

## 탄성형 에폭시의 열전도율 및 기계적 특성에 대한 연구

‘이관우, 이 경용, 최용성, 박 복기’ 박대희  
원광대학교, 호원대학교

### Study of Thermal Conductivity and Mechanical Property of Elastic Epoxy

Kwan-Woo Lee\*, Kyoung-Yong Lee, Yong-Sung Choi, Bok-ki Park\* and Dae-Hee Park  
Wonkwang University, \*Howon University

#### Abstract

In this paper, we studied on the thermal conductivity and a mechanical property of the elastic epoxy. According to industrial development, insulation materials have various properties. They are solid, liquid, gas state, there are various type. Epoxy, a kind of insulation material, demand of not only high hardness but also elastic property. When the electric current flows into the conductor and the place where the heat occurs, this heat becomes the cause which shortens the life of the electrical appliance. Therefore, for the heat occurred transmit quickly, thermal conductivity of the insulation material is highly demanded. We studied on the thermal conductivity of elastic epoxy on the high voltage. In this result, thermal conductivity confirmed that it followed thermal property of mixed epoxy and additives. Hardness is decreased when additives increased.

**Key Words** : Elastic epoxy, Thermal conductivity, Hardness, Additives

#### 1. 서 론

산업이 발전함에 따라 전기 재료는 점점 다양한 재료를 요구하게 된다. 전기 절연 재료로서의 에폭시는 전기적 특성 및 기계적 특성이 우수하여 다양한 전기 제품에 사용되고 있다. 기존에 개발된 전기 절연용 에폭시는 강도가 높으나 취성 특성 및 탄성 특성이 낮아 내충격성이 약한 것으로 알려져 있다. 이 관점에서 탄성형 에폭시는 내충격성을 개선하여 전기적 제품에 사용할 수 있는 틈새시장이 있을 수 있다.

전기적 제품은 도체에 전기가 흐를 경우 열이 발생하는데 이 열이 잘 발산될 수 있도록 설계하

여야 한다. 열전도율은 열에너지를 전달하는 능력을 말하는데 [1], 절연 재료로서 사용되는 에폭시는 낮은 열전도율을 갖게 되는데 이는 상대적으로 낮은 고분자의 원자 밀도에 기인한다. 열이란 입자의 움직이는 평균속도와 관련이 있는데 전류 역시 단위 시간당 전자의 흐름이므로 수학적 표현으로 전기식과 많은 부분 동일하게 표현이 가능하다. 전기 절연 재료는 케이블 도체에 전기가 흐를 경우 열이 발생되는데 이열이 얼마나 빨리 빠져 나가는가가 열전도율이 된다. 전기 절연 재료인 에폭시는 고분자 화합물이기 때문에, 온도에 대한 제한을 받게 된다 [2]. 이는 전기 제품이 사고가 발생할 경우 견딜 수 있는 온도, 단시간에 견딜 수 있는 온

도, 장시간 수명이 다할 때까지 사용될 수 있는 온도로 나누어 지게 된다. 열전도율은 바로 이 온도의 함수가 된다. 사고가 발생할 경우의 온도는 계통이 단락이 발생하던지, 혹은 지락이 발생하였을 경우 절연 재료가 짧은 시간 동안 견딜 수 있는 온도를 말하며 단락 시간과 단락 전류에 함수가 되는 특성을 갖고 있다. 이 경우는 열전도율의 함수 관계는 없으며, 열용량의 함수가 되게 된다. 그러나 전기재료에 전기가 흐르기 때문에 정상적인 열 흐름이 지속적으로 발생하기 때문에 열전도율과 단락시 온도와의 일정한 함수 관계를 갖게 된다 [3]. 다음은 상시 전기 재료에 전류가 흐를 경우인데, 이 경우는 절연 재료를 통하여 끊임없이 열류가 흐르기 때문에 전기 전도율은 전기 기구의 용량을 정하는 필요조건이 되게 된다.[4]

따라서, 본 논문은 시료에 대하여 열류 특성을 연구하였다. 실 제품에 적용하기 위하여 0~85 phr 범위 내에서 실험을 한 결과 10-20phr의 범위가 최적 조건으로 확인되었기 때문에 탄성형 에폭시의 최적 배합비를 구할 수 있도록 개질제를 0~20 phr의 범위를 정하여 제한된 범위에서 실험을 하였다. 그리고 전기 재료로서 사용되는 탄성형 에폭시는 개질제의 함량에 따라 열전도율이 어떤 특성을 갖는지 조사하였다. 이 결과 탄성형 에폭시는 개질제의 함량에 따라 단순 증가하는 경향을 갖고 있었으며, 15 phr의 경우 0.57 w/Km을 갖는 것을 확인하였다.

## 2. 시료 및 실험 방법

### 2.1 시료 제작

에폭시 시편은 비스페놀 A형의 에폭시에 개질제를 첨가한 형태에서 주제를 제작하였다. 개질제의 비율은 0 phr, 5 phr, 10 phr, 15 phr, 20 phr의 비율로 하였으며, 개질제와 에폭시를 충분히 반응시킨 상태에서 경화제 및 충전제를 첨가 후 탈포를 0.05 Torr에서 약 30분간 실시하였다. 개질제의 비율을 축소시킨 이유는 이 전의 실험 결과 이 범위 내에서 탄성형 에폭시의 최적 특성이 나오기 때문이다. 이 후 예열된 시편 금형에 탈포가 끝난 혼합액을 주입한 후 기포가 없어질 때까지 다시 진공 탈포하였다. 그리고 1차 경화 및 2차 경화를 실시하였다. 경화를 2차로 나누어서 하는 이유는 1차 경화시 에폭시기가 완전히 반응이 일어나지 않기

때문이며, 다시 온도를 변화시켜서 경화 반응을 일으킬 경우 잔여된 에폭시기가 다시 반응을 일으키기 때문이다. 그러므로 1, 2차 반응시간과 향후 온도에 따른 반응 조건도 추후 연구할 필요가 있을 것으로 예상된다. 시료 제작시는 이 조건을 생략하고, 온도 조건 및 시간을 1차 경화는 130 ℃에서 3시간, 2차 경화는 120 ℃에서 12시간으로 정한 상태에서 시편을 제작하였다.

### 2.2 열전도율

열전도율 측정은 ANTER사의 UNITHERM MODEL 2021을 사용하여 실험하였다 [5]. 측정 장치는 그림 1과 같다.

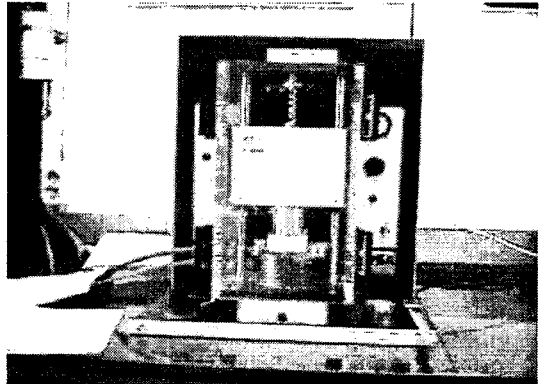


그림 1. 열전도율 측정 장치.

열류의 가장 기본적인 형태는 열전달이며 그 기본 원리는 Fourier법칙에 따른다. 물체내의 단위 면적을 단위시간에 통과하는 열량을  $Q \text{ W/m}^2$ 라 하고, 열이 흐르는 방향의 온도 구배를  $\Delta T/\Delta x \text{ }^\circ\text{C/m}$ 라 하면  $Q = -\lambda \Delta T/\Delta x$ 의 관계가 성립한다.[6]

측정 장치 구조도는 그림 2와 같다. 이 원리를 이용하여 상부 열원부에 열을 가하면, 열은 시험재료와 참고 재료를 통하여 냉각부까지 흐른다. 이때 센서를 통하여 상부온도와 중부온도 및 하부 온도를 측정하여 모니터에 표시한다. 절연 재료 및 동 열결부는 센서를 통한 온도가 측정 범위내에 들어 올 수 있도록 조정한다. 냉각부는 일정하여 질 수 있도록 조정한다.

이 경우 시편의 열전도율은 재료의 열전달 방식식에 의하여 정의된다. 이때의 관계는 식 (1)과 같다.

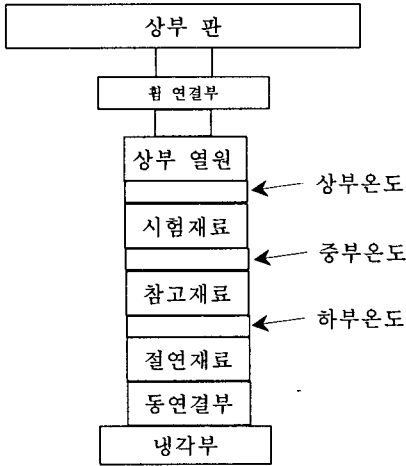


그림 2. 측정 장치 구조도.

$$q = (k \cdot A \cdot \Delta T) / \Delta X \quad \text{----- (1)}$$

여기서 q는 재료의 열류 [W], k는 재료의 열전도율 [W/mK], A는 열류가 통과되는 단면적 [m<sup>2</sup>] 그리고 ΔX는 재료의 두께 [m]이다.

이는 수학적으로 전기 전도율의 관점에서도 동일하게 표현될 수 있는데 전류는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$I = \sigma A V / \Delta l \quad \text{----- (2)}$$

여기서 I는 전류 [A], σ는 전기 전도율 [Q/m], A는 단면적 [m<sup>2</sup>], V는 전압 [V] 그리고 Δl는 도체의 길이 [m]이다.

이 관점에서 기본적인 개념으로서 입자의 흐름인 열과 전자의 흐름인 전류는 같은 개념으로서 수학적인 표현으로 동일하게 표현된다고 할 수 있다. 전기 제품으로서 설계에서 발생하는 열 ΔT는 0.24I<sup>2</sup> R t가 되므로 이 함수 관계로부터 재료의 허용 온도로 부터 제품에 흐를 수 있는 전기량을 결정할 수 있게 된다. 그러므로 이 관점에서 재료의 열전도율은 제품의 정격 용량을 정하는 데 결정적인 역할을 하는 인자인 것을 알 수 있게 된다.

위 식 (1)에 의하여 재질이 다른 두 물체가 접촉하였을 경우에 재료의 열 방정식은 식 (3)과 같이 된다. 여기서 한쪽은 알려진 재료의 참고치가 되고, 다른 한쪽은 측정을 위한 시료의 열방정식이 된다. 이때 열류는 동일하게 되므로  $q_s = (k_s \cdot A_s \cdot \Delta T_s) / \Delta X_s$ ,  $q_r = (k_r \cdot A_r \cdot \Delta T_r) / \Delta X_r$ ,  $q_s = q_r$  이 되므로 식 (3)과 같이 된다.

$$(k_s \cdot A_s \cdot \Delta T_s) / \Delta X_s = (k_r \cdot A_r \cdot \Delta T_r) / \Delta X_r \quad \text{-- (3)}$$

여기서 샘플을 통하여 흐르는 단면적이나 참고 재

료의 단면적은 동일하므로 계산식으로부터 제거 될 수 있게 된다. 각 항목은 다음과 같다.

$q_s$  : 샘플 시료의 열류

$k_s$  : 샘플 시료의 열전도율

$A_s$  : 샘플 시료의 단면적

$\Delta T_s$  : 샘플 시료의 온도차

$\Delta X_s$  : 샘플 시료의 두께

$q_r$  : 표준 시료의 열류

$k_r$  : 표준 시료의 열전도율

$A_r$  : 표준 시료의 단면적

$\Delta T_r$  : 표준 시료의 온도차

$\Delta X_r$  : 표준 시료의 두께

그러면 식 (3)은 식 (4)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$k_s = k_r \cdot \Delta T_r / \Delta T_s \cdot \Delta X_r / \Delta X_s \quad \text{--- (4)}$$

그러므로 표준 시료의 열전도율을 알고 두께를 알 경우 측정할 시료의 온도차와 두께를 알게 되면 열전도율  $k_s$ 를 구할 수 있다.

시편은 원통형상의 Φ50 X 2mm의 탄성형 에폭시를 사용하였으며, 개질제 첨가량은 0, 5, 10, 15, 20 phr로 하였다.

### 2.3 경도

경도는 일반적으로 압입으로부터 발생하는 영구 변형에 대한 전기적 변형성으로 정의할 수 있다.

탄성형 에폭시의 경도를 실험하기 위하여는 쇼어 A 방식에 의하여 실험하였다. 이 방식은 작은 다이아몬드를 선단에 고정시킨 낙하체를 일정한 높이  $h_0$ 에서 실험편 위에 낙하 시키면 다시 반발하여 올라가는데 이때 올라간 높이를  $h_r$  라 하면 쇼어 경도 ( $H_s$ )는 다음 식 (5)로 표시된다.

$$H_s = 1000/65 \times h / h_0 \quad \text{----- (5)}$$

이 방식에 의하여 탄성형 에폭시의 경도를 실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열전도율

탄성형 에폭시의 열전도율의 측정 결과는 그림 3과 같다. Lichteneccker는 두 다른 재료가 무작위로 연결되어 있을 경우 열전도율은 다음 식 (5)를 제안하였다.

$$\ln K = V_f \cdot \ln K_f + V_p \cdot \ln K_p \quad \text{----- (5)}$$

이 식에 의해 열전도율을 구하면 표 1과 같다.

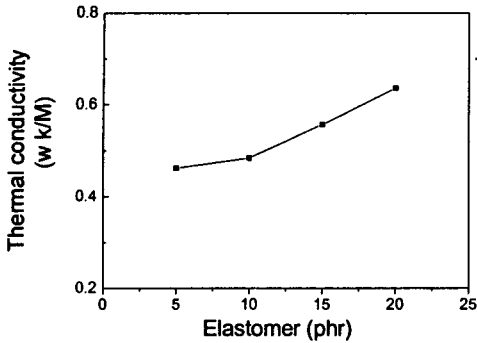


그림 3. 탄성형에폭시의 열전도율 의존성

표 1. 열전도율의 이론식과 계산식비교

개질제 첨가량	열저항 (W/mK)	이론식	오차율 (%)
5	0.47	0.46	2
10	0.52	0.48	6.7
15	0.57	0.56	1.8
20	0.62	0.64	-2.4

### 3.2 경도

탄성형 에폭시의 경도 실험 결과는 그림 4와 같다. 경도는 개질제의 함량에 따라 단순 감소하는 특성을 나타내고 있는데 이는 개질제의 성분이 탄성형 에폭시에 영향을 미치고 있기 때문이다.

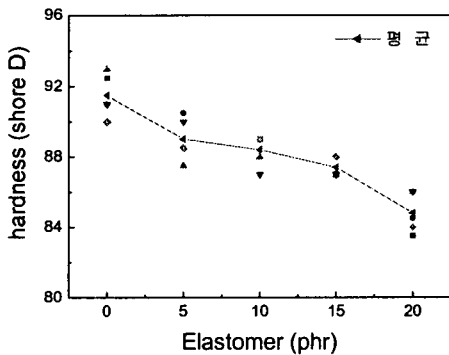


그림 4. 개질제 함량에 따른 경도 의존성

## 4. 결론

탄성형 에폭시의 배합 최적 조건을 찾기 위한 열 전도율 및 경도 실험을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개질제의 배합에 따른 열전도율은 Lichtenecker가 제안한 식에 유사한 데이터를 얻을 수 있었다.

2) 경도 역시 시간에 따라 단순 감소하고 있다. 이는 개질제의 영향이다.

## 감사의 글

논문은 한국전력공사의 중기지원과제 R-2002-B-253의 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] 송진수, "반도체 소자의 열저항에 관하여(1)", 전기학회논문지, 28권 1호, pp.430-436, 1978.
- [2] Luiz Meyer et al., "Thermal Conductivity of Filled Silicone Rubber and its Relationship to Erosion Resistance in the Inclined Plane Rest", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No 4, pp. 620-630, 2003.
- [3] En-Bo Wei et al., "Thermal conductivity of graded spherical composites with contact resistance", Physics letters A 319, pp401-405, 2003.
- [4] C. Farren et al., "Thermal and Mechanical Properties of Liquid Crystalline Epoxy Resins as a Function of Mesogen Concentration", Polymer, pp1507-1514, 2001
- [5] 이재현, "열전도율 측정 방법에 관하여", 태양에너지, 1권 2호, pp39-44, 1981.
- [6] 배종우, "열적 신뢰성이 향상된 에폭시 봉지제", 부산대학교 박사논문, pp32-64, 2001