GPS를 이용한 티타늄 드럼의 용접조건 최적화에 대한 연구

오원빈* · 김일수*[†] · 윤태종* · 이보람* · 이충우* · 강봉용** · 심지연**

*목포대학교 기계공학과

**한국생산기술연구원 탄소소재응용연구그룹

A Study on the Optimization of Welding Conditions for Titanium Drums Using GPS

Won-Bin Oh*, Ill-Soo Kim*[†], Tae-Jong Yun*, Bo-Ram Lee*, Chung-Woo Lee*,
Bong-Yong Kang**, and Ji-Yeon Shim**

*Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Mokpo, 58554, Korea

**Carbon&Light Materials Application R&D Group, KITECH, Jeonju, 54853, Korea

[†]Corresponding author: ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received March 11, 2021; Revised May 17, 2021; Accepted June 4, 2021)

Abstract

The importance of the titanium drum manufacturing technology, which influences the specification of electrolytic copper foils, is being greatly emphasized, and an immediate research is required. The challenges in the current titanium drum production process are that the welding beads generated by the welding of the heat affected zone during the welding process may cause stains or discoloration during the generation of electrolytic copper foils, and hot spot defects may occur in the current density operation range. Consequently, the quality of the copper foil is significantly deteriorated. Therefore, it predicts the strain, stress, and safety rate by the heat transfer analysis of titanium drums for the electrolytic copper foil and optimizes welding process variables according to the case-by-case strain, stress, and safety rate by considering the inhibition of the residual stress.

Key Words: Electrolytic copper foil, Titanium drum, Welding, Heat transfer, GPS algorithm

1. 서 론

전해 동박은 우수한 전기적, 기계적 특성 및 제조 공정의 용이성으로 리튬 이온 배터리용 집전체로 널리 사용되며 얇고 향상된 기계적 특성이 요구되고 있다. 전해 동박 제조용 양극은 표면 산화 피막의 내식성이 우수하고 주조가 용이한 납이 사용되고 있으나 컴퓨터 및 통신 장비 등 각종 정밀 전기, 전자 장비의 경량화 및 극소형화가 진행됨에 따라 동박 두께가 초정밀화되고 있다. 또한 현재 양극의 내마모성 및 내식성 등을 증가시키기 위하여 점차 티타늄 양극으로 대체되고 있다¹⁾.

전해도금에서 사용되는 기지(Substrate) 전극으로써는 Titanium drum이 많이 이용되는데, 그 이유는 음극 표면에 형성되는 산화막 때문에 전해액 내에서 매우

우수한 내식성을 나타내고, 도금 후에 Drum으로부터 동박을 분리하기 쉬운 장점 때문에 현재 제박공정에서 사용되는 Titanium drum은 전해 동박의 스펙에 맞추어 형상, 구조, 크기와 같은 정보가 모두 달라 100% 주문 생산 방식을 사용하여 공급이 되고 있다. 특히 기존에 제조기술에 대한 특허가 종료되었음에도 부품의 안전성을 위하여 기존에 전해 동박용 Titanium drum을 생산해왔던 일본에서 전량 수입하여, 높은 의존도가 지적되고 있다.

향후 전자 기기의 고집적화 및 슬림화에 따라 PCB의 협피치화 및 박막화 기술 전개가 지속될 것으로 판단되며, 특히, PCB의 협피치화에 따라 PCB에 적용되는 동박은 두께 및 조도를 저감시키는 방향으로 기술이 전개될 것으로 사료된다. 현재 2~12 μ m 두께의 동박을 반도체 패키지용 PCB에 적용하고 있고, 향후 회로 패

턴의 협피치화에 따라 $3\mu\text{m}$ 이하의 극박 채용 비율이 증가될 것으로 사료되는 시점에서 전해 동박의 스펙컬링에 영향을 주는 Titanium drum 제작 기술의 중요성 및 관련 기술개발이 시급하게 요구된다^{2,3)}.

기존의 Titanium drum 생산 공정은 제조되는 전해 동박의 품질 저하 및 생산성 등에 영향을 미치는 다양한 문제점이 있다. 열 영향부에 의한 문제점들을 해결하고, 제작기술의 중요성을 인식하여 Titanium drum에 관련된 연구가 수행중이다. 용접에 의한 열 영향부의 문제점은 이론적, 기술적, 경험까지 다양한 분야의 학문적 내용들이 결합되어야 하며, 제조과정에서 용접 공정변수에 따라 나타나는 열 영향부를 파악하고 용접 공정변수간의 상호효과에 대한 연구가 요구된다.

최근에는 Titanium의 용접부위를 평가하는 연구가 집중적으로 진행되고 있는 추세이다. 선행되어진 Titanium 용접공정 과정에서의 형성된 용접부위 평가 연구로 Lee 등⁴⁾은 Titanium의 Laser peening 공정을 통해 용접부의 기계적 특성 개선 및 발생된 열적 응력의 완화에 미치는 영향을 확인하였고, Yum⁵⁾은 Titanium을 용접한 후 용접부의 기계적 성질과 인장 파절면의 관찰을 통해 구조적 변화를 확인하였다. 또한 Berg 등⁶⁾은 가공된 Titanium 시편에 Output voltage를 변화시키면서 인장강도와 용접부의 기계적 성질을 평가하였으며, 전압과 주파수의 조절을 통해 출력에너지 변화시켜 용접부의 특성 평가하였다. Kim⁷⁾은 전해 동박 생산과정의 전착과정에서 전해액에 영향을 받는 Titanium 용접부에 대한 부식거동을 연구하였으며, Min 등⁸⁾은 Titanium 용접 시 가장 널리 사용되는 GTA 용접공정에서 용접부의 형상, 변색 및 굽힘 특성에 대해 연구하였다.

Lim 등⁹⁾은 Fiber laser를 활용한 Titanium 용접 공정 시 보호 가스를 공정변수로 선정하여 용접공정에서 보호가스의 영향에 따른 용접부 강도를 분석하였다. Liu 등¹⁰⁾은 Titanium 판재를 이용하여 레이저의 여러 가지 변수에 대한 Titanium의 용접특성을 평가하였다. Lee 등¹¹⁾은 Titanium에서의 레이저 용접 특성을 평가하기 위해 레이저빔의 Pulse 폭, Spot 직경을 고정하고, 출력전류를 변화시키며 용접한 후 용접부의 기계적 성질에 관하여 연구하였다.

용접조건 최적화에 관한 연구는 Kim 등¹²⁾은 Titanium GTA(Gas Tungsten Arc) 용접부의 기계적 성질 및 성형성에 미치는 공정변수를 연구하였다. Lee 등¹³⁾은 반응표면법을 이용하여 용접 조건을 선정하며, 실험에 의한 접합강도 인자에 대한 분석을 통해 최적조건의 기준을 마련하고자 하였다. Kim 등¹⁴⁾은 유한요소 해석을 통하여 용접에 의한 변형과 잔류응력에 대해

고찰하고 용접 공정의 변화에 대한 변수해석을 통하여 용접 변형과 잔류응력을 최소화 하는 최적의 용접 공정을 도출하였다.

Titanium 용접공정의 경우 고려해야하는 공정 변수에 범위가 넓어 비교적 최적화 공정변수를 도출하기에 많은 연구가 요구되고 있다^{15,16)}.

Titanium 용접 조건에 따른 기계적 특성 및 용접부의 품질에 관련되어 많은 문헌 보고와 연구가 이루어졌으나 플레이트 형상을 대상으로 용접 기법 연구가 대부분이고, Titanium drum의 제작과정에서 열영향부를 파악하여 용접기술을 적용하기 위해 최적의 용접조건을 선정하는 연구는 미비한 수준이다¹⁷⁾.

따라서, 본 연구에서는 2차 전지용 전해 동박에 대한 Titanium drum에 적용되는 용접공정의 최적화를 위하여, 용접 공정변수에 따른 해석 결과를 확인하고자 하였다. 이러한 연구 목표를 달성하기 위하여 Titanium drum의 Transient thermal - static structural 연성해석을 통해 온도 분포, 응력 및 변형률 예측을 하였다.

열탄소성 시뮬레이션 결과를 기반으로, Titanium drum 용접공정 변수를 최적화 할 수 있는 수학적 모델을 개발하였고 GPS(Generalized-Pattern Search) 최적화 기법을 적용하여 2차 전지용 전해 동박에 대한 Titanium drum의 최적의 용접 공정변수를 선정하였다. 선정된 용접 공정변수를 이용하여, 전해 동박에 대한 Titanium drum의 안전율 및 내구성 향상을 규명하였다.

2. 열탄소성 해석

열전달의 형태에는 전도, 대류, 복사 등의 형태가 있다. 본 논문에서는 열전도에 의한 해석이 주로 수행되므로 이에 대한 지배방정식을 소개하고 경계조건에 대한 기본 사항을 기술하였다.

전도는 열에너지가 온도의 구배에 의해서 고체나 유체를 통해서 전달되는 현상이고 대류, 복사 등과 구별되게 된다. 열전달 방법 중의 하나인 전도는 Fourier의 법칙으로 시간당 변화량의 형태를 사용하여 기술된다. 등방성 재료의 경우에는 다음과 같다.

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

식 (1)로 표현되는데, q 는 단위 면적 당의 법선 n 방향으로의 열 흐름 변화율이며, κ 는 온도의 함수인 열전도 계수이다. 식의 음의 부호는 양의 방향의 흐름은 온도 구배의 음의 방향이므로 (즉, 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐름) 포함되어 있다. 직교 좌표계에서는 열 흐름 벡터의 각 요소는 다음과 같다.

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\kappa \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

식 (2)가 되며, 벡터 형태로는 아래의 식과 같다.

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T \quad (3)$$

이방성 재료의 경우 직교좌표계로 표현된 Fourier 법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_x &= \left(-\kappa_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + \kappa_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + \kappa_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ q_y &= \left(-\kappa_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + \kappa_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + \kappa_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ q_z &= \left(-\kappa_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + \kappa_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + \kappa_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)로 표현되며, k_{ij} 는 열전도 텐서이며 비가역적인 열역학 법칙에 의하여 대칭행렬이 된다.

열전도 방정식은 온도에 따라 변하는 열전도계수를 가진 등방성 고체의 경우 열에너지 방정식은 Fourier의 법칙을 이용한 에너지 보존의 법칙에 의해서 구해진다. 에너지 보존의 법칙은

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

식 (5)이며 Q 는 단위 부피당의 내부 열 생성물이고, ρ 는 밀도, c 는 비열, 그리고 t 는 시간이다. c 는 일반적으로 온도에 따라 변한다. 열전달 계수나 비열이 온도에 따라 변하면 식 (5)는 비선형 방정식이 되고 두 가지 계수가 모두 온도에 따라 변하지 않으면 선형 방정식이다. 등방성 재료와 일정한 열 관련 계수를 가진 방정식의 경우에는 다음과 같다.

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{\kappa} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

여기에서 α 는 열 확산계수로서 다음과 같이 정의 된다.

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (7)$$

열 특성계수들이 일정하고 내부에서 열이 발생하지 않는 경우, 열전달 방정식은 확산 방정식이 되며 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

열 특성계수가 일정하고 시간에 따라 열전달이 달라지지 않으면 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{\kappa} = 0 \quad (9)$$

식 (9)로 되고 Poisson 방정식의 형태가 된다. 열 특성계수가 일정하고 시간에 따라 열전달이 달라지지 않으며 내부에서 열이 발생하지 않으면 다음과 같다.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (10)$$

식 (10)의 형태로 열전달 방정식이 간략화 되고 Laplace 방정식이 된다. 위의 식에서 $\nabla^2 T$ 는 직교좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (11)$$

식 (11)은 상기의 가정들을 기초로 하여 ANSYS S/W를 이용하여 열박음 Simulation을 수행하였다.

Titanium outer drum 용접 시 공정변수인 용접전류와 아크전압은 용접부와 그 구조물에 여러 가지 영향을 미치는데 대표적인 용접변형, 잔류응력 및 응력분포의 구조적인 안전성을 확보하고자 ANSYS Transient thermal, Static structural 해석 Tool을 사용하여 열전달 및 열 탄소성 해석을 실시하였다.

Fig. 1에는 해석 절차를 나타내었으며, 2차 전지용 Titanium drum의 2차원 설계도면을 바탕으로 3D 모델링 프로그램인 SolidWorks S/W를 사용하여 3D 모델링을 수행하였고, 본 해석을 위하여 Titanium 재질의 Drum을 사용하였다. Fig. 2는 상용 프로그램을 사용하여 해석하고자 하는 Titanium drum의 구조를 나타낸다.

Fig. 1 The procedure and method for thermal-structural analysis simulation

Fig. 2 The 3D modeling of a titanium drum

Fig. 3 Titanium outer drum grid generation

본 연구 목적인 Titanium outer drum의 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 위한 Titanium 재료의 기계적 특징은 Table 1에 나타내었고, 화학적 특징은 Table 2에 나타낸다. 열 탄소성 해석은 용접부의 온도 분포 및 온도 변화를 가상으로 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하고 열에 의한 변형 및 응력을 확인함으로써 용접결과를 예측하였다. 이러한 특징 때문에 Workbench static structural 해석 Tool을 사용하여 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 수행하였다.

시뮬레이션 해석 시 설정한 경계조건은 Table 3에 용접속도, Cooling time, 그리고 실제 용접과정 과정의 주변온도 등을 나타낸다. Titanium outer drum 용접부의 열전달 해석을 수행하기 위하여 사용된 격자는 Tetrahedron method를 사용하여 Fig. 3과 같이 구성하였다. 경계조건은 현장에서 사용되는 조건을 기반으로 Titanium에 온도 400℃를 적용하였다. 또한, Titanium outer drum이 고정되는 상황으로 끝단에

Fixed support를 적용하고 자중을 고려하여 중력가속도 약 9.81m/s²를 적용하였고, Fixed variable로 용접속도는 40cm/min, Cooling time은 3,600sec로 구성하였다.

각 구성품의 접촉조건은 격자에서 격자로 하중 및 변형 정보를 넘겨 줄 수 있도록 Bonded 조건을 이용하여 절점을 공유하였다. 해석은 Transient thermal - static structural 연성해석을 수행하였으며, 용접 공정변수에 따른 해석결과를 확인하여 Titanium outer drum의 변형량, 응력을 예측하고자 하여 최적의 용접 공정변수를 결정하였다.

Titanium outer drum과 Titanium 측면판의 접합 부위는 제조공정에서 용접에 의해 발생하는 열 영향을 받아 부위별 소재 내부의 전도성 불균일과 용접변형 발생이 우려되는 부분이다. 따라서 Titanium outer drum의 응력분포 및 변형을 최소화하기 위해 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 실시하였고, Titanium outer drum 용접부의 용접변형을 최소화할 수 있는 용접조건을 도출하기 위해 용접 공정변수로 용접전류 및 아크전압으로 선정하고, 열전달 해석과 열 탄소성 해석을 실시하였다.

Titanium drum은 용접 공정변수를 고려한 시뮬레이션이 필요하므로 반응인자에 영향을 많이 주는 주요 인자를 식별해내는데 주로 사용되는 실험계획법 중 일 반적인 완전요인배치법을 이용하였다. 완전요인 배치법은 모든 실험계획법의 이론적 근거가 되며, 최적화 및 인자 선별의 목적으로 매우 빈번하게 사용되고 있다.

반복이 없는 이원배치 실험법의 경우 식 (12)와 같이 실험의 대상으로 인자를 2개 선정하여 해석에 실시하는 방법으로 인자를 각각 a, b라 정의하였다. 해석에 사용된 인자는 용접 공정변수인 아크전압과 용접전류로 2개이며 수준 수는 6개로 구성하였다. 해석계획은 총 12개의 Case로 Table 4와 같이 수립하였다.

본 해석의 경계조건은 현장에서 사용되는 조건을 기반으로 Titanium에 온도 400℃를 적용하였다. 또한, Titanium outer drum이 고정되는 상황으로 끝단에 Fixed support를 적용하고 자중을 고려하여 중력가속도 약 9.81m/s²를 적용하였다.

Table 1 Mechanical properties of titanium

Material condition	Titanium
Tensile strength	220MPa
Yield strength	140MPa
Elongation at break	54%
Modulus of elasticity	116GPa
Shear modulus	43GPa
Thermal conductivity	17W/m · K

Table 2 Chemical properties of titanium

Material	N	C	H	Fe	O	Ti
Titanium	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	Rem.

Table 3 Thermal analysis boundary condition

Parameter	Value
Convention	22℃
Material condition	Titanium
Welding speed	40cm/min
Solver type	Transient thermal, Static structural
Cooling time	3,600sec
Gravitational acceleration	9.81m/s ²

Table 4 The simulation plan for the trend of arc voltage

Case no.	Welding current (A)	Arc voltage (V)
1	100	25
2	100	24
3	100	23
4	100	22
5	90	25
6	90	24
7	90	23
8	90	22
9	80	25
10	80	24
11	80	23
12	80	22

Fig. 4 Heat transfer analysis result

$$N = ab \quad (12)$$

2가지의 공정 변수(용접전류, 아크전압)를 적용하여 12개의 Case를 수립하여 Transient thermal - static structural 연성해석을 실시하였다. 열적 특성을 분석하여 Temperature를 예측하였다. Fig. 4에 Titanium drum의 열전달 해석 결과를 나타낸다.

Titanium drum의 용접부가 열 영향을 받음으로써 발생하는 최대 변형량과 최대 응력을 열탄소성 해석한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. Titanium drum의 최대 변형량은 Case 2에서 0.21mm, 최소 변형량은 Case 12에서 0.18mm로 확인하였다. 최대 응력은 Case 1에서 178.16MPa Titanium drum의 하단부에서 최대 응력이 나타나는 것을 확인하였으며, 안전율은 Case 12에서 1.68로 가장 높음을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 최적화기법을 이용한 용접 공정변수 최적화

2차 전지에서 사용되는 Titanium drum의 용접부의 건전성 및 구조적 안정성을 위해서는 용접 공정변수인 용접전류, 아크전압의 두 가지 매개 변수를 선정해야한다. 이를 기초로 매개 변수가 수정 매개 변수로 고

Fig. 5 Thermal stress analysis result

려되었다. Titanium drum의 용접부 내구성 및 구조적 안정성은 용접공정 파라미터를 조정하는 것에 달려 있다.

따라서 Titanium drum의 최대 변형량, 최대 응력, 안전율을 포함하는 연성해석을 통해 성능을 예측하였다. 따라서 과다설계를 하지 않으며, 용접부의 건전성 및 구조적 안정성을 극대화하기 위한 최적의 용접 공정 변수가 필요하다. Titanium drum의 최대 변형량, 최대 응력, 안전율을 예측할 수 있는 수학적 모델을 기반으로 용접 공정변수 최적화를 구현하였다.

Titanium drum의 경우 e-나라 표준인증에 의하여 안전율 1.5이상을 만족하여야 한다. 따라서 안전율 1.5를 최소 제한조건으로 설정하였으며, 변형률 최소, 최대응력 최소를 만족하는 용접 공정변수를 도출하였다.

일반화 패턴검색(GPS, Generalized-Pattern Search) 패턴의 생성, 격자크기의 결정, 폴링, 확장과 축소 등으로 해를 찾는다. 처음 단계로 임의의 탐색 단계가 있는데, 이것은 현재 해보다 좋은 해를 찾기 위해 인접지역을 탐색하는 방법으로 방향벡터를 사용한다. 또한 인접지역의 탐색은 보통 격자라고 불리는 집합에서 이루어지는데, 격자크기가 인접해의 거리를 결정한다.

이 격자 크기는 탐색해를 찾는 중요한 인자로 해의 국소 또는 전역 수렴 여부를 결정한다. 폴링(Polling)은 인접해를 탐색하는 과정에서 가장 좋은 인접해를 다음 단계에서의 해로 설정하는 방법과 좋은 해가 나오기만 하면 그 해를 다음 단계에서 해로 즉시 사용하는 방법이 있다. 이때 현재해보다 더 나은 해를 발견하면 성공적 폴링이라고 하고 격자 크기를 감소하지만, 인접해보다 좋지 않은 해가 발생되면 비성공적 폴링이라고 하고 격자 크기를 증가시켜 해를 탐색해서, 가장 좋은 해를 찾아가는 방법이다.

Generalized-Pattern Search는 비변화를 기반의 최적화 알고리즘으로 목적함수의 변수를 이용해 형성된 다차원 그물망(Mesh)을 이동하며, 최적화를 수행한다. 최적화를 수행하기 위한 목적함수는 식 (13)과 같이 정의한다. 목적함수 $f(x)$ 의 변수 x 는 식 (14)와 같이 구성되고 n 은 목적함수 변수의 차원 개수, k 는 갱신 횟수, Δ_k 는 k 번째 갱신에서 그물망의 격자크기, d 는 그물망에서의 이동방향을 의미하며, 다음과 같다.

$$\min f(x) \text{ where } f: R^n \rightarrow R \quad (13)$$

$$\Omega = x \in R^n : l < x < u, l \leq u$$

$$x \in X, x = x_k \pm \Delta_k d, \Delta_k > 0 \quad (14)$$

목적함수를 최소화하기 위해 먼저 초기 값 x_0 를 설정하고 이에 따른 목적함수 $f(x_0)$ 를 계산한다. 이때 갱신횟수 k 는 0으로 하며, 이러한 과정을 초기화라고 지칭하며, 첫 번째 갱신을 수행하기 위해 미리 설정된 목적함수에 의해 $f(x_1)$ 을 산출한다.

만약 목적함수의 갱신이 성공적이고 수렴된다면 그물망의 크기를 줄여 계산을 반복한다. 그물망의 격자크기 Δ_k 가 일정 값 이하가 되었을 때 최적해로 수렴하였다고 판단할 수 있으며, 최대 업데이트 횟수 또는 최대 시뮬레이션 횟수를 제한하여 최적화 과정을 강제종료 시킨다.

Clarke¹⁸⁾가 제시한 방향미분 개념을 적용하여 식 (15)에 의해 x 가 최적해를 찾아가고 모든 그물망을 감소시켜가면서 GPS의 수렴해석을 수행하였으며, 이러한 정리를 바탕으로 GPS 최적화 기법의 프로그램 모식도를 Fig. 6에 나타낸다.

$$\nabla f(x) \geq \lim_{k \in K} \sum \frac{f(x_k + \Delta_k d) - f(x_k)}{\Delta_k} \geq 0 \quad (15)$$

GPS 최적화 기법의 적용과 산출은 상용 수치해석 프로그램인 MATLAB을 이용하여 각각의 함수공차들을 적용하였으며, 12개의 해석결과 데이터를 이용하였다. GPS 기법도 용접전류, 아크전압에 대한 범위 값은

Fig. 6 GPS method diagram for predicting welding parameters

최소 [80A, 22V]에서 최대 [100A, 25V]로 선정하였으며, 지속적인 반복산출을 통해 용접 공정변수 결과 오차를 감소시키다가 그물망의 감소가 안정화되는 부분에서 산출을 정지하도록 구성하였다. 목적함수에 사용된 변수들은 용접공정의 주요인자로 판단되는 용접전류, 아크전압으로 선정하고 이러한 변수에 의해 형성되는 최대 변형률, 최대 응력, 안전율은 회귀모델을 사용하였다.

제한함수의 매개변수 상·하한 값은 e-나라 표준인증에서 요구하는 안전율인 1.5 이상을 만족하고, 매개변수에 따른 최대 변형률, 최대 응력을 만족하는지 확인하기 위하여 선정하였다.

최적화 기법의 적용성을 향상시키기 위해 함수공차를 다양하게 나누어 적용하였으며, GPS 최적화 기법의 변수들은 Table 5에 나타낸다. Generalized-pattern search 최적화 기법에 의해 산출된 결과는 Table 6에

Table 5 GPS method parameters and their values

Optimal method		GPS(Generalized-Pattern Search)
Function tolerance (Mesh size)		1E-6, 2E-6, 3E-6, 4E-6, 5E-6, 6E-6, 7E-6
Range of parameter	Min. Value	Welding current 80A Arc voltage 22V
	Max. Value	Welding current 100A Arc voltage 25V
Range of constraint value		Maximum deformation : $0 \leq D_1 \leq 0.21$ Maximum equivalent stress : $0 \leq E_1 \leq 190$ Safety factor: $1.5 \leq S_1 \leq 1.68$
Solver		Pattern search
Algorithm		Positive basis 2N
Derivatives		Consecutive

Table 6 The results of various population sizes using GPS method

Population size	Welding current(A)	Arc voltage(V)	Results of objective D(mm)	Results of objective E(MPa)
1.E-06	80.00	22.25	0.18	148.46
2.E-06	98.76	22.00	0.19	165.58
3.E-06	97.57	22.52	0.19	163.98
4.E-06	97.89	22.73	0.19	167.56
5.E-06	98.62	23.94	0.19	173.18
6.E-06	98.28	24.50	0.20	174.70
7.E-06	89.90	23.92	0.19	164.21

Fig. 7 The results of GPS method for maximum deformation and maximum equivalent stress

나타내었으며, 제한조건을 만족하는지 확인하기 위해 Fig. 7에 나타낸다. 연성해석 결과를 기초로 최대 변형량, 최대 응력, 안전율 예측 정확도 분석한 결과, 최적 용접 공정변수는 용접전류 89.90A, 아크전압 23.92A로 선정하였다.

3.2 검증 해석

Fig. 8과 같이 최소 변형량은 0.17mm로 확인하였고 최대응력은 152.7MPa 안전율은 1.63으로 e-나라 표준인증에서 요구하는 안전율을 만족함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차 전지용 전해 동박의 제작에 적용되는 Titanium drum의 용접 공정변수를 최적화하기 위하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 용접 공정변수 변화를 분석하고, 선정된 각각의 함수들을 기반으로 GPS 최적화 기법을 적용하여 최적의 작업조건을 선정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 12개의 Case 별로 수행한 시뮬레이션 결과에 따

Fig. 8 Verification thermal stress analysis result

르면, Titanium drum의 최대 변형량은 Case 1에서 0.21mm, 최소 변형량은 Case 12에서 0.18mm로 확인하였으며, Case 12에서 안전율이 1.68로 가장 높음을 확인하였다.

2) GPS 기법을 적용하여 Population size에 따른 최대 변형량은 0~0.21mm를 넘지 않으면서 최대 응력 값은 0~190MPa이며 안전율이 1.5~1.68의 조건을 만족시키는 제한조건을 선정하였다.

3) 안전율이 1.5를 만족하면서 변형량이 최소인 경우는 Population size가 3.E-06과 Population size가 7.E-06 일 때 변형량이 1.7×10^{-3} mm 차이가 발생하지만 최대응력이 약 0.22MPa 높아 최적 용접 공정변수는 용접전류 89.90A, 아크전압 23.92V로 선정하였다. 또한 검증 실험을 통하여 기준치를 만족하였다.

향후에 2차 전지용 전해 동박 제조 시 Titanium drum의 생산성을 고려하여 2차 전지용 전해 동박 생산설비 설계에 중요한 자료로 사용될 것으로 예상되며, 2차 전지용 전해 동박에 대한 Titanium drum의 제작을 위한 용접특성을 파악할 수 있는 기초연구 자료

활용 및 실제 환경에 따른 용접방식 선정에 필요한 최적화를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

This work was supported by the material&components technology development program (No. 20010658, Development of Commercialization Technology for Titanium Cathode Drum to Manufacture Copper Foil Used in Electric Vehicle Batteries) funded By the Ministry of Trade, industry & Energy(MOTIE, Korea)

ORCID: Won-Bin Oh: <https://orcid.org/0000-0003-2032-1031>

ORCID: Tae-Jong Yun: <https://orcid.org/0000-0002-3827-5857>

ORCID: Bo-Ram Lee: <https://orcid.org/0000-0002-0201-6335>

ORCID: Ill-Soo Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9936-6760>

References

1. D. R. Turner and G. R. Johnson, The Effect of Addition Agents on the Kinetics of Copper Electrodeposition from a Sulfate Solution - L cathode Potential-Current Density Relation, *J. Electrochemical Soc.* 109(9) (1962) 798-804.
2. S. W. Oh and MA thesis, An Analysis on Peeling Strength of Copper Foil of PCB Inner-layer by Surface Profile and Type of Epoxy, *Kyungpook University*, Kyungpook, Korea (2007) 1-7.
3. J. H. Choi and MA thesis, PCB Design of Bluetooth RF module using Micro Strip Line and BALUN, *Sogang University*, Seoul, Korea (2002) 1-4.
4. W. R. Lee, T. S. Park, and I. K. Park, Study on a Residual Stress Reduce in Laser Welding Process using Ti6Al4V, *J. Weld. Join.* 34(4) (2016) 35-41. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.6.35>
5. M. K. Yun, H. S. Kim, H. S. Yang, M. S. Bang, S. W. Park, and K. M. Lee, Mechanical Properties of Laser-Welded Cast Titanium and Titanium Alloy, *The Korean Academy of Prosthodontics*, 44(5) (2006) 642-653.
6. E. Berg, W. C. Wagnere, G. Davik, and E. R. Dootz, Mechanical Properties of Laser-Welded Cast and Wrought Titanium, *Prosthet Dent*, 74(3) (1995) 250- 257. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(05\)80131-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(05)80131-3)
7. C. K. Kim and MA thesis, A Study on the Corrosion Behavior of Plasma Weld Titanium, *Hanyang University*, Seoul, Korea (2010) 32-40.
8. S. H. Min, S. Y. An, J. T. Park, Y. D. Park, and N. H. Kang, Effects of GTAW Pulse Condition on Penetration, Discoloration and Bending Property for Titanium Tube, *J. Weld. Join.* 32(6) (2014) 47-55. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.6.47>
9. J. T. Lim and W. R. Lee, The Effect of Shielding Gas Composition on CW Fiber Laser Fusion Smart Welding Process of Ti-6Al-4V Alloys, *Korean Soc. Sci. Art.* 38(4) (2020) 315-326.
10. J. Liu, I. Watanabe, K. Yoshida, and M. Atsuta, Joint Strength of Laser-Welded Titanium, *Dent. Mater.* 18(2) (2002) 143-148. [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(01\)00033-1](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(01)00033-1)
11. J. J. Lee, K. S. Kim, S. G. Ahn, T. S. Bae, and C. W. Park, Mechanical Properties of Laser-Welded Titanium Joints, *Korean J. Dent. Mater.* 30(2) (2003) 147-152.
12. J. H. Kim and MA thesis, The Effect of Pulse Condition on Mechanical Properties and Formability in GTA Welds of Commercial Pure Titanium Sheet, *Pusan University*, Pusan, Korea (2010) 40-50.
13. S. W. Lee and J. W. Kim, Selecting Optimum Conditions for SPR Processing of High Tension Steel Plates and Aluminium Sheets Using Response Surface Methodology, *J. Weld. Join.* 37(4) (2019) 339-346. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.4.8>
14. J. S. Kim, I. H. Im, J. S. Kim, and J. S. Suh, Welding Residual Stress Evaluation and Process Optimization of CTBA Trailing Arm using Finite Element Analysis, *J. Weld. Join.* 36(4) (2018) 70-74. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.4.8>
15. H. H. Yang and C. S. Park, The Effects of Anodizing Process Parameters and Oxidation Temperature under Atmospheric Environment on Morphology of the Pure Titanium by Alternating Current Arc-anodizing, *J. Korean Inst. Surf. Eng.* 41(1) (2008) 16-22. <https://doi.org/10.5695/JKISE.2008.41.1.016>
16. J. D. Kwon, Y. T. Bae, and S. J. Choi, The Evaluation of Mechanical Properties on the Changes of Micro-structure for Titanium Alloy(Ti-6Al-4V), *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. - A*, 26(4) (2002) 609-616. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2002.26.4.609>
17. S. H. Min and MA thesis, Penetration, Oxidation, and Bending Characteristics of Titanium Precision Tubes According to GTAW Pulse Welding Conditions, *Pusan University*, Pusan, Korea (2015) 10-19.
18. Clarke, Converting mathematics tasks to learning opportunities: An important aspect of knowledge for mathematics teaching, *Math. Educ. Res. J.* 21(1) (2009) 85-105. <https://doi.org/10.1007/BF03217539>