

GMA 용접공정에서 적외선 온도 센서를 이용한 용융지 크기 예측

Weld pool size estimation of GMAW Using IR Temperature Sensor

김병만 · 김영선 · 조형석

한국과학기술원 기계공학과 (Tel : 869-3253; E-mail : kbm@lca.kaist.ac.kr)

ABSTRACT : A quality monitoring system in butt welding process is proposed to estimate weld pool sizes. The geometrical parameters of the weld pool such as the top bead width and the penetration depth plus half back width are utilized to prove the integrity of the weld quality. The monitoring variables used are the surface temperatures measured at three points on the top surface of the weldment. The temperature profile is assumed that it has a gaussian distribution in vertical direction of torch movement and verify this assumption through temperature analysis. A neural network estimator is designed to estimate weld pool size from temperature informations. The experimental results show that the proposed neural network estimator which used gaussian distribution as temperature information can estimate the weld pool sizes accurately than used three point temperatures as temperature information. Considering the change of gap size in butt welding, the experiment were performed on various gap size.

KEY WORDS : Gas Metal Arc Welding Process, Weld Pool Size, Surface Temperature, Neural Networks, Weld pool size Estimator, IR temperature sensor, Gaussian Temperature Estimator

1. 서론

GMA(Gas Metal Arc) 용접 공정은 소모성 전극과 용접할 모재 사이에 고전류를 가할 때 발생하는 전기적인 아크를 열원으로 하여 용접물을 접합하는 공정이다. 일반적인 용접 공정은 모재의 용융과 응고, 재결정 과정을 거치고 이로인해 형성된 용융지의 크기는 용접부의 기계적 성질에 큰 영향을 미치므로 용접의 품질을 판단하는 중요한 인자로 사용된다. 이 용융지의 크기는 그림 1과 같이 표면 비드 폭, 용접 깊이 및 이면 비드의 크기로 나타낼 수 있다. 이러한 용접부의 형상에 큰 영향을 미치는 인자들로는 용접 전류와 아크 전압, 토치의 이송속도, 전극의 크기 및 위치, 보호 가스 등이 있다.

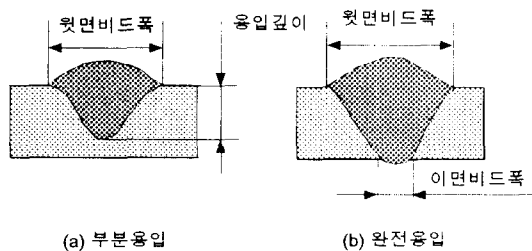


그림 1. 용융지의 크기

최근 아크 용접의 자동화에 대한 필요성이 증가하면서 용접부의 품질을 실시간으로 모니터링하는 연구가 활발하게 진행되어 왔는데 이를 위해서는 먼저 용접의 품질을 잘 대변해 줄 수 있는 적절한 변수들의 선정이 중요하다. 그 중에서도 용융지의 표면 온도, 용접시의 전류, 전압의 변동 그리고 윗면 비드의 크기들은 이를 위해 사용되고 있는 중요한 용접 변수들이다. 용접부의 표면 온도는 용융지의 크기와 밀접한 관련이 있으므로 온도 해석을 통한 용융지의 크기 해석에 많은 관심을 기울여왔다. D.H.Hardt [1] 와 Doumanidis [2]는 단순화된 용융지의

모델을 구성하여 용융지의 크기를 제어하였는데 이것은 모두 Rosenthal [3]의 열전달 식으로 부터 얻어진 단순화된 용접부의 모델을 근거로한 해석 방법이다. 이 해석적인 방법들은 기본적으로 많은 가정들이 포함되어 있고 용접 공정에서의 외란에 대한 고려를 할 수 없다는 한계때문에 용융지의 크기를 정확하게 예측하는 데에는 큰 어려움이 따른다. 따라서 실제 공정에서 온도를 측정함으로써 용융지의 크기를 예측하고자 하는 노력이 진행되었다. 이러한 연구로는 포토 다이오드를 이용하여 용접부의 한 점의 온도를 측정하므로 용융지의 크기를 예측하는 방법[4]과 아크의 영향을 크게 받는 윗면의 온도를 측정하는 대신 이면온도를 측정하여 용융지의 크기를 예측하는 방법[5] 그리고 용접부의 온도를 스캐닝하여 얻어진 온도 구배로부터 용융지의 크기를 예측하거나 용접선을 추적하는 방법[6] 그리고 IR camera를 사용하여 얻어진 열화상을 영상처리를 통하여 해석함으로써 용융지의 크기를 예측하는 방법[7]등이 소개되었다.

2. 용접변수의 선정

본 연구에서는 용융지의 온도 분포를 얻기위해 표면의 온도가 용접 진행방향의 횡방향으로 가우시안 분포를 갖는다고 가정하였다. 이것은 D. Hardt 에 의해 아크 용접의 경우 모재에 가해지는 열입력이 용접 진행 방향의 횡방향으로 가우시안 분포를 갖는다는 것[1]과 여러가지 온도 해석을 통해 얻어진 결과들[6, 8, 9]에서 이런 가정이 타당하다고 할 수 있다. 또한 용융지의 온도분포를 IR camera를 통해 얻어진 W. Chen [7]의 결과에서도 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다.

이것은 용접 아크열이 일반적으로 가우시안 분포와 가깝고 일반적인 열전달의 경우 열이 지수함수 형태로 전달되는 것에서 유추할 수 있다. 따라서 이상적인 용접조건에서 표면 온도 분포를 가우시안으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이 가우시안 온도 분포는 다음과 같이 나타낸다. 즉,

$$T - T_o = (T_{max} - T_o) \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

여기에서 T_{max} 는 온도의 최고점이고 σ 는 분포의 분산이며, μ 는 모재의 표면에서 T_{max} 가 발생하는 위치이다. 여기에서는 용접선을 따라 최고 온도가 발생한다고 가정하므로 μ 는 항상 0이 된다. 따라서 온도 분포는 T_{max} 와 σ 의 두 값으로 간단히 나타낼 수 있다. 이 값들을 용접변수로 사용할 수 있는지를 판단하기 위해 기존의 온도해석 모델을 이용하여 용접 조건과 가우시안 분포값의 관계를 나타내었다.[10] 그 결과는 그림 2에 나타내었다.

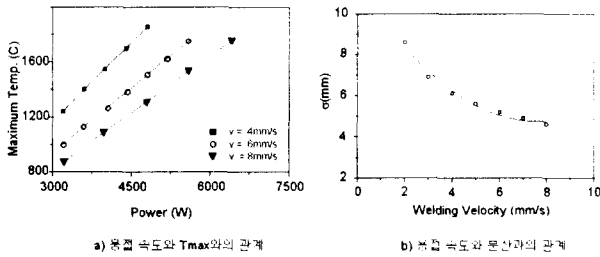


그림 2. 용접조건과 가우시안 분포의 관계(온도 해석)

이때 용접 표면의 온도분포로부터 열량을 구하여 보면

$$q = \int_{-\infty}^{\infty} c_p \cdot T(x) \cdot dV \quad (2)$$

이다. 이때 $dV = d \times dx \times dy$ 이므로

$$q = \int_{-\infty}^{\infty} c_p \cdot T_{max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot d \cdot dx \cdot dy \quad (3)$$

이를 용접 토치의 이송 방향에 대해 단위길이당 열량으로 나타내면

c_p 가 상수의 값을 갖는다고 할때,

$$q/x = \sqrt{2\pi} \cdot c_p \cdot d \cdot T_{max} \cdot \sigma \quad (4)$$

이다. 즉 용접시 모재에 작용하는 단위 길이당 열입력은 $T_{max} \times \sigma$ 에 비례하는 값이라고 할 수 있다. 따라서 이 값을 용융지의 크기를 예측하는 인자로 사용하였다.

3. 온도분포와 용융지 크기 측정

표면 온도분포와 용융지 크기의 상관관계를 얻기 위하여 다양한 용접조건에 대해서 용접 실험을 수행하였다. 표면 온도 분포의 측정을 위해 고온의 온도를 측정할 수 있는 적외선 온도계를 설계하였다. 이 적외선 온도계는 비접촉식으로 측정하기 때문에 측정부가 고온을 건디어 내지 않아도 되고 측정대상의 온도가 변하는 경우에도 측정시간이 짧아 여러점을 하나의 센서로 측정할 수 있고 움직이는 물체의 온도 측정이 용이한 장점이 있다. 이 적외선 센서의 출력값과 실제 온도 사이의 관계를 구하기 위해 센서의 교정 실험을 행하였고 그 결과 250°C에서 1200°C 사이에서 정확하게 온도를 측정할 수 있음을 알 수 있다.[10]

이 적외선 온도센서를 용접 진행방향의 횡축으로 일렬로 위치시키고 여기에서 측정된 세점의 온도값으로부터 RMS(root mean square) 오차가 최소값이 되는 가우시안 온도분포를 구하였으며 용접 시험이 끝난후 시편처리를 통해 각각의 조건에 대해 용접폭, 용접 깊이를 측정하였다. 실험에 사용한 시편은 열간 압연 ANSI 1025 강판이며 두께는 4mm, 크기는 300 x 50mm 이다.

용접시에 두 모재사이의 gap은 2mm를 두었고 보호가스로는 아르곤 가스를 사용하였다.

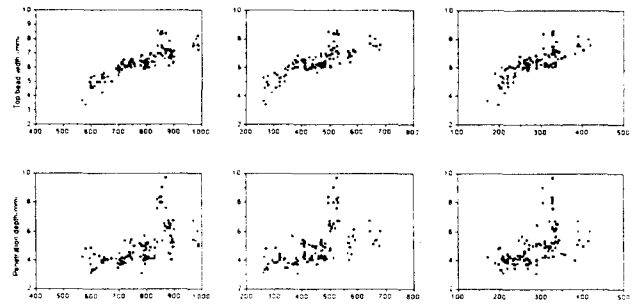


그림 3. 세 점의 온도측정과 용융지 크기의 관계

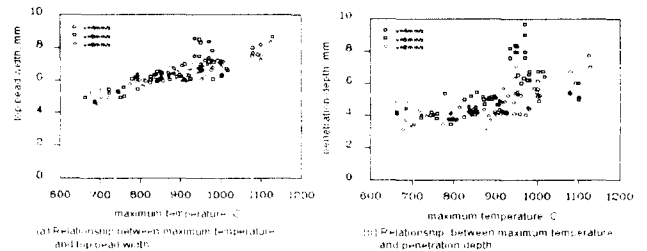


그림 4. 가우시안 분포와 용융지의 크기의 관계

그림 3은 용접선 중심에서 5mm(T_1), 10mm(T_2), 15mm(T_3) 떨어져고 뒤로 12mm 떨어진 점에서 측정한 온도 값과 용융지의 크기를 나타낸 것이고 그림 4는 이 값들로부터 얻은 T_{max} 와 σ 값과 용융지의 크기를 나타낸 것이다. 이때 용접 열입력량은 2800W에서 4800W 값을 주었고 속도는 4, 6, 8 mm/sec의 속도로 용접을 행하였다.

용접 공정중에는 고온의 아르곤에 의한 모재의 변형때문에 모재간의 gap 크기가 변하는 기하학적인 변형이 일어난다. 따라서 gap 크기의 변화에 따른 온도분포와 용융지 크기 사이의 관계를 실험을 통하여 구하였다.

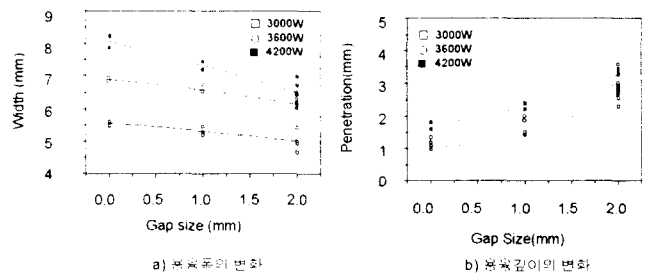


그림 5. Gap의 크기에 따른 용융지 크기

gap의 크기를 각각 0mm, 1mm, 2mm로 변화시켜 가면서 앞에서와 같은 용접 조건으로 실험을 행하였다. 그림 5는 gap의 크기가 달라질 때, 용접 속도가 6mm/s 인 경우 용접 power가 각각 3000W, 3600W, 4200W인 경우에 측정된 가우시안 온도분포와 용융지 크기 사이의 변화를 나타내었다. Gap이 커지는 경우 용융폭은 작아지는 대신 용융 깊이는 커진다. 이것은 gap이 커짐으로 아르곤에 의한 열이 모재의 아래부분까지 쉽게 전달되기 때문이다. 그림 6에는 용접 조건이 달라질 때 gap size의 변화

에 대한 T_{max} 와 σ 와 용융지 크기와의 관계를 나타내었다. 용융 폭의 경우 gap size가 변하더라도 최고 온도에 대한 폭의 크기의 변화가 작은 반면에 용융 깊이의 경우에는 gap의 변화에 따라 큰 변화를 보인다. 따라서 용융지의 크기를 예측하는 경우 gap에 대한 고려는 정확한 예측을 위해 필요하다는 것을 알 수 있다.

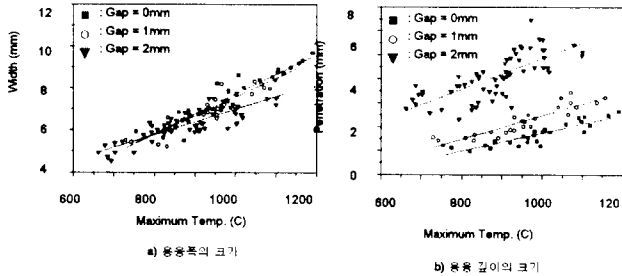


그림 6. 최고온도에 따른 용융지 크기

4. 신경회로망을 이용한 용융지 크기 예측

지금까지 실험을 통해 각각의 용접 조건이 변할 때 용융지 크기의 관계를 알아보았다. 이를 실제 용접 공정에 사용하기 위해 실시간으로 용접 품질을 예측할 수 있는 신경회로망을 이용한 용융지 크기 예측기를 구성하였다. 신경회로망은 수학적 접근이 어려운 시스템을 모델링하거나 최적화하는데 많이 사용하고 있는데[11], 용접 공정은 시스템 자체의 비선형성과 공정 해석의 어려움때문에 시스템을 정확하게 모델링할 수 없고 공정이 외란에 영향을 많이 받기 때문에 신경회로망을 이용한 용융지 크기 예측기를 구성하였다. 여기에서는 다층 퍼셉트론(Multilayer perceptron)을 사용하여 용융지 크기 예측기를 구성하였다.

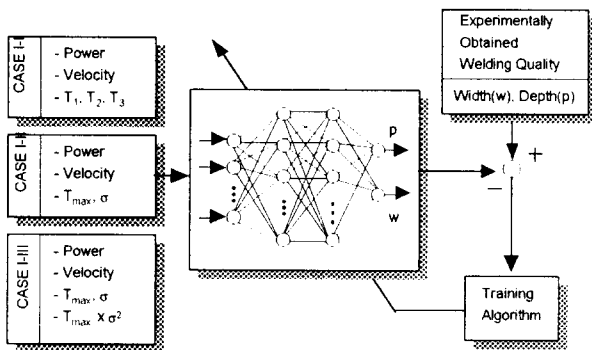


그림 7. 제안된 용융지 크기 예측기의 구조

이를 이용하여 앞의 실험을 통해 얻어진 측정된 온도 정보와 각각의 용접 조건을 입력으로하고 용융지의 크기를 출력으로 하는 용융지 크기 예측 시스템을 구성하였다.

4.1 Gap이 일정한 경우 용융지 크기 예측 결과

Gap이 일정한 경우 용융지 크기 예측기의 성능을 평가하기 위하여 학습에 사용하지 않은 30개의 입-출력 쌍을 이용하여 각각의 신경회로망의 성능을 평가하였다. 이때 중간층의 수는 2개이고 각각의 노드수는 20개였다. 입력으로 사용된 용접 변수들은 용접 속도, 열입력 그리고 앞에서 측정을 통해 얻

은 온도정보이다. 각각의 온도 변수들에 대한 용융지 크기 예측 성능을 알아보기 위해 세 점의 온도를 입력으로 사용한 경우와 가우시안 온도 분포를 사용한 경우 그리고 가우시안 분포와 표면온도로부터 얻은 열량을 입력으로 사용하는 경우, 이 세가지에 대해 용융지 크기 예측기를 구성하였다.

각각의 경우 예측 성능을 표 1에 나타내었다. 결과에서 세 점의 온도를 이용하여 신경회로망의 입력으로 사용한 경우보다 가우시안 온도 분포를 이용한 경우가 좀 더 나은 예측 결과를 보임을 알 수 있다. 이에 대한 오차의 빈도에 관한 그림은 그림 8에 나타내었다.

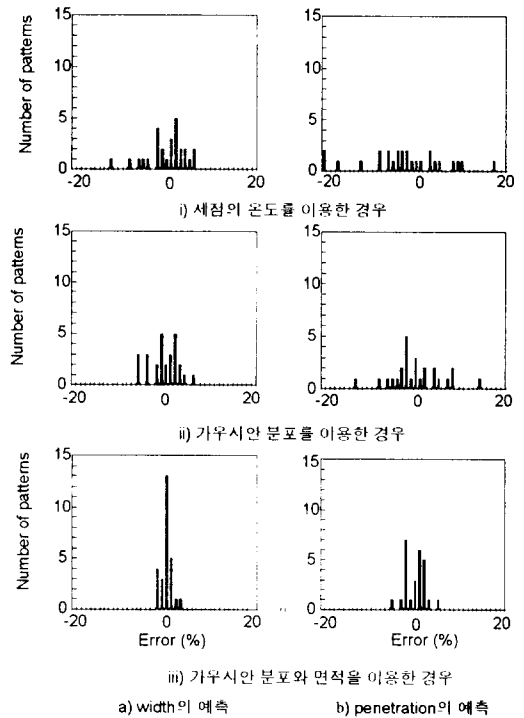


그림 8. Gap이 일정한 경우의 용융지 예측 결과

4.2 Gap의 크기가 변하는 경우의 예측 결과

앞에서 실험을 통해 구한 다양한 gap size에서의 실험 데이터를 바탕으로 측정 온도로 부터 용접 품질을 예측하기 위하여 신경회로망을 이용하여 gap이 변하지 않는 경우와 동일한 용접 품질 예측기를 구성하였다. 이때 입력으로는 용접속도, 열입력 그리고 온도 정보들을 사용하였다. 이때 온도 정보로는 마찬가지로 세 점의 온도와 가우시안 분포, 그리고 가우시안 분포와 열량에 해당하는 값을 입력으로 사용하였다. 사용된 신경회로망의 구조로는 중간층이 2개 그리고 각각의 층에 대한 노드의 수는 20개씩을 사용하였고 학습에 사용하지 않은 다른 입-출력 쌍 40개를 이용하여 용접 품질 예측 성능을 평가하였다.

표 2는 이에 대한 결과이다. 각각의 오차에 대한 빈도수를 나타내는 결과가 그림 9에 나타나있다.

5. 결론

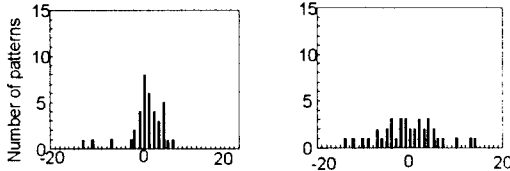
본 연구에서는 GMA 용접 공정에서 적외선 온도 센서에서 측정된 모재의 표면온도로부터 얻어진 온도분포를 이용한 용융지 크기 예측 방법을 제안하였다. 이를 위해 표면 온도를 측정

하기 위한 온도 센서 시스템을 구성하여 실제 맞대기 용접에서 표면의 온도를 측정하였고 신경회로망을 이용하여 용융지 크기를 예측하였다. 실험 결과로부터 얻은 결론으로는

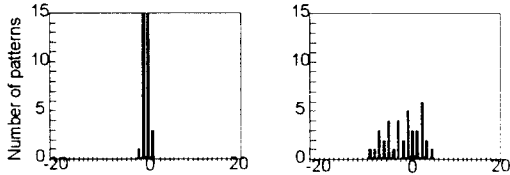
1. 용융지의 크기를 예측하기 위하여 구성된 신경회로망의 입력으로 용접부의 가우시안 온도분포를 이용하여 향상된 예측결과를 얻을 수 있었다.

2. 실제 용접 공정중에 작용하는 외란의 하나로 용접부의 갭이 변하는 경우 가우시안 온도분포값과 용융지 크기와의 관계를 보였다.

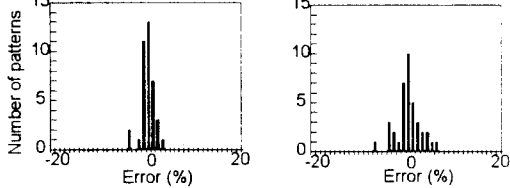
3. Gap 이 변하는 경우 온도분포를 가우시안으로 가정하는 경우 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었다.



i) 세점의 온도만을 이용한 경우



ii) 가우시안 온도분포를 이용한 경우



iii) 가우시안 분포와 편차를 이용한 경우

그림 9. Gap 이 변하는 경우 예측 결과

	평균 오차	분산	최고 오차
3점 온도	3.4 %	0.8	11.5 %
가우시안 온도 분포	2.5 %	0.6	6.4 %
가우시안 온도분포와 합	1.0 %	0.2	3.5 %

a) 용접 폭의 추정 결과

	평균 오차	분산	최고 오차
3점 온도	6.8 %	1.7	19.5 %
가우시안 온도 분포	4.2 %	1.1	12.3 %
가우시안 온도분포와 합	1.8 %	0.4	5.7 %

b) 용접 깊이의 추정 결과

표 1. Gap 이 일정한 경우 용접 품질 추정 결과 비교

	평균 오차	분산	최고 오차
3점의 온도	3.0 %	0.6	9.1 %
가우시안 온도 분포	1.8 %	0.4	6.0 %
가우시안 분포와 편차	0.4 %	0.1	1.4 %

a) 용접 폭의 추정 결과

	평균 오차	분산	최고 오차
세 점의 온도	6.2 %	1.6	15.1 %
가우시안 온도 분포	4.5 %	1.0	14.9 %
가우시안 분포와 편차	2.9 %	0.6	7.5 %

b) 용접 깊이의 추정 결과

표 2. Gap 이 변하는 경우 용접 품질 추정 결과 비교

Reference

- [1]. D.E.Hardt, D.A.Garlow, and J.B.Weinert, "A model of full penetration arc welding for control system design", ASME Trans. Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp40-46, March, 1985
- [2]. C.C. Doumanidis and D. E. Hardt, "Simultaneous in-process control of heat-affected zone and cooling rate during arc welding, Welding Journal, pp 96-106, May, 1993
- [3]. D.Rosental, "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", Welding Journal, pp220-234, May, 1941
- [4]. K. Masubuchi et al., "Improvement of fusion welding through modeling, measurement and real-time control", MIT Technical Report, 1982
- [5]. D.Garlow, "Close-loop control of fullpenetration welds using optical sensing of backhead width", M.S. Thesis, Dep. Mach. Eng. M.I.T., June, 1982
- [6]. J.P.Boillot, P.cielo, et. als., "Adaptive welding by fiber optic thermographic sensing: An analysis of thermal and instrumental considerations", Welding Journal, pp209-217, July, 1985.
- [7]. W.Chen and B.A.Chin, "Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques", Welding Journal, WRS, pp181-185, April, 1990
- [8]. C.C. Doumanidis, "Modeling and control of timeshared and scanned torch welding", Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 116, pp387-395, September, 1994
- [9]. T.W.Eagar and N.S.Tsai, "Temperature fields produced by traveling distributed heat sources", Welding Journal 62, pp346s-355s, 1983.
- [10]. B.M.Kim, "A study on the monitoring of welding quality using IR temperature sensor in GMA welding process", MS. Thesis, Dep. Mech., KAIST, Feb, 1996
- [11]. D.R.Hush and B.G.Horne "Progress in Supervised Neural Networks", IEEE Signal Processing Magazine, pp8-38, Jan. 1993