

전자기 용접의 충돌 속도에 대한 코일 형상의 영향

박현일¹ · 이광석¹ · 이진우¹ · 이영선¹ · 김대용[#]

Effect of a Coil Shape on an Impulse Velocity of the Electromagnetic Welding

H. Park, K. Lee, J. Lee, Y. Lee, D. Kim

(Received March 5, 2019 / Revised March 19, 2019 / Accepted March 22, 2019)

Abstract

Electromagnetic impulse welding (EMIW) is a type of solid state welding using the Lorentz force generated by interaction between the magnetic field of the coil and the current induced in the workpiece. Although many experimental studies have been investigated on the expansion and compression welding of tube using the EMIW process, studies on the EMIW process of lap joint between flat sheets are uncommon. Since the magnetic field enveloped inside the tube can be controlled with ease, the electromagnetic technique has been widely used for tube welding. Conversely, it is difficult to control the magnetic field in the flat sheet welding so as to obtain the required welding velocity. The current study analyzed the effects of coil shape on the impulse velocity for suitable flat one-turn coil for the EMIW of the flat sheets. The finite element (FE) multi-physics simulation involving magnetic and structural field of EMIW were conducted with the commercial software LS-DYNA to evaluate the several shape variables, viz., influence of various widths, thicknesses, gaps and standoff distances of the flat one-turn coil on the impulse velocity. To obtain maximum impulse velocity, the flat one-turn coil was designed based on the FE simulation results. The experiments were performed using an aluminum alloy 1050 sheets of 1.0mm thickness using the designed flat one-turn coil. Through the microscopic interfacial analysis of the welded specimens, the interfacial connectivity was observed to have no defects. In addition, the single lap joint tests were performed to evaluate the welding strength, and a fracture occurred in the base material. As a result, a flat one-turn coil was successfully designed to guarantee welding with bond strength equal to or greater than the base material strength.

Key Words : Electromagnetic Impulse Welding, Flat One-turn Coil, Aluminum Alloy Sheet, Multi-physics Simulation

1. 서론

최근 자동차의 연비 규제[1]가 심화됨에 따라 차체에 여러가지 종류의 경량 소재를 기존에 사용되던 철 계열 강판과 복합 적용하는 다중 소재 설계(multi-material design) 방안이 제시되고 있으며, 이때, 다중 소재로 설계된 부품간 효율적인 접합 방안에

대한 필요성이 대두되고 있다. 종래의 열 기반 용접의 경우 다중 소재의 열 물성 차이로 인해 공정 적용이 쉽지 않고, 볼트나 너트 등을 이용한 체결의 경우 무게 증가와 생산성을 감소시킨다는 문제점을 안고 있다. 따라서, 이를 보완하기 위한 혁신적인 접합 기술의 개발이 필요한 실정이다.

충돌 용접(impulse welding) 기술은 마이크로 초 단위의 짧은 시간 내에 이동재(flying part)를 모재(parent part)에 300m/s 이상의 고속으로 충돌시켜 고

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소, 변형제어연구실
Corresponding Author : Materials Deformation Department, Korea Institute of Materials Science, E-mail : daeyong@kims.re.kr, ORCID ID : 0000-0002-0786-718X

상(solid-state) 접합 시키는 기술이다[2]. 이동재를 가속시키는 에너지원의 종류에 따라 여러가지 충돌접합기술들이 개발되었고, 그 중에서 전기를 에너지원으로 하는 전자기 충돌 용접 (electromagnetic impulse welding: EMIW) 기술에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

1892년 Maxwell[3]에 의해 전자기 현상의 기본 원리가 정립된 이래로, 이를 이용한 많은 연구가 진행되었다. 그중 1969년 Khrenov와 Chudakov에 의해 개발된 EMIW 기술[4]은 전기-자기 관계에 의해 형성되는 전자기력의 운동에너지로 목표 소재를 접합시키는 기술로 세부적인 원리는 다음과 같다. 고밀도의 전기 에너지를 대용량 축전지(capacitor)에 충전한 후 전기 유도 코일에 순간적으로 방전(discharging)하게 되면 전위차가 발생하게 되며, 패러데이 법칙(Faraday's law)에 의해 자속의 시간 변화율 크기와 같고 방향은 반대인 유도 기전력(induced electromotive force)이 형성되고, 이는 근처 이동재 위에 와 전류(eddy current)를 유도 시킨다. 한편, 유도 코일에 전기가 흐르면, 앙페르 법칙(Ampere's law)에 의해 코일 도선을 기준으로 반 시계 방향으로 회전하는 자기장이 형성되며, 소재에 유도된 와 전류와 코일 주변에 형성된 자기장 사이의 외적(cross product) 방향으로 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용해 이동재를 가속하여 모재에 충돌시킨다. 이때, 접합을 달성하기에 충분한 충돌 속도를 확보할 만한 초기 유격 거리(stand-off)를 설정해 주어야 한다. 300m/s 이상의 고속으로 가속된 이동재가 모재에 충돌하게 되면, 고체 재료가 고점도 유체(high-viscosity fluid)처럼 거동하게 되고[5], 두 재료가 용융점에 도달하지 않은 상태로 고상 접합이 이루어지게 된다. 또한, 이 과정에서 이동재가 모재에 충돌 시 충돌 영역에서 고속 대기류(jet)가 발생하는데[6], 이는 고상 접합 시 접합 강도에 직접적인 영향을 미치는 소재 표면의 산화 막(oxide layer)를 제거하여 순수한 상태의 소재 표면을 야기한다. 이러한 EMIW 시 소재 거동에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나있다.

전기 에너지를 이용한 공정인 만큼 EMIW는 주로 전기전도도(electric conductivity)가 높은 소재들에 적용된다. 초기에는 주로 축 대칭 폐 단면(axisymmetry closed end surface)을 가지고 있어 전자기력 집중이 비교적 손쉬운 관재에 적용하는 연구가 주로 진행되었고[7], 그 후에는 관재 간 겹침 접합(lap joint)에

적용하려는 연구가 꾸준히 진행되었다.

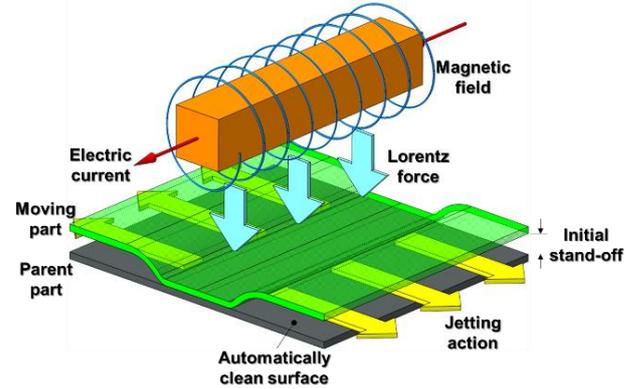


Fig. 1 Typical EMIW process

Kore et al. [8]은 EMIW를 이용한 관재 접합 시 유격 거리가 미치는 영향을 분석하였고, 테이퍼드(tapered)된 I자형 코일을 사용해 알루미늄과 스테인리스 관재 사이의 전자기 충돌 용접을 달성하였다[9]. 그 외, Aizawa et al.[10]은 알루미늄 합금과 SPCC 스틸 관재와의 겹침 접합을 시도하였고, Zhang et al. [11]은 U-자형 코일을 제안하여 다양한 접합 길이에 대한 시험을 수행하였다. 그러나, 이러한 연구들은 주로 실험적으로 진행되었고, 다 물리 해석을 통해 코일의 형상이 접합 거동에 미치는 영향을 분석한 사례는 찾아보기 힘들다.

따라서, 본 연구에서는 다 물리 해석을 통해 평판 코일의 형상이 소재의 충돌 속도에 미치는 영향을 분석하여 알루미늄 관재 겹침 접합에 적절한 평판 코일 형상을 설계하였다. 접합부 폭이 6mm 이하인 알루미늄 겹침 접합 시편을 제조하기 위하여 Y-자형 일회 회전 평판 코일을 제안하고, 전자기-변형이 연계된 다 물리 해석(multi-physics simulation)을 수행하여 코일의 두께, 간격에 따른 소재 간 충돌 속도를 분석하였다. 다 물리 해석은 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하였다. 충돌 속도가 최대가 되는 코일의 형상을 선정하여 코일을 제작하였고 이를 이용하여 1.0mm 두께의 1050 알루미늄 합금 관재 겹침 용접 실험을 수행하였다. 접합된 시편의 현미경 계면 분석을 통해 계면 연결성을 분석하였고, 단일 겹침 접합 강도 테스트(single lap joint)를 수행하여 접합부의 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재 물성

본 연구에서는 전기전도도가 높은 1050 알루미늄 합금 판재를 접합 목표로 선정하였다. 판재의 두께는 1.0mm 이며, 소재의 조성은 다음 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of AA1050 sheet

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al.
0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	Bal.

판재의 기계적 물성을 측정하기 위해 ASTM-E8 표준 규격의 압연 방향 시편을 제작하였고, 만능 인장 시험기를 사용해 일축 인장 시험을 수행하여 획득하였다. 측정된 경화 곡선은 다음 Fig. 2 에 나타나 있다. 한편, 일 회전 코일은 전기전도도가 높은 구리 소재로 제작되었다. Table 2 에 전기전도도와 자기 투과율을 포함한 상세한 소재 물성들이 정리되었다.

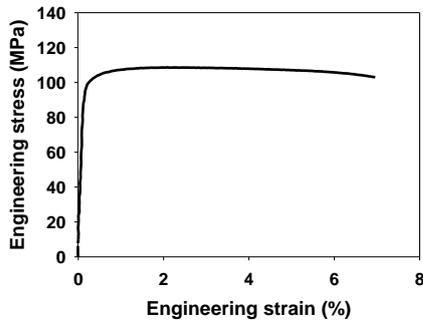


Fig. 2 Flow curve of AA1050 sheet

Table 2 Material properties

	AA1050	Copper
Density (kg/m ³)	2.71	7.92
Elastic modulus (GPa)	68.95	110
Yield strength (MPa)	89.26	129.92
Ultimate tensile strength (MPa)	107.72	230.15
Uniform elongation (%)	2.15	29.74
Total elongation (%)	7.01	52.93
Electric conductivity (MS/m)	35.6	59.6
Magnetic permeability (μH/m)	1.26	1.26

2.2 충/방전 장치

본 연구는 재료연구소에 설치되어있는 충/방전 장치를 통해 수행되었고, 전체 외관은 Fig. 3 과 같다. 장비의 대용량 컨덴서는 최대 119kJ 의 에너지까지 저장 가능하며, 최대 17kV 까지의 충전 전압을 가용할 수 있다. 장비 시스템의 회로 특성들을 Table 3 에 나타내었다. 실험은 전원 공급장치(power supply)로부터 인가된 고밀도의 전류를 대용량 컨덴서(capacitor bank)에 충전 후, 코일 액츄에이터로 방전함으로써 진행되며, 장비는 실험자의 안전을 위해 원격조종 장치(remote controller) 로 조작되었다. 회로에 흐르는 등가 전류 파형(equivalent electric current profile)은 로고스키(Rogowski coil)과 오실로스코프(digital storage oscilloscope)를 통해 측정되었다.

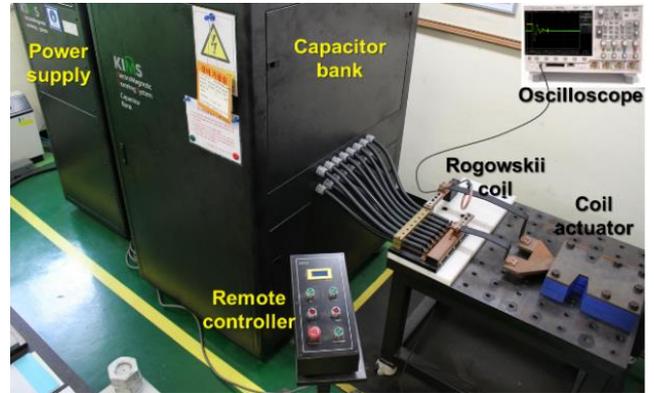


Fig. 3 Apparatus of EMIW system

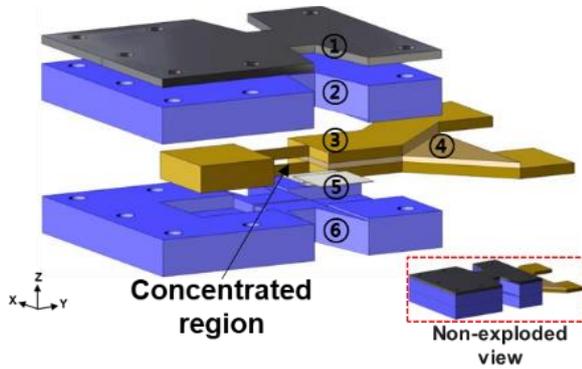
Table 3 System circuit properties

Capacitance (μF)	Resistance (mΩ)	Inductance (μH)
673.6	13.79	1.58

2.3 코일 액츄에이터 설계

EMIW 를 판재에 적용하기에 적합한 코일 액츄에이터의(actuator) 외관(housing)과 대략적인 평판 일회전코일의 형태를 설계하였고, 그 개략도를 Fig. 4 에 나타냈다. 평판 일 회전 코일의 형태의 경우, ③과 같이 일 회전 Y-자 형태로 제작하여 전자기력을 집중시키기 위해 최소화된 단면적을 갖고 있는 집중 영역(concentrated region)이 목표 소재를 위 아래로 감싸도록 하였다. 따라서, 이동체와 모재의 구분 없이 상 하부 소재 모두 가속하여 상대 충돌이 발생한다. 일 회전 코일의 윗면과 아랫면 간 절연을 위해 베

크라이트(bakelite)를 ④와 같이 삽입하였고, 방전 시 코일에 작용하는 반발력을 상쇄시키기 위해 베크라이트에 비해 비교적 연성이고 절연 성질이 있는 나일론(nylon)을 사용하여 ②와 ⑥의 상/하부 고정 부를 제작하였다. 마지막으로, 코일 액츄에이터의 전체적인 강성을 보완하기 위해 ①의 강철판을 최상부에 덧대어 고정하였다.



No.	Part name	Material	Function
①	Cover plate	Steel	Stiffness reinforcement
②	Upper fixture	Nylon	Electric insulator
③	Flat coil	Copper	Induction coil
④	Insulator	Bakelite	Electric insulator
⑤	Work sheet	Aluminum	Conductive work sheet
⑥	Lower fixture	Nylon	Electric insulator

Fig. 4 Design of the flat one-turn coil actuator

목표 소재의 집속 영역 배치도를 Fig. 5에 나타내었다. 소재는 70mm × 60mm의 크기로 절단하여 준비하였고, 초기 유격 거리를 설정하기 위한 10mm × 10mm 크기의 알루미늄 1050 합금이 두 목표 소재 사이에 삽입되었다. 평판 일 회전 코일의 세부적인 치수와 초기 유격 거리를 설정하는 삽입된 알루미늄 합금의 두께는 이후 수행 될 다 물리 해석을 통해 결정된다.

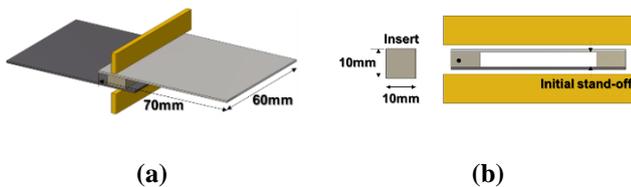


Fig. 5 Concentrated region: (a) iso view and (b) side view

3. 해석 방법

3.1 해석 모델링

전자기 충돌 용접 해석은 전자기-구조 다 물리 연계 해석을 3 차원으로 구현 할 수 있는 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA 를 사용하여 수행되었다[12]. 전자기와 구조 해석은 각각 내연적(implicit), 외연적(explicit) solver 를 사용하여 계산이 진행된다. 또한, 전자기장(electromagnetic field)은 경계 요소 방법(boundary element method)을 통해 해석이 진행되므로, 유한요소 격자 모델링이 필요 없지만, 코일의 전류와 소재에 유도되는 와 전류의 흐름을 고려하기 위해서는 전도체의 육면체 격자 요소 화가 필요하다.

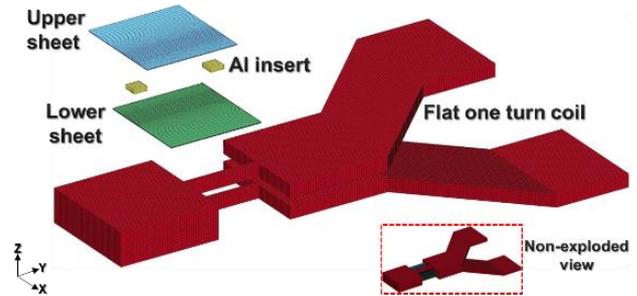


Fig. 6 Finite element model

Fig. 6에 전자기 충돌 용접 유한 요소 모델을 나타내었다. 일 회전 코일은 2.0mm × 2.0mm × 2.0mm 크기의 육면체 요소 134,676 개로 구성되었고, 강체(rigid body)로 고려되었다. 상 하부 목표 소재의 경우 0.5mm × 0.5mm × 0.3mm 크기의 육면체 요소 62,832 개로 구성되었고, 초기 유격 거리를 위한 삽입체(insert)는 0.5mm × 0.5mm × 0.5mm 크기의 육면체 요소 53,067 개로 구성되었다. 상 하부 목표 소재와 삽입체는 변형체(deformable body)로 고려되었고, MAT-24-Piecewise-Linear-Plasticity 물성 모델이 사용되었다. 앞서 일축 인장 실험을 통해 획득된 경화 곡선을 다음 Voce 식 피팅(fitting)을 통해 특성화 하였다[13].

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 - (\sigma_s - \sigma_0) \exp\left(-\frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_c}\right) \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효 응력과 변형률을 나타내며, σ_0 는 외삽 된 초기 항복 응력(extrapolated

initial yield stress), σ_s 는 포화 응력(saturation stress), ϵ_c 는 특성 변형(characteristic strain)을 나타내는 상수들이다. 경화 곡선의 외삽을 위해 특성화된 Voce 경화 변수들은 Table 4에 나타내었다. Mukai et al.[14]의 1050 알루미늄 합금의 변형률 속도 민감도에 대해 분석한 논문에서 따르면, 5000/s 미만의 변형률 속도에서는 강도에 대한 변형률 속도 민감도가 미미하다. 또한, 본 연구에서는 코일의 형상이 충돌 속도에 미치는 영향을 상대적으로 비교분석 하는 것이 주된 목적이기 때문에, 준 정적 물성을 사용하여 해석을 수행하였다.

Table 4 Hardening constants

σ_0 (MPa)	σ_s (MPa)	ϵ_c
102.7	110.8	0.0062

앞서 Table 3에 나열된 장비의 회로 특성들인 정전용량(capacitance), 저항(resistance), 인덕턴스(inductance)들이 입력되었고, 장비의 최대 충전 전압인 17kV에서 안전 계수 0.7을 고려한 임의의 11kV 충전 전압이 입력되었다.

3.2 해석 조건

코일 형상에 따른 영향을 분석하기 위해 대략적으로 설계된 Y-자형 평판 코일의 세부 치수들에 대한 해석 조건들을 설정하였다. 다음 Fig. 7에 그 세부 조건들을 나타내었다. 각각, 너비, 집중 영역, 두께, 코일과 소재 사이의 거리, 그리고 유격 거리, 이상 총 다섯 가지 형상 변수들에 대한 영향을 분석하였고, 각 변수들에 대한 세부 조건들을 Table 5에 정리하였다.

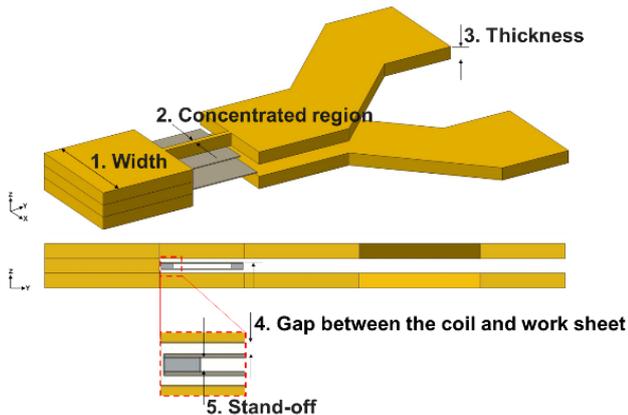


Fig. 7 Shape variables of the flat one-turn coil

Table 5 Conditions variation

No.	Type	Variation (mm)
1	Width	60, 100, 140, 180
2	Concentrated region	3, 5, 7, 9
3	Thickness	8.5, 12.5, 16.5, 20.5
4	Gap between the coil and work sheet	1, 2, 3
5	Stand-off	2, 3, 4, 5

4. 해석 결과

4.1 최대 충돌 속도 정의

Fig. 8은 시간에 따른 충돌 영역 단면 거동을 나타낸다. 목표 소재가 초고속으로 충돌하게 되면 고점도 유체처럼 거동하게 되고, 충돌한 부분 정면은 반발력으로 뒤로 밀려나게 되지만, 근접 영역은 순간적으로 튀어올라 접합이 달성된다.

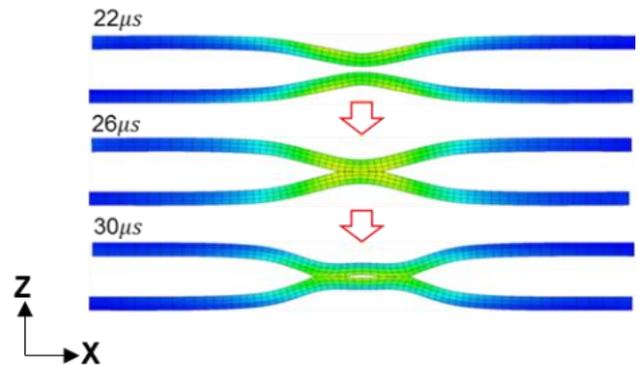


Fig. 8 Impulse section with respect to the time

Fig. 9은 접합 영역 1~10번 질점(node)들에서의 충돌 속도 분석을 나타낸다. 10번 중앙 질점에서 초기 충돌이 발생하고 근접해 있는 9번 질점이 순간적으로 튀어올라 최대 충돌 속도를 달성하여 접합이 된다는 것을 예측할 수 있다. 이때, 초기 충돌부 10번 질점에 근접해 있는 9번 질점의 속도를 접합이 달성되는 조건인 최대 충돌 속도로 정의하였고, 이후 코일 형상이 최대 충돌 속도에 미치는 영향을 분석하였다.

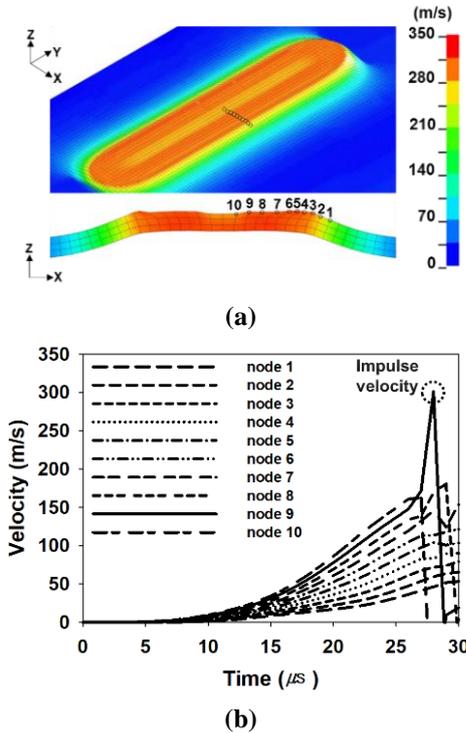


Fig. 9 Impulse velocity distribution: (a)velocity distribution and (b)node velocity variation

4.2 코일 형상이 최대 충돌 속도에 미치는 영향 분석

코일 형상 조건들이 충돌 속도에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10(a)의 너비에 대한 충돌 속도 변화를 살펴보면, 집속 영역을 제외한 나머지 너비가 바뀌어도 충돌 속도 변화가 미미한 반면, Fig. 10(b)의 집속 영역의 너비 변화는 충돌 속도에 직접적으로 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 너비가 증가한다는 것은 결국 코일의 단면적이 증가한다는 것을 의미한다. 이는 Fig. 10(c)의 코일 두께에 대한 영향과 동일하다. 코일 집속 영역의 너비나 두께가 증가하여 단면적이 증가하게 되면, 코일의 저항이 감소하게 된다. 저항의 감소는 곧 코일에 흐르는 전류의 총량 증가를 야기해, 코일 주변에 형성되는 자기장 밀도 증폭 효과를 가져온다. 이는 다음 자기 밀도 B 에 관한 비오-사바르 법칙(Biot-Savart's law)을 통해 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \tag{2}$$

여기서, I_1 은 코일에 흐르는 전류의 량, μ_0 는 진공의 투자율($=1.26\mu\text{H/m}$), 그리고 r 은 소재와 코일 사이의 간격이다. 한편, 단면적이 증가하면서, 실질적으로 소재에 와 전류를 유도시키는 코일 표면(skin)에 흐르는 전류 밀도는 감소하게 된다. 소재에 유도되는 와 전류의 량이 감소하게 되면 로렌츠 힘 F_L 이 감소하게 되는데, 이는 다음 로렌츠 법칙(Lorentz law)[15]을 통해 나타낼 수 있다.

$$F_L = I_2 \times B \tag{3}$$

여기서, I_2 은 소재 표면에 유도되는 와 전류의 량이다. 식 (2)를 (3)에 대입하면, 코일에 흐르는 전류 I_1 와 소재에 유도되는 와 전류 I_2 가 소재를 가속시키는 로렌츠 힘에 미치는 영향을 나타낼 수 있다.

$$F_L = \frac{I_1 \mu_0 I_2}{2\pi r} \tag{4}$$

정리하자면, 코일의 단면적 증가는 I_1 을 증가시키고, I_2 를 감소 시킨다. 이 관계에 의해 최적의 단면적 값이 존재하며, 집속 영역의 너비가 5mm 일 때 그리고 코일의 두께가 12.5mm 일 때 최대 충돌 속도를 달성하였다. Fig. 10(d)는 코일과 소재 사이의 간격에 대한 영향을 나타낸다. 간격이 증가하면서 충돌 속도가 점점 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 식 (4)로 설명될 수 있다. 간격 r 은 로렌츠 힘과 반비례 관계이므로, 간격이 증가함에 따라 충돌 속도 또한 감소하게 되고, 결국 최소 간극 1mm 일 때 최대 충돌 속도를 달성하였다. 코일과 소재 사이의 절연 층을 고려하면, 약 1mm 보다 작은 간극은 허용되지 않는다. Fig. 10(e)는 소재 간 유격 거리에 대한 영향을 나타낸다. 충돌 속도가 일정 유격거리까지는 증가하다가 그 뒤로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이 유격 거리는 로렌츠 힘을 받은 소재가 가속하는 구간이 된다. 즉, 유격 거리가 너무 짧으면 가해진 로렌츠 힘이 동일 해도 가속 할 수 있는 구간이 짧기 때문에 충분한 충돌 속도를 달성 할 수 없고, 반대로 유격 거리가 필요 이상으로 길면 가속 후 손실되는 운동에너지가 증가하여 충돌 속도가 감소된다. 이러한 관계에 의해 유격 거리가 4mm 일 때 최대 충돌 속도를 달성하였다.

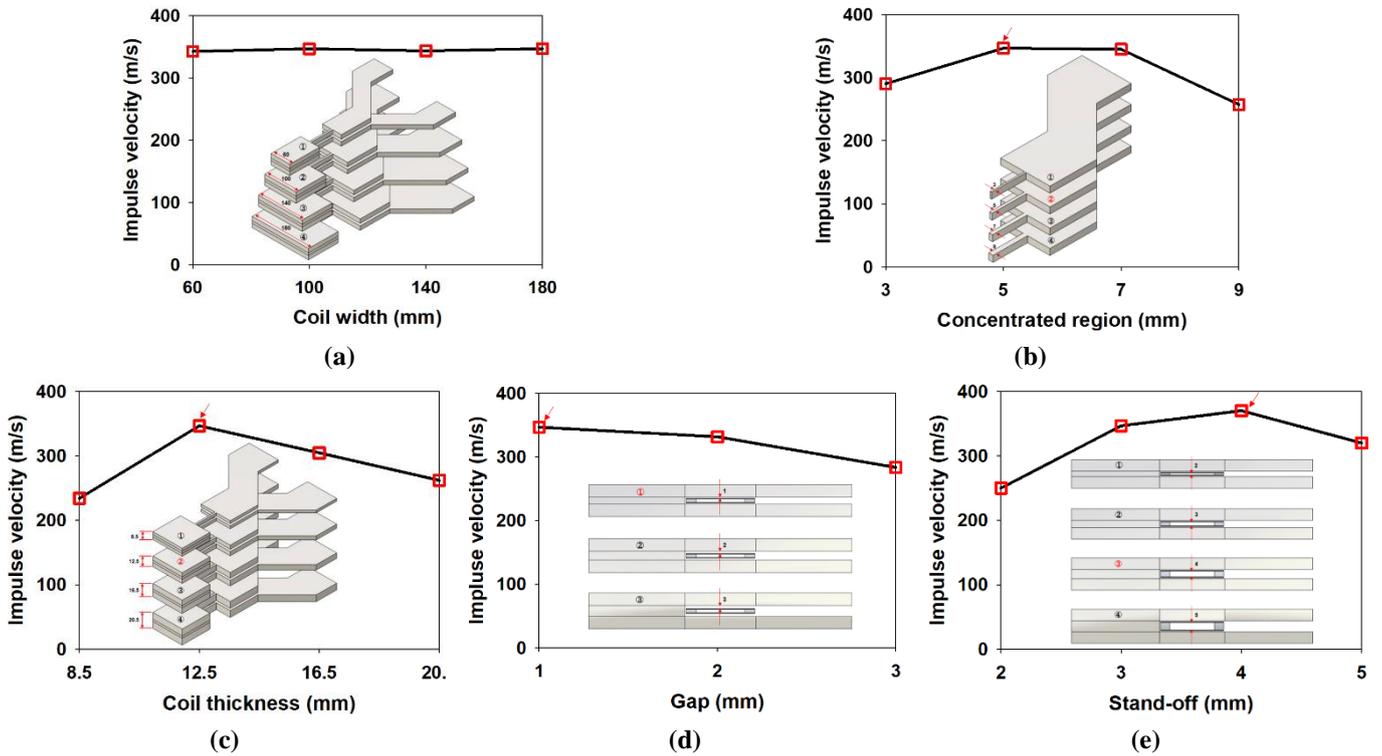


Fig. 10 Impulse velocity variation with respect to the shape condition: (a) Coil width, (b) concentrated region, (c) coil thickness, (d) gap and (e) stand-off

5. 실험 결과

5.1 전자기 충돌 용접

앞서 수행한 해석을 기반으로 앞서 대략적으로 설계된 Y-자 형 코일의 최적 세부 치수를 획득하였고, 그 값들은 Table 6에 정리되었다.

Table 6 Optimum detailed dimensions of the flat one-turn coil

Width	Concentrated region	Thickness	Gap	Stand-off
100mm	5mm	12.5mm	1mm	4mm

이를 참고해 구리 소재를 가공하여 일 회전 평판 코일을 제작하였다. Fig. 11에서 제작된 코일의 형상을 확인 할 수 있다. 실험은 약 10kV와 12kV 두 충전 전압 조건에서 수행되었고, 측정된 전류 파형을 Fig. 12에 나타내었다. 10kV의 전압을 인가하였을 때 최대 전류는 약 270kA, 12kV의 최대 전류는 약

310kA였고, 12kV 충전 전압에서 접합을 달성하였다. 각 충전 전압 별 시편의 형상을 Fig. 13에 나타내었다.



Fig. 11 Fabricated flat one-turn coil

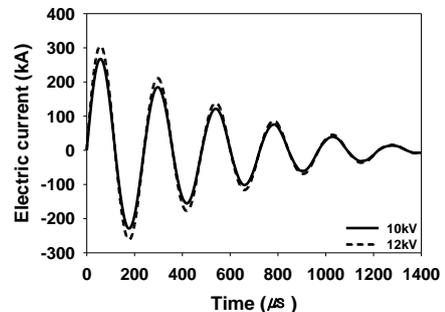


Fig. 12 Measured electric current profile

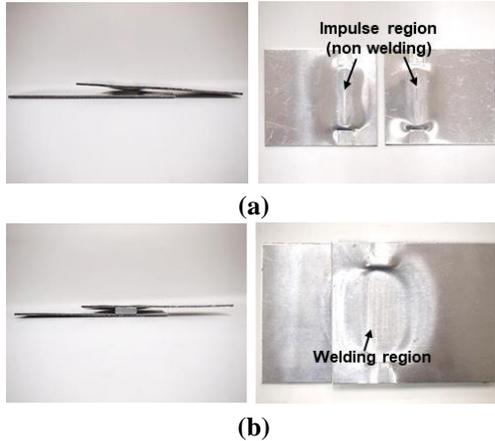


Fig. 13 Shape of the specimens: (a)10kV and (b)12kV

5.2 접합 강도 평가

접합 강도를 평가하기 위해 12kV 충전 전압에서 접합된 소재를 폭 6mm의 시편으로 가공하여 단일 겹침 접합 강도 시험(single lap joint test)을 수행하였다. Fig. 14(a)와 (b)에 각각 시험 후 시편의 파단 형상과 하중-변위 곡선을 나타내었다. 파단이 접합부가 아닌 모재에서 발생하였으므로, 모재와 접합 시편의 최대 하중 값이 흡사하였다. 따라서, 접합 강도는 모재의 강도 이상으로 판단된다.

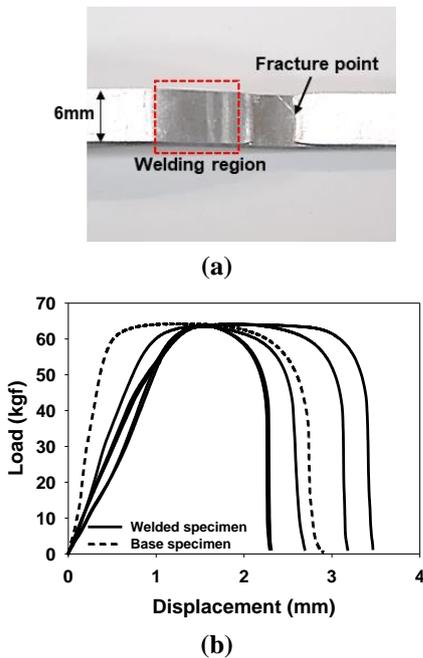


Fig. 14 Results of the single lap joint tests: (a) failure shape, (b) load-displacement curves

5.3 접합 계면 분석

접합 계면 평가를 위해 Fig. 15의 단면 절단을 수행하였다. E, M, C는 접합 영역을 가로질러 절단한 단면이고 T는 접합 선을 따라 절단한 단면이다.

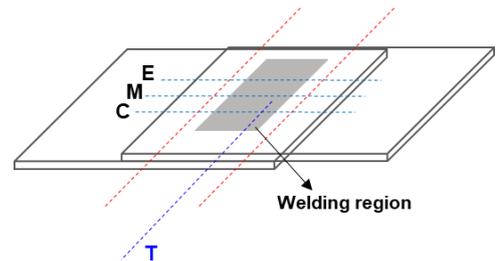


Fig. 15 Cross section of the welding specimen

광학 현미경(OM: optical microscope)을 사용해 접합 영역 각 절단 단면의 계면을 평가하였고, 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. E, M, C 횡단면에 대해서는 전해 에칭(electrolytic etching: H₂O 95 ml + HBF₄ 5 ml, 15V, 60sec)을 수행하여 미세 조직을 살펴보았다.

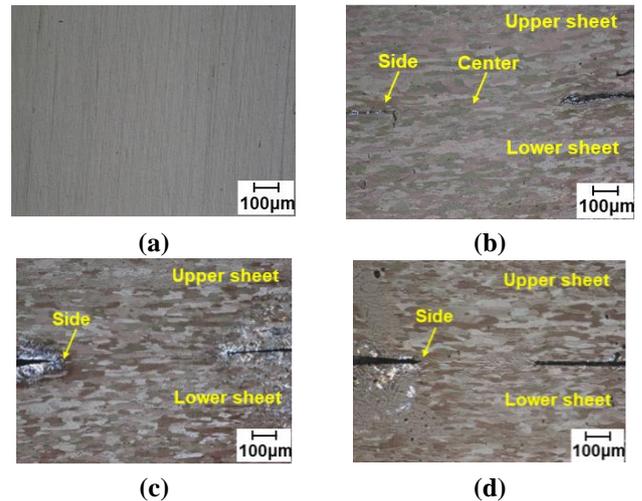


Fig. 16 Microstructural characterization (OM): (a) T-section, (b) E-section, (c) M-section and (d) C-section

해석 결과와 마찬가지로 충돌 영역 중앙은 반발(bounding)으로 인해 접합이 달성되지 않은 것을 확인 할 수 있었고, E, M, C 횡단면의 side와 center부분(Fig. 16(b)(c)(d) 참조)에 대해서는 주사 전자 현미경(SEM: scanning electron microscope)을 통한 추가적인 계면 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 17에 나타내었다.

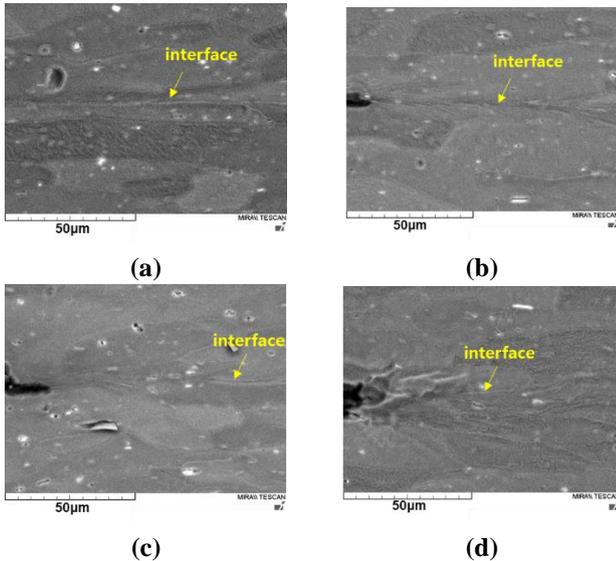


Fig. 17 Microstructural characterization (SEM): (a) E-section (center), (b) E-section (side), (c) M-section (side) and (d) C-section (side)

충돌 중앙부 인접 영역의 경우 기공이나 특별한 결함이 없고 계면 간 연속성(continuity)을 보였으므로, 기계적 접합을 달성한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 전자기 충돌 용접을 이용해 알루미늄 합금 관재의 겹침 접합을 수행하기 위해 Y-자형 코일의 설계를 제안했고, 다 물리 해석을 수행하여 코일의 세부 치수들이 충돌 속도에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 최대 충돌 속도를 달성하는 코일의 최적 세부 치수들을 획득하였고, 이를 기반으로 구리 소재를 이용하여 실제 코일을 제작하였다. 제작된 코일을 갖고 전자기 충돌 용접 실험을 수행하였고, 그 결과 약 12kV 충전 전압에서 관재 겹침 접합을 달성하였다. 또한, 단일 겹침 접합 강도 시험을 수행한 결과 파단이 접합부가 아닌 모재에서 발생함을 확인 하였으므로, 결과적으로 모재 강도보다 우수한 접합부를 갖는 전자기 충돌 용접이 가능한 평판 일 회전 코일을 확보하였다. 연구를 통해 얻은 세부 결론들은 다음과 같다.

(1) 목표 소재가 초고속으로 충돌하게 되면 고점도 유체처럼 거동하게 되고, 충돌한 부분 정면은 반발력으로 뒤로 밀려나게 되지만, 근접 영역은 순간적으로 튀어올라 접합이 달성된다.

(2) 코일의 단면적 증가는 코일의 흐르는 전류를 증가시키고, 소재에 유도되는 와 전류를 감소시킨다. 이 관계에 의해 최적의 단면적 값이 존재하며, 집속 영역의 너비가 5mm 일 때 그리고 코일의 두께가 12.5mm 일 때 최대 충돌 속도를 달성하였다.

(3) 코일과 소재 사이의 간극은 작을수록 좋지만, 절연 층을 고려하여, 1mm 간극일 때 최대 충돌 속도를 달성했다.

(4) 소재 간 유격 거리가 너무 짧으면 가해진 로렌츠 힘이 동일 해도 가속 할 수 있는 구간이 짧기 때문에 충분한 충돌 속도를 달성 할 수 없고, 반대로 유격 거리가 필요 이상으로 길면 가속 후 손실되는 운동에너지가 증가하여 충돌 속도가 감소된다. 이러한 관계에 의해 유격 거리가 4mm일 때 최대 충돌 속도를 달성하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 기관 고유사업(주요사업, PNK6000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] European emission standards, 2018, Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles, Vol. 443.
- [2] Psyk V, Risch D, Kinsey BL, Tekkaya AE, Kleiner M, 2011, Electromagnetic forming - A review. J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 5, pp. 787~829.
- [3] Maxwell JC, 1873, A treatise on electricity and magnetism. Oxford: Clarendon Press, Vol. 1.
- [4] Khrenov KK, Chudakov VA, 1969, Magnetic pulse welding of butt joints between tubes, Autom. Weld. Ussr., Vol. 22, No. 8, pp. 75.
- [5] Brown WF, Bandas J, Olson NT, 1978, Pulsed magnetic welding of breeder reactor fuel pin end closures, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 30.
- [6] Cowan GR, Holtzman AH, 1963, Flow configurations in colliding plates: explosive bonding, J. Appl. Phys., Vol. 34, No. 4, pp. 928~939.

- [7] TAMAKI K, KOJIMA M, 1988, Factors Affecting the Result of Electromagnetic Welding of Aluminum Tube: Study on Electromagnetic Welding, Trans. Japan. Weld. Soc., Vol. 19, No. 1, pp. 53~59.
- [8] Kore SD, Date PP, Kulkarni S V, 2007, Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets, Int. J. Impact. Eng., Vol. 34, No. 8, pp. 1327~1341.
- [9] Kore SD, Date PP, Kulkarni S V, 2008, Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets, J. Mater. Process. Technol., Vol. 208, No. 1~3, pp. 486~493.
- [10] Aizawa T, Kashani M, Okagawa K, 2007, Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints, Weld. J., Vol. 86, pp. 119~124.
- [11] Zhang Y, Babu SS, Prothe C, Blakely M, Kwasegroch J, Laha M, et al. Application of high velocity impact welding at varied different length scales, 2001, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 5, pp. 944~952.
- [12] Livermore Software Technology Corporation, 2012, Electro-magnetism and Linear Algebra in LS-DYNA.
- [13] Voce E, 1948, The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation, J. Inst. Met., Vol. 74, pp. 537~562.
- [14] Mukai T, Higashi K, Tsuchida S, Tanimura S, 1993, Influence of strain rate on tensile properties in some commercial aluminum alloys, J. Japan. Inst. Light. Met., Vol. 43, pp. 252~257.
- [15] H.A. Lorentz, 1895, Attempt of a theory of electrical and optical phenomena in moving bodies. Leiden: EJ Brill.