

2018년 8월

석사학위 논문

고강도방탄소재 ARMOX600T
FCAW 용접부 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

국 방 호

고강도방탄소재 ARMOX600T
FCAW 용접부 특성에 관한 연구

A Study on Weldability Characteristics of
High Strength Bulletproof Material ARMOX600T
FCA Welding

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

국 방 호

고강도 방탄소재 ARMOX600T
FCAW 용접부 특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

국 방 호

국방호의 석사학위논문을 인준함

| | | | |
|-----|-------|------|----------------|
| 위원장 | 조선대학교 | 특임교수 | <u>방한서 (인)</u> |
| 위 원 | 조선대학교 | 교수 | <u>방희선 (인)</u> |
| 위 원 | 조선대학교 | 조교수 | <u>송국현 (인)</u> |

2018년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

| | |
|--|----|
| List of Figures | IV |
| List of Tables | V |
| Abstract | VI |
| | |
| 제 1장. 서론 | 1 |
| 1.1 연구배경 및 목적 | 1 |
| 1.2 소재의 특징과 용접특성 | 2 |
| 1.2.1 ARMOX600T 소재의 특징 | 2 |
| 1.2.2 소재의 용접특성 | 3 |
| 1.3 플럭스 코어 아크용접(Flux Core Arc welding) | 6 |
| 1.3.1 플럭스 코어 아크용접의 원리 및 특징 | 9 |
| 1.3.2 Flux Cored Wire | 8 |
| 1.3.3 FCA 용접장비 | 11 |

| | |
|------------------------------|----|
| 제 2장 . 연구 방법 | 12 |
| 2.1 실험 조건 | 12 |
| 2.1.1 이음부 형상 | 12 |
| 2.1.2 용접조건 | 13 |
| 2.2 용접부 특성 평가 | 15 |
| 2.2.1 비파괴 검사 | 15 |
| 2.2.2 경도시험 | 16 |
| 2.2.3 인장시험 | 17 |
| 2.2.4 굽힘시험 | 17 |
| 2.2.5 충격시험 | 18 |
| 제 3장 . 연구결과 | 19 |
| 3.1 용접부 단면 특성 | 19 |
| 3.2 용접부 기계적 특성 | 21 |
| 3.2.1 경도분포 | 21 |
| 3.2.2 인장시험 특성 비교 | 23 |
| 3.2.3 굽힘시험 특성 | 27 |
| 3.2.4 충격시험 특성 | 28 |
| 3.3 용접부 비파괴 검사 | 29 |
| 3.3.1 용접부 방사선 투과검사(RT) | 29 |
| 3.3.2 용접부 초음파탐상 검사(UT) | 32 |

3.3.3 용접부 자분탐상 검사(MT) 35

제 4장 . 결론 37

참고문헌 38

List of Figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Gas-shielded FCAW process | 7 |
| Fig. 1.2 Self-shielded FCAW process | 7 |
| Fig. 1.3 Types of flux-cored wire | 9 |
| Fig. 1.4 Configuration of FCA welding equipment | 11 |
| Fig. 2.1 Schematic diagram of joint specimen and corresponding cross-sectional bead profile | 12 |
| Fig. 2.2 Schematic representation of SAAB joint sample | 12 |
| Fig. 2.3 Location of Vickers micro-hardness test | 16 |
| Fig. 2.4 Vickers micro-hardness tester | 16 |
| Fig. 2.5 Schematic diagram of tensile test specification | 17 |
| Fig. 2.6 Schematic diagram of bend test specification | 17 |
| Fig. 2.7 Schematic picture of impact test specification | 18 |
| Fig. 3.1 Hardness distribution along the transverse section of weld bead | 22 |
| Fig. 3.2 Stress strain diagrams of tensile samples at different welding currents or welding speeds of T23 and T24 | 23 |
| Fig. 3.3 Stress strain diagrams of tensile samples at different welding currents or welding speeds of T23 and T24 | 24 |
| Fig. 3.4 Fracture tensile test specimens for welding conditions of T23 and T24 | 25 |
| Fig. 3.5 Fracture bend test samples at different welding conditions of T23 and T24 | 27 |
| Fig. 3.6 Fracture impact test samples at different welding conditions of T23 and T24 | 28 |
| Fig. 3.7 Radiographic test report of welded specimens - Page1 | 30 |
| Fig. 3.8 Radiographic test report of welded specimens - Page2 | 31 |
| Fig. 3.9 Report of ultrasonic testing - Page1 | 33 |
| Fig. 3.10 Report of ultrasonic testing - Page2 | 34 |

Fig. 3.11 Report of magnetic particle testing 36

List of Tables

| | |
|---|----|
| Table. 1.1 Chemical composition and mechanical properties of ARMOX600T steel | 2 |
| Table. 1.2 Chemical composition and mechanical properties of domestic and ESAB Wire | 4 |
| Table. 1.3 Carbon equivalent values of different grades ARMOX steel | 5 |
| Table. 1.4 Equations used to estimate equivalent carbon content | 5 |
| Table. 1.5 Classification of flux-cored wires | 8 |
| Table. 1.6 Classification of FC wire based on alloy composition | 10 |
| Table. 2.1 Welding conditions used in this study | 13 |
| Table. 2.2 Welding conditions of SAAB | 14 |
| Table. 2.3 ISO 5817:2014 Standard | 15 |
| Table. 3.1 Evaluation of FCAW specimens based on ISO 5817:2014 standard .. | 20 |
| Table. 3.2 tensile strength of welded specimens made by SAAB-ESAB Wire .. | 26 |
| Table. 3.3 Charpy impact test result | 28 |
| Table. 3.4 Radiographic test conditions | 29 |

ABSTRACT

A Study on Weldability Characteristics of High Strength Bulletproof Material ARMOX600T FCA Welding

Kuk Bang-Ho

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

CO-Advisor : Prof. Bang, Han-Sur, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Welding that can make the structure economical and reliable is widely used as a key process in the various manufacturing industries including automotive, rail, shipbuilding and aerospace. However, the welding is often faced with drawbacks relating to technical limitations on joint design, welding defects leading to critical degradation of the structural integrity and joint performance, deformation and residual stress induced by welding heat. As a result, the limitation of the process needs to be controlled for superior joint quality.

ARMOX 600T steel used in present study has been currently applied to outside panel in military automotive industry. ARMOX 600T steel, which is high-strength steel of 2 GPa, has poor weldability due to its higher carbon and alloying element contents than lower-strength steel. This makes

high-strength steel more susceptible to welding thermal cycle, leading to variations of microstructures and mechanical properties of welds. Welding is needed for construction of automotive structures due to its huge potential to maintain the quality of the structures. In the present study, ultra high strength steel ARMOX 600T having excellent bulletproof performance is considered as a base material. SAAB Corporation, a material supplier, recommends ESAB's FCAW (Flux-Cored Arc Welding) wire as a recommended filler wire in welding ARMOX 600T steel. Since the price of filler wire is high, considering the economic efficiency, the applicability of domestic FCAW filler wire is examined. The automotive industries employ internationally known codes and standards to maintain the product quality. It is therefore necessary that an appropriate welding method should be required to obtain the sound joint.

Therefore, in present study, welding of ARMOX 600T steel has been performed to examine the weldability by Flux Cored Arc Welding (FCAW). Joint properties have been evaluated through non-destructive, mechanical and metallurgical test. As a result of present study, the tensile strength of joint was 594 MPa, which is approximately 95% of SW-307NS wire used. The joints produced by domestic H Company FCAW filler wire yields lower tensile strength in comparison to that of the joints made by ESAB FCAW filler wire. The weld metal hardness made by domestic H Company FCAW filler wire is almost equivalent to 216 HV. Several non-destructive inspections and quality evaluations show various defects in the weldment that do not satisfy the quality requirement criteria. Further investigations are required to resolve the current issues.

제 1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

용접·접합은 재료의 접합을 보다 경제적이고 신뢰성 있게 하는 공정으로, 주요 산업분야인 중공업, 자동차산업, 전기·전자산업 등 대부분의 제조업 분야에서 요소기술로 적용되고 있으며, 앞으로도 그 역할은 더욱 증대되고 있다. 이 공정은 기타 가공조립법에 비해서 재료의 절삭, 형상의 일체성, 기밀성, 생산성 측면 등에서 우수하다는 장점을 가지고 있는 반면, 품질과 관련된 기술적 제약, 열에 의한 재료의 변질과 변형 및 잔류응력의 발생, 용접 대상재료의 제한 등의 결점을 가지고 있다.[30-3]

자동차의 구조물 제작에도 필수적으로 수반되는 것이 용접공정이며, 구조물의 품질에도 많은 영향을 끼치게 되는 부분이고, 그 때문에 국제적으로 통용되는 규정(code)과 표준(standard)을 적용하도록 품질관리에 대해 엄격히 요구하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 방탄능력이 우수한 2Gpa(Giga Pascal)급에 해당하는 ARMOX 600T 초고강도강 소재를 채용하고자 구조물에 적용할 세부적인 용접조건을 제시할 기준서를 마련하고자 한다. 또한 ARMOX 600T 소재를 용접함에 있어서 소재 공급사인 SAAB사에서 추천 용가재로 ESAB사의 FCAW Wire를 권장하고 있다. 하지만 용접용 Wire 가격이 고가이기 때문에 경제성을 고려하여 국산 Wire를 채용하고자 이에 대한 적용 타당성을 검토하고자 한다.[31]

이를 위해 본 연구에서 ARMOX 600T 소재에 FCAW(Flux-Cored Arc Welding)용접을 적용 한 후 용접부의 특성을 연구하여 세부적인 사항을 종합하여 결론을 도출하고자 한다.

1.2 소재의 특징과 용접특성

1.2.1 ARMOX600T 소재의 특징

소재는 SAAB사의 2GPa급 ARMOX600T로 중탄소강(C 0.30~0.45%)이며 관통에 대한 보호능력이 매우 우수한 고경도의 방탄소재이며 차량에 별도로 장착하는 추가 방탄판이나 경량화가 요구되는 부위에 사용된다. ARMOX600T의 두께는 4~20mm 정도이며 570~640 HBW 의 경도 범위가 보장된다. 소재의 작업성이 우수하며 경도 / 인성의 균형을 가지며 탄도무기 피탄시 관통에 대한 보호성이 뛰어나고 소재의 열처리 공정은 필요하지 않다.[31]

소재의 화학적 성분과 기계적 물성을 Table 1.1에 나타내었다.

Table. 1.1 Chemical composition and mechanical properties of ARMOX600T steel

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | B |
|-----------|------|------|----------|-------|-----|---------------|-----|-------|
| max | max | max | max | max | max | max | max | max |
| % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 0.47 | 0.70 | 1.00 | 0.010 | 0.003 | 1.5 | 3.00 | 0.7 | 0.005 |
| 인장강도(MPa) | | | 경도치(HBW) | | | 충격치(J)(-40°C) | | |
| 2000 | | | 611 | | | 16 | | |

1.2.2 소재의 용접특성

본 연구에서는 10mm 두께의 모재를 사용했으며 제조사인 SAAB에서는 권장 Wire로 ESAB사의 메탈게 FCW 와이어를 추천하지만 고가의 수입산 Wire이기 때문에 경제성을 고려해서 용가재는 국산 와이어를 사용하였다.

소재의 용접은 FCAW 용접법을 사용하여 맞대기 용접을 실시하였으며 용가재는 방탄소재 용접용 메탈게 스테인레스강 Flux Cored Wire SW-307NS(1.2 ϕ)를 사용하였다. 국산 Wire에 대한 화학 성분을 Table 1.2에 ESAB Wire와 비교해보았다.

ARMOX 소재에 대한 수소 균열에 대한 내성은 강철에 대한 탄소 당량(The carbon equivalent)으로 나타낼 수 있다. CET와 CEV에 따른 탄소 당량은 국제적 기준으로 가장 공통적인 두 가지 유형이다. 탄소 당량 값이 낮으면 용접 이음부(Joint)의 필요 예열 온도가 낮아진다. ARMOX 소재의 일반적인 탄소 당량 값을 Table 1.3에 나타내었다. [32]

또한 권장 용접입열(Welding heat input) 값을 대입하여 용접하면 이음부에 우수한 기계적 성질이 생긴다. 용접 성능으로 인한 용접입열 Q는 전류, 전압 및 용접 속도에 따라 달라지며 접합부에 전달된 에너지 / 길이를 나타낸다. 이 값은 용접 이음부의 기계적 성질에 영향을 미친다. 아크의 열량은 용접하는 동안 손실되며, 열효율 계수 k는 용접 이음부로 전달되는 용접 입열 부분을 나타낸다.

다양한 용접법에 따라서 열효율도 다르다. 소재의 카본 당량의 대략적인 값을 Table 1.4에 나타내었다. [32]

Table. 1.2 Chemical composition and mechanical properties of domestic and ESAB Wire

| Wire | C(%) | Si(%) | Mn(%) | P(%) | S(%) | Cr(%) | Ni(%) | Mo(%) | | | |
|-----------|------|-------|--------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|------|------|
| SW-307NS | 0.08 | 0.83 | 6.15 | 0.022 | 0.008 | 17.78 | 8.25 | 0.15 | | | |
| 인장강도(MPa) | | | 연신율(%) | | | 충격치(J)(-20℃) | | | | | |
| 627 | | | 40.8 | | | 106 | | | | | |
| Wire | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V | Nb | Cu |
| OK Tubrod | 0.10 | 0.8 | 1.70 | 0.03 | 0.03 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.002 | 0.05 | 0.30 |
| 인장강도(MPa) | | | 연신율(%) | | | 충격치(J)(-20℃) | | | | | |
| 580 | | | 26 | | | 120 | | | | | |

Table. 1.3 carbon equivalent values for ARMOX materials

| Steel grade | Thickness range | CET ¹ [%] | CEV ¹ [%] |
|----------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| Armox 370T CL1 & CL2 | 3-100 mm | 0.46-0.50 | 0.67-0.73 |
| Armox 440T | 4-80 mm | 0.39-0.42 | 0.67-0.73 |
| Armox 500T | 3-80 mm | 0.46-0.50 ² | 0.67-0.73 ² |
| Armox 600T | 4-20 mm | 0.58-0.61 | 0.83-0.86 |
| Armox Advance | 4-12 mm | 0.64-0.68 | 0.89-0.96 |

Table. 1.4 Equations used to estimate equivalent carbon content

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

1.3 플럭스 코어 아크용접(Flux Core Arc welding)

1.3.1 플럭스 코어 아크용접의 원리 및 특징

플럭스 코어 아크용접(Flux Cored Arc Welding, FCAW)의 원리는 GMA 용접과 유사하지만, 와이어 중심부에 플럭스가 채워져 있는 FC 와이어를 사용한다. FCA 용접은 FC 와이어를 일정한 속도로 공급하면서 와이어와 모재 사이에 아크를 발생시키고, 발생된 아크열로 모재와 와이어를 용융시켜 용접비드를 형성한다.

FCA 용접은 보호 가스의 사용 여부에 따라 가스보호 FCA 용접과 자체보호 FCA 용접으로 분류된다. Fig 1.1과 같이 외부에서 별도의 보호 가스를 공급하여 용융부가 보호 가스뿐만 아니라 플럭스에서 생성된 슬래그에 의해 보호되기 때문에 용융 풀이 이중으로 보호된다.

자체보호 FCA 용접에서는 Fig 1.2와 같이 외부에서 추가적인 보호 가스가 공급되지 않기 때문에 FC 와이어의 플럭스에서 발생하는 가스와 슬래그에 의해 용접부가 보호된다.

와이어는 내부에 충전된 재료에 따라 슬래그를 형성하는 플럭스가 주성분일 경우에는 플럭스 코어드(FC) 와이어라 하며, 금속 분말이 주성분일 경우에는 메탈 코어드(Metal Cored) 와이어라고 부른다. FCA 용접에서는 플럭스가 용융되어 슬래그를 형성하기 때문에 SMA 용접에서와 같이 생성된 슬래그는 브러시나 피닝 해머 등으로 제거하여야 한다. [29-59]

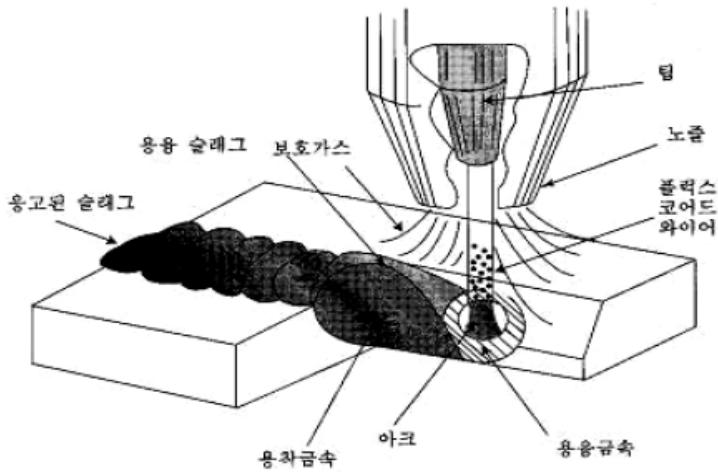


Fig. 1.1 Gas-shielded FCAW process

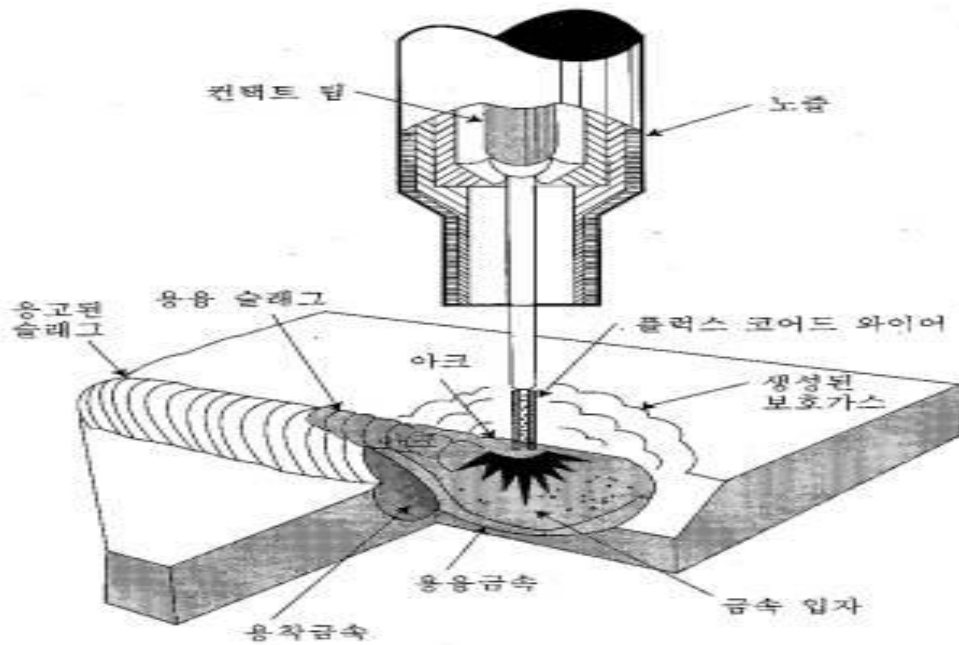


Fig. 1.2 Self-shielded FCAW process

1.3.2 Flux Cored Wire

FC 와이어는 금속튜브와 튜브 내에 충전된 플럭스로 구성되어 있고 금속튜브의 단면 모양이나 플럭스 조성은 매우 다양하다. Fig 1.5은 FC 와이어의 단면 형상을 나타낸 것으로 제조능력, 생산성, 경제성, 용접의 작업성, 용접품질 등을 극대화하기 위해 다양한 형상을 갖는다. 단면 형상은 플럭스 충전율, 아크 안정성, 용적 이행, 와이어 용융속도 등에 큰 영향을 미친다. 단면형상은 다음의 Table 1.5와 같이 크게 3 가지 형태로 구분된다.[29-61]

Table. 1.5 Classification of flux-cored wires

| | |
|----------|--|
| 튜브 형상 | 스트립의 끝이 맞대기 형상을 하고 있는 경우로 이음부가 없거나 스트립의 끝이 겹쳐있는 형상 |
| 심장 형상 | 스트립의 양쪽 끝이 접혀져 와이어 안쪽으로 내려온 형상으로 제조회사에 따라 여러 가지로 나뉜다. |
| 이중 겹침 형상 | 튜브 내부에 또다른 튜브를 가지고 있는 형상으로 외부 공간에는 플럭스를, 내부공간에는 금속분말을 채운다. |

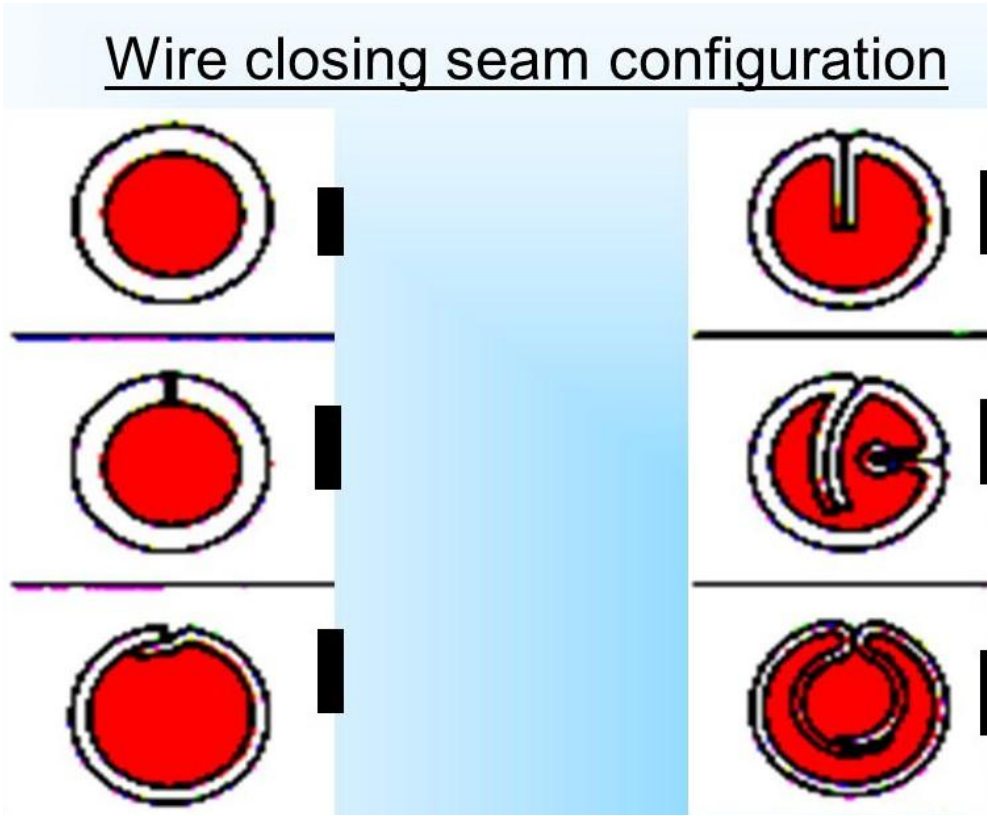


Fig. 1.3 FC Types of flux-cored wire

FC 와이어에서 플럭스가 차지하는 비중은 약 15~50%(중량비) 인데, 플럭스 성분은 용착금속의 기계적 물성치와 용접작업성에 큰 영향을 준다. 플럭스는 아크 안정제, 슬래그 형성제, 탈산제, 탈질제, 가스 형성제 및 합금성분 등을 포함하며 FC 와이어는 플럭스 성분계에 따라 다음의 Table 1.5와 같이 분류한다.[29-61]

Table. 1.6 Classification of FC wire based on alloy composition

| Wire | 특징 |
|-------------|---|
| 메탈 코어드 와이어 | <ul style="list-style-type: none"> · Fe, Fe-Cr, Fe-Mo, Cr, Fe-Ni, Fe-Mn 등의 금속분말을 95% 이상 포함. · 첨가되는 아크 안정제는 스파터 발생량을 줄이고 아크 안정성 향상. · 슬래그 성분이 없기 때문에 용착효율이 98% 수준으로 높다. |
| 자체보호 FC 와이어 | <ul style="list-style-type: none"> · Flux의 50% 정도가 CaF_2, CaCO_3 같은 가스 형성제로 구성. · Fe-Al, Fe-Ti 등 강력한 탈질제가 다량 첨가. · K, Na, Li 등의 아크 안정제가 첨가. |
| 가스보호 FC 와이어 | <ul style="list-style-type: none"> · 100% CO_2 나 혼합 가스를 보호가스로 사용. · 비드 외관이나 슬래그 박리성을 좋게 하기 위해 특정 화합물이 첨가(SiO_2, MgO, Al_2O_3, ZrO_2 등) |

1.3.3 FCA 용접장비

가스보호 FCA 용접에 사용되는 용접장비의 구성은 GMA 용접장비의 구성과 거의 동일하기 때문에 GMA 용접장비는 FCA 용접에 사용될 수 있다. 그러나 자체보호 FCA 자체보호 용접에서는 보호 가스 공급을 위한 설비가 필요없기 때문에 다소의 차이는 있다. 자체보호 FCA 용접장비에는 교류와 직류 용접기가 있으며, 각각 용접 토치를 손으로 조작하는 반자동 형과 기계로 주행시키는 자동형이 있다. Fig 1.7은 일반적인 반자동 FCA 용접장비의 구성으로 용접기, 용접 케이블, 와이어 송급장치 및 용접 토치로 구성된다.

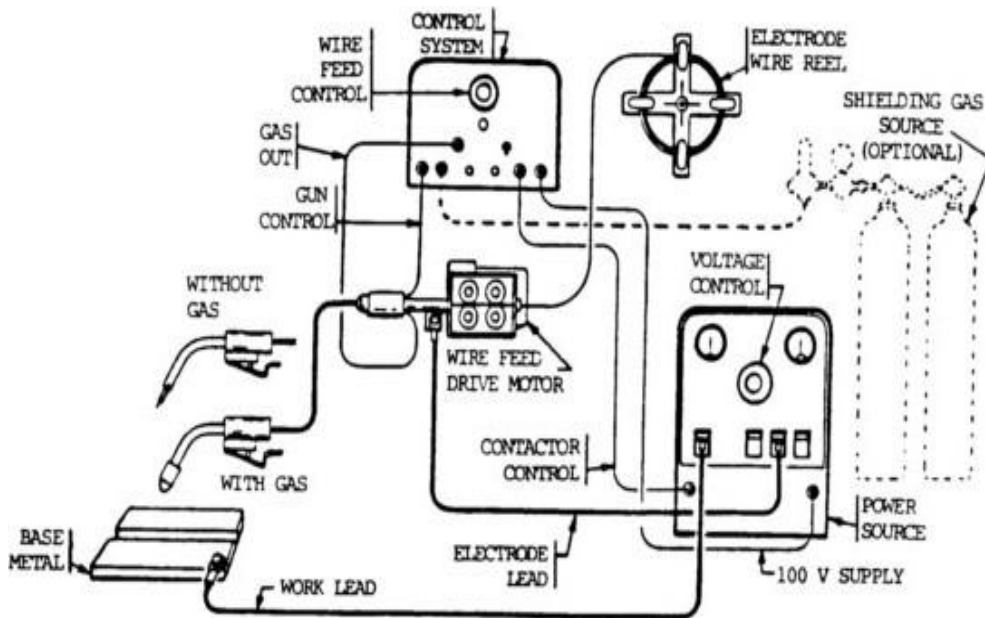


Fig. 1.4 Configuration of FCA welding equipment

제 2 장 연구방법

2.1 실험조건

2.1.1 이음부 형상

Fig 2.1과 2.2는 본연구 시험편과 SAAB사의 이음부 형상으로 본 실험에서 피용접재는 두 면을 50° V형 그루브(Groove)로 가공하였고 전면 및 이면 총 3 pass를 용접을 실시하여 맞대기 용접하였다. 시험편의 보호가스는 CO₂ 99%, 20 l/min, SAAB사는 혼합가스 Ar 25:CO₂ 75, 15~18 l/min을 사용하였으며, 예열 및 층간온도는 SAAB사의 경우 125~150(°C)를 적용하였다.

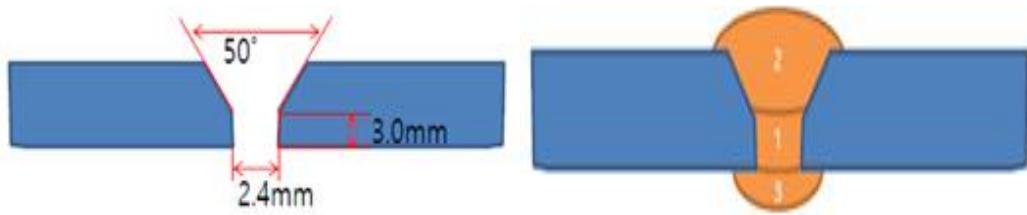


Fig. 2.1 Schematic diagram of joint specimen and corresponding cross-sectional bead profile

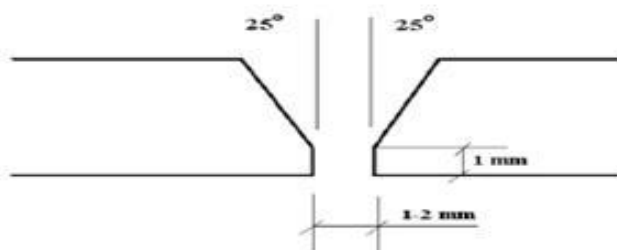


Fig. 2.2 Schematic representation of SAAB joint sample

2.1.2 용접조건

본 연구시험편의 용접품질에 영향을 미치는 많은 인자 중 중요인자의 선택은 전류, 전압, 용접속도(입열량)는 고려하였으나 예열, 층간온도, 혼합가스 사용은 고려하지 않았다. SAAB사의 경우 Ar 25:CO₂ 75 혼합가스를 사용하였고 예열, 층간온도를 고려하고 입열량에 따른 적절한 냉각시간을 부여하였다. 중요인자의 변화조건을 각각 Table 2.1과 Table 2.2에 나타내어 비교하였다.

Table. 2.1 Welding conditions used in this study

| 본 연구 시험 조건 | | | | | | |
|------------|-----|---------|-------|------------------|------------------------|----|
| 용접법 | 조건 | 전류(A) | 전압(V) | 용접속도 (mm/min) | 보호가스 (ℓ /min) | 자세 |
| FCAW | T23 | 170~210 | 22~28 | 1-469 | CO2 99% (20 ℓ /min) | 1G |
| | | | | 2-218 | | |
| | | | | 3-249 | | |
| | T24 | 170~210 | 22~28 | 1-335 | CO2 99% (20 ℓ /min) | 1G |
| | | | | 2-176 | | |
| | | | | 3-276 | | |

Table. 2.2 Welding conditions of
SAAB

| SAAB사 시험 조건 | | | | | | | | |
|-------------|------|-------------|-------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------------|----|
| 용접법 | 조건 | 전류 (A) | 전압 (V) | 용접속도 (mm/min) | 예열 및 층간온도 (℃) | 냉각 시간 (s) | 보호가스 (ℓ/min) | 자세 |
| FCAW | D321 | 150~ 176 | 19~ 20.8 | 250 | 150 | 14.6 | Ar 75: C02 25 (15~18 ℓ/min) | 1G |
| | D322 | 150~ 220 | 22~28 | 250 | 150 | 24.7 | Ar 75: C02 25 (15~18 ℓ/min) | 1G |
| | D323 | - | - | - | 125 | 35.6 | Ar 75: C02 25 (15~18 ℓ/min) | 1G |

2.2 용접부 특성 평가

2.2.1 비파괴 검사

본 연구에서는 용접시험편에 대하여 결함을 검사하기 위하여, 내부결함 측정 방사선투과시험(Radiographic Testing), 초음파탐상시험(Ultrasonic Testing)과 외부결함 측정 자분탐상시험(Magnetic particle Testing)을 실시하였다.

ISO 5817:2014(Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloy-beam welding excluded-Quality levels for imperfections, 강의 아크 용접 이음-품질 등급 기준) 국제규격에 의거하여 용접부 품질 검사를 실시하였다. Table. 2.3에 ISO 5817:2014 규격을 나타내었다.

Table. 2.3 ISO 5817:2014 Standard

| Imperfection designation | Limits for imperfections for quality levels | | |
|--------------------------|---|--|---------------------------------------|
| | Moderate(D) | Intermediate(C) | Stringent(B) |
| Undercut | $h \leq 0.2t$ but max. 1mm | $h \leq 0.1t$ but max. 0.5mm | $h \leq 0.05t$ but max. 0.25mm |
| Excess weld metal | $h \leq 1mm + 0.25b$, but max. 10mm | $h \leq 1mm + 0.15b$, but max. 7mm | $h \leq 1mm + 0.1b$, but max. 5mm |
| Cracks | Not permitted | Not permitted | Not permitted |
| Lack of fusion | Short imperfections: $h \leq 0.4s$, but max. 4mm | Not permitted | Not permitted |

2.2.2 경도시험

본 연구에서는 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 1 kgf로 실시하였으며, 용접부의 상부 표면으로부터 2 mm, 하부 표면으로부터 2 mm 떨어진 지점에서 1 mm 간격으로 측정하였다.

측정위치는 상/하부 표면으로부터 2 mm 떨어진 지점에서 용착금속부 6point, 열영향부 각 3points씩 6points, 모재부 각 3points씩 6points 총 18points 측정하였다. Fig. 2.3은 경도측정 위치이며 Fig. 2.4은 실험에 사용된 경도측정기의 사진이다.

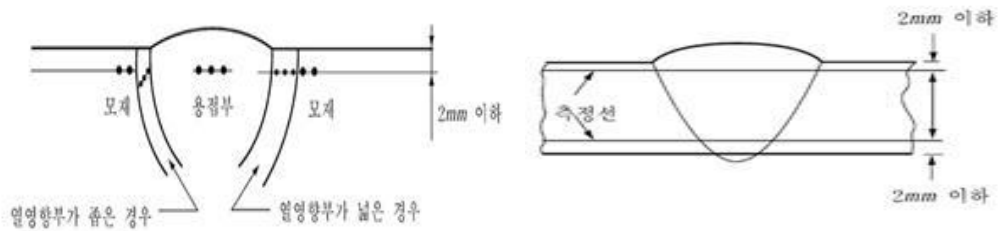


Fig. 2.3 Location of Vickers micro-hardness test

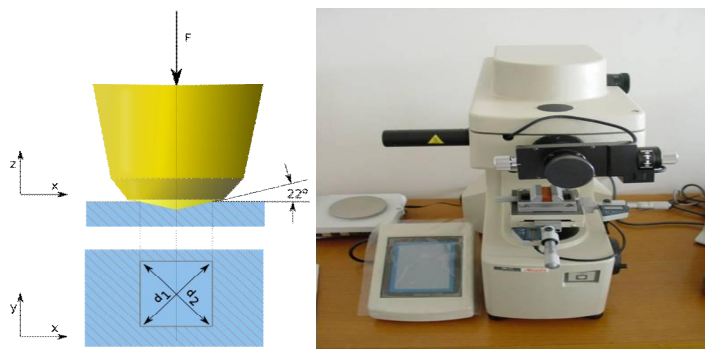


Fig. 2.4 Vickers micro-hardness tester

2.2.3 인장시험

인장시험은 ASTM E8, ASTM E466 규격에 따라 시험편을 제작해 시험하였으며, Horizontal 방향으로 2개씩 채취하였다. Fig. 2.5은 인장시험편 제원을 나타내었다.

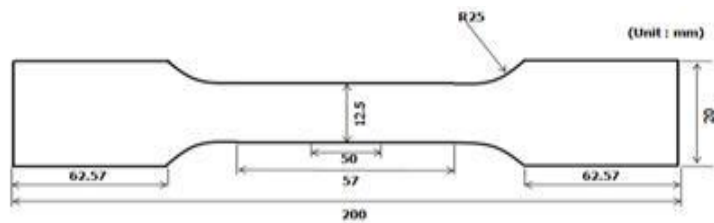


Fig. 2.5 Schematic diagram of tensile test specification

2.2.4 굽힘시험

모재 및 용접부의 연성 결함의 유무를 조사하기 위하여 굽힘 시험을 하였다. 굽힘 시험은 시험편을 자유 굽힘이나 형 굽힘에 의하여 용접부를 구부려서 결정하였고, 용접부의 연성과 결함을 확인하기 위하여 Fig. 2.6과 같이 시험편을 제작하였으며, 굽힘시험편은 앞면 및 뒷면에서 2개씩 채취하여 시험하였다.

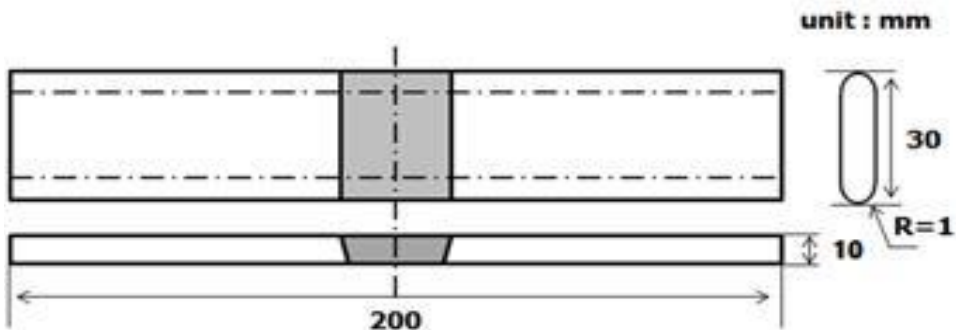


Fig. 2.6 Schematic diagram of bend test specification

2.2.5 충격시험

충격시험은 ASTM E23-07에 의거하여 용착금속, Fusion line, Fusion line+1,2,3mm에 깊이 2mm의 노치를 삽입하여 Fig 2.7과 같이 시험편을 제작하였고, -20 °C 조건에서 시험을 수행하였다.

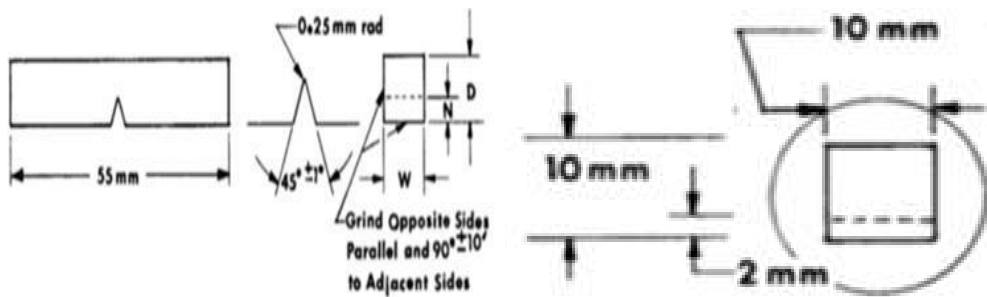


Fig. 2.7 Schematic picture of impact test specification

제 3 장 연구결과

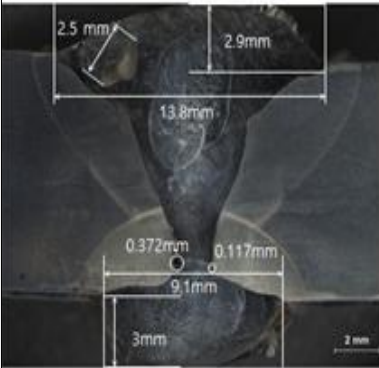
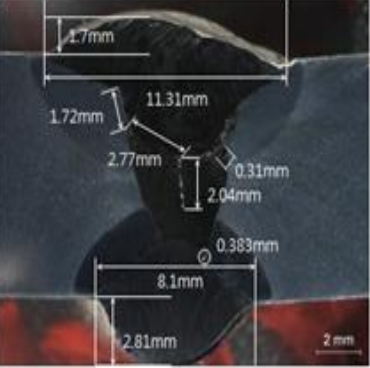
3.1 용접부 단면 특성

용접부의 품질평가를 Table 3.1에 나타내었다. T23조건에서는 용접부 중앙 여러 부위에 융합부족(Lack of fusion)이 발견되었고 기공이 형성되었다. 융합부족은 각 패스간 용접부 사이를 충분히 용융시키지 못해서 발생한 것으로 용접속도가 너무 빠르거나 부적절했기 때문으로 판단된다. 또한 가스가 미처 용착금속부를 빠져 나가지 못해 기공이 생성된 것으로 판단된다. 앞서 언급한 인장강도 평가에서 T23 조건이 가장 낮은 인장강도를 얻은 것은 다수의 내부결함에 의한 것임을 확인했다.

T24 조건에서는 다수의 융합부족이 발견되었으며, 특히 용접부 중앙에 균열(Crack)을 확인하였다. 이는 용접시 발생한 확산성 수소가 용접부 냉각시에 용착금속부에 집중적으로 확산되어 수소 분압을 증가시키고 이로 인해 국부적 응력집중을 발생시켰고 냉간 용접을 실시하여 용접시에는 급열, 용접후에는 급냉상태로 인해 잔류응력 증대효과가 균열 발생에 영향을 준 것으로 판단된다.

따라서 Crack으로 인해 ISO 5817 국제규격을 만족하지 못하였다.

Table. 3.1 Evaluation of FCAW specimens based on ISO 5817:2014 standard

| 용접 조건 | | T23 | | T24 | |
|---------------------|-------|---|----------------|--|----------------|
| 횡단면 | |  | |  | |
| Continuous undercut | h(mm) | × | | × | |
| | Level | B | | B | |
| Excess weld metal | b(mm) | b(top)=13.80 | b(bottom)=9.10 | b(top)=11.31 | b(bottom)=8.10 |
| | h(mm) | h(top)=2.90 | h(bottom)=3.0 | h(top)=1.7 | h(bottom)=2.81 |
| | Level | C | D | B | D |
| Cracks | h(mm) | × | | 2.04 | |
| | Level | B | | not permitted | |
| Lack of fusion | h(mm) | 0.37, 0.12 | | 1.72, 2.77, 0.31, 0.38 | |
| | Level | D | | D | |

3.2 용접부 기계적 특성

3.1.1 경도분포

용접부의 용착금속부, 열영향부, 모재에 대하여 경도를 측정하였다. 경도분포는 열영향부>모재>용착금속부 순서로 나타났으며, 최대 경도값은 Bottom쪽 열영향부(HAZ)에서 544~549HV로 모재 대비 약 155HV정도 상승하였다.

용착금속부 경도가 HV 168로 모재(HV 391) 대비 223HV 정도 큰 폭으로 경도가 감소했음을 확인하였다. 용접부의 경도분포를 Fig 3.1에 나타내었다.

용접부 모두 용착금속부에서 경도가 큰 폭으로 감소했는데, 이같은 큰 폭의 경도 저하로 인해 용접부에 외력이 작용시에 용착 금속부가 상대적으로 취약하므로 파단이 용착금속부에서 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

SAAB사의 경도시험 결과도 경도분포는 국내산 Wire 적용시와 동일하게 열영향부>모재>용착금속부 순으로 나타났고 최대 경도값은 열영향부에서 HV 624로 확인되었다. 용착금속부 평균 경도값은 200~230HV 이며 모재 대비 큰 폭으로 경도가 감소했음을 확인하였다.

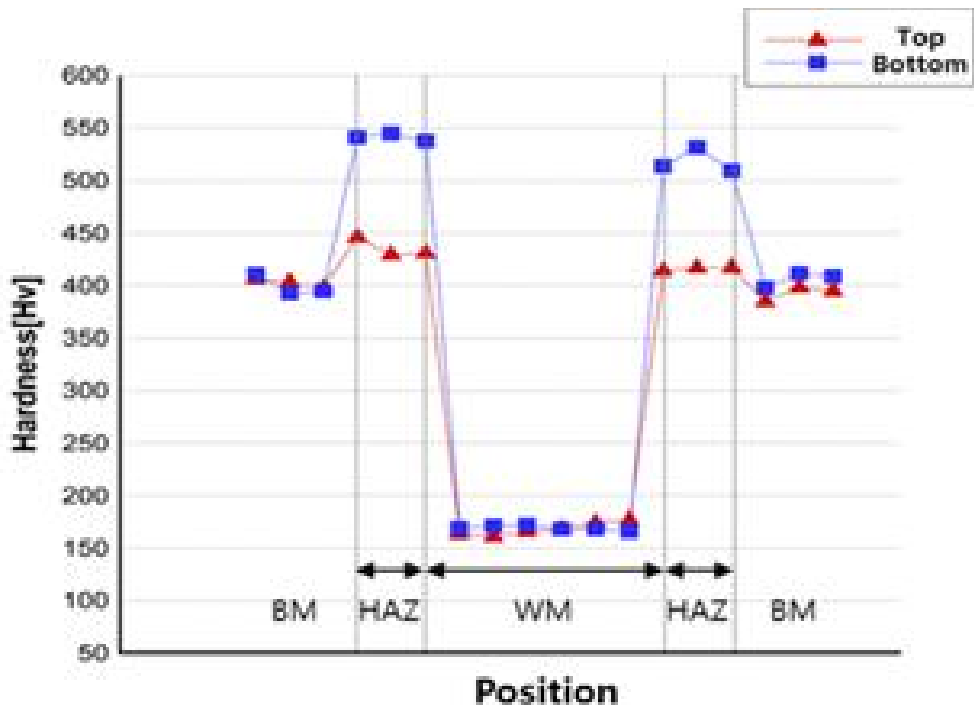


Fig. 3.1 Hardness distribution along the transverse section of weld bead

3.1.2 인장시험 특성 비교

용접부의 인장강도를 확인하기 위하여 인장시험편을 가공하여 실험을 실시하였고 시험결과, 수평 방향에서의 평균 인장강도가 약 594MPa로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 용접부 전 구간에 걸친 용입부족 및 융합부족이 발생하였으므로 다소 낮은 인장강도가 나타난 것으로 판단된다. T23, T24 두가지 용접 조건별 인장강도 값을 Fig 3.2에, 수평방향 인장강도 값을 Fig. 3.3에 나타내었다.

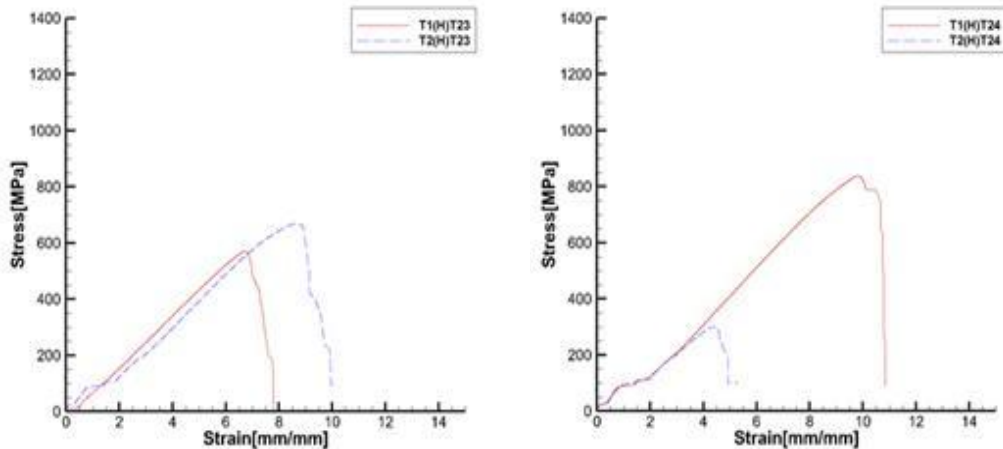


Fig. 3.2 Stress strain diagrams of tensile samples at different welding currents or welding speeds of T23 and T24

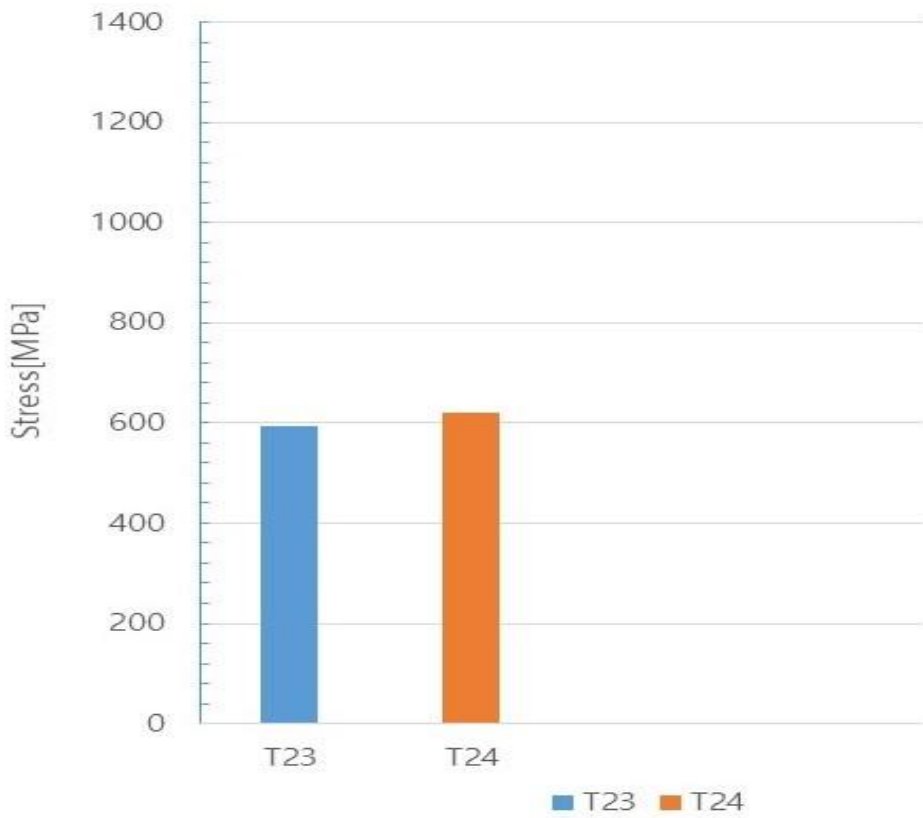


Fig. 3.3 Stress strain diagrams of tensile samples at different welding currents or welding speeds of T23 and T24

시험편의 수평방향 인장강도시험 후 시험편 파단사진을 다음의 Fig 3.4에 나타내었다. 시험 결과, 용접 시험편의 용착금속부에서 파단이 발생하였다.





용착금속부에서 파단이 발생한 원인은 사용된 와이어의 기계적 물성이 모재에 비해 낮고, 또한 비파괴검사에 검출된 바와 같이 용입부족 및 기공과 같은 결함발생으로 상대적으로 취약한 용착금속부에서 파단이 발생한 걸로 판단된다.



Fig. 3.4 Fracture tensile test specimens for welding conditions of T23 and T24

비교를 위해 SAAB사에서 제공한 인장시험 결과를 Table 3.2에 나타내었다. 가장 높은 인장강도는 D322-2 조건에서 940MPa 이고, 가장 낮은 인장강도는 D321-1 조건에서 767MPa를 기록하였다. 인장시험 후 파단은 용착금속부 및 열영향부에서 발생하였다.

Talbe. 3.2 tensile strength of welded specimens made by SAAB-ESAB Wire

| 조건 | 최대 인장강도 (MPa) | 파단사진 |
|--------|---------------|--|
| D321-1 | 767 |  |
| D321-2 | 850 |  |
| D322-1 | 898 |  |
| D322-2 | 940 |  |
| D323-1 | 885 |  |
| D323-2 | 881 |  |

3.1.3 굽힘시험 특성

용접부의 연성을 평가하기 위하여 굽힘시험편을 앞, 뒷면에서 2개씩 채취하여 시험을 실시하였으며 모든 시험편이 굽혀지지 않고 파단됨을 확인하였다. 각 용접 조건별 굽힘 시험편 파단위치를 Fig 3.5에 나타내었다.

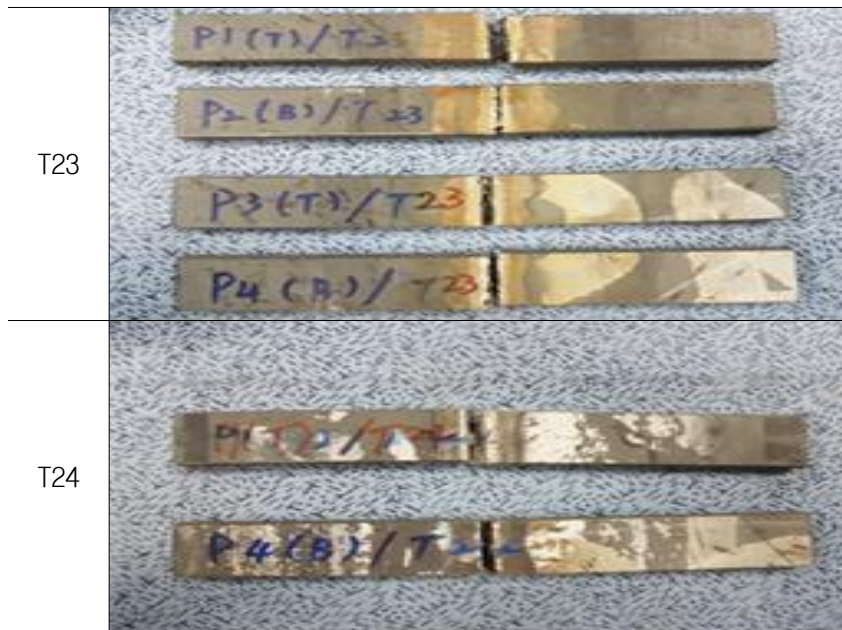


Fig. 3.5 Fracture bend test samples at different welding conditions of T23 and T24

3.1.4 충격시험 특성

충격시험은 용착금속부에 샤르피 충격시험을 실시하였으며 결과를 Table 3.3에 나타내었으며 충격시험편 파단 위치를 Fig 3.6에 나타내었다. -20℃의 조건에서 시험을 수행하였으며 샤르피 충격치는 평균 62J로 높게 나타났다.

이는 FCAW Wire가 저온인성에 우수한 스테인레스계 Wire이므로 흡수에너지 값이 높은 것으로 판단된다.



Fig. 3.6 Fracture impact test samples at different welding conditions of T23 and T24

Table. 3.3 Charpy impact test result

| 용접조건 | 넓이(mm) | 온도(℃) | 충격치(J) |
|----------|--------|-------|--------|
| FCAW-T23 | 10 | -20℃ | 46.95 |
| FCAW-T23 | | | 60.90 |
| FCAW-T24 | | | 61.97 |
| FCAW-T24 | | | 64.02 |

3.3 용접부 비파괴 검사

3.3.1 용접부 방사선 투과검사(RT)

방사선투과시험 장비를 사용하여 KOST-RTP-504 절차에 따라 시험을 진행하였다. 시험조건은 다음의 Table. 3.4과 같다.

Table. 3.4 Radiographic test conditions

| 방사선원 | 필름 | 투과도계 | 증감지 | 방사선원과 필름 사이의 거리 | Source size | 촬영 기법 |
|--------|-----------|-------|---------------|-----------------------|-----------------------------|----------|
| Ir-192 | Type 1 | ASTM형 | Pb 0.127mm | 500mm / 2652mm | 2.7 x 1.75mm / 3 x 2.5mm | SWSI |

방사선 투과시험 결과, 용접부 모두 T2-4 3-E 구간에서 Accept판정을 받았지만 전 구간에 용입부족 현상이 발생하였다. 이는 낮은 용접전류, 빠른 용접속도 등의 이유로 용접부에 용입불량이 발생한 것으로 판단된다. 용접부 RT검사 기록지를 Fig 3.7, 3.8에 나타내었다.

KOSTEC.CO.,LTD

Page 1 of 2

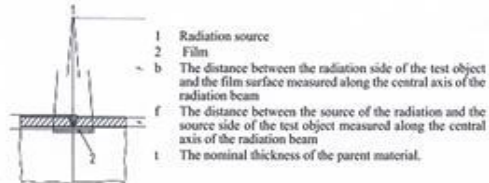


REPORT OF RADIOGRAPHIC TESTING

| | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|------------|
| Hull No. | WPS 조선대산학 | Report No. | KOST-RT-16-003 | Date : | 2016-11-30 |
| Material : | SPV355 | Equipment : | 880D | I.Q.I : | ASTM |
| Radiation : | Ir-192 | Technique : | SWSI | Film : | TYPE I |
| Procedure : | KOST-RTP-504, 104 (Rev.2) | Screen : | Pb 0.127 mm | SFD/FFD : | 2652 mm |
| Reference Report : | Refer to RT Report No. | Density : | 2.0-3.8 | Sensitivity : | 0.25 mm |
| Total : | 8 Films | Develop Time & Temp : | 5Min in 20℃ | Source Size : | 3 X 2.5 mm |
| Repair : | 7 Films | Welding Process : | GMAW, FCAW | Acceptance Criteria : | KS B0845 |

| Ident. No | Total Films | Repair Films | Contents | | | Welder No. | Thickness | | |
|----------------------------|-------------|--------------|----------|-----------|--------|------------|-----------|----|----|
| | | | Film No. | Interpret | Result | | T1 | T2 | |
| KV-WPS-BW-A001 Rev.02 T1-4 | 4 | | 0 | 0-1 | LP,GP | R | . | 10 | 10 |
| | | | 1 | 1-2 | SI,GP | R | . | 10 | 10 |
| | | | 2 | 2-3 | LF,LP | R | . | 10 | 10 |
| | | | . | 3-E | . | A | . | 10 | 10 |
| KV-WPS-BW-A002 Rev.02 T2-4 | 4 | | 0 | 0-1 | LP | R | . | 10 | 10 |
| | | | 1 | 1-2 | LP | R | . | 10 | 10 |
| | | | 2 | 2-3 | LP | R | . | 10 | 10 |
| | | | 3 | 3-E | LP | A | . | 10 | 10 |

THE END



Abbreviations
A : Accept *SD : Surface defect *FM : Film defect (mar) *RC : Root concavity *TC : Transverse Crack *WH : Worm hole
R : Repair *UC : Under cut *GP : Gas pore(Blow hole) *SI : Slag inclusion *LF : Lack of fusion *LP : Lack of penetration



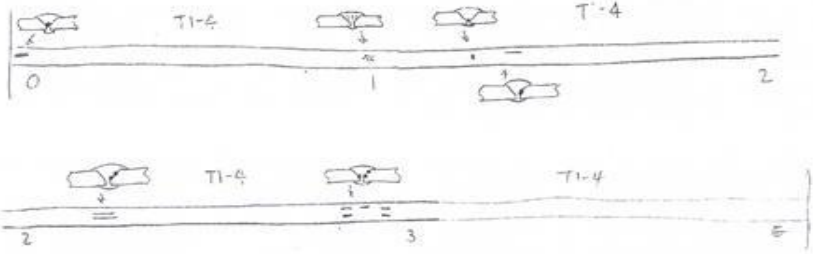
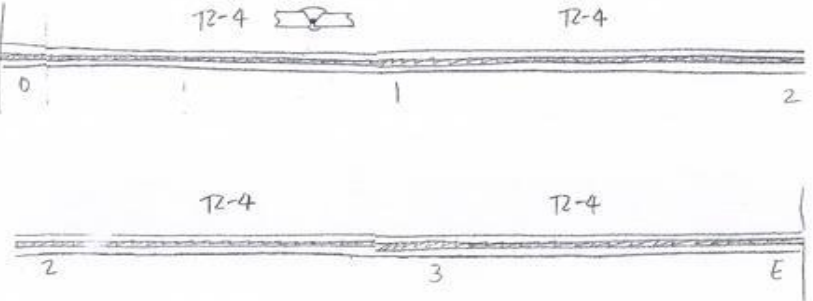
| | | | | |
|----------------------|-----------------------|---|-------|-------|
| KOSTEC | | <input checked="" type="checkbox"/> Reviewed by <input type="checkbox"/> Witnessed by | | |
| Reviewed by Level II | Approved by Level III | Owner | Class | Class |
| 11/30 762 | 11/30 [Signature] | | | |
| H.KIM | N.J.PARK | | | |

HS(3) 13 210 A4 (201408)

Fig. 3.7 Radiographic test report of welded specimens - Page1

KOSTEC.CO.,LTD

Page 2 of 2

| | | | |
|--|-----------|--|----------------|
|  | | REPORT OF RADIOGRAPHIC TESTING | |
| Hull No. | WPS 조선대산학 | Report No. | KOST-RT-16-003 |
| | | Date : | 2016-11-30 |
| 개선행상 결함내용 (용입불량)  | | 1. Y형 맞대기 양면용접 4. 현상 Y형 맞대기 양면용접부에서 용접중단부에 용입이 되지 않아 전단면에 걸쳐 연속적으로 나타남. 2. 용입 ~ 용접잔류가 있거나 용접부의 각도가 기울어짐 ~ 과열현상, ROOT GAP부족 및 용입속도 부족 등의 원인에 의해 용접부에 Incomplete Penetration 나타날 수 있음. | |
|  | | | |
|  | | | |

HS(3) 13 210 A4 (201408)

Fig. 3.8 Radiographic test report of welded specimens - Page2

3.3.2 용접부 초음파탐상 검사(UT)

초음파탐상시험 장비로 KOST-UTP-504 절차에 따라 시험을 진행하였다. 시험편 표면에 접촉매질 CMC solution을 도포하였고, 사각탐촉자를 사용하였으며 주파수는 4MHz, 굴절각은 70° , 60° , 45° 로 선정하였다.

검사 결과 용접부 모두 용입부족 및 기공으로 Repair 판정이 나왔다. T23, T24조건에서는 용접부 전 위치에서 각각 용입부족 및 융합불량이 발생하였다. 용접부 UT검사 기록지를 Fig 3.9, 3.10에 나타내었다.

KOSTEC.CO.,LTD

Page 1 of 2



REPORT OF ULTRASONIC TESTING

Hull No. : WPS 조선대학교 Report No. : KOST-UT-16-003 Date : 2016-11-30

Material : Steel Joint : Butt Probes : 4MHz 8X9MM 70°,60°,45° 4M 10N
 Test Block : STB - A1 & BCB(RB) Technique : 0.5 SKIP, 1.0 SKIP, Straight
 Equipment : USM GO Couplant : CMC Solution
 Procedure : KOST-UTP-504, 104 (Rev.2) Transfer Correction : 2 dB
 Reference Report : Refer to UT Report No. Welding Process : GMAW, FCAW
 Total Check Length : 2,000 mm WPS No.: KV-WPS-BW-A001 Rev.02 T1-4
 Repair Length : 1,210 mm WPS No.: KV-WPS-BW-A002 Rev.02 T2-4

| Ident. No | Welder No. | Thickness | | Check Length | Loc. | Lev. | X | W | Y | D | L | Kind | Result |
|---------------------|------------|-----------|----|--------------|------|------|-----|----|----|----|-------|----------|--------|
| | | T1 | T2 | | | | | | | | | | |
| KV-WPS-BW-A001 T1-4 | | 10 | 10 | 1,000 | 01 | III | 1 | 30 | 32 | 10 | 10 | LF | R |
| | | | | | 02 | III | 240 | 30 | 32 | 10 | 50 | LF | R |
| | | | | | 03 | III | 240 | 30 | 32 | 10 | 50 | LF | R |
| | | | | | 04 | III | 325 | 30 | 32 | 10 | 10 | LF | R |
| | | | | | 05 | III | 435 | 30 | 32 | 10 | 5 | porosity | R |
| | | | | | 06 | III | 620 | 30 | 32 | 10 | 5 | porosity | R |
| | | | | | 07 | III | 700 | 30 | 32 | 10 | 30 | LF | R |
| | | | | | 08 | III | 875 | 30 | 32 | 10 | 50 | LF | R |
| KV-WPS-BW-A002 T2-4 | | 10 | 10 | 1,000 | 01 | III | 1 | 30 | 32 | 10 | 1,000 | LF | R |
| THE END | | | | | | | | | | | | | |

Abbreviations
 A : Accept Level : Region of echo height L : Flaw length *LF: Lack Of Fusion Or Linear Flaw
 R : Repair D : Flaw depth W : Beam Length
 ARL Over : III X : Distance from "0" point to flaw DRL : Disregard Level
 DRL-ARL : II Y : Distance from beam index to bead center ARL : Amplitude Rejection Level

| | | | | |
|----------------------|-----------------------|---|-------|-------|
| KOSTEC | | <input checked="" type="checkbox"/> Reviewed by <input type="checkbox"/> Witnessed by | | |
| Examined by Level II | Reviewed by Level III | Owner | Class | Class |
| 11/30 762 | 11/30 [Signature] | | | |
| H. KIM | N.J.PARK | | | |

HS(3) 13 212 A4 (201408)

Fig. 3.9 Report of ultrasonic testing - Page1

KOSTEC.CO.,LTD

Page 2 of 2

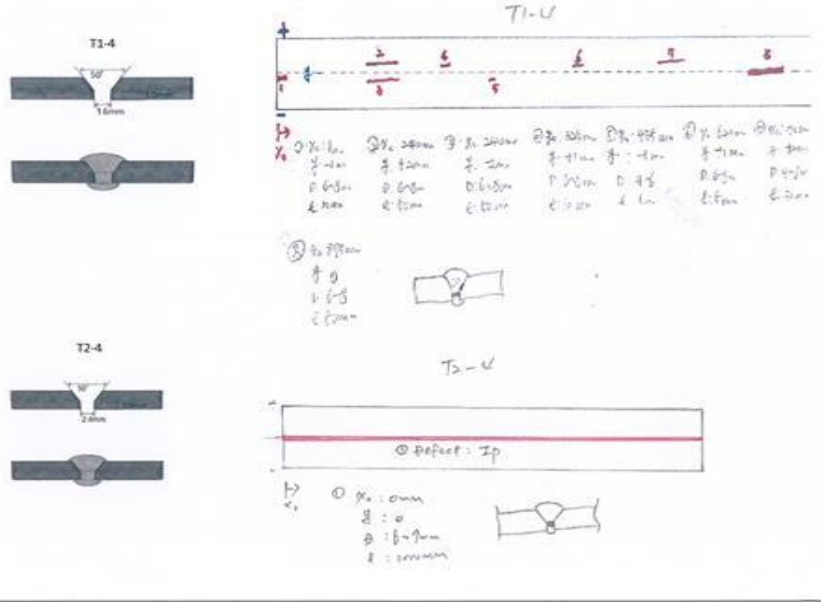
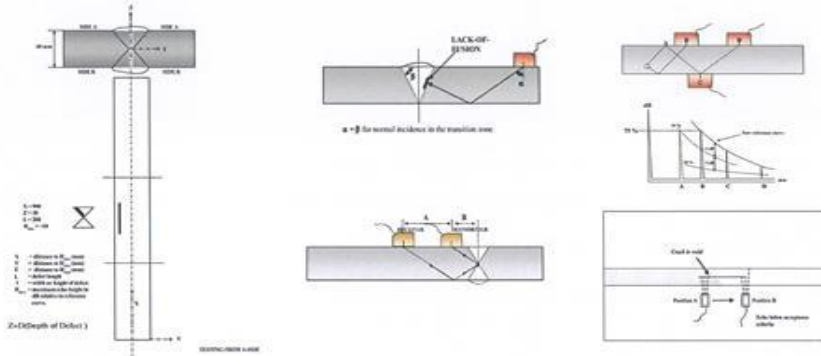


REPORT OF ULTRASONIC TESTING

Hull No. WPS 조선대선학

Report No. KOST-UT-16-003

Date : 2016-11-30



HS(3) 13 212 A4 (201408)

Fig. 3.10 Report of ultrasonic testing - Page2

3.3.3 용접부 자분탐상 검사(MT)

자분탐상 시험 장비로 KOST-MTP-504 절차에 따라 시험을 진행하였다. 시험편은 용접된 상태 그대로 유지하였으며, 교류전류를 통전하여 시험편을 자화시키고 습식 1.2~2.4ml/100ml의 농도를 가진 비형광 자분 7C-Black(20)을 도포하여 검사를 실시하였다.

용접부 MT검사 기록지를 Fig 3.11에 나타내었다. 검사결과 용접부 표면에서 결함은 발생하지 않았다.

KOSTEC.CO.,LTD

Page 1 of 1



REPORT OF MAGNETIC PARTICLE TESTING

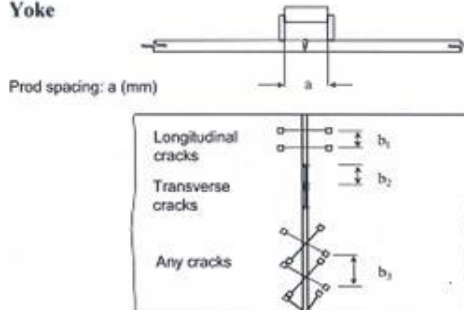
Hull No. WPS 조선대산학 Report No. KOST-UT-16-003 Date : 2016-11-30

Material : Steel B/G Color : White Direction : Longi.
 Surface Condition : AS Welded & Ground Test Block : Field Indicator &Lifting Power (10 lbs.)
 Equipment : YOKE Current : AC220V Medium : Wet - Non Fluorescent
 Procedure : KOST-MTP-504, 104 (Rev.2) Magnetic Particle : 7C - Black (1.2 - 2.4ml)
 Reference Report : Refer to MT Report No. Welding Process : GMAW, FCAW
 Total Check Length : 2,000 mm Batch No: 16MPB17
 Repair Length : 0 mm

| Ident. No | Welder | Check Length | Loc. | Step | X | L | Kind | Result |
|----------------------------|--------|--------------|------|------|---|---|------|--------|
| KV-WPS-BW-A001 Rev.02 T1-4 | . | 1,000 | . | FW | . | . | . | A |
| KV-WPS-BW-A002 Rev.02 T2-4 | . | 1,000 | . | FW | . | . | . | A |

THE END

Yoke



Abbreviations

A : Accept X : Distance from "0" point to Indication
 R : Repair L : Indication Length
 Step : Examination Time *FW:After Final Welding

| KOSTEC | | Reviewed by <input checked="" type="checkbox"/> Witnessed by <input type="checkbox"/> | | |
|----------------------|-----------------------|---|-------|-------|
| Examined by Level II | Reviewed by Level III | Owner | Class | Class |
| H. KIM | N.J.PARK | | | |

HS(3) 13 214 A4 (201408)

Fig. 3.11 3.11 Report of magnetic particle testing

제 4장 결론

본 연구에서 ARMOX600T 소재에 대한 국산 와이어 채용에 대한 적합성 평가와 관련하여 용접부의 기계적, 금속학적 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접부 특성 분석 및 비파괴검사 결과 용접부의 용합부족, 용입부족과 기공 등 용접결함이 발생했으며, 또한 Crack이 발견되어 ISO 5817 국제규격을 만족하지 못하였다.
- 2) 경도분포는 열영향부>모재>용착금속부 순으로 측정되었으며, 용착금속부의 경도가 모재대비 큰 폭으로 감소하였으며 경도는 HV 168로 모재(HV 391) 대비 223HV정도로 크게 발생하였다.
- 3) 용접부의 인장강도는 594MPa로 SAAB사 대비(870) 31% 낮은 인장강도를 확인하였다.
- 4) SAAB사 ESAB 와이어 채용 기술보고서와 비교 검토 결과, 국산 H사 FC 와이어 채용시 SAAB사 대비 인장강도는 미치지 못하였다. 경도는 용착금속부 평균 HV=216으로 거의 상응하는 결과치를 확보하였다. 하지만 비파괴검사 및 품질평가에서 용접결함이 다수 발생, 용접부 품질 요구기준에 만족하지 못하였다. 따라서 이에 대한 해결이 필수적이라고 판단된다.
- 5) 상기 용접결함의 발생 원인으로는 용접작업자의 숙련도, 혼합 보호가스, 예열, 후열, 층간온도 등이 고려되지 않았기 때문으로 판단되며 이에 대해 작업시 고려해야 한다.

참고문헌

- [1] M. S. Jang, M. J. Bang and J. H. Gwak : 왜 지금 현대차는 가벼워지려 하는가?, 2015.03.17
- [2] S. R. Shah and S. Tosunoglu : Friction stir welding:Current state of the art and future prospectss, WMSCI, 2012
- [3] H. T. Kim and S. C. Kil, High efficient welding technology of the car bodies, Journal of welidng and joining, 2016, 34-4, pp62-66
- [4] T. Kawasaki, T. Makino, K. Masai, H. Ohba, Y. Ina and M. Ezumi, Application of friction stir welding to construction of railway vehicles, JSME, 2004, 47-3. pp502-511
- [5] Y. B. Choi, M. J. Kang, D. C. Kim and I. S. Hwang, High current arc welding technology of Aluminum alloy, Journal of KWFS, 2013, 31-1, pp21-25
- [6] A. C.F. Silva, D. F.O. Braga, M.A.V. de Figueiredo and P.M.G.P. Moreira, Friction stir welded T-joints optimization, Materials and Design, 2014, 55, pp120-127
- [7] H. C. You and H. T. Kim, Recent technological tendency of joining for light aluminium alloy, Journal of KWJS, 2011, 29-3, pp260-269
- [8] H. W. Kim, Y.S. Lee, M. S. Kim and C. Y. Y, 자동차 차체 경량화 및 차체용 알루미늄 합금판재의 개발동향, 27-4
- [9] 마찰교반용접(Friction Stir Welding), 한국과학기술정보연구원
- [10] ESAB : Friction Stir Welding Technical Handbook, <http://www.esab.com>
- [11] S. I. Seo, Introduction of friction stir welding and its application to aluminum rolling stock, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

- [12] S. B. Choi, S. W. Kim and S. K. Jung, 자동차 경량화 기술동향과 개발 전략, 한국과학기술정보연구원 정보분석연구소, 2013
- [13] J. H. Lee, Aluminum & Aluminum Based-Alloy, Total Information Network Services, www.technonet.co.kr
- [14] J. H. Cho, M. H. Kim and J. W. Choi, Application of friction stir welding processes for aluminum alloy boat, Journal of KWJS, 2012, 30-2, pp31-36
- [15] C. H. Kim, Y. N. An and H. S. Im, Laser welding of automotive aluminum alloys, Journal of KWJS, 2011, 29-4, pp21-26
- [16] K. Elangovan and V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, Materials and Design, 2008, 29, 362-373
- [17] L. Cui, X. Yang, G. Zhou, X. Xu and Z. Shen, Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints, Materials science and engineering A, 2012, 543, pp58-68
- [18] Y. Zhao, L. Zhou, Q. Wang, K. Yan and J. Zou, Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding, Material and design, 2014, 57, pp146-155
- [19] L. Cui, X. Yang, Y. Xie, X. Hou and Y. Song, Process parameter influence on defects and tensile properties of friction stir welded T-joints on AA6061-T4 sheets, 2013, 51, pp161-174
- [20] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee and S. B. Jung, Spot friction stir welding of 5052 al alloy, KWJS, 2005, 44, pp235-237
- [21] D. M. Kang, J. S. Jang, K. D. Park and D. Y. Lee, The joints characteristics of al 5052 aluminium alloy in friction stir welds, Journal of korean society for power system engineering, 2016, 20-3, pp51-56
- [22] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung and K. Song, Joint

- characteristics of spot friction stir welded al 5052 alloy sheet, Journal of KWJS, 2006, 24, pp71-76
- [23] R&B : Etchant List, www.randb.co.kr
- [24] Y. Zhao, L. Zhou, Q. Wang, K. Yan, J. Zou, Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding, Materials and Design, 2014, 57, pp146-155
- [25] W. B. Lee, S. W. Kim, C. Y. Lee, Y. M. Yeon, W. S. Chang, C. C. Shur and S. B. Jung, Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy, Journal of KWJS, 2004, 22, pp69-76
- [26] Y. M. Yeon, W. B. Lee, C. Y. Lee, S. B. Jung and K. Song, Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet, Journal of KWJS, 2006, 24, pp71-76
- [27] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu and B. Zou, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, Materials and Design, 2011, 32, pp4461-4470
- [28] Y. Yan, D. T. Zhang, Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum and AZ31 magnesium alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20, pp619-623
- [29] 용접접합편람 3편 공정 및 열가공, 대한용접접합학회, pp.7-63
- [30] 용접접합편람 1편 철강 및 비철재료, 대한용접접합학회, pp.3-295
- [31] SAAB : <https://www.ssab.com/products/brands/armox/armox-600t>
- [32] SAAB : <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net>
- [33] Se won Sohn, Sung hee Hong. (2002). 방탄소재의 연구동향 및 방탄헬멧 개발. 한국정밀공학회지, 19(7), 7-19.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 세심히 지도해주시고 격려해주신 방한서 교수님께 감사드립니다. 항상 제자들을 걱정해주시고, 저에게 새로운 길을 경험하게 해 주신 것에 대해서 항상 감사히 여기겠습니다.

그리고 본 논문의 검토와 세심한 조언으로 체계를 잡아주신 방희선 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 항상 바쁘신데도 제자들을 위해서 애쓰시는 모습을 보며 많은 것들을 느꼈고, 힘들고 어려움을 겪을 때마다 많은 격려를 해주신 점 말로 표현하지 못 할 감사함을 느낍니다. 또 논문이 완성되어 오늘에 이르기까지 항상 자기 일처럼 도와 주셨던 모든 대학원생 여러분들께도 마음속 깊이 감사드립니다.

지난 대학원 생활을 돌이켜 보면 직장을 다니면서 학업을 마쳐야 되는 상황에서 정말 힘들고 포기하고 싶은 적도 많았지만 오늘에 이르러 생각해보면 정말 값진 시간이었다고 또한 저 자신을 돌아보게 되는 계기가 되었던 것 같고 뿌듯함을 느낍니다.

앞으로 살아가면서 힘들거나 포기하고 싶은 때가 오면 오늘의 이 순간을 기억하여 더 밝은 앞날을 위해 나아갈 것을 다짐하며 살아가겠습니다.
감사합니다.

2018년 6월

국 방 호 올림