

# 균질화 기법을 이용하여 기공이 있는 이차전지 극판의 대표 기계 물성 도출을 위한 연구

표창민\*, 김재웅\*<sup>#</sup>

\*한국생산기술연구원

## Estimation of Representative Mechanical Property of Porous Electrode for Secondary Batteries with Homogenization Method

Changmin Pyo\*, Jaewoong Kim\*<sup>#</sup>

\*Korea Institute of Industrial Technology

(Received 13 May 2022; received in revised form 02 June 2022; accepted 16 August 2022)

### ABSTRACT

The demand for electric vehicles has increased because of environmental regulations. The lithium-ion battery, the most widely used type of battery in electric vehicles, is composed of a cathode, an anode, and an electrolyte. It is manufactured according to the pole plate, assembly, and formation processes. To improve battery performance and increase manufacturing efficiency, the manufacturing process must be optimized. To do so, simulation can be used to reduce wasted resources and time, and a finite-element method can be utilized. For high simulation quality, it is essential to reflect the material properties of the electrode by considering the pores. However, the material properties of electrodes are difficult to derive through measurement. In this study, the representative volume element method, which is a homogenization method, was applied to estimate the representative material properties of the electrode considering the pores. The representative volume element method assumes that the strain energy before and after the conversion into a representative volume is conserved. The method can be converted into one representative property, even when nonhomogeneous materials are mixed in a unit volume. In this study, the material properties of the electrode considering the pores were derived. The results should be helpful in optimizing the electrode manufacturing process and related element technologies.

**Keywords** : Electrode(전극), Equivalent Material Property(등가재료물성), Porosity(공극), Finite Element Method (유한요소해석), Orthotropic Elasticity(직교이방성)

## 1. 서 론

환경오염이 심해질수록, 관련 환경 규제도 심

화되고 있다. 최근에는 내연기관 자동차에 대한 규제가 커지고 있으며, 그에 대한 대안으로 수소 자동차와 전기자동차가 각광받고 있다<sup>[1]</sup>. 수소자동차의 경우 관련 기반이 아직 미비한 상황으로, 현재는 전기자동차가 대표적인 친환경 자동차로 주목 받고 있으며, 그에 따라 에너지 저장장치로 리

# Corresponding Author : [kjw0607@kitech.re.kr](mailto:kjw0607@kitech.re.kr)

Tel: +82-62-600-6480 Fax: +82-62-600-6099

튴 이온전지도 함께 주목 받고 있다. 리튬 이온 전지는 고 에너지 밀도, 고출력 등의 장점을 지니고 있어서 현재 전기 자동차에 가장 많이 사용되고 있는 에너지 저장장치중 하나이다<sup>[2]</sup>.

리튬이온 전지는 양극, 음극, 전해질로 구성되어 있으며, 제조공정으로는 크게 전극 공정(Pole plate process), 조립 공정(Assembly process), 화성 공정(Formation) 으로 구성되어 있다<sup>[3]</sup>. 전지의 성능을 향상시키고, 제조 효율을 높이기 위해서는 제조공정의 최적화가 필수적이며, 공정 최적화를 위해 시뮬레이션을 이용하여 자원과 시간의 낭비를 줄일 수 있다.

유한요소해석(Finite element method, FEM)은 대표적인 시뮬레이션 기법으로 다양한 공정을 각각 모사하여 최적 설계 혹은 최적 공정을 도출하는데 도움을 줄 수 있는 기법이다. 전극의 제조 공정 시 발생할 수 있는 문제를 예측하고, 관련된 대안을 도출함으로써 관련 시수와 비용을 절약할 수 있다.

하지만, 전극의 경우 그 두께가 100 $\mu$ m 수준이고, 기공이 있는 소재<sup>[4]</sup>로 탄성계수, 프아송비 등 유한요소해석을 위한 재료물성 도출이 어렵다. 전극의 재료 물성 추정을 위해 Xu는 리튬이온배터리(LIB) 전체에 대해 측정을 통해 힘-변형량 커브(F-D Curve)를 도출하여 양극-분리막-음극 전체의 재료물성을 대표물성으로 계산하였다<sup>[5]</sup>. Wierzbicki 는 실린더 형상의 리튬이온셀의 기계물성을 균질화 기법을 통해 재료물성을 추정하였다<sup>[6]</sup>. 또한 Cheng 은 주요 양극 소재인 NMC의 재료 물성 도출을 위해 파우더 상태로 소결한 이후 나노인텐터를 이용하여 탄성계수를 측정하였다<sup>[7]</sup>.

상기의 방법론으로 전극 전체의 재료물성을 계산하거나 전극 소재의 재료물성을 유추할 수는 있지만, 전극 각각이 기공이 있는 실제 현상에 대해 재료물성 도출에는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 균질화 기법(Homogenization method) 중 대표적인 방법인 대표체적요소(Representative volume element, RVE)<sup>[8-11]</sup>를 적용하여 기공이 있는 전극소재의 재료물성을 유추하였다. 본 연구를 통해 실험적으로 도출하기 힘든 기공이 있는 전극의 재료물성을 유추함으로써 유한요소해석을 통한 재

료의 거동을 예측하고, 최적 설계 및 공정 최적화에 기여할 수 있을 것으로 판단한다. 특히 프레싱을 통해 전극을 제조하는 카렌더(Calendar)공정에서는 기공이 있는 전극을 압착하여 전극을 제조하는 공정으로 카렌더 공정의 최적화 및 관련 요소 기술의 최적화를 위해서는 본 연구가 필수적이라고 판단한다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 서론에서는 본 연구의 필요성과 개괄에 대해 정리하였고, 본문에서는 전극 소재의 재료물성, 기공률과 기공형상을 소개하는 한편, 균질화 기법 및 대표체적요소 방법론을 소개한다. 이를 기반으로 직교 이방성 재료의 대표기계물성(Representative mechanical properties) 값을 제시하였다. 마지막으로 본문의 결과를 정리 및 요약하였다.

## 2. 기존 연구 및 배경 이론

### 2.1 복합재의 등가물성 도출 연구

복합재료의 경우 등가 재료 물성 도출에 관한 연구가 다수 수행되었다. 등가 재료물성 도출을 위해 균질화 기법이 적용되었으며, 균질화 기법에는 대표체적요소 방법(Representative volume method)<sup>[8-11]</sup>, 대표 유닛 셀 방법(Representative unit cell method)<sup>[12]</sup>, 대표 등가 연속체 방법(Representative equivalent continuum method)<sup>[13]</sup> 등의 방법론이 있다. 이 중 대표체적요소 방법은 복합재를 비롯하여 기공이 있는 재료의 기계물성을 추정하는데 사용되었다. 다 방향의 파이버가 혼합된 강화 플라스틱의 등가재료물성을 추정하는데 활용되는 한편<sup>[8]</sup>, 등방성이 아닌 이방성 재료의 등가 물성을 추정하기 위해서 적용되기도 하였다<sup>[9,10]</sup>. 또한 기공이 있는 재료의 물성을 도출하는데도 활용되기도 하였다<sup>[11]</sup>.

### 2.2 대표 체적 요소 방법(RVE Method)

대표체적요소 방법은 대표체적으로의 치환 전후의 변형률 에너지가 보존된다는 것을 전제로 하고 있으며, 단위 부피 내에 균질하지 않은 재료가 혼합된 경우에도 하나의 대표 물성으로 치환이 가

능하다는 것을 가정한다. 지배방정식은 하기 식 (1)-(5) 과 같다<sup>[8-11]</sup>.

식 (1)은 치환전의 변형률 에너지는 보존된다는 것을 의미하고 있으며, 식 (2), 식 (3)은 각각 치환전의 변형률 에너지 계산 공식, 치환 후의 변형률 에너지 계산공식을 의미한다. 식 (3)에서 제시되고 있는 주요 변수인 요소별 응력 가중 평균, 요소별 변형률 가중 평균에 관한 내용은 각각 식(4), 식(5)에서 언급되었다.

$$U^* = U \quad (1)$$

$$U^* = \frac{1}{2} \int_{V_{RVE}} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} \overline{\sigma_{ij} \epsilon_{ij}} V_{RVE} \quad (3)$$

$$\overline{\sigma_{ij}} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V^*} \sigma_{ij}(x, y, z) dV \quad (4)$$

$$\overline{\epsilon_{ij}} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V^*} \epsilon_{ij}(x, y, z) dV \quad (5)$$

$U^*$  : 균질화 전 변형률 에너지

$U$  : 균질화 후 변형률 에너지

$V^*$  : 균질화 전 전체 부피

$V_{RVE}$  : 균질화 후 부피

$\sigma_{ij}$  : 요소별 응력

$\epsilon_{ij}$  : 요소별 변형률

$\overline{\sigma_{ij}}$  : 요소별 응력 가중평균

$\overline{\epsilon_{ij}}$  : 요소별 변형률 가중평균

### 3. 전극의 재료 특성 및 재료 행렬

#### 3.1 전극의 재료 특성

서론에서 언급한바와 같이 이차전지에 사용되고 있는 극판의 경우 기공이 존재하기에, 기공을 고려한 재료물성의 도출이 필요하다. 통상적으로 기공의 형상, 크기 및 기공의 배치 등은 Fig. 1과 같

이 랜덤하게 분포하고 있으며, 이를 정형화하기는 매우 어려운 것이 현실이다.

또한 전극의 두께가 100 $\mu$ m의 극판으로 탄성계수, 프아송비를 도출할 수 있는 기존의 측정법(ex. UTM, Universal test machine)을 이용한 재료물성 도출이 어렵기에, 측정을 통한 재료물성 도출에는 어려움이 존재한다.

#### 3.2 직교이방성 재질 및 완전이방성 재질

3.1절에서 소개한 바와 같이 전극의 기공의 형상, 크기, 배치는 일정하지 않기 때문에, 본 재료는 완전이방성 재질(Anisotropic mechanical property)로 보는 것이 적합하다. 관련한 재료 물성 행렬은 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \overline{\sigma_x} \\ \overline{\sigma_y} \\ \overline{\sigma_z} \\ \overline{\sigma_{xy}} \\ \overline{\sigma_{xz}} \\ \overline{\sigma_{yz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ & & & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ & & & & D_{1313} & D_{1323} \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\epsilon_x} \\ \overline{\epsilon_y} \\ \overline{\epsilon_z} \\ \overline{\epsilon_{xy}} \\ \overline{\epsilon_{xz}} \\ \overline{\epsilon_{yz}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

상기 행렬식을 도출하기 위해서는 21개의 요소를 도출해야하기에 21개 이상의 조건에서 응력-변형률을 측정하여 재료 물성 행렬을 도출하여야 한다.

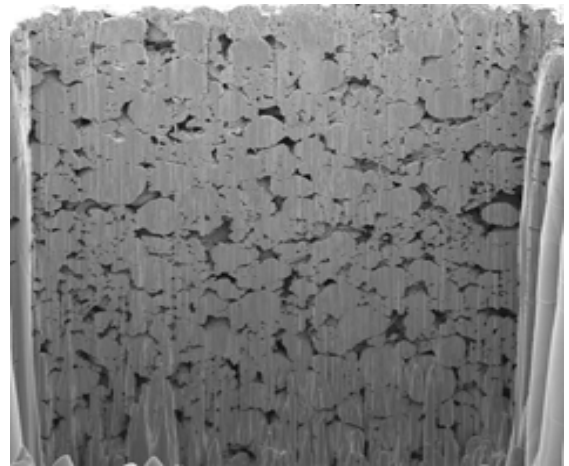


Fig. 1 The shape of electrode (Example)

문제는 응력-변형률의 측정이 어려우며, 어렵게 측정을 하더라도 특정 시편에서의 물성행렬이 전체를 대변할 수 있는지는 의문이 존재한다. 즉, 완전히방성재질로 재료 등가물성을 추정하는 것은 시뮬레이션을 위한 대표기계물성 도출에 비효율적이고, 적합하지 않다는 결론을 내릴 수 있다. 그에 본 연구에서는 기공률을 바탕으로 보다 효율적인 대표기계물성 도출방법을 제안한다.

다수 시편의 기공률을 측정한 이후, 기공률을 토대로 기공의 형상, 기공의 크기, 기공의 배치가 일정하다고 가정하는 직교 이방성 재질(Orthotropic property)로 가정하여, 대표 기계물성을 도출하였다. 관련 행렬식은 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \overline{\epsilon_x} \\ \overline{\epsilon_y} \\ \overline{\epsilon_z} \\ \overline{\epsilon_{xy}} \\ \overline{\epsilon_{xz}} \\ \overline{\epsilon_{yz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\sigma_x} \\ \overline{\sigma_y} \\ \overline{\sigma_z} \\ \overline{\sigma_{xy}} \\ \overline{\sigma_{xz}} \\ \overline{\sigma_{yz}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

직교 이방성 재질로의 가정은 실제 기공형상을 완벽하게 반영하지 못하는 한계가 존재하지만, 모재의 재료물성과 기공률 데이터만 존재하면 기공을 반영한 대표기계물성을 도출할 수 있는 효율적이고 의미 있는 방법론으로 판단된다.

### 3.3 모재 재료 물성 및 기공률

모재 재료물성은 본 연구에서는 기업 기밀로 인해 전극의 물성 정보와 관련 측정 결과를 제시하지 못하며, 그에 기존 논문에서 제시된  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ 의 모재 재료 물성을 적용하였다[5]. Cheng은 Mechanical and physical properties of  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ 의 재료 에서 양극 소재인 NMC의 모재 물성을 파우더 형태로 소결 후 나노

인덴터로 측정된 결과를 제시하였다.

기공률과 기공의 크기는 한국기초과학지원연구원의 장비인 Micromeritics 사의 Autopore IV9500 장비를 활용하여 분석하였다(Fig. 2). 분석원리는 Mercury porosimetry 방식으로 수은을 기공에 투입하여, 기공률 및 기공의 크기를 분석하는 방식이다. 본 연구에서는 역시 기업기밀로 인해 측정결과를 제시하지 못하며, 기공의 크기 및 기공률은 역시 기존 논문에서 제시된  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ 의 기공률과 기공의 크기를 활용하였다. Primo는 NMC 96%wt, CB 2%wt, PVdF 2%wt인 재료의 기공률과 기공의 크기를 측정하였으며, 기공률로는 42%, 기공 크기는 반지름 기준  $1.0\mu\text{m}$ 에 가장 많이 분포하고 있음을 확인하였다<sup>[14]</sup>. 기공의 형상은 구로 가정하였다. 본 연구에서 적용한 모재의 기계물성 및 기공률은 Table 1과 같다.

## 4. 등가 물성 도출 및 결과

### 4.1 컴퓨터 소프트웨어

기공이 있는 재료의 등가물성 추정을 위해 유한요소해석 프로그램을 이용하여 응력분포를 계산한 이후 행렬계산을 통해 등가물성 행렬 및 등가 탄성계수 및 프아송비를 도출하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램으로는 Dassault system의 Abaqus 2020을 사용하였고, 행렬 계산을 위해서 python 3.8.5.를 이용하였다. Abaqus의 경우 기술적 타당성이 높은 소프트웨어로 유한요소해석 프로그램으로 많이 사용되고 있고<sup>[15,16]</sup>, python의 경우에도 행렬계산 및 데이터 처리를 위해 많이 사용되고 있다<sup>[17]</sup>.

Table 1 Mechanical properties of Cathode

Contents	Value	Ref.
Young's Modulus (GPa)	199±12	[7]
Poisson's ratio	0.25	[7]
Porous rate (%)	42	[14]
Porous radius (Representative value, $\mu\text{m}$ )	1.0	[14]



Fig. 2 Equipment for measuring the rate of porosity & diameter of pores (Autopore IV9500)

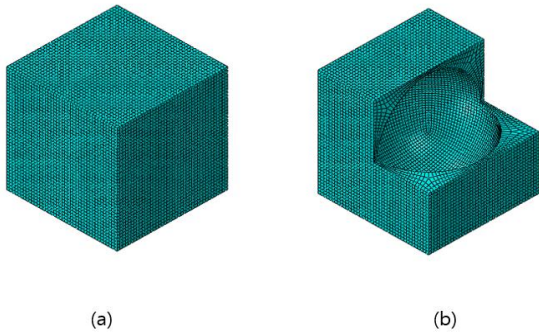


Fig. 3 The shape of unit model for analysis (a) Isotropic view of whole model, (b) Section view of model

Table 2 Representative Mechanical properties of Cathode with porosity

Contents	Original Material	Real Material (with porosity)
Young's Modulus (GPa)	199.0	89.5
Poisson's ratio	0.25	0.189

## 4.2 단위 모델

단위 모델의 설정을 위해서는 기공의 크기, 기공의 형상, 기공률 등의 데이터가 필요하다. 3.3절에서 소개한바와 같이 기존 연구<sup>[14]</sup>를 토대로 기공률과 대표기공의 크기를 선정하였다. 반지름이 1  $\mu\text{m}$ 인 구 형상의 기공이 부피의 42%를 차지하기 위한 단위 모델의 부피는  $9.97\mu\text{m}^3$ 이고 이런 경우 단위 모델의 단면 길이는 2.15 $\mu\text{m}$ 이다. 상기 형상을 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 격자의 크기는 0.05 $\mu\text{m}$ , 격자 모델은 C3D8R로 설정하였고, 31,000여개의 격자모델로 모델링을 구성하였다.

## 4.3 등가물성 도출 프로세스 및 결과

등가물성을 나타내는 행렬식의 계산을 위해서는 등가 변형률(Equivalent Strain)과 등가 응력(Equivalent stress)이 방향별로 필요하다. 특히 등가 응력은 격자 응력값의 평균으로 계산이 되며, 이때 격자별 부피가 다르기 때문에 격자 부피에 따른 가중평균법으로 계산되어진다. 인장 방향으로의 변형과 전단 변형으로의 변형이 이루어지는 케이스별 등가 변형률과 등가응력을 이용하여, 등가물성 행렬식을 계산하게 되고, 등가응력의 계산을 위해 Abaqus를 활용하였고, 행렬식의 계산을 위해 Python을 이용하였다. 관련 계산결과는 Table 2과 같다.

## 5. 논의

4절의 결과와 같이 기공이 있는 경우와 없는 경우 재료물성의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 기공이 있는 상태의 재료를 모재물성을 이용하여 FEM 시뮬레이션을 할 경우, 정합성에 있어서 문제가 발생한다는 것을 의미한다. 얇은 박판의 경우 재료물성의 측정이 어렵지만 기공을 고려한 등가물성의 계산이 필요하며 대표체적요소 방법은 그를 위해 매우 효율적인 방법이다. 특히 향후 많은 분야에서 적용될 이차전지의 대량생산 및 고속 생산을 위해서는 시뮬레이션이 선행되어야 하고, 본 연구는 그를 위한 기반 기술이 될 것으로 판단한다.

본 연구를 통해 기공이 있는 전극의 재료물성을 추측하였다. 다만 기공을 일정한 형상, 일정한 패턴인 직교이방성 재질로 가정을 하여 대표물성을 계산하였기에 한계가 존재한다. 또한 측정의 어려움으로 인해 시뮬레이션으로 결론을 내려야 하는 한계 역시 존재한다. 그에 후속 연구에서는 측정을 통한 검증을 수행할 계획이다. 기계물성의 측정을 위해서는 마이크로 단위계의 만능시험기(Universal test machine), 초음파를 이용한 방법(Ultrasonic pulse echo overlap), 공진법(Acoustic resonance method), 임펄스(Impulse excitation technique) 등이 존재한다. 관련하여 측정 장비를 보유한 기관을 통해 측정을 시도하였지만, 기공이 있는 전극의 측정에는 어려움이 있어서 장기적인 관점에서의 연구가 필요하다.

특히, 기존의 해외 연구사례의 경우 초음파를 이용한 방법, 공진법등을 이용한 사례<sup>7)</sup>가 보고되고 있으나, 국내에서는 관련 사례가 찾기 어려우며, 장비가 있는 기관에서도 다른 소재를 이용한 측정은 있지만, 전극을 이용한 재료물성 도출 사례는 없는 것이 현실이다. 후속 연구에서는 장비를 보유한 기관과의 협업을 통해 시뮬레이션을 통해 도출한 결과와 실제 측정결과를 비교하여 본 연구의 타당성을 검증할 계획이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 대표체적요소 방식을 적용하여 기공이 있는 전극의 등가재료물성을 추정하고 검증하였다.

1. 전극 내 기공은 그 형상과 그 분포가 랜덤하게 이루어져 있지만 직교이방성재질로의 가정을 통해 등가물성을 추정하였다.
2. 양극인  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ 의 등가재료물성을 추정하였으며, 모재물성과 기공률, 기공크기는 기존 문헌을 활용하였다.
3. 기공을 반영한 상태와 모재상태의 재료물성은 다르게 나타나며, 관련 제품 및 장비 시뮬레이션 시 기공을 반영한 상태의 물성을 적용해야 해석 정확성을 향상시킬 수 있다.
4. 전극의 재료물성의 측정은 어려운 점이 있어

후속 연구에서 수행할 계획이다.

## 후 기

This work was supported by Technology Innovation Program (project name : Equipment technologies for 50cm<sup>2</sup> all solid state battery cell, project Number : 20012349) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea).

## REFERENCES

1. Son, Y., "The Status of electric vehicle industry and technology development" Auto Journal, pp. 39-45, 2021
2. Shin, D., Ahn, H., "Research Trends of Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries used in Electric Vehicles", The Korean powder metallurgy & materials institute, Vol. 26, No. 1, pp. 58-69, 2019.
3. Lee, C. H., Lee, J. C., "Improved drying process for electrodes in production of Lithium-ion batteries for electric vehicles", Journal of Korea academia-industrial cooperation society, Vol. 19, No. 6, pp. 37-45, 2018.
4. Lee, Y. G., Fujiki, S., Jung, C. et al., "High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver - carbon composite anodes," Nat Energy, Vol. 5, pp. 348, 2020.
5. Xu, J., Liu, B., Wang, X., Hu, D., "Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies", Applied Energy, Vol. 172, pp. 180-189, 2016.
6. Wierzbicki, T., Sahraeim E., "Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical lithium-ion cells", Journal of power sources, Vol. 241, pp. 467-476, 2013.
7. Cheng, E., Jong, K., Taylor, N., Choe, H., Wlfenstine, J., Sakamoto, J., "Mechanical and physical properties of  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ ", Journal of the European ceramic society, Vol. 37, pp. 3213-3217, 2017.
8. Breuer, K., Stommel, M., "RVE modelling of short

- fiber reinforced thermoplastics with discrete fiber orientation and fiber length distribution”. *SN Applied Science*. Vol. 2. pp. 91, 2020.
9. Blanco, P. J., Sánchez, E., Neto, R., “Variational foundations and generalized unified theory of RVE-based multiscale models”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 23, pp. 191-253, 2016.
  10. Bargmann, S., Klusemann, B., Markmann, J., Schnabel, J. E., Schneider, K., Soyarslan, C., Wilmers, J., “Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review”, *Progress in materials science* Vol. 96, pp. 322-384, 2016.
  11. Pyo, C., Kim, Y., Kim, J., Kang, S., “A Study to Derive Equivalent Mechanical Properties of Porous Materials with Orthotropic Elasticity,” *Materials*. Vol. 14, No. 18, pp. 5123, 2021.
  12. Schmitz, A., Horst, P., “A finite element unit-cell method for homogenized mechanical properties of heterogeneous plates. *Composites Part A*,” *Applied Science and Manufacturing*, Vol. 61, pp. 23-32, 2014.
  13. Zheng, Q., Fan, H., “Equivalent continuum method of plane-stress dominated plate-lattice materials”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 164, pp. 107865, 2021.
  14. Primo, E., Chouchane, M., Touzin, M., Vazquez, P., Franco, A., “Understanding the calendaring processability of  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  based cathodes”, *Journal of power sources*, Vol. 488, pp. 229361, 2021.
  15. Pyo, C., Kim, J., Kim, J. “Estimation of Heat Source Model’s Parameters for GMAW with Non-linear Global Optimization—Part I: Application of Multi-island Genetic Algorithm”, *Metals*, Vol. 10, pp. 885, 2020.
  16. Deng, D., Murakawa, H., “Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements”, *Computational Materials Science*, Vol. 37, pp. 269-277, 2006.
  17. Sixun, T., Haipeng, G., Hao, L., Lei, Q., “The FEM Model Driven Method of the Static Performance Calculation for Gas Journal Bearing by Python,” 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, pp. 18-22, 2018.