

건식 열화처리가 FRP의 표면 열화와 유전특성에 미치는 영향

The Influence of Dry Treatments on the Surface Degradation and Dielectric Properties in Fiber Reinforced Plastics

이백수* · 이덕출* · 정의남** · 유도현*** · 김종택*

B.S. Lee · D.C. Lee · E.N. Chung · D.H. You · J.T. Kim

(1998년 6월 11일 접수, 1998년 9월 22일 채택)

ABSTRACT

In this paper, we investigated the change of wettability, surface potential decay and dielectric properties caused by ultraviolet-treated, thermal-treated and discharge-treated FRP(fiber reinforced plastics) respectively for finding out the influence of dry treatments effected to electrical characteristics on the surface of polymer composites.

For the change of wettability, the contact angle of thermal-treated specimen with the high temperature of 200°C increased. But that of UV-treated and discharge-treated specimen decreased. The characteristic of surface potential decay shows the tendency of the remarkable decrease on UV-treated and discharge-treated specimens, but no difference on thermal-treated specimen compared with untreated one. Also, for the dielectric properties, it shows the increase at large on the treated specimens and especially, the remarkable increase on thermal-treated one.

1. 서 론

유기고분자 재료는 물질구성에서 기대되는 우수한 전기 절연성과 광범위하게 변화할 수 있

는 기계적 특성 및 화학적 안정성 때문에 전기·전자부품, 전력·통신케이블 및 전자 Device 등 각종 전기 절연분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.

* 인하대학교 전기공학과

** 삼척산업대학교 전기과

*** 안산전문대학 전기과

특히, 근래 이들 재료에 기계적 특성을 보강하기 위해 유기재료와 무기재료를 복합화시킨 Hybrid고분자 재료가 다방면에 걸쳐 개발 및 이용되고 있는데, 그 중 유리섬유강화 복합재료(FRP: fiber reinforced plastics)는 고분자 화학의 발전에 힘입어 애자, 부싱, PCB기판 및 항공, 우주 산업에 이르기까지 그 응용 분야가 급격하게 확대되어 가고 있는 실정이다¹⁾.

그러나 FRP를 전기절연재료로서 옥외환경에서 사용하는 경우, 제품의 수명 및 성능을 저하시키는 다양한 물리·화학적 열화요인에 노출된다. 예를 들어, 태양의 복사열, 자외선, 방전, 습기 및 온도의 극한적 변화, 염분, 오염물의 부착 등을 들 수 있다. 이러한 외적 요인으로 발생하는 열화는 복합재료 구성성분 중, 주로 유기고분자 재료 및 인위적으로 복합화된 계면의 특성 변화가 지배적인 인자로 되고 있다. 이것이 복합재료의 사용에서 장기적으로 요구되는 전기적·기계적 성능 저하에 중대한 영향을 미쳐, 최종적으로 절연파괴 현상을 야기시킨다²⁾. 이러한 문제가 있음에도 불구하고, 고분자 복합재료의 성능과 수명에 미치는 열화요인의 영향에 대해서는 아직 연구가 미흡한 실정이다. 특히 고분자의 종류에 따라, 실제환경에서 발생하는 열화 메커니즘은 다르게 진행되며³⁾, 에폭시/유리섬유의 복합체인 FRP의 각종 환경에 있어, 경시적 특성저하에 대한 보고는 매년 급속히 늘고 있는 FRP의 사용량에 비해 거의 없는 실정이다. 따라서, 여러 가지 열화요인으로부터 발생하는 복합재료의 특성변화를 검토하여 두는 것은 활용면에 있어 제품의 수명 예측과 장기적 신뢰도 향상에 중요한 정보를 제공할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 FRP의 특성변화에 영향을 주는 열화요인들 중 건식열화 특성을 규명하기 위하여 실제 고분자 절연재료로 사용되고 있는 FRP 복합재료를 각각 자외선 조사, 방전 열화 및 고온 열화를 통하여 가속열화시켜 이들 재료의 표면 열화특성과 유전특성을 비교 분석하여 건식 열화에 의한 FRP재료의 특성변화를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 처리시료의 제작

본 실험에서 사용한 시편은 프레스성형법으로 제작된 글라스크로스 적층판으로서 에폭시 수지에 글라스 화이버를 이축방향으로 직조하여 배열시킨 것이다. 글라스화이버의 직경이 10 μ m 이고, 함유량은 체적비로 각각 52, 46%의 두가지 시료를 사용하였으며 실험에 사용된 각 FRP의 사양을 Table 1에 나타냈다. 시료의 처리에 따른 특성변화를 관찰하기 위하여 섬유방향에 대해 45°, 두께 1.5mm로 절단한 후 절단면을 연마하였으며, 연마제 및 접착제 성분 등의 불순물을 제거하기 위하여 에탄올 용액속에서 초음파 세척후 건조 처리하여 시료로 사용하였다.

Table 1 Specification of FRP laminate

	시료 A	시료 B
FRP 구성	글라스크로스 적층판	
성형법	프레스성형법	
글라스표면처리	에폭시실란	
비중	1.9	1.8
글라스함유율 (중량비)	69%	64%
글라스함유율 (체적비)	52%	46%
제조회사	(주)아리사와(日本)	

2.2 측정

열에 의한 시료의 가속열화는 일정한 가스분위기(공기), 일정 압력(상압) 하에서 열화온도를 200 $^{\circ}$ C로 일정하게 유지하면서, 열화시간을 각각 20, 40, 60, 80시간씩 변화시켜 가며 일반 전기로(CS 5-12, 조선과학기계제작소) 내에서 처리한 후 특성 변화를 조사하였다. 방전 열화처리 는 캐리어 가스의 유량은 25 ml/min, 방전시 반응기 내부의 압력은 0.2 Torr, 방전전력 50W로 유지한 산소 가스분위기 하에서 저온플라즈마 형태를 이용하여 1, 2, 3, 4시간씩 열화처리하였다. 또한 자외선 열화처리는 분광자외선 조사장치(UV-A, THE Q-PANEL CO.)를 이용하여 공기 분위기, 상압 하에서 220V, 300~400 mA의 에너지로 380nm~320nm의 파장 범위 내에서 20, 40, 60, 80시간씩 각각 처리한 후 특성변화를 관측하였다.

시료표면의 젖음성측정은 표면과 물방울 사

이에 형성되는 접촉각으로 결정되는데, FRP의 경시적 표면열화의 측정은 20°C의 실온에서 Contact Angle Meter(Tantec Co.)를 사용하였으며, 탈이온 증류수 5 μ l를 Sessile Drop형태로 시료 표면에 하적하여 1분이 경과한 후 He-Ne레이저를 조사하여 반사된 빛의 각도를 측정하고, 이를 10회 연속 측정하여 그 평균값으로 나타내었다.

표면의 전기적 특성변화를 알아보기 위하여 코로나 대전장치(Electrostatic Honestmeter, Hi-shido Co.)를 이용하여 시료 표면을 대전시킨 후, 전하의 경시적 변화를 측정하였다. 이때에 가해진 전압은 3kV, 대전시간 5분, 정(⊕)·부(⊖)극성 전하주입으로 수행하였고, 전극과 시료 표면의 거리는 5mm, 탐침(Probe)과 시료표면 거리는 2mm로 유지하면서 표면전위가 초기치의 1/2에 이를 때까지 측정을 하였다.

또한 유전을 및 유전손을 측정하기 위하여 시료의 크기에 적합한 원형의 마스크를 제작하여 Al으로 진공증착하고 실버페스트로 리드선을 접속하여, 일정시간 건조시킨 후 항온조에 넣고 임피던스 어날라이저(4192A, Hewlett Packard)에 연결하여 60Hz~10MHz에 이르는 주파수 영역에 걸쳐 유전특성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 질량 변화

자외선, 열 및 방전 열화시킨 각 시료에 대한 질량변화를 Fig. 1에 나타낸다. 방전열화와 자외선열화된 시료의 질량변화는 선형적인 감소를 보였으며, 특히 방전열화에 따른 시료의 질량감소가 가장 현저하게 진행됨을 알 수 있다. 또한, 열 열화된 시료의 질량변화는 20시간 이후부터 급격히 발생하여 자외선열화된 시료의 질량 변화량보다 처리시간 경과에 따른 감소량이 크게 나타났다. 이는 열화가 진행됨에 따라 열에너지가 점차적으로 시료 표면 뿐만 아니라 내부 계면까지 영향을 미쳐, 공유결합에 의한 3차원 구조를 갖는 고분자 매트릭스와 계면의 불안정한 비결합 전자쌍 및 이중결합의 전자를 여기시켜서 열산화 속도를 급격히 증가시키고 이로 인

한 질량감소가 가속된 것으로 생각된다³⁾. 방전 열화의 경우에는 단시간 내에 급격한 질량변화를 보이는데, 이것은 자외선 및 열 열화와는 달리 시료의 Binding energy보다 강한 방전 전리 에너지가 시료 표면에 조사됨으로 인해 결합쇄의 파괴가 급격히 발생된 결과로 보여진다. 그러나 자외선열화의 경우에는 photon을 통한 여기에너지의 주입이 시료 내부에까지 이르지 못하고 극표면(수십 Å)에 한정적으로 작용하여 질량변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 추정된다⁴⁾.

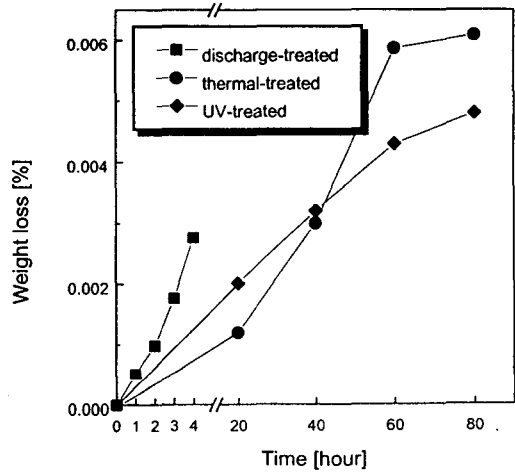


Fig. 1 Weight loss of treated FRP

3.2 접촉각

열화시간의 경과에 따른 각각의 접촉각 변화를 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 열화되지 않은 시료의 접촉각이 70° 정도이나 각종 열화가 진행됨에 따라 방전열화와 자외선열화의 접촉각이 크게 줄어드는 경향을 보였다. 특히, 방전열화 시료는 단기간 열화에서도 접촉각이 급격히 감소하여, 4시간 열화 시료가 20° 이하의 낮은 값을 나타냈다. 자외선열화 시료는 열화가 진행됨에 따라 접촉각이 서서히 감소하며 열화된 표면의 젖음성 증가를 보였다. 그러나 열 열화 시료의 접촉각 변화는 열화시간이 경과함에 따라 접촉각이 오히려 증가하여 80° 이상의 값을 나타내며, 자외선 및 방전열화와는 다른 특성변화를 보였다. 자외선 및 방전열화의

경우에는 강한 주입에너지가 시료 표면에 충돌하여 공유결합쇄의 파괴를 야기하고, 인접한 결합쇄와의 연속적인 파괴를 일으킨다. 특히 결합력이 약한 C-C 및 C-H의 파괴가 집중적으로 발생되어 대기 중의 산소와 재공유가 유도되며, 최종적으로 열화로 인한 표면은 산소를 갖는 다양한 친수적 극성표면으로 변화한다. 이러한 과정을 통한 고분자 표면의 급격한 산화가 표면 젖음성의 증가를 야기시킨 것으로 생각된다^{4,5)}. 또한, 방전열화와 자외선 열화를 비교해 볼 때, 방전열화 하에서는 전리된 강한 이온에 충돌한 흔적으로 cave형태의 표면요철이 발생되었고, 표면에 다양한 산소기 및 -OH의 極性水酸基 유기와 함께 표면요철 발생이 자외선열화에 비해 훨씬 큰 접촉각 변화를 나타내는 것으로 추측된다^{6,7)}. 이에 반해, 열에 의한 FRP의 특성변화는 표면에 친수적 라디칼이 생성되기 보다는 오히려 표면에 잔존하던 저분자 물질의 증발과 함께 표면 및 내부에 존재하던 미반응 물질의 재가교 및 에폭시(CH_2-CH) 내에 존재하는 산소와의 이중 결합쇄가 형성되는 등 열에 노출된 시료의 재경화로 인하여 표면 활성도가 지연되어, 방전 및 자외선열화와 상반되는 접촉각의 증가가 나타난 것으로 생각된다⁸⁾.

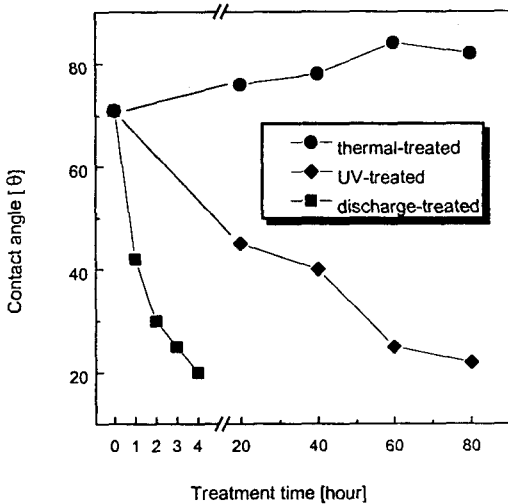


Fig. 2 Contact angle of Treated FRP

3.3 표면 열화

각종 열화된 시료의 SEM에 의한 표면변화를 Photo.1에 나타낸다. 열화되지 않은 시료에 비해, 방전열화 시료와 자외선열화 시료의 표면변화는 상당히 진전되고 있다. 자외선 열화의 경우는 단시간 열화에서도 시료 표면이 크게 파괴된다. 특히 에폭시 표면이 강하게 패여 나가는 형태의 변화가 보인다. 자외선 열화된 경우에는 표면이 cave형태로 깎여 나가는 방전열화 시료와는 달리 craze가 에폭시 표면에 서서히 진전되는 형태의 변화가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 열 열화의 경우는 경시적 변화에 있어 40시간까지는 변화가 거의 발생하지 않았으며, 80시간 열 열화시료에서 약간의 표면변화를 볼 수 있었다.

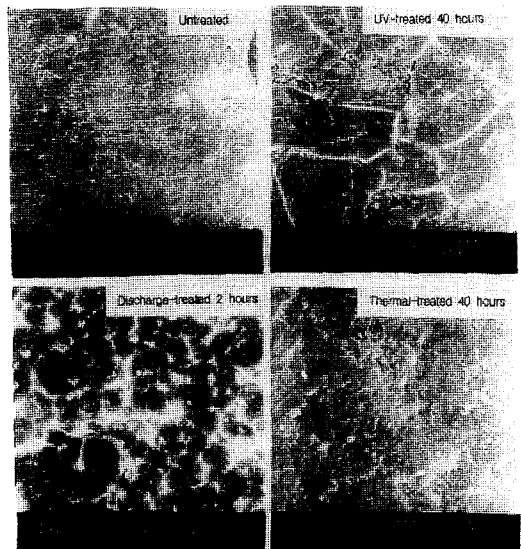


Photo. 1 SEM of the surface of FRP after treatment

각종 열화로 인한 시료 표면변화의 발생과 진전은 각기 다른 형태로 나타남을 알 수 있다. 즉, 방전열화는 강한 전리상태의 이온 및 전자 에너지가 국부적으로 편중되어 시료 표면에 홈과 같은 깊은 cave를 형성하고, 열화시간이 장시간으로 됨에 따라 연속적인 내부로의 파괴가 진행된다. 자외선열화는 표면이 단파장의 광에너지에 충돌하여 전자적 여기와 화학적 반응을

일으켜서 전리되며, 2차적으로 분자쇄의 절단으로 결합력이 저하하여 craze가 발생하는 것으로 추정된다. 그러나 열 열화 시료는 자외선열화 및 방전열화와 같은 표면에서의 강한 표면열화는 보이지 않았고, 오히려 접착각이 증가하는 현상에서 알 수 있는 바와 같이 에폭시수지 부분에서 미반응물과의 결합에 따른 재경화의 결과로 시간이 경과하며 domain이 증가하는 것을 알 수 있었다.

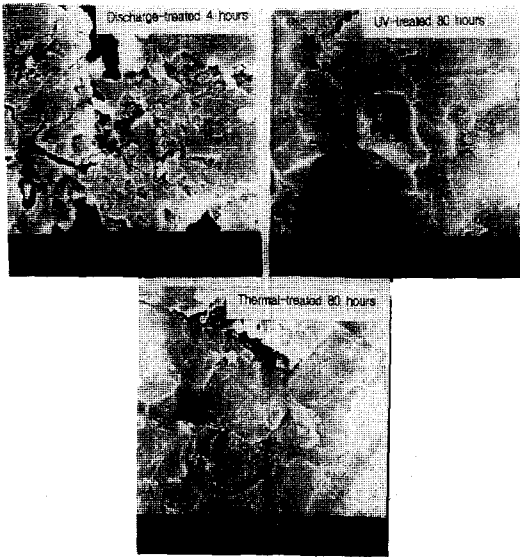


Photo. 2 SEM of the surface of FRP after treatment

3.4 표면전위 감쇄특성

각종 열화된 시료로부터 관측한 접착각 변화와 전기적 특성변화와의 상관관계를 분석하기 위해, 시료를 코로나 대전장치에 설정하고 대전 전압(V.) 3kV, 대전시간(t_c) 3분의 일정한 실험 조건으로 코로나 대전시킨 시료의 표면전위감쇄 특성을 Fig. 3, 4, 5에 각각 나타낸다. 각각의 열화 시료는 정(+)극성으로 주입된 전위는 약 1.7kV, 부(-)극성으로 주입된 시료의 표면전위는 거의 2kV 정도의 초기 대전값과 극성효과를 나타냈다. 전위 감쇄특성에서 현저한 감쇄를 나타내는 것은 자외선 열화된 시료이며, 대전종지 후 표면전위가 거의 1분 내에 완전히 zero값으로 감쇄한다. 방전 열화된 시료 역시 열화시간

에 비례하여 표면전위감쇄가 크게 발생했다. 각종 열화된 시료 중, 열 열화 시료가 가장 적은 변화를 보이며 오히려 열화되지 않은 시료보다 전하감쇄가 일어나지 않고 있다. 또한 자외선 및 방전열화된 시료의 전위감쇄특성은 처리시간이 증가함에 따라 표면전위가 급격히 감소하고, 감쇄의 정도에 있어서도 경시적으로 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 극성효과에 있어서는 정(+)전하에 의한 시료의 전하축적보다는 부(-)전하에 의한 축적이 한층 크게 나타났고, 시간의 경과에 따른 감쇄 역시 부전하로 대전된 시료에서 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 시료 표면이 방전 및 자외선 열화로 인해 근본적으로 열 열화된 시료와는 다른 형태의 표면변화가 발생되고 있음을 추정할 수 있다. 접착각 변화의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이, 방전 및 자외선 열화는 내부보다 상대적으로 불안정한 구조로 결합되어 있는 FRP 표면의 망목상 고분자 쇄를 강한 여기에너지(광 및 전리)로 여기시켜 표면 결합쇄를 절단하여 반응성 라디칼을 집중적으로 발생시킴으로서 표면이 급격하게 친수적 특성이 나타났기 때문으로 생각되었다. 그러나 열 열화에 의한 전위 감쇄특성의 변화는 라디칼이나 극성수산기의 생성보다는 오히려 저분자물질의 증발과 재가교가 촉진되어 표면에 반응성 극성기가 감소된 결과로 추정할 수 있다.

또한, 부코로나 대전에 의한 이온 주입은 안정적으로 이루어지는 것에 반해, 정코로나 대전에 의한 전하주입은 대전 전반에 걸쳐 상당히 불안정한 특성을 보였다. 이는, 각각의 처리로 인해 시료표면에 발생된 라디칼 및 활성종 등이 절단된 결합쇄와 재반응하여 산소 및 수산기를 포함하는 부(-)성 극성기가 생성되었기 때문으로 추정되며, 이로 인해 부코로나 주입이 정코로나 주입에 비하여 표면전위가 훨씬 높게 나타나는 것으로 생각된다. 부코로나 방전으로 표면에 공급되는 이온은 열화로 인해 발생한 부성극성기의 영향을 받아 시료 표면에 지속적인 축적이 이루어지는 것에 반해, 정코로나 방전으로 주입된 정이온은 대전이 진행되는 동안 표면의 부성 극성기와 활발히 재결합을 일으켜 부코로나

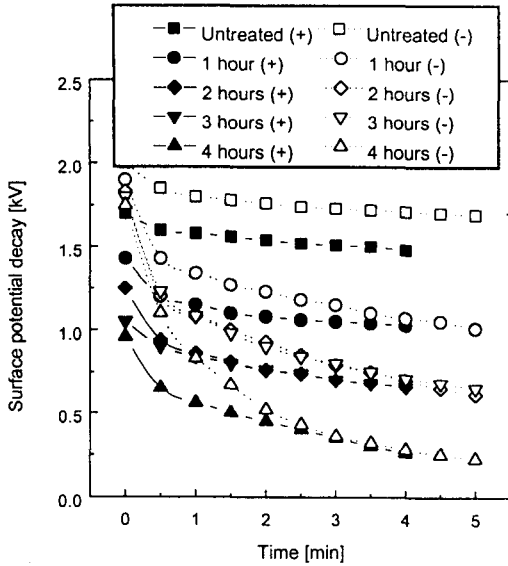


Fig. 3 Surface potential decay on discharge-treated FRP

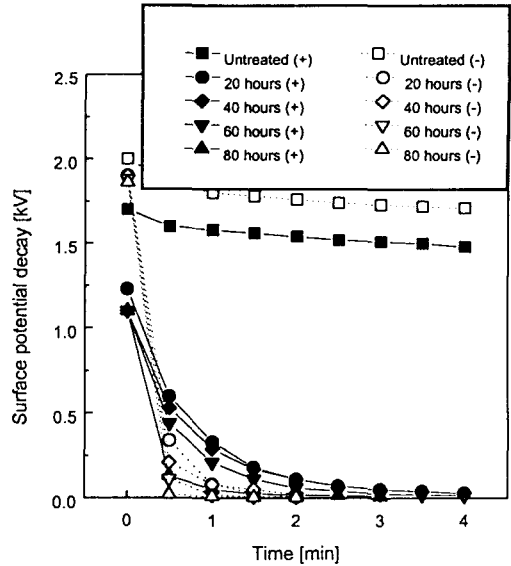


Fig. 5 Surface potential decay on UV-treated FRP

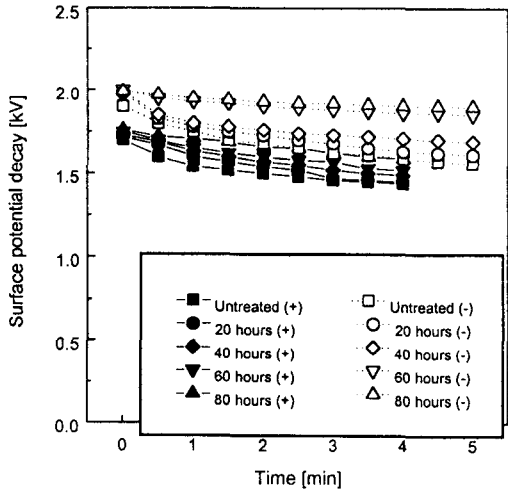


Fig. 4 Surface potential decay on thermal-treated FRP

대전에 비하여 불안정한 대전특성을 나타내며 최종적으로 낮은 전위를 나타내게 된 것이다.

표면전위감쇄와 접촉각 변화를 상호 비교해 보았을 때, 방전 및 자외선 열화로 인해 FRP 표면에는 부극성을 띠는 수산기 및 산소기가 집중적으로 발생한 것으로 생각된다. 이러한 라디칼들로 인해 표면 에너지가 증가하고 젖음성이 큰 친수적 극성 표면으로 변하며, 전기적으로는

표면전위감쇄가 단시간 내에 급격히 일어나게 되는 반비례적 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 즉 젖음성이 증가할수록 표면에 전하의 축적이 어려워지며 또한 축적된 전하의 누설이 쉽게 이루어짐을 알 수 있었다.

3.5 유전율 분석

각각의 조건에서 열화된 시료의 유전율 특성을 Fig. 6, 7, 8에 나타낸다. 유전율은 측정 주파수 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이며 각종 처리시간이 길어짐에 따라 증가하고 있다.

초기 열화되지 않은 시료의 유전율은 약 4 정도의 값을 나타낸다. 그러나 방전열화된 시료는 4.5~5.5, 자외선열화의 경우는 4~5, 그리고 열열화 시료의 것은 5~6.5 정도의 값을 보인다. 유전율 변화에 있어서, 가장 큰 변화를 보이는 것은 열 열화 시료이며, 처리시간의 경과에 따라 약간의 차이를 보이는 플라즈마처리 및 자외선처리 시료와는 달리, 급격히 증가함을 알 수 있다. 열열화 시료가 장시간 강한 열에너지에 노출됨으로 열화의 초기단계에서는 수지와 경화재 사이에 재경화 반응이 진행되지만, 시간이 경과함에 따라 과경화 반응으로 이어져 수지 내부 및 유리섬유와의 계면에서 박리가 발생되기

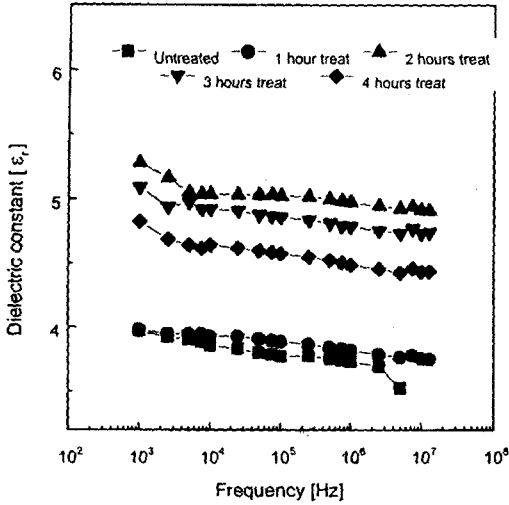


Fig. 6 Dielectric constant vs frequency with exposure time on discharge-treated FRP

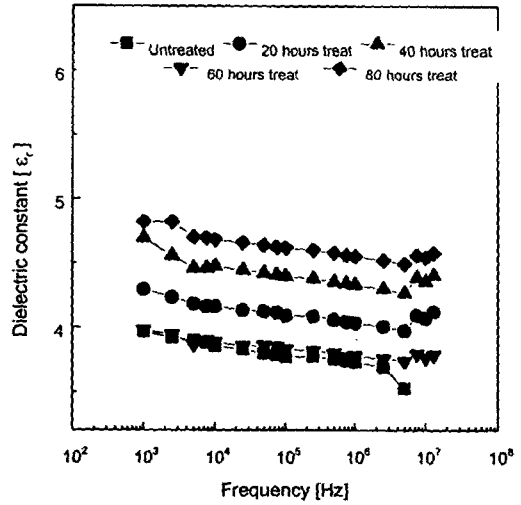


Fig. 8 Dielectric constant vs frequency with exposure time on UV-treated FRP

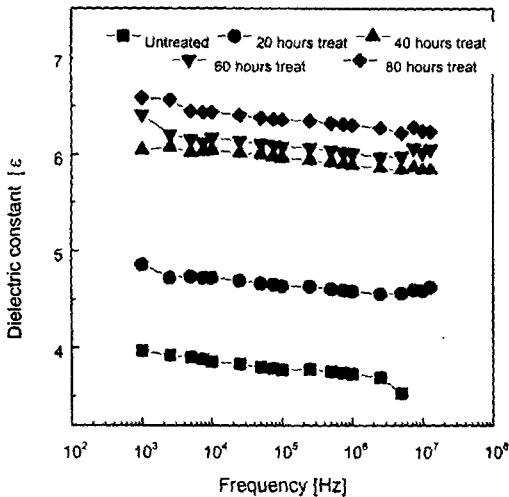


Fig. 7 Dielectric constant vs frequency with exposure time on thermal-treated FRP

시작한다. 또한 수지와 유리섬유 사이의 계면에서 열팽창 계수의 차이로 인한 슬립(slip)이 발생된다. 이로 인해, 시료 내부에서 계면상 결합쇄의 절단 및 크랙(crack)으로 이어져 유전율이 크게 상승한 것으로 생각된다^{9,10)}. 방전 및 자외선열화에서는 여기에너지가 시료표면에만 한정적으로 작용하여, 시료 표면에서의 다양한 구조 변화 및 전자여기를 통한 분자쇄의 파괴를 유발

한다. 특히, 자외선 열화는 시료 극표면의 활성화 만들 유발시키지만, 방전열화는 내부로 수백 nm의 cave 및 crack을 야기시켜 계면분극 및 쌍극자 배향분극의 증가로 자외선열화 시료보다 유전율이 상승한 것으로 생각되었다.

4. 결론

FRP의 성능에 영향을 미치는 열화요인 중 건식열화 과정에 속하는 자외선, 열 및 방전 열화에 의한 경시적 열화특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 각 열화로 인한 접촉각 변화에서, 가장 급격한 변화를 보이는 것은 방전열화된 시료이며, 주입에너지가 표면(수백 nm)에 집중적으로 작용하여 공유결합된 C-C 및 C-H의 파괴를 야기하고 기중 산소와 개공유를 발생하여 친수적 극성표면으로 변화됨을 알 수 있다. 그러나 열열화된 시료의 접촉각은 열화되지 않은 시료보다 오히려 증가하는 소수적 표면특성을 보였다. 이는 열에 노출된 시료가 잔존하던 미반응 물질과의 재가교 및 산소와의 이중결합쇄를 형성하여 재경화 반응이 일어난 결과로 생각된다.
- 2) 각각의 건식열화로 인한 표면전위 감쇄특성

은 열열화를 제외한 방전열화 및 자외선열화 모두 열화처리 시간이 길어질수록 축적되는 전하량이 크게 줄어들음을 알 수 있었고, 정(⊕)극성 및 부(⊖)극성의 결과에서는 열화처리로 인해 표면에 발생된 극성기는 산소를 포함하는 부성 수산기로 결론질 수 있었다. 따라서, 각종 절연재료로 사용되는 FRP는 열에 의한 영향보다는 자외선이나 방전환경하에서 표면 절연특성이 급격히 저하됨을 알 수 있었다.

- 3) 열화에 따른 시료의 유전특성 변화는 각 시료 모두 유전율이 상승하는 결과를 얻었다. 특히, 열 열화된 시료의 유전율이 2배 가까운 유전율을 나타냈다. FRP는 강한 열에 노출될 시, 표면의 전기적 인 특성의 저하보다는 오히려 내부에서의 수지와 섬유사이에서 계면박리와 이중 물질 간의 열팽창 계수의 차이로 인한 슬립(slip) 발생의 결과로 기계적 인장강도 저하를 나타내게 된다¹¹⁾.

본 연구는 기초전력공동연구소에서 주관하는 '98전력기술기초연구과제(97-중-06)에 의해서 수행되었음을 알립니다.

참 고 문 헌

- 1) 森田幹郎, 岩本 博, “電子工學のための複合材料”, 電子通信學會編, pp. 1~9, 1986.
- 2) 松岡良輔, 石原正道, “送配電用ポリマーがいしの開發”, 電氣學會誌, Vol. 18, No. 4, pp. 347~354, 1994.
- 3) 高柳素夫, 三田 達, “高性能高分子複合材料”, 丸善株式會社, pp. 285~326, 1990.
- 4) 寺本和良, 岡島敏浩, 松本好家, 栗原茂, “紫外線による表面改質”, 日本接着學會誌, Vol. 29, No. 4, pp. 180~187, 1993.
- 5) Takao Sakai, Makoto Nakao, Satohiko Hoshino, Motoshige Yumoto, “Processing of Polymer Surface by Low Pressure Discharge in Gases” 電氣學會誌, Vol. 112, No. 8, pp. 718~723, 1992.
- 6) Fabio Garbassi, Marco Morra, Ernesto Occhiello, “Polymer Surfaces”, John Wiley & Sons LTD, pp. 301~331, 1994.
- 7) M.B. NEIMAN, “Aging and Stabilization of Polymers”, ИЗДАТЕЛЬСТВО<НАУКА>, pp. 5~33, 1964.
- 8) Souheng WU, “Polymer Interface and Adhesion”, MARCEL DEKKER, INC., pp. 276~328, 1982.
- 9) P. Plueddemann, “Composite Materials-Mechanism of Adhesion through Silane Coupling Agents”, Academic Press, pp. 174~216, 1974.
- 10) 高分子學會高分子實驗學編集委員會, “熱力學的・電氣的 および光學的 特性”, 共立出版株式會社, pp. 284~345, 1984.
- 11) 이백수, 이덕출, “열처리가 유리섬유 강화 복합재료의 전기적 및 기계적 성질에 미치는 영향”, 한국전기전자재료학회, Vol. 11, No. 3, pp. 174~180, 1998.