



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

석사학위논문

미스트 냉각을 적용한 스테인리스 박판의 용접변형 저감

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

나 민 주

미스트 냉각을 적용한 스테인레스 박판의 용접변형 저감

The Welding Deformation Reducing Of Stainless Steel
Thin Plates By Applying Mist Cooling

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

나 민 주

미스트 냉각을 적용한 스테인레스 박판의 용접변형 저감

지도교수 주 성 민

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

나 민 주

나민주의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방 한 서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방 희 선 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 성 민 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
1장. 서론	1
제 1절 연구배경	1
제 2절 연구동향	2
제 3절 연구목적	3
2장. 이론적 배경	4
제 1절 용접 잔류응력 및 변형	4
1.1 용접잔류응력 발생 메커니즘	4
1.2 용접변형의 발생 원인과 종류	7
1.3 용접변형 방지 및 저감 대책	10
1.4 잔류응력 계측방법	16
제 2절 이류체노즐(Air atomizer)	19
제 3절 금속재료 용접	20
3.1 스테인리스강	20
3.2 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW)	22
3장. 실험방법	26
제 1절 사용 재료 및 용접조건	26

1.1 시험편 및 용접재료	26
1.2 용접 및 이류체노즐 조건	28
제 2절 장치 구성	29
제 3절 실험방법	30
3.1 면외변형량 계측	29
3.2 온도분포이력 측정	31
3.3 잔류응력 계측	32
3.4 인장강도 및 경도 측정	33
4장. 결과 및 고찰	35
제 1절 Bead on plate 및 Heat sink welding 분석	35
1.1 면외변형량	35
1.2 온도분포이력	36
1.3 잔류응력	39
1.4 인장강도 및 경도	41
1.5 공정별 시편 비교	43
5장. 결 론	44
참고문헌	45

그림 목록

그림 2.1	국부적 가열 및 냉각에 의한 열응력과 잔류응력	6
그림 2.2	용접변형의 종류	9
그림 2.3	일반적인 용접후 잔류응력분포	13
그림 2.4	기계적 완화법에 따른 잔류응력 그래프	14
그림 2.5	롤러 및 프레스에 의한 변형교정	14
그림 2.6	X선 잔류응력 측정 장치	18
그림 2.7	불활성가스 텅스텐 아크용접 계략도	24
그림 2.8	TIG 용접의 기본 장치도	24
그림 3.1	주요 실험에 대한 시편의 치수	26
그림 3.2	전체 장치구성	29
그림 3.3	면외변형 최대지점 선정	30
그림 3.4	K-type 열전대 용접부의 이면에 부착	31
그림 3.5	열전대 부착 지점선점	31
그림 3.6	스트레인게이지 부착 지점	32
그림 3.7	Water jet 이용한 단면절단	32
그림 3.8	인장시험 시편의 치수	34
그림 3.9	비커스 경도 시험 계략도 및 장비	34
그림 4.1	시간에 따른 BOP용접시 LVDT 계측지점에서의 면외변형량	35
그림 4.2	시간에 따른 BOP용접시 온도분포이력	37
그림 4.3	시간에 따른 HSW용접시 온도분포이력	37
그림 4.4	시간에 따른 BOP와 HSW 온도분포이력 비교	38
그림 4.5	BOP의 중심부로부터 길이 및 폭방향 잔류응력측정 결과	40
그림 4.6	HSW의 중심부로부터 길이 및 폭방향 잔류응력측정 결과	40
그림 4.7	HSW와 모재 인장강도 비교	41
그림 4.8	BOP와 HSW 경도 비교	42
그림 4.9	최적 실험조건 BOP와 HSW 시편	43

표 목 록

표 2.1	국부 가열법의 종류	14
표 2.2	이류체 노즐의 혼합 및 방식에 따른 종류	18
표 2.3	이류체 미세분무노즐 특성	19
표 2.4	극성에 따른 비드형상 비교	25
표 3.1	STS 304 화학성분	27
표 3.2	STS 304 기계적 특성	27
표 3.3	TIG 용접조건	28
표 3.4	이류체 노즐 냉각조건	28
표 4.1	이류체 노즐 최적 냉각조건	43

ABSTRACT

The Welding Deformation Reducing Of Stainless Steel Thin Plates By Applying Mist Cooling

Min-Ju Na

Advisor : Prof. Sung-min Joo, Ph. D.

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

The welding of the sheet metal is often problematic because the distortion of thin sheet is a common phenomenon resulting from the welding process. The main problem with welding is to keep the distortion as low as possible and to reduce the residual stresses. The residual stresses and distortions of structures by welding have a negative effect on the safety of mechanical structures. That is, the expansion of material by high temperature and distortion by cooling during welding process is caused by tensile and compressive residual stresses in welding material, and this residual stresses can induce fracture and fatigue problems of welding structures. Residual stresses are produced in weldments due to mismatching and non-uniform distributions of plastic and thermal strains. So Attempts were made to reduce the residual stresses produced in TIG welding process using Air atomizer. Spray water cooling is an important technology used in the industry for the cooling of materials from temperatures up to 1800k. Mist cooling was conducted into the gas tungsten arc welding trailing. How a trailing heat sink can be used for control of welding induced buckling distortion on thin plate structures. In this paper, regarding residual stresses distributions, Out-of-plane deformation, temperature histories and mechanical properties were measured. The accurate prediction of residual stress and deformation is very important to improve the quality of weldments.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

현대 산업의 기반이 되는 용접·접합기술은 산업 전반에 걸쳐 각 분야의 제품을 생산하기 위해 대단히 중요한 위치를 차지하고 있는 가공기술이다. 따라서 많은 연구자들은 효율적인 시공과 용접품질 향상을 위하여 다방면으로 연구를 진행하고 있다[1].

용접에서 수반되는 국부적인 가열과 냉각에 의해 용접부에는 잔류응력과 변형이 발생한다. 잔류응력과 변형은 용접구조물 제작에 있어서 균열 생성과 형상 및 치수 오차를 유발할 뿐만 아니라, 그 구조물의 피로파괴 또는 파괴 전파에 직접 또는 간접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 용접잔류응력은 용접구조물의 좌굴강도에 영향을 주며 취성균열의 발생을 초래한다. 용접변형도 취성파괴와 피로파괴의 원인으로 작용하며 구조물의 외관을 해치고 국부적으로 변형이 집중되어 구조물의 파괴사고를 유발하는 위험성을 내포하고 있다. 특히 용접구조물이 박판인 경우 면외변형의 일종인 좌굴변형에 취약하다. 이러한 문제점은 우주항공, 자동차 그리고 선박과 같은 전반적인 산업분야에서 공통적으로 발생한다. 잔류응력이 문제가 되는 경우에는 이를 후열처리 함으로써 제거할 수 있으며, 용접변형의 경우 변형 방지용 치구와 다양한 교정법을 통해 제어 및 교정이 가능하지만, 박판의 경우 제어가 쉽지 않고, 지그 제작 및 후가공으로 인한 추가비용과 시간소요가 경제성을 떨어뜨린다. 변형 교정을 위한 후처리에 사용되는 시간과 비용을 최소화시켜야 하며, 간단한 변형 교정법 및 변형 방지법의 개발이 생산현장에 필요한 실정이다[2,3]. 따라서 용접구조물의 안전과 외관을 해치는 용접변형 및 잔류응력의 문제점들을 해결하기 위해서 용접부의 잔류응력 분포를 파악하는 것이 선행되어야 하며, 정량적인 분석 또한 필요하다. 변형을 저감할 수 있는 공정법을 개발하여 보다 신뢰할 수 있고 경제적인 새로운 예측법과 방지법이 요구된다[4,20].

1.2 연구동향

냉각시스템 및 이를 적용한 용접변형 및 잔류응력 저감에 관련한 연구동향은 다음과 같다. 시성규는 분무냉각 노즐의 분사조건을 달리하여 유량분포와 분무액적의 입자와 속도장을 분석하여 유체 역학적 냉각특성을 연구하였고[5], 이수관은 미스트 냉각에 필요한 노즐에 공급되는 냉각수의 압력과 압축공기의 압력을 조절하여 미스트 유동을 고온의 실린더에 분사하여 냉각특성을 연구하였고[6], 진성태는 물-공기가 내부에서 혼합되어 분무되어지는 노즐을 이용하여 고온 금속 시편을 냉각 후 물과 공기의 유속에 따른 시편 내부에서 온도를 연구하였다[7]. D.G Richards 등은 FSW용접 시 액화 CO₂ 를 적용하여 냉각열원의 위치와 출력, 크기에 따라 용접잔류응력이 얼마나 저감하는지 연구를 하였다[8]. TWI(The Welding Institute)의 Guan 등은 가열 및 냉각 기법을 이용하여 용접 시 용접부의 균일한 온도구배를 야기함으로써 좌굴변형의 주인자인 용접수축하중(shrinkage force)을 감소시키기 위하여 LSDN(Low Stress No Distortion)법을 제안하였으며[9], N Bagshaw는 스테인레스 박판 TIG용접 시 용접부 이면에 액화CO₂ 를 분사하여 변형을 저감하였으며 아크토치와 분무노즐 사이거리를 최적화하는 방법을 제안하였다[10].

1.3 연구목적

오스테나이트계 스테인리스강은 인성, 연성, 그리고 내식성 등의 우수한 기계적 성질을 가지며 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되어지고 있다. 특히 STS304는 가장 대표적인 스테인리스강으로 우수한 성형성과 내식성이 필요한 화학공업, 식품제조설비와 용접이 필요한 열교환기와 초산저장 수송용기 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다[5]. 하지만 용접 시 발생하는 용접변형 및 잔류응력으로 인해 구조물의 신뢰성이 저하되며, 박판용접의 경우에는 면외변형에 취약하다. 이를 교정하기 위해 지그를 통한 구속과 후처리 및 열원공급 등의 방법들이 적용되고 있다. 지그나 후처리에 의한 방법은 경제성이 떨어지기 때문에 공정 중에 실시간으로 변형을 저감할 수 있는 미스트 분무냉각을 적용해보고자 하였다. 또한, 오스테나이트계 스테인리스강의 경우 일반적으로 예열을 하지 않는다. 예열을 하게 되면 냉각속도가 늦어져 입계 탄화물 석출에 의한 입계 예민화 현상이 나타나 내식성을 떨어뜨리기 때문이다[6].

따라서 추가적인 열원 대신에 미스트 분무냉각을 이용하여 급랭시키는 방법을 적용하여 내식성을 확보하고자 하였다. 미스트 분무냉각은 유동 내 액체의 양을 조절하여 균일하고 적절한 냉각을 하는데 사용된다. 이는 재료의 특성과 열전달 특성을 모두 만족시켜야 하는 제강공정에서 사용될 수 있다. 특히 강의 열처리와 주조 및 단조공정에서 냉각속도를 빠르게 조절하여 담금질의 역할을 대신할 수 있다.[11].

본 연구에서는 스테인레스강의 TIG용접 시 후방에 미스트 냉각을 적용하여 실시간으로 용접변형과 잔류응력이 저감하는지를 알아보기 위해 Heat sink welding(용접 후 급랭)을 실시하였으며, 실험적인 접근방법으로 용접부의 z축 변위, 온도분포 이력 및 잔류응력을 계측함으로써 급랭을 통해 변형 및 잔류응력이 저감되는지를 알아보하고자 하였다.

2 장 이론적 배경

2.1 용접 잔류응력 및 변형

2.1.1 용접잔류응력 발생 메커니즘

용접에 의해 접합부재가 국부적으로 가열과 냉각과정의 열 사이클을 받으면, 불균일한 열변형을 분포와 고온에서의 소성변형을 및 용접금속의 수축 등에 의해 응력이 발생하며, 실온까지 냉각한 후에도 이 응력은 잔류하게 된다. 이 용접 사이클 과정에서의 응력을 열응력 또는 용접응력이라 부르며, 접합부가 완전히 냉각한 후에 잔류하는 응력을 용접잔류응력이라고 한다. 용접부의 냉각과정에서의 응력은 용접금속의 수축에 동반하는 응력으로 여겨지기 때문에 일반적으로 수축응력이라고 불리어지기도 한다[14, 19, 20].

용접잔류응력의 발생 메커니즘을 설명하기 위해 그림 2.1에 나타난 직사각형 판재에 대해 A, B, C 세 개의 영역으로 나누고, 편의상 B와 C는 제외하고 A만을 가열할 수 있다고 가정한다. 그림 (a)와 같이 영역 A만을 가열하게 되면 B와 C영역에 의해 구속되므로 영역 A는 자유롭게 팽창할 수 없게 되어 응력이 발생하게 된다. 즉, 판재에 발생하는 열응력은 그림과 같이 영역 A에서 압축응력 σ_1 이 생기고, 영역 B와 C에는 이것에 대응하는 인장응력이 σ_2, σ_3 이 발생한다. 이것은 영역 B와 C가 영역 A를 구속하기 때문에 생기는 현상이며, 그 결과로 인해 판재는 그림에 과장하여 표시한 것과 같은 변형이 동반된다.

압축응력 σ_1 은 영역 A의 온도상승과 함께 점차 그 절대치가 증가하지만 그 값이 무한정 커지는 것은 아니다.

앞서 설명하였듯이 온도가 증가함에 따라 재료는 연화하여 변형저항이 감소하므로 이에 따라 압축응력은 한정되며 온도상승에 의한 지속적인 팽창은 압축소성변형을 일으키게 된다. 그림 2.1(b)는 영역 A를 가열 및 냉각한 경우 냉각 후 판재의

응력과 변형의 상태를 나타낸 것이다. 응력분포는 (a)와 정확히 반대 형상을 갖게 되었는데 영역 A에는 인장응력이 영역 B와 C에는 압축응력이 잔류하고 있기 때문이다.

이는 가열시 압축소성변형이 축적된 영역 A가 냉각되면서 수축이 일어나 생기는 현상이다. 즉, 압축소성변형을 받은 영역 A가 냉각 시에는 오히려 수축량이 B와 C 영역보다 크게 되므로 이들의 구속을 받아 인장응력을 일으키며, 최종적으로 그림과 같은 잔류응력과 변형이 남게 된다.

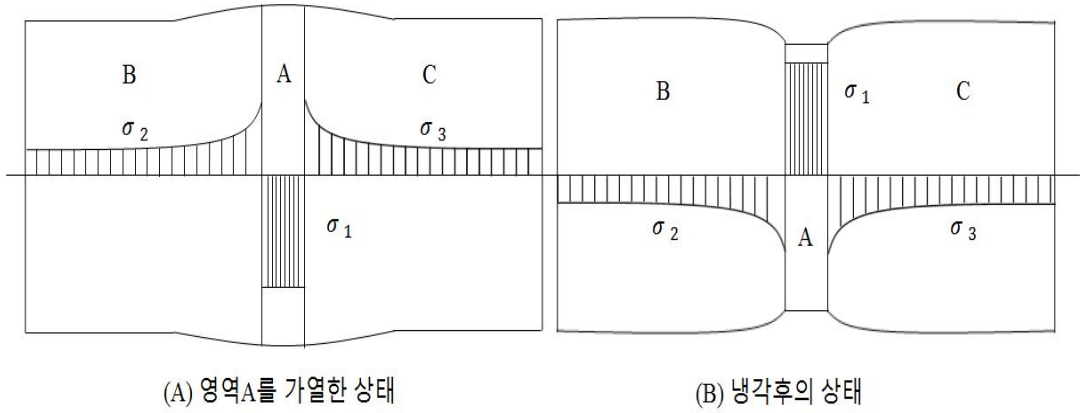
용접잔류응력의 발생은 앞에서 설명한 모델에서 볼 수 있는 바와 같이, 용접부의 가열과 냉각에 동반되는 열응력의 최종상태로써 이해하는 것이 가능하다. 여기서 응력의 발생에 필요한 조건으로써 구조부재에 있어서 어떠한 구속이 존재하지 않으면 안 된다.

이런 부재에 대한 구속에는 외부에서 주는 것과, 실제 가열냉각에 있어서 부재 자신 혹은 부재 상호간에 자연히 생기는 것도 있다.

잔류응력은 용접 시 열을 받으면 금속재료는 팽창해야 하지만, 구속되어 있어 연신을 할 수 없어 재료에는 실제적으로 압축응력이 걸리게 된다. 같은 원리로 냉각시 재료는 수축해야 되지만 양 끝단이 고정된 상태로 인장응력이 잔류하게 된다. 용접 프로세스에 의해 용접부 근방에서 용접열원에 의해 급속가열·급속냉각의 열사이클을 받으면, 열원의 이동과 함께 온도장이 변화하므로 용접부에 불균일한 온도분포가 발생한다.

불균일한 온도분포에 의한 용접부 근방의 열팽창·수축을 용접부로부터 떨어져 있는 저온상태의 부재가 이를 구속하여 결과적으로 용접변형과 잔류응력이 발생한다. 특수 구조물 또는 후판의 경우 잔류응력에 의해 취성파괴를 일으킬 수 있으므로 기계적 또는 열처리를 통해 잔류응력을 완화시키는 방법을 적용하고 있다[1,4,14].

그림 2.1 국부적 가열 냉각에 의한 열응력과 잔류응력



2.1.2 용접변형의 발생 원인과 종류

용접 시 국부적으로 열을 가하여 두 부재를 접합하는 방법으로 국부적인 가열은 열응력을 발생시키고, 발생한 열응력은 열변형을 생성하고, 용접이 완료된 후에 영구적으로 남아 있는 변형을 용접변형이라 한다.

용접변형의 메커니즘 순서는 다음과 같다.

- ① 구속상태에서 가열
- ② 팽창에 의한 열응력증가
- ③ 열응력 \geq 항복응력
- ④ 소성변형
- ⑤ 냉각
- ⑥ 수축량 > 팽창량
- ⑦ 용접변형 발생

용접변형의 발생 원인은 대표적으로 4가지가 있다.

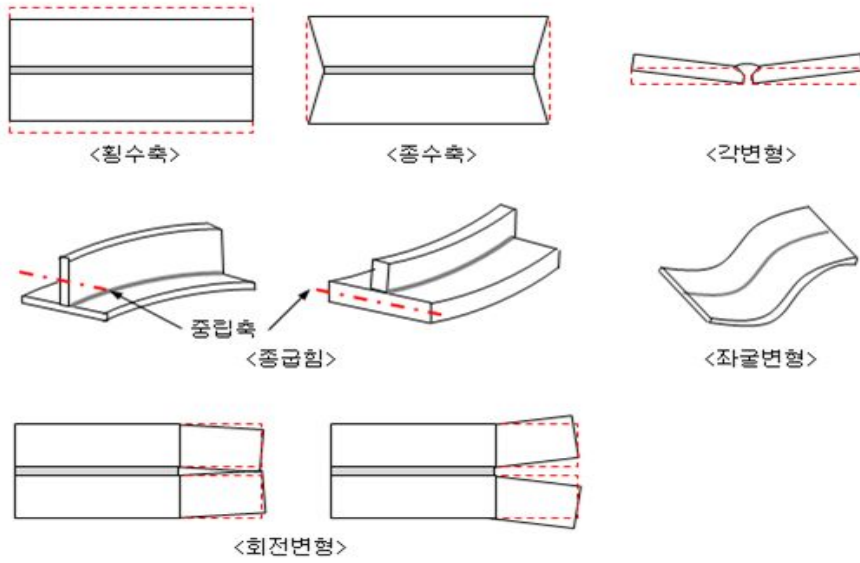
- ① 모재의 영향 - 모재의 열팽창 계수가 크고, 열전달이 잘되는 재료일수록 용접부 변형이 발생하기 쉬운 경향이 있다. 이러한 차이점은 Carbon Steel과 Stainless Steel의 용접부에서 쉽게 발견할 수 있는 현상으로, 열팽창이 큰 Stainless Steel 용접부는 Carbon Steel에 비해 더 큰 용접부 변형을 나타낸다.
- ② 용접 형상 - V형 이음에서는 각 변화가 한 방향에서만 일어나지만 X형 이음부에서는 뒷면 용접 시 발생하는 각 변화가 반대 방향이므로 앞면 용접의 각 변화와 상쇄되어 전체적인 각 변형이 작게 된다.
- ③ 용접의 속도 - 용접 속도를 빠르게 하는 것이 각 변형방지에 유효하다. 용접 진행속도가 느릴수록 앞서 전파되는 용접열이 많아지고, 속도가 빠를수록 적어지기 때문에 용접 진행이 빠를수록 용접변형이 적어진다.
- ④ 대입열 - 고능률의 대입열 용접일수록 많은 용융금속이 발생하게 되면서 응고 수축에 의한 응력이 크게 작용한다. 따라서 용접부 변형을

최소화하기 위해서는 가능한 저입열의 용접 방법으로 용접하는 것이 좋다.

용접변형의 종류는 크게 면내와 면외의 수축변형으로 나눌 수 있으며 총 6가지가 있다.

- ① 횡수축 : 용접선의 직각(횡)방향의 수축으로 용접선 주변의 수축에 의한 발생한다.
- ② 종수축 : 용접진행 방향으로 용접선 가열부위가 수축하는 현상이다.
(횡수축에 비하여 미미한 양)
- ③ 각변형 : 두꺼운 부재의 깊이에 따라 수축량이 달라 발생한다.
(상단 수축 > 하단수축)
- ④ 종굽힘 : 주로 용접 길이가 길고, 부재의 종립축과 용접부가 일치하지 않을 경우 발생한다.
- ⑤ 회전변형 : 용접되지 않은 맞대기 부분의 흠이 용접의 진행에 따라 닫히거나 열리는 현상, 용접속도에 의한 영향을 크게 받아 방향을 결정한다.
- ⑥ 좌굴변형 : 얇은 판을 용접할 때 내부에 생기는 잔류응력으로 판이 좌굴되어 발생한다. [1,4,14,20]

그림 2.2 용접변형의 종류



2.1.3 용접변형 방지 및 저감 대책

용접변형을 체계적으로 제어하기 위해서는 구조물의 형상과 작업조건에 따라 변형 방지대책을 적용할 것인지 아니면 교정방법을 적용할 것인지를 계획하고 그 구체적인 방법에 대해서도 검토해야 한다. 또한 용접변형을 방지하기 위해 과도하게 변형을 구속하는 경우 용접부에 균열이 발생됨으로 주의해야 한다. 발생한 용접 변형은 쉽게 교정하기가 어렵고, 많은 노력과 시간이 소요되므로 용접변형방지에 대한 기본적인 사항으로서는

- ① 용착금속의 양을 줄인다.
- ② 용착열이 작은 용접법을 채택한다.
- ③ 용접변형이 문제가 될 경우에는 구속을 크게 한다.
- ④ 잔류응력이 문제가 될 때는 구속을 작게 한다.

3.1) 설계 및 시공단계의 대책

- ① 용접 길이 축소 : 프레스 굽힘 가공, 형강류 사용, 단속용접채용
- ② 용착량 감소 : 합리적인 각장 및 홈 형상 설계
- ③ 보강재 사용
- ④ 변형을 최소화 할 수 있는 이음부 배치
- ⑤ 용접 작업 전 변형량 축소 : 재료운반 및 절단 시 변형 축소
- ⑥ 조립정도 확보 : 홈 치수 및 조립정도
- ⑦ 용접 작업 전 역변형
- ⑧ 비용착열이 작은 용접법 채용
- ⑨ 변형 방지치구를 사용
- ⑩ 용접변형이 작게 되는 조립 및 용접 순서를 채용

3.2) 용접 잔류응력의 완화

잔류응력을 완화하는 방법에는 다음과 같은 방법들이 있다.

- ① 응력 완화 열처리법

- 용접부 또는 그 근방의 재료를 적절한 온도로 가열, 유지하고 균일한 냉각과정을 통하여 용접부의 성능을 개선하여 용접 잔류응력 등의 유해한 영향을 제거하는 것으로 용접 후열처리라고 한다.
- 열처리에 의해 잔류응력이 완화되는 원리
 - 가. 온도의 상승에 따른 항복응력이 저하되는 현상
 - 나. 고온에서 재료의 Creep이 발생하여 응력이 이완되는 현상
 - 다. 고온에서 금속의 내부 스트레인이 회복되어 재결정이 생기는 현상
- 응력제거효과는 가열온도 및 유지시간이 클수록 크다.

② 저온응력완화법

다음 그림 2.3은 용접선으로부터 100mm 정도 떨어진 부분에서 150~200℃로 가열 후 즉시 수냉하여 용접부에 존재하는 용접선 방향의 인장잔류응력을 제거하는 방법에 의한 잔류응력분포를 나타낸다.

- 응력완화 기구 : 용접선 양측의 압축응력 부분을 가열하면 용접부에 인장응력이 생겨 잔류인장응력과 겹쳐 용접부에 인장소성 변형을 발생시켜 용접부 응력을 감소시킨다. 이 방법은 용접선 방향의 잔류응력에는 효과가 있으나, 용접선에 직각방향의 잔류응력에는 효과가 없다.

③ 기계적 완화법

용접용기에 대한 수압시험이나 용접구조물에 대한 하중시험을 하면 용접부 부근의 길이방향 잔류응력은 완화된다. 이러한 시험과 같이 용접부 부근에 외력을 가하여 응력 완화 처리하는 방법이다.

- 응력완화 기구 : 평판의 용접선과 평행하게 외력을 가하여 인장했을 때의 응력은 곡선 b_1 및 b_2 와 같이 된다.

다음 그림 2.4와 같이 잔류응력과 하중의 합이 항복응력 이하인 부분

의 응력은 부하와 더불어 상승하지만 양자의 합이 항복응력에 도달하면 재료의 항복응력 이상으로는 되지 않는다. 판중의 소성영역이 확대되어 감에 따라 판 전체의 응력은 하중을 제거 후 그림의 C곡선과 같이 경사가 완만하게 되어 잔류응력이 완화된다.

3.3) 역변형에 의한 변형 방지법

횡수축과 종수축에 대해서는 실용적인 방지대책이 없으나 실험식에 의해 수축량을 예상하여 그 양만큼을 사전에 반영하는 형식을 적용한다.

가로굽힘변형의 방지대책법은 두께 및 각장의 크기에 따라 역변형량을 결정하고 미리 변형량 만큼 소성역변형을 주면 가로굽힘변형을 방지할 수 있다.

3.4) 변형의 교정

허용한계를 초과하는 변형이 발생하였을 경우에는 교정을 해야 한다. 용접변형의 교정에는 소성변형을 줄 필요가 있고, 그림 2.5와 표2.1과 같이 냉간가압, 가열 가압, 국부 가열법이 있다.

① 냉간 가압법

- 실온에서 기계적인 힘을 가하여 소성변형을 일으켜 용접변형을 교정하는 방법이다.
- 롤러, 프레스 등에 의한 방법이다.
- 비교적 얇은 판의 교정에 한정된다.

② 가열 가압법

- 가열과 동시에 기계적인 힘을 가하여 용접변형을 교정하는 방법이다.

③ 국부 가열법

- 변형이 생긴 용접구조부재를 국부적으로 가열한 후 즉시 냉각시켜 수축에 의한 응력을 발생시킴으로 굽힘 변형을 교정하는 방법이다.
- 상방으로 굽힘 변형이 생긴 부재의 돌출부를 국부적으로 급가열하면 부재는 온도상승에 따라 팽창하려고 하나 주위의 차가운 부분의 강성 때문에 구속되어 자유로운 팽창이 허용되지 않아 결과적으로 압축응력이 생기고 소성 변형이 발생한다. 여기에 물을 뿌려 가열부를 급랭시키면 부재는 수축하여 가열했던 부위에는 인장응력이 생겨 끌어 당김으로써 굽힘변형이 교정된다.
- 가장 일반적인 방법이나 Quenching 되기 쉬운 강종의 경우는 급랭을 피하고 공랭시키는 것이 좋다[1,4,1420].

그림 2.3 저온 응력 완화법에 의한 잔류응력분포

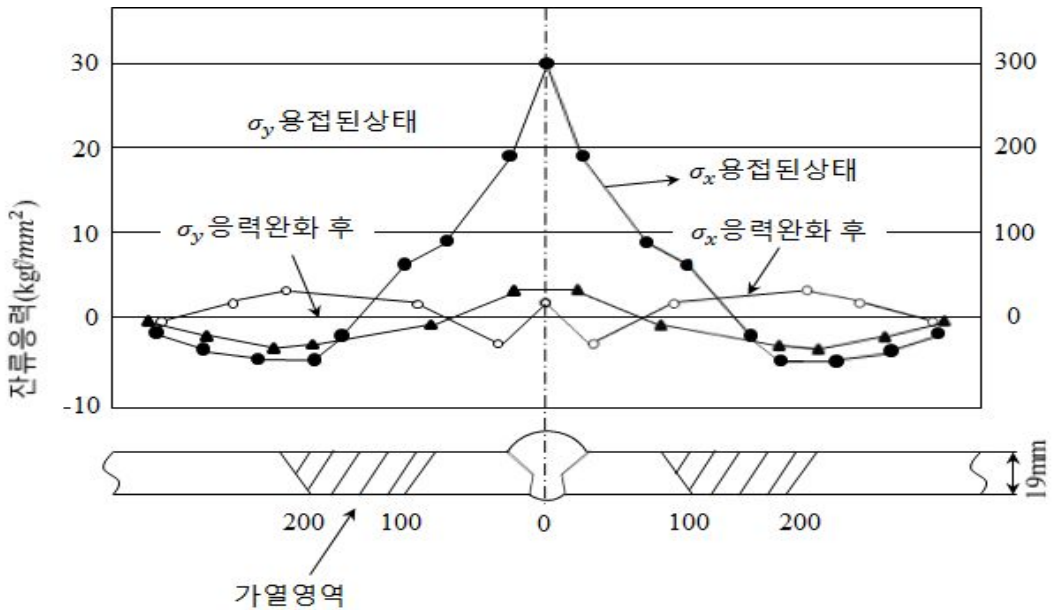


그림 2.4 기계적 완화법에 따른 잔류응력 그래프

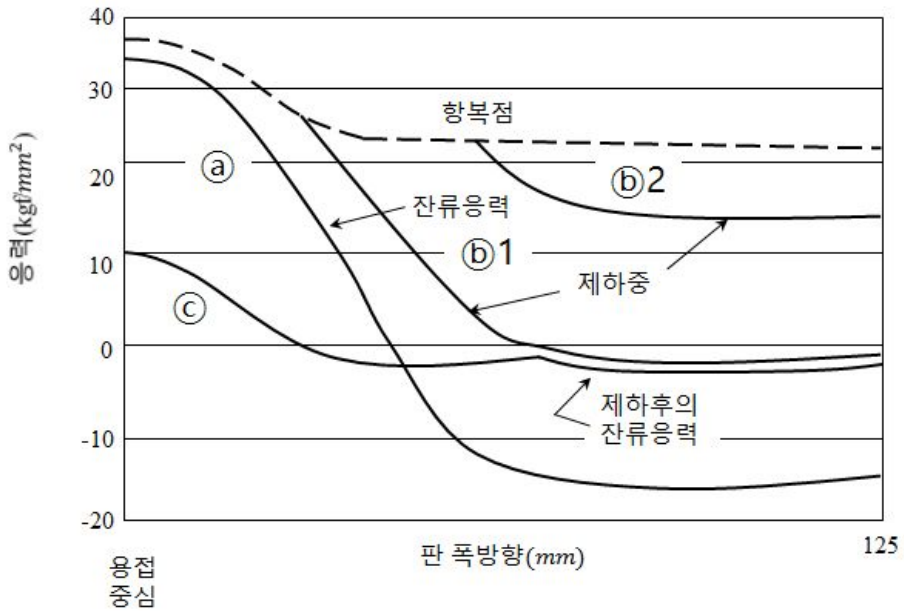


그림 2.5 롤러 및 프레스에 의한 변형교정

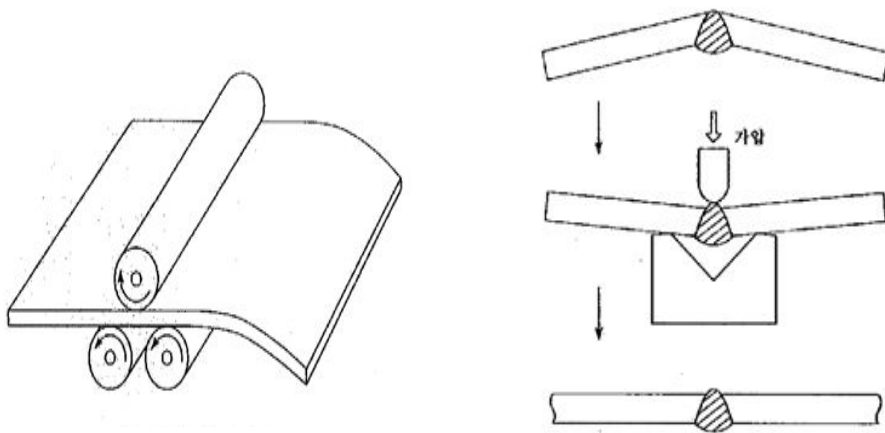
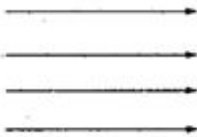

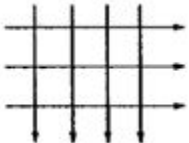
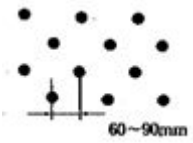
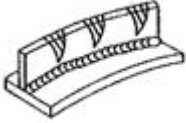



표 2.1 국부 가열법의 종류

가열법	열을 가하는 방법	특징
선 열처리 배면 열처리 선상가열		변형교정법의 기본형으로 배면 열처리에 많이 이용된다. 주로 횡굽힘변형의 교정에 사용된다.
솔잎 열처리		각 방향으로 변형교정의 효과가 있기 때문에 균일하게 교정되고 마무리가 좋다. 유사한 방법으로 십자형 열처리가 있다.
격자형 열처리		큰 변형의 교정에 이용된다. 비교적 균일하게 마무리가 된다. 표면이 타서 상하기 쉽기 때문에 주의를 요한다.
점열처리		수축력이 큰 주로 6mm이하의 박판의 이완을 교정하는데 이용된다. 표면이 용기하기 쉽기 때문에 주의를 요한다.
삼각 형상열처리 (쇄기형 가열)		주로 골재의 굽힘변형이나 굽힘가공에 적용된다.
고리형 열처리		매우 효과적인 열처리 방법으로 특히 마무리가 좋다.

2.1.4 잔류응력 계측방법

용접잔류응력 계측기법은 크게 파괴적 시험법과 비파괴적 시험법으로 구별된다. 대표적인 파괴적 시험법으로는 다음과 같은 방법이 있으며, 이들 시험법은 잔류응력으로부터 해방되는 변형률을 계측하여 해당지점의 잔류응력으로 환산하게 된다.

- ① Hole drilling and ring core method
- ② Layer removal method
- ③ Sectioning method

파괴적 시험법의 경우 시편이 파손되기 때문에 시험 비용이 많이 들어가게 되고, 용접 체결부 시편의 피로파괴시험이 병행되는 경우 용접부 잔류응력을 계측한 시편과 피로시험에 투입되는 시편이 서로 상이하게 된다는 점과 외부 하중에 의한 잔류응력의 변화를 측정할 수 없다는 단점이 있다.

비파괴적 시험법으로는 다음과 같은 계측기법이 있으며, 시편을 파괴하지 않으므로 비용측면에서 유리하나 대부분의 계측장비가 매우 고가이다. 또한 초음파법(ultrasonic method)에서는 노이즈(noise)가 발생하고, 자석식응력지시계법(magnetic method)에서는 상당히 넓은 탐침자 면적의 평균치가 계측되어 용접잔류응력과 같이 비드부에서 급변하는 잔류응력장의 정량화에 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

- ① X-Ray Diffraction(XRD) method
- ② Neutron diffraction method
- ③ Ultrasonic method
- ④ Magnetic method[3]

잔류응력의 측정은 용접에 있어서 어려운 문제 중의 하나이며 여러 가지 방법이 시도되고 있으나 정도가 높고 신뢰성이 있는 방법은 극히 적은 현실이다.

다음은 잔류응력 계측 방법들을 간략히 설명한다.

4.1) 응력이완법

잔류응력을 정량적으로 측정할 때 X선을 이용하는 경우를 제외하고, 절삭 등 기계가공에 의하여 응력을 이완하고, 이때 생기는 탄성변형을 전기적 또는 기계적 변형도계를 써서 측정하는 경우가 많다. 저항선 변형도계(Wire strain gauage)가 가장 널리 사용되고 있으며 이것은 가느다란 Cu-Ni 합금 또는 온도계수가 적은 전기저항선을 종이, 베이클라이트지 등에 붙이고, 보통 위를 펄트로 싼 게이지 및 계측기로 구성되어 있다. 사용법은 게이지를 시험편에 부착하고, 시험편과 함께 하중을 걸면, 게이지에 길이변화가 생기며, 전기저항은 변형에 정비례적으로 변화함으로, 이것을 Wheatstone bridge 기지를 이용하여 측정함으로써, 탄성변형에 의한 역변형량을 알 수 있는 것이다. 게이지는 1방향의 변형을 측정하는 방법과 3방향의 변형을 동시에 측정하는 방법이 있다.

4.2) X선 회절법

그림 2.6은 X선을 이용한 잔류응력 측정장치 전체 사진을 나타낸 것이며, 그림 2.6은 실제 측정 사진으로 이동식 측정기를 나타낸 것이다. 금속재료는 금속원자가 공간에 규칙적으로 배열된 결정격자 구조를 갖고 있다. 이 결정에 파장 λ 의 X선을 비치면, 결정내의 원자면에서 X선이 반사된다. 이것은 거울면에서 빛이 반사하는 원리와 유사하며 이때, 원자면에 대한 X선의 입사각을 θ , 원자면의 간격을 d 라 하면 다음 식과 같은 조건을 만족시키는 방향으로 선택적인 반사가 일어난다.

$$n\lambda = 2d\sin\theta, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

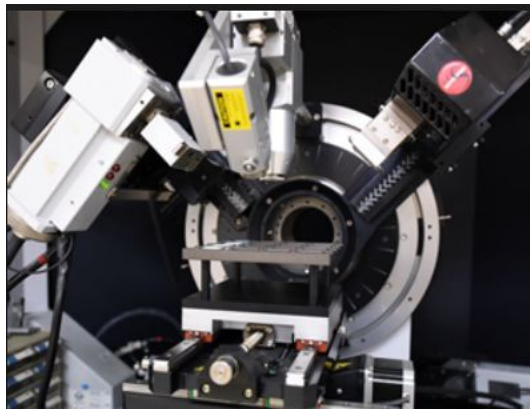
지금 어떤 방향의 반사(n =일정)에 대하여 생각할 때, 결정에 탄성응력이 가해지면, 원자간 간격 d 가 비례적으로 변화함으로, 반사되는 x선의 방향이 변화한다. 이때의 변화를 측정하면 원자면 간격 D 의 변형을 알 수 있으며, 이 값에 의해 곧 응력을 측정할 수 있다. 이 변화가 가장 감도 좋게 측정되는 것은 $\theta=90^\circ$ 부근임으로, 실제의 측정에 있어서는 배면반사의 X선을 이용한다. 이것은 X선 회절법에 의한 잔류응력 측정방법이다.

4.3) 구멍뚫기 방법에 의한 잔류응력 평가

잔류응력의 정량적 평가기법 중 신뢰성이 비교적 높은 구멍뚫기 방법은 잔류응력이 존재하는 부재에 구멍을 천공하면서 주변의 변형구속이 해제된다는 사실에 근거하여 응력 형태의 변화 값이 잔류응력의 측정치가 된다.

천공법에 의해 잔류응력을 이완시킬 때 원형구멍 주위에서의 스트레인 변화량을 계측하는 것이기 때문에 다른 요인에 의한 스트레인의 변화를 최소화하여야 한다. 그러나 이 스트레인의 변화량은 문헌에 따르면 약 40μ 정도의 겉보기 스트레인 변화가 생긴다는 단점을 내제하고 있다[2,4].

그림 2.5 X선 잔류응력 측정 장치




2.2 미스트 분사용 노즐

분무냉각에 사용되는 내부 혼합형 이류체노즐은 고속으로 운동하는 공기의 운동 에너지를 이용하여 액체를 미립화시키기 때문에 액체와 공기가 혼합되어 분무되는 특성을 지니게 된다. 혼합은 액체와 공기의 분사조건 및 충돌 유동조건이 대단히 중요한 인자들로 작용되게 되고 분무 형태는 노즐의 구조적 설계 특성에 따라 좌우된다. 액체와 기체의 충돌에 의한 혼합 분산에 의해서 액체를 미립화하는 것이다. 비교적 낮은 압력에도 미세한 분무를 얻을 수 있으며, 또한 기류와 액류의 충돌방법을 비교적 자유롭게 선택할 수 있어 분무각의 제어가 쉽다는 이점을 갖기 때문에 금속의 열처리 및 제강공정 등 산업현장에 널리 사용 중이다. 표 2.2 와 표 2.3은 이류체노즐의 혼합 및 방식에 따른 종류와 이류체 미세분무노즐 특성을 나타낸다.[5,6,7].

표 2.2 이류체 노즐의 혼합 및 방식에 따른 종류

이류체 노즐	
혼합방법에 따라 내부 및 외부혼합형으로 분류	스프레이 - 압축된 물이 노즐에서 수압에 의해 분무
분무방식에 따라 스프레이 및 미스트로 분류	미스트 - 액적을 분무시키는데 공압에 의해 분무

표 2.3 이류체 미세분무노즐 특성

	<p>XA-PR type</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 비교적 좁은 분사각도(보통20°이하의) Full-cone형 분사형태 ② 기체와 액체가 노즐내부의 혼합실에서 서로 혼합되어 노즐의 선단중심부의 단일 orifice 를 통하여 미세하게 분무된다. ③ 분무되는 액체입자가 미세할수록 기체 소모량은 많아진다.
---	---

2.3 금속재료 및 용접

2.3.1 스테인리스강

스테인리스강은 철(Fe)에 상당량의 Cr(보통 12%이상)을 넣어서 녹이 잘 슬지 않도록 만들어진 강으로 여기에서 필요에 따라 C(탄소), Ni(니켈), Si(규소), Mn(망간), Mo(몰리브덴) 등을 소량씩 포함하고 있는 합금강이라고 볼 수 있다.

일반적으로 산화성 분위기에서 Cr이 약 12% 이상 함유되면 스테인리스강 본래의 부동태 피막을 나타낸다. 이렇게 하여 만들어진 스테인리스강은 철(Fe)을 주성분으로 하면서도 보통강이 가지고 있지 않은 여러 가지 특성, 즉 표면이 미려하고, 외부 환경에 녹이 잘 슬지 않는 점, 열에 견디기 좋은 점 및 저온 분위기에서 외부충격에 대해서도 잘 견딘다는 점을 가지고 있다. 그러므로 이와 같은 특성으로 인해 상용재료로 다양하게 사용되고 있다. 그러나 Cr 및 기타 성분의 함유량에 따라 기계적 성질, 열처리 특성 등에 현저한 변화가 있으며 또한 내식성의 정도에도 큰 차이가 있다. 근래에 와서 다양한 용도에 적합하게 성능 및 용도가 다른 각종의 스테인리스강이 만들어지고 있다. 이들 스테인리스강은 보통 같은 계열에 속하는 것은 비슷한 성질을 가지나 다른 계열에 속하는 것은 스테인리스강이라도 그 성질과 특성에서 대단히 큰 차이가 있다. 일반적으로 스테인리스강은 그 금속조직 및 특성에 따라 마르텐사이트계, 페라이트계, 오스테나이트계, 석출경화형, 오스테나이트-페라이트계 (2상) 등 총 5가지로 대별된다.

스테인리스강은 표면 청결, 우수한 내식성과 내마모성, 높은 강도, 내산화성이 크며, 가공성이 우수한 특징이 있으며 오스테나이트 스테인리스강의 경우에는 저온특성이 우수하며, 내화 및 내열성도 뛰어나다[11].

오스테나이트계 스테인리스강의 용접은 기본적으로 탄소강과 동일하지만 스테인리스강 특유의 특징이 있기 때문에 이들을 잘 이해할 필요가 있다. 스테인리스강과 탄소강의 차이로는 먼저 스테인리스강이 탄소강에 비해 열팽창 계수가 크고 열전도율이 작은 점과 용융온도가 낮다는 점을 들 수 있다. 이 같은 특징을 잘 이해하

여 용접시공 조건을 결정하여야 한다. 또 오스테나이트계 스테인리스강 중에서도 응고균열 감수성이 높은 강종을 용접할 때는 용접금속의 고온균열을 방지하기 위하여 용접금속에 수 %의 페라이트가 함유되도록 용접재료를 선정하여야만 한다. 그러나 이 같은 페라이트는 응고균열 방지에는 효과가 있으나 내식성 및 기계적 성질을 악화시키기 때문에 강종, 용접방법, 용도에 적절한 페라이트 함량을 갖도록 설계된 용접재료를 사용하여야만 한다. 또 적절한 용접재료를 선정하여 사용하더라도 보호가스가 부족하거나 아크 전압이 과다하게 높으면 대기 중으로부터 질소 등의 가스가 혼입 되어 페라이트의 양이 변할 수 있기 때문에 용접시공이 주의 깊게 행해져야 한다. 또한, 오스테나이트계 스테인레스강은 500~800℃로 장시간 가열하거나 서랭하면 결정입계에 크롬탄화물이 석출되기 때문에 크롬 농도가 낮아져 스테인레스강의 특성을 잃게 되어 300계열의 강에 대하여 흔히 언급되는 입계부식이 되기 쉽다. 이를 방지하기 위하여 탄소 함량을 0.03%이하로 낮추거나 니오브나 티타늄을 첨가하여 크롬탄화물 대신 니오브탄화물이나 티타늄탄화물을 석출시켜 탄소를 안정화시켜야한다[15].

2.3.2 가스 텅스텐 아크용접

가스 텅스텐 아크 용접(GTAW : Gas Tungsten Arc Welding)은 티그(TIG : Tungsten Inert Gas) 용접이란 용어로 널리 알려져 있다. 이 용접법은 아르곤(Ar)이나 헬륨(He) 등 불활성 가스 분위기 중에서 텅스텐 전극과 모재 간에 발생시킨 아크로 용접재료와 모재 간에 발생시킨 아크로 용접재료와 모재를 녹여서 접합하는 방법이다. 빨리 산화하여 용접에 어려움이 많은 마그네슘을 용접하기 위해 개발되었으나 현재에는 알루미늄, 스테인레스강, 탄소강, 구리 및 그 합금 등의 용접에 아주 적합한 것으로 알려져 있다.

비소모성 텅스텐 전극봉과 모재간의 아크열에 의해 금속을 용해하여 결합하는 방법으로 용융지, 텅스텐 전극봉, 용가재 주의를 보호가스의 공급에 의해 대기로부터 용접부를 보호하며 모재의 두께에 따라 용가재를 첨가하거나 하지 않을 수도 있다.

그림 2.7과 그림 2.8은 불활성가스 텅스텐 아크용접 계략도 및 TIG용접의 기본 장치도를 나타낸다. 전원(power supply), 토오치(torch), 비소모성전극, 보호가스 공급을 조절하는 유량계 등이 있다.

현재 사용되고 있는 TIG용접기 전원은 정전류 특성인 AC와 DC이다. AC 및 DC의 선택은 용접특성 및 모재재질에 따라 좌우된다.

전원으로서 아크가 안정하고, 전극 소모가 적은 직류 전극 마이너스(DCSP)가 가장 널리 사용된다. 그러나 알루미늄이나 알루미늄을 많이 포함하는 합금 등에서는 표면의 산화피막에 의해 용접 시 악영향을 미치므로, DCSP에서는 용접이 곤란하게 된다. 이러한 경우에는 청정작용(Cleaning action) 효과를 얻을 수 있는 직류 전극 플러스(DCRP) 또는 교류(AC)를 이용한다.

청정작용이란 용접 시 용접봉과 모재 사이의 극성 배치가 전극봉이 양극(+), 모재가 음극(-)으로 연결되었을 때 음극 쪽인 모재 표면에 발생하는 음극 청정작용으로 산화막이 제거되는 것을 뜻한다. 이 청정작용은 대부분의 금속에서 발생하며 알루미늄과 마그네슘 등과 같이 산화력이 높으며, 산화물의 용융온도가 모재의 용융온도보다 높은 재질에서 특히 중요하다. 이 재질의 용접 시에는 산화물이 녹지 않고 용융지를 덮고 있어 용융지의 흐름이나 용접과 용융금속간의 결합을 방지하기 때

문에 용접이 곤란하다. 따라서 가스 용접이나 수동 아크 용접 시에는 산화물을 화학반응으로 제거할 수 있는 용제를 사용해야 하며, 불활성가스 아크용접 시에는 청정작용으로 모재 표면의 산화막이 제거되어 용제 사용 없이 용접할 수 있게 된다. 다음 표 2.4는 극성에 따른 비드형상 비교를 나타낸다.

2.1) 직류 정극성(D.C.S.P)

전자가 모재에 매우 빠른 속도로 부딪치기 때문에 모재에 상당한 열을 발생시킨다. 그러므로 모재가 빨리 녹게 되고 양전하를 띤 가스이온이 전극봉 쪽으로 느린 속도로 움직이므로 모재 표면의 산화막을 제거하는 청정작용이 없다. 정극성에서는 용입이 깊고 용접속도가 빠르며 비드 폭은 좁아진다.

2.2) 직류 역극성(D.C.R.P)

텅스텐 전극봉이 모재보다 열을 많이 받기 때문에 직류 정극성보다 4배 정도 사이즈가 큰 전극봉을 사용해야 한다. 텅스텐 전극봉이 커지면 아크가 불안정하므로 실제 용접에 잘 이용되지 않는다.

2.3) 교류(AC)

교류용접은 특히 알루미늄, 마그네슘과 같은 경금속 용접에 적합하다. 이론적으로는 교류전원의 반은 DCSP이고 나머지 반은 DCRP이다. 그러나 실제적으로 역극성 방향에서는 모재표면의 녹, 수분, 산화막 등이 교류흐름을 방해한다. 그러므로 아크는 불안정하여지고 꺼지게 된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 용접전류에 높은 전압과 고주파를 첨가한다. 고주파 전류는 산화막을 뚫어 용접전류가 통과할 수 있는 통로를 만들어 모재 간 아크를 안정하게 유지시켜준다.

그림 2.7 불활성가스 텅스텐 아크용접 계략도

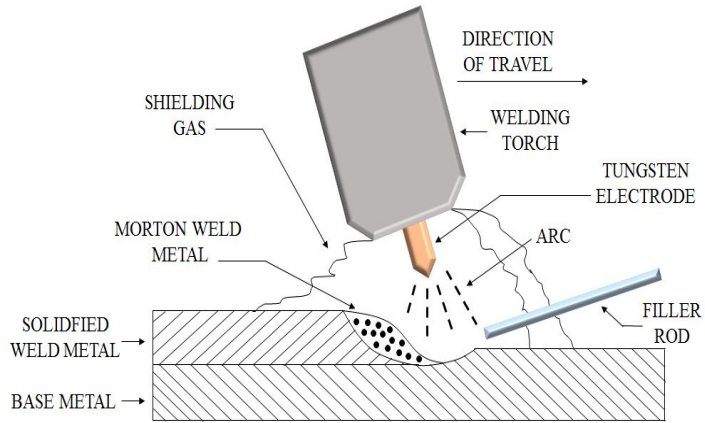


그림 2.8 TIG 용접의 기본 장치도

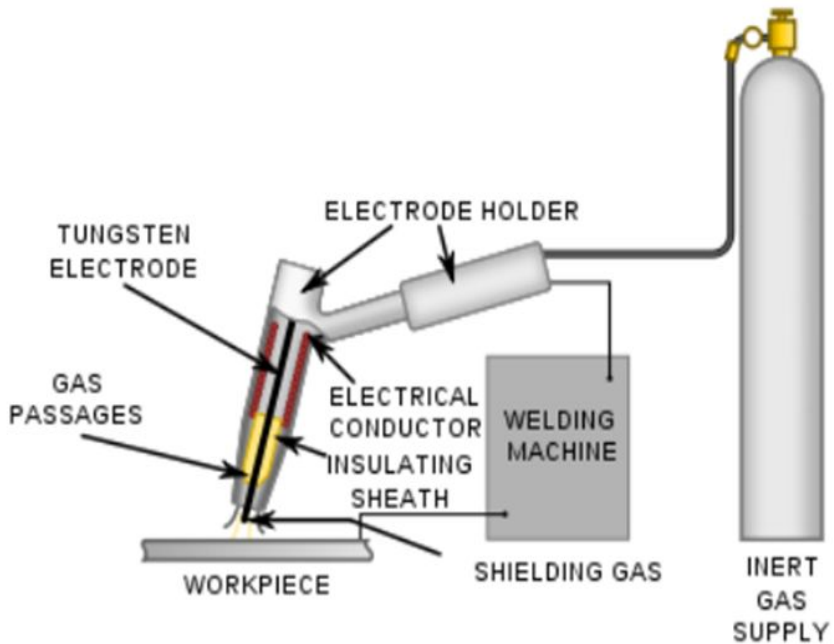
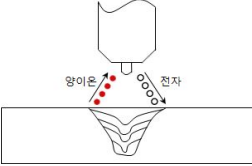
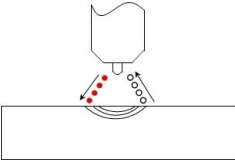
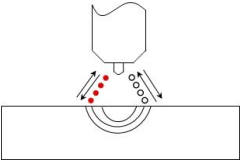


표 2.4 극성에 따른 비드형상 비교

사용극성	DCEN	DCEP	AC
전자와 이온의 흐름 용입 현상			
청정 작용	없음	있음	있음 (DCEP의 50%)
발생 열	70% 모재	30% 모재	50% 모재
	30% 전극봉	70% 전극봉	50% 전극봉
용입	깊고 좁음	얕고 넓음	중간
용도	대부분의 금속의 용접	박판 용접	Al, Mg

제 3 장 실험방법

3.1 사용 재료 및 실험조건

3.1.1 시험편 및 용접재료

본 연구에 사용된 금속재료는 오스테나이트계 스테인리스강 STS304이며 용접 시험편규격을 그림 3.1과 같이 길이 2 mm, 폭 100 mm, 길이 200 mm 시험편을 제작 하여 TIG(Tungsten Inert Gas welding), HSW(heat sink welding) 용접을 실시 하였다. 다음 표 3.1과 표 3.2에서는 시험편 화학적 조성치와 기계적 특성을 나타 내었다.

그림 3.1 주요 실험에 대한 시험편의 치수

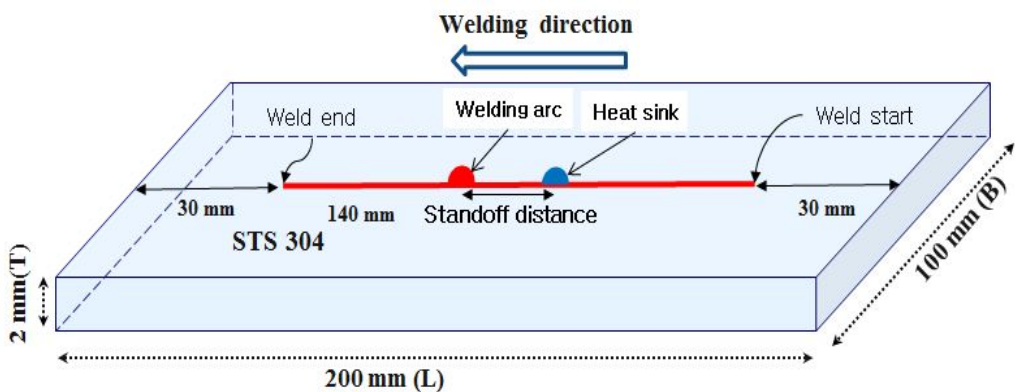


표 3.1 STS304 화학성분

재료 \ 성분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
STS 304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	18.00 ~20.00	8.00 ~10.50

표 3.2 STS304 기계적 특성

Material	Y.S(MPa)	T.S(MPa)	E.I(%)
STS 304	290	580	60

3.1.2 용접 및 이류체노즐 조건

각 공정별 TIG(Tungsten Inert Gas welding), HSW(Heat Sink Welding)의 BOP(Bead on plate) 실험을 실시하여 주요 변수 조건을 선정하였다.

용접시편 중앙으로 제살용접(Autogenous Weld)으로 BOP용접을 아래보기 자세로 TIG 자동용접 한다. 보호가스(Shield Gas)로는 순도 99.9%의 Ar gas를 사용하였다. 다음 표3.3의 용접조건을 고정하여 실험을 진행하였다.

표 3.3 TIG 용접조건

Welding process	Welding current	Welding voltage	Welding speed	Welding heat point
GTAW	100 A	10 V	10 mm/s	1kJ/cm

다음 표 3.4는 HSW 용접 시 후방에서 미스트냉각(mist cooling)을 실시할 때 고정되는 조건을 나타낸다. 본 실험에서는 PR 종류 및 Standoff Distance(SOD)를 변수로 실험을 진행하였다.[10]

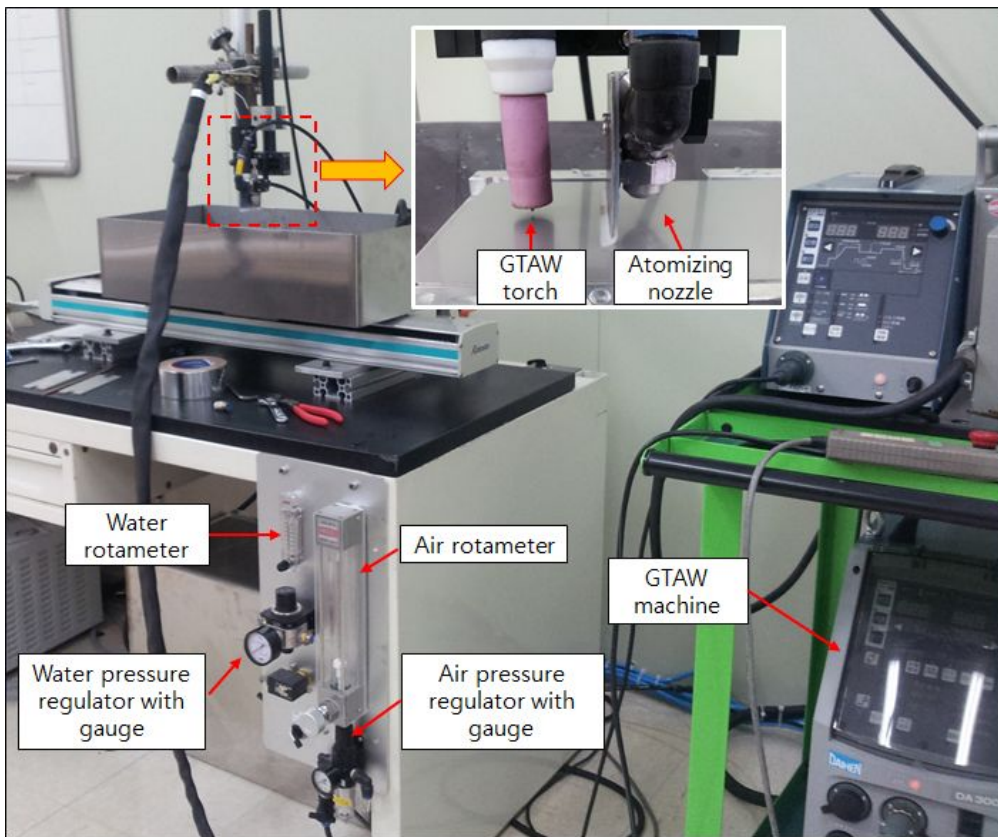
표 3.4 이류체 노즐 냉각조건

Atomized spray	Air	Water	Height	Radius
PR 200	1 Bar	0.1 MPa	10 mm	9 mm
PR 150	1.2 Bar	0.1 MPa	10 mm	9 mm
PR 100	0.8 Bar	0.1 MPa	10 mm	9 mm

3.2 장치구성

본 연구에서 사용되어진 TIG 용접기는 DAIHEN사의 DA300P 교류/직류 겸용 용접기로서 교류 주파수를 200Hz까지 조절가능하며, 아크 집중성이 대폭 향상하는 장점을 갖고 있다. 그리고 분무냉각에 사용된 노즐은 한미노즐ENG(주)사의 XA-PR 계열의 이류체 노즐로서 비교적 좁은 분사각도의 Full-cone형 분사형태이며, 혼합형으로 미세하게 분부가 되어 직진성이 크다는 장점을 갖고 있다. TIG 토치와 이류체노즐 사이에 세라믹 판을 설치하여 미스트분무 액적들이 용접에 방해되지 않도록 하였다. 다음 그림3.2는 전체 장치구성을 보여주고 있다.

그림 3.2 전체 장치구성

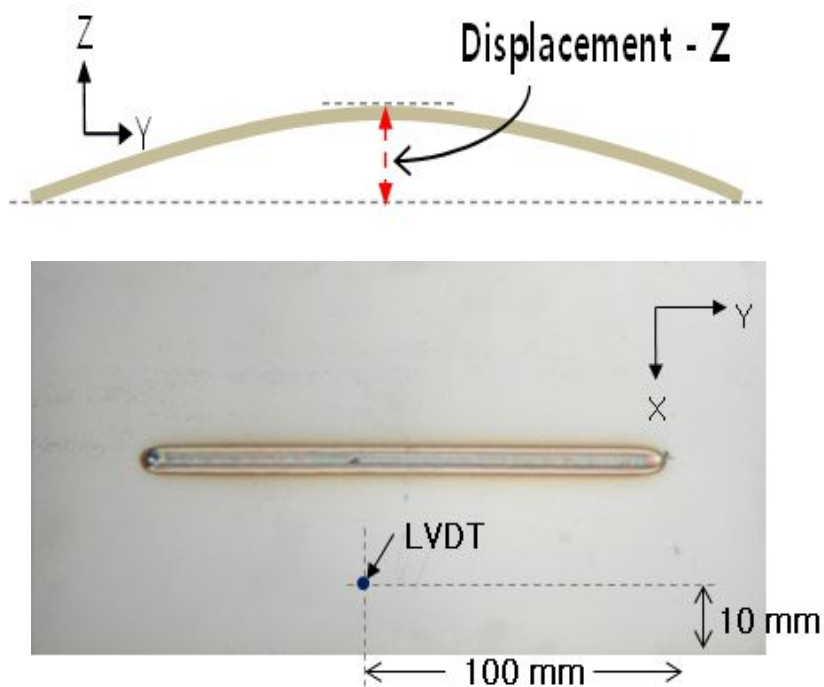


3.3 실험방법

3.3.1 면외변형량 계측

각 공정별 conventional welding, Heat Sink welding(HSW) 용접 후 발생한 변위량을 측정하였다. 수차례 용접을 실시하여 변형이 발생된 시편들을 레이저 변위계를 사용하여 최대변형 지점을 선정 후 LVDT(Linear variable differential transformer)을 사용하여 Z변위를 측정하였다. 다음 그림 3.3는 LVDT를 이용하여 측정할 지점을 나타내는데, 폭 및 길이방향 끝단으로부터 각각 10mm, 100 mm 떨어진 지점에 LVDT를 위치한 후 용접 전후의 면외변형 변위를 관찰하였다.

그림 3.3 면외변형 최대지점 선정



3.3.2 온도분포이력 측정

각 공정별 TIG, HSW 용접 시 발생하는 온도이력 분포를 K-type형 열전대를 이용하여 측정하였다. 이때 용접중심부를 기준으로 0, 5, 10, 16, 24, 32, 40mm 간격으로 시편 이면에 K-type 열전대를 부착 후 측정하였다. 다음 그림 3.4와 그림 3.5 같이 열전대를 부착한 모습과 시편이면의 부착 지점 간격을 나타낸다. 열전대를 아크쪽이 아닌 시편의 이면에 부착하는 이유는 용접열에 의해 녹을 수 있으며 HSW용접의 경우 냉각시스템에 의해 직접적으로 분사된 액적들의 영향을 받기 때문이다[17].

그림 3.4 K-type 열전대 용접부의 이면에 부착

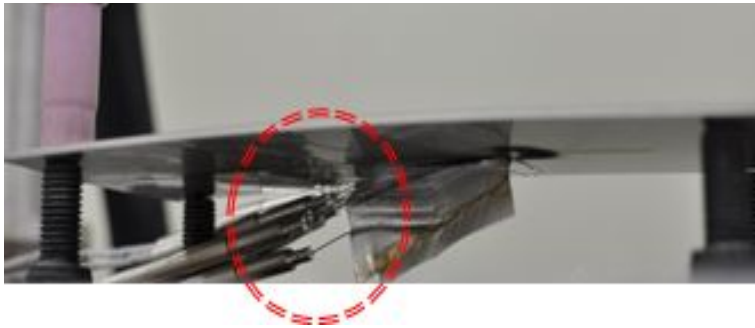


그림 3.5 열전대 부착 지점 선정



3.3.3 잔류응력 계측

각 공정별 TIG, HSW 용접 시 발생하는 잔류응력을 측정하였다. 이때 용접중심부를 기준으로 0, 5, 10, 16, 24, 32, 40mm 간격으로 시편에 2축 (X,Y축) Strain gauge를 부착하여 측정하였다. 위치 선정 시 고려사항은 다음과 같다. 용접 비드는 형태상 게이지 부착이 용이하지 못하기 때문에 용접비드에서 가장 가까운 곳으로부터 일정한 간격으로 잔류응력 위치를 선정하였다. 비드 방향으로는 잔류응력이 가장 크게 발생될 것으로 예상되는 시편의 중앙부를 선정하였다[16]. 그림 3.6과 그림 3.7과 같이 단면의 범위를 고려하여 용접부 기준으로 상·하단에 스트레인게이지를 부착하였고 Water jet을 이용하여 단면을 절단하여 절단 전후의 스트레인차를 계측하였다.

그림 3.6 스트레인게이지 부착 지점

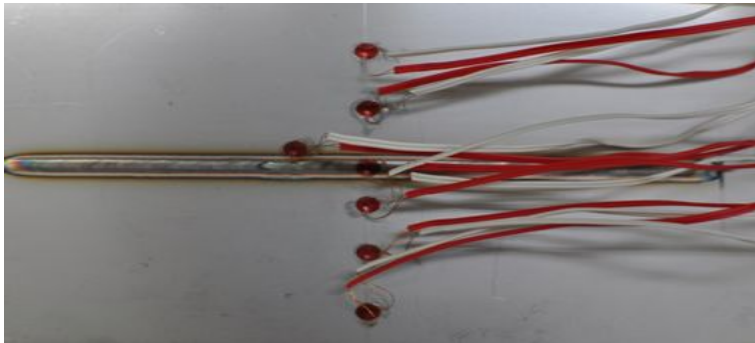
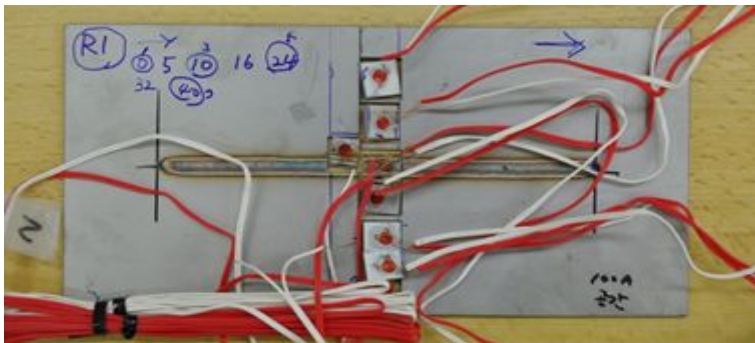


그림 3.7 Water jet 이용한 단면절단



3.3.4 인장강도 및 경도

각 공정별 TIG, HSW 용접부의 인장 강도를 평가하였다. 인장시험편은 KS B 0801 규격(ISO 6892)에 규정된 시험 속도 0.083 mm/sec로 실험을 실시하였다.

다음 그림 3.8은 시험편의 규격을 나타내었다.

각 공정별 TIG, HSW 용접부에 대하여 경도 측정은 그림 3.9에 나타낸 Akashi사의 HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하였다. 현미경 배율은 50 μ m이며, 136° 다이아몬드 피라미드 입자를 사용하였다. 경도 측정을 위하여 용접부 횡단면을 절단하여 미세연마 후 애칭 후 측정하였다.

용접부 상부표면으로부터 횡방향으로 0.5mm 간격으로 하중 0.2kgf, 하중유지시간 10sec로 경도를 측정하였다

그림 3.8 인장시험 시편의 치수

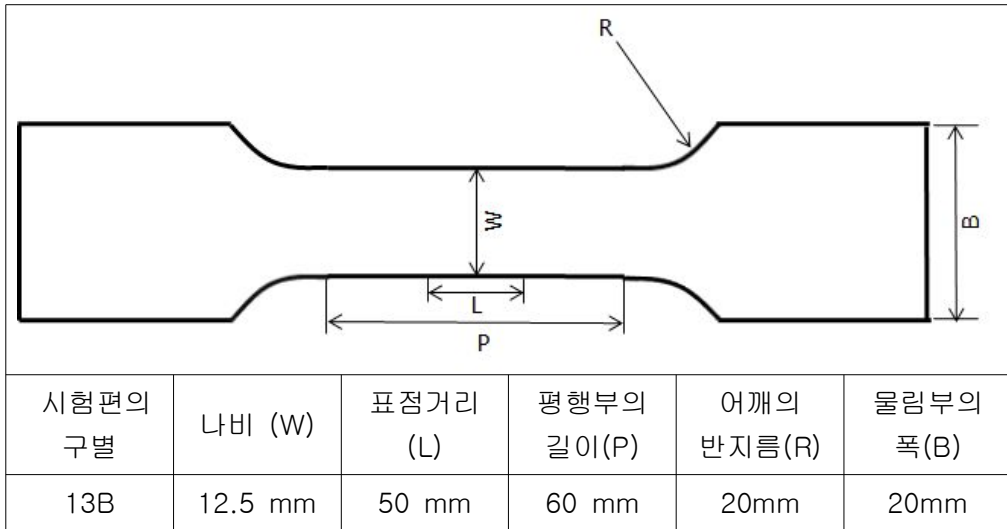
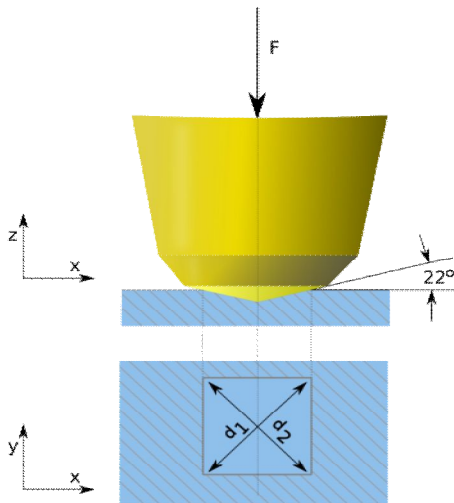


그림 3.9 비커스 경도 시험 계략도 및 장비



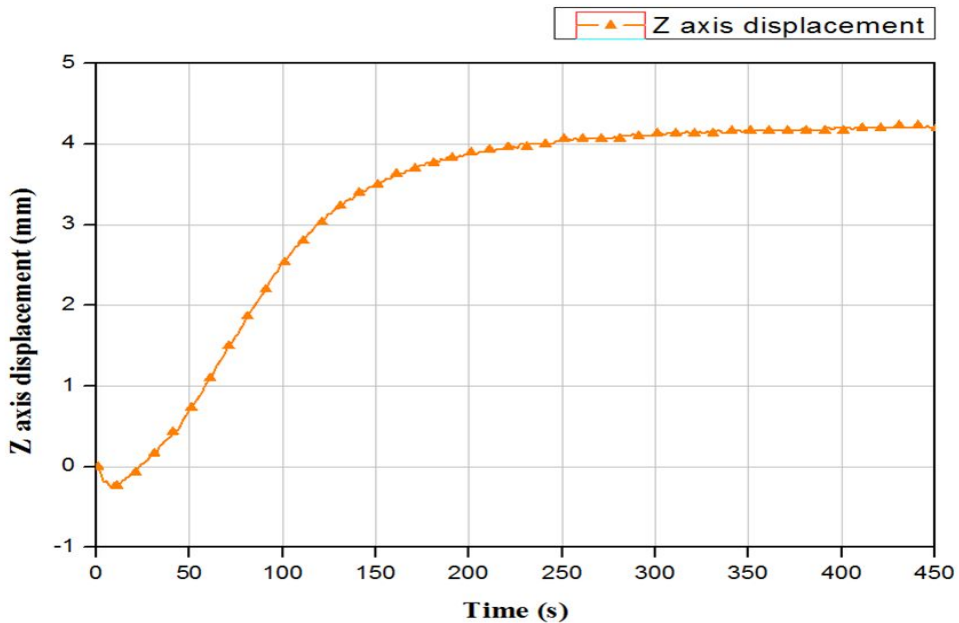
제 4 장 결과 및 고찰

제 1절 Bead on plate 및 Heat sink welding 분석

4.1.1 면외변형량

두께가 2mm인 오스테나이트계 스테인레스강(STS304)에 GTAW(Gas Tungsten arc welding)용접을 실시하여 선정해놓은 LVDT지점에서 Z축 변위를 측정하 값은 다음 그림 4.1의 그래프와 같다. 용접할 때 초기에 열을 받아서 잠깐 팽창하였다가 용접이 끝난 20초 이후부터 서서히 서랭하면서 수축하여 위로 볼록한 형상이 되며 최대 약 4.2mm의 변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 4.1 시간에 따른 BOP용접 시 LVDT 측정지점에서의 면외변형량



4.1.2 온도이력

각 공정별 TIG, HSW용접을 실시하기 전 용접부 이면에 미리 선점 해놓은 7개의 지점을 용접부 중심부로부터 0, 5, 10, 16, 24, 32, 40mm로 하고 K-type형 열전대에 따른 결과 그래프이다.

다음 그림 4.2를 보면 BOP용접 시 시간에 따라 용접부 중앙부터 외측까지 점차 온도가 낮아지고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 4.3을 보면 HSW 용접 시 통상적인 용접과 달리 용접부의 온도이력곡선에 왜곡이 생긴 것을 알 수 있다.

다음 그림4.4와 같이 BOP와 HSW의 용접부에서의 온도이력만 놓고 비교를 해보았을 때, 같은 시간대에 약 300℃ 이상 차이가 나는 것으로 보아 미스트냉각을 적용했을 때 급랭이 더 잘 되는 것을 알 수 있다. 또한 예민화구간(500~800℃)이 약 1초정도 감소되는 것으로 보아 오스테나이트계 스테인리스강의 입계부식방지에 도움이 될 것으로 사료된다.

그림 4.2 시간에 따른 BOP용접시 온도이력

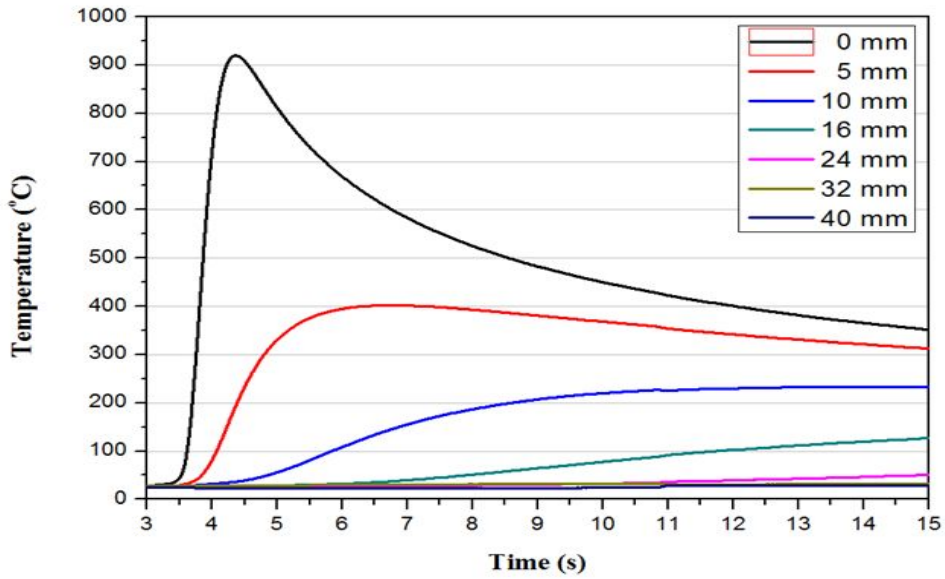


그림 4.3 시간에 따른 HSW용접시 온도이력

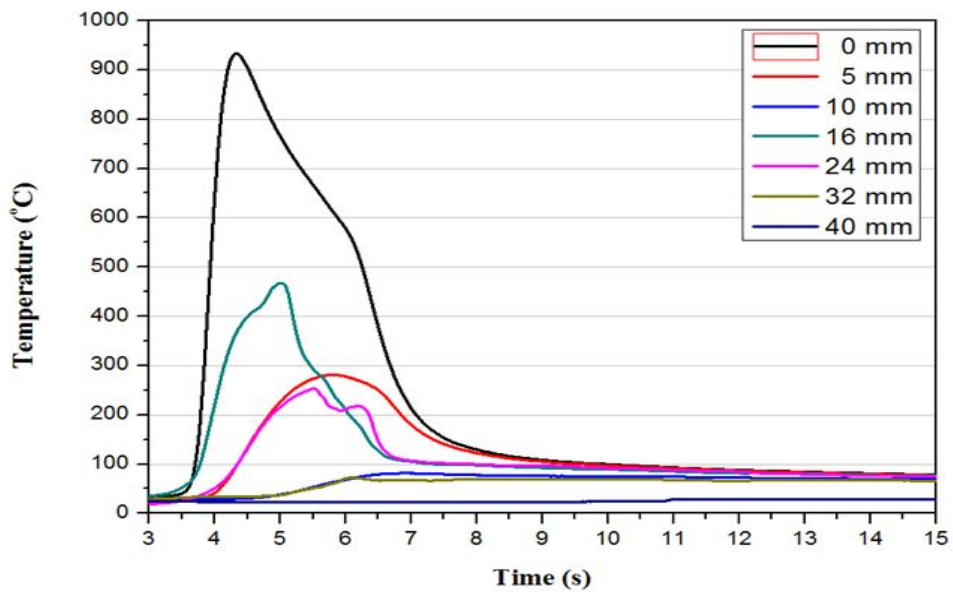
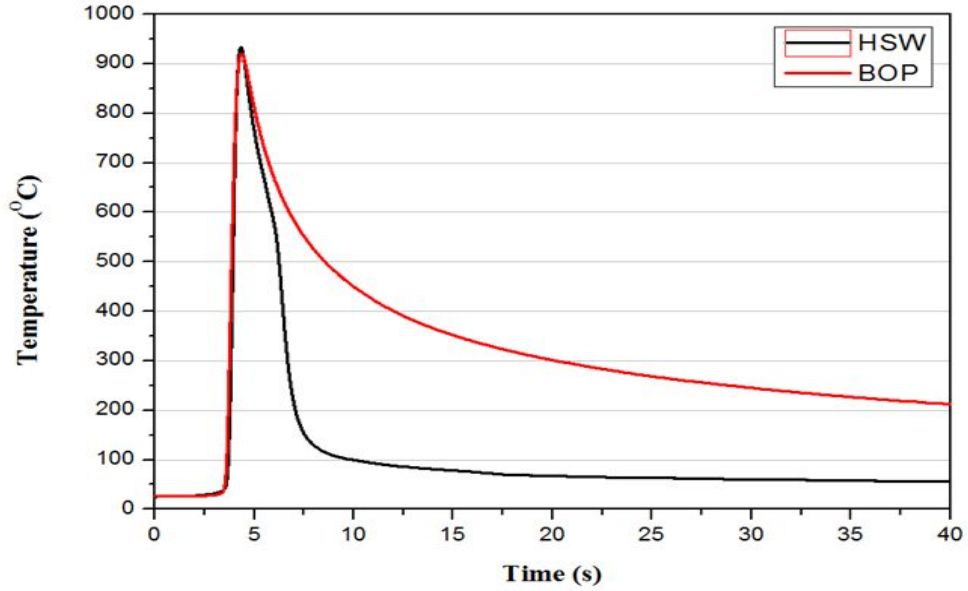


그림 4.4 시간에 따른 BOP 와 HSW 온도이력 비교



4.1.3 잔류응력

다음 그림 4.5와 그림 4.6은 각 공정별 TIG, HSW용접을 실시한 후 선점 해놓은 7개의 지점을 용접부 중심부로부터 0, 5, 10, 16, 24, 32, 40mm로 하고 스트레인 게이지를 부착하여 얻은 그래프이다.

길이방향의 구속도가 폭이나 두께보다 크기 때문에 통상적인 용접을 적용한 시편과 냉각용접을 적용한 시편을 비교해보면 용접부의 길이방향 인장잔류응력은 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 분포양상에서는 뚜렷한 차이를 보인다. 즉 통상적인 용접시편의 경우 폭 방향에 걸친 길이방향 응력성분이 모두 인장상태로 존재하는 반면 미스트냉각을 적용하여 제작한 시편의 용접잔류응력은 용접부 중심부에는 인장잔류응력이 발달해 있고 폭의 바깥으로 갈수록 압축응력이 발달하고 있다. 전체적으로 인장응력 발생부 면적과 압축응력 발생부 면적이 유사하다, 이 결과로 유추해볼 때 통상적인 용접부에서 관찰되는 위로 볼록한 형태의 변형은 상부의 인장잔류응력 분포형태와 연관 지을 수 있으며 하면의 잔류응력 분포는 압축응력이 분포하고 있는 형태로 존재할 것으로 추측된다. 반면 냉각용접을 적용한 시편의 경우 길이방향 잔류응력이 폭 방향으로 인장과 압축이 균형을 이루고 있다는 것은 최종 변형 상태가 평평한(flat)한 것과 밀접한 연관이 있다고 판단된다.

그림 4.5 BOP의 중심부로부터 길이 및 폭방향 잔류응력측정 결과

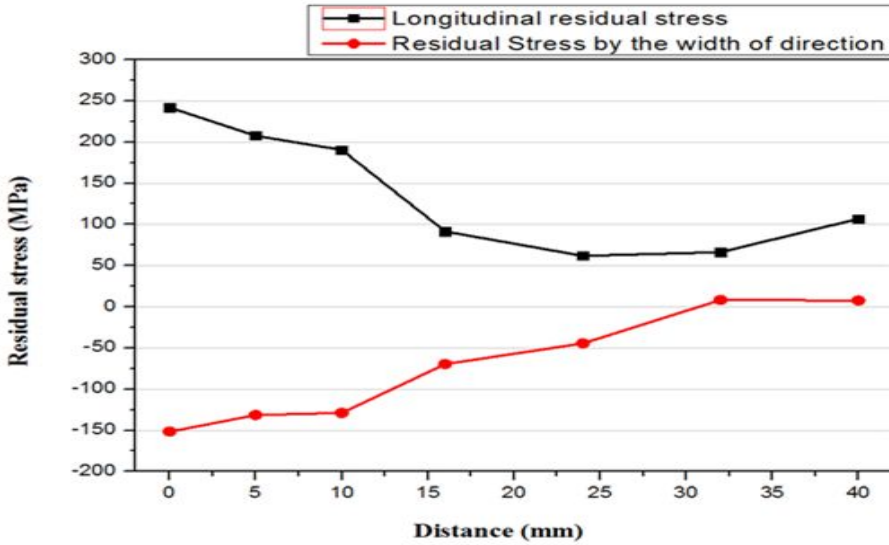
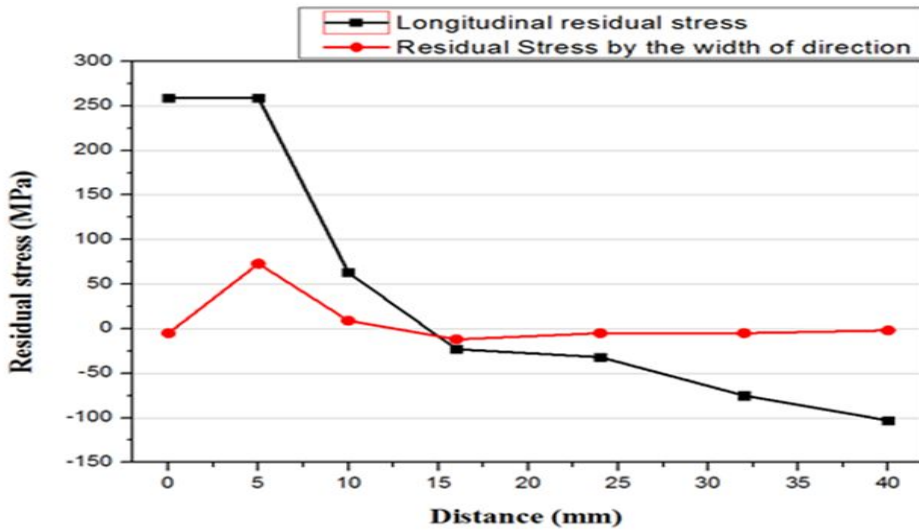


그림 4.6 HSW의 중심부로부터 길이 및 폭방향 잔류응력측정 결과



4.1.4 인장강도 및 경도

다음 그림 4.7의 그래프를 보면 냉각부가 적용된 시편의 인장강도가 모재보다 더 높으나 연신율은 10% 저하된 것을 알 수 있다.

또한, 그림 4.8의 그래프를 보면 HSW가 BOP보다 용접부에서 경도 값이 20~40HV 상승하는 것을 알 수 있다. 위와 같은 현상이 일어나는 것은 오스테나이트계 스트레인이리스강 용접 시 미스트 분무를 함으로써 얻어지는 냉각효과, 즉 경화가 일어난 것으로 사료된다.

그림 4.7 HSW와 모재 인장강도 비교

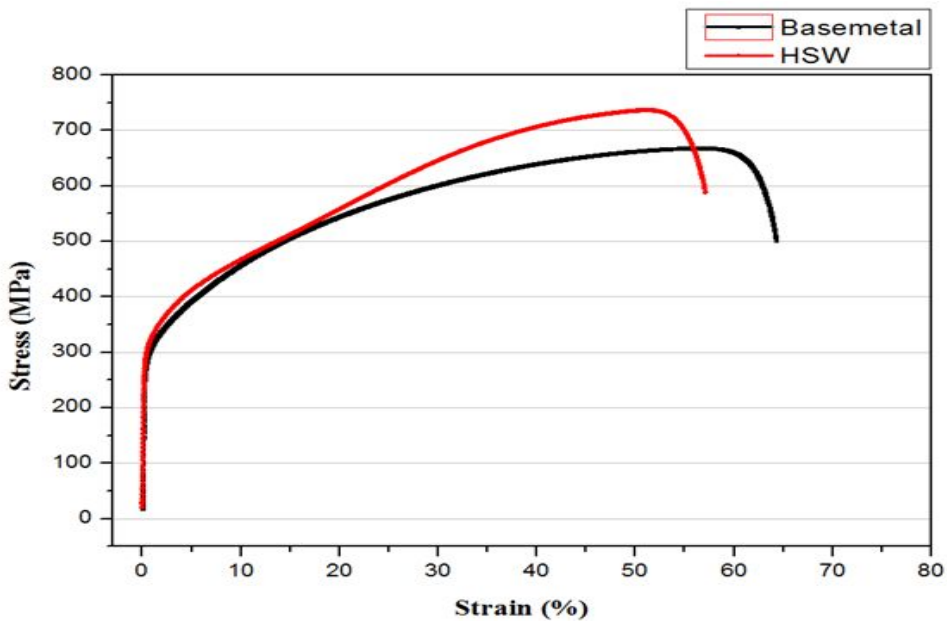
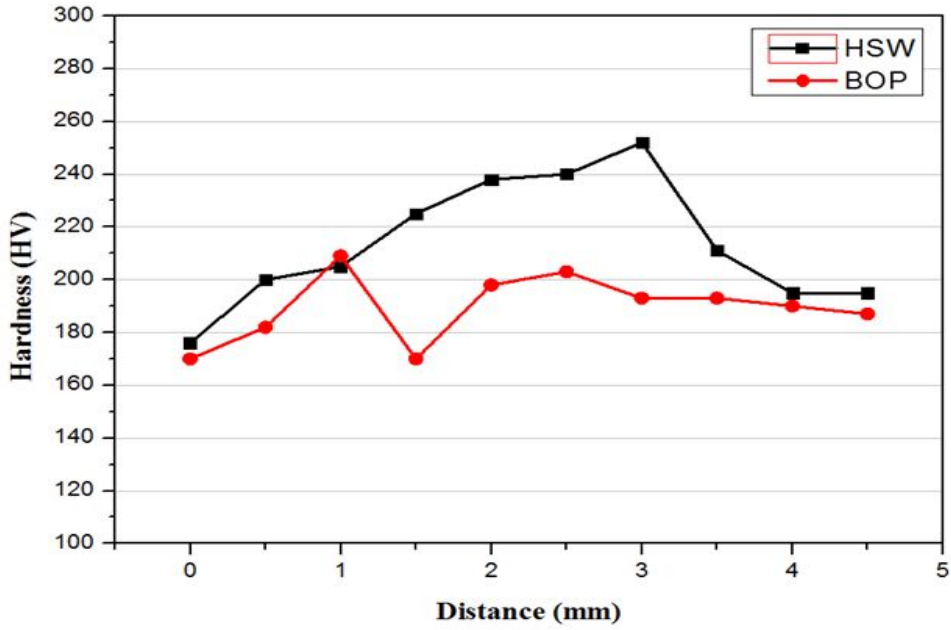


그림 4.8 HSW와 BOP 경도 비교



4.1.5 공정별 시편 비교

다음 그림 4.9와 그림 4.10은 각각 BOP 및 HSW 용접을 실시한 시편이다. 두 시편의 용접조건은 표 3.3과 같으며, HSW 경우 표 3.3의 용접조건과 표 3.4의 이류체노즐 조건에 아크와 냉각부의 이격거리 SOD(Standoff distance)를 변수로 실험을 진행한 결과 표 4.1 최적의 조건을 도출하였다.

그림 4.9 최적 실험조건 BOP와 HSW 시편



표 4.1 이류체 노즐 최적 냉각조건

Atomized spray	Air	Water	Height	Radius	Standoff distance
PR 200	1 Bar	0.1 MPa	10 mm	9 mm	25mm

제 5 장 결 론

본 연구에서는 산업분야에 많이 쓰이는 오스테나이트계 스테인레스강(2mm)에 대하여 BOP와 HSW 용접을 실시하여 용접변형 및 잔류응력, 온도이력, 그리고 기계적 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) LVDT를 이용한 BOP 용접은 Z축 변위량이 약 4.2mm인 반면 HSW적용 시에는 변형이 없음을 발견 할 수 있었다.
- 2) 열전대를 이용하여 온도이력을 확인한 결과, 예민화구간(5~800도)를 BOP보다 HSW용접이 약 1초정도 더 빠르게 급랭하는 것을 관찰 할 수 있는데, 이는 입계부식감소 측면에서 유리할 것으로 사료된다. 또한 같은 시간대에 온도차이가 약 300도 이상 나는 것으로 보아 미스트냉각의 급랭효과가 크다는 것을 알 수 있었다.
- 3) BOP와 HSW 모두 인장응력이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있고, 길이방향의 잔류응력의 최대 크기는 큰 차이가 없지만 HSW의 경우에는 인장과 압축 잔류응력이 균형을 이루는 것을 알 수 있었다.
- 4) 인장강도는 모재보다 HSW가 약 50Mpa 상승하였으나 연신율은 저하됨을 알 수 있었으며, 경도값은 BOP보다 HSW가 약 20HV정도 높은 것을 알 수 있는데 이는 급랭으로 인한 경화현상이 발생한 것으로 사료가 된다.
- 5) 용접열원과 미스트냉각 이격거리(SOD)값은 PR200의 노즐일때 25mm가 최적의 조건으로 도출되었으며 시편의 변형이 없었다.
- 6) 실험결과 미스트냉각이 변형저감에 효과적인 것을 확인하였으며 박판용접 시 발생하는 면외변형, 특히 좌굴변형 방지에 효과적으로 적용이 가능하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 김재웅·양영수 : 용접 잔류응력과 변형, 대한용접·접합학회, 2011.01, pp3-151
- [2] 권명옥 : 스테인레스강의 용접, 한국철강협회 스테인리스스틸클럽, 1999.01, pp111-175
- [3] N. S. Rossini : Methods of Measuring Residual Stresses in Components, Materials and Design, 2012, vol.35, pp572-588
- [4] Frag Soul and Nada Hamdy : Numerical Simulation of Residual Stress and Strain Behavior After Temperature Modification, INTECH, 2012, pp217-242
- [5] 시성규 : 선재주변의 Mist 분무 유동장 해석, RIST, Vol.17, 2003, pp51-57
- [6] 이수관 : 고온 실리더의 미스트 냉각, 대한기계학회, Vol.26 No.3, 2001 pp448-457
- [7] 진성태 : 물-공기 혼합 분무에 의한 고온 금속 표면의 냉각실험, 부산대학교, 석사 2003
- [8] D.G. Richards : Simulation of the Effectiveness of Dynamic Cooling for Controlling Residual Stresses in Friction Stir Welds, Manchester University, 2008, pp1-10
- [9] Guan Q, Brown K. W. and Guo D: Method of apparatus low stress non distortion welding of thin welded of thin-walled structural elements, International Patent Application No. PCT/GB88/00136, 1989
- [10] N. Bagshaw : Low stress no distortion(LSND) welding in 304 stainless steel: Improved numerical simulation and experimental validation, The Welding Institute, 2004.11, pp813
- [11] 박현미 : STS304강판 용접부의 초음파 특성에 관한 연구, 부경대학교, 석사 2011

- [12] 박만진 : 중성자 회절을 이용한 Stainless steel 용접부위의 잔류응력 측정, 서울산업대학교, 석사 2001
- [13] 박성호 : AISI 304강의 상온/고온 인장특성에 관한 연구, 한국추진공학회, 2008, Vol.12 No.5, pp35-42
- [14] 방한서 : 박판 구조물의 용접 설계, 대한용접·접합학회, 용접기술강습회, 1994, pp325-328
- [15] 나의균 : SUS 316 스테인레스강 TIG용접부의 부식특성평가에 관한 연구, 대한기계학회, 2012, pp32-36
- [16] 최원두 : TIG용접 시 박판에 작용하는 열응력 해석 및 잔류응력 측정에 관한 연구, 충남대학교, 석사 2001
- [17] 천광산 : X선 회절법을 이용한 선체 용접잔류응력 및 이완도 평가, 목포대학교, 석사 2009
- [18] 선상우 : 전자처리 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 용접 및 하중 조건에 따른 구조용 강재의 용접부 잔류응력 측정, 조선대학교, 석사 2014
- [19] 홍성성 : ESPI를 이용한 하중조건에 따른 용접부의 잔류응력 정량평가, 조선대학교, 석사 2012
- [20] 방한서 : 용접부의 강도 및 변형, 대한용접·접합학회, 용접공학하계대학교재 1995, pp215-225
- [21] 방한서 : 고장력강 용접이음부의 용접응력 및 열 분포 특성에 관한 연구, 대한용접·접합학회, 1997, vol.1 ,pp59-63