

# 아크로봇 용접 공정변수 예측시스템에 다중회귀 분석법의 사용

이정익<sup>1\*</sup>

## Usage of Multiple Regression Analysis in Prediction System of Process Parameters for Arc Robot Welding

Jeong-Ick Lee<sup>1\*</sup>

**요 약** Adaptive 아크 로봇 용접을 위한 용접 공정 변수와 용접 부 형상 사이에 상관관계를 조사하는 것은 중요한 일이다. 하지만 맞대기 용접의 공정에 있어 갭으로 인해 정확한 이면비드를 예측하는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서는, 먼저 맞대기 용접을 통해 외부 용접 조건과 용접 비드 형상사이 상관관계가 규명되었고, 이를 응용하여 적절한 이면비드를 얻기 위한 개발이 이루어졌고, 이 연구결과는 산업 전 분야에 폭넓게 사용될 수도 있다. 다중회귀분석법이 공정변수 예측을 위한 연구방법으로 적용되었다. 예측방법의 결과들 또한 비교 및 분석이 이루어졌다.

**Abstract** It is important to investigate the relationship between weld process parameters and weld bead geometry for adaptive arc robot welding. However, it is difficult to predict an exact back-bead owing to gap in process of butt welding. In this paper, the quantitative prediction system to specify the relationship external weld conditions and weld bead geometry was developed to get suitable back-bead in butt welding which is widely applied on industrial field. Multiple regression analysis for the prediction of process parameters was used as the research method. And, the results of the prediction method were compared and analyzed.

**Key Words** : Gas Metal Arc Welding(가스 메탈 아크 용접), Back-Bead(이면 비드), Width of Back-Bead(이면 비드 폭), Depth of Back-Bead(이면비드 높이), Laser Vision Sensor(레이저 비전 센서), Multiple Regression Analysis(다중 회귀 분석)

### 1. 서론

로봇을 이용한 가스 메탈 아크(GMA) 용접은 기존의 일반 아크용접을 개량한 기술로서 보호가스, 전류, 전압, 용접속도, 와이어의 크기와 같은 용접 변수를 적절하게 선택함으로써, 원하는 제품의 생산과 용이한 자동화 등 경제적인 장점이 있어 기계구조물 제작 분야에 널리 사용되고 있다. 이러한 로봇 아크 용접을 이용한 금속재료의 접합에 있어서 고품질의 접합부를 만들어 내기 위해서 이면비드의 주요부 형상 예측 및 용접성을 정확히 평가하는 것이 중요하다.[1]

용접된 부재의 단면을 보면 이와 관련한 품질평가의 주요 기준인 용접부 단면형상을 볼 수 있다. 지금까지의 연구 예는, 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법에 의한 용융부의 거동 예측[2], 용접 속도와 단락 주파수의 관계 규명을 통한 이면비드 제어[3], 용접비드형상의 수학적 모델

에 의한 예측 및 용접공정 변수와 용접 비드폭의 상관관계 규명[4-5], 용접공정 변수로 용접물 표면상 5점의 온도를 이용한 용융지 크기를 예측 제어연구[6]등 용접공정변수와 비드 형상의 상관관계를 규명하고 비드 형상의 예측 및 제어를 위한 많은 연구가 수행된 바 있다. 최근에는 후판의 시편 상 용접에서 용접공정 변수를 이용하여 이면비드를 제어하려는 제한적인 연구로부터 맞대기 용접에서 용접공정 변수에 루트간극을 추가하여 이면비드의 용접성을 제어하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 본 연구에서는 맞대기 GMA용접에서 외부 용접변수에 의해서 이면비드의 기하학적 형상을 효과적으로 제어하기 위한 다중회귀분석법[7-8]에 의한 이면비드의 형상변수에 따른 실험식들을 개발하였다. 그리고, 이를 역변환시켜 실제 용접공정에서 원하는 이면비드 형상을 얻기 위해 공정변수를 예측하는 회귀식을 개발하였다. 또한, 이 회귀식에 실험을 통해 얻은 데이터들을 이용하여 회

<sup>1</sup>인하공업전문대학 기계설계과(교수)

접수일 08년 3월 4일

수정일 08년 6월 15일

\*교신저자: 이정익(jilee@inhac.ac.kr)

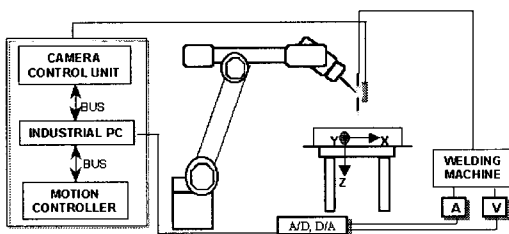
재제정일 08년 6월 16일

귀 데이터와 비회귀 데이터에 적용시켜봄으로서, 공정변수 예측시스템[9-11]을 실시간 적용제어에 사용할 수 있음을 보여주었다. 그러나, 본 연구에서는 GMA용접에서 정해진 용접조건(전류, 전압, 속도)과 비드형상(갭, 이면비드 폭, 이면비드 깊이)의 관계를 회귀분석법을 사용해 도출하고 이를 역변환시켜 원하는 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 도출하는 공정변수 예측 시스템을 부분적으로 개발하는 것이 독창적인 아이디어이기는 하지만, 이것을 표준화시켜서 표준화된 회귀 데이터와 비회귀 데이터도 만족하는 일반화된 시스템을 만들기 위해서는 보다 많은 실험과 연구가 필요할 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

실험장치는 로봇 장치, 용접장비 및 이면비드 계측용 비전 장비로 구성된다. 로봇 장치로는 3축 모션제어기를 이용하였다. 용접기는 CO<sub>2</sub> 아크 용접기로 100% CO<sub>2</sub>를 보호가스로 사용하였다. 와이어는 지름 1.2mm에 최대 정격 2차 전류가 350A인 정전압 전원방식의 용접기를 사용하였다. 이면비드의 갭, 폭과 깊이 검출을 위한 비전 장치로는 레이저 비전 시스템을 사용하였으며, 이는 비전 시스템 컨트롤러와 비전 카메라로 구성되어 있다. 이 비전 컨트롤 시스템에는 PC기능이 있으므로 비전 처리, 비전 카메라 제어 기능 및 다중회귀분석을 수행할 수 있다. 실험을 위한 장치 개략도는 아래 그림 1에 나타내었다.

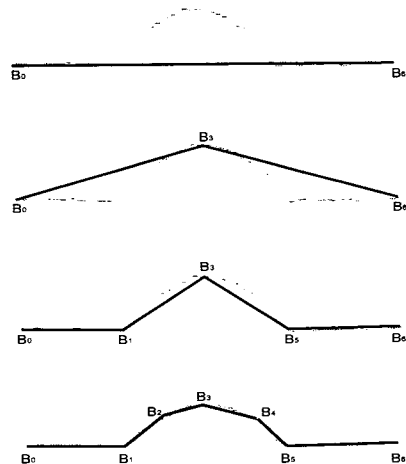


[그림 1] 이면비드의 예측을 위한 시스템 개략도

### 2.2 실험 데이터를 얻기 위한 비전처리

그루브 갭에 따른 이면비드의 폭과 깊이는 비전 센서로부터 측정된 데이터에서 얻어진다. 레이저 비전센서로부터 획득한 용접 비드의 형태인 레이저 띠(laser stripe)는 256개의 픽셀들로 이루어져 있다. 그루브 갭, 이면비드의 폭, 깊이 측정을 위하여 우선 점들의 집합을 선 또는 곡선 성분들로 표현해야 한다. 선분에 의한 윤곽선으로 약근시키려면 먼저 프로파일의 분할화가 필요하며 이

에 만족할만한 다각형 선분을 얻기 위해서는 절점을 추출해야 한다. 분할법은 양쪽 끝점으로부터 절점을 찾아내는 방법이다. 그림 2는 윤곽선 표현을 위한 분할법을 나타낸 것으로 첫 번째 에지점 B<sub>0</sub>와 마지막 에지점 B<sub>6</sub>을 직선으로 연결하고 이 선분에서 가장 멀리 떨어진 에지점을 찾아 B<sub>3</sub>로 한다. 이와 같은 작업을 반복적으로 수행해 B<sub>1</sub>과 B<sub>5</sub>의 에지점을 구하고, B<sub>1</sub>과 B<sub>5</sub>에서 가장 먼 거리의 에지점 B<sub>2</sub>를 구하고, B<sub>2</sub>와 B<sub>5</sub>에서 가장 먼 거리의 에지점의 직선으로부터 수직거리를 계산하고, 모든 점에 대한 직선거리가 임계치보다 작으면 프로그램은 중지되며, 그렇지 않을 경우 이상과 같은 프로그램 작업을 반복적으로 수행한다. 본 연구에서는 임계치 최소값을 2 mm로 두었으며, 이 길이 내 포함되는 점을 에지점으로 삼았다. 생성되는 에지점은 최대 17개까지 생성될 때까지 수행하도록 하였다. 본 연구에서는 정밀도 0.05 mm의 비전 센서로 측정하였다.



[그림 2] 비드 표면 윤곽선 표현을 위한 분할법

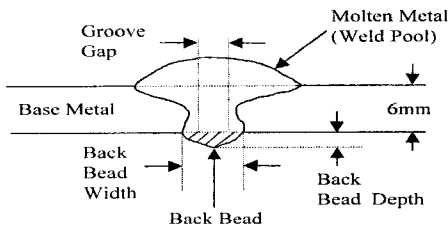
### 2.3 실험 방법

실험에서 사용된 시편(180mm(W) X 100mm(L) X 6mm(t))은 SS41 연강을 두 장 맞대기 용접한 것이다. 실험에 사용된 모재의 기계적 특성 및 화학적 조성은 SS41에 따른다. 용접변수 종류 및 용접조건은 표 1에 나타내었다. 위의 조건을 조합하여 72가지 실험을 각 3회씩 수행 후 각 조건마다 평균하여 72개의 조건에 대한 데이터를 얻었다. 이들 각각의 실험조건과 시편 이면의 용접부 위 길이방향 100mm중 최초, 최후 양측 10mm를 제외한 80mm를 비전센서로 계측하여 용접될 이면비드의 갭의 평균, 이면비드의 폭과 깊이 값을 구하여 이면비드 공정변수 예측시스템을 구성하기 위한 데이터로 사용하였다.

이면비드의 개략도는 그림 3과 같다. 프로파일 데이터 측정에 사용된 레이저 비전센서는 출력 40mW, 파장 680nm의 레이저 다이오드와 대역 통과 필터가 설치되어 있고, 한 프로파일 당 256개의 점을 샘플링하며 초당 40 프로파일링을 수행할 수 있다. 용접을 위한 보호가스의 유량은 15 l/min, 용접팁과 작업물(모재) 사이 거리는 15mm로 정하여 실험하였다.

[표 1] 용접 변수 및 조건

variables	units	conditions
welding current	ampere	200, 210, 220, 230
arc voltage	volt	24, 25
welding speed	mm/sec	4, 5, 6



[그림 3] 이면비드의 폭과 깊이에 대한 개략도

### 3. 다중회귀 분석법의 결과 및 고찰

#### 3.1 용접 공정변수에 따른 이면비드 형상도출

용접 입력변수인 아크 전압, 용접 전류, 용접 속도에 따른 이면비드의 형상인 그루브 갭, 이면비드 비드 폭, 깊이와는 관계를 갖고 있을 것으로 추측된다. 본 연구에서는 먼저, 이 변수들 관계를 검토하는 비드 예측 회귀 모델을 만들었다. 이들 예측 회귀 모델을 검토하는 방법으로는 통계적인 방법인 다중회귀분석법을 사용하였다. 회귀분석에 사용된 독립변수들로는 아크 전압, 용접 전류와 용접 속도 3개이다. 회귀분석에 사용된 데이터는 독립변수의 조건을 조합하여 해석단계 데이터의 5가지 조건과 검증단계의 데이터 5가지 조건을 사용하여 개발된 회귀 모델의 적합성을 검증하였다. 본 회귀분석에는 상용 통계 프로그램인 SPSS를 사용하였다. 용접 공정변수들과 이면비드 형상과의 상관계수는 표 2와 같다. 표 2는 독립변수 및 종속변수들에 대한 데이터를 함께 해석한 결과로서 상관계수에서 서로 같은 것끼리의 상관관계는 1(100%)이며, -1에 가까울수록 두 변수 간에 양의 상관관계가 있으며, -1에 가까울수록 두 변수 간에 음의 상관관계가 있음을 의미한다.

[표 2] 이면 비드의 용접 변수와 공정 변수간의 상관관계

	current	voltage	speed	gap	width	depth
current	1					
voltage	-0.037	1				
speed	0.018	0.014	1			
gap	0.836	0.783	-0.890	1		
width	0.812	0.765	-0.932	0.879	1	
depth	0.858	0.751	-0.887	0.876	0.880	1

[표 3] 모델 요약 및 예측 오차

dependent variable	model summary	prediction error rate
gap of back-bead	adjusted R <sup>2</sup>	0.873
	standard error of the estimate	0.1622
	analysis error of non-regression data	8.92 %
	analysis error of regression data	6.53 %
width of back-bead	adjusted R <sup>2</sup>	0.948
	standard error of the estimate	0.2206
	analysis error of non-regression data	7.35 %
	analysis error of regression data	5.52 %
depth of back-bead	adjusted R <sup>2</sup>	0.888
	standard error of the estimate	0.1651
	analysis error of non-regression data	8.51 %
	analysis error of regression data	6.15 %

GMA 맞대기 용접에서 용접 입력변수인 아크 전압, 용접 전류, 용접 속도에 따른 이면비드의 형성은 그루브 갭, 이면비드 용접부위의 비드 폭, 깊이와는 어느 정도 상관관계를 갖고 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 아크 전압, 용접 전류, 용접 속도와 이면비드 용접부위의 갭, 폭과 깊이와의 상관관계를 검토하는 비드 예측 회귀 모델을 만들었다. 이들 예측 회귀모델 검토방법으로는 통계적인 방법인 다중회귀분석법을 사용하였다. 회귀분석에 사용하는 독립변수로는 용접기에서 공급되는 아크 전압, 용접 전류와 3축 모션제어에 의한 용접속도이다. 회귀분석에 사용된 데이터는 독립변수의 조건을 조합하여 회귀분석에 사용되었던 5가지 조건과 임의의 5가지 조건을 사용하여 개발된 실험식들의 회귀모델 적합성을 검증하였다. 또한, 이들의 결과는 표 3과 같다.

표 2에서 그루브 갭, 이면비드의 폭과 깊이의 경우 모두에서 용접 속도, 용접 전류와 아크 전압의 순서로, 상관

관계가 있음을 보여주고 있다. 회귀분석의 신뢰성을 보장하기 위하여 회귀 모델 계수의 유의확률이 0.05보다 높은 변수를 제외시키는 방법에 따라 수정계수를 구하였다. 이에 대한 그루브 갭, 이면비드 용접 폭, 용접 깊이에 대한 모델의 요약 및 예측 에러율 등의 결과를 표 3에 표시하였다. 다음 식 (1), (2), (3)은 이면비드, 변수들을 회귀식의 형태로 얻은 것이다.

$$G = 0.849 + (I*0.617) + (V*0.622) + (S*-0.745) \quad (1)$$

$$W = 1.334 + (I*5.039) + (V*5.981) + (S*-6.671) \quad (2)$$

$$D = 0.458 + (I*3.036) + (V*2.697) + (S*-3.246) \quad (3)$$

여기서,

G: gap to be welded, W: width of back-bead, D: depth of back-bead, I: welding current,

V: arc voltage, S: welding speed

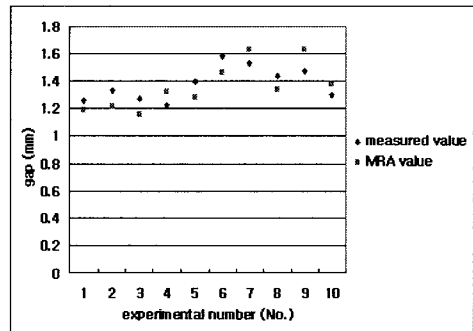
[표 4] 다중 회귀 분석의 중요성 레벨

	constant	welding current	arc voltage	welding speed
P-value of gap	0.021	0.043	0.004	0.012
P-value of width	0.003	0.030	0.015	0.009
P-value of depth	0.021	0.005	0.003	0.015

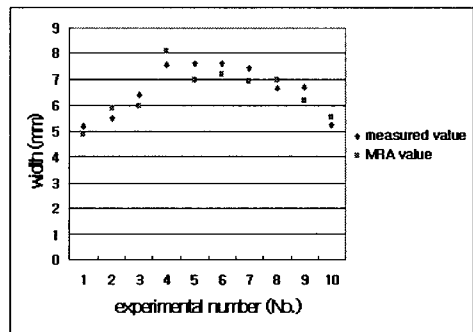
표 4는 다중회귀분석에 의한 유의성 수준을 나타낸 것이다. 본 해석에서 유의성 수준이 0.05이상을 넘으면 독립변수와 종속변수의 유의성이 떨어진다고 하고 독립변수를 제거시키는 방법으로 회귀 모델식을 구성한다. 선형 회귀 모델을 이용하여, 실험에 사용했던 데이터를 통해 예측하였을 경우, 측정치와 다중회귀분석법에 의한 예측치를 비교하여 그루브 갭, 이면비드의 폭과 깊이를 나타낸 것이 그림 4, 5, 6이다. 실험횟수 가운데 처음 5개는 해석단계의 데이터이고 나머지 5개는 검증단계의 데이터를 사용하였다.

표 3에서 그루브 갭의 경우 모델의 수정계수는 0.873을 표준추정오차는 0.1622을 나타낸다. 해석단계 데이터의 에러율은 8.92 %를, 검증단계 데이터의 에러율은 6.53 %를 나타내었다. 이면비드의 폭의 수정계수는 0.948을, 표준추정오차는 0.2206을 나타낸다. 해석단계 데이터의 에러율은 7.35 %를, 검증단계 데이터의 에러율은 5.52 %를 나타내었다. 또한, 이면비드의 깊이의 경우 모델의 수정계수는 0.888을 표준추정오차는 0.1651을 나타낸다. 해

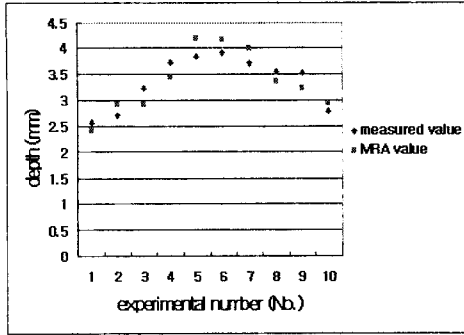
석단계 데이터의 에러율은 8.51 %를 검증단계 데이터의 에러율은 6.15 %를 나타내었다. 해석결과 이면비드 변수 세 가지(그루브 갭, 이면비드의 폭 및 깊이) 결정계수를 보면 최하 87 % 이상의 높은 값을 나타냄으로써 용접공정변수들이 이면비드의 형상에 큰 영향을 미치며, 정확한 이면비드 예측이 어느 한계 내에서 가능한 모델임을 알 수 있었다. 오차를 계산에서는 최고 9 % 미만의 값을 보여줌으로써 비교적 정확한 회귀모델이라 할 수 있다. 3가지 결과 가운데서 그루브 갭이 가장 낮은 수정계수를 나타내며 해석단계 및 검증단계에서도 에러율이 다른 변수에 비해 높은 값을 나타냄으로써, 예측하기 가장 어려운 변수임을 알 수 있었다. 실제 용접의 적용 면에서는 3가지 평균오차들이 검증단계 및 해석단계 모두에서 90 % 이상의 정확도를 가지므로 이 회귀식으로 원하는 이면비드 형상을 얻기 위한 용접 공정변수 예측시스템을 생각하게 되었다.



[그림 4] 실제 측정치와 다중 회귀 분석데이터 간의 이면비드 그루브 갭 비교



[그림 5] 실제 측정치와 다중 회귀 분석데이터 간의 이면비드 폭 비교



[그림 6] 실제 측정치와 다중 회귀 분석데이터 간의 이면 비드 깊이 비교

### 3.2 이면비드 형상에 따른 용접 공정변수 도출

앞서 용접공정 변수를 통해서 맞대기 용접의 임의의 갭에서 원하는 형상의 비드를 얻을 수도 있으나, 실제 로봇 GMA용접에서 용접선 추적과 같은 용접 자동화 및 제어 알고리즘에 이용할 수 있으며, 다양한 용접 조건에서도 쉽게 임의의 비드형상을 위한 최적의 공정변수 예측을 가능하게 하기 위해서 다음과 같은 연구방법을 시도하였다. 식 (1), (2), (3)을 다음 벡터로 정의하여 다음과 같은 간단한 행렬의 형태로 바꿀 수 있다.

$$S = T_M P \tag{4}$$

여기서,

S: bead shape matrix,  $T_M$ : transformation matrix,

P: welding parametric matrix,

$$S = \begin{pmatrix} G & - & 0.849 \\ W & - & 1.334 \\ D & - & 0.458 \end{pmatrix},$$

$$T_M = \begin{pmatrix} 0.617 & 0.622 & -0.745 \\ 5.039 & 5.981 & -6.671 \\ 3.036 & 2.697 & -3.246 \end{pmatrix},$$

$$P = \begin{pmatrix} I \\ V \\ S \end{pmatrix} \tag{5}$$

여기서,

G: gap to be welded, W: width of back-bead, D: depth of back-bead, I: welding current,

V: arc voltage, S: welding speed

원하는 비드 형상을 얻기 위한 용접 공정변수 예측 시스템에 사용될 회귀 모델식을 유도하기 위해 앞서 식 (4)을 역 변환시키면 다음과 같은 하나의 식으로 표현될 수 있다.

$$P = T_M^{-1} S \tag{6}$$

또한 식 (6)에 의해 얻어지는 공정변수 예측 모델식은 다음 행렬의 형태로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} I \\ V \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -13.9708 & 0.0957 & 3.0098 \\ -38.2656 & 2.5438 & 3.5545 \\ -44.8607 & 2.2031 & 5.4603 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G - 0.849 \\ W - 1.334 \\ D - 0.458 \end{pmatrix} \tag{7}$$

식 (7)로 부터 시스템 공정변수를 위해 사용되는 용접 전류, 아크 전압, 용접 속도의 방정식은 다음과 같이 식 (8), (9), (10) 나타낼 수 있고, 이들의 해석결과는 표 3과 같다.

$$I = 10.3551 + (-13.9708 * G) + (0.0957 * W) + (3.0098 * D) \tag{8}$$

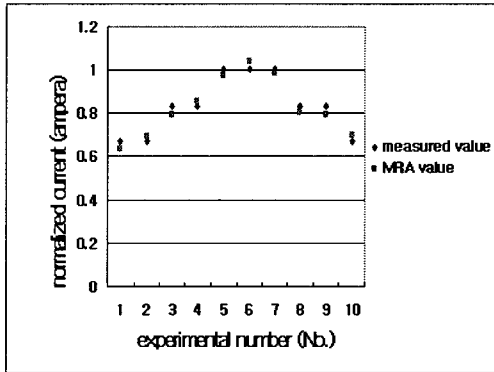
$$V = 27.4661 + (-38.2656 * G) + (2.5438 * W) + (3.5545 * D) \tag{9}$$

$$S = 32.6470 + (-44.8607 * G) + (2.2031 * W) + (5.4603 * D) \tag{10}$$

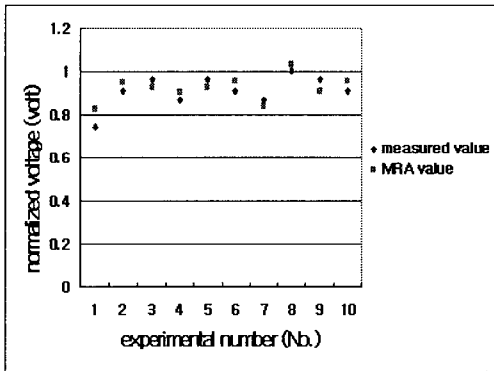
개발된 알고리즘의 신뢰성을 검증하고 평가하기 위해서 앞서 3.1절에서 사용했던 검증단계의 데이터 5개와 해석단계 데이터 5개를 사용하여 역변환된 다중회귀 모델 식 들로 해석하였다. 또한, 이들의 검증단계 데이터와 해석단계 데이터들을 표준화된 측정치와 다중회귀분석값으로 비교하였다. 이들에 대한 표준화된 용접 전류, 표준화된 아크 전압, 표준화된 용접 속도에 대한 데이터들의 비교선도가 아래 그림 7, 8, 9에 나타내었고, 이들의 검증단계의 에러율과 해석단계의 에러율을 표 5에 나타내었다. 표 5의 결과로 보아 모든 데이터의 경향을 파악하기는 어려우나 표준화된 용접 전류, 표준화된 아크 전압, 표준화된 용접 속도로 원하는 이면비드 형상을 얻으려 함에 있어 예측 에러율이 최고 6.5 %이하를 나타내줌으로써 실제 원하는 비드 형상을 얻기 위한 공정 변수를 예측하는 것이 가능함을 알 수 있었다. 해석 결과로는 표준화된 용접 속도의 예측 에러율이 가장 크며, 표준화된 아크 전압, 표준화된 용접 전류의 순서로 오차가 작아짐을 보여주었다. 결과적으로, 맞대기 용접의 용접 공정변수시스템을 구성함에 있어 용접 속도가 가장 예측하기 어려운 변수로 고려할 수 있었다.

본 연구는 비전센서를 통해 얻어지는 임의의 그루브 갭과 탄산가스 아크 용접의 원하는 이면비드 형상을 얻기 위한 용접 공정변수 예측 회귀 모델식을 얻는데 목적

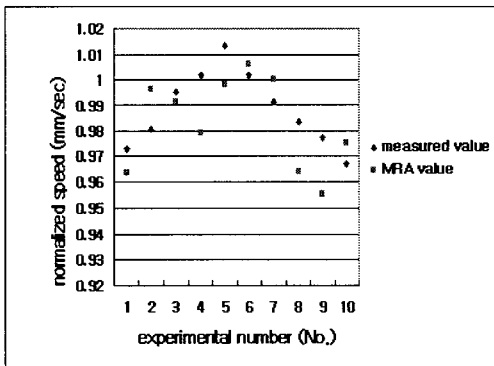
이 있다. 즉, 통계적인 다중회귀분석법으로 용접 공정변수들과의 상관관계를 해석하고 회귀식의 역변환을 이용해 이면비드 변수를 통한 용접 공정변수의 회귀식을 얻는데 있다.



[그림 7] 표준화된 전류 값과 다중회귀 분석 전류 값과의 용접 전류 비교



[그림 8] 표준화된 전압 값과 다중회귀 분석 전압 값과의 아크 전압 비교



[그림 9] 표준화된 속도 값과 다중회귀 분석 속도 값과의 용접 속도 비교

[표 5] 종속 변수와 에러율

dependent variables	error rate	
normalized welding current	error rate for the verification level	4.56 %
	error rate for the analysis level	2.84 %
normalized arc voltage	error rate for the verification level	5.38 %
	error rate for the analysis level	3.66 %
normalized welding speed	error rate for the verification level	6.35 %
	error rate for the analysis level	4.67 %

#### 4. 결론

갭이 존재하는 가스 메탈 아크 용접에서, 원하는 이면비드 형상을 얻기 위하여 제안되는 용접 변수들에 관한 회귀 모델식을 얻을 수 있었다. 이면비드 형상 변수들과 용접 공정변수들의 양방향 회귀 모델식을 구하고, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지금까지 비드형상 변수와 용접 공정변수의 상관관계가 주로 상관용접까지 적용된 반면, 본 연구에서는 갭이 존재하는 맞대기 용접에서 이면비드의 형상 예측까지 연구를 수행하였다.
2. 용접 공정변수를 이용하여 이면비드 형상을 얻기 위한 다중회귀식을 1차 직선형으로 모델링 하였고, 최대 9.5 %이하의 해석오차를 보여주었다. 또한, 그루브 갭, 이면비드 깊이, 이면비드 폭의 순서로 큰 예측 에러율을 나타내서, 그루브 갭이 가장 예측하기 어려운 변수로 생각되었다.
3. 원하는 이면비드를 얻기 위하여 제시되는 용접 공정변수에 관한 다중 회귀식을 1차 직선형으로 모델링 하였고, 최대 6.5 %이하의 해석오차를 보여주었다. 또한, 표준화된 용접 속도, 표준화된 아크 전압, 표준화된 용접 전류의 순서로 큰 예측 에러율을 나타내서, 용접 속도가 가장 예측하기 어려운 변수로 생각되었다.
4. 같은 실험 데이터로 양방향 모두 10 % 이내의 예측 에러율을 나타냄으로써 실제 용접에 적용 가능성을 보여주었으며, 특히 용접 공정변수의 회귀모델식에 의한 이면비드의 형상 예측은 에러율도 낮으며, 실제 용접에 유용하게 이용될 수 있으리라 생각된다.

**참고문헌**

[1] J. B. Lee, Y. W. Bang, S. W. Oh and H. S. Chan, 1997, "Control of Bead Geometry in GMAW", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 116~123.

[2] W. H. Kim and S. J. Na, 1997, "Numerical Analysis of Weldment by Considering the Convection of Welding Arc and Weld Pool", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 1, pp. 26~35.

[3] J. H. Ahn, and J. W. Kim, "A study on the Back Bead Control by Using Short Circuit Frequency in GMA Welding of Sheet Metal", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 330~339.

[4] I. S. Kim, W. H. Kwon and C. E. Park, 1996, "The Effects of Welding Process Parameters on Weld Bead Width in GMAW Processes", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 33~42.

[5] I. S. Kim, 1997, "A Development of Mathematical Models for Prediction of Optimal Weld Bead Geometry for GMA Welding", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 3, pp. 250~259.

[6] T. G. Lim, H. S. Cho and K. S. Boo, 1994, "Control of Weld Pool Size in GMA Welding Process using Neural Network", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 12, No. 1, pp. 59~72.

[7] Takagi, T., and Segeno, M., (1985)," 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.

[8] Cook, G. E., Andersen K., and Barnett, R. J., (1986), " Keynote address: Feedback and adaptive control in welding", *Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*, Gatlinburg, USA, 18-22, pp.891-903.

[9] Raveendra, J., and Parmar, R. S., (1987), " Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding", *Metal Construction*, Vol. 19, No. 2, pp.31R-35R.

[10] Chandel, R. S., (1988), "Mathematical modeling of as metal arc weld features", *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, April, pp.109-120.

[11] Yang, L. J., Chandel, R. S., and Bibby, M. J., (1993), "The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds", *Welding Journal*, Vol. 72, No. 1, pp.11-s-18-s.

[12] Park, J. W., (2007), "Computational modeling to predict the welding deformation in steel structures", *Transactions of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 8, No. 1, pp. 96-102.

[13] Lee, J. S. and Kim, S. H., (2001), "Thermal analysis of continuous coating welding-coated mild", *Transactions of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 2, No. 1, pp. 7-12.

**이 정 익(Jeong-Ick Lee)**

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학. 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1993년-1999년 : (주)대우전자. 중앙연구소 (선임연구원)
- 2000년-2006년 : 용인송담대. 자동차기계설계전공 (교수)
- 2007년-현재 : 인하공전. 기계공학부. 기계설계과 (교수)

<관심분야>

CAD/CAM/CAE, 공장자동화, 생산자동화, 사출금형, 유비쿼터스, MEMS, BIOMECHANICS