



국내 CFRP 긴장재의 전달길이에 관한 실험적 연구

정우태^{1)*} · 박영환¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 구조교량연구실

An Experimental Study on Transfer Length of Domestic CFRP Tendon

Woo-Tai Jung^{1)*} and Young-Hwan Park¹⁾

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Structural Engineering & Bridges Research Division, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT CFRP(carbon fiber reinforced polymer) tendons can be used as an alternative to solve the corrosion problem of steel tendons. Material properties of CFRP tendons such as bond strength, transfer length, and development length should be determined in order to apply to concrete structures. First of all, in case of application for pretension concrete members with CFRP tendons, transfer length is an important factor. A total of 9 beams have been cast to determine transfer length and development length of domestic CFRP tendon in this paper. Test results revealed that transfer length of the prestressing 25% and 50% are 34D, 55D respectively. Also, transfer length has increased as the prestressing force has increased. A change was observed in transfer length of developed CFRP tendon after 9 weeks. α_t of developed CFRP tendon was 2.3 similar to the steel strand.

Keywords : carbon fiber reinforced polymer, prestressing tendon, transfer length, development length

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 (이하 PSC) 구조물은 긴장재를 활용하므로 처짐 및 균열제어가 용이하여 콘크리트 구조물의 장대화 및 품질향상에 큰 기여를 하고 있다. 1962년 구운교가 국내 최초로 PSC 교로 가설된 이후 많은 PSC 교량들이 건설되었다. 2008년도 교량현황조사에 의하면 전국 도로교 24,923개중에서 20.3%인 5,061개가 PSC 교량이며, 일선 실무자 및 설계자들이 가장 선호하는 교량형식이어서 앞으로도 더 많은 교량들이 가설될 예정이다.¹⁾ PSC 구조물에 사용되는 긴장재 (prestressing tendon)는 대부분 강재 (steel)이지만, 교량 또는 해안가의 콘크리트구조물은 열악한 외부 환경에 노출되어 있기 때문에 눈, 비와 같은 수분이나 제설제 또는 염분과 같은 외부 부식 촉발인자로 인해 강재 긴장재에 부식이 발생할 가능성이 크다. PSC 구조물에서 긴장재가 부식되어 긴장력이 저하되면 구조물의 내하력이 감소되어 PSC 구조물의 안전성에 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 최근 선진국들을 중심으로 유리나 탄소 등 내부식성이 강한 섬유복합재료 (fiber reinforced polymer composites, 이하 FRP)를 활용한 긴장재의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 콘크리트구조물에 성공적으

로 적용된 사례가 증가하고 있어, 향후 그 이용이 급속히 확대될 것으로 예상된다.

현재 CFRP (carbon fiber reinforced polymer) 긴장재 및 정착장치를 개발하기 위한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 CFRP 긴장재 개발에 이은 다양한 정착구 개발을 목적으로 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.²⁾

CFRP 긴장재를 콘크리트구조물에 적용하기 위해서는 부착강도, 전달길이, 정착길이와 같은 재료적 특성이 명확히 결정되어야 한다. 특히 프리텐션 콘크리트 부재에 CFRP 긴장재가 적용될 경우 전달길이는 긴장력 도입에 있어서 중요한 요소가 된다.

전달길이는 긴장력을 부착 및 긴장재를 통하여 콘크리트에 전달하는 데 필요한 길이를 말한다. 전달길이 구간에서 긴장재의 지름증가는 반지름 방향으로 콘크리트에 압축력을 발생시켜 이 압축력에 의한 마찰력이 콘크리트에 긴장력을 도입시키며, 이러한 일종의 췌기작용을 *hoyer effect*이라고 한다. 전달길이는 긴장력의 크기, 긴장재 지름, 단면형태, 표면상태 등에 의해 영향을 받으므로 이론적으로 정하기는 어려우며 측정 결과를 참고하여 정하고 있다.^{3,4)}

Mahmoud⁵⁾는 *leadline*, CFCC에서 생산된 CFRP 긴장재의 전달길이 및 정착길이를 결정하기 위한 실험을 수행하였는데, *leadline*의 경우 긴장력이 인장강도의 50%, 70%에서 각각 450, 600 mm로 보고하고 있으며, CFCC의 경우는 각각 310, 400 mm로 보고하였다. *leadline*의 전달길이는 Abdelrahman 등⁶⁾이 수행한 실험에서 긴장력 50%,

*Corresponding author E-mail : woody@kict.re.kr
Received November 3, 2008, Revised February 26, 2009
Accepted April 17, 2009
©2009 by Korea Concrete Institute

70%에서 각각 360, 500 mm로 보고하고 있으며, Soudki 등⁷⁾은 각각 650, 725 mm로 보고하고 있다. ACI³⁾에서는 탄소섬유인 경우, 긴장량이 50~70%인 leadline 전달길이는 직경의 50~80배로 제시하고 있고, CFCC는 50배로 제시하고 있다.

전달길이는 부착특성, 콘크리트 강도, 긴장재 직경 등에 영향을 받지만, 본 연구에서는 자체 개발된 긴장재의 기본적인 전달길이를 산정하기 위해 긴장량을 변수로 하여 실험을 수행하였다. 또한 ACI 전달길이 산정식을 적용할 수 있도록 특성 계수 α_t 를 실험 결과로부터 도출하고 본 실험으로 산정된 전달길이는 자체 개발된 CFRP 긴장재의 중요한 특성으로서 관련 기술자료에 반영될 것이다.

2. 전달길이 실험체 제작

2.1 CFRP 긴장재 기본제원

CFRP 긴장재는 자체 개발된 것으로 형태는 Fig. 1과 같다. CFRP 긴장재의 단면은 연선 형태가 아닌 원형이며 공칭직경 ϕ 9.5, 유효면적 70.88 mm^2 로서, Table 1에 기본제원을 나타내었다.

자체 개발된 CFRP 긴장재는 탄소섬유 및 비닐에스터 수지를 사용하였고, 섬유 무게 함유율 측정 결과 62.59%로 나타났다. 또한 Fig. 1과 같은 X형 피복을 갖는 긴장재의 부착강도는 14.08 MPa로, 외산 FRP 긴장재의 부착강도 평균보다 약 20% 증가시켰으며, 본 연구에서는 기본적인 성능과약을 위해 특별한 표면처리를 추가하지 않았다 (Fig. 2).

2.2 실험 변수

실험체는 크게 긴장력 및 긴장재 개수로 나누어진다. 도입 긴장력은 CFRP 긴장재 극한 인장강도의 25, 50%로 하였고, 긴장재는 1개 또는 2개가 설치되었다.

전달길이를 파악하기 위해, CFRP 긴장재에 변형률계이지를 좁은 간격으로 부착할 경우 CFRP 긴장재와 콘크리트와의 순수한 부착길이가 짧아져서 전달길이 및 정

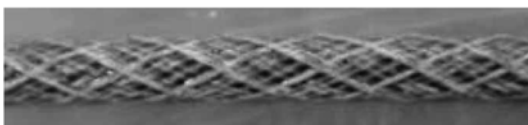


Fig. 1 Shape of CFRP tendon

Table 1 Properties of CFRP tendon

Cross section type	Diameter (mm)	Area (mm^2)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strain (%)
Round	9.5	70.88	2,500	135	1.8

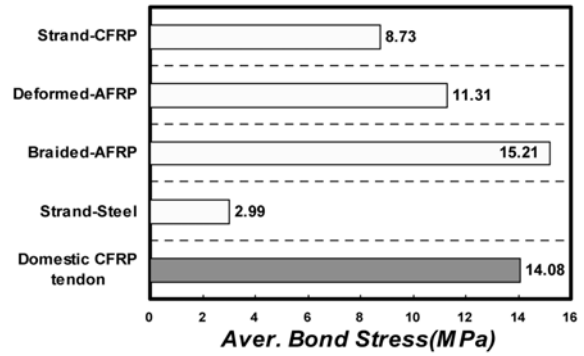


Fig. 2 Average bond stress of various tendons

착길이에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CFRP 긴장재에 변형률계이지 (strain gauge : 5 mm)를 dead쪽에서 지간 중앙까지 보 단부로부터 100, 200 mm 떨어진 곳에 부착하고 이후로 200 mm 간격으로 Fig. 3과 같이 부착하였다. 따라서 도입 긴장력이 같은 3개 실험체의 실제 변형률계이지 부착위치를 콘크리트 타설 전에 미리 실측하고, 타설 후에 양생된 3개의 실험체로부터 계측된 데이터를 길이별로 정렬하여 데이터를 100 mm 간격으로 측정된 것처럼 나타낼 수 있다. 또한 CFRP 긴장재에 부착된 변형률계이지 위치에 맞추어 콘크리트 측면에 또 다른 변형률계이지 (strain gauge : 60 mm)를 부착하여 CFRP 긴장재로부터 계측된 변형률과 비교하였다.

정착길이는 긴장재가 극한 인장강도까지 발현되는데 필요한 전달길이 이후의 매립길이로서, 본 연구에서는 CFRP 긴장재에 비부착구간을 설치하여 정착길이를 고찰하였다.

2.3 실험체 제작

프리텐션 실험체의 기본제원은 단면 $200 \times 300 \text{ mm}$, 지간 길이 3,000 mm이며, 설계기준강도는 45 MPa의 레미콘을 사용하여 제작하였다 (Fig. 4). 인장철근은 SD400의 D10 철근을 철근비 0.0041로 배근하였으며, 압축철근에는 D13을 세가닥 배근하였고, 사용재료의 물성은 Table 3에 나타내었다.

2.4 실험체 긴장 및 해제

2.4.1 긴장력 도입 및 양생

CFRP 긴장재를 거푸집에 설치하기 전에 변형률계이지 부착 및 비부착구간 설치 등 작업을 수행하였다. 거푸집 조립이 완료되면 CFRP 긴장재를 긴장틀 내의 거푸집에 위치시키고 긴장작업을 수행하였다. 긴장작업은 CFRP 긴장재의 극한인장강도의 약 25, 50%를 긴장한 후, 콘크리트를 타설하고 양생하였다. CFRP 긴장재에 긴장력을 도입한 순간부터 제거까지 CFRP 긴장재에 부착된 변형률계이지를 통하여 변형률 변화를 계측하였다 (Figs. 5~7).

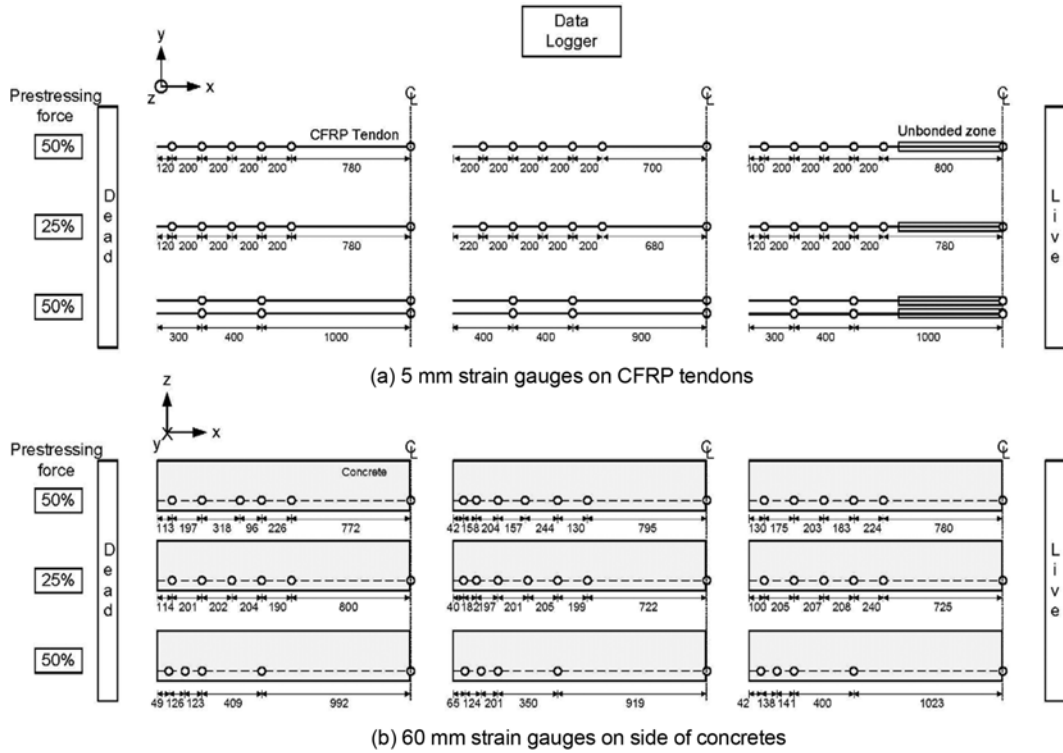


Fig. 3 Gauge configuration for the measurement of transfer length

Table 2 Test variables

Specimens	Initial stress level (f_{pi}/f_{pu})	No. of CFRP tendons	Unbonded length (mm)
Pre-1*50-D	0.5	1	-
Pre-1*50-M	0.5	1	-
Pre-1*50-L	0.5	1	1,400
Pre-1*25-D	0.25	1	-
Pre-1*25-M	0.25	1	-
Pre-1*25-L	0.25	1	14,00
Pre-2*50-D	0.5	2	-
Pre-2*50-M	0.5	2	-
Pre-2*50-L	0.5	2	1,400

Table 3 Properties of soncrete and rebars

Materials	Properties	
	Concrete	Compressive strength (MPa)
Steel reinforcing bars (D10/13)	Yield strength (MPa)	426/481
	Diameter (mm)	9.53/12.70
	Area (mm ²)	71.33/126.70

재로 파악된 전달길이와 콘크리트 표면에 부착된 변형률 변화로 파악된 전달길이를 비교하였다. 콘크리트 측면에 부착한 변형률계기는 CFRP 긴장재에 부착한 위치와 동일하게 하였다 (Fig. 8).

2.4.2 전달길이 측정을 위한 게이지 부착

타설 3일 후 거푸집을 제거하고 콘크리트 측면에 변형률계기를 부착하였다. 긴장력 제거시 CFRP 긴장재의 변형률 변화가 콘크리트 표면에 전달되므로, CFRP 긴장

2.4.3 긴장력 제거

실험체에 긴장력을 도입하기 위해서는 도입된 긴장력을 제거하여야 한다. 긴장력 제거시 콘크리트 강도가 낮으면 슬립 발생 등의 문제가 발생하기 때문에 도로교설

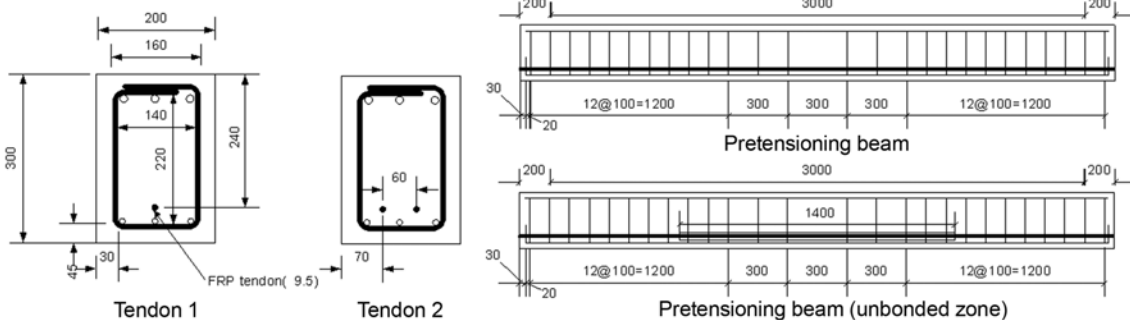


Fig. 4 Dimension of specimens



Fig. 5 Steel and CFRP tendon setting



Fig. 9 Prestressing release

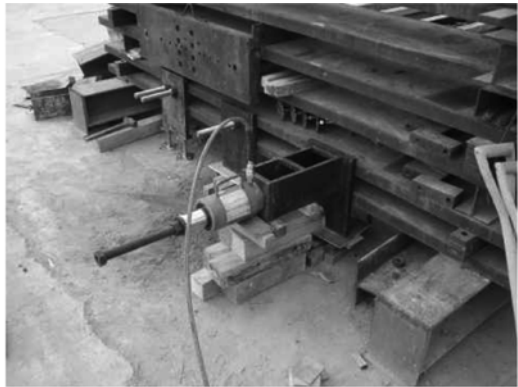


Fig. 6 Prestressing work

계기준에서는 프리텐션 부재의 경우 30 MPa, 포스트텐션 부재는 28 MPa로 콘크리트 강도를 규정하고 있으며, 이때 공시체는 특별히 규정되지 않는 한 부재의 양생조건과 동일하게 양생시켜야 한다.⁸⁾ 본 연구에서는 FRP 관련 규정 부재로 이 규정에 따라 콘크리트 타설시 제작한 공시체의 강도를 확인한 후 긴장력 제거를 수행하였다.

콘크리트 양생 9일 후 공시체강도 확인 결과 42 MPa로 나타나 도로교설계기준의 30 MPa를 초과하므로 도입된 긴장력을 제거하였다. 긴장력 제거는 실톱을 사용하여 긴장축 (live)부터 실시하였다 (Fig. 9).

3. 전달길이 측정 결과

3.1 긴장량에 따른 전달길이

전달길이 산정을 위해 프리텐션 실험체 9개를 제작하였고, 긴장작업에서부터 CFRP 긴장재에 부착된 변형률 게이지의 변형률 변화를 계측하였다. Table 4에 전달길이 측정 결과를 나타내고, Figs. 10과 11은 각각 긴장량 25, 50%인 경우의 CFRP 긴장재 및 콘크리트 변형률을 나타냈다. Fig. 12는 2개의 CFRP 긴장재에 50%로 긴장된 실험체의 단부로부터 길이에 따른 표면부착 콘크리트의 변형률을 나타냈다.



Fig. 7 Curing and measuring

Table 4 Test results of transfer length

Specimens	Initial stress level f_{pi} / f_{pu}	No. of CFRP tendons	Measured transfer length L (mm)	
			5 mm gauge	60 mm gauge
Pre-1*50-D	0.5	1	520(55D)	404(43D)
Pre-1*50-M	0.5	1	520(55D)	404(43D)
Pre-1*50-L	0.5	1	520(55D)	404(43D)
Pre-1*25-D	0.25	1	320(34D)	419(45D)
Pre-1*25-M	0.25	1	320(34D)	419(45D)
Pre-1*25-L	0.25	1	320(34D)	419(45D)
Pre-2*50-D	0.5	2	400(43D)	390(41D)
Pre-2*50-M	0.5	2	400(43D)	390(41D)
Pre-2*50-L	0.5	2	400(43D)	390(41D)



Fig. 8 Gauge attachment

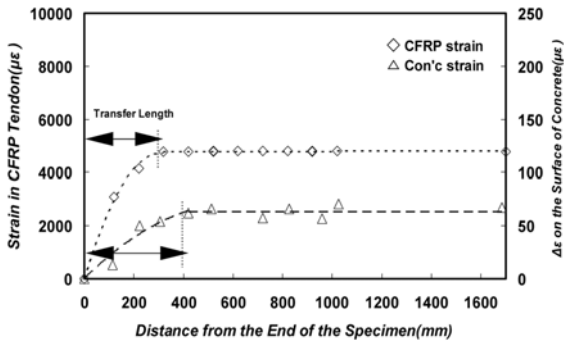


Fig. 10 Strain distribution along CFRP tendon (25%)

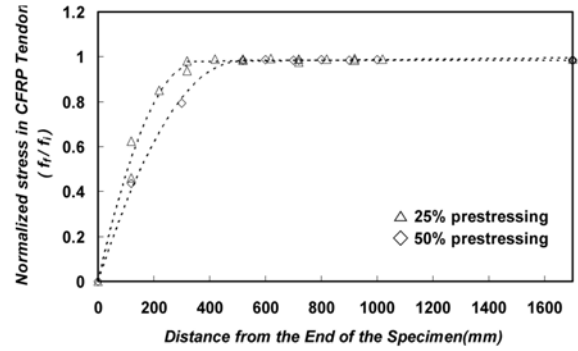


Fig. 13 Normalized transfer length (25, 50%)

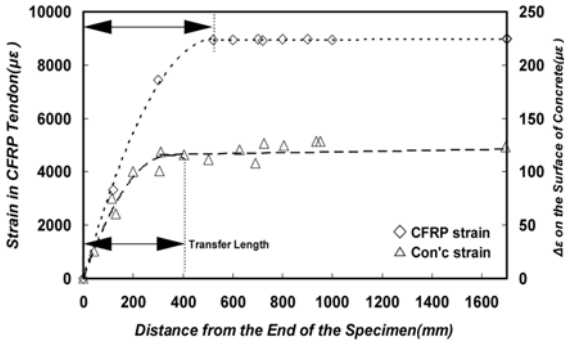


Fig. 11 Strain distribution along CFRP tendon (50%)

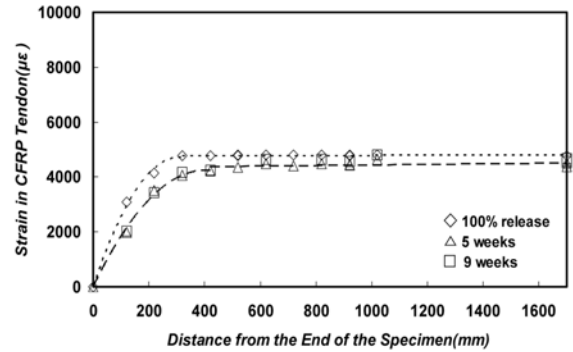


Fig. 14 Time-dependent effect on transfer length (25%)

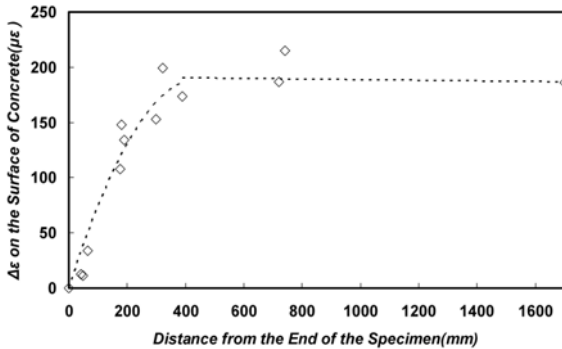


Fig. 12 Strain distribution along CFRP tendon (50% × 2)

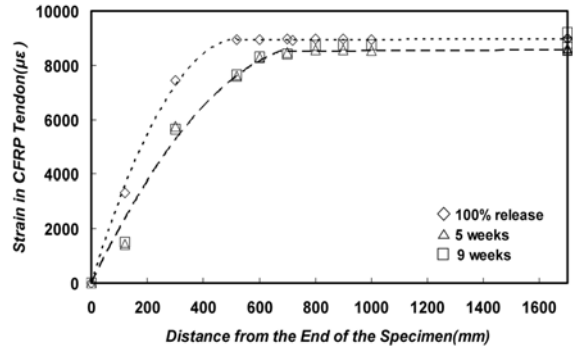


Fig. 15 Time-dependent effect on transfer length (50%)

긴장량 25%인 경우, CFRP 긴장재로부터 측정된 전달길이는 320(34D) mm이고, 콘크리트로부터 측정된 전달길이는 419(45D) mm이었다. 긴장량 50%인 경우, CFRP 긴장재로부터 측정된 전달길이는 520(55D) mm이고, 콘크리트로부터 측정된 전달길이는 404(43D) mm이었다. 긴장량 50%가 두개인 경우, CFRP 긴장재로부터 측정된 전달길이는 400(43D) mm이고, 콘크리트로부터 측정된 전달길이는 390(41D) mm이었다.

콘크리트 표면에 부착된 게이지로부터 측정된 전달길이는 긴장력 증가에 따라 전달길이가 감소하는 경향을 보였지만 CFRP 긴장재에 부착된 변형률게이지는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 콘크리트 표면 변형률 측정에 의한 전달길이 산정은 CFRP 긴장재의 변형률을 직접 측정하지 못하는 경우의 대안으로써, 본 연구에서는

전달길이 산정을 위해 CFRP 긴장재로부터 직접 측정된 변형률을 사용하였다.

Fig. 13은 긴장량 25, 50%의 전달길이를 모든 변형률 게이지에 대해 마지막 변형률을 초기 변형률로 나누어 정규화하였다. 따라서 정규화된 값은 긴장력 손실이 100%인 0과 손실이 0%인 1 사이로 나타나게 된다. 이 결과도 변형률에 의한 전달길이 분포와 비슷한 경향을 보였고, 긴장력이 증가하면 전달길이도 늘어나는 것으로 나타났다.

3.2 시간경과에 따른 전달길이

Figs. 14 및 15는 긴장량 25, 50%의 시간경과에 따른 변형률 변화를 그래프로 나타내었다. 긴장력 도입후 5주

까지는 긴장력 손실이 발생하지만 5주와 9주 후의 변형을 증감이 미미하므로 긴장력 도입 이후의 손실은 5주 안에 완료되는 것으로 나타났다. 긴장량 25%의 경우, 시간에 따른 전달길이는 도입 직후의 전달길리와 비슷하였지만, 긴장량 50%의 경우는 약 20% 증가된 65D로 나타났다. Mahmoud⁵⁾는 FRP 종류에 따라서, 시간경과에 따른 전달길이가 일정할 수도 또는 증가할 수도 있다고 보고하였으며, Zou⁹⁾는 시간에 따라 긴장력은 손실되지만 전달길이는 영향을 받지 않는다고 보고하였다.^{5,9)} 본 연구에서는 긴장력의 크기에 따라 시간경과가 전달길이에 영향을 주는 것으로 나타나 향후 다양한 긴장력에 대한 시간경과에 따른 전달길이의 영향을 고찰하여야 할 것으로 사료된다.

3.3 전달길이 산정식

ACI 318-05는 강연선용 전달길이를 계산하는 간단식을 식 (1)과 같이 제시하고 있다.¹⁰⁾

$$L_t = \frac{f_{pe}d_b}{20.67} \quad (1)$$

여기서, 전달길이 L_t 와 공칭 스트랜드 직경 d_b 의 단위는 mm이며, 긴장된 긴장재의 유효응력 f_{pe} 의 단위는 MPa이다. 식 (1)은 1950년대와 60년대에서 실험을 토대로 도출되었다. 비록 식 (1)과 같이 콘크리트 강도가 전달길이에 영향을 주지 않는다는 연구도 있지만, 강연선으로 긴장된 콘크리트에 관한 최근 연구에서는 전달길이가 일반적으로 콘크리트강도가 커질수록 감소한다고 보고하고 있고, 이러한 연구중 많은 연구자들은 콘크리트 강도 영향을 고려한 전달길이용 식을 제안하고 있으며 몇몇 연구는 상업용 CFRP 긴장재 (스트랜드형 로드형)의 전달길이를 실험하였다.¹¹⁾ 연구로부터 관측된 전형적인 전달길이는 $50\sim 80d_b$ 범위로 나타났다. 그들의 실험 결과를 바탕으로 Mahmoud¹²⁾ 등은 CFRP 스트랜드와 로드의 전달길이는 콘크리트강도의 함수로 제안하고 식 (2)와 같이 산정할 수 있다고 보고하였다.^{5,12,13)}

$$L_t = \frac{f_{pe}d_b}{\alpha_t f_c^{2/3}} \quad (2)$$

여기서, α_t 는 보강재-특성 계수 (reinforcement-specific coefficient)로 회귀분석에 의해 산정되며, 상업용 제품인 leadline은 1.9, CFCC는 4.8로 제시하고 있다. 식 (2)는 ACI 440.4R-04에 채택되어 CFRP로 긴장된 콘크리트의 전달길이 산정에 적용되고 있다.

본 연구에서 도출된 전달길이 데이터를 이용하여 새로운 전달길이 산정식을 제안하고 수정하는 것은 시험체 수가 작기 때문에 신뢰도가 떨어질 수 있으므로, 본 연구에서는 식 (2)로 전달길이를 산정하기 위하여 개발된

긴장재 만의 특성 계수를 제시하고자 한다.

측정된 전달길이 데이터에 근거하여 전달길이와의 추세선을 통해 보강재-특성 계수인 α_t 를 산정하였고, Fig. 16과 같이 Mahmoud¹²⁾가 제시한 다른 재료의 특성계수와 같이 나타내었다.

본 연구에서 개발된 CFRP 긴장재의 보강재-특성 계수를 산정한 결과, α_t 는 2.3으로 나타났으며, Leadline과 CFCC의 α_t 사이에 위치하지만 PS강연선 ($\alpha_t=2.4$)과 비슷한 것으로 나타났다.

3.4 정착길이 실험

본 절에서는 비부착 구간을 갖는 실험체를 4점 휨 재하하여 CFRP 긴장재의 정착길이 실험을 수행하였다 (Fig. 17).

실험체의 비부착구간이 1,400 mm이므로, 한쪽의 정착길이는 1,000 mm이며 실험 결과는 Table 5에 정리하였다.

Fig. 18은 정착길이 실험체의 하중-변위를 나타낸다. 실험 결과 긴장량 증가에 따라 균열하중 및 인장철근 항

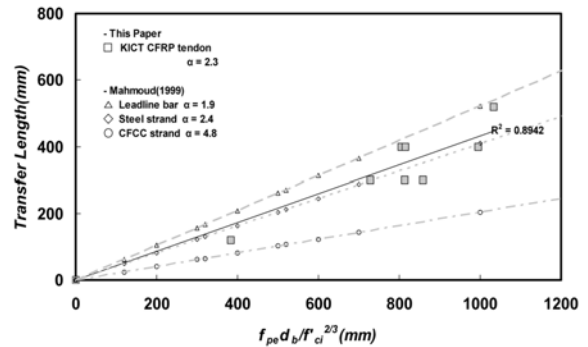


Fig. 16 Transfer length correlation for developed CFRP tendon, steel strand, leadline bar, and CFCC strand

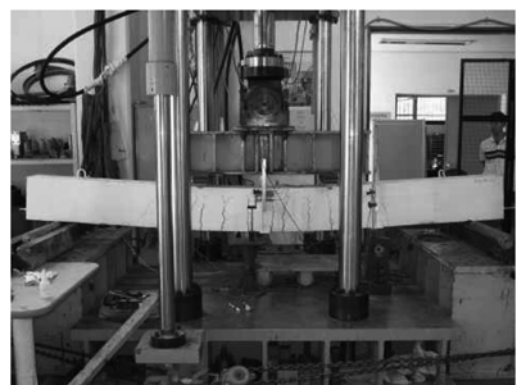


Fig. 17 View after testing

Table 5 Test results of development length

Specimens	Unbonded length (mm)	Bonded length (mm)	Failure mode
Pre-1*50-L	1,400	1,000	CFRP rupture
Pre-1*25-L			
Pre-2*50-L			Concrete crush

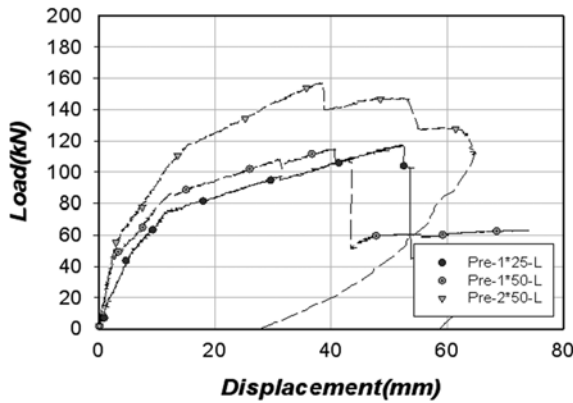


Fig. 18 Load-deflection curve

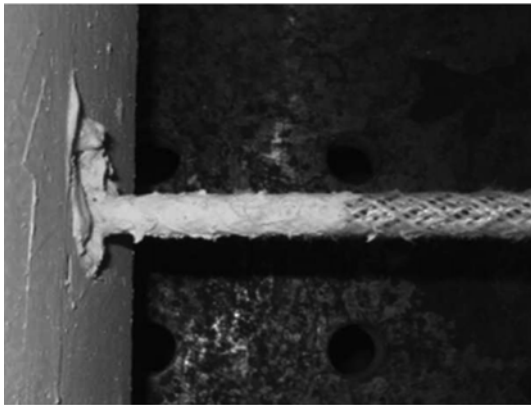


Fig. 19 End of beam after testing

복하중이 증가하였고, CFRP 긴장재 1개인 실험체 Pre-1*25-L, Pre-1*50-L는 긴장재 파단으로 최대하중이 비슷하게 나타났다. CFRP 긴장재가 2개인 실험체 Pre-2*50-L 경우는 긴장재 1개보다 최대하중이 30% 증가한 시점에서 콘크리트 압괴로 실험이 종료되었다. 모든 실험체에서 양단의 CFRP 긴장재와 콘크리트와의 슬립은 발생하지 않았다 (Fig. 19).

정착길이는 긴장재를 파단시킬 수 있는 길이이며, 본 연구에서는 Pre-2*50-L 실험체를 제외한 Pre-1*25-L, Pre-1*50-L 실험체에서 긴장재 파단을 확인하였다. 따라서 CFRP 긴장재의 정착길이는 1,000 mm(105D) 이하로, ACI 440-4R에서 제시된 leadline의 175D보다 작게 나타났다.

정착길이는 부착강도에 영향을 받으므로 본 연구에서 사용된 CFRP 긴장재의 부착강도는 leadline보다 4배 이상이어서 정착길이가 짧아진 것으로 판단되며, 향후 정착길이 변수실험을 통하여 정확한 정착길이 도출이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 자체 개발된 CFRP 긴장재의 전달길이 특성을 파악하기 위해 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 본 연구에서 사용된 CFRP 긴장재의 전달길이는 긴장력 25%인 경우는 34D, 긴장력 50%인 경우는 55D로 측정되었고, 긴장력이 커지면 전달길이가 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 시간경과에 따른 전달길이 변화를 살펴보면, 긴장력 도입 후 5주까지는 긴장력 손실이 발생하지만 5주와 9주후의 변형을 증감이 미미하므로 긴장력 도입 이후의 손실은 5주 안에 완료되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 긴장력의 크기에 따라 시간경과가 전달길이에 영향을 주는 것으로 나타나 향후 다양한 긴장력에 대한 시간경과에 따른 전달길이의 영향을 고찰하여야 할 것이다.
- 3) 보강재 특성계수 산정 결과, 본 연구에서 사용된 CFRP 긴장재의 보강재-특성 계수 α_f 는 2.3으로 PS 강연선 ($\alpha_f=2.4$)과 비슷한 것으로 나타났다.
- 4) 정착길이 실험 결과, CFRP 긴장재의 정착길이는 1,000 mm (105D)이하로, ACI 440-4R에서 제시된 leadline의 175D보다 작게 나타났다. 이 결과는 기본 정착길이로써, 향후 피복두께, 표면처리 등의 다양한 변수를 통해 보다 정확한 정착길이가 도출되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설핵심기술연구개발사업의 일원으로 한국 건설교통기술평가원의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부, “교량현황조사서,” 국토해양부, 2008, 134 pp.
2. 한국건설기술연구원, “FRP 긴장재 및 정착장치의 개발과 활용을 위한 연구,” 한국건설기술연구원, 2007, 435 pp.
3. ACI Committee 440, *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (ACI 440.4R-04)*, ACI Farmington Hills, Michigan, USA, 2004, 35 pp.
4. 동명사, 프리스트레스트 콘크리트, 동명사, 1997, 208 pp.
5. Mahmoud, Z. I., Rizkalla, S. H., and Zaghoul, E.-E R., “Transfer and Development Length of Carbon Fiber Reinforced Polymer Prestressing Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, 1999, 602 pp.
6. Abdelrahman, A. A. and Rizkalla, S. H., “Serviceability of Concrete Beams Prestressed by Carbon Fiber Reinforced Plastic Bars,” *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, 1997, pp. 447~457.
7. Soudki, K. A., Lee, C., and Green, M. F., “Transfer Length of CFRP Rods in Prestressed Concrete Beams,” *Proceedings of 1st CSCE Structural Speciality Conference*, Edmonton, Alberta, Canada, May 29-June 1, 1996, pp. 111~122.
8. 건설교통부, “도로교설계기준,” 건설교통부 2005, 345 pp.
9. Patrick, X. and Zou, W., “Long-term Properties and Transfer Length of Fiber-Reinforced Polymers,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No. 1, 2003. pp. 10~19.

10. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-05/318R-05)," ACI Farmington Hills, Michigan, USA, 2005, 430 pp.
11. Gross, S. P. Yost, J. R. and Matthew V. D'ANGELO, "Transfer Length of CFRP Rods in Pretensioned Concrete Beams," FRPRCS-8 University of Patras, Patras, Greece, July 16-18, 2007, pp. 504-505.
12. Mahmoud, Z. I. and Rizkalla, S. H., "Bond of CFRP Prestressing Reinforcement," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS2)*, Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 877-884.
13. Mahmoud, Z. I., Rizkalla, S. H., and Zaghoul, E., "Transfer and Development Length of CFRP Reinforcement," *Proceedings of the 1997 CSCE Annual Conference*, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1997, pp. 101-110.

요 약 CFRP (carbon fiber reinforced polymer) 긴장재는 PC 강연선의 부식문제를 해결하기 위해 대안으로 사용될 수 있다. CFRP 긴장재를 콘크리트구조물에 적용하기 위해서는 부착강도, 전달길이, 정착길이와 같은 재료적 특성이 명확히 결정되어야 한다. 특히 프리텐션 콘크리트 부재에 CFRP 긴장재가 적용될 경우 전달길이는 긴장력 도입에 있어서 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 개발된 CFRP 전달길이 및 정착길이를 산정하기 위해 프리텐션 보 9개를 제작하였다. 전달길이 실험결과, 긴장력 25%인 경우는 34D, 긴장력 50%인 경우는 55D로 측정되었고, 긴장력이 커지면 전달길이가 증가하는 것으로 나타났다. 시간경과에 따른 전달길이 변화를 살펴보면, 긴장력의 크기에 따라 시간경과가 전달길이에 영향을 주는 것으로 나타났다. 보강재 특성계수 산정 결과, 본 연구에서 개발된 CFRP 긴장재의 보강재-특성 계수 α_f 는 2.3으로 PS강연선 ($\alpha_f=2.4$)과 비슷한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 탄소섬유복합재, 긴장재, 전달길이, 정착길이