

중간부 부착파괴된 CFRP 판 보강 RC 보의 휨강도 평가

Evaluation of Nominal Flexural Strength in RC Beams Strengthened with CFRP Plate and Failed by Intermediate Crack Debonding

홍성남¹⁾
Hong, Sung Nam

박종인²⁾
Park, Jong In

김태완^{3)*}
Kim, Tae Wan

박선규⁴⁾
Park, Sun Kyu

Abstract

This paper shows a study carried out on the estimation of nominal flexural strength for CFRP-plated RC beams failed by intermediate crack debonding. A strength reduction factor is proposed to consider the effect of the intermediate crack debonding for the determination of nominal flexural strength. The proposed factor is derived from experimental data and utilizes the ratio of effective stress(or strain) in the CFRP plate to its ultimate strength(or strain) which is called effective strain model. An analytical equation for the estimation of the nominal flexural strength is formulated as a function of strength reduction factor. The validity, accuracy and efficiency of the proposed factor are established by comparing the analytical results with the experimental data, and the major design codes, as well as a number of factors given by researchers. The analytical results presented in this paper indicate that the proposed factor can effectively estimate the flexural nominal strength of CFRP-plated reinforced concrete beams failed by intermediate crack debonding.

Keywords : CFRP, Effective strain, Nominal strength, Strength reduction factor

1. 서론

RC(reinforced concrete) 구조물은 형상과 크기에 크게 제약을 받지 않고 경제성과 내구성이 우수하여 가장 많이 사용되는 구조형식 중의 하나이다. 하지만 환경변화, 시공 및 설계오류 및 교통하중증가 등과 같은 예측 불가능한 여러 가지 요인에 의해 손상을 입게 됨에 따라 내하력이 저하 될 수 있다. 따라서 RC 구조물은 완성 후에 정기적인 점검을 실시하여 구조물의 손상도를 파악할 필요가 있고, 저하된 성능에 따라 적절한 보강이 필요하다.

일반적으로 RC 구조물 보강에 사용되는 재료는 강판에서 외부 PS(prestress) 강선으로 발전하였으며, 최근에는 고강도, 고강도/중량비, 피로 및 부식에 대한 높은 저항성 등의 재료적 특징을 지니는 CFRP 판 보강재가 많이 사용되고 있다(Meier and Winistorfer, 1995; Head, 1996). RC 보를 CFRP 판으로 보강했을 때 강도와 강성이 증가하는 효과가 있지만, 기존 RC 보의 파괴와는 다른

CFRP 판과 콘크리트의 계면에서의 응력집중으로 인하여 부착파괴가 발생한다(Saadatmanesh and Ehsani, 1991; Heffernan and Erki, 1996; Ross et al., 1999; Rahimi and Hutchinson, 2001; Pesic and Pilakoutas, 2003; Aram et al., 2008).

CFRP 판 보강 RC 부재의 부착파괴에 대한 연구는 국내·외에서 수행하고 있고, 강판의 경우와 마찬가지로 단부 부착파괴에 대해서는 역학적 거동특성이 많이 밝혀진 상태이다(Oehlers and Moran, 1990; Quantrill et al., 1996; Garden and Hollaway, 1998; Ahmed et al., 2001; Colotti et al., 2004; Gao et al., 2005; Yao and Teng, 2007a/b). 하지만 단부 부착파괴의 경우와 달리 중간부 부착파괴에 관한 연구는 매우 한정적이고 실험결과도 제한된 수만이 보고되고 있다(Garden, et al., 1998; Tumialan, et al., 1999; Triantafillou and Plevris, 1992; Rahimi and Hutchinson, 2001). 특히, 이러한 부착파괴를 예상하기 위한 신뢰성 있는 모델이 개발되어 있

1) 정회원, 성균관대학교 과학기술연구소 선임연구원, 공학박사
2) 정회원, 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정, 공학사
3) 정회원, 성균관대학교 BK21 연구교수, 공학박사
4) 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

* Corresponding author : tk776@skku.edu 031-290-7530

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

지 않다. 그 이유는 첫째로 보강재로 사용되는 CFRP 판의 특성에 주의를 기울이지 않았기 때문이다. 강판으로 보강된 RC 보의 실험에서는 중간부 부착파괴는 나타나지 않았고 대부분 단부 부착파괴가 일어났다. 그 이유는 CFRP는 재료 자체가 매우 가볍고 강도가 높아서 강성에 대한 강도비(strength/stiffness ratio)가 높는데 반하여 강판은 강성이 매우 커서 유연성이 떨어지기 때문이다. 그 결과 동일한 보강량을 보강한다고 가정하였을 때 일반적으로 강판보다 CFRP는 좀 더 얇고 작은 강성으로 보강이 가능하게 된다. 따라서 단부 부착파괴는 줄어들고 중간부 부착파괴의 가능성은 늘어난다(Oehlers and Seracino, 2004).

본 연구에서는 CFRP 보강시스템의 중간부 부착파괴에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위하여 보강실험을 실시하였다. 그리고 실제 보강성능 평가 및 설계 시에 필요한 신뢰성 있는 휨강도(부착파괴강도) 예상 모델을 개발하기 위하여 실험결과로부터 유효변형률 모델에 근거하여 CFRP 판의 강도감소계수를 제안하였다. 제안된 강도감소계수는 타 연구자들의 휨강도 실험결과와 비교하여 그 유효성을 검증하였다.

2. CFRP 판 보강 RC 보 휨강도

CFRP 판 보강 구조물 또는 구조부재의 휨강도, 즉 휨에 대한 극한강도를, 를 만족할 만한 정확도로 알아 낼 수 있다면 구조물의 사용기간 중에 예상되는 최대하중에 대하여 구조물의 안전을 적절한 수준으로 확보할 수 있을 것이다.

2.1 CFRP 판 보강 RC 보의 파괴

CFRP 판 보강 RC 구조물의 휨강도는 RC 구조물의 경우와 마찬가지로 Fig. 1에 나타내었듯이 균형 CFRP 단면적 $A_{f,b}$ 을 결정하고, 이 단면적과 실제 설계 및 시공된 CFRP 단면적을 비교하여 파괴형태를 판별하고 단면해석을 통해서 결정된다.

RC 보의 휨파괴 형태는 일반적으로 압축 또는 인장파괴로 구분할 수 있지만, CFRP 판 보강 RC 보는 압축 및 인장파괴 외에 부착파괴가 추가적으로 발생한다. 보강상세 및 설계조건에 따라 보강된 RC 보에서 취성의 부착파괴가 압축 또는 인장파괴 이전에 발생할 가능성이 많다.

따라서 CFRP 판으로 보강할 경우 단순히 RC 보와 같이 설계할 수 없고, 부착파괴에 대한 영향을 반드시 고려해야 한다.

CFRP 판 보강 RC 보의 부착파괴는 Fig. 2와 같이 분류할 수 있다(Teng et al., 2002). CFRP 판 단부에서 생기는 높은 계면응력(interfacial stress)에 의하여 발생하는 균열이 중앙부로 발전하는 단부 부착파괴(end debonding)와 중앙부에서 발생한 휨균열 또는 휨-전단균열이 양단으로 발전하는 중간부 부착파괴(intermediate crack debonding)가 있다. 이 두 부착파괴는 역학적으로 서로 다른 거동을 보이며, 전자는 취성파괴를 후자는 상대적으로 연성파괴를 유발하는 특징이 있다.

단부 부착파괴에 관한 연구는 매우 광범위 하게 진행되고 있고, 실험결과 또 많은 수가 보고되고 있다. 그리고 이러한 부착파괴를 예상하기 위한 신뢰성 있는 모델들이 여러 연구자에 의해 개발 및 제안되었다(Quantrill et al.,

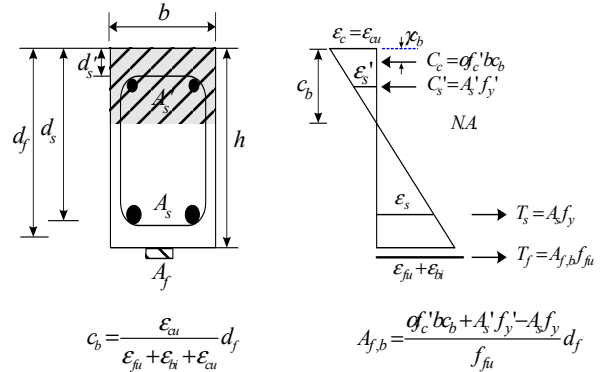


Fig. 1 Balanced CFRP area of the strengthened beam

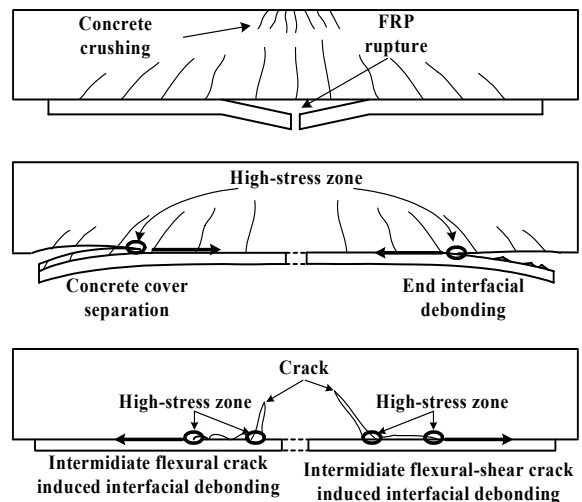


Fig. 2 Failure modes of CFRP-plated RC beams

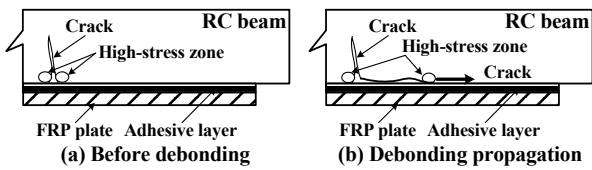


Fig. 3 Mechanism of Intermediate crack debonding

1996; Ahmed et al., 2001; Colotti et al., 2004; Gao et al., 2005; Yao and Teng, 2007b). 하지만 중간부 부착파괴에 대한 연구는 매우 한정적이고, 신뢰성 있는 모델이 개발되어 있지 않다. 이는 많은 수의 연구자들이 CFRP 보강재의 특성에 주의를 기울이지 않고 기존 강판 보강재의 경험을 그대로 CFRP 보강재에 적용하고 있기 때문이다.

중간부 부착파괴의 역학적 특성은 다음과 같다. FRP로 인장 보강된 단순 RC 보의 지간 중간부에 균열이 발생하면, 콘크리트에서 생긴 인장력이 FRP로 전달된다. 그 결과 FRP와 콘크리트 사이에서 국부적인 응력집중이 생기게 된다. 그리고 하중이 증가할수록 콘크리트와 FRP의 경계면에서 생기는 계면응력(interfacial stresses)이 증가하게 된다. 이런 응력이 일정 크기에 다다르면 균열이 있는 부분에서 부착파괴가 발생하게 되는데, 일반적으로 양단부중 균열에 가까운 쪽으로 파괴가 일어난다. Fig. 3은 중간부 부착파괴의 메커니즘을 나타낸 것이다.

상대적으로 세장한 부재 또는 상당히 얇은 CFRP로 보강된 부재에서 중간부 부착파괴는 매우 중요한 파괴모드로 여겨지고 있다. 이와 관련하여 연구자들은 중간부 부착파괴를 중요 파괴모드로 여기고 관심이 증가하고 있다. 하지만 현재까지의 연구결과(Sebastian, 2001; Teng et al., 2003; Lu et al., 2007)는 파괴 거동을 이해하기 위한 기초자료로 중간부 부착파괴 메커니즘을 밝혀내고 있지 못하고 있다. 게다가 CFRP 보강시스템에 있어서 중간부 부착파괴에 대한 명확한 이해가 부족한 상태에서 보강설계를 하고 있으며, 실험실에서의 실험결과 등에 기초하여 CFRP 보강시스템을 현장에 적용하고 있다.

2.2 CFRP 보강 RC 보의 휨강도

RC 구조물에서 가장 중요한 것은 그 부재의 휨강도를 아는 것이다. 휨강도는 구조물의 수명동안 작용할 예측가능한 모든 하중에 대하여 파괴나 다른 결함을 유발함이 없이 어느 정도의 여유를 가지고 견딜 수 있는 것이라야

한다. 하지만 CFRP 판 보강 RC 보는 복잡한 거동을 보인다. 그 이유는 RC 구조물의 전형적인 파괴 형태인 압축 및 인장파괴 외에 부착파괴가 존재하기 때문이다. 더욱이 앞서 2.1절에서 언급하였듯이 단부 부착파괴에 대한 연구는 많이 진행되어 실험 및 이론적 연구가 거의 정립된 상태이지만 중간부 부착파괴에 대한 연구는 매우 미미하다. 이러한 문제의 복잡성과 함께 이용 가능한 연구 결과의 제한은 중간부 부착파괴 거동에 맞는 정확한 강도예측모델의 개발을 어렵게 하고 있다.

기존의 모델들은 CFRP 판 보강 RC 보의 휨강도 M_n 을 계산하기 위하여 다음과 같은 표현식을 사용하고 있다.

$$M_n = T_s(d - \frac{a}{2}) + T_f(d_f - \frac{a}{2}) + C_s'(\frac{a}{2} - d') \quad (1)$$

여기서 a 는 콘크리트 등가응력의 깊이, d 는 콘크리트 압축 연단에서 인장철근 도심까지 거리, d' 는 콘크리트 압축 연단에서 압축철근 도심까지 거리, d_f 는 콘크리트 압축 연단에서 CFRP 보강재 도심까지 거리이다. 그리고 C_s' 는 휨저항에 대한 압축철근의 기여분이고, T_s 는 휨저항에 대한 인장철근의 기여분이고, T_f 는 휨저항에 대한 CFRP 보강재 기여분이다. T_s 와 C_s' 은 기존 설계시방서나 RC 구조물 설계에 관한 도서를 이용하여 쉽게 계산될 수 있기 때문에 이용 가능한 모델들 사이의 주된 차이점은 CFRP 판의 기여분인 T_f 의 평가에 있다.

휨저항에 대한 CFRP 보강재의 기여분 T_f 를 정확히 예측하는 여러 가지 요소에 따라 파괴 메커니즘이 변화하기 때문에 불가능하다. 또한 CFRP 보강된 RC 보의 취성파괴인 부착파괴가 발생하기 때문에 CFRP 보강재의 인장강도가 완전히 발현되지 못한다. 따라서 여러 연구자들 및 설계기준에서는 강도감소계수 ϕ_{frp} 를 도입하여 CFRP 보강재의 기여분 T_f 을 적절하게 감소시켜 휨강도 산정에 이용하고 있다.

CFRP 판 보강 RC 구조물의 휨강도 평가는 식 (2)에 나타내었듯이 CFRP 판 및 부착파괴의 영향을 연구자 및 각국의 설계기준에서는 강도감소계수 ϕ_{frp} 를 통하여 고려하고 있다. 이는 CFRP판이 구조물의 외부 특히 하면에 부착되며 외부환경에 노출되어 있는 상태이므로 주변환경에 영향을 받으며, 여러 가지 화학적 침식에 의해 장기 노출된 CFRP 판은 일반적으로 강도가 감소하는 것으로 보고되고 있기 때문이다. 또한 철근과 달리 CFRP 판은

Table 1 ϕ_{frp} from the existing literature

Reference	Equation	ϕ_{frp}
ACI 440.2R-02 (2002)	$M_u = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + \phi_{frp} A_f f_{fu} \left(h - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_y \left(\frac{a}{2} - d'\right)$ (2)	Material coe. = 0.85 $\phi_{frp} = 0.85$
CSA S806-02 (2002)		$\phi_{frp} = 0.75$
Lee (2001)		$\phi_{frp} = 0.70$
JCI (1998)		$\phi_{frp} = 2/3$

A_s, A_s', A_f : Area of tensile steel, compressive steel, FRP
 f_y : Yield strength of steel, f_{fu} : Rupture strength of FRP

뚜렷한 항복점이 없고 파단 시까지 선형거동을 하는 취성적 특성을 갖고 있으며, 일반적인 파괴모드 외의 CFRP 판과 모재와의 부착파괴가 부재의 강도를 지배하기 때문에 휨강도 평가 시에 안전율을 충분히 고려되어야 한다. 이러한 이유로 각국의 설계기준 및 연구자들은 CFRP 판의 불확실성 및 부착파괴를 고려하는 방법으로 재료계수 또는 강도감소계수를 적용하고 있다. Table 1은 기존 연구에서 제시하는 재료계수와 강도감소계수이다.

Table 1에 나타난 강도감소계수는 CFRP 판과 콘크리트 사이의 부착이 완전부착이라는 가정하에 제안된 것들과 실험결과를 바탕으로 회귀분석을 통하여 제안된 것들이다. 그러므로 중간부 부착파괴 거동에 대한 것을 고려하고 있지 못하고, 고려하기 위해서는 적절한 강도감소가 제시되어야 한다.

결론적으로 CFRP 판 보강 RC 보는 일반 RC 보의 경우와 달리 압축 및 인장파괴 뿐만 아니라 부착파괴가 존재한다. 그리고 부착파괴의 형태에 따라 그 휨강도가 결정되기 때문에 그 거동을 정확히 파악할 필요가 있다. 단부 부착파괴에 대해서는 신뢰성 있는 모델이 개발되어 있고, 이것을 이용하여 휨강도 평가가 가능하고 해석 및 설계에 적용이 가능하다. 하지만, 중간부 부착파괴의 경우에는 신뢰성 있는 모델이 개발되어 있지 않으므로 정확한 휨강도 평가가 불가능하다. 따라서 중간부 부착파괴로 인한 휨강도 감소에 대한 강도감소계수의 평가가 적절히 이루어져야 한다.

3. 실험

RC 보 실험체를 대상으로 CFRP 판의 중간부 부착파괴에 영향을 미치는 다양한 변수를 도출하고, 부착파괴하중

Table 2 Material properties

Concrete	Specific design strength (MPa)	Splitting strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	
	24	2.2	20.7	2.16×105	
Steel	Type	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
	D-10	475.2	766.6	2.01×106	14.4
	D-13	466.2	679.3	2.11×106	17.2
CFRP Plate	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)		Elastic modulus (MPa)	
		Manufacturer	Experimental	Manufacturer	Experimental
	0.130	2,350	2,891	1.80×106	1.73×106
Epoxy	Tensile strength (MPa)	Tensile shear strength (MPa)		Curing time (min)	
	24.1	5.3		36.5	

및 변형률을 파악하고자 하였다.

3.1 실험 재료

실험체 제작을 위해 사용된 콘크리트는 설계압축강도 24 MPa인 레미콘(ready mixed concrete)이다. 콘크리트 타설시 콘크리트 압축강도 시험방법(KS F 2405)에 의거하여 $\phi 100 \times 200$ 압축강도 시험용 공시체 몰드를 취득 후 재령 28일에 각각 3개씩 압축강도시험을 실시하여 평균값을 구하였다. 그리고 철근은 인장주철근으로 D10과 압축주철근으로 D13을 사용하였으며, 전단철근으로 D10을 사용하였다. 보강재로 사용된 CFRP 판은 국내에서 M사에서 제작된 1방향 판을 사용하였으며, 각 재료시험 결과를 요약하여 나타내면 Table 2와 같다.

3.2 단면 제원 및 실험 변수

실험체 넓이×높이는 200×300mm로 인장축과 압축축 피복두께를 동일하게 30mm로 하였으며, 순지간 길이는 3.0m, 실험체 전체 길이는 3.4m로 제작하였다. 일반적으로 복철근 RC 보는 압축철근의 단면적보다 인장철근의 단면적이 큰 것이 정상이다. 하지만 인장철근 단면적이 압축철근 단면적 보다 적게 배치하였다. 그 이유는 CFRP 판이 인장부에 보강됨에 따라 휨파괴 이전에 콘크리트 압축파괴를 방지하기 위함이다. 압축철근으로 3-D13, 인장철근으로는 3-D10을 배근하였다. 또한 휨 파괴에 앞서 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위하여 각 실험체에는 계수전

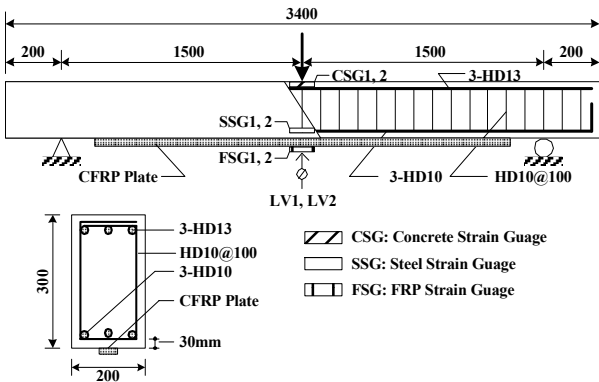


Fig. 4 Specimen details and gauge installation

Table 3 Test variables

Beams	CFRP plate			Remarks
	Layer	Width (mm)	Bond length (mm)	
Cont	-	-	-	No strengthening
BPS60	1	50	1800	
BPS90			2700	
BPD60	2	50	1800	
BPD90			2700	
BPDW60	1	100	1800	
BPDW90			2700	

단력의 2배가 넘는 전단강도를 발현할 수 있도록 D10의 스티럽을 100mm 간격으로 배근하였다. 실험체의 자세한 형상 및 치수를 나타내면 Fig. 4와 같다.

실험체는 총 7개로서 Table 3에 나타낸 바와 같이 기준실험체인 무보강 실험체는 CFRP 판을 보강하지 않은 일반 RC 보, 보강실험체는 국내에서 M사에서 제작된 두께 1.3mm, 폭 50mm의 CFRP 판 1매 보강 실험체와 CFRP 판을 겹쳐서 2매 적층 보강한 실험체 및 실험체의 폭 방향으로 2매를 보강한 실험체에 대하여 각각 부착길이를 순지간의 60%와 90%에 대하여 제작하였다.

보강성능 실험에 사용된 가력기는 250kN 용량의 액츄에이터(actuator)로 1점 재하하였다. 보강 실험체의 압축철근, 인장철근 및 CFRP 판의 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 최대하중이 작용하는 중앙부에 각각 2개씩의 변형률 게이지를 부착하였으며, 콘크리트의 압축변형률을 측정하기 위하여 67mm 변형률 게이지를 중앙부 콘크리트 압축연단에서 10mm 떨어진 위치에 부착하였다. 그리고 중요 단면인 지간 중앙부에서의 처짐을 측정하기

위하여 LVDT를 설치하였다. 설치한 센서로부터 나오는 데이터는 데이터 로거(EDX-1500A)로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 데이터를 정리하였다.

3.3 CFRP 판 보강 RC 보 실험결과

3.3.1 파괴 양상

기준실험체인 Cont는 균열하중 이후에 균열폭이 급격히 증가하면서 인장철근 항복 후 콘크리트 압축부의 압괴로 파괴되는 전형적인 휨 파괴를 나타내었다. 이는 실험체 제작 시 전단철근을 설계전단력에 비해 많이 배치하여 전단파괴를 방지하고, 압축철근의 양보다 인장철근의 양을 적게 배치하여 인장파괴를 유도한 예상된 결과이다.

CFRP 판으로 휨 보강한 실험체의 대표적인 파괴형상은 Fig. 5와 같다.

CFRP 판을 순지간의 60%로 보강한 실험체(BPS60, BPD60, BPDW60) 중에서 CFRP 판 1매를 단순 부착한 BPS60 실험체의 경우 중앙부 콘크리트 계면에서 발생한 박리가 단부로 진행되어져 파괴되었으나, 2매를 적층 보강한 BPD60 실험체와 2매를 폭방향으로 부착한 BPDW60 실험체는 CFRP 판 단부의 콘크리트가 할렬파괴되면서 최종적으로 부착파괴되었다. CFRP 판의 단부에 작용하는 인장력의 증가 및 콘크리트 부재에 발생된 휨균열이 복합적으로 작용하여 피복콘크리트의 탈락을 초래한 것으로 판단되었다.

CFRP 판을 순지간의 90%로 보강한 실험체(BPS90, BPD90, BPDW90)에서는 CFRP 판의 보강량에 상관없이 모두 중앙부 하중가력점에서 최초 CFRP 판과 콘크리트 계면에서의 부착파괴가 관찰되었으며, 중앙부에서 발생한 부착파괴는 단부로 진행되어지면서 최종 파괴되었다. 이와 같이 최대모멘트가 작용하는 중앙부에서 시작되어 단부로 진전되는 CFRP 판의 부착파괴 현상은 부착길이가 클수록 단부부착파괴 보다는 중간부 부착파괴가 일어나는 경향을 나타내었다. 이는 실교량 보강에서 CFRP 판 부착길이는

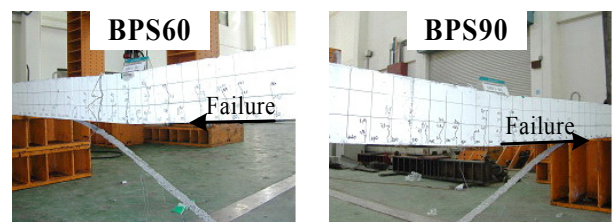


Fig. 5 Failure modes of specimens

대부분 순지간에 대해 시공 가능한 길이로 결정이 되기 때문에 실교량에서도 중간부 부착파괴가 일어날 가능성 크고 중요 파괴 메커니즘의 하나라고 판단된다.

3.3.2 하중-처짐 관계

CFRP 판 휨보강된 각 실험체의 파괴 시까지 하중-변위 곡선을 나타낸 Fig. 6에서 알 수 있듯이 인장철근 항복이 발생된 이후에도 CFRP 판이 추가적으로 응력을 분담함에 따라 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, CFRP 판의 부착파괴와 동시에 최대내력이 저하된 후 기준실험체인 RC 보와 동일한 거동을 보였다. 아래 Table 4는 전 실험체의 항복 및 극한하중과 처짐 그리고 부착파괴시의 CFRP 판의 변형율을 요약하여 나타낸 것이다.

CFRP 판 보강량의 증가에 따라서 휨강성과 항복하중이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 동일 부착길이를 갖는 실험체에서는 두 개의 CFRP 판을 겹쳐서 보강하는 방법보다 폭 방향으로 보강량을 증가시키는 것이 부착파괴에 효과적인 것으로 관찰되었다. 이는 폭 방향으로 보강

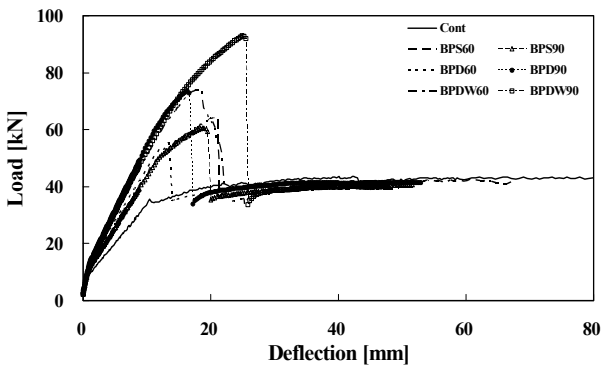


Fig. 6 Load-deflection curves

Table 4 Summary of test results

Beams	Yielding		Ultimate(Debond failure)			Failure modes
	Load (kN)	Def. (mm)	Load (kN)	Def. (mm)	CFRP strain ($\times 10^{-6}$)	
Cont	35.5	10.4	41.1	88.9	-	Flexural
BPS60	49.5	11.5	64.2	20.4	6,231	ICD
BPS90	49.6	11.7	60.5	18.9	5,945	ICD
BPD60	-	-	55.7	13.4	2,737	ED
BPD90	60.1	11.28	73.7	16.5	4,454	ICD
BPDW60	64.4	13.7	74.3	18.4	4,309	ED
BPDW90	63.2	12.68	92.9	24.9	6,372	ICD

ICD : intermediate crack debonding, ED :end debonding

으로 인하여 CFRP 판과 콘크리트의 부착면적이 증가됨으로써 부착파괴에 대한 저항을 증가시키기 때문인 것으로 생각되었다.

CFRP 판 1매를 보강한 실험체에서는 부착길이가 상관 없이 부착파괴하중은 유사한 것으로 관찰되었다. 부착길이가 60% 이상일 경우 부착파괴에 대하여 동일한 효과를 갖는 것으로 나타나, 동일한 보강량을 가질 때 일정 부착길이가 이상에서는 부착길이에 관계없이 보강성능은 일정한 것을 알 수 있었다. 부착길이를 90%로 부착한 실험체에서는 CFRP 판 단부에서의 탈락현상은 관측되지 않았으며, 중앙부의 최대 휨모멘트가 작용하는 구간에서 발생한 부착파괴가 단부로 진전되면서 최종적으로 파괴되었다.

CFRP 판 2매를 적층 시공한 실험체에서는 부착길이가 60%일 때 CFRP 판의 단부에서 발생한 휨균열로부터 인장철근을 따라 콘크리트의 피복을 물고 떨어지는 탈락파괴가 발생하였으며, 이때 인장철근은 항복하중에 도달하지 않았다. 그러나 부착길이가 90%인 실험체는 철근 항복 이후에 휨변형의 증가에 의해 지간 중앙부에서 부착파괴가 발생하여 단부로 진행되는 파괴형태를 보였다. 그리고 CFRP 판 2매를 폭방향으로 병렬 부착한 실험체의 경우는 부착면적의 증가로 인하여 철근항복 이후에도 하중은 꾸준히 증가하였고, 부착길이를 60%로 보강한 경우는 적층 시공한 실험체와 동일한 파괴 현상인 CFRP 판의 단부에서 인장철근 이하의 피복콘크리트가 인장철근을 따라 파괴되는 현상이 발생하였다.

3.3.2 하중-CFRP 변형률 관계

CFRP 판으로 휨보강된 RC 보서 하중의 증가에 따른 CFRP 판의 대표적인 변형률 분포를 파괴모드에 따라 나타내었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 CFRP 판을 1매 보강하여 중간부 부착파괴된 실험체에서는 부착길이에 걸쳐 선형의 변형률 분포를 보였으며, 철근항복 이후에는 탄소섬유 판의 하중 분담률이 증가하여 변형률 분포의 기울기도 증가하였다.

CFRP 판 2매를 높이 방향으로 적층 보강 후 단부 부착파괴된 실험체의 변형률 분포를 나타내면 Fig. 8과 같다. 이 실험체에서는 철근의 항복 이전에 CFRP 판의 단부에서 피복콘크리트를 물고 떨어지는 부착파괴가 발생되었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 하중의 증가에 따라서 부착길이에 나타난 변형률 분포는 일정하며, 철근의 항복

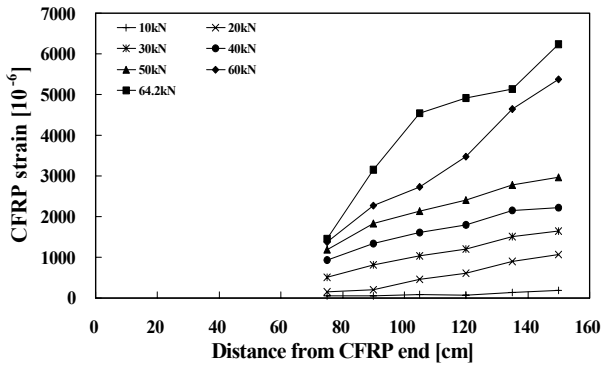


Fig. 7 Load-CFRP plate strain curves: BPS60

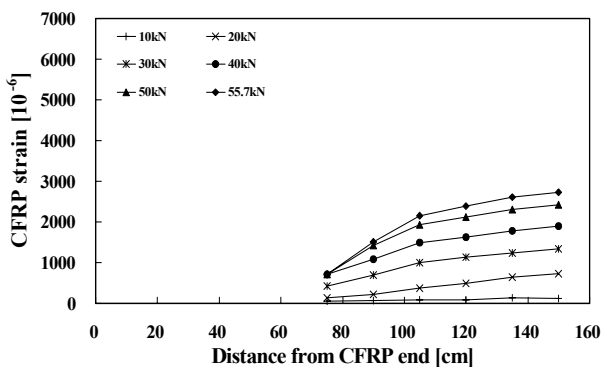


Fig. 8 Load-CFRP plate strain curves: BPD60

이전에 탄소섬유판의 단부에서 탈락파괴가 발생되었기 때문에 탄소섬유판의 변형률이 급격히 증가하는 현상은 나타나지 않았다.

그리고 Table 4에서 BPS60 보다 BPS90 실험체가 보강길이가 길음에도 불구하고 부착파괴시 CFRP 판 변형율은 더 적게 나타난 현상은 선행 연구의 실험결과(김진울, 2007; 양동석, 2005)와 동일한 결과로서, 중간부 부착파괴 시에 보강길이는 극한강도에 영향이 미미한 것으로 판단되었다.

결론적으로 CFRP 판을 이용하여 휨 보강된 실험체의 거동을 살펴보면 다음과 같다. CFRP 판 보강량이 증가됨에 따라 항복하중, 부착파괴하중 및 강성은 증가되고 그에 따라 처짐은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 항복하중 이후의 부착파괴시의 하중은 부착방법에 따라 변하였다. 이러한 현상은 CFRP 판과 콘크리트와의 부착강도가 부착면적에 비례하여 증가하는 것에 따른 것으로 판단되었다. 또한 부착길이가 증가함에 따라 파괴형상이 단부 부착파괴에서 중간부 부착파괴로 전이 되는 것을 알 수

있었다. 따라서 CFRP 판의 부착길이는 CFRP 판의 부착단부에서의 탈락파괴를 결정하는 요인으로 작용하며, 일정 길이 이상 CFRP 판을 부착할 경우, 즉 중간부 부착파괴, 발생에는 Table 4에서 알 수 있듯이 부착파괴시의 변형률을 일정하게 적용하는 것이 합리적인 것이라 판단되었다.

4. 부착강도감소 계수 제안 및 검증

중간부 부착파괴 시의 CFRP 판의 휨저항에 대한 기여분을 정확하게 평가하는 것을 힘들다. 따라서 본 연구에서는 식 (3)에 나타내었듯이 CFRP 판의 유효응력(혹은 유효변형률)과 극한강도(혹은 극한변형률)의 비로 결정되는 유효변형률 모델에 근거하여 강도감소계수를 제안하고자 한다. 유효응력(유효변형률)은 부착파괴 시 시간중양 CFRP 판의 응력과 변형률을 의미한다.

$$\phi_{frp} = \frac{f_{db}}{f_{fu}} = \frac{\epsilon_{db}}{\epsilon_{fu}} \quad (3)$$

또한 여러 연구자의 실험데이터를 이용하여 제안된 강도감소계수의 유효성에 대하여 검증을 하였다.

4.1 강도감소계수 제안

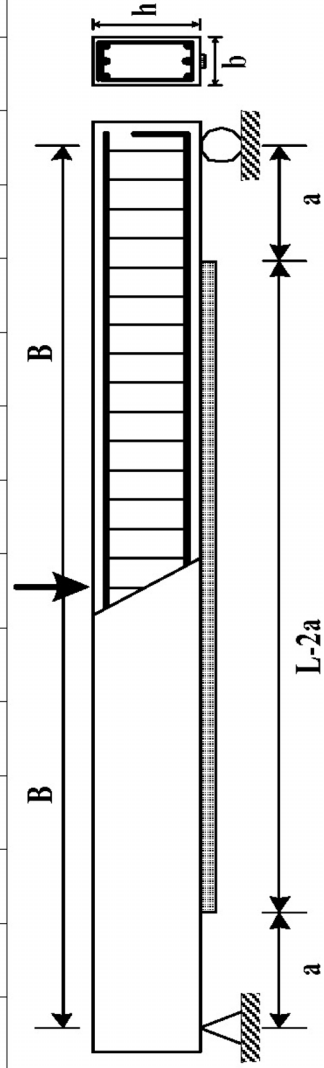
CFRP 판 보강 RC 보의 중간부 부착파괴 시의 강도감소계수를 제안하기 위하여 본 연구에서 보강실험을 통하여 얻은 실험데이터와 타 연구자(김진울, 2007; 박중열, 2002; 양동석, 2005)의 실험에서 부착파괴 시의 CFRP 판의 변형률을 비교 하였다. 비교 실험체들의 파괴형태는 중간부 부착파괴로 제한하였다.

파괴 시의 CFRP 판 변형률 데이터를 식 (3)을 이용하여 유효변형률 비를 계산하여 비교하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 유효변형률 비의 평균값은 0.446이다. 이 값을 강도감소계수로 적용하기에는 계산의 복잡 및 적용의 어려움이 따를 것으로 판단되어, 적용이 간편하고 계산의 단순화가 가능한 값인 0.45를 제안하고자 한다.

CFRP 판 보강 RC 보의 중간부 부착파괴 시 휨강도 평가 식은 앞서 제안된 강도감소계수 값을 식 (2)에 대입하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

Table 5 Flexural test data collected from the existing literature

Beams	Concrete beam						Reinforcement						Loading						FRP plate				Reference
	b (mm)	h (mm)	ds (mm)	ds' (mm)	fc' (MPa)	E _c (GPa)	E _s (GPa)	f _y (MPa)	A _s (mm ²)	E _s ' (GPa)	f _y ' (MPa)	A _s ' (mm ²)	B (mm)	L (mm)	Plate type	E _f (GPa)	f _{fu} (MPa)	t _f (mm)	b _f (mm)	a (mm)			
NFCB1	200	300	265	35	16.4	19.2	200	560	214	200	560	380	800	2400	CFRP	175	2870	1.3	50	100	Yang(2007)		
BFS60	200	300	265	35	20.7	21.6	200	466	214	200	475	380	1500	3000	CFRP	173	2891	1.3	50	600	This research		
BFS90	200	300	265	35	20.7	21.6	200	466	214	200	475	380	1500	3000	CFRP	173	2891	1.3	50	150			
BFD90	200	300	265	35	20.7	21.6	200	466	214	200	475	380	1500	3000	CFRP	173	2891	2.6	50	150			
BFDW90	200	300	265	35	20.7	21.6	200	466	214	200	475	380	1500	3000	CFRP	173	2891	1.3	100	150			
C4u. 1.0	100	100	84	16	51.2	33.8	215	350	85	215	350	57	587	587	CFRP	111	1414	1.5	67	45	Garden et al. (1998)		
C5u. 1.0	100	100	84	16	51.2	33.8	215	350	85	215	350	57	772	772	CFRP	111	1414	1.5	67	45	Tumialan et al. (1999)		
A1	150	300	250	-	51.7	34.0	207	427	792	-	-	-	1065	2130	CFRP	230	3400	0.165(1)	150	0			
A2	150	300	250	-	51.7	34.0	207	427	792	-	-	-	1065	2130	CFRP	230	3400	0.165(2)	150	0			
A7	150	300	250	-	51.7	34.0	207	427	792	-	-	-	1065	2130	CFRP	230	3400	0.165(2)	75	0			
4	76	127	111	-	44.7	31.6	200	517	33	-	-	-	468	1220		186	1450	0.65	63.2	75	Triantafyllou and Plevris (1992)		
6	76	127	111	-	44.7	31.6	200	517	33	-	-	-	468	1220	CFRP	186	1450	0.90	63.3	75			
8	76	127	111	-	44.7	31.6	200	517	33	-	-	-	468	1220		186	1450	1.90	63.9	75			
B3	200	150	120	30	49.2	25.0	210	460	157	210	460	157	750	2100	CFRP	127	1532	0.8	150	85	Rahimi and Hutchinson (2001)		
B6	200	150	120	30	49.2	25.0	210	460	157	210	460	157	750	2100	CFRP	127	1532	1.2	150	85			
B7	200	150	120	30	49.2	25.0	210	460	157	210	460	157	750	2100	GFRP	36	1074	1.8	150	85			



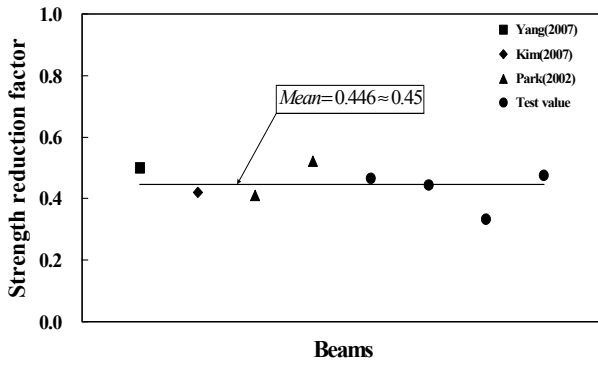


Fig. 9 Strength reduction factor

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{a}{2} - d' \right) + 0.45 A_f f_{fu} \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

4.2 강도감소계수 검증

본 연구에서 제안된 강도감소계수의 검증을 위한 사용 가능한 실험데이터를 얻기 위해 여러 연구문헌을 수집 및 분석하였다. 또한 수집된 모든 실험데이터의 파괴형태는

중간부 부착파괴이다. 그리고 하중재하, 단면상세, 철근상세 및 보강재에 관한 내용을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

캔틸레버(cantilever) 보의 자유단에 집중하중을 재하여 실험한 Garden(1998)의 실험체 C4u,1.0과 C5u,1.0를 제외한 Table 6에 나타낸 모든 실험체는 일반 RC 단순보를 CFRP 판으로 보강하여 3점 또는 4점 재하로 수행된 실험체들이다. 그리고 단면은 모두 직사각형을 사용하였다.

CFRP 판 보강 RC 보에 앞서 대해 앞서 제안된 강도감소계수와 Table 1에 나타낸 여러 연구자 및 설계기준에서 제안된 강도감소계수를 실험결과 값과 비교한 결과를 Table 6에 정리하여 나타내었다. 휨강도 결정은 식 (4)를 이용하여 평가하였다. 그리고 Fig. 10은 수집된 타 연구자들의 연구문헌에서 제시된 실험데이터와 강도감소계수에 따른 비교를 나타낸 것이다.

Table 6에서 알 수 있듯이 여러 연구자 및 설계기준에서 제시된 강도감소계수 값은 휨강도(부착파괴강도)를 과대평가하는 것으로 나타났다. 이것은 CFRP 판과 콘크리트가 완전부착이라는 가정을 하에 재료의 감소계수만

Table 6 Comparisons of existing factors with the experimental data and the proposed factor in debonding load(or nominal flexural strength)

Beams	Test (a) (kN)	This Research		ACI 440.2R-02 (2002)		CSA S806-02 (2002)		Lee (2001)		JCI (1998)	
		Load (b) (kN)	(a)/(b)	Load (c) (kN)	(a)/(c)	Load (d) (kN)	(a)/(d)	Load (e) (kN)	(a)/(e)	Load (g) (kN)	(a)/(g)
NFCB1	77	64.30	1.20	80.64	0.95	82.44	0.93	79.44	0.97	77.44	0.99
BPS60	64.2	63.35	1.01	81.33	0.79	83.28	0.77	80.03	0.80	77.85	0.82
BPS90	60.5	63.35	0.95	81.33	0.74	83.28	0.73	80.03	0.76	77.85	0.78
BPD90	73.7	92.82	0.79	127.21	0.58	130.97	0.56	124.70	0.59	120.50	0.61
BPDW90	92.9	92.82	1.00	127.21	0.73	130.97	0.71	124.70	0.74	120.50	0.77
C4u, 1.0	15.43	13.41	1.15	18.23	0.85	19.00	0.81	17.87	0.86	17.66	0.87
C5u, 1.0	11.33	10.20	1.11	13.86	0.82	14.45	0.78	13.59	0.83	13.43	0.84
A1	72.8	75.41	0.97	74.23	0.98	76.31	0.95	73.59	0.99	72.44	1.01
A2	84.9	82.10	1.03	87.50	0.97	90.20	0.94	86.86	0.98	85.00	1.00
A7	86.1	75.41	1.14	74.23	1.16	75.43	1.14	73.59	1.17	72.44	1.19
4	14.8	10.35	1.43	14.48	1.02	14.93	0.99	14.18	1.04	13.67	1.08
6	14	12.80	1.09	18.36	0.76	18.96	0.74	17.96	0.78	17.29	0.81
8	18.7	22.22	0.84	30.16	0.62	31.33	0.60	29.18	0.64	28.92	0.65
B3	27.6	24.61	1.12	32.27	0.86	33.06	0.83	31.74	0.87	30.85	0.89
B5	34.9	31.16	1.12	41.60	0.84	42.12	0.83	40.90	0.85	39.71	0.88
B7	29.8	31.51	0.95	43.85	0.68	45.33	0.66	42.72	0.70	41.01	0.73
Average			1.06		0.83		0.81		0.85		0.87
S.D.			0.150		0.154		0.153		0.153		0.155
C.O.V.			0.142		0.185		0.189		0.180		0.178

S.D. : Standard deviation, C.O.V. : Variation of coefficient

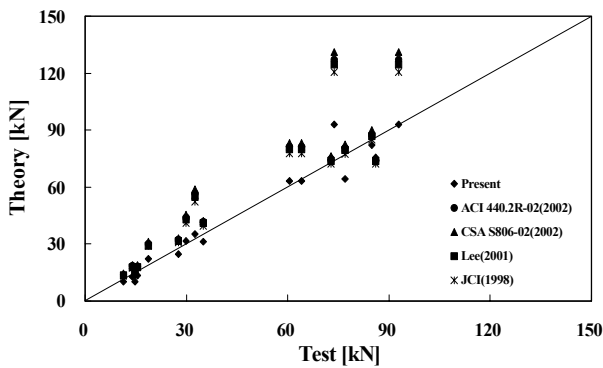


Fig. 10 Comparisons of existing factors with the experimental data and the proposed factor

을 고려하였기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 강도감소계수는 평균, 분산 및 변동계수가 각각 1.06, 0.15, 0.142로 나타났지만, ACI 440.2R-02(2002), CSA S806-02(2002), JCI(1998) 및 이용택(2001)은 평균, 분산 및 변동계수가 각각 0.81~1.24, 0.153~0.184, 0.149~0.189로 나타나, 중간부 부착파괴된 CFRP 판 보강 RC 보의 휨강도(부착파괴 강도)를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 CFRP 판으로 휨보강한 RC 보의 휨 거동 특성 및 CFRP 판과 콘크리트 사이의 중간부 부착파괴 거동을 정적 실험을 통하여 파악하고자 하였다. 제한된 실험으로부터 얻은 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) CFRP 판을 순지간의 60%로 보강한 실험체 중에서 BPS60를 제외하고는 단부 부착파괴가 관찰된 반면 90%로 보강한 실험체는 모두 중간부 부착파괴로 최종 파괴되었다. 이러한 중간부 부착파괴는 실교량 보강에서 CFRP 판 부착길이는 대부분 순지간에 대해 시공 가능한 길이로 결정이 되기 때문에 동일한 파괴형태가 일어날 가능성 크고 중요 파괴 메커니즘의 하나라고 생각된다.
- (2) CFRP 판을 이용하여 휨 보강한 실험체는 보강량이 증가됨에 따라 항복하중, 부착파괴하중 및 강성은 증가되고 그에 따라 처짐은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 항복하중 이후의 부착파괴시의 하중은 부착 방법에 따라 변하였다. 이러한 현상은 CFRP 판과 콘크리트와의 부착강도가 부착면적에 비례하여 증가

하는 것에 따른 것으로 판단되었다.

- (3) 중간부 부착파괴된 CFRP 판 보강 RC 보의 휨강도를 예측하기 위해 제안된 강도감소계수는 CFRP 판의 유효응력(또는 유효변형률)과 극한응력(또는 극한변형률) 비로 정의 되는 유효변률 모델을 이용하여 실험데이터로부터 제안하였다. 제안된 강도감소계수의 유효성, 정확성 및 타당성을 입증하기 위해서 각국의 설계기준 및 연구자들에 의해 제안된 계수 값과 실험값을 본 연구결과와 비교한 결과 CFRP 판 보강 RC 보의 휨강도를 매우 효율적으로 평가할 수 있음을 나타내었다.

참고문헌

1. 김진을, CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 정적 및 피로 거동, 성균관대학교 석사학위논문, 서울, 2007.
2. 박중열, 조홍동, 한상훈, "탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 보강방법에 따른 휨성능 개선", 대한토목학회논문집, 제22권 4-A호, 2002, pp.895-903.
3. 양동석, 탄소섬유 계면부착을 고려한 보강 RC 휨부재의 거동 특성, 성균관대학교 박사학위논문, 서울, 2005.
4. 양동석, 홍성남, 박신규, "탄소섬유판으로 부착보강된 철근콘크리트 부재의 계면 부착거동", 대한토목학회논문집, 제27권 3호, 2007, pp.443-452.
5. 이용택, 이리형, "CFS로 보강된 철근콘크리트 보의 휨내력향상효과에 관한 연구", 구조물진단학회지, 제3권 3호, 2008, pp.203-212.
6. ACI 440.2R-02, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, USA, 2002.
7. Ahmed, O., Gemert D. V. and Vanderwalle L., "Improved model for plate end shear of CFRP strengthened RC beams", Cement & Concrete Composites, vol. 23, No. 1, 2001, pp.3-19.
8. Aram, M. R., Czaderski, Z. and Motavalli, M., "Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams", Composites Part B: Engineering, vol. 39, No. 5, 2008, pp.826-841.
9. Colotti, V., Spadea, G. and Swamy, R. N., "Structural model to predict the failure behavior of plated reinforced concrete beams", Journal of Composites for Construction, vol. 8, No. 2, 2004, pp.104-122.
10. CSA S806-02, Design and construction of building components with fibre reinforced polymers, Canadian Standards Association, Canada, 2002.
11. Gao, B., Leung, C. K. Y. and Kim, J. K., "Prediction of concrete cover separation failure for RC beams strengthened with CFRP strips", Engineering Structures, vol. 27, No. 2, 2004, pp.177-189.
12. Garden, H. N. and Hollaway, L. C., "An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced

- concrete beams”, *Composite Structures*, vol. 29, 1998, pp.175-188.
13. Garden, H. N., Quantrill, R. J., Hollaway, L. C., Thorne, A. M. and Parke, G., “An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams”, *Construction and Building Materials*, vol. 12, 1998, pp.203-219.
 14. Head, P. R., “Advanced composites in civil engineering - A critical overview at this high interest, low use stage of development”, *International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Montreal, Canada, 1996, pp.3-15.
 15. Heffernan, P. J. and Erki, M. A., “Equivalent capacity and efficiency of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced plastic sheets”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 23, No. 1, 1996, pp.21-29.
 16. JCI, Technical report on continuous fiber reinforced concrete, Japan Concrete Institute, Tokyo, 1998.
 17. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P. and Jiang, J. J., “Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, No. 2, 2007, pp.161-174.
 18. Meier, U. and Winistorfer, A., “Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheets”, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, Ghent, Belgium, 1995, pp.509-516.
 19. Oehlers, D. J. and Moran, J. P., “Premature failure of externally plated reinforced concrete beams”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 116, No. 4, 1990, pp.978-995.
 20. Oehlers D. J. and Seracino R., *Design of FRP and steel plated RC structures: retrofitting beams and slabs for strength, stiffness and ductility*, Elsevier, Oxford, 2004.
 21. Pestic, N. and Pilakoutas, K., “Concrete beams with externally bonded flexural FRP-reinforcement: analytical investigation of debonding failure”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 34, No. 4, 2003, pp.327-338.
 22. Quantrill, R. J., Hollaway, L. C. and Thorne, A. M., “Predictions of the maximum plate end stresses of FRP strengthened beam: Part II”, *Magazine of Concrete Research*, vol. 48, No. 177, 1996, pp.343-351.
 23. Rahimi, H. and Hutchinson, A., “Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 5, No. 1, 2001, pp.44-56.
 24. Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W. and Hughes, M. L., “Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates”, *ACI Structural Journal*, vol. 96, No. 2, 1999, pp.212-220.
 25. Saadatmanesh, H. and Ebsani, M. R., “RC beams strengthened with FRP plates II: analysis and parametric study”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, No. 2, 1991, pp.3434-3455.
 26. Sebastian, W. M., “Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, No. 7, 2001, pp.792-798.
 27. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L., *FRP-strengthened RC structures*, John-Willy & Sons, UK, 2002.
 28. Teng, J. G., Smith, S. T., Yao J. and Chen, J. F., “Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs”, *Construction and Building Materials*, vol. 17, 2003, pp.447-462.
 29. Triantafillou, T. and Plevris, N., “Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, 1992, pp.201-211.
 30. Tumialan, G., Serra, P., Nanni, A. and Belarbi, A., “Concrete cover delamination in reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets”, *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, Maryland, USA, pp.725-735.
 31. Yao, J. and Teng, J. G., “Plate end debonding in FRP-plated RC beams—I: Experiments”, *Engineering Structures*, vol. 29, No. 10, 2007a, pp.2457-2471.
 32. Yao, J. and Teng, J. G., “Plate end debonding in FRP-plated RC beams—II: Strength model”, *Engineering Structures*, vol. 29, No. 10, 2007b, pp.2472-2486.

(접수일자 : 2010년 11월 1일)

(수정일자 : 2011년 2월 25일)

(심사완료일자 : 2011년 6월 14일)

요 지

본 논문은 중간부 부착파괴된 CFRP 보강 RC 보의 휨강도 산정을 다루고 있다. CFRP 보강 RC 보의 중간부 부착파괴의 영향을 고려하기 위해 강도감소계수를 제안하였다. 제안된 계수는 CFRP의 유효응력(또는 유효변형률)과 극한응력(또는 극한변형률) 비로 정의 되는 유효변률 모델을 이용하여 실험데이터로부터 유도하였다. 휨강도 산정식은 강도감소계수를 변수로 하여 함수를 구성하였다. 제안된 강도감소계수의 유효성, 정확성 및 타당성을 입증하기 위해서 각국의 설계기준 및 연구자들에 의해 제안된 계수 값과 실험값을 본 연구결과와 비교 및 검증했다. 본 논문에서 제시하는 해석 결과는 제안된 강도감소계수가 중간부 부착파괴된 CFRP 보강 RC 보의 휨강도를 매우 효율적으로 평가할 수 있음을 나타낸다.

핵심 용어 : CFRP, 유효 변형률, 공칭강도, 강도감소계수
