

전자기 펄스 용접시 누수압력을 예측하기 위한 실험모델의 개발

심지연⁺, 김일수⁺⁺, 김인주⁺, 강봉용^{*}
(논문접수일 2009. 10. 26, 심사완료일 2009. 11. 30)

A Development of Experimental Model Prediction of Leakage Pressure in MPW

Ji-Yeon Shim⁺, Ill-Soo Kim⁺⁺, In-Ju Kim⁺, Bong-Yong Kang^{*}

Abstract

MPW(Magnetic Pulse Welding) is a technologies for welding of metals by means of repulsive force on account of the interaction between electro-magnetic field of coil and current induced in outer pipe. These MPW is one of the most useful welding process of welding ability of the dissimilar metal in which cylindrical materials, such as pipe, tube. As the quality of a weld joint is strongly influenced by process parameters during the welding process and the success of the welding to evaluated according to the leakage pressure. Generally, the process parameters is magnetic pressure, the gap between outer pipe and inner pipe, and the ratio of thickness to diameter of pipe(D/T) in MPW. Therefore, the goal of this study was to explain the effect of parameters on the weld joint leakage pressure. For these purposes, FFD(Fractional Factorial Design) were used for the experiment. The measured data were analyzed by regression analysis and verification experiments with random condition were conducted to confirm the suggested experimental model.

Key Words : Magnetic pulse welding(전자기 펄스 용접), Leakage pressure(누수압), FFD(일부실시법)

1. 서론

전자기 펄스 응용 기술은 기본적으로 자장에 의한 압력을 사용하므로 물리적인 접촉없이 금속을 가공하는 방법으로 환경오염 발생원인 가스, 용가재, 윤활유 없이 고품질의 제

품을 생산할 수 있는 친환경적인 공정기술이다. 특히 전자전 된 고에너지를 코일을 통하여 순간적으로 방전하여 발생되는 전자기력을 이용하여 용접 대상물을 고속 충돌시켜 용접하는 기술로서 열을 가하지 않기 때문에 재료의 특성 차이로 유발되는 결함이 발생하지 않으며 열영향부(HAZ)가 발생

+ 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터
* 교신저자, 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터 (kanbo@kitech.re.kr)
주소: 561-841 전주시 덕진구 팔복동 716-10번지
++ 목포대학교 기계공학과

하지 않아 고품질의 용접을 실현시킬 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 이유로 전기·전자, 자동차, 우주항공산업등 산업전반에 다양하게 적용할 수 있어 실제 생산현장에서 본 기술을 적용하여 높은 생산성 및 고품질을 통한 경제적 효과를 얻고 있으며 최근 EWI(Edsion Welding Institute), TWI(Technology Welding Institute), HIT(Harbin Institute of Technology) 및 OSU(Ohio State University)를 중심으로 체계적인 이론 확립, 이중금속 접합 실험 및 수치해석을 통한 전자기 펄스 용접 공정 최적화 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내의 경우 전자기 펄스 용접 기술에 대한 연구가 미흡한 실정이며 국내 산업체에서의 적용은 이루어지지 않고 있다.

전자기 펄스 용접부의 품질과 밀접한 관계를 갖는 공정변수 경우 모재와 접합재의 재질 및 치수에 따라 적정 공정변수 범위가 변화되므로 공정에 따른 데이터의 축적은 대단히 중요하다. 전자기 펄스 용접 공정변수의 체계적 정리는 P. Zhang⁽²⁾에 의하여 이루어졌으며 M. Kojima⁽³⁾등은 Al/Cu, Al/Steel 접합시 성공적인 접합을 위한 공정변수의 적정 구간에 대하여 보고하였으며 이 후 H. Hokari⁽⁴⁾등은 공정변수 중 접합재와 모재사이의 간격이 누수압력에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 V. Shribman⁽⁵⁾은 Al/Steel 접합시 공정변수에 따른 단면 관찰을 통하여 공정변수가 접합부에 미치는 영향에 대하여 보고하였다. 국내의 경우 최근 RIST(Research Institute of Industrial Science & Technology)⁽⁶⁾에 의하여 공정변수 중 모재와 접합재 사이의 간격이 용접강도에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었으나 그 외 공정변수들이 접합부에 미치는 영향 및 공정변수들간 상관관계에 대한 연구는 시도되지 않았다. 따라서 본 연구는 전자기 펄스 용접에서 공정변수들이 접합부의 품질에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 한다. 이를 위하여 기 보고된 문헌을 토대로 전자기력, 모재와 접합재사이의 간격, 접합재의 두께 변화를 공정변수로 선정하고 용접시 접합부 신뢰성 평가를 위한 누수실험시 누수압력 변화에 초점을 맞추었다. 실험은 상용 소프트웨어인 MINITAB을 이용하여 완전요인설계(Full factorial design)에 따라 실험계획을 수립하고 측정된 데이터는 회귀분석을 이용하여 분석하였으며 마지막으로 제시된 실험모델의 검증에 의해 임의조건에서의 검증실험을 수행하였다.

2. MPW 공정변수

전자기 펄스 용접은 Fig. 1과 같이 충전된 고에너지를 코일에 순간적으로 방전시켜 발생하는 전류와 접합재 발생되는 유도전류 사이의 상호작용에 의한 반발력 즉 전자기력

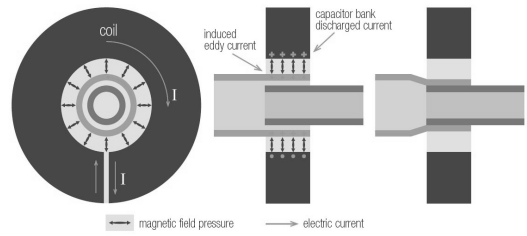


Fig. 1 A Schematic diagram of MPW⁽⁵⁾

(Electromagnetic pressure)이용하여 고속 충돌을 발생시켜 접합하는 공정이다.⁽¹⁾ 전자기력에 의해 이동(Flying)하는 접합재는 모재에 충돌한 후 금속젯(Metal jet)에 의하여 용접부 주변의 불순물들은 제거되며 모재의 항복강도 이상이 되면 유체와 같은 흐름으로 금속학적 접합이 이루어진다.

Masatoshi. H는 전자기 펄스 용접 품질에 영향을 미치는 주요 공정변수로 working coil의 인덕턴스(L)과 모재와 접합재 사이의 간격 및 접합재의 직경/두께의 비(D/T)로 보고하였으나 working coil의 인덕턴스는 대개 식 (1)과 같이 working coil의 형상 및 인덕턴스(L)에 의해 결정되는 전자기력(P)로 간주한다. 전자기력은 접합재의 모재 충돌에 필요한 전자기 에너지로서 역할을 하며 모재와 접합재 사이의 간격 및 접합재의 두께는 식 (2)와 같이 접합재와 모재간 충돌을 위한 가속도를 얻기 위한 역할을 한다.^(5,7)

$$P = \mu_0 K^2 n^2 U^2 C \frac{\sin^2(\omega t (e^{-Rt/L}))}{2l^2} \quad (1)$$

P = 전자기력, MPa.

μ_0 = 자기투자율, Hn/m.

K = working coil의 계수

n = working coil의 감김수

U = 충전전압, V

ω = 방전파형

C = 캐패시턴스, F

R = 저항, Ohm

L = 인덕턴스, Hn.

l = working coil의 길이, m

t = 방전시간, s

$$m \frac{d^2h}{dt} = F_m - F_\sigma \sigma \quad (2)$$

m = 접합재 면적, kg

h = 접합재와 모재 사이의 간격, m
 F_m = 자기속력
 σ = 접합재의 기계적 세기, N/m²

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

전자기 펄스 용접을 이용한 Al/Cu 이종금속 접합시 공정 변수들의 접합부 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 웰메이트(주)사의 최대 충전에너지 84kJ 용량의 전자기 펄스 전원장치, working coil 및 방전 파형 관찰을 위한 로고우스키코일(Rogowski coil)로 구성하였다.

접합재와 모재는 각각 Al 1070 및 C1220으로 Fig. 3과 같이 접합재를 코일 가장자리까지 삽입하였으며 working coil 과 접합재 사이의 거리는 시편 조작 편의 및 절연내압을 고려하여 1mm로 설정하였다.

3.2 완전요인설계

전자기 펄스 용접 접합부의 품질은 공정 변수들이 서로 연관되어 작용하므로 양호한 용접 품질을 얻는 일은 쉽지 않다. 실험계획법(Design of experiment)이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게

취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다.⁽⁸⁾

실험계획법은 크게 세 가지 원리 및 가정 아래 수행하게 되는데 1)랜덤화의 원리(Randomization), 2)반복실험의 원리(Replication), 3)블록화의 원리(Blocking)에 의해 수행되어진다. 우선, 랜덤화의 원리는 실험을 수행한다는 것은 실험을 수행함에 있어서 실험순서가 랜덤하게 정해져야 한다는 것으로 랜덤하게 실험이 수행되지 못하면 실험 인자로 고려한 인자외에 다른 숨겨진 인자(주로 시간에 의존하는)가 실험에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 반복 실험과 반복 관측은 동일한 실험 조건에 대해 반복적으로 실험을 실시하는 것으로 실험 오차의 추정에 필수적이며 이를 통해 p-value 산출이 가능한 것으로 실험의 재현성을 높이고 실험과정 상에서 발생할 수 있는 측정오차를 최소화하기 위함이다. 실험설계를 통해 관심 있는 실험 인자가 반응인자에 어떻게, 얼마나 영향을 끼치는지 확인하고자 하는 과정에서 관심 밖의 다른 인자가 반응인자의 영향을 정밀하게 추정할 수 없다, 이런 경우에 관심 밖의 인자를 block인자로 간주하고, 이를 고려하여 실험인자의 영향이 반응인자에 어떻게, 얼마나 끼치는지를 좀 더 정밀하게 추정하고자 하는 방법으로 블록화의 원리를 적용하게 된다.⁽⁹⁾

일반적으로 kn 요인 실험법이란, 인자의 수가 n이고 각 인자의 수준수가 k인 실험계획법으로 모든 인자 간 수준의 조합에서 실험이 이뤄진다. 따라서 실험이 반복되지 않아도 kn번의 실험횟수가 실시되어야 하며 인자의 효과와 상호작용을 추정할 수 있다는 특징이 있다. 특히 완전 요인 설계의 일반 완전 요인설계(General full factorial designs)의 경우 실험 인자 수준에 따른 모든 조합에서 실시되는 실험계획이다.⁽⁹⁾

3.3 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 인자는 충전전압, 모재와 접합재 사이의 간격, 접합재의 두께이며 수준은 Table 1과 같다.

Table 2는 실험을 통하여 획득한 27개의 데이터로서 획득한 데이터의 회귀분석을 통하여 공정변수 변화에 따른 누수 압력을 예측할 수 있는 아래의 직선방정식을 개발하였다.

$$P = -95.9 + 17.6V + 2.78G + 4.17TZ \quad (3)$$

분산기법을 이용하여 개발된 수식모델의 적합성 여부를 분석하고 검사하였으며 개발된 방정식에 대한 추정치의 표준오차, 상관계수 및 결정계수는 Table 3에 나타내었다. 분



Fig. 2 Experimental setup of MPW

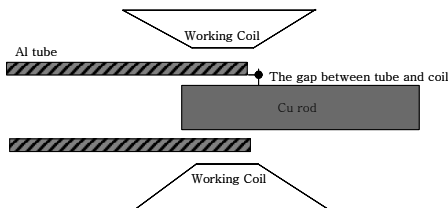


Fig. 3 A Schematic diagram for MPW process

Table 1 Factors and levels for experimental design

Process Parameters				
Symbol	Factors	Levels		
		-1	0	1
V	Charge voltage(kV)	5	7	9
T	Thickness of outertube(mm)	0.7	1.0	1.3
G	The Gap between outer pipe and inner pipe(mm)	0.4	0.8	1.2

Table 2 General full factorial designs and experimental result

General full factorial designs				
No.	V (kV)	G (mm)	T (mm)	Leakage pressure (kgf/cm ²)
1	5	0.4	1.3	0
2	5	0.4	0.7	0
3	7	0.4	1.3	25
4	9	0.4	1	70
5	7	1.2	1.3	30
6	9	1.2	0.7	70
7	7	1.2	1	30
8	9	0.8	0.7	65
9	5	0.8	1.3	0
10	5	1.2	1.3	0
11	9	1.2	1	75
12	9	0.4	1.3	70
13	7	0.8	1.3	30
14	7	0.8	0.7	25
15	5	0.8	0.7	0
16	9	0.8	1	80
17	9	0.8	1.3	70
18	7	0.4	1	20
19	5	0.8	1	10
20	9	1.2	1.3	75
21	5	1.2	0.7	0

석결과를 통하여 직선방정식 대한 결정계수 값은 0.96으로 누수압력 총 변동의 96%가 회귀식에 의하여 설명되어 개발

Table 3 Analysis of variance test for mathematical models for leakage pressure

Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
5.95	96.5	96.0

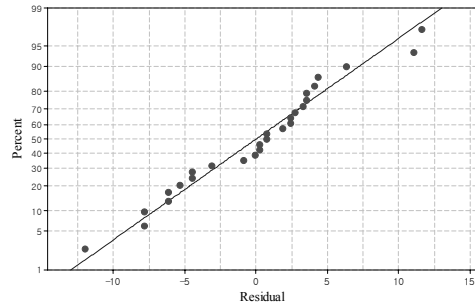


Fig. 4 Normal probability plot of the residuals

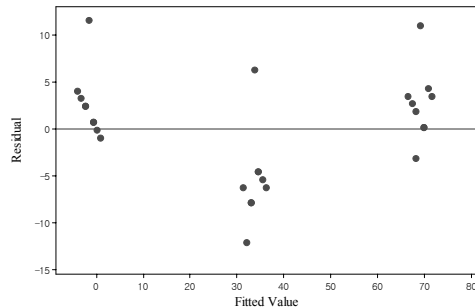


Fig. 5 Residuals Versus the Fitted Values

모델의 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

개발된 직선방정식의 오차항에 대한 잔차 분석을 통하여 전체적인 모형의 적합정도를 판단하기 위하여 Fig. 4~7을 제시하였다. Fig. 4는 정규 확률도-데이터가 정규분포를 따르는지 다른 변수가 반응에 영향을 주는지 또는 데이터에 특이치가 있는지 여부를 판단한 것으로서 데이터들이 직선에 가깝게 분포됨에 따라 정규분포를 나타내었다.

Fig. 5는 잔차 대 적합치 분산이 일정하지, 비선형 관계가 있는지 또는 데이터에 특이치가 있는지의 여부를 판단한 것으로 잔차 분포의 몇 개의 데이터를 제외한 모든 데이터들이 0을 중심으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 6은 히스토그램-데이터가 특정 방향으로 치우쳐져 있는지 또는 데이터에 특이치가 있는지 여부를 판단한

것으로 정규분포를 보여주고 있다.

마지막으로 잔차 대 데이터 순서-시간 또는 데이터 수집 순서로 인해 데이터에 체계적인 효과가 있는지 여부는 Fig. 7을 통하여 판단하였으며 각 몇 개의 데이터를 제외한 모든 관측치에서 잔차 0을 중심으로 분포되어 있는 것을 확인하였다.

오차항에 대한 4가지 가정 정규성(Normality), 등분산성(Equal variation), 독립성(Independence), 선형성(Linearity) 모두 만족하여 모델에 문제가 없는 것으로 나타나 본 연구에서 고려한 공정변수에 따른 누수압력을 예측할 수 있는 모델이 개발되었다.

공정변수 변화에 따른 누수 예측 모델 개발 후 공정변수의 주효과를 검토하기 위하여 Fig. 8과 같이 주효과도를 검토하였다. 인자 각 수준에서의 평균값으로 인자의 수준을 변경하였을 때 모재와 접합재 사이의 간격 및 모재의 두께의 경우 수준을 변경하여도 평균치가 변하지 않는 반면 충전 전압을 변경하면 누수압력의 변화가 크다. 따라서 충전전압의 인자가 공정에 가장 영향을 미친다고 판단된다.

Fig. 9는 검증실험 및 본 논문에서 제시한 식에 의한 결과

를 그래프로 나타낸 것이며 Table 5는 실험값과 예측값의 오차를 나타내고 있다.

누수시의 압력은 전 실험조건에 대해 예측값이 실험값보다 낮게 나타났다. 1과 3번의 실험조건의 오차는 10%이상

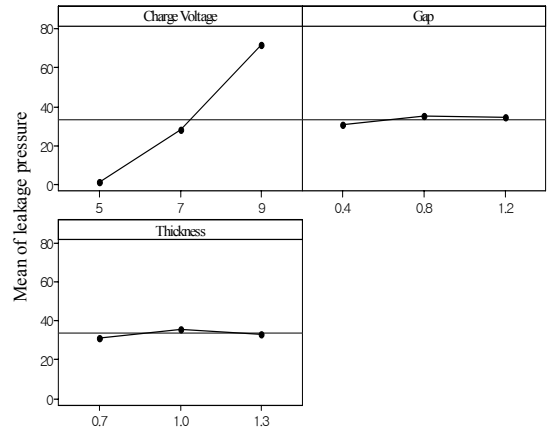


Fig. 8 Main Effects Plot for leakage pressure

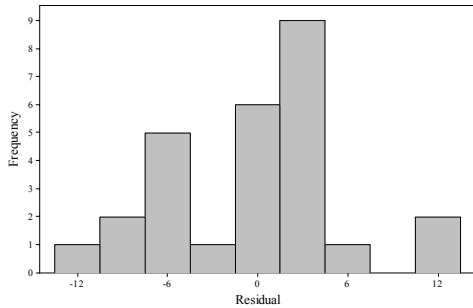


Fig. 6 Histogram of the Residuals

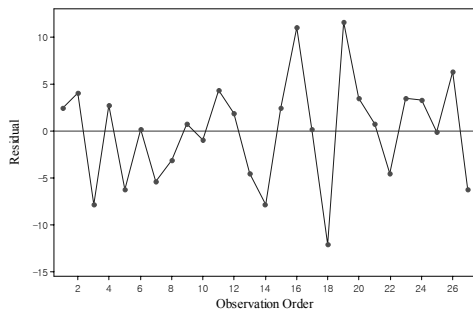


Fig. 7 Residuals versus the order of the data

Table 4 Welding condition of verification experiment

Run order	V (kV)	G (mm)	T (mm)
1	6	1.2	0.85
2	8	1.2	0.85
3	9	1.2	0.85
4	9	1.2	1.15
5	9	1.2	0.65

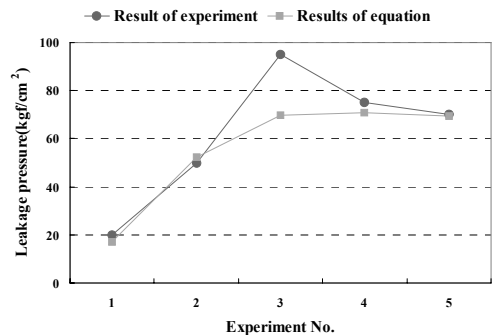


Fig. 9 Comparison plots for verification experiment and suggested equation result

Table 5 Result of verification

Run order	Leakage pressure (kgf/cm ²)		Error (%)
	Exp.	Prediction	
1	20	17.1	14.6
2	50	52.3	4.5
3	95	70.0	26.4
4	75	70.7	5.7
5	70	69.3	1.0

Error=(Exp.-Prediction)/Exp.×100

이나 실험값과 예측값의 변화가 전체적으로 동일한 경향을 보이므로 개발된 실험식을 이용하여 공정변수들의 조합에 대한 누수압력의 대략적인 경향을 파악하는 데에는 문제가 없는 것으로 판단되며 개발된 수식은 정확한 값의 예측이 아닌 경향을 파악하는데 한정적으로 사용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 전자기 펄스 용접을 이용한 이종금속 접합에서 공정변수가 접합부의 품질에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 보고된 문헌을 바탕으로 공정변수를 선정하고 누수압력을 예측할 수 있는 실험식을 개발하였다. 개발된 실험식을 통하여 공정변수 중 충전전압의 인자가 공정에 가장 영향을 미친다고 판단된다. 또한 개발된 수식은 공정변수들의 조합에 대한 누수압력의 경향을 파악하는데 적용가능하며 추후 최적의 공정변수를 선정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) Livschitz, Y., Gafriand O., and Shribman V., 2000, "Innovative Welding and Forming with Magnetic Pulse Technology," *New Materials and Development processes*, pp. 1~6.
- (2) Peinui, Z., 2003, "Joining Enabled by High Velocity Deformation," A Thesis for a Doctorate, Ohio State University, USA, pp. 183~200.
- (3) Kojima, M. and Tamaki, K., 1990, "Electromagnetic welding of tube," *The 5th International symposium of the japan welding society*, April, pp. 201~206.
- (4) Hokari, H., Sato, T., Kawauchi, K., and Muto, A., 1998, "Magnetic impulse welding of aluminum tube and copper tube with various core materials," *Journal of Japan Welding Society*, pp. 615~622.
- (5) Shribman, V., Livschitz, Y., and Gafri O., 2005, "The Application of Magnetic Pulse Welding in the Automative industry," *Advanced Transmission Design & Performance*, pp. 21~27.
- (6) Kim, S. W., Chen, C. K., Kim, S. H., 2008, "Effects of the Stand-off Distance on the Weld Strength in Magnetic Pulse Welding," *Journal of The Korean welding & Joining society*, Vol. 26, No. 6, pp. 48~53.
- (7) Okagawa, K. and Aizawa, T., 2006, "Effect of gap on seam welding by applying magnetic pressure," *Journal of JSTP*, Vol. 47, No. 7, pp. 632~636.
- (8) Park, S. H., 1990, *Design of experiments*, Min Young Sa, Republic of Korea, pp. 1~15.
- (9) Eretech, 2005, "Minitab Realese 14," Eretech, ISBN, 89-90239-07-9, pp. 574~615.
- (10) Hwang, Y. K., Chung, W. J., and Lee, C. M., 2008, "Experimental Study of Cutting Force and Surface Roughness Prediction in MQL Turning of Al 6061," *Journal of the korean society for precision engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 159~167.