

연속섬유(FRP)시트와 콘크리트의 부착강도 영향 요인 검증

고훈범
인하공업전문대학 건축과

Verification of Parameters Influencing Bond Strength between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete

Hune-Bum Ko
Department of Architecture, Inha Technical College

요약 최근 콘크리트 구조물을 보강하는데 경량이며 높은 강도를 가지고 있는 FRP(Fiber Reinforced Polymer)시트의 사용이 증가하고 있는데 구조물 보강 설계 시 부착 강도가 매우 중요하다. 그래서 FRP시트와 콘크리트 사이의 부착 강도에 대한 정확한 수치 모델을 얻기 위하여 많은 연구자가 다양한 변수(콘크리트 압축강도 및 인장강도, 콘크리트와 FRP의 탄성계수, 콘크리트와 FRP의 폭과 두께, 파괴에너지, 부착 길이, 유효부착길이, 최대 부착 응력과 최대 슬립)를 가지고 실험과 해석 연구를 수행하여 왔다. 결과적으로 많은 모델이 도출되었으나 실무에 쉽게 사용될 수 있는 검증된 모델은 제시되지 않았다. 그래서 본 연구는 현재까지 제안된 23개의 모델(Khalifa 모델, Iso 모델, Maeda 모델, Chen 모델 등)로부터 부착 강도에 미치는 요인을 분석하고 188개의 시험체에 대한 부착 강도 실험값을 각 모델들의 수치 결과값과 비교하여 수식이 간단하고 높은 정도를 가진 사용하기 쉬운 모델을 제시하고자 하였다. 결과적으로 부착 강도 모델로 Iso 모델과 Holzenkämpfer 모델의 유효부착길이에 근거한 실용성 있는 모델을 제안하였다.

Abstract Fiber-reinforced polymer (FRP) laminate sheets, which are lightweight with high strength, are commonly used to reinforce concrete structures. The bonding strength is vital in structural design. Therefore, experiments and analytical studies with differing variables (concrete compressive strength and tensile strength, the elastic modulus of concrete and FRP, thickness of concrete and FRP, width of concrete and FRP, bond length, effective bond length, fracture energy, maximum bond stress, maximum slip) have been conducted to obtain an accurate numerical model of the bond strength between an FRP sheet and concrete. Although many models have been proposed, no validated model has emerged that could be used easily in practice. Therefore, this study analyzed the parameters that influence the bond strength that were used in 23 of the proposed models (Khalifa model, Iso model, Maeda model, Chen model, etc.) and compared them to the test results of 188 specimens via the numerical results of each model. As a result, an easy-to-use practical model with a simple and high degree of expression was proposed based on the Iso model combined with the effective bond length model that was proposed by Holzenkämpfer.

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

이 논문은 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

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

email: hbko@inhac.ac.kr

Received May 27, 2020

Accepted September 4, 2020

Revised June 18, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

최근 철근콘크리트 구조물에 대한 보강방법으로 수십 년 동안 사용된 철판에서 FRP시트로 대체되어 오고 있으며 FRP시트의 사용은 계속적으로 증가하리라 예상된다. 그 이유는 FRP재료가 높은 강도, 장수 명, 부식 저항성, 비자성, 중량에 비해 높은 강도 등의 특성을 가지고 있기 때문에 지진이나 노후화 등으로 인한 피해를 입은 콘크리트 구조물을 보강하는데 효과적이기 때문이다.

일반적으로 FRP시트로 보강된 콘크리트 구조물에서 FRP시트와 콘크리트 경계의 균열진전과 파손에 의해 부착이 약화되면 결과적으로 콘크리트면으로부터 FRP시트가 완전하게 떨어져 나가게 되는 경우가 발생한다. 이와 같이 FRP시트와 콘크리트 사이의 부착은 콘크리트와 FRP시트사이의 응력전달을 하는데 매우 중요한 역할을 하며, FRP시트로 보강된 콘크리트 구조물의 구조적 성능은 콘크리트와 FRP사이의 부착강도에 의존한다고 할 수 있다. 그래서 FRP시트와 콘크리트 사이의 부착강도에 대한 정확한 수치모형을 얻기 위하여 많은 연구자가 다양한 변수를 가지고 실험연구와 해석연구를 수행하여 왔다. 결과적으로 많은 모형이 도출되었으나 실무에 쉽게 사용될 수 있는 검증된 모형은 제시되지 않았다. 본 연구는 현재까지 제안된 24개의 부착강도모델로부터 부착강도에 미치는 요인을 분석하고 11명의 연구자의 188개의 시험체에 대한 부착강도 실험결과 값을 각각의 모델들의 수치결과 값과 비교하여 비교적 수식이 간단하여 사용하기 쉬운 모델을 제시하고자 하였다.

2. 기존 연구에 대한 고찰

일반적으로 FRP시트와 콘크리트 부착특성을 확인하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일면전단시험이나 양면전단시험을 실시한다. 이러한 시험을 통하여 이론적으로 6가지 형태의 파괴모드를 추정할 수 있는데 실제적으로는 복합적인 모드에 의해 파괴에 이른다[1]. 6가지 형태의 파괴모드로는 콘크리트의 파괴, FRP파단을 포함한 시트의 인장파단, 접착제의 파괴, FRP시트와 콘크리트사이에서 FRP시트의 박리, 콘크리트와 접착제사이의 계면파괴, FRP시트와 접착제사이의 계면파괴를 꼽을 수 있다. 그런데 일반적으로 가장 많이 일어나는 파괴는 콘크리트와 FRP시트사이의 계면파괴로 거의 대부분의 부착강도 모델은 이 파괴모드를 기본으로 제안하고 있다.

물론 다른 파괴모드도 예상될 수 있으나 FRP시트파단인 경우 FRP특성에 의해 쉽게 강도를 계산할 수 있으며, 접착제인 경우 에폭시타입이 대부분인데 종류가 매우 다양하고 각 나라마다 사용하는 종류가 너무 많아 정량화하기 어렵다는 문제와 접착제의 파괴가 일어나지 않도록 재료가 선택되어야 한다는 전제조건으로 접착제를 고려한 파괴모델은 거의 제안하고 있지 않은 실정이다. 부착강도모델은 많은 연구자가 제안하고 있으나 현재까지 객관적으로 인정된 안정화된 모델은 없는 실정이다. 그래서 지금까지 제안된 모델을 바탕으로 모델의 특성을 분석하고자 한다. FRP시트의 강성은 FRP 폭과 두께 그리고 탄성계수로 표현할 수 있으며 거의 대부분의 식에 사용되고 있다.

모델에 사용된 각 변수의 설명은 다음과 같다. a =계산에 의해 결정되는 상수, b_c =콘크리트 판폭, b_f =FRP시트 폭, c_f =FRP 박리시험의 회기분석으로부터 결정된 상수, E_c =콘크리트탄성계수, E_f =FRP탄성계수, f_c =콘크리트압축강도, f_t =DIN1048의 Pull-out시험으로 결정된 콘크리트표면 인장강도, G_f =파괴에너지, L =부착길이, L_e =유효부착길이, l_f =FRP시트의 단면이차모멘트, P_u =부착강도, t_f =FRP시트 두께, t_c =콘크리트 두께, β_L =부착길이와 유효부착길이와 관련된 기하학적 보정계수(부착길이 보정계수), β_w =FRP시트와 콘크리트판의 폭과관련된 기하학적 보정계수(폭보정계수), τ_u =최대부착응력, δ_f 는 부착응력-슬립곡선에서 최대부착응력시의 슬립, δ_u =최대 슬립

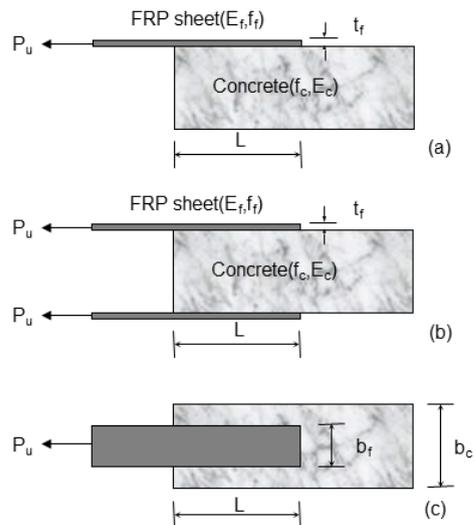


Fig. 1. Pull test type
(a) Single shear test (b) Double shear test (c) plan

(1)~(3)모델은 FRP에 대한 연구의 초기단계 모델로 FRP시트 폭과 부착길이만으로 부착강도를 표기하고 있으며 모델제한만으로도 의미가 크다고 할 수 있다. 물론 변수가 적어 부착강도를 정확히 표현하기 어렵다.

(1) Tanaka(1996)[2]와 Sato et al.(1996)[3]

$$\tau_u = 6.13 - \ln(L) \quad P_u = \tau_u L b_f$$

(2) Hiroyuki와 Wu(1997)[4]

$$\tau_u = 0.27L^{-0.669} \quad P_u = \tau_u L b_f$$

(3) Yoshizawa와 Wu(1997) [5]

$$P_u = b_f L (5.88L^{-0.669})$$

(4)모델은 (1)~(3)모델의 변수에 FRP시트의 탄성계수와 두께가 부가된 모델이며 유효부착길이 개념을 제안했다는데 의미가 있는 모델로 평가된다. 그러나 유효부착길이 FRP시트의 강성에 반비례한다고 가정하고 있으나 최근의 모델에서는 강성에 비례한다고 보고되고 있다.

(5)모델은 FRP시트와 콘크리트의 탄성계수와 두께를 변수로 도입하고 파괴에너지의 개념을 도입하고 있으며, (6)모델은 (5)모델에 FRP시트와 콘크리트의 폭 변수를 부가하였다. (7)모델은 (6)모델을 실험결과에 근거하여 더욱 정교하게 수정한 모델이다. (8)모델은 (5)와 (6)모델을 간략화시킨 모델로 추정되는데 3가지 모델 모두 파괴에너지 개념을 도입하고 있으며 파괴에너지에 대한 별도의 수식이 필요하게 된다. (9)모델은 부착강도에 대한 가장 초기 모델로서 FRP시트의 폭과 부착길이 그리고 콘크리트인장강도를 변수로 제안하였는데 콘크리트 강도가 부착강도에 영향을 미친다는 최근의 연구결과를 반영하고 있는 매우 의미가 있는 초기모델이다. (10)모델은 (9) 모델과 유사하나 콘크리트의 인장강도대신에 압축강도를 변수로 사용하고 있다.

(4) Maeda 외.(1997)[6]

$$\tau_u = (110.2 \times 10^{-6}) E_f t_f$$

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(E_f t_f)}, \quad P_u = \tau_u L_e b_f$$

(5) Täljsten(1994)[7]

$$P_u = b_f \sqrt{\frac{2G_f E_f t_f}{1 + (E_f t_f / E_c t_c)}}$$

(6) Yuan과 Wu(1999)[8]

$$P_u = b_f \sqrt{\frac{2G_f E_f t_f}{1 + (E_f t_f b_f / E_c t_c b_c)}}$$

(7) Yuan 외(2001)[9]

$$\lambda_1 \tanh[\lambda_1(L - a)] = \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)$$

$$\lambda_1^2 = (\tau_u / \delta_l E_f t_f) (1 + (E_f t_f b_f / E_c t_c b_c))$$

$$\lambda_2^2 = (\tau_u / (\delta_f - \delta_l) E_f t_f) (1 + (E_f t_f b_f / E_c t_c b_c))$$

$$P_u = (\tau_j b_f \delta_f) / (\lambda_2 (\delta_f - \delta_l)) \sin(\lambda_2 a)$$

(8) Lorenzis 외(2001)[10]

$$P_u = b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}$$

(9) Van Gemert(1980)[11]

$$P_u = 0.5b_f L f_t$$

(10) Adhikary와 Mutsuyoshi(2001) [12]

$$P_u = b_f L (0.25 f_c^{0.67})$$

(11)모델은 최대부착응력개념을 도입하고 콘크리트압축강도와 FRP시트의 탄성계수와 두께를 변수로 사용하고 있으며 유효부착길이도 변수로 제안하고 있는 것이 특징이다. (12)모델은 (11)모델과 유사하나 탄소섬유와 아라미드섬유를 구분해서 모델을 제안하고 있다. (13)모델은 (11)모델과 유사하게 최대부착응력과 유효부착길이를 제안하고 있는데 최대부착응력은 콘크리트 인장강도를 변수로, 유효부착길이는 100mm로 고정하고 있는 것이 특징이다.

(11) Khalifa 외(1998)[13]

$$\tau_u = (110.2 \times 10^{-6}) (f_c / 42)^{0.67} E_f t_f$$

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(E_f t_f)}, \quad P_u = \tau_u L_e b_f$$

(12) Izumo 외(1999)[14]와 JCI(2003)[15]

$$CFRP: P_u = (3.8 f_c^{0.67} + 15.2) E_f b_f t_f L \times 10^{-3}$$

$$AFRP: P_u = (3.4 f_c^{0.67} + 69) E_f b_f t_f L \times 10^{-3}$$

(13) Yang 외(2001)[16]

$$\tau_u = 0.5 f_t, \quad L_e = 100 \text{ mm}$$

$$P_u = (0.5 + 0.08 \sqrt{0.01 E_f t_f / f_t}) b_f L_e \tau_u$$

(14)와 (15)모델은 JCI(Japan Concrete institute, 일본콘크리트학회)에서 추천된 모델로 실험에 의해 최대 부착응력은 콘크리트 압축강도, 유효부착길이는 FRP시트의 탄성계수와 두께에 의존된다고 주장하고 있다. (16) 모델은 파괴에너지 개념을 콘크리트 압축강도로 쉽게 표현하여 모델은 간단하나 유효부착길이에 대한 변수를 제외시켰다.

(14) Sato 외(1996)[17]와 (JCI 2003)[15]

$$\begin{aligned} \tau_u &= 2.68x10^{-5} (f_c)^{0.2} E_f t_f \\ L_e &= 1.89 (E_f t_f)^{0.4} \text{ if } L_e > L : L_e = L \\ P_u &= \tau_u L_e (b_f + 7.4) \end{aligned}$$

(15) Iso 외(JCI 2003)[15]

$$\begin{aligned} L_e &= 0.125 (E_f t_f)^{0.57} \text{ if } L_e > L : L_e = L \\ \tau_u &= 0.93 (f_c)^{0.44}, P_u = \tau_u L_e b_f \end{aligned}$$

(16) Dai et al.(2005)[18]

$$\begin{aligned} G_f &= 0.514 f_c^{0.236} \\ P_u &= (b_f + 7.4) \sqrt{2 E_f t_f G_f} \end{aligned}$$

(17) Neubauer and Rostásy(1997)[19]

$$\begin{aligned} L_e &= \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_t}}, G_f = c_f f_t \\ \beta_L &= (L/L_e)(2 - L/L_e) \\ \beta_w &= \sqrt{1.125 \left(\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/400} \right)} \\ P_u &= \begin{cases} 0.64 \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} & \text{if } L \geq L_e \\ 0.64 \beta_L \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} & \text{if } L < L_e \end{cases} \end{aligned}$$

(17)~(22)모델들은 정교한 모델들로 콘크리트와 FRP 시트의 특성, 그리고 유효부착길이를 포함하고 있으며 특히 폭보정계수와 부착길이보정계수를 제안하고 있다. 정교한 모델이 실험값과 가장 유사한 결과를 보여줄 수는 있으나 결과적으로 모델이 너무 복잡해지는 경향이 있다. (17)~(20)모델은 유사한 폭보정계수와 부착길이보정계수를 변수로 가지고 있는 유사모델이라고 할 수 있다.

(18) Holzenkämpfer(1994)[20]와 Blaschko 외 (1998)[21]

$$\begin{aligned} L_e &= \sqrt{\frac{E_f t_f}{4 f_t}}, G_f = c_f f_t \beta_w^2 \\ \beta_L &= (L/L_e)(2 - L/L_e) \\ \beta_w &= \sqrt{1.125 \left(\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/400} \right)} \\ P_u &= \begin{cases} 0.78 b_f \sqrt{2 G_f E_f t_f} & L \geq L_e \\ 0.78 b_f \beta_L \sqrt{2 G_f E_f t_f} & L < L_e \end{cases} \end{aligned}$$

(19) fib(2001)[22]

$$\begin{aligned} \beta_L &= (L/L_e)(2 - L/L_e) \\ \beta_w &= 1.06 \sqrt{(2 - (b_f/b_c)) / (1 + (b_f/400))} \\ P_u &= \begin{cases} 0.64 \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} & \text{if } L \geq L_e \\ 0.64 \beta_L \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} & \text{if } L < L_e \end{cases} \end{aligned}$$

(20) CNR DT200/2004(2004)[23]

$$\begin{aligned} L_e &= \sqrt{E_f t_f / (2 f_t)}, k_G = 0.03 \\ \beta_L &= \begin{cases} 1 & \text{if } L \geq L_e \\ (L/L_e)(2 - L/L_e) & \text{if } L < L_e \end{cases} \\ \beta_w &= \begin{cases} \sqrt{\frac{(2 - 0.33)}{(1 + (b_f/400))}} & \text{if } L \geq L_e \\ \sqrt{\frac{(2 - (b_f/b_c))}{(1 + (b_f/400))}} & \text{if } L < L_e \end{cases} \\ P_u &= b_f \sqrt{2 E_f t_f k_G \beta_L \beta_w \sqrt{f_t f_c}} \end{aligned}$$

(22)모델은 (21)모델보다 훨씬 복잡한 모델로 보여지는데 부착길이보정계수는 동일한 개념의 변수를 사용하고 있다. (23)모델은 다른 모델과 다르게 최대부착응력을 변수로 사용하고 있는 것이 특징이다.

(21) Chen and Teng(2001)[24]

$$\begin{aligned} L_e &= \sqrt{E_f t_f / \sqrt{f_c}} \\ \beta_L &= \begin{cases} 1 & L \geq L_e \\ \sin\left(\frac{\pi L}{2 L_e}\right) & L < L_e \end{cases} \\ \beta_w &= \left[\frac{2 - (b_f/b_c)}{1 + (b_f/b_c)} \right]^{0.5} \\ P_u &= 0.427 \beta_L \beta_w \sqrt{f_c L_e} \end{aligned}$$

(22) Lu et al.(2005)[25]

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

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_u}{\delta_l E_f t_f}}, \lambda_2 = \sqrt{\frac{\tau_u}{(\delta_u - \delta_l) E_f t_f}}$$

$$a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left[0.99 \sqrt{\frac{\delta_u - \delta_l}{\delta_u}} \right] \quad \tau_u = 1.5 \beta_w f_t$$

$$G_f = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad \delta_l = 0.0195 \beta_w f_t$$

$$\beta_L = \sin \left[\pi L / 2L_e \right]$$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - (b_f/b_c)) / (1.25 + (b_f/b_c))}$$

$$P_u = \beta_L b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}$$

(23) Camli and Binici(2007)[26]

$$L_e = \sqrt{E_f t_f / \sqrt{f_c}} \theta = \sqrt{\tau_u / (\delta_u \sqrt{f_c})}$$

$$\tau_u = 3.5 f_c^{0.19}$$

$$\delta_u = f_c^{-0.4} (L/L_e)^{0.8} (b_f/b_c)^{0.4}$$

$$P_u = \sqrt{\tau_u \delta_u} \sqrt{E_f t_f b_f \tanh(\theta L / L_e)}$$

3. 부착강도에 미치는 인자분석

2장에서 제안된 23종류의 부착강도모델에 대한 각각의 인자를 Table 1에서 보는 바와 같이 분석하고 그룹화하였다. 부착강도에 영향을 주는 인자는 크게 콘크리트

물성과 FRP 물성으로 구분할 수 있는데 모델에 따라 콘크리트 물성이 포함되지 않는 경우도 있다. 모델에 사용된 각각의 인자를 살펴보면 FRP시트폭은 모든 모델에 사용되었으며, FRP시트의 탄성계수와 두께가 사용된 모델은 18개, FRP시트의 부착길이 및 유효부착길이 사용된 모델은 18개, 콘크리트 압축강도나 인장강도가 사용된 모델은 15개로 나타났다. 그 외 콘크리트 너비, 파괴에너지, 콘크리트탄성계수, 부착응력-슬립관계가 모델에 사용되었다. 결과적으로 인자를 많이 포함한 모델일수록 정교한 모델일 가능성이 크지만 복잡하게 된다는 단점을 가지게 된다.

4. 부착강도모델 비교

2장에서 많은 연구자에 의해 제안된 다양한 부착강도 모델을 살펴보았는데 대부분의 모델이 한정된 실험결과값에 근거하다 보니 일반적으로 사용하는 데는 한계가 있는 것도 사실이다. 일반적으로 변수를 적게 쓴 간단한 모델일수록 실험값과 상이한 결과값을 보여주며, 복잡한 모델일수록 모델개발시 사용된 실험값과 상당히 높은 연관성을 보여주고 있다[21]. 본 장에서는 기존에 제안된 부착강도모델을 다양한 연구자의 실험값과 비교 분석해 보고자 한다. 비교를 위하여 Table 2에서 보는 바와 같

Table 1. Factors considered by existing bond strength models

Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
concrete compressive strength(f_c)										●	●	●		●	●	●				●	●		●
concrete tensile strength(f_t)									●				●				●	●	●	●		●	
elastic modulus of concrete(E_c)					●	●	●																
width of concrete(b_c)						●	●										●	●		●	●	●	●
thickness of concrete(t_c)					●	●	●																
elastic modulus of FRP(E_f)				●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
thickness of FRP(t_f)				●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
width of FRP(b_f)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
bond length(L)	●	●	●				●		●	●		●					●	●	●	●	●	●	●
effective bond length(L_e)				●							●		●		●		●	●	●	●	●	●	●
fracture energy(G_f)					●	●		●								●		●					●
constant determined from a analysis(a, c_f)							●										●	●					
maximum bond stress(τ_u)																							●
slip at τ_u (δ_l)																							●
maximum slip at zero strength(δ_u)																							●

Table 2. Experimental database

Name	No.	Concrete properties				FRP properties				P_u (kN)
		f_c (MPa)	f_t (MPa)	b_c (mm)	E_f (GPa)	t_f (mm)	b_f (mm)	L (MPa)	f_f (MPa)	
Tan[27]	12	28.6	2.9	100	97 235	0.111 0.169 0.338	50 75	70 100 130	2777 3500	6.46~ 13.95
Zhao et al.[28]	5	15.6 27.9	2.08 2.87	150	240	0.083	100	100 150	3350	11~ 12.75
Takeo et al.[29]	33	23.5 ~ 48.1	2.61~ 3.87	100	230 373	0.111 0.165 0.167 0.334 0.501	40	100 200 300 500	2942 3481	6.75~ 14.35
Ren[30]	30	21.8 34.4 42.2	2.5 3.22 3.6	150	83.03 207	0.33 0.507	20 50 80	60 100 150	3271 3890	4.61~ 22.8
Ueda et al.[31]	16	22.6~ 44.7	2.55~ 3.71	100 500	230 372	0.11 0.165 0.22 0.33 0.55	10 20 50 100	75 150 200 300 700	2940 3479	2.4~ 38.0
Wu et al.[32]	19	42.0 57.6	3.71 4.21	100	23.9 230 390	0.083~ 1.0	40 100	250 300	4200 4400	11.8~ 27.25
Dai et al.[18]	16	35	3.21	400	74 84 230	0.11 ~1.14	100	330	1500 3030 3500 3550	23.1~ 60.9
Ko et al.[33]	18	31.4	2.99	100	35 72.6 261	0.144 0.167 0.353	50	300	1700 3600 4340	4.4~ 15.6
Bima et al.[34]	7	24~ 36.5	2.5~ 3.3	150	230	0.111 0.167 0.222 0.334	100	100 150	3400	16.8~ 28.3
Carlo et al.[35]	14	58 63	4.5~ 4.7	100	230 390	0.165 0.33 0.495	50	65~ 130	3000 3430	12.1~ 29.8
Kamiharako et al.[36,37]	18	34.9~ 75.5	3.2~ 5.36	100	270	0.111 0.222	10 ~90	100 145 150 175 250	3320 3500	2.9~ 14.9
Total	188	15.6~ 75.5	2.08~ 5.36	100~ 500	23.9~ 390	0.083~ 1.14	10~ 100	60~ 700	1500~ 4400	2.4~ 60.9

이 11명의 연구자의 실험결과에서 188개의 시험체에 근거하여 콘크리트와 FRP특성 인자와 부착강도 값을 도출하였다. 시험체 값을 전부 인용하기에는 양이 너무 많아 요약된 값만을 나타내었다.

실험결과 값에 의거하여 각각의 모델에 필요한 인자를 사용하여 부착강도 값을 계산하였다. 그 중에서 계산이 간편한 모델과 결정계수 값이 우수한 모델을 중심으로 Fig. 2에 나타내었다. 계산된 결과의 결정계수를 살펴보면 Chen 모델이 가장 정도 높은 값을 보여주고 있으나

다양한 인자를 도입한 복잡한 모델을 사용하고 있다. 정도 높은 부착강도 계산을 위해 추천할 만한 모델이라고 판단된다. 그런데 Khalifa 모델, Maeda 모델, Iso 모델도 Chen 모델과 비교하여 비슷한 결정계수값을 보여주고 있으며 Chen 모델보다 매우 간단한 수식으로 이루어진 것을 알 수 있다. 그래서 간략화된 모델을 제안하고자 Khalifa 모델, Maeda 모델, Iso 모델을 중심으로 다른 연구자들의 모델과 비교 분석하였다.

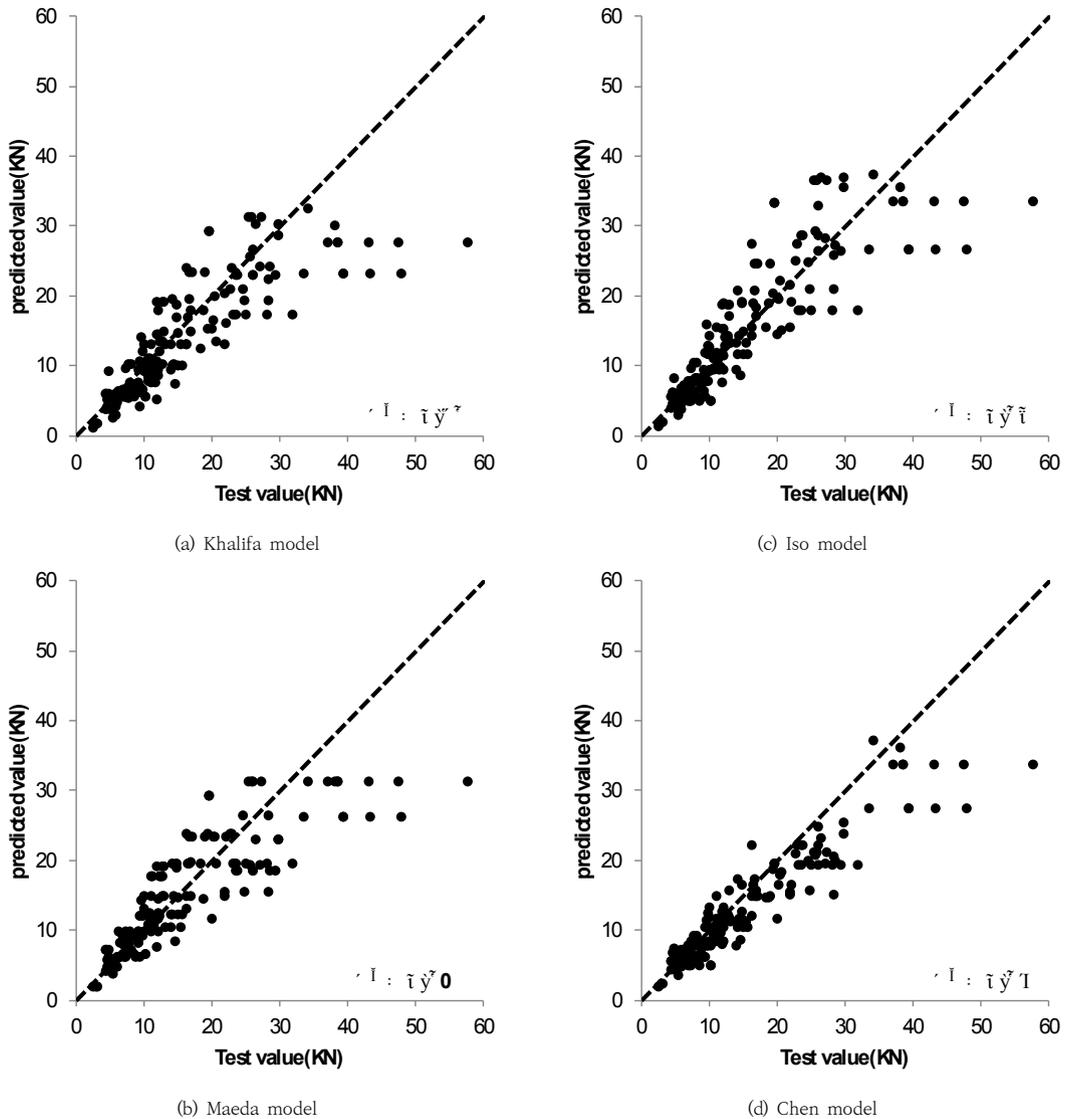


Fig. 2. Comparisons of predicted and test bond strengths

5. 간략화 모델의 제안

Table 1에서의 인자분석을 통하여 부착강도에 가장 많은 영향을 미치는 인자로 콘크리트 강도, FRP시트의 탄성계수, 두께, 폭, 그리고 유효부착길이라는 것을 확인 하였으며 Table 2의 실험값을 가지고 다양한 모델에 적용해 본 결과 Iso모델이 간단하면서도 부착강도 실험값을 높은 정도를 가지고 예측할 수 있었다.

그래서 Iso모델에 근거하여 다른 연구자의 최대부착값과 유효부착길이값을 차용하여 다양한 계산한 결과 다음의 (24)식이 가장 간단하면서도 실험값을 정도 높게 추정

할 수 있었다. 이 간략화된 모델은 최대부착은 Iso 모델의 값, 그리고 유효부착길이는 Holzenkämpfer 모델의 값을 차용하였다. 그리고 더욱 변수를 더욱 간략화를 위하여 (24)식에서의 콘크리트 인장강도($f_c = 0.3(f_c)^{0.67}$, CEB-FIB)는 콘크리트 압축강도로부터 환산할 수 있으므로 결과적으로 식(25)와 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 제안된 간략화 모델로 계산한 결과를 Fig. 3에 보여주고 있다. 하나의 실험결과에 맞춘 모델이 아닌 다양한 실험결과 값에 근거한 모델로 결정계수가 0.83을 나타내고 있어 충분한 정도를 가지고 있는 모델이라고 판단된다.

(24) Iso의 수정 모델

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

$$L_e = \sqrt{(E_f t_f)/(4f_t)} \text{ if } L_e > L : L_e = L$$

$$P_u = \tau_u L_e b_f$$

(25) 간략화한 모델

$$L_e = \sqrt{(E_f t_f)/(1.2f_c^{0.67})} \text{ if } L_e > L : L_e = L$$

$$P_u = 0.93(f_c)^{0.44} L_e b_f$$

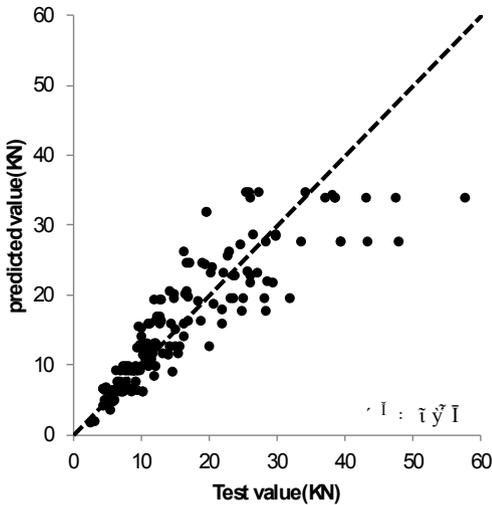


Fig. 3. Test bond strengths verses predictions of proposed bond strength model

3. 결론

본 연구를 통하여 23개의 부착강도모델로부터 부착강도에 미치는 요인을 분석하고 11명의 연구자로부터 얻은 188개의 시험체에 대한 부착강도 실험결과 값을 도출하여 각각의 모델들의 수치결과 값과 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 부착강도 모델의 인자분석을 통하여 부착강도에 가장 많은 영향을 미치는 주요 인자로는 콘크리트 강도, FRP시트의 탄성계수, 두께, 폭, 그리고 유효부착길이라는 것을 확인하였으며 부가적인 인자로 콘크리트 너비, 파괴에너지, 콘크리트탄성계수, 부착응력-슬립관계를 꼽을 수 있었다.

2. 부착강도 모델을 분석해 본 결과 일반적으로 변수를 적게 쓴 간단한 모델일수록 실험값과 상이한 결과값을 보여주며, 복잡한 모델일수록 모델개발시 사용된 실험값과 상당히 높은 연관성을 보여주고 있다
3. Iso모델에 근거하고 Holzenkämpfer모델의 유효부착길이값을 차용하여 (25)와 같은 간략화한 모델을 제안하였으며, 이 모델은 부착강도값을 높은 정도를 가지고 예측할 수 있고 수식이 간단하여 사용하기 편리한 모델로 판단된다.

References

- [1] 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))
- [2] T. Tanaka, *Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement*, Graduation thesis, Hokkaido University, Japan, 1996.
- [3] 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.
- [4] Y. Hiroyuki, Z. Wu, "Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension", *Proc. of 3rd international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, Vol.1, pp.287-294, 1997.
- [5] H. Yoshizawa, Z. Wu, "Predicting Bond Strength between FRP Plates and Concrete Substrate: Applications of GMDH and MNL R Approaches", *Proc. of 3rd international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, Vol.1, pp.284-294, 1997.
- [6] 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*, Vol.1, Sapporo, Japan Concrete Institute, p.279-285, 1997.
- [7] B. Täljsten, *Plate bending: Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics*. Doctoral thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 1994.
- [8] H. Yuan, Z. S. Wu, "Interfacial fracture theory in

- structures strengthened with composite of continuous fiber", *Proc. of the Symposium of China and Japan. Science and Technology of the 21st Century*, Tokyo, Japan, pp.142-155, 1999.
- [9] H. Yuan, Z. Wu, H. Yoshizawa, "Theoretical solution on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates", *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, Vol.18, NO.1, pp.27-39, April 2001.
DOI:http://dx.doi.org/10.2208/jscej.2001.675_27
- [10] L. D. Lorenzis, B. Miller, A. Nanni, "Bond of Fiber-Reinforced Polymer Fibers to Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.98, No.3, pp.256-264, 2001.
- [11] D. Van Gemert, "Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, pp.67-72, 1980.
- [12] B. B. Adhikary, H. Mutsuyoshi, "Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet", *Proc. of 5th international symposium on Fiber reinforced concrete structures(FRPRCS-5)*, Thomas Telford Publishing, Vol. 1, pp.371-378, 2001.
- [13] A Khalifa, WJ Gold, A Nanni, A Aziz, "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.4, pp.195-203, 1998.
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195))
- [14] K. Izumo, N. Saeki, M. Fukao, T. Horiguchi, "Bond behavior and strength between fiber sheets and concrete", *Transactions of the Japan Concrete Institute*, pp.423-430, 1999.
- [15] 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*, Kyoto, Japan, pp. 4-42, 2003.
- [16] 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, 20019(in Chinese).
- [17] Y. Sato, K. Kimura, Y. Kobatake, "Bond behaviors between CFRP sheet and concrete", *Journal of structural construction engineering*, AIJ, No.500, pp.75-82, 1997(in Japanese).
- [18] 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))
- [19] U. Neubauer, F. S. Rostasy, "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", *Pro. of the 7th International Conference on Structural Faults and Repair*, Vol.2, Edinburgh, Scotland, pp.109-118, July 1997.
- [20] P. Holzenkämpfer, *Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile*, Dissertation, TU Braunschweig, 1994(In German).
- [21] M. Blaschko, R. Niedermeier, K. Zilch, "Bond failure modes of flexural members strengthened with FRP", *Proc. of the second international conference on composites in Infrastructure*, Tucson, Arizona, USA, Vol.1, pp.315-327, 1998.
- [22] fib, Externally bonded FRP reinforced for RC structures, fib Bulletin 14 TC Report, 2001.
- [23] CNR-DT 200, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design, 2001.
- [24] J. F. Chen, J. G. Teng, "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete", *Journal of structural engineering*, ASCE, Vol.127, No.7, pp.784-791, July 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))
- [25] 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>
- [26] U. S. Camli, B. Binici, "Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry", *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.7, pp.1431-1446, July 2007.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.003>
- [27] Z. Tan, *Experimental research for RC beam strengthened with GFRP*, Master thesis, Tsinghua University, China, 2002(in Chinese).
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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).
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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))
- [34] 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.
- [35] 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))
- [36] 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).
- [37] 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/jscej.1999.634_197

고 훈 범(Hune-Bum Ko)

[중신회원]



- 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 건축과 교수

<관심분야>

건축시공, 건축재료