

광섬유 센서를 이용한 탄소섬유시트 보수보강 콘크리트구조물에서의 자기진단기법

Self Diagnosis Technique of Concrete Structure Repaired and Strengthened by Carbon Fiber Sheets Using Optical Fiber Sensors

김기수

Ki Soo Kim

초 록 노후된 콘크리트 사회기반시설 구조물의 활용성 증대와 수명의 연장을 위하여 여러 가지의 보수보강 방법이 시행되어지고 있으나 최근에는 시공이 용이하고 보강효과가 좋은 탄소섬유시트를 활용하는 방법이 널리 쓰여지고 있다. 탄소 섬유로 보수보강을 할 경우 강도가 증진되고 강성이 향상되어 좋은 방법으로 알려져 있으나, 철근 콘크리트에 비해 연성이 떨어져 파괴 시 취성 파괴의 형태를 보일 수 있다, 그리고 보수보강된 구조물을 보강재로 인하여 크랙의 진전을 맨눈으로 확인하기가 어려워지게 된다. 따라서 구조물의 취약함을 드러내는 시기인 보수보강시 광섬유센서를 내장케 하여 취성파괴를 감시하고 구조물의 거동을 모니터링함으로써 안전한 구조물이 되도록 할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 광섬유센서를 이용하여 모재와 보강재의 구조거동을 분석하였으며, Peel out 효과라 불리는 계면 파괴현상을 효과적으로 자기진단 할 수 있음을 입증하였다.

주요용어: 콘크리트 구조물, 탄소섬유시트, 보수보강, 광섬유센서, 자기진단

Abstract In order to extend the life time of building and civil infra-structure, nowadays, patch type fibrous composite materials are widely used. Repaired concrete columns and beams gain the stiffness and strength, but they lose toughness and show brittle failure. Usually, the cracks of concrete structures are visible with naked eyes and the status of the structure in the life cycle is estimated with visible inspection. After repairing of the structure, crack visibility is blocked by repaired carbon sheets. Therefore, structural monitoring after repairing is indispensable and self diagnosis method with optical fiber sensor is very useful. In this paper, peel-out effects is detected with optical fiber sensors and the strain difference between main structure and repaired carbon sheets when they separate each other.

Keywords: concrete structure, carbon fiber sheet, repaired and strengthened, optical fiber sensor, self diagnosis

1. 서 론

사회기반시설을 구축하는 다양한 토목·건축 분야의 주요 콘크리트 구조부재에 탄소섬유시트를 비

롯한 섬유복합재료를 이용하여 보수·보강하는 공법은 최근에 세계적으로 많이 활용되고 있는 신공법 중에 하나이다. 기존의 보수·보강재료에 비해 섬유 복합재료에 의한 시공방법의 장점은 구조부재

의 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 고정하중 증가의 부담이 없고 작업공간이 협소한 곳에서도 별도의 부대장치 없이 손쉽게 작업할 수 있다. 아울러 구조부재의 손상정도와 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, 취성과괴를 나타낼 수도 있기 때문에 섬유재료를 이용한 보수·보강공법의 단점을 보완하기 위해 자기진단 기법을 도입할 필요가 있으며 이를 위해 광섬유 센서를 이용한 시스템 계측의 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 게

이지는 실내 실험에서의 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 광섬유 센서는 구조물에 직접 매설, 부착 뿐만 아니라 다양한 부속장치를 사용하여 구조물의 거동을 평가할 수 있는 장점이 있다[8,9]. 탄소섬유와 같은 섬유 복합재료의 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. 광섬유 센서의 적용 원리

변형률을 측정하는 대표적인 광섬유 센서에는 fiber Bragg grating(이하 FBG)센서와 Fabry-Perot 센서가 있다. Fabry-Perot 센서는 수작업을 거쳐야 하므로 대량생산이 불가능하고, 정밀도는 높지만

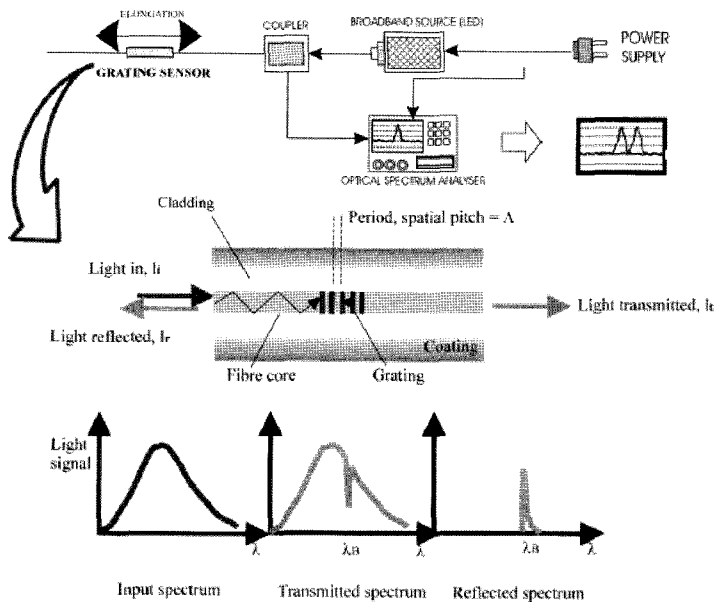


Fig. 1 Schematic diagram of FGB sensor signal

가격이 비싸고 외부 환경에 민감하다. 이에 반해 FBG센서는 대량생산이 가능하므로 가격이 저렴하고 Fabry-Perot와 비교하여 외부 환경에 덜 민감하여 구조물 계측용 센서로 많이 쓰이고 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물 계측에 적합한 FBG 센서를 사용하였다.

2.1. Fiber Bragg Grating 센서의 스트레인 측정 원리

FBG는 Ge가 첨가된 광섬유 코아에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절을 변화시켜 유도하여 grating의 주기에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 격자 소자이다. Fig. 1은 FBG 센서의 구조를 나타낸 것이다. 빛이 입사되었을 때 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며 나머지 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타나게 된다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

n : 유효 굴절률, Λ : grating period

grating에서 반사되는 Bragg 파장은 유효 굴절률과 grating 간격의 함수이며 FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량이 가해질 경우 Bragg 파장이 달라지므로 이를 이용하여 Bragg 파장의 변화를 측정하여 가해진 물리량을 구할 수 있다. 이를 정량화 하여 스트레인 변화에 대한 Bragg 중심 파장의 변화는 아래 식 (2)와 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \tag{2}$$

P_e : 광탄성 상수, ϵ : 광섬유 grating에 가해진 스트레인

3. 철근 콘크리트 보의 FBG 광섬유 센서의 평가

3.1. 시험체 제작

FBG 광섬유 센서의 기본특성을 이용하여 광섬유 센서가 철근 콘크리트 구조물에 계측용 센서로 활용 시 그 응답특성과 각종 부착기구의 특성을 평가하기 위하여 15×25×180cm 크기의 보를 제작하고 하중을 가하여 얻어지는 인장 및 압축변형률 값을

사용되고 있는 전기저항식 변형률 게이지와 비교하였다. 실험에 사용된 철근 콘크리트 보의 제원과 물성치는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Specification and material properties of test specimen

Specimen	Check point	Materials	
		Steel bar	Concrete
CTL I	Tensile strain variation	2@D13(tensile)	$f_{ck}=270\text{kg/cm}^2$
		2@D10(compr.)	
CTL II	Compressive strain variation	2@D13(tensile)	$f_{ck}=270\text{kg/cm}^2$
		2@D10(compr.)	

3.2. 시험방법

광섬유 센서의 신호응답 및 압축변형률의 측정 가능성 확인과 센서의 길이를 증가시켜, 일반적인 전기저항식 게이지로 구현할 수 없는, 균열발생 이후의 변형률 측정할 수 있는 長섬유센서(Macro FBG)의 적용성을 평가하였다. 4점재하 방식으로 하중을 재하하여 인장변형률(CTL I)과 콘크리트 상부의 압축변형률과 철근에 부착하여 매설한 광섬유센서(CTL II)의 신호응답을 평가하였다(Fig. 2,3).

3.3. 시험결과

예비실험으로 동일한 보 시험체 3개를 센서를 적용하지 않은 상태에서 파괴 시까지 가력하여 파괴강도를 측정하고 나서 센서를 적용한 시험체의 하중 조건을 결정하였다. 본 시험에서는 파괴시 하중의 약 40%인 4 ton까지를 반복재하한 CTL I 시편의 경우, Loading-Unloading 시 변형률 응답이 기존의 변형률센서와 거의 일치하는 것으로 나타나 광섬유 센서의 부착기구 적용방법 및 시험방법의 적합성을 확인하였다(Fig. 4). 또한 CTL II 시편의 경우, 압축 변형률 측정을 위하여 게이지 길이 45cm인 광섬유 센서에 미리 2000 $\mu\epsilon$ 의 Pre-Tension을 가하여 실험하였으며, 실험결과 7 ton이 가해진 후 전기저항식 변형률게이지는 파손되어 측정이 불가능한 데 비해 광섬유센서는 Unloading 시 잔류변형률도 측정이 가능하므로 균열발생 및 대변형 후에도 유효한 센서

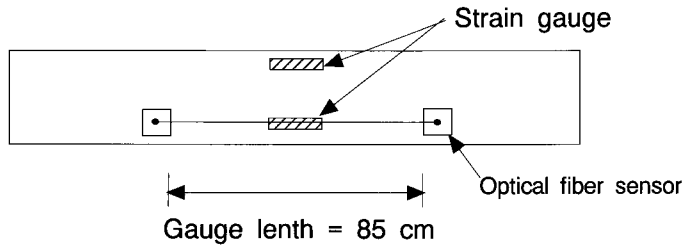


Fig. 2 Specimen for tensile test (CTL I)

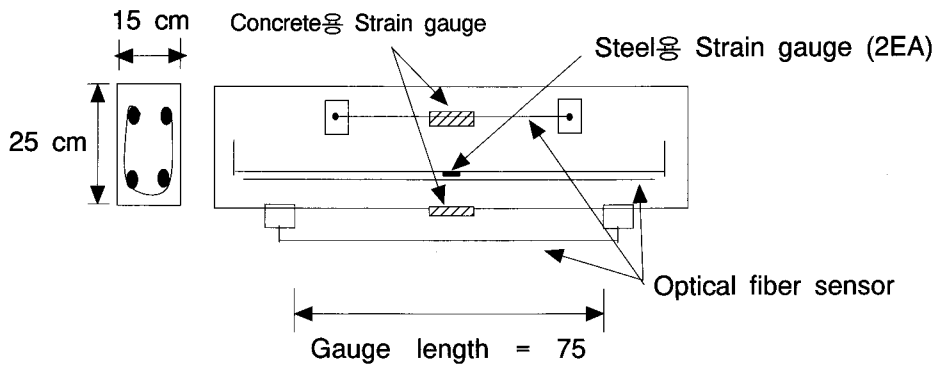


Fig. 3 Specimen for compressive test with embedded steel (CTL II)

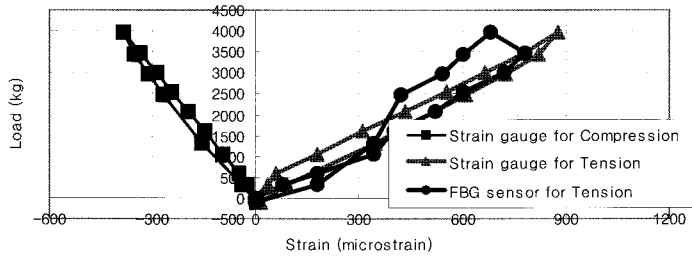


Fig. 4 Results from strain gauge & FBG sensor for tensile test (CTL I)

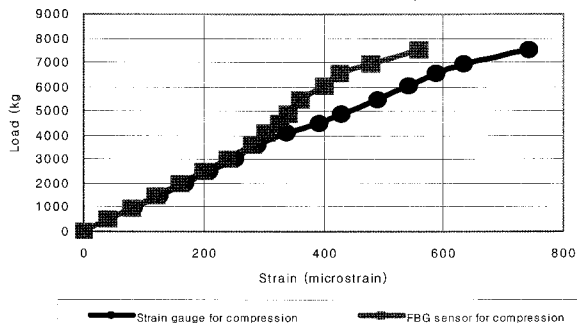


Fig. 5 Results from strain gauge & FBG sensor for compressive test (CTL II)

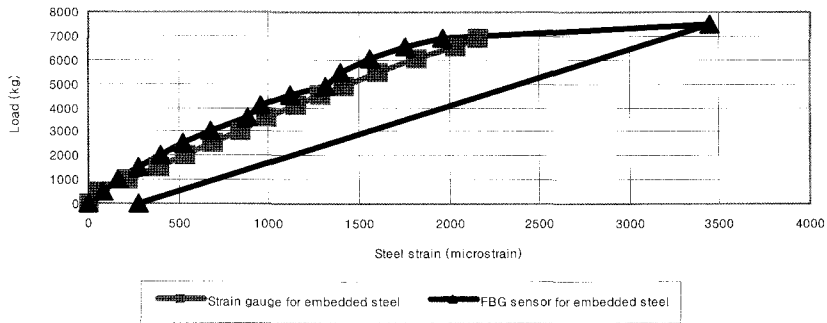


Fig. 6 Results from strain gauge & FBG sensor for embedded steel (CTL II)

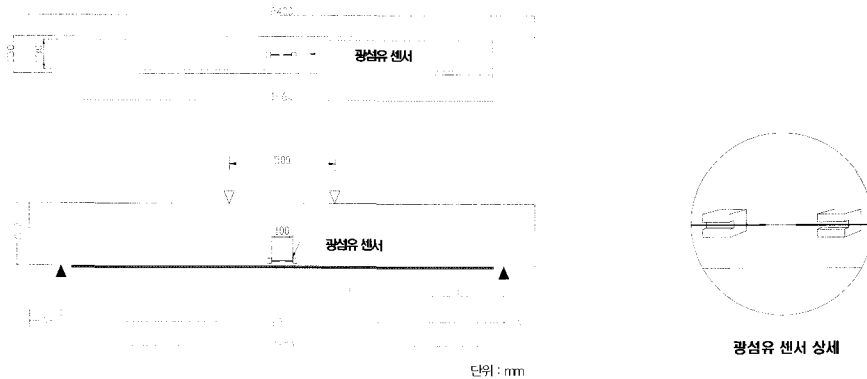


Fig. 7 Dimensions of bending test specimens and details of FBG sensors

서로 평가할 수 있었다(Fig. 5). 철근에 매립된 광섬유 센서의 경우도 기존의 전기저항식 철근계이지와 매우 유사한 거동을 보여주고 있어 구조물 계측용으로 유효 적절한 센서임을 확인하였다(Fig. 6).

4. FBG 광섬유 센서를 이용한 섬유재료시트의 보강공법의 설계 및 실험

4.1. 시험체 제작

휨거동 관찰을 위한 시험체인 철근콘크리트 보는 단면치수 15cm×25cm, 유효충(d=21cm), 철근량은 최대철근비($\rho_{max} = 0.75\rho_b = 0.01466$)을 기준으로 압축철근 2-D10, 인장철근 2-D13, 길이 2.8m, 순지간길이 2.4m인 장방향 복근보로 제작하였다. 아울러 시험체의 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보강은 D10 철근을 10cm 간격으로 하였다(Fig. 7). 휨거동 관찰을 위한 시험체의 형상은 Fig. 7과 같다. 또

한

전단에 의한 거동을 관찰하기 위해 단면치수 10cm×10cm, 길이 40cm의 무근 보를 제작하여 복합재료를 보수·보강 시의 거동을 관찰하였다. 전단거동의 관찰을 위한 시험체의 형상은 Fig. 8과 같다.



Fig. 8 Dimensions of shear test specimens

4.2. 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 보강성능을 분석하고 가장 효율적인 복합재료 보강재의

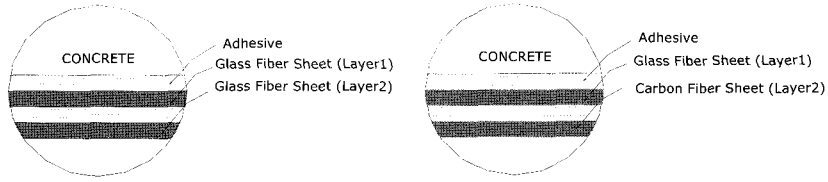


Fig. 9 Combinations of lay-ups in hybrid type repairing patch

조합을 찾아내고자 하였다. Fig. 9와 같이 현재 널리 사용되고 있는 복합재료 보강재인 유리섬유와 탄소섬유를 다시 조합하여 가장 효과적인 조합의 복합 섬유 보강재를 파악하려 하였다. 본 연구의 휨 실험은 Fig. 10과 같은 가력방법을 이용하여 GCO(유리섬유와 탄소섬유의 조합)와 GGO(유리섬유와 유리섬유의 조합) 두 가지 경우를 콘크리트 보의 옆면과 보강재로 보강된 밑면의 변형률을 비교함으로써 일반적인 복합재료 보강재의 단점인 조기 탈락을 경보할 수 있는 새로운 진단 기법을 개발하고자 하였다. 한편 Fig. 11과 같이 전단보 실험의 경우 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.

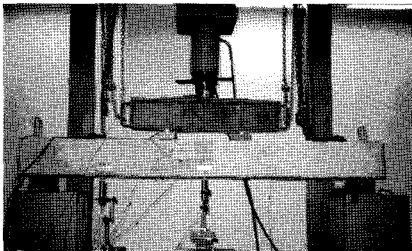


Fig. 10 Specimen under 4 point bend test

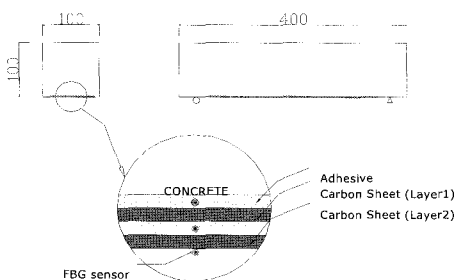


Fig. 11 Combinations of lay-ups in shear specimen and embedded FBG sensors

4.3. 실험결과

휨 거동 관찰을 위한 두 가지 실험의 경우 Fig. 12의 GGO 보다 Fig. 13 GCO의 경우 역학적으로 파괴에너지가 커서 급작스런 취성파괴의 위험성이 적은 것으로 나타나 더욱 효율적인 보강재 조합인 것으로 나타나고 있다. 또한 두가지 다른 보강재 조합인 GGO와 GCO 모두 하중증가에 따라서 측면과 밑면의 변형률이 차이를 보여주고 있어 효과적인 탈락 경보 모니터링이라 사료된다. Fig. 14와 같이 강관으로 광섬유를 보호한 전단 보 실험의 경우도, 유효적절하게 변형률의 차이를 측정할 수 있음을 확인하였으며, 보강재 탈락을 조기에 경보 할 수 있는 진단 기법의 한 방편으로 사료된다.

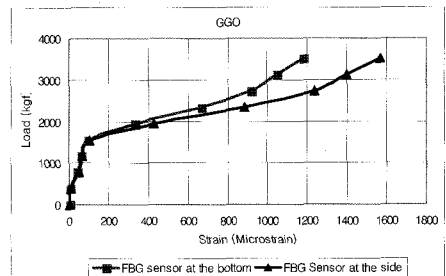


Fig. 12 Bending test result from the beam strengthened with two glass fiber sheets

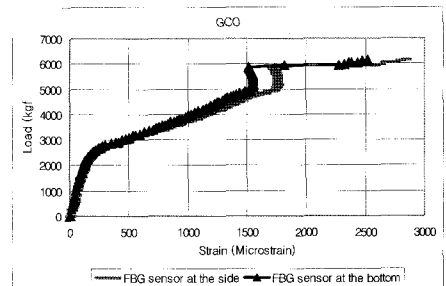


Fig. 13 Bending test result from the beam strengthened with one glass fiber sheet and one carbon fiber sheet

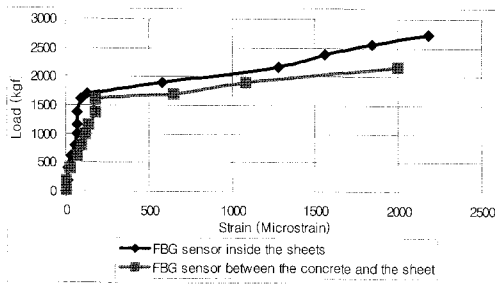


Fig. 14 Shear test result from the beam strengthened with two carbon fiber sheets

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 광섬유센서와 보강용 탄소섬유시트에 부착된 광섬유센서는 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보인다. 이는 두가지 구조시스템이 특정하중이상에서는 일체로 거동하지 않음을 보여주는 좋은 예이며 이를 이용하여 구조물의 이상을 판별해 낼 수 있을 것이며, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강체 사이의 delamination과 접착면에서의 슬립에서 찾아 볼 수 있다. 이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시점등을 산출해낼 수 있으며 구조물의 유지관리를 위한 정기적인 구조 진단에 따르는 비용을 절감하는데 일조할 수 있다. 아울러 보다 체계적이고 정량적인 기준을 수립하기 위해서는 광섬유 계측 기술의 발전과 더불어 복합재료 보강재의 실험적 연구자료가 보다 축적되어야 할 것이다

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Laura De Lorenzis, Brian Miller and 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 and Chung-ho Woo, "Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors," Composite Structures 51, pp. 9-20, (2001)
- [3] Sarah E. Mouring, Oscar Barton and 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, L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors," Journal of Composite Materials, Vol. 27, No. 17, pp 1618-1662, (1993)
- [5] K. S. Kim, J. W. Yoo, S. K. kim and B. Y. kim, "Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors in the Cement Concrete Structure," SPIE Vol. 2718, pp. 218-231, (1996)
- [6] K. S. Kim, J. U. Ryu, S. J. Lee and L. Choi, "In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with a Optical Fiber Sensor System," SPIE Vol. 3043, pp. 72-76, (1997)
- [7] S. H. Baek, and K. S. kim "Optical Fiber Monitoring System of Bridge in Korea", Proceeding of the 1st Health Monitoring Workshop, pp. 555-563, Stanford Univ., (1997)
- [8] K. S. Kim, M. Breslauer and G. S. Springer, "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, A. Segall and G. S. Springer, "The use of Strain Measure- ment for Detecting Delamination in Composite Laminates, Composite Structures," Vol. 23, pp. 75-84, (1993)