

# xEV용 배터리 팩 버스바의 열해석 연산 시간 단축을 위한 형상 간략화 모델링 방법 개발

김 대훈\* · 임 학 송  
인팩 소재해석팀

## Development of a Geometry Simplification Modeling Method for Reducing Computational Time in Thermal Analysis of xEV Battery Pack Busbar

Daehoon Kim\* · Haksong Lim

Advanced Technology Reserach, Infac R&D Center, 53 Saneop-ro, 155beon-gil, Gwonseon-gu, Suwon-si, Gyeonggi 16648, Korea

(Received 16 October 2025 / Revised 19 December 2025 / Accepted 20 December 2025)

**Abstract :** With the rapid expansion of electrification in automotive industries, research on thermal management of electrical components has increasingly become more important. The battery pack busbar plays a critical role in xEV vehicle by ensuring effective thermal management, electrical connection, and other important functions. Thermal analysis of busbars using commercial CAE tool has been prevalent, imposing a huge burden on computational efforts in the early stage of development. In this study, Geometry Simplification Method(GSM) is proposed to reduce computational time in the thermal analysis of high power busbars, deriving a lumped model with analogy from the initial model by introducing parameters such as volume, surface area, and characteristic length of the busbar. The GSM method is found to be in close agreement with the CAE tool under various conditions, showing similar temperature results.

**Key words :** Busbar(버스바), GSM(형상 간략화 모델), Thermal analysis(열 해석), Battery pack(배터리 팩), Battery(배터리)

### 1. 서론

최근 전기차(EV) 및 하이브리드 전기차(HEV)의 보급이 증가함에 따라, 고전류를 전달하는 전장품의 설계 및 성능 검증이 점점 더 중요해지고 있다.<sup>1,4)</sup> 이 중 xEV용 버스바는-배터리 셀들의 전류를 연결시키는 주요 연결 요소로 작용하며 이에 따라 전류가 흐를 때 저항성 발열이 발생하게 된다. 만약 적절한 열 관리가 이루어지지 않는다면, 절연재 손상, 효율 저하, 심각한 경우 화재 발생까지 초래할 수 있다. 따라서 정확한 발열 해석을 통해 최적의 버스바 설계를 도출하는 것이 필수적이다.

최근 전기차 및 전력 변환 장치의 고전류 운전 조건에서 버스바의 발열 문제는 시스템 신뢰성에 직접적으로 영향을 미치는 핵심 요인으로 인식되고 있다. 이에 따라 버스바의 열 해석을 중심으로 한 다양한 연구가 수행되고

있다.<sup>5,6)</sup> 우선, 버스바의 정상 및 과도 상태 열 해석을 규명하는 연구가 보고되었다. Plesca<sup>7)</sup>는 시간에 따른 전류 부하 변화와 이에 따른 온도 상승을 모사하기 위해 수치 해석 기법이 활용되었으며, 특히 과도 상태에서의 온도 분포와 안정화 과정을 정밀하게 예측하는데 중점을 두었다. Hou 등<sup>8)</sup>은 버스바 표면에서의 복사 열전달과 형상에 따른 구체적인 대류 특성 효과를 고려한 연구도 제안되었다. 고온에서 단순 대류 해석만으로는 실제 운전 환경을 충분히 반영하기 어렵기 때문에 복사와 형상에 따른 대류 특성 모델을 구축하여 다양한 운전 조건에서의 온도 예측 정확도를 향상시켰다. 이러한 접근은 버스바 온도 해석의 신뢰성을 높이고 고온 환경에서의 열손실 메커니즘을 규명하는데 기여하였다.

종합하면 기존 연구들은 주로 정상 및 과도 열해석, 복사

\*Corresponding author, E-mail: daehoon.kim@infac.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

항을 포함한다중 열전달 메커니즘 반영에 집중되어 있다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 상용 해석 프로그램을 기반으로 수행되며, 해석 자원 소모가 크고 계산 시간이 길다는 한계가 존재한다. 실제 업무에서 동일 형상에 대해 다양한 조건을 반복적으로 해석해야 하는 상황을 고려한다면 해석 소프트웨어의 라이선스 제약, 고성능 CPU 코어의 부족, 계산 자원 한계 등으로 인해 상용 프로그램만을 이용한 전산 해석에는 현실적인 어려움이 존재한다.

본 연구는 복잡한 형상을 간략화 하는 방법을 이용하여 해석 시간을 단축하는 GSM(Geometry Simplification Modeling) 방법을 제안하고자 한다. 형상 간략화 방법이 제한된 자원 환경에서도 효율적인 해석을 가능하게 하는지 분석하고자 한다.

## 2. 해석 대상 버스바

xEV용 버스바는 좁은 착장 공간에 맞추기 위해 일반적으로 곡면이 복잡하고 차량에 따른 복잡함 단면 형상을 가지며, 이를 그대로 해석할 경우 높은 계산 비용을 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 발열 해석의 빠른 결과를 도출하기 위해 Fig. 1의 xEV용 버스바 형상을 단순 육면체 형태의 등가 모델로 간략화 하였다. 간략화된 구조는 복잡한 형상으로부터 확보 가능한 주요 열전달 특성인 표면적과 부피를 보존하며, 특성길이를 이용하였다. 단순한 등가 육면체는 실제 버스바의 전류 흐름 및 발열 집중 위치를 완전히 반영하지 못한다. 특히 굴곡, 연결부 등에서 전류 경로가 길어지고 국부 저항 증가가 발생한다. 이러한 복잡한 경로를 직선 길이로 환산하기 위해 특성길이를 이용하였다. 따라서 표면적, 부피, 특성길이를 기반으로 형상을 재구성하여 평균온도를 구할 수 있다. 또한 열 집중이 일어나는 버스바의 최대 온도를 도출하기 위해 보정계수를 추가하였다. 해당조건을 만족하는 육면체 형상은 복잡한 버스바의 구조와 유사한 열전달 특성을 재현할 수 있으므로 정략적 해석에서 충분한 정확도를 확보할 수 있다. 여기서 Fig. 1(a)의 경우는 본래의 단일 평판 구조이므로 별도의 형상 간략화 없이 주어진 부피, 표면적 그리고 전류 길이를 통해 해석에 적용하였으며, Fig. 1(b), (c)의 경우 형상 간략화를 이용하여 해석을 진행하였다.

본 연구에서 사용된 약어는 다음과 같다. RG4와 MV는 내부 개발 단계에서 사용되는 차량 형상 식별 코드이며, EV는 Electric Vehicle을 의미한다. CBA는 Cell Block Assembly의 약어이며, Snsng는 Sensing을 의미한다. 또한 3P4S와 2P6S는 각각 병렬(Parallel) 및 직렬(Series) 연결 구조를 나타내는 표기이다.



Fig. 1 Original xEV busbar geometries for GSM-based thermal analysis

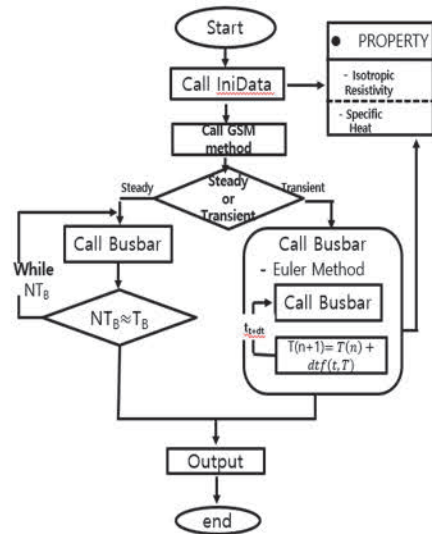


Fig. 2 Geometry simplification modeling of an xEV busbar for thermal analysis

Fig. 2는 형상 간략화 모델 기법을 수행하기 위한 계산 과정을 보여주는 것으로, 전체 과정은 크게 세 단계로 구분된다.

첫 번째 단계는 초기 데이터(Call inidata) 및 열 물성치를 설정하는 부분으로 버스바의 형상 정보(질량, 부피, 표면적, 특성길이), 경계조건(전류, 대류계수, 대기온도)가 입력되며 열 물성치(비열, 저항률)를 함수로부터 불러오는 과정이다.

두 번째 단계는 GSM 방법 단계이며 첫 번째 단계에서 입력한 형상 정보를 바탕으로 실제 버스바 형상을 동일한 체적과 표면적을 갖는 등가 육면체 형상으로 형상 간략화 과정을 거친다.

마지막으로는 열 해석 조건에 따라 정상 상태 및 과도 상태 해석을 수행한다. 정상 상태의 경우 버스바의 전류에 의한 발열과 대류에 의한 열 손실 간의 평형 조건을 만족하는 에너지 보존식을 Newton-Raphson 방법을 이용하여 계산한다. 과도 상태 해석은 시간에 따른 온도 변화를 구하기 위해 Euler method를 이용하여 시간에 따른 온도 변화를 구하였다. 모든 해석 과정은 Matlab을 기반으로 구현되었다. 본 절차는 다양한 형상 및 경계 조건 변화에 따른 버스바의 열적 민감도 분석에도 동일하게 적용된다.

### 3. GSM 방법을 이용한 xEV 용 버스바 해석

본 해석법에서는 Fig. 1의 버스바 평균 온도 및 최대 온도를 구하기 위해 앞서 언급한 형상 간략화 모델을 적용하여 에너지 보존식을 구하였다.

#### 3.1 초기 정보 및 형상 간략화 모델링

본 연구에서는 다양한 형상의 버스바에 대해 형상 간략화 모델을 적용하고 GSM 방법의 적용 가능성을 정량적으로 분석하였다. 실제 차량 개발 현장에서는 적용 위치, 설치 환경, 냉각 방식 등에 따라 해석 조건이 달라질 수 있으며, 본 논문에서는 이러한 실무 조건을 최대한 반영하여 해석 조건을 설정하였다.

Table 1에서 초기 온도( $T_a$ ) 위치하는 배터리 팩 또는 모듈 내부의 일반적인 온도 범위인 25 °C에서 45 °C를 유지하지만 고온 환경이나 열악한 방열 조건에서는 60 °C 수준까지 상승할 수 있어 본 해석에서는 고온 조건인 60 °C를 적용하였다.

대류 열전달 계수( $h_{conv}$ )는 설치 환경과 열 방출 조건에 따라 달라지며, Fig. 1(b), (c)의 경우 방열이 제한된 구조로 인해 10 W/m<sup>2</sup>K를 적용하였고 Fig. 1(a)의 경우 상대적으로 개방된 조건을 갖는 25 W/m<sup>2</sup>K로 설정하였다.

전류(I) 조건은 3case 모두 급속 충전 시의 운용 조건을 구성하였다. 시간에 따른 전류 변화는 급속 충전 과정 중

Table 1 Thermal analysis conditions and current profiles for xEV busbar models

	$h_{conv}$ W/m <sup>2</sup> K	Current condition		$T_a$
		t (s)	Current (I)	
RG4	25	947	350	60
2P6S (3P4S)	10	820.2	227(340.5)	
		927	211.6(317.4)	
		1018.2	199(298.5)	
		1119.6	187.4(281.5)	
		1312.8	178(267)	
		1404	139(208.5)	

Table 2 Characteristic length, GSM and correction factor of various busbar

	RG4	2P6S	3P4S
k	1	2	1.3
$L_c$	0.7	10.3	6.2
GSM	X	O	O

전류 프로파일을 기반으로 설정되었으며, 이는 실제 충전 인프라 환경에서 측정되는 전류 상승, 유지, 감소 구간을 모사하도록 구성하였다.

본 해석에 적용된 대류 열전달 계수와 대기 온도는 실제 xEV 배터리 팩 개발 단계의 설계 사양을 기반으로 선정하였다. 실제 주행 중에는 냉각 유량 변화나 인접 부품의 열간섭으로 인해 변동할 수 있으나, 본 연구의 목적은 GSM 기반 모델과 상용 CAE 해석 간의 상대적 온도 예측 특성을 비교하는 데 있으므로, 이러한 대기온도 가정은 두 해석에 동일하게 적용되어 결과 비교의 타당성에는 영향을 미치지 않는다. 복사열전달의 기여도가 대류 및 전도에 비해 매우 작아 실무 열해석에서도 일반적으로 제외된다. 본 연구에서도 동일한 가정을 적용하여 복사열전달을 고려하지 않았다.

버스바의 형상 간략화는 버스바의 주어진 부피, 표면적 그리고 특성길이를 이용하여 동일한 크기의 부피와 표면적을 갖는 육면체의 가로, 세로, 높이를 이분법(Bisection method)을 이용하여 구하였다. 또한 보정 계수(k)를 이용하여 버스바의 최대 온도값을 상용 프로그램과 비교하였다. 보정 계수(k)는 각 형상에서 간략화 모델이 재현하지 못하는 열전달 특성을 보완하기 위해 CAE 해석 결과를 바탕으로 경험적으로 도출하였다. 보정된 k는 경계조건 변화(전류, 대류계수, 대기온도)에 대해 안정적으로 유지되었으며, 새로운 형상에 대해 GSM방법을 적용할 경우 동일한 방법을 통해 적정 보정계수값을

산출할 수 있다. 버스바의 해석 조건 및 보정계수 값은 Table 1, 2에 나타나있다.

**3.2 열역학적 해석 방법**

이 절에서는 버스바의 온도를 구하기 위한 형상 간략화 방법과 정상 상태 및 과도 상태의 온도를 구하기 위한 에너지 보존식을 기술한다.

**3.2.1 형상 간략화 방법**

먼저 아래와 같이 육면체의 부피 및 표면적을 정의한다.

$$V = H \times L \times D \tag{1}$$

$$A_s = 2(HD + DL + LH) \tag{2}$$

이분법을 사용하여 주어진 부피(V), 및 버스바의 표면적(A<sub>s</sub>)을 만족하는 H, L, D를 다음과 같이 계산한다. 여기서 H는 육면체 형상에서의 높이, L는 전류 길이, D는 세로의 길이를 나타낸다.

먼저 아래와 같이 초기 범위를 설정한다.

$$H_{lower} = H_{min.ini}, H_{upper} = H_{max.ini} \tag{3}$$

식 (4)-(7)를 수렴할 때까지 다음과 같이 반복 계산한다.

$$H = \frac{H_{lower} + H_{upper}}{2} \tag{4}$$

$$L = L_c \times H, D = \frac{V}{H \times L} \tag{5}$$

$$A_s^{calculated} = 2(HD + DL + LH) \tag{6}$$

여기서 A<sub>s</sub>는 버스바의 표면적을 나타낸다.

$$\begin{aligned} |A_s^{calculated} - A_s| &= tolerance, \\ |V^{calculated} - V| &= tolerance \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 만약 A<sub>s</sub><sup>calculated</sup> > A<sub>s</sub> 이면 H<sub>upper</sub> = H , A<sub>s</sub><sup>calculated</sup> < A<sub>s</sub> 일 경우, H<sub>lower</sub> = H로 최대 반복 횟수까지 반복계산 하여 H, L, D를 계산한다.

**3.2.2 정상 상태 해석**

버스바의 정상 상태 온도는 다음 에너지 보존식을 만족해야 한다.

$$q_{net} = q_{gerneration} - q_{out} \tag{8}$$

따라서, 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$f(T) = I^2 \rho(T) \frac{L}{A_c} - h_{conv} A_s (T_B - T_a) \tag{9}$$

위 식 (9)의 비선형 방정식을 f(T)=0을 만족하는 온도 T를 구하기 위해 Newton-Raphson 방법을 이용하여 풀 수 있다. 수치 해를 구하기 위해, 온도의 변화율을 중앙 차분법을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\frac{df(T)}{dT} = \frac{f(T+\Delta T) - f(T-\Delta T)}{2\Delta T} \tag{10}$$

위 식 (10)을 활용하여 다음과 같이 온도를 아래의 수렴 조건을 만족할 때까지 반복계산 한다.

$$T_{new} = T - \frac{f(T)}{df/dT} \tag{11}$$

$$|T_{new} - T| < tolerance \tag{12}$$

**3.2.3 과도 상태 해석**

과도 상태 에서는 버스바의 온도가 시간에 따라 변화하며, 이는 미분 방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{I^2(t) \rho(T) \frac{L}{A_c} - h_{conv} A_s (T_B - T_a)}{m c_p(T)} \tag{13}$$

식 (13)을 풀기 위해 Euler method을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 h<sub>conv</sub>는 대류 열전달 계수이며, I는 전류, ρ는 전기저항률, AC는 버스바의 단면적, T<sub>a</sub>, T<sub>B</sub>는 각각 공기 및 버스바 표면의 온도이다.

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t f(t_n) \tag{14}$$

여기서 Δt는 시간 증분(Time step)이며 f(t<sub>n</sub>)은 식 (13)에서 정의한 순간 온도 변화율을 의미한다.

**4. GSM 해석법과 CAE 결과 비교**

이 절에는 형상 간략화 방법으로 구한 결과와 CAE로 구한 결과를 비교하고 GSM 해석법의 실용성을 판단한다.

**4.1 결과 비교**

Fig. 3은 형상 간략화 모델링 방법과 CAE 프로그램을 통해 계산된 정상 상태 온도를 비교한 결과이다. 전반적으로 모든 형상에서 평균 온도 및 최고온도에 대한 오차는 단 2 °C 이내로 나타났으며, 특히 최고 온도에서는 2P6S의 경우 단 0.2 °C의 차이만을 보여 형상 간략화 모델의 높은 정확도를 확인할 수 있다. RG4는 단일 평판 구조로 GSM 방법을 사용하지 않고 해석이 수행되었음에도

불구하고 CAE 결과와 온도차이가 크게 없는 것으로 나타났다. 이는 단순 형상의 경우에는 GSM 기반 해석을 하지 않아도 형상 조건을 안다면 충분히 신뢰성 있는 결과를 제공함을 의미한다.

Fig. 4는 과도 상태일 때 버스바의 평균 및 최고 온도 결

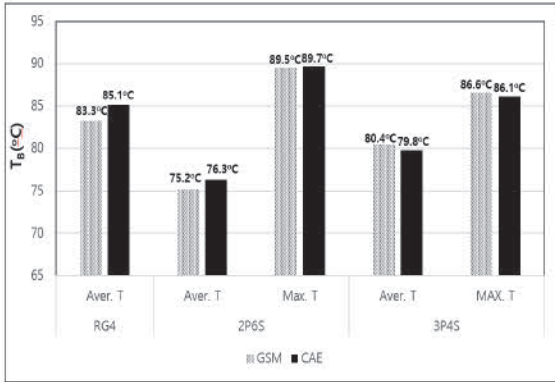
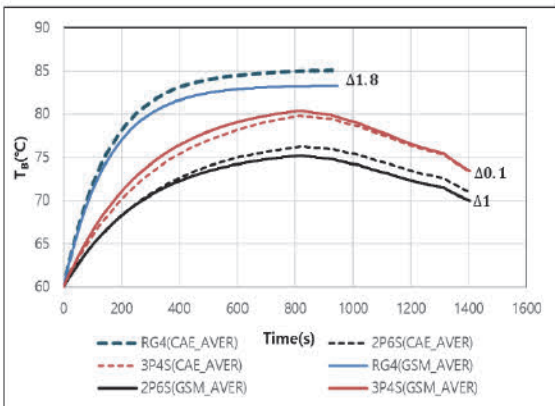
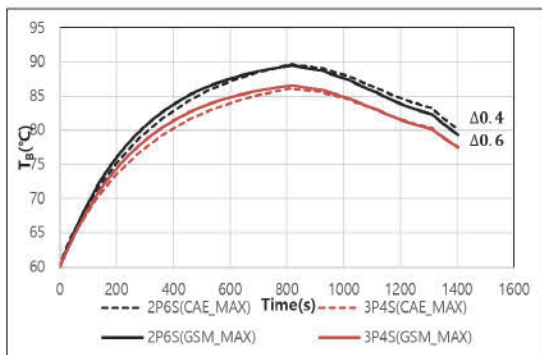


Fig. 3 Steady state average/max temperature comparison between GSM and CAE for various busbar geometries



(a) Comparison of transient Average temperatures calculated by GSM and CAE



(b) Comparison of transient Maximum temperatures calculated by GSM and CAE

Fig. 4 Transient state temperature comparison between GSM and CAE for various busbar geometries

과를 비교한 것이다. 전체 해석 Time step 동안 세 형상 모두에서 GSM 방법이 CAE 해석 경향을 잘 추종하는 것으로 나타났다.

Fig. 4(a)에서 RG4의 경우 두 해석 결과 간 최대 차이가 약 1.8°C로 나타났으며, 3P4S와 2P6S에서는 각각 약 1.0°C, 0.1°C로 나타났다. Fig. 4(b)에서는 2P6S와 3P4S에서 각각 약 0.4°C, 0.6°C의 차이가 발생하였다.

이러한 온도 차이는 주로 열전달 해석 방식 차이에서 비롯된 것으로 판단되며, 특성길이 설정을 통해 평균 온도를 우선적으로 일치시킨 뒤, 최대 온도의 차이를 줄이기 위해 보정계수를 적용하였다. 따라서 평균 온도에서의 차이는 주로 전류의 흐름에 대한 오차, 최대 온도 차이는 보정계수 적용의 한계에서 비롯된 것으로 판단된다.

이러한 결과는 GSM 방법이 단순히 정상 상태뿐만 아니라 시간에 따른 온도 변화에도 효과적임을 나타낸다. 특히, 복잡한 형상에 대해 GSM 방법을 적용할 경우 평균 및 최고 온도 모두가 높은 정확도를 보여주었으며, 이는 GSM 모델이 과도 상태에서도 충분한 신뢰성이 있음을 보여준다.

Fig. 5는 세가지 경계조건(전류, 대류 열전달 계수, 대기 온도)의 변화에 따라 발생하는 오차율을 비교한 것이다. 단일 변수만을 변화시켜 독립적인 영향을 분석하였다. 전류 변화에 따른 오차율은 준선형적인 양상을 보인다. 전류가 0.5배에서 2배까지 증가함에 따라 오차율은 점진적으로 상승한다. 이는 버스바의 발열량이 전류 제공에 비례하기 때문이며, 고전류 조건에서는 발열이 급증하면서 온도 변화가 더 민감하게 반응한다. 전류 비율이 1에서 1.5까지 증가할 때 오차율은 약 0.9%에서 1.3%까지 증가하며 2.0까지 증가 시 최대 1.7% 수준의 오차율이 발생하였다.

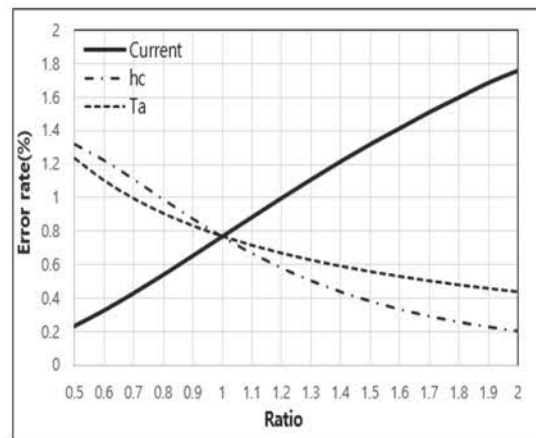


Fig. 5 Variation of GSM-CAE temperature prediction error with boundary condition changes

대류 열전달계수는 표면에서의 열손실을 결정하는 중요한 변수이며, 이 계수의 변화는 오차율에 반비례하는 경향이 있다. 특히 열전달 계수가 기준값 1(10 W/m<sup>2</sup>K)보다 작아지는 경우 오차율은 상대적으로 빠르게 증가하며, 0.5에서는 최대 약 1.3 % 수준의 오차율이 발생하였다. 이는 내부에서 생성된 발열이 효과적으로 방출되지 못하고 축적되어 오차율을 증가시키는 요인으로 판단된다. 반면, 계수가 증가함에 따라 방열효과가 증가하여 오차율이 줄어드는 경향을 보인다. 20 W/m<sup>2</sup>K 이상부터는 오차율 감소폭이 작아지며, 열전달 한계에 수렴하는 특성이 있다.

대기 온도 변화에 따른 오차범위는 비교적 낮은 수준을 유지였으며, 이는 각 조건에서 내부 발열량이나 열전달 계수는 동일하므로 절대적인 온도 결과는 달라지더라도 시스템 내의 온도차이는 일정하게 유지되기 때문이다. 즉, 대기온도의 변화가 전체 시스템에 동일한 온도차이만을 유발하므로, 모델의 구조적 해석 정확도에는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 6은 시간간격(Log scale)에 따른 수치적 해석 방법에 따른 온도 수렴 특성을 나타낸 것이다. 간단한 Euler method부터 2차, 3차, 4차 Runge-Kutta Method까지 적용한 결과 모든 Time step에서 거의 동일한 수준의 결과를 보였다. 이는 고차 수치해석을 사용하지 않더라도 단순한 방법으로도 정확한 예측이 가능함을 의미한다.

우측 상단의 표는 각 시간간격에 대해 열 해석이 수행되는 시간을 나타낸 것이다.  $\Delta t=10^{-3}$ 에서는 5.91초가 소요되었으며,  $\Delta t=0.1$ 대비 약 30배 이상의 시간이 소요되었다.

따라서 본 연구에서 제안한 해석법은 복잡한 수치 해석법 없이도 간단한 열저항 기반의 수식으로 빠른 계산 시간을 확보할 수 있으며, 실무 적용시 Euler method으로 시간간격을 0.1초로 설정하는 것이 가장 효율적인 방법이 될 수 있다. 이는 버스바의 반복 해석 시 계산 비용을 줄이면서 충분한 정밀도를 달성할 수 있다.

Table 3은 대류계수 5~25 W/m<sup>2</sup>K, 대기온도 25~60 °C, 전류 200~600 A 조건에서 총 10case의 온도 결과에 대한 평균 오차를 정리한 표이다. 단순 형상의 RG4는 정상상태에서 평균 오차율 1.25%, 과도 상태에서 0.42%로 가장 낮은 값을 보였으며, 고전류 조건에서도 최대 1%오차로 안정적인 결과를 나타냈다. 2P6S, 3P4S의 경우, 고전류 조건에서 최대 오차가 각각 5.8%, 2% 발생하였다. 평균 온도 오차율은 2P6S에서 정상 상태 4.1%, 과도 상태 3.2%, 3P4S에서 정상 상태 0.25%, 과도 상태 0.79%로 나타났다. 최대 온도 오차율은 2P6S는 정상상태 2.7%, 과도 상태 1.9%, 3P4S는 정상 상태 0.74%, 과도 상태 1.0%이다.

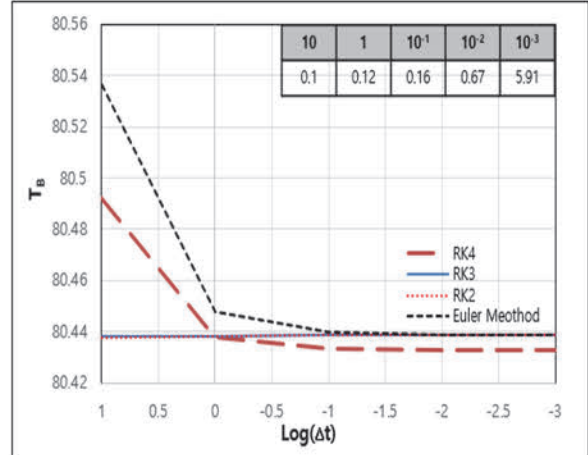


Fig. 6 Temperature convergence comparison using various numerical analysis methods

Table 3 Average thermal error rates and analysis times for various busbar geometries under multiple boundary conditions

		Modeling		
		RG4	2P6S	3P4S
Error rate (Aver. T)	Steady state	1.25	4.1	0.25
	Transient state	0.42	3.2	0.79
Error rate (MAX. T)	Steady state	-	2.7	0.74
	Transient state	-	1.9	1.0
Time (GSM Method)	Steady state	0.06 s		
	Transient state	0.11 s		
Time (ANSYS)	Steady state	7 s	10 s	9 s
	Transient state	1 h 32 m	4 h 37 m	4 h 21

또한, 동일한 시간 간격 조건(Time step 0.1)에서 해석 시간을 비교한 결과, GSM Method 방법은 정상 및 과도 상태에서 모두 0.5 s미만으로 매우 짧게 나타났다. 반면, CAE 프로그램의 경우 정상 상태 해석은 모두 10 s미만이 소요되었지만, 과도 상태 해석에서는 동일 시간 간격(0.1 s) 조건에서 RG4는 1 h 32 m, 2P6S 및 3P4S는 각각 4 h 37 m, 4 h 21m의 계산 시간이 소요되었다. 여기서, CAE 프로그램은 10-core CPU환경에서 수행된 결과이다. 이러한 결과는 실제버스바의 다양한 경계 조건을 고려한 형상 간략화모델이 어려운전 조건에서 충분한 정확도를 유지하면서도 해석 시간을 크게 단축할 수 있음을 보여준다.

## 5. 결론

본 연구에서 제안된 GSM(Geometry simplification Modeling)기반 버스바 열해석 결과를 상용 CAE 프로그램과 비교하여 그 정확성과 적용 가능성을 평가하였다. GSM 방법은 여러 CASE의 조건을 빠르게 도출할 수 있지만 국부적 온도 결과를 확인할 수는 없다. 따라서 초기 컨셉 단계의 설계에서 다수의 설계 모델을 신속하게 검토하는데 매우 유용하다. 본 논문의 검증은 CAE 결과를 기준으로 수행되었으며, 향후 실험 기반 데이터를 활용한 추가 검증을 통해 GSM 방법의 실무 적용성을 보다 명확히 판단할 예정이다. 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 정상 상태 및 과도 상태에서 세 형상(RG4, 2P6S, 3P4S) 모두 실제 해석 조건에서 CAE 프로그램과 2 °C 이내의 오차로 유사한 온도 결과를 보였다.
- 2) 경계 조건(전류, 대기온도, 대류 계수)에 의한 오차율은 고전류에서 최대 1.7%, 저 대류 조건에서 1.3%의 오차가 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에서 제안한 GSM 방법은 Euler Method 방법으로 Time step 0.1로 설정하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났으며, 이는 복잡한 수치해석 없이도 빠른 계산 시간 및 정확도를 확보할 수 있음을 보였다.
- 4) 여러 경계조건(10case)을 변경하여 해석을 진행한 결과, RG4의 경우 최대 1.25%(정상 상태)의 평균 오차율을 나타냈으며, 2P6S, 3P4S의 경우 4.1%(과도 상태), 1%(정상 상태)의 평균 오차율을 보였다. 또한, 과도 상태 해석 시 4 h 30 m에서 1 s 이내로 단축시킬 수 있다.

- 5) GSM 방법은 평균 및 최대 온도 예측에는 적합하나, 국부적인 Hotspot 분석에는 한계가 있으므로 국부 안전성 평가와 같은 높은 정밀도가 요구되는 평가에는 상세 3D CAE 또는 실험적 접근이 필요하다.

## References

- 1) D. B. Nah and H. S. Shin, "HEV: A Review," *Journal of Energy Engineering*, Vol.19, No.1, pp.39-50, 2010.
- 2) K. Y. Kim, "The Wave of Change by Electric Vehicles," LGERI Report, LG Economic Research Institute, 2010.
- 3) S. Lee, Y. Chung, S. Kim and B. Kang, "Analysis Method of EMI Conducted Noise for Automotive Battery Equalizer Reflecting Test Environment Using Partial Element Equivalent Circuit Extraction Technique," *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.8, pp.583-592, 2025.
- 4) D. Yeom and S. Jang, "A Study on the Improvement of Cooling Performance According to the Cooling Surface Configuration of EV Battery Pack," *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.7, pp.533-544, 2025.
- 5) A. Plesca, "Thermal Analysis of Busbars from a High Current Power Supply System," *Energies*, Vol.12, No.12, Paper No.2288, 2019.
- 6) J. Hus, "Estimating Busbar Temperatures," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.26, No.5, pp.926-934, 1990.
- 7) A. Plesca, "Busbar Heating during Transient Conditions," *Electric Power Systems Research*, Vol.89, pp.31-37, 2012.
- 8) W. Hou, K. Sun, S. Sun and M. Li, "Numerical Investigation of Electro-Thermal Field Distribution Law of Busbar under Different Operation Conditions," *Metals*, Vol.13, No.8, Paper No.1361, 2023.