



콘크리트내 표면매입 보강된 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착-미끄러짐 관계 해석

서수연 ^{1)*}

¹⁾한국교통대학교 건축공학과

Analysis on the Interfacial Bond-Slip Relationship between Near Surface-Mounted FRP Plate and Concrete

Soo-Yeon Seo ^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

ABSTRACT In this paper, a stress transfer mechanism between near surface-mounted (NSM) fiber reinforced polymer (FRP) plate and concrete was investigated and a reliable analytical procedure for it was presented by using bi-linear bond-slip model simulating the bond behavior of NSM FRP plate. As a result, critical values in the bi-linear model such as maximum shear strength, slip at that time and failure slip at the initiation of softening de-bonding were suggested for being used in the differential equation considering the interfacial characteristic between NSM FRP and concrete. Also, it was found that the bond-slip behavior could be suitably predicted by using the proposed procedure even in the case of various bond lengths from the comparison with bond test result.

Keywords : near surface-mounted retrofit, FRP plate, interfacial characteristic, bi-linear bond-slip model

1. 서 론

최근 FRP(fiber reinforced polymer)를 이용한 철근콘크리트 구조물의 보강에 있어서 콘크리트 부재 표면에 일정한 깊이로 홈을 성형하고 FRP바를 표면에 매입한 후에 에폭시를 이용하여 마감하는 표면매입 보강공법(NSMR, near surface-mounted retrofit)이 개발되어 건물보강에 활용되고 있다. 표면매입 보강공법은 보강재를 콘크리트 표면에 매입함으로써 부착공법에 비하여 높은 보강효율을 보일뿐만 아니라 보강재가 부재 내부에 위치하게 됨으로써 상대적으로 외부 환경에 민감하지 않은 장점이 있다.

반면에, 이 공법은 FRP 보강재를 매입하기 위하여 콘크리트 내에 일정크기 이상의 홈을 형성해야 하는 추가적인 작업을 필요로 하여 이에 따라 현장적용성이 낮아지게 된다. 이러한 단점을 보완하고자 콘크리트 부재에 폭이 좁고 깊이가 긴 홈을 형성하고 이 내부에 FRP 판을 세로로 세워서 매입보강하는 비교적 시공이 용이한 방안

에 대한 연구가 국내외에서 진행되어 왔다.¹⁻⁸⁾ 기존 연구 결과는 전체적으로 이 방법이 기존 방법에 비하여 홈 작업이 용이하고, 홈 내에 삽입된 FRP 판의 부착력이 높아 보강효율이 높은 것으로 보고하고 있다. 또한 부착 및 부재실험과 이론적인 연구를 통하여 FRP 판을 이용한 표면매입 보강시 보강내력을 평가할 수 있는 방안이 제시되어 실제 실용적인 방법으로 적용되고 있다.

최근 Seo 등^{1,2)}은 실험 및 이론적인 연구를 통하여, 표면매입 보강이 표면부착 보강에 비하여 현저히 보강내력을 향상시킴을 확인하고, 표면매입 보강시 FRP 판의 부착길이 증가에 따라 내력이 증가하며 또한 비록 보강량이 같을지라도 FRP의 열수를 증가시킬 경우 내력이 증가함을 밝혔다. 또한 매입 보강재의 부착길이에 따른 각 보강재의 적정 간격, 그리고 무리효과를 고려한 상관관계식을 제시하고 실험을 통하여, 식의 적합성을 확인하였다.³⁾

표면매입 보강된 FRP 판으로부터 콘크리트로의 응력 전달은 에폭시를 통하여 비교적 넓은 FRP 판 표면의 부착전단응력이 콘크리트에 전달되기 때문에 응력전달이 매우 효과적이다. 이 응력전달은 기본적으로 철근과 콘크리트의 부착관계이론을 따르지만 표면매입보강된 FRP 판의 부착면적과 강성이 크기 때문에 부착계면에서의 응력전달에 대해서는 지속적인 연구가 요망된다.

따라서 이 연구에서는 표면매입 보강된 FRP 판과 콘

*Corresponding author E-mail : syseo@ut.ac.kr
 Received September 10, 2013, Revised November 5, 2013,
 Accepted November 5, 2013
 ©2014 by Korea Concrete Institute

크리트사이의 응력전달기구를 이론적으로 연구하고자 한다. 특히 이선형 부착모델을 이용하여 부착거동을 묘사하고 이를 실험 결과와 비교하여 신뢰성있는 해석방법을 제시하고자 한다.

2. 표면매입 보강된 FRP 판의 부착모델

2.1 부착모델 지배 방정식

Fig. 1과 같이 콘크리트 내에 표면매입 보강된 판의 경계값 문제는 다음과 같이 위치 x 에서의 미지수, 즉 판에서의 축응력과 변형도 $\sigma_p(x)$ 와 $\epsilon_p(x)$, 콘크리트에서의 축응력과 변형도 $\sigma_c(x)$ 와 $\epsilon_c(x)$, 부착길이를 가로지르는 계면전단응력 $\tau(x)$, 그리고 보강판과 콘크리트 변위인 u_p 와 u_c 의 차인 계면 미끄러짐 $\delta(x)$ 을 포함하고 있다. 이들에 네 개의 미지수는 평형과 적합조건에 따른 응력전달문제 지배방정식, 보강판과 콘크리트에 대한 응력-변형도 관계, 그리고 계면에서의 부착기구관계와 관련되어 있다. Ali 등⁴⁾은 표면부착 보강의 이론식을 근거로 표면매입 보강된 판과 콘크리트 접합부에 대한 평형방정식을 다음과 같이 정리하였다.

$$\frac{d\sigma_p}{dx} = \frac{\tau L_{per}}{A_p} \quad (1)$$

$$\sigma_p A_p + \sigma_c A_c = 0 \quad (2)$$

여기서, L_{per} 은 파괴평면의 주변길이, A_p 와 A_c 는 각각 보강 판과 콘크리트의 단면적이다.

E_p 와 E_c 를 각각 보강판과 콘크리트의 탄성계수라고 할 때, 판과 콘크리트에 대한 각각의 응력-변형도 관계로 부터,

$$\sigma_p = E_p \epsilon_p = E_p \frac{du_p}{dx} \quad (3)$$

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c = E_c \frac{du_c}{dx} \quad (4)$$

계면에서의 미끄러짐(δ)는 u_p 와 u_c 의 차이로서 이를 2차 미분하면,

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{d^2u_p}{dx^2} - \frac{d^2u_c}{dx^2} \quad (5)$$

식 (1)과 (2)를 식 (3)에서 구한 값과 함께 식 (5)에 대입하면,

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} + \frac{d^2u_c}{dx^2} - \frac{\tau}{E_p} \frac{L_{per}}{A_p} = 0 \quad (6a)$$

식 (2)와 (4)를 미분하고 식 (1)을 이용함으로써, 식 (6b)를 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2u_c}{dx^2} = \frac{\tau}{E_c} \frac{L_{per}}{A_c} \quad (6b)$$

식 (6b)를 (6a)에 대입하면 식 (7)과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} - \beta_2 \tau = 0 \quad (7)$$

$$\beta_2 = \frac{L_{per}}{A_p} \left(\frac{1}{E_p} + \frac{A_p}{E_c A_c} \right) \quad (8)$$

여기서, x 는 하중이 작용하지 않는 단부로 부터의 거리이며 $\tau = f(\delta)$ 는 부착-미끄러짐의 함수 이다.

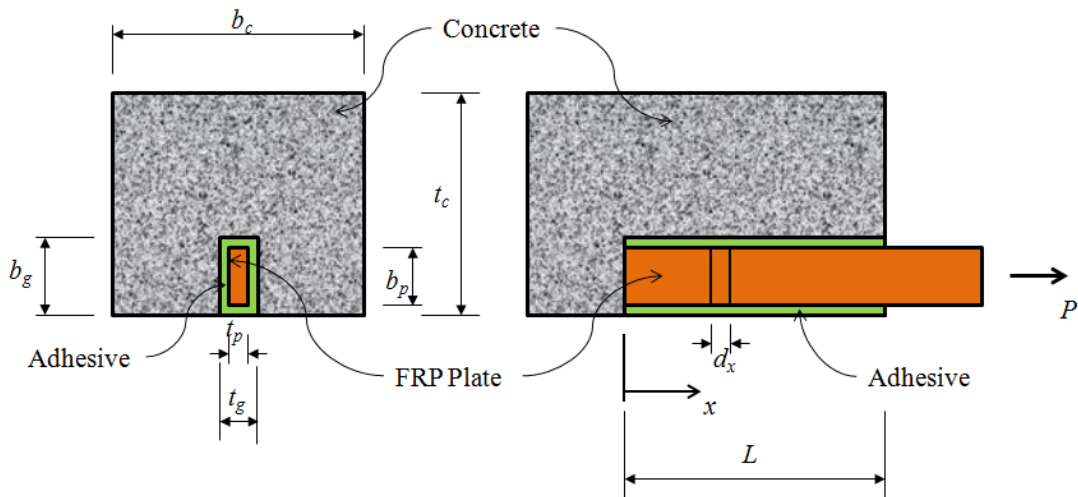


Fig. 1 Detail of NSM FRP plate in concrete

2.2 이선형 부착-미끄러짐 모델을 사용한 해석

전술한 이론모델에서 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 선형 또는 이선형 모델을 부착강도-미끄러짐 관계로 사용할 수 있다.

Fig. 2의 이선형 부착-미끄러짐 모델에서 δ_1 이 매우 작은 값일 경우에는 선형모델이 된다. 이선형 모델에 대하여, 미끄러짐 δ 에 따른 거동은 다음과 같은 세 구간으로 구분할 수 있다.

$$\tau = \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta, 0 \leq \delta \leq \delta_1 \text{ 일 때} \quad (9a)$$

$$\tau = \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta), \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \text{ 일 때} \quad (9b)$$

$$\tau = 0, \delta_f \leq \delta \text{ 일 때} \quad (9c)$$

여기서, δ_f 와 τ_f 는 각각 계면에서의 최대 미끄러짐과 전단강도를 나타내며, δ_1 은 τ_f 에서의 미끄러짐을 나타낸다.

세개의 구간으로 나누어진 부착-미끄러짐 관계에서 $\delta_f \leq \delta$ 인 경우는 최대내력이후의 구간이기 때문에 식 (7)의 해를 다음과 같이 두개의 구간으로 나타내어 작용하중과 미끄러짐의 관계를 최대내력까지 표현할 수 있다.

2.2.1 탄성구간(Zone I)

탄성단계, 즉 $0 \leq \tau \leq \tau_f$ (또는 $0 \leq \delta \leq \delta_1$)에서의 식 (7)의 해, 즉 미끄러짐(δ)은 다음과 같다.

$$\delta(x) = \frac{P\beta_0}{A_p\lambda_1} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \quad (10)$$

여기서,

$$\beta_0 = \left(\frac{1}{E_p} + \frac{A_p}{E_c A_c} \right), \lambda_1 = \sqrt{\frac{\beta_2 \tau_f}{\delta_1}}, \quad (11)$$

$$\beta_1 = \frac{L_{per}}{A_p}, \beta_2 = \beta_1 \beta_0$$

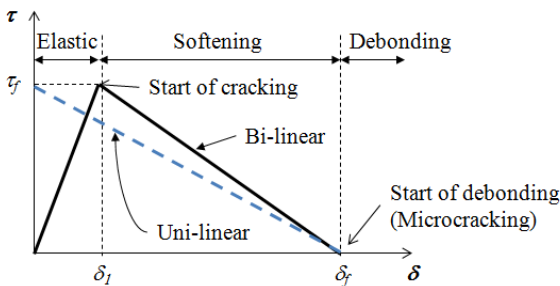


Fig. 2 Bond-slip relation

여기서, P 는 작용 하중, L 은 보강판의 길이이다.

2.2.2 탄성 연화구간(Zone II)

탄성 연화구간은 계면의 부착이 연화되기 시작하는 구간으로서, $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$ 일 때이다. 이 구간에서는 폭 L_{per} 의 계면에서 콘크리트에 미세균열이 발생하기 시작하고 이에 따라 전단응력분포의 감소가 시작된다. x 의 위치에 따라 다음과 같이 두 가지의 구간이 존재하게 된다.

1) $\delta \leq \delta_1$ 인 구간

$$\delta(x) = \delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1 (L-a))} \quad (12)$$

2) $\delta > \delta_1$ 인 구간

$$\delta(x) = (\delta_f - \delta_1) \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1 (L-a)) \cdot \sinh(\lambda_2 (x-L+a)) - \cos(\lambda_2 (x-L-a)) \right] + \delta_f \quad (13)$$

여기서,

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{\beta_2 \tau_f}{(\delta_f - \delta_1)}} \quad (14)$$

작용하중 P 는 다음과 같다.

$$P = \sigma_p|_{x=L} A_p = \frac{\beta_1 \tau_f A_p}{\lambda_2} \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1 (L-a)) \cdot \cos(\lambda_2 a) + \sin(\lambda_2 a) \right] \quad (15)$$

상기 식에서 a 는 연화된 계면의 길이이며 접합부는 단부에서 극한하중에 도달한다. 즉 $a=0$ 일 때, 최대의 작용하중 P_{IC} 를 얻을 수 있다. 이에 따라 a 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tanh[\lambda_1 (L-a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tan(\lambda_2 a) \quad (16)$$

$$P_{IC} = \frac{\tau_f L_{per}}{\lambda_2} \frac{\delta_f}{(\delta_f - \delta_1)} \sin(\lambda_2 a)$$

$$= \frac{\tau_f L_{per}}{\lambda_3} \sin(\lambda_2 a) \quad (17)$$

여기서,

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 (\delta_f - \delta_1)}{\delta_f} \quad (18)$$

a 는 반복계산을 통하여 계산될 수 있다. 그러나 부착 길이가 무한히 긴 경우에는, $x=L$ 에서 $\tau=0$ 일 때 P_{IC} 가 최대가 되므로 식 (19)와 같이 정리할 수 있다.

$$P_{IC} = \frac{\tau_f L_{per}}{\lambda_3} \quad (19)$$

3. 부착실험 결과와의 비교

3.1 실험개요

전술한 이론 모델의 적합성을 평가하고 Fig. 2의 부착 강도-미끄러짐 모델의 적정 값을 평가하기 위하여 기존의 실험 결과¹⁾를 재분석하고 이론 결과와 비교하였다. Table 1은 실험체 일람표를 나타낸다. Fig. 3과 같이 200 mm×200 mm×400 mm의 두개의 콘크리트 블록을 FRP로 매입보강 연결하여 제작되었고, 한 개의 블록은 고정시키고 나머지 블록에 인장력을 가하여 보강부위에 전단응력이 작용하도록 하였다. 실험체에 사용된 콘크리트의 압축강도는 21 MPa이었고, FRP 보강재는 탄소섬유계로서 S사의 Carbodur-Plate S512/80을 사용하였으며 접착용 레진은 Sikadur®-30으로서 2액형 레진을 사용하였다. FRP의 인장강도와 탄성계수는 각각 2800 MPa와 160000

MPa이며 에폭시는 압축강도 70 MPa, 인장강도 28 MPa, 전단강도 18 MPa, 그리고 탄성계수는 128000 MPa이다. 보강방법은 두께 1.2 mm 폭 16 mm인 FRP판 3개를 에폭시로서 1줄로 겹쳐 부착시킨 뒤 폭 7.1 mm, 깊이 20 mm의 홈에 매입하였다. FRP의 부착길이는 150, 200, 300 mm의 세 종류이며, 각 길이별로 전단키가 있는 경우와 없는 경우를 변수로 하였다. 전단키는 지름 20 mm, 깊이 17 mm이며 전단키가 1개(S1)일 때는 가력방향에서 50 mm 위치에 설치하고, 2개(S2)일 때는 65 mm간격(부착길이 150 mm), 90 mm 간격(부착길이 200 mm), 140 mm(부착길이 300 mm)간격으로 설치를 하였다. 두개의 블록에서 관찰부위와 비관찰부위를 구분하여 비관찰부위는 추가의 시트보강을 하여 파괴가 발생하지 않도록 하였다.

3.2 실험 결과

실험 결과, 부착면 부위에서의 콘크리트 탈락에 의해 최종 파괴되는 표면부착 보강의 양상과 달리 표면매입 보강된 실험체는 Fig. 4와 같이 보강재의 매입깊이 내에 있는 콘크리트가 박락되는 양상을 보였다.

콘크리트 내에 매입된 FRP판의 위치별 변형도를 측정하기 위하여 모든 실험체에 변형률게이지를 부착하였다. 각 위치별 변형도 측정 결과는 하중이 도입된 부분에서 변형도가 높게 나타났고 가력면에서 멀어질 수록 Fig. 5

Table 1 Specimen list¹⁾

Specimen name	Bond length (mm)	CFRP plate size		Shear key
		Thickness (mm)	Width (mm)	
150-1	150	3.6	16	None
200-1	200			
300-1	300			
150-1-S1	150			1 Layer
200-1-S1	200			
300-1-S1	300			2 Layer
150-1-S2	150			
200-1-S2	200			
300-1-S2	300			

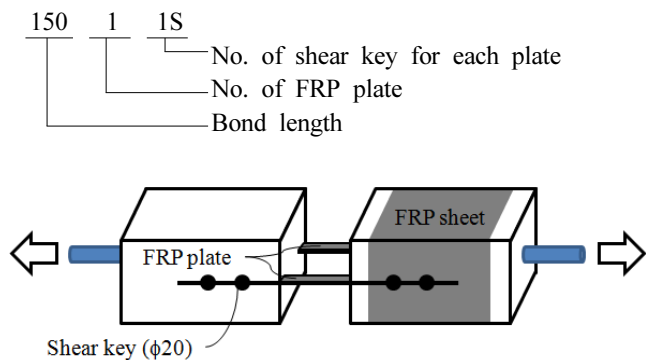


Fig. 3 Bond test specimen



Fig. 4 Concrete failure from bond test

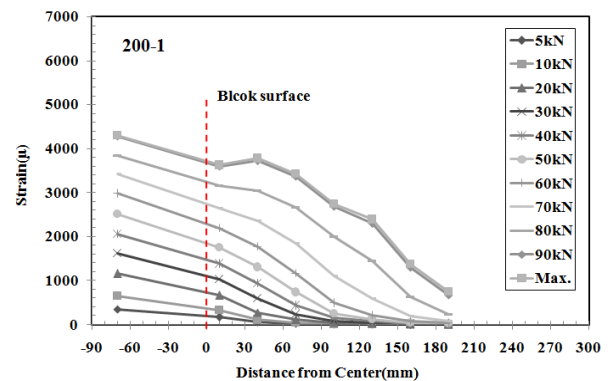


Fig. 5 Strain distribution of NSM FRP plate (bond length = 200 mm)

의 변형도 분포에서와 같이 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 측정된 변형도로 부터, FRP의 응력-변형도 관계가 선형적이기 때문에 Fig. 6과 같이 변형률계이지를 부착한 경우, 식 (20)을 이용하여 국부 전단응력응력을 구할 수 있다.

$$\tau_{i,i+1} = \frac{A_p}{p_f} E_f \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (20)$$

여기서, x_i 와 x_{i+1} 은 각각 변형률계이저 i 와 $i+1$ 의 위치이며, ϵ_i 와 ϵ_{i+1} 은 해당위치에서의 측정된 변형도 값, p_f 는 부착된 둘레길이이다.

또한 전단응력에 대응되는 미끄러짐은 식 (21)을 이용하여 가력반대방향 단부에서부터의 변형도값을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\delta_{i,i+1} = \sum_{k=0}^i \frac{\epsilon_{k+1} + \epsilon_k}{2} (x_{k+1} - x_k) \quad (21)$$

Fig. 7은 Table 1의 실험체들에 대하여 식 (21)에 의해 구한 변위와 작용하중을 그래프로 나타낸 그림이다. 그

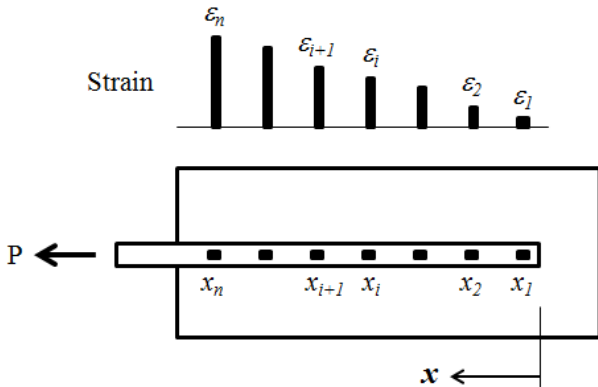


Fig. 6 Strains at each location

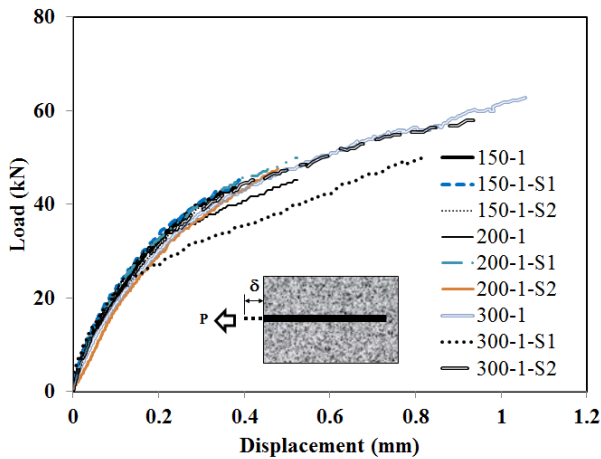


Fig. 7 Load-slip curves from bond test

림으로부터, 부착길이가 300 mm이고 전단키가 1개 있는 300-1-S1 실험체를 제외하고 모든 실험체의 곡선형태가 거의 일치됨을 알 수 있다. 이는 부착길이가 길어지더라도 부착 거동에서는 큰 변화가 없고 다만 부착길이가 길어질 수록 내력과 그에 따른 변위가 증가하며 전단키는 큰 역할을 하지 않음을 의미한다.

3.3 이론모델과 실험 결과의 비교분석

전술된 이론모델을 이용하여 부착실험체에 대한 하중-미끄러짐 거동을 묘사하기 위해서는 Fig. 2의 이선형 모델에서의 임계값인 최대 전단응력 τ_f 와 이때의 변위 δ_1 , FRP의 박락이 시작되는 변위 δ_f 가 적합하게 정해져야 한다. 각 임계값들은 기존 연구자들의 연구를 분석하여 다음과 같은 과정으로 산정하였다.

3.3.1 최대전단강도

최대전단강도에 대하여 Blaschko⁵⁾는 에폭시의 전단강도에 따라 변하는 것으로 간주하고 식 (22)을 제시하였다.

$$\tau_f = 0.2 \sqrt{a'_c} \tau_{af} \quad (a'_c \leq 150) \quad (22)$$

여기서, τ_{af} 는 에폭시의 전단강도이다.

Pecce⁷⁾은 모래코팅이 된 바형 보강재에 대해서는 3 MPa, 이형돌기 또는 나사형 돌기가 있는 보강재에 대해서는 11-14 MPa을 최대전단강도로 제시하였다. Ceroni⁸⁾는 여러 연구자들의 실험 결과를 회귀분석하여, 비록 데이터가 분산된 양상을 보였지만, 표면매입 보강된 FRP판에 대하여 식 (23)과 같은 최대전단강도 산정식을 제시하였다. 또한 Ali 등⁴⁾은 실험을 통하여 최대전단강도 산정식으로 식 (24)를 제시하였다.

$$\tau_f = 14.5 e^{-0.00004\omega} \quad (23)$$

여기서, $\omega = E_p A_p / (f'_c p_{f,NSM})$ 이고 $p_{f,NSM}$ 은 FRP 판의 단면 둘레길이이다.

$$\tau_f = 0.54 \sqrt{f'_c} b_p^{0.4} t_p^{0.3} \quad (24)$$

이상과 같은 기존 연구자들에 의한 제안식으로 Table 1의 실험체들에 대하여 최대전단강도를 계산하고 또한 실험 결과를 식 (20)에 따라 산정하여 비교하여 나타내면 Fig. 7과 같다. 기존 연구자들에 의해 언급된 바와 같이 실험 결과로부터, 최대전단강도도 부착길이와 상관없는 것으로 나타났으며, 두개 실험체를 제외하고는 모두 10 MPa이상의 값을 보였고 평균적으로는 11.4 MPa로 나타났다. 이 값은 기존 연구자들에 의해 제시된 범주의 값이

다. 그리고 실험 결과와 가장 근사한 최대전단강도값을 보이는 것은 식 (24)에 의한 것으로 나타났다.

3.3.2 최대부착강도에서의 미끄러짐

최대전단강도일 때의 미끄러짐 변위인 δ_1 은 Fig. 2에서 초기강성을 결정하며 또한 균열이 발생하여 연화거동이 시작됨을 나타낸다. 표면매입 보강된 보강재에 대하여 여러 연구자들에 의해 제시된 값은 바 형태의 보강재에 대해서는 0.1-0.45 mm, 관형태의 보강재에 대해서는 0.25 mm가 제시되었다. Fig. 7의 실험 결과를 관찰해보면, 변위 0.25 mm미만에서도 하중과 변위의 관계가 곡선으로 변함을 알 수 있고 이는 연화거동이 발생함을 의미한다. 즉 δ_1 값은 0.2 mm미만이 될 수 있으며, 이에 따라 일부 연구자들의 경우에는 δ_1 을 “0”으로 간주하여 Fig. 2의 점선과 같은 선형 모델을 적용하기도 한다. δ_1 을 0.01~0.3 mm로 변화시키면서 여러 번의 해석을 실시하고 그 결과를 실험 결과와 비교함으로써 적합한 δ_1 을 찾을 수 있다.

Fig. 9는 각 부착길이가 다른 각 실험체들에 대한 해석 결과를 나타낸 것으로서, 그림으로부터 모든 실험체에 대하여 δ_1 의 값이 0.05 mm에서부터 0.2 mm범위 내일 때 실험 결과의 강성과 유사한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3.3 박락시작시의 변위

보강재의 박락과 함께 연화거동이 발생하는 시점인 δ_f 에 대해서 Ceroni⁸⁾은 부착실험을 통하여 0.7-0.8 mm의 범위를 확인하였으나, 얇은 판의 경우에는 최대 1.2 mm까지도 가능함을 보고하였다. 또한 Ali 등⁴⁾은 콘크리트 압축강도와 접합부 두께를 변수로 한 식 (25)를 제시하였다.

$$\delta_f = 0.78 \left(\frac{f_c^{0.27}}{t_g^{0.3}} \right) \quad (25)$$

식 (25)의 δ_f 를 적용하여 계산한 Fig. 9로부터, 최대내력과 관련해서는 해석 결과와 실제 실험 결과와 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이유로서는 식 (25)에 따라 계산된 δ_f 가 모든 실험체에 대하여 일정한 값인 0.985를 사용하였지만, 식 (17)의 최대내력인 P_{IC} 는 δ_f 에 따라 변하게 된다. 이에 따라, 부착길이가 변하는 실험체에 대하여 실험 결과값과 대응될 수 있도록 δ_f 를 반복하여 변화시키고 실험 결과의 평균값에 가장 근사하게 P_{IC} 를 구한 뒤 이를 실험 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 또한 이때의 δ_f 값 변화를 나타내면 Fig. 11과 같다. 그림으로부터, 부착길이에 따라 매우 선형적으로 δ_f 값이 증가하고 그 비율이 일정함을 알 수 있다. 이는 부착길이가 길수록 비례적으로 연화거동구간이 길어지게 됨을 의미한다.

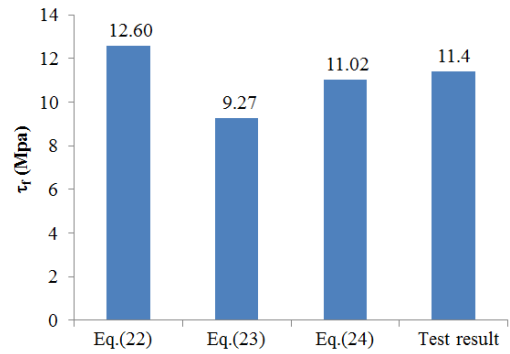
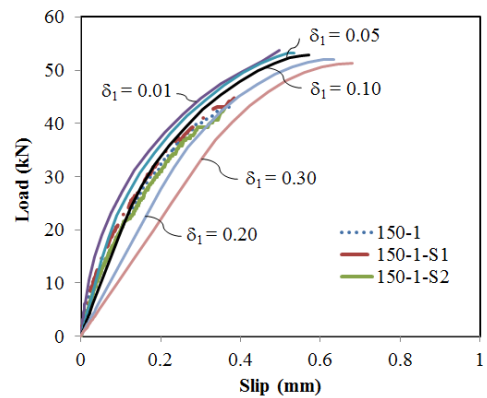
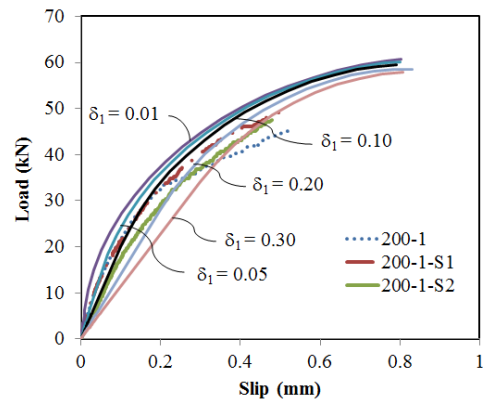


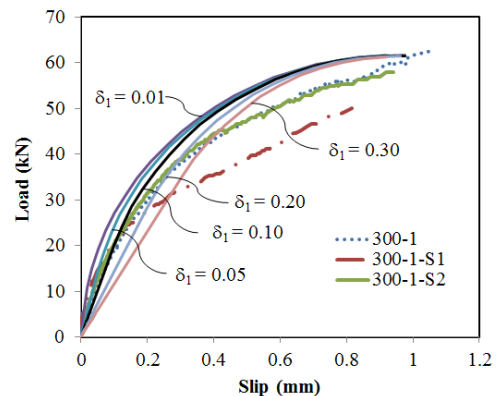
Fig. 8 Maximum bond strength



(a) Bond length 150 mm



(b) Bond length 200 mm



(c) Bond length 300 mm

Fig. 9 Comparison of experimental and analytical result corresponding to δ_1 values

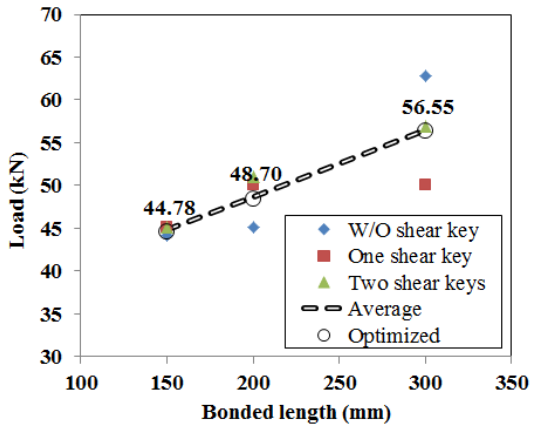


Fig. 10 Optimized P_{IC} values by changing δ_f

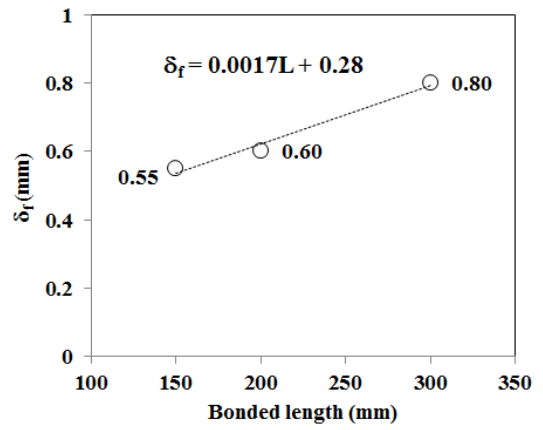
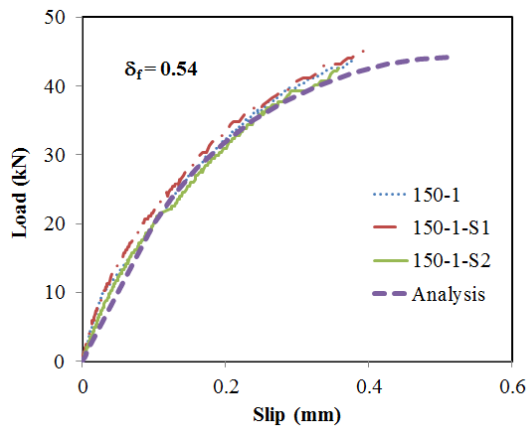
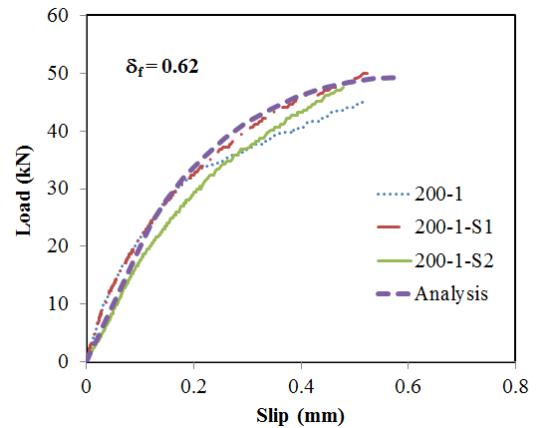


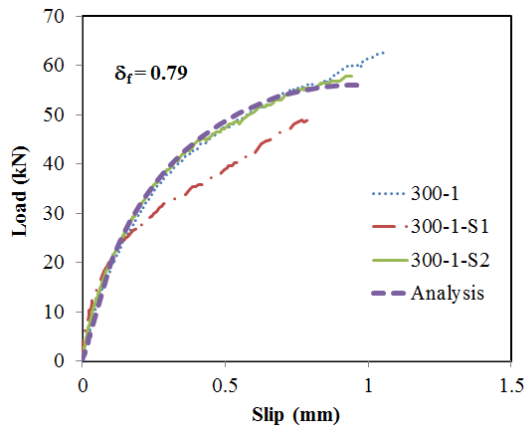
Fig. 11 Variation of δ_f values for optimized P_{IC}



(a) Bond length 150 mm



(b) Bond length 200 mm



(c) Bond length 300 mm

Fig. 12 Analytical load-slip curves using δ_f values by Eq. (26)

3.3.4 해석 결과의 비교

전술한 결과를 반영하여, Fig. 2의 모델에서, 최대전단 응력값은 식 (24)에 의해 산정하고, 이때의 미끄러짐 변위는 0.1 mm로 가정하며, 또한 연화거동이 시작될 때의 미끄러짐 변위는 식 (26)을 이용하여 해석을 실시하였다.

$$\delta_f = 0.0017L + 0.28 \quad (26)$$

여기서, L 은 표면매입된 부착길이다.

Fig. 12는 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸 그림으로서, 이 연구에서 제시된 해석모델을 이용하여 구한 하중-미끄러짐 관계 그래프와 실험 결과의 그래프가 좋은 대응을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 표면매입 보강된 FRP판과 콘크리트의 부착-미끄러짐 관계는 계면의 부착전단강도와 그때의 국부적인 미끄러짐, 박락에 의한 콘크리트 연화거동을 고려한 이론모델을 사용함으로써 그 거동을 적절히 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 부착전단강도와 국부적인 미끄러짐 관계를 나타내는 이선형 모델을 적용함에 있어서, 실험 결과 분석을 실시한 결과, 최대전단응력도인 τ_f 는 Ali 등에 의해 제시된 식을 사용하는 것이 적합한 것으로 사료된다. 또한, 최대전단응력도일 때의 변위 δ_1 은 부착길이에 따른 변화는 없지만, 부착파괴시의 δ_f 는 부착길이가 길어질수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이 관계를 이용하여 표면매입 보강된 FRP 판의 부착-미끄러짐 거동을 계산한 결과 실제 실험체와 유사한 부착-미끄러짐 관계를 얻을 수 있어, 이 연구에서 제시된 방법이 표면매입 보강된 FRP 판의 부착미끄러짐 해석모델로서 유효한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구의 이고, 이에 감사를 드립니다.

1. Seo, S. Y., Oh, J. G., and Choi, K. B., "Bond Capacity of Concrete Member Strengthened by Various Methods Using FRP Plate," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 8, 2011, pp. 55-63.
2. Seo, S. Y., Feo, L., and Hui, D., "Bond Strength of Near-Surface-Mounted FRP Plate for Retrofit of Concrete Structures," *Composite Structures*, Vol. 95, 2013, pp. 719-727. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.08.038>)
3. Seo, S. Y., "Bond Strength of Near-Surface-Mounted FRP Plate in RC Member," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, 2012, pp. 415-422. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.4.415>)
4. Mohamed Ali, M. S., Oehlers, D. J., Friffith, M. C., and Seracino, R., "Interfacial Stress Transfer of Near Surface-Mounted FRP-to-Concrete Joints," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 7, 2008, pp. 1861-1868. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.006>)
5. Blaschko, M., "Bond Behavior of CFRP Strips Glued Into Slits," *Proceeding, 6th International Symposium on FRPRCS*, Singapre, 2013, pp. 203-214.
6. Ceroni, F., Peccea, M., Bilottab, A., and Nigro E., "Bond Behavior of FRP NSM Systems in Concrete Elements," *Composite Part B*, Vol. 43, No. 2, 2012, pp. 99-109. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.017>)
7. Pecce, M., Manfredi, G., Realfonzo, R., and Cosenza, E., "Experimental and Analytical Evaluation of Bond Properties of GFRP Bars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 13, No. 4, 2001, pp. 281-290. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:4\(282\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(282)))
8. Pecce, M. and Ceroni, F., "Modeling of Tension Stiffening Behavior of RC Ties Strengthened with FRP Sheets," *ASCE Journal of Composite Construction*, Vol. 8, No. 6, 2010, pp. 510-518. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:6\(510\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(510)))

요 약 이 연구는 표면매입 보강된 FRP 판과 콘크리트사이의 응력전달기구를 이론적으로 연구한 것으로서 이선형 부착모델을 이용하여 부착거동을 묘사하고 이를 실험 결과와 비교하여 신뢰성있는 해석방법을 제시하였다. 연구로부터, 표면매입된 FRP 판과 콘크리트사이의 계면특성을 고려한 미분방정식에 이선형 부착-미끄러짐 관계곡선을 사용하여 해석할 경우, 모델의 임계값인 최대전단강도와 미끄러짐 변위, 그리고 박락에 의한 연화거동이 시작될 때의 변위값 선정과정이 제시되었다. 또한 제안된 모델을 사용하여 부착길이가 다르게 보강된 표면매입 FRP 판의 미끄러짐 거동을 해석한 결과 실제 거동을 매우 근사하게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 표면매입보강, FRP 판, 계면특성, 이선형 부착-미끄러짐 모델