

원주 TIG 용접에서 이면 비드 형상 제어를 위한 Filler Wire 송급힘과 용접자세의 상관 관계에 대한 연구

A study on the mapping between the feeding force of filler wire and welding position for the control of back bead shape in orbital TIG Welding

° 강선호*, 조형석**, 장용삼***, 장희석****, 우승엽****

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 (Tel:02-958-3451; Fax:968-1638)

**한국과학기술원 기계공학과 (Tel:042-869-1638; Fax:042-869-3210)

***대성중앙연구소 (Tel:02-293-0126; Fax:02-292-8788)

****명지대학교 기계공학과 (Tel:0330-30-6424; Fax:0330-36-9998)

Abstracts In TIG welding of pipe, back bead size monitoring is important for weld quality assurance. Many researches have been performed on estimation of the back bead size by heat conduction analysis. However numerical conduction model based on many uncertain thermal parameters causes remarkable errors and thermomechanical phenomena in molten pool can not be considered. In this paper, filler wire feeding force in addition to weld current, wire feedrate, torch travel speed and orbital position angle is monitored to estimate back bead size in orbital TIG welding. Monitored welding process variables are fed into an artificial neural network estimator which has been trained with the monitored process variables (input patterns) and actual back bead size (output patterns). Experimental verification of the proposed estimation method was performed. The predicted results are in a good agreement with the actual back bead shape. The results are quite promising in that estimation of invisible back bead shape can be achieved by analyzing the welding parameters without any conventional NDT of welds.

Keywords Orbital TIG welding, Artificial neural net, Feeding force, Back bead shape, Estimator

1. 서론

Tungsten Inert Gas Welding은 비소모성 텅스텐 전극과 용접 모재 사이에 아크를 발생시켜 금속을 접합하는 용접 방법으로서 용융부 산화방지를 위한 분위기 가스로는 불활성가스로 아르곤(Ar)이나 헬륨(He) 또는 이의 혼합 가스를 주로 사용하며 이 불활성가스는 텅스텐 전극봉이 들어있는 노즐을 통하여 공급된다. 용가재 (filler wire)는 대부분의 박판 경우에는 사용하지 않고 후판의 경우 Groove 작업과 함께 공급하게 된다. 일반 아크 용접과는 달리 TIG 용접은 spatter가 없고 양질의 용접이 가능하여 많은 분야 특히 정밀용접 분야에 널리 적용되고 있다. TIG 용접 적용 분야 중에서 특히 고기능이 필요한 원주 TIG 용접은 현재 송유관, 가스배관, 핵 및 화학 플랜트의 파이프 라인 용접에 이용되고 있으나 모두가 수작업에 의존하고 있다. 파이프 라인에서 양질의 용접 결과를 얻기 위해서는 초층용접 (Root Run)시 용접부 이면비드 (Back Bead) 형성이 가장 중요하다. 고정된 파이프가 수평 위치로 놓여 있는 경우 원주 방향을 따라 0° ~ 360° 로 용접 토치가 회전을 하면서 용접을 하게 되면 용접 자세에 따라 용접 조건이 달라지게 되며 용접 토치가 위치한 장소에 따라서 이면 비드 형성이 영향을 주는 중력, 표면장력, Arc Pressure, 액상 고상의 계면장력, 용접방향 등의 요인이 달라지게 된다. 이들 용접 공정 변수와 이면 비드 형상의 관계를 실험적으로 나타내는 연구와 위의 상관관계를 열전달 현상을 분석하여 해석적으로 구하는 연구가 수행되어 왔으나 이는 많은 단순화와 가정을 통한 결과이며 실제의 경우는 용접 공정이 비선형 특성을 나타내므로 실용화 시키기 어렵다.

특히 Filler Wire를 공급하는 경우 Filler Wire로 용융 풀 (Molten Pool)을 이면 방향으로 밀어주는 힘이 존재하게 되어 해석적인 방법의 적용은 더욱 어렵다. 대표적으로 180° 위치 즉 위보기자세의 경우 용융된 모재가 중력 방향으로 흘러내려 모재이면보다 높은 이면 비드 형성이 매우 어렵다. 이 경우 Filler Wire의 송급량을 증가시켜 용융풀을 위 방향으로 더 많이 밀어 주게 되면 높은 이면비드 형성이 가능하게 된다.

Filler Wire 송급량의 증감은 곧바로 용융풀을 지지하는 힘으로 나타나게 되며 용융풀의 형성 정도에 따라서 송급 힘 (feeding force)이 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 송급힘을 포함한 용접공정 변수와 이에 대응하는 이면 비드 형상과의 관계를 인공신경 회로망을 이용하여 규명하였다.

2. 실험장치

본 연구에서는 Transistor Inverter 제어 방식의 TIG 용접기를 이용하였다. 360° 회전이 가능한 회전 작업대에 1축 Robot 이송장치를 장착하였으며 Robot 이송대 위에 용접 토치를 부착하여 토치 이송속도를 제어하였다. 용접 시편은 회전작업대에 설치한 Jig를 이용하여 용접할 두 개의 시편을 설치하고 용접 도중 발생하는 열변형을 방지하였다.

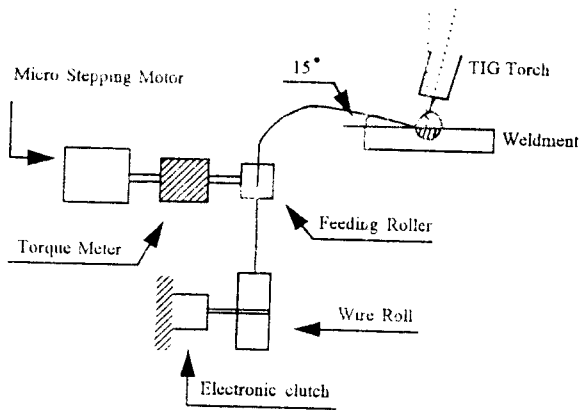


그림1. Filler Wire Feeding Unit 구성도

Filler Wire 이송장치는 그림 1과 같이 구성하였다. Wire Roll에 감겨 있는 Filler Wire가 탄성력에 의해 풀려 짐을 방지하도록 전자 클러치를 이용하였으며 Feeding Roller를 이용하여 송급되어지는 Filler Wire에 작용되는 힘을 측정하기 위해 구동 모터와 사이에 Torque Meter를 부착하였다. 용접토치와 Filler Wire Nozzle은 용접실험 중 위치 변동이 없도록 고정시킬수 있는 Jig를 사용하였다. 실험장치는 강판을 이용하여 용접 실험을 하지만 실제 수평으로 고정된 파이프의 원주방향 용접과 동일한 용접자세를 취하여 용접할 수 있도록 제작되어 있다.

3. 용접 실험

실험에 사용된 용접 시편은 현재 LNG 배관용 파이프의 규격에 해당하는 두께와 Groove 형상을 적용하였으며 그림 2와 같이 두께 6mm의 압연 강판으로 폭 45mm 두께 150mm로 절단하였고 용접부는 45° Single V-Groove로 가공하였으며 Root Face는 0.5mm 가 되도록 제작하였다.

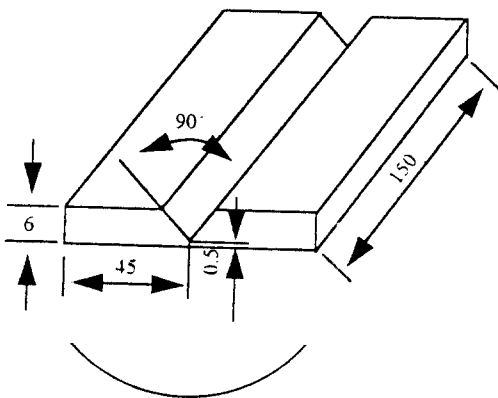


그림2. 용접시편 형상

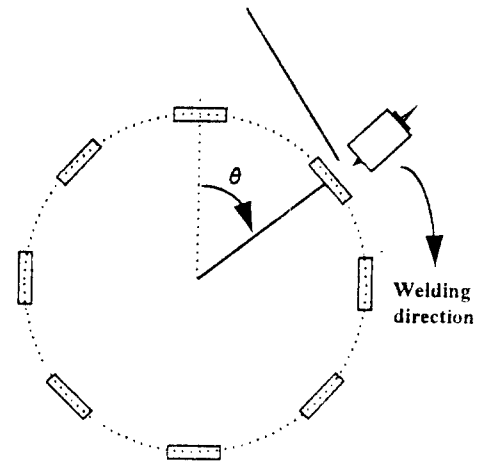


그림3. 용접 자세

원주용접에서의 여러자세에 대한 용접조건 실험은 그림 3과 같이 45° 간격으로 8가지 용접자세에 대하여 모든 자세에서 이면 비드가 형성되는 조건으로 실험을 하였다. 용접은 90초 동안 진행시키고 시작후 일정시간이 지난 뒤 용접상태가 정상 상태에 도달하고 난후 데이터를 취득하였으며 이 부분의 용접물을 절단하여 이면 비드 명상을 측정하였다. 각 실험조건에 따라 원하는 이면 비드 폭 (B_w)과 이면비드높이 (B_h)를 얻을 수 있도록 하는 용접공정 제어 변수는 용접전류 (I), 토치이송속도 (V_t), 용접위치 (θ), Filler Wire 송급속도 (V_w)로 하였으며 이면비드폭과 이면비드높이를 추정하기 위한 변수로 Filler Wire 송급힘을 측정하였다. 기초실험으로 용접공정변수 변화에 따른 Filler Wire 송급힘을 측정하였으며 이를 근거로 이면비드 명상을 추정하기 위한 Filler Wire 송급힘과 용접공정변수와의 상관관계 실험을 수행하였다. 본 연구의 실험은 용접전류와 토치이송속도를 각각 $I=140A$, $V_t=1.4mm/s$ 로 고정 시켜두고, 용접위치 θ 와 Filler Wire 송급속도 (V_w)를 제어하였으며 각 조건에 대한 Filler Wire 송급힘 (F_w)과 이면비드 명상을 측정하여 인공신경 회로망을 이용, 식(1)의 상관관계를 구하였다.

$$S(B_w, B_h, F_w) = F(I, V_t, \theta, V_w) \quad (1)$$

4. 실험결과 및 고찰

기초 실험으로 실시했던 용접 전류 변화에 따른 Filler Wire 송급힘 변화는 그림 4에 나타내었다. $V_t=1.4mm/s$, $\theta=0^\circ$, $V_w=37.7mm/s$ 로 고정시키고 용접전류를 증가시켰을 때 Filler Wire 송급힘이 감소함을 나타낸다. 이는 용접 전류 증가에 따라 용융부 입열량이 증가하여 모재를 많이 용융시키게 되고 이에 따라 Filler Wire 송급힘은 용융부의 송급 저항력이 감소하게 되어 송급힘도 따라서 감소한다. 즉 Filler Wire 송급량이 일정해도 용접전류 변화에 따라 용융부에 송급되는 Filler Wire의 송급힘은 변화가 발생함을 알 수 있다.

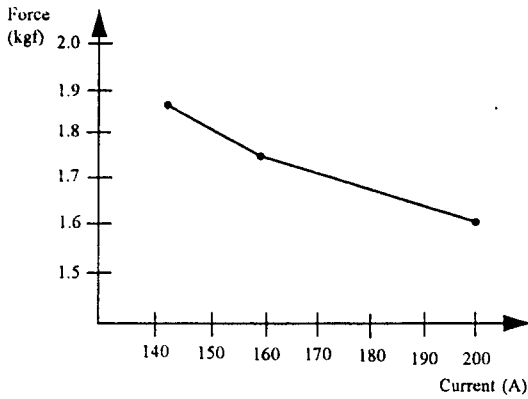


그림 4. 전류변화에 따른 Wire 송급힘 측정
($V_t=1.4\text{mm/s}$, $V_w=37.7\text{mm/s}$, $\theta=0^\circ$)

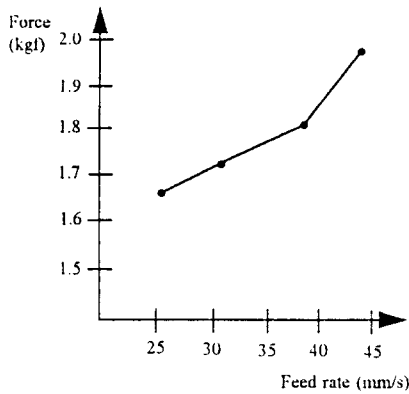


그림 5. Filler Wire Feed Rate 변화에 따른 Wire 송급힘 측정
($V_t=1.4\text{mm/s}$, $I=140\text{A}$, $\theta=0^\circ$)

그림 5는 $I=140\text{A}$, $V_t=1.4\text{mm/s}$, $\theta=0^\circ$ 로 고정시키고 송급속도만 변화를 주었을 때 송급힘과의 관계를 실험한 것이다. 용접전류를 일정하게 하여 용융부 입열량을 고정시켜도 Filler Wire 송급량이 증가함에 따라 용융부의 용융온도가 감소하게 되어 Filler Wire의 송급 저항력이 증가함을 알 수 있다. 따라서 그림 4와 그림 5로부터 용융부의 용융상태를 추정할 수 있는 변수로서 Filler Wire 송급힘을 측정, 이용 가능함을 알 수 있다.

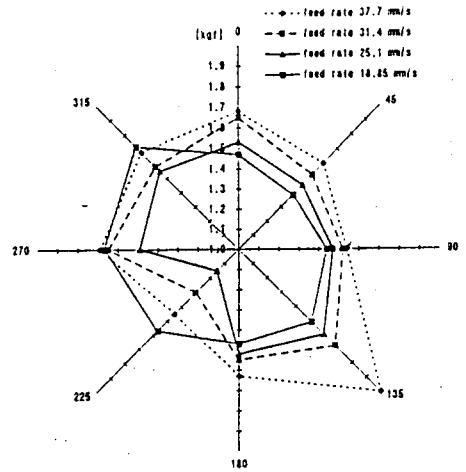


그림 6. 용접자세별 Wire Feed Rate 변화에 따른 송급힘 변화 측정
($V_t=1.4\text{mm/s}$, $I=140\text{A}$)

그림 6은 용접 위치 변화에 따른 송급힘 변화를 실험한 것이다. 실험한 것이며 $I=140\text{A}$, $V_t=1.4\text{mm/s}$ 로 고정시키고 용접위치별 Filler Wire 송급 속도에 따른 송급힘 변화를 측정한 것이다. 135° 위치에서의 송급힘은 다른 용접자세에 비해 크게 나타나고 있으며 이는 Wire feeding nozzle과 반대 방향인 Torch 이동 방향으로 용융금속이 치우치게 된 결과로 보인다. 반대 위치인 225° 위치에서는 상대적으로 송급힘이 낮게 나타나고 있으며 용융금속이 Wire feeding nozzle 쪽으로 치우쳐 온도 분포가 높게 된 결과이다. 각 위치에 대한 Filler Wire 송급속도에 따른 힘 분포는 송급속도가 증가할수록 송급힘이 증가하는 경향을 나타내고 있으나 동일한 송급속도에 대한 용접 위치별 송급힘 변화는 용융금속이 중력 방향으로 치우치는 결과에 따라 다른 경향을 나타낸다. 실험결과 중 각 위치별 Wire Feed Rate 증가에 따라 송급힘이 증가하는 경향을 나타내고 있으나 $V_w=18.85\text{mm/s}$ 의 경우는 송급힘의 변화가 Wire Feed Rate 변화에 따른 경향에 어긋나 있다. 이 경우는 이면비드가 제대로 형성되지 않은 경우로써 이면비드가 형성되는 경우에 비해 각 위치별 송급힘이 크게 나타나고 있다.

표 1. 신경회로망을 통한 Wire 송급힘, 이면비드폭과 높이의 예측 결과

Torch position angle	Estimation error (%)		
	Force	Back bead width	back bead height
0°	-3.94	-6.71	-23.89
0°	4.25	3.36	14.82
45°	13.07	-1.50	7.20
90°	7.60	-3.65	9.61
90°	-0.31	-7.97	22.52
135°	-8.28	11.16	45.41
180°	9.04	3.70	9.24
180°	13.15	12.96	15.72
225°	-16.00	-3.89	16.70
270°	3.21	-11.56	-39.80
315°	-5.69	-1.93	0.28

6. 결론

원주용접의 경우 이면비드 형상을 추정, 제어하기 위한 파라미터로 Filler Wire 송급힘이 중요하게 작용함을 알 수 있다.

첫째, 용접전류 변화에 대한 송급힘의 변화를 측정할 수 있다. 즉 전류 변화에 따른 용융풀 변화를 송급힘을 측정함으로써 추정 가능하다.

둘째, Filler Wire 송급량에 따른 송급힘 변화가 측정 가능하다.

셋째, 송급힘을 포함한 용접 공정 변수와 이면비드 형상과의 관계를 인공신경회로망을 이용하여 Mapping 관계를 찾을 수 있다.

학습 예러와 추정 예러를 줄이기 위해 충분한 학습 데이터가 필요하나 본 논문에서 사용된 데이터는 용접 위치별 실험데이터가 다소 부족하나 향후 충분한 양의 데이터를 사용하여 더욱 정확한 Mapping을 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] AWS, "Welding Handbook", 1991, pp.74~88
- [2] Larry Jeffus, "Welding : principles and applications", pp. 338~344
- [3] Yoh-Han Pao, "Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989
- [4] Shin Kikushima, "Development of a Parameter Generating System for Arc Welding Based on Heat Conduction Analysis", Transactions of Japan Welding Society, Vol. 17, No. 1, April, 1986

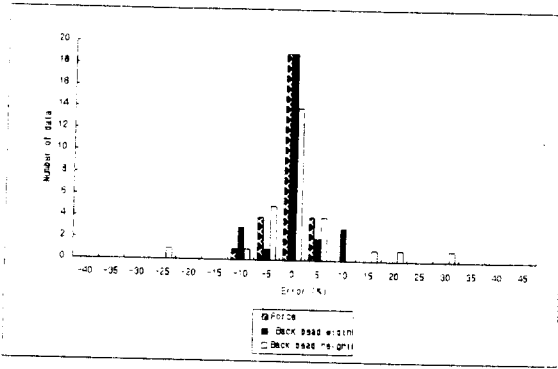


그림6. 학습 오차 분포

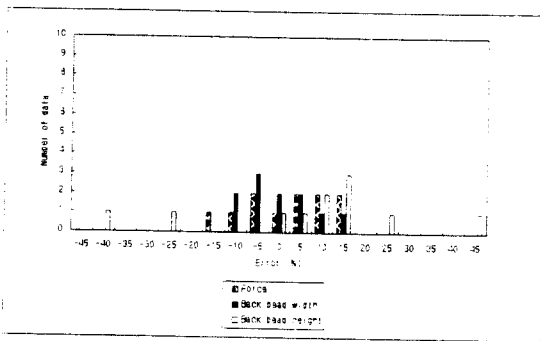


그림7. 추정 오차 분포

원주 TIG 용접에서 용접공정변수와 이면 비드 형상의 상관관계를 구하기 위하여 용접조건에 대한 토치의 위치 (θ), Filler Wire 송급속도 (V_w), 전류 (I), 토치이송속도 (V_t) 등 4개를 입력패턴으로 사용하고 송급힘 (F_w), 비드폭 (B_w), 비드두께 (B_n) 등 3개를 출력 패턴으로 사용하여 인공신경 회로망을 구성하였다. 28개의 실제 실험한 실험데이터로 학습(Training) 하였으며 인공신경회로망의 이면 비드 형상과 송급힘에 대한 추정능력을 11개의 데이터로 검증하였다. 인공신경회로망을 이용한 용접질 추정 기법의 성능 향상을 위하여 은닉층의 수와 노드 (Node)수를 바꾸어가며 회로망을 구성하여 수행한 결과 첫 번째 은닉층의 노드의 수를 18개, 두 번째 은닉층의 노드의 수를 14개로 구성하는 것이 다른 구조의 신경회로망에 비하여 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 표1은 4-18-14-3의 신경 회로망을 통한 예측결과의 오차를 나타낸 것이다. 표1에 나타난 것과 같이 송급힘과 이면비드의 폭에 비교하여 이면비드 두께에 대한 오차가 큼을 알 수 있다. 이는 원주 용접질의 결정에 가장 중요한 이면 비드 높이는 입력패턴으로 사용한 토치의 위치 (θ), Filler Wire 송급속도 (V_w), 전류 (I), 피용접속도 (V_t) 등 4개의 용접공정변수 이외의 다른 변수의 영향도 받기 때문이라 판단된다. 또한 용접시편의 제작시 이면 비드 형성에 영향을 주는 Root Face를 일정하게 하지 않은 것도 오차의 폭을 크게 하는데 영향을 미친 것 같다.