



## 콘크리트 파괴 자가진단을 위한 하이브리드 FRP 보강근의 적용 특성

박석균<sup>1)\*</sup> · 김대훈<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>대전대학교 토목공학과

## Applicability of Hybrid FRP Reinforcing Bar for Self-diagnosis of Concrete Fracture

Seok-Kyun Park<sup>1)</sup> and Dae-Hoon Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

**ABSTRACT** For investigating self-diagnosis applicability, a method based on monitoring the changes in the electrical resistance of hybrid FRP (having electrical property) reinforced concrete has been tested. Then after examining change in the value of electrical resistance of carbon fiber in CFRP (non-hybrid type), CFGFRP and CFAFRP (hybrid type) before and after the occurrence of cracks and fracture in non-hybrid and hybrid FRP reinforced concrete at each flexural weight-stage, the correlations of each factors (the changes in electrical resistance and load as a function of strain, deflection) 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. Therefore, it can be recognized that hybrid FRP (including carbon fiber) reinforcing bar could be applied for self-diagnosis of fracture in reinforced FRP concrete fracture.

**Keywords** hybrid FRP, CFRP, CFGFRP, AFGFRP, self-diagnosis

### 1. 서 론

최근, 구조물의 효과적인 유지관리와 유효이용에 대한 관심이 높아지면서, 새로운 설계방식과 재료 및 공법 등의 개발이 이루어지고 있다. 그러나 재료파괴를 자기 스스로가 진단 예측하는 것이 가능하게 된다면, 한층 유효하게 대처할 수 있다. 재료의 파괴측정에 대해서는 변형률계이지와 변위계가 이용되어 왔지만, 콘크리트 재료의 경우에는 균열전파의 형태에 따라 측정치가 크게 영향을 받기 때문에, 재현성이 나쁘고 초기조건의 설정이 필요하여 하중재하 후의 불연속 측정이 곤란하다. 큰 시험부재에서는 파괴위치와 측정위치의 일치가 어려워 다수의 센서사용에서는 계측오류의 원인이나 비용이 높아지는 등 종래 방법에서는 근본적인 해결에 이르지 못하였다. 따라서 구조물에 대한 새로운 파괴예측 센서의 개발이 요구되고 있다<sup>5)</sup>.

콘크리트 구조물 자체가 파괴 예측 기능을 가지면 돌발적인 파괴사고 감소에 의한 인명과 손상의 경감 및 재료의 절약에 의한 환경보전이 가능해진다. 간편하고 저렴한 방법으로 파괴예측의 시간적 여유가 충분히 있고,

위험장소나 육안으로 조사할 수 없는 장소에 사용할 수 있는 파괴예측 센서가 개발되면 실용적으로도 큰 효과가 있다. 하나의 유효한 방법으로서 콘크리트 구조물에 사용되고 있는 재료 자체가 파괴를 자가진단 할 수 있는 스마트(또는 인텔리гент재료)화 되는 것이다. 재료자체가 파괴진행을 자가진단 할 수 있으면 복잡한 회로와 다수의 센서 사용은 불필요하게 되고, 강하고 중후한 설계로 해야 할 필요가 없어진다<sup>1,5)</sup>.

본 연구는 이와 같은 목적을 위해 국내에서 제작한 하이브리드 FRP의 일종인 CFGFRP(탄소-유리섬유강화 플라스틱)를 중심으로 다양한 형태의 바(bar)를 콘크리트 보강근으로 이용하여 자가진단 센서로서의 기능과 콘크리트 부재 내에서의 작용특성에 대하여 검토하였다.

### 2. 하이브리드 FRP(CFGFRP) Bar의 자가진단 재료로서의 작용 원리

스마트구조물의 궁극적 목표는 구조재료 그 자체가 센서기능을 갖는 것이다. 탄소 섬유를 인텔리гент센서로서 이용하는 것은 이와 같은 목적에 가장 부합되고 실용적 전망이 가장 밝다.

탄소섬유강화플라스틱(CFRP)에는 도전성이 있고, 그 도전특성을 이용해 그 소재내부의 손상상태를 파악하는

\*Corresponding author E-mail : skpark@dju.ac.kr

Received January 27, 2006, Accepted June 23, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

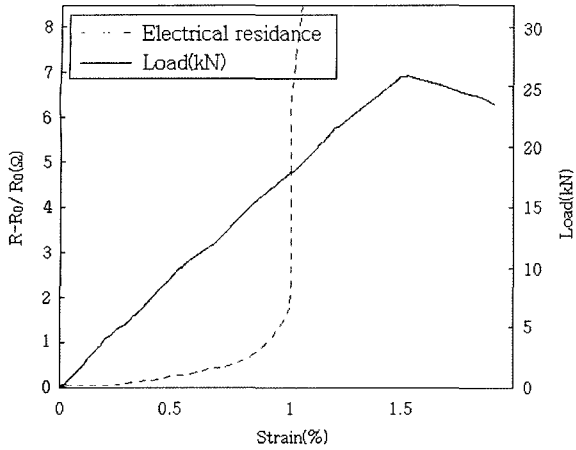


Fig. 1 Relationship between strain, change ratio of electrical resistance((R-R<sub>0</sub>)/R<sub>0</sub>) and load of CFGFRP bar

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 탄소-유리섬유강화플라스틱(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 시작한다. 이 과정에서 탄소섬유단의 전기저항치를 계속하고 있으면 서서히 변형률에 따라 저항치가 증가된다. 하중을 더욱 증가시키면 CFGFRP재는 파단되지 않지만, 탄소섬유는 완전히 파단되어 전기저항치는 무한대로 큰 값이 된다<sup>1-5)</sup>.

Fig. 1에는 CFGFRP재에 인장 하중을 가했을 때 이와 같은 양상을 실험 예를 통해 나타낸 것이다. 집선으로 나타낸 하중에 따른 탄소섬유단의 전기저항변화에서 보면, 하중에 따라 탄소섬유단의 전기저항치가 증가하기 시작해 파괴단계에서는 탄소섬유단이 먼저 파괴되어 무한대에 가까운 전기저항이 얻어지지만, 실선으로 나타낸 하중에 따른 변형률선도에서는 CFGFRP 복합재가 아직 파괴되지 않은 유리섬유단의 역할로 더욱 하중을 받을 수 있어 극한하중까지는 아직 파괴에 여유가 있음을 알 수 있다. 이 단계에서 하중을 제거하면 CFGFRP재는 거의 원래대로 복원되지만, 파단된 탄소섬유는 원래상태로는 돌아가지 않아 전기저항치가 원래상태보다 큰 값을 나타낸다. 이로부터 사전에 하중-변형률-전기저항의 잔유치 관계를 조사해 두면 전기저항잔유치로부터 부재에 작용한 최대하중 혹은 구조부재의 최대변형률을 무응력상태에서 추정할 수 있게 된다.

Table 1 Concrete mix proportion

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				Add.mixture AE (g/m <sup>3</sup> )
					W	C	S	G	
20mm	100mm	5%	44%	42%	185	439	671	962	132

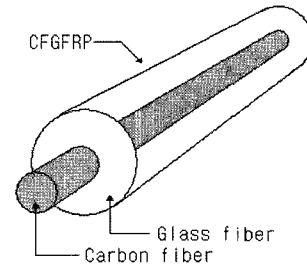


Fig. 2 Typical shape of CFGFRP bar for self-diagnosis

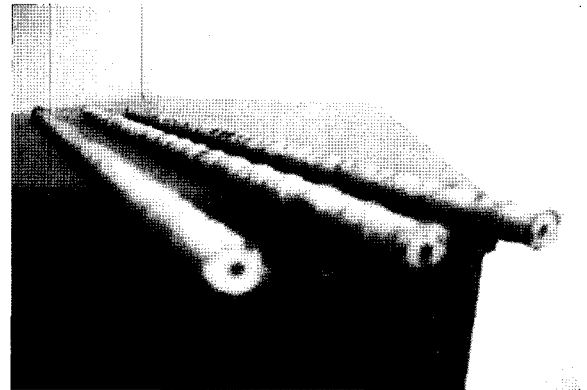


Fig. 3 Manufactured CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) bar

또한, 무엇보다도 전기저항치가 변화하기 시작할 때부터 무한대로 될 때를 신호로 보고하도록 하면 CFGFRP가 파괴되기 전에 파괴를 예지할 수 있다. 탄소섬유의 한계신장률을 여러 가지 다르게 함으로서 파괴예지의 감도를 조정할 수 있다. 이들 재료는 이미 실용화가 도모되고 있고, 제일 많이 이용되고 있는 것은 은행의 현금창구 등의 경비방범용 인텔리전트기능으로서 금고실 벽과 천장, 바닥에 사용되고 있다<sup>5)</sup>.

이러한 자가진단 기능을 갖는 하이브리드 FRP bar의 형상은 Fig. 2과 같이 제작하였으며, Fig. 3은 제작된 탄소-유리섬유강화플라스틱(CFGFRP)의 예이다. 탄소섬유와 유리섬유의 적정 함유율은 다음 실험을 통해 정하였다.

또한, 본 연구에서는 기존 연구<sup>1-6)</sup>에서와는 달리, 센서기능을 갖는 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)의 체적비(Vol.%)를 변화시키고, 하이브리드 재료로서 유리섬유 강화플라스틱(GFRP)뿐만 아니라 아라미드섬유강화플라스틱(AFRP)을 추가로 실험 하였다.

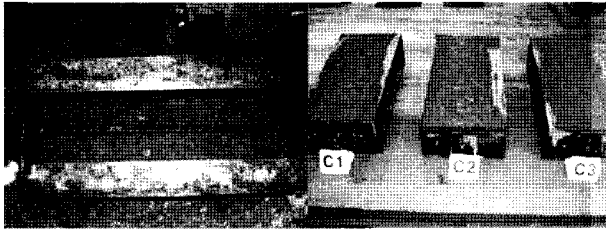
### 3. 실험 방법

#### 3.1 시험체의 설계

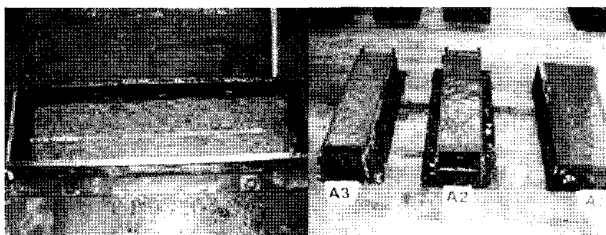
콘크리트의 배합은 설계기준강도 28N/mm<sup>2</sup>의 보통 콘

**Table 2** Properties of FRP bar materials

Items Kind of Fiber		Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic coefficient (MPa)	Electrical resistance ( $\Omega$ )	Specimen No.	
Bar	CFRP (CF 100 Vol.%)	12	4000	$2 \times 10^5$	10.78	C1~C3	
	Hybrid type	CFAFRP (CF 18.4 Vol.%)	10.5	3000	$1.16 \times 10^5$	9.71	A1~A3
		CFGFRP (CF 3.3 Vol.%)	11	2000	$0.437 \times 10^5$	6.00	CG1~CG2



(a) CFRP (CF 100 Vol.%)



(b) CFAFRP (CF 18.4 Vol.%)



(c) CFGFRP (CF 3.3 Vol.%)

**Fig. 4** Specimens of FRP bar reinforced concrete

크리트 배합표에 의해 배합하였으며, KS F 2403과 KS F 2407에 따라 압축강도용 시편과 휨강도용 시편을 각각 제작하였다. 콘크리트의 배합조건은 Table 1과 같다.

본 연구의 실험에 이용한 각종 FRP bar형 보강근의 특성을 Table 2에 나타내었다. FRP bar형 섬유는 장섬유 다발 묶음상이다. 전체 실험은 탄소섬유강화프라스틱(CFRP) 단독 보강근과 탄소-유리섬유강화프라스틱(CFGFRP), 아라미드-유리섬유강화프라스틱(AFGFRP) 하이브리드 보강근의 3가지 조건으로 대별하여 실시하였다.

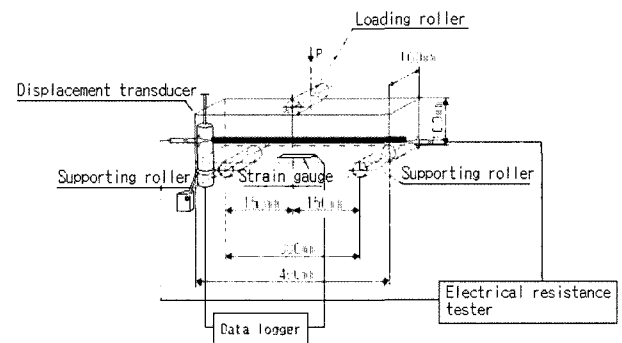
먼저, 파괴정보센서역할을 담당하는 CF(탄소섬유)는 Vol.%별로 제작하여 타 섬유로 보강하지 않은 단순 CFRP(섬유질 이형리브 부분 제외 CF 100 Vol.%)만을 대상으로 한 경우와, AF(아라미드섬유)로 보강된 CF 함유 Vol.%가 18.4, GF(유리섬유)로 보강된 CF 함유 Vol.%가 3.3인 2종류의 하이브리드 FRP조건을 선정하였다. 이들 3종류의 FRP는 모두 섬유질의 이형 리브를 바(bar) 표면에 가공 부착하여 콘크리트와의 부착을 양호하게 하였다.

CF는 범용 저저항률 섬유이면서 저항측정 중에 주위 온도의 영향이 없는 섬유이다. 보호역할의 GF(유리섬유)와 AF(아라미드섬유)는 복합섬유로드가 CF의 파단에도 최종과피 되지 않도록 CF보다 훨씬 큰 파단신장과 작은 종탄성을 특성을 갖는 섬유로서, CF보다는 파단특성(취성 파괴특성)이 양호하다고 고려하여 실험에 반영하였다. Fig. 4에는 본 실험에 사용한 각종 FRP bar 보강근을 사용하여 시험체를 제작하는 장면을 나타내었다.

### 3.2 측정개요

콘크리트 시험체는 중앙점 재하법에 따른 콘크리트의 휨강도 시험용 공시체(KS F 2403)로서, 그 크기는 단면적  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 길이  $400 \text{ mm}$ 이고, 휨 파괴시험은 UTM시험기를 이용하였다. 휨 파괴 시험체의 치수와 측정방법을 Fig. 5에 나타내었고, 측정 장면은 Fig. 6와 같다. 치짐과 휨 인장변형률-전기저항-하중의 관계를 얻기 위해 변위 변환계(Displacement transducer), 스트레인게이지와 전기저항 측정기, 로드셀을 이용하였다.

휨 하중 재하시 콘크리트 시험체의 하단부 인장변형률과 치짐을 측정하기 위해 각각 변위(치짐) 변환 센서



**Fig. 5** Layout of flexural fracture test of specimen



**Fig. 6** Setting of test specimen

(Displacement transducer), 스트레인게이지를 설치하였다. 또한, 전기저항 측정은 직류 2단자법을 이용하고, FRP 보강근 바(bar)를 콘크리트 시험체 바깥으로 나오게 배근한 후, CF재료의 양단에 전극을 도전성 접착제로 접착한 시험체에 1 mA의 일정전류를 통전한 상태에서, 하중단계별 재하 시의 전압변화를 전기저항변화로써 컴퓨터 레코더에 기록해서 구하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 CFRP (CF 100 Vol.%)

먼저, 휨 파괴시험용 콘크리트 시험체의 사용 보강근이 CFRP (CF 100 Vol.%) (초기전기저항치  $R_0$ : 10.78  $\Omega$ )인 경우에 대해서 휨 시험으로 하중을 재하 한 경우의 재하하중별 처짐과 휨 인장변형률, 전기저항 변화를 각각 Fig. 7에 나타내었다.

한편, Fig. 8에는 같은 조건 시험체에 대해서 처짐 및 하중변화에 따른 전기저항변화 양상을 나타내었다. 여기서, 점선은 하중변화를 나타낸다.

Figs. 7과 8에서와 같이 CFRP(CF 100 Vol.%) 보강근

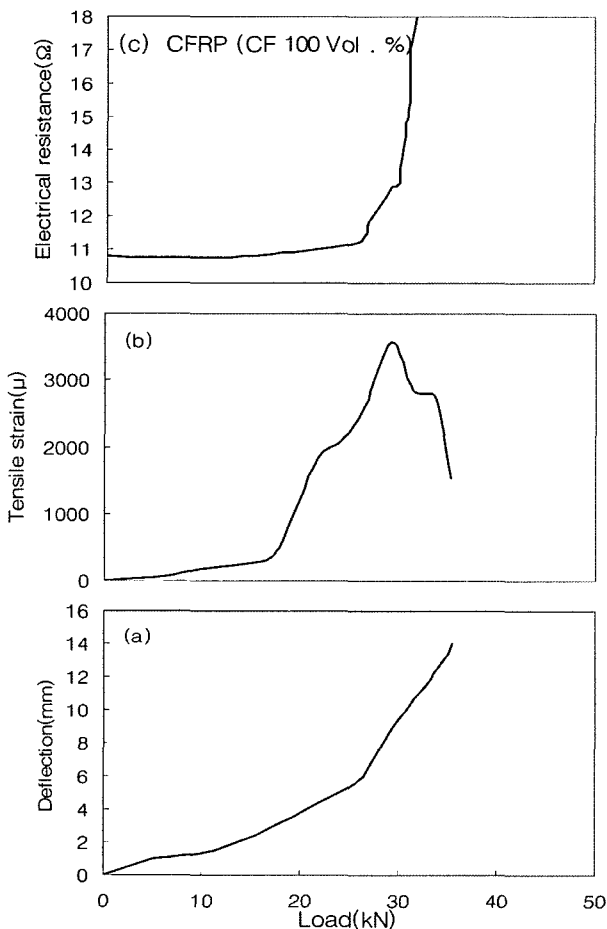


Fig. 7 Changes in electrical resistance, flexural tensile strain & deflection as a function of load for CFRP (CF 100 Vol. reinforced concrete specimen

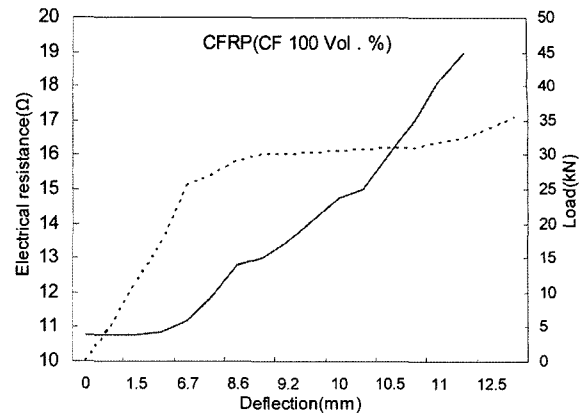


Fig. 8 Changes in electrical resistance as a function of deflection and load(dotted line) for CFRP (CF 100 Vol.%) reinforced concrete specimen

콘크리트 휨강도 시험시 전기저항값을 측정하여 얻은 데이터가 처짐, 인장변형률과 어떠한 관계가 있는지 측정한 결과, 하중의 증가에 따라 처짐은 서서히 증가하다가 하중 35.4kN이 가해졌을 때 14.8mm의 값을 나타내며 파괴되었다. 전기저항(초기전기저항값 : 10.78 $\Omega$ )은 하중이 가해져 처짐이 늘어나면서 서서히 증가하다가 6.7mm를 넘어서면서 급증하기 시작하여 30kN에서는 거의 수직을 나타내며 증가하였다.

하중-전기저항-인장변형률의 관계를 측정한 결과, 하중이 증가함에 따라 인장변형률은 서서히 증가하다가 하중이 29.3kN을 지나면서 감소하는 경향을 보였다. 이때 인장변형률은 3575 $\mu$  이다. 전기저항-인장변형률도 비슷한 양상을 나타내었다.

##### 4.2 CFAFRP (CF 18.4 Vol.%)

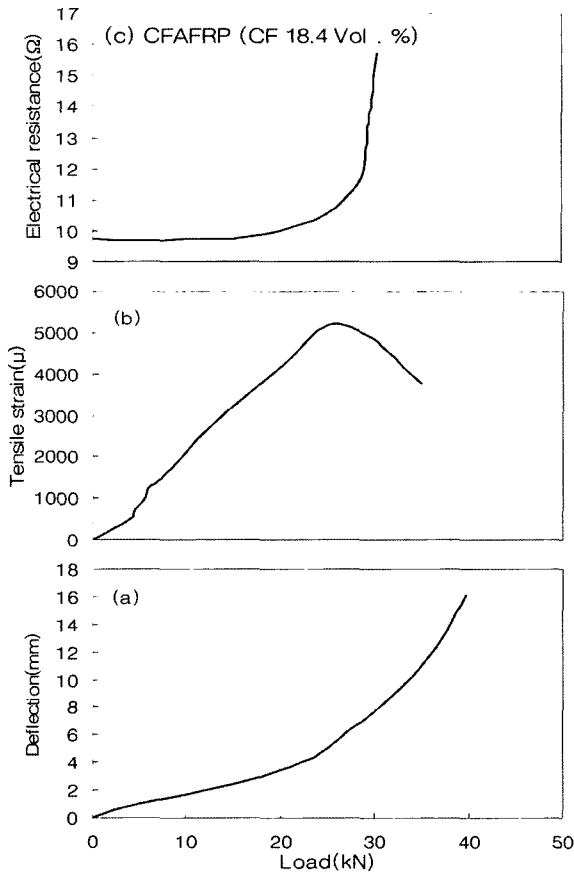
다음은 휨 파괴시험용 콘크리트 시험체의 사용 보강근이 CFAFRP (CF 18.4 Vol.%) (초기전기저항치  $R_0$ : 9.71 $\Omega$ )인 경우에 대해서 휨 시험으로 하중을 재하 한 경우의 재하하중별 처짐과 휨 인장변형률, 전기저항 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

한편, Fig. 10에는 같은 조건 시험체에 대해서 처짐과 하중변화에 따른 전기저항변화 양상을 나타내었다. 여기서, 점선은 하중 변화를 나타낸다.

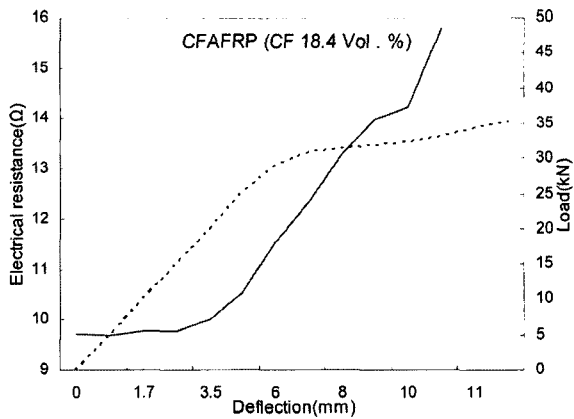
Figs. 9와 10에서와 같이 CFAFRP (CF 18.4 Vol.%) 보강근 콘크리트 휨강도 시험시 전기저항값을 측정하여 얻은 데이터가 처짐, 인장변형률과 어떠한 관계가 있는지 측정한 결과, 하중의 증가에 따라 비슷한 비율로 증가하다가 처짐이 16.1mm일 때 39.6 kN을 나타내며 파괴되었다.

전기저항은 하중의 증가에 따라 처짐이 증가하면서 처짐 3.5mm 정도까지 작은 비율로 증가하다가 3.5mm에서 직선적분포를 나타내며 파괴하중 39.6kN에서 최대값을 나타내었다.

하중-전기저항-인장변형률의 관계를 측정한 결과, 하중



**Fig. 9** Changes in electrical resistance, flexural tensile strain and deflection as a function of load for CFAFRP (CF 18.4 Vol.%) reinforced concrete specimen



**Fig. 10** Changes in electrical resistance as a function of deflection and load (dotted line) for CFAFRP (CF 18.4 Vol.%) reinforced concrete specimen

의 증가에 따라 인장변형률도 서서히 증가하다가 하중 29.3kN 정도에서 최대값을 나타내면서 점점 감소하는 경향을 보였다. 전기저항-인장변형률도 전기저항이 서서히 증가하는 하중 29.3kN 부근까지 인장변형률은 증가하고 하중이 점점 더 올라가면서 전기저항은 최대값을 나타내며 올라간 반면 인장변형률은 오히려 감소되는 양상을 나타내었다.

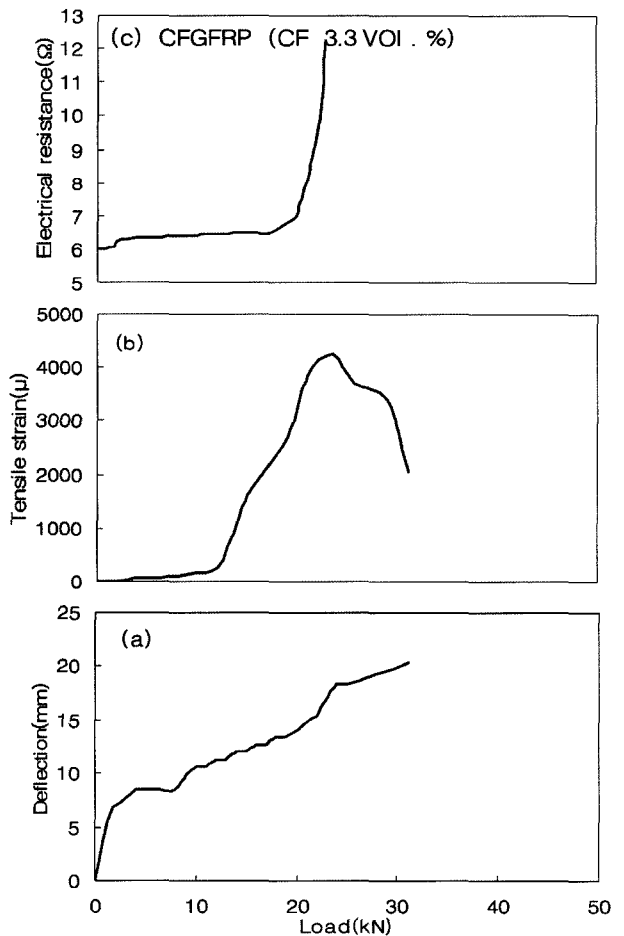
### 4.3 CFGFRP (CF 3.3 Vol.%)

다음은 휨 파괴시험용 콘크리트 시험체의 사용 보강근이 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) (초기전기저항치  $R_0$ :6.00Ω)인 경우에 대해서 휨 시험으로 하중을 재하 한 경우의 재하하중별 처짐과 휨 인장변형률, 전기저항 변화를 각각 Fig. 11에 나타내었다.

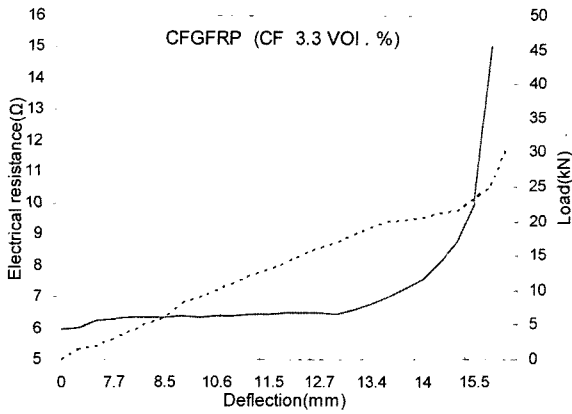
한편, Fig. 12에는 같은 조건 시험체에 대해서 처짐과 하중변화에 따른 전기저항변화 양상을 나타내었다. 여기서, 점선은 하중변화를 나타낸다.

Figs. 11과 12에서와 같이 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%)보강근 콘크리트 휨 강도 시험 시 전기저항 값을 측정하여 얻은 데이터가 처짐, 인장변형률과 어떠한 관계가 있는지 측정한 결과, 하중의 증가에 따라 처짐은 서서히 증가하다가 하중 31kN이 가해졌을 때 20.4mm의 값을 나타내며 파괴되었다. 전기저항(초기전기저항값 : 6.0Ω)은 하중이 가해져 처짐이 늘어나면서 서서히 증가하다가 13mm를 넘어서면서 급증하기 시작해 26kN에서는 410.63Ω까지 도달하였다.

하중-전기저항-인장변형률의 관계를 측정한 결과, 하중이 증가함에 따라 인장변형률은 서서히 증가하다가 하중



**Fig. 11** Changes in electrical resistance, flexural tensile strain and deflection as a function of load for CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) reinforced concrete specimen



**Fig. 12** Changes in electrical resistance and relative change ratio electrical resistance as a function of deflection and load(dotted line) for CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) reinforced concrete specimen

이 12kN을 지나면서 급격히 증가하였고, 하중이 23.5kN 일때 4250 $\mu$  최고값을 나타낸 후 다시 하중이 증가함에 도 급격히 떨어졌다. 전기저항-인장변형률도 비슷한 형 상을 나타내었다.

#### 4.4 실험결과 분석

이상의 3조건에 대한 하이브리드형 FRP 보강근의 하 중단계별 센서기능 특성에 대하여 검토해 본 결과, 시험 체에 가해진 응력과 변형률, 처짐과의 관계는 시험체가 파괴되기까지는 거의 직선관계를 나타내지만, 변형률과 CF의 전기저항변화 관계에 대해서는 특징적인 현상을 나 타내었다. 하중의 증가와 더불어 전기저항은 직선적으로 증가해 가지만, 어느 변형률을 초과하면 비직선적으로 전 기저항이 변화하게 됨을 알 수 있다. 이 때, 하중변화는 미소함에 반해 저항변화량은 급격히 변화하는 영역이 존 재함을 알 수 있다<sup>1-5)</sup>. 또한, 파괴는 콘크리트의 인장 측 균열이 진행되면서 CF, AFRP, GFRP, 순으로 발생하였다 . 이에 따라, CF가 파단하는 것으로부터 파괴를 예측하 면서, AFRP, GFRP의 파괴강도 또는 CF의 파괴강도를 조절하면 그 기간동안은 구조물의 파괴를 방호 할 수 있 을 것으로 사료된다. CF의 파단 후는 파단신장률이 큰 GFRP나 AFRP가 기계적 강도를 유지하고 있기 때문에 이 시점에서는 시험체 자신의 파괴는 일어나지 않기 때 문이다.

즉, CF를 파괴정보 센서로서 사용하고, 이보다 연성효 과를 갖는 GFRP나 AFRP를 보강재료로 사용하면 그 첨 가비에 따라 파괴하중까지 충분한 기계적 여유를 부여할 수 있어, 안정된 구조물의 유지관리 모니터링에 유효하 게 응용할 수 있다고 판단된다. 또한, 평균파단 신장 위 치는 큰 파단신장의 CF단을 이용한 경우에 평균파단 신 장위치는 CF단의 파단신장특성에 따라 쉽게 제어할 수 있다. 따라서 보다 저 파단신장의 도전섬유를 이용하면 더욱 초기 변화율 단계로부터 치명적 파괴방지의 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있어 본 단독 CFRP 보강근과

CFGFRP, AFGFRP 하이브리드 FRP 보강근의 자기진단 센서로서의 역할은 충분히 가능할 것으로 전망된다.

한편, 전기저항 변화는 콘크리트의 변위변화상태와 상 관관계를 나타내고 있다. 이는 CFGFRP근 콘크리트에서 기계적 열화를 전기저항변화로서 취급할 수 있음을 의미 한다. 따라서 장기간의 반복재하나 단기간의 지진 등에 의해 피해를 받은 구조물과 같이 외견상으로는 피로정도 를 판별할 수 없는 상황에서 전기저항 측정으로부터 구 조부재의 진단을 비교적 간단하면서 더구나 저비용으로 할 수 있음을 알 수 있다. 다만, GFRP는 고파단 신장을 가지고 있지만, 저탄성으로 금속근과 같은 신뢰성을 가 지고 있지는 못하다. 그러나 고탄성인 CF와 하이브리드 화 함으로써, 금속근에 필적 한 보강근이 될 수 있음을 알 수 있다<sup>4)</sup>.

또한, 하이브리드 FRP에서 CF의 체적비(vol.%)는 본 실험에서 사용한 범위에서는 센서로서의 기능을 충분히 발휘함을 알 수 있었다. 그러나 가급적 CF의 첨가비 (vol.%)를 작게 할수록 파괴정보를 빨리 얻을 수 있을 것 으로 판단되어 민감한 센서로서의 기능이 더욱 향상될 것으로 전망된다.

따라서, 이와 같은 특성을 이용하면, 대단히 큰 외력이 구조물에 가해지는 상황에서 명료하고 간단한 파괴상황 모니터링시스템을 확립하는 것이 가능하다고 판단된다. 또한, 전기저항이 크게 증가하는 변형을 위치는 사용하고 있는 탄소섬유다발의 파단신장률에 의존하게 된다.

특히 탄소섬유다발의 vol.%량의 조절을 통해 전기저항 변화를 유도할 수 있다고 사료되어 보다 긴 인장재의 사 용이 필요한 현장조건 구조물에 대해서도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 보다 확실한 것은 CFRP재료강 도를 변화시켜 현장구조물에 맞는 센서기능을 갖도록 하 면, 다양한 형태의 현장구조물에 대해서도 적용이 가능 하여, 하중단계별 파괴정보 예측에 관한 진단제어가 가 능할 것으로 판단된다. 이와 같은 방법에 의해 구조물의 파괴상황 진단조건을 보다 효과적이고 용이하게 설정하 는 것이 가능할 것으로 기대된다. 또한, CF복합재료의 경우는 알칼리에 대한 높은 내식성을 갖고 있기 때문에, 장기간의 내구성을 고려할 때, 보강근의 부식문제로 인 한 구조물의 파괴 가능성도 낮아질 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

이상에서 연구된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 단일형 및 하이브리드형 FRP 보강근의 특성에 대 하여 검토해 본 결과, 하중의 증가와 더불어 전기 저항은 직선적으로 증가해 가지만, 어느 변형률을 초과하면 비직선적으로 전기저항이 변화하게 됨을 알 수 있다. 이 때, 하중변화는 미소함에 반해 저항 변화량은 급격히 변화하는 영역이 존재함을 알 수 있다. 또한, 파괴는 CF, AFRP, GFRP 순으로 발생

하였다. 이에 따라, 하이브리드형 FRP 보강근의 경우 CF가 파단하는 것으로부터 파괴를 예측하면서, 보다 연성적인 파단신장 특성을 갖는 AFRP, GFRP의 강도조절에 따라 어느 정도의 기간은 구조물의 극한 파괴단계까지 여유를 조절하여 줄 수 있다.

2) 이로부터, CF를 파괴정보 센서로서 사용하고, 이보다 연성효과를 갖는 GFRP, AFRP 등을 보강재료로 사용하면, 그 강도비에 따라 극한 파괴하중까지 충분한 기계적 여유를 부여할 수 있어, 그 기간동안에는 보강 등의 대책을 수립할 수 있어 안정된 구조물의 유지관리 모니터링에 유효하게 응용할 수 있다고 판단된다. 또한, 평균파단 신장위치는 큰 파단신장의 CF단을 이용한 경우에 CF단의 극한파단신장의 크기에도 의존하게 할 수 있어, 치명적 파괴로의 경고위치를 CF단의 파단신장특성에 따라서도 쉽게 제어할 수 있다. 따라서 보다 저 파괴신장의 도전섬유를 이용하면 더욱 초기 변형률단계로부터 치명적 파괴방지의 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있어 본 CFGFRP 하이브리드 바(bar)의 자가진단 센서로서의 역할은 충분히 가능할 것으로 전망된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원 산학연 공동연구개발사업에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다. 또한 FRP 제작에 협조하여 주신 (주)동원건설에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔 外, CFGFRP複合材料とCFGFRP筋コンクリートの破壊自己診断, 日本窯業學會誌, Vol.100, No.12, 1992, pp.1429~1434.
2. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, 콘크리트損傷に對する自己診断, セメント・コンクリート論文集, No.47. 1993, pp.826~831.
3. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, CFGFRP筋によるコンクリート構造材の破壊檢知, セメント・コンクリート論文集, No. 48.
4. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔(1995), 炭素・ガラス 複合纖維補強筋 콘크리트における損傷の自己診断, セメント・コンクリート論文集, No.576, 1994.
5. 杉田, 스마트コンジット-VI, 日本複合材料學會誌, Vol.23, No.5, 1997.
6. N.Muto, H.Yanagida, T.Nakatsuji, M.Sugita, Y.Ohtsuka, Y.Arai and C.Saito, *Materials design of CFGFRP-reinforced concretes with diagnosing function for preventing fatal fracture*, *Advanced Composite Materials*, Vol.4, No.4, 1995.
7. K. Schulte and C. Baron, *Composites Science & Technology*, No.36, 1989, pp.63~76.
8. 박찬기, 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 설계 및 적용, 박사학위논문, 건국대학교, 2004.

**요 약** 본 연구는 콘크리트 보강근으로 사용된 단일 FRP 또는 하이브리드 FRP (전기적 특성을 가지고 있는)의 전기저항 변화를 모니터링 함으로써, 콘크리트의 파괴에 대한 자가진단 적용 특성을 검토하기 위해 수행되었다. CFRP (단일형), CFGFRP와 CFAFRP (하이브리드형)의 3종류로 보강된 콘크리트에 휨 하중 재하 단계별로 하중을 가하여 균열 또는 파괴가 발생하기 전후의 탄소섬유의 전기저항 변화를 조사하여, 각 인자의 관계특성(각 하중단계별 전기저항, 변형률, 처짐 등의 변화)을 분석하였다. 그 결과, 콘크리트 인장축 파괴 시 탄소섬유단이 파괴될 때 전기저항은 크게 증가하지만, 그 후 하이브리드 FRP 재료 중 탄소섬유를 보강하고 있던 유리섬유나 아라미드섬유가 나머지 추가 재하 하중에 저항할 수 있어 콘크리트 시험체의 전 파괴단계에까지는 이르지 않았다. 따라서 탄소섬유가 포함된 하이브리드 FRP 보강근은 콘크리트 시험체의 파괴를 사전에 감지할 수 있는 자가진단 재료로서의 적용 및 사용이 가능함을 알 수 있다.

**핵심용어** 하이브리드FRP, CFRP, CFGFRP, AFGFRP, 자가진단