

# 전기구동 자동차용 리튬이온 배터리의 고효율 운전을 위한 냉방 및 난방 시스템 설계에 대한 이론적 접근법

김대완<sup>1</sup>, 이무연<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

## Theoretical approach on the heating and cooling system design for an effective operation of Li-ion batteries for electric vehicles

Dae-Wan, Kim<sup>1</sup> and Moo-Yeon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

**요약** 본 연구에서는 전기구동 자동차에 동력원으로 사용되는 고전압 및 고용량 배터리의 고효율 운전을 위하여 배터리 열관리 시스템 기술을 소개하고 이론적 설계 방법에 소개하고 한다. 이를 위하여 전기구동 자동차의 배터리로 많이 사용되는 리튬이온 배터리의 고효율 운전을 위한 발열 모델링을 제시하였고, 열원의 종류에 따른 냉방 및 난방 시스템 설계를 에너지 평형식을 이용하여 부하를 계산하였다. 특히, 리튬이온 배터리의 발열 모델링을 이용하여 충전 및 방전 시 발열 반응열과 흡열 및 흡열기시 배터리 작동의 최적 온도를 유지하기 위한 냉방과 난방 설계 기술을 제시하였다. 전기구동 자동차 종류에 따라 배터리 사용 비중이 다르기 때문에 효율적인 배터리 열관리를 위하여 계절별 및 작동 모드별 부하에 따른 배터리 열관리 기술을 제안하였다. 또한, 냉방 부하가 가장 큰 여름철 동일 조건에서 외부 공기 온도가 같다고 가정하면 냉방 능력은 수랭식 냉매 방법이 가장 크며 공랭식 방법이 가장 작게 나타난다.

**Abstract** This study is aiming to suggest the effective thermal management system design technologies for the high voltage and capacity battery system of the electricity driven vehicles and introduce the theoretical designing methods. In order to investigate the effective operation of the battery system for the electricity driven vehicles, the heat generation model for Li-ion battery system using the chemical reaction while charging and discharging was suggested and the thermal loads of the heat sources (air or liquid) for cooling and heating were calculated using energy balance. Especially, the design methods for the cooling and heating of the battery system for maintaining the optimum operation temperature were investigated under heating, cooling and generated heat (during charging and discharging) conditions. The battery thermal management system for the effective battery operation of the electricity driven vehicles was suggested reasonably depending on the variation of the season and operation conditions. In addition, at the same conditions under summer season, the cooling method using the liquid and active cooling technique showed a relatively high capacity, while cooling method using the passive cooling technique showed a relatively low capacity.

**Key Words** : Battery, Cooling, Heating, Thermal Management, Vehicle

### 기호설명

$A$  : 면적, ( $m^2$ )

$C_p$  : 정압 비열, ( $kcal/kg \cdot K$ )

$h$  : 대류 열전달 계수, ( $kcal/m^2 \cdot h \cdot K$ )

$L$  : 길이, ( $m$ )

본 논문은 이 논문(작품)은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-10-5440-8421 email: mylee@dau.ac.kr

Received January 10, 2013

Revised (1st February 4, 2014, 2nd February 5, 2014)

Accepted May 8, 2014

- $m$  : 질량, (kg)
- $\dot{m}$  : 질량 유량, (kg/hr)
- $T$  : 온도, (K)
- $TR$  : 열저항, ( $m^2 \cdot K/W$ )
- $Q$  : 열전달량, (kcal)
- $\epsilon$  : 효율

## 하첨자

- $a$  : 공기 (air)
- $bm$  : 배터리 모듈 (battery module)
- $c$  : 냉각수 (coolant)
- $ch$  : 칠러 (chiller)
- $i$  : 입구 (inlet)
- $init$  : 초기 (initial)
- $o$  : 출구 (inlet)
- $r$  : 라디에이터 (radiator)

## 1. 서론

석유 및 석탄등과 같은 화석에너지의 고갈과 더불어 환경규제에 법규의 강화로 수송 분야인 자동차 산업에서도 친환경 고효율 자동차에 관심이 증가하고 있으며, 완성차 업체들을 중심으로 기존의 대표적인 동력기관인 내연기관을 대체하는 자동차들을 개발하고 있다. 특히, 기존의 엔진을 대체하는 대용량 모터와 기존의 에너지원인 화석연료를 대체하는 고전압 및 고용량 배터리로 구동되는 전기구동 자동차 (xEVs)에 대한 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 이중 기존의 내연기관과 모터가 결합된 하이브리드 자동차 (HEV)는 전기구동 자동차중 가장 먼저 상용화에 성공하였다. 그러나 하이브리드 자동차 (HEV)는 주행 중 모터의 사용보다는 내연기관의 사용이 많아 기존 내연기관 자동차 대비 연비 및 이산화탄소 배출이 저감된다는 장점을 가지고 있으나 국제적인 친환경 자동차에 대한 관심 및 요구를 만족시켜 주기에 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 내연기관 사용을 최소화 하고 모터 사용량을 늘리기 위하여 배터리 용량을 증가시킨 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV) 개발되었다[3]. 최근에는 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV)를 포함한 HEVs가 가지는 한계인 내연기관을

동력원에서 제거하고 순수하게 배터리에서 공급되는 전기만을 이용하여 모터를 구동하는 순수전기자동차 (BEV)의 개발이 활발히 진행되고 있으며 국내는 물론 해외에서도 완성차 형태로 다양하게 출시되고 있다 [4]. 순수전기자동차 (BEV)를 포함한 전기구동 자동차들은 공통적으로 자동차를 구동하기 위한 대용량 구동 모터 (Traction motor), 전기를 모터에 공급하기 위한 이차전지인 고전압 배터리 (High voltage battery system) 및 구동 모터에 전류를 공급하기 위한 인버터 (Inverter)등 고발열 전자장비(High heat flux electronic devices)들로 구성된다. 이러한 부품들은 주행 시 열을 발생하는 주요한 장치들이며 전기구동 자동차의 주행거리를 향상시키기 위해서는 적절한 냉방 기술 및 난방 기술이 적용된 열관리 기술이 필요로 한다[5]. 특히, 전기구동 자동차를 구성하는 고발열 전자장비중 배터리는 자동차의 주행거리와 밀접한 연관성을 가지고 있으며 자동차의 제한된 공간(Lay-out)으로 인하여 배터리를 장착할 수 있는 무게, 크기 및 용량에 한계가 존재한다. 즉 전기구동 자동차는 주행 시 배터리의 작동 환경, 운전 특성 및 충전/방전 시 효율에 따라 주행거리가 결정되며, 전기구동 자동차의 수명 및 주행거리 향상을 위하여 고전압 및 고용량 배터리 작동 시 적절한 냉방 및 난방을 위한 열관리 시스템 기술이 필요로 한다[6].

기존의 전기구동 자동차용 배터리에 관한 연구는 전기구동 자동차에서 배터리 사용에 따른 전기화학적 작동 특성을 관리하는 배터리 관리 시스템 (BMS) 기술 및 배터리 자체의 열적 거동 특성에 관한 연구들이다[7-14]. 더불어, Jang et al. (2010)은 배터리 냉각 효율을 개선하기 위하여 히트파이프를 이용하는 연구를 제안하기도 하였다[15]. 즉 전기구동 자동차의 배터리로 널리 사용되는 배터리에 대한 전기화학적 작동특성에 관한 연구는 이루어지고 있으나, 자동차의 주행환경 및 작동환경에 따른 배터리의 고효율 운전을 위한 냉방 및 난방 시스템을 포함한 배터리 열관리 시스템 (Battery thermal management system, B-TMS)에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 설계 기술에 대한 일반적인 방법론을 제시하는 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 배터리 열관리 시스템 (B-TMS)을 위한 난방 및 냉방 기술을 소개하고 효과적인 설계를 위한 방법론에 대하여 이론적으로 접근하였다. 또한, 전기구동 자동차의 주행환경 및 작동환경에 따른

배터리 성능을 최적으로 유지하기 위한 고효율 배터리 열관리 시스템 설계 방법을 제시하였다.

## 2. 이론적 해석

### 2.1 배터리 열관리 시스템 (B-TMS)

전기구동 자동차(xEVs)는 배터리를 동력원으로 사용하는 자동차를 의미하며, 하이브리드 자동차 (HEV), 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV) 및 순수전기자동차 (BEV) 등이 있다. 전기구동 자동차에는 현재 상용화되는 배터리 중 에너지 밀도가 우수한 리튬이온 배터리가 사용하고 있으나, 리튬이온 배터리는 사용 온도에 따라 충전 및 방전 효율이 불안정하고 배터리 수명이 달라지는 단점을 가지고 있다[16]. 이를 해결하기 위하여 배터리 열관리 시스템인 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 기술을 이용하여 배터리 작동시의 작동 온도와 충전 및 방전 시 발열반응을 통하여 발생하는 열을 일정하게 유지하고, 궁극적으로 배터리 사용 온도를 제어한다. 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 기술은 크게 냉방과 난방 기술이 있고, 냉방 및 난방 기술은 작동유체에 따라 공기를 사용하는 공랭식과 액체를 사용하는 수랭식으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전기구동 자동차에서 일반적으로 쓰이는 냉방 및 난방을 위한 설계 기술을 이론적으로 설명하고, 전기구동 자동차가 운행되는 계절별, 부하별 및 모드별 필요한 냉방 및 난방 기술인 배터리 열관리 시스템 기술을 제시한다.

### 2.2 B-TMS용 냉방 및 난방 기술

전기구동 자동차의 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 용 냉방 및 난방 기술은 다음과 같다. 먼저, 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 용 난방 기술은 열원의 종류에 따라 공랭식 및 수랭식으로 구분되며, 열원을 가열함으로써 배터리 주변에 난방을 제공하는 것이다. 난방 방식으로는 배터리 모듈을 구성하는 최소 단위인 셀을 직접 가열하는 내부 코어 가열, 배터리 모듈 외부 표면을 가열하는 외부 표면 가열, 배터리 모듈 내부 표면을 가열하는 내부 표면 가열과 배터리 모듈 내부 공기를 가열하여 배터리 온도를 높이는 내부 공기 유로 가열방식 등이 있다.

배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 용 냉방 기술은 난방과 같이 열원의 종류에 따라 공랭식 및 수랭식으로 구분

되며, 열원을 냉각함으로써 배터리 주변에 냉방을 제공하는 것이다. 냉방 방식으로는 팬을 이용해 공기를 직접 배터리 모듈에 공급하는 공랭식 방법 (Passive cooling), 라디에이터를 통하여 냉각수를 냉방하는 수랭식 공랭 방법 (Liquid and passive cooling) 및 냉매를 통하여 냉각수를 냉방하는 수랭식 냉매 방법 (Liquid and active cooling) 등이 있다.

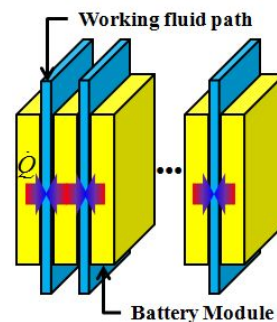
### 2.3 배터리 발열 모델링

전기구동 자동차의 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 을 위한 적절한 냉방 및 난방 방식을 선택하기 위하여 배터리 작동에 따른 온도특성을 알아야 한다. 이를 위하여 배터리 발열모델링을 진행하여야 하며, 본 논문에서 제시한 냉방 및 난방 방식 적용을 위한 배터리 발열 모델링은 Song (2013) and Choi (2013)의 논문을 바탕으로 구성하였다[17,18].

$$\dot{m}_c C_{p,c} dT_c = hw(T_m - T_c)dx \quad (1)$$

$$T_{c,o} = T_m - (T_m - T_{c,i})e^{-\frac{1}{\dot{m}_c C_{p,c} TR}} \quad (2)$$

먼저, 배터리 작동에 따른 발열 온도를 예측하기 위하여 배터리 셀로 구성된 모듈에 부착된 냉각유로 출구의 온도를 이용하는 것이다. Fig. 1에서 보는 것처럼, 배터리 모듈과 냉각유체 사이에 열전달량을 식 (1)을 이용하여 계산하여 배터리 모듈 냉각수 출구 온도를 식(2)와 같이 계산한다. 여기서,  $TR = \frac{1}{hA}$ 은 열전달 시 발생하는 열 저항을 의미한다. Fig. 1은 배터리 모듈과 모듈을 주변에 작동유체가 순환할 수 있는 유로로 구성된 배터리 열관리 시스템의 단면을 나타내고 있다.



[Fig. 1] Heat transfer mechanism between battery module and working fluid for B-TMS

■ 난방 모델링

앞서 언급한 배터리 난방 방식 중 작동유체인 공기를 가열하여 배터리 모듈을 난방하는 내부 공기 유로 가열 방식은 배터리를 직접 가열하는 다른 방식에 비하여 안정성이 가장 큰 방법이기 때문에 본 논문에서는 이 방식을 설명한다. 내부 공기 유로 가열은 배터리 난방을 위하여 작동 유체인 공기를 전기 저항 히터를 이용하여 가열하는 방식으로 전기 저항 히터에서 발열되는 열량이 모두 작동유체에 전달된다고 가정하면, 전기 저항 히터 출구의 작동유체 온도는 식 (3)을 이용하여 계산된다.  $Q_{heater}$ 는 전기 저항 히터 발열량이고, 작동유체 출구 온도인  $T_{c,o}$ 는 식 (4)를 이용하여 계산된다.

$$Q_{heater} = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (3)$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{Q}{\dot{m}_c C_{p_c}} \quad (4)$$

■ 냉방 모델링

배터리 냉방은 사용되는 배터리의 종류에 따라 모델링이 다르지만, 본 논문에서는 전기구동 자동차용 배터리로 널리 사용되는 리튬이온 배터리에 대한 냉방 모델링을 제시하고자 한다. 리튬이온 배터리는 저온 성능과 안정성도 중요하지만 고온에서 배터리 작동 성능과 안정성도 중요하게 다루어지고 있다. 이러한 이유로는 리튬이온 배터리의 경우 방전 하면서도 발열되기 때문에 작동 온도가 올라갈 경우 화재 및 폭발에 취약하기 때문이다[19].

첫째, 공랭식 (Passive cooling)은 팬을 이용하여 작동유체인 공기를 직접 배터리에 공급하여 냉방하는 방식으로 일반적으로 냉방 용량이 수랭식보다 작아 비교적 냉방 부하가 적은 봄과 가을철에 적합한 방식이다. 배터리 모듈의 냉방을 위한 작동 유체로 사용하는 공기와 배터리 모듈사이에서 직접적인 열전달이 이루어지고 팬을 이용하여 유량을 제어하여 냉방 능력을 조절할 수 있다. 배터리의 발열량과 공기에서 제거된 열량이 같다고 가정하면, 공기로 전달된 열전달량은 식 (5)와 같다. 여기서 Q는 배터리에 발열된 발열량이다[6].

$$Q = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (5)$$

둘째, 수랭식 공랭 방법 (Liquid and passive cooling)은 작동유체로 냉각수를 사용하고 라디에이터를 이용하여 배터리의 발열량을 공기를 이용하여 외부로 냉각하는

방식으로 일반적으로 공랭식보다 냉방 용량이 크기 때문에 봄 및 가을철의 부하가 클 경우, 등관길 주행, 그리고 고속 주행일 때 사용된다. 본 방식은 라디에이터에서 냉각수와 공기 사이에 열교환이 이루어지며 펌프를 이용하여 배터리 발열량에 따라 유량을 제어하고 라디에이터 팬을 이용하여 공기와의 열교환량을 제어한다. 냉각수에서 배터리로부터 흡수한 열전달량은 식 (6)을 이용하여 계산하고,

$$Q_r = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (6)$$

라디에이터에서 열전달량은 식 (7)과 같이 계산된다. 여기서,  $\epsilon_r$ 은 라디에이터 효율을 의미하며 라디에이터 사양에 따라 결정된다.

$$Q_r = \epsilon_r \cdot \dot{m}_a C_{p_a} (T_{c,i} - T_{a,i}) \quad (7)$$

셋째, 수랭식 냉매 방법 (Liquid and active cooling)은 냉방 방식 중 가장 높은 냉방 용량을 가지고 있으며 냉방 부하가 가장 큰 여름철, 등관길 주행, 그리고 고속 주행일 때 사용된다. 본 방식은 냉매를 이용하여 저온을 유지하는 칠러 (Chiller)와 배터리를 냉각하는 작동유체인 냉각수 사이에 대류 열전달을 이용하는 것으로 부하가 가장 큰 경우에 적합한 냉각 방식이다. 냉각수에서 배터리로부터 흡수한 열량과 칠러와의 열전달량은 식 (8)을 이용하여 계산한다.

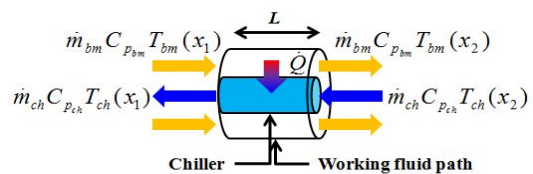
$$\dot{Q} = h \Delta T dA \quad (8)$$

여기서  $\Delta T$ 는  $T_{bm} - T_{ch}$ 이다.

Song (2013)의 박사학위 논문을 참고하여, 칠러 및 배터리 냉각을 위한 유로 사이의 길이가 L인 임의의 두 위치  $x_1$ 과  $x_2$  지점에서 열전달량은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{bm} C_{p_{bm}} T_{bm}(x_1) &= \dot{m}_{bm} C_{p_{bm}} T_{bm}(x_2) + \dot{Q} \\ \dot{Q} &= \dot{m}_{bm} C_{p_{bm}} T_{bm}(x_1) - \dot{m}_{bm} C_{p_{bm}} T_{bm}(x_2) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, 식 (8)을 식 (9)에 대입하고 정리하면 배터리의 발열량과 칠러에서 흡수한 열전달량을 식 (10)과 같이 계산한다. Fig. 2는 배터리의 발열량과 칠러 사이의 열전



[Fig. 2] Heat transfer mechanism between chiller with refrigerant and working fluid path for battery module

[Table 1] Characteristics of battery cooling methods

Type	Cooling method	Specification			
		Season	Cooling load	Working parts	Heat transfer
Type 1	Passive (Air)	Spring / Fall	Low level	Fan	Slow cooling
Type 2	Liquid and Passive (Natural convection)	Spring / Fall	Middle level	Pump / Radiator	Middle speed cooling
Type 3	Liquid and Passive (Forced convection)	Spring / Early summer / Fall	Middle level	Pump / Radiator / Fan	Middle speed cooling
Type 4	Liquid and Active (Refrigerant)	Summer	High level	Pump / Chiller	Fast cooling

달을 나타내고 있다.

$$\dot{Q} = h \Delta T dA = \dot{m}_{lm} C_{p_{lm}} \{T_{lm}(x_1) - T_{lm}(x_2)\} \quad (10)$$

일반적으로, 공랭식 방법은 공기와 배터리가 직접 열교환 하기 때문에 열전달량은 공기의 질량 유량과 공기의 정압 비열 및 배터리 측 공기 입구 온도로 결정되며, 제시된 방법은 부하가 가장 작을 때 적당하다. 수랭식 공랭 방법은 배터리에서 배터리와 냉각수가 열교환하고 배터리 냉각수와 공기가 라디에이터에서 열교환하기 때문에 라디에이터 효율에 따라 열전달량이 달라진다. 따라서 열전달량은 배터리 냉각수의 질량 유량, 정압 비열 및 라디에이터 측 냉각수 입구 온도로 결정되며 일반적으로 공랭식 방법 보다 부하가 큰 시스템에 사용된다. 또한, 라디에이터에서 나오는 냉각수 출구 온도 (배터리 측 냉각수 입구 온도)가 공랭식 방법에서 배터리 측 공기 입구 온도 보다 낮아지므로 배터리에서 열전달량을 크게 할 수 있습니다. 마지막으로, 수랭식 냉매 방법은 배터리 냉각수가 수랭식 공랭 방법처럼 순환하지만 공기보다 낮은 온도의 칠러 냉각수와 열교환이 이루어지므로 열전달량이 가장 크다.

### 3. 결과 및 고찰

전기구동 자동차에 사용되는 배터리 열관리 시스템 (B-TMS)은 배터리의 에너지 밀도와 배터리 사용 환경 및 비율에 따라 각기 다른 냉방 및 난방 방식이 필요 하며, 배터리 냉방 및 난방 부하는 주행 계절 및 모드별 부하가 달라지므로 적절하게 설계해야 한다.

#### ■ 냉방 방식

배터리 냉방 방식은 열원에 따라 공랭식과 수랭식으

로 나누며, 열원을 냉각하는 방법으로는 공랭식 (Type 1), 수랭식 공랭 (Type 2 및 Type 3) 및 수랭식 냉매 (Type 4) 등이 있으며, 수랭식 공랭은 자연 대류 방식 (Natural convection, Type 2)과 강제 대류 방식 (Forced convection, Type 3)이 있으며, Table 1에 나타나 있다. Table 1은 계절별 부하에 따른 배터리 냉방 방법을 나타내고 있으며, 관련 필요 부품 및 열전달 속도를 설명한다. Table 1에 나타난 냉방 방식은 전기구동 자동차의 종류에 따른 필요 배터리 냉방용량에 따라서 Table 2와 같이 분류된다. 따라서 전기구동 자동차의 종류 및 냉방 부하에 따른 배터리 냉방 방식은 적절히 설계되어야 한다. Table 2는 전기구동 자동차에 따른 배터리 열관리 시스템의 냉방 방식을 나타낸다.

[Table 2] Cooling methods for the battery thermal management system of xEVs

Condition	Cooling method			
	FCEV	HEV	PHEV	BEV
Spring	Type1	Type2	Type2	Type3
Summer	Type2	Type2	Type3 / Type4	Type4
Autumn	Type1	Type2	Type2	Type3
Winter	Type1	Type1	Type1	Type2

첫째, 연료전지 자동차 (FCEV)에 쓰이는 배터리는 전기구동 자동차 중에서 에너지 밀도 및 사용 비율이 가장 낮아 주행 계절 및 모드별 부하가 가장 낮아 필요 냉방 용량이 작은 공랭 (Type 1) 방식을 사용한다. 둘째, 하이브리드 자동차 (HEV)는 일반적으로 배터리 사용 비율이 20%정도이며, 주 동력원은 내연기관을 사용하기 때문에 배터리 에너지 밀도가 순수전기자동차 (BEV)에 비하여 상대적으로 낮다. 따라서 여름철 및 등관길 주행 등 냉방

부하가 클 경우에도 배터리 냉방 방식으로 공랭 (Type 1) 또는 수랭식 자연 공랭 (Type 2) 방식을 사용한다. 셋째, 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV)는 주 동력원이 배터리와 전기구동 모터이며, 내연기관은 전기 생산을 위하여 운전된다. 그러므로 배터리 에너지 밀도 및 사용 비율이 하이브리드 자동차 (HEV)에 비하여 비교적 높아 배터리의 작동 온도를 일정하게 제어하기 위하여 충분한 냉방 용량이 필요하다. 봄, 가을, 겨울철 및 일반적인 주행일 때는 연료전지 자동차와 하이브리드 자동차와 같은 공랭 (Type 1) 또는 수랭식 자연 공랭 (Type 2) 방식으로 냉방하고 여름철 및 등관길 주행과 같은 냉방 부하가 클 경우에는 냉방 용량이 가장 큰 수랭식 강제 공랭 (Type 3) 또는 수랭식 냉매 (Type 4) 방식을 사용한다. 넷째, 순수 전기자동차 (BEV)는 주동력으로 배터리와 전기구동 모터를 사용하기 때문에 여름철 및 등관길 주행뿐만 아니라 봄 및 가을철 일반적인 주행 모드일 때도 냉방 부하가 크기 때문에 수랭식 강제 공랭 (Type 3) 또는 냉방 용량이 가장 큰 수랭식 냉매 (Type 4) 방식을 사용한다.

결과적으로, 배터리 에너지 밀도 및 사용 비율이 상대적으로 큰 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV)와 순수 전기자동차 (BEV)는 운행조건과 계절조건에 따라 냉방 부하가 크기 때문에 시스템이 복잡하고 무거운 수랭식으로 일반적으로 설계한다. 반면 배터리 에너지 밀도 및 사용 비율이 비교적 낮은 연료전지 자동차 (FCEV)와 하이브리드 자동차 (HEV)는 계절 및 주행에 따른 부하가 비교적 적기 때문에 냉방 시 시스템이 간단하고 가벼운 공랭식으로 설계하여 자동차의 중량을 줄이는 것이 바람직하다.

#### ■ 난방 방식

배터리 난방 방식은 배터리 모듈 또는 팩을 직접 가열하여 난방하는 직접식과 열원을 이용하여 간접적으로 가열하여 난방하는 간접식이 있다. 리튬이온 배터리는 물과 열에 민감하기 때문에 직접식 보다는 간접식이 많이 사용되며, 이 중 배터리 모듈 내부 작동유체 (냉각수 또는 공기)를 가열하여 배터리를 난방하는 방식이 많이 사용된다. 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 설계에서 난방 방식은 냉방 방식에 비하여 부하가 크지 않기 때문에 전기구동 자동차의 종류, 주행 조건 및 계절 조건에 맞는 냉방 기술을 설계 한 후 결정된 작동 유체에 따른 난방 방식을 적용하는 단계로 설계가 이루어져야 한다. 또한,

냉방 방식의 경우, 냉방 부하가 가장 큰 여름철 동일 조건에서 외부 공기 온도 (공기 입구 온도)가 같다고 가정하면 냉방 능력은 수랭식 냉매 방법이 가장 크며 공랭식 방법이 가장 작게 나타난다. 이상의 결과를 바탕으로, 전기구동 자동차의 주행환경 및 계절별 부하에 따른 효과적인 배터리 난방 및 냉방 방식을 제시하고 향후 전기구동 자동차의 배터리 고효율 운전 및 수명연장을 위한 이론적 설계를 위한 참고자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 리튬이온 배터리를 사용하는 전기구동 자동차용 고효율 배터리 열관리 (B-TMS) 설계를 위한 이론적 방법을 제시하였고, 자동차의 주행환경 및 부하에 따른 난방 및 냉방 방법을 제시하였다.

- (1) 전기구동 자동차에 쓰이는 리튬이온 배터리는 충전 및 방전 시 열이 발생하며 배터리 작동 온도에 따라 배터리 효율이 변화하여 배터리 작동 온도를 일정하게 제어하기 위한 배터리 열관리 시스템 (B-TMS)이 필요하다.
- (2) 배터리 열관리 시스템은 난방 기술과 냉방 기술로 분류되며, 작동유체에 따라 공랭식과 수랭식으로 분류된다.
- (3) 난방 기술은 배터리를 직접 가열하는 직접식과 열원을 간접적으로 가열하는 간접식이 있고, 냉방 기술은 열원에 따라 공랭식 (Type 1), 수랭식 자연 공랭 (Type 2), 수랭식 강제 공랭 (Type 3) 및 수랭식 냉매 (Type 4) 방식이 있다.
- (3) 전기구동 자동차는 운행 시 배터리 사용 비율과 배터리 에너지 밀도에 따라 사용되는 냉방 기술이 다르며, 난방 및 냉방 부하에 맞는 방법으로 열관리를 하여야 한다.
- (4) 배터리 열관리 시스템 (B-TMS) 설계는 전기구동 자동차의 종류, 주행 조건 및 계절 조건에 맞는 냉방 방식을 설계 한 후 결정된 작동 유체에 따른 난방 방식을 설계하는 단계로 이루어진다.
- (5) 본 연구에서 리튬이온 배터리의 고효율 운전을 위한 열관리 시스템에 대한 이론적 설계 방법을 제시하였으나 향후 실험을 통하여 이론적 방법을 검증하고자 하며, 실차에 적용하여 배터리 성능 향상을 검토하고 한다.

## References

- [1] H. S. Kim, B. Y. Han, H. K. Park, "Flow analyses around the battery pack for a new", Trans. of the Korean Society for Computational Fluids Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 82-87, 2011.
- [2] H. S. Lee, C. W. Cho, J. P. Won, M. Y. Lee, "Performance Characteristics of the Thermal Management System for Passenger Hydrogen Fuel Cell Vehicle" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 3, pp. 986-993, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.986>
- [3] S. J. Park, D. H. Hung, "Design of vehicle cooling system architecture for a heavy duty series-hybrid electric vehicle using numerical system simulations", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME, Vol. 132, No. 9, 092802. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4000587>
- [4] K. H. Kim, B. S. Han, Y. B. Yang, KEIT PD Issue report, pp. 61-83, Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, 2012
- [5] J. P. Won, H. S. Lee, "The Need to Develop Thermal Management System Technologies of Electric Driven Vehicles (EV, PHEV, FCEV)", Auto Journal, Vol. 33, No. 12, pp. 22-28, 2011.
- [6] M. Y. Lee, "Thermal Management of the Motor/Battery System for Electric Driven Vehicles (VTMS)", Auto Journal, Vol. 33, No. 12, pp. 36-41, 2011.
- [7] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, M. Pecht, "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles", Energies, Vol. 4, No. 11, pp. 1840-1857, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en4111840>
- [8] J. W. Choi, G. Y. Cho, J. H. Park, J. H. Lim, H. C. Jeong, S. W. Cha, "Effects of Battery Thermal Management System in EV Based on Simulation", Proceedings of the KSAE 2011 fall annual Conference, pp. 2617-2621, 2011.
- [9] J. Y. Han, S. S. Kim, S. S. Yu, "Lithium-ion battery thermal management two-dimension modeling for hybrid vehicles thermal management", Proceedings of the KSAE 2012 fall annual Conference, pp. 2338-2343, 2012
- [10] M. Flik, T. Heckenberger, S. Edwards, P. Kroner, "Thermal Management For Hybrid Vehicles", Technical Press Day 2009, 2009
- [11] B. Pfeifer, C. Ghiu, "Industry Developments : EV Battery Thermal Management", Qpedia, 2013, <http://www.coolingzone.com>, July 2013
- [12] X. Hu, "Battery Thermal Management in Electric Vehicles", ANSYS, 2013, <http://www.ansys.com>
- [13] U. S. Kim, "A study on the thermal behaviors of lithium-ion batteries for electric vehicle applications", Doctor Thesis, Ajou University, 2013.
- [14] C. H. Park, S. J. Kim, H. S. Hwang, H. G. Lee, "Development of a battery management system(BMS) simulator for electric vehicle(EV) cars", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 6, pp. 2484-2490, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.6.2484>
- [15] J. C. Jang, S. H. Rhi, S. K. Kim, "Electric Automotive Battery Cooling System with Heat pipe", Proceedings of the KSME 2010 fall annual Conference, pp. 2596-2600, 2010.
- [16] J. S. Lee, "Thermal modeling of a lithium-ion battery pack", Master Thesis, Ajou University, 2010
- [17] H. S. Song, "A Study on the Modeling and Efficient Operating Condition of the Liquid-cooled Battery System for RE-EVs", Doctor Thesis, Korea University, 2013.
- [18] J. W. Choi, "Development of a Thermal Management System Model and a Capacity Fade Model for Li-ion Batteries in Electric Vehicles", Master Thesis, Seoul National University, 2013.
- [19] S. J. Park, "Simulation on thermal management system in hybrid and electric vehicle", SAREK Journal, Vol. 42, No. 10, pp. 48-57, 2013

김 대 완(Kim, Dae-Wan)

[정회원]



- 2008년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (박사과정)

&lt;관심분야&gt;

친환경 자동차 열관리, 신재생에너지, 자성유체

**이 무 연**(Lee, Moo-Yeon)

**[정회원]**



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품 연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환 시스템, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체, 자성유체