

자기진단 CPGFRP의 파괴예측기능 평가를 위한 콘크리트 적용실험

Evaluation of Fracture Detection Function for the Concrete by Self-Diagnosis CPGFRP

○ 최 현 수* 박 진 섭* 정 민 수** 강 병 희***
Choi, Hyun-Soo Park, Jin-Sub Jnng, Min-Soo Kang, Byeung-Hee

Abstract

To maintain serviceability of concrete structure more than proper it is necessary not only predict service life through periodical monitor but also need monitoring system to recognize optimal time and method for repair. Recently, CPGFRP, replacing some GFRP with CF, is developed and used for monitoring concrete fraction. But dramatic resistance change of CPGFRP is showed below 0.5% strain and it is not small strain in terms of monitoring micro crack in concrete. In other word, monitoring with CF is not suitable in low stress but hight stress. In this study, we accessed applicable possibility and reliability of CPGFRP composite as monitoring sense that is proved very sensitive to stress through domestic and oversea previous study.

CPGFRP composite plays a role in specimen like steel and increases flexural strength. CPGFRP composite shows resistance increasement in micro crack. In particular, CPGFRP is more sensitive than strangage in low stress. Resistance change ratio curve is very similar to strain curve so sensitivity and reliability is very excellent to monitor concrete fracture.

키워드 : 자기진단, 파괴검지, 스마트콘크리트, 전기저항, 탄소분말

Keywords : Self-Diagnosis, Fracture detection, Smart concrete, Electrical resistance, Carbon powder.

1. 서 론

토목 및 건축 구조물에 대한 합리적이고 정확한 설계·시공은 물론 구조물 시공 후의 안전 점검, 보수·보강 등의 적절한 유지 관리 업무는 구조물의 사용을 항상 최적의 상태로 유지하고 구조물의 공용 수명을 연장시키는 데 있어 매우 중요하다.

구조물의 사용성을 적정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 정기적인 점검을 통해 잔존 수명을 미리 예측하여야 함은 물론, 최적의 보수 시기와 보수 방법을 알려줄 수 있는 시설물 유지 관리 예측 시스템이 요구된다.

따라서, 최근 물질이 스스로 외부로부터 자극을 감지하고 판단해서 결론을 내린 뒤 자체적으로 반응하는 기능을 갖춘 재료인 Self-diagnosis materials 또는 intelligent materials에 많은 관심이 집중 되어왔으며 미국, 일본 등을 중심으로 많은 연구가 수행되어 왔다.

특히, 최근 콘크리트 구조부재의 새로운 손상진단 재료로서의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)의 유리섬유의 일부를 탄소섬유(CF, Carbon Fiber)로 치환한 재료, 즉 CFGFRP(Carbon Fiber Glass Fiber Reinforced Plastics)가 개발되어 콘

크리트에 파괴예측에 이용되기 시작했다. 즉, CFGFRP가 인장 또는 휨 하중을 받을 때 별도로 재료 중에 도입된 검지부(detection part)의 전기저항 변화를 측정함으로써 재료 전체의 손상·파괴의 정도를 예측할 수 있다는 것이다. 또한, 이 재료는 철근에 비해 비강도가 크고 경량으로 녹슬지 않는 등의 특징을 가지고 있기 때문에 콘크리트의 보강재료로서의 실용화가 진행되고 있다.

그러나 지금까지의 보고에 의하면 부하시 CFGFRP의 전기저항의 큰 변화증가는 약 0.5%의 변형부터 생기며, 이 값은 콘크리트의 미세 파괴 검지의 관점에서는 작은 변형영역이라고 볼 수 없다. 다시 말하여 CF를 이용한 예측은 비교적 높은 응력일 경우에는 적합하지만 낮은 응력(특히 연속적 작용에 의한 경우)에는 적합하다고 볼 수 없다.

따라서, 최근 많은 연구를 통하여 CF대신에 탄소분말 입자(CP, Carbon Powder) 등의 percolation구조를 이용한 CPGFRP(Carbon Powder Glass Fiber Reinforced Plastics)는 보다 낮은 저응력 저변형에서도 전기저항의 변화가 생긴다고 확인되고 있다. 이로 인하여 이러한 CPGFRP는 콘크리트의 보강과 보다 낮은 응력에서의 파괴검지라고 하는 양쪽의 기능을 겸비한 재료가 될 가능성이 크다.

본 연구에서는 국내외 등에서 선행된 연구에 의하여 외부 하중에 대한 전기저항 변화가 대단히 민감한 것으로 밝혀진

* 정회원, 동아대 대학원 석사과정

** 정회원, 동아대 박사수료

*** 정회원, 동아대 건축학부 교수, 공학박사

CPGERP를 실제 콘크리트 경화체 중에 도입하여 그 적용가능성과 신뢰성을 고찰하는 것을 목적으로 한다.

2. CFGFRP와 CPGFRP 복합체

2.1 CPGFRP 복합체의 구조

그림 1은 CPGFRP를 나타낸 것으로, 검지부는 비닐에스테르수지와 스티렌모노머를 희석한 용액에 경화제를 넣고, 이것에 도전상으로서 CP를 10vol%가 되도록 슬러리를 제작한다. 그리고 슬러리를 초음파 욕조 속에서 GF에 함침·경화시킨 후, 소정의 길이로 절단하여 전극을 연결하였다. 검지부는 시험편의 인장면으로부터 1mm의 장소에 위치하도록 가공하였다.

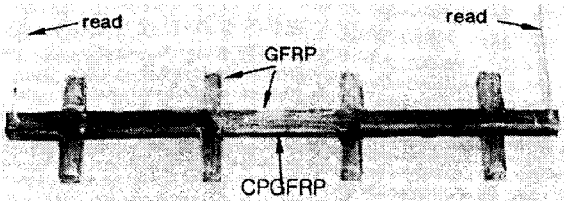
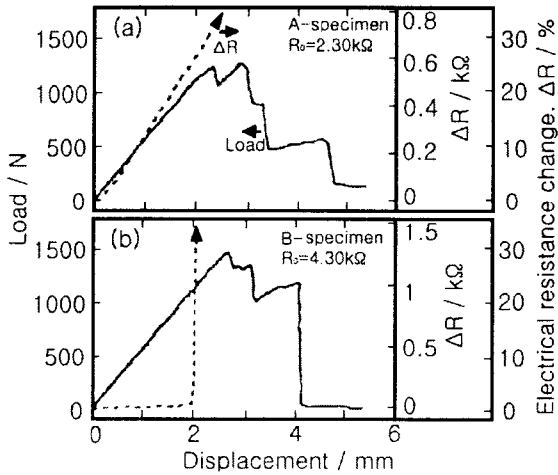


그림 1. CPGFRP 복합체

2.2 CFGFRP와 CPGFRP 복합체의 하중에 따른 변위 및 저항의 변화

그림 2는 CFGFRP와 CPGFRP 시험편에 대하여 3등분점 휨 시험을 하였을 때의 하중-변위 곡선과 전기저항 변화(ΔR)와의 관계를 나타낸다.



Sample name	electrically conductive phase	Diameter of powder or fiber	Diameter of detection part
A	carbon powder	5 μ m	0.5mm
B	carbon fiber	4 μ m	0.5mm

그림 2. 3등분점 휨 시험에 따른 하중·변위·전기저항 변화율 곡선

CPGFRP는 아주 작은 변위의 영역부터 전기저항의 변화가 생겨 ΔR 은 변위에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것을 알

수 있다. 그러나, CFGFRP 시험편은 작은 변위에서 ΔR 은 거의 변화를 보이지 않으며, 재료의 최종 파괴에 가까운 변위에서 급격히 증가하였다. 이는 CFGFRP 중에서 검지부가 되는 CFRP의 전기저항변화가 주로 강인한 CF의 파단에 의해 생기기 때문으로 생각된다.

또한, 시험편에 반복하중을 가할 경우, CPGFRP는 그림 3과 같이 저하중에서도 전기저항이 잔류하며, 작용하중이 증가함에 따라 잔류저항이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 하중 제거후의 잔류저항을 측정함으로써 재료가 과거에 받은 하중 이력을 추측할 수 있는 것을 의미한다.

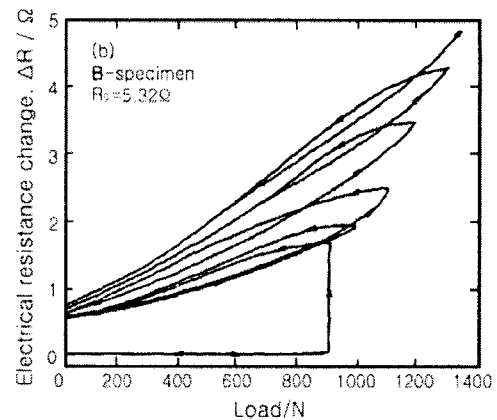
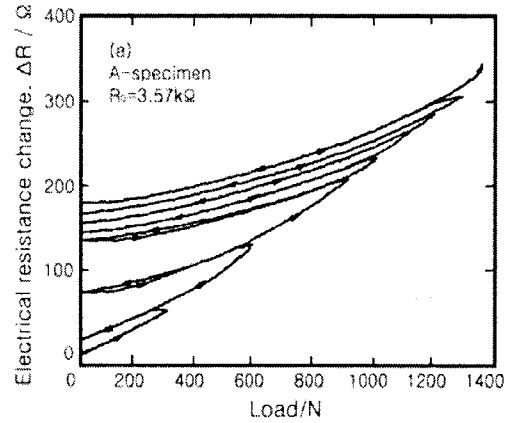


그림 3. 반복 하중에 따른 하중저항변화율 곡선

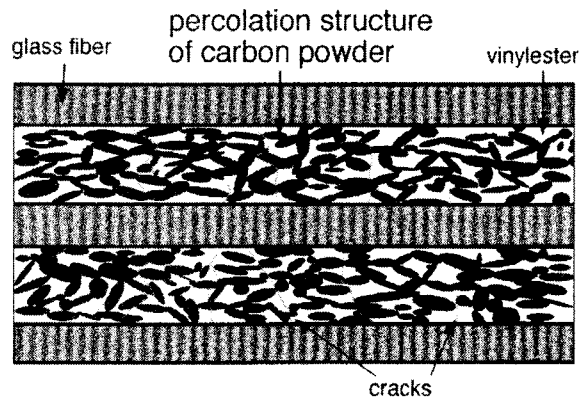


그림 4. CPGFRP의 Percolation Structure 모식도

3. 실험

3.1 실험인자 및 수준

본 연구의 실험인자 및 수준은 표 1과 같다. 변형 및 균열 발생 거동에 따르는 CPGFRP 센서의 신뢰성을 평가하기 위하여 각 시험편에 스트레인 게이지를 부착하고 다이얼게이지를 설치하여 시험편의 변형과 처짐을 측정하였다. 또한, CPGFRP 복합체의 적용에 따른 휨 강도의 영향을 검토하기 위하여 콘크리트와 모르타 시험편을 센서를 적용한 것과 적용하지 않은 것으로 구분하였다.

표 1. 실험인자 및 수준

	W/C (%)	CPGFRP sensor	strain gauge	dial gauge	symbol
콘크리트 시험편 (15×15×55cm)	55	有	有	有	CS
		無			C
모르타 시험편 (4×4×16cm)	50	有	有	有	MS
		無			M
수준	1	2	1	1	

3.2 배합설계

본 실험에 사용된 콘크리트와 모르타의 배합은 표 2, 3과 같다.

표 2. 모르타의 배합

W/C (%)	SP (%)	단위용적중량(g/l)		
		W	C	S
50	0.5	315	200	486

표 3. 콘크리트의 배합

W/C (%)	slump (cm)	s/a (%)	air (%)	W (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)		
					C	S	G
55	15	40	2	220	399	657	1023

3.3 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료의 물성은 표 4와 같다.

표 4. 사용재료의 물성

사용재료	물성
보통포틀랜드시멘트	비중 : 3.15 blaine : 3,200 (cm ² /g)
잔골재	비중 : 2.56 흡수율 : 2.29% F.M : 2.48
굵은골재	비중 : 2.69 흡수율 : 1.21% F.M : 6.53 최대치수 : 20mm
고성능AE감수제	폴리카르본산에테르계 SP-8N 비중 : 1.07

3.4 실험방법 및 측정

그림 5는 콘크리트와 모르타의 휨 시험용 공시체의 모식도를 나타낸 것이며, 실험은 휨 강도와 변형율, 처짐, 그리고 CPGFRP의 저항변화율(ΔR/R0)을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 콘크리트와 모르타 시험편의 휨 강도

그림 6은 일반 모르타 및 콘크리트 시험체와 내부에 CPGFRP 센서를 설치한 시험체의 재령 28일 휨 강도를 나타낸 것이다. 실험결과, 모르타의 경우 CPGFRP 센서를 설치한 모든 조건에서 센서를 미설치한 경우에 비하여 평균 10.6%씩 강도가 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 CPGFRP 복합체에 의한 보강효과가 나타났기 때문인 것으로 판단되며, 日本東京大學과 清水(SHIMZ)建設에서 개발된 기존의 CFGFRP과 동일한 콘크리트 보강성능을 가질 것으로 예상된다.

그러나, 콘크리트 시험체의 경우에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이는 센서의 길이가 35cm로서, 시험체 길이 55cm에 비하여 크게 짧아 보강효과가 없었기 때문인 것으로 판단된다.

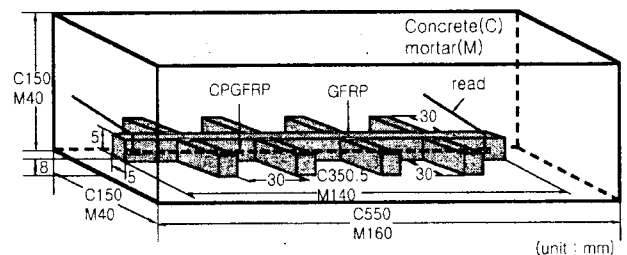


그림 5. CPGFRP 복합체를 적용한 시험편의 모식도

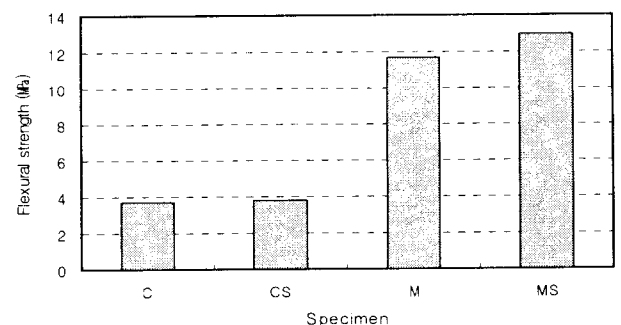


그림 6. 모르타 및 콘크리트 시험체의 휨강도

4.2 시험체의 파괴에 대한 예측성능 평가

그림 7은 모르타의 휨 하중에 대한 응력과 변형, 그리고 처짐과 이에 따른 전기저항을 측정하는 것이다.

CPGFRP 복합체에 의한 저항 변화율은 모르타 시험체의 1

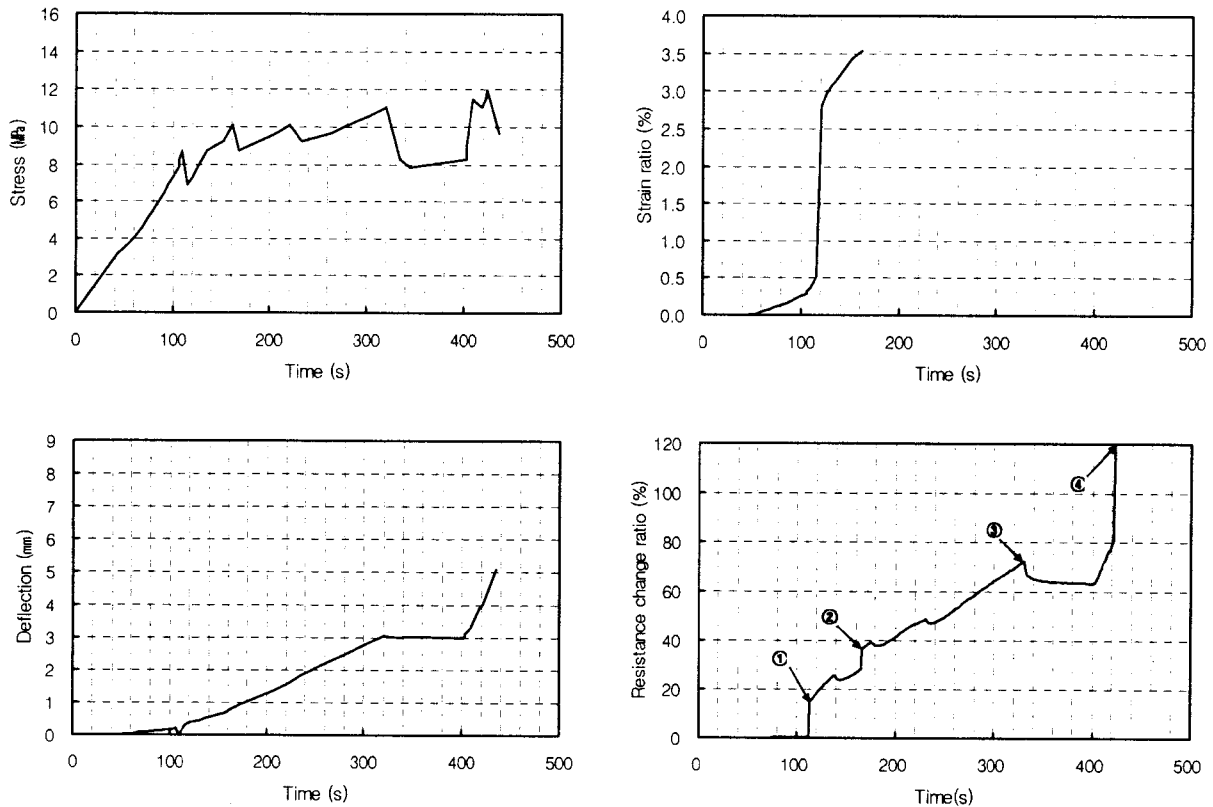


그림 7. CPGFRP를 적용한 모르터 시험체의 시간경과에 따른 응력·변형·처짐·저항변화율 곡선

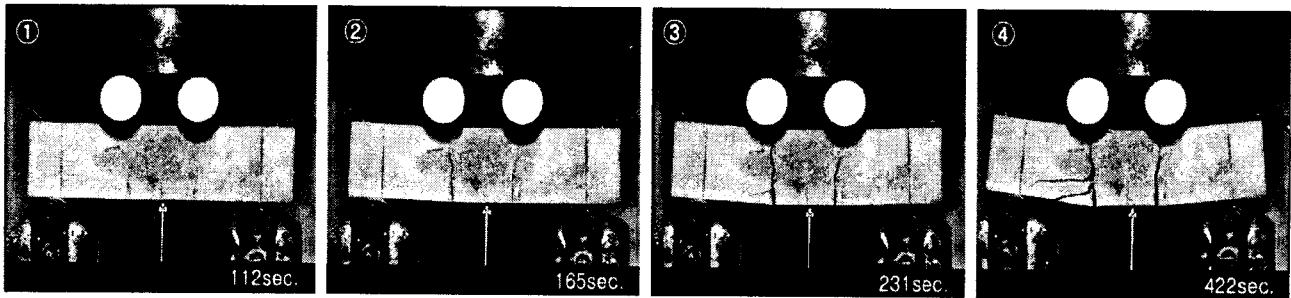


사진 1. 모르터 시험체의 시간에 따른 균열발생 상황

차 미세균열①의 발생과 동시에 약 15%의 불연속적인 저항의 증가를 보였다. 또한 이때의 저항변화율($\Delta R/R_0$)은 모든 실험조건에서 0.3-0.4의 범위로 비교적 균일한 값을 나타내어 제측상의 신뢰성이 큰 것으로 판단된다. 이후 2차 균열②이 발생하는 161초에서는 5초 후인 166초에 약 9%의 저항 변화율의 증가를 보였다. 그 이후에는 응력 곡선과 유사한 거동을 나타내며 지속적인 증가를 보이다 4차 균열④이 발생한 시점인 424초보다 1초 앞서 무한대의 저항 증가를 보이고 CPGFRP 복합체가 센서로서의 기능을 상실하였다. 이는 모르터 시험체의 치명적인 파괴 이전에 미세

균열의 확장으로 CPGFRP 복합체내의 검지부에서도 탄소 분말 사이에 유사한 균열이 발생하여 percolation path가 상당량 분단되었기 때문으로 판단된다.

그림 8에서 나타난 바와 같이 스트레인게이지는 저하중 영역에서 CPGFRP복합체에 비하여 감도가 낮은 것으로 나타났으며, 1차 균열 발생시점에서 급격한 변형율의 증가를 보이며 162초 이후 파괴되어 측정이 불가능하였다.

그림 10과 같이 콘크리트의 경우에서도 변형율과 처짐은 응력곡선과 유사한 거동을 나타내었다. 저항변화율은 응력이 작용함과 거의 동시에 $0.7k\Omega$ 으로 증가하였으며, 그 후에도 하중의 작용에 따라 지속적인 증가를 보였다.

그러나, 전술한 바와 같이 CPGFRP복합체가 철근과 같은 보강효과를 나타내지 못했기 때문에 균열발생에 대한 저항변화를 관찰하기 어려웠다. 향후 철근콘크리트 보의 휨실험을 통하여 초기 균열발생에서 파괴시점까지의 파괴성상과 전기저항에 관한 추가된 연구가 필요하다.

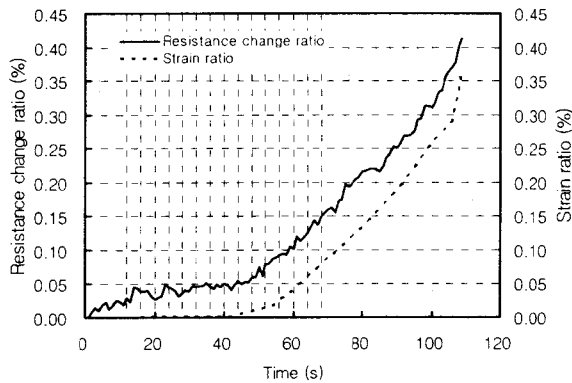


그림 8. MS 시험체의 1차 균열 발생부분

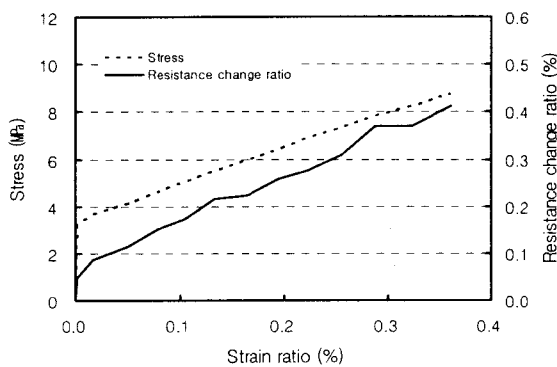


그림 9. 모르타 시험체의 변형에 따른 응력·저항변화를 곡선

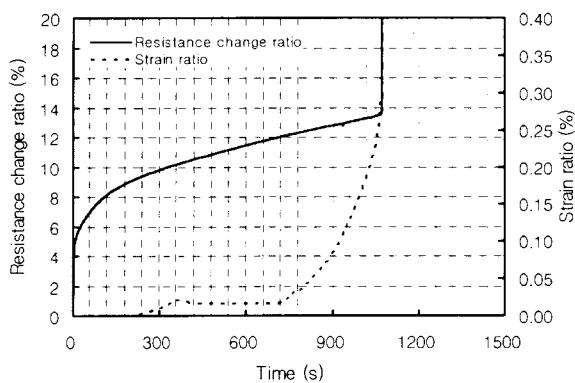
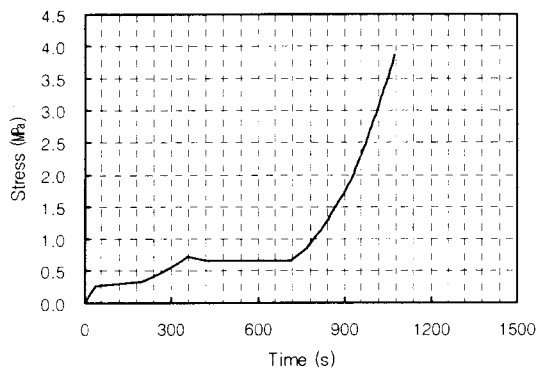


그림 10. CPGFRP를 적용한 콘크리트 시험체의 시간경과에 따른
응력·변형·저항변화를 곡선

5. 결 론

- 1) CPGFRP 복합체는 콘크리트계 재료의 휨 강도를 증가시키는 철근과 같은 보강효과를 나타내었다.
- 2) CPGFRP 복합체의 저항 변화율은 시간에 따른 시험체의 변형과 아주 유사하게 나타나 구조물의 파괴에 대한 계측의 감도 및 신뢰성이 우수한 것으로 나타났다.
- 3) CPGFRP 복합체는 시험체의 미세균열 발생시 불연속적인 저항변화율의 증가를 나타내었다. 특히 저하중영역에서는 스트레인 게이지에 비하여 우수한 감도를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Soon-Gi Shin, Self-Diagnosis of GFRP Composites Containing Carbon Powder and Fiber as Electrically Conductive Phases, METALS AND MATERIALS International, Vol. 7, No. 6, 2002
2. 박석균, 유지 관리 모니터링 기술의 현황과 발전 방향, 콘크리트학회지, 제 12권 3호 2000. 5
3. 김기수, 광성유 센서를 이용한 유지 관리 모니터링 기술, 콘크리트학회지, 제 12권 5호 2000. 5
4. 이종열, 인텔리전트 재료를 이용한 유지 관리 모니터링 기술, 콘크리트학회지, 제 12권 3호 2000. 5
5. 배인환, 전문가 시스템을 이용한 유지관리 모니터링 기술, 콘크리트학회지, 제 12권 3호 2000.5
6. 신민생 외 1, "기초 계측공학", 원창출판사, 2002
7. 사단법인 한국콘크리트학회, "최신 콘크리트공학", 기문당, 1992
8. 정재동, "콘크리트 콘크리트공학", 선성각, 1998