

마할라노비스 거리를 이용한 압력용기 용접부 용접성 평가에 관한 연구

김일수*, 이종표⁺, 이지혜⁺, 정성명⁺, 김영수⁺, Reenal Ritesh Chand⁺, 박민호⁺

(Manuscript received: Aug, 16, 2012 / Revised: Nov, 13, 2012 / Accepted: Nov, 13, 2012)

A Study Evaluating Welding Quality in Pressure Vessel Using Mahalanobis Distance

Ill Soo Kim*, Jong Pyo Lee⁺, Ji Hye Lee⁺, Sung Myoung Jung⁺, Young Su Kim⁺, Reenal Ritesh Chand⁺, Min Ho Park⁺

Abstract

Robotic GMA (Gas Metal Arc) welding process is one of widely acceptable metal joining process. The heat and mass inputs are coupled and transferred by the weld arc to the molten weld pool and by the molten metal that is being transferred to the weld pool. The amount and distribution of the input energy are basically controlled by the obvious and careful choices of welding process parameters in order to accomplish the optimal bead geometry and the desired quality of the weldment. To make effective use of automated and robotic GMA welding, it is imperative to predict online faults for bead geometry and welding quality with respect to welding parameters, applicable to all welding positions and covering a wide range of material thickness. MD (Mahalanobis Distance) technique was employed for investigating and modeling the GMA welding process and significance test techniques were applied for the interpretation of the experimental data. To successfully accomplish this objective, two sets of experiment were performed with different welding parameters; the welded samples from SM 490A steel flats. First, a set of weldments without any faults were generated in a number of repeated sessions in order to be used as references. The experimental results of current and voltage waveforms were used to predict the magnitude of bead geometry and welding quality, and to establish the relationships between weld process parameters and online welding faults. Statistical models developed from experimental results which can be used to quantify the welding quality with respect to process parameters in order to achieve the desired bead geometry based on weld quality criteria.

Key Words : Mahalanobis distance(마할라노비스의 거리), GMA welding(가스 메탈 아크 용접), Normal distribution(정규분포), Optimal welding parameter(최적 용접조건), Welding quality(용접품질)

1. 서론

대기압 이상의 운전환경에서 기체나 유체에 의해 작동되는

산업설비인 압력용기는 산업설비라는 관점에서 발전분야와 석유화학분야에서 그 용도가 빛을 발하고 있으나 고온, 고압, 부식 등 까다로운 운전환경에서 견딜 수 있는 압력용기용 강재뿐

* 목포대학교 공과대학 기계공학과
주소: 534-729 전남 무안군 청계면 도림리 61, 목포대학교 공과대학 5공학관 421호
⁺ 목포대학교 공과대학 기계공학과

✉ Corresponding Author E-mail: ilsookim@mokpo.ac.kr

만 아니라 장기간 운전에 대한 안전성 보증을 위해 용기를 제작하는 용접방법이나 기타 시공법에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요한 문제이다. 최근 온난화 지역에서의 LNG나 원유의 고갈 및 이들 자원들에 대한 가격 상승 등으로 극지나 심해저까지 채굴을 실시하게 됨에 따라 이들을 처리하는 선박이나 구조물에 해당되는 압력용기 및 Tube들은 혹독한 저온 환경에서도 저온인식이 확보되고 용접결합 등이 없는 건전한 용접부에 대한 보증 요구가 한층 중요시 되는 상황으로써, 용접시공 기술의 개발이 요구되는 상황이다.

압력용기의 사용 환경이 더욱 엄격하게 되고 친환경화 설계가 요구되는 추세로, 저온, 고온, 고압환경하의 용접성이 우수한 저합금계강, 고Cr계 내열강재 등에 대한 강재들의 용접은 구조물의 제작 과정에서 가장 중요한 작업 중의 하나이고, 용접부의 요구 성능 확보와 생산성을 고려해 적합한 용접 프로세스 및 용접재료의 선택 및 개발이 필요하다⁽¹⁾. 압력용기 용접부에 요구되는 성능은 곧 압력용기의 신뢰성으로 연결되며, 실제로 압력용기 사용 중 여러 가지 손상사태가 용접부에서 발견되었으며, 산업설비로서의 압력용기는 설계된 수명이 다할 때까지 수십 년 동안 사고 없이 안전하게 사용될 수 있도록 성능이 우수한 강재사용과 더불어 신뢰할 수 있는 용접시공이 뒷받침되어야 한다.

용접 결함을 결정하는데 많은 통계적 방법이 사용되어지고 있다. 하지만 품질 및 변수에 대하여 설명하는데 제한되어있으며, 이전의 많은 연구에서는 용접 전압과 전류에 따른 용접 결함에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Shengqiang, Hiroyuki와 Hidennori은 MD를 사용하여 용접품질과 수량분석을 통해 GMA 용접결함을 비교·분석하였으며⁽²⁾, Wu, Gao와 Hu는 맞대기 용접에서 금속 아크 용접의 비정상적인 상황을 검출을 위해 실시간 모니터링 시스템을 개발하였다⁽³⁾. Adolffsson, Brahami, Bolmsjo 그리고 Claesson는 아크전압 편차에 의해 용접품질을 결정하기 위하여 통계적 방법을 사용하였고⁽⁴⁾, Li와 Simpson은 아크 용접의 용접 불량 위치 검출을 위해 파라메트릭 접근 방법을 이용하였다⁽⁵⁾. 따라서 현재까지 실시간(real-time)으로 용접품질을 제어하기 위한 최적의 용접조건 선정 알고리즘 개발이 전무한 실정이다.

본 연구에서는 상대적으로 장비의 구축 및 재료의 수급 용이성 등을 고려하여, GMA 용접을 이용하여 선박용 압력용기의 용접부 품질확보를 위해, 전류·전압 측정기를 통해 측정된 전압과 전류를 통해 용접품질과 변수사이 관계를 결정하는 MD와 정규 분포 방법을 사용하여 분석하여, 최적의 용접조건을 선정하였다.

2. MD 알고리즘

마할라노비스 거리(MD)란 각각의 케이스가 여러 가지 변수

(variables), 중심값(mean)들로 이루어진 중심(cantroid)에 대해서 갖는 거리를 말하며, 1936년 인도의 유명한 통계학자 P.C Mahalanobis에 의해 설립된 통계적 방법이다^(6,7). MD는 변수에 의한 표본에 유사성을 판별하는데 유용하게 사용되어진다. MD의 계산은 통계학적 분야에서 설명되어지며, 일반적으로 단변량 이상치 판별을 위해 사용되어 진다. MD는 변량의 위치와 분포에 대한 공분산행렬을 포함하여 계산되어지므로 유클리드 거리와 같은 다차원적인 거리에 관련되어 뛰어난 특성을 보인다. MD의 정의는 다음과 같다.

$$MD = [(x_i - \mu)^r C^{-1}(x_i - \mu)^{1/2}] \quad (1)$$

x_i 는 각변량에 대한 표본값을 나타내며, μ 는 변량들의 위치, C는 공분산 행렬을 나타낸다. 일반적으로 μ 는 변량들의 산술 평균, C는 공분산 행렬의 표본을 나타낸다. 정규분포에서 MD_i^2 는 카이제곱에 의해 P자유도와 함께 분포된다.

MD알고리즘에 따르면 다변량 이상치는 MD가 커짐에 따라 쉽게 판별 되어 질수 있다. 품질 제어 기술에서는 MD가 커지는 것을 공정 중 발생하는 품질저하로 평가 할 수 있으며, 이러한 기술은 용접품질 검사에 이용될 수 있다. 용접품질은 용접전류, 전압의 다변량 이상치 MD에 의해 판별되어지며 이를 위해 실제 용접실험에 의해 측정된 표본 값들이 필요하다. 측정된 값을 이용하여 MD를 구하기 위해 평균 변형 절차에 의해 수정된 식 (2)를 사용하였으며 다음과 같다.

$$M_d = \frac{V_i'^2 - 2rV_i' + C_i'^2}{1 - r^2} \quad (2)$$

V_i' 와 C_i' 는 용접 전류와 전압의 i번째 값을 나타낸다. 첫째 전압 V와 전류C에 대한 평균 및 표준편차는 다음의 식 (3)과 (4)에 의해 계산된다.

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n}}, \sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n}} \quad (4)$$

전압과 전류의 값은 아래 식을 사용하여 표준화하였다.

$$V_n' = \frac{V_n - \bar{V}}{\sigma_v}, C_n' = \frac{C_n - \bar{C}}{\sigma_c} \quad (5)$$

상관계수 r은 다음과 같은 식으로 표준화하였다.

$$r = \sum_{i=1}^n \frac{V_i \times C_i}{n} \quad (6)$$

r의 가치를 표준화하는 것은 데이터의 분포에 의존하고 두 매개 변수의 관계를 표시하기 때문에 중요하다.

표준분포는 MD와 같이 용접 품질을 결정하는 중요한 요소이다. 표준분포는 밀도 함수에 의해 정의되며 수식 (7)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

일반적인 품질관리와 표준분포의 이론에 따르면, 분포에 속한 지점을 고려한 임계값을 흔히 $\pm 3\sigma$ 로 설정한다. 결과가 $\pm 3\sigma$ 의 범위 내에 있는 경우에는 품질이 좋고 예외적인 결과를 품질이 좋지 않다고 판단한다.

본 연구에서는 MD값의 분포는 정규분포 규칙을 준수한다고 추정하고 있으며, 이에 따른 MD값의 범위는 0에서 $\pm 3\sigma$ 까지 허용된다. 이것은 용접 전압과 전류로부터 MD를 계산하여 정규분포의 평균에서 $\pm 3\sigma$ 까지의 범위에 속한다면 용접품질이 좋은 것으로 판단할 수 있다⁽⁸⁾.

3. 용접실험

3.1 용접실험 개요 및 절차

선박용 압력용기 용접부 용접공정의 최적화를 위한 용접실험



Fig. 1 The apparatus for welding experimentation employed

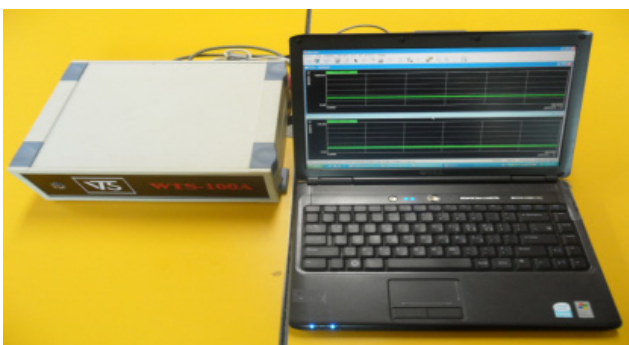


Fig. 2 Welding voltage and current measuring devices

을 위하여 반자동 직선 캐리지와 LM 가이드레일, 와이어 송급 피더기 등을 통합하여 전체 실험 시스템을 구성하였다. 용접공정은 GMA 용접기를 선정하였으며, 350A급 용접기를 사용하여 수행하였다. 용접실험을 위한 시스템의 구성은 Fig. 1에서 보는바와 같다. 또한, 체계적인 결과분석을 위하여 출력되는 전류 및 전압의 정확한 계측이 요구되므로 WTS-100A를 사용하여 용접 중 발생하는 전류 및 전압을 측정하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 WTS-100A를 나타낸다.

용접 캐리지의 전·후 주행, 이동속도 및 토치의 상·하·좌·우 미세조절은 캐리지 토치부 다이얼의 조작을 통하여 제어하였으며 보호 가스는 순도 98%의 CO₂를 사용하였으며, 보호가스 유량은 15~18(l/min)상태를 유지하였다. 또한, 모재와 토치와의 거리(CTWD)는 20~23를 일정하게 유지하여 균일한 용접 품질을 형성할 수 있도록 하였다. 시험편은 용접구조용 압연강재인 SM490A를 사용하였으며, 선정된 시험편의 두께는 선박용 압력용기 제작에 주로 이용되는 12mm로 선정하였다. 압력용기의 최적 용접조건 선정을 위한 시험편의 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 절단한 후 밀링머신으로 맞대기(Butt) 형태의 시험편으로 제작하였다⁽⁹⁾. 실험에 사용된 시험편의 모식도는 Fig. 3과 같다.

용가재는 모재와 이음부 형상을 고려한 압력용기 제작에 많이 사용되는 $\varnothing 1.2\text{mm}$ 인 AWS ER70S-3를 이용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 실험에 적용한 SM490A의 WPS(Welding Procedure Specification) 기준을 나타내며, 용접조건은 수동 예비실험을 바탕으로 안정된 비드영역을 도출하는 공정변수의 범위를 선정하였다.

입력변수는 용접전류, 아크전압, 용접속도로 선정하였으며, 출력변수는 발생하는 이면비드 폭과 높이로 선정하였다. Fig. 4는 용접공정의 입력변수 및 출력변수 사이의 상관관계를 나타낸다.

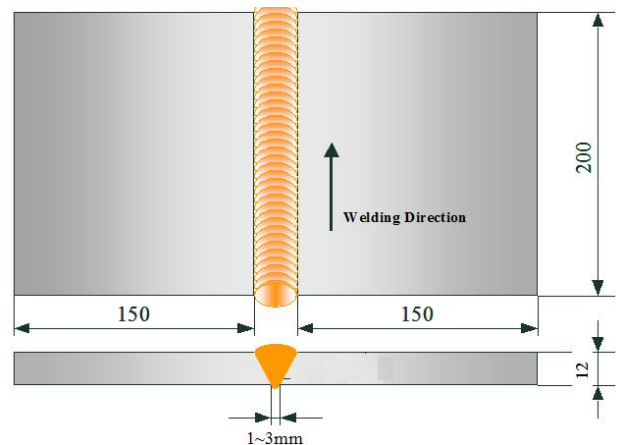


Fig. 3 Overview of GMA butt weld specimen

Table 1 WPS reference table

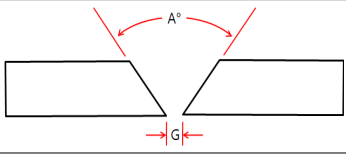
	Details
Joint Type	
Groove Angle	60°
Base Metal Grade	SM490A
Thickness	12mm
Welding Wire	AWS ER70S-3
Shielding Gas	CO ₂
Root Gap	1mm
Welding Length	400mm
Evaluation Item	Welding Condition (Amp/Volt/Speed/Weaving)

Table 2 Welding Parameters and Levels

Symbol	Process Parameter	Levels	
		1	2
V	Arc Voltage(V)	24	26
I	Welding Current(A)	180	220
S	Welding Speed(cm/min)	20	30



Fig. 5 Measurement of bead geometry



Fig. 4 Welding parameters and geometry on GMA welding process

3.2 용접실험

본 실험은 선박용 압력용기 제작을 위한 용접부 용접조건인 입력변수와 출력변수 사이의 상관관계를 분석하는데 목적이 있다. GMA 용접을 이용한 선박용 압력용기 용접조건인 입력변수는 용접전류, 아크전압 및 용접속도로 선정하였고, 출력변수는 비드형상(이면비드 폭 및 높이)을 선정하였다. 3개의 공정변수의 실험 수준(level)과 적용범위는 관련자료 및 WPS를 기준으로 선정하였으며, Table 2에서와 같이 공정변수들을 1(low), 2(high)로 분류하여 실험을 수행하였다. Full-factorial 실험계획법을 이용하여 L16배열 실험계획을 수립하였으며, 각각의 공정변수를 이용하여 용접실험을 수행한 결과 용접성을 확인하기 위한 2개의 표본을 선정하였다.

시험편의 비드형상의 측정을 위해 용접시험편의 가로축 중간부분을 와이어 컷팅머신(wire cutting machine)을 이용하여 절단하고 용접부 단면의 형태를 확인하기 위해 폴리싱(polishing) 작업을 수행하였다. 시험편의 비드형상을 나타내기 위하여 3% HNO₃ 용액을 이용하여 에칭(etching)하였다. 정확한 비드형상의 측정을 위하여 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배울 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다. Fig. 5는 광

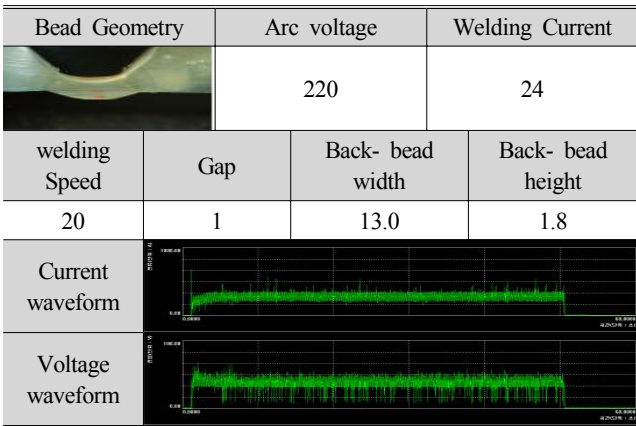
학현미경을 나타낸다.

용접 품질을 선정하기 위해서 전류전압 측정기를 통해 획득한 아날로그 용접조건(아크전압, 용접전류)을 디지털로 변환하였다. 실험으로 얻어진 결과값을 정의된 수식을 통해 표준편차 및 MD를 계산하였고, 계산되어진 MD값은 정규분포방법을 통해 용접품질을 결정한다. 용접품을 결정하는 세 단계는 첫 번째로 전류/전압 밀도에 따라 결정되며, 두 번째로 용접시간에 관하여 MD를 확인하고, 마지막으로 정규분포 비율을 사용하여 용접품을 결정한다.

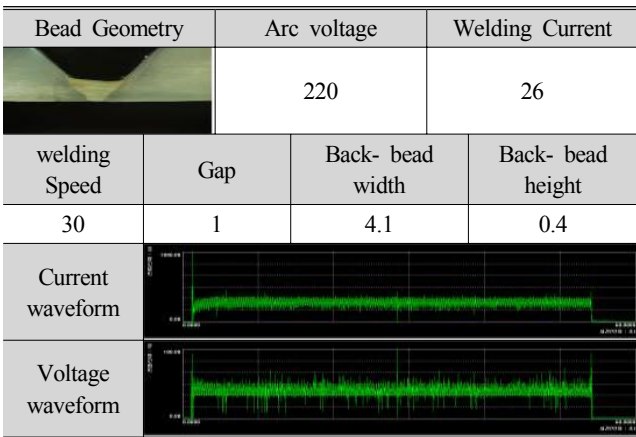
4. 실험결과 및 고찰

비드 형성율은 적정 이면비드의 높이 및 폭을 선정하고, 선정된 영역에 포함된 경우 적정 이면비드가 형성되었다고 가정하여 형성율을 측정하였다. 예비실험 및 관련 자료를 기초로 적정 이면비드 형상은 높이 1~2.5mm, 폭 10~20mm로 선정하였다⁽¹⁰⁾. 이면비드의 폭은 용접 개선부를 충분히 용융시키고, 현장 작업자들이 만족스럽다고 판단할 수 있는 정도인 10~20mm로 선정하였다. 전류전압 측정기를 통해 획득한 아날로그 용접조건(아크전압, 용접전류)을 Fig. 6과 같이 나타내었다. case1에서는 이상적인 이면비드를 형성한 용접부 형상을 나타내며, 반대로 case2는 이면비드 폭이 매우 좁은 (2mm 이하)형태의 용접부를 나타낸다.

측정된 용접전압 및 용접전류를 비드의 육안검사 및 마크로 형상을 바탕으로 선정된 두 개의 실험데이터를 분석하여 용접조건에 따른 품질을 분석하였으며, MD알고리즘을 이용하여 용접 공정을 평가 하였다. 각각의 중심값을 중앙에 교차시켜 케이스 값들을 나열해보면 일종의 군집원리를 이용하여 특정 케이스의 값이 심하게 벗어났는가를 보기 위한 거리값 계산에 사용했다. 용접의 시작부분과 끝부분에서 용접품질이 다른 부



(a) case 1



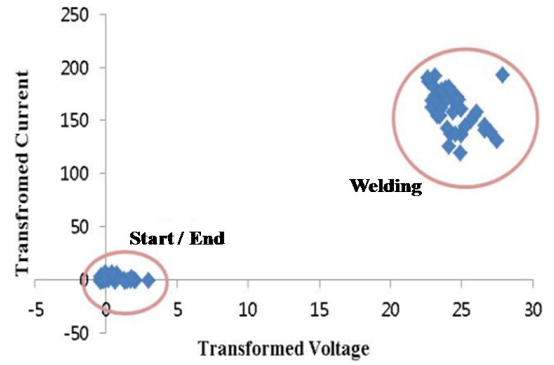
(b) case 2

Fig. 6 Experiment results from the performed experiment with bead geometry

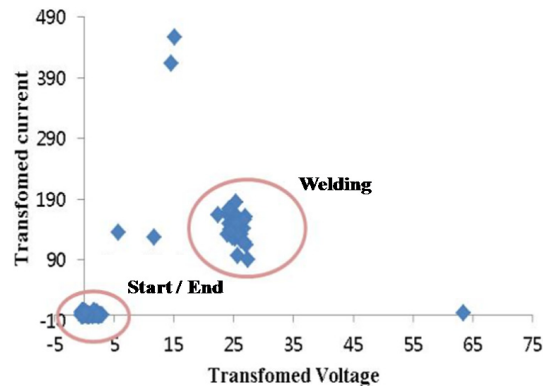
분에 비해 결함으로 간주되기 때문에 초기 용접상태를 용접 준
으로 간주하였으며, 용접 전후 실험 데이터를 비교하였을 때
서로 다른 공간의 존재는 용접 결함을 나타내었다. Fig. 7은 두
개의 데이터를 분석하여 나타낸 그림이며, Fig. 7(a)의 경우 (b)
에 비해 용접 과정에서 군집현상이 조밀하게 형성되는 것을 확
인 할 수 있었다.

Fig. 8은 시간에 따른 MD 분석결과를 나타낸다. Fig. 8(a)은
양호한 용접품질을 보여주지만, 시작부분과 끝부분에서 MD알
고리즘이 불안정하지만 용접공정을 따라 움직이면서 안정되어
가는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8(b)은 용접공정에 불안정한
MD결과를 나타내며, 용접과정 중에 MD값이 크게 변화하는
걸 확인할 수 있었다.

용접이 진행되는 시간변화에 따른 용접효율 분석은 Fig. 9에
나타냈으며, 용접품질의 기준선은 정규분포 방법을 통해 얻어진
92.8%로 정의하여 파선으로 나타내었다. 즉, 실험에서 얻은 정
량화한 용접품질이 기준선을 넘으면 용접품질이 우수한 것으로
판단한다. Fig. 9(a)에서 용접품질이 92.8% 이상으로 나타남으

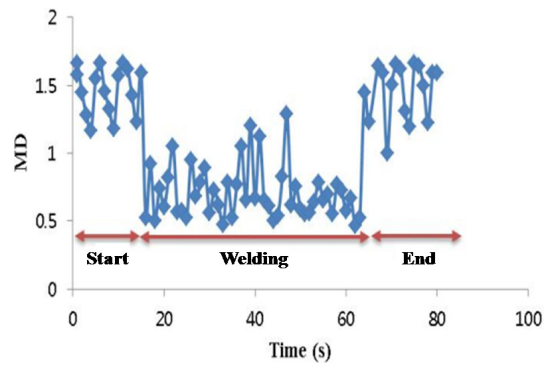


(a) Good weld

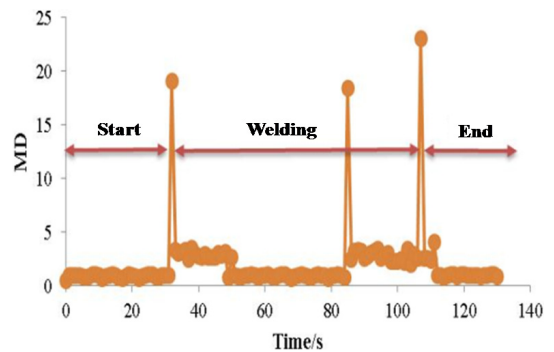


(b) Fault weld

Fig. 7 Typical transformed welding current and arc voltage

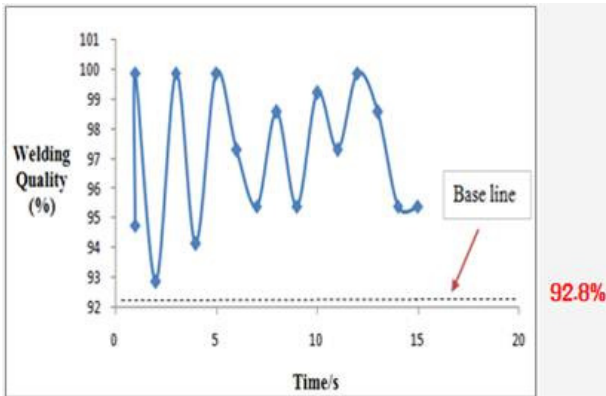


(a) Good quality welding

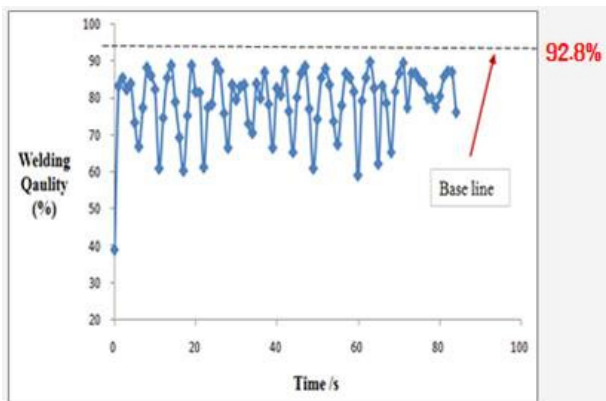


(b) Fault quality welding

Fig. 8 MD distribution with respect to time



(a) Quantified welding quality for good weld



(b) Quantified welding quality for fault weld

Fig. 9 Welding quality of optimal process parameter

로써 용접품질이 우수함을 알 수 있었다. Fig. 9(b)의 경우 용접 전류 및 전압에 비해 넓은 루트갭의 영향으로 아크의 불안정성이 값의 변화에 큰 영향을 작용하여 기준선인 92.8% 이하로 용접 품질이 좋지 않음을 알 수 있었으며, 용접성에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수에는 용접전류, 아크전압, 용접속도이며 출력 변수에는 비드폭, 비드높이라는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

선박용 압력용기의 GMA 용접공정의 품질확보를 위해 용접 변형 및 기계적 성질에 미치는 영향을 연구하며, 선박용 압력용기의 GMA 용접공정에 대한 용접실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 선박용 압력용기 용접공정에 적합한 350A급 전용 GMAW 용접기를 사용하여 용접가능성을 검토하고 안정된 비드영역을 도출하는 최적의 공정변수의 범위를 선정하였다.
- (2) 전류 및 전압값의 정확한 측정을 위해 WTS-100A를 사용하여 용접 중 발생하는 전류 및 전압을 측정하여 비교·분

석하였다.

- (3) 자동용접용 캐리지를 이용한 평판 용접실험을 수행하여 용접조건 선정 및 마할라노비스 거리 분석법을 통한 용접부 품질검사를 수행할 수 있었다.
- (4) 마할라노비스 거리를 분석한 결과로써 용접 중 균집현상이 조밀하게 형성되는 것을 확인 하였으며, 정규분포 방법을 통해 얻어진 92.8%의 기준선을 넘으면 용접품질이 우수한 것으로 판단 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 IT기반 서남권 중형조선산업 지역혁신센터사업으로 수행된 연구 결과임.

References

- (1) Hwang, H. C., and Lee, E. J., 2007, *ASME&PV Code Section VIII Div, Node Media*, pp. 231~294.
- (2) Feng, S., Hiroyuki, O., Hidennori, T., Yomizo, K., and Hu, S., 2011, "Qualitative and Quantitative Analysis of GMAW Welding Fault Based on Mahalanobis Distance," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 6, pp. 949~955.
- (3) Wu, C. S., Gao, J. Q., and Hu, J. K., 2007, "Real-time Sensing And Monitoring in Robotic Gas Metal Arc Welding," *International Journal of Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 303~310.
- (4) Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjo, G., and Claeson, I., 1999, "Online Quality Monitoring in Short-circuit Gas Metal Arc Welding," *Welding Journal*, Vol. 78, No. 2, pp. 59~73.
- (5) Li, X., and Simpson, S. W., 2009, "Parametric Approach to Positional Fault Detection in Short Arc Welding," *Science And Technology Of Welding And Joining*, Vol. 14, No. 2, pp. 146~151.
- (6) Taguchi, G., and Jugulum, R., 2002, *The Mahalanobis Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*, John wiley & Sons, New York, pp. 6~8.
- (7) Avishek, P., and Maiti, J., 2010, "Development of a Hybrid Methodology for Dimensionality Reduction in Mahalanobis Taguchi System using Mahalanobis Distance and Binary Particle Swarm Optimization," *Expert System with applications*, Vol. 37, No. 2, pp. 1286~1293.
- (8) Itagaki, M., Takamiya, E., Watanabe, K., Nukaga, T.,

- and Umemura, F., 2007. "Diagnosis of Quality of Fresh Water for Carbon Steel Corrosion by Mahalanobis Distance," *Corrosion Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 3408~3420.
- (9) Hwang, H. C., and Lee, E. J., 2009, *ASME B & PV Code Section VIII Div. 1(2007 Edition)*, Node Media, pp. 231~294.
- (10) Kim, J. S., 2011, "An Experimental study on Prediction of Back-bead Geometry in Pipeline using the GMA Welding Process," *KSMTE*, Vol. 20, No. 1, pp. 74~80.