아크 출력과 동저항의 통계적 분석을 활용한 아크 안정성 및 비드 품질에 따른 용접 건전성 평가

박 주 용^{*,†} · 송 상 호^{*}

^{*}한국해양대학교 조선해양시스템공학부

Study on the Evaluation of Weld Soundness Based on Arc Stability and Bead Quality using the Statistical Analysis of Arc Power and Arc Dynamic Resistance

Ju-Yong Park^{*,†} and Sang-Ho Song^{*}

^{*}Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.,
Busan, 49112, Korea

[†]Corresponding author : jjpack56@gmail.com

(Received August 1, 2019 ; Revised September 2, 2019 ; Accepted September 11, 2019)

Abstract

The goal of this study was to evaluate weld soundness based on arc stability and bead quality using a statistical analysis of the arc power and the arc dynamic resistance. To achieve this, 50 passes of welding experiments were carried out. The welding current and voltage for every pass were obtained at a sampling rate of 5,000 Hz. The weld beads were classified into 4 quality levels by visual inspection and X-ray tests. The measured arc current and voltage were converted to a dimensionless value that was independent of the value itself, and then mapped onto a non-dimensional current-voltage plane. The welding data in the non-dimensional current-voltage plane were grouped into 50 areas ($A_0 \sim A_{49}$) surrounded by the lines of constant arc power and arc dynamic resistance, which changed every $\pm 2\%$ of mean value. The number of welding data points ($N_0 \sim N_{49}$) in each group were distributed in a quasi-lognormal distribution form. When this distribution skewed more leftward, the data in the center became denser and the arc became more stable. The statistical analysis of the entire welding data distribution of 50 passes showed that the cumulative probability=0.8 at the percentile $\alpha = 0.22$ was an indication of weld soundness. The cumulative probability for a good bead was higher than 0.8, and was lower for a poor bead. This tendency remained consistent in a piecewise analysis of 125 sections of each bead. The sections with irregular bead or pores showed a much lower cumulative probability than 0.8, while sound bead sections had higher than 0.8, that is, a higher arc stability. The piecewise analysis makes it possible to evaluate weld quality in real time during welding

Key Words : Welding current and voltage, Arc stability, Arc power, Arc dynamic resistance, Weld quality, Statistical analysis

1. 서 론

용접공정은 선박 및 해양플랜트 건조에 있어서 가장 중요한 공정으로 구조물의 품질을 결정짓는 중요한 요

소이다. 용접품질은 비드 형상과 용접부의 결함 유무에 의해 일차적으로 결정되며 비파괴검사 및 기계적 성질 시험 등의 여러 가지 시험과 검사에 의해 결정된다.

아크 안정성은 비드 형상과 용접결함에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 임의의 아크 전류값에 대해 적정

한 범위의 아크 전압이 유지될 때 확보된다. 아크는 일종의 방전 현상으로 그 자체가 매우 불안정한 물리 현상이며 GMAW나 FCAW와 같은 소모성 전극이 사용되는 용접공정의 경우 금속 이행으로 인해 아크 길이가 계속 변화됨에 따라 아크 전류와 아크 전압은 항상 변화하게 되며 용접금속 이행의 양상에 따라 그 변화되는 형태도 달라진다^{1,2)}. 또한, 같은 용접금속 이행에서도 전류의 크기가 달라지면 안정된 아크를 보여주는 아크 전압의 범위는 달라진다. 아크 안정성에 관련된 연구로는 Y.J.Park(1998)³⁾ 등은 용접조건에 따른 비드 형상, 스패터 발생량과 아크 신호 특성 등의 다양한 용접 변수를 고려하여 FCAW의 아크 안정성 평가를 하고자 하였고 G.G.Koo(2014)⁴⁾ 등은 전압과 전류 진동의 정도로 아크 안정도를 추정하는 모델을 개발을 통해 최대 전력을 투입할 수 있는 알고리즘을 구현하고자 하였다. S.K.Kang(1997)⁵⁾ 등은 용접공정을 해석하고자 하는 주제를 따라 스패터 포집기를 이용한 아크 안정성을 판별하고자 하였고 단락 이행 상태의 특성에 주목하여 연구를 진행하였다. H.W. Shina(1995)⁶⁾ 등은 와이어 송급 속도의 변동에 따른 아크 안정성과의 상관관계를 실험을 통해 분석하였다. 아크 안정성에 대해 상기와 같은 다양한 연구가 진행되었지만⁷⁻⁹⁾, 아직도 용접전류와 용접전압의 변화에 따른 정성적인 평가에 의존하고 있고 정량적인 척도에 의해 평가하는 기준은 아직 마련되어 있지 않다.

한편 아크 전류와 아크 전압의 곱으로 표현되는 아크 출력은 용접에너지로서 용접 비드의 크기와 형상을 좌우한다. 즉, 아크 전류에 대한 아크 전압이 적정범위에 있어도 출력이 계속 변하게 되면 용접 비드의 크기와 형상이 일정하지 않게 되어 용접품질을 하락시키는 요인이 된다. 따라서 용접 중 아크 출력을 일정 범위 내로 유지하는 것이 용접품질을 충족할 수 있는 요건이 된다. 본 연구에서는 용접 중의 용접전류와 용접전압 신호를 고속의 샘플링 속도로 측정하여 그 궤적을 전류-전압 평면에 나타내고 이 데이터를 적절히 가공하고 통계적으로 분석하여 안정된 아크와 일정한 출력을 유지하는 기준을 제시하는 것이 목적이다.

2. 아크 동저항 및 아크 출력

아크 안정성은 아크 길이와 밀접한 관련이 있으며 아크 길이는 일종의 저항으로 용접 시 지속적으로 변화하므로 아크 동저항으로 일컬어진다. 식(1)은 옴의 법칙으로 임의의 저항값일 때 저항값에서 이 관계는 전류-전압 평면에서 한 직선으로 나타나며 아크 동저항이 클수록 기울기가 큰 직선으로 나타난다. 한편, 식(2)는

아크 출력이며 임의의 아크 출력값에서 아크 출력 곡선은 전류-전압 평면에서 쌍곡선으로 나타나며 아크 출력이 클수록 원점에서 멀어진 곡선으로 나타난다.

$$V = R \cdot I \quad (1)$$

$$P = V \cdot I \Rightarrow V = \frac{P}{I} \quad (2)$$

Fig. 1은 평균전류 200.5 A 전압 28.79 V인 0104 시편의 용접 동안 5,000Hz의 샘플링 속도로 측정한 아크 전류 및 아크 전압값을 (x, y) 좌표로 하는 용접 데이터의 분포를 전류-전압 평면에 나타낸 그래프이며 중심점은 평균 전류 및 평균 전압을 나타내는 상태의 용접데이터로 볼 수 있다. 여기에서 직선으로 표시된 R_c , R_r , R_l 선은 각각 동일한 아크 동저항을 나타내는 등아크 동저항선이며 점선으로 표시된 P_c , P_u , P_b 선은 등아크 출력선을 나타내며 각 선 옆에 표시된 숫자는 아크 출력값과 저항값을 나타낸다. Fig. 1에서 중심점을 지나는 직선 부근에 많은 점이 위치할수록 아크 길이가 평균 길이로 일정하게 유지된 것을 의미하며 안정된 아크로 간주할 수 있다. 마찬가지로 아크 출력에서 Fig. 1의 중심점을 지나는 등아크 출력선 근처에 많은 점이 위치할수록 아크 출력이 일정 범위 내로 유지됨을 의미하며 이는 용접품질을 양호하게 유지하는 기준이 된다. 즉, Fig. 1의 전류-전압 평면에서 용접데이터가 중심부에 많이 분포할수록 아크 안정성과 용접품질이 양호한 상태임을 알 수 있다.

Fig. 1에서 용접전류 및 용접전압은 요구 용접상황에 따라 그 값의 크기는 달라질 수 있으므로 데이터의 위

Fig. 1 Distribution of welding data and lines of arc power and arc resistance mapped into the current-voltage plane

Fig. 2 Distribution of welding data and lines of arc power and arc resistance mapped into the nondimensionalized current-voltage plane

치보다는 분포상태를 평가하는 것이 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 점들이 값의 크기에 무관하게 2차원 평면에서 중심점으로부터 떨어진 정도를 나타내는 값으로 무차원화하여 표현하였다.

$$V_n = \frac{V - V_m}{V_m} \quad (3)$$

$$I_n = \frac{I - I_m}{I_m} \quad (4)$$

$$V_n = \frac{R}{R_m}(I_n + 1) - 1 \quad (5)$$

$$V_n = \frac{P}{P_m} \frac{1}{(I_n + 1)} - 1 \quad (6)$$

식(3)과 식(4)는 전류 및 전압값을 무차원값으로 변환하는 식이다. 여기서 V_n , I_n 은 무차원화된 아크 전압, 아크 전류이고, V_m , I_m 은 평균 아크 전압과 평균 아크 전류이다. 식(3)과 식(4)을 식(1)과 식(2)에 대입하면 식(5), 식(6)으로 표기된다. Fig. 2는 식(3)~식(6)을 적용하여 Fig. 1에 나타난 용접데이터 분포와 등아크 동저항선 및 등아크 출력선을 무차원화된 전류-전압 평면상에 나타낸 것이다.

3. 용접실험

3.1 실험 방법

본 연구에서 수행된 용접실험은 연강 시편에 1.4mm Flux Cored Wire, 100% CO₂를 사용하였으며 20개의

시편에 시편 당 4 패스, 총 50 패스의 용접을 수행하였다. 용접조건은 용접전류 160A~220A, 용접전압 23~27V, 용접속도 25~35cm/min, 보호 가스 유량 25l/min가 적용되었으며 시편의 크기는 250×100×10mm이고 V 그루브 이음부의 맞대기 용접을 하였다.

3.2 용접결과

Table 1은 50패스 용접비드 일부에 대한 용접전류, 용접전압, 비드 모양 및 비드 품질을 나타낸 표이다. 비드 품질은 비드 외관과 방사선투과 검사결과를 바탕으로 양호한 순서로 A~D 등급으로 평가하였다. 본 연구에서는 5,000Hz의 샘플링 속도로 용접데이터를 측정하였으며 불안정한 영역인 아크의 시작, 종료 영역 약 5mm는 제외하고 정상 상태에 도달한 용접상태의 데이터를 분석 대상으로 하였으며 패스 당 데이터 수는 대략 800,000개 내외이다.

4. 용접데이터의 통계적 분석 및 검토

FCAW와 같이 소모성 와이어를 사용하는 아크용접은 와이어의 용융으로 인해 아크 길이는 계속 변화하며 이에 따라 용접전류 및 전압도 일정 범위 내에서 변화하게 된다. Fig. 1 또는 Fig. 2에서 용접데이터의 분포가 중심영역에서 벗어난 부분이 증가할수록 아크의 불안정성과 아크 출력의 불균일성이 커진다.

본 연구에서는 용접데이터의 분포를 통계적으로 분석하기 위해 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 무차원화된 전류-전압 평면의 데이터 중심점 즉, 평균 전류와 평균 전압을 나타내는 점을 지나는 아크 출력선 및 아크

Table 1 Bead shape and quality level according to current, voltage mean

Specimen No	I_Avg	V_Avg	Bead shape	Bead quality
0104	200.5	28.79		A
0204	197.91	28.64		A
1103	194.97	28.65		B
1201	186.59	28.73		B
1101	185.48	28.78		C
1401	190.42	28.65		C
0301	218.75	28.55		D
0801	200.28	28.66		D

Fig. 3 Definition of 50 weld data areas in the nondimensionalized current-voltage plane

동저항선에서 아크 출력 및 아크 동저항값이 $\pm 2\%$ 씩 증감된 아크 출력선 및 아크 동저항선인 P_1 , P_{-1} , R_1 , R_{-1} 로 둘러싸인 용접데이터 영역을 A_0 , 거기에 $\pm 2\%$ 추가로 더 증감된 아크 출력선 및 아크동저항선인 P_2 , P_{-2} , R_2 , R_{-2} 로 둘러싸인 용접데이터 영역에 A_0 영역을 뺀 영역을 A_1 , 계속하여 동일한 방식으로 $\pm 2\%$ 추가로 증감된 영역을 정의하였다. 그 다음 각 영역을 지나 는 용접데이터의 수를 전체 데이터 수로 나눈 값을 구 하면 이 값은 용접데이터가 각 영역을 지나 는 확률에 해당된다. A_{48} 밖의 영역은 한 영역으로 간주하여 A_{49} 로 정의하였다. 상기 과정을 Fig. 3에 나타난 용접데이터 분포에 적용하면 Table 2와 같이 나타나며 이는 각 영역을 지나 는 용접데이터의 확률분포표에 해당된다. 이 분포를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같으며 이는 로그 정규분포와 매우 유사하다. Fig. 4의 유사로그정규분포에서 왼쪽으로 치우치는 비대칭성(Leftward skewness)가 클수록 용접 중 아크전류-아크전압으로 이루어진 용접데이터가 평균영역 부근에 많이 밀집되어 있음을 뜻하며 이는 아크 안정성 및 출력 균일성이 높다는 것을

Fig. 4 Probability distribution of welding data

Fig. 5 Cumulative probability distribution of welding data

의미한다.

Fig. 5는 Fig. 4의 용접데이터 분포의 누적분포를 나타낸 그래프이다. Fig. 4와 Table 2를 살펴보면 A_{10} 영역까지 데이터의 분포확률은 정상적인 비드가 비정상 비드보다 높았으나 그 이후에는 낮아진다. 즉, N_{10} 까지

Table 2 Probability distribution of welding data in 50 weld data areas of each welding pass

Pass No	N(Area(%))													Bead quality
	N_0	N_1	N_2		N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}	N_{13}		N_{47}	N_{48}	N_{49}	
0104	1.4	4.2	6.8		7.1	5.9	4.8	3.9	3.0		0.0	0.0	0.0	A
1001	1.2	3.6	6.1		7.0	5.9	5.2	4.2	3.4		0.0	0.0	0.0	A
1504	1.7	5.0	7.8	...	6.8	5.7	4.7	3.6	2.6	...	0.0	0.0	0.0	A
0101	1.0	3.2	5.4		7.1	6.2	5.3	4.5	3.7		0.0	0.0	0.0	C
0801	0.9	2.5	4.2		6.2	5.6	4.9	4.3	3.6		0.1	0.1	0.2	D
2001	1.1	3.3	5.6		6.9	6.1	5.3	4.4	3.7		0.0	0.0	0.0	C

Fig. 6 Data percent of each area and quality level of bead of specific specimen

의 누적확률이 정상과 비정상비드에서 가장 차이가 많이 되며 그 값은 0.8을 기준으로 구분된다. 이는 전류-전압 분포에서 평균 전류 및 평균 전압의 $\pm 22\%$ 이내의 영역에 전체 데이터의 80% 이상이 분포해 있으면 정상 비드로 간주할 수 있음을 의미한다. Fig. 4의 분포를 유사 로그정규분포로 가정하면 백분위수 22% ($\alpha = 0.22$)에서의 누적분포값=0.8이 정상비드와 비정상비드를 구분하는 기준이 된다. Fig. 6은 전체 50패스에 대해 $\alpha = 0.22$ 에서의 누적확률을 나타낸 결과이며 누적확률=0.8을 경계로 하여 그 이상은 정상 비드이며 여기에서 멀어질수록 품질이 나빠지는 비정상 비드임을 나타내고 있어 이 기준이 아크 안정성 및 용접품질 평가의 척도로 유효함을 알 수 있다.

한편 불량으로 평가된 비드의 경우 비드 전체가 아니라 부분적으로 기공이나 불규칙 비드 형상이 발생하여 불량으로 평가된 경우가 많다. 본 연구에서는 상기 평가 기준을 한 비드 내에서 정상적인 부분과 불량인 부분을 평가하는 데에도 유효한지를 조사하였다. 이를 위해 한 비드를 125구간으로 나누고 Fig. 7~8에서와 같이 각 구간에 대해 $\alpha = 0.22$ 에서의 누적확률을 조사하고 각 구간의 비드 형상 및 결함 여부와 비교하였다. Fig. 7~8에서 맨 위 그림은 X-ray검사결과, 그 아래는 비드그림 및 분석결과를 나타내고 있다. 분석 결과, 정상적인 비드 형상을 나타내는 구간은 $\alpha = 0.22$ 에서의 누적확률이 0.8을 상회하는 값을 나타내었으나 불규칙한 비드 형상이나 기공이 나타난 비드 구간에서는 0.8에 미치지 못하였으며 불량의 정도가 심할수록 누적확률값은 더욱 낮은 값으로 나타났다. 이 결과는 상기의 평가기준으로 용접 중에 실시간으로 용접 불량 여부를 평가할 수 있음을 보여준다. 본 연구는 무차원화된 데

Fig. 7 Piecewise quality analysis of 125 sections in 0704 weld bead

Fig. 8 Piecewise quality analysis of 125 sections in 0301 weld bead

이터로 수행하였기 때문에 용접전류 및 용접전압의 크기에 무관하게 적용할 수 있을 것으로 판단하지만 데이터가 220~280A의 중전류 구간에 속해있어 용접금속 이행 형태가 다른 저전류역이나 고전류역에서는 별도의 검증과정이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 보호 가스나 와이어 직경이 다른 경우에도 본 연구 결과를 그대로 적용하기는 어려울 것으로 사료 된다. 하지만 본 연구의 방법론은 소모성전극을 사용하는 GMAW, FCAW 공정 일반에 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 아크 전류-전압 평면에서 용접데이터의 분포상태를 통계적으로 분석하여 양호한 아크 안정성과 균일한 용접출력에 근거한 용접 건전성 평가의 정량적 기준을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 아크 전류-아크 전압 평면상의 용접데이터를 평균 값에서 떨어진 정도를 나타내는 무차원값으로 변환하여 아크 전류 및 아크 전압값의 크기와 무관하게 데이터의 분포상태를 분석할 수 있었다.
- 2) 무차원화된 아크 전류-아크 전압 평면상에서 데이터 중심점으로부터 떨어진 순서대로 영역 50개를 정의

하고 각 영역을 통과하는 용접데이터 수의 분포를 조사한 결과 유사로그정규분포를 나타내었으며 오른쪽으로 치우치는 비대칭성이 클수록 양호한 용접 건전성이 나타나는 관련성을 나타내었다.

3) 용접데이터의 유사로그정규분포도에서 백분위수 22%($\alpha=0.22$)에서의 누적확률값=0.8이 정상 비드와 불량 비드를 구분하는 기준이 됨을 알 수 있었다.

4) 각 비드를 125구간으로 구분한 후 ' $\alpha=0.22$ 에서의 누적확률=0.8' 기준을 적용해 본 결과 한 비드 내에서도 구간별로 정상 여부의 판정이 가능하였으며 이를 통해 용접 중 실시간으로 아크 안정성 및 용접품질 평가가 가능함을 보여주었다.

ORCID: Ju-Yong Park: <https://orcid.org/0000-0003-4571-0017>

References

1. S. H. Rhee, Arc Characteristic and Application of the Arc Welding, *J. Korean Weld. Join.* 10(1) (1992) 7-11.
2. K. M. Bae and S.M.Cho, A Study on the Development of Arc Length Estimation Method in FCAW, *J. Korean Weld. Join.* 27(3) (2009) 67-72.
3. Y. J. Park, K. S. Kim and K.Y.Choi, A Study on Evaluation of Arc Stability of FCAW Process, *J. Korean Weld. Join.* (1988) 198-200.
4. G. G. Koo, J. J. Jung, G. H. Kim, and S. W. Kim, Arc stability factor estimation model, *Institute of Control, Robotics and Systems*, (2014) 67-70.
5. S. K. Kang, H. S. Moon and S. J. Na, A study on determining arc stability using weight of spatter, *J. Korean Weld. Join.* 15(6) (1997) 41-48.
6. H. W. Shin, Y. B. Choi, Y. H. Sung and H. S. Chang, Effects of Wire Speed Fluctuation on Arc Stability in GMA Welding, *J. Korean Weld. Join.* 13(4) (1995) 85-102.
7. M. J. Gang, S. H. Lee and J. J. Yoo, Development of Estimation Model for Arc Stability Considering Arc Extinction with Multiple Regression Analysis in CO₂ Arc Welding, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.* 24(8) (2000) 1885-1898.
<https://doi.org/10.22634/KSME-A.2000.24.8.1885>
8. T. Mita, A. Sakabe and T. Yokoo, Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding, *Weld. Int.* 2 (1988) 152-159.
9. Y. J. Won, K.S. Boo and H.S.Cho, Real-Time Estimation of Arc Stability in GMAW Process, *J. Korean Weld. Join.* 8(1) (1990) 31-42.