

와이어 송급속도의 시계열 분석을 통한 GMAW의 용접성능에 관한 연구

(A Study on GMAW Performance by ARMA Modeling of Wire Feed Rate)

최용범* 성원호* 우승엽* 박원일* 장희석**

(* 명지대학교 기계공학과 대학원 ** 명지대학교 기계공학과)

1. 서론

Gas Metal Arc Welding(GMAW)은 일반 아크용접에서 발전된 것으로 처음에는 고전류 영역에서 작은 직경의 노출된 금속전극이 사용되고 shield gas로는 불활성가스(Inert Gas)만을 사용되다 후에 CO₂ 같은 화합가스나 CO₂-Ar 등의 혼합가스를 shield gas로 사용하게 되었으며, 저전류영역과 Inverter를 사용한 변조된 직류도 용접에 이용할 수 있게 됨으로써 적용분야가 확장되고 있다. 이러한 GMA 용접기술의 발달은 최근 로봇 공학의 발달과 더불어 자동 용접설비의 개발 및 이의 적용이 급증하는 추세이다. GMA 용접의 자동화를 실현하기 위하여 용접성능의 실시간 평가기법 개발과 용접선 추적 등을 위한 아크센서의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 주로 용접 전류·전압 등 전기 물리적 용접변수들을 측정, 분석하여 평가되어 오던 용접성능(아크 안정성, 이행 모드 등)을 와이어 송급속도의 시계열 분석을 통하여 평가해 보았다.

현재까지의 실험적 고찰과 연구 등의 결과에 의하면 GMA 용접공정에서 용접부의 품질에 영향을 주는 여러가지 요인중 용적이행과정과 아크 안정성(arc stability)의 비중이 가장 크고 여기에는 shield gas, 용접전압(V), 용접전류(I) 그리고 wire 송급속도(wire feed rate) 등이 복합적으로 영향을 주는 것으로 파악되어 있다. 특히 wire 송급속도 및 이의 변동량은 용접 전압, 전류 등의 전기적 신호에는 크게 반영되지 않는 용접기 mechanism의 기계적 특성(아크길이의 실제 변동량, wire extension 등)을 포함하는 정보이므로, 이를 이용하면 전기적 신호보다 효과적으로 용접성능을 규명할 수 있으리라 기대된다.

2. 용적이행과 wire의 송급성

GMA 용접작업에 있어서 wire의 송급속도는 용접 전류의 설정과 비례한다. 실제로 GMA 용접작업에 있어서 문제의 상당부는 wire의 송급 불안정에서 오는 아크 불안정, contact tip에의 wire 용착 등에 기인한다. 물론 아크 불안정과 wire 송급불안정의 상호인과 관계를 해석적으로 모델링하기는 어렵다. 먼저, 소모전극으로 쓰이는 GMA 용접용 wire는 비교적 직경이 작고(0.8mm-1.2mm), 굽어있는 torch cable을 통해 contact tip 까지 안정되게 송급 되어야 하는데, 그 긴 경로와 굴곡 및 안내 tube와의 틈새(gap)때문에 최종 용접부에서는 다소의 송급 변동이 발생한다. 그 변동은 용적이행중 아크변화 요인이 되며, 이는 전압, 전류변화와 아크 반발력(arc force) 등을 수반하고, 다시 wire 송급속도의 변화요인이 된다.

한편 CO₂를 shield gas로 사용할 때 용접도중 가장 보편적으로 관찰되는 단락이행모드에서 단락시에는 wire의 송급을 억제하는 효과를 가지며, 아크가 커지고 활성화되는 구간에서는 torch cable 내부에 정체하고 있던 wire가 자체의 탄성과 spring liner의 복원력에 의하여 순간적으로 밀려나오게 된다. 그러므로 아크의 안정성에 직접적인 연관이 있는 단락이행의 주기는 용접기 토치측에서의 wire 송급속도 변동에 직접적으로 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 토치측의 wire 송급속도 변동의 주기는 곧 단락이행의 주기로 볼 수 있고, 또한 이의 변화폭(한 주기동안 송급속도의 차이, 그림 1의 ΔR)은 아크길이(arc length)에 영향을 주는 요인이 되며 일정 구간에서 이들의 표준편차(Std[ΔR])는 아크의 안정화 정도를 나타낸다.^[3]

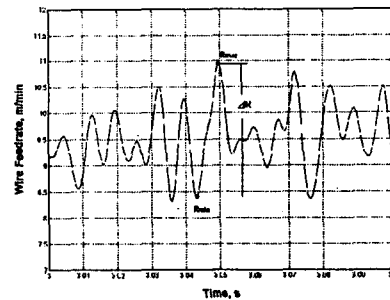


Fig 1. Wire Feedrate Fluctuation (ΔR)

본 연구는 용접상태의 실시간 모니터링 관점에서 용적이행 현상 및 아크의 변화를 반영하고 있는 wire 송급속도의 변화를 측정하여 이를 시계열 분석하여 ARMA model의 계수변화가 용적이행 등 용접상태 및 피 용접물의 급격한 형상 변화 등을 감지할 수 있는지에 초점을 맞추었다.

3. Wire 송급장치의 동특성(Dynamics)

Wire 송급속도의 변동과 아크 안정성과의 상호관계를 파악하기 위하여 전술한 wire 송급장치의 동특성을 고찰해 볼 필요가 있다. 그림 2(a)에 토치 케이블 내의 안내스프링(liner)과 이를 통과하는 wire의 간략도를 도시하였다. 여기서 입구 측에서의 송급속도를 v_1 라 하면 토치측 출구에서의 송급속도 v_0 는 용접 process dynamics에 의한 arc force 및 liner의 휨진동(flexural vibration)에 직접적인 영향을 받을 것이다.

따라서 토치측 wire 송급속도는 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$v_o = v_i - \frac{dx_a}{dt} \quad (1)$$

여기서, x_a 는 arc force에 의한 liner의 횡진동에 기인한 길이방향 변위.

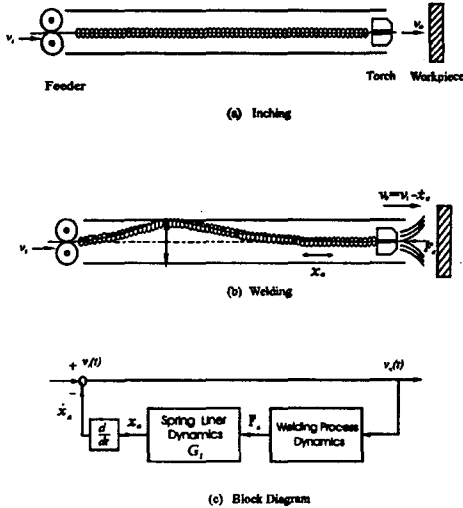


Fig 2. Schematic Diagram of Spring Liner System

이를 그림으로 설명하면 송급기 측의 wire는 물리로 고정되어 있으므로 그림 2(b)에서 처럼 토치케이블 내에서의 liner의 횡진동이 x_a 방향의 변위로 나타나고 이것이 토치측에서의 송급 불안정을 일으키는 원인이 된다. 이를 다시 블록선도로 도시하면 그림 2(c)와 같다.

여기서 G_1 은 자중을 고려한 스프링 라이너(liner)의 진동특성을 표시하는 2nd order system의 전달함수로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (2)$$

여기서, m 은 liner spring의 equivalent mass,

c 는 equivalent damping coefficient,

k 는 횡진동 방향의 spring constant이며 liner spring의 축방향 진동(axial vibration)은 무시.

한편, 공정중 변화하는 용접전류에 대하여 안정한 조건의 용접전압을 유지하기 위한 용접기의 자기 제어기능이 아크에 영향을 미치는 부분과 용접 process dynamics에 의한 arc force 등의 liner 진동에 영향을 미치는 현상은 여러가지 물리적 현상(용융부의 유동, 아크물리, 열 및 물질전달)이 복합된 공정이므로 정확한 모델링이 불가능하다(그림 2(b)에서 Welding Process Dynamics에 해당하는 부분). 여기서 발생되

는 arc force는 liner에 외력으로 작용하여 횡진동을 유발하고, 이는 토치측 송급속도를 변화시켜 결국 아크의 불안정을 야기하게 된다. 그런데 이는 앞서도 언급하였듯이 전기, 아크, 열물리적인 현상이 복합된 공정이므로 용접전류의 설정에 민감하게 반응하며 변화할 것으로 예측된다. 따라서 전체적인 전달함수의 변화 또한 이에 대응하여 변화할 것으로 예상된다.

4. Wire 송급속도의 시계열 분석

일정한 측정주기(sampling frequency)로 신호를 받아들였을 때 앞서있는 신호들은 각각 그 선행된 정도만큼의 영향을 현재의 신호에 미치게 된다. 즉, k 번째의 신호 $y(k)$ 는

$$y(k) = \sum a_l y(k-l) + \sum b_m x(k-m) \quad (3)$$

여기서, $y(k)$: k 번째 출력신호

$x(k)$: k 번째 입력신호

a_i 's : autoregressive parameters

b_m 's : moving average parameters

으로 표현되며 이의 계수를 최소자승법(least squares technique)에 의하여 구한다. 이를 autoregressive moving average(ARMA) model이라 하며, 모든 a_l 이 zero 이면 moving average(MA) model 되고, 모든 b_m 이 zero 이면 autoregressive(AR) model이 이 된다. Moving average part의 차수를 N , autoregressive part의 차수를 M 이라 하면 이는 ARMA(M, N) model이 된다. 특히 ARMA(2,1) model의 계수 a_1, a_2, b_1 은 물리적으로 2nd order system 에서의 ζ, ω_n 과 연관이 있는것으로 알려져 있다[2].

본 연구에서는 spring liner system을 2nd order system으로 해석하여 전달함수 G_1 을 가정하였으므로 ARMA(2,1) model을 적용하여 이상용접상태와 피용접물의 형상변화를 감지할 수 있는지를 조사하였다. GMA 용접에서 아크의 형상변화 및 단락을 유발하는 기계적 요소인 wire의 송급속도 변동과 아크의 발생 원인 전기적 요소인 용접전압 사이의 상호 관계가 용적이행 상태 및 피용접물의 형상변화에 따른 용접상태 변화를 감지하는데 역할을 할것이라는 가정하에 (3)식에서의 출력신호를 토치측 wire 송급속도의 변동량(fluctuation)에 해당하는 토치측 송급속도와 송급기 측 송급속도의 차이인 $v_o(k) - v_i(k)$ 로, 입력신호를 용접전압 $V(k)$ 로 설정하였다.

본 실험에서는 각각의 용접변수를 10MHz의 속도로 4초씩 sampling 하였으며, 이들의 데이터 갯수(record length)는 40,960개이다. ARMA fitting을 위한 데이터 갯수는 512개를 취했으며 이는 time record 상에서 0.05초에 해당한다. 따라서 전체구간에서 각각 80개의 ARMA parameter의 조합이 계산된다.

5. 용접 실험

본 연구에서는 Transistor Inverter 제어 방식의 정격출력 DC 350A, 36V인 용접전원을 사용하는 GMA 용접기를 사용하여 실험하였다. 이때 용접기 토치는 작업대에 고정시켜 놓았고, 용접시편을 DC motor와 ball-screw 이송장치로 구동되는 X-Y Table에 설치하여 용접중 외부요인에 의한 토치의 진동을 최소화하였다. 또한 이는 용접속도를 DC motor의 속도를 조절하여 변화시킴으로써 토치의 움직임에 의한 용접속도 변화에 상응하는 효과를 가진다. 용접시편은 두께 6.0mm의 일반 구조용 압연강재(KSD3503-SS41; mild steel)로써, 이를 폭 100mm, 길이 340mm로 절단하여 표면을 연삭숫돌로 다듬어 사용하였다. 한편 급격한 피용접물의 형상변화를 구현하기 위하여 평판에 그림 3과 같이 notch를 가공하여 groove 용접에 적용하였다.

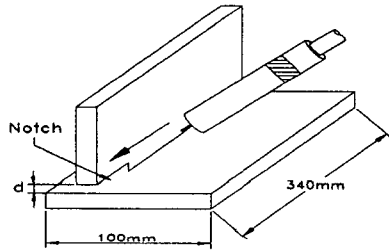


Fig 3. Groove Welding Specimen with Notch
($d = 3\text{mm}$)

Wire 송급기(feeder)측과 토치측에서의 wire 송급속도의 측정은 rotary encoder와 F/V converter를 이용하여 wire의 선속도를 회전속도로 바꾸어 이를 측정하는 각속도 측정기를 만들고 이를 양측에 각각 부착하여 입력 및 출력부의 wire 송급속도를 측정하였다. 그림 4에 본 연구에서 구성한 wire 송급속도 계측을 위한 실험장치의 간략도가 도시되어 있다.

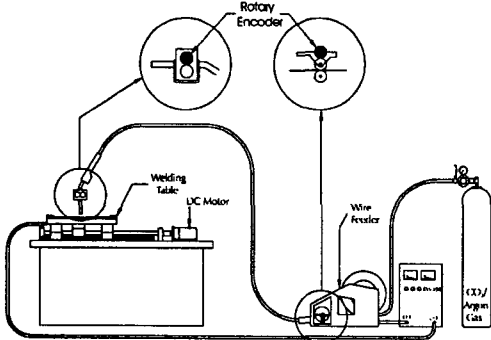


Fig 4. Diagram of GMA Welding Experimental System

6. 결과 및 분석

용접전압과형(welding voltage, V)과 wire 송급속도의 변동량인 (wire feedrate fluctuation, $v_o - v_i$)를

GMA 용접공정에 영향을 미치는 입력 및 출력속 요소로 보고 ARMA(2,1) model의 fitting결과 그림 5에서 그림 7의 (b)에 나타내었다. 각 parameter들은 스펙터를 다량 유발하고 비드형상이 불규칙한 불량 용접을 초래하는 비정상적인 단락이행이 일어날 때(그림 5-2의 2.5초 이후, 그림 7) 심한 변동을 보이는것이 관찰되었다.

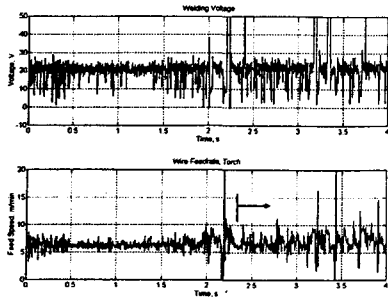
그림 6은 일반적인 단락이행모드로 notch 시작점을 통과한 이후에 autoregressive parameter(a_1, a_2)의 변동이 관찰되었다. 여기서 notch 통과 이전의 parameter 변화를 살펴보면 그림 6-1은 Ar을 25% 첨가한 CO_2 -Ar 혼합가스를 사용하여 안정적인 단락이행을 유도한 경우로 용접 전압을 관찰하면 용접 초반부에 단락이행을 보이다 그 이후에 부분적으로 스프레이 이행모드가 관찰되며, 이 구간에서는 parameter의 변화가 안정된 상태를 유지하다 notch 통과 이후(2초이후)에 변동이 시작됨을 볼 수 있다. 그림 6-2는 CO_2 를 shield gas로 사용한 경우로 notch 통과 이전의 용접구간에 계속 나타나는 미소한 변동은 지속적인 단락이행 상태를 나타내며 notch 이후(2초이후)에 변화폭이 커져 용접상태에 변화가 있음을 보여준다.

그림 7의 경우는 notch 통과 이전에 이미 비정상적인 용접상태에 있어 parameter의 변동이 심하기 때문에 notch를 판별하는데 장애요인이 되고있다. 이러한 비정상적인 단락이행은 높은 용접전류에서 wire의 송급속도가 빨라 wire가 지속적으로 모재에 충돌하여 송급이 정제되는 경우에 일어난다. 이때 notch는 순간적으로 토치와 모재사이의 간격을 넓혀주는 역할을 하므로 충돌주기가 둔화되거나(그림 7-1, 2초이후) 순간적으로 충돌이 멈추는(그림 7-2, 1.5-3초 사이구간) 결과를 초래한다. 본 실험결과에 의하면 전자의 경우는 ARMA parameter로 판별하기 어려우나 후자의 경우는 충돌이 멈춘것을 감지할 수 있었다.

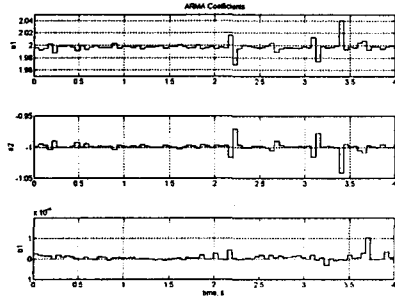
그림 8은 아크 안정성을 반영하고 있는것으로 규명된 토치측 wire 송급속도 변동량의 구간별 표준편차와 ARMA parameter중 a_1 과의 비교이다. 여기서 ARMA parameter의 변화가 나타나는 구간의 아크 안정도가 떨어지는것을 볼 수 있다.

7. 결론

GMA 용접에서 용접부 품질은 용접중의 contact tip과 용접물의 거리(CTWD), 용접 wire의 순간적인 배출정도(Wire Extension), 아크 반발력(F_a), 차폐가스(shield gas)의 종류 및 유량, 용접전원의 불안정(voltage fluctuation), wire의 성분 등에 의해서 복합적으로 영향을 받으나 이들 인자 중 대부분이 wire의 송급속도 변동에 의하여 영향을 받거나 상호 연관되어 영향 주는 관계에 있다. 이를 전제로 wire 송급속도 신호의 시계열 분석을 통하여 얻어진 ARMA coefficient 들을 관찰함으로써 불안정한 용적이행 상태 및 피용접물의 형상변화 등이 인식가능해 졌다.

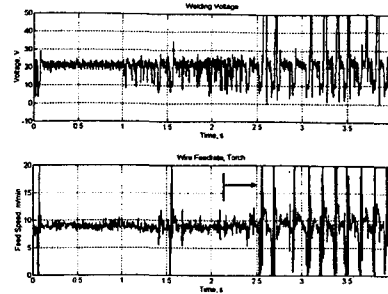


(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate

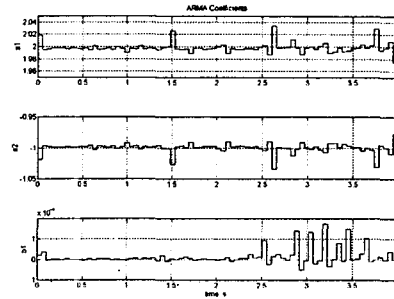


(b) ARMA Parameters (v_o/V)

Fig 5-1. ARMA Parameters (250A, CO₂-Ar Mixed Gas)

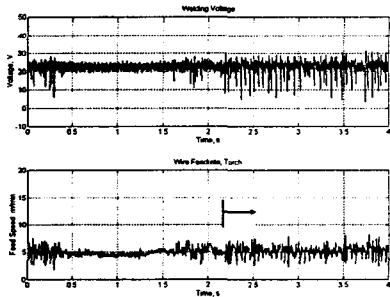


(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate

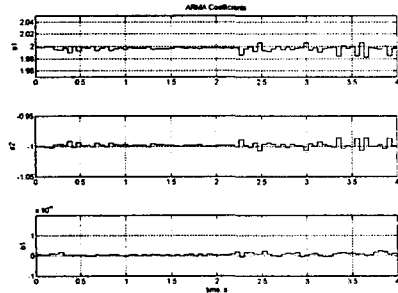


(b) ARMA Parameters (v_o/V)

Fig 5-2. ARMA Parameters (300A, CO₂-Ar Mixed Gas)

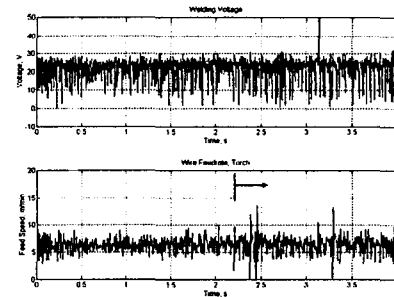


(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate

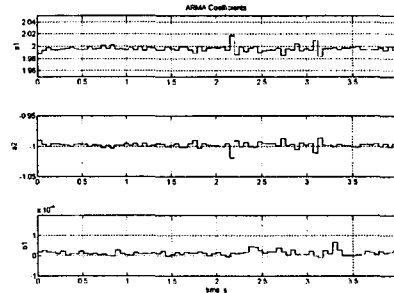


(b) ARMA Parameters (v_o/V)

Fig 6-1. ARMA Parameters (200A, CO₂-Ar Mixed Gas)

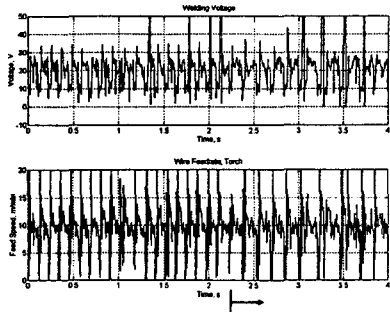


(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate

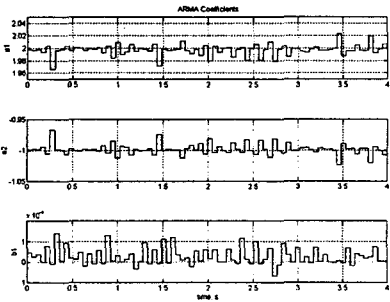


(b) ARMA Parameters (v_o/V)

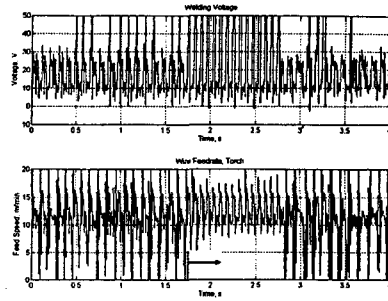
Fig 6-2. ARMA Parameters (250A, CO₂)



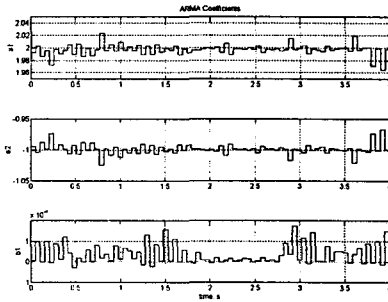
(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate



(b) ARMA Parameters (v_0/V)
Fig 7-1. ARMA Parameters (300A, CO₂)



(a) Welding Voltage and Torchside Wire Feedrate



(b) ARMA Parameters (v_0/V)
Fig 7-2. ARMA Parameters (350A, CO₂)

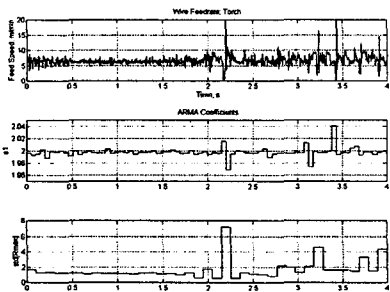


Fig 8. Std[ΔR] and a_1 Parameter

참고 문헌

- 1) AWS : Welding Handbook, (1991) pp110~115
- 2) S.M. Pandit, S.M. Wu : Time Series and System Analysis Modeling and Applications, (1979), Univ. of Wisconsin-Madison
- 3) 신현욱, 최용범, 성원호, 장희석 : GMAW에서 와이어 송급 속도의 변동이 아크안정성에 미치는 영향에 관한 연구, 대한용접학회 논문집, (to appear)