

다구찌 방법을 이용한 CO₂ 자동용접의 공정변수 분석

김인주*, 박창언, 김일수, 성백섭, 손준식, 유관종, 김학형(목포대 기계공학과)

An Analysis for Process Parameters in the Automatic CO₂ Welding Using the Taguchi Method

I. J. Kim, C. E. Park, I. S. Kim, S. B. Sung, J. S. Son, K. J. You, H. H. Kim(Mech. Eng. Dept., MPU)

ABSTRACT

The robotic CO₂ welding is a manufacturing process to produce high quality joints for metal and it could provide a capability of full automation to enhance productivity. Despite the widespread use in the various manufacturing industries, the full automation of the robotic CO₂ welding has not yet been achieved partly because the mathematical model for the process parameters of a given welding task is not fully understood and quantified. Several mathematical models to control welding quality, productivity, microstructure and weld properties in arc welding processes have been studied. However, it is not an easy task to apply them to the various practical situations because the relationship between the process parameters and the bead geometry is non-linear and also they are usually dependent on the specific experimental results. Practically, it is difficult, but important to know how to establish a mathematical model that can predict the result of the actual welding process and how to select the optimum welding condition under a certain constraint.

In this research, an attempt has been made to develop an intelligent algorithm to predict the weld geometry (top-bead width, top-bead height, back-bead width and back-bead height) as a function of key process parameters in the robotic CO₂welding. To achieve this above objective, Taguchi method was employed using five different process parameters (tip gap, gas flow rate, welding speed, arc current, welding voltage) as a guide for optimization of process parameters.

Key Words : Design of Experiment(실험계획법), SN Ratio(SN비), Taguchi Method(다구찌 방법), Orthogonal Array(직교배열), Quality Characteristics (품질특성)

1. 서론

자동화 및 아크용접 기술은 로봇을 이용하여 생산성을 높이는 방법보다 용접품질을 향상시켜 생산성을 높이는 데 주력하고 있으며, 이와 같은 추세는 용접속도를 증가시켜 생산성을 향상시키는 방법이 한계에 이르렀기 때문에 품질향상을 통하여 불량 발생률을 감소시키기 위한 기술개발 방향으로 진행되고 있다. 자동 로봇 CO₂ 용접은 생산성을 향상하기 위하여 자동화를 통한 소재의 고품질을 제공하기 위한 생산 공정이다. 다양한 산업에서 사용되어지고 있음에도 불구하고, 자동 로봇 CO₂ 용접은 주어진 용접조건에서의 공정 변수에 대한 수학적 모델이 완전히 이해되고 정립되어지지 않아 부분적으로만 수행되어지고 있는 실정이다. Tarng et al. 등은 다구찌

방법을 사용하여 용접비드 최적화에 대한 연구를 수행하였는데 용접전류와 용접속도가 매우 큰 영향 인자라고 주장하였다. Carpia et al.은 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용하여 수집된 실험데이터에 대해 신경회로망을 적용하였으며, Peatterson et al. 은 함수의 근사를 위한 인공신경망의 설계 문제를 제시하였다. 제어인자로는 데이터의 양, 훈련데이터의 잡음정도, 예측데이터의 잡음정도, 인공신경망의 구조(은닉층의 수와 은닉뉴런의 수)를 선정하고, $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용하여 특성치로서 예측오차를 수집하였으며, 용접 품질, 생산성, 미세구조와 아크 용접에서의 미세조직을 제어하기 위한 여러 수학적 모델이 연구되어지고 있다. 그러나, 공정변수와 비드형상 사이의 관계가 비선형적이고 특정 실험결과에 의존하기 때문에 이러한 모델들이 실제 적용되는 것은 쉬운 일

이 아니다. 실제로 이는 매우 어려운 일이지만 실제 용접공정에서의 결과를 예측할 수 있는 수학적 모델을 정립하는 방법과 특정 제약조건 하에서 최적 용접 조건을 선정하는 방법을 아는 것이 중요하다.

본 연구에서는, 자동 로봇 CO₂ 용접에서 중요한 공정변수인 비드형상(표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이)을 분석하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이러한 연구목적을 달성하기 위하여, 공정변수의 최적화를 위한 지표로서 5개의 다른 공정변수(팁 간극, 가스 유출량, 용접속도, 아크전류, 용접전압)를 사용한 다구찌 방법을 적용하였다.

2. 실험

실험의 수행을 위하여 범용 로봇 용접기 Hitachi M6060-2를 선택하고, 용접 시험편 가공은 힘이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단 한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 한다. Fig. 1은 범용 로봇 용접기 Hitachi M6060-2를 나타내며 Fig. 2는 컨트롤러를 나타낸다.



Fig. 1 A robot manipulator employed

자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제들은 모델링, 센싱 그리고 용접공정의 제어 등이 포함되며, 이 중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 일반적인 모델링은 비용절감 및 응답요소의 주 및 상호작용 효과에 관한 요구된 정보를 제공할 수 있는 요인실험(factorial experiment)방법이 최근에 개발되어 사용되고 있으며 본 연구에서는 이 방법을 선정하였다.

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Yieldpoint (kg/mm ²)	Elongation (%)	Impact value (Kgm/cm ²)	Hardness (Hv)
SS330	34~44	20	26	6	126

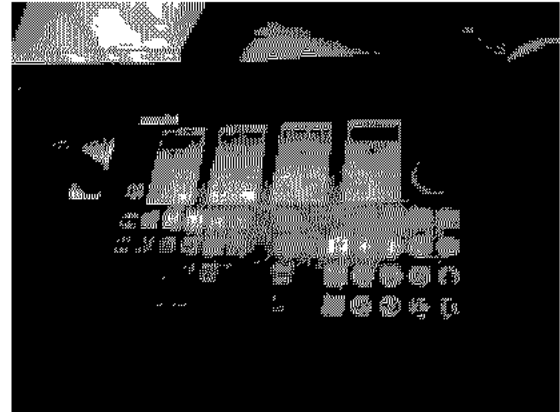
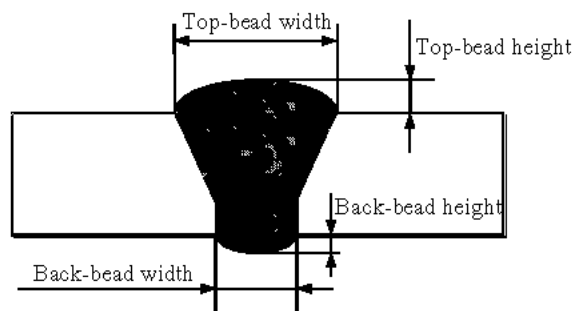


Fig. 2 Hitachi(M6060-2) process robot controller

본 실험은 완전한 요인실험으로 연구할 수 있는 n요소를 갖는 최소한의 처리 콤비네이션과 주 영향 및 상호작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 통하여 선택한 공정변수들은 팁 간극, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이며 응답요소는 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이이다. 용접재료의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Tables 1~2에 각각 나타낸다.

Table 2 Chemical composition of base metal

Element(%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
Material	0.15	0.001	0.6	0.051	0.05	0.04	0.08	0.5	Bal.



W_T : Top-bead width
 W_B : Back-bead width
 H_T : Top-bead height
 H_B : Back-bead height

Fig. 3 Schematic diagram for measurement of weld bead geometry

Fig. 3은 비드크기(표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이)의 측정을 위한 모식도를 나타낸다. 공정변수와 비드형상관계를 모델링하기 위한 로봇CO₂ 용접기는 용접을 실행하기 위한 프로그램 경로를 테스트한다. 150×200×4.5mm 일반구조용 압연강판 시험편을 용접지그에 고정하고 요구된 공정변수를 프로그램 유닛(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 용접기와 불활성가스가 공급됨에 따라 로봇은 준비상태가 되고 용접은 실행된다. 새로운 공정변수를 프로그램 유닛을 이용하여 재프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로측 중간 부분을 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한후 폴리싱(polishing)한다. 시험편 양쪽 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이를 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 stainless wirebrush 및 cloth paper #400, #800, #1500, #2000 순서로 시험편을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital etch용액을 이용하여 에칭한다. 비드크기를 정확히 측정하기 위하여 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다.

3. 다구찌 방법을 적용한 공정변수 분석

용접 실험은 2-레벨 설계(two-level design) 기법을 사용하였으며, L₃₂ 직교 배열(orthogonal array)을 사용한 비드형상에 대한 실험을 하였다. 비드형상에 대한 품질특성(quality characteristics) 즉, 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭과 이면 비드높이는 다음과 같은 망소특성의 SN비 공식으로 표현된다.

$$\eta_{\psi} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{\psi}^2)_k \right] \quad (1)$$

여기서 η_{ψ} 는 j번째 실험의 i번째 품질특성의 SN비, $(y_{\psi}^2)_k$ 는 j번째 실험의 i번째 품질특성의 k번째 측정치 제곱값을 의미한다. 식(1)을 이용하여 계산한 비드형상에 대한 각각의 SN비를 나타내었다. 각각의 비드형상에 대한 SN비의 결과를 그래프로 표현하면 Figs. 4~7과 같다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 최적의 표면 비드폭을 예측하기 위해서는 실험 2가 최상임을 알 수 있다. 또한 최적의 표면 비드높이를 위해서는 실험 12의 조건, 최적 이면 비드폭을 위해서는 실험 10의 조건이 최상임을 알 수 있다. 마지막으로 최적 이면 비드높이를 위해서는 실험 2의 실험조건이 최상임을 알 수 있다. 표면 비드높이, 이면 비드폭과 이면 비드높이는 Figs. 5~7에 나타낸다.

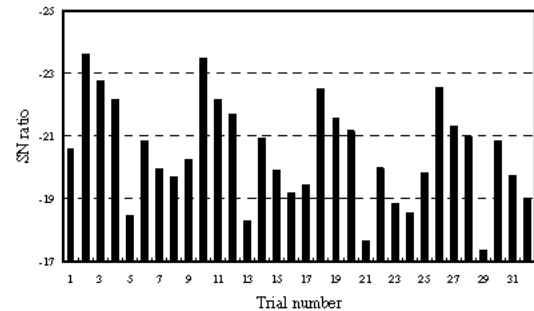


Fig. 4 SN ratio for the top-bead width

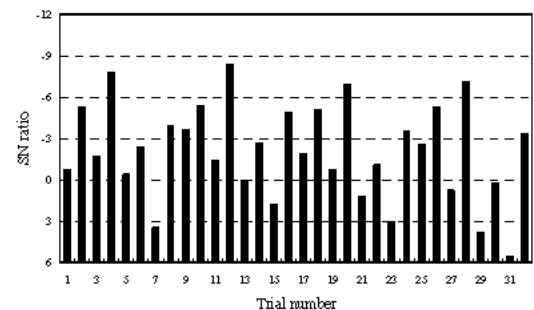


Fig. 5 SN ratio for the top-bead height

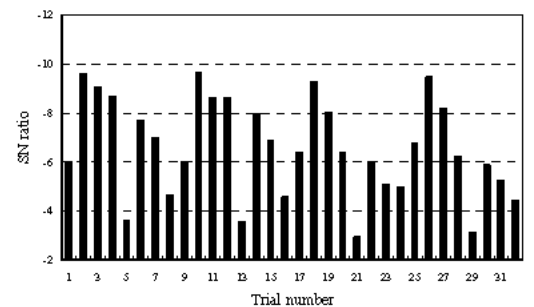


Fig. 6 SN ratio for the back-bead width

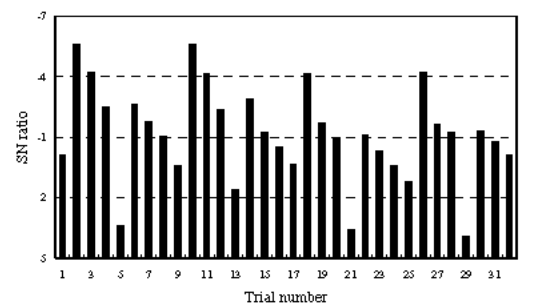


Fig. 7 SN ratio for the back-bead height

식 (1)을 이용하여 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭과 이면 비드높이에 관한 품질 특성을 얻을 수 있다. 다구찌 방법(Taguchi method)에 의한 4가지 품질 특성을 고려하여, 가중 방법(weighting

method)은 4가지 SN비를 통합함으로써 SN비 θ_j 를 구할 수 있다.

$$\theta_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \eta_{ij} \quad (2)$$

여기서, m은 품질 특성의 수이고 ω_i 는 i번째 품질 특성에 대한 가중 계수(weighting factor)이고, 표면 비드높이과 이면 비드높이에 대한 가중 계수는 0.1, 표면 비드폭과 이면 비드폭은 0.4로 결정하였다. 전체 비드형상에 대한 SN비는 Fig. 39에 나타내었다. 실험 계획이 직교배열로 작성되어 있기 때문에, 공정 변수의 각각 다른 레벨에서의 SN비와 32개의 실험에 대한 SN비의 전체 평균값을 계산하였다.

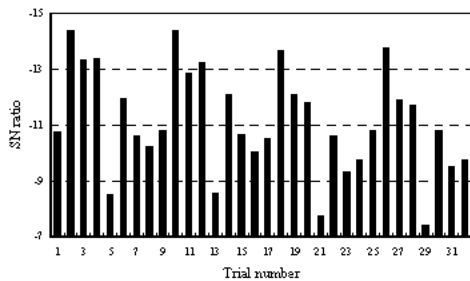


Fig. 8 SN ratio for the bead geometry

다구찌 방법에 의해 SN비가 음의 방향으로 클수록 다중 비드형상에 품질 특성이 좋아진다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 2번째 실험에서의 SN비가 가장 크고 32개의 실험 중 가장 뛰어난 다중 성능 특성을 가지고 있다.

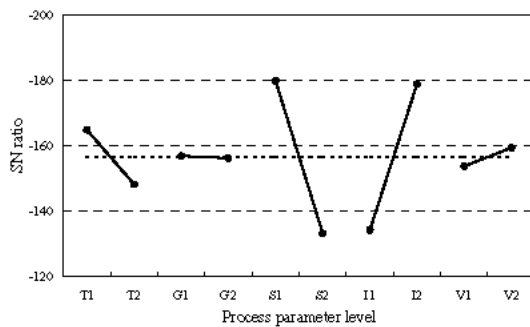


Fig. 9 SN response for the bead geometry

Fig. 9에서 점선은 SN비의 전체 평균값을 나타낸다. SN비의 값이 음의 방향으로 값이 크다는 것은 더 나은 다중 품질특성을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 여기에서, 공정변수의 최적 레벨은 T₁, G₁, S₁, I₁, V₁이다.

4. 결론

다구찌 방법을 통하여 2-레벨 L₃₂ 직교 배열 설계 기법을 사용하여 32개의 실험조건으로 비드형상에 영향을 미치는 공정변수에 대한 SN비를 분석함으로써 로봇 GMA 용접공정의 여러 복잡한 현상을 고려한 제어시스템 설계에 필요한 최적의 다중 성능을 비교 분석하였다. 최적 공정변수는 레벨 1에서 법간극, 가스 유출량, 용접속도이고 레벨 2에서 아크전류와 용접전압이다. 가스 유출량의 SN비는 SN비 평균값 주위에 분포한다는 것을 알 수 있다. 또한, 용접 속도와 용접 전류의 SN비는 레벨 변화에 비해 매우 크다. 따라서 공정변수 중 용접 속도와 용접전류는 비드형상에 많은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Khosrow Dehnad, "Quality control, robust design, and the taguchi method", Pacific Grove : Wadsworth Brooks/Cole, pp. 3 ~ . 1989.
2. M. S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design," New Jersey :Prentice-Hill, pp. 67 ~ 13, 1989.
3. S. Phadke Madhav, "Quality Engineering Using Robust Design," pp. 23 ~ 4, 1989.
4. G. Taguchi, "System of experimental design," English Trans. by L. W. Tung, Vols. 1 and 2, New York : UNIPUB/Kraus International Publications andMichigan : American Supplier Institute, pp. 16 5 ~ 22, 1987.
5. Shin Taguchi-Diane Byrne, "The taguchi approach to parameter design," ASQC Conference Award Best written Technical Paper, 1989.
6. 박성현, "“다구찌 방법을 중심으로 한 응용실험계획법”", 영지문화사, pp. 177, 1997.
7. Douglass C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", John Wiley Ssons, 1996.
8. Phillip J. Ross, "Taguchi techniques for quality engineering", McGraw-Hill, 1995.
9. J. C. McGlone, "The submerged arc butt welding of mild steel Part 1: The influence of procedure parameters on weld bead geometry",The Welding Institute Report 79/1978/PE, 1978.
10. Y.S. Tarng, W. H. Yang, "Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the taguchi method " The international jounarl of Advanced Manufacturing Technology, vol. 14 pp. 54 9 ~ 54, 1998