

## 장갑판재용 고경도 강판의 용접 기술동향

정영철<sup>1)</sup> · 김찬규<sup>1)</sup> · 이승준<sup>2)</sup> · 정용문<sup>2)</sup> · 박철수<sup>2)</sup> · 이병석<sup>2)</sup> · 박태원<sup>3)</sup> · 김홍규<sup>3)</sup> · 조영태<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 창원대학교 메카트로닉스대학 기계공학부

<sup>2)</sup> 한화디펜스(주) 창원1사업장 체계/생산기술팀

<sup>3)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

## Welding Technical Trend of High Hardness Armour Steel for Combat Vehicle

Youngcheol Jeong<sup>1)</sup> · Chankyu Kim<sup>1)</sup> · Seungjun Lee<sup>2)</sup> · Yongmun Jung<sup>2)</sup> · Choulsoo Park<sup>2)</sup> ·  
Byungsuk Lee<sup>2)</sup> · Taewon Park<sup>3)</sup> · Hongkyu Kim<sup>3)</sup> · Young Tae Cho<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Mechanical Engineering, College of Mechatronics, Changwon National University, Korea

<sup>2)</sup> System/Manufacturing Engineering Team, Changwon Plant1, Hanwha Defense, Korea

<sup>3)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 28 February 2019 / Revised 9 April 2019 / Accepted 26 April 2019)

### ABSTRACT

Increase of combat capability through the lightweighting of vehicles has been internationally issued. One of the methods for lightening is applying high hardness armor(HHA) steel which is outstanding ballistic performance and protection performance compared to weight. Development of HHA steel is currently completed in America, United Kingdom, Australia and Germany. It is used for not only combat vehicle, but also various combat device. Korea is developing new material of HHA steel according to this trend. When such HHA steel is applied to structure, welding process is used for connection of the structure. Cracks from hydrogen embrittlement and cold cracking are easily generated in welds of HHA steel and it greatly affects the strength of all structure. Decrease of strength from welding defect is critical to combat capability. Therefore, welding process optimization is important for performing the role of structure. In this study, international welding technology is reviewed through scientific research paper and patent.

Key Words : High Hardness Armor Steel(고경도 장갑판재), Welding Process(용접공정), Patent Trend(특허동향),  
Welding Technology Trend(용접기술동향)

### 1. 서론

경량화를 통한 운송체의 연비 효율 및 성능향상은

\* Corresponding author, E-mail: ytcho@changwon.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

최근 중요한 문제로 인식되고 있으며 지구온난화 및 환경 규제에 따라 운송체의 경량화는 더욱 중요한 필수 개발 요소가 되었다. 따라서 다양한 산업군의 제조사에서는 경량화의 수단으로 가볍고 강한 소재를 적용하는 것을 바탕으로 마케팅을 하고 있다. 방위산업에서도 소재 경량화 적용에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있으며 전투차량의 경우 장갑판재 경량화를 위한 연구 개발이 진행되고 있다.

장갑판재의 3가지 주요 역할로는 적의 공격을 무산시키고 전투차량을 온전하게 유지하며 전투차량 내의 전투원을 안전하게 하는 것이다. 즉 방탄성능에 대한 성능이 중요한 지표가 될 수 있다. 따라서 전투차량의 방탄성능 향상을 위하여 기존에는 두께가 매우 두꺼운 단일 장갑재를 적용되어왔다. 그로 인해 방탄성능은 우수하나 전투차량의 중량증가로 인해 연료의 효율, 전투 지역의 이동범위, 병력 이송의 제한 등으로 전투 차량의 첫 번째 역할인 전투능력이 저하되게 된다. 따라서, 최근에는 방탄성능은 유지하고 판재의 두께는 감소시켜 경량화를 하는 연구 개발이 진행되고 있다. Fig. 1은 국가별 전투차량의 최고속도와 중량을 나타낸다.



Fig. 1. Combat vehicle trend according to nation

경량화 요구에 발맞추어 알루미늄이나 티타늄, 철강 등 다양한 금속 장갑소재들이 개발되고 있으며 비철 장갑소재로는 티타늄 합금 및 세라믹 등의 소재가 적용되고 있다. 티타늄 합금 및 세라믹 소재의 경우 제

조 가격이 높고 용접 및 가공이 어려워 특정 위치에 적용되고 있다. 그와 반대로 철강 장갑판재는 상대적으로 가격이 저렴하고 강도 및 용접성이 우수하여 장갑판재로써 많이 이용되고 있다. 주로 고경도 장갑(HHA: High Hardness Armor) 판재 및 균질 압연 장갑(RHA: Rolled Homogeneous Armor) 판재가 사용되고 있다. HHA 판재는 급냉 후 열처리를 통해 경도가 매우 높아 방탄성능이 매우 우수한 판재이며 균질 압연 장갑판재의 경우 공랭과 압연공정을 통해 경도는 상대적으로 낮으나 취성 파괴 저항성이 높다. 최근에는 고경도 장갑판재의 사용과 초고경도 장갑(UHHA: Ultra High Hardness Armour)판재 개발이 주를 이루고 있다<sup>[1-3]</sup>.

전투차량은 장갑판재의 구조체이며 장갑판재의 이음부를 용접공정을 이용하여 제작되고 있다. 과거에는 대부분이 수용접을 통하여 제작되었으나 자동화 기술 및 로봇산업에 의하여 반자동 및 자동 시스템의 적용이 빠르게 이루어지고 있다. 또한 높은 경도의 장갑판재 소재의 개발로 인하여 용접부 수소취화, 잔류응력으로 인한 열영향부 균열, 열연화로 인한 경도 저하 등의 결함들이 발생하여 용접공정의 개선 및 개발이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 최근 이슈가 되고 있는 HHA 판재의 용접공정기술에 대한 국내외 기술동향 및 특허 동향을 소개하고자 한다.

## 2. 고경도 장갑판재 개발현황

### 2.1 고경도 장갑판재 용접 규격

장갑판재 제작 규격은 두 가지 주요 그룹에 따라 나뉘며 대부분의 국가는 미국 장갑판재 제작 규격을 따른다. 첫 번째는 장갑 판재가 매우 높은 경도 수준을 갖는 MIL-A-46100D 사양이며 2008년부터 MIL-DTL-46100E로 개정되어 적용되고 있다. 두 번째 제작 규격은 HHA보다 낮은 경도 수준을 가지고 있지만 취성 균열에 의한 재료 파손을 피하고 인성 및 연성의 향상을 통하여 개선된 용접성을 제공하는 MIL-A-12560의 균질 압연 장갑판재이다. 2009년부터는 MIL-DTL-12560J의 명칭으로 개정되어 적용되고 있다. MIL-DTL-12560J 사양은 미국 육군 연구소에서 개발한 개선된 균질압연장갑(IRHA: Improved Rolled Homogeneous Armor)를 도입하여 2002년에 수정되었다. 개선된 균질 압연장갑 판재는 경도에 따라 두 가지 단계로 나누어

지며 기존의 장갑판재보다 높은 경도를 가지고 있다. 개선된 균질열연장갑 판재가 개발되기 전에는 미국에서는 1.5인치 이하의 Mn-Mo-B 합금과 Ni-Cr-Mo 합금이 적용되었다<sup>[4]</sup>.

Table 1. Specification of high hardness steel according to major nation<sup>[5-8]</sup>

Hardness equivalences(HB)		
DEF 8030 (AUST)	U.S military specification (U.S)	DEF STAN 95-24 (U.K)
Class 2A : 260-310 Class 2B : 280-330	MIL-DTL-12560J Class 2 < 31.8 mm (277-321)	Class 1 (262-311)
Class 3 : 340-390	MIL-DTL-12560J Class 1 < 12.7 mm (341-388)	Class 2 < 9 mm (341 min)
	12.7 < t < 19.1 mm (331-375)	9 < t < 15 mm (311 min)
	19.1 < t < 31.8 mm (321-375)	15 < t < 35 mm (285 min)
	31.8 < t < 50.5 mm (293-331)	35 < t < 50 mm (262 min)
Class 4 : 370-430	MIL-DTL-12560J Class 4B (381 max)	No equivalent
Class 5 : 420-480	MIL-DTL-12560J Class 4A (442 min)	Class 3A 5 < t < 50 mm (420-480)
Class 6 : 470-535	MIL-DTL-46100E	Class 3 < 15 mm (470-540) 15 < t < 35 mm (470-535)
Class 7 : 530-605	No equivalent	Class 4 < 15 mm (530-605) 15 < t < 50 mm (495-605)
Class 8 : 560-655	No equivalent	Class 5 (560-655)

HHA 판재의 국제적인 통합 규격은 현재 없으며 주요 장갑판재 생산 국가별로 장갑판재 규격을 정하여 제작하고 있다. 주요 장갑 판재 생산국가인 미국, 영국, 오스트리아 정도에 따른 장갑 판재 규격 및 등급을 Table 1에 나타내었다.

장갑판재 제작 규격은 장갑 판재 구조물의 기계적 완전성과 화학적인 완전성을 동시에 요구하고 있다. 브리넬 경도 값으로 241~388HB의 제한을 가지는 MIL-DTL-12560J과 브리넬 경도값 477~534HB의 제한을 가지는 고경도 장갑판재에 대한 MIL-DTL-46100E의 규격이 있으며 오스트레일리아와 영국 또한 미국의 정도 제한 규격과 유사한 규격을 보유하고 있다.

HHA 판재는 전투차량의 구조물에도 적용되고 있으며 용접 공정을 이용하여 이음부가 형성된다. HHA 판재(브리넬 경도 477~534HB)이음부의 경우 미국 육군 탱크사령부 품질관리 규격인 TACOM 12479550 규격에 의해 제한된다. TACOM 12479550 규격에서는 용접 공정에 따라 검사 방법 및 규격에 대하여 규정하고 있다.

### 2.2 고경도 장갑판재 용접성

Fig. 2와 같이 고경도 장갑판재의 용접부는 용접부, 모재, 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone)로 나눌 수 있으며 열영향부는 다시 RH-HAZ(Rehardened Heat Affect Zone), T-HAZ(Tempered Heat Affect Zone)의 하위 영역으로 나누어 질 수 있다. 이 영역은 정도에 따라 재경화되어 정도가 높아지는 범위인 RH-HZ 그리고 열연화에 의하여 떨어지는 범위인 T-HAZ로 명칭되어 진다. Fig. 3에 HHA 판재 용접부의 정도 프로파일을 나타내었으며 HHA 판재의 용접부 및 열영향부의 크기는 각 규격에서 제한을 두고 있다. 고경도 및 고강도강은 열영향부에서 기계적 강도가 저하되는 열연화 현상과 수소취화균열등이 쉽게 발생된다. 이와 같은 현상을 발생하게 하는 인자는 고경도 및 고강도강의 특수한 금속조직의 영향, 용접 열원에 의한 잔류 응력의 정도, 용융된 금속으로 확산되어지는 수소가 있다<sup>[9-10]</sup>.

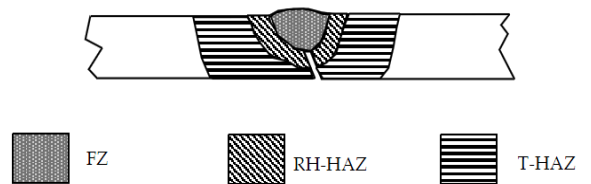


Fig. 2. Area of weld in HHA steel<sup>[10]</sup>

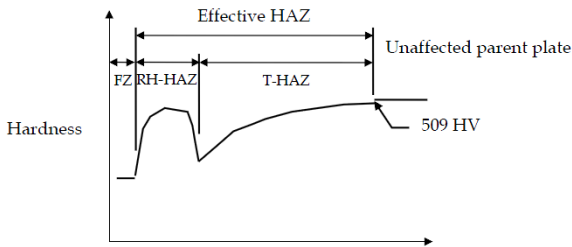


Fig. 3. Hardness distribution of HHA steel<sup>[10]</sup>

2.3 고경도 판재 적용 및 제작사

HHA 판재의 경우 전투차량 이외에 수송 차량에도 적용이 시도되고 있으며 이외에 방탄성능이 적용된 민간차량과 방탄조끼의 복합소재의 재료로도 적용되고 있다.

HHA 판재 생산 및 개발은 방위산업의 대표 국가인 스웨덴, 호주, 미국, 독일에서 HHA 판재를 생산 및 공급하고 있다. 대부분이 미국 국방부 규격인 MIL 규격에 맞추어 제작하고 있으며 현재는 경도 500HBW 급의 HHA 판재를 주력으로 생산 및 공급하고 있으며 일부에서는 600HBW 급의 UHHA 판재의 생산까지 하고 있다. 국내의 HHA 판재의 개발 현황은 500HBW 급의 장갑판재 개발을 진행 중에 있다. Table 2에 대표적인 HHA 판재 생산 국가, 회사 및 생산 판재의 종류에 대하여 나타내었다.

Table 2. Major industry for HHA steel

Nation	Manufacturer	Model	Hardness
Swenden	SSAB	ArmoX 500T	480-540HBW
		ArmoX 600T	570-640HBW
		Ramor 500	490-560HBW
		Ramor 550	540-600HBW
Australia	Bisalloy	HHA 500	477-534HBW
		UHH 600	570-640HBW
America	EVRAZ	Armalloy500HH	477-534BHN
		Armalloy500HH+	530-570BHN
		Armalloy500UHH	590-670BHN
	Leeco steel	MIL-A 46100	477-534BHN
	Alro steel	Armor 46100	477-534BHN
German	Thyssenkrupp	Secure 500	480-530HBW
		Secure 600	570-640HBW

3. 고경도 장갑판재 용접연구 동향

3.1 연구 동향

Fig. 4와 같이 장갑판재용 고경도강 용접에 관련한 연도별 국외 논문 현황을 검토해본 결과 미국, 인도, 터키, 콜롬비아, 오스트레일리아, 일본, 슬로베니아 순으로 연구 결과가 많았다. 1988년도는 용접부 형성에 영향변수 파악이 시작되었으며 Gedeon 외 2명이 미국 M1 탱크에 적용되는 용접부 형성 비용 절감을 위하여 용접 변수 파악을 수행하였다. 용착율, 용접부 수 소량, 비드 형상, 스패터량 등의 다양한 변수를 고려하여 보호가스 비용을 최소화하는 조건을 찾았다<sup>[11]</sup>. 2009년부터 용접부의 강도를 바탕으로 공정변수 최적화가 수행되었으며 Unfried 외 2명은 MIL-A-46100 장갑판재의 경도 및 미세조직을 예측하는 연구를 수행하였다<sup>[12]</sup>. Robledo 외 2명은 충격, 인장, 방사선투과시험, 경도시험 결과를 바탕으로 용접재료와 보호가스 조건을 최적화하였다<sup>[13]</sup>. 2013년도부터는 용접공정으로 발생하는 결함에 대한 원인 규명 및 분석에 대하여 심도 있는 연구가 진행되었으며 새로운 용접 방법들의 적용이 이루어지기 시작하였다. Kuzmi의 박사학위 논문에서는 고경도 장갑판재의 동향 파악 및 레이저 & 아크 하이브리드 용접을 적용하여 장갑판재 용접부에서 발생하는 결함을 최소화 하는 조건을 도출하였다<sup>[14]</sup>. 국내에서는 최근에 장갑판재의 용접방법에 따른 변수 결정 및 열처리 등의 연구가 시작되고 있다. 조환희 외 2명은 고경도 장갑판재에 적용되고있는 불활성 가스 금속 아크 용접(GMAW: Gas Metal Arc Welding) 대신에 스티드 용접 방법을 적용하여 그 강도를 평가하였으며 임현석 외 4명은 500HBW급 외산

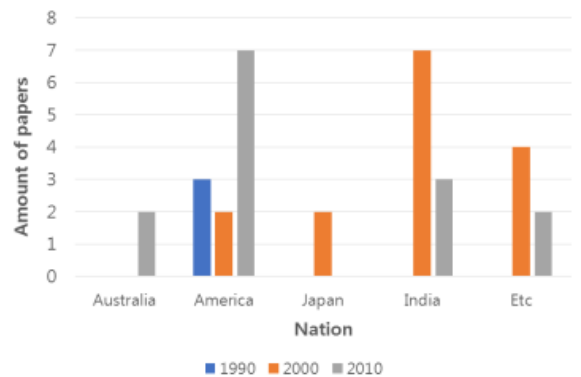


Fig. 4. Amount of related paper according to nation

고경도 장갑 판재의 템퍼링 온도에 대한 기계적인 특성과 야금학적 고찰을 수행하였다<sup>[15-16]</sup>.

### 3.2 아크 용접

아크 용접은 초기 설비비용이 타 용접 방법에 비해 저렴하고 높은 생산성을 기대할 수 있어 산업 현장에서 가장 많이 적용되고 있는 용접 방법이다. 장갑판재에 용접 공정 또한 아크 용접방법이 가장 많이 적용되고 있으며 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

1996년 Alkemade는 GMAW방법으로 예열온도와 입열량 조건을 변경하여 3가지 용접재료의 균열 발생 여부 및 경도를 확인하였다.

용접재료는 페라이트계 및 오스테나이트계 스테인리스 재료와 듀플렉스 오스테나이트계/ 페라이트계 스테인리스 재료를 사용하였으며 모재의 인장강도보다 낮은 용접재료를 적용하였다. 시험 시편은 509-568HV 급의 고경도 장갑판재를 이용하여 Y 그루브 시편을 제작하였다. 예열 온도 0~150 °C, 입열량 0.5~1.4 kJ/mm로 변경하며 균열생성 유무를 확인 하였을 때 입열량 범위 1.0~1.4 kJ/mm, 예열 온도 범위 50~75 °C에서 균열이 발생하지 않았다. 균열형태는 용접부 중심부에서 발생하는 균열과 용접부 루트에서 균열이 시작하여 용접부 경계를 따라 용접부 토우로 진전되는 균열 형태를 확인 하였다. 그리고 실험결과를 바탕으로 며 3종의 용접재료 시편에서 열연화로 인하여 경도가 현저히 떨어지는 부분을 확인하였다.

오스테나이트계 스테인리스 재료를 사용한 용접부에서 가장 낮은 경도를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 용접부 중심부와 용접부 경계라인을 따라 발생한 균열의 사진을 나타내고 있다<sup>[10]</sup>.

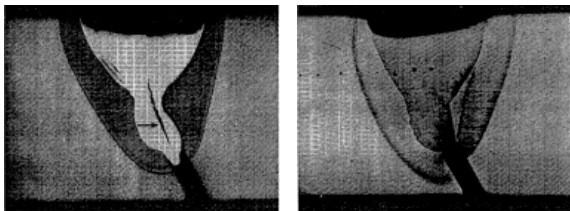


Fig. 5. Type of crack in y groove specimens<sup>[10]</sup>

2008년 Magudeeswaran의 2명은 3편의 논문을 통하여 차폐금속아크용접(SMAW: Shield Metal Arc Welding)과 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW: Flux Cored Arc Welding)방법과 함께 오스테나이트계 스테인리스 용접

재료와 저수소 페라이트계 용접재료를 사용하여 고경도 장갑판재에서 발생하는 수소 확산정도, 인장강도, 인성 및 피로강도를 확인하였다.

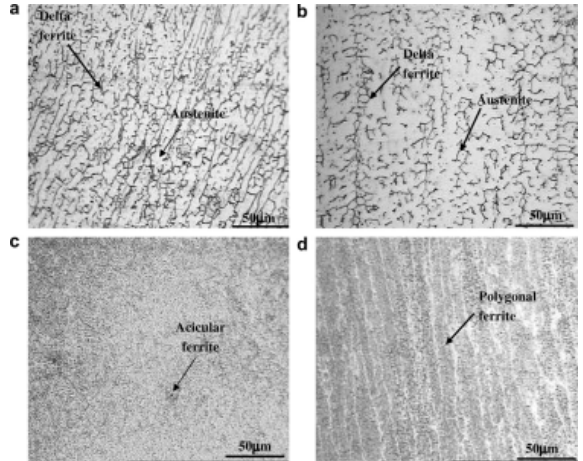


Fig. 6. Optical micrographs of weld metal region:

- (a) SMAW with austenitic stainless material
- (b) FCAW with austenitic stainless material
- (c) SMAW with low hydrogen ferritic material
- (d) FCAW with low hydrogen ferritic material<sup>[19]</sup>

스테인리스용 용접재료를 적용하고 있는 고경도 장갑판재의 용접부에 대하여 용접성 점검을 수행하였으며 수소확산 실험 결과 오스테나이트계 스테인리스 용접재료가 저 수소 페라이트계 용접재료 보다 용접부 수소 포함 정도가 적었다. 그리고 FCAW 방법이 SMAW 방법보다 높은 수소 확산 저항력을 나타내었다. 인장강도 및 충격 실험 결과 저 수소 페라이트계 용접재료를 사용한 용접부의 인장강도가 우수한 인장특성을 가지고 있었다. 그 이유는 페라이트 형태의 존재와 coarse grain HAZ(CGHAZ)의 연화정도가 낮기 때문이다. 충격특성의 경우 높은 니켈 함유량과 많은 오스테나이트 상을 가지고 있는 오스테나이트계 스테인리스 용접재료를 사용한 용접부가 높은 특성을 나타내었다. 또한 FCAW보다 SMAW가 높은 인장강도와 충격특성을 나타내었다. 피로특성의 경우 저수소 페라이트계 용접재료 더 높은 내피로성을 나타내었으며 SMAW가 FCAW에 비해서 상대적으로 높은 피로 수명을 보였다. Fig. 6은 각 시편 조건에 따른 금속조직을 나타내는 사진이며 Fig. 6a, b에 SMAW와 FCAW의 공정에 오스테나이트계 용접재료를 사용한 용접부 단면

금속 조직은 오스테나이트 기조직 위에 델타페라이트 금속 조직이 생성됨을 확인 되었다. 그리고 FCAW 공정 적용한 금속 조직이 SMAW 적용 시편보다 조대화 되어진 델타 페라이트 생성을 확인 할 수 있다. Fig. 6c, d의 동일 용접 공정에서 저수소 페라이트계 용접재료를 사용하였을 때는 침상 페라이트와 입상 페라이트의 금속 조직 생성을 확인 할 수 있었으며 SMAW를 적용하였을 때 더욱 미세한 침상페라이트가 생성되는 것을 확인하였다.

전체적으로 SMAW 적용한 시편이 FCAW의 시편보다 금속 조직 사이즈가 미세하였으며 이로 인해 기계적 높은 기계적 성질을 나타내었다<sup>[17-19]</sup>.

### 3.3 레이저 용접

레이저 용접은 좁은 HAZ부위와 깊은 용입을 구현할 수 있어 높은 품질의 용접부를 형성할 수 있으며 고강도의 경량화 소재 용접에 많은 적용이 이루어지고 있다. 장갑관재의 레이저 용접에는 아크 용접 공정 비하여 많은 연구가 이루어지고 있지는 않은 실정이다.

1998년 Basset은 레이저용접 이용하여 두 종의고경도 장갑관재의 맞대기 용접가능성 여부를 확인하였으며 10 kW CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 용접조건 및 용접재료에 따른 용접성을 평가하였다. 페라이트계 솔리드 와이어 1종, 페라이트계 플럭스 코어드 2종과 오스테나이트계 플럭스 코어드 2종, 오스테 나이트계 메탈 코어드 2종의 용접재료를 선정하였으며 레이저 파워, 용접 속도, 용접재료 직경, 용접재료 공급 속도에 따라 충격특성과 방탄 특성을 확인하였다.

Fig. 7은 용접재료에 따라 생성된 용접비드를 나타내며 육안검사 결과 플럭스코어드 와이어를 사용한 용접부의 비드에 표면과 내부 크랙 결함이 발생하였다. 그로 인해 충격특성의 결과에서도 플럭스코어드 용접재료를 사용한 용접부의 충격특성이 가장 낮은 값을 나타내었으며 제살 용접부와 솔리드와이어를 사용했을 때 가장 우수한 충격특성을 나타내었다. 방탄 시험은 0.3 인치 APM2 탄환과 방호탄도한계속도 목표 값 V50을 목표로 시험을 수행하였으며 용접부, 열영향부, 모재 영역의 방탄 특성을 확인하였다. 전체 시편에서 관통은 되지 않고 탄흔만 발생하였다. 그리고 제살 용접부와 솔리드와이어를 사용한 용접부에서 가장 높은 V50값을 확인하였다. 추가적으로 아크 용접부와 레이저 용접부와 비교를 진행하였으며 일반적으로 아크 용접은 레이저 용접에 비하여 넓은 HAZ부

를 생성하여 결함 가능성을 높게 된다.

이 연구에서는 아크 용접과 오스테나이트계 플럭스를 사용하여 비교 시험편을 제작하였으며 넓은 HAZ 부를 가진 아크 용접부의 방탄시험 결과 레이저 용접 시편의 제살 용접부와 솔리드와이어 적용 시편에서 유사한 방탄성능을 확인하였다.

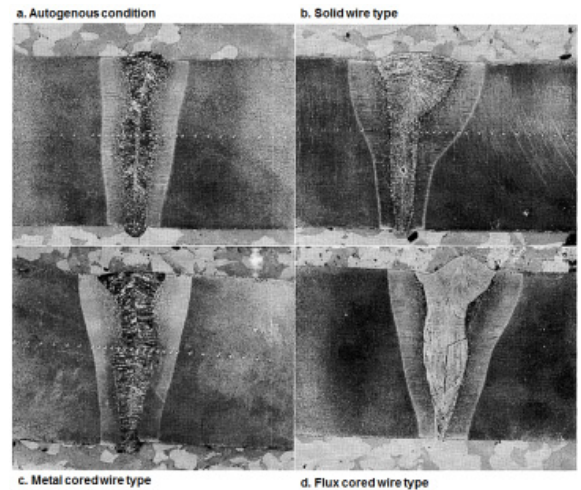


Fig. 7. Form of weld according to welding consumable<sup>[20]</sup>

### 3.4 마찰교반 용접

마찰교반용접은 고속으로 회전하는 비소모성 공구를 피접합체에 삽입하여 공구와 피접합체와의 마찰에 의해 발생한 열을 이용하여 접합하는 방법으로 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해 개발되었다. 마찰교반용접은 공정 중에 용융 및 응고 과정을 수반하지 않는 고상 용접공정이어서 용접부의 기계적 특성이 우수할 뿐 아니라 기존의 용융용접 방법으로는 건전한 용접부를 얻기 어려웠던 난 용접성 금속소재에 대하여 우수한 용접성능을 나타내고 있다<sup>[21]</sup>.

2016년 El-batahgy의 3명은 마찰교반용접의 541HV 급 장갑관재 적용가능성을 검토하였으며 마찰교반용접 변수인 공구 회전속도 용접속도, 가압력에 따른 기계적 특성과 금속조직 분석을 수행하였다. Fig. 8은 실험 개략도와 공구의 치수를 나타내고 있다. 그 결과 A<sub>1</sub> 변태점 온도(723 °C) 이상에서 600 mm/min의 용접속도와 600 rpm의 공구 회전 속도로 텅스텐카바이드 공구를 사용하였을 때 높은 건전성과 완전 용입되는 결과를 확인하였다. 교반영역에서 가장 높은 평균 경

도(575HV)를 확인하였으며 HAZ영역에서 가장 낮은 평균 경도(325HV)가 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. HAZ부위는 과열된 조대 마르텐사이트 구조가 형성되었고 교반영역은 소성 변형과 높은 냉각 율로 인하여 미세한 마르텐사이트 구조를 나타내었다. 인장강도의 경우 모재 경도(541HV) 대비 용접부 경도(575HV)가 높음에도 불구하고 인장시험 결과 모재의 약 75%의 결과를 나타내었으며 HAZ 영역이 그 영향을 미쳤을 것으로 판단하고 있다. 충격 특성의 경우 모재의 충격 특성과 유사한 결과를 확인하였다<sup>[22]</sup>.

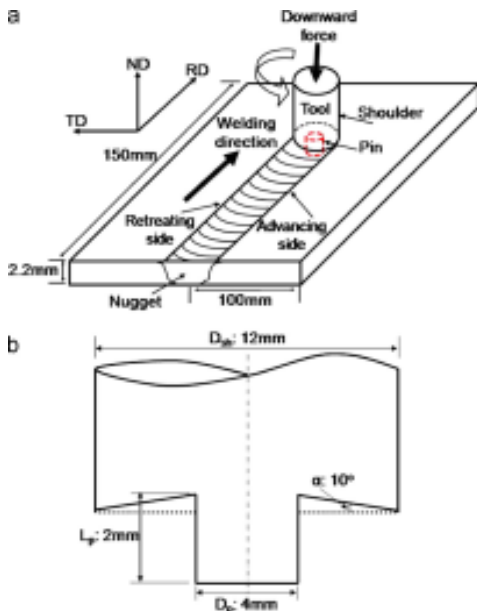


Fig. 8. Schematic illustration of (a) FSW process and (b) FSW tool<sup>[22]</sup>

### 3.5 레이저 & 아크 하이브리드 용접

레이저 & 아크 하이브리드 용접은 레이저 열원과 아크 열원을 동시에 적용하여 용접부를 형성하는 용접방법이며 레이저 용접의 장점과 아크 용접의 장점을 모두 확보할 수 있다. 높은 에너지밀도를 가지는 레이저 열원이 선행하면서 키홀을 생성하게 되고 후행하는 Arc 열원이 와이어를 녹이면서 홀을 채우게 된다. 따라서 레이저 용접에서 가지지 못하는 용착량과 아크 용접공정에 가지지 못한 깊은 용입을 동시에 확보하게 된다. 이러한 레이저 & 아크 하이브리드 용접의 특징은 고경도 장갑판재의 용접부에서 발생하는 결함을 최소화 할 수 있다. 강도저하 결함이 발생하는

열영향부가 최소화 되고 필렛 용접부위에서 발생하는 후면부 가우징 용접 공정을 레이저 깊은 용입 구현으로 생각할 수 있다. Fig. 9는 레이저 & 아크 하이브리드 용접의 용접부와 공정 개략도를 나타내었다<sup>[23-28]</sup>.

Atabaki의 2명은 레이저 & 아크 하이브리드 용접을 이용하여 용접속도, GMAW 토치와 레이저 사이의 거리 최적화 연구를 수행 하였다. 맞대기 이음과 필렛 이음 두 가지 이음에서 최적화를 수행하였으며 맞대기 이음에서는 용접속도 35 mm/s, GMAW 토치와 레이저 사이 거리 3 mm에서 높은 용접부 건전성을 확인하였다. 또한 아크전압을 감소할수록 언더컷 발생이 감소하였다. 필렛 이음에서는 높은 속도의 용접속도에서 기공이 다량 발생하였으며 용접속도를 10 mm/s로 낮추었을 때 기공이 감소되는 것을 확인하였다. 필렛 이음에서도 맞대기 이음과 동일하게 GMAW 토치와 레이저 사이 거리 3 mm에서 최적의 건전성을 확인하였다<sup>[29]</sup>.

Sowards의 4명은 레이저 & 아크 하이브리드 용접에서 열연화 HAZ 부위의 파단 메커니즘을 변형의 축적 관점에서 설명하였으며 중성자 Bragg-edge 이미지 확인 방법을 통하여 열연화 HAZ부위의 변형이 축적되는 것을 확인 하였다<sup>[30]</sup>.

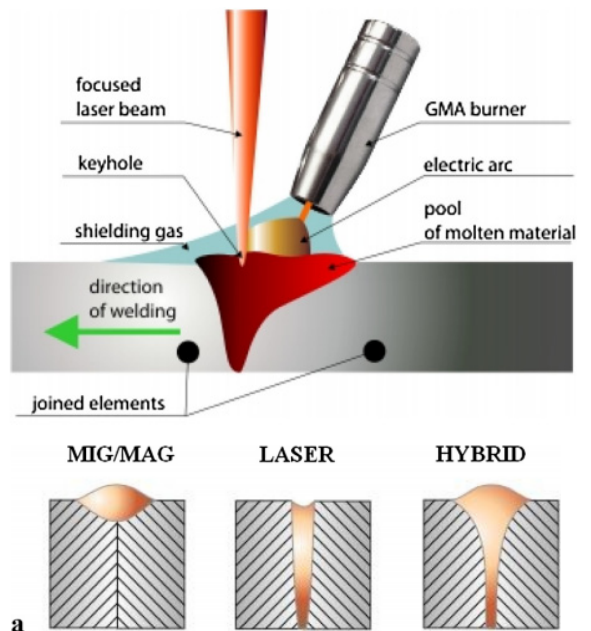


Fig. 9. Process and welding bead of laser & arc hybrid system<sup>[31]</sup>

### 3.6 적용 가능 용접기술

고경도 장갑판재의 용접시 발생하는 열영향부의 결합 현상은 고경도 장갑판재 뿐만 아니라 차량의 경량화 소재로 적용되고 있는 고강도강의 용접부에서도 확인 되는 결합이다. 이러한 결합을 최소화하는 방법은 충분한 예열을 진행하거나 열영향부의 크기를 최소화하기 위하여 저입열 또는 하이브리드 용접 공정을 적용하는 방법이 있다. 따라서 고경도 장갑판재의 용접결합을 최소화할 수 있는 용접 공정을 소개하고자 한다<sup>[32,33]</sup>.

첫 번째로 CMT(Cold Metal Transfer)는 저입열의 아크용접 공정을 구현할 수 있는 공정으로 열영향부 결합을 최소화하는데 해결책이 될 수 있다. CMT 공정은 기존 아크 용접 공정에서 입열량 제어를 위해 펄스 전류를 적용했던 것을 용접 와이어의 기계적 제어를 통하여 전기적인 입열량을 최소화한 용접 방법이다. 기계적 제어의 방법은 용융된 용접 와이어가 단락이 감지되었을 때 용접 와이어의 후퇴를 이용하여 입열량 및 스패터 발생을 최소화 한다. 단락 상태에서 전기적인 입열량 제어는 완벽하게 수행되기 어렵지만 기계적인 방법은 완벽하게 전기적인 입력을 제한하고 입열량을 제어하여 접합부의 기계적인특성 향상뿐만 아니라 열영향부위의 최소화를 할 수 있다. 또한 아크가 재발생 되면서 발생하는 스패터 또한 기계적인 제어로 완벽히 최소화 될 수 있다. Fig. 10은 CMT 용접의 기계적 제어 사진을 나타내고 있다<sup>[34-38]</sup>.

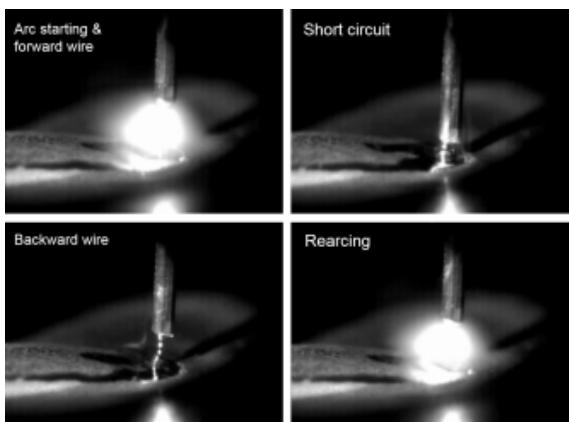


Fig. 10. Picture of mechanical wire control in CMT

두 번째는 인덕션 & 아크 하이브리드 용접 방법이다. 유도가열과 아크 용접공정을 동시에 적용하는 방

법으로써 유도가열을 이용하여 예열 효과를 동시에 진행할 수 있다. 유도가열(Induction Heating, IH)은 단순한 장비구조로 인해 초기 투자비용이 적고 휴대성이 높아 설치 및 용접장소의 제한이 없다. 또한 적절한 제어를 통해 용접부 표면으로 가열부위를 제한할 수 있어 열영향부를 최소화할 수 있으며 용접 자세에 영향을 받지 않기 때문에 로봇을 이용한 용접 자동화에 쉽게 적용될 수 있다. 유도가열을 이용하여 예열공정을 동시에 적용할 수 있으며 예열이 필수적인 고경도 장갑판재의 공정비용을 절감할 수 있다. 또한 예열을 통하여 잔류응력 최소화 및 수소방출을 기대할 수 있다. Fig. 11은 인덕션 & 아크 하이브리드 용접의 시스템을 나타낸 그림이다<sup>[39-41]</sup>.

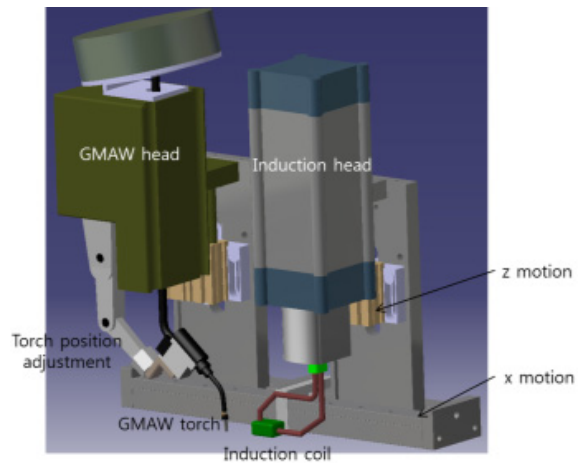


Fig. 11. Picture of induction & arc hybrid system

## 4. 고경도 장갑판재 특허동향

Fig. 12와 같이 국내외 특허 분석결과 전체적으로는 고강도강의 제조 및 용접방법에 대한 특허가 고경도강 및 장갑판재의 특허보다는 많이 출원 및 등록된 상태이다. 국내와 국외 특허 분석을 위한 검색식은 다음과 같다.

국내: (고경도강 + 고강도강 + HHA) \* (용접 + 접합 + Weld + MIG + MAG + TIG + GMAW + GTAW + SAW + FCAW)

국외: (High hardness armour steel + High hardness steel + High strength steel) \* (Weld + MIG + MAG +



TIG + GMAW + GTAW + SAW + FCAW)

국내특허의 경우 자동차용 고강도 강판의 제조 및 용접 방법의 특허가 대다수 이었으며 장갑판재의 제조 및 용접방법에 대한 특허는 미비하였다. 해외의 경우 50년대부터 고강도 및 고경도강의 제조방법에 대한 관련특허가 출원 되었으며 최근에는 방위산업분야의 제품에 적용하는 방법 및 용접 방법에 대한 출원이 활발히 진행되고 있었다.

Table 3과 같이 국외의 장갑판재 용접관련 주요 특허 분석을 수행하였으며 미국의 경우 용접 이음의 형태에 따른 용접방법에 대한 특허가 많았으며 유럽의 경우 고경도 장갑판재를 사용한 복합 소재에 대한 특허가 주를 이루었다. 그리고 최근 중국에서도 레이저와 GMAW를 이용하여 장갑판재의 이음방법 및 용접방법에 대한 특허가 공개되었다.

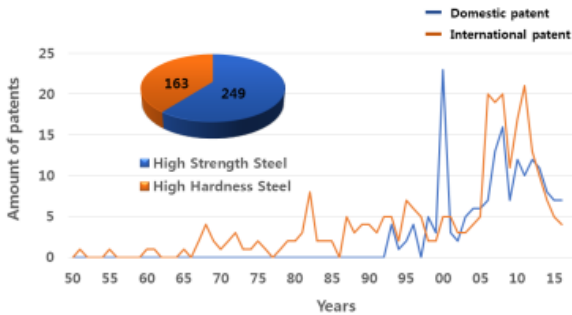
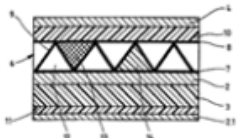
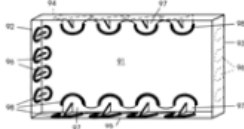
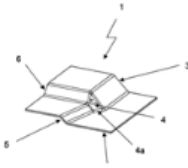


Fig. 12. Amount of patent according to nation

Table 3. Major patent related welding of HHA steel

Application information	Summary of patent content
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : EP</li> <li>Patent date : 1998.08.04</li> <li>Patent number : EP 19980114601</li> </ul>	 <p>To protect the vehicle from landmines, weld 13 ~ 19 mm high hardness steel like sandwich. In this case, the inner and outer steel plates are welded on the basis of the lattice-shaped steel material to serve as shock absorbing shocks from the explosion.</p>

Application information	Summary of patent content
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : USA</li> <li>Patent date : 1998.10.14</li> <li>Patent number : US 09/170972</li> </ul>	 <p>Describing a method for a lap joint, an angled joint, and a multi-layer joint to combine hardened steels used in ballistic protection of vehicles.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : DE</li> <li>Patent date : 2005.03.24</li> <li>Patent number : DE 200510014298</li> </ul>	<p>It is a patent for the manufacturing method of high hardness steel used for the protection of the vehicle. The plate is manufactured by hot forming and press hardening method. The plate is made of 4 ~ 15 mm thick and materials such as ARMORS 500T, 560T and 600T of SSAB or SECURE 400, 450, 500 and 600 of ThyssenKrupp steel are used.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : USA</li> <li>Patent date : 2006.03.23</li> <li>Patent number : US 11/387444</li> </ul>	 <p>It is a patent for welding method using ARMORX 500T, 560T of SSAB company known as Armor steel and SECURE 400, 450, 500, 600 of ThyssenKrupp steel.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : EP</li> <li>Patent date : 2013.08.05</li> <li>Patent number : EP 20130827556</li> </ul>	<p>Ceramic, hardened steel and FRCC are used for military vehicles requiring light weight and high ballistic protection. Patent for jointing and fastening method (welding and brazing, bolting)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Patent country : CN</li> <li>Patent date : 2016.07.08</li> <li>Patent number : CN 201610539596</li> </ul>	<p>It is a patent describing welding process according to joining method such as butt welding and lap joint welding when laser and GMAW are used to produce high hardness bulletproof plate.</p>

## 5. 결론

높은 방탄성과 기동력을 구현할 수 있는 고경도 장갑판재의 연구 현황 및 용접기술에 대한 분석을 수행하였다

논문 및 특허 현황을 검토해본 결과 국외 논문의 경우 미국, 인도, 터키, 콜롬비아, 오스트레일리아, 일본, 슬로베니아 순으로 연구 결과가 많았다. 국내 논문의 경우 2018년도 2건의 결과만 확인 할 수 있었다. 특허 분석 결과 미국의 경우 용접 이음의 형태에 따른 용접방법에 대한 특허가 많았으며 유럽의 경우 고경도 장갑판재를 사용한 복합 소재에 대한 특허가 주를 이루었다. 그리고 최근 중국에서도 레이저와 GMAW를 이용하여 장갑판재의 이음방법 및 용접방법에 대한 특허가 공개되었다.

현재까지의 연구내용을 분석하였을 때 용접부 경도가 높을수록 기계적 특성과 방탄성능이 우수하게 나타났다. 용접재료 및 공정에 따른 용접부 경도를 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Weld hardness according to process and materials

Process	Welding material	Weld hardness [HV]
SMAW	Low hydrogen ferritic steel	311
	Austenitic stainless steel	261
FCAW	Low hydrogen ferritic steel	294
	Austenitic stainless steel	245
Laser Welding	Autogenous	500-570
	Ferritic steel	440
Friction Stir Welding	Austenitic steel	410
	Autogenous	575
Laser & Arc hybrid welding	Ferritic steel	494-500

장갑판재의 방탄성능 향상을 위해 용접부 경도 연화를 방지할 수 있는 저입열 용접 공정에 관한 연구가 필요하며 이를 위해 다양한 열원을 검토하고 용접성능을 평가해야한다. 예를 들면 CMT(Cold Metal Transfer)

용접, 하이브리드 용접, 마찰교반용접에 대한고경도 장갑판재의 용접공정에 관한 추가적인 연구개발이 기대 된다.

## 후 기

“본 연구는 국방과학연구소의 지원사업으로 수행되었습니다.”

## References

- [1] H. S. Lim, J. M. Lee, Y. B. Song, H. K. Kim and B. C. Hwang, “Effect of Tempering Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of ARMOX 500T Armor Plate,” Korean J. Mater. Res., Vol. 27, No. 7, pp. 357-361, 2017.
- [2] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. M. Reddy and K. Sivakumar, “Effect of Buttering and Hardfacing on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armour Steel Joints,” Mater. Design, Vol. 32, No. 2, pp. 469-479, 2011.
- [3] G. M. Reddy, T. Mohandas and K. K. Paqukutty, “Effect of Welding Process on the Ballistic Performance of High Strength Low-Alloy Steel Weldments,” J. Mater. Process. Tech., Vol. 74, No. 1-3, pp. 27-35, 1998.
- [4] J. J. Prifti, R. Squillaciotti and R. Cellitti, “Improved Rolled Homogeneous Armor(IRHA) Steel Through Higher Hardness,” U.S. Army Research Laboratory, 1997.
- [5] U.S. Department of Defense, “MIL-A-12560H - Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous,” 1990.
- [6] U.S. Department of Defense, “MIL-A-46100D - Armor Plate, Steel, Wrought, High Hardness,” 1988.
- [7] Australian Department of Defence, “Australian Defence Standard, DEF(AUST) 8030, Rolled Armour Plate, Steel(3-35 mm),” 2005.
- [8] UK Ministry of Defence, “UK Defence Standard, DEF STAN 95-24, Armour Plate, Steel(3-160 mm),” 2004.
- [9] U.S. Army Tank-Automotive and Armaments

- Command, "Tacom Drawing 12479550, Ground Combat Vehicle Welding Code-Steel," 2006.
- [10] S. J. Alkemade, "The Weld Cracking Susceptibility of High Hardness Armour Steel," Defence Science and Technology Organisation, p. 24, 1996.
- [11] Steven A. Gedeon, James E. Catalano, "Reduction of MI Weld Fabrication Costs·the Effect of Weld Shielding Gas Composition," U.S. Army Laboratory Command, 1998.
- [12] J. Unfried S., C. M. Garzon and J. E. Giraldo, "Numerical and Experimental Analysis of Microstructure Evolution During Arc Welding in Armor Plate Steels," J. Mater. Process. Technol., pp. 1688-1700, 2009.
- [13] D. M. Robledo, J. A. S. Gomez and J. E. G. Barrada, "Development of a Welding Procedure for MIL A 46100 Armor Steel Joints Using Gas Metal Arc Welding," Dyna, pp. 65-71, 2011.
- [14] L. Kuzemikova, "An Investigation of the Weldability of High Hardness Armour Steels," Ph. D. Thesis, University of Wollongong, 2013.
- [15] H. H. Cho, Y. C. Shin and H. J. Yi, "STUD Welding on High Hardness Armor Steel of KWV," Journal of the KIMST, Vol. 19, No. 5, pp. 567-573, 2016.
- [16] H. S. Lim, J. M. Lee, Y. B. Song, H. K. Kim and B. C. Hwang, "Effect of Tempering Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of ARMOX 500T Armor Plate," Korean J. Mater. Res., Vol. 27, No. 7, pp. 357-361, 2017.
- [17] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian, and G. Madhusudhan Reddy, "Hydrogen Induced Cold Cracking Studies on Armour Grade High Strength, Quenched and Tempered Steel Weldments," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 7, pp. 1897-1908, 2008.
- [18] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian, G. M. Reddy, T. S. Balasubramanian, "Effect of Welding Processes and Consumables on Tensile and Impact Properties of High Strength Quenched and Tempered Steel Joints," J. Iron Steel Res. Int., Vol. 15, No. 6, pp. 87-94, 2008.
- [19] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian, G. M. Reddy, "Effect of Welding Processes and Consumables on High Cycle Fatigue Life of High Strength, Quenched and Tempered Steel Joints," Mater. Des., Vol. 29, pp. 1821-1827, 2008.
- [20] J. Bassett, "Laser Welding of High Hardness Armour Steel," Sci. Technol. Weld. Joi., Vol. 3, No. 5, pp. 244-248, 1998.
- [21] K. J. Lee, "Recent Research & Development Trend on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing," Journal of KWJS, Vol. 31, No. 2, pp. 26-29, 2013.
- [22] A. M. El-Batahgy, T. Miura, R. Ueji and H. Fujii, "Investigation into Feasibility of FSW Process for Welding 1600 MPa Quenched and Tempered Steel," Mater. Sci. Eng. A, Vol. 651, pp. 904-913, 2016.
- [23] S. Katayama, Y. Naito, S. Uchiumi and M. Mizutani, "Laser-Arc Hybrid Welding," SSP., Vol. 127, pp. 295-300, 2007.
- [24] M. Ono, Y. Shinbo, A. Yoshitake and M. Ohmura, "Development of Laser-Arc Hybrid Welding," NKK Tech. Rev., No. 86, pp. 8-12, 2002.
- [25] B. Ribic, T. A. Plamer and T. Debroy, "Problems and Issues in Laser-Arc Hybrid Welding," Int. Mater. Rev., Vol. 54, No. 4, pp. 223-244, 2013.
- [26] L. Liu, X. Hao and G. Song, "A New Laser-Arc Hybrid Welding Technique based on Energy Conservation," Materials Transactions, Vol. 47, No. 6, pp. 1611-1614, 2006.
- [27] G. Song, L. Liu and P. Wang, "Overlap Welding of Magnesium AZ31B Sheets Using Laser-Arc Hybrid Process," Mater. Sci. Eng. A., Vol. 429, No. 1-2, pp. 312-319, 2006.
- [28] M. Mazar Atabaki, N. Yazdian, R. Kovacevic, "Hybrid Laser/Arc Welding of Thick High-Strength Steel in Different Configurations," Adv. Manuf., Vol. 6, No. 2, pp. 176-188, 2018.
- [29] J. W. Sowards, D. S. Hussey, D. L. Jacobson, S. Ream, P. Williams, "Correlation of Neutron-based Strain Imaging and Mechanical Behavior of Armor Steel Welds Produced with the Hybrid Laser Arc Welding Process," J. Res. Natl. Inst. Stan., Vol. 123, No. 123011, pp. 1-8, 2018.
- [30] C. Bagger, F. O. Olsen, "Review of Laser Hybrid

- Welding,” J. Laser Appl., Vol. 17, No. 1, pp. 2-14, 2005.
- [31] B. Acherjee, “Hybrid Laser Arc Welding: State-of-Art Review,” Opt. Laser Technol., Vol. 99, No. 1, pp. 60-71, 2018.
- [32] WTIA, WTIA Technical Note No. 15 - Welding & Fabrication of Quenched and Tempered Steel 1996, WTIA.
- [33] N. Yurioka, H. Suzuki, “Hydrogen Assisted Cracking in C-Mn and Low Alloy Steel Weldments,” International Materials Reviews, Vol. 35, No. 4, pp. 217-249, 1990.
- [34] C. G. Pickin, S. W. Williams, M. Lunt, “Characterisation of the Cold Metal Transfer(CMT) Process and its Application for Low Dilution Cladding,” J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 3, pp. 496-502, 2011.
- [35] A. S. Azar, “A Heat Source Model for Cold Metal Transfer(CMT) Welding,” J. Therm. Anal. Calorim., Vol. 122, No. 2, pp. 741-746, 2015.
- [36] L. Jian, M. Ninshu, L. Yongping and M. Hidekazu, “Investigation of Interface Layer Failure and Shear Strength of CMT Brazed Lap Joints in Dissimilar Materials,” Transactions of JWRI, Vol. 40, No. 1, pp. 101-107, 2011.
- [37] A. Schieril, “The CMT Process a Revolution in Welding Technology,” Weld Word, Vol. 49, No. 9, p. 38, 2005.
- [38] T. Kursun, “Cold Metal Transfer(CMT) Welding Technology,” The Online Journal of Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 35-39, 2018.
- [39] X. Bai, H. Zhang and G. Wang, “Modeling of the Moving Induction Heating Used as Secondary Heat Source in Weld-based Additive Manufacturing,” Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol. 77, No. 1-4, pp. 717-727, 2015.
- [40] H. T. Zhang, X. Y. Dai, J. C. Feng and L. L. Hu, “Preliminary Investigation on Real-Time Induction Heating-Assisted Underwater Wet Welding,” Welding Journal, Vol. 94, pp. 8-15, 2015.
- [41] N. Arif, H. Chung, “Alternating Current-Gas Metal Arc Welding for Application to Thick Plates,” J. Mater. Process. Technol., Vol. 222, pp. 75-83, 2015.