

저하중용 자기진단 GFRP의 제조와 특성

신순기*[†] · 임현주 · 이준희

*동아대학교 신소재공학부
동아대학교 재료공학부

Fabrication and Properties of Self-diagnosis GFRP for Low Loading

Soon-Gi Shin*[†], Hyun-Ju Lim and Jun-Hee Lee

*Center for Advanced Net Shape Manufacturing and Clean Processes, Dong-A University
Division of Metallurgical and Materials and Chemical Engineering

(2003년 7월 24일 받음, 2003년 10월 17일 최종수정본 받음)

Abstract A CP-GFRP(Carbon Powder-Glass Fiber Reinforced Plastic) sensor was fabricated for fracture detection. The electric resistance of the sensor was measured on condition of various composition of carbon powders and thickness of bundle of glass fibers. The resistance of the sensor was decreased as the increase of the content of carbon powders and the TEX of the glass fibers. In the case of loading on CP-GFRP, because inner crack was propagated, the part of percolation structures was disconnected. These observations show the following results. The conduction of CP-GFRP sensor is due to percolation structure of carbon powders and increase of resistance is due to expansion of cracks.

Key words fracture detection, GFRP, resistance, percolation structure

1. 서 론

뱀, 교량 등의 중요 콘크리트 구조물들의 노후화가 사회적인 문제로 대두되면서 대형사고에 대한 우려의 목소리가 높아지고 있다. 이러한 구조물에 대한 신뢰성 문제는 구조물 자체에 손상 및 파괴예측 기능을 부여함으로써 상당히 해결 할 수 있다.

파괴예측 기능부여를 목적으로 한 기능재료로서 자기진단 GFRP¹⁻⁷⁾가 제안되어 사용되고 있다. 그 중 대표적인 것이 CF-GFRP(Carbon Fiber-Glass Fiber Reinforced Plastic)로서 이것은 강화재의 역할을 하는 유리섬유 중 일부를 탄소섬유로 치환하여 그것이 가지는 고강도, 고탄성의 기계적 성질과 전도성의 전기적 성질을 동시에 이용한 재료이다.

그러나 이러한 CF-GFRP에 부분적으로 도입되는 탄소섬유의 강도가 너무높아 저하중용으로는 부적합하다는 점이 종종 지적되고 있다.^{4,6)} 이러한 단점을 개선하기 위해서 탄소섬유 대신에 탄소분말을 부분적으로 도입한 CP-GFRP(Carbon Powder-Glass Fiber Reinforced Plastic)가 고안되어 현재 다양한 연구^{8,9)}가 진행되고 있다. 연구되고 있는 CP-GFRP는 탄소분말의 percolation구조¹⁰⁾를 도전경로로 이용한 저하중 영역(본 연구에서는 2% 변형 이하를 말함)까지도 모니터링 할 수 있는 구조물 센서로서 기대되고 있다.

본 연구에서는 CP-GFRP를 저하중 파괴예측 센서로 응용시 성능발현에 중요한 역할을 하는 검지부의 초기저항에 미치는 인자와 본 연구에서 제작한 CP-GFRP의 특성을 알아보고자 하였다.

2. 실험 방법

강화재로는 유리섬유(Owens Corning Korea Co., Type30), 기지재에는 내알카리성과 산화성이 우수한 비닐에스테르 수지(금강고려화학(주), R3791N), 도전상에는 플레이크상(평균입경 10 μm)의 그라파이트 탄소분말(日本黒鉛工業(주), No. 0288)을 사용하였다. Fig. 1에는 먼저 검지부의 제조공정을 모식적으로 나타내었다. 요약하면 유리섬유에 도전상인 탄소분말을 침투시켜 제조하였으며, 이때 최적 조건을 설정하기위해 탄소량과 유리섬유 묽음의 굵기를 변화시켰다. 수지와 스티렌 모노머((주)알파켄, XLUB s-125)를 혼합기(JKICA works, RW20DZM.n)를 이용하여 2:3(체적비)의 비율로 희석한 용액에 1%의 경화제를 넣어 탄소분말을 일정한 밀착된 슬러리를 제작하였다. 슬러리를 유리섬유에 함침 시키는 작업은 20 kw용량의 초음파 욕조(KUM SUNG ULTRASONIC.Co.,)속에서 10분간 진행하였다. 이 때 초음파 욕조의 온도는 냉각수 순환장치를 이용하여 일정하게 유지토록 하였다.

함침작업 후 유리섬유 묽음을 초음파욕조에서 꺼내어 일정직경의 노즐에 통과시켜 원통형으로 성형 후 상온 및 80°C의 항온조에서 일정시간 경화시켰다. 경화된 유리섬

[†]E-Mail : e841780@mail.donga.ac.kr

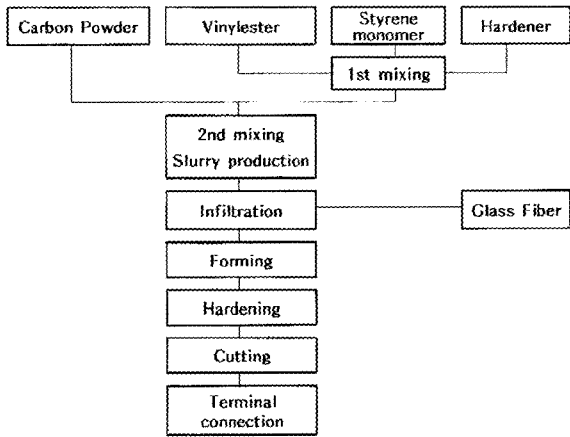


Fig. 1. Fabrication processes of detection part.

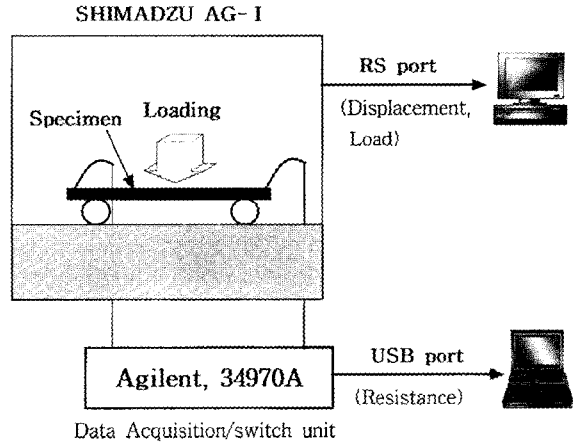


Fig. 3. Method of resistance measurement on CP-GFRP sensor.

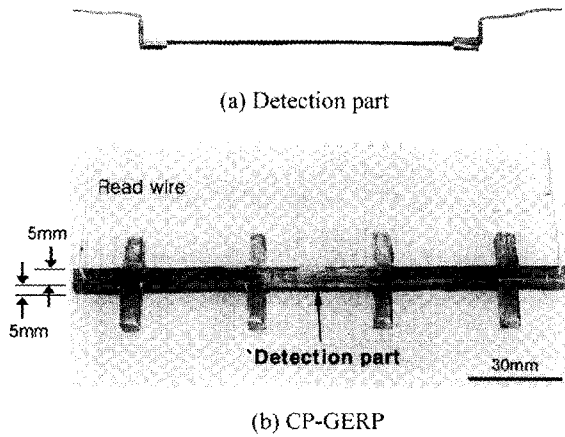


Fig. 2. Appearance of detection part and CP-GFRP specimen.

유 묶음은 130 mm의 길이로 절단하여 양끝에 저항측정을 위한 전극을 연결하였다.

이렇게 제작한 검지부를 유리섬유강화 플라스틱 적층체 중에 도입하였으며 이 때 적층체 시험편의 유리섬유 함유율은 45 vol%로 고정하였다.

Fig. 2에는 위의 방법으로 제작한 검지부와 검지부를 도입한 CP-GFRP 시험편의 사진을 나타내었다. CP-GFRP 제작시 검지부는 밑면(인장면)으로 부터 1 mm 위쪽 중앙부에 위치토록 조정하였다. 시험편 중의 가지부분은 실제 사용 시 미끄럼을 방지하기 위함이다.

이렇게 제조한 시험편(크기: 폭 5 mm, 두께 5 mm, 길이 140 mm)에 대하여 조직관찰 후 인장시험기(SHIMADZU, AG-1)를 이용해 3점 굽힘시험을 실시하였다(Fig. 3). 시험조건은 지점 거리 50 mm, 하중부가속도 1 mm/min이다. 전기저항은 검지부의 리드선에 DATA LOG(Agilent, 34970A)를 연결하여 하중이 부가되는 동안 실온에서 실시간으로 기록하였다.

또, 시험 후 파단부위의 검지부 측면을 SEM(HITACHI, S2400)으로 관찰하여 시험 전의 미세조직과 비교·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 검지부의 특성

Fig. 4는 제작한 검지부의 단면과 측면을 SEM으로 관

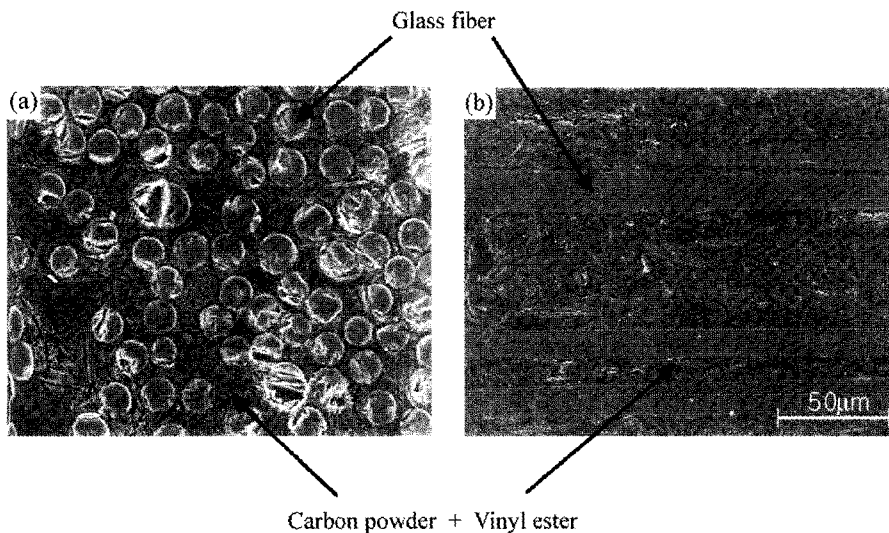


Fig. 4. SEM micrographs of detection part. a) cross section, b) side section.

찰한 것이다. 유리섬유사이에 탄소분말이 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 검지부 제조시 유리섬유 묶음의 양을 일정하게 고정한 상태(900 TEX)에서 슬러리 제조시 첨가한 탄소분말의 양에 따른 검지부의 초기 저항값을 나타낸 것이다. 20 vol.%까지는 탄소분말의 첨가량이 많아질수록 저항값은 감소하며, 저항값의 분포도 안정적임을 알 수 있다. 이는 탄소분말의 첨가량이 많을수록 더 많은 percolation구조를 이루어 도전성이 증가함에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 탄소분말의 첨가량을 25 vol.% 이상으로 첨가하게 되면 다시 증가하며 저항값의 분포도 다소 불안정해지는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 탄소분말이 첨가량이 증가함에 따라서 함침공정 중 슬러리의 점도가 높아져 유리섬유 중에 탄소분말의 침투가 균일하게 일어나지 않기 때문이라 사료된다.

Fig. 6은 탄소분말의 첨가량을 20 vol.%로 일정하게 하여 제조한 유리섬유 묶음의 굵기에 따른 초기 저항값의 변화를 나타낸 것이다.

TEX값의 증가는 섬유가닥의 굵기가 다소 증가하기는 하지만(300TEX: 12 μm , 900TEX: 15 μm , 1800TEX: 15

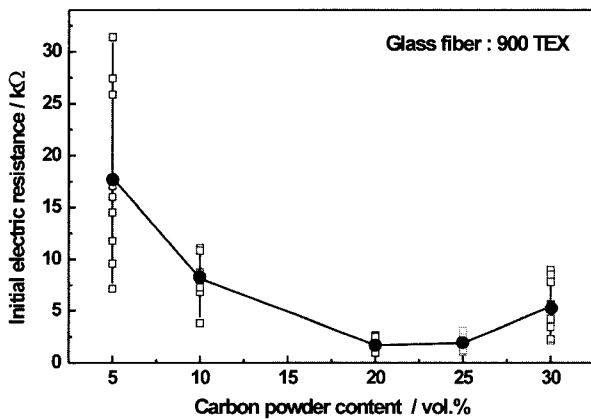


Fig. 5. Variation of initial electric resistance with carbon powder content in detection part.

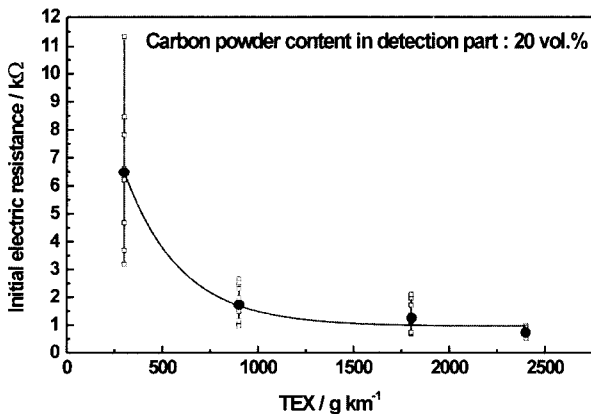


Fig. 6. Variation of initial electric resistance with TEX of glass fiber.

μm , 2400TEX: 17 μm) 유리섬유 묶음에 포함된 섬유의 가닥수가 크게 많아져(300TEX: 1000가닥, 900TEX : 2000가닥, 1800TEX: 4000가닥, 2400TEX: 4000가닥) 결과적으로 센서 검지부의 굵기가 증가함을 나타낸다. 이 그림으로부터 TEX값이 증가할수록 저항값이 급격히 감소하며 저항값의 분포도 비교적 안정됨을 알 수 있다. 이것은 일반적인 경우 전기저항이 경로의 단면적에 반비례하는 것과 동일한 원리로 TEX값이 증가할수록 검지부의 단면적이 늘어나 도전경로(completion path)가 많이 형성되기 때문으로 생각된다.

3.2 검지부 도입 플라스틱 적층체(CP-GFRP)의 특성

Fig. 7은 검지부를 도입한 플라스틱 적층체 시험편에 대하여 3점 굽힘시험으로 얻은 하중-변위곡선과 전기저항 변화(ΔR)와의 관계를 나타낸 것이다. 그림중의 ΔR 은 $[(R-R_0)/R_0] \times 100$ 의 식에 의해 얻어진 값이다. 식 중 R은 하중부가시의 저항값을, R_0 은 하중을 부가하지 않은 상태의 초기 저항값을 나타낸다. 이 그림으로부터 시험편의 파단이 일어나기 전까지는 하중이 증가함에 따라 ΔR 이 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 재료내부에 생긴 크랙에 의한 도전경로의 차단정도가 하중량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하기 때문으로 사료된다. 특히 탄소섬유를 이용한 CF-GFRP¹¹⁾에서는 저항값의 변화가 거의 나타나지 않았던 저하중 영역에서도 고하중 영역과 동일한 선형성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에는 평가 후 굽힘시험 한 시험편의 측면과 아랫부분의 외관을 나타내었다. 앞의 연구⁹⁾에서 고찰한 바와 같이 파괴 형상은 층간 전단파괴는 거의 관찰하지 않으며 굽힘파괴가 지배적임을 알 수 있다.

이 결과로부터 CP-GFRP의 초기 저항과 하중이 가해진 상태의 저항을 측정하여 ΔR 을 구함으로써 재료에 발생한 파괴나 손상의 정도를 추측 할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 9에는 굽힘시험 전후에 있어서 CP-GFRP의 검지부 내부 조직을 SEM으로 관찰 한 결과를 나타내었다.

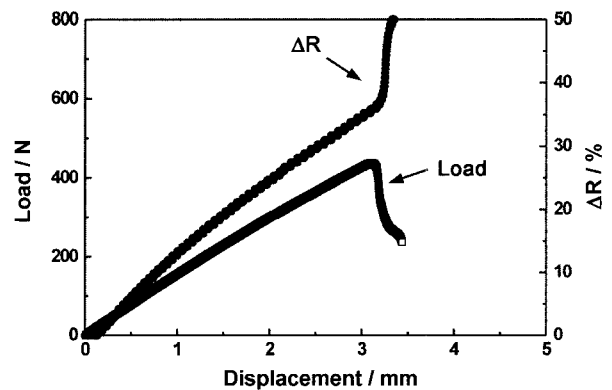


Fig. 7. Relation between ΔR and load-displacement curve for 3-point bending test of CP-GFRP specimen.

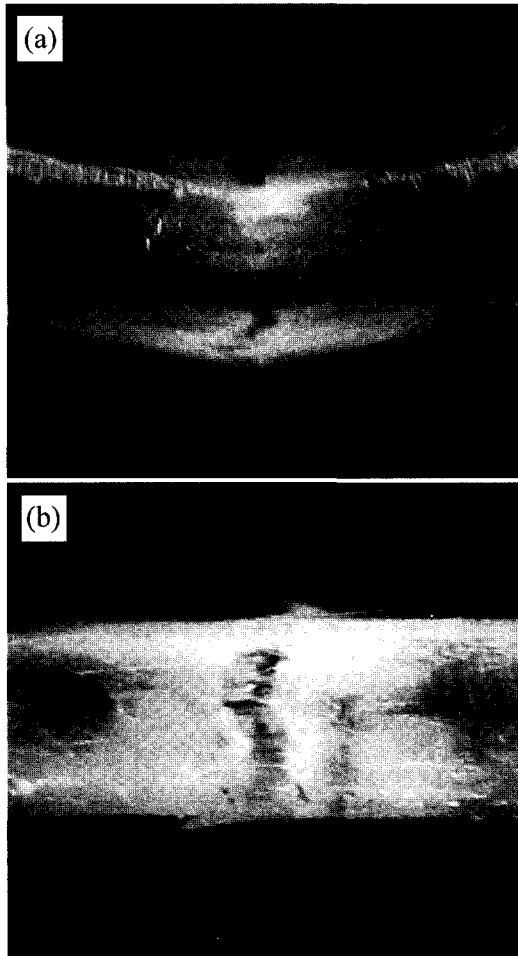


Fig. 8. Appearance of fractured CP-GFRP specimen. a) side, b) bottom

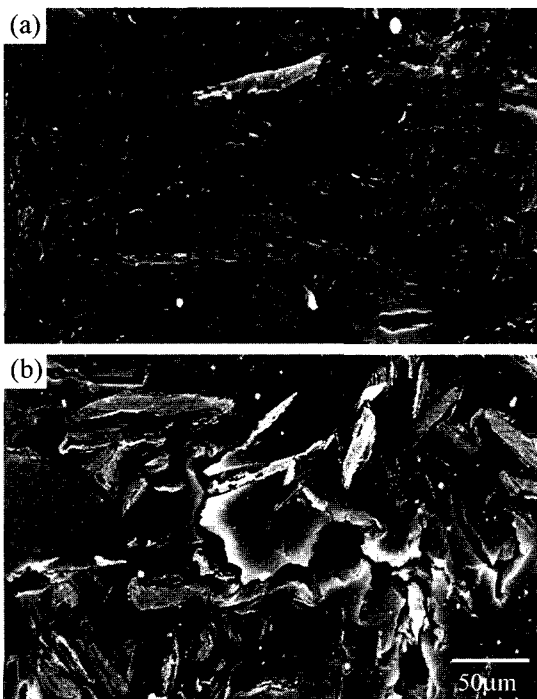


Fig. 9. SEM micrographs of detection part a) before loading, b) after loading.

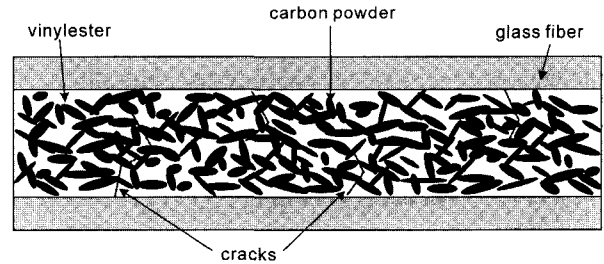


Fig. 10. Schematic diagram of crack deformation in CP-GFRP by loading.

a)는 하중을 가하기 전의 조직으로 탄소분말들이 percolation구조를 이루며 균일하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 탄소분말과 기지 사이에 일부 갈라진 틈을 볼 수 있는데 이것은 슬러리가 경화되면서 수지와 탄소분말과의 수축률 차이에 의해 일어난 현상이라고 사료된다.

b)는 시험 후의 조직으로 a)에서 볼 수 없었던 다수의 크랙이 탄소분말들 사이로 생성되어 있음을 볼 수 있다.

이 결과로부터 시편에 하중을 가했을 때 저항값이 증가하는 현상을 간단히 정리하면 Fig. 10에 모식적으로 나타낸 것처럼 탄소분말의 percolation구조 중 일부가 외부 하중으로 발생한 크랙으로 인해 연결이 끊어지게 되어, 이로 인해 시편전체의 저항값이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

저하중에서도 파괴예측기능을 가지는 CP-GFRP센서의 개발을 목적으로 이 센서를 제조함과 동시에 그 특성에 대하여 평가하였다.

검지부에 포함된 탄소분말의 양이 많아질수록 초기저항값은 감소하였다. 또한 검지부에 사용된 유리섬유 묶음의 굵기가 증가할수록 초기저항값은 감소하였다. 이 결과는 절연체 기지에서 탄소분말들이 이루는 percolation구조가 도전경로가 되며 탄소분말의 양이 많아짐으로 도전경로가 상대적으로 많아져 초기저항값이 감소하였음을 보여준다. 또, CP-GFRP에 외부하중이 가해질 경우 저항값의 증가는 하중으로 인해 내부에 발생한 크랙이 탄소분말이 이루는 percolation구조 중 일부를 절단하여 도전경로가 줄어들어 기인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(kosef) 지정 신소형재 가공청정 공정개발 연구센터(R12-2002-058-01003-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y.

1. Ohtsuka, J. Am. Ceram. Soc. **76**, 875 (1993).
2. H. Matsubara, M. Takada and H. Yanagida, Chem. Chem. Industry **49**, 40 (1996).
3. Y. Arai, S. G. Shin, M. Takada, M. Tsujii, H. Matsubara and H. Yanagida, Ceram. Mater. Syst. Compos. Struct. **99**, 551 (1998).
4. M. Takada, S. G. Shin, H. Matsubara and H. Yanagida, J. Jpn. Soc. Compos. Mater. **25**, 225 (1999).
5. H. Yanagida and H. Matsubara, J. Jpn. Soc. Mech. Eng. **102**, 68 (1999).
6. S. G. Shin, H. Matsubara, Y. Okuhara, H. Yanagida and N. Takeda, Proc. 6th Jpn. Inter. SAMPE Symp. **2**, 995 (1999).
7. Y. Okuhara, S. G. Shin, H. Matsubara and H. Yanagida, Trans. Mater. Res. Soc. Jpn. **25**, 581 (2000).
8. S. G. Shin, Met. & Mat. Int., **7**, 605 (2002).
9. S. G. Shin, Y. H. Kim and J. H. Lee, Kor. J. Res., **12**(2), 135 (2002).
10. S. Kirkpatrick, Rev. Mod. Phys., **45**, 574 (1974).
11. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y. Ohtsuka, Y. Arai, Adv. Composite Mater., **4**, 297 (1995).
12. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita, Y. Ohtsuka and Y. Ari, J. Am. Ceram. Soc., **101**, 860 (1993).