

研究論文

GMAW에서 와이어 송급속도의 변동이 아크안정성에 미치는 영향에 관한 연구

신현욱* · 최용범** · 성원호** · 장희석***

Effects of Wire Speed Fluctuation on Arc Stability in GMA Welding

H.W. Shin, Y.B. Choi, Y.H. Sung and H.S. Chang

Key Words : GMAW(아크용접), Wire Speed Fluctuation(Wire 송급속도 변동), Arc Stability(아크 안정성), Phase-Plane Diagram(위상평면도)

Abstract

Weld quality of GMA welding processes is closely related to arc stability. Although many researches on arc stability have been performed, real-time estimation of arc stability has not been attempted. For instance, Mita proposed a off-line statistical method in which short circuiting and arcing time, and voltage and current wave forms were sampled to assess arc stability. But this method is not suitable to assess arc stability for GMA welder which employ inverter power source due to its controlled current and voltage wave forms.

In this paper, the relationship between arc stability and wire feed rate fluctuation is analyzed to propose new criterion for inverter power source. When arc voltage and arc current and arcing time are analyzed, we can assess arc stability only for short circuit transfer mode. When wire feed rate is analyzed, we can estimate arc stability under the condition of spray transfer mode as well. Hence, the wire feed rate is chosen for monitoring process variable to cover possible metal transfer modes in GMAW.

Through this research, it has been identified that arc stability in GMA welding processes is closely related to wire feed rate. When inverter power source is used, conventional statistical method of estimating arc stability, such as Mita index, is no longer valid due to its controlled voltage and current wave forms. Arc stability has been also examined in phase plane diagram.

* 비회원, 하나정공

** 학생회원, 명지대학교 기계공학과 대학원

*** 정회원, 명지대학교 기계공학과

1. 서 론

GMA 용접은 용접 변수의 적정 선택에 따라 생산성 향상 및 용접자동화가 용이하다. 특히 최근에는 로봇공학의 발달과 더불어 유용한 용접방법임이 확인되고 있고, 이에따른 우수한 용접질(熔接質)과 이의 감시 및 제어방안을 위한 연구가 필요하게 되었다. 현재까지 여러 실험적 고찰과 연구를 통하여 용적이행과정과 아크 안정성(arc stability)이 용접품질을 결정하는 중요한 요인이며, 이에 영향을 주는 변수로는 shield gas 를 비롯하여 용접전압(V), 용접전류(I), Wire 전극의 크기 및 전극을 배출하는 contact tip과 모재사이의 간극(CTWD), 용접중 wire의 배출 정도(wire extension), 그리고 wire 송급속도(wire feed rate) 등이 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 알려졌다.

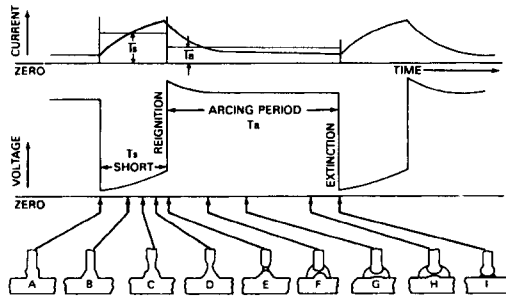


Fig. 1 Short Circuiting Transfer in GMA Welding Processes

일반적으로 CO₂ 용접에서는 단락용적이행(short circuiting metal transfer-그림1 참조)이 박판용접, 비정상 위치용접 및 groove 용접 등에 적용되고 있고, 이밖에도 평균용접전류가 단락용적이행보다는 약간 높으나 비교적 전전류영역으로 용접할 때는 입상용적이행(globular transfer)을, Ar이 70% 이상 함유된 CO₂-Ar 혼합가스를 shield gas로 사용하여 고전류로 용접하면 스프레이 용적이행모드를 얻을 수 있다. 한편 GMA 용접시 용융금속 표면은 차폐가스의 영향을 직접적으로 받아 용접부의 표면장력에 여러 가지 영향을 끼치게 되며, 특히 표면의 급냉으로 인한 용접부 내의 기포(blow-hole)발생은 용접질의 치명적인 결함이 되기도 한다. GMAW에서는 용접질을 결정하는 공정변수들이 서로 밀접한 상관관계를 가

지고 있으나, 상호간의 수학적 해석이 곤란하고 그 적용에도 한계가 있으므로 실험적 고찰과 비교를 통하여 적정 변수들을 선택 적용하는 방법으로 용접질의 개선을 시도하고 있다.

용적이행중의 용융금속의 표면장력을 중요한 인자로 보고 낮은 전류로 고속용접을 실행하기 위하여 유황(S)이나 셀레늄(Se)같은 계면활성화 원소를 소량 첨가하여 표면장력을 낮출 수 있는 wire electrode를 사용하는 방안이 일본에서 연구된 결과 규칙적 단락이행 비율이 높아지고 외관상으로 우수한 용접비드가 형성된 것으로 알려졌다. 국내에서도 wire에 Ti, Ca, S, 등을 첨가하여 wire의 조성성분 변화에 따른 용접성을 연구, Ti 및 Ca의 증가는 단락이행영역을 축소시키고 globular이행영역을 증가시키며, S는 0.005-0.015%의 성분조성함량의 변화에 따라 용적이행의 주파수가 증가됨을 밝힌바 있다^{3,4)}. 용접 방법에 있어서도 파형제어기술의 발달에 따라 초기의 thyristor식 용접기에서 transistor pulse기로, 그 후에 다시 inverter식 용접기가 개발되어 용접성이 크게 향상되었다. 그러나 inverter 용접전원의 파형 제어에서는 전원의 외부특성이 정전압 특성으로 단락기간에 전류의 상승률을 전자적으로 제어하므로 스파터 발생량을 줄이고 bead외관을 개선하고 있지만, 아크발생 기간(arcing period)은 제어시 고려되지 않으므로 이에따라 용적의 크기가 변화되는 단점(이는 앞으로 설명하게 될 아크 안정성 평가방법 중 하나인 Mita의 아크 안정성 지수의 산출에 근본적인 문제점으로 나타남)이 있다⁵⁾. 이밖에도 다양한 방법으로 용접중 용융부 형상을 측정하거나 또는 추정하는 기법이 개발되었고, 이를 이용한 용접품질의 제어기술이 연구되었다^{6,7)}. 그러나 각 용접변수사이의 관계가 정확하게 정의되어 있지 않고, 다양한 용접 조건 및 외란에 대한 모델링이 어려우므로, 용접품질에 대한 제어가 용이하지 않다. 따라서 다양한 용접조건에 대하여 어느 정도의 용접품질확보는 가능하겠으나, 이상적인 용접품질을 보장할 수 있는 자동용접시스템의 개발은 현실적으로 어렵다고 보며, 중요한 제어변수가 될 수 있는 용접변수(전류, 전압, wire 송급속도 등)와 용접 품질에 대한 상호 상관관계의 해석적 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 GMA 용접기에서 구조적으로 피하기 어려운 wire 송급속도(wire feed rate)의 변동(fluctuation)과 GMA 용접부품질에 결정적 영향을 미치는 아크 안정성(arc stability)과의 관계를 실험을

통하여 분석하였다.

2. 아크의 안정성과 평가

GMA 용접에서는 내부결함이나 외관불량을 초래하지 않고 과도한 스퍼터가 발생되지 않는 안정된 아크를 유지하는 것이 중요하지만, 실제 용접시에는 여러가지 외란 요인과 함께 wire 송급시 구동 roller에서부터 contact tip까지의 긴 송급경로에 의한 송급불균일(fluctuation) 때문에 지속적인 아크의 안정성을 기대하기는 어렵다. 지금까지는, 용접 작업자의 경험 등에 따라 아크의 형상을 관찰하거나 용접중의 발생음 등을 청취하여, 주관적이며 정성적(qualitative)인 평가를 하여 왔으나, 최근에는 아크 상태가 직접적으로 반영되는 용접전압 및 전류의 파형분석 등을 통한 정량적(quantitative)인 평가방법이 시도되었다. Arai는 CO₂ 용접의 저전류 영역 단락이행모드에서 아크시간(arcing time)의 표준편차와 아크 안정성과의 상관 관계를 추적하였고¹²⁾, Lucas는 아크의 안정성이 단락시간(short-circuit)의 최고 전류치와 단락 주기의 균일성에 의한 것임을 밝혔다¹³⁾. 또한 Mita는 CO₂ 아크용접서 용접 전압 및 전류 파형으로부터 얻어지는 여러인자를 충분히 고려하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 통하여 아크시간(Ta), 단락시간(Ts), 평균아크전류(I_a), 평균단락전류(I_s)로 구성된 아크 안정성 지수를 제시한 바 있다¹⁴⁾. 그러나 당시 이들 연구에 적용된 용접기는 인버터 제어기술이 발달하기 이전의 용접기로, 최근 사용이 늘고있는 인버터 용접기의 특성을 고려한다면 다른 측면에서의 아크 안정성 평가방법이 요구된다고 볼 수 있다.

3. Wire 송급(Wire Feed Mechanism)

3.1 용적이행과 wire의 송급성

GMA 용접작업에 있어서 wire의 송급속도는 용접 전류의 설정과 비례한다. 그러나 GMA 용접에서 wire의 송급 불안정에서 오는 아크 불안정, contact tip에의 wire 융착 등은 안정된 wire의 송급을 저해하는 요인이 된다. 아크 불안정과 wire 송급불안정의 상호인과관계를 해석적으로 모델링하기는 어렵지만

다음과 같이 가정할 수 있다. 먼저, 소모전극으로 쓰이는 GMA 용접용 wire는 비교적 직경이 작고(0.8 mm-1.2mm) 탄성계의 성질을 가지므로 cable을 통해 contact tip까지 송급 되는 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. 이때 모재와 토치 사이에서 활성화된 아크는 일정한 아크길이(arc length)를 유지하려 하므로 송급 가속화에 의한 wire의 과잉공급은 wire의 끝부분에서 용융급속방울의 형태로 성장하게되며, 상대적으로 arc length는 줄어들어 다시 한번 단락이 일어나게 된다(그림 1(A)-(I) 참조). 이때 용융급속방울이 모재에 이행되고 이러한 현상이 계속 반복되게 된다. 그러므로 아크의 안정성에 직접적인 연관이 있는 단락이행의 주기는 용접기 토치측에서의 wire 송급률 변동에 직접적으로 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그림. 2는 한 단락이행 주기에서의 토치측 wire 송급속도 변동을 나타내는 ΔR (한 주기동안 송급속도의 차이)을 도시하였으며, 이의 변화폭은 arclength에 영향을 주는 요인이므로 이의 일정구간 내에서의

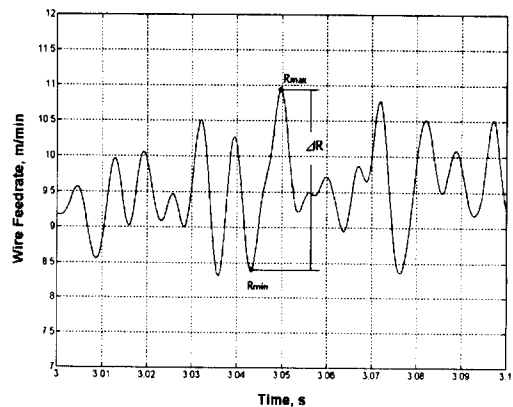


Fig. 2 Difference between Maximum and Minimum Wire Feedrate(ΔR) in Short Circuit Period

표준편차는 그때의 아크 안정화 정도를 의미한다고도 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 인버터 용접기의 아크 안정성 평가에 직접 이용해 보았고, 같은 구간에서 계산된 Mita index와 비교하여 보았다.

3.2 Wire 송급장치의 동특성(Dynamics)

Wire 송급속도의 변동과 아크 안정성과의 상호관계를 파악하기 위하여 전술한 wire 송급장치의 동특성을 고찰해 볼 필요가 있다. 그림 3(a)에 토치케이블 내의 안내스프링(liner)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(F_a) 및 liner의 횡진동(flexural vibration)에 직접적인 영향을 받을 것이다. 따라서 토치측 wire 송급속도는 다음과 같이 설명할 수 있다.

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

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

이를 그림으로 설명하면 송급기 측의 wire는 롤러로 고정되어 있으므로 그림 3(b)에서 처럼 토치케이블 내에서의 liner의 횡진동이 x_a 방향의 변위로 나타나고 이것이 토치측에서의 송급 불안정을 일으키는 원인이 된다. 이를 다시 블록선도로 도시하면 그림 3(c)와 같다. 여기서 G_1 은 자중을 고려한 스프링 라이너(liner)의 진동특성을 표시하는 전달함수로 다음과 같이 가정할 수 있다.

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

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 제어 기능이 아크에 영향을 미치는 부분과 용접 process dynamics에 의한 arc force(F_a) 등의 liner 진동에 영향을 미치는 현상은 여러가지 물리적 현상(용융

부의 유동, 아크물리, 열 및 물질전달)이 복합된 공정이므로 정확한 모델링이 불가능하다(그림 3(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. 궁극적으로 welding process dynamics에 의한 효과는 토치측 송급 변동률에 대한 용접전압·전류의 변화로 나타날 수 있으므로 본 연구에서는 실험 데이터의 주파수분석을 통하여 이들 사이의 전달함수

$$\left(\frac{\text{Voltage}}{\text{Torchside Feedrate}} \right) \text{와} \left(\frac{\text{Current}}{\text{Torchside Feedrate}} \right)$$

를 측정하였다.

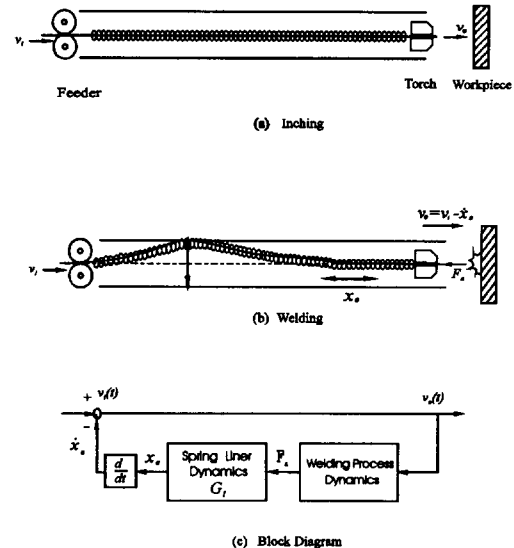


Fig. 3 Schematic Diagram of Spring Liner System

4. 실험

본 연구에서는 인버터 용접기에 대하여 여러가지 조건변화에 따라 Mita가 제안한 안정성 지수를 적용하여 아크의 안정성을 평가해 보고, wire 송급기구적으로 발생하는 토치측의 wire 송급속도 변동이

아크 안정화 정도에 어느 정도 연관이 있다는 가정 하에 이의 표준편차를 Mita의 아크 안정성 지수가 구해지는 구간에 대하여 계산하여 두 방법의 결과를 비교하기 위한 실험을 실시하였다. 또한 dynamic signal analyzer(FFT analyzer)를 이용하여 용접도중 sampling된 전류, 전압, 송급속도 등의 주파수영역 분석을 수행하였고, 이를 통하여 아크 안정성과 wire 송급속도 변동률(fluctuation)간의 상호관계에 대한 물리적 해석을 시도하였다. 그리고 이들 공정변수들 사이의 coherence를 측정하여 상호간의 연관정도를 파악해 보았고, 실제 물리적으로 모델링이 불가능한 부분(wire 송급속도 변동률과 용접전압, 전류 등)에 대하여 전달함수(transfer function)를 측정하여 분석해 보았다.

마지막으로 비선형 시스템의 일반적 분석기법인 위상평면해석(phase plane analysis)을 도입하여 토치측 wire 송급속도, v_0 와 이의 시간미분인 가속도, $\frac{dv_0}{dt}$ 의 diagram을 이용한 안정성 판정법을 제시 하였으며, 이는 향후 아크 안정성의 정량화된 지수를 찾기위한 기초연구자료가 될 것이다.

4.1 용접 실험

4.1.1 용접기

본 연구에 사용된 용접기는 Transistor Inverter 제어 방식의 CO₂/MAG 용접기로, 이 용접기의 정격출력은 DC 350A, 36V이며 용접전원, remote controller, wire 송급기, 토치 등의 요소로 구성되어 있다.

그림 4에 본 실험 시스템의 간략도가 도시되어 있다. 이때 용접기 토치는 작업대에 고정시켜 놓았고,

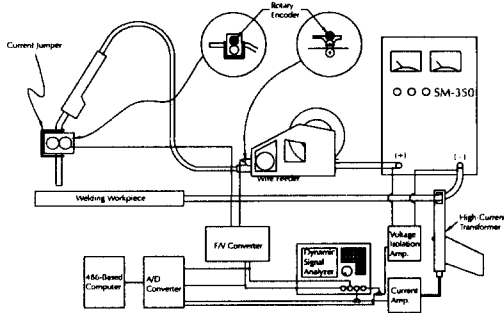


Fig. 4 Diagram of GMA Welding Process Parameters Measuring System

용접시편을 DC motor와 ball-screw 이송장치로 구동되는 X-Y Table에 설치하여 용접중 외부요인에 의한 토치의 진동을 최소화하였다.

4.1.2 용접시편

본 연구에 사용된 용접시편은 두께 6.0mm의 일반 구조용 압연강재(KSD3503-SS41; mild steel)로써, 이를 폭 100mm, 길이 340mm로 절단하여 표면을 연삭숫돌로 다듬어 사용하였다.

4.2 용접 공정변수의 측정

4.2.1 Wire 송급속도의 측정

본 연구에서는 wire 송급기의 입출력 송급 속도, 특히 토치측 송급속도의 변동과 아크 안정성과의 관련성 여부를 평가하는 것이 주된 논제이므로 이의 정확한 측정이 필요하다. 따라서 wire의 선속도를 회전속도로 바꾸어 rotary encoder로 이를 측정하는 각속도 측정기를 만들어 wire 송급기측과 토치측에 각각 부착하여 wire 송급속도를 측정하였다. Rotary encoder에서 발생하는 pulse의 주파수는 frequency to voltage (F/V) converter 소자를 이용하여 이에 비례하는 직류 전압으로 바꾼다. Wire 송급기의 송급속도는 용접전류 setting과 비례하여 증가하며 대략 15 - 18 m/min 의 범위를 가진다. 이에 해당하는

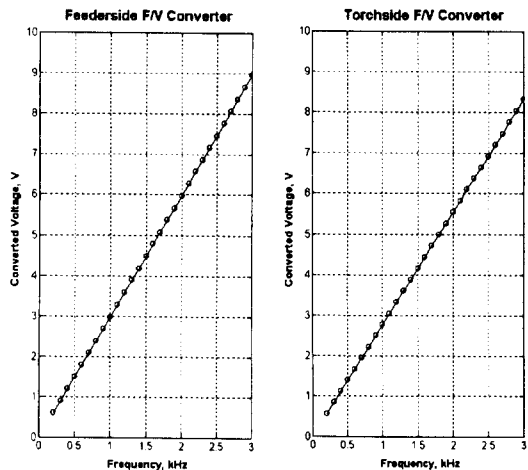


Fig. 5 Calibration Chart of Wire Feedrate Measuring System

주파수(300Hz-3kHz)를 100Hz 간격으로 발생시켜 이를 F/V converter로 변환한 직류전압과의 관계를 그림 5에 도시하였으며, 주파수변화에 따른 평균 전압변화가 완벽한 선형성을 나타낸다.

4.2.2 용접전압 및 전류의 측정

용접전압은 고전압 측정장비(high voltage isolator, TEK A6902B)를 사용하였고, 용접전류는 전류측정 장비인 current amplifier(TEK AM503S)와 이를 이용하여 고전류를 측정할 수 있게 해주는 high current transformer(TEK CT-4)를 사용하여 측정하였다. 계측장비들로부터 측정된 용접도중의 용접 전류, 전압 및 wire 송급 속도 등의 파형을 컴퓨터로 분석하기 위한 data acquisition 장비로는 12bit 1MHz의 A/D converter(Data Translation DT2839)를 사용하였다.

4.2.3 Dynamic Signal Analyzer(FFT Analyzer)의 이용

본 실험에서 용접전류, 용접전압 등의 용접 공정 변수와 용접시 용융부에서 발생하는 열물리적 현상과 관련되어 용접 토치측 wire 송급속도 변동과의 상관도를 측정하기 위하여 dynamic signal analyzer를 사용하여 이들의 power spectrum density(PSD), 및 상호간의 cross correlation, coherence 및 transfer function 등을 주파수 분석에 의하여 계산하였다.

5. 결과 및 분석

Dynamic signal analyzer에서 주파수 분석을 위하여 16.384kHz로 각 조건 별로 5초씩 sampling 하였으므로 각각의 channel 당 81,920 개의 data points가 형성된다. Mita index에 의한 아크 안정성의 평가는 일정한 구간 내에서 전류 또는 전압의 threshold 값으로 아크상태와 단락상태로 용접진행상태를 구분하고 한구간 내에서 각 모드의 발생회수 및 이때의 평균전류, 아크시간 및 단락시간의 표준편차에 의하여 통계적으로 안정성을 평가한다. 그리고 본 연구에서 제시하는 wire의 송급변동(그림 2의 ΔR)과 이의 일정 구간에서의 표준편차($Std[\Delta R]$)를 계산하였는데, 기존의 Mita index와의 비교를 위하여 이들 두 방법의 계산구간을 같게 설정하였다. 계산의 신뢰도를 높

이기 위하여 계산간격을 0.5초(8,192 data)로 하였다. 따라서 본 실험에서 sampling한 5초동안의 data를 이용하면 전체에 대하여 10번의 구간별 Mita index와 $Std[\Delta R]$ 을 계산할 수 있다.

5.1 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 보았다. 여기서,

$S_R = Std[\Delta R]$, ΔR : 송급속도의 한 주기동안의 최대편차 (그림 2참조)

그림 6에는 shield gas로 CO₂를 사용하고, 용접전류를 200-350A까지 50A씩 증가시키며 실험한 경우에 대한 각 파라미터의 파형을 도시하였다. 그림 6(a)는 4가지 조건중 200A의 경우를 측정 전구간(5초)에 대하여 도시한 것이고, (b)~(e)는 각 전류조건별로 0.5초에 해당하는 구간을 확대하여 도시한 것이다. 그림 7에는 그림 6에 도시된 각 조건에 대하여 0.5초 마다의 Mita index의 변화가 실선으로 도시되어 있다. 이때 초기에 아크가 불안정하게(지수가 높게) 나타나는 것은 arc start의 영향이다. 여기에 점선으로 표시된 것은 그 구간 내에서의 토치측 wire 송급속도의 변동에 대한 표준편차(S_R)이다. 그림에서 200A, 250A 및 350A 전류조건인 경우 Mita index와 토치측의 wire feed rate fluctuation의 표준편차가 일부 구간에서만 유사한 경향으로 나타나고, 외관이 불량하고 스패터의 발생이 많았던 300A 조건에서는 서로 상관성이 없다. 이같은 현상으로 Mita index는 실시간 파형제어기능이 있는 인버터 방식의 용접기에는 적용이 곤란하다는 추론이 가능하다. 또한 아르곤 혼합가스 사용시 globular 용적이행이나 spray 용적이행 상태에서는 Mita index의 계산이 불가능해진다.

그림 8에는 CO₂ 및 아르곤 혼합가스(Ar-80%, CO₂-20% mixed)를 사용한 실험결과에 대하여 전류조건별로 토치측 feed rate fluctuation의 표준편차($Std[\Delta R]$) 및 이때의 최대 $\Delta R(\Delta R_{max})$ 의 변화를 도시하였다. 그림에서 이들 두 값의 증감경향이 유사함을

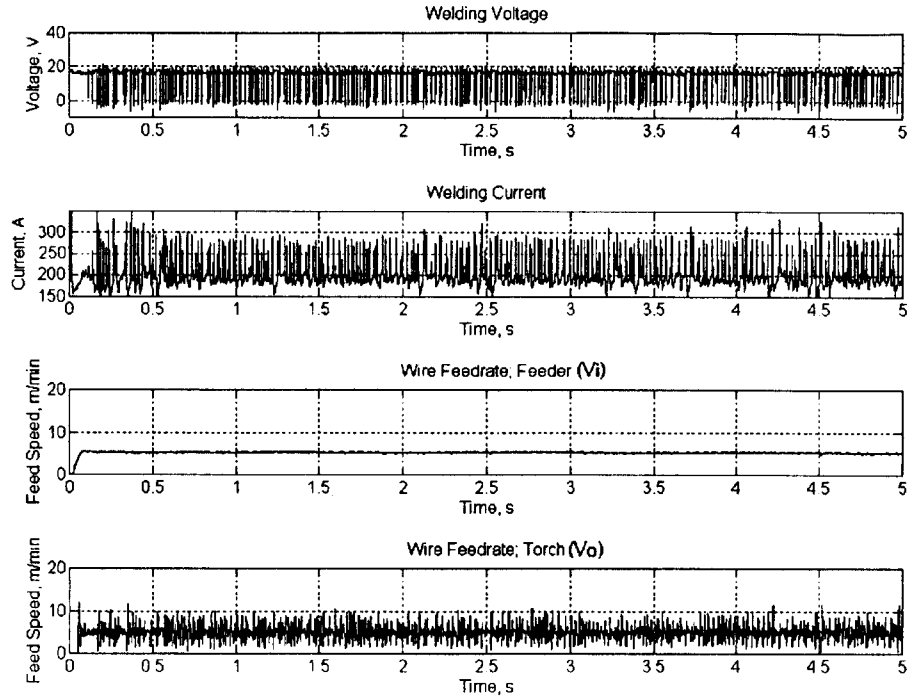


Fig. 6(a) Time Records of Process Parameters in GMA Welding ($I=200A$, CO_2 Shield)

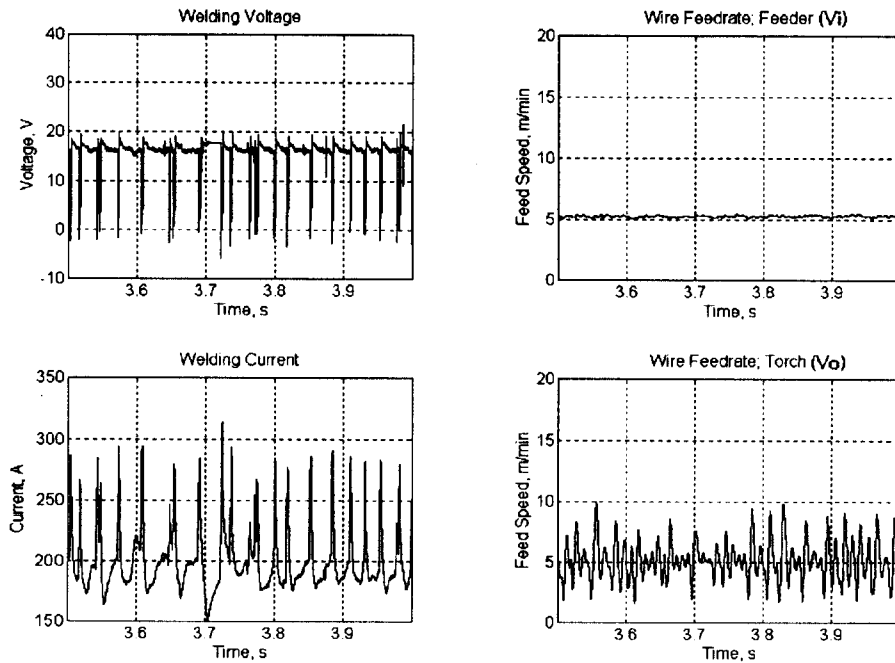


Fig. 6(b) Typical Time Records of Process Parameters in GMA Welding ($I=200A$, CO_2 Shield)

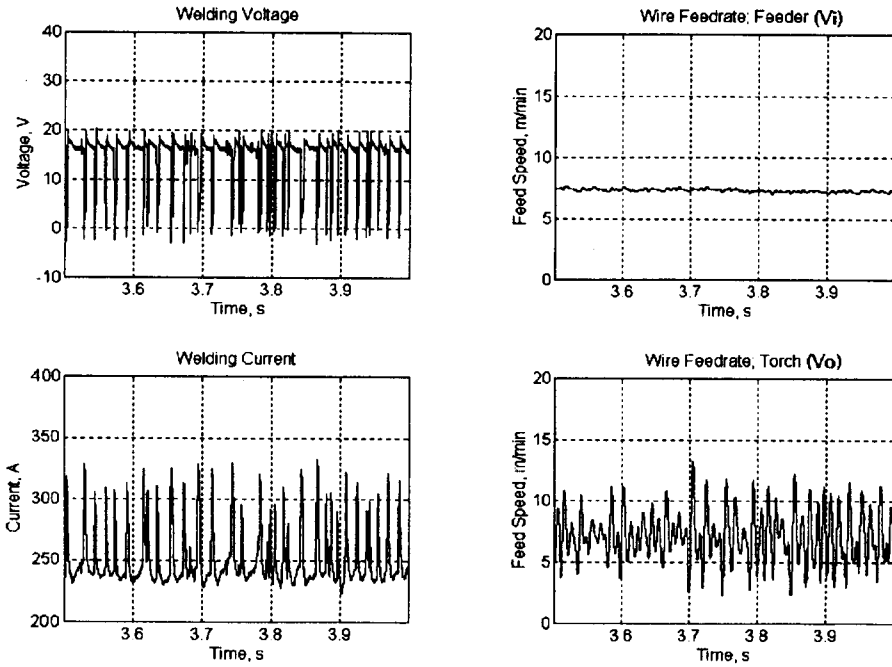


Fig. 6(c) Typical Time Records of Process Parameters in GMA Welding ($I=250A$, CO_2 Shield)

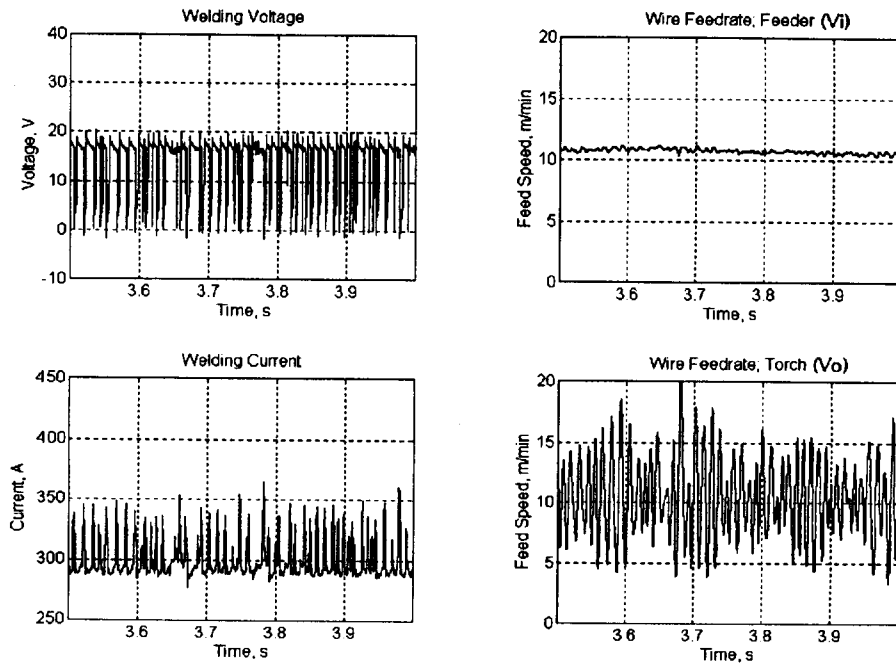


Fig. 6(d) Typical Time Records of Process Parameters in GMA Welding ($I=300A$, CO_2 Shield)

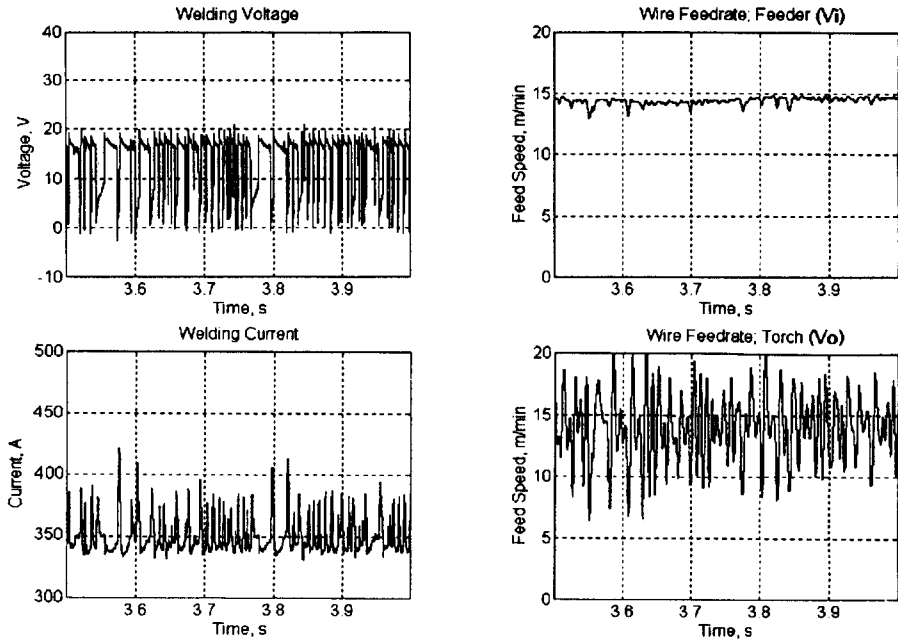


Fig. 6(e) Typical Time Records of Process Parameters in GMA Welding ($I=350A$, CO_2 Shield)

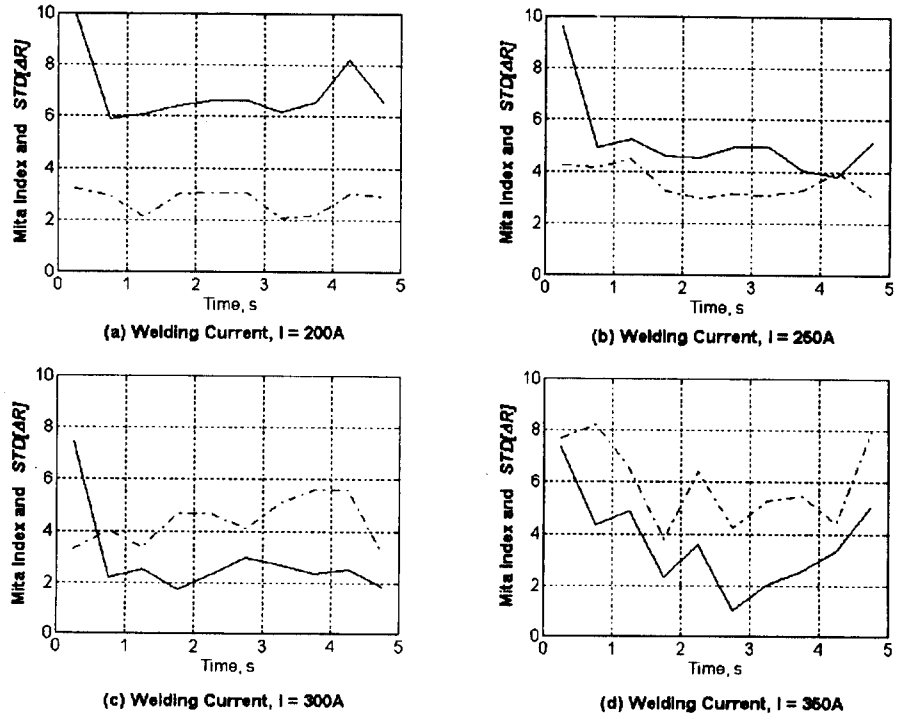


Fig. 7 Mita Index and Wire Feed Speed Fluctuation during GMA Welding(CO_2 Shield)
 (— : Mita index, - - - : $STD [\Delta R]$)

볼 수 있는데 이는 향후 실시간 아크 안정성 평가시 통계적 계산루틴을 사용하지 않고 구간별 ΔR_{max} 값의 검출만으로도 효과적인 아크 안정성 모니터링이 가능함을 시사한다. Ar-CO₂를 shield gas로 사용한 경우 spray 용적이행이 나타난 200A, 250A 에서 $Std[\Delta R]$ 계산결과는 그림 8(a)와 같이 전반적인 용접구간에 걸쳐서 안정적으로 낮은값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그리고 단락이행모드가 지배적으로 나타난 CO₂ 용접에서는 250A, 300A에서 아크가 안정한 경우였으며, mixed gas(Ar+CO₂)인 경우는 300A 에서 두가지 이행모드가 공존하는 용접상태임을 육안관찰할 수 있었다. 특히 그림 8(a)에서 1.4 m/min의 $Std [\Delta R]$ 값을 경계로 아크의 안정화 정도를 구분할 수 있었다. 그림 8(b)에서는 5 m/min의 ΔR_{max} 값을 경계로 단락이행 및 스프레이 이행의 구분도 가능함을 알 수 있었다.

위의 결과를 종합해 볼때 $Std [\Delta R]$ 및 ΔR_{max} 의

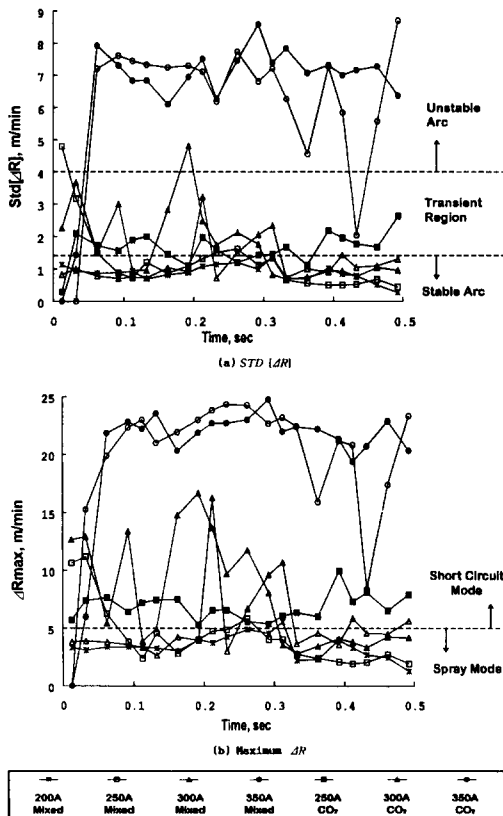


Fig. 8 $Std [\Delta R]$ and Maximum ΔR for Various Welding Conditions

분석으로 용접중 순간적인 아크 안정성 변화의 모니터링이 가능함을 알 수 있었다.

5.2 주파수 분석에 의한 wire 송급성능의 평가

앞절에서는 토치측 wire의 송급속도 변화로 아크 안정성을 평가해 보았다. 따라서 이러한 적용이 타당성이 있는지 여부에 대하여 이들 연관된 파형(송급기측 및 토치측 송급속도, 용접전압 전류)의 주파수 분석을 통해 검증해 보고자 한다.

그림 9에는 그림 6에 도시된 각 조건에 대하여 용접전류, 전압, 송급기, 토치측의 송급속도에 대한 전 구간(5초)에 걸친 주파수 영역 분석결과(PSD : Power Spectrum Density) 및 이때의 토치측 송급속도와 전압, 전류간의 coherence 파형을 도시하였다. 이는 용접전류의 설정에 비례하여 송급속도가 증가하는 용접기의 작동원리에 해당하는 부분으로, F/V 전류가 높아질수록 우측으로 이동함을 알 수 있다. 이는 용접전류의 설정에 비례하여 송급속도가 증가하는 용접기의 작동원리에 해당하는 부분으로, F/V converter의 출력 파형이 적분회로의 특성 때문에 rotary encoder 출력의 주파수를 포함하고 있어 송급속도가 증가할수록 peak가 고주파 영역으로 이동하는 현상이다. 한편 토치측(torchside feed rate의 PSD)에서는 peak가 나타나는 주파수 성분이 설정된 4가지 전류에 대하여 모두 일정하다. 이는 spring liner vibration의 1차 고유진동수(1st natural frequency)를 의미한다고 볼 수 있다. 앞서 그림 7에서 Mita index 및 S_R 의 계산에서 용접 전류가 증가할수록 안정성이 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 즉 전류가 커질수록 송급기측 feed rate가 증가하고, 이에 따른 토치측의 feed rate fluctuation이 커짐에 의하여 아크 안정성은 저하됨을 알 수 있다. 이러한 현상은, 그림 9의 토치측 PSD선도상에서 토치측 wire feed rate의 first peak(1st natural frequency) 이하의 저주파 영역(spring liner의 기계적 진동에 기인함)의 spectrum power가 전류 증가에 따라 커짐을 주목 하면 확인할 수 있다. 한편 각각의 경우에 대한 coherence 파형(그림 9)을 살펴보면 토치측 송급속도가 전압에 미치는 영향이 저주파 영역에서는 비교적 높게 나타나며, 각 조건 별로는 전류가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

이를 종합해 보면 전류가 높아질수록 welding process dynamics가 심하게 변하며 wire 송급속도와 전

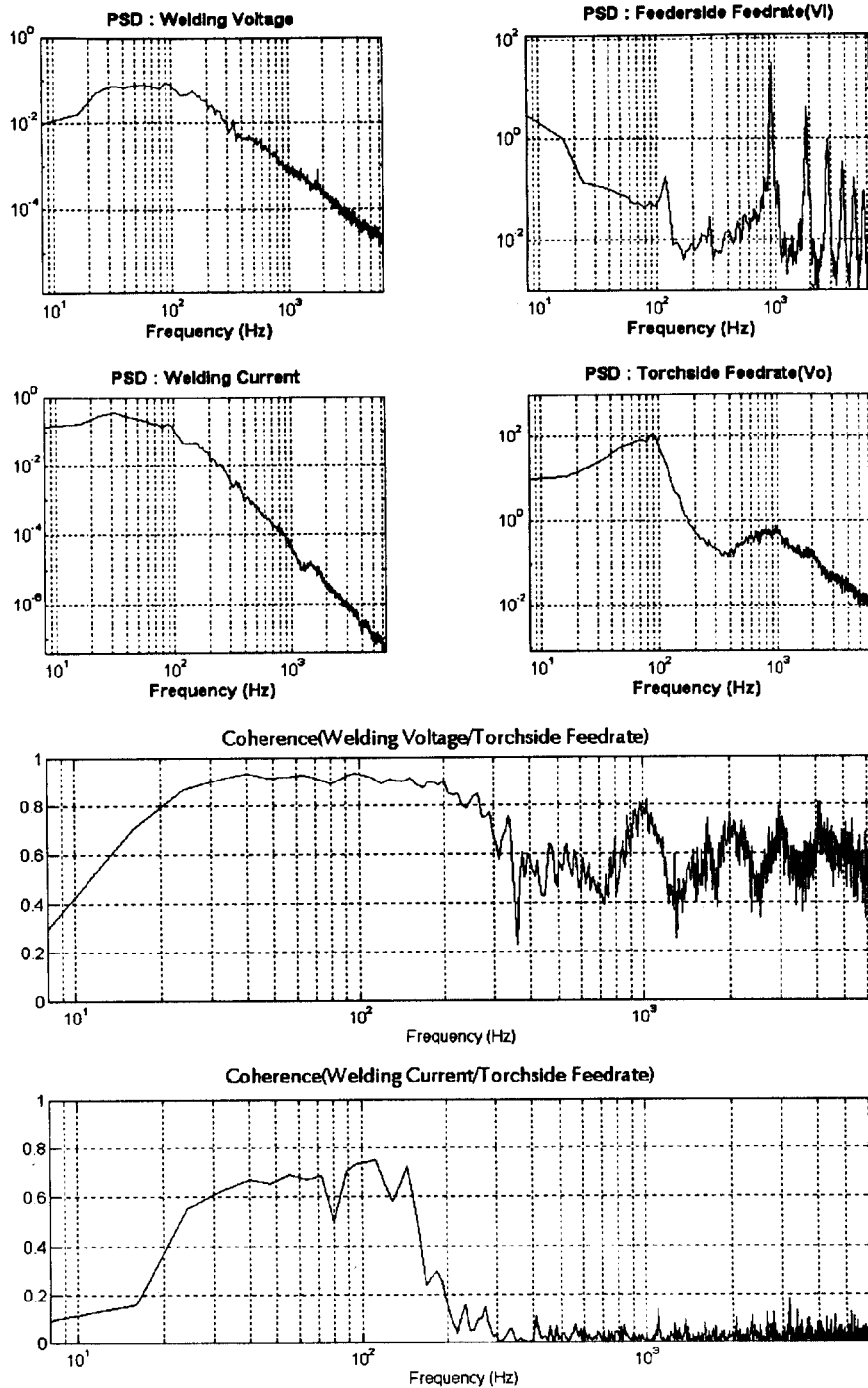


Fig. 9(a) PSD Plots for Various Process Parameters and Coherence between Voltage(Current) and Torch-side Wire Feed rate, v_o . (Welding Current = 200A)

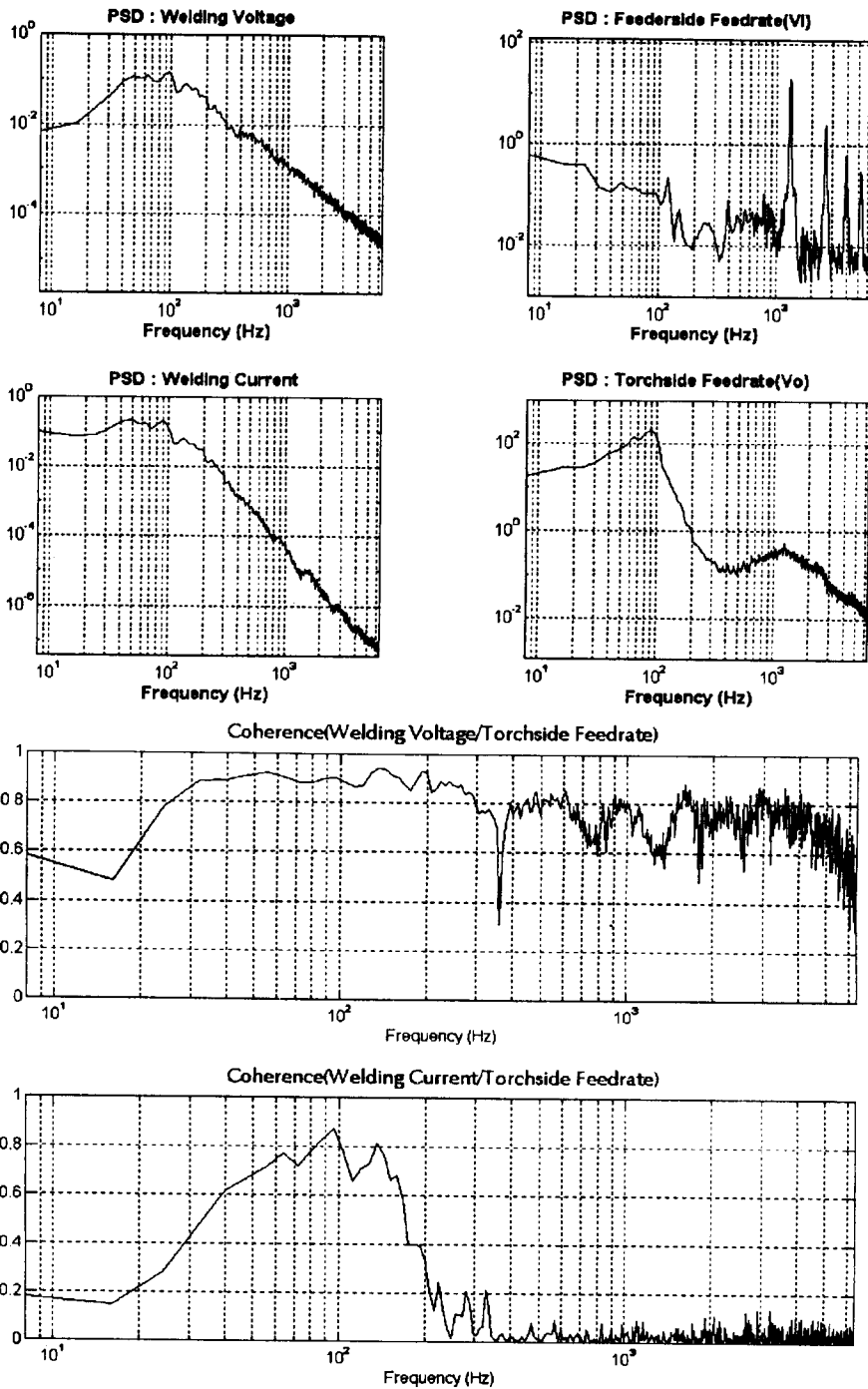


Fig. 9(b) PSD Plots for Various Process Parameters and Coherence between Voltage(Current) and Torch-side Wire Feed rate, v_o . (Welding Current = 250A)

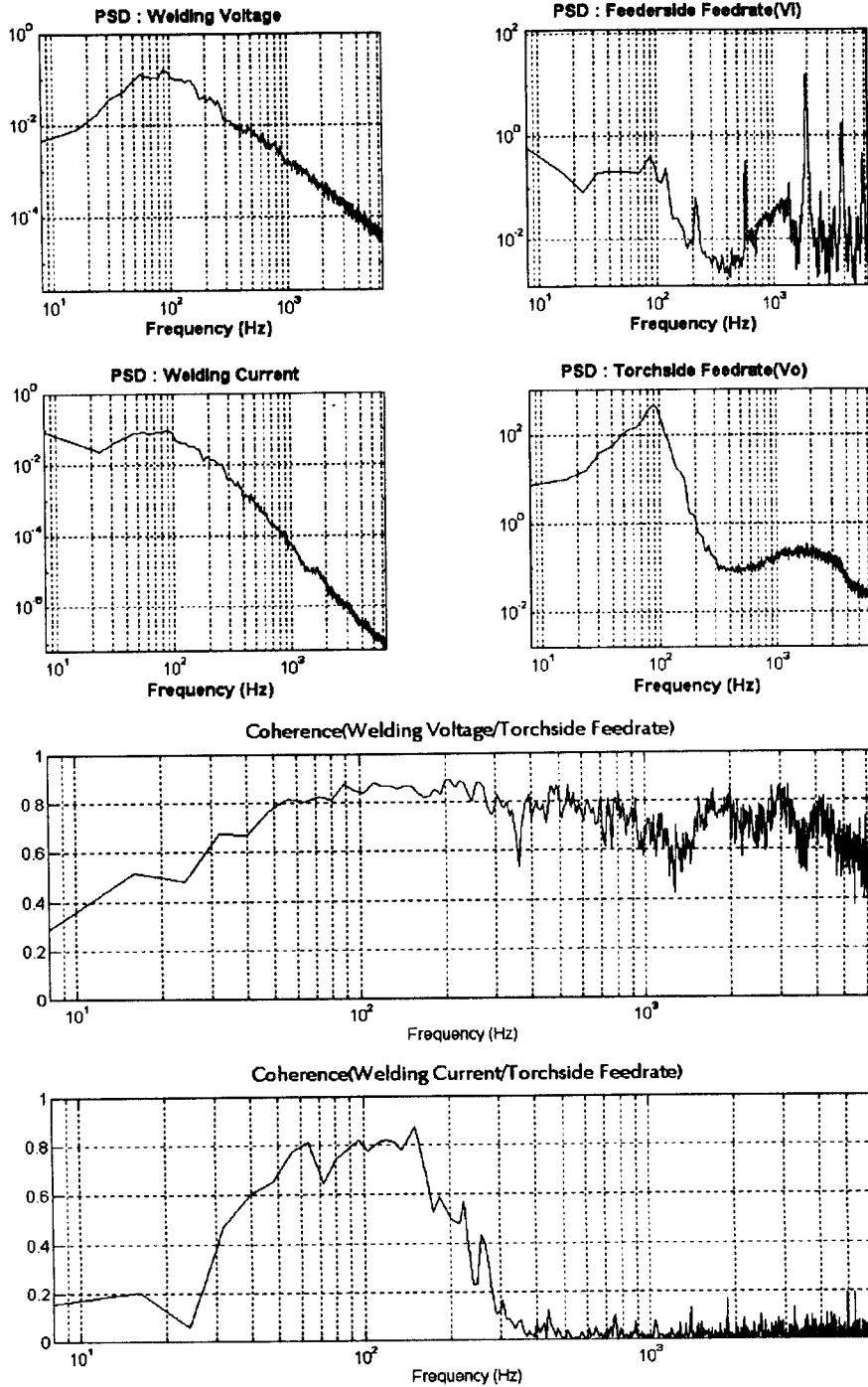


Fig. 9(c) PSD Plots for Various Process Parameters and Coherence between Voltage(Current) and Torch-side Wire Feed rate, v_o (Welding Current = 300A)

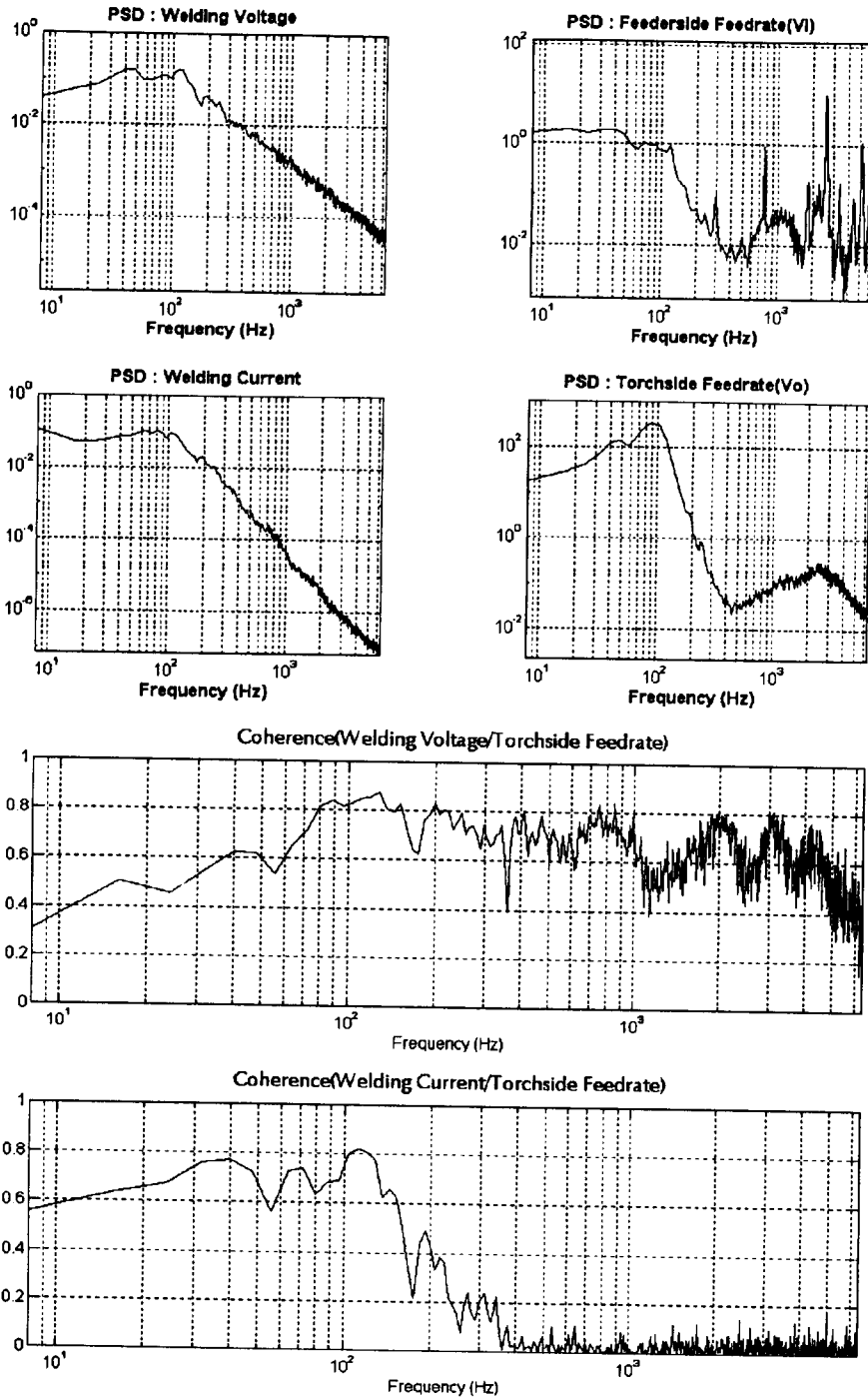


Fig. 9(d) PSD Plots for Various Process Parameters and Coherence between Voltage(Current) and Torch-side Wire Feed rate, v_w . (Welding Current = 350A)

압·전류파형과의 상관도 분석은 어려워지며, 따라서 이들 전압·전류 파형만으로 이들 구간에서의 아크 안정성을 분석하는 것은 무리가 있음을 보여준다.

5.3 Wire 송급속도의 위상평면(Phase Plane)해석

본 절에서는 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 순간가속도를 각각 축으로 하는 위상평면도를 그려서 곡선의 궤적이 나타내는 규칙성을 주시하고, 이를 아크 안정화 정도를 나타내는 척도로 적용할 수 있는지를 검토해 보았다. 먼저 그림 10에 CO₂ 용접과 Ar-CO₂ 혼합가스용접에 대한 여러 가지 조건에서의 토치측 송급속도의 위상평면도 중 아크 안정화 정도를 특징지을 수 있는 대표적인 예를 도시하여 보았다.

위상평면상의 궤적이 일정한 패턴의 폐곡선(閉曲

線)이면 그 시스템은 선형이며 매우 안정한 상태에 있음을 알 수 있다. 그러나 궤적의 이탈정도가 주기마다 심한 편차를 가지고, 개곡선(開曲線)을 그린다면 이 시스템은 비선형이고 매우 불안한 상태에 있음을 나타낸다. 따라서 그림 10(a)(b)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. 특히 그림 10(b)는 스프레이 이행에 대한 것으로, Mita index로는 안정성을 평가할 수 없었던 예이다. 반면 그림 10(c)와 같이 궤적이 불안하고 형상의 편차도 큰 경우는 심한 아크 불안정 상태에 있음을 시사한다. 따라서 토치측 wire feed rate에 대한 위상평면도는 아크의 주기성과 안정화 정도를 동시에 표현해 주는 훌륭한 기법임을 알 수 있다.

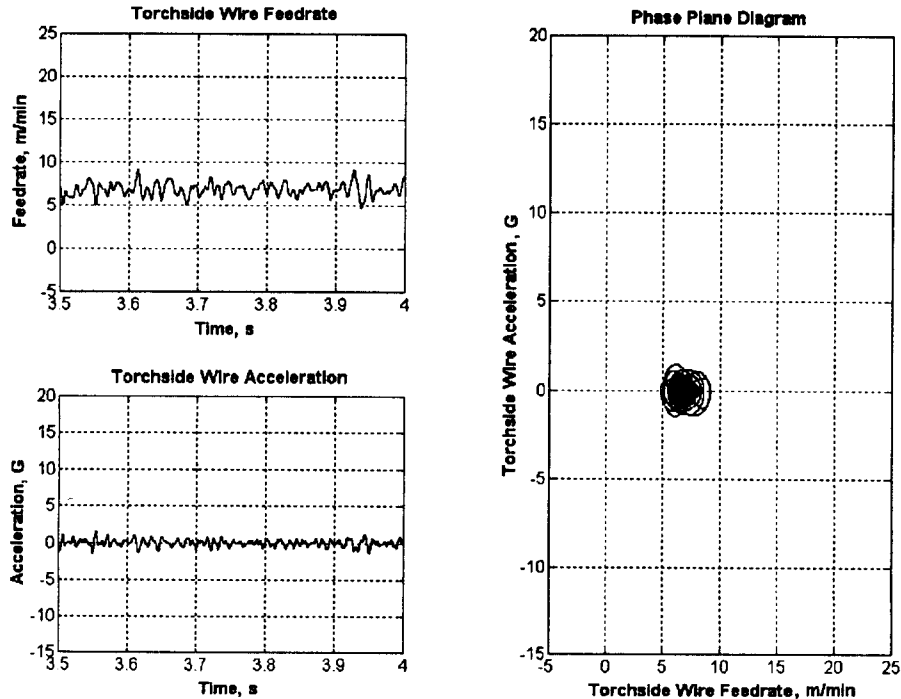


Fig. 10(a) Phase Plane Diagram of Torch-side Wire Feed Rate(v_w) (CO₂, Current=250A, Voltage=MidHigh Range)

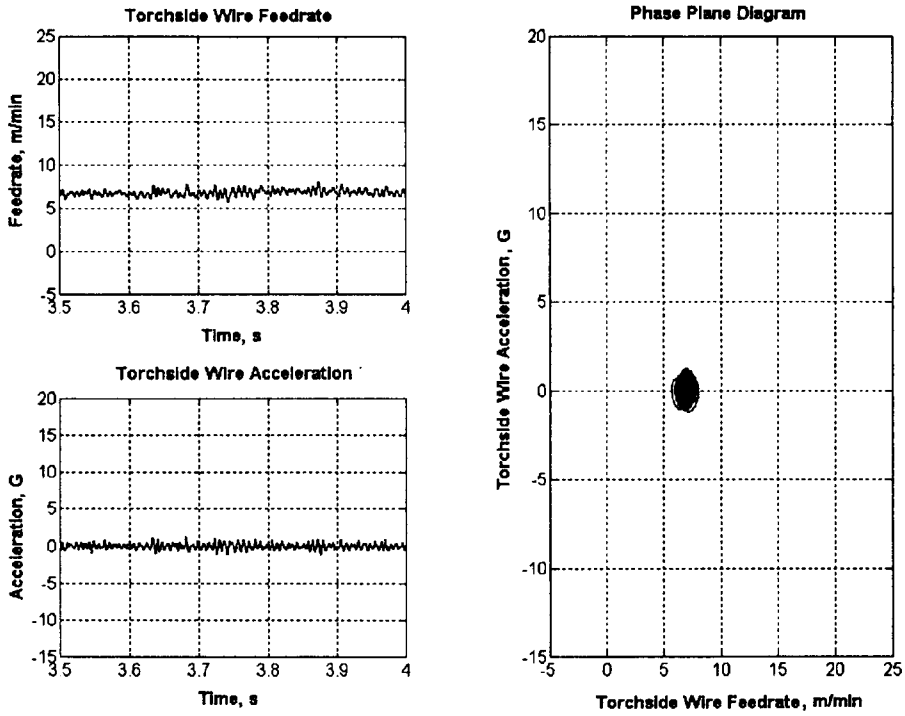


Fig. 10(b) Phase Plane Diagram of Torch-side Wire Feed Rate(v_w) (CO₂-Ar Mixed, Current=250A, Voltage=MidHigh Range)

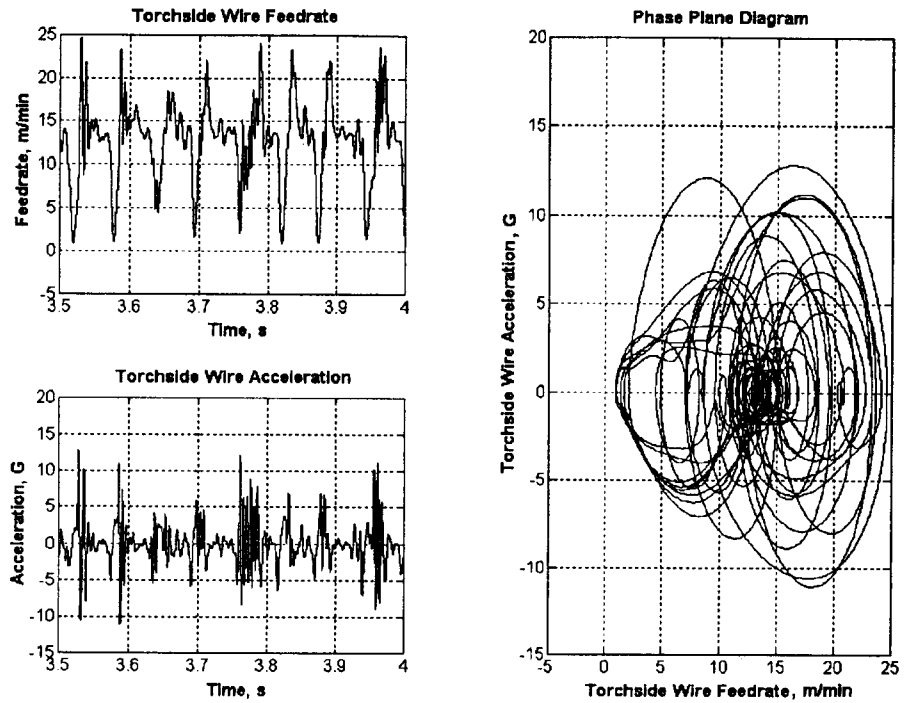


Fig. 10(c) Phase Plane Diagram of Torch-side Wire Feed Rate(v_w) (CO₂, Current=350A, Voltage=LowMid Range)

6. 결 론

Wire의 송급성이 아크 안정성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 wire 송급속도의 변동과 기존의 Mita 안정성 지수와의 상관관계를 규명하고자 하였으나, SCR 제어방식이 아닌 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 받는 것으로 알려져 있으나, 아크 안정성의 실시간(real time) 평가의 관점에서 wire의 송급속도 변동과 밀접한 관련이 있음을 실험을 통하여 규명하였다.

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. 토치축의 wire 송급속도와 용접전류, 전압 사이의 coherence를 고찰하면, 설정된 용접전류가 커질수록 coherence가 저하되는 것을 알 수 있다(그림 9). 이는 저전류 영역에서는 전류 또는 전압의 변화파형에 wire 송급속도의 변화가, 즉 아크 안정성이 어느정도 반응이 되지만, 용접전류의 설정이 커지면 이에 비례하여 송급속도도 커지고, wire 송급 케이블 내에서의 라이너 횡진동 등 송급 시스템의 동특성에 관련된 요인들의 영향이 커져 이들이 아크 안정성에 복합적으로 작용하므로 아크 안정성의 평가시 용접 전류, 전압의 파형만으로 이를 해석할 수 없고, wire 송급속도의 변동을 고려해야만 한다.

4. Wire 송급속도의 위상평면해석을 도입함으로써 아크 안정성 평가에 새로운 기법을 제시하였다. 설정된 용접 전류조건에서 전압을 높이고 낮춤에 따라 안정성이 변화함을 볼 수 있다. 특히 고전류 영역(300 A이상)에서는 이같은 현상이 두드러짐을 알 수 있다.

즉 같은 전류조건에서 전압을 높이면 wire 송급속도의 위상평면에서의 궤적이 안정해 진다. 특히 Ar-CO₂ 혼합가스를 사용할 때, 특정 전류조건에서 전압을 높이면 스프레이 모드가 발생하는데 이 때 송급속도는, 단락이행시와 비교하면, 위상평면에서 한 점에 집중된다. 특히 기존의 방법에서는 시도할 수 없었던 스프레이 용적이행에서의 아크 안정성도 wire 송급속도의 위상평면 궤적으로 평가할 수 있음을 시사한다.

이상의 고찰을 종합해 보면 GMA 용접기술은 기계, 전기, 물리, 화학, 금속 등의 다양한 기술분야의 복합 기술로써, robot 등을 이용한 용접 자동화에 대응한 용접품질의 향상은 물론, 용접속도의 향상과 박판 용접에 대한 용접기술 향상이 끊임없이 요구되는 분야이다. 이같은 요구에 대응하여 광범위한 용접 조건 및 방식에 대한 정량적인 아크 안정성 평가기술의 개발이 선행되어야 할 과제이다. 현재까지 많은 아크 안정성 평가와 관련된 연구가 진행되어져 왔지만 주로 구형 SCR 방식 용접기의 단락이행모드에 국한되어 있었다. 본 연구에서는 최근 인버터 용접기의 사용증가 추세를 고려하여 인버터 용접기를 사용하여 Ar-CO₂ 혼합가스용 접(스프레이 용적이행)에까지 아크 안정성 평가의 영역을 넓히고자 노력하였다. 그러나 마지막 절에서 제시 한 위상평면도 해석방법을 적용할 때 아크 안정도의 정량적 측정기술의 개발은 아직 미진한 상태이다. 따라서 이의 실시간 정량적 평가 기술의 개발이 현재로서는 가장 절실히 요구되고 있다. 한편 위상평면도는 GMAW system의 혼돈(chaos)현상을 관찰할 수 있는 자료이기도 하다. 따라서 이러한 혼돈이론을 적용한 아크의 안정화 평가방법의 개발도 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) AWS : Welding Handbook, (1991), pp.110-115
- 2) Takeshi shinoda : Recent Trend of Research Activities of MAG Welding in Japan of Preprints, 대한용접학회 춘계학술대회논문집, (1994), pp.23-34
- 3) 안 영호, 방 국수, 이 종봉, 신 병현 : Effect of Ca and S on Droplet Transfer in GMAW, 대한용접학회 추계학술대회논문집, (1992), pp.132-134

- 4) 안 영호, 방 국수, 최 종훈 : Effects of Ti of Electrodes on Metal Transfer in CO₂ Welding, 대한용접학회 춘계학술대회논문집, (1993), pp.61~63
- 5) 박 송춘, 라 규환 : The Trend of Fuzzy-Controlled Welding Machines in Japan, 대한용접학회지, 제12권, 제1호, (1994), pp.44~50
- 6) 임 태균, 조 형석, 부 광석 : Control of Weld Pool Size in GMA Welding Process Using Neural Networks, 대한용접학회지, 제12권, 제1호, (1994), pp.232~245
- 7) 원 윤재 : CO₂가스 아크 용접에서의 아크 안정성을 고려한 용융지 크기 제어에 관한 연구, 한국과학기술원, 정밀공학과 박사학위논문, (1993)
- 8) R. D. Richardson and R. W. Richardson : The Measurement of Two-dimensional Arc Weld Pool Geometry by Image Analysis, Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME WAM, (1982), pp.65~75
- 9) J.M. Katz and D. E. Hardt : Ultrasonic Measurement of Weld Penetration, Control of Manufacturing Processes and Robotic System, ASME WAM, Nov., (1983), pp.79~95
- 10) M.Zecksenhouse and D.E. Hardt : Weld Pool Impedence Identification for Size Measurement and Control, Trans. of ASME, J. of Dyn. Syst. Meas. and Contr., Vol.105, Sept., (1983), pp.179~184
- 11) H. Nomura : Back Bead Width Control in One Side SAW Using Flux Copper Backing, J. of Japan Welding Society, Vol.3 No.3, (1985), pp.471~477
- 12) T. Arai et al : The Investigation of Arc Phenomina by means of a Computer, 일본용접학회논문집, 제1권, 제3호, (1983), pp.317~322
- 13) W. Lucas : Microcomputer Systems, Software and Expert System for Welding Engineering, Welding Journal, Apr., (1987), pp.19~30
- 14) T.Mita et al : Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Arc Welding, Welding International, No.2, (1988), pp.152~159
- 15) T. Shinoda, H. Ono : Entwicklung eines Metal Aktivgas Engspalt Schwessverfahrens mit negativer Polung der Drahtelektrode, Schweißen und Schneiden, Vol.44, No.9, (1992), pp.485~488
- 16) H. Miyazaki, T. Shinoda : Prevention of Puckering Using Double Wire MIG Welding Process J. of Light Metal Welding & Construction Vol.30, No.12, (1992), pp.655~663