

아크 용접에서 이면비드 크기의 적응 제어

부 공석, 조 형석, 오 준호

한국 과학기술원 생산 공학과

Adaptive Control of the Back Bead Width in Gas Metal Arc Welding Process

Kwang Suck Boo, Hyung Suck Cho, Jun Ho Oh

Department of Production Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

This paper describes the design and implementation of the adaptive controller to maintain the good weld quality in gas metal arc welding process. The weld torch travel speed and the surface temperature are taken, respectively, as an input and an output of the welding control system. Because of the very complex phenomena of the process, the input-output dynamic model was experimentally identified by AIC (Akiak Information Criterion). Based on the model structure, the explicit model reference adaptive controller is simulated in order to regulate the output temperature to the desired level.

1. 서 론

GMAW (Gas Metal Arc Welding) 공정은 아크 용접 공정의 하나로써 산업 현장에서 가장 널리 이용되는 접합 공정이다. GMAW는 접합부의 용가재로서 사용되는 전극이 연속적으로 공급되면서 강한 전류를 흘릴 때 전극과 모재 사이에 발생하는 전기적인 아크를 열원으로 하여 전극과 모재를 붙여서 접합하는 방법이다. 일반적으로, 용접부의 결함이 발견되면 그 결함부는 보수되어야 하며 이러한 검색과 보수에 드는 비용이 전 생산비의 많은 부분을 차지할 뿐만 아니라 생산성의 감소를 유발한다. 최근에는, 이러한 용접 결함의 발생 가능성을 줄여서 생산성의 향상을 도모하고 작업 환경의 개선에 대한 대표적인 방법으로서 용접 공정의 자동화에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. [1] [2]

용접부의 성능을 나타내는 인자로서 용융지의 크기, 용입깊이 및 열 영향부의 크기 등을 들 수 있으며 [2], 이들은 용접조치의 위치, 용접속도, 용접전압 및 전류, 그리고 아크 상태에 의하여 크게 영향을 받는다. 그러므로, 자동 아크 용접 장치는 용접부의 성능을 나타내는 변수들을 측정하고, 제어함으로써 용접중 발생하는 여러 공정 외란의 영향을 보상하는 기능을 요구한다. 그러나, 아크 용접시에 발생하는 강한 아크 광, 스파터 등에 의하여 용접 변수들인 용융지의 크기 및 용입 깊이의 측정에 어려움이 있으며, 용접 공정에 미치는 여러 제 현상들의 영향에 의하여 적합한 제어기의 설계에 많은 어려움이 있다. [3] [4] 본 논문에서는 GMAW 공정에서 박판 용접의 이면 비드 크기를 모니터링하고 제어하기 위하여 용접부의 표면 온도를 측정하며, 측정된 표면 온도를 귀환하여 여러 공정 외란 및 용접 조건 변화에 대응하여 일정한 용접 결을 얻기 위한 적응 제어를 설계하고자 한다.

2. 용접 변수의 측정

박판 용접에 있어서의 열 유동은 두께 방향으로의 구배가 매우 작기 때문에 이차원적으로 여겨질 수 있다. 용접중 아크열에 의해서 용융된 용융지의 경계는 등온선의 하나이므로 용융지의 형상권 비드의 크기는 용접부의 표면온도와 같은 관계가 있으리라 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 박판 용접의 이면 비드의 크기를 모니터링 하기 위해서 적외선 온도 센서를 이용하여 표면 온도를 측정하고 측정된 온도와 이면 비드의 관계를 실험적으로 구하였다.

절대온도 0 °K 이상인 모든 물체는 그 온도에 따라 분자의 운동량이 달라지게 되고 그에 따른 에너지를 방출한다. 여기서의 에너지는 전자기파로서 그 양을 측정함에 의해서 그 물체의 온도를 알 수 있다. 사용한 온도 센서는 wide band pyrometer형으로서 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 용접 모재의 표면상의 한 점에서 방출된 에너지는 대물렌즈에서 집적되고 aperture를 거쳐서 적외선 센서로 전달된다. 사용된 광 센서는 4 m의 파장에서 최대의 감응도를 갖는 PbSe photo-conductive형의 적외선 센서로서 시간 정수는 최대 3 sec이다. 적외선 센서의 목표면적은 1 입방 밀리미터로서 거의 한 점에서 방출 에너지를 측정한다. 용접중 온도 센서를 용접부의 표면에 노출시키면 용접점에서의 방사 에너지 뿐만 아니라 강한 아크 광에 의한 에너지 역시 적외선 광 센서에 감지된다. 이러한 아크 광에 의한 잡음을 제거하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 최자점 감지회로를 이용하여 신호처리를 하였다.

완전 용입 GMAW공정에서 이면 비드의 크기와 측정된 표면온도의 관계는 실험적으로 구하였다. 이때 표면 온도의 측정점의 위치는 Fig. 1에 나타난 것과 같다. 측정점의 선정은 측정된 온도와 이면 비드 크기와 같은 연관을 가지면서 측정오차 위치에 따른 측정값의 변화가 작은 점으로 선정되었다. 일반적으로 용접과 같은 이동 열원에 의한 열 유동에서는 열원이동 방향의 뒷부분의 온도구배가 작으므로 Fig. 1과 같은 아크 열원의 옆으로 8mm, 용접 진행 방향의 뒷쪽으로 4mm의 측정점이 선정되었다. 용접은 1.2mm의 전극을 사용하여 bead on plate 용접에 의해 이루어졌으며 용접속도는 3mm/sec에서 7mm/sec의 변화를 갖고 용접파워를 3.2KW에서 6.5KW로 변화시키면서 용접을 행하였다. 용접실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 표면온도는 이면비드와 대조증가하는 관계를 갖는다. Fig. 3은 용접열원의 크기의 증가는 이면비드 크기의 증가를 가져오기에 따라 표면온도 역시 증가함을 나타낸다. 따라서 표면온도의 측정에 의하여 완전용입 용접에서의 이면비드 크기의 모니터링이 가능함을 알 수 있다.

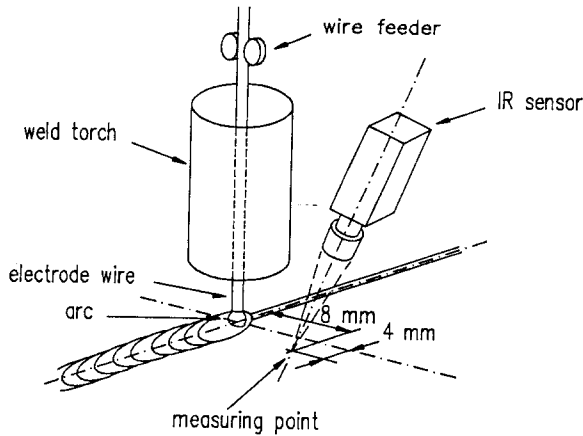


Fig. 1 Schematic diagram of the gas metal arc welding process and IR sensor arrangement.

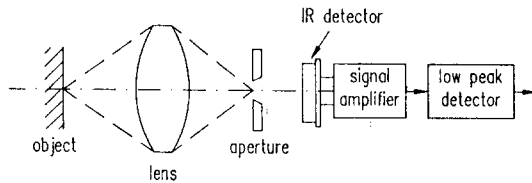


Fig. 2 Schematics of the optical system to measure the surface temperature of the weldment.

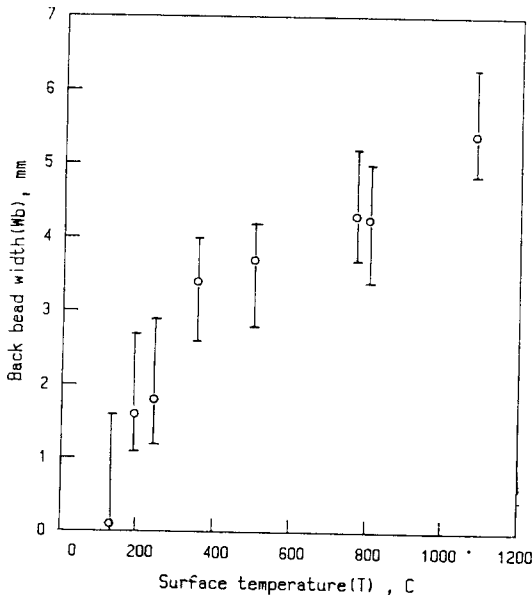


Fig. 3 Correlation between the back bead width and the surface temperature.

3. GMAW 공정의 모델링

GMAW 공정을 제어하기 위한 시스템의 블록선도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 GMAW 공정의 입력은 용접전압, 전류 및 용접토치의 이송속도이며 출력은 용접전압과 전류의 선속도이며 출력은 용접부의 표면온도이다. 본 논문에서는 안정한 아크상태를 유지시키기 위하여 용접전압과 전류는 일정한 값으로 고정시켰으며 용접토치의 이송속도를 변화시킴에 의해서 단위길이당 용접 열입력을 제어하고자 한다. 그러므로, 여기서는 입력변수인 용접속도 이송속도와 출력인 표면온도 사이의 수학적 모델을 구하고자 한다.

GMAW 공정은 열전도현상, 상태변화, 용융 내부의 용융속도의 유동현상 및 용접 금속의 용융저로의 첨가현상 등의 복잡한 물리적 현상에 의해서 구성되기 때문에 물리적 현상 및 기본방정식에 근거한 수학적 모델의 유도는 매우 어려울 뿐만 아니라, 제어기 설계를 위해서는 너무 방대한 모델이 유도되리라 판단된다. 따라서 본 논문에서는 정상용접조건 부근에서의 아크 용접의 동적현상을 나타내는 수학적 모델을 ARMA에 의한 실험적 방법인 방법을 이용하여 구하고 용접조건 변화 및 용접종료에 의한 모델의 매개변수 (parameter)들의 변화를 알아내고자 한다.

정상용접조건에서 용접속도와 표면온도간의 동적모델을 다음과 같은 ARMA (Auto Regressive and Moving Average) 모델로 가정하였다.

$$A(q^{-1}) y(k) = q^{-d} B(q^{-1}) u(k) + C(q^{-1}) e(k) \quad (1)$$

여기서, $y(k)$ 와 $u(k)$ 는 각각 k 순간에서의 출력과 입력을 나타내며, $e(k)$ 는 평균값이 "0"이고 편차가 인 표준분포잡음이다. 그리고,

$$A(q^{-1}) = 1 - a_1 q^{-1} - a_2 q^{-2} - \dots - a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m} \quad (2)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_r q^{-r}$$

이다. 식 (1)에서 입력 $u(k)$ 는 용접속도로써 평균속도 5mm/sec에서 +3mm/sec의 값 사이에서 균일분포 (uniform distribution)를 갖으며, 표면온도는 매 200msec에서 샘플링 되었다. 용접전류 200A, 용접전압 18V에서 이러한 랜덤 용접속도에 대한 표면온도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서의 입력과 출력값을 갖고서 식 (1)과 (2)의 모델차수를 AIC (Akaike Information Criterion) 조건에 근거하여 결정하였다.

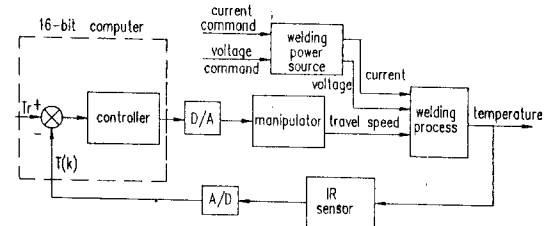


Fig. 4 Block diagram of the gas metal arc welding control system.

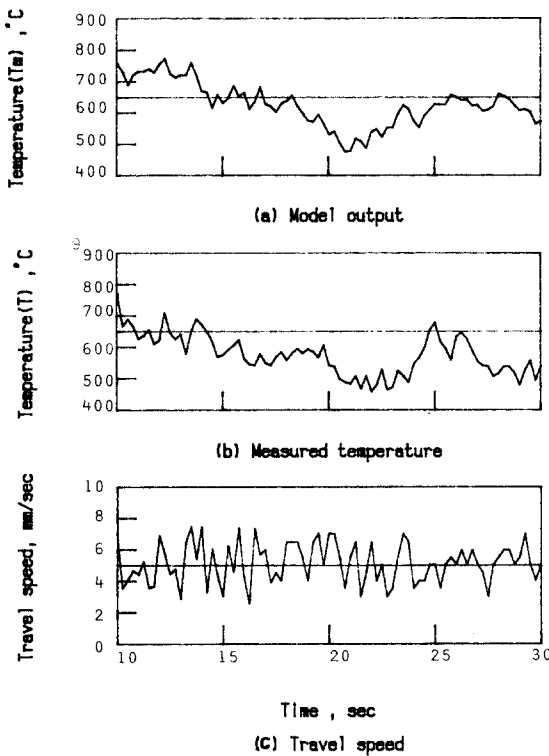


Fig. 5 Torch travel speed input sequence and surface temperature output and predicted output generated using proposed ARMA model.

$$AIC = mN[\log(2\pi\sigma_e^2) + 1] + 2s \quad (3)$$

여기서, $m=1$, σ_e^2 는 식(1)의 $e(k)$ 의 variance, s 는 파라미터의 수이다. 모델차수에 따른 AIC 값의 변화는 표 1에 나타내었으며, 여기에서 부터 용접 공정은 $n=2$ 인 이차 시스템의 구조를 갖음을 알 수 있다. 이러한 결과는 용접부에서의 표면 온도는 수학적으로 무한대의 차수를 갖는 DPS (Distributed Parameter System)이지만 위의 AIC 평가에 근거하여 2차 시스템으로의 차수 감소가 가능함을 나타낸다. 모델의 차수와 시간 지연의 값에 따른 모델의 파라미터들을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 $B(q^{-1})$ 의 차수의 증가에 의해 시스템의 특성은 non-minimum phase 특성을 갖음을 알 수 있다. 그러므로, 여기서는 non-minimum phase를 갖지 않도록 $B(q^{-1})$ 의 차수를 결정하였으며 그 값은 0차수이다. 0차수의 $B(q^{-1})$ 에 대해서 $A(q^{-1})$ 의 차수가 $n=2$ 일때 시간지연 d 에 따른 모델의 출력을 용접속도의 변화와 실험에 의한 표면 온도와 함께 Fig. 5에 나타내었다.

Table 2 Parameter estimates and pole and zero of the model for various model order.

delay d	order (n,m)	parameters					poles	zeros
		a1	a2	a3	b0	b1		
1	2,0	0.81157	0.13980		0.02391		-0.1459 0.95756	
	2,1	0.8188	0.12837		0.02183	-0.07638	-0.1346 0.9534	3.498
	3,1	0.78816	-0.059	0.23112	0.03439	-0.07189	-0.92-i0.479 0.972	2.09
2	2,0	0.81997	0.12453		-0.0814		-0.131 0.951	
	2,1	0.78642	0.15172		-0.0817	-0.10142	-0.16 0.94	-1.24
	3,1	0.758	-0.022	0.213	-0.0736	-0.0987	0.965 -0.103±i0.459	-1.3403

식(3)과 ILS (Iterative Least Squares)에 의해 용접 속도 변화에 대한 표면온도의 동적 특성은 다음과 같은 동적 모델에 의해 묘사가 가능하다.

$$(1 - a_1 q^{-1} - a_2 q^{-2}) y(k) = q^{-2} b_0 u(k) + (1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2}) e(k) \quad (4)$$

식(3)의 파라미터들의 값은 표 2에 나타내었다.

Table 1 Akiake information criterion AIC for various model order.

delay d	order n	AIC
1	1	-379.01
	2	-383.50
	3	-377.70
2	1	-381.67
	2	-386.59
	3	-380.81

4. 모델 추종 적응제어의 설계

GMAN공정은 매우 비선형적인 특성을 갖는 공정이기 때문에 식(4)와 같은 정상 용접조건에 있어서의 입출력관계는 용접조건 변화 및 공정의란에 의하여 식(4)의 파라미터들이 변화하게 된다. 제어 변수에 작용하는 외란에 대한 영향을 고려하기 위해서는 파라미터 변화에 따른 영향을 계산하는 적응제어가 필수적으로 요구된다. 적응제어의 성공적인 수행을 위해서는 두가지 근본적인 사항이 요구된다. 하나는 용접 공정의 플랜트의 구조에 대한 선지식이 요구되고 다른 하나는 플랜트의 적합 제어기의 구조의 선정이 우선되어야 하는 것이다. 본 논문에서는 GMAN공정을 나타내는 플랜트의 모델로서 식(4)의 구조를 갖는 것으로 하며 이때의 파라미터에 대한 지식은 없다고 한다. 그리고, 제어기의 구조는 LANDAM(5)에 의한 LMF (Linear Model Following Controller)를 근간으로 한다.

4.1 선형 모델 추종 제어기

플랜트의 모델이 식(1)과 같을때 제어의 목적은

$$C_2(q^{-1}) y(k+d) = 0 \quad k \geq 0 \quad (5)$$

이다. 여기서 $C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_m q^{-m}$ 이다.

제어목적인 식(5)를 만족하는 제어입력은 LANDAU등 [5]에 의해 식(6)와 같다.

$$u(k) = \frac{1}{b_0} \left[C_2(q^{-1}) y^m(k+d) - R(q^{-1}) y(k) - B_s(q^{-1}) u(k) \right] \quad (6)$$

여기서, $B_s(q^{-1})=B(q^{-1})S(q^{-1})-b_0$ 이고, $R(q^{-1})$ 와 $S(q^{-1})$ 은

$$C_2(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}R(q^{-1}) \quad (7)$$

을 만족하는 다항식으로서 각각

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{ns} q^{-ns} \quad (8)$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{nr} q^{-nr} \quad (9)$$

이다. 여기서, $n = d-1$ 이고, $n = \max(n-1, n-d)$ 이다.

4.2 모델 추종 적응 제어기

식(4)과 같은 plant에 대해서는 선형 모델 추종제어기의 제어 입력은 식(6), (7), (8), (9)에 의해서

$$u(k) = \frac{1}{b_0} \left[(1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2}) y^m(k+2) - (r_0 + r_1 q^{-1}) y(k) - b_0 s_1 q^{-1} u(k) \right] \quad (10)$$

과 같다. 여기서, c_1, c_2, r_0, r_1, s_1 은 각각 $C_1(q^{-1}), R(q^{-1}), S(q^{-1})$ 의 계수이며 식(7)에 의해서

$$s_1 = a_1 + c_1^2 \quad (11)$$

$$r_0 = a_1 s_1 + a_2 + c_2^2 \quad (12)$$

$$r_1 = a_2 s_1 \quad (13)$$

의 관계식을 갖는다. 식(4)의 계수들의 값이 알려지지 않는 경우에는 매순간 계수들을 예측하면서, 예측된 계수에 따라서 제어입력을 변화시키는 적응 제어기의 제어 입력은 식(14)과 같다.

$$u(k) = \hat{b}_0^{-1}(k) \left[C_2(q^{-1}) y^m(k+d) - \hat{p}_0^T(k) \phi(k) \right] \quad (14)$$

$$\hat{p}_0(k) = \left[\hat{r}_0(k) \quad \hat{r}_1(k) \quad \hat{b}_0 s_1(k) \right] \quad (15)$$

$$\phi_0(k) = \left[y(k) \quad y(k-1) \quad u(k-1) \right] \quad (16)$$

이다. 이 경우의 계수 예측은 RLS (Recursive Least Squares) 방법에 의하여 다음과 같다.

$$\hat{p}(k) = \hat{p}(k-1) + F_k \phi(k-d) \epsilon^*(k) \quad (17)$$

여기서, $\hat{p}(k)=[\hat{r}(k), \hat{r}(k), \hat{b}(k), \hat{b} s(k)]$
 $\phi(k-d)=[y(k-d), y(k-d-1), u(k-d), u(k-1)]$ 이며,
 F_k 는 계수적응 이득 (parameter adaptation gain) 으로서

$$F_{k+1} = \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[F_k - \frac{F_k \phi(k-d) \phi^T(k-d) F_k}{\lambda_1(k) / \lambda_2(k) + \phi^T(k-d) F_k \phi(k-d)} \right] \quad (18)$$

이다. 여기서, $0 < \lambda_1(k) < 1$, $0 < \lambda_2(k) < 2$, $F_0 > 0$ 이다. 식(16)의 $\epsilon^*(k)$ 는

$$\epsilon^*(k) = \frac{\hat{e}(k)}{1 + \phi^T(k-d) F_k \phi(k-d)} \quad (19)$$

이다. 여기서 $\hat{e}(k) = C_1(q^{-1})y^m(k) - p(k-1)\phi(k-d)$ 이다. 식(14)에서 (19)로 표현되는 적응 제어기의 블록선도는 Fig. 6과 같다.

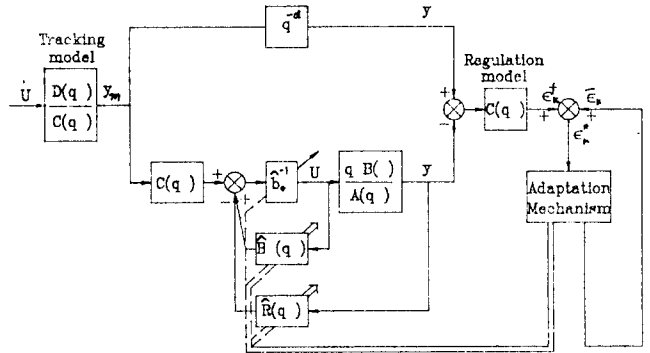


Fig. 6 Block diagram of the explicit model reference adaptive controller.

5. 적응 제어기의 시뮬레이션

식(14), (17), (18), (19)로서 나타내어지는 적응 제어기를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였다. 아크 용접 공정의 동적 모델은 식(3)과 같이 표현되며, 초기에는 표 2에서의 파라미터 값인

$$\begin{aligned} a &= 0.81997 \\ a &= -0.12453 \\ b &= -0.0814 \end{aligned} \quad (20)$$

를 유지하다가, $k=100$ 인 순간에 시스템의 파라미터가

$$\begin{aligned} a &= 1.07110 \\ a &= -0.013129 \\ b &= -0.08982 \end{aligned} \quad (21)$$

변화하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였고 그 결과를 Fig. 7 와 Fig. 8 에 나타내었다. 식(20)은 용접 전류 200A와 용접 전압 18V에 의한 파라미터이고, 식(21)의 파라미터는 용접 전류 200A와 용접 전압 22V인 경우에 대한 아크 용접의 동적 모델에 대한 파라미터값이다. 이와같은 용접 조건의 변화는 실제 용접 작업시 용접토지와 모재간의 거리 변화, tack 용접, 용접 회로상의 임피던스변화 등과 같은 외란에 의해서 발생할수 있다. Fig. 7 에서 잡음의 영향을 고려하지 않은 경우에 대한 파라미터 예측과 표면 온도의 제어 결과를 나타낸 것이다. 적응 제어기에서 사용된 식(14)의 필터 $C_2(q^{-1})$ 은 $C_2(q^{-1})=(1-0.3q^{-1})$ 으로 선정하였으며, 파라미터 적응 이득의 초기값 F_0 , 식(17)의 $\lambda_1(k)$ 와 $\alpha = \lambda_1(k)/\lambda_2(k)$ 는 각각 187, 0.97,

0.95로 설정하였다. Fig. 7 은 초기의 파라미터 예측은 약 3 step후이면 실제값으로 접근하고 100step이후 파라미터의 변화에 대해서도 빠른 접근을 보여준다. 그리고, 제어결과에 의한 아크 용접의 출력인 온도는 기준값인 1.0에 출력값이 기준값 이상을 기록하나 실제 파라미터의 값은 후에 기준값을 유지하는 결과를 보여준다. Fig. 8 의 결과에서부터 전이 영역에서의 출력의 응답과 플랜트 파라미터의 변화에 따른 출력의 응답 특성은 필터 $G_2(q)$ 의 설정에 따라서 지배적임을 알 수 있었으며, 식 (4)의 노이즈에 의한 동적 특성을 고려하지 않은 경우는 파라미터 적응 알고리즘 (17), (18)을 실제 파라미터값을 매우 정확히 추적함을 알 수 있었다. Fig. 8 는 플랜트의 동적 특성 (3)에서 $G(q) = 1 - 0.0852q - 0.6258q^2$ 이고, 잡음 $e(k)$ 는 편차가 0.1이고 평균값이 "0"인 표준분포를 갖는 잡음을 고려한 경우에 대한 적응 제어 결과를 보여준다. Fig. 8 에서 전이 영역에서의 출력응답의 급격한 변화는 거의 플랜트 파라미터의 계산에 있어서 잡음의 영향에 의해 급격한 파라미터값의 변화에 의한 것으로 파라미터 적응 이득의 초기값을 줄이면 이러한 급격한 변화는 다소 완화된다. 파라미터 값으로의 수렴속도 역시 감소하였다. 100step 이후의 플랜트 파라미터 변화에 대해서 적응 이득의 재선정이 없으면 파라미터 수렴속도가 매우 느릴 뿐만 아니라 파라미터 값이 드리프트 (drift) 하는 경향이 있었다. 그러므로, 본 연구에서는 플랜트 파라미터 변화에 따라 실제 파라미터 값으로의 수렴이 늦음에 의해 발생하는 출력 오차의 변화를 기록하고 그 값이 어느 수준이상이면 파라미터 적응 이득을 초기값으로 다시 설정하였다. 그 결과 Fig. 8 에 나타낸 바와 같이 파라미터들은

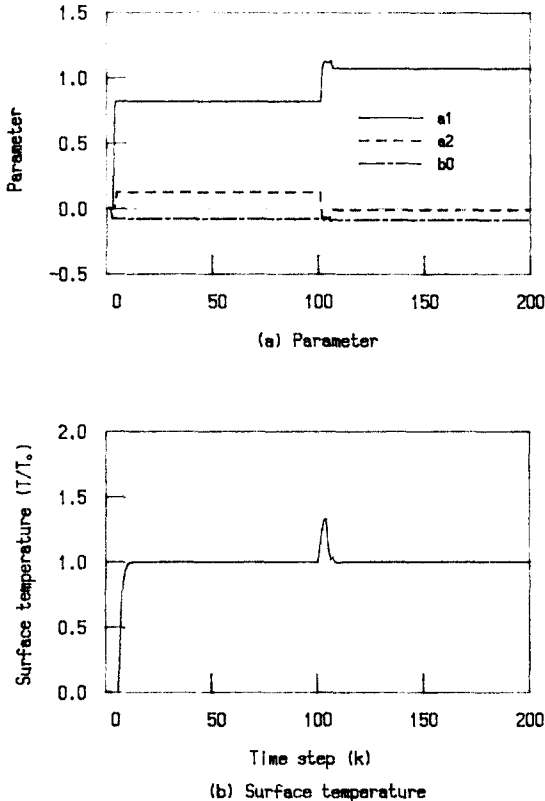


Fig. 7 The simulation results of the MRAC when subject to parameter variation at 100 step. (not considered the plant noise)

100step이후 약 5step의 경과후에 빠른 수렴속도를 보여주고 있다. 그러나, 수렴된 파라미터들은 실제값과는 약간의 오차를 나타내어 $a = 1.0820$, $b = 0.00217$, $b = -0.0912$ 를 기록하였다. 이상에서, 공정상 of 적응을 고려하는 경우에는 RLS (Recursive Least Square) 방법으로서는 정확한 파라미터 값의 예측에는 어려움이 있으며 따라서 이의 보완은 필요한 것이다. 그러나, 출력응답은 기준값을 유지하는 결과를 보여주며 이는 Goodwin [6]에 의해 설명된 PI제어기에 의한 제어 특성을 나타낸다. Fig. 9 는 고정된 이득을 갖는 경우는 플랜트 파라미터가 변화한 경우에도 좋은 응답 특성을 보여주나, $Kp = 2.0$ 의 경우에는 100step이후의 출력응답이 크게 요동함을 나타낸다. 고정된 이득을 갖는 PI제어기의 경우 그 제어 이득의 설정에 따라서 출력응답이 크게 영향을 받으며, 이는 아크 용접과 같은 비선형성의 특성이 강한 플랜트에 있어서 PI제어기의 설계에 많은 어려움을 제시한다. 그러므로, Fig. 8 와 Fig. 9 의 비교에서 알 수 있듯이 공정의 동적 특성의 변화가 예견되는 경우에는 안정하고 강건한 제어 성능을 기대할 수 있다.

6. 결론

소모성 전극을 사용한 아크 용접 공정에서 이면비드의 크기를 일정하게 유지하기 위하여 용접부의 표면 온도를 측정하고, 용접 공정상의 외란과 용접 조건의 변화에 의한 공정 특성의 변화에 적응하여 용접 속도를 제어하는 제어 시스템에 대하여 연구하였다. 연구 결과에 의해 다음과 같은 결론이 가능하였다.

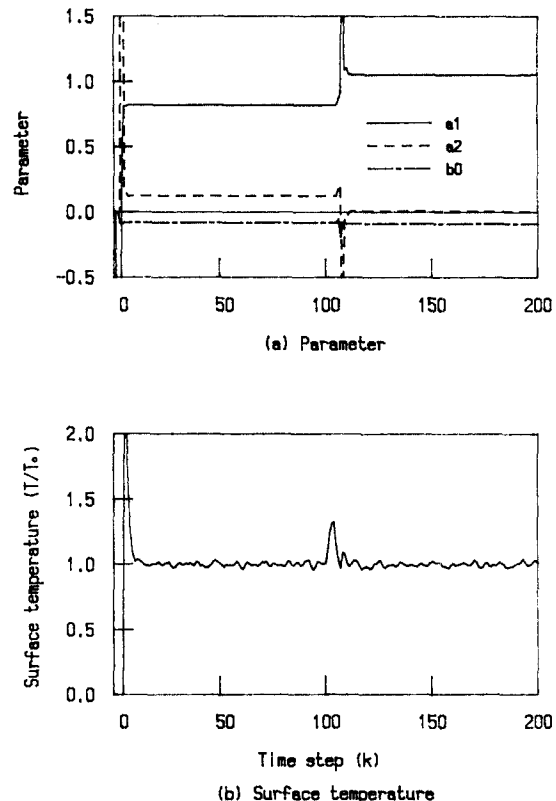


Fig. 8 The simulation results of the MRAC when subject to parameter variation at 100 step (considered the plant noise with 0.1 of variance and zero mean)

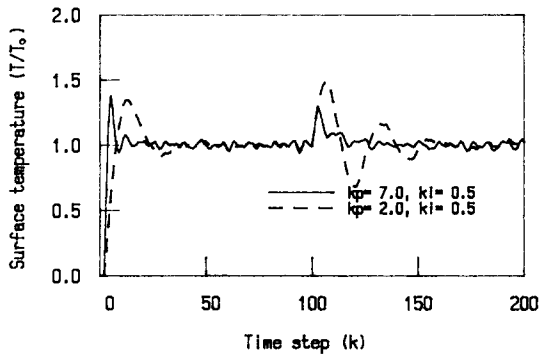


Fig. 9 The simulation results of the PI controller with fixed gains

1. 박판 용접의 경우에는 표면 온도의 측정으로부터 이면비드 크기의 모니터링이 효과적이다.
2. 수학적으로 무한차수를 갖는 용접부의 표면온도의 동적 변화 특성은 작동점에 대한 선형화된 모델에 근거한 실험적인 해석에 의해 이차의 차수를 갖는 ARMA 모델로의 차수 감소가 가능하였다.
3. 제안된 적응 제어기는 플랜트 특성이 변화하는 아크용접 공정에는 매우 효과적인 제어특성을 보여준다.

참고 문헌

1. M. Masubushi, D.E. Hardt, "Implementation of fusion welding through modelling, measurement and real-time control", M.I.T Technical Report, 1979.
2. D. A. Dornfeld, M. Tomizuka, and G. Langari, "Modelling and Adaptive Control of Arc Welding Process", Measurement and Control for batch manufacturing, ASME, pp. 53-64, 1984.
3. R. W. Richard, D. A. Buitow, et. al., "Coaxial arc weld pool viewing for process monitoring and control", Welding Journal, pp43-50, March, 1984.
4. C. Dourmanidas and D. Hardt, "A model for real-time control of weld material properties", Modelling, Sensing, and Control of Manufacturing Processes, ASME Winter Annual Meeting, pp.143-163, 1986.
5. I. D. Landau and R. Lozano, "Unification of Discrete Time Explicit Model Reference Adaptive Control Designs", Automatica, Vol. 17, No. 4, pp.593-611, 1981.
6. Goodwin and Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice-hall, 1984.
7. K. J. Astrom, "Maximum Likelihood and Prediction Error Method", Trends and Progress in System Identification, Pergamon Press.