

전기저항 측정에 의한 FRP의 파괴 예측 기능의 평가

신순기[†] · 김영희 · 이준희

동아대학교 재료금속 · 화학공학부

Evaluation of Fracture Detection Function for the FRP by Electrical Resistance Measurement

Soon-Gi Shin[†], Young-Hee Kim and Jun-Hee Lee

Division of Metallurgical and Materials, and Chemical Engineering, Dong-A University 840,
Hadan 2-dong, Saha-gu, Busan, 604-714

(2001년 10월 15일 받음, 2002년 2월 9일 최종수정본 받음)

Abstract Carbon powders (CP) and carbon fiber (CF) were introduced into glass fiber reinforced plastics (FRP) composites to obtain fracture detection function. The composites were evaluated through the relation between a load-displacement curve and an electrical resistance change curve in three point bending test. CP containing FRP (CP-FRP) has a sensitivity of electrical resistance change at much lower load level than CF containing FRP (CF-FRP). In loading-unloading tests, CP-FRP showed a large amount of residual electrical resistance which enables the estimation of loading hysteresis.

Key words : FRP, carbon powder, fracture detection, electrical resistance

1. 서 론

경량 구조용 재료로서 널리 쓰이고 있는 FRP (fiber reinforced plastics)는 성형의 용이성을 활용하여 가장 실용화가 많이 이루어진 복합재료¹⁾라고 할 수 있다. 특히, 최근 유리 섬유 (이하 GF로 칭함)의 일부를 탄소섬유 (이하 CF로 칭함)로 치환한 재료인 CF-FRP²⁾는 CF의 고강도, 고탄성 등의 우수한 기계적 성질을 이용함과 동시에 CF의 전기 전도성을 이용하여 재료에 파괴 예측 기능을 부여할 수 있는 기능성 재료³⁾로도 기대되고 있다. 즉 CF-FRP가 인장 또는 굽힘 하중을 받을 때 별도로 재료 중에 도입된 검지부 (detection part)의 전기저항 변화를 측정함으로써 재료 전체의 손상·파괴의 정도를 예측할 수 있다는 것이다. 지금까지 알려진 바로는 CF의 파괴에 의한 CF-FRP의 전기저항 변화는 약 0.5% 변형에서 생기기 시작한다. 이 값은 재료 전체 파괴시의 변형인 약 2%보다는 작지만 손상 예측의 관점에서는 반드시 작은 변형이라고는 말할 수 없다. 다시 말하여 CF를 이용한 예측은 비교적 높은 응력일 경우에는 적합하지만 낮은 응력 (특히 연속적 작용에 의한 경우)에는 적합하다고 볼 수 없다. 이것은 CF를 이용할 경우 전기저항 변화가 주로 강인한 CF가 과단되지 않으면 일어나지 않기 때문으로 생각된다. 이에 대하여 CF 대신에 탄소분말 (이하 CP라고 칭함) 등의 percolation 구조⁴⁾를 이용하면, 보다 낮은 응력하에서도 전기저항의 변화를 기대할 수 있다. 지금까지 저자들은 Si₃N₄ 기지에 TiN⁵⁾ 등 도전성

입자의 percolation 구조를 이용한 Si₃N₄-SiC₅ 세라믹 복합재료의 파괴 예측 기능에 대하여 연구한 결과, 이 구조가 우수한 예측 기능을 나타내는 것을 보고하였다.

본 연구에서는 FRP를 보다 낮은 응력 하에서도 예측 기능을 발휘할 수 있는 재료로의 적용 가능성을 검토할 목적으로, CF-FRP 중의 CF 대신에 CP의 percolation 구조를 이용한 검지부를 도입한 CP-FRP를 제조하여 그 예측 기능을 평가하였다. 여기서는 CP의 입경을 변화시킨 CP-FRP와 종래의 CF-FRP에 대하여 굽힘 또는 반복 굽힘 시험시 하중-변위 곡선과 전기저항 변화의 관계를 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

FRP 제작시 강화재료는 GF (Asahi fiber glass Co. Ltd., R-220), 기지에는 내알카리성과 산화성이 우수한 비닐에스테르 수지 (Showakobunshi Co. Ltd., Ripokishi R-840)를 사용하였다. 또 도전상에는 CP (SEC Co. Ltd., SGP-5)와 CF (Toho Relyon Co. Ltd., UM63-12K-H50)를 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 시험편의 재료 구조 설계를 모식적으로 나타낸다. 윗부분은 시험편 전체, 아랫부분은 각 부분을 확대한 것이다. 검지부는 시험편의 인장면으로부터 1mm 되는 곳에 위치하도록 하였다. 이 그림으로부터 본 재료의 대부분은 FRP로 결합상인 비닐 에스테르 (B), GF (A)로 구성되어 있음을 알 수 있다. 검지부의 도

[†] E-mail: e841780@mail.donga.ac.kr

Table 1. Construction of detection part in fabricated composites.

Sample name	Electrically conductive phases	Diameter of powder of fiber/ μm	Diameter of detection part/mm
A	carbon powder	5	0.5
B	carbon powder	5	0.3
C	carbon fiber	4	0.5

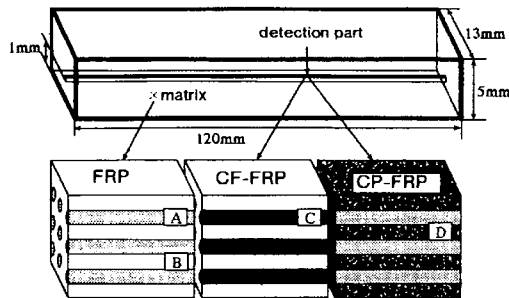


Fig. 1. Schematic drawing of the material structure for the fracture detection FRP using electrical conductivity, (a) glass fiber as a reinforcing fiber, (b) vinylester as a binder phase, (c) carbon fiber as a electrically conductive fiber, (d) carbon powder + vinylester as a electrically conductive phase.

전상으로 CP를 이용한 경우(CP-FRP)는 비닐 에스테르의 일부를 CP로, 또 CF를 이용한 경우(CF-FRP)는 GF의 일부를 CF로 치환하는 방법으로 도입하였다. Table 1에는 본 연구에서 제작한 3종류의 시험편에 대하여 검지부에 도입한 도전상의 종류, CP 또는 CF의 직경, 검지부의 직경을 나타낸다. 검지부의 제작법을 간단히 설명하면, CP-FRP의 경우, 먼저 비닐 에스테르 수지와 스치렌 모노머(Kanto Chemical Co. Ltd.)를 2 : 3 (vol.)의 비율로 희석한 용액에 1%의 경화제를 넣어 CP를 혼합한 슬러리를 제작하였다. CP의 양은 종류에 관계없이 10vol%로 하였다. 이 슬러리를 초음파 육조중에서 GF에 함침/경화시킨 후, 소정의 길이로 절단하여 양끝에 압착단자로 전극을 연결하였다. CF-FRP의 경우는 전극을 붙인 한 묶음의 CF에 비닐 에스테르 수지를 함침/경화시킨 후 소정의 길이로 절단하여 전극을 연결하였다.

이와 같이 제작한 검지부를 FRP중에 도입하였다. 검지부가 시험편 전체에 대한 체적 분율은 0.14~0.39vol%이다. FRP의 제작에는 1vol%의 경화제를 첨가한 비닐 에스테르 수지를 GF속에 강제로 침투시키는 소위 filament winding법¹⁾을 채용하였다. FRP중의 GF의 함유율은 45vol%로 하였으며, 굽힘 시험편은 폭 10mm, 두께 5mm, 길이 120mm의 치수로 가공하였다.

이러한 시험편에 대하여 3점굽힘시험(span 50mm, cross head 속도 1mm/min)과 동시에 전기 저항 변화를 측정하였다. 이때의 하중-변위-전기저항 변화의 관계를 각각의 시험편에 대하여 구하였다. 또 일정 하중까지 부가 후 하중을 제거하는 방법으로 시험을 행하여, 이때 전기저항의 잔류 유무를 조사하였다. 전기저항은 검지부에 리드선을 연결하여 디지털 멀티미터로 측정하였다. 시험전후 시험편의 단면 조직을 주사전자현미경(SEM, JEOL R-840)

을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 시험편 A에 도입한 검지부에 대하여 연마후의 SEM 사진을 나타낸다. (a)는 단면, (b)는 측면을 나타낸다. (a)에서 둥근원으로 보이는 부분이 GF이며, (b)에서 관찰되는 작은 입자들은 CP이다. 이 그림으로부터 CP 입자들은 비닐에스테르 수지중에 잘 분산되어 있으며, 또한 GF사이에 균일하게 분포하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 (a)~(c)는 시험편 A~C에 대하여 3점 굽힘 시험을 하였을 때의 하중-변위곡선(실선)과 전기저항 변화(점선, ΔR)와의 관계를 나타낸다. 그림중의 R_0 는 시험편의 초기저항값을 나타낸다. ΔR 에 대해서는 전기저항변화($R-R_0$)와 변화율 [$(R-R_0)/R_0 \times 100$]을 함께 표시하였다. CP-FRP 시험편인 A와 B를 보면, 어느쪽의 경우에도 아주 작은 변위의 영역부터 전기저항의 변화가 생겨 ΔR 는 변위에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또, A와 B에서 검지부의 직경의 차이에 의해 R_0 가 다르지만 ΔR 은 거의 동일한 곡선모양을 나타냄을 알 수 있다.

한편, CF-FRP인 시험편 C에서는 시험편 A, B와 전혀 다른 ΔR 을 나타낸다. 즉, 작은 변위에서 ΔR 은 거의 변화를 보이지 않지만 재료의 최종 파괴에 가까운 변위에서 급격히 증가한다.

이상의 결과로부터 CP-FRP가 CF-FRP에 비하여 극히 작은 변위에서 전기저항이 변화하여 검지기능이 크게 향상되는 것을 알 수 있다.

여기서 FRP 굽힘시험시의 파괴형태와 ΔR 과의 관련성에 대하여 간단히 고찰한다. 본 연구에서 행한 굽힘시험시의 span/시험편의 두께비 10은 JIS규격(K 7055) 등에서 정하고 있는 FRP 굽힘시험 규격의 15~17보다 작아, 변형·파괴거동에 있어서 층간 전단파괴²⁾가 혼재하고 있다고 생각된다. 그러나 변형 중 또는 파괴 후의 시험편에서 층간 전단파괴도 일부 일어나고 있는 것처럼 보였지만, 굽힘파괴가 지배적이었다. 따라서 시험편의 길이방향으로 도입된 검지부에서의 전기저항은 층간 전단파괴에 의하여 변화했다고는 보기 어려우며, 주로 굽힘(인장) 방향에서의 변형·파괴에 의하여 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 4 (a), (b)에는 시험편 A와 C에 대하여 하중을 일정값만큼 증가시키면서 반복적으로 가하였을 때의 ΔR 과 하중량의 관계를 나타내었다. CP-FRP인 시험편 A의 경우 최대 하중의 약 25%인 300N의 저하중의 경우에도 전기저항이 잔류하며 또 부가하중이 증가함에 따라 잔류저항이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, CF-FRP인 시험편 C의 경우에는 최대 하중의 약 70%인 900N 이하의 하중에

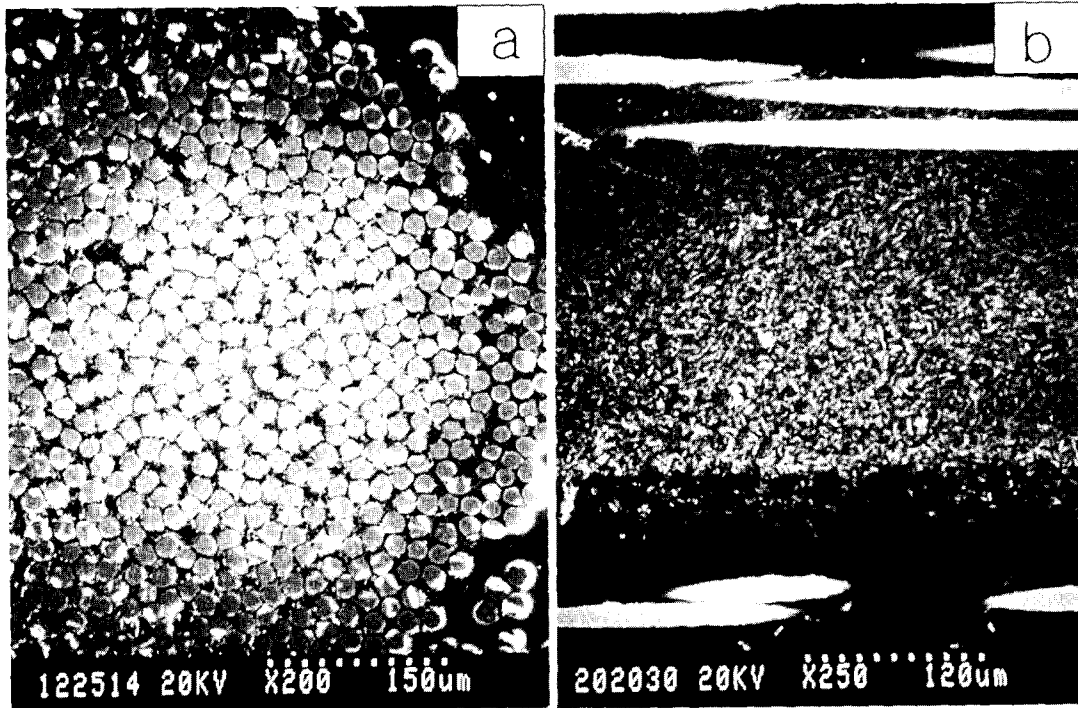


Fig. 2. SEM micrographs of detection part used in sample A. (a) cross-section, (b) side-section.

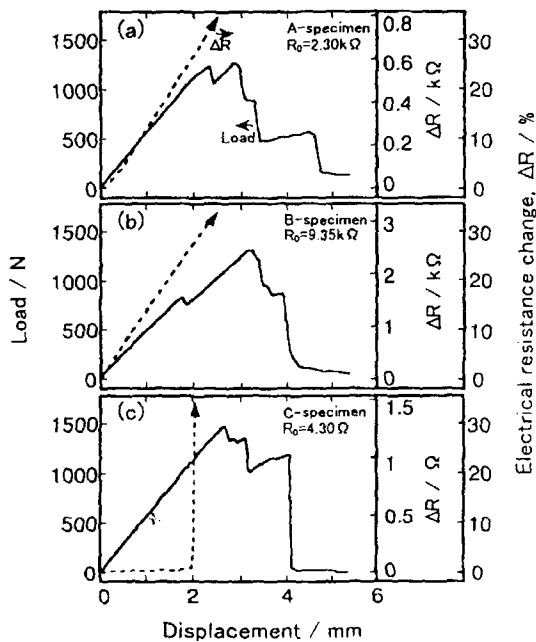


Fig. 3. Load vs. displacement and electrical resistance change vs. displacement curves for three point bending test of various samples. R_0 is the initial value of electrical resistance.

서는 잔류저항을 관찰할 수 없다. 또 900N 이상의 하중에서도 잔류저항을 나타내지만 그 정도는 시험편 A에 비하여 극히 작음을 알 수 있다. 이 결과로부터 CP-FRP는 CF-FRP보다 상당히 낮은 하중에서 잔류전기저항이 생기는 것이 확인되었다. 이러한 잔류저항을 측정함으로써 이전에 받은 부하의 이력을 판단할 수 있는 재료들이 보고^{3,5)}되고 있지만, CP-FRP의 경우도 이러한 성질을 가지고 있음을 알

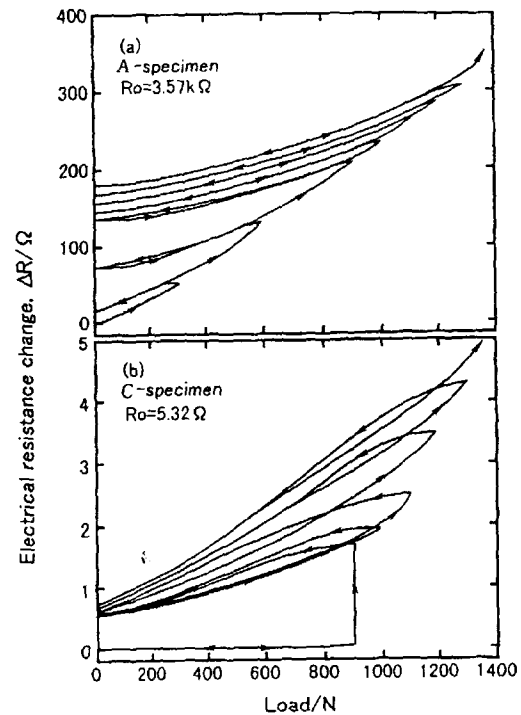


Fig. 4. Electrical resistance change vs. load curves for sample A and C in a loading and unloading test.

수 있다.

Fig. 3 및 Fig. 4에서 시험편 C의 결과에 대하여 다른 연구자들의 결과^{2,3)}와 비교해 보기로 한다. 종래의 연구에서는 종류가 다른 CF를 도입한 CF-FRP의 ΔR 및 잔류저항을 주로 인장시험을 이용하여 조사하고 있다. 본 연구에서 굽힘시험을 이용한 평가를 하고 있는 것은 시료제작의 편리함 뿐만 아니라 실제 응용면에서도 굽힘하중이 중요⁶⁻⁸⁾

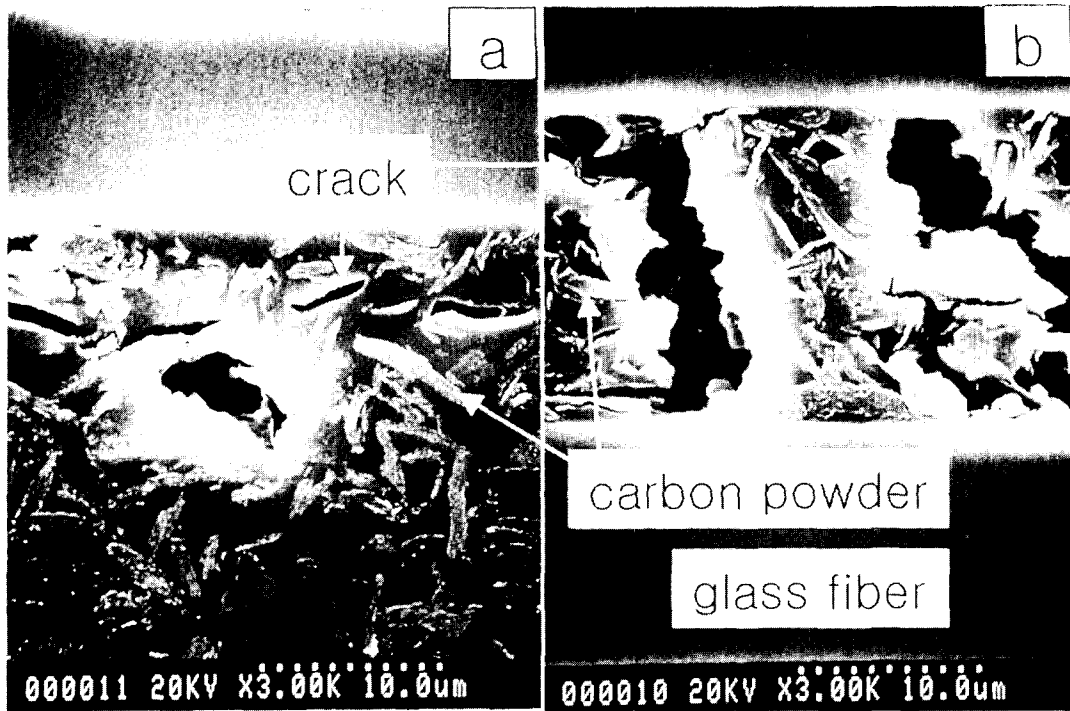


Fig. 5. SEM micrographs of polished side-section of detection parts after loading test. (a) loaded at 300N, (b) loaded at 1000N.

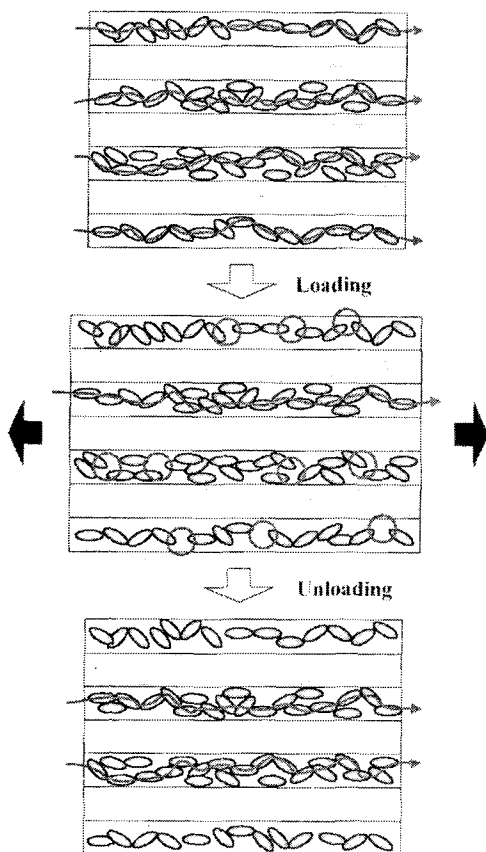


Fig. 6. A schematic drawing of percolation structure change of carbon powder in detection part of CP-FRP for loading and unloading.

하다고 판단되었기 때문이다. 본 연구의 CF-FRP의 결과를 종래의 결과와 비교하면, 먼저 ΔR 의 변화, 잔류저항의

발생 등에 있어서 차이를 보인다. ΔR 는 종래의 인장시험에서는 초기에 약간 변화하여, 최대하중의 약 50%에서 급격히 변화하지만 본 연구의 굽힘시험에서는 최대하중의 약 75%에서 급격히 변화할 때까지 거의 변화하지 않는다. 또 잔류저항도 종래의 연구에서는 최대하중의 40% 정도에서 나타나지만, 본 연구에서는 최대하중의 약 70%에서 발생한다. 이들 차이의 원인은 실험방법의 차이는 물론 본 연구에서 제작한 시험편에서 검지부가 시험편 표면에 위치하고 있지 않기 때문(인장하중이 가장 많이 작용하는 표면으로부터 1mm 내부)으로 생각된다. 두께 t 시험편의 굽힘시험에 있어서 인장응력이 작용하는 표면부 및 Δt 만큼 내부면에서의 변형 ϵ , ϵ' 은 탄성범위 내에서는 근사적으로 다음의 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon' = \epsilon \{1 - 2(\Delta t/t)\} \tag{1}$$

본 시험에서는 $t=5\text{mm}$, $\Delta t=1\text{mm}$ 이므로 $\epsilon' = 0.3\epsilon$ 이 되어, 즉 검지부의 변형은 인장면 표면부의 60%가 된다. 또 굽힘시험에서는 span 중심에서의 거리에 따른 변형분포도 존재한다. 이러한 이유로 결국 종래의 인장시험에 비하여 본 연구의 굽힘시험에서는 ΔR 와 잔류 전기저항이 상당히 작게 검출되었다고 생각된다.

다음에 본 연구에서 제작한 CP-FRP와 CF-FRP에 대하여 굽힘시험을 실시하였을 때 ΔR 이 차이를 나타낸 이유에 대하여 고찰하고자 한다. Fig. 5는 시험편 A에 대하여 300N 및 1,000N의 하중을 부가 후, 제거하였을 때 검지부의 조직관찰의 결과를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 검지부의 하중이 증가함에 따라 기지중에 미세크랙의 발생이 많아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 결국 이러한 현상이

일어나 도전상인 CP 입자간의 접촉이 떨어지게 되어, 전기 저항이 증가되었다고 생각된다. 또 Fig. 4에서 하중 제거후에 전기저항이 잔류한 것은 FRP 및 검지부중의 기지에 약간의 소성변형이 일어나 Fig. 6에 모식적으로 나타낸 것처럼 한번 떨어진 도전상은 원래의 위치로 완전히 되돌아오지 않거나 또는 CP 입자간이 떨어질 때 전단응력 등이 작용하여 입자 서로가 처음과 같이 접촉하지 않기 때문으로 사료된다. 한편, CF-FRP 경우에는 CF자신이 과단될 때까지는 도전경로가 절단되지 않기 때문에 작은 변위 영역에서는 전기저항의 변화는 나타나지 않으며 CF의 과단과 동시에 크게 전기저항이 변화된 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 CP를 도전상으로 이용하면, CF에 비하여, 저하중에서 파괴예측이 가능하다는 것, 또 하중 제거후의 잔류저항이 생기기 쉽다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

탄소분말 및 탄소섬유를 검지부의 도전상으로 이용한 유리섬유-플라스틱 복합재료를 제작하여 3점 굽힘시험을 이용하여 파괴예측 기능을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 탄소분말을 도전상으로 이용하면 탄소섬유에 비하여 낮은 하중에서 전기저항이 보다 민감하게 변화하며 또 재료가 파괴될 때까지 거의 직선적으로 변화한다.

2) 하중 제거 후에도 전기저항이 일부 잔류하며 그 양은 하중량이 높아질수록 증가하였다. 또 탄소섬유를 이용하였을 경우에 비하여 보다 낮은 하중에서 잔류저항이 발생하였

다.

3) 탄소분말을 검지부의 도전상으로 도입한 FRP는 탄소섬유를 도전상으로 이용한 FRP에 비하여 보다 낮은 응력하에서의 파괴예측이 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30100-003-3) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 宮八裕夫外 6人, 複合材料事典, 朝倉書店, 14 (1991).
2. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsujii, M. Sugita and Y. Ohtsuka, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 875 (1993).
3. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsujii, M. Sugita, Y. Ohatsuka and Y. Ari, *J. Am. Ceram. Soc.*, **101**, 860 (1993).
4. S. Kirkpatrick, *Rev. Mod. Phys.*, **45**, 574 (1974).
5. M. Takada, H. Matsubara, S-G. Shin, T. Mitsu ka and H. Yanagida, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **108**, 397 (2000).
6. 森田幹朗, 金原勳, 福田博, 複合材料, 日刊工業新聞社 (1988).
7. E.A. Armanios and L.W. Rehfield, *ASTM STP972*, **81** (1988).
8. A. Wada and S. Motogi, *J. Soc. Mat. Sci., Jpn*, **49**, 494 (2000).