

FRP 시트의 유효부착길이 모델에 대한 검증

고훈범
인하공업전문대학 건축학과

Verification of Effective Bond Length Model Between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete

Hune-Bum Ko
Department of Architecture, Inha Technical College

요약 FRP시트의 우수한 성능을 발휘하기 위하여 콘크리트와의 정확한 부착강도를 추정하는 것이 중요한데 이때 유효부착길이 중요한 역할을 한다. 유효부착길이에 영향을 미치는 요인으로는 FRP시트의 종류, 시트의 탄성계수, 시트의 두께, 콘크리트의 압축강도, 콘크리트의 인장강도, 실험상수 등을 꼽을 수 있다. 이러한 다양한 인자들로 인하여 유효부착길이에 대한 정량적인 평가가 쉽지 않아 아직까지도 실무에 사용 가능한 모델로 발전되지 못하였다. 본 연구는 FRP시트와 콘크리트와의 부착특성 모델에 필요한 다양한 연구자들이 제시한 유효부착길이 모델을 실험자료에 근거하여 실무에서 사용 가능할 수 있도록 정량적인 검증을 하고자 한다. 15개의 유효부착길이 모델에 대하여 모델에 미치는 요인을 분석하고 문헌에서 인용한 188개의 시험체에 대한 실험결과를 Chen&Teng 모델과 Iso 모델을 사용하여 부착강도를 도출하였다. 그리고 그 도출한 부착강도를 근거로 각각의 유효부착모델을 비교해 본 결과 FRP시트의 탄성계수와 두께, 콘크리트의 강도 인자로 이루어진 간단한 모델만으로도 부착강도를 정도 높게 추정할 수 있다고 판단된다.

Abstract The excellent reinforcement performance of fiber-reinforced polymer(FRP) sheet bonded to concrete is verified, importantly, by estimating the correct bond strength between concrete and the FRP sheet. The effective bond length also plays an important role in this verification. Generally, many parameters, such as the type, elastic modulus, and thickness of the FRP sheet, the compressive and tensile strengths of concrete, and the experimental constant, affect the effective bond length. Since these various parameters make it difficult to quantitatively evaluate the effective bond length, a model that can easily be used in practice for the evaluation is needed and yet to be developed. Hence, this study analyzed the above-mentioned parameters in 15 proposed models and compared them to the experimental results of 188 specimens using the bond strength models of Chen & Teng and Iso. Consequently, this study indicated that highly accurate bond strength could be estimated by simple effective bond length models that included the strength of concrete and the elastic modulus and thickness of the FRP sheet.

Keywords : Bond Strength, Concrete, Concrete Compressive Strength, Effective Bond Length, FRP

이 논문은 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Hune-Bum Ko(Inha Technical college)

email: hbko@inhac.ac.kr

Received April 25, 2022

Revised June 7, 2022

Accepted July 7, 2022

Published July 31, 2022

1. 서론

구조물에 대한 보강방법으로는 강판에 의한 방법과 FRP(FRP-Fiber Reinforced Polymer) 시트 보강 방법을 꼽을 수 있다. 일반적으로 강판에 의한 보강방법이 경제적이며 많이 사용되고 있으나 최근 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등 다양한 FRP제품이 국내외적으로 많이 소개되어 철근 콘크리트 구조물에 적용하는 사례가 늘고 있다. FRP시트는 강판과 비교하여 가격은 고가이지만 경량이어서 시공하기 편리하여 현장에서는 선호하는 재료이며, 또한 역학적 특성과 내구성도 강판에 비교하여 우수한 특징을 가지고 있다.

FRP시트의 우수한 성능을 발휘하기 위하여 콘크리트와의 정확한 부착강도를 추정하는 것이 중요한데 이때 유효부착길이가 중요한 역할을 한다. 유효부착길이에 영향을 미치는 요인으로는 FRP시트의 종류, 시트의 탄성계수, 시트의 개수, 시트의 두께, 시트의 변형, 콘크리트의 압축강도, 콘크리트의 인장강도, 실험상수 등을 꼽을 수 있다. 이러한 다양한 인자들로 인하여 유효부착길이에 대한 정량적인 평가가 쉽지 않아 외국에서는 다양한 실험을 통하여 검증하고 여러가지 모델들을 제안하였으며 각국의 코드로도 반영되었지만, 아직까지도 실무에 사용 가능한 모델로 발전되지 못하였으며 어떠한 모델이 더 정확하게 유효부착길이를 표현할 수 있는지에 대해서 검증되지 못하였다.

본 연구는 FRP 시트와 콘크리트와의 부착특성 모델에 필요한 다양한 연구자들이 제시한 유효부착길이 모델을 실험자료에 근거하여 실무에서 사용 가능할 수 있도록 부착강도 모델을 통하여 정량적인 검증을 하고자 한다.

2. 유효부착길이에 대한 기존 연구

FRP시트의 유효부착길이에 대한 연구는 여러 연구자에 의해 진행되었으며 다양한 모델이 제안되었고 또한 선진국에서는 각 나라의 코드로도 반영되었다[1-14]. 국내에서도 FRP시트의 부착특성에 대한 연구가 이루어지고 있으나 유효부착길이에 대한 연구는 아직도 미흡한 실정이다.

(1)모델은 FRP시트에 대한 유효부착길이의 초기단계 모델로 FRP시트 탄성계수 및 시트 두께와 콘크리트 인장강도로 표현하고 있으며 Eurocode에 반영된 모델이다. (2)모델은 간단한 모델의 하나로 FRP시트 탄성계수

및 시트 두께만을 표기하고 있다. (3)모델은 (1)모델로부터 수정된 모델로 이탈리아, 유럽, 영국코드에 동일하거나 또는 변형된 형태로 사용되고 있어 가장 많이 인용되고 있는 모델로 판단된다.

(1) Holzenkämpfer(1994)[1]

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{4f_t}} \text{ (Eurocode 8-3, Europe)}$$

(2) Sato 외(1996)[2]

$$L_e = 1.89 (E_f t_f)^{0.4}$$

(3) Neubauer and Rostásy(1997)[3]

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_t}} \text{ (CNR-DT 200/04, Italy)}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{C_2 f_t}} \text{ (FIB B14-Appendix A1, Europe)}$$

$$L_e = 1.44 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ck} f_t}} \text{ (FIB B14-Appendix A2, Europe)}$$

$$L_e = 0.7 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_t}} \text{ (CT TR55, UK)}$$

여기에서, $C_2=2$, f_{ck} =특성강도(Characteristic strength of concrete)

(4)모델은 최소제곱법으로 얻은 식으로 FRP시트 탄성계수 및 시트 두께로 표현하고 있으며, 미국과 캐나다 코드에 변형된 형태로 사용되고 있다. (5)모델은 (1)모델과 (3)모델과도 유사한데 콘크리트 인장강도 대신에 압축강도로 표현하고 있으며, 호주 코드로 사용되고 있다. (5) 모델은 Chen과 Teng의 부착강도 (16)모델에 포함된 유효부착길이모델로 현재까지 부착강도를 비교적 정확하게 추정하는 모델로 알려져 있다[5].

(4) Maeda 외(1997)[4]

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(E_f t_f)}$$

$$L_e = \frac{23300}{(n E_f t_f)^{0.58}} \text{ (ACI 440.2R-02, USA)}$$

$$L_e = \frac{25350}{(E_f t_f)^{0.58}} \text{ (ISIS CSA S806-02, Canada)}$$

여기에서, n=FRP의 층 수

(5) Chen and Teng(2001)[5]

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} \text{ (CIDAR, Australia)}$$

(6)모델인 경우 유효부착길이를 고정된 값 100mm로 표현하고 있는데 너무 단순화된 표현이라고 판단된다.

(7)모델은 (2)모델과 유사하다. (7)모델과 (9)모델은 각각 (2)모델과 (5)모델과 유사하며, (8)모델인 경우는 FRP시트 탄성계수 및 시트 두께와 콘크리트 압축강도외에 접착층의 전단강성을 도입한 것이 특징이다.

(6) Yang 외(2001)[6]

$$L_e = 100mm$$

(7) Iso 외(2003)[7]

$$L_e = 0.125(E_f t_f)^{0.57}$$

(8) Ueda 외(2003)[7]

$$L_e = \frac{38.1(E_f t_f)^{0.38}}{\left(\frac{G_a}{t_a}\right)^{0.657} f_c^{0.118}}$$

(9) Dai 외(2005)[8]

$$L_e = 0.74 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_c^{0.236}}}$$

(10), (11), (12)모델인 경우는 너무 복잡하게 표현하고 있어 정밀한 수치해석을 수행할 때 사용될 수 있으나 간단한 식으로 사용하기에는 관련된 인자가 많다. (13)모델과 (14)모델은 유사한 모델로 판단되며 FRP시트 탄성계수 및 시트 두께와 콘크리트 압축강도로만 표현되어 있다. (15)모델은 (1)모델과 (3)모델과 유사한 모델로 판단된다.

(10) Lu 외(2005)[9]

$$L_e = a + \frac{1}{2\lambda_1} Ln \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}$$

(11) Seracino 외(2007)[10]

$$L_e = \frac{\pi}{2 \sqrt{\frac{t_f L_{per}}{\delta_f E_f A_f}}}$$

(12) Bakay 외(2009)[11]

$$L_e = \frac{\epsilon_f E_f t_f}{k \sqrt{f_c}}$$

(13) Ben Oueddou 외(2009)[12]

$$L_e = 0.012 t_f \left(\frac{E_f}{\sqrt{f_c}} \right)$$

(14) Wu 외(2009)[13]

$$L_e = 0.395 \frac{(E_f t_f)^{0.54}}{f_c^{0.09}}$$

(15) Shen 외(2015)[14]

$$L_e = 1.67 \frac{\sqrt{E_f t_f}}{f_t}$$

여기에서, 모델에 사용된 각 변수의 설명은 다음과 같으며, a , λ_1 , λ_2 =계산에 의해 결정되는 상수, b_c =콘크리트 판폭, b_f =FRP시트폭, c_2 , d_f , k =FRP 박리시험의 회기분 석으로부터 결정된 상수, E_f =FRP탄성계수, f_c =콘크리트 압축강도, f_t =DIN1048의 Pull-out시험으로 결정된 콘크리트표면 인장강도, G_a/t_a =접착층의 전단강성, L =부착길이, L_e =유효부착길이, P_u =부착강도, t_f =FRP시트 두께, β_L =부착길이와 유효부착길이와 관련된 기하학적 보정계수(부착길이보정계수), β_w =FRP시트와 콘크리트판의 폭과관련된 기하학적 보정계수(폭보정계수), τ_u =최대 부착응력, δ_f 는 부착응력-슬립곡선에서 최대부착응력시의 슬립, ϵ_f =FRP시트의 변형도를 의미한다.

3. 유효부착길이에 미치는 인자분석

2장에서 제안된 15종류의 유효부착길이모델에 대한 각각의 인자를 Table 1에 분석하고 그룹화 하였으며, 유효부착길이에 영향을 주는 인자는 크게 콘크리트 물성과 FRP 물성으로 구분할 수 있는데 모델에 따라 각각의 물성이 포함되지 않는 경우도 있다.

Table 1에서 살펴보면 (6)모델을 제외하면 FRP시트의 탄성계수 및 시트 두께가 유효부착길이에 영향을 미치는 기본인자라 할 수 있으며 (2)모델, (4)모델, (7)모델, (10)모델을 제외하면 콘크리트 강도특성도 유효부착길이에 영향을 미치는 주요한 인자라고 할 수 있다. 그 외 인

Table 1. Factors considered by existing effective bond length model

Factor name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
concrete compressive strength(f_c)					●			●	●		●	●	●	●	
concrete tensile strength(f_t)	●		●												●
elastic modulus of FRP(E_f)	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
thickness of FRP(t_f)	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
width of FRP(b_f)											●				
strain of FRP(ϵ_f)												●			
bond length($L=100mm$)						●									
value calculated from experiments(a, λ_1, λ_2)										●					
constant determined from a analysis(d_f, k)											●	●			
maximum bond stress(τ_u)											●	●			
slip at τ_u (δ_l)											●				
shear stiffness of adhesive layer(G_a/t_a)								●							

자료는 FRP너비, FRP 변형도, 부착길이, 실험이나 해석으로 결정되는 상수, 최대부착응력, 최대부착응력시 슬립, 접착층의 전단강성을 꼽을 수 있다.

결과적으로 인자를 많이 포함한 모델일수록 정교한 모델일 가능성이 크지만 복잡하게 된다는 단점을 가지게 된다. 유효부착길이 모델들은 재료의 특성들을 반영하여 논리적으로 도출된 모델이기 보다는 모델에 관련된 각각의 인자들을 실험변수로 사용하여 한정된 실험에 의하여 얻어진 실험적 모델이라는 한계를 가지고 있다.

4. 유효부착길이 모델에 대한 비교

유효부착길이 모델에 대한 비교를 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 11개의 문헌 188개의 시험체의 실험 결과 값을 인용하였으며, 실험값을 전부 인용할 수 없어서 비교에 필요한 요약된 값을 나타내었다.

2장에서 언급한 15개의 유효부착길이 모델에서 실무에서 간편하게 사용할 수 있는 모델로 Table 1에서 살펴본 유효부착길이에 영향을 미치는 기본 인자인 FRP시트의 탄성계수 및 두께와 콘크리트 강도특성으로 구성된 11개의 모델을 선택하였다. 유효부착길이는 부착강도를 추정하기 위해 매우 필수적인 인자로 각 유효부착길이모델의 신뢰성을 확인하기 위해서는 부착강도모델을 통해서 검증해야 한다. 부착강도 모델은 다양한 모델이 제안되고 있지만 본 연구에서는 복잡하지만 부착강도를 정도

높게 추정한다고 알려져 있는 (16) Chen&Teng모델 [5,9]과 콘크리트강도와 FRP시트폭만으로 간단하게 부착강도를 표현한 (17) Iso 모델을 가지고 유효부착길이 모델을 검증하였다. 유효부착길이모델에 대한 검증은 Chen&Teng과 Iso의 부착강도모델에 포함된 유효부착길이 (5)와 (7)모델을 포함하여 Table 2에 제시된 11개의 유효부착길이모델을 사용하여 이루어졌다.

각 모델을 통하여 유효부착길이를 188개의 시험체에 대하여 구하였으며 유효부착길이는 Chen& Teng과 Iso의 부착강도모델에 대입하여 부착강도를 계산하여 실험값과 비교해 보았다. Table 2에는 상대적으로 부착강도에 대한 실험값을 비교적 정도 높게 추정한 Chen&Teng모델의 결과값 만을 나타내었으며 해석값을 전부 인용할 수 없어, 비교를 위하여 최소와 최대값만을 표현하여 전체적인 값의 분포만을 나타내었다.

(16) Chen&Teng 부착강도 모델[5]

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & L \geq L_e \\ \sin\left(\frac{\pi L}{2L_e}\right) & L < L_e \end{cases}$$

$$\beta_w = \left[\frac{2 - (b_f/b_c)}{1 + (b_f/b_c)} \right]^{0.5}$$

$$P_u = 0.427\beta_L\beta_w\sqrt{f_c}b_fL_e$$

(17) Iso 외 부착강도 모델[7]

$$\tau_u = 0.93(f_c)^{0.44}$$

$$P_u = \tau_u L_e b_f$$

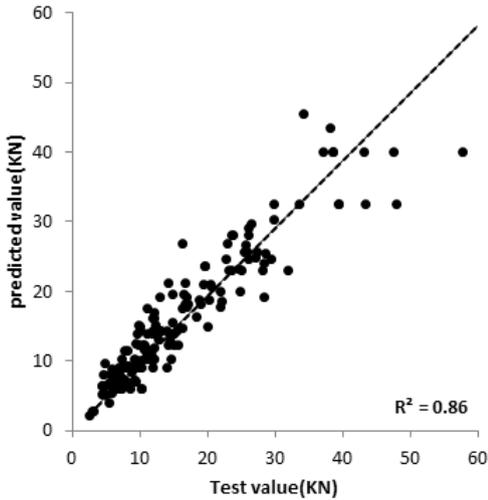
Table 2. Experimental database and analysis results calculated by Chen&Teng's bond strength model

Name	No.	Concrete properties		FRP properties			P_u (kN)	P_u (kN)(Predicted value)														
		f_c (MPa)	f_t (MPa)	t_f (mm)	L (MPa)	f_f (MPa)		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(12)	(14)	(15)				
Tan[15]	12	28.6	2.9	0.111 0.169 0.338	70 100 130	2777 3500	6.46~ 13.95	4.3~ 6.1	10.5 ~ 13.8	6.1~ 8.6	7.0~ 13.2	6.3~ 8.9	11.4 ~ 14.5	3.6~ 5.3	7.3~ 10.3	4.2~ 8.4	6.3~ 9.2	8.4~ 11.9				
Zhao et al.[16]	5	15.6 27.9	2.08 2.87	0.083	100 150	3350	11~ 12.75	7.4~ 8.4	14.9 ~ 20.0	10.4 ~ 11.9	12.3 ~ 16.4	10.7 ~ 12.4	15.1 ~ 20.2	5.3~ 7.1	11.4 ~ 14.2	9.1~ 9.1	9.8~ 12.4	16.6 ~ 17.1				
Takeo et al.[17]	33	23.5 ~ 48.1	2.61~ 3.87	0.111 0.165 0.167 0.334 0.501	100 200 300 500	2942 3481	6.75~ 14.35	4.4~ 8.0	9.8~ 16.3	6.2~ 11.3	2.2~ 7.0	6.5~ 11.7	7.6~ 12.7	3.6~ 7.3	7.3~ 13.2	5.6~ 21.6	6.4~ 12.3	9.0~ 16.4				
Ren[18]	30	21.8 34.4 42.2	2.5 3.22 3.6	0.33 0.507	60 100 150	3271 3890	4.61~ 22.8	3.3~ 14.9	6.8~ 35.2	4.7~ 21.1	2.0~ 11.4	4.9~ 22.3	5.1~ 21.7	2.8~ 15.5	5.4~ 27.0	5.5~ 27.4	4.8~ 25.0	6.8~ 27.2				
Ueda et al.[19]	16	22.6~ 44.7	2.55~ 3.71	0.11 0.165 0.22 0.33 0.55	75 150 200 300 700	2940 3479	2.4~ 38.0	1.3~ 25.0	2.9~ 59.2	1.9~ 35.4	1.4~ 18.2	2.0~ 37.3	2.7~ 35.0	1.1~ 26.4	2.2~ 45.5	1.7~ 47.6	1.9~ 42.4	2.8 ~ 43.5				
Wu et al.[20]	19	42.0 57.6	3.71 4.21	0.083~ 1.0	250 300	4200 4400	11.8~ 27.25	7.6~ 14.9	20.0 ~ 34.2	10.8 ~ 21.1	3.0~ 14.3	11.4 ~ 22.2	13.9 ~ 19.6	7.7~ 17.9	14.4 ~ 28.1	8.7~ 42.7	12.8 ~ 27.3	12.4 ~ 24.4				
Dai et al.[8]	16	35	3.21	0.11 ~1.14	330	1500 3030 3500 3550	23.1~ 60.9	13.3 ~ 23.0	32.6 ~ 50.6	18.8 ~ 32.5	11.2 ~ 21.2	19.5 ~ 33.9	29.9 ~ 29.9	12.1 ~ 22.6	23.1 ~ 40.1	15.3 ~ 46.0	20.5 ~ 37.0	24.7 ~ 42.8				
Ko et al.[21]	18	31.4	2.99	0.144 0.167 0.353	300	1700 3600 4340	4.4~ 15.6	3.5~ 7.2	9.2~ 16.2	5.0~ 10.2	6.2~ 14.2	5.2~ 10.6	12.0 ~ 12.0	2.9~ 6.6	6.0~ 12.3	2.7~ 11.2	5.1~ 11.1	6.8~ 14.0				
Bima et al.[22]	7	24~ 36.5	2.5~ 3.3	0.111 0.167 0.222 0.334	100 150	3400	16.8~ 28.3	10.1 ~ 16.9	24.1 ~ 36.5	14.3 ~ 23.9	8.0~ 16.3	15.0 ~ 24.8	18.7 ~ 23.1	9.4~ 16.4	17.8 ~ 29.2	11.7 ~ 34.4	15.8 ~ 26.9	18.6 ~ 32.2				
Carlo et al.[23]	14	58 63	4.5~ 4.7	0.165 0.33 0.495	65~ 130	3000 3430	12.1~ 29.8	7.6~ 16.5	21.7 ~ 40.2	10.7 ~ 23.3	3.3~ 9.5	11.7 ~ 25.5	14.6 ~ 16.9	8.6~ 21.1	15.0 ~ 32.6	9.7~ 47.8	13.7 ~ 31.8	11.6 ~ 25.3				
Kamihar-ako et al.[24,25]	18	34.9~ 75.5	3.2~ 5.36	0.111 0.222	100 145 150 175 250	3320 3500	2.9~ 14.9	1.6~ 8.6	3.9~ 22.0	2.3~ 12.2	2.1~ 12.1	2.4~ 12.8	3.3~ 18.8	1.5~ 8.4	2.8~ 15.5	2.0~ 10.5	2.5~ 13.9	3.0~ 15.1				
Total	188	15.6~ 75.5	2.08~ 5.36	0.083~ 1.14	60~ 700	1500~ 4400	2.4~ 60.9	1.3~ 25.0	2.9~ 59.2	1.9~ 35.4	1.4~ 21.2	2.0~ 37.3	2.7~ 35.0	1.1~ 26.4	2.2~ 45.4	1.7~ 47.8	1.9~ 42.4	2.8~ 43.5				

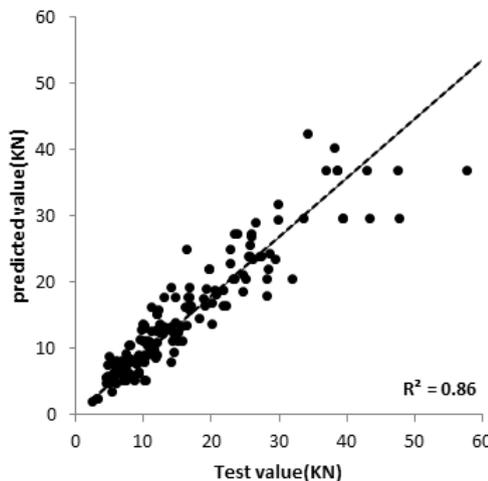
Table 3. Linear regression analysis results(R^2)

Bond strength model name	Effective bond length model no.										
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(12)	(14)	(15)
Chen&Teng	0.85	0.84	0.85	0.50	0.85	0.44	0.85	0.86	0.76	0.86	0.81
Iso	0.72	0.68	0.72	0.56	0.71	0.21	0.73	0.72	0.69	0.73	0.67

Chen&Teng과 Iso의 부착강도모델에 대한 실험값과 해석값의 상관관계의 정도는 Table 3에 결정계수로 나타내었다. 11개의 유효부착길이모델 중 (4)모델과 (6)모델을 제외하고 Chen& Teng 부착강도모델로 계산된 결정계수는 0.76에서 0.86 분포를, Iso 부착강도모델에서는 0.67에서 0.73의 분포를 나타내고 있어 각각의 모델에서는 전체적으로 비슷한 값의 분포를 보여주고 있다.

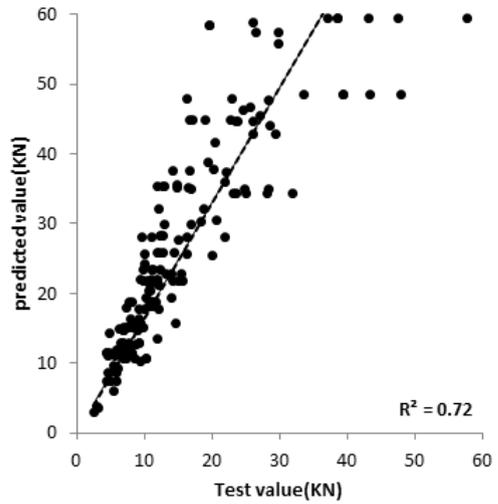


(a) Dai's effective bond length model

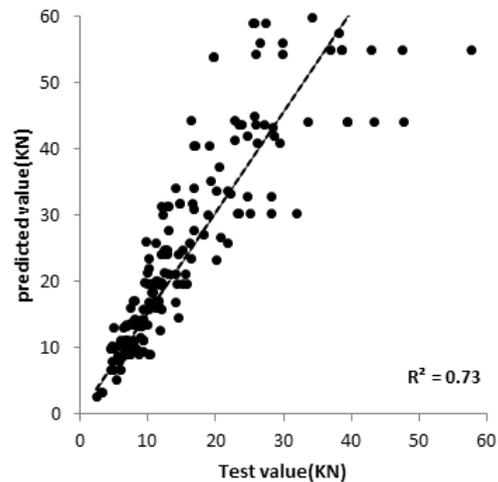


(b) Wu's effective bond length model

Fig. 1. Comparisons of predicted and test bond strength based on Chen&Teng's bond strength model



(a) Dai's effective bond length model



(b) Wu's effective bond length model

Fig. 2. Comparisons of predicted and test bond strength based on Iso's bond strength model

여기에서, (4)모델인 경우 e함수가 가진 특성으로 인하여 부착길이의 분포가 넓어질수록 값의 분포가 차이나서 결정계수가 낮은 값을 보여주고 있다고 판단되며, (6)모델은 부착길이에 관계없이 유효부착길이를 100mm로 일정한 값을 사용하기 때문에 해석값의 정확도가 낮게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 1과 Fig. 2는 Table 3에서 비교적 결정계수가 높은 값을 보여주는 (9) Dai 의 모델과 (14) Wu 의 모델에 대한 결과를 보여주고 있는데 Fig. 1과 Fig. 2의 결정

계수의 차이는 Chen&Teng 부착강도모델이 Iso와 부착강도모델 보다 다양한 변수를 사용하고 있어 유효부착길이 모델 종류와 관계없이 실험값을 좀더 정확히 평가하고 있다고 판단된다.

본 연구에서는 Chen&Teng과 Iso 부착강도모델만을 사용하여 다양한 유효부착길이 모델을 비교하였으므로 어떤 모델이 가장 정확하게 유효부착길이를 표현할 수 있는 모델이며 어떤 모델이 가장 실무에 유효한 모델인가 하는 정확한 모델 비교에 대한 한계가 있을 수 있다고 판단된다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 도출한 해석결과를 살펴보면 각각의 부착강도모델에 맞는 유효부착길이 모델이 당연히 존재하지만 (4)모델과 (6)모델을 제외한 유효부착모델들은 정도의 차이는 있으나 실무적으로 부착강도를 평가하는데 충분한 신뢰성을 가지고 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 15개의 유효부착길이 모델에 대하여 모델에 미치는 요인을 분석하고 문헌에서 도출한 188개의 시험체에 대한 실험결과를 각각의 유효부착길이 모델을 사용하여 Chen&Teng과 Iso의 부착강도 모델을 통하여 부착강도를 도출하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기존에 제안된 15개의 유효부착길이 모델에 미치는 중요 요인으로 FRP시트의 탄성계수 및 두께와 콘크리트 강도특성을 꼽을 수 있었다.
- (2) 부착강도에 대한 해석값과 실험값을 비교해 본 결과, 결정계수를 살펴보면 FRP시트의 탄성계수 및 두께와 콘크리트 강도로 구성된 11개의 모델 중 (4)모델, (6)모델을 제외하고 전체적으로 상관관계가 높은 경향을 보여주고 있으며 이러한 모델들은 실무적으로 부착강도를 평가하는데 충분한 신뢰성을 가지고 있다고 판단된다.

향후 상기의 모델 중 좀 더 정도 높고 간편한 유효부착길이 모델을 도출하기 위해서는 추가적인 실험결과자료의 축적과 함께 다양한 부착강도모델을 통한 검증이 필요하다.

References

- [1] P. Holzenkämpfer, *Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile*, Ph. dissertation, TU Braunschweig, 1994(In German).
- [2] Y. Sato, T. Ueda, Y. Kakuta, T. Tanaka, "Shear reinforcing effect of carbon fibre sheet attached to side of reinforced concrete beams", *Proc. of 2nd international conference on advanced composite materials in bridges and structures*, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, pp.621-627, 1996.
- [3] U. Neubauer, F. S. Rostasy, "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", *Proc. of the 7th International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Scotland, Vol.2, pp.109-118, July 1997.
- [4] T Maeda, Y Asano, Y Sato, T Ueda, Y Kakuta, "A study on bond mechanism of carbon fiber sheet", *Proc. of 3rd international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, Sapporo, Japan Concrete Institute, Vol.1, pp.279-285, 1997.
- [5] J. F. Chen, J. G. Teng, "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol.127, No.7, pp.784-791, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784))
- [6] Y. X. Yang, Q. R. Yue, Y. C. Hu, "Experimental study on bond performance between carbon fiber sheets and concrete", *Journal of Building Structures*, Vol.22, No.3, pp.36-42, 2001(in Chinese).
- [7] Japanese Concrete Institute, Technical Report of Technical Committee on Retrofit Technology, *Proc. of the International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures*, Japanese Concrete Institute, Kyoto, Japan, pp.4-42, 2003.
- [8] J. Dai, T. Ueda, Y. Sato, "Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method", *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol.9, No.1, pp.52-62, 2005.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:1\(52\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(52))
- [9] X. Z. Lu, J. G. Teng, L. P. Ye, J. J. Jiang, "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete", *Engineering Structures*, Vol.27, NO.6, pp. 920-937, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>
- [10] R. Seracino, M. R. R. Saifulnaz, D. J. Oehlers, "Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints", *Journal of Composites for Construction*, Vol.11, NO.1, pp. 62-70, 2007.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(62))
- [11] R. Bakay, E. Y. Sayed-Ahmed, N. G. Shrive, "Interfacial debonding failure for reinforced concrete beams strengthened with carbon-fiber-reinforced polymer strips", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.36, pp.103-121, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1139/L08-096>

[1] P. Holzenkämpfer, *Ingenieurmodelle des verbundes*

- [12] M. Ben Ouedzou, A. Belarbi, S. W. Bae, "Effective bond length of FRP sheets externally bonded to concrete", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.3, No.2, pp.127-131, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2009.3.2.127>
- [13] Z. Wu, S. M. Islam, H. Said, "A three-parameter bond strength model for FRP-concrete interface", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.28, No.19, pp. 2309-2323, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684408091961>
- [14] D. Shen, H. Shi, Y. Ji, F. Yin, "Strain Rate Effect on Effective Bond Length of Basalt FRP Sheet Bonded to Concrete", *Article in construction and Building Materials*, Vol.82, pp.206-218, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.016>
- [15] Z. Tan, *Experimental research for RC beam strengthened with GFRP*, Master's thesis, Tsinghua University, China, 2002(in Chinese).
- [16] H. D. Zhao, Y. Zhang, M. Zhao, "Research on the bond performance between CFRP plate and concrete", *Proc. of 1st conference on FRP-concrete structures of China*, pp.247-253, 2000.
- [17] K. Takeo, H. Matsushita, T. Makizumi, G. Nagashima, "Bond characteristics of CFRP sheets in the CFRP bonding technique", *Proc. of Japan concrete institute*, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, June 1997.
- [18] H. T. Ren, *Study on basic theories and long time behavior of concrete structures strengthened by fiber reinforced polymers*, Ph.D. thesis, Dalian University of Technology, China, 2003(in Chinese).
- [19] T. Ueda, Y. Sato, Y. Asano, "Experimental study on bond strength of continuous carbon fiber sheet." *Proc. of 4th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures*, SP-188, Farmington Hills(MI), ACI, pp.407-416, 1999.
- [20] Z. S. Wu, H. Yuan, Y. Hiroyuki, K. Toshiyuki, "Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface", *ACI International SP-201-8*, pp.133-152, 2001.
- [21] H. Ko, Y. Sato, "Bond stress-slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic Load", *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol.11, No.4, pp.419-426, 2007.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:4\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:4(419))
- [22] B. A. Bimal, M. Hiroshi, "Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet", *Proc. of 5th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures*, Cambridge, University of Cambridge, pp.371-378, 2001.
- [23] P. Carlo, T Davide, M. Claudio, "Experimental study on bond behavior between concrete and FRP reinforcement", *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol.12, No.2, pp.180-189, 2008.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(180))
- [24] A Kamiharako, T Shimomura, K Maruyama K, "The Influence of the substrate on the bond behavior of continuous fiber sheet", *Proc. Japan Concrete Institute*, Vol.25, No.2, pp.1735-1740, 2003(in Japanese).
- [25] A Kamiharako, T Shimomura, K Maruyama K, N. Hiroyuki, "Analysis of bond and debonding behavior of continuous fiber sheet bonded on concrete", *Journal of The Japan Society of Civil Engineers*, Vol.45, No.634, pp.197-208, 1999(in Japanese).
DOI: https://doi.org/10.2208/jsece.1999.634_197

고 훈 범(Hune-Bum Ko) [증신회원]



- 1992년 3월 : Kyoto Univ. 대학원 건축학과 (공학석사)
- 2007년 3월 : Kyoto Univ. 대학원 도시환경공학과 (공학박사)
- 1992년 10월 ~ 1998년 2월 : 금호건설기술연구소 주임연구원
- 2012년 1월 ~ 2012년 12월 : Ghent Univ. 초빙학자
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 건축학과 교수

<관심분야>
건축시공, 건축재료