



콘크리트 내에 표면매입 보강된 FRP 판의 부착강도

서수연^{1)*}

¹⁾한국교통대학교 건축공학과

Bond Strength of Near Surface-Mounted FRP Plate in RC Member

Soo-Yeon Seo^{1)*}

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

ABSTRACT This paper analyzed seventy eight previous test results to evaluate bond strength of Near Surface-Mounted (NSM) FRP and prediction formulas previously proposed by researchers. The results showed that the most reliable bond strength prediction was the one proposed by Seracino, who considered the shape coefficient (ratio of width-thickness) and stiffness of FRP. However, the equation tended to underestimate the bond strength, especially serious when FRP bond length was relatively short, because the equation did not consider the effect of bond length. Based on the analysis of previous test results, the relation between bond length and bond strength and the group effect due to close proximity of FRPs were determined. Based on the findings, the Seracino's formula was modified and its applicability was evaluated. The result showed that the suggested formula can be used effectively to predict the bond strength of NSM FRP.

Keywords : near surface-mounted FRP, bond strength, shape coefficient (ratio of width-thickness), bond length, group effect

1. 서 론

FRP(fiber reinforced polymer)를 이용한 콘크리트 구조물의 보강에서, 표면매입 보강(near surface-mounted retrofit, NSMR)은 콘크리트에 홈을 형성하는 추가의 작업이 필요하지만, 보강효과를 높일 수 있고 FRP가 표면에 노출되지 않기 때문에 환경의 영향을 저감시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다.

최근 이에 따라 서수연,¹⁻³⁾ 정우태,⁴⁾ 임동환,⁵⁾ EI-Hacha,⁶⁾ Yost,⁷⁾ Ali,⁸⁾ Seracino,^{9,10)} Sena-cruz¹¹⁾ 등은 콘크리트 부재에 폭이 좁고 깊이가 긴 홈을 형성하고 이 내부에 FRP 판을 세로로 세워서 매입하여 보강하는 비교적 시공이 용이한 방안을 강구하고 이에 대한 연구를 실시하였다. 이들의 연구 결과는 판형태의 FRP를 매입하는 방법이 다른 NSMR방법에 비하여 홈작업이 용이하고, 홈내에 삽입된 FRP 판의 부착력이 높아 보강효율이 높은 것으로 보고하고 있다. 또한 판형태의 FRP를 표면매입할 경우, 매입에 따른 부착강도와 변형에 대한 이론적인 연구도 함께 수행하여 그 결과가 제시되었다.

그러나 아직까지 실제 FRP판의 형태 및 방법, 매입깊

이, 콘크리트 강도 등과 같은 여러 인자에 따라 계산된 결과 값이 실제 실험으로 나타난 부착성능을 적절히 묘사하지 못하는 것으로 확인되어 이 연구에서는 기존 연구자들의 실험연구 결과를 분석하고 각 연구자의 내력평가방법을 비교한 뒤 실제 표면매입 보강된 FRP판의 부착강도를 적절하게 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. FRP를 이용한 표면매입 보강

콘크리트 구조물의 보강을 위하여 표면매입방법을 사용한 것은 1950년대 유럽에서 철근을 이용한 보강이 시초이다. 이후 FRP 재료의 발달에 의해 시트 또는 판형태로 제작된 FRP를 콘크리트 표면에 부착시켜 보강하는 방법이 널리 활용된 이후 최근에 FRP 재료를 표면에 매입하는 보강방법을 현장에 적용하고 있는 상황이다.

이에 따라 ACI 440¹²⁾과 CEB-fib¹³⁾에서 표면매입 보강 공법에 관한 내용을 반영하여 실제 설계에 활용될 수 있도록 하고 있다. 그러나 현재까지 FRP 부재의 표면매입 보강과 관련해서는 아직까지 그 연구 결과가 매우 제한적이기 때문에 시공법의 체계화 및 설계법의 완성을 위한 연구가 필요한 상황이다.

Fig. 1은 FRP를 이용한 표면매입 보강공법의 대표적인 상세를 나타낸다. 얇은 판형태인 FRP를 매입할 경우에는 비교적 홈작업이 용이하고 부착면적을 증가시킬 수

*Corresponding author E-mail: syseo@ut.ac.kr

Received February 20, 2012, Revised March 20, 2012,

Accepted April 12, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

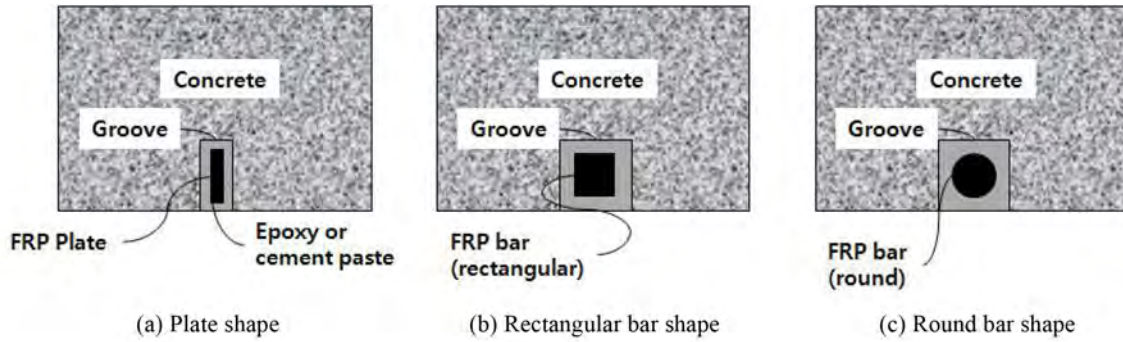


Fig. 1 NSM systems with different shapes of FRP

있기 때문에 보강효율을 높일 수 있다. 그러나 상대적으로 홈의 깊이가 소정의 깊이 이상이 되어야 하기 때문에 피복이 얇은 부재의 경우에는 적용상의 제한이 따른다.

반면에 사각형 또는 원형인 FRP를 매입할 경우에는 상대적으로 판형인 경우에 비하여 부착면적이 감소되지만 홈의 깊이를 깊게 형성하지 않고 상대적으로 넓게 형성해야 하기 때문에 피복이 얇은 부재의 경우 적용이 용이하다.

FRP 보강재를 매입하여 보강하는 표면매입 보강법의 우수성은 Nami¹⁴⁾가 고속도로 교량을 대상으로 한 휨 실험을 통하여 밝혔다. 그는 CFRP 판을 외부표면에 부착시킨 경우에는 CFRP 판이 최종단계에서 박락되었으나, 바형태로 제작한 CFRP를 콘크리트 표면에 매입시킨 경우에는 CFRP 바가 인장파단되었고, 전체 내력에 대한 기여도도 각각 17%와 29%로서 표면매입 보강이 효과적인 것으로 보고하였다.

EI-Hacha⁶⁾는 동일 축강성을 갖는 표면 부착보강과 FRP 판, FRP 바를 이용한 표면매입 보강에 대하여 각각 그 성능을 보 휨 실험으로 평가하여 표면매입 보강이 표면 부착 보강에 비하여 훨씬 높은 보강성능을 보유하고 있음을 확인하였고 특히 FRP 판을 부재 내에 세워서 삽입 보강한 경우가 가장 우수한 성능을 발휘하는 것으로 발표하였다.

Yost 등⁷⁾은 철근콘크리트 휨부재를 대상으로 주근비와 표면매입 보강 FRP 판의 보강량 등을 변수로 휨 실험을 실시하여, 표면매입 보강을 함으로써 강도와 강성 등에서는 현격한 향상이 가능하지만, 에너지 연성과 변위 연성의 측면에서는 감소될 수 있음을 밝혔다.

국내에서는 정우태⁴⁾가 표면부착 보강과 FRP 바와 판으로 표면매입 보강된 RC보에 대한 휨 실험을 실시하여 표면매입 보강이 표면부착 보강에 비하여 약 50% 보강 효과가 증가하지만 여전히 부착파괴가 존재함을 확인하였으며, 임동환⁵⁾은 I형과 T형 FRP 판을 이용하여 표면매입 보강한 T형 보의 휨 거동에 대한 실험연구를 실시하여 I형 판에 비하여 T형 FRP 판으로 표면매입 보강된 경우가 훨씬 높은 보강성능을 발휘하며 균열폭을 제어함에 있어서 매우 우수한 것으로 보고하였다.

최근 서수연 등^{1,2)}은 부착 실험을 통하여 동일 보강량

으로 보강한 표면매입 보강이 표면부착 보강에 비하여 1.5배 이상 부착강도를 상승시킬 수 있음을 밝혔고 휨 실험³⁾으로부터는 표면부착에 비하여 표면매입 보강시 2배 이상의 보강효과가 발휘되고 특히 표면매입의 경우 중앙부의 일정구간을 비부착하더라도 충분한 보강효과가 발휘될 수 있음을 확인하였다. 또한 부착실험 결과 분석을 통하여 FRP 판의 부착강도 산정식을 제시하고 휨부재의 강도평가에 적용하여 제안된 식의 적합성을 평가하였다.

그러나 제안식은 매우 제한된 실험 결과만을 대상으로 하고 있기 때문에 실제 설계에 적용하기 위해서는 추가의 연구가 요망된다. 국외에서는 Ali 등,⁸⁾ Seracino^{9,10)}에 의해 제시된 계산방법이 있으나, 이들 식 또한 제한된 연구 결과를 근거로 하고 있기 때문에 실제 설계에 활용되기 위해서는 다양한 변수를 고려한 평가가 요망된다.

3. 표면매입 보강 FRP의 부착강도

표면매입 보강된 FRP 판의 인장력에 대한 부착저항은 매입된 FRP 판의 파단, 충전된 에폭시와 FRP 판 사이의 부착, 그리고 콘크리트의 할렬강도 등에 의해 이루어진다. 충분한 매입길이가 확보되어 FRP 판의 인장파단에 의해 내력이 결정될 경우, FRP 판의 강도로 내력이 결정되지만, 그 이전에 부착파괴에 의한 미끄러짐이 발생하거나 콘크리트가 할렬파괴될 경우에는 낮은 내력을 보이게 된다.

이와 같은 파괴기구를 고려하여 서수연 등²⁾은 FRP 판과 콘크리트를 접착시키는 충전 에폭시의 강도, 매입길이와 FRP 판의 폭에 의해 결정되는 접촉면적, 콘크리트 강도, 연단길이 등을 고려하여 파괴기구별 내력을 다음 식과 같이 제안하였다.

$$\text{- FRP의 인장파단: } T_{f1} = \phi A_f f_f \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

$$\text{- 충전 에폭시의 전단파괴: } T_{f2} = \lambda \tau_{ef} (2b_f h_e) \quad (\text{kN}) \quad (2)$$

$$\text{- 콘크리트 할렬파괴: } T_{f3} = 0.57 \beta \sqrt{f_{ck}} A_{fr} \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

$$T_f = \min. \{T_{f1}, T_{f2}, T_{f3}\} \quad (\text{kN}) \quad (4)$$

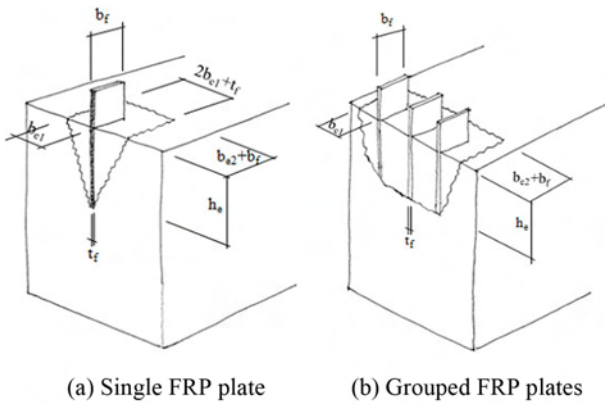


Fig. 2 Failure surface of NSMR with FRP plate

여기서, A_f 는 FRP의 단면적, f_f 는 FRP의 최대강도, b_f 는 FRP판의 폭, λ 는 유효부착감소계수, τ_{ef} 는 에폭시의 전단 파괴강도, h_e 는 매입된 FRP의 부착길이, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, A_{ff} 은 콘크리트 할렬파괴선으로 형성된 표면적이다.

특히 Fig. 2와 같이 단일 FRP 판 매입시와 무리로 FRP를 매입한 경우 할렬파괴면을 이상화하여 표면적을 계산하고 파괴면을 따라 콘크리트가 할렬파괴할 경우의 콘크리트 인장강도를 산정하도록 하였다. 평면상의 투영부분인 b_{e1} 과 b_{e2} 는 Eq. (5)와 같이 표현하여 매입길이와 파괴각도에 따라 변하는 것으로 간주하였다. 실험체와의 비교를 위한 계산에서 계수 α_1 은 0.3을 사용하고 α_2 는 0을 사용하였다. 또한 여러 개의 FRP 판을 매입한 경우에는 각각의 FRP에 대한 중첩을 고려한 무리효과를 반영하여 표면적을 산정하도록 하였다.

$$b_{e1} = \alpha_1 h_e, \quad b_{e2} = \alpha_2 h_e \quad (5)$$

Ali 등⁸⁾은 콘크리트에 표면매입 보강된 FRP 판의 부착파괴거동을 수학적으로 묘사하기 위한 모델을 구축함에 있어서, 실험 결과를 근거로 표면부착 파괴시의 강도를 Eq. (6)과 같이 제시하였다. 기존 연구자들의 연구 결과에 따르면 부착파괴가 전체 거동을 지배할 경우, 부착길이 증가에 비례하여 부착강도가 증가하는 것으로 보고하고 있지만, 이 식은 부착강도를 단순히 FRP 판의 폭과 두께 그리고 콘크리트 강도만을 변수로 하고 있기 때문에 실제 FRP의 부착길이에 따른 내력 증가를 반영할 수 없는 문제점이 있다.

$$\tau_f = 0.54 \sqrt{f_{ck}} b_f^{0.4} t_f^{0.3} \leq f_f \quad (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

Seracino 등⁹⁾은 Eq. (6)을 다시 비선형 회귀분석하여 콘크리트 부착파괴 강도를 산정하는 Eq. (7)을 제시하고 그 결과를 기존 실험 결과와 비교하여 적합함을 밝혔다. 그러나 이 식 역시 FRP의 매입길이에 따라 증가하는 강도를 반영할 수가 없다.

$$P_{IC} = \alpha \beta \sqrt{f_{ck}} b_f^{1.36} t_f^{0.21} \leq f_f b_f t_f \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

여기서, α 는 대표값으로 0.19를 사용하고 β 는 $L \geq 200$ mm일 때 1.0, $L < 200$ mm일 때 $L/200$ 을 사용한다.

또한 Seracino 등¹⁰⁾은 표면매입 보강된 다양한 형태의 FRP에 대한 부착파괴강도 산정을 위하여 Eq. (8)과 같이 수정보완된 식을 제시하였다.

$$P_{IC} = \alpha_p 0.85 \phi_f^{0.25} f_{ck}^{0.33} \sqrt{L_{per}(EA)}_f < f_f A_f \quad (\text{kN}) \quad (8)$$

여기서, $L_{per} = 2b_f + t_f$, $\phi_f = b_f/t_f$, α_p 는 대표값으로서 1.0을 사용하고 95% 신뢰도를 갖는 하한값으로서 0.85를 사용한다.

Eq. (8)은 FRP 판 뿐만 아니라 다양한 형태를 모두 포함할 수 있도록, FRP 판의 폭과 두께의 비인 형상계수 ϕ_f 유효부착길이인 L_{per} , 그리고 보강재의 강성 (EA)의 영향을 반영하고 있다. 실제 여러 연구자들의 실험 결과와의 비교를 통하여 매우 유용한 식임을 증명하였다.

그러나 이 식도 다른 식과 마찬가지로 전술한 바와 같이 부착길이가 길어짐에 따라 증가하는 강도를 적절히 반영할 수 없는 문제점이 있다.

4. 기존식의 평가 및 제안

콘크리트 내에 표면매입 보강된 FRP의 부착강도 산정을 위한 기존 식들의 적합성을 평가하기 위하여 기존 연구자들에 의해 수행된 실험 결과 데이터를 수집한 뒤 분석하였다.

총 78개의 부착실험 결과로서 데이터의 특성은 Tables 1~4에 나타난 바와 같다. 각 표에서 나타내는 기호의 경우, f_{ep} 는 에폭시의 인장강도, b_g 와 t_g 는 각각 홈의 깊이와 폭을 나타낸다.

Table 1에 나타난 서수연의 실험 결과²⁾는 FRP 판을 1열 매입한 경우와 동일한 면적을 3등분으로 나누어서 50 mm 간격으로 설치한 두가지 경우에 대한 값이다. 즉 FRP가 인접하여 배치될 경우 무리효과를 관찰하기 위한 것이다. 기본적으로 사용재료의 강도는 모두 동일하다. 주요변수 중의 하나는 매입길이로서 매입길이가 길어질수록 부착강도가 높아짐을 알 수 있다.

Table 2의 Seracino에 의한 실험데이터⁹⁾ 역시 판형태의 FRP를 콘크리트에 매입보강한 경우로서 콘크리트 강도, 판의 두께 및 폭, 그리고 매입길이가 주변수이다. 콘크리트 강도가 증가함에 따라 부착강도가 증가하고, 매입길이에 따라라도 부착강도가 증가하는 양상을 보인다.

Table 3은 Seracino에 의해 수행된 다른 실험 결과¹⁰⁾를 나타낸다. 전체적으로 콘크리트와 FRP와 같은 재료는 동일하지만, FRP 재료의 두께와 폭을 변화시켜 그 영향을 관찰하였다. 기본적으로 FRP의 표면적이 증가함에 따라 부착강도가 증가함을 확인할 수 있다.

Sena-Cruz에 의해 수행된 Table 4의 실험 결과¹¹⁾는

Table 1 Seo's test data²⁾

Specimen name	Test result (kN)	Failure shape	f_{ck} (MPa)	f_f (MPa)	f_{ep} (MPa)	E_f (MPa)	t_f (mm)	b_f (mm)	b_g (mm)	t_g (mm)	h_e (mm)
150-3*	130.4	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	150
200-3*	133.4	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	200
300-3*	158.9	C, Y	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	300
150-3-1S*	134.4	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	150
200-3-1S*	151.0	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	200
300-3-1S*	158.9	C, Y	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	300
150-3-2S*	136.3	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	150
200-3-2S*	146.1	C	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	200
300-3-2S*	158.9	Y	21	2,800	28	160,000	1.20	16.00	17.00	7.20	300
150-1	88.3	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	150
200-1	90.2	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	200
300-1	125.5	C, Y	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	300
150-1-1S	90.2	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	150
200-1-1S	100.0	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	200
300-1-1S	100.0	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	300
150-1-2S	90.2	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	150
200-1-2S	102.0	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	200
300-1-2S	113.8	C	21	2,800	28	160,000	3.60	16.00	17.00	12.00	300

Failure shape: C = concrete split, D = debonding of FRP, Y = yield/fracture of FRP, and P = pull out of FRP

*Specimens with grouped FRP plates (center-to-center of FRP plates = 50 mm, number of FRP plate = 3)

FRP 판의 두께가 동일하지만 부착길이와 홈의 폭이 변화됨에 따른 영향을 관찰한 것으로서, FRP의 부착을 위한 에폭시의 양이 증가하더라도 부착강도의 확연한 증가는 나타나지 않음을 알 수 있다.

모든 실험데이터의 변수별 분포를 정리하면, 다음과 같다.

- 콘크리트 압축강도: 21~65 MPa
- FRP의 인장강도: 2,240~2,800 MPa
- FRP의 두께: 1.2~101.08 mm
- FRP의 형상: 단면이 구형이며 폭-두께비 (b_f/t_f)는 0.12~16.67
- FRP의 부착길이: 100~350 mm
- 홈의 폭: 4.2~104.8 mm
- 홈의 깊이: 9.95~30.6 mm

Figs. 3~6까지는 전술한 기존 식을 활용하여 대상 실험체의 내력을 산정한 결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 3으로부터, 서수연에 의해 제안된 식은 실험체를 전반적으로 지나치게 과소평가하는 경향을 보이며 또한 분포가 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 Eq. (5)에 의한 투영길이는 단순히 부착길이만을 주요 변수로 한 실험 결과를 근거로 제시되었기 때문에, 동일 부착길이에서도 나타나는 콘크리트 강도, FRP 부재의 단면형상에 따른 영향을 적절하게 반영하지 못함을 의미한다.

Figs. 4와 5는 Eqs. (6)과 (7)에 의한 결과를 실험 결과와 비교하여 나타낸 것으로서, 기본적으로 이 두 식은 모두 콘크리트 압축강도, FRP 부재의 두께와 폭만을 변

수로 하고 있으며 FRP 부재의 두께와 폭에 대한 지수값만이 서로 다르다. Eq. (6)은 부착길이 100 mm인 경우 실험 결과와 계산 결과가 좋은 대응을 보이지만, 그 이외의 구간에서는 분산의 정도가 높게 나타나고 있다. 반면에 Eq. (7)의 경우에는 부착길이 200 mm와 300 mm 사이의 구간에서 실험 결과와 계산 결과가 좋은 대응을 보이지만, 그 이외의 구간에서는 분산정도가 크고 또한 전체적으로 내력을 과소평가하는 양상을 보였다.

반면에 Eq. (8)에 의해 계산된 결과를 나타낸 Fig. 6은 실험 결과와 계산 결과가 전체 부착길이에 대하여 다른 식들에 비하여 아주 좋은 대응을 보이고 있다. Eq. (8)이 다른 식들과 다른 점은 FRP 단면의 폭 두께비와 FRP의

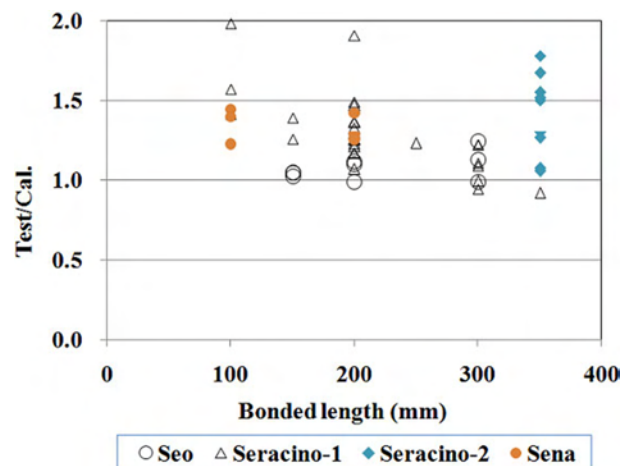


Fig. 3 Calculated result by Eq. (5)

Table 2 Seracino's test data⁹⁾

Specimen name	Test result (kN)	Failure shape	f_{ck} (MPa)	f_f (MPa)	f_{ep} (MPa)	E_f (MPa)	t_f (mm)	b_f (mm)	b_g (mm)	t_g (mm)	h_e (mm)
30 Mpa-100-10	20.4	D	30	2,643	16	161,800	1.22	10.02	10.02	4.20	100
30 Mpa-150-10	23.2	D	30	2,643	16	161,800	1.23	10.33	10.33	4.20	150
30 Mpa-200-10	27.9	D	30	2,643	16	161,800	1.22	10.48	10.48	4.20	200
30 Mpa-250-10	26.6	D	30	2,643	16	161,800	1.22	10.29	10.29	4.20	250
30 Mpa-300-10	26.0	D	30	2,643	16	161,800	1.22	10.38	10.38	4.20	300
30 Mpa-350-10	23.0	D	30	2,643	16	161,800	1.22	10.35	10.35	4.20	350
42 Mpa-200-10	30.6	D	42	2,643	16	161,800	1.27	10.29	10.29	4.20	200
48 Mpa-200-10	33.7	C	48	2,643	16	161,800	1.28	10.10	10.10	4.20	200
49 Mpa-200-10	33.3	C	49	2,643	16	161,800	1.26	10.56	10.56	4.20	200
49 Mpa-200-20	68.6	C	49	2,796	16	161,800	1.28	20.43	20.43	4.20	200
49 Mpa-100-20	64.1	P	49	2,796	16	161,800	1.27	20.37	20.37	4.20	100
49 Mpa-200-20	75.0	P	49	2,796	16	161,800	1.28	20.22	20.22	4.20	200
49 Mpa-300-20	68.1	C	49	2,796	16	161,800	1.24	19.79	19.79	4.20	300
30 Mpa-100-20	51.4	D	30	2,796	16	161,800	1.20	20.00	20.00	4.20	100
30 Mpa-150-20	57.8	D	30	2,796	16	161,800	1.20	20.00	20.00	4.20	150
30 Mpa-200-20	66.7	D	30	2,796	16	161,800	1.20	20.00	20.00	5.40	200
65 Mpa-200-10	45.0	D	65	2,643	16	161,800	2.88	10.08	10.08	5.40	200
65 Mpa-200-20	108.8	D	65	2,796	16	161,800	2.97	19.77	19.77	4.20	200
53 Mpa-200-10	31.9	D	53	2,643	16	161,800	1.24	10.23	10.23	4.20	200
53 Mpa-200-20	77.9	C	53	2,796	16	161,800	1.26	20.47	20.47	4.20	200
53 Mpa-200-10	34.0	D	53	2,643	16	161,800	1.30	10.43	10.43	4.20	200
53 Mpa-200-20	72.5	C	53	2,796	16	161,800	1.27	20.10	20.10	4.20	200
53 Mpa-100-10	29.5	C	53	2,643	16	161,800	1.26	10.37	10.37	4.20	100
53 Mpa-300-10	37.9	C	53	2,643	16	161,800	1.27	10.30	10.30	4.20	300
53 Mpa-100-20	63.8	D	53	2,796	16	161,800	1.25	20.23	20.23	4.20	100
53 Mpa-300-20	66.3	C	53	2,796	16	161,800	1.25	20.15	20.15	4.20	300
33 Mpa-100-15	31.9	P	33	2,643	16	161,800	1.26	14.93	14.93	4.20	100
33 Mpa-200-15	47.5	D	33	2,643	16	161,800	1.26	15.65	15.65	4.20	200
33 Mpa-300-15	51.6	D	33	2,643	16	161,800	1.26	15.31	15.31	4.20	300
65 Mpa-200-10	45.1	D	65	2,643	16	161,800	2.90	9.95	9.95	5.40	200
33 Mpa-300-20	67.8	C	33	2,796	16	161,800	1.24	19.85	19.85	4.20	300
33 Mpa-200-20	60.7	D	33	2,796	16	161,800	1.20	20.00	20.00	4.20	200

Failure shape: C = concrete split, D = debonding of FRP, Y = yield/fracture of FRP, and P = pull out of FRP

Table 3 Seracino's test data¹⁰⁾

Specimen name	Test result (kN)	Failure shape	f_{ck} (MPa)	f_f (MPa)	f_{ep} (MPa)	E_f (MPa)	t_f (mm)	b_f (mm)	b_g (mm)	t_g (mm)	h_e (mm)
12×3	59.2	D	37	2,643	16	160,000	2.76	12.37	12.37	5.76	350
12×4	54.1	D	37	2,643	16	160,000	4.24	12.47	12.47	7.24	350
12×6	47.6	D	37	2,643	16	160,000	5.73	12.35	12.35	8.73	350
24×4	130.0	D	37	2,643	16	160,000	4.33	24.06	24.06	7.33	350
12×12 ⁺	85.9	D	37	2,643	16	160,000	12.00	12.00	12.00	15.00	350
30×7	165.3	D	37	2,643	16	160,000	7.30	30.60	30.60	10.30	350
26×20 ⁺	199.4	D	37	2,643	16	160,000	20.60	25.26	25.26	23.60	350
12×30 ⁺	115.8	D	37	2,643	16	160,000	30.75	12.01	12.01	33.75	350
12×50 ⁺	110.5	D	37	2,643	16	160,000	50.33	12.19	12.19	53.33	350
12×60 ⁺	133.6	D	37	2,643	16	160,000	61.03	11.74	11.74	64.03	350
12×70 ⁺	144.8	D	37	2,643	16	160,000	71.25	11.93	11.93	74.25	350
12×80 ⁺	134.6	D	37	2,643	16	160,000	81.02	12.28	12.28	84.02	350
12×100 ⁺	154.0	D	37	2,643	16	160,000	101.08	12.30	12.30	104.08	350

Failure shape: C = concrete split, D = debonding of FRP, Y = yield/fracture of FRP, and P = pull out of FRP

⁺Specimens with rectangular or wide FRP

Table 4 Sena-Cruz's test data¹⁾

Specimen name	Test result (kN)	Failure shape	f_{ck} (MPa)	f_f (MPa)	f_{ep} (MPa)	E_f (MPa)	t_f (mm)	b_f (mm)	b_g (mm)	t_g (mm)	h_e (mm)
Lb100_W4	29.4	P	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	4.00	100
Lb100_W5	30.7	P, Y	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	5.00	100
Lb100_W6	28.9	P	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	6.00	100
Lb200_W4	34.5	P, Y	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	4.00	200
Lb200_W5	33.5	Y	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	5.00	200
Lb200_W6	35.0	Y	50	2,879	33	156,100	1.45	9.56	15.00	6.00	200

Failure shape: C = concrete split, D = debonding of FRP, Y = yield/fracture of FRP, and P = pull out of FRP

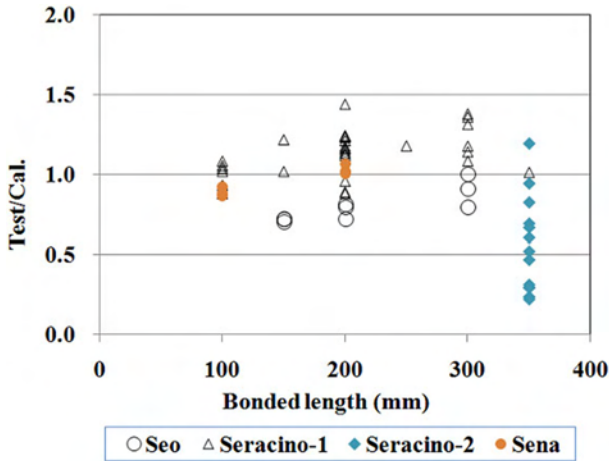


Fig. 4 Calculated result by Eq. (6)

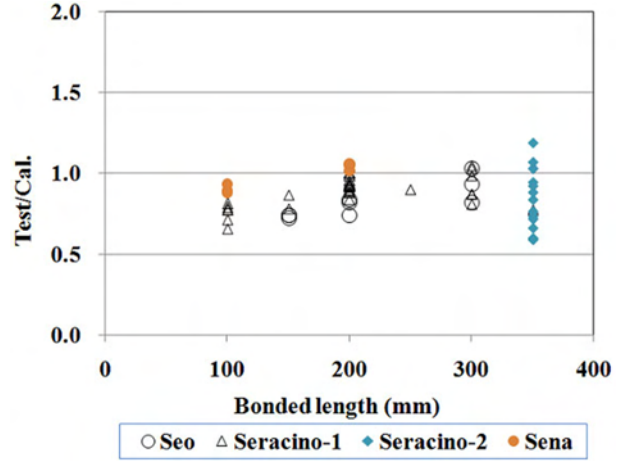


Fig. 6 Calculated result by Eq. (8)

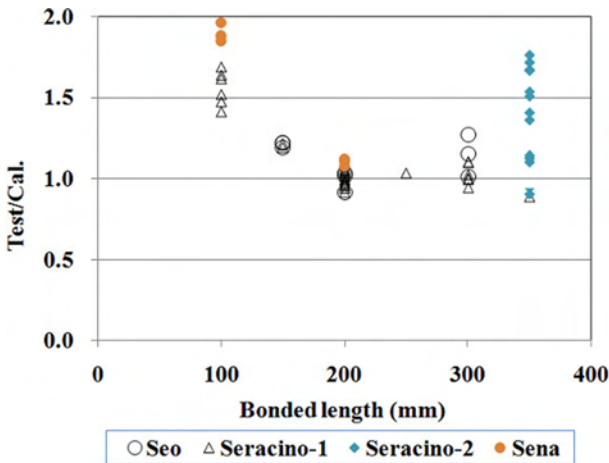


Fig. 5 Calculated result by Eq. (7)

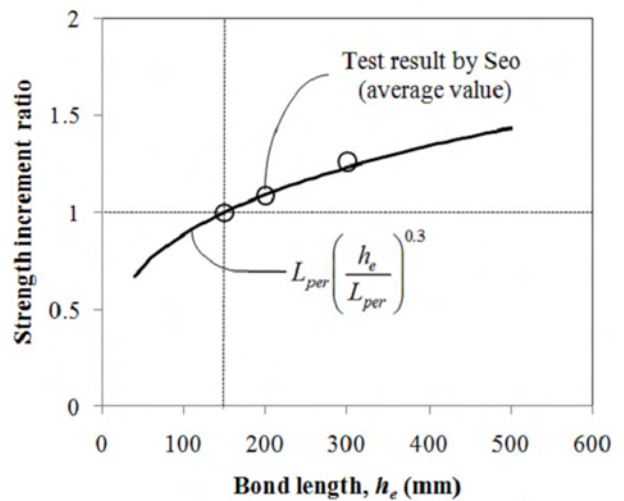


Fig. 7 Calculated result by Eq. (9)

강성을 고려하였고 또한 콘크리트 강도 지수값을 줄여 그 영향을 저감시킨 것이다.

비록 Eq. (8)에 의한 결과가 다른 식에 비하여 전체적으로 실험 결과와 좋은 대응을 보이지만, 실험 결과를 다소 과대평가하는 양상을 보이고 특히 부착길이가 작을수록 그 경향이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 Eq. (8)에는 부착길이가 증가에 따른 영향이 전혀 반영되어 있지 않기 때문으로 볼 수 있다. 또한 Eq. (8)은 여러 개의 FRP가 설치될 경우 무리효과에 의한 현상을 적절히 고려하

고 있지 않다.

부착길이가 증가에 따른 내력증가는 실제 매입길이가 FRP의 폭과 두께비로 표현된 L_{per} 보다 길게 되면, 그 증분만큼 내력증가가 발생하는 것으로 간주할 수 있다. 이에 따라 L_{per} 에 증분계수를 곱하여 그 증가 정도를 표현할 수 있다. Fig. 7은 서수연 등의 실험 결과 부착길이가 150 mm에서 200 mm, 300 mm로 증가할 때의 내력증가율(부착길이별 3개 실험체의 평균값을 나타낸 것임)과

Eq. (9)의 증분계수를 고려한 결과를 함께 나타낸 것이다. 이 그림으로부터, 실험에서 나타난 내력증분과 Eq. (9)에 의한 증분계수를 고려한 결과가 거의 일치하는 양상을 보임을 알 수 있다.

또한 FRP 부재가 지나치게 서로 인접하여 매입될 경우에는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 무리효과에 의해 콘크리트의 부착파괴 면적이 감소하게 되므로 이를 반영하여야 한다. 중첩되지 않을 때의 각 FRP 유효폭의 합과 중첩된 부분을 공제한 전체 유효폭 비를 도입함으로써 무리효과를 고려할 수 있다. Eq. (10)은 무리효과 계수 (η)를 나타낸다. 이상의 부착길이에 따른 증분계수와 무리효과계수를 적용하여 Eq. (8)을 수정제안하면 Eq. (11)과 같다.

$$\gamma = \left(\frac{h_e}{L_{per}} \right)^{0.3} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{L_{per}\gamma + B_e}{nL_{per}\gamma} \leq 1.0 \quad (10)$$

$$P_{IC} = \alpha_p 0.41 n \eta \phi_f^{0.25} f_{ck}^{0.33} \sqrt{(L_{per}\gamma)(EA)_f} < n f_f A_f (\text{kN}) \quad (11)$$

여기서, $(EA)_f$ 는 FRP의 강성, n 은 무리효과 반영시 포함되는 FRP 부재의 개수, B_e 는 무리에 포함되는 FRP 중첩의 단 두 개 FRP의 중심간 거리이며 α_p 는 대표값으로

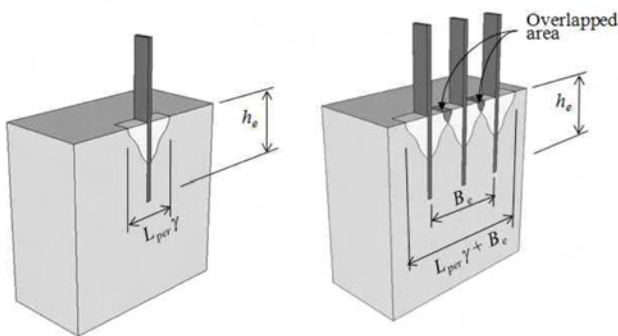


Fig. 8 Effective concrete width of grouped FRPs

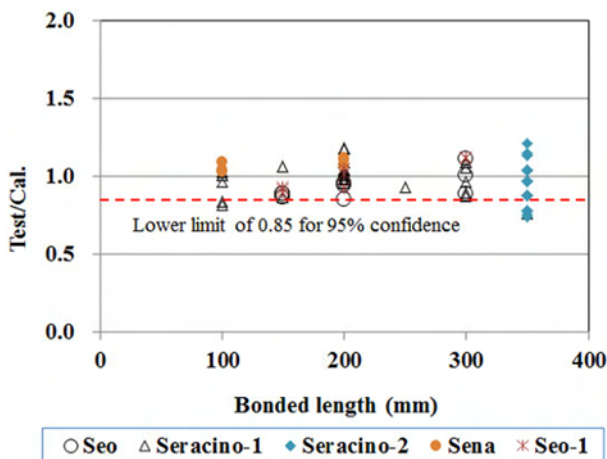


Fig. 9 Calculated result by Eq. (9)

서 1.0을 사용하고 95% 신뢰도를 갖는 하한값으로서 0.85를 사용한다.

Eq. (11)에 의해 보강재가 3열인 실험 결과를 포함한 모든 실험체의 내력을 계산한 뒤 실험 결과와 비교하여 나타내면 Fig. 9와 같다. 그림의 범례에서 Seo-1은 3개의 FRP 판이 500 mm 간격으로 매입보강된 실험체에 대한 계산 결과의 비를 나타낸다. 그림으로부터, 실험 결과와 계산 결과가 전체적으로 좋은 대응을 보임을 알 수 있고, 특히 무리효과가 적절히 반영되어, 유효폭이 중첩되는 경우도 Eq. (11)로 내력예측이 가능함을 알 수 있다. 다만 Eq. (11)은 에폭시재료의 재료적 특성에 의한 부착파괴는 고려하지 않기 때문에 이와 같은 재료적 특성에 의한 부착파괴는 재료 특성을 고려한 별도의 계산이 필요하다.

5. 결 론

- 1) 사각형 FRP 부재를 이용한 표면매입 보강에서 매입된 FRP의 부착강도를 평가하기 위한 총 73개의 기존 실험 결과를 분석하고, 기존 연구자들에 의해 제안된 식들을 평가한 결과, FRP 부재의 형상계수 (폭-두께비)와 강성을 반영한 Seracino의 식이 부착내력을 가장 근사하게 예측하는 것으로 나타났다.
- 2) 그러나 Seracino의 식은 실험 결과를 다소 과대평가하는 양상을 보이고 특히 부착길이가 작을수록 그 경향이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 부착길이가 증가에 따른 영향이 Seracino의 식에는 전혀 반영되어 있지 않기 때문으로 볼 수 있다.
- 3) 이 논문에서는 기존 실험 결과의 분석을 통하여 부착길이와 강도와의 상관관계를 찾고 또한 여러 개의 FRP 부재를 인접하여 배치시 발생하는 무리효과를 고려하여 Seracino식을 수정제안하였다. 이 제시된 식을 이용하여 기존 실험체에 대한 내력을 계산하고 평가한 결과, 제안된 식으로서 표면매입 보강된 FRP의 부착강도를 매우 근사하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부임.

참고문헌

1. 서수연, 오재길, 최기봉, “FRP 판을 이용한 콘크리트 보강에서 보강방법에 따른 부착성능,” 대한건축학회 논문집, 27권, 8호, 2011, pp. 55~63.
2. 서수연, 윤승조, 권영순, 최기봉, “표면매입 보강방법으로 콘크리트 내에 매입된 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착거동,” 콘크리트학회 논문집, 23권, 5호, 2011, pp. 675~682.

3. 서수연, 최기봉, 권영순, “FRP 판으로 표면매입 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능,” 구조물진단학회지, 16권, 1호, 2012, pp. 18~26.
4. 정우태, “CFRP로 표면매립 보강된 철근콘크리트 보의 등가 단면 모델을 고려한 휨거동 분석,” 명지대학교 박사학위논문, 2009.
5. 임동환, “표면매입 및 외부부착 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 거동에 관한 실험 연구,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 601~609.
6. El-Hacha, R. and Rizkalla, S. H., “Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures,” *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, 2004, pp. 717~726.
7. Yost, J. R., Gross, S. P., Dinehart, D. W., and Mildenberg, J. J., “Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips,” *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp. 430~437.
8. Ali, M. S. M., Oehlers, D. J., Friffith, M. C., and Seracino, R., “Interfacial Stress Transfer of Near Surface-Mounted FRP-to-Concrete Joints,” *Engineering Structures*, Vol. 30, 2008, pp. 1861~1868.
9. Seracino, R., Raizai Saifulnaz, M. R., and Oehlers, D. J., “Generic Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints,” *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 11, No. 1, pp. 401~409.
10. Seracino, R., Jones, N. M., Ali, M. S. M., Page, M. W., and Oehlers, D. J., “Bond Strength of Near-Surface Mounted FRP Strip-to-Concrete Joints,” *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 11, No. 4, pp. 401~409.
11. Sena-Cruz, J. and Barros, J., “A Pullout Test for the Near Surface Mounted CFRP-Concrete Bond Characterization,” Conference of Sociedade Portuguesa de Materials, 13, Porto, 2007.
12. ACI Committee 440, “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-01),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2001, 41 pp.
13. Fib TG9.3, “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures,” Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded FRP Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2001.
14. Nami, A., “FRP Reinforcement for Bridge Structures,” *Proceedings, Structural Engineering Conference Beams, Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 5, No. 1, 2000, pp. 12~17.

요약 이 연구에서는 FRP 부재를 이용한 표면매입 보강에서, FRP의 부착강도를 평가하기 위하여 총 78개의 기존 실험 결과를 분석하고, 기존 연구자들에 의해 제안된 식들을 평가하였다. 그 결과 FRP부재의 형상계수(폭-두께비)와 강성을 반영한 Seracino의 식이 부착내력을 가장 근사하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 Seracino의 식은 실험 결과를 다소 과소평가하는 양상을 보이고 특히 부착길이가 작을수록 그 경향이 두드러진 것으로 나타났다. 이는 부착길이 증가에 따른 영향이 Seracino의 식에는 전혀 반영되어있지 않기 때문으로 볼 수 있다. 기존 실험 결과의 분석을 통하여 부착길이가 강도와의 상관관계를 찾고 또한 여러 개의 FRP부재를 인접하여 배치시 발생하는 무리효과를 고려하여 Seracino 식을 수정 제안하였다. 이 제시된 식을 이용하여 기존 실험체에 대한 내력을 계산하고 평가한 결과, 제안된 식으로서 표면매입 보강된 FRP의 부착강도를 매우 근사하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 표면매입 FRP, 부착강도, 형상계수(폭-두께비), 부착길이, 무리효과