기 술 보 고

전자기 펄스 용접의 원리 및 적용

강봉용 · 심지연 · 강문진 · 김인주

Principle and Application of Magnetic Pulse Welding

Bong-Yong Kang, Ji-Yeon Shim, Moon-Jin Kang and In-Ju Kim

1. 서 론

최근 금속가공산업은 자동차, 조선 기계, 전자 등의 부품소재 제조에 있어 핵심적인 산업으로 자리하고 있다. 특히 가장 많은 비중을 차지하고 있는 용접산업은 저임금을 바탕으로 한 중국기술의 추격과 선진국의 고품질화에 직면하고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 친환경 공정기술의 개발과 신기술을 통한 제품의 부가가치 제고가 요구된다.

MPW는 자기장에 의한 전자기력을 사용하므로 물리적인 접촉 없이 금속을 가공하는 방법으로서, 용접(brazing과 soldering 포함), 금형 및 소성가공공정에서 환경오염 발생원인 용접재료, 가스, 용가재, 플럭스, 윤활유 및 세척유 등이 필요 없이도 고품질의 제품을 생산할 수 있는 친환경적인 공정기술이다. 그 외에도 도금된 상태에서 작업이 가능하여 기존의 공정에서 결함이 발생되었을 때 재도금을 실시하는 후공정이 생략되어 도금공정에서 배출되는 오염물질도 줄일 수 있고, 작업이 수 μs 하에서 이루어지기 때문에 전력소모가 매우 적으며 작업시간을 절약할 수 있는 장점을 갖고 있다[1].

MPW 기술은 초기에 구 소련(Soviet Union)에서 제한적으로 군사 분야에 적용을 위하여 개발되었다. 그 이후에 자동차, 가전 등의 분야에서 본 기술에 대한 산업적 응용에 관심을 갖기 시작하였으며. 1980년 M. Kojima[2]등에 의해 본격적으로 이종금속의 접합에 관한 연구가 시작되었다. 이후 H. Hokari[3]등에 의해 공정변수에 따른 접합부 특성이 보고되었다. 최근 EWI (Edsion Welding Institute), TWI(The Welding Institute), HIT(Harbin Institute of Technology) 및 OSU(Ohio State University)를 중심으로 체계적인 이론 확립과 이종금속 접합 실험과 수치해석을 통한 MPW공정 최적화에 연구가 진행되고 있다.

최근에는 Pulsar사, Dana사 및 Magneform사 등이 장비 및 시스템을 개발하여 보급하고 있으며 GM, Ford, Arvin Hutchinson과 같은 자동차회사와 Boeing, Lockheed Martin, Pratt and Whitney와 같은 항공회사, AMP, Thomas, Betts, Electrolux, Whirlpool 등의 전기/전자회사의 실제 생산현장에서 MPW기술을 현장에 적용하여 높은 생산성과를 통한 경제적인 개선효과를 얻고 있다.

그럼에도 불구하고 MPW에 대한 국내에서의 관심은 크지 않다. 1988년도 서울대학교 이동녕 교수 연구팀에서 본 기술을 응용하여 금속을 성형하는 실험실 차원의 연구를 수행한 바 있고, 국방과학연구소에서도 일부 연구가 수행되었다. 이후 1995년도에 한국생산기술연구원에서 이와 유사한 원리인 폭발접합에 관한 연구가 진행되었으며, 최근에는 소용량의 전자기 발생 전원장치 개발 및 이종금속 적용에 관한 기초 연구가 웰메이트(주), 한국생산기술연구원, 목포대학교를 통하여 진행되고 있다. 또한 MPW를 이용한 가공기술을 생산현장에 적용한 사례는 대우중공업에서 해외장비를 도입하여 파이프 확관 작업에 일부 사용한 사례가 유일하며 국산화된 장비는 개발되지 않았다.

따라서 본 고는 MPW기술의 국산화를 통하여 국가산업의 경쟁력 강화를 위하여 MPW 기술의 원리 및 적용사례에 대하여 기존의 보고된 자 료들을 토대로 MPW 기술을 소개하고자 한다.

2. 원 리

MPW의 원리는 이미 잘 알려진 폭발접합과 유사하다. 다만 폭발접합(explosive joining)은 폭약의 폭발로 발생되는 순간적인 높은 충격에너지를 이용하여 금속을 접합시키며, 반면에 MPW은 충전된 고에너지를 순간적으로 방전함으로써 발생되는 전자기력을 이용하여 두 금속사이에 고속 충돌을 발생시켜 금속을 접합시키는 공정이다[4].

서로 다른 재질과의 접합에서 미리 충전되어 있던 축전기를 순간적으로 방전시켜 Fig. 1과 같이 코일에 전

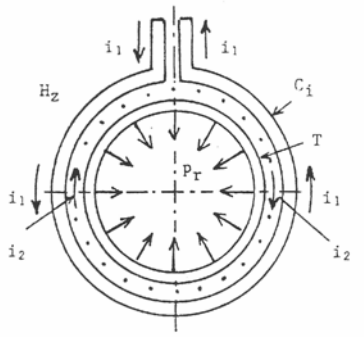


Fig. 1 The principle of the magnetic pulse welding process[3)]

류(i_1)를 흘리면 매우 강한 자기장 H_z가 발생하며 전기전도체인 접합재(Outer tube)에 유도전류(i_2)가 발생된다. 두 전류(i_1, i_2)의 상호작용에 의한 반발로 인한 전자기력 P_r에 의하여 접합이 이루어진다.

이때의 전자기력은 식(1)으로서 나타낸다.

$$P_r = \frac{B_z^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H_z^2}{2} \tag{1}$$

여기서

H : Magnetic field intensity(A/m)
B : Magnetic flux density (Wb/m^2)
μ : permeability (H/m)

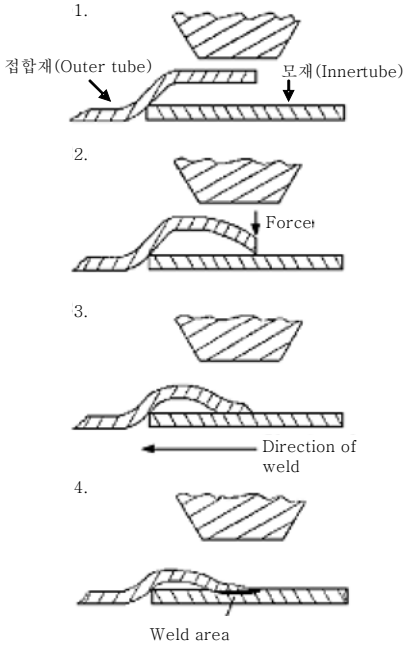


Fig. 2 Examples of metal deformation in MPW process[4)]

이러한 전자기력에 의해 Fig. 2와 같이 접합재는 모재(inner tube)에 충돌한 후 모재의 항복강도 이상이 되면 접합재는 유체와 같은 흐름을 시작하고 금속젯(metal jet)에 의하여 용접부 주변의 불순물들은 제거된다. 빠른 공정속도로 인하여 열 발생이 거의 없음에도 불구하고 금속학적인 접합이 이루어진다[1)].

3. 장 치

성공적인 접합을 위해서는 가공물에 따른 충분한 전자기력을 얻을 수 있는 장치설계가 중요하다. 일반적으로 MPW 장치는 Fig. 3과 같이 전자기 발생 전원장치, 코일 및 자속집중기로 구성된다.

Fig. 4는 Pulsar에서 개발한 전자기 발생 전원장치로서 동력 공급 장치, 에너지 저장 축전기, 제어회로, 축전기의 코일로의 충격 방전을 위한 스위치장치, 그리고 전달선과 버스로 구성되었다.

코일(working coil)은 가공물 표면에 순간적으로 고자기장을 생성시켜 금속을 접합하는데 사용되며 가공의 종류와 가공물의 크기에 의해 결정되는 치수 및 형상, 발생하는 자계의 자속시간과의 관계나 급격한 방전에 의한 콘덴서의 손상을 방지하기 위해 최적의 인덕턴스를 계산한다. 또한 공정중의 충격력에도 견뎌내며 안전성을 유지하기 위한 충분한 기계적 강도와 질량을 갖도

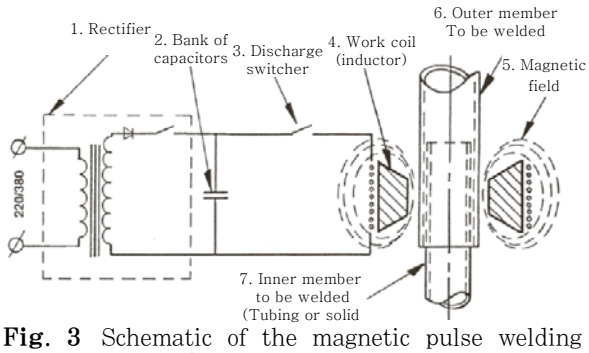


Fig. 3 Schematic of the magnetic pulse welding process[5)]

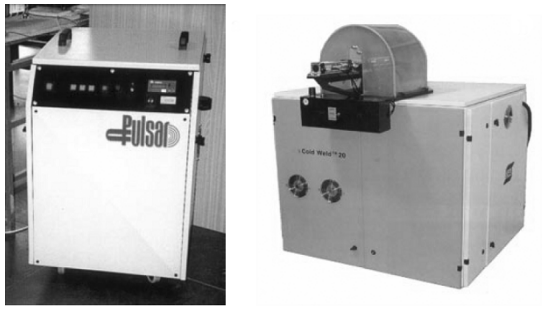


Fig. 4 The magnetic pulse power source from Pulsar[6)]

록 설계한다. Fig. 5와 같이 일반적으로 기계적 강도가 크고 전기저항이 적은 베릴륨동을 가공하여 사용하며 코일의 형태로는 적용 제품에 따라 외측에서 내측방향으로 접합되는 솔레노이드 형의 압축 코일(E)과 내측에 삽입되어 외측방향으로 접합시키는 팽창코일(E) 및 평판의 가공물에 사용되는 평판형 코일(E)을 사용한다[6].

자속집중기(field shaper)는 코일과 접합재 사이에 위치하며 코일로부터 전류가 방전되면 전기적 유도 작용에 의해 접합재로 유도전류를 전달한다. Fig. 6과 같이 코일에 전류가 흐르면 자속집중기의 외측표면에 코일의 전류(I_1)와 반대방향으로 유도전류(I_2)가 생기고, 이 유도전류는 또 다시 자속집중기의 내측표면에 이와 반대반향의 전류를 유도한다. 이 유도전류에 의해 자속집중기 표면과 모재 사이에 자기장이 형성되고 모재 표면에 또 다른 반대방향의 유도전류(I_3)가 생성되어 접합이 이루어지게 된다. 이러한 자속집중기를 이용하면 고효율의 전자기력을 얻을 수 있으며 자속집중기의 설계는 코일과 마찬가지로 가공물의 형상에 적합하게 제작되어야 한다. 또한 코일과의 전기적 결합상태가 좋아야 하므로 전기적 특성이 좋고 공정시 충격력을 견딜 수 있도록 기계적 강도가 좋은 재료 선정이 요구된다. 또한 코일과 마찬가지로 베릴륨동이 주로 사용되며 경우에 따라 경화 알루미늄 합금을 사용한다[6].

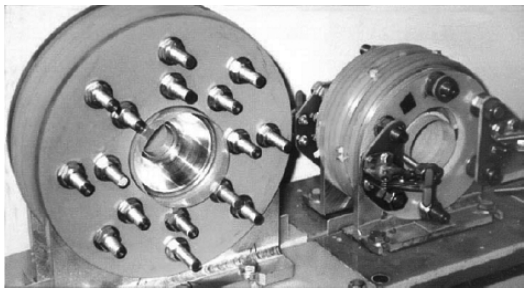
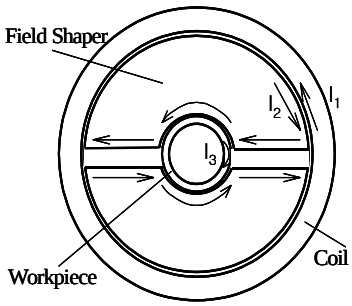


Fig. 5 Examples of coils used for magnetic pulse welding[6]



I_1 : coil current

I_2 : primary induced current

I_3 : secondary induced current

Fig. 6 Principle of the field shaper

MPW 공정에 사용되는 금속재는 저항으로 인하여 빠른 속도로 금속내로 자기장이 생성되었다가 결국 0으로 감소한다. 이를 표피효과라 하며 금속재내로 침투하는 자기장의 침투가 표피 깊이 (skin depth)에 한정되어 있으므로 짧은 펄스가 요구된다. Fig. 7과 같은 전류의 감쇠는 사실상 에너지 손실을 의미하는 것으로 방전 전류의 최초 반주기만(T/2)을 공정에 이용한다[3]. 이 때의 전자기력은 용접의 성공여부 및 품질을 결정하는 핵심요소로써, 최적의 전자기력을 얻기 위해서는 적용하고자 하는 제품에 적정한 장치설계 뿐만 아니라 공정변수의 영향에 대한 충분한 고려가 필요하다.

앞에서 언급한 바와 같이 MPW 공정시 최적의 공정변수의 선정은 접합부의 성능을 좌우한다. 이들 변수로는 Fig. 8의 에너지 변환 원리에 의하여 방전 전류에 따른 코일의 인덕턴스, 충돌을 위한 충분한 운동에너지를 얻기 위한 접합재의 D/T(접합재 직경/두께)비, 접합재와 모재사이의 간격(G)으로 분류한다[2].

코일의 인덕턴스는 전자기 에너지로서 역할을 수행하여 전자기 에너지가 증가할수록 충돌 속도 역시 증가한다. 따라서 최적의 인덕턴스 값을 가질 때 최대값을 갖으며 D/T비는 접합재의 소성 작업(plastic work)에 영향을 미치며, 접합재와 모재사이의 간격은 모재에 부딪혀 충돌하기 전 접합재를 가속하는데 필요하다.

코일의 인덕턴스는 Zhang[5]에 의한 계산값과 실험값의 비교를 통하여 아래의 Grover's 식이 적정함이 증명되었으며 코일과 접합재 사이의 간격은 1mm가 적정한 것으로 보고되었다[2].

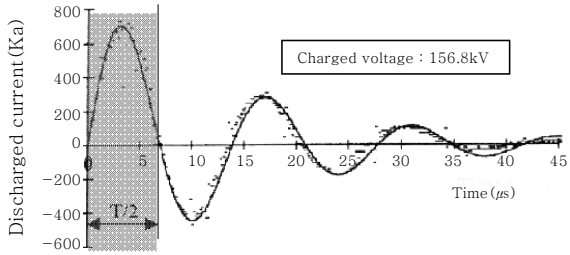


Fig. 7 Discharge current wave form flowing in the inductor coil[3]

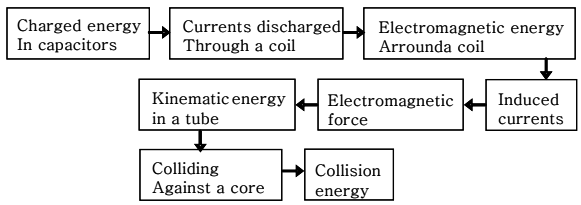


Fig. 8 Flow chart of energy transitions in MPW[2]

$$L = \frac{0.00254\mu_0 \pi r^2}{l} \times N^2 \quad (2)$$

여기서,

L : Inductance

r : radius of coil

N : turn number

l : length of coil

μ : permeability

접합재의 D/T비와 접합재와 모재사이의 간격은 Kojima[2]의 실험을 통하여 Table 1.과 Fig. 9에 나타나있다. 접합재의 직경이 증가하면 더욱 쉽게 용접이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 D/T비가 클수록 용접이 더욱 용이함을 알 수 있었다. 또한 인덕턴스와 접합재와 모재사이의 간격 G가 타원의 중심에 가장 근접할 때 성공적인 용접수행이 가능함을 확인할 수 있다.

이러한 공정변수에 의하여 충돌 속도가 결정되며 Fig. 10과 같이 충돌점(contact point) 속도(V_k)와 충돌 속도(V)는 다음과 같이 표현된다[2].

$$V_k = V sin\theta \quad (3)$$

Table 1 Variation of the acceptable limit of gap G(mm) with both of the tube diameter and the numbers of turn of coil[2]

N \ D	12	15	17.5	20
10	-	-	1.5<G<5	1<G<5.5
15	-	G=3	1<G<5	1<G<5.5
20	-	2.5<G<4	1.5<G<3.5	G=3

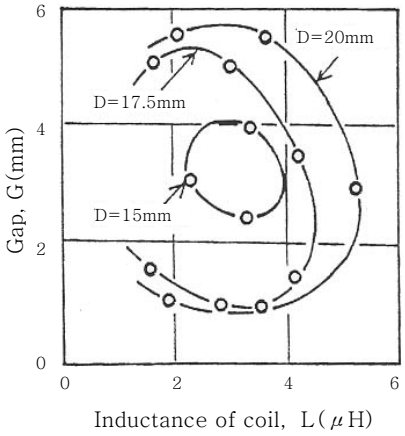


Fig. 9 Combinations of acceptable limits of gap and inductance[2]

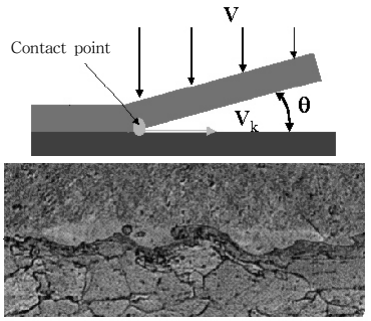


Fig. 10 Description of the joint when welding with MPW[7]

여기서,

V_k : contact point velocity

V : impact velocity

충돌과 동시에 접합재와 모재사이에서 발생된 금속젯(metal jet)에 의해 접합표면에 존재하는 오염층이 제거되어 접합에 필요한 청결한 표면이 얻어지며 접합이 이루어지기 때문에 금속젯의 발생은 필수적이다. 일반적으로 금속젯은 모재와 접합재의 성분으로 이루어지는데 접합재가 모재에 비해 밀도가 비슷하거나 적을 때는 대부분 접합재의 성분으로 구성된다[8].

5. 접합계면 특성

MPW를 이용한 금속접합 시 접합계면에서 경도가 증가함을 Fig. 11을 통해 알 수 있으며, 폭발용접과 유사한 Fig. 12와 같은 웨이브 패턴(wave pattern)이 발견되었으며 이를 통하여 두 기술의 원리가 유사함을 확인할 수 있다.

웨이브 패턴은 접합과정에서 접합재와 모재의 충돌점에서 발생되는 압력이 접합되는 금속의 전단강도에 비

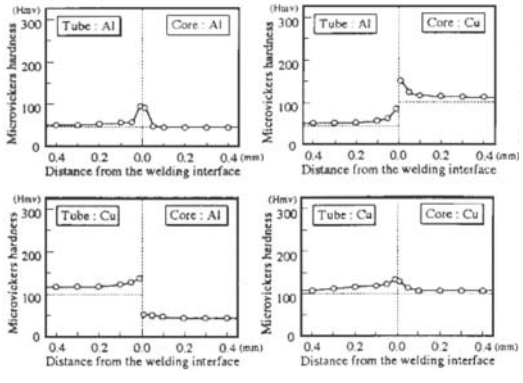


Fig. 11 Hardness profiles of joints with dissimilar materials[4]

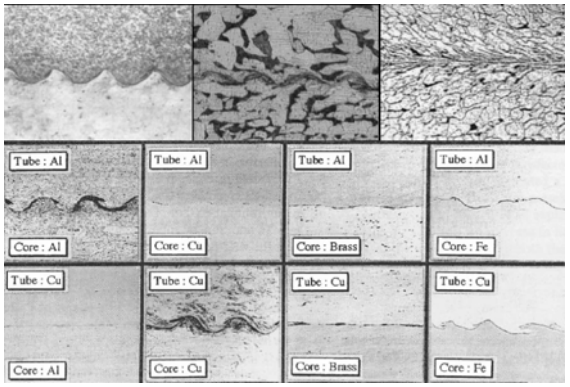


Fig. 12 Micrographs from interfaces of MPW with different core materials and different tube materials[3)]

해 훨씬 크기 때문에 금속은 유체와 같은 거동을 하여 소성적으로 흐르게 되어 나타난 것으로, 모재에서의 이동속도가 어떤 임계값 이상인 경우에 생기는데 이 임계값 이하에서는 접합공정과 관련된 접합변수들이 약간만 변화하여도 접합계면에서 미접합부가 생길 수 있다. 금속재의 종류에 따라 용접 시 이종금속 심의 경계면에 화합물 층이 발생되었지만 그것의 두께는 2-20㎛로 매우 적으며 파동의 앞과 뒤쪽 부위에는 Fig. 13과 같이 금속이 고화된 포켓(pocket)이 존재할 수 있는데 이는 금속젯 형성하고 있는 접합재와 모재의 성분으로 이루어져 있으며 접합과정에서 접합재의 동적에너지 일부가 열로 변함으로 인해 접합계면에서 온도가 급상승하여 금속젯의 일부가 용융되어 급랭된 부분을 나타낸다. 접합재와 모재가 고용체를 형성할 경우는 연성을 갖게 되지만 금속간화합물을 형성할 경우에는 매우 취약하여 접합부의 성능에 많은 영향을 끼치게 된다[8)].

근본적으로 접합계면의 특성은 주요 공정변수인 코일의 인덕턴스, 코일과 접합재와의 간격 및 접합재와 모재간의 거리에 의해서 결정되는 동적변수인 속도 및 충돌각 그리고 접합재의 두께 및 모재와 접합재의 물리적 기계적 성질 등에 좌우되기 때문에 이들의 영향을 충분히 고려하여 접합변수를 설정하는 것이 중요하다[8)].

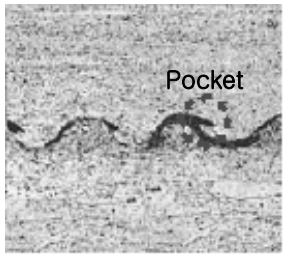


Fig. 13 An example of pocket between flyer and parent plates(both in Al) in MPW[3)]

6. 적 용

초기 MPW는 설비산업에서 brazing의 부식 가능성 때문에 이를 대체할 기술의 필요성이 증가함에 따라 개발되었다. MPW는 접합과 동시에 금속학적 상호작용이 더 이상 이루어지지 않기 때문에 부식의 위험이 적다. 또한 접합 가능성이 부족한 금속간의 접합이 가능하며 금속의 고유저항이 큰 전도성이 작은 금속의 경우 copper driver등과 같은 부속재를 사용하여 접합이 가능하다. 이러한 이유로 현재 산업에서의 MPW의 적용은 이종금속의 접합에 초점을 맞추어 더욱 실용적으로 사용되고 있으며 점차 경량화 되어가는 부품산업에서의 본 기술의 적용은 Fig. 14와 같이 자동차의 Al 스페이스 프레임, 드라이브샤프트 등에 사용되어 부품수의 감소를 통한 단순화를 통하여 중량감소의 효과를 가져왔다.

또한 MPW 공정은 높은 반복성을 가지고 있어 가공물에 따른 최적의 공정변수가 결정되면 손쉽게 제어 및 조정이 가능하여 한 시스템의 연간 생산 가능량은 백만 부품 이상으로 보고되고 있다[9)]. Fig. 15는 현재까지 보고된 MPW을 이용한 다수의 금속 접합 여부를 나타

Fig. 14 Examples of various components of application of the magnetic pulse welding process[7)]

	Magnesium	Steel	Nickel	Titanium	Stainless steel	Zirconium	Molybdenium	Brass	Copper	Aluminium
Aluminium	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Copper	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Brass								■	■	■
Magnesium	■									■
Steel		■			■					■
Molybdenium							■			
Zirconium						■				
Stainless steel			■	■	■					
Nickel			■	■	■					

Fig. 15 Material combinations that have been successfully welded with the magnetic pulse welding technology[7)]

낸다.

비록 아직 다루어지지는 않았지만 최근 개발된 초고강도스틸(Ultra high strength steels)의 접합도 가능할 것으로 보고되고 있다.[9] 이러한 스틸은 용접 작업시 발생하는 열에 반응하기 때문에 이를 고려한 설계가 필요하지만 본 기술은 고상용접공정(Cold welding process)으로 적용이 가능하다.

7. 결 언

본 고에서는 MPW의 원리, 장치, 공정변수, 접합계면 특성 및 적용에 대하여 기술하였다.

MPW는 생산성 및 품질향상측면에서 큰 장점을 가지고 있으며 응용분야가 매우 다양한 용접법으로 선진외국의 산업체를 중심으로 자동차, 가전 등의 분야에서 본 기술에 대한 산업적 응용에 대한 연구가 진행 중이다. 따라서 국내에서 MPW에 대한 기초적인 이론적, 실험적 연구와 이의 응용에 대한 관심을 기울여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. B.T. Spitz and V. Shribman : Magnetic pulse welding for tubular applications, The Tube & Pipe Journal, **11-2** (2000), 32-34
2. M. Kojima and K. Tamaki : Electromagnetic welding of tube, The 5the International symposium of the japan welding society, Aprial (1990), 201-206
3. 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
4. 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
5. 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
6. J.S. Lee : Electro-magnetic forming, KSME, **28-5** (1988), 476-486
7. V. Shribman : Take Advantage of the New Magnetic Puls Welding Process, Svetsaren, **56-2** (2001), 14-16
8. B.Y. Kang and H.J. Kim : Theory and Characteristics of Explosive Welding, Journal of the korean welding society, **11-3** (1993), 1-9
9. A. Kochan : Magnetic Pulse Welding Shows Potential for Automotive Applications. Assembly Automation, **20-2** (2000), 129-132
10. J.F. Erdmann : The Basic Fundamentals of Magnetic Pulse Welding, Schweissen und Schneiden, **19-1** (1967), 2-8
11. M. Pezzutti, : Innovative Welding Technologies for the Automotive Industry, Welding Journal, **79-6** (2000), 43-46
12. J. Pearson : Advanced High Energy Forming, Explosive Welding, ASTME, (1961), 60-159.
13. G. Hurshal : Bonding of Aluminum by the capacitor discharge magnetic forming processes, Welding Journal, **46** (1967), 507-510
14. 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
15. 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. G.G. Corbett, S.R. Reid, and W. Johnson : Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A Review, International Journal of Impact Engineering, **18-2** (1996), 141-230
23. A. Turgutlu, S.T. Al-Hassani, and M. Akyurt : The influence of projectile nose shape on the morphology of interface in impact spot welding, International Journal of Impact Engineering, **18-6** (1996), 657-669
24. 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
25. D. H. Birdsall, F.C. Ford, H.P. Furth and R. E. Riley : Magnetic Forming, Am. Mach./Metalworking Manuf, **105** (1961), 117-121
26. E.J. Bruno : High Volecity Foriming of Metals, ASTME, 55
27. W.F. Brown, J. Bandas and N.T. Olson : Pulsed magnetic welding of breeder reactor fuel pin end closures, welding journal, **57-61** (1978), 22-26
28. S.H. Lee and D.N. Lee : Estimation of magnetic pressure in tube expansion by electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **57** (1996), 311-315
29. J. Bednarczyk : Distributions of forces in the inductors used in metal processing in the pulse magnetic field, *Journal of Materials Processing Technology*, **133** (2003), 340-347
30. A.A. Tamhane, M.M. Altynova and G.S. Daehn :

Effect of sample size on ductility in electromagnetic ring expansion, *Scripta Materialia*, **34** (1996), 1345-1350
31. H.G. Baron and R.H. Henn : Springback and Metal Flow in forming shallow dishes by explosives, *Int. Journal of Mechanical Sciences*, **6** (1964), 435-444
32. G.K. Fenton : Development of numerical tools to model plasticity in aluminum due to electromagnetic forces, *M.S. Thesis, Ohio State University*, This thesis contains detailed information on the CALE code, (1996)
33. A.G. Bogle : Effective inductance and resistance of screenede coils. *J. Inst. E. E.*, **878** (1940), 299-316
34. V. Shribman : Take advantage of the new magnetic puls welding process, *Svetsaren*, **56/2-3** (2001), 14-16
35. M. Kaltenbacher, H. Landes and R. Lerch : An efficient calculation scheme for the numerical simulation of coupled magneto mechanical systems, *IEEE Trans. Magnetic,* **33** (1997), 1646-1649
36. G.A. Dilts : Moving least squares particle hydro dynamics. II. Conservation and boundaries, *Int. J. Numer. Meth. Eng.,* **48** (2000), 1503-1524
37. W. H. Drysdale, J.D. Powel, B.P. Burns and A. E. Zielinski : A survey of codes for modeling electro magnetic launching, *Army Research Laboratory Report,* ARL-MR-64 (1993)
38. G. Hainsworth, P.J. Leonard, D. Rodger and C. Lyden : Finite element modeling of magnetic compression using coupled electromagnetic structural codes, *IEEE Trans. Magn.,* **32** (1996), 1050-1053
39. K.T. Hsieh : A Lagrangian formulation for mechanically, thermally coupled electromagnetic diffusive processes with moving conductors, *IEEE Trans. Magn.,* **31** (1995), 604-609
40. K.T. Hsieh and B.K. Kim : One kind of scaling relations on electro mechanical systems, *IEEE Trans. Magnetic,* **33** (1997), 240-244
41. Dana Corporation : Magnetic Pulse welding Process To Decrease Vehicle Weignt and Increase Fuel Efficiency, *Research and data for Status Report,* (2001)
42. M. Kaltenbacher , H. Landes and R. Lerch : A strong coupling model for the simulation of magnetomechanical systems using a predictor/ multicorrector algorithm, *Appl. Comput. Electromagnetic. Soc. J.,* **12** (1997), 102 - 106
43. B. Bendjima, K. Srairi and M. Féliachi : A coupling model for analysing dynamical behavior of an electromagnetic forming system. *IEEE Trans. Magnetic,* **33** (1997), 1638-1641
44. F. Azzouz, B. Bendjima, M. Féliachi and M.E. Latréche : Application of macro-element and finite element coupling for the behavior analysis of magnetoforming systems. *IEEE Trans. Magnetic,* **35** (1999), 1845-1848
45. N. Takatsu , M. Kato and K. Sato : High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force, *JSME Int. J.,* **31** (1988), 142-148
46. G.K. Penton and G.S. Daehn : Modeling of electro magnetically formed sheet metals, *J. Mater. Process. Technology*, **75** (1998), 6-16

• 강봉용(姜奉龍)
• 1960년생
• 한국생산기술연구원,정밀접합팀
• 용접전원파형제어,용접재료개발
• e-mail : kanbo@kitech.re.kr

• 심지연(沈志娟)
• 1980년생
• 한국생산기술연구원,정밀접합팀
• 전자기 펄스 용접 공정
• e-mail : shimjy@kitech.re.kr

• 강문진(姜紋珍)
• 1963년생
• 한국생산기술연구원, 정밀접합팀
• 용접지능제어, 용접기기개발
• e-mail : moonjin@kitech.re.kr

• 김인주(金麟柱)
• 1968년생
• 한국생산기술연구원 지능형부품소재센터
• 용접공정제어
• e-mail : k9inju@kitech.re.kr