연 구 논 문

울트라 내로우 갭 용접에서 갭 내 고른 아크입열 분포를 위한 상·하 토치요동 효과

김 두 영* · 나 석 주*

*한국과학기술원 기계공학과

Effect of Up-and-Down Torch Oscillation for Providing Uniform Heat Input along the Sidewall of Gap on Ultra Narrow Gap Welding

Doo-Young Kim* and Suck-Joo Na*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

Narrow gap welding has many advantages over conventional V-grooved butt welding such as high productivity, small deformation and improved mechanical property of joints. With narrower groove gap, less arc heat input is expected with all the other advantages of narrow gap welding. The main defects of narrow gap welding include the lack of root fusion, convex bead surface and irregular surface, all of which have negative effects on the next welding pass. This paper suggests an up-and-down torch oscillation for ultra narrow gap welding with gap size of 5mm and investigates the proper welding conditions to fulfill the reliable and high welding quality.

First, GMA welding model was suggested for ultra narrow gap welding system with Halmoy's model referenced for wire melting modeling. And the arc length in ultra narrow gap was defined. Secondly, based on the experimental results of up-and-down torch oscillation welding, phase shift of current and wire extension length were simulated for varying oscillation frequency to show that weld the bead shape in ultra narrow gap welding can be predicted.

As the result, it was confirmed that reliable weld quality in ultra narrow gap welding can be achieved with up-and-down torch oscillation above 15Hz due to its ability to provide uniform heat input along the sidewall of gap.

(Received February 10, 2003)

Key Words : Ultra narrow gap welding, Up-and-down torch oscillation, Oscillation frequency, GMAW.

1. 서 론

생산현장에서 V-그루브나 이중 V-그루브와 같은 형태의 용접법이 많이 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 용접법은 많은 용접패스 수를 필요로 하고 있기 때문에 낮은 생산성과 큰 열변형 등 용접품질을 저하시킬 수 있는 요인들이 많이 발생한다. 따라서, 높은 생산성과 용접품질 향상을 위해서 좁은 그루브가 요구된다[1-8]. 그루브 폭이 좁아질수록 아크의 불안정 현상이나 아크힘보다 용융금속의 수두압이 크게 되어 용융금속의 선행현상이 생기고, 루트융합불량이 생기기 쉽다. 또한 용융금속의 유동성이 급감하여 표면 비드 형상이 불균일하거나 볼록한 형태가 되어 다음 패스 용접시 결함을 야기하기 쉽다[9,10]. 최근에 개발된 울트라 내로우 갭 용접 공정에서는 5mm정도의 그루브 폭에서 펄스전류에 의한 와이어 돌출길이를 제어하고 아크발생 위치(와이어 끝단)를 그루브 내에서 상하요동시켜서 아크입열을 분산 제어하는 공정이 개발되었다[9,10]. 이 공정은 아크입열을 그루브 내에 고루 분포시킴으로써 용융금속의 유동성을 증가시켜 비드 표면 형상의 개선 및 루트면에서의 융합을 충분히 확보하기 위한 것이다. 그러나, 이 방법은 일반적인 GMA용접기를 적용할 수 없고, 전류 펄스의 최대값·최소값 및 펄스폭 설정 등 용접변수의 선정에 있어 어려운 점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 방법들을 보완하여 5mm정도의 울트라 내로우

갭 용접 공정에 적용가능하고 그루브 내에서 아크입열을 고루 분산시키기 위하여 기계적인 상하 토치요동을 제안하였다. 또한 일반적인 신뢰성 높은 용접품질을 얻기 위하여 적절한 용접조건을 선정하였다.

2. 용접시스템 모델링

울트라 내로우 갭 용접시스템을 모델링하기 위하여 와이어 용융모델이 규명되어야 한다.

Halmoy는 통상의 용접 조건에 대해서 저항열이 와이어 돌출부에서 선형적으로 증가함을 확인하였고, 와이어 끝단에서의 열평형에 의해서 와이어 용융속도에 관한 식을 유도하였다[11-13].

와이어의 돌출길이(L_e)의 변화율은 식(1)과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{dL_e}{dt} = V_f - V_m = V_f - \frac{AI}{1 - B(L_e/V_f)I^2} \quad (1)$$

여기서, $A = \Phi / S(H_o + b)$, $B = a / S^2(H_o + b)$ 이다.

a는 와이어 돌출부 끝단에서의 전기저항(Ωmm), b는 상온에서 와이어의 열에너지(J/mm^3), L_e는 와이어 돌출길이(m), V_f는 와이어 송급속도(mm/s), S는 와이어의 단면적(mm^2), V_m은 와이어 용융 속도(mm/s), H_o는 용적이탈 직전의 용적의 단 위 부피당 열이다.

Halmoy는 와이어 돌출부에서의 전압강하(V_e)를 식(2)로 나타내었다[12,13].

$$V_e = \frac{V_f S}{I} H_e = \frac{aL_e I}{S} - \frac{bV_f S}{I} \quad (2)$$

여기서, H_e는 와이어 돌출부 끝단에서 단위 부피당 열이다.

아크에서의 전압강하(V_a), 용접전류, 아크길이(L_a) 사이의 관계는 Ayrton의 식으로 식(3)과 같이 정의된다[14].

$$V_a = V_{a0} + R_a I + E_a L_a \quad (3)$$

여기서, $E_a = E_{al} + E_{ai} I$ 이다.

Fig. 1은 GMA용접시스템의 등가전기회로를 나타낸 것이다. GMA용접시스템은 다음과 같이 모델링 된다.

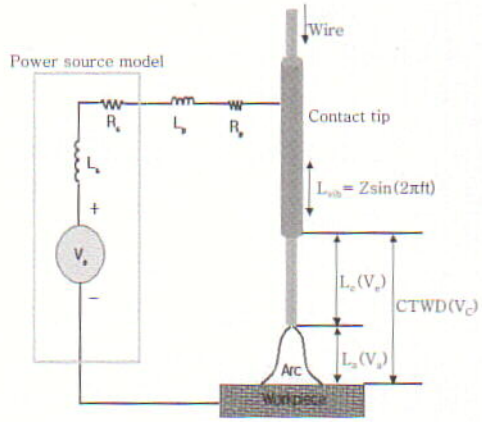


Fig. 1 Equivalent circuit of GMA welding system included torch vibration

$$V_o = V_c + (R_s + R_p)I + (L_s + L_p)\frac{dI}{dt} \quad (4)$$

$$V_c = V_a + V_e \quad (5)$$

다음으로 울트라 내로우 갭 용접에서 토치의 상하요동을 고려하여 아크 길이를 정의하였다[9-10].

Fig. 2에 (a)처럼 L_{bottom} 〈= $W_g/2$이면 아크 길이는 L_a = L_{bottom}가 된다. 여기서, L_{bottom}은 와이어 끝단에서 루트면까지의 길이로써 다음 식에 의해서 변화하게 된다.

$$L_{bottom} = CTWD + L_{vib} - L_e \quad (7)$$

$$L_{vib} = Z\sin(2\pi ft) \quad (8)$$

여기서, L_{vib}는 용접토치에 가해지는 요동파형, Z는 진폭, f는 요동주파수, CTWD (Contact Tip to Workpiece Distance)는 팁끝단에서 모재까지의 거리이다.

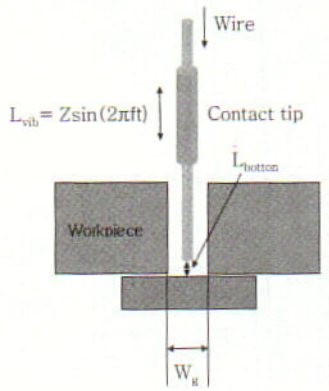
Fig. 2에 (b)처럼 L_{bottom} 〉$W_g/2$이면 아크 길이는 $L_a = W_g/2$로 일정하다고 정의한다.

그러므로, 본 연구에서는 아크 길이를 다음과 같이 정의하였다.

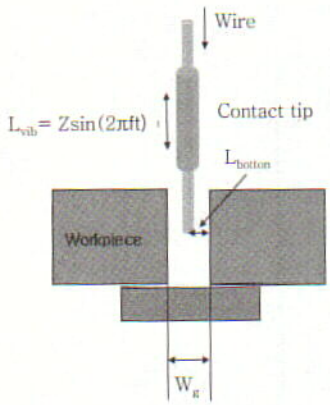
- L_{bottom}〈$=W_g/2$인 경우 $L_a = L_{bottom}$
- L_{bottom} 〉$W_g/2$인 경우 $L_a = W_g/2$

울트라 내로우 갭 용접시스템의 모델은 비선형미분방정식으로 나타나며, 식(1)에서 식 (8)을 동시에 풀어야 한다. 본 연구에서는 4계 Runge-Kutta법으로 비선형 미분방정식을 풀었다.

각각의 상수값을 Table 1에 정리하였다.



(a) L_{bottom} (=W_g / 2 (L_a=L_{bottom})



(b) L_{bottom} 〉W_g / 2 (L_a=W_g / 2)

Fig. 2 Definition of arc length in ultra narrow gap welding

Table 1 Parameters used for numerical analysis of arc characteristics

Welding conditions	I_o	400 A
	V_f	357 mm/s
	CTWD	28 mm
	L_{eo}	25 mm
Power source and cable	V_o	35 V
	L_s+L_p	0.002 H
	R_s+R_p	0.001 Ω
Arc	V_{ao}	15.22 V
	R_a	30.7 mΩ
	E_{al}	0.6315 V/mm
	E_{ai}	1.02×10^{-5} Ω/mm
Electrode wire (ø1.2 YGW15)	a	1.2×10^{-3} Ωmm
	b	3.98 J/mm^3
80% Ar + 20% CO_2	Ho	11.1 J/mm^3
	Φ	3.48 V

3. 실험 장치 및 용접조건

용접전원은 정전압특성을 갖고 고전류 용접이 가능한 600A급 MIG용접기를 사용하였다. 사용한 용접 와이어는 ø1.2인 강(steel) 재질의 YGW15를 사용하였고, 보호가스는 80% Ar + 20% CO_2인 혼합가스를 사용하였다. 5mm이하의 울트라 내로우 갭 용접에서 보호가스의 종류는 상당히 중요하다. 일반적으로 순수 아르곤 가스는 용적이행이 스프레이 모드가 잘 발생하여 안정한 아크를 유지할 수 있지만, 상대적으로 큰 아크로 인해 5mm이하의 갭에서 아크가 불규칙적으로 그루브 벽면을 타고 오르락 내리락하거나 그루브 입구에서 아크가 발생하는 현상이 생겨 5mm이하의 울트라 내로우 갭 용접에 사용될 수 없다. 반면에 상대적으로 아크 크기가 작은 80% Ar + 20% CO_2인 혼합가스인 경우엔 순수 아르곤 가스에서와 같은 불규칙적인 현상은 나타나지 않고 안정한 용접이 가능하다[9,10,15].

Fig. 3은 기계적인 상하토치요동시스템의 구동부를 나타낸다. 65W 용량의 DC 모터, 모터의 전원 공급을 위한 전원공급장치(power supply), 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 링크와 리니어 모션 가이드(linear motion guide), 고정 지그 등으로 구성된다. 실험에 사용된 시편의 두께는 20mm의 연강을 사용하였고, backing재는 두께 10mm의 연강을 사용하였다. 따라서, 토치 요동폭을 고려하여 CTWD는 28mm로 설정하였다. 용접전류는 400A, 용접전압 35V, 용접속도는 9mm/s로 설정하였다. 보호가스의 유량은 25cm^3/min로 설정하였다.

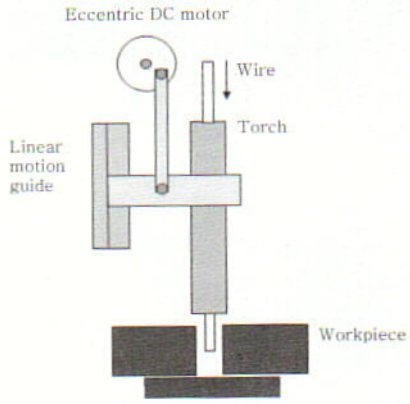


Fig. 3 Overall layout of torch oscillation part

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 요동폭이 4mm인 경우에 아크 거동을 촬영한 모습이다. 아크의 발생위치가 그루브 벽면을 타고

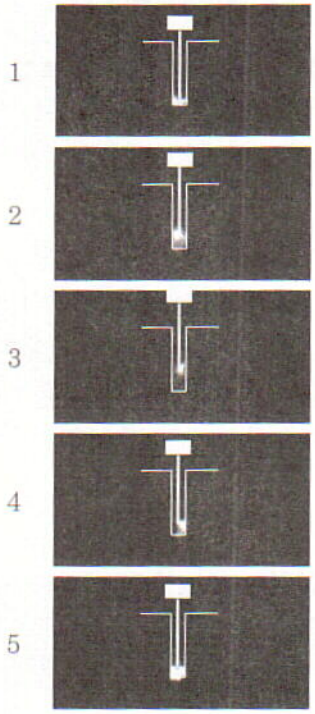


Fig. 4 Arc images in ultra narrow gap welding (oscillation distance : 4mm)

오르락 내리락하는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 아크 입열이 그루브 벽면에 고루 분포될 수 있음을 확인하였다.

Fig. 5는 주파수에 따른 모의실험에 의한 전류 파형과 용접실험에 의한 전류 파형을 토치 위치마다 대응하는 전류값을 평균하여 1주기만을 나타낸 것으로 대체로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5의 주파수에 따른 전류 파형을 보면, (a) 5Hz인 경우는 토치의 위치에 대해 전류파형의 앞섬현상이 지배적이다. 이 경우엔 모의실험 결과에 의해서 자기 제어효과가 충분히 일어나기 때문에 아크의 발생 지점의 위치가 거의 변하지 않는다. 이것은 전류가 저항이 최소가 되는 패스로 흐르게 되며, 자기 제어효과가 충분하면 용접 와이어와 루트면 사이의 거리가 항상 일정하게 유지되고 그 유지된 거리가 벽면에 의한 거리보다 짧아 요동현상이 발생하지 않기 때문이다. 따라서, 토치의 상하요동의 효과를 기대하기 어렵다. 즉, 아크가 그루브 벽면을 타고 오르는 현상이 일어나지 않고, 아크 입열이 루트면에 집중되게 된다. 따라서, 루트면에서의 입열은 크기 때문에 루트융합은 충분하나 비드 표면에서는 입열이 작아 비드 표면 형상이 불규칙하거나, 볼록한 형상이 예측된다.

(b) 10Hz인 경우는 토치의 위치에 대해 전류파형의 앞섬현상이 지배적이다. 아크가 그루브 벽면을 타고 오르는 현상이 나타나지만, 자기제어효과의 영향으로 상하요동의 효과가 큰 영향을 미치지는 못한다.

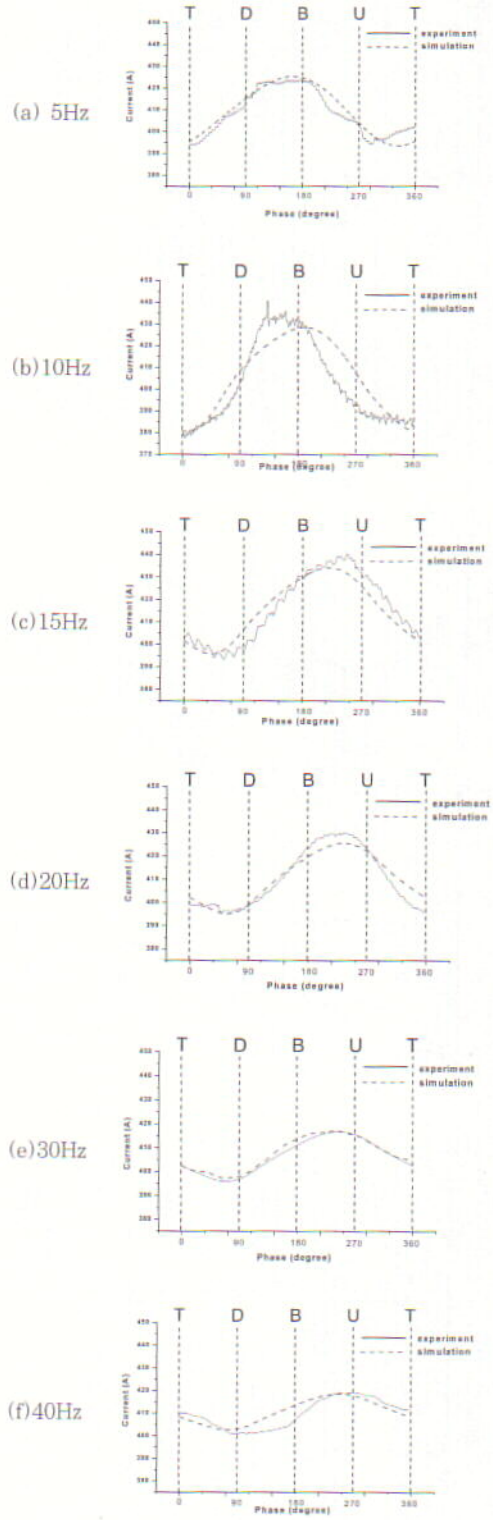


Fig. 5 Current wave form on varying oscillation frequency (T:top D:downward B:bottom U:upward)

따라서, 루트면에서의 입열은 크기 때문에 루트융합은 충분하나 비드 표면에서는 입열이 작아 비드 표면 형상이 불규칙 하거나, 볼록한 형상이 예측된다.

(c) 15Hz, (d) 20Hz, (e) 30Hz, (f) 40Hz인 경우는 토치의 위치에 대해 전류파형의 뒤짐현상이 지배적이고 주파수의 증가에 따라 뒤짐현상이 커짐을 확인할 수 있다. 또한 자기제어효과가 급격히 감소하기 때문에 상하토치요동의 효과가 아크에 반영 되어 토치의 각 위치에 대응하여 아크 입열이 공급됨을 알 수 있다. 이때 토치 위치의 최고점과 최저점 모두 전류가 높게 나타나고, 고주파일수록 용접기 내부의 인덕턴스 영향으로 전류의 변화가 감소한다. 따라서, 루트면과 비드 표면에서의 충분한 입열이 보장 되므로 충분한 루트융합과 평면이거나 오목한 비드 표면 형상이 예측된다.

이것은 본 연구에서 적용된 울트라 내로우 갭 용접시스템에 대한 모델링이 실제 시스템을 잘 나타냄을 검증해 준다. 따라서, 모의실험을 통한 주파수에 따른 토치 위치와 전류 파형의 위상차 변화 및 와이어 돌출길이의 변화 등의 결과를 신뢰할 수 있고, 실제 용접현상을 설명하는 기준으로 적용하였다.

Fig. 6은 모의실험에 의한 주파수에 따른 토치 위치와 전류 파형의 위상차를 나타낸 것이다. 9.3Hz이하 저주파수에서는 전류의 앞섬(lead)현상이 생기고, 9.3Hz 이상 고주파수에서는 전류의 뒤짐(lag)현상이 생김을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 모의실험에 의한 주파수에 따른 와이어 돌출길이의 최대값과 최소값의 차이를 나타낸 것이다.

와이어 돌출길이의 변화는 자기제어효과 (self-regulating effect)와 관련이 있다. 9.3Hz이상 고주파수에서는 자기제어효과가 충분히 일어나 지 않아 주파수가 증가함에 따라 와이어 돌출 길이의 변화가 지수적으로 감소한다. 이것은 고주파에서는 용접기 내부의 인

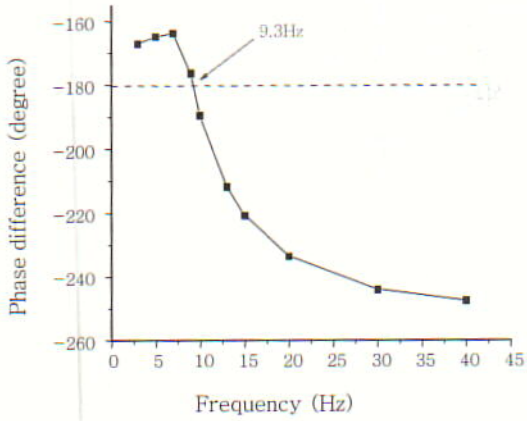


Fig. 6 Phase difference between I and Lvib on varying oscillation frequency

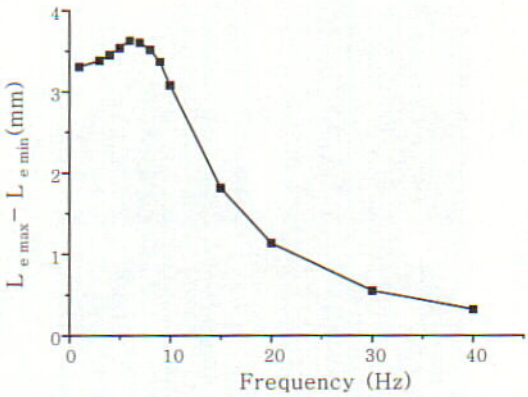


Fig. 7 The difference between maximum and minimum electrode length on varying oscillation frequency

덕턴스의 영향 으로 전류의 변화가 작아지기 때문이다. 9.3Hz 이하 저주파수에서는 자기제어효과가 상대적으로 충분히 일어나 와이어 돌출 길이의 변화가 크고, 6Hz에서 가장 큰 값을 가진다. 따라서, 주파수에 따른 토치 위치와 전류 파형의 위상차 변화와 자기제어효과는 용접 현상을 설명하는 중요한 요인임을 알 수 있다.

주파수에 따른 전류 파형의 변화와 와이어 돌출길이의 변화로부터 용접부의 비드 형상을 예측해 보았다. 최고점에서의 전류가 낮으면 비드 표면이 불균일하거나 볼록한 형상이 되고, 전류가 높은 경우에는 비드 표면이 평면 또는 오목한 형상이 된다. 최저점에서의 전류가 낮으면 루트면에서의 루트융합불량이 생기고 전류가 높으면 충분한 루트융합을 얻을 수 있다.

Fig. 8은 주파수에 따른 용접부의 단면의 형상을 나타낸 것이다.

모든 주파수 조건에서 루트면에서의 루트융합은 충분히 확보되었음을 알 수 있다. 0Hz에서 10Hz인 경우에 단면 형상은 아래 또는 중간 어느 한 부분이 두드러지게 볼록한 형태이거나 비드 표면 형상이 볼록한 형상을 보여준다. 15Hz에서 40Hz인 경우에 단면 형상은 대체로 측면용입깊이가 고르며 비드 표면 형상이 평편하거나 오목하게 나타난다.

Fig. 9는 주파수에 따른 비드 표면 형상을 보여준다. (a)는 0~10Hz의 저주파수의 상하요동 을 가했을 때 비드 표면 형상이다. 표면이 불규칙한 비드임을 확인할 수 있다. 이와 같은 불규칙한 비드는 다음 패스시 용접 품질을 저하시키는 요인으로 작용한다.

(b)는 15~40Hz의 고주파수의 상하요동을 가했을 때 비드 표면 형상이다. 비드의 모양이 오목하게 양호하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 2회 용접(two pass welding)를 했을 때 단면 형상이다.

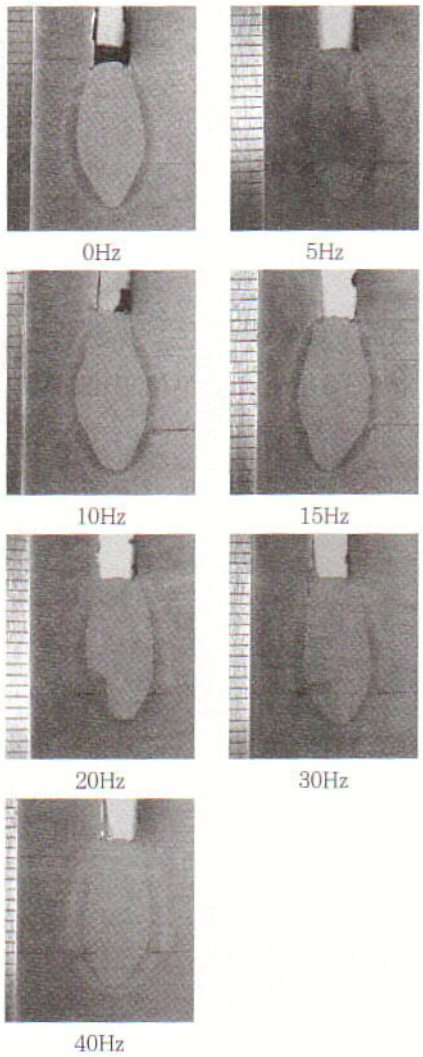


Fig. 8 Bead cross-section on welded area in ultra narrow gap

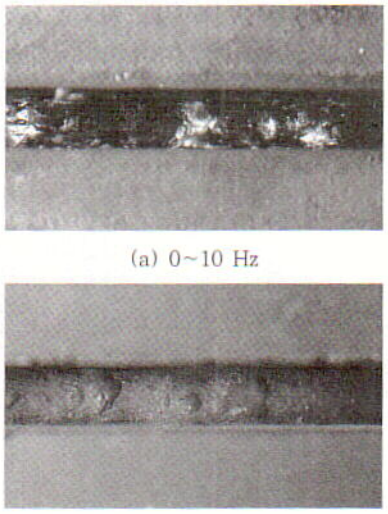


Fig. 9 Bead shape on varying oscillation frequency

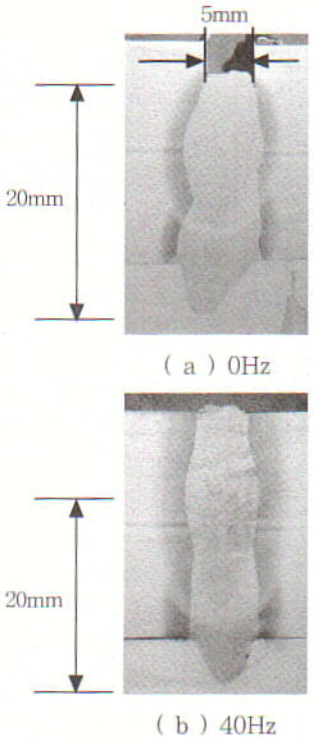


Fig. 10 Bead cross-section of two pass welding in ultra narrow gap (80% Ar+20% CO_2)

첫번째 용접시 용접전류는 400A, 용접전압 35V이고, 두번째 용접시 용접전류 380A, 용접전압 33V였다. Fig. 10(a)는 상하토치요동을 가하지 않았을 경우에 단면이고, (b)는 40Hz의 상하토치요동을 가했을 경우에 단면을 나타낸다.

상하토치요동을 적용한 경우는 그루브 내에서 아크 입열의 고른 분포와 용융풀의 유동성을 증가시키기 때문에 실제 용접품질이 양호함을 확인할 수 있다[9,10].

5. 결 론

와이어만을 그루브 내에 삽입하여 토치를 상하 요동시키는 공정을 울트라 내로우 갭 용접에 적용하고, 용접품질을 향상시킬 수 있는 용접변수를 선정하고자 하는 해석과 실험을 통해서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1)상하토치요동시의 주파수에 따른 토치 위치와 전류파형의 위상차 변화와 와이어 돌출길이의 변화 등의 실험과 수치 계산 결과로부터 10Hz이하 저주파수에서는 자기제어효과에 의한 영향으로 상하토치요동의 효과가 일어나지 않고, 10Hz이상의 고주파수에서 상하토치요동의 효과가 발생함을 확인하였다.

2)고주파수의 상하토치요동은 아크 입열을 그루브 내에서 고르게 분포시킬 수 있고, 용융풀의 유동성 증가로 인한 용접결함을 극복할 수 있다.

3)주파수에 따른 전류 파형의 변화와 와이어 돌출길이의 변화로부터 비드 형상을 예측할 수 있다. 토치 위치의 최고점에서 전류가 낮으면 비드 표면이 불균일하거나 볼록한 형상이 되고, 전류가 높은 경우에는 비드 표면이 평면 또는 오목한 형상이 된다. 최저점에서 전류가 낮으면 루트면에서의 루트융합불량이 생기고 전류가 높으면 충분한 루트융합을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. V. Y. Malin : The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding Part I, Weling Journal, April, 1983, 22-30.
2. V. Y. Malin : The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding Part II, Weling Journal, June, 1983, 37-46.
3. U. Dilthey and J. Gollnick : Through the Arc Sensing in GMA-Welding with High Speed Rotating Torch, IECON '98 Proceedings of the 24th Conference of the IEEE, Industrial Electronics Society, Vol. 4, 1998, 2374-2377.
4. G.K. Hicken and C.E. Jackson : The Effect of Applied Magnetic Fields on Welding Arcs, Welding Journal, Research Supplement, November, 1966, 515/s-524/s.
5. Y.-H. Kang : A Study on the Automatic Welding by Using Electromagnetic Arc Oscillation, PH.D. Thesis, KAIST, 2001.
6. S. Kimura, I. Ichihara and Y. Nagai : Narrow Gap, Gas Metal Arc Welding Process in Flat Position, Welding Journal, July, 1979, 44-52.
7. Y. Sugitiani, Y. Kobayashi and M. Murayama : Development and Application of Automatic High Speed Rotation Arc Welding, Welding International, May, 1991, 577-583.
8. O.E. Ostrovskii, V.I. Kulit and V.A. Kazakov : Narrow gap Welding Large Thickness with a Deformed Electrode, Welding International, Vol.9, No.9, 1995, 731-734.
9. T. Nakamura and K. Hiraoka : Characteristics of Phenomena in Narrow Gap Welding and Proposal new Welding Process at Ultra Narrow Gap Joint-Development of Ultra Narrow Gap Welding Process(Report1), Quar. J. JWS, 19-1, 2001, 44-53.
10. T. Nakamura and K. Hiraoka : GMA Welding Process with Synchronized Control of Current Waveform and Wire Feed Rate-Development of Ultra Narrow Gap Welding Process(Report4), Quar. J. JWS, 20-2, 2002, 246-258.
11. M. Ushio and W. Mao : Modeling of an Arc Sensor for DC MIG/MAG Welding in Open Arc Mode : Study of Improvement of Sensitivity and Reliability of Arc Sensors in GMA Welding (1st Report), Q. J. Jpn. Weld Soc., Vol.14, No.1, 1996, 99-107.
12. E. Halmoy : Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential, Arc Physics and Weld Pool Behavior, The Welding Institute, Cambridge, 1980, 49-54.
13. J.-W. Kim : A study on the Analysis of Weld Pool Convection and Seam Tracking by Considering the Arc Length Characteristic in GMA Welding, PH.D. Thesis, KAIST, 1991.
14. K. Ando : Welding arc phenomena, Tokyo, Sanpoh, 1962
15. J. F. Lancaster : The Physics of welding, 2nd edition, Oxford, Pergamon, 1986.