



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](#)

2017년 8월
석사학위논문

고망간강/스테인레스강 맞대기 용접시
물리적 성질이 잔류응력에 미치는 영향

조선대학교 대학원

토목공학과

유기상

고망간강/스테인레스강 맞대기 용접시 물리적 성질이 잔류응력에 미치는 영향

Effect of Material Properties on Residual Stress in Butt
Welding of High Manganese Steel / Stainless Steel

2017 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

유 기 상

고망간강/스테인레스강 맞대기 용접시 물리적 성질이 잔류응력에 미치는 영향

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2017 년 04 월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

유 기 상

유기상의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김영중 (인)

위원 조선대학교 교수 박祥濬 (인)

위원 조선대학교 교수 차正雄 (인)

2017년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
제2장 이론적 배경	5
2.1 잔류응력	5
2.1.1 잔류응력의 생성원인	5
2.1.2 잔류응력이 강구조물에 미치는 영향	8
2.1.3 잔류응력 측정방법	12
2.2 이종용접	23
2.2.1 스테인리스강	23
2.2.2 스테인리스강의 용접	25
2.3 열전도 및 열탄소성 이론	26
2.3.1 열전도 이론의 정식화	26
2.3.2 열탄소성 이론의 정식화	27

제3장 동종/이종재의 용접잔류응력 해석 및 영향 29

 3.1 동종/이종재의 용접잔류응력 해석 및 실험 29

 3.1.1 동종/이종 용접잔류응력 해석 29

 3.1.2 동종/이종 용접잔류응력 실험측정 및 비교 46

 3.1.3 동종/이종 용접잔류응력 비교 52

 3.2 이종용접부의 물성치에 따른 잔류응력의 영향 61

 3.2.1 항복응력에 따른 잔류응력의 영향 66

 3.2.2 탄성계수에 따른 잔류응력의 영향 68

 3.2.3 열 전단계수에 따른 잔류응력의 영향 70

 3.2.4 열팽창 계수에 따른 잔류응력의 영향 72

 3.2.5 고찰 74

 3.3 동종/이종 외적하중에 대한 역학적 거동 76

 3.3.1 용접선 방향 잔류응력에 인장응력을 가함 77

 3.3.2 용접선 직각방향 잔류응력에 인장응력을 가함 83

제4장 결 론 89

참 고 문 헌 91

그림 목 차

그림 1.1	도로교의 철거, 교체이유의 내역	1
그림 1.2	부식 손상 증가율 및 유지보수 비용 분석	4
그림 2.1	조립 3부재의 잔류응력	6
그림 2.2	주변이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포	6
그림 2.3	구속된 용접이음에 생기는 잔류응력 분포	7
그림 2.4	균열 부근의 용접 잔류응력 분포	9
그림 2.5	용접잔류응력의 영향	11
그림 2.6	측정법에 따른 측정 깊이	12
그림 2.7	브래그의 법칙	13
그림 2.8	중성자회질을 이용한 변형률 측정	14
그림 2.9	Definition of inherent strain	16
그림 2.10	Brueckner의 중첩원리	18
그림 2.11	2차원에서의 탄성중첩원리	19
그림 2.12	Deep hole drilling technique	20
그림 3.1	시험편의 치수	30
그림 3.2	시험편의 경계조건	31
그림 3.3	동종/이종강재의 용접부 형상	32
그림 3.4	용접부의 Base metal 과 Filler metal의 위치	33
그림 3.5	온도에 따른 재료의 물성치의 거동	34
그림 3.6	시험편의 기계적 성질의 온도의 의존성	34
그림 3.7	동종강재 용접시 단면 마크로와 FEM해석 단면 형상	35
그림 3.8	이종강재 용접시 단면 마크로와 FEM해석 단면 형상	36

그림 3.9 동종강재의 용접부 부분의 잔류응력	37
그림 3.10 이종 강재의 용접부 부분의 잔류응력	39
그림 3.11 잔류응력 측정 위치	40
그림 3.12 동종 용접의 잔류응력	40
그림 3.13 동종 용접의 σ_y 잔류응력	41
그림 3.14 이종용접 Case 별 잔류응력	45
그림 3.15 시험편 절단 순서	47
그림 3.16 시험편 strain gage 부착 및 세부절단	47
그림 3.17 동종용접의 해석과 실험결과 비교	48
그림 3.18 Case 1의 해석과 실험 결과 비교	49
그림 3.19 Case 2의 해석과 실험 결과 비교	50
그림 3.20 Case 3의 해석과 실험 결과 비교	51
그림 3.21 Case 별 해석의 잔류응력 측정위치	52
그림 3.22 측정 위치별 용접선 방향(σ_x)의 동종/이종 잔류응력비교	55
그림 3.23 측정 위치별 용접선 방향(σ_y)의 동종/이종 잔류응력비교	58
그림 3.24 측정 위치별 용접선 방향(σ_z)의 동종/이종 잔류응력비교	60
그림 3.25 모델 형상 및 치수와 해석 pass순서	61
그림 3.26 비교 모델의 잔류응력 측정위치	62
그림 3.27 측정위치별 용접선방향(σ_x), 용접선 직각방향(σ_y)의 잔류응력 비 교	64
그림 3.28 물성치에 따른 잔류응력 측정위치	65
그림 3.29 항복응력 변경 후 동종/이종 비교	67
그림 3.30 탄성계수 변경 후 동종/이종 비교	69
그림 3.31 열전달계수 변경 후 동종/이종 비교	71

그림 3.32 선팽창계수 변경 후 동종/이종 비교 73
 그림 3.33 Case 4와 이종용접의 비교 75
 그림 3.34 용접선 방향과 용접선 직각방향의 경계조건 및 인장응력 76
 그림 3.35 동종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교 79
 그림 3.36 이종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교 82
 그림 3.37 동종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교 85
 그림 3.38 이종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교 88

표 목 차

표 2.1 스테인리스강의 분류	23
표 3.1 동종 용접시 사용되는 시험편의 물성	33
표 3.2 이종 용접시 사용되는 시험편의 물성	33
표 3.3 물성치 변화에 따른 비교 순서	65

ABSTRACT

Effect of Material Properties on Residual Stress in Butt Welding of High Manganese Steel / Stainless Steel

Yu, Ki Sang

Advisor : Prof. Park, Jeong Ung, Ph.D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Corrosion deterioration or cyclic loading of steel structure results in fatigue, buckling and fatigue. Double corrosion and deterioration damage of RC deck are generated mostly. In Japan, 1691 highway bridges and 390 bridges were demolished and repaired / reinforced during the ten years from 1977 to 1986. The reasons for this are classified into six categories: damage and lack of load bearing capacity, seismic countermeasures, functional problems, improved construction, and other factors. In addition, it can be seen that the damage of the bottom plate and the corrosion of the steel are 51%, which is the cause of the specific gravity.

As a method to reduce damage caused by corrosion of steel and to prolong the life of steel structure, it is possible to minimize corrosion damage by using steel which is not easily corroded in bridges. The recently developed high manganese steel is resistant to corrosion, has high strength properties, and has excellent formability and is used in many industrial fields. Instead of using high manganese steel, the entire bridge can be combined with other steel materials for light weight and cost reduction, and it is possible to design an economical and efficient system by using it locally where corrosion is severe. However, the mechanical behavior of the welded joint between the high manganese steel and other members of the material has not yet been clarified, and the effect of residual stress on the fatigue strength and fracture strength has not yet been clarified to be. Therefore, it is

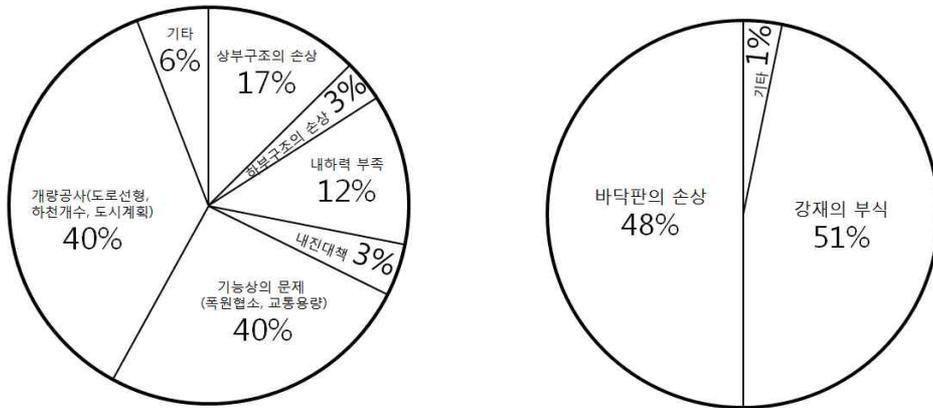
very important to evaluate accurately the effect of welding residual stress on dissimilar material of steel structure during welding.

In this paper, residual stress analysis is performed by using finite element method and the surface residual stress is measured and compared in order to characterize the residual stress caused by dissimilar material welding of high Mn and stainless steels. Parametric analysis of the change of the residual stress due to the change of main properties was performed by considering the result. As a result, the main factors affecting the welded joint were identified. In addition, tensile loads were applied to different welds to determine the mechanical behavior.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

부식 열화나 반복 하중작용에 의한 강구조물은 파손, 좌굴, 피로 등의 손상이 나타난다. 이중 부식 과 RC바닥판의 열화손상이 가장 많이 발생되어지고 있다. 일본에서는 1977년부터 1986년까지 10년 사이에 도로교 1691개, 강교량 390교에 대해서 철거 및 보수/보강 실시하였다(박정웅 등, 2004). 그러한 이유는 손상과 내하력 부족, 내진대책, 기능상의 문제, 개량공사 및 기타의 6개 항목으로 분류하였고, 도로교 교체의 이유 중 가장 큰 원인으로 개량공사가 60%로 나타났다. 또한, 강 교량 상부구조 손상 구성비에 대해서는 바닥판의 손상과 강재의 부식 이 51%로 비중이 큰 원인이라는 것을 알 수가 있다.



(a) 도로교 교체 구성비(1691교)

(b) 상부구조의 손상구성비

(강교량 69개 교량을 대상)

그림 1.1 도로교의 철거, 교체 이유의 내역(박정웅 등, 2004)

위와 같은 강재의 부식 에 의한 피해를 줄이고 강구조물의 수명 연장을 해결하는 방법으로 부식 이 잘되지 않는 강재를 교량에 사용함으로써 부식 손상을 최소화 할 수 있다. 최근 개발된 High Mn강은 부식 에 강하고 높은 강도의 특성을 지니고 성형성이 매우 우수한 강재로 많은 산업분야에 사용되고 있다. 교량 전체를 High Mn강을 사용하기 보다는 경량화와 비용절감을 위해 다른 강재와 결합하여 국부적으로 부식 이 심

한 곳에 사용하여 경제적이고 효율적인 설계를 할 수 있다. 하지만 아직 High Mn강과 다른 재질의 부재가 연결하는 이중용접부에 대한 역학적인 거동이 아직 확실히 규명되어 있지 않고, 이중 용접부에 발생하는 잔류응력이 피로강도, 파괴강도에 미치는 영향 또한 아직 규명되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이중용접 시 발생하는 용접잔류응력이 강구조물의 안정성에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 이중 용접구조물의 안전성 평가에 있어서 매우 중요한 부분이다.

본 논문에서는 High Mn강과 스테인리스강을 이중 맞대기 용접 시 생기는 잔류응력의 특성을 파악하기 위해 유한요소법을 통한 이중 용접잔류응력 해석을 실시하고, 표면잔류응력을 측정하여 비교하였다. 그 결과를 고찰하여 주요 물성의 변화에 의한 잔류응력의 변화를 Parametric 해석을 수행하였다. 그 결과 이중용접부에 미치는 주요 인자를 규명하였다. 또한 이중용접부에 인장응력을 재하 하여 역학적 거동을 파악하였다.

1.2 연구동향

본 연구에서는 강구조물의 대형화와 부식 및 강재를 효율적으로 상용하기 위해 이중 용접의 연구 현황과 강구조물의 부식 에 관한 환경적 요인의 영향에 대하여 자료들을 조사하였다.

장경호, 이진형(2000)은 인장력이 받는 이중강재의 접합부에 응력거동을 파악하기 위해 유한요소법을 이용한 3차원 탄소성해석을 실시하였다. 잔류응력은 사용되는 강재의 인장강도가 클수록 증가하였고, 이중용접부의 잔류응력은 용접 구조용 강재의 인장강도가 클수록 증가 한다고 발표하였다. 또한 장경호, 이진형(2001)은 인장력을 받는 이중강재 접합부의 변형을 연구하였다.

장경호 등(2000)은 이중강재 트러스 부재의 좌굴 거동에 관한 연구를 통하여 고강도의 이중강재를 사용할 경우 단면을 감소시키고 경제적이고 경량화된 트러스교 설계가 가능할 것으로 사료하였다.

장경호 등(2003)은 동종강재 및 이중강재 용접접합부의 잔류응력의 특징을 연구하여 이중강재 맞대기 용접시 고강도강재의 인장강도가 클수록 잔류응력의 크기의 차이가 증가한다고 발표하였다.

이진형 등(2006)은 장대화된 교량과 대형 강구조물의 일반 강판의 경우보다 강도가

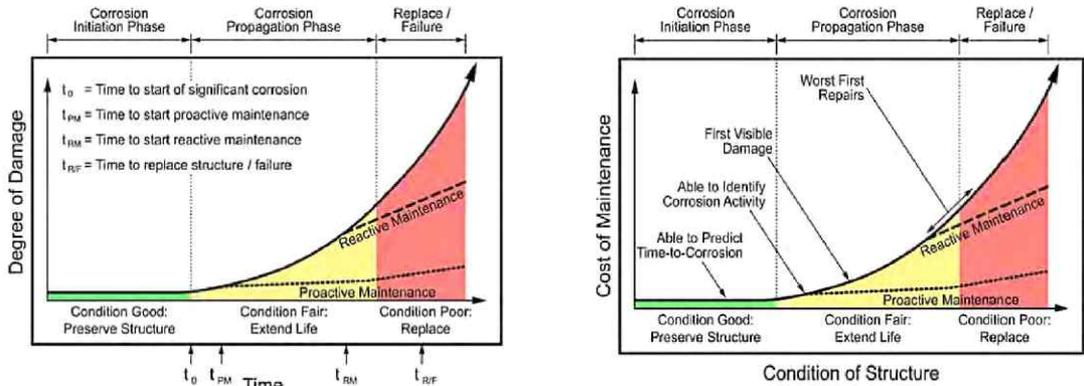
높은 고성능 강재 사용을 위해 SM570-TMC 강의 고온 시 기계적 성질 및 용접접합부의 잔류응력 특징을 연구하였다.

박정웅 등(2016)은 High Mn강과 STS304강 이중 맞대기용접시 용접프로세스가 잔류응력에 미치는 영향을 대한용접접합학회에서 학술발표를 실시하여 이중용접 강구조물의 이에 관한 연구가 진행되고 있다.

강구조물의 부식 과 관련된 환경적요인의 영향의 국내 현황분석으로 해안 근처에서는 비래 염분에 의한 구조물 부식 이 보고되고 있으며 내륙에서는 제설염의 사용으로 인한 부식 이 보고되고 있다(이광주 등, 2008). 교량의 경우를 예로 들어 대체적인 경향을 검토해 보면, 염분으로 인해 염해가 발생된 교량은 크게 해안 및 해상에 구조물이 건설되어 해수에 의해 직접 염분이 침투 하는 경우와 육상에 건설되어 겨울철 제설을 하기위해 살포되는 제설제에 의해 발생하는 사례가 보고되고 있다. 해상이나 해안에 설치되어 있는 구조물의 손상은 전반적인 부식 현상을 보이나, 육상교량은 바닥판상면, 연석 및 난간 또는 신축이음으로부터 누수가 발생되어 교대의 구체 등에도 국부적인 손상이 발생하고 있다(유덕용 등, 2011). 강재는 1%가 부식 되어 녹으로 변하면 재료의 강도는 5~10% 감소하고, 양면으로 5%가 부식 되어도 더 이상 사용할 수 없는 것으로 알려져 있기 때문에(이찬영, 2010) 하중을 지지하는 주요 구조체로 사용되거나 전체 구조의 안전성에 영향을 미치는 이음부에 사용될 경우 구조물의 내구성 및 안전성에 위험 요인으로 작용할 수 있다. 강교량의 경우를 예로 들면 용접부, 볼트이음부, 구조적으로 반복응력을 받는 부위, 체수부 등 구조적 양극으로 거동하는 부위는 다른 곳에 비해 국부 부식 의 위험성이 상대적으로 더 높다(이의호, 1999). 특히 이음부에 발생하는 부식 은 구조체의 전체 안전성에 영향을 줄 수 있기 때문에 상당한 주의가 필요한 부분이다. 국내의 강교량 등 강구조물에 대한 부식 대책 마련 및 이와 관련된 연구는 철근콘크리트 구조에 대한 염화물의 영향의 연구보다 상대적으로 매우 미흡한 수준으로 더 많은 연구가 진행되어져야 할 것으로 판단된다.

또한, 미국의 보고 자료에 의하면 교량에서 발생하는 대부분의 부식 은 제설재의 염분으로서, 염분량이 낮거나 거의 없을 경우 교량의 예상 수명을 100년이라고 하면 제설재의 염분에 장기적으로 노출되는 경우는 약 15~18년의 수명이 예측되고 있다(NACE; Vitaliano, 1992). 미국 내 583,000개의 교량 중 15%는 철근 및 강부재의 부식이 결합 발생의 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있으며, 이에 대한 유지보수 및 교체 비용으로 매년 83억 달러의 직접비와 830억 달러의 간접비가 소요되고 있다 (FHWA, 2001; Ross, 2003). 미국부식 공업회(National Association of Corrosion Engineers)의

보고자료에 의하면 부식 손상뿐만 아니라 부식의 증가속도 또한 시간에 비례하여 증가함을 볼 수 있다(그림1.2). 예를 들어 점검 년도에 발생한 부식율이 2%일 경우 계속 유지보수가 되지 않는다면 1년 뒤에는 5 ~ 6%에 해당하는 부식이 발생하게 된다.



(a) 부식 발생과 시간과의 상관관계

(b) 구조물 상태에 따른 유지보수 비용

그림1.2 부식 손상 증가율 및 유지보수 비용 분석(FHWA, 2001; NACE, 2012)

위와 같이 현재 국내·외에서 많은 연구가 진행되고 있으나 이중의 주요 물성치의 변화에 의한 잔류응력의 변화는 연구가 이루어지지 않았다. 따라서, 본 논문에서 물성치의 변화에 따른 잔류응력의 변화를 Parametric 해석을 수행함으로써 이중 용접부에 미치는 주요 인자를 규명하고 역학적 거동을 파악함으로써 이중 용접이 다양한 산업분야에 적용 할 수 있을 거라고 판단된다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 잔류응력

잔류응력은 외부에 작용하는 하중을 모두 제거하여도 물체 내부에 존재하고 있는 응력을 말한다. 특히 용접이음에는 물체에 외부에 작용하는 하중을 모두 작용하지 않아도 용접에 의한 국부가열로 용접부의 불균일한 용탕의 응고, 온도분포, 수축에 의한 불균일한 수축응력 등으로 상의 변태 및 전위에 의한 응력제가 발생하며, 용접제와 인접 모재가 냉각수축하여 용접부에도 주위 금속에 의해 억제 당하기 때문에 인장응력이 발생되는데 이를 용접잔류응력(Weld residual stress)라고 한다. 이 용접잔류응력은 용접 입열, 이음형상, 용접순서, 판 두께, 용착순서, 모재의 크기, 경계조건 등을 통해 영향을 받는다. 또한, 용접잔류응력은 구조물의 피로강도, 좌굴강도, 파괴강도, 취성, 부식 저항, 진동특성 등에 영향을 끼치는 중요한 요소가 된다.

2.1.1 잔류응력의 생성원인

용접을 함으로써 생기는 잔류응력은 크게 모재에 잔류응력과 구조물에 잔류하는 응력 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로는 용접부와 그 주변의 높은 열에 의하여 발생하는 소성변성과 변태로 발생하는 국부적인 및 용접금속 자체의 냉각에 따르는 수축에 의해서 생기는 잔류응력으로 내적 구속에 의한 응력이고, 두 번째로 용접이음이 그 주변에서 자유로운 팽창 또는 수축을 구속당한 상태에서 용접할 때에 생기는 응력 즉, 외적구속에 의한 응력이 있다. 복잡한 구조물은 위의 두 가지형식의 응력이 동시에 발생하는 경우가 많다. 실제 잔류응력이 발생하는 상황은 용접이 행해지는 부재의 치수, 진행방향, 형상 및 용접방법에 따라 다르고 상당히 복잡하다.

그림 2.1(a) 초기 3부재에서 중간부재는 연결되어있지 않다. 그림 2.1(b)과 같이 중간부재를 당겨 용접을 하면 구조물 외부에서 외력은 작용하지 않으나 중간부재에서는 인장응력이 발생되고, 양쪽의 부재에서는 압축응력이 작용되어 진다. 아래 그림 2.1과 같이 구조물 내부에 응력이 존재되는 것을 잔류응력이라고 한다.

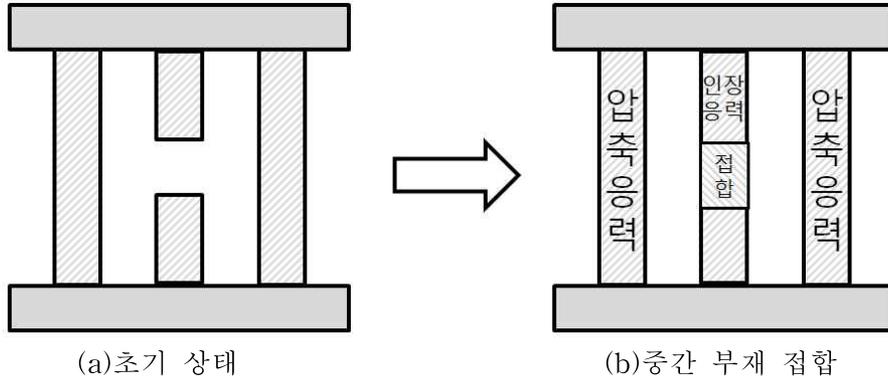


그림 2.1 조립 3부재의 잔류응력(이승엽, 2011)

잔류응력이 존재하는 구조물은 평형상태를 유지하기 때문에, 구조물 내부의 임의의 단면에 대하여 생성되어 있는 잔류응력은 반드시 힘의 평형과 모멘트 평형조건을 만족시켜야 한다. 즉 구조물이 안정하기 위해선 주어진 단면에 생성되어진 압축 잔류응력과 인장 잔류응력의 합력은 반드시 0이 되어야 한다. 용접잔류응력분포를 보통 주변이 자유로운 맞대기이음에서 잔류응력 분포는 그림 2.2과 같다.

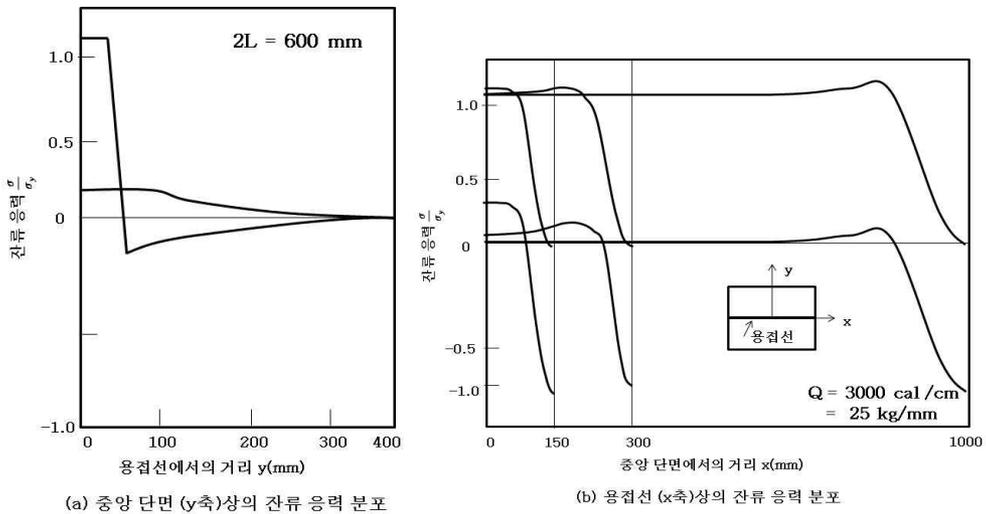


그림 2.2 주변이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포 (엄기원, 2010)

실제의 아크 용접이음에서 잔류응력분포는 용접하는 모재의 형상, 치수에 의해 다소 다르며, 용접이음부근에서 잔류응력이 불규칙하게 변동되므로 더욱 복잡하게 된다. 그러나 맞대기용접이음의 잔류응력분포의 전반적인 특성은 그림 2.3와 같다. 용접 길이가 긴 경우에는 용접부의 근처의 용접선 방향의 잔류응력()쪽이 용접선 직각방향의 잔류응력(σ)보다 매우 크다. 용접 부 근처에서는 종 방향의 인장 잔류응력의 크기는 재료의 인장항복응력의 크기가 된다. 그림 2.3 (a)와 같은 모양을 하고 있다면 횡방향의 수축이 구속되어 있다.

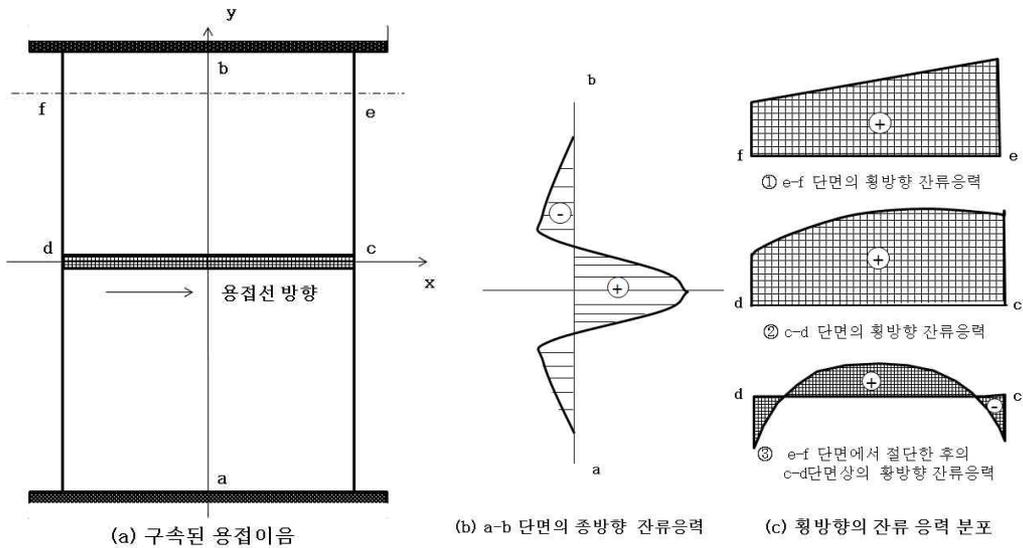


그림 2.3 구속된 용접이음에 생기는 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

(b),(c)는 구속되어 있는 용접이음에서의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. (b)는 a-b 단면의 종 방향 잔류응력(σ_x)을 나타내고 있다. 용접비드 주변에서는 큰 인장잔류응력이 발생하고, 비드에서 조금 떨어진 곳은 압축잔류 응력의 형태로 나타나는 그래프이다. (c)는d-c단면의 횡 방향 잔류응력(σ_y)을 나타내고 있다. 횡방향의 잔류응력은 수축을 구속하여 생기게 된 잔류응력이다. 구속응력이 문제가 되는 이유는 후판의 맞대기이음을 여러층으로 용접할 때 처음 용접을 하는 용접층에 생기는 구속응력이 대부분 단면이 작고 변형되기 쉬운 용접부에 집중되어 있으며 용접부의 구속응력이 매우 크게 집중되어 용접 균열의 원인이 되는 경우가 있다.

2.1.2 잔류응력이 강구조물에 미치는 영향

강구조물에서 용접 후 구조물 표면에 인장잔류응력이 남아있는 것은 일반적으로 바람직하지 않게 생각되어지고 있다. 그 이유는 표면에 남아있는 인장잔류응력은 구조물의 부품의 피로강도를 저하시키고 피로수명을 단축시키기 때문이다. 인장잔류응력이 남아 있는 경우 인장응력이 더 가해지게 되면 많이 견디지 못한다. 이러한 사실은 부품이 대부분 취성일 때, 즉 소성변형이 거의 혹은 전혀 작용되지 않은 상태에서 파단될 때 명백하다. 공장에서 미리 제작된 제품에 존재하는 인장잔류응력은 장기간에 걸쳐 응력부식 균열을 발생시킬 수 있다. 하지만 반대로는 표면의 압축잔류응력은 일반적으로 좋은 영향을 끼친다. 실제로, 제품의 피로수명을 향상시키기 위해서 표면압연(surface rolling)이나 샷피닝(shot peening) 등의 방법을 사용하여 표면에 압축잔류응력이 발생하도록 하고 있다. 특히 용접구조물의 강도에 대해서 잔류응력의 영향은 중요한 문제이고 잔류응력의 분포, 크기의 상태에 따라서 피로파괴, 취성파괴, 균열 등의 종료로 인해 나쁜 영향을 미치게 된다.

가. 취성파괴

취성파괴는 보통 갑작스럽게 부재 내에서 균열이 발생한다. 잔류응력이 급격히 전단면에 전파해서 파괴가 일어난다. 이때 소성변형은 거의 일어나지 않고 파괴가 일어난다. 이와 같은 취성파괴는 저온 등의 특수한 환경에서 발생한다. 하지만 보통 상태의 구조물에서도 또한 발생한다. 변형속도의 증가 또는 두꺼운 단면일 때, 온도의 저하 등의 원인 때문에 부재의 소성변형이 억제된 상태에 있을 경우 어떠한 경우에 의해서 큰 응력이 작용되면 취성파괴가 발생 한다. 이때 잔류응력은 대부분의 부재단면에 초기응력으로 가해져서 취성파괴에 영향을 준다. 또한, 용접 부 부근에는 항복점에서 가까운 큰 잔류응력이 존재하므로 외부하중에 의한 근소한 응력이 가산되기만 해도 취성파괴가 생길 가능성이 있으며, 또한 연강은 저온에서 연성이 상쇄되므로 교량, 선박, 저장탱크 등의 구조물이 동계의 저온 정하중 아래에서 갑자기 취성파괴가 될 수 있다.

나. 균열

균열이 있는 판을 용접을 하게 되면 균열 근처에 과도적 열응력과 잔류응력은 균열이 없는 판과 다르게 나타난다. 용접에 의한 인장 잔류응력장의 실온부근의 온도에서 균열이 발생하게 되면 균열 면에 있어서 작용되는 인장잔류응력이 해방되어 균열 부근에서 잔류응력의 재분포가 일어나게 된다. 그 결과 모든 경우에 균열의 선단 부근에서는 재료의 항복응력을 넘게 되는 인장응력장이 발생되고 이 인장응력장은 균열의 선단에 소성 변형을 일으킨다.

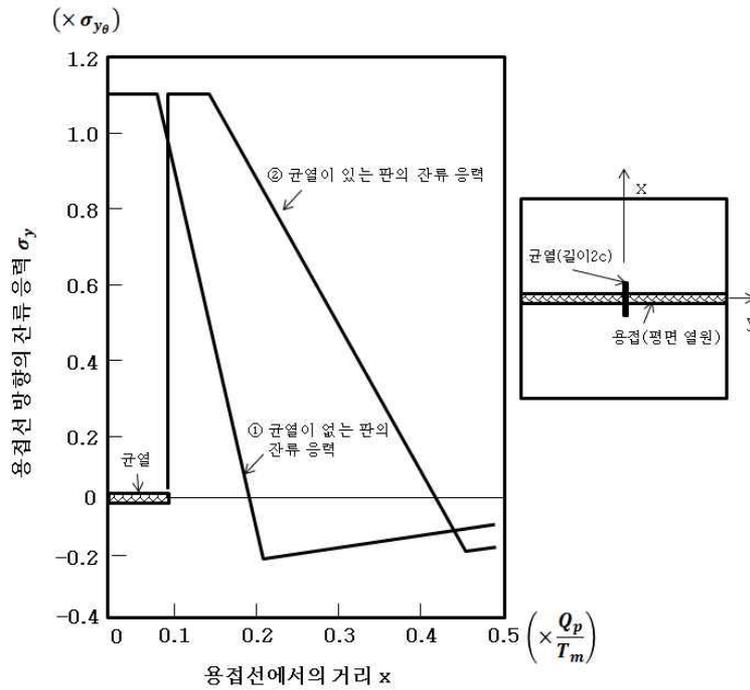


그림 2.4 균열 부근의 용접 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

그림 2.4은 균열이 없는 판과 균열이 있는 판의 잔류응력 분포를 비교한 것이다. 균열이 있는 판을 용접하게 되면 높은 인장잔류응력이 균열 선단 부근에 발생하여 잔류응력의 범위가 넓어지게 된다. 인장 잔류응력의 범위는 용접에 대한 균열 선단 부분의 최고 온도 상승에 의해 의존된다.

$$\theta_{m^c} - \theta_0 = 0.242 \frac{Q_p}{c} \quad (2.1)$$

$$T_e = \theta_e - \theta_0 = \frac{\epsilon_{y0}}{\alpha} \quad (2.2)$$

여기서,

θ_0 : 판의 초기온도 Q_p : 평면 열원의 세기 α :선팽창계수 ϵ_{y0} : 초기온도의 항복 변형도

식 (2.2)에서는 T_{m^c}/T_e 이 커질수록 인장 잔류응력장의 범위가 크게 되어 진다. 균열 선단부근에 잔류하는 소성 변형도(ϵ_p)는 식 (2.3)과 같다

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{y0}} = \frac{1}{2} \frac{c}{r} \frac{T_{m^c}}{T_e} \quad (2.3)$$

균열이 생긴 경우 인장 잔류응력장이 실온부근에서 재 분포후의 잔류응력분포에 대해서도 위와 같은 특성을 가지고 있어 균열 부근에서의 잔류 응력분포는 그림 2.4의 ②와 일치 한다. 그러나 균열 선단 부근의 잔류 소성 변형도는 식 (2.3)으로 계산되는 값보다 훨씬 적게 나타난다.

다. 피로강도

강 부재에 외력이 반복 작용하게 되면 구조적인 응력 집중부 또는 용접형상이 용접 결함 등을 원인으로 하는 응력집중부에서 균열이 발생하게 되어 결국에는 부재가 파괴에 도달하게 된다. 이와 같은 손상이 지속적으로 축적되어 균열이 발생하고 진전하게 되는 현상을 피로라고 한다. 피로는 인장응력이 반복적적인 현상 때문에 발생되어 지지만 외력에 의해 압축응력만이 작용되는 부위에서도 마찬가지로 인장 잔류응력이 존재하게 되면 피로균열이 발생하게 된다.

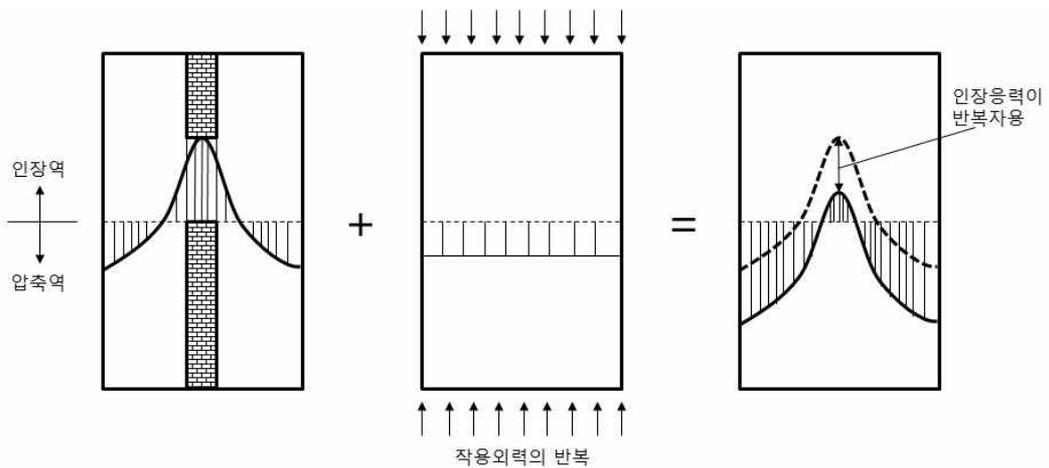


그림 2.5 용접잔류응력의 영향(박정웅 등, 2004)

그림 2.5는 용접잔류응력의 영향 모식도를 나타내는 그림이다. 용접부에는 용접 시공과정의 냉각과정에서 통 항복점에서 가까운 인장응력이 내부응력으로 남아 있게 된다. 이렇게 압축응력이 용접부에 작용하게 되면 용접부의 중첩된 인장응력과 내부응력이 반복적으로 작용되어 진다.

2.1.3 잔류응력 측정방법

잔류응력을 측정하는 방법에는 실험적인 계측방법과 이론적인 방법 두 가지의 방법이 있다. 실험적인 계측 방법은 측정 시 측정부재의 파괴 정도와 측정할 수 있는 두께의 따라 나눌 수 있게 된다. 또 이론적인 방법은 수치해석적인 방법으로 유한요소해석을 이용한 프로그램을 이용하여 잔류응력을 측정할 수 있는 방법이다. 최근에 많이 사용되어 지고 있는 내부 잔류응력을 측정할 수 있는 방법은 중성자법(Neutron Method), 고유변형도법(Inherent Strain Method), Contour Method, Deep Hole drilling method 등이 있다.

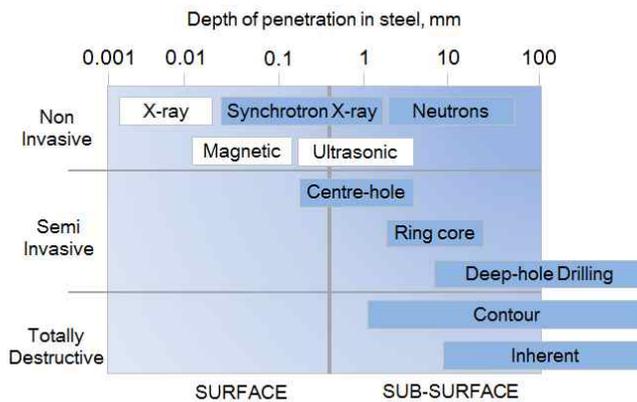


그림 2.6 측정법에 따른 측정 깊이

가. 중성자법(Neutron Method)

중성자는 입자로서의 성질 과 파동으로서의 성질도 함께 가지고 있어 빛이나 소리와 마찬가지로 회절·간섭효과를 나타는 입자로, 1932년 Sir James Chadwick에 의해 발견 되었고, 1936년 Halban 과 Preiswerk 및 Mithchell 과 Powers에 의해 X-선과 마찬가지로 결정구조에 의해 회절 될 수 있음이 실험적으로 증명되었다(Bacon, 1975).

회절(diffraction)현상은 파동들이 진행될 때에 물체의 모서리 부분이나 파동의 파장 정도의 크기를 갖는 구멍을 통과할 때의 진행방향으로 파동들이 일으키거나 퍼지는 현상을 말한다. 회절현상은 브래그의 법칙(Bragg's Law)이론을 따르는데 결정과 같이 주기적인 구조를 가지고 있는 물에 대해서는 일정한 파장의 빛을 여러 각도에서 비추어 본다면, 어느 각도에서는 강한 빛의 반사가 일어나게 되지만 다른 각도에서는 반사가 거의 일어나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 물질을 구성하는 원자들의 산란된 빛이 결정구조가 반복에 의해 약해지거나 강해지기 때문이다. 브래그의 법칙(Bragg's Law)이론은 결정구조의 폭과 빛의 파장, 혹은 광선과 반사면이 이루는 각도 사이의 관계를 설명한다.

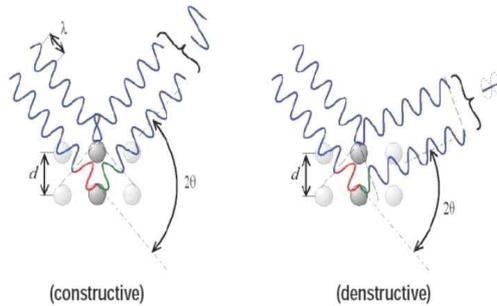


그림 2.7 브래그의 법칙(Bragg's Law)

$$d_{kl} \cdot \sin\theta_{hkl} = n\lambda \tag{2.4}$$

여기서,

θ : 결정면과 입사된 빛 사이의 각도, d : 주기 구조의 폭, n : 정수, λ : 빛의 파장

식 (2.4)는 브래그의 법칙(Bragg's Law) 조건으로 만족할 경우 빛은 반사각과 입사각이 같으며 회절 한다. 금속재료에 내부응력이 생기게 되면 각 결정 안에서는 격자면의 간격들이 줄거나 늘어나게 된다. 이 격자 간의 거리를 회절현상을 이용 측정하여 변형을 측정할 수 있게 된다.

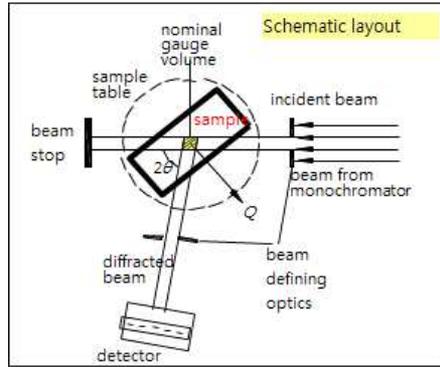


그림 2.8 중성자회절을 이용한 변형률 측정

응력측정은 회절을 이용한 변형률을 이용하여 구할 수 있다. 보통 응력은 재료가 등방성인 가정(즉, 재료의 전부피의 Poisson's ratio(ν)와 Young's Modulus(E)를 알고 있다.)하에 결정되어 진다. 표면응력을 알아내기 위한 X-선 응력측정법에서는 시료면의 법선방향의 응력성분이 존재하지 않는 다고 가정한다.($\sigma_3 = 0$) 이 때, 임의방향의 변형률은 탄성이론으로부터 시료평면상 $\sin^2\psi$ 와 선형함수 또는 임의의 방향 ϕ 의 응력성분 σ_ϕ 의 관계를 갖는 다음과 같은 식 이 주어지게 된다.

$$\left(\frac{\Delta d}{d} \right)_{\phi\psi} = \varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_\psi \sin^2\psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \tag{2.5}$$

여기서,

$\varepsilon_{\phi\psi}$: 임의방향의 변형률, ψ : 시료면의 법선과 회절면의 법선이 이루는 각,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 세 주축응력(principal stress)

위 식 을 이용한 방법은 양축응력상태(biaxial stress state) 또는 유일 축 응력상태(uniaxial stress state)를 결정할 때에만 적용할 수 있다.

일반적으로 시료 내부의 일정한 점에서는 시료의 좌표축 yz 에 대한 변형률텐서(ϵ)는 Q에 대하여 시료의 방위를 변화시켜 결정할 수 있다. 시료좌표축에 대한 Q의 방향 cosine이 ($l'm'n'$)이라고 하면 이 방향의 변형률은 다음 식 (2.6)과 같게 된다.

$$e(l'm'n') = l'^2 \epsilon_{xx} + m'^2 \epsilon_{yy} + n'^2 \epsilon_{zz} + 2l'm' \epsilon_{xy} + 2m'n' \epsilon_{yz} + 2n'l' \epsilon_{zx} \quad (2.6)$$

따라서, 변형률텐서(ϵ)를 결정하려면 적어도 6가지 서로 다른 방향의 변형률 e ($l'm'n'$)를 측정해야 한다. 이와 같이 한 좌표계에 대한 ϵ 의 성분이 결정되면 대칭텐서(ϵ)의 대각선화로 주축변형률(principle strain) ϵ 를 구할 수 있게 되고, 주축응력텐서(σ)는 재료의 영률(Young's Modulus)과 포아송비(Poisson's ratio)를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{1}{1+\nu} \begin{pmatrix} \epsilon^D_x \\ \epsilon^D_y \\ \epsilon^D_z \end{pmatrix} + \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} (\epsilon^D_x + \epsilon^D_y + \epsilon^D_z) \quad (2.7)$$

대부분의 재료는 비등방 적이며 중선자선은 특정한 방위를 갖는 경정립으로부터 회절되므로 등방균질재료의 가정 하에 기계적으로 결정된 탄성상수를 사용하는 것이 적합하지 않을 수 있다. 이 경우 주어진 재료에 기지의 탄성변형을 주어 행한 중선자 회절의 보정실험에서 얻은 유효중성자 Young's Modulus와 Poisson's ratio를 사용한다 (신은주 등, 1999).

나. 고유변형도법(Inherent Strain Method)

고유변형도(Inherent Strain)를 역학적으로 정의하면 응력이 없는 초기 상태의 연속체에 어떤 원인에 의해 고유응력이 분포하게 되었을 때, 연속체 내의 임의의 미소요소를 연속체로부터 절단해 내어 응력을 제거한 상태에서 잔류하고 있는 변형도라고 할 수 있다(Fujimoto, 1970).

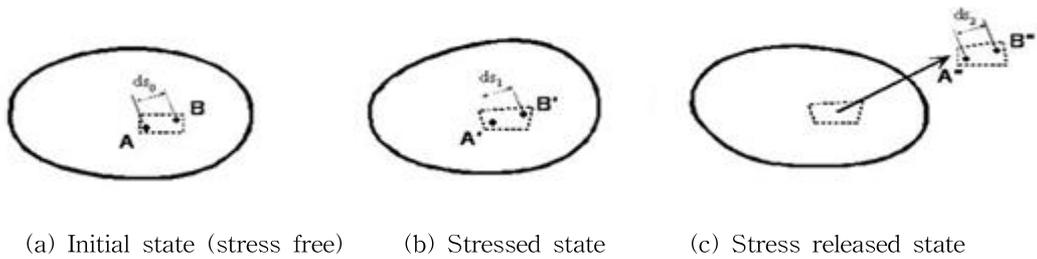


그림 2.9 Definition of inherent strain (Fujimoto, 1970)

그림 2.9은 응력상태를 통한 고유변형도에 대한 설명의 그림이다. (a)는 응력이 존재하지 않는 초기 상태의 연속체를 나타내고 있고, (b)는 열변형도와 같이 외력 이외의 현상에 의해 응력이 분포하는 상태를 나타내고 있으며, (c)는 응력 상태에 있는 미소요소를 절단해 내어 응력을 제거하여 준 상태를 나타내고 있는 그림이다. 용접에 의해 발생하는 고유변형은 일반적으로 용접 부 부근에서 발생하며, 그 범위는 용접 열에 의해 열 탄소성이력을 받는 영역에서 발생된다고 본다. 소수의 고유변형은 용접부의 자유로운 팽창을 구속시키거나 잔류응력을 발생시키지 않으나 이외의 고유변형은 잔류응력을 유발시킨다. 이와 같이 잔류응력을 유발시키는 고유변형을 일반적으로 유효고유변형 또는 고유변형이라고 한다. 탄성체의 임의 위치에 발생하는 고유변형과 탄성변형, 그리고 응력과의 사이에는 각각 탄성응답매트릭스, 탄성응력-변형매트릭스 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\{\varepsilon^*\} = [H^*] \{\varepsilon\} \quad (2.8)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] [H^*] \{\varepsilon^*\} \quad (2.9)$$

여기서,

$\{\varepsilon^*\}$: 임의 위치에서 발생하는 고유변형, $\{\varepsilon\}$: 탄성변형, $\{\sigma\}$: 응력

$[H^*]$: 탄성응답 매트릭스, $[D]$: 탄성응력-변형매트릭스

고유변형이 분포하는 크기와 영역은 절단 등에 의해서 새롭게 소성변형이 발생되지 않으며 절단을 하여도 변화하지 않는다. 따라서 고유변형은 그 시험체로부터 측정된 탄성 변형량을 이용하여 다음과 같이 계산 될 수 있다. 먼저 부재에 발생하는 탄성 변형(잔류변형)을 절단하여 해방시키고 이것을 스트레인게이지(Strain Gage)를 이용하여 가능한 많은 탄성 변형 $\{\varepsilon\}$ 을 측정한다. 그 탄성 변형에서는 여러 가지의 측정오차가 혼입될 가능성이 있어 측정방식 을 다음과 같이 식 (2.8)의 식 을 유도할 수 있다.

$$\{m\varepsilon\} - [H^*] \{\dot{\varepsilon}^*\} = \{V\} \quad (2.10)$$

여기서,

$\{V\}$: 오차, $\{\dot{\varepsilon}^*\}$: 고유변형의 최확치

고유변형의 최확치 $\{\dot{\varepsilon}^*\}$ 는 최소자승법으로부터 다음과 같은 식 을 구할 수 있다.

$$\{\dot{\varepsilon}^*\} = [H^*] [H^*]^{-1} [H^*]^T \{m\varepsilon\} \quad (2.11)$$

식 (2.11)을 이용하여 고유변형의 최확치 $\{\dot{\varepsilon}^*\}$ 을 식 (2.9)의 $\{\varepsilon^*\}$ 에 대입하면 용접잔류응력의 최확치를 다음과 같은 식 (2.12)을 이용하여 탄성해석으로 구할 수 있다.

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] [H^*] \{\dot{\varepsilon}^*\} \quad (2.12)$$

여기서,

$\{\dot{\sigma}\}$: 최확치

라. Contour Method

탄성 이론에 따르면, 잔류응력을 포함하고 있는 물체의 단면은 변형이 생기며, 변형된 단면을 복원하는데 필요한 힘은 잔류 응력과 같다. 그림 2.10은 Brueckner의 중첩원리(Brueckner, 1973)를 보여주고 있다.

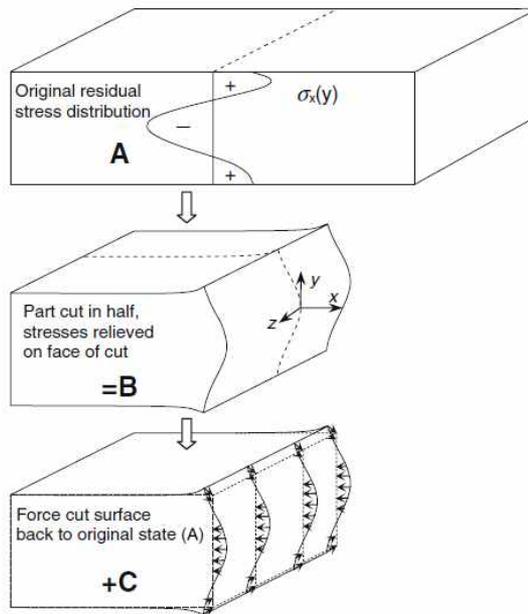


그림 2.10 Brueckner의 중첩원리

A는 초기 잔류응력을 보여주고 있다. 이를 중심($x=0$)으로 두 부분으로 자르면 잔류응력은 절단에 의해 풀리게 된다. B는 절단된 부분으로 응력이 부분적으로 완화되어 남은 응력에 의해 표면에서 변형이 나타나게 된다. C는 응력 없는 상태로 절단 하여 생성된 변형이 원래의 평면 형태로 돌아간다. 탄성 상태로 가정한다면 B의 응력과 B에서 C로 변화되는 부분의 응력이 가장 처음 물체가 원래 가지고 있던 잔류응력이다.

$$(x, y, z) = \sigma^B(x, y, z) + \sigma^C(x, y, z) \quad (2.13)$$

여기서,

σ^A : 처음의 잔류응력, σ^B : 절단 후 남아 있는 잔류응력,
 σ^C : 이완된 단면의 응력

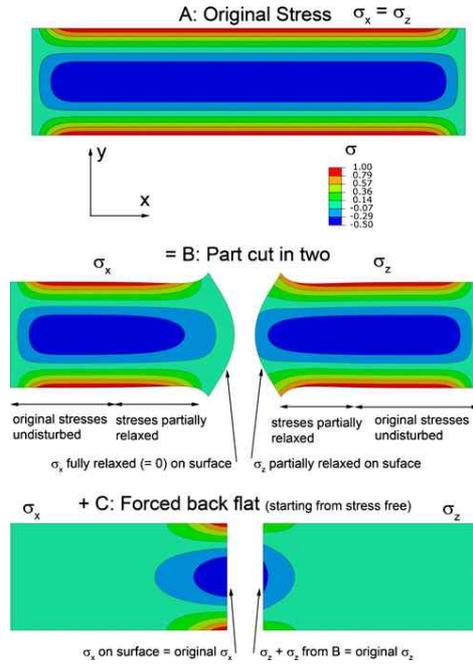


그림 2.11 2차원에서의 탄성중첩원리 (P. Pagliar 등, 2011)

그림 2.11는 유한요소해석 프로그램으로 해석한 탄성 중첩원리이다. 각각 방향에 따른 응력을 보여주기 위해 오른쪽 절반은 σ , 왼쪽은 σ_x 를 나타내고, 색깔은 응력의 크기이며 변형은 실제보다 크게 나타나있다(P. Pagliar 등, 2011).

다. Deep Hole drilling Method

Deep hole drilling(DHD)법은 두께 방향 잔류응력 분포를 계산하는데 사용되는 방법으로서 물리적 응력 이완을 통해 측정하게 된다. 처음 시편에 직경 3.175mm의 구멍을 뚫어 크기를 측정 실시 한다. 다음으로 처음 구멍을 중심으로 하여 직경 10mm의 코어 시편을 만들어 처음 구멍의 크기를 측정하여 그 변화량을 측정하여 잔류응력을 계산하는 방법이다. 그림 2.12 은 DHD법의 절차를 보여주고 있는 그림이다.

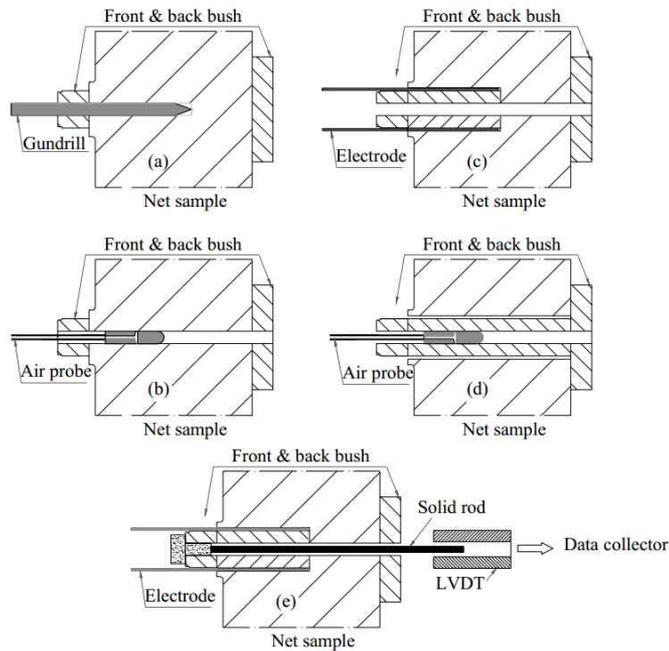


그림 2.12 Deep hole drilling technique (F.Hosseinzadeh 등, 2009)

먼저, Gundrill을 이용하여 시편의 두께 방향으로 기준 구멍을 뚫고(그림 2.12 a), air probe를 기준구멍에 넣어 일정간격으로 구멍의 직경을 측정한다(그림 2.12 b). 다음 순서로는 기준구멍을 중심으로 전기 방전 가공하여 구멍을 뚫은 후(그림 2.12 c), 마지막으로 기준 구멍의 지름을 처음 측정 지점과 동일한 깊이 간격으로 재 측정하여 준다(그림 2.12 d).

위에서 측정된 기준구멍의 지름을 $d(\theta)$, 구멍을 뚫은 후 기준구멍의 지름을 $d'(\theta)$ 라 하고 각각 측정 위치 ' $\theta, \theta_2, \dots, \theta_m$ '이라 한다면, 지름의 변화는 $\Delta d(\theta) = d'(\theta) - d(\theta)$ 로 나타내고 이를 이용하여 잔류응력을 계산할 수 있게 된다. 변형 $u_{rr}(\theta)$ 과 잔류응력 ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ 그리고 σ_{zz})의 관계는 식 (2.14)과 같이 나타 낼 수 있게 된다.

$$u_{rr}(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d(\theta)} = -1 \times [f(\theta)\sigma_{xx} + g(\theta)\sigma_{yy} + h(\theta)\sigma_{xy} - v\sigma_{zz}] \quad (2.14)$$

여기서,

$$f(\theta) = 1 + 2\cos 2\theta, \quad g(\theta) = 1 - 2\cos 2\theta, \quad h(\theta) = 4\sin 2\theta, \quad E : \text{탄성계수}$$

$$v : \text{푸아송비}$$

위에 식 을 각각의 측정위치에 대한 행렬로 나타내면 아래 식 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{u}_{rr}(\theta) = \frac{1}{E} M\sigma \quad (2.15)$$

식 (2.15)를 축 방정식으로 나타내게면, 식 (2.16)와 같게 된다. $\Delta \varepsilon_{xx}$ 는 평면 변형률이다.

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_{rr}(\theta_1) \\ \bar{u}_{rr}(\theta_2) \\ \vdots \\ \bar{u}_{rr}(\theta_m) \\ \Delta \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \times \begin{pmatrix} f(\theta_1) & g(\theta_1) & h(\theta_1) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_i) & g(\theta_i) & h(\theta_i) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_m) & g(\theta_m) & h(\theta_m) & -v \\ -v & -v & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

여기서,

$$\Delta \varepsilon_{xx} : \text{평면 변형률}$$

이렇게 구해진 변형을 이용 하여 잔류응력을 구할 수 있게 된다(F.Hosseinzadeh 등, 2009).

$$\sigma = - M u_{,rr} \quad (2.17)$$

$$M^* = (M M)^{-1} M^T \quad (2.18)$$

여기서,

M^* : M의 역행렬, M^T : M의 전치행렬

2.2 이중 용접

2.2.1 스테인리스강

스테인리스강(stainless steel)은 탄소강에 비하여 매우 우수한 내식성과 내열성을 가지며, 기계적 성질과 가공성이 우수한 합금강이다. 스테인리스강은 화학공업, 토목·건축 및 가정 주방용품에 최근에 널리 사용되게 되었다. 스테인리스강의 용접은 최근에는 매우 중요한 기술로 여겨지고 있다. 스테인리스강(stainless steel)의 대략적인 구별은 표 2.1과 같이 분류된다. 또한, 스테인리스강의 성질에는 물리적 성질, 기계적 성질, 취성화로 나뉜다.

표 2.1 스테인리스강의 분류

종 류	개략성분(%)			내식 성	가능성	용접성	자성
	Cr	Ni	C				
마르텐사이트계	11~15	-	1.20 이하	가능	가능	불가능	있다
페라이트계	16~27	-	0.35 이하	양호	약간 양호	약간 가능	있다
오스테나이트계	16이상	7이상	0.25 이하	가능	우수	우수	없다.

가. 물리적 성질

스테인리스강은 구조용 탄소강과 상당히 다른 물리적 성질을 가지고 있다. 이는 용접성에 직간접적으로 크게 영향을 미친다. 즉 스테인리스강의 영률, 밀도 및 비열은 연강과 거의 같은 정도이며, 용점은 낮고 열전도율은 특히 작으며 연강의 약1/3정도이다. 그러므로 용접후의 냉각속도는 연강의 경우보다도 훨씬 완만하게 된다.

나. 기계적 성질

스테인리스강의 기계적 성질은 연화한 상태에서 인장강도가 약 $50\sim 70\text{ g/mm}$ 정도 이므로 연강($14\sim 52\text{ kg/mm}^2$)에 비하여 상당히 강하고, 연신율이 양호하다. 액체공기의 저온에서도 노치인성을 잃지 않는 우수한 성질을 가지고 있어 액체공기의 저온에도에서도 사용하는 용기의 제작에 사용하게 된다. 또한, 탄소강에 비하여 고온의 기계적 성질 및 내산화성이 우수하고, 내열강으로서도 많이 사용되고 있다.

다. 취성화

스테인리스강의 기계적 성질은 연화한 상태에서 인장강도가 약 $50\sim 70\text{ kg/mm}^2$ 정도 이므로 연강($14\sim 52\text{ kg/mm}^2$)에 비하여 상당히 강하고, 연신율이 양호하다. 액체공기의 저온에서도 노치인성을 잃지 않는 우수한 성질을 가지고 있어 액체공기의 저온에도에서도 사용하는 용기의 제작에 사용하게 된다. 또한, 탄소강에 비하여 고온의 기계적 성질 및 내산화성이 우수하고, 내열강으로서도 많이 사용되고 있다.

2.2.2 스테인리스강의 용접

스테인리스강(stainless steel)은 고가이기 때문에 고급인 오스테나이트계 Cr-Ni강의 사용은 적으며, 보다 싼 Cr강, 페라이트계 합금강 또는 탄소강으로 대응하는 경우가 많다. 그러므로 양자간의 이종재료 이음이 필요하게 된다. 이종금속의 용접이음에서는 용착금속의 모재 때문에 그 화학성분이 희석되어, 기계적 성질과 내식 성이 모재와 달라지며, 모재의 화학성분과 용입량에 따라 적당한 용접봉을 선정하여야 한다.

가. 탄소의 이동

이종금속의 용접경계의 양쪽의 화학성분이 다른 경우에는 적절한 고온과 알맞은 시간으로 가열하면 경계면을 가로 잘라서 탄소이동이 일어나게 된다. 이 때문에 탈탄한 부분에서 강도부족으로 파단이 일어날 가능성이 있다.

나. 열응력 파괴

스테인리스강의 이종용접에는 팽창계수가 다르므로, 이 부분이 가열되면 큰 열응력이 발생하게 된다. 특히 급격한 온도변화의 경우에는 열 충격(thermal shock)에 의하여 균열과 보통의 온도변화화가 여러 번 반복하게 되면 열 피로에 의하여 용접금속의 지단 또는 본드에 따라 균열이 발생하게 된다. 열 충격과 열 피로에 의한 균열을 열응력 파괴라고 한다. 특히, 화력발전, 가스터빈 등의 온도변화가 일어나기 쉬운 용접 구조물에서 매우 중요하다.

2.3 열전도 및 열탄소성 이론

2.3.1 열전도 이론의 정식화

비선형 열전달 지배 기초 방정식은 아래의 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2.19)$$

재료를 등방성이라 가정하면 열전도율은 $\lambda_z = \lambda$ (정수)이므로, 식 (2.19)는 식 (2.20)으로 다시 나타낼 수가 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + Q \quad (2.20)$$

여기서,

c : 비열 ($cal/g^\circ C$), T : 온도 ($^\circ C$), ρ : 밀도 (g/cm^3),

t : 시간 (sec), Q : 단위시간당 입열량

식 (2.20)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분적분한 후 Fourier 법칙의 경계조건을 대입하여 Matrix화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[K] \{\theta\} + \Sigma [C] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Sigma \{F\} \quad (2.21)$$

여기서,

$\{\theta\}$: 온도의 함수, $[K]$: 열전도 Matrix,

$[C]$: 열용량 Matrix, $\{F\}$: 열유속 백타

2.3.2. 열탄소성 이론의 정식화

용접 응력해석을 위하여 재료는 등방성임을 가정, 탄성 및 소성 전역에서 재료의 기계적 성질(탄성계수, 항복응력, 비저항, 열팽창 계수)의 온도 의존성을 고려하였다. 소성역에서는 항복조건으로 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-Mises 조건을 사용하였다. 전변형률은 열변형률과 탄성 변형률의 합이다.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \quad (2.22)$$

여기서,

$\{\varepsilon\}$: 전변형률, $\{\varepsilon^e\}$: 탄성 변형률, $\{\varepsilon^t\}$: 열변형률

영변형률 응력과 변형률은 후크의 법칙으로부터 식 (2.23)이 된다.

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \quad (2.23)$$

여기서,

$[D^e]$: 탄성 응력-변형률 매트릭스

식 (2.23)에 식 (2.22)를 대입하면,

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\varepsilon\} - [D^e] \{\varepsilon^t\} \quad (2.24)$$

이때, 재료의 역학적 성질의 온도 의존성을 고려하여 응력 증분의 영향을 $[D^e]dT$ 라 쓰고, 증분형으로 쓰게되면 식 (2.25)가 된다.

$$d\{\sigma\} = [D^e] (d\{\varepsilon\} - [C]dT) \quad (2.25)$$

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 식 (2.22)와 식 (2.23)를 이용하여 증분형으로 쓰면,

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^t\} \quad (2.26)$$

$$\{\sigma\} = \{ \} + \{d\varepsilon^t\} \quad (2.27)$$

$\{\varepsilon^e\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 T 의 함수 이므로, 탄성 변형률의 증분은

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT \quad (2.28)$$

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT + \{\sigma\}dT \quad (2.29)$$

탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D^e] \{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (2.30)$$

소성상태에서의 전변형률 증분 $\{d\varepsilon\}$ 은 탄소성 및 열변형률의 $\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^T\}$ 합이면, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성식은 다음과 같이 구분할 수가 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e] \{d\varepsilon\} - [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \lambda - [D^e] \{\alpha\}dT + \frac{[D^e]}{dT} \times [D^e]^{-1} \{d\sigma\}dT \quad (2.31)$$

여기서,

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} : \text{편차 응력}, \lambda : \text{양(+) 스칼라양}$$

용접에 의한 열응력 해석에서는 각 요소에 관한 평형 방식정은 아래 식 (2.32)와 같다.

$$[K] \{dU_I\} + \Sigma \{dL_I\} = \Sigma \{dF_I\} \quad (2.32)$$

여기서,

$$\{dU_I\} : \text{변위벡터}, \{dL_I\} : \text{열에 의한 등가 절점력}$$

제 3 장 동종/이종재의 용접잔류응력 해석 및 영향

본 장에서는 제2장에서 이론을 바탕으로 동종/이종재 시험편을 사용하여 잔류응력 측정 실험을 실시한 후 용접 잔류응력해석을 유한요소 프로그램을 사용해 해석하여 그 결과를 실험 데이터와 비교함으로써 프로그램의 신뢰성 확인하고, 프로그램 해석을 통해 얻어진 동종/이종 용접잔류응력을 비교하여 나타난 차이점을 물성치의 따라 잔류응력의 영향을 비교 고찰하고자한다. 또한, 용접선 방향과 직각방향으로 인장응력을 가해봄으로써 동종/이종 용접구조물의 역학적 거동을 파악하고자한다.

3.1 동종/이종재의 용접잔류응력 해석 및 실험

본 논문에서 사용한 유한요소 프로그램인 MSC.Marc은 1차원, 2차원, 3차원 모델을 만들어 정적 및 동적 정권에서 선형 또는 비선형 응력 및 열 해석을 할 수 있는 프로그램으로 변형과 물리적 거동을 해석 할 수 있는 프로그램이다. 더 자세한 프로그램 설명은 MSC,Marc 홈페이지(<http://www.mscsoftware.com/kr/product/marc>)에 자세히 기술되어 있다. 위의 MSC.Marc 프로그램을 이용하여 용접잔류응력 해석을 하였고, 고유변형도법을 이용하여 표면 잔류응력을 측정하여 해석된 결과와 비교 하여 프로그램의 신뢰성을 확인 하였다.

3.1.1 동종/이종 용접잔류응력 해석

가. 해석모델

해석을 하기 위해서는 먼저 시험편과 같은 모델링하기위해서 정확한 치수와 형상이 필요하다. 시험편은 총길이 250mm, 폭 298mm, 두께 15mm대해 해석을 진행하였고 해석 시 길이방향을 x축, 폭방향을 y축, 두께방향을 z축으로 규정하였다. 경계조건은 그림 3.2와같이 시험편을 각각의 위치에 구속을 시켰다.

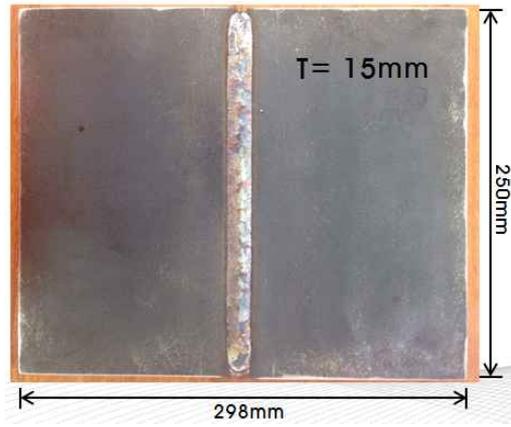
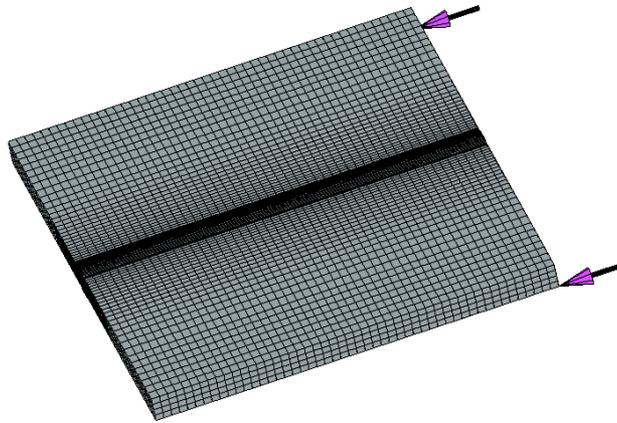
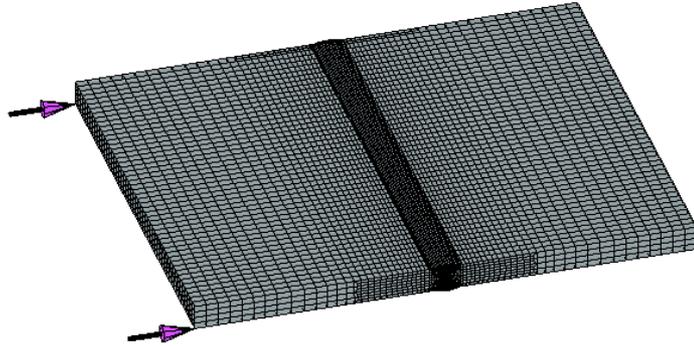


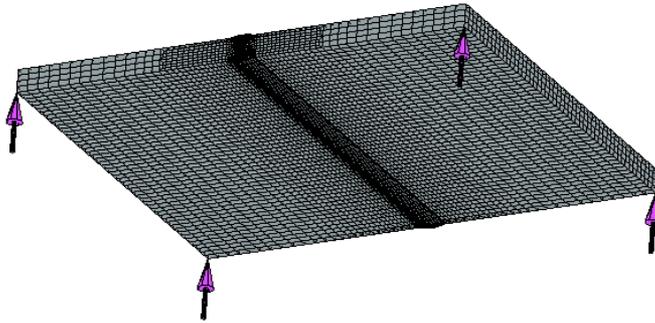
그림 3.1 시험편의 치수



(a) x방향의 경계조건



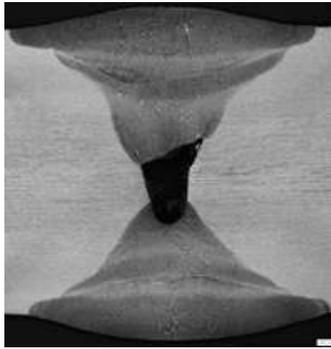
(b) y방향의 경계조건



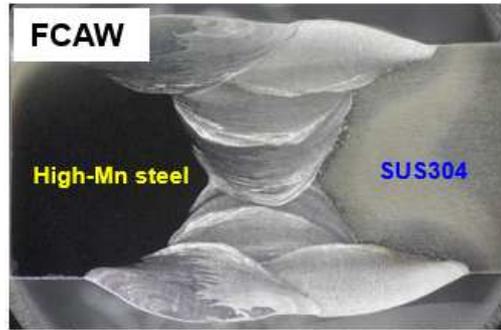
(c) z방향의 경계조건

그림 3.2 시험편의 경계조건

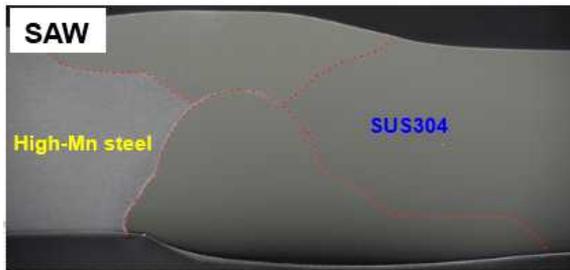
동종강재의 해석은 그림 3.3(a)와 같이 하나의 모델을 이용하여 해석 하였고, 이종강재의 용접해석은 그림 3.3(b),(c),(d)와 같이 세 가지의 용접부의 형상을 가지고 해석을 실시하였다.



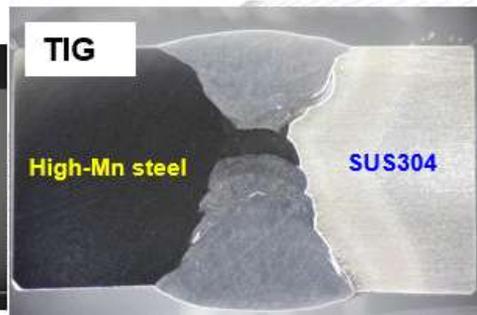
(a) 동종강재의 용접 부 형상



(b) 이종강재 용접 부 형상 (Case1)



(c) 이종강재 용접 부 형상(Case2)



(d) 이종강재 용접 부 형상 (Case3)

그림 3.3 동종/이종강재의 용접부 형상

나. 해석 조건

해석과 실험 시 사용된 강재는 High Mn강과 SUS304강을 사용하였고, 아래의 표 3.1과 표 3.2는 각각 동종/이종 용접에서 사용되는 물성을 보여주고 있다. 동종 용접 시 Base Metal과 Filler Metal의 차이는 Filler Metal의 항복응력 값이 Base Metal의 -20%의 값을 가진다. 또한, 이종 용접 시 Filler Metal의 항복응력 값 역시 High Mn 강재의 항복응력 값의 -20%의 값을 가진다.

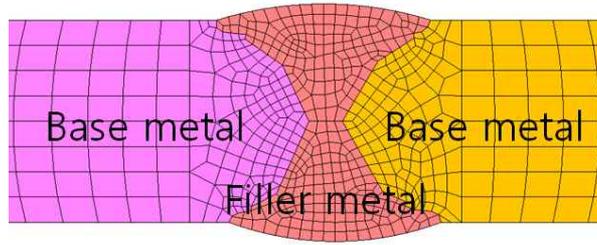


그림 3.4 용접부의 Base metal 과 filler metal의 위치

표 3.1 동종 용접시 사용되는 시험편의 물성

	Base Metal (High Mn)	Filler Metal
Mass density (g/mm)	7.66E-09	7.66E-09
Young's Modulus (GPa)	175	175
Yield stress (MPa)	442	354
Poisson's ratio	0.27	0.27

표 3.2 이종 용접시 사용되는 시험편의 물성

	Base Metal (High Mn)	Filler Metal	Base Metal (SUS304)
Mass density (kg/mm^3)	7.66E-09	7.66E-09	7.90E-09
Young's Modulus (GPa)	175	175	198.5
Yield stress (MPa)	442	354	265
Poisson's ratio	0.27	0.27	0.3

열전달 해석에서 사용되는 재료의 물성들은 온도의 변화에 따라 그 값이 변하게 되는데, 아래 그림 3.4와 3.5은 온도의 의존성과 기계성질의 온도의 의존성을 나타내는 그림이다.

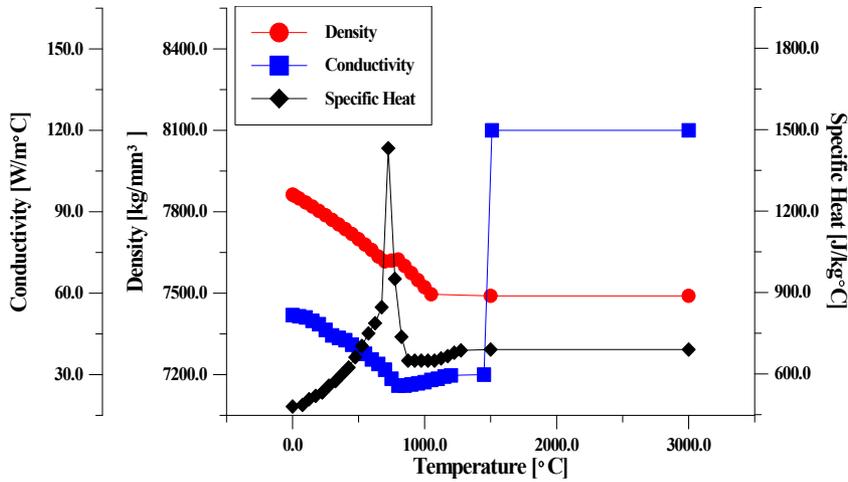


그림 3.5 온도에 따른 재료의 물성치의 거동 (용접강도연구위원회, 2005)

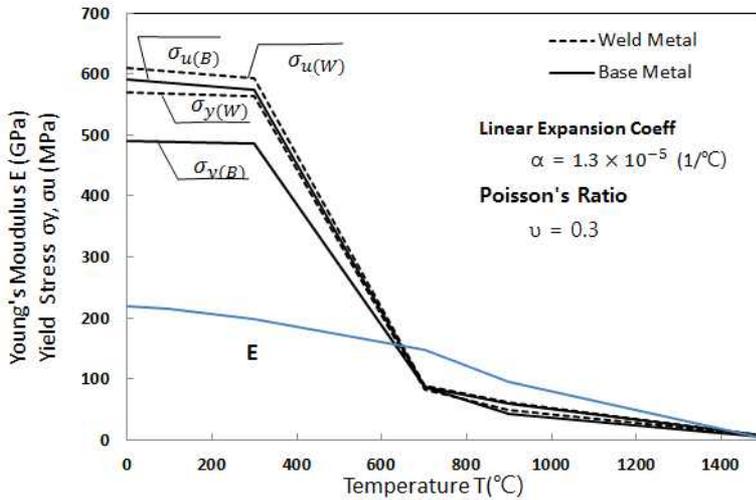
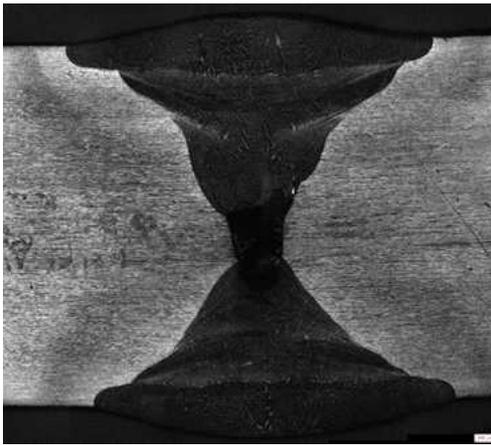


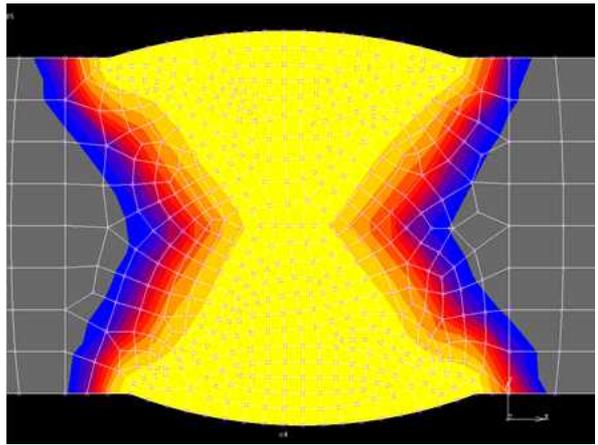
그림 3.6 시험편의 기계적 성질의 온도의 의존성

다. 열전달해석에 의한 온도분포

그림 3.6과 그림 3.7은 각각 동종과 이종 강재의 실제 시험편 용접 시 열영향부 (700~1500℃)의 단면마크로 사진과 열전달해석에 의한 온도분포를 비교 하였다. 700~1500℃의 열영향부의 FEM해석결과 실제 용접부의 단면 마크로와 비교 하였을 때 용접 단면마크로의 열영향부의 범위와 FEM해석 결과 열영향부의 범위가 비슷하다는 것을 그림 3.7에서 확일 할 수 있다. 또한, High Mn강의 열전달계수는 일반 강에 비해 약 4배 정도 작은 값을 가지고 있다. 따라서 일반강에 열영향부의 폭이 약 1.5배 정도 더 크게 나타났다.

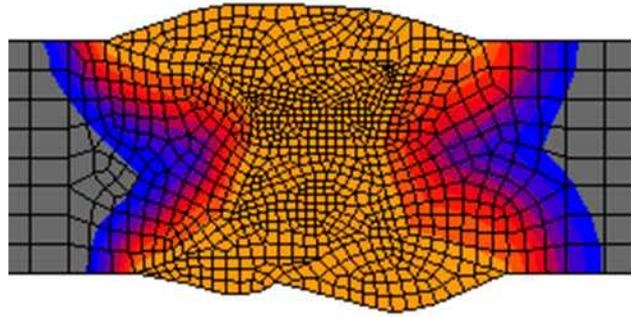
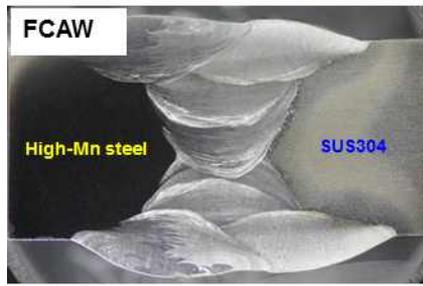


(a) 용접 부 단면마크로

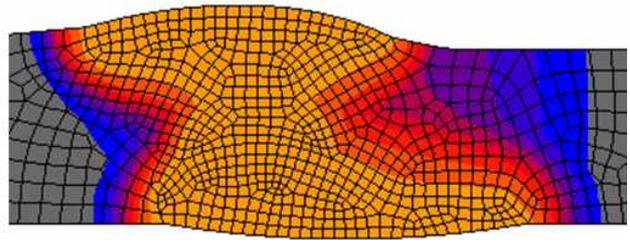
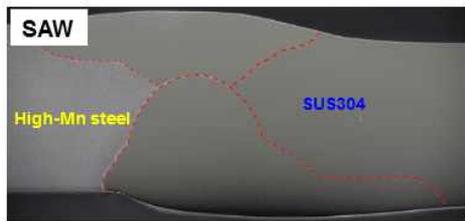


(b) FEM해석 단면 형상

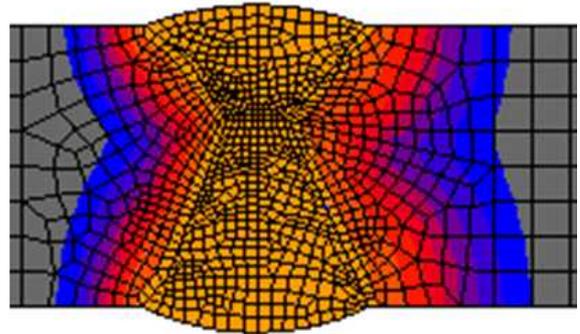
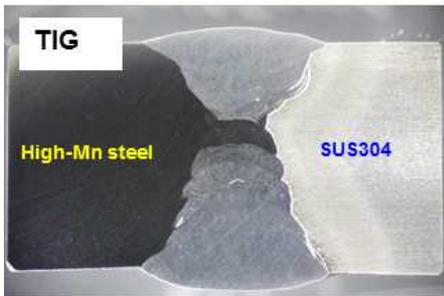
그림3.7 동종강재 용접시 단면 마크로와 FEM해석 단면 형상



(a) Case 1의 용접 부 단면마크로 및 FEM해석 단면 형상



(b) Case 2의 용접 부 단면마크로 및 FEM해석 단면 형상



(c) Case 3의 용접 부 단면마크로 및 FEM해석 단면 형상

그림 3.8 이종강재 용접시 단면 마크로와 FEM해석 단면 형상

라. 용접 잔류응력 해석결과

아래 그림 3.8은 동종강재 용접 시 발생하는 잔류응력 값을 용접부의 쪽의 Equivalent Von Mises Stress, σ_y 을 확대하여 나타내주는 그림이다.

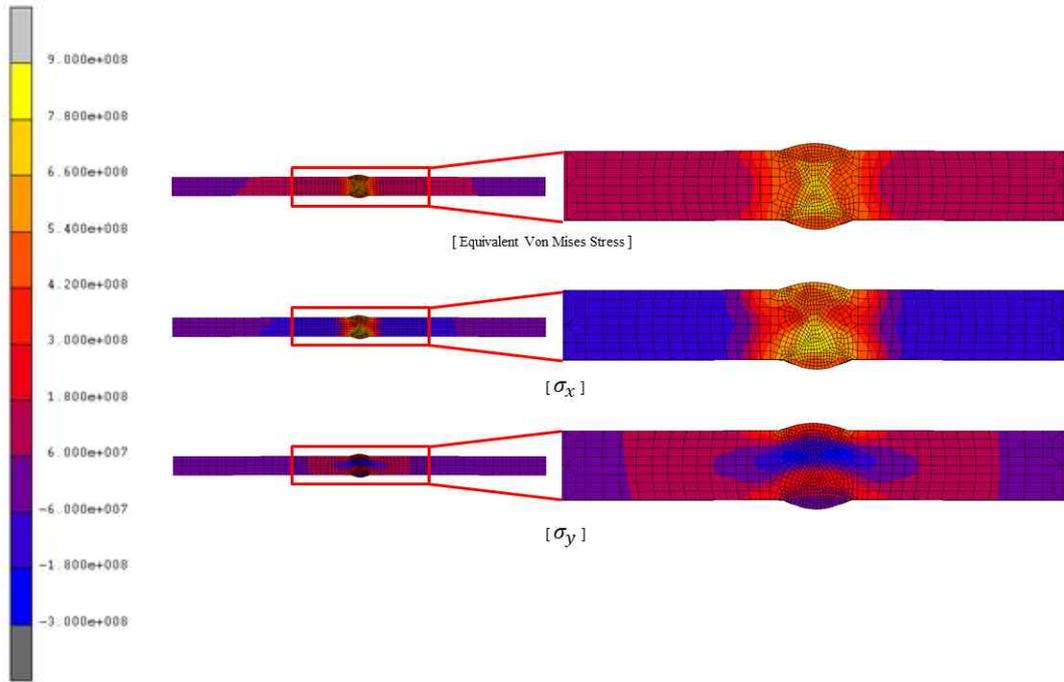
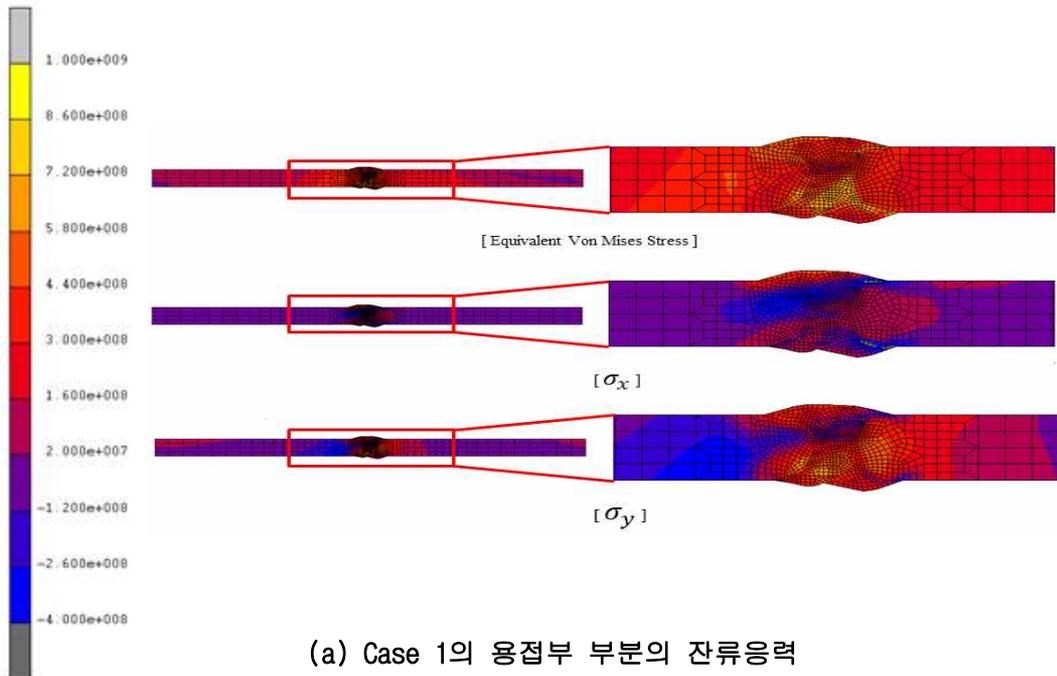
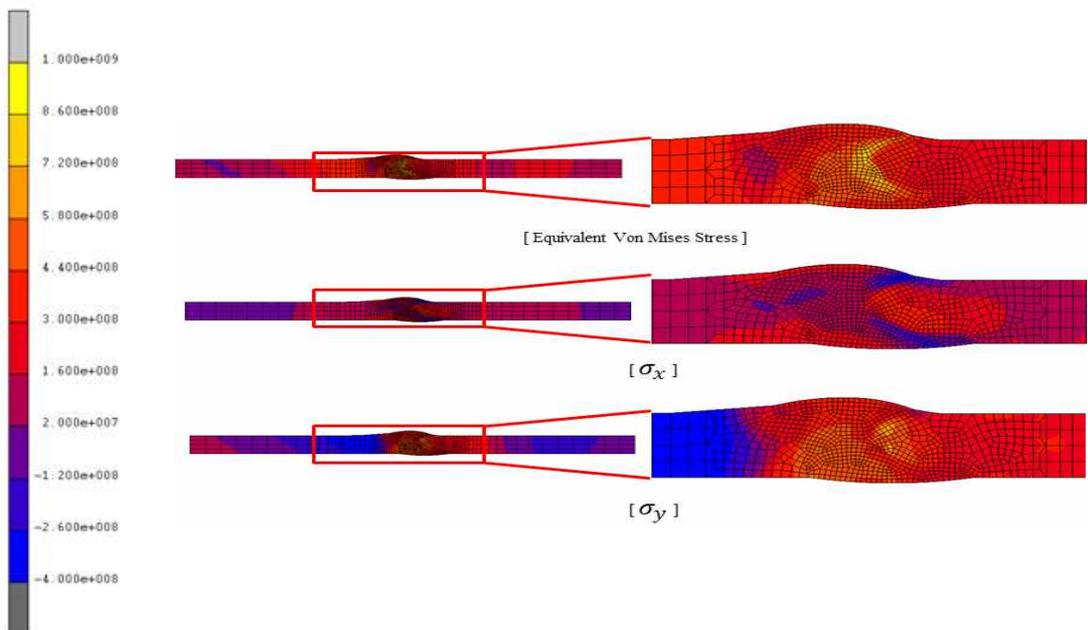


그림 3.9 동종강재의 용접부 부분의 잔류응력

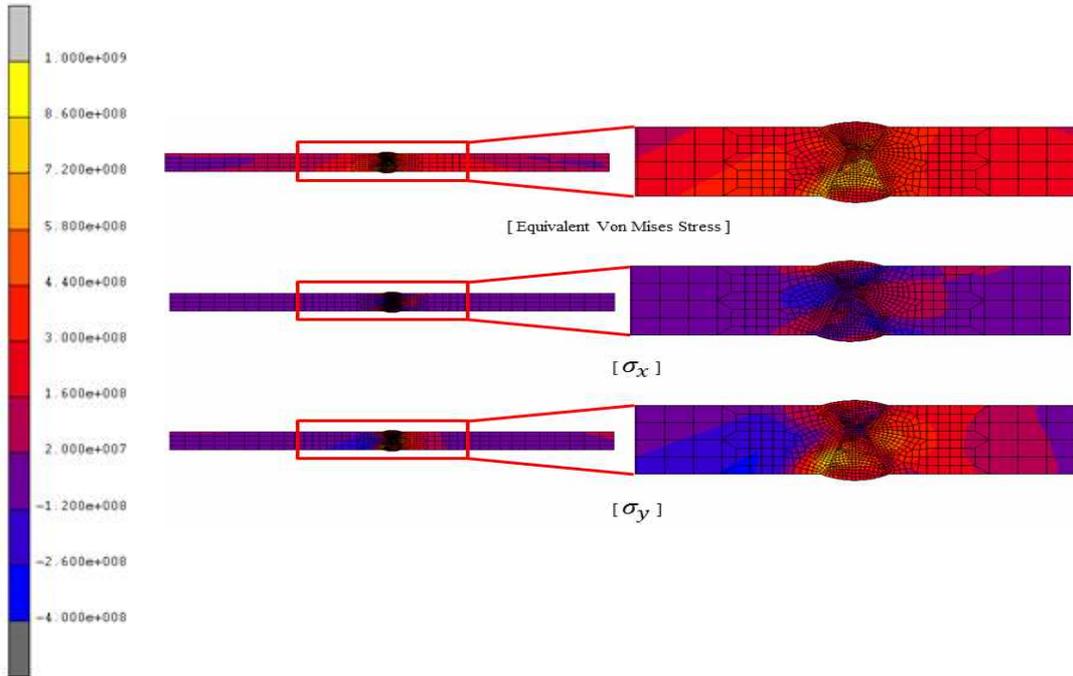
다음 그림 3.9는 이종강재 용접 시 발생하는 잔류응력 값을 위의 그림과 같이 나타낸 Case 별로 나타낸 그림이다. 용접선 방향의 잔류 응력 값은 중앙부에 인장잔류응력이 분포되어 있고, 용접선 직각방향의 잔류 응력 값은 용접 중앙부에 압축잔류응력이 분포되어 있는 것을 확인 할 수가 있다.



(a) Case 1의 용접부 부분의 잔류응력



(b) Case 2의 용접부 부분의 잔류응력



(c) Case 3의 용접부 부분의 잔류응력

그림 3.10 이중 강재의 용접부 부분의 잔류응력

이중강재의 잔류응력 단면을 보게 되면 Case 1의 경우 용접선 방향의 잔류응력은 낮아지다가 어느 부위에서 높아지는 현상이 있다. 용접선 직각방향의 경우에는 용접부의는 용접선 직각방향보다는 큰 잔류응력이 존재 한다는 것을 확인 할 수 있다. Case 2의 경우에는 용접선 방향에서 top과 bot면에서는 잔류응력이 급격하게 떨어지는 것이 확인되고 용접선 직각방향에 경우에는 L_Base에서 낮은 잔류응력이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. Case 3의 경우 용접선 방향과 용접선 직각 방향의 모두 용접부에서 일정하지 않는 잔류응력이 존재하는 것을 확인 할 수 있다.

잔류응력의 측정위치는 다음 그림 3.11과 같이 시험편의 중앙부를 측정하였다. 시험편모델의 중앙부를 절단하여 중앙부의 잔류응력을 측정하였고, 측정위치는 중앙부의 단면의 Top면과 Bot면의 결과를 정리 하였다.

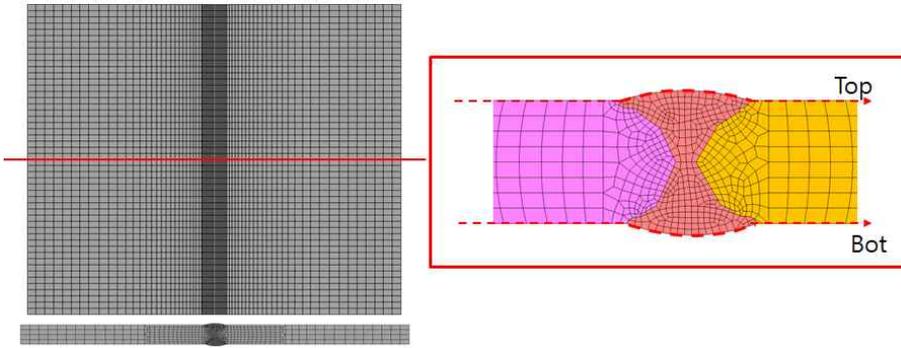


그림 3.11 잔류응력 측정 위치

잔류응력은 용접선 방향 잔류응력 과 용접선 직각방향 잔류응력 σ_y 을 측정하여 비교 하였다. 다음 그림 3.12은 동종재의 σ_x 잔류응력, 그림 3.13은 동종재의 σ_y 잔류응력 을 보여 주고 있다.

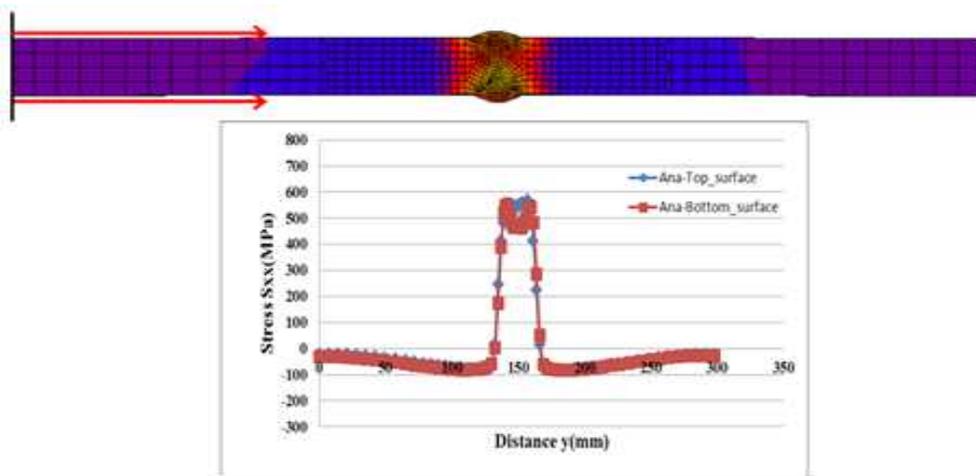


그림 3.12 동종 용접의 σ_x 잔류응력

그림 3.12에와 같이 동종에서는 용접잔류응력이 용접 부에서는 인장응력이 작용하고 있고, Base Metal부에서는 약간의 압축응력이 작용하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

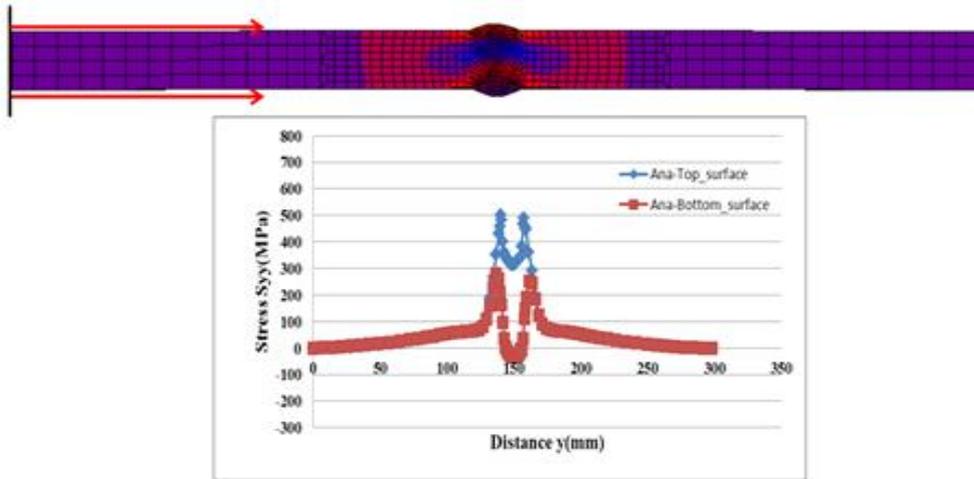
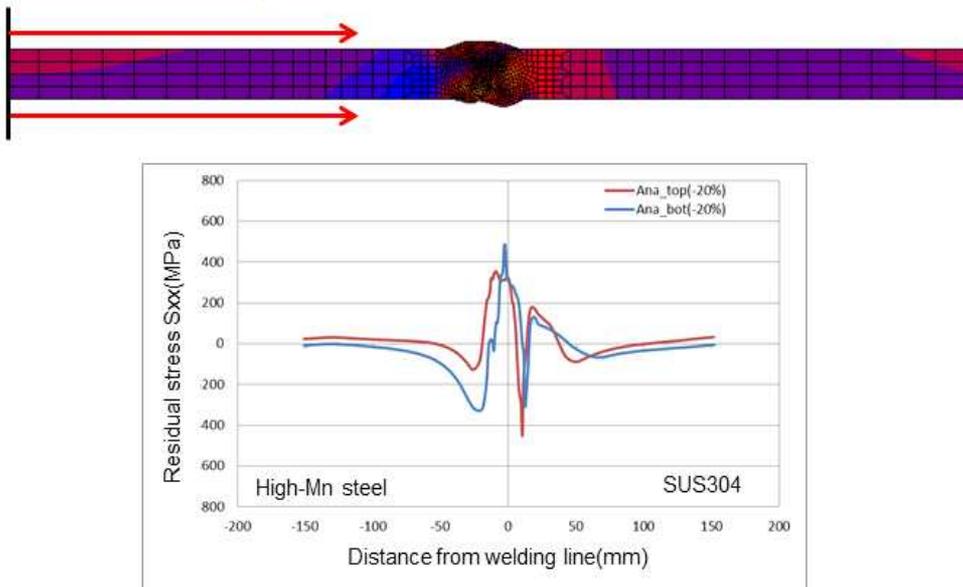


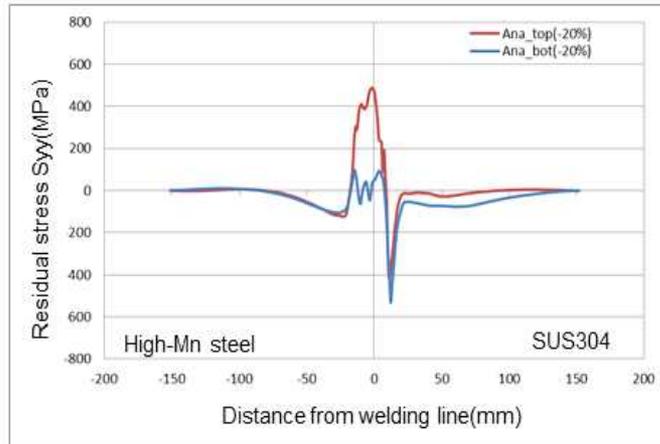
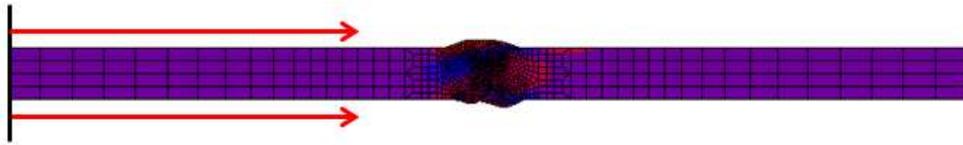
그림 3.13 동종 용접의 잔류응력

그림 3.13에서 보이는 바와 같이 용접선 방향의 잔류응력 값이 용접부에서 top과 bot면은 크게 차이가 나고 있다. Top면에서는 인장응력이 작용하고 있고, Bot면의 경우에는 압축응력이 작용되는 것을 확인 할 수 있다.

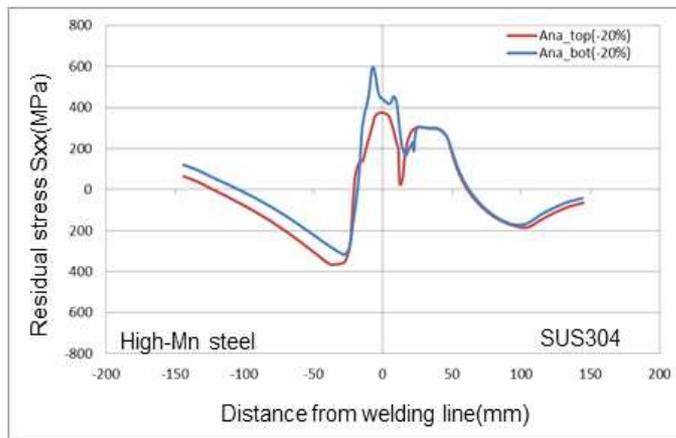
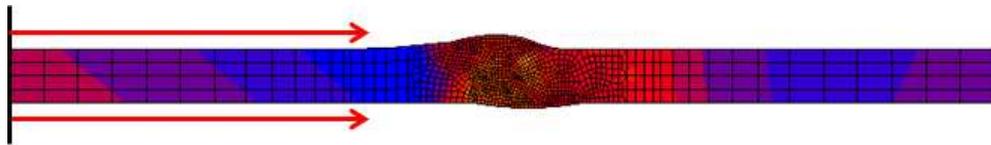
그림 3.14는 Case 별 시험편 중앙의 Top, Bot 면의 표면의 잔류 응력 값을 나타낸 그래프이다. Case 1의 경우 용접선 방향의 잔류응력은 왼쪽의 Base Metal 과 Filler Metal사이에서 큰 응력 값이 큰 폭으로 튀는 것을 확인 할 수 있다. 용접선 직각 방향에서는 Top면이 Bot면 보다 큰 인장응력이 나타내지고 용접부가 아닌 부분에서는 대부분 비슷한 잔류응력 값을 나타내고 있다. Case 2의 경우 용접선 방향의 잔류응력은 Case 1보다 더 비슷한 잔류응력 값이 나왔다. 하지만 여전히 이중용접의 특징인 응력의 급격한 변화가 있었다. 용접선 직각방향의 경우에는 Top면이 bot면보다 100MPa 정도 더 큰 폭으로 변화하였다. Case 3의 경우 Case 1, Case 2보다 용접부의 잔류응력 변화가 더 좁게 형성되었다. 그이유로는 Tig용접 단면이 좁게 형성되어 있기 때문이라고 판단된다. Case 1부터 Case 3까지 전체적으로 잔류응력을 비교해본 결과 이중용접을 한 경우 모두 Filler metal부분과 SUS304의 Base metal 부분의 경계면에서 응력 값이 확 티는 이중재의 특성이 공통적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다.



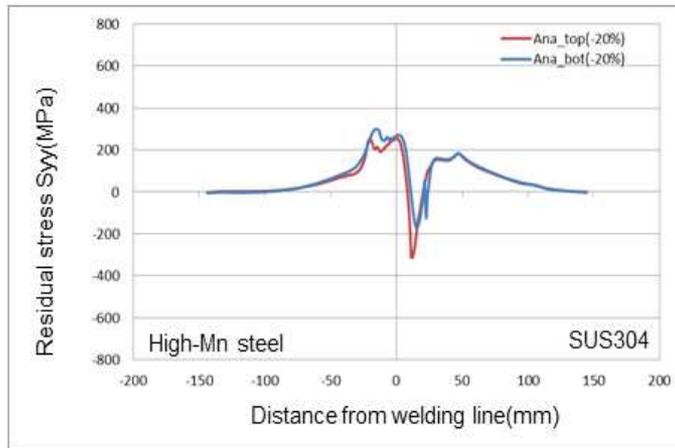
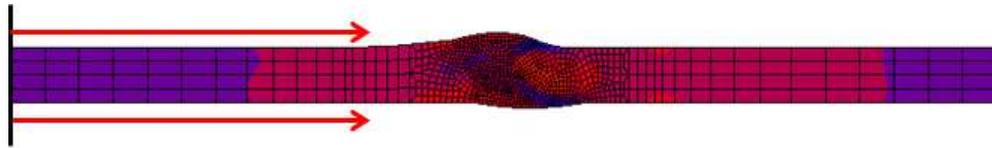
(a) 이중용접 Case 1의 잔류응력



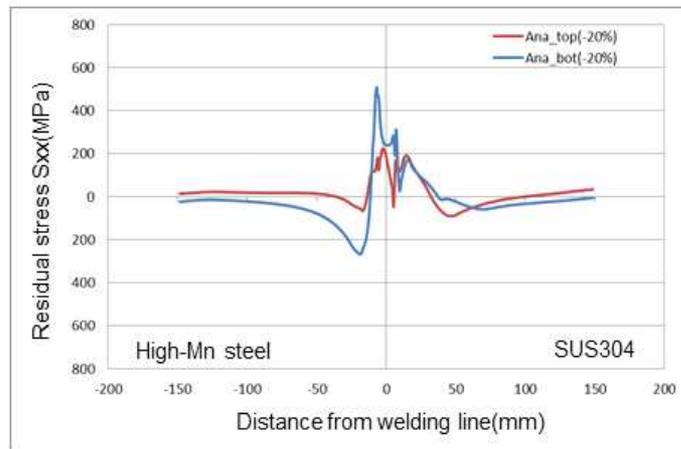
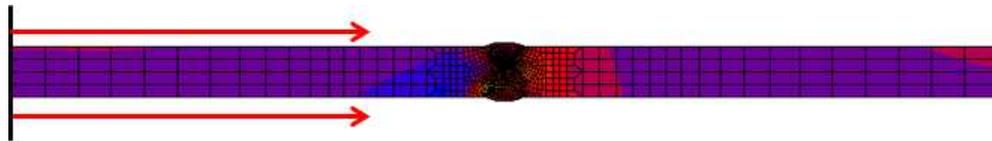
(b) 이종용접 Case 1의 잔류응력



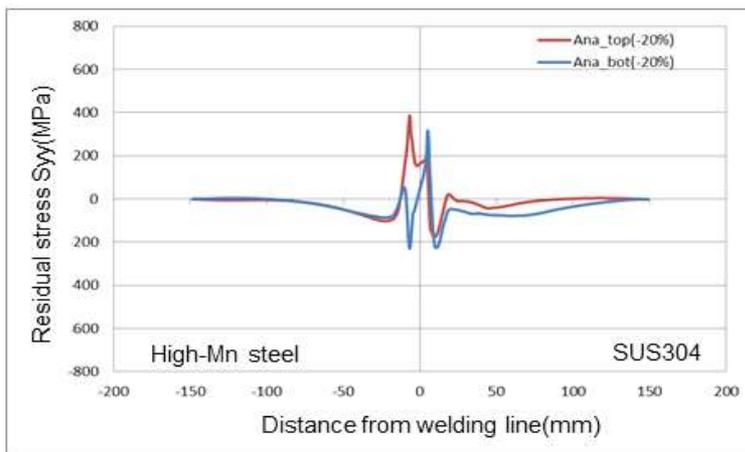
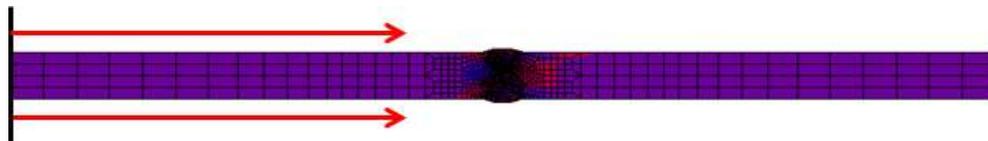
(c) 이종용접 Case 2의 σ_x 잔류응력



(d) 이종용접 Case 2의 잔류응력



(e) 이종용접 Case 3의 σ_x 잔류응력



(f) 이종용접 Case 3의 잔류응력

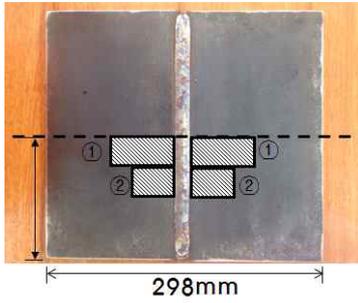
그림 3.14 이종용접 Case 별 잔류응력

3.1.2 동종/이종 용접잔류응력 실험결과 및 비교

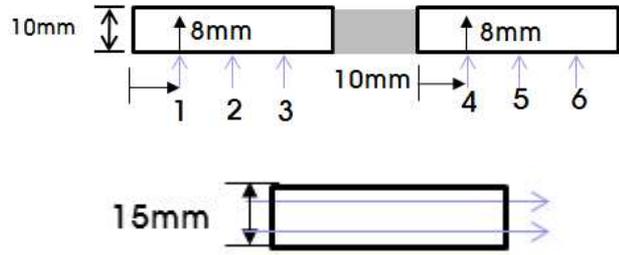
동종/이종 용접잔류응력 실험은 제2장의 잔류응력 측정법 중 고유변형도법을 이용하여 용접잔류응력 실험을 실시하였다. strain gage는 1축과 2축을 사용하였고 이종의 급격한 변화가 일어나는 곳을 미리 해석을 통해 알아내었고 그 부분에 1축5개짜리 strain gage를 부착하여 더 정확한 응력 변화를 얻을 수 있었다.

가. 실험순서

잔류응력 측정을 하기위해 시험편의 중앙부를 중힘으로 하여 용접부의 양편에 일정한 길이 간격으로 strain gage를 부착 하여 측정하였다. stain gage는 1축과 2축을 섞어 사용하여 용접선 방향과 용접선 직각방향의 실험값을 얻을수 있게 하였다. 실험순서로는 다음 그림 3.14와 같이 실시하였다. 그림 3.14(a)와같이 gage가 부착된 곳을 빗금친 부분과 같이 용접부 양옆을 와이어 커팅 하여 절단한다. 그림 3.14(b)그림은 1차 절단 후 세부절단을 나타내는 그림 이다. 완전히 절단하지 않고 2mm남겨 놓은 채 절단한다. 마지막으로 그림 두께방향으로 표면이 나올 수 있게 위에 아래 3mm간격으로 3등분하여 절단한다.그림 3.16는 그림 3.14와 같이 그림들의 순서로 시험편에 gage를 부착한 후의 절단한 순서의 사진들이다. 시험편에 strain gage를 부착하여 절단 시 열이 발생하지 않는 EDM절단기를 사용하여 시험편을 절단하였다. 절단 순서가 완료될 때 마다 결과를 P3로 측정하여 더욱더 정확한 실험값을 얻을 수 있었다. 표면잔류응력 측정이므로 2축 1축gage를 주로 사용하였고 해석결과 정확한 값을 얻기 위한 곳에 2축 gage를 부착하여 측정하였다.

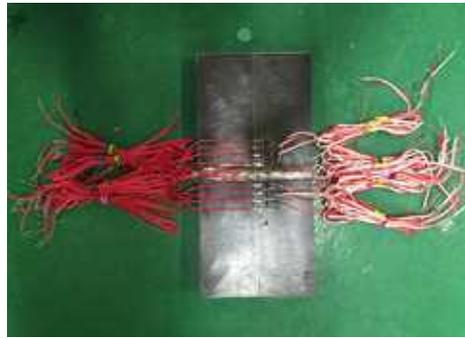


(a) 1차절단

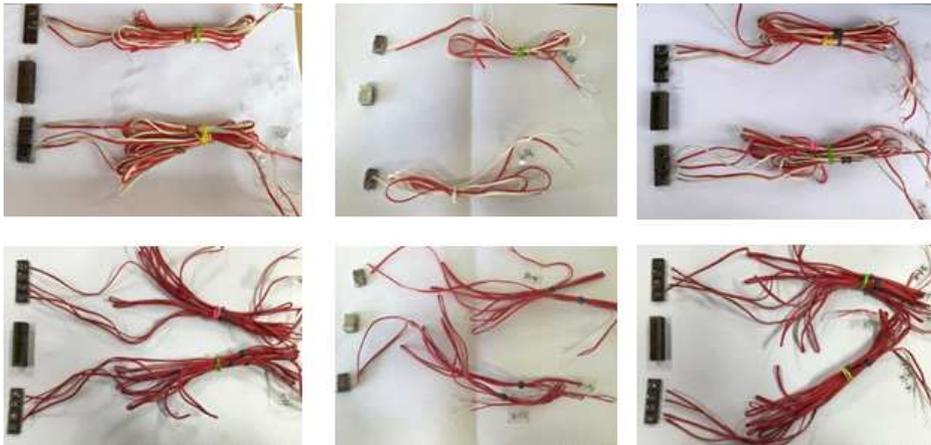


(b) 세부절단

그림 3.15 시험편 절단 순서



(a) 시험편 및 strain gage 부착

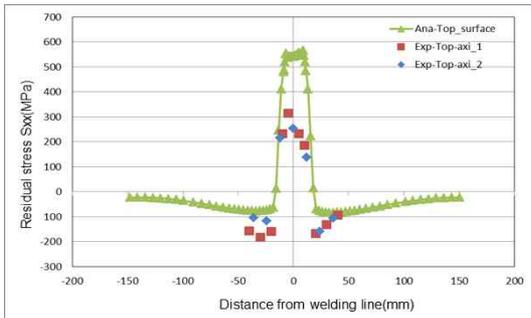


(b) 세부절단

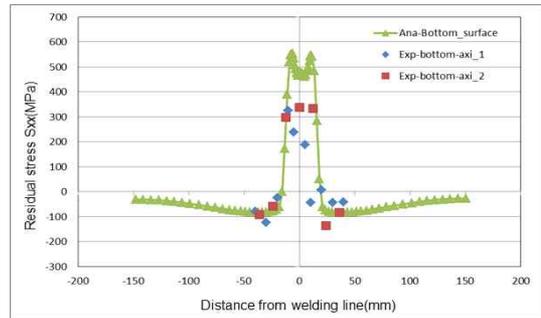
그림 3.16 시험편 strain gage 부착 및 세부절단

나. 실험결과 비교

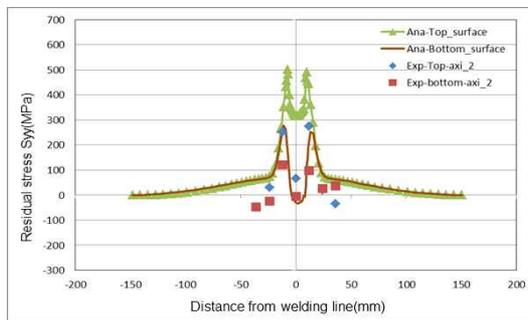
위와 같이 실험을 진행한 결과 실험값을 얻을 수 있었다. 먼저 그림 3.17은 동종용접의 실험 결과와 잔류응력 해석을 통해 얻어진 결과 값들과 비교한 그래프이다. 그림 3.17에서는 실험값과 해석 값이 용접 중앙부에서 해석값이 더 높게 측정되었다. 하지만 모재의 부분에서는 실험값과 해석 값이 잘 맞는 것을 확인 할 수 있다. 다음 그림 3.18은 그림 3.17과 같이 이종용접 시험편 Case 1,2,3의 용접선 방향과 용접선 직각방향의 Top면과 Bot면의 잔류응력 측정값이다.



(a) 동종재의 σ_x 의 Top면의 결과 비교



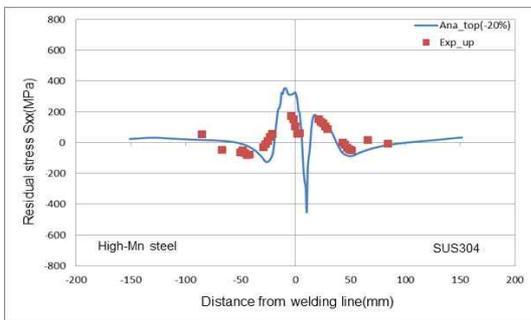
(b) 동종재의 σ_x 의 bot면의 결과 비교



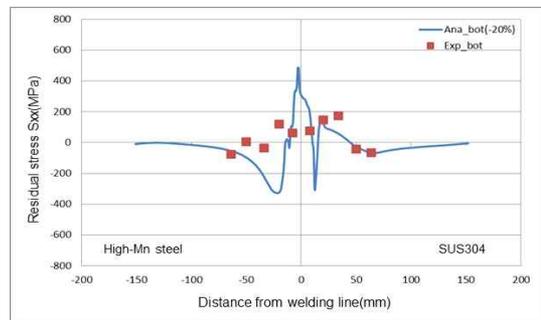
(c) 동종재의 σ_y 의 Top, Bot면의 결과 비교

그림 3.17 동종용접의 해석과 실험결과 비교

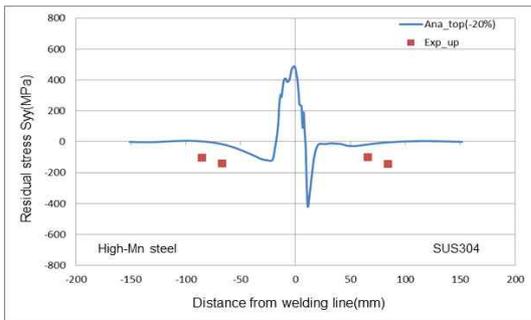
그림 3.18은 Case 1의 실험값과 해석값의 비교 그림이다. 용접선 방향의 Top의 경우 1축 5개짜리 gage를 사용하여 잔류응력의 꺾이는 부분을 정확히 알 수 있었고, 용접부와 모재의 경우 모두 실험값과 해석 값이 잘 맞는 다고 할 수 있었다. Bot면의 경우 실험값과 해석 값의 차이가 약간 나기는 하지만 모재와 용접부의 일부분에서 잘 맞는 것을 확인 할 수 있었다. 용접선 직각방향 의 경우 Top의 경우 실험값이 약간 부족하긴 하지만 응력 값이 어느 정도 맞는다고 할 수 있다. Bot의 경우 모재와 용접부의 응력 값이 비슷하게 측정되었다. Case 1 경우 실험값과 해석 값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.



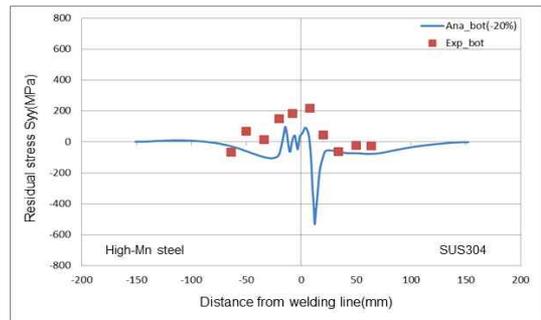
(a) σ_x 의 Top면의 결과 비교



(b) σ_x 의 Bot면의 결과 비교



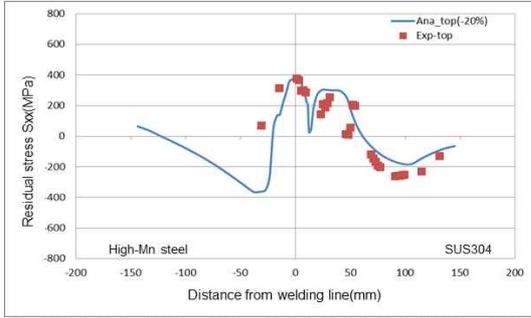
(c) σ_y 의 Top면의 결과 비교



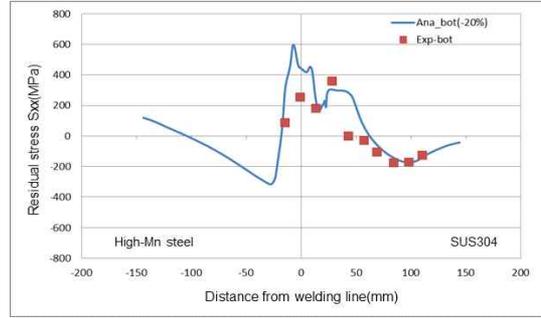
(d) σ_y 의 Bot면의 결과 비교

그림 3.18 Case 1의 해석과 실험 결과 비교

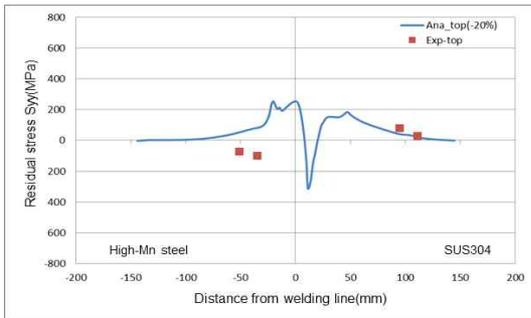
다음은 Case 2의 용접잔류응력 해석과 실험값의 비교 그래프이다. 용접선 방향의 Top면을 보면 이종의 특징이 나타내어져 있고 실험값과 해석 값이 잘 맞았고 모재와 용접 부 사이가 인장응력 값이 큰 차이가 일어나지 않았고, Bot면의 경우에도 해석과 실험결과가 상당히 일치하는 것을 포함할 수 있다.



(a) 의 Top면의 결과 비교



(b) σ_x 의 Bot면의 결과 비교



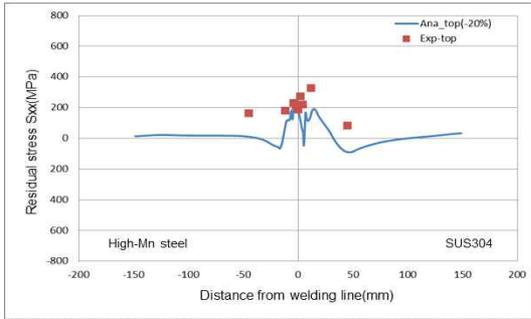
(c) σ_y 의 Top면의 결과 비교



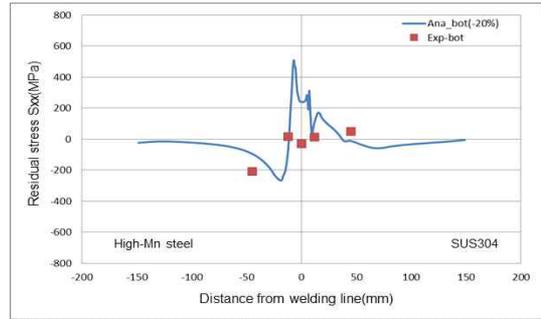
(d) σ_y 의 Bot면의 결과 비교

그림 3.19 Case 2의 해석과 실험 결과 비교

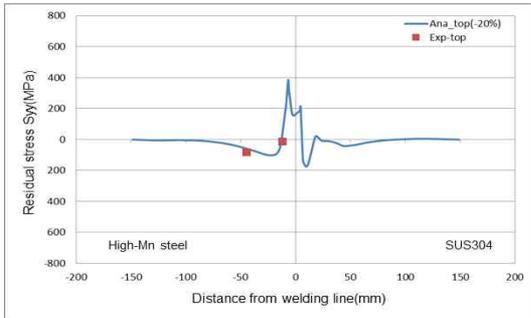
그림 3.20 Case 3의 실험 결과 비교잔류응력 해석과 시험 값을 비교해본 결과 동종 재에서는 용접 부 부분의 응력 값이 200MPa정도 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 이유는 시험편 용접부의 용접결함을 가지고 있어 차이가 난 것으로 보인다. 이종재의 경우 용접선 직각방향의 경우 많은 실험값을 가지고 있지 않지만 전체적으로 보았을 경우 값이 잘 맞는 경향을 확인 할 수 있다.



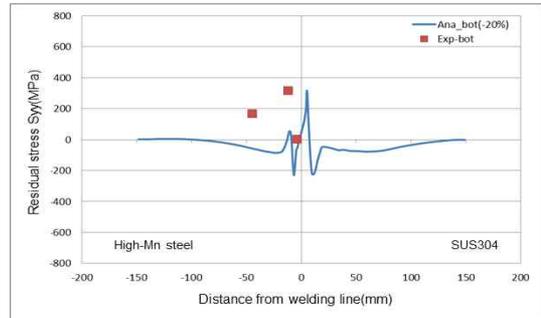
(a) 의 Top면의 결과 비교



(b) σ_x 의 Bot면의 결과 비교



(c) σ_y 의 Top면의 결과 비교



(d) σ_y 의 Bot면의 결과 비교

그림 3.20 Case 3의 해석과 실험 결과 비교

3.1.3 동종/이종 용접 잔류응력 비교

동종과 이종의 용접 차이점을 알기위하여 동종의 용접 단면을 이용하여 이종을 해석하여 비교 하였다. 잔류응력의 측정위치는 그림 3.20과 같은 위치에서 측정하였고, 측정위치 1, 2, 3, 4, 5, 6은 용접선방향 , 용접선 직각방향 σ_y 을 측정하였고 4, 5, 6은 추가로 두께방향은 σ_z 방향을 측정하였다.

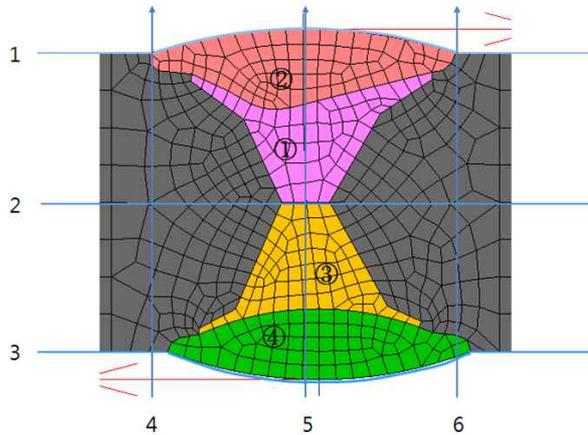
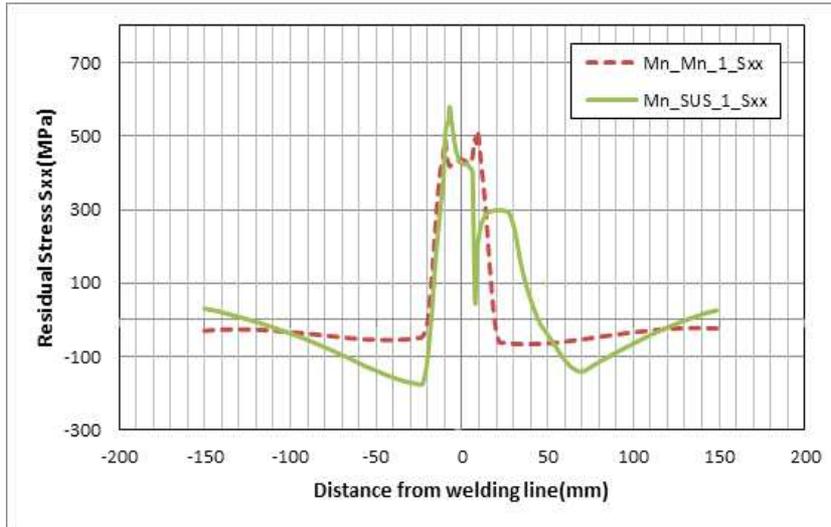
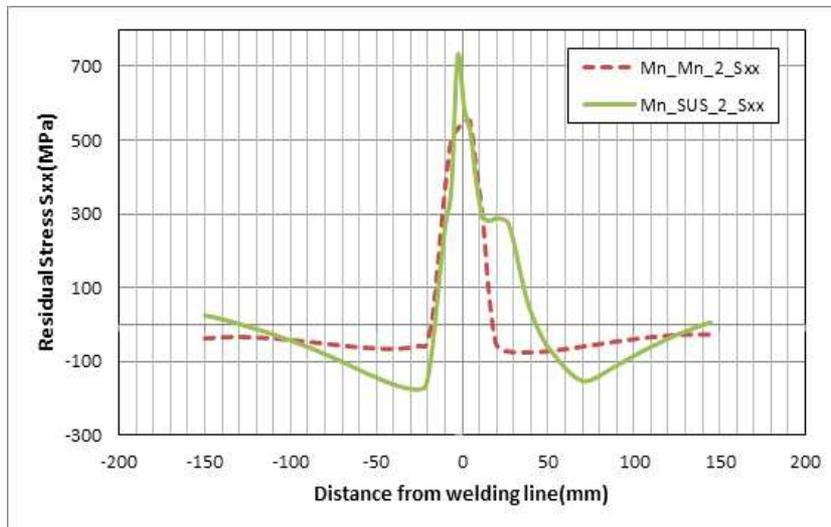


그림 3.21 Case 별 해석의 잔류응력 측정위치

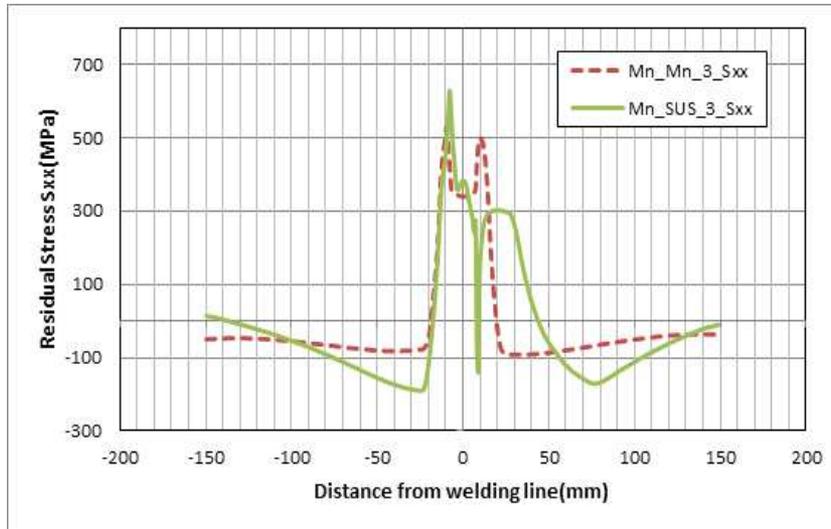
다음 그림 3.22는 측정 위치별 용접선 방향(σ_x)의 동종/이종 잔류응력비교 그래프이다. (a)측정위치 1의 용접선 방향의 경우 동종과 이종의 가장 큰 차이점은 R-Base쪽에서 동종은 일정하게 잔류응력이 감소하는 반면, 이종의 경우 응력 값이 튀는 현상이 발생하게 된다. (b)의 경우 크게 나타나지 않았으며, (c)에서는 (a)와같은 형태의 그래프가 나타나게 되었다. (d),(e),(f) 경우는 두께방향의 잔류응력을 측정한 값이다. (d)의 경우 L-Base의 쪽으로 동종과 이종의 차이가 크지 않게 나타나고 있고, (e)의 경우에도 형태는 비슷하나 잔류응력의 크기는 이종일 때 더 높게 나타났다. (f)의 경우 이종의 top면 bot에서 낮은 응력 값을 나타내어 중앙부로 갈수록 잔류응력 값이 커졌으며, 동종의 경우 (d), (e)와 잔류응력의 형태와 크기가 약간 비슷하다는 것을 알 수가 있다.



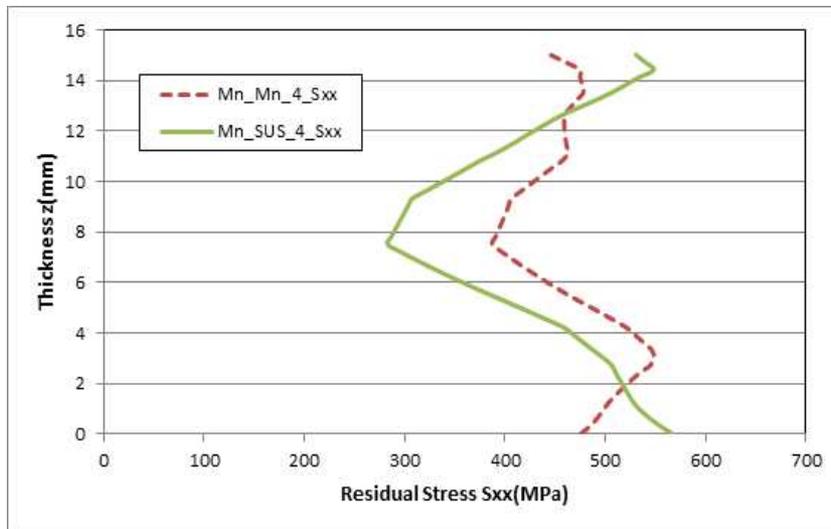
(a) 측정위치 1의 방향 비교



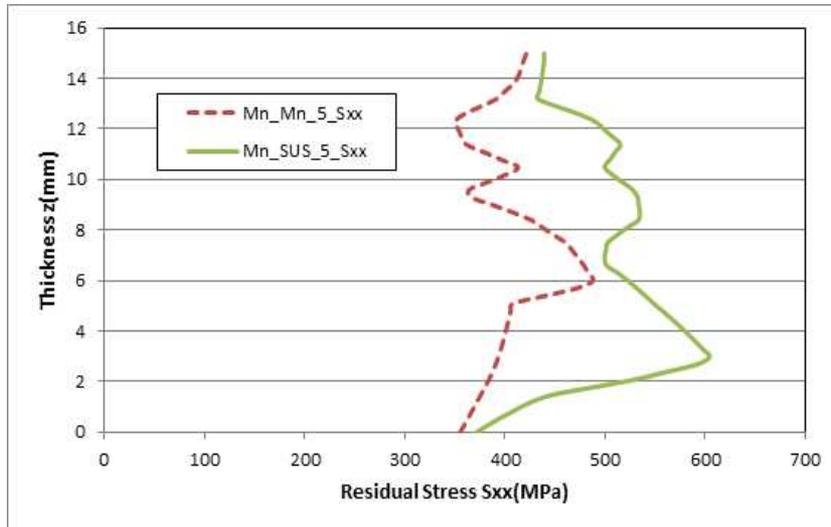
(b) 측정위치 2의 σ_x 방향 비교



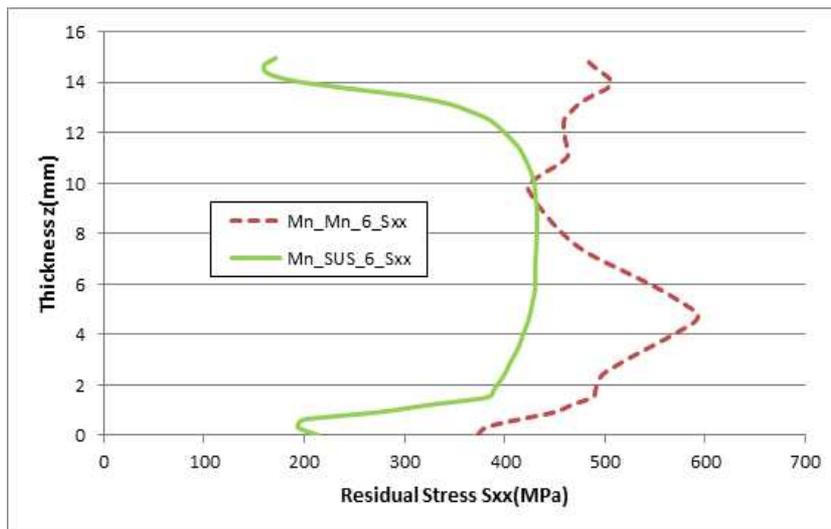
(c) 측정위치 3의 방향 비교



(d) 측정위치 4의 σ_x 방향 비교



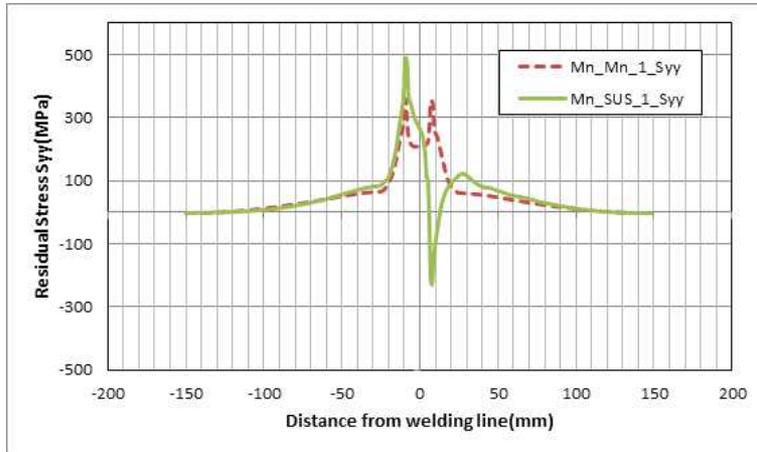
(e) 측정위치 5의 방향 비교



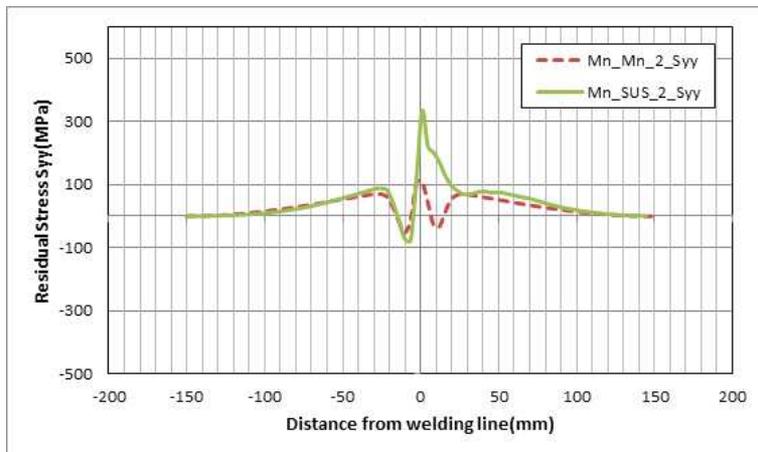
(f) 측정위치 6의 σ_x 방향 비교

그림 3.22 측정 위치별 용접선 방향(σ_x)의 동종/이종 잔류응력비교

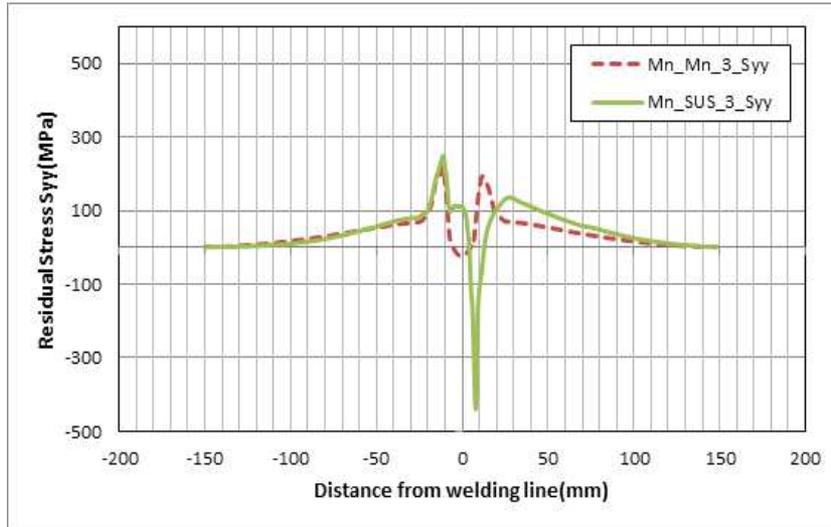
다음 그림 3.23은 용접선 직각방향의 동종과 이종의 측정위치에 따라 비교한 그래프이다. (a), (b), (c)에서 동종의 경우 0mm기준으로 거의 대칭인 응력 값이 측정되었으나, 이종의 경우 0.26mm정도의 거리에서 응력 값이 큰 변화가 생기는 것을 알 수 있었다. (a), (c)에서는 압축으로 잔류응력이 튀었으며, (b)에서는 인장응력으로 값이 튀는 현상이 발생하였다. (e), (f), (g) 대한 두께방향()의 동종/이종 잔류응력의 비교 그래프이다. (e)와 (f)는 동종과 이종이 비슷한 잔류응력 값이 측정 되었으며, (f)의 경우 용접선 방향과 비슷하게 잔류응력이 분포되었다.



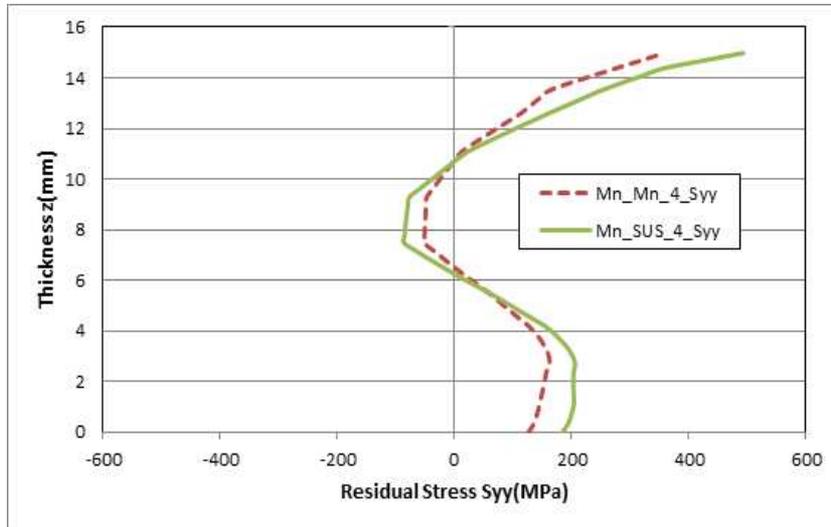
(a) 측정위치 1의 σ_y 방향 비교



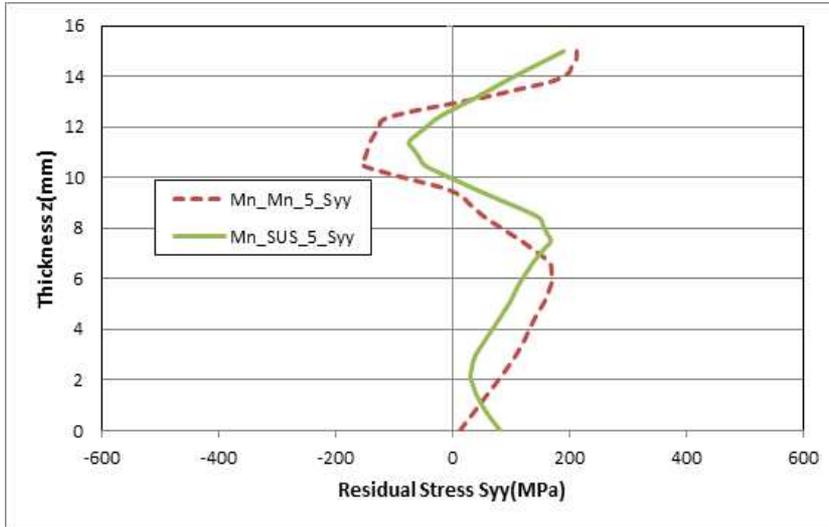
(b) 측정위치 2의 σ_y 방향 비교



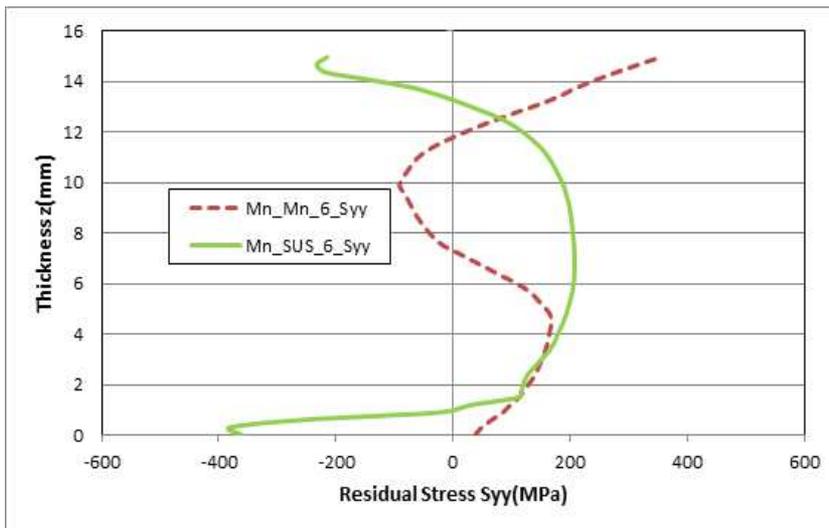
(c) 측정위치 3의 방향 비교



(d) 측정위치 4의 σ_y 방향 비교



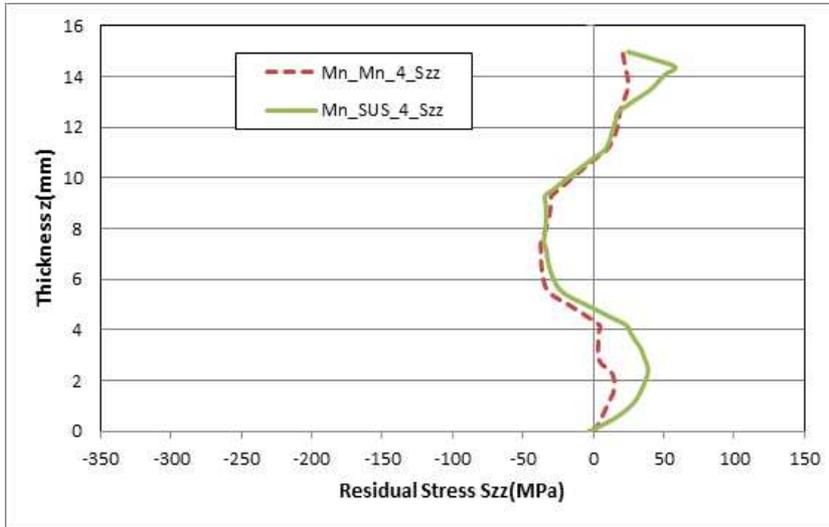
(e) 측정위치 5의 방향 비교



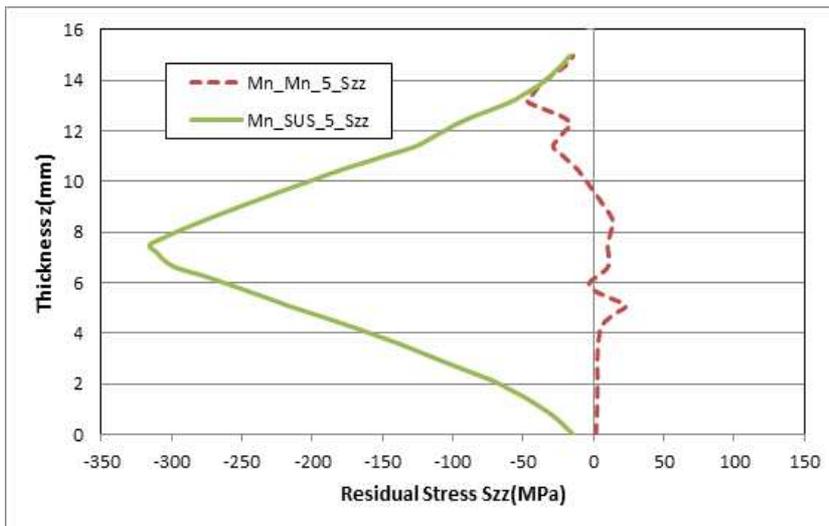
(f) 측정위치 6의 σ_y 방향 비교

그림 3.23 측정 위치별 용접선 방향(σ_y)의 동종/이종 잔류응력비교

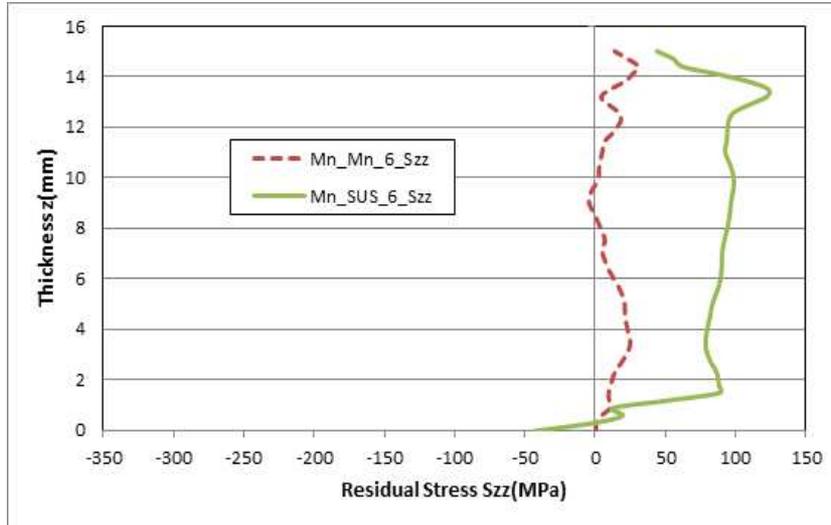
다음 그림 3.24는 두께방향의 동종과 이종의 잔류응력 값을 비교한 그래프이다. 두께 방향의 잔류응력은 (a), (b) 에서는 비슷한 경향을 보였으나 (c)에서는 많이 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 동종과 이종의 잔류응력 분포를 비교 해본 결과 Filler Metal과 SUS304강 경계면에서 다른 동종과 다리 큰 차이가 있다는 것을 확인 할 수 있었다.



(a) 측정위치 4의 방향 비교



(b) 측정위치 5의 σ_z 방향 비교

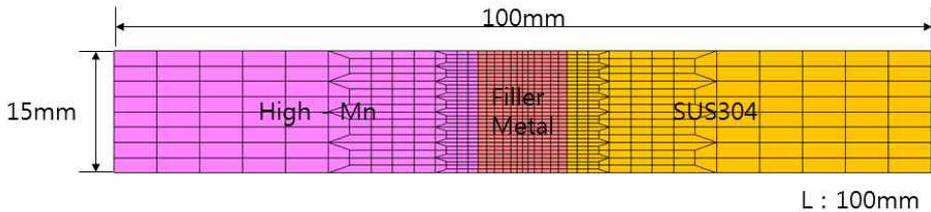


(c) 측정위치 6의 방향 비교

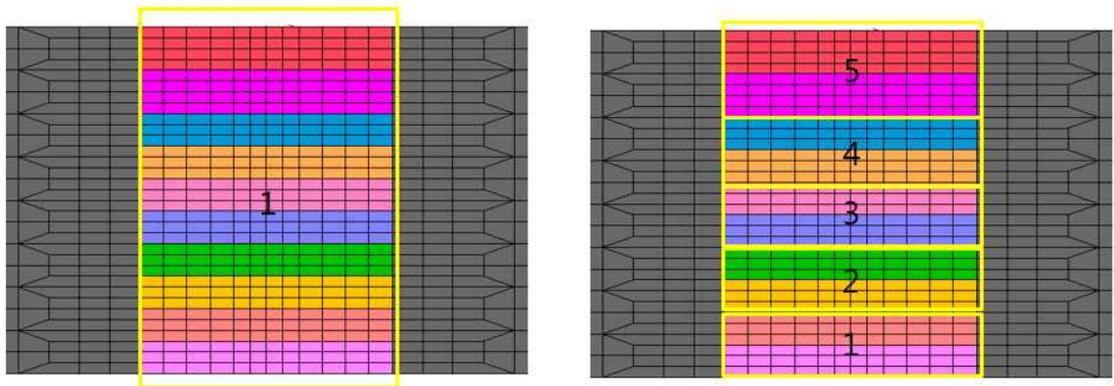
그림 3.24 측정 위치별 용접선 방향(σ_z)의 동종/이종 잔류응력비교

3.2 이종용접부의 물성치에 따른 잔류응력의 영향

위의 그림 3.21~3.23에서 Filler Metal과 SUS304강 경계면에서 동종과 다르게 잔류응력이 큰 차이가 있다는 것을 확인하여 그 원인이 무엇인지 알아보기 위해 이종용접부의 물성치에 따른 잔류응력에 영향에 대해 연구해 보았다. 먼저 용접 부의 형상과 용접 순서에 영향인지를 확인하기 위해 간단한 모델링을 이용하여 확인 하여 보았다. 그림 3.24에서 모델링 형상과 측정위치를 보여주고 있다. 측정위치로는 그림 3.25와 같이 측정 하였다. Case A의 경우는 1pass로 용접을 한 모델이고, Case B의 경우 5pass로 나누어 해석하므로 튀는 현상이 패스의 영향을 때문에 튀는 것인지 확인 해보았다. 그림 3.27 측정위치별 용접선방향(), 용접선 직각방향(σ_y)의 잔류응력 비교 그래프이다.



(a) 모델 형상 및 치수



(b) 1pass 용접해석 (Case A)

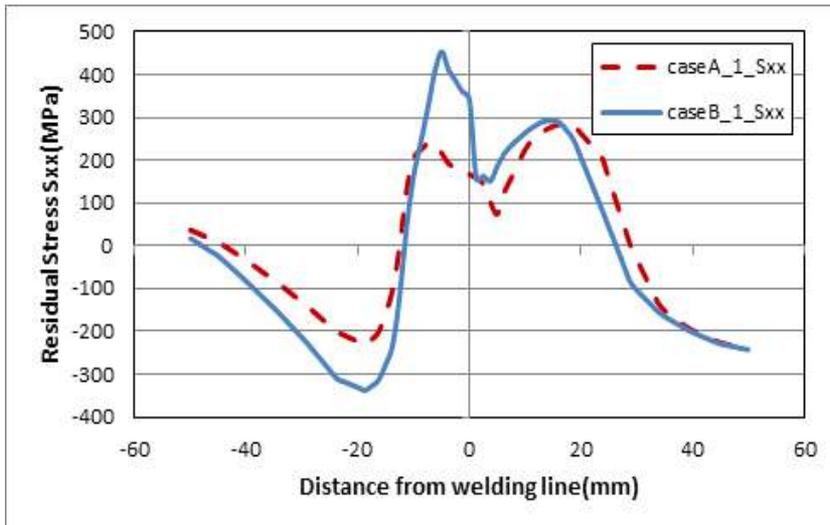
(c) 5pass 용접해석 (Case B)

그림 3.25 모델 형상 및 치수와 해석 pass순서

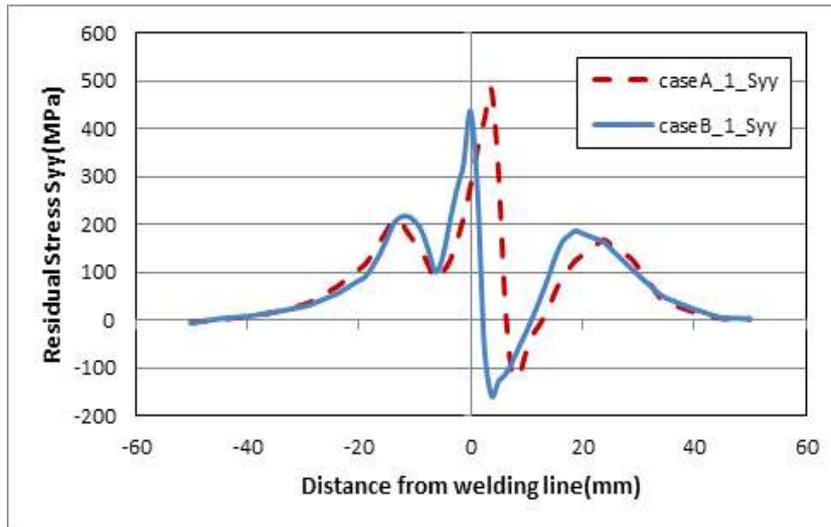


그림 3.26 비교 모델의 잔류응력 측정위치

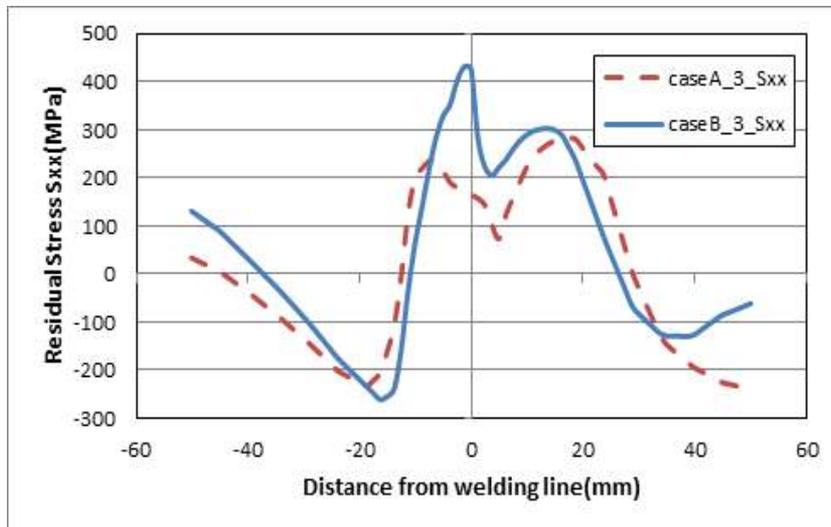
그림 3.27에서 역시 이중재의 특징인 응력 값의 큰 변화가 나타났다. 용접패스와 용접부 형상으로는 원인을 파악 할 수가 없어 표 3.3과 같이 동종강재의 Right_Base Metal의 강재 물성치를 SUS304의 물성치(항복응력, 탄성계수, 열전도계수, 선팽창계수)를 하나씩 바꾸어 보며 해석하였고, 결과 값을 이중강재의 측정값과 비교하여 급격한 응력변화의 원인을 확인해보았다.



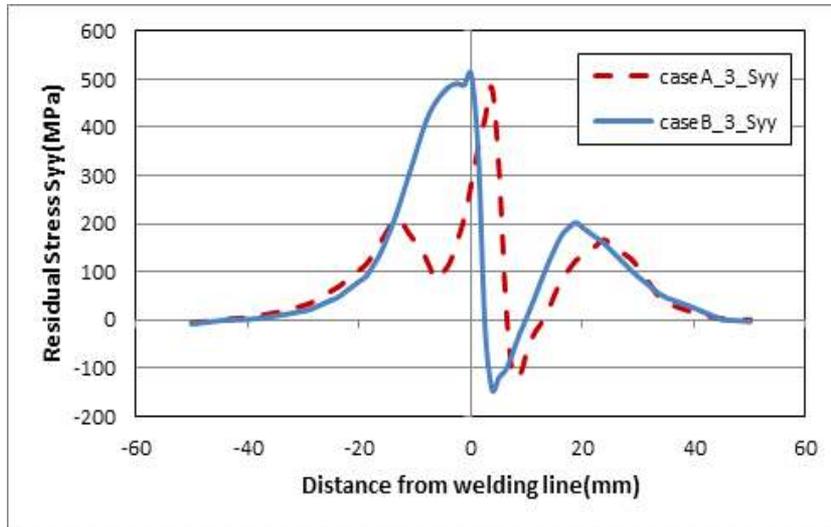
(a) Case A, B의 측정위치1의 방향 비교



(b) Case A, B의 측정위치1의 방향 비교



(c) Case A, B의 측정위치3의 σ_x 방향 비교



(d) Case A, B의 측정위치3의 방향 비교

그림 3.27 측정위치별 용접선방향(σ_x), 용접선 직각방향(σ_y)의 잔류응력 비교

표 3.3 과같이 Case 1에서는 항복응력을 SUS와 동일하게 하여 해석하였고 Case 4까지 탄성계수, 열전달계수, 선팽창계수 순서대로 바꾸어 동종과 비교 하였다. 측정위치는 그림 3.28와 같이 결과 값을 측정하였다.

표 3.3 물성치 변화에 따른 비교 순서

	물성			Yield Stress (Y)	Young's Modulus (E)	Thermal Expansion (TE)	Heat Conductivity (HC)
	L_Base	WM	R_Base				
동종	Mn	WM	Mn	-	-	-	-
case1			Mn	Mn→SUS 2.65E+008	-	-	-
case2			Mn	-	Mn→SUS 1.985E+011	-	-
case3			Mn	-	-	Mn→SUS 1.5959E-005	-
case4			Mn	-	-	-	Mn→SUS
이종			SUS	-	-	-	-

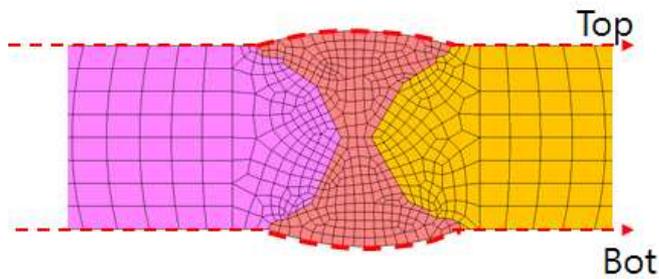
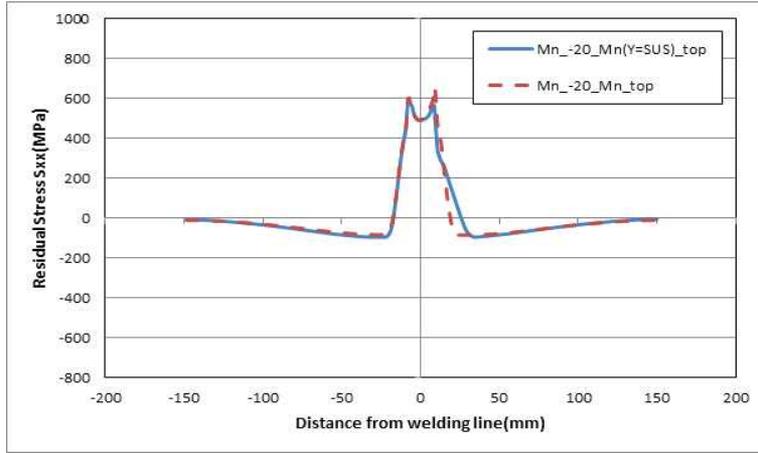


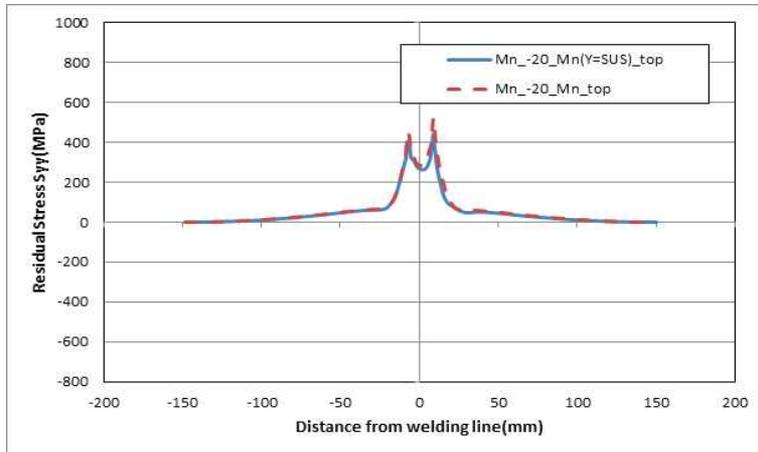
그림 3.28 물성치에 따른 잔류응력 측정위치

3.2.1 항복응력에 따른 잔류응력의 영향

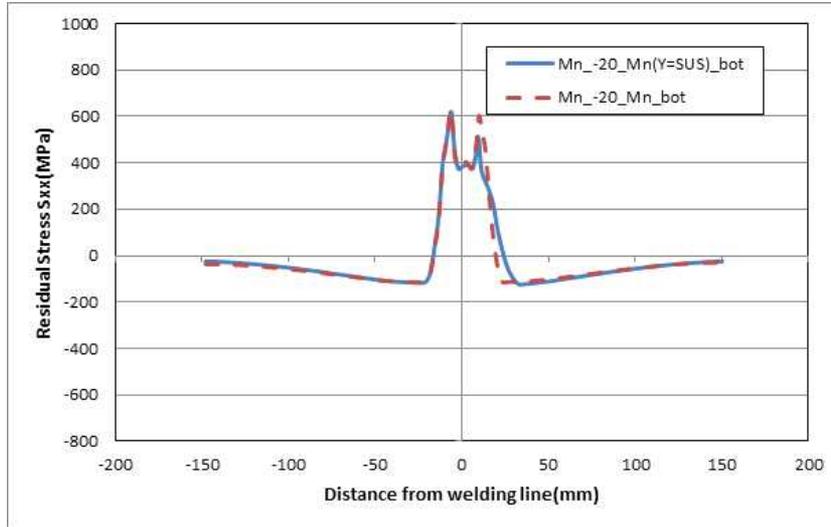
그림 3.29는 R_Base의 High Mn강의 항복응력을 SUS304강의 항복응력으로 변경하여 비교 하였다. 그림 3.26에서 항복응력을 변경해 보아도 이종의 급격한 변화는 일어나지 않은 것을 확인 할 수 있다. 용접선 방향과 용접선 직각방향 모두에서 큰 차이가 없었다.



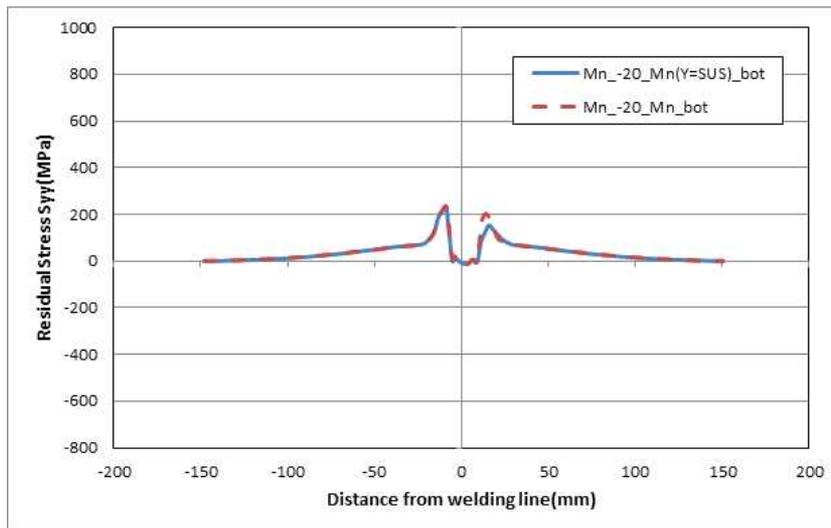
(a) Case 1의 top면 방향 비교



(b) Case 1의 top면 σ_y 방향 비교



(c) Case 1의 bot면 방향 비교

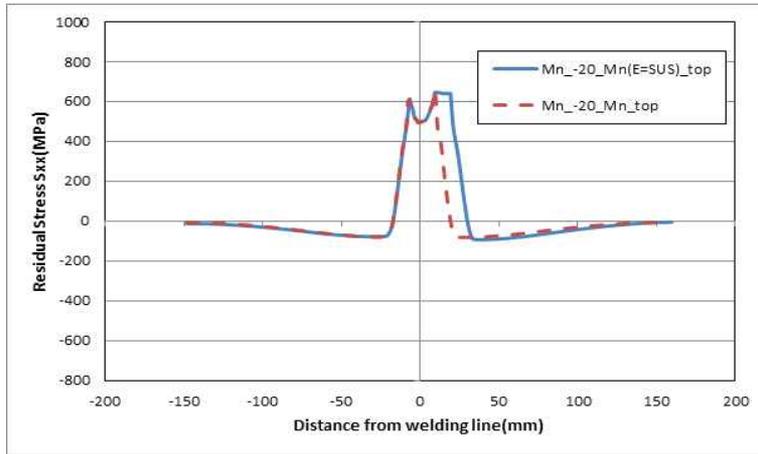


(d) Case 1의 bot면 σ_y 방향 비교

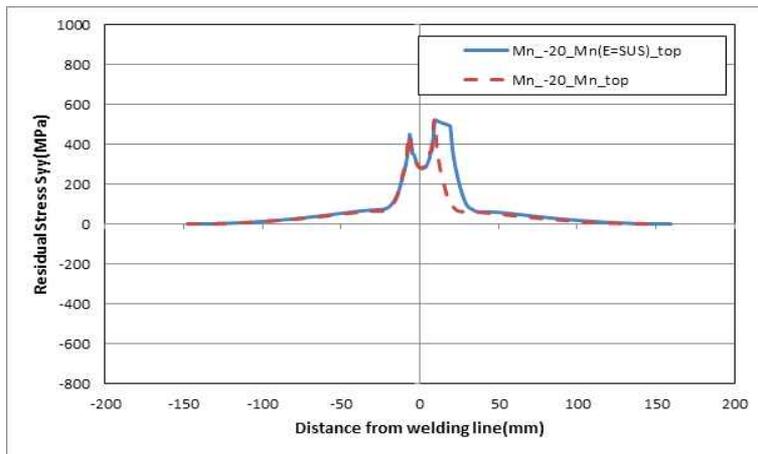
그림 3.29 항복응력 변경 후 동종/이종 비교

3.2.2 탄성계수에 따른 잔류응력의 영향

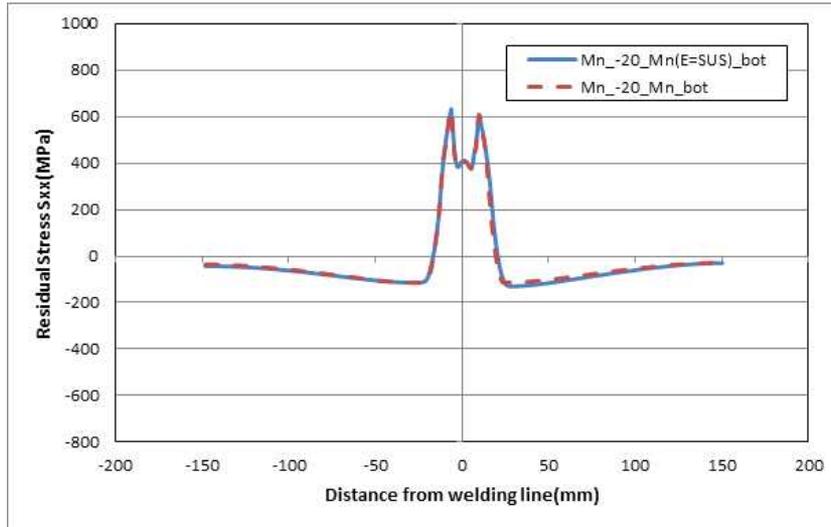
그림 3.30는 R_Base의 High Mn강의 탄성계수를 SUS304강의 탄성계수로 변경하여 비교 하였다. 그림 3.30(a), (b)에서 R_Base에서 약간의 변화가 생겼고 응력 값이 일정하게 유지되는 형태가 발생하였다. 하지만 Bot면에서는 차이가 거의 일어나지 않았다.



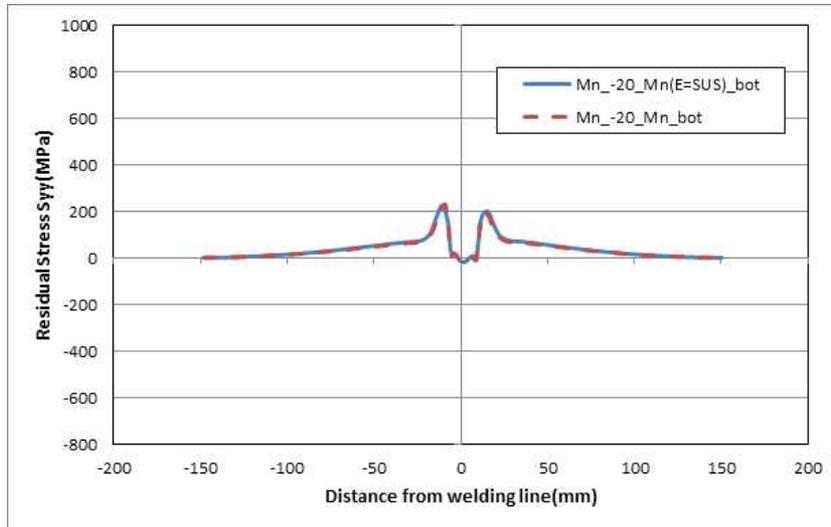
(a) Case 2의 top면 방향 비교



(b) Case 2의 top면 σ_y 방향 비교



(c) Case 2의 bot면 방향 비교

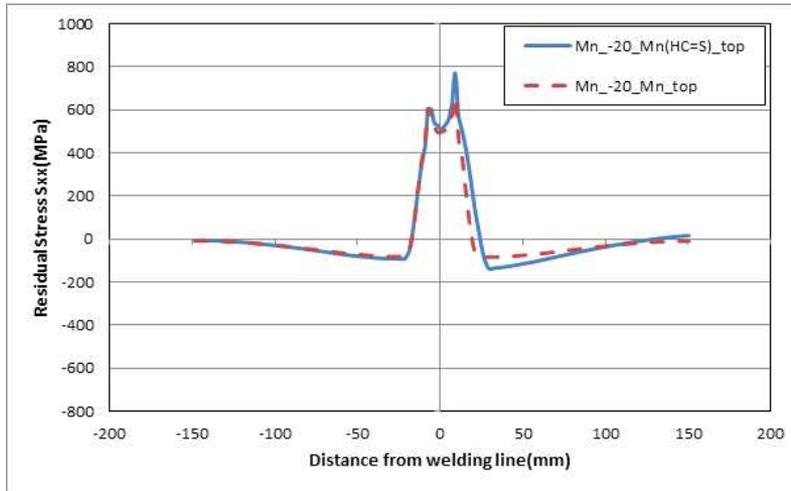


(d) Case 2의 bot면 σ_y 방향 비교

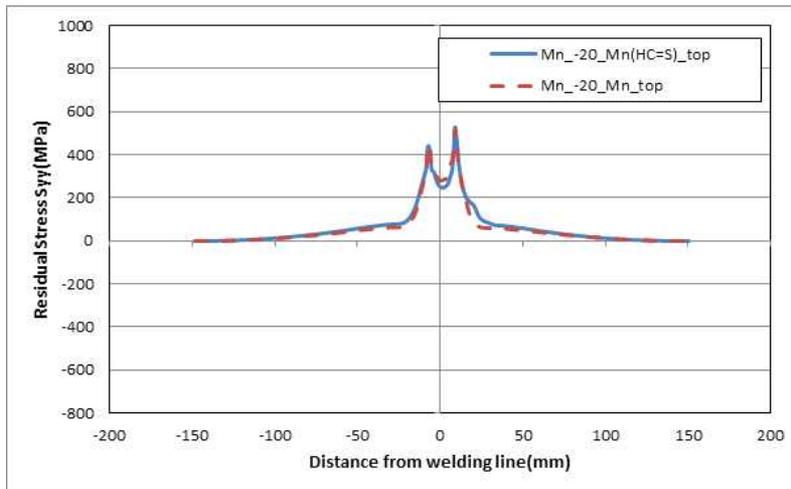
그림 3.30 탄성계수 변경 후 동종/이종 비교

3.2.3 열전달계수에 따른 잔류응력의 영향

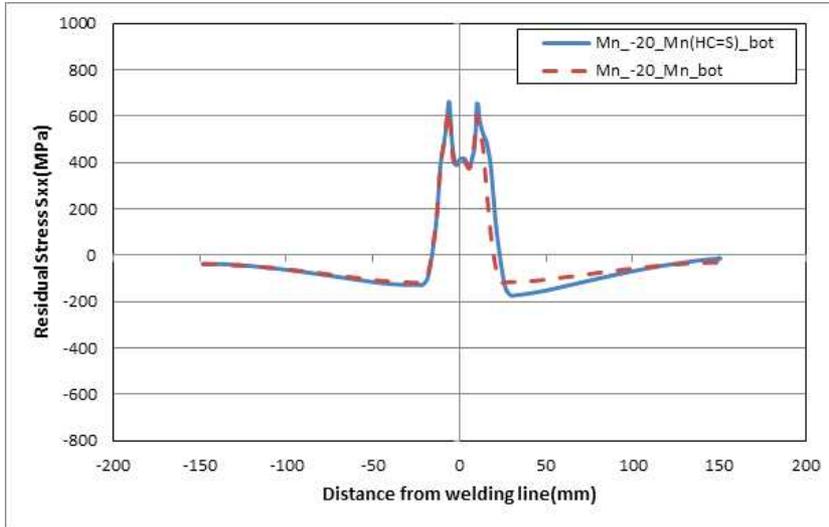
그림 3.31는 R_Base의 High Mn강의 탄성계수를 SUS304강의 열전달계수로 변경하여 비교 하였다. 열전달계수를 변경해 보아도 이종의 급격한 변화는 일어나지 않은 것을 확인 할 수 있다. 응력 값이 비슷하게 나타났고 큰 특징이 없었다.



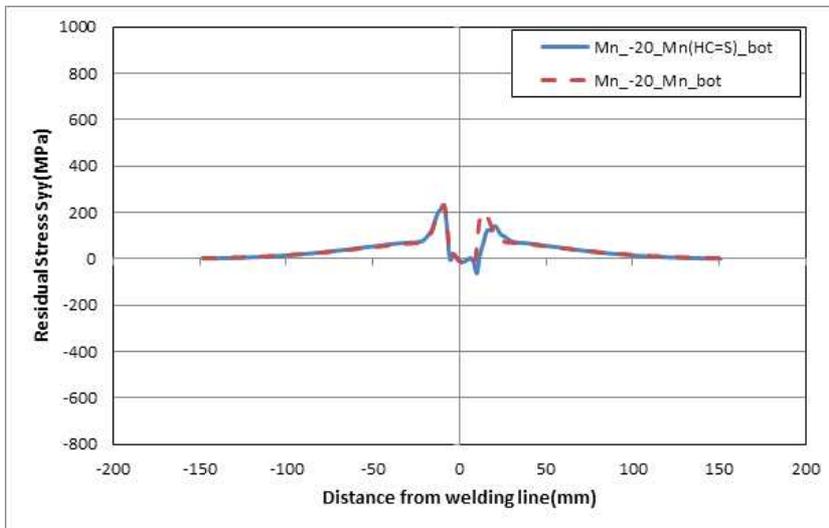
(a) Case 3의 top면 방향 비교



(b) Case 3의 top면 σ_y 방향 비교



(c) Case 3의 bot면 방향 비교

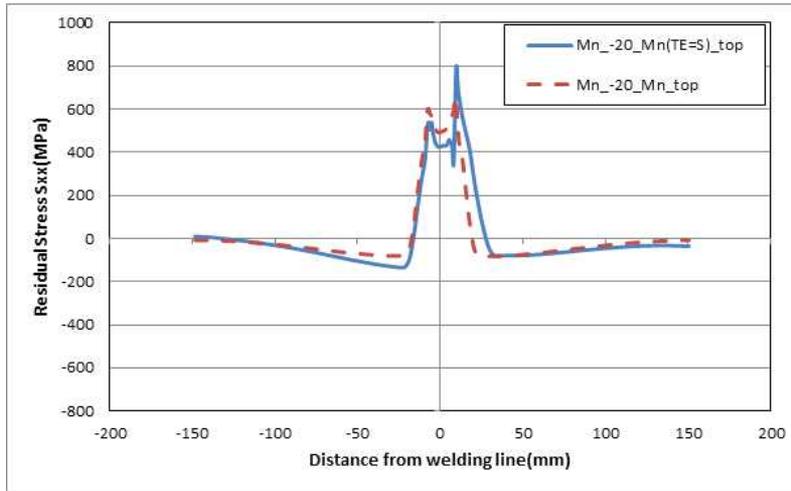


(d) Case 3의 bot면 σ_y 방향 비교

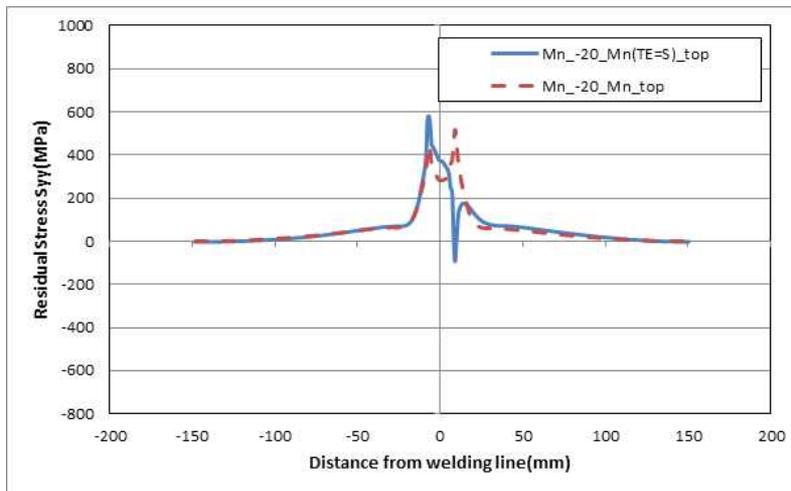
그림 3.31 열전달계수 변경 후 동종/이종 비교

3.2.4 선팽창계수에 따른 잔류응력의 영향

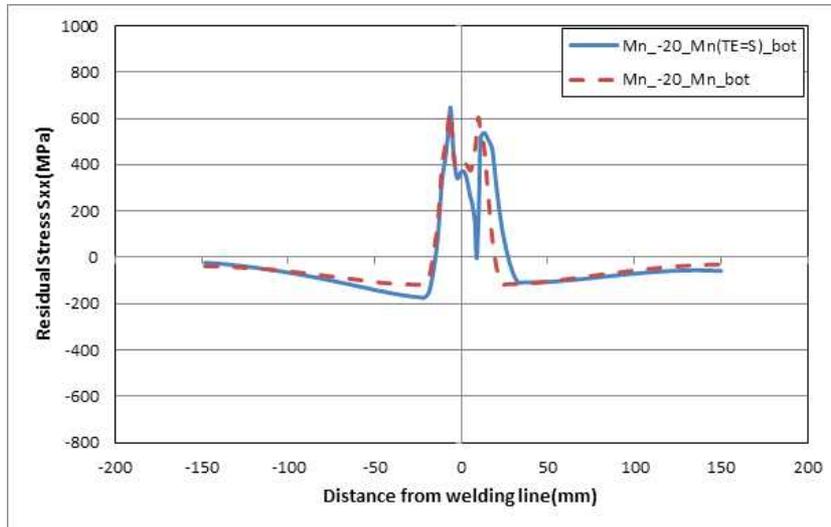
그림 3.32는 R_Base의 High Mn강의 선팽창계수를 SUS304강의 선팽창계수로 변경하여 비교 하였다. 선팽창계수를 변경하게 되면 용접선 방향 용접선 직각방향 모두에서 이중용접의 특징인 튀는 부분을 발견되었다. 이중용접과 선팽창계수의 변경에 대한 용접 잔류응력을 비교하여 보았다.



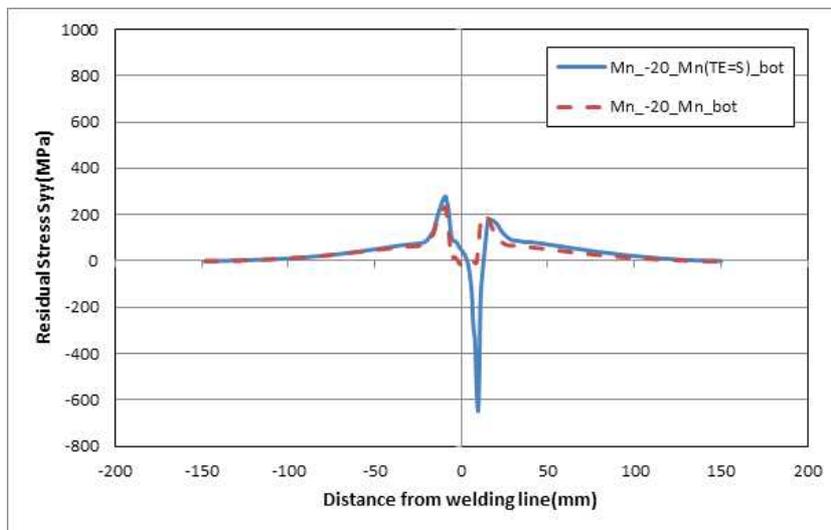
(a) Case 4의 top면 방향 비교



(b) Case 4의 top면 σ_y 방향 비교



(c) Case 4의 bot면 방향 비교

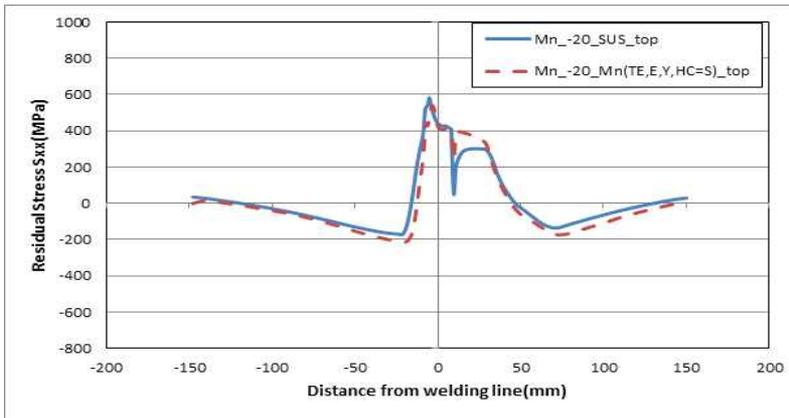


(d) Case 4의 bot면 σ_y 방향 비교

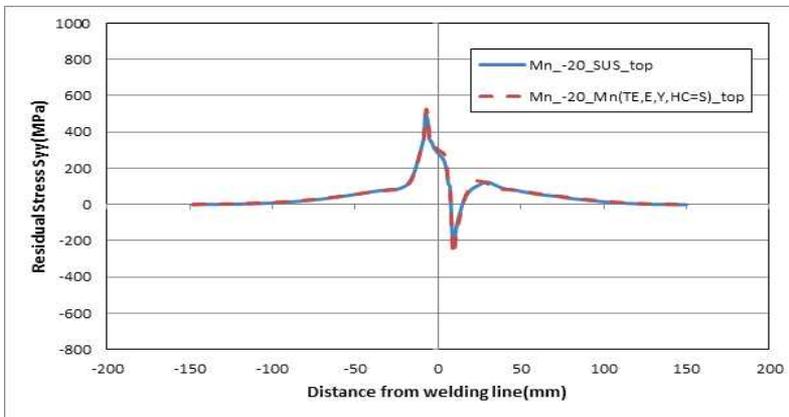
그림 3.32 선팽창계수 변경 후 동종/이종 비교

3.2.5 고찰

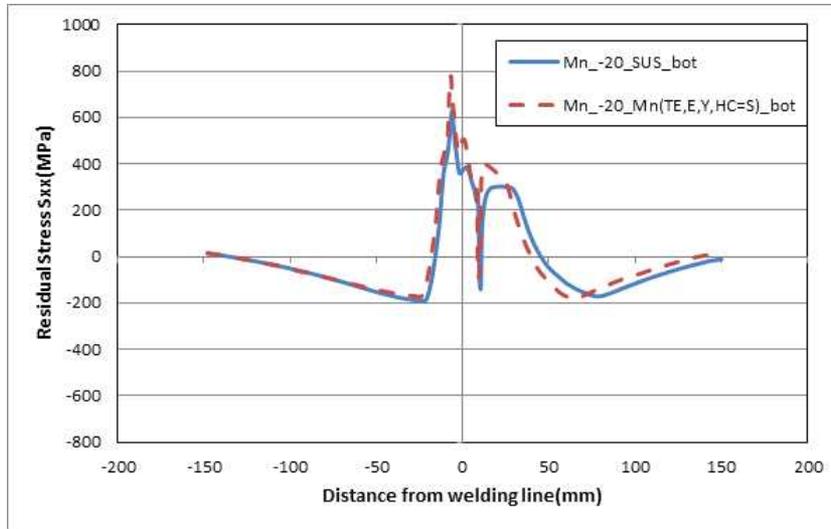
그림 3.33는 Case 4의 결과 값과 이중용접과의 비교한 그래프이다. (a)에서 -150mm 부터 0mm까지 응력 값이 비슷하나 튀는 이중용접의 경우에서 더 크게 튀는 것을 확인 할 수 있었다. 구 후에는 비슷한 잔류응력 값이 측정되었다. (b)의 경우에는 응력 값과 거의 일치할 정도의 잔류응력 값이 측정되었고, (c)또한 (a)에서와 비슷한 경우의 잔류응력이 측정 되었다. Case 4와 이중용접의 잔류응력 값을 비교 해본결과 선팅창계수를 다르게 함으로써 동중용접의 값이 이중용접의 튀는 잔류응력이 생겨 비슷한 형상을 보인다는 것을 알 수 있었다.



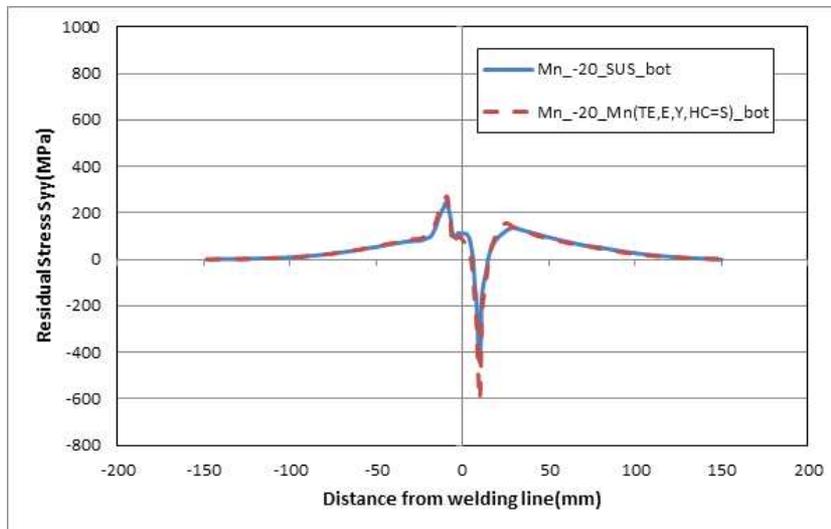
(a) Case 4와 이중용접의 top면 방향 비교



(b) Case 4와 이중용접의 top면 σ_y 방향 비교



(c) Case 4와 이중용접의 bot면 방향 비교

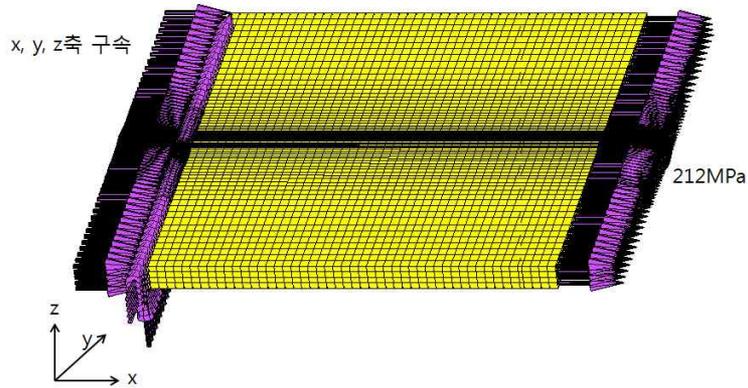


(d) Case 4와 이중용접의 bot면 σ_y 방향 비교

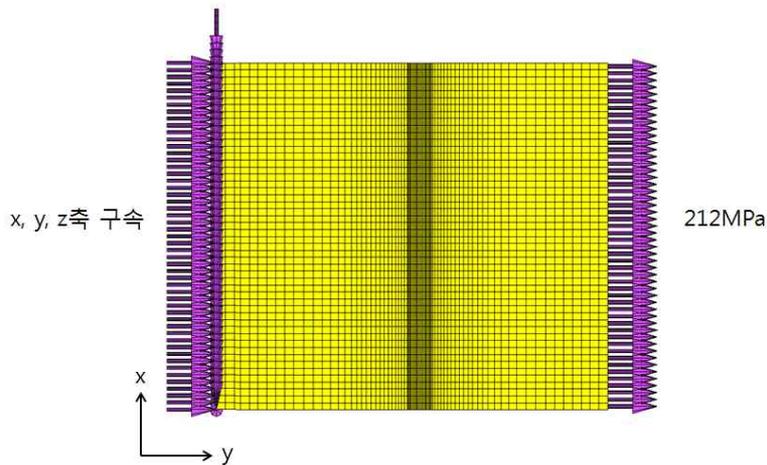
그림 3.33 Case 4와 이중용접의 비교

3.3 동종/이종 용접구조물의 역학적 거동

동종과 이종강재로 용접을 실시한 후 용접선 방향과 용접선 직각방향에 인장응력을 가하여 용접 후 생긴 잔류응력의 변화를 살펴보았다. 그림 3.34과 같이 경계조건과 인장응력을 설정하였고 인장응력의 값은 SUS304강의 항복응력의 70%로 설정하였다. 또한, 측정값의 위치는 그림 3.28과 같이 측정하였다.



(a) 용접선의 경계조건 및 인장응력(tensile_A)



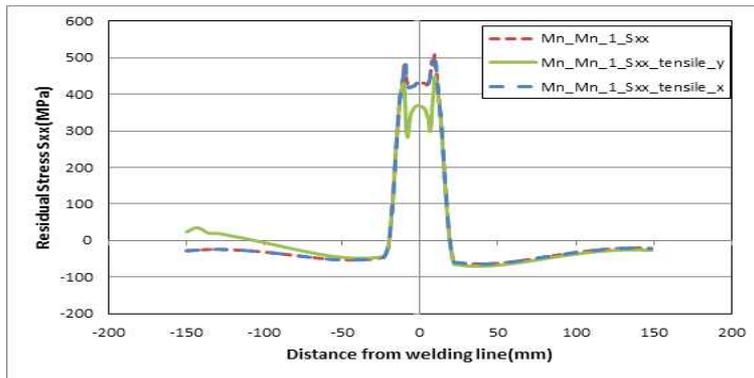
(b) 용접선 직각방향의 경계조건 및 인장응력(tensile_B)

그림 3.34 용접선 방향과 용접선 직각방향의 경계조건 및 인장응력

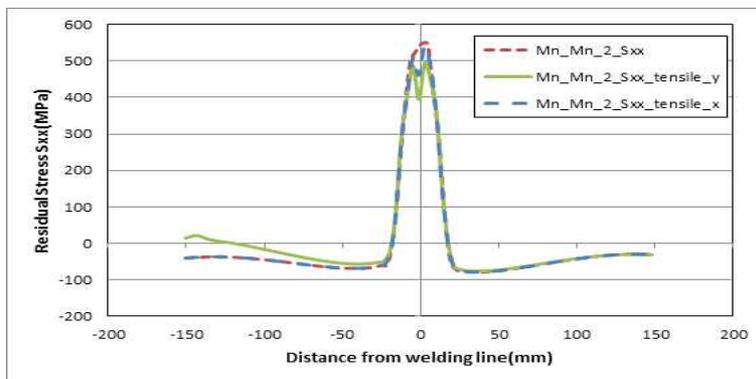
3.3.1 용접선 방향 잔류응력에 인장응력을 가함

가. 동종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교

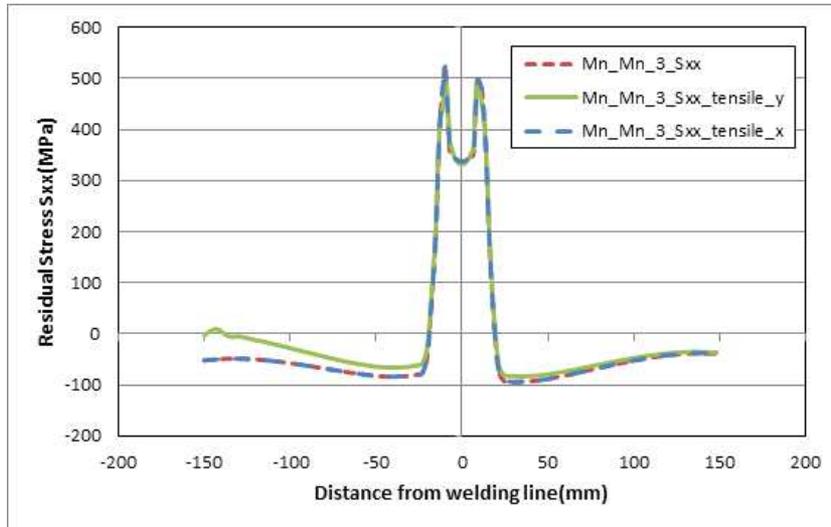
그림 3.33과 같이 경계조건과 인장응력 설정한 후 결과를 비교해보았다. 비교는 용접 후의 잔류응력과 인장응력(tensile_x, tensile_x)을 동종/이종으로 나누어 비교 하였다. (a)의 tensile_y의 하중을 가한 후 용접부의 잔류응력은 100MPa 정도 떨어졌다는 것을 확인 할 수 있다. (b), (c)는 큰 차이가 없었다. (d), (e), (f)의 경우 tensile_x가 가한 후에도 응력 값이 변화가 없지만 (e), (f)의 경우 잔류응력의 형상은 비슷하지만 tensile_y의 인장응력이 가해 진후 응력 값이 감소하였다.



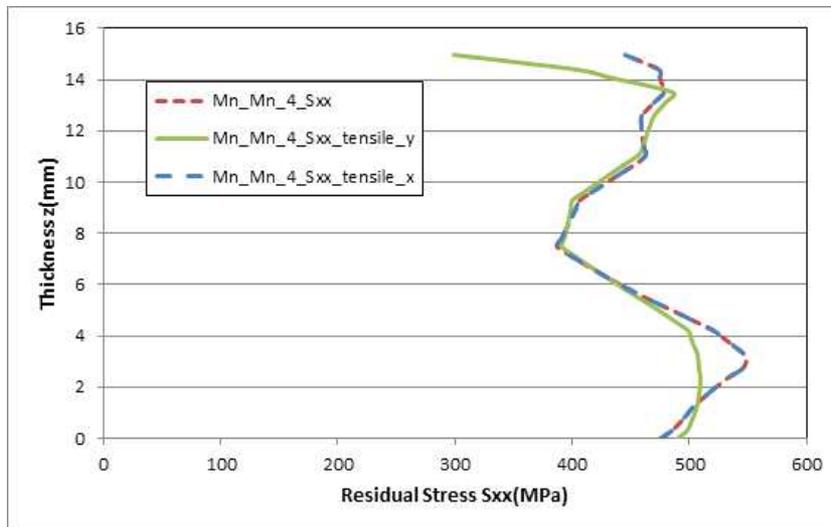
(a) 측정위치 1의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



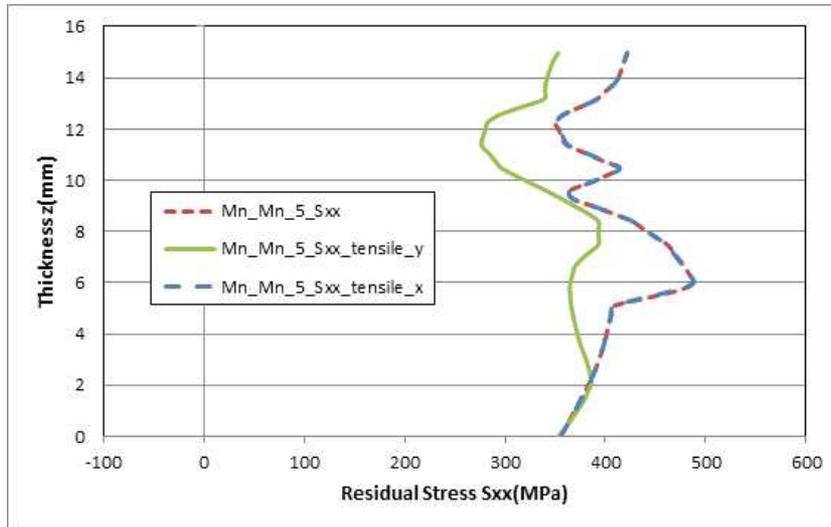
(b) 측정위치 2의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



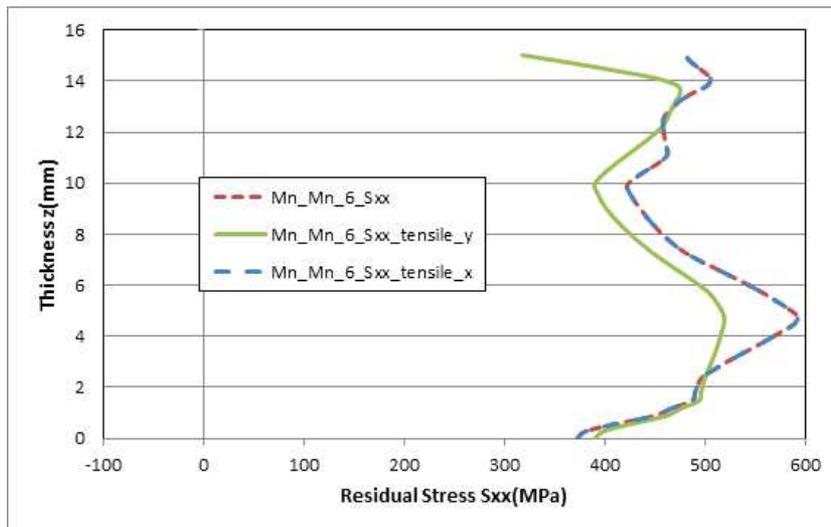
(c) 측정위치 3의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(d) 측정위치 4의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(e) 측정위치 5의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

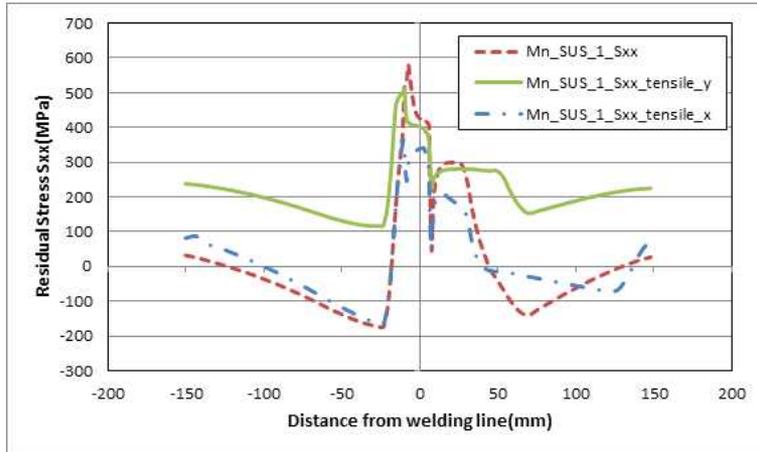


(f) 측정위치 6의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

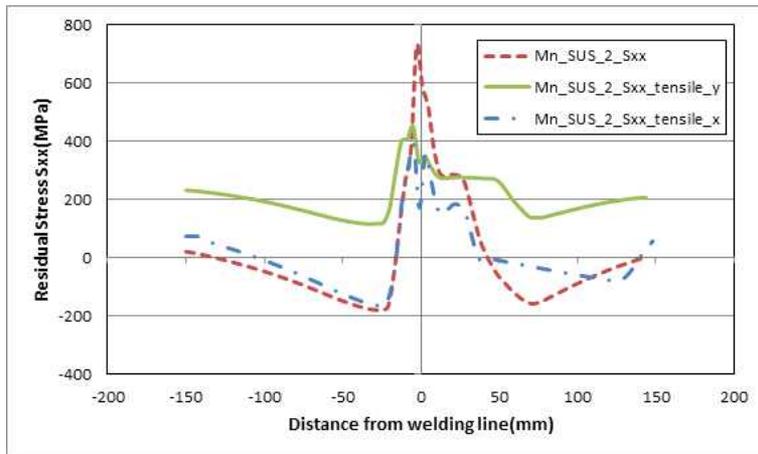
그림 3.35 동종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교

나. 이종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교

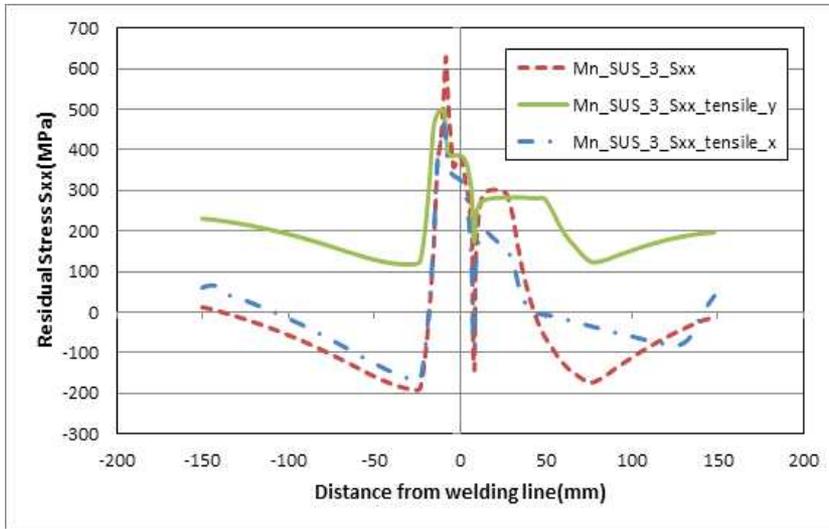
비교한 결과 동종에서의 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력을 가한 결과를 비교하여 보면 큰 차이가 없었다. 하지만 이종에서는 용접선 직각방향으로 인장응력을 가한 후에는 응력이 상승한 것을 알 수 있었다.



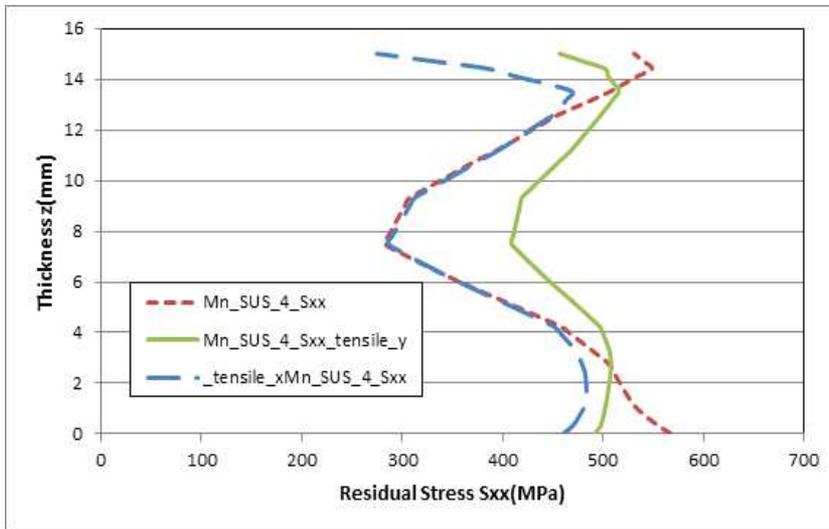
(a) 측정위치 1의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



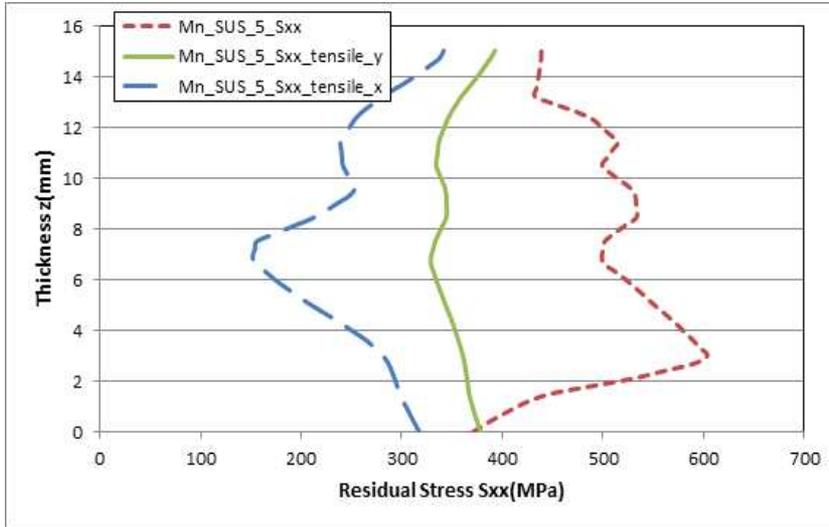
(b) 측정위치 2의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



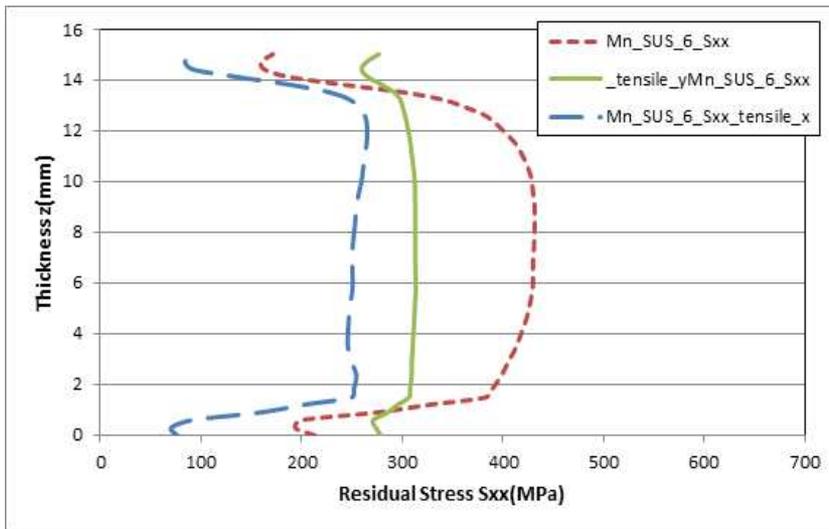
(c) 측정위치 3의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(d) 측정위치 4의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(e) 측정위치 5의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



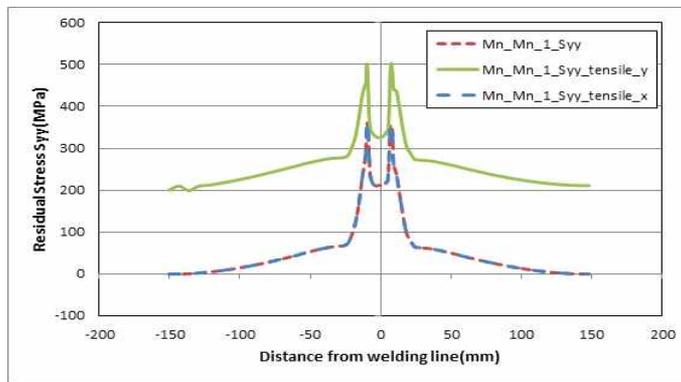
(f) 측정위치 6의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

그림 3.36 이종에서 용접선 방향의 잔류응력과 인장응력 비교

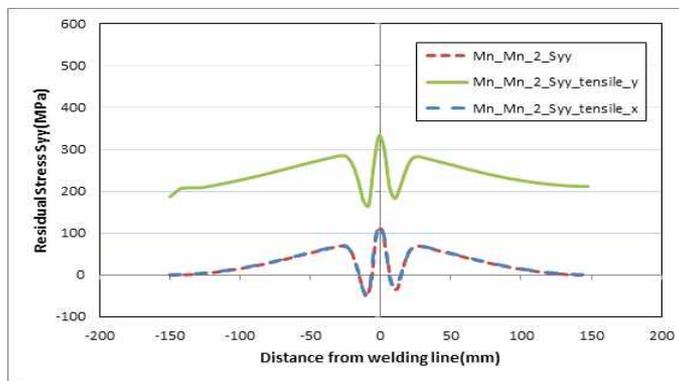
3.3.2 용접선 직각방향 잔류응력에 인장응력을 가함

가. 동종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교

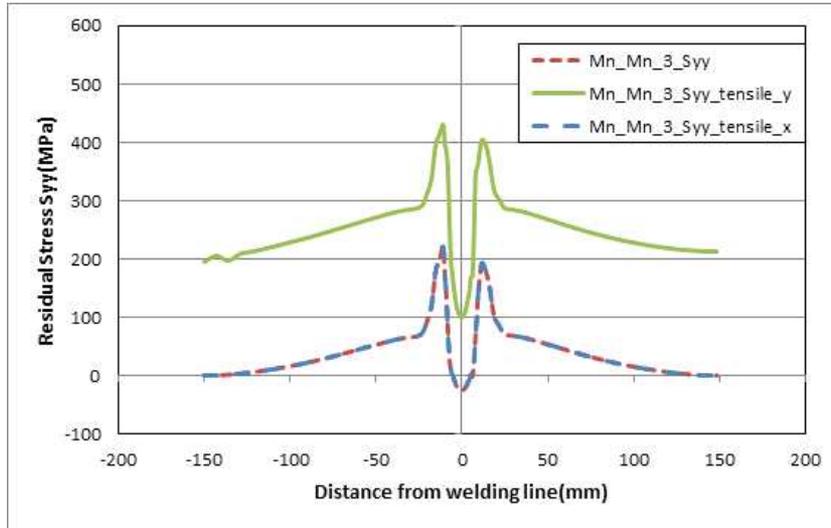
동종용접에서의 용접선 직각방향의 잔류응력에 tensile_x의 인장응력을 가하여도 변화가 없었으며, tensile_y의 인장응력이 가해졌을 경우에는 200MPa정도의 응력이 상승하였다는 것을 확인 할 수 있었다. (d), (e), (f)의 경우에서도 (a), (b), (c)와 똑같은 변화가 있다는 것을 확인할 수가 있었다.



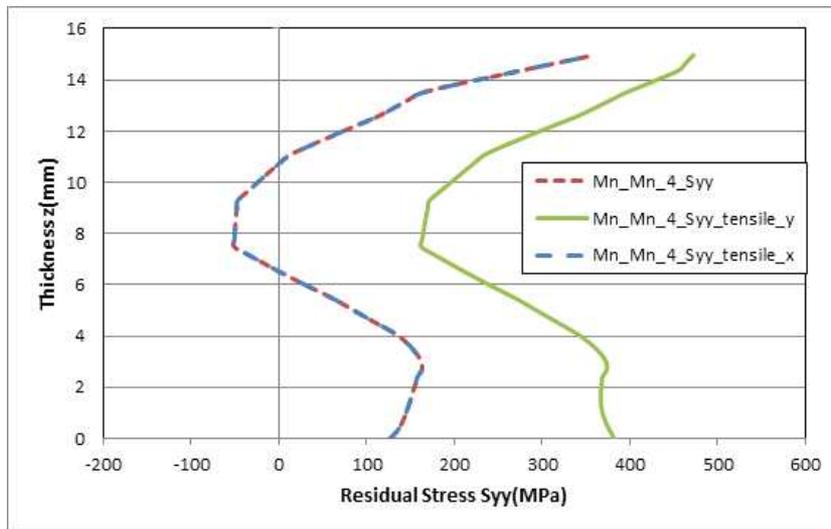
(a) 측정위치 1의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



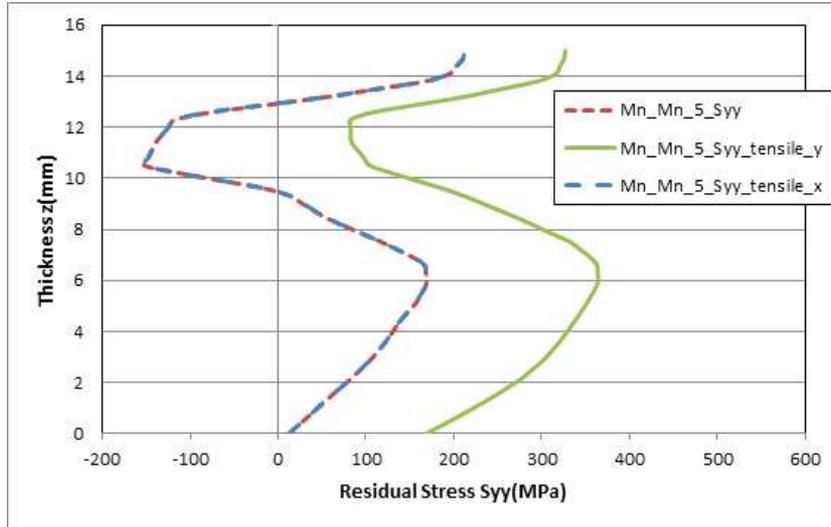
(b) 측정위치 2의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



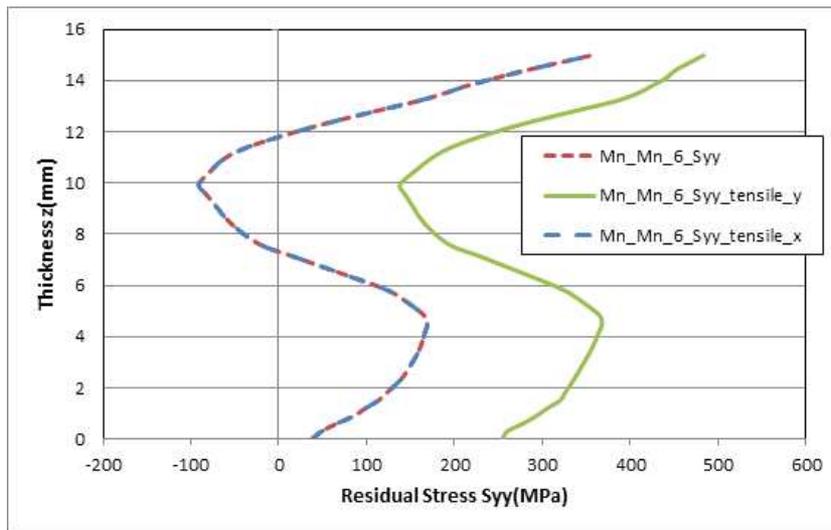
(c) 측정위치 3의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(d) 측정위치 4의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(e) 측정위치 5의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

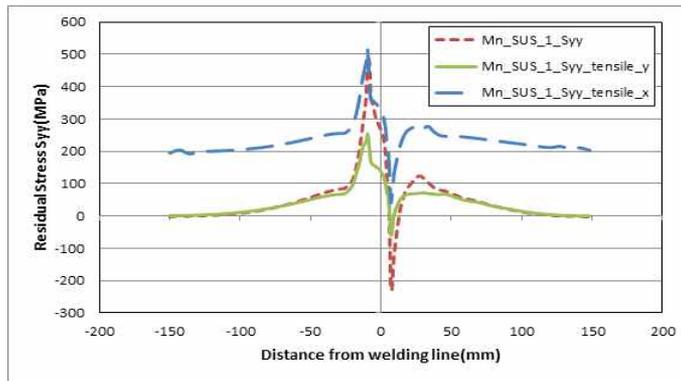


(f) 측정위치 6의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

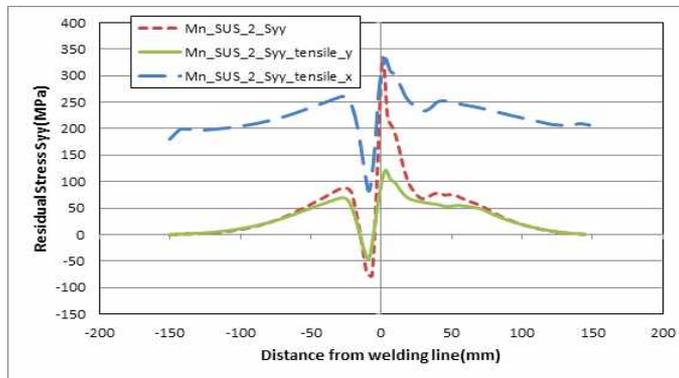
그림 3.37 동종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교

나. 이종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교

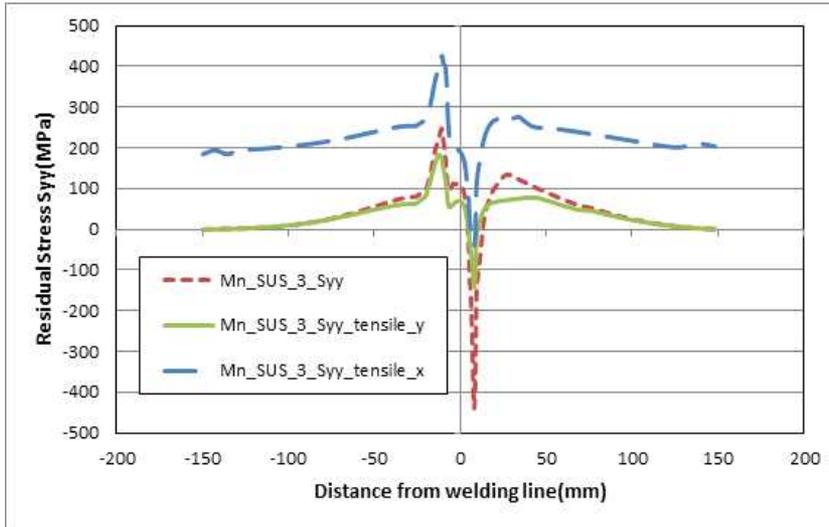
이종용접부의 용접선 직각방향의 잔류응력에 tensile_y인장응력을 가했을 경우에는 (a), (c)에서는 sus304의 강제에서 잔류응력의 값이 되는 부분에서 응력값이 증가 200 MPa정도 증가하였고 (b)의 경우에는 감소하였다는 것을 알 수가 있다. (d), (e),의 경우 표면에서의 잔류응력값이 tensile_y의 인장응력이 가해 졌을 경우 약간 감소하였지만 중앙부에서는 비슷한 양상을 보였고, (f)의 경우 표면에서와 두께방향의 내부의 잔류응력값이 큰 차이가 있었지만 인장응력을 가했을 경우 그 폭이 200 MPa 정도로 줄어들었다는 것을 확인 할 수 있었다.



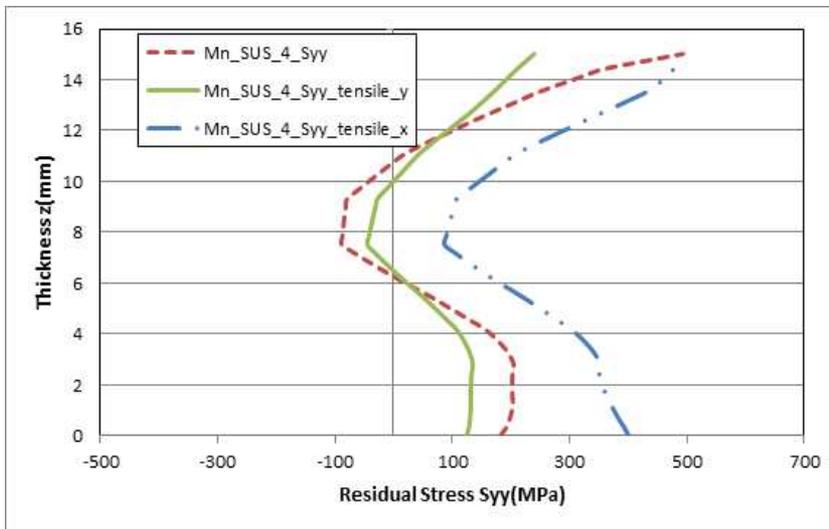
(a) 측정위치 1의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



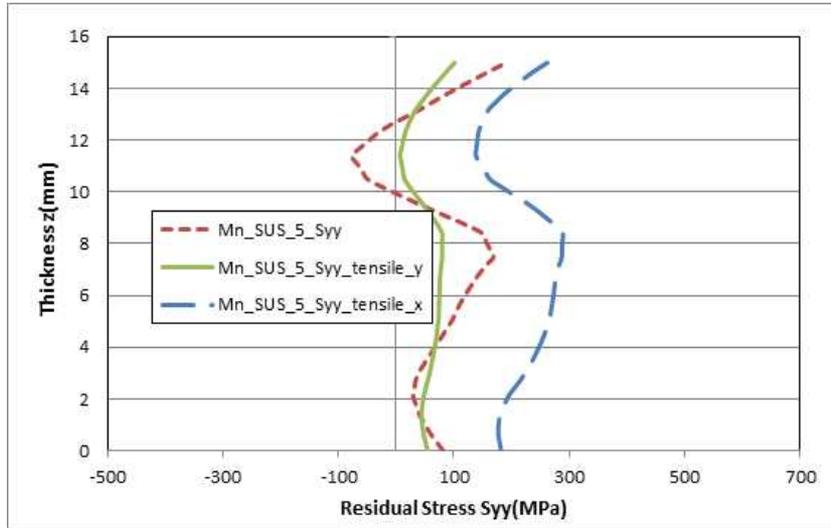
(b) 측정위치 2의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



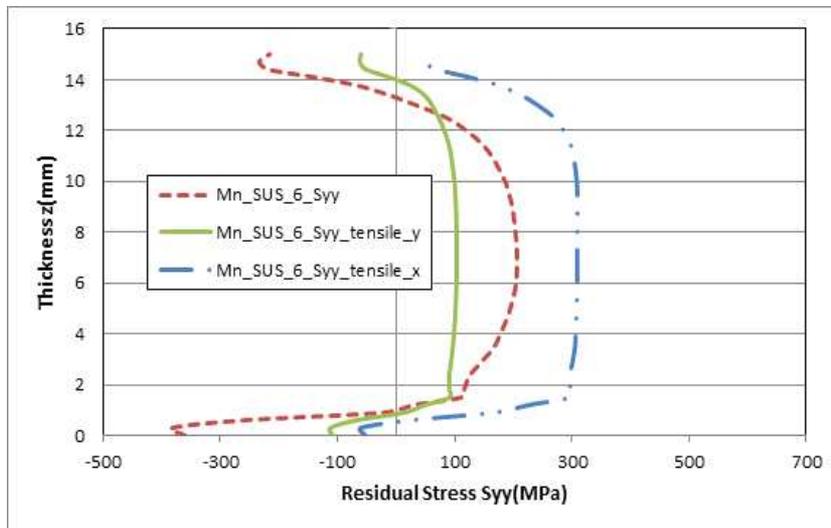
(c) 측정위치 3의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(d) 측정위치 4의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(e) 측정위치 5의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교



(f) 측정위치 6의 잔류응력과 인장응력 후 잔류응력 비교

그림 3.38 이종에서 용접선 직각방향의 잔류응력과 인장응력 비교

제 4 장 결 론

강구조물의 부식화와 용접 중에 생기는 용접잔류응력은 부재의 사용성과 강도를 떨어뜨려 균열전파력을 증가시키고, 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 용접잔류응력의 특성을 알고 강구조물의 역학적 거동에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 고망간강과 스테인리스강을 이중 맞대기 용접 시 생기는 잔류응력의 특성을 파악하기 위해 유한요소법을 통한 이중 용접잔류응력 해석을 실시하고, 표면잔류응력을 측정하여 비교를 통해 결과를 고찰하여 주요 물성의 변화에 의한 잔류응력의 변화를 Parametric 해석을 수행하였다. 그 결과 이중용접부에 미치는 주요 인자를 규명하였다. 또한 이중용접부에 인장응력을 재하 하여 역학적 거동을 파악하였다.

1) 동종/이중 용접 잔류응력 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하여, 해석결과가 검증되어 이중 용접시 발생하는 특성을 규명하기 위한 다양한 해석을 수행 할 수 있게 되었다.

2) 해석을 통해 동종/이중 용접잔류응력을 비교 한 결과 동종에서는 용접부 비드 중앙을 기준으로 거의 대칭인 잔류응력 값이 나왔으나, 이중에서는 이중재중 강도가 약한 부재의 Fusion Line에서 응력 값이 급격하게 변화는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 급격한 변화를 이중용접부의 잔류응력의 특성이라고 할 수 있다.

3) 이중용접부의 급격한 응력변화의 원인을 알기위해 용접부 단면의 형상과 용접입열 pass수를 변경한 결과, 이중용접 특징짓는 영향 인자가 아닌 것을 확인 할 수 있었다.

4) 이중의 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 강재의 주요 물성(탄성계수, 항복응력, 열전달계수, 선팽창계수)를 변화시켜 해석한 결과, 가장 큰 영향을 주는 것은 선팽창계수였다. 다른 물성치를 고정하고 선팽창계수를 변화시킴으로서 이중 용접시 발생하는 급격한 응력변화를 방지할 수 있었다. 따라서 이중 용접시 선팽창계수를 제어할 수 있다면 급격한 응력변화를 방지할 수 있다.

5) 또한, 용접 후 생기는 용접잔류응력이 외적 하중에 의한 역학적인 거동에 미치는 영향을 알기위해 용접선방향과, 용접선 직각방향으로 인장응력을 212 MPa(설계하중) 가하여 보았다. 용접선 방향의 잔류응력에 용접선 직각방향의 인장응력을 가했을 경우 동종의 경우에는 모재 쪽에 서의 응력 값은 큰 차이가 없으나 용접부의 중앙 쪽에서 응력 값이 줄어들었다. 이종의 경우에 모재쪽에서의 응력값은 200 MPa로 전체적으로 상승하였으나, 용접부 에서는 급격한 응력의 변화가 약 300 MPa 정도 줄어들었다.

6) 용접선 직각방향의 잔류응력에 용접선 방향의 인장응력을 가했을 때, 동종의 경우에는 응력값이 모재와 용접부 전체적으로 200MPa 상승하였다. 모재에서는 응력이 전체적으로 200 MPa상승하였다. 용접부의 경우에 급격한 응력값의 변화가 약 300 MPa 정도 줄어들었다.

참 고 문 헌

1. 강미현(2010), “중성자 회절법을 이용한 Stainless steel 파이프의 잔류응력 측정”, 충남대학교 신소재공학과 학위논문, pp.9~11.
2. 국토해양부(2010), 한국시설안전공단 안전점검및정밀안전진단세부지침.
3. 김진영(2001), “FEM과 XRD를 利用한 點熔接部の 殘留應力에 관한 研究”, 동아대학교 기계공학과 학위논문, pp.6~7.
4. 박정웅(2004), 박연수, 경갑수, “강교의 피로와 보수보강”, 구미서관, pp.17~20.
5. 박정웅(2013), 안규백, 우완측, 허승민, “고유변형도법에 의한 두께 25mm 맞대기용 접부의 두께방향의 잔류응력측정”, 대한용접.접합학회, 제 31권, 제4호, pp.67~72.
6. 박정웅(2009), 이승엽, “극후관 용접시 용접조건에 따른 잔류응력의 영향”, 대한용접·접합 학회 춘계 학술대회 제51집, pp.105.
7. 박정웅(2016), 유기상, 김숙환, 이목영, 김홍주, “High Mn강과 SUS304강 이종 맞대기용접시 용접프로세스가 잔류응력에 미치는 영향”, 대한용접.접합학회, 제64권, pp.68.
8. 신대운(2014), “상변태를 고려한 파이프의 용접잔류응력 해석”, 조선대학교 토목공학과 학위논문, pp.28~29.
9. 신은주(1990), 김허준, T.M Holden, 이창희, 성백석, 심해섭, “중성자회절에 의한 잔류응력측정법 개발” 한국원자력연구원.
10. 신현섭(2014), 황지현, 김병철, 서동우, 박기태, “환경적 요인이 강구조물 부식이 내구성에 미치는 영향: 국내외 현황분석”, 한국구조물진단유지관리공학회, 제18권 2호, pp.183~186.
11. 엄기원(2010), “최신 용접공학”, 동명사, pp.272~357
12. 유덕용(2011), 정수형 “교량구조물의염화물피해사례분석”, 한국시설안전공단시설안전 pp.91~104.
13. 이광주(2008) 김희주, 박창호, 신재인, 공정식, “PS 강선의부식 에의한PSC beam 거더의LCP 제안”, 대한토목학회학술대회논문집, pp.269~273.
14. 이승엽(2011), “ 강구조물의 용접해석조건이 잔류응력분포에 미치는 영향” 조선대학교 토목공학과 학위논문, pp16~17.

15. 이은택(2006), “강구조 초고층건축물의 과거, 현재 그리고 미래”, 대한건축학회, 제 19권 제2호, pp.23~29.
16. 이의호(1999), “국내건설및산업계의부식 문제현황과대책”, 대한토목학회지 47(9), pp.51~54.
17. 이주성(1985), “유한요소법입문”, 동명사.
18. 이찬영(2010), “국내고속도로의강교도장현황”, 한국강구조학회지, pp.9~10.
19. 이창현(1997), “고유변형도법을 이용한 보강판의 용접변형 예측에 관한연구”, 서울대학교 조선해양공학과 학위논문, pp.21~25.
20. 장경호(2002), 이진형, “인장력을 받는 이종가재 용접접합부의 잔류응력해석”, 대한용접접합학회, 제22권 제2-A호, pp201~210.
21. 장문석(2016), “유한요소법을 이용한 용접구조물의 취성균열진전 해석모델개발”, 조선대학교 토목공학과 학위논문, pp34~35.
22. 장창두(1989), 서승일, “고유변형도법에 의한 잔류응력의 계산”, 대한용접.접합학회, 제7권, 제1호, pp.36~41.
23. 정원석(1997), 김정구, 서창제, 이병훈, “산성비 분위기에서 교량용 강재 SWS400의 용접부 부식 에 관한 연구”, 대한용접접합학회, 대한용접접합학회 학회지 15(5), pp.124~133.
24. 한국도로공사도로교통기술원(2004), “콘크리트노출바닥판의적용및유지관리에관한연구”.
25. 허승민(2014), “강재의 초기 잔류응력과 상변태를 고려한 용접 잔류응력 해석에 관한 연구”, 조선대학교 토목공학과 학위논문, pp4~9.
26. Brueckner HF(1973), "*Field singularities and related integral representations*", Mechanics of Fracture G. C. Sih, ed.
27. *Federal Highway Administration(2001), Corrosion Costs and Preventitive Strategies in the United States*, FHWA, Report FHWA-RD-01-156.
28. F.Hosseinzadeh(2009), A.H.Mahmoudi, C.E.Truman and D.J.Smith, "*Prediction and Measurement of Through Thickness Residual stresses in Large Quenched Components*", Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol.2, pp.978~988.
29. Fujimoto. T(1970), "*A Method for Analysis of Residual Welding Stress and Deformations Based on the Inherent Strain*", Journal of the Japan welding society, vol.39, No.4.

30. G.E. Bacon(1975), "*Neutron Diffraction, 3rd edition*", Clarendon Press, Oxford.
31. www.mssoftware.com/kr/products, MSC Sofewar Corporation, 2017.
32. P. Pagliaro(2011), M.B. Prime, J.S. Robinson, B. Clausen, H. Swenson, M. Steinzig, B. Zuccarello, "*Measuring Inaccessible Residual Stresses Using Multiple Methods and Superposition*", Society for Experimental Mechanics, vol.51, pp.1123~1134.
33. Ross, R(2003), Goldstein, M, "*Better Roads Magazine*".
34. The National Association of Corrosion Engineers(NACE, 2012), "*Corrosion Control Plan for Bridges*", A NACE Internatinal White Paper.
35. Vitaliano, D.F(1992), "*An Economic Assessment of the Social Costs of Highway Salting and the Efficiency of Substituting of Nes Deicing Material*", Journal of Policy Analysis and Management, vol.11, No.3, pp.397~418.