아크 용접의 열화상을 이용한 용접품질 추정에 관한 연구

박 주 용^{*,†} · 김 우 성^{*}

^{*}한국해양대학교 조선해양시스템공학부

A Study on the Estimation of Weld Quality Using the Thermal Images During Arc Welding

Ju-Yong Park^{*,†}, and Woo-Seong Kim^{*}

^{*}Dept of Naval Architecture and Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Busan, 49112, Korea

[†]Corresponding author : jypark@kmou.ac.kr

(Received January 8, 2018 ; Revised January 24, 2018 ; Accepted February 19, 2018)

Abstract

The thermal image of weld pool and its adjacent area contains many useful information related to the weld quality. Occurrence of weld defects such as porosity, slag inclusion, or crack or during welding causes the change of thermal distribution adjacent area where the weld defects occur. The accidental root gap change makes the different temperature distribution also. In this research the various thermal images of flux cored arc welding were obtained by use of a high-speed infrared camera. The thermal image of weld area 2cm behind the arc shows thermal image of bead and the corresponding signals of welding current and voltage. The 4 kinds of specimens, V-groove specimens without root gap, with changing root gap, filled partly with slag pieces and coated partly with grease at intervals of 30 mm were used. The thermal images for each case were analyzed by the specific evaluation values, Wt and At, extracted from the thermal image. Wt value indicates the width over the specific thermal intensity and At indicates the area which means the summation of the thermal intensity over the specific value. The analysis result showed a meaningful change of these values when any weld defects occurred. The change of At values was more prominent than the change of Wt value. It means the weld quality can be monitored by the change of At values from the thermal image of weld area during welding.

Key Words : Arc welding, Thermal image, Estimation of weld quality, Weld defect, Bead shape

1. 서 론

용접 시 측정 가능한 용접신호를 용접품질 예측에 활용하고자 하는 시도는 꾸준히 이루어져왔다¹⁻²⁾. 이를테면 J.Y.Yoon (2015)는 용접 전류 파형과 펄스 주파수를 통해 용접의 품질을 실시간으로 판단하고자 하였다³⁾. 또한 용접시 발생하는 불량을 실시간 감지하기 위하여 전류파형을 모니터링 하여 품질을 실시간 예측하고자 하였다⁴⁾. 한편 용접결함부의 위치를 검출하기 위한 모니터링 변수로 아크 빛의 강도를 이용한 T.D.Cho (2000)의 연구도 발표된 바 있다⁵⁾. D.S.Hwang(2012)

은 실시간 Arc 용접품질 평가 시스템과 더불어 3차원 레이저 센서 등을 활용하여 용접비드형상을 연속적으로 측정하여 관리하는 융합시스템 적용을 제시하였다⁶⁾. 용접품질 예측에 관한 연구는 아크광이나 외부센서를 이용한 경우가 소수 있긴 하지만 대부분은 전류, 전압 신호의 분석을 통해 이루어져왔다. 전류, 전압 신호를 이용한 품질예측은 별도의 센서를 필요로 하지 않아 매우 편리한 방법이지만 하나 용접결함의 발생여부라든가 비드형상과의 상관관계에는 명확한 기준을 마련하기 어려웠다.

본 연구에서는 용접 시 적외선카메라를 이용해 얻을 수 있는 열화상 이미지가 비드 형상과 용접결함 발생여부와 어떠한 상관관계를 가지고 있는지를 조사하여 열

화상으로부터 용접부의 품질을 예측해보고자 하였다.

2. 비드 주변의 열강도 및 가설

2.1 열강도와 온도의 상관관계

모든 물질은 절대온도 0K 가 넘는 경우 에너지를 방출하며 물질에 따라 방사율은 서로 다르다. 이상적인 흑체는 외부로부터 받은 에너지를 100% 흡수하고 그 대로 방출하여 방사율이 1이 된다⁷⁾. 일반적인 금속의 경우 금속 종류, 산화, 표면 상태에 따라 방사율이 다르며 포착하는 방사 에너지의 주파장 대역에 따라라도 달라진다. 따라서 일정 면적에 대해 해상도에 따라 각 지점의 에너지를 측정하는 IR 카메라의 경우 상이한 방사율 차이로 인해 온도 측정값의 오차가 크므로 직접 온도를 출력하는 것보다 상대적인 열강도를 출력하는 것이 일반적이다.

본 연구에서 사용된 IR 카메라에서 출력하는 열강도와 실제온도 사이의 관계를 조사하기 위해 비드 폭 가장자리 위치에 Fig. 1 (a)와 같이 IR Thermometer와 IR카메라의 초점을 맞춘 후 Fig. 1 (b)와 같이 용접하는 동안 Thermometer와 IR카메라로 온도와 열강도를 동시에 측정하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 1 Calibration test of IR camera

Fig. 2 Relation between thermal intensity and temperature

Fig. 3 Definition of the specific evaluation parameters W_t and A_t

2.2 용접부의 열강도의 평가변수

본 연구에서는 1x256 픽셀의 해상도를 갖는 IR카메라로 초당 300프레임의 속도로 열화상을 촬영하였으며 용접부 중심으로 $0.48 \times 132 \text{ mm}^2$ 영역에 해당되는 각 프레임의 열화상으로부터 Fig. 3과 같은 열강도 분포를 구할 수 있었다. 이 열강도 분포와 용접품질과의 상호 관련성을 도출하기 위해 W_t 와 A_t 의 2개의 평가변수를 도입하였다. W_t 는 특정 열강도(T^*) 이상이 되는 영역의 폭이며 A_t 는 열강도가 T^* 이상되는 영역의 면적으로 그 영역이 함유하는 열에너지와 관련된 변수이다.

비드의 폭과 높이는 비드 내부 및 주변의 온도와 밀접한 관련이 있는 중요한 인자임을 바탕으로⁷⁻⁸⁾ 이 평가변수를 고찰해보면 다음과 같은 3가지의 가설을 세울 수 있다.

1) W_t 는 특정 열강도(T^*)에서의 폭으로 특정온도보다 높은 영역의 폭을 의미하므로 비드 폭과 비례한다고 볼 수 있다.

2) A_t 는 특정 열강도(T^*)보다 높은 영역의 열강도면적으로 그 영역의 열에너지의 크기에 해당된다고 볼 수 있다. 용접 직후의 비드의 덧살이 크다면 덧살이 작을 때보다 많은 열을 함유하고 있으므로 A_t 값은 비드의 덧살, 즉 비드높이와 관련이 있다고 간주할 수 있다.

3) 기공(Porosity), 슬래그 혼입(Slag inclusion), 균열(Crack) 등의 용접결함이 발생한 영역은 금속으로 채워진 주변영역에 비해 상대적으로 열전도율이 낮다. 따라서 결함이 있는 영역이 주변영역보다 함유하고 있는 열에너지가 높을 것으로 간주하는 것은 합리적이다.

3. 용접 실험

3.1 실험 조건

본 연구에서는 NIT사의 Luxcell Core-S IR 카메라, 6축 용접로봇 및 FCAW용접기와 직경 1.4mm의 연강 및 고장력강용 플렉스코어드 와이어와 100% CO₂ 보호가스를 사용되었다.

용접 시편은 0, 1.6, 3.0mm의 갭을 갖는 I-그룹 시편과 거기에 기공과 슬래그 혼입 결함을 유도하기 위해 부분적으로 그리스를 도포한 시편과 슬래그조각을 이음부에 채운 시편 등3종류를 사용하였다. Fig. 4는 3종류의 시편 형상을 보여주며 Table 2는 시편 구분을 위한 시편 넘버링을 보여주고 있다. Table 3은 실험 시 적용되었던 용접조건이다.

Fig. 4 Three kinds of specimens

Table 2 Specimen numbering

Gap	Normal	Coated with grease	Filled with slag pieces
0mm	n01, n02	g01, g02	s01, s02
1.6mm	n11, n12	g11, g12 g13, g14	s11, s12 s13, s14
3mm	n21, n22	g22	s21, s22

Table 3 Welding condition

Parameter	Value	Units
Current	220	A
Voltage	24	V
Travel speed	27	cm/min
Measuring speed	300	Frame/s
Measuring area	0.48*132	mm ²

3.2 분석 소프트웨어

본 연구에서는 열화상의 분석을 위해 IR 카메라 제작사에서 제공하는 NIT Visualization software와 자체 개발한 ThermoAnalyzer의 2가지 소프트웨어를 사용하였다.

Fig. 5에 보여주고 있는 NIT Visualization software는 IR 카메라에서 측정된 열강도 분포를 각 프레임 단위로 제공하며 각 프레임의 최대, 최소 및 평균 열강도 값을 제공한다. 하지만 여기에서 제공하는 정보로는 용접품질의 평가를 위해 2.2절에서 도입한 평가변수에 관한 값을 얻을 수 없으므로 평가변수 W_t 와 A_t 를 분석할 수 있는 프로그램 “ThermoAnalyzer”를 자체 개발하였다. Fig. 6은 ThermoAnalyzer를 통해 W_t 와 A_t 한를 분석하는 화면이다.

4. 결과 및 분석

4.1 비드 형상과 열강도 분포의 관계

2.2절에서 도입한 평가변수 W_t 와 A_t 는 비드폭과 비드높이와 상관관계가 있다는 가설을 세운 바 있다. 이를 검증하기 위해 갭이 서로 다른 시편으로 용접실험을 한 후 용접 시작점으로부터 50, 70, 90, 135, 165, 195 mm 만큼 떨어진 지점에서의 비드 폭과 높이를 측정하여 이를 각각 그 지점에서 W_t 와 A_t 의 값과 비교하였다.

Fig. 5 NIT Visualization software

Fig. 6 Analysis of W_t and A_t for selected data

Fig. 7 Relationship between W_t and the measured bead width

Fig. 8 Relationship between A_t and the measured bead height

Fig. 7은 비드폭과 W_t 의 값을 비교한 그래프이고 Fig. 8은 비드높이와 A_t 의 값을 비교한 그래프이다. 이 그래프를 통해서 비드폭 및 비드높이와 W_t 및 A_t 는 상호 선형관계로 각각 식(1)과 식(2)의 관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 이 값들의 변화를 통해 비드폭과 비드높이의 변화를 실시간으로 추적할 수 있다.

$$y = 2.155x - 2.32 \quad (1)$$

$$y = 13,178x - 78,604 \quad (2)$$

4.2 용접결함과 열강도 분포의 상관관계

가설 3)에 의거해 용접결함 발생 시 열강도 분포의 변화를 조사하고자 이음부의 3 지점에 1cm 길이로 그리스가 도포된 시편과 슬래그 조각으로 채워진 시편으로 용접을 시행한 후 X선 투과시험을 시행하였다. X선 투과시험 결과 g11와 g32의 2개의 시편에서 기공이 발생된 부위를 검출할 수 있었다.

기공이 발생된 부위 1cm와 해당 부위의 전후 1cm 영역의 3지점에 대해 1cm에 해당되는 21프레임의 평균 A_t 값을 조사하였다. 아래의 Fig. 9에서 Fig. 12는 기공이 발생한 위치의 시편 및 X선 투과시험 결과와

Fig. 9 The pore-occurred area of specimen g11

Fig. 10 A_t value at the pore-occurred area of g11

Fig. 11 The pore-occurred area of specimen g32

Fig. 12 A_t value at the pore-occurred area of g32

해당 지점의 A_t 값을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기공이 발생한 영역의 A_t 값이 부근보다 높음을 알 수 있었다.

기공과 슬래그 혼입의 결함을 유도하기 위해 그리스를 도포하거나 슬래그 조각을 이음부에 채웠지만 X선 투

Fig. 13 A_t value at the defect-induced area and the normal area

과시험 결과 g11과 g32 이외의 시편에서는 뚜렷한 결함 흔적을 발견할 수 없었다. 하지만 결함유도 조치를 한 부분에서 X선 투과시험에서 발견되지 않은 미세한 기공이나 슬래그 혼입이 생겼을 가능성도 있다는 판단 하에 결함유도 조치를 취한 시편에 대해 의 A_t 값을 조사하였다. 조사 결과 결함유도 조치를 취한 시편들 중 약 70%에서 결함유도 조치가 취해진 3부분의 A_t 값이 결함유도 조치를 하지 않은 시편의 동일한 위치의 A_t 값 보다 높게 나타났다. Fig. 13은 그 중 대표적인 3개의 시편에 대한 결과를 나타낸 것이다. 이는 결함유도 조치를 취한 부분에서 발생한 미세결함들이 열전도에 영향을 주어 나타난 결과라는 합리적인 추정이 가능하다.

5. 결 론

본 연구를 통해 적외선카메라를 통해 얻어진 용접비

드 주변 및 용융 부위에 대한 열화상 및 열강도 분포의 변화를 조사함으로써 비드 형상이나 용접결함의 유무와 같은 용접 품질을 추정할 수 있었으며 용접실험과 용접 결과분석에 다음과 같은 구체적인 결론에 이르렀다.

첫째, 열화상에서 구한 열강도 분포에서 추출된 2개의 평가 변수, 특정 열강도에서 열강도 폭 W_t 와 열강도 면적 A_t 는 비드 폭, 비드 높이, 결함의 유무에 따라 유의미한 변화를 보여 용접품질 추정에 유용한 평가변수이다.

둘째, 비드 폭은 열강도 폭 W_t 와, 비드 높이는 열강도 면적 A_t 와 선형적인 관계인 식(1)과 식(2)의 관계임이 밝혀졌고 용접 시 W_t , A_t 값을 통해 비드 폭과 비드 높이의 추정이 가능하다.

셋째, 용접결함 발생 영역은 주위의 용접금속영역보다 낮은 열전도로 인해 열에너지가 더 크며 이로 인해 A_t 값이 증가하였다. 따라서 용접비드에서 A_t 값이 상대적으로 큰 영역은 용접결함이 발생되었을 가능성이 높다.

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

References

1. Lee, J. H., Choi, S. W., Shin, D. S., Kim, G. H., A Study on Weld Pattern Analysis and Weld Quality Recognition using Neural Network, *Journal of KIICE*, 13-2 (2009), 407-412
2. Cho, J. W., Chung, C. M., Choi, Y. S., A Defect Detection of Thin Welded Plate using an Ultrasonic Infrared Imaging, *Journal of ICRS*, 13-11 (2007), 1060-1066
<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2007.13.11.1060>
3. Yoon, J. Y., Lee, Y. M., Shin, S. C., Choi, H. W., A Study on Welding Process Algorithm through Real-time Current Waveform Analysis, *Journal of Welding and Joining*, 33(4) (2015), 24-29
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.4.24>
4. Yoon, J. Y., Shin, S. C., Choi, H. W., Characterization of MAG Welding Quality by Real Time Current Signal Measurement, *Abstract of KWJS*, 64 (2016), 83
5. Cho T. D., Yang, S. M., A Study on On-Line Quality Monitoring Using Arc Light in Gas Metal Arc Welding, *Journal of KWJS*, 18(4) (2000), 82-86
6. Hwang, D. S., Gho, M. H., Development and Application of Realtime Weld Quality Monitoring System, *Journal of Welding and Joining*, 30(1) (2012), 44-50
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.1.44>
7. Lee, M. Y., Quality Monitoring Techniques Using Thermal Radiation in Laser Welding Process, *Journal of KWJS*, 23(3) (2005), 26-30