

완전용입 풀의 진동을 이용한 형상측정에 관한 연구

유 중 돈*

A Study on Weld Pool Oscillation for Pool Geometry Measurement

C. D. Yoo*

Key Words : Pool Oscillation(풀 진동), Full Penetration Control(완전용입제어), Natural Frequency(고유진동수), Osillation Mode(진동모드), Arc Voltage(아크전압), Arc Light Emission(아크빛)

Abstract

Weld pool oscillation for the full-penetration GTA welding process was investigated for its possible application to weld penetration control through theoretical modeling and experiment. Energy method was used to estimate the natural frequency of the molten pool having the physically-acceptable weld geometry and oscillation modes. An unique experimental system was built which had the data acquisition and video capabilities so that the pool oscillation signals and molten pool surfaces could be monitored continuously. Pool oscillation was detected through arc voltage and arc light emission simultaneously. The signal from arc light emission showed good coherence with that from arc voltage, and arc light generated the higher quality signal. The molten pool was found to oscillate in different oscillation modes based on the travel speed and weld geometry. The natural frequency estimated from the theoretical model agreed reasonably well with the experimental results.

* 정회원, 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과

1. 서 론

용융 풀의 진동(weld pool oscillation)이란 풀이 외력에 의하여 진동하는 현상이며, 이 경우에 풀의 진동, 특히 진동수는 풀의 표면장력과 크기 및 용입 상태에 영향을 받게된다. 용융 풀의 진동 현상이 처음 관찰된 이후 [1], 이 진동현상을 이용하여 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접공정에서 용융 풀의 윗면(top side)에서 용융 풀의 진동수(oscillation frequency)를 측정하여 용입상태나 풀의 크기를 제어하는 방법이 연구되어 왔다. 풀 진동을 이용한 용입제어 시스템 [2,3]이 개발되어 파이프나 박판의 완전용입 상태를 진동수를 통하여 제어하는 데 사용되고 있다. 그러나 현재까지 개발된 시스템은 아크길이 짧거나 용접 속도가 느린 완전용입 상태의 GTA 용접에서만 사용이 가능하여 응용범위가 제한되고 있다.

풀 진동에 관한 연구는 크게 용융 풀의 상태가 풀의 진동에 미치는 영향을 규명하기 위한 이론적인 해석과 진동의 효율적 측정방법에 관한 실험의 두분야에 대하여 진행되고 있다. 해석을 위한 대표적인 모델로는 막판(membrane) 모델 [4], potential flow 모델 [5], 및 힘의 평형(force equilibrium) 모델 [6]이 있는데, 이 모델들은 풀의 고유진동수를 모재의 표면장력, 비중, 풀의 형상인 폭과 시편두께의 함수로 나타내었다. 그러나, 이 모델들은 풀의 옆면이 수직면이고 표면이 대부분 원형인 단순한 풀의 형상에만 적용이 가능하고 실제와 유사한 용입 상태나 다양한 진동모드(oscillation mode)에 대하여 적용할 수 없다는 단점이 있다.

풀 진동의 측정방법은 일반적으로 용융 풀을 용접전류나 분위기 가스를 펄스나 삼각함수의 형태로 진동시키고, 이로인한 풀의 진동은 아크전압 [4, 7]이나 아크빛(arc light emission) [2, 3]의 변화를 측정하여 풀 윗면의 진동을 아크길이의 변화로 간접적으로 측정하였다. 이때 측정된 진동수는 용융 풀의 댐핑상수(damping coefficient)가 작으므로 고유진동수와 거의 같은 값이며, 부분용입 상태에서는 대략 200에서 300Hz에서, 완전용입 상태에서는 100 Hz이하에서 진동한다. 또한 풀의 크기가 커지면 진동수가 낮아지게 된다. 이와같은 관계를 이용하여 용융 풀의 진동을 측정하고 그 진동수를 이용하여 용입상태나 풀의 크기를 예측하거나 혹은 용접전류나 용접속도를 변화시켜 일정하게 진동수를 유지함으

로써 원하는 용입상태나 풀의 크기로 제어하는 데 응용하였다. 예를 들어 측정된 진동수가 원하는 진동수보다 높으면 실제풀의 크기가 원하는 크기보다 작으므로 용접전류를 높이거나 용접속도를 낮추어 풀의 크기를 원하는 진동수에 해당하는 크기로 제어할 수 있다[3].

이 연구의 목적은 완전용입상태에서 실제와 유사한 풀의 형상과 다양한 용입상태나 진동모드에 대하여 고유진동수를 예측할 수 있는 이론 모델을 구하고, 실험치와 비교하여 이론모델의 정확성을 검증하고자 한다. 또한, 아크빛과 아크전압을 이용한 센서를 통하여 다양한 풀 형상의 진동을 측정하고 각 센서로부터 얻은 신호를 비교하고자 한다. 부분용입 상태에서도 같은 방법의 이론과 실험을 적용할 수 있으나 [8], 이 경우에는 측정된 신호의 질(signal quality)이 낮으므로 실제 응용이 어렵기 때문에 부분용입의 경우는 제외하였다.

2. 이론적 해석

Rayleigh의 에너지 방법을 이용하여 용융 풀의 고유진동수를 풀의 형상과 용입상태, 모재의 비중 및 표면장력의 함수로 유도하였다. 에너지 방법을 이용한 이유는 실제 풀의 형상이 완전해(exact solution)를 구하기 위하여 사용되는 식이 경계조건을 만족시키기 너무 복잡하기 때문에, 단순한 풀의 형상에 대한 완전해를 구한 다른 모델들과 달리 복잡한 풀의 형상과 진동모드를 유지하는 대신 근사해를 구하였다.

용융 풀 시스템 이 진동시 에너지의 손실이 없다면, 표면장력에 의한 최대 위치에너지, U_{max} 는 최대 운동에너지, T_{max} 와 같게 된다.

$$U_{max} = T_{max} \quad (1)$$

이때 진동모드와 다른 조건을 만족하는 변위함수(displacement function), $F_t(x,y,z,t)$ 가 주어지고 표면장력, σ 과 비중 ρ 이 상수라고 가정한다면, 최대 위치에너지와 최대 운동에너지는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{max} = \frac{1}{2} \sigma \int \left(\left(\frac{dF_t}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dF_t}{dy} \right)^2 \right) \max dA \quad (2)$$

$$T_{max} = \frac{1}{2} \rho \int \left(\frac{dFt}{dt} \right)^2_{max} dV \quad (3)$$

위의 식에서 적분은 풀의 자유면 A와 체적 V에 대하여 수행하게 된다. 자유면과 체적은 Fig. 1에 나타난 풀의 형상에 의하여 결정된다. 이때 z축은 풀의 표면과 수직이며, x축은 용접속도의 방향을 나타낸다. 풀의 형상은 자유면은 타원형으로 가정하였고, 벽면은 완전용입 상태에서는 원추형으로(Fig. 1a), 밑면이 윗면에 비하여 아주 작은 경우에는 밑면이 잘린 타원체형(Fig. 1b)으로 가정하였다. Fig. 1b의 용입상태를 완전용입 상태와 구분하여 천이용입(transition penetration)상태로 정의한다.

풀의 움직임이 sinusoidal하다면 풀 안에서의 최대

변위와 속도는 아래와 같다.

$$Ft(x,y,z,t)_{max} = F(x,y,z) \sin(\omega t) |_{max} = F(x,y,z) \quad (4)$$

$$\frac{dFt}{dt} |_{max} = \omega F \cos(\omega t) |_{max} = \omega F(x,y,z) \quad (5)$$

위의 식(2)-(5)를 식(1)에 대입하면, 용융 풀에서의 고유진동수를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\omega^2 = \frac{\int \left(\left(\frac{dF}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dF}{dy} \right)^2 \right) dA}{\rho \int F^2 dV} \quad (6)$$

진동모드는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 대칭모드(symmetric mode), sloshing 모드 및 복합모드(mixed mode)로 분류하여 해석하였다. 대칭모드는 정지상태나 느린 용접속도에 적용한다. 복합모드는 모재의 밑면이 녹기 시작하여 밑면의 크기가 윗면의 크기에 상당히 작은 경우에 적용하며, 이때 풀의 윗면은 부분용입상태의 진동모드로 아랫면은 완전용입상태의 대칭모드로 진동한다고 가정한다.

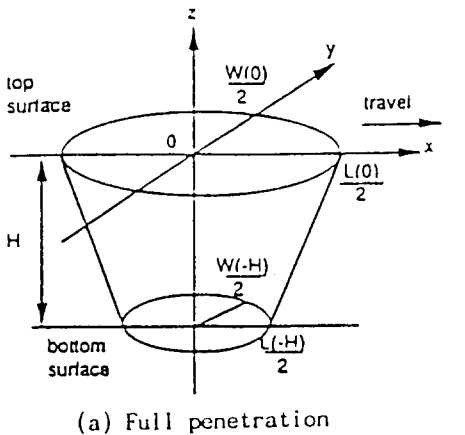
변위함수는 풀의 형상과 진동모드에 의하여 결정되고, 풀의 체적이 일정하고(volume constant), 옆면에서의 속도가 없다는 조건(no slip condition)을 만족하는 어떤 함수도 변위함수가 될 수 있다. 그러므로 변위함수는 유일하지 않고, 본 연구에서 사용한 변위함수는 아래와 같다.

$$F(x,y,z) = K A \left(\frac{z}{H} \right) B \left(\frac{2x}{L(z)}, \frac{2y}{W(z)} \right) \quad (7)$$

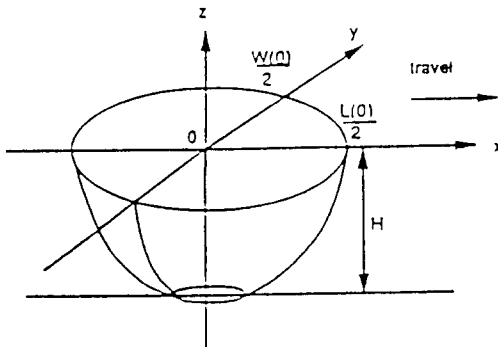
이때 H는 시편의 두께이고, L(z)와 W(z)는 z축에 따른 풀의 길이와 폭을 각각 나타낸다(Fig. 1) 위의 식에서 함수 A는 z축을 따른 진동크기(amplitude)의 변화를 나타내고 함수 B는 x-y면에서의 진동모드를 나타내며, 이들 함수는 아래와 같이 가정할 수 있다.

$$A \left(\frac{z}{H} \right) = (1 + (1-p) \frac{z}{H})^n \quad (8)$$

$$B \left(\frac{2x}{L(z)}, \frac{2y}{W(z)} \right) = 1 + C_1 r + C_2 r^2 + C_3 r^3 + \dots \quad (9)$$



(a) Full penetration



(b) Transition penetration

Fig. 1 Weld geometry and coordinate system

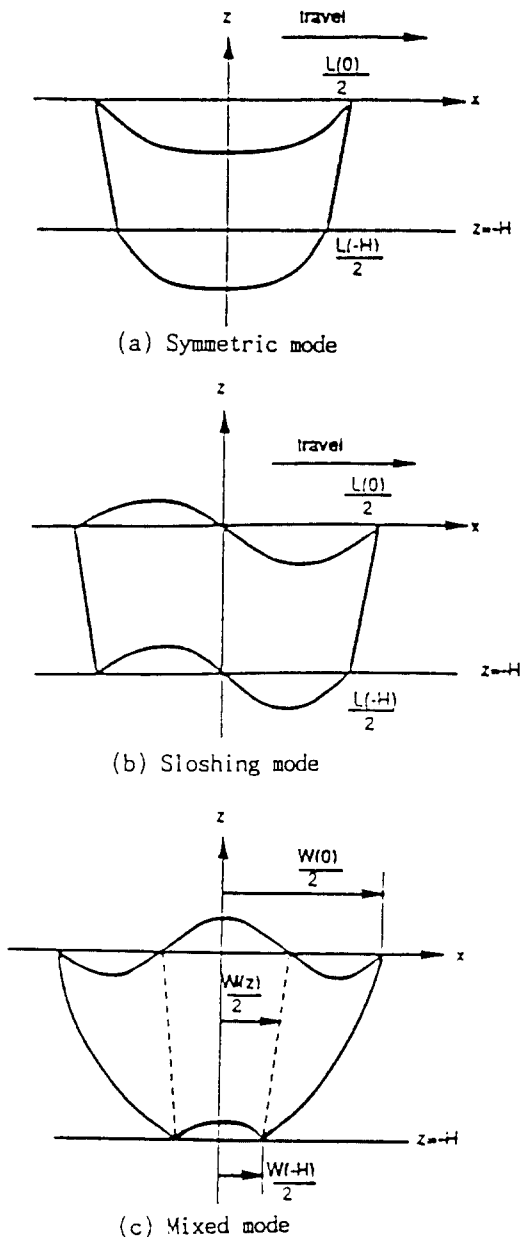


Fig. 2 Weld pool oscillation mode

$$r^2 = \left(\frac{2x}{L(z)}\right)^2 + \left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2 \quad (10)$$

$$p = \frac{W(-H)}{W(0)} \quad (11)$$

이때 p 는 벽면의 기울기로 풀의 아랫면과 윗면의

폭의 비로 나타내고 C_1 는 임의의 상수이다. 식(8)의 상수 n 은 z 축을 따른 진동크기의 변화를 결정하는 상수로써, 대칭모드에서는 -2 로 결정이 되지만 sloshing모드나 복합모드에서는 결정되지 않는다. 이 경우 n 의 값은 상계해의 특성을 이용하여 구할 수 있다.

각 진동모드는 식(9)의 고차항(high order terms)을 제외시키고 경계조건과 질량불변조건을 만족하는 변위함수는 대칭모드, sloshing 모드 및 복합모드에서 각각 아래와 같다.

$$F(x,y,z) = K(1 + (1-p)\frac{z}{H})^{-2}$$

$$\left(1 - \left(\left(\frac{2x}{L(z)}\right)^2 + \left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2\right)\right)^2 \quad (12)$$

$$F(x,y,z) = K(1 + (1-p)\frac{z}{H})^n \left(\frac{2x}{L(z)}\right)$$

$$\left(1 - \left(\left(\frac{2x}{L(z)}\right)^2 + \left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2\right)\right)^2 \quad (13)$$

$$F(x,y,z) = K(1 + (1-p)\frac{z}{H})^n \left(1 - \left(\left(\frac{2x}{L(z)}\right)^2 + \left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2\right)\right)$$

$$\left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2 \left(1 - \left(\left(\frac{2x}{L(z)}\right)^2 + \left(\frac{2y}{W(z)}\right)^2\right)\right) \quad (14)$$

대칭모드, sloshing 및 복합모드의 변위함수를 식(6)에 대입하여 각 모드에 해당하는 풀의 형상에 대하여 적분하여 구한 고유진동수, ω 는 일반적으로 아래의 식(15)와 같이 무차원형태인 고유진동수, ω^* 로 나타낼 수 있다. 무차원 고유진동수는 풀의 절대치수인 폭과 시편두께나 재료의 특성인 비중이나 표면장력과 무관하게 되어, 고유진동수를 풀의 형상을 나타내는 벽면의 기울기나 진원도의 함수로 나타낼 수 있게 된다. 대칭모드, sloshing 모드 및 복합모드의 경우에 구한 변위함수인 식(12)~(14)에 대한 무차원 고유진동수는 각각 아래의 식(16)~(18)과 같다.

$$\omega^* = \omega / \left(\frac{1}{W(0)} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho H}}\right) \quad (15)$$

$$\omega^* = 2(2(2 - e^2)(p + p^{-3}))^{0.5} \quad (16)$$

$$\omega^* = 4((2n+3)(4 - 3e^2) \frac{(1+p^{2n})(1-p)}{(1-p^{2n+3})}) \quad (17)$$

$$\omega^* = \left(\frac{4\sqrt{5}}{1} \right) (2p^{2n+4} + p^{2n} - 4p^{n+2} + 3) (2 - e^2)^{0.5} \quad (18)$$

$$e^2 = 1 - \left(\frac{W(0)}{L(0)} \right)^2 \quad (19)$$

이때 식(18)의 I 는 수치적으로 구하여야 하며 [8], e 는 풀 표면의 진원도(eccentricity)를 나타낸다. 식(17)과 (18)에 나타난 n 의 값은 상계해의 특성을 이용하여 결정한다. (4.1절 참조). 위의 식(16)~(18)을 이용하여 이론적으로 구한 고유진동수는 실험을 통하여 측정된 풀의 형상을 대입하여 고유진동수를 계산하고, 실제 풀의 진동수와 비교하여 모델의 정확도를 예측할 수 있다. 또한 풀의 진동수와 윗면의 형상을 측정하였을 때, 용융 풀의 아랫면 형상을 예측하는데 응용이 가능하여 전반적인 용입상태의 예측 및 제어에 응용할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험조건

3.1. 실험장치

실험장치는 GTA 용접을 위한 시스템으로써, 3 자유도의 gantry-type GTA 용접시스템, 데이터 수집(data acquisition) 및 비디오(video) 시스템으로 구성되어 있다. 실험장치의 구성은 Fig. 3에 나타나 있다. 본 연구에 사용된 장치는 진동신호를 풀의 윗면과 아랫면의 화상(image)과 동시에 관찰할 수 있도록 고안되었다.

전체 시스템을 제어하는 컴퓨터는 IBM-AT이며 대부분 C 언어로 프로그램하였다. 사용한 용접기의 용량은 150 암페어이며 transistor를 통한 용접전류형태의 programming이 가능하다. 고정구(fixture)는 공압 실린더를 사용하여 시편을 균일한 힘으로 누르고 고

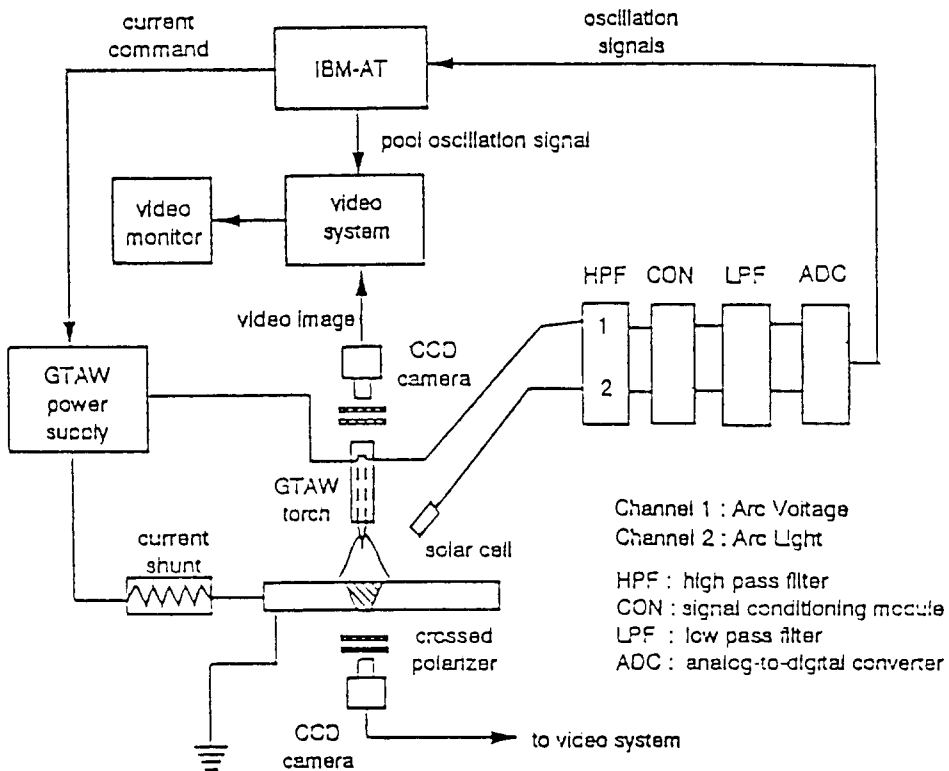


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

정구의 밑부분은 뜯려있어 유리를 통해 풀의 아랫면을 CCD 카메라를 이용하여 관찰할 수 있도록 설계되었다.

용접전류를 펄스형태로 발생시켜 풀을 진동시키고, 펄스 발생 직후 아크전압과 아크빛의 변화를 통하여 풀의 진동을 측정하였다. 아크전압은 용접봉과 시편 사이의 전압으로 측정하고, 아크빛은 작은 구멍(pin hole)이 뚫린 상자 내부에 설치된 태양전지(silicon solar cell)를 이용하여 측정하였다. 아크빛 센서 상자는 용접봉 진행방향의 반대편에 30cm 떨어진 위치에서 아크를 향하여 고정시켰다. 측정된 신호는 high pass filter를 통하여 5Hz 이하의 신호를 제거한 후에 증폭되었다. 증폭된 AC 신호는 low pass filter를 통하여 450Hz 이상의 성분을 제거하였다.

이와같이 처리된 신호는 데이터 수집용 보드를 통하여 0.5초 동안 1000Hz로 수집(sampling)된 후, 순차적으로 메모리에 저장되었다. 용접이 끝난 후에, 메모리에 저장된 신호들은 디스크에 저장하였다.

비디오 시스템은 풀의 윗면과 아랫면의 화상을 풀 진동신호와 동시에 관찰할 수 있도록 고안하였다. Coaxial vision 도치 [9]를 사용하여 윗면의 화상을 관찰하였고 아랫면의 화상은 고정구의 아랫면에 설치된 CCD 카메라를 통하여 관찰하였다. 두 화상은 화상 혼합기(video mixer)를 통하여 하나의 화상으로 합쳐지고 frame grabber의 입력으로 보내져 메모리에 저장된다. 풀의 진동신호는 저장된 화면의 위편에 그려지고, 기타의 공정에 대한 정보는 화상의 아래에 출력된다. 이와같이 처리된 화상은 풀의 윗면과 아

랫면 화상, 풀 진동신호 및 기타의 정보를 포함하고 있으며(Fig. 4), VCR 테이프에 녹화되었다.

이와같은 데이터 수집과 화상처리 작업을 동시에 수행하기 위하여, interrupt와 DMA(Direct Memory Access) 방법을 사용하였다. 이 시스템을 이용하여 한개의 시편에서 얻을 수 있는 진동신호의 갯수는 최대 120이며, 이는 할당된 메모리의 크기(allocated memory size)에 의하여 결정된다. 풀의 진동은 펄스 전류로 풀을 진동시킨 직후에 0.5초 동안 측정하며, DC값은 펄스전류를 가하기 직전에 측정하였다.

3.2. 실험조건 및 신호처리

시편의 재질은 304 스테인레스 강으로 autogenous bead-on-plate 용접을 DCEN으로 하였다. 시편의 크기는 5×30cm이고 두께는 2.3mm(0.09 inch)이며, 모든 시편은 acid pickling 용액에 넣어 표면의 불순물을 제거하고 용접직전에 증류수로 세척하여 사용함으로써 시편의 표면조건이 일정하도록 하였다. 분위기 가스로는 아르곤을 사용하였고, 시편의 밑면에도 분위기 가스를 공급하여 산화를 방지하였다. 펄스전류는 용접전류보다 100 암페어 높은 전류를 5×10⁻³초 동안 지속시켰다.

실험중 용접전류와 용접속도를 변화시키며 풀의 진동신호를 구하였다. 일반적으로 한번의 용접에서는 용접속도와 아크길이를 고정시키고 용접중에 용접전류를 변화시켜 풀의 크기를 변화시키며 이에 대한 진동신호를 측정하였다. 아크길이는 2.5mm(0.1 inch)로 유지하였다. Base 전류의 범위는 40에서 100 암페어이고 용접속도는 0, 5.1, 10.2, 15.2, 20.3cm/min(2.4, 6.8 inch/minute)이다.

한번의 용접에서 10내지 20개의 풀의 크기와 진동수가 다른 신호를 얻을 수 있었다. 용접이 끝난 후, 저장된 풀의 진동신호를 시간과 주파수 영역(time and frequency domain)에서 처리하였다. 시간 영역에서는 주로 신호의 질과 특성을 검토하였고, 주파수 영역에서는 신호의 Power Spectral Density(PSD)로 부터 진동수를 계산하였다. 처리된 각 신호는 VCR 테이프에 녹화된 풀의 영상과 데이터 파일(data file)의 이름과 번호를 이용하여 각 신호에 해당하는 영상을 추출하고 이 영상으로 부터 풀의 크기를 측정하였다.

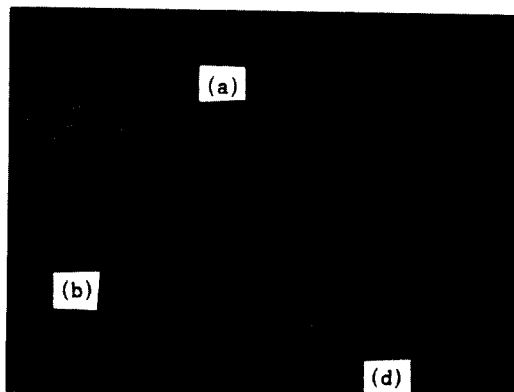


Fig. 4 Weld pool surface image with oscillation signal and process information
 (a) oscillation signal (b) bottom surface
 (c) top surface (d) information

4. 결과 및 고찰

풀의 형상과 진동모드가 고유진동수에 미치는 영향을 이론모델을 이용하여 예측하였다. 실험으로 측정된 풀 진동신호의 특징을 분석하고, 이론적으로 구한 고유진동수는 실험 결과와 비교하여 모델의 정확도를 검증하였다.

4.1. 이론해석결과

에너지 방법으로 예측한 완전용입 풀의 고유진동수는 풀의 폭에 반비례하고, 모재의 비중과 두께의 제곱근에 반비례하며 모재의 표면장력의 제곱근에 비례한다(식(15)). 이는 박판 모델의 결과와 유사하다. 대칭모드에서 풀의 벽면 기울기와 진원도의 영향은 식(16)으로부터 구할 수 있고, Fig. 5는 이 영향을 보여준다. 이때 진원도 대신 풀의 길이와 폭의 비율로 나타내었다. 진원도가 작을수록 혹은 기울기가 커질수록 진동수가 감소함을 알 수 있는데, 이는 풀의 무게가 증가하고, 풀의 움직임을 제한하는 구속조건이 작아지기 때문이다. 벽면의 기울기가 작아짐에 따라 진동수가 급격히 증가하는 것으로 나타나는데, 실제로는 이와같이 높은 진동수가 발생할 수 없으므로 이와같은 범위에서는 완전용입의 모델을 적용할 수 없으며 천이용입 상태의 모델을 사용하여야 한다.

Sloshing 모드는 용접속도가 빠른 경우에 적용하며

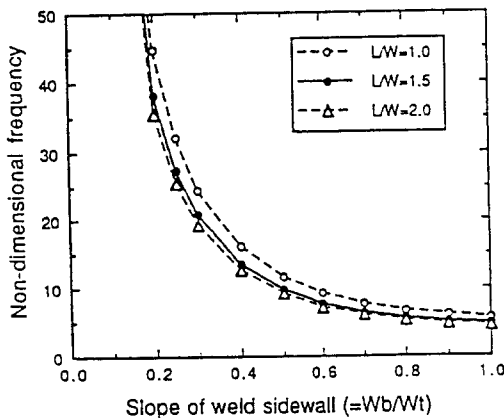
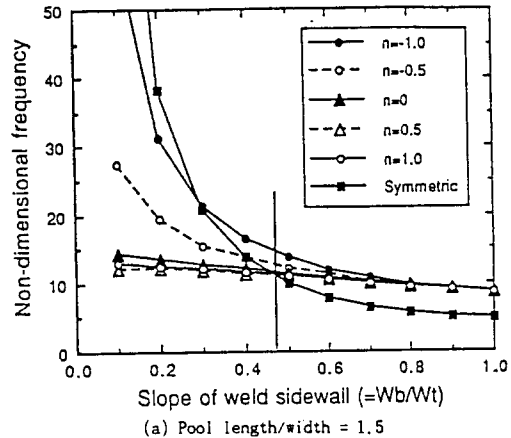
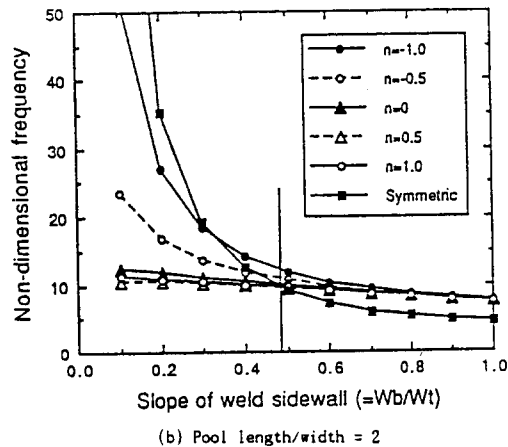


Fig. 5 Theoretical results for full penetration in symmetric mode

n 값, 풀의 벽면 기울기 및 진원도의 영향은 식(17)로부터 구할 수 있고, Fig. 6a와 6b는 풀의 길이와 폭의 비율이 각각 1.5와 2.0인 경우, n 값과 벽면 기울기가 고유진동수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 벽면 기울기가 증가함에 따라 진동수가 낮아지며 n 값의 영향이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 대칭모드는 비교를 위하여 삽입하였다. 풀의 길이와 폭의 비율이 2인 경우에는 1.5인 경우와 비교하여 같은 추세를 보이지만 진동수가 낮게된다. 이는 풀의 무게가 증가하기 때문이다. 이론적으로 n 의 값을 구할수 없지만, 에너지 방법으로 구한 진동수는 상계해(upper bound solution)이므로 가장 낮은 진동수를 제공하는 n 값을 구하고 이때의 진동수를 고유진동수로 결정하



(a) Pool length/width = 1.5



(b) Pool length/width = 2

Fig. 6 Theoretical results for full penetration in sloshing mode

었다.

복합모드는 풀의 밑면이 녹기 시작하여 윗면에 비해 상당히 작은 경우에 적용한다. 이와같은 경우에 식(16)의 대칭모드로 구한 계산 결과는 고유진동수가 너무 높게 나오기 때문에 대칭모드는 적용할 수 없다. 복합모드는 밑면이 녹기 시작할 때를 고려하였으므로 부분용입과 완전용입의 특성을 함께 가지고 있다고 추론할 수 있다. 즉, 풀의 윗면은 부분용입 상태로, 풀의 아랫면은 완전용입 상태로 진동한다. 정지상태와 풀의 길이와 폭의 비가 1.5인 경우에 대한 식(18)의 결과를 Fig. 7a와 7b에 각각 나타내었다. Fig. 7a에서 보는 바와 같이 벽면의 기울기가 커질수록 풀의 질량이 커지므로 진동수가 작아진다. 완전용입 상태의

진동수가 복합모드의 진동수보다 높은 경우, 풀은 복합모드로 진동한다고 가정할 수 있으며 이때의 벽면의 기울기는 대략 0.47이다. 이 값은 풀의 길이와 폭의 비가 1.5인 경우(Fig. 7b)에도 유사하다. 그러므로 벽면 기울기가 0.47보다 작은 경우에는 용융 풀은 완전용입 상태의 대칭모드 보다는 천이용입 상태의 복합모드로 진동할 가능성이 높다. n의 값은 sloshing모드의 경우와 같이 상계해의 특성을 이용하여 구하였다.

4.2. 실험결과

본 연구에서 사용한 실험장치를 이용하여 연속적으로 변화하는 풀의 형상과 진동신호를 측정할 수

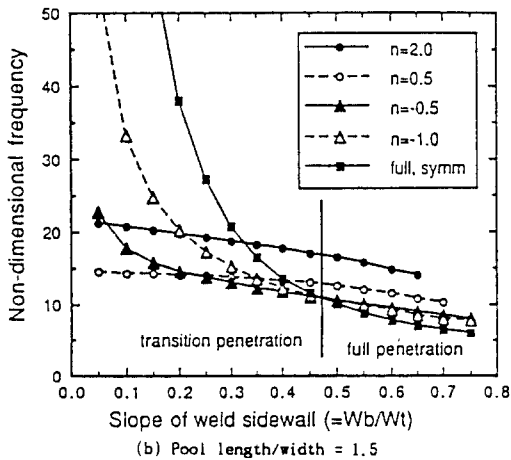
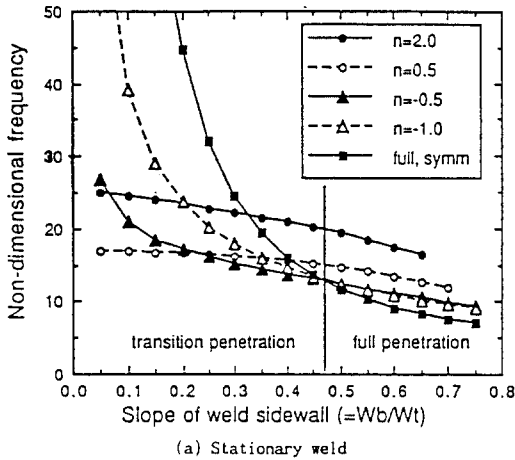


Fig. 7 Theoretical results for transition penetration in mixed mode

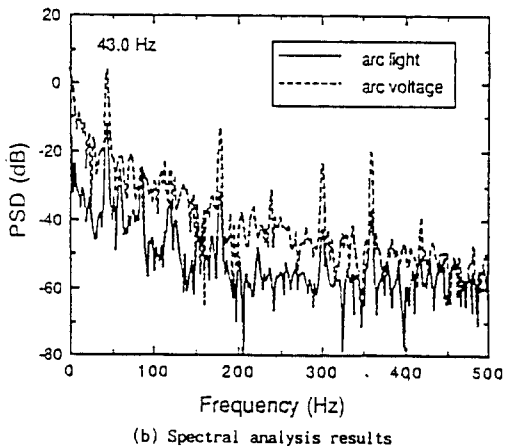
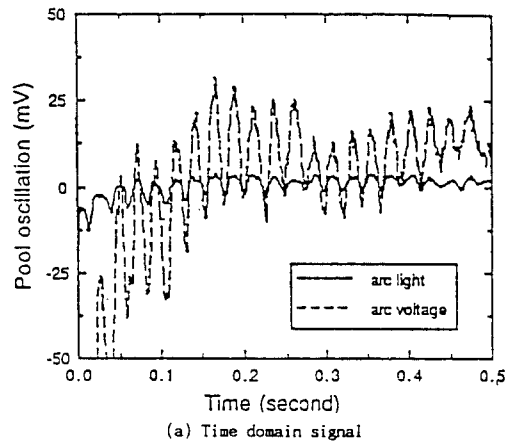


Fig. 8 Pool oscillation in stationary weld

있었다. 측정된 풀의 진동신호 중에서 정지상태와 5.1 및 20.3cm/min의 용접속도로 용접봉이 이동하는 상태의 신호의 시간과 주파수 영역에서의 결과를 각각 Fig. 8, 9, 10에 보였다. 정지상태의 풀의 경우, 아크 전압과 아크빛의 신호가 Fig. 8a의 시간 영역에서 나타난 바와 같이 서로 일치하며 진동은 0.5초 동안 지속된다. 이때의 PSD 계산결과는 Fig. 8b에서 보이는 바와 같이 주파수 영역에서 진동수가 43Hz로 나타났다. 이는 대칭모드로 풀이 진동하는 것으로 판단된다. 이외의 피크들은 용접기의 전원으로 부터 발생한 잡음이다. 용접속도가 5.1cm/min인 경우는 Fig. 9에 나타내었다. 시간 영역에서는 정지상태의 경우와 비교하여 진동이 0.25초 동안만 존재하며 신호의 질이 정지상태와 비교하여 떨어지고, PSD 계산 결과 58.6과

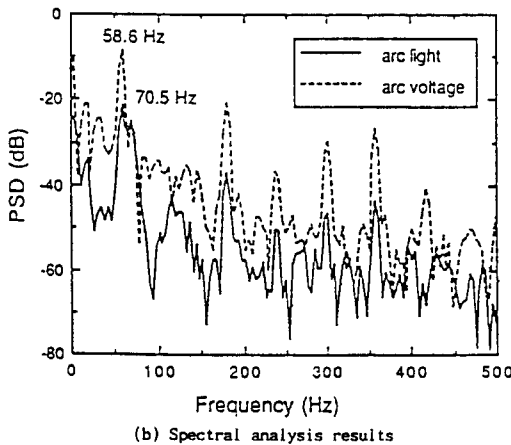
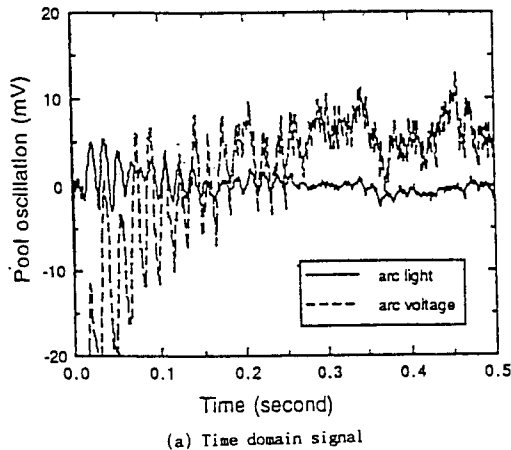


Fig. 9 Pool oscillation traveling at 5.1cm/min

70.5Hz인 두개의 진동수가 구해지는 것으로 보아, 용융 풀의 진동시 두개의 진동모드가 존재하는 것을 알 수 있다. 아크 빛과 아크 전압의 신호는 잘 일치하며, 용접봉이 이동하는 경우에는 아크빛의 신호의 질이 아크전압보다 좋다. 용접속도가 5.1cm/min보다 빠른 경우에서도 비슷한 추세이며 Fig. 10에 나타난 20.3 cm/min의 용접속도에서는 진동은 0.1초 동안만 존재하며 풀의 진동수도 잡음 보다 작게되어 풀의 진동수를 추출하는 것이 용이하지 않다. 일반적으로 용접속도가 빨라짐에 따라 신호의 질이 떨어진다.

신호의 질이 용접속도에 크게 영향을 받는데 그 원인에 대하여 용접봉의 이동 및 새로 녹는 모재에 의한 댐핑 영향등 여러가지로 추정을 하였다. 느린 용접속도에서도 떨어지는 것으로 보아 용접봉 위치의

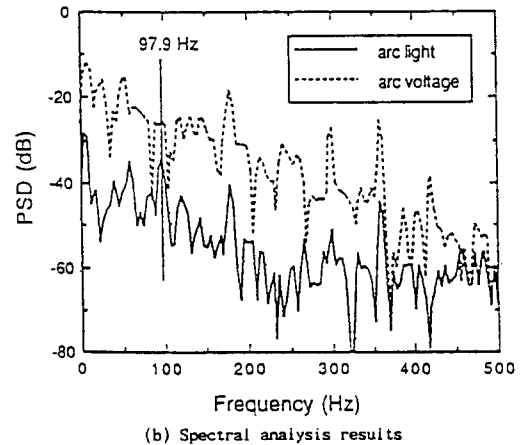
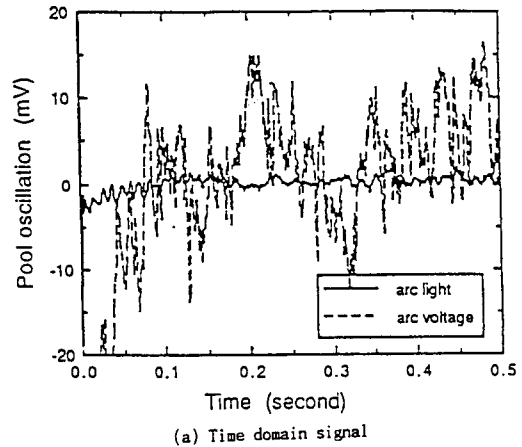


Fig. 10 Pool oscillation traveling at 20.3cm/min

이동이나 댐핑의 영향이 신호에 미치는 영향은 작을 것으로 판단된다. 녹화된 화상으로부터 용접봉이 이동하는 경우 풀 표면의 산화물의 움직임으로 부터 풀의 유동이 빨라지는 것을 관찰할 수 있는데, 용접봉의 이동이 용융 풀의 유동상태에 영향을 주어 신호의 질을 저하시키는 것으로 추정된다. 아크빛이 아크전압보다 좋은 질의 신호를 발생시키는 이유는 아크전압이 아크길이의 변화에 비례하지만 아크빛의 강도는 아크의 체적에 비례하기 때문인 것으로 추정된다. 실험결과로부터 용접속도가 20.3cm/min이상인 경우에는 풀의 진동수 추출이 곤란하다. 그러므로, 고속 용접시 용입제어를 위하여 신호의 질을 높이기 위한 측정 및 신호처리 분야에 관한 연구가 필요한 것으로 추정된다.

4.3. 이론 및 실험결과 비교

에너지 모델에서 녹화된 풀의 영상으로부터 측정된 풀의 형상을 이용하여 계산된 고유진동수와 실험으로 구한 진동수를 각 용접속도에 대하여 비교하였다. 이 경우 실험에서 구한 진동수는 resonance 진동수이나, 댐핑의 영향이 작기 때문에 고유진동수와 거의 동일하다. 실제 진동모드는 현재의 실험장비로는 확인할 수 없으므로, 실험에서 측정된 풀의 형상으로 부터 이론 모델을 이용하여 계산한 각 진동모드의 고유진동수를 측정된 진동수 비교하여 제일 근사한 값을 그 모드에서의 진동수로 간주하였다. 계산에 사용한 스

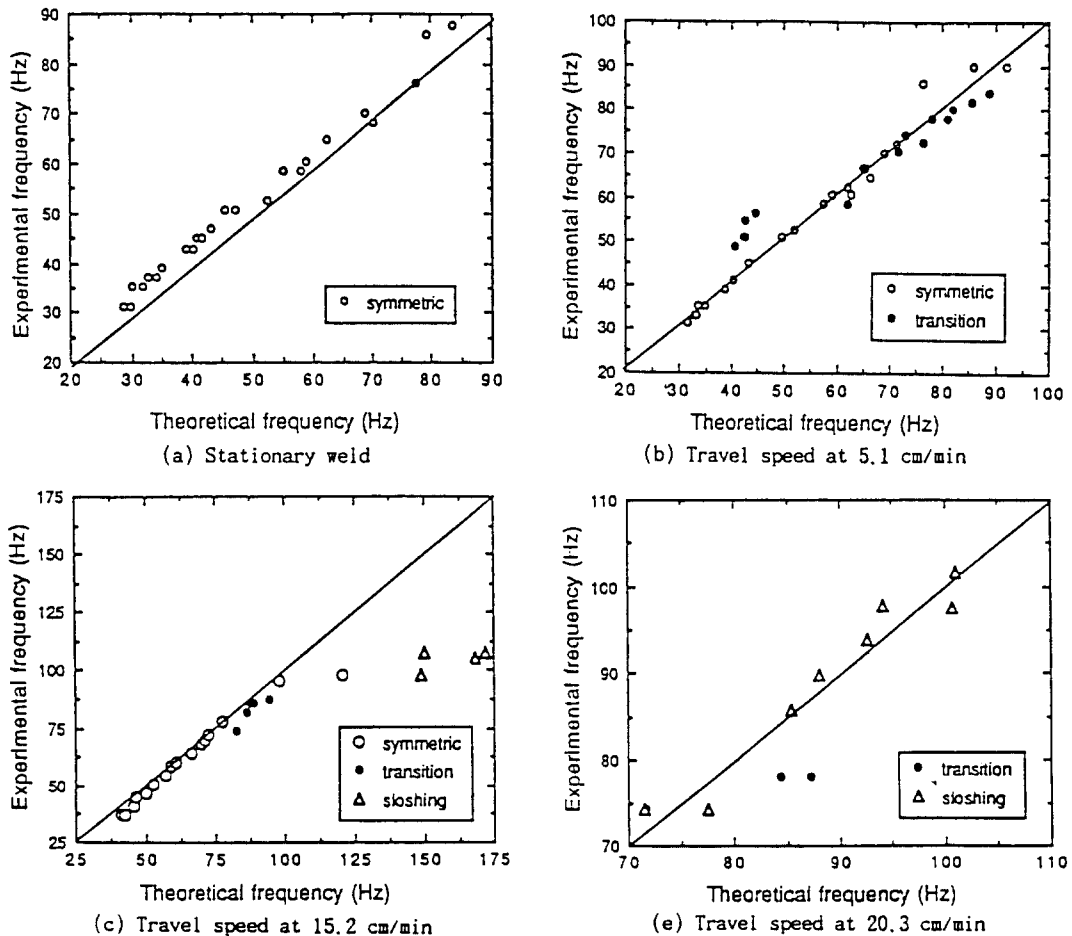


Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental results

테인레스 강의 비중과 표면장력의 값은 각각 7.8g/cm^3 과 1800dyne/cm 이다.

정지상태에서는 Fig. 11a에 나타난 바와 같이 이론치가 실험값과 잘 일치함을 보이고 있다. 이론 진동수는 모두 대칭 모드의 경우이다. 용접속도가 5.1cm/min 인 경우에는 Fig. 11b에 나타난 바와 같이 대칭 모드에서는 일치함을 볼 수 있다. 그러나 하나 이상의 진동수가 측정된 경우에 높은 진동수는 sloshing 모드와 일치하지 않고 복합모드의 진동수와 일치하였다. 용접속도가 10.2cm/min 인 경우에도 일반적인 추세는 용접속도 5.1cm/min 의 경우와 유사하다. 이 용접속도에서는 벽면의 기울기가 대략 0.7 이상에서 대칭 모드와 혼합모드의 진동수는 이론치와 실험값이 잘 일치하였다. 용접속도가 15.2cm/min 인 경우에는 (Fig. 11c), 이론치와 실험값이 상당한 차이를 보이고 있다. 용접속도가 20.3cm/min 인 경우에는 (Fig. 11d), 대칭 모드의 진동수는 없고 sloshing 모드가 주로 존재하였다. Sloshing 모드는 용접속도가 15.2cm/min 이상에서 주로 나타나며 그 이하의 속도에서는 혼합 모드가 대칭모드와 같이 나타난다.

위의 결과로부터, 진동수가 낮은 경우가 높은 경우보다 이론치와 실험값이 잘 일치하고, 이 경우 대부분은 대칭모드임을 알 수 있다. 또한 풀 벽면의 기울기가 작을수록 진동수가 높아지며, 모델이 풀의 진동수를 정확하게 예측하지 못하는 경향을 보인다. 벽면의 기울기가 0.7 이상인 경우에는 이론 모델이 풀의 진동수를 비교적 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다. 실제 응용의 관점에서 보면, root pass의 용접시 용접속도가 20.3cm/min 이하인 경우에 풀의 진동을 이용하여 완전 용입상태의 제어가 가능한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구의 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 에너지 방법을 이용하여 실제로 가까운 완전용입 풀의 형상과 진동모드에 대한 고유 진동수를 계산할 수 있는 모델을 유도하였다.
2. 개발한 실험장치로 풀의 변화에 따른 진동신호의 변화와 풀의 형상을 연속적으로 관찰할 수 있으며, 한번의 용접에서 최대 120개의 신호를 측정하여 실험의 효율을 높일 수 있었다.
3. 아크전압과 아크빛은 잘 일치하고 용접봉이 이

동하는 경우 아크빛의 신호의 질이 더 높았다. 이동하는 풀의 경우, 풀은 하나 이상의 모드로 진동하는 것을 실험을 통하여 관찰할 수 있었다.

4. 여러개의 진동모드가 혼합된 경우, 진동수가 낮은 경우에는 대칭모드가 지배적이고 sloshing 모드는 용접속도가 15.2cm/min 이상인 경우에만 존재하며, 그 이하의 용접속도에서는 용융 풀은 대칭모드와 혼합모드로 진동한다.
5. 이론 모델에서 예측한 고유진동수는 용접속도가 15.2cm/min 보다 작고 풀의 벽면 기울기가 0.7 보다 큰 경우 실험에서 측정된 진동수와 잘 일치하였다.
6. 용접속도가 20.3cm/min 이하인 경우, 풀의 진동을 이용한 완전 용입상태의 제어가 가능하며, 그 이상의 용접속도에서도 진동 신호를 얻을 수 있는 측정 및 신호처리 방법에 관한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Kotecki, D. J., Cheever, D. L. and Howden, D. J., 1972. Mechanism of ripple formation during welding solidification, *Welding Journal* 51(8)
2. Lillquist, R. D. and Case, A. W., 1987, Method and apparatus for measuring weld penetration in an arc welding process, US patent number 4711986
3. Deam, R. T., 1989, Weld pool oscillation : A new way to define a weld procedure, *Proceedings of 2nd international conference on trend in weld research*, Tennessee
4. Tam, A. S. and Hardt, D. E., 1989, Weld pool impedance for pool geometry measurement : Stationary and nonstationary pools, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol, 111
5. Zacksenhouse, M., 1983, Weld pool impedance identification for size measurement and control, S. M. Thesis, M.I.T, Department of Mechanical Engineering
6. Zacksenhouse, M. and hardt, D. E., 1983, Weld pool impedance identification for size measurement and control, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 105
7. Renwick, R. J. and Richardson, R. W., 1981, Experi-

- mental investigation of GTA weld pool oscillations, Welding Journal 62(2)
8. Yoo, C. D., 1990, Effects of weld pool conditions on pool oscillation, Ph. D Thesis, The Ohio State Univ., Welding Engineering Department
 9. Richardson, R. W., Gutow, D. A. and Rao, S. H., 1982, A vision based system for arc weld pool size control, Measurement and control for batch manufacturing, ASME special publication