

# 동적 열 특성을 이용한 전자 장치의 시변화 전열 변수 규명 Identification of time-variant parameters of the electro thermal system by analyzing dynamic thermal behavior

\*#김정균<sup>1</sup>, Iswor Bajracharya<sup>2</sup>, Wataru Nakayama<sup>3</sup>, 문희곤<sup>4</sup>, 이선규<sup>5</sup>

\*#J. K. Kim(junggyun@gist.ac.kr)<sup>1</sup>, Iswor Bajracharya<sup>2</sup>, Wataru Nakayama<sup>3</sup>, H. G. Moon<sup>4</sup>, S. K. Lee<sup>5</sup>  
<sup>1</sup> 광주과학기술원, <sup>2</sup>광주과학기술원, <sup>3</sup> Thermal Tech International, <sup>4</sup>광주과학기술원, <sup>5</sup>광주과학기술원

Key words : Electro-thermal system modeling, Dynamic thermal response, Bond graph modeling

## 1. 서론

전자 패키지 시스템의 모델링과 시뮬레이션은 오랫동안 중요한 문제 중의 하나였다. 특히 전자 패키지 시스템이 인클로저(enclosure) 안에 장착되어 있는 경우는 시간에 따른 시스템 내외부의 온도 변화로 인해 훨씬 복잡해진다. 현재까지 많은 시뮬레이션 기법이 FEM 을 이용하고 있지만 과도상태(transient state) 해석의 경우 많은 계산 시간을 요구하고 있고, 또한 시스템이 시변화(time-variant) 변수로 이루어진 경우 해석에 어려움이 있다. 본 연구에서는 전자 패키지 소자의 열 거동을 명확하게 모사할 수 있는 모델링 기법을 확립하고자 시스템 다이내믹 수법의 하나인 본드 그래프(bond graph)를 이용하였다.

본드 그래프는 다이내믹 시스템을 해석하는 도구 중의 하나로 파워의 흐름에 따른 'effort' 변수와 'flow' 변수의 변화를 통해 시스템을 그래픽적으로 표현하며, 기계, 전기, 자기, 열 등 여러 물리적 영역이 결합된 경우 해석이 용이한 방법이다[1]. 최근에는 본드 그래프를 이용하여 전열 시스템(electro-thermal system)의 하나인 파워 반도체에서 전기적 입력과 열적 출력을 반도체의 스위칭에 따라 모델링하는 연구가 진행되었다[2,3,4].

본 연구에서는 동적 열 특성을 이용하여 시변화 변수를 가지는 전열시스템을 명확하게 모델링하고자 한다. 제시된 시스템 모델링을 통하여 부품 요소의 열 변형 또는 부품 결합신뢰도에 따른 전자소자의 열 거동 변화를 예측하여 패키지 시스템의 설계 지침을 제공하고자 한다. 시스템 모델링은 동적 환경 변화 아래 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 통하여 검증되었다.

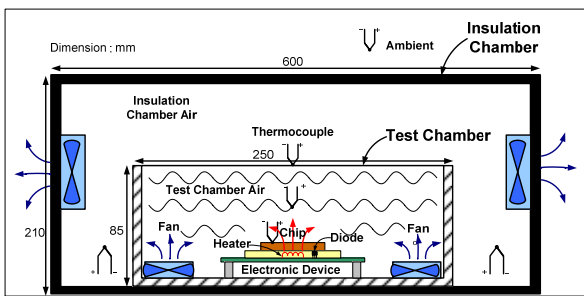


Fig. 1. Enclosed electronic package experimental set up

## 2. 실험장치 구성 및 시스템 모델링

그림 1 은 인클로저안에 있는 전자 패키지 시스템의 실험장치 구성을 나타낸다. 테스트 챔버 중앙에는 전자 소자가 위치해 있고, 장치 안에는 발열을 위한 히터와 전자 소자의 온도 측정을 위한 다이오드가 내장되어 있다. 테스트 챔버 내부에는 균일한 내부 공기 온도 유지를 위하여 냉각 팬이 장착되어 있고, 테스트 챔버는 외부공기 온도 변화의 영향을 최소화하기 위하여 단열 챔버 안에 위치해 있다. 열전대를 이용하여 전자 소자 위의 칩, 테스트 챔버 내부 공기, 테스트 챔버 케이스 표면, 단열 챔버 내부 공기

의 온도를 측정하였다.

그림 2 는 전자 소자 히터에서 발생한 열이 칩 표면, 테스트 챔버 내부의 공기, 테스트 챔버의 케이스 표면, 그리고 마지막으로 단열 챔버 내부 공기까지 진행되는 열의 흐름을 보여주고 있다. 전자 소자에 전류를 가하였을 경우 줄히팅(joule Heating)에 의해 발생하는 전기적 입력이 열적 출력으로 바뀌게 되고 이러한 전체적인 열의 흐름을 그림 3(a)에서 전기적 모델과 열적 모델이 결합된 전열시스템 모델링을 본드 그래프 모델링을 이용하여 보여주고 있다. 그림 3(b)는 이러한 본드 그래프 모델링을 전통적인 방법인 전기적 회로로 치환한 네트워크 모델링을 보여주고 있다.

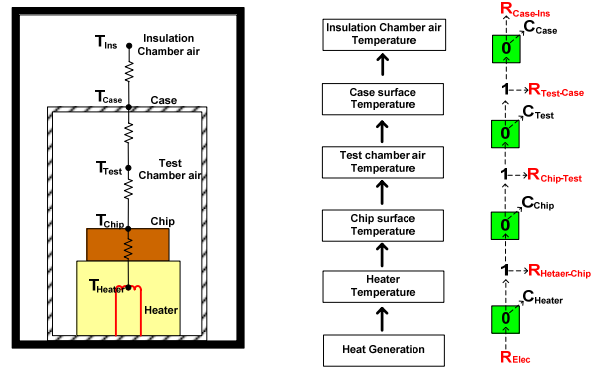
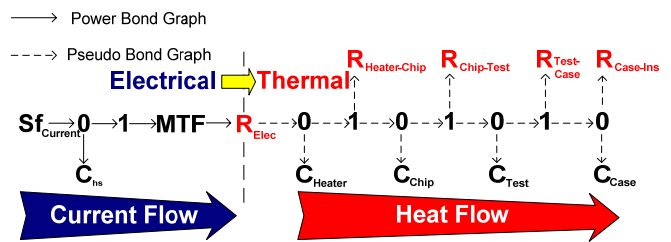
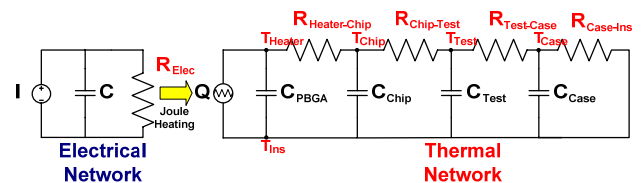


Fig. 2. Heat flow process and bond graph modeling



(a) Bond graph modeling of electro-thermal system



(b) Electrical network and thermal network of the system

Fig. 3. System modeling

## 3. 시스템 변수 규명

전열 시스템 모델링 설계를 위해서는 시스템 열 변수를 규명하는 과정이 필요하다. 먼저 열저항(thermal resistance,  $K/W$ ) 값은 각 노드(node) 포인트 간의 온도 차이 값을 이용하여 구할 수 있다. 그림 4 는 히터와 칩 표면간의 온도 차이 값( $\Delta T_{Heater} - \Delta T_{Chip}$ )을 보여주고 있다. 온도 차

이 값은 먼저 각 노드 포인트에서 히터 발열에 의한 온도의 상승 값( $\Delta T$ )을 구한 후, 각 상승 값 사이의 차이를 이용하여 온도 차이 값을 구한다. 이를 커브피팅(curve fitting)하여 시간에 따른 온도 차이 값의 관계식을 구하고 이를 이용하여 히터와 칩 표면간의 열저항 값을 구할 수 있다. 온도 차이 값과 열저항, 열류(heat flow rate,  $Q$ ) 간의 관계식은 다음과 같다. (1)~(2)

$$\Delta T_{Heater} - \Delta T_{Chip} = R_{Heater-Chip} \cdot Q \quad (1)$$

$$R_{Heater-Chip} = \frac{\Delta T_{Heater} - \Delta T_{Chip}}{Q} \quad (2)$$

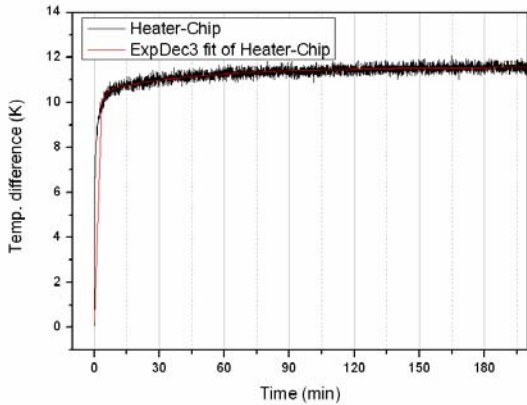


Fig. 4. Temperature difference curve between PBGA heater and chip surface and exponential decay fitted curve

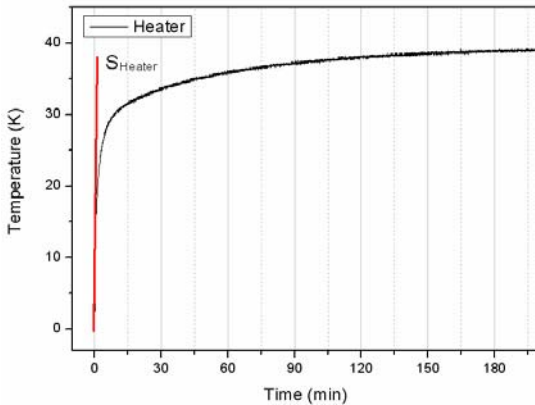


Fig. 5. Temperature response on the electronic device heater and the slope at the initial state ( $t = 0$ )

그림 5 는 본드 그래프 모델링을 구성하고 있는 열용량 (thermal capacitance,  $J/K$ ) 값을 구하는 과정을 보여주고 있다. 열류( $q(t)$ )와 열 용량간의 관계식은 식 (3)과 같다. 이 때  $t = 0$  즉, 초기 상태일 때의 온도 증가 기울기 ( $S_{Chip}$ )와 열용량( $C_{Chip}$ ) 관계는 식 (5)와 같고, 이를 이용하여 열용량 값을 구할 수 있다. 식 (6)과 같은 방법으로 나머지 노드 포인트들의 열용량 값을 구할 수 있다.

$$q(t) = -\frac{1}{R_{Heater-Chip} \cdot C_{Heater}} \cdot q(t) + Q \quad (3)$$

$$\Delta \dot{T}_{Case}(0) = S_{Heater} = \frac{1}{C_{Heater}} \dot{q}(t) = \frac{Q}{C_{Heater}} \quad (5)$$

$$S_{Chip} = \frac{Q}{C_{Chip}} \quad (6)$$

이때 전자 소자 히터의 내부 저항( $R_{Elec}$ )과 히터 온도의 관계식은 (7) 식과 같이 주어 졌다.

$$R_{Elec} = 111.91 + 0.1230 \cdot T_{Heater} \quad (7)$$

따라서 일정한 전류를 전자 소자에 가한 경우라도 발열

에 의해 히터의 온도가 상승하면서 저항값이 증가하고 이에 따라 시스템에 입력되는 열류는 온도가 증가함에 따라 증가한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안된 전열시스템의 본드 그래프 모델링은 150mA 의 전류를 전자 소자에 가하였을 경우, 시스템의 온도거동 측정값과 시뮬레이션 값의 비교를 통하여 검증되었다. 그림 6 에서 보듯이 온도의 변곡 부분과 안정상태(steady-state)에서 측정값과 시뮬레이션 값이 일치함을 알 수 있다.

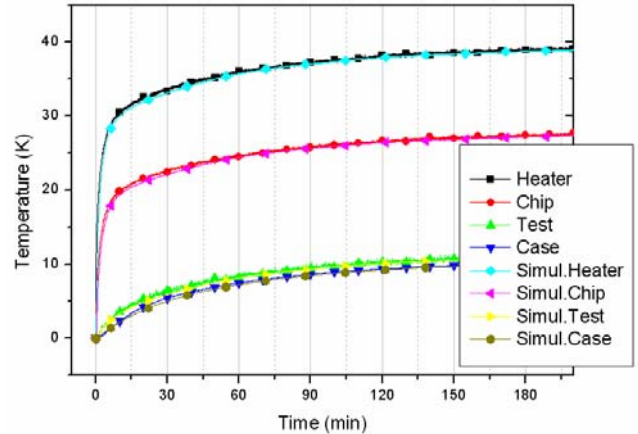


Fig. 6. Simulation results and measured curve with bond graph modeling

#### 4. 결론

인클로저로 둘러싸인 전자 패키지 시스템의 전열 모델링과 시뮬레이션 방법이 제시하고 시뮬레이션 값과 측정값의 비교를 통하여 검증하였다. 시스템 모델링은 장치의 작동에 따라 줄히팅에 의해 발생하는 열이 장치에 전달되는 전기적 모델과 열적 모델이 결합된 전열 모델링으로 구성 되어있다. 시스템 모델링을 구성하는 열저항의 경우 주위 노드 간의 온도 차이를 이용하여 규명하는 방법이 제시하여 전자 소자 내부의 온도가 증가함에 따라 장치에 전달되는 열류 변화를 고려한 시스템 모델링이 가능하였다.

#### 참고문헌

1. Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis, Ronald C. Rosenberg, "System Dynamics: A unified approach 2<sup>nd</sup> ed" John Wiley & Sons, Inc.
2. J. Garcia, G. Dauphin-Tanguy, C. Rombaut, "Bond Graph Modeling of Thermal Effects in Switching Devices." In Proceedings of the SCS Conference ICBGM'95. Las Vegas. , 145-150, 1995
3. J. Garcia, G. Dauphin-Tanguy, C. Rombaut, "Eletrothermal Bond Graph Model for Semiconductor Switching Devices." In Proceedings of the APEC'96 Conference. San Jose., 258-263, 1996
4. J. Garcia, G. Dauphin-Tanguy, C. Rombaut, "Modeling and Simulating the Dynamic Electrothermal Behavior of Power Electronic Circuits Using Bond Graphs." IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 2, 1641-1647, 1996