

3D CAD 모델을 이용한 이차 전지의 형상 결함 검출

조영호* · 류근호** · 이상열***

Geometrical Defect Detection of Secondary Battery Using 3-Dimensional CAD Model

Yeong-Ho Jo* · Keun-Ho Rew** · Sang-Yul Lee***

Abstract

In this study, we transformed 4680 type lithium-ion batteries to 3-dimensional CAD models and present a methodology to detect defects using Radon inverse transformation. Transparency was applied to the model to make it look like a CT image when viewed from the front. One normal and three defect models were created and analyzed. The models were saved as image files while rotating at a certain angle. Then, we used the Radon inverse transformation to reconstruct the original 3D geometry from the image files. Finally, we successfully found defects in the defect models for three cases.

Keywords : Lithium-ion Battery, Defect Detection, Radon Inverse Transformation, Non-destructive Testing

Received : 2022. 10. 11. Revised : 2022. 10. 27. Final Acceptance : 2022. 10. 30.

※ This research was financially supported by Hansung University.

* First Author, Bachelor's Candidate, Department of Mechanical Engineering, Hansung University, e-mail : 1791302@hansung.ac.kr

** Co-Author, Professor, Department of Robotics Engineering, Hoseo University, 201 Sandan 7-ro, Seongmun-myeon, Dangjin-si, Chungcheongnam-do, 31499, Korea, Tel: +82-41-360-4862, e-mail: khrew@hoseo.edu

*** Corresponding Author, Professor, Department of Mechanical Engineering, Hansung University, 116 Sanseongyo-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02876, Korea, Tel: +82-2-760-4126, e-mail: sangyul.lee@hansung.ac.kr

1. 서 론

리튬-이온 배터리(Lithium-ion Battery)는 높은 에너지 밀도와 긴 수명주기를 가지고 있어 다른 종류의 배터리들과의 경쟁에서 우위를 가질 수 있었다. 이러한 장점들을 가진 리튬-이온 배터리가 여러 전자기기와 전자자동차산업에 접목되기 시작하면서, 배터리산업은 급격하게 변화하고 있다. 국제에너지기구 IEA의 세계 전기차 시장전망 보고서는 최근 여러 소규모 배터리생산 회사들이 병합되거나, 공장의 규모를 늘려나가는 상황으로 보아 리튬-이온 배터리의 원자재수급과 제조업이 상당히 성장할 것으로 전망하고 있다[IEV, 2021]. 2020년에는 전 세계에서 연간 300 GWh 정도의 리튬-이온 배터리 생산능력을 보였으며, 2030년에는 연간 3.2 TWh까지 증가할 것이라 예측된다[IEV, 2021].

리튬-이온 배터리의 안정성을 위해서 배터리 제조 및 양산시 발생한 기계적인 결함을 빠르고 정확하게 찾아내는 기술이 선행되어야 한다. 정확하고 빠른 배터리 검사를 위해 여러 연구가 진행되었다. Jiang 등은 리튬-이온 배터리의 데이터를 이용하여 배터리 팩의 고장을 진단하는 연구를 진행하였고[Jiang et al., 2021], Bauermann 등은 배터리 셀의 결함을 음향현미경을 이용해서 찾아내는 비파괴 검사방법을 연구했다[Bauermann et al., 2020]. Herminso 등이 연구하는 단층촬영과 3D X-ray를 이용한 전자자동차의 배터리 검사방법은 정밀하고 빠르게 결함을 찾아낼 수 있다는 장점이 있어 최근 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며[Gómez et al., 2022], SFA 같은 3D X-ray 비파괴 검사기술을 보유한 기업과 SK온, LG에너지솔루션의 사례처럼 국내 배터리 제조회사 간의 협력도 증가하고 있다[Lee, 2022].

특히, CT와 같은 3차원 비파괴 검사는 배터리의 내부를 속속들이 확인할 수 있는 기술이다. 그러나 CT는 매우 많은 X-ray영상을 필요로 하기 때문에 검사 시간이 매우 오래 걸린다. 따라서 이 시간을 줄이기 위한 다양한 선행 연구가 필요하다. 이를테면 계산 시간을 줄이기 위한 CT 계산 알고리즘 연구나 배터리 결함 검출 등에 대한 연구 등이 필요하다.

본 연구에서는 그 중에서도 배터리의 3D CAD 모델로부터 X-ray를 모사한 영상을 찍은 후, 이를 레이돈(Radon) 역변환을 통해 3차원 영상을 얻는 기법에 대해

연구하였다.

모델링을 통해 배터리의 결함을 찾아내는 기초연구를 수행하면 레이돈 역변환과 추가적인 영상기법을 통해 실제 배터리에서도 결함을 찾아낼 수 있게 될 것이다. 실물로 이를 검증하는 것이 본 연구의 추후 연구 목표이며, 본 연구는 이를 위한 기초 연구로 수행되었다.

배터리 모델은 4680 리튬-이온 배터리이며 UGNX로 실제 수치에 기반해 양품 모델 1개, 결함품 모델 3개, 총 4개의 CAD 모델을 만들어 사용하였다. 시뮬레이션 모델을 이용하여 CT 촬영과 유사하게 360°의 회전각에서 0.25° 단위로 총 1,440장의 영상을 추가로 생성하였다[Gonzales et al., 2017]. 이에 더하여, 각 모델별로 결함을 구분할 수 있는 최적의 영상 개수를 알아보기 위해 단위 각도를 변경해보며 영상을 추가로 생성하였다. 이 영상의 집합을 레이돈 역변환 기법을 사용하여 3차원 모델로 복원할 수 있다. 이후, 3차원 영상처리를 통해 결함품 모델에서 결함을 찾아내는 기술개발을 목표로 한다.

2. 레이돈 변환에 관한 기초 이론

2.1 레이돈 변환(Radon Transformation)

대상 물체를 광선으로 투시하면 해당 광선에 대한 선적분값은 대상 물체를 투영한 신호의 크기를 의미한다. 이 변환을 레이돈 변환이라고 하며 (1)에 수식이 표시되어 있다[Freeman, 2010]. 이를 충분히 작은 각도에 대해 회전하면서 모든 신호를 적분하면 전체 각도에 대해 레이돈 변환 결과를 보유하게 된다. 레이돈 변환은 극좌표(S, θ)에 대한 함수이며, (S, t)는 2차원 영상 $f(x, y)$ 가 각도 θ 만큼 회전했을 때의 좌표이다. 본 연구에서는 2차원 배터리 영상 $f(x, y)$ 의 레이돈 변환 Rf 를 투명도가 적용된 이미지로 추출하였다.

$$Rf(S, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(S \cos \theta - t \sin \theta, S \sin \theta + t \cos \theta) dt \quad (1)$$

2.2 레이돈 역변환

레이돈 변환 결과 Rf 에 푸리에 역변환 \mathcal{F}^{-1} , 푸리에 슬라이스 정리 $\mathcal{F}(Rf)(S, \theta)$, 백 프로젝션 기법 \mathcal{B} 을 이용하면 원본 영상 $f(x, y)$ 를 얻을 수 있다. 이를 레이돈 역변환이라고 한다. 레이돈 역변환은 데카르트좌표

(x, y) 에 대한 함수이며, 식 (2)과 같이 표현 할 수 있다 [Freeman, 2010]. 본 연구에서는 레이돈 역변환을 사용하여 3차원 모델에서 추출된 이미지로부터 원본 3차원 형상을 재구성하였다.

$$f(x, y) = \frac{1}{2} \mathcal{B} [\mathcal{F}^{-1} (|\mathcal{S} \mathcal{F} (Rf) (S, \theta)|)] (x, y) \quad (2)$$

3. 3D CAD 모델 제작

3.1 3차원 분석 대상 배터리

본 연구에서는 4680 형식의 배터리를 모델링하여 사용한다. 4680 배터리는 Telsa의 2020 Battery Day 에서 발표한 새로운 규격의 배터리이다. 기존의 2170 배터리와 비교하면 에너지 용량은 5배, 출력은 6배 증가했으며, 16% 주행거리 개선을 보여주어 차세대 배터리로 각광받고 있다[Frazelle, 2021].

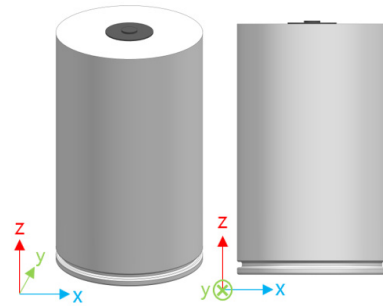
4680 배터리 모델은 SIEMENS의 UGNX를 사용하여 제작하였다. 형태와 상세 수치는 TESLA에서 공개한 4680 배터리의 특허문서를 참고하였다[Bonne et al., 2022]. Tran과 Fowler는 리튬-이온 배터리에서 발생할 수 있는 결합의 원인을 정리하였다[Tran and Fowler, 2020]. 리튬-이온 배터리에서 발생할 수 있는 다양한 기계적 결합 중에서 3차원 캐드 모델로 시각화 할 수 있는 경우를 찾아 선별하였다. 이후, 각 결합을 연구한 논문을 참고하여 본 연구에서 양품과 결합품 총 4개의 모델을 제작하여 사용했다.

배터리가 외부의 충격으로 인해 셀에서 변형 혹은 균열이 발생하게 된다면, 배터리 내부에서 단락이 일어나 화재가 발생할 수 있기에[Kalnaus et al., 2018], 배터리에 균열이 발생한 경우를 첫 번째 결합모델로 선정하였다. 배터리의 열 발생 속도가 열 방출 속도를 초과하면 배터리의 내부온도가 높아지고 전극에서 열과 가스가 발생한다. 또한, 팽창이 발생하여 전극이 눌러지게 된다[Finegan et al., 2015]. 이후 배터리 내부의 압력이 높아지면서 중심 편이 기존의 위치에서 벗어나게 되고 배터리가 폭발하게 된다[Finegan et al., 2017]. 배터리가 폭발하기 전, 전극과 중심 편이 구부러지는 현상을 관측할 수 있기에, 이 경우를 두 번째 결합모델로 선정하였다. 전극이 구부러져 물리적으로 서로 맞닿게 되는 결합이 발생하면, 단락이 발생하여 사고로 이어진다

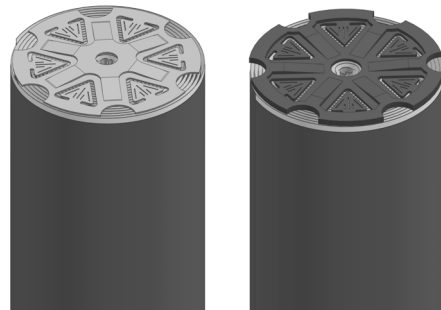
[Zan et al., 2021]. 이러한 이유로 전극이 물리적으로 접촉된 경우를 세 번째 결합모델로 선정하여 총 3개의 결합모델을 제작하였다. 다만, 일부 모델은 연구의 편의성과 가시성을 위해 수치의 변형과 모델의 간략화를 진행하였다.

3.2 양품 배터리 모델

〈Figure 1〉은 왼쪽부터 4680 배터리 모델을 삼각투상(Trimetric View)과 정면(Front View)으로 바라본 영상이다. 〈Figure 1〉의 모델과 같이 4680 배터리를 보호하는 셸은 지름 46 mm, 높이 80 mm, 0.5 mm ~ 0.6 mm의 두께를 가지고 있다. 4680 배터리의 캔의 흰 부분은 모두 음극을 띄며, 배터리 윗부분의 검은 부분은 양극을 띄고 있다. 4680 배터리의 윗면과 밑면을 제거하면, 〈Figure 2〉와 같은 집전체들이 나오게 된다. 왼쪽부터 양극과 음극의 집전체이다. 양극에 있는 집전체는 약 260 μm 의 두께를 가지며, 음극의 집전체는 약 400 μm 의 두께를 가진다. 배터리의 단면은 〈Figure3〉

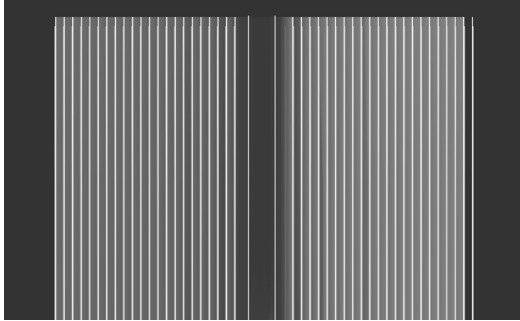


〈Figure 1〉 Trimetric and Front View of Normal 4680 Battery Model



〈Figure 2〉 Anode and Cathode Current Collector of 4680 Battery Model

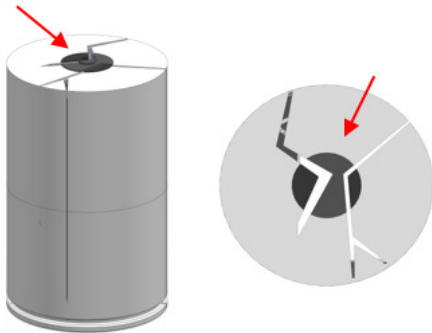
와 같은 모습을 띄고 있다. Bonne et al.[2022]에서 공개한 4680 배터리의 실제 CT 영상과는 다르게 <Figure 3>에서는 머리카락처럼 보이는 모양의 전극은 3.1 3차원 분석 대상 배터리에서 서술한 이유로 적용하지 않았다.



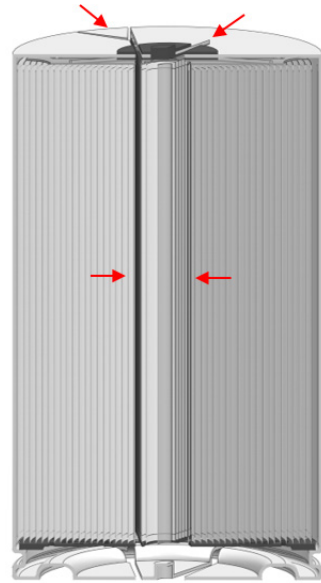
<Figure 3> Electrode of 4680 Battery Model Similar to CT Image

3.3 균열이 발생한 배터리 모델

<Figure 4>는 왼쪽부터 파손된 모델을 삼각투상과 정면으로 바라본 이미지이며, <Figure 5>는 모델의 단면을 보여주고 있다. Kalnaus 등이 연구한 자료를 토대로 지속된 압입으로 인해 배터리에 심각한 균열이 발생한 상태를 재현했다[Kalnaus et al., 2018]. <Figure 4>의 붉은색 화살표로 표시한 위치에서도 확인할 수 있듯이, 얇은 균열이 2개의 굵은 결합으로부터 뻗어나가는 형태로 제작하였고, <Figure 5>의 붉은색 화살표가 표시한 것처럼 균열은 배터리를 독립된 여러 조각으로 나눌 만큼의 깊이를 가지고 있다. 이런 균열을 통해 바깥에서도 배터리 내부를 관찰할 수 있다.



<Figure 4> Trimetric and Top View of Cracked 4680 Battery Model



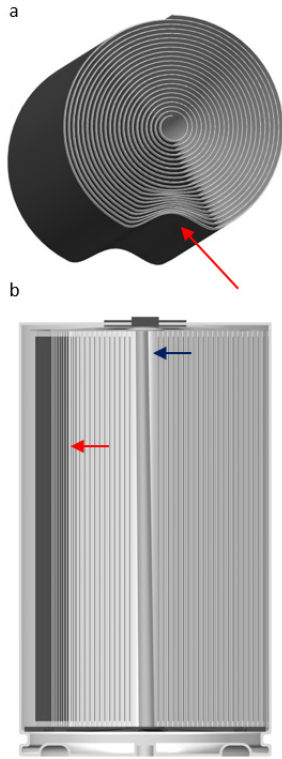
<Figure 5> Cross-section of Cracked 4680 Battery Model

3.4 전극과 중심 핀이 구부러진 배터리 모델

Finegan 등은 중심 핀이 없는 상태의 배터리에서 열폭주가 발생하기 1초 전의 전극을 단층촬영에 성공했다[Finegan et al., 2015]. 본 연구에서는 이를 참고하여 모델을 제작하였다. 전극의 양극과 음극 사이에서 가스가 발생하고 가스가 생성되는 지점으로부터 전극이 일정 방향으로 밀리게 된다. 이로 인해 전극이 구부러지게 되고 <Figure 6(a, b)>에서 붉은색 화살표로 표시한 곳과 비슷하게 전극이 배터리의 한 방향으로 밀린 상태를 띄게 된다. 가스로 인해 전극이 밀리는 결합은 열폭주의 주된 이유이기도 하다.

<Figure 6(b)>는 중심 핀이 있는 상태의 18650 리튬-이온 배터리에서 열폭주로 인한 폭발이 발생하는 동안 중심 핀이 폭발의 영향을 받아 움직이는 모습을 4680 배터리로 모델링한 이미지이다. 모델은 Finegan 등의 연구를 참고하여 제작하였다[Finegan et al., 2017]. 열폭주로 인해 폭발이 일어나면 배터리 내부의 가스가 밖으로 분출되며, 배터리의 중심 핀은 그 압력으로 인해 배터리 밖으로 튀어나오게 된다. <Figure 6(b)>의 진한 파란색 화살표로 표시한 부분처럼 전극 및 중심 핀이 중심축을 벗어나면서 밖으로 나가려는 모습을 의도하였다.

〈Figure 6(a)〉는 중심 핀이 없는 상태에서 전극의 결함을 나타냈고, 〈Figure 6(b)〉는 전극의 결함과 중심 핀의 결함을 동시에 보여준다. 전극의 결함과 중심 핀의 결함은 〈Figure 6(b)〉와 같이 하나의 모델로 제작할 수 있으며, 연구의 관찰대상인 각 경우에서의 결함은 구분할 수 있기에 두 개의 경우를 각각 모델링하지 않고 하나의 모델로 합쳐 제작하였다.

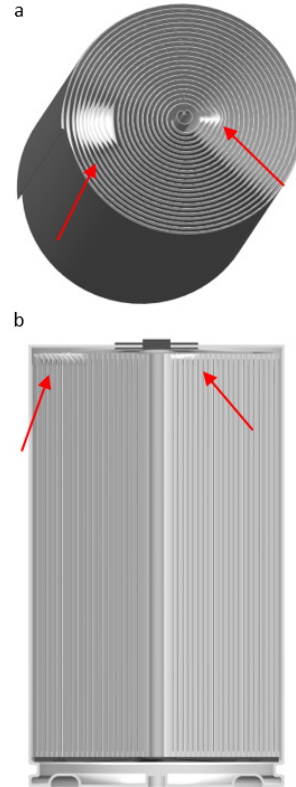


〈Figure 6〉 (a) Bending model of electrode due to gas generation;
(b) Cross-section of 4680 battery model with bended electrode and center pin

3.5 전극끼리 물리적으로 접촉된 배터리 모델

전극이 휘어 전극의 음극과 양극 사이에 물리적 접촉이 일어나면 그 결과로 배터리 안에서 단락이 발생하게 되며, 큰 사고로 이어지게 된다[Zan et al., 2021]. 〈Figure 7(a)〉는 4680 배터리의 전극이 바깥쪽으로 휘어 인접한 전극과 물리적으로 접촉이 일어난 상황을 모델링한 이미지이며, 〈Figure 7(b)〉는 다른 전극과 물리적으로 접촉된 배터리 모델의 단면을 보여준 이미지

이다. 〈Figure 7(a, b)〉의 붉은 화살표가 표시한 곳에서 전극이 물리적으로 접촉되어있는 결함을 확인할 수 있다.

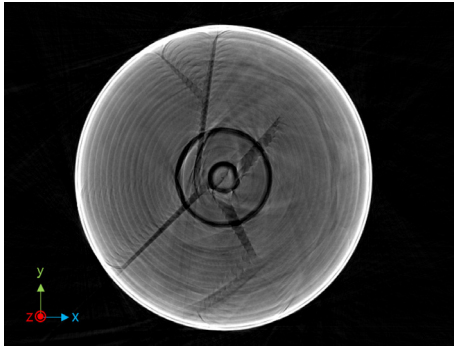


〈Figure 7〉 (a) Physical contact with adjacent electrode caused by electrode deformation; (b) Cross-section of 4680 battery model with electrode deformation

4. 배터리 3차원 재구성

4.1 균열이 발생한 배터리 모델의 3차원 재구성 결과

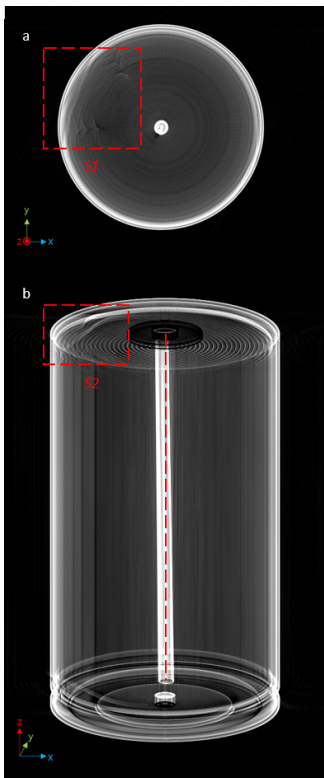
〈Figure 8〉은 〈Figure 4〉, 〈Figure 5〉와 같은 균열이 발생한 배터리 모델에 레이돈 역변환(Radon inverse transformation)을 적용해서 복원한 영상 중 하나이다. 배터리 3차원 모델을 X-ray처럼 모사한 1,440장을 이용하여 3차원 영상을 얻고, Z 좌표를 상단 부터 하단으로 내리면서 상면(Top view)에서 한 층씩 관찰하였다. 〈Figure 8〉에서 배터리 내부를 중단하는 진한 색을 가진 균열을 관찰할 수 있다.



〈Figure 8〉 Reconstructed top view of cracked 4680 battery model

4.2 전극과 중심 핀이 구부러진 배터리 모델의 3차원 재구성 결과

〈Figure 9〉는 〈Figure 6〉의 모델에 레이돈 역변환을 적용해 얻은 영상이다. 그 중, 〈Figure 9(a)〉는 3차

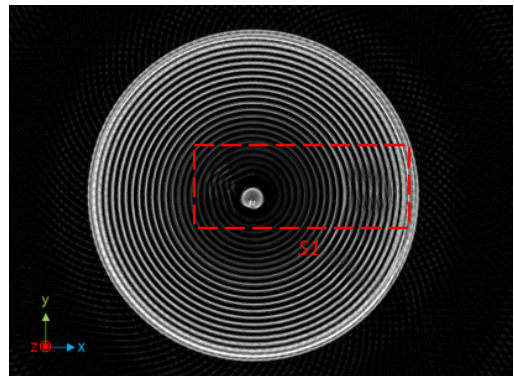


〈Figure 9〉 Reconstructed view of battery model with bended electrode and center pin: (a) Reconstructed top view; (b) Reconstructed trimetric view

원 이미지를 상면에서 바라본 영상이며 〈Figure 9-b〉는 삼각투상으로 바라본 영상이다. 〈Figure 9(a)〉의 구역 S1에서 전극이 눌린 결함을 구분할 수 있으며, 〈Figure 9(b)〉의 구역 S2에서도 전극이 눌린 결함을 관찰할 수 있다. 〈Figure 9(b)〉에서 Z 축과 평행한 점선을 비교해보면 휘어진 중심 핀을 발견할 수 있다.

4.3 전극끼리 물리적으로 접촉된 배터리 모델의 3차원 재구성 결과

〈Figure 10〉는 〈Figure 7〉과 같은 모델을 〈Figure 8〉, 〈Figure 9(a)〉와 동일한 방법으로 얻은 영상이다. 〈Figure 10〉에서 표시한 구역 S1에서 전극이 다른 전극과 접촉된 결함을 발견할 수 있다.



〈Figure 10〉 Reconstructed Top View of Battery Model with Electrode Deformation

4.4 모델별 최적 영상 개수 분석

레이돈 역변환으로 3차원 모델로 복원 시 필요한 최적의 영상 개수를 알아보기 위해 복원에 사용한 영상의 개수 별로 결과를 비교해보았다.

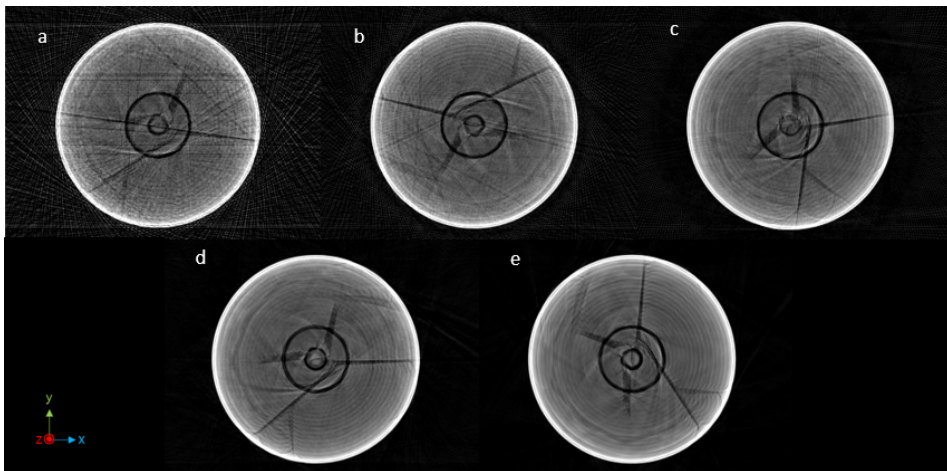
〈Figure 11〉은 균열이 발생한 배터리 모델의 영상을 사용하였다. 〈Figure 11(c-e)〉는 알파벳 순서대로 360장, 720장, 2,880장의 영상을 사용해 레이돈 역변환으로 복원을 진행한 영상 중 일부이다. 〈Figure 11(a, b)〉는 360장의 영상에서도 결함의 구분이 가능해 90장과 180장의 영상을 생성하여 추가로 복원을 진행하였다. 90장의 영상으로 복원을 진행해도 결함을 시각적으로 확인할 수는 있으나, 720장 이하의 영상을 사용한 경우에

는 복원 영상이 선명하지 않으며, 복원에 많은 영상을 사용할수록 선명한 복원 영상을 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다.

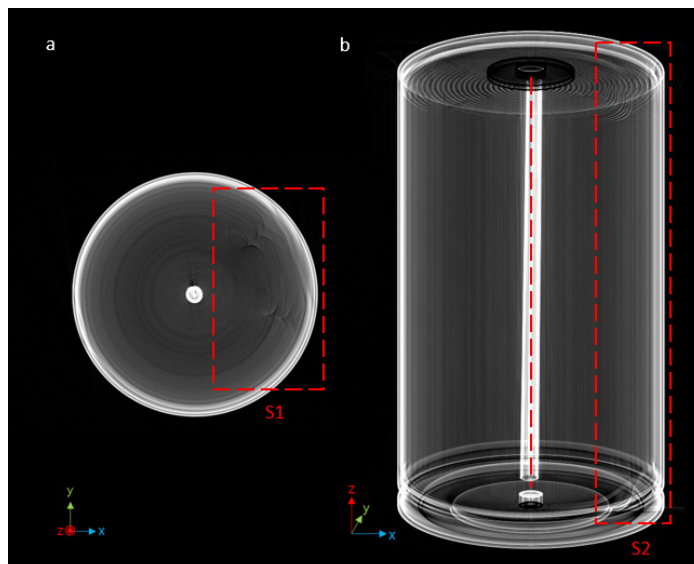
〈Figure 12〉는 2,880장의 전극과 중심 핀이 구부러진 배터리 모델 영상을 레이돈 역변환을 적용해 얻은 복원 영상이다. 〈Figure 12(a)〉의 구역 S1에서 전극이 구부러진 결합을 〈Figure 9(a)〉의 구역 S1에서보다

선명하게 구분하였으며, 〈Figure 12(b)〉의 구역 S2에서 전극 전면에 걸쳐 구부러짐을 구분할 수 있게 되었다. 〈Figure 9(b)〉와 마찬가지로, 〈Figure 12(b)〉에서도 붉은 점선과 비교하면 중심 핀의 구부러짐을 확인할 수 있다.

〈Figure 13〉은 전극끼리 물리적으로 접촉된 배터리 모델로 2,880장의 영상을 생성하여 레이돈 역변환을

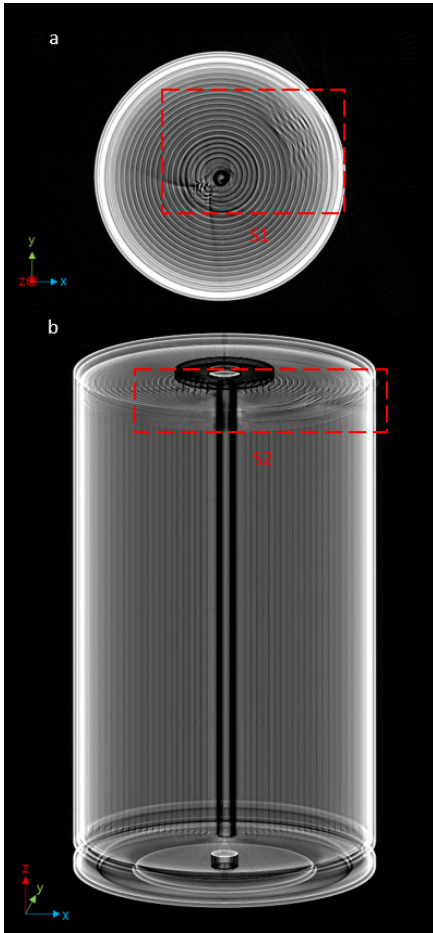


〈Figure 11〉 Reconstructed top view of cracked 4680 battery model using (a) 90 images; (b) 180 images; (c) 360 images; (d) 720 images; (e) 2,880 images



〈Figure 12〉 Reconstructed view of bended electrode and center pin battery model using 2,880 images; (a) Reconstructed top view; (b) Reconstructed trimetric view

적용해 복원을 진행한 결과이다. <Figure 10>의 구역 S1과 <Figure 13(a)>의 구역 S1을 비교해봤을 때, <Figure 13(a)>의 구역 S1에서 결함이 더 선명하게 보였으며, <Figure 13(b)>의 구역 S2에서도 전극끼리 접촉된 결함을 볼 수 있다.



<Figure 13> Reconstructed view of electrode deformation battery model using 2,880 images; (a) Reconstructed top view; (b) Reconstructed trimetric view

5. 결 론

본 연구에서는 4680 배터리의 3D CAD 모델을 양품 모델 1개와 균열이 발생한 결함 모델, 전극과 중심 핀이 구부러진 결함 모델, 전극끼리 물리적으로 접촉된 결함 모델, 총 4개의 모델을 제작한 후, 360°의 회전각에서

각 모델별로 0.25° 단위의 1,440장의 영상을 생성하였다. 복원에 필요한 최적의 영상개수를 알아보기 위해, 각도의 단위를 변경하며 영상을 추가로 생성하였으며, 영상의 집합을 레이돈 역변환 기법을 사용하여 3차원 모델로 복원하여 결함품 모델에서의 결함을 찾아내는데 성공하였다.

균열이 발생한 배터리 모델은 레이돈 역변환을 사용한 복원에 90장의 영상을 사용한 경우에서도 결함을 확인할 수 있지만, 영상을 720장 이하로 사용한 경우는 레이돈 역변환을 이용한 복원 영상이 선명하지 못하며, 복원에 많은 영상을 사용할수록 결함의 선명도가 높아짐을 알 수 있었다. 전극과 중심 핀의 구부러진 결함은 1,440장을 사용했을 때 동시에 두 결함을 파악할 수 있으며, 전극끼리 맞닿은 모델의 결함은 1,440장을 복원에 사용했을 때 구분이 가능했다.

레이돈 역변환을 사용하여 복원을 진행할 때 필요한 영상의 개수가 상이하다. 비교적 작은 결함일수록 결함을 판단하는데 복원 영상이 많이 필요하며, 큰 면적을 가진 결함일수록 적은 영상으로도 결함을 구분 할 수 있는 경향을 보여 결함의 크기, 면적에 따라 이러한 차이가 발생하는 것으로 보인다.

본 연구에서는 모델링을 통해 배터리의 결함을 찾는데 성공했으며, 추후 연구에서 레이돈 역변환과 추가적인 영상기법을 통해 실제 배터리에서도 결함을 찾아내는 것이 추후 연구의 목표이다.

References

- [1] Bauermann, L. P., Mesquita, L. V., Bischoff, C., Drews, M., Fitz, O., Heuer, A., and Biro, D., "Scanning acoustic microscopy as a non-destructive imaging tool to localize defects inside battery cells", *Journal of Power Sources Advances*, Vol. 6, 2020, 100035.
- [2] Bonne, E., Matthieu, M., Andrew, K., Matthew, G., and Daniel, M., "tabless energy storage devices and methods of manufacturing thereof", WO 2022/061187 A1, filed 17 September, 2021 and published 24 March, 2022.

- [3] Finegan, D. P., Darcy, E., Keyser, M., Tjaden, B., Heenan, T. M. M., Jervis, R., Bailey, J. J., Vo, N. T., Magdysyuk, O. V., Drakopoulos, M., Michiel, M. D., Rack, A., Hinds, G., Brett, D. J. L., and Shearing, P. R., "Identifying the Cause of Rupture of Li-ion Batteries during Thermal Runaway", *Advanced Science*, Vol. 5, Issue 1, 2017, 1700369.
- [4] Finegan, D. P., Scheel, M., Robinson, J. B., Tjaden, B., Hunt, I., Mason, T. J., Millichamp, J., Michiel, M. D., Offer, G. J., Hinds, G., Brett, D. J. L., and Shearing, P. R., "In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway", *Nature communications*, Vol. 6, 2015, 6924.
- [5] Frazelle, J., "Battery Day", *Communications of the ACM*, Vol. 64, Issue 5, 2021, pp. 52-59.
- [6] Freeman, T. G., *The Mathematics of Medical Imaging: A Beginner's Guide*, Springer Undergraduate Texts in Mathematics and Technology, Springer, New York, 2010.
- [7] Gómez, H. V., Begun, D. L., Bhattad, P., Mo, K., Rad, M. N., White, R. T., and Kelly, S. T., "Assessing rechargeable batteries with 3D X-ray microscopy computed tomography, and nanotomography", *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 37, 2022, pp. 519-535.
- [8] Gonzales, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing*, 4th, Pearson, New York, 2017.
- [9] IEV, *Global EV Outlook 2021*, IEV, 2021, Available at <http://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> (Downloaded 25 August, 2022).
- [10] Jiang, L., Deng Z., Tang, X., Hu, L., Lin, X., and Hu, X., "Data-driven fault diagnosis and thermal runaway warning for battery packs using real-world vehicle data", *Energy*, Vol. 234, 2021, 121266.
- [11] Kalnaus, S., Wang, H., Watkins, T. R., Kumar, A., Simunovic, S., Turner, J. A., and Gorney, P., "Effect of packaging and cooling plates on mechanical response and failure characteristics of automotive Li-ion battery modules", *Journal of Power Sources*, Vol. 403, 2018, p. 20.
- [12] Lee, S. H., "에스에프에이, LG·SK에 배터리 검사장비 동시 공급 성공", *THEELEC*, 12 July, 2022, <http://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=17436>.
- [13] Tran, M. K. and Fowler, M., "A Review of Lithium-Ion Battery Fault Diagnostic Algorithms: Current Progress and Future Challenges", *Algorithms*, Vol. 13, Issue. 3, 2020, 10.3390/a13030062.
- [14] Zan, G., Zhang, J., Monaco, F., Gul, S., Qian, G., Li, J., Vine, D. J., Cloetens, P., Yun, W., Pianetta, P., and Liu, Y., "Understanding multi-scale battery degradation with a macro-to-nano zoom through its hierarchy", *Journal of Material Chemistry A*, Vol. 9, 2021, 19886-19893.

■ 저자소개



조영호

현재 한성대학교 기계전자공학부에 학사 과정 재학 중이며 주 관심분야는 연료전지, 이차전지, 인공지능이다.



류근호

현재 호서대학교 로봇공학과 교수로 재직 중이며, KAIST 기계공학과에서 학사 및 석사, 박사학위를 취득하였다. 미래산업에서 선임 연구원, 파인디앤씨에서 책임 연구원을 맡은 바 있다. 주 관심분야는 모터

제어, 영상처리, 신호처리이다.



이상열

현재 한성대학교 기계전자공학부 조교수로 재직 중이며, 서울대학교 기계항공공학부에서 학사 및 석사, 동 대학 자동차공학과에서 박사학위를 취득하였다. 두산인프라코어에서 선임 연구원, 호서대학교 로봇

자동화공학과에서 조교수를 맡은 바 있다. 주 관심분야는 기계시스템과 인공지능, 영상처리이다.