

# 전자기 펄스 용접용 Working Coil 개발

강봉용 · 심지연 · 김일수 · 박동환 · 김인주 · 이광진

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第4號 別冊

2009. 8

## 전자기 펄스 용접용 Working Coil 개발

강봉용 · 심지연 · 김일수 · 박동환 · 김인주 · 이광진

### Development of Working Coil for Magnetic Pulse Welding

Bong-Yong Kang, Ji-Yeon Shim, Ill-Soo Kim, Dong-Hwan Park, In-Ju Kim and Kwang-Jin Lee

#### 1. 서 론

최근 자동차 산업은 에너지 절감을 위한 차체 중량의 경량화를 목표로 Aluminum, Magnesium 등과 같은 경량소재의 적용 방안이 논의 중이다<sup>1)</sup>. 그러나 단순히 차체, 부품 등을 경량소재로 제작할 경우 완제품에 요구되는 강도, 강성 등을 만족시킬 수 없으므로 기존소재와의 결합이 불가피하며 이에 이종소재간 접합 기술이 검토되고 있다.

일반적으로 이종금속 접합은 기존 용융 용접으로는 접합재간 물리적 성질차로 인하여 응고, 균열, 기공, 산화 등의 결함뿐만 아니라 변형 및 부식이 발생되므로 고상용접의 한 종류인 전자기 펄스 용접(Magnetic Pulse welding)이 이상적 대안으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

전자기 펄스 용접은 Fig. 1과 같이 충전된 고에너지를 순간적으로 방전하였을 때 발생하는 전자기력을 이용한 용접으로 고에너지 충전을 위한 전원장치와 방전을 위한 working coil로 구성되며 성공적인 용접을 위해서는 접합에 필요한 충분한 전자기력을 얻을 수 있는 working coil 개발이 중요하다.

국외 전자기 펄스 용접 기술은 이스라엘 Pulsar사의 기술개발을 시작으로 Magneform사, Dana사 등이 장치를

개발하여 보급하고 있으며 Ford사는 중공형 Aluminum 드라이브 샤프트(drive shaft) 제조시 본 공정을 적용하였으며 GM사는 자동차 스페이스 프레임(Space frame) 간 접합시 본 기술의 적용을 검토중이다<sup>2)</sup>.

Table 1은 전원장치와 working coil을 포함한 전자기 펄스 용접장치 관련 특허로서 1999년 Dana사는 드라이브 샤프트 제조를 위한 전자기 펄스 용접 전원장치 및 원형 working coil을 개발하였으며 JAPAN SCIENCE & TECHNOLOGY CORP는 평판 working coil 제작 연구를 진행중이다.

Table 1 Patent of Magnetic pulse welding apparatus

출원 번호	출원명	출원인	출원 연도
US6977361	Molecular bonding of vehicle frame components using magnetic impulse welding techniques	Dana Co. Ltd.	2005
US687596	Apparatus for electromagnetic forming, joining and welding	Ford Motor Company	2005
US6548791	Energy storage apparatus and inductor tools for magnetic pulse welding and forming	Inli, LLC	2003
US6389697	Fabricating automotive spaceframes using electromagnetic forming or magnetic pulse welding	Fuel Cell and Integrators, Inc.	2002
US6104012	Molecular bonding of vehicle frame components using magnetic impulse welding techniques	Dana Co. Ltd.	2000
US5981921	Method of magnetic pulse welding an end fitting to a driveshaft tube of a vehicular driveshaft	DanaCo. Ltd.	1999
US5824998	Joining or welding of metal objects by a pulsed magnetic force	Pulsar Welding Ltd.	1998

\* 「마그네틱 응용기술 및 시장분석」 (주) 비아글로벌 2006

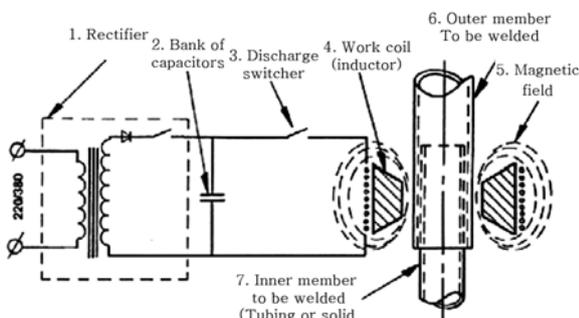


Fig. 1 Schematic of the magnetic pulse welding process<sup>2)</sup>

그러나 국내 전자기 펄스 용접용 working coil 제작은 숙련자의 경험에 의존하고 있어 시제품 제작 비용절감 및 안전성 확보를 위한 효과적인 개발 기술이 요구되고 있다.

따라서 이중 금속 접합을 위한 전자기 펄스 용접용 working coil의 제작 기술 확보를 목표로 기 보고된 문헌을 통하여 코일의 형상 및 재질을 결정 후 수치해석 모델을 통하여 working coil과 접합재간 발생하는 전자기 현상을 검토하였으며 이를 바탕으로 시제품을 제작하여 성능을 시험하였다.

## 2. Working Coil 개발

충전되어 있던 에너지를 순간적으로 방전하면 working coil에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장과 접합재에 발생하는 유도전류에 의한 자기장이 서로 반발하며 이때 발생하는 반발력 즉 전자기력으로 접합이 이루어진다. 전자기력의 지속시간은 수십  $\mu s$  이내로 접합을 위해서는 접합재에 충분한 운동에너지를 줄 수 있는 전자기력이 필요하다<sup>3)</sup>.

현재 각종 요인을 고려한 완전한 working coil 개발 이론은 확립되지 않았으며 일반적인 고려인자는 형상, 전기적·기계적 특성으로 분류된다<sup>4)</sup>. 따라서 Fig. 2와 같이 첫째 적용처에 따라 접합방향을 고려한 형상을 결정하고 둘째, 공정중의 충격력에도 견딜 수 있는 충분한 강도와 질량 값을 뿐만 아니라 전기적 저항이 낮은 재질 선정 후 working coil과 접합재간 상호작용에 의한 전자기력 분포를 검토하여야 한다.

### 2.1 형 상

용접에 사용되는 working coil의 형태로는 코일의

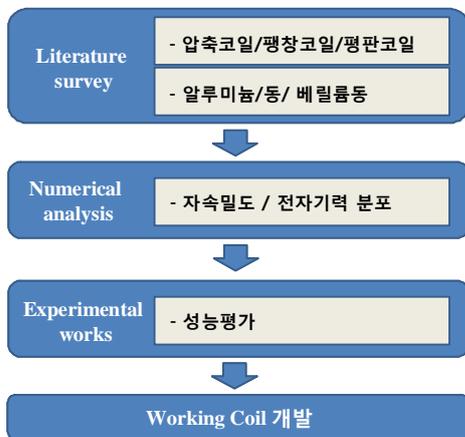


Fig. 2 Flowchart of the working coil design

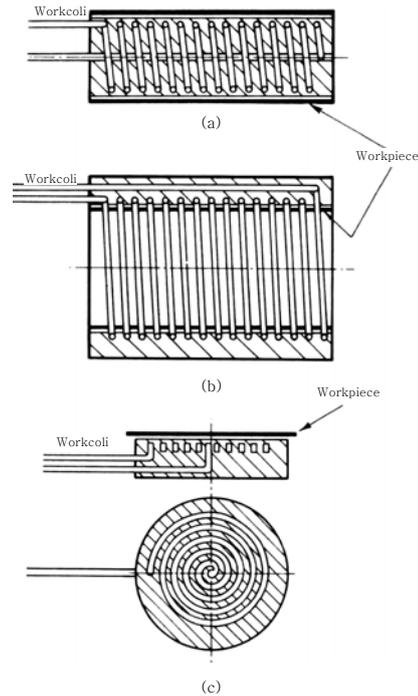


Fig. 3 Typical electromagnetic coils (a) expansion coil (b) compression coil (c) plate coil<sup>2)</sup>

위치에 따라 Fig. 3와 같이 압축코일, 팽창코일, 평판 코일로 분류되며 감김수에 따라 원턴(one-turn)코일, 멀티턴(multi-turn)코일로 나누어진다.

압축코일은 가공물을 둘러싼 솔레노이드 형으로서 외측에서 내측방향으로 용접이 이루어지며 팽창코일은 가공물의 내측에 삽입되어 내측에서 외측방향으로 용접이 이루어진다. 또한 평판 코일은 가공물의 위, 아래에 위치하여 판재 용접에 사용된다<sup>4)</sup>.

따라서 원형 관재의 접합시 사용되는 압축, 팽창 코일중 접합재의 바깥에 위치하여 접합재의 치수 제한이 없으며 전자기 펄스 전원장치와 연결이 간편한 원턴 압축코일 형상을 결정하였다.

### 2.2 재 질

전자기 펄스 전원 장치를 통해 충전된 고에너지를 working coil을 통하여 순간적으로 방전시켜 발생하는 전자기력을 이용하여 접합이 진행되므로 working coil의 재질은 자계의 지속시간 및 급격한 방전에 의한 콘덴서 손상을 방지하기 위하여 전도율(conductivity)과 같은 전기적 특성을 고려하여야 한다<sup>4)</sup>. 또한 Fig. 4와 같이 가공물에 작용하는 전자기력의 반작용으로 코일에도 충격력이 발생함에 따라 이를 견디면서 안정성을 유지하기 위한 기계적 강도와 질량을 가져야한다. 따라서 Table 2와 같이 동, 알루미늄, 베릴륨 동등을 검토

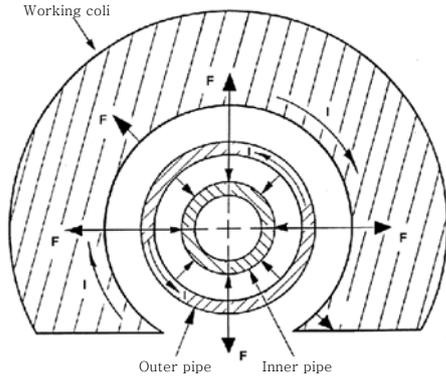


Fig. 4 A repellent force to the initial working coil<sup>3)</sup>

Table 2 Mechanical and electrical properties of material

Material	Hardness (Vickers)	Electrical Resistivity (ohm-m)	Permeability ( $\mu$ )
Al 6061	75	4.32e-8	1
Cu 1220	50	1.70e-8	1
BeCu 17000	90	2.07e-8	1

하였으며 베릴륨동이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

### 2.3 수치해석 모델 개발

코일의 형상 및 재질이 결정되면 이의 적합여부 및 접합에 필요한 전자기력 분포를 확인하여야 한다. 그러나 접합에 이용되는 전자기력은 전기, 자기, 접합재간 상호작용에 의하여 결정되므로 이를 실험으로 연구하기에는 한계를 가지고 있으므로 이러한 단점을 보완할 수 있는 수치해석 모델 개발은 유용한 수단이 될 수 있다.

전자기 펄스 용접 공정시 발생하는 전자기력  $P$ 는 식 (1)로 표현되며 접합을 위한 충분한 전자기력을 얻기 위해서는 working coil에 흐르는 전류와 자기장의 크기가 커야한다<sup>5)</sup>.

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (1)$$

$BPSSP$ 는 자속밀도(magnetic flux density  $Wb/m^2$ ),  $H$ 는 자계의 세기(magnetic field intensity),  $\mu$ 는 투자율(Permeability)이다.

#### 2.3.1 지배방정식 및 경계조건

해석을 위하여 지배방정식은 아래와 같이 전자기 현

상을 해석하는데 기초가 되는 Maxwell의 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{D} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

여기서  $E$ 는 전기의 세기(magnetic field intensity  $V/m^2$ ),  $D$ 는 자속밀도(electric flux density  $Coul/m^2$ ),  $J$ 는 전류밀도 (current density  $A/m^2$ )이다<sup>4)</sup>.

경계조건은 지정한 면의 자속이 면에 수직인 방향으로 생성되는 조건인 자속 수직조건(절대좌표계에서  $\vec{B}$ 는  $y = 0$ )과 지정한 면에서는 자속이 면에 평행인 방향으로 생성되는 조건인 자속 평형조건( $AZ = 0$ )을 이용하였다. 자유도는 유한요소 모델이 만들어진  $x - y$  평면의 수직인 방향( $z$ 방향)의 자기벡터로 2차원 해석에서는 다음과 같이 나타난다.<sup>6)</sup>

$$B = \left(\frac{\partial AZ}{\partial y}\right)u_x - \left(\frac{\partial AZ}{\partial x}\right)u_y \quad (6)$$

#### 2.3.2 해석방법 및 절차

일반적으로 경계 조건을 갖는 편미분 방정식의 해를 구하는 수치해석적인 방법으로 가장 널리 사용되는 것은 유한요소법(Finite element method)이라 할 수 있다. 현재 개발되어 있는 대부분의 상용프로그램들이 이에 기초하고 있음에 따라 전자기장 수치해석 프로그램인 ANSYS/Emag를 사용하여 방전시 코일에 작용하는 전자기력을 조사하였다.

Fig. 5는 해석에 사용된 부재 및 코일의 형상을 나타

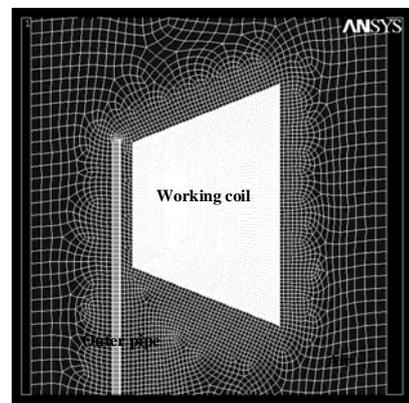


Fig. 5 2D axisymmetric problem setup and mesh generation

**Table 3** Material properties for analysis

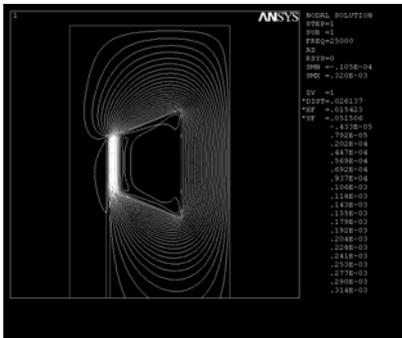
Material	Electrical Resistivity (ohm-cm)	Magnetic Susceptibility	Relative permeability ( $\mu$ )	Poisson's ratio
Al	2.7e-006	6e-007	1	0.33
BeCu	1.7e-006	8e-008	1	0.343
Air	-	-	1	-

낸 것으로 2차원 축대칭 모델을 구성하여 해석을 단순화시켰으며 8kV 충방전시 발생되는 500kA, 25kHz의 전류를 입력하여 하모닉 응답 해석(Harmonic Response Analysis)을 실행하였다. 또한 표피효과를 고려한 Quad 형태의 mesh를 생성하였다. 총 노드수는 33,966, 요소의  $A/m^2$  개수는 11,249이며 Table 3은 해석에 사용된 접합재 및 코일의 재질을 나타낸다.

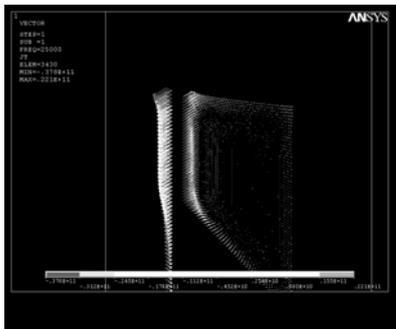
2.3.3 해석결과

Fig. 6은 코일과 접합재사이의 자속분포이며, 공극을 지나는 자속선의 분포는 코일에 인접한 접합재 방향에 집중되었음을 확인할 수 있으며 자속선의 집중에 따라 코일과 접합재사이에 강한 전자기력이 생성된다.

Fig. 7은 전류밀도 해석 결과로서 2D 해석에서 전류는 오직 Z방향으로 발생되므로 x축과 y축을 120°로



**Fig. 6** Distributions of the magnetic flux line



**Fig. 7** Distributions of the current density (isometric view)

교차시킨 아이소메트릭으로 출력하여 전류밀도를 확인하였다. 코일에 +Z방향으로 전류가 부과되었으며 접합재에 입력 전류의 반대 방향인 -Z방향으로 전류가 발생되었다.

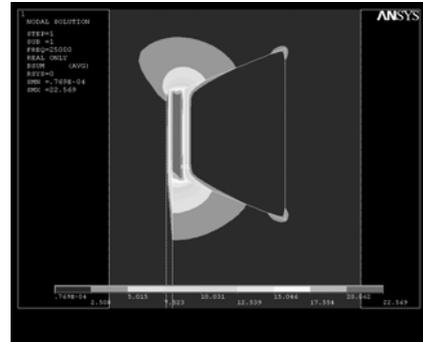
Fig. 8은 자기장에 의한 자속밀도로서 자속은 도체의 외각에 집중되어 도체 표면에 집중되어 나타나고 있으며 이를 통하여 표피효과(Skin effect)를 확인할 수 있다.

이때 코일에서 발생하는 전자기력은 약 220Mpa로서 코일과 인접한 접합재 길이방향 중심부에서 가장 크며 가장자리로 이동할수록 감소한다. 따라서 Fig. 9와 같이 코일과 접합재간 상호작용으로 공정이 진행되는 동안 접합재의 바깥표면으로부터 내부표면으로 전자기력이 작용하여 접합재의 충돌을 야기한다.

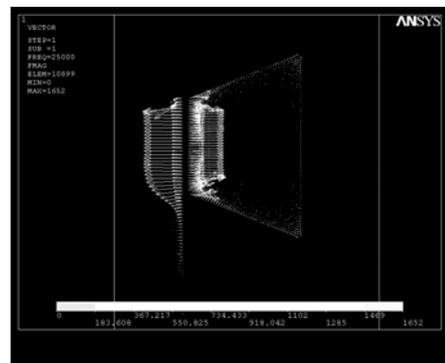
3. 실험

3.1 실험 방법

개발된 working coil의 성능 평가를 위한 실험 장치 구성은 Fig. 10과 같이 웰메이트(주)사의 최대 충전에너지 36kJ 용량의 전자기 펄스 전원장치를 사용하였으며 시편은 별도의 지그를 제작하여 고정하였다. 또한 방전



**Fig. 8** Distributions of the magnetic flux density



**Fig. 9** Distributions of the magnetic force vector plot



Fig. 10 Experimental setup of MPW

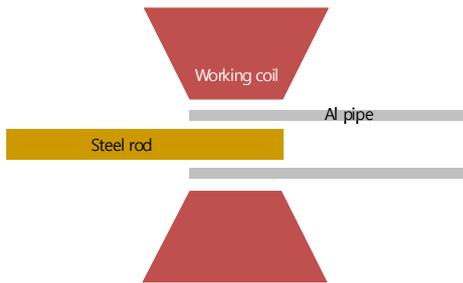


Fig. 11 A Schematic diagram for experiment

Table 4 The welding conditions

Capacitance ( $\mu f$ )	720
Charge Voltage (kV)	8
Energy (kJ)	23
Al 1070 pipe (mm)	8, 0.7t
Steel SM45C rod (mm)	5
The cap between Al and Cu (mm)	0.75

파형 관찰을 위하여 로그우스키코일을 working coil에 설치하였다. 접합재 Aluminum pipe와 Steel rod는 working coil내 Fig. 11과 같이 삽입되었으며 용접조건은 Table 4와 같다. 접합후 광학현미경을 이용하여 접합부 단면을 관찰하였다.

### 3.2 실험 결과

Fig. 12는 충전된 에너지를 working coil에 방전 시 측정된 파형으로서 감쇠진동의 sin파 형상이 기록되었으며 접합에 필요한 피크 전압까지의 도달시간은 약 28us이다. 접합이 완료된 시편의 외관은 Fig. 13(a)와 같이 어떠한 결함도 검출되지 않았으며 원주방향 매크로 관찰결과 100% 접합이 이루어졌음을 Fig. 13(b)를 통하여 확인하였다. 또한 시편의 길이방향의 단면에

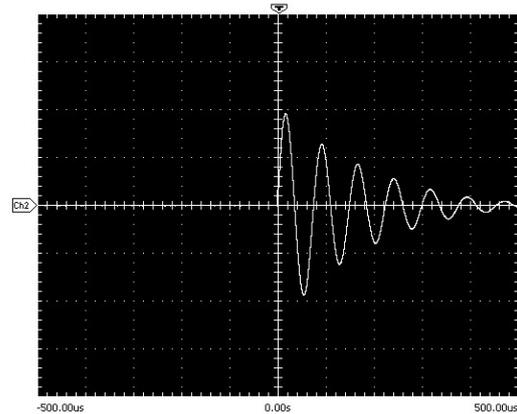
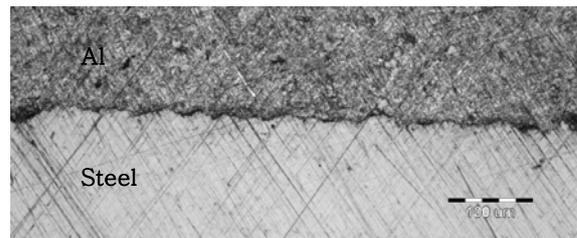


Fig. 12 Discharge current waveform (15v/div, 100us/div)



(a) Welded joint (b) Macro cross section



(c) Microstructure of the welded region

Fig. 13 Al/Cu tubular welded joint

서는 Fig. 13(c)와 같이 고상용접(Solid state welding) 접합부의 특징인 웨이브(wavy) 형상이 관찰되어 개발된 코일의 성능에 대한 신뢰성을 확보하였다.

## 4. 결 론

이종 금속 접합을 위한 전자기 펄스 용접용 working coil 개발을 위하여 압축형 코일로서 베릴륨동을 가공/제작하였으며 2D 전자기 모델개발을 통하여 접합을 위한 전자기력 발생을 확인하였다. 개발된 코일을 이용한 Al/Steel 실험결과 표면결함은 발생되지 않았으며 접합부 계면에서 웨이브 패턴이 관찰되어 성공적인 접합이 이루어졌음을 확인하였다. 따라서 본 장치의 산업현장 적용시 친환경 공정을 통한 고품질 제품 생산 및 생산성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. K. Ito and H. Kobayashi : Production and Fabrication Technology Development of Aluminum Useful for Automobile Lightweights, *Advanced engineering materials*, **8-9** (2006), 828-835
2. P. Zhang : Joining Enabled by High Velocity Deformation, The Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University (2003), 183-200
3. D. Dudko, V. Chudakov, L. Kistersky and T. Barber : Magnetic pulse welding of tubing, *Exploring the cold welding process, Fabricator*, **26-8** (1996), 62-66
4. J.S. Lee : Electro-magnetic forming, *KSME*, **28-5** (1988), 476-486
5. S.H. Lee and D.N. Lee : A Finite Element Analysis of Electromagnetic Forming for Tube Expansion, *KSME*, **16-6** (1991), 1874-1875
6. H. Yu, C. Li, Z. Zhao and A. Li : Effect of field shaper on magnetic pressure in electromagnetic forming, *JMPT*, **168** (2005), 247
7. B.T. Spitz and V. Shribman : Magneti pulse welding for tubular applications, *The Tube & Pipe Journal*, **11-2** (2000), 32-34
8. M. Kojima and K. Tamaki : Electromagnetic welding of tube, The 5the International symposium of the japan welding society, *Aprial* (1990), 201-206
9. H. Hokari, T. Sato, K. Kawauchi, and A. Muto : Magnetic Impulse Welding of Aluminium Tube and Copper Tube with Various Core Materials. *Welding International*, **12-8** (1998), 619-626
10. M. Kojima and K. Tamaki : Electromagnetic welding of tube, The 5the International symposium of the japan welding society, *Aprial* (1990), 201-206
11. H. Hokari, T. Sato, K. Kawauchi, and A. Muto : Magnetic Impulse Welding of Aluminium Tube and Copper Tube with Various Core Materials. *Welding International*, **12-8** (1998), 619-626
12. A. Kochan : Magnetic Pulse Welding Shows Potential for Automotive Applications. *Assembly Automation*, **20-2** (2000), 129-132
13. S.W. Kim, C.K. Chun and S.H. Kim : Effects of the Stand-off Distance on the Weld Strength in Magnetic Pulse Welding, *KSME*, **26-6** (2008), 48-53
14. J.F. Erdmann : The Basic Fundamentals of Magnetic Pulse Welding, *Schweissen und Schneiden*, **19-1** (1967), 2-8
15. M. Pezzutti, : Innovative Welding Technologies for the Automotive Industry, *Welding Journal*, **79-6** (2000), 43-46
16. G. Hurshal : Bonding of Aluminum by the capacitor discharge magnetic forming processes, *Welding Journal*, **46** (1967), 507-510
17. Y.A. Sergeeva, V.A. Chudakov and G.N. Gordan : Examination of the transition zone in magnetic pulse welded joints between aluminum and copper, *Paton welding journal* **1-12** (1989), 874-877
18. K.K. Botros and T.K. Groves : Fundamental impact-welding parameters an experimental investigation using a 76-mm powder cannon, *Journal of applied physics*, **51-7** (1980) 231-241
19. G.R. Cowan, O.R. Bergmann, and A.H. Holtzman : Mechanism of bond zone wave formation in explosive clad metals, *Metallurgical Transactions*, **2** (1971), 3145-3155
20. G.R. Cowan and A.H. Holtzman : Flow configuration in colliding plates explosive bonding, *Journal of applied physics*, **34-4** (1963), 928-939
21. D.R. Chichili, K.T. Ramesh and K.J. Hemker : The High- Strain-Rate Response of Alpha-titanium: experiments, deformation mechanism and modeling, *Acta material*, **46-3** (1998), 1025-1043
22. N. Takatsu, M. Kato, K. Sato, T. Tobe : High speed forming of metal sheets by electromagnetic force, *Jpn. Soc. Mech. Eng. Int. J.*, 31-1 (1988), 14
23. K. J. Lee, S. Kumai, T. Arai and T. Aizawa : Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding, *Materials Science and Engineering:A*, **471 1-2** (2007), 95-101
24. W. Brown, J. Bandas and N. Olson : Pulsed magnetic welding of breeder reactor fuel pin end closures, *Welding Journal*, **57-61**(1978), 22-26
25. Kojima, Tamaoki, Suzuki and Sasaki : Deformation resistance in magnetic pulse welding and impact speed and acceleration required for pressure welding, *Quarterly Journal of the Japan welding Society*, **7-1** (1989), 75-81
26. Onzawa and Ishii : Study on wave formation at the explosive weld boundary, *Journal of the Japan Welding Society*, **41-4** (1972), 102-111



- 강봉용
- 1960년생
- 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kanbo@kitech.re.kr



- 박동환
- 1961년생
- 웰메이트(주) 대표이사
- 용접 자동화, 아크/저항 용접
- e-mail : pdh@welmate.com



- 심지연
- 1980년생
- 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터
- 전자기 펄스 용접
- e-mail : shimjy@kitech.re.kr



- 김인주
- 1968년생
- 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터
- 용접공정제어
- e-mail : inju99@kitech.re.kr



- 김일수
- 1958년생
- 목포대학교 기계조선해양공학부
- 용접 공정 제어 및 최적화
- e-mail : ilsookim@mokpo.ac.kr



- 이광진
- 1973년생
- 한국생산기술연구원 동력부품센터
- 용접 야금
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr