

## 원통형 배터리의 유형에 따른 배터리 팩의 에너지 밀도 비교

김태석 · 이종욱\*

한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

### Comparison of Energy Density for Battery Pack According to Cylindrical Battery Type

Taeseok Kim · Jongwook Lee\*

School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

(Received 3 December 2025 / Revised 9 January 2026 / Accepted 9 January 2026)

**Abstract :** This study conducted a comparative analysis of energy density at the cell and pack levels across various types of cylindrical battery cells. While 18650 and 21700 cylindrical battery cells have been commonly used in the past, cylindrical batteries with a 46 mm diameter have recently attracted significant attention because they can store more energy and reduce the number of cells required, providing substantial advantages at the battery pack level. Furthermore, this trend greatly influences the changes in energy density of battery cells and battery packs, so a detailed analysis of this aspect is necessary. Unlike other types of battery cells, cylindrical battery cells have standardized dimensions, making them more suitable for general analytical studies. Accordingly, this study carried out an in-depth analysis of the energy density characteristics of cylindrical battery cell-based systems based on these advantages.

**Key words :** Electric vehicle(전기자동차), Energy density(에너지 밀도), Cylindrical battery cell(원통형 배터리), Arrangement of battery cell(배터리 셀 배치), Battery pack(배터리 팩)

### 1. 서론

전기자동차(EV)의 보급률 확산에 따라 전기차에 장착되는 배터리 팩의 에너지 밀도 증대와 효율적인 내부공간 활용이 성능 평가에서 중요해지고 있다. 특히 실제 주행 조건에서, 배터리 팩의 에너지 밀도 및 중량 등의 특성은 주행 거리, 전비와 같은 차량 주행 성능에 영향을 미치고 밀도 높은 에너지의 배터리의 탑재는 전기차의 안전성 등에도 영향을 미친다.<sup>1,2)</sup> 이로 인해 배터리 팩의 경량화 및 에너지 밀도 증대에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.<sup>3,5)</sup>

최근에는 모듈을 생략하고 배터리 셀을 직접 배터리 팩에 배치하는 CTP(Cell-to-Pack) 기술이 소개되었고 많은 관심을 받고 있다. CTP 기술에서는 모듈 단계를 제거함으로써 부품 수를 줄이고 무게를 감소시키며, 공간 활용 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. CTP 기술을 적용하면 기존 배터리 팩 대비 약 15%의 체적 활용성 향상과 40%가량의 부품 감소를 가능하게 한다고 알려져 있

다.<sup>6-8)</sup> 즉, CTP 기술의 궁극적인 목표는 에너지 밀도를 향상하는 것에 있다고 할 수 있다. 이러한 기술적 흐름을 고려했을 때 앞으로도 배터리 팩의 에너지 밀도 증대에 대한 중요성은 계속해서 높아질 것이다.

배터리 팩뿐만 아니라 배터리 셀 단위에서도 에너지 밀도를 증대하려는 노력을 확인할 수 있다. 대표적인 예가 46800, 46950 원통형 셀과 같은 큰 지름을 가진 원통형 셀의 개발 확대이다. 기존의 전기차 시장의 원통형 배터리 셀들은 18650 또는 21700 배터리가 다수를 차지하였다. 그런 이유로 원통형 배터리 셀에 대한 연구가 그동안 활발하게 진행되어 왔다.<sup>9,10)</sup> 그러나 최근에는 46 mm의 지름을 가지는 원통형 배터리가 개발되었고 많은 전기차 모델에서 해당 원통형 셀과 유사한 유형들의 사용이 거론되고 있다. 그 이유는 46 mm 지름의 원통형 배터리 셀들이 높은 에너지를 탑재하고 있기 때문이다. 예를 들어 18650 원통형 배터리 셀의 용량은 약 10.84 - 12.25 Wh의 범

\*A part of this paper was presented at the KSAE 2025 Spring Conference

\*Corresponding author, E-mail: [jwl@koreatech.ac.kr](mailto:jwl@koreatech.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

위로 분포하고 있으나 46800 원통형 배터리 셀의 용량은 약 87.25~83.41 Wh의 범위로 탑재 용량의 차이가 크다는 것을 여러 연구들을 통하여 확인할 수 있다.<sup>11-13)</sup> 그만큼 46 mm 지름의 원통형 배터리 셀의 탑재를 통하여 많은 에너지를 탑재할 수 있다. 그밖에도 고에너지 배터리 셀 사용으로 인해 탑재되는 배터리 셀 개수가 줄어들고 전기적 연결 수가 감소하기 때문에 배터리 팩 내부 구조의 단순화 가능해진다. 결과적으로 배터리 셀의 에너지 밀도 증대로 인하여 다양한 이점을 얻을 수 있게 된다.

본 연구는 이러한 중요성을 가지는 배터리 셀과 팩 단위의 에너지 밀도에 대해 보다 심층적인 분석을 수행한다. 특히 새로운 유형의 배터리 셀이 개발되었다는 점을 고려하여, 원통형 셀 기반의 에너지 밀도 특성을 분석한다. 18650, 21700, 46950의 세 가지 원통형 배터리 셀을 대상으로 하여 배터리 셀 단위와 배터리 팩 단위에서의 에너지 밀도를 비교 및 분석한다. 배터리 셀 단위에서는 각 유형별 셀의 형상과 탑재 에너지(용량)를 통해서 에너지 밀도가 분석될 것이다. 그러나 배터리 팩 단위에서는 배터리 셀들 간 간격, 배치 방식 등도 함께 고려될 것이다. 또한 배터리 셀 지름의 변화가 에너지 밀도에 미치는 영향도 분석될 것이며 이를 통해 효율적인 배터리 팩 구성 방안들을 제시할 것이다. 배터리 셀 단위의 에너지 밀도에 대한 분석은 기존에도 다양한 연구를 통해 수행되어 왔다.<sup>11-13)</sup> 원통형 셀은 단면이 원형이기 때문에 배터리 팩에 설치될 경우 낭비되는 영역이 불가피하게 발생한다. 이러한 특성은 기존의 연구들과 같이 배터리 셀 단위 에너지 밀도 분석만으로는 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구는 배터리 셀 단위에서의 에너지 밀도의 분석과 더불어 기존의 연구에서 수행되지 못한 배터리 팩 단위에서의 에너지 밀도를 분석하고 정량적으로 평가하여 배터리 셀 및 팩의 에너지 밀도에 대한 이해를 높이도록 한다.

## 2. 원통형 배터리 셀의 유형별 에너지 밀도 분석

### 2.1 원통형 배터리 셀의 유형 분석

원통형 리튬이온 배터리 셀은 지름과 높이에 따라 명명된다. 셀 이름의 첫 번째와 두 번째 숫자는 셀의 지름(단위: mm)을, 세 번째 이후의 숫자는 셀의 높이(단위: mm)를 의미한다. 예를 들어 18650 셀은 지름 18 mm와 높이 65 mm의 규격을 가지며, 21700 셀은 지름 21 mm와 높이 70 mm의 규격을 가진다. 최근에는 더 큰 에너지와 부피를 가지는 지름 46 mm, 높이 95 mm인 46950 배터리도 개발되어 왔다.

Fig. 1(a)~(c)에 각각 원통형 배터리 셀의 대표적인 유형들인 18650, 21700, 46950의 형상 정보를 나타냈다. 원통형 배터리 셀들은 크기에 따라 저장 가능한 에너지 용량

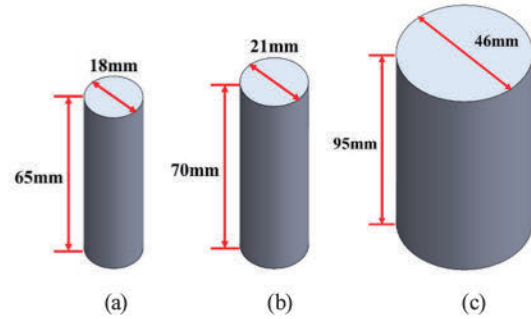


Fig. 1 Dimensions of cylindrical battery cells: (a) 18650 battery cell, (b) 21700 battery cell and (c) 46950 battery cell

Table 1 Representative types of cylindrical battery cells: 18650 battery cell, 21700 battery cell and 46950 battery cell

Cell type	18650	21700	46950
Diameter [mm]	18	21	46
Height [mm]	65	70	95
Volume [m <sup>3</sup> ]	16.54 × 10 <sup>-6</sup>	24.25 × 10 <sup>-6</sup>	157.88 × 10 <sup>-6</sup>
Energy [Wh]	12.5	18.6	125

과 셀의 부피가 서로 다르다.

따라서 이들의 성능을 동일한 관점으로 비교하기 위한 기준이 필요하다. 그러한 기준의 한 예로 에너지 밀도를 고려할 수 있는데, 에너지 밀도는 같은 부피에 탑재된 에너지 수준으로 정의할 수 있다. 높은 에너지 밀도를 가지는 배터리 셀을 사용하면 에너지 밀도가 낮은 배터리 셀을 사용했을 때보다 전기자동차의 주행거리를 향상시킬 수 있다. 따라서 배터리 셀의 에너지 밀도는 중요한 경쟁력이 될 수 있다. 본 장에서는 각 원통형 배터리 셀에 대한 형상과 탑재 에너지에 대한 분석을 통하여 셀 단위의 부피 에너지 밀도를 비교한다.

Table 1은 대표적인 원통형 셀 3가지 유형들의 형상과 탑재 에너지를 정리한 것이다. 특히, 각 원통형 셀들의 에너지 용량은 2025년 국내에서 개최된 배터리 전시회에서 소개된 기술 정보를 바탕으로 작성되었다. 배터리 셀의 용량은 메이커의 기술 개발 수준에 따라 다소 차이가 있을 수 있기 때문에 본 연구에서는 동일한 기업에서 공개된 정보를 바탕으로 연구가 수행되었다. 본 연구에서 사용된 원통형 배터리 셀들의 용량의 수준을 객관적으로 평가하기 위하여 전 세계적으로 판매되고 있는 각 유형별 원통형 배터리 셀들의 용량들을 살펴볼 필요가 있다. 그 결과, 18650 원통형 배터리 셀은 약 10.84 Wh - 12.25 Wh의 범위로 확인되었고 21700 원통형 배터리 셀과 46800 원통형 배터리 셀의 용량은 각각 약 16.60 Wh - 23.99 Wh, 약 82.75 Wh - 83.41 Wh 범위로 확인되었다.<sup>11-13)</sup>

2.2 배터리 셀 유형별 에너지 밀도 비교

원통형 배터리 셀의 에너지 밀도는 각 유형별 탑재 용량과 규격에 따른 부피의 비로 정의할 수 있다. 뿐만 아니라 부피의 증가 수준과 에너지 밀도의 변화 수준도 함께 비교되었고 원통형 배터리 셀의 유형별 에너지 밀도에 대한 분석 결과가 다음과 같이 정리되었다.

Table 2는 원통형 배터리 셀의 3가지 유형들에 대한 부피와 에너지 밀도의 값들과 차이를 나타낸 것이다. 21700 원통형 배터리 셀은 18650 원통형 배터리 셀에 비해 탑재 에너지는 약 48.8% 높고 부피는 약 46.58%가 높게 확인되었다. 상대적으로 부피와 탑재 용량의 증가 수준이 유사하였고 그 때문에 부피 에너지 밀도도 약 1.51%의 차이로 거의 유사하였다. 그러나 46950 원통형 배터리 셀은 18650 원통형 배터리 셀에 비해 용량은 10배 높고 부피는 약 9.5배 높아 부피 에너지 밀도는 약 4.8%로 증가하는 것으로 확인되었다. 결론적으로 18650 원통형 배터리 셀에서 가장 낮은 에너지 밀도가 확인되었고 46950 원통형 배터리 셀이 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 부피가 큰 배터리 셀을 활용하면 더 적은 수량으로도 많은 양의 에너지를 탑재할 수 있는 것으로 확인할 수 있었다. 46950 원통형 배터리 셀이 다른 유형의 배터리 셀 보다 높은 에너지 밀도를 가지는 것은 단순 부피의 증가로 인한 것은 아닐 것이다. 46950 원통형 배터리 셀은 기존 유형과 다른 내부 구조를 가지며 이 점도 에너지 밀도의 향상에 영향을 미쳤을 것이다.

그 밖에도 18650, 21700, 46950 원통형 배터리 셀의 외부 케이스가 모두 동일한 두께(1 mm)라고 가정했을 때 케이스가 배터리 셀 전체의 부피에서 차지하는 부피 비율을 살펴보면 에너지 밀도의 증가에 대해 좀더 이해할 수 있을 것이다.

Fig. 2는 지름의 차이에 대한 에너지 밀도의 비교를 위하여 3가지 유형의 원통형 배터리 셀이 같은 두께(1 mm)의 외부 케이스로 이루어진 경우를 모델링 한 것이다. 여

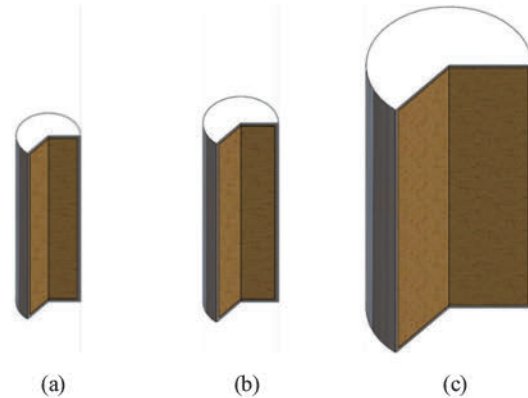


Fig. 2 Comparison of battery cell case(with 1 mm thickness) volume ratio in cylindrical battery cell: (a) 18650 battery cell (23 %), (b) 21700 battery cell (21 %) and (c) 46950 battery cell (10 %)

기에서 Fig. 2의 모든 원통형 배터리 셀들의 내부는 젤리롤(Jelly roll)로 모두 채워진 상태로 가정하였다. 18650 원통형 배터리 셀에서 케이스가 차지하는 비율은 약 23%로 확인되었다. 또한, 21700 원통형 배터리 셀은 약 21%의 비율을 46950 원통형 배터리 셀은 약 10%의 비율을 외부 케이스가 차지하는 것을 확인할 수 있었다. 배터리 셀에서 케이스가 차지하는 부피 비율이 줄어들면 내부의 젤리롤의 부피가 상대적으로 증가한다고 볼 수 있으므로 최종적으로 에너지 밀도가 향상되는 결과를 얻을 수 있다. 이를 통해서도 배터리 셀의 부피 증가는 에너지 밀도에 긍정적인 효과를 미칠 것으로 예상할 수 있다.

그러나 배터리 셀 단위에서 확인된 에너지 밀도에 대한 경향성이 배터리 팩 단위에도 적용되는 것은 아니다. 실제로 배터리 팩은 셀 간 간격, 배열 방식, 팩 내부 구조물 등으로 인해 공간 활용에 제약을 받으며 에너지 밀도도 많은 영향을 받기 때문이다. 따라서 팩 단위에서의 에너지 밀도를 파악하기 위해서는 셀 배치 특성 및 팩 설계를 포함한 종합적인 분석이 필요하다.<sup>14)</sup>

다음 장에서는 원통형 배터리 셀 기반의 배터리 팩 단위의 에너지 밀도에 대한 상세한 분석을 진행한다. 배터리 셀과 배터리 팩의 3D model을 활용하여 직접 원통형 셀을 배치하면서 셀 간 간격과 배열 방식의 차이들이 고려되어 배터리 팩 단위의 에너지 밀도가 분석될 것이다.

3. 유형 별 원통형 배터리 셀 탑재에 따른 배터리 팩 에너지 밀도의 변화

3.1 원통형 배터리 셀 탑재를 위한 배터리 팩 선정

본 장에서는 원통형 배터리 셀의 유형별 탑재가 배터리 팩의 에너지 밀도에 미치는 영향을 분석할 것이다. 특히, 실제 원통형 배터리 셀을 직접 탑재할 수 없기 때문에

Table 2 Comparison of energy density by cylindrical battery cell types

Cell type	18650	21700	46950
Energy [Wh]	12.5	18.6	125
Energy increase rate [%]	100	148.8	1000
Volume [m <sup>3</sup> ]	16.54 × 10 <sup>-6</sup>	24.25 × 10 <sup>-6</sup>	157.88 × 10 <sup>-6</sup>
Volume increase rate [%]	100	146.58	954.51
Volumetric energy density [kWh/m <sup>3</sup> ]	7.56 × 10 <sup>2</sup>	7.67 × 10 <sup>2</sup>	7.92 × 10 <sup>2</sup>
Energy density increase rate [%]	100	101.51	104.77

3D model을 바탕으로 탑재 및 분석을 수행한다. 원통형 배터리 셀의 3D model은 이미 알려진 규격이 존재하기 때문에 규격을 바탕으로 만들 수 있다. 그러나 탑재를 위한 배터리 팩은 정해진 규격이 없기 때문에 특정 대상에 대한 선정이 필요하다. 본 연구에서는 원통형 배터리 셀을 가장 활발하게 사용하는 제조사 대표 전기차 배터리 팩을 대상으로 선정하였다. 다만, 상세한 배터리 팩의 치수를 측정할 수 없어 미디어 상에 공개된 자료를 바탕으로 자체적으로 3D model을 개발하였다.

Fig. 3(a)는 본 연구에서 3가지 유형의 원통형 배터리 셀의 탑재를 위한 배터리 팩의 3D model을 나타낸다. 실제 해당 배터리 팩에는 21700 원통형 배터리 셀이 4개의 영역으로 구분되어 탑재되어 있었다. Fig. 3(b)의 푸른색 영역이 실제 원통형 배터리 셀이 탑재되는 영역이다. 배터리 팩 단위의 부피를 계산하기 위하여 배터리 팩의 높이는 배터리 셀의 높이와 같다고 가정하였다. 실제의 경우, 본 연구에서 가정한 것과 달리 배터리 팩의 높이는 배터리 셀의 높이와 같지 않으며 배터리 팩의 다양한 내부 부품들의 영향 및 설계 목표로부터 결정된다. 그러나 본 연구에서는 배터리 셀을 제외한 부품들의 영향을 고려하지 않기 위해 가정한 것으로, 실제 배터리 팩의 경우 본 연구 결과와 차이가 있을 수 있다.

원통형 배터리 셀이 배터리 팩에 탑재될 때는 냉각 성능, 구조적 성능 등의 이점을 위해 Honeycomb 또는 정육각형(Hexagonal) 패턴으로 불리는 방법으로 배치한다.<sup>9)</sup> 그리고 각 원통형 배터리 셀들은 일정한 간격을 두고 배치되는 경우가 많다. 이를 고려하여 본 연구에서 개발한 배터리 팩의 3D model에 3가지 유형의 원통형 배터리 셀을 탑재한다. 원통형 배터리 셀들의 배열 방식은 정육각형 패턴으로 탑재하며 배터리 셀 간 간격은 간격이 없는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하기 위하여 0 mm와 1 mm로 설정하여 원통형 배터리 셀을 탑재하였다. 각 유

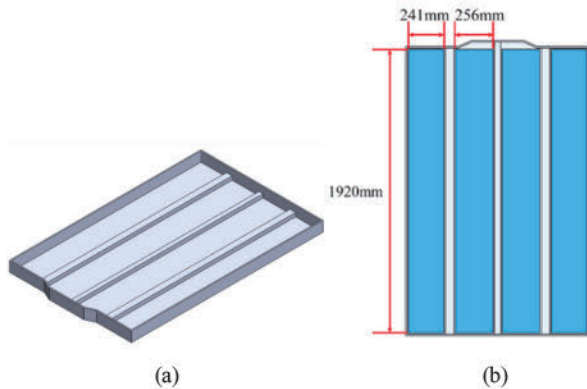


Fig. 3 3D model of battery pack: (a) battery pack without battery cells and (b) placement area of battery cells

형별 원통형 배터리 셀들이 탑재된 모습은 다음의 그림에서 확인할 수 있다.

Fig. 4는 18650 원통형 배터리 셀의 셀 간 간격이 0 mm (Fig. 4(a)) 인 경우와 1 mm (Fig. 4(b)) 인 경우의 배치, 21700 원통형 배터리 셀의 간격이 0 mm (Fig. 4(c)) 인 경우와 1 mm (Fig. 4(d)) 인 경우의 배치 그리고 46950 원통형 배터리 셀의 간격이 0 mm (Fig. 4(e)) 인 경우와 1 mm (Fig. 4(f)) 인 경우의 배치를 나타낸다. Fig. 4에서 사용된 배터리 팩은 실제 원통형 배터리 셀을 사용하는 배터리 팩의 치수를 기반으로 개발되었기 때문에 현실적인 부분에서는 긍정적이다. 하지만 특정 배터리 셀의 유형을 기반으로 개발되었을 것이며 내부 배터리 셀의 간격들도 정확하게 알 수 없기 때문에 Fig. 4와 같이 유형별 배터리

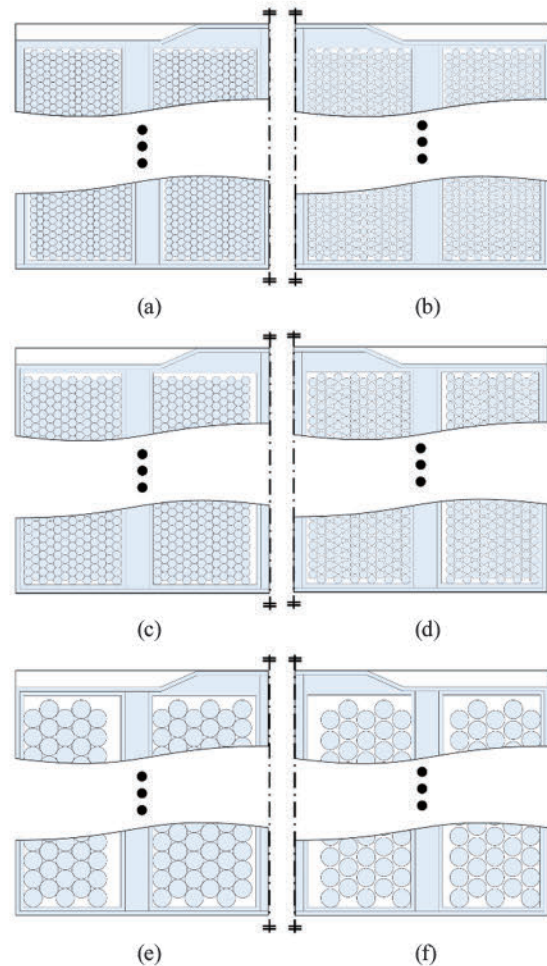


Fig. 4 Arrangement of cylindrical battery cells: (a) 18650 battery cells with cell-to-cell distance 0 mm, (b) 18650 battery cells with cell-to-cell distance 1 mm, (c) 21700 battery cells with cell-to-cell distance 0 mm, (d) 21700 battery cells with cell-to-cell distance 1 mm, (e) 46950 battery cells with cell-to-cell distance 0 mm and (f) 46950 battery cells with cell-to-cell distance 1 mm

셀을 탑재했을 때 빈 공간이 많음을 확인할 수 있다. 이는 배터리 팩의 에너지 밀도를 분석하면서 좀 더 상세하게 확인할 수 있다.

Table 3은 유형별 원통형 배터리 셀들을 일정한 간격 (또는 간격이 없거나)을 두고 배치한 배터리 팩의 에너지 밀도들을 비교한 것이다. 원통형 배터리 셀들 간의 간격 없이 배치한 경우 18650 원통형 배터리 셀은 6,572개, 21700 원통형 배터리 셀은 4,908개, 46950 원통형 배터리 셀은 902개가 탑재된다. 반면 배터리 셀들 간의 간격을 1 mm로 유지하여 배치한 경우 각각 5,830개, 4,326개, 880개로 탑재되는 배터리 셀들의 수가 감소한다. 이로 인하여 배터리 팩 단위의 탑재 용량도 변화하며 배터리 팩 에너지 밀도도 영향을 받는다. 탑재 에너지를 비교해 보면 46950 원통형 배터리 셀을 간격 없이 배치했을 때 112.75 kWh로 가장 높았으며, 18650 원통형 배터리 셀을 1 mm의 간격으로 배치했을 때 72.88 kWh로 가장 낮았다. 모든 유형에서 간격이 증가하면 탑재 에너지가 감소하는 것은 동일하게 확인되었다. 하지만, 유형별 원통형 배터리 셀의 높이가 다르기 때문에 배터리 팩의 부피에서는 차이가 발생할 수 있다. 이를 고려한 배터리 팩의 에너지 밀도를 비교해보면 21700 원통형 배터리 셀을 간격 없이 탑재했을 때 약  $6.83 \times 10^2 \text{ kWh/m}^3$ 으로 가장 높았고 18650 원통형 배터리 셀을 1 mm의 셀 간 간격으로 배치했을 때 약  $5.87 \times 10^2 \text{ kWh/m}^3$ 로 가장 낮았다.

46950 원통형 배터리 셀이 가장 많은 에너지를 가지고 있음에도 에너지 밀도는 21700 원통형 배터리 셀을 탑재했을 때로 확인되었다. 이러한 결과는 특정 배터리 셀을

대상으로 개발된 배터리 팩을 사용했기 때문에 다른 유형들의 배터리 셀을 탑재했을 때 낭비되는 공간들이 많기 때문으로 분석할 수 있다. Fig. 4의 (e)와 (f)에서는 특히 빈 공간이 많은 것을 확인할 수 있는데 이와 같이 배터리 팩의 공간을 한정할 경우 다양한 유형들의 배터리 셀들이 효율적으로 탑재될 수 없다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 탑재 영역을 한정하는 방법이 아닌 다른 기준을 고려할 필요가 있다. 즉, 정해진 배터리 팩의 공간 내에서 분석하는 것이 아닌, 새로운 기준을 바탕으로 배터리 팩의 에너지 밀도 비교가 필요하다.

### 3.2 원통형 배터리 셀의 비 활용 영역에 대한 분석

새로운 기준을 고려하기 전에 원통형 배터리 셀을 배터리 팩에 탑재할 때 발생하는 비 활용 영역에 대한 분석이 필요하다. 원통형 배터리 셀은 형상적 특징으로 인하여 배터리 팩에 배치되면 배터리 셀들 사이에 비 활용 영역이 발생한다. 이 영역에는 추가적인 원통형 배터리 셀이나 다른 부품을 탑재할 수 없어 다른 용도로도 활용이 되지 않는 낭비되는 공간이다. 이러한 비 활용 영역의 발생은 원통형 배터리 셀을 기반으로 한 배터리 팩의 일반적인 한계점으로 여겨진다. 또한 이들의 공간의 발생은 배터리 팩의 에너지 밀도를 높이는 것에 대한 장애물이 된다. 그런 이유로 배터리 팩의 에너지 밀도에 대한 새로운 분석을 위한 선행 연구로 원통형 배터리 셀의 유형별로 만들어 내는 비 활용 영역에 대해서 분석한다. 원통형 배터리 셀의 유형별로 달라지는 지름에 따른 비 활용 영역의 변화를 살펴보기 위하여 가장 작은 단위의 배열을 아래와 같이 모사하였다.

Fig. 5는 배터리 팩에 배열된 원통형 배터리 셀을 2D 형태로 나타낸 것이다. 3개의 배터리 셀이 모두 최단 거리

Table 3 Energy capacity, volume and volumetric energy density characteristics of 18650 battery cell, 21700 battery cell, and 46950 battery cell

Cell type	18650		21700		4695	
Cell-to-cell distance [mm]	0	1	0	1	0	1
Number of cells	6,572	5,830	4,908	4,326	902	880
Total energy [kWh]	82.15	72.88	91.29	80.46	112.75	110
Occupiable volume [m <sup>3</sup> ]	$12.41 \times 10^{-2}$		$13.36 \times 10^{-2}$		$18.13 \times 10^{-2}$	
Volumetric energy density [kWh/m <sup>3</sup> ]	$6.62 \times 10^2$	$5.87 \times 10^2$	$6.83 \times 10^2$	$6.02 \times 10^2$	$6.22 \times 10^2$	$6.07 \times 10^2$
Volumetric energy density rate [%]	100	88.71	103.19	90.95	93.91	91.62

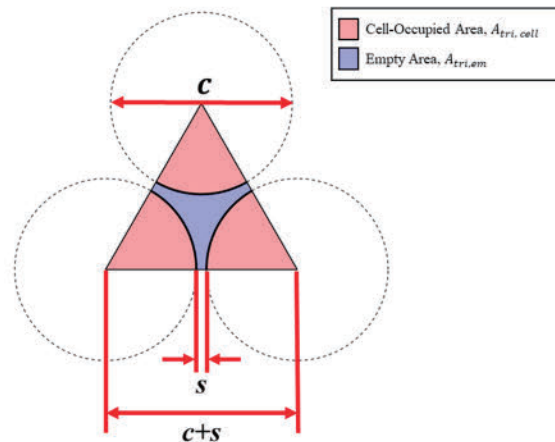


Fig. 5 Analysis of the void spaces between cells according to the arrangement of cylindrical battery cells

로 만났을 때, 배터리 셀들의 중심을 이어 삼각형을 구성하였고 이때 만들어지는 비 활용 영역을 보라색으로 표현하였다. 단, Fig. 5에서는 원통형 배터리 셀들 사이의 간격이 있는 경우도 함께 고려되었다. 배터리 셀의 지름을  $c$ , 셀 간 간격을  $s$ 라 할 때, 배터리 셀들이 만나면서 만들어지는 삼각형의 넓이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{tri} = \frac{\sqrt{3}}{4}(c + s)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서  $A_{tri}$ 는 3개의 배터리 셀들이 배치되어 만들어지는 삼각형의 넓이를 의미한다. 또한, 삼각형의 넓이에서 실제 원통형 배터리 셀들의 넓이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{tri,cell} = \frac{\pi}{8}c^2 \quad (2)$$

식 (2)에서  $A_{tri,cell}$ 은 삼각형 안에서 원통형 배터리 셀들이 차지하는 넓이를 나타낸다. 따라서 원통형 배터리 셀들이 배열되었을 때 만들어지는 비 활용 영역의 넓이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{tri,em} = \frac{\sqrt{3}}{4}(c + s)^2 - \frac{\pi}{8}c^2 \quad (3)$$

식 (3)에서  $A_{tri,em}$ 은 삼각형 안에서 삼각형 내부의 비 활용 영역을 나타낸다. 식 (1)~(3)을 활용하여 삼각형 전체 면적 중 셀이 차지하는 영역의 비율과 비 활용 영역의 비율을 나타내면 아래와 같다.

$$R_{tri,cell} = \frac{A_{tri,cell}}{A_{tri}} = \frac{\pi c^2}{2\sqrt{3}(c+s)^2} \quad (4)$$

$$R_{tri,em} = 1 - \frac{A_{tri,cell}}{A_{tri}} = 1 - \frac{\pi c^2}{2\sqrt{3}(c+s)^2} \quad (5)$$

식 (4)에서  $R_{tri,cell}$ 은 삼각형 영역 안에서 배터리 셀이 차지하는 영역의 비율을 나타내며 식 (5)에서  $R_{tri,em}$ 은 비 활용 영역의 비율을 나타낸다.

식 (4)와 (5)를 통하여 원통형 배터리 셀의 유형에 따른 셀 간 간격의 영향 분석이 가능하다. 따라서 배터리 셀 간 간격의 증가에 따른 배터리 셀 면적과 비 활용 영역의 면적에 대한 비교 분석이 수행되었다.

Fig. 6은 모든 배터리 셀 유형을 대상으로 셀 간 간격이 0~3 mm로 변할 때 배터리 셀 영역의 비율과 비 활용 영역의 비율의 변화를 나타낸 것이다. 배터리 셀들 사이의 간격이 없는 경우에는 모든 배터리 셀들이 차지하는 영역의 비율과 비 활용 영역의 비율이 일정하였다. (각각

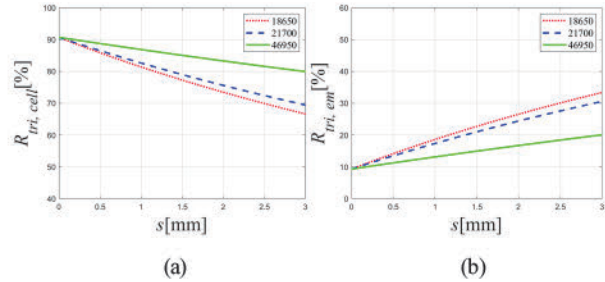


Fig. 6 Comparative analysis of the cell and void areas of cylindrical battery cells according to variations in the spacing between cells: (a) cell area relative to the total area and (b) void area relative to the total area

$\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 90.69\%$  와  $1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 9.31\%$ ) 그러나 배터리 셀들 간의 간격이 증가할 수록, 배터리 셀 지름의 크기인 한 차이가 발생하였다. 배터리 셀의 지름이 작을수록 셀 간 간격이 커지면 배터리 셀이 차지하는 영역의 비율이 줄어들고 비 활용 영역의 비율이 증가하였다. 이러한 차이는 18650 원통형 배터리 셀과 46950 원통형 배터리 셀에서 명확하게 확인할 수 있었다. 동일한 배터리 셀들 간 간격 조건에서, 배터리 셀 지름이 클수록 비 활용 영역의 비율은 감소하였다. 그리고 배터리 셀의 지름이 클수록 그 효과는 더 크다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 동일한 배터리 팩 공간에서 더 큰 지름의 배터리 셀을 사용하면 비 활용 영역의 비율은 줄어들게 되고 배터리 셀이 차지하는 영역의 비율은 높아지게 된다. 배터리 팩 관점에서는, 높은 지름을 가진 배터리 셀일수록 배터리 팩 내부에서의 배치가 높은 조밀성을 가지며 공간 효율성이 향상되어 지름이 작은 소형 배터리 셀에 비해 더 높은 에너지 밀도를 확보할 수 있다. 따라서 배터리 셀들 사이의 간격이 일정한 배터리 팩 설계 시, 지름이 큰 배터리 셀을 선택하는 것이 비 활용 영역을 효과적으로 줄이고 내부 공간 활용을 극대화할 수 있다. 실제 배터리 팩에서도 이와 같은 원통형 배터리 셀의 유형별 경향성이 확인되는지 분석하기 위하여 다음의 장에서는 배터리 팩 단위의 분석을 수행한다.

원통형 배터리 셀의 지름이 지금보다 증가할 경우 삼각형 배치와 다른 형태로 배치될 수 있으며 구체적으로는 하나의 행 또는 열로만 배치될 수 있을 것이다. 이 경우 비 활용 영역의 비율이 앞에서 분석한 것보다 달라질 것이다. 이를 고려하기 위하여 다음과 같은 배치 공간과 분석을 수행하였다.

Fig. 7은 배터리 셀들이 하나의 행(또는 열)로 배치된 배터리 팩 내부 공간 중 일부를 나타내며 붉은색으로 표시된 부분은 배터리 셀이 차지하는 영역이고 푸른색으로 나타낸 부분은 비 활용 영역을 나타낸다. 전체 영역에 대

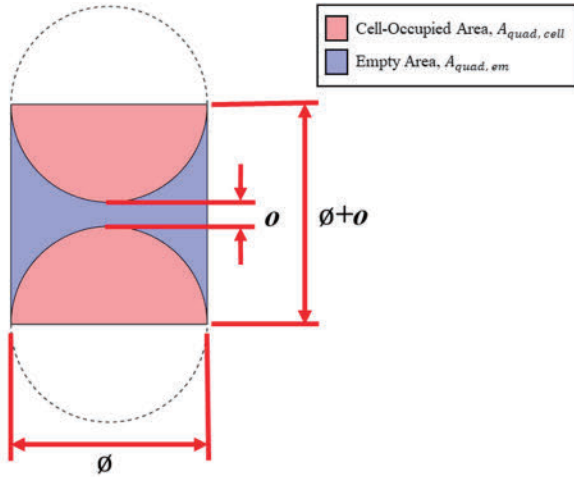


Fig. 7 Analysis of the void spaces between cells according to unidirectional arrangement of cylindrical battery cells

하여 이 두 영역이 차지하는 각각의 비율을 각각  $R_{quad,cell}$  과  $R_{tri,em}$  이라고 정의한다. 그리고 배터리 셀들 사이의 간격에 따라 이들의 비율 값을 살펴보면 Fig. 8과 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

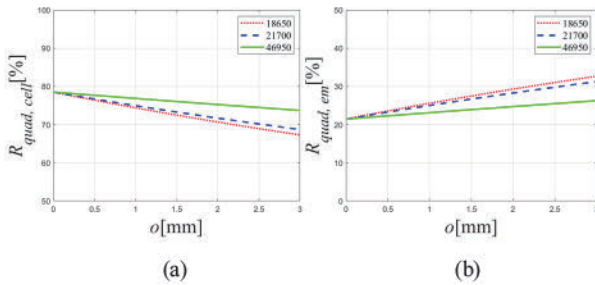


Fig. 8 Comparative analysis of cell and void areas of cylindrical battery cells according to the change in spacing between battery cells placed in one direction: (a) cell area relative to total area and (b) void area relative to total area

모든 배터리 셀 유형에 대하여 배터리 셀들 사이의 간격이 0~3 mm로 변할 때 배터리 셀이 차지하는 영역의 비율( $R_{quad,cell}$ )을 Fig. 8(a)에, 비 활용 영역이 차지하는 영역의 비율( $R_{tri,em}$ )을 Fig. 8(b)에 각각 나타냈다. 배터리 셀의 배치가 달라졌음에도 앞의 삼각형 배치의 결과와 같이 배터리 셀의 지름이 클수록 배터리 셀이 차지하는 비율은 증가하고 비 활용 영역이 차지하는 비율은 감소하여 에너지 밀도 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

본 절에는 정삼각형 단위의 셀 배열을 기반으로 셀 간 간격과 지름 변화가 공간 활용에 미치는 영향을 정량적으로 분석했다. 그 결과, 셀 지름이 증가할수록 사공간 비

율을 감소한다는 일반적인 경향을 도출했다.(이는 한 방향으로 배치된 경우에도 동일하게 확인되었다.) 그러나 실제 배터리 팩은 제한된 직사각형 공간 내에서 셀을 규칙적으로 배치하는 구조를 가지며, 공간 활용도는 삼각형 모델에서 나타나는 이상적인 결과와는 다른 양상을 보일 수 있다. 따라서 실제 설계에 가까운 공간 활용 특성을 분석하기 위해, 다음 절에서는 사각형 공간을 정의하고, 동일한 총 에너지 용량을 충족하는 셀 배치 조건 하에서 셀 지름에 따른 공간 점유율 및 사공간 비율을 분석하고자 한다.

### 3.3 동일한 에너지 탑재 기준의 배터리 팩에 대한 원통형 배터리 셀의 유형별 특성

앞에서 우리는 정해진 공간 내부에 서로 다른 유형의 원통형 배터리 셀을 배터리 팩에 탑재하고 에너지 밀도를 비교하였다. 그러나 제한된 공간을 바탕으로 한 배터리 팩의 에너지 밀도는 공정한 비교가 어렵다는 것이 확인되었다. 따라서 본 장에서는 새로운 기준을 통하여 배터리 팩의 에너지 밀도를 비교할 것이다. 에너지 밀도는 배터리 팩의 부피와 탑재 에너지로 도출된다. 이를 바탕으로 본 장에서는 목표 탑재 에너지를 선정하고 해당 에너지를 탑재할 수 있는 유형별 배터리 팩을 도출하여 에너지 밀도를 비교할 것이다. 동일 에너지를 탑재하기 위한 영역이 작을수록 더 높은 에너지 밀도를 가질 수 있기 때문이다. 이를 위해 Fig. 9와 같은 배터리 셀들의 배열과 배터리 팩의 치수를 고려한다.

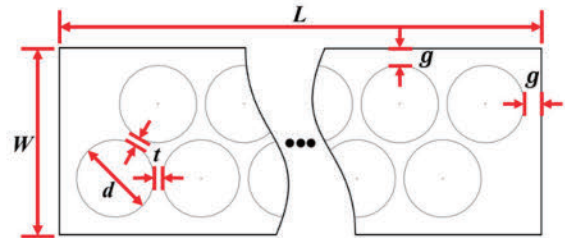


Fig. 9 Internal configuration of the battery pack with two rows of cylindrical battery cells

Fig. 9는 배터리 팩의 에너지 밀도 비교를 위하여 본 장에서 새롭게 제안하는 배터리 팩 내부의 배터리 셀들 배열의 모습이다. 가장 간단한 단위와 배열로 원통형 배터리 셀들을 배치하고 그 배터리 셀들을 탑재할 수 있는 사각형 형태의 배터리 팩을 구성하여 탑재 에너지의 부피를 결정한다.

이때 목표로 선정된 탑재 에너지는 23,250 Wh이다. 해당 에너지를 탑재하기 위해서는 18650 원통형 배터리

셀, 21700 원통형 배터리 셀 그리고 46950 원통형 배터리 셀은 각각 1,860개, 1,250개, 186개가 필요하다.

Fig. 9와 같이 원통형 배터리 셀들을 배치했을 때, 배터리 팩의 폭, 길이 그리고 넓이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = 2g + d + \frac{\sqrt{3}}{2}(d + t) \quad (6)$$

$$L = 2g + d + \frac{1}{2}(N - 1)(d + t) \quad (7)$$

$$A_{rec} = W \times L \quad (8)$$

여기에서 배터리 셀의 지름을  $d$ , 배터리 셀들 사이의 거리를  $t$ , 셀의 개수를  $N$  그리고 배터리 팩과 배터리 셀 사이의 거리를  $g$ 라고 나타냈다. 또한 배터리 팩의 폭과 길이를 각각  $W$ 와  $L$ 로 나타냈으며  $A_{rec}$ 는 배터리 팩의 넓이를 의미한다.

배터리 팩의 넓이는 원통형 배터리 셀들의 유형에 따라 변할 수도 있지만 배터리 셀들 사이의 간격에 따라 다를 수 있다. 배터리 셀들 사이의 간격의 영향성을 제외하기 위하여 배터리 셀 간 간격이 없는 상태에서의 배터리 팩의 에너지 밀도를 비교하면 다음과 같다.

Table 4는 동일한 용량의 에너지를 탑재하기 위하여 필요한 각 유형별 원통형 배터리 셀의 수량, 배터리 팩의 부피 그리고 배터리 팩의 에너지 밀도를 나타낸다. 가장 높은 에너지 밀도는  $5.35 \times 10^2 \text{ kWh/m}^3$ 이며 46950 원통형 배터리 셀을 탑재했을 때로 확인되었다. 반면 가장 낮은 에너지 밀도는 18650 원통형 배터리 셀을 탑재했을 때이고 에너지 밀도는  $3.98 \times 10^2 \text{ kWh/m}^3$ 였다. 이 결과를 통하여 더 높은 에너지 밀도의 배터리 팩을 위해서는 지름이 큰 원통형 배터리 셀이 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Energy density comparison of rectangular battery packs with zero cell-to-cell distance

Cell type	18650	21700	46950
Energy [Wh]	12.5	18.6	125
Number of cells	1,860	1,250	186
Total energy [kWh]	23.25		
Rectangular battery pack area [m <sup>2</sup> ]	$89.86 \times 10^{-2}$	$77.86 \times 10^{-2}$	$45.73 \times 10^{-2}$
Rectangular battery pack volume [m <sup>3</sup> ]	$5.84 \times 10^{-2}$	$5.45 \times 10^{-2}$	$4.34 \times 10^{-2}$
Volumetric energy density [kWh/m <sup>3</sup> ]	$3.98 \times 10^2$	$4.27 \times 10^2$	$5.35 \times 10^2$
Density increase rate [%]	100	107.17	134.45

3.2장과 유사하게 비 활용 영역의 변화를 분석하기 위하여 배터리 셀들이 차지하는 영역과 비 활용 영역 각각의 넓이를 다음과 같이 나타낸다.

$$A_{rec,cell} = \frac{\pi}{4}d^2N \quad (9)$$

$$A_{rec,em} = WL - \frac{\pi}{4}d^2N \quad (10)$$

여기에서  $A_{rec,cell}$ 는 셀이 차지하는 영역을 의미하며  $A_{rec,em}$ 는 비 활용 영역이 차지하는 영역을 나타낸다. 두 영역이 전체 배터리 팩의 넓이에서 차지하는 비율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{rec,cell} = \frac{A_{rec,cell}}{A_{rec}} = \frac{\pi d^2 N}{4WL} \quad (11)$$

$$R_{rec,em} = 1 - \frac{\pi d^2 N}{4WL} \quad (12)$$

여기에서 배터리 팩에서 배터리 셀들이 사용하는 넓이의 비율을  $R_{rec,cell}$ 로 나타냈고 배터리 팩에 대한 비 활용 영역의 넓이의 비율을  $R_{rec,em}$ 로 나타냈다. 새로운 배터리 팩 내부에서의 배터리 셀간 간격의 영향을 살펴보기 위하여 간격에 따른 배터리 셀 영역과 비 활용 영역의 변화를 다음과 같이 나타냈다.

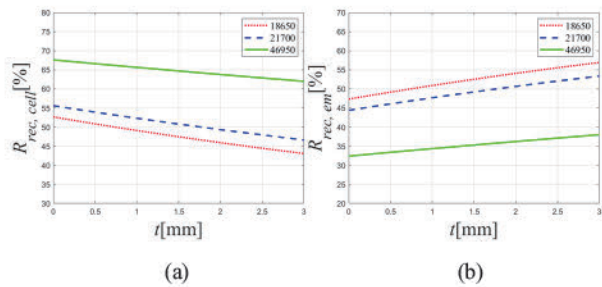


Fig. 10 Analysis of the effects of battery cell type and cell-to-cell spacing on the cell occupied area in battery pack with the same energy capacity: (a) cell area relative to the total area and (b) void area relative to the total area

Fig. 10(a)와 (b)는 각각 배터리 셀들 사이의 간격 변화에 따른 배터리 셀이 차지하는 면적 비율과 비 활용 영역이 차지하는 면적 비율을 나타낸다. 앞의 결과와 유사하게 원통형 배터리 셀의 지름이 클수록 비 활용 영역의 비중이 줄어들었다. 또한, 배터리 셀들 사이의 간격이 증가하더라도 비 활용 영역의 비율이 증가하는 폭이 크지 않았다. 이를 통하여 새로운 배터리 팩에서도 비록 배터리 셀들 사이의 간격이 존재하더라도 더 큰 지름의 원통형

배터리 셀을 쓰는 것이 에너지 밀도를 높일 수 있는 방법이라는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 18650, 21700, 46950 원통형 셀을 대상으로 배터리 셀 및 배터리 팩 단위의 에너지 밀도를 비교하였다.

배터리 셀의 경우 원통형 배터리 셀 자체가 가진 특성으로 인하여 대체적으로 높은 에너지 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 각 유형 별 배터리 셀들은 서로 다른 치수를 가지기 때문에 각 배터리 셀의 부피 및 용량이 상이하였다. 그러나 에너지 밀도 측면에서는 큰 차이는 없었다. 가장 큰 차이가 18650 원통형 배터리 셀과 46950 원통형 배터리 셀에서 확인되었으나 그 수준은 약 4.8% 정도였다. 따라서 배터리 셀 단위에서는 거의 유사한 에너지 밀도를 가진다는 것이 확인되었다.

배터리 팩 단위의 에너지 밀도를 비교하기 위하여 본 연구에서는 원통형 배터리 셀을 주로 사용하는 배터리 팩의 3D model을 고려하였다. 해당 배터리 팩에 18650/21700/46950 원통형 배터리 셀들을 탑재하고 실제 탑재된 배터리 셀들을 통하여 탑재 용량과 에너지 밀도가 비교되었다. 그러나 이 경우 고려된 배터리 팩이 특정 배터리 셀을 기준으로 개발되었기 때문에 다른 유형의 배터리 셀들은 탑재에 제한이 있었다. 따라서 새로운 기준의 분석이 필요함이 확인되었다.

원통형 배터리 셀들은 배터리 팩에 탑재될 때 비 활용 영역을 만들어 내기 때문에 비 활용 영역에 대한 분석도 본 연구를 통하여 수행되었다. 본 연구의 결과를 통하여 원통형 배터리 셀의 경우 지름이 증가할수록 배터리 팩의 비 활용 영역이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 배터리 셀들 사이의 간격도 비 활용 영역에 영향을 주었는데 간격의 크기가 커지면 모든 유형의 배터리 셀에서 비 활용 영역이 증가하였다. 다만 원통형 배터리의 지름이 클수록 그 증가폭은 감소하였다.

원통형 배터리 셀들의 유형별 에너지 밀도 비교를 좀 더 균형 있게 하기 위하여 목표 탑재 에너지를 선정하고 탑재 에너지 달성 기준의 배터리 팩 부피를 바탕으로 에너지 밀도를 비교하는 방식이 본 연구에서 새롭게 제안되었다. 해당 방법을 통하여 비교한 결과 원통형 배터리의 지름이 클수록 높은 에너지 밀도를 가지는 배터리 팩이 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이 경우에도 원통형 배터리 셀의 지름이 클수록 공간을 보다 효율적으로 활용할 수 있으며 비 활용 영역 발생의 단점도 다른 유형의 원통형 배터리 셀들보다 크지 않다는 것이 확인되었다. 본 연구의 결과를 통하여 배터리 팩의 에너지 밀도

향상에 좋은 참고가 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 에너지 밀도 관점에서 배터리 셀의 지름을 분석하였다. 그러나 원통형 배터리 셀의 지름이 증가하면 배터리 셀 중심 온도 상승, 내부 저항 증가 등의 문제들이 발생할 수 있어 배터리 셀 지름의 증가가 모든 상황에서 긍정적인 영향을 미치는 것은 아니다. 따라서 이러한 문제점을 고려한 최적의 배터리 셀 지름에 대한 분석이 필요할 것이다, 후속 연구에서는 이들의 효과들을 모두 고려하여 최적의 배터리 셀의 지름에 대한 심층적인 분석을 수행할 것이다.

#### 후 기

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 전기자동차 안전성 평가 및 통합 안전 기술개발(RS-2023-00243574) 과제 의 일환으로 수행된 연구 결과로 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) Y. Pan, Y. Xiong, L. Wo, K. Diao and W. Guo, "Lightweight Design of an Automotive Battery-Pack Enclosure via Advanced High-Strength Steels and Size Optimization," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.22, No.5, pp.1279-1290, 2021.
- 2) S. J. Hong, J. W. Lee and G. H. Kim, "Development of Electric Vehicle Crash Scenarios and Safety Testing Methods Considering Road Infrastructure," *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, Vol.16, No.2, pp.27-33, 2024.
- 3) J. Park, J. Lee and S. Ha, "Structural Safety Evaluation and Frame Reinforcement Methods Based on Battery Position in EV Conversion Trucks," *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, Vol.17, No.2, pp.45-50, 2025.
- 4) J. W. Lee, "Analysis of Types and Performance of Portable Replaceable Batteries," *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.4, pp.357-362, 2024.
- 5) H. Kim and C. Kim, "Effective Mechanical Properties of an Innovative Module-Free Li-Ion Battery Pack Integrated with Honeycomb Cells and Optimum Design for Enhanced Crash Energy Absorption," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.25, No.6, pp.1297-1307, 2024.
- 6) H. Wang, S. Wang, X. Feng, X. Zhang, K. Dai, J. Sheng, Z. Zhao, Z. Du, Z. Zhang, K. Shen, C. Xu, Q. Wang, X. Sun, Y. Li, J. Ling, J. Feng, H. Wang and M. Ouyang, "An Experimental Study on the Thermal Characteristics of the Cell-to-Pack System," *Energy*, Vol.227, Paper No.120338, 2021.
- 7) C. Zhang, S. Wang, Z. Liu, Y. Li, Z. Sun, H. Jing, X. Gao, W. Hu, H. Yang, C. Xu, Y. Li, J. Sun, H. Wang and X.

- Feng, "Experimental Investigation on the Venting Gas of Cell-to-Pack Lithium-Ion Battery Module During Thermal Runaway," *Journal of Energy Storage*, Vol.88, Paper No.111533, 2024.
- 8) J. W. Lee, "Effect of Battery Pack Stiffness Depending on Battery Cell Types in Cell-to-Pack Technology," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.26, No.1, pp.63-71, 2025.
- 9) S. Hong, D. Ma, W. Zeng, J. Shi, Y. Liu, L. Yang, Y. Fan, Y. Liu, C. Yang and B. Hong, "Optimization of Fast-Charging Strategy for LISHEN 4695 Cylindrical Lithium-Ion Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol.629, Paper No.236013, 2025.
- 10) H. Kim, "Numerical Study on Cooling Characteristics for Thermal Safety of Cylindrical Li-Ion Battery Cell with Tabless Structure," *Transactions of KSAE*, Vol.31, No.6, pp.457-465, 2023.
- 11) S. Baazouzi, N. Feistel, J. Wanner, I. Landwehr, K. P. Birke and A. Fill, "Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells-A Generic Overview," *Batteries*, Vol.9, No.6, Paper No.309, 2023.
- 12) M. Ank, A. Sommer, K. A. Gamra, J. Schöberl, M. Leeb, J. Schachtl, N. Streidel, S. Stock, M. Schreiber, P. Bilfinger, C. Allgäuer, P. Rosner, J. Hagemester, M. Rößle, R. Daub and M. Lienkamp, "Lithium-Ion Cells in Automotive Applications: Tesla 4680 Cylindrical Cell Teardown and Characterization," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.170, No.12, Paper No.120536, 2023.
- 13) K. Mekdour, A. K. M. R. Reddy, J. I. G. Dawkins, T. M. G. Selva and K. Zaghib, "Comparative Analysis of Cell Design: Form Factor and Electrode Architectures in Advanced Lithium-Ion Batteries," *Batteries*, Vol.11, No.12, Paper No.450, 2025.
- 14) T. S. Kim, "Comparison of Energy Density for Battery Pack According to Cylindrical Battery Type," *KSAE Spring Conference Proceedings*, p.1153, 2025.