

인공신경망을 이용한 탄산가스 아크용접의 잔류응력 예측

Predicting Method of Residual Stress
Using Artificial Neural Network in CO₂ Arc Welding

조.용준*, 이세현**, 엄기원**

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 한양대학교 정밀기계공학과

ABSTRACT

A prediction method for determining the welding residual stress by artificial neural network is proposed. A three-dimensional transient thermomechanical analysis has been performed for the CO₂ Arc Welding using the finite element method. The validity of the above results is demonstrated by experimental elastic stress relief method which is called Hole Drilling Method. The first part of numerical analysis performs a three-dimensional transient heat transfer analysis, and the second part then uses results of the first part and performs a three-dimensional transient thermo-elasto-plastic analysis to compute transient and residual stresses in the weld. Data from the finite element method were used to train a backpropagation neural network to predict residual stress. Architecturally, the fully interconnected network consisted of an input layer for the voltage and the current, a hidden layer to accommodate failure mechanism mapping, and an output layer for residual stress. The trained network was then applied to the prediction of residual stress in the four specimens. The results of predicted residual stress have been very encouraging.

1. 서 론

구조물은 아크 용접함에 있어서 용접부 부근은 아크열에 의해 국부적으로 가열되고, 이로 인한 불균일한 온도 분포는 과도 열응력과 비탄성적인 변형을 발생시킨다. 이러한 변형에 의해 용접 후 냉각 수축의 과정을 거친 용접부 부근에는 복잡한 구속에 의한 응력이 잔류하게 된다. 이러한 응력들은 취성, 파괴강도, 피로강도, 진동특성, 부식저항등에 영향을 주게 된다. 이와 같은 현상은 대부분의 용접공정이 공통적으로 지닌 문제점으로 이 분야에 대해 그 동안 많은 연구가 수행되어져왔다.

이러한 용접 잔류응력 문제를 해결하기 위해서 우선적으로는 용접부위의 잔류응력 분포를 정확히 이해하고 해석하며 더 나아가 보다 신뢰성과 경제성 있는 새로운 예측법이 요구된다.

본 연구에서는 잔류응력의 효과적인 예측방법을 제안하기 위하여 학습 능력을 지닌 Error Back Propagation 알고리즘에 의한 Multilayer Perceptron 인공신경회로망을 수렴적 방법으로 도입하여 용접부의 잔류응력 예측에 응용하고자 하였으며, 범용 유한요소 해석 패키지인 ANSYS 4.4A를 이용

한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 인공 신경회로망의 학습에 필요한 데이터를 산출하였다. 또한, 재질이 연강인 시편에 탄산가스 아크 V형 맞대기 용접을 수행한 후, 기존의 실험 방법중 파괴적이며 스트레스 이완법의 가장 대표적인 방법인 Hole-Drilling 방법을 이용하여 앞에서 얻어진 수치 해석 결과의 타당성을 검증하여 인공신경회로망에 학습된 데이터가 신뢰성있는 것임을 입증 하였다.

이상의 방법을 사용하여 기존의 방법보다 더욱 정확하고 신속하게 잔류응력을 예측하고자 하였다. 이러한 연구는 복잡한 용접 현상에 의한 잔류응력 분포의 정확한 이해에 큰 도움을 줄 수 있을 뿐더러, 용접 부위의 잔류응력에 대한 실시간 측력을 얻어내어 용접공정에 응용함으로써 공정 제어시 용접 구조물의 품질 관리 및 형상에 큰 도움을 줄 수 있으리라 예상된다.

2. 인공신경회로망의 적용

2.1 적용 배경

잔류 응력은 일반적인 실험적 진지에 의해서는 측정되기 힘들다. 왜냐하면, 센서가 응력 제거에 의한 변형을 변화를 감지하기 위해서는, 센서 부착 상태에서 어떤 형식으로든 잔

유용력을 높추시키야만 하는데 이를 위해서는 부재를 파괴하
 야 하기 때문이다.

이러한 단점을 보완하기 하기 위해서 수치해석 기법이
 도입될 수 있다. 하지만 이 방법도 계산 시간에 의한 시간 지
 연 요소를 지니고 있기 때문에 실제적인 용접공정 응용에는
 한계점을 지니고 있다.

이러한 이유에서 파괴에 의한 실험적 방법의 단점과 시
 간 지연에 의한 수치해석 방법의 단점을 모두 보완해 주면서
 정확도에 있어 두 방법과 큰 차이가 없는 새로운 잔류응력
 예측법이 필요하다. 본 연구에서는 위의 단점들을 보완하고
 정점을 살리기 위하여 인공신경회로망을 잔류응력 예측법에
 적용하였다. 이전의 방법에서 오는 정점은 학습 데이터를 적
 절히 적용하고 검증함으로써 본 예측법에서도 가능하게 하였
 다.

2.2 신경회로망의 구조 및 특성

신경회로망이란 생명체의 신경조직을 모방하여 모델화된
 정보처리 시스템으로 단순 소자들의 병렬, 분산 연결구조를
 가지고 있으며, 외부로부터 들어오는 입력에 의하여 dynamic
 state response를 일으킴으로써 필요한 출력을 생성시키는 것
 이다. 이는 코딩화된 알고리즘에 의하여 기억장치에 저장된
 정보를 순차적으로 인식하여 그 결과를 다시 기억하는 기존
 의 노이만식 디지털 컴퓨터의 sequential인산의 기능상 한계
 를 극복하기 위한 모형을 시도로써 MLP 시스템 혹은
 neuromorphic 시스템이라는 의미를 지니고 있기도 하다.

일반적으로 신경회로망은 데이터를 병렬 분산 처리하는
 방식을 사용하고 있고 내용의 일부 또는 관련된 암시를 가지
 고 전체를 찾아내는 CAM(Content Addressable Memory)방식
 의 연상 기억 능력과 고장 극복(fault-tolerance)이 있고 학습
 에 의해 자극과 응답에 대한 한정적 경험을 일반화함으로써
 처후에 필요에 따라 적절한 해를 구할 수 있는 학습 능력을
 지니고 있다.

본 연구에서는 용접시스템등과 같이 많은 변수를 포함하
 고 있는 복잡한 시스템의 경우 모든 변수에 대한 적절한 범
 치를 추측해내는 것은 매우 어려운 일이므로, 소자의 내단위
 병렬성에 의한 용이한 하드웨어 구현능력에 이로부터 인한 빠른
 처리속도에 의거하여 용접공정의 실시간 제어 등에 응용될 수
 있는 신경회로망을 이용하여 용접 전류, 전압과 잔류 응력과
 의 비선형 함수를 구하였다. 이들 관계는 인공 신경회로망이
 지니고 있는 weight 값에 의해 결정되고 입력 전류, 전압에
 따른 그때의 결과를 사용하여 용접공정의 잔류응력 해석에
 사용하였다.

2.3 신경회로망의 구현 원리

인공 신경 회로망은 neuron과 synapse로 구성된 생체의
 신경 조직을 단순화시켜 모방한 모델을 기본으로 하고 있다.
 한 전진에서의 뉴런은 인접한 많은 뉴런으로부터 입력신호를
 받아서 하나의 결론을 출력하게되고 시냅스는 뉴런의 출력을
 받아서 weight를 곱한 후 다른 뉴런으로 보내게 된다.

이러한 기본 소자들은 임출력층과 hidden layer로 나뉘
 이지 전체 신경망을 구성한다. 간단한 계산 능력만을 지닌 기
 본 소자들이 서로 유기적으로 연결되어 임출력사이의 복잡
 한 함수 관계를 구현하며 이러한 함수 관계는 비선형성이 매
 우 심한 경우 상당히 효과적으로 적용될 수 있다.

3. 유한요소법에 의한 학습 데이터의 산출

3.1 유한요소법 적용

용접 공정의 수치해석에 관한 기초이론은 Rosenthal등
 에 의해 이미 1930년대에 완성되기 시작하였다. 이들 방법들
 은 이상화된 여러 조건들을 사용하였기 때문에 정확한 해를
 구하기에는 부적합하였으나 용접 공정의 비선형성을 적절히
 설명하고 있어 이후의 수치 해석 방법에 토대를 마련하였다.
 1970년대에 들어서면서 컴퓨터와 유한요소법의 도움으로 복
 잡한 형태의 과도 열전달 문제와 비분방정식을 효과적으로
 처리 할 수 있게 되었으며, 이에 따라 각종 용접 공정의 보다
 정확한 시뮬레이션이 가능하게되었다.

탄산 가스 아크 용접의 해석은 기존에 발표된 GMA용접
 해석과 같은 맥락에서 취급되어질 수 있으며, 좀 더 이전에
 연구되었던 GTA용접 해석에 적절한 mesh 처리를 해줌으로
 써 가능하게 되었다.

본 연구에서는 결과의 정확성과 경제성을 고려하여
 thermal analysis와 stress analysis은 분리하여 순차적으로
 해석하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 열해석에서 얻어진
 결과를 응력해석에 적용함으로써 이루어질 수 있다.

3.2 용접 공정의 분석 및 가정

탄산가스 아크 용접 공정을 해석하기 위하여 용접의 진
 행에 따른 메카니즘을 살펴보면, 일정한 입력 분포를 갖는 용
 접 아크가 용접될 두 평면 위를 x 방향으로 속도 v 로 유
 치일때, 용접 토치로 부터 나오는 일정한 흐름을 갖는 월성
 피복 기스가 대기오염으로 부터 용접부를 보호하기 위하여
 사용되며, 아크열에 의해 와이어가 용융되고 입력량의 나머지
 부분들은 평면에 흡수된다. 결국, heat flow는 모든 3차원 방

향으로 흐르면서 용융된 와이어와 함께 두 평판을 용융시키 결합시킨다.

이 과정은 아크의 입열 형태가 용집 중심선에 대하여 대칭이 되는 Gaussian 분포라고 가정하여 두 평판의 한쪽면만을 분석하였다.

용집이 완료된 후 용집부의 부근에는 급격한 온도상승으로 인한 팽창과 냉기에 의한 수축이 일어난다. 이러한 온도변화의 과정에서 이음의 부근에는 복잡한 구조에 의한 탄성·소성적 응력민화가 발생하며, 냉각 후에 응력이 잔류하게된다. 이러한 응력의 변화는 열 응력 해석에서 얻어진 결과를 이용해서 해석될 수 있었다.

3.3 해석 과정

1) 아크 입열 모델

아크 입열은 온도 분포와 그에 따른 냉각속도 그리고 용융부와 열영향부의 크기에 직접적으로 영향을 주기 때문에 이를 모델링하는 작업은 매우 중요하다. 용집조건, 즉, 피복가스, 노즐거리, 흡의 형상 등은 아크효율에 중요한 영향을 미치지만 본 해석에서는 이 값들의 변화는 무시하고 일정한 값은 아크효율로 사용했다. 열전도율과 비열은 온도에 따라 값이 변하는 미선형 데이터를 사용하였으며 특히 비열 값에는 점열을 고려할 수 있는 데이터를 사용했다. 아크와 용지의 온도는 각 조건의 전압, 전압 조건 아래에서 아크가 와이어를 녹이는데 필요한 열량을 고려하여 사용했다. 평판에 대한 아크 입열은 모든 시간동안, 대칭적인 가우시안 분포라고 가정했다. 이 분포는 기존 연구에서 수행된 모델을 사용하였다.

$$q''(x, y, t) = \frac{3\eta_{eff}VI}{\pi r_b^2} \exp\left[-\frac{3}{r_b^2}[(x-v)^2 + y^2]\right] \quad (1)$$

2) 표면 열손실

지연대류열전달은 $y=0$ 인 대칭면을 제외한 모든 평판의 표면에서 일어난다. 과거의 모델들에 기초하여, 일정한 값이 피복가스에 영향을 받지 않는 모든 표면에 사용되었으며, 기존 연구에 의한 선형식이 용집 도우치 노즐 아래 표면부의 강제대류 계수로 사용되었다.

$$h = 13 Re^{1/2} Pr^{1/3} k_{gas} / NPD \quad (2)$$

탄산가스의 특성에 기초하여 Re와 Pr를 계산하고, 일원이 용집방향으로 이동함에 따라 속도를 고려하여 FLUX에 의해 적절한 heat flux가 각 time-step의 nodal point에 가해지고 새로운 mesh가 형성됨에 따라 새로운 경계 조건이 간정된다. 경계 조건은 일정한 h 값이 노즐주위의 모든 점에서 사용되었다. 이상의 방법으로 위열부분의 heat flux, 열전달 계수를 구하여 해석에 사용하였다.

3) mesh 생성

mesh 생성은 수치해석결과의 정확도와 경제성에 결정적인 역할을 한다. 용집중심선 근처에서는 고온이 급격히 변화하므로 더 세밀한 요소가 필요하다.

탄산가스 아크 용집의 경우 용집이 완료되기 전에 급속의 냉각이 계속적으로 가해지므로 보다 정확한 해를 얻기 위해서는 계속적인 mesh의 생성이 필요하다. V형 흡을 모델링할 경우에는 더욱 많은 노드가 필요하지만 연구 목적상 V흡 내에 195개의 절점을 배치하였다. 용집공정의 묘사는 150 mm를 64부분으로 나누어 32 단계로 해석하였으며 각 단계마다 4.68 mm의 요소를 더해나갔다. 해석은 첫번째 패스가 완전히 완료된 후 1시간의 냉각과정을 거친 다음 두번째 패스가 진행되도록 하였다.

4) 냉각

용집이 종료되면 더 이상의 입열은 주어지지 않으며 그 순간부터 냉각이 시작된다. 이때, 냉각 속도는 공정이 완료된 시편의 성질을 결정하는 매우 중요한 요인이다. 냉각과정은 sub-routine COOL을 만들어 상온(293°K)을 주위 온도로 설정하고, $y=0$ 인 면을 제외한 모든 면에 새로운 경계조건을 부여해 대기 중에서 냉각시켰다. 용집이 끝난 직후의 time-step은 작게하여 급격한 온도 변화에 민감하게 하였으며, 시간이 경과함에 따라 time-step을 증가시켜 경제성을 고려했다. 각 time-step의 결과 값을 응력해석으로 return 시켰다.

5) 잔류응력 계산

냉각을 포함한 모든 공정이 끝난 후에 앞에서 얻은 결과들을 이용하여 시편 내부의 잔류응력을 계산하기 위해서는 열해석 과정들이 응력해석 모듈에서 민형, 민복되어야한다. 열해석 단계에서 생성된 mesh를 이용하여, 응력해석에 적당한 새로운 mesh를 형성하여 응력해석을 가능하게하였다. 시편의 세전은 등방성, 균일전로 가정하였고 용착 금속 부분도 같은 재료로 간주하여 해석하였다. 시편의 구조는 $y=0$ 인 면에서 모든 방향의 변위를 구속하였고 노드의 node들은 민형에 자유롭게 하였다.

이상의 조건에 따라, 각 step의 thermal 해석 결과들을 이용하여 90 단계의 static 해석을 수행하였다. 이 과정은 thermal 해석 결과를 return받아 실행함으로써 큰 기억장치 용량과 많은 처리 시간이 요구되었다.

3.4 해석 결과 및 고찰

앞의 해석과정에 의해 탄산 가스 아크 V형 및대기 용집을 시뮬레이션하였다. 나중에 스트레인 게이지에 의한 실험에서 얻어진 데이터와의 비교를 위하여 용집방향에서 중앙인 부분, 즉, $x=75mm$ 인 면을 축으로 하여 각 노드의 응력 분

모를 관찰 하였다. 용접방향의 응력은 용접 중심선을 중심으로 인장응력이 처음 감소하게 되며 끝단 부분에서는 압축응력이 적용됨을 볼 수 있다. 인장응력의 최대값은 횡방향 응력을 약간 넘는 정도의 값을 나타내었다. 횡방향 응력은 종방향 응력에 비해 상대적으로 작은 값을 나타냈으며 역시 용접 중심선 부근이 최대 인장응력을 받고 있었다. 사용된 시편의 두께 (6mm)효과를 생각하여 두께 방향의 응력은 고려 대상에서 제외시켰다.

용접 입면이 증가할수록 최대 인장 응력을 받고 있는 부분이 중심선에서 멀어지고, 끝단의 압축 응력도 점점 증가함을 알 수 있었다. 횡방향의 응력도 입면방이 증가할수록 증가됨을 알 수 있었는데, 이는 높은 전류, 전압에서의 용접 시공이 잔류응력에 더욱 취약함을 보여주는 좋은 예가 될 것이다.

사용된 시편의 크기 효과에 따라 끝단으로 갈수록 압축 응력의 크기가 증가됨을 볼 수 있으며, 상대적으로 폭이 넓은 시편에서 발생하는 응력의 현상과는 반대의 형태를 보이고 있다.

4. 학습 데이터의 검증

4.1 Hole-Drilling 방법의 적용

무척 작은 구멍용 잔류응력이 존재하는 물체에 뚫으면, 자유 표면의 응력이 '0'이 되어야 한다는 이유에서 그 부분의 응력이 노출되게 된다. 구멍 밑에 존재했던 변형방향 응력의 제거는 구멍 근방의 응력을 완화시키고, 그에 따라 측정 물체의 표면에서는 국부 응력이 완화하게 된다. 이때, 구멍주위의 변형률의 변화를 측정함으로써 물체가 원래 가지고 있던 잔류 응력을 계산해 낼 수 있다.

1) Through-Hole 해석

균일한 잔류응력 σ_r 를 받고 있는 얇은 원의 임의점 P(R, α)에서의 변형 방향 초기 응력 상태를 극좌표로 나타내면,

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (3)$$

관통 구멍이 뚫린 후의 상태는,

$$\sigma_r'' = -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \quad (4)$$

최후응력에서 최초응력을 빼면, 구멍을 뚫은 것 때문에 초래된 응력 변화를 구할 수 있다.

$$\Delta \sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r \quad (5)$$

이 식들을 사용하여 Hook의 법칙에 대입하여 임의의 점에서 노출된 응리값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (6)$$

두축의 응력이 동시에 존재할 때는 중첩의 원리를 사용하여 2축응력 상태에서 노출된 변형률을 구할 수 있다.

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad (7)$$

관계식은 측정된 변형률로부터 두 주응력과 가, σ 를 얻기 위한 식으로 바뀌게 된다. 세개의 비지수가 있기 때문에 세개의 독립적인 변형률의 측정이 이루어져야 한다. 이 세 측정값은 순차적으로 45°씩 증가하는 로켓트 스트레인 게이지를 사용하여 구할 수 있다.

2) Blind-Hole 해석

관통구멍 해석과 비교해 볼 때 비관통구멍 해석은 하나 더 많은 독립변수가 필요하게 되지만, 본 연구에서는 Schajer에 의해 제안된 식을 사용하여 두 개수를 구하였다.

$$\bar{a} = \frac{2E\bar{\Delta}}{1+\nu} \quad (8)$$

$$\bar{b} = 2E\bar{B} \quad (9)$$

인장 구멍저름에 대해 노출된 스트레인은 구멍깊이가 증가함에 따라 증가하게 된다. 이 과정은 구멍깊이가 지름과 같거나 약간 클 때까지 계속된다. 그러므로 본 연구에서는 스트레인 신호를 최대로 하기 위해서 구멍깊이를 Z/D₀=1로 정하였다.

4.2 실험 시편 제작

용접구조물의 잔류응력을 측정함에 있어서 용접시편의 크기는 실제 구조물에 존재하는 정도의 잔류응력을 포함할 수 있도록 충분한 크기를 갖고 있어야 한다.

본 논문에서는 용접구조물의 길이 및 너비효과를 감안하여 다음과 같이 용접 시편을 제작하였다. 용접모재는 일반 용접 구조물로 가장 많이 사용하는 SS41을 사용하였다. 너비 100 mm, 길이 150 mm, 두께 6 mm의 시편을 전류와 전압을 변화시키거나 탄산가스 V형 빗대기 단면 용접하였다. 첫번째 패스는 용접 속도, 9 mm/sec로 220A, 27V의 조건에서 용접을 수행하였고, 두번째 패스는 용접 속도, 9.4 mm/sec로 전류 250~285A, 전압 30~35V를 적절히 조정하여 가비 용접을 수행하였다. 이때 Shielding Gas로는 탄산가스만을 사용하였다.

4.3 실험 과정 및 결과

앞 절에서 언급한 원리를 바탕으로 위에서 용접된 시편의 잔류응력을 측정함에 있어, 스트레인 게이지, 변형률 측정 장치 그리고 구멍 뚫기 작업등은 보다 정확한 실험 결과를 위해 매우 신중히 결정되었다.

중심을 중심으로 세 개의 서로 다른 스트레인 게이지를 인정한 각도와 거리를 유지하도록 시편에 부착하는 일은 대

단히 힘든 일이다. 그러므로 본 연구에서는 세 개의 그리드가 한 개이진에 들어있는 Rosette Strain Gauge를 사용하였다.

변형률 측정장치로는 고 정밀도의 Strain Indicator를 사용하였고, Switch & Balance Unit을 사용하여 세 개이진의 출력력을 동시에 인입으로써 구멍 뚫기 작업시 한번에 세 개의 변형율을 얻을 수 있었다.

구멍은 드릴의 진동에 관계없이 개이진의 중심에 매우 정밀하게 가공되어이힘으로 Milling Guide라는 보조장치를 사용하였다.

이상의 과정을 4개의 시편에 반복적으로 수행하였다. 잔류응력은 중심심을 중심으로 감소되는 경향을 보였으며, 끝단에 가까워지면 그 크기가 급격히 줄어들고, 그 최대 값은 항복응력보다 약간 큰 수치를 보이주었다.

이상에서의 결과를 수치해석의 결과와 비교하여 각각의 용접조건에 대한 실험치를 해석치와 비교하였다. 진만저으로 응력분포의 경향은 일치하였으나 정량적인 문제에서 약간의 오차를 발견할 수 있었다.

본 연구의 목적상, 해석에 의한 결과값은 실험에 의한 결과 값과 비교해 볼 때 어느 정도 신뢰성을 지니고 있다고 판단되므로 인공 신경망 회로에 학습시켜 잔류응력을 예측하는 데 적절한 데이터라 할 수 있었다.

5. 인공신경회로망에 의한 잔류응력 예측

5.1 학습과정 및 데이터 처리

인공신경회로망은 많은 변수들이 매우 심한 비선형성을 나타내는 공정에 효과적으로 사용할 수 있으므로 탄산가스 아크 용접에 의한 용접 후 잔류응력 예측에 적용하여 기존의 예측방법에 새로운 내인을 제시하였다.

용접은 전류와 전압을 변화시키거나 수행되었으므로 입력 변수는 전류와 전압으로 정하였고 활성화 함수로 사용된 Sigmoid 함수의 특성상 값이 0.1~0.9 사이의 값으로 표준화하여 사용하였다. 출력 변수는 실험치 신뢰성이 입증된 유한요소법에 의한 실험치 결과치, 즉, 종방향 응력과 횡방향 응력을 역시 0.1~0.9 사이의 값으로 표준화하여 적용하였다. 여기서 가 노드와 진접 사이의 응력 변화는 거의 선형적이므로 수치해석 모델과 비슷한 비율의 진접 분할을 출력 층에 적용하였다. hidden layer의 경우, 기존의 논문을 참고하여 다른 모델보다 오차율이 적고 안정적인 20×20의 형태를 택하였다.

학습에 필요한 자료는 전류, 전압이 각각 220~285A, 27~35V로 변화시키거나 계산된 데이터를 기초로 하였으며, 가 데이터의 잔류 응력 분포 변화가 그다지 크지 않으므로 학습에 필요한 데이터 수는 10개로 한정시켰다.

5.2 잔류 응력 예측

이상의 학습 방법에 의해 인공신경회로망을 학습시킨 결과 95.3%의 학습율을 얻을 수 있었고, 학습된 범위 내에서의 잔류 응력 결과는 최고 오차 7%를 넘지 않았다. 이는 입의의 전류, 전압을 신경회로망에 입력했을 때 나오는 출력을 비교하여 알 수 있었다.

10개의 학습 데이터와 같은 입력을 학습된 예측 프로그램에 적용하였을 경우 결과 값은 학습 데이터와 거의 차이를 못 느낄 정도였고, 학습된 데이터 사이의 값을 입력하여 인공 신경망을 이용하였을 경우 출력은 학습된 출력 데이터의 사이에 있는 값을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제시된 잔류응력 예측방법은 기존의 예측 방법과 비교하여 볼 때 신뢰성 문제에 있어서 수치해석적 기법과 큰 차이가 없을뿐 아니라, 경제적인 측면에서도 실험적 방법이나 수치적 계산 방법에 비해 일등히 우수함을 알 수 있었다. 이 방법에 의해 직진한 데이터로 학습된 용접공정의 경우, 매우 신속하고 정확하게 용접 잔류 응력을 구할 수 있으므로 산업 현장에 쉽게 응용이 가능하며, 품질 및 생산성 향상에 큰 도움을 줄 수 있으리라 생각된다.

6. 결론

지금까지 유한요소법과 인공 신경회로망을 이용하여 탄산가스 아크 맞대기 용접의 잔류응력 예측방법에 관하여 알아보았다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각기 다른 용접조건으로 탄산가스 아크 맞대기 용접을 실시한 후 Hole-Drilling 방법으로 잔류응력을 측정하여 부위에 따른 잔류응력의 분포 및 특성을 알 수 있었다.
2. 유한요소법을 이용하여 탄산가스 아크용접의 3차원 열진도 해석을 수행하였으며 열진도 해석 결과를 응력해석에 적용하여 잔류응력값을 계산하였다.
3. 다양한 수치해석 결과를 실험치와 비교하여 유한요소법을 이용한 수치해석의 신뢰성을 입증하였다.
4. 수치해석에서 얻은 결과를 인공신경망에 학습시켜 주어진 범위내의 전류, 전압에 대한 잔류응력을 구할 수 있는 새로운 예측 법을 제시하였다.
5. 본 연구에 의한 예측결과는 신속성과 정확성 면에서 기존의 방법보다 우수함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Lippmann, Richard P., "An Introduction to Computing with Neural Nets.", *IEEE Assp Magazine* (1987)
2. Onda, H. and Y. Nishinaga, "Neural Net Application to Welding Defect Identification.", *Journal of Fujitsu Science and Technology* (1993)
3. "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Strain Gage Method." *Measurement Group Tech Note TN-503-3* (1988)
4. Schajer, G. S., "Application of Finite Element Calculation to Residual Stress Measurements." *Journal of Engineering Materials and Technology*, 103 (1981)
5. Rosenthal, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting." *Welding Journal*, 20 (1941)
6. Fridmann, E., "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method." *Journal of Pressure Vessel Technology*, Trans. ASME, 97 (1975)
7. Tekriwal, P. and J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding." *Journal of Welding Research* (1988)
8. Ueda, U. and Y. C. Kim, "A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress." Trans. JWRI, 18 (1989)

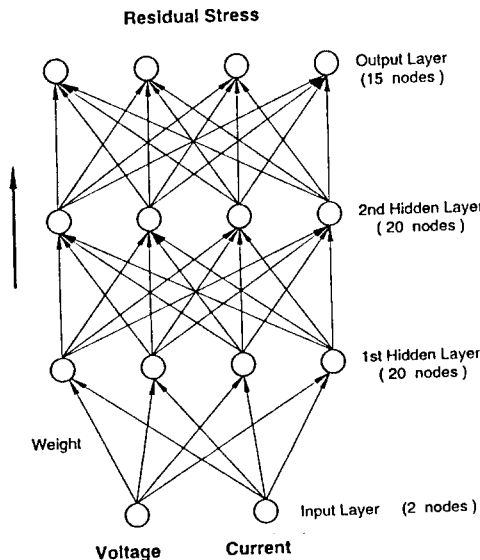


Fig.1 Schematic Diagram of Neural Network

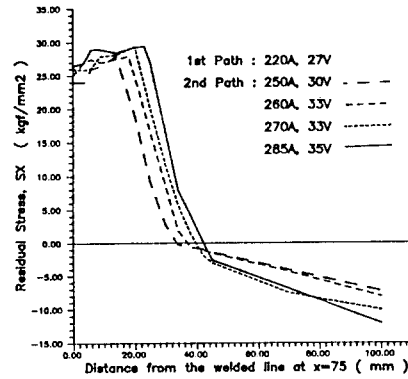


Fig.2 Longitudinal Residual Stress Distribution by FEM

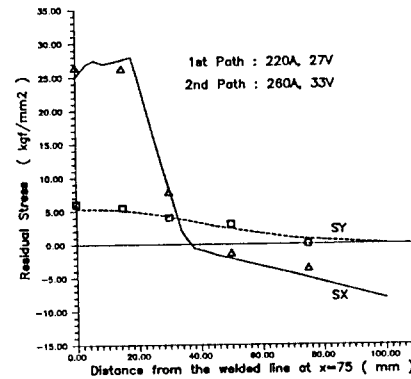


Fig.3 Comparison of Experiment Data with Analysis Data

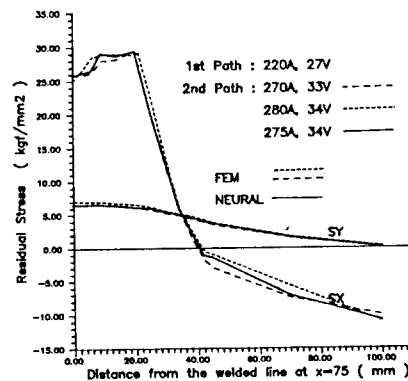


Fig.4 Verification of Predicted Data by Neural Network