

가스 메탈 아크 용접에서 토치 위빙 중 표면 입열 분포 해석에 관한 연구

김용재*(한양대학교 대학원 정밀기계공학과), 이세현(한양대학교 기계공학부)

A Study of Heat Input Distribution on the Surface during Torch Weaving in Gas Metal Arc Welding

Y Kim(Precision Mech. Eng. Dept. HYU), S Rhee(Mechanical Eng. Dept., HYU)

ABSTRACT

In weaving welding where a V groove exists, the heat input distribution is an important factor that determines the defectiveness of the bead shape, undercut and over-lap. In this study, the amount of heat input, which is determined by the welding current, voltage, speed and weaving conditions is calculated through numerical methods. Furthermore, the heat input distribution as a two-dimensional heat source was observed when applied to each groove. Therefore, a heat input control algorithm is suggested to prevent the defects generated from undercut or over-lap, which was verified through an analysis of the heat input distribution.

Key Words : 토치 위빙(Torch Weaving), 아크 용접(Arc Welding), 가우시안 분포(Gaussian Distribution), 입열 분포(Heat Input Distribution)

1. 서론

연속적으로 공급되는 심선과 모재 사이에 전기적인 아크를 발생시켜 심선과 모재를 녹여 접합시키는 용접 방법인 GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 자동화의 유연성과 현장 적응성 때문에 용융 용접 중 가장 널리 사용되고 있다. 이 때 발생하는 아크는 직접적으로 모재에 입열을 가하므로, 아크의 길이, 아크 반경, 이에 따른 아크의 온도 분포 등에 의해 모재 표면이나 모재 내부의 온도 변화가 크게 영향을 받는다. 이러한 온도 변화는 결국 용융지 형상과 열 영향부 크기, 용접부와 용접부 부근의 화학적 조성 등의 물리적, 금속적 특성으로 나타나게 되고, 이것은 용접 품질을 결정하는 주요한 인자가 된다. 따라서 용접 공정이 갖는 복잡성과 비선형성에도 불구하고, 아크 현상을 이해하려는 연구와 더불어 용접 대상물의 온도 분포를 해석적으로 예측하려는 여러 연구가 필요하게 되었다. 그러나 대부분의 연구들이 비드온 용접의 해석으로써 그루브나 필럿에서 행해지는 실제 용접 현상을 제

현하기에는 그 적용 범위가 제한적일 수 밖에 없었고, 필럿 용접에서 일반적으로 행해지는 위빙 용접에 관한 입열 변화 해석은 아직까지 연구 사례가 없는 상태이다.

따라서, 본 연구는 위빙 용접에서의 입열 분포에 따른 용융지 형성 과정과 필럿 용접에서의 용접 현상을 이해하고, 이를 보다 나은 용접 품질을 얻기 위한 입열량 제어의 기초로 삼고자 위빙 용접시의 그루브 표면의 입열 분포를 알아보았다. 수치 해석 방법을 통해 위빙 조건에 따른 용접 전류, 용접 전압 변화를 해석하였고, 가우시안 분포를 갖는 열원에 대한 그루브 표면의 입열 분포를 V 그루브와 U 그루브에 적용하여 해석하고 그 결과를 고찰하였다. 이를 기초로, 위빙 끝단에서 언더컷 및 오버랩의 결합 발생을 방지하기 위한 용접 전압 조절 알고리즘을 제안하였다. 아울러 제안된 모델의 성능을 그루브 표면의 입열 분포 해석을 통해 검증하였다.

2. 용접 전류와 전압의 수학 모델링

용접 과정에서 아크 길이의 변화는 용접 전류 값을 결정하는 중요한 요소이다.

아크 길이는 아크 특성식, 전력 특성식, 그리고 아크 평형식을 통하여 결정된다. 여기에 용융 속도식과 심선 둘출식을 더하면, 용접 전류 값을 식 (1)^[1]로 얻을 수 있다.

$$K_0 \frac{d^2 I}{dt^2} + (bK_0 I^2 - K_1) \frac{dI}{dt} + aI + b(L - K_2 - K_1 I) I^2 = F_r - \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

여기서, $K_0 = H/\beta$, $K_1 = -(R+\alpha)/\beta$, $K_2 = (V_{OC} - V_0)/\beta$ 이고, I 는 평균 용접 전류, V_{OC} 는 개회로 전압, R 은 회로 저항, H 는 인덕턴스, F_r 는 심선 송급 속도, L 은 텁-모재간 거리이며, a , b , V_0 , α , β 는 상수이다. 식 (1)에 $V_0 = 15.7$ V, $\alpha = 1/45$ V/A^[2], $\beta = 0.7$ V/mm^[3], $V_{OC} = 26.53$ V, $R = 1/42$ Ω, $a = 0.3$ ^[3], $b = 0.00005$ ^[3], $H = 0.00016$ H를 상수로 결정하면, 전류 변화는 텁-모재간 거리와 심선 송급 속도의 함수가 된다. 여기서 심선 송급 속도가 일정할 때, 위빙 조건과 용접 속도에 따라 변하게 되는 텁-모재간 거리와 텁-모재간 거리 변화율(dL/dt)에 의해 전류가 결정된다.

실제적인 V 그루브 위빙 용접에서, 그루브 단면은 용융지가 형성되면서 V 형태에서 4 차 함수의 U 형태로 바뀌게 된다. 그루브 각이 90°인 아래보기 V 그루브 용접에서, 용융지는 아크 때문에 위빙 폭 보다 넓게 형성되고, 용접 순간에 그루브 단면적은 일정하게 유지된다고 가정하면, 식 (2)를 그루브 형상으로 얻을 수 있다. 여기서, z 는 그루브 높이, s 는 약 0.0038, m 은 0, p 는 약 2.06mm이다.

$$z = s(x - m)^4 + p \quad (2)$$

U 그루브에서 용접선 바로 위의 텁-모재간 거리를 20 mm로 하고, 용접 속도 4 mm/sec, 위빙 폭 8 mm, 위빙 주파수 1 Hz, 심선 송급 속도를 5.5 m/min로 정하면, 식 (1)의 비선형 미분방정식을 수치 해석을 통해 풀 수 있다. 그림 1은 그 해석 결과로 시간에 따른 용접 전류와 아크 길이의 변화이다. 용접 전류는 토치가 위빙 끝단으로 향할 경우 서서히 증가하다가 위빙 중심으로 나올 경우에 갑자기 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 위빙 끝단 부근에서는 위빙 속도 변화가 텁-모재간 거리 변화에 따른 아크 길이 변화, 전류 변화에 따른 용융 속도 변화보다 항상 크기 때문인 것으로

설명할 수 있다. 아크 길이는 위빙 끝단 부근에서 가장 작아지고, 용접선 부근에서 가장 커진다는 것을 관찰할 수 있다. 이는 위빙 끝단에서 아크 반경이 작아져 높아진 전류와 더불어 모재를 집중적으로 가열하는 요인이 됨을 의미한다. 한편, 용접 전압은 정전압 모드의 전력 특성 때문에 전류 변화에 비해 변화폭이 매우 작아 거의 일정한 값이 됨을 알 수 있었다.

이를 통해 얻어진 전류와 전압값은 표면 입열 분포 해석시 입열량을 결정하는데 사용되게 된다.

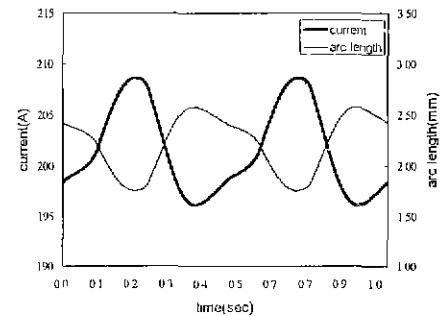


Fig. 1 Current and arc length variation with time

3. 표면 입열 분포

3.1 가우시안 분포

실제적으로 열원은 점이 아니기 때문에 2 차원 가우시안(Gaussian) 분포로 열원을 가정하였다. 분포의 99% 영역까지를 입열 지름으로 한 입열 분포식은 식 (3)과 같으며, 이 때 위빙 중 입열 지름은 아크 길이와 1 차 선형 비례 관계($R = 0.4L_a$)가 있다고 가정하였다^[4]. 여기서, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 은 아크 중심으로부터 거리이며, η 는 아크 효율(arc efficiency)로 0.75의 값을 사용하였다. $Q = VI$ 는 입열량을 나타내고, k 는 분포 계수로서 1/4.6의 값을 사용하였다. 그리고 R 은 용접 순간의 입열 반경이다.

$$q(r) = \eta \frac{Q}{k\pi R^2} \exp\left(-\frac{r^2}{kR^2}\right) \quad (3)$$

3.2 그루브에서 입열 분포

V 그루브에서 위빙 할 경우의 아크 길이와 형태는 그림 2와 같다. 아크 길이는 위빙 중심에서 4.11mm, 위빙 끝단에서 1.32mm로 나타났다. 그림 3은 입열 분포를 보여준다. 이 때의 최대 입열값은 1105 Joule/mm²였고, 평균값은 24.16 Joule/mm²였다. 토치가 위빙 끝단으로 이동할 경우의 입열량이 토치가 위빙 중심으로 이동할 경우에서보다 높은 값

으로 나타났다. 이는 토치가 위빙 끝단을 향할 경우 전류가 커져 입열량이 증가하고, 토치가 위빙 중심을 향할 경우에는 전류가 급속히 감소하여 입열량이 줄어 드는 현상에 기인한다. 또한 위빙 끝단에서는 아크 길이가 작고 아크가 닿는 부위도 작아, 이것이 전류의 상승과 더불어 위빙 끝단에서 입열을 집중시키는 요인으로 작용하였다. 따라서 위빙 끝단의 용융이 더욱 진행되고 그루브 형태는 U 모양을 갖게 된다.

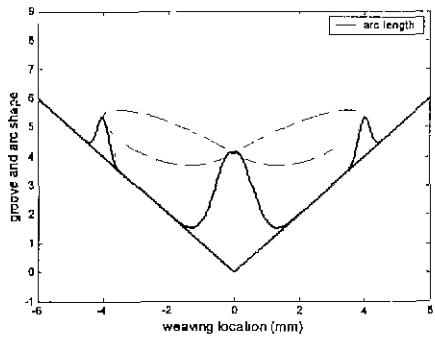


Fig 2. Groove and arc length on V groove

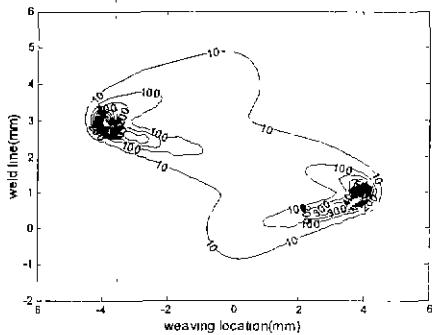


Fig 3 Heat input distribution on V groove

실제 용접 중에 발생하는 U 그루브의 경우에 대한 위빙 중 아크 길이와 형태를 그림 4에 나타내었다. U 그루브 형태는 식(2)에서 가정한 것으로 하였고, 이때의 아크 길이는 위빙 중심에서 2.44mm, 위빙 끝단에서 1.81mm로 나타났다. 그림 5는 이 경우의 입열 분포를 보여준다. 위빙 끝단에서, 아크가 닿는 부위가 V 그루브의 경우보다는 커서 입열은 V 그루브보다 작게 나타났다. 그러나 여전히 입열이 위빙 끝단에 집중되고 있음을 알 수 있다. 최대 입열값은 460.5 Joule/mm²이고, 평균값은 25.93 Joule/mm²로 나타났다.

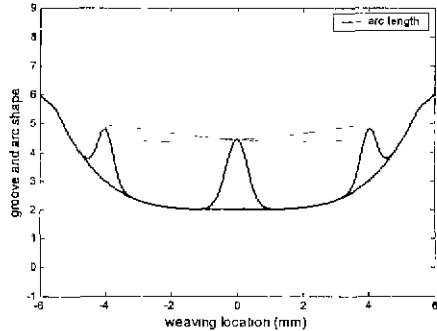


Fig 4 Groove and arc length on U groove

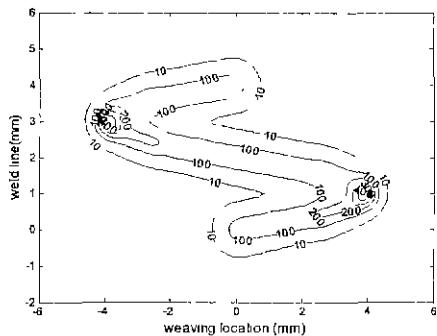


Fig 5 Heat input distribution on U groove

이상의 모의 실험에서 위빙 끝단의 입열량은 평균보다 최대 3 배 이상 높은 값을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 입열 집중은 그루브 각이 작을수록, 위빙 폭이 클수록 더욱 크게 되며, 이는 실제 용접에서 위빙 폭을 제한 시킬 뿐만 아니라 아크 센서 적용 시 추적 오차에 따른 언더컷의 용접 결함을 수반하게 된다. 따라서 위빙 끝단에서 단위 면적당 입열량을 줄이는 재어가 필요함을 알 수 있다.

4. 용접 전압 조절

4.1 용접 전압 조절

용접 전압은 아크 길이에 직접적인 영향을 미치며 아크 길이에 따라 아크 반경이 변화므로 높은 용접 전압은 큰 아크 반경을 만든다고 할 수 있다. 따라서 위빙 끝단에서 용접 전압을 높여 아크 길이를 크게 하면, 아크 반경이 커져 동일한 입열에 대해 단위 면적당 입열량이 작아지게 된다. 이와 같은, 입열 집중을 막기 위해 제안한 용접 전압 제어 함수는 식(4)와 같다. 여기서 V_{impul} 는 용접 인가 전압, V_{ref} 는 기준 용접 인가 전압, λ 는 조절 폭을 결정하는 상수이다. 그림 6은 $V_{\text{ref}} = 22$ V, λ 를 0.02으로 정했을 경우의 아크 전압의 변화이다.

$$V_{\text{input}} = V_{\text{ref}} \times (1 + \lambda - \lambda \cos 4\pi t) \quad (4)$$

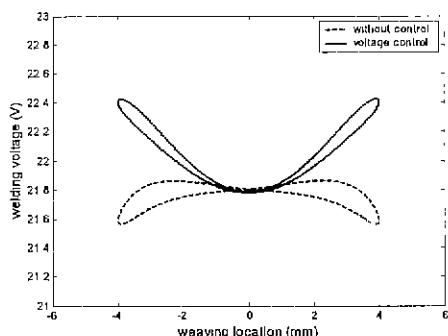


Fig. 6 Arc voltage variation with voltage control

4.2 표면 입열 분포

U 그루브의 경우에 대해 용접 전압을 조절하였을 때, 위빙 중 아크 길이와 형태는 그림 7 과 같다. 이 때의 아크 길이는 위빙 중심에서 2.44 mm, 위빙 끝단에서 3.06 mm로 나타나 용접 전압 조절을 통해 위빙 끝단의 아크 길이가 커졌음을 알 수 있다.

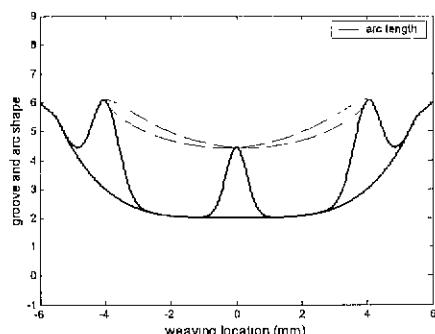


Fig. 7 Arc length with voltage control

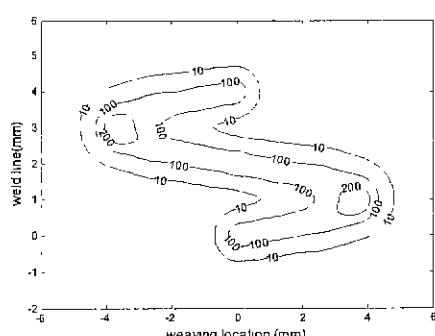


Fig. 8 Heat distribution with voltage control

그림 8 은 이 경우의 입열 분포를 보여주며, 이를 그림 5 의 용접 전압 조절을 하지 않은 경우와 비교해 보면, 전체적으로 아크 전압이 커져 단위 면적당 입열량의 평균은 26.52 Joule/mm²로 다소 커졌지만, 위빙 끝단에서는 아크 반경이 커지면서 단위 면적당 입열량이 약 반(285.6 Joule/mm²)으로 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서 용접 전압 조절을 통해 위빙 끝단의 입열 집중을 줄일 수 있음을 검증할 수 있었다.

5. 결론

팁-모재간 거리와 팀-모재간 거리 변화에 따른 아크 전류 변화를 나타내는 비선형 미분 방정식과 위빙 조건을 결합하여, U 그루브에서의 위빙 중 용접 전류 변화, 아크 길이 변화와 용접 전압 변화를 살펴 보았다. 위 결과를 토대로 용접 전류와 용접 전압으로 결정되는 입열량을 계산하였고, 이를 2 차원 가우시안 분포를 갖는 열원으로 가정하여 V 그루브와 U 그루브에 적용하였을 때의 입열 분포선 및 최대 입열값을 계산하였다. 그루브 단위 표면에 대한 입열 분포 해석에서, 위빙 끝단에 입열 집중이 생김을 알 수 있었다. 따라서 위빙 끝단에서 이러한 입열 집중을 막기 위해, 위빙 끝단에서 아크 전압을 높여 아크 길이 회복을 돋는 용접 전압 조절 알고리즘을 제안하였다. 용접 전압 조절 알고리즘을 U 그루브 위빙에 적용하였을 경우 위빙 끝단의 입열량을 효과적으로 줄일 수 있음을 표면 입열 분포 해석을 통해 검증할 수 있었다.

참고문헌

1. E. Murakami, K. Kugai And H. Yamamoto, "Dynamic Analysis of Arc Length and its Application to Arc Sensing", Sensors and Control Systems in Arc Welding, pp 216-226, 1994
2. M. E. Shepard, G. E. Cook, "A Nonlinear Time-Domain Simulation of Self-Regulation in Gas-Metal Arc Welding", International Trends in Welding Science and Technology, pp 905-910, 1993
3. J. Nortish, Advanced Welding Processes, p147
4. J. F. Lancaster, The Physics of Welding, Pergamon Press ,1984