

# 경화공정을 고려한 LED 패키징 실리콘의 잔류응력에 대한 유한요소해석

## Finite element analysis on the residual stress in LED encapsulment silicone considering cure process

\*송민재<sup>1</sup>, #김흥규<sup>2</sup>, 강정진<sup>3</sup>, 홍석관<sup>4</sup>, 김권희<sup>5</sup>

\*M. J. Song<sup>1</sup>, #H.K.Kim(krystal@kitech.re.kr)<sup>2</sup>, J. J. Kang<sup>3</sup>, K. H. Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원, 고려대학교 대학원, <sup>2</sup> 한국생산기술연구원 금형·성형기술연구부

<sup>3,4</sup> 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부, <sup>5</sup> 고려대학교 기계공학부

Key words : LED, silicone, encapsulment, residual stress, cure kinetics

### 1. 서론

LED(Light Emitting Diode: 발광 다이오드)는 고효율, 장수명, 소형화, 저소비 전력, 친환경 광원 등 우수한 특징을 가지고 있어 많은 용도에 응용되고 있다. 이러한 LED는 소자를 보호하기 위한 봉지재로서 열적, 광학적 특성이 우수한 에폭시, 실리콘 등의 열경화성 폴리머가 사용된다. 특히, 실리콘 폴리머는 내열성이나 내구성이 요구되는 고휘도 LED 용도로 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 앞으로 대형 LCD용 백라이트, UV-LED 등으로 사용이 확대되고 있고 중장기적으로 매우 높은 성장을 보일 것으로 예측된다. 실리콘 폴리머는 액상의 주재, 경화제를 섞어서 금형 등의 틀에 집어넣고 열을 가하여 경화시키고 이를 냉각시키는 제조과정을 통하여 만들어진다. 이러한 제조과정에서 발생하는 잔류 응력은 강도저하 및 복굴절의 발생으로 LED 제품의 기능저하를 일으킬 수 있다. 실리콘 제조과정에서 발생하는 잔류응력은 경화과정 중에 발생하는 것과 냉각과정 중에 발생하는 것으로 나뉘어진다고 알려져 있다. 본 연구에서는 실리콘 폴리머의 경화 및 냉각 과정에서 발생하는 잔류응력의 정량적 예측을 위해 전체 공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 경화공정에 대해서는 실리콘 특성에 맞는 경화반응속도 모델을 적용하였으며, 해석의 편의상 축대칭 원통 형상을 대상으로 하였다. 전체 공정 후에 발생하는 잔류 응력에서 경화 및 냉각 공정 각각의 영향을 비교, 평가하였다.

### 2. 실리콘 몰딩 공정

실리콘 폴리머의 성형은 압축성형(compression molding) 공정을 도입하였다. 압축성형은 미리 예열된 일정한 형태의 금형에 투입하고 고온, 고압으로 압축하여 제품을 생산하는 공정이다. Fig. 1은 해석에 적용된 원통형 실리콘의 모델이다.

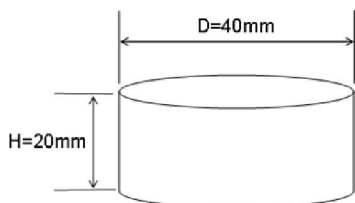


Fig. 1 Design of molded silicone encapsulment

### 3. 경화반응분석

#### 3.1 경화반응속도 모델 (cure kinetics)

실리콘 폴리머는 열경화성 수지로서, 경화과정 중에 발생하는 반응열을 측정하면 경화특성을 알 수 있다.[1] 반응열을 측정하여 경화특성을 실험적으로 구하는 방법 중에 가

장 보편적으로 사용되는 방법이 DSC(Differential Scanning Calorimeter)실험이다. DSC에 의한 실리콘 폴리머의 경화반응속도를 구하기 위해 60°C, 70°C, 80°C, 90°C 온도에서의 등온경화 실험을 수행하였다. 이러한 실험결과를 적합한 경화반응속도식으로 모델링 할 수 있다. 본 연구에서는 측정된 데이터를 식(1)과 같은 자동촉매 반응식(autocatalyzed cure kinetics)을 이용하여 분석하였다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m(1-\alpha)^n \quad (1)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

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. Table 1에는 구한 반응속도의 차수를 나타내었으며 Fig. 2 경화도를 실험값과 반응속도식으로 피팅한 결과이며 반응속도식이 실험값을 비교적 정확히 표현할 수 있음을 보여준다.

Table 1 Constant of cure kinetics for silicone polymer.

	Cure temperature (°C)			
	60	70	80	90
$k(\times 10^{-3})$	1.736	3.839	9.739	21.58
$A (s^{-1})$	4.007x 10 <sup>10</sup>			
$E(kj/mol)$	85.293			
$m$	0.62			
$n$	1.39			

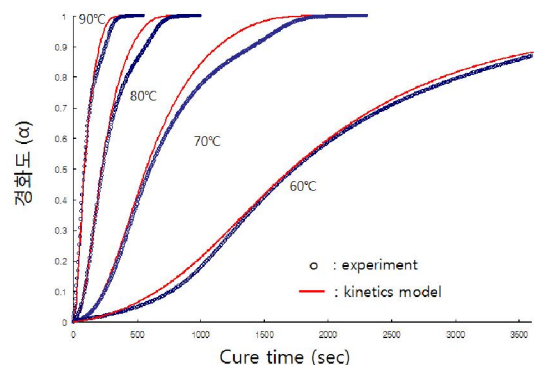


Fig. 2 Comparison of degree of cure between experiment and kinetics model

#### 3.2 경화 수축 (cure shrinkage)

열경화성 수지는 경화가 진행됨에 따라서 화학적인 반

응으로 수축이 발생한다. 보통 경화수축은 경화도와 선형적인 관계를 가진다고 알려져 있고, 본 연구에 사용된 실리콘 폴리머는 약 3% 정도의 경화수축이 발생한다. 따라서 다음과 같이 경화도에 선형적인 함수로 해석에 적용하였다.

$$\Delta V = \Delta \alpha V^T \quad (3)$$

여기서  $\Delta V$ 는 경화 부피수축율의 변화량,  $\Delta \alpha$ 는 경화도의 변화  $V^T$ 는 총 경화 부피 수축율이다.

#### 4. 냉각 공정 해석

경화 후 냉각시 열경화성 실리콘 폴리머는 유리전이온도( $T_g$ )를 기준으로 다른 열팽창계수를 가지게 된다. 따라서 열팽창 계수값은 Fig.3 과 같이 냉각시 열팽창계수 값을 달리하여 적용하였다. 냉각시간은 경화 후 약 1 분간 자연대류상태에서 냉각시킨다고 가정하였다.

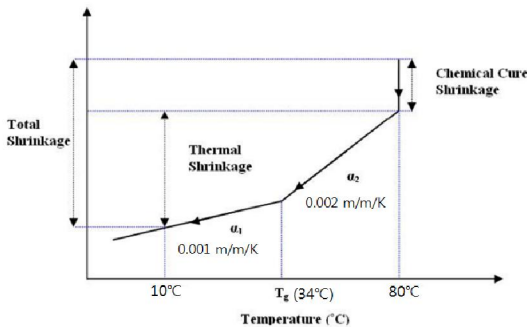


Fig.3 Molding silicone shrinkage as a function of temperature due to chemical cure as well as cooling

#### 5. 유한요소 해석

실리콘 폴리머는 80°C 온도의 등온상태로 경화후 10°C의 상온에서 자연대류로 냉각한다고 가정하였다. Table 2에 해석에 사용한 물성치를 나타내었다. 물성치는 matweb.com의 silicone encapsulation grade를 참조하였다

Table 2 Material property of silicone polymer	
밀도( $\rho$ )	1290 Kg/m <sup>3</sup>
열전도도(k)	0.311W/m_K
비열(Cp)	4.581 J/kg_K
포와송비( $\nu$ )	0.37

유한요소해석에는 비선형 Implicit 해석프로그램인 MSC.Marc 를 사용하였으며 육면체 요소를 적용하였다. 냉각시 열전달 해석을 위한 대류 열전달계수에는 자연대류상태를 가정하여  $h=1W/m^2 K$  의 값을 적용하였다. Fig.4 는 경화해석에서 얻어진 유효 잔류응력 분포와 냉각해석에 대한 결과이다. 경화시 최대 응력은 11MPa 정도가 나왔으며 냉각시 최대 응력은 90MPa 정도가 나왔다. 따라서 경화보다 냉각시에 잔류응력이 크게 나왔다.

Fig.5 에는 원통의 중심에서 원통 표면까지 반지름 방향에 따른 잔류응력의 크기를 나타내었다. 결과를 보면 구속되지 않은 원주 윗면에서 잔류응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다.

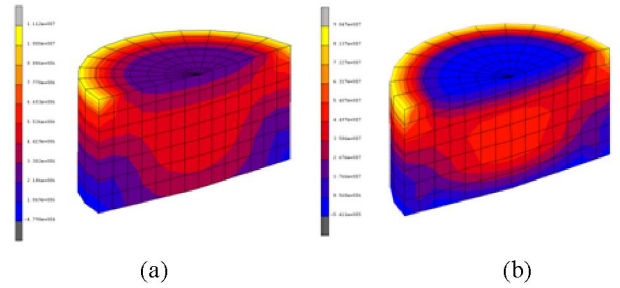


Fig.4 Effective residual stress distribution ; (a) curing (b)cooling

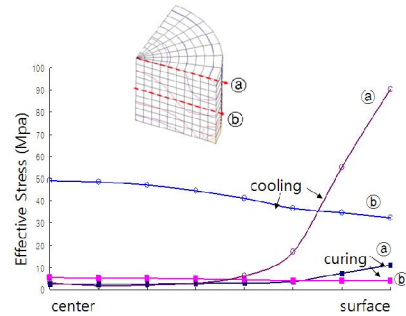


Fig.5 Effective stress plot along radius direction

Fig. 6 은 경화해석에서 얻어진 유효 변형률 분포와 냉각 해석에 대한 결과이다. 경화시 최대 유효 변형률은 4.39% 정도가 나왔으며 냉각시 최대 유효 변형률은 8.24% 정도가 나왔다. 이는 잔류응력의 경우와 유사하게 경화공정보다는 냉각공정에서의 수축 변형률이 더 큰 것을 나타낸다. 그러나, 경화공정은 겉으로 드러나는 잔류응력이나 변형률뿐만 아니라 실리콘 물성의 결정에도 영향을 미치기 때문에 후속 냉각 공정은 물론 전체 몰딩 공정의 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

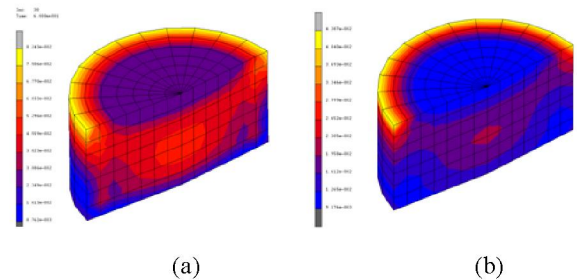


Fig.6 Effective strain distribution ; (a) curing (b)cooling

#### 5. 결 론

발광다이오드 (LED)의 보호재로 사용되는 실리콘 폴리머의 경화 및 냉각과정에서의 잔류응력경향에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. DSC 실험을 통하여 실리콘의 경화반응속도식을 구하고 이를 통하여 경화공정의 유한요소해석을 수행하였다. 또한 경화 후 냉각공정의 해석을 수행하고 이를 비교하였다. 그 결과 실리콘 내의 잔류응력이나 변형률 측면에서는 경화공정보다 냉각공정의 영향이 큰 것으로 예측되었다.

#### 후 기

본 연구는 2009년도 한국과학재단(R11-2007-028-03001-0)의 지원과 지식경제부 산업핵심기술개발사업 “LCD 용 LED Backlight 생산을 위한 대면적 정밀 패키징 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.