

다중회귀분석법을 이용하여 공정변수예측 시스템 개발
A Development of System for Prediction of Process Parameters
Using Multiple Regression Analysis

김 일 수*, 박 창 언*, 김 용 복**, 손 준 식*, 이진필*

* 목포대학교 기계공학과, ** 광주직업훈련원

I. 서 론

일반적으로 로봇 아크용접부의 품질은 자체의 외관뿐만 아니라 내구성과 안정성에 영향을 미치므로 강판의 재질과 형상에 따른 최적의 용접조건하에서 용접을 수행하여야 한다. 최적의 용접조건을 선정하기 위해서는 용접부의 두께 및 형상, 적용되는 용접장비의 종류 및 상태, 용접에 영향을 미치는 작업환경 변화에도 제각기 달라지게 되므로 많은 횟수의 실험을 수행하여야 한다. 또한 최적의 용접조건은 강판의 종류, 용접장비, 용접부 품질 등의 많은 항목으로 구성되어 있어서 대단히 방대한 분량의 데이터가 필요하다. 이러한 방대한 분량의 용접 데이터를 유효 적절하게 활용하기 위한 방법으로 용접관련 데이터베이스인 Weldsearch를 비롯해서 WPS(Word Process System) 관리용 데이터베이스 시스템, 용접인력관리용 데이터베이스 시스템, 용접시공 데이터베이스 시스템 등 다양한 용접용 데이터베이스 시스템이 개발되어 산업에 활용되고 있다^{1~3)}. 하지만 용접용 데이터베이스 시스템은 용접공정에서 필요로 하는 기술적 정보를 신속하게 제공하고, 용접중 발생하는 여러 가지 외적변화를 제어하여 균일한 용접부를 형성하는 데에는 한계가 있다⁴⁾.

본 연구는 로봇을 이용하여 GMA용접시 발생하는 여러가지 외적요인을 제어하기 위한 알고리즘을 개발하기 위하여 상업용 통계프로그램(SPSS)을 이용하여 공정변수와 비드크기와의 상호관계를 연구하고, 실험결과를 기초로 하여 곡선 방정식을 개발하였다. 개발된 실험식을 기초로 하여 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 이를 위하여 최소자승법(least square method)을 이용하여 개발된 실험식을 역변화시켰으며, 또한 개발된 알고리즘의 신뢰성 및 정확성을 평가하기 위하여 추가적인 실험을 실시하고 예측된 공정변수들과 실험값들을 비교·분석하였다.

II. 재료 및 실험방법

실험편의 재료는 200×70×12mm 두께의 SS400 일반구조용 압연강재이다. 용접재료의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Tables 1~2에 나타내었다. 본 실험을 위하여 선택한 공정변수들은 와이어직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도이며, 공정변수들과 한계는 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield point (kg/mm ²)	Elongation (%)	Impact value (kgm/cm ²)	Hardness (Hv)
SS400	43.5	32.5	25	6.2	128

Table 2 Chemical composition of base metal

Material	Element(%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
SS 400	0.15	0.0	0.697	0.013	0.007	0.041	0.087	0.503	Bal.

여기서 아크전류는 solid wire 와이어 직경에 크게 영향을 받으므로, 와이어 직경 0.9 mm 인 경우 아크전류는 90, 190, 250 Amp이며, 반면에 직경이 1.2 및 1.6 mm인 경우 아크전류는 180, 260, 300 Amp를 선정한다. 또한 보호가스는 Ar 80% + CO₂ 20%를 사용하였으며 contact tube의 선단으로부터 모재(base metal) 까지의 거리 CTWD(Contact Tube Work Distance)는 20mm를 선정하였다.

Table 3 Welding Parameters and Limits

Parameter (Unit)	Limits
Wire diameter (mm)	0.9, 1.2, 1.6
Welding speed (mm/min)	250, 330, 410
Arc current (Amp)	90, 190, 250, 180, 260, 360
Welding voltage (Volt)	20, 25, 30,

실험을 위하여 로봇 GMA아크용접기는 6축 로봇(ABB1500)을 선택하고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전달한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 한다. 시험편을 용접지그에 위치한 다음, 실험디자인에서 선정된 공정변수를 프로그램 유닛(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 그 후 로봇을 이용하여 용접을 실시한다. 새로운 공정변수값은 프로그램 유닛을 이용하여 재 프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭 후 폴리싱(polishing)한다. 비드크기를 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭 한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경 및 profile projector로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 비드크기(비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드면적)를 측정한다.

III. 실험결과 및 고찰

최소 자승법⁵⁾을 이용하여 적절한 비드크기가 주어지면 이 비드크기로부터 최적의 공정변수들을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하기 위해서 공정변수들과 비드크기의 관계는 다음과 같이 나타내었다.

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \quad (1)$$

여기서

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad \theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi(x_1) \\ \vdots \\ \varphi(x_1) \end{bmatrix}$$

앞에서 개발된 실험식들⁶⁾을 변형시키면 다음과 같다.

$$\ln W^\nabla = 0.4294 \ln D + 0.7083 \ln V + 0.3518 \ln I - 0.4590 \ln S \quad (2)$$

$$\ln H^\nabla = -0.1245 \ln D - 0.7182 \ln V + 0.6393 \ln I - 0.2394 \ln S \quad (3)$$

$$\ln P^\nabla = -0.5668 \ln D + 0.0130 \ln V + 1.4005 \ln I - 0.3640 \ln S \quad (4)$$

$$\ln A_T^\nabla = 0.3967 \ln D + 0.7541 \ln V + 1.0879 \ln I - 0.6805 \ln S \quad (5)$$

여기서

$$W^\nabla = \frac{W}{0.81193}, \quad H^\nabla = \frac{H}{2.14899}, \quad P^\nabla = \frac{P}{0.00490}, \quad A_{T^\nabla} = \frac{A_T}{0.08539}$$

위의 방정식들은 다음 벡터로 정의하여 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$y_1 = \theta_1 \Phi_1 \quad (6)$$

여기서

$$y_1 = \begin{bmatrix} \ln W^\nabla \\ \ln H^\nabla \\ \ln P^\nabla \\ \ln A_{T^\nabla} \end{bmatrix}, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} \ln D \\ \ln V \\ \ln I \\ \ln S \end{bmatrix}, \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} 0.4294 & 0.7083 & 0.3518 & -0.4590 \\ -0.1245 & -0.7182 & 0.6393 & -0.2394 \\ -0.5668 & 0.0130 & 1.4005 & -0.3640 \\ 0.3967 & 0.7541 & 1.0879 & -0.6805 \end{bmatrix}$$

식(6)을 이용한 시스템결정인자는

$$\begin{bmatrix} \ln D \\ \ln V \\ \ln I \\ \ln S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.9481 & -0.1005 & -2.2775 & 4.5911 \\ 0.1143 & -1.1589 & 0.4166 & 0.1078 \\ -4.6543 & -0.6483 & -0.7471 & 3.7670 \\ -10.1985 & -2.3793 & -2.0604 & 7.3486 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln W^\nabla \\ \ln H^\nabla \\ \ln P^\nabla \\ \ln A_{T^\nabla} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)로부터 와이어 직경, 아크전압, 용접전류, 용접속도의 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ln D = -4.9481 \ln W^\nabla - 0.1005 \ln H^\nabla - 2.2775 \ln P^\nabla + 4.5911 \ln A_{T^\nabla} \quad (8)$$

$$\ln V = 0.1143 \ln W^\nabla - 1.1589 \ln H^\nabla + 0.4166 \ln P^\nabla + 0.1078 \ln A_{T^\nabla} \quad (9)$$

$$\ln I = -4.6543 \ln W^\nabla - 0.6483 \ln H^\nabla - 0.7471 \ln P^\nabla + 3.7670 \ln A_{T^\nabla} \quad (10)$$

$$\ln S = -10.1985 \ln W^\nabla - 2.3793 \ln H^\nabla - 2.0604 \ln P^\nabla + 7.3486 \ln A_{T^\nabla} \quad (11)$$

여기서 $W^\nabla, H^\nabla, P^\nabla, A_{T^\nabla}$ 은 비드폭, 비드높이, 용입길이, 비드면적의 함수를 나타낸다.

개발된 모델들은 로봇 GMA용접의 용접선 추적(seam tracking)과 같은 용접자동화 및 제어알고리즘으로 이용할 수 있으며, 특히 다양한 용접조건에서도 쉽게 임의의 비드형상에 최적의 공정변수 예측이 가능하다는 특징을 갖고 있다⁷⁻⁸⁾.

개발된 알고리즘의 신뢰성을 검증 및 평가하기 위하여 임의로 10개의 공정변수들 값을 선정하여 동일 용접조건 및 비드크기 측정방법을 이용하여 추가적인 실험을 실시하였다.

Fig. 1은 개발한 곡선 방정식을 이용하여 예측한 10개의 와이어 직경과 실험에 이용된 와이어 직경값과 비교한 결과를 각각 나타낸다. 1, 3, 5번 실험조건에서 미세한 오차(error)가 존재하지만 예측된 결과와 실험조건과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 곡선 방정식을 이용하여 예측한 아크전압 값과 실험조건 값과 비교결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 따르면 곡선 방정식에서 6 및 10번의 예측 값에 오차가 존재하지만 상당히 정확하게 아크전압을 예측함을 알 수 있었다. Fig. 3은 식(10)을 이용하여 용접전류 크기를 실제 예측한 결과와 실험조건 값에 대해서 그래프로 나타내었다. 용접전류 크기들의 예측값들이 비록 미세한 오차가 존재하지만 실제 값들과 잘 일치함을 Fig. 3으로부터 알 수 있다. 역모델 식(11)을 이용

하여 예측한 용접속도와 실측치를 비교 분석한 분포도 그래프를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 1, 3, 5, 9번 실험조건에서 상당한 error가 존재함을 알 수 있다.

결론적으로 임의의 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 예측할 수 있는 역 곡선 방정식 모델에는 미세한 오차가 존재하고 있으며, 이 오차들은 기계적인 설정오차 및 비드형상에서 오는 측정오차 때문이라 생각되며, 앞으로 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 앞으로 산업체에 적용하기 위해서는 맞대기 혹은 겹치기 용접에서 이용될 수 있도록 추가적인 실험 및 용접방법 선정이 필요하며, 현재 이에 대한 연구가 진행중이다.

IV. 결 론

로봇GMA 용접기를 이용하여 bead-on-plate용접을 실시한 후 광학 현미경 및 Profile Projector를 이용하여 비드크기를 측정하였다. 최소자승법을 이용하여 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수 예측 모델을 개발하였으며, 추가적인 실험을 통하여 개발된 알고리즘의 신뢰도 및 정확성을 비교, 분석하였고 계산한 이론값과 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 본 연구의 결과는 산업현장에서 균일한 비드크기를 보장하기 어려운 부분에 효과적으로 제어함으로써 안정된 용접결과를 얻을 수 있는 용접의 실시간 계측 및 제어 시스템 그리고 전문가 시스템의 구성에 가장 효과적인 수단으로 이용될 것으로 예상된다. 개발된 시스템을 이용하여 용접함으로써 용접 데이터 및 작업의 표준화, 작업자의 전문가에 대한 의존도 경감, 새로운 용접조건 결정을 위한 실험 횟수 감소 및 기존 데이터의 공유로 용접 작업에 있어서의 생산성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. T. Araya and S. Saikawa, "Recent actives on sensing and adaptive control of arc welding", 3rd Int. Con. on Trends in Welding Research, pp. 833~842, (1992)
2. S. Budgifvars, "Computer Aided Welding (CAW) The State-of-the-Art", IIW Doc, Vol. XII-1226, pp. 325~360, (1991)
3. R. Hecht-Nielsen, "Neurocomputing Picking the human brain", IEEE Spectrum Vol. 25, No. 3, pp. 2136~2141, (1988)
4. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, No. 1, pp. 116~132, (1985)
5. C. L. Lawson and R. J. Hanson, "Solving least squares problems", Englewood Cliffs, NJ, USA, pp. 471~501, (1974)
6. 김용복, "임의의 비드형상을 위한 최적의 공정변수 예측 알고리즘 개발에 관한 연구", 석사학위논문, 목포대학교, (1998)
7. 김일수, "GMA 용접에 최적의 용접비드 형상을 예측하기 위한 수학적 모델 개발", 大韓 熔接學會誌, Vol. 15 No. 3, pp. 118~126, (1997)
8. J. C. McGlone, and D. B. Chadwick, "The submerged arc butt welding of mild steel Part 2: The prediction of weld bead geometry from the procedure parameters", The Welding Institute Report, pp. 80~132, (1980)

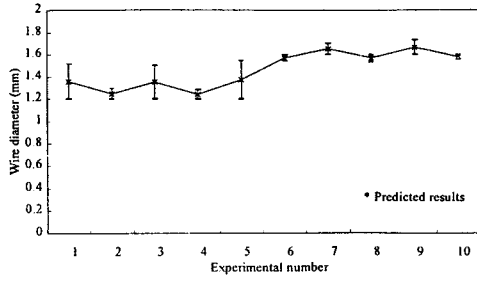


Fig. 1 Comparison of measured and predicted wire diameter using curvilinear equation

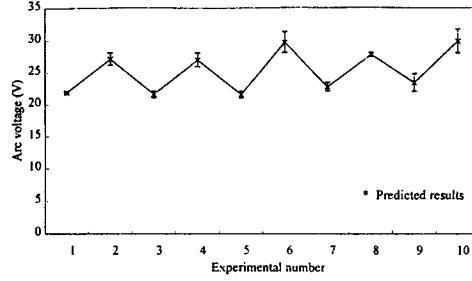


Fig. 2 Comparison of measured and predicted arc voltage using curvilinear equation

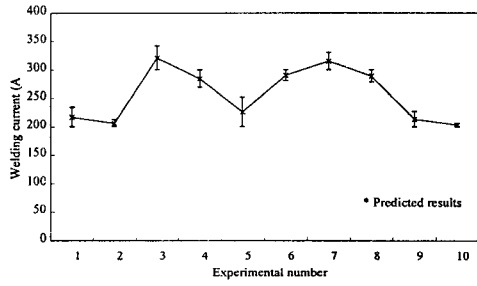


Fig. 3 Comparison of measured and predicted welding current using curvilinear equation

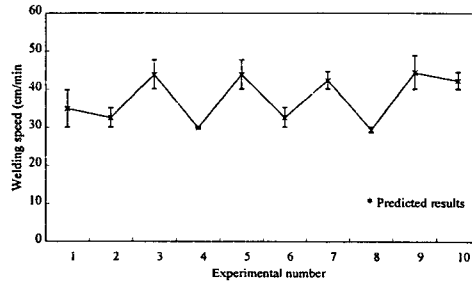


Fig. 4 Comparison of measured and predicted welding speed using curvilinear and linear equation