

ESPI를 이용한 자외선조사량에 따른 폴리머애자의 탄성계수 변화 연구

김경석*, 김동수⁺, 장호섭⁺⁺, 박찬주⁺⁺⁺, 장완식⁺⁺⁺⁺, 정현철⁺⁺⁺⁺⁺
(논문접수일 2010. 2. 23, 심사완료일 2010. 3. 26)

Elasticity Modulus Change Research of Polymer Ultraviolet Dosage by using ESPI

Kyeongsuk Kim*, Dongsoo Kim⁺, Hosub Chang⁺⁺, Chanjoo Pack⁺⁺⁺, Wansik Jang⁺⁺⁺⁺, Hyunchul Jung⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract

Recently, environment problems have effects on the electronic equipments. Security problems are presented. For security reasons, it is necessary to study electronic equipments. In this paper, we handle the Elasticity modulus on the polymer insulator by UV irradiation. The types of material are used in this experiment, is the EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer). For increasing the reliability, real material specimens are used. For this study, we used ESPI (Electronic speckle pattern interferometry), UTM (Universal thesting machine) device, Accelerated weathering tester. Through this measurement, we evaluated how much UV irradiation has effect on polymer insulator and how long does it take to change the polymer insulator. Also this paper will give a help in electronic industry and the method of measuring the insulator elasticity modulus of polymer could be utilized in life estimation and replacement time of the products of electronic equipment that is used in real industrial fields.

Key Words : Polymer insulator(폴리머애자 절연재), UV irradiation(자외선 조사), Elasticity modulus(탄성계수), ESPI(전자처리 스페클 패턴 간섭계)

* 조선대학교 기계설계공학과
+ 조선대학교 첨단부품소재공학과
++ 조선대학교 레이저응용 신기술 개발 연구센터
+++ 조선대학교 기계설계공학과 대학원
++++ 조선대학교 기계공학과
+++++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (yonggaryjung@gmail.com)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

1. 서론

최근에 대기 중의 환경오염 가중되어 감에 따라 오존층의 파괴가 일어나 지표면으로 복사되는 자외선량이 증가한다. 이 자외선은 물체를 잘 투과하는데, 이는 유기체의 상호간에 파괴적으로 작용시키는 역할을 한다. 이러한 자외선의 영향을 전력기기로 사용하는 폴리머 애자를 대상으로 고려할 필요가 있다. 전력설비의 갓(sheds) 부분의 폴리머 절연재는 이러한 오존층 파괴로 인한 자외선의 영향에 의하여 절연재가 손상되어 전기의 절연거리가 감소함에 따라 열화가 가속화 된다. 그 결과로 절연재 재료의 본래의 유연성과 재료 자체의 기계적 특성이 변화되는 현상이 발생한다⁽¹⁻³⁾. 따라서 옥외용 절연재료로 사용하는 폴리머에 대한 QUV(light fastness) 모델 LU-0819를 조사하여 그에 대한 시험편의 형상을 진단하여 애자의 탄성계수를 정량적으로 평가하고 적정교체 시기를 예측해 보았다.

시험편은 절연재로 주로 쓰이는 EPDM(Ethylene Propylene Diene monomer)을 이용하였고, 실제 전력기기에 사용하는 폴리머 애자의 시험편을 제작하여 분석을 위한 적용실험을 진행하였다. 폴리머 애자의 탄성계수를 정량적으로 측정하기 위하여, ESPI(Electronic speckle pattern interferometry)를 사용하였으며, 자외선 조사량에 따른 절연재를 정량 측정하였다.

2. 이론

2.1 ESPI의 측정원리

레이저를 광학적으로 거친 표면에 조사를 하면 회고 검은 반점 형상을 볼 수 있는데 이것을 스페클이라고 한다. 레이저를 이용한 ESPI 계측은 이 스페클을 이용하여 대상체의 변형에 따른 변위를 측정하게 된다⁽⁴⁾.

Fig. 1은 면내변위 측정을 위한 간섭계의 개략도이다. 조사되는 두 개의 레이저광은 조사면에 대해 같은 각도 θ 로 두 방향에서 조사하게 되며, 조사된 레이저광은 각각 물체표면에서 스페클패턴을 형성하고 각 스페클 패턴은 다시 간섭하여 제 2의 스페클패턴을 형성하게 된다. 제 2의 스페클패턴은 조사된 레이저광의 위상차에 의해 형성이 되며, 조사광의 광경로를 추적함으로써 물체 변위와 레이저광의 위상과의 상관관계를 규명할 수 있다⁽⁶⁻⁷⁾.

Fig. 2는 레이저로 부터 결상면(Image plan, CCD camera)까지의 조사광의 광경로를 나타낸 것이다. 두 조사광의 광경로 δ_1 와 δ_2 에 의해 제 3의 스페클이 형성되며, 이 때의 위상

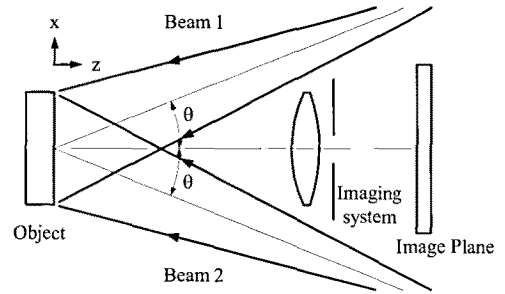


Fig. 1 Schematic of in-plane displacement sensitive interferometer

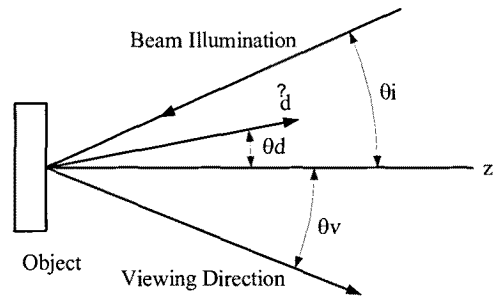


Fig. 2 Optical path tracing

차 $\Delta\phi$ 를 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi = \delta_1 + \delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta_i \quad (1)$$

즉, 면내변위 측정간섭계에서 변위 벡터 \vec{d} 의 면외변위 성분 d_z 는 제거되며 면내변위 성분 d_x 만을 측정할 수 있게 된다. 변위성분에 대해서 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d_x = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi}{\sin\theta_i} \quad (2)$$

2.2 위상 추출

식 (2)에서 물체의 변위에 따른 광 위상차는 조사빔 1과 2의 스페클간의 간섭에 의해 제 3의 스페클이 형성되면서 나타내게 되며, 이때 간섭현상을 수식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\phi \quad (3)$$

여기서 I : 간섭에 의한 광강도분포, I_1 : 조사빔 1의 광강도분포, I_2 : 조사빔 2의 강도분포이다.

식 (3)으로부터 위상차를 추출하기 위해서는 미지수가 3개(I_1, I_2, ϕ)이므로, 식 (3)으로부터 직접 위상차를 구할 수 없다. 즉, 위상을 추출하기 위해 최소한 3개의 방정식이 필요하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Piezo-electro transducer(PZT)를 이용한 위상변조 기법을 사용하고 있다⁽⁵⁾. 본 연구에서는 $\frac{\pi}{2}$ 간격으로 위상을 변조하여 4개의 방정식을 얻어 위상을 추출하는 4-bucket phase shifting method를 이용하였다. PZT에 의해 위상변조된 4개의 광강도분포를 식 (4)와 같이 쓸 수 있으며, 각 이미지는 PC에 기록이 되고 식 (5)와 같은 처리를 통하여 위상차를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{dc} + I_m \cos \phi & (4) \\
 I_2 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\
 I_3 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \pi) \\
 I_4 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \frac{3\pi}{2})
 \end{aligned}$$

여기서 $I_{dc} = I_1 + I_2$ 이고, $I_m = 2\sqrt{I_1 I_2}$ 이다.

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (5)$$

ESPI에서 물체의 변형 측정은 변형 전후의 레이저의 광로 변화를 구함으로써 가능하다. 즉 물체의 변형에 의한 위상차를 $\Delta\phi$ 라고 할 때, 물체변형 후에 형성된 제 3의 스페클패턴은 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{def} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (6)$$

물체의 변형에 의한 최종 위상변화량 $\phi + \Delta\phi$ 는 식 (4)와 식 (5)를 적용하여 추출할 수 있다. 물체의 변형에 의한 위상변화 $\Delta\phi$ 는 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = I_{def} - I = (\phi + \Delta\phi) - \phi \quad (7)$$

최종적으로 식 (7)에 의해 구하여진 변형위상을 이용하여 식 (2)에 대입함으로써 물체의 변형을 구할 수 있다.

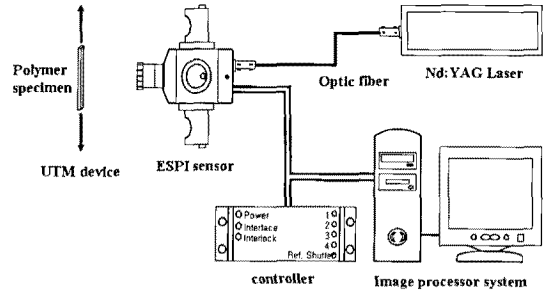


Fig. 3 Experimental setup

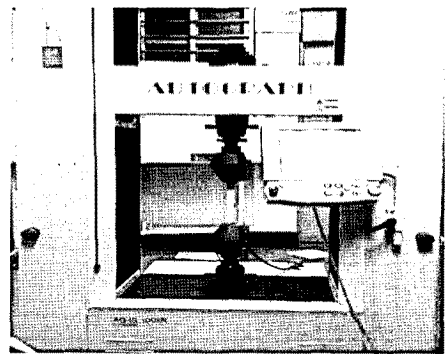


Fig. 4 UTM device

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치의 구성

ESPI 실험장치는 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며 구성은 Fig. 3과 같이 532nm 파장의 Nd:YAG Laser source, ESPI Sensor, 532nm 파장의 Nd:YAG Laser source 전용 광파이버(Glass Fiber Couple), PZT(Piezo-electric transducer) 제어장치, 화상처리장치(Image processing system)로 구성하였다. 센서내부의 PZT에 의해 위상이동을 할 수 있으며, PC의 위상지도 해석 프로그램(ISTRA)를 이용하여 변위를 정량화 할 수 있게 된다.

인장시험기는 SHIMADZU사의 제품(AG-IS 100kN)을 사용하였고, 장비는 Fig. 4와 같다. 인장시험기 인장시험, 압축시험, 굽힘시험 등 규격에 따른 시험이 가능하고, 장기간의 시험이 가능하고 다양한 재료의 시험이 가능한 장비이다. 본 논문의 실험에서는 표준 인장시험편의 인장을 위해서 사용하였다. 장비의 세부 사항은 Table 1과 같다.

자외선조사에 관한 처리는 Q-PANEL사의 QUV Accelerated

Table 1 Specifications of UTM

Description	Technical data
Loading method	High-precision, constant-speed strain control using two ball screws
Force capacity	50N to 250kN (5kgf to 25kgf)
Force measurement accuracy	Standard accuracy type : Within $\pm 1\%$ of an indicated value High accuracy type : Within $\pm 0.5\%$ of an indicated value

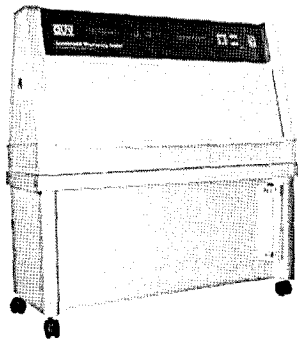


Fig. 5 Accelerated weathering tester

weathering tester 모델 LU-0819를 이용하여 최대조사도 313nm을 갖는 UVB type의 형광램프가 부착되어 있다. 이러한 UV조사로 인한 표면의 변화를 관찰하였다. QUV Accelerated weathering tester 모델 LU-0819은 Fig. 5와 같다.

3.2 시험편

본 논문에서는 현재 전력기기에 사용되고 있는 폴리머 애자의 시험편을 전남 동부지역, 순천, 광양에서 사용되고 있는 폴리머 애자(원재료:EPDM)를 사용하였으며, 동일 소재의 시험편을 일정 크기(100×100×2mm)로 제작하였으며, 이를 fig. 12에 나타내었다. 본 논문의 실험인 자외선 조사에 따른 탄성계수를 측정하기 위하여 Fig. 6에 제시된 제작 시험편을 일정 크기(100×20×2mm)로 절취하였다. 실험에 사용될 절취된 시험편을 Fig. 7에 나타내었다.

3.3 실험 방법

자외선이 폴리머 애자의 탄성계수에 끼치는 영향을 측정

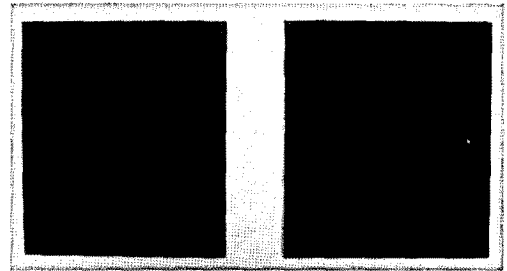


Fig. 6 Specimens of the original polymer

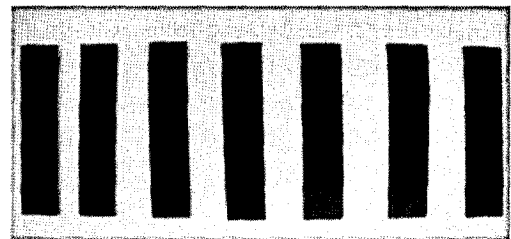


Fig. 7 cutted Specimens of the original polymer

하기 위하여, Fig. 7에 제시된 시험편을 자외선 조사 장치를 통하여 자외선을 조사하였다. 자외선 조사량은 일정세기(313nm)로 10일 간격으로 조사하여 최고 50일까지 조사하였다. 조사된 시험편은 Fig. 3에 제시된 실험 장치의 구성을 통하여 측정되어진다. 이 때, UTM 장치를 이용하여 0.08mm/min의 인장속도를 주었으며, 로드셀을 통하여 시험편에 걸리는 하중 값을 획득하였다. 하중차가 50mN의 등간 격으로 증분이 될 때 ESPI 센서를 통하여 위상지도를 획득하였다. 획득되어진 위상지도는 위상지도 해석 프로그램을 이용하여 분석하여 탄성계수를 도출하였다.

4. 실험 결과 및 분석

자외선은 물체를 잘 투과하기 때문에, 유기체 상호간에 파괴적으로 작용시키는 역할을 한다. 이러한 자외선 조사량에 따른 탄성계수의 변화를 측정하였다. 응력을 측정하기 위하여 UTM 장비를 이용하여 인장 시 시험편에 인가되는 실제 하중을 측정할 수 있었다. 먼저 자외선을 조사하지 않은 시험편을 측정하였다. 이를 0-day로 표현하였으며, 자외선 조사일에 따라 10-day, 20-day, 30-day, 40-day, 50-day로 표현하였다. 먼저 0-day 시험편을 살펴보면, 시간의 흐름에 따라 시험편에 인가되는 실제 하중은 Fig. 8에 나타내었다. 하중

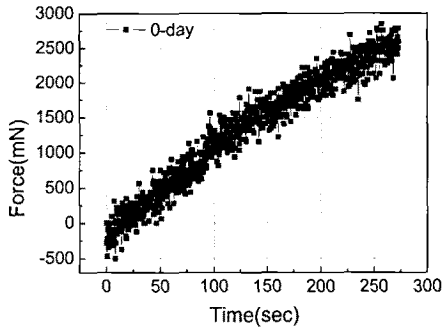


Fig. 8 The actual load which is caught in the specimen

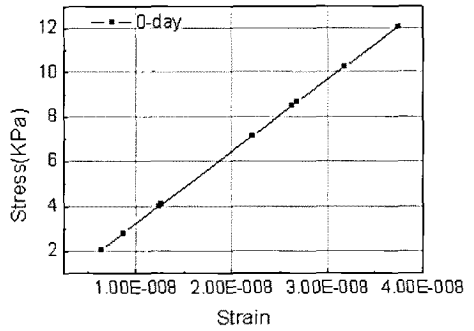


Fig. 10 Strain-stress curve by Ultraviolet irradiation

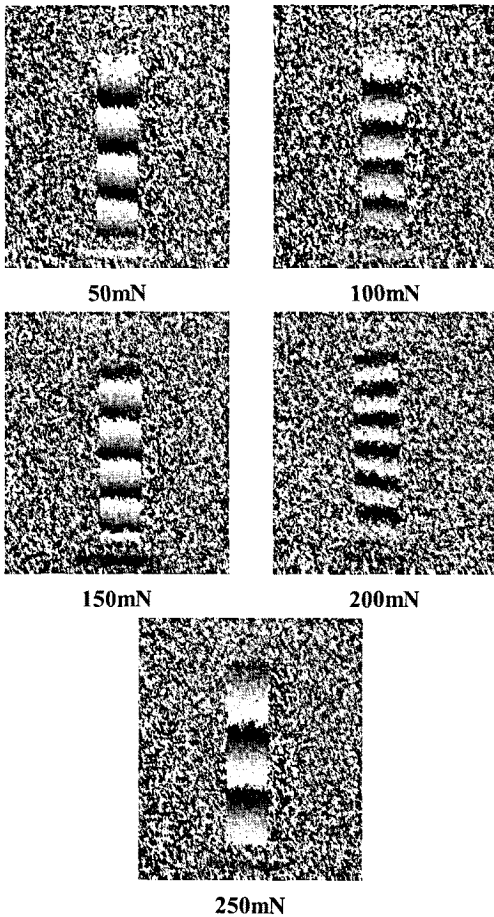


Fig. 9 The phase map which follows in load

변화에 따라 50mN의 등분을 나누어 탄성구간 내에서 위상 지도를 획득하였다. 획득된 위상지도는 Fig. 9에 나타내었다.

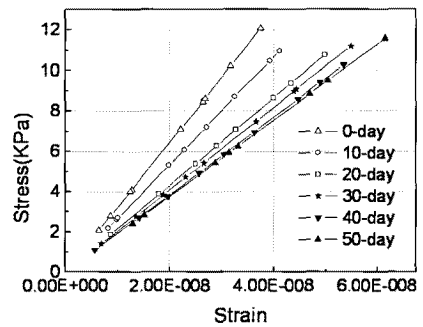


Fig. 11 Strain-stress curve by Ultraviolet irradiation per day

Fig. 10는 0-day 시험편의 응력-변형을 선도이며, 탄성계수는 0.322GPa로 측정되었다.

위 방법과 동일한 해석 방법으로 0~50day의 시험편을 측정 및 해석하였으며 각 자외선 조사일에 따른 응력-변형률 선도를 Fig. 11에 나타내었으며, Fig. 12는 열화일수별 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 탄성계수값을 Table 2에 나타내었다. 실험 결과 자외선 조사량은 인장 강도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

UTM 장비와 ESPI를 이용하여 측정한 실험 결과 자외선에 오래 노출된 시험편일수록 열화시간(일)에 따라 탄성계수가 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 열화일수가 긴 시험편일수록 탄성계수의 감소량이 크게 나왔으며, UTM과 ESPI의 실험을 통하여 물성측정을 할 수 있었다. 탄성계수의 감소현상은 자외선의 노출이 긴 시험편일수록 분자간의 결속력이 떨어져 탄성계수의 감소 현상이 생기는 것으로 사료된다.

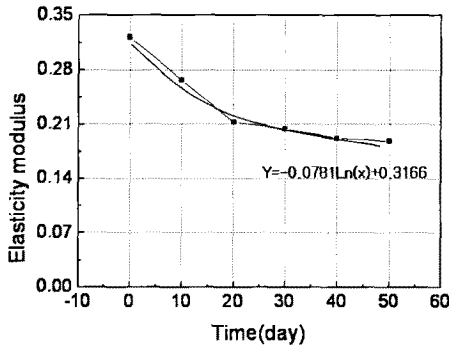


Fig. 12 Elasticity modulus by Ultraviolet irradiation per day

Table 2 Elasticity modulus by Ultraviolet irradiation per day

day	Elasticity modulus (GPa)
0	0.322
10	0.267
20	0.213
30	0.204
40	0.192
50	0.188

5. 결론

본 연구에서는 옥외용 고분자 절연재료인 EPDM을 대상으로 자외선 조사로 인한 폴리머 애자의 인장강도 특성을 연구하였다. 자외선 조사로 인한 탄성계수를 측정함으로써 폴리머 애자의 수명을 판단할 수 있을 것이라 사료되며 또한 절연체의 광화학적 자연현상에 의하여 노화가 진행되어 전력기기의 이상 현상들로 인한 제품의 수명 감축에 대해 검증할 수 있는 결과를 제시할 수 있다. 이와 같은 폴리머 애자의 절연체 탄성계수를 측정함으로써, 실제 현장에서 사용하는 전력기기의 제품에 대하여 수명평가와 적정 교체시기를 적용할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 절연체의 탄성계수를 측정함으로써 역으로 각 지역의 자외선 발생량을 예측 평가

하는데 있어 발전가능성을 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

후기

이 논문은 2008학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

- (1) Shong, K. M., Bang, S. B., Kim, C. M., Kim, Y. S., and Jung, C. H., 2008, "The Characteristics of UV Generation and Aging Materials in according to Surface Discharge," *Trans, KIEE*, Vol. 57, No. 9, pp. 1606~1611.
- (2) Moreno, V. M. and Gorur, R. S., 1999, "AC and DC Performance of polymeric Housing Materials for HV Outdoor Insulator," *IEEE Die and EI*, Vol. 6, No. 3, pp. 342~350.
- (3) Xu, Y., He, Y., Zeng, F., and Zhang, R., 1999, "Aging in EPDM used for Outdoor Insulation," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 1, pp. 60~65.
- (4) Jung, H. C., 2004, "Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI," A Thesis for a Doctorate, Chosun university, Republic of Korea
- (5) Creath, K., 1985, "Phase-shifting speckle interferometry," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 18, pp. 3053~3058.
- (6) Lee, Y. H., Kim, K. S., Jung, S. W., and Choi, T. H., 2004, "Resonance Frequency Analysis to Laser Welding Condition by Time-average ESPI," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 1, pp. 245~249.
- (7) Yang, S. P., Kim, K. S., Jung, H. C., Kim, T. Y., Kang, K. S., Kim, D. J., and Lee, C. W., 1999, "A study under behavior of tensile and vibration in composite plate by ESPI method," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 106~111.