

하이브리드 FRP보강근 콘크리트의 손상 자가진단

Self-Diagnosis of Damage in Hybrid FRP Reinforced Concrete

박석균* 김대훈**

Park, Seok-Kyun Kim, Dae-Hoon

ABSTRACT

For giving self-diagnosing capability, a method based on monitoring the changes in the electrical resistance of hybrid FRP reinforced concrete has been tested. Then after examining change in the value of electrical resistance of carbon fiber in CFRP, CFGFRP, CFAFRP and e.t.c., before and after the occurrence of cracks and fracture in hybrid FRP reinforced concrete at each flexural weight-stage, the correlations of each factors were analyzed. As the results, it is clarified that when the carbon fiber tows fracture, the electrical resistance of it increase largely, and afterwards hybrid FRP composites can be resist the load due to the presence of the reinforced fiber, for example, glass fiber or aramid fiber tows.

1. 서론

사회기반시설을 구축하는 다양한 토목분야의 주요구조부재에 스마트구조물과 같은 지적구조시스템을 도입하려는 연구가 최근 크게 각광받고 있다. 이러한 시스템이 실현될 수 있다면, 각종 재해에 대해 생명과 재산을 보전할 수 있어 안전성 향상에 기여함은 물론, 내구성이나 노후화 점검에도 유효하여 구조물의 장수명화에 따른 라이프사이클코스트의 저감으로도 이어질 수 있다. 건설분야에서는 소위 파괴예지센서로서 건전성 모니터링(health monitoring)의 기능만이라도 실용화 될 수 있다면, 이러한 효과는 크게 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

이와 같은 목적을 위한 연구로서 전기저항 측정이 가능한 CF(탄소섬유)를 이용하여 CFGFRP(Carbon Fiber Glass Fiber Reinforced Plastic), CFAFRP(Carbon Fiber Aramid Fiber Reinforced Plastic) 등의 다양한 하이브리드형 로드를 제작하고, CF의 첨가 체적비와 그 밖의 보강섬유재료 변화에 따른 전기적 특성과 역학적 특성 변화로부터 콘크리트 파괴 자가진단 기능에 대하여 검토하였다. 또한, 참고로 탄소섬유보강시트에 대해서도 센서로서의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 탄소섬유 복합재료의 자가진단 센서로서의 작용원리

탄소섬유강화플라스틱(CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic))에는 도전성이 있고, 그 도전특성을 이용해 소재내부의 손상상태를 파악하는 것이 가능하다. 그런데, 탄소섬유는 큰 강도를 갖지만, 무른 특성을 갖기 때문에 파단개시부터 파단에 이르기까지의 여유가 작은 결점이 있다. 따라서 탄소섬유만으로 보강한 복합재인 CFRP에 센서기능을 갖게 하는 것은 매우 어려운 문제를 수반한다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 개발된 것이 탄소섬유유리섬유강화플라스틱(CFGFRP)이다. 즉, CFGFRP재료는 그 구성재료의 탄소섬유단은 도전성 재료이고, 또 탄소섬유의 한계신장률이 유리섬유보다 작기 때문에 이 복합재료를 서서히 인장가력하면 그 신장에 따라 탄소섬유가 조금씩 파단하기 시작해 탄소섬유단

*정회원, 대전대학교 공과대학 토목공학과 부교수

**정회원, 대전대학교 대학원 토목공학과 석사과정

의 전기저항치를 계측하고 있으면 서서히 변형률에 따라 저항치가 증가된다. 더욱 하중을 증가시키면 CFGFRP재는 파단되지 않지만, 탄소섬유는 완전히 파단되어 전기저항치는 무한대로 큰 값이 된다. 이 단계에서 하중을 제거하면 CFGFRP재는 거의 원래대로 복원되지만, 파단된 탄소섬유는 원래상태로는 돌아가지 않아 전기저항치가 원래상태보다 큰 값을 나타낸다. 이로부터 사전에 하중-변형률(또는 처짐)-전기저항의 잔유치 관계를 조사해 두면 전기저항 잔유치로부터 부재에 작용한 최대하중 혹은 구조부재의 최대변형률을 무응력상태에서 추정할 수 있게 된다.

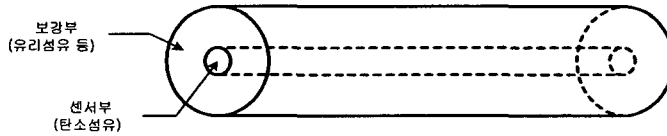


그림 1. 자가진단형 CFGFRP 보강근의 제조 형상

따라서, 전기저항치가 무한대로 될 때를 모니터링 하면 CFGFRP가 파괴되기 전에 파괴를 예측할 수 있다. 탄소섬유의 한계신장률을 여러 가지 다르게 함으로서 파괴에지의 감도도 조정할 수도 있다. 그림 1에 자가진단형 CFGFRP 보강근의 제조 형상을 나타내었다.

3. 실험조건

콘크리트의 배합은 설계기준강도 28N/mm^2 의 보통 콘크리트 배합표에 의해 배합하였으며, KS F 2403과 KS F 2407에 따라 압축강도용 시험체과 휨강도용 시험체를 각각 제작하였다. 콘크리트의 배합조건은 표 1과 같다.

표 1. 콘크리트 배합조건

Gmax. (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	s/a (%)	단위재료량(kg/m ³)				AE제 (g/m ³)
					W	C	S	G	
20mm	10cm	5%	44%	42%	185	439	671	962	132

상기 콘크리트 시험체에 대하여 보강근으로 이용한 각종 FRP 로드 특성 표 2에 나타내었다. FRP 로드형 섬유는 장섬유 다발묶음상이다. 전체 실험은 크게 3가지 조건, 즉 CFRP 단독, CFAFRP(Carbon Fiber Aramid Fiber Reinforced Plastic), CFGFRP(Carbon Fiber Glass Fiber Reinforced Plastic)로 대별하여 실시하였다. 실험에는 모두 리브가 부착된 이형 로드를 사용하였다. 또한, 부속실험으로서, 무보강근의 동일 시험체의 하부면에 탄소섬유시트(CFS)로 보강한 시험체에 대해서도 센서로서의 가능성을 검토하였다. 그림 2에는 이들 재료를 콘크리트 보강근으로 제작한 시험체의 휨 파괴 실험과 측정개요도를 나타내었다. 측정은 콘크리트의 처짐과 휨 인장변형률-CF의 전기저항-하중의 관계를 얻기 위해 LVDT, 스트레인게이지와 전기저항 측정기, 로드셀을 이용하였다. 사진 1은 본 연구에서 제작 사용한 CFGFRP로드로서 이형 리브를 부착하기 전의 모습을 나타낸 것이다.

표 2. 본 실험에 이용한 각종 FRP 로드 보강근의 특성

섬유 종류		특성치		로드직경 (mm)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	전기저항 (Ω)	시험체 No.
로드	CFRP (CF 100 Vol.%)		-	12	4000	2.0×10^5	10.8	C1~C3
	CFAFRP (CF 18.4 Vol.%)	AFRP	11	3000	1.16×10^5	9.7	A1~A3	
	CFGFRP (CF 3.3 Vol.%)	GFRP	11	2500	0.437×10^5	6.0	CG1~CG2	
시트	CFS		-	-	3500	2.35×10^5	30k	CFS1~CFS2

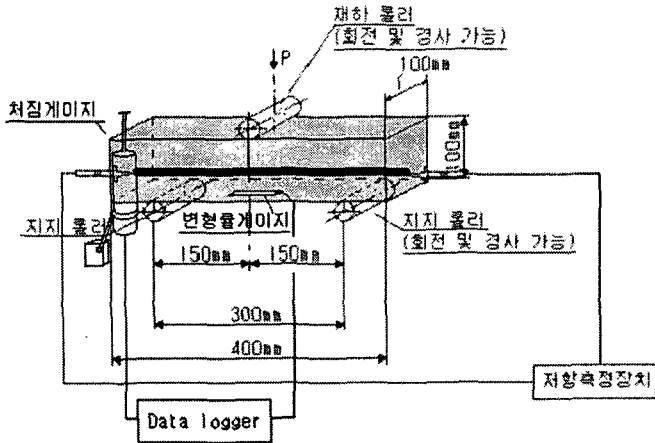


그림 2. 시험체의 치수와 실험방법 개요 (단위:mm)

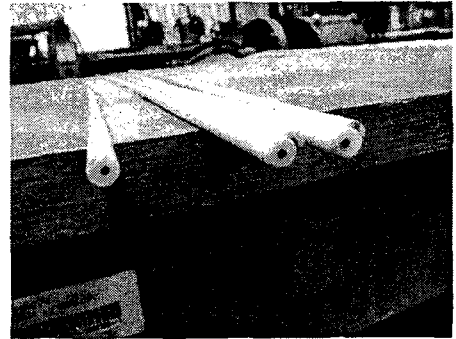


사진 1. 제작된 환형 CFRGFRP 로드 (리브 미부착 상태)

4. 결과 및 고찰

상기에서 언급한 4가지 조건 중에서 로드조건에 대해서 실험을 통해 얻은 인장재하 시의 대표적인 변형률, 처짐-전기저항(증가율)-하중의 관계를 그림 2~그림 4에 나타내었다. 그림에서 점선은 하중변화를 나타낸다.

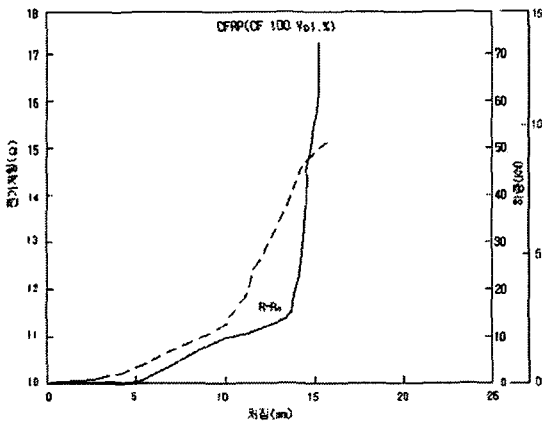


그림 2 CFRP (CF 100 Vol.%) 콘크리트

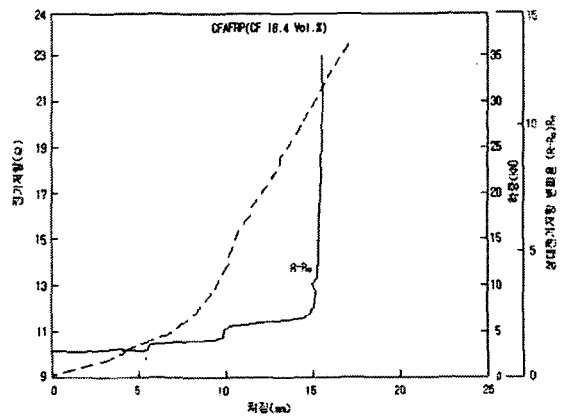


그림 3. CFAFRP (CF 18.4 Vol.%) 콘크리트

한편, 그림 5~8은 각 FRP보강 종류에 따른 재하하중별 콘크리트 시험체의 처짐, 휨인장변형률, 콘크리트 내부에 삽입된 또는 외부에 부착된 CF의 전기저항변화를 나타낸 것이다.

이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 탄소섬유(CF)의 평균과단 신장위치에서 CF단이 대량으로 파괴되는 때에 하중변화는 미소함에 비해 전기저항은 대단히 크게 변화하고 있다. 그 후는 CF단보다 큰 극한과단신장을 갖는 GF단, AF단이 하중을 받아내고 있다고 추측할 수 있다. 전기저항이 수직에 가깝게 급격히 변하는 위치에서는 이미 CF단이 파괴된 것을 의미하지만, 콘크리트 시험체가 파괴되기까지는 CFRP단독의 경우이외에는 하중증가곡선이 계속 유지되고 있어, 이 추측은 옳은 것으로 판단된다. 처짐과 하중값의 관계도에서도 역시 CFRP의 경우가 처짐이 작은 상태에서 파괴에 이르고 있어, 취성에 가까운 파괴경향을 나타내고 있다. 하이브리드형 보강근 사용의 경우에는 파괴는 먼저 콘크리트의 하연에 휨균열이 발생하고 있지만 (CFRP단독 경우도 동일), CF, AFRP, GFRP 순으로 발생하였

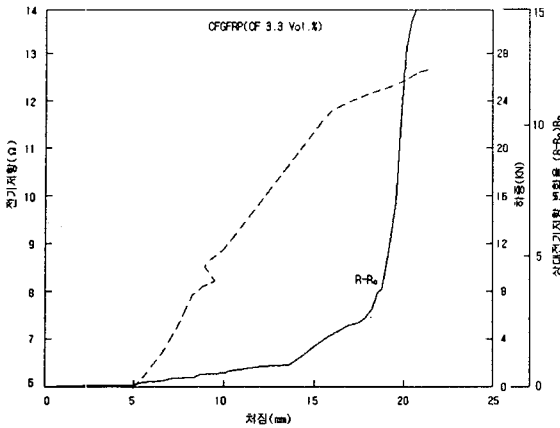


그림 4. CCFGFRP (CF 3.3 Vol.%) 콘크리트

다. 이에 따라, CF가 파단하는 것으로부터 파괴를 예측하면서, AFRP, GFRP의 강도에 따라 어느 정도의 기간은 구조물의 파괴를 방호할 수 있을 것으로 사료된다. CF의 파단 후는 파단신장률이 큰 GFRP나 AFRP가 기계적 강도를 유지하고 있기 때문에 이 시점에서는 시험체 자신의 파괴는 일어나지 않기 때문이다.

또한, 그림 4에서와 같이, 평균파단 신장위치는 큰 파단신장의 CF단을 이용한 경우에 평균파단 신장위치는 CF단의 극한파단 신장의 크기에도 의존하게 할 수 있어, 치명적 파괴로의 경고위치를 CF단의 파단신장특성에 따라 쉽게 제어할 수 있다. 따라서 보다 저 파괴신장의 도전섬유를 이용하면 더욱 초기 변형률단계로부터 치명적 파괴방지에 관한 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

한편, CF시트를 사용하는 경우에는 시트의 배치상태나 형태에 따라 다소 차이를 나타낼 수 있는 문제가 노출되었으나, 이들 문제점을 개선할 경우, 로드를 사용한 경우와 같은 유사한 결과가 얻어져(그림 8 참조), 이 역시 구조체의 파괴정보 예측 센서로서의 가능성이 있음을 알 수 있었다.

한편, 이상의 결과는 상기 2.항에서 설명한 작용원리와 거의 같은 양상으로 나타나, 본 연구에서 사용한 하이브리드 FRP보강근은 자가진단 센서로서 충분히 사용이 가능하다고 판단된다.

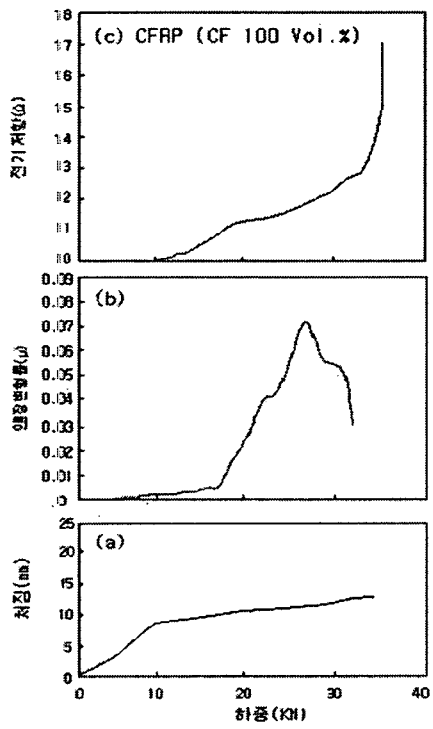


그림 5. CFRP(CF100Vol.%) 콘크리트

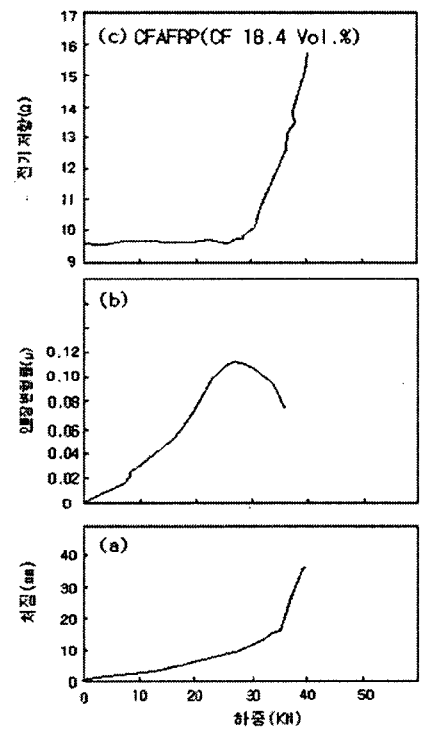


그림 6. CFAFRP(CF18.4Vol.%) 콘크리트

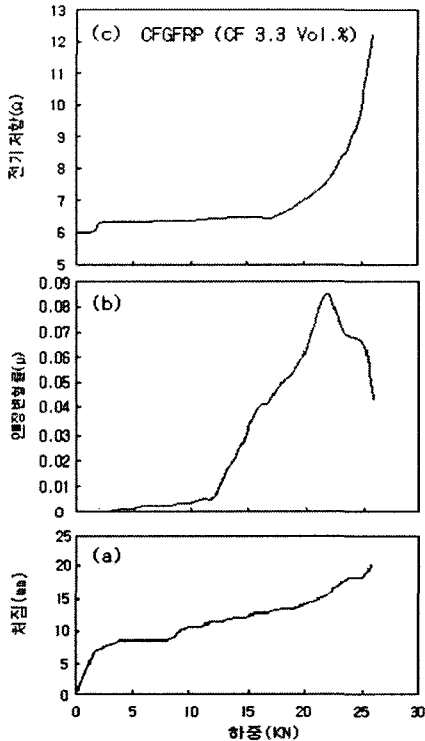


그림 7. CF3.3Vol.%CFRP콘크리트

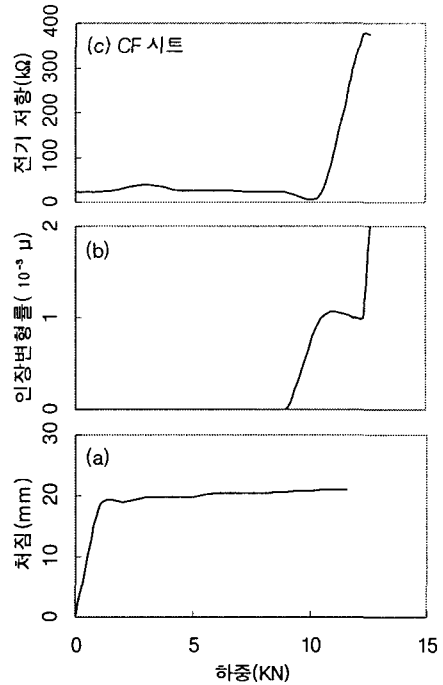


그림 8. CF시트 콘크리트

5. 결론

본 연구에서 사용한 하이브리드 FRP보강근과 같이 CF를 파괴정보 센서로서 사용하고, 이보다 연성효과를 갖는 GFRP, AFRP 등을 보강재료로 사용하면 그 첨가비의 조정과, CF의 파단신장률의 선정에 따라 파괴하중까지 충분한 기계적 여유를 부여할 수 있기 때문에, 파괴정보예측을 위한 자가진단 센서로서의 역할을 기대할 수 있다. 따라서 안정된 구조물의 유지관리 모니터링에 유효하게 이용할 수 있다고 판단된다. 또한, CF보강시트에 대해서도 보다 전문화된 사용방법을 강구할 경우, 이 역시 보강과 센서재료로서의 양자 역할이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 산학연 공동연구개발사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다. 또한, FRP로드 제작에 협조하여 주신 (주)동원건설에 감사드립니다.

참고문헌

1. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, (1994), CF3.3Vol.%CFRP筋によるコンクリート構造材の破壊検知, セメント・コンクリート論文集, No.48.
2. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, (1995), 炭素・ガラス複合繊維補強筋コンクリートにおける損傷の自己診断, セメント・コンクリートNo.576.