

레진으로 접착 보강한 강재보의 거동

Experimental and Analytical Study on the Steel Beam bonded with CFRP Strip

Ikhyun Sung^{a,1}

^a Department Civil Engineering, University of Hanseo, 360 Daegok ri, Seosan 123-456, Republic of Korea

ABSTRACT

In this paper, the behaviour of composite steel-CFRP members is studied experimentally and using FE-analysis. The use of advance composite materials in construction for repair and rehabilitation has become a frequent used method in the last decade. FRP composites have many advantages over the traditional technique of steel bonding for a number of reasons: 1. Composites add little or no additional weight to a building, eliminating the need for costly foundation strengthening.

2. FRP composites are very thin (1.2mm to 1.4mm). So there is no loss of floor space and negligible effect over the architectural aspect.

3. FRP composites do not corrode, this makes it long lasting. However, the method is yet to become a mainstream application due to a number of economical and design related issues. Brittle debonding failure, aging effect on bonding, broad based awareness and proper design guidelines are the main concern for future research works. This paper is focused on the ultimate load carrying capacity of the CFRP-strengthened beams and their effect on the deflection and failures modes by varying the amount of CFRP content.

KEYWORDS

Beams
CFRP
steel plating
strengthening
debonding

이 논문에서는 강재 보와 보강을 위하여 부착한 탄소섬유판의 동일거동을 분석하기 위하여 시험과 유한요소해석을 수행하고, 시험 및 해석 결과를 이용한 분석을 실시하였다. 현재 국내외의 연구에서는 복합재료를 사용한 보수 보강 복구에 대한 사용검토가 많이 연구되어 지는 실정에서 섬유보강 복합재료는 얇고 강도가 좋으며 가벼워 구조물의 보강 시에 사하중의 증가를 발생시키지 않고 부재의 치수 증가에도 영향이 없어 매우 유용한 재료로 부각된다. 그러나 노후화에 따른 부착력 저하 등의 문제와 경제성 및 설계상의 어려움으로 사용이 극히 제한적인 부분이다. 이 연구에서는 탄소섬유판이 부착된 단순한 강재보의 성능을 평가하였으며, 부착성능 측면에서는 양호한 사용성능을 가지는 것으로 나타났다. 향후 노후화에 대한 검토가 수행된다면 실제 구조물에 대한 적용에도 문제가 없을 것으로 판단된다.

접착부착
복합재료
경제적 시공
급속시공
섬유보강 복합재

© 2017 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-41-660-1050. Email. iksung@hanseo.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Feb. 09, 2017
Revised Feb. 24, 2017
Accepted Mar. 20, 2017

1. 서론

재난 시 가설교량 또는 임시성능향상을 위하여 도심에서 시행되는 가교나 보강을 위한 구조물에서 보의 성능을 일시적으로 향상시킬 필요가 있는 경우와 함께 추가되는 하중에 저항하기 위하여 급속히 성능향상이 필요한 경우가 자주 발생한다. 이때 대부분 거더에 추가부재의 용접 또는 볼트로 체결하는 과정이 복잡하고 교통의 제한 등 불편함이 따르기 마련이며 내하력 증진의 효과를 위하여 보다 큰 부재를 교체해야하는 실정이 많아 비용상의 문제가 대두되기도 한다. 따라서 이러한 문제는 현장에서 보다 나은 방법의 강구를 필요로 하게 된다. 또한, 성능보강을 위해 기존 빔을 해체하고 대체하는 과정에서는 비용의 손실이 많이 들어 긴급보수 및 보강의 관점에서 보다 나은 방법을 고려하는 것 역시 필요하다고 하겠다. 본 연구에서는 이러한 보수, 보강 및 복구시에 시간 비용의 문제를 극복하고 성능향상을 도모하기 위해 구조물의 보강을 접착부착방식으로 접근하여 거더의 하부(인장측)에 레진을 사용하여 CFRP Strip을 부착시켜 강성을 보강하는 방법으로 내하력을 높일 수 있도록 연구하고자 하였다. 이러한 방법은 재해 및 재난 발생 시 응급복구 및 보강에 사용될 수 있으며 시간절약과 함께 시공의 제약을 갖는 위치에서 편리하게 시공이 가능하도록 하여 구조의 거동을 향상하고 수명을 연장하는 기능을 가지므로써 급속대응의 방안으로 제안하고자 한다. 또한 이와 유사한 임시 보강방안에서도 많은 활용이 가능할 것이다. 이러한 방법의 성능평가를 위하여 부착보강의 시험편을 통하여 빔의 강성보강효과를 찾고 성능향상정도를 파악하여 실질적 사용 범위를 파악하였다.

2. 연구과정 검토

2.1 시험을 통한 분석평가

시험은 H형강 하부플랜지 하단에 CFRP strip을 Sikadur-30레진으로 접착 부착하여 순수 휨 상태영역에서 인장보강 능력을 확인하고자 4점가력 시험을 수행하고 이를 통하여 아래와 같은 사항을 판단하고자 하였다.

- ① CFRP strip과 강제보와의 접착이 인장능력 강화 등의 일체적 거동을 발휘하는 지를 파악하고자 하였다.
- ② 접착부착이 성능을 발휘하게 되면 인장저항능력범위 향상의 정도를 파악해 보고자 하였다.
- ③ 레진으로 접착한 CFRP strip과 스틸 빔의 부착거동을 휨 실험을 통해 부착성능의 저항정도를 파악하였다.

휨 시험을 위한 장치로는 가력장치, 처짐계(LVDT, Kyowa), 스트레인게이지(Kyowa), 데이터로거, UCA M60A(Kyowa), 가력장치하중컨트롤러 및 로드셀 로 구성되어 있으며 각각 4점 가력시험 시편과 시험광경은 아래의 Fig. 1과 같다.



Fig. 1 4-point bending test configuration

Table 1. 3 types of specimen symbol summary

표기	설명
OR-1,2	보강하지 않은 원 시험편
SN-1,2	현장보강을 모사하여 가벼운 녹 제거 후 CFRPStrip을 부착한 보강시험편
GR-1,2	표면을 그라인드로 충분히 연마 후 CFRP Strip을 부착한 보강시험편

2.2 CFRP STRIP 특징

시험용 보는 H형강 $200 \times 200 \times 8 \times 12$ 과 하부플랜지 하부에 보강재로써 2mm두께의 CFRP Strip을 에폭시레진을 이용하여 형강과 접착하여 부착시킨다. 보강재의 성능 정도를 판단하고자 다음 3가지 종류의 시험 보를 준비하였다. 첫째로 부착 성능을 파악하기 위하여 CFRP Plate를 부착하지 않은 원래의 강재 시험편 2개의 가력실험 결과를 바탕으로 비교하도록 한다. 둘째, 현장작업을 감안하여 표면의 녹을 거친 사포로 간략히 제거한 정도의 거칠게 만든 시편 2개와 세 번째는 하부플랜지에 고운 사포를 사용하여 그라인더로 표면을 녹제거 후 매끈하게 처리한 후에 카본플레이트 접합을 한 시편2개로 Table 1.과 같이 총 6개의 시편을 준비하였다. 또한 시험을 위하여 보강시편 거치를 위한 경계조건을 갖춘 부수자재를 포함하여 시험시편이 구성된다. 여기서 부착을 통하여 인장능력을 향상 시키고자 한 목적을 갖는 CFRP Strip은 강재에 비하여 80%이상 가볍고 알루미늄과 비교하여 400%이상 강하다. 또한, 화학적 부식과 진동 저항성이 높고 110°C 이상의 온도에도 저항성 있다. 온도능력은 $710 (J/kg \cdot k)$ 및 열전도율 $17 (W/(m \cdot k))$, 열팽창계수 (선팽창계수) $-0.1 (10^{-6}/k)$ 이며 밀도는 $1.56 g/cm^3$ 휨은 ($0^{\circ} = 1050 MPa$, $90^{\circ} = 900 MPa$)이며 인장력 ($0^{\circ} = 950 MPa$, $90^{\circ} = 900 MPa$)이고 신장율(elongation) 1.6%의 재료 특성을 가진다. 이러한 물성을 갖는 재료를 사용하여 거더 하부에 부착 보강함으로 보의 내하력을 증진하고자 하며 시공시간의 단축과 거동의 특성을 판단하고자 하였다. Fig. 2.에서 시험시편에 관하여 제시하였다. (a)는 접착제인 Sikadur-30 레진을 도포하는 것이며, (b)에서 강성보강을 위한 CFRP strip을 나타낸다. (c)는 3종류의 접착면을 갖는 시험편을 나타내며, (d) 4점가력시험을 위하여 하중시험시편을 표시한다.



(a) resin sikadur-30



(b) CFRP Strip



(c) surface types



(d) test specimen

Fig. 2 Test specimen configurations

2.3 구조해석을 통한 검토

시험을 시행한 후 결과의 비교를 위하여 해석을 수행하였으며 Fig. 3과 같이 해석모델을 만들고 하중은 시험과 같이 4점가력을 수행하였다. 한편, 해석특성은 재료상수를 Plastic-Bilinear로 하여 영계수, 포아송비, 항복계수, 밀도를 입력하여 수행하였다. 여기서 각각의 계수는 다음 Table 2와 같다. 여기서, SS400강재의 항복응력 자체가 400 ~ 510 MPa이며 최대 처짐을 간단히 모멘트 면적법을 이용하여 수 계산으로 구해보면서 이 모델에 적합한 항복응력은 490MPa로 결정하여 적용하였다.

Table 2. analysis factor

계수	입력수치
Young's Modulus	$2.07 \times 10^8 \text{ KN/m}^2$
poisson's ratio	0.3
yielding stress	490 MPa
density	$7.80 \text{ KN/m}^4 \cdot \text{s}^2$

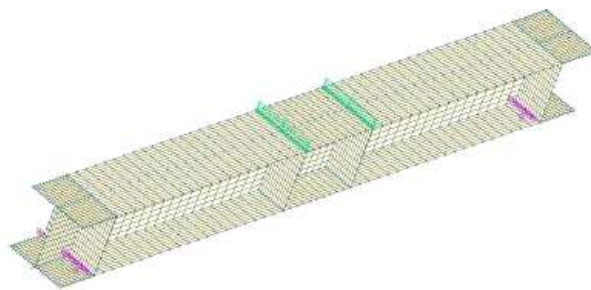


Fig. 3 analysis model

해석의 목적은 실 시험과 이론상의 수치에 대한 차이점을 확인하고 임시가설이나 긴급보강과 같은 신속한 강도증진을 가질 수 있는 복합재료의 부착성능을 확인하고자 하는 것이므로 시험결과와의 비교가 중요한 사안이 된다. Fig. 4.에서는 해석을 통한 형강의 하중에 의해 변형된 상태에서 응력분포를 나타내었다.

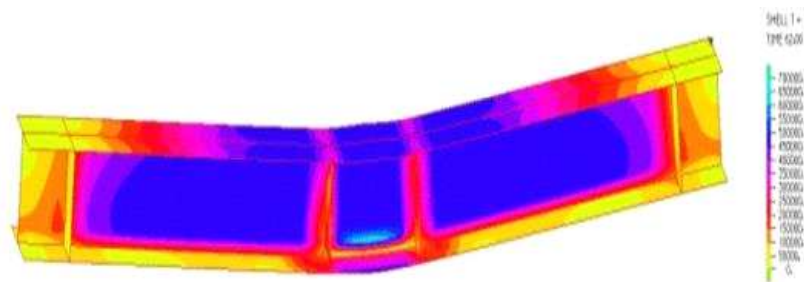


Fig. 4 stress resultant

한편, 레진으로 부착한 CFRP판은 Glue Mesh 옵션을 사용하여 앞에서 언급된 재료상수를 감안하여 부착되도록 하였다. 해석에서 결과에 영향을 미치는 인자로 스티프너의 영향이 실 가력시험과 해석 간에 차이를 나타냄을 볼 수 있어 스티프너의 유무에 대한 분석을 다시 시행하였으나 유의미한 사항을 도출하지 못하였다. 추후 연구에서 부착에 대한 해석을 보다 다양한 요소의 조합으로 재해석해야 할 필요가 있다고 판단되어진다. 그리고 본 연구의 특징은 기존에 복합재료 부착을 통한 강성보강은 대부분 강제 보에 이루어지지 않았고 노후화된 콘크리트의 보수 보강에 적용이 되어 왔었다. 강재의 표면에 직접 복합재료 판을 접착 부착하여 강성을 높이고 긴급보수와 같은 현장대응 측면에서 사용 성을 확인하고자 하므로 성능의 판단은 비교적 간단한 인자의 확인으로 가능할 수 있도록 한다.

3. 시험과 구조해석 분석

3.1 무 보강 시험편의 해석 및 실측값 비교

Fig. 5에서 보강을 위하여 부착되지 않은 기본 시험편에 대한 해석결과와 가력시험결과를 나타냈다. 하중-변위 그래프 상에 최대하중 및 처짐의 값은 비교적 비슷하나 일부 차이점이 발생되는 것은 stiffner의 강성이 해석모델과 차이를 갖는 것으로 생각된다.

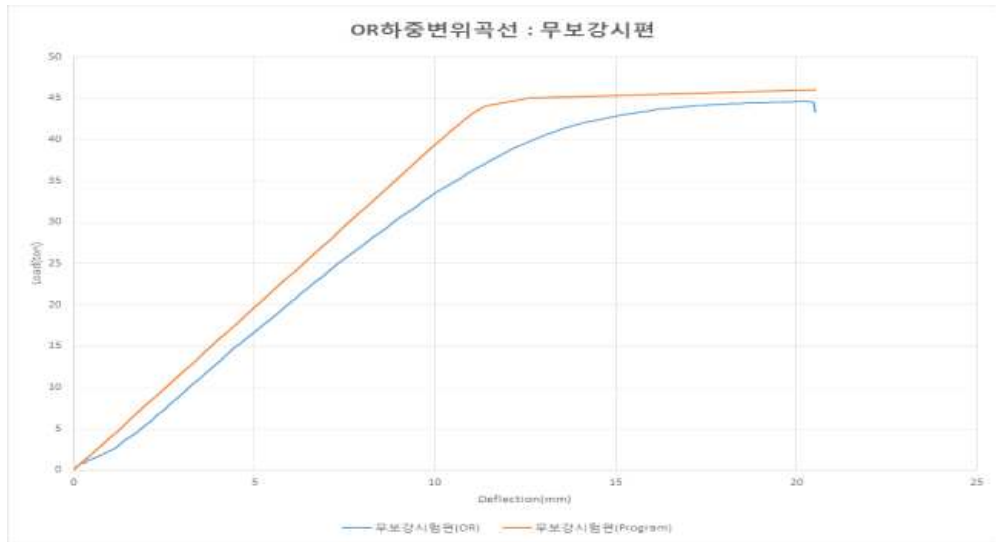


Fig. 5 analysis and test comparison at LF



Fig. 6 analysis and test comparison at UF

또한, Fig. 6은 상부플랜지 위치에서의 결과로 최대하중과 변위 모두 유사한 영역에서 근사한 거동을 나타내어 무 보강 기준시험편에 대한 시험 값과 해석모델의 거동을 통하여 해석모델의 기준치를 확인 하였다. 따라서 연구의 목적인 레진으로 접착 부착된 CFRP 판의 기능과 성능이 급속시공 및 보수보강에 적용이 가능한지 여부를 판단하는 것으로 시험결과는 측정된 데이터를 중심으로 가력크기, 시험편의 중앙부 처짐, 각 위치별 변형률($\mu\epsilon$:micro strain)값을 기준으로 비교한다.

3.2 시험결과 분석

Fig. 2의 c)와 같이 3가지(OR, SN, GR)의 무 보강 및 CFRP 부착 표면의 거칠기를 달리한 시험편은 휨에 대한 항복가력이 약 500 kN 정도에서 항복하는데 보강 없는 시험편에 비하여 부착 보강된 두 가지 시험편은 변형에 대하여 인장저항 특징이 확실하게 나타남을 볼 수 있었다. 이것으로 볼 때 보강의 효과는 분명히 있음을 간단한 시험결과로 알 수 있었다. Fig. 7.은 3종류의 시험 보에 대한 하중-처짐 곡선으로 중앙부와 좌·우측 1/4지점의 처짐을 그린 것이다. GR 및 SN의 부착 보강된 시험 보에서 저항이 모두 증가한 것을 볼 수 있고 부착성능도 전반적으로 양호한 거동을 관측할 수 있다. 또한, 보강된 CFRP Strip의 효과는 무 보강의 450 kN에서 더 향상된 것을 판단할 수 있다. CFRP Strip의 두께가 2mm인 특징에도 하중저항능력이 크게 향상되는 것은 공학적으로 사용가능성을 보여준다고 판단된다.

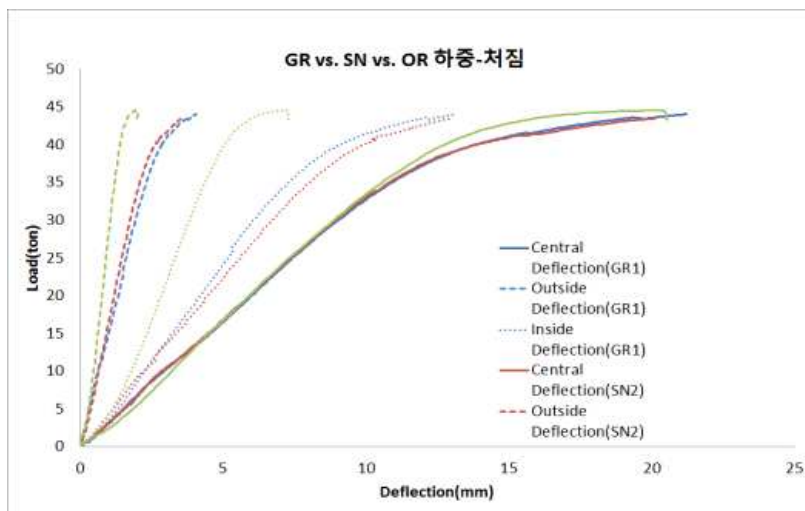


Fig. 7 3types specimen load-deflection

Fig. 7에서 보여 준 바와 같이 빨강과 파랑이 나타내는 보강 CFRP를 하부플랜지 하부에 접착하면 휨 저항능력은 보강판의 탈락 전까지는 무 보강 일반 보에 비하여 내하력이 일정량 증가하는 것이 뚜렷하다. 특히, 1/4지점 내, 외측의 하중-처짐은 보강의 효과가 처짐의 유연성으로 명확하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 부착된 CFRP Strip이 탈락하게 되는 경우는 접착면 파괴 양상을 보인다. 여기서 볼 때 파단 직전의 하중에 대한 저항성은 접착력으로 만 견디게 되어 접착력 강화 또는 부착성능 향상 방법을 개량하여 연구하면 더욱 더 좋은 구조거동과 성능을 발휘할 것으로 판단되었다.

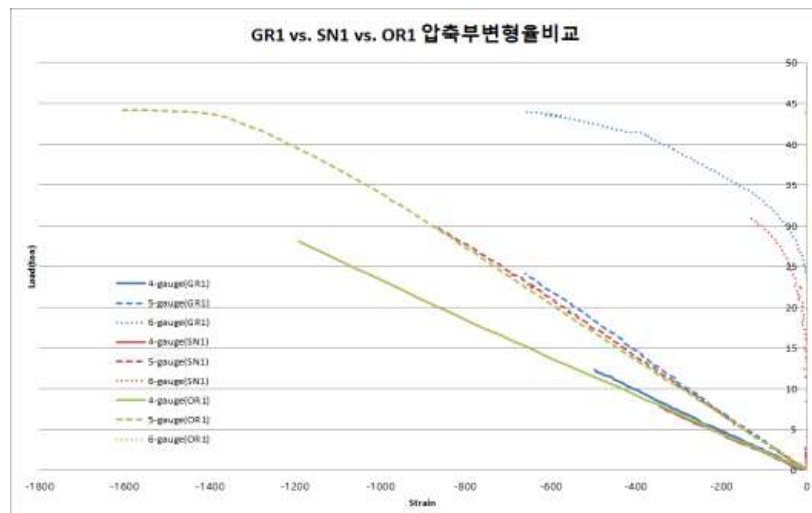


Fig. 8 3types load-strain curve at UF

Fig. 8은 보강된 보의 압축부인 상부플랜지에서의 하중-변형률을 나타낸다. 여기서 보는 바 북부중양부에서 보강된 보의 압축영역까지 변형률이 270 kN의 하중까지는 아직 인장을 받아 중립축 기준으로 상승된 효과를 나타낸다. 한편, 하중의 증가에 따른 변형률의 값을 보면 기존 빔의 제원에 2000 $\mu\epsilon$ 까지는 선형변형을 지속하나 이후로 파단까지 6500 $\mu\epsilon$ 의 변형 값을 나타낸다. 그러나 SN과 GR의 보강보의 경우에는 비슷한 1600 $\mu\epsilon$ 대역에서 선형거동 변형률을 나타내고 있으며 파단까지는 4500 $\mu\epsilon$ 변형으로 접착된 CFRP Strip의 부착이 약 30%이상의 하중을 더 분담하여 저항함을 알 수 있다. 또한 중립축위치인 시험편의 북부중양 위치의 결과는 CFRP보강이 인장을 더 분담함을 명확하게 알 수 있었다. 하중 가력에 대한 대칭성을 파악하고자 한 내측 4위치의 처짐은 모두 약 7mm 발생되었으므로 하중의 재하는 적절하게 진행된 것으로 판단되었다. 가력지점에 위치한 상부플랜지 최상단 중앙위치의 압축스트레인 값은 1800 $\mu\epsilon$ 을 나타낸다. 이는 탄성 상태의 보 이론에 따라 전형적인 보의 거동형상을 보여 시험에 대한 이론적 부합을 잘 보여주었다는 의견이다. Fig. 9.에서는 GR(그라인트로 표면 처리하여 접착 면을 매끈하게 처리한 시험편)과 SN(현장에서 접착 면을 거칠게 처리한 시험편) 및 OR(카본플레이트의 부착이 없이 무보강상태의 원 빔)의 하부 플랜지 하단의 인장영역에서 하중-변형률 그래프를 나타내었다. GR시험편에서 북부중양부의 게이지는 CFRP의 인장 보강에 따라 초기에는 인장 대역부근에 위치하나 하중이 진행 될수록 압축대역으로 이동하였다가 최종으로 파단 되는 형상을 Fig. 8.에서 볼 수 있다. 이는 무 보강 시험편은 하중재하 즉시 바로 압축영역으로 기울어지는 형상인 Fig. 8을 참고할 때 보강의 효과를 확인할 수 있다는 판단이다. Fig. 9에서 CFRP의 보강효과는 인장부분의 스트레인 수치의 증가와 그래프의 길이가 늘어난 면을 볼 때 2mm두께의 단면적 증가가 거의 없는 단순 접착한 재료에서 보강효과가 충분한 능력을 발휘한다고 판단된다. 따라서 통상 구조용 강재를 사용한 보에서 강도증진을 목적으로 부재를 덧대어 용접하거나 다른 부재를 추가로 연결하기 위하여 볼트연결로 강성을 확보하고 보강하는 기존의 방법보다는 시공시간이 단축되고 시공방법에서도 매우 간단하며 기술적으로 숙련이 필요하지 않아 가설 및 임시적용 현장에 유용하다고 생각된다. 더욱이 에폭시접착제를 현장에서 간편하게 도포하여 CFRP Strip을 기존 강재의 소요단면에 접착하여 구조전체의 강성을 증진하고 내구성을 확보하는 방안으로의 성능은 효과적임을 충분히 알 수 있었다.

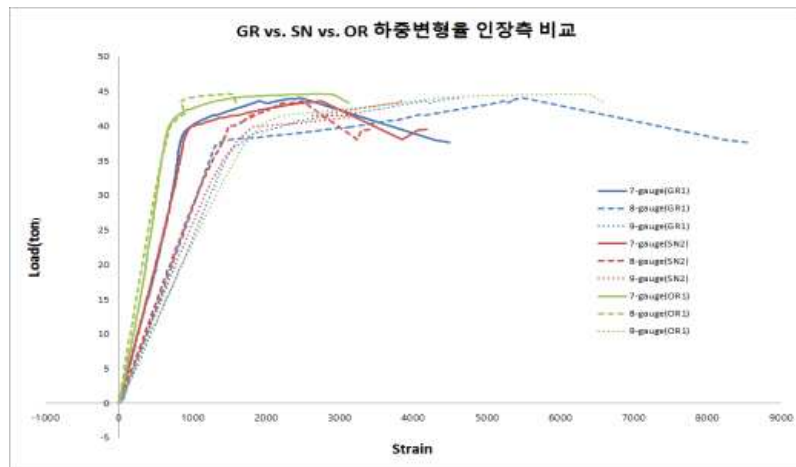


Fig. 9 3types load-strain curve at LF

그러나 접착을 위하여 레진을 사용한 경우 부착면의 레진 도포두께와 부착면의 마찰력 및 거동 시험 저항 뿐 만 아닌 다양한 내력조건에서 저항능력에 대한 판단은 보다 엄밀한 시험을 통하여야 할 것으로 생각된다. 또한, 시험을 통한 보강효과가 인장측 스트레인 값으로는 약 40%정도의 효과를 줌으로 알 수 있었다. 또한, Fig. 9.에서의 파괴점까지의 긴 저항능력은 보강된 시험편이 내하능력이 더 있음을 알 수 있었다. 처짐의 경우 보강된 시험편에 처짐이 조금 작게 나타나고 이는 보강효과로 인하여 강성이 증가된 이유로 보인다. Fig. 10.은 보강 CFRP Strip이 부착 탈락된 파괴 후 형상을 나타내었다. 보는 바와 같이 휨에 의한 파괴흔적이 플랜지하부에 열화흔적으로 나타나 있으며 전형적인 휨 파괴 때 인장 항복형상을 보여 준다고 할 수 있다. 이러한 파괴시점이 조금 지난 상황에서 보강 부재의 파단이 발생하여 사실상 재료의 항복시점까지는 부착성능에 대한 거동의 기여가 있었다고 볼 수 있었다. 이는 접착하여 부착된 보강재가 보강역할을 하는데 있어 레진이 갖는 성능이 재료가 하중을 받아 저항하는데 있어 구조적 거동을 부착력으로 지지하고 있다는 의미이며 사실, 레진의 특성이 폴리머재료로 시간에 따른 경화의 문제 등에 의해 장기적 사용에 대한 검증이 반드시 필요하다는 생각이지만 단기 보강의 경우에는 성능이 상당히 효과적임을 알 수 있었다.



Fig. 10 Specimen Failure configuration

4. 결론

기존의 보에 인장보강을 위하여 에폭시로 구성된 레진을 도포한 후 CFRP Strip으로 접착 부착하여 보의 내하력 증진정도를 검증하고자 하였다. 3종류 시험편 준비하여 비교해석을 수행하고 또한 시험결과를 도출하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 플랜지 하단에 레진을 바르고 접착시켜 부착한 보강 CFRP Strip은 인장저항을 증가시키고 처짐 감소를 보여주었다.
- ② 부착 보강한 RESIN (EPOXY)의 성능은 충분한 결과를 나타내었다. 현장에서 즉시 작업이 가능하고 작업의 난이도도 간단하여 기술적 도포 및 양생을 충분히 한다면 부착을 통한 CFRP Strip과 스틸거더 사이의 전단부착 성능은 양호하게 발현될 수 있음을 보여주었다.
- ③ 보강효과를 감안할 때 보강재와 모재간의 접착력이 강성보강효과에 지대한 영향을 미치는 것으로 보이므로 레진을 이용하여 부착할 때 CFRP의 부착 면 역시 약간의 거칠기를 갖도록 사포질을 하고 보도 블라스팅(샌드, 쇼트)을 한 상태에서 일정 두께로 도포하여 접착하는 것이 부착성능향상에 도움이 될 것으로 생각된다.
- ④ CFRP Strip의 부착은 단면적을 증가시키지 않으면서 강도를 증진하는데 효과적인 방법이다. 또한, 시공이 간편하고 효과도 충분한 것으로 판단된다.

References

- A. Aprile, Member, ASCE, S. Limkatanyu and E. Spacone, Engineering Dept., University of Ferrara, Via Saragat 1, 44100 Ferrara, Italy " Analysis of RC Beams Strengthened with FRP Plates" ASCE Structures Conference, Washington, DC, May 2001.
- American Institute of Steel Construction. (2001). Manual of steel construction: load and resistance factor design. Third edition.
- Schnerch, D. Strengthening of Steel Structures with High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymer Materials, 2005. Ph.D. Dissertation, NC State University.
- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003), Strengthening of steel - concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets, Journal of structural engineering, Vol. 129, No. 1; pp 30-40.
- Al-Saidy, A.H., Klaiber, F.W. & Wipf, T.J. (2004). Repair of steel composite beams with carbon fiberreinforced polymer plates. Journal of Composites for Construction, 8 (2), 163-172.
- Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R. & Hastings, J.N. (2001). Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. Journal of Bridge Engineering, 6 (6), 514-522.