

인공신경망을 이용한 이면비드 예측 및 용접성 평가

이정익*, 고병갑†

(논문접수일 2006. 8. 22, 심사완료일 2007. 1. 25)

Back-bead Prediction and Weldability Estimation Using An Artificial Neural Network

Jeong-ick Lee*, Byung-kab Koh†

Abstract

The shape of excessive penetration mainly depends on welding conditions(welding current and welding voltage), and welding process(groove gap and welding speed). These conditions are the major affecting factors to width and height of back bead. In this paper, back-bead prediction and weldability estimation using artificial neural network were investigated. Results are as follows. 1) If groove gap, welding current, welding voltage and welding speed will be previously determined as a welding condition, width and height of back bead can be predicted by artificial neural network system without experimental measurement. 2) From the result applied to three weld quality levels(ISO 5817), both experimented measurement using vision sensor and predicted mean values by artificial neural network showed good agreement. 3) The width and height of back bead are proportional to groove gap, welding current and welding voltage, but welding speed. is not.

Key Words : Excessive penetration(용입 과다), Prediction of back-bead(이면 비드의 예측), Assessment of weldability(용접성 평가), Segment splitting method(분할법), Artificial neural network(인공 신경망), Backpropagation(오류역전파법), Back-bead width(이면비드 폭), Back-bead Height(이면비드 깊이)

1. 서론

로봇을 이용한 가스 매탈 아크(GMA) 용접은 기존의 일반 아크용접을 개량한 기술로서 보호가스, 전류, 전압, 용접속도, 와이어의 크기와 같은 용접 변수를 적절하게 선택함

로서, 원하는 제품의 생산과 용이한 자동화 등 경제적인 장점이 있어 기계구조물 제작 분야에 널리 사용되고 있다⁽¹⁾. 이러한 로봇 아크 용접을 이용한 금속재료의 접합에 있어서 고품질의 접합부를 만들어 내기 위해서 이면비드의 주요부형상 예측 및 용접성을 정확히 평가하는 것이 중요하다⁽¹⁾.

* 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계설계과 (jilee@inhac.ac.kr)

주소: 402-752 인천광역시 남구 용현동 253번지

† 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계과

용접된 부재의 단면을 보면 이와 관련한 품질 평가의 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 이면 비드 제어⁽³⁾, 용접비드형상의 수학적 모델에 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 용접(bead-on plate)에서 용접공정 변수(welding parameter)를 이용하여 이면비드를 제어하려는 제한적인 연구로부터 맞대기 용접(butt welding)에서 용접공정 변수에 루트간극(groove gap)을 추가하여 이면비드의 용접성을 제어하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 1995년 Ohshima 등⁽⁷⁾은 “MIG용접 용융지의 계층형 Fuzzy Modeling과 제어”라는 논문을 통해 용융지 폭, 전류치, 갭(gap)으로부터 용입 깊이를 Fuzzy 추론하였으며, Ohshima 등⁽⁸⁾은 “Neural Network에 의한 용접 용융지의 modeling과 제어”라는 논문에서 인공지능제어기에 용접 전류 및 루트 간극을 주고 용입 깊이를 구할 수 있는 모델을 제시하였다. 용접 균열이나 용입 과다, 부족과 같은 용접 결함은 취성 파괴나 연성 균열의 원인으로서 작용한다. 용입 과다는 접합부 단면을 통하여 용접금속을 충분히 녹일 수 있는 입열량이 부족할 때 전형적으로 발생한다. 입열량(heat input)은 용접 변수의 함수로서, 용접 전류와 전압에 비례하고, 이송 속도에 반비례한다. 용입 깊이는 대부분 용접물 표면상의 온도를 측정하여 예측하고, 이면비드를 제어하는 것으로 지금까지의 연구는 수행되어 왔다^(4,5). 여기서, 용입이란 용접공정에서 모재가 입열(heat input)에 의해 용융되어 용접금속(weld metal)이 된 부분을 말한다. 본 연구는 별도 측정이나 모니터링 없이 결함 없는 이면비드를 얻기 위한 비드형상 제어에 용접 변수를 이용한 연구로서, 구체적 방법으로 4가지의 용접 변수(루트간극, 용접전류, 용접전압, 용접속도)를 입력변수로 주었을 때, 이면비드의 폭과 깊이를 출력변수로 하여 인공신경망을 이용하여 예측하고, 이것으로 용입 과다의 여부를 용접 국제 규격인 ISO 기준에 따라 3단계⁽⁹⁾로 분류하고, 실제 비전을 통한 측정값과 비교 검토하여 연구 결과의 객관적 근거를 뒷받침 하였다.

2. 이면비드의 예측 및 용접성 평가

2.1 용접 용융지의 단면

용접 이면비드의 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구

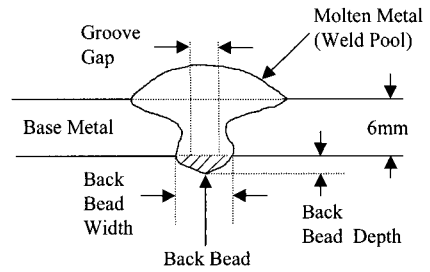


Fig. 1 Cross section of butt welded molten pool

에서는 Fig. 1에서 모재 표면으로부터 이면비드의 정상까지의 거리를 이면비드 깊이(back-bead depth), 루트 간격을 따라 모재가 용융되어 이면비드에 만들어진 넓은 부분을 이면비드 폭(back-bead width)으로 정의하였다. 본 연구에서는 용접 입력변수가 정해질 경우 균일한 조건으로 용접된다고 가정하고 선행연구⁽⁴⁾에서처럼 용접된 일부분의 단면을 측정하는 대신 비전 센서의 분할법을 이용하였다. 용접 길이부분 80mm(전체 100mm 용접 부위 중 양끝 10씩 20mm는 제외)를 화상 처리하여 이면비드의 깊이와 폭을 평균한 값을 인공지능 오류역전파법의 훈련 데이터로 이용하였다. 이는 지금까지 이면비드의 평가 연구 기준^(1,6)과는 달리 용접 중 용접이 불완전한 양끝 부분을 제외한 나머지 이면비드 부분이 전체 용접성을 대신할 수 있는 기준이 될 수 있다고 생각했기 때문이다. 일반적으로, 지금까지의 연구는 용접 중에 여러 곳의 온도를 측정하거나⁽⁶⁾, 일정 부분의 위치를 절단하여 용접부위의 형상을 경험적으로 예측⁽¹⁾하였다. 본 연구에서는 용접 시작부분과 끝 부분은 연구결과에 영향을 준다고 생각하여 이면비드의 평가 기준 부위에서는 제외시켰다.

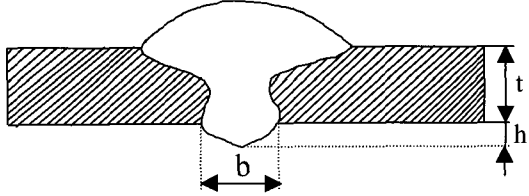
2.2 용입 과다(excessive penetration)의 정의와 ISO기준

용입 과다는 맞대기 용접에서 가장 빈번하게 발생하는 결함의 하나이다. 아래 Table 1에 용입 과다의 형상, 원어적 정의 및 3단계 등급 표를 나타내었다⁽⁹⁾. Table 1에서 보는 것처럼 비교적 덜엄격(Moderate) → 중간(Intermediate) → 엄격(Stringent)로 갈수록 용입 과다의 평가 기준이 더 엄격해짐을 알 수 있다.

2.3 레이저 비전 센서에 의한 화상 획득 및 특징점 추출

레이저 비전 카메라를 통해 얻어진 용접 이면비드의 형태

Table 1 General shape of excessive penetration

<p>General Shape (excessive penetration)</p>		
<p>Explanations English</p>	<p>Excess weld metal protruding through the roof of a weld made from one side or through weld metal previously deposited from either side of a multi-run joint</p>	
<p>Limits for Imperfections for Quality Level</p>	<p>Moderate</p>	<p>$h \leq 1 \text{ mm} + 1.2 b$</p>
	<p>Intermediate</p>	<p>$h \leq 1 \text{ mm} + 0.6 b$</p>
	<p>Stringent</p>	<p>$h \leq 1 \text{ mm} + 0.3 b$</p>

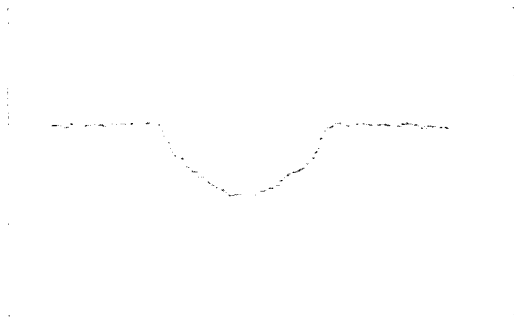


Fig. 2 Stripe of back-bead geometry

는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 레이저 띠 혹은 디지털 곡선^(10,11)은 256개의 일련의 점들로 구성되어 있다.

선분에 의한 윤곽선으로 근사화 시키려면 먼저 프로파일의 분할화가 필요하며, 이에 만족할 만한 다각형 선분을 얻기 위해서는 구석점 또는 절점을 추출해야 하는데, 이들 방법 중 하나로 분할법(segment splitting method)이 있다. 분할법은 상-하 분할법이라고도 하며, 이것의 기본 알고리즘 성격은 첫 곡선에서 시작해서, 정점을 찾아나가는 것이다. 분할화 방안은 선분이 어떤 조건을 만족시키지 못하면 계속 분할시키는 것이다. 이는 Duda와 Hart에 의하여 기본 알고리즘⁽¹¹⁾이 제시되기도 하였다. 본 연구에 사용된 곡선 근사화를 위한 분할법에 쓰인 알고리즘은 다음과 같은 4단계로 수행된다.

- 가. 주어진 곡선에 대하여 첫 번째 에지점 B_0 와 마지막 에지점 B_6 를 직선으로 연결한다.
- 나. 곡선의 모든 점에 대하여 1단계에서 연결한 직선(직선 B_0B_6)으로부터의 수직거리를 계산한다. 만일, 모든 점에

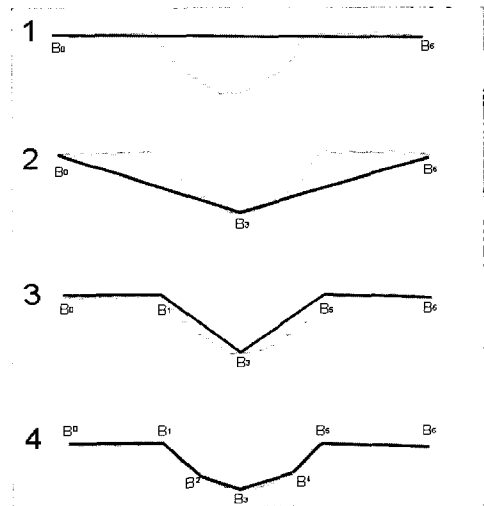


Fig. 3 Segment splitting method for back-bead stripe expression

대한 직선거리가 문턱치(허용범위, threshold)보다 작으면 끝내고 그렇지 않으면 다음 단계를 시행한다.

- 다. 직선으로부터 가장 먼 수직거리인 점을 절점(2:에지점 B_3 , 3:에지점 B_1, B_5 , 4:에지점 B_2, B_4)으로 삼고 절점과 앞의 성분의 끝점을 연결함으로써 새로운 약간 선분을 얻는다.
- 라. 다시 2단계로 돌아가서 반복적으로 시행한다. 이 반복적인 과정은 매우 효과적이며 이러한 분할법은 반복 세부 분할법이라고도 불린다.

이면비드 형성에 대한 알고리즘의 예시를 Fig. 3에 나타내었고, Photo 1은 실험에 사용된 이면비드에 과다 용입을 가



Photo 1 Welded specimen including back-bead of excessive penetration

진 시편의 사진을 나타낸 것이다.

2.4 오류역전파법(Backpropagation) 학습 알고리즘

본 연구에서 이면비드 예측에 사용하는 오류역전파법 학습 알고리즘의 기본 원리는 다음과 같다. 입력 층의 각 유니트에 입력 패턴을 주면 이 신호는 각 유니트에서 변환되어 중간층에 전달되고 최후의 출력층에서 신호를 출력하게 된다. 이 출력값과 기대값을 비교하여 차이를 줄여나가는 방향으로 연결강도를 조절하고, 상위층에서 역전파하여 하위층에서는 이를 근거로 다시 자기층의 연결강도를 조정해 나간다. 지도학습에서는 입력 및 원하는 출력(목표출력) 패턴(벡터)이 네트워크에 제시된다. 네트워크는 입력층에 주어진 입력패턴이 출력층에 전파되면서 변환 출력패턴을 목표패턴과 비교한다. 네트워크에서 출력된 패턴이 목표패턴과 일치하는 경우에는 학습이 일어나지 않는다. 그렇지 않은 경우는

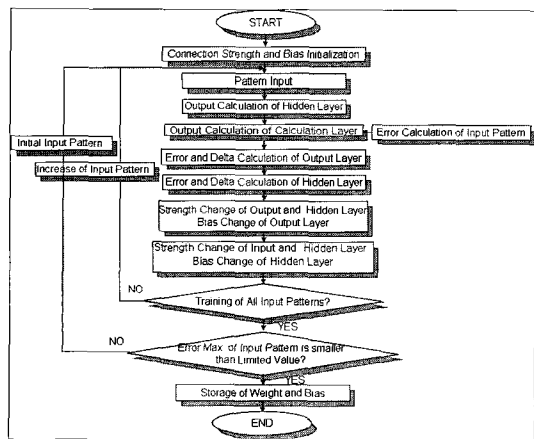


Fig. 4 Flowchart for artificial neural network training

얻어진 출력 패턴과 목표패턴의 차이를 감소시키는 방향으로 네트워크의 연결강도를 조절하여 학습을 한다. 이를 알고리즘 흐름도로 나타내면 아래 Fig. 4와 같다.

3. 실험

3.1 실험 장치

실험 장치는 로봇 장치, 용접 장비 및 비전 장비로 구성된다. 로봇 장치로는 3축 XY-Table을 이용하였다. 용접장비로는 용접기와 지그(jig)로 구성된다. 용접기는 CO₂ 아크 용접기로 100% CO₂ 가스를 보호가스로 사용하였다. 와이어는 $\Phi 1.2\text{mm}$ 의 최대 정격 2차 전류가 350A인 정전압 전원 방식의 용접기를 사용하였다. 또한, 맞대기 용접을 하기 위해 실험에 적당한 지그를 제작하여 사용하였다. 이면비드의 폭, 깊이 검출을 위한 비전 장치로는 캐나다 Servo Robot사의 레이저 비전 시스템을 사용하였다. 이 비전 시스템은 컨트롤 장치인 CAMI 시스템과 레이저 비전 카메라 헤드(M-SPOT -90)로 구성되어 있다. 로봇 토치와 레이저 비전 카메라 부와는 전방 미리보기 거리(look-ahead distance)를 고려하여 32mm 가량 떨어져 있다. 비전 시스템 컨트롤러인 CAMI 시스템은 AMD 5x86 CPU(75MHz Pentium CPU)를 장착한 산업용 PC, 비전 처리 및 레이저 파워와 스캐닝 컨트롤 등을 위한 DSP가 내장된 카메라 제어 장치이다. 카메라 헤드는 능동적 광학 삼각법을 응용한 자동 동기 주사 방식을 사용한다. 수광부에서 얻어진 2차원 이미지는 단면상의 각 점의 위치를 계산한다. 광원으로는 출력 40mW, 파장 680nm의 레이저 다이오드를 사용하며, 카메라의 렌즈부에는 아크 용접시에 발생하는 아크 광, 스파터, 가스등으로 발생하는 노이즈를 줄이기 위한 대역 통과 필터를 설치하였다. 레이저 카메라는 256개 점을 샘플링하며, 초당 40프로파일링을 행한다. 실험에 사용된 시스템 개략도는 Fig. 5에 나타나 있다.

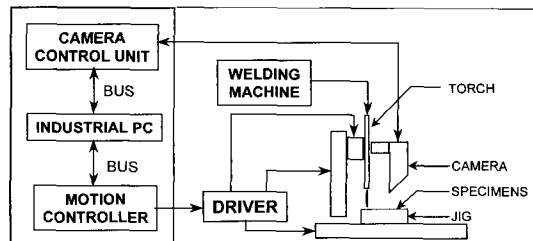


Fig. 5 System configuration for welding and welded excessive penetration

3.2 실험 방법

실험에서 사용된 시편은 180(w) x 100(l) x 6 mm(t) 크기
의 탄소강 2장을 V홈(45°) 맞대기로 용접(V groove butt
welding)한 것이다. 실험에 사용된 용접 조건은 6mm 탄소
연강의 적정조건을 참고문헌에 의거⁽¹²⁾하여 용접을 수행하
였는데, 루트 간격은 1.2~1.5mm, 용접 전류는 200~230A,
용접 전압은 24~25V, 용접 속도는 4~6mm/sec, 보호 가
스 유량은 15 ℓ/min, 용접 팁 끝에서 심선길이(CTWD)는
15mm로 하여 실험을 행하며 이면 용입 과다를 관찰하였다.

3.3 인공신경망의 구성

루트간격, 용접전류, 용접전압, 용접속도 4개의 변수(13neuron)
를 이용해 최적의 신경회로망 구조(architecture)를 얻기 위

하여 선형적(heuristic)으로 입력층(input layer), 8개의 은닉
층(hidden layer) 2층을, 2개의 출력층(output layer)을 가진
13 x 8 x 8 x 2의 인공 신경회로망을 구성하고(Fig. 6), 실험
결과를 이용하여 인공신경망을 학습하였다. 이 구조는 몇 가
지 구조에 대해서 4가지 입력 용접조건에 대한 이면비드의
용입 크기 상의 상관 관계에 대한 학습성을 테스트 한 후 선
정되었다. 또한, 흐름도를 Fig. 4에 나타내었으나 실제 적용
한 프로그램은 Matlab s/w의 오류 역전파법 모델을 이용해
입력 4개, 출력 2개의 목표를 정한 후 수렴할 때까지 최적
의 학습율과 모멘텀 계수를 고려하여 자유도 횡수를 조정하
였다. 예측기 학습을 위해서 학습율과 모멘텀 계수를 각각
0.3, 0.7이 사용되었고, 여러 가지 이득에 대해서 예측 오차
의 수렴성과 상호 관계의 학습성을 시험하여 선정되었다. 반
복 학습의 횡수는 입출력 층의 자유도를 고려하여 3,000회
로 하였다. 이러한 이유에서 적은 실험회수에 비해서 인공신
경망에 의한 이면비드의 예측이 순조롭게 이루어졌다.

구성된 인공신경망을 통해 구해진 연결 가중치와 바이어
스를 저장한 후 이면비드의 용입 과다를 검출하는데 적용하
였다. Table 2는 입력 변수 4개가 주어졌을 경우의 이면비드
용입 과다의 비전에 의한 화상처리 값(계측치)과 인공신경
망에 의해 구해진 값(예측치)의 경우의 10가지를 예를 들어
나타내었다.

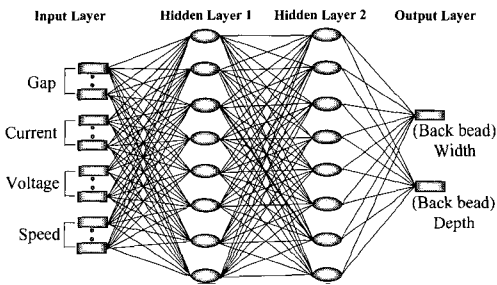


Fig. 6 Artificial neural network for measuring of back bead

Table 2 Comparisons of back-bead geometry between measuring data of any welding conditions and neural network data of back propagation

No.	(Groove) Gap (mm)	(Welding) Current (A)	(Welding) Voltage (V)	(Welding) Speed (mm/sec)	Measuring Data (mm)		BPN Data (mm)	
					Width	Depth	Width	Depth
1.	1.2	200	25	5	1.54	0.77	1.58	0.82
2.	1.2	200	25	6	1.68	0.84	1.71	0.86
3.	1.3	200	24	4	1.97	0.96	1.99	0.99
4.	1.3	200	24	6	1.92	0.92	1.95	0.94
5.	1.3	200	25	6	1.95	0.95	1.97	0.98
6.	1.3	210	25	4	2.12	1.04	2.16	1.07
7.	1.3	210	25	5	1.95	0.95	1.99	0.98
8.	1.4	200	24	4	1.99	0.98	2.05	1.03
9.	1.4	200	25	5	2.15	1.53	2.19	1.58
10.	1.4	210	25	6	2.31	1.71	2.43	1.82

4. 고찰

실험 방법에서 기술한 바와 같은 용접 조건⁽¹²⁾으로 맞대기 용접을 수행하였고, 루트간극, 용접전류, 용접전압, 용접속도를 다양하게 하여 형성된 이면비드 부분 80mm(100mm 용접부위에서 양끝 10mm씩 제외)의 폭의 평균값과 깊이의 평균값을 48개 혼련하여 인공신경 망에 학습시켰다. 그 후, Table 2에 나오는 것처럼 화상처리에 의한 이면비드의 폭과 깊이를 알고 있는 4가지 입의의 입력 조건 10개를 입력 층에 넣어 인공신경망의 예측치와 비교하여 보았다. Table 2에서 보듯이 다소의 오차는 있지만 레이저 비전 센서에 의한 이면비드의 측정 평균치와 오류 역전파법에 의한 이면비드의 측정 평균치는 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 수치적으로 두 값은 비교하기가 애매하므로 보다 정량적인 오차율을 구해 Table 3에 기술하였다.

Table 2에서 보듯이 본 연구 결과로는 인공신경망에 의한 값이 실제 계측치보다 다소의 큰 값을 얻었다. 그 차이를 이면비드에 대한 폭과 깊이에 대한 오차율로 Table 3에 나타내었다. 이는 실제 계측치와 인공신경망의 추정치의 오차율을 나타내는 것으로, 본 연구의 목적인 용접 조건이 주어진 경우 이면비드의 폭과 깊이를 신뢰할 만한 범위 내에서 예측해 낼 수 있도록 오차율을 줄이는데 있었는데, Table 2의 입의의 조건으로 수행한 결과 폭의 오차율 평균은 2.14%, 깊이의 오차율 평균은 3.69%를 보였다. 이러한 예측치가 이상과 같이 작은 오차율을 보인다고는 하나 이것이 이면비드의 용접성 평가에 유용하게 사용되기 위해서 앞서 Table 1에

기술한 용입 과다를 위한 용접품질 3단계 한계(ISO5817 기준)⁽¹³⁾를 참고하여 Table 2의 측정치와 인공신경망 예측치 2가지 모두를 3단계 검사기준(moderate, intermediate, stringent)에 넣어 보고 용접성의 가부를 예측한 결과 Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 표에서 ○는 기준에 만족함을 ×는 기준에 만족하지 않음을 나타낸 것이다. 측정치와 예측치가 용접품질 평가 3단계에 같은 결과를 보여줌으로 해서 결과적으로 인공신경망에 의한 예측치를 용접성 평가 데이터로 적용하여도 문제가 없음을 알 수 있었다. 이는 예측치가 측정치보다 이면비드의 폭, 깊이 모두 높은 성향을 보이거나 용접성 평가 기준에서는 같은 결과가 나타나는 것으로 보아 이면비드의 폭, 깊이 값 모두 비례적 오차를 가지고 증대됨을 알 수 있었다. 마지막으로, 참고문헌⁽⁷⁾을 통해 용입 깊이가 용접전류, 용접전압에 비례하고 용접속도에 반비례함을 알 수 있었다. 이는 용입 깊이가 맞대기 용접에서는 이면비드의 형상에 영향을 준다는 가정에서 연구하였다. 실험결과 문헌에서 본 결과처럼 루트 간극, 용접전류에는 이면비드 형상이 비례적으로 민감하게 반응하고 용접전압에는 그리 민감하지 않게 비례하며, 용접속도에는 이면비드의 형상이 반비례하는 현상을 나타내었다. 용접 조건별 이면비드의 평균 폭과 깊이의 변화를 아래 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다. Fig. 7의 경우 루트갭, 용접전압 및 용접속도가 고정된 경우 용접전류가 변화 시의 이면비드 평균 깊이, 폭과의 관계를 측정치와 인공신경망의 결과와 비교하였다. Fig. 8은 루트갭, 용접전류 및 용접속도가 고정이고, 용접전압이 변화 시의 이면비드 평균 깊이, 폭과의 관계를 측정치와 인공신경망

Table 3 Comparisons of back-bead geometry between error rates and weldability rates under any welding conditions

No.	Gap (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/sec)	Error % of width	Error % of height	Moderate	Intermediate	Stringent
1.	1.2	200	25	5	2.53	6.09	○	○	○
2.	1.2	200	25	6	1.75	2.33	○	○	○
3.	1.3	200	24	4	1.01	3.03	○	○	○
4.	1.3	200	24	6	1.54	2.13	○	○	○
5.	1.3	200	25	6	1.02	3.06	○	○	○
6.	1.3	210	25	4	1.85	2.80	○	○	○
7.	1.3	210	25	5	2.01	3.06	○	○	○
8.	1.4	200	24	4	2.93	4.85	○	○	○
9.	1.4	200	25	5	1.83	3.16	○	○	○
10.	1.4	210	25	6	4.94	6.36	○	○	×

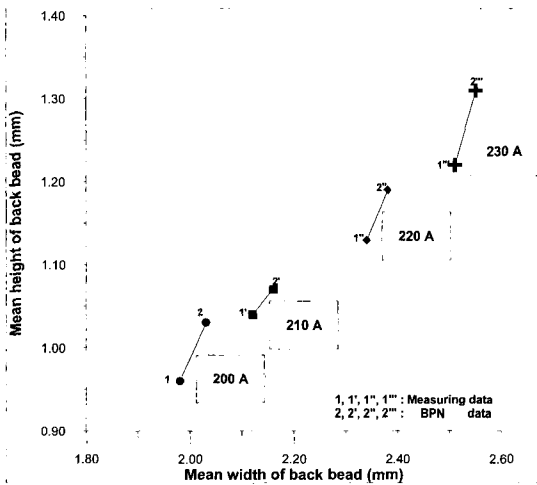


Fig. 7 Back-bead geometry changes by welding current under groove gap 1.3mm, welding voltage 25V and welding speed 4mm/sec

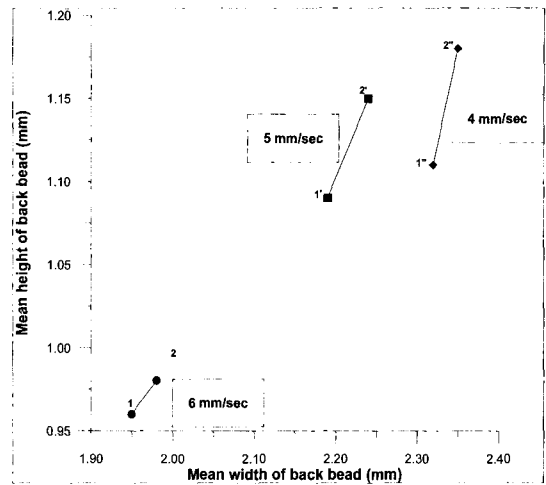


Fig. 9 Back-bead geometry changes by welding speed under groove gap 1.3mm, welding current 220A and welding voltage 24V

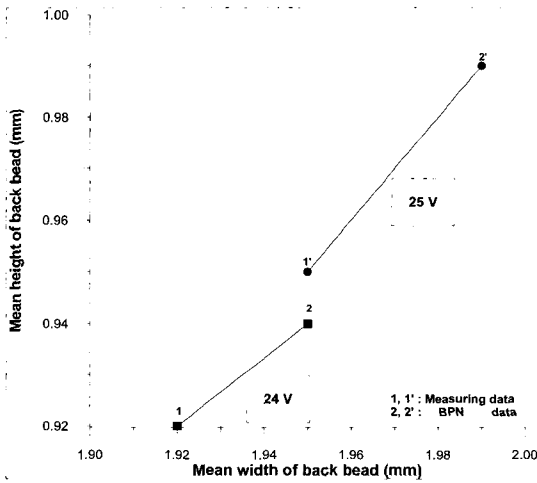


Fig. 8 Back-bead geometry changes by welding voltage under groove gap 1.3mm, welding current 200A and welding speed 6mm/sec

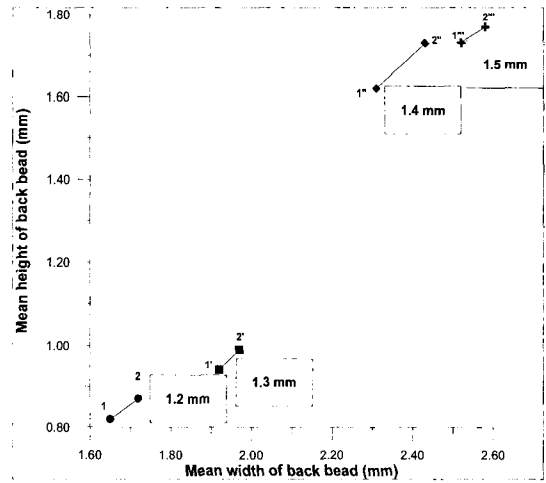


Fig. 10 Back-bead geometry changes by groove gap under welding current 210A, welding voltage 25V and welding speed 6mm/sec

의 결과와 비교하였다. Fig. 9는 루트갭, 용접전류 및 용접전압이 고정의 경우 용접속도가 변화 시의 이면비드 평균 깊이, 폭과의 관계를 측정치와 인공신경망의 결과와 비교하였다. Fig. 10은 용접전류, 용접전압 및 용접속도가 고정의 경우 루트갭 변화 시의 이면비드 평균 깊이, 폭과의 관계를 측정치와 인공신경망의 결과와 비교하였다. 모든 실험의 경우 분할법에 의한 실제 측정치보다 인공신경망이 약간의 더 큰

오차율을 보여주었으나 오차율은 실제 용접에 적용할 수 있을 만큼 작았다.

5. 결론

이면비드의 용입 과다 여부를 평가하기 위해 인공신경 회로망을 설정하고, 이면비드의 평가 기준을 3단계로 구분 후,

적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 루트간격, 용접전류, 용접전압, 용접속도 값들의 적절한 조합으로 비전 센서를 이용한 측정치 평균값과 유사한 값을 얻을 수 있는 인공신경망을 구축하여 직접 측정 없이 이면비드의 폭과 깊이를 근사적으로 예측할 수 있었다.
- (2) 비전 센서에 의한 측정치와 인공신경망에 의한 예측 평균치로 ISO결합 기준인 용입 과다 기준 3단계에 적용한 결과 모두 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 루트간격, 용접전류, 용접전압, 용접속도가 용입 깊이에 영향을 주어 결과적으로 이면비드 형상에 영향을 주게 됨을 실험을 통해 알 수 있었고, 비례, 반비례 관계는 입 열식의 변수 배열과 일치했다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, J. B., Bang, Y. W., Oh, S. W. and Chan, H. S., 1997, "Control of Bead Geometry in GMAW," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 116-123.
- (2) Kim, W. H. and Na, S. J., 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) Ahn, J. H. and Kim, J. W., "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) Kim, I. S., Kwon, W. H. and Park, C. E., 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) Kim, I. S., 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) Lim, T. G., Cho, H. S. and Boo, K. S., 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) Kenji, O., Masaki, M., Tatsuya, I., Yasuyoshi, K. and Satoshi, Y., 1995, "Application of Multi-Layered Fuzzy Inference to Weld Pool Model and Control," *The Japanese Welding Society, The Textbook of Research Group for Welding Method*, June, pp. II-48-II-52.
- (8) Kenji, O., Akihisa, T., Takefumi, K. and Satoshi, Y., 1995, "Modeling and Controlling of Weld Pool Using Neuro Network," *The Textbook of Research Group for Welding Method*, June, pp. II-53-II-56.
- (9) Lee, B. Y., 1997, "Defects, examples and prevention of welded structures," *Welding Summer School Textbook*, pp. 249-295.
- (10) Kim, H. S., 1994, *Image Recognition-Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, Neural Network*, Press Seong Neung, pp. 229-259.
- (11) Jain, R., Kasturi, R. and Schunck, B. G., 1995, *Machine Vision*, McGraw-Hill, pp. 186-233.
- (12) Lee, D. H., Park, S. H. and Park, S. K., *The Handbook of Special Welding*, Press Iljin, pp. 155-170.
- (13) Yoo, Y. T., Kim, J. Y., Ro, K. B., Yang, D. J., Oh, Y. S., Im, K. G. and Kim, J. H., 2003, "Estimation of Laser Welding Behavior of SM 45C Steels by Plume Monitoring," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 14-21.
- (14) Yoon, S. U., Kim, J. Y., Song, K. S. and Cha, Y. H., 2006, "The Development of Automatic Inspection System for Flaw Detection in Welding Pipe," *Transactions of the Korean Society of Machine*.