

# 플라즈마 표면처리에 따른 고분자절연재료용 유리섬유의 표면개질

論 文

52C-5-3

## Surface Modification of Glass Fiber for Polymer Insulator by Plasma Surface Treatment

林 暉 範\* · 李 德 出\*\*

(Kyung-Bum Lim · Duck-Chool Lee)

**Abstract** - It is hard to expect excellent electrical, mechanical and chemical properties from most of the composite materials presently used as insulators due to insufficient wettability property caused by the difference of interfacial properties between the matrix material and the reinforcer. Therefore, various interfacial coupling agents have been developed to improve the interfacial properties of composite materials. But if the wettable coupling agents are used outdoor for a long time, change in quality takes place in the coupling agents themselves, bringing about deterioration of the properties of the composite materials. In this study, glass surface was treated by plasma to examine the effect of dry interface treatment without coupling agent. It was identified that the optimum parameters for the best wettability of the samples at the time of generation of plasma were oxygen atmosphere, 0.1 torr of system pressure, 100 W of discharge power, and 3 minutes of discharge time. Also, the surface resistance rate and dielectric property were improved.

**Key Words** : wettability property, coupling agents, dry interfacial treatment, plasma

### 1. 서 론

일반적으로 고분자 재료는 전기 절연성, 가공성 및 기계적 강도가 우수할 뿐만 아니라 대량생산과 경량화가 가능하여 여러 산업분야에 활용되고 있다[1]. 그 중 발전기, 가스차단기, 전력변환장치, 고분자 애자 등에 이용되고 있는 전력용 절연물 및 고도의 절연시스템은 전기적 절연특성과 기계적 강도 및 열적 특성이 양호하여야 한다. 그러나 이러한 특성을 만족하려면 단일상 고분자 재료만으로는 한계가 있기 때문에 선진각국에서는 무기질 재료와 유기질 재료를 혼합시킨 복합재료에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[2, 3].

복합재료의 일종인 유리 섬유강화 복합재료(FRP; fiber reinforced plastics)는 에폭시 수지에 유리섬유를 함침시킨 하이브리드(hybrid) 재료이며 전기적, 화학적으로 우수한 특성 뿐만 아니라 양호한 기계적 강도를 지니고 있어 인쇄회로기판을 비롯한 전기·전자부품, 전력·통신 케이블 등의 전기절연분야에 사용되고 있으며, 또한 경량, 고강도의 구조물로 인정되어 우주, 항공, 자동차 분야 등에도 폭넓게 사용되고 있다[4, 5].

복합 절연재료의 특성은 강화재와 매트릭스 사이의 계면

접착특성에 따라 현저한 특성 차이를 나타내고 있다. 복합 절연재료의 계면특성을 개선하기 위하여 계면 결합제를 강화재 표면에 처리하면 계면 접착특성을 향상시킬 수 있다. 그 중 습식계면 결합제로 강화재 표면을 처리한 후 복합재료를 제작하면 매트릭스와 강화재 계면에서의 제반 특성이 향상된다는 보고가 있다[6, 7]. 그러나 산업의 다양화 및 고도화에 따라 주위 환경이 가혹화되므로써 소재 부품들이 매우 열악한 상태에 놓임에 따라 복합절연재료의 계면 결합제 자체의 변질로 오히려 계면특성이 크게 저하하여 절연특성을 저하시켜 결국 절연파괴를 야기시킬 수 있다[8, 9]. 이와 같이 습식 계면결합제의 열화되는 단점을 해결하기 위한 방안으로 최근 플라즈마를 이용한 물질 표면처리를 통해 표면 상태를 개질시켜 계면접착성을 향상시킨 복합재료에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 강화재 표면에 처리하는 계면 결합제의 처리방법에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있고, 처리의 불균질성은 복합재료 내부의 결합을 야기시킬 수 있다. 플라즈마를 이용하여 강화재 표면을 처리하면 플라즈마내의 활성종(라디칼, 자외선, 충돌전자 등)이 강화재 표면에 극성기와 미세요철을 형성하고 정전기적 대전효과에 의해서 친수성이 증가한다[10-12].

본 연구에서는 유리 섬유강화 복합재료의 계면특성을 향상시키기 위한 목적으로 건식 계면처리방법의 연구를 수행하였다. 건식 계면처리방법의 일종인 플라즈마를 이용하여 강화재로 사용되는 유리섬유의 표면을 처리하여 가장 우수한 젖음성을 나타내는 최적조건을 설정하도록 하였다. 각각의 특성분석은 접촉각, 표면장력, 유전특성 및 표면저항률을 측정하여 최적조건을 설정하였다.

\* 正 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 氣 工 學 科 工 學 博 士

\*\* 正 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

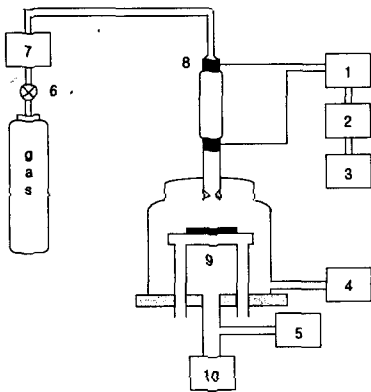
接 受 日 字 : 2003年 2月 18日

最 終 完 了 : 2003年 3月 26日

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 처리

본 실험에 사용된 플라즈마 처리장치의 시스템은 전원부, 방전부, 배기 및 진공검출부로 나누어져 있다. 장비의 전체적인 개략도와 실제 제작된 형태를 그림 1에 나타내었다.



- |                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| 1. Matching network     | 2. Power meter  |
| 3. Plasma generator     | 4. Vacuum gauge |
| 5. Rotary pump          | 6. Valve        |
| 7. Mass flow controller | 8. Electrode    |
| 9. Substrate            | 10. Cold trap   |

그림 1 플라즈마 처리장치의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of plasma treatment system

유리섬유의 플라즈마 표면 처리조건을 설정하기 위하여 우선 유리섬유와 성분이 유사한 유리를 사용하여 최적의 처리조건을 설정하였다. 먼저 플라즈마 처리에 앞서 유리 표면을 세척하였다. 마이크로 용액(Integration products Corp. UK, Model Micro-90) 5%와 증류수 95%를 혼합한 용액에서 20분간 초음파 세척을 한 후, 증류수 속에서 약 10분간 초음파 세척을 한 후, 증류수를 바꾸어 가며 3회의 반복 세척을 하였다.

세척된 유리를 플라즈마 반응조에 설정하고 플라즈마 방전을 발생시켰다. 처리조건은 반응가스로 산소를 20 cc/min 주입시키면서 진공펌프를 이용하여 반응조의 압력을 0.1 Torr로 고정시킨 후 13.56 MHz의 플라즈마 발생장치를 사용하여 플라즈마를 발생시켰다. 플라즈마 방전은 방전전력과 처리시간에 따른 특성변화를 알아보기 위하여 방전전력을 20 W에서 140 W로 변화시켜가면서 표면을 처리하였다. 또한 1분에서 10분간 플라즈마처리를 하였다.

### 2.2 측정방법

플라즈마 처리에 따른 표면의 젖음정도와 표면 활성화 상

태에 따른 표면 자유에너지의 변화를 알아보기 위하여 접촉각 측정장치(2MG, ERMA INC.)를 사용하여 표면에 물방울을 하적하여 두 물질 사이의 계면에 형성되는 인력변화를 측정한다. 접촉각 측정은 접촉각 측정장치를 사용하여 시료 표면에 탈이온 증류수 2  $\mu$ l를 sessile drop 형태로 하적시켜 측정하였다. 최종값은 측정을 10회 반복하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 측정값을 평균하여 얻었다. 또한 표면의 자유에너지는 접촉각 측정을 통해 구할 수 있다. 젖음성은 일정압력 하의 평면이 고체 표면위에 있는 액적으로 구성된 계를 고려하여 얻고자하는 액체와 고체의 힘의 평형을 생각하면 구할 수 있다. 평평한 고체 표면에 한 방울의 액체를 놓으면 표면장력 및 계면장력의 균형에 의해 액체방울은 특정한 형태를 나타낸다. 이때 액체의 표면전선과 액체-고체간에 계면이 이루는 각인 접촉각으로부터 Owen's의 식에 의해 구한 표면에너지(surface energy)는 식 (1)과 같다[13].

$$1 + \cos \theta = 2 \left[ \frac{(\gamma_s^d)^{1/2} (\gamma_l^d)^{1/2}}{\gamma_l} + \frac{(\gamma_s^p)^{1/2} (\gamma_l^p)^{1/2}}{\gamma_l} \right] \quad (1)$$

본 실험에서는 표면의 자유에너지는 탈이온 증류수와 methylene 용액을 하적시켜 구한 접촉각을 식(1)에 의하여 구하였다. 표면 및 재료 내부의 전기적 절연특성을 조사하기 위해 원형 마스크를 제작하여 Al을 진공증착하여 전극을 형성시킨 후 임피던스 어날라이저(41P2A, Hewlett Packard)에 연결하여 500 Hz ~ 13 MHz에 이르는 주파수 영역에 걸쳐 유전특성을 조사하였고, 시료를 항온조(Sample Chamber, Takeda Riken, TR43C)에 설치하고 미소전류계(Picoammter 487, Keithley.Co)를 이용하여 100 V의 직류 전압을 인가하여 안정된 누설전류값을 측정 후 최종적으로 저항률을 산출하였다. 또한 최적조건에 의해 제작된 복합재료의 기계적 특성을 조사하기 위하여 인장강도 측정장치(Model 4202, Instron Corporation, Japan)를 사용하여 시험편을 grip 간격 10 mm, 크로스 헤드 속도는 10 mm/min로 인장시켜 측정된 값으로는 5회 측정을 통한 결과 값의 평균치를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 접촉각 측정특성

유리섬유강화 복합재료에 있어서 플라즈마 표면처리를 통한 접착력 향상 및 계면특성을 향상시키기 위한 조건을 설정하기 위하여 유리 표면을 플라즈마 처리한 후 젖음성 변화특성을 조사하였다. 플라즈마 처리조건에 따른 접촉각 변화 특성을 그림 2와 그림 3에 나타낸다.

그림 2와 같이 방전전력이 높을수록 접촉각은 감소하였고, 처리시간의 증가에 따라 접촉각은 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 플라즈마 처리시 시료 표면에 자유 라디칼을 증가시키고, 전자가 표면에 충돌하여 표면층에 대전됨으로써 정전상호작용에 의해 접촉각이 낮게 나타나는 것으로 판단된다[14]. 그러나 여기서 접착력을 향상시켜 젖음성을 좋게 하기 위해 방전전력을 지나치게 증가시키면 오히려

표면에서 절연특성을 저하시킨다[12, 15].

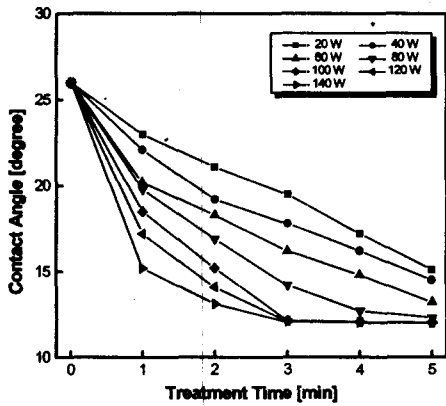


그림 2 플라즈마 처리조건에 따른 유리표면의 접촉각 특성  
Fig. 2 Contact angle properties of glass surface as plasma treatment conditions

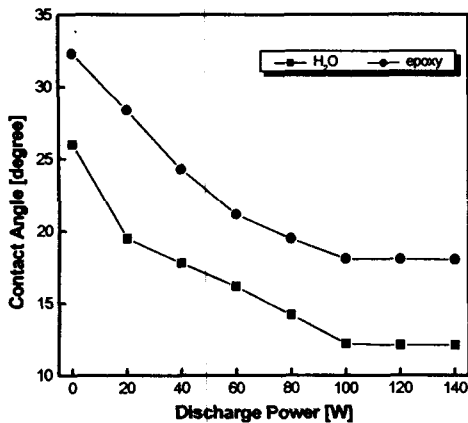


그림 3 플라즈마 방전전력에 따른 유리표면의 접촉각 특성 (3분처리)  
Fig. 3 Contact angle properties of glass surface as plasma discharge power (3min treatment)

또한 유리섬유와 에폭시 수지와와의 젖음특성을 알아보기 위하여 증류수와 에폭시 액적을 사용하여 접촉각을 측정하였다. 이때 에폭시는 비스페놀-A형 수지를 사용하였으며, 상온에서의 점도가 크기 때문에 점도를 낮추기 위해 80℃ 분위기에서 30분간 방치시킨 후 5 μl sessile drop 형태로 하적시켜 측정하였다. 그림 3은 처리시간이 3분 일때의 방전전력의 변화에 따른 접촉각의 변화특성을 증류수와 에폭시 액적에 대해 측정한 결과이다. 증류수와 에폭시 액적을 사용하여 측정한 결과는 모두 접촉각이 감소하는 결과를 보이고 있다. 그림 2와 같이 접촉각은 처리시간에 따라 감소할 하나 일정시간 이후 서서히 포화되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과 역시 플라즈마내에서 높은 에너지를 가진 활성종들이 표면에 충돌하여 라디칼을 형성하고, 표면이

공기중에 노출될 때 산소와 반응하여 표면에 극성기를 만들어줌으로써 친수화가 증가되어 접촉각이 감소한 것으로 판단되고, 일정시간후 접촉각이 일정하게 나타나는 것은 충돌 전자에 의해 표면에 형성된 자유라디칼을 포함한 전하들이 공기 중의 분자들에게로 전이되어 임계표면장력이 감소하게 되어 접촉각이 일정하게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 접촉각 측정을 통한 표면활성화 에너지를 표 1과 그림 4에 나타내었다. 표면에너지는 접촉각이 감소할수록, 즉 표면의 젖음성이 증가할수록 표면의 활성화에너지가 증가하였다.

표 1 플라즈마 처리에 따른 유리표면의 표면에너지 (3분처리)

Table 1 Surface energy of glass surface as plasma treatment (3min treatment)

Power	$\theta_{\text{water}}$ [degree]	$\theta_{\text{methylene}}$ [degree]	$\gamma_s^d$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^a$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
untreated	26	55	21.40	44.33	65.73
20 W	19.5	52.5	22.36	46.44	68.8
40 W	17.8	50.3	23.32	46.17	69.49
60 W	16.2	49.5	23.61	46.46	70.07
80 W	14.2	48.2	24.14	46.61	70.75
100 W	12.2	46	25.37	46.09	71.46
120 W	12.1	45.9	25.42	46.07	71.49
140 W	12.1	45.8	25.48	46.03	71.51

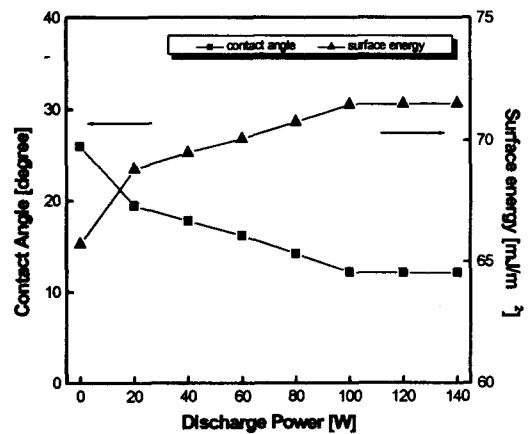


그림 4 플라즈마 처리에 따른 유리표면의 접촉각 및 표면에너지 (3분처리)

Fig. 4 Surface energies of glass surface as plasma treatment (3min treatment)

또한 플라즈마 처리된 각각의 시료 표면을 대기 중에 방치시켰을 때 시간 경과에 따른 접촉각의 변화 특성을 표 2와 그림 5에 나타낸다. 대기 방치시간에 따른 접촉각 변화 특성은 대기 방치시간이 증가함에 따라 접촉각이 증가하고 있음을 나타낸다.

표 2 표면처리 후 시료표면의 대기방치시간-표면에너지특성  
 Table 2 Exposure time-surface energy properties of sample surface after surface treatment

Exposure time [hour]	$\theta_{\text{water}}$ [degree]	$\theta_{\text{methylene}}$ [degree]	$\gamma_s^d$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^a$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
0	12.1	45.8	25.31	46.13	71.44
1	12.6	46.9	24.77	46.49	71.26
2	13.13	47.3	24.58	46.51	71.09
3	13.58	47.6	24.43	46.52	70.95
4	13.93	48.0	24.22	46.61	70.83
5	14.2	48.5	23.96	46.76	70.72

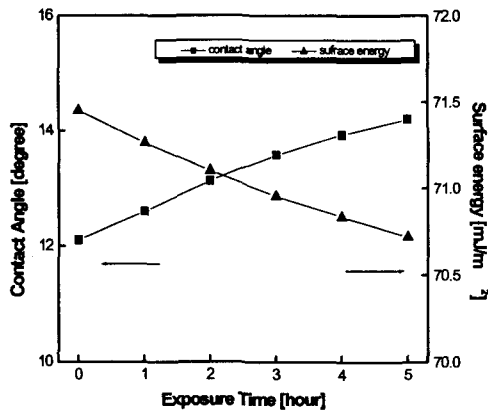


그림 5 표면처리 후 시료표면의 대기방치시간-접촉각-표면에너지특성  
 Fig. 5 Exposure time-contact angle-surface energy properties of sample surface after surface treatment

3.2 유전특성

플라즈마 표면처리에 의한 전기적 특성을 분석하기 위하여 시료의 비유전율을 측정하고 그 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6에서 플라즈마 방전전력이 증가할수록 비유전율이 낮아져 100 W 처리시에 가장 낮은 값을 나타내었고, 그 이상의 전력에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 접촉각의 경향과 유사한 결과로 플라즈마 처리시 플라즈마내의 활성종이 유리표면에 충돌하여 유리섬유에 잔존하는 잔유물과 표면 수분층을 제거하는 세정효과로 인하여 계면의 weak boundary layer의 형성을 막아주고, 100 W 이상의 높은 방전전력에서는 과도한 에너지에 의해 표면 결합체의 절단으로 유전특성이 저하하는 것으로 판단된다. 또한 주파수에 따른 비유전율의 변화는 저주파수 대역보다는 고주파수 대역에서 낮은 비유전율을 나타내고 있는 것은 주파수가 증가함에 따라 분극시간이 짧아지고, 정전용량의 감소로 비유전율이 저주파수 대역보다 고주파수 대역에서 낮게 나타난다.

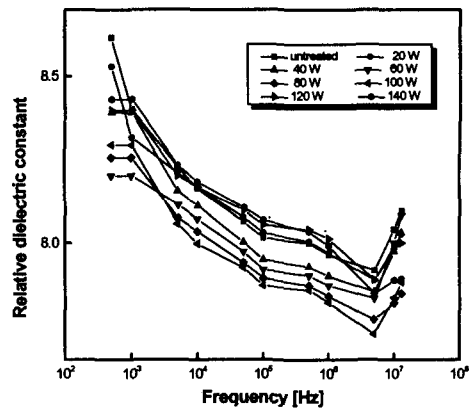


그림 6 플라즈마 처리에 따른 유리표면의 비유전율  
 Fig. 6 Relative dielectric constant of glass surface as plasma treatment

3.3 표면저항률 특성

접촉각 변화를 통한 표면 활성화에 따른 표면 에너지를 측정하고 비유전율을 통해 표면 및 계면의 전기적 특성을 조사한 후, 플라즈마 방전전력에 따른 표면저항률을 측정하고 결과 그림 7과 같다.

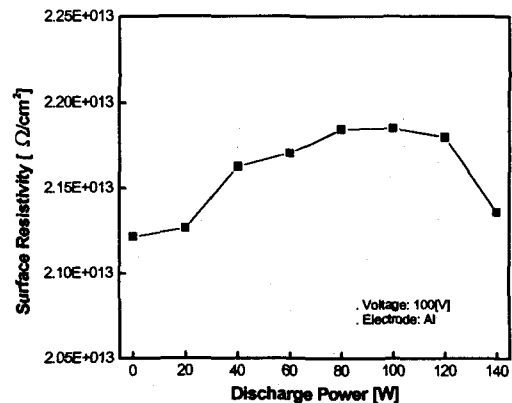


그림 7 플라즈마 처리에 따른 유리표면의 표면저항률  
 Fig. 7 Surface resistivity of glass surface as plasma treatment

그림에서 보는 바와 같이 방전전력이 증가할수록 표면저항률이 미처리 시료보다 상승하여 100 W 플라즈마 처리시에는  $2.17 \times 10^{13}$  Ω으로 증가하고, 그 이상의 방전전력에서는 표면저항률이 저하하였다. 이는 유전특성의 결과와 유사한 결과로 방전전력이 증가함에 따라 플라즈마 처리시 유리 표면에 생성된 라디칼에 의한 표면세정효과에 따라 100 W의 방전전력까지는 전기적 절연특성이 향상됨을 의미하고, 그 이상의 방전전력에서는 높은 에너지로 결합이 절단되어 오히려 절연능력이 저하하는 것으로 판단된다.

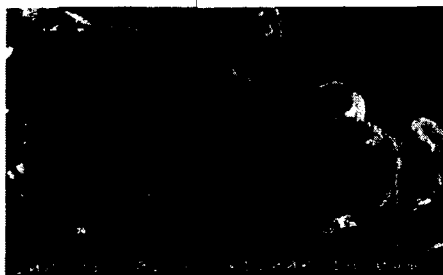
결과적으로 플라즈마 표면처리로 인한 젖음성 향상을 위한 최적의 조건은 방전전력 100 W, 처리시간 3분에서 가장 좋은 젖음성과 절연특성이 향상되었다.

3.4 인장강도 및 SEM 파단면

플라즈마 표면처리에 따른 측정된 접촉각 및 표면에너지 특성, 유전특성, 표면저항률 특성을 종합하여 최적의 플라즈마 처리조건으로 제시된 방전전력 100 W, 처리시간 3분 동안 유리섬유를 플라즈마 처리하였다. 처리 후 유리섬유와 에폭시 수지를 경화시켜 복합재료를 제작하여 플라즈마 처리에 의한 시료의 기계적인 특성변화를 조사하기 위하여 인장강도를 측정하였다. 시험편의 제작은 유리섬유(E-glass)를 적당한 크기(120×120 mm)에 맞게 채단한 후 섬유의 체적함유율을 구하기 위해 전자저울로 채단된 유리섬유의 무게를 측정하였다. 유리섬유는 300℃로 유지시킨 전기로에서 30분간 열처리하여 표면의 유기물질 및 이물질을 제거한 후 사용하였다. 유리섬유를 비스페놀형 에폭시 수지는 주재(DGEBA, YD-128)와 경화제(MNA, KBH-1085)를 중량비가 100:80으로 배합하였으며, 경화시간을 단축하기 위하여 경화촉진제(BDMA)는 에폭시 중량의 3%를 첨가시켜 혼합한 후 유리섬유를 함침시킨 후 hot-press 방법으로 겔화 시작점에서 판상으로 몰드하여 경화과정을 통하여 제작하였다. 완성된 복합재료의 섬유 체적함유율을 측정하기 위하여 전자저울에서 무게를 측정하였다. 그리고 복합재료의 섬유 체적함유율은 섬유의 무게, 수지의 무게를 측정하고, 섬유의 밀도와 매트릭스 수지의 밀도에 의해 섬유 체적함유율을 산출하였다. 시험편의 평균 섬유 체적함유율은 54 %인 것을 사용하였다. 또한 그림 8에 복합재료의 주사전자현미경(SEM)을 통해 확인한 표면의 형상을 나타낸다.



(a) untreated



(b) plasma treatment (100 W, 3min)

그림 8 FRP 복합재료의 주사전자현미경 사진  
Fig. 8 SEM photos of FRP composite material

인장강도 측정결과 플라즈마 미처리시 제작된 시료의 인장강도는 280 MPa 정도의 값을 보였으나, 플라즈마 표면처리된 시료의 인장강도는 290 MPa 정도로 미처리된 유리섬유를 복합화한 시료보다 높은 인장강도값을 나타낸다. 이러한 결과는 플라즈마 처리에 의해 유리섬유와 에폭시 수지의 접착특성이 향상된 결과로 판단된다. 즉 플라즈마 처리시 복합재료에 있어서 수분층을 제거하여 계면의 결합요인인 weak boundary layer의 형성을 막아 계면결합이 양호해진 결과이다. 또한 플라즈마 처리시 표면에 생성된 라디칼이 기증 산소와 화학반응을 하여 극성기를 도입하고 이들 극성기 사이에서 수소결합이 가능한 관능기가 많아지고 이 관능기들이 에폭시 수지의 관능기와 반응하여 접착력을 향상시킨 결과로 판단된다[16, 17].

또한 그림 8은 플라즈마로 표면 처리후 제작된 복합재료의 표면 SEM 사진과 플라즈마 처리를 하지 않은 재료의 표면 SEM사진이다. 플라즈마로 표면처리한 복합재료에서는 유리섬유와 매트릭스의 결합정도가 양호할 뿐만 아니라 매트릭스가 유리섬유 주위에 균일하게 접착되어 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 복합재료의 전기적, 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 요인으로 작용한다.

또한 그림 8은 플라즈마로 표면 처리후 제작된 복합재료의 인장파단면과 플라즈마 처리를 하지 않은 재료의 인장파단면에 대한 주사전자현미경(SEM)사진이다. 플라즈마로 표면처리한 복합재료에서는 유리섬유와 매트릭스의 결합정도가 양호할 뿐만 아니라 매트릭스가 유리섬유 주위에 균일하게 접착되어 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 복합재료의 전기적, 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 요인으로 작용한다.

3.5 플라즈마 표면개질 모델링

플라즈마 표면처리에 따른 효과는 첫째, 표면으로부터 오염된 유기물을 제거하는 표면 세정효과, 둘째, weak boundary layer를 제거하는 에칭(etching)효과, 셋째, 표면층의 가교(crosslinking), 넷째, 표면화학구조의 개질(modification) 등의 효과를 나타낸다. 플라즈마를 시료 표면에 처리하면 플라즈마내의 다량의 라디칼이 유리섬유 표면에 충돌하여 플라즈마 처리된 표면에서 친수화를 발생시킨다. 또한 표면의 이물질과 표면에 형성된 수분층을 제거하는 세정효과가 일어난다. 이러한 플라즈마 처리로 인한 표면에서 라디칼 발생과 세정작용으로 인하여 weak boundary layer의 형성을 방지하여 표면에서 친수화가 진행되고 복합재료 제작시 젖음성을 향상시켜 계면결합을 양호하게 형성시킨다. 플라즈마를 이용한 표면개질 과정을 모델링한 결과를 그림 9에 나타낸다. 플라즈마로 유리섬유 표면을 처리하면 다량의 라디칼이 형성되고, 표면에서 수분층을 제거하는 세정작용과 weak boundary layer의 형성을 억제시킨다. 즉, 표면에 형성된 라디칼은 산소를 포함하고 있는 친수성 나타내고 플라즈마 방전 에너지에 의해 표면분자쇄의 저분자화가 진행된다. 플라즈마 표면처리로 인해 표면에서 젖음성의 향상으로 표면 활성화에너지가 증가시켜 유리섬유와 에폭시 복합재료의 제작시 양호한 계면결합을 형성시킨다.

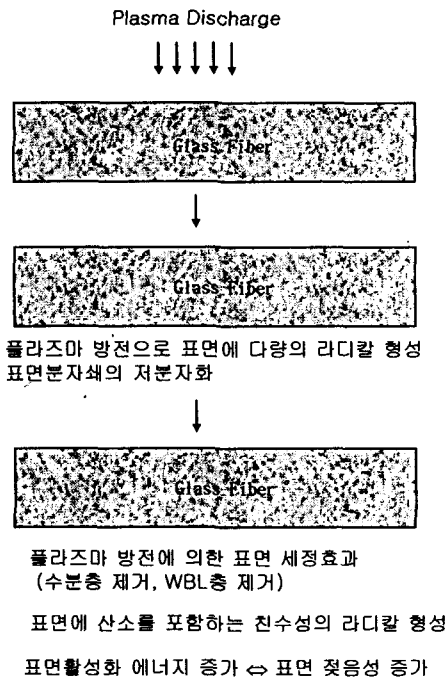


그림 9 플라즈마 처리된 유리섬유 표면개질 과정  
 Fig. 9 Surface modification process of plasma-treated glass fiber

#### 4. 결 론

본 연구에서는 플라즈마 기술을 응용하여 고분자 복합 절연재료의 계면특성 향상을 위한 glass 표면처리조건을 제시하고, 표면개질 모델링을 도출한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- ① 플라즈마 표면처리의 최적조건은 산소분위기에서 100 W, 0.1 Torr, 처리시간 3분이었다.
- ② 플라즈마 처리 한 glass 시료의 접촉각은 12° 이고, 플라즈마 미처리 시료는 26° 이었다. 플라즈마 처리에 따라 접촉각이 감소함을 알았다. 그리고 플라즈마 미처리 시료의 표면에너지는 65.73 mJ/m<sup>2</sup>이지만, 플라즈마 처리하면 71.46 mJ/m<sup>2</sup>로 증가한다. 이로써 플라즈마 처리하면 표면이 활성화함에 따라 친수적 표면으로 변화되고 젖음성이 증가함을 알았다.
- ③ 플라즈마 미처리 glass 시료의 비유전율은 10 kHz 주파수 대역에서 8.16을 나타내지만 플라즈마 처리한 시료의 비유전율은 같은 10 kHz 주파수 대역에서 7.99로 감소하였다. 이는 플라즈마 처리로 표면 세정작용에 따른 것으로 추정된다.
- ④ 플라즈마를 처리하지 않은 유리섬유를 보강한 에폭시 복합재료의 인장강도는 280 MPa이며, 플라즈마 처리한 복합재료는 290 MPa를 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 인하대학교 박사후 연구과정 (Post-Doc.) 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] K. Dušek, "Epoxy Resins and Composites", Springer-Verlag, pp. 24~54, 1985.
- [2] Y. Watanabe, "Development of Outdoor Epoxy Resin Mold Apparatus for Distribution Systems", IEEE Trans, On Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 204~211, 1990.
- [3] H. Hara, C. H. Park, M. Akazaki, "Effect of Heat Treatment and Mechanical Stress on the Dielectric Strength of Uniaxially Drawn PET Film", IEEE EI, Vol. 19, No. 4, pp. 273~280, 1984.
- [4] M. H. Geier, "Quality Handbook for Composite Materials", Chapman & Hall, pp. 4, 1994.
- [5] Dr. A. Brent Strong, "Fundamentals of Composites Manufacturing", Society of Manufacturing Engineers, pp. 15~21, 1989.
- [6] R. Yosomita, K. Morimoto, A. Nakajima, Y. Ikada, T. Suzuki, "Adhesion and Bonding in Composites", Marcel Dekker Inc., pp. 109~147, 1989.
- [7] Edwin P. Plueddemane, "Interface in Polymer Matrix Composite", Academic Press, New York & London, Vol. 6, pp. 173~216, 1974.
- [8] Akemi Futakawa and S. Yamasaki, "Dynamic Deformation and Strength of Stator End Winding During Sudden Short Circuit", IEEE EI, Vol. 16, No. 1, pp. 31~39, 1981.
- [9] W. Johnson and S. K. Ghoshm, "Some Physical Defects Arising in Composite material Fabrication", J. of. Materials Sci., Vol. 16, pp. 285~301, 1981.
- [10] M. Mercedes Pastor-Blas, Jose Miguel Martin-Martinez, John G. Dillard, "Surface Characterization of Synthetic Vulcanized Rubber Treated with Oxygen Plasma", Surface and Interface Analysis, Vol. 26, pp. 385~399, 1998.
- [11] N. Dilsiz, E. Ebert, W. Weisweiler, G. Akovali, "Effect of Plasma Polymerization on Carbon Fibers Used for Fiber/Epoxy Composites", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 170, pp. 241~248, 1995.
- [12] 임경범, 이덕출, "플라즈마 표면처리가 Poly(ethylene terephthalate) 필름의 전기적 및 기계적 성질에 미치는 영향", 한국산업안전학회, Vol. 16, No. 3, pp. 61~67, 2001.

- [13] D. W. Van Krevelen, "Properties of Polymers", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 227~240, 1990.
- [14] 堺 孝 夫, "放電による固體誘電體表面の劣化と改質", 靜電氣學會誌, Vol. 18, No. 5, pp. 449~456, 1994.
- [15] Michael L. Owen and Patrick J. Smith, "Plasma treatment of polydimethylsiloxane", Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion, K. L. Mittal(ed.), VSP, pp.319~325, 1995.
- [16] 中尾一宗, "表面, 接着, 複合材料", 表面技術, Vol. 42, No. 10, pp. 964~975, 1991.
- [17] R. Yosomota, K. Morimoto, A. Nakajima, Y. Ikada, T. Suzuki, "Adhesion and Bonding in Composites", Marcel Dekker Inc., pp. 49~81, 1989.

## 저 자 소 개



### 임 경 범(林 暎 範)

1969년 9월 18일생. 1993년 2월 인천대학교 공대 산업안전공학과 졸업. 1999년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현 인하대학교 박사후 과정 연구원

Tel : (032) 860-7393

Fax : (032) 863-5822

E-mail : kblim69@orgio.net



### 이 덕 출(李 德 出)

1939년 1월 22일생. 1963년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1966년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년 9월 일본 나고야대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1998년 인하대학교 공대 학장. 1998년 대한전기학회 회장. 1978년~현재

인하대학교 전기공학과 교수

Tel : (032) 860-7393

Fax : (032) 863-5822

E-mail : leedc@inha.ac.kr