

용접현상분석을 위한 신호 처리 알고리즘

Signal Processing Algorithm for Analysis of Welding Phenomena

나 석 주 · 문 형 순

S. J. Na and H. S. Moon



나석주/한국과학기술원/1952년생/용접현상 분석, 용접자동화 및 레이저가공 관련 연구 수행



문형순/한국과학기술원/1968년생/용접현상 분석 및 용접자동화 분야

1. 서 론

최근 들어 컴퓨터의 처리속도 증가, 고속으로 데이터를 측정할 수 있는 장비들의 발달 그리고 다양한 주변기기 및 센서들의 개발로 인해 비선형적인 요소와 복잡한 현상을 동반하는 용접공정을 해석하고자 하는 움직임이 활발히 진행되어 오고 있다. 이러한 용접공정 해석을 위한 접근방법중에서 우선적으로 결정해야할 사항으로는 비선형적인 요소와 복잡한 물리현상들을 실제적으로 해석하기 위한 측정변수의 선정과 이러한 변수를 사용하여 물리적인 현상을 적절히 표현할 수 있는 알고리즘의 개발 등을 들 수 있다. 최근까지의 연구결과를 바탕으로 해서 측정변수들의 예를 들면 용접전류(welding current), 아크전압(arc voltage), 음향신호(acoustic signal), 아크 광(arc light) 그리고 온도(temperature) 등이 있다. 용접공정을 분석하기 위한 알고리즘으로는 확률론적 접근(statistical approach), 다양한 실험치를 이용한 인공지능적 접근(artificial intelligence approach) 그리고 경험치를 바탕으로 인덱스(index)를 선정하여 이를 직접

사용하는 방법 및 인공지능과 결합된 형태를 이용하는 방법 등이 있다. 또한 용접공정의 특성을 분석하기 위해서는 크게 금속이행모드(metal transfer mode), 아크의 안정성(arc stability) 그리고 용접품질(weld quality) 등을 판별할 수 있는 알고리즘의 개발이 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 용접공정 분석과 관련된 최근까지의 연구동향 및 용접신호의 특성을 좀더 심도 있게 분석하기 위해 구축해야할 필수 요건 등을 소개하고자 하며 이를 사용자가 손쉽게 이용할 수 있는 사용자 인터페이스 프로그램을 개발적으로 설명하고자 한다.

2. 용접공정 분석을 위한 알고리즘

2.1 금속이행모드

용접전류와 전압의 조합, 사용하는 용접봉의 두께 및 보호가스의 종류 등에 의해서 결정되는 금속이행은 용접부의 강도 및 생산성에 중요한 인자로 작용하며, 사용하고자 하는 모재의 용접부에 금속

이행에 의해서 적절한 입열이 전달되지 않으면 완전한 용입이 이루어지지 않거나 용융부가 너무 크게 형성되어 부적절한 용접부를 얻기 쉽다. 따라서 다양한 용접조건 하에서 금속이행 모드를 예측하기 위한 알고리즘 개발이 필수적이라 할 수 있다.

Adam 등은 전압, 전류신호를 1 kHz로 측정하고 이를 주파수분석 및 확률론적 파라메타를 통하여 단락(short circuit), 입상용적(globular) 및 스프레이(spray) 모드를 판별하였다¹⁾. 단락이행의 경우 전압 전류 신호가 다양한 주파수 영역에서 나타나며 입상용적의 경우 어느 한 영역에서 주파수가 최대치를 나타내며 스프레이의 경우 저주파수 영역에서 최대치를 나타낸다. 또한 표준편차(standard deviation)의 경우 단락이행이 가장 크며 다음이 입상용적, 스프레이 순으로 나타난다. Fig. 1, 2 그리고 3에 주파수 분석과 관련된 결과를

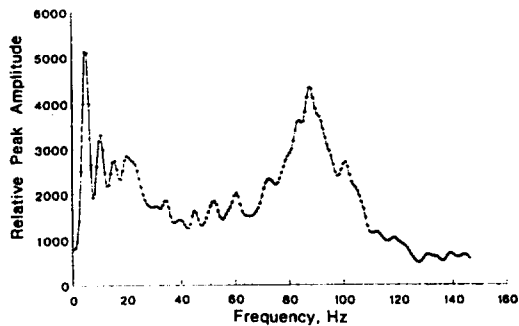


Fig. 1 Output of Fourier transform for short-circuiting transfer mode

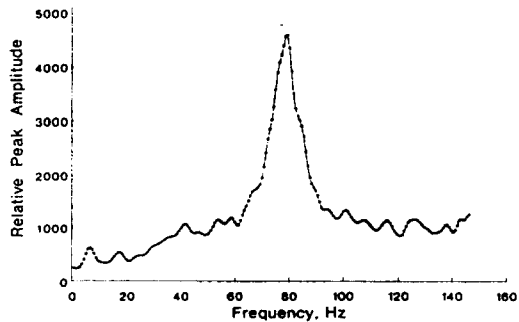


Fig. 2 Output of Fourier transform for globular transfer mode

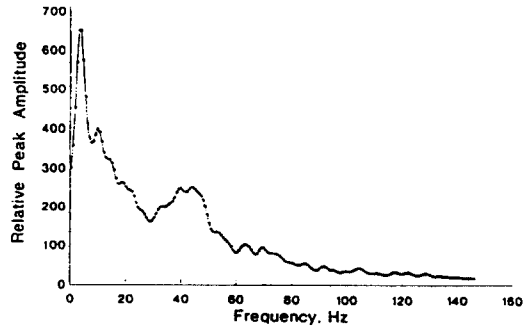


Fig. 3 Output of Fourier transform for spray transfer mode

나타내었다. 이때 사용된 용접조건은 보호가스 Ar98%+O₂2%, 1.2mm 직경의 AWS ER100S-1용접봉 등이다.

Stroud 등은 용접전류, 아크전압 그리고 음향신호를 2.5 kHz로 측정한 후 이를 신경회로망(neural network)의 입력으로 사용하였다²⁾. 여기서

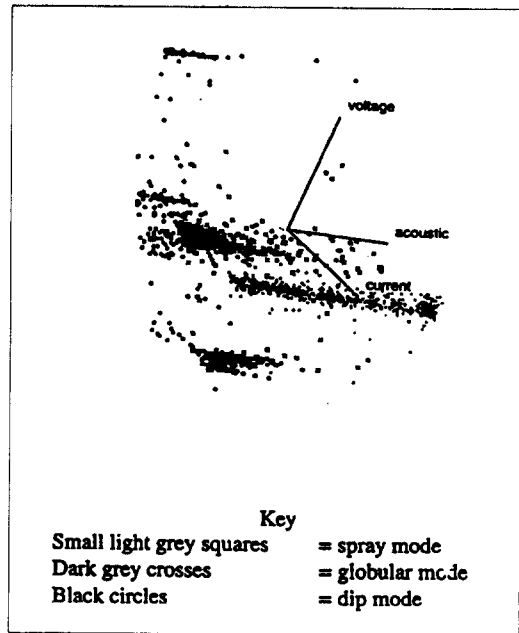


Fig. 4 3-dimensional scatter plot showing voltage, current and acoustic characteristics of spray, globular and dip metal transfer mode

입력으로 사용된 전압, 전류는 샘플링 (sampling) 동안의 평균치를 사용하였으며 신경회로망을 학습하기 위한 결과로 각각의 금속이행모드를 선정하였다. 이를 Fig. 4에 나타내었다.

Wang등은 변화하는 전압값을 7.3 kHz로 측정하여 전압의 변동치 (fluctuation)와 금속이행모드와의 관계를 설정하였다³⁾. 전압 변동치와 금속이행모드와의 관계는 다음과 같다.

- short-circuiting : $\Delta u > 10V$
- globular : $1 < \Delta u < 10V$
- spray : $0.3V < \Delta u < 1V$

여기서 $\Delta u = V_{max} - V_{min}$ 이다. 즉 전압의 변동치가 작을수록 스프레이 모드로 이행됨을 나타낸다.

전류와 전압의 조합에 따른 금속이행모드를 Fig. 5에 나타내었으며 사용된 용접조건은 보호가스 Ar 75%+CO₂ 25%, AWS E71T-1 1.6mm 직경의 용접봉등 이었다. 이 결과에 의하면 전류값이 어느 정도 낮더라도 전압값이 클 경우 입상용적을 나타내며 이와 반대로 전류값이 어느 정도 높더라도 전압이 낮은 상태에서는 단락모드가 형성됨을 알 수 있다.

Ogunbiyi등은 전압, 전류 파형에서 특징이 될만한 변수를 선정하여 인덱스를 형성하고 이를 이용하여 금속이행모드 및 아크의 안정성을 판별하였다⁴⁾. 여기서 사용된 인덱스는 다음과 같다.

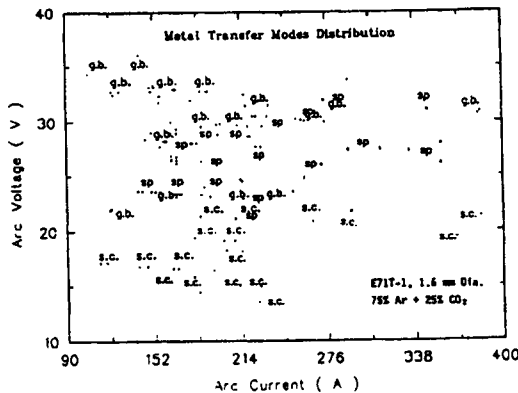


Fig. 5 Metal transfer modes determined by arc voltage fluctuation criteria

$$\text{Transfer index, TI} = 1 - \frac{I_{min}}{I_{mean}}$$

$$\text{Transfer stability index, TSI} = \frac{I_{max}}{I_{mean}}$$

$$\text{Dip consistency index, DCI} = 1 - \frac{V_{bk}}{V_{mean}}$$

여기서,

I_{mean} : arithmetic average of the welding current transient sample

I_{max} : the maximum value

I_{min} : the minimum value

V_{mean} : the arithmetic average of the welding voltage transient samples

V_{bk} : the arithmetic average of all the voltage transient samples less than or equal to V_{mean}

여기서 TI의 경우 스프레이 모드에서는 평균전류값과 최저치의 전류값이 많이 차이가 나지 않기 때문에 0에 가까운 값을 나타내며 단락모드의 경우 평균값보다 최저치가 훨씬 작기 때문에 1에 가까운 값을 그리고 입상용적의 경우는 중간 값을 나타낸다. TSI의 경우 스프레이 모드에서는 평균전류값과 전류의 최대치가 거의 비슷하기 때문에 1에 가까운 값을 가지며 단락모드의 경우에는 1보다 큰 값을 가지게 된다. DCI의 경우 스프레이 모드에서는 거의 0의 값을 가지며 단락모드의 경우 V_{bk} 가 너무 작은 경우 베이스(base) 전압이 너무 낮은 상태가 되어 아크가 불안해지는 경향을 나타내며 이때 DCI는 1에 가까운 값을 갖게 된다. 반면 적절한 단락이 일어나면 0.5에서 0.8에 가까운 값을 나타낸다. 이와 관련된 내용을 Fig. 6에 나타내었으며 Ogunbiyi등이 제안한 금속이행모드와 아크의 안정성에 대한 법칙(rule)에 대한 예를 아래에 나타내었다.

IF (0.3 < TI < 0.5) AND (0.5 < DCI < 0.8) AND (TSI < 2)

THEN Transfer mode = DIP

Process = STABLE

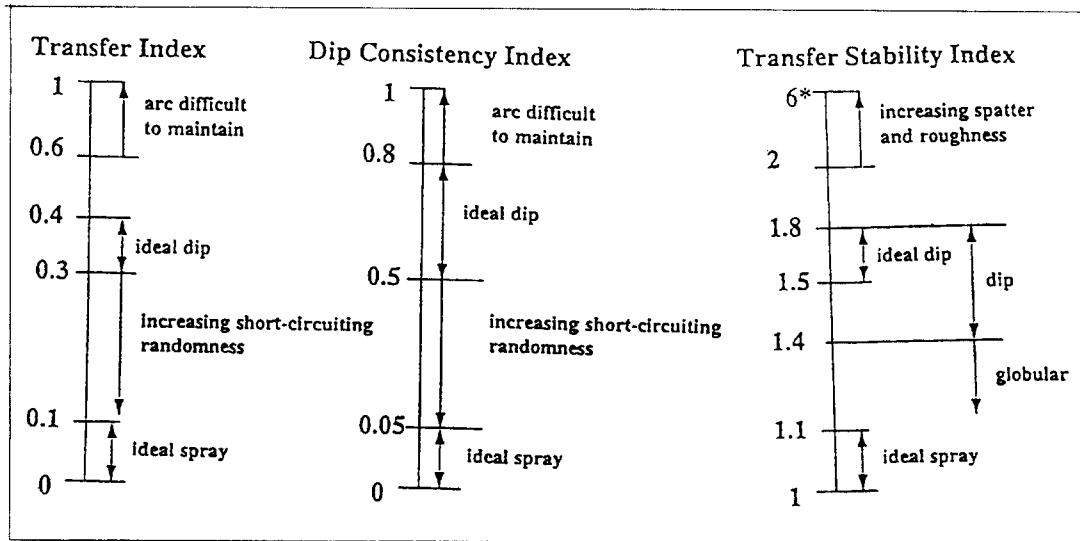


Fig. 6 Monitoring indices classification chart

IF (0.1 < TI < 0.3) AND (TSI < 1.6) AND (DCI < 0.1)

THEN Transfer = GLOBULAR
Process = UNSTABLE

2.2 아크의 안정성

금속이행모드 중에서 용접파형을 제어하기가 가장 어려운 부분이 단락모드이며 따라서 아크의 안정성을 판별하고자 할 때 주로 거론되는 모드가 단락모드이다. 입상용적이나 스프레이의 경우 녹은 용가재와 모재사이의 접촉이 이루어지지 않고 금속이행이 일어나나 단락모드의 경우 모재와 용융된 용가재 사이에 브리지(bridge)가 형성되어 단락이 일어나며 이 브리지가 끊어져서 아크가 발생하는 매우 복잡한 물리적인 현상을 동반하게 된다. 따라서 단락 혹은 아크 발생시 단락 유지시간이나 아크가 발생하는 시간 그리고 이때의 전압, 전류의 크기 및 기울기 등은 단락모드의 안정성을 나타내는 인자들로 쓰이곤 한다.

Mita등은 다양한 실험조건 하에서 경험적으로 안정된 아크의 용접조건을 선정할 다음 이를 이용해서 아크의 안정성을 결정하기 위한 인덱스를 정의하였다⁵⁾. 이 인덱스는 다음과 같다.

$$W = W_a + W_r + W_p$$

$$W_a = \ln\left(\frac{s[T_s]}{1.3} \times \frac{s[T_a]}{3.8} \times \frac{s[I_s]}{24} \times \frac{s[I_a]}{23.6}\right)$$

$$W_r = 2\ln(R_a/R_i)$$

$$W_p = \ln(P_a/P_i)$$

여기서,

s : standard deviation, T_s : short circuit time

T_a : arc time, I_a : average arc current

I_s : average short circuit current

R_a : average resistance observed during the arc period,

R_i : average resistance during the arc period under the optimum welding conditions

P_a : power during the arc time

P_i : power during the arc time under the optimum welding conditions

W_a 는 단락모드의 균일성을 나타내는 인덱스이고 W_r 는 아크 발생시 나타나는 저항이 상대적으로 너무 클 경우 아크가 꺼지는 현상을 표현하는 인자이며 W_p 는 아크가 발생할 때 들어가는 열량이 너무 클 경우 단락상태에서 형성된 브리지가 폭

발함으로 인해 아크가 불안정해지는 현상을 나타내는 인자이다. 안정된 아크하에서 단락이 균일하게 일어나면 W_a 값은 0에 가깝게 되고 아크가 불안할 경우 이 값은 증가하게 된다. W_R 과 W_P 는 상대적으로 변하는 값들로 W_R 이 증가할 수록 W_P 는 감소하게 되고 W_P 가 증가할수록 W_R 은 감소하게 된다. 이와 관련하여 다양한 용접조건하에서 아크의 안정성을 표시한 인자들을 Fig. 7, 8 그리고 9에 나타내었다. 측정된 신호의 샘플링 속도는 10 kHz이며, 사용된 보호가스는 CO_2 15 l/min, 그리고 1.2mm의 직경을 가진 솔리드와이어(solid wire)를 사용하였다.

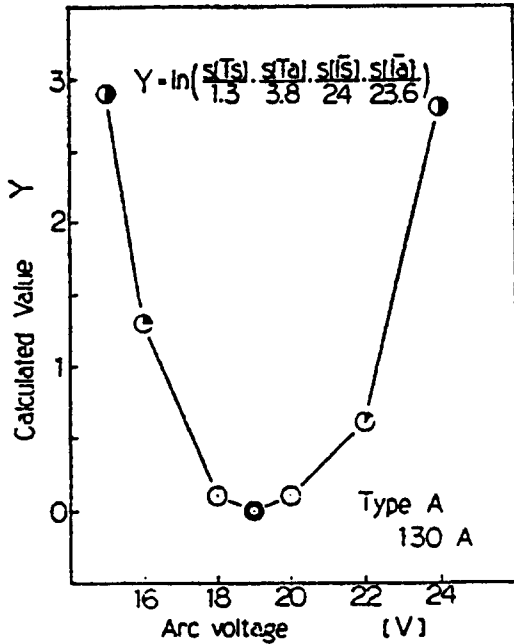


Fig. 7 Correlation between calculated value and arc stability

Shinoda등은 단락모드에서 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 아크의 안정성을 판별할 수 있는 인덱스를 제안하였다⁶⁾. 단락모드에서 I-V 선도를 그려보면 안정된 아크의 경우 규칙적으로 루프(loop)가 형성되나 불안정한 아크의 경우 형성되는 루프의 규칙성이 많이 깨어지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 Fig. 10과 같이 루프의 면적을 계산

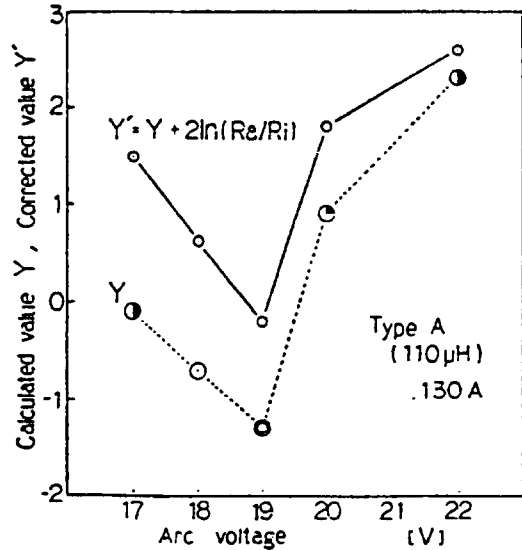


Fig. 8 Correction for arc extinction

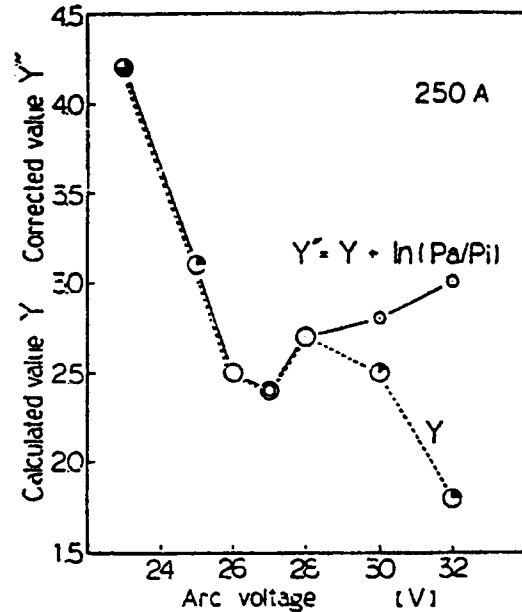


Fig. 9 Correction for abnormal growth of globule

하고 계산된 면적 각각에 대해서 표준편차를 구하여 이 표준편차가 작은 경우 안정된 아크로 인식하고 클 경우 불안정한 아크로 분류하게 된다. 면적

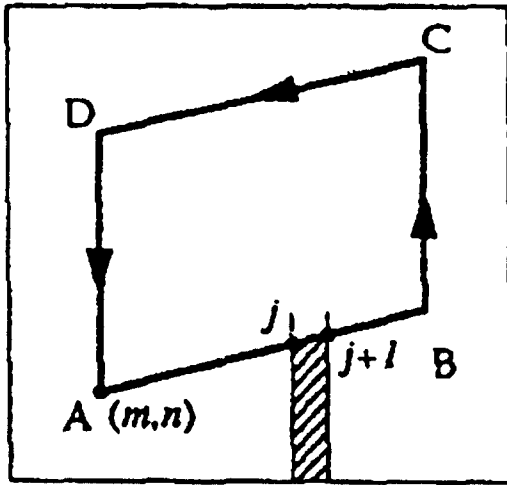


Fig. 10 Method for calculating area

과 표준편차를 구하는 식은 다음과 같다.

$$area = \sum_{j=m}^{n-1} \left(\frac{V_{j+1} + V_j}{2} \times (i_j - i_{j+1}) \right)$$

$$standarddeviation = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k (S_k - S)^2}$$

S : average of area

S_k : area for each loop

N : the number of loop

사용된 용접조건은 Ar80%+CO220%의 보호가스 와 15l/min의 유량이었고 4 kHz의 샘플링 속도로 데이터를 측정하였다.

Rehfeldt등은 아크전압을 측정변수로 선정하여 단락상태에서의 전압과 아크가 발생할 순간의 전압을 측정하였다. 또한 측정된 신호를 퍼지논리에 적용하여 단락모드에서의 안정성을 판별하였다⁷⁾.

이외에도 측정된 전류와 전압을 이용하여 평균값, 표준편차, 확률밀도함수 등의 확률론적 접근을 통해서 아크의 거동과 규칙성을 기술하고자 하는 접근방법도 있으며⁸⁾ 전류, 전압 그리고 와이어의 송급속도를 측정변수로 선정하여 이를 확률함

수, 오실로그램(oscillogram) 그리고 히스토그램(histogram)등으로 표현하여 아크의 안정성과 금속이행 특성을 분석하고자 하는 연구도 활발히 진행되어 오고 있다^{9,10)}.

2.3 용접품질

용접품질은 아크의 안정성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 아크가 불안할 경우 실제적으로 나타나는 용접품질은 허용영역에서 많이 벗어나게 된다. 용접품질과 관련된 최근까지의 연구동향을 살펴보면 다양하게 변화하는 용접 신호를 측정, 분석하여 용접품질과의 연관성을 알아내기보다는 선정된 용접조건들과 결과적으로 얻어지는 용접품질과의 관계를 인공지능을 이용하여 결정짓는 것이 대부분이었다. 이와 같이 용접신호와 용접품질과의 관계를 결정할 수 있는 인자 선정이 어려운 이유는 사용하는 용접조건 및 모재의 종류에 따라 용접품질과 관련된 적절한 허용오차등과 같은 변수들의 기준이 일률적이지 못하다는데 있다.

Matteson등은 음향신호와 용접품질과의 관계를 신경회로망을 이용해 표현하였다¹¹⁾. 이때 사용된 입력으로는 측정된 음향신호의 최대진폭(peak amplitude), RMS(root mean square)진폭 그리고 파워스펙트럼(power spectrum)을 30개의 구간으로 나누어 각각의 구간마다 평균치를 구한 값들이며, 신경회로망 학습을 위한 결과치로는 용접품질과 신뢰수준(confidence level)으로 선정하였다. 학습을 위해 사용된 입력중 파워스펙트럼과 관련된 부분을 Fig. 11에 나타내었다.

또한 Reilly등은 용접부의 불연속점을 인식하기 위한 목적으로 음향신호를 측정하여 이를 신경회로망에 적용하였다¹²⁾. Matteson등은 보호가스의 유량에 따른 용접 품질을 예측하기 위하여 신경회로망을 적용하였다¹³⁾. 신경회로망을 구성하기 위한 입력은 음향신호를 이용하였고 학습을 위한 결과치는 용접 품질을 사용하였다. 이를 Fig. 12에 나타내었으며 보호가스 유량이 적절한 값보다 작을 수록 용접 품질이 떨어짐을 알 수 있다.

Na등은 다양한 용접조건하에서 단락모드의 전류, 전압을 측정하고 이를 인공지능을 이용하여 용접 품질과의 관계를 규명하였다¹⁴⁾. 여기서 사용된 입력은 단락시 나타나는 전압-전류 루프간의

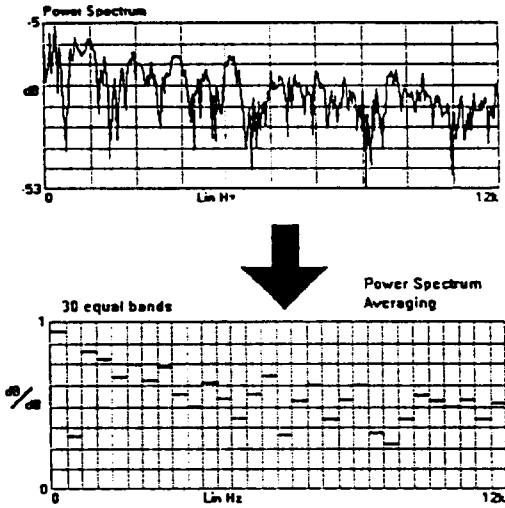


Fig. 11 Power spectrum averaging

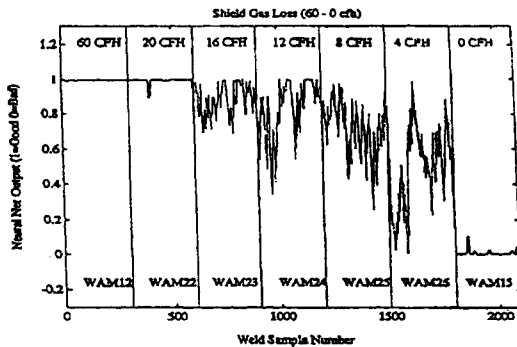


Fig. 12 Neural network output for gas flow rate

표준편차를 사용하였으며 결과치로는 보호가스 부족, 모재의 표면상태 그리고 전압-전류가 적절히 선정되었는가에 대한 정보 등이다.

Luksa등은 단락모드에서 측정된 음향신호와 용접품질과의 관계를 파워스펙트럼을 이용하여 표현하였으며¹⁵⁾ 고정된 아크전압하에서 용접전류를 다양하게 변화시켜가며 실험하였다. 이때 측정된 음향신호에 대한 파워스펙트럼과 용접품질사이의 관계는 파워스펙트럼의 크기가 작을수록 즉 소리가 조용할수록 용접품질이 향상됨을 결과적으로 알 수 있었다.

3. 용접현상 분석을 위한 S/W의 개발

용접현상을 분석하기 위한 측정변수는 매우 다양하며 따라서 이를 적절히 선정하는 작업도 중요한 문제로 대두된다. 용접현상을 이해하기 위한 가장 기본적인 측정변수로는 전류와 전압을 들 수 있다. 음향신호, 금속이행현상 그리고 용접품질과 관련된 용접조건들은 전류와 전압의 조합에 의해서 결과적으로 나타나는 물리적인 현상들이며 국내, 외 논문 및 자료를 보더라도 측정변수를 선정하는데 있어 전류와 전압을 위주로 거의 모든 현상을 예측하고 있음을 알 수 있다. 즉 전압과 전류를 측정변수의 기본으로 선정하고 필요에 따라 음향신호, 온도 그리고 아크 빛 등을 추가변수로 선정한다면 신뢰성이 개선된 용접신호 평가장치를 구성할 수 있으리라 사료된다.

용접현상은 매우 복잡하고 매 순간마다 동적으로 변하는 특성을 가지고 있으므로 이러한 특성을 상세히 관찰하기 위해서는 고속의 샘플링속도를 갖는 측정회로가 요구된다. 뿐만 아니라 측정된 신호를 적절히 신호처리하여 아크의 안정성, 금속이행모드 그리고 용접품질등과 관련된 알고리즘 개발도 필수적으로 요구된다. 이에대한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있으며, 한국과학기술원 기계공학과 용접자동화 시스템 연구실에서 산업기술 정책연구소의 지원을 받아 LG 산전(주), 민택리서치, 신성기전(주), 조흥전기산업(주), 한국용접공업(주)와 함께 개발하고 있는 용접현상분석을 위한 H/W 및 S/W의 기본사양은 다음과 같다. Table. 1은 기본적인 시스템 사양을 나타내고 있으며, 이를 기반으로 해서 개선된 용접평가장치를 구현할 수 있으리라 사료된다. 또한 측정 시스템 및 개발된 알고리즘을 사용자가 손쉽게 접근할 수 있는 사용자 인터페이스 프로그램(user interface program) 개발에 관한 연구도 병행하고 있다. 사용자 인터페이스 프로그램과 관련된 예를 Fig. 13에 나타내었으며 용접현상 해석을 위한 전체적인 구성도가 Fig. 14에 보여지고 있다.

여기서 사용자 인터페이스 프로그램은 측정회로로부터 얻은 전류, 전압 혹은 부가적인 신호들을 이용해서 금속이행모드, 아크 특성, 아크의 안정성 분석과 용접품질등에 관련된 사항을 사용자가 손쉽게 접근할 수 있도록 하기 위한 것이며, 향후

Table 1 Proposed system for analyzing welding phenomena

measuring parameters	<ul style="list-style-type: none"> ▶ welding current (I), arc voltage (V) ▶ arc light, arc sound, temperature
measuring method	<ul style="list-style-type: none"> ▶ μ-processor unit ▶ smpling rate : up to 50kHz
data processing methods	<ul style="list-style-type: none"> ▶ I-V line diagram ▶ Statistics ▶ Frequency analysis ▶ Oscillogram, Histogram
purpose of proposed system	<ul style="list-style-type: none"> ▶ arc stability ▶ metal transfer mode ▶ weld quality ▶ welding power source performance ▶ signal processing method for sensor

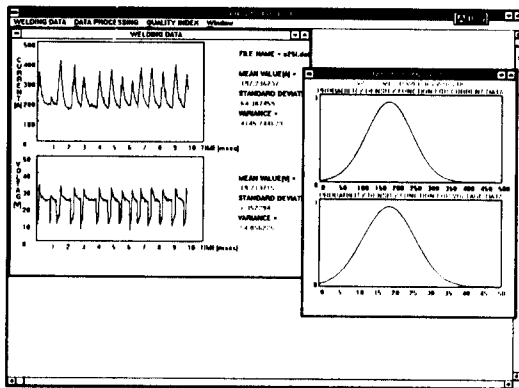


Fig. 13 Example of user interface program by using MS-WINDOWS

에는 용접공정과 관련하여 사용자가 좀더 실제적으로 손쉽게 공정특성을 인지할 수 있도록 프로그램이 개발되어져야 할 것이다.

4. 결 론

용접공정은 매우 복잡하고 비선형적인 요소를 많이 포함하고 있기 때문에 용접현상을 심도 있게 관찰하기 위해서는 다양한 각도에서의 접근방법이 필요하다. 예를 들면 용접전류, 아크전압 그리고 음향신호 등을 들 수 있으며 이와 관련된 연구도 활발히 진행되어 오고 있다. 하지만 지금까지 제안된 알고리즘을 통일시킬 만한 접근방법은 아직 이루어지지 못하고 있는 실정이며 이로 인해 사용하는 용접조건이나 용접기 혹은 사용자에 따라 용접공정분석을 위한 알고리즘은 조금씩 다른 특성을 나타낼 수밖에 없다. 따라서 용접현상을 분석하고자 할 때 부분적이거나 기준으로 제시될 수 있는 즉 통일성 있는 알고리즘 개발을 위한 제안들이 요구된다.

끝으로 지금까지의 연구결과를 토대로 개선된 용접기 과형제어를 위한 세밀한 용접파형 분석, 양질의 용접부를 얻기 위한 적절한 용접변수 선정을 위한 알고리즘 개발 그리고 용접공정 상태를 사용자 쉽게 이해할 수 있는 시스템 구축 등에 대해서는 지속적인 연구가 요구된다.

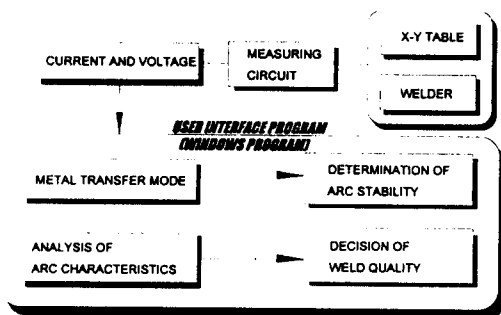


Fig. 14 Overall system for windows program and weld monitoring

참 고 문 헌

1. G. Adam and T. Siewert : Sensing of GMAW droplet transfer modes using ER 100S-1 electrode, *Welding Journal*, Vol. 69, No. 3, (1990), pp.103s-108s
2. Dr. Ray Stroud, Daniel Vincent and John McCardle : The application of neural networks to the classification of metal transfer mode in metal inert gas welding, *Proc. of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp. 459-468
3. W. Wang, S. Liu and J. E. Jones : Flux cored arc welding; Arc signals processing and metal transfer characterization, *Welding Journal*, Vol. 74, No. 11, (1995), pp.369s-377s
4. B. Ogunbiyi and J. Norrish : GMAW metal transfer and arc stability assessment using monitoring indices, *Computer Technology in Welding, Six International Conference, Lanaken, Belgium*, 9-12 June, (1996)
5. T. Mita, A. Sakabe and T. Yokoo : Quantitative estimate of arc stability for CO2 gas shielded arc welding, *Welding International*, No. 2, (1988), pp.152-159
6. T. Shinoda and H. Nishikawa : Monitoring and Signal Processing of Short Circuiting Metal Transfer of Metal Active Gas Welding Process, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp. 558-565
7. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil D. Rehfeldt and Dipl.-Ing. Th. Schmitz : Fuzzy Logic in Monitoring of Arc Welding, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31-June 2, (1995), pp. 477-486
8. D. Rehfeldt, A. Bollmann, T. Korbe, N. Kost and W. Rostek : Computer-aided quality control by process analyzing monitoring and documentation, *Int. Conf. for the Joining of Material JOM-5*, 10-12th May, Helsingor, Denmark, (1991), pp.11-16
9. V. Ponomarev, B. Lindberg and O. Al-Erhayem : JOM-ARC analyser for arc welding process, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp.612-615
10. S. J. Na, H. S. Moon : A Study on High Speed Measuring for Welding Process Signals and Signal Analysis, *KWS Autume Conference*, , October, Seoul, (1993), pp. 37-40
11. A. Matteson, R. Morris and R. Tate : Real-time GMAW quality classification using an artificial neural network with airborne acoustic signal as inputs, *Int. Conf. on Computerization of Welding Information IV*, November 3-6, Orlando, Florida, (1992), pp.189-197
12. R. Reilly, X. Xu and J. E. Jones : Neural network application to acoustic emission signal processing, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp.146-160
13. A. Matteson, R. Morris : Intelligent assessment of proper arc weld execution, *Int. Conf. Proc. on Modeling and Control of Joining Processes*, December 8-10, (1993), pp. 353-360
14. S. J. Na, J. S. Sin and J. W. Kim : A Study on Seam Tracking and Arc Data Monitoring for Sheet Metal Welding, *Int. Conf. on Computerization of Welding Information IV*, November 3-6, Orlando, Florida, (1992), pp.240-250
15. K. Luksa and A. Klimpel : Using Arc Sound to GMA Welding Process Evaluation, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, 1995, pp. 403-408