 기반한 수정된 BEP 모델의 수립(1차실험 실험체, 문힘길이 135 mm인 경우)

d_n)에 대한 보강근의 발현 인장강도 결과를 나타내고 있다. 그림 9의 횡축은 보강근의 문힘길이를 보강근의 직경으로 나눈 비(ratio)를 나타내며, 종축은 보강근의 인장응력을 나타내고 있다. 또한 비교를 위하여 실험결과를 그래프에 삽입하였다. 속이 빈 사각점으로 표시된 것은 실험결과 도출된 각 문힘길이별 평균부착강도를 기본정착길이 식 (3)에 입력하여 얻은 정착길이비를 나타내고 있으며, 점선은 그 결과를 회귀분석한 그래프이다(표 5의 부착강도별 기본정착길이 결과 참조).

제시된 그림 9에 의하면, Cosenza 등(2002)의 수정된 BEP 부착모델에 근거한 해석적 기본정착길이 모델식은 본 보강근의 인장응력(f_1)이 270 MPa에 도달하기 위한 전달길이(l_m)를 직경의 14배, 즉 126 mm가 필요한 것으로 제시하고 있다. 반면, 실험결과는 보강근의 인장강도 270 MPa에 해당하는 정착길이비는 보강근 직경의 약 17배인 것을 알 수 있다. 이는 Cosenza 등(2002)의 해석적 모델식이 GFRP

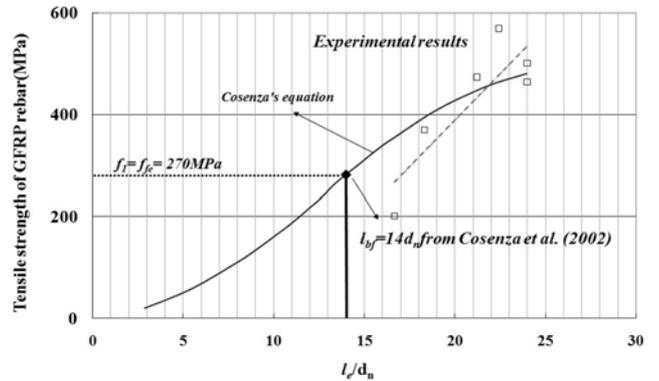
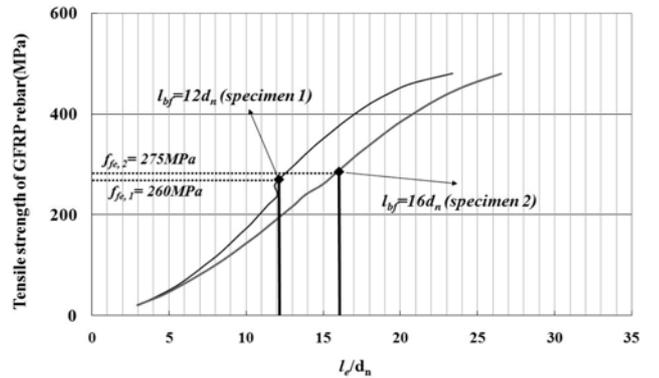
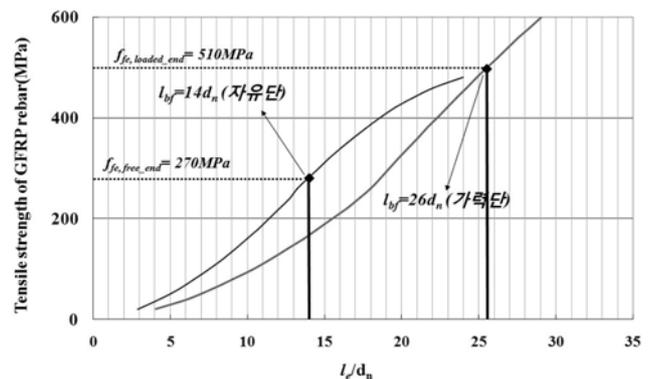


그림 9. Cosenza 등(2002) 과 실험결과와의 비교



(a) 수정된 BEP 모델의 계수에 의한 영향



(b) 자유단과 하중가력단의 모델차에 의한 영향

그림 10. Cosenaz 등(2002)의 정착길이모델 민감도 분석

보강근의 기본정착길이를 과소평가함으로써, 작은 정착길이를 요구하게 되기 때문에 보수적인 설계가 불가능한 것으로 판단된다.

이와 같이 Cosenza 등(2002)의 모델이 GFRP 보강근의 정착길이를 과소평가하게 되는 이유를 분석해 보면, 첫 번째, Cosenza 등의 해석적 모델이 수정된 BEP 모델에 근거함으로써, 실험에 근거하여 간략화되고 쉬워지는 등 적용성이 개선되는 반면, 결정된 계수들에 의하여 그 결과가 크게 지배되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 실제 제시된 그림 10(a)와 같이, 두 개의 각 실험체의 계수값을 달리 적용하였을 때, 기본정착길이의 차이가 약 $4d_n$ 이 발생하는 것을 볼 수 있다. 두 번째는 자유단과 하중재하단의 부착강도-슬립 모델에 따라 전달길이가 크게 달라진다는 문제가 있다. 하중재하단과 자유단의 부착강도-슬립 그래프를 보면, 최대부착강도(τ_m)와 하강부의 경사(p) 등은 동일한 반면, 최대부착강도에 해당하는 변위(s_m)값이 매우 큰 차이가 있기 때문에 기본전달길이 결과에 차이가 발생한다. 예로서, 그림 10(b)는 자유단과 하중재하단의 수정된 BEP 모델의 계수들에 근거한 정착길이 변화를 비교하여 나타내고 있다. 하중재하단의 그래프는 동일한 시험체의 하중재하단의 데이터에 근거하여 그린 것이다. 그림과 같이 어느 위치의 변위데이터로부터 수정된 BEP 모델을 구축하여 계수를 사용하느냐에 따라 기준강도가 270 MPa에서 510 MPa로 크게 상향되면서 기본정착길어도 약 $26d_n$ 으로 1.9배 정도의 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

결과적으로, 당초 Cosenza 등(2002)의 기본 정착길이모델이 실험으로 도출된 부착응력-슬립 거동에 근거하므로 본 이형 GFRP 보강근의 기본 정착길이를 적절하게 제시할 수 있을 것으로 예상하였으나, 상기한 바와 같은 민감도의 문제가 있으며 더욱이 기본정착길이를 과소평가할 수 있는 우려가 있으므로 설계에 적용하기에는 문제가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이를 Pull-out 실험을 통해 규명하고자 하였으며, ACI의 설계모델식과 해석적모델을 통하여 비교, 고찰하였다. 이와 같은 분석을 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

1. 이형철근과 이형 GFRP 보강근이 다양한 문힘길이를 삽입된 29개 실험체의 Pull-out 실험을 수행하였다. 실험결과 파괴모드가 부착파괴에서 보강근의 인장파괴로 변화되는 임계문힘길이는 철근의 경우 보강근 직경의 15배, 이형 GFRP 보강근의 경우 20배인 것으로 확인되었다. 부착파괴된 보강근의 표면상태를 확인한 결과, 철근의 이형은 전혀 변형이 없는 반면, 이형 GFRP 보강근의 표면 이형은 모두 전단파괴된 것을 확인할 수 있었으며, 부착성능의 차이도 이것에 기인하는 것으로 판단할 수 있다.
2. 이형 GFRP 보강근의 평균부착강도는 8.15 MPa인 것으로 나타났으며, ACI 440.1R-03의 기본정착길이식에서 9 mm 직경의 부착강도를 5.9 MPa로 평가하고 있음을 감안할 때, 보강근으로서 충분한 부착강도를 보유하고 있음을 확인하였다.

3. 충분한 횡구속이 수반된 9 mm 직경의 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이를 설계모델식인 ACI440.1R-03과 -06으로 산정하였으며, 비교 평가하였다. 03의 경우 인발력과 저항력의 평형방정식에 근거하고 있으며, 06의 경우 휨부착 실험결과의 회귀식에 근거하고 있다. 결과는 ACI440.1R-03의 경우, 평균부착강도인 8.15 MPa를 입력한 경우 직경의 21배이며, 식(4)로 평가한 경우 36배인 것으로 나타났다. ACI 440.1R-06의 평가결과는 직경의 50배가 필요한 것으로 나타났다. 이것은 본 모델이 휨부착실험에 근거하여 콘크리트 덮개의 영향을 고려할 수 있으므로, 설계를 위하여 유효한 것은 사실이지만, 본 실험에서 덮개가 직경의 약 8배로 충분한 점을 감안한다면, 너무 과대한 기본정착길이를 요구하게 됨으로써, 과대설계의 문제가 있는 것으로 나타났다. 또한, GFRP 보강근의 설계강도의 수준에 따른 기본정착길이 변화를 고찰하였으며, 보강근의 설계강도가 증가함에 따라 ACI440.1R-06의 기본정착길이의 증가가 가장 큰 것으로 나타났다.
4. Cosenza 등(2002)이 제안한 부착응력-슬립모델에 근거한 해석적 기본정착길이모델을 본 이형 GFRP 보강근에 적용하였다. 해석결과, GFRP 보강근 직경의 14배를 요구하는 것을 확인하였다. 이는 실험결과에 대하여 약 6배정도 적게 필요한 것으로 평가하고 있었다. 당초 본 모델이 부착슬립 모델로부터 유도된 해석적 모델로 본 이형 GFRP 보강근의 이형 전단파괴의 특성을 적절히 고려할 수 있게 함으로써, 유효할 것으로 예상하였지만, 상기한 바와 같이 기본정착길이를 과소평가하는 문제가 있어 설계에 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다. 더욱이, 수정된 BEP 모델의 설계상수의 민감도가 너무 큰 것으로 나타남으로써, 본 해석모델의 사용을 위해서는 매우 정밀한 실험이 요구되는 문제가 있다.
5. 이상과 같은 실험적, 해석적 고찰결과, 충분한 횡구속이 수반되는 경우 9 mm 직경의 이형 GFRP 보강근의 기본정착길이는 보강근 직경의 21배가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 설계시에는 ACI440.1R-03에서 제시하고 있는 식 (4)가 유효한 것으로 판단된다. 그러나, 본 이형 GFRP 보강근의 다양한 직경에 대한 정착길이를 결정하기 위해서는 좀 더 포괄적이며 일반적인 정착길이모델식이 필요하며, 직경의 영향과, 덮개 및 보강근의 위치(상부 및 하부)에 대한 영향을 고찰하기 위한 실험적 연구가 수반되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 문도영, 심종성, 오홍섭(2006) 초단유리섬유와 에폭시 혼합물을 이용한 FRP보강근 표면성형기법 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권 제4A호, pp. 775-785.
- 문도영, 오홍섭, 심종성(2005) 이형리브를 갖는 GFRP 보강근의 부착성능에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목

학회, 제25권 제5A호, pp. 719-727.

- ACI 440.1R-03 (2003) Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, ACI, Farmington Hills, Michigan, USA
- ACI 440.1R-06 (2006) Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, ACI, Farmington Hills, Michigan, USA
- Achillides, Z. and Pilakoutas, K. (2004) Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composite for Construction*, Vol 8, No. 2, pp. 173-181.
- Al-Zahrani, M.M, Al-Dulajjan, S.U., Nanni, A., Bakis, C.E., and Boothby, T.E. (1999) Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations. *Construction and Building Materials*, Vol 13, pp. 299-309.
- Bakis, C.E., Uppuluri, V.S., Nanni, A., and Boothby, T.E. (1998) Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, Issue 8, pp. 1307-1319.
- Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R. (1997) Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 1, No. 2, pp. 40-51.
- Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R. (2002) Development length of FRP straight rebars, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 33, Issue 7, pp. 493-504.
- Elegehausen, R. Popov, E.P., and Bertero, V.V. (1983) *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*, Report No. 83/23, EERC, Univ. of California, Berkeley.
- Marval, L.J., Cox, J.V., and Cochran, K.B. (2003) Bond between carbon fibre reinforced polymer bars and concrete. I: Experimental study, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, pp. 154-163.
- Moon, D.Y. (2008) *Bond behaviour of newly developed deformed GFRP bars*. Ph. D Dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea.
- Moon, D.Y, Usama, A.E., and Benmokrane, B. (2009) Effective surface deformation height and bond rigidity of gfrp reinforcing bars with ribs, *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 17, No. 3, pp. 161-171.
- Okelo, R. and Yuan, R.L. (2005) Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 3, pp. 203-213.
- Wambeke, B. and Shield, C. (2006) Development length of glass fiber reinforced polymer bars in concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, pp. 11-17.
- Zhang, B. and Benmokrane, B. (2002) Pullout bond properties of fiber-reinforced polymer tendons to grout. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 399-408.

(접수일: 2010.7.7/심사일: 2010.8.30/심사완료일: 2010.8.30)