

리튬 이온 배터리에 대한 자속 밀도 (magnetic flux density) 기반 위조 방지 대책

Masahito Tsukano *1 Naoki Noguchi *1 Minako Terao *1
Miwa Tobita *1 Kazuma Takenaka *1 Jun Okano *2
Yukiko Onoue *3 Kaoru Omichi *2 Yuki Tominaga *2

이 연구는 리튬 이온 배터리에 대한 자속 밀도 기반 위조 방지 대책의 원리를 제시한다. 지구 온난화에 대한 대응책으로 전기 자동차의 사용이 증가함에 따라 리튬 이온 배터리의 생산이 더 확대될 것으로 예상된다. 그러나 이러한 배터리에는 희귀한 소재가 포함되어 있기 때문에 도난이나 위조품으로 대체하는 표적이 될 수 있다. 우리는 이 연구에서 배터리가 제조업체 또는 개별적인 배터리에 대하여 고유한 자속 밀도를 생성한다는 사실을 확인할 수 있었는데, 그 이유는 조립 과정에서 발생하는 오류가 파라미터에 변화를 발생시키기 때문이다. 또한 실험 전체에 걸쳐 우리는 실린더형 셀로 구성된 배터리 팩에서는 개별적으로 고유한 자속 밀도를 관찰할 수 있었던 한편, 프리즘형 셀에서는 제품의 유형에 해당하는 플럭스 밀도가 생성된다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 원리는 위조 방지 수단으로 사용될 수 있는데, 그 이유는 위조품에서는 고유성을 재현하기 힘들기 때문이다.

개요

온실가스를 더 많이 배출함으로써 인하여 지구 온난화가 급속히 가속되고 있고, 그 결과 전 세계적으로 폭우, 이상 고온 및 가뭄과 같은 극단적인 기상 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 이는 생태계와 인간 사회에 현저하게 부정적인 영향을 미치고 있다⁽¹⁾. 이러한 기후 변화는 글로벌 규모의 막대한 손실의 원인이 되는 사회적 문제를 촉발할 수 있고, 환경뿐 아니라 사회 전반에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 문제는 단기적 및 장기적 위협으로 인식하여야 하며⁽²⁾, 이에 대한 대책을 마련하는 것이 강조되고 있다. 이러한 기후 변화를 완화하기 위해, 각국은 파리 협정을 기초로 하여 온실가스 배출 저감에 대한 목표를 설정하여 다양한 대책을 시행하고 있다⁽³⁾.

운송 분야에서는 자동차 및 기타 이동 수단의 전기화가 진행되고 있고⁽⁴⁾, 전 세계의 정부는 운행 중 이산화탄소를 배출하는 가솔린 차량을 전기차로 전환하는 정책을 적극적으로 추진하고 있다⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾. 이러한 전환으로 인하여 차량용 리튬 이온 배터리의 사용이 급격하게 증가하게 되었으며⁽⁷⁾, 이러한 추세는 앞으로도 계속될 것으로 예상된다⁽⁸⁾. 그러나, 이러한 배터리 유통의 증가와 함께 위조품에 대한 우려 역시 증가하고 있다. 차량용 리튬 이온 배터리는 대용량이고, 코발트 및 니켈과 같은 희귀 금속을 포함하고 있기 때문에 경제적 가치가 높으며, 따라서 이는 도난 및 위조품 제조의 매력적인 표적이 되고 있다. 위조품 배터리의 확산은 심각한 안전 문제의 원인이 된다. 예를 들어, 위조품 리튬 이온 배터리가 전동 공구와 같은 소비자 제품에 널리 유통되고 있으며, 이러한 배터리를 사용함으로써 인하여 수많은 화재 사고가 발생하였다⁽⁹⁾. 우리는 이러한 문제를 해결하기 위해, 진품과 위조품 리튬 이온 배터리 팩을 구별할 수 있는 비파괴적 및 비침습적 기술을 개발하고 있다. 이 연구에서 우리는 진품과 위조품 리튬 이온 배터리 팩을 구별할 수 있는지 여부를 확인하기 위해 작동 중 자속 밀도를 측정하는 실험 작업을 수행하였고, 이 때 특별히 프리즘형 및 실린더형 셀을 사용하는 배터리 팩에 초점을 맞추었다.

*1 Innovation Center, Marketing Headquarters

*2 Innovative Research Excellence, Power Unit & Energy, Honda R&D Co., Ltd.

*3 Corporate Strategy Operations, Honda Motor Co., Ltd.

선행 연구

Kong 외 연구진은 리튬 이온 배터리 위조품에 대한 연구를 수행하였다⁽¹⁰⁾. 연구진의 연구 결과에 따르면, 위조품 배터리 셀에는 새로 제작된 불법 제품뿐 아니라 올바르지 않은 모델 번호, 크기 또는 모양, 그리고 품질 기준을 만족하지 못하였지만 외관상 진품 제품과 유사한 노후한 그리고 불량인 제품이 포함돼 있다는 사실을 확인하였다. 그 결과, 육안으로는 정품과 구별할 수 없을 만큼 정교한 위조품 배터리가 시장에 유통되고 있는 상황이다⁽⁹⁾.

정품 배터리 팩은 배터리 셀 및 팩 내의 제어 메커니즘을 통하여 안전하게 작동하도록 설계되어 있다. 반면 위조품은 종종 올바르게 작동하지 않거나 제어 기능 자체가 없는 경우가 많으므로⁽¹¹⁾ 종종 과전압이나 과전류⁽⁹⁾와 같은 문제를 초래할 수 있는데, 이러한 문제는 최악의 경우 비정상적인 과열이나 화재 위험으로 이어질 수 있다.

이러한 위험을 완화하기 위해, 배터리 제조업체 및 배터리에 의하여 구동되는 제품의 제조업체는 위조 배터리 팩을 식별하기 위한 지침을 제공하거나 소비자에게 경고하고 진품 여부를 표시하기 위해 홀로그램 실을 적용하는 등과 같은 다양한 대응책을 시행하고 있다⁽¹²⁾. 그러나 앞서 언급하였듯이, 매우 정교하게 제작된 위조품이 널리 퍼져 있기 때문에 이러한 조치만으로 사고를 방지하는 데에는 한계가 있다. 따라서 외형의 차이에 의존하지 않으면서 위조 제품을 식별해 낼 수 있는 탐지 기술이 필요한 실정이다.

외형에 의존하지 않는 QR 코드 또는 내장 IC 칩을 사용하여 진품을 식별하는 대안이 제시되었다⁽¹⁰⁾. 그러나, 이러한 방법 역시 완전하지 않은데, 그 이유는 QR 코드 역시 손쉽게 복제될 수 있고, IC 칩은 정품으로부터 제거한 후 위조품에 장착할 수 있기 때문이다.

Eto 외 연구진⁽¹³⁾은 서로 다른 전극 형태를 가진 두 가지 종류의 프리즘형 셀 주위의 자기장을 측정하고, 셀 유형에 따라 자기장의 분포가 변화한다는 사실을 확인하였다. 이를 바탕으로 우리는 프리즘형 셀의 자속 밀도를 더욱 정밀하게 측정하였고, 각 제품은 고유한 자속 밀도를 가진다는 사실을 검증하였다. 또한 우리는 다수의 실린더형 셀이 포함된 배터리 팩이 제조 공정의 차이로 인하여 자속 밀도에 개별적인 차이가 있다는 사실을 확인하였다. 이는 정품의 외관은 모방할 수 있을지라도 자속 밀도는 복제할 수 없다는 사실을 보여주는 것이다. 따라서, 자속 밀도를 측정함으로써 배터리가 정품으로 제조되었는지 여부를 확인할 수 있다.

위조 리튬 이온 배터리 탐지 개념

프리즘형 셀에서 위조품을 식별하는 방법

위조된 프리즘형 셀의 식별은 모델의 유형에 따라 내부 구조가 다르다는 사실에 기초한다. 일반적으로 배터리 셀의 전류 컬렉터 및 기타 내부 구조적 요소는 개발자에 따라 다르다. 그 결과, 충전 및 방전 시 배터리 셀을 통해 전류가 흐르는 경우 밀도 분포의 차이가 발생하고, 배터리 셀 주변에는 제품 특유의 자속 밀도가 발생하게 된다. 따라서 비록 위조품이 외관상 정품과 유사하다 할지라도, 내부 구조의 차이로 인하여 자속 밀도는 탐지 가능한 변화를 초래하게 되고, 이를 통해 위조 셀을 식별할 수 있게 된다.

실린더형 셀의 위조품을 식별하는 방법

실린더형 셀을 포함하고 있는 배터리 팩에서는 조립 과정에서 발생하는 개별적인 변화가 자속 밀도에 영향을 미치게 되고, 그 결과로 인하여 동일한 모델의 배터리라 할지라도 다른 플럭스 패턴이 나타날 수 있다.

내부 전류 포집 호일(foil)을 전기적으로 터미널에 연결하는 실린더형 셀의 양극 및 음극 터미널에는 그림 1과 같이 탭(tab)이라고 부르는 구성 요소가 사용된다. 충전 및 방전 과정 중 전류가 탭에 집중되는데, 이로 인하여 탭 주변에는 국지적으로 높은 자속 밀도를 생성하게 되고, 실린더형 셀의 원주를 따라 균일하지 않은 플럭스의 분포가 만들어지게 된다.

셀의 외관을 통해 탭의 위치를 식별할 수 없어서 조립 작업 중 탭의 방향은 의도적으로 정렬할 수 없다. 따라서 결과적으로 배터리 팩 조립 시 탭의 방향에 대한 무작위성이 발생하게 되고, 이는 자속 밀도에 영향을 주어 각 배터리 팩마다 고유한 플럭스 분포가 만들어지게 된다. 이러한 특성을 사용하면 출하 시점 및 검증 과정 중 다시 플럭스의 밀도를 측정함으로써 배터리 팩이 진품으로 제조되었는지 확인할 수 있다. 이 메커니즘을 통해 동일한 실린더형 셀을 사용하고 외관이 진품과 완전히 동일한 위조 배터리 팩이 제조된다 하더라도, 자속 밀도의 변동을 확인하여 정품과 위조품 팩을 구별할 수 있다.

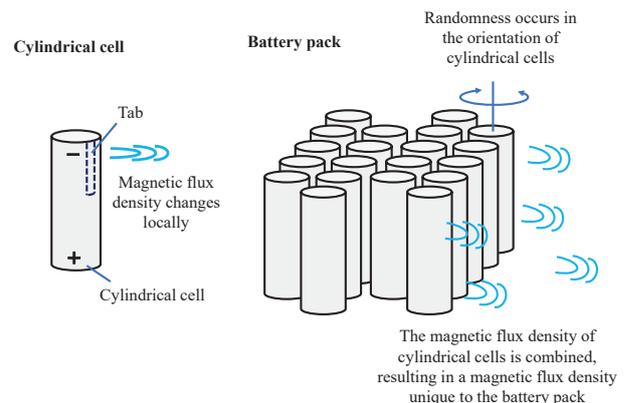


그림1 실린더형 셀에서 개별적인 차이를 유발하는 요인

실제 장비를 사용한 검증 작업

이전 부문에서 설명한 방법은 실제 장치를 사용하여 배터리의 충전 및 방전 중 생성되는 자속 밀도를 측정함으로써 검증되었다. 특별히, 각각의 프리즘형 및 실린더형 셀에 대하여 다음의 두 가지 포인트가 확인되었다.

- 서로 다른 모델 번호의 프리즘형 셀은 각기 다른 고유한 자속 밀도를 생성한다.
- 실린더형 셀이 포함된 배터리 팩은 개별 배터리 팩에 대하여 고유한 자속 밀도를 보인다.

프리즘형 셀의 측정

a) 실험 방법

그림 2는 측정 설정에 대한 개요이다. 샘플 A 및 샘플 B의 두 개의 샘플이 사용되었다. 두 샘플 모두 배터리 성능 규격과 외부 치수가 동일하였지만 모델 번호는 서로 달랐다. 측정 작업은 양극 측 중심선에서 1mm 떨어진 지점에서 라인을 따라 수행하였다.

셀의 측면 윗부분에서 아랫부분까지 5mm의 간격으로 총 17개의 지점에서 측정하였다. 충전 중 생성된 자속 밀도를 시뮬레이션하기 위해 3A의 전류를 흐르게 하였다. 지구 자기장 및 기타 정적 자기장의 영향을 제거하기 위해, 먼저 전류를 흐르게 하지 않은 상태에서 자속 밀도를 측정하였고, 이후 이 값을 충전 중 측정된 플럭스 밀도에서 차감하였다. 다음의 측정값은 정적 자기장을 차감한 후의 자속 밀도이다.

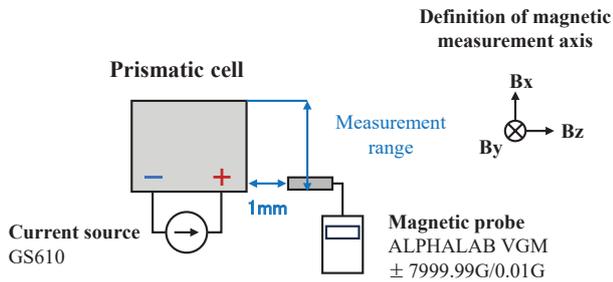


그림2 프리즘형 셀의 측정 방법

b) 측정 결과

그림 3은 측정된 자속 밀도이다. 각 그래프의 수직 축은 측정된 값(μT)을, 수평 축은 측정 위치를 의미한다. 측정 위치는 셀의 터미널 쪽 엣지를 기준으로 0mm로 정의된다. 두 샘플 A 및 샘플 B 모두에서 B_x , B_y , 및 B_z 측정값 중 최대값은 약 10~20mm 지점에서 관찰 되었다. 샘플 사이에서 절대값 및 그 차이는 B_x 및 B_z 에 비하여 B_y 에서 더 두드러졌다. 샘플 A의 최대 B_y 값은 18mm 지점에서 $74.5 \mu T$ 였고, 샘플 B의 최대 B_y 값은 13mm 지점에서 $40.5 \mu T$ 였다. 비록 B_x 및 B_z 의 절대값이 상대적으로 작았지만, 0~20mm 범위에서 샘플 사이에서 $1 \mu T$ 이상의 차이(센서의 판독 오차 범위)가 관찰되었다.

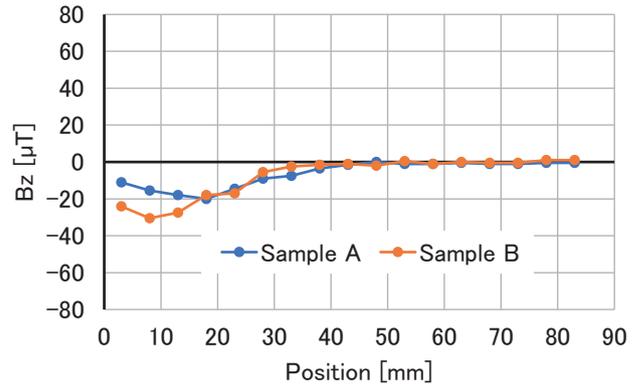
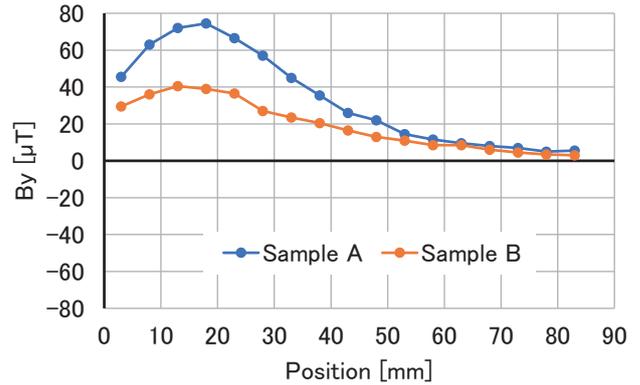
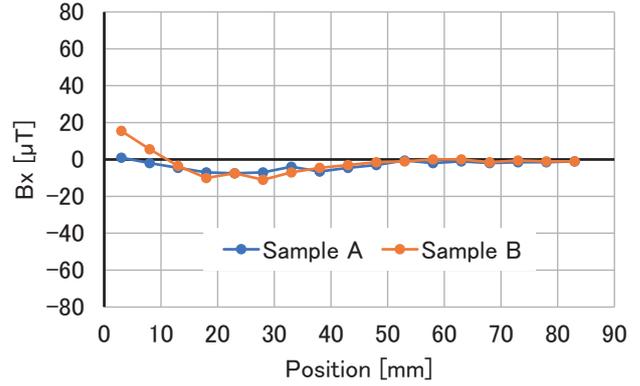


그림3 프리즘형 셀의 자속 밀도의 측정 결과

실린더형 셀을 사용한 배터리 팩의 측정

이전 부문에서 설명한 바와 같이, 실린더형 셀의 위조 탐지 개념은 셀의 원주 방향에서 자속 밀도의 균일하지 않은 분포와 조립 시 실린더형 셀의 각 위치에서의 변화로 인하여 배터리 팩에서 생성된 고유한 자속 밀도에 기초한다. 예비 실험에서는 균일하지 않은 분포가 존재한다는 사실을 확인하기 위해 실린더형 셀 주변의 자속 밀도를 측정하였다. 그 후 배터리 팩 사이에 개별적인 차이가 존재하는지 확인하기 위해 배터리 팩의 자속 밀도를 측정하였다.

실린더형 셀 자속 밀도의 측정

a) 실험 방법

그림 4는 측정 틀이다. 8개의 자기 센서를 축을 따라 10mm 간격으로 실린더형 셀의 표면으로부터 5mm 떨어진 위치에 배치하였다. 이 센서를 사용하여 충전 중 자속 밀도를 측정하였다. 3축 자기 센서를 사용하여 3개의 성분인 실린더형 셀의 축을 따른 축 방향 성분(B_x), 원주 방향 성분(B_θ), 및 방사상 성분(B_r)에 대한 측정값을 구하였다.

이 측정 틀을 사용하여 실린더형 셀에서 원주 방향의 0~360도를 15도의 간격으로 24회 측정하였다. 축 방향에서 센서 보드를 스캔하여 총 32개의 측정 포인트를 구하였다. 프리즘형 셀 측정과 마찬가지로, 먼저 전류를 흐리지 않은 상태로 자속 밀도를 측정한 후, 1.45A의 전류를 사용하여 실린더형 셀을 충전할 때의 자속 밀도로부터 정적 자기장 효과를 차감함으로써 그 차이를 계산하였다.

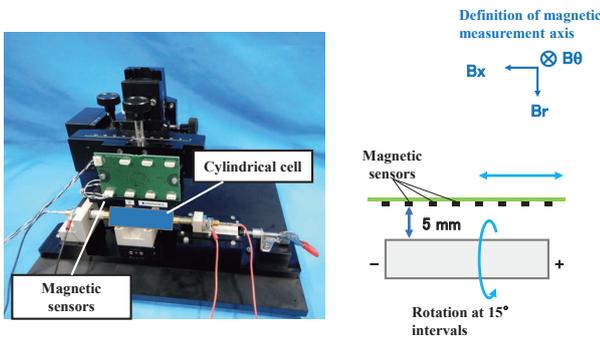


그림4 실린더형 셀의 측정 틀

b) 측정 결과

그림 5는 충전 중 자속 밀도의 측정 결과이다. 수직 축은 실린더형 셀의 축 좌표(x)이고, 수평 축은 원주 각(θ)이다. $x = 0\text{mm}$ 위치는 양극에 해당하고, $x = 70\text{mm}$ 위치는 음극에 해당한다. 또한, 그림 5의 결과로부터, 그림 6은 음극 부근의 $x = 60\text{mm}$ 에서 원주 방향의 자속 밀도를 보여준다. 가장 큰 변화는 자속 밀도의 B_θ 성분에서 관찰되었는데, 이는 180도 위치에서 $23.6\mu\text{T}$ 로 최대치였다. B_r 성분 역시 원주 방향으로 균일하지 않은 분포를 보여주고, 이 때 최대 및 최소값 사이의 차이는 $7.6\mu\text{T}$ 이다. 이에 반해 B_x 성분은 최소한의 변화를 보였고, 원주 방향에서 거의 균일한 상태를 유지하였다.

이 결과는 실린더형 셀의 방향에 따라 배터리 팩 내에서 발생하는 자속 밀도의 개별적인 차이를 보여준다.

배터리 팩 자속 밀도의 측정

a) 실험 방법

다음으로, 다수의 실린더형 셀을 사용한 배터리 팩이 각각의 유닛에 대하여 고유한 자속 밀도를 발생시키는지 여부를 조사하였다. 3개의 Honda Mobile Power Pack e: 유닛을 각각 두 번씩 측정하였으며, 동일한 및 다른 유닛 사이에서 자속 밀도를 비교하였다. 실린더형 셀에 대한 자속 밀도 측정과 마찬가지로 그림 7과 같은 전용 측정 틀 및 자기 센서 배열 방식을 개발하였다. 배터리 팩에 8.7A의 방전 전류를 흘린 상태로 및 전류를 흘리지 않은 상태로 자속 밀도를 측정하였고, 이러한 값의 차이를 측정값으로 사용하였다.

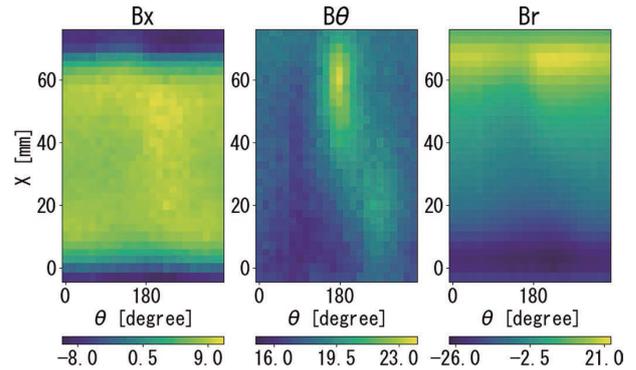


그림5 실린더형 셀의 자속 밀도 측정 결과

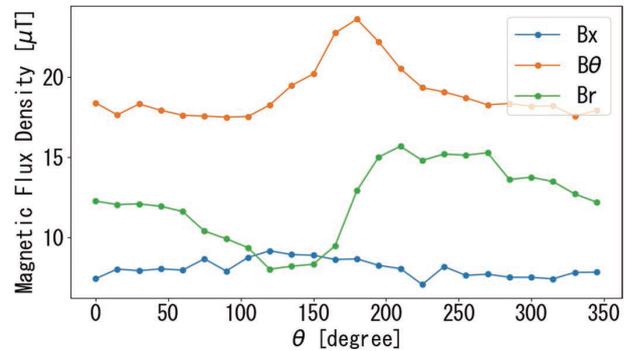


그림6 $x = 60\text{mm}$ 위치에서의 원주 방향 자속 밀도

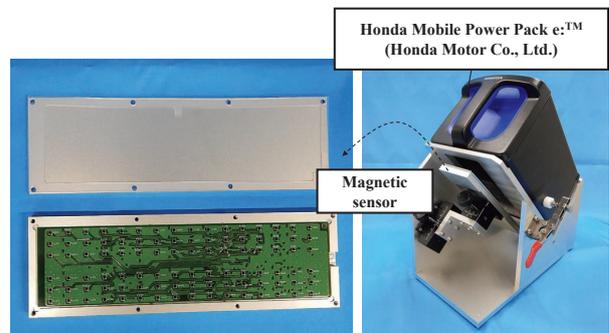


그림7 배터리 팩 측정 틀

b) 측정 결과

3개의 배터리 팩 A, B, C에 대하여 각각의 개별적인 유닛 사이의 측정값과 차이를 시각화하였다. 대표적인 예로써, 그림 8은 배터리 팩 A 및 배터리 팩 B의 측정값을 보여준다. 이 그림의 배터리 팩 사이에서 자속 밀도 사이의 차이는 관찰되지 않았다.

따라서 각 배터리 팩에 대하여 두 번의 측정 작업을 수행하였고(그림 9), 동일한 배터리 팩에 대한 측정값의 차이(그림 10)을 시각적으로 표현하였다. 동일한 배터리 팩에 대한 측정값의 차이는 노이즈 수준에 불과하였다. 그러나, 배터리 팩 B 및 배터리 팩 A 뿐만 아니라 배터리 팩 C 및 배터리 팩 A 사이에서도 측정값 사이의 분포에 지속적인 차이를 확인할 수 있었다. 표 1은 그림 9 및 10에 표시된 각 분포의 최대 및 최소 차이와 함께 B_x , B_y , 및 B_z 에 대한 측정 오류($\pm 3\sigma$)를 보여준다. 이 때 σ 는 동일한 배터리 팩의 차이로부터 계산된 왜곡 없는 표준편차이다. 동일한 배터리 팩에 대한 측정값의 최대 차이가 $1.8\mu T$ 였던 반면, 다른 배터리 팩의 경우, 최소 차이는 $5.1\mu T(B-A)$ 였다. 이러한 차이는 측정 오류의 범위를 벗어나는 값이었고, 통계학적으로 유의미한 것이었다.

이러한 결과는 처음에는 배터리 팩에 의하여 생성된 자속 밀도에 눈에 띄는 차이가 없다는 사실을 보여주는 것이었다. 이는 모든 배터리 팩에 존재하는 공통적인 신호 요소가 개별적인 차이를 압도하기 때문이다. 그러나, 배터리 팩 사이의 차이를 계산하고 공통 요소를 제거함으로써 각 배터리 팩이 고유한 자속 밀도를 가진다는 사실을 확인할 수 있었다.

표 1 각 측정에 대한 최대-최소값 비교

	B_x (μT)	B_y (μT)	B_z (μT)
A-A	1.6	1.8	1.2
B-B	1.3	1.4	1.0
C-C	1.4	1.5	1.1
B-A	5.1	9.3	15.6
C-A	7.0	10.4	13.4
$\pm 3\sigma$	± 0.8	± 1.1	± 0.9

논의할 사항

프리즘형 셀 및 자속 밀도의 구조

그림 11은 프리즘형 셀의 일반적인 구조이다. 그림 11의 우측 다이어그램에서 확인할 수 있는 바와 같이, 작동 중 전류는 전극을 통해 수직으로 흐르게 된다. 따라서, B_y 성분은 전류의 흐름과 수직이고, B_x 및 B_z 성분보다 더 커지는 경향이 있으며, 이러한 경향은 이 실험에서 측정된 두 샘플 모두에서 뚜렷하게 관찰되었다. B_y 성분에 대한 측정 작업은 위조 프리즘형 셀을 식별하는 데 유용할 것으로 생각할 수 있는데, 그 이유는 이렇게 함으로 고유한 특성을 보다 분명하게 파악할 수 있기 때문이다. 또한 B_x 및 B_z 성분의 정점 위치는 전극과 와인딩의 접촉 지점과 일치한다. 그림 3에서 B_x 및 B_z 성분의 피크 위치는 샘플 A의 그것보다 원점에 더 가깝고, 샘플 B의 전극과 와인딩의 실제 접촉 지점 역시 샘플 A의 외부 터미널과 더 가깝다는 사실을 확인하였다.

두 샘플 사이에서 컬렉터의 구조에도 차이가 존재하고, 이는 B_y 성분의 정점값에서 약 $20\mu T$ 정도의 값의 차이가 원인이 될 수 있다. 위에서 확인할 수 있는 바와 같이, 컬렉터 구조 및 배열의 차이에 따라 측정값에 차이가 발생하기 때문에, 각 셀의 타입마다 고유한 자속 밀도 분포를 가지게 된다.

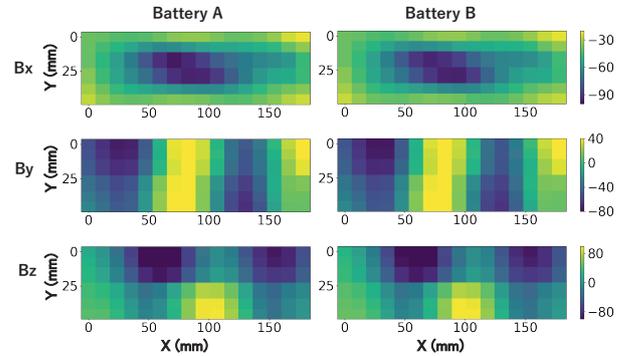


그림 8 배터리 팩 A 및 B의 자속 밀도

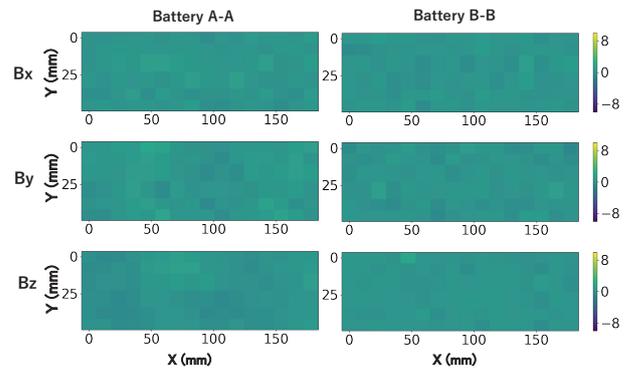


그림 9 동일한 유닛 내에서 자속 밀도의 차이

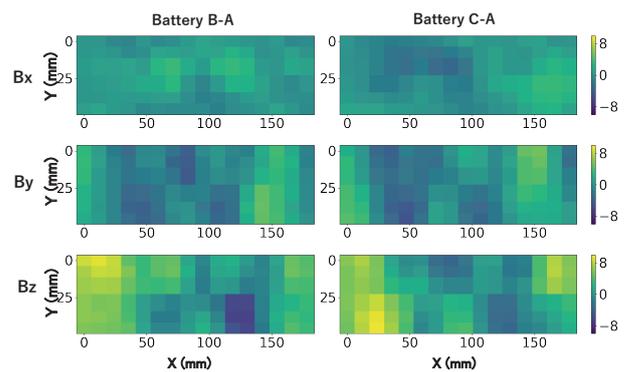


그림 10 다른 유닛 사이의 자속 밀도의 차이

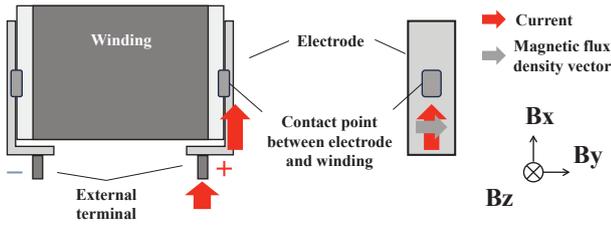


그림11 프리즘형 셀 및 전극의 전체 다이어그램

실린더형 셀에서의 개별적인 차이

실린더형 셀의 원주 방향으로 균일하지 않은 자속 밀도가 발생한다는 사실이 확인되었다. 특히 180도 위치에서 B_{θ} 성분의 정점값이 확인되었고, 따라서 우리는 실제로 이 영역에 음극 탭이 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다.

또한 Ampère 법칙에 따라 자속 밀도는 전류 밀도의 방향(B_r 및 B_{θ} 성분)에 수직인 성분으로 나타난다. 이와는 대조적으로, 탭에 의하여 발생한 특징은 전류 방향과 평행한 B_x 성분에서 덜 두드러지며, 이에 따라 보다 균일한 분포를 보였다(그림 6).

이러한 경향 역시 배터리 팩의 자속 밀도에 영향을 미칠 수 있다. 표 1에서 확인할 수 있는 바와 같이, 배터리 팩 B 및 배터리 팩 A뿐 아니라 배터리 팩 C 및 배터리 팩 A 사이의 차이는 B_x 성분과 비교하였을 때 B_y 및 B_z 성분에 대하여 더 크다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 그림 10은 각 배터리 팩이 개별 유닛에 대하여 특유의 고유한 자속 밀도를 가진다는 사실을 보여준다.

이전 부분의 “위조 리튬 이온 배터리 식별”에서 설명한 식별 방법을 사용하여, 이러한 결과는 각각의 실린더형 셀의 B_r 및 B_{θ} 성분이 균일하지 않은 자속 밀도 분포를 보인다는 사실을 확인시켜 주는 것이었다. 결과적으로 이러한 균일하지 않은 분포 역시 실린더형 셀이 포함된 배터리 팩의 자속 밀도에 개별적인 차이를 유도하게 된다.

결론

이 연구에서는 자속 밀도를 사용하여 위조 리튬 이온 배터리를 탐지하는 개념을 제안하였고, 이는 프리즘형 및 실린더형 셀에 대하여 검증되었다. 이 결과를 통해 우리는 프리즘형 셀이 셀의 종류에 따라 고유한 자속 밀도를 보이고, 실린더형 셀은 탭 영역 주변에서 자속 밀도가 국지적으로 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 실린더형 셀을 사용하는 배터리 팩(Honda Mobile Power Pack e:)의 자속 밀도는 유닛마다 고유한 값을 가진다는 사실을 확인할 수 있었다.

위조품과 진품을 구별하는 기술을 상용화하기 위해 지기 플럭스 밀도를 기반으로 한 배터리 인증 방법이 필요하다. 앞으로 우리는 자속 밀도를 활용한 배터리 인증 기술 개발에 정진할 것이다.

참고문헌

- (1) IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2022, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf, (accessed 2024-07-30)
- (2) World Economic Forum, Global Risks Perception Survey 2023-2024, The Global Risks Report 2024 19th Edition, Insight Report, 2024, https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf, (accessed 2024-07-30)
- (3) United Nations, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/climate-action>, (accessed 2024-09-25)
- (4) Ministry of Economy, Trade and Industry, Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_koho_r2.pdf, (accessed 2024-07-30), (in Japanese)
- (5) Council of the European Union, ‘Fit for 55’: Council adopts regulation on CO₂ emissions for new cars and vans, March 2023, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>, (accessed 2024-07-30)
- (6) The White House, Executive Order on Strengthening American Leadership in Clean Cars and Trucks, August 2021, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/08/05/executive-order-on-strengthening-american-leadership-in-clean-cars-and-trucks/>, (accessed 2024-07-30)
- (7) International Energy Agency, Global EV Outlook 2024, April 2024, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8e1b5f/GlobalEVOutlook2024.pdf>, (accessed 2024-07-30)
- (8) International Renewable Energy Agency, Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050, April 2020, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_Summary_2020.pdf, (accessed 2024-07-30)
- (9) National Institute of Technology and Evaluation, Beware of “low price, high risk” non-genuine batteries, 2024, <https://www.nite.go.jp/data/000154542.pdf>, (accessed 2024-07-30), (in Japanese)
- (10) Lingxi Kong, Diganta Das, et al., “The Distribution and Detection Issues of Counterfeit Lithium-Ion Batteries,” Energies, Vol. 15, No.10, 2022, 3798
- (11) Tapesh Joshi, Saad Azam, et al., “Safety and Quality Issues of Counterfeit Lithium-Ion Cells,” ACS Energy Letters, Vol. 8, No. 6, 2023, pp. 2831-2839
- (12) Francesco Rullani, Karin Beukel, et al., “Anti-counterfeiting strategy unfolded: A closer look to the case of a large multinational manufacturer,” Strategic Management Journal, Vol. 42, No. 11, 2021, pp. 2084-2103
- (13) Eto, Akimoto, et al., “Study of individual identification method by measuring the magnetic field of battery,” Proceedings of Power and Energy Conference, 2022 (in Japanese)

* Honda Mobile Power Pack e: is a registered trademark or trademark of Honda Motor Co., Ltd.

* All other company names, organization names, product names, service names, and logos that appear in this paper are either registered trademarks or trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders.