

GMAW에서 와이어 송급속도의 변동이 아크안정성에 미치는 영향에 대한 연구

(A Study on Effects of Wire Speed Fluctuation on Arc Stability in GMA Welding)

최용범* 성원호* 신현욱** 장희석***

(* 명지대학교 기계공학과 대학원 ** 한국켄트 *** 명지대학교 기계공학과)

1. 서론

Gas Metal Arc Welding(GMAW)은 일반 아크용접에서 발전된 것으로 1920년대에 관련이론이 발표되어 1948년경부터 실용화되었다. 처음에는 고전류 영역에서 작은 직경의 노출된 금속전극이 사용되고 shield gas로는 불활성가스(Inert Gas)만을 사용하는 것으로 인식되어져, 지금까지 사용되고있는 MIG(Metal Inert Gas)용접으로 알루미늄용접에 적용하였으나, 후에 더 발전하여 CO₂ 같은 화합가스나 CO₂-Ar 등의 혼합가스를 shield gas로 사용하게 되었으며 저전류영역과 변조된 직류(Inverter DC)도 사용할 수 있게 됨으로써 용접할 수 있는 금속의 종류도 많아졌다. 이러한 GMA 용접기술의 발달과 더불어 최근에는 로봇을 이용한 전자동 용접설비의 개발 및 적용이 급증하는 추세이다. 이러한 용접 자동화를 실현하기 위하여 실시간 아크 안정성 평가기법의 개발과 용접선 추적 등을 위한 아크센서의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 지금까지 주로 용접후 각 용접변수들의 통계적 처리에 의하여 평가되어 오던 아크 안정성 평가기법의 문제점이었던 on-line monitoring의 어려움을 극복하기 위하여 용접도중 wire feedrate의 측정을 통한 아크 안정성 평가기법을 제시하였다. GMA 용접공정에서 용적이행과 용접부의 품질 등은 여러가지 공정변수에 의해 영향을 받으며, 용접중 아크가 불안정하면 스파터의 발생이 심해지고 용접 효율이 떨어지며, 용접부 내부에 hole이나 void같은 결함이 발생하는 요인이 되기도 한다. 현재까지 실험적 고찰과 연구 등을 통하여 용적이행과정과 아크 안정성(arc stability)이 용접품질을 결정하는 가장 중요한 요인이며, shield gas, 용접전압(V), 용접전류(I) 그리고 wire 송급속도(wire feed rate) 등이 아크 안정성에 큰 영향을 주는것으로 파악되어 있다. 특히 wire 송급속도및 이의 변동량은 용접 전압, 전류 등의 전기적 신호에는 크게 반영되지 않는 용접기 mechanism의 기계적 특성(아크길이의 실제 변동량, wire extension 등)을 포함하는 정보이므로, 현재까지 아크 안정성 판정에 사용되어왔던 전기적 신호보다 효과적으로 이를 규명할 수 있으리라 기대된다.

2. 아크의 안정성과 측정이론

GMA 용접에서는 내부결함이나 외관불량을 초래하지 않고 과도한 스파터가 발생되지 않는 안정된 아크를 유지하는 것이 중요하지만, 실제 용접시에는 여러가지 외란 요인과 함께 wire 송급시 구동 roller에서 부터 contact tip까지의 긴 송급경로에 의한 송급 불균일(fluctuation) 때문에 지속적인 아크의 안정성을 기대하기는 어렵다. 아크의 변화는 직접적으로 용접전압·전류의 변화로 반영되고, 최종 용접상태의 품질로 나타나므로, 여러가지로 아크의 안정성을 평가하려는 방법이 시도되었다. 지금까지는, 용접 작업자의 경험 등에 따라 아크의 형상을 관찰하거나 용접중의 발생

음 등을 청취하여, 주관적이며 정성적(qualitative)인 평가를 하여 왔으나, 최근에는 아크상태가 직접적으로 반영되는 용접전압 및 전류의 파형분석 등을 통한 정량적(quantitative)인 평가방법들이 제시되었다^[3,14,15]. 이중 Mita는 CO₂ 아크용접에 대하여 아크 안정성에 영향을 미치는 용접 전압 및 전류 파형으로부터 얻어지는 여러인자를 충분히 고려하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 통하여 아크시간(Ta), 단락시간(Ts), 평균아크전류(Ia), 평균단락전류(Is)로 구성된 아래의 안정성 지수를 제시한 바 있다.

Mita는 이 지수를 일정 전류에서 전압을 변동시키며 용접을 실시한 실험에 적용하여 그 전류에서 아크가 가장 안정되는 전압조건이 존재함을 보이고, 전류의 변동에 따른 최적 안정전압·전류의 조합과 그때의 지수값을 구하였다. 그러나 당시 Mita의 연구에 적용된 용접기는 인버터 제어기술이 발달하기 이전의 용접기로, 최근 널리 보급되어 사용되기 시작한 인버터 제어방식 용접기의 특성을 고려한다면 다른 측면에서의 아크 안정성 평가방법이 요구된다고 볼 수 있다.

3. 용적이행과 wire의 송급성

GMA 용접작업에 있어서 wire의 송급속도는 용접 전류의 설정과 비례한다. 실제로 GMA 용접작업에 있어서 trouble의 상당부분은 wire의 송급 불안정에서 오는 아크 불안정, contact tip에의 wire 용착 등에 기인한다. 물론 아크 불안정과 wire 송급불안정의 상호인과관계를 해석적으로 모델링하기는 어렵다. 먼저, 소모전극으로 쓰이는 GMA 용접용 wire는 비교적 직경이 작고(0.8mm-1.2mm), 굽어있는 torch cable을 통해 contact tip까지 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 켜지고 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 송급률 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 arc length에 영향을 주는 요인이므로 이의 일정구간 내에서의 표준편차는 그때의 아크 안정화 정도를 의미한다고도 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 인버터 용접기의 아크 안정성 평가에 직접 이용해 보았고, 같은 구간에서의 Mita index와 비교하여 보았다.

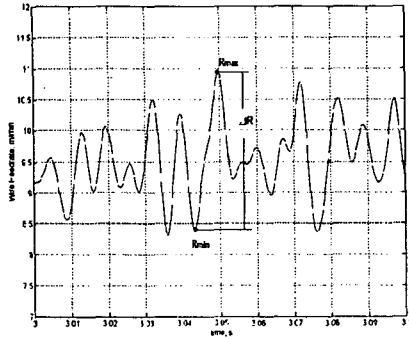


Fig 1. ΔR for Calculation of $Std[\Delta R]$

4. Wire 송급장치의 동특성(Dynamics)

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

$$v_o = v_i - \frac{dx_a}{dt} \quad (4)$$

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

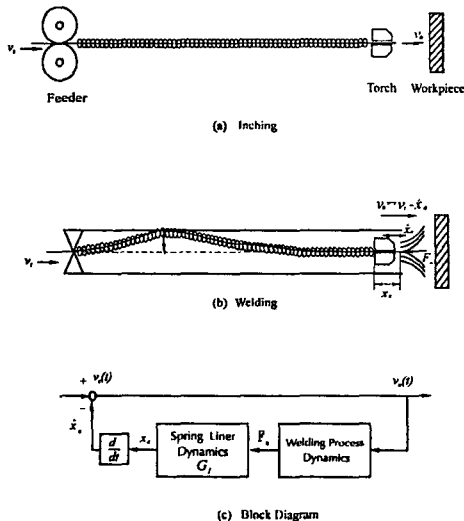


Fig 2. Schematic Diagram of Spring Liner System

이를 그림으로 설명하면 송급기 측의 wire는 물러고 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 전달함수로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (5)$$

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

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.

본 연구에서는 wire 송급기의 입출력 송급 속도, 특히 토치측 송급속도의 변동과 아크 안정성과의 관련성 여부를 평가하는 것이 주된 논제이므로 이의 정확한 측정이 필요하다. 따라서 rotary encoder와 F/V converter를 이용하여 wire의 선속도를 회전속도로 바꾸어 이를 측정하는 각속도 측정기를 만들어 이를 wire 송급기의 송급기측과 토치측에 각각 부착하여 입력 및 출력부의 wire 송급속도를 측정하였다. 이외에 Mita index 산출을 위하여 용접전압 및 전류를 측정하였다.

한편 용접전류, 용접전압 등의 용접 공정변수와 용접시 용융부에서 발생하는 열물리적 현상과 관련된 용접 토치측 wire 송급속도 변동과의 상관도를 측

정하기 위하여 dynamic signal analyzer를 사용하여 이들의 power spectrum density(PSD), 및 상호간의 cross correlation, coherence 및 transfer function 등을 주파수 분석에 의하여 계산하였다. 그림 3에 본 실험에서 구성한 측정 시스템의 간략도가 도시되어 있다.

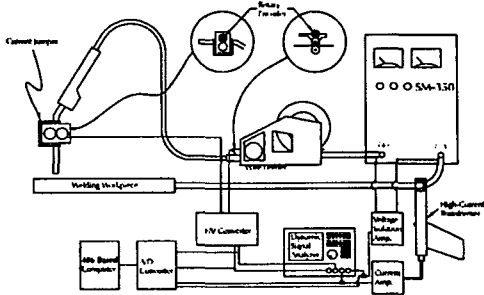


Fig 3. Diagram of GMA Welding Process Parameters Measuring System

6. 결과 및 분석

가. Mita Index 및 송급 변동률에 의한 아크 안정성 평가의 비교

본 연구에서는 토치측 wire 송급속도의 변동이 아크의 안정성 정도에 미치는 영향이 일정 구간에서의 송급속도 변동량의 표준편차(S_R)에 반영되어 있을 것으로 가정하고 이를 아크 안정성 평가에 적용하여 Mita index에 의한 결과와 비교해 보았으며 그 결과가 그림 4에 도시되어 있다. 그림에서 200, 250 및 350A 조건의 경우 두가지 지수가 비슷한 양상을 보이지만 300A의 경우 서로 다른것을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 인버터 방식의 용접기에서 Mita index 적용이 곤란하다는 것을 의미한다.



Fig 4. Mita Index and Wire Feed Speed Fluctuation during GMA Welding(CO_2 Shield)
(—: Mita index, - - - - : STD [ΔR])

나. 용접공정변수의 주파수분석

다음은 본 연구에서 각 공정변수들의 상호관계를 분석하기 위한 주파수 분석의 PSD 그림이다. 각 조건 중 wire feedrate fluctuation이 비교적 심한 300A에 대한 결과이며, voltage의 PSD에서 나타난 peak는

단락주기가 볼 수 있으며 이는 토치측 wire feedrate의 peak와 같다. 한편 송급기측의 wire feedrate에서 나타나는 첫번째 peak는 송급기의 송급속도에 해당하는 rotary encoder의 출력성분이고 토치측에서 단락주기를 중심으로 power가 분포하는 것은 feedrate의 변동이 심하다는 것을 의미한다. 이 외에 토치측의 wire feedrate와 전압, 전류간의 coherence가 도시되어 있으나 전달함수의 파악에는 어려움이 있다.

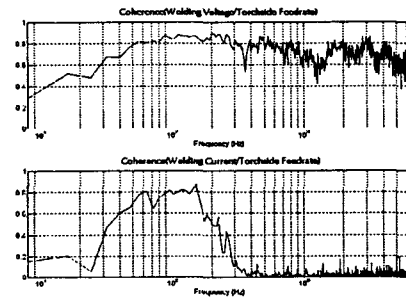
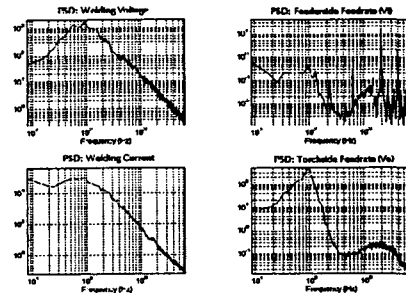


Fig 4. PSD Plots for Various Process Parameters and Coherence between Voltage(Current) and Torch-side Wire Feedrate, v_w , (Welding Current = 300A)

다. Wire 송급속도의 위상평면(Phase Plane)해석

Wire 송급속도 변동의 불안정이 아크 안정성에 영향을 미친다는 가정을 좀 더 정성적으로 분석하기 위하여 이의 위상평면(phase plane) 해석을 시도하였다. 즉 일정한 구간에서 wire 송급속도의 변화량과 이의 시간변화량인 순간 가속도를 각각 축으로 하는 위상평면도를 그려서 곡선의 궤적이 나타내는 규칙성을 주시하고, 이를 아크 안정화 정도를 나타내는 척도로 적용할 수 있는지를 검토해 보았다.

위상평면상의 궤적이 일정한 패턴의 폐곡선이면 그 시스템은 선형이며 매우 안정한 상태에 있음을 알 수 있다. 그러나 궤적의 이탈정도가 주기마다 심한 편차를 가지고, 개곡선을 그린다면 이 시스템은 비선형이고 매우 불안한 상태에 있음을 나타낸다. 따라서 그림 6(a:단락이행)와 같이 궤적이 일정한 영역에 집중되어 있고 곡선 형상의 편차가 심하지 않은 경우, 그때 다소간의 wire 송급속도의 편차가 존재한다 하더라도 이는 주기적이며 비교적 안정한 상태에 있다고 볼 수 있다. 반면 그림 6(b:단락이행; c:스프레이)와 같이 궤적이 불안하고 형상의 편차도 큰 경우는 심한 아크 불안정 상태에 있음을 시사한다. 따라서 토치측 wire 송급속도에 대한 위상평면도는 아크의 주기성과

안정화 정도를 동시에 표현해 주고 있다.

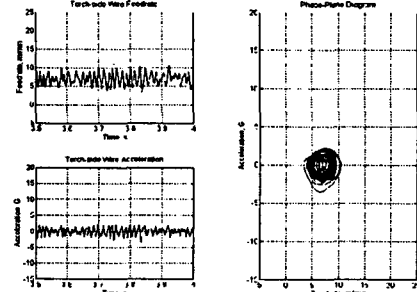


Fig 6(a). Time Records and Phase Plane Diagram (CO₂, Current=250A, Voltage=LowMid Range)

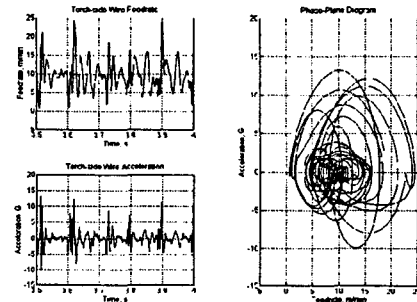


Fig 6(b). Time Records and Phase Plane Diagram (CO₂, Current=300A, Voltage=LowMid Range)

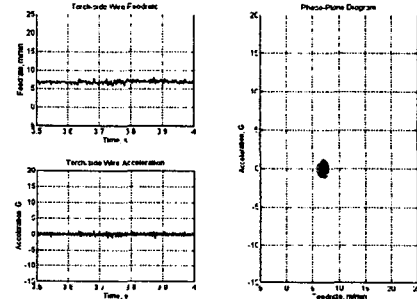


Fig 6(c). Time Records and Phase Plane Diagram (CO₂-Ar Mixed, Current=250A, Voltage=MidHigh Range)

7. 결론

Wire의 송급성이 아크 안정성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 wire 송급속도의 변동과 기존의 Mita 안정성 지수와의 상관관계를 규명하고자 하였으나, SCR 이외의 파형제어식 인버터 용접기에는 Mita에 의해 제시된 아크의 안정성지수가 적용될 수 없음을 밝혔다. 용접시 아크의 안정성은 전류가 커질수록 떨어지며, 이러한 현상은 전류를 높게 설정할수록 wire의 송급속도 변동이 심해짐을 통해 규명할 수 있었다. 또한 wire 송급속도의 위상평면 해석을 새롭게 시도하였으며, 이상의 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. GMA 용접에서의 아크 안정성은 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 받으며, 특히 위의 인자들 중 대부분이 wire의 송급속도 변동에 의하여 영향을 받거나, 혹은 상호 연관되어 영향을 서로 주는 관계이므로, 아크 안정성은 wire의 송급속도 변동과 밀접한 관련이 있다.

2. 아크 안정성을 평가하기 위하여 사용되어 온 단락 및 아크 발생구간에서의 전류, 전압 파형의 통계적 분석방법(Mita Index)은 SCR제어방식 이외의 인버터 파형제어식 용접기에서는 적용될 수 없다.

3. 저전류 영역에서는 전류 또는 전압의 변화파형에 wire 송급속도의 변화가, 즉 아크 안정성이 어느정도 반영이 되지만, 용접전류의 설정이 커지면 이에 비례하여 송급속도도 커지고, wire 송급 케이블 내에서의 라이너 휘진동 등 송급 시스템의 동특성에 관련된 요인들의 영향이 커져 이들이 아크 안정성에 복합적으로 작용하므로 아크 안정성의 평가시 용접전류, 전압의 파형만으로 이를 해석할 수 없고, wire 송급속도의 변동을 고려해야만 한다.

4. Wire 송급속도의 위상평면 해석은 아크 안정성 해석에 새로운 기법을 제시하였다. 설정된 용접 전류 조건에서 전압의 변화에 따라 안정성이 변화한다. 특히 고전류 영역(300A 이상)에서는 이같은 현상이 두드러진다. Ar-CO₂ 혼합가스를 사용할 때, 특정 전류 조건에서 전압을 높이면 스프레이 모드가 발생하는데 이 때 송급속도는, 단락이행시와 비교하면, 위상평면에서 한 점에 집중된다. 따라서 기존의 방법에서 시도할 수 없었던 구형용적이행이나 스프레이용적이행에서의 아크 안정성도 wire 송급속도의 위상평면 궤적으로 평가할 수 있음을 시사한다.

8. 향후 연구 과제

현재까지 많은 아크 안정성 평가와 관련된 연구가 진행되어져 왔지만 주로 구형 SCR 방식 용접기의 단락이행모드에 국한되어 있었다. 본 연구에서는 현재 인버터 용접기의 사용증가 추세를 고려하여 인버터 용접기 및 Ar-CO₂ 혼합가스용접(스프레이 용적이행)에까지 아크 안정성 평가의 영역을 넓히고자 노력하였다. 그러나 위상평면 해석방법을 적용할 때 아크 안정도의 정량적 측정기술의 개발은 아직 미진한 상태이다. 따라서 이의 실시간 정량적 평가 기술의 개발이 현재로서는 가장 절실히 요구되고 있다.

참고 문헌

- 1) AWS : Welding Handbook, (1991) pp110~115
- 2) 원 윤재; CO₂가스 아크 용접에서의 아크 안정성을 고려한 용융지 크기 제어에 관한 연구, 한국과학기술원, 정밀공학과 박사학위논문, (1993)
- 3) T. Arai et al.; The Investigation of Arc Phenomena by means of a Computer, 일본용접학회논문집, 1(3), (1983), pp.317~322
- 4) W. Lucas; Microcomputer Systems, Software and Expert System for Welding Engineering, Welding Journal, Apr, (1987), pp19~30
- 5) T.Mita et al.; Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Arc Welding, Welding International, No.2, (1988), pp152~159