

비부착 탄소섬유판 긴장재로 외부 긴장 보강된 철근콘크리트 보의 해석

The Analysis for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Unbonded Prestressed CFRP Plates

박종섭* · 정우태** · 박영환*** · 김철영****

Park, Jong Sup · Jung, Woo Tai · Park, Young Hwan · Kim, Chul Young

Abstract

This paper suggests a modified bond reduction coefficient considering the average CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) strain concept for the unbonded prestressed CFRP plate strengthening system. The strengthened length and the pure bending length were seen to influence the variation of the strain of unbonded CFRP plate. Therefore, a new bond reduction coefficient considering such effect was suggested. Comparison with the experimental data revealed that the analytic results obtained by considering the proposed bond reduction coefficient were effective in estimating the strain of the unbonded CFRP plate in the CFRP plate prestressing system.

Keywords : carbon fiber reinforcement polymer, strengthening, CFRP plate, bond reduction coefficient, external prestressing

요 지

본 논문에서는 비부착 CFRP판으로 긴장 보강된 철근콘크리트 보를 해석하기 위한 수정된 부착감소계수를 제안하였다. 기존의 비부착 강연선의 극한응력 해석식에 대한 분석을 통해 비부착 CFRP판 긴장재로 보강된 철근콘크리트 보에 대한 적용성을 검토하였으며, 적용상의 문제점을 도출하였다. 합리적인 비부착 CFRP판 극한응력 해석식을 제안하기 위해 부착 CFRP판 긴장재의 평균변형률 개념으로부터 비부착 CFRP판 긴장재의 보강길이와 하중 재하 형태에 따른 순수휨구간 길이가 고려된 확장된 부착감소계수를 제안하였다. 최종 부착감소계수는 기존의 비부착 CFRP판 긴장 보강보에 대한 실험연구 문헌의 실험결과를 이용한 통계적 방법으로 결정되었으며, 제안된 부착감소계수를 포함한 극한응력 해석식에 의해 계산된 값을 실험결과와 비교하여 제안식의 유효성을 검토하였다.

핵심용어 : 탄소섬유판, 보강, 부착감소계수, 비부착 외부 긴장

1. 서 론

섬유보강 복합재료(Fiber Reinforced Polymer : FRP) 쉬트 또는 판은 높은 비강도(중량 대 강도비), 내부식성, 시공의 편리성 등의 재료가 지닌 장점으로 최근 철근 콘크리트 구조물의 보강에 많이 적용되고 있다. FRP 쉬트 또는 판을 이용한 보강공법은 대부분 에폭시와 같은 접착제를 사용하여 기존 구조물의 표면에 부착하는 방법으로 적용되고 있으며, 이와 같은 FRP 부착공법은 구조물의 극한 강도를 증가시키기 위한 효과적인 공법이지만 공법의 기본원리상 사용 하중 수준에서의 균열하중 증가나 항복하중의 증가는 미미한 수준이며, 특히 균열 폭과 변형의 억제는 거의 기대할

수 없는 공법이다(EI-Hacha, 2004). FRP 부착공법은 또한 조기 부착파괴로 재료의 효율성을 100% 발휘하지 못하는 문제점이 있으며, 많은 연구자들이 이러한 부착파괴의 원인과 해결방안을 찾기 위한 실험적, 해석적 연구를 수행해오고 있다(Smith 등, 2001). 그러나 많은 연구에도 불구하고 아직까지 부착파괴의 명확한 발생원인과 부착파괴를 예측하기 위한 방법은 제시되지 못하고 있는 실정이다(Rosenboom, 2006).

이러한 FRP 부착공법이 지닌 단점들을 극복하기 위한 방법으로 CFRP(Carbon FRP)판 또는 쉬트 긴장 보강 시스템이 제안되었다(Garden과 Hollaway, 1998; Wu 등, 1999). CFRP판 긴장 보강 시스템은 CFRP가 갖고 있는 재료적 장

*정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원 (E-mail : jspark1@kict.re.kr)

**정희원 · 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 연구원 (E-mail : woody@kict.re.kr)

***정희원 · 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 책임연구원 (E-mail : yhpark@kict.re.kr)

****정희원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : cykim@mju.ac.kr)

점을 충분히 활용할 수 있을 뿐 아니라 긴장시스템의 장점을 통해 기존 FRP 부착공법이 갖고 있는 문제점을 보완할 수 있는, 현재로서는 FRP 보강분야에서 가장 진보된 공법으로 알려져 있다(El-Hacha, 2004). 기존의 CFRP판 긴장 부재에 대한 연구는 대부분 부착 시스템에 대한 연구로 비부착 CFRP판의 거동에 대해서는 아직까지 연구가 거의 이루어지지 못하고 있다.

비부착 긴장재를 갖는 철근콘크리트 부재에 관한 기존 연구는 대부분 비부착 강연선의 거동에 대한 연구가 주를 이루었다(Naaman 등, 1991; Tan 등, 1997; Ng, 2003). CFRP판은 강연선과 비교할 때 형상이 다를 뿐 아니라 탄성계수가 낮고 특히 항복점이 없는 취성적 재료 특성을 갖는다는 점에서 기존 비부착 강연선과는 거동이 다를 것으로 예측되지만 기본적으로 CFRP판이 부착되어 있지 않다는 점에서는 비부착 강연선의 거동과 유사점이 많을 것으로 판단된다. 이러한 개념에 따라 FRP 긴장재를 활용한 프리스트레스 콘크리트 구조물에 대해 다루고 있는 ACI 440.4R(2004)에서는 비부착 FRP 긴장재의 응력을 Naaman 등(1991) 기존의 연구자들에 의해 제시된 비부착 강연선의 설계식을 준용하도록 제안하고 있다. 그러나 ACI 440.4R(2004)에 제시된 Naaman 등의 설계식은 부재 단부에 긴장재가 정착된 경우를 대상으로 하기 때문에 경간 내에 CFRP판의 단부가 정착되는 보강공법의 설계에 준용하기에는 무리가 있다. 또한 ACI의 설계식은 정형화된 재하 형태에 대해서만 적용하도록 제한되어 있기 때문에 다양한 재하 형태를 고려하기 어렵다.

본 연구에서는 비부착 CFRP판으로 외부 긴장 보강된 철근콘크리트 보에서 비부착 CFRP판의 극한 응력을 예측할 수 있도록 비부착 FRP 긴장재에 대한 ACI 설계식을 분석·평가하였으며, 합리적으로 수정·보완된 새로운 부착감소계수를 제시하였다. 최종적으로 제안된 해석식에 의해 계산된 값을 비부착 CFRP판을 갖는 긴장 보강보에 대한 실험결과와 비교하여 비부착 CFRP판용 부착감소계수(Bond reduction coefficient)의 유효성을 검토하였다.

2. 비부착 CFRP판의 극한응력식

2.1. 기존 비부착 긴장재의 극한응력 설계식

비부착 긴장재를 갖는 부재의 공칭모멘트를 구하기 위해서는 비부착 긴장재의 극한응력 f_{ps} 를 예측할 필요가 있다. 그러나 이미 알려진 바와 같이 비부착 긴장재는 주변 콘크리트와의 변형을 적합조건을 만족하지 못하므로 변형을 적합조건에 따르는 일반적인 단면해석에 의해서는 극한응력을 계산할 수 없다(박상렬, 2004).

비부착 긴장재의 극한 응력을 예측하기 위해 수행된 기존의 연구에서는 공통적으로 비부착 강연선에 대해 다음과 같은 식을 사용한다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps} \quad (1)$$

여기서, f_{pe} 는 강연선의 유효프리스트레스이고, Δf_{ps} 는 유효프리스트레스상태이후의 극한하중상태까지 하중 증가에 따른 강연선의 응력증가량이다. 비부착 강연선에 대한 실험을 통해

f_{ps} 의 경험적 예측방정식을 제안한 많은 연구자들은 비부착 효과를 고려하기 위한 계수를 도입하여 식(1)을 식(2)와 같은 형태의 예측방정식으로 제안하였다(Naaman 등, 1991).

$$f_{ps} = f_{pe} + \lambda E_{ps} (\Delta \epsilon_{cps})_{\max} \quad (2)$$

여기서 $(\Delta \epsilon_{cps})_{\max}$ 는 강연선 위치에서 콘크리트 최대변형률을 나타내는 것으로 최대모멘트 위치에서의 완전 부착된 강연선 변형률을 의미한다. λ 는 비부착 효과를 고려하기 위한 부착감소계수이다. 연구자들은 λ 를 부착되었을 때 최대 모멘트 위치에서 발생하는 강연선의 변형률에 대한 비부착 강연선의 변형률 비로 정의하고 식(2)를 통해 기존의 변형률 적합조건식에 의한 단면해석방법에 따라 비부착 강연선의 극한응력을 예측할 수 있도록 하였다(Naaman 등, 1991; Tan 등, 1997; Ng, 2003).

비부착 강연선에 대한 초기 연구에서 Baker 등은 λ 를 하나의 상수값으로 제안하였다(Baker, 1952; Gifford, 1956). 그러나 최근 연구에서는 비부착 강연선의 응력증분에 영향을 미치는 인자들을 포함하는 함수의 형태로 λ 를 제안하고 있다. Naaman 등(1991)을 비롯한 비부착 강연선에 대한 기존 연구에서는 공통적으로 긴장재 깊이에 대한 경간길이의 비가 비부착 강연선의 응력에 영향을 주는 가장 중요한 인자로 취급되고 있다(오병환, 1999; 박상렬, 2004; Ghallab 등, 2005). Naaman 등(1991)은 비부착 강연선의 변형률 감소량이 긴장재 유효깊이(d_p)에 대한 경간길이(L)의 비(L/d_p)와 관련된 것으로 발표하였다. 또한 Ghallab 등(2005)은 긴장재의 유효프리스트레스가 증가할수록 외부 비부착 긴장재의 응력 증분이 감소하는 것으로 보고하였다. 다른 연구자들은 부재의 처짐에 따른 강선의 편심변화 효과(Second order effect), 편향부(Deviator)의 위치 등도 비부착 강연선의 응력에 관계하는 인자로 제안하고 있다(Tan 등, 1997; Ng, 2003). ACI 440.4R(2004)에서도 긴장재 편심거리 변화에 따른 영향(2nd order effect)을 고려하지 않는 내부 비부착 FRP 텐던에 대해서는 Naaman 등(1991)의 제안식을 준용하며, 외부 비부착 FRP 텐던에 대해서는 편심거리의 변화를 고려한 Aravinthan 등(1997)의 식을 준용하여 설계하도록 제안하고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 CFRP판 긴장 보강 시스템은 기본적으로 구조물 하면에 CFRP판을 직선 배치하는 방식이며, 하면에 밀착되어 설치되므로 편심거리의 변화나 편향부의 개수, 위치 등은 CFRP판의 응력변화에 영향을 주지 않을 것으로 예상된다.

Naaman 등(1991)이 기존의 실험결과들과 예측식들에 대한 상관관계를 분석한 결과에 따르면 비부착 긴장재의 극한 응력 f_{ps} 에 대한 예측값은 실험값과 상관관계가 높게 나타나지만 응력 증가량 Δf_{ps} 에 대한 예측값은 실험값과의 상관관계가 매우 불량한 것으로 나타났다. Naaman은 이러한 경향을 나타내는 이유에 대해 Δf_{ps} 에 비해 유효프리스트레스 f_{pe} 가 크기 때문인 것으로 주장하고 비부착 긴장재를 갖는 부재에 대한 단순화된 해석기법을 제안하였다.

Naaman은 식(3)과 같이 작용하중 형태에 따른 부착감소계수를 적용한 비부착 강연선에 대한 예측식을 제안하였으며, 제안식을 통해 부착 강연선을 갖는 부재의 해석방법으로 비부착 강연선을 갖는 부재를 해석할 수 있도록 하였다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c} - 1 \right) \quad (3)$$

여기서,

- $\Omega_u = 2.6/(L/d_p)$: 중앙 1점 재하인 경우의 부착감소계수
- $\Omega_u = 5.4/(L/d_p)$: 3등분점 재하인 경우의 부착감소계수
- E_{ps} : 강연선의 탄성계수
- ϵ_{cu} : 콘크리트의 압축변형률
- d_p : 긴장재 도심까지의 길이
- c : 극한상태에서 중립축까지의 거리

식(3)은 미지의 중립축 c 를 포함하므로 단면에서의 힘의 평형조건식을 이용하여 미지수 f_{cu} , c 를 시산법에 의해 구해야 한다.

Naaman은 설계식에 사용할 수 있도록 Ω_u 를 식(4)와 같이 안전율을 고려하여 수정 제시하고 연속경간에 적용하기 위한 계수를 추가로 적용하여 비부착 강연선에 대한 설계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c} - 1 \right) \frac{L_1}{L_2} \quad (4)$$

여기서,

- $\Omega_u = 1.5/(L/d_p)$: 1점 재하인 경우의 부착감소계수
- $\Omega_u = 3.0/(L/d_p)$: 3등분점 재하인 경우의 부착감소계수
- L_1 : 동일 강연선에 의해 영향을 받는 하중재 하간길이
- L_2 : 정착단 간의 강연선 길이

2.2 비부착 CFRP판 긴장재 극한응력 제안식

비부착 강연선에 대한 기존 연구에서는 공통적으로 비부착 긴장재의 변형률은 부착된 긴장재 변형률의 길이 방향 평균 값과 관련한 것으로 밝히고 있다(Harajli, 1990; Naaman, 1991). 박상렬 등(2007)은 비부착 긴장재의 응력 평균화를 고려하기 위해 긴장재의 깊이 변화와 휨모멘트 변화를 고려한 응력 평균화 감소계수를 제안하였고 응력 평균화 이외의 요인들에 의한 차이를 반영하기 위한 응력 수정계수를 도입하여 비부착 FRP 긴장재의 극한응력을 계산하도록 제안했다.

기존 연구에서는 대부분 비부착 긴장재가 부재 단부에 정착된 경우를 대상으로 하기 때문에 경간길이가 비부착 긴장재의 변형률 변화에 유의한 변수로 고려하고 있다(Harajli, 1990; Naaman, 1991). 그러나 본 연구에서와 같이 보강된 부재에서는 긴장재의 정착위치가 경간 내에 위치하게 되므로 보강길이가 비부착 CFRP판의 변형률에 영향을 주는 유의한 변수라고 할 것이다. 즉 경간길이가 동일하더라도 CFRP판의 보강길이에 따라 비부착 CFRP판의 변형률은 서로 다르게 변화한다.

그림 1은 CFRP판 긴장재의 변형률 분포를 나타낸 것으로 그림에서 점선은 유효프리스트레스와 콘크리트의 균열을 고려하지 않았을 때의 부착된 CFRP판의 변형률 분포이며, 실선은 부착 CFRP판 변형률의 평균값, 즉 비부착 CFRP판의 변형률 분포를 나타낸다. 그림 1로부터 비부착 CFRP판의 변형률 $\bar{\epsilon}_B$ 과 부착 CFRP판 변형률의 최대값 ϵ_B 와의 관계는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\epsilon}_B = \epsilon_B \left[\frac{(L_p + L_b)}{2L_p} \right] \quad (5)$$

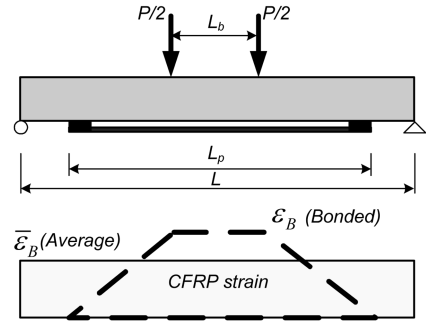


그림 1. CFRP판의 변형률 분포

여기서,

- ϵ_B : 최대모멘트 위치의 부착 CFRP판 변형률
- L_p : CFRP판 긴장재의 길이
- L_b : 순수휨구간의 길이

그림 1에서 하중이 경간 1/3 지점에 재하되고 보강길이가 경간길이와 같은 경우에는 식(5)의 대괄호안의 값이 2/3가 되며 이는 박상렬 등(2007)이 제시한 응력 평균화 계수와 같은 값이 된다. 박상렬 등(2007)의 제안식에서는 보강길이를 별도로 고려하지는 않고 있다. 한편 식(5)에 보인 바와 같이 부착된 CFRP판의 평균변형률, 즉 비부착 CFRP판의 변형률은 보강길이와 반비례 관계에 있으며, 순수 휨구간의 길이와는 비례관계에 있음을 알 수 있다. 이러한 관계를 식(3)의 부착감소계수에 도입하면 비부착 CFRP판 긴장재의 부착감소계수 Ω_p 는 다음과 같아진다.

$$\Omega_p = \alpha \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{L_p + L_b}{L_p} \right) + C \quad (6)$$

식(6)에서 우변의 첫 항의 첫 번째 괄호는 Naaman 등(1991)에 의해 제시된 비부착 긴장재의 깊이 변화를 고려하기 위한 부착감소계수이며, 두 번째 괄호는 평균 변형률 효과를 고려하기 위해 확장된 부착감소계수이다. 식(6)의 α 는 기타 요인을 포함하는 수정계수이며, C 는 통계분석에 의해 결정되는 상수항이다. α 와 C 는 실험값 등을 이용해 통계적으로 구할 수 있다.

박종섭 등(2005)의 실험결과를 통해 식(6)의 계수와 상수를 도출한 결과 식(6)은 음(-)의 상수항 C 를 갖는 것으로 나타났으며, 지간길이가 길어지는 경우에는 부착감소계수가 음이 되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 절편 C 를 제거하고 평균 변형률 효과를 고려하기 위한 확장 부착감소계수를 간략화하여 식(6)을 다음과 같이 수정하였다.

$$\Omega_p = \alpha \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{L_b}{L_p} \right) \quad (7)$$

3. 극한응력 예측식의 평가

본 장에서는 비부착 긴장재에 대한 기존의 설계식과 본 연구에서 제안한 부착감소계수를 적용한 해석결과를 기존의 실험연구 결과와 비교하여 비부착 CFRP판에서의 적용성을 고찰하였다. 해석은 부착감소계수를 고려하는 단면해석으로 수행하였으며, 부착감소계수는 Naaman이 제시한 값과 본 연구에서 제안된 값을 각각 사용하였다.

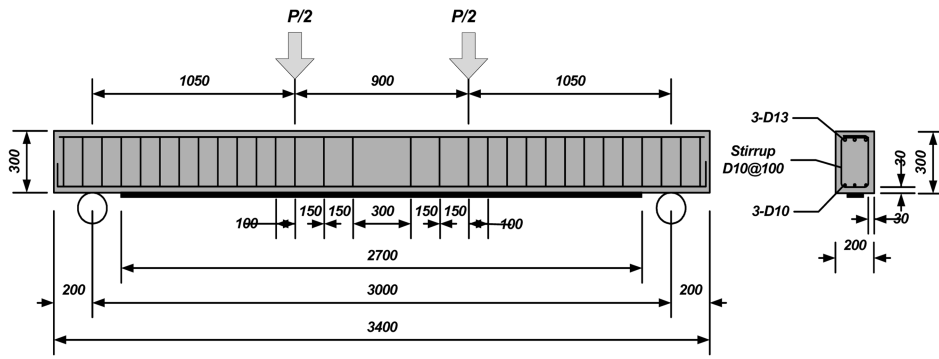


그림 2. CFRP판 긴장 보강 철근콘크리트 보(박종섭 등, 2005)

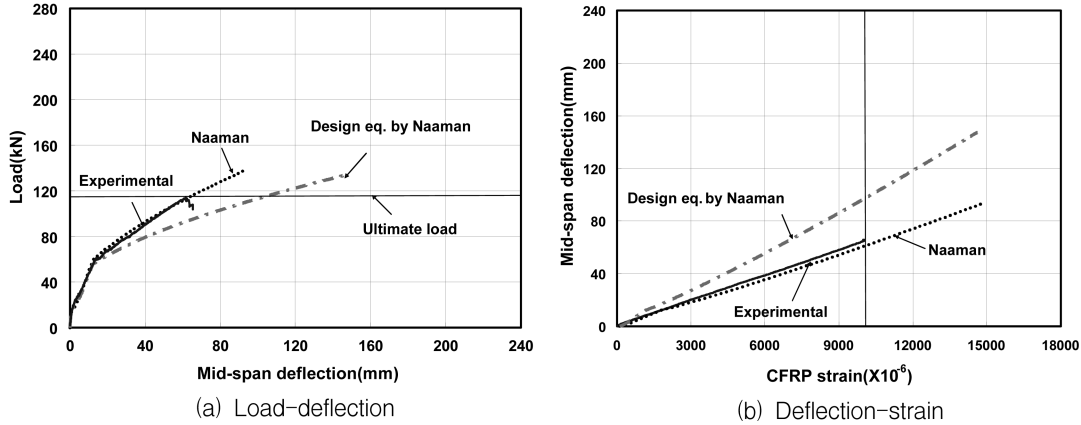


그림 3. Naaman 제안식과 실험값의 비교

3.1 Naaman 식의 평가

박종섭 등(2005)은 부착된 CFRP판으로 긴장 보강된 보와 비부착 CFRP판으로 긴장 보강된 보의 거동을 비교하고 보강효과를 파악하기 위해 그림 2와 같은 철근콘크리트 보에 대한 4점 재하 시험을 수행하였다. 그림 3은 박종섭 등(2005)이 실험한 비부착 실험체 중에서 대표적인 실험체에 대해 Naaman의 제안식과 설계식에 의한 하중-변위, 변위-변형률 곡선을 실험값과 비교하여 나타낸 것이다.

그림 3은 식(3) 및 식(4)의 부착감소계수를 고려하여 CFRP판 파단시까지 단면해석을 수행한 결과이며, 보 중앙에서의 변위는 그림 4와 같은 소성힌지 개념이 고려된 보의

곡률도(Curvature diagram)로부터 식(8)과 같이 구간별 적분을 통해 계산하였다(Park, 1975). 그림 4에서 L_b 는 재하 하중 간격이며, L_h 는 Virloguex(1982)에 의해 제안된 소성힌지 구간이다.

$$\Delta_{max} = \left(\frac{\phi_1 x_1 + \phi_2 x_2}{2} \right) \Delta x_1 + \left(\frac{\phi_2 x_2 + \phi_3 x_3}{2} \right) \Delta x_2 + \dots \quad (8)$$

그림 2에서 보는 바와 같이 박종섭 등(2005)의 철근콘크리트 보강실험체는 보강길이가 경간길이의 90%에 달하고 재하하중도 보강길이의 3등분점에 재하되는 형태로 Naaman 식의 제한조건에 부합하기 때문에 그림 3의 해석결과가 실험체의 거동을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 그림 3에 의하면 안전율을 고려한 Naaman의 설계용 부착감소계수를 사용하는 경우 동일 변위에서 하중 및 CFRP판의 변형률이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)의 수직선은 압축파괴 시 측정된 CFRP판의 최종 변형률을 나타낸다.

박영환 등(2006)은 유효프리스트레스의 크기와 보강길이에 따른 비부착 CFRP판 긴장 보강 철근콘크리트 보의 보강성을 평가하기 위해 그림 5와 같은 보강실험체를 대상으로 정적 재하 실험연구를 수행하였다. 본 연구에서는 박종섭 등(2005), 박영환 등(2006)의 실험결과를 해석결과와 비교하기 위하여 실험체별 명칭을 표 1과 같이 경간길이, 보강길이 및 긴장력 수준으로 통일시켜 나타냈다.

그림 6에는 보강길이가 각기 다른 유효프리스트레스 수준 20% 실험체의 변위-변형률 관계에 대해 Naaman 식의 해석결과와 실험값을 비교하여 나타내었다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 Naaman 식은 기본식과 설계식 모두 비부착 CFRP판의 변형률을 실제보다 과대하게 평가하고 있다. 이러한 경향의 원인은 크게 두 가지를 추정해 볼 수 있다. 첫 번째는

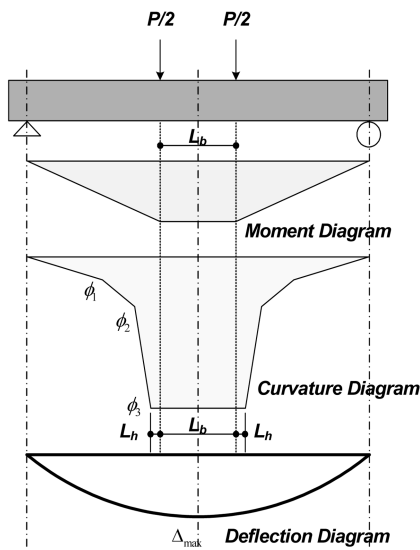


그림 4. 곡률도를 이용한 변위계산

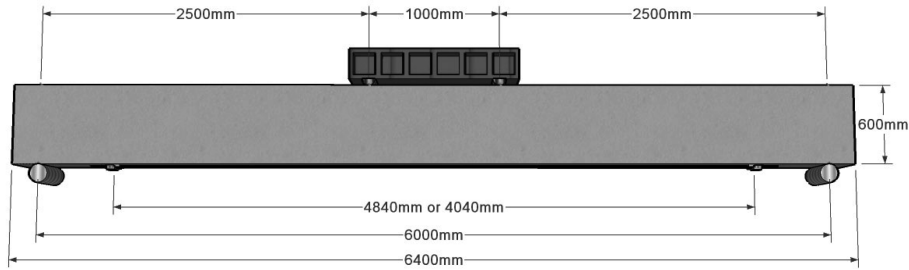


그림 5. 보강길이를 변수로 하는 실험체(한국건설기술연구원, 2006)

표 1. 비교 대상 실험체

명칭	실험체명	경간길이 (m)	보강길이 (mm)	긴장력수준 (%)	참고문헌
3-2700-00	PL-NF-N-0	3	2700	00	박종섭 등 (2005)
6-4840-20	LUB20	6	4840	20	
6-4840-50	LUB50	6	4840	50	
6-4040-20	SUB20	6	4040	20	
6-4040-50	SUB50	6	4040	50	

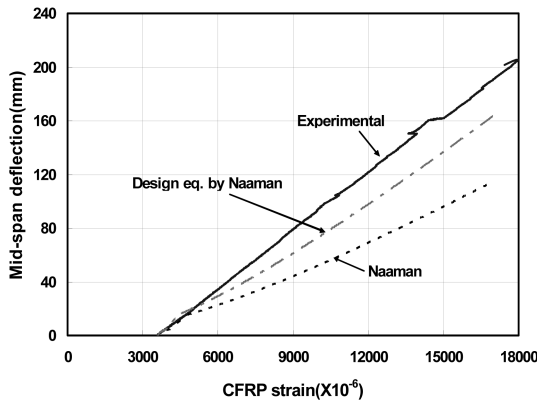
Naaman의 기본 제안식이 보강길이가 아닌 경간 길이에 대한 함수로 제안되었기 때문에 CFRP판 긴장 보강과 같이 경간 내에 정착장치가 설치되는 경우를 부착감소계수에서 고려하지 못하기 때문이다. Naaman 식에 의해 오차가 발생하는 두 번째 원인은 재하 하중 형태에 따라 구분된 계수를 사용하기 때문인 것으로 판단된다. Naaman은 중앙 집중 재하일 경우에는 3등분점 재하의 경우보다 약 50% 감소된 부착 감소계수를 제안하고 있다. 박영환 등(2006)의 실험체는

3등분점 재하보다는 전단구간이 길고 중앙 집중 재하보다는 전단구간이 짧은 경우로 실제로는 Naaman이 제시한 두 가지 부착 감소계수의 중간 값을 사용해야 할 것으로 판단되지만 해석에서는 3등분점 재하의 경우에 적용하는 계수를 사용하였기 때문에 해석값에 오차가 발생한 것으로 판단된다.

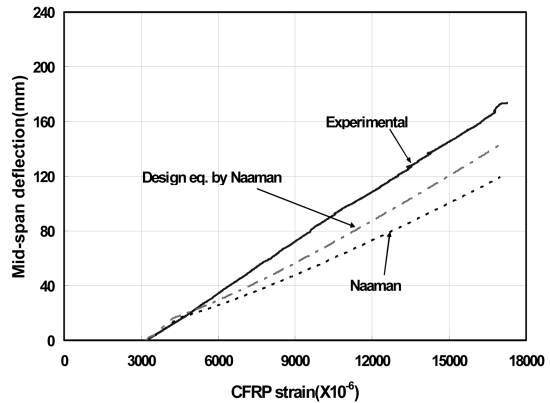
3.2 극한응력 제안식의 평가

그림 7은 박영환 등(2006) 실험체의 CFRP판 변형률 증분을 각 변수별로 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 유효프리스트레스 크기에 따른 변위-변형률 증분 관계를 나타낸 것으로 유효프리스트레스의 크기는 변형률 증분에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 보강길이는 비부착 CFRP판의 변형률 증분에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 식(6)에서 상호 역비례관계에 있는 것으로 제안한 보강길이와 비부착 CFRP판 변형률의 관계는 타당함을 알 수 있다.

한편 그림 3(b), 그림 6에서 보인 바와 같이 부착감소계수가 작아질수록 해석에 의한 CFRP판 변형률은 작아지게 되

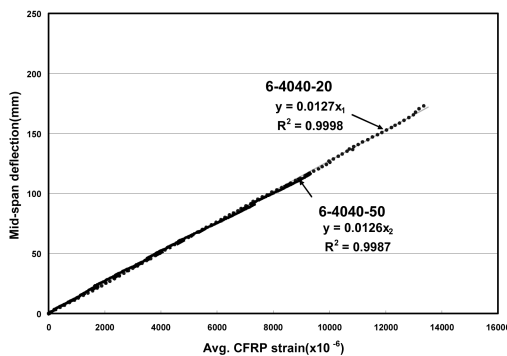


(a) 6-4840-20

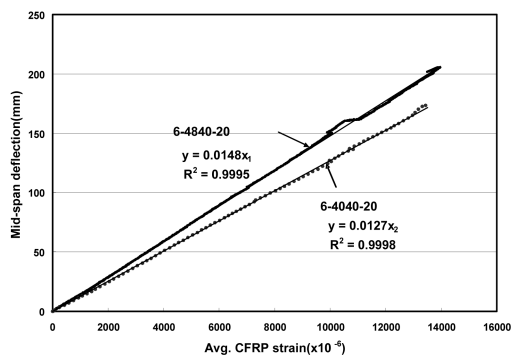


(b) 6-4040-20

그림 6. 보강길이에 따른 변위-변형률 비교



(a) 유효프리스트레스별



(b) 보강길이별

그림 7. 실험변수별 변위-변형률 증분 관계

며 변위-변형률 곡선의 기울기는 커지게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 이용하여 그림 7의 변위-변형률 관계의 기울기와 부착감소계수를 변수로 하는 통계분석을 통해 식(6)의 수정계수를 다음과 같이 결정하였다.

$$\Omega_p = \alpha \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{L_b}{L_p} \right) = 14.6 \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{L_b}{L_p} \right) \quad (8)$$

식(8)에서 보강길이가 경간길이와 같고 하중이 경간의 3등분점에 재하된 경우는 Naaman 식의 3등분점 재하에 대한 부착감소계수와 유사한 형태의 부착감소계수로 표현된다. 식(8)에 의해 Naaman 식의 제한조건에 따른 부착감소계수를 계산하면 Naaman이 제안한 부착감소계수 값의 91%가 된다. 즉, 식(8)은 기존의 Naaman 식을 적용하던 부재에 대해서도 안전측으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 식(8)에 제안된 부착감소계수는 순수 휨구간을 갖지 않는, 즉 중앙 집중 하중 재하의 경우에는 적용이 곤란하다. 중앙 집중 하중이 재하 되는 경우를 고려하기 위해 본 연구에서는 순수 휨

구간 길이를 Harajli(1990)에 의해 제시된 소성힌지구간 개념을 도입하여 부착감소계수를 식(9)와 같이 수정하였다. Harajli(1990)는 비부착 강연선의 총 신장량은 소성영역 내에서 발생하는 변형률이 지배적이라는 이론을 제시하여 하중 재하 패턴을 별도로 고려하지 않는 부착감소계수를 유도한 바 있다. 박종섭 등(2005), 박영환 등(2006)에서 수행한 비부착 CFRP판 긴장 보강보의 실험 결과에 따르면 소성영역에서의 신장량이 Harajli가 제시한 바와 같이 전체 신장량을 지배할 정도로 큰 차이를 나타내진 않고 있다. 본 연구에서 분석한 결과, Harajli의 연구에 제시된 소성힌지구간의 50% 값을 반영했을 때 부착감소계수에 의한 해석값이 실험값과 가장 근접하는 것으로 나타났다.

$$\Omega_m = 11.5 \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{L_0}{L_p} \right) \quad (9)$$

여기서, L_0 : 소성영역(= $L_b + 2L_h$)

L_h : 소성힌지구간 (= $0.25h + Z/40$)

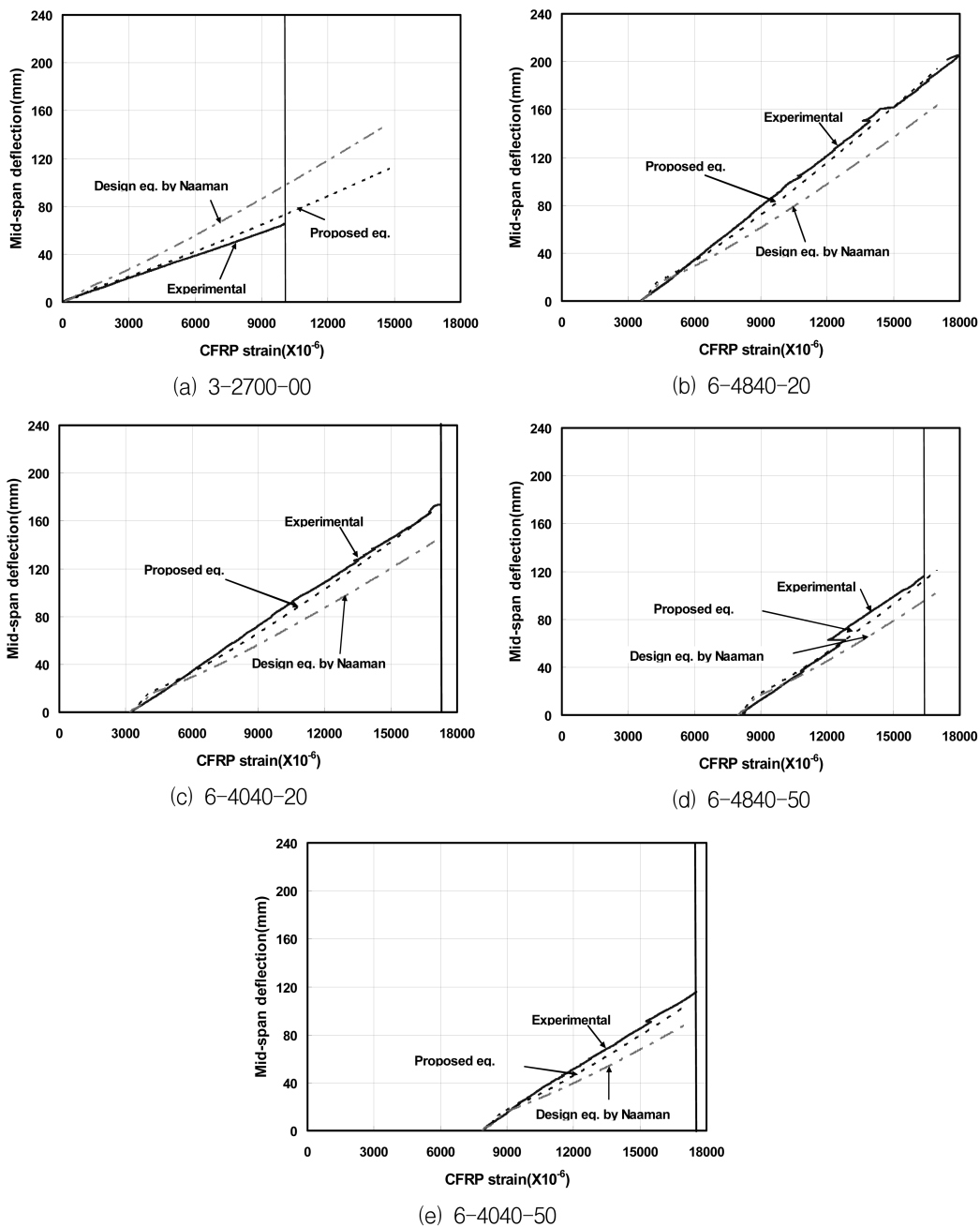


그림 8. 제안식에 의한 변위-변형률 비교

h : 보의 높이
 Z : 전단구간

참고문헌

그림 8은 식(9)에 제안된 비부착 CFRP판 긴장재의 부착 감소계수를 적용한 경우와 Naaman의 설계용 부착감소계수를 적용한 경우의 CFRP판 파단변형률까지의 해석결과를 비부착 CFRP판 긴장 보강실험체의 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 8(b)~(e)에 나타낸 결과를 보면 Naaman의 설계식이 안전율을 고려했음에도 실제 비부착 CFRP판의 변형률을 과대 평가하는데 비해 본 논문에서 제안된 부착감소계수는 비부착 CFRP판의 거동을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 8(a)에 보는 바와 같이 Naaman 식의 제한조건과 유사한 형태로 실험되어 Naaman 식의 거동 예측이 상대적으로 우수했던 경우에 있어서도 제안식은 안전측으로 거동을 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

그림 8에 나타낸 수직선은 실험에서 측정된 CFRP판의 최대 변형률 위치를 나타낸다. 압축과괴로 실험이 종료된 3-2700-00을 제외하면 제안식은 CFRP판의 최대변형률에서의 변위값도 실제와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 8의 결과로 볼 때, 본 연구에서 제안된 부착감소계수는 기존의 비부착 FRP 텐던을 위한 부착감소계수보다 확장된, 다양한 보강길이와 하중재하 형태를 갖는 경우의 설계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비부착 CFRP판 긴장재를 갖는 철근콘크리트 보강보의 해석을 위해 기존의 비부착 긴장재의 극한응력 해석에 대한 분석을 실시하고, 기존의 실험 연구결과를 비부착 CFRP판의 변형률 관점에서 새로이 분석하여 비부착 CFRP판 긴장재를 위한 확장·수정된 부착감소계수를 제안하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 보강구조물을 대상으로 하지 않았던 기존의 비부착 긴장재 극한응력 예측식은 보강구조물에서와 같이 경간내에 긴장재 단부가 위치하는 경우를 고려하지 못하므로 비부착 CFRP판 긴장 보강부재의 거동 묘사에는 한계가 있는 것으로 나타났다.
2. FRP 긴장재를 갖는 콘크리트에 대한 설계지침인 ACI 440.4R에 제안된 비부착 FRP 긴장재용 부착감소계수는 정형화된 하중 재하형태에 대해서는 유용하지만 보강길이에 대한 순수휨구간 길이비가 감소된 경우에는 비부착 CFRP판의 변형률을 과대 평가한다.
3. 평균변형률 개념과 소성영역을 고려하여 순수휨구간 길이와 보강길이를 변수로 추가한 비부착 CFRP판 긴장재를 위한 부착감소계수를 제안하였으며, 제안된 부착감소계수는 기존 설계식의 적용범위뿐만 아니라 다양한 보강길이를 갖는 보강실험체의 실험결과와도 잘 일치하는 것으로 나타나 다양한 보강길이와 하중재하 형태를 갖는 보강부재 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 박상렬(2004) 외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에서 프리스트레싱 강재의 극한응력. **콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제16권 5호, pp. 677-686.
- 박상렬, 양철영, 김창훈(2007) CFRP 긴장재를 이용한 외부 보강 철근콘크리트 보의 극한 휨강도. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 5A호, pp. 671-679.
- 박종섭, 박영환, 유영준, 정우태, 강제운(2005) 부착 또는 비부착된 탄소판으로 긴장 보강한 RC보의 보강성능. **콘크리트학회 학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권 1호, pp. 279-282
- 오병환, 유성원(1999) 외부 프리스트레스트 콘크리트 부재의 극한상태에서의 강선응력예측식 제안. **콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제11권 6호, pp. 13-24.
- 박영환 등(2006) Bridge200 노후 교량의 성능향상 기술 개발. 최종보고서, 건기연 2006-082, 한국건설기술연구원.
- ACI committee 440 (2004) *Prestressing concrete structure with FRP tendons*, American Concrete Institute, ACI 440.4R-04.
- El-Hacha, R., Wight, R.G., and Green, M.F. (2004) Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 8, No. 1., pp. 3-13.
- Garden, H.N., and Hollaway, L.C. (1998) An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with pre-stressed carbon composite plates. *Composites Part B, ELSEVIER*, pp. 411-424.
- Ghallaab, A. and Beeby, A.W. (2005) Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, Issues 9-10, pp. 945-957.
- Harajli, M.H. (1990). Effect of span-depth ratio on the ultimate steel stress in unbonded prestressed concrete members. *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 3, pp. 205-312.
- Naaman, A.E. and Alkhairi, F.M. (1991) Stress at ultimate in unbonded posttensioning tendon. Part 2- Proposed methodology. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, pp. 683-692.
- Ng, C.K. (2003) Tendon stress and flexural strength of externally prestressed beams. *ACI Structural Journal*, 1005, pp. 644-653.
- Park, R., and Paulay, T. (1975) *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.
- Rosenboom, O.A. (2006) *Behavior Of Frp Repair/Strengthening Systems For Prestressed Concrete*, Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Smith, S.T. and Teng, J.G. (2001) Interfacial stresses in plated beams. *J. of Engineering Structures*, ASCE, Vol. 23, pp. 857-871.
- Tan, K. and Ng, C. (1997) Effects of deviator and tendon configuration on behaviour of externally prestressed beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 99, pp. 13-22.
- Virlogeux, M. (1982) External prestressing. *IABSE Proceeding, International Association for Bridge and Structural Engineering*, P-62/82, Switzerland, pp. 101-108.
- Wu, Z., Matsuzaki, T., Yokoyama, K., and Kanda, T. (1999) Retrofitting method for reinforced concrete structures with externally prestressed carbon fiber sheets. *Proc., 4th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4)*, ACI SP-188, American Concrete Institute, Detroit, pp. 751-765.

(접수일: 2007.11.19/심사일: 2007.12.12/심사완료일: 2007.12.12)