

# 초기 상승법에 의해 계산된 활성화에너지의 오차 보정에 관한 연구

## Study on the Correction of Error Involved in Activation Energies Calculated by the Initial Rise Method

柳 康 植\* · 秋 榮 培\*\* · 柳 富 衡<sup>§</sup> · 金 鳳 治<sup>§§</sup>  
(Kang-Sik Ryu · Young-Bae Choo · Boo-Hyung Ryu · Bong-Heup Kim)

### 요 약

열자격전류 특성으로부터 초기상승법에 의해 계산된 활성화 에너지에 포함된 오차를 평가하고 이 오차를 줄일 수 있는 오차보정식을 제안하였으며, 또한 그 정밀도를 좌우하는 오차보정계수를 수치계산에 의해 결정하였다. 초기상승법으로 계산된 활성화 에너지는 이 방법을 적용하는 데이터 구간의 실정여하에 따라 그 참값에 대해 0.7~10% 이상의 상대적 오차를 함유하게 되는데, 제안된 오차보정식에 따라 수정된 후에는 약 0~0.5%로 줄일 수 있음을 확인하였다. 이로부터 초기상승법에 의해 평가된 활성화 에너지는 비록은 오차를 수반하고 있더라도 본 연구에서 제안한 오차보정법을 이용하면 거의 진값에 가까운 값을 얻을 수 있으며, 그 효용성과 신뢰성은 매우 높은 것으로 결론된다.

**Abstract-** The errors of activation energy calculated by the initial rise method from the characteristics of thermally stimulated current have been estimated and an equation for the correction of the error is proposed. The coefficients needed in the proposed equation are determined by the numerical method. It is shown that the activation energy calculated by the conventional initial rise method contains errors of 0.7~10% depending on the location of the data points of the interval on which the method is applied. However, the error can be reduced to less than 0.5% when corrected by using the proposed equation. It is finally concluded that the activation energy determined by the initial rise method can approach the true value by adapting the proposed error correction method which is effective and reliable.

### 1. 서 론

열자격전류(Thermally Stimulated Current; TSC)

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 先任研究員 · 工博  
 \*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 研究員  
 § 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 §§ 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 名譽教授 · 工博  
 接受日 字 : 1988年 11月 8日  
 1次修 正 : 1989年 1月 30日

측정법은 이전부터 반도체분야에서 에너지 준위를 구하기 위하여 사용되어 왔으며, 근래에는 절연체 및 유전체내에 존재하는 하전입자들의 거동을 연구하는 강력한 수단으로 인정되어 그 기본이론과 응용에 관한 내용이 여러 방면에 걸쳐 날로 발전하고 있다<sup>1-3)</sup> 이와 더불어 TSC 측정에 의해 관측된 특성으로부터 재료내의 하전입자들과 관련된 활성화 에너지 등과 같은 기본적 물리량을 구할 수

있는 해석법이 많이 보고되고 있으며<sup>4-6)</sup>, 특히 Cowell-Woods<sup>5)</sup> 및 Garlick - Gibson<sup>6)</sup>에 의해 각각 제안한 바 있는 Curve fitting법과 초기상승법(Initial rising method)은 이와 같은 목적에 부합되는 가장 우수한 해석법으로 평가되고 있다.<sup>7-9)</sup>

이 중 Curve fitting법에 대해서는 저자에<sup>7)</sup> 의해 종래의 방법을 더욱 발전 시켜 TSC의 발생원인에 구애받지 않으며, 매우 정밀한 활성화에너지는 물론 이론적인 TSC 피크의 크기 및 그 발생온도도 구할 수 있는 Optimal curve fitting법이 보고된 바가 있으나, 이것을 이용하는데에는 반드시 컴퓨터에 의한 수치해석을 하여야 한다는 제한이 있다. 이에 비해 초기상승법은 실험결과로부터 승온초기부분에서의 TSC값과 그 발생온도만을 취해 일위적으로 간단하게 활성화 에너지를 구할 수 있다는 장점때문에 지금까지 가장 보편적으로 사용하고 있는 방법이다. 이것은 승온초기부분에서의 온도  $T_0$ 가 T와 같다고 보고 TSC이론식중에 포함된 적분항  $\int_{T_0}^T \exp(-E/kT) dt$ 가 0이 된다는 가정을 기초로 하기때문에 TSC 피크의 약 10%이하의 부분까지만을 사용할 경우에만 비교적 정확한 활성화 에너지를 구할 수 있으나<sup>8)</sup>, 실제로 관측된 대부분의 TSC 특성에서는 피크의 약 10%되는 초기부분에서의 완화과정이 매우 불안정하여 이때의 TSC값들을 정확하게 취하기가 어렵기때문에 일반적으로 10% 이상에서부터 약 50%되는 부분까지도 이용하고 있다. 그러나 이 경우에는 적분항을 0으로 간주할 수 없으므로 TSC 피크의 어느부분까지를 초기상승법에 필요한 데이터 구간으로 설정하는가에 따라 그때의 적분항만큼 계산된 활성화 에너지에 오차가 포함된다<sup>9)</sup> 따라서 데이터 구간의 설정에 관계없이 초기상승법으로 계산된 활성화 에너지값의 신뢰도를 높이기 위해서는 이 오차분에 대해서 보다 일반성 있는 보정을 하여야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 이상과 같은 관점에서 초기상승법에 의해 계산된 활성화 에너지의 오차보정을 연구 대상으로 삼아 초기상승법에 필요한 데이터구간을 피크의 약 0.2에서 50%까지 변화시켜 그 변화에 따른 활성화 에너지의 오차를 평가하고 또 그 결과들을 이용하여 오차를 보정할 수 있는 오차보정식을 제시하며, 이때 필요한 가장 적합한 오차보정계수를 수치계산에 의해 결정함으로써 초기상승법의 사용을 보다 일반화시키고 계산된 활성화 에너지값의 신뢰도를 높이고자 한다.

## 2. 기본이론

일반적으로 TSC는 그 특성이 매우 복잡하여 그 성질에 따라 여러가지 식으로 표현할 수 있으나,<sup>1)</sup> 다음과 같이 하나의 간단한 형태의 식으로 바꾸어 나타낼 수 있다.<sup>1)</sup>

$$TSC = I = A \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - B \int_{T_0}^T \exp \left( -\frac{E}{kT'} \right) dT' \right\} \quad (1)$$

여기서 A, B는 TSC의 성질에 따라 각기 다른 표현되는 변수이며, E는, 활성화 에너지, k는 Boltzman 정수, T는 절대온도,  $T_0$ 는 승온초기온도이다. 한편 이 식 (1)에서 A, B는 많은 파라미터를 포함한 변수로서 TSC의 성질에 구애됨이 없이 식(1)을 수치계산에 적용하기 위해서는 A와 B를 소거하여야 하며, 이와 같은 목적에 따른 결과식만을 소개하면 다음에와 같다.<sup>2)</sup>

$$I = I_m \exp \left\{ - (t - t_m) - t_m^2 \exp(t_m) (W(t) - W(t_m)) \right\}$$

단,  $t = E/kT, t_m = E/kT_m,$

$$W(t) = \int_t^\infty (\exp(-t') / (t')^2) dt'$$

$$W(t_m) = \int_{t_m}^\infty (\exp(-t') / (t')^2) dt' \quad (2)$$

여기서  $I_m$ 은 TSC 피크의 최대치,  $T_m$ 은  $I_m$ 의 발생 온도이며, 적분항  $W(t)$  및  $W(t_m)$ 의 계산은 Romberg 수치적분법<sup>10)</sup>과 비슷한 정도의 정확도를 가졌으면서도 점근전개(asymptotic expansion)법<sup>10)</sup>과 같은 정도의 계산속도를 가진 Jenkins방법을<sup>11)</sup> 적용하였다.

다음으로 본 연구에서 고찰하고자 하는 초기상승법에 대해서 그 개요를 간단히 소개하면 다음과 같다.

주지하는 바와 같이 초기상승법에 있어서는 식 (1)로부터 승온초기의 온도부근에서의 온도  $T_0$ 를 T와 같다고 보면 적분항은 무시할 정도로 적어져 0으로 간주할 수 있다. 따라서 식 (1)은

$$I = A \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \quad (3)$$

로 바꾸어 쓸 수 있으며, 이 식의 양변에 대수를 취하면

$$\ln(I) = \ln(A) - \frac{E}{kT} = \text{constant} - \frac{E}{k} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (4)$$

이 되어  $\ln(I) \sim 1/T$ 의 Arrhenius 도식하면 저온측에서 직선이 되고 그 기울기로부터 E값을 구할 수 있다. 일 예에서 그림 1(a)는  $T_m=300K$ ,  $I_m=100$ ,  $E=0.9eV$ 인 경우의 TSC를 식(2)에 의해 이론적으로 도식한 것이며, 그림 1(b)는 그림1의 (a)에 대해서 Arrhenius도식한 것으로서 TSC의 저온부근에서는  $\ln(I) \sim 1/T$ 이 직선이 되고 I의 상한치로  $I_m$ 의 50%되는 점과 하한치로 10%되는 점사이에서 구한 E값은 0.82eV이다. 여기서 TSC축인 I의 값은 normalize 한 것이며, 활성화 에너지의 진값은 0.9eV와 초기상승법으로 구한 0.82eV과는 큰 차이가 있음을 알 수 있는데 이것은 이미 언급한 바와 같은 초기상승법으로 평가된 값에 내포된 오차로서  $\ln(I) \sim 1/T$ 의 기울기를 구할 때 데이터의 범위를 어떻게 설정하느냐에 따라 다르다. 따라서 정확한 값의 활성화 에너지를 얻기 위해서는 초기상승법으로 평가된 값에 포함된 이와 같은 오차분에 대해서 보정을 하여야 할 필요성이 있다.

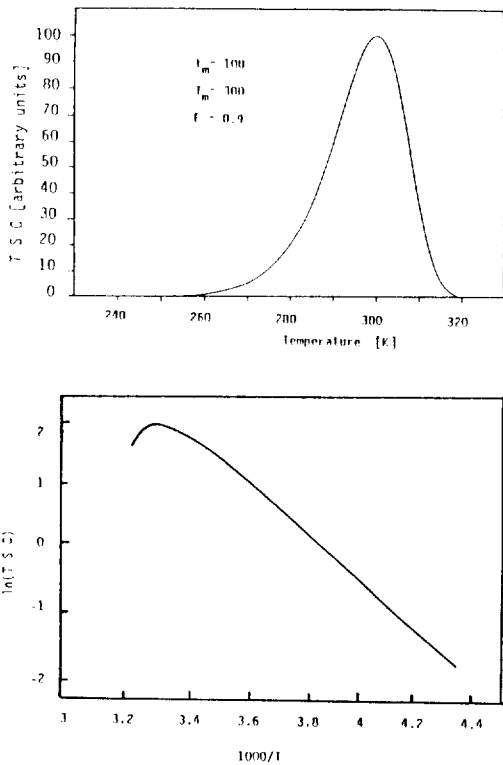


그림 1 이론적인 TSC 특성과 Arrhenius 도식  
**Fig. 1** Theoretical characteristics of TSC and Arrhenius plot.

### 3. 오차의 보정에 관한 알고리즘

지금 그림 2(a)에서와 같이 TSC피크값이  $I_m$ 인 TSC곡선으로부터 초기상승법에 적용할 전류값의 데이터구간에 대한 하한치를  $I_1$ , 상한치를  $I_2$ 라 하고 또  $I_1/I_m$ 과  $I_2/I_m$ 을 각각  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ 라 할 때 임의로  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 를 먼저 결정한다 다음  $I_1 = \delta_1 I_m$ 과  $I_2 = \delta_2 I_m$ 에 해당하는 온도  $T_1$ ,  $T_2$ 를 동일한 간격으로 분할(약 20개 정도)하여 분할된 각각의 온도 T와 이때의 전류값 I들을 초기상승법에 적용할 데이터 값으로 한다. 이때의 I값은  $T_m$ 과  $I_m$  및  $t_m$ 을 미리 정하여 식(2)에 의해 이론적으로 구할 수 있으며, 편의상 본 연구에서는  $T_m=300K$ ,  $I_m=1$ ,  $0.02 \leq 1/t \leq 0.1$ 로 하였다. 이와같이 하여 얻어진 데이터로부터 활성화 에너지를 구하기 위해 그림 2(b)에서와 같이 T는  $1/T$ 로, I는  $\ln(I)$ 로 변화한 후 이 구간에서의 데이터들에 대해 최소자승법(least square method)을 적용하여 그 기울기를 계산하였으며 식(4)를 이용하여 활성화 에너지 E값을 구할 수 있다.

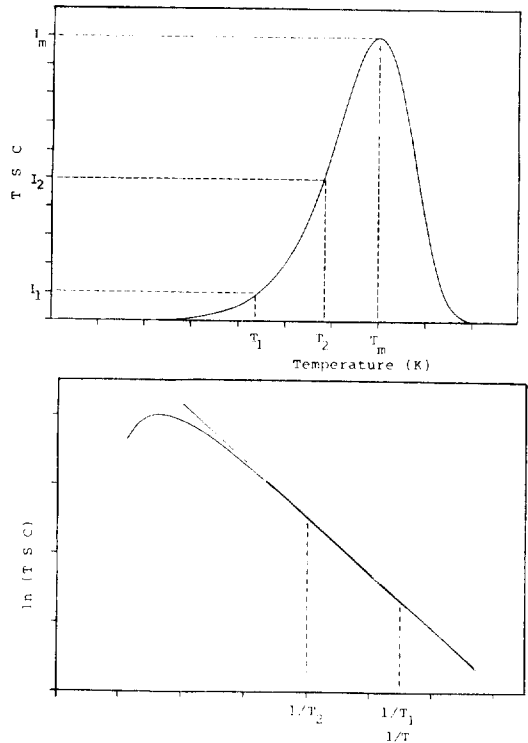


그림 2 초기상승법에 적용할 데이터 구간의 설정과 Arrhenius 도식  
**Fig. 2** Arrhenius plot and selection of data interval to apply in the initial rise method.

여기서 구해진 활성화 에너지는 당연히 초기상승법에 의한 오차를 수반하고 있으며, 이때의 활성화에너지를  $E_i$ ,  $E_i'$ 를 구하기 위해 미리 설정하였던 활성화에너지의 참값을  $E$ 라 하면

$$Err = \left| \frac{E - E_i}{E} \right| \times 100\% \quad (5)$$

와 같은 신술 오차식을 이용하여 그 오차를 구할수 있다.

그림 3은  $\delta_2$ 를 0.5로 하고  $\delta_1$ 과  $1/t_m$ 을 변화시키면서 전술한바와 같은 방법으로 구한 %오차 Err과  $1/t_m$ 의 변화와의 관계를 도시한 것으로서 이로부터 Err과  $1/t_m$ 사이에는 직선적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 따라서 Err은  $1/t_m$ 의 함수로 표현될 수 있다. 여기서  $1/t_m$ 의 변화는 0.02~0.1 사이의 범위에서 0.005씩 증가시켰다.

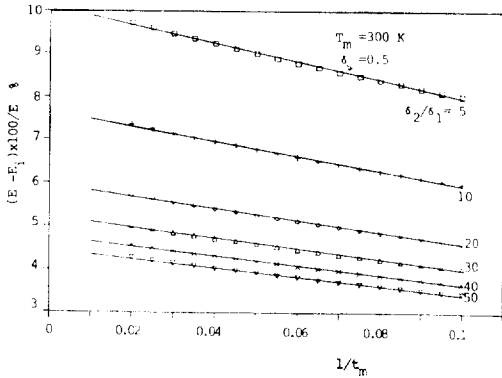


그림 3  $1/t_m$ 의 변화에 따른 퍼센트 오차  
**Fig. 3** Error percent in accordance with the variation of  $1/t_m$ .

이와 같은 관계는 Err과  $1/t_m$ 과의 그래프에서 Err축의 절편을 A, 그 기울기를 B라하면

$$Err = A - B \left( \frac{1}{t_m} \right) \quad (6)$$

로 표현할 수 있으며, 식(5)와 식(6) 및  $t_m = E/kT_m$ 으로부터

$$E = A'E_i - B'kT_m$$

단,  $A' = \frac{100}{100 - A}$   
 $B' = \frac{B}{100 - A} \quad (7)$

인 관계를 얻을 수 있으므로 초기상승법으로 구한 활성화 에너지  $E_i$ 는  $A'$ 와  $B'$ 값이 결정되면 식(7)에 의해 보정될 수 있다.

이상은  $\delta_2$ 를 일정한 값인 0.5로 보고  $\delta_1$ 과  $t_m$ 을 변화시켜  $1/t_m$ 과 오차와의 관계로부터 얻은 실물이나 한편으로  $\delta_2$ 를 어떻게 설정하는가에 따라서도 그 오차는 변화할 것이다.

다음으로 식 (7)에서 A와 B를 결정하기 위해 본 연구에서는

$$\delta_2: \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{9}, \frac{1}{10}$$

$$\delta_1: \frac{1}{5}\delta_2, \frac{1}{10}\delta_2, \frac{1}{15}\delta_2, \dots, \frac{1}{45}\delta_2, \frac{1}{50}\delta_2 \quad (8)$$

로 변화시키면서 이에 따른 데이터를 취한 후  $t_m$  값을 일정하게 놓고 이  $\delta$  ( $\delta_1, \delta_2$ )의 변화에 따라  $E_i$ 를 구하면 식(7)을 이용하여  $A', B'$ 의 관계를 얻을 수 있다.

그림 4, 그림 5는 각각 이와 같은 방법에 의해 편의상  $1/t_m = 0.02$ 일때만을 고려하여 일정한  $\delta_1$ 에서  $\delta_2$ 를 변화하면서 구한  $A'$ 와  $B'$ 를 도시한 것으로서 이로부터  $A'$ 와  $B'$ 는

$$A' = A_0 + A_1\delta_1 + A_2\delta_2$$

$$B' = B_0 + B_1\delta_1 + B_2\delta_2 \quad (9)$$

와 같은 종속적인 두개  $\delta_1, \delta_2$ 의 함수로 표현할 수 있음을 알 수 있으며, 결과적으로 식(9)을 식(7)에 대입하면 초기상승법으로 구한 활성화 에너지  $E_i$ 에 대해

$$E = (A_0 + A_1\delta_1 + A_2\delta_2)E_i + (B_0 + B_1\delta_1 + B_2\delta_2)kT_m \quad (10)$$

와 같은 보정식을 얻을 수 있다. 여기서  $A_0, A_1, A_2, B_1, B_2, B_2$ 를 보정계수를 하며 이 값의 결정은 보정된 활성화 에너지값의 정밀도를 좌우하게 된다.

#### 4. 보정계수의 평가

보정계수  $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ 는  $\delta$  ( $\delta_1, \delta_2$ )와  $A', B'$ 의 관계를 도시한 그림(4), 그림(5)에서 각 데이터들에 대해 식(9)을 이용하여 최소자승법을 적용하면 구할 수 있는데 그 방법은 대략적으로 다음

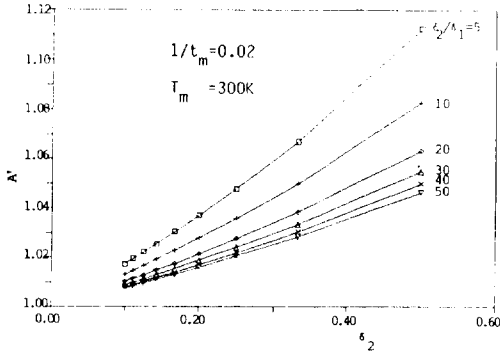


그림 4  $\delta_2$ 의 변화에 따른  $A'$ 의 도식  
Fig. 4 plot of  $A'$  in accordance with the variation of  $\delta_2$ .

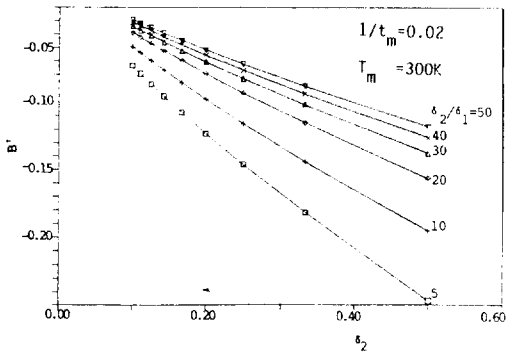


그림 5  $\delta_2$ 의 변화에 따른  $B'$ 의 도식  
Fig. 5 Plot of  $B'$  in accordance with variation of  $\delta_2$ .

에서와 같다.

지금 식(9)에서  $A'$ 의 경우에 대해  $A'(\delta_{1k}, \delta_{2k})$ 와  $A_k$ 를 각각  $\delta_{1k}, \delta_{2k} (k=1, 2, \dots, m)$ 에서의 이론적인  $A'$ 값과 그림(4)에서의 데이터에 의한  $A'$ 값이라 할때 이  $A'(\delta_{1k}, \delta_{2k})$ 와  $A_k$ 를 서로 일치시키기 위해서는

$$S(A') = \sum_{k=1}^m |A'(\delta_{1k}, \delta_{2k}) - A_k|^2 \quad (11)$$

이 최소가 될 것을 필요로 하는 최소자승법을 이용하면 가능한데, 이  $S(A')$ 를 최소화시키기 위해서는 각각  $A_0, A_1, A_2$ 에 대해

$$\frac{\partial S(A')}{\partial A_0} = 0, \quad \frac{\partial S(A')}{\partial A_1} = 0, \quad \frac{\partial S(A')}{\partial A_2} = 0 \quad (12)$$

인 세 개의 조건식을 얻을 수 있다. 따라서 식 (11)과 식 (12)로부터

$$\begin{pmatrix} \sum 1 & \sum \delta_1 & \sum \delta_2 \\ \sum \delta_1 & \sum \delta_1^2 & \sum \delta_1 \delta_2 \\ \sum \delta_2 & \sum \delta_1 \delta_2 & \sum \delta_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum A' \\ \sum \delta_1 A' \\ \sum \delta_2 A' \end{pmatrix} \quad (13)$$

같은 행렬식을 얻을 수 있으므로

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum 1 & \sum \delta_1 & \sum \delta_2 \\ \sum \delta_1 & \sum \delta_1^2 & \sum \delta_1 \delta_2 \\ \sum \delta_2 & \sum \delta_1 \delta_2 & \sum \delta_2^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum A' \\ \sum \delta_1 A' \\ \sum \delta_2 A' \end{pmatrix} \quad (14)$$

와 같이 계수  $A_0, A_1, A_2$ 를 구할 수 있으며,  $B'$ 에 대해서도  $A'$ 에서 행한 것과 같은 방법을 적용하면  $B_0, B_1, B_2$ 를 구할 수 있다. 이와 같은 방법에 의해 구한 보정계수는 표 1과 같다.

표 1 보정계수

Table 1 Correction - coefficient.

$A_0=0.9905836$	$B_0=-0.013812$
$A_1=0.661711$	$B_1=-1.555900$
$A_2=0.094467$	$B_2=-0.176232$

### 5. 오차의 보정에 대한 검토

표 2는 편의상  $1/t_m=0.02$ 인 경우에서  $\delta$  ( $\delta_1, \delta_2$ ) 변화에 따라 초기상승법을 이용해 구한 활성화 에너지  $E_i$ 와 식(10)에 의해  $E_i$ 를 보정시킨후의  $E'$ 값을 나타낸 것이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 표 2에서의 값들을 가지고  $E_i$ 와 활성화 에너지 진값  $E$  사이의 %상대오차를 각각 일정한  $\delta_2$ 에서  $\delta_1$ , 일정한  $\delta_1$ 에서  $\delta_2$ 의 변화에 따라 도시한 것으로서  $E_i$ 값은  $\delta$  ( $\delta_1, \delta_2$ )의 변화와 더불어  $E$ 값과 약 0.7~10%사이의 큰 오차를 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유로부터 전술한 바와 같이 이 값을 어떠한 방법으로 보정하면 그 오차를 줄여 참값  $E$ 에 가까워 질 수 있는가에 착안하여 오차보정식 및 그 보정계수를 도출하여 냈는데, 이들을 이용하여 보정된 활성화 에너지 값에 대해 그 신뢰도를 평가하면 다음에서와 같다.

즉 그림 7(a)와 그림 7(b)는 표 2에서의 값들을

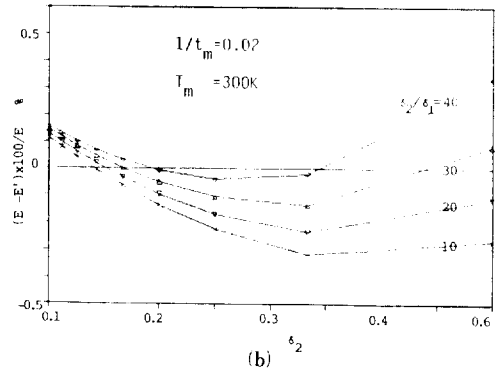
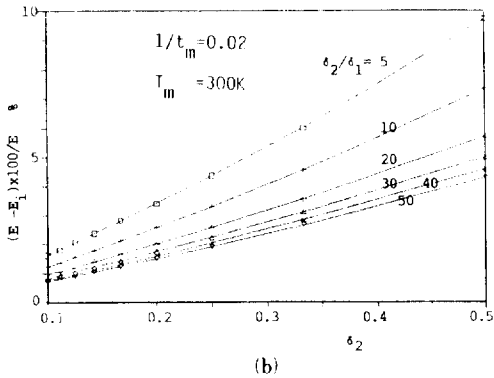
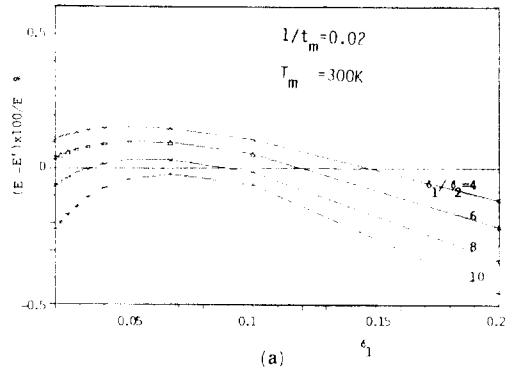
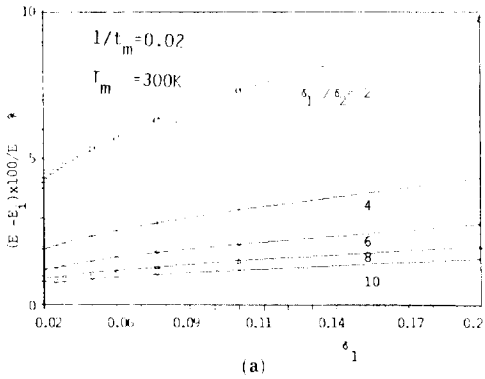


그림 6 오차보정전의 초기상승법에 의해 계산된 활성화 에너지의 오차.

- (a)  $\delta_1$ 의 변화에 따른 오차
- (b)  $\delta_2$ 의 변화에 따른 오차

Fig. 6 % Error of activation energy calculated by the Initial Rise Method before the error-correction ( $1/t_m=0.02$ ).

- (a) % Error in accordance with the variation of  $\delta_1$ .
- (b) % Error in accordance with the variation of  $\delta_2$ .

가지고 활성화 에너지의 진값 E와 보정된 후의 값 E'와의 %상대오차를 각각  $\delta_2$ 가 일정할 때  $\delta_1$ ,  $\delta_1$ 이 일정할 때  $\delta_2$ 의 변화에 따라 도시한 것으로서 보정전의 0.7~10%가 되던 오차가 보정후 약 0~0.5% 이하로 줄어들었으며, 초기상승법에 적용할 데이터 구간의 설정에 있어서도 가장 이상적인  $\delta(\delta_1, \delta_2)$ 의 범위는  $\delta_1=0.04\sim 0.13$ ,  $\delta_2=0.1\sim 0.2$  인 경우로서 그때의 오차는 약 0.1%이하로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

실제로 실험을 통해 관측된 TSC 특성 결과에서

그림 7 오차보정후의 초기상승법에 의해 계산된 활성화 에너지의 오차

- (a)  $\delta_1$ 의 변화에 따른 오차
- (b)  $\delta_2$ 의 변화에 따른 오차

Fig. 7 % Error of activation energy calculated by the Initial Rise Method after the error-correction ( $1/t_m=0.02$ ).

- (a) %Error in accordance with the variation of  $\delta_1$ .
- (b) %Error in accordance with the variation of  $\delta_2$ .

초기상승법에 의해 얻어진 활성화 에너지에 대하여 오차보정식을 적용한 일례를 검토하여 보면 그 신뢰도는 쉽게 이해할 수 있다.

지금 그림 8은 n형 단결정 Si wafer를 사용해  $10^{20}$  분위기에서 열산화에 의해 두께  $2000\text{\AA}$ 의  $\text{SiO}_2$ 를 형성하여 상부전극으로 Al 전극을 진공증착한 Al-SiO<sub>2</sub>-Si인 MOS 시편에 바이어스온도  $T_b$ 가 100°C 일때 각각 6V, 10V, 20V의 바이어스 전압  $V_b$ 을 4분간 인가한후 다시 온도를 실온까지 급냉한 다음 온도의 증가와 더불어 관측한 TSC 특성으로서 이

표 2  $\delta$ 의 변화에 따른 E, E', E<sub>i</sub>의 값의 비교 (1/t<sub>m</sub>=0.02)

Table 2 Comparison of the value of E, E', E<sub>i</sub> in accordance with the variation of  $\delta$ . (1/t<sub>m</sub>=0.02)

$\delta_2/\delta_1$ 1/ $\delta_2$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
2	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.1667542	1.1973965	1.2105934	1.2184237	1.2237771	1.2277459	1.2308471	1.2333616	1.2354569	1.2372403	E <sub>i</sub>
	1.2875542	1.2839384	1.2854596	1.2874163	1.2892411	1.2908593	1.2922849	1.2935459	1.2946692	1.2956775	E'
3	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2146816	1.2336781	1.2418927	1.2467709	1.2501065	1.2525791	1.2545108	1.2925500	1.2573813	1.2584914	E <sub>i</sub>
	1.2969004	1.2913833	1.2913198	1.2920431	1.2928833	1.2936927	1.2944376	1.2560767	1.2957289	1.2962877	E'
4	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2362300	1.2499715	1.2559262	1.2594641	1.2618836	1.2636770	1.2938836	1.2662139	1.2671599	1.2679649	E <sub>i</sub>
	1.2976724	1.2924634	1.2920422	1.2923830	1.2928875	1.2933962	1.2938836	1.2943346	1.2947486	1.2951284	E'
5	1.2925500	1.2923888	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2485017	1.2592483	1.2639111	1.2666823	1.2685776	1.2699826	1.2710802	1.2719699	1.2727110	1.2768055	E <sub>i</sub>
	1.2970602	1.2923888	1.2918746	1.2920512	1.2923886	1.2927548	1.2931107	1.2934443	1.2937533	1.2940363	E'
6	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2020055	1.2925500	E
	1.2564231	1.2652361	1.2690632	1.2713383	1.2728944	1.2740470	1.2749491	1.2749491	1.2762879	1.2768055	E <sub>i</sub>
	1.2962291	1.2920552	1.2915270	1.2916200	1.2918659	1.2921459	1.2924232	1.2924232	1.292306	1.2931575	E'
7	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2619556	1.2694182	1.2726609	1.2745888	1.2759076	1.2768851	1.2776486	1.2782878	1.2787835	1.2792221	E <sub>i</sub>
	1.2954328	1.2916809	1.2911659	1.2912116	1.2914002	1.2916242	1.2918497	1.2920651	1.2922670	1.2924547	E'
8	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	2.2925500	E
	1.2660359	1.2725027	1.2753139	1.2769855	1.2781289	1.2789766	1.2796388	1.2801756	1.2806227	1.2810030	E <sub>i</sub>
	1.2947257	1.2913263	1.2908330	1.2908506	1.2910061	1.2911858	1.2913749	1.2915567	1.2817279	1.2918876	E'
9	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	2.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2691679	1.2748703	1.2773501	1.2788248	1.2798336	1.2805815	1.2811657	1.2811657	1.2820337	1.2823692	E <sub>i</sub>
	1.2941104	1.2910064	1.2905386	1.2905573	1.2906599	1.2908168	1.2909789	1.2911358	1.2912841	1.2914227	E'
10	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	1.2925500	E
	1.2716469	1.2767443	1.2789617	1.2802804	1.2811826	1.2810514	1.2623758	1.2827973	1.2831500	1.2834501	E <sub>i</sub>
	1.2935769	1.2907225	1.2789617	1.2902660	1.2903683	1.2905037	1.2906451	1.2906451	1.2909134	1.2910357	E'

표 3 세가지 방법으로 각각 계산된 활성화 에너지의 비교

Table 3 Comparison of the activation energies calculated by three methods

method Vias voltage V <sub>b</sub>	Initial rise method E <sub>i</sub> [eV]	Error-correction method E' [eV]	Optimal curve fitting method E [eV]
6	0.363	0.393	0.3948
10	0.475	0.518	0.5159
20	0.550	0.600	0.6026

특성에 대해 식(4)로 정의되는 초기상승법을 적용하여  $\delta_1=0.1$ ,  $\delta_2=0.5$ 사이의 값들을 데이터로 취해 구한 활성화 에너지 E<sub>i</sub>를 표 3에 나타내었다.

한편, 이 활성화 에너지 값들을 오차보정식에 적용하여 보정된 값의 정밀도를 판단하기 위해서는 그림 8에서 각각의 TSC 특성에 대해 활성화 에너지의 참값을 알아야하는데, 현재로서는 저자에 의해 보고된 바 있는 Optimal curve fitting<sup>7)</sup>을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 이론식과 실험결과를 일치시키는 과정에서 얻어지는 값을 참값으로

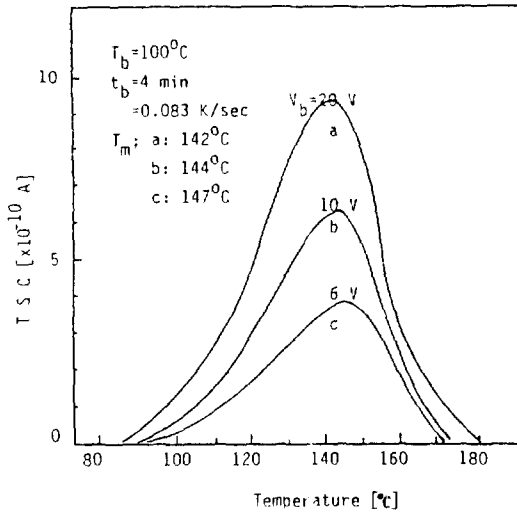


그림 8 Al-SiO<sub>2</sub>-Si 시편에서의 TSC 특성  
 Fig. 8 Characteristics of TSC in Al-SiO<sub>2</sub>-Si specimen.

간주할 수 밖에 없다.

이와 같은 이유에 의해 표 3은 Optimal curve fitting 법에 의해 계산된 활성화 에너지 E와 식(10)의 오차보정식에 의해 계산된 보정후의 값 E'를 함께 모아 놓은 것으로서 이로부터 알 수 있는 바와 같이 초기상승법에 의해 계산된 E<sub>i</sub>값들을 E 값과 비교해서 약 7.9~8.7%사이의 큰 오차를 갖고 있으나 식(9)에 의해 E<sub>i</sub>값을 보정한 후의 E'값은 E 값과의 사이에 약 0.4%의 오차만 갖고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결론으로부터 초기상승법을 이용하여 구한 활성화 에너지가 비록 많은 오차를 내포하고 있더라도 본 연구에서의 오차보정식과 보정계수를 이용하면 Optimal curve fitting법에서의 값이 컴퓨터 시뮬레이션을 하지 않아도 인위적인 계산으로 쉽게 참값에 가까운 정확한 값으로의 보정이 가능한 것으로 결론된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는

1. 초기상승법으로 결정된 활성화 에너지는 선정된 데이터 구간 즉  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ 의 변화와 더불어 약 0.7~10%의 오차를 함유하고 있음을

알았다.

2. 이 오차를 줄이기 위한 오차보정식을 제시하고 오차보정식에 필요한 보정계수를 수치계산에 의해 결정하였다.
3. 본 오차보정식에 의해 보정된 후의 활성화 에너지값은 거의 참값에 가까운 0~0.5% 이내까지 보정이 가능하였다.

이상으로부터 데이터 구간의 변화에 따라 많은 오차를 갖고 있는 초기상승법에 의해 평가된 활성화 에너지도 본 연구에서의 오차보정법을 이용하면 보다 정확한 값으로의 보정이 가능하여 그 신뢰도는 매우 높을 것으로 결론된다.

### 참 고 문 헌

- 1) R.Chen and Y.Kirsh, "Analysis of Thermally Stimulated Processes," Pergamon Press(New York), 1981.
- 2) 김봉흠, 류강식, "PVDF 일렉트렛트의 공간전하에 의한 TSC", 전기학회 논문지, 36, 9(1987).
- 3) 류강식 외, "PVDF 필름의 초전특성에 공간전하가 미치는 영향", 전기학회 논문지, 37, 163(1988).
- 4) G.F.Garlick and A.F.Gibson, "The Electron Trap Mechanism of Luminescence in Sulphide and Silicate Phosphors", Proc.Phys.Soc., A60, 574(1948).
- 5) T.A.T.Cowell and J.Woods, "The Evaluation of Thermally Stimulated Current Curves", Brit.J.Appl.Phys., 18, 1045(1967).
- 6) R.A.Creswell and M.M.Pearlman, "Thermal Current From Corona Charged Mylar", J.Appl.Phys., 41, 2365(1970).
- 7) 류강식, 김봉흠, "PVDF 필름에서의 Optimal Curve Fitting에 의한 TSC 피크의 수치해석", Polymer, 11, 268(1987).
- 8) 김봉흠, 류강식, "폴리에틸렌 텔레프탈레이트중에 트랩된 캐리어에 의한 열자극전류의 수치해석", 전기학회논문지, 36, 783(1987).
- 9) 이현우, 류강식, 김봉흠, "초기상승법에 의해 계산된 활성화 에너지의 오차보정에 관한 연구", 전기학회 창립 40주년기념 학술대회논문집, 251(1987).
- 10) N.S.Mohan and R.Chen, "Numerical Curve Fitting for Calculating Glow Parameters", J.Phys.D:Appl. Phys., 3,243(1970).
- 11) T.R.Jenkins, "On Computing the Intergral of Glow Curve Theory", J.Comput. Phys., 29, 203(1978).