

## 폴리머 애자용 EPDM 고무의 자외선 열화특성

### UV Aging on EPDM rubber for use in polymer Insulators

연복희\* · 이상용\* · 안종식\* · 허창수\*

(Youn Bok Hee\* · Lee Sang Yong\* · An Jong Sik\* · Huh Chang Su\*)

#### Abstract

The effects of accelerated UV radiation on EPDM used for a polymeric insulator were investigated by contact angle, surface voltage decay after corona charging, SEM-EDX, ATR-FTIR and XPS. EPDM occurs as loss of hydrophobicity by UV treatment, which followed by surface cracking and chalking. The surface voltage decay on UV-treated EPDM show that the shorter decay time corresponded to the treated samples with a longer UV exposure time. The surface oxygen and aluminum content were found to increase and carbon decrease, as is observed in EDX analysis. The ATR-FTIR and XPS indicated that C-C and C-H groups decreased and the highly oxidized carbon bonds such as C-O, C=O and O-C=O increase with time. Also, the effects of surface charges on hydrophobicity based on our results is discussed.

**Key Words :** Polymeric outdoor insulator, EPDM, UV-radiation

#### 1. 서론

옥외용 폴리머 절연재료는 기존의 자기질 및 유리 질 절연물보다 경량, 발수성, 기계적 강도, 내오손특성 등이 우수하여 전 세계적으로 사용이 확대되고 있다. 이로써 설치비용 및 유지보수 비용을 절감하고 있으며, 새로운 기능이 부가된 고분자 절연물이 개발되고 있다. 우리나라에서도 기존 자기질 애자를 대체하여 폴리머 애자가 사용되기 시작한 이후로 많은 업체에서 각기 특성을 가진 재료를 사용하여 외피를 제조·판매하고 있다. 하지만, 옥외용 고분자 재료로 사용되고 있는 실리콘 고무, EPDM, Epoxy 수지 같은 재료는 고분자이기 때문에 장기간 옥외에 노출될 경우에 성능이 저하하는 단점을 가지고 있어 많은 연구자들은 정확한 열화 메카니즘을 밝히고 교체주기를 결정하기 위한 많은 노력을 하고 있다. 더구나, 30년 이상 운전경험이 있는 외국에 비해 우리나라에서는 실제 사용기간이 짧아 국내실정에 맞는

정확한 열화형태 및 판정에 대한 기준이 부족한 상태이다.

본 논문에서는 배전용 폴리머 현수애자의 갖 재료로 많이 사용되고 있는 EPDM 고무의 옥외 사용 시 발생하는 자외선의 노출을 통하여 절연재료 표면의 전기적 특성변화와 물리·화학적 특성변화를 살펴봄으로써 열화정도를 파악하고 적절한 교체주기에 도움이 되고자 하였다. 또한, 표면에 축적된 전하량의 감쇠특성을 살펴봄으로써 축적전하의 표면발수성 영향 등을 고찰하였다.

#### 2. 실험

본 실험은 옥외 절연용 EPDM을 대상으로 하였으며, 각종 첨가제가 첨가된 것이다. 시료는 5mm의 판상시료로 준비하였고, 표면에 불순물 제거를 위하여 초음파 세척기로 단시간 세정하여 100시간 이상동안 데시게이터 안에서 건조하였다. 자외선 처리는 Q-panel 사의 QUV accelerated weather tester를 사용하였는데, 본 장치는 UVB type의 313nm에서 최대 방사강도를 가지는 램프가 양쪽에 8개 부착되어있다. 처리기간 중 휴지기간이나 응축, 스프레이를 사

\* 인하대학교 전기공학과  
(인천시 남구 용현동 인하대학교,  
Fax: 032-863-5822  
E-mail : g1991139@inhavision.inha.ac.kr )

용하지 않아 자외선 만의 열화영향을 시험하였다. 최대 방사파장에서 자외선 조사강도와 분위기 온도는 각각  $0.67\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$ 와  $50^\circ\text{C}$ 로 자동조절 하였다.

자외선이 조사되는 동안 초기시료와 일정시간 단위로 꺼낸 시료를 대상으로 표면발수성 및 표면전위 감쇠특성을 조사하였고, SEM을 이용한 미세구조 변화와 EDX와 XPS 분석을 통하여 재료 표면에서의 구성성분의 변화와 화학적 구조변화, 그리고 FTIR을 이용하여 화학적 특성기의 변화를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 접촉각

옥외용 절연물에서 열화와 관련된 방전은 오손과 흡습상태에서 발생하므로 외피재료의 표면발수성은 절연성능 및 장기성능에 크게 영향을 주므로 대단히 중요하다. 자외선 조사시간에 따른 EPDM의 단위시간별 접촉각 측정결과를 그림 1에 나타내었다. 자외선 조사시간이 점차 길어지면서 표면 발수성이 손상되어, 4000시간 조사된 시료는 적하된 후 물막을 이루었다. 또한 육안으로 자외선 처리된 시료표면에 흰색 가루형태의 초킹현상이 일어난 것을 볼 수 있었다. 이는, 본 연구에 사용된 자외선 램프의 주파장 대역이  $313\text{nm}$ 임( $h\nu=382\text{kcal}/\text{mol}$ )을 고려할 때, 자외선의 광양자 에너지가 EPDM의 주쇄나 측쇄( $\text{C}-\text{C}=348\text{kcal}/\text{mol}$ )의 결합에너지보다 크므로 이러한 결합체를 절단시키기에 충분하다. 그러므로, 고에너지의 자외선 조사로 발수성이 저하하는 것은 주쇄 및 측쇄 결합력이 약해 절단되고, 반응성 산소기의 부착으로 표면에너지가 높아져 친수화된 것으로 생각된다.

#### 3.2 표면전위 감쇠

기존 연구결과에 따르면 표면에 축적된 전하로 인하여 표면 발수성은 상당히 감소하며, 시간이 지나면서 표면전하는 감소하고 이에 따라 발수성도 다시 회복한다는 사실을 발표하였다.<sup>1),2)</sup> 이러한 현상은 폴리머 절연재료 뿐만 아니라 자기질 및 유리질에서도 같은 경향을 나타내었다. 이러한 표면전하의 축적은 교류 고전압 인가 중 분극현상이나 표면에 적하된 물방울 사이의 전기적 거동으로도 표면이 대전될 수 있다는 연구결과가 있으며, 이러한 전하가 옥외 장기성능에 중대한 발수성에 영향을 주므로 대전특성이 옥외 고분자 절연재료의 열화 인자 중 자외선 조사로 인하여 어떠한 영향을 받는지 조사할 필요가 있다.

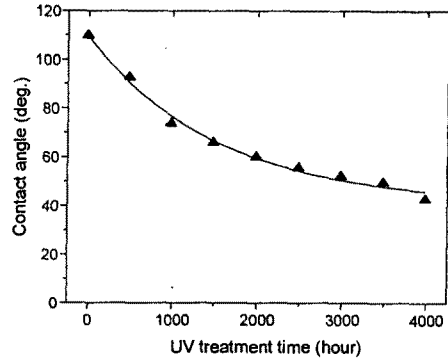


그림 1. 자외선 조사에 따른 표면접촉각의 변화

그림 2는 EPDM시료의 자외선 조사시간에 따른 표면전위 감쇠특성을 나타낸 것이다. 자외선 조사시간이 길어지면서 표면 대전전위는 초기시료에 비해 빠른 속도로 감쇠했다. 위와 같이 감쇠속도가 자외선 조사로 변화하는 것은 고에너지의 자외선이 조사됨에 따라 표면이 산화되거나 새로운 재결합과정이 발생하면서 새로운 구조의 표면층이 생성되었고, 이러한 표면층이 정전하에 대한 전도특성이 변화하였기 때문이다. EPDM은 자외선 조사로 인하여 표면에서 C-C 및 C-H 결합해가 절단되어, 다수의 라디칼이 발생하고 표면이 여기 상태가 되면서 반응성이 높아진다. 여기에 반응성 산소기가 부착되어 표면에너지가 증가하게 된다. 표면에 인위적으로 축적된 전하는 표면의 활성정도에 비례하여 전하가 감소된다. 이로써 자외선 조사로 표면이 상당히 활성상태가 되면서 표면에 주입된 전하가 빠른 시간에 감소된 것으로 판단된다.

이러한 표면전위 감쇠속도가 천천히 감소하게 되면 절연성 측면에서 장점으로 판단할 수 있지만 장시간 유지되는 전하는 표면에 수분이 존재할 때 발수성 유지에 문제를 일으킨다. 표면이 대전된 상태에서 수분이 표면에 부착되면 수분과 표면 전하간에 상호반응력이 발생하고 이로 인해 물방울이 합쳐지며 표면에 필라멘트형의 수분채널을 형성시켜 건조대아 크과 섬락의 발생확률을 높인다. 예전의 실리콘 고무에서 동일한 실험결과 실리콘 고무의 경우는 자외선 조사로 인하여 표면전위가 점차 천천히 감쇠하였다. 그러므로 EPDM에서는 이러한 표면전하로 인한 발수성의 영향을 없으며, 실리콘 고무와 다른 메카니즘으로 열화되는 것을 알 수 있다.

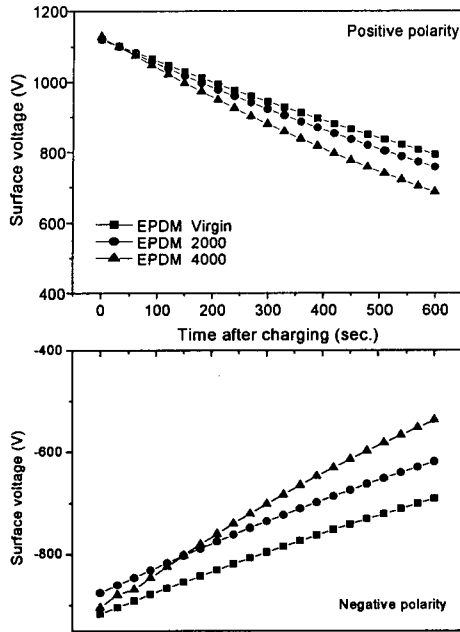


그림 2 자외선 조사에 따른 표면전위 감쇠 특성

### 3.3 SEM-EDX

가속 자외선 열화된 EPDM 시료의 표면 미세구조를 SEM으로 관찰하였으며, 또한 표면구성분의 변화를 SEM에 부착된 EDX로 조사하였다.

그림 3은 자외선 조사시간에 따른 표면 미세구조의 변화를 나타낸 것이며, 표 1은 표면 구성분의 자외선영향을 나타낸 것이다.

자외선 처리로 인하여 표면에 크랙 현상을 확인할 수 있었으며, 표면에 충전제 노출도 있었다. 또한 EDX결과 자외선 처리시간이 장기화되면서 C성분의 급격한 감소와 Al과 O가 모두 증가하는 경향을 나타내었다. O의 증가는 결합체 중 C의 절단과 자동산화반응 때문이며, Al의 증가는 충전제의 외부노출 때문으로 판단된다.

### 3.4 ATR-FTIR

자외선 처리 시간에 따른 시료를 ATR결정에 부착하여 관찰한 FTIR결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 초기시료에서 충전제에 포함된 O-H, 그리고 C-H 결합체의 stretching과 bend 운동에 대한 피크가 각 특성파수에서 관찰되었다. 하지만 자외선 조사시간이 길어지면서, 위 모든 피

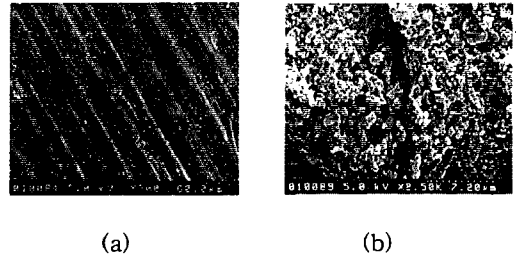


그림 3. 자외선 조사에 따른 표면 미세구조변화  
(a) 초기시료 (b) 4000시간 조사 시료

표 1 자외선 조사에 따른 구성비의 변화

Samples	C	O	Si	Al
Virgin EPDM	51.7	28.6	1.9	17.8
UV-treated EPDM for 2000 hours	23.3	53.3	1.3	22.1
UV-treated EPDM for 4000 hours	14.1	60.7	1.5	23.7

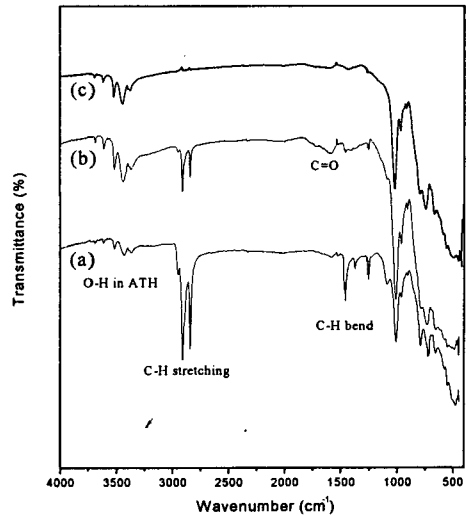


그림 4 자외선 조사에 따른 FTIR 스펙트라  
(a) 초기시료 (b) 2000시간 처리시료  
(c) 4000시간 처리시료

크들의 크기가 감소하였다. 이는 자외선이 결합력이 약한 결합체를 공격하여 절단시키고, 그 자리에 반응성 산소기들이 부착되는 자동산화반응의 결과이다. 또한 2000시간 조사된 시료에서 C=O의 카르보

닐기가 관찰되었다가 4000시간 조사된 시료에서는 사라졌다. 하지만 실제 이러한 카르보닐기가 없어졌다고 보기는 어렵다. SEM 결과에서도 보았듯이 충전제가 밖으로 노출되었는데, 이로써 ATR 결정자체와 시료 간에 접착에 문제가 있을 수도 있다.

### 3.5 XPS

그림 5는 초기시료와 4000시간 처리된 시료의 XPS 분석결과 중 wide scan mode로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 초기시료를 (b)는 자외선 처리된 시료의  $C_{1s}$ 와  $O_{1s}$  피크를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 자외선 조사시간이 길어지면서 C성분 피크는 감소하고 O피크가 증가하였다. 이는 앞에서의 결과와 마찬가지로 자동산화 반응의 결과이다.

그림 6는 XPS 스펙트라를 high resolution mode로 측정된 결과로  $C_{1s}$ 의 피크를 분리하여 나타내었다. EPDM의 경우는 대표적으로 C-C결합과 C-H결합을 나타내는 284.6eV의 피크(①)와 C-O기는 286.2eV(②), O=C기의 287.8eV(③), 그리고 O-C=O를 나타내는 289.3eV(④)의 피크로 분리하였다. 자외선 조사에 따라 C-C와 C-H(①)의 피크가 감소하였으며, 다른 산소기가 부착된 O=C, O-C=O 피크가 증가하였다. 특히 O-C=O 피크는 자외선 조사로 인하여 새로이 생겨났다. 다른 연구자에 따르면 이 피크를 열화검출 지표로 사용된 바가 있다.<sup>3)</sup> 이러한 피크의 변화는 비교적 결합에너지가 약한 C-C결합이 고에너지의 자외선 조사로 절단되고 반응성이 강한 산소기가 그 위치에 부착되는 자동산화반응이 가속화되었기 때문이다. 이러한 표면의 다수의 산소기들이 발수성에 영향을 준 것으로 판단된다.

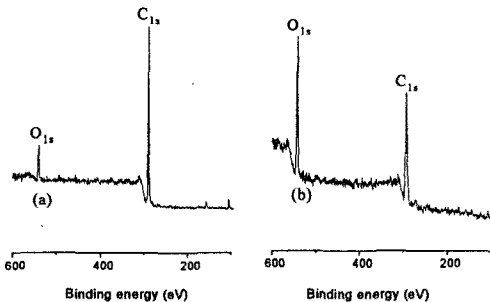


그림 5 EPDM의 XPS wide scan mode 스펙트라  
(a) 초기시료 (b) 4000시간 자외선 처리시료

### 4. 결론

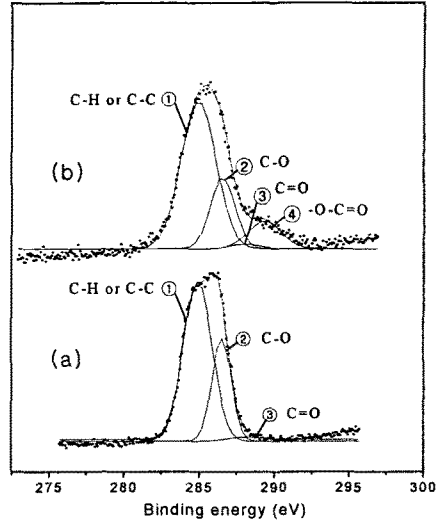


그림 6 EPDM의 XPS high-resolution scan mode 스펙트라  
(a) 초기시료 (b) 4000시간 자외선 처리 시료

배전용 폴리머 현수애자의 갓 재료로 많이 사용되고 있는 EPDM 고무의 자외선 가속열화 시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. EPDM 절연재료는 고에너지의 자외선 조사로 발수성이 저하하며, 이는 발수성기의 절단과 그 자리에 고에너지의 산소기가 부착한 결과이다.
2. 코로나 대전을 통한 표면전위 감쇠특성을 조사한 결과 자외선 조사로 인하여 표면이 활성화되어 자외선 조사시간이 길어질수록 표면전위가 빠른 시간에 감쇠하였다.
3. 이러한 발수성과 코로나 대전특성의 변화는 표면에 존재하는 특성이 자동산화반응을 일으켜 산화되어 C=O, O-C=O의 결합구조로 변화되었기 때문이다.

### 참고 문헌

- [1]. V. M. Moreno, "Ac and dc Performance of Polymeric Housing Materials for HV Outdoor Insulator", IEEE Die. El., 6(3), 1999
- [2]. V. Moreno, "Effects of surface charge in the hydrophobicity levels of insulating materials", IEE Gen. Trans. and Dist., 145(6), 1998
- [3]. Y. Xu, "Aging in EPDM used for Outdoor Insulation", IEEE Die. and E.I., 6(1), 1999