

## 고장력 장갑판재의 자동용접 시스템 최적 설계에 관한 연구

김병호<sup>\*,#</sup>, 강현제<sup>\*</sup>, 서재현<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>국방기술품질원

### A Study on the Optimal Design of a Robotic Welding System for a High-strength Steel Armor Plate

Byeong-Ho Kim<sup>\*,#</sup>, Hyeon-Je Kang<sup>\*</sup>, Jae-Hyun Seo<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Defense Agency for Technology and Quality

(Received 2 May 2016; received in revised form 31 May 2016; accepted 2 June 2016)

#### ABSTRACT

This study proposes an optimal design for a robotic welding system for a high-strength steel armor plate. In order to identify the welding defect parameters, we analyzed the 4M (man, machine, materials, method) characteristics diagram, as well as a cause and effect matrix, to improve the productivity and quality of welding defects. From these analyses, we designed optimal welding conditions and carried out welding tests -- such as mechanical testing and macro structure tests -- with positive results. We determined that it was possible to obtain a quality similar to manual welding with our robotic welding system. In the future, we expect that the system will be used as inspiration for future welding system designs.

**Key Words** : Amor Plate(장갑판재), Welding(용접), Robot System(자동화), Optimal Design(최적화)

#### 1. 서 론

민수산업에 적용되는 산업용 로봇은 단순한 반복 작업을 빠르고 정밀하게 수행할 수 있고 그 목적에 맞게 최적화 되어 많은 산업현장에 자동화 및 생산성을 향상시켜왔다. 산업용 로봇은 사전적 의미로 인간을 대신하여 작업현장에서 노동을 행하는 자동화 기계로서 여러 산업에서 다양한 공정작업들을

자동 제어하는 공업용 기계를 통칭하는 것이다. 이러한 산업용 로봇의 등장으로 고온, 극저온, 고압 등 인간이 접근할 수 없는 극한 환경에서도 작업이 가능해졌다. 또한 무인 자동화공장이 가능해져서 노동력이 절감되고 제조공정이 신속하고 정밀해짐에 따라 가격 경쟁력 제고와 제품 품질 향상이 달성되었다<sup>[1-3]</sup>.

# Corresponding Author : kjbshh@dtq.re.kr

Tel: +82-55-279-4035, Fax: +82-55-279-4780

특히, 용접산업은 대표적인 기피산업 분야 중 하나로 우수한 용접기술 인력이 점점 줄어들고 있다. 하지만 자동차, 조선, 반도체, 디스플레이, 에너지산업 등 용접 적용 시장이 확대되고 있어 용접 분야의 노동력 확보, 용접 효율성 향상 등은 국내 용접산업의 현안으로 떠오르고 있으며, 최근에는 민수산업과 더불어 방위산업에서도 이러한 용접 자동화를 위해 연구가 진행 중이다.

육군의 대표적 지상궤도장비인 자주포, 전차, 장갑차에서 외부 방호성능(Ballistic Performance)을 위해 적용되는 소재는 130Kg급 초고장력 후판과 5000계열인 알루미늄 장갑판재 등이 적용중이며, 이러한 무기체계는 처음 시제 개발 시 차체 및 포탑 등 용접구조물은 거의 수동으로 용접 작업이 이루어졌다. 그러나 군 전력화 및 생산성 향상을 위해 모든 용접 공정에서 차체 및 포탑 구조물 등은 수동에서 자동으로 변화의 필요성이 대두되었다.

하지만 산업용 로봇은 프로그램으로 짜인 작업만 수행하기 때문에 작업 중간 발생하는 예외적인 이벤트에 대한 처리가 어렵고 작업 전체에 대한 사전 계획인 로봇을 교시하는 작업자의 숙련도에 따라 작업 품질이 크게 좌우된다는 문제를 지니고 있다. 그렇기 때문에 로봇과 작업 대상물의 위치가 유동적인 환경이나 교시자에게 낯선 환경에서는 로봇의 사용이 제한되고 좋은 품질을 보장할 수 없게 된다. 또한 위험한 환경에서 사람을 대신하고자 하는 산업용 로봇의 목적과 달리 사람과 유사한 인지 능력이 없기 때문에 그 목적을 원만히 이루기 어려운 상황이다. 특히, 방호성능이 필요한 지상궤도장비에서 용접부는 가장 취약 할 수밖에 없으며, 용접결함으로 탄이 관통 되었을 때에는 인명피해까지 발생할 수 있기 때문에 수동용접에서 자동용접으로 변경 시에 다양한 측면에서 용접변수 및 환경요인 등을 고려해야 한다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하고자 지상궤도 장비에서 적용하고 있는 고장력 장갑판재 아크 자동용접 시스템 최적 조건을 도출하고자 수행 하였다. 이를 위해 자동용접 시 발생할 수 있는 요인에 대해 결함원인을 심층적으로 분석하여 기계적 특성 및 조직시험 등 입증시험을 통해 최적설계 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 설계 방안

본 연구에서는 고장력 장갑판재에 대한 아크 자동용접 시스템 최적조건을 도출하고자 하였고, 이를 위해 먼저 공장 현장에 설치되어 있는 용접로봇 시스템 구성을 살펴보았다. Table 1은 용접로봇 시스템 구성을 나타내고 있으며, Fig. 1은 공정별 용접로봇 적용 현황을 나타내고 있다. Table 1 및 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 용접 로봇은 총 3기이며, 작동축은 10축에서 17축까지 움직일 수 있으며, 로봇 1기는 1개의 로봇과 4개의 작업장으로 구성되고 있고 2기, 3기는 1개의 로봇과 2개의 작업장으로 이루어져 있다. 또한 로봇 1기는 대형 SUB 구조물, 2기는 개방형 Main 구조물, 3기는 Box형 Main 구조물을 용접 할 수 있다. 이 때, 총 용접 자동화율은 67%로 예상되며, 현재 대형 구조물 자동용접에서 발생하는 불량률은 5% 이내지만, 불량률 0%의 용접 자동화 시스템이 갖춰지게 되면 생산성은 비약적으로 증가 하게 될 것이다.

용접 자동화 시스템 최적화 설계방안을 위해 자동용접에서 발생하는 용접결함 및 용접에 영향을 미치는 요인 등을 분석하여 검토하였다.

Table 2는 4M(Man, Machine, Materials, Method) 기준의 용접 불량에 대한 결함유발 인자를 도출한 표를 나타내며, 본 실험에서 용접결함의 유무는 비파괴 검사인 RT(Radiographic Testing)통해 판단하였다. 결함유발 인자는 크게 용접조건(Welding Condition), 모재(Base Metal), 용접재료(Welding Materials), 용접사(Welding operator)로 분류 할 수 있었으며, 다시 용접조건은 용접기법, Arc길이 등으로, 모재는 화학조성 및 탄소당량, 결정입자 크기 등으로, 용접

**Table 1 The composition of robot system**

Classification	1st Robot (#1)	2nd Robot (#2 ~ #4)	3rd Robot (#5, #6)
Basic Composition	1-Robot 4-Work Station	1-Robot 2-Work Station	#5 : 1-R, 2-W/Station #6 : 1-R, 2-W/Station
Operating axial	10shaft(Basic 6 + 4 shaft)	17shaft(Basic 6 + 11 shaft)	17shaft(Basic 6 + 11 shaft)

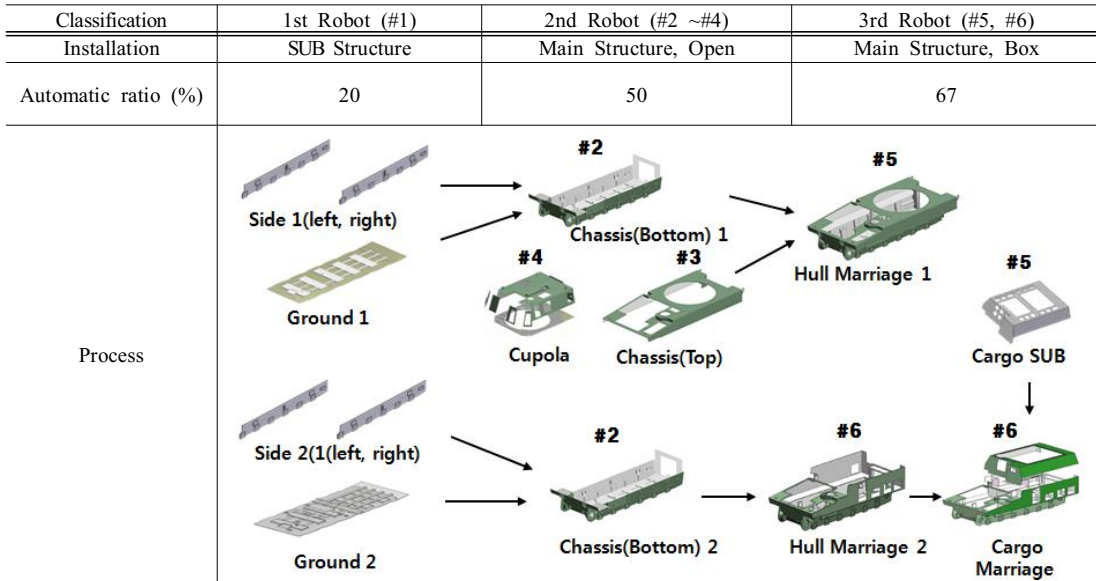


Fig. 1 The application of welding robot process

Table 2 The Defect parameter of welding(4M)

Welding Condition	Base Metal	Welding Materials	Welding operator
-Shielding gas type and flow -Welding sequence -Air humidity -Current -Voltage -Welding speed -Grove shape -Preheating and post temperature -Wind velocity -Working angle -Manipulation of electrode	-Carbon equivalent -Chemical composition -Grain size -Foreign matter -Arc blow -Part size -Deformation of part	-Chemical composition -Detachability of slag -Diameter of welding materials -Type of welding materials -Nonequilibrium solidification -Dry of welding materials -Manufacturing Time	-Workmanship -Cleanliness -Angle of torch -Calibration of torch -Coolant of torch -Interference of welding cable, tool and product -Back Gouging -Grind condition

재료는 용접재료 성분, 슬래그 박리성 등으로, 용접사는 숙련도(기량), 용접부 청결상태 등으로 재분류하여 사소한 결함유발 인자도 검토 하였다.

Fig. 2는 품질관리 기본 7가지 도구 중 하나인 특성요인도 개념을 적용하여 용접 결함 발생원인 인자를 분석 하였다. 이를 위해 용접 전문가 및 관계자들이 모여 브레인스토밍(Brain Storming) 방식을 이용하여 세부 요인을 토의하였다. Fig. 2에서 나타나듯이 용접에서 발생할 수 있는 결함 발생 주요 인자를 심층분석 해 본 결과 기공결함(Gas Cavity)은 주로 보호가스 차폐기능, 접합(Joint) 형상, 이물질 및 전류/전압값이 원인이었고, 융합불량(Lack of Fusion)은 부품의 변형, 와이어 속도, 이물질, 토치 각도가 주요 원인 이었다.

또한, 제품별 결함 발생원인 및 핵심인자를 분석하기 위해 C&E(Cause and Effect) 매트릭스 분석을 수행 하였다. C&E 매트릭스는 원인과 결과 사이의 관계, 목표와 방법사이, 문제가 되고 있는 항목요소, 방법간의 관계에 대한 정보를 제공하고 이들 관계의 상대적 중요도를 나타내기 위해 사용하는 도표이며, 분석결과는 Fig. 3, 4에 나타내었다.

먼저 용접에 영향을 미치는 요인(이물질, 모재, 작업각도, 전압, 전류 등)을 변수로 삼아 세로축으로 나열하고 가로축으로는 이러한 변수에 따른 결과인

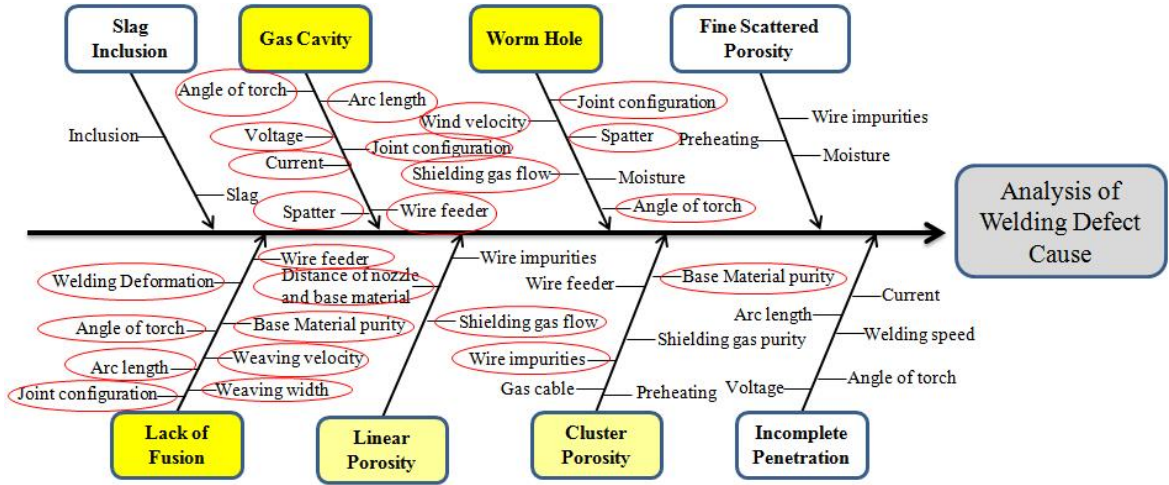


Fig. 2 Analysis of characteristics

Rating of Importance to Customer			7	7	3	9	3	3	1	3			
No	Key Process Input	C or U	Gas Cavity	Worm Hole	Fine Scattered Porosity	Lack of Fusion	Linear Porosity	Cluster Porosity	Incomplete Penetration	Crack	Total	Rank	
1	Wire impurity	C	7	7	5	1	3	7	3	3	167	19	
2	Wire quality	U	9	7	1	7	1	9	5	3	225	11	
3	Base material	C	7	9	5	7	3	7	3	3	247	7	
4	Slag	U	1	1	1	7	3	1	1	3	129	23	
5	Torch angle	C	9	9	9	9	9	9	9	3	315	1	
6	Current	C	5	7	7	9	9	5	9	7	267	4	
7	Voltage	C	5	7	7	9	9	5	9	7	267	4	
8	Distance of nozzle and base material	C	9	9						7	5	289	2
9	Joint structure	C	9	9						7	5	289	2
10	Arc length	U	7	9						5	5	231	10
11	Welding speed												
12	Wire feeder speed (Parameter)												
13	Wire feeder speed (Installation)												
14	Shielding gas												
15	Wind velocity												
16	Torch condition												
17	Preheating												
18	Moisture												

3rd Robot(Process #5)

Defect Type	Count	Rank
LF	10	1
GC	5	2
WH	5	2
CP	2	3
FP	1	4
CSP	1	4
Crack	1	4
Slag	1	4
LP	1	4

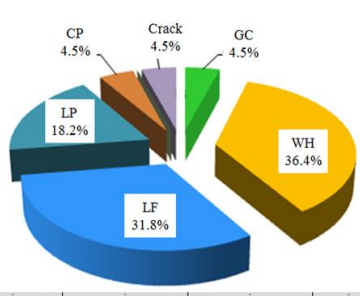
Very Critical(9), Critical(7), Normal(3), Weak(3), No(1), C: Controllable or U: Uncontrollable

Fig. 3 Analysis C&E of 3rd Robot (Process #5)

기공, 워홀, 미세 분산된 기공, 용합불량, 선형기공 등 결함을 나열하였다. 그리고 서로 대응이 되는 요소간의 관련성이 깊은 것은 9에서 적은 것은 1로 표시하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 실제 Box형 Main 구조물을 용접한 로봇 3기(공정 #5)에서 발생한 용접결함

은 LF(Lack of Fusion) 35.9%, GC(Gas Cavity) 21.7%, WH(Worm Hole) 20.7% 등으로 발생하였고, 이는 중요도에 따라 점수를 9, 7, 7 부여 하였다. 그리고 최종적으로 모든 점수를 종합하면 각 항목에 대한 순위가 결정된다. 분석결과 토치위치(작업 각도), 노즐-모재 간 거리, 이음부 형상(Joint 구조),

Rating of Importance to Customer			1	3	9	1	9	5	3	1	3					
No	Key Process Input	C or U	Slag Inclusion	Gas Cavity	Worm Hole	Fine Scattered Porosity	Lack of Fusion	Linear Porosity	Cluster Proximity	Incomplete Penetration	Crack	Total	Rank			
4	Slag	U	9	1	1	1	7	3	1	1	3	113	27			
5	Torch angle	C	3	9	9	9	9	9	9	9	3	291	1			
6	Current	C	3	5	7	7	9	9	5	9	7	259	4			
7	Voltage	C	3	5	7	7	9	9	5	9	7	259	4			
8	Distance of nozzle and base material	C	1	9	3 <sup>rd</sup> Robot(Process #6) 							9	7	5	265	3
9	Joint structure	C	3	9								9	9	5	273	2
10	Arc length	U	1	7								7	5	219	10	
11	Welding speed	C	3	3								3	9	207	12	
12	Wire feeder speed (Parameter)	C	1	3								3	3	115	26	
13	Wire feeder speed (Installation)															
14	Shielding gas															
15	Wind velocity															
16	Torch condition															
17	Preheating															
18	Moisture															

Very Critical(9), Critical(7), Normal(3), Weak(3), No(1), C: Controllable or U: Uncontrollable

Fig. 4 Analysis C&E of 3rd Robot (Process #6)

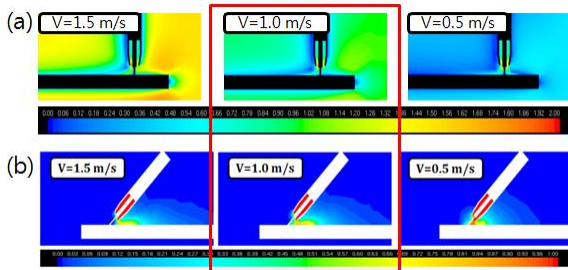


Fig. 5 Effect of wind speed on (a)stream of air distribution and (b)shielding gas flow

전압, 전류 순으로 나타났다. Fig. 4에 나타나듯이 같은 방식으로 로봇 3기(공정 #6)을 분석해본 결과 주요 요인은 토치위치(작업각도), 이음부 형상(Joint) 구조, 노즐-모재간 거리, 전압, 전류 순으로 나타났다. 이런 방식으로 각 로봇 호기별 용접에 영향을 미치는 요인을 종합해보면, 토치위치(각도), Joint 형상(구조), 노즐-모재 거리, 토치(내부 스페터 부착) 전압, 전류, Wire, 가우징의 균일성, 이물질(모재), Arc 길이 및 용접 연결부 등 11개의 핵심인자를 파악 하였다.

Fig. 5는 용접 조건에 영향을 미치는 외부 바람 영

Table 3 Mechanical Properties of welding specimens

Mechanical Test	Standard	16t		19t	
		Robot	Manual	Robot	Manual
Tensile Strength (MPa)	Base Metal (T.S 70%, 689.0 ↑)	908.5±12.5	807.5±10.2	891.8±8.8	867.3±9.4
Impact Energy (-40°C, J)	Base Metal (46.2 ↑)	66.3±5.2	61.0±4.2	67.2±2.5	56.7±2.8
Hardness (HmV)	Weld Metal	251.3±0.5	213.3±4.5	255.3±8.5	229.7±4.5
	Heat Affected Zone	334.7±3.5	341.3±2.5	314.3±4.5	308.5±2.5
	Base Metal	366.5±3.1	371.5±2.4	367.5±10.5	388.3±12.5

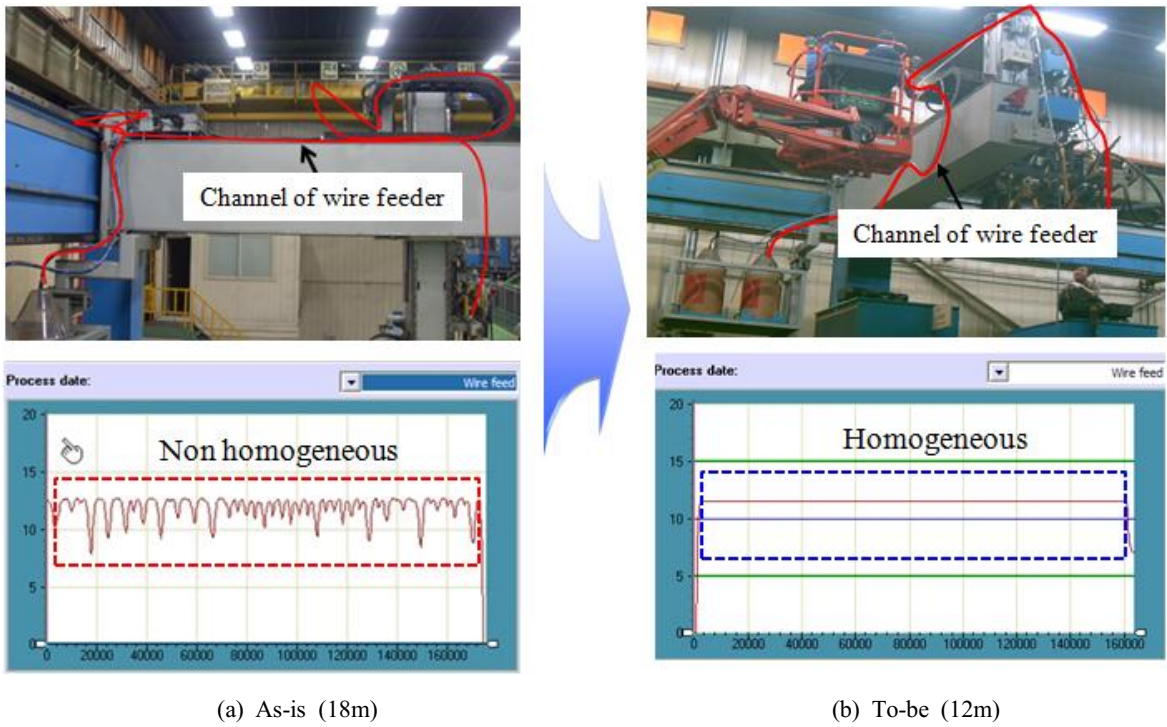


Fig. 6 Redesign of wire feeder system

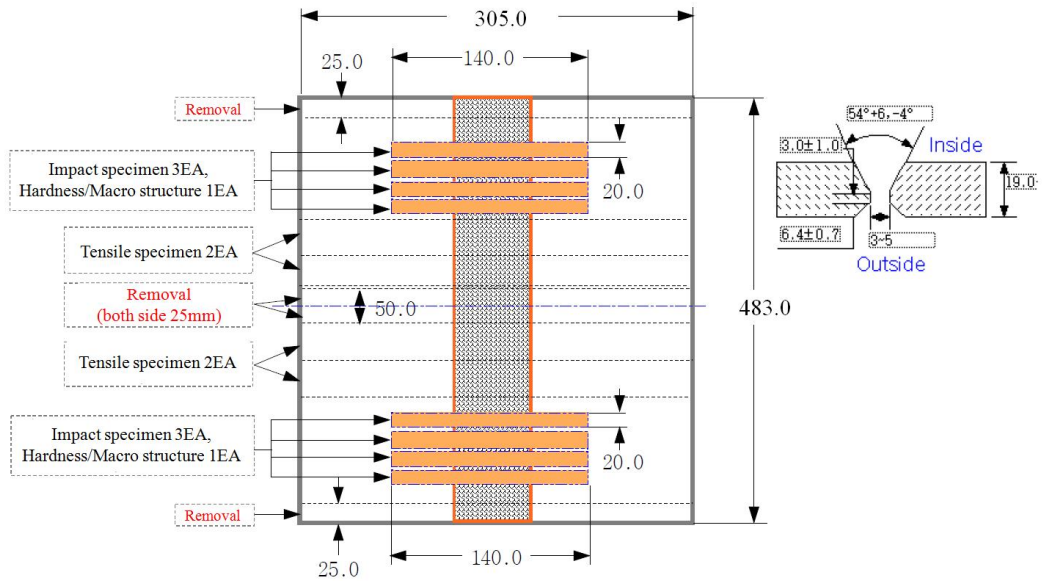


Fig. 7 Specimen of welding

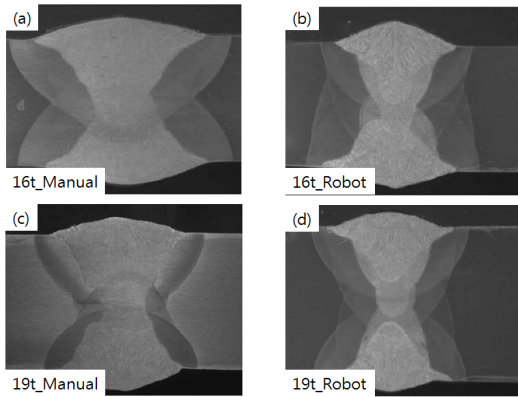


Fig. 8 Macrography of manual and robot welding

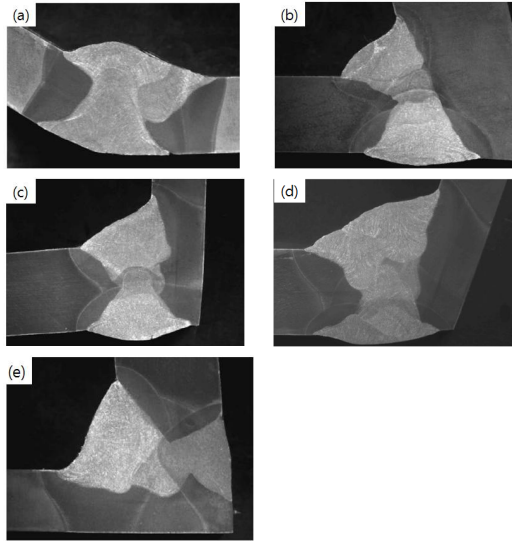


Fig. 9 Robot welding macrography of representative joint region

향을 분석하기 위한 외부 풍속 차이에 따른 용접토치 주변 유동 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5에서 나타나듯이 1.0m/s 이상의 외부 풍속은 용접봉 주변의 기류 분포 유동 및 보호 가스 유동에 영향을 주기 때문에 용접조건 설정 시 적절한 제어가 필요하다. 실제로 이 분석을 통해 토치 높이 최적 설정 및 가스유량을 증대 하였고, 냉/난방 송풍 배출구 방향을 개선하였다. Fig. 6에서는 용접 와이어 과부하 해소를 통한 Arc 안전성을 유지 및

품질 개선을 위해 송급 케이블 길이를 기존 18m에서 12m로 단축하였고, 꺾임부위 최소화로 자동송급 장치의 안정적인 작동과 와이어 공급 균일성을 지속적으로 유지 할 수 있었다.

즉 이러한 방식을 통해, 자동용접에서 발생할 수 있는 용접결함 및 원인들은 실제 로봇용접에서 발생할 수 있는 사례와 품질경영 기법 등의 설계방안을 적절히 접목시켜 아크 자동용접 시스템 최적 조건을 도출하였다.

### 3. 시험 결과

본 실험에서 적용되는 용접법은 GMAW(Gas Metal Arc Welding)이며, 모재는 MIL-A-12560의 방탄소재, 용접재료는 MIL-100S-1, 보호가스는 Ar(98%)+O<sub>2</sub>(2%)을 적용 하였다. 최적화된 자동용접 시스템으로 제작된 용접시험편 형상은 Fig. 7에 나타내고 있다. Fig. 7에서 나타나듯이 용접시험편에서 충격, 경도, 인장 시험편을 제작 하였고 Macro 조직사진은 HAZ(Heat Affected Zone) 부분이 포함된 부분에서 채취하였다. 기계적 성질 시험 결과는 Table 3에 나타내고 있다. Table 3에서 보듯이 판재는 16t, 19t를 각각 사용하여 로봇과 수동으로 용접한 결과를 비교 하고 있다. Table 3에서 볼 수 있듯이 용접부의 합격판정 기준은 인장강도가 689.0MPa로 모재대비 70% 이상, 충격강도(-40℃)는 모재와 동등한 46.2J 이상, 최고경도는 400HmV 이하로 측정결과 규격을 모두 만족 시켰다. Fig. 8은 용접의 건전성을 확인하기 위해 수동 및 자동용접 후 광학현미경(Olympus GX41) 조직사진을 나타내고 있다. Fig. 8의 (a)~(d)에서 볼 수 있듯이 16t 및 19t 판재의 수동 및 용접 후 Macro 조직 사진에서 어떠한 결함도 관찰되지 않으며 완전용입 및 용합이 이루어진 것을 관찰 할 수 있다. 또한 로봇용접 품질을 확인하기 위해 각 용접공정에서 발생 할 수 있는 대표 조인트 부분에 대해 비파괴검사 및 Macro 조직시험을 한 결과 Fig. 9와 같이 나타 내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 대표 조인트 부분은 5가지로 분류 할 수 있으며, 방사선투과 시험(Radiography testing) 결과 MIL-STD-1264에 의거 판정 등급에 의거 Grade 1

으로 규격(Grade II 이상)을 충족 시켰고, Macro 조직시험에서도 용입상태는 모두 결함없이 완전용입 및 용합이 이루어진 것을 관찰 할 수 있다. 본 연구를 통해 고장력 장갑판재 자동용접에서 발생할 수 있는 용접결함 및 요인에 대한 설계방안을 도출하여 최적화 하였고, 입증시험을 통해 수동용접과 대비하여 용접품질이 동등한 수준임을 알 수 있었다. 또한, 수동용접의 경우 용접사 기량에 품질이 좌우되는 반면 로봇용접은 표준화된 작업이 가능함에 따라 균일한 품질 확보가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 자주포에 적용되는 고장력 장갑판재 자동용접 시스템 최적 조건에 관한 내용으로 차체 및 포탑 용접 구조물에 적용되는 장갑판재의 자동용접의 각 공정에 대한 용접결함에 대한 설계방안 및 개선방안을 검토하였고, 이를 토대로 최적화된 용접 품질을 검증하기 위해 Macro 조직 및 기계적 시험을 실시하여 아래와 같은 결론을 도출 하였다.

1) 자동용접 시스템 최적화를 위해 용접 불량에 대한 결함유발 인자, 결함 인자 분석(특성 요인도) 및 C&E 매트릭스 분석과 같은 품질경영 기법 및 외부 풍속영향성 및 송급 와이어 길이 등 환경 조건 등을 개선하여 최적 조인트별 용접조건을 도출 하였다.

2) 최적화된 로봇 용접조건으로 제작된 용접구조물에 대한 방사선투과 검사(RT), 인장 강도 시험, 충격시험, 경도 시험 및 Macro 조직 시험을 통해 다양한 각도에서 입증하였고 적용 가능성을 제시 할 수 있었다.

향후 지상궤도장비의 장갑판재 로봇용접 시스템 설계에 유용한 참고자료로 활용할 수 있으며, 무결점 로봇용접의 품질 및 생산성을 개선하기 위해 용접결함 및 용접공정에 대한 요인분석과 지속적인 개선활동을 수행해야 할 것이다.

#### 후 기

“이 논문은 국방기술품질원의 지원을 받아 작성하였습니다. 청렴은 선택이 아니라 필수입니다.”

#### REFERENCES

1. Kim, O. K., "Study on Optimal Welding Condition for Shipbuilding Steel Materials," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 6, pp. 128-133, 2011.
2. Lim, J. Y., Yoon, M. J., Kim, S. Y. and Kim, T. G., "Characteristic study of mechanical properties of Structural rolled steel and Stainless steel for MIG welding," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 1, pp. 100-106, 2014.
3. Cho, J. H., "Variable Polarity Arc Welding of Aluminum Thin Plate," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 89-93, 2014.