

카본판을 접착보강한 강재의 거동분석

Structural behavior on the steel beam with strengthening bonded carbon plate

Ikhyun Sung¹

¹ Department of Civil Engineering, Hanseo University/360 Daegok ri, Seosan, Chungnam 123-456, Republic of Korea

ABSTRACT

The use of advanced composite materials in strengthening and repair of existing structures is increasing rapidly. This paper describes an effectiveness of a bonding of carbon fiber reinforced sheets to corroded steel members for the repair. Three types of surface treatment, what we call cleaning, of corroded plate are chosen as parameters. They are “without cleaning”, “removal of painting by brushing” and “complete removal of painting”. From the experimental study, the following findings are obtained. 1) When the steel plate is subjected to tensile force, carbon fiber sheets adhered to the painted steel gives a higher strength against peeling compared to that of the plate without painting, 2) The grade of surface treatment, or cleaning of the corroded steel plate affects the strengthening effect.

KEYWORDS

Bonding
Strengthening
steel-CFRP
adhesive
interfacial

구조물에 복합재료를 사용한 보강과 복구에 대한 사용이 증가하고 있는 상황에서 갑작스러운 강도저하로 발생하는 재난을 피하기 위하여 임시 보강하고자 탄소섬유 판을 이용하여 기존금속재와 접합(접착방식)을 통한 강도증진효과를 연구하였다. 특히 실험을 통하여 강-탄소섬유보강재로 이루어진 복합 재 거동을 파악하였으며 여기에 적절한 시험을 위한 새로운 형태의 시험편을 제작하였다. 접합재로 레진을 접착하는 부착 면을 달리하여 거동을 비교하기 위하여 표면처리가 다른 시험편을 각각 고려하여 시험한 결과 강성 보강효과는 물론 일체거동의 특성이 잘 나타남을 알 수 있었다.

접착보강
강-탄소섬유판
부착표면
강성보강효과

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

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

ARTICLE HISTORY

Received Mar. 07, 2016
Revised Mar. 16, 2016
Accepted Mar. 27, 2016

1. 서론

급속 보강과 임시 강도증진의 효과가 필요한 상황은 현재 건설과정에서 자주 발생하는 일이다. 특히, 교통량이 많은 도심에서 가교구축을 하였으나 통행차량 하중이 증가되거나 일시적으로 보강이 필요한 경우와 같은 일은 현장에서 잦은 고민으로 나타나게 된다. 이러한 경우, 다양한 재료와 특성을 가진 보강 법에 대하여 시험되고 판단되어져 향후 수명기한 내 성능을 충분하게 발휘하는 구조물관리가 가능하다면 보강방안의 선택이 유용할 것이다. 또한, 성능보강을 위해 기존 빔을 해체하고 대체하는 과정에서 손실과 비용이 많이 들어 긴급보수 및 보강의 관점에서 보다 나은 방법을 고려하는 것이 대두된다고 하겠다. 특히 구조물에서 보강의 관점 중 용접이나 볼트연결이 아닌 접착, 부착연결에서 내하력 정도를 판단하여 거동의 범위를 제안한다면 이는 시공뿐만 아니라 재해 및 재난의 관점에서 긴급복구 시 가교의 재하에 대한 대처능력을 향상 시킬 수 있고 시간의 절약을 통한 경제성과 시공제약을 극복하는데 도움이 될 것이고 사용수명 연장 및 급속대응 가능하고 또한 이와 유사한 임시 보강에 많은 활용이 가능할 것이다. 따라서 부착보강의 시험편을 통하여 빔의 성능향상과 강성보강범위를 파악하여 실질적 사용 범위를 파악하였다.

2. 연구의 목적

2.1 실험방법

본 실험은 Beam 하부 플랜지 하단(인장 측)에 Carbon Plate를 부착하여 인장성능 향상 정도를 확인하고자 실험을 통하여 아래와 같은 사항을 판단하고자 하였다.

- ① 강재와 일체적 거동을 할 수 있는 방법인 지를 파악하고자 하였다.
- ② 인장저항능력범위 향상의 정도를 파악해 보고자 하였다.
- ③ 레진으로 부착한 카본플레이트와 스틸 빔의 휨 실험을 통한 부착성능을 파악하였다.

휨 시험을 위한 장치는 가력장치, 처짐계(LVDT,Kyowa), 스트레인게이지(Kyowa), 데이터로거 UCAM60A(Kyowa), 가력장치하중컨트롤러 및 로드셀 로 구성되어 있으며 각각 실험 시편의 특징은 아래의 Fig. 1과 같다.

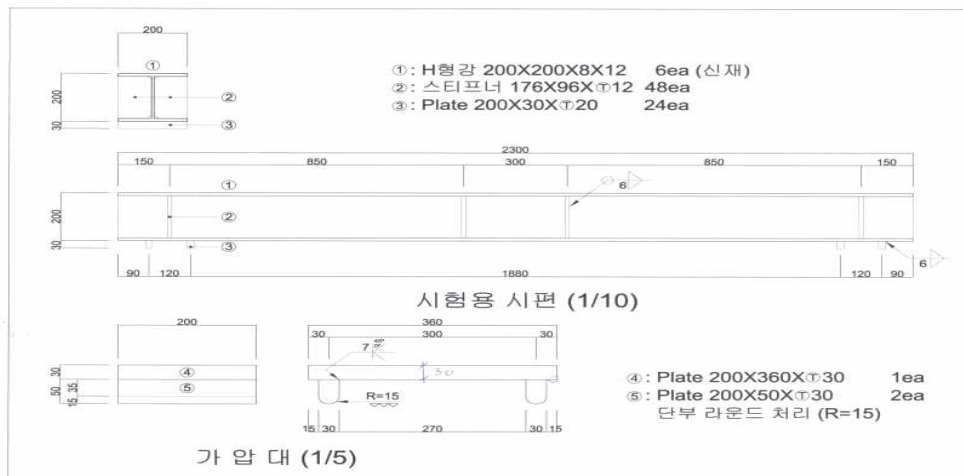


Fig. 1. test specimen configuration

2.2 카본 플레이트 특징

실 시험용 시편은 아래 Fig. 1과 같은 제원을 갖는 H형강 200×200×8×12과 카본플레이트(CFRP plate)를 준비하고 카본 플레이트성능을 파악하기 위하여 카본판을 부착하지 않은 원래의 강재 시험편 2개의 가력실험 결과를 바탕으로 비교하도록

한다. 또한, 현장작업을 감안하여 표면의 녹을 간략히 제거한 정도의 거칠게 만든 시편 2개와 하부플랜지에 그라인더로 표면을 매끈하게 처리한 후에 카본플레이트 접합을 한 시편 2개로 총 6개의 시편을 준비하였다. 또한 시험을 위하여 보강시편 거치를 위한 경계조건을 갖춘 부수자재를 포함하여 시험 시편이 구성된다. 또한, 부착하여 인장능력을 향상 시키고자 한 목적을 갖는 카본플레이트는 강재에 비하여 80%이상 가벼우며, 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) $-0.1(10^{-6}/k)$ 휨강성 ($0^\circ = 1050 MPa$, $90^\circ = 900 MPa$) 인장력 ($0^\circ = 950 MPa$, $90^\circ = 900 MPa$) 신장율(elongation) 1.6% 밀도 $1.56 g/cm^3$ 의 재료 특성을 가진다. 따라서 이러한 물성을 갖는 재료를 사용하여 부착 보강함으로써 보의 인장 내하력을 증진하고자 하며 시공시간의 단축과 사용성을 증진하고자 한다.

3. 실험

(1) 부착재(에폭시레진)

빔 하단에 카본플레이트 접착한 후 인장저항능력 증진을 파악하고자 한 시험은 부착위치에 대하여 거친 표면에 부착하는 방법과 매끈한 표면을 만들어 부착하는 방법의 2가지 종류를 가지고 시험하였으며 가력시험의 방법은 3점 가력 방법과 4점 가력 방법이 있다. 그 중 3점 가력방법은 시편 중앙 점 에서 최대 모멘트가 발생하며 전 부재 길이에 대하여 전단력이 발생한다. 그러나 4점 가력¹⁾의 경우에는 두 점의 하중재하 구간 사이에 순수 휨 상태가 되며 구간 내에 전단발생이 없는 순수 휨 상태가 되어 플레이트 부착에 따른 순수 휨 정도를 체크하는데 유리하다. 따라서 본 실험에서는 4점 가력상태를 기준으로 하여 실험을 실시하였다. 또한, 카본플레이트의 부착은 접합의 방법에서 용접, 볼트체결의 방법이 아닌 Sikadur-30의 에폭시 접착제를 사용하여 모재와 접착으로 부착, 보강하였다. Fig. 2에서 3점 가력과 4점 가력의 차이점을 비교 도식³⁾하였고 Fig. 3에서는 에폭시 접착과정을 도식하였다.

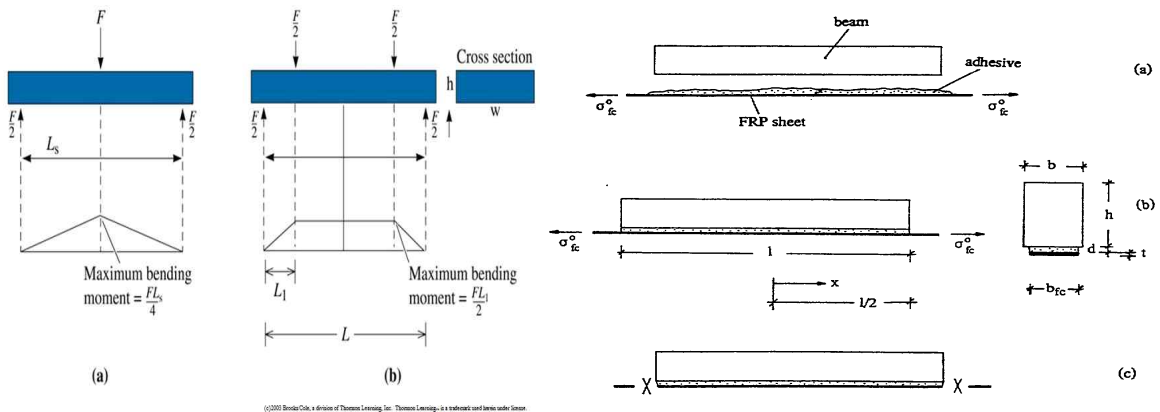


Fig. 2. 3 and 4 point loading comparison Fig. 3. bond between beam and CFRP with resin

Table 1. specimen symbol summary

기호	설명
OR-1	보강하지 않은 원 시험편-첫세트
OR-2	보강하지 않은 원 시험편-두번째세트
SN-1	현장보강을 위하여 가벼운 녹제거 후 카본플레이트를 부착한 보강시험편-첫번째 세트
SN-2	현장보강을 위하여 가벼운 녹제거 후 카본플레이트를 부착한 보강시험편-두번째 세트
GR-1	표면을 그라인더로 충분히 연마 후 카본플레이트를 부착한 보강시험편-첫번째 세트
GR-2	표면을 그라인더로 충분히 연마 후 카본플레이트를 부착한 보강시험편-첫번째 세트

Table 1에서 나타낸 바와 같이 본 연구의 목적인 보에 카본판을 부착하여 보강한 실험시편의 강도증진효과 검증과 부착효과에 관한 실험 과정에서 최대한 변수를 줄이고자 파악하고자 하는 부분을 휨에 대한 거동을 주로 파악하는 것으로 실험을 실시하였다. 부착한 보강 재료에 대한 거동파악방법은 외국의 시험사례 및 시공과정을 분석하여 불필요한 부분을 제외하고 본 실험의 목적만을 분명히 찾고자 하였다. 시험에 대한 결과를 비교 분석하기 위하여 성능보강이 없는 원 BEAM의 가력시험 결과 및 고찰을 통하여 보강이 없는 원 상태의 보에 대한 거동을 결정하기 위한 표준가력시험을 먼저 수행한다. 이후 급속시공 시와 같은 현장시공을 고려하여 세밀한 표면처리가 어려운 경우를 가정하고 표면 녹 처리를 간략히 한 상태에서 카본플레이트를 부착하는 경우 가력시험 결과 및 고찰을 통해 현장에서 급속한 부착이 수행될 경우 보강된 카본판에 대한 보와의 일체성능을 평가 하고자 하며, 마지막 방법으로는 접착위치를 완전 녹제거한 후 카본판을 부착한 경우의 가력시험 결과 및 고찰을 위해 카본플레이트 접합면을 그라인더를 이용하여 매끈하게 정리한 후 접합재의 성능을 평가하고자 한 순서로 정리하였고 이후에 세 가지의 시편에 대한 결과를 서로 비교하여 각각 2회의 실험을 실시하여 각각의 결과를 비교하고 전체시험 결과를 모두 비교하는 순서로 진행하고자 한다. 그림 4에서 각각 다른 표면처리를 수행한 시편형상과 시험시편에 대한 가력시험광경을 나타내는 것을 볼 수 있다.



Fig. 4. specimen configuration and testing sight

(2) 시험결과 분석

본 연구의 목적이 레진으로 접착 부착된 보강재의 기능과 성능이 급속시공 및 보강공법에 적용 가능한지 여부를 판단하는 것으로 시험에 대한 3가지 경우를 고려하여 준비과정을 거쳐 시행되었으며 결과는 기초적인 휨시험에 대한 방법과 같으며 측정된 데이터를 중심으로 가력크기, 시편의 중앙부 처짐, 각 위치별 변형률($\mu\epsilon$:micro strain)값을 기준으로 비교한다.

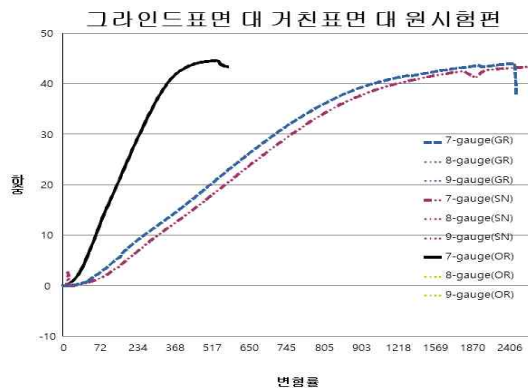


Fig. 5. load-strain curve for 3types specimen

Fig. 5와 같이 3가지(OR, SN, GR) 서로 다른 시험시편은 하중 가력 치 약 500 kN의 범위에서 항복하는 것으로 나타나고 있으나 보강 없는 원 시험편에 비하여 보강된 두 가지 시험편은 변형에 대하여 유연한 특성을 볼 수 있다. 이것으로 볼 때 보강의 효과는 분명히 있음을 간단한 시험결과로 알 수 있었다. Fig. 6은 보강된 카본플레이트의 효과를 비교한 것으로 하중을 받는 효과가 450 kN에서 더 향상된 것을 판단할 수 있다. 보강재의 두께가 2mm정도 인 것을 감안하면 부착 보강한 얇은 판이 지지하는 하중의 범위는 공학적으로 사용 가치를 둘 정도로 효과적인 것으로 판단되었다.

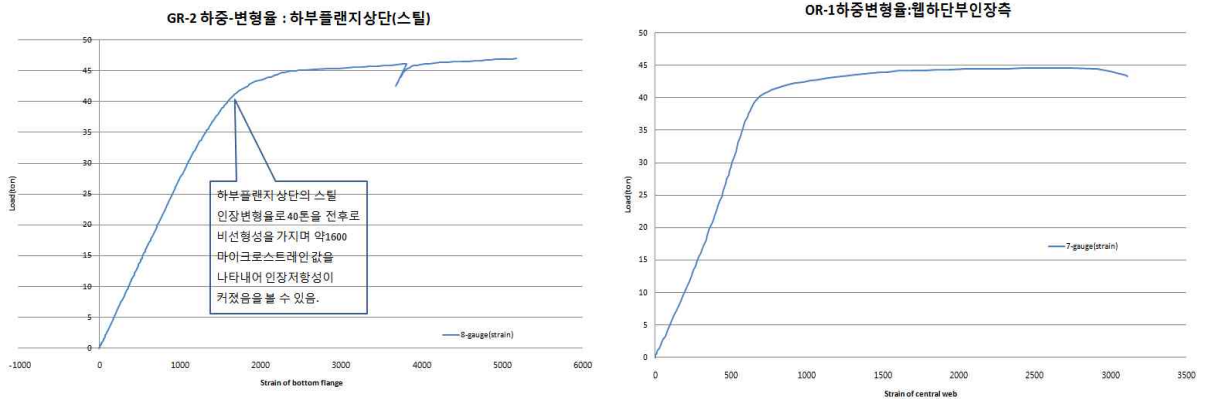


Fig. 6. comarision effect of built up

Fig. 6에서 보여 준 바와 같이 탄소섬유판을 하부플랜지 하부에 접착하여 보강한 경우에서 인장 부 휨 저항능력은 부착된 보강판이 탈락하기 전까지는 보강 없는 일반 빔에 비하여 내하력이 일정량 증가하는 것이 뚜렷하다. 그러나 보강재가 탈락하게 되는 경우는 접착면의 파단으로 보강재의 파괴없이 접착면 파괴 양상을 보인다. 이는 하중에 대한 저항성이 접착력으로 향상된다고 판단되며 보다 강한 접착이나 부착성능을 가진다면 구조 성능의 향상이 매우 클 것으로 생각된다. 즉, 부착방법에 서 개량된 방안에 대한 연구가 매우 필요하다는 판단이다.

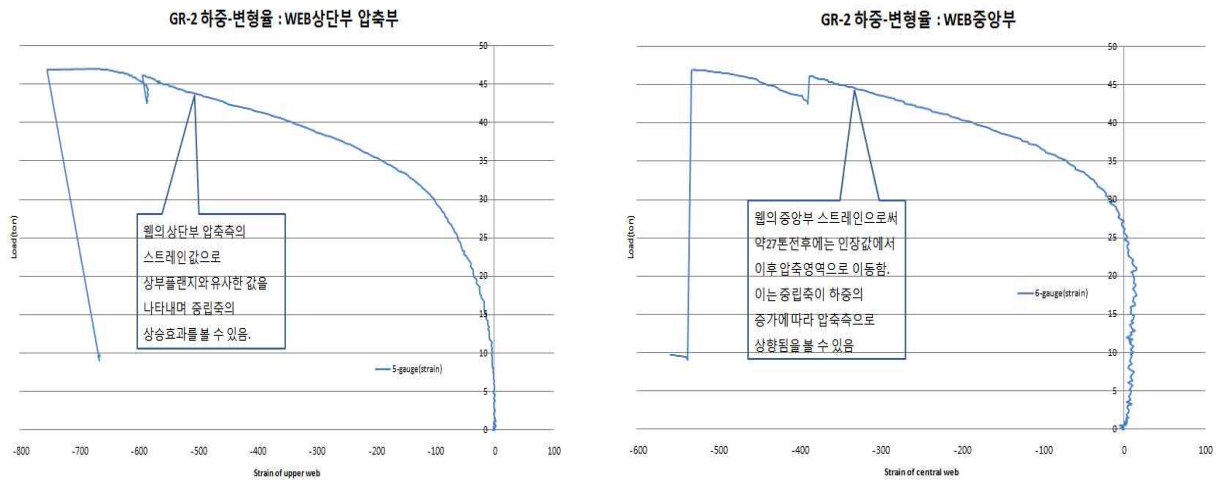


Fig. 7. GR specimen UF and Middle Web point load-strain

Fig. 7은 보강 사편의 복부관 상단과 중앙점에서의 하중-변형률을 나타낸다 여기서 보는 바 중앙부에서 보강후 인장영역에 위치하는 변형율이 270 kN의 하중에서는 압축축으로 변화하는 것을 보이는데 이는 부착된 보강재가 파단전 까지 충분한 내하력을 가지고 있음을 나타내며 특히, 중립축의 상승효과를 갖고도 일정기간 성능을 발휘함을 알 수 있다. 또한, 하중의 증가에 따른 변형률의 값을 보면 기존 빔의 제원에 2000 $\mu\epsilon$ 에서 선형변위를 이후로 파단까지 6500 $\mu\epsilon$ 의 변형을 지속하

SN과 GR의 카본플레이트 보강 빔의 경우는 선형변위까지는 비슷한 $1400\mu\epsilon \sim 1600\mu\epsilon$ 이나 파단까지는 $4500\mu\epsilon$ 의 변형을 하여 접착된 카본플레이트가 약 30%이상의 하중을 더 분담하여 저항함을 볼 수 있었다. 중립축으로 생각되는 시험편의 북부 판 중앙 위치에서 측정된 결과에서는 중립의 상태에서 압축의 영역으로 저항하여 카본플레이트가 인장력을 더 분담함을 알 수 있다. 그리고 실험에서는 무보강 시험편의 가력상태는 조금 빠른 가력이 진행된 것으로 판단되나 가력에 따른 응답(스트레인, 처짐)은 적정한 결과를 얻도록 측정이 된 것으로 판단된다. 그러나 가력의 속도에 따른 스트레인이 충격력을 포함할 수 있으므로 특징분석을 기준으로 하는데 약간의 수정이 필요하다는 생각이다. 그리고 대칭성을 파악하고자 한 내측 4위치의 처짐은 모두 약 7mm 발생되었으므로 사실상 하중의 재하는 적절하게 진행된 것으로 판단되었다. 하중 점 아래의 상부플랜지 최상단 중앙위치의 압축스트레인 값은 $1800\mu\epsilon$ 을 나타낸다. 압축영역에서 인장영역과 비슷한 대역의 스트레인 값을 가진다는 특징을 알 수 있어 전형적인 빔의 거동형상을 보여준다고 판단되었다. 그림 7에서는 GR(그라인드로 표면 처리하여 접착 면을 매끈하게 처리한 시험편)과 SN(현장에서 접착 면을 거칠게 처리한 시험편) 및 OR(카본플레이트의 부착이 없이 무보강상태의 원 빔)의 UF(상부플랜지)상단의 압축 변형 율을 표시하였다. 여기서 기존 빔을 기준으로 OR과 SN, GR의 순으로 압축 측 스트레인이 작아지는 현상은 중립축이 인장 측 하부에 보강된 탄소섬유판의 보강효과로 중립축이 상승되어 압축의 변형이 상대적으로 작아짐으로 볼 수 있다. 이것은 인장 측 결과와 비교해도 매우 잘 일치하는 결과를 얻는다. GR시험편에서 북부판 중앙부의 중립축근처 게이지는 카본플레이트의 인장력 보강에 따라 초기에는 인장대역부근에 위치하나 하중이 진행 될수록 압축대역으로 이동하였다가 최종으로 파단 되는 형상을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이는 무 보강 시험편과 비교하여 하중증가에 따라 압축 측으로 기울어지는 형상을 보강효과로 보아도 될 것으로 판단된다.

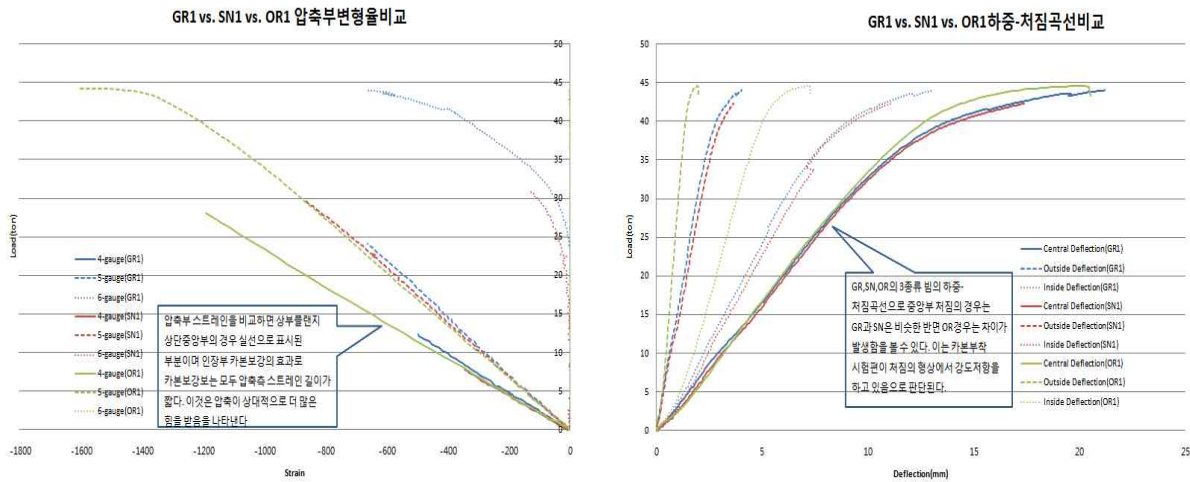


Fig. 8. Load-strain curve at middle of web

또한, 카본 플레이트의 보강효과는 인장부분의 하중저항이 늘어나고 하중저항에 따른 그래프의 각도가 효과를 표시하고 있음을 볼 수 있다고 판단된다. 따라서 일반 빔을 사용하여 강도증진을 위하여 용접이나 다른 부재의 추가 볼트연결로 강성을 확보하고 보강하는 기존의 방안보다 시간적으로 단축되고 시공편의 측면에서 매우 간편하고 기술적 어려움이 없는 방안으로 유용성이 좋으며 에폭시접착제를 도포하여 카본플레이트를 기존 강재의 요구 단면에 부착함으로써 강성을 증진하고 내구성을 확보하는 방안으로서 그 성능은 효과적임을 강도증진의 측면에서 충분히 알 수 있었다. 그러나 카본플레이트의 보강효과는 우선적으로 접착되는 면의 접착제두께와 접착면의 마찰능력 및 카본플레이트와 일체적 거동 시험 저항 뿐 만 아닌 다양한 내력조건에서 저항능력에 대한 판단은 보다 엄밀한 시험을 통하여야 할 것이다. 실험에서는 보강효과가 인장 측 스트레인 값으로는 약 40%정도의 효과를 줌으로 알 수 있었다. 그림 8에서는 가장 일반적인 시험편의 P-Δ 곡선을 나타낸다. 여기서 알 수 있는 바는 carbon plate의 보강효과를 처짐과 하중저항능력으로 판단할 수 있다. 파괴점까지 긴 저항능력을 갖고 있음은 보강된 시험편이 일부하중 내하능력이 더 있음을 알 수 있다. 또한, 처짐의 경우 보강된 시험편에 처짐이 조금 작게 나타나고 이는 보강효과로 인하여 강성이 증가된 이유로 보이나 사실 보강재인 카본플레이트의 두께가 매우 작아 그 영향은 판단하

기에 어려움이 있다고 생각된다. 한편, 그림 7에서 인장 측 거동에서 실선으로 표시된 하부플랜지 최하단의 거동은 비례한도 내에서는 유사한 그래프를 나타내나 항복위치에서 소성거동영역으로 갈수록 보강 판의 인장 부담 력이 나타남을 볼 수 있고 또한 쉐션(압축측), 가는 점선(중립축)에서는 카본플레이트 보강효과로 무 보강 톨 빔의 거동과 완전한 차이를 보인다. 여기서 부착력을 주는 에폭시레진의 능력이 매우 중요한 사안이며 본 연구에서 레진의 역할은 시험 시 파괴점까지 충분히 유용한 접착력을 발휘하였다.

4. 결론

기존의 보에 보강효과를 주기 위하여 에폭시 레진을 도포한 후 인장영역을 카본플레이트로 부착 보강하여 내하력 상승효과를 검증하고자 하였다. 이 중 OR(무보강 시험편), SN(현장조건을 고려하여 간략히 샌드처리한 거칠기의 조건에서 카본판을 부착한 시험편), GR(카본판의 부착을 위하여 표면을 그라인더로 매끈하게 처리하여 부착성능을 높인 시험편)의 3종류 시험편 준비하여 비교 시험결과를 도출하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 보강효과를 주는 카본 플레이트가 보에 대하여 인장과 압축강성에 주는 효과는 인장강도의 증가와 함께 처짐의 감소효과 등 어느 정도 있음을 볼 수 있었으나 카본플레이트가 보강에서 줄 수 있는 단면적의 증가가 매우 작아 응력의 변화에 미치는 영향을 판단하기에는 더 다양한 조건의 보강 플레이트를 사용하여 확인할 필요가 있다는 의견이다. 이는 보강의 효과를 응력으로 대응하기 위해서 단면적의 변화를 고려할 수 있는 충분한 두께의 보강 카본플레이트가 필요하다는 판단이다.

② 실험결과를 보면 총 6개 시험편 중 1개 시편을 제외하고는 실험결과가 매우 양호한 거동을 표현하고 있으며 카본 플레이트를 부착하기 위하여 사용하는 RESIN (EPOXY)의 성능은 적절한 부착력을 가질 수 있도록 기술적 도포 및 양생을 수행한다면, 카본플레이트와 스틸거더와의 전단성능을 가지는 데에는 충분히 양호하다는 결론을 얻을 수 있다.

③ 또한 내하력의 증진에 필수적인 카본플레이트의 단락을 방지하기 위해서는 레진의 적절한 도포 및 접합기술을 증가시키는 방법 이외에도 거더 단부에 BOLTING을 수행하여 접착전단성능을 개선하는 것을 더욱 좋은 성능을 가질 수 있다.

④ 보강효과를 감안할 때 카본플레이트와 모재간의 접착능력이 강성보강효과에 지대한 영향을 미치는 것으로 보이므로 레진을 이용하여 부착할 때 카본플레이트 부착면 역시 약간의 거칠기를 갖도록 사포질을 하고 카본플레이트의 부착 면에도 레진을 얇게 도포하며, 모재(스틸거더)는 블라스팅(샌드, 쇼트)을 한 상태에서 레진을 일정한 두께로 도포하여 접착하는 것이 부착성능향상에 도움이 될 것으로 생각된다.

⑤ 따라서 빔을 탄소섬유판으로 보강할 경우에는 실제로 단면적의 증가는 미소하나 인장강도의 증진효과를 가질 수 있으므로 실제 적용을 위해서 사실상 빔의 거동특성상 압축부와 인장부의 거동이 중립축을 기준으로 적절히 배분되어야 거더의 역할을 역학적으로 충분히 수행할 수 있다는 생각이며, 이를 위하여 적어도 비대칭단면을 갖도록 압축부에 대한 적절한 보강이 요구된다는 것이다. 이를 위하여 압축측 플랜지의 항복이 적어도 인장측 플랜지 보다 너무 큰 차이를 갖지 않기 위한 적절한 대책이 요구된다고 사료된다.

⑥ 거더 실험에서 압축플랜지와 인장플랜지의 강성차이가 발생하는 경우 휨에서 인장영역의 강성증가량을 고려하여 압축측도 보강이 필요하다. 이는 휨 가력상태에서 인장영역은 보강되어 움직임이 적은 반면 압축은 그때 가력을 받아 변형이 크게 되어 전체적으로 볼 때 압축영역이 먼저 항복에 도달하는 실험이 될 가능성이 많다. 따라서 보의 휨 능력을 판단해야 하는 경우에는 인장과 압축의 대역을 적절히 분배할 필요가 있다. (즉, 상부플랜지와 하부플랜지 사이의 스트레인이끼리 유사한 대역에서 하중에 대한 변형율을 기록하도록 하여야 한다는 의미이다.)

⑦ 카본플레이트의 부착능력은 하부플랜지 상단의 스트레인 값과 카본플레이트 하단의 스트레인 값으로 비교가 가능하며 확실히 카본플레이트가 인장능력을 분담하여 거동함을 보여주고 있다. 모든 부착시편은 탄성거동상태에서는 양호하게 부착 거동을 발휘하였으나 이후 소성대역에서는 GR2시험편을 제외한 나머지는 약 450kN 근처에서 플레이트의 탈락과 부착파괴가 발생하였다. 이것을 통하여 부착능력을 본 실험에서는 결정하기 어려워 부착성능을 향상시킨다면 보다 좋은 역학적 거동을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 (주)스틸코리아의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

- Carol Shield, Jerome Hajjar, Katsuyoshi Nozaka, "REPAIR OF FATIGUED STEEL BRIDGE GIRDERS WITH CARBON FIBER STRIPS", MN/RC - 2004-02
- H.B. Liu, X.L. Zhao* and R. Al-Mahaidi, "THE EFFECT OF FATIGUE LOADING ON BOND STRENGTH OF CFRP BONDED STEEL PLATE JOINTS", Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)
- Naofumi Inaba, Norio Ogata, Atsushi Homma, Masatsugu Nagai, Akira Kobayashi, "EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTIVENESS OF CFRP BONDING TO CORRODED STEEL MEMBERS", 2004. FORCA TOW SEET Technical Report.
- Albrecht, P., "Fatigue Strength of Adhesively Bonded Cover Plates", Journal of Structural Engineering, Vol. 113 No. 6, Jan., 1987. pp. 1236-1250.
- David Schnerch, Kirk Standford, and Bryan Lanier, "Use of High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymers(CFRP) for Strengthening Steel Structures", North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- IkHyun Sung, "Test on the strengthening effects and behavior of Roll beam with Stiffened carbon-plate", Journal of The Korean Society of Disaster Information, Vol. 9 No. 4 Dec. pp.392-399