

# LED 인캡슐레이션 실리콘의 경화반응속도에 따른 warpage 유한요소해석 F.E. Analysis of warpage for LED encapsulation silicone considering cure reaction rate

\*송민재<sup>1</sup>, #김흥규<sup>2</sup>, 윤길상<sup>2</sup>, 김권희<sup>3</sup>

\*M. J. Song<sup>1</sup>, #H.K.Kim(krystal@kitech.re.kr)<sup>2</sup>, G. S. Yoon<sup>3</sup>, K. H. Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원, 고려대학교 대학원, <sup>2</sup> 한국생산기술연구원 금형·성형연구그룹  
<sup>3</sup> 고려대학교 기계공학부

Key words : cure reaction rate, warpage, silicone resin, LED, encapsulation, FEM, viscoelastic

## 1. 서론

최근 친환경 광원으로 확대되고 있는 LED (Light Emitting Diode)는 광원의 소자 보호를 위한 봉지재(encapsulant)로서 열경화성 수지가 사용된다. 특히 실리콘 레진은 내열성이나 내구성의 요구 수준이 높은 고출력 LED 용도로 적합하여 사용이 확대되고 있다. 그런데, 제조 과정 중 발생하는 잔류응력은 수축(shrinkage) 및 휨(warpage) 등을 발생시켜 LED 제품의 기계적, 광학적 특성의 저하를 유발한다.

본 연구에서는 유한요소해석을 사용하여 경화속도가 실리콘 레진의 휨에 미치는 영향을 검토하였다. 경화속도가 빠른 경우와 느린 경우의 2 가지 조건 각각에 대해 예상되는 휨량을 비교하였다. 또, 탄성모델과 점탄성모델을 사용한 유한요소해석을 각각 수행하고 실험결과와 비교하였다. 이를 통해 실리콘 레진에 적합한 재료 모델을 검토하였다.

## 2. 실리콘 레진의 경화 공정 모델링

### 2.1 경화반응모델 (cure kinetics)

경화도는 경화중에 발생하는 실리콘반응열을 측정하여 식(1)과 같은 자체촉매 경화 반응속도식의 상수들을 구하였다.<sup>[1]</sup>

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m(1-\alpha)^n, k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 경화도,  $k$ 는 반응속도상수,  $m$ 과  $n$ 은 반응차수,  $A$ 는 빈도상수,  $E$ 는 활성화 에너지,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다.

### 2.2 경화 수축(cure shrinkage) 모델링

본 연구에 사용된 실리콘은 완전 경화시 약 3% 정도의 경화수축이 발생하며, (2)와 같이 경화도에 선형적인 함수로 가정하였다.

$$V = \alpha V^T \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 경화 부피수축율,  $\alpha$ 는 경화

도,  $V^T$ 는 총 경화 부피 수축율이다.

### 2.3 탄성 계수 모델링

실리콘 수지는 액체상에서 경화되면서 점점 고체상으로 되며 탄성계수는 증가하게 되는데, 경화도와 탄성계수 사이에 선형적인 관계로 가정하였다. 따라서 식(3)과 같이 나타내었다.

$$E = E_0\alpha \quad (3)$$

여기서,  $E_0$ 는 비례상수이다.

## 3. 유한요소해석

실리콘 레진은 50mm x 10mm x 2mm 의 직사각형 형상을 모델링 하였다. 경화조건은 130 °C 에서 30 분간 등온으로 경화시킨조건(등온급경화)과 상온에서 130 °C 까지 승온으로 천천히 경화시킨 조건(승온경화)의 두가지 경우를 비교하였다. Fig.1 은 130°C 등온상태에서 급경화시켰을때의 측정점의 온도 및 경화도 분포이다. 급격한 경화반응의 영향으로 반응열이 높게 발생하였고 최대 153°C의 발열반응이 관찰되었다. Fig.2 는 상온에서 130°C까지 천천히 승온하며 경화시켰을 때의 측정점 온도 및 경화도 분포이다. 급경화와는 달리 경화와 온도분포는 완만하게 분포되었으며 반응열의 온도는 크게 발생하지 않았다.

냉각해석에서는 등온 급경화 및 승온경화시 최대발열온도를 기준으로 상온으로 냉각시 발생하는 휨을 해석하였다. 그런데 실리콘 레진은 대부분의 폴리머와 마찬가지로 탄성과 점성의 성질을 모두 가지는 점탄성 거동을 보이고 있다. 따라서, 경화공정 후 탄성계수가 일정한 경우와 점탄성 거동을 가지는 경우의 2 가지에 대해 냉각 해석을 수행하고 비교하였다. 점탄성 거동에 대해서는 온도에 따른 응력 완화(stress relaxation) data 를 사용하여 식 (4)와 같은 prony series 를 구하고 이를 점탄성 해석에 적용하였다.

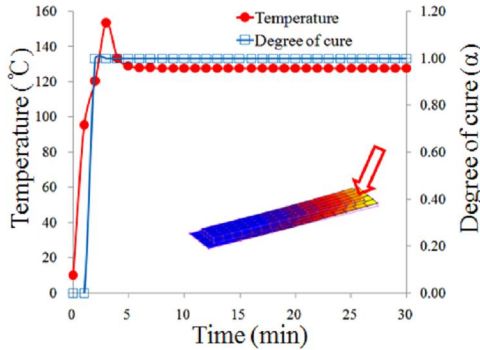


Fig. 1 Temperature and DOC profile during fast cure process.

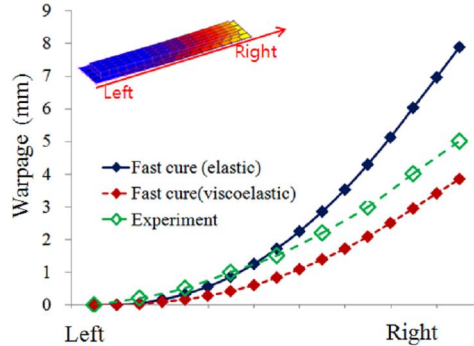


Fig. 3 Warpage profile during fast cure process

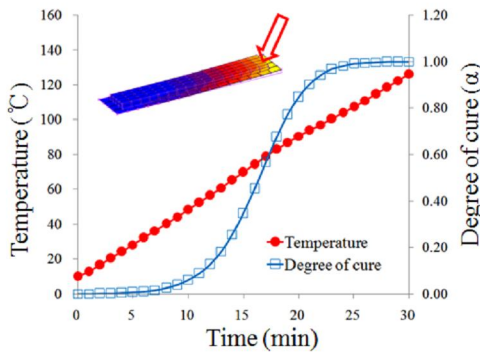


Fig. 2. temperature and DOC profile during slow cure process

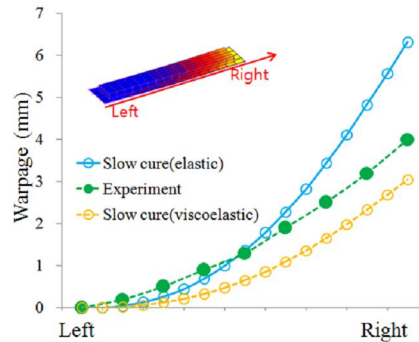


Fig. 4. Warpage profile during slow cure process.

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} = G_0 + \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (4)$$

여기서,  $t$  는 시간,  $G_0$  는 완화 계수(equilibrium modulus),  $G_i$  는  $i$  모드에 대한 전단계수,  $\tau_i$   $i$  모드에 대한 시간 상수이다

이러한 해석 결과를 비교하기 위해 실험을 수행하였다. 온도조절이 가능한 열판 (hot plate) 위에서 130°C 등온 상태에서 30 분간 급경화와 상온에서부터 130°C까지의 승온경화를 각각 수행한 후 상온으로 냉각하였다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 등온 급경화 및 승온경화 후 냉각시켰을 때의 해석결과를 실험결과와 비교한 것이다. 비교로부터 점탄성해석 결과가 탄성해석보다 실험에 더 근접한 것을 확인할 수 있었다.

급격한 경화반응은 반응열의 상승으로 기관과의 열팽창계수차이에 의해 큰 휨과 수축이 발생할 수 있다. 급격한 경화반응을 최대한 억제하면서 실리콘 몰딩(silicone molding)의 공정시간(cycle time)을 줄일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

LED 광원의 소자 보호를 위한 실리콘 레진에 대해 다른 경화속도를 적용한 경화 및 냉각공정의 탄성/점탄성 유한요소해석을 수행하고이를 실제 실험결과와 비교하였다.

- (1) 급격한 경화반응에서는 경화반응열의 상승으로 인해 실리콘 레진의 휨이 증가하였다.
- (2) 탄성해석과 점탄성해석을 실험결과와 비교한 결과 점탄성해석이 실제 휨 양을 좀 더 정확히 예측하고 있음을 볼 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 “LED Encapsulation 장비 및 통합공정 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] Kamal M.R and Sourour S., “Kinetics and thermal characterization of thermoset cure” Pol. Eng. Science Vol.13, No.1, pp.59-64, 1973