

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 27, No. 2 (2007. 4)

신형 리브재 CFGFRP 보강근 및 CF 보강시트로 보강된 콘크리트의 파괴예측 자가진단

Self-Diagnosis for Fracture Prediction of Concrete Reinforced by New Type Rib CFGFRP Rod and CF Sheet

박석균

Seok-Kyun Park

초 록 본 연구에서는 탄소섬유로 보강된 콘크리트의 전기저항 변화를 모니터링하는 방법에 의해, 콘크리트의 파괴에 대한 자가진단 적용 특성을 검토하였다. 미분쇄 탄소섬유와 코크스 분체로 구성된 신형 리브재가 포함된 CFGFRP (탄소섬유 유리섬유 강화 플라스틱)와 콘크리트 보강용 CF(탄소섬유) 시트에 휨 하중 재하 단계별로 하중을 가할 때 균열 또는 파괴가 발생하기 전후의 탄소섬유의 전기저항 변화를 조사하여, 각 인자의 관계특성(각 하중단계별 전기저항, 변형률, 처짐 등의 변화)을 분석하였다. 그 결과, 콘크리트 인장측 파괴 시 탄소섬유 보강근, 신형 리브, 시트가 파괴될 때, 전기저항은 크게 증가하지만, CFGFRP의 경우는 그 후 하이브리드 FRP 재료 중 탄소섬유를 보강하고 있던 유리섬유가 나머지 추가 재하 하중에 저항할 수 있어 콘크리트 시험체의 전 파괴단계에까지는 이르지 않았다. 따라서 CFGFRP의 보강근과 신형 리브, CF시트는 FRP로 보강된 콘크리트의 파괴를 사전에 감지할 수 있는 자가진단 재료로서의 적용이 가능함을 알 수 있었다.

주요용어: 자가진단, 센서, CFGFRP, 리브, 탄소섬유시트, FRP보강 콘크리트

Abstract For investigating self-diagnosis applicability, a method based on monitoring the changes in the electrical resistance of carbon fiber reinforced concrete has been tested. Then after examining change in the value of electrical resistance at each flexural weight-stage of carbon fiber in CFGFRP (carbon fiber and glass fiber reinforcing plastic) with new type rib and carbon sheet for concrete reinforcing, the correlations of electrical resistance and load as a function of strain, deflection were analyzed. As the results, it is clarified that when carbon fiber rod, rib and sheet fracture, the electrical resistance of it increase largely, and specially in case of CFGFRP, afterwards glass fiber tows can be resist the load due to the presence of the hybrid (carbon and glass) reinforced fiber. Therefore, it can be recognized that reinforcing bar and new type rib of CFGFRP and sheet of CF could be applied for self-diagnosis of fracture in reinforced FRP concrete.

Keywords: Self-Diagnosis, Sensor, CFGFRP Rod, Rib, CF Sheet, FRP Reinforced Concrete

1. 서론

최근, 콘크리트 구조물의 효과적이며 효율적인 유지관리기술에 대한 관심이 증대되면서, 새로운 센서기능을 이용한 지능형 진단기술에 대한 연구가

활발히 진행되고 있다. 지금까지는 주로 재료의 파괴예측에 대해서는 변형률계이지와 변위계가 이용되어 왔지만, 콘크리트 재료의 경우에는 균열전파의 형태에 따라 측정치가 크게 영향을 받기 때문에, 재현성이 나쁘고 초기조건의 설정이 필요하여

(접수일: 2007. 2. 22, 심사완료일: 2007. 3. 26) 대전대학교 토목공학과; Department of Civil Engineering, Daejeon University, Daejeon, 300-716 (E-mail: skpark@dju.ac.kr)

하중재하 후의 불연속 측정이 곤란하다. 또한, 큰 시험부재에서는 파괴위치와 측정위치의 일치가 어려워 다수의 센서를 사용할 수밖에 없지만, 이럴 경우 계측오류의 원인이나 비용이 높아지는 등의 문제가 발생하여, 종래 방법으로는 근본적인 해결이 곤란하다. 따라서 구조물에 대한 새로운 파괴예측 센서의 개발이 요구되고 있다[5,9].

콘크리트 구조물 자체에 파괴 예측 기능을 부여하면 돌발적인 파괴사고 감소에 의한 인명과 손상의 경감 및 재료절약에 의한 경제손실 저감과 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. 이에 대한 유효한 방법의 하나로서는 콘크리트 구조물에 사용되고 있는 재료 중 그 자체가 파괴를 자가진단 할 수 있는 지능형 스마트기능을 갖게 하는 것이다. 재료자체가 파괴진행을 자가진단 할 수 있으면 복잡한 회로와 다수의 센서 사용은 불필요하게 되고, 구조물 자체를 강하고 중후한 설계로 해야 할 필요가 없어진다[1,5,9].

이와 같은 목적으로 개발된 탄소섬유를 이용한 하이브리드 FRP 보강근의 자가진단 센서관련 연구는 이미 발표된 바 있고, 이들 연구결과에서는 충분히 자가진단 센서로서의 활용이 가능성이 실험을 통해 입증된 바 있다[1-7,9]. 그러나 본 연구에서는 기존 연구와 동일한 개념을 이용한 것이지만, 지금까지 시도되지 않은 새로운 응용분야에 대한 자가진단 센서로서의 활용 가능성에 대해 검토하여 보았다. 이를 위해 국내에서 제작한 탄소유리섬유강화플라스틱(carbon fiber glass fiber reinforcing plastic; 이하 CFGFRP라 함) 보강근(bar, rod)을 이용하여 기존의 연구에서처럼 코어 보강근(탄소섬유(이하 CF라 함))을 센서로 이용할 뿐만 아니라, 환경상태의 하이브리드(CFGFRP) 보강근 표면에 미분쇄(微粉碎)탄소섬유와 코크스분체를 혼합하여 접착시킨 리브(rib)재를 새로이 고안하여 리브재 자체에도 센서기능을 부여하여 자가진단 소재로서의 활용 가능성을 검토하였다. 또한, 현재 콘크리트 보강재로서 많이 사용되고 있는 탄소섬유시트에 대해서도 시트 스스로가 파괴를 사전에 예측할 수 있는 자기진단 센서로서의 기능을 해낼 수 있는지에 대해서도 추가로 검토하였다.

2. CFGFRP에서 탄소섬유의 자가진단 재료로서의 작용 원리

탄소섬유에는 도전성(導電性)이 있고, 그 도전특성을 이용해 그 소재내부의 손상상태를 파악하는 것이 가능하다. 그런데, 탄소섬유는 큰 강도를 갖지만, 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 탄소유리섬유강화플라스틱(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[1-5,9].

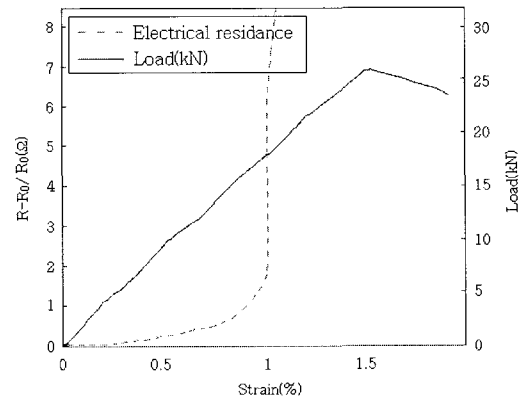


Fig. 1 Relationship between strain, change ratio of electrical resistance($(R-R_0)/R_0$) and load of CFGFRP bar

Fig. 1에는 CFGFRP재에 인장 하중을 가했을 때 이와 같은 양상을 그래프로 모의하여 나타낸 것이다. 여기서, 점선의 경우는 CF rod의 하중단계별 변형률과 전기저항과의 관계를 나타낸 것이고, 실선은 CFGFRP재의 하중단계별 변형률 관계를 나타낸 것이다. 점선으로 나타낸 하중에 따른 탄소섬유단의 전기저항변화에서 보면, 하중에 따라 탄소섬유단의 전기저항치가 증가하기 시작해 파괴단계에

서는 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 전기저항 잔유치로부터 부재에 작용한 최대하중 혹은 구조부재의 최대변형률을 무응력상태에서 추정할 수 있게 된다[1-5,9].

또한, 무엇보다도 전기저항치가 변화하기 시작할 때부터 무한대로 될 때를 신호로 보고하도록 하면 CFGFRP가 파괴되기 전에 파괴를 예지할 수 있다. 아울러 탄소섬유의 한계신장량을 여러 가지 다르게 함으로서 파괴예지의 감도를 조정할 수도 있다.

3. 실험 방법

이러한 자가진단 기능을 갖는 하이브리드 FRP rod의 형상은 Fig. 2와 같이 제작하였으며, Fig. 3은 제작된 기존형 CFGFRP의 예이다. 탄소섬유와 유리섬유의 적정 함유율 등에 대해서는 기존의 연구[9]에서 제시한 바 있다.

또한, Fig. 4에는 본 연구에서 최초로 제안한 환형상태의 하이브리드(CFGFRP) 보강근 표면에 미분쇄 탄소섬유와 코크스분체(이들 재료는 도전성이 있음) 혼합물을 접착시켜 리브(rib)재로서 제작한 신형 CFGFRP의 예를 나타내었다.

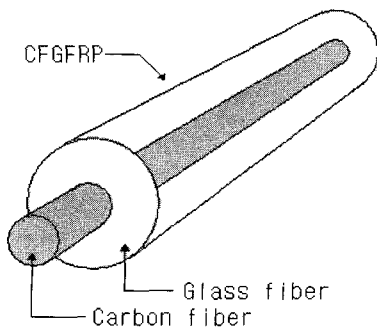


Fig. 2 Typical shape of CFGFRP rod for self-diagnosis

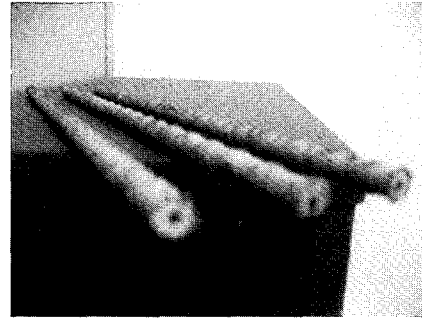
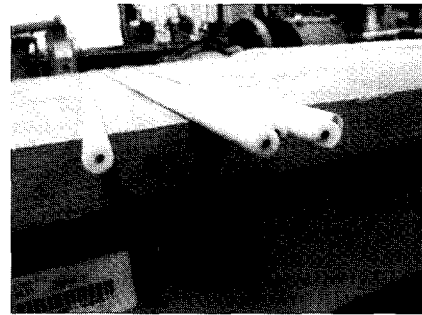
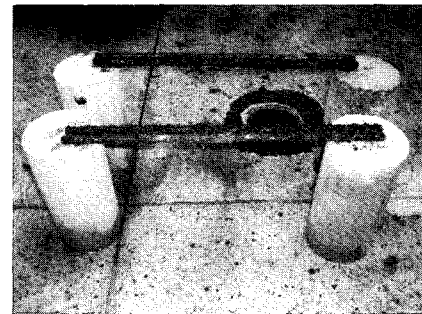


Fig. 3 Existing CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) rod (deformed type)



(a) Non-deformed (ring shape) type CFGFRP rod



(b) New type CFGFRP rod

Fig. 4 Manufactured new type CFGFRP (CF 3.3 Vol.%) rod

3.1. 시험체의 설계

콘크리트의 배합은 설계기준강도 28 MPa의 보통 콘크리트 배합기준에 의하였으며, KS F 2403과 KS F 2407에 따라 압축강도용 시편과 휨강도용 시편을

각각 제작하였다. 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같다.

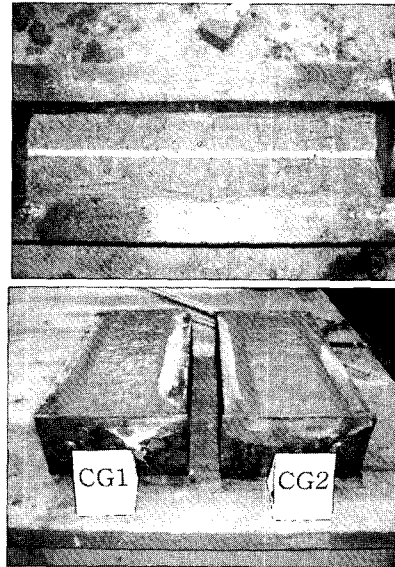
Table 1 Concrete mix proportion

Gmax (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit mass(kg/m ³)				Ad- mixture
					W	C	S	G	AE (g/m ³)
20	100	5	44	42	185	439	671	962	132

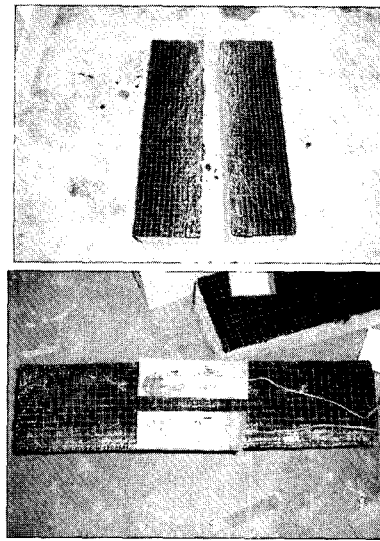
본 연구의 실험에 이용한 각종 시험체의 유형을 Table 2에 나타내었다. 국내에서 제작한 CFGFRP 보강근을 이용하여 그 코어 보강근(CF)뿐만 아니라, 환형상태의 하이브리드(CFGFRP) 보강근 표면에 미분쇄 탄소섬유와 코크스분체를 혼합하여 접착시킨 리브재에도 센서기능을 부여하여 자가진단 소재로서의 활용 가능성을 검토하였다. 또한, 현재 콘크리트 보강재로서 많이 사용되고 있는 탄소섬유시트에 대해서도 시트 스스로가 파괴를 사전에 예측할 수 있는 자기진단 센서로서의 기능을 해낼 수 있는지에 대해서도 추가로 검토하였다.

먼저, 파괴정보센서역할을 담당하는 CF는 Vol.% 별로 제작하여 유리섬유(glass fiber; 이하 GF라 함)로 보강된 CF함유 Vol.%가 3.3인 CFGFRP를 기존 리브재 방식과 신형 리브재 방식(미분쇄 탄소섬유와 코크스분체를 혼합하여 접착)의 2종류로 나누었고, 탄소섬유시트는 기존 제품 1종류를 선정하였다.

CF는 범용 저저항률 섬유이면서 저항측정 중에 주위 온도의 영향이 없는 섬유이다. 보호역할의 GF(유리섬유)는 앞서도 언급하였듯이 복합섬유로드가 CF의 파단에도 최종파괴 되지 않도록 CF보다 훨씬 큰 파단신장과 작은 종탄성을 특성을 갖는 섬유로서, CF보다는 파단특성(취성파괴특성)이 양호하다고 고려하여 실험에 반영하였다. Fig. 5에는 대표적으로 본 실험에 사용한 CFGFRP 시험체와 CFS 시험체의 예를 나타내었다.



(a) Specimens of CFGFRP bar reinforced concrete



(b) Specimens of CFS reinforced concrete

Fig. 5 Specimen examples used in this study

Table 2 Properties of each FRP material type

Kind of Fiber	Items	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic coefficient (MPa)	Electrical resistance (Ω)	Rod or sheet type
Rod type, CFGFRP (CF 3.3 Vol.%)	CFRP	11	2,500	0.44×10^5	-	Existing type, New type
	CFRP		4,000	2.00×10^5	10.78	
Sheet type, CFS	CFS	-	3,500	2.35×10^5	30k	Existing type

3.2. 측정개요

콘크리트 시험체는 중앙점 재하법에 따른 콘크리트의 휨강도 시험용 공시체(KS F 2403)로서, 그 크기는 단면적 100 mm × 100 mm, 길이 400 mm이고, 휨 파괴시험은 UTM시험기를 이용하였다. 휨 파괴 시험체의 치수와 측정방법을 Fig. 6에 나타내었고, 측정 장면은 Fig. 7과 같다.

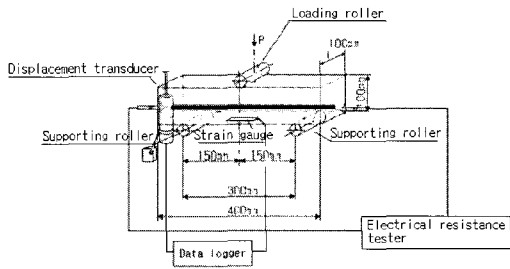


Fig. 6 Layout of flexural fracture test of specimen

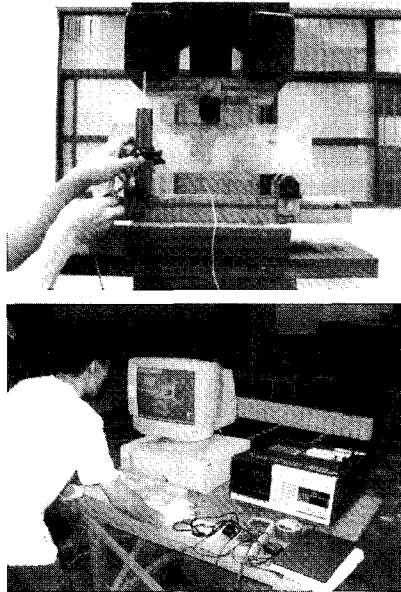


Fig. 7 Setting of test specimen

휨 하중 재하시 콘크리트 시험체의 하단부 인장 변형률과 처짐을 측정하기 위해 각각 변위(처짐) 변환 센서(Displacement transducer), 스트레인게이지를 설치하였다. 또한, 전기저항 측정은 직류 2단 자법을 이용하고, FRP 보강근을 콘크리트 시험체 바깥으로 약간만 나오게 배근한 후, CF재료의 양단에 전극을 도전성 접착제로 접착한 시험체에 1 mA

의 일정전류를 통전한 상태에서, 하중단계별 재하시의 전압변화를 전기저항변화로서 컴퓨터에 기록해서 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1. 기존 리브재 방식 CFGFRP

휨 파괴시험용 콘크리트 시험체의 사용 보강근이 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) (초기전기저항값 R_0 : 6.0 Ω)인 경우에 대해서 휨 시험으로 하중을 재하 한 경우의 재하하중별 처짐과 휨 인장변형률, 전기저항 변화를 각각 Fig. 8에 나타내었다. 한편, Fig. 9에는 같은 조건 시험체에 대해서 처짐과 하중변화에 따른 전기저항변화 양상을 나타내었다. 여기서, 점선은 하중변화를 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%)보강근 콘크리트 휨 강도 시험 시 전기저항값을 측정하여 얻은 데이터가 처짐, 인장변형률과 어떠한 관계가 있는지 측정한 결과, 하중의 증가에 따라 처짐은 서서히 증가하다가 하중이 31 kN 가해졌을 때 20.4 mm의 값을 나타내며 파괴되었다. 전기저항(초기전기저항값: 6.0 Ω)은 하중이 가해져 처짐이 늘어나면서 서서히 증가하다가 13 mm를 넘어서면서 급증하기 시작해 26 kN에서는 거의 무한대에 가깝게 변화하여 계측가능 최대범위에서는 410.63 Ω 까지 도달하였다.

하중-전기저항-인장변형률의 관계를 측정한 결과, 하중이 증가함에 따라 인장변형률은 서서히 증가하다가 하중이 12 kN을 지나면서 급격히 증가하였고, 하중이 23.5 kN일때 4,250 μ 로 최고값을 나타낸 후 다시 하중이 증가함에도 급격히 떨어졌다. 전기저항-인장변형률도 비슷한 형상을 나타내었다[9].

4.2. 신형 리브재 방식 CFGFRP

Fig. 10에는 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%)에 미분쇄 탄소분말과 코크스분체 혼합 리브재를 사용한 시험체(신형 리브재 방식 CFGFRP)의 경우의 하중-전기저항-인장변형률의 관계를 측정한 결과를 나타내었다.

본 측정결과에서는 기존 리브재 방식 CFGFRP(CF 3.3 Vol.%)의 경우와 비슷한 양상을 보이는데, Fig. 10의 이점쇄선은 미분쇄 탄소분말과 코크스분체 혼합 리브재의 전기저항-처짐의 관계를 나타낸

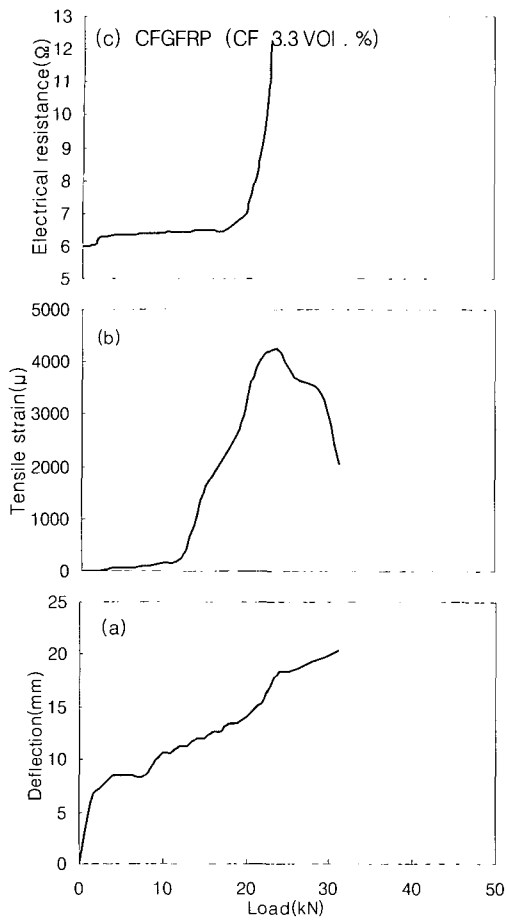


Fig. 8 Changes in electrical resistance, flexural tensile strain and deflection as a function of load for CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) reinforced concrete specimen

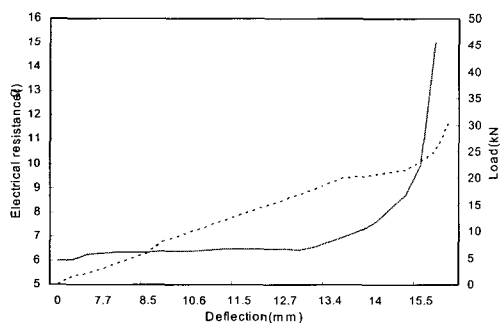


Fig. 9 Changes in electrical resistance and relative change ratio electrical resistance as a function of deflection and load(---line) for existing CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) reinforced concrete specimen

것으로, 하중이 증가함에 따라 인장부의 해당 리브재가 먼저 파괴되면서 전기저항 역시 CFGFRP의 CF로드가 파괴되기보다 이전에 변화가 나타남을 알 수 있다.

이러한 결과를 이용하면 미분쇄 탄소분말과 코크스분체 혼합 리브재의 파괴, CFGFRP(CF 3.3 Vol.%)의 CF의 파괴, GFRP의 파괴 순에 따라 순차적으로 전기저항 변화가 나타나, 기존 리브재 방식의 CFGFRP인 경우보다 조기에 단계별 입체적 파괴예측이 가능하여 보다 파괴예측의 안전율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 다시 말해 본 실험 리브재 방식 CFGFRP를 사용할 경우, CF로드의 센싱기능과 더불어 입체적인 성능을 발휘할 수 있어, 더욱 안정적이고 정확한 파괴예측 기능을 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

더욱이 본 실험 리브재 방식은 GFRP 단독 사용의 경우에도 사전 파괴예측 센서로서 적용이 가능하여, 보다 경제적이며 폭 넓은 FRP 보강근에 대한 자가진단 적용이 기대될 것으로 사료된다.

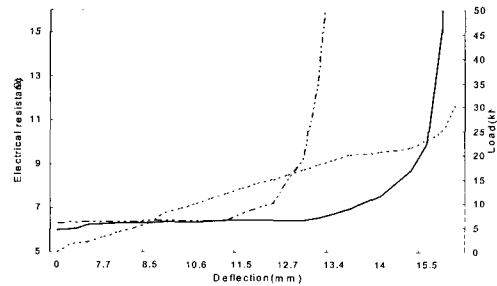


Fig. 10 Changes in electrical resistance and relative change ratio electrical resistance as a function of deflection and load(---line) for new CFGFRP(CF 3.3 Vol.%) reinforced concrete specimen with new type rib (- · - · - line)

4.3. CF시트

이번에는 상기 시험방법과 동일한 방식에 의해 CF시트로 보강한 콘크리트 시험체에 대한 휨파괴 시험결과, 처짐과 하중변화에 따른 전기저항변화 양상을 Fig. 11에 나타내었다.

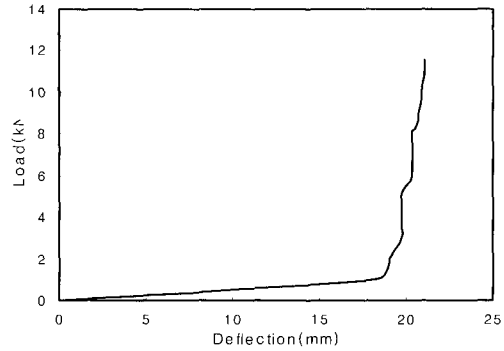
Fig. 11에서와 같이 CF시트 보강 콘크리트 휨 강도 시험 시 전기저항 값을 측정하여 얻은 데이터가 처짐, 하중과 어떠한 관계가 있는지 측정한 결과,

하중의 증가에 따라 처짐은 서서히 증가하다가 하중이 13 kN 가해졌을 때 21.5 mm의 값을 나타내며 파괴되었다. 전기저항(초기전기저항값: 25.0 k Ω)은 하중이 가해져 처짐이 늘어나면서 서서히 증가하다가 21.5 mm를 넘어서면서 거의 무한대로 접어들기 시작하여(계측가능 최대범위에서는 390 k Ω 까지 도달) 처짐의 최대값에서 전기저항도 거의 무한대로 증가되기 시작해 이 단계에서 콘크리트와 CF시트가 거의 동시에 파괴됨을 알 수 있다. 다행히 처짐이 최대값 21.5 mm에 이르기 전에 즉, 19 mm(이 때 하중은 4 kN)에 이를 때, 전기저항에 약간의 변화(약 10 k Ω)가 감지되어 이상 징후를 파괴되기 전에 정밀계측을 지속할 경우, 파악할 수 있는 가능성을 남겨 주었다. 본 시험결과에서 하중이 4 kN정도밖에 가해지지 않았음에도 불구하고, 처짐이 19 mm로 급속히 증가하게 된 것은 처짐 계측 지점의 CF시트와 콘크리트 바닥면 사이에 먼저 박리가 일어나 거의 무보강 상태로 콘크리트(무근 콘크리트)가 노출되어 휨강도에 제대로 저항하지 못하였기 때문으로 사료된다. 그러나 그 이후 이 부분을 제외하고는 나머지 영역에서 두 재료간의 부착은 유지되어, 최대 처짐에 도달할 때 전기저항과 하중도 최대값에 이르고 있어 두 재료가 최대하중까지 같이 저항하다가 동시에 파괴되고 있음을 알 수 있다. 따라서 CF시트와 콘크리트 바닥면 사이의 부착이 제대로 이루어진 경우에는 더욱 정확한 정도로 CF시트의 파괴예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

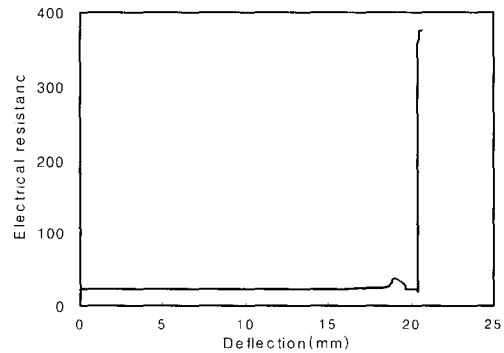
이상의 연구결과에서 알 수 있는 바와 같이, CFGFRP 보강근의 경우, CF를 파괴정보 센서로서 사용하고, 이보다 연성효과를 갖는 GFRP를 보강재로 사용하면, 파괴하중까지 충분한 여유를 부여할 수 있어, 안정된 구조물의 유지관리 모니터링에 유효하게 응용할 수 있다고 판단된다.

또한, 큰 파단신장의 CF단을 이용한 경우에 평균 파단 신장위치는 CF단의 파단신장(제품종류)특성에 따라 쉽게 제어할 수 있다. 따라서 보다 저 파단신장의 도전섬유 또는 CF의 Vol. %를 보다 작게 하면 더욱 초기 변화를 단계로부터 치명적 파괴방지의 정보를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

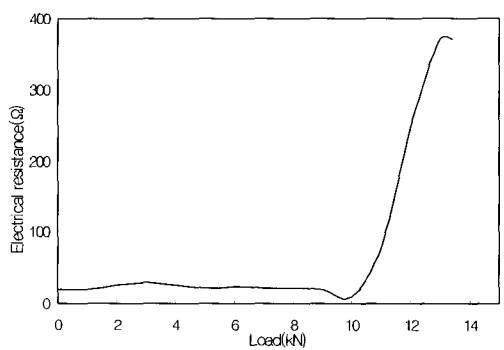
한편, 전기저항 변화는 콘크리트의 변위변화 상태와 상관관계를 나타내고 있다. 이는 CFGFRP 보강근 콘크리트에서 기계적 열화를 전기저항변화로써 취급할 수 있음을 의미한다. 따라서 장기간의 반복제하나 단기간의 지진 등에 의해 피해를 받은



(a) Relationship between load and deflection of CF sheet



(b) Relationship between electrical resistance and deflection of CF sheet



(c) Relationship between electrical resistance and load of CF sheet

Fig. 11 Relationship between load and electrical resistance - deflection, electrical resistance and load of concrete reinforced by CF sheet

구조물과 같이 외견상으로는 피로정도를 판별할 수 없는 상황에서 전기저항 측정으로부터 구조부재의 진단을 비교적 간단하면서 더구나 저비용으로 할 수 있음을 알 수 있다. 다만, GFRP는 고파단 신장을 가지고 있지만, 저탄성으로 금속근과 같은 신뢰성을 가지고 있지는 못하다. 그러나 고탄성인 CF와 하이브리드화 함으로써, 금속근에 필적한 보강근이 될 수 있음을 알 수 있다[4,9].

아울러, 본 연구에서 최초로 시도된 환형상태의 하이브리드(CFGFRP) 보강근 표면에 미분쇄 탄소섬유와 코크스분체 혼합물을 접착시켜 리브(rib)재로서 제작한 신형 CFGFRP를 보강근으로 한 콘크리트와, CF시트를 보강재로 한 콘크리트에 대해서도 이와 같은 개념에 의해 CF의 센서기능을 검토한 결과, 충분히 파괴예측 가능 센서로서 응용될 수 있음을 알 수 있었다.

특히, 신형 리브재를 이용한 CFGFRP의 경우는 신형 리브재에 센서기능을 추가로 부여함으로써 보다 입체적인 센서기능 강화로 구조체를 보다 안전하게 유지관리할 수 있는 스마트 센서기능을 한층 강화시킬 수 있음을 실험을 통해 입증하였다. 더욱이 신형 리브재의 기능을 활용할 경우, GFRP 단독, 또는 이와 유사한 성능을 갖는 AFRP (aramid fiber reinforcing plastic) 등의 단독 보강근에도 리브재에 대한 센서기능 부여가 가능할 것으로 예상되어, 보다 경제적이고 안정적인 자가진단 효과가 기대된다.

또한, 콘크리트 보강재로서 다용도로 사용되고 있는 CF시트에 대해서도 CF의 센서기능을 어느 정도 활용할 수 있는 가능성이 열어져, 이 경우 역시 스마트 센서기능을 부여할 수 있을 것으로 전망된다. 금번 실험에서는 CF시트와 콘크리트 바닥면간의 부착시공에 다소 오류가 있어 정확한 사전 파괴예측 감지센서로서의 기능과 안전성 확보에 일부 문제가 있음을 알 수 있었으나, 이에 대한 보완연구를 통해 문제해결이 가능할 것으로 사료된다. 이에 따라 향후에는 양 재료 간의 부착성능을 향상시켜 보다 안정적이고 효과적인 스마트 센서로서의 역할을 입증해 볼 예정이다.

5. 결론

이상에서 연구된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 섬유 보강근에 미분쇄 탄소분말과 코크스분체

혼합물로 구성된 신형 리브재를 적용한 CFGFRP 보강 콘크리트의 자가진단 센서로서의 적용 가능성을 검토한 결과, 하중이 증가함에 따라 인장부의 해당 리브재가 먼저 파괴되고, 그 이후 CFGFRP의 탄소섬유 보강근이 파괴되면서, 이들 각 단계에서 전기저항 변화가 뚜렷이 관찰되어 파괴예측 검지를 위한 자가진단 센서로서 활용이 가능함을 알 수 있다.

- (2) 이에 따라, 기존 리브재 방식의 CFGFRP인 경우보다 훨씬 조기에 단계별 파괴 예측이 입체적으로 가능하게 되어, 보다 안정적이고 정확한 파괴예측 기능을 부여할 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 본 신형 리브재 방식은 GFRP나 AFRP 단독 사용의 경우에도 리브재 방식을 통해 사전 파괴예측 센서로서 적용이 가능하며, 보다 경제적이며 폭 넓은 FRP 보강근에 대한 자가진단 적용이 기대될 것으로 전망된다.
- (3) 콘크리트 보강재로서 다용도로 사용되고 있는 CF시트에 대해서도 CF의 자가진단 센서기능을 검토하여 본 결과, 시트와 콘크리트 간의 부착시공에 일부 문제가 있었지만, 이 문제가 개선될 경우 파괴예측 센서로서 그 적용 가능성이 클 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원(KICTTEP)의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다. 또한 FRP 제작에 협조하여 주신 (주)동원건설과 실험에 협조하여 주신 (주)드림이엔지의 김대훈 씨에게 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, 日本窯業學會紙, 100[12], pp. 1429-1434, (1992)
- [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, pp. 826-831, (1993)
- [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, pp. 808-813, (1994)
- [4] 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, 炭素・ガラス複合

- 纖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・コンクリート論文集, No. 576, pp.
53-59, (1995)
- [5] 杉田, スマートコンポジット-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*, 36, pp. 63-76, (1989)
- [8] 박찬기, "콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 설계 및 적용", 박사학위논문, 건국대학교, (2004)
- [9] 박석균, 김대훈, "콘크리트 파괴 자가진단을 위한 하이브리드 FRP 보강근의 적용 특성", *한국콘크리트학회 논문집*, Vol. 18, No. 3, pp. 439-445, (2006)