

RSM 방법에 의한 리튬이온 배터리 팩의 최적 설계

주강우 · 장경민 · 김광선[†]

[†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Study on Optimization of Li-ion Battery Pack Design by RSM

Kangwo Joo, Kyungmin Jang and Kwang sun Kim[†]

[†]KOREATECH School of Mechatronics Engineering

Abstract

This paper is to derive information about the optimal shape of the pack has a minimum temperature range of a Li-ion battery equipped with a module. We selected the shape of the pack in order to reduce the temperature deviation between the batteries as a variable. And we derived the experimental points with a minimum of DOE by D-optimal. We analyzed the temperature and the flow within the battery pack by using a numerical analysis verified in previous studies. We derive the equation for the temperature variation in the objective function using the RSM and performed optimization. As a result, it was confirmed that with the variation in the 1.706e-4°C when to apply an optimized shape.

Key Words : Li-Ion Battery, Optimization, DOE, RSM

1. 서 론

최근 스마트폰 노트북, 캠코더 등 고성능 휴대용 반도체 기기가 상품화 되면서 리튬이온 배터리의 방열 문제가 이슈화되고 있다. 배터리 팩의 방열 문제는 배터리의 수명 및 기기의 동작에 직접적인 영향을 미치기 때문에 필수적으로 연구해야 하는 분야이다. 본 연구에서는 배터리 팩을 구성하는 기본 단위인 배터리 모듈에서 팩의 공기 통로의 형상을 최적화하여 방열을 최소화 할 수 있는 형상을 제안하였다. 선행연구에서 특정 방전율에 해당하는 방열값 검증 및 기본 형상의 팩에 대한 수치해석을 진행하였다[1-2]. 팩의 온도 해석은 수치해석 상용 패키지 프로그램인 Star-CCM+ 9.02를 사용하였고, 실험계획은 MINITAB 14를 이용하였으며, 최적화는 AMESim의 Design Exploration 분석 도구를 활용하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 지배방정식

배터리 주위의 유체의 유동 특성에 영향을 주는 종

속 변수들은 일반화된 보존 원리를 따르게 된다. 각각의 종속 변수들을 통칭하여 ϕ 로 두면, 이러한 보존 원리는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mu\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + Z \quad (1)$$

Γ 와 Z 는 종속변수 ϕ 의 의미가 특정될 때, 이에 대응하는 양으로 각각 확산계수와 생성항을 표현한다. 위의 일반형 미분식은 좌측부터 시간항, 대류항, 확산항, 그리고 생성항이다. 모든 확산 플럭스는 관련 변수의 구배에 의하여 지배되는 것은 아니며, 확산항으로 $\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)$ 를 사용한다고 해서 반드시 ϕ 의 방정식이 구배에 의한 확산일 필요는 없다. 형식상 확산항에 알맞지 않은 것은 Z 의 일부분으로 처리할 수 있으며, 필요에 따라 확산계수 Γ 는 0이 될 수도 있다.

2.1.1. 연속방정식

식 (1)에서 종속 변수 ϕ 가 1인 경우, 연속방정식으로 표현된다. 수치해석에서 유동장은 질량 보존 또는 연속 방정식으로 표현되는 구속 조건을 반드시 만족해야 하며, 식 (2)와 같이 표현된다.

[†]E-mail : kskim@koreatech.ac.kr

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu) = Z \quad (2)$$

식 (2)는 압축성 유동뿐만 아니라 비압축성 유동에서도 적용되며, 이 때 생성항은 추가적으로 발생하거나 소멸되는 질량을 의미하고, 본 연구에서는 0으로 간주한다.

2.1.2. 운동량방정식

뉴턴 유체에 관하여 주어진 방향에 대한 운동량 보존을 지배하는 미분 방정식을 비슷한 방법으로 나타낼 수 있으나, 전단응력과 수직응력이 고려되어야 하며, Stoke의 점성법칙은 Fick의 법칙이나 푸리에의 법칙에 비해 복잡하기 때문에 운동량 방정식은 에너지 방정식에 비해 식 자체가 복잡하다. 식 (1)의 ϕ 가 속도 성분이며, u 가 x 방향의 속도일 때, 이에 관한 운동량 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + B_x + V_x \quad (3)$$

여기서, μ 는 점성계수, p 는 압력, B_x 는 단위 체적당 x 방향의 체적력, V_x 는 $\nabla(\mu \nabla u)$ 외에 추가되는 점성력의 항이다.

2.1.3. 에너지방정식

식 (1)로부터 얻어진 에너지 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} u + \frac{\partial T}{\partial y} v + \frac{\partial T}{\partial z} w \right) = \nabla \cdot k \nabla T + Z \quad (4)$$

여기서, c_p 는 정압비열이며, T 는 온도이다. 열플럭스는 전도와 수송에 관한 2개의 항으로 나타난다. 수송에 관련된 부분이 존재하지 않는다면 열플럭스는 전도항만 존재($F = -k \nabla T$)하게 된다. k 는 열전도도이다[3].

2.2. 최적화 기법

본 연구에서 최적화된 배터리 팩의 형상을 도출하기 위하여 RSM 방법을 사용하였다. 일반적인 실험 계획법에서 찾아지는 최적조건은 실험 전에 정한 인자들의 수준 조합 중 하나가 되는 제약이 따른다. 예를 들어, 인자가 전압인 어떤 실험에서 각 수준의 특성치가 Fig. 1(a)와 같다면 최적조건은 20 V가 될 것이다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 20 V보다 낮은 어떤 전압이 될 가능성이 있다.

인자가 1개 이상인 경우, 각 인자에 따른 추정치를 3차원 공간에 나타내면 이 값들은 어떤 곡면 상의 점들

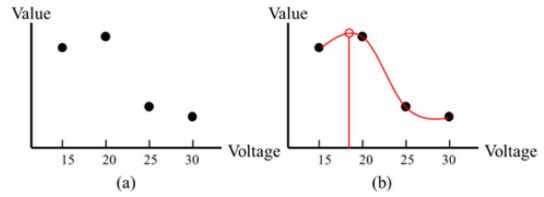


Fig. 1. Optimization Value.

로 표현될 수 있다. 이때, 추정치들이 지나가는 선 또는 면을 반응 표면(response surface)라 하고 이 면 상의 최대 또는 최소에 해당하는 점을 찾아 최적 조건으로 삼는 것이 RSM 방법이다. 대부분의 반응 표면에서, 곡면의 근사 함수는 다항식의 조합으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 부드러운 곡면을 형성하기 위해 반응 곡면을 2차 다항식으로 가정하였으며 식(5)에 2차 다항 모형을 나타내었다.

$$C = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

C 는 목적함수가 되며 β_i 는 별도로 결정해야 하는 계수이다. k 는 설계 변수의 개수를 나타낸다. 이 때 필요한 β_i 의 개수는 식 (6)에 의해 결정할 수 있다[4].

$$\text{number}_{\beta} = (k+1)(k+2)/2 \quad (6)$$

3. 수치해석

3.1. 해석 모델 및 격자 생성

수치해석을 위한 기본 형상은 Fig. 2와 같다. 챔버 내부에 배터리 팩이 중심부에 위치하여 대칭형상을 띠

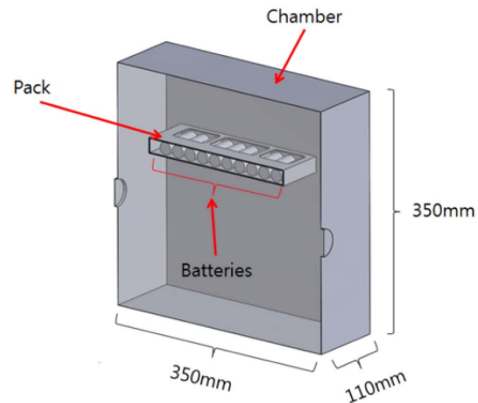


Fig. 2. Physical model.

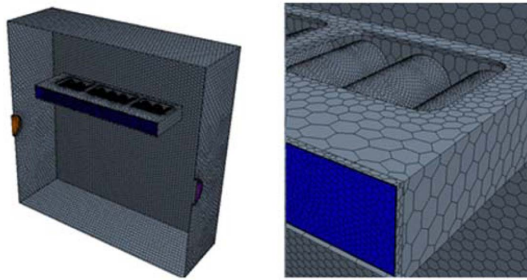


Fig. 3. Mesh Generation.

고 있다. 따라서 해석시간의 단축 및 용이성을 위하여 1/2 모델을 사용하였다.

기본 형상을 바탕으로 Polyhedral Mesher를 이용하여 Fig. 3과 같이 다면체 격자를 생성하였으며, 격자수는 형상에 따라 차이가 있었지만 약 45만개 내외로 측정되었다.

3.2. 기본 경계 조건

해석에 사용된 조건을 Fig. 4 및 Table 1에 나타내었다.

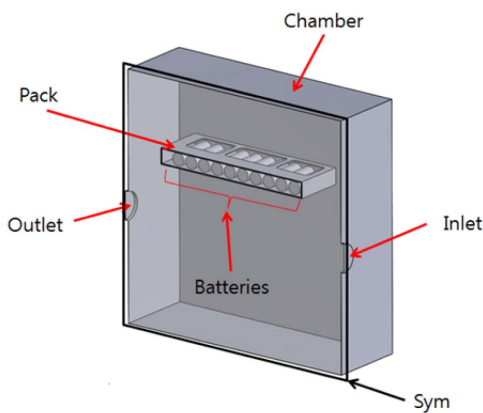


Fig. 4. Boundaries.

Table 1. Boundary conditions.

Boundary	Condition
Inlet	Atmosphere
Outlet	
Sym	Symmetry plane
Pack	Adiabatic
Chamber	
Batteries	2.0 C-Rate
Initial temperature	25°C

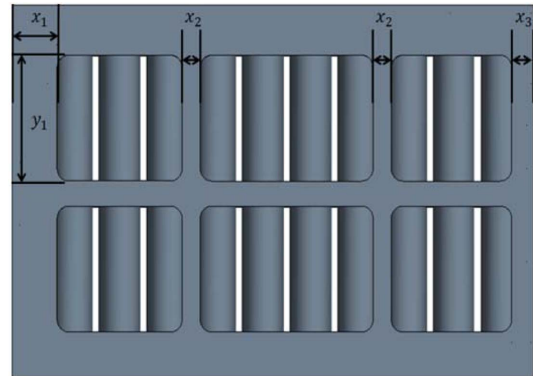


Fig. 5. Pack module and variables.

3.3. 설계 변수 설정 - 실험계획법

배터리 모듈은 ESS 및 중대형 배터리팩의 기본 단위가 되는 부품이며 그 자체로 하나의 전지팩으로 사용된다. 따라서 모듈 단계에서 쿨링 성능은 매우 중요하다. 모듈에서는 배터리 간의 간격 및 외부 공기 순환이 이루어지는 공간이 쿨링 성능에 중요한 인자이다. 그러나 모듈 자체의 크기가 제한되어 있고, 해석 대상이 되는 모듈의 경우 배터리 간격이 매우 좁으므로 본 연구에서는 배터리 간격은 변수에서 제외하도록 한다. Fig. 5에 모듈과 변수를 도시하였다. 배터리 모듈은 공정상 상하가 대칭으로 이루어지므로, 상단의 공기통로 3개에 대하여 그 크기를 정하는 변수를 각각 x_1 , x_2 , x_3 , y_1 으로 한다.

본 연구에서는 MINITAB의 D-optimal 실험계획법을 통하여 합리적인 결론을 얻을 수 있는 실험을 설계한다[5-6]. 합리적으로 설계된 실험일지라도, 실험 횟수는 상당하며, 이에 대해 실제로 제품을 만들어 보는 것도 무시할 수 없다. 따라서 앞에서 검증된 수치해석 기법을 통하여 그 결과를 얻도록 한다.

Table 2에 4개의 변수에 대한 모든 실험을 표시하였다. Table 4는 모든 실험에 대하여 D-optimal방법을 적용하여 설계한 최적 실험이다. 또한 RSM 방법에서 찾아야 하는 계수의 개수는 식(6)으로부터 15개임을 알고, 이에 따라 15개의 실험점을 택하였다.

4. 해석 결과

앞 절의 경계조건과 Table 2의 실험점에 의거하여 반복 수치해석 한 결과를 Table 3에 나타내었다. 배터리 팩 및 BMS의 운용 측면에 있어서 배터리 간의 온도 편차는 중요한 요소가 될 수 있다. 온도 편차가 클

Table 2. Analysis cases.

No.	x1	x2	x3	y1
1	26.5	21.2	14.5	47.5
3	17.3	39.6	23.7	2.5
4	35.7	39.6	23.7	32.5
5	26.5	58	14.5	17.5
6	35.7	2.8	23.7	32.5
8	35.7	39.6	5.3	2.5
10	26.5	21.2	14.5	17.5
11	26.5	-15.6	14.5	17.5
14	35.7	39.6	23.7	2.5
15	26.5	21.2	-3.9	17.5
16	35.7	2.8	23.7	2.5
23	26.5	21.2	32.9	17.5
26	26.5	21.2	14.5	-12.5
28	17.3	2.8	23.7	2.5
30	8.1	21.2	14.5	17.5

Table 3. Numerical results.

No.	Avr Temp	Temperature Characteristic
1	56.44	9.31
3	78.00	22.95
4	60.06	15.94
5	75.50	30.70
6	54.45	15.01
8	77.71	21.68
10	60.28	12.72
11	58.91	11.18
14	79.71	17.16
15	59.55	13.41
16	69.31	17.07
23	63.69	34.82
26	61.97	13.13
28	67.90	17.29
30	59.54	15.72

수록 방전을 및 냉각 등의 운용이 어렵기 때문이다. 따라서 온도 특성으로써 일정 간격 위치에서의 최대 온도 편차를 측정하였다.

Table 4. Coefficients of RSM equation.

Coefficient	Value
β_0	-11.0000
β_1	0.9484
β_2	0.1884
β_3	-0.3791
β_4	0.6260
β_{11}	-0.0080
β_{22}	0.0035
β_{33}	0.0237
β_{44}	-0.0068
β_{12}	-0.0052
β_{13}	-0.0253
β_{14}	-0.0181
β_{23}	7.434
β_{24}	-0.0004
β_{32}	-7.434
β_{34}	0.0117

5. 최적화

RSM 방법에 의한 최적화를 위해 식(5)를 이용하여 2차식을 전개한 결과 식(7)을 얻었다. 식을 얻는 과정에서 목적함수를 Y로 설정하였기에 설계변수 y1은 x4로 대체하였다. 실험점으로 수행한 수치해석 결과로부터 구한 각 항의 계수는 Table 4에 나타내었다. 계수는 MATLAB R2013a를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned}
 y = & \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 \\
 & + \beta_{33}x_3^2 + \beta_{44}x_4^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{14}x_1x_4 \\
 & + \beta_{22}x_2x_2 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{24}x_2x_4 + \beta_{32}x_3x_2 + \beta_{33}x_3x_4 \\
 & + \beta_{34}x_3x_4
 \end{aligned} \quad (7)$$

최적화는 AMESim의 Design Exploration 분석 도구를 활용하였고, Fig. 6의 결과 화면으로부터 Table 5의 최적 형상을 얻었다. 목적함수의 값은 1.706e-4로써 거의 0에 근접하고 온도편차가 거의 없음을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 온도편차를 최소로 갖는 최적의 배터리팩 형상을 도출하기 위하여 수치해석, 실험계획법 및 RSM 방법을 이용한 최적화 작업을 수행하였다. 그 결

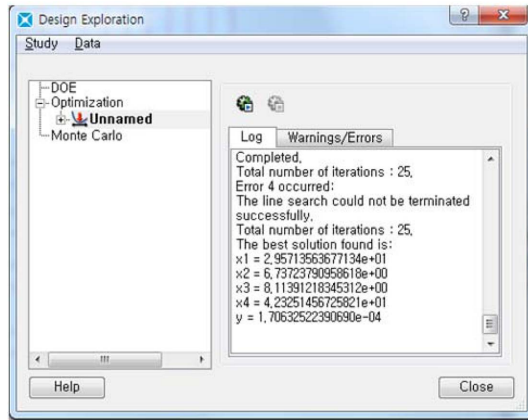


Fig. 6. Optimization result.

Table 5. Optimized design and temperature characteristic.

Variables	x1	x2	x3	y1
Value(mm)	29.57	6.74	8.11	42.33
Temperature Characteristic	1.706e-4°C			

과, 온도 편차가 거의 0에 근접하는 형상을 얻었다. 추후 연구에는 본 논문에서 도출된 형상을 바탕으로 실설계에 적용하여 제작 및 실험으로 검증하는 작업이 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A2A1A01013835)입니다.

참고문헌

1. Jang, H., Jang, K.M., and Kim, K.S., "A Research on the Assessment of Thermal Performance of Energy Storage Li-Ion Battery Pack", *KSSDT*, 13(1), pp.101-108, (2014).
2. Jang, K.M., Choi, K.W., NamGoong, J. E., and Kim, K.S., "A STUDY ON LI-ION BATTERY PERFORMANCE SUBJECT TO CATHODE MATERIALS USING CFD", *IMECE2012-87194*, (2012).
3. CD-adapco, *STAR-CCM+ v9.02 User guide*, (2014).
4. Ravindran, A., Ragsdell, K. M., and Reklaitis, G. V., *Engineering Optimization: Methods and Applications, 2nd Edition*, Wiley, (2006).
5. Park, S. H., and Choi, B. C., *Understand of DOE by SPSS & SAS Analysis*, Min Young Press, (2005).
6. Minitab Inc, *MINITAB User guide*, ISBN 0-925636-49-5, (2003).

접수일: 2015년 2월 27일, 심사일: 2015년 3월 12일,
게재확정일: 2015년 3월 23일