'87 韓國自動制御學術會議論文集 1987. 10.16~17

소모성 전극의 아크 용접에서 이면비-드 폭의 모니터링 과 제어에 관한 연구

°부 광 석 , 오 준 호 , 조 형 석

* 한국 과학 기술원 생산 공학과

A Study on the Monitoring and Control of the Back Bead Width in Arc Welding with Consumable Electrode

K.S. Boo , J.H. Oh , and H.S. Cho

* Dept. of Production Engineering, KAIST

ABSTRACT

The purpose of this study is to monitor and control the back bead width in arc welding with consumable electrode for reduction of the occurence of weld defect. The temperature of a point on the weldement surface is selected as a monitoring parameter, and measured by an optical infra-red sensor. The correlation between the back bead width and the surface temperature is experimentally obtained for various thicknesses of the weldment. The welding travel speed and the surface temperature are taken, respectively, as an input and an output of the welding process under the stable condition of arc. A PI control scheme to maintain the surface temperature at the desired level is proposed by the experimental study.

1. 서 론

아크 용접은 모재와 전극 사이에 강한 전류를 흘릴때 발생하는 아크를 열원으로 하여 접합부를 녹여서 접합하는 방법이다. 용접부에 결함이 발생하였을 때는 결함 발생 부위를 제거하고 재용접을 해야하기 때문에 결함발생의 가능성을 줄이는 것이 생산성 향상과 원가 절감을 위하여 필수적이다. 결함 발생의 가능성을 줄일 뿐만 아니라 작업 환경의 개선을 위하여 제시된 대표적인 방법이 로보트 또는 수치제어 매니퓰레이터를 이용하여 용접작업을 대행하고 용접상태를 센서를 이용하여 모니터링 하여 공정을 제어하는 것이다. 이렇게 용접공정을 자동화 하기 위해서는 용접할 부위의 정확한 위치와 용접상태를 실시간으로 측정하여 그 상태에 따라 용접기와 매니퓰레이터에 적절한 명령을 내려주는 것이 필수적이다.

용접토치가 용접부에 정확히 위치 하였을때 용접정도는 용융지의 폭과 깊이 또는 이면 비드의 폭으로 나타내는데, 용융지의 폭을 측정하기 위하여 TV 또는 CCD카메라를 이용한 영상 처리법이 많이 연구되었다. [1], [2] 영상 처리법은 실시간 신호처리를 위해서는 고가의 장비를 요하는 등의 이유로 실용성이 떨어 지므로, 용융 비드에서 방사되는 적외선 광을 측정하거나 용융부 이면에서 방사되는 적외선 광을 측정하여 용접상태를 모니터링 하기도한다. [3] 그러나, 이면 비드에서 방사되는 광을 측정하기 위해서는 수광소자가 용접토치와 동시성을 유지해야 할 뿐만 아니라 실제 용접시 수광소자를 설치하기가 곤란한 경우가 있다. [3]그러므로 실시간으로 처리가 가능하고 비교적 염가 이면서 용접상태를 모니터링하는 센서의 개발과 이를 이용한 용접상태 제어가 용접공정의 자동화를 위해서는 매우 시급하면서 중요한 문제이다.

본 논문은 소모성 전극을 사용하는 MIG용접에서 완전 용입시 이면 비드의 폭을 모니터링하고 외란에 강건한 공정 제어기를 구현하는 것을 목적으로 한다. 지금까지 이면 비드의 폭을 모니터링하기 위해 많이 사용된 이면에서 방출되는 광량을 측정하는 방법은 용접토치와 센서간의 동시성을 유지하는 문제 때문에 실제 적용상에는 많은 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 용접토치와 일치된 센서의 사용이 중요하므로, 본 논문에서는 이면 비드의 폭을 모니터링하는 변수로서 용접부의 표면온도를 이용하였다.

2. 적외선 온도센서 와 신호처리.

용접상태를 모니터링하기 위해서는 적절한 측정변수가 선정되어야 한다. Hardt.+], Ramsey [5], 등에 의하면 용접부의 표면온도는 부분 용입시의 이면 비드와 깊은 연관이 있는 것으로 나타내었으므로, 본 연구에서는 완전용입시 이면 비드의 폭을 모니터링하기 위해서 용접부의 표면온도를 측정 변수로 선정하고 적외선 온도센서를 이용하여 이를 측정하였다.

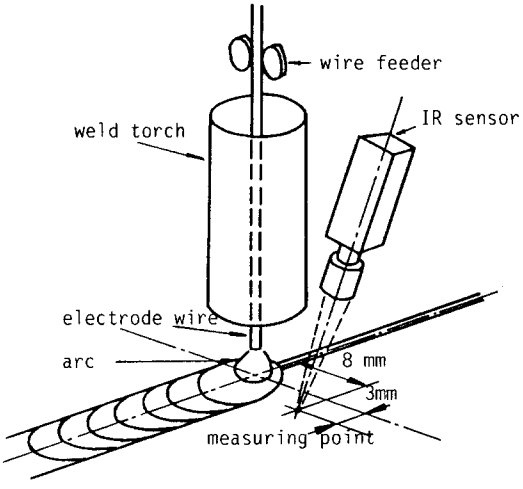

Fig.1 Schematic diagram of arc welding process and IR sensor

2.1 적외선 온도센서

절대온도 0°이상의 물체는 분자운동에 의해서 파장에따라 어떤세기를 갖는 광을 방사한다. 특정파장에 대한 광의 세기는 온도의 고저와 물체의 표면상태 등에 의해서 크게 영향을 받는다. 따라서, 어떤 물체에서 방사되는 특정파장을 갖는 광의 세기로부터 그 물체의 표면온도를 알수가 있다. Fig. 2는 그에따른 측정원리를 나타낸 개략도 이다. Fig. 2에서, 물체에서 방사되는 광은 대물랜즈에서 집광되어 간섭필터를 거쳐 광센서에 이른다 여기서, 간섭필터는 narrow band pass 필터로서 아크와같은 잡광의 영향을 제거하고 특정파장의 광만을 받아들이기 위함이다. 측정된 광량에 비례하여 나오는 전류신호는 전류/전압 변환기에서 처리가 용이한 전압신호로 변환되며, 이는 실제용접시 같은 측정점에서의 열전대가 갖는 온도값으로 조정되었다.

2.2 신호처리

용접시 소모성 전극이 녹아 모재로 전달되는 과정에서 방출되는 spatter와 아크의 강한빛이 적외선 온도센서의 측정영역 이내로 들어오면 온도신호는 실제 표면온도 이상의 값이된다. 이 영향을 제거하기 위해서 적외선 센서의 출력신호는 low peak detector 를 통과한다. Fig. 3의 raw data는 low peak detector를 통과한 신호이며,

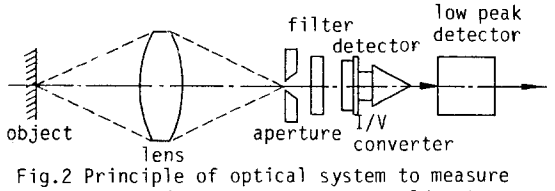

Fig.2 Principle of optical system to measure the surface temperature on weldment

어러한 신호특성 으로서는 온도를 모니터링 하거나 제어기를 구성할때 많은 어려움이 따른다. raw data의 평균값을 순환적으로 얻기 위하여 다음과 같이 지수적 이동평균(exponentially moving average)를 이용하였다.

$$A(k) = \frac{n-1}{n} A(k-1) + \frac{1}{n} I(k) \qquad (1)$$

여기서, A(k)는 새로운 평균값, A(k-1)은 현재의 평균값, I(k)는 측정되는 값이고 n은 가중인수 (weighting factor)이다. Fig. 3에 식(1)에서 n=30의 경우에 처리된 결과를 나타내었다.

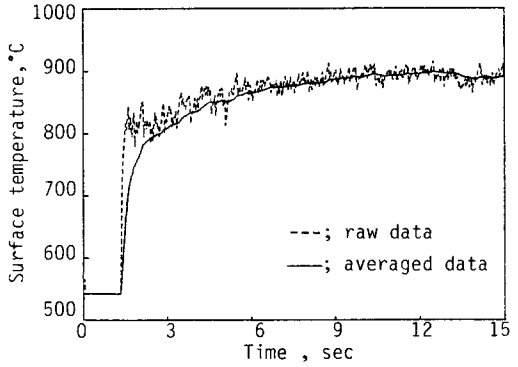

Fig.3 Comparison of moving averaged data with raw data

3. 용접부 표면온도와 이면 비드와의 관계

일반적으로 완전용입을 필요로하는 용접에서 사용되는 모재는 비교적 두께가 얇은 박판의 경우이므로, 용접시의 온도분포는 두께 방향으로는 온도구배가 없는 이차원 분포로 가정된다. 아크에 의해서 가해진 열과 모재와 대기로 빠져나가는 열량의 차에 의해서 용융지가 형성되고 박판의 경우 두께방향의 온도구배가 매우 작으므로, 표면온도의 측정에서 부터 이면 비드의 크기를 유추하는 것이 가능하다. 두께가 3mm, 4mm, 5mm인 강판에서 표면온도와 이면 비드와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 용접조건을 변화시킴에 의해서 이면 비드의 폭의 크기를 변화시키고 그때의 표면온도를 Fig. 1에 나타낸 바와같이 용접토치 에서부터 옆으로 8mm, 용접진행 반대 방향으로 3mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 두께가 클수록 이면 비드의 폭이 작은 영역에서 온도변화가 뚜렷이 나타나지 않는것은 두께 방향으로의 무시할수 없는 온도구배에 의한 영향으로 판단된다. 박판의 경우 이면 비드의 폭과 표면온도는 단조 증가하는 관계를 가짐으로, 표면온도 측정으로 이면 비드의 폭을 모니터링하는 것이 가능하다.

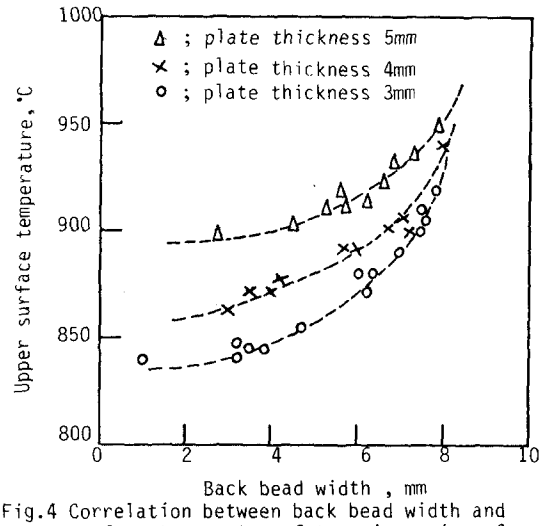

Fig.4 Correlation between back bead width and surface temperature for various size of plate thickness

4. 이면 비드폭의 제어

Fig. 4에서, 주어진 용접물의 두께에 대해서는 이면 비드폭과 표면 온도와는 일대일의 대응관계가 존재함을 알수있다. 그러므로, 원하는 크기의 이면비드 폭을 유지하기 위해서는 이면비드 폭에 상응하는 표면온도 값을 정확히 유지하면 된다. 따라서, 이면비드 폭을 제어할 시스템의 입력과 출력은 Fig. 5에서와 같이 각각 용접속도, 용접전압, 용접전류의 용접입력 조건과 용접부의 표면온도가 된다. 그러나, 용접시 아크를 안정되게 유지하기 위해서는 용접전압과 용접전류를 잘 선정하여야 하므로, 안정된 아크를 갖는 용접전압과 용접전류를 유지하면서 용접속도만을 변화시킴으로서 이면 비드의 폭을 제어하려한다.

4.1 제어기의 구조선정

제어기의 구조와 구조에 따른 이득을 선정하는 것은 실험을 통한 시행착오법(trial and error method)으로 행하였다. 이는 용접공정을 지배하는 열 전도 관계가 매우 비선형적일 뿐만아니라 편미분형으로 표시되므로 공정의 동적 거동을 묘사하는 모델의 유도에는 많은 문제점이 따르기 때문이다. 제어기를 선정하는 실험은 두께 3mm의 연강판에

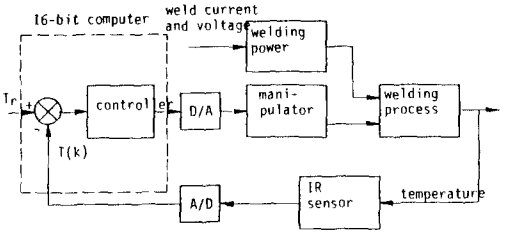

Fig.5 Block diagram of welding process control system

용접전류 200A, 용접전압 24V를 가하면서 용접부의 표면온도를 Fig. 1과 같은 측정점 에서 측정하고 측정된 온도를 귀환하여 제어기를 실현하였다. 제어기의 성능은 천이영역과 정지상태 에서의 성능을 근거로 하였다. 천이영역의 성능은 과도응답(overshoot) 이 발생하지 않으면서 가장빠른 응답 특성을 갖는 것을 우선으로 했으며, 정상상태 성능은 정상상태 오차에 의해서 판단하였다.

1). 비례 제어기

제어기의 실현은 마이크로 컴퓨터에 의해서 디지탈 제어기로 구현하였으며 그 블록선도는 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 식(2)와 같은 간단한 비례제어기에 의한 응답 특성과 제어입력을 나타낸다.

$$u(k) = u_o - K_p (T_r - T(k)) \qquad (2)$$

여기서, U(k)는 k번째 샘플시간 에서의 용접속도(mm/sec), Uo는 공칭용접속도(norminal travel speed; mm/sec), Tref는 기준온도(°c), T(k)는 k번째 샘플된 온도(°c), 그리고, Kp는 비례이득(mm/sec, °c)이다. Fig. 6에서 용접전압과 용접전류는 각각 24V와 200A이고, 공칭용접속도 Uo가 6.7mm/sec 에서 Tref의 900 °c 지령에 대해 비례이득의 변화에 따른 응답특성을 나타낸 것이다.

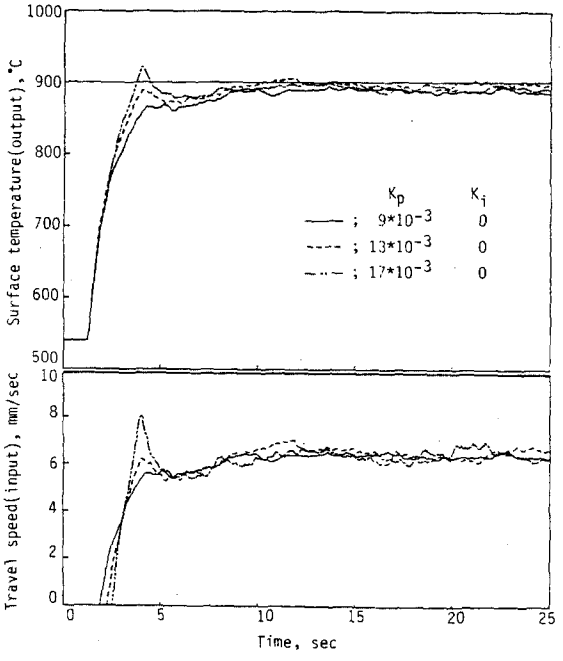

Fig.6 Variations of input and output for various proportional gains in welding process ; weld voltage=24V, weld current=200A

Fig. 6은 Kp가 클수록 표면온도의 응답은 천이 영역에서 과도응답이 큼을 나타낸다. 이것은 초기에 기준온도에 빨리 접근하기 위해 용접속도가 거의 "0"가 되는데, 이때 일정한 용접전압과 용접전류에 의해 소모성 전극이 계속해서 용접부 표면에 적층됨으로 인하여 표면온도가 보다 과도하게 증가되기 때문이다. 따라서, 가장 적합한 비례제어기의 이득은 Kp=0.009이며, 제어기의 구조상 정상오차가 존재하기 때문에 이의 보상을 위해서 비례 적분 제어기를 구현 하였다.

2). 비례 적분 제어기

비례 적분 제어기는 식(3)과 같이 구현되며, 비례이득 Kp=0.009에 대해서 적분이득 Ki를 변화시킨 결과를 Fig. 7에 나타 내었다.

$$u(k) = u_o - K_p (T_r - T(k)) - K_i \sum_{i=o}^{k} (T_r - T(i)) \quad (3)$$

여기서, Ki는 적분이득 이다. Fig. 7에서 과도응답이 없는 제어이득은 Kp=0.009일때 Ki=7x10^{-5} 이나, 천이영역 에서의 응답특성이 느리고 Ki가 보다 크면 과도응답이 발생한다. 실제 용접시 과도응답이 발생한 경우는 전반적으로 용접속도가 느린 경우로서, 용접후 너무 과도한양의 용융비드가 형성되어 있음을 알수가 있다. 비례 적분 제어기는 정상상태 오차를 제거하는 잇점은 있으나 천이 영역에서의 늦은 응답특성 또는 과도응답이 실제 용접시에 좋지 않은 영향을 미치므로 이면 비드폭을 제어하는 제어기로서 적절하지 못한 것으로 판단된다.

3). 조건적 비례 적분 제어기
(conditional PI controller)

조건적 비례 적분 제어기는 초기에 큰오차가 존재할때는 비례 제어에 의해 급격히 응답 하다가 오차가 어느 범위 이내에 있게되면 비례 적분 제어기에 의해서 제어되는 구조이다. 이는 천이 영역에서의 빠른응답을 갖는 비례 제어기의 특성과 정상상태에서 정상상태 오차를 제거하는 비례 적분 제어의 특성을 혼용한 것으로 그 구조는 식 (4)와 같다.

$$u(k) = u_o - K_p (T_r - T(k)), \quad \text{if } T_r - T(k) > e_o \quad (4)$$

$$u(k) = u_o - K_p (T_r - T(k) - K_i \sum_{i=o}^{k} (T_r - T(i)), \quad \text{if } T_r - T(k) \leq e_o$$

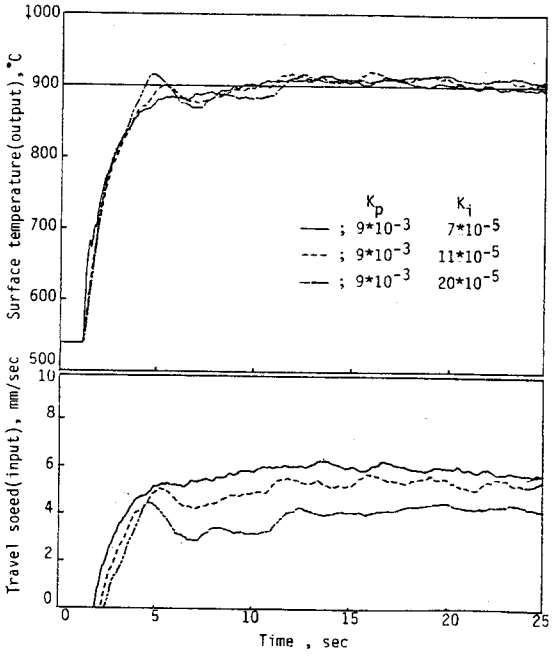

Fig.7 Variations of input and output for various integral gains in welding process ; weld voltage=24V, weld current=200A

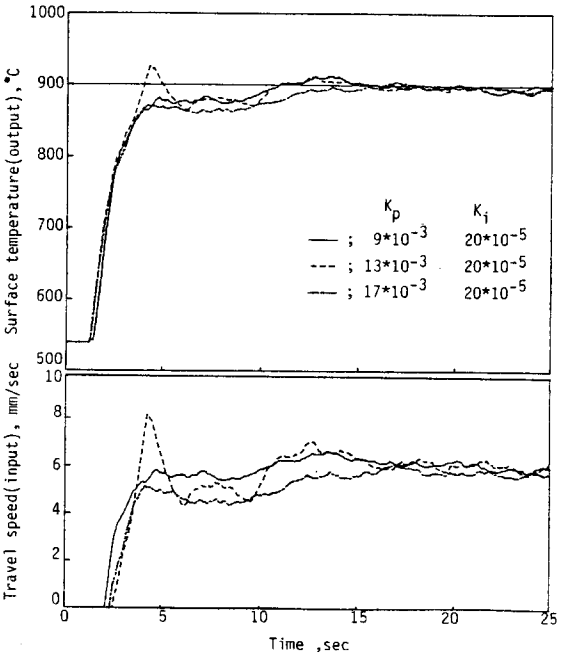

Fig.8 Variations of input output for conditional controller in welding process ;weld voltage =24V, weld current =200A

여기서, e 는 설정된 오차한계 이다. 비례및 적분이득을 변화 시킴에의한 응답 특성을 나타낸것은 Fig. 8과 같으며, 여기서 Kp=0.009과 Ki=2x10^5 을 가질때 천이 영역 에서의 응답특성과 정상상태에서 정상상태 오차제거의 성능이 매우 우수함을 알수 있으며, 용접후 용접비드의 모양 또한 매우 양호한 형태로 나타났다.

4.2 용접시편 두께의 변화에 의한 영향

선정된 제어기의 성능을 비교하고, 일정온도로 유지한 제어 결과가 용접부에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 용접중 모재의 두께를 3mm에서 4mm로 변화 시켰다. 모재 두께의 변화가 용접 공정에서 갖는 의미는 두께 변화에 의하여 열손실의 양이 변화하므로 같은용접 입력에 대해서는 두께가 클수록 열손실이 증가하여 용융지의 크기가 줄어든다. 따라서, 완전 용입 공정의 경우는 같은 용접 입력량에 대해서는 두께가 클수록 이면 비드의 크기가 감소한다. 용접 모재 두께의 변화가 이러한 용접 결과에 미치는 영향 이외에도, 두께 변화로 인하여 용접시 heat sink 가 변하게 되므로 이에 의한 제어기의 성능평가는 임의의 알지못한 외란 존재시에 그 제어기의 강건성을 판정하는 도구가 되는 의미가 있다. Fig. 9는 용접 모재 두께의 변화가 있는 경우 선정된 제어기에 의한 제어 결과와 제어하지 않은 경우의 표면 온도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9에서, 외란이 존재하는 경우의 제어결과 역시 조건적 비례 제어기가 가장 좋은 특성을 나타냄을 알수 있으며, 비교적 균일한 온도가

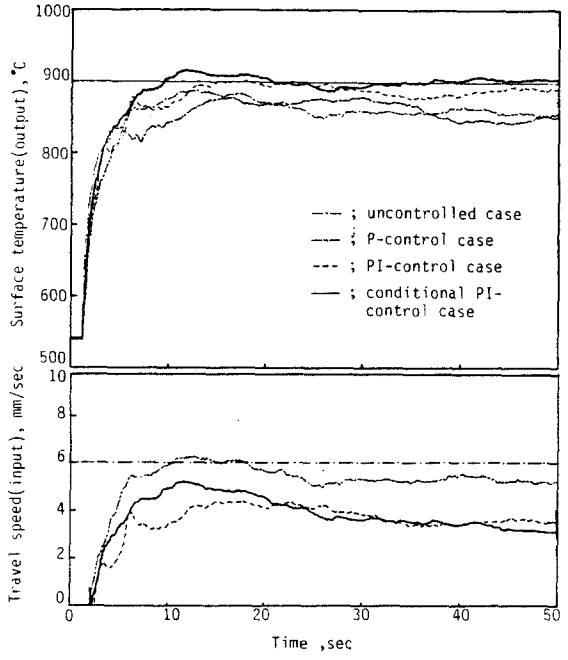

Fig.9 Comparision of various control results under the chgange of plate thickness ;weldvoltage=24V, weld current =200A

유지됨을 알수있다. 두께의 변화가 있는 경우의 용접결과, 표면온도를 일정하게 유지한 경우와 그렇지 않은 경우의 차이는 Fig. 4에서 볼수 있듯이 이면 비드의 크기에는 많은 차이가 있다. 제어를 하지 않은 경우는 3mm두께의 모재에서 이면 비드가 발생했다 할지라도, 모재의 두께가 증가된 경우의 이면 비드는 발생하지 않았으며 이는 Fig. 9에서 보듯이 두께 증가시 표면온도가 감소되는 것에서 부터도 판단이 가능하다. 그러나, 표면온도를 일정하게 제어한 경우는, 두께의 변화에 따라 비록 이면 비드 폭의 크기는 같지 않았으나, 두께에 따른 온도 값에 상응하는 이면 비드 폭을 유지하였다. 이는, 두께의 변화로 인하여 열손실이 변화할때 표면온도가 일정하도록 용접속도를 조정하므로서 열손실 변화에 따른 영향을 보상하여 줌에의한 것임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 소모성 전극을 사용하는 아크용접에서의 이면 비드폭을 모니터링하고 균일하게 유지하기위한 제어기 구현을 위해서 용접부의 표면온도를 측정하였다, 연구 결과에 의해 내려진 결론은 다음과 같다.

1. 적외선 온도센서는 매우 효과적으로 용접부의 표면온도를 측정하며, 용접시 발생하는 spatter, 아크의 강한 빛에의한 영향은 low peak detector와 지수함수적 이동평균을 통하여 적절히 제거할수 있었다.
2. 박판을 사용하는 완전 용입공정에서, 표면온도의 측정에 의해서 이면 비드폭의 크기를 모니터링 할수있다.
3. 용접 속도만으로 이면 비드의 폭을 제어하는 경우에는, 조건적 비례 제어기가 과도한 와이어의 용착을 초래하지 않고서 표면온도를 정상오차 없이 유지하는 것으로 판단된다.
4. 두께변화와 같은 외란이 있을때 표면온도를 일정하게 유지함에 의해서 두께변화로 인한 열손실량의 변화에따른 용융비드 폭의 변화가 어느정도 보상이 가능하다.

표면온도를 유지하는 제어기에 의해서 이면 비드폭의 균일성 유지는 가능하나, 용접속도만을 변화시킴에 의하여서는 표면비드의 높이와 폭이 변화하는 원인이 되므로, 앞으로는 용접전류와 용접전압으로 표면 비드의 크기제어를 병행하여야 할것으로 판단되며, 보다 효과적인 제어기를 설계하기 위해서는 용융지 성장을 묘사하는 동적 모델이 유도 되어야한다.

Reference

1.A.R.Vroman and H.Brandt,"Feedback control of GTA welding using puddle width measurement", Welding Journal, pp742-749, September, 1976

2.R.W.Richardson, D.A.Gutow, and S.H.Rao," A vision based system for arc weld pool size control", Measurement and Control for Batch Manufacturing, Winter annual meeting of ASME, pp65-75,1982.

3.H.Nomura, Y.Satoh, et al,"Arc light intensity controls current in SA welding system", Welding and Metal Fabrication, pp457-465, September,1980.

4.B.E.Bates and D.E.Hardt,"A real time calibrated thermal model for closed loop weld bead geometry control", J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME, Vol.107, pp25-33, March, 1985.

5.R.W.Ramsey,"Infrared temperature sensing systems for automatic fusion welding", Welding Journal, pp837s-847s, August, 1963.