



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2016년 8월

석사학위 논문

이종재료 스테인리스강(STS304)
/ 연강(SS400)의 GTAW용접
특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

이 훈 영

이종재료 스테인리스강(STS304)
/ 연강(SS400)의 GTAW용접
특성에 관한 연구

A Study on the Welding Characteristic of
Dissimilar Materials(STS304/SS400) by GTAW

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

이 훈 영

이종재료 스테인리스강(STS304)
/ 연강(SS400)의 GTAW용접
특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

이 훈 영

이훈영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 방 한 서 (인)

위 원 조선대학교 교 수 방 희 선 (인)

위 원 조선대학교 교 수 주 성 민 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

목 차

| | |
|-----------------------|-----|
| List of Figures | III |
| List of Tables | V |
| Abstract | VI |

1장. 서 론

| | |
|-----------------------|---|
| 1 . 1 연구배경 및 목적 | 1 |
| 1 . 2 연구동향 | 3 |
| 1 . 3 연구내용 | 4 |

2장. 이론적 배경

| | |
|-------------------------------|----|
| 2 . 1 GTAW 용접프로세스 개요 | 5 |
| 2.1.1 GTAW의 원리 | 5 |
| 2.1.2 용접의 아크 특성 | 6 |
| 2.1.3 극성에 따른 특성 | 10 |
| 2 . 2 스테인리스강-연강의 용접부 특성 | 11 |

3장. 실험 방법

| | |
|------------------------------|----|
| 3 . 1 재료 및 장비 | 13 |
| 3 . 2 용접 조건 | 17 |
| 3 . 3 기계적 성능 및 금속학적 특성 | 19 |
| 3.3.1 인장 시험 | 19 |

| | |
|---|----|
| 3.3.2 경도 시험 | 20 |
| 3.3.2 마크로 및 마이크로 조직 분석 | 21 |
| | |
| 4장. 결과 및 고찰 | |
| 4 . 1 인장 강도 특성 | 22 |
| 4.1.1 동종재 스테인리스강(STS304) | 22 |
| 4.1.2 동종재 연강(SS400) | 24 |
| 4.1.3 이종재 스테인리스강-연강(STS304-SS400) | 26 |
| 4 . 2 경도 특성 | 29 |
| 4.2.1 동종재 스테인리스강(STS304) | 29 |
| 4.2.2 동종재 연강(SS400) | 31 |
| 4.2.3 이종재 스테인리스강-연강(STS304-SS400) | 33 |
| 4 . 3 미세조직 특성 | 35 |
| | |
| 5장. 결 론 | 37 |
| | |
| 참고문헌 | 39 |

List of Figures

| | | |
|---------|---|----|
| Fig 2.1 | Gas Tungsten Arc Welding | 5 |
| Fig 2.2 | Steady-state voltage-current characteristic of a discharge at about 100N/m ² , showing order of magnitude values | 6 |
| Fig 2.3 | Voltage along arc axis : The voltage along arc axis is divided into three regions; the anode voltage drop, the cathode voltage drop, and column | 7 |
| Fig 2.4 | Voltage-current characteristic for welding arc | 8 |
| Fig 2.5 | Relation arc length and arc voltage by shield gases | 9 |
| Fig 3.1 | Experiment material | 14 |
| Fig 3.2 | TIG welding machine | 15 |
| Fig 3.3 | Tensile test machine and specimen dimensions for tensile test | 19 |
| Fig 3.4 | Vickers hardness test machine | 20 |
| Fig 3.5 | Optical microscope | 21 |
| Fig 4.1 | Stress-strain curve of STS304-2 | 23 |
| Fig 4.2 | Tensile fracture surface of STS304 | 24 |
| Fig 4.3 | Stress-strain curve of SS400-1 | 25 |
| Fig 4.4 | Tensile fracture surface of SS400 | 26 |
| Fig 4.5 | Stress-strain curve of STS304-SS400-1 | 27 |
| Fig 4.6 | Tensile fracture surface of STS304-SS400 | 28 |
| Fig 4.7 | Micro vickers hardness for STS304 | 30 |

Fig 4.8 Micro vickers hardness for SS400 32

Fig 4.9 Micro vickers hardness for STS304-SS400 34

Fig 4.10 Micro-structure of specimen 36

List of Table

| | | |
|-----------|---|----|
| Table 2.1 | Polarity | 10 |
| Table 3.1 | Chemical composition of STS304 and SS400 | 13 |
| Table 3.2 | Mechanical properties of STS304 and SS400 | 13 |
| Table 3.3 | Specifications of 500LT | 16 |
| Table 3.4 | Welding wire specifications | 17 |
| Table 3.5 | TIG welding condition | 18 |
| Table 4.1 | Result of tensile test for STS304 | 23 |
| Table 4.2 | Result of tensile test for SS400 | 25 |
| Table 4.3 | Result of tensile test for STS304-SS400 | 27 |
| Table 4.4 | Mean value of tensile test | 28 |

ABSTRACT

A Study on the Welding Characteristic of Dissimilar Materials(STS304/SS400) by GTAW

Hun-yeong Lee

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

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

There is a growing application of non-ferrous materials in terms of development of engineering technology, diversification of the material environment and cost reduction.

However, by welding of the same metal it may not be able to meet the change of the material. Therefore, study of the dissimilar metal welding is required.

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) is a welding that melts the basic metal and filler metal by generating tungsten electrodes and arc among inert gas atmospheres and using arc heat. GTAW process becomes necessary in various industries such as plant and ship because it can obtain high quality welding and demanding is increasing.

In this research the experiment was made by classifying material into the same(STS304+STS304, SS400+SS400) and different(STS304+SS400) kind with choosing a cold strip stainless steel sheet(STS304) and a general structural rolled steel material(SS400).

Under welding condition of 12~16V, 115~180A, picking a test piece was performed by Gas Tungsten Arc Welding using $\Phi 2.4\text{mm}$ TIG wire.

Using mechanical properties through tensile test and hardness test, results about the same and different material are followed below:

- 1) Welding the different metal STS304 and SS400 was successful, and the expansion experiment by Gas Tungsten Arc Welding brought about the cutting face in tensile test is shown in the region of HAZ(Heat affected zone) of SS400.
- 2) Hardness was the highest in welded metal of STS304+SS400 and hardness of STS400 HAZ was higher than SS400.
- 3) STS304 and SS400 will be profited from considering mechanical property and price with use condition.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

용접은 두 개 이상의 재료에 외력 또는 열을 가하여 용접부위에서 재료를 접합하는 것으로 이음형상과 구조가 단순하고 재료가 절약되며 공정절차를 감소할 수 있고 생산성을 높일 수 있으며 기밀성을 확보할 수 있다. 최근에는 용접대상의 재료가 금속 재료 뿐만 아니라 세라믹 등 무기재료와 플라스틱 등의 유기재료까지 확장되었고 이종 재료 간의 용접 등 적용분야가 확대되고 있다.[1]

스테인리스강은 탄소강에 다량의 크롬(Cr)을 함유한 강으로 강의 성분 중에 Cr이 공기 중의 산소와 반응하여 강의 표면에 매우 얇고 연속적이고 안정한 크롬산화물 필름(30~50Å 두께의 부동태 피막)을 형성하여 강의 표면을 부동태화 함으로써 화학반응으로부터 보호해 준다. 이렇듯 내식성이 우수한 스테인리스강은 일반 탄소강이나 알루미늄 재에 비하여 도장과 같은 방청처리가 필요하지 않아 스푼, 나이프 및 일용품과 화학공업용 기계설비, 위생기기 등에 많이 사용되는 금속이다.[4]

스테인리스강은 화학성분상 Ni의 함유 유무에 따라 크게 Fe-Cr계 또는 Fe-Cr-Ni계로 대분류되며, 화학성분 변화에 따라 페라이트(Ferrite), 마르텐사이트(Martensite), 오스테나이트(Austenite), 2상(Duplex) 및 석출경화(Precipitation Hardening) 등으로 분류할 수 있다.[4]

현재 대부분 구조물 제작 이음 용접에는 동종 재료가 사용이 되고 있는 실정이다. 하지만 제품의 경제성 향상과 대량 생산, 원가절감 및 작업공정 단축 등을 위하여 이종재 용접의 적용에 대한 중요성이 부각되고 있다. 하지만 이종재의 용접에 경우 각 재료의 열전도, 열팽창 계수 등의 물성치가 다를 뿐만 아니라 용융점도 다르기 때문에 용접 시 용접 결함 및 금속간화합물(Intermetallic compound, IMC) 등의 발생에 의하여 건전한 접합부를 갖기 힘들다. 또한 동종재 용접으로는 제품의

성능(물리적, 화학적, 기계적)을 충족시키기 불가능한 경우가 발생할 수 있으므로 경도, 강도가 요구되는 구조물이나, 내마모성, 내식성이 요구되는 플랜트 제작 시, 이종 재료 용접방법에 대하여 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)의 장점은 아크 안정성이 높고 용접부의 품질이 우수하고, 스테인리스강 등의 고합금강, Al 및 Al합금 소재인 고압가스 압력 용기, Ni 및 Ni합금을 사용하는 원자력 노즐 및 튜브, Ti, Zr, Ta 등과 같은 활성이 강한 재료용접에 적용 가능하다.[6] 그렇기 때문에 GTAW 용접절차를 냉간 압연 스테인리스강판(STS304)과 일반 구조용 압연강판(SS400)소재의 이종 재료 용접방법에 적용한다면 건전한 용접부를 가질 수 있을 것이라고 판단하였다.

본 연구는 이종재인 냉간 압연 스테인리스 강(STS304)과 일반 구조용 압연강(SS400) 소재를 사용하여 GTAW 용접절차로 용접 후 용접부 기계적 성질 및 용접성을 알아보하고자 한다. 또한 동종재(STS304+STS304, SS400+SS400)의 용접부와 비교하여 기계적 성질 및 용접성을 평가하고자 한다.

1.2 연구동향

이종 금속의 용접에 관한 연구는 서구 및 일본 등지에서 석유 화학 공업이나 발전소 등을 중심으로 활발히 진행되어 용접 시 발생하는 많은 제반 문제에 대한 이론적인 해석과 기술 개발이 이루어져 왔으나 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지고 있는 않는 상황이다. 용접에 대상이 되는 이종 금속재료로는 Ferrite Steels, 스테인리스강, 알루미늄, 구리, 니켈 등이 이용되고 있다.[7]

또한 저항 용접과 마찰 용접에 의한 이종재의 결합 특성에 관한 연구 결과[8,9]와 Overlay용접부의 Disbonding에 관한 연구[10] 결과가 보고되었으며 여러 가지 용접법이 시도되고 있다. 그러나 연강과 스테인리스강의 이종금속 용접 시 용융점, 열팽창 계수, 비중 및 열전도의 차이와 희석에 따른 용착 금속부의 조성변화, 금속학적 성질 변화 등의 문제점이 발생된다.[11]

이종 금속의 용접 기술의 개발 및 실용화에 야기되는 가장 큰 문제가 용접금속이 기계 구조물 등에 사용될 경우 파괴와 관련된 강도이며, 균일 재료의 파괴 거동(취성파괴, 피로파괴, 환경파괴 등)은 탄성학적으로 해석되어 왔다. 이 해석 결과는 파괴를 미연에 방지하기 위하여 설계에도 적용되어졌으며, 또한 체계화된 파괴 역학을 이종 금속 용접재의 파괴 거동 해석이나, 강도 설계에 적용시켜 보자는 시도는 일찍부터 이루어져 왔었다.[12,13,14] 그러나 이종 금속 용접 시 발생하는 파괴 거동에 대하여는 탄성학적 해석상의 난점이 있는 것이 현실이다.[15]

1.3 연구내용

동종 및 이종 재료의 용접시험편을 제작 후 KS규격 등에 입각하여, 성능시험(인장강도, 경도) 및 조직검사를 수행하였다. 이를 통하여 기계적 성질 및 용접성의 타당성을 확인해보고자 한다.

- 1) 동일한 용접조건으로 TIG용접기를 사용하여 동종 재료의 용접 시험편 및 이종 재료의 용접시험편을 제작하였다.
- 2) 제작된 동종 및 이종 재료의 용접 시험편을 K.S규격에 입각하여 가공 후 용접부의 성능평가(인장 및 경도)를 수행하였다.
- 3) 단면시험용 시험편을 가공 후 용접부(용접금속부, 열영향부 및 모재부)의 조직사진을 확인하였다.
- 4) 실험결과를 통해 동종 및 이종 재료의 용접성을 비교하여 산업 현장에 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 GTAW 용접프로세스 개요

2.1.1 GTAW의 원리

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)은 Fig.2.1과 같이 용접부 주위에 He, Ar 등과 같은 불활성가스를 보호가스로 사용하면서 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 접합하는 용접법을 말한다. 보호가스로는 모재와 전극의 산화를 방지하기 위하여 불활성가스인 He이나 Ar 등을 사용한다. 이 용접법은 모든 용접자세에 적용할 수 있으므로, 아크가 매우 안정되고 용접부 품질이 우수하므로 산화나 질화 등에 민감한 재료의 용접에도 사용된다. 그러나 다른 용접법에 비하여 용접속도가 느리므로 생산성이 낮다.[16]



Fig. 2.1 Gas Tungsten Arc Welding

2.1.2 용접의 아크 특성

(1) 아크 방전 현상

특별한 경우를 제외하고 아크와 외부전기 회로사이에는 전극이 존재하며, 전류는 전극을 매개로 하여 기체와 전기회로 사이를 흐르게 된다. 용접 아크의 경우 전극은 탄소이거나 금속이며, 고체이거나 액체인 경우도 있다. 부(-)전극을 음극이라고 하며, 음극으로부터 전자를 가스 중에 방출 시킨다. 반면에 양(+전극을 양극이라고 한다.[17]

저기압 가스가 들어있는 방전관 중에서 접촉된 2개의 전기도체에 전류를 흐르게 하고, 약간의 간격을 띄우게 되면 Fig. 2.2와 같이 도체 사이에 방전 현상이 발생한다. 이 아크방전은 다른 방전에 비해 저전압, 대전류 아크로 큰 에너지로 금속을 용융시키는 용접열원으로 취급이 용이한 특징이 있다.[18]

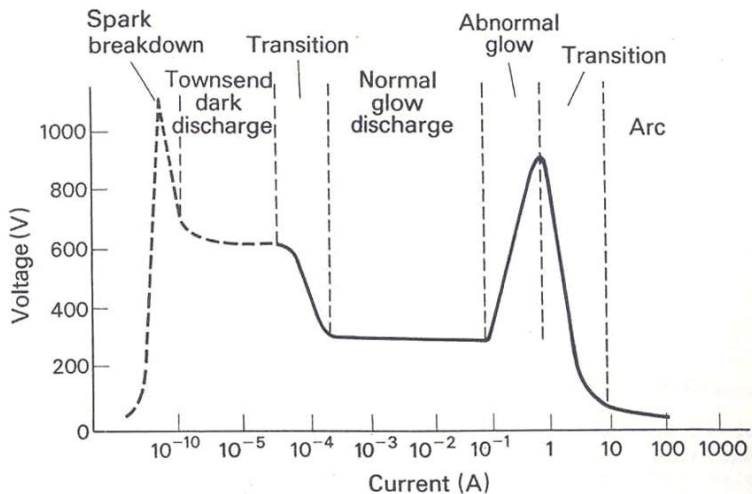


Fig. 2.2 Steady-state voltage-current characteristic of a discharge at about 100 N/m^2 , showing order of magnitude values

아크는 기체 중 또는 전극으로부터의 증기 중에서 전극사이의 방전이다. 아크 방전을 상세하게 관찰하면 그 구조와 전압분포는 Fig. 2.3과 같이 나타낼 수 있고, 음극과 양극의 아주 좁은 범위(음극에서는 약 0.01mm 이하)에 전압강하 영역이 존재한다. 그 사이에는 아크 기둥 강하 영역이라는 비교적 전기 저항이 작은 부분이 있다. 아크 전압이라고 하는 것은 양극 강하 전압, 아크 기둥강하 전압, 그리고 음극 강하 전압의 합으로 나타낼 수 있다.[19]

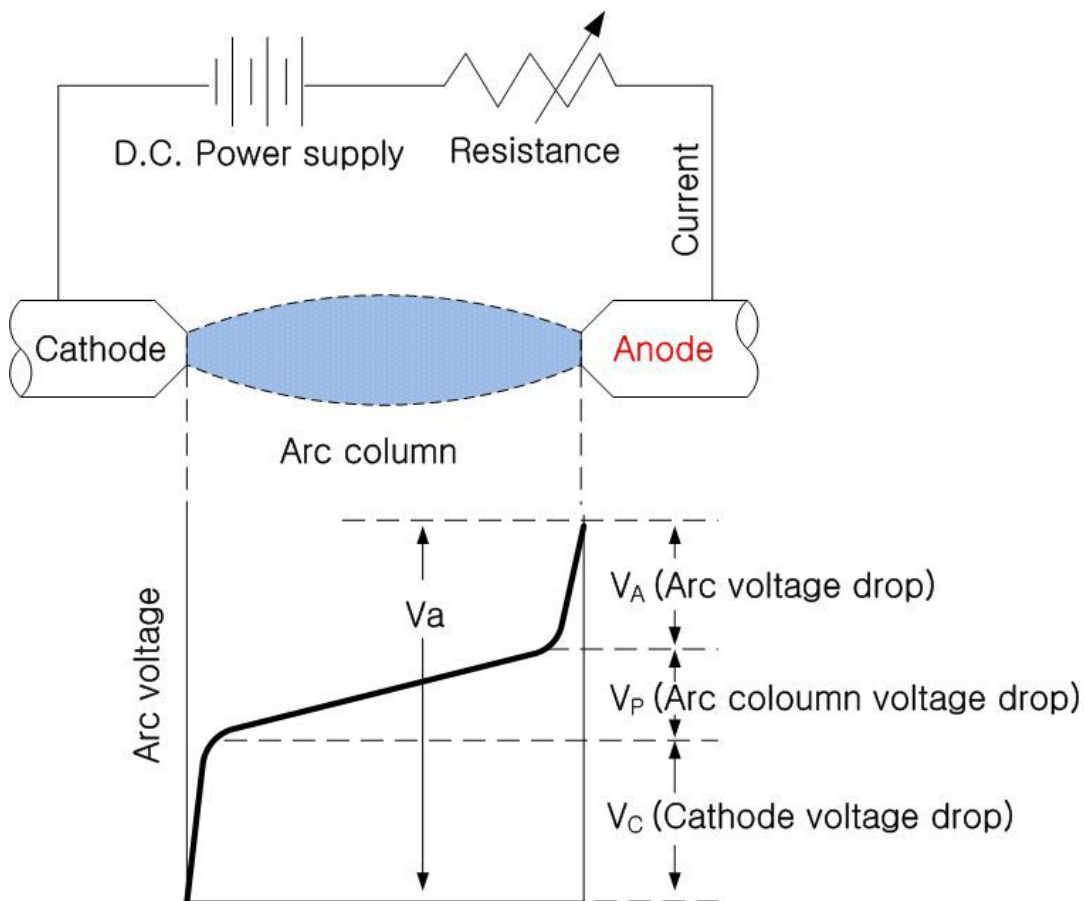


Fig. 2.3 Voltage along arc axis : The voltage along arc axis is divided into three regions; the anode voltage drop, the cathode voltage drop, and arc column

(2) 아크 전압과 전류 특성

Fig. 2.4는 아크 방정을 TIG 용접에 대한 전류와 전압특성을 조사한 것이다. 수냉 동판과 텅스텐 전극을 일정한 거리만을 띄어서 Ar가스 분위기 중에서 아크방전을 시키면 Fig. 2.3과 같은 곡선이 얻어진다.[20]

전류가 높은 영역에서는 전압이 서서히 증가하고 전류가 낮은 영역에서는 전압이 급격하게 강하하는 특성을 나타낸다. 실제 용접에서는 상승특성 영역조건을 사용하는 경우가 많지만 이 아크 특성 곡선은 아크가 소비되는 에너지의 특성을 의미한다.

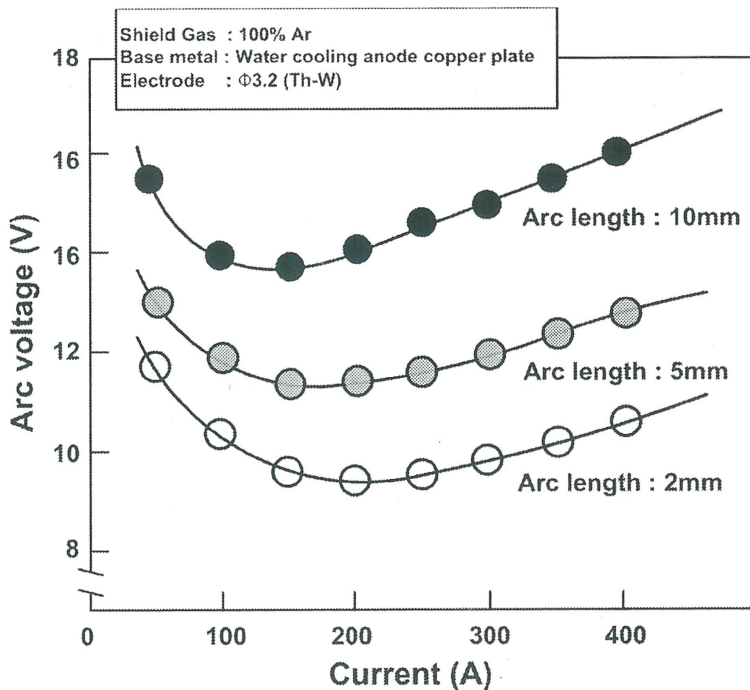


Fig. 2.4 Voltage-current characteristic for welding arc

전류를 일정하게 하고 아크 길이와 전압 관계를 조사하면 Fig. 2.5와 같은 곡선을 보이게 된다. 아크 길이와 전압은 거의 비례관계로 증가하며, 전압을 높인다는 것은 아크 길이를 길게 한다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 2.4에서 보호가스를 He가스와 Ar가스로 사용한 경우 아크 길이와 전압의 관계도 나타내고 있다. 동일한 아크 길이에서도 보호가스를 무엇을 사용하는가에 따라 아크 전압이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 실제 용접에 있어서도 보호가스마다 적정 전압이 달라진다는 것을 나타내고 있다.[20]

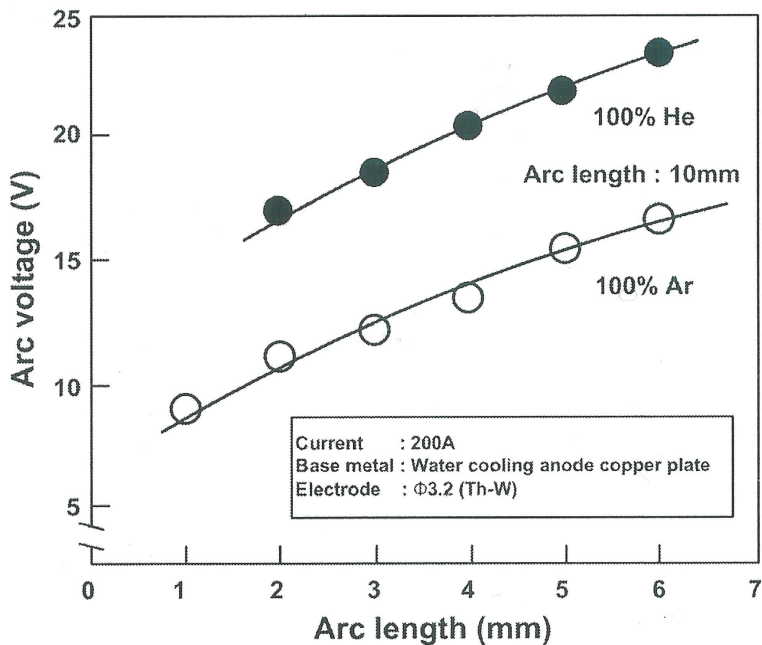
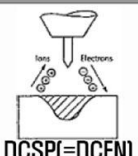

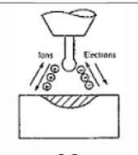


Fig. 2.5 Relation arc length and arc voltage by shield gases

2.1.3 극성에 따른 특성

극성은 용접전원에서 나오는 양과 음의 단자가 전극과 모재 중 어디에 연결되는가에 의해 정해지는 특성이며 정극성(Direct Current Straight Polarity, DCSP 또는 Direct Current Electrode Negative, DCEN), 역극성(Direct Current Reverse Polarity, DCRP 또는 Direct Current Electrode Positive, DCEP), 및 교류(Alternating Current, AC)의 3가지가 있다. 극성에 따라 아크특성 및 용융특성이 달라진다. Table 2.1은 비소모성 전극을 사용하는 GTAW와 소모성 전극을 사용하는 GMAW에 있어서 극성에 따른 특성을 나타내었다.[16]

Table. 2.1 Polarity

| Polarity | GTAW | GMAW, SMAW |
|--|--|---|
|  <p>DCSP(=DCEN)</p> | 30% heat generation at electrode 70% heat generation at workpiece deep penetration narrow bead width no cleaning effect commonly used | higher melting rate reduced penetration seldom used (some use in surfacing application) |
|  <p>DCRP(=DCEP)</p> | 70% heat generation at electrode 30% heat generation at workpiece shallow penetration wide bead width strong cleaning effect | stable arc smooth metal transfer deep penetration low spatter good weld bead commonly used |
|  <p>AC</p> | 50% heat generation at electrode 50% heat generation at workpiece medium penetration medium bead width cleaning every half cycle | unstable arc no arc blow low cost of power sources larger electrodes and higher current for SMAW seldom used for GMAW |

2.2 스테인리스강/연강의 용접부 특성

스테인리스강은 화학성분 변화에 따라 Ferrite계, Martensite계, Austenite계로 분류되며 스테인리스강은 구조용 탄소강과는 상당히 다른 물리적 성질을 가지고 있다. 대표적인 차이점으로는 열전도가 연강에 비하여 작고(연강의 약 $\frac{1}{3}$), 열팽창 계수는 Austenite계에서는 연강보다 약 1.5배 크며 Martensite계와 Ferrite계에서는 연강과 거의 같다. 이와 같은 차이점 때문에 용접후의 냉각속도는 연강의 경우보다 완만하지만, Austenite계에서는 용접에 의한 변형이 연강보다 대단히 크다.

용접부재는 야금학적으로 접합되며, 용착 금속에는 집중적으로 열이 공급된다. 특히, 급격한 용접 입열에 의하여 열영향부(Heat affected zone) 및 용접 금속부(Welded metal)의 조직이나 조성은 모재의 용해상태로부터 합금성분의 변화 및 합금 합금성분의 산화에 의한 증발에 따라 모재와 전혀 다르다고 밝혀졌다. 용접 직후 용접선에서 조금 떨어진 위치에서는 비교적 낮은 열전도 상태가 되며 이 부위의 온도는 약 800℃정도가 된다. 재료 강도 특성으로는 탄성계수, 항복 응력이 온도의 하강에 따라 상승되며 냉각과정 중 변형, 응력 등이 발생된다. 이때 1500℃전후 온도 직후에는 어느 값 이상 변형을 받으면 결정 입계에 용접 결함인 고온 크랙이 발생한다.

STS304조직은 열영향부에서 Martensite조직이 형성되며 Austenite조직은 감소하는 경향이 있다. 이러한 조직변화는 내식성 및 기계적 성질 등에 미치는 영향이 크다. 용접부의 부위조직 변화에 따른 내식성 및 기계적 성질의 둔화는 열처리에 의하여 회복시킬 수 있다. 1000℃부근에서 가열 후 급냉하면 내식성 및 인성이 양호하게 된다. 그러나 800℃부근의 가열은 항복강도 및 경도 등 기계적 성질을 변화시키며 내식성 및 인성 등에 악영향을 주므로 주의를 요한다. 경우에 따라서는 용접부에 생기는 문제들을 해결하기 위하여 용접 후 열처리를 해야 할 필요가 있다. 용접 후 열처리를 해야 할 경우 아래와 같은 상황을 고려하여 한다.[4]

- 1) 고용화 열처리 : 1050~1100℃로 가열하여 모재두께 1Inch당 1Hour 유지 후 수냉 또는 공냉하는 것으로 원칙적으로는 가혹한 부식환경에서 사용되는 경우, 장시간의 열을 받아 취화물, 탄화물이 석출된 것. 냉각에 의해 심하게 경화한 것 등에 한하여 적용한다.
- 2) 안정화 열처리 : 850~930℃ 가열 후 모재 두께 1Inch 당 2Hour 유지 후 공냉한다.
- 3) 응력제거 열처리 : 820~870℃ 가열 후 모재 두께 1Inch당 1Hour 유지 후 공냉 하는 것으로 저탄소 및 안정화 Austenite계 스테인리스강에 있어서 잔류 응력이 크게 나쁜 영향을 미칠 경우에만 적용되며 이종재료 용접부에는 적용하지 않는 것이 좋다.
- 4) 치수 안정화 열처리 : 보통 550℃이하로 가열 후 공냉하는 것으로 사용 중에 변형될 우려가 있을 경우에 실시하는 것으로 저탄소 또는 안정화 Austenite계 스테인리스강에서는 600~850℃에서 작업하는 것이 좋다.

제 3 장 실험 방법

3.1 재료 및 장비

시험 재료는 발전설비 중의 하나인 열교환기(Heat Exchanger) 제작 시 많이 사용되는 우수한 내열성과 내식성을 가지고 있으며 저온 및 고온에서 양호한 가공성과 기계적 성질 등을 가지고 있는 냉간압연 스테인리스강(STS304) 과 선박, 차량 등 모든 분야에 널리 사용되며 상대적으로 스테인리스강 보다 저렴한 연강(SS400)을 선정하여 동종재(STS304+STS304, SS400+SS400)의 용접부와 이종재(STS304-SS400)의 용접부의 성능의 차이를 밝혀서 작업환경 및 상황에 맞게 적용하는 것이 목적이다. 각 시험편으로 선정한 재료의 일반적인 화학적, 기계적 성질은 Table. 3.1과 Table. 3.2와 같다.

Table. 3.1 Chemical composition of STS304 and SS400

| STS304 | | | | | SS400 | | | | | | | |
|----------------------|-------|------|------|-------|---------------------------------|-------|------|------|------|-----|---------|------|
| chemical composition | | | | | chemical composition(austenite) | | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
| 0.067 | 0.411 | 1.00 | 0.32 | 0.007 | ≤0.12 | ≤0.50 | ≤0.6 | 0.03 | 0.03 | 0.6 | 1.5~13. | 0.60 |

Table. 3.2 Mechanical properties of STS304 and SS400

| Material | Yield strength (kgf/cm ²) | Tensile strength (kgf/cm ²) | Elongation (%) |
|----------|---------------------------------------|---|----------------|
| STS304 | 2,090 | 5,302 | 40 |
| SS400 | 2,498 | 4,078 | 17 |

Fig. 3.1은 시험편을 나타낸 것이다. 하얗게(위쪽) 보이는 재료는 STS304이며 검게(아래쪽) 보이는 재료는 SS400을 나타낸 것이다. 준비된 시험편의 크기는 T3 x 100mm x 150mm를 사용 하였다.

준비된 시험편에 사용되는 GTAW 용접장비는 Fig. 3.2와 같이 WORLDWEL사의 500LT모델을 사용하였다. 500LT모델은 조선 및 플랜트 산업 현장에서 많이 사용되는 TIG용접기 중 하나로 디지털 디스플레이로 용접 중 용접 전류의 확인이 용이하며 원격 조절기 부착이 가능하다는 장점을 갖고 있다.

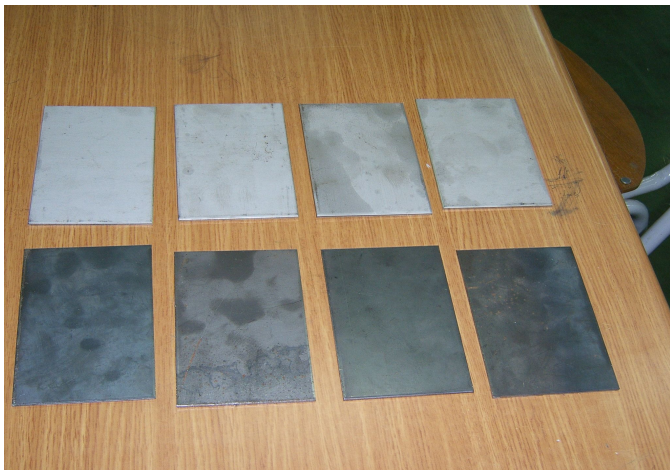


Fig. 3.1 Experiment material

준비된 시험편에 사용되는 GTAW 용접장비는 Fig. 3.2와 같이 WORLDWEL사의 500LT모형을 사용하였다. 500LT모형은 조선 및 플랜트 산업 현장에서 많이 사용되는 수냉식 인버터 DC TIG용접기 중 하나로 디지털 디스플레이로 용접 중 용접 전류의 확인이 용이하며 원격 조절기 부착이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 해당용접기의 사양은 Table. 3.3에 상세하게 나타 내었다.



Fig. 3.2 TIG welding machine

Table. 3.3 Specifications of 500LT

| Division | Specifications |
|-----------------------------|-----------------|
| Rated input voltage (V) | 380 |
| Rated output voltage (A) | 500 |
| Rated input (KVA) | 22 |
| Output current range (A) | 15~500 |
| Output voltage (V) | 28 |
| Crater current (A) | 10~500 |
| Pulse current (A) | 10~150 |
| Rated utilization (%) | 60 |
| Body(WxDxH) (mm) | 365 x 705 x 575 |
| Body weight (ton) | 0.051 |

3.2 용접 조건

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400)의 용접의 용접 조건을 바탕으로 이종재(STS304-SS400)의 용접을 Table. 3.5와 같이 용접전압 12~16V, 용접전류 115~180A, 용접속도는 분당 150~200mm로 동일한 조건으로 준비된 Tig용접기를 사용하여 용접을 진행하였다. 용접 시 사용된 보호 가스는 헬륨(He) 보다 열의 발생이 적고 아크의 안전성이 좋은 아르곤(Ar)가스이며 용가재의 크기는 $\phi 2.4$ 이다. 용접작업성 향상과 원활한 용착금속의 용입을 위해 개선가공 각도를 30° 로 하였다. Table. 3.2와 같이 용가재는 AWS(American Welding Society) 규격에 맞춰 현대중합금속사의 ST-50.6, ST-308, ST-309를 준비하여 용접을 진행 하였다.

Table. 3.4 Welding wire specifications

| 용접 시편 | 용접봉 규격 | | 화학적 성분 (%) | | | | |
|---------------|-----------------|----------------|------------|------|------|------|------|
| | AWS 규격 | 적용용접봉 (현대중합금속) | C | Si | Mn | Ni | Cr |
| SS400+SS400 | A5.18 ER7S-6 | ST-50.6 | 0.07 | 0.68 | 1.29 | | |
| STS304+STS304 | A5.9 ER308 | ST-308 | 0.05 | 0.38 | 1.75 | 10.1 | 19.8 |
| SS400+STS304 | A5.9 ER309 | ST-309 | 0.07 | 0.38 | 1.88 | 12.8 | 24.4 |

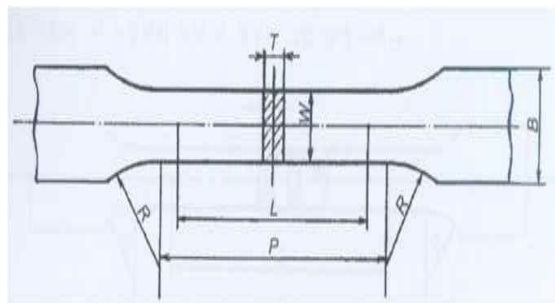
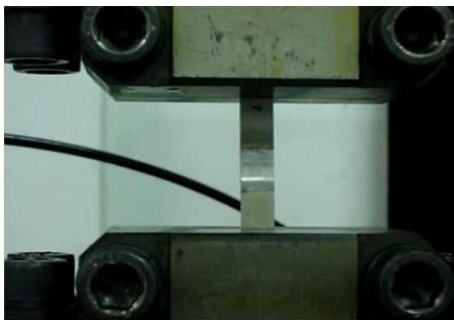
Table. 3.5 TIG welding condition

| Welding parameter | | Values | | |
|-------------------|--------------------------|-------------|---------------|--------------|
| | | SS400+SS400 | STS304+STS304 | SS400+STS304 |
| GTAW | 용접전압 (V) | 12~16 | 12~16 | 12~16 |
| | 용접전류 (A) | 115~180 | 115~180 | 115~180 |
| | 보호가스 | Ar | Ar | Ar |
| | 텅스텐전극경 (mm) | 2.4 | 2.4 | 2.4 |
| | 용접속도 (mm/min) | 150~200 | 150~200 | 150~200 |
| | Gap size (mm) | 2.4 | 2.4 | 2.4 |
| | Groove Angle (deg) | 30' | 30' | 30' |

3.3 기계적 성능 및 금속학적 특성

3.3.1 인장 시험

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400) 및 이종재(STS304+SS400)의 용접 접합부의 용접성 및 기계적 성능을 알아보기 위해 인장강도 측정은 SHIMADZU사 EHF-EG200JN-40L 유압식을 사용하였으며, WIN SERVO 프로그램을 사용하였다. 인장시험편은 금속재료 인장 시험편 규격인 KS B 0801에 따라 13A호 규격을 사용하여 Load Speed 0.033333mm/sec로 시험하였다. Fig. 3.2는 시험에 사용된 장비와 시편의 규격을 나타내었다.[21]



(단위 : mm)

| 시험편의 구 별 | 나 비 W | 표점거리 L | 평행부의길이 P | 어깨의 반지름 R | 물림부의 폭 B |
|----------|-------|--------|----------|-----------|----------|
| 13A | 20 | 80 | 약 120 | 20~30 | - |
| 13B | 12.5 | 50 | 약 60 | 20~30 | 20 이상 |

Fig. 3.3 Tensile test machine and specimen dimensions for tensile test

3.3.2 경도 시험

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400) 및 이종재(STS304+SS400)의 용접 접합부의 경도 측정은 Akashi사의 모델 HM-112의 비커스 경도 시험기로 현미경 배율은 $\times 50$ 이며, 135° 다이아몬드 피라미드 입자를 사용하여 용접방향에 수직인 단면을 절단하여 미세연마 후 에칭을 실시한 후 하중시간 10sec, 하중 500gf 조건으로 상부표면으로부터 0.2mm, 1.5mm, 2.6mm 지점에서 용접부로부터 1.0mm씩 등간격으로 경도를 측정하였다. Fig. 3.3은 시험에 사용된 장비를 나타낸 것이다.



Fig. 3.4 Vickers hardness test machine

3.3.3 마크로 및 마이크로조직 분석

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400) 및 이종재(STS304+SS400)의 용접 접합부의 결함과 미세조직 관찰을 위하여 접합한 소재의 접합부를 절단한 후 마운팅(Mounting)하여 #200~#2000의 Emery paper를 이용하여 연마 후 0.2 μ m의 Alumina 단계까지 경면 연마를 시행한 후 접합시험편의 미세조직을 파악하기 위해 접합부의 횡단면(Cross section)을 광학현미경(Optical Microscope)을 이용해 관찰하였다. 광학현미경을 통한 접합부의 조직을 관찰하기 위해 시편을 미세 연마 후 $\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ 에칭 후 증류수 세척하여 미세조직을 관찰하였다.

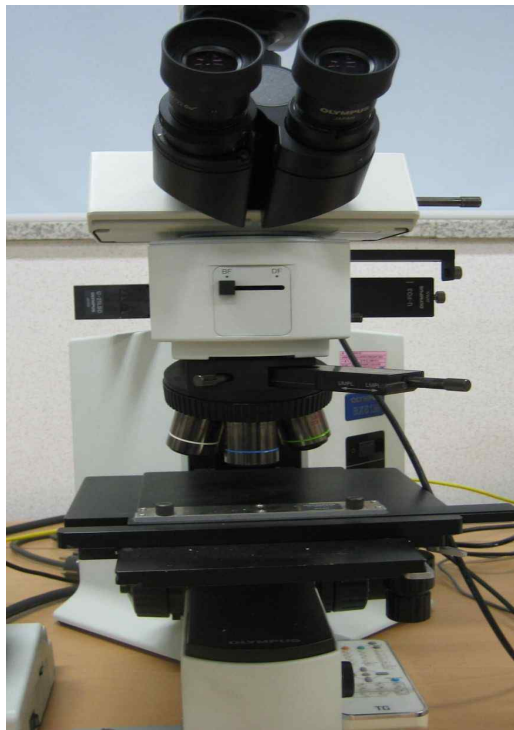


Fig. 3.5 Optical Microscope

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 인장 강도 특성

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400) 및 이종재(STS304+SS400) 용접 시험편을 각각 5개씩 준비하여 시험편의 양끝을 시험기에 고정시키고, 시험편의 축 방향에 당기는 힘을 작용시켜 파단되기까지의 변형과 주어진 힘을 측정하여 각 시험편의 변형에 대한 저항성의 크기를 알아 보았다.

4.1.1 동종재 스테인리스강(STS304)

동종재인 스테인리스강(STS304)의 용접 시험편 5개의 인장 시험값을 Table. 4.1에 나타냈다. 각 시험편의 평균 최대 인장강도는 $3511.43\text{kgf}/\text{cm}^2$, 연신율은 40.95%로 측정되었다. 인장 시험 결과, Fig. 4.1과 같이 STS304-2의 시험편에서 최대 인장강도 $3525.64\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 가장 높게 측정되었으며 이때의 항복강도는 $1891.35\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 측정되었고 연신율은 42.02%로 측정되었다.

Fig. 4.2는 인장 시험 결과 스테인리스강(STS304)의 파단면을 보여주는 그림이다. Fig. 4.2를 볼 때, 파단부분에서 네킹(Necking)현상이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 파단면이 입계파단이 된 것을 확인할 수 있었다. 이로써 연성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

Table. 4.1 Result of tensile test for STS304

| STS304 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 최대 인장강도 (kgf/cm ²) | 3517.32 | 3525.64 | 3519.21 | 3495.68 | 3499.32 |
| 항복강도 (kgf/cm ²) | 1977.25 | 1891.35 | 1763.25 | 1763.25 | 1835.29 |
| 항복점의 연신율 (%) | 1.83 | 1.79 | 1.65 | 1.69 | 1.87 |
| 파괴점의 연신율 (%) | 41.7 | 42.02 | 41.55 | 39.44 | 40.08 |

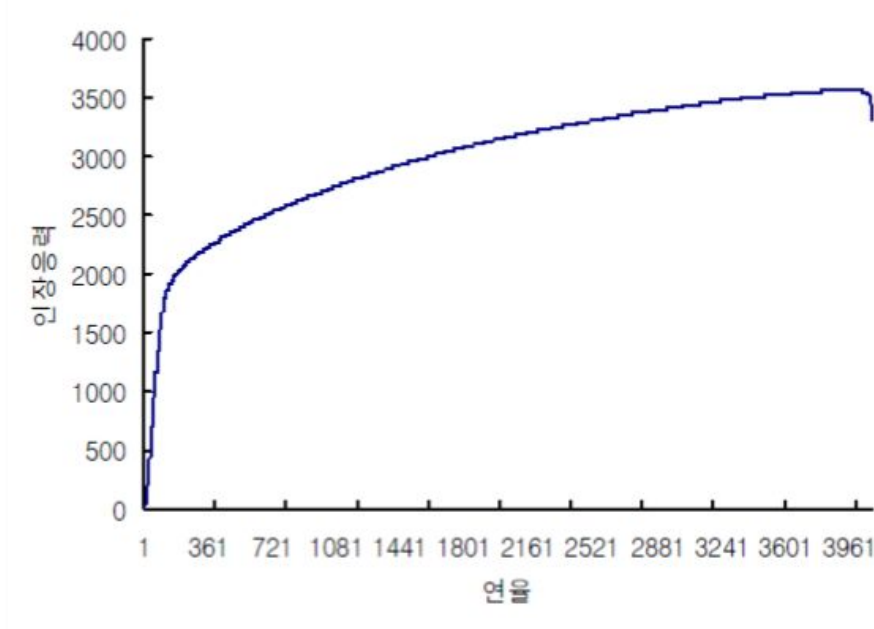


Fig. 4.1 Stress-strain curve of STS304-2

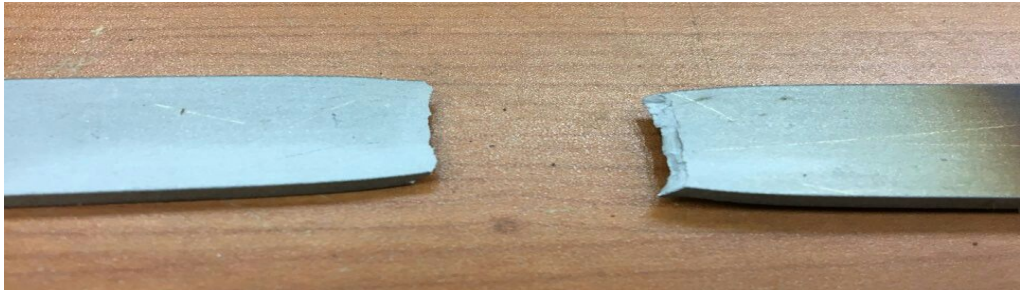


Fig. 4.2 Tensile fracture surface of STS304

4.1.2 동종재 연강(SS400)

동종재인 연강(STS304)의 용접 시험편 5개의 인장 시험값을 Table. 4.2에 나타냈다. 각 시험편의 평균 최대 인장강도는 2660.99kgf/cm^2 , 연신율은 18.95%로 측정된다. 인장 시험 결과, Fig. 4.3과 같이 SS400-1의 시험편에서 최대 인장강도 2765.21kgf/cm^2 로 가장 높게 측정되었으며 이때의 항복강도는 2141.00kgf/cm^2 로 측정되었고 연신율은 21.04%로 측정되었다.

Fig. 4.4는 인장 시험 결과 연강(SS400)의 파단면을 보여주는 그림이다. Fig. 4.4를 볼 때, 파단부분에서 네킹(Necking)현상이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 파단면이 입계파단이 된 것을 확인할 수 있었다. 이로써 연성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

Table. 4.2 Result of tensile test for SS400

| SS400 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 최대 인장강도 (kgf/cm ²) | 2765.21 | 2543.89 | 2654.17 | 2754.35 | 2587.34 |
| 항복강도 (kgf/cm ²) | 2141.00 | 1997.25 | 2009.53 | 2113.52 | 1999.48 |
| 항복점의 연신율 (%) | 1.42 | 1.38 | 1.41 | 1.40 | 1.39 |
| 파괴점의 연신율 (%) | 21.04 | 15.87 | 19.56 | 20.22 | 18.08 |

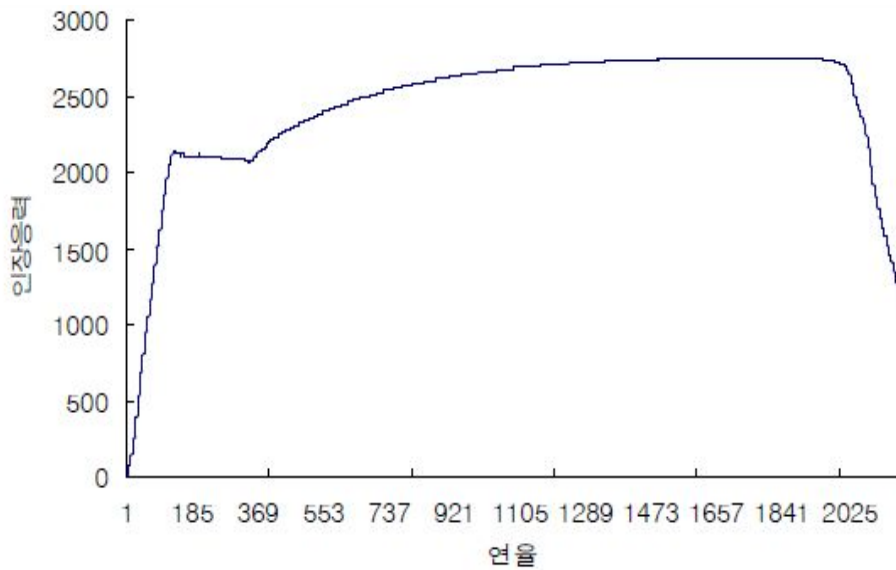


Fig. 4.3 Stress-strain curve of SS400-1



Fig. 4.4 Tensile fracture surface of SS400

4.1.3 이종재 스테인리스강-연강(STS304+SS400)

이종재인 스테인리스강과 연강(STS304+SS400)의 용접 시험편 5개의 인장 시험 값을 Table. 4.3에 나타냈다. 각 시험편의 평균 최대 인장강도는 2308.36kgf/cm^2 , 항복강도는 2104.92kgf/cm^2 , 연신율은 22.50%로 측정되다.

인장 시험 결과, Fig. 4.5과 같이 STS304-SS400-1의 시험편에서 최대 인장강도 2323.29kgf/cm^2 로 가장 높게 측정되었으며 이때의 항복강도는 2143.50kgf/cm^2 로 측정되었고 연신율은 23.75%로 측정되었다.

Fig. 4.6는 인장 시험 결과 이종재(SS304+SS400) 용접부의 파단면을 보여주는 그림이다. Fig. 4.6를 볼 때, 동종재(STS304, SS400)와 동일한 파단부분에서 네킹(Necking)현상이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 파단면이 입계파단이 된 것을 확인할 수 있었다. 이로써 연성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

이종재(STS304+SS400) 용접부의 시험편에서 최대 인장강도값 2308.36kgf/cm^2 는 상대적으로 강도가 낮은 연강의 최대 인장강도값인 2660.99kgf/cm^2 과 유사한 측정값이 나타났으며 이를 통하여 이종재를 GTAW 용접절차로 용접한 경우에도 기계적 성질인 인장강도는 적합하게 나타나는 것으로 판단할 수 있었다.

즉, 이종재 용접시험편에서의 파단부분은 용접부에서 떨어진 연강인 SS400의 영역

에서 파단 되었는데, 이는 스테인리스강과 연강의 용접성이 양호함을 나타내 주며 스테인리스강판과 연강의 맞대기 용접부의 강도는 연강의 두께를 고려하여 설계하여야 한다고 판단된다.

Table. 4.3 Result of tensile test for STS304+SS400

| STS304+SS400 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 최대 인장강도 (kgf/cm ²) | 2323.29 | 2279.01 | 2319.28 | 2321.57 | 2298.69 |
| 항복강도 (kgf/cm ²) | 2143.50 | 2096.55 | 2130.55 | 2143.53 | 2010.49 |
| 항복점의 연신율 (%) | 3.04 | 2.47 | 2.52 | 2.95 | 2.53 |
| 파괴점의 연신율 (%) | 23.75 | 20.85 | 23.41 | 22.55 | 21.95 |

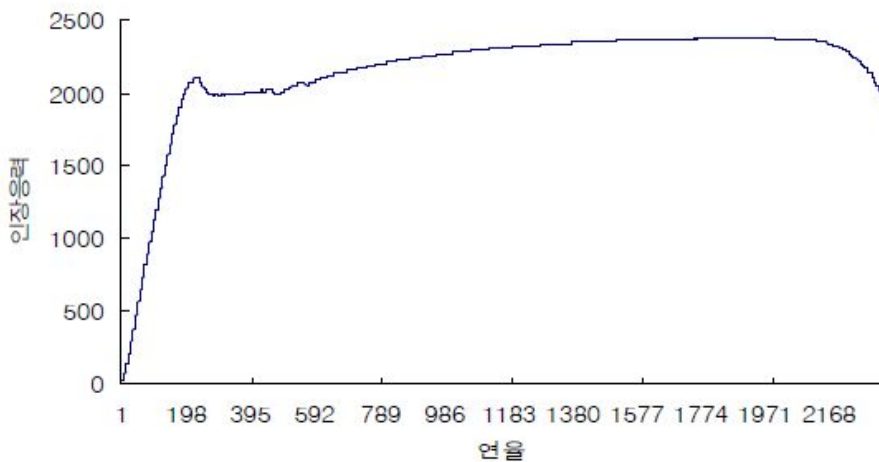


Fig. 4.5 Stress-strain curve of STS304+SS400-1

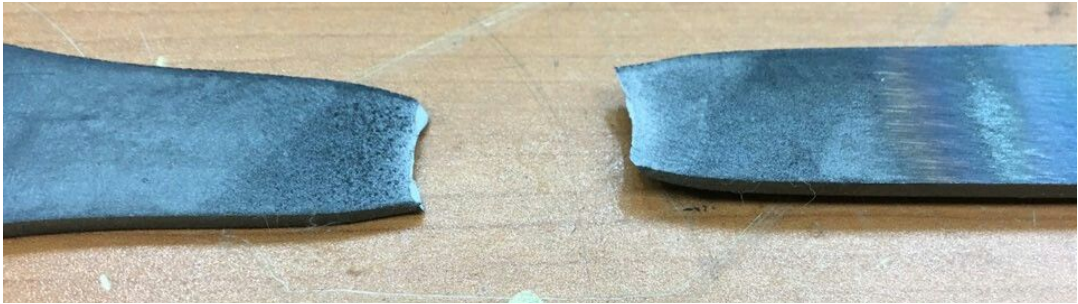


Fig. 4.6 Tensile fracture surface of STS304-SS400

Table. 4.4 Mean value of tensile test

| 재료 | 최대 인장강도 (kgf/cm ²) | 항복강도 (kgf/cm ²) | 항복점의 연신율(%) | 파괴점의 연신율(%) |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|
| STS304 (A) | 3511.43 | 1846.07 | 1.7 | 40.95 |
| SS400 (B) | 2660.99 | 2052.15 | 1.4 | 18.95 |
| STS304-SS400 (C) | 2308.36 | 2104.92 | 2.7 | 22.50 |

동종재(STS304+STS304, SS400+SS400) 및 이종재(STS304+SS400) 용접 시험의 각 최대 인장강도, 항복강도, 항복점의 연신율, 파괴점의 연신율의 평균값을 나타냈다.

4.2 경도 특성

4.2.1 동종재 스테인리스강(STS304)

동종재인 스테인리스강의 용접부의 경도값은 Fig. 4.7과 같은 분포로 나타났다. 경도 측정은 상표면으로부터 0.2mm, 1.5mm, 2.6mm 지점에서 용접부로부터 1.0mm씩 등간격으로 경도를 측정하였다.

상표면으로부터 깊이0.2mm에서 측정된 경도값은 모재(Base metal)에서 168.9Hv, 열영향부(Heat affected zone)에서 177.8Hv, 용접부(Welded metal)에서 219Hv로 나타났다. 깊이1.5mm에서 측정된 경도값은 모재에서 178.4Hv, 열영향부에서 188.4Hv, 용접부에서 207.5Hv로 나타났다. 깊이2.6mm에서 측정된 경도값은 모재에서 184.4Hv, 열영향부에서 188.6Hv, 용접부에서 205.1Hv로 나타났다.

15~70% Cr을 함유한 Fe-Cr계 스테인리스강을 400~500°C구간에서 장시간 유지하면 경도의 급격한 증가 및 연성의 급격한 감소를 가져오는 취화 현상이 발생한다. 이는 Cr이 농축된 탄화물의 석출에 의한 일종의 석출경화 현상이다. 이러한 현상으로 측정된 경도값이 모재부에 비해 용접부에서 경도값이 높게 측정된 것으로 판단된다.[4]

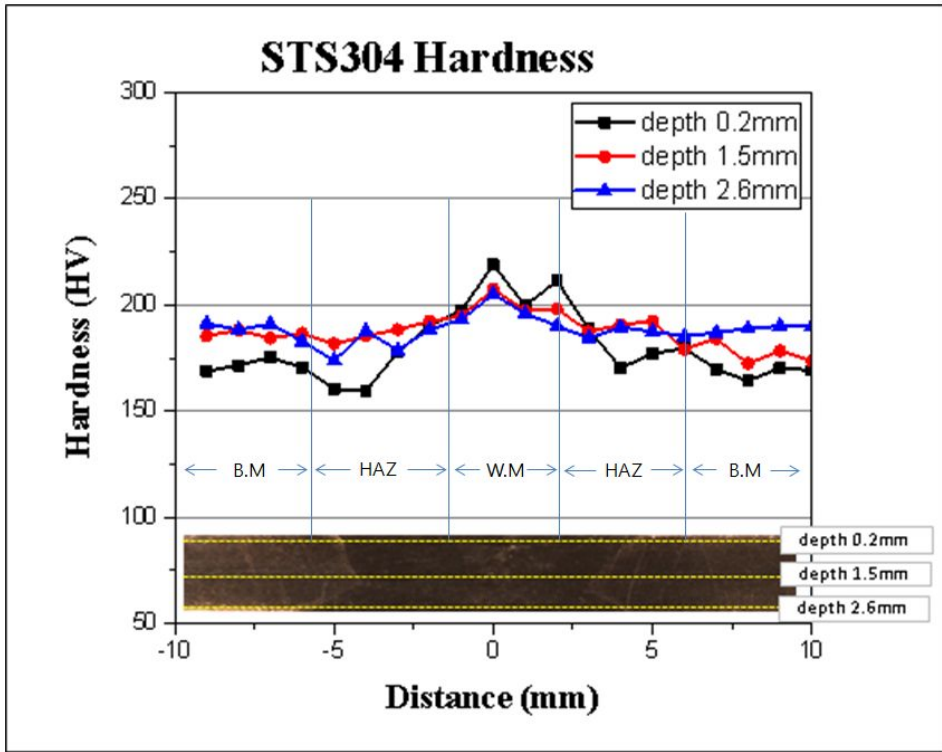


Fig. 4.7 Micro vickers hardness for STS304

4.2.2 동종재 연강(SS400)

동종재인 연강의 용접부의 경도값은 Fig. 4.8과 같은 분포로 나타났다. 경도 측정은 상표면으로부터 0.2mm, 1.5mm, 2.6mm 지점에서 용접부로부터 1.0mm씩 등간격으로 경도를 측정하였다.

상표면으로부터 깊이0.2mm에서 측정된 경도값은 모재(Base metal)에서 107.2Hv, 열영향부(Heat affected zone)에서 127.7Hv, 용접부(Welded metal)에서 172.2Hv로 나타났다. 깊이1.5mm에서 측정된 경도값은 모재에서 106.2Hv, 열영향부에서 126.8Hv, 용접부에서 151.1Hv로 나타났다. 깊이2.6mm에서 측정된 경도값은 모재에서 109.6Hv, 열영향부에서 134.7Hv, 용접부에서 137.2Hv로 나타났다.

이러한 경도 결과값은 용접열에 의해 오스테나이트화된 조직이 냉각에 의해 펄라이트변태 도중 과냉도가 커져 철원자의 확산이 충분히 일어날 수 없게 되는 온도 부근(약 550℃)까지 낮아지면 확산이 단 시간에 일어날 수 없게 되기 때문에 무확산 변태인 마르텐사이트변태가 발생하게 되어 소입경화가 일어나게 된다. 이러한 현상으로 결과 값이 나타난 것으로 판단된다.[22]

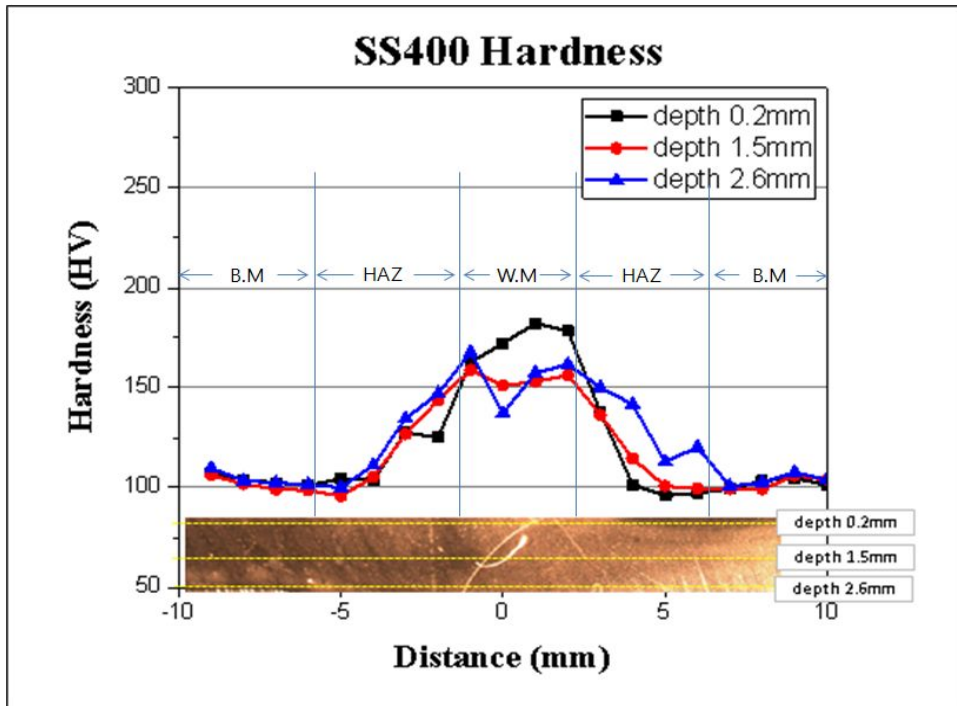


Fig. 4.8 Micro vickers hardness for SS400

4.2.3 이종재 스테인리스강-연강(STS304+SS400)

이종재(STS34+SS400)의 용접부의 경도값은 Fig. 4.9과 같은 분포로 나타났다. 경도 측정은 상표면으로부터 0.2mm, 1.5mm, 2.6mm 지점에서 용접부로부터 등간격으로 1.0mm씩 경도를 측정하였다.

상표면으로부터 깊이0.2mm에서 측정된 경도값은 STS304의 열영향부(Heat affected zone)에서 183.1Hv, SS400의 열영향부에서는 126.3Hv, 용접부(Welded metal)에서 208.4Hv로 나타났다. 깊이1.5mm에서 측정된 경도값은 STS304의 열영향부에서 178.2Hv, SS400의 열영향부에서 128.3, 용접부에서 190.2Hv로 나타났다. 깊이2.6mm에서 측정된 경도값은 STS304의 열영향부에서 165.8Hv, SS400의 열영향부에서 123.5Hv, 용접부에서 1185.1Hv로 나타났다.

이러한 결과는 스테인리스강에서의 석출경화 현상과 SS400의 소입경화 현상의 의하여 경도값이 Fig. 4.9와 같이 나타난 것으로 판단된다.

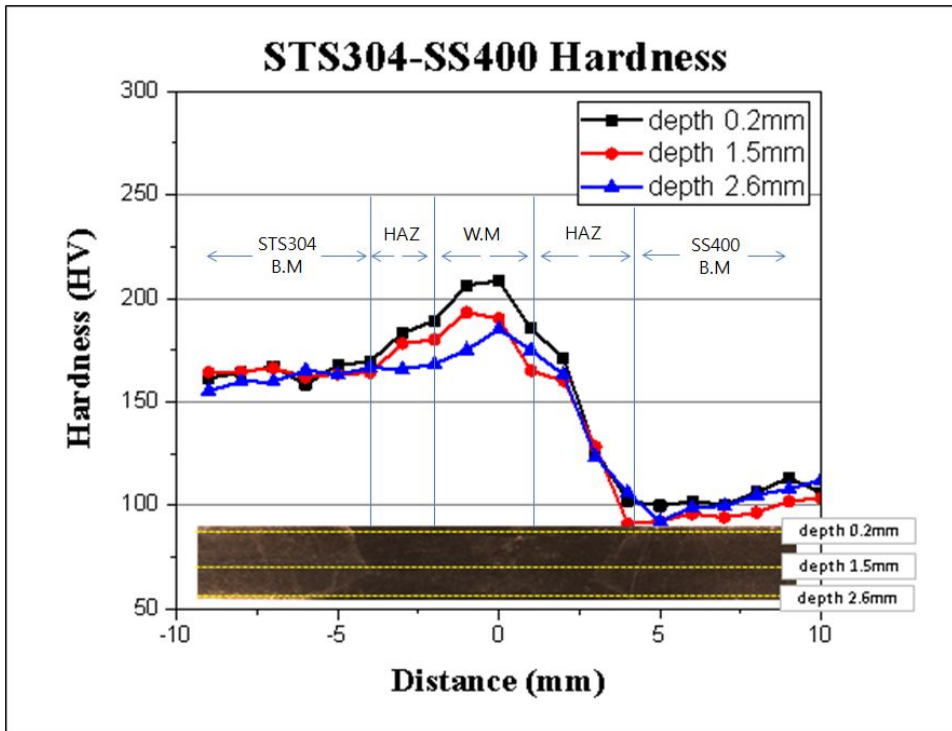


Fig. 4.9 Micro vickers hardness for STS304+SS400

4.3 미세조직 특성

STS304+SS400의 이종금속 용접부에 대한 미세조직을 Fig.4.11에 나타내었다. 일반적으로 용접부에 오스테나이트 결정립이 조대하게 나타나지만 해당 조직에서는 나타나지 않았다. 하얗게 나타난 조직은 오스테나이트기지이고 검게 나타난 부분은 페라이트 혹은 페라이트와 오스테나이트의 혼합조직으로 스테인리스강 용착 금속에서 볼 수 있는 현상이다. 이것은 Mo과 Cr이 페라이트 안정화원소이고 Ni이 오스테나이트 안정화 원소이기 때문에 STS304, SS400의 화학적 조성차이로 따른 미세조직 분포에 차이로 판단된다.

STS304의 열영향부에서는 조직에서 흑색으로 나타나는 δ -페라이트가 나타 나며 방향성이 없어지고 조직이 미세하게 변하고 있다.

SS400에 열영향부 조직으로 침상형 페라이트(Acicula ferrite), 페라이트 사이드 플레이트(Ferrite side plate), 다각형 페라이트(Polygonal ferrite), 입계 페라이트(Grain boundary ferrite)와 상부 베이나이트(Upper Bainite)가 혼합된 조직이 나타난다. 하지만 침상형 페라이트와 페라이트 사이드 플레이트는 관찰되지 않고 대부분 미세화 된 입계 페라이트와 다가형 페라이트를 포함한 세립 페라이트(Fine grain ferrite)가 형성 되었다.

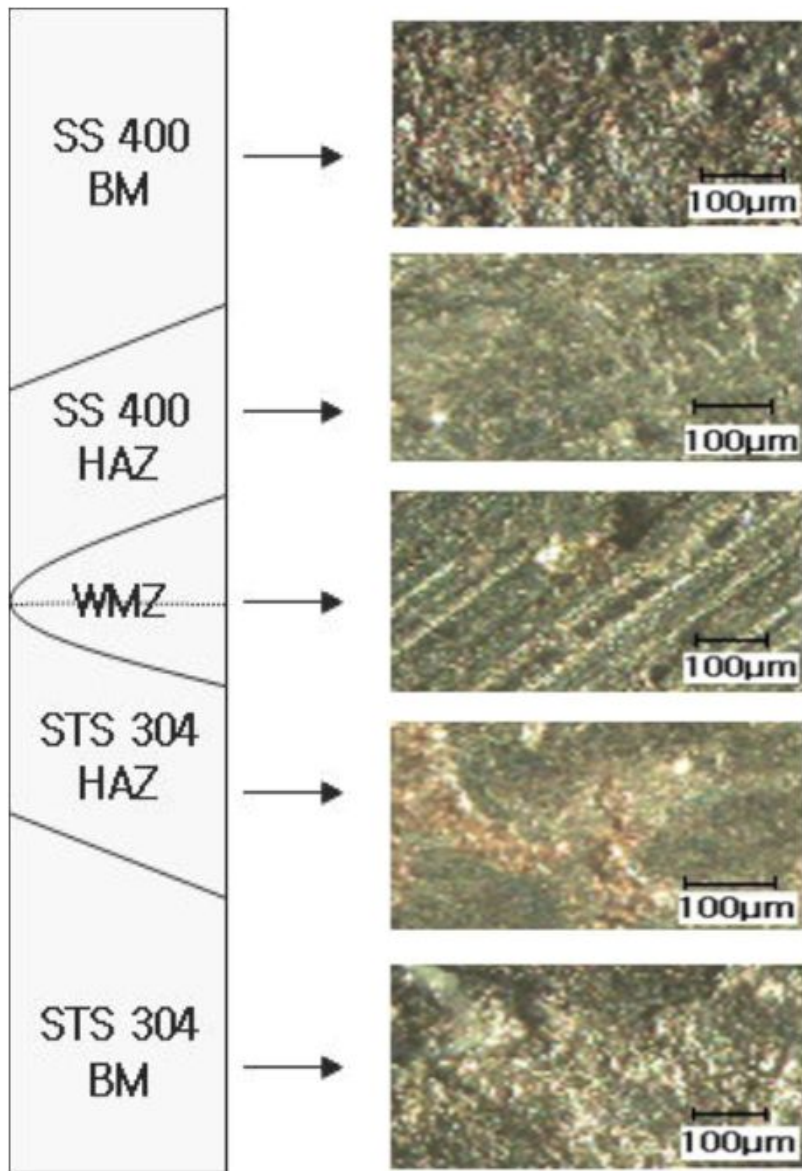


Fig. 4.10 Micro-structure of specimen

제 5 장 결 론

본 연구에서는 이종금속재료인 냉간 압연 스테인리스강(STS304)과 일반 구조용 압연 강(SS400)를 선정하여 동종재료(STS304+STS304, SS400+SS400)와 이종재료(STS304+SS400)를 나누어 GTAW의 용접 절차로 맞대기(Butt joint)용접을 실시하였다. 이를 통해 얻어진 시험편으로 인장실험 및 경도실험을 한 결과, 용접부의 기계적 특성 및 용접성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인장 실험 결과, STS304의 최대 인장강도는 3511.43kgf/cm^2 , SS400의 최대 인장강도는 2660.99kgf/cm^2 , 이종재용접(STS304-SS400) 시험편의 최대 인장강도는 2308.36kgf/cm^2 로 측정되었다. 이는 상대적으로 강도가 낮은 연강의 최대 인장강도값에 비하여 이종재의 최대 인장강도값이 약 87%의 성능을 보여주는 것으로 확인되었다. 또한 연신율의 경우 이종재에서 22.5%가 측정되어 동종재인 연강의 18.95%보다 3.6% 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 이종재 용접시편에서의 파단부분은 용접부에서 떨어진 연강 부위인 SS400의 영역에서 파단 되었는데, 이는 스테인리스강과 연강의 용접성이 양호함을 나타내 주며 스테인리스강과 연강의 맞대기 용접부의 강도는 연강의 두께를 고려하여 설계하여야 한다고 판단된다.
- 3) 경도 실험 결과, 동종재(STS304) 용접 시 용접부에서 219Hv , 동종재(SS400) 용접 시 용접부에서 172.2Hv , 이종재(STS304+SS400) 용접 시 208.4Hv 가 측정되었다. 이는 동종재(SS400) 실험 대비 약 121%의 경도가 측정된 것을 확인할 수 있었으며 특히 동종재(STS304) 실험 대비 약 95%의 우수한 경도가 측정된 것을 확인할 수 있었다.

- 4) GTAW를 이용한 이종재(STS304+SS400) 용접부의 용접성을 평가한 결과, 실제 산업에 적용 가능한 기계적 특성 및 용접성을 확인할 수 있었으며, 이를 적용한 제품을 생산할 경우 경제성에 유리할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 구병춘, 김재훈: “용접부의 피로강도 시험평가 및 해외규격과의 비교연구”, 대한용접·접합학회지, 제25권 제1호 (2007)
- [2] 구선모: “자동차 후륜 샤프 부품의 용접 변형을 고려한 수치해석”, 경북대학교, 2011
- [3] 최병길: “용접기술의 현황과 전망”, 한국기계연구원, 1996
- [4] 권명옥: “스테인리스강의 용접”, 한국철강협회 스테인리스스틸클럽, 1999
- [5] AWS : Welding Handbook, Vol. 2, 8th Ed, 1991
- [6] Y. Kimura, S. Harada, T. Satoh, K. Ariga and K. Yasuda: "Application of He-DCEN TIG Orbital Welding to Aluminium Piping, Journal of JWS, 15-1", 1997
- [7] Y. H. Lee and E. P. Yoon: "Study on the Disbonding of Stainless Steel Overlay Welded Metal", Journal of KWS, Vol.1, No.2, 1983.
- [8] Y. Mukai, A. Nishimura: "Fatigue Crack Propagation Behavior in the Hardness Heterogeneous Field", Trans JWS, Vol.14, No.1, 1983.
- [9] G. C. Sih and J. R. Rice: "the Bending of Plates of Dissimilar Materials with Cracks", Trans. ASME, pp.477-482, 1964.
- [10] G. C. Sih and E. P. Chen: "Normal and Shear Impact of Layered Composite with a Crack: Dynamic Stress Intensification", J. Appl.Mech. Trans. ASME, Vol.47, pp.351-358, 1980.
- [11] H. S. Park, W. Y. Kin and C. Y. Kang: "Welding and Bonding of Dissimilar Metal Steel / Nonferrous Metal", Journal of KWS, Vol.14, No.6, pp1-2, 1996.

- [12] Seiichikage: "Friction Welding of Al and Cu", 輕金屬容接, Vol.19, No.11, pp.501-508, 1981.
- [13] Isao Masumoto. et al: "Study on Diffusion Welding of Stainless Steel to Mild steel", 容接學會誌, Vol.51, No.12, pp.1179-1187, 1981.
- [14] Akiomi Kouno ,et al: "Diffusion Bonding of 2 1/4 Cr - 1Mo Steel and 13Cr Steel", 容接學會誌, Vol.51, No.4, pp.371-380, 1982.
- [15] 나중식: “이종재료 (SS400+STS304) 용접부의 기계적 성질에 관한 연구”, 금오공과대학교, 2008, 석사
- [16] 조상명: “용접공정 개론” 2002
- [17] R. T. C Choo, J. Szekely and R. C. Wedthoff: "Modeling of High-Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Welding", Welding Journal, AWS, 1990
- [18] J. F. Lancaster: "The Physics of Welding", England, 1984
- [19] N. S. Tsai: "Heat Distribution and Weld Geometry in Arc Welding", MIT, 1983
- [20] M. Satou: "Fundamentals of Welding, Arc Phenomenon", Journal of the Japan Welding Engineering Society
- [21] Korean Industrial Standards : KS B 0801, Test pieces for tensile test for metallic materials, 2007 Ed.
- [22] 방한서: “선박용접 이론 및 현장 적용”, 知性界, 2005
- [23] 방희선, 방한서, 김유철, 주성민, 좌순원, 노찬승: “SS400-sts304 이재용접부의 외력작용시 용접잔류응력 특성”, 대한용접·접합학회, 2009
- [24] 김재웅, 양영수: “용접 잔류응력과 변형”, 대한용접·접합학회, 2011
- [25] 엄기원: “ 최신 용접공학”, 동명사, 1977
- [26] 기계용어편찬회: “기계용어사전”, 도서출판일진사, 1995
- [27] 산업기술교육훈련학회: “산업기술훈련논문지”, 2007