

## 전기 자동차용 니켈수소 배터리 1차원 열전달 모델링

한재영\* · 박지수\* · 유상석\*\* · 김성수\*\*

\* 충남대학교 기계공학과, \*\* 충남대학교 메카트로닉스공학과

### One-Dimension Thermal Modeling of NiMH Battery for Thermal Management of Electric Vehicles

Jaeyoung Han\*, Jisoo Park\*, Sangseok Yu\*\* and Sung-soo Kim\*\*

\* Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

\*\* Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received August 28, 2013 ; Revised January 2, 2014 ; Accepted January 15, 2014)

**Key Words:** Hybrid Vehicle(하이브리드 자동차), Battery(배터리), Thermal Management(열 관리), Module(모듈), Temperature Distribution(온도 분포), Charge(충전), Discharge(방전), NiMH (니켈 수소 이온)

**초록:** 전기 자동차의 연료 소모량은 배터리 성능에 의존한다. 배터리의 성능은 작동온도에 민감하기 때문에, 배터리 온도 관리는 성능과 내구성을 보장한다. 특히, 배터리 팩에서의 모듈의 온도 분포는 냉각 특성에 영향을 미친다. 이 연구는 모듈 사이의 온도 분포를 확인 할 수 있는 배터리 열적 모델링에 초점을 두었다. 본 연구의 배터리 모델은 NiMH 각형 모델이며, 10개의 모듈로 구성되어졌다. 배터리 열 모델은 열 발생, 채널을 통과하는 대류 열 전달 그리고 모듈 사이의 전도 열 전달로 구성되었다. 배터리 내에서 발생하는 열발생 모델은 충/방전 동안의 전기적인 저항열에 의해 계산되어 진다. 모델은 전 하이브리드 자동차의 운전 동안 적절한 열관리의 전략을 결정한다.

**Abstract:** Fuel consumption rates of electric vehicles strongly depend on their battery performance. Because the battery performance is sensitive to the operating temperature, temperature management of the battery ensures its performance and durability. In particular, the temperature distribution among modules in the battery pack affects the cooling characteristics. This study focuses on the thermal modeling of a battery pack to observe the temperature distribution among the modules. The battery model is a prismatic model of 10 NiMH battery modules. The thermal model of the battery consists of heat generation, convective heat transfer through the channel and conduction heat transfer among modules. The heat generation is calculated by the electric resistance heat during the charge/discharge state. The model is used to determine a strategy for proper thermal management in Electric vehicles.

- 기호설명 -

$A$  : 열전달 면적( $m^2$ )  
 $I$  : 전류(A)  
 $R$  : 내부저항(K/W)  
 $V$  : 전압(V)  
 $t$  : 두께(m)  
 $T$  : 온도(K)  
 $Q$  : 열량(W)

$h$  : 대류 열전달 계수( $W/m^2K$ )  
 $k$  : 열 전도도( $W/mK$ )  
 $c_p$  : 비열( $J/kgK$ )  
 $M$  : 배터리 질량(kg)  
 $f$  : 마찰계수  
 $\eta$  : 쿨롱 효율  
 coul : Coulomb  
 gen, trans : Generation, Transfer  
 rej : Rejection  
 amb : Ambient

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

avg	: Average
conv, cond	: Convection, Conduction
b	: Battery
c	: Cooling

## 1. 서론

화석연료의 연소를 통해 동력을 발생시키는 기존의 내연기관은 유해 배기가스 배출로 인해 대기 오염의 주요 원인으로 지적되고 있다. 또한, 최근 화석연료의 부존량이 위협받으면서 동 연료를 사용하는 동력기관에 대한 대체 기관의 필요성이 대두됨에 따라 하이브리드 및 전기자동차에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 전기 자동차는 주 동력원으로 배터리를 사용하며 매연이나 화석연료비의 상승과 같은 문제에 상대적으로 영향을 적게 받지만, 아직 상용화를 위해서는 해결해야 할 과제가 많다.

일반적으로 배터리는 효율이 낮은 운전 범위에서 작동되면 과도한 열 발생으로 인하여 내부 온도가 상승하게 되고 이는 배터리의 수명과 성능에 크게 영향을 미치게 된다. 배터리의 운전 온도는 전기화학 반응 및 충방전 효율, 전하 수용성, 안전, 차량 수명 등에 직접적인 영향을 끼친다. 배터리의 운전 온도는 높을수록 내부 저항이 낮아지고, 전압이 높아져 배터리의 용량과 출력이 좋아진다. 하지만 임계값 이상의 높은 운전 온도는 배터리 용량과 수명에 악영향을 끼치게 된다. 또한 너무 낮은 운전 온도는 영구적으로 배터리의 용량이 감소하는 결과를 초래하게 된다.<sup>(1,2)</sup>

전기자동차용 배터리의 열관리 기법은 Pesaran 등<sup>(3)</sup>에 의해 보고되기 시작하였다. 이 논문에서는 배터리 열관리를 위해 ADVISOR 모델을 이용한 열관리 모델을 구성하였으며 구성한 모델을 바탕으로 차량 운전 환경 하에서의 배터리 열적 특성을 분석 하였다. 하지만, 배터리 특징을 모두 나타내기에는 상대적으로 단순한 모델을 적용하였고, 열관리에 필요한 팬과 기타 구성 품에 대한 모델은 포함되어 있지 않았다. 또한, 전체 배터리 팩을 하나의 집중용량으로 가정하여 셀 간의 냉각효과를 확인할 수 없다. Pesaran<sup>(4,5)</sup>은 또 EVs와 HEVs의 열관리 방법에 대한 연구도 보고하였다. 그는 능동 냉각과 수동 냉각, 공기 냉각과, 액체 냉각, 가열 및 냉각의 혼합과 가열을 고려하지

않은 냉각시스템에 대해서 연구 하였다. 또한, Kim 등<sup>(6)</sup>은 보다 진보된 형태의 배터리 열관리 디자인 모델을 개발하고 냉각수 등, 설계 변수들의 변화에 따른 냉각효과를 관찰하였다. 하지만 모듈간의 온도 분포 특성은 포함되어 있지 않다. 통상 제어 로직의 개발을 목적으로 하는 열관리 계통 연구에서는 집중용량법을 이용한 배터리 모델과 단순 모델을 이용한 열관리 계통을 적용하는 것이 일반적이다. 하지만, 실제 배터리 열관리에서 중요하다고 할 수 있는 국부 고온의 발생은 집중 용량 모델을 적용하게 되면 확인할 수 없어 국부 과열을 효과적으로 통제할 수 있는 적절한 제어 로직을 연구하는 데는 한계가 있다.

본 연구에서는 기존의 집중 용량 법을 적용한 모델이 가지고 있는 한계인 국부 과열을 확인할 수 있도록 1차원 배터리 팩 모델을 개발하였다. 모델은 Matlab/Simulink<sup>®</sup> 플랫폼 하에서 개발되었으며, 열관리 계통의 적절한 제어를 모사하는지 확인할 수 있도록 팬 모델을 개발하고 이를 니켈-수소 배터리 모델과 통합하여 주어진 부하 조건에 따른 배터리 팩의 온도 변화를 확인하고자 한다.

## 2. 배터리 모델

본 연구에서 개발된 배터리 모델의 결과 검증을 위한 참조 모델은 미국 국립 Argonne 연구소에서 개발한 차량 시뮬레이터 Autonomie<sup>®</sup>의 라이브리 중 파나소닉사의 배터리, 니켈-수소 전지 모델이다. Autonomie의 경우 상용으로 제공하는 소프트웨어에 배터리 제원을 제공해 주고 있기 때문에 모델 비교 검증을 위해 동일한 제원을 이용해 배터리-열 관리 시스템을 개발하였다.

배터리 셀은 총 60개로 구성이 되어 있으며 제원은 Table 1과 같다. 여러 개의 셀을 모아 모듈이라 하며, Table 1과 같이 모듈의 개수는 10개, 1개의

**Table 1** Mechanical specification of battery cell

Contents	Spec.
Cell per Module	6
Cell Diameter	0.0322(m)
Cell Length	0.374(m)
Cell mass	0.17(kg)
Number of Module	10
Module Width	0.0966(m)
Module Length	0.374(m)
Module thickness	0.0644(m)

모듈 당 셀의 개수는 6개로 설정하였다.

본 연구에 적용한 배터리 모델은 가장 널리 사용되는 전기회로 기반의 모델인 Warburg impedance를 무시한 간단한 형태의 Randles 등가 회로를 이용하였으며, 셀 단위에서 충/방전 전류에 따라 배터리 단자전압의 동적 거동을 나타낸다.<sup>(7)</sup>

### 3. 배터리 에너지 보존 법칙

#### 3.1 열용량에 따른 배터리 열관리

배터리 냉각 방법에는 유냉식, 수냉식, 공랭식 등 다양한 방법이 존재 하지만<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 공기를 냉각수 유체로 사용하는 공랭식을 채택하였으며, Fig. 2는 냉각을 위한 공기 흐름을 보여주고 있다. 모듈은 냉각수 채널을 사이에 두고 직렬로 연결되어 있으며, 냉각수는 모듈과 근접한 냉각수 채널에 각각 유입되어 배터리를 냉각하게 된다. 배터리의 냉각 특성에 초점을 맞추어, 유입되는 냉각 공기의 온도는 일정하다고 가정하였다.

배터리 열관리 시스템 모델에서는 발열 모델, 열전달 모델, 압력 강하 모델 등이 포함되며, 발열 모델과 열전달 모델은 배터리 모듈의 온도를 계산하기 위해서 사용되어지며, 압력강하 모델은 팬의 기생전력을 계산하기 위해서 사용되어진다.

#### 3.2 발열 모델

배터리 내부에서 발생될 수 있는 열량은 충/방전 시 서로 상이하다. 물리적으로 방전 시에는 전류, 내부저항에 의해서 발열이 되고, 배터리 충전 시에는 전류, 내부 저항 이외에 충전에 의한 Coulombic 효율을 고려해야 한다. Coulombic 효율은 방전 중에 배터리로부터 제거된 에너지와 충전 중에 커패시터 저장하기 위해 사용되어진 에너지의 비이다.<sup>(9)</sup> 따라서 배터리 셀에 의해 발생된 열은 다음과 같다.

$$Q_{gen} = I^2 R \quad (\text{discharge}) \quad (1)$$

$$Q_{gen} = I^2 R - IV(1 - \eta_{coulomb}) \quad (\text{charge}) \quad (2)$$

#### 3.3 열전달 모델

배터리 모듈은 전기자동차 차체 프레임 상단과 승차공간 하단 사이에 설치되어 있으며, 배터리 모듈에서 발생하는 열은 냉각용 공기에 의해 제

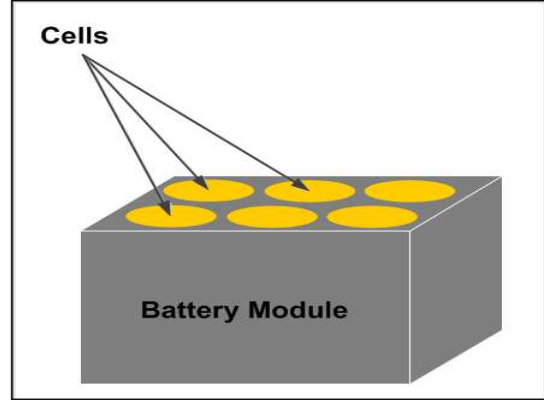


Fig. 1 Conceptual schematic of a battery module

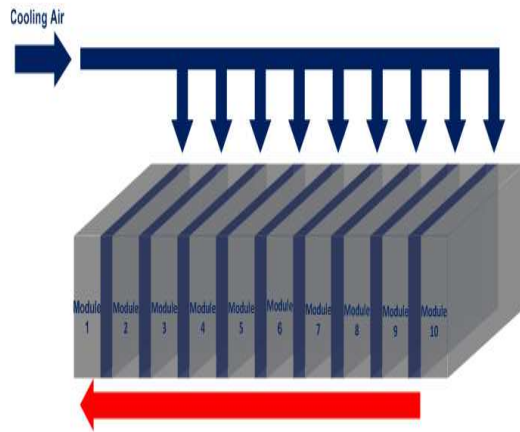


Fig. 2 Schematics of a cooling system

거 된다. 본 연구에서는 배터리 모듈을 각기동의 형태로 가정하였으며 배터리의 온도는 발열량과 방열량의 에너지 보존 법칙을 적용하여 다음과 같이 결정되어진다.

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{Q_{gen} - Q_{rej}}{\rho_b c_{p,b}} \quad (3)$$

여기서,  $Q_{gen}$ ,  $Q_{rej}$  는 각각 열 발생량과 냉각 공기로의 방열량이다.

냉각공기 출구 온도와 냉각 공기로 방출된 열은 보통 다음과 같이 계산되어진다.

$$Q = h A_b \Delta T_{avg} \quad (4)$$

배터리 표면이 균일한 온도로  $T_b$ 로 유지되면, 배터리 체적내의 에너지 균형을 이용하여 정리하면 다음과 같은 수식을 도출 할 수 있다.

$$\frac{d(T_s - T_{avg})}{T_b - T_{avg}} = \frac{h p}{\dot{m} c_p} dx \quad (5)$$

$x = 0(T_{avg} = T_{c,i})$ 부터  $x = L(T_{avg} = T_{c,o})$ 까지 적분을 수행하면 다음 식을 얻는다.

$$\ln \frac{T_b - T_{c,o}}{T_b - T_{c,i}} = - \frac{hA_s}{\dot{m}c_p} \quad (6)$$

따라서 최종적인 냉각공기 출구 온도는 다음과 같이 결정되어진다.<sup>(10)</sup>

$$T_{c,o} = T_b + (T_{c,i} - T_b) \exp\left(-\frac{h_c A_s}{\sum \dot{m} c_{p,c}}\right) \quad (7)$$

$$Q_{rej} = UA_s(T_b - T_{c,o}) \quad (8)$$

대류 열전달 계수  $h$ 는 유속을 고려하여 층류와 난류 각 영역에서의 영향을 고려하였으며, 난류 운전시는 Gnielinski 상관 식을 사용하여 열전달 계수를 결정하였다.<sup>(11)</sup>

$$Nu_D = \frac{h_c D_h}{k_c} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (9)$$

총합 열전달 계수는 냉각공기와의 대류현상과 배터리 내부에서의 전도현상에 의해 결정이 되며, 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{conv}} + \frac{t_b}{k_b}} \quad (10)$$

### 3.4 압력강하 모델

압력강하 모델은 압력강하를 극복하기 위한 요구되는 팬의 동력을 계산하는데 중요한 역할을 하며, 다음과 같은 관계식이 성립된다.<sup>(11)</sup>

$$\Delta P = f \frac{L\rho V_{avg}^2}{2D} \quad (11)$$

식 (8)에서의  $f$ 는 유체 점성에 의한 마찰인자이며 Petukhov는 비교적 넓은 범위의 Reynolds 수를 포괄하는 단일 상관 식을 개발하였으며 본 연구에서는 아래의 상관 식을 사용하여 마찰인자를 결정하였다.<sup>(11)</sup>

$$f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6) \quad (12)$$

### 3.5 다중 모듈 모델

배터리 팩에서의 모듈과 모듈 사이 온도 분포는 냉각 특성 및 방법에 따라 상이하며, 이러한 온도 분포가 균일하게 이루어져야 배터리의 원하는 성능을 보장받을 수 있다. Fig. 3은 모듈의

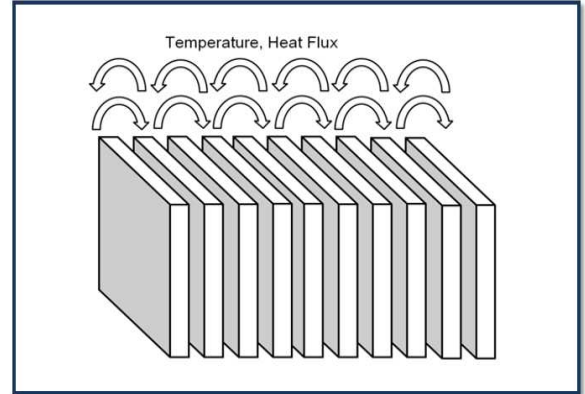


Fig. 3 Communication between neighboring modules in the battery pack.

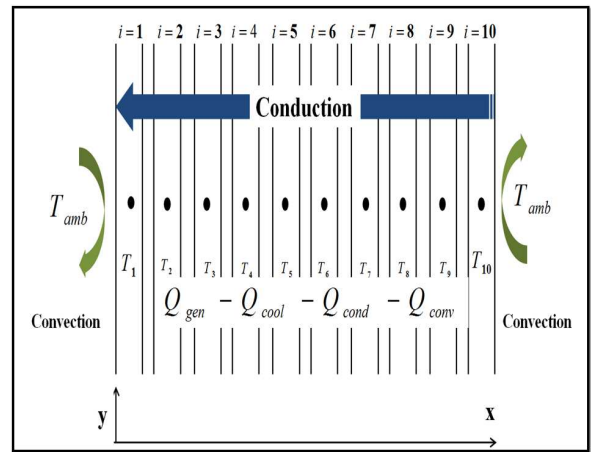


Fig. 4 Schematics of the module to module heat transfer

연결 방법을 나타낸 것으로서 본 연구에서는 그림과 같이 직렬형태로 배터리가 내장되어 있다고 가정하였다. Courant Number가 영향을 주지는 하지만, 적절한 시간 간격과 모듈 간 격자를 구성하게 되면, 차분형의 배터리 팩 구성을 통해 원하는 근사해를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 열전도 수치 해석으로 Matlab/Simulink® 상용 소프트웨어를 이용하여 도함수(Derivatives)를 차분형(Differences)으로 대체한 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용하였다.

배터리 팩은 10개의 배터리 모듈로 구성이 되어 있으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 첫 번째 모듈과 마지막모듈은 전도와 대류를 모두 고려하고, 가운데 모듈은 이웃 모듈과의 전도만을 고려하였다. 첫 번째 모듈과 마지막 모듈은 외기 온도와 대류 열전달 효과를 고려하여 일반적인 전도와 대류 방정식을 사용하였다.

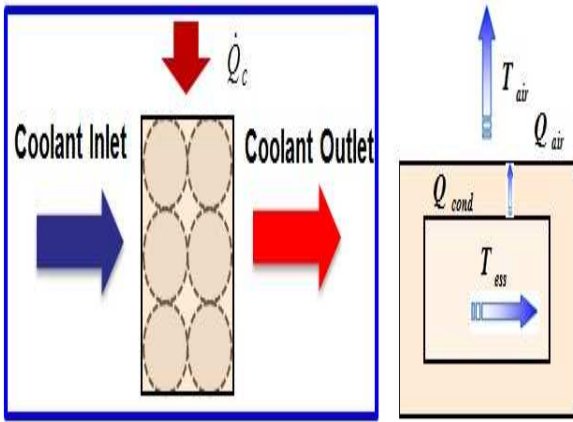


Fig. 5 Schematic of the battery model and heat transfer modes

들은 유한 차분법을 적용하였고 모듈 내부에서 온도는 균일하고 초기 배터리 온도는 외기 온도와 동일하다고 가정하여, 다음과 같은 경계조건을 설정하였다.

경계조건:

$$\frac{\partial T(5,t)}{\partial x} = 0 \text{ and } -k \frac{\partial T(5,t)}{\partial x} = k \frac{\partial T(6,t)}{\partial x} \quad (13)$$

초기조건:

$$T(x,0) = T_i \quad (14)$$

양단의 모듈은 대기와 접촉되어 대류 현상이 존재하고 다음과 같은 경계조건을 적용하였다.

경계조건:

$$-k \frac{\partial T(9,t)}{\partial x} = h [T(10,t) - T_i] \quad (15)$$

초기조건:

$$T(x,L) = T_i \quad (16)$$

온도구배의 함수는 근사적으로 절점 온도의 함수로 다음과 같이 기술 될 수 있다.

$$Q_{cond, Bi} = k_{cell} A \left( \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{(\Delta x)^2} \right) \Delta x \quad (17)$$

#### 4. 결과

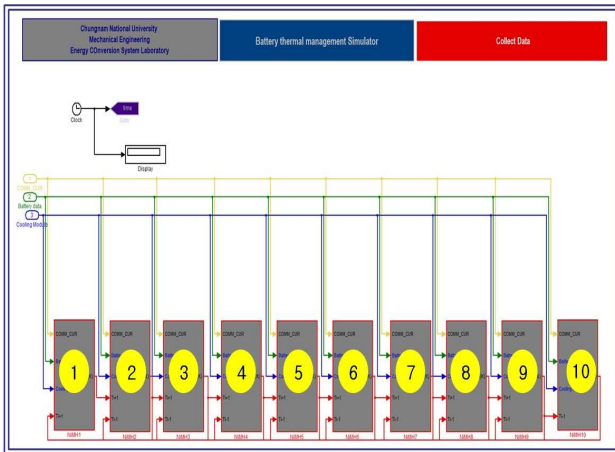


Fig. 6 Integration of the battery with the thermal management system

시뮬레이션은 10개의 모듈로 구성된 배터리 팩을 이용하였다. 본 연구에서는 정적 전류의 입력을 사용하여 충/방전시의 발생하는 배터리 팩의 온도변화, 모듈사이의 온도 분포 및 열전달 계수의 변화에 따른 온도분포를 각 모듈에 대해서 확인하였다. 또한, 배터리의 초기온도는 열적 평형을 고려하여 대기의 온도(293.15K)와 동일하다고 가정하였다.

Fig. 6은 본 연구에서 최종적으로 개발된 니켈수소 배터리 열관리 시스템이며, 10개의 모듈의 온도 분포를 확인 할 수 있도록 구성이 되어있다.

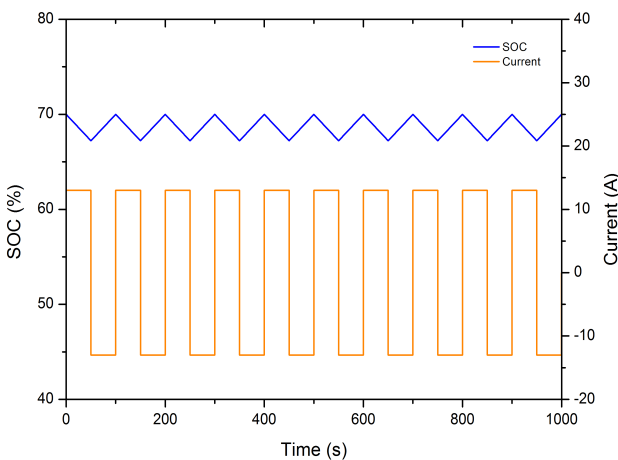


Fig. 7 Charge/discharge load profile & SOC

모듈에서의 에너지 보존 방정식은 식 (3)에서 설명 되어 지며, 외기와 접촉되어 있지 않은 모

#### 4.1 배터리 팩 온도 및 냉각공기 유량

배터리 냉각 방법에는 유냉식, 수냉식, 공랭식 등 다양한 방법이 존재 하지만<sup>(7)</sup> 본 연구에서는 공기를 냉각공기 유체로 사용하는 공랭식을 채택하였다. Fig. 7은 입력 전류 펄스 충/방전 프로파

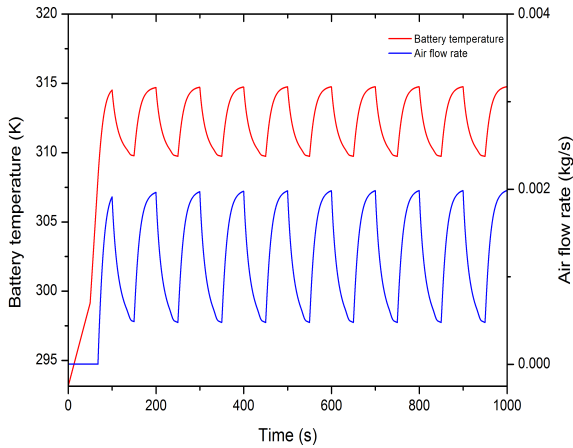


Fig. 8 Battery pack temperature and air flow rate

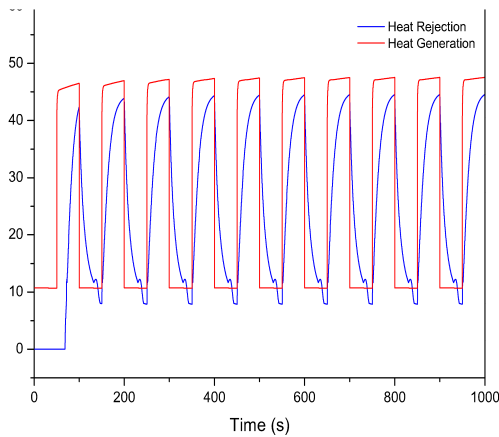


Fig. 9 Heat generation & Heat rejection for battery pack

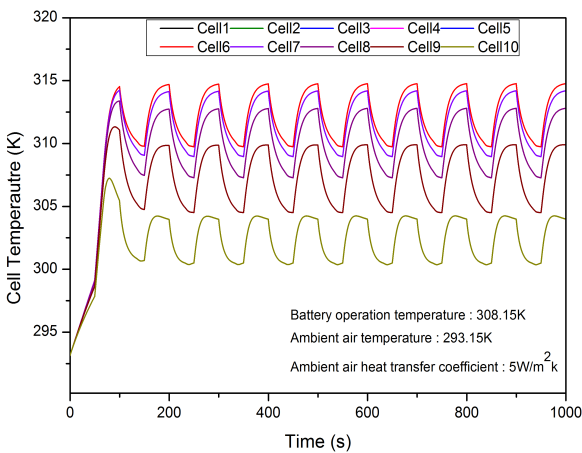


Fig. 10 Battery module temperature

일 대비 배터리의 SOC 변화를 보여주고 있다. 충/방전이 이루어지면서 배터리에 열이 발생하며, 냉각공기 유입에 의해 방열이 이루어진다.

Fig. 8은 펄스 전류 충·방전 시뮬레이션 결과에 대한 배터리 팩의 온도 변화와 냉각 공기의

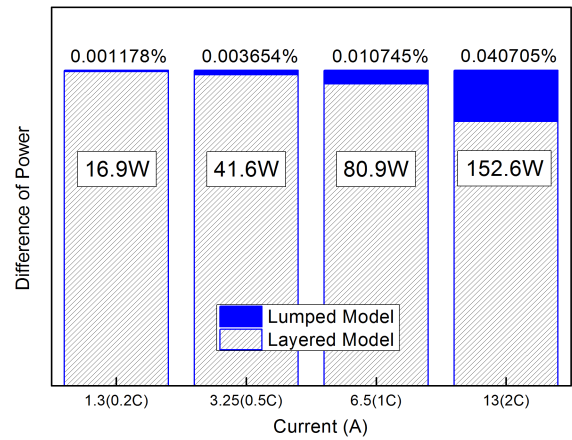


Fig. 11 Comparisons of Lumped vs. Layered model

유량의 변화이다. 배터리 팩의 온도는 동일조건에서 온도가 가장 높게 형성되는 5번 모듈의 온도를 측정 하였다. 특히, 냉각공기 유량은 5번 모듈의 온도 정보를 받아 PI 제어로 인하여 공기의 유량이 설정 온도에 맞게 공급되어 지고 있다. 또한 유입되어지는 냉각 공기는 병렬 형태로 각 냉각공기 채널에 유입이 되어, 모듈 간의 초기 냉각공기 온도는 동일하다고 가정하였다. 최초 대기 온도와 같은 293.15K에서 충전이 이루어지면 충전에 따른 열의 발생으로 인하여 배터리의 온도가 급격히 증가하게 되고, 초기에 최소의 유량만이 유입되었던 냉각 공기는 온도가 기준 온도 이상이 되었을 때 방열에 따른 온도 상승을 막기 위해 공기가 모듈에 유입되게 된다. 배터리의 작동 온도는 308.15K으로 설정하였으며, 공기의 대류 열전달 계수는  $5W/m^2K$ 로 설정하였다.

4.2 열 발생 및 방열

배터리 모듈에서 발생하는 열은 배터리와의 열교환에 의해서 냉각공기로 방출되게 된다. Fig. 9는 배터리 내에서 발생한 열과 발생된 열을 냉각공기로 방출하는 그림이다. 충/방전에 의해 배터리내부의 온도 증가를 막기 위해서 냉각수가 유입이 되며, 유입된 냉각수에 의해서 방열이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

4.3 배터리 모듈의 온도

Fig. 10은 펄스 전류 충/방전 에 따른 각각의 배터리 모듈의 온도 분포를 확인할 결과이다. 그림에서 보듯이, 1번 모듈과 10번 모듈의 온도가 가장 낮게 형성이 되며 2번에서 안쪽 모듈로 들

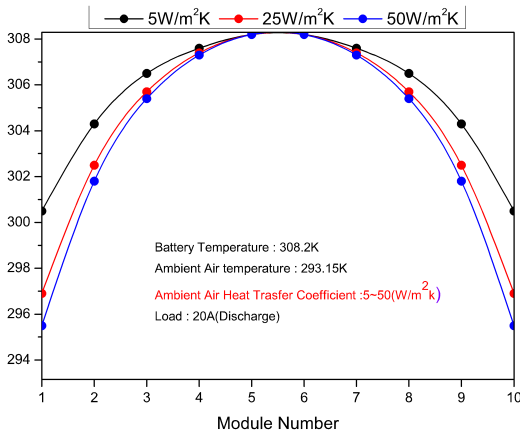


Fig. 12 Effect of Ambient air heat transfer coefficient

어갈수록 온도가 높은 곳에서 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 11에서 더 자세히 확인할 수 있다. Fig. 11은 부하를 방전상태 20A 정 전류를 주었을 경우 대류 열전달 계수의 변화에 따른 모듈과 모듈사이의 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 안쪽 모듈일수록 더 높은 온도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 안쪽 모듈일 경우 이웃모듈과의 전도 현상, 대기와 접촉되어 있는 모듈일 경우 대기와의 대류 현상에 의해서 각 모듈마다 온도차가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 대기 대류 열전달 계수를  $5W/m^2K$ ,  $25W/m^2$ ,  $50W/m^2K$  로 변화시켰을 경우의 모듈에 대한 온도 분포는 그림과 같이 경우에 대기와 접촉되어 있는 모듈을 배터리 온도가 더 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 대류 열전달 계수가 증가할수록 대기와의 열전달이 더 활발해져 냉각이 더 잘 이루어진다. Fig. 12는 집중용량 모델과 다중 모듈 모델 간의 출력 차이를 보여준다.

집중 용량 모델은 각각의 단위 전지들을 고려하지 않았으며, 집중 용량 모델이 다중 모듈 모델 보다 출력이 낮게 나타나며, 정 전류를 크게 할수록 출력차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 전류가 13A 일 때, 최대 0.040705%의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 집중용량 모델보다 다중 모듈 모델을 적용하였을 경우 모듈 간의 온도 차의 의한 배터리 모듈의 보다 정확한 출력 값을 확인할 수 있는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 모듈과 모듈 사이의 온도 분포를 확인할 수 있는 배터리 열관리 시스템을 개발하였으며, 배터리의 온도 제어와 모듈 과 모듈 사이의 온도 분포를 확인하였다.

(1) 2C 펄스 전류 방전을 입력으로 주었을 경우 배터리 팩의 온도가 기준 온도인 308.15K 에 제어가 되는 것을 확인할 수 있다.

(2) 배터리 각각의 모듈의 온도는 안쪽 모듈일 경우 더 높은 온도를 보이며, 대기와 접촉되어 있는 모듈일 경우에 상대적으로 더 낮은 온도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

(3) 대류 열전달 계수를  $5W/m^2K$ ,  $25W/m^2$ ,  $50W/m^2K$  로 변화시켰을 경우의 모듈에 대한 온도 분포는 대류 열전달 계수가 증가할수록 냉각의 효과가 더 증가하는 것을 확인할 수 있다.

(4) 다중 모듈 모델을 적용 하였을 경우, 집중 용량 모델보다 최대 0.040705%의 출력 오차가 발생하며, 이는 다중 모듈 모델이 모듈 간의 온도 차에 의한 보다 정교한 출력 값을 확인할 수 있다.

(5) 본 연구를 통해 개발된 모델은 실험적 검증을 거쳐 향후 시스템 최적 운전을 위한 냉각 시스템 설계 및 운전 최적화를 위해 사용할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 산업융합기반구축사업(과제번호 : 10035209)과 일반연구자 지원 사업(과제번호 : 20120007531)으로 수행된 결과입니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Park, S. J. and Jung, D. H., 2013, "Battery Cell Arrangement and Heat Transfer Fluid Effects on the Parasitic Power Consumption and the Cell Temperature Distribution in a Hybrid Electric Vehicle," *Journal of Power Sources*, Vol. 227, pp. 191~198.
- (2) Jang, S.Y, PCT/1020090113521, 11.02, 2009
- (3) Pesaran, A. A., 2002, "Battery Thermal Models for Hybrid Vehicle Simulations," *Journal of Power Sources*, Vol. 110, pp. 377-382.

- (4) Pesaran, A. A., 2003, "Cooling and Preheating of Batteries in Hybrid Electric Vehicles," *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, March 16-20.
- (5) Pesaran, A. A., 2001, "Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions," *Advanced Automotive Battery Conference*, February 6-8.
- (6) Kim, G. H., 2006, "Battery Thermal Management design modeling," Conference paper, October 23-28.
- (7) Lee, J. K., Kim, J. E. and Cha, H. J., 2011, "Experiment and Implementation of NiMH Battery Model for Autonomie Environment," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 60, No.10, pp.1875~1880.
- (8) Park, S. J., 2011, "A Comprehensive Thermal Management System Model for Hybrid Electric Vehicles," Ph.D. Dissertation, University of Michigan.
- (9) Benhamin, A., Agar, E., Dennison, C.R. and Kumbur, E.C., 2013, "On the Quantification of Coulombic Efficiency for Vanadium Redox Flow Batteries: Cutoff Voltages vs. State-of-charge Limit," *Electrochemistry Communications*, Vol. 35, pp. 42~44.
- (10) Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J., 2012, *Heat and Mass transfer : Fundamentals and Applications*, McGrawHill, pp. 470~471.
- (11) Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S., 1996, *Fundamental of Heat Transfer*, Incropera, pp. 420~450.