

자동차 부품제조를 위한 전자기 펄스 용접기술

강봉용 · 심지연 · 김일수 · 박동환 · 이광진

Application of Magnetic Pulse Welding for Manufacturing Automobile Parts

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

1. 서 론

현재 산업 전반의 분야에서 지구자원 보호와 환경오염에 관한 관심이 고조되고 있고, 이에 따라 국내를 포함한 선진국에서도 관련 규정을 신설하고 환경관련 기준 및 오염물질 배출 허용에 관련한 규제를 강화 하고 있는 상황이다¹⁾. 특히 자동차 산업의 경우 CO₂ 배기가스 및 연비와 직결되어 있는 자동차 중량 절감의 중요성이 강조됨에 따라 자동차 경량화 기술은 환경 친화적인 자동차 개발의 핵심기술로 연구되고 있다.

그러나 소비자의 편의성 추구, 안전기준의 강화 등으로 중량은 지속적으로 증가하고 있어 이를 혁신적으로 절감할 수 있는 기술 개발이 요구된다.

따라서 차체 중량의 경량화를 위한 새로운 가공 및 조립 기술의 개발, 최적화 설계 기술 도입 등이 고려되고 있으며 특히, 대체 경량 재료의 적용에 연구가 집중되고 있다. Table 1은 국외 자동차업체에서 고급차종의 차체 및 부품에 적용되고 있는 강재를 알루미늄, 마그네슘과 같은 경량재로 대체하여 스페이스 프레임에 적용한 사례이다²⁾.

경량재의 사용은 철제 차체에 비하여 동일한 차체 강

성 조건을 만족시킬 때 약 30% 이상의 경량화가 가능한 것으로 보고되고 있으나, 경량재의 단일 사용은 차체 및 부품에서 요구하는 안전성 및 기존의 부품과 연결 등에서 요구 성능을 만족시키기 어렵기 때문에 구조재와 경량재의 적절한 혼합사용이 필요하다⁴⁾.

대부분 이중재로 이루어진 제품의 구조 효율성은 용접부에 의해서 결정되므로 강재와 경량재 용접을 위한 적합한 공정 개발이 시급히 요구된다.

현재 자동차 산업에서 이용되고 있는 용융용접(점용접, 아크용접 등)은 두 재료의 상이한 물성차로 인한 금속조직 조대화, 고·저용융상의 분리로 인하여 결함을 유발한다. 특히, 원자구조가 달라서 용접 시 균열의 발생빈도가 높고, 기공이 발생하기 쉽다.

또한, 접착제(Adhesive bond)와 리벳팅을 이용한 접합은 접합재의 기하학적 형상, 표면처리 상태, 사용온도, 습도 등 환경 조건에 의해서 많은 영향을 받는 단점을 가지고 있어 고상용접법인 확산용접, 마찰용접 사용이 검토되고 있다.

확산용접은 가열, 가압 수단을 이용하여 고체 상태에서 원자를 인력권내에 접근시킴으로써 금속결합이 이루어져 용접되는 것으로, 확산속도 차이에 의한 모재의 보이드 발생 및 용접재의 성질차에 의한 용접 불량, 용접강도 및 피로강도 저하가 발생되기 쉬우며, 마찰열을 이용하는 마찰용접의 경우 국부 가열로 열영향부가 매우 좁다는 장점이 있으나 용접면의 정밀한 가공 및 정렬이 필요하고 용접장비가 매우 고가이다⁵⁾.

따라서 최근 마찰교반용접과 전자기 펄스 용접이 주목받고 있다. 마찰교반용접은 모재 용융점의 약 80%이하에서 용접이 이루어지는 고상용접으로 이중재간 용접차에 따른 문제점을 피할 수는 있으나 용접부 흔적이 남고 반복 사용시 특수한 형상으로 가공된 고가의 프로브 교체가 요구된다⁴⁾. 이에 비하여 전자기 펄스 용접은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 전자기 응용기술로서 자장

Table 1 Joining methods used in spaceframe³⁾

Model	Joining methods
Ford Contour (Steel monocoque)	Spot welding
Audi A8 (Al. spaceframe)	Spot welding MIG welding Self-piercing rivet Clinch
GM Precept (Al. spaceframe)	Spot welding MIG welding Self-piercing rivet
Audi A2 (Al. spaceframe)	Laser welding MIG welding Self-piercing rivet

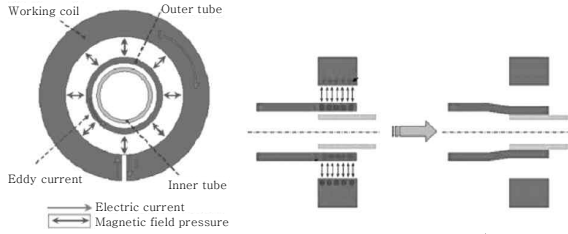


Fig. 1 Schematic of the MPW process⁶⁾

에 의해 발생하는 전자기력을 사용하여 물리적인 접촉 없이 금속을 용접하므로 이종금속간 용접에 적합하며 환경오염 발생원인 용접재료, 가스, 용가재 등이 필요 없이도 고품질의 제품을 생산할 수 있는 친환경적인 공정기술이다. 또한 작업이 수 25 μ s내에서 이루어지기 때문에 전력소모가 매우 적을 뿐만 아니라 생산성도 매우 높아 경제적인 개선 효과도 큰 장점을 갖고 있다⁶⁾.

이러한 이유로 국외에서는 전자기 펄스 용접을 이용한 자동차 부품제조연구가 활발히 진행되고 있으나 국내 자동차 산업에서의 관심은 크지 않다.

따라서 본 고는 전자기 펄스 용접의 국내 자동차 산업에서의 적용을 위하여 국내·외 자동차 산업에서의 전자기 펄스 용접 관련 기술 동향을 조사하고 진행 중인 Al/Steel, Al/Cu 이종재 용접 연구를 소개를 통하여 적용 가능성을 검토하고자 한다.

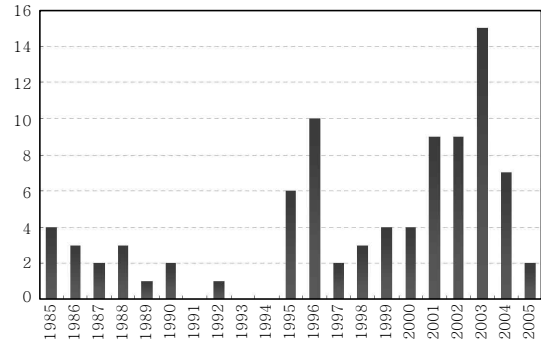
2. 전자기 펄스 용접 기술 동향

전자기 펄스 용접의 원리는 이미 잘 알려진 폭발용접과 유사하며, 다만 폭발용접(explosive welding)은 폭약의 폭발로 발생하는 순간적인 높은 충격에너지를 이용하여 금속을 용접시키는 반면에 전자기 펄스 용접은 충전된 고에너지를 순간적으로 방전함으로써 발생하는 전자기력을 이용하여 두 금속사이에 고속 충돌을 발생시켜 금속을 용접시키는 공정이다⁷⁾.

전자기 펄스 용접관련 연구는 구 소련(Soviet Union)에서 제한적으로 군사 분야에 적용을 위하여 진행되었다⁸⁾.

Fig. 2는 전자기 펄스 용접관련 특허 동향으로서 1980년대 중반부터 1990년대 중반까지 기술 개발은 다소 하락하였으나 1990년대 후반부터 급격히 증가하였다. 이후 본 기술의 전기/전자, 자동차 산업 적용에 확대 적용하고자 EWI(Edsion Welding Institute), TWI(Technology Welding Institute), HIT(Harbin Institute of Technology) 및 OSU(Ohio State University)를 중심으로 이론 확립, 실용화를 위한 기술개발이 진행되었다.

전자기 펄스 용접 기술의 체계적인 이론 연구는 P.



* 「마그네틱 용융기술 및 시장분석」 (주) 비아글로벌 2006

Fig. 2 Trend of patent of MPW (X: 출원년도, Y:출원건수)

Zhang⁸⁾등에 의하여 이루어졌으며, 대부분 공정변수(충전전압, 외부재와 내부재 사이의 간격, 외부재의 두께)의 영향에 대한 연구가 보고되었다. 특히 M. Kojima⁹⁾등은 Al/Cu, Al/Steel 용접시 고품질의 용접부를 얻기 위한 공정변수의 적정 구간에 대하여 보고하였으며, 이후 H. Hokari¹⁰⁾등은 공정변수 중 용접재와 모재사이의 간격이 누수압력에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 V. Shribman⁴⁾은 Al/Steel 용접시 공정변수에 따른 단면 관찰을 통하여 공정변수가 용접부에 미치는 영향에 대하여 보고하였다.

자동차 산업에서의 전자기 펄스 용접기술 적용은 Table 2에 나타낸바와 같이 2000년 이후 스페이스 프레임, 중공형 드라이브 샤프트를 중심으로 자동차 부품 제작을 위한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

Fig. 3은 Chrysler, Stanadyne등 자동차 제조사에

Table 2 MPW Patent for manufacturing automobile parts

Patent No.	Title	Assignee	Pub. Date
US7256373	Apparatus and method for manufacture of a driveshaft by a pulsed magnetic force process	Pulsar Welding Ltd.	2006
US687596	Apparatus for electromagnetic forming, joining and welding	Ford Motor Company	2005
US6389697	Fabricating automotive spaceframes using electromagnetic forming or magnetic pulse welding	Fuel Cell Inc.	2002
US6104012	Molecular bonding of vehicle frame components using magnetic impulse welding techniques	Dana Co. Ltd.	2000
US6420686	Apparatus for joining metal components	Fuel Cell Inc.	2000
US5981921	Method of magnetic pulse welding an end fitting to a driveshaft tube of a vehicular driveshaft	Dana Co. Ltd.	1999
US5966813	Method for joining vehicle frame components	Dana Co. Ltd.	1999



(a) Gas fill tube (Chrysler) (b) Drive Shaft (Ford)
(c) Mechanical fuel pump (GM) (d) Water separator (Stanadyne)

Fig. 3 Manufacture of automotive components using MPW

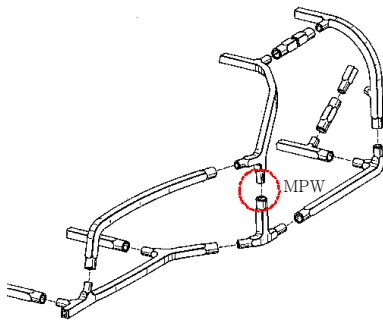


Fig. 4 Aluminum spaceframe using MPW

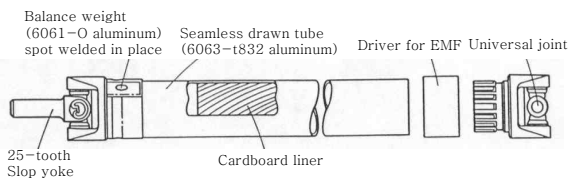


Fig. 5 Ford 4" drive shaft⁶⁾

서 본 기술을 이용하여 개발된 자동차 부품으로 Fig. 4와 같이 Dana사, Fuel Cell사는 전자기 펄스 용접을 이용한 Al/Steel 스페이스 프레임 제작 기술을 개발하였으며 GM사는 본 기술의 적용을 검토 중이다.

또한 Pulsar사 등은 SM45C 요크부(yoke)와 Al6063을 이용한 드라이브 샤프트 제작을 위한 전자기 펄스 용접장치를 개발하였으며 Fig. 5와 같이 1998년 Ford사는 전자기력을 이용한 드라이브 샤프트를 개발하여 Pick-up Truck에 적용하였다⁸⁾.

이에 반하여 국내의 경우 1988년도 서울대학교 이동녕 교수 연구팀에서 전자기력을 이용한 금속 성형 연구를 수행하였으며, 국방과학연구소에서도 일부 연구가 수행되었으나 전자기 펄스 용접에 대한 국내에서의 관심

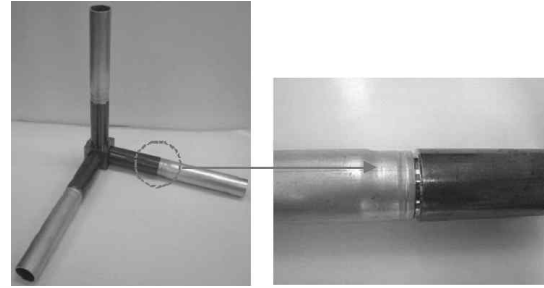


Fig. 6 Subscale spaceframe

은 크지 않았다. 그러나 자동차 산업에서의 경량재 적용이 확대되어 감에 따라 1995년 전자기 펄스 용접과 유사한 원리인 폭발용접에 관한 연구를 시작으로 2004년 서울대학교 오수익 교수 연구팀³⁾의 전자기력을 이용한 알루미늄(Al6063) 스페이스 프레임 제작 기술이 연구되었으나 관련 장비를 수입하여 사용해야 하므로 본 기술의 현장적용에 어려움이 있어 최근 한국생산기술연구원은 소용량 전자기 발생 전원장치 개발을 시작으로 자동차 라디에이터 트랜스퍼 튜브 제작을 위한 Al/Cu 이종금속기술 및 스페이스 프레임, 드라이브 샤프트 적용을 위한 Al/Steel 이종금속기술 개발을 위한 공정변수 영향 분석 및 공정 최적화 기술을 연구 중이다¹¹⁾. Fig. 6은 Al6063/SM45C재를 이용하여 개발 중인 스페이스 프레임이다.

3. Al/Steel, Al/Cu 이종재 용접

앞서 언급한 바와 같이 차체 경량화를 위한 기술개발은 경량 차체 개발, 경량 부품개발에 집중되고 있으며, 현대자동차는 1999년 ANVANT 모델로 리벳팅, 기계적 접합법을 이용하여 알루미늄 스페이스 프레임을 개발을 시도하였으나 접합부의 정밀한 가공 및 연결 부재인 cast node 설계가 요구됨에 따라 스페이스 프레임의 실용화, 제품화를 위한 경제적이고 생산성이 우수한 용접기술을 연구 중이다⁴⁾. 또한 자동차 라디에이터 트랜스퍼 튜브는 원자재 가격 상승으로 인한 가격경쟁 저하에 따라 소재를 기존의 황동에서 Al1070과 황동 이종재 사용으로 가격경쟁력을 확보하고자 용접기술을 개발 중이다. 따라서 이종재간 용접이 발생하는 라디에이터 트랜스퍼 튜브, 스페이스 프레임, 드라이브 샤프트 등 자동차 부품에 전자기 펄스 용접기술 적용하기 위한 기초 실험으로 Al1070/SM45C, Al1070/C1220 이종재 용접 실험을 실시하여 적용 가능성을 검토하였다.

3.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 전자기 펄스 용접장치는 웰메이트(주)

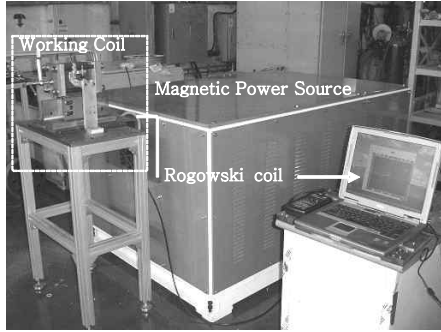


Fig. 7 Experimental setup of MPW

Table 3 Specifications of W-MPW36

Dimension	1138mm(W) × 1445mm(D) × 1120mm(H)
Weight	2ton
Power requirement	200V AC, 13.5kVA
Capacitance	720μF-10kV (36kJ)

에서 개발된 W-MPW36으로 Fig. 7에서와 같이 전자기력 발생장치, working coil 및 로고우스키 코일로 구성하였다. 로고우스키 코일은 대전류를 측정할 수 있으며 코일을 도체에 감기만 하면 되는 간단 구조로서 본 실험에서는 working coil의 출력단에 감아 방전 파형을 측정하였다.

전자기 펄스 용접장치의 총 충전 에너지량은 Table 3에 나타난 바와 같이 36kJ이며 최대 인가전압은 10kV, 최대 펄스 전류는 830kA, 25kHz이다.

외부재는 외경 φ10mm, 두께 0.7mm의 알루미늄 Al 1070 파이프, 내부재는 외경 φ7.2mm의 Cu C1220 및 SM45C rod를 사용하였으며 시험 전 시험편의 성형 및 가공 시 표면에 존재하는 불순물 및 윤활유등을 제거하기 위하여 아세톤 증탕으로 20분 동안 초음파 세척을 실시하였다. 실험조건은 Table 4에 나타난 바와 같다. 외부재와 내부재는 Fig. 8에서와 같이 코일 가장자리까지 삽입하였으며 working coil과 외부재 사이의

Table 4 Welding condition

Outer pipe	Inner rod	G ₁ (mm)	G ₂ (mm)	V ₁ (kV)
Al1070	C1220/ SM45C	1mm	0.7	9
				8
				7
				6

G₁: Gap between working coil and outer pipe

G₂: Gap between outer pipe and inner rod

V₁: Charged voltage

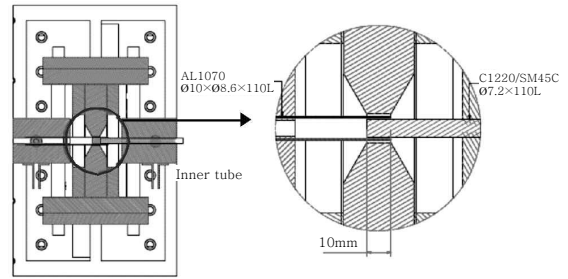


Fig. 8 Specimens for experiment

간격은 시험 조작 편의 및 절연내압을 고려하여 1mm로 설정하였다.

시험 후 용접부 품질 평가를 위하여, 수압 시험 및 인장시험을 실시하였다. 수압시험은 100kgf/cm²의 압력에서 10분간 유지시킨 후 누수여수를 관찰하였으며 인장시험은 만능시험기(UTM, 50ton)을 이용하여 1mm/min의 속도로 실시하였다. 누수발생이 없는 시험편의 용접부는 광학현미경을 이용하여 계면형상을 관찰하였다.

3.2 실험결과

Working coil에 전압을 6kV부터 9kV까지 인가하였을 때 로고우스키 코일을 통하여 측정된 파형은 Fig. 9과 같이 나타났다. 충전전압이 증가함에 따라 피크전압이 증가하며 감쇠진동의 sine파 형상이 기록되었다. 방전시간은 28us로서 충전전압의 증가와 관계없이 일정하였으며 방전 시 working coil에 발생된 전자기력에 의하여 외부재는 내부재의 충돌하여 용접이 이루어졌다.

용접이 완료된 시험편의 외관에서는 어떠한 결함도 검출되지 않았으며 Table 5에 나타난바와 같이 Al/Cu, Al/Steel 이중재간 용접 시 충전전압 8kV 이상의 조건에서 누수는 발생되지 않았다. 또한 시험편에 기준치 이상의 압력을 가하였을 때 Fig. 10(a)와 같이 외부재에서 파열되었으며 인장시험 결과 Fig. 10(b)에서와

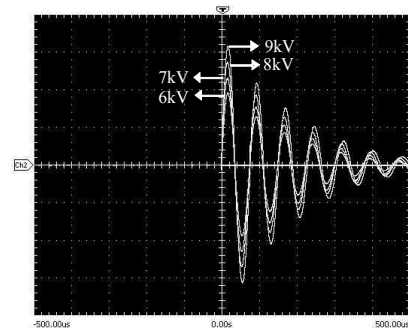
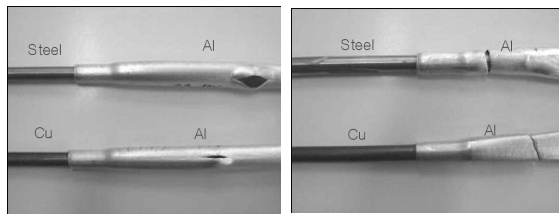


Fig. 9 Discharge current waveform (Y:15v/div, X:100us/div)

Table 5 Result of experiment

V1 (kV)	E (kJ)	V ₂ (V)	C (kA)	Result
9	29.1	45	747	No leakage
8	23	40	664	No leakage
7	17.6	35	581	leakage
6	12.9	30	498	leakage

E : Charged energy
 V₂ : Measured voltage
 C : Discharged current



(a) Leakage test (b) Tensile test
 Fig. 10 Results of leakage test and tensile test

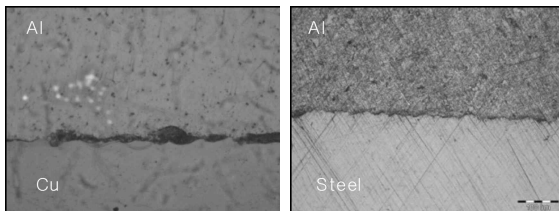


Fig. 11 Macro cross section of weldment

같이 용접부가 아닌 외부재에서 파단이 발생되었다.

또한 용접계면에서는 Fig. 11에서와 고상용접 용접부의 계면 특성인 파동(wavy)형태 관찰되었다. 파동형태는 외부재와 내부재의 충돌 시 발생된 압력이 시험재의 동적 항복강도에 비해 매우 크기 때문에 시험재는 유체와 같은 거동으로 소성변형이 진행되고 순간적으로 급랭하며 발생된 것이다⁵⁾. 따라서 누수, 인장 실험결과와 단면관찰에 의하여 Al/Steel, Al/Cu 이종 금속간 용접 시 전자기 펄스 용접 적용이 가능함을 확인하였다.

4. 맺 음 말

현재 자동차 산업은 차체 경량화를 위하여 경량소재와 구조재를 결합하여 사용하는 추세로 나아가고 있으며, 결합기술은 공정기술, 조립, 안전, 재활용에 이르기까지 영향을 미치기 때문에 적절한 결합기술 개발이 요구하고 있다.

이상에서 보고한 바와 같이 전자기 펄스 용접 기술은 Ford, GM사 등 국외 자동차 제조사 및 연구기관을 통

하여 활발히 진행되고 있으나 국내에서의 관심은 미흡한 실정이다. 이에 자동차 부품제조에 적용을 확대하고자 자동차 산업에서의 전자기 펄스 용접 관련 연구동향을 조사하였으며, 라디에이터 트랜스퍼 튜브, 스페이스 프레임, 드라이브 샤프트 개발을 위한 기초연구로 Al/Cu, Al/Steel 이종재 용접 실험을 실시하였다. 용접에 요구되는 공정시간은 약 28us이며 소재 변화에 따라 적정 공정변수를 선정하여 용접시 고품질의 용접부를 확보할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 기술을 자동차 부품 제조에 적용시 차체 경량화 뿐만 아니라 생산성 향상 및 원가절감에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 위하여 본 기술의 현장적용을 위한 공정 최적화 연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. I.S. Chang : Innovative Lightweight Concept in Car Bodies, KWJS, 21-7 (2003), 18-20 (in Korean)
2. H. Kang and W.M. Kyoung : Structural Design Optimization of the Aluminum Space Frame Vehicle, KSAE, 16-1 (2008), 175-180 (in Korean)
3. Y. B. Park : Design of Joints for the Automotive Spaceframe with Electromagnetic Forming and Adhesive Bonding, The Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Seoul National University (2004),
4. T.W. Lim and W.S. Cho : Current status of Car Body Weight Reduction, KSAE, Journal of the scientific lecture (1999), 128-137 (in Korean)
5. The Korean Welding and Joining Society : Guide for welding, KWJS, 2007, 171-200 (in Korean)
6. V. Shribman, A. Stern, Y. Livshitz and O. Gafri : Magnetic Pulse Welding Produces High-Strength Aluminum Welds, AWS Welding Journal, April, (2002), 33-37
7. V. Shribman, Y. Livshitz and O. Gafri : The Application of Magnetic Pulse Welding in the Automotive Industry, GPC Advanced Transmission Design& Performance (2005), 21-27
8. 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
9. M. Kojima and K. Tamaki : Electromagnetic welding of tube, The 5th International symposium of the japan welding society, April (1990), 201-206
10. 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
11. B.Y. Kang, J.Y. Shim, M.J. Kang, I.S. Kim, D.H. Park and I.J. Kim : Development of working coil

for Magnetic Pulse welding, KWJS, 27-5 (2009), 6-12 (in Korean)

12. A. Kochan : Magnetic Pulse Welding Shows Potential for Automotive Applications. Assembly Automation, 20-2 (2000), 129-132
13. B.T. Spitz and V. Shribman : Magneti pulse welding for tubular applications, The Tube & Pipe Journal, 11-2 (2000), 32-34
14. 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 (in Korean)
15. B.T. Spitz and V. Shribman : Magneti pulse welding for tubular applications, The Tube & Pipe Journal, 11-2 (2000), 32-34
16. M. Kojima, K. Tamaki and T. Furuta : Effect of Collision Angle on the Result of Electromagnetic Welding of Aluminium, JWS, 20-2 (1989), 36-42
17. M. Marya, M.J. Rathod, M. Kutsuna and D. Preiem : Steel to Aluminum Joining by Control of Interface Microstructures, Materials Science Forum, 539-543 (2007), 4013-1018
18. Y. Livshitz, O. Gafri, V. Shribman : Innovative welding and Forming with Magnetic Pulse Technology, New Materials and development process, GPC'00 (2000), 1-6
19. 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
20. J.S. Lee : Electro-magnetic forming, KSME, 28-5 (1988), 476-486 (in Korean)
21. H. Yu, C. Li, Z. Zhao and A. Li : Effect of field shaper on magnetic pressure in electromagnetic forming, JMPT, 168 (2005), 247



- 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



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



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