



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.

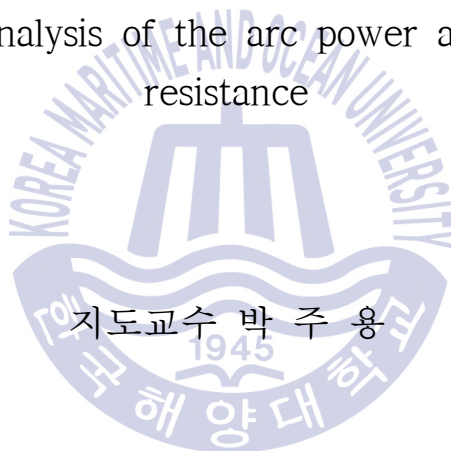
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

아크 출력과 동저항의 통계적 분석에 따른 아크 안정성 및 용접 품질에 관한 연구

Study on the arc stability and the weld quality based on
the statistical analysis of the arc power and the dynamic
resistance



2019년 01월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

송 상 호

본 논문을 송상호의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장	공학박사	남 중 호	(인)
위 원	공학박사	조 효 제	(인)
위 원	공학박사	박 주 용	(인)

2019년 1월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 내용	4

2. 아크 출력과 아크 동저항에 대한 고찰

2.1 용접 비드 형상	5
2.2 용접 전류 및 용접 전압	7
2.3 아크 출력과 아크 동저항	8

3. 아크 안정성 및 용접 품질 평가 기준

10

4. 본 론

4.1 실험 가설	16
4.2 실험 계획	17
4.2.1 실험 장비	17
4.2.2 분석 소프트웨어	19
4.2.3 사용 시험편	21
4.2.4 용접 조건	22
4.2.5 비파괴 검사	23

5. 실험 및 결과

5.1 시험편 육안 확인 및 비파괴 검사 결과 비교	24
5.2 전류-전압 평면 궤적과 출력 및 동저항의 상관관계	37
5.2.1 전류-전압 파형 전처리	38
5.2.2 전류-전압 범위에 따른 구간별 데이터 밀집도 분석	39
5.2.3 전류-전압 평면 궤적 분석 결과	42
5.3 검증	44

6. 결 론

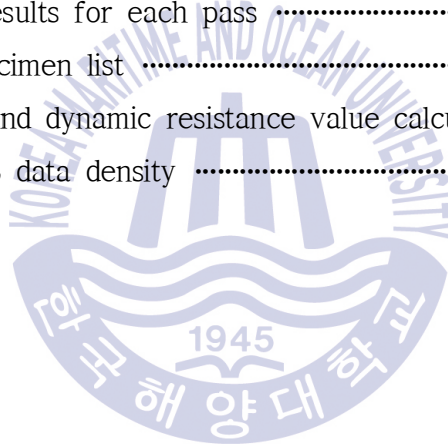
50

참고문헌

52

List of Tables

Table 1 Groove shape by plate thickness	6
Table 2 Parameter of arc stability and arc quality	10
Table 3 Welding materials	22
Table 4 Welding parameter	22
Table 5 Inspection results for each pass	34
Table 6 Selected specimen list	37
Table 7 Arc power and dynamic resistance value calculated with average 79% data density	42



List of Figures

Fig. 1 Cross section of butt joint welded (V-Groove)	5
Fig. 2 Current-voltage distribution map	11
Fig. 3 Normalized current-voltage distribution map	13
Fig. 4 Normalized current-voltage distribution map with arc power and dynamic arc resistance	14
Fig. 5 HYOSUNG ProPAC600 welding machine	17
Fig. 6 MONITECH welding expert multi	18
Fig. 7 WELD GOOD WAVE software	19
Fig. 8 Various logo of python library	20
Fig. 9 Specimen carbon plate	21
Fig. 10 Report of radiographic examination (a)	25
Fig. 11 Report of radiographic examination (b)	26
Fig. 12 Front of failure specimen 03	27
Fig. 13 Back side of failure specimen 03	27
Fig. 14 Radiographic examination of specimen 03	27
Fig. 15 Front of failure specimen 04	28
Fig. 16 Back side of failure specimen 04	28
Fig. 17 Radiographic examination of specimen 04	28
Fig. 18 Front of failure specimen 05	29
Fig. 19 Back side of failure specimen 05	29
Fig. 20 Radiographic examination of specimen 05	29
Fig. 21 Front of failure specimen 06	30
Fig. 22 Back side of failure specimen 06	30

Fig. 23 Radiographic examination of specimen 06	30
Fig. 24 Front of failure specimen 07	31
Fig. 25 Back side of failure specimen 07	31
Fig. 26 Radiographic examination of specimen 07	31
Fig. 27 Front of failure specimen 08	32
Fig. 28 Back side of failure specimen 08	32
Fig. 29 Radiographic examinamtion of specimen 08	32
Fig. 30 Example of signal data before pre-processing	38
Fig. 31 Example of signal data after pre-processing	38
Fig. 32 Normalized current-voltage distribution map by Area	39
Fig. 33 Log normal distribution by area data percent	40
Fig. 34 Cumulative distribution by area data percent	41
Fig. 35 Distribution map at 22% arc power and dynamic resistance section	43
Fig. 36 Example of 125 distribution map with arc power and dynamic resistance section	44
Fig. 37 Specimen 2 – 2 pass weld quality analysis	46
Fig. 38 Specimen 7 – 4 pass weld quality analysis	46
Fig. 39 Specimen 11 – 3 pass weld quality analysis	47
Fig. 40 Specimen 3 – 1 pass weld quality analysis	48
Fig. 41 Specimen 5 – 2 pass weld quality analysis	48
Fig. 42 Specimen 11 – 4 pass weld quality analysis	49

Study on the arc stability and the weld quality based on the statistical analysis of the arc power and the dynamic resistance

Song, Sang Ho

Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

Welding techniques are applied as a major process in the manufacture of most metal structures. In particular, the automotive, shipbuilding and plant industries have been partially automated and are still heavily equipped with manual and semi-automatic welding. In terms of weld quality, the quality and stability of the arc can be considered an important factor in order to produce a designer or a result of a weld meeting specific criteria. However, there is a possibility of weld defects even if these factors fall into the normal category, and when assessing weld quality, they rely on the visual assessments and manual testing through non-destructive testing.

This study performed more than 80 welding times and detected welding current and welding voltage using a welding signal detector during the welding process. After converting the detected signals into data, power and dynamic resistance related to the arc energy intensity were calculated. It is like the energy to melt wires and parent metal, and the arc dynamic resistance is generally associated with arc length and at the same time a constant power is required to meet the desired weld quality, making it an evaluation on weld quality and arc stability. Probability and graph analysis based on the statistical method were then performed by projecting the calculated values onto the current-voltage plane trajectory. The relationship between these results and the results of welding by visual and non-destructive testing was investigated to establish objective and quantitative criteria to assess how the quality and stability of arcs alone affect weld quality. It is judged that this can be easily evaluated by a person who is not a high-function or a non-destructive examination.

KEY WORDS: Welding current and voltage 용접 전류, 전압; Welding monitoring 용접 모니터링; Arc stability 아크안정성; Weld quality 용접품질 Statistical method 통계적 방법

아크 출력과 동저항의 통계적 분석에 따른 아크 안정성 및 용접 품질에 관한 연구

Song, Sang Ho

Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

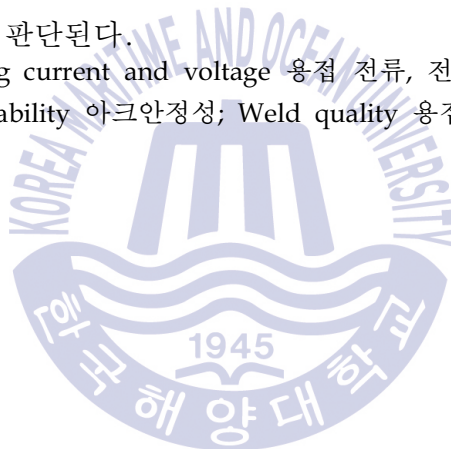
Abstract

용접기술은 대부분의 금속구조물 제조에서 주요 공정으로 적용된다. 특히 자동차, 조선해양, 플랜트 산업은 전체 건조공정의 대부분에 용접공정이 적용되고 있고 부분적으로 자동화가 이루어지고 있으나 여전히 수동 및 반자동 용접이 많이 적용되고 있다. 용접 품질 측면에서 설계자 또는 특정 기준에 만족하는 용접 결과를 만들기 위해 아크의 품질과 안정성은 중요한 요소라고 볼 수 있다. 하지만 이러한 요소들과 같은 다양한 용접 변수들이 정상 범주에 속하더라도 용접 결함이 발생할 가능성이 있으며, 용접 품질을 평가할 때는 고기능자의 육안 평가와 비파괴검사를 통한 수동 검사에 의존하고 있다.

본 연구에서는 80회 이상의 용접을 수행하고 용접과정동안 용접신호 검출 장치를 이용하여 용접전류와 용접전압을 검출하였다. 검출된 신호를 데이터

로 변환한 후 아크 에너지 세기와 연관이 있는 출력(power), 동저항(dynamic resistance)를 계산하였다. 이는 와이어 및 모재를 용융 시키는 에너지와 같고, 일반적으로 아크 동저항은 아크 길이와 관련이 있으며 동시에 일정한 출력이 있어야 원하는 용접 품질을 만족할 수 있기 때문에 아크의 품질과 안정성에 대한 판단 요소로 삼았다. 그 다음 전류-전압 평면 궤적에 계산된 값을 투영하여 통계적 방법으로 확률 및 그래프 분석 등을 시행하였다. 이 결과와 육안 및 비파괴검사에 의한 용접 결과의 관련성을 조사하여 용접신호의 분석만으로 아크의 품질과 안정성이 용접 품질에 어떠한 영향을 미치는 지를 평가하는 객관적, 정량적 기준을 마련하였다. 이를 통해 고기능자 또는 비파괴검사가 아닌 일반 작업자가 손쉽게 용접 품질을 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

KEY WORDS: Welding current and voltage 용접 전류, 전압; Welding monitoring 용접 모니터링; Arc stability 아크안정성; Weld quality 용접품질 Statistical method 통계적 방법



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

용접은 조선 및 해양플랜트 분야의 공정과 설계에 따라 조금씩 다르지만 절반 이상에서 필요할 정도로 단순히 강재를 접합하는 기술을 넘어서서 실제 생산효율에 영향을 끼치고 있는 중요한 부분이다. 최근 용접공정의 경우 무인화 및 자동화 시스템의 구축이 급속하게 발전하고 있어 용접 현상에 대한 정확한 해석과 분석이 요구되고 있다. 또한 고품질 용접의 비중이 커짐에 따라 용접 중 발생하는 불량을 파악하거나 원인규명을 통한 대책 수립으로 제품의 품질과 신뢰성을 확보하기 위한 품질 평가 시스템 개발이 중요시 되고 있는 실정이다.

품질 평가의 경우 일반적으로 비드 표면에 대한 외관 검사가 1차적으로 이루어지게 된다. 비드 표면이 미려하고 규칙적인 리플과 함께 비드 폭 또는 높이의 변화가 적을 경우 품질이 양호한 것으로 판정하며 표면 형상이 불규칙하거나 비드 폭 또는 높이의 변화가 많은 경우, 언더컷이나 오버랩이 발생한 경우는 불량으로 판정하게 된다. 하지만 이러한 경우 비드 내부에 존재하는 결함 즉, 기공, 균열, 용융 불량 및 용입 부족의 경우 외관 검사로만은 결함을 추정하기 힘들다. 따라서 2차적으로 비파괴 검사를 수행하여 결함유무를 조사한 후 이를 반영하여 판정을 내리게 된다.

상기의 과정은 객관적 품질 평가까지 상당한 기간과 비용이 요구될뿐더러 외관 검사만 수행한다고 해도 고기량 용접기술자가 필요하게 된다. 본 연구에서는 비드형상 또는 비파괴검사에 의존하지 않는 객관적이고 신속한 평가기법을 위해 용접신호를 대표하는 용접 전류와, 전압을 이용하여 용접 품질과 안정성을 보고자하였다. 이는 결함 발생의 중요한 인자가 될 수 있으므로 두 인자값으로부터 품질과 관련된 특정 계수를 추출하여 이 계수값을 통한 분석과 기준

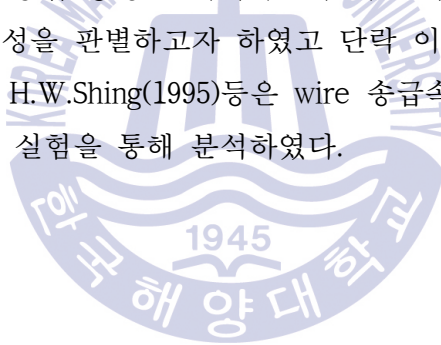
의 외관 검사 및 비파괴검사 결과와의 검증을 통해 효과적인 용접 품질 평가 기준을 마련하고자 하였다.



1.2 연구 동향

용접부 품질 추정에 관한 연구로 일반적인 방법은 용접부의 다양한 데이터를 측정하여 얻어낸 데이터를 분석하는 방법이 보편적이다. 특히 용접 전류와 용접 전압 신호 인자는 반드시 고려해야하는 부분이며 펄스 파형과 수치해석, 레이저 센서, 방출 광량 등의 다양한 센서로부터 측정된 데이터를 변수로서 추가하여 용접의 생산성 향상과 품질 평가 기준 연구가 진행되고 있다.

Y.J.Park(1998)등은 용접 조건에 따른 비드 형상, 스파터 발생량과 아크 신호 특성등의 다양한 용접 변수를 고려하여 FCAW의 아크 안정성 평가를 하고자 하였다. G.G.Koo(2014)등은 전압과 전류 진동의 정도로 아크 안정도를 추정하는 모델을 개발을 통해 최대 전력을 투입할 수 있는 알고리즘을 구현하고자 하였다. S.K.Kang(1997)등은 용접 공정을 해석하고자 하는 추세를 따라 스파터 포집기를 이용한 아크 안정성을 판별하고자 하였고 단락 이행모드의 특성에 주목하여 연구를 진행하였다. H.W.Shing(1995)등은 wire 송급속도의 변동에 따른 아크 안정성과의 상관관계를 실험을 통해 분석하였다.



1.3 연구 내용

본 연구에서는 FCAW(Flux Cored Arc Welding) 용접 공정과 관련하여 2장에서 용접 비드, 용접 전류 및 전압 그리고 아크 출력과 동저항에 대한 전반적인 개념에 대해 논하였다. 3장에서는 아크 안정성과 품질 평가의 기준이 되는 아크 출력과 동저항 선으로부터 만들어지는 영역에 대해 설명하였다. 이와 관련된 실험 조건과 장비, 분석 도구 등을 4장에서 설명하고자 하며, 5장에서 비교검증을 위한 비파괴 검사 결과와 육안 평가 결과 그리고 파형 데이터의 통계적 분석 방법 및 결과 등을 소개하고 품질 평가 기준을 통해 분석한 결과에 대해서도 설명하고자 한다. 마지막으로 6장에서는 결론을 통해 연구 내용을 정리하고자 한다.



제 2 장 아크 출력과 아크 동저항에 대한 고찰

2.1 용접 비드 형상

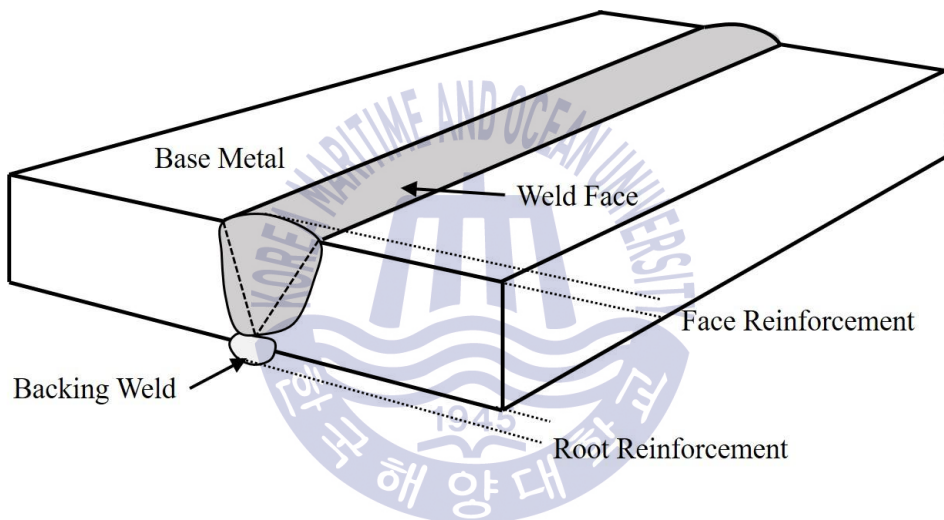


Fig. 1 Cross section of butt joint welded (V-Groove)

용접 후 비드의 형상은 Fig. 1과 같이 나타난다. 일반적으로 이음부(Joint)와 그루브(Groove)에 따라 명칭을 달리하는데, 위의 사진은 맞대기 이음부(Butt joint)이다. 또한 모재(Base Metal) 가운데가 V 모양으로 홈이 파져있는데 이는 V-그루브(V-Groove)라 한다. 그루브는 판재 이음 시 용접열이 두께방향으로 밑 부분까지 전달될 수 있도록 하는 역할을 한다. 그루브 형상은 통상 5가지 형상으로 구분되며 Table 1은 박판에서 후판으로 판 두께가 달라짐에 따라 취해야 할 적절한 그루브 형상을 보여주고 있다.

용접 덧살은 용접을 시공한 방향으로 모재보다 튀어나온 높이로서 표면 덧살

(Face reinforcement)와 이면 덧살(Root reinforcement)로 나누어 볼 수 있다. 용입 부족(Incomplete penetration), 균열(Cracking), 언더컷(Undercut), 기공(Porosity), 블로우홀(Blow hole) 등과 같은 용접 결함을 덧살에서 찾아 볼 수 있어 용접 품질 평가 시 주의 깊게 봐야할 부분이다. 또한 비드표면에는 나타나지 않으나 비드 내부에도 기공이나 균열 또는 비금속 혼입물과 같은 용접결함이 포함된 경우도 있다.

Table 1 Groove shape by plate thickness

Plate thickness	박판 ← → 후판
Groove shape	스퀘어 - 베벨 - V - J - U



2.2 용접 전류 및 용접 전압

용접 전류는 아크의 에너지 상태와 와이어 용융에 직결되는 중요한 변수로 비드 폭과 용입 깊이를 결정하는 매우 중요한 인자이다. 통상적으로 용접 전류는 와이어 송급 속도와 비례하도록 용접전원에서 설정되어 있다. 이 설정 값은 와이어 끝과 모재의 표면사이의 거리인 아크 길이에 따라 변화하며 토치의 전류 컨택트 팁과 와이어 끝 거리인 와이어 돌출길이(Stickout 또는 Wire extension)에 의해서도 변화한다.

용접 중에 용접전원에서 설정된 초기 전류 값의 변화가 적을수록 비드의 형상도 변화가 적게 된다. 또한 용접 전압의 경우는 아크길이와 직접 비례하며 용접전압이 너무 낮으면 아크 길이가 짧아져 단락에 의해 아크가 꺼지며 너무 큰 경우도 아크가 꺼지게 되므로 일정 범위를 유지하여야 한다. 일정범위가 유지된 경우 아크 안정성을 확보하게 되는데 아크 안정성이 확보되는 범위 내에서도 전압이 높으면 비드가 퍼져 비드높이가 줄어들고 비드 폭이 커지게 되며 전압이 낮으면 비드가 블록해지며 비드 폭이 줄어들게 된다. 따라서 용접전압의 변화도 최소화되는 것이 바람직하다 할 수 있다.

하지만 와이어가 용융되어 모재로 용융물이 이동하는 용접금속이행과정에서 아크 길이의 변화는 필연적으로 발생하게 되고 용접금속의 이행은 매초 수십회에서 수백번까지 일어난다. 이 과정에서 용접전류와 전압은 일정한 유형으로 아주 짧은 시간에 변화를 반복하게 된다.

2.3 아크 출력과 아크 동저항

아크는 전극과 모재사이에 일어나는 전기적 방전현상으로 아크 내에는 전기를 띤 수많은 입자가 존재해 자신과 반대의 극을 갖는 전극으로 이동하게 된다. 전자(e-)는 음극에서부터 방출되어 고온 분위기로 인해 방출되는 열 방출(Thermal emission)과 전위차가 큰 전기장에 의해 방출되는 전기장 방출(Field emission)에 의해 방출된다.

따라서 아크 방전은 전극에 전위차가 발생함에 따라 전극과 기체에 지속적으로 발생하는 절연 파괴의 일종으로서 아크 용접을 에너지의 근원에 따라 분류하면 전기에 속하게 된다. 전위차에 의해 흐르는 전류는 옴의 법칙(Ohm's law)을 따르게 되는데 전기장과 도선의 전압, 도선의 길이 간에 상관관계를 통해 수식으로 표현한 형태는 식 (1)과 같다.

$$V = IR, \quad (1)$$

단, V =전압 [V], I =전류 [A], R =저항 [ohm]

P =출력, V =전압, I =전류, R =전기저항으로 표현한다면 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$P = VI$$
$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

용접은 용접기와 모재가 아크에 의해 연결되어 형성되는 전기회로에 해당되며 아크는 아크 길이에 의해 저항이 달라지는 일종의 가변저항으로 간주할 수 있다. 이때의 아크출력은 아크의 에너지로서 아크 양단의 전압과 아크를 지나가는 전류의 곱으로 표현된다. 용접 시 아크길이는 계속 변화하고 아크길이에 의해 정해지는 저항도 이에 따라 순간적으로 계속 변화하므로 아크저항은 일반적으로 아크 동저항으로 일컬어진다.

식 (1)과 식(2)에서 확인할 수 있듯이 아크 출력과 동저항은 용접 전류와 용접 전압의 간단한 계산으로 나타낼 수 있다. 용접 전류와 전압은 비드 폭, 용입 깊이 그리고 아크 길이, 비드 높이 등의 변수에 영향을 미치기 때문에 이에 따라 아크 출력과 동저항이 달라진다고 볼 수 있다.



제 3 장 아크 안정성 및 용접 품질 평가 기준

아크 안정성은 앞에서 언급한 바와 같이 용접 전류와 용접 전압에 영향을 받는다. 또한 아크 출력과 아크 동저항에 밀접하게 관련되어 있다. 일반적으로 용접을 시작함에 따라 아크의 발생부터 종료까지 아크가 지속적으로 유지되는 것을 ‘아크가 안정적이다.’ 라고 말할 수 있으며, 아크 주위의 자기장의 세기가 비대칭에 될 때 생기는 아크 쏠림(Arc blow)으로 인해 원래의 용접 위치를 벗어나게 되어 용접 비드 형상이 고르지 못하게 나오는 경우 등을 ‘용접 품질이 좋지 못하다.’ 라고 말할 수 있다.

이처럼 아크에 작용하는 다양한 물질들이 아크의 지속력과 아크 형성에 지대한 영향을 미치게 되는데 관련 변수들을 아래 Table 2에서 볼 수 있다.

Table 2 Parameter of arc stability and arc quality

Condition	Parameter
용접 환경	분위기, 플럭스, 슬래그, 용융지의 상태 모재와 심선의 화학성분, 모재의 표면 상황
용접기	전원 종류와 특성, 용접 전류, 용접 전압
용접사	용접 자세

대표 용접 변수인 용접 신호, 즉 용접 전류와 용접 전압만으로 아크 안정성과 용접 품질을 평가하기 위해 전류-전압 평면 궤적(Fig. 2)을 이용하였다.

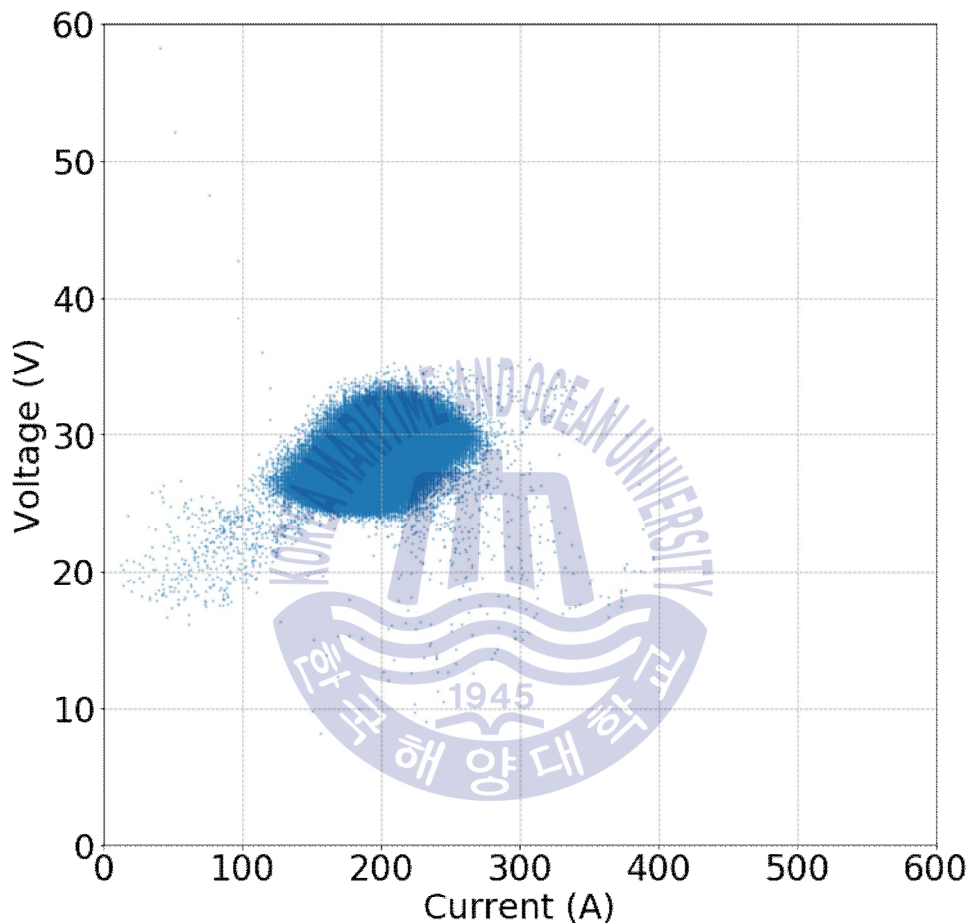


Fig. 2 Current-voltage distribution map

하지만 전류와 전압의 설정값의 크기에 따라 형상이 변화하기 때문에 다음 식 (3)과 같이 무차원화를 하였다.

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{V - V_m}{V_m}, \\ I_n &= \frac{I - I_m}{I_m} \end{aligned} \quad (3)$$

V_n , I_n 은 무차원화된 용접 전압, 전류 값이고 V_m , I_m 은 평균 용접 전압과 전류 값이다. 실제값이 평균값에서 얼마나 떨어져 있는 정도를 나타내는 편차에 평균값을 나눠 차원을 없애주었다. 식 (3)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= (V_n + 1)V_m, \\ I &= (I_n + 1)I_m \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 아크 출력과 동저항을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= P \frac{1}{I}, \\ V &= RI \end{aligned} \quad (5)$$

아크 출력과 동저항에 대한 식으로 변환할 수 있고, 여기에 식 (4)를 대입하면 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} (V_n + 1)V_m &= P \frac{1}{(I_n + 1)I_m}, \\ V_n + 1 &= P \frac{1}{(I_n + 1)I_m V_m}, \\ V_n &= \frac{P}{P_m} \frac{1}{(I_n + 1)} - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

평균 전력과 전압의 곱은 평균 전력으로 계산되어 식 (6)과 같이 아크 출력에 대한 수식을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} (V_n + 1)V_m &= R(I_n + 1)I_n, \\ V_n + 1 &= R(I_n + 1) \frac{I_m}{V_m}, \\ V_n &= R(I_n + 1) \frac{I_m}{V_m} - 1, \\ V_n &= \frac{R}{R_m}(I_n + 1) - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 아크 동저항에 대한 수식으로 바뀌게 된다. 식 (6)과 식 (7)에서 확인할 수 있듯이 무차원화된 값으로 변함에 따라 y 절편이 -1인 수식으로 계산된다. V_n , I_n 을 그래프로 표현하면 다음과 같다.

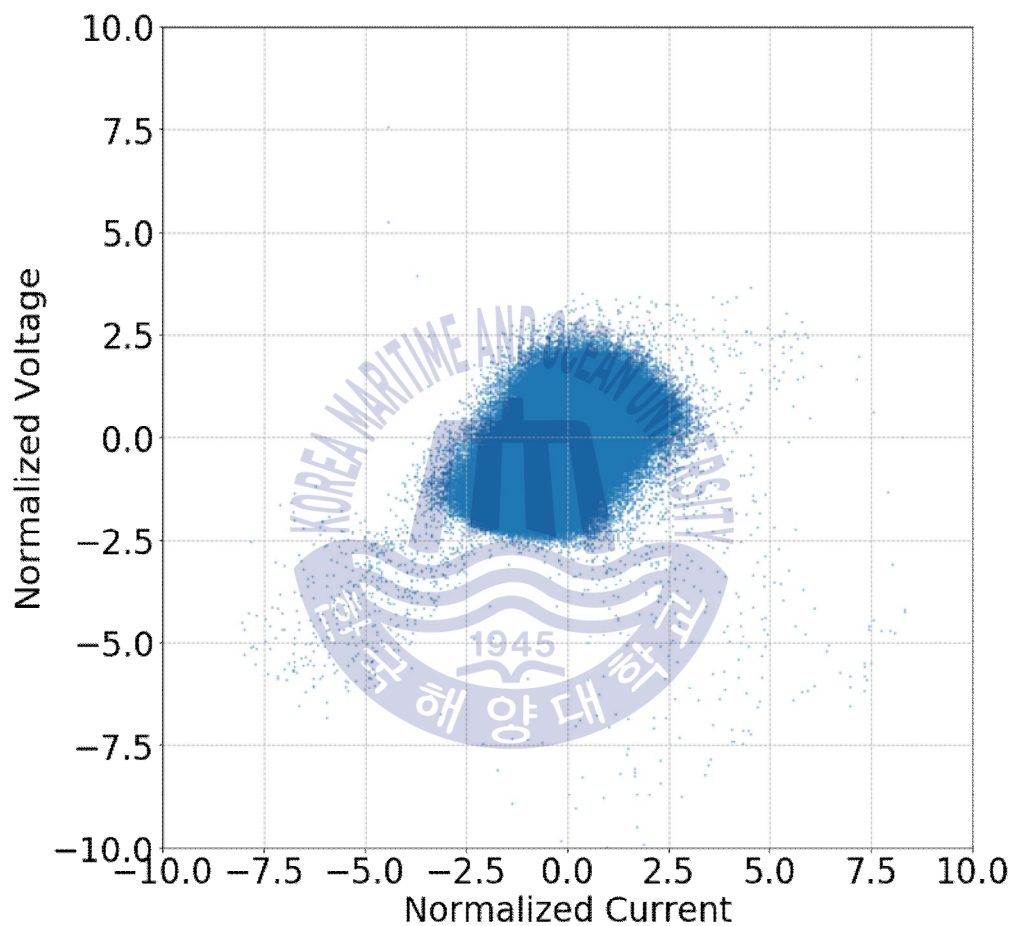


Fig. 3 Normalized current-voltage distribution map

또한 아크 출력과 동저항을 그래프 위에 표시하면 다음처럼 나타낼 수 있다.

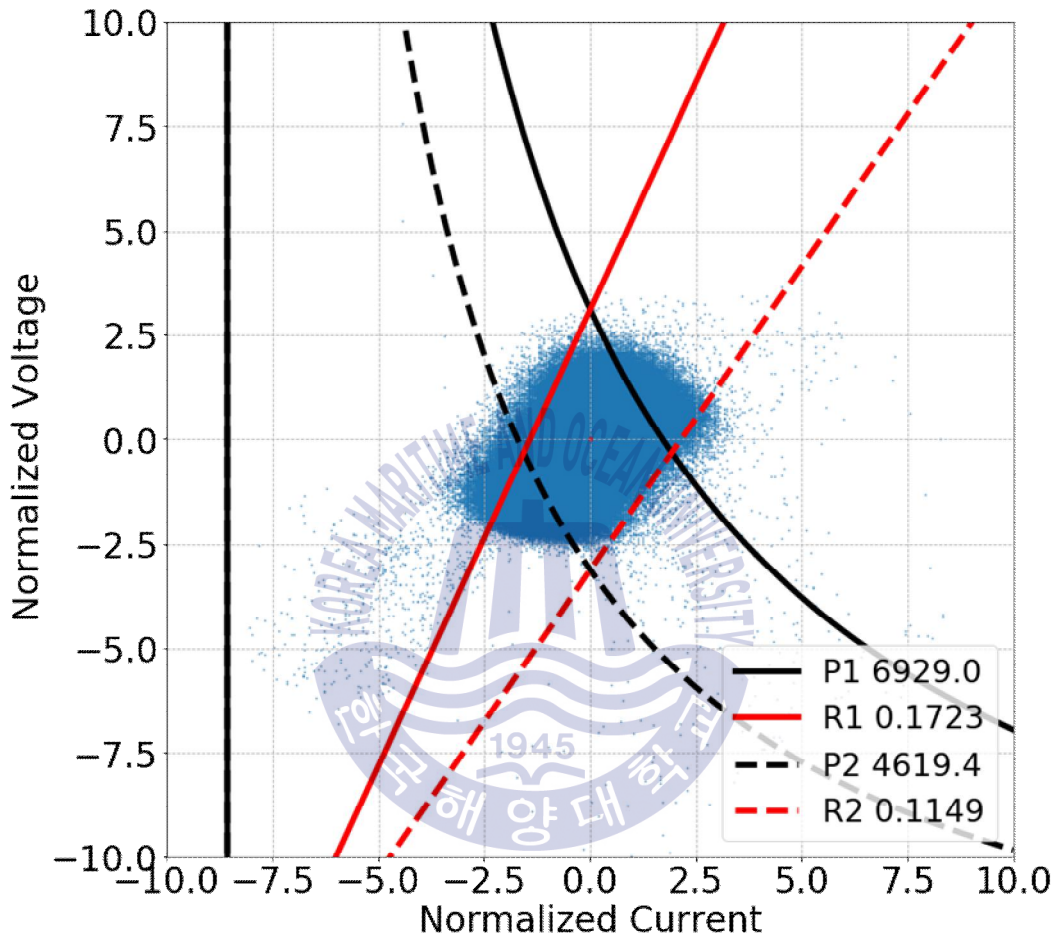


Fig. 4 Normalized current-voltage distribution map
with arc power and dynamic arc resistance

Fig. 4는 두 개의 아크 출력과 동저항을 표시한 것이다. 가운데 좌표를 기준으로 일정한 값만큼 떨어진 두 개의 곡선은 아크 출력을, 두 개의 직선은 아크 동저항을 나타낼 수 있고 4개의 선으로 만들어진 중간의 범위는 ‘아크가 가장 안정적인 범위’로 판단된다.

만약 정상 용접 데이터의 경우 해당 범위에 속하는 데이터의 비율이 커질 것

이고 결합 용접 데이터의 경우 데이터의 비율이 작아질 것이다. 따라서 아크 출력과 동저항 사이에 생긴 범위는 용접 전류와 전압이 가장 안정적인 구간이라 추정하였고 이를 아크 안정성과 용접 품질의 평가 수단으로 삼았다.



제 4 장 본 론

4.1 실험 가설

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

1. 아크 출력은 용접 품질과 관련이 있고 아크 동저항은 아크 길이와 관련이 있다. 적절한 범위 내의 값을 가져야 정상 품질의 용접 결과물을 얻을 수 있다.

: 아크 출력과 동저항은 용접 전류와 전압에 기인하기 때문에 용접 품질에 영향을 미친다. 따라서 출력과 동저항에 따라 용접 품질이 달라질 것이다.

2. 용접 전류와 전압 파형에서 값이 크게 튀는 경우 그 부분에서 용접 결함이 발생할 가능성이 높다.

: 정상 용접 시의 파형과 결함 발생 시 파형이 상이하게 다른 것을 육안으로 확인할 수 있다. 따라서 파형 분석을 하면 정상 용접과 결함 용접 파형의 분류가 가능할 것이다.

3. 용접 결함 즉, 기공(Porosity), 용입부족(Incomplete Penetration), 균열(Crack), 블로우홀(Blow Hole) 등은 용접 용융부에 영향을 줄 뿐만 아니라 기본 용접 변수인 용접전류와 용접전압에 변화를 발생시킨다.

: 용접전류와 전압의 변화는 용접 결함의 원인과 연관이 있다. 따라서 전류와 전압 변화를 살펴보면 결함

4.2 실험 계획

4.2.1 실험 장비

- 효성 ProPAC600 CO2/MAG 용접기

조선 및 중공업에 특화된 다기능 고효율 용접기로서 입력전압과 Stick-out (용접선 돌출길이)가 변동하더라도 안정된 출력과 적절한 아크길이를 유지하는 기능을 가지고 있다.



Fig. 5 HYOSUNG ProPAC600
welding machine

이용 가능 용접으로는 CO_2 용접, MAG 용접, 스테인레스 MIG 용접이 가능하다. 각 용접 방법에 맞는 가스를 적용해야하며 CO_2 99.9% 이상, MAG의 경우 $Ar + 5\sim 20\% CO_2$ 또는 3종 혼합가스, 스테인레스 MIG 용접의 경우 $Ar + 2\% O_2$ 를 사용해야한다. 정격 사용율은 100% 이며 와이어 종류는 FCAW 용접 방법에 맞는 연강 코어드 와이어 1.2, 1.4, 1.6 mm Ψ 를 사용할 수 있다.

- MONITECH 용접 파형분석 전용장비(MULTI)

용접 신호 검출 장비로서 용접기의 종합 성능 파악, 용접 재료 작업성 평가, 안정성 및 아크 Start 특성 평가, 파형 확대 및 축소 등 다양한 기능을 포함하고 있어 초기 측정값에 대한 분석이 용이하다.



Fig. 6 MONITECH welding expert multi

계측 가능한 채널로는 용접 전류, 용접 전압, 와이어 송급 속도 등이 있으며 이 밖에도 다양한 채널을 통해 용접 변수를 측정할 수 있다. 전류 범위는 직류 또는 교류 모두 2,000kA까지이며 전압은 최대 100V이다. 하지만 특수한 경우에는 200V까지도 가능하다.

파형 샘플링은 최대 200kS/s이며, 한 대의 기기에 ARC, RESISTANCE, TIG(PLASMA) 등의 조합이 가능할뿐더러 초고속 카메라 등과 연동 기능이 내장되어 있어 어느 환경에서든지 유연한 연구를 진행할 수 있다.

4.2.2 분석 소프트웨어

- WELD GOOD WAVE

Fig. 3 장비의 전용 소프트웨어(Fig. 4)로서 용접 전류 및 용접 전압의 파형을 표시해줄 뿐만 아니라 확대 및 축소 기능을 통해 손쉽게 파형을 확인할 수 있다. 또한 정상 단락, 비정상 단락 횟수를 자동으로 계산해주고 구간별 파형 분석과 전력과 동저항의 그래프를 자동으로 작성해주는 등의 편의 사항이 내장되어 있어 초기 용접신호 분석에 적합하다.

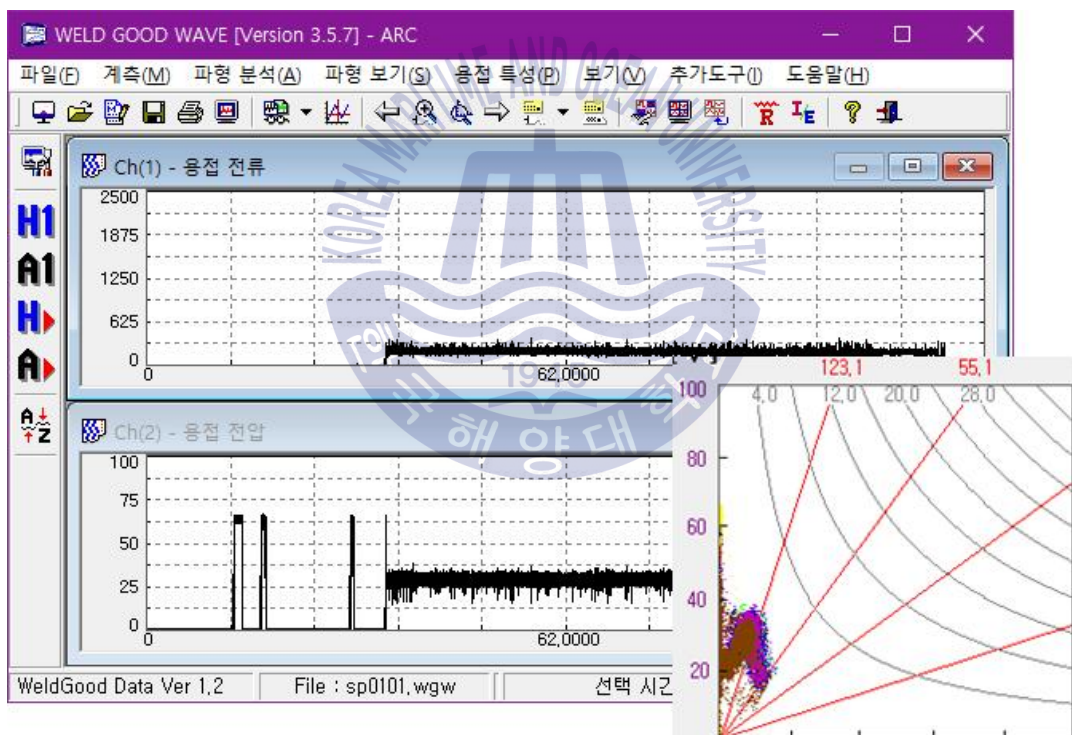


Fig. 7 WELD GOOD WAVE software

- Jupyter Notebook

프로그래밍 언어 중 하나인 Python 기반의 개발 도구이다. 서버-클라이언트 환경에서 웹브라우저로 코딩하고 여러 가지 결과물을 쉽고 빠르게 도출할 수 있다는 장점이 있다. 또한 Python과 호환되는 다양한 라이브러리를 불러올 수 있어 여러 분야에서 효과적으로 적용할 수 있다.

본 연구에서는 용접 전류, 용접 전압 등 시계열 데이터를 주로 다루기 때문에 데이터를 다루는데 특화된 라이브러리인 pandas, 그래프를 보여줄 수 있는 라이브러리인 matplotlib, 수치해석에 적합한 numpy 등을 사용하여 데이터 분석에 사용하였다.



Fig. 8 Various logo of python library

4.2.3 사용 시험편

시험편은 SS400 강종으로 탄소강재(Fig. 7)이다. 크기는 250mm x 100mm x 10T로서 두께가 있기 때문에 다층 용접을 계획하였다. V-groove와 맞대기 이음부(Butt joint)를 주었고 아래보기 자세에서 가장 이상적인 조건을 설정하였다.



Fig. 9 Specimen carbon plate

4.2.4 용접 조건

● 실험 재료 및 변수

용접은 수동 용접으로서 사람이 직접 진행하였다. 총 20개의 시험편을 제작하였으며, 시험편 당 총 4패스의 용접을 수행하였다. Wire 두께는 조선소에서 주로 쓰이는 1.4mm 그리고, 보호가스로는 100% CO_2 를 사용하였고 가스 유량은 25 l/min 이다. 전류는 중간 전류 영역대로 설정하여 약 260A를 기준으로 했고 전압은 전류 영역에 맞추어 약 26V 로 설정하였다.

Table 3 Welding materials

Wire	KISWEL 1.4mm Flux Cored Wire
Shielding gas	100% CO_2
Base Metal	Mild Steel(250×100×10T)

Table 4 Welding parameter

Parameter	Value	Units
Current	260	A
Voltage	26	V
Gas Flow	25	l/min
Signal detection rate	5,000	Hz

위의 Table 4와 같이 10T 두께의 모재에 적합한 조건으로 설정하였다. 용접 신호는 1초에 5,000번을 측정하였다. 그 이상의 신호를 검출 할 수 있지만 데이터의 양과 정확성 등을 고려하여 데이터 분석이 용이할 정도의 값을 설정하였다. 시간, 전류, 전압으로 구성되어 측정되는 데이터의 양은 한 시험편 당 400,000개 ~ 800,000개로서 검출 시작 시간과 몇 번째 패스인지에 따라 조금씩 달라진다.

4.2.5 비파괴 검사

용접 품질 평가 검증 수단으로 비파괴 검사를 수행하였다. 비파괴 검사의 다양한 방식 중 방사선투과(Radiographic Testing) 방식으로 시행하였다. 이는 방사선(X-선 또는 γ -선)을 시험편에 조사했을 때 투과 방사선의 강도의 변화 즉, 건전부와 결함부의 투과선량의 차에 의한 필름상의 농도차를 2차원 영상으로 기록하여 결함을 검출하는 방법으로 용접부, 주조품 등의 결함을 검출하는 방법이다.



제 5 장 실험 및 결과

5.1 시험편 육안 확인 및 비파괴 검사 결과 비교

Fig. 11의 방사선 투과검사 보고서를 확인 결과 ‘시험편 03’, ‘시험편 04’, ‘시험편 05’, ‘시험편 06’, ‘시험편 07’, ‘시험편 08’ 이 용합 불량, 기공 등으로 불합격 판정을 받았다.

또한 Fig. 12 ~ Fig. 29은 6개의 불합격 시험편의 용접 비드 사진과 비파괴 검사 결과 사진이며, 용접은 사진 기준으로 오른쪽에서 왼쪽으로 진행되었다. 각 시험편의 육안 확인과 함께 비파괴 검사 결과 사진을 나타내어 결함 부위를 상세히 확인 할 수 있도록 하였다.



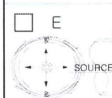
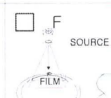
 HANA HANA INSPECTION AND ENGINEERING CO., LTD.		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 방사선 투과검사 보고서			
		page 1 of 2			
Customer 주 문 주	바론 코리아		Report No. 보고서 번호	BR-HUR-18-001	
Const & MFT. 제 작 자	바론 코리아		Project Name 공 사 명	WELDER TEST	
Material 재 질	SS400		Item Name 제 품 명	PLATE	
Shooting Position 투과 방법	☒ Single	☐ Double	Item No. 제 품 번 호	N/A	Rev. 개정 0
Interpretation 판 독	☒ Single	☐ Double	I Q I 투과 도 계	08F	☒ S. Side
Joint Config 용접 모양	FCAW		Thick of test part 모재 두께	10	☒ mm
X-ray Equip. 엑스레이 장비	Kvp	mA	Sensitivity 감 도	2.0 %	
Radioisotope 방사성동위원소	☒ Ir-192	20 Ci	Film Size 필름 크기	3 1/8" × 12" 4 1/4" × 12"	☒ Inch
Focal Size 조점 크기	2.4 × 3.4	☒ mm	Film Type 필름 종류	KODAK AA400 TYPE I	
Exposure Time 노출 시간	2 min	30 sec	Screen 스크린	☒ Front 전방 Pb:0.005 Inch ☒ Back 후방 Pb:0.005 Inch	
FFD/SFD 거 리	500	☒ mm	Contrastmeter/DBD 계조계/농도차	☐ 15형 ☐ 20형 ☒ 사용무	
Development 현상 조건	20 °C	5 min	Lead Backing 산란방지 납판	☒ Yes 유 ☐ No 무	
Density 농 도	2.0 ~ 4.0		Code 적용 규격	KS B 0845	
Surface Condition 표면 상태	☒ As Welded		Procedure 절차서	HN-NDT-RT-P01	Rev. 개정 3
☒ A  ☐ B  ☐ C  ☐ D  ☐ E  ☐ F  ☐ G  ☐ H 					
Date of examination 시 험 일 자			2018. 05. 16.		
Examined by 검 사 자			Const & MFT. 제 작 사		
Interpreted by 판 독 자					
Approved by 승 인 자					

Fig. 10 Report of radiographic examination (a)



Fig. 12 Front of failure specimen 03



Fig. 13 Back side of failure specimen 03

Fig. 12을 확인해보면 약 시작 3.2cm 부근에서 기공이 발생하였고 그 뒷부분에 까지 영향을 미쳐 용합불량이 발생하였다. 특히 Fig. 13에 발생한 1cm 정도 크기의 용합 불량은 매우 심각 정도이며 보수 용접이 필요한 부분임을 알 수 있다.

Fig. 14은 ‘시험편 03’의 비파괴검사 결과 사진이다. Fig. 12와 Fig. 13에서 알 수 있듯이 용접 시작 부분에서 용합 불량에 의한 것을 확인할 수 있다. 또한 비드 중반부에서는 비드의 높낮이가 낮아 명도 차이가 생긴 것을 볼 수 있다.

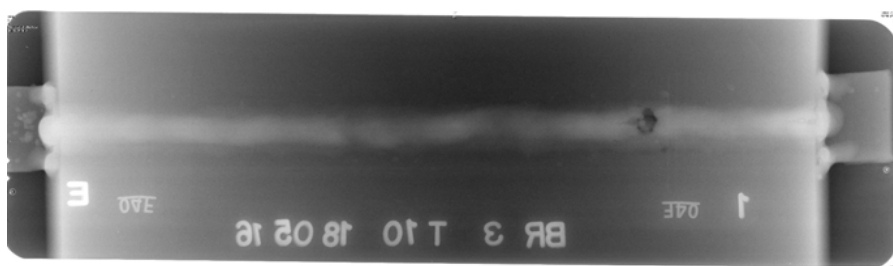


Fig. 14 Radiographic examination of specimen 03

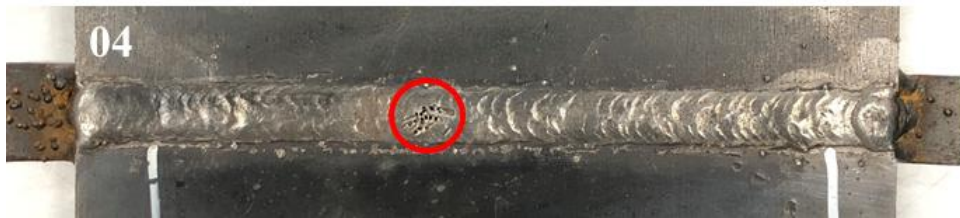


Fig. 15 Front of failure specimen 04



Fig. 16 Back side of failure specimen 04

Fig. 15에서 육안으로 확인 할 수 있는 기공을 발견할 수 있었다. 해당 기공은 시작 지점으로부터 약 6.2cm 부근에서 생겼다. Fig. 16에서는 특별한 결함 부위를 찾을 수는 없지만 비드의 높낮이가 고르지 않다는 점을 발견할 수 있었다. Fig. 17를 확인해보면 Fig. 15에 생겼던 기공이외에 비드 중반부에도 미세한 기공이 생긴 것을 확인하였다. 보통 비드 표면으로 들어난 기공의 경우 비드 내부에서부터 발생된 경우가 많다. 용접 1 ~ 3패스 사이에 생긴 기공이 오른쪽에서부터 왼쪽으로 점점 올라오다가 4 패스에서 완전히 비드 표면으로 나타난 것으로 판단된다.

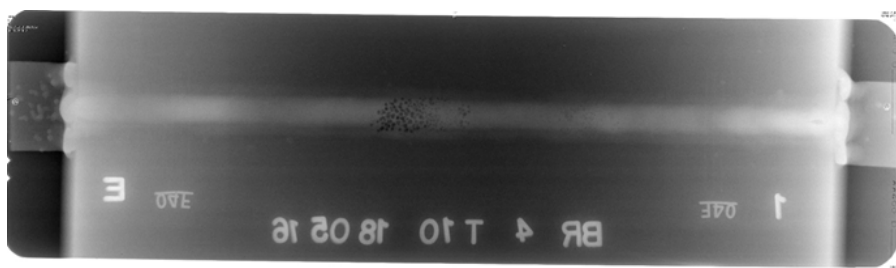


Fig. 17 Radiographic examination of specimen 04



Fig. 18 Front of failure specimen 05



Fig. 19 Back side of failure specimen 05

용접 종료 1cm 부근에서 융합 불량을 확인할 수 있다. 융합 불량 원인은 1) 용접속도가 빠른 경우 2) 용접전류가 낮은 경우가 대표적이다. Fig. 18와 Fig. 20에서 비드 높이가 균일하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 용접 전류가 낮음으로 인해 와이어 용융량이 충분치 않아 융합 불량이 발생한 것으로 판단된다. Fig. 18에서 또한 마찬가지로 종료 1cm 지점에서 비드 바깥쪽으로 보이는 검은색 융합불량이 눈에 띈다. 또한 그 옆으로 길게 2cm ~ 3cm 정도 이어지는 융합불량 또한 심각한 결함으로 판단된다.

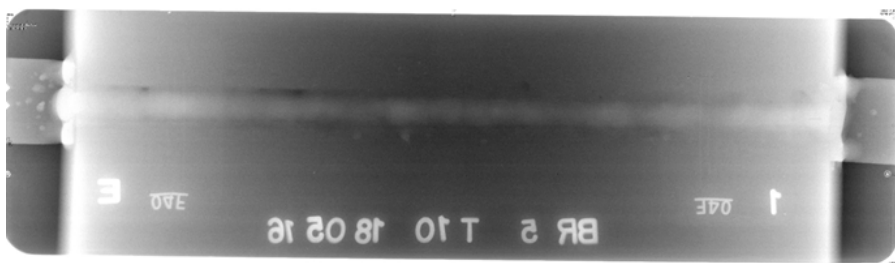


Fig. 20 Radiographic examination of specimen 05



Fig. 21 Front of failure specimen 06



Fig. 22 Back side of failure specimen 06

Fig. 21에서 확인할 수 있듯이 기공이 발생하였다. 이는 ‘시험편 04’에서 나타난 Fig. 15와 비슷한 결함이라고 판단된다. 기공을 그대로 방치할 경우 구조물의 피로 수명을 단축하는 요인이 되기 때문에 반드시 보수 용접을 해야 할 것으로 판단된다.



Fig. 23 Radiographic examination of specimen 06



Fig. 24 Front of failure specimen 07



Fig. 25 Back side of failure specimen 07

Fig. 24을 보면 육안 상으로는 결함이 없는 것처럼 보이지만 비드 폭이 일정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 25를 보면 종료 지점 약 0.5cm 전 부분에서 비드가 제대로 형성이 되지 않은 것을 확인 할 수 있을뿐더러 Fig. 26에서 비드의 높낮이가 고르지 않음을 볼 수 있다.

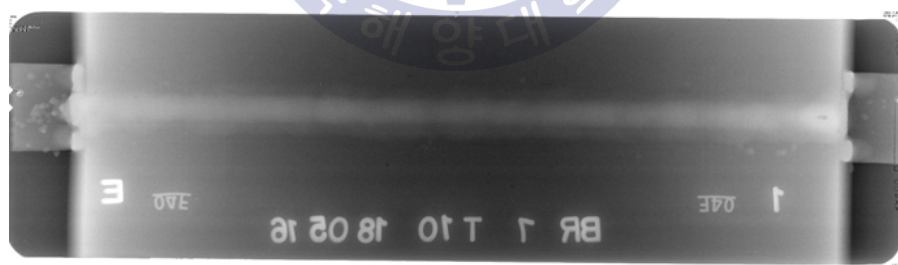


Fig. 26 Radiographic examination of specimen 07



Fig. 27 Front of failure specimen 08



Fig. 28 Back side of failure specimen 08

Fig. 27에서 비드 외관을 살펴보면 용접 시작을 함과 동시에 비드의 높낮이 상대적으로 고르지 못하다. 종료 지점으로 갈수록 비드 폭이 넓어지고 스파터가 많이 형성 된 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 28에서 비드 표면 불량과 더불어 폭 가라앉은 형상과 함께 Fig. 29에서 육안으로 발견하지 못한 기공이 있음을 확인할 수 있었다.

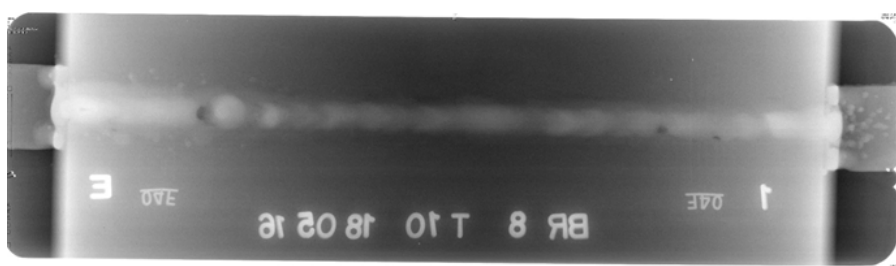


Fig. 29 Radiographic examination of specimen 08

방사선 투과 검사 결과와 더불어 20개 시험편의 각 패스에 대한 육안 검사 또한 진행하였다. 비드의 상태 및 결함 상태를 정리하고 이를 토대로 Table 5에서 알 수 있듯이 최고등급 ‘A’ 에서 최하등급 ‘D’ 까지 등급을 부여하였다.



Table 5 Inspection results for each pass

Specimen - Pass Number	Bead Condition & Defect Type	Grade
1-1	0.5/10에 비드 함몰, 4~6/10 에 피트, 그 외 양호	C
1-2	6/10에 비드 협소 구간 발생, 9/10부분에 피트, 그 외 양호	C
1-3	4~6/10 피트, 2/10 피트, 그 외 양호	A/B
1-4	정상, 양호	A
2-1	0.5/10 비드 함몰, 1~3, 7~9/10피트	C
2-2	8~10 피트, 그 외 양호	B
2-3	3,8/10 비드 약간 협소, 그 외 양호	B
2-4	양호	A
3-1	3/10 용각, 7/10 비드협소,	D
3-2	3/10 약한 불규칙 비드	B
3-3	3/10 비드 협소, 8.5/10 Crack, 전반적 불규칙	D
3-4	전반적 미세피트, 그 외 양호	B
4-1	7/10 미세피트, 그 외 양호	B
4-2	3~4/10 기공	D
4-3	2~4 불규칙 비드, 5~6/10 기공 및 비드 불규칙	D
4-4	6/10 표면 기공, 그 외 양호	C
5-1	1/10 비드 약 함몰, 그 외 양호	B
5-2	2~4/10 비드 불규칙, 9/10 피트	C
5-3	1~7 언더컷 및 융합불량, 불규칙 비드, 8~9 비드 함몰, 오목	D
5-4	5~6 불규칙 비드, 9/10 언더컷,	D
6-1	6~7 피트, 그 외 양호	B
6-2	2.5,4 약간 언더컷, 8~9 언더컷, 전반적으로 약간 비드 불규칙	C
6-3	6~7 표면기공, 비드 협소, 그 외 양호	C
6-4	7/10 강한 표면 기공, 그 외 양호	C
7-1	0.5/10 큰 기공(또는 비드 함몰), 그 외 양호	C
7-2	6~10 비드 함몰, 언더컷	D
7-3	전체 불규칙 비드	D
7-4	,9/10 피트, 그 외 양호	B
8-1	1~2 비드 패임(끊임) 3~4 비드 함몰 6~10 비드 함몰, 불규칙	D
8-2	2.5~3 비드 함몰(패임), 그 외 양호	D
8-3	1~7/10 비드 불규칙	C/D
8-4	5~6 비드 폭 축소, 피트, 그 외 양호	B/C
9-1	1/10 원형 패임	B/C
9-2	정상 비드	B
9-3	1~2 언더컷	B/C
9-4	정상, Spatter 과다	B

10-1	정상	A
10-2	정상	B
10-3	정상, 미려한 비드	A
10-4	정상, 미려한 비드	A
11-1	9/10 표면기공	C
11-2	중반부 표면기공	B
11-3	4/10 피트, 그 외 양호	B
11-4	3~6/10 피트, Spatter 과다	B/C
12-1	0.5/10 원형 패임, 그 외 양호	A/B
12-2	9/10 비드 한쪽 면 함몰	B/C
12-3	정상	B
12-4	7~10 비드 커짐, Spatter 과다	B/C
13-1	0.5/10 원형 패임, 그 외 양호	A/B
13-2	5/10 언더컷, 그 외 양호	B
13-3	4,6 언더컷	B/C
13-4	양호	A
14-1	7~10 비드 한쪽 면 기공, 그 외 양호	B/C
14-2	3/10 비드 약간협소, 그 외 양호	A/B
14-3	8~9 비드 커짐, 그 외 양호	A/B
14-4	3~5 약간 언더컷, 5/10 Crack	B/C
15-1	1/10 패임, 1~2비드협소, 그 외 양호	B
15-2	9/10 비드협소, 그 외 양호	A/B
15-3	3~6 피트, 그 외 양호	A/B
15-4	양호	A
16-1	시작 부 패임, 그 외 양호	A
16-2	2~3 비드 폭 협소, 그 외 양호	A/B
16-3	3~4 비드 폭 축소, 그 외 양호	B
16-4	양호	A
17-1	시작 부 패임, 그 외 양호	A/B
17-2	1,3,5 언더컷, 후반부 양호	C
17-3	1, 4/10 언더컷 성 비드협소, 그 외 양호	B
17-4	양호	A
18-1	7/10 비드 커짐	A/B
18-2	4~5 언더컷, 비드 협소	B
18-3	3~4피트, 그 외 양호	B
18-4	3-10/10비드불규칙, Spatter 과다	C
19-1	시작 부 패임, 9-10/10 기공, 그 외 양호	B/C
19-2	양호	A
19-3	4/10 비드 폭 축소, 7~9/10 비드 폭 커짐	A/B
19-4	양호	B

20-1	시작 부 패임, 1.5/10 언더컷 및 비드 폭 축소	B/C
20-2	3~4 약간 오목, 그 외 양호	A
20-3	3~4 약간 협소	A
20-4	양호	B



5.2 전류-전압 평면 궤적과 출력 및 동저항의 상관관계

아크의 품질과 안정성 평가를 위해 정상 용접 데이터의 분석이 필요하다. 따라서 Table 5에서 평가한 것을 바탕으로 등급이 ‘A’ 인 시험편의 패스 데이터 13개를 선정하였다.

Table 6 Selected specimen list

Condition	Specimen Number	Pass Number	Grade
정상	1	4	A
	2	4	A
	10	1	A
	10	3	A
	10	4	A
	13	4	A
	15	4	A
	16	1	A
	16	4	A
	17	4	A
	19	2	A
	20	2	A
	20	2	A

각 패스의 데이터는 ‘시간’, ‘용접 전류’, ‘용접 전압’ 세 가지 항목으로 구성되어 있으며, 아크 시작점 및 종료 지점을 제외한 정상 용접 데이터만을 추출하여 분석을 실시하였다.

5.2.1 전류-전압 파형 전처리

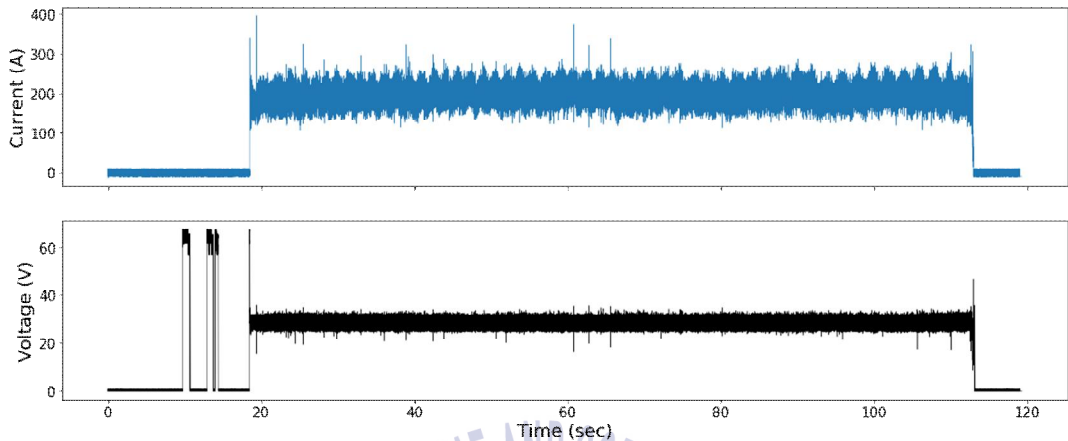


Fig. 30 Example of signal data before pre-processing

정상 용접 데이터의 정확한 분석을 위해서는 아크 생성 시점 이전의 데이터는 제거할 필요가 있다. 따라서 아크 시작점과 종료지점을 제외한 정상 용접 데이터만 남기고 불안정한 데이터를 제거 후(Fig. 31) 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다.

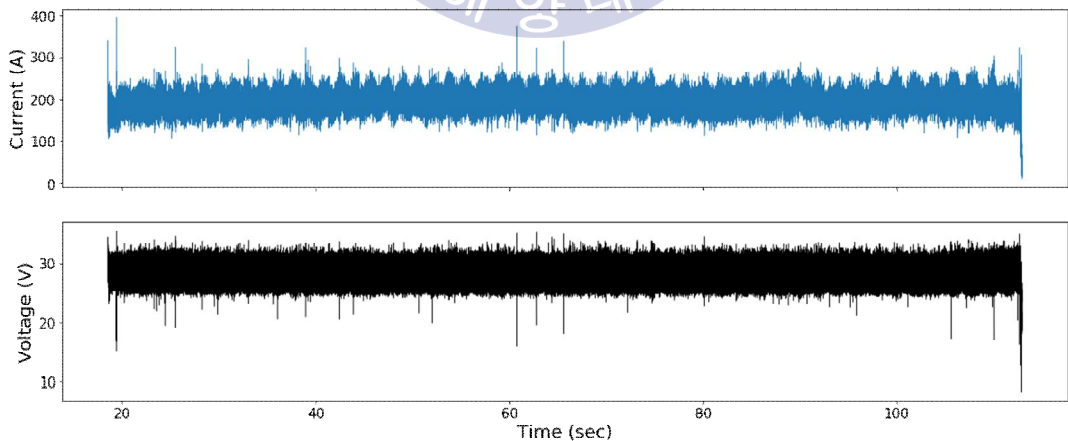


Fig. 31 Example of signal data after pre-processing

5.2.2 전류-전압 범위에 따른 구간별 데이터 밀집도 분석

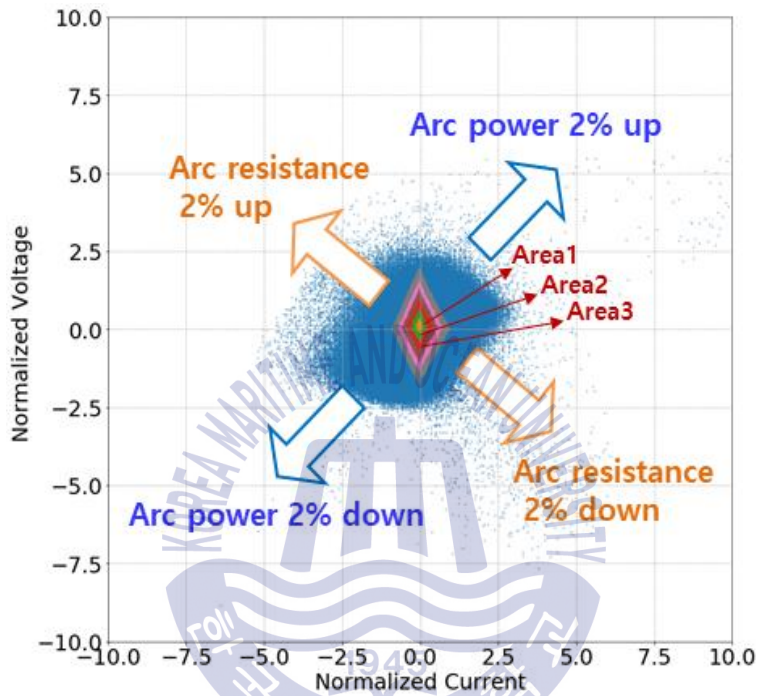


Fig. 32 Normalized current-voltage distribution map by Area

정규화된 데이터의 가운데 값 0으로부터 일정 비율만큼 증가 또는 감소되는 아크 출력과 동저항을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 증감 비율을 2%로 하였을 때 아크 출력과 동저항으로부터 만들어지는 하나의 영역에서 데이터 밀집도 분석을 수행하였다.

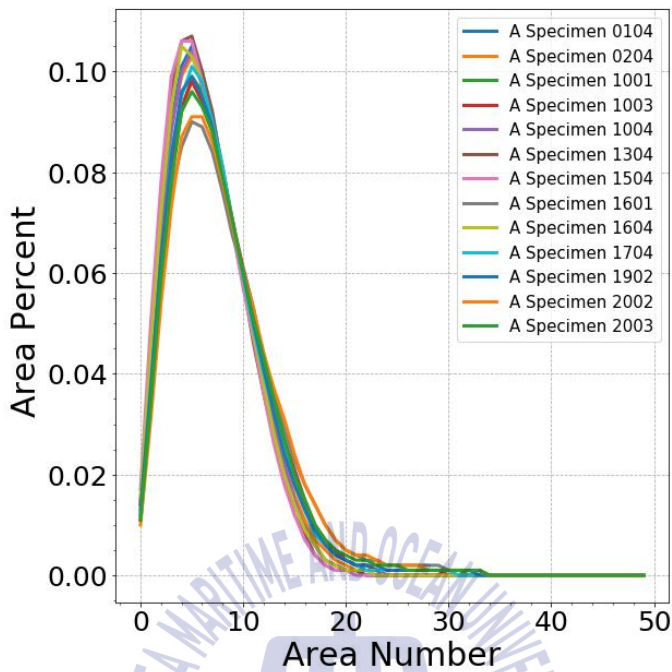


Fig. 33 Log Normal distribution by Area data percent

선정된 13개의 정상 데이터에 대한 각 영역별 데이터 밀집도를 표현하였다. 분포는 로그 정규 분포의 형태이며, Area 0에서부터 49까지 50개의 영역 중 5번째 영역에서 각 패스의 평균 데이터 밀집도가 10%로 가장 높았다.

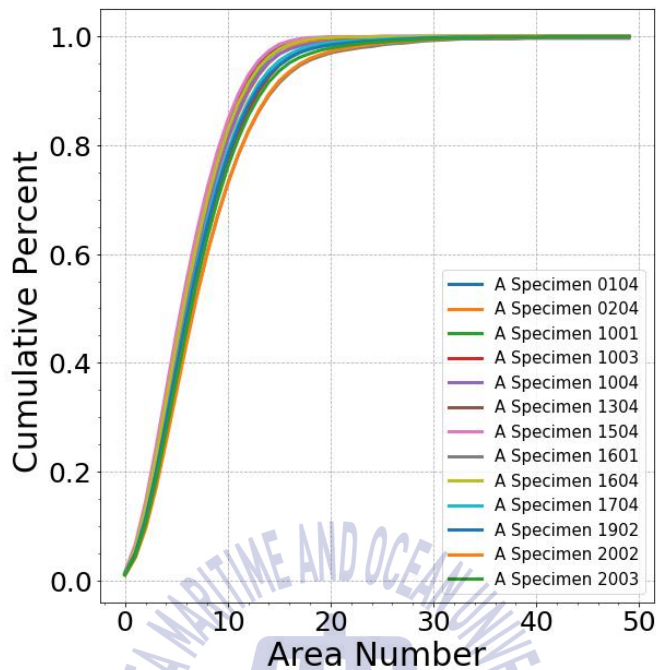


Fig. 34 Cumulative distribution by Area data percent

영역별 데이터 밀집도는 그 전 영역에 대한 밀집도를 반영하고 있지 않기 때문에 0번째 영역에서부터 49번째까지 누적된 데이터 밀집도를 통해 효율적인 품질 판단의 기준이 되는 아크 출력 및 동저항 범위를 판단하고자 하였다.

본 연구에서는 정상 용접의 기준을 아크 출력과 동저항 범위의 데이터 비율 80% 이상으로 가정하였고 위의 그래프(Fig. 34)로부터 분석결과 10번째 영역에서 평균 누적 데이터 비율은 약 79%이고, 이때의 아크 출력 및 동저항 범위의 증감 비율은 22%인 것을 확인 할 수 있었다.

5.2.3 전류-전압 평면 궤적 분석 결과

Fig. 33은 아크 출력과 동저항으로 만들어진 범위 안에 속한 데이터의 비율이 평균 79%인 전류-전압 평면 궤적이다. 정상 데이터의 평균 출력, 동저항 값을 계산하였고 이를 통해 종합된 정상 데이터들의 평균값이 가장 안정적인 것이라 추정하였다.

Table 7 Arc power and dynamic resistance value calculated with average 79% data density

Specimen - Pass	Data Percent	P1	R1	P2	R2
1 - 4	82	7044.5	0.175	4503.9	0.112
2 - 4	81	6915.8	0.177	4421.6	0.13
10 - 1	77	6850.8	0.178	4380.0	0.114
10 - 3	77	6700.8	0.183	4284.2	0.117
10 - 4	81	6882.4	0.177	4400.2	0.113
13 - 4	84	7248.3	0.169	4634.1	0.108
15 - 4	85	6879.1	0.179	4398.1	0.115
16 - 1	73	6172.7	0.204	3946.5	0.130
16 - 4	83	6995.0	0.178	4472.2	0.114
17 - 4	79	7032.9	0.178	4496.5	0.114
19 - 2	78	6924.5	0.182	4427.1	0.116
20 - 2	72	6666.7	0.190	4262.3	0.121
20 - 3	76	6812.8	0.185	4355.8	0.118
Mean	79.08	6,855.9	0.18	4,383.3	0.12

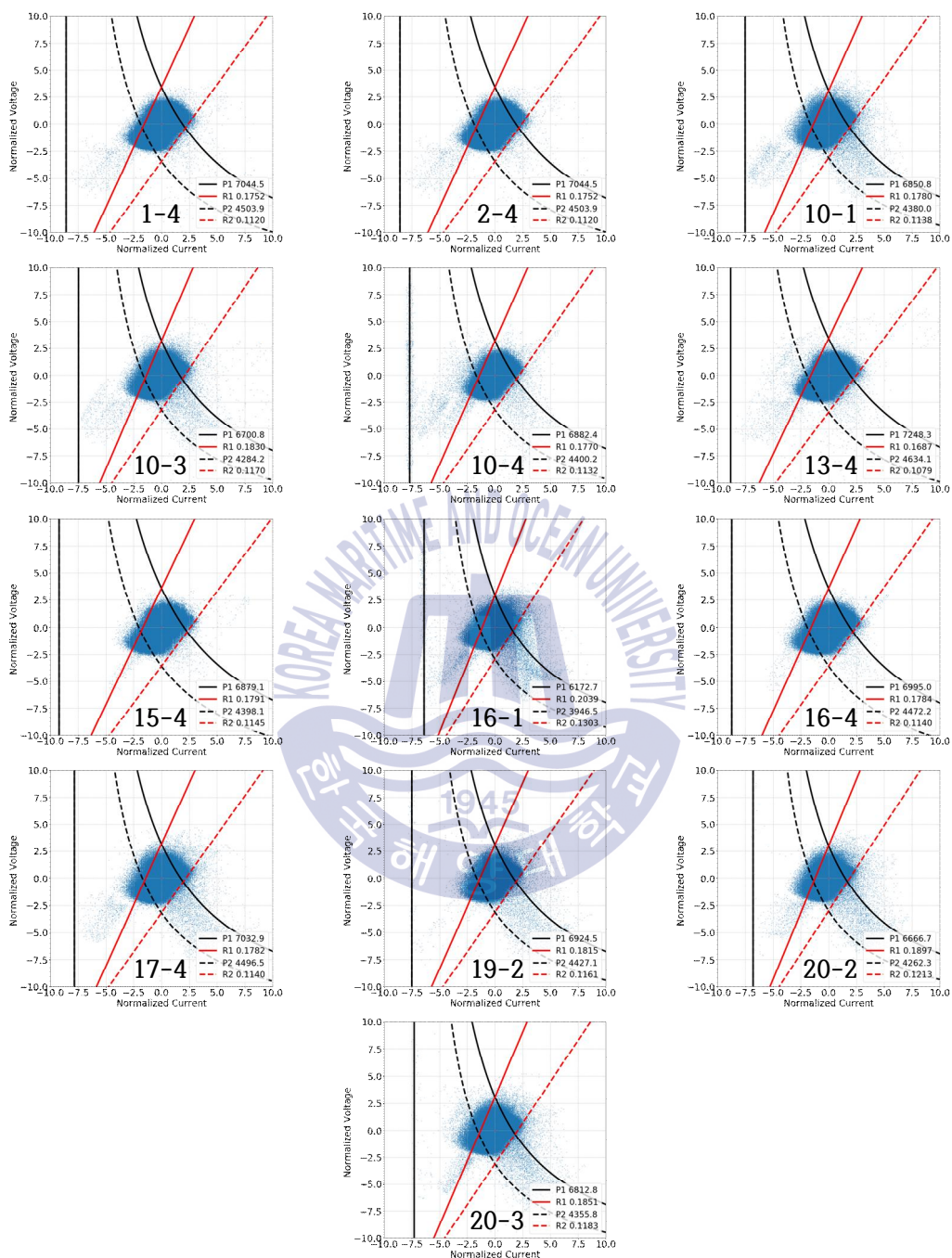


Fig. 35 Distribution map at 22% Arc power and dynamic resistance section

5.3 검증

정상 데이터들의 평균 아크 출력과 동저항 값을 다른 용접 데이터에 대입하여 실제 용접 품질 평가에 사용가능한 정도인지 검증하였다.

검증은 품질 평가의 기준이 된 Table 6의 13개 데이터를 제외한 데이터를 사용하였으며 육안으로 보았을 때 정상이라고 판단할 수 있는 A(good), B(acceptable) 등급과 결함으로 판단할 수 있는 C(poor), D(defected) 등급을 나누어 수행하였다.

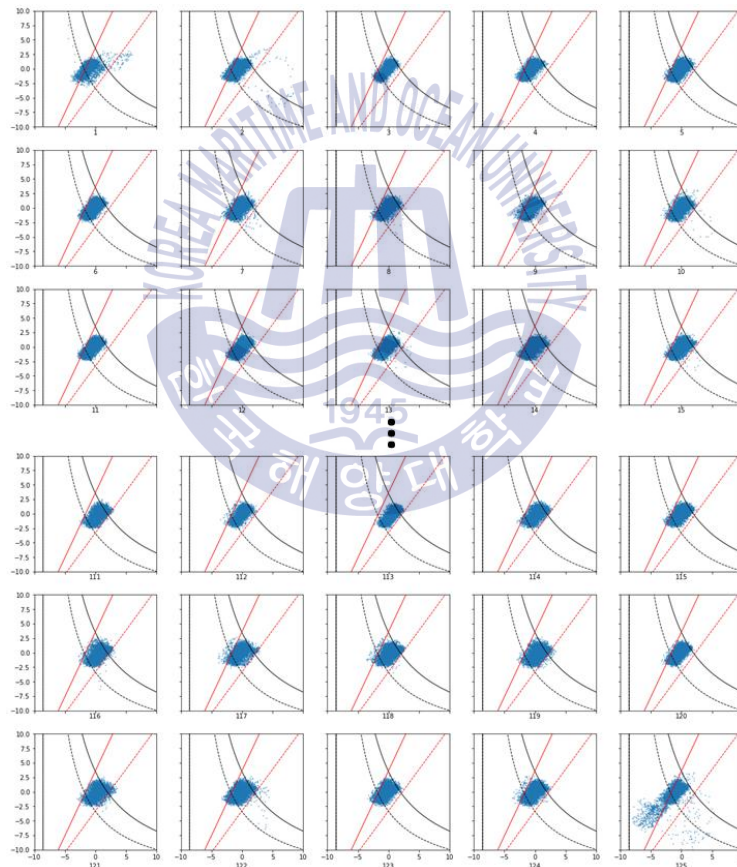


Fig. 36 Example of 125 distribution map with arc power and dynamic resistance section

또한 보다 자세한 검증을 위해 Fig. 34와 같이 250mm의 시험편을 2mm로 나눈 총 125개의 구간에 22%의 아크 출력 및 동저항 영역을 적용하고 해당되는 데이터 밀집도를 분석하였다.



● 정상 시험편의 패스 분석

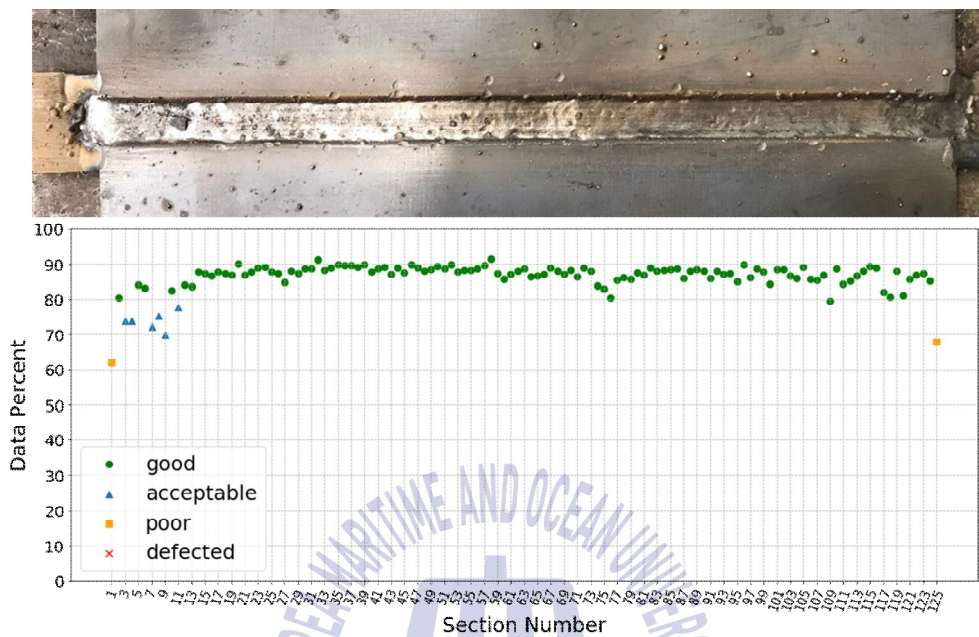


Fig. 37 Specimen 2 - 2 pass weld quality analysis

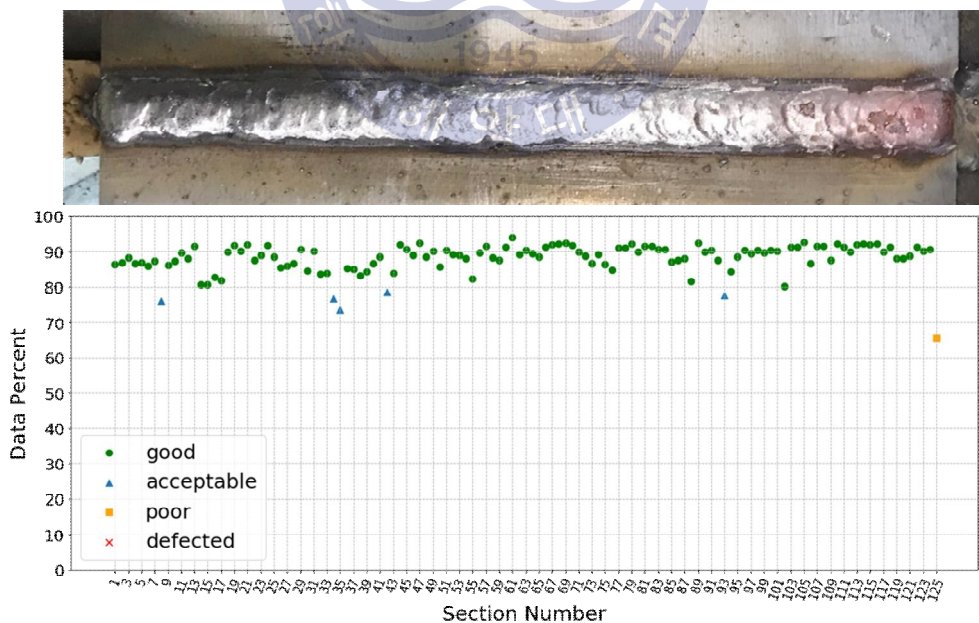


Fig. 38 Specimen 7 - 4 pass weld quality analysis

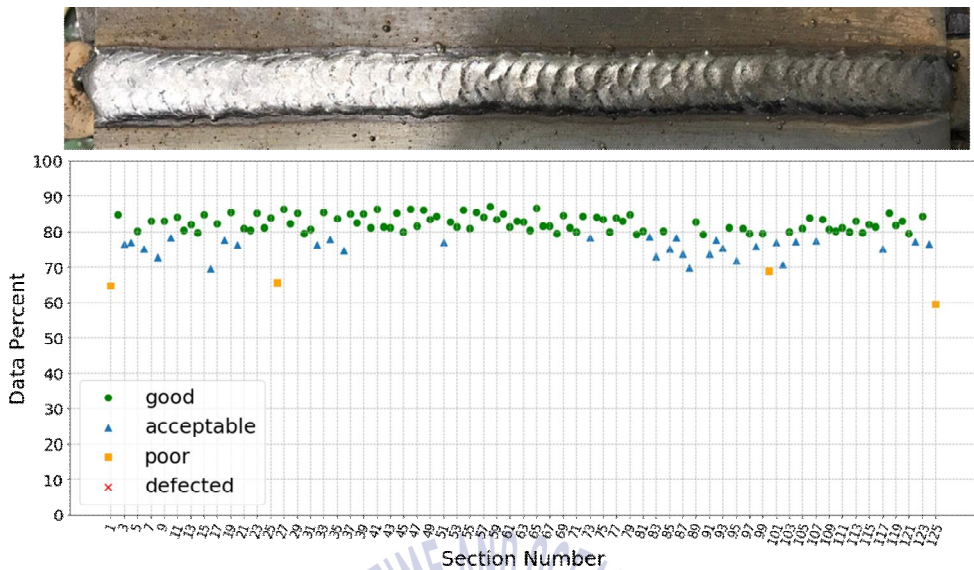


Fig. 39 Specimen 11 - 3 pass weld quality analysis

시험편 2 - 2, 7 - 4, 11 - 3은 Table 5의 육안 평가 등급에서 B(acceptable)인 데이터이다. 해당 데이터의 125개 구간에 대한 품질 평가를 실시하였다. 앞서 계산된 정상 용접 데이터의 기준이 되는 79%에 따라 분석된 결과를 위의 사진에서 확인할 수 있다.

각 구간별 아크 출력과 동저항으로 이루어진 데이터 밀집도가 79% 이상일 경우 good으로 표시하였고 실제 비드 사진과 비교하였을 때 대부분의 데이터가 유사하게 표시되는 것을 확인할 수 있었다.

● 결함 시험편의 패스 분석

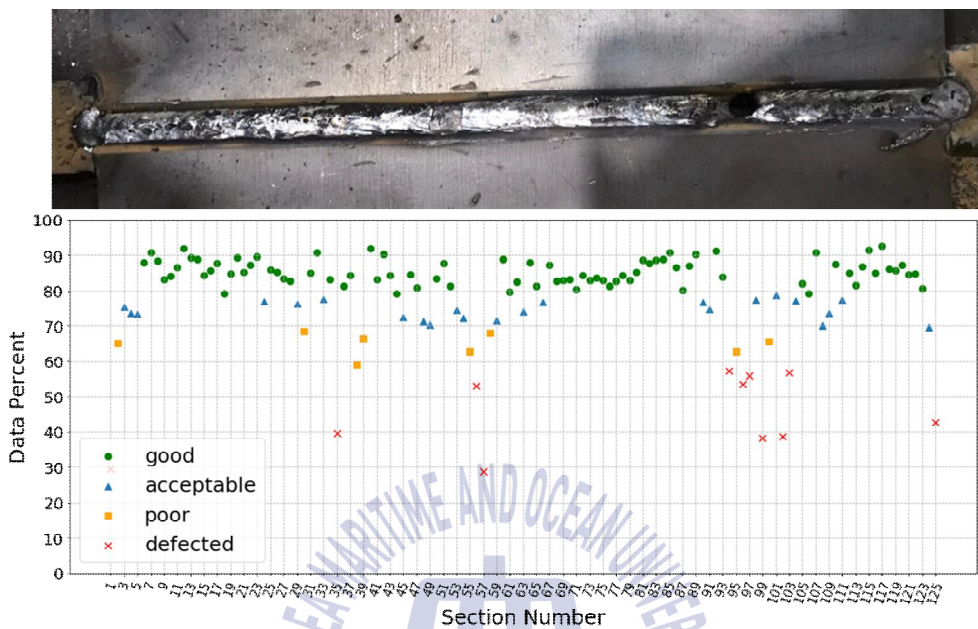


Fig. 40 Specimen 3 - 1 pass weld quality analysis

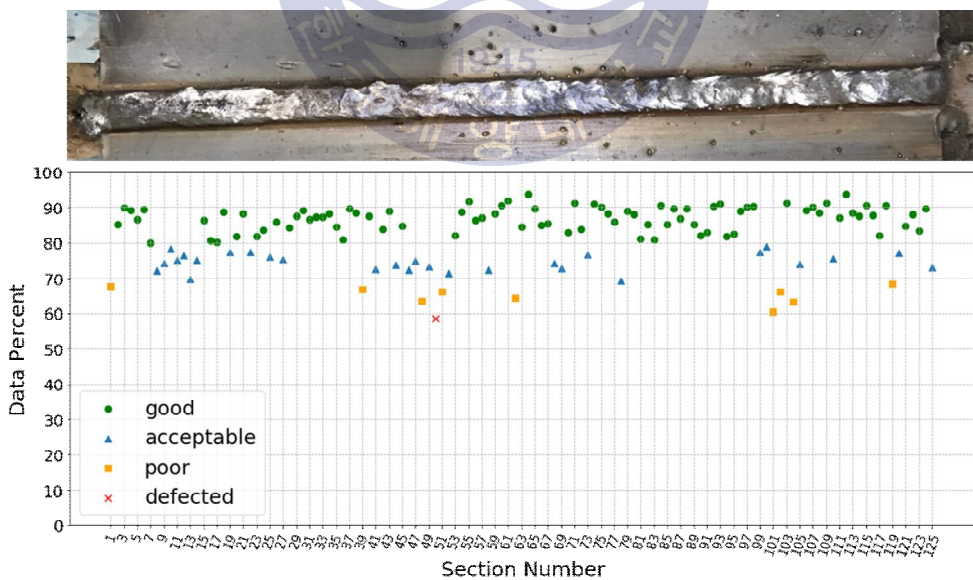


Fig. 41 Specimen 5 - 2 pass weld quality analysis

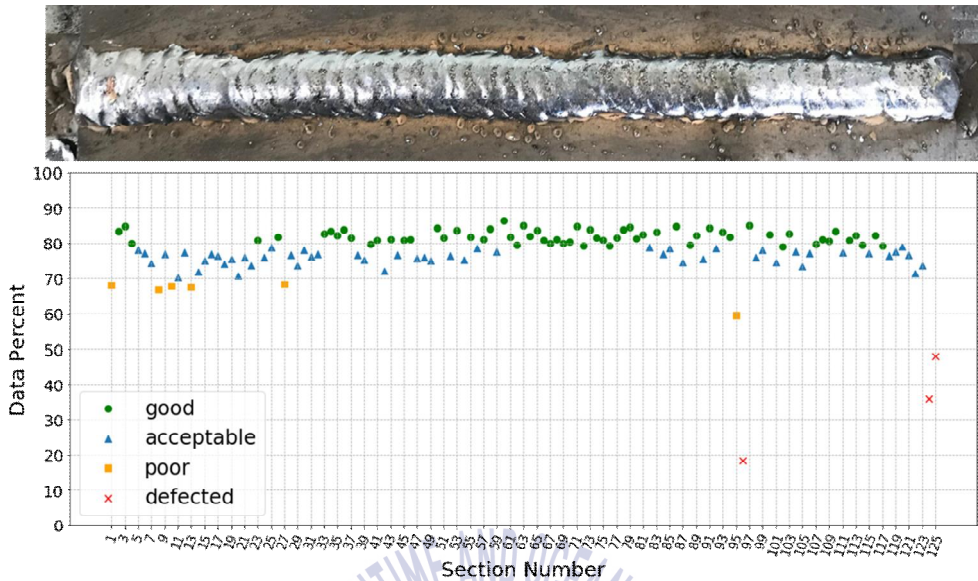


Fig. 42 Specimen 11 - 4 pass weld quality analysis

시험편 3 - 1, 5 - 2, 11 - 4은 Table 5의 육안 평가 등급에서 C와 D인 데이터이다. 시험편 3 - 1의 경우 비파괴검사 결과에서 알 수 있듯이 용합 불량으로 인한 불합격 판정을 받은 시험편이다. 데이터에서도 그것을 반영하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 용합불량이 일어난 부분에서 X표시가 급격히 증가했으며 위치 또한 비슷하게 나타내고 있다.

시험편 5 - 2의 경우 불규칙적인 비드 형상을 보여주고 있다. 실제 비드 사진만 보았을 땐 알기 어려운 부분도 데이터를 통해 쉽게 파악이 가능하다. 시험편 11 - 4는 스패터가 과도하게 생긴 경우이다. 데이터에서도 상황을 반영하듯 good 상태가 대부분을 차지하지만 일부 구간에서 poor와 defected를 찾을 수 있다.

제 6 장 결 론

본 연구를 통해 아크 출력과 동저항 그리고 아크의 안정성 및 용접 품질에 어떠한 영향을 미치는지 확인할 수 있었다. 연구 과정을 돌아보며 아래에 4가지 결론으로 종합하고자 한다.

(1) A(good)등급의 시험편의 데이터를 통해 평균 데이터 밀집도가 약 79% 이상일 때 정상 용접의 기준으로 삼았다. 또한 이를 바탕으로 아크 출력과 동저항의 증감율이 22%일 때 생기는 영역에서의 데이터 밀집도 분석 결과 정상과 결함 용접 데이터 사이에서 분명한 차이가 있음을 확인하였다.

(2) 전류-전압 평면 궤적의 무차원화된 전류 및 전압값을 사용함으로써 전류 및 전압의 설정값 크기에 상관없이 아크 안정성과 용접품질의 신속한 평가가 가능하였다.

(3) 기존 분석방법인 용접 전류 및 용접 전압 신호 대신 아크 출력과 아크 동저항을 사용하여 아크 안정성, 용접 품질을 추정할 수 있는 기준을 제시하였다.

(4) 비파괴검사에서의 평면적 품질 평가 방법과 달리 본 연구의 품질 평가 방법을 통해 각 패스별 예상 결함 위치를 알 수 있는 등의 보다 입체적인 품질 평가가 가능하였다.

추후 연구에서는 더 많은 정상 용접 데이터의 확보와 다양한 용접 조건에서의 데이터의 수집을 통해 아크 출력과 동저항의 관계를 명확히 할 것이며, 파형 패턴 분석, 인공지능망과 딥러닝과 같은 대규모 데이터 분석을 적용하여 보다 효율적인 품질 추정이 가능할 것으로 사료된다.



참고문헌

- 박주용, 2010. 용접생산공학. GS인터비전.
- Y.J.Park. K.S.Kim. Y.K.Choi. 1998. *A Study on Evaluation of Arc Stability of FCAW Process*. 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집. 198-200.
- G.G.Koo. J.J.Jung, G.H.Kim, S.W.Kim. 2014. *Arc stability factor estimation model*. 제어로봇시스템학회 각 지부별 자료집. 67-70.
- S.K.Kang. H.S.Moon, S.J.Na. 1997. *A study on determining arc stability using weight of spater*. Journal of Welding and Joining 15. 41-48.
- H.W.Shin, Y.B.Choi, Y.H.Sung, H.S.Chang. 1995. *Effects of Wire Speed Fluctuation on Arc Stability in GMA Welding*. Journal of Welding and Joining 13. 85-102.
- S.H.Rhee. 1992. *Arc Characteristic and Application of the Arc Welding*. Journal of Welding and Joining 10. 7-11.
- M.J.Kang. S.H.Lee. J.J.Woo. 2000. *Development of Estimation Model for Arc Stability Considering Arc Extinction with Multiple Regression analysis in CO₂ Arc Welding*. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A 24. 1885-1898.
- T.Arai et al. 1983. *The investigation for Arc Phenomina by means of a Computer*, Quarterly Journal of the Japan Welding Society1. Vol.1. No.3. pp 317-322.
- W.Wang. S.Liu. J.E.Jones. 1995. *Flux cored arc welding; Arc signals processing and metal transfer characterization*. Welding Journal. Vol. 74. No.11. pp 369-377