

광섬유 센서를 이용한 패치형 복합재료 보강 구조물에서의 진단기법에 관한 연구

Study on the Self Diagnosis of Reinforced Concrete Beam Repaired by Patch Type Composite with Optical Fiber Sensors

이 정 근, 한 성 도, 엄 진 성, 이 정 규, 정 철, 김 기 수

호서대학교 벤처대학원, 충남 아산시 배방면 세출리 산 27-1

1. 서 론

사회기반시설을 구축하는 다양한 토목·건축 분야의 주요 콘크리트 구조부재에 탄소섬유시트를 비롯한 섬유복합재료를 이용하여 보수·보강하는 공법은 최근에 세계적으로 많이 활용되고 있는 신공법 중에 하나이다. 기존의 보수·보강재료에 비해 섬유 복합재료에 의한 시공방법의 장점은 구조부재의 내하력을 증가시킬 수 있고 기존에 발생한 균열을 구속하는 효과를 얻을 수 있다. 탄소섬유와 같은 복합재료는 강재에 비교해 강도가 8~10배이고, 탄성률은 거의 같은 특징을 가지고 있어 철근 콘크리트 구조물의 보수·보강에 효과적이다. 또한 파괴강도 까지 거의 탄성체로 거동할뿐만 아니라, 비중은 철의 약 0.2배로 여타 공법에 비해 사하중 증가의 부담이 없고 작업 공간이 협소한 곳에서도 별도의 부대장치 없이 손쉽게 작업할 수 있다 아울러 구조부재의 손상 정도와 손상부위에 따라 보강량이 다르게 적층수를 조절할 수 있으므로 상태에 따라 적절한 보강이 가능하다. 이와 같이 여러 장점을 가진 섬유복합재료이지만 보수보강 후 강성이 달라지고 이를 예측하기가 어려우며, 시야를 가리게 되므로 균열을 관찰할 수가 없고, 취성파괴를 나타낼 수도 있기 때문에 섬유재료를 이용한 보수·보강공법의 단점을 보완하기 위해 자기진단 기법을 도입할 필요가 있으며 이를 위해 광섬유 센서를 이용한 시스템 계획의 활용이 적합하다.

구미 선진국에서는 1980년대부터 광섬유를 이용한 계측 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고⁽¹⁻⁴⁾, 국내에서도 다양하게 연구가 되어졌다⁽⁵⁻⁷⁾. 전기저항식 게이지 시스템을 대체할 수 있다고 전망하고 있다. 현재 상용화되어 있는 전기저항식 게이지는 실내 실험실에서의 안정성과 광범위한 시장성은 확보되어있으나 실 구조물의 거동을 계속적으로 진단 또는 상태감시를 위해서는 내구성과 장기적인 안정성 그리고 작업성 등에서 적지 않은 문제점을 가지고 있다고 평가되고 있다. 또한 전기저항식 게이지의 경우 측정하고자 하는 표면에 직접 부착하는 방법 외에 다른 대안이 없는 실정이나 광섬유센서는 구조물에 직접 매설, 부착뿐만 아니라 다양한 부속장치를 사용하여 구조물의 거동을 평가할 수 있는 장점이 있다⁽⁸⁻⁹⁾. 탄소섬유와 같은 섬유복합재료의 경우 표면의 요철 및 거칠기 등에 의하여 전자식 게이지의 사용이 불합리함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 보수·보강 시 효율적인 섬유계 복합재료의 조합을 찾아내고, 광섬유 계측기술을 철근콘크리트 구조물에 적용하여, 효과적으로 탈락을 조기에 경보할 수 있는 진단기법을 개발하고자 한다.

2. FBG 광섬유 센서를 내장한 패치형 복합재료 보강공법의 설계 및 실험

2.1 시험체 제작

휨거동 관찰을 위한 시험체인 철근콘크리트 보는 단면치수 15cm×25cm, 유효총(d=21cm), 철근량은 최대철근비($\rho_{max} = 0.75\rho_b = 0.01466$)을 기준으로 압축철근 2-D10, 인장철근 2-D13, 길이 2.8m,

순 지간길이 2.4m인 장방형 복근보로 제작하였다. 아울러 시험체의 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보강은 $\phi 10$ 철근을 10cm 간격으로 하였다. 또한 전단에 의한 거동을 관찰하기 위해 단면치수 10cm×10cm, 길이 40cm의 무근 보를 제작하여 복합재료를 보수·보강 시의 거동을 관찰하였다. 전단거동의 관찰을 위한 시험체의 형상은 그림 1과 같다.

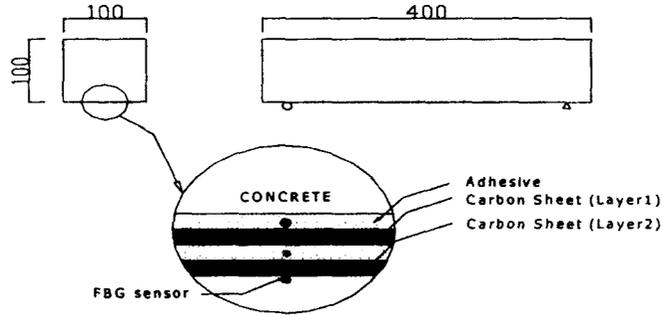


그림 1. 보강재 조합 및 광섬유 센서 측정방법

2.2 실험방법

탄소섬유는 보강성능이 다른 섬유에 비해 뛰어난 반면 화재에 약한 반면, 유리섬유는 방화 성능이 있고 탄소섬유에 비해 갑작스런 탈락현상이 덜하다. 따라서 이 두 섬유를 조합하여 보강했을 경우 보강 성능을 분석하고 가장 효율적인 복합재료 보강재의 조합을 찾아내고자 하였다. 그림 9와 같이 현재 널리 사용되고 있는 복합재료 보강재인 유리섬유와 탄소섬유를 다시 조합하여 가장 효과적인 조합의 복합 섬유 보강재를 파악하려 하였다. 본 연구의 횡 실험은 3점 가력방법을 이용하여 GCO(유리섬유와 탄소섬유의 조합)와 GGO(유리섬유와 유리섬유의 조합) 두 가지 경우를 콘크리트 보의 옆면과 보강재로 보강된 일면의 변형률을 비교함으로써 일반적인 복합재료 보강재의 단점인 조기 탈락을 경보할 수 있는 새로운 진단 기법을 개발하고자 하였다. 한편 그림 1과 같이 탄소섬유와 탄소섬유의 조합으로 두 층의 복합재료 보강재 사이와 콘크리트와 보강재 사이에 극소강관을 사용하여 광섬유를 보호하여, 두 지점의 변형률을 측정함으로써 새롭게 조기 탈락을 경보할 수 있는 방법을 시도하였다.

4.3 실험결과

횡 거동 관찰을 위한 두 가지 실험의 경우 GGO 보다 GCO의 경우 역학적으로 파괴에너지가 커서 급작스런 취성파괴의 위험성이 적은 것으로 나타나 더욱 효율적인 보강재 조합인 것으로 나타나고 있다. 2과 같이 두가지 다른 보강재 조합으로된 부재에서 하중증가에 따라서 측면과 일면의 변형률이 차이를 보여주고 있어 효과적인 탈락 경보 모니터링을 할 수 있으리라 사료된다. 그리고 전단 보 실험의 경우도, 유효적절하게 변형률의 차이를 측정할 수 있음을 확인하였으며, 보강재 탈락을 조기에 경보 할 수 있는 진단기법의 한 방편으로 사용이 가능하다.

앞에서 살펴본 하중-변형률 그래프는 보강부재의 거동을 이해하기는 쉽지만 부착파괴의 뚜렷한 징후를 알기는 힘들기 때문에 여기서는 내, 외부 변형률의 차이를 외부의 변형률 값으로 나눈 무차원의 값(I_{dr})과 하중그래프를 그림 3과 같이 그려보았다.

$$I_{df} = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e}$$

I_{df} : 무차원 전단지수

ε_i : 내부 변형률

ε_e : 외부 변형률

여기서, 부착파괴가 유발된 부재들을 살펴보면 부착파괴를 유발하는 것으로 추정되는 수직 균열 차가 발생하기 시작하는 4000 kgf에서의 그 추이에 확연한 변환점이 있음을 알 수 있다. 하지만 그림 3에서와 같이 단부 탈락이 일어나지 않는 보의 중앙 부분에서는 이 변환점을 찾기는 힘들다. 이 변환점은 보강재 외부에 부착한 광섬유센서의 변형률이 급격히 증가하기 때문인데 이 현상은 콘크리트와 보강재의 분리이후 중앙부에 급격한 처짐 증가로 보강재 단부의 응력집중이 발생하면서 복합재료 보강체와 모재 콘크리트가 일체거동을 하지 못하게 되면서 나타나는 현상으로 분석된다.

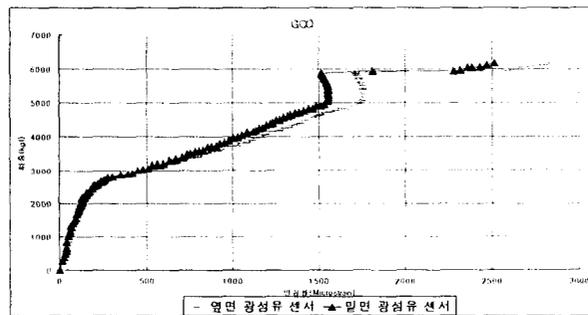


그림 2. 유리섬유와 탄소섬유 복합 보강 부재의 변형률 거동

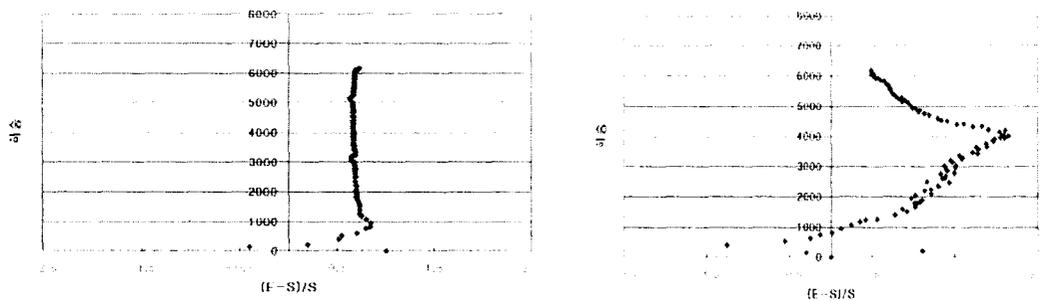


그림 3. 휨 보 중앙부와 단부의 하중에 따른 전단지수 변화

5. 결론

본 논문을 통하여 효율적인 복합재료 보강재의 조합과 광섬유 계측 기술을 건축/토목 보강 구조물에 적용하여, 복합재료의 탈락을 효과적으로 예측할 수 있다. 특히 콘크리트에 부착된 광섬유 센서와 보강용 탄소섬유시트에 부착된 광섬유 센서는 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보인다. 이에 착안하여 전단지수의 개념을 도입하였고, 이 개념에 의해 일체로 거동여부를 적절히 판단할 수 있고 이를 이용하여 구조물의 이상을 판별해 낼 수 있을 것이며, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강체 사이의 delamination과 접촉면에서의 슬립에서 찾아 볼 수 있다. 이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시정등을 산출해낼 수 있으며 구조물의 유지관리를 위한 정기적인 구조 진단에 따르는 비용을 절감하는데 일조 할 수 있다. 아울러 보다 체계적이고 정량적인 기준을 수립하기 위해서는 광섬유 계측 기술의 발전과 더불어 복합재료 보강재의 실험적 연구자료가 보다 축척되어야 할 것이다

감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 스마트사회기반시설연구센터의 지원으로 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Laura De Lorenzis, Brian Miller & Antonio Nanni, "Bond of Fiber-Reinforced Polymer Laminates to Concrete" ACI Materials Journal, May-June 2001.
- (2) Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou & Jingshen Wu, Chung-ho Woo "Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors" Composite Structures 51(2001), 9-20
- (3) Sarah E. Mouring & Oscar Barton, Naval Academy, D. Kevin Simmons "External Retrofit of R/C Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates" Stanford Univ, USA. Structural Faults & Repair conference, 2001
- (4) K. S. Kim, et'al, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors," Journal of Composite Materials, Vol. 27, pp 1618 - 1662, 1993.
- (5) K. S. Kim, et'al, "Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors in the Cement Concrete Structure", SPIE Vol. 2718, pp218-231, 1996.
- (6) J. W. Yoo, et'al, "In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with a Optical Fiber Sensor System", SPIE Vol. 3043, pp72-76, 1997.
- (7) S. H. Baek, et'al, "Optical Fiber Monitoring System of Bridge in Korea", Proceeding of the 1st Health Monitoring Workshop, pp555-563, Stanford Univ., 1997.
- (8) K. S. Kim, et'al, "The Effect of Embedded Sensors on The Strength of Composite Laminates, Journal of Reinforced Plastics and Composites," Vol. 11, pp 949 - 958, 1992.
- (9) K. S. Kim, et'al, "The use of Strain Measurement for Detecting Delamination in Composite Laminates, Composite Structures," Vol. 23, pp 75 - 84, 1993.