

## 전기자동차용 배터리 팩 주위의 유동장 해석

김 현 수,<sup>1</sup> 한 병 윤,<sup>1</sup> 박 형 구\*<sup>2</sup>

### FLOW ANALYSES AROUND THE BATTERY PACK FOR A NEV

H.S. Kim,<sup>1</sup> B.Y. Han<sup>1</sup> and H.K. Park\*<sup>2</sup>

*The battery pack, a main component of NEV(Neighborhood Electric Vehicle), needs cooling system when it is charging or discharging to prevent the degradation of the battery charging efficiency. The purpose of this study is to analyse the effects of cooling methods, changing positions of inlet and outlet and changing area ratios of inlet and outlet. It has been observed that in the point of uniform cooling, suction from the exit side is more efficient than blowing from the inlet. And there is a suitable inlet/outlet area ratio in maximizing the mass flow rate. A commercial code, STAR-CCM+(ver. 4.02), was used for the numerical study.*

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 저속전기차(NEV), 배터리 냉각(Battery cooling), 강제대류(Forced convection)

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 친환경 수송수단에 대한 관심이 높아지면서 연비향상과 이산화탄소 배출량을 감소를 목적으로 하이브리드자동차(HEV), 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV), 저속전기차(NEV) 및 전기자동차(EV)가 개발되고 있다.

저속전기차(NEV)는 차체의 경량화 및 소형화를 통해 소모 전력을 줄여 근거리 운행을 목적으로 하고 있으며, 동력으로 배터리만을 사용한다. 탑재되는 배터리의 종류는 Li-ion, Ni-MH 등이 있으며 종류에 따라 그 정도는 다르나, 충방전 과정에서 전자의 이동에 따른 발열현상 및 압력상승이 관찰되며, 특히 양극판과 음극판이 용접에 의하여 접합되는 극주 지점에서 전자의 이동이 집중되어, 충전전류가 높아짐에 따라 전자이동의 집중에 의한 발열이 심화되어 고온부가 형성된다. 다수의 단일 배터리 셀로 구성된 배터리 팩이 적용되므로, 안정적이며 지속적인 성능유지를 위하여 배터리팩의 냉각은 중요하며, 특히 고 전류 충방전의 경우 극주 부분의 발열집중을 고려한 유로 설계가 필요하다.

배터리 발열 및 냉각의 다양한 연구는 국내 및 국외에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, NREL의 경우 각 HEV 차량 배터리의 다양한 운전조건에서의 발열특성을 연구하고 있다.

Pesaran[1]는 배터리 다양한 냉각방식의 소개와 함께 배터리 냉각에 대해 유동장 및 온도장 해석을 통해 온도분포 등을 분석하였으며, Kizilel외 3인[2]은 HEV용 배터리의 Active Air Cooling System과 PCM(Phase changing materials)을 비교 분석하였다. Yu외 3인[3]은 주기적인 충전 및 방전과정에서의 온도상승을 분석하고, 이를 CFD를 통해 최적화 하는 방법 및 결과를 제시하였다.

이 연구는 현재 개발 중인 저속전기차(NEV)에 탑재를 목적으로 설계된 Ni-MH 배터리를 대상으로 수행되었으며, 배터리 팩에서 단일 배터리 내 고 전류 충방전에서 극주 부분의 발열 집중을 가정하였다. 연구 목적은 동일 극주 부분의 발열 집중 배터리에 대하여 효과적인 유로 설계의 영향을 파악하여 기초자료로 활용하고자 한다. 차량 구조상 배터리 팩 장착 위치의 제한에 의해 차량 바닥에 장착되며, 더불어 방수 및 방진 조건 충족되어야하므로, 외부환경에의 노출이 적어야한다. 냉각성능의 평가 기준은 입구 위치 및 크기를 변화시켜 이에 따른 온도분포 및 배터리 사이의 체널과 상부 빈 공간에서의 속도차이를 정성적으로 비교하였으며, 질량유량 차이와 최고온도 차이를 정량적으로 비교해보았다. 전산해석에는 CFD 상용코드인 'STAR-CCM+'이 사용되었다.

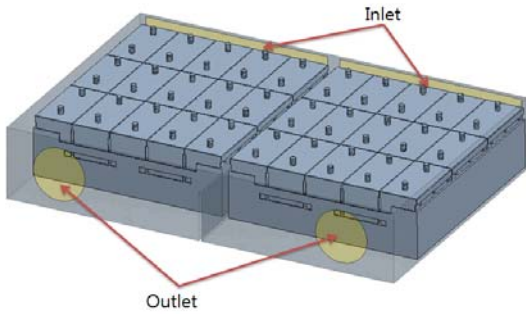
접수일: 2011년 7월 15일, 수정일: 2011년 9월 16일,

계재확정일: 2011년 9월 19일.

1 정회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 전남대학교 기계시스템 공학부

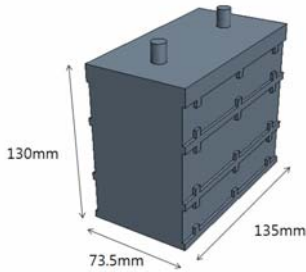
\* Corresponding author, E-mail: park@chonnam.ac.kr



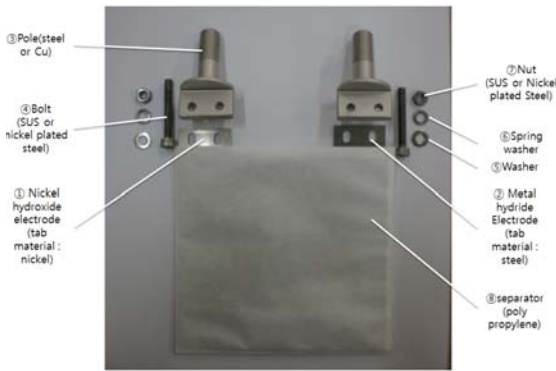
(a) Schematic shape of battery pack



(b) Position of inlet



(c) Dimensions of battery



(d) Elements of battery

Fig. 1 System of battery pack

## 2. CFD 해석 모델 및 조건

### 2.1 배터리 해석 모델

이 논문에서 전산해석 수행에 사용된 모델은 60Ah급 니켈 메탈 하이드라이드 배터리(Ni-MH battery)로서 3×5 형태의 모듈 2개로 구성된 배터리 팩이며, 단일 배터리 셀의 크기 및

전체 해석 모델의 형상은 Fig. 1과 같다. 배터리 내부의 양극, 음극 사진에서 너트와 볼트의 체결부위에 해당하는 용접 부위를 발열부(energy source)로 가정하였다.

배터리 셀 표면에 접해있는 케이스는 방수 케이스로서 Fig. 1에서 보이는 직사각형의 유동통로가 입구(Inlet) 방향에도 설치되어있으며, 하단 부분에서는 유동장이 형성되지 않게 된다. 단일 배터리 셀의 외부 재질은 폴리프로필렌이며, 내부는 양극판과 음극판 및 격리판(separator), 전해액(electrolyte)으로 구성되어있으며, 내부 물질의 형상 및 물성치를 모두 고려하는 것은 비효율적이므로 내부발열부와 그 외 배터리 구성 부분을 구분하여 해석조건을 부여하였다. 실제적으로 배터리내부에 들어가는 30~40장의 마이크로 미터 단위의 양극판과 음극판, 격리판 및 전해액을 모두 고려하여 해석을 하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 형상 단순화를 고려하였으며, 열전도도 계산을 통해 이러한 형상단순화가 실제적 현상에 최대한 부합하도록 하여 그 영향을 최소화하고자 하였다. 첫 번째 해석 변수로 출구(Outlet)의 크기를 배터리 하단방향으로  $0.007m^2, 0.0014m^2, 0.0021m^2, 0.0028m^2$ 로 증가시켜 입구(Inlet) 면적변화에 따른 질량유량과 이에 따른 온도장 및 정상상태에서 동일 전열량에 따른 평균온도 및 최고온도 차이를 분석하였다. 두 번째 해석 변수로  $0.0028m^2$  크기의 입구 위치를 상단, 중단, 하단으로 변화시켜 이에 따른 입구위치에 따른 온도장을 분석하였다.

### 2.2 지배방정식 및 난류 모델

발열하는 배터리 해석은 고체내부의 전도해석과 외부 유체에 의한 대류를 모두 고려하여야 하며, 외부유체의 경우 27℃ 공기이다. 입구영역에서 배터리 상부로의 급격한 유로 축소로 속도가 빨라지는 구간의 레이놀즈 수(Reynolds Number)는, 직사각형 형태의 덕트(Duct) 내 내부유동으로 고려하였을 경우 4100이상이며, 배터리 주위 유동에서의 레이놀즈 수가 전반적으로 3500에서 4100 사이이므로, 이에 따라 난류유동을 가정하였다. 일부 고체 영역의 경우 발열조건은 극주 부분에서 발열량은 배터리 5C 고전류 충전 시 입력에너지에서 충전량에 대한 전기에너지 차를 발열에너지로 간주하여 이를 계산한 결과값 75W로 설정하였으며, 고체 영역 내부의 열전도도(Thermal conductivity)는  $8.0 W/mk$ 로 가정하였다[4]. 모든 물성 값은 일정하며, 중력, 점성소산 및 복사 열전달 효과는 무시하였다. 이러한 가정 하에 지배방정식을 나타내면 다음과 같다.

Fluid region (air)

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

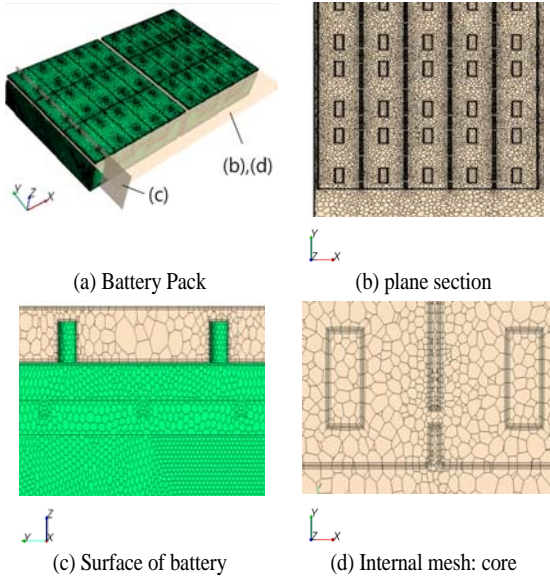


Fig. 2 Mesh generation

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{k_f}{C_{p,f}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i' T_j'} \right] \quad (3)$$

Solid region (battery)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_b \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{Q} = 0 \quad (4)$$

식 (1)은 연속방정식, 식(2)는 운동량 방정식, 식(3)은 에너지 방정식, (4)열전도 방정식이다. 여기서  $-\overline{\rho u_i' u_j'}$  는 레이놀즈 응력을,  $-\overline{\rho u_i' T_j'}$  는 난류 열 유속을 의미한다.[5] 난류 모델은 난류 경계층의 벽면효과를 잘 묘사하는 것으로 알려진 Realizable K-Epsilon 모델을 사용하였다. 난류운동에너지 k와 난류소산율  $\epsilon$  은 식(5)와 식(6)에서 도출된다.

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \epsilon)}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_1 \rho S \epsilon - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $C_1 = \max[0.43\eta/(\eta+5)]$ ,  $\eta = Sk/\epsilon$  이며,  $C_2$ 는 상

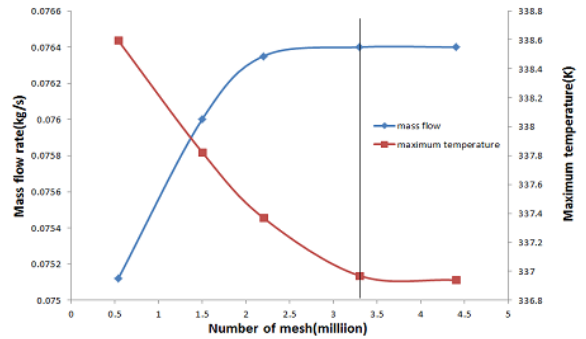


Fig. 3 Mesh adaptation for mass flow rate and maximum temperature

수,  $\mu_t$ 는 난류 와 점성계수,  $G_k$ 는 평균 속도구배에 의한 난류 운동에너지 발생  $G_b$ 는 부력 등에 의한 난류 운동에너지의 발생을 의미하며,  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\epsilon$ 은 난류 Prandtl 수이다.

### 2.3 격자생성 및 계산조건

배터리 외부의 유동해석과 더불어 배터리 내부의 전도해석도 함께 계산되어야하므로 내부와 외부 모두 격자를 생성했으며, 고 전류 충방전을 가정하여 발열이 집중되는 영역을 배터리 내부에 설정하였다. Fig. 2의 내부 격자(Internal mesh)에서 내부발열가정부(core)가 이에 해당한다. 이 연구에서는 ‘STAR-CCM+’의 격자 생성 기능을 이용하였으며, 각 해석에 대해 약 3,300,000개의 격자를 생성하였다.

격자생성기준은 격자 개수에 따른 질량유량과 최고온도의 변화를 확인하는 것이며, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 3,300,000개의 격자를 생성하였을 때 그 변화가 없음을 확인하였다.

해석모델의 대기압 조건의 입구에서 유입된 공기는 배터리 상단부와 방수케이스의 일부 유입구를 거쳐 출구로 배출이 되며 출구에서의 조건은 125mm\*125mm 축류 팬에 의한 생성되는 압력 차이를 계산하여 이를 적용하였다. 이때 팬의 전후면 압력차 값인 50.4Pa을 경계조건으로 적용하였다.

배터리와 유체의 접촉면은 점착조건(No-slip condition)과 온도연속조건으로 주었으며, 그 외 전체해석영역의 경우 점착 조건과 단열조건을 주었다. 또한 압력보정을 위한 계산방법으로 SIMPLE 알고리즘[6]이 사용되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 입구 크기 변화에 대한 온도장 비교

Fig. 4는 310K에서 345K의 동일한 온도 스케일이 적용된 해석결과로서, 배터리팩을 상부 표면을 나타낸 그림이다. 입

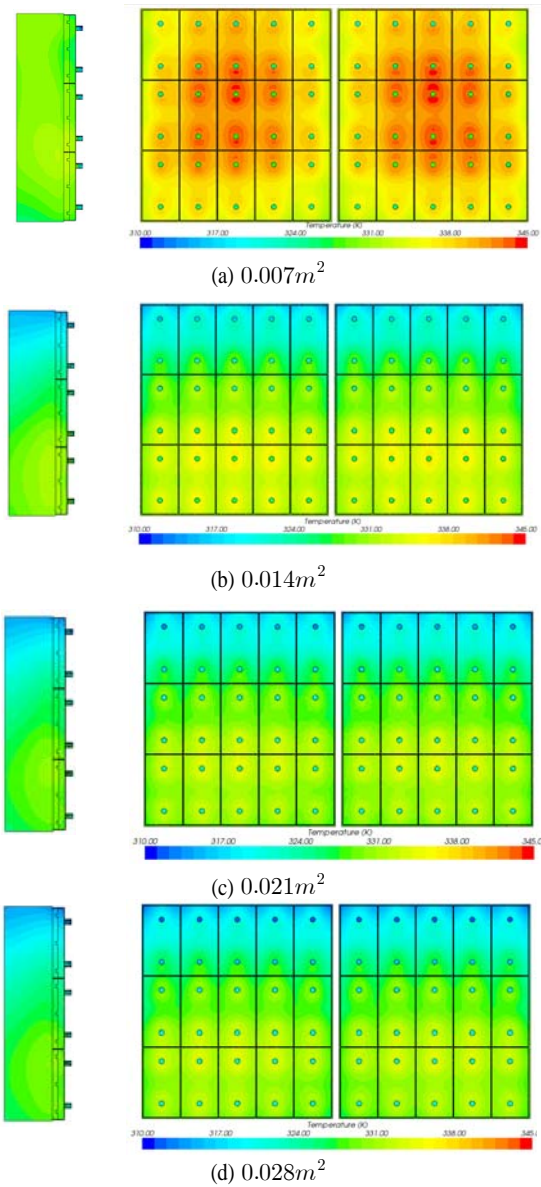


Fig. 4 Temperature distributions for various inlet areas

구 면적 변화에 따른 온도장을 비교해 볼 때, 입구면적이 (a)  $0.007m^2$ 에서 (b)  $0.014m^2$ 로 증가함에 따라 배터리 상단의 표면온도 차이가 확연함을 알 수 있다. 특히 (a)  $0.007m^2$ 의 경우 매우 적은 유량이 빠른 속도로 입구 측에서 진입하게 되어 출구보다 입구의 온도가 상대적으로 높아지며, 온도분포로부터, 유체에 의해 원활한 냉각이 일어나지 않음을 확인할 수 있다. 반면 (c)  $0.021m^2$ 와 (d)  $0.028m^2$ 에서 확인할 수 있

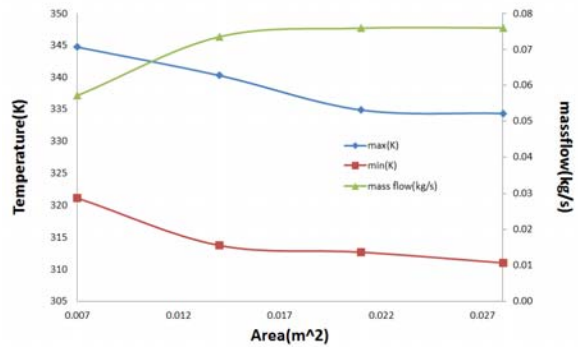


Fig. 5 Variations of temperature and mass flow rate for various inlet areas

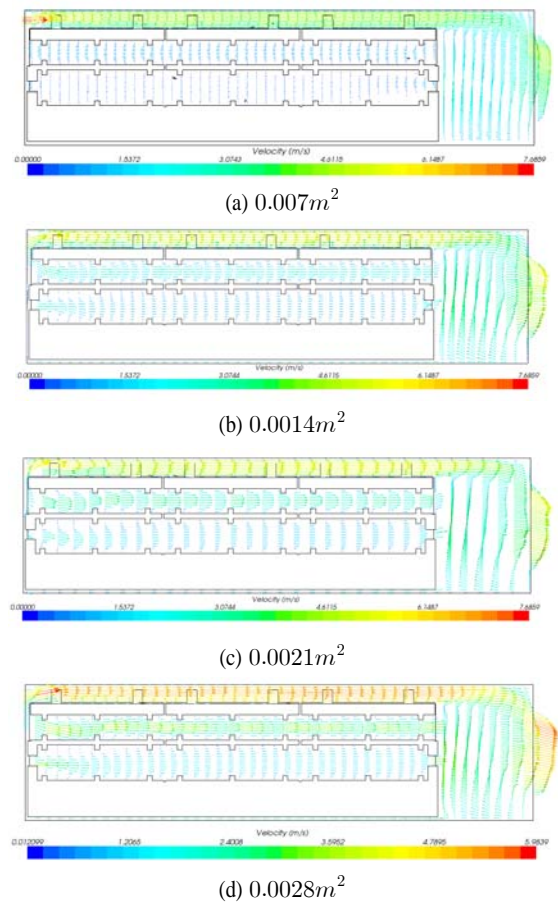


Fig. 6 Velocity plots for various inlet areas

듯 입구면적 증가했으나 유체가 가져가는 전열 량의 차이가 크지 않아 전반적인 온도분포에 큰 영향을 주지 않으며, 입구 측의 국소적인 온도 강하만을 확인할 수 있다. 이는 배터리

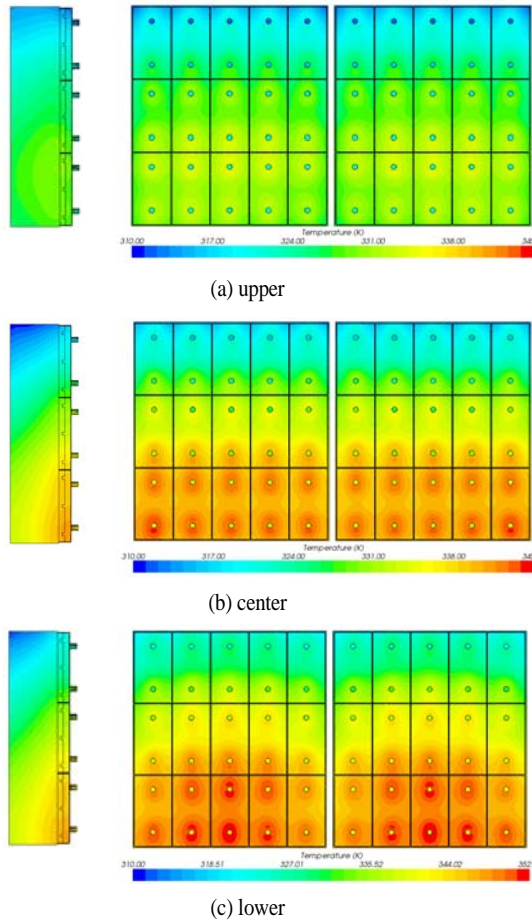


Fig. 7 Temperature distributions for various inlet positions

냉각에 입구크기의 증가가 더 이상 효과적이지 않음을 의미하며, 차량 설계상 하부의 방수 방진을 위해선 (c)  $0.021m^2$ 의 경우가 적합함을 생각해볼 수 있다. 질량유량과 연관 지어 생각해볼 때 질량유량이 수렴함에 따라 최고온도 지점 및 전체적인 온도분포가 크게 차이가 없게 되며 이는 단순히 유량을 늘리는 것이 효과적이지 않다는 것을 의미한다. 따라서 냉각에 필요한 적절한 유량이 있음을 알 수 있다. 이러한 온도차이가 발생하는 원인은 입구 크기가 커짐에 따라 질량유량이 증가함과 동시에 입구 부분에서 유입부분의 유로 형상 변화에 기인한 것으로 고려된다. 이는 상부로의 유동이 원활하게 하였으며, 채널 내 유량도 증가시키게 되며, 측면에서의 온도 분포 변화를 통해 알 수 있다.

Fig. 5로부터 배터리 팩에서의 최고온도와 최저온도가 입구면적이 증가함에 따라 계속적으로 감소하지 않고 일정 수준에서 수렴함을 알 수 있다.

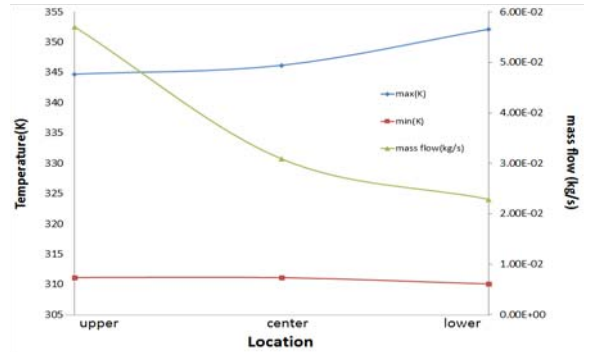


Fig. 8 Variations of temperature and mass flow rate for various inlet positions

### 3.2 입구 크기 변화에 따른 속도장 비교

Fig. 6은 배터리 사이 채널에서 유동을 보여주며 (a)  $0.007m^2$ 에서는 유체의 초기 진입속도가 매우 크게 되어 이로 인해 배터리 사이의 채널 유동이 출구 쪽으로부터 진입하게 되어 많은 압력강하가 발생하게 되는 좋지 않은 유동 예를 보여주고 있다. (b)  $0.014m^2$ 에서 (d)  $0.028m^2$ 로 입구 면적이 배터리 하부 방향으로 증가함에 따라 채널로의 유동이 입구 쪽에서 출구 쪽으로 형성됨을 확인 할 수 있으며, 채널 내 유동속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 속도분포의 측정위치는 Fig. 2의 (a)에서 표시된 (c)면으로부터 +x 방향으로 36.75mm 떨어진 배터리와 배터리 사이의 면을 나타내며, 채널의 폭은 4mm이다.

### 3.3 입구 위치 변화에 따른 온도장 비교

Fig. 7의 확인할 수 있듯 최고온도 및 온도분포가 다르며, 발열이 집중되는 극주 부분이 상대적으로 배터리 상단에 위치해 있으므로 입구위치가 상단에 있게 되면, 상대적으로 중, 하단에 입구가 위치하는 경우에 비해 냉각에 유리함을 알 수 있다. 유동저항이 없는 팩 케이스 상부 쪽으로 유동이 대부분 형성되기 때문에 입구위치가 바닥면에 근접할수록 팩 케이스의 상부 쪽으로 유동이 진행할 때 매우 큰 압력강하가 예상된다. 이는 유동저항의 증가로 볼 수 있으며, 이러한 유동저항의 증가로 인해 질량유량의 감소가 발생하며, 이는 Fig. 8 질량유량변화 그래프로도 알 수 있다.

이러한 질량유량 감소로 냉각효과가 감소되면서 배터리 고온영역이 상대적으로 확대될 또한 알 수 있다. 입구위치에 따라 최저온도의 경우 냉각이 가장 잘 되는 부분이 입구 측, 가장 발열 집중의 영향이 적은 하단부분에서 최저온도 지점이 형성됨을 확인할 수 있었다.

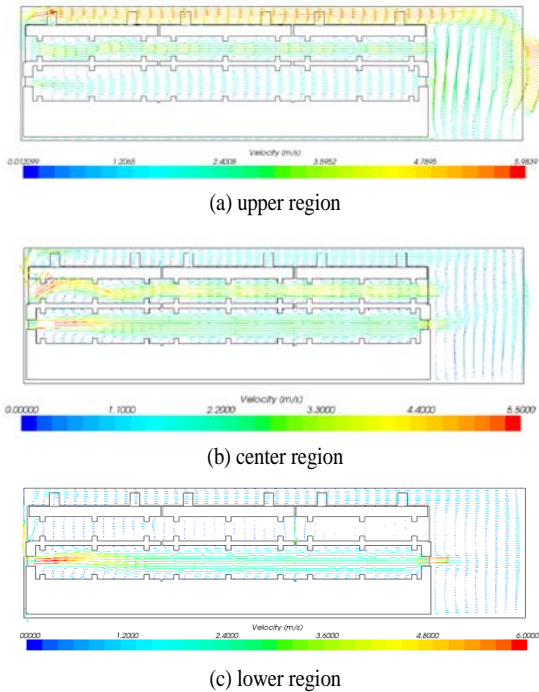


Fig. 9 Velocity plots for various inlet positions

### 3.4 입구 위치 변화에 따른 속도장 비교

Fig. 9에서 확인할 수 있듯 (b)의 경우 채널 내 유속이 빨라 채널로 진입하는 유량이 많음을 예상할 수 있으나 입구가 상단에 위치하는 (a)의 경우에 비해 채널에서의 냉각보다는 배터리 상부표면에서의 냉각이 보다 효과적임을 Fig. 8의 최대온도 변화와 연관 지어 생각해 볼 수 있다. 특히 입구를 하단에 설치 할 경우 상단으로 유동이 원활하지 않게 되어 냉각효과가 확연히 감소함을 예상할 수 있다.

## 4. 결 론

이 연구는 상용코드인 STAR-CCM+ Version 4.02를 이용하여 현재 개발 중인 Ni-MH 배터리 팩에 대하여 입구면적변화와 입구위치에 따른 유동해석에 대한 결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고 전류 충방전의 경우 발열집중현상을 고려하여 입구

면적에 따른 변화를 분석한 결과 일정 면적이상에서는 입구면적이 증가함에 따라 질량유량이 선형적으로 증가하지 않고 일정수준에서 수렴함과 질량유량 수렴에 따른 냉각효과 정체를 확인할 수 있었다.

2) 입구위치 변화에 따라 질량유량의 변화가 있었으며 채널로 내 유동과 상부표면에서의 냉각효과 비교가 필요함을 알 수 있었으며, 제한된 설계 조정 범위 내에서 적합한 입구위치 선정 중요성을 확인할 수 있었다.

3) 향후 고온부 부근에 추가적인 입구를 설치 할 경우 냉각효과가 상승을 예상할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 호남 광역 경제권 선도 산업 육성사업단의 고효율 저공해 친환경 하이브리드 자동차 부품소재 육성사업의 지원으로 수행된 연구결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2001, Pesaran, A.A. "Battery thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions", Advanced Automotive Battery Conference NREL 1617 Cole Blvd. Golden, Colorado 80401.
- [2] 2009, Kizilel R. Sabbah, R. Selman, J.R. Al-Hallaj, S. "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs", *Journal of Power Sources*, Vol 194, pp.1105-1112.
- [3] 2008, Yu, L.J. Qin, Peng, M.J. Zhy, Yang, L. "Numerical simulation and optimization of nickel-hydrogen batteries", *Journal of Power Sources*, Vol 179, pp.848-853.
- [4] 2010, 장인형, 외2인, "HEV 배터리 Module의 Case에 따른 강제 냉각 해석, 대한기계학회 춘계학술대회 pp.252-257
- [5] 1995, Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Longman, pp.41-84
- [6] 2007, Tao, Y.B. He, Y.L. Huang, J. Wu, Z.G. and Tao, W.Q. "Numerical study of local heat transfer coefficient and fin efficiency of wavy fin-and tube heat exchangers," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.46, pp.768-778.