



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

열화상 이미지를 이용한 아크 용접
품질 추정에 관한 연구

Study on the estimation of weld quality
using the thermal images during arc welding



2018년 1월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

김 우 성

본 논문을 김우성의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 남 종 호 (인)

위 원 공학박사 조 효 제 (인)

위 원 공학박사 박 주 용 (인)

2018년 1월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	viii

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 최근 연구동향	2
1.3 연구내용	3

2. 열강도와 섭씨온도 상관관계 분석

2.1 분석의 필요성	4
2.2 분석 과정	4
2.2.1 열판 측정	5
2.2.2 비드 열영향부 측정	6
2.3 분석 결과	10

3. 본 론

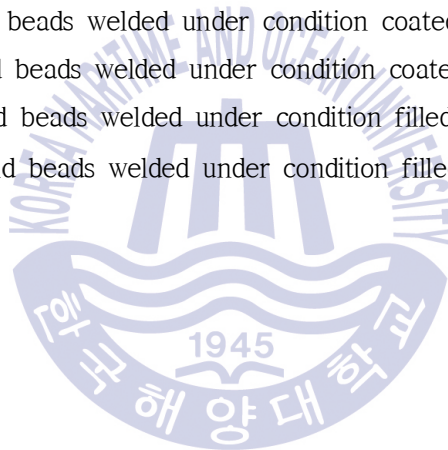
3.1 실험 가설	12
3.2 실험 계획	13
3.2.1 실험 장비	13
3.2.2 분석 소프트웨어	17
3.2.3 사용 시편	19
3.2.4 용접 조건	21

4. 결 과	
4.1 분석 방법	22
4.2 용접 비드 폭 및 덧살 높이와 열강도 분포의 관계	26
4.2.1 용접 비드 폭 및 덧살 높이의 측정	26
4.2.2 열강도 분포곡선의 분석	35
4.3 용접결함과 열강도 분포의 상관관계	36
4.3.1 RT결과에 따른 열강도 분석	42
4.3.2 결함예상 지점에서의 열강도 분석	47
5. 결 론	52
Reference	54



List of Tables

Table 1 Celsius temperature and thermal energy	11
Table 2 Thermal intensity of bead area	13
Table 3 Specimens	20
Table 4 Welding materials	21
Table 5 Welding parameters	21
Table 6 Width of weld beads welded under normal condition	26
Table 7 Height of weld beads welded under normal condition	27
Table 8 Width of weld beads welded under condition coated with grease	29
Table 9 Height of weld beads welded under condition coated with grease	29
Table 10 Width of weld beads welded under condition filled with slag pieces ...	32
Table 11 Height of weld beads welded under condition filled with slag pieces ...	32



List of Figures

Fig. 1 IR thermometer	5
Fig. 2 Arrangement of hot plate test	5
Fig. 3 Result of hot plate test	6
Fig. 4 Arrangement of measuring at HAZ	7
Fig. 5 1st measuring of HAZ(15mm far from center of the bead)	7
Fig. 6 Result of measuring of HAZ(15mm far from center of the bead)	8
Fig. 7 2nd measuring of HAZ(10mm far from center of the bead)	8
Fig. 8 Result of measuring of HAZ(10mm far from center of the bead)	9
Fig. 9 Relation between thermal energy and celsius temperature	10
Fig. 10 Welding experiment system to obtain the thermal image	14
Fig. 11 KAWASAKI 6axis welding robot	14
Fig. 12 DAIHEN welding machine	15
Fig. 13 NIT IR camera	16
Fig. 14 NIT Visualization software	17
Fig. 15 Data loading using Thermoanalyzer	18
Fig. 16 W_T , A_T 2D plots of selected data	18
Fig. 17 Specimen with normal condition	19
Fig. 18 Specimen coated with grease	19
Fig. 19 Specimen filled with slag pieces	20
Fig. 20 Specimen numbering	20
Fig. 21 Definition of the specific evaluation parameters W_T and A_T	22
Fig. 22 3D plots of selected data	23
Fig. 23 W_T , A_T 2D plots of selected data	24
Fig. 24 Plots for each frame and transition of continuous frame	25
Fig. 25 Weld bead of specimen having no gap and no defects-1	27
Fig. 26 Weld bead of specimen having no gap and no defects-2	27
Fig. 27 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and no defects-1	28

Fig. 28	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and no defects-2	28
Fig. 29	Weld bead of specimen having 3mm gap and no defects-1	28
Fig. 30	Weld bead of specimen having 3mm gap and no defects-2	28
Fig. 31	Weld bead of specimen having 0mm gap and coated with grease-1	30
Fig. 32	Weld bead of specimen having 0mm gap and coated with grease-2	30
Fig. 33	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease-1	30
Fig. 34	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease-2	31
Fig. 35	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease-3	31
Fig. 36	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease-4	31
Fig. 37	Weld bead of specimen having 3mm gap and coated with grease-1	31
Fig. 38	Weld bead of specimen having no gap and filled with slag pieces-1	33
Fig. 39	Weld bead of specimen having no gap and filled with slag pieces-2	33
Fig. 40	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces-1	33
Fig. 41	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces-2	33
Fig. 42	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces-3	34
Fig. 43	Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces-4	34
Fig. 44	Weld bead of specimen having 3mm gap and filled with slag pieces-1 ..	34
Fig. 45	Weld bead of specimen having 3mm gap and filled with slag pieces-2 ..	34
Fig. 46	Relationship between W_T and the measured bead width	35
Fig. 47	Relationship between A_T and the measured bead height	36
Fig. 48	RT result of weld bead having no gap and no defect-1	37
Fig. 49	RT result of weld bead having no gap and no defect-2	37
Fig. 50	RT result of weld bead having 1.6mm gap and no defect-1	37
Fig. 51	RT result of weld bead having 1.6mm gap and no defect - 2	37
Fig. 52	RT result of weld bead having 3mm gap and no defect-1	38
Fig. 53	RT result of weld bead having 3mm gap and no defect-2	38
Fig. 54	RT result of weld bead having no gap and coated with grease-1	38
Fig. 55	RT result of weld bead having no gap and coated with grease-2	38
Fig. 56	RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease-1	39
Fig. 57	RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease-2	39
Fig. 58	RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease-3	39

Fig. 59	RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease-4	39
Fig. 60	RT result of weld bead having 3mm gap and coated with grease-1	40
Fig. 61	RT result of weld bead having no gap and filled with slag pieces-1	40
Fig. 62	RT result of weld bead having no gap and filled with slag pieces-2	40
Fig. 63	RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces-1	41
Fig. 64	RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces-2	41
Fig. 65	RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces-3	41
Fig. 66	RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces-4	41
Fig. 67	RT result of weld bead having 3mm gap and filled with slag pieces-1	42
Fig. 68	RT result of weld bead having 3mm gap and filled with slag pieces-2	42
Fig. 69	Pore-occurred location on the bead of specimen No. G32	43
Fig. 70	RT result of pores-1	43
Fig. 71	The change of thermal strength at the pore-occurred location	44
Fig. 72	Location of Slag Inclusion on the bead of specimen No. G12	44
Fig. 73	RT result of slag inclusion	45
Fig. 74	The change of thermal strength at the predicted point of slag inclusion	45
Fig. 75	Pore-occurred location on the bead of specimen No. G11	46
Fig. 76	RT result of pores-2	46
Fig. 77	The change of thermal strength at the predicted point of pores	46
Fig. 78	The change of A_T on 0mm gap with grease-1	47
Fig. 79	The change of A_T on 0mm gap with grease-2	48
Fig. 80	The change of A_T on 1.6mm gap with grease-1	48
Fig. 81	The change of A_T on 1.6mm gap with grease-2	48
Fig. 82	The change of A_T on 0mm gap with slag pieces-1	49
Fig. 83	The change of A_T on 0mm gap with slag pieces-2	49
Fig. 84	The change of A_T on 1.6mm gap with slag pieces-1	50
Fig. 85	The change of A_T on 1.6mm gap with slag pieces-2	50
Fig. 86	The change of A_T on 3mm gap with slag pieces-1	50

Study on the estimation of weld quality using the thermal images during arc welding

Kim, Woo Seong

Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

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 since they have a different thermal conductivity from the weld metal. The different root gap cause the change of bead shape and it makes the different thermal distribution also. This research aims to estimate the weld quality such as bead shape and occurrence of weld defects from the thermal image of weld area through the analysis of the thermal image. For this object the continuous thermal images of flux cored arc welding were obtained by use of a high speed infrared camera. The 3 kinds of specimen group were used for welding experiments. The first group consist of I-groove specimens with different root gap to get the different bead shape. The specimens of the second group and the third group were partly filled with slag pieces or partly coated with grease to generate the pore or slag inclusion. To effectively analyze the thermal image the specific evaluation parameters, W_T and A_T were introduced. W_T value indicates the width over the specific thermal

intensity and A_T indicates the area which means the summation of the thermal intensity over the specific value. The analysis result showed W_T has the linear relationship to bead width and A_T to bead height. A_T value on the places where weld defects occurred increased meaningfully comparing to one of the adjacent area. The analysis result showed the weld quality can be estimated by the W_T and A_T value extracted from the thermal image during welding.

KEY WORDS: Arc welding 아크용접; Thermal image 열화상 이미지; Thermal intensity 열강도; Bead shape 비드형상; Weld defects 용접결함; Weld quality 용접 품질; Welding signal 용접신호



열화상 이미지를 이용한 아크 용접 품질 추정에 관한 연구

Kim, Woo Seong

Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

용접부 및 그 주변의 열화상 이미지는 용접 품질에 연관된 많은 유용한 정보를 담고 있다. 기공이나 슬래그 혼입, 크랙 등과 같은 용접 결함은 용접 금속과 열전도율의 차이로 인해 해당 부위의 열 분포를 변화시킨다. 또한 루트 갭이 달라질 경우 비드 형상이 달라지며 이로 인해 용접부의 열 분포가 달라진다. 본 연구는 비드형상 및 용접결함발생과 같은 용접품질을 용접부의 열화상 분석을 추정하고자 하는 데에 있다. 이 목적을 위해 초고속 열화상 카메라를 이용해 플럭스 코어드 아크용접에 대한 열화상 이미지를 획득하였다. 용접실험에 사용된 시편은 총 3종류로, 첫번째 그룹은 비드형상의 변화를 주기 위해 서로 다른 루트갭을 갖는 I-groove 시편이며 2번째와 3번째 그룹의 시편은 각각 기공과 슬래그 혼입을 발생시키기 위해 부분적으로 이음부에 슬래그 조각을 투입하거나 그리스를 도포하였다. 실험을 통해 얻어진 열화상을 효과적으로 분석하기 위해 2개의 평가변수 W_T 와 A_T 를 도입하였다. W_T 는 열화상의 열강도분포도에서 특정 열강도값에서의 폭을 의미하고 A_T 는 특정 열강도값 이상의 면적을 의미한다. 분석결과 W_T 는 비드 폭과 A_T 는 비드높이와 직선적인 관계가 있음이 나타났다. 또한 결함이 발생된 지점에서의 A_T 값은 주변의 열강도값에 비해 높은 값을 보이는 결과를 나타내었다. 이 분석결과는 용접 중 열화상에서 추출되는 2개의 평가변수 W_T 와

A_T 에 의해 용접품질이 추정될 수 있음을 보여주었다.

KEY WORDS: Arc welding 아크용접; Thermal image 열화상 이미지; Thermal intensity 열강도; Bead shape 비드형상; Weld defects 용접결함; Weld quality 용접품질; Welding signal 용접신호



제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

조선 및 해양플랜트 분야에서는 고강도, 고내구성을 갖는 소재 개발이 요구됨에 따라 용접 등의 이용기술에 대한 검증과 공정개발 관련 기술 수요가 증가하고 있다. 특히 조선, 해양 산업의 침체를 극복 할 수 있는 방법으로 지능형 품질평가 알고리즘을 용접 모니터링 시스템에 접목하는 것이 세계적 이슈가 되고 있다. 본 논문에서는 생산성 향상을 위한 용접 품질예측에 초점을 맞췄으며 이를 위해 열화상 이미지를 사용하였다. 용접부의 품질을 예측하기 위해서는 일반적으로 전류, 전압 신호를 이용한 비교적 간단한 품질 예측이 보편적이다. 그러나 전류, 전압 신호를 이용한 품질예측 방법은 결함 발견의 정확도가 다소 떨어지는 경우가 발생된다. 또한 모재 사이의 갭의 변화나 비금속 개재물의 영향에는 전류, 전압 파형이 눈에 띄게 변하지 않는 한계가 존재하므로 해당 신호만으로는 비드 내부의 미세한 결함을 발견하는데 어려움이 있다.

그에 따라 최근 용접공정의 생산성 향상 및 품질개선을 위하여 용접 자동화 시스템 기술개발 및 용접 모니터링 시스템 관련 기술에 관한 중요성이 대두되고 있다. 단순한 신호의 처리가 아닌 용접 부위를 직접 관찰하여 데이터를 추출하고 이를 바탕으로 보다 정밀한 품질 예측을 시도하고 있다. 이로부터 본 연구에서는 열화상카메라를 이용하여 용접아크 및 열영향부를 관찰하고 보다 효과적인 용접 품질예측을 실현하기 위한 방법에 접근하고자 하였다.

1.2 최근 연구동향

용접부의 품질을 예측하기 위해서는 일반적으로 전류, 전압 신호를 이용한 품질 예측이 보편적이다. 관련연구로는 J.Y.Yoon(2015)는 용접 전류 파형과 펄스 주파수를 통해 용접의 품질을 실시간으로 판단 하고자 하였다. 전류, 전압 파형을 통한 품질 모니터링은 인자들을 수치해석적인 방법으로 판단하여 결함을 검출하고자 하였다. J.H.Lee(2009)는 수많은 용접 모니터링 인자 중 전류, 전압 데이터를 바탕으로 신경회로망을 적용하여 수식적으로 공식화하기 힘든 비선형적 용접 현상을 분석하였다. 최근 용접 모니터링 시스템 관련 기술과 관련하여 D.S.Hwang(2012)은 실시간 Arc 용접품질 평가 시스템과 더불어 3차원 레이저 센서 등을 활용한 용접 Bead의 형상을 연속적으로 측정하여 관리하는 융합시스템 적용을 제시하였다. 또한 Arc부 방출 광량 또는 음향의 변화를 이용한 평가 시스템 등도 제안 하였다. S.C.Kim(2016)은 파이프 용접에 있어 열화상 온도 분포로 결함을 찾고자 하였다.

즉, 다양한 인자를 이용한 용접부 품질 모니터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 생산성 향상과 보다 효과적인 품질 예측을 위해 용접 부위의 데이터를 실시간으로 수집하고자 하는 연구가 최근 큰 이슈가 되고 있다.

1.3 연구내용

본 연구에서는 해양플랜트 소재의 FCAW(Flux Cored Arc Welding) 및 MIG 용접공정과 관련하여 용접결함과 열화상 이미지 패턴간의 상관관계를 분석하고 결함을 예측하는 시스템을 개발 하였다. 결함 예측을 위한 실험에서는 모재에 갭, 윤활유 도포, 비금속 개재물 도포 등을 통해 강제 결함을 발생 시킨 후 열화상 카메라를 이용해 모재의 열 영향부를 실시간으로 촬영하였다. 도출된 데이터를 통해 일정 강도 이상의 면적(A_T)과 일정 강도 이상의 비드 온도 폭(W_T)을 계산하였다. 이를 바탕으로 비드의 외관과 RT(Radiographic test)결과를 바탕으로 열강도의 변화와 모재의 결함여부와의 검증을 수행하였다.



제 2 장 열강도와 섭씨온도의 상관관계 분석

2.1 분석의 필요성

모든 물질은 절대온도 0K가 넘는 경우 에너지를 방출하며 물질에 따라 방사율은 다르다. 이상적인 흑체는 외부로부터 받은 에너지를 100% 흡수하고 그대로 방출하여 방사율이 1이 된다. 일반적인 금속의 경우 금속 종류, 산화, 표면 상태에 따라 방사율이 다르며 포착하는 방사 에너지의 주 파장 대역에 대해서도 달라진다. 따라서 일정 면적에 대한 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 카메라의 경우에도 상대적인 열강도를 출력함에 따라 비드 영역의 온도에 대한 정보도 필요하다. 이를 위해 용접실험을 통해서 IR Thermometer와 IR 카메라로 측정된 결과를 비교하여 적외선카메라의 출력 열강도와 온도의 상관관계를 조사할 필요가 있다.

2.2 분석 과정

앞서 설명한 열강도와 섭씨온도간의 상관관계 분석을 위해 용접 열 영향부와 유사한 열원을 갖는 3가지 경우를 선정하여 실험을 진행 하였다. 분석과정에서는 다양한 온도를 방출하는 열원, NIT 열화상 카메라 및 적외선 온도 측정기를 사용 하였다. 이를 통해 얻어진 열강도와 섭씨 온도간의 상관관계를 분석한다.

열화상 카메라는 본 연구의 실험 조건인 300mm 거리에서 약 63.36mm²의 면적을 초당 300frame 간격으로 촬영한다. Fig.1의 적외선 온도 측정기는 두 레이어 포인트 사이의 거리를 지름으로 하는 가상의 원을 설정하고 해당 면적에

분포하는 섭씨온도의 평균을 측정할 수 있는 장비이다. 모재의 온도측정에 적합하도록 방사율(γ)을 0.22로 설정하였으며 1초 간격으로 데이터를 제공한다.



Fig.1 IR thermometer

2.2.1 열판 측정

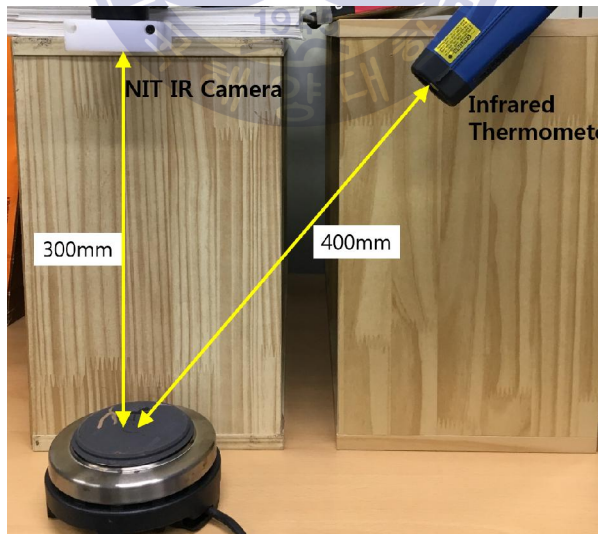


Fig.2 Arrangement of hot plate test

첫 번째 열원으로 상온에서부터 약 530°C 에 이르는 열을 방출하는 열원을 측

정 대상으로 하였다. 위의 Fig.2와 같이 열영향부를 기준으로 열화상카메라(300 mm 거리에 위치)와 적외선 온도측정기(400mm 거리에 위치)를 배치하였다. 측정 점은 열원의 중심으로부터 약 10mm 가량 벗어난 지점을 측정하였으며 이는 열원의 모든 면적에서 온도가 일정함을 바탕으로 한다.

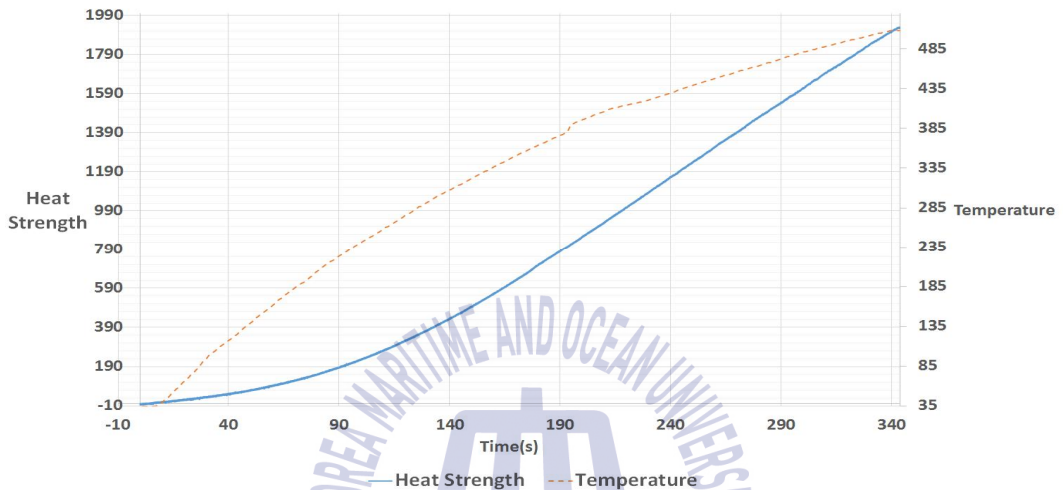


Fig.3 Result of hot plate test

Fig.3을 통해 열영향부 측정지점의 온도 범위(약 20°C~530°C)에서의 열강도 변화 값(-10~1950)을 얻게 되었다.

2.2.2 비드 열영향부 측정

다음으로 실제 용접 과정에서 발생될 열강도를 측정하기 위해 비드 주변 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)를 중심으로 측정을 실시하였다. 해당 측정은 용융부가 아닌 비드 주변의 열영향부를 측정하므로 용융부에 비해 비교적 낮은 온도의 결과를 측정 할 수 있다.

비드 열영향부 측정은 아래의 Fig.4와 같이 열영향부를 기준으로 열화상 카메라(300mm 거리에 위치)와 적외선 온도 측정기(900mm 거리에 위치)로 구성되어 있다. 적외선 온도 측정기의 위치는 최적의 측정 거리인 900mm로 설정하여

두 개의 측정점이 이루는 가상의 면적을 최소화 하고자 하였다.

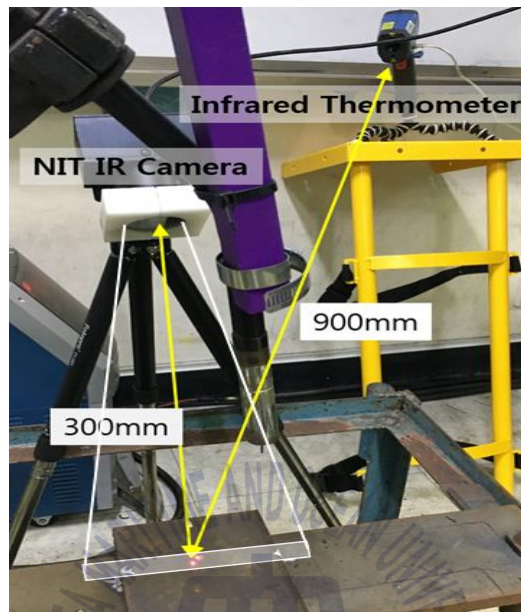


Fig.4 Arrangement of measuring at HAZ

온도 측정 지점은 아래의 Fig.5와 같이 비드 중심으로부터 약 15mm가량 떨어진 곳으로 설정하여 용융 부위에 비해 상대적으로 저온인 영역에서의 열강도와 온도와의 관계를 파악하고자 하였다.



Fig.5 1st measuring of HAZ(15mm far from center of the bead)

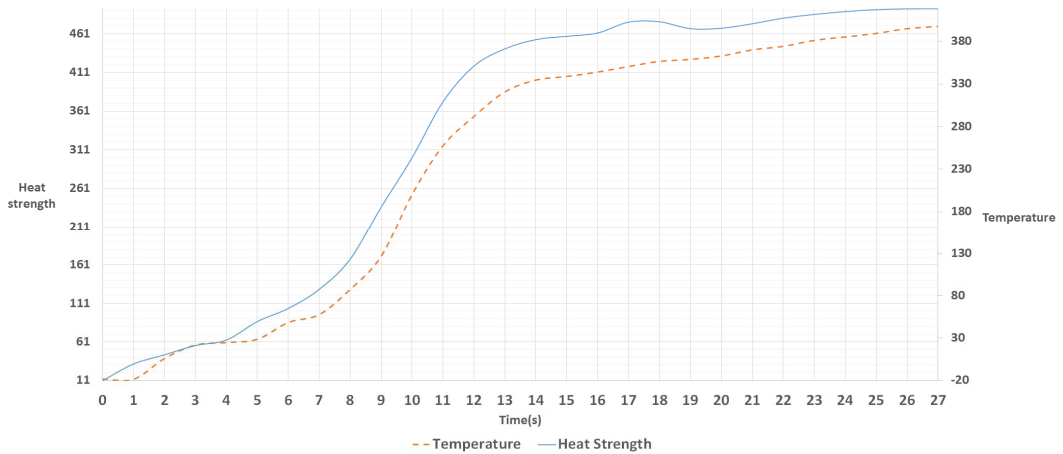


Fig.6 Result of measuring of HAZ(15mm far from center of the bead)

Fig.6과 같이 열영향부 측정지점의 온도 범위(약 20°C~470°C)에서의 열강도 변화 값(-10~420)을 얻게 되었다.

두 번째 측정은 아래의 Fig.7과 같이 비드 중심으로부터 비드 폭의 1/2 가량 떨어진 위치(비드 폭의 끝 지점)에서 측정을 실시하였다. 용융부에 비해 저온이지만 첫 번째 측정에 비해 상대적으로 고온인 영역을 측정하고자 하였다.

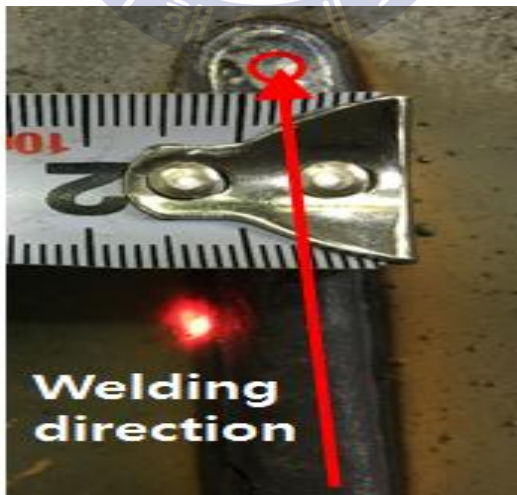


Fig.7 2nd measuring of HAZ(10mm far from center of the bead)

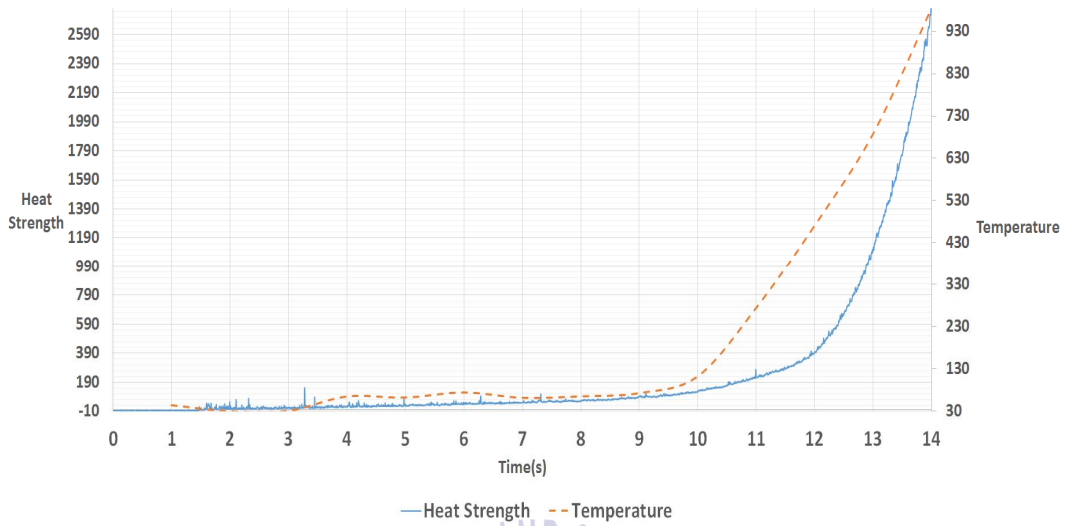
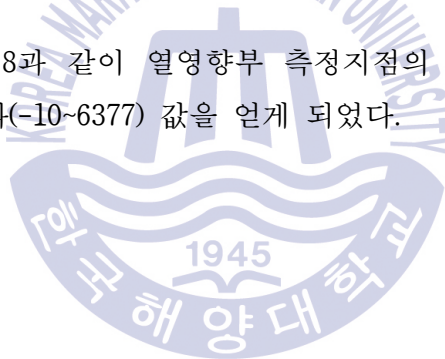


Fig.8 Result of measuring of HAZ(10mm far from center of the bead)

측정 결과 위의 Fig.8과 같이 열영향부 측정지점의 온도 범위(약 20℃~1050℃)에서의 열강도 변화(-10~6377) 값을 얻게 되었다.



2.3 분석 결과

위에서 측정된 3가지 경우의 데이터를 바탕으로 열강도와 섭씨온도와의 상관 관계를 나타내었다. 아래의 Fig.9는 x 축을 섭씨온도 y 축을 열강도로 하여 상관 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

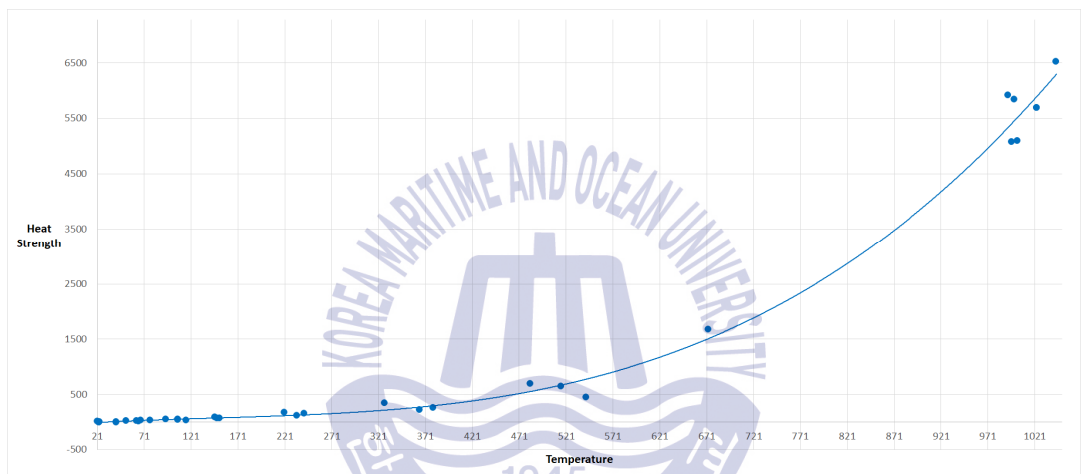


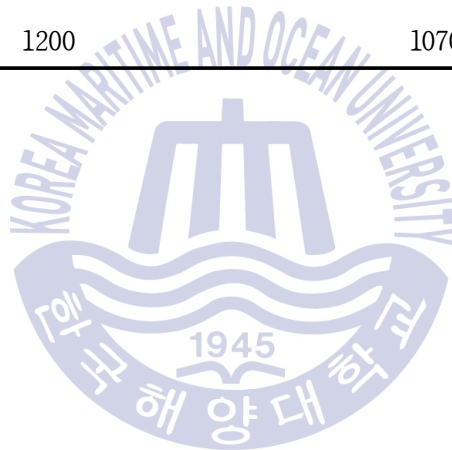
Fig.9 Relation between thermal energy and celsius temperature

두 변수의 관계는 아래의 식 (1)과 같이 3차방정식의 형태로 도출 되었으며 섭씨온도가 커질수록 열강도 증가에 따른 증가폭 또한 커지는 것을 찾을 수 있었다. 주요온도에 따른 열강도의 변화는 아래의 Table 1과 같이 나타난다.

$$y = 0.000008x^3 - 0.003x^2 + 1.028x - 29.32 \quad (1)$$

Table 1 Celsius temperature and thermal energy

Celsius temperature(°C)	Thermal energy
400	414
500	734
600	1235
700	1964
800	2969
900	4298
1000	5999
1100	8119
1200	10708



제 3 장 본 론

3.1 실험 가설

본 연구에서는 효율적인 검증을 위해 아래와 같은 가설을 토대로 실험을 계획하고 진행 하였다.

1. 기공(Porosity), 슬래그 혼입(Slag inclusion), 균열(Crack) 등의 용접결함은 용접 용융부와 그 주변 영역의 열강도 분포에 변화를 발생시킨다.

: 공기 또는 다른 기체로 채워져 있는 기공과 균열이 있는 부분 및 슬래그가 혼입된 부분은 모재와 열전도율이 다르다. 따라서 해당 결함이 측정되는 시점에는 비드 및 주변영역의 열강도 분포가 달라질 것이다.

2. 용접 결함이 발생한 부위는 열전도율이 낮아 모재(Base metal)와 주변 영역에 비해 열강도가 높다.

: 기체, 비금속 물질 등은 비드의 용융풀에 비해 열전도율이 낮다. 따라서 해당 결함 내부의 열이 응고과정에서 주변 열 영향부로 확산되지 못함에 따라 주변에 비해 열강도가 높을 것이다.

3. 특정 열강도(T^*)에서의 과형 폭(W_T)은 비드 폭과 비례한다.

: 비드의 열강도 분포는 정규분포를 따른다. 따라서 비드 양 끝단의 온도 및 열강도는 동일하므로 특정 열강도에서의 과형 폭(W_T)은 비드 폭과 동일할 것이다.

4. 특정 열강도(T^*) 이상의 파형 면적(A_T)은 비드 덧살(Reinforcement)의 크기와 관련 있다.

: 비드의 열강도 분포는 정규분포를 따르게 되므로 비드의 중앙부는 파형의 최고점과 일치할 것이다. 따라서 특정 열강도 이상의 파형 면적(A_T)은 비드 덧살과 관련이 있을 것이다.

위의 가설을 토대로 열전도율에 따른 비드 면적을 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2 Thermal intensity of bead area

	with defects	with no defects	large reinforcement	small reinforcement
Thermal energy of bead area	large	small	large	small

3.2 실험 계획

3.2.1 실험 장비

열화상 카메라는 6축 용접 로봇의 토치 끝단에 부착하여 아래의 Fig.10과 같이 비드를 따라 라인(Line)형으로 측정 가능하도록 구성하였다. 또한 아크에 직접적으로 초점을 맞출 경우 발생하는 촬영 가능 열강도 범위 이탈(Over flow)을 방지하기 위해 열화상 카메라의 초점을 용접 토치 끝단의 아크 영역으로부터 아크 진행방향의 반대 방향으로 2cm가량 뒤쪽에 맞추었다. 따라서 열화상 카메라는 용접속도와 카메라 촬영 속도를 고려하였을 때, 아크 진행 후 약 4.5초에 해당 지점을 촬영 하므로 비드가 응고 된 후 남아있는 열강도 분포를 촬영하게 된다. 용접 결함은 용융상태보다 응고가 진행되는 과정에서 발생할 가

능성이 높기 때문에 해당 부위를 촬영하는 것은 결함 발견 및 검증에 효과적인 것이라고 판단하였다.

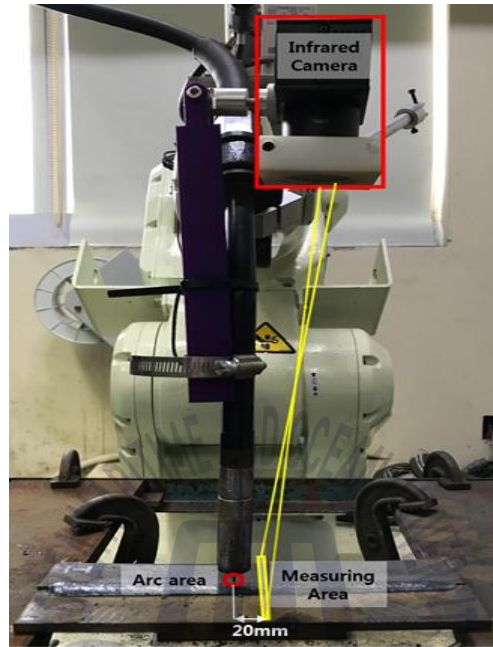


Fig.10 Welding experiment system to obtain the thermal image

- KAWASAKI 6축 용접 로봇



Fig.11 KAWASAKI 6axis welding robot

Fig.11의 6축 자동용접 로봇은 아래와 같은 사양을 통해 본 실험에 적합한 조건을 갖추고 있다.

- ✓ 제어 축수 : 6축
- ✓ 기억 용량 : 4MB
- ✓ 교시 방식 : 티칭방식 또는 프로그래밍방식
- ✓ 와이어 송급 장치 및 롤러
- ✓ 보호가스 송급 토치 적용
- ✓ CO_2 보호가스 사용 용접 가능

● DAIHEN FCAW 용접기



Fig.12 DAIHEN welding machine

Fig.12의 용접기는 보호가스를 동반한 아크용접에 적합하다.

- ✓ 이용 가능 용접 : CO_2 100% arc welding, $Ar80\% + CO_220\%$ arc welding
- ✓ 정격 사용율 : 60%(통전, 휴지 운전 사이클의 비율)
- ✓ 와이어 종류 : 연강 코어드 와이어(\varnothing 1.6, \varnothing 1.4)

- NIT IR(Infrared) Camera



Fig.13 NIT IR camera

Fig.13은 NIT사의 초고속 열화상 카메라로써 아래와 같은 조건을 갖추고 있다. 위의 장비는 3D프린트로 자체 제작된 거치대를 이용 하여 용접 토치 끝단에 고정된다.

- ✓ 제품명 : Luxell core-s
- ✓ 크기 : 80(l)×44.8(w)×50(h)
- ✓ 초점거리 : 64pixel(9mm, 24mm), 128pixel(35mm, 70mm), 256pixel(35mm, 70mm)
- ✓ 촬영속도 : 64pixel-1200frame/s, 128pixel-600frame/s, 256pixel-300frame/s

3.2.2 분석 소프트웨어

- NIT(IR camera maker) visualization software

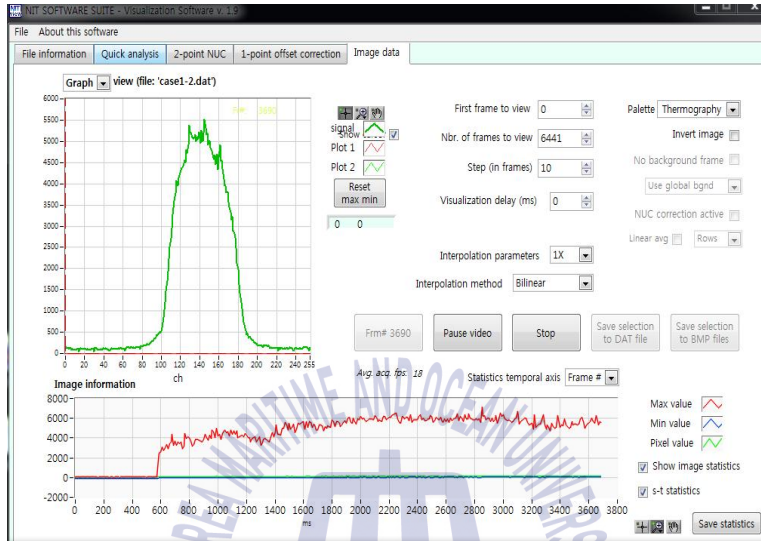


Fig.14 NIT Visualization software

Fig.14의 NIT Visualization software는 열화상 카메라로부터 얻어진 열강도 파형을 각 프레임 단위로 열람할 수 있게 한다. 또한 촬영 과정 전체를 하나의 그래프로 나타내어 열강도 최댓값, 최솟값을 표기하고 해당 범위 안에서 열강도 분포가 변화하는 경향을 관찰할 수 있다. 시작 프레임과 종료 프레임을 지정하면 해당 범위의 파형을 연속적으로 표현하여 열원의 위치와 열강도의 변화를 파악할 수 있다.

그러나 위의 소프트웨어는 단순한 열람기능만 갖추고 있어 앞서 설정한 용접 변수인 W_T , A_T 값을 계산하고 분석함에 한계가 존재한다.

- ThermoAnalyzer(자체 개발 소프트웨어)

앞선 언급된 상용 소프트웨어의 한계를 해결하고 추출된 데이터를 보다 효과

적으로 분석하기 위해 아래의 Fig.15와 같은 C# 기반의 ThermoAnalyzer를 개발하였다. 아래의 Fig.16과 같이 열화상 카메라로부터 얻어진 데이터를 바탕으로 설정변수인 W_T , A_T 의 2D plot 가능하며 또한 3D plot과 특정 프레임에서의 파형을 분석할 수 있다.

보다 심층적인 계산 기능으로 특정 구간을 설정하여 해당 범위에서의 열강도 평균, 열강도 차이 등의 결과를 얻을 수 있다. 또한 다수의 프레임 단면을 선택 가능하여 동시에 plot 함으로써 특정 구간의 파형 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 더불어 파형 분석 주요 인자들을 쉽게 파악하기 위해 마우스 포인트가 가리키는 좌표의 pixel 번호와 열강도를 제공하여 효율적인 분석이 가능하도록 구현하였다.

Pixel1	Pixel2	Pixel3	Pixel4	Pixel5	Pixel6	Pixel7	Pixel8	Pixel9	Pixel10	Pixel11	Pixel12	Pixel13	Pixel14	Pixel15	Pixel16	Pixel17	Pixel18	Pixel19	Pixel20
47	60	46	48	53	75	41	52	28	24	38	29	25	31	30	23	24	22	24	21
39	49	49	46	47	100	27	26	29	27	21	27	27	25	24	22	22	27	24	21
39	49	42	49	85	52	42	29	26	34	31	24	28	29	29	41	29	40	24	21
51	75	45	50	28	22	22	26	25	21	20	25	27	24	20	26	20	20	27	22
44	77	66	79	24	33	25	21	29	22	29	28	27	27	22	27	22	27	24	20
45	88	66	47	26	24	27	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
74	113	30	36	24	24	18	14	17	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
53	66	25	17	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
99	29	29	21	24	24	14	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
67	49	21	21	42	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
67	47	14	22	21	37	20	21	17	40	33	25	20	20	24	24	24	24	24	24
60	47	14	22	21	37	20	21	17	40	33	25	20	20	24	24	24	24	24	24
51	50	23	25	27	23	27	21	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
49	43	15	15	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
39	43	15	25	23	17	13	24	10	33	29	17	24	43	20	24	24	24	24	24
49	43	15	15	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
41	42	19	36	29	20	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
49	43	15	30	28	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
36	30	35	30	28	14	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
49	43	15	30	28	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
49	43	15	30	28	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
37	33	26	30	24	21	14	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
35	49	33	19	37	33	18	17	17	13	28	24	24	24	24	24	24	24	24	24
49	39	19	22	20	21	14	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
44	37	21	22	20	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
38	34	28	30	23	20	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
49	43	15	30	28	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
42	52	29	33	32	41	34	41	33	42	30	28	28	28	28	28	28	28	28	28
42	52	29	33	32	41	34	41	33	42	30	28	28	28	28	28	28	28	28	28
42	52	29	33	32	41	34	41	33	42	30	28	28	28	28	28	28	28	28	28
80	93	46	25	20	21	23	20	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
37	31	14	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
26	27	19	27	23	24	23	19	21	24	21	33	24	32	30	27	28	24	24	24
47	44	17	22	25	21	26	17	17	27	29	20	20	20	20	20	20	20	20	20
34	34	39	17	22	26	25	19	21	23	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
38	32	30	21	22	21	24	21	16	27	29	20	20	20	20	20	20	20	20	20
49	43	15	30	28	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
32	34	31	23	22	25	25	19	24	21	27	24	23	23	23	23	23	23	23	23
37	45	22	29	29	29	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

Fig.15 Data loading using ThermoAnalyzer

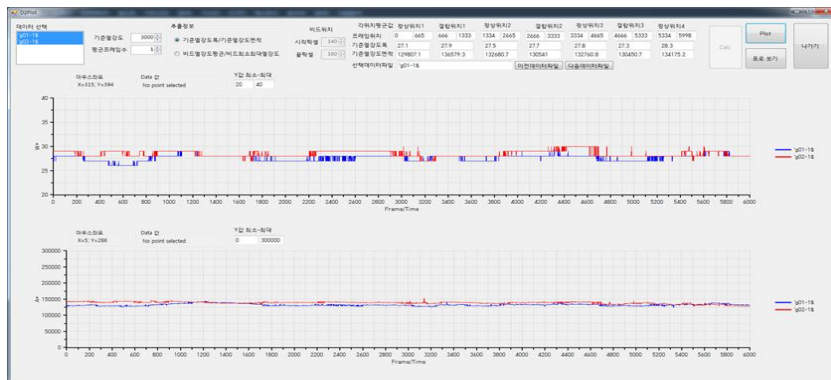


Fig.16 W_T , A_T 2D plots of selected data

3.2.3 사용 시편

실험에 사용한 시편은 일반 연강 철판으로 I-groove 편면 맞대기 용접에 적합한 재료를 사용하였다. I-groove 편면 맞대기 용접은 모재의 두께가 얇은 경우에 적합하며 V-groove에 비해 모재의 용융 정도가 낮으므로 결함을 관찰하는데 있어 용이 할 것이라 판단하였다.

시편은 Fig.17과 같이 비드의 폭과 높이의 차이를 얻을 수 있도록 각각 0, 1.6mm, 3mm의 갭을 갖는 시편 그룹과 Fig.18과 같이 기공을 유도하기 위해 이음부 상에 용접시작점에서부터 10~20mm 구간, 40~50mm 구간, 70~80mm 구간의 3지점에 그리스를 도포한 시편그룹, 마지막으로 Fig.19와 같이 슬래그 혼입 결함을 유도하기 위해 동일한 3지점에 슬래그 조각을 채운 시편그룹의 총 3종류의 시편을 준비하였다.

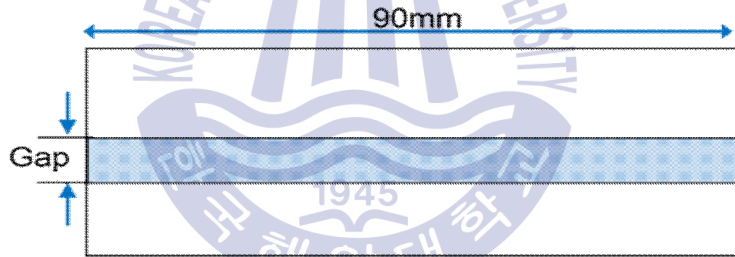


Fig.17 Specimen with normal condition

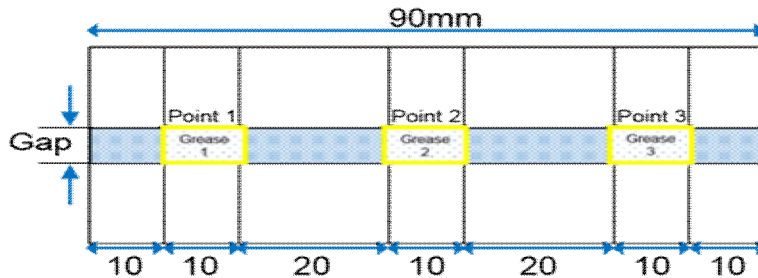


Fig.18 Specimen coated with grease

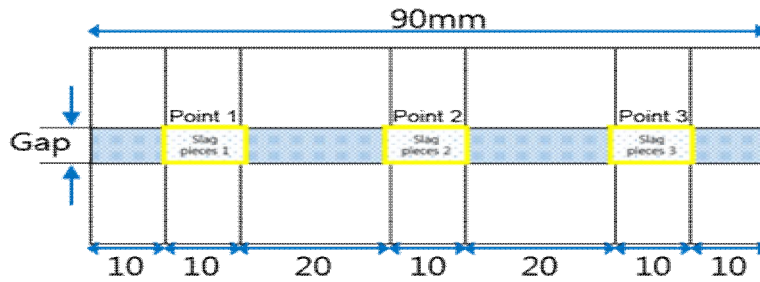


Fig.19 Specimen filled with slag pieces

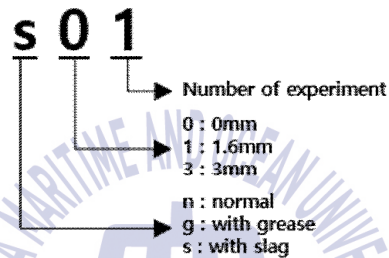


Fig.20 Specimen numbering

상기한 시편의 종류를 쉽게 구분하기 위해 Fig.20에서 볼 수 있는 바와 같이 1문자, 2숫자로 표현되는 시편 번호 부여 규칙을 정하였다. 첫 번째 문자는 정상 혹은 결함을 표기하는 n(normal), s(with slag), g(with grease)로 표현되며 두 번째 숫자는 두 모재사이 겹의 간격을 나타낸다. 세 번째 숫자는 동일한 조건과 겹을 갖고 있는 시편의 개수를 나타내기 위한 숫자로써 표기하였다.

Table 3 Specimens

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	n31, n32	g32	s31, s32

이를 바탕으로 Table 3과 같이 총 21개의 실험 시편을 구성하고 실험을 진행하였다.

3.2.4 용접 조건

- 실험 재료 및 변수

Table 4 Welding materials

Wire	KISWEL 1.4mm Flux Cored Wire
Shielding gas	100% CO_2
Base metal	Mild steel(250×40×8T)

보다 정확한 용접 결과를 추정하기 위해 위의 Table 4와 같이 FCAW 전용 와이어와 100% CO_2 가스를 사용하였다.

Table 5 Welding parameters

Parameter	Value	Units
Current	220	A
Voltage	24	V
Travel speed	27	cm/min
Measuring speed	300	frame/s
Measuring area(1 frame)	0.48×132	mm^2

위의 Table 5와 같이 전류, 전압 및 용접속도는 8T 두께의 모재에 적합한 조건을 설정 하였다. 또한 열화상 카메라는 초당 300frame의 촬영속도를 설정하여 총 230mm길이의 구간을 진행하며 약 15,333개의 프레임을 촬영하게 된다. 각 프레임은 총 1×256개의 픽셀로 구성되어 256개의 값을 기록한다. 따라서 한 시편에 대한 실험을 진행함에 있어 총 3,925,248(15,333×256 pixel)개의 열강도 값을 얻을 수 있다.

제 4 장 결 과

4.1 분석 방법

최적의 분석을 위해 비드 및 주변 영역의 열강도 분포를 평가할 변수로써 W_T 와 A_T 를 도입하였다. 두 변수는 아래의 Fig.21에 나타난 바와 같이 특정 열강도 값에서의 파형 폭과 해당 열강도 이상의 면적을 의미하며 다음과 같은 의미를 내포하는 것으로 간주할 수 있다.

- W_T
 - ✓ 특정 열강도(T^* , 일정 비드 폭에서의 열강도)에 상응하는 폭을 의미
 - ✓ 비드의 폭과 관련된 변수
- A_T
 - ✓ 특정 열강도(T^*) 이상의 면적
 - ✓ 비드의 높이와 관련된 변수
 - ✓ 용접 결함을 나타내는 변수

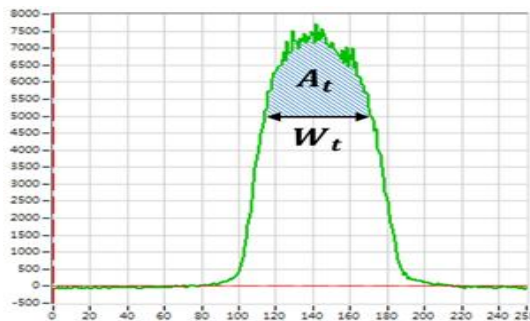


Fig.21 Definition of the specific evaluation parameters W_T and A_T

앞서 설명된 ‘Thermoanalyzer’ 를 이용하여 위의 변수들에 따른 열강도 분포를 2D, 3D로 분석 하였다.

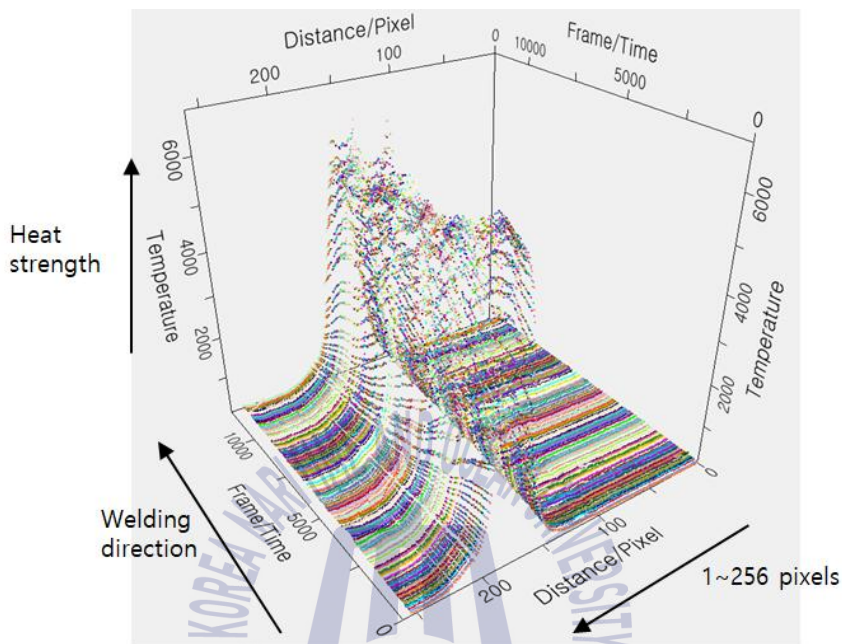


Fig.22 3D plots of selected data

앞선 3.1절에서 언급된 바와 같이 각 프레임에서의 열강도 파형은 정규분포를 따른다. 용접 경로를 따라 촬영된 데이터를 Fig.22와 같이 3D 파형으로 나타내었을 때 비드의 형상과 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 위의 3D 분석 기능을 통해 비드의 폭, 덧살의 크기를 가시적으로 유추할 수 있으며 각 점들의 조밀, 희소 정도에 따른 비드 표면의 형상 등을 예측할 수 있다.

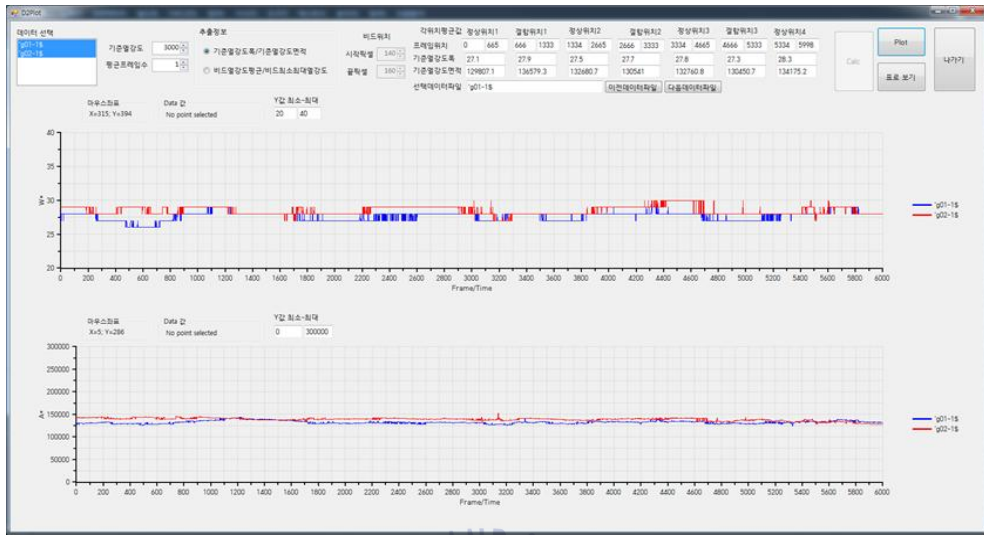


Fig.23 W_T , A_T 2D plots of selected data

2D 분석은 앞선 Fig.21에서 설정된 두 변수의 값을 각 프레임에 따라 나타내어 분석이 가능하다. 해당 분석은 비드 폭과 덧살 크기의 변화를 파악하기 위해 용이하다.

비드 형상에 영향을 미치는 전류, 전압, 보호가스 유량 등은 비드 폭을 수시로 변화하게 한다. 그에 따라 Fig.23 상단의 그래프와 같이 비드 폭(W_T)의 변화를 발견할 수 있다. 덧살 크기의 변화는 Fig.23 하단의 그래프를 통해 확인 가능하며 예시로 나타난 Fig.23의 두 가지 케이스는 비교적 안정적인 덧살 크기를 유지하고 있음을 파악할 수 있다.

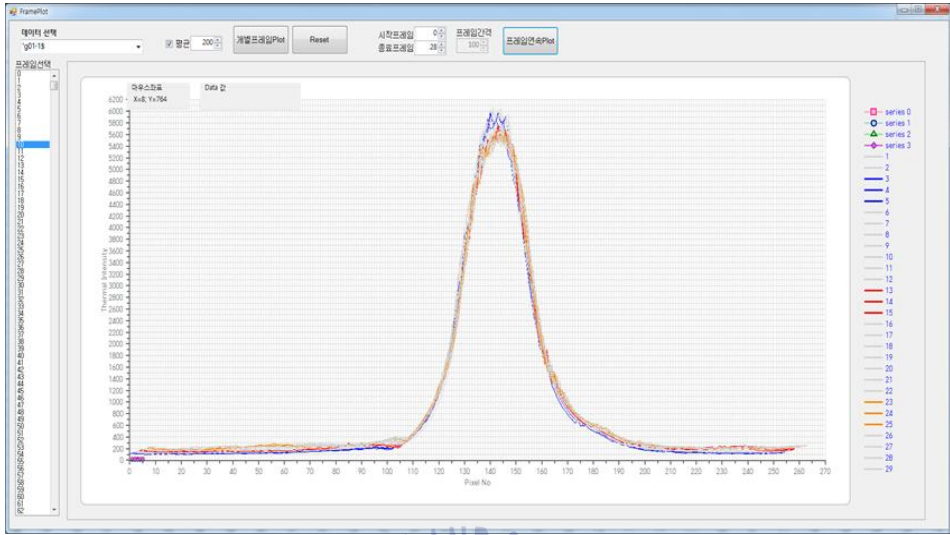


Fig.24 Plots for each frame and transition of continuous frame

세부적인 열강도 변화를 파악하기 위해서는 매 프레임에 따라 변화하는 파형을 상호 비교 할 필요성이 있다. Fig.24는 특정 프레임에서의 파형을 선택하여 변화하는 정도를 파악할 수 있다. 예를 들어, 특정 프레임에서의 파형과 해당 프레임 이후 다른 프레임에서의 파형 등을 다수 선택하여 동시에 분석 가능하며 이를 통해 일정 구간에서의 파형 변화를 가시적으로 확인 할 수 있다.

4.2 용접 비드 폭 및 덧살 높이와 열강도분포의 관계

4.2.1 용접 비드 폭 및 덧살 높이의 측정

Fig.25 ~ Fig.45은 3가지 종류의 시편으로 용접한 용접비드 사진이다. 아래의 Table 6,8,10은 각 시편의 특정 지점에서의 비드 폭(mm)을 측정하였고 Table 7,9,11은 각 시편의 특정 지점에서의 비드 높이(mm)를 측정하였다. 측정 지점은 용접 시작점으로부터 50, 70, 90, 135, 165, 195 mm 만큼 떨어진 곳으로 설정하였다. 시편명의 g와 s에서는 135, 165, 195 mm 지점에 그리스(윤활유)와 슬래그 조각으로 결함을 유도하였다.

- 정상상태 용접결과

Table 6 Width of weld beads welded under normal condition

Location	n01	n02	n11	n12	n31	n32
50	10.9	11.0	11.3	11.7	8.8	8.8
70	11.0	11.0	11.3	10.7	9.3	8.1
90	10.9	10.8	11.6	11.1	9.0	7.6
135	11.1	10.4	10.4	10.9	9.6	9.4
165	11.6	10.9	11.4	10.4	10.0	9.9
195	11.5	10.9	9.7	10.2	9.9	9.8

Table 7 Height of weld beads welded under normal condition

Location	n01	n02	n11	n12	n31	n32
50mm	2.8	3.0	2.2	2.8	0.7	0.2
70mm	2.8	3.0	2.4	2.9	0.9	0.3
90mm	2.8	3.0	2.3	2.8	1.1	0.5
135mm	2.9	3.1	2.2	2.7	1.2	0.8
165mm	2.9	3.0	1.9	2.5	1.1	1.2
195mm	2.5	2.7	1.2	2.1	1.3	0.9

Table 6과 7은 결함유도조치가 없는 정상상태 시편의 비드 폭과 덧살 높이를 나타낸다. 비드 폭은 0mm와 1.6mm 갭에서 비교적 유사한 경향을 나타내었으나 3mm 갭에서는 0mm와 1.6mm에 비해 폭이 작아짐을 발견할 수 있다. 덧살 높이는 갭의 크기가 커짐에 따라 감소하고 있다.



Fig.25 Weld bead of specimen having no gap and no defects - 1



Fig.26 Weld bead of specimen having no gap and no defects - 2

Fig.25와 Fig.26은 결함유도조치가 없고 두 모재사이의 갭이 없는 정상시편에 대한 용접비드이다. CO_2 100% 보호가스 사용시에 나타나는 스패터가 일부 있지만 비드외관은 비교적 무난한 상태이다. 용접 중 변형으로 비드 끝부분에 시편이 떨어져 의도치 않은 갭이 나타나 비드높이가 낮아진 현상이 생겼으나 용

접불량과는 무관하다고 볼 수 있다.

N11



Fig.27 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and no defects - 1

N12



Fig.28 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and no defects - 2

Fig.27과 Fig.28은 결함유도조치 없이 1.6mm 갭에서 용접을 진행 하였다. 위의 Fig.25, Fig.26과 마찬가지로 비드의 외관은 비교적 무난하나 용접 변형으로 인한 비드 끝부분의 벌어짐의 발생으로 비드 높이가 낮아지는 현상이 발생하였다. 결함과는 무관하게 용접이 진행된 것으로 간주할 수 있다.

N31



Fig.29 Weld bead of specimen having 3mm gap and no defects - 1

N32



Fig.30 Weld bead of specimen having 3mm gap and no defects - 2

Fig.29과 Fig.30은 결함유도조치가 없이 3mm 갭에서 용접이 수행되었다. 앞선

시편에서 발생하였던 변형을 방지하기 위해 경로의 양 끝단에 가용접을 실시하였다. 비드 외관은 정상상태의 무난한 경향을 보이고 있으나 3mm 갭으로 인해 두 모재 사이로 용입 깊이가 커짐에 따라 비드 덧살의 높이가 현저히 낮아짐을 육안으로 확인 할 수 있다.

- 그리스(윤활유) 도포를 통한 결함 유도 용접결과

Table 8 Width of weld beads welded under condition coated with grease

Location	g01	g02	g11	g12	g13	g14	g32
50mm	10.9	11.1	11.0	11.2	10.9	10.6	9.5
70mm	10.7	10.9	10.3	11.0	11.0	10.4	10.0
90mm	10.7	11.1	10.8	11.0	10.4	10.5	9.7
135mm	10.8	11.1	10.9	11.0	10.7	10.6	10.2
165mm	10.8	10.7	11.3	11.6	10.3	9.8	10.3
195mm	10.6	11.0	11.6	11.9	10.4	10.7	10.0

Table 9 Height of weld beads welded under condition coated with grease

Location	g01	g02	g11	g12	g13	g14	g32
50mm	2.9	3.0	2.4	2.1	2.8	2.8	1.5
70mm	3.1	3.0	2.5	2.3	2.7	2.9	1.6
90mm	2.9	3.1	2.6	2.4	2.9	2.9	1.7
135mm	3.1	2.9	2.7	2.7	2.7	3.0	2.0
165mm	3.0	2.9	2.7	2.8	2.7	3.0	1.6
195mm	2.8	2.9	2.6	2.5	2.3	2.9	1.1

Table 8과 9는 결함을 유도하기 위해 특정 구간에 그리스를 도포한 시편에 대한 비드 폭과 덧살의 높이를 나타낸다. 비드 폭은 앞선 정상시편과 마찬가지로 0mm와 1.6mm 갭에서 비교적 유사한 경향을 나타내었으나 3mm 갭에서는 0mm와 1.6mm에 비해 폭이 작아짐을 발견할 수 있다. 덧살 높이는 0mm와

1.6mm 갭에서 비교적 유사한 경향을 나타내고 있으나 g12시편의 일부 지점은 비교적 낮은 결과를 보이고 있다. 3mm 갭에서의 덧살 높이는 현저히 낮게 측정되었다.

G01



Fig.31 Weld bead of specimen having 0mm gap and coated with grease - 1

G02



Fig.32 Weld bead of specimen having 0mm gap and coated with grease - 2

Fig.31과 Fig.32는 비교적 비드 폭이 일정하며 그리스의 일부가 비드를 중심으로 좌우로 묻어남을 확인 할 수 있다. Fig.32 비드의 일부 지점에서는 비드 표면에 작은 크기의 용접 불량을 보이고 있으나 이는 결함과 무관하다고 판단 된다.

G11



Fig.33 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease - 1

G12



Fig.34 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease - 2

Fig.33과 Fig.34는 위의 Fig.29와 Fig.30의 시편에 비해 덧살의 높이가 낮지만 비드 폭은 유사한 경향을 보이고 있다.

G13



Fig.35 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease - 3

G14



Fig.36 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and coated with grease - 4

Fig.35와 Fig.36은 Fig.33, Fig.34와 덧살 높이가 유사한 경향을 나타내고 있다. 하지만 두 시편 모두 용접경로 후반부에서 비드에서 좌우 끝단이 매끄럽지 못하고 다소 불균일함을 발견할 수 있다. 이는 도포된 그리스로 인해 용접 중 미소한 영향을 받았으리라 예상된다.

G32



Fig.37 Weld bead of specimen having 3mm gap and coated with grease - 1

Fig.37의 시편은 앞선 시편들에 비해 덧살 높이가 현저히 낮음을 확인 할 수 있다. 이 또한 3mm 갭으로 인한 용입 깊이가 깊어짐에 영향을 받았으리라 예상된다. 특히, 측정위치 195mm 부근의 비드 표면에 작은 용접불량이 발생함을 확인 할 수 있다.

- 슬래그 투입을 통한 결함 유도 용접결과

Table 10 Width of weld beads welded under condition filled with slag pieces

Location	s01	s02	s11	s12	s13	s14	s31	s32
50mm	11.7	10.9	10.2	10.8	10.4	10.5	9.8	9.8
70mm	11.7	10.8	10.5	10.9	10.4	9.9	10.4	10.2
90mm	11.5	10.7	10.2	10.9	10.7	11.4	9.3	9.5
135mm	11.3	11.3	10.8	10.9	10.8	10.8	9.9	10.4
165mm	11.4	11.4	10.4	11.7	10.5	10.5	10.7	10.1
195mm	11.5	11.4	10.9	11.2	10.7	10.9	10.7	10.4

Table 11 Height of weld beads welded under condition filled with slag pieces

Location	s01	s02	s11	s12	s13	s14	s31	s32
50mm	2.8	2.6	2.3	2.4	2.4	2.8	1.3	1.7
70mm	2.6	2.8	2.4	2.5	2.4	2.9	1.4	1.7
90mm	2.8	2.9	2.6	2.7	2.6	3.1	1.7	1.8
135mm	2.8	3.0	2.9	2.6	2.9	3.0	1.8	1.9
165mm	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9	1.9	1.9
195mm	2.6	3.1	2.2	2.4	2.9	2.5	1.5	2.0

Table 10과 11은 결함을 유도하기 위해 특정 구간에 슬래그 조각을 채운 시편에 대한 비드 폭과 덧살의 높이를 나타낸다. 비드 폭은 0mm와 1.6mm 갭에서 비교적 유사한 경향을 나타내었으나 3mm 갭에서는 0mm와 1.6mm에 비해 폭이 작아짐을 발견할 수 있다. 덧살 높이는 s14 시편은 0mm 갭에서의 시편과

비교적 유사한 것을 제외하고 갭이 커짐에 따라 덧살 높이가 낮아짐을 보인다. 특히 3mm 갭 시편은 이전 갭과의 덧살 높이 차이가 비교적 큰 경향을 보인다.

S01



Fig.38 Weld bead of specimen having no gap and filled with slag pieces - 1

S02



Fig.39 Weld bead of specimen having no gap and filled with slag pieces - 2

Fig.38과 Fig.39는 결함 유도조치에 의한 비드의 형상이 영향을 받고 있음을 확연하게 확인 할 수 있다. 비드의 형상의 변화가 있는 이유는 결함 유도를 위한 슬래그 조각이 용융되지 않고 그대로 남아있어 원활한 비드 형성에 영향을 준 것으로 판단된다. 해당 부분에서의 결함 발생 여부를 조사할 필요가 있음을 보여준다.

S11



Fig.40 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 1

S12



Fig.41 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 2

Fig.40과 Fig.41 또한 비드 표면 형상에 작은 변화가 있음을 보여준다. 용접이 매끄럽지 못함을 보여준다.



Fig.42 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 3



Fig.43 Weld bead of specimen having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 4

Fig.42는 비교적 무난한 용접이 이루어졌다. 그러나 Fig.43의 시편은 경로 후반부의 비드 표면 형성에 영향을 준 부분이 있음을 육안으로 확인 할 수 있다.



Fig.44 Weld bead of specimen having 3mm gap and filled with slag pieces - 1



Fig.45 Weld bead of specimen having 3mm gap and filled with slag pieces - 2

Fig.44와 Fig.45 역시 결함유도조치가 이루어진 용접경로 후반부의 비드 표면 형상이 결함유도조치가 취해지지 않은 경로 전반부에 비해 불균일함을 보여준

다. 비드표면이 불균일한 부분은 앞선 시편들과 마찬가지로 슬래그 조각이 용융되지 않고 비드 응고과정에 남아있어 용접 불량을 발생시켰음을 예상할 수 있다. 또한 앞선 0mm, 1.6mm 갭에 비해 덧살 높이도 낮아짐을 확인 할 수 있다.

4.2.2 열강도 분포곡선의 분석

앞서 정의한 특정 열강도(T^*)에서의 폭(W_T)과 특정 열강도(T^*) 이상의 면적(A_T)은 각각 비드 폭과 덧살 높이와 관련된 평가 변수임을 언급 하였다. 그에 따라 측정된 비드 폭과 덧살 높이의 변화를 통해 평가 변수 W_T 와 A_T 와의 관계를 파악하였다.

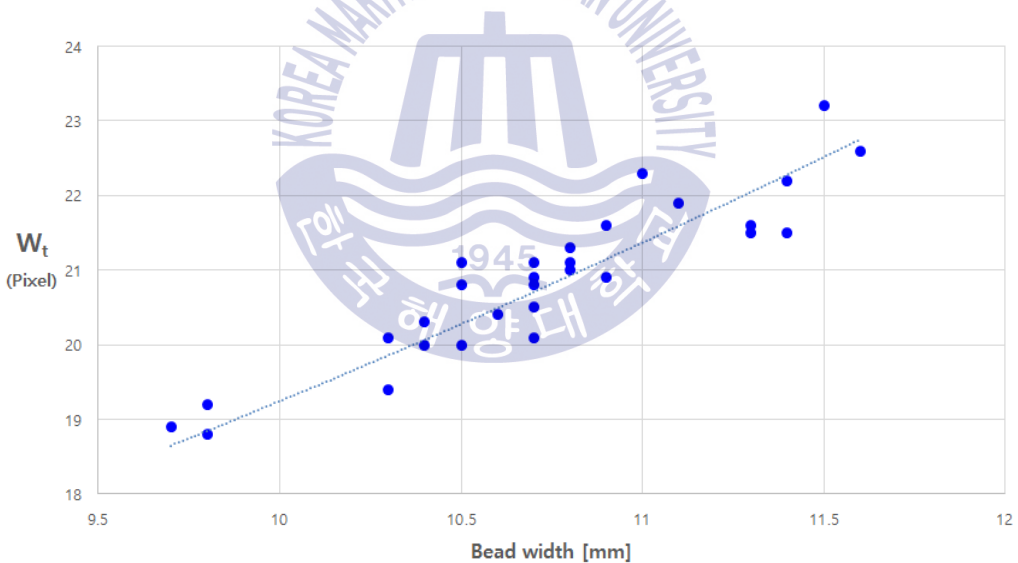


Fig.46 Relationship between W_T and the measured bead width

위의 Fig.46과 같이 비드 폭이 점차 증가함에 따라 특정 열강도(T^*)에서의 폭 (W_T) 또한 증가함을 파악할 수 있다. 따라서 3.1절의 실험 가설 3이 타당함을 증명할 수 있다.

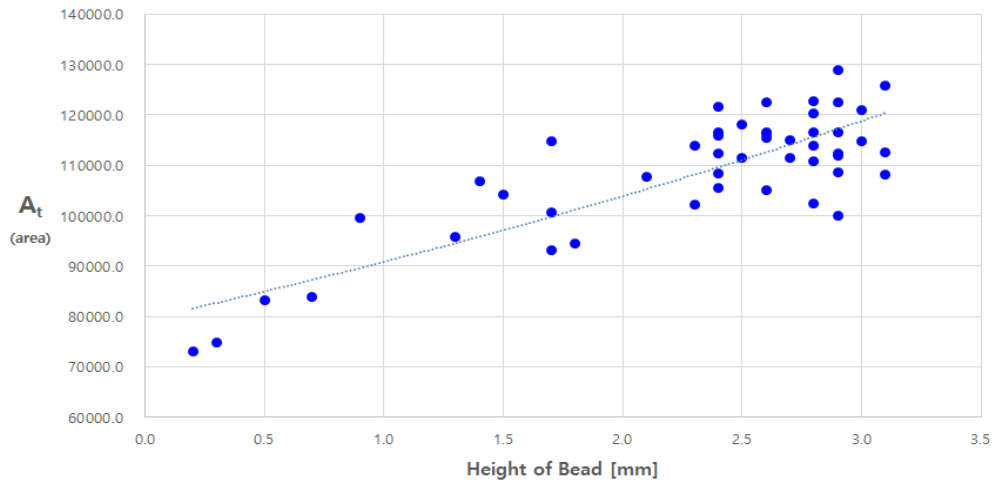


Fig.47 Relationship between A_T and the measured bead height

위의 Fig.47과 같이 덧살 높이가 증가함에 따라 특정 열강도(T^*) 이상의 면적 (A_T) 또한 증가함을 파악할 수 있다. 따라서 3.1절의 가설 4가 타당함을 증명할 수 있다.

4.3 용접결함과 열강도 분포의 상관관계

용접결함이 발생할 시 열강도 분포가 어떻게 변화하는지를 조사하기 위해 3.2.3 절에 기술한 바와 같이 용접결함이 발생될 수 있는 시편으로 용접한 후 방사선 투과검사(Radiographic test, 이하 RT)를 시행하여 용접결함의 발생유무를 조사한 후 결함이 발생된 지점에 대한 열강도 분포의 변화를 분석하였다.

아래의 Fig.48~Fig.68은 각 시편의 용접비드에 대해 RT를 시행한 결과 사진이다.

- 정상상태 RT 결과



Fig.48 RT result of weld bead having no gap and no defect - 1



Fig.49 RT result of weld bead having no gap and no defect - 2



Fig.50 RT result of weld bead having 1.6mm gap and no defect - 1



Fig.51 RT result of weld bead having 1.6mm gap and no defect - 2

Fig.48~Fig.51은 결함유도조치가 취해지지 않은 정상적인 시편으로 용접한 결과에 대한 RT사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 결함으로 보이는 부분이 없이 정상적으로 용접되었음을 알 수 있다. 단 Fig.48과 49의 끝부분은 용접 중의 변형으로 인해 간격이 생긴 것이며 Fig.50 및 51의 루트부에 보이는 검은 점들은 편면용접에 의해 나타난 시편 이면 루트부의 불규칙한 비드표면, 슬래그 부착 등에 의해 나타는 것으로 용접결함과는 무관한 현상이다.

N31

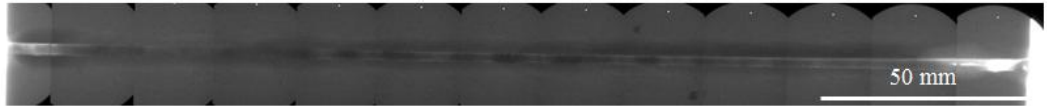


Fig.52 RT result of weld bead having 3mm gap and no defect - 1

N32

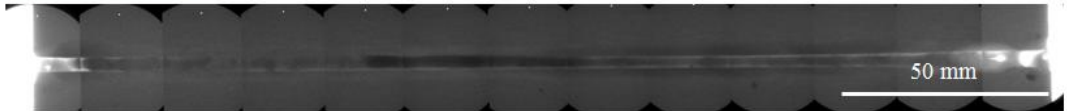


Fig.53 RT result of weld bead having 3mm gap and no defect - 2

Fig.52와 Fig.53은 3mm 갭을 갖는 시편에 용접 중의 변형을 막기 위해 가용 접을 실시한 시편으로 비교적 균일하게 용접되었으나 사진 상의 경로 끝부분의 불규칙하며 밝은 부분은 이 지점에서 발생한 용락 현상에 의해 비롯되었다. 용접 비드 경로 중 검게 나타난 부분은 편면용접으로 인한 루트부의 불규칙한 비드표면과 여기에 부착된 슬래그로 인한 것으로 결함과는 무관하다.

- 그리스(윤활유)를 도포한 기공결함유도 시편 용접의 RT 결과

G01



Fig.54 RT result of weld bead having no gap and coated with grease - 1

G02



Fig.55 RT result of weld bead having no gap and coated with grease - 2

Fig.54와 Fig.55는 기공 유도를 위해 그리스를 도포하였지만 용융지의 유동을 통해 발생된 기포가 잘 배출되어 기공을 형성하지는 않은 것으로 판단되며 용접 비드의 형상도 비교적 균일한 결과를 보여주었다.

G11

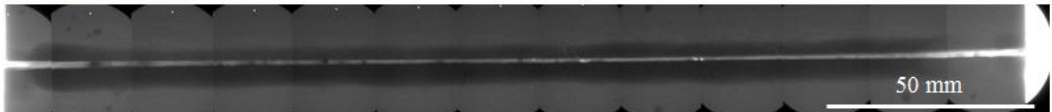


Fig.56 RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease - 1

G12



Fig.57 RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease - 2

G13



Fig.58 RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease - 3

G14

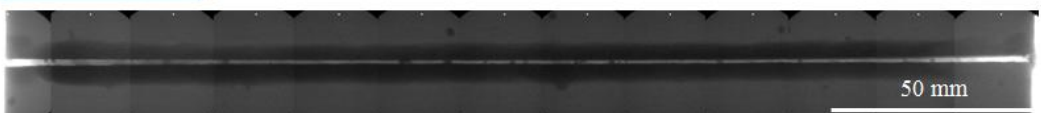


Fig.59 RT result of weld bead having 1.6mm gap and coated with grease - 4

Fig.56~Fig.59는 1.6mm의 갭으로 인해 이전의 0mm 갭과 달리 두 부재 사이의 갭을 흰색 선으로써 확인 할 수 있다. Fig.56의 G11 시편의 용접 비드에서는 두, 세 곳의 지점에서 기공으로 추정되는 흰색 점들을 발견 할 수 있었다. 위의 시편들의 갭에 나타나는 검은 부분은 시편 육안검사 결과 앞서 언급된 바와 같이 완벽히 제거되지 못하고 모재 뒤편의 비드표면에 남아있는 슬래그라고 판단

되며 용접 결함과는 무관한 것으로 판명되었다.

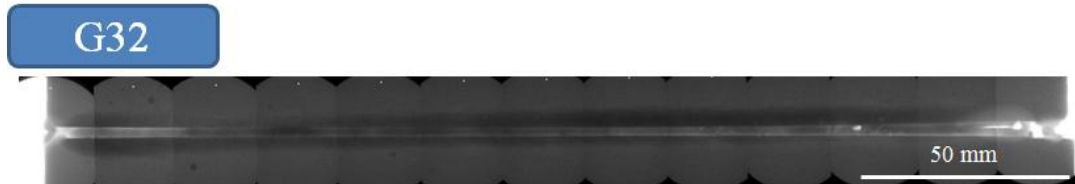


Fig.60 RT result of weld bead having 3mm gap and coated with grease - 1

Fig.60 시편은 3mm 갭으로써 이전의 시편과 다르게 용접 비드 끝단의 마무리가 원활히 이루어지지 않았음을 보여주며 이는 용락 현상에 의한 것으로 결함과는 무관하다. 또한 앞선 Fig.37의 G32 시편의 육안검사와 연관되어 용접 시작부위로부터 약 189mm 진행된 지점에서 기공으로 추정되는 결함을 발견할 수 있다.

- 슬래그 투입을 통한 결함유도 시편 RT 결과



Fig.61 RT result of weld bead having no gap and filled with slag pieces - 1



Fig.62 RT result of weld bead having no gap and filled with slag pieces - 2

Fig.61과 Fig.62는 결함유도를 위해 슬래그 조각을 넣은 시편이다. 해당 시편은 앞서 비드 외관결과에 상응하는 비드의 형상을 나타낸다. 두, 세 곳에서의 비드 형상이 정상적이지 못하나 이는 용융되지 못하고 남아있는 슬래그 조각으

로 인한 것이라 할 수 있다. 따라서 용접 결함과의 연관성을 조사할 필요가 있다. 두 시편 모두 특이한 점을 찾을 수 없으며 앞선 시편과는 달리 용락 현상이 발생하지 않은 것으로 확인된다.

S11

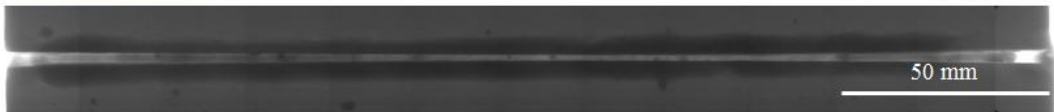


Fig.63 RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 1

S12



Fig.64 RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 2

S13



Fig.65 RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 3

S14

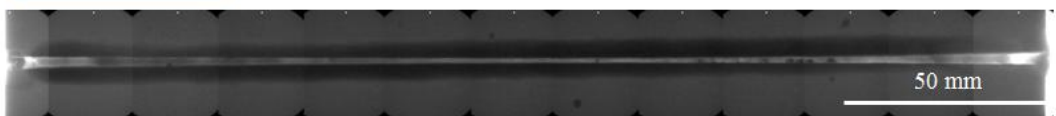


Fig.66 RT result of weld bead having 1.6mm gap and filled with slag pieces - 4

Fig.63~Fig.66은 슬래그 조각을 이용해 슬래그 혼입을 유도한 시편들 중 1mm gap을 발생시킨 시편들이다. 해당 시편들은 1mm gap으로 인해 용접 경로에 밝은 부분이 발생하였으며 이 중 검은 부분은 앞서 언급된 바와 같이 편면 용접 비드 후면에 남아있는 슬래그 조각으로 결함과는 무관하다.

S31

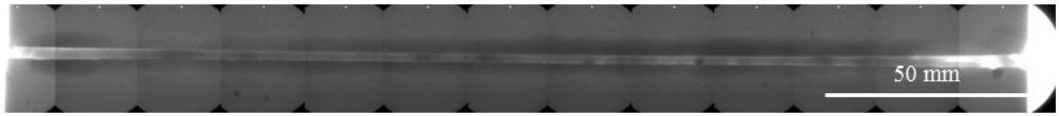


Fig.67 RT result of weld bead having 3mm gap and filled with slag pieces - 1

S32

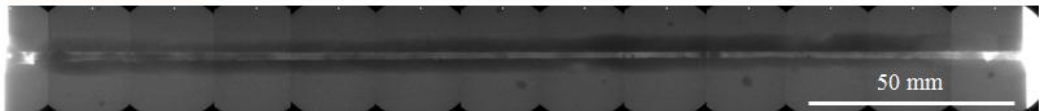


Fig.68 RT result of weld bead having 3mm gap and filled with slag pieces - 2

Fig.67과 Fig.68은 3mm 갭으로써 용접 비드 끝부분의 용접이 원활히 이루어지지 않고 용락이 발생하였다. 이는 로봇용접 경로 끝단에 비드 마무리가 원활치 않아 발생한 것으로 결함과는 무관하다. 용접경로에서는 결함으로 예상되는 특이한 점이 발견되지 않았으며 검은색으로 보이는 부분은 앞서 언급된 바와 같이 모재 이면에 제거되지 못한 슬래그의 흔적이라 할 수 있으며 결함과는 무관하다.

4.3.1 RT 결과에 따른 열장도 분석

위의 RT(Radiographic test) 결과를 바탕으로 기공, 슬래그 혼입 등의 결함이 발생되었으리라 예상되는 시편을 바탕으로 해당 위치에서의 A_T 변화를 분석하였다.

열장도 변화를 판단하기 위해 용접 진행경로 중 결함으로 예측되는 위치를 기준으로 전, 후 10mm 부위에 걸친 열장도를 비교하였다. 각 열장도의 1번 항목은 결함발생 예상 위치를 기준으로 용접진행 방향의 반대방향으로 5mm 전으로부터 10mm 떨어진 구간의 열장도의 평균을 나타내었다. 2번 항목은 결함발생 예상 위치를 기준으로 양쪽으로 각 5mm 부분의 열장도 평균을 나타낸다. 3번 항목은 결함발생 예상 위치를 기준으로 용접진행 방향으로 5mm부터 약 10

mm 떨어진 구간의 열강도 평균을 나타낸다.

- 기공 발생 지점에서의 A_T 변화 1

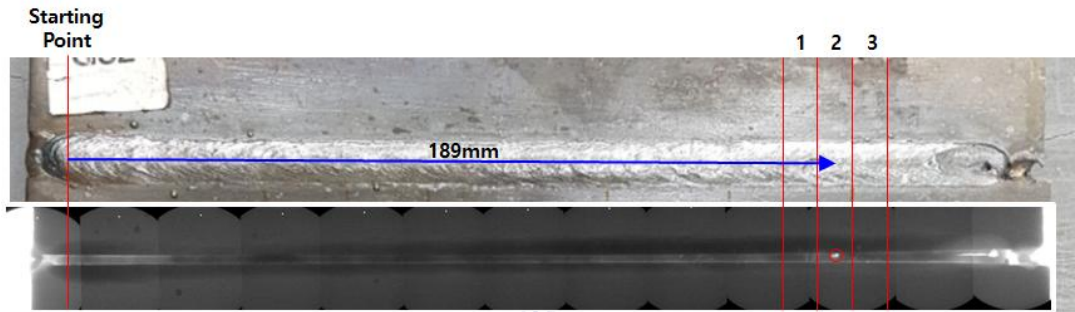


Fig.69 Pore-occurred location on the bead of specimen No. G32

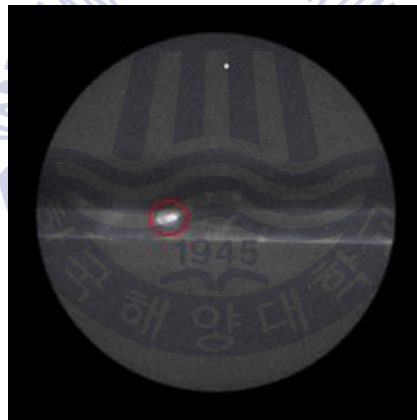


Fig.70 RT result of pores-1

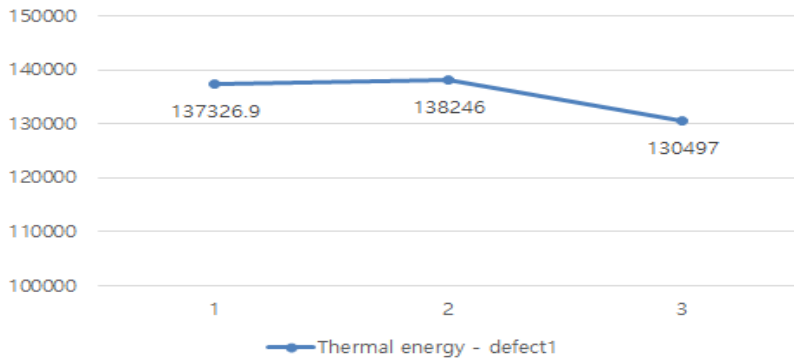


Fig.71 The change of thermal strength at the pore-occurred location

Fig.69로 부터 용접 시작 후 약 189mm 지점에 기공으로 예상되는 결함을 감지 할 수 있다. Fig.70에 나타난 바와 같이 용접 비드에 투과 결과가 주변과 다른 모습을 볼 수 있다. 이를 토대로 Fig.71과 같이 분석한 결과 결함이 발생하였을 것으로 예상되는 지점 2에서 주변 영역보다 상대적으로 높은 열강도를 갖고 있는 것으로 확인 할 수 있었다. 지점 1은 결함 유도 물질인 grease가 용접 진행방향과 반대로 밀려남에 따라 열강도의 차이가 크지 않은 것으로 예상된다.

- 슬래그 혼입 발생 지점에서의 A_T 변화

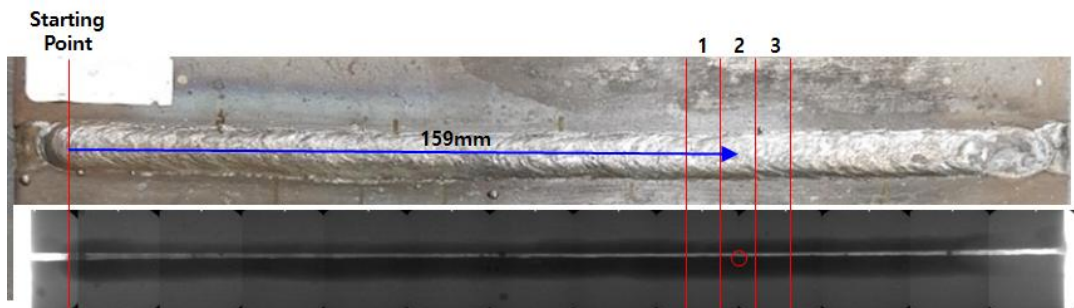


Fig.72 Location of Slag inclusion on the bead of specimen No. G12

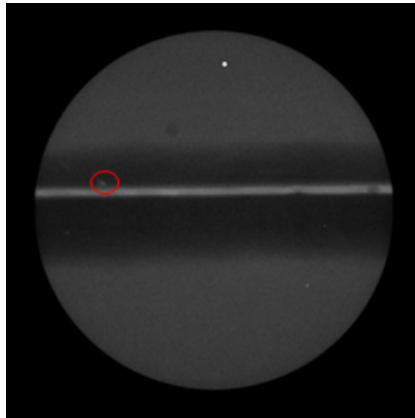


Fig.73 RT result of slag inclusion

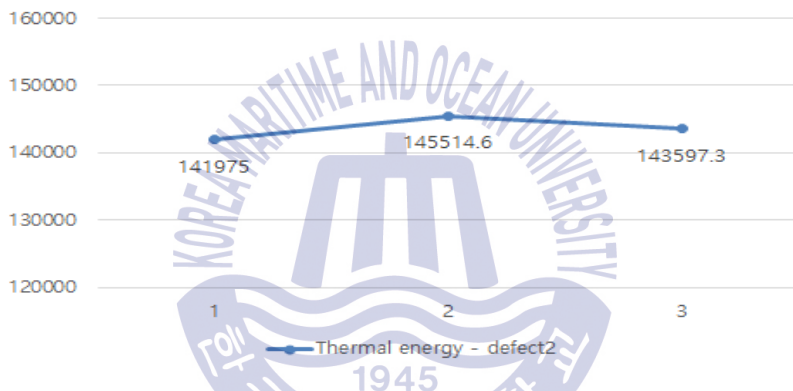


Fig.74 The change of thermal strength at the predicted point of slag inclusion

Fig.72는 그리스를 도포한 시편이지만 결함의 크기와 위치로 미루어 보았을 때 용접 시작 후 약 159mm 지점에 슬래그 혼입으로 예상되는 결함을 감지 할 수 있다. Fig.73을 통해 해당 부위를 확대하여 확인한 결과 용접선을 기준으로 상단에 투과 결과가 주변과 다른 부위를 찾을 수 있다. 이를 토대로 Fig.74와 같이 분석한 결과 결함이 발생하였을 것으로 예상되는 지점 2에서 주변 영역보다 상대적으로 높은 열강도를 갖고 있는 것으로 확인 할 수 있었다.

- 기공 발생 지점에서의 A_T 변화 2

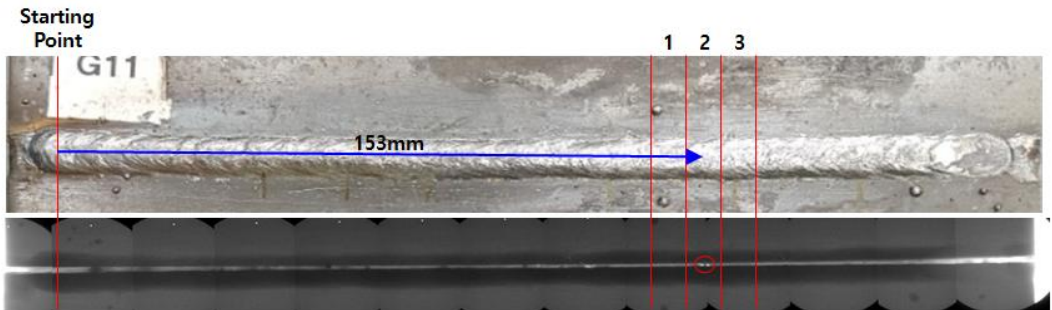


Fig.75 Pore-occurred location on the bead of specimen No. G11



Fig.76 RT result of pores-2

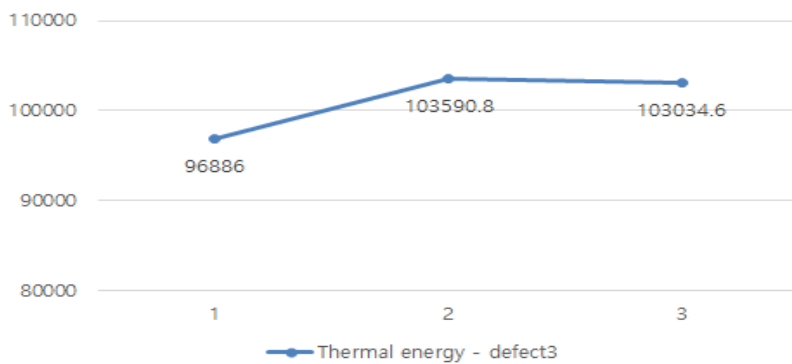


Fig.77 The change of thermal strength at the predicted point of pores

Fig.75로 부터 용접 시작 후 약 153mm 지점에 기공으로 예상되는 결함을 감지 할 수 있다. Fig.76을 통해 용접 경로 중 비드의 중심부분에 투과 결과가 주변과 다른 한 점을 찾을 수 있다. 이를 토대로 Fig.77과 같이 분석한 결과 결함이 발생하였을 것으로 예상되는 지점 2에서 주변 영역보다 상대적으로 높은 열강도를 갖고 있는 것으로 확인 할 수 있었다. 지점 3은 아크와 보호가스로 인해 그리스가 주변까지 영향을 줄 수 있을 것임을 예상할 수 있다.

위의 세 가지 분석 결과를 바탕으로 3.1절의 가설 1, 2를 증명할 수 있다.

4.3.2 결함예상 지점에서의 열강도 분석

이번 절에서는 RT결과를 통해 결함이 가시적으로 발견되지는 않았지만 미세 결함이 발생할 가능성이 큰 결함유도조치 지점에서의 W_T , A_T 값을 분석하였다.

측정 지점 1,2,3은 결함유도조치가 취해지지 않은 조건(normal)과 결함유도조치가 취해진 조건(defected)에서 각각 용접 시작점으로부터 약 15, 45, 75mm 떨어진 곳의 열강도 이상의 면적(A_T)를 비교하였다.

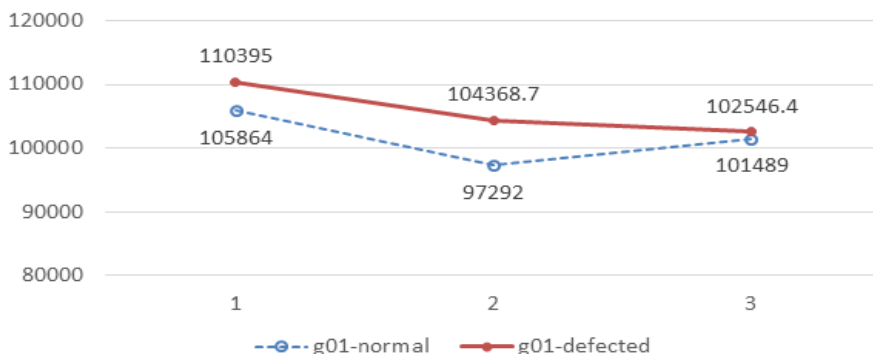


Fig.78 The change of A_T on 0mm gap with grease-1

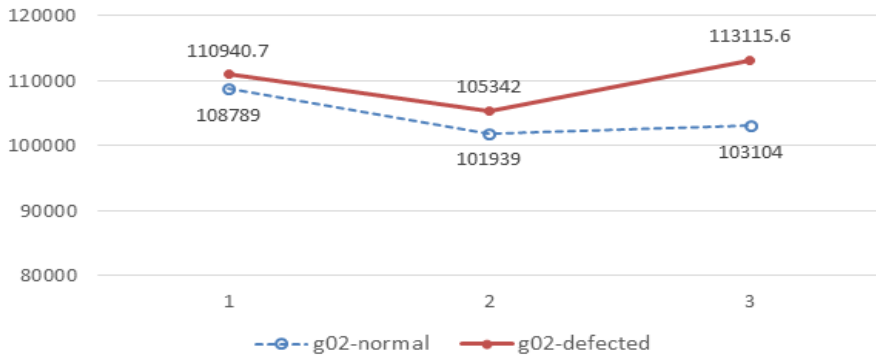


Fig.79 The change of A_T on 0mm gap with grease-2

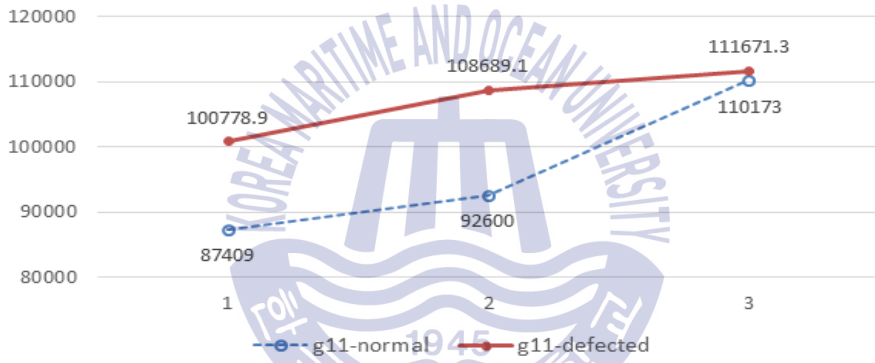


Fig.80 The change of A_T on 1.6mm gap with grease-1

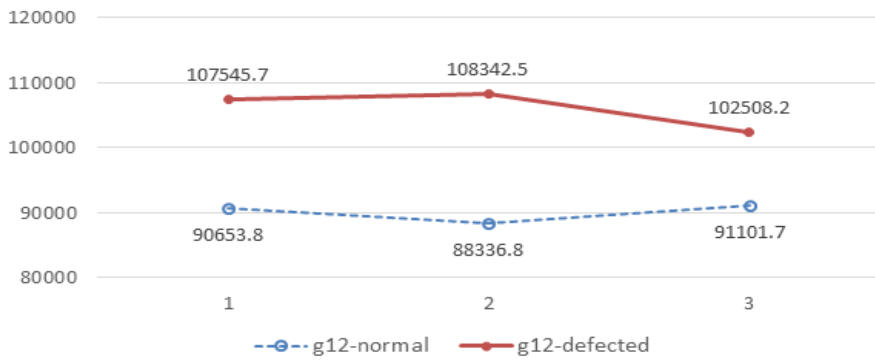


Fig.81 The change of A_T on 1.6mm gap with grease-2

Fig.78~Fig.81은 그리스 결합유도 지점과 정상지점에서의 A_T 를 비교하였다. 0mm 갭에 비해 1.6mm 갭의 열강도 면적이 다소 높게 측정되었으며 상대적으로 결합유도조치가 취해진 부분에서의 열강도 면적 값이 크게 측정됨을 확인할 수 있다.

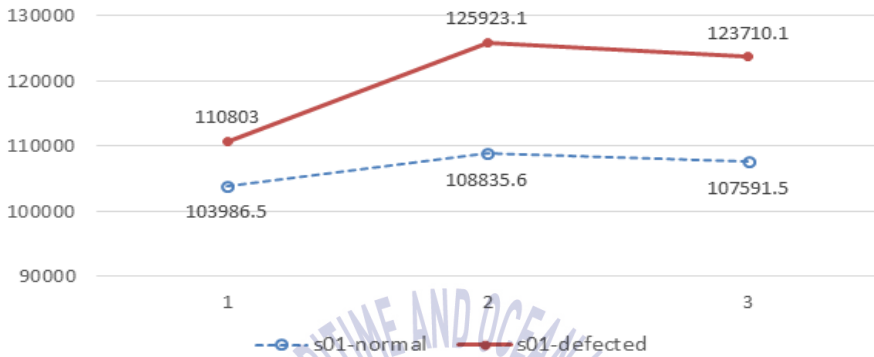


Fig.82 The change of A_T on 0mm gap with slag pieces-1

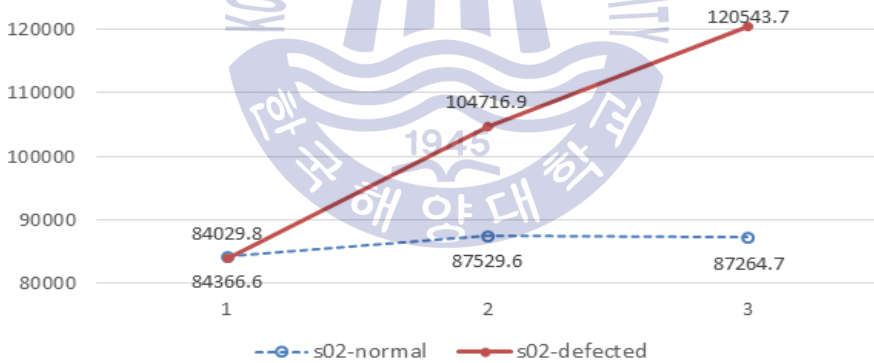


Fig.83 The change of A_T on 0mm gap with slag pieces-2

Fig.82와 Fig.83은 0mm 갭에서 슬래그 조각을 이용하여 결합이 유도된 시편의 열강도 면적을 비교 하였다. Fig.82는 그리스를 통한 결합 유도보다 열강도 면적이 크게 측정됨을 보이며 이는 슬래그가 용융되어 열강도 면적에 영향을 주었으리라 판단된다.

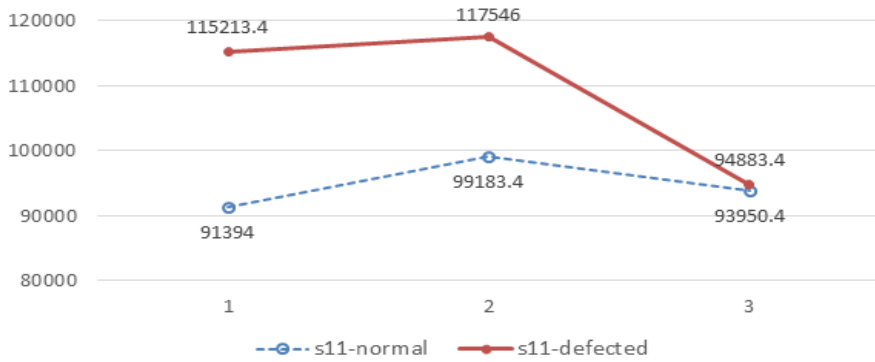


Fig.84 The change of A_T on 1.6mm gap with slag pieces-1

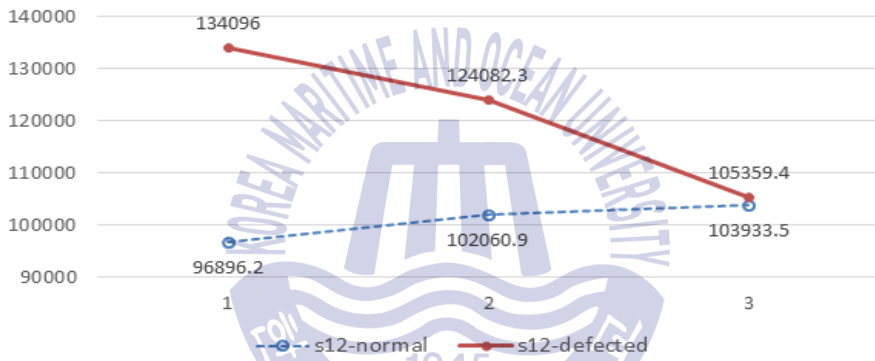


Fig.85 The change of A_T on 1.6mm gap with slag pieces-2

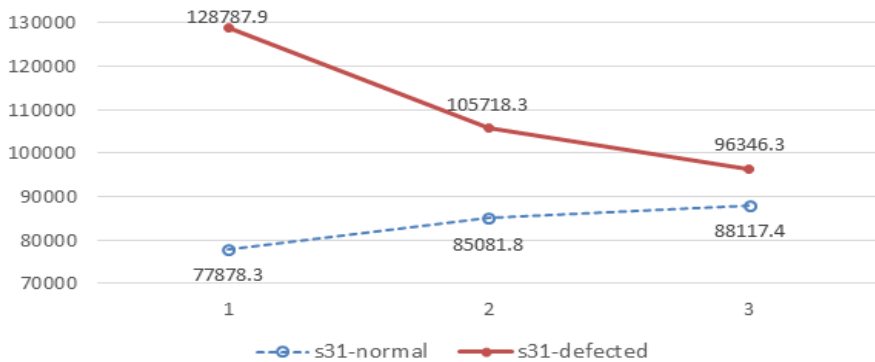


Fig.86 The change of A_T on 3mm gap with slag pieces-1

Fig.84~Fig.86은 1.6mm와 3mm 갭에서 슬래그 조각으로 결함이 유도된 시편의 열강도 면적을 비교 하였다. 앞선 시편들과 마찬가지로 결함이 예상되는 지점이 정상인 부분에 비해 열강도 면적이 높게 나타났으며 3mm 갭은 용입 깊이가 커짐으로 인해 덧살의 높이가 낮아져 1.6mm에 비해 작은 값을 나타내고 있다.

위의 분석을 통해 결함이 예상되는 지점에서 열강도의 면적이 정상 부분에 비해 높게 형성 되는 것을 확인하였다. 이는 RT 결과를 통해 결함이 가시적으로 드러나지는 않았지만 해당 부위에서의 열강도 변화와 평가변수 A_T 값의 변화를 통해 X선 투과검사에서 나타나지 않은 미세한 기공이나 슬래그 혼입에 의한 열전도 변화에 기인했을 것으로 사료된다.



제 5 장 결 론

본 연구를 통해 적외선카메라로 부터 얻어진 용접비드 주변 및 용융 부위에 대한 열화상 이미지는 그 부분의 열강도분포를 보여주며 이의 변화를 분석하여 용접 품질을 추정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 열강도분포의 변화에 대한 효과적인 분석을 위해 Thermoanalyzer로 명명된 열강도 분석 프로그램을 개발하였다.

용접실험과 Thermoanalyzer를 사용한 실험결과 분석을 통해 다음과 같은 3가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 2개의 평가 변수, 특정 열강도 T^* 에서의 열강도폭 W_T 와 T^* 이상의 열강도 면적 A_T 는 비드 폭, 비드 높이, 결합의 유무에 따라 일정한 변화를 보여 용접 품질을 추정에 유용한 변수임을 알 수 있었다.

둘째, 비드 폭은 열강도폭 W_T 와 비례하는 관계임이 증명되었고 덧살 높이는 열강도 면적 A_T 와 비례하는 관계를 보여 용접 시 W_T , A_T 의 변화를 통해 비드 폭과 비드 높이를 추정할 수 있었다.

셋째, 비드 내의 용접결함은 그 영역이 용접금속보다 낮은 열전도로 인해 비드 영역의 열강도가 더 크게 되며 따라서 A_T 의 값이 커짐을 알 수 있었다.

위의 3가지 결론을 통해 용접부의 열화상에서 얻어지는 열강도 분포의 변화

를 추적 하여 비드 폭, 비드높이 및 결합유무를 추정할 수 있음이 밝혀졌다.

추후 연구에서는 보다 다양한 용접결함에 대한 열강도 분포 곡선의 변화 패턴을 정밀 분석 하여 비파괴검사를 시행하지 않고도 용접 결함의 종류나 용접 결함의 발생 정도까지 추정할 수 있을 것으로 사료된다.



Reference

- 박주용, 2010. 용접생산공학. GS인터비전.
- Yoon, J. Y., Lee, Y. M., Shin, S. C., Choi, H. W., 2015, *A Study on Welding Process Algorithm through Real-time Current Waveform Analysis*, Journal of KWJS 33-4, 24-29.
- Yoon, J. Y., Shin, S. C., Choi, H. W. : *Characterization of MAG Welding Quality by Real Time Current Signal Measurement*, KWJS 2016-Spring, 83-83
- Hwang, D. S., Gho, M. H., *Development and Application of Realtime Weld Quality Monitoring System*, 2012, Journal of KWJS 30-1, 44-50
- Mok-Young Lee, *Quality Monitoring Techniques Using Thermal Radiation in Laser Welding Process*, 2005, Journal of KWJS 23-3, 26-30
- Kim, I. S., Park, C. U., Son, J. S., Park, S. Y., Jung, Y. J., Tarlagadda Prasad , *Controlling Welding Bead Using Infrared Thermography*, 2000, Journal of Welding and Joining 18-6, 55-61
- U. Sreedhar, C. V. Krishnamurthy, Krishnan Balasubramaniam, 2012, *Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring*, Journal of Materials Processing Technology vol.212, 1557-1566.
- Hwang, D. S., Gho, M. H., 2012, *Development and Application of Realtime Weld Quality Monitoring System*, Journal of KWJS 30-1, 44-50.
- Cho, S. M., Choi, K. W., Lee, G. W., 2000, *Trends of Monitoring Technology for the Arc Welding Quality*, Journal of Welding and Joining 18-4, 4-10
- Paul Kah, Pavel Layus, 2014, *Real-Time Weld Process Monitoring*.
- Kim, S. C., Shin, J. Y., Jung, H. C., 2016, *Defect measurement of Welded pipe by welding using infrared thermography*, 한국생산제조학회 학술발표대회

논문집, 165.

C. Fabry, A. Pittner, 2016, *Data-based Process Monitoring and Control in Narrow Gap GMAW*.

Ro, C. S., Kim, K. S., Chang, H. S., 2014, *Method for Measuring Weld Temperature Using an Infrared Thermal Imaging Camera*, 한국비파괴검사학회지 34(4), 299-304.

