



배터리 팩의 효과적인 냉각을 위한 공기
입구 형상 최적화

AOC2023-TeamKart

목차

A table of contents.

01 배경설명

02 모델링

03 해석

04 최적화

05 결론



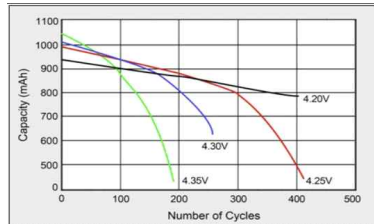
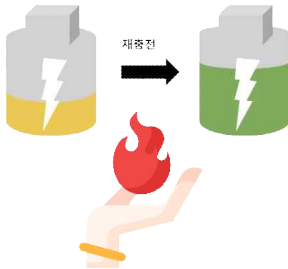
A glowing lightbulb is centered in the frame. The background is a dark gray grid pattern. The lightbulb's glass part is filled with a bright, glowing light that has a yellow-to-white gradient. The text 'Part 1.' and '배경설명' is overlaid on the lightbulb's glass part.

Part 1.

배경설명

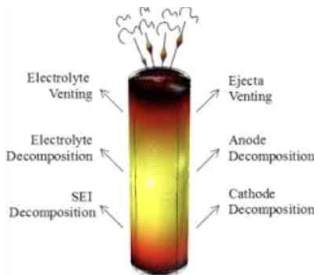
고온의 영향

-배터리의 수명 감소

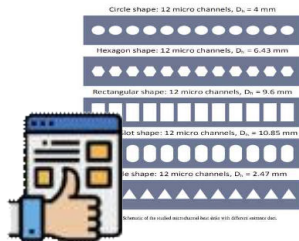


고온의 영향

-열폭주



주제 소개

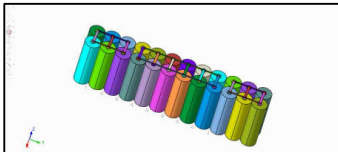




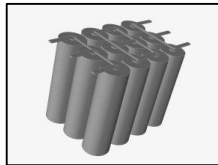
Part 2.

모델링

CAD modeling_배터리 모듈 모델링(수정모델)



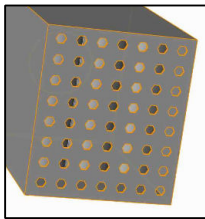
4S6P배터리 모듈



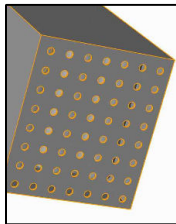
SAMSUNG 21700-40T 4S3P 모듈

CAD modeling_흡입구 형상 4가지

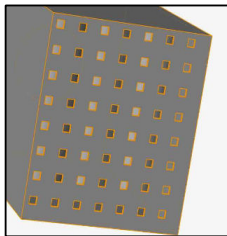
micro channel 의 흡입구 형상에 따른 냉각 효과의 차이를 연구한 논문을 참조하여 흡입구 형상 총 4가지로 결정함.



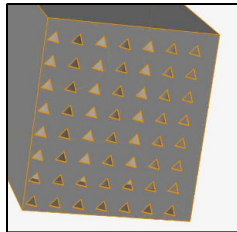
육각형



원형



사각형



삼각형

A glowing lightbulb with a grid overlay, containing the text 'Part 3.' and '해석'. The lightbulb is the central focus, emitting a warm orange glow. The grid is a dark, semi-transparent pattern that covers the entire image, including the lightbulb. The text is white and centered within the lightbulb's glow.

Part 3.

해석

Work Flow



Inspire modeling



Simlab CFD



DOE

DOE



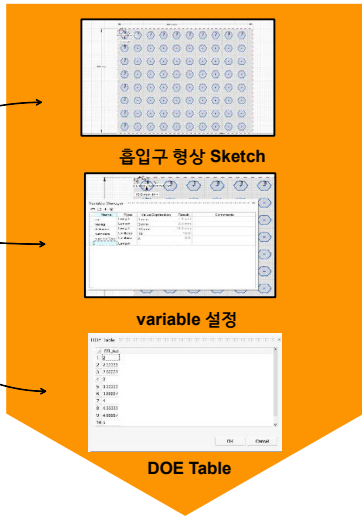
MATLAB

Data Analysis

Work Flow



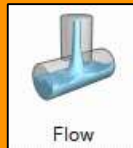
inspire modeling



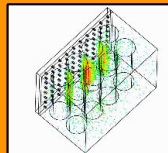
Work Flow



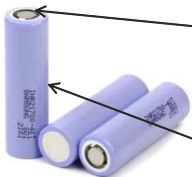
Simlab CFD



Simlab Flow Solution



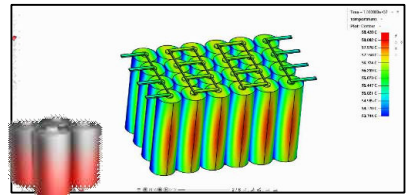
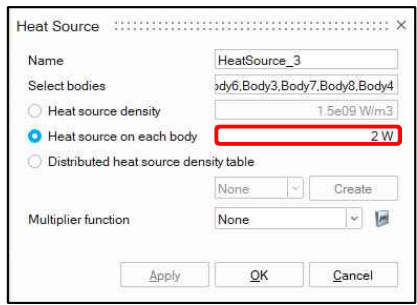
해석 조건 설정_물성치



In-layer-Thermal-Conductivity(W/m^*K) = 0.9 (W/m^*K)

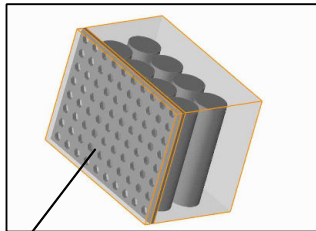
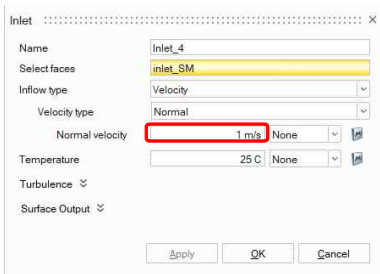
Specific heat Capacity (J/kg^*K) = 900 (J/kg^*K)
Through-layer-Thermal-Conductivity(W/m^*K) = 24 (W/m^*K)
Density(kg/m^3) = 2887 (kg/m^3)

해석 조건 설정_셀의 발열



Battery Pack Solution

해석 조건 설정_초기 유속



Inlet Boundary



Part 4.

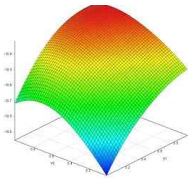
최적화

최적화 단계

초기탐색 과정



변수 영향 측정

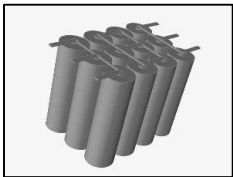


최적 흡입구 형상 탐색

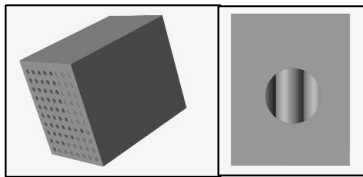


초기 탐색 과정_모델링

초기탐색 과정: 입구 형상과 크기변화에 따른 최적화 가능성을 탐색하는 단계



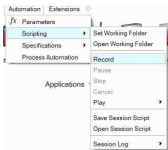
<초기 셀 모델>



<초기 배터리 박스 모델, 배출구>

초기 탐색 과정_해석자동화

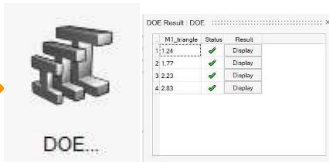
자동화를 위한 Record 기능



Record 기능



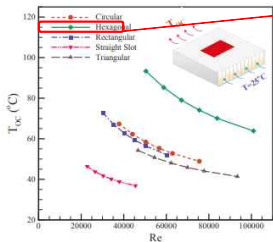
파이썬 Script



실험계획법(DOE)

초기 탐색 과정

실험계획법(DOE)



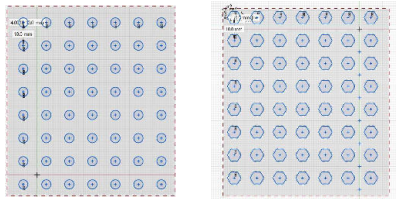
육각형반지름	육각형넓이	구멍전체넓이	원반지름
1	2.598076211	2.598076211	0.564189584
1.33333	4.61877906	6.158356683	0.651469202
1.66666	7.21682063	12.02798627	0.728364164
1.99999	10.39220092	20.78429792	0.797882566
2.33332	14.14491994	33.00462459	0.861811362
2.66665	18.47497767	49.26629922	0.921314853
2.99998	23.38237413	70.14665475	0.977201766
3.33331	28.86710932	96.22302415	1.030060933
3.66664	34.92918322	128.0727404	1.080336874
4	41.56921938	166.2768775	1.128379167

<참고 논문의 결과: 육각형과 원형의 온도 차가 가장 큼>

<흡입구의 실험계획법 >

초기 탐색 과정

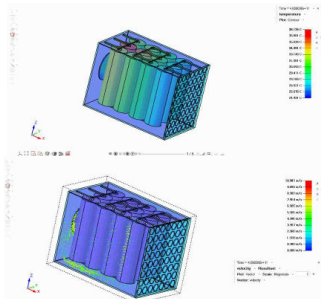
공기가 들어오는 벽면에 총 8행7열 로 흡입구를 등간격으로 배치함.



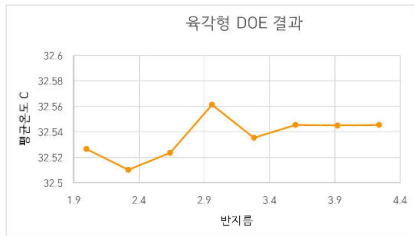
<흡입구 배치 형상>

초기 탐색 과정

해석 결과_육각형



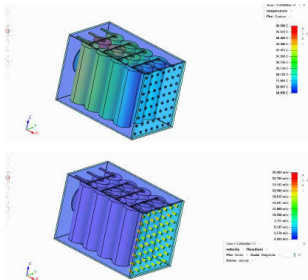
육각형반지름	평균온도
2	32.5266
2.33333	32.5103
2.66667	32.5236
3	32.5613
3.33333	32.5354
3.66666	32.5455
4	32.5451
4.33333	32.5455
4.666	32.5259



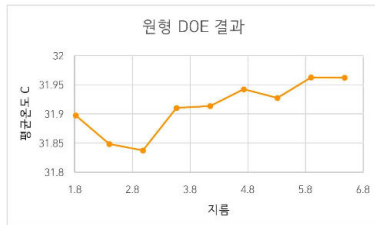
<육각형 흡입구 해석 결과>

초기 탐색 과정

해석 결과_원형

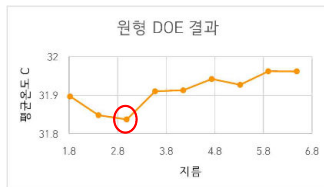
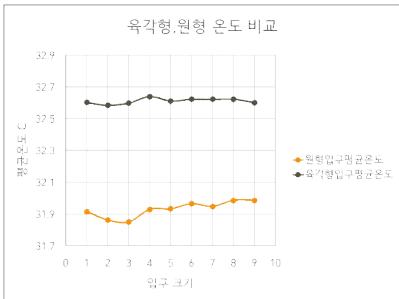


원지름	평균온도C
1.819	31.897
2.42522	31.848
3.03144	31.837
3.63767	31.91
4.24389	31.913
4.85011	31.942
5.45633	31.927
6.06256	31.962
6.66878	31.9617



<원형 흡입구 해석 결과>

초기 탐색 과정 결과 분석



흡입구의 종류에 따라 냉각효과가 다름
 흡입구의 크기변화와 온도변화의 관계가 선형적이지 않음.



최적화 가능성 확인

초기 탐색 과정

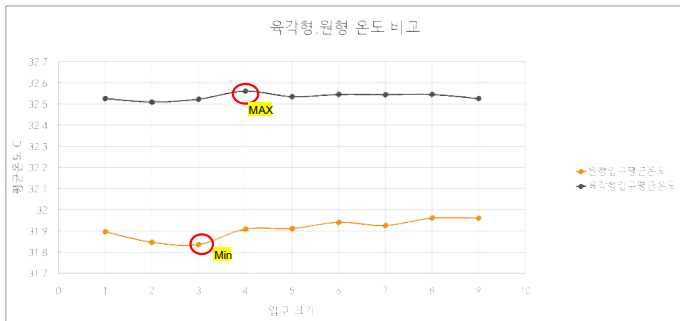
초기 모델의 문제점

1. 흡입구의 형상과 크기에 따른 온도 변화 수준이 너무 작다.

MAX-Min=32.5613-31.837=0.7243C

육각형 형상 크기에 따른 최대 온도 차이 32.5613-32.5103=0.051C

원형 형상 크기에 따른 최대 온도 차이 31.962-31.837=0.125C



초기 탐색 과정

초기 모델의 문제점

2. 해석에 생각보다 너무 오랜 시간이 걸림.



<불필요한 부품이 있는 초기 모델>

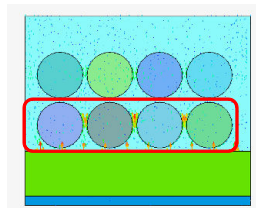
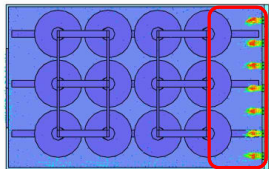
3. Steady State의 비현실성



<해석 완료된 Steady State 결과>

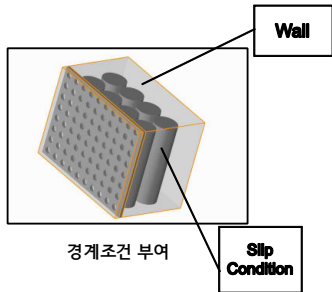
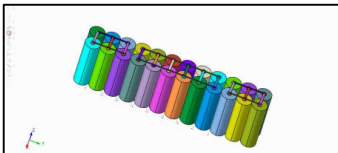
변수 영향 측정

수정된 모델






변수 영향 측정

수정된 모델_해석시간 단축



변수 영향 측정

Flow Solution Setting

Transient Parameters :	
Time step size	10 s None 
Final time	500 s
Flow	Turbulent 
Turbulence	Spalart-Allmaras 

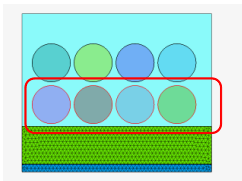
셀 발열량의 선정 기준이 $4C_{rate}$ 를 1000초 동안 방전했을 때의 발열 결과였기 때문에 그의 절반인 500s를 Final Time으로 설정함.

변수 영향 측정

실험계획법 DOE_실험계획표 작성

육각형	사각형	삼각형	원지름	
1	1.62	0.71	1.82	
1.75	2.82	1.24	3.18	
2.5	4.03	1.77	4.55	
3.25	5.24	2.23	5.91	
4	6.45	2.83	7.28	

<실험 계획표>



<앞열 셀>

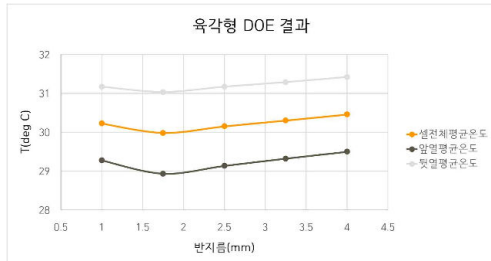
- 초기탐색 과정과 마찬가지로 육각형을 기준으로 실험계획표를 작성함.
- 육각형의 반지름을 1mm~4mm로 5분위로 나누어 실험계획표 작성함.
- 총 넓이가 같은 상황에서 각 형상의 규격을 결정함.

- 관찰한 값은 총 6개
- 셀전체평균온도, 앞열평균온도, 뒷열평균온도, 기체 평균온도, 유로평균속도, 전체평균속도

변수 영향 측정

DOE 결과_육각형

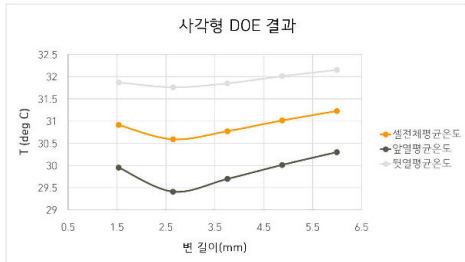
육각형	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도	유로평균속도	전체평균속도
1	30.2247	29.2767	31.1684	27.066	28.4282	1.39712
1.75	29.9836	28.9332	31.0317	27.0239	8.21391	1.43955
2.5	30.1503	29.1337	31.1679	27.0694	3.83281	1.39777
3.25	30.3008	29.3204	31.2852	27.1846	2.07526	1.36597
4	30.4556	29.4962	31.4163	27.2485	1.32434	1.33884



변수 영향 측정

DOE 결과_사각형

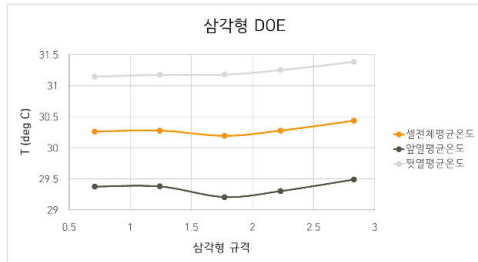
사각형	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도
1.62	30.9125	29.9543	31.8712	27.6645
2.82	30.5886	29.4093	31.7624	27.5048
4.03	30.7713	29.6964	31.8496	27.5744
5.24	31.0122	30.0113	32.012	27.6775
6.45	31.2237	30.2977	32.1522	27.7826



변수 영향 측정

DOE 결과_삼각형

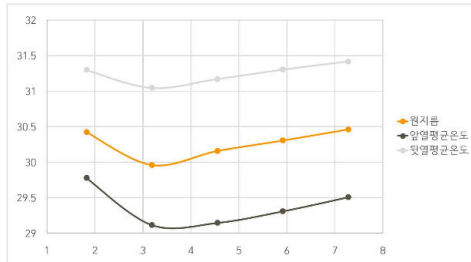
삼각형	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도
0.71	30.2585	29.3736	31.1426	27.0676
1.24	30.2748	29.3772	31.1718	27.1152
1.77	30.1903	29.2064	31.1758	27.0992
2.23	30.2743	29.3021	31.2482	27.1367
2.83	30.4329	29.4884	31.3805	27.2504



변수 영향 측정

DOE 결과_원형

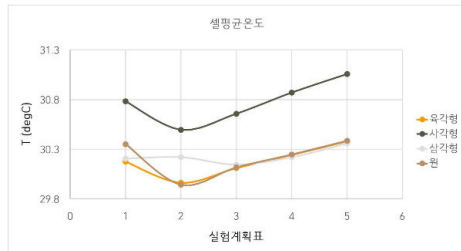
원지름	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도
1.82	30.4245	29.7767	31.2977	27.156
3.18	29.9603	29.1156	31.0448	27.0258
4.55	30.1581	29.1454	31.1703	27.1662
5.91	30.3051	29.3077	31.3022	27.1968
7.28	30.4621	29.5072	31.4184	27.2467



변수 영향 측정

DOE 결과비교_셀평균온도

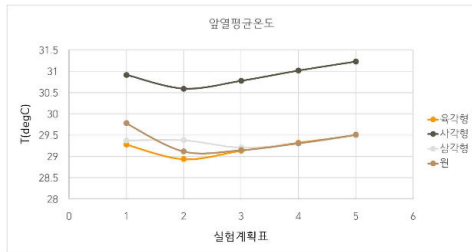
셀평균온도				
	육각형	사각형	삼각형	원
1	30.2247	30.9125	30.2585	30.4245
2	29.9836	30.5886	30.2748	29.9603
3	30.1503	30.7713	30.1903	30.1581
4	30.3008	31.0122	30.2743	30.3051
5	30.4556	31.2237	30.4329	30.4621



변수 영향 측정

DOE 결과비교_앞열평균온도

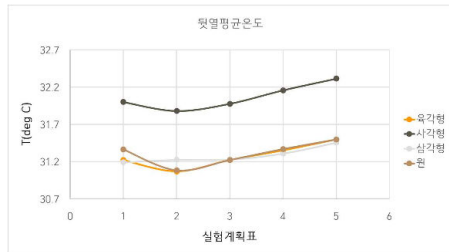
앞열평균온도				
	육각형	사각형	삼각형	원
1	29.2767	30.9125	29.3736	29.7767
2	28.9332	30.5886	29.3772	29.1156
3	29.1337	30.7713	29.2064	29.1454
4	29.3204	31.0122	29.3021	29.3077
5	29.4962	31.2237	29.4884	29.5072



변수 영향 측정

DOE 결과비교_뒷열평균온도

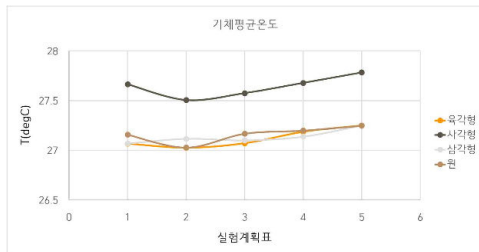
뒷열평균온도					
	육각형	사각형	삼각형	원	
1	31.1684	31.8712	31.1426	31.2977	
2	31.0317	31.7624	31.1718	31.0448	
3	31.1679	31.8496	31.1758	31.1703	
4	31.2852	32.012	31.2482	31.3022	
5	31.4163	32.1522	31.3805	31.4184	



변수 영향 측정

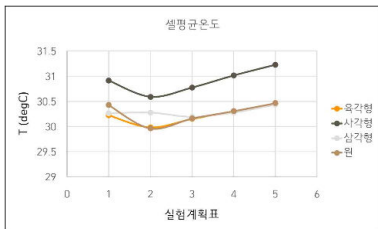
DOE 결과비교_기체평균온도

기체평균온도				
	육각형	사각형	삼각형	원
1	27.066	27.6645	27.0676	27.156
2	27.0239	27.5048	27.1152	27.0258
3	27.0694	27.5744	27.0992	27.1662
4	27.1846	27.6775	27.1367	27.1968
5	27.2485	27.7826	27.2504	27.2467



변수 영향 측정

결과 분석



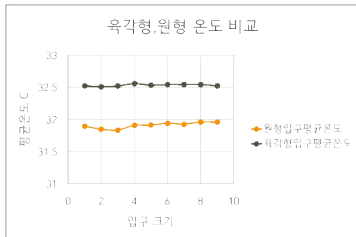
<변수영향측정 단계 결과>

셀평균온도 최대 차이

사각형(2번크기)-육각형(2번크기)=1.24C

앞옆평균온도 최대 차이

사각형(2번크기)-육각형(2번크기)=2.29C



<초기탐색 단계 결과>

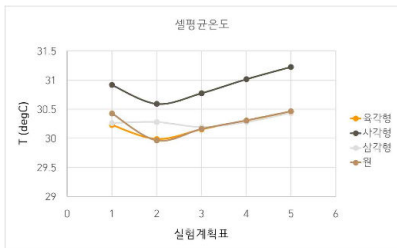
초기탐색 육각형/원 최대 온도차 0.7C

초기탐색결과 육각형 최대 온도차: 0.051C

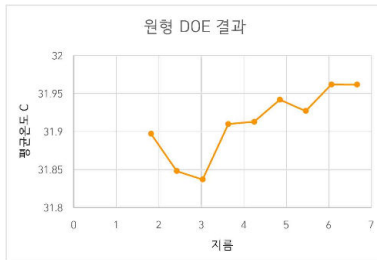
변수영향측정결과 육각형 최대 온도차: 0.5C

변수 영향 측정

결과 분석



<변수영향측정 단계 결과>

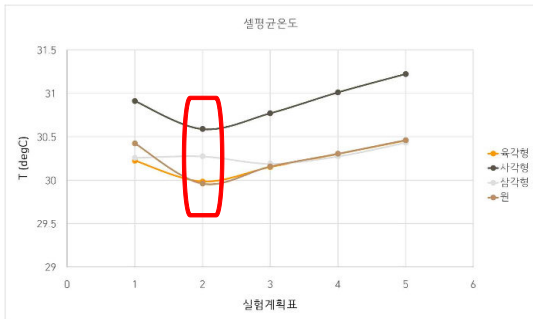


<초기탐색 단계 결과>

흡입구의 형상과 규격이 셀의 냉각에 유의미하게 영향을 미친다는 것을 확인함.
 흡입구 형태가 육각형일 때 셀의 온도가 가장 낮아 냉각효과가 가장 뛰어남을 확인함

변수 영향 측정

결과 분석



<변수영향측정 단계 결과>

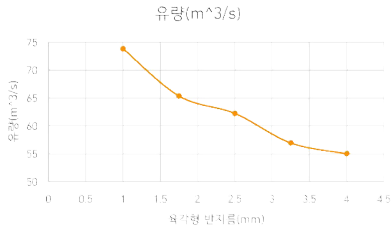
온도가 국부적으로 낮아지는 **최적점**이 존재함

변수 영향 측정

최적점이 존재하는 이유

육각형	유로평균속도	유로면적	유량(Q)
1	28.4282	2.598076211	73.85863015
1.75	8.21391	7.956608397	65.35486528
2.5	3.83281	16.23797632	62.23707802
3.25	2.07526	27.44217998	56.94965843
4	1.32434	41.56921938	55.05178

<육각형 흡입구의 속도 결과>

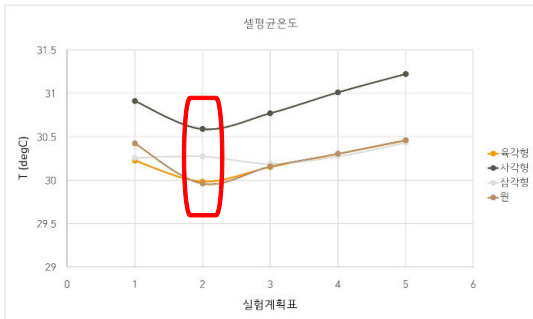


<유량의 변화>

직관적으로는 단위 시간당 유량이 가장 많은 최소 크기의 흡입구일때의 평균 온도가 가장 낮아야 할 것 같지만 실제로는 그렇지 않다.

변수 영향 측정

결과 분석

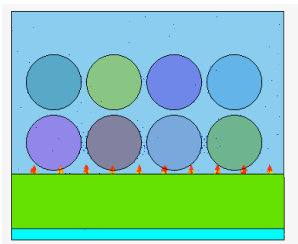


<변수영향측정 단계 결과>

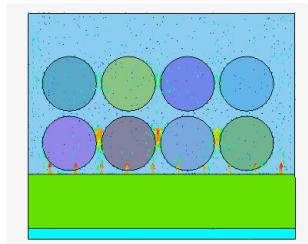
온도가 국부적으로 낮아지는 **최적점**이 존재함

변수 영향 측정

극소점이 존재하는 이유



<육각형_반지름 1mm>

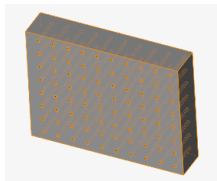


<육각형_반지름 1.75mm>

결과적으로 흡입구의 넓이가 작을 때는 유로 유속도 빨라 시간당 유량이 많지만 면적이 작은 만큼 유동의 흐름을 고르게 발달시키지 못해 흡입구 크기에 최적구간이 존재한다.

최적 흡입구 배치 확인

앞선 단계에서 가장 좋은 냉각 효과를 보인 육각형 흡입구 형상을 실제 조건에서 검증하고 흡입구의 배치가 미치는 영향을 확인하는 단계



<격벽 20mm>

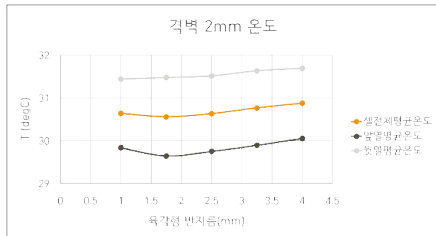


<격벽 2mm>

최적 흡입구 배치 확인

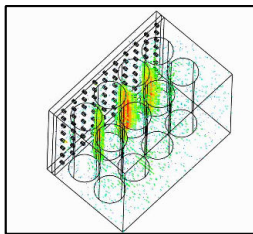
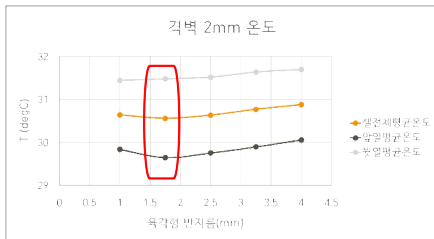
격벽 2mm 해석 결과

육각형	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도
1	30.911	29.9741	31.846	27.5825
1.75	30.817	29.7529	31.8874	27.595
2.5	30.9032	29.8772	31.9338	27.6137
3.25	31.0614	30.0448	32.0728	27.7561
4	31.1868	30.2326	32.1399	27.8072



최적 흡입구 배치 확인

격벽 2mm 해석 결과



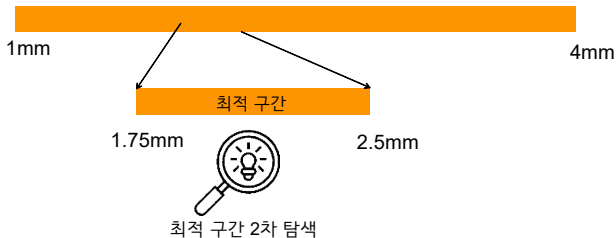
최적 구간이 존재함.

현실적인 조건에서도 흡입구의 영향이 유의미함.

최적 흡입구 배치 확인

최적 구간 2차탐색

온도가 낮아지는 최적 구간을 실험계획법으로 탐색하여 현재 찾아진 최적점 보다 온도가 더 낮은 최적점이 존재하는지 분석



최적 흡입구 배치 확인

최적 구간 2차탐색

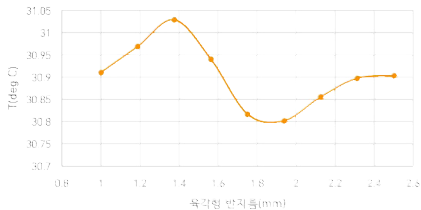
육각형	셀전체평균 온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도	유로평균속도	전체평균속도
1	30.911	29.9741	31.846	27.5825	1.09796	1.6018
1.1875	30.969	30.0265	30.969	27.644	0.748281	1,6
1.375	31.0293	30.0912	31.9691	27.6877	0.59794	1.52721
1.5625	30.9407	29.9855	31.8991	27.6297	0.632935	1.56315
1.75	30.817	29.7529	31.8874	27.595	1.06487	1.61026
1.9375	30.8019	29.7525	31.8505	27.5756	1.06078	1.60371
2.125	30.8555	29.8026	31.9119	27.6118	1.05927	1.58609
2.3125	30.8977	29.8446	31.949	27.6387	1.02433	1.58012
2.5	30.9032	29.8772	31.9338	27.6137	0.973864	1.56406



최적 흡입구 배치 확인

최적 구간 2차탐색

2mm 격벽 셀링구 온도

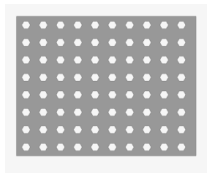


반지름 1.75mm~2mm 구간이 최적 구간임을 확인함.

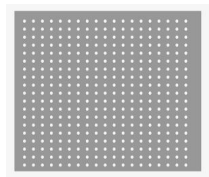
최적 흡입구 배치 확인

최적 흡입구 배치 형태 확인

흡입구의 크기를 고정하고 흡입구의 개수를 변화시켜가며 냉각효과를 관찰함.



<육각형 반지름 1.75mm 일반 격벽>



<같은 넓이의 반지름 육각형 반지름 1mm 다공성 격벽>

최적 흡입구 배치 확인

최적 흡입구 배치 형태 확인

다공성 격벽의 육각형 흡입구 크기는 다공성 벽의 효과를 극대화하여 관찰하기 위해 최소 크기인 1mm로 설정

육각형반지름	흡입구총면적	흡입구개수
1	145.4923	56.00001238
1.75	445.5701	171.5000115
2.5	909.3267	350.00001
3.25	1536.762	591.4999696

흡입구 개수	행	열
56	7	8
170	13	13
350	19	19
590	25	24

실험계획표

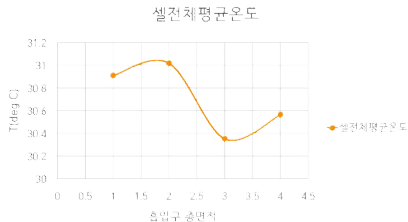
$$\frac{\text{흡입구 총면적}}{\text{반지름}1\text{mm 육각형 넓이}} = \text{흡입구 개수}$$

최적 흡입구 배치 확인

최적 흡입구 배치 형태 확인

<다공성 격벽 해석 결과>

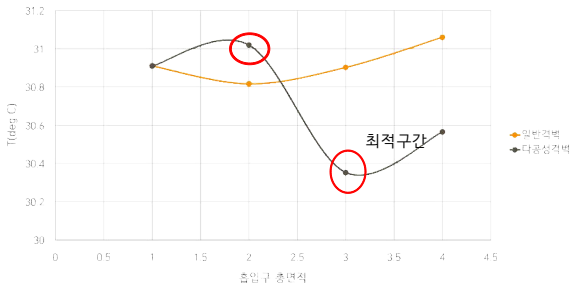
행	열	셀전체평균온도	앞열평균온도	뒷열평균온도	기체평균온도
7	8	30.911	29.9741	31.846	27.5825
13	13	31.0202	30.1369	31.9041	27.6704
19	19	30.3535	29.4648	31.2432	29.9531
25	24	30.5658	29.8059	31.3255	27.0198



최적 흡입구 배치 확인

최적 흡입구 배치 형태 확인

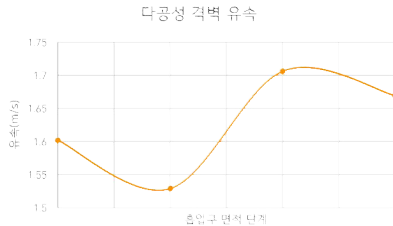
셀평균온도 비교



최적 흡입구 배치 확인

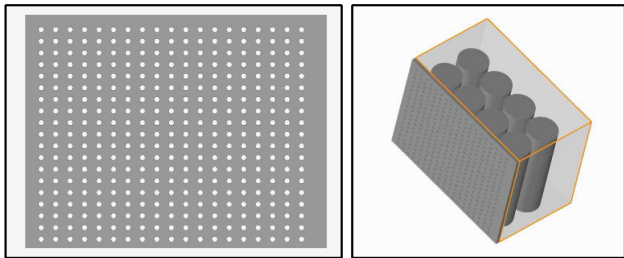
최적 흡입구 배치 형태 확인

행	열	유체영역평균속도
7	8	1.6018
13	13	1.52891
19	19	1.70609
25	24	1.66945



A glowing lightbulb is mounted on a mechanical base that is plugged into a wall outlet. The base is constructed from various metal components, including gears and a small motor, giving it a robotic appearance. The lightbulb is illuminated, casting a warm glow. The scene is set against a textured wall and a dark surface.

Part 5.
결론



<최종 최적화 형상>

최종적으로 냉각효과를 가장 높일 수 있는 흡입구의 형상은 육각형이며
LV 배터리 박스 흡입구의 최적의 배치 방법은 19*19 다공성 배치다.

"Comparison of the effect of five different entrance channel shapes of a micro-channel heat sink in forced convection with application to cooling a supercomputer circuit board" -Alireza Moradikazerounia , Masoud Afrandb , Jalal Alsarrafc , Omid Mahiand,e , Somchai Wongwisesf,g , Minh-Duc Tranh,I

GM TodysMahmudSM. (2020). Thermal characterization of a cylindrical Li-ion battery cell.

Haobing ZhouZhouFei. (2019). "Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe" .

M. Waseem MarzookHales, Yatish Patel etAlasrair. (2022). Thermal evaluation of lithium-ion batteries: Defining the cylindrical cell.

Maan Al-ZareerMichalak, Carlos Da silva, Cristina H.AmonAndrew. (2021). Predicting specific heat capacity and directional thermal conductivities of. Marco SteinhardtIrene Gillich, Alexander Rheinfeld etElisabeth. (2021). "Low-effort determination of heat capacity and thermal c ductivity for cylindrical 18650 and 21700 lithium-ion cells" ."

Qichao WuHuang,Xiaoli YuRui. (2023). "Measurement of thermophysical parameters and thermal modeling of 21,700 cylindrical battery."

Tao Wang, K.J. Tseng, Jiyun Zhao † , Zhongbao Wei "Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies"