

## 리튬이온 배터리용 다층박판 금속의 초음파 용착시 용착강도

김진범\*, 서지원\*, 박동삼\*\*,#

\*인천대학교 대학원 기계공학과, \*\*인천대학교 기계공학과

### Welding Strength in the Ultrasonic Welding of Multi-layer Metal Sheets for Lithium-Ion Batteries

Jin-Bom Kim\*, Ji-Won Seo\*, Dong-Sam Park\*\*,#

\*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Incheon National University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Incheon National University

(Received 12 April 2021; received in revised form 23 April 2021; accepted 26 April 2021)

#### ABSTRACT

As a significant technology in the smartization era promoted by the Fourth Industrial Revolution, the secondary battery industry has recently attracted significant attention. The demand for lithium-ion batteries (LIBs), which exhibit excellent performance, is considerably increasing in different industrial fields. During the manufacturing process of LIBs, it is necessary to join the cathode and anode sheets with thicknesses of several tens of micrometers to lead tabs of the cathode and anode with thicknesses of several hundreds of micrometers. Ultrasonic welding exhibits excellent bonding when bonded with very thin plates, such as negative and positive electrodes of LIBs, and dissimilar and highly conductive materials. In addition, ultrasonic welding has a small heat-affected zone. In LIBs, Cu is mainly used as the negative electrode sheet, whereas Cu or Ni is used as the negative electrode tab. In this study, one or two electrode sheets (t0.025 mm Cu) were welded to one lead tab (t0.1 mm Cu). The welding energy and pressure were used as welding parameters to determine the welding strength of the interface between two or three welded materials. Finally, the effects of these welding parameters on the welding strength were investigated.

**Key Words** : Ultrasonic Welding(초음파 용착), Lithium-Ion Battery(리튬이온 배터리), Welding Strength(용착강도), Multi-layer Metal Sheets(다층 금속판), Welding Condition(용착 조건)

#### 1. 서 론

4차 산업혁명으로 촉진되고 있는 스마트화 시대의 가장 중요한 기술의 하나로 최근 이차전지 산업이 크게 주목받고 있다. 이러한 이차전지에는 여러

종류가 있으나 그 중에서도 뛰어난 성능을 지니고 있는 리튬이온 배터리(Lithium-Ion Battery: LIB)에 대한 수요가 여러 산업분야에서 크게 증가하고 있다. LIB는 주로 휴대폰 등 모바일 기기의 전원 용도로 주로 사용되어 왔지만, 최근에는 고정형 축전 시스템, 자동차의 동력 등으로 용도가 크게 확대되고 있다. 특히 세계 각국의 자동차 전동화 정책의 급속한 추진에 따라 EV, xEV(HEV, PHEV) 등 전기

# Corresponding Author : [dspark@inu.ac.kr](mailto:dspark@inu.ac.kr)

Tel: +82-32-835-8418, Fax: +82-32-835-0793

자동차용 배터리의 수요가 급증하고 있다. 최근 우리나라도 정부의 대규모 육성정책 추진과 더불어 제조업체들간의 K-배터리 동맹도 추진되고 있다.

LIB의 제조과정에서 LIB의 형태나 용량에 따라 달라질 수 있지만 수십  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 수십장의 층상 구조를 갖는 음극판(anode sheet)과 양극판(cathode sheet)을 수백  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 양극이 되는 1장의 리더 탭(lead tap)에 접합(joining)하는 공정이 필요하다. 접합방법으로는 초음파 용착(ultrasonic welding), 저항용착(resistance welding), 레이저빔 용착(laser beam welding), 와이어 본딩(wire-bonding) 및 기계적 접합(mechanical joining) 등이 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 이 중에서 이종재료(dissimilar material)나 고전도성 재료는 물론 LIB의 전극판과 같이 두께가 얇은 박판 재료의 접합 시 접합성이 우수할 뿐만 아니라 열영향부(heat-effected zone)도 작은 등의 장점으로 인하여 초음파 용착이 널리 사용되고 있다.

LIB의 출력 손실과 열발생을 최소화하기 위해서는 극판과 리더 탭의 용착품질이 매우 중요한데 전기자동차용 LIB의 접합기술 및 특성에 대한 전반적인 연구결과가 소개된 바 있으며<sup>[1, 2]</sup>, 배터리 탭의 초음파 용착 시 용착 품질 특성<sup>[3]</sup> 등의 연구도 발표되었다. 또한, LIB의 극판이나 리더 탭의 소재를 고려하여 Cu와 Ni 박판 소재의 초음파 용착 시 용착 파라미터(parameter)가 접합강도에 미치는 영향<sup>[4]</sup>, Al과 Cu의 용착 시 나타나는 특성<sup>[5,6]</sup>, Ni과 Cu의 초음파 용착시 용착성<sup>[7]</sup> 등에 대한 연구가 있으며, 초음파 용착용 혼(horn)의 설계와 제작 혼의 용착성에 대한 연구<sup>[8-10]</sup>도 발표된 바 있다.

한편, 음극판으로는 주로 Cu, 음극 탭으로는 Cu 또는 Ni이 사용되는데 Cu와 Ni의 초음파 용착에 관한 연구는 다수 발표되었으나 점점 두께가 얇아지고 있는 다층 구조를 갖는 Cu 음극판과 Cu 리더 탭의 초음파 용착에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 다층 배터리의 용착에 대한 기초연구로 음극판용 0.025mm 두께의 Cu 소재 1장 또는 2장을 리더 탭용 0.1mm 두께의 Cu 소재에 초음파 용착할 때 용착에너지가 두 소재간의 용착품질을 결정하는 용착강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

## 2. 리튬이온 배터리와 초음파 용착

### 2.1 리튬이온 배터리의 종류와 구조

LIB의 급격한 발전에 따라 그 종류와 구조도 다양하게 소개되고 있지만<sup>[11, 12]</sup> 기본적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다<sup>[11]</sup>. LIB는 크게 원통형과 프리즘형으로 나눌 수 있으며, 낮은 에너지 밀도에도 불구하고 체적 효율이 좋아 프리즘형 중에서도 파우치형(pouch type)이 가장 많이 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> LIB의 종류와 상관없이 배터리 셀(cell)의 내부 구조는 분리판(separator), 배터리 용량에 따라서 층수가 다르지만 일반적으로 수십층의 전극(electrode)인 음극판과 양극판이 각기 1장의 탭에 접합되어 있다.

Fig. 2는 파우치형(pouch type)의 셀을 더욱 자세히 나타낸 것으로 주로 양극판은 Al, 음극판은 Cu 소재로 만들며, 리더 탭의 경우 양극 탭은 Al, 음극 탭은 Cu 혹은 Ni로 만들어진다. 배터리의 효율을 높이기 위하여 소재 두께는 점점 작아지고 있는데 전극판의 경우 최근 10 $\mu\text{m}$  이하로도 만들고 있다.

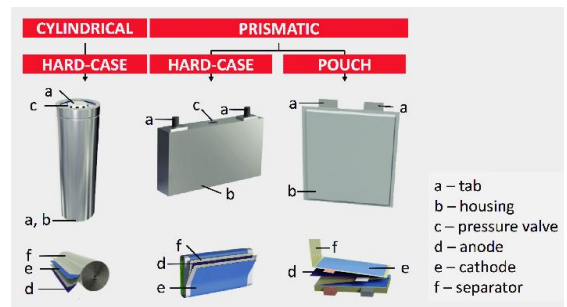


Fig. 1 Shapes of LIB cells<sup>[11]</sup>

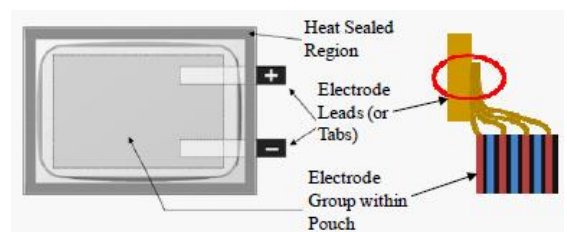


Fig. 2 Schematic diagram of a pouch type prismatic battery cell<sup>[1]</sup>

## 2.2 초음파 금속 용착의 기본 원리

LIB 셀의 각 전극판과 탭은 주로 초음파 용착으로 접합되며 접합 품질은 배터리의 성능과 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 3은 초음파 금속 용착의 기본 원리를 나타낸 것이다. 전원공급기(power supply)는 50~60Hz의 일반 전원을 초음파 용착에서 주로 사용하게 되는 20~40kHz의 초음파 전원으로 변환하는 발전기이며, 진동자(transducer)는 전기적 에너지를 기계적 진동에너지로 변환시킨다. 부스터(booster)는 진동자의 진동 진폭을 증폭하여 혼(horn)에 전달하는데 초음파 용착에서 가장 핵심적인 요소인 혼은 이 진동을 증폭시켜 앤빌(anvil)과 혼의 팁(tip) 사이에 설치되는 용착 소재에 적절한 압력과 종진동(longitudinal vibration)의 초음파 진동을 가하며 용착하게 된다. 초음파 진동은 용착시편 접합부의 마찰열에 기인하는 큰 소성변형을 일으키며 두 용착 소재의 용점(melting point) 이하에서 소재의 고상확산(solid-state diffusion) 작용에 의하여 강한 결합이 이루어지게 된다<sup>[13]</sup>.

초음파 용착은 용착 소재들의 용점 이하에서 용착이 이루어지므로 열영향부가 극히 작으며, 동종 재료는 물론 이종 재료나 고전도성 재료 및 두께가 아주 얇은 박판 재료의 접합 시 접합성이 우수한 등의 많은 장점을 지니고 있어 현재 LIB의 리더 탭 용착에 가장 많이 사용되고 있다.

초음파 용착 시 용착변수는 장비에 따라 작동모드를 선택할 수 있는데 용착에너지, 혼의 팁이 소재를 누르는 압력, 용착시간 및 혼의 진동 진폭 등이 있으며 이는 용착 품질에 큰 영향을 미치므로 적절한 값을 선택하지 않으면 안된다.

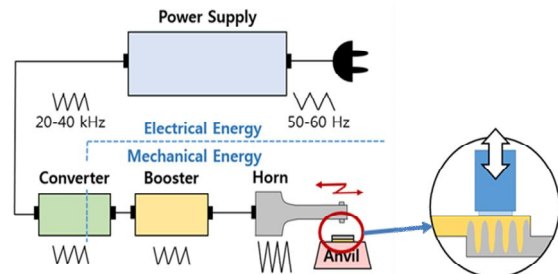


Fig. 3 Schematic diagram of the ultrasonic metal welding

## 3. 실험방법

### 3.1 용착 소재 및 용착장치

용착 실험에 사용된 소재는 LIB의 음극 전극판으로 주로 사용되고 있는 순도 99.9%, 두께 0.025mm의 Cu와 음극의 리더 탭으로 사용되는 순도 99.9%, 두께가 0.1mm인 Cu이다. 시편의 형상은 Fig. 4와 같이 길이 50mm, 폭 10mm로 제작되었으며 용착부의 면적은 혼의 팁 면적과 동일한 3mm x 3mm로 하였다. 용착실험 시 리더 탭 1장(Cu, t0.1mm)에 음극판이 되는 Cu 소재(t0.025mm)를 1장 또는 동시에 2장을 각각 초음파 용착하였다.

용착기는 한국의 듀라소닉(주)에서 개발된 D9800으로 4종류의 용착모드(Time Welding, Absolute Time, Correlative Length, Energy)를 가지고 있으며 3종류의 용착 모니터링 기능(Time, Welding Energy, Depth)도 가지고 있다.

Fig. 5는 용착기 및 용착시편을 용착기에 설치한 모습을 보여주고 있다. 앤빌(anvil) 바로 위에는 두께가 두꺼운 Cu를, 그 위에 1장 또는 2장의 얇은 전극판 Cu를 설치하고 용착하였다.

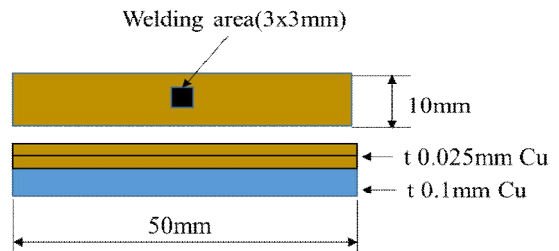


Fig. 4 Shape of welding specimen

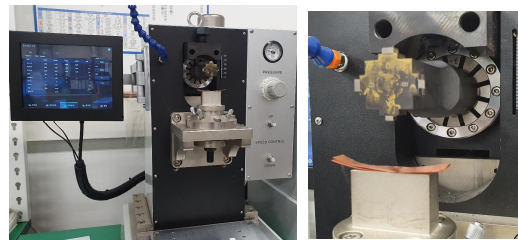


Fig. 5 Welding machine and experimental setup (D9800, Durasonic Co., LTD, Korea)

### 3.2 초음파 혼

실험에 사용된 초음파 혼의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 혼은 주로 종진동만을 이용하나 최근에는 종진동과 비틀림 진동을 동시에 갖는 혼이 일부 사용되기도 한다. 혼의 끝단에는 용착소재에 직접 진동을 전달하는 팁이 있는데 팁에는 Fig. 6(b)와 같이 널링 가공(knurling) 하는데 이 형태는 용착성에 영향을 미친다.

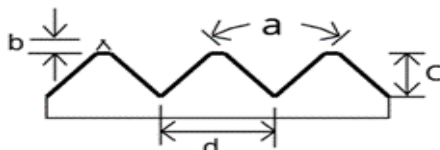
### 3.3 용착조건

용착 소재의 두께가 0.025mm인 박판일 경우 뒤에서 언급할 용착부가 완전히 분리되는 것이 아니라 용착부 경계에서 찢어짐(tearing) 현상이 나타나는데 이는 필요 이상으로 용착이 강하게 된 것이기 때문에(overwelding) 적절한 용착조건 선정이 중요하다. 초음파 용착기의 경우 여러 용착 모드가 있는데 많은 예비실험을 통하여 용착조건을 설정하였다. 특히 시간모드(time mode) 일 경우 용착시간 변수에 용착강도가 지극히 민감하게 반응하여 본 연구에서는 에너지 모드를 사용하여 용착하였다.

Table 1은 용착조건을 나타내는데 Cu 전극판 1장만을 용착할 때와 2장을 동시에 용착할 때 모두 같은 조건을 적용하였다. 실험의 정확성을 높이기 위하여 각 조건별로 2회씩 용착을 수행하였다.



(a) Horn with longitudinal vibration mode



(unit: mm)

a	b	c	d
90°	0.05	0.10	0.30

(b) Knurling pattern of horn tip

Fig. 6 Horn used in experimentation

### 3.4 인장시험에 의한 용착강도 측정

용착시편의 용착 후 용착부의 용착강도를 측정하기 위하여 Fig. 7(a)에 나타낸 1kN의 로드셀을 갖는 인장시험기(COMETEC®)를 이용하였으며, 시편의 인장속도는 10mm/min로 하였다.

일반적으로 용착부의 강도를 측정하는 방법에는 용착 시편의 양 끝단에서 수직 인장력을 주는 인장전단시험(tensile shear test), 상하 시편의 형상을 ‘U’자로 굽혀 순수 인장강도를 측정하는 U-test 및 시편의 한쪽 끝단에서 용착된 두 소재를 ‘T’자 형태로 만들어 인장력을 가하는 T-test (or Peel test) 등이 사용되나 본 연구에서는 용착 시편의 두께가 아주 얇아 Fig. 7(b)와 같이 ‘T’ 시험법을 사용하였다.

3장을 용착시킨 시편의 경우 Fig. 4의 시편 형상에서 윗부분의 0.025mm의 Cu 판을 먼저 인장시험 후 두 번째 0.025mm의 시편을 인장시험 하였다.

인장시험 시 나타나는 시험곡선으로부터 피크 하중을 용착강도로 측정하였는데, 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 각 용착조건별로 2회씩 용착한 시편에 대한 2회의 피크 하중의 평균값으로 최종 용착강도를 구하였다.

Table 1 The welding parameters

Welding parameters	Levels
Pressure (MPa)	0.1, 0.2
Welding energy (Joule)	2, 4, 6, 8



(a) Tensile test machine



(b) Specimen setup

Fig. 7 Tensile test machine(COMETEC®) and setup of the welded specimen for ‘T’ tensile test

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 인장시험 후 용착부 파손형태

1장의 0.025mm 두께 Cu를 0.10mm Cu에 용착한 시편에 대한 인장시험 결과 용착 소재의 분리 형태는 Fig. 8과 같이 나타났는데 0.025mm의 Cu용착부가 분리(separation) 되는 경우와 용착부가 찢어지는(tearing) 형태로 나타났다.

Fig. 8(a)와 같이 용착부 분리된 경우 얇은 Cu 소재의 일부가 두꺼운 Cu 소재에 고착(adhesion) 되어 있는데 두 소재 사이의 고상확산(solid-diffusion)에 의하여 용착이 잘 이루어진 경우라고 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 용착부의 일부가 파손이 일어나면서 전체적으로 상부 Cu가 찢어지며 분리된 상태인데, 실험에서 용착조건이 압력이 높거나 용착에너지가 과도할 경우 이 현상이 자주 나타났다. 과도한 용착조건으로 상부 Cu에 심한 소성변형을 일으키고 이는 용착부의 크랙 등으로 이어진 것으로 판단된다.

2장의 얇은 Cu 소재를 두꺼운 Cu 소재에 용착할 경우 인장시험 후의 시편 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 두 곳 용착부 모두가 분리된 경우로 용착부에 뚜렷한 팁과 앤빌의 용착 자국(mark)가 뚜렷하게 관찰되며, Fig. 9(b)에서는 최상단 Cu 소재에 찢어짐 현상이, Fig. 9(c)에서는 두 곳 용착부 모두가 찢어짐이 발생하는 경우를 보여준다. 일반적으로는 용착조건이 가혹할수록 찢어짐 현상이 더욱 자주 나타났다.

인장시험에 의하면 최상단에서의 용착강도가 두 번째 용착부에서의 용착강도가 대체로 높게 나타나고 있는데, 따라서 찢어짐이 발생하면 무조건 용착 불량이라고 단정하기는 어렵다. 이는 용착물이 어떠한 하중조건까지를 견뎌야 하는지에 대한 기준이 먼저 제시되어야만 판단을 할 수 있는 문제이기 때문이다. 현재 LIB는 물론이고 초음파 용착을 이용하는 대부분의 제품에서 용착부의 허용하중 기준이 거의 제시되지 않고 있는 상태로, 용착의 품질이나 불량 발생 여부에 대한 모니터링을 위해서는 다양한 용착 제품의 형상이나 용도에 따른 허용하중에 대한 설계나 기초 실험연구가 절실히 필요하다고 판단된다.

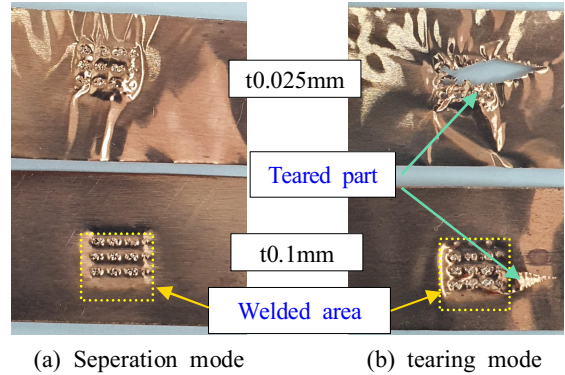


Fig. 8 Failure mode of specimen(2 layers)

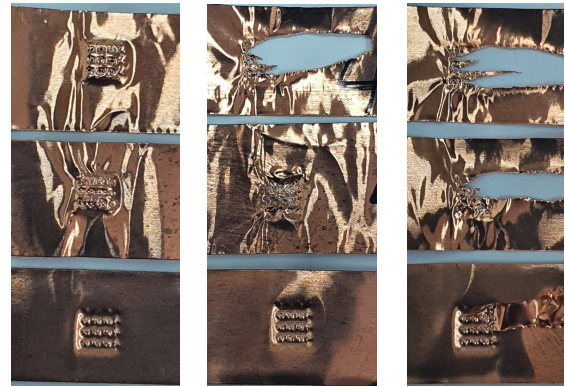


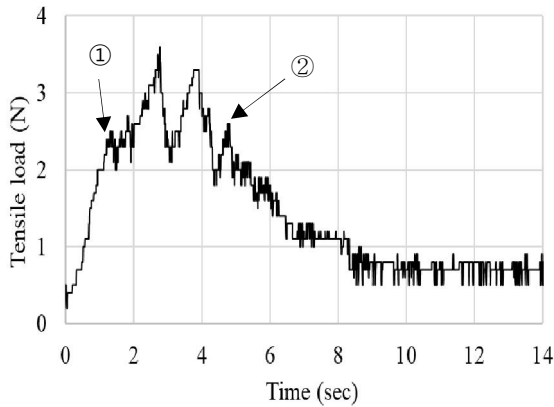
Fig. 9 Failure mode of specimen(3 layers)

### 4.2 인장시험에 의한 용착강도

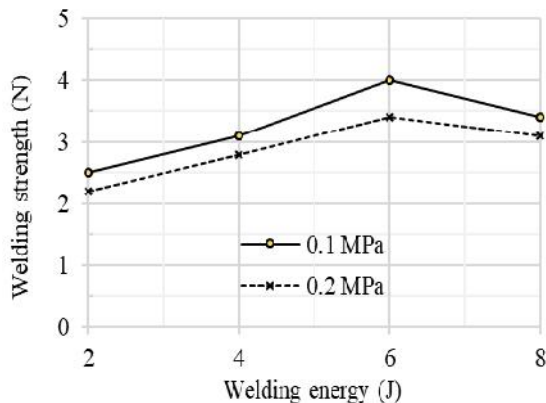
용착 후 시편은 Fig. 7에서 보인 ‘T’ 시험법으로 인장시험을 하였다. Fig. 10은 용착압력 0.1MPa, 용착에너지 4 Joule로 용착한 시편에 대한 인장시험 결과를 나타낸 예이다. ①과 ②는 용착부의 분리가 최초로 시작되는 점과 완전히 끝나는 점으로, 그 사이에서 하중의 파고가 나타나는데 이는 Fig. 8과 Fig. 9에서 보듯이 혼의 팁과 앤빌의 널링 패턴에 상응하여 3~4줄의 용착 마크가 나타나는데 각 용착 마크 줄이 분리될 때마다 피크부가 나타난 것으로 보인다.

앞에서 설명한 대로 각 용착조건별 최종 용착강도는 동일 용착조건으로 2회 용착한 시편에 대한 두 최대 인장하중의 평균치로부터 구하였다. Fig.

11은 0.025mm와 0.1mm의 두 Cu 소재를 용착했을 때의 용착강도를 보인 것으로 용착강도는 용착에너지에 거의 비례하여 증가하나 6 Joule에서 최대치를 보인다. 8 Joule에서 오히려 강도가 떨어지는 것은 앞에서 설명한 것과 같이 과도 용착조건에 의하여 용착부가 큰 소성변형을 받아 크랙 등의 발생에 기인하여 나타난 것으로 판단되며, 용착부의 분리가 Fig. 8(b)에서 나타난 것과 같이 두 소재가 찢어지는 현상으로 나타나는 것에도 상관관계가 있다고 볼 수 있다.



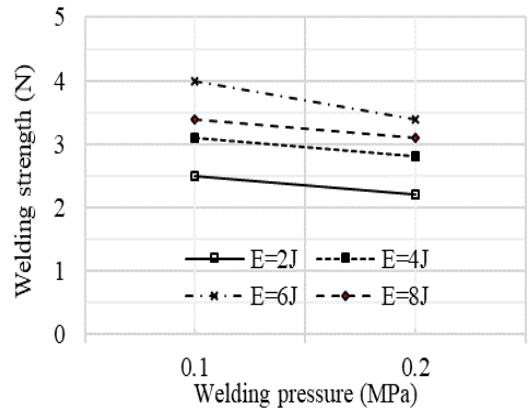
①: starting point of failure ②: endpoint of failure  
**Fig. 10 One example of the 'T' tensile strength test (welding pressure 0.1MPa, welding energy 4Joule)**



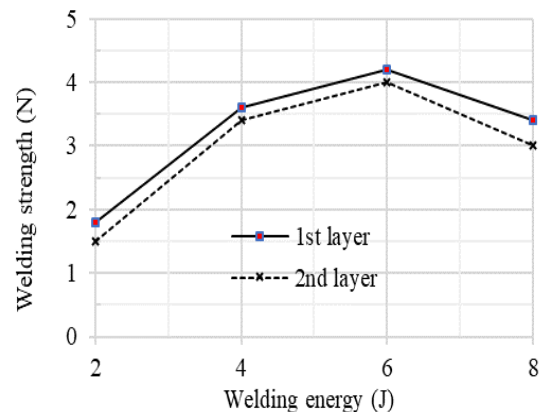
**Fig. 11 Relationship between welding strength and welding energy (two layer sheet welding)**

Fig. 12는 앞에서와 같은 용착조건에서 용착압력과 용착강도의 관계를 나타낸 것으로, 압력이 높을 경우 용착강도가 미미하나 감소한다는 것을 보여주는데 이 또한 과도 용착조건에 의한 것이라 판단된다. 이러한 실험결과는 초음파 용착 시 용착소재의 종류나 두께 등에 따라 최적의 용착조건을 사용해야 된다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

Fig. 13은 두께 0.025mm의 두 Cu 소재를 0.01mm 소재에 용착압력 0.1MPa로 용착하고 0.025mm의 두 소재를 각각 인장시험으로 분리할 때 각 분리층에서의 용착강도를 나타낸 것이다.



**Fig. 12 Relationship between welding strength and welding pressure (two layer sheet welding)**



**Fig. 13 Relationship between welding strength and welding energy (welding pressure 0.1MPa)**

앞에서와 같이 용착에너지가 증가할수록 용착강도도 증가하나 6 Joule에서 최대치를 보이고 있다. 또한, 두께 0.025mm의 최상단 Cu 소재와 중간층 Cu 소재의 용착강도가 중간층과 두께 0.1mm의 최하단 Cu 소재와의 용착강도가 약간이나마 더 크게 나타나고 있다. 이는 혼 팁에서의 초음파 진동에 의한 용착에너지가 최상단 소재에 최대로 전달되고 아래층으로 갈수록 그 전달이 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 이는 현재 LIB가 수십층의 전극판을 이용하므로 층수의 증가에 따라 용착조건을 적절히 선정하지 않으면 안된다는 것을 보여주는 것이다.

Fig. 14는 두께 0.025mm의 두 Cu 소재를 0.01mm 소재에 용착압력 0.2MPa로 용착하고 0.025mm의 두 소재를 각각 인장시험으로 분리할 때 각 분리층에서의 용착강도를 나타낸 것이다. Fig. 13과 유사한 경향을 보이고 있으나 Fig. 13과 비교해 볼 때 용착강도가 더욱 떨어진다는 것을 보여주고 있는데 이는 앞에서 설명한 과도 용착조건에 기인한다고 판단된다. 특히 용착에너지가 2 Joule인 경우 두 번째와 세 번째 소재 사이에는 용착이 전혀 이루어지지 않았다. 수십층 구조인 실제 LIB에 이런 미용착이나 용착불량이 발생할 경우 접촉저항이 커지고 이는 LIB에서 나타나는 화재의 원인이 될 수도 있으므로 LIB의 초음파 용착조건 설정이 아주 중요하다는 것을 알 수 있다.

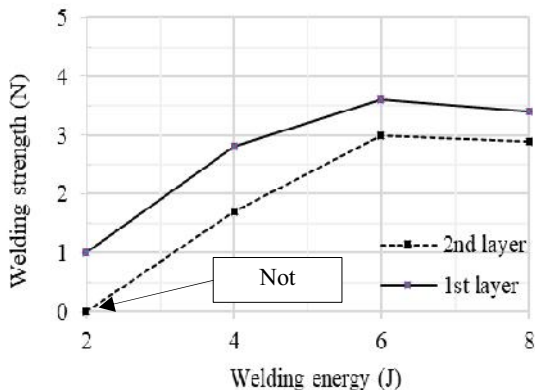


Fig. 14 Relationship between welding strength and welding energy (welding pressure 0.2MPa)

## 5. 결론

본 연구는 다층 배터리의 용착에 대한 기초연구로 음극판용 0.025mm 두께의 Cu 소재 1장 또는 2장을 리더 탭용 0.1mm 두께의 Cu 소재에 초음파 용착할 때 용착에너지가 용착강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용착시험에 대한 인장시험 결과 용착 소재의 분리는 전반적으로 분리와 찢어짐 형태로 나타났다. 정상적 용착 시 얇은 소재의 일부가 두꺼운 소재에 고착되어 있는데 이는 두 소재 사이의 고상확산에 의한 현상이다.
2. 용착시험의 인장시험 결과 용착강도는 용착에너지와 비례하는 경향이나 6 Joule에서 최대로 나타났다. 8 Joule에서 오히려 강도가 떨어지는 것은 과도 용착조건에 의하여 용착부가 큰 소성변형을 받아 크랙 등의 발생에 기인하여 나타나며, 이는 용착소재 분리 시 찢어지는 현상과도 관계가 있다고 판단된다.
3. Cu 소재 3장의 용착 시 용착강도는 용착두께 0.025mm의 최상단 Cu 소재와 중간층 Cu 소재의 용착강도가 중간층과 두께 0.1mm의 최하단 Cu 소재와의 용착강도가 용착압력에 따라 최대 약 10% 및 16% 정도 크게 나타났는데 이는 용착에너지가 최상단 소재에 최대로 전달되고 아래층으로 갈수록 그 전달이 적어지기 때문이다.
4. 초음파 용착에서 LIB가 수십층의 전극판을 이용하므로 층수의 증가에 따라 용착조건을 적절히 선정하지 않으면 용착부의 미용착으로 인한 저항 증가와 이로 인한 화재발생의 원인이 될 수도 있어 LIB의 초음파 용착조건 설정과 나아가 용착불량 여부를 자동적으로 판단하는 기법의 도입이 중요하다는 것을 알 수 있다.

## 후 기

“이 논문은 인천대학교 2019년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음”

## REFERENCES

1. Lee, S. S., Kim, T. H., Hu, S. J., Cai, W. W. and Abell, J. A., "Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review," In ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Vol. 1, pp. 541-549, 2010.
2. Cai, W. W., Kang, B. S. and Hu, S. J., Ultrasonic Welding of Lithium-Ion Batteries: Chapter 1 INTRODUCTION, ASME press, pp. 1-24, 2017.
3. Lee, S. S., Kim, T. H., Hu, S. J., Cai, W. W., Abell, J. A. and Li, J., "Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 135, No. 2, pp. 021004/1-13, 2013.
4. Shahid, M. B., Han, S. C., Jun, T. S. and Park, D. S., "Effect of Process Parameters on the Joint Strength in Ultrasonic Welding of Cu and Ni Foils," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 34, Issue 11, pp. 1217-1224, 2019.
5. Ni, Z. L. and Ye, F. X., "Dissimilar Joining of Aluminum to Copper Using Ultrasonic Welding," Materials Manufacturing Processes, Vol. 31, No. 16, pp. 2091-2100, 2016.
6. Satpathy, M. P., Mohapatra, K. D., Sahoo, A. K. and Sahoo, S. K., "Parametric Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Spot Welded Aluminium to Copper Sheets," IOP Conference Series: Materials Science Engineering, Vol. 338, Paper No. 012024, 2018.
7. Seo, J. S., Jang, H. S. and Park, D. S., "Ultrasonic Welding of Ni and Cu Sheets," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 30, pp. 1069-1073, 2015.
8. Jang, H. S., Park, W. Y. and Park, D. S., "Design and Weldability Verification of the 40kHz Horn for Ultrasonic Metal Welding," Journal of the Korean Society Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 55-60, 2013.
9. Park, W. Y., Lee, C. H. and Park, D. S., "Ultrasonic Horn Design and Weldability in Thin Ni Plates Welding," Advanced Materials Research, Vol. 941-944, pp. 2053-2057, 2014.
10. Seo, J. S., Lee, Y. J., Kim, J. W. and Park, D. S., "Design Improvement and Performance Evaluation of 20kHz Horn for Ultrasonic Cutting," Journal of the Korean Society Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 135-140, 2013.
11. Schröder, R., Aydemir, M. and Seliger, G., "Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells," Proceedings Manufacturing, Vol. 8, pp. 104-111, 2017.
12. Chen, X., Shen, W., Vo, T. T. and Kapoor, A., "An Overview of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles," 2012 10th International Power & Energy Conference(IPEC), IEEE, pp. 230-235, 2012.
13. Zhang, C. and Li, L., "A Coupled Thermal-Mechanical Analysis of Ultrasonic Bonding Mechanism," Metallurgical and Materials Transaction B, Vol. 40, pp. 196-207, 2009.