

2022년 2월

석사학위 논문

해양구조용 고강도강의 구속도의  
영향에 따른 용접부 잔류응력  
평가에 관한 연구

조선대학교 대학원

선박해양공학과

성 대 희

# 해양구조용 고강도강의 구속도의 영향에 따른 용접부 잔류응력 평가에 관한 연구

A Study on the evaluation of residual stress characteristics of weld joints by effect of constraints with high-strength steel for offshore structure

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

선박해양공학과

성 대 희

해양구조용 고강도강의 구속도의  
영향에 따른 용접부 잔류응력  
평가에 관한 연구

지도교수            안   규   백

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

선박해양공학과

성   대   희

## 성대희의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박정웅 (인)

위원 한국원지력연구원 책임연구원 우완측 (인)

위원 조선대학교 부교수 안규백 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

## Contents

Table contents .....	iii
Figure contents .....	iv
ABSTRACT .....	vii
제1장 서론 .....	1
제1절 연구 배경 및 목적 .....	1
제2절 종래의 연구동향 .....	3
제3절 본 연구의 구성 .....	5
제2장 용접 잔류응력 생성에 관한 이론적 배경 .....	7
제1절 서언 .....	7
제2절 용접부 잔류응력 발생 메커니즘 .....	7
제3절 용접부 잔류응력 측정법 .....	11
제3장 해양구조용 고강도강 용접부 잔류응력 분포 특성 ...	23
제1절 서언 .....	23
제2절 시험편제작 및 용접조건 .....	23
1. 화학적 성질 .....	23
2. 기계적 성질 .....	23
3. 시험편제작 .....	24
가. 완전구속 시험편 제작 .....	24

나. 완전비구속 시험편 제작 .....	27
제3절 완전구속 맞대기 이음부의 용접잔류응력 분포 특성 ....	29
1. 절단법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	29
2. 굴곡측정법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	33
3. 중성자회절법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	38
4. 유한요소법에 의한 잔류응력 해석 결과 .....	47
제4절 완전비구속 맞대기 이음부의 잔류응력 분포 특성 ....	55
1. 절단법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	55
2. 굴곡측정법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	58
3. 중성자회절법에 의한 잔류응력 측정 결과 .....	62
4. 유한요소법에 의한 잔류응력 해석 결과 .....	70
제5절 고찰 .....	79
1. 완전구속과 완전비구속 상태의 잔류응력 분포 특성 .....	79
2. 요약 .....	94
 제4장 결론 .....	 95
참고문헌 .....	96
연구실적 .....	100
감사의 글 .....	101

## Table contents

Table 1 Chemical composition of E500 .....	23
Table 2 Mechanical properties of E500 .....	24
Table 3 Chemical composition of welding consumable (AWS A5.29 E91T1) .....	24
Table 4 Mechanical properties of welding consumable (AWS A5.29 E91T1) .....	24
Table 5 Welding conditions in used .....	25
Table 6 2 axis strain gauge information in used .....	29
Table 7 Uniaxial 5-elements strain gauge information in used .....	29
Table 8 Wire electric discharge machining conditions .....	34
Table 9 Incident slit and detector slit conditions .....	39
Table 10 Ferritic steel(low carbon steel, bcc) conditions .....	39

## Figure Contents

Fig. 1.1 Flow chart of this study .....	5
Fig. 2.1 Changes of thermal stress due to heating and cooling .....	8
Fig. 2.2 Simple model of thermal stress by welding .....	8
Fig. 2.3 Welding residual stress and temperature distribution process .....	10
Fig. 2.4 Approximate residual stress distribution in butt welds .....	11
Fig. 2.5 Residual stress measurement methods with thickness limit .....	12
Fig. 2.6 X-ray diffraction by Bragg' s law .....	13
Fig. 2.7 Residual stress measurement principle by X-ray diffraction .....	13
Fig. 2.8 The principle of the hole drilling method .....	15
Fig. 2.9 Contour method process .....	17
Fig. 2.10 Schematic of the neuron residual stress instrument .....	18
Fig. 2.11 An example of diffraction peak, residual stresses were calculated based on diffraction peaks between stressed and stress-free states .....	18
Fig. 2.12 Ellipse heat source model .....	21
Fig. 3.1 Groove shape and dimensions of test specimen .....	25
Fig. 3.2 Constrained and steel backing condition of E500 .....	26
Fig. 3.3 Macrostructure of constrained weld .....	27
Fig. 3.4 Angular distortion measurement of constrained weld .....	27
Fig. 3.5 Unconstrained and ceramic backing condition of E500 .....	28
Fig. 3.6 Macrostructure of unconstrained weld .....	29
Fig. 3.7 Angular distortion measurement of unconstrained weld .....	29
Fig. 3.8 Strain gauges picture in used .....	30
Fig. 3.9 Strain gauge attachment position of constrained weld .....	31
Fig. 3.10 Cutting process for measurement of welding residual stress with constrained weld .....	31
Fig. 3.11 Constrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y$ by cutting method .....	33
Fig. 3.12 Schematic diagram of cutting process for contour method .....	34
Fig. 3.13 WEDM cutting process of constrained weld specimen .....	35
Fig. 3.14 Constrained weld specimen by contour method process .....	35
Fig. 3.15 Constrained weld residual stress distribution using contour method .....	35
Fig. 3.16 Constrained weld residual stress $\sigma_x$ by contour method .....	37
Fig. 3.17 Neutron diffraction measurement of constrained weld specimen .....	38
Fig. 3.18 Neutron diffraction measurement of constrained weld free specimen .....	38
Fig. 3.19 Neutron diffraction measurement points for constrained weld specimen .....	39



Fig. 3.20 Constrained weld specimen by neutron diffraction process ..... 40  
 Fig. 3.21 Constrained weld stress free specimen contour method process ..... 40  
 Fig. 3.22 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by neutron diffraction ... 42  
 Fig. 3.23 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by neutron diffraction ..... 44  
 Fig. 3.24 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by neutron diffraction ... 46  
 Fig. 3.25 Weld pass of constrained weld ..... 47  
 Fig. 3.26 Modeling and boundary conditions of constrained weld ..... 47  
 Fig. 3.27 Constrained weld residual stress distribution of FEM ..... 49  
 Fig. 3.28 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by FEM ... 51  
 Fig. 3.29 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by FEM ..... 53  
 Fig. 3.30 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by FEM .. 55  
 Fig. 3.31 Strain gauge attachment position of unconstrained weld ..... 56  
 Fig. 3.32 Cutting process for measurement of welding residual stress with unconstrained weld ..... 56  
 Fig. 3.33 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  by cutting method ..... 58  
 Fig. 3.34 WEDM cutting process of constrained weld specimen ..... 59  
 Fig. 3.35 Constrained weld specimen by contour method process ..... 59  
 Fig. 3.36 Constrained weld residual stress distribution using contour method ... 59  
 Fig. 3.37 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$  by contour method ..... 61  
 Fig. 3.38 Neutron diffraction measurement of unconstrained weld specimen ..... 62  
 Fig. 3.39 Neutron diffraction measurement of unconstrained weld free specimen ..... 62  
 Fig. 3.40 Neutron diffraction measurement points for unconstrained weld specimen ..... 63  
 Fig. 3.41 Unconstrained weld specimen by neutron diffraction process ..... 63  
 Fig. 3.42 Unconstrained weld stress free specimen contour method process ..... 63  
 Fig. 3.43 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by neutron diffraction .. 65  
 Fig. 3.44 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by neutron diffraction .. 67  
 Fig. 3.45 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by neutron diffraction ..... 69  
 Fig. 3.46 Weld pass of constrained weld ..... 70  
 Fig. 3.47 Modeling and boundary conditions of constrained weld ..... 70  
 Fig. 3.48 Constrained weld residual stress distribution of FEM ..... 72  
 Fig. 3.49 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by FEM ..... 74  
 Fig. 3.50 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by FEM ..... 76  
 Fig. 3.51 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by FEM ..... 78  
 Fig. 3.52 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm

	by cutting method, contour method, neutron diffraction, FEM .....	81
Fig. 3.53	Constrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ of surface + 12.5mm by contour method, neutron diffraction, FEM .....	83
Fig. 3.54	Constrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ of surface + 22mm by contour method, neutron diffraction, FEM .....	85
Fig. 3.55	Unconstrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ of surface + 3mm by cutting method, contour method, neutron diffraction, FEM .....	88
Fig. 3.56	Unconstrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ of surface + 12.5mm by contour method, neutron diffraction, FEM .....	90
Fig. 3.57	Unconstrained weld residual stress $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ of surface + 22mm by contour method, neutron diffraction, FEM .....	93

## ABSTRACT

### A Study on the evaluation of residual stress characteristics of weld joints by effect of constraints with high-strength steel for offshore structure

Daehee Seong

Advisor : Prof. Gyubaek An, Ph.D.

Department of Naval Architecture

& Ocean Engineering, Graduate

School of Chosun University

Recently, due to the depletion of marine resources, interest in the extraction of marine energy from deep and deep seas has increased, and the installation environment for offshore structures is moving to extreme areas. In addition, as oil field development expands to about 1000mm in deep sea, the installation environment for offshore structures is getting worse. In order to properly install offshore structures in the use environment, it is necessary to develop high-tensile steel for offshore structures and to develop appropriate welding technology. Since steel materials for offshore structures are different from ships and installation environments, they are mostly of a fixed type and require stricter quality. Welding is a core technology that must be used inevitably in the manufacture of offshore structures, and deformation and residual stress occurring during welding are well known as major factors causing various problems. In welding technology applied to various industrial sites, control of deformation and residual stress is a very important issue, and it is a task given to all structures where welding is used. In particular, since residual welding stress adversely affects fatigue fracture and fracture toughness, efforts are being made to control residual stress. In this study, the residual stress generated during welding of high-tensile steel applied to offshore structures was quantitatively identified through destructive, non-destructive, and numerical analysis. To investigate the effect, the residual stress distributions were evaluated under various restraints.

First, butt weld joints were fabricated under different welding constraint conditions in order to understand the characteristics of the welding residual stress distribution according to the influence of the constraint conditions by varying the constraint conditions of high tensile steel for offshore structures.

Second, the welding residual force characteristics of fully constrained and unconstrained specimens were evaluated. The destructive and non-destructive methods were applied to evaluate the welding residual stress. As the fracture method, the most widely known cutting method was applied, and a relatively recently applied contour method was applied for mutual comparison. By applying the neutron diffraction method using Hanaro as a non-destructive method, the welding residual stress in the thickness direction as well as the surface was measured. the FEM method was established by comparing the experimental results of the welding residual stress distribution according to the influence of the constraint conditions through FEM.

Finally, it is judged that the distribution characteristics of the welding residual stress according to the influence of the constraint conditions can be grasped through the analysis technique.

# 제1장 서론

## 제1절 연구배경 및 목적

최근 근해의 자원고갈에 따라 심해 및 원해에서의 해양에너지 채굴에 대한 관심의 증가에 따른 해양구조물설치 환경이 극한 지역으로 옮겨 가고 있다[1]. 육상자원의 부족과 해양자원 탐사 및 시추 기술의 발전으로 해양자원 개발이 심해 (약 3000mm)까지 확대되고 있다[2]. 해양구조물 중에서 심해에 설치되는 해양구조물의 종류는 반잠수식 시추선 (Semi-Sub.), TLP (Tension Leg Platform), SPAR, FPSO (Floating Production Storage & Offloading) 등이 있다[3]. 연안에 설치되는 구조물은 고정식이 많은데 잭업(Jack-up), 재킷(Jacket), GBS (Gravity Base Structure) 등은 원유 시추용으로 고정식인 반면, FSRU (Floating Storage and Regasification Unit)는 LNG 저장 및 재기화 플랜트이고, VLFS (Very Large Floating Structures)는 해상 항만이나 공항으로 활용할 수 있는 초대형 해상구조물이다. 초대형 해양구조물 수요는 육상공간의 부족, 환경친화적 해양개발 및 SOC 수요증가 등에 따라 늘어날 전망이다[3]. 따라서, 초대형 해상구조물의 조기 실용화도 가능할 것이다[3]. 하지만, 심해, 북극해 등 깊고 험한 바다에 해양구조물을 설치하고, 극한의 환경에서 평균 20년 이상 사용을 요구하고 있으며, 해양구조물 강재는 설치환경이 선박과 달라서 대부분 고정식으로 구성되어 있기 때문에 보다 엄격한 품질이 요구되고, 용접부의 품질관리는 무척 중요한 파라메타이다[4]. 해양구조물의 제작에서 용접은 필연적으로 사용되어야 하는 핵심 기술이며, 구조물의 제작, 보수 작업에 대한 활용성 및 경제성으로 매우 효율적인 수단으로 사용되고 있다. 용접을 통하여 필연적으로 용접변형과 잔류응력이 발생되고, 이러한 용접변형과 잔류응력은 각종 문제를 발생시키는 주요인자로 잘 알려져 있다[5-7]. 특히 용융 용접의 경우는 집중적인 열에 의해 국부적으로 용융부를 형성하게 되며, 용융부를 포함한 그 주위는 불균일한 온도분포를 형성하면서 가열과 냉각과정을 겪는다. 이러한 열의 가열 및 냉각과정을 통하여 용접변형과 잔류응력이 생성 되게 되는데, 용접에서 발생하는 변형을 제어하기 위하여 구속을 통한 용접을 진행하는 경우가 있다. 구속은 용접변형의 제어에는 도움이 되지만, 용접잔류응력 측면에서는 구조물의 응력을 더욱 상승시키는 효과를 가져오기도 한다. 예를 들면, 완전구속을 하면 변형 제어는 유리하지만 용접잔류응력의 측면에서는 구조물에 발생하는 응력을 더욱 증가시키는 효과를 가져온다. 반대로 비구속조건에서 용접을 하게되면 용접변형은 크게 발생하고, 잔류응력은 감소하게 된다. 용접변형은 구조물의 안전성에 영향을 미치기도 하지만, 외관의 형상에 큰 영향을 미치게 되어서 구조물이 불안전하게 보이므로 가능한 용접에 의해서 발생된 변형은 제어가 필요하다. 한편, 용접잔류응력의 경우는 구조물의 외관으로 전혀 나타나지 않기 때문에 일반적으로 잔류응력의 영향을 외관상 파악하기는 어렵다.

하지만, 용접잔류응력은 구조물의 안전성과 밀접한 관련이 있으며, 용접구조물의 좌굴 강도 취성균열의 진전 피로수명에 큰 영향을 미치게 된다. 이처럼 구조물의 안전성에 영향을 미치는 용접잔류응력은 외부에서 힘이 가해지지 않은 상태에서 재료 자체적으로 보유한 응력의 불균일한 분포로 정의된다[9-10]. 근래에는 고강도의 다양한 용접구조용 재료의 적용이 확대되고, 용접구조물이 거대화되면서 용접잔류응력 및 용접변형이 구조물에 미치는 영향에 대한 관심이 증가하고 있다. 해양구조물의 대형화뿐만 아니라 경량화의 필요성이 요구되고, 적용 강재의 고강도, 극후물화로 이어져 해양구조용 강재로써 기존의 항복강도 355MPa급 강재뿐만 아니라, 최근에는 항복강도 420 및 460MPa급 고강도 강재까지 사용되고 있다[12]. 고강도강에서 용접에 의한 잔류응력은 일반강 등에 비해 많은 응력을 내포할 것으로 예상되며, 잔류응력은 구조물의 인성저하, 피로파괴에 대하여 악영향을 미치게 되는 것으로 알려져 있다[17-18]. 특히 용접부의 경우 균열 발생과 갑작스런 파단이 잔류응력과 외부응력이 함께 결합되어 발생시키는 것으로 알려져 있다[17-18]. 그 중 인장잔류응력은 재료의 피로 저항성을 저하시켜 피로 균열의 성장 속도를 빠르게 한다고 알려져 있다[19-20]. 하지만 이와는 반대로 압축 잔류응력은 재료의 피로 강도를 향상시킴으로써 피로 균열의 전파를 억제하여 피로 수명을 향상시키는 응력으로 작용하게 된다. 따라서 용접 시 생성되는 잔류응력 문제를 해결하기 위해서는 잔류응력 측정을 통하여 그 분포와 크기는 얼마인지에 대한 정확한 분석이 필요하고, 이를 최소한의 크기로 이완시켜 주거나 제거 할 수 있는 적절한 대응책을 개발하여야 한다. 고강도강일수록 용접잔류응력이 크게 분포하는 것으로 잘 알려져 있으며, 용접잔류응력은 불안전파괴의 발생 및 전파경로에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[23-24].

본 연구에서는 해양구조용 고강도강을 대상으로 구속조건을 다르게 하여 구속도의 영향에 따른 용접잔류응력 분포 특성을 파악하기 위하여, 서로 다른 용접구속조건에서의 Butt 용접이음부를 제작하였다. 완전구속상태의 시험편과 완전비구속상태의 시험편에서 발생하는 용접잔류응력 특성을 평가하였다. 용접잔류응력의 평가는 파괴적인 방법인 절단법과 굴곡측정법을 적용하였으며, 비파괴적인 방법으로는 비교적 최근에 적용되고 있는 중성자회절법을 적용하였으며, 해석적인 방법의 유한요소법을 통하여 상호 비교 검토하였다. 용접구조물의 전체적인 안전성에는 두께방향의 잔류응력 분포가 영향을 미치는 경우가 있기 때문에 두께방향의 잔류응력분포에 대해서도 면밀한 검토를 수행하였다. 또한, 실험적인 방법으로 측정된 용접잔류응력의 분포를 바탕으로 해석적인 방법을 적용한 구속도의 유무에 따른 용접잔류응력의 분포특성을 분석하기 위한 시스템을 구축하였다.

## 제2절 종래의 연구동향

용접잔류응력을 측정하는 방법으로는 실험적인 방법과 해석적인 방법이 있다. 실험적인 방법에서는 파괴적, 비파괴적, 준비파괴적인 방법이 있으며, 해석적인 방법에는 수치해석적 방법인 유한요소법에 의해 발전되어 왔다. 1934년 Mathar[25]에 의해 최초로 제안된 응력이완법의 일종인 Hole Drilling Method (HDM)는 간편하며, 경제적이고 준비파괴적인 방법이다. 그 이후에도 Rendler와 Vigness[26], Jayarama Rao[27] 등에 의하여 실험적인 방법으로 잔류응력과 측정되는 변형률 사이의 관계를 나타내는 이완상수를 결정하는 연구가 발표되었다. 또한, Kelsey[28]는 중분적으로 Hole을 뚫고 각 단계마다 이완되는 변형률을 측정하여 이완상수를 각각 구함으로써 두께방향으로 변하는 잔류응력을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 유한요소법을 이용한 잔류응력 해석은 L.Tall[29]이 1964년 1차원 해석으로 연구가 시작되었고, 1970년대 이후 Masubuchi[30], Fujita[31], Ueda[32], Argyris[33], Fress[34] 등이 2차원 해석으로 발전시켰다. 1996년 Yasuhisa[35]가 맞대기 용접에 의한 수축변형과 잔류응력계산, 필렛용접에 대한 수축변형 계산을 유한요소법으로 수행한 바 있다. 구조물에 작용하는 잔류응력에 관한 연구도 활발히 진행되어, Galotolo[36]는 잔류응력 하에서 피로균열 진전과 그에 따른 잔류응력의 재분포를 연구하였다. 후판 다층 용접재에 대한 유한요소 해석은 1990년대 연구가 시작되었으며, Hibitt과 Marcall[37]은 유한요소법을 사용하여 용접에 대한 열역학적 모델을 발전시켰으며, Roelens와 Matrud[38]는 두께가 30mm인 후판의 단면에 대한 용접 잔류응력을 실험과 유한요소 해석을 통하여 비교 검증하였다. 또한, Rybicki[39], Leung[40-41]은 다층 용접해석모델을 제시하였으며, Shim[42]은 다층 용접의 2차원 해석에 적합한 입열량 모델을 유한요소법을 이용한 잔류응력 해석에 적용하였다. 이처럼 용접 잔류응력을 상세하게 해석하는 방법은 수치해석적 방법인 유한요소법에 의해 발전되어 왔다. 하지만, 종래의 연구자들은 단지 표면에서의 용접잔류응력에만 관심을 갖고 측정을 하였다. 선박 및 용접구조물의 대형화에 따라 적용강재의 고강도, 극후물화가 급속하게 이루어지고 있으며, 파괴안전성에 관한 관심은 더욱 증가하고 있다. 이러한 산업의 요구에 대응하기 위하여 용접구조물에서의 파괴안전성을 확보하기 위한 노력이 진행중이며, 파괴안전성에 영향을 미치는 인자 중의 하나인 용접잔류응력의 분석 및 측정이 필요하다. 최근 다양한 잔류응력 측정법이 국내외에서 개발되고 활발한 연구가 이루어지고 있다[43-44]. 파괴법에 기초한 굴곡 측정법 (Contour Method)과 딥홀드릴링법 (Deep Hole Drilling), 비파괴법에 기초한 방사광 X-ray (Synchrotron X-ray Diffraction) 및 중성자 회절법 (Neutron Diffraction) 등이 주목받고 있다. 중성자 회절법(Neutron Diffraction)은 중성자의 회절 특성을 이용한 잔류응력 측정 장치로써 다른 비파괴 검사 장치에 비해 가장 두께 시험편까지 잔류응력을 측정하는 방법이다[45]. 비파괴법 중 하나인 X선 측정법은 재

료 내부로 침투되는 투과력이 낮아 주로 100 $\mu$ m 이내의 표면에 분포하는 잔류응력의 측정이 가능하고, 표면의 상태에 따라 측정값이 매우 달라지는 어려움이 있다[46]. 이에 비해 중성자 회절법은 일반적으로 중성자는 낮은 산란 단면적 때문에 재료 내부로 깊이 투과할 수 있다. 지금까지 영국 ISIS의 중성자 잔류응력 측정 장치가 60mm 두께 측정이 최대였으나, 최근 한국원자력연구원 중성자과학연구부에서 2007년부터 4년간 걸친 연구개발 끝에 연구용원자로 하나로(HANARO)에서 생산된 중성자를 이용하여 80mm 두께의 시편 측정을 성공하였으며, 세계적으로 최대 투과력을 가진 중성자 잔류응력 측정 장치(Residual Stress Instrument, RSI)를 개발하였다[45]. 굴곡 측정법(Contour Method)은 2001년 로스알라모스 연구소의 Prime에 의해 최초로 고안된 이래로 다수의 해외 연구자들에 의해 적용되어 왔다[47]. 측정하고자 하는 시험편에 잔류응력 변화를 주거나 어떠한 소성변형도 유발시키지 않으면서 단지 평면으로 자르게 되면 재료 내부의 잔류응력으로 인해 표면에 10 ~ 100 $\mu$ m의 굴곡이 형성된다. 재료의 내부 잔류응력으로 인해 생성된 굴곡을 측정하고, 유한요소법을 이용하여 절단된 표면에 생성된 굴곡을 다시 처음의 상태로 되돌리는 역해석을 수행하여 잔류응력을 도출할 수 있다. 샘플의 물리적 변형을 기반으로 한 파괴측정법의 일종으로 기존 측정법에 비해 접근성이 좋고 작동이 간단하며 특히 정량적으로 2차원 잔류응력 분포를 확인할 수 있다는 장점으로 최근 활발하게 연구되고 있다. 단점으로 절단면에 수직방향의 잔류응력만 계측할 수 있다는 것이다. 한국원자력연구원에서는 국내 유일의 데이터처리, 수치해석법 등의 방법으로 측정된 굴곡 좌표 데이터를 통한 잔류응력 변환 프로그램을 활용한 Contour method용 측정 장치를 개발하였다. X-ray 잔류응력 측정법은 1930년경에 미국, 독일에서 제시된 방법으로 초기에 사진법에 의한 X선 필름을 사용한 측정이었지만 1950년 초기 현재의 표준인 계수관 식의 X-ray 회절장치(Diffractometer)를 개발하여 측정정밀도나 작업성이 향상되었다. 1970년에는 X선에 의한 평면응력 측정법의 표준화가 이뤄졌으며, 1980년대에는 세라믹, 박막, 복합재료 등 측정재료의 확장, 깊이를 측정하는 Synchrotron, 중성자 등 선원의 확장에 따른 연구가 활발히 진행되었으며, 오늘날까지 연구가 활발히 진행되고 있다. 방사광 X-ray(Synchrotron X-ray Diffraction)는 1980년 전후부터 방사광이나 중성자에 의한 회절실험이 X선 응력 측정기법을 적용하여 응력의 거동을 평가하는 연구가 활발히 진행되었다.



### 제3절 본 연구의 구성

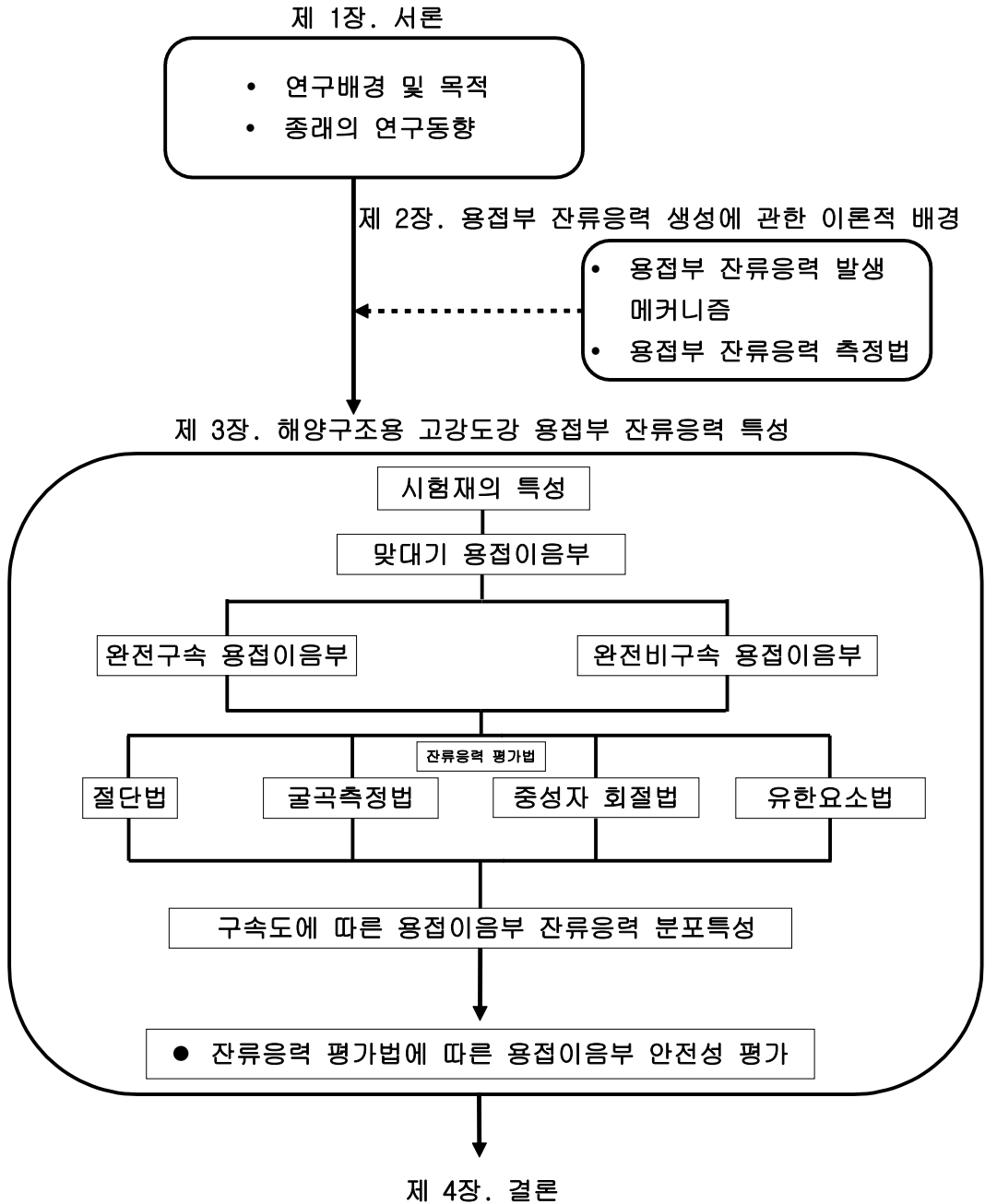


Fig. 1.1 Flow of this study

1장에서는 연구배경 및 목적, 종래의 연구동향, 본 연구의 구성을 나타냈다.

2장에서는 잔류응력 생성에 관한 이론적 배경, 발생 메커니즘, 잔류응력 측정법에 대하여 구성하였다. 잔류응력 매커니즘에 관하여 자세한 설명과 중요성을 나타내었고, 측정법의 이론 및 각 실험법의 장단점을 구성하였다.

3장에서는 해양구조용 고강도강의 화학적, 기계적 성질을 나타내었고, 구속에 따른 맞대기 이음부 용접부 시험편 제작에 관한 용접조건을 나타냈다. 실제 구속용접부와 비구속용접부의 일부분을 채취하고, 연마하여 Macro 단면을 분석하였다. 용접시 불연속적인 열에 의해 발생된 각 변형을 평가하였고, 용접잔류응력 거동을 평가하기 위한 실험법의 측정결과 및 해석 결과를 고찰하였다.

4장에서는 맞대기 이음부 용접부의 구속에 따른 용접부 잔류응력 분포특성에 관하여 절단법, 굴곡측정법, 중성자회절법의 3개 실험법을 통하여 구속도의 영향에 따른 맞대기 용접부에 분포하는 잔류응력의 특성에 관하여 고찰 하였으며, FEM 해석시스템의 구축을 위하여 구속의 영향을 고려한 수치해석을 수행하여 수치해석적인 방법으로 구속도의 영향을 판단할 수 있는 해석모델을 개발 하였다.

5장에서는 해양구조용 고강도강 구속에 따른 용접부 각 변형 및 잔류응력 평가에 관한 연구의 요약 및 결론을 도출하였다.

## 제2장 용접잔류응력 생성에 관한 이론적 배경

### 제1절 서언

용접잔류응력은 용접시 필연적으로 발생하며, 용접부에서 발생하게 되는 각종 강도문제 및 파괴의 원인이다. 용접잔류응력은 눈에 보이지 않을 뿐 아니라 설계자의 관점에 따라서 일반용접구조물에서 발생하게 되는 연성파괴의 경우 용접잔류응력이 구조물의 강도에 미치는 영향이 작다고 생각하는 것이 일반적이다. 한편, 고강도 극후물재의 경우 불안전파괴(취성파괴)에 대한 가능성이 증가하게 되고, 용접잔류응력이 영향을 미치게 되기 때문에, 기계적 또는 열처리를 통해 잔류응력을 완화시키는 방법을 적용하고 있다. 또한, 용접잔류응력 성분 중에서, 압축잔류응력은 피로강도를 저하시키는 원인이 되기 때문에 용접부의 피로성능 향상을 위한 용접잔류응력의 제어 및 재분포를 위한 노력으로 각종 방법이 적용되기도 한다. 이처럼 용접잔류응력은 구조물의 강도 및 수명에 영향을 미치게 되므로 정확한 계측을 통한 용접잔류응력의 분포를 파악하는 것이 중요하다. 또한, 용접잔류응력의 생성 메커니즘과 제어방법에 대한 명확한 검토가 필요하다.

### 제2절 용접부 잔류응력 생성 메커니즘

용접부에서 생성되는 잔류응력의 생성 메커니즘을 분석하기 위하여, Fig. 2.1 에서와 같이 연강(mild steel) 봉 양단을 구속하고 있는 상태에서 가열과정과 냉각과정에서 발생하게 되는 응력변화 과정을 해석적인 방법으로 검토한 경우를 나타냈다. 상온(20℃, 초기상태)에서 100℃ 이하로 가열하게 되면, 팽창에 의한 양단구속의 영향으로 연강봉에는 압축응력이 발생하게 되고, 더 높은 온도로 가열하게 되면, 탄성을 소실하게 되면서 응력은 감소하게 된다. 600℃ 근처까지 온도를 상승시키면 연강봉은 더 이상의 탄성을 갖을 수 없게 되어서 압축응력은 감소하게 되고 거의 소실된 상태가 된다. 초기상태에서 가열온도를 100℃ 이상으로 하면, 열팽창에 의해 생성되었던 압축응력이 항복응력을 초과하여 소영영역에 도달한다. 온도를 계속 상승시키면 온도증가에 따라 재료의 항복응력과 탄성계수 값이 감소하기 때문에 생성된 압축도 감수하게 되며, 연강의 경우 600℃ 이상으로 온도를 상승시키면 재료 내부에서 거의 응력이 소멸한다. 가열 팽창에 의해 생성된 열응력이 항복응력을 초과한 소성영역에서 냉각을 시작하면, 냉각 시작과 함께 탄성적으로 수축과 팽창에 의해 생성되었던 압축응력은 탄성적 수축에 의해 제거되며, 계속되는 수축으로 인하여 인장응력이 생성되어서 생성된 인장응력은 초기 20℃에 도달하게 되면 잔류응력으로 남게 된다. 연강의 경우 200℃ 이상으로 가열 후 냉각하면 잔류응력이 항복응력 이상의 값으로 남게 된다. 이러한 현상은 Fig. 2.1에서와 같이 양단을 구속하고 있기 때문에 시험편 전체를 가열하여도 잔

류응력이 존재하게 된다[4].

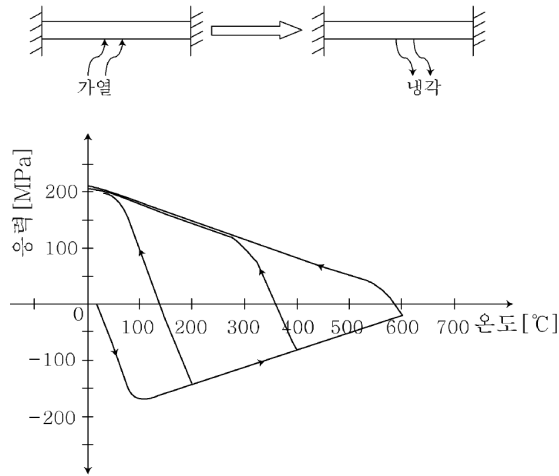


Fig. 2.1 Changes of thermal stress due to heating and cooling[4]

용접열원에 대하여 고려하면, Fig. 2.2 에서와 같이 용접열원에 의해 평판을 가열하면 가열부위는 팽창하고, 열원에서 멀어진 영역에서는 온도상승이 없기 때문에 가열부위를 구속하는 효과가 나타난다. 이러한 현상은 Fig. 2.1에서의 양단구속 부재와 유사하기 때문에 동일형태로 단순 모델화가 가능하다. 평판 전체에 온도가 일정하고, 균일하게 가열되어 온도가 상승한다면 평판에서의 열응력 및 잔류응력은 생성되지 않는다. 그러나 용접열원 같은 부분에 열이 가해진다면 열응력 및 잔류응력은 용접부 주위의 불균일한 온도분포에 의해 생성되며, 열응력 및 잔류응력은 각 방향에 따른 온도구배가 어떠한 분포를 가지고 있는지에 따라 잔류응력분포가 결정된다[4].

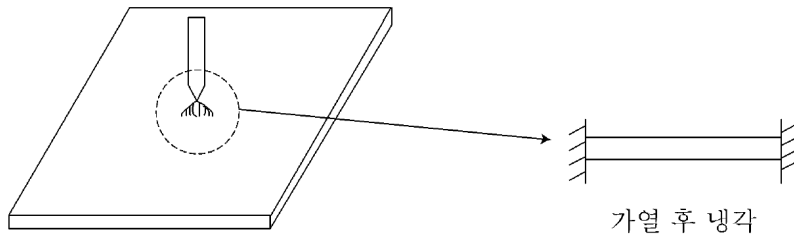


Fig. 2.2 Simple model of thermal stress by welding[4]

깊이방향 효과를 무시한 용접에서, 용접선방향의 열응력 및 잔류응력 생성과정을 Fig. 2.3에 나타냈다. 일반적으로, 용접선방향을 x방향, 용접선수직방향을 y방향, 용접선두께방향을 z방향으로 정하여 각 방향의 응력성분을 결정한다. 용접선방향 잔류응력(x방향),  $\sigma_x$  는 용접선수직방향(y방향)의 불균일한 온도분포에 의해 생성된다. 용접열원에 가까운 전방 A-A 단면에서는 폭방향에 따른 온도변화가 용접선 주변에서 약간 상승하지만, 용접선에서 폭방향으로 떨어진 부분에서는 온도상승이 없다. 용접선 부근에서는 용접선방향으로 팽창하려고 하고, 용접선에서 떨어진 부분에서는 원래상태를 유지하려고 하는 구속 효과가 작용하게 된다. 용접선 주변은 압축잔류응력이 나타나고, 용접선에서 떨어진 부분에서는 압축잔류응력과 동일한 크기의 인장잔류응력이 나타나 길이방향의 힘은 평형을 이루게 된다. A-A 단면 용접선 주변과 떨어진 부분에 온도가 균일하게 유지되면서 온도가 상승하였다면 용접선방향 열응력 발생이 없다. 용접열원 중심부분인 B-B 단면에서는 열원주변의 온도가 용융온도에 도달하여 재료의 항복응력 및 탄성계수 값이 0에 접근하기 때문에 초기가열에 의해 생성된 압축잔류응력이 감소하여 0에 접근하게 된다. 용접선 가까운 부분에서는 온도분포에 따라 적절한 압축잔류응력이 남아있고, 용접선에서 먼 부분의 잔류응력은 용접선 주변에 남아있는 압축잔류응력에 반하여 힘의 평형을 만족하기 위한 인장잔류응력이 존재하게 된다. B-B 단면을 지나면 용접선 주변은 가열과정이 끝나고, 냉각과정이 시작된다. 용접선 주변에서 탄성적으로 수축이 일어나기 때문에 C-C 단면에서는 용접선을 중심으로 수축에 의한 인장잔류응력이 나타나기 시작된다. 용접선에서 먼 부분에서는 힘의 평형을 만족하기 위한 잔류응력이 발생된다. D-D 단면에서와 같이 용접선 주변에서 지속적인 냉각이 진행되어 상온에 도달하면, 용접선주변에는 용접선방향으로 인장잔류응력이 존재하게 된다. 용접선으로부터 먼 부분에서는 힘의 평형을 만족하기 위한 압축잔류응력이 존재한다. 일반적으로 용접선 주변에서 생성된 최고인장잔류응력은 재료의 항복응력을 초과하여 발생하는 경우가 많이 있다. 용접선에서 먼 부분에서의 압축잔류응력은 평판의 폭, 길이에 영향을 받고, 폭이 충분히 길면 적은 값으로 먼 곳까지 분포하게 된다[4].

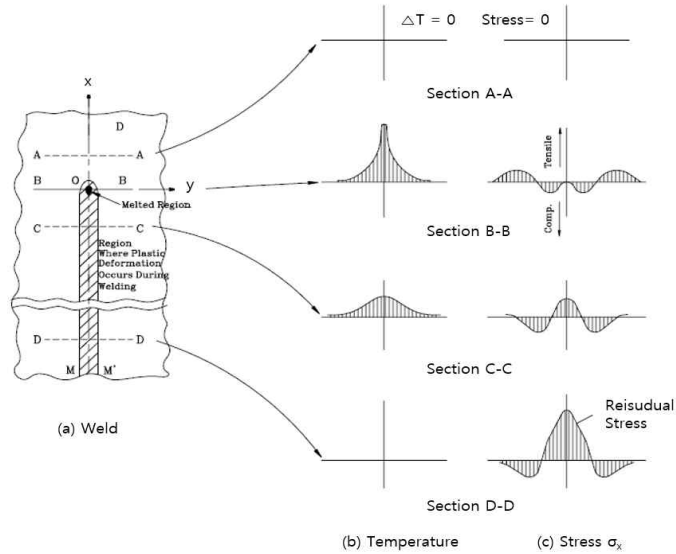


Fig. 2.3 Welding residual stress and temperature distribution process[4]

한편, 두께가 두꺼운 3차원 형상 부재에서 용접열원에 의해 발생된 각 방향의 용접잔류응력 생성원인은 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$  는 용접선수직방향 및 용접선두께방향 온도의 불균일한 분포에 의해 결정되고, 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$  는 용접선방향 및 용접선두께방향 온도의 불균일한 분포에 의해 결정되며, 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$  는 용접선방향 및 용접선수직방향 온도의 불균일한 분포에 의해 결정된다. 일반적으로 평판용접에서는 용접선수직방향 온도구배가 가장 크게 나타나고, 용접선두께방향은 길이가 짧기 때문에 용접선방향이 가장 큰 잔류응력이 생성된다. 맞대기 용접부 개략적인 잔류응력분포 및 형상을 Fig. 2.4에 나타냈다. Fig. 2.4 (a)에서와 같이 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$  은 용접선에서 항복응력을 약간 초과하는 인장잔류응력이 나타나고, 용접선에서 먼 부분에서는 압축잔류응력이 나타난다. 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$  은 일반적으로 항복응력 정도의 값을 나타낸다. 압축잔류응력은 용접선에서 멀어질수록 증가하거나 일정하게 되고, 맞대기 용접에서 용접선방향 압축잔류응력은 인장잔류응력에 상응하여 힘의 평형을 만족하기 위하여 생성되기 때문에 인장잔류응력의 크기 및 분포와 시편의 폭에 의해 결정된다. 시편 폭이 충분히 넓으면 작은 값의 압축잔류응력이 넓게 분포하고, 시편 폭이 좁으면, 큰 압축잔류응력이 좁은 영역에 존재하게 된다. 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$  은 Fig. 2.4 (b)에서와 같이 용접선에 따라 표시하면 시편 끝단에서는 표면이기 때문에 잔류응력이 0 이고, 시편의 중앙 부분에서는 거의 일정한 인장잔류응력 값이 나타난다. 맞대기 용접에서 정상적인 잔류응력 분포가 이루

어지려면 시편의 길이가 300mm 이상으로 충분히 길어야 하며, 맞대기 용접에서 폭방향의 잔류응력은 시편의 중앙 부분에서는 인장잔류응력이 존재하고 용접선 끝단에서는 압축잔류응력이 된다. 용접선직각방향 잔류응력은 용접시 구속상태 등에 영향을 받으나 일반적으로 용접선방향의 인장잔류응력에 비하여 적은 값으로 나타난다[4].

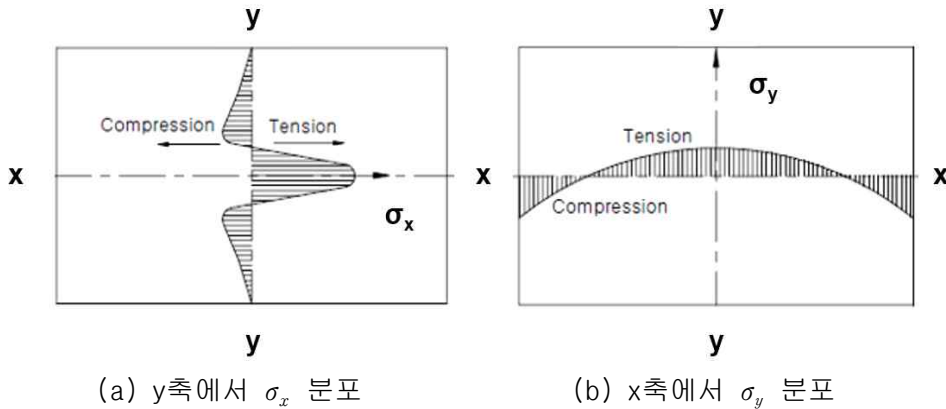


Fig. 2.4 Approximate residual stress distribution in butt welds[4]

### 제3절 용접부 잔류응력 측정법

용접시 열원으로 인해 불규칙한 온도의 형성으로 가열, 냉각에 따라 구조물 안에 내재되는 잔류응력이 형성된다. 잔류응력은 구조물의 파괴강도, 피로강도, 좌굴강도, 용접부의 균열, 응력부식균열 등의 문제를 발생시키기 때문에 종래부터 많은 연구를 통하여 잔류응력에 대한 측정과 분석에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 잔류응력 측정법에는 크게 파괴적 방법과 비파괴적 방법이 있다. Fig. 2.5는 두께별 잔류응력 측정법을 나타낸 것이다. 표면에서의 잔류응력 측정법은 비파괴적 방법으로 X-ray 측정법, 준 파괴적 방법으로 Hole-drilling 측정법, 파괴적 방법으로 절단법이 있다. 두께 내부의 잔류응력 측정법은 비파괴적 방법으로 중성자회절법, 준파괴적 방법은 Deep-hole drilling 측정법, 파괴적 방법으로 굴곡측정법이 대표적이다. 표면의 잔류응력 분포는 피로 및 파괴에 미치는 영향이 크지만, 두께방향의 잔류응력 분포는 균열의 진전 방향 및 진전 속도 등의 많은 영향을 준다고 알려져 있다.

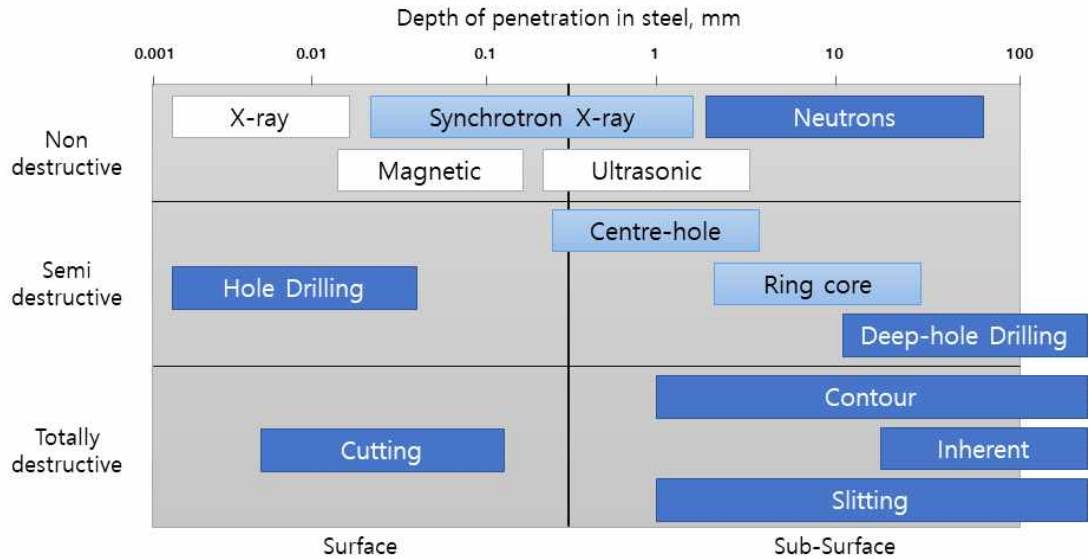


Fig. 2.5 Residual stress measurement methods with thickness limit

비파괴적 방법인 X-ray 회절에 의한 측정법은 다결정체(Polycrystalline material)의 표면에 특성 X-ray를 입사하고, Bragg's law에 의한 X-ray 회절로 격자 면 간격을 측정하고, 용접잔류응력을 계산하는 원리이다. Fig 2.6와 같은 금속 표면에 X-ray를 투사하면 일부는 내부로 침투하여 흡수되고, 일부는 반사된다. 입사각에서는 각 격자면에서 반사하는 X-ray의 파장이 정수배가 될 때는 서로 겹쳐 강하게 되고, 그렇지 않으면 생략된다. X-ray의 파장은 Bragg's law의 조건을 만족시키면 X-ray의 위상은 일치한다. 따라서  $\theta$ 를 측정하면 격자상수  $d$ 를 알아낼 수 있고,  $d$ 의 변화를  $\theta$ 의 변화로써 측정하면 격자의 변형률을 알 수가 있다[4]. Bragg's law의 정의는 다음 같다.

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

여기서,  $n$  : 정수

$\lambda$  : 빛의 파장

$d$  : 격자상수

$\theta$  : 결정면과 입사된 빛 사이의 각도



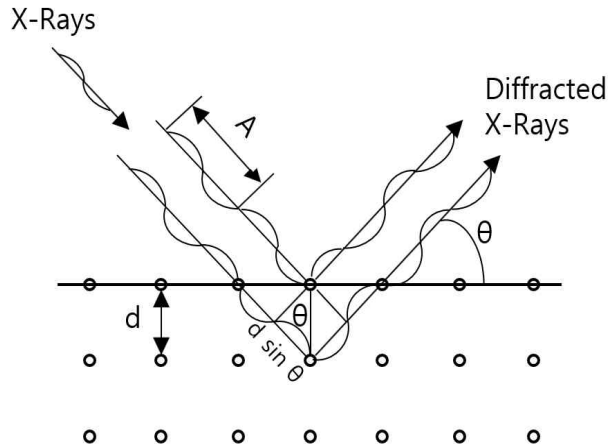


Fig. 2.6 X-ray diffraction by Bragg's law[4]

금속재료에 응력이 가해지고, 탄성변형이 일어나게되면 원자간의 간격이 변한다. Fig 2.7과 같이 X-ray 최대강도가 나타나는 반사각도  $2\theta$ 가 변한다. 반사각도  $2\theta$  변화에 따라 원자층 간의 거리변화를 구할 수 있고, 잔류응력이 존재하지 않는 표준시편의 원자층 간의 거리와 비교하면 잔류응력을 구할 수 있다. 그러나 X-ray 조사면에 녹이 있으면 회절선을 얻을 수 없기에 표면을 전처리 후 잔류응력을 측정한다. 따라서 가공층의 응력을 구하는 것이 목적이 아니면 표면가공을 전해연마 등으로 제거해야 한다. 측정은 원자간의 탄성변형에 관한 문제이므로 소성변형에는 관계없다. X-ray 측정법은 재료의 손상 없이 잔류응력측정이 가능하며, 응력분포가 극히 불균일할 때에도 표면의 극히 작은 부분에 존재하고 있는 잔류응력을 측정할 수 있는 장점이 있다[4].

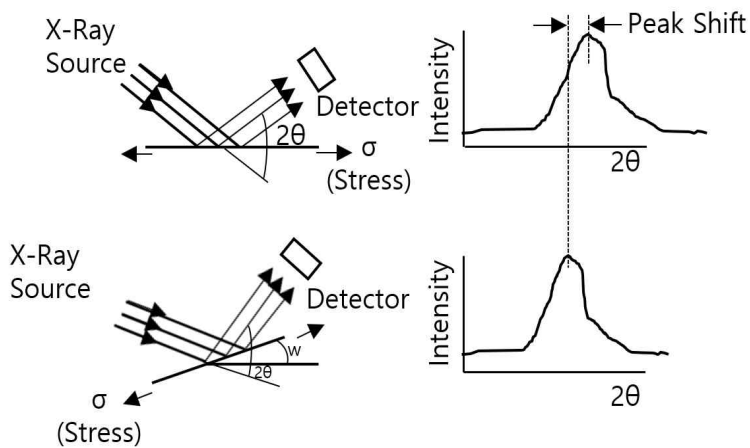


Fig. 2.7 Residual stress measurement principle by X-ray diffraction

Hole drilling은 재료 및 구성 요소의 고정 및 적용된 응력을 측정하는데 사용되는 잔류응력 측정 기술이다. 완전히 파괴하지 않고, 미세한 수준에서 잔류응력 측정이 가능하며, 응력을 측정하고자 하는 부분의 표면에 스트레인 게이지를 부착하고, 일정 깊이로 Hole drilling을 하여, 이때 발생하는 변형률을 측정한다. Fig. 2.8에서 볼 수 있듯이 표면에 스트레인 게이지를 부착한 후에 구멍가공을 통하여 재분포 된 변형률을 가지고 잔류응력을 구할 수 있다. Deep hole drilling 측정법은 구멍의 깊이가 75mm 이상 측정이 가능하다. 시편에 두께방향으로 구멍을 뚫고, 구멍의 직경을 측정한다 [49]. 구멍 주변의 원형 슬롯을 절단하고, 마지막으로 구멍의 직경을 다시 측정하여 변형률을 구한다. Hole drilling과 Deep hole drilling 측정법의 장점은 준파괴적인 방법으로 반복적인 잔류응력 측정이 가능하고, 휴대성이 좋다. 금속 및 비금속의 광범위한 재료에 적용이 가능하며, 단순하고 복잡한 구성 요소 모양 모두에 적용이 가능하다. 하지만, 실험 후 구멍가공에 대하여 부식 등 관리가 필요하며, Deep hole drilling 측정법의 경우는 6mm 미만의 두께에는 적용되지 않는다. 측정된 변형률 값으로 잔류응력을 계산하는 공식은 기준구멍의 지름을  $d(\theta)$ , 구멍을 뚫은 후 기준구멍의 지름을  $d'(\theta)$ 이며, 스트레인 게이지의 측정 위치가 ' $\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_m$ ' 이면, 지름의 변화는  $\Delta d(\theta) = d'(\theta) - d(\theta)$ 로 나타내며, 이를 이용하여 잔류응력을 계산할 수 있다. 변형  $\overline{u_{rr}}(\theta)$ 과 잔류응력( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ ) 그리고  $\sigma_{zz}$ 의 관계는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다[47].

$$\overline{u_{rr}}(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d(\theta)} = -\frac{1}{E} \times [f(\theta)\sigma_{xx} + f(\theta)\sigma_{xx} + g(\theta)\sigma_{yy} + h(\theta)\sigma_{xy} - \nu\sigma_{zz}] \quad (2.1)$$

여기서,  $f(\theta) : 1 + 2\cos 2\theta$

$g(\theta) : 1 - 2\cos 2\theta$

$h(\theta) : 4\cos 2\theta$

$E$  : 탄성계수

$\nu$  : 푸아송비

위에 식을 각각의 측정위치에 대한 행렬로 나타내면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{u_{rr}}(\theta) = \frac{1}{E} M\sigma \quad (2.2)$$

식 (2.2)을 축 방정식으로 나타내면, 식 (2.3)과 같고,  $\Delta \epsilon_{zz}$ 는 평면변형률이다.

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_{rr}(\theta_1) \\ \bar{u}_{rr}(\theta_2) \\ \vdots \\ \bar{u}_{rr}(\theta_m) \\ \Delta \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \times \begin{pmatrix} f(\theta_1) & g(\theta_1) & h(\theta_1) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_i) & g(\theta_i) & h(\theta_i) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_m) & g(\theta_m) & h(\theta_m) & -v \\ -v & -v & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

이렇게 구해진 변형을 이용하여 잔류응력을 구할 수 있다.

$$\sigma = -EM^* \bar{u}_{rr} \quad (2.4)$$

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

(2.5)

여기서,  $M^* = M$ 의 역행렬

$M^T = M$ 의 전치행렬

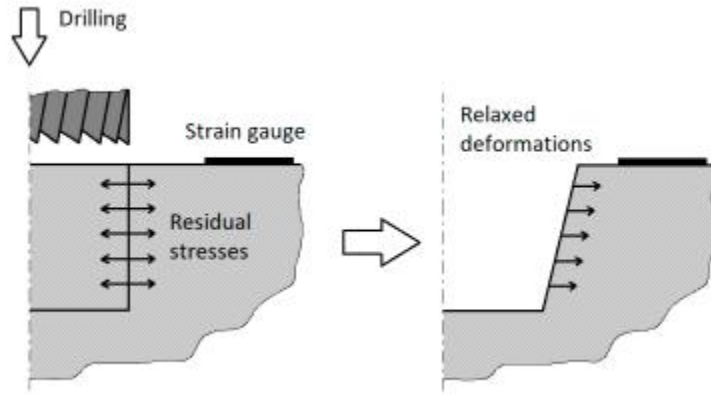


Fig. 2.8 The principle of the hole drilling method[48]

절단법은 잔류응력을 완화시키면서 발생하는 변형률을 측정할 수 있도록 배치한 후 스트레인 게이지 방향과 수직방향으로 주위 부분을 톱으로 절단하게 되면, 스트레인 게이지로부터 읽히는 표점거리의 변형률  $\varepsilon$ 를 읽을 수 있게 된다. 여기서 스트레인 게이지는 기계적인 미세한 변화(strain)를 전기신호로 검출하는 장치이다. 일반적으로 금속재료의 저항치는 힘에 따라 인장이면 증가하고, 압축되면 감소하는 저항치 변화를 측정하게된다. 변형된 변형률을 측정하여 Hook's law에 의해 응력을 계산하는 방법이

다. 용접종료 후 잔류응력 측정을 원하는 위치에 스트레인 게이지를 부착하여, 그 주위 부분을 절단하여 제거하면 잔류응력은 해소되기 때문에 잔류응력 해소에 의해 탄성 변형률의 측정이 가능하다. 초기 변형률에서 절단 후 변형률이 0 이상의 + 값으로 나타나면 인장잔류응력이 존재하고, - 값으로 나타나면 압축잔류응력이 존재함을 알 수 있다. 절단법에 의한 잔류응력 측정은 스트레인 게이지를 표면에 부착하기 때문에 표면잔류응력만을 구할 수 있으며, 판재의 두께가 얇은 경우에 평면응력 상태로 생각하여 구할 수 있다. 장점으로는 용접열영향부와 같이 불균일한 재료를 포함한 경우에도 비교적 측정이 용이하다. 하지만, 재료의 표면에서 잔류응력을 측정하고, 재료를 완전히 파괴해야 하는 단점이 있다. 절단과정에서도 열에 의한 오차가 발생할 가능성이 있다. 물체에서 일어나는 변형과 힘 사이의 관계인 Hook' s law는 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

여기서, E : 탄성계수

$$\varepsilon : \text{변형률} = \frac{\Delta L}{L}$$

굴곡측정법은 로스알라모스 연구소의 Prime에 의해 고안된 후 다수의 해외 연구자들에 의해 적용되었다[47]. 굴곡측정법은 샘플의 물리적 변형을 기반으로 한 파괴적인 측정법의 일종으로 기존 측정법에 비해 접근성이 좋고 작동이 간단하며 특히 정량적으로 2차원 잔류응력 분포를 확인할 수 있다는 장점으로 최근 활발하게 연구되고 있다. 재료를 미세하게 절단하여 시험편 내부에 존재하는 잔류응력으로 인해 발생하는 단면 변형 굴곡을 측정하고, 이 단면을 잔류응력이 없는 평면상태로 되돌리는데 필요한 응력을 유한요소법으로 계산하여 시험편 절단 이전의 잔류응력을 예측하는 측정법이다. 굴곡측정법은 샘플에 물리적 손상을 가하는 파괴법에 기반하는 측정법이기 때문에 실제 사용되는 제품에 잔류응력 분포를 그대로 측정할 수 없고 측정을 위한 샘플을 따로 제작해야 한다는 단점이 있으며, 표면을 절단시 킬 때 소성응력을 받게 된다면 재료가 가지고 있던 고유의 잔류응력을 정확히 측정할 수 없다는 단점도 있다. 하지만 측정하려는 재료의 종류나 모양에 제약이 없으며 별도의 시설, 장비, 발생원이 필요하지 않고, 손쉬운 측정방법으로 2차원의 Stress map을 구하는데 용이하다. 기본원리는 잔류응력이 존재하는 부분을 절단 한 다음에 각 상태의 스트레스를 합하고 근사치를 구하여 이전의 스트레스를 구하는 방법이다. 표면을 변하게 하는 변형력은 오로지 재료가 가지고 있던 잔류응력이어야만 한다. 따라서 재료의 표면변화는 탄성변화로 이루어졌고, 재료를 자르면 표면변화에 영향을 미칠 수 있는 소성변형은 없다는 가정이 필요하다. Fig. 2.9의 Step A는 가공 이전의 샘플이고, Step B는 단면의 잔류응력을 측정하기 위해 샘플을 자른 상태이며, 잘려진 단편은 주변부가 가했던 힘이 사라진 상태이

므로 스트레스가 풀려 스트레스 풀림 상태가 되며, 이로 인해 표면의 변화가 일어난다. Step C는 변형된 표면에 역방향으로 힘을 가해 (force back) 자르기 전 상태로 만드는데 필요한 힘을 탄성해석을 통해 계산하는 과정이다. 탄성변형 하에서 중첩의 원리에 따라 각 단계별 응력분포는 아래와 같이 표현이 될 수 있다.

$$\text{Step A : } \sigma_A(x,y,z) = \sigma_B(x,y,z) + \sigma_C(x,y,z)$$

$$\text{Step B : } \sigma_B(x,y,z) = 0 \text{ (무응력)}$$

$$\text{Step C : } \sigma_A(x,y,z) = \sigma_C(x,y,z)$$

굴곡측정법로 실제 잔류응력을 측정하는 과정은, Step C에서 역변형(force back)은 탄성변형이다. 양 쪽 단면을 측정하고, 계산하여 전단응력의 영향력을 상쇄. ( $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$ ), 무응력(Stress free)상태인 Step B의 응력은 0 이므로 이와 같이 잔류응력을 계산할 수 있다.

$$\sigma_B(x,y,z) = 0 \rightarrow \sigma_A(x,y,z) = \sigma_C(x,y,z)$$

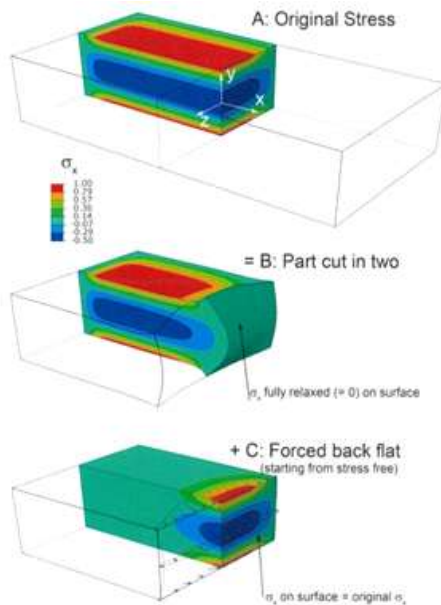


Fig. 2.9 Contour method process[47]

중성자회절법은 중성자를 이용하여 용접잔류응력을 측정하는 원리이다. 원자로 내부

에서 우라늄과 같은 중성자 발생 물질이 핵분열을 일으키며 발생하는 다양한 파장의 중성자원을 단결정인 단색기(monochromator)를 이용하여 일정한 파장( $\lambda$ )을 가진 중성자(Neutron)만 선택하여 빔 가이드로 이동시킨다[50]. Fig. 2.10에서와 같이 단파장 빔은 크기를 결정하는 mm 폭의 빔 슬릿(incident slit)을 통과하게 된다. 이 때 재료의 내부에 침투된 중성자는 원자핵으로부터 산란되고 중성자는 임의의 회절각( $2\theta$ )에 따라 일정한 격자면 입자(grains)로부터 Bragg's law( $\lambda=2d*\sin\theta$ )에 따라 회절하여 Fig. 2.11의 그림과 같이 입자의 면간 거리(interplanar distance, d-spacing, d)에 따라 peak의 위치가 결정된다.

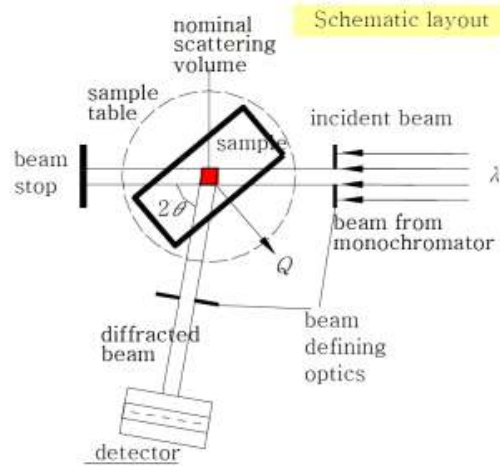


Fig. 2.10 Schematic of the neuron residual stress instrument[50]

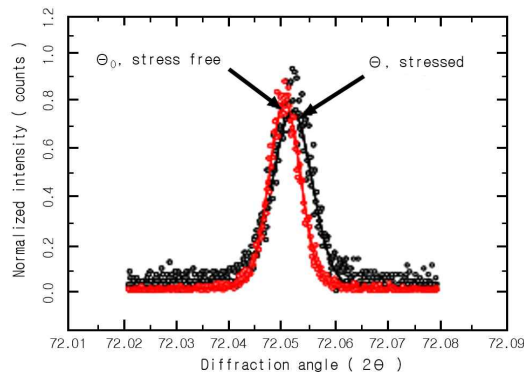


Fig. 2.11 An example of diffraction peak, residual stresses were calculated based on diffraction peaks between stressed and stress-free states[50]

중성자회절법에 의한 회절 peak의 위치 변화에 따른 용접잔류응력 계산법은, 중성자가 회절된 격자면의 면간거리(d)를 고유한 변형 게이지(strain gauge) 값으로 가정하여, 이로부터 기준 면간거리(d<sub>0</sub>, 무응력, stress free) 값으로부터 변형된 변형률(ε)을 계산식 2.6을 이용하여, 회절 peak 위치 변화로 변형을 계산한다.

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot(\theta)(\theta - \theta_0) \quad (2.6)$$

- 여기서, d : 측정된 면간거리
- d<sub>0</sub> : 무응력 상태의 면간거리
- θ : 측정된 회절 peak 중심각도
- θ<sub>0</sub> : 무응력 상태의 peak 중심각도

잔류응력(residual stress)은 Hook' s law 적용한 식을 이용하여 계산하고, 3축 주응력(Principal stress)을 아래의 계산식 2.7로 계산한다.

$$\sigma_{ii} = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} [\epsilon_{ii} + \frac{\nu_{hkl}}{1 - 2\nu_{hkl}} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz})] \quad (2.7)$$

- 여기서, σ<sub>ii</sub> : 잔류응력
- E<sub>hkl</sub> : 격자면 회절 탄성계수
- ν<sub>hkl</sub> : 격자면 포아송비
- ε<sub>ii</sub> : 변형률

용접부의 잔류응력검토의 실험적인 방법 이외에 폭 넓게 사용되고 있는 것은 이론 해석적 방법과 수치해석적 방법이다. 이론해석적 방법은 컴퓨터 응용기술이 발달되기 전에 잔류응력 해석을 위하여 이론적 해석이 시도되었다. 용접열전달에 대한 이론 해석해를 이용하였으며, 주로 가열과정은 무시하고 냉각과정에서 발생하는 수축 양을 이용하여 잔류응력 계산을 하였다. 수축에 의해 일어난 변형을 고유변형률(Inherent strain)로 정의하고, 힘의 평형방정식, 모멘트의 평형방정식, 적합방정식 및 탄성이론을 적용하여 이론 해석해를 구하였다. 그러나 실제 용접역학문제는 열탄소성, 비정상 상태의 문제이므로 이론 해석해를 이용한 결과의 신뢰성에 문제가 있으며, 최근 컴퓨터의 발달에 의해 수치해석 기법이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 수치해석적방법은 최근 컴퓨터의 발달로 여러 분야에서 수치해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 유한요소법(Finite element method, FEM)을 이용한 적용사례에 관한 연구가

많이 발표되고 있다. 용접공정을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위해서는 용접열원을 적절한 모델(일반적으로 분포열원모델)로 가정하여 용접부재에 입열시킴으로써 열전달해석을 수행한다. 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포가 형성되어 각 위치마다 열팽창량이 상이하여 열응력이 발생한다. 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 하기 때문에 냉각 후 잔류응력으로 남는다. 그러므로 수치해석을 위해서는 비선형 과도 열탄소성(nonlinear transient thermo elasto plastic)해석을 수행해야 한다. 이러한 열탄소성해석을 통하여 용접부에서 발생하는 잔류응력분포 및 변형까지도 예측이 가능하다. 열탄소성해석은 실제 용접 현상을 반영할 수 있고, 용접 순서의 변화에 따른 차이를 고려할 수 있어서 좋은 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 용접현상에 대한 온도해석을 서행하여 해석영역의 실시간 온도분포를 구하게 되면 온도분포 결과를 이용하여 열탄소성 해석을 수행할 수 있다. 유한요소 수식화 과정 중 변형률은 식 2.8과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\epsilon] = [\epsilon]_e + [\epsilon]_p + [\epsilon]_{th} \quad (2.8)$$

여기서,  $\epsilon$  : 전변형률

$\epsilon_e$  : 탄성변형률

$\epsilon_p$  : 소성변형률

$\epsilon_{th}$  : 열변형률

Stress 항을 전변형률과 소성변형률, 열변형률의 행렬식으로 표현하면 식 2.9, 2.10과 같다.

$$[\epsilon] = [B][U] \quad (2.9)$$

$$[\sigma] = [C][\epsilon]_e = [C]([B][U] - [\epsilon]_p - [\epsilon]_{th}) \quad (2.10)$$

가상일 원리를 이용하여 유한요소 수식화를 수행하고 외부하중과 Body Force 항을 제거하면 결과식은 식 2.11과 같이 표현된다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = 0 \quad (2.11)$$

행렬형태의 식으로 표현하면 식 2.12 ~ 2.15와 같다.

$$\int_V [B]^T [C] [B] dV [U] = \int_V [B]^T [C] ([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \quad (2.12)$$



$$[K][U] = [F] \quad (2.13)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV \quad (2.14)$$

$$[F] = \int_V [B]^T [C] ([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \quad (2.15)$$

위의 선형행렬식을 계산함으로써 유한요소 해석을 수행할 수 있다. 위의 수식을 수치 해석적으로 푸는 일은 가열, 냉각하는 전체과정을 미소 시간으로 나누어 계산하는 과도상태의 문제이며, 비선형 열탄소성 문제가 된다[51-52]. 해석 사용프로그램은 MSC.marc를 사용하였으며, 용접 열원의 모델링을 위해 marc 옵션인 weld flux, weld filler, weld path를 사용하였다. 용접열원은 Fig. 2.12와 같이 부피를 갖는 열원으로 모델링 하였다.

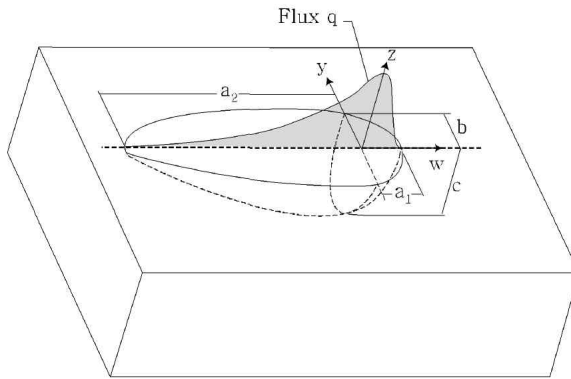


Fig. 2.12 Ellipse heat source model

열원방정식은 (2.16)과 (2.17)를 이용하였다.

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad (2.16)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad (2.17)$$

여기서,  $q_f$  : 전방 용융풀 단위 체적 입열량

$q_r$  : 후방 용융풀 단위 체적 입열량

$Q = \eta VI$  : 총 입열량

$a$  : X 방향 용접 폭

$b$  : Y 방향 용접 깊이

$c_f$  : Z 방향 전방 용융풀 길이

$c_r$  : Z 방향 후방 용융풀 길이

$\eta$  : 효율

$f_f f_r$  : 무차원 수

$$f_f = \frac{2}{(1 + c_r/c_f)} \quad f_r = \frac{2}{(1 + c_f/c_r)}$$

용접 폭, 깊이 등의 자료는 용접시험편 단면을 채취하여 이를 기초로 선정하였다. Weld path option으로 용접선을 설정하였으며, Weld filler option으로 용접열원이 이동함에 따라 용접와이어가 생성되도록 모델링하였다.

## 제3장 해양구조용 고강도강 용접부 잔류응력 분포 특성

### 제1절 서언

제2장에서 잔류응력 생성에 관한 이론적 배경과 잔류응력 측정법에 대하여 검토하였다. 용접구조물은 용접으로 제작되며, 용접열에 따라서 발생하는 변형, 잔류응력, 결함 등의 여러 가지 문제가 발생할 가능성이 있으며, 그것에 따라서 구조물은 안전성에 영향을 받게 된다. 특히 용접 잔류응력과 변형은 구조물의 성능에 좋지 못한 영향을 미치며, 그 발생에 악영향을 미치는 인자는 매우 다양하다. 제3장에서는 해양구조용 고강도강의(두께 25mm) 맞대기 용접이음부를 대상으로 구속도의 영향에 따른 용접잔류응력 분포특성을 규명하기 위하여 절단법, 중성자회절법, 굴곡측정법, 유한요소법을 적용 하였다.

### 제2절 시험편제작 및 용접조건

#### 1. 화학적 성질

본 연구에서는 해양구조용 강재인 항복강도 500MPa급(이하, E500) 강 종을 사용하여 구조물에 가장 폭 넓게 사용되는 용접이음부 형상인 맞대기 이음부를 대상으로 구속도의 영향에 따른 용접부 잔류응력의 분포에 대하여 검토하였다. 본 연구에 사용한 해양구조용 E500 강재의 화학적 성질을 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Chemical composition of E500

Materials	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ceq (%)
E500	0.07	0.19	1.55	0.008	0.002	0.44

#### 2. 기계적 성질

해양구조용 E500강재의 기계적 물성을 Table 2에 나타냈다. 항복강도가 529MPa정도로써 해양구조물에 적용되는 강재 중에서는 고강도강이며, 충격인성 또한 -40℃에서 평균 249J로 저온 충격인성이 우수한 강재이다.

Table 2 Mechanical properties of E500

Materials	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Charpy Impact test, -40℃, (J)
E500	529	646	19	249J

### 3. 시험편제작

#### 가. 완전구속 시험편제작

구속상태의 영향에 따른 용접부에서의 역학적 거동은 다르게 나타나며, 특히 용접잔류응력과 변형은 구속의 영향에 따라서 다른 거동을 할 것으로 예상되어서 본 연구에서는 완전구속 상태와 완전비구속 상태를 실험적으로 재현하여 잔류응력 및 각변형의 영향을 검토하였다. 시험편의 제작에 사용된 용접재료는 해양구조용 E500강재에 범용적으로 사용되는 AWS A5.29 E91T1의 상용 용접재료를 적용하였다. 용접재료의 화학적 성질 및 기계적 성질은 Table 3, Table 4에 나타냈다. 용접재료의 항복강도는 모재 대비 약 50MPa 정도 높은 580MPa 오버 매칭을 하였다. 용접재료의 인장강도는 650MPa, 연신율 20% 였다. 완전구속 시험편제작을 위한 시험편의 사이즈는 Fig. 3.1에 나타났으며, 용접길이 400mm, 폭 150mm, 두께 25mm, 개섩각 양면 45°, 개섩형상은 V-groove 이며, 루트갭은 4mm로 하여 시험편을 제작하였다.

Table 3 Chemical composition of welding consumable (AWS A5.29 E91T1)

Welding consumable	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
AWS A5.29 E91T1	0.06	0.29	1.23	0.007	0.008

Table 4 Mechanical properties of welding consumable (AWS A5.29 E91T1)

Welding consumable	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
AWS A5.29 E91T1	580	650	20

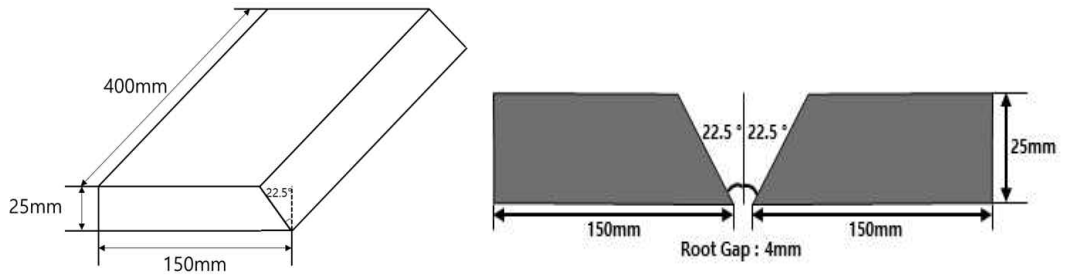


Fig. 3.1 Groove shape and dimensions of test specimen

선박 및 해양구조물 제작 시 사용되는 용접프로세스 중 FCAW(Flux cored arc welding)와 SAW(Submerged arc welding)가 일반적으로 폭넓게 사용되고 있다. 본 연구는 이 중에서 가장 범용적으로 사용되고 있는 FCAW를 적용하였다. 시험편제작에 사용된 FCAW의 용접조건을 Table 5에 나타냈다. 적용된 입열량은 15kJ/cm 로 총 11 pass, 6 layer로 수행되었다. 용접자세는 1G(아래보기)로 가장 보편적인 방법을 적용하였으며, 용접와이어의 직경은 1.2 $\phi$ 를 사용하였고, 보호가스는 100% CO<sub>2</sub>를 사용하였다. 완전구속 시험편의 구속조건 및 백킹재에 대해서는 Fig. 3.2에 나타냈다. (a)는 앤드랩 양 끝단에 완전구속을 하였고, 용접시 열로 인한 각변형 방지를 위하여 지그로 고정 후 용접을 진행하였다. 또한, (b)와 같이 구속 효과를 더욱 높이기 위하여 steel backing을 적용하여 용접시험편을 제작하였다.

Table 5 Welding conditions in used

Process	Pass	Current	Voltage	Speed	Heat Input
	No.	(A)	(V)	(cm/min)	(kJ/cm)
FCAW	11	270	30	32	15
* Welding Position : 1G * Wire diameter: 1.2 $\phi$ * Shielding gas : 100% CO <sub>2</sub>					



(a) constrained condition of constrained weld



(b) steel backing condition of constrained weld

Fig. 3.2 Constrained and steel backing condition of E500

완전구속 시험편의 Macro 단면을 Fig. 3.3에 나타냈다. 용접 후 용접금속의 폭은 30mm 이며, FCAW 이음부의 열영향부의 폭은 약 4mm이다. 완전구속 시험편의 각변형 측정사진을 Fig. 3.4에 나타냈다. 완전구속 시험편은 steel backing과 지그를 이용하여 완전구속상태에서 용접을 실시하였기 때문에 용접 후 각변형이 거의 발생하지 않았다.



Fig. 3.3 Macrostructure of constrained weld specimen



Fig. 3.4 Angular distortion measurement of constrained weld

#### 나. 완전비구속 시험편제작

완전비구속 시험편제작에 사용된 용접재료는 완전구속 시험편에 적용한 용접재료와 동일하다. 화학적 성질은 Table 3, 기계적 물성은 Table 4에 표기하였다. 용접재료의 기계적 물성은 항복강도 580MPa, 인장강도 650MPa, 연신율 20%이다. 완전비구속 시험편의 사이즈는 Fig. 3.1에서 같이 길이 400mm, 폭 150mm, 두께 25mm이다. 개섩각은 양면 45°, 개섩형상은 V-groove, 루트갭은 4mm이다. 완전비구속 시험편의 용접조건은 Table 5에 나타냈다. 완전비구속 시험편의 용접프로세스는 완전구속 시험편과 동일한 FCAW(Flux cored arc welding)를 적용하였다. 총 11 pass를 진행하였고, 15 kJ/cm 동일한 입열량으로 용접을 진행하였다. 용접자세는 1G(아래보기), 용접와이어는 1.2 $\phi$ 와 보호가스는 100% CO<sub>2</sub>를 사용하였다. 완전비구속 시험편의 구속 및 백킹재의 조건은 Fig. 3.5에 나타냈다. Fig. 3.5의 (a)에서와 같이 앤드탭 양 끝단에 tag 용접을 통하여 최소한의 구속을 하였다. Fig. 3.5의 (b)는 백킹재로 사용한 ceramic backing을 나타냈다. 완전비구속 시험편의 macro 단면을 Fig. 3.6에 나타냈다. 용접 후 용접금속의 폭은 32mm이며, FCAW 이음부의 열영향부의 폭은 약 4mm이다. 완전비구속 시험편의 용

접 후 각변형량을 정량적으로 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3.7에 나타냈다. 용접부  
 중심으로 좌측과 우측에 각각 3° 각변형이 발생하였다.



(a) constrained condition of unconstrained weld



(b) ceramic backing condition of Unconstrained weld

Fig. 3.5 Unconstrained and ceramic backing condition of E500



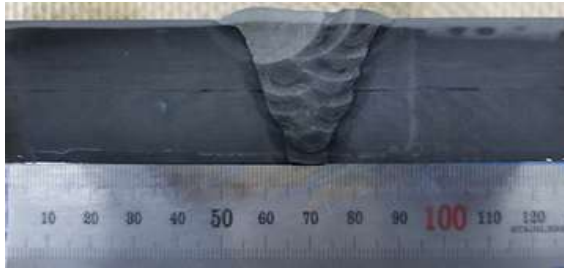


Fig. 3.6 Macrostructure of unconstrained weld specimen

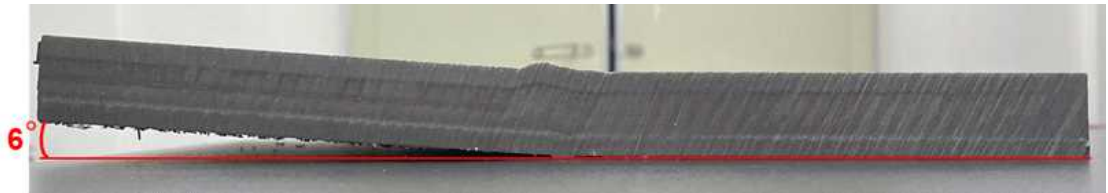


Fig. 3.7 Angular distortion measurement of unconstrained weld

### 제3절 완전구속 맞대기 이음부의 용접잔류응력 분포 특성

#### 1. 절단법에 의한 잔류응력 측정 결과

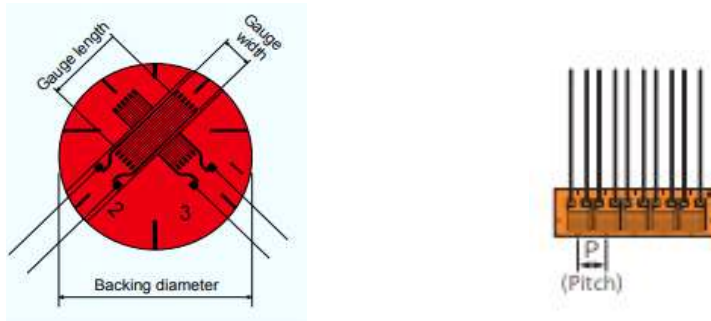
절단법에 의한 용접잔류응력을 계측하기 위하여 1축 및 2축 스트레인게이지를 사용하였다. 2축 스트레인게이지의 정보는 Table 6에 나타났다. 스트레인게이지 길이 1mm, 폭 0.7mm, backing 길이와 폭  $\Phi 4.5$ , 저항 120 $\Omega$ 의 재원을 갖는 스트레인게이지를 적용하였다. 1축 5-elements 스트레인게이지의 정보는 Table 7에 나타났다. 1축 방향에서 5개의 게이지를 통하여 연속적인 변형을 측정이 가능하다. 스트레인게이지의 길이 1mm, 폭 1.4mm이며, base의 길이 12mm, 폭 4mm, 저항 120 $\Omega$ , 게이지간의 간격 Pitch는 2mm이다. 실제 사용한 스트레인게이지의 사진을 Fig. 3.8에 나타났다.

Table 6 2 Axis strain gauge information in used

Basic type	Gauge L	Gauge W	Backing L	Backing W	Resistance
FCA-1	1mm	0.7mm	$\Phi 4.5$	$\Phi 4.5$	120 $\Omega$

Table 7 Uniaxial 5-elements strain gauge information in used

Basic type	Gauge L	Gauge W	Base L	Base W	Resistance	Pitch
KFGS-1	1mm	1.4mm	12mm	4mm	120 $\Omega$	2mm



(a) 2 axis strain gauge      (b) uniaxial 5-elements strain gauge

Fig. 3.8 Strain gauges picture in used

완전구속 시험편의 절단법에 의한 용접부 용접잔류응력 측정을 위한 스트레인게이지 부착위치를 Fig. 3.9에 나타냈다. 용접잔류응력 분포는 주로 HAZ(Heat affected zone, 열영향부)를 포함한 용접부근방에서 급격한 변화를 갖게 되므로 최대한 HAZ 근방에 스트레인게이지를 부착하였다. 절단법에 의한 잔류응력 측정 시 절단속도에 의해서 발생하는 열의 제어가 필요하여, 절단속도는 2mm/min 으로 유지하였으며, 절삭유와 물을 통하여 절단 시 발생하는 열을 제어하였다. 스트레인게이지는 용접선방향의 중심인 150mm 근방에 부착하였다. 응력변화가 심하게 발생하는 HAZ 영역은 1축 5-elements 스트레인게이지를 fusion line으로 부터 용접선 폭방향으로 20mm까지 촘촘하게 부착하였다. 2축 스트레인게이지는 fusion line에서 용접선 폭방향으로 25mm, 30mm, 40mm, 65mm, 85mm, 130mm 위치에 부착하였다. 또한, 용접선방향의 반대면에도 동일한 위치에 스트레인게이지를 부착하여 측정된 응력값의 신뢰성을 확보하고자 하였다. Fig. 3.10 (a)는 용접된 시험편에 잔류응력 측정을 위한 스트레인게이지를 부착한 상태를 나타냈으며, 부착 후에 데이터로거를 사용하여 초기값을 측정하였다. Fig. 3.10 (b)는 용접선 수직 방향으로 절단하여 용접선방향의 용접잔류응력을 해방시켰다. Fig. 3.10 (c)는 용접선방향과 두께방향으로 절단을 통한 용접선수직방향의 용접잔류응력과 두께방향의 용접잔류응력을 해방시켰다. 두께방향의 잔류응력까지 해방시켜서 가능한 표면에서의 효과만을 얻기 위하여 두께방향으로 절단을 수행하였다.

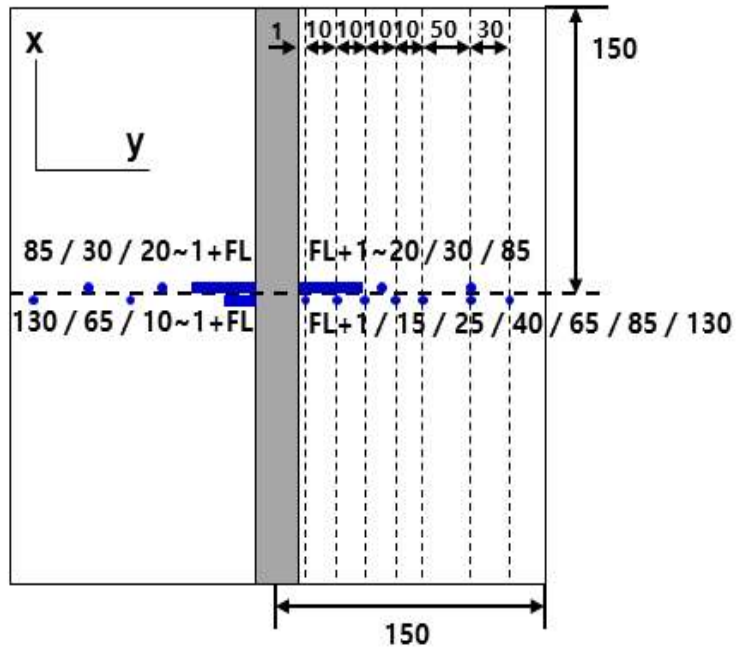
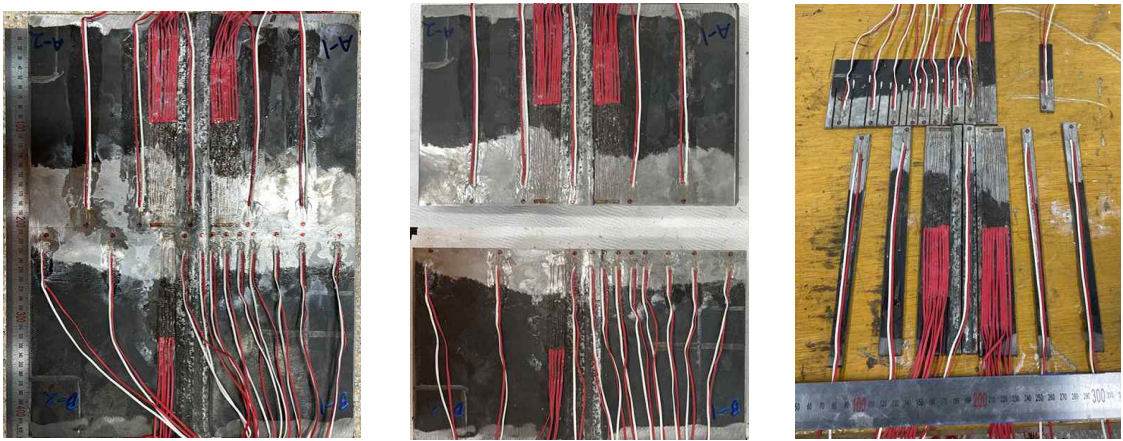


Fig. 3.9 Strain gauges attachment position of constrained weld

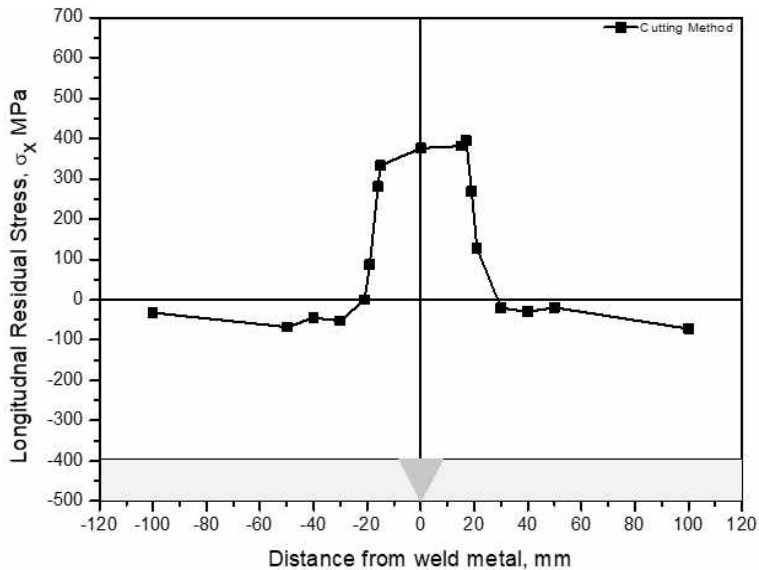


(a) initial condition (b) after first cutting (c) after second cutting

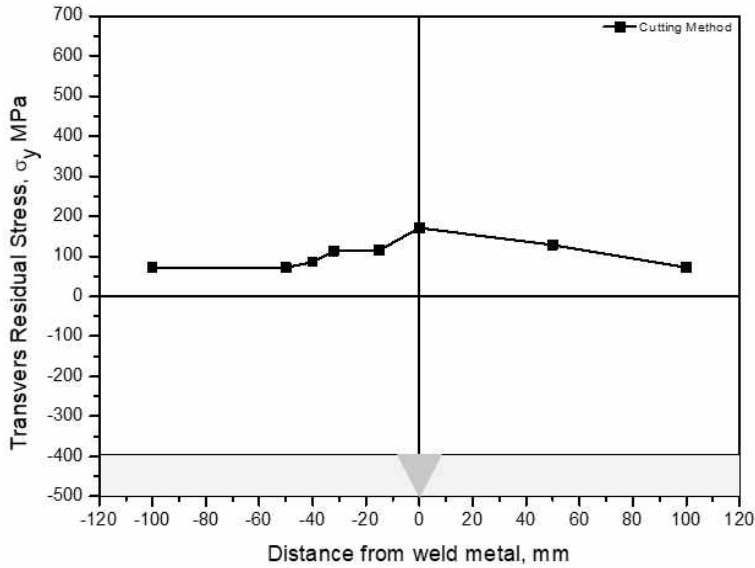
Fig. 3.10 Cutting process for measurement of welding residual stress with constrained weld

해양구조용 E500 강재 완전구속 시험편의 절단법에 의한 잔류응력 측정결과를 Fig. 3.11에 나타냈다. Fig. 3.11 (a)는 용접선수직방향 절단 후 용접부로부터 모재쪽으로 떨어진 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 거동을 나타냈다. 표면의

좌측 FL+1mm 부분에서 332MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접선에서 멀어질수록 인장응력이 감소하여 FL+130mm 부분에서는 -106MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm 부분에서 381MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+130mm에서는 -268MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 좌측보다 약 50MPa 정도 큰 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+130mm에서 약 -160MPa 정도 큰 압축응력이 분포하였다. 좌측과 우측의 정량적인 용접잔류응력값에는 용접순서의 영향으로 다소 차이는 있었으나, 정성적인 분포양상은 동일한 분포를 나타냈다. 용접부에서 용접잔류응력은 용접금속과 열영향부에서 값이 크게 변화하는데, 본 시험편에서도 스트레인게이지의 부착위치에 따라서 그 값이 차이를 나타냈다. Fig. 3.11 (b)는 용접선방향 절단 후 용접부에서 폭방향으로 멀어지는 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 거동을 나타냈다. 용접부에는 170MPa 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에 114MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접선에서 멀어질수록 인장응력이 감소하여 FL+130mm 부분에서 22MPa 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+50mm에 128MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+130mm 부분에 -77MPa 압축잔류응력이 분포하였다.  $\sigma_x$ 에 비해  $\sigma_y$ 는 다소 작은 응력을 나타냈는데, 일반적으로 용접선방향 잔류응력에 큰 응력이 분포하고, 용접선수직방향 잔류응력은 용접선방향 잔류응력보다 작은 잔류응력이 분포하는 현상과 동일한 경향을 나타냈다.



(a) longitudinal residual stress



(b) transverse residual stress

Fig. 3.11 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  by cutting method

## 2. 굴곡측정법에 의한 잔류응력 측정 결과

굴곡측정법을 이용하여 동일하게 제작된 시험편을 이용하여 용접잔류응력을 측정하였다. 굴곡측정법의 특성상 절단면에 수직방향의 잔류응력만 계측이 가능하므로 용접선수직방향으로 절단하여 용접선방향,  $\sigma_x$ 의 잔류응력을 측정하였다. Fig. 3.12에 절단방향에 대한 모식도를 나타냈다. 절단은 와이어 방전가공(Wire electrical discharge machining, WEDM)에 의해서 이루어졌으며, 와이어 성분 및 조건은 Table 8에 나타냈다. 절단 속도는 시간당 12mm로 설정하여 물속에서 방전가공을 수행하였다. 와이어방전가공시 와이어의 직경이 크면 데이터의 에러가 증가하기 때문에 가능한 직경이 작은 와이어를 쓰는 것을 권장하나, 과도하게 직경이 작을 경우 절단 시간이 늘어나며, 와이어가 끊어지는 경우가 발생할 수 있으므로 유의하여 와이어의 직경을 결정하는 것이 중요하여 본 연구에서는 절단에 가장 적합화된 0.25mm 직경의 와이어를 적용하였다.

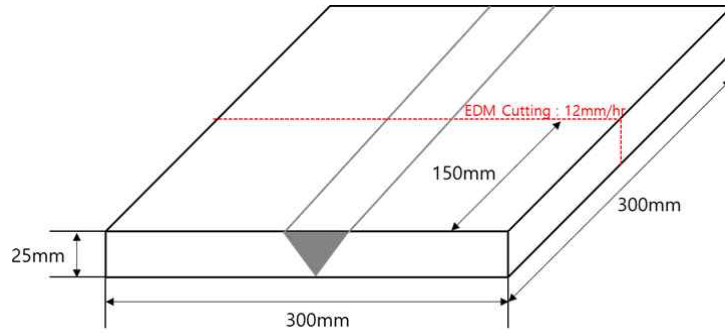


Fig. 3.12 Schematic diagram of cutting process for contour method

Table 8 Wire electric discharge machining, Conditions

Wire electric discharge machining, condition	
wire component	wire dimension
brass ( Cu 65% + Zn 35% )	0.25mm

완전구속 시험편의 절단면을 Fig. 3.13에 나타냈다. Fig. 3.14에 완전구속 시험편의 굴곡측정과정을 나타냈다. 절단면 양쪽을 측정함으로써 대칭이 되는 포인트에 대하여 평균을 구하여 굴곡에 대한 데이터를 정리하였다. 결함 및 불순물에 의한 측정 오류를 발생시킬 가능성이 있는 데이터를 삭제하고, 최 외각 좌표들을 이용하여 시험편의 경계를 추출하였다. 오류를 삭제한 데이터를 이용하여 경계를 3차원의 연속적이고, 매끄러운 spline fitting을 시행하였다. spline fitting은 매듭간격이 종방향과 횡방향 모두 10mm로 언더피팅(underfitting) 현상이 일어나지 않게 유의하여 적용하였다. 최 외각좌표들을 상용프로그램인 Abaqus 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 파일로 만들고, 유한요소 해석을 통하여 재료가 가지고 있었던 초기잔류응력을 계산하였다. Fig. 3.15에는 굴곡측정법에 의한 용접선방향 용접잔류응력 분포를 나타냈다. 해석에 필요한 물성인 탄성계수는 206 GPa, 푸아송비는 0.3을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. Element type은 C3D20R으로 절점이 20개인 3차원 연속체 2차 육면체 요소이며 적분점이 9개인 저감적분요소를 적용하였다. 완전구속 시험편의 용접부에서 약 480MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접부에서 멀어짐에 따라 인장잔류응력이 감소하여 폭방향 끝단부에는 약 -270MPa 압축잔류응력 분포하였다.

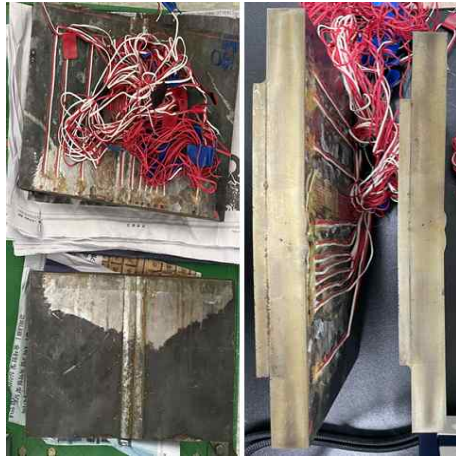


Fig. 3.13 WEDM cutting process of constrained weld specimen

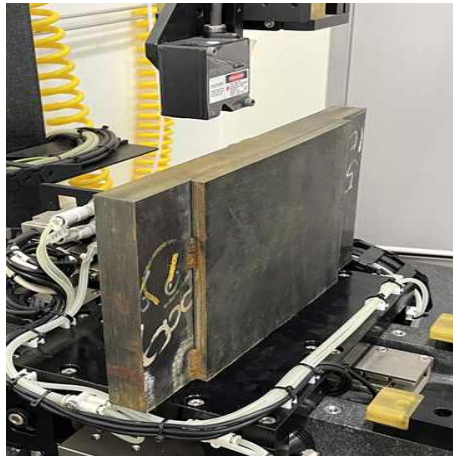


Fig. 3.14 Constrained weld specimen by contour method process

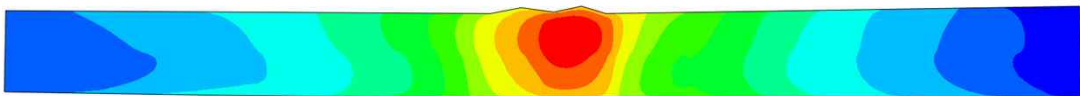
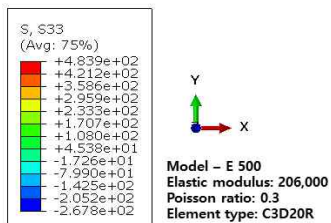
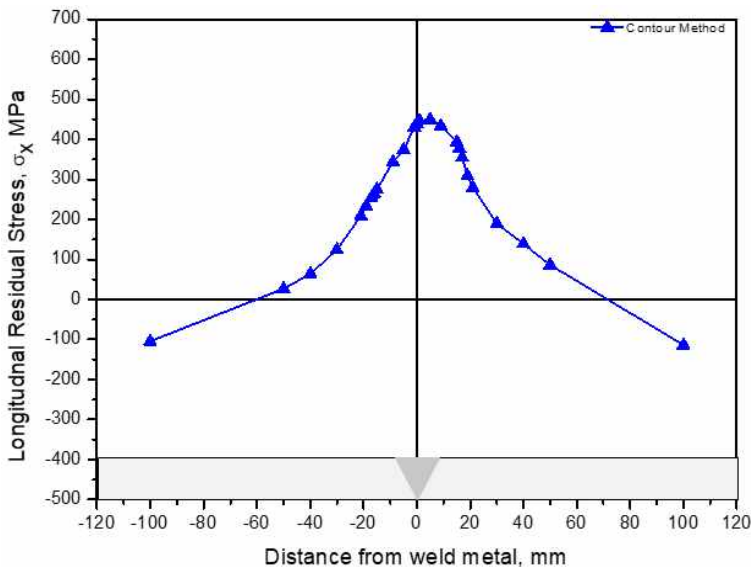


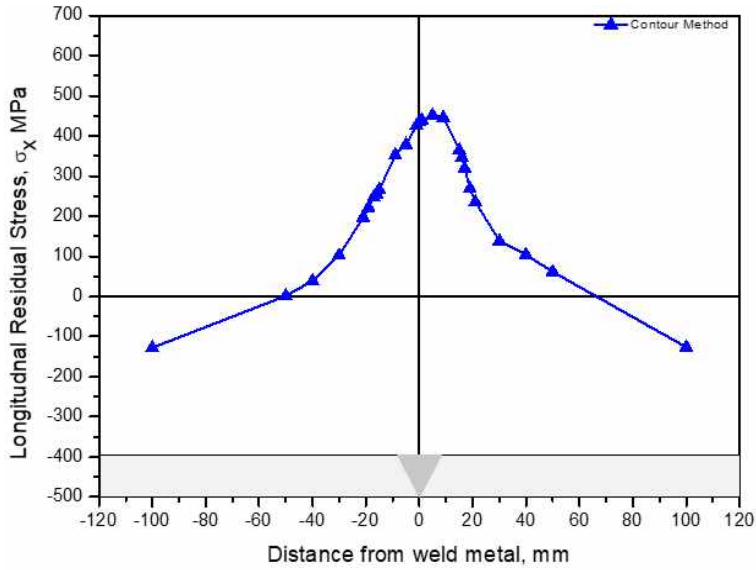
Fig. 3.15 Constrained weld residual stress distribution using contour method

Figure. 3.16의 (a)는 표면으로부터 두께방향으로 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 거동을 나타냈다. 용접금속에서 438MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, 좌측 FL+1mm에는 274MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -104MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 393MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -114MPa 압축잔류응력이 분포하였다. (b)는 표면으로부터 두께방향으로 12.5mm 위치의 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부에서 434MPa 인장잔류응력이 분포하고, 좌측 FL+1mm에는 265MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -127MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 364MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -126MPa 압축잔류응력이 분포하였다. (c)는 표면으로부터 두께방향으로 22mm 위치의 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 좌측 FL+1mm에서 219MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -85MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 288MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -94Ma 압축잔류응력이 분포하였다. 좌측과 우측은 용접순서의 영향에 따른 최대잔류응력에 차이가 있었으며, 우측의 FL+1mm에서 마지막 용접패스로 인하여 좌측의 FL+1mm 보다 약 120MPa 높은 인장잔류응력이 형성되었다. 일반적으로 용접잔류응력은 최종패스의 영향을 많이 받기 때문에 그러한 현상이 본 연구에서 사용한 시험편에서도 나타났다. 또한, face에서의 잔류응력에 비교하여 root부에서의 잔류응력이 낮게 나타났는데, 이것은 최종적으로 용접이 끝나는 face에서 잔류응력이 크게 나타나기 때문이다.

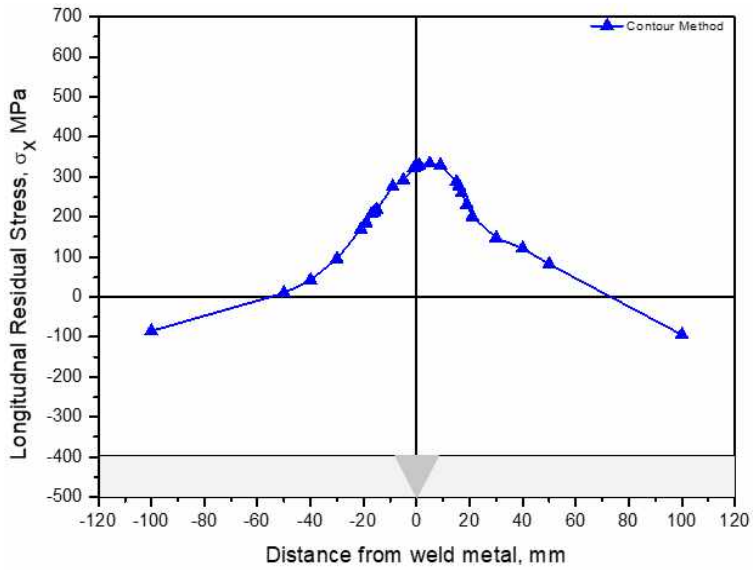


(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm





(b) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



(c) longitudinal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.16 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$  by contour method

### 3. 중성자회절법에 의한 잔류응력 측정 결과

중성자회절법은 비파괴측정법으로 세축방향의 응력을 80mm이상의 두께까지 측정이 가능하다. 중성자회절법으로 잔류응력을 측정하기 위한 완전구속 시험편을 Fig. 3.17에 나타내었으며, 완전구속 시험편에서 채취한 초기응력상태를 파악하기 위한 시험편( $d_0$ )을 Fig. 3.18에 나타냈다.  $d_0$  시험편은 용접선방향, 용접선수직방향에 대해 4mm 간격으로 방전가공을 통하여 절단하여 열에 의한 응력변화를 최소화하면서 절단 하였다. 표면에서 두께방향으로 16mm까지 방전가공 하였으며, root 위 4mm까지 방전가공을 수행하여 잔류응력을 제거하였다. Fig. 3.19에는 완전구속 시험편에 대한 중성자회절법을 이용하여 측정한 위치를 나타냈다. 용접잔류응력은 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 지점, 12.5mm 들어간 지점, 22mm 들어간 위치에서 측정하였으며,  $d$  시험편과  $d_0$  시험편 모두 같은 위치에서 측정하였다. Table 9에는 완전구속 시험편( $d$ )과 응력해방시험편( $d_0$ )에 사용한 Incident slit과 detector slit의 크기를 나타냈다. slit의 크기로 인하여 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 지점, 22mm 들어간 지점을 측정하였다.



Fig. 3.17 Neutron diffraction measurement of constrained weld specimen



Fig. 3.18 Neutron diffraction measurement of constrained weld free specimen

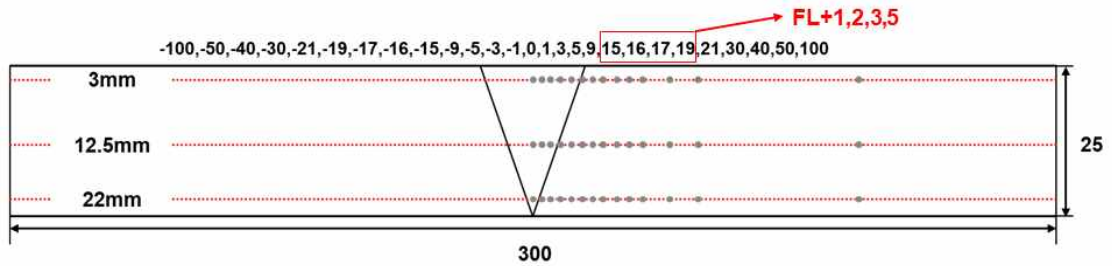


Fig. 3.19 Neutron diffraction measurement points for constrained weld specimen

Table 9 Incident slit and detector slit Conditions

	Incident slit	Detector slit
size	2x2	2x10

중성자 회절 조건에 따른 파장과 총 투과 가능한 길이를 Table 10에 나타냈다. 구부린 단결정 단색기(bend perfect crystal monochromator) Si (220) 사용하여 감쇄능이 최소인 take-off angle  $45^\circ$  및  $1.46\text{\AA}$ 의 파장 조건을 사용하였다. 중성자가 나오는 방향으로부터 detector까지의 각도는  $77.6^\circ$  이다. 중성자회절법에 의한 완전구속 시험편의 각 방향에서의 용접잔류응력 모습을 Fig. 3.20에 나타내었고, 완전구속 시험편의 응력완화시험편 측정 모습을 Fig. 3.21에 나타냈다. 용접선방향(Longitudinal direction), 용접선수직방향(Transverse direction), 용접선두께방향(Normal direction)에 맞게 시험편을 설치한 후에 중성자를 투과시켜 측정하였다.

Table 10 Ferritic steel(low carbon steel, bcc) conditions

Monochromator	$2\theta_m$ (deg)	$\lambda$ ( $\text{\AA}$ )	Reflection plane	$2\theta_s$ (deg)	Fom	$l_m$ (mm)	$D_{ref}$ (mm)	$D_{tr}$ (mm)
Si (220)	45	1.46	211	77.6	82	65	21	53

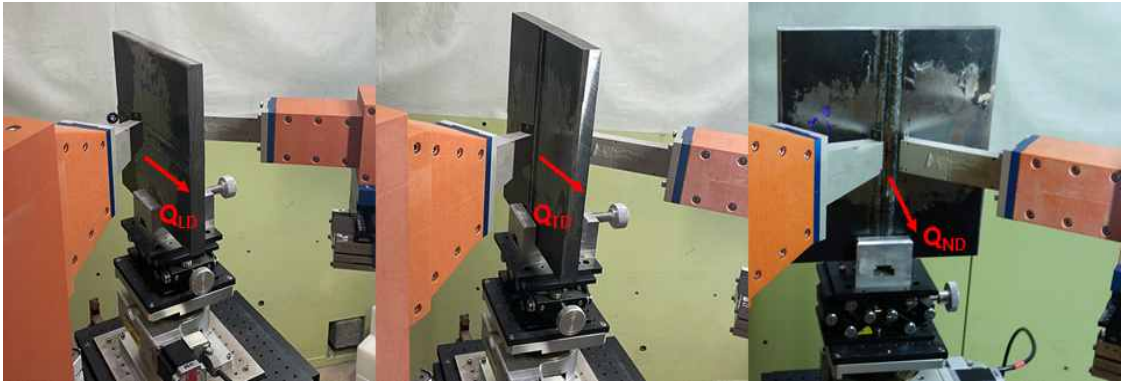


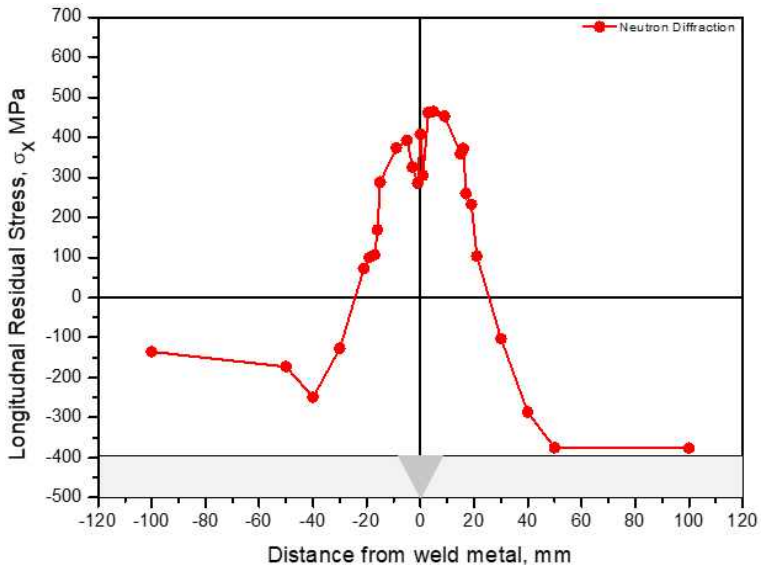
Fig. 3.20 Constrained weld specimen by neutron diffraction process



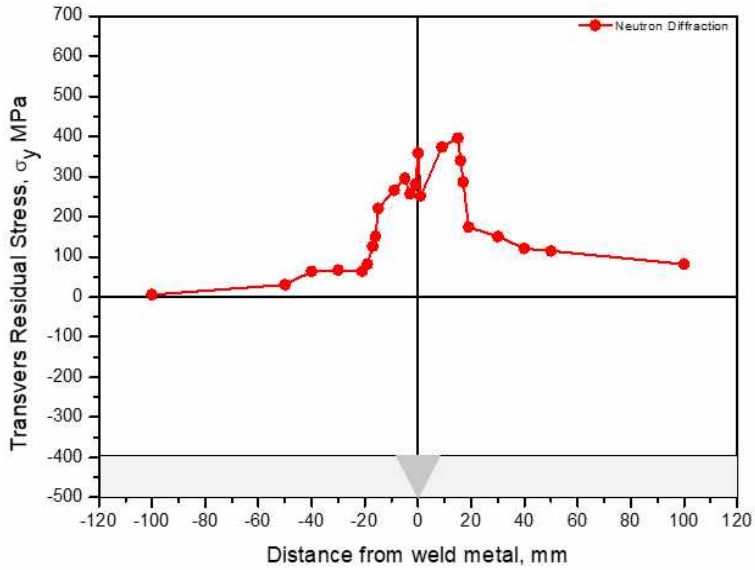
Fig. 3.21 Constrained weld stress free specimen contour method process

Figure. 3.22에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향으로 3mm 부분의 용접잔류응력분포를 나타냈다. 중성자회절법에 의한 측정은 용접부의 중심으로 좌측, 우측에 대하여 폭방향으로 측정하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향으로 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측에 대하여 분포 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 407MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 287MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 모재쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하며 FL+100mm에서 -135MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 358MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -376MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 마지막 용접이 끝난 우측 부분이 좌측에 비해 높은 잔류응력이 존재하였으며, 우측 FL+1mm에서의 약 100MPa 정도의 높은 인장잔류응력이 존재하였고, 우측 FL+100mm에서도 약 -200MPa 정도의 높은 압축잔류응력이 측정되었다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다.

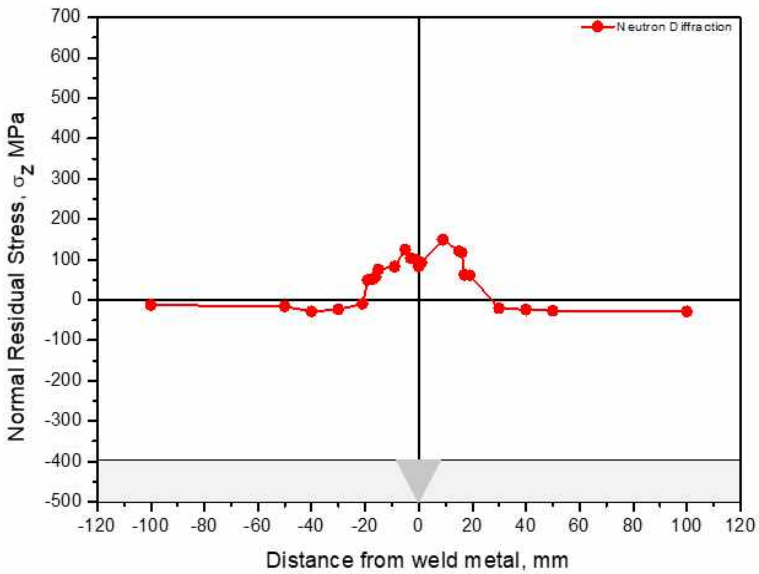
용접부의 중앙에서 약 358MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 220MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 5MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 395MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 81MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.  $\sigma_y$  도  $\sigma_x$  와 유사하게 우측 FL+1mm에서 약 175MPa의 높은 인장잔류응력이 분포하였으며, 우측 FL+100mm에 약 75MPa의 높은 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부 중앙에서는 82MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서는 76MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 -12MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 120MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -28MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 좌측보다 약 40MPa의 높은 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서는 -10MPa의 높은 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm



(b) transverse residual stress in surface + 3mm

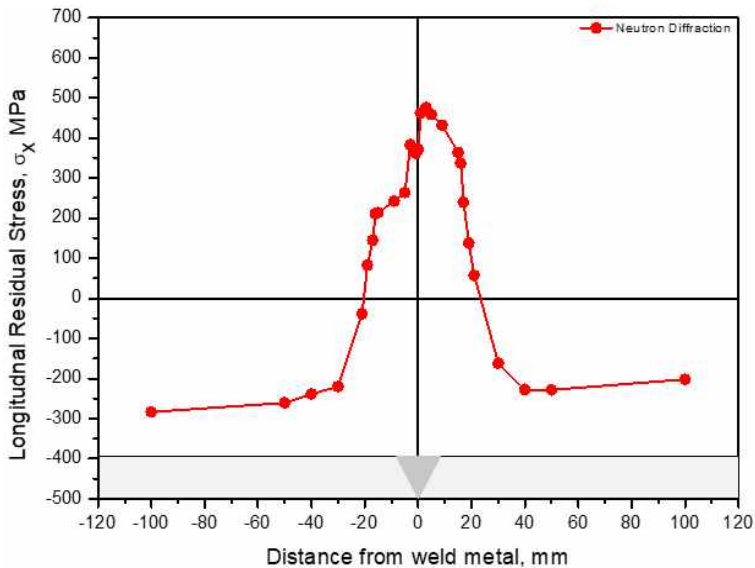


(c) normal residual stress in surface + 3mm

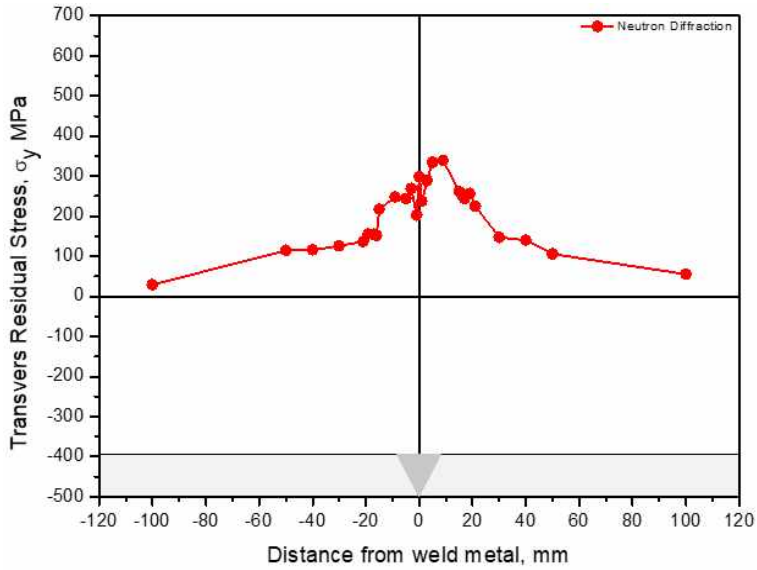
Fig. 3.22 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by neutron diffraction

Figure. 3.23에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 12.5mm 부분의 용접잔류응력을 나타냈다. 측정과정은 표면으로부터 두께방향으로 3mm의 과정과 동일하다.

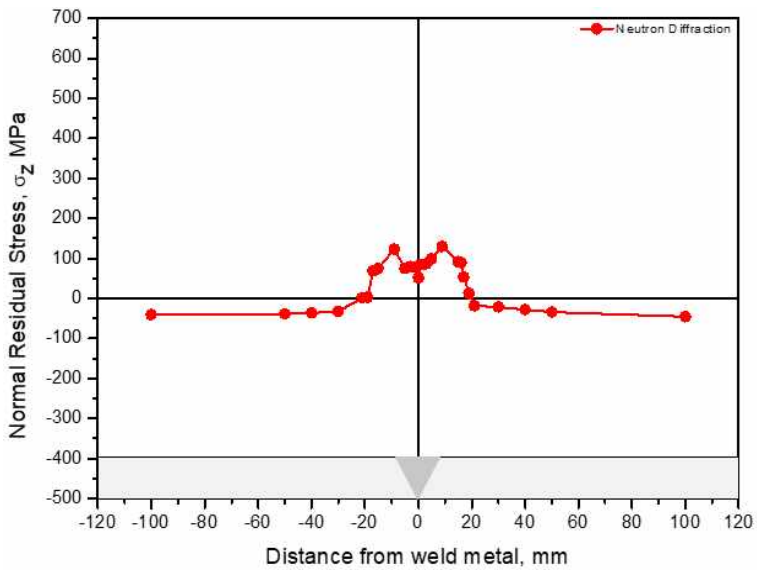
(a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 372MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 용접부 중앙을 중심으로 좌측 FL+1mm에 213MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 -284MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에 363MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 -202MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 298MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 217MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 29MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 261MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 55MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 51MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 75MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm -40MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm 91MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -45MPa의 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



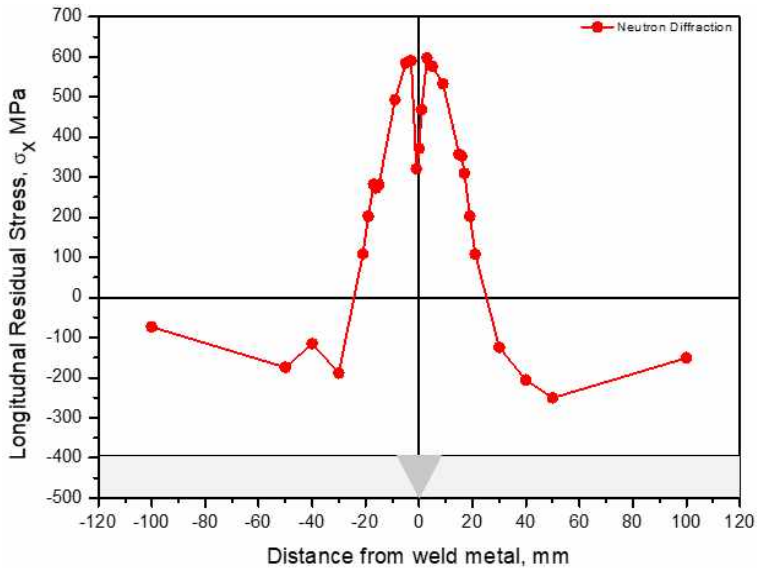
(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

Fig. 3.23 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by neutron diffraction

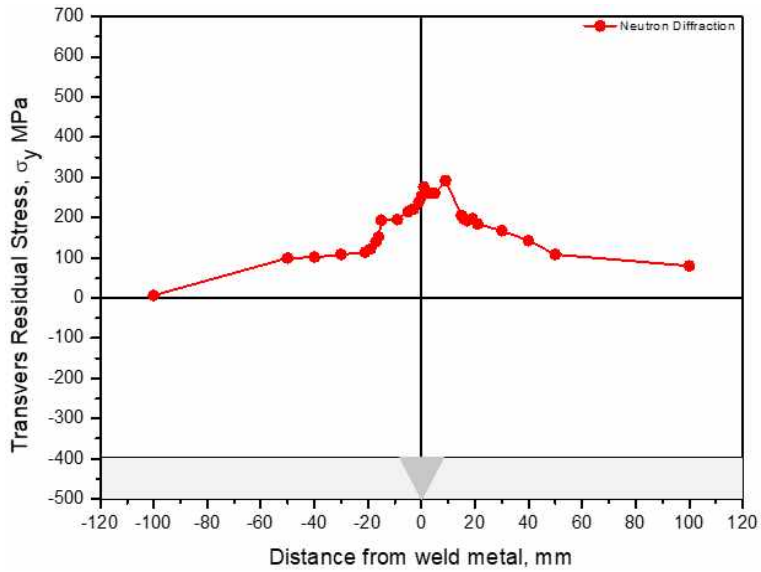
Figure. 3.24에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 22mm 부분의 용접잔류 응력이다. 측정과정은 표면으로부터 두께방향으로 3mm의 과정과 동일하다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측



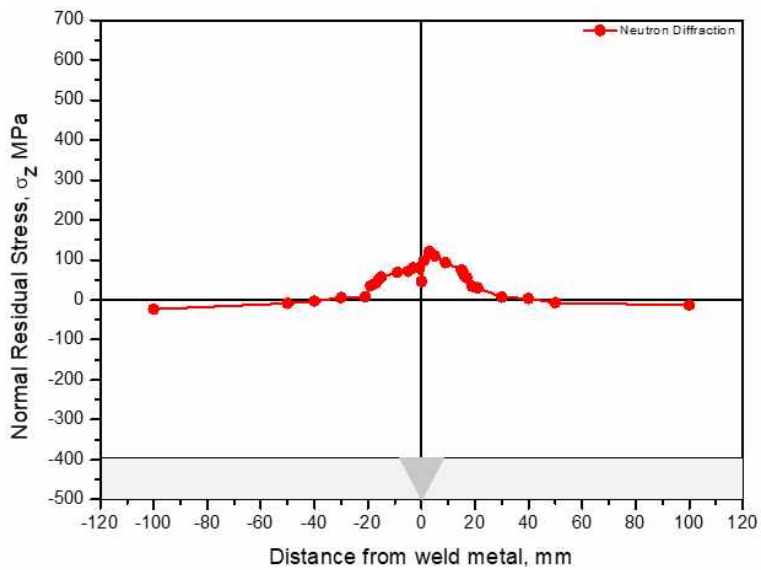
용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 371MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 용접부를 중심으로 좌측 FL+1mm에 281MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접부에서 폭방향 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하여 FL+100mm에서는 -73MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 357MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -151MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 253MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측에는 FL+1mm에는 193MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 7MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 205MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 80MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서는 45MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 용접부 좌측 FL+1mm에서는 56MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -23MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 용접부 우측 FL+1mm에서는 75MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -13MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 표면으로부터 두께방향 22mm의 용접부 잔류응력은 표면으로부터 두께방향 3mm, 12.5mm 보다 높게 형성이 되었다. 종래의 연구결과에 따르면 최대 잔류응력은 표면으로부터 두께방향으로 약 5 ~ 10mm 지점에서 발생한다고 알려져 있다. 그러나 초층부에서 최대 잔류응력이 발생한 것은 steel backing의 영향으로 인해 발생한 현상으로 완전한 구속의 영향으로 변형을 제어함으로써 내재되는 잔류응력의 크기가 커진 것에 기인한 것으로 판단된다[53].



(a) longitudinal residual stress in surface + 22mm



(b) transverse residual stress in surface + 22mm



(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.24 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by neutron diffraction

#### 4. 유한요소법에 의한 잔류응력 해석 결과

완전구속 시험편의 용접부 잔류응력 응력분포 특성 파악을 위하여 Marc 2017 상용프로그래를 사용하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 평면변형률조건을 이용한 2차원 해석을 진행하였으며, Fig. 3.25에는 해석에 사용한 model의 용접패스를 나타냈다. 해석모델은 실험적으로 분석한 실제 용접부의 macro 단면을 분석하여 용접비드 폭 과 높 등을 측정하여 실제 완전구속 시험편과 동일한 크기로 modeling을 하였다. 요소형식은 Quad-meshes를 사용하였다. 열원 모델은 용접해석에 범용적으로 사용되고 있는 Goldack 모델을 사용하였으며, 해석 시 필요한 용접 속도와 입열량은 실제 용접조건과 동일하게 하였다. Fig. 3.26에는 해석모델과 경계조건을 나타냈다. 완전구속 시험편의 경우는 양끝단의 모든 방향을 구속하고, 용접부 초층부를 구속하여 실제 완전구속 시험편과 동일하게 경계조건을 설정하였다. Fig. 3.27의 (a)는 완전구속 시험편 해석 model의 용접선방향응력,  $\sigma_x$ 의 분포를 나타냈다. 용접부 근방에서 최대인장잔류응력이 형성되었으며, 용접부에서 폭방향으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하여 압축잔류응력이 형성되었다. Fig. 3.27의 (b)는 완전구속 시험편 해석 model의 용접선수직방향응력,  $\sigma_y$ 의 분포를 나타냈다. Fig. 3.27의 (c)는 완전구속 시험편 해석 model의 용접선 두께방향응력,  $\sigma_z$ 의 분포를 나타냈다.

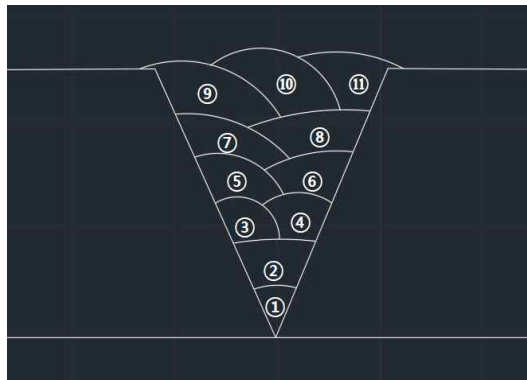


Fig. 3.25 Weld pass of constrained weld

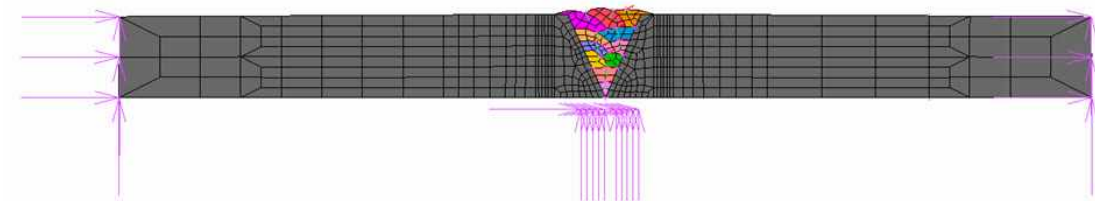
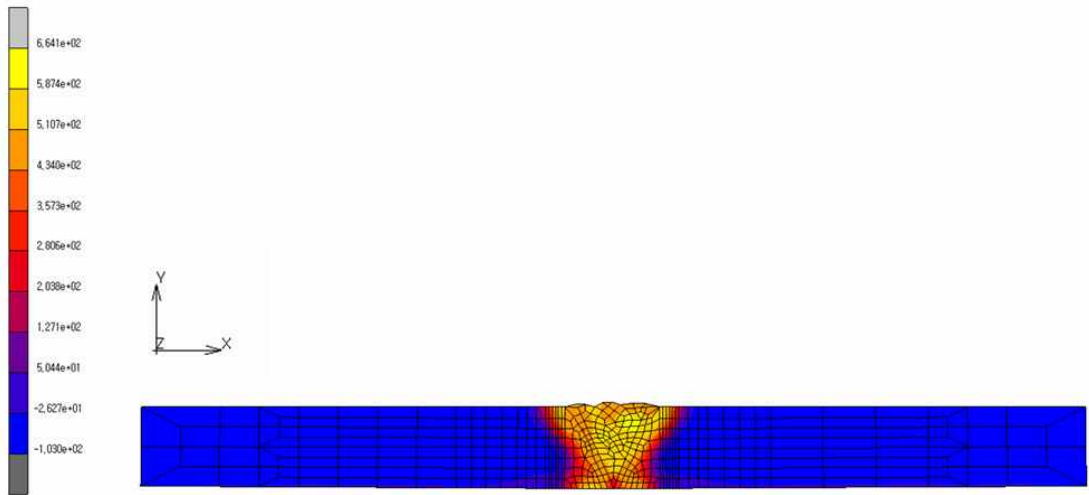
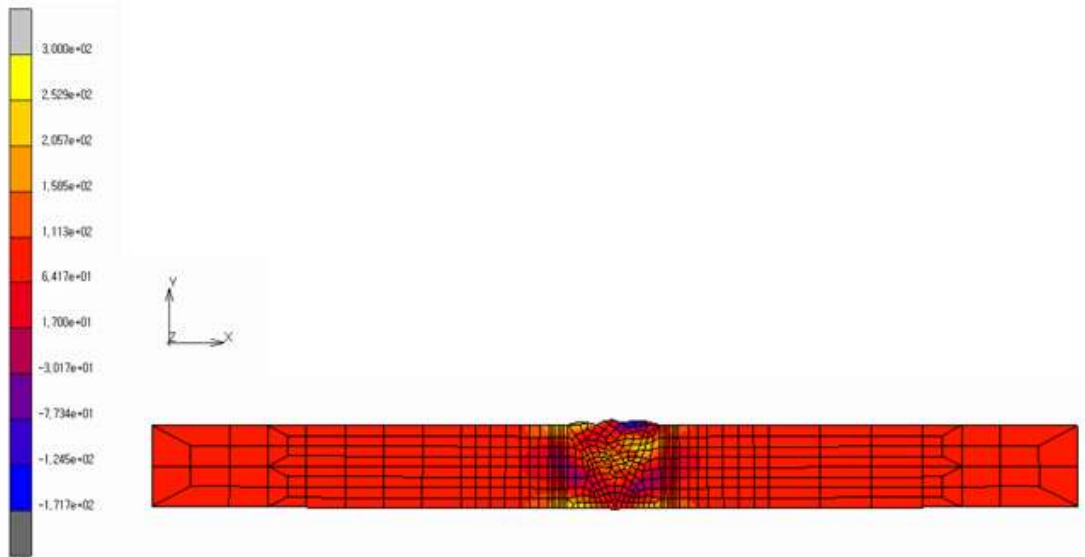


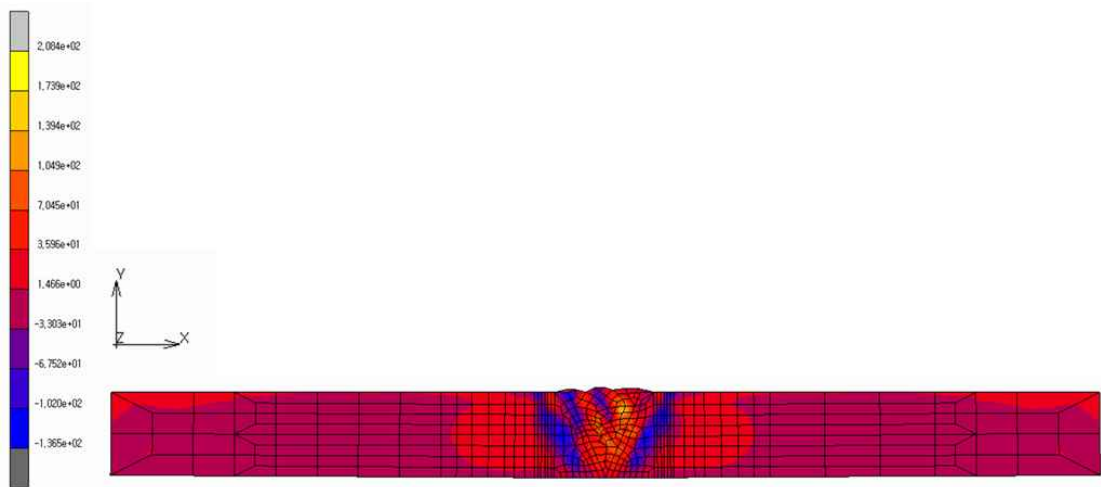
Fig. 3.26 Modeling and boundary conditions of constrained model



(a) longitudinal residual stress distribution



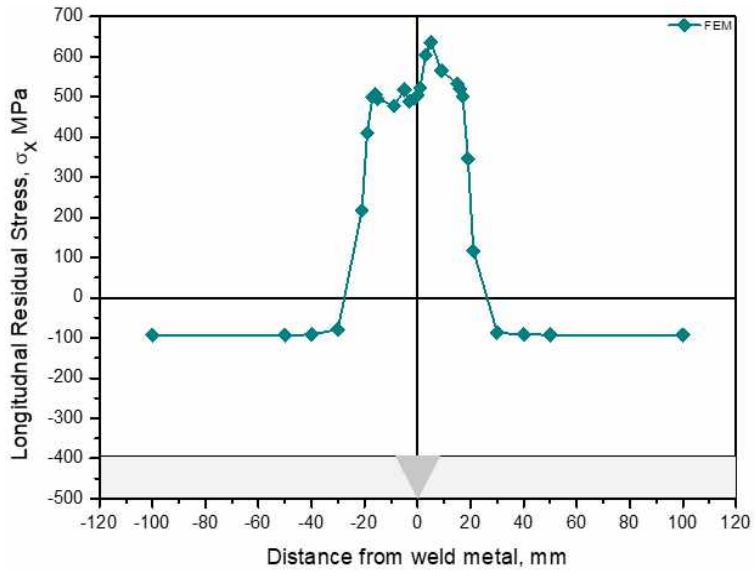
(b) transverse residual stress distribution



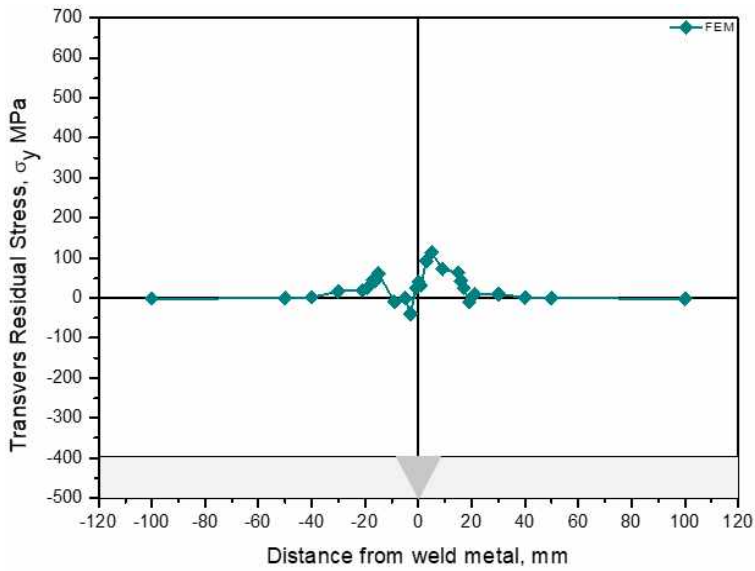
(c) normal residual stress distribution

Fig. 3.27 Constrained weld residual stress distribution of FEM

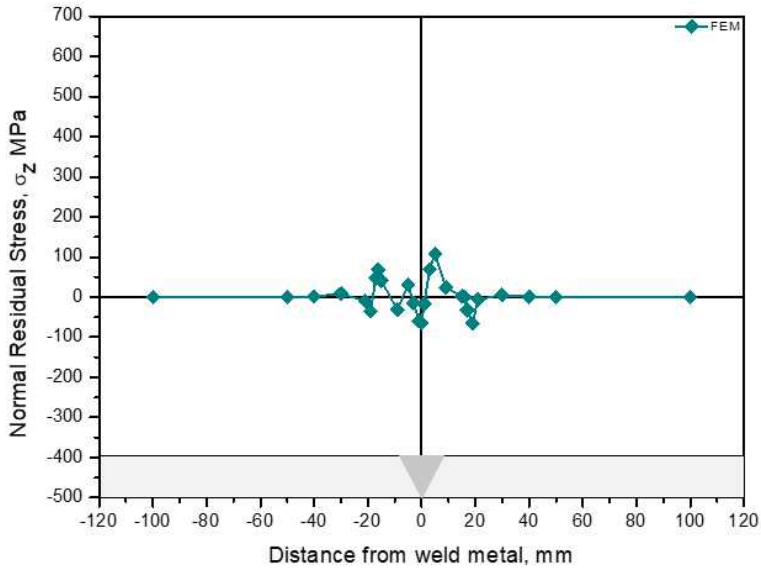
Figure. 3.28에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향으로 3mm 깊이에서의 용접잔류응력 분포를 나타냈다. 용접부 중심으로부터 좌측, 우측을 분석하였고, 용접부 폭방향으로 분석하였다. (a)는 표면으로부터 두께방향으로 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측의 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 500MPa의 인장잔류응력이 분포되었고, 좌측 FL+1mm에는 495MPa의 인장잔류응력이 분포되었으며, 모재쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하여 FL+100mm에서 -93MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 532MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -92MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 20MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 25MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 41MPa의 인장잔류응력이 존재하였고, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 -64MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서는 40MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 -1MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm



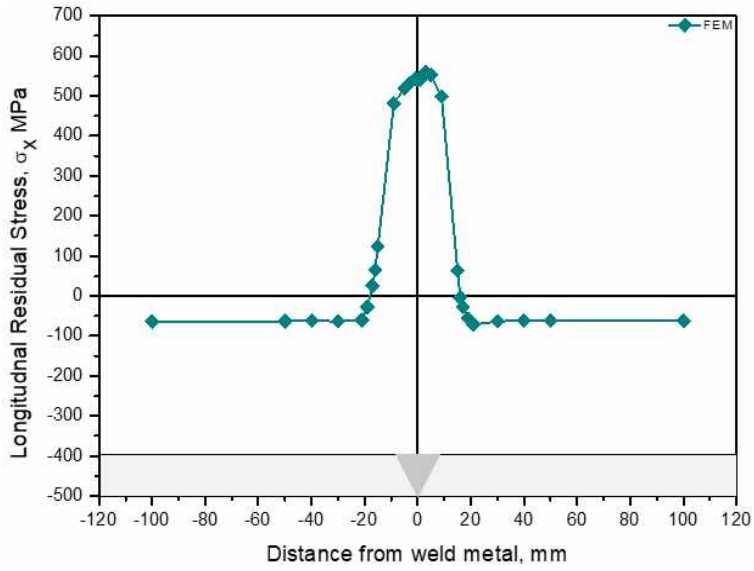
(b) transverse residual stress in surface + 3mm



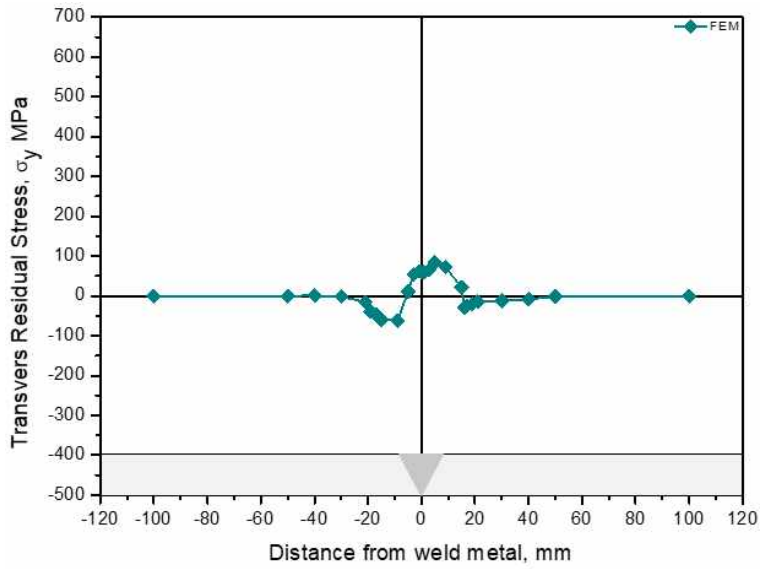
(c) normal residual stress in surface + 3mm

Fig. 3.28 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by FEM

Figure. 3.29에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 12.5mm 부분의 용접잔류응력이다. 유한요소해석 용접부의 중심으로 좌측, 우측 분석하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부 중앙에서 약 541MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 123MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 폭방향 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하며, FL+100mm에서 -63MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 63MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -62MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 60MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 -61MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 -30MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 61MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 -75MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 -68MPa 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.

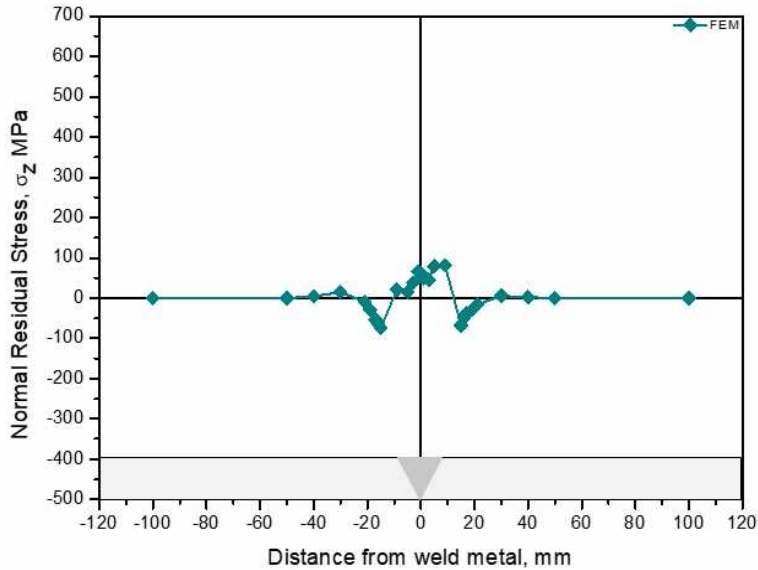


(a) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



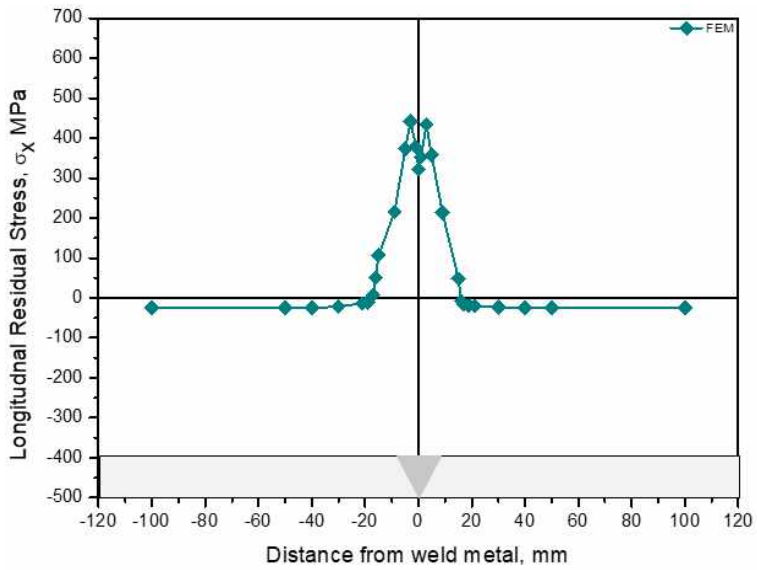


(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

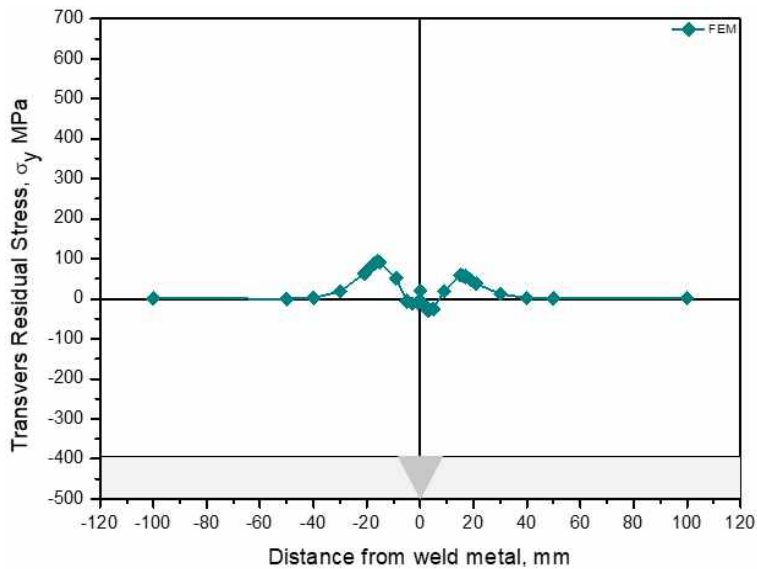
Fig. 3.29 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by FEM

Figure. 3.30에는 완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 22mm 부분의 용접잔류 응력이다. 유한요소해석의 용접부의 중심으로 좌측, 우측을 분석하였고, 용접부로부터 폭방향 쪽으로 분석을 하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 241MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에 160MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 폭방향 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하며, FL+100mm에서 -32MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 66MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -31MPa 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 19MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 90MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 59MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 19MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 2MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 1MPa 인장잔류응

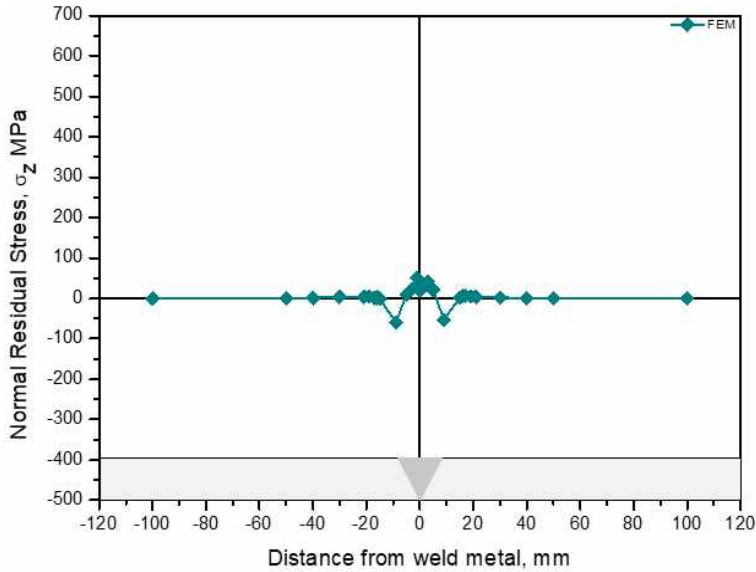
력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 22mm



(b) transverse residual stress in surface + 22mm



(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.30 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by FEM

## 제4절 완전비구속 맞대기 이음부의 용접잔류응력 분포 특성

### 1. 절단법에 의한 잔류응력 측정 결과

완전비구속 시험편의 절단법에 의한 용접부 용접잔류응력 측정을 위한 스트레인 게이지 부착위치를 Fig. 3.31에 나타냈다. Fig. 3.32 (a)는 스트레인게이지를 부착한 초기값을 나타냈다. Fig. 3.32 (b)는 용접선 수직 방향으로 절단하여 용접선방향의 용접 잔류응력을 해방시켰다. Fig. 3.32 (c)는 용접선방향과 두께방향으로 절단을 통한 용접선수직방향의 용접잔류응력과 두께방향의 용접잔류응력을 해방시켰다. 절단법 측정 과정 및 스트레인 게이지는 완전구속 시험편과 동일하게 진행하였다.

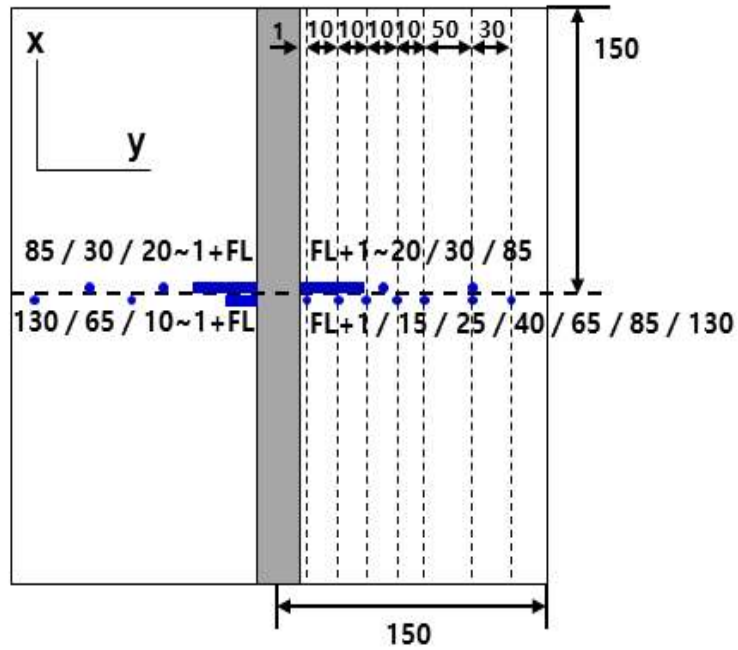
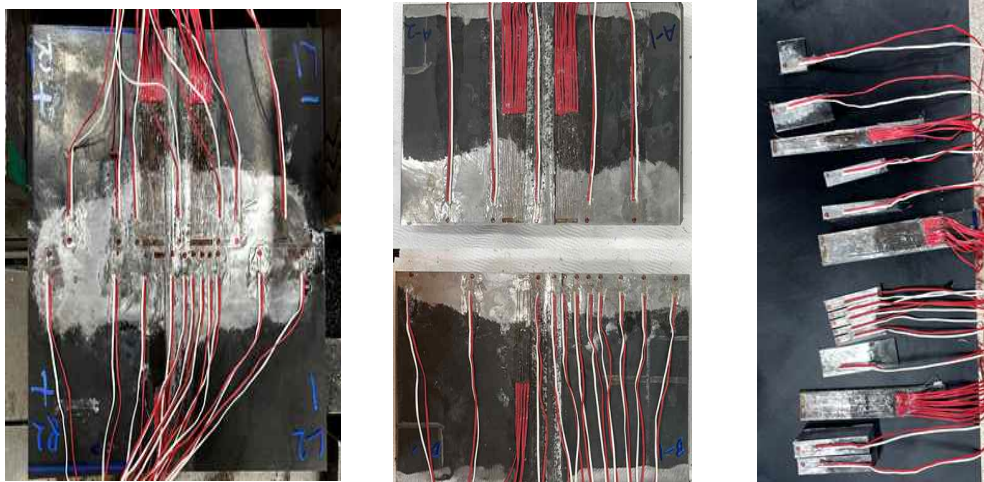


Fig. 3.31 Strain gauge attachment position of unconstrained weld



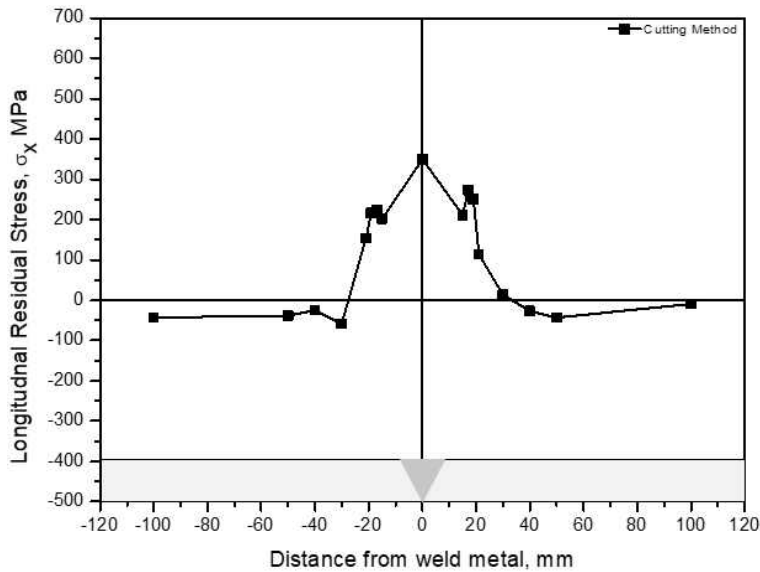
(a) initial

(b) after first cutting

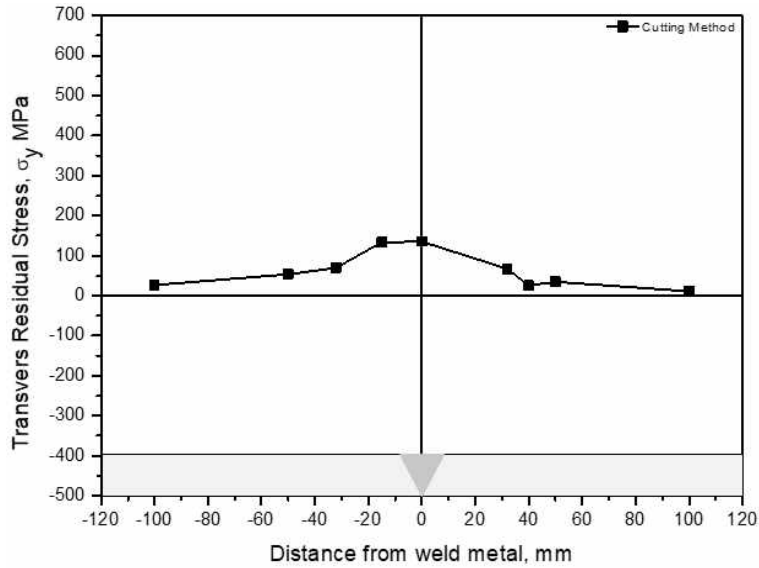
(c) after second cutting

Fig. 3.32 Cutting process for measurement of welding residual stress with unconstrained weld

해양구조용 E500 강재 완전비구속 용접시험편의 절단법에 의한 잔류응력 측정결과를 Fig. 3.33에 나타냈다. Fig. 3.33 (a)는 용접선수직방향 절단 후 용접부로부터 폭방향 쪽으로 떨어진 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 표면 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 375MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 202MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접선에서 멀어질수록 인장응력이 감소하여, FL+100mm에서 -9MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 210MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -43MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. Fig. 3.33 (b)는 용접선방향, 용접선두께방향 절단 후 용접부로부터 폭방향 쪽으로 떨어진 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 표면 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부에서 170MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 114MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+130mm에는 22MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+50mm에는 128MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+130mm에 -77MPa의 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress



(b) transverse residual stress

Fig. 3.33 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  by cutting method

## 2. 굴곡측정법에 의한 잔류응력 측정 결과

완전비구속 시험편의 굴곡측정법은 완전구속 시험편의 측정과 동일한 과정으로 진행하였다. 완전비구속 시험편의 굴곡측정은 Fig. 3.34의 절단면을 양 쪽 모두 측정하고, 대칭되는 포인트에 대하여 평균을 구하고 굴곡에 대한 데이터를 정리하였다. Fig. 3.35에는 완전비구속 시험편의 굴곡측정과정을 나타냈다. Fig. 3.36에는 굴곡측정법에 의한 용접선방향 용접잔류응력 분포를 나타냈다. 탄성계수는 206 GPa, 푸아송비는 0.3을 전체 유한요소에 적용하였다. Element type은 C3D20R으로 절점이 20개인 3차원 연속체 2차 육면체 요소이며 적분점이 9개인 저감적분요소를 적용하였고, Abaqus 해석프로그램을 통한 잔류응력 계산을 하였다. 용접부에 약 480MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, 폭방향 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하여, 약 -270MPa 압축잔류응력으로 분포하였다. Fig. 3.36에서 볼 수 있듯이 용접부, 열영향부에서 약 80mm까지 인장잔류응력이 분포하였다.

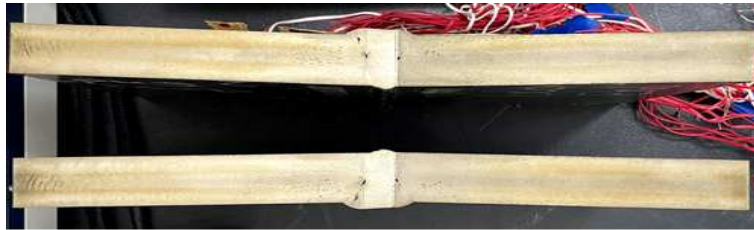


Fig. 3.34 WEDM cutting process of constrained weld specimen

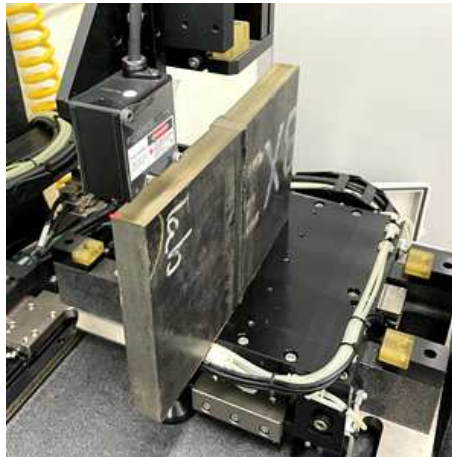


Fig. 3.35 Constrained weld specimen by contour method process

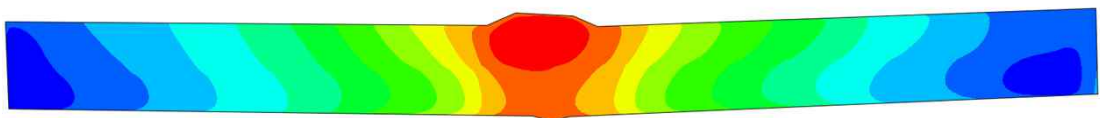
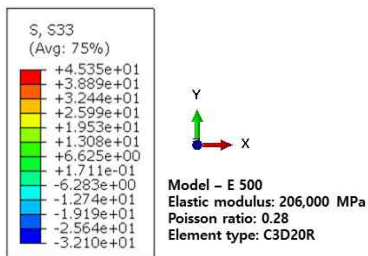
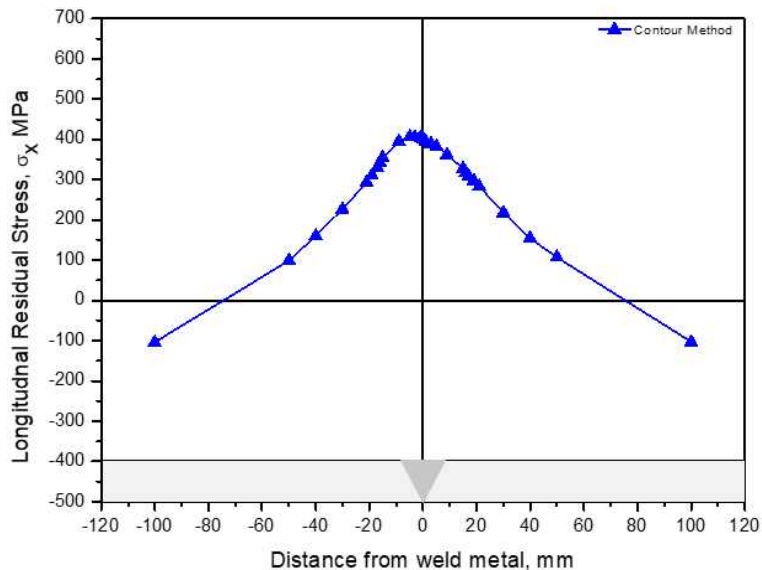


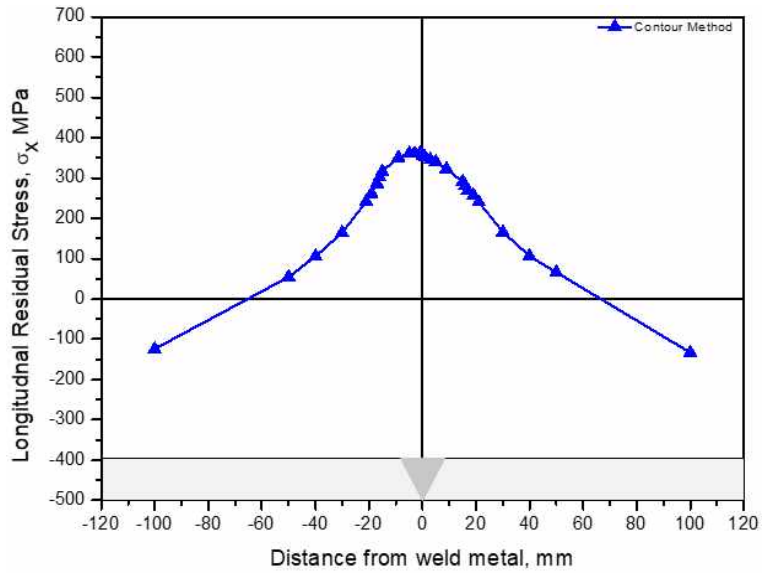
Fig. 3.36 Constrained weld residual stress distribution using contour method

Figure. 3.37의 (a)는 표면으로부터 두께방향으로 3mm 위치의 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 401MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 350MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -103MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 320MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -100MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)는 표면으로부터 두께방향으로 12.5mm 위치의 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 357MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 310MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -120MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 290MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -130MPa 압축잔류응력이 분포하였다. (c)는 표면으로부터 두께방향으로 22mm 위치의 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 좌측 FL+1mm에서 283MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -135MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 250MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -145Ma의 압축잔류응력이 분포하였다. 좌, 우의 용접순서의 영향에 따른 최대응력에 차이가 있었다.

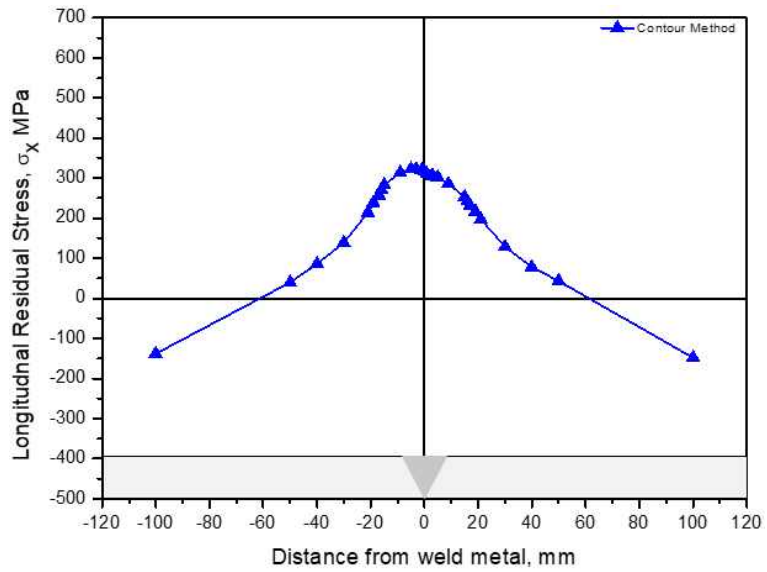


(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm





(b) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



(c) longitudinal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.37 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$  by contour method

### 3. 중성자회절법에 의한 잔류응력 측정 결과

완전비구속 시험편의 중성자회절법 측정은 완전구속 시험편의 측정과 동일한 조건과 과정으로 진행하였다. 완전비구속 시험편은 Fig. 3.38에 나타내었으며, 완전비구속 시험편에서 채취한 초기응력상태를 파악하기 위한 시험편( $d_0$ )을 Fig. 3.39에 나타냈다.  $d_0$  시험편은 용접선방향, 용접선수직방향에 대해 4mm 간격으로 방전가공을 통하여 절단 하여 열에 의한 응력변화를 최소화하였으며 절단하였다. 표면에서 두께방향으로 16mm까지 방전가공하였으며, root 위 4mm까지 방전가공을 수행하여 잔류응력을 제거하였다. Fig. 3.40에는 완전비구속 시험편의 중성자회절법 측정 포인트를 나타냈다. 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 위치에서, 12.5mm 들어간 지점, 22mm 들어간 지점을 측정하였으며,  $d$  시험편과  $d_0$  시험편 모두 같은 위치에서 측정하였다. Table. 9에는 완전비구속 시험편( $d$ )과 응력해방시험편( $d_0$ )에 사용한 Incident slit과 detector slit의 크기를 나타냈다. slit의 크기로 인해 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 지점, 22mm 들어간 지점을 측정하였다. 중성자회절법 완전비구속 시험편 측정 사진을 Fig. 3.41에 나타냈고, 완전비구속 시험편의 응력완화시험편 측정 사진을 Fig. 3.42에 나타냈다.



Fig. 3.38 Neutron diffraction measurement of unconstrained weld specimen



Fig. 3.39 Neutron diffraction measurement of unconstrained weld free specimen

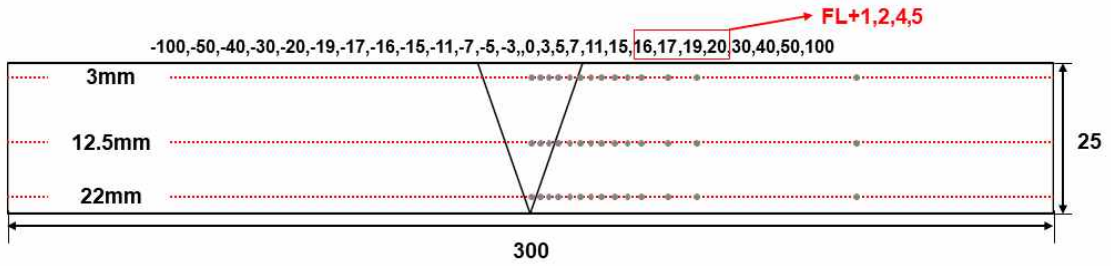


Fig. 3.40 Neutron diffraction measurement points for unconstrained weld specimen



Fig. 3.41 Unconstrained weld specimen by neutron diffraction process

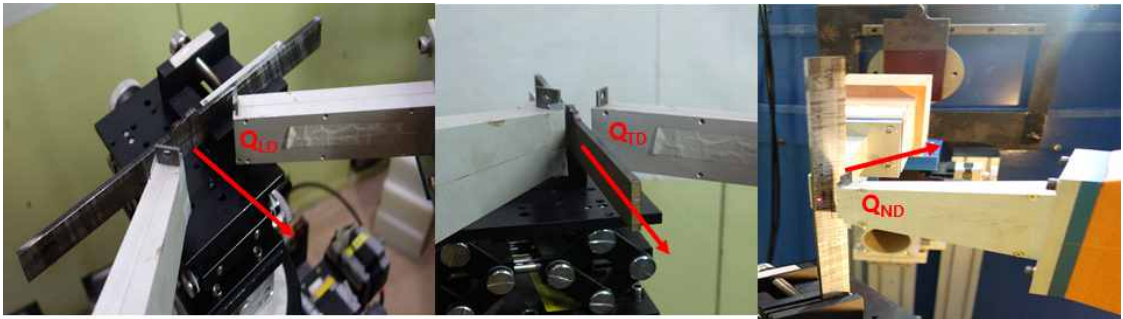
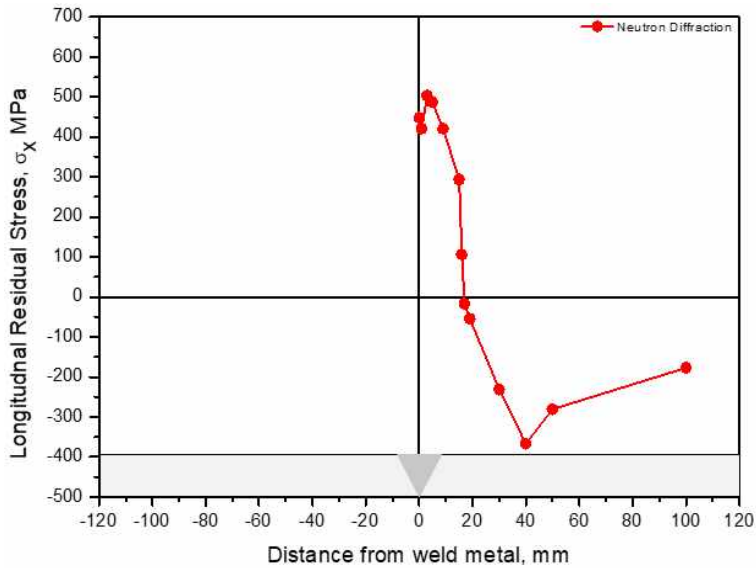


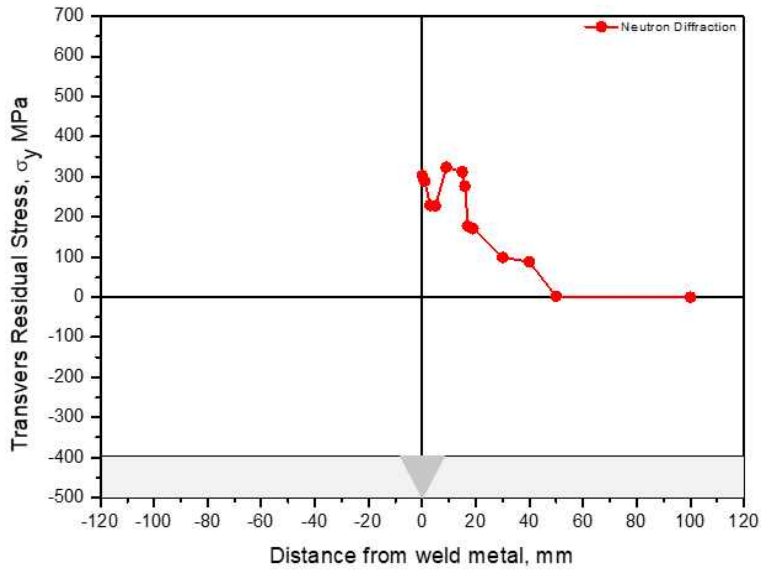
Fig. 3.42 Unconstrained weld stress free specimen contour method process

Figure. 3.43에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 3mm 부분의 용접잔류 응력이다. 중성자회절법측정은 용접부의 중심으로 우측을 측정하였고, 용접부로부터 폭방향 쪽으로 측정을 하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 447MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 293MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -177MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래

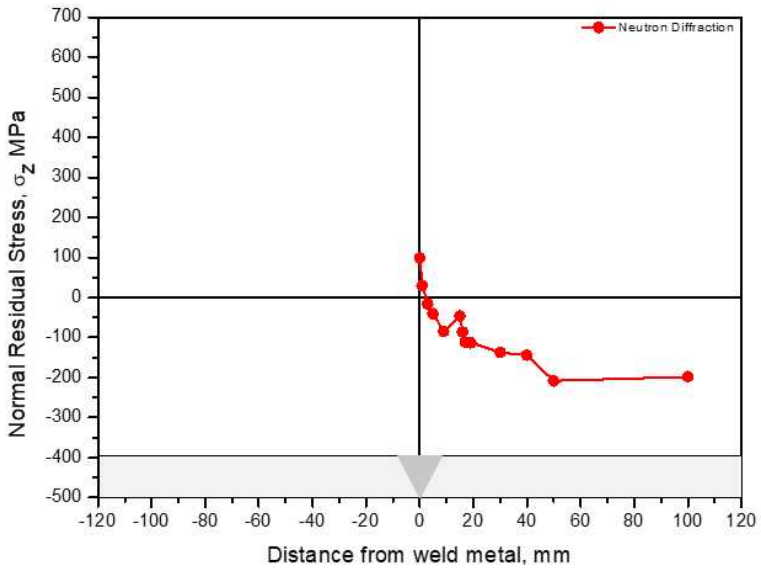
프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 우측 용접 잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 302MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 312MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 99MPa 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 -46MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -198MPa의 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm



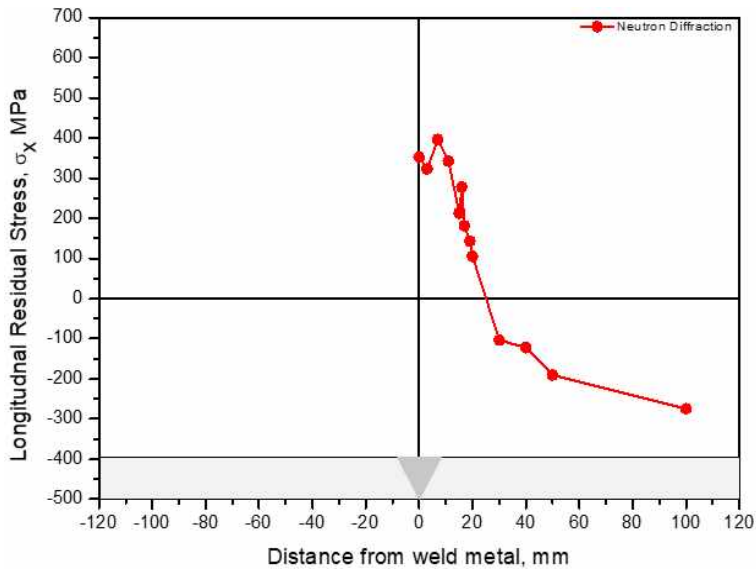
(b) transverse residual stress in surface + 3mm



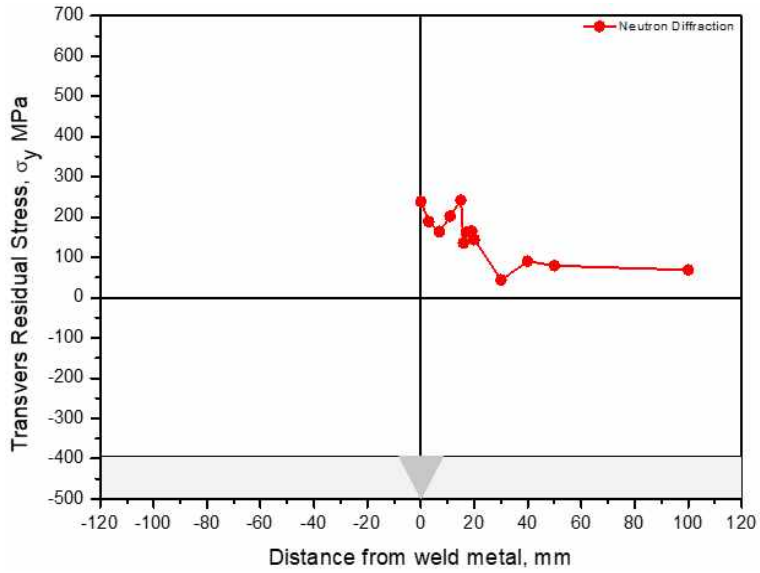
(c) normal residual stress in surface + 3mm

Fig. 3.43 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by neutron diffraction

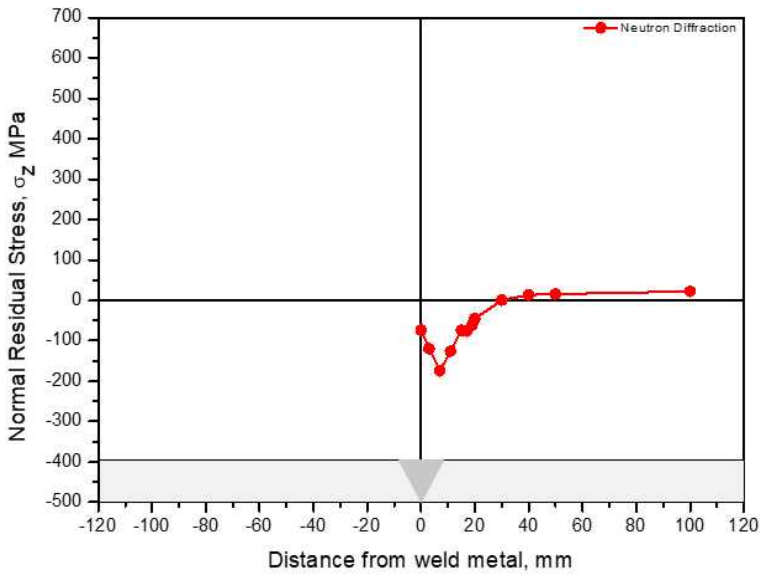
Figure. 3.44에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 12.5mm 부분의 용접 잔류응력이다. 측정과정은 표면으로부터 두께방향으로 3mm의 과정과 동일하다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부 중앙에서 351MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 용접부 중앙을 중심으로 우측 FL+1mm에 277MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 -275MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부 중앙에서 238MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 238MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 68MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부 중앙에서 -74MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm -75MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 22MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



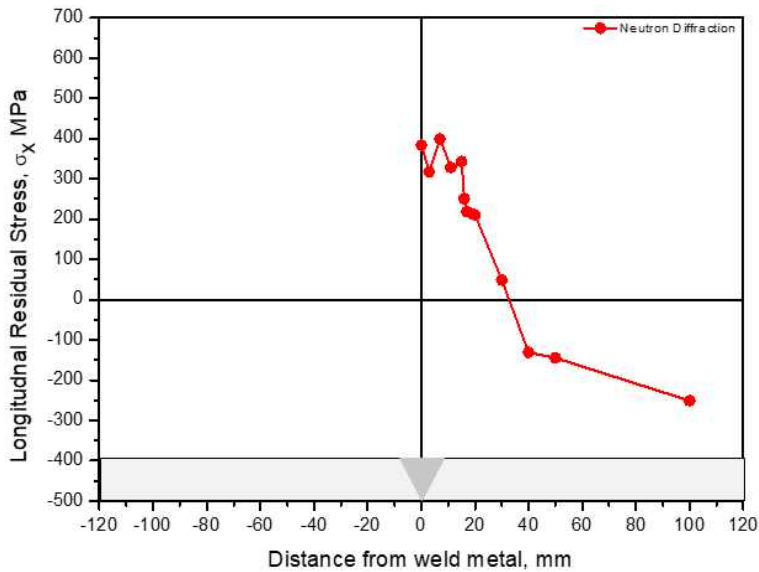
(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

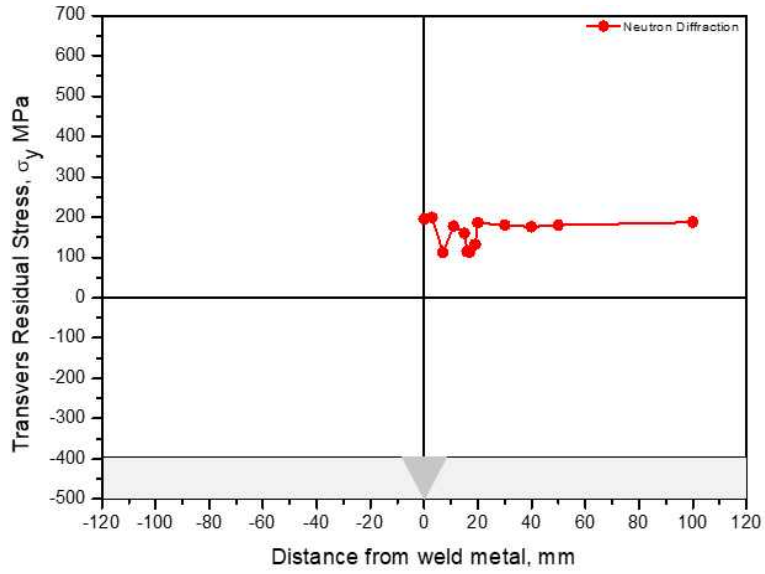
Fig. 3.44 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by neutron diffraction

Figure. 3.45에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 22mm 부분의 용접잔류응력이다. 측정과정은 표면으로부터 두께방향으로 3mm의 과정과 동일하다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 우측 용접 잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 383MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 250MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -251MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직 방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부에서 195MPa 인장 잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에는 114MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 187MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 우측 용접잔류응력 거동을 확인 하였다. 용접부에서는 -5MPa 압축잔류응력이 분포하였다. 용접부 우측 FL+1mm에서는 39MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 6MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.

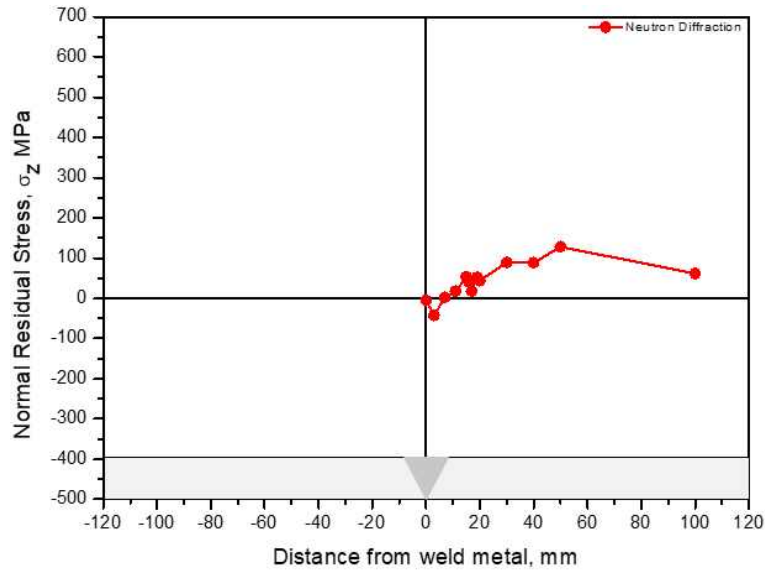


(a) longitudinal residual stress in surface + 22mm





(b) transverse residual stress in surface + 22mm



(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.45 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by neutron diffraction

#### 4. 유한요소법에 의한 용접잔류응력 해석 결과

완전비구속 시험편의 용접부 잔류응력 응력분포 특성 파악을 위한 열탄소성 해석은 Marc 2017 상용프로그램을 사용하였다. 2차원 해석을 진행하였으며, Fig. 3.46에 해석에 사용한 model의 용접패스를 나타냈다. 해석모델은 실험적 방법으로 검토한 시험편의 macro 단면을 분석하여 용접비드 형상을 그대로 modeling 하였다. Fig. 3.47에는 해석모델과 경계조건을 나타냈다. 완전비구속 시험편의 단순 지지조건을 통하여 최소한의 경계조건을 설정하였다. Fig. 3.48 (a)는 완전비구속 시험편 해석 model의 용접선방향응력,  $\sigma_x$ 의 분포도이다. 용접부 근방에서 최대인장잔류응력이 형성되었으며, 용접부에서 폭방향으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하여 압축잔류응력이 분포하였다. Fig. 3.48의 (b)는 완전비구속 시험편 해석 model의 용접선수직방향응력,  $\sigma_y$ 의 분포도이다. 최소한의 경계조건으로 변형이 발생하여 전체적인 잔류응력분포 양상은 완전구속 시험편과 거의 동일 하였으며, 정량적인 값은 비교적 낮은 잔류응력이 분포하였다. Fig. 3.48의 (c)는 완전비구속 시험편의 용접선두께방향응력,  $\sigma_z$ 의 분포도이다.

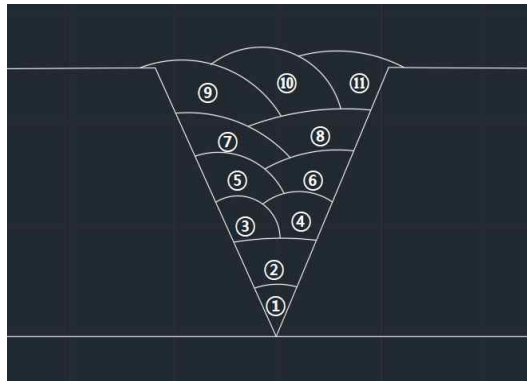


Fig. 3.46 Weld pass of unconstrained weld

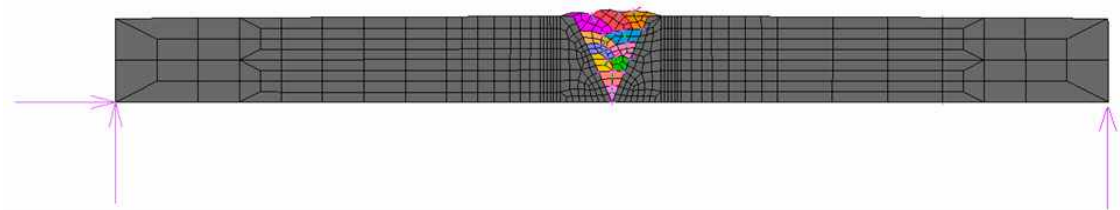
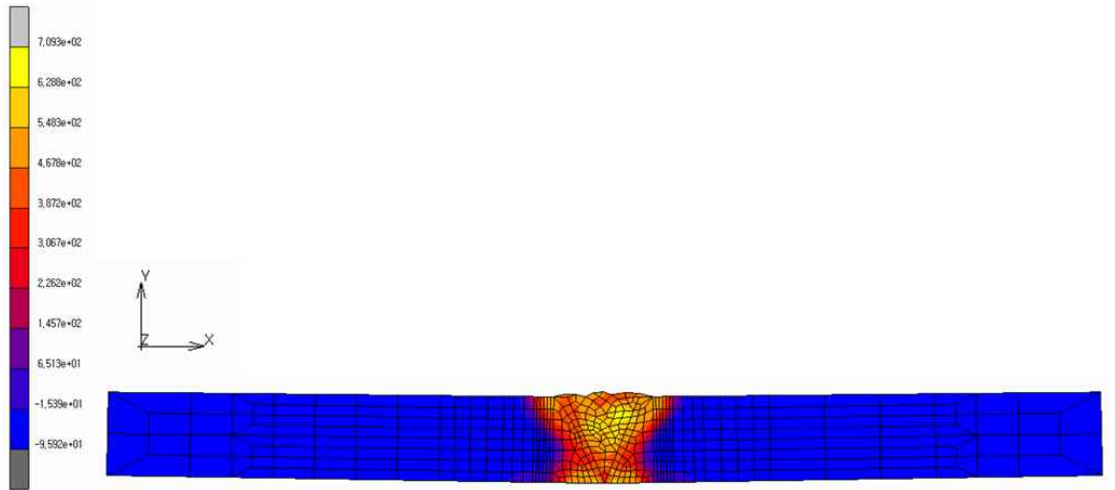
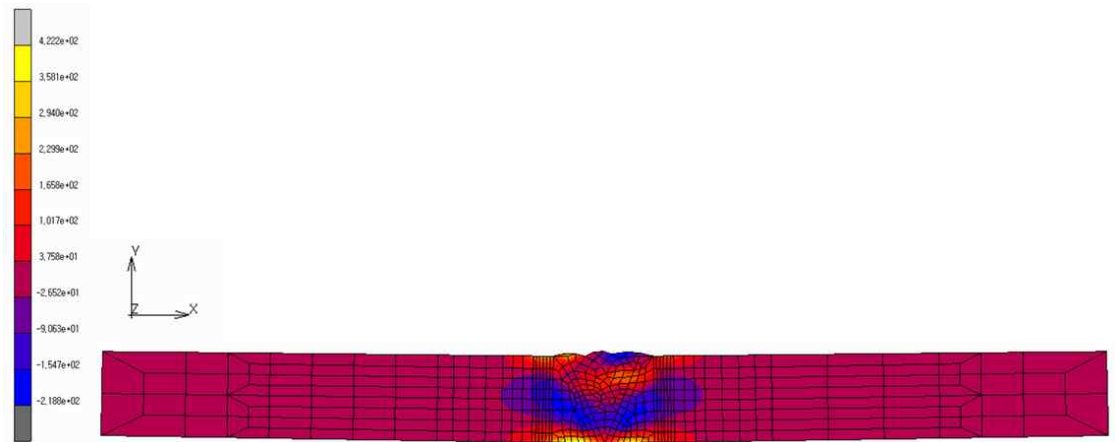


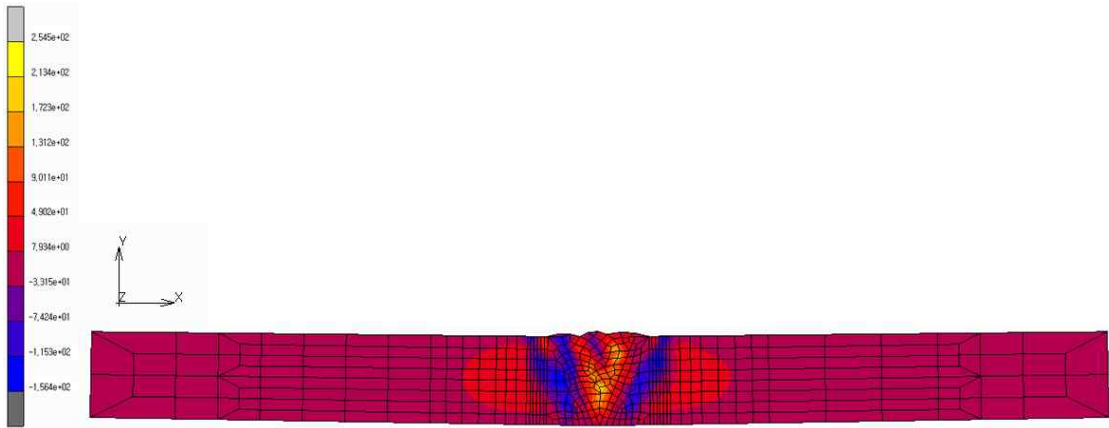
Fig. 3.47 Modeling and boundary conditions of unconstrained weld



(a) longitudinal residual stress distribution



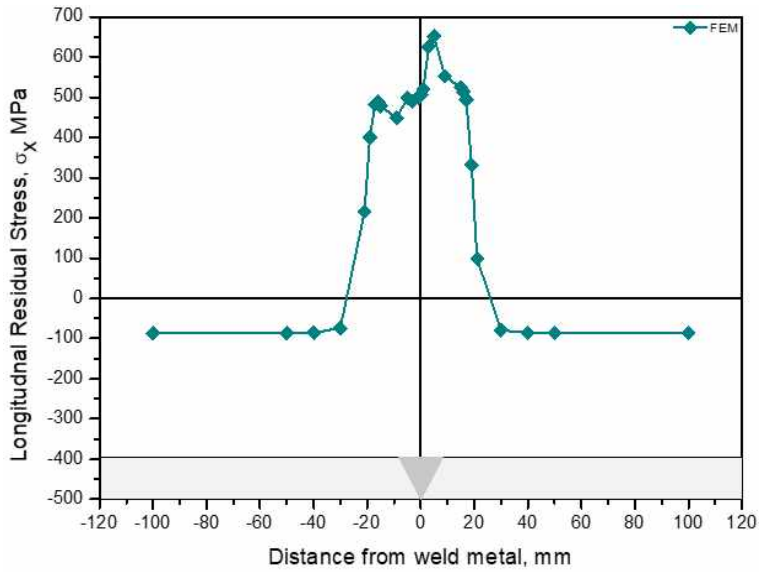
(b) transverse residual stress distribution



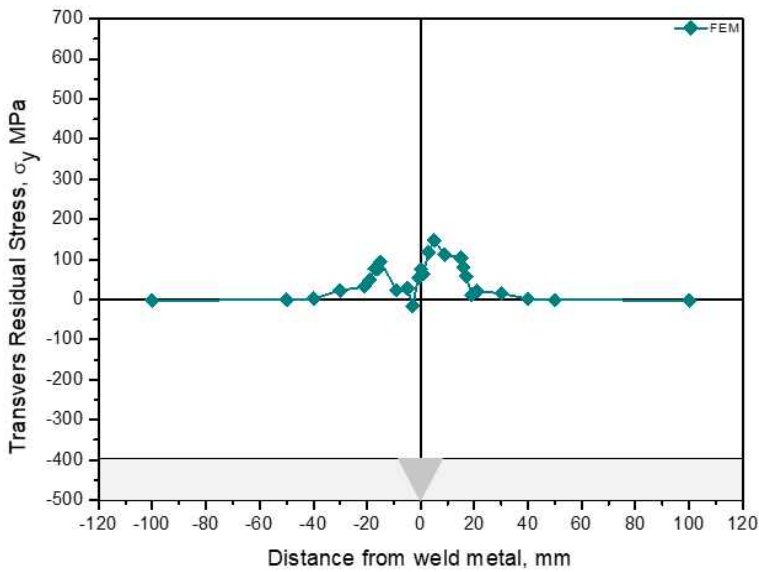
(c) normal residual stress distribution

Fig. 3.48 Unconstrained weld residual stress distribution of FEM

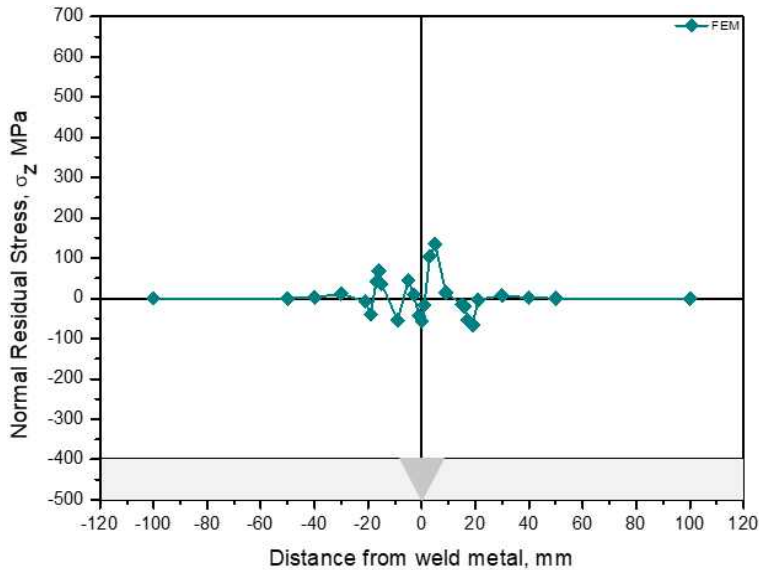
Figure. 3.49에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 3mm 부분의 용접잔류응력을 나타냈다. 용접부를 중심으로 좌측, 우측을 분석하였고, 용접부로부터 폭방향 쪽으로 분석 하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 505MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 477MPa의 인장잔류응력이 분포 하였으며, 폭방향 쪽으로 갈수록 인장잔류응력이 감소하며, FL+100mm -87MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 523MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -1MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께 방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 76MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm 에서 94MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -1MPa 압축잔류응력이 분포 하였다. 우측 FL+1mm에서 103MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -1MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용 접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 -56MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서는 35MPa의 인장잔류 응력이 분포하였으며, FL+100mm에 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에 서 -14MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 1MPa의 인장잔류응력이 분포 하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm



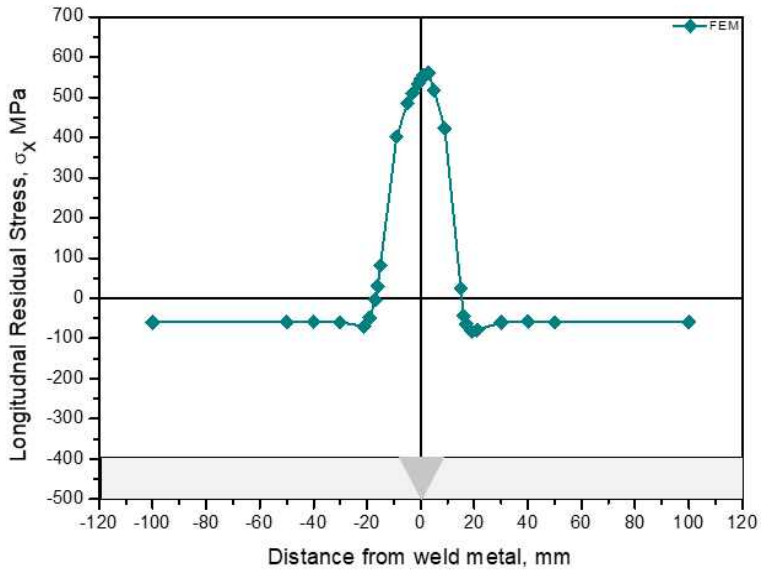
(b) transverse residual stress in surface + 3mm



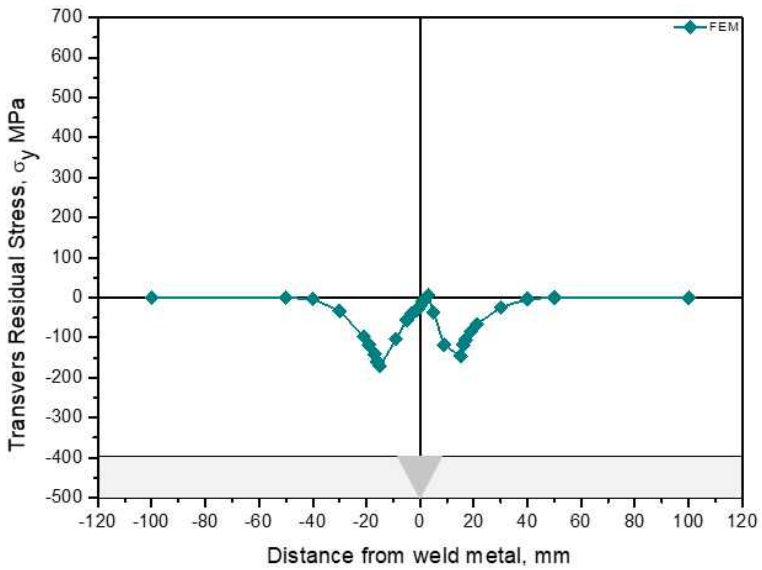
(c) normal residual stress in surface + 3mm

Fig. 3.49 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by FEM

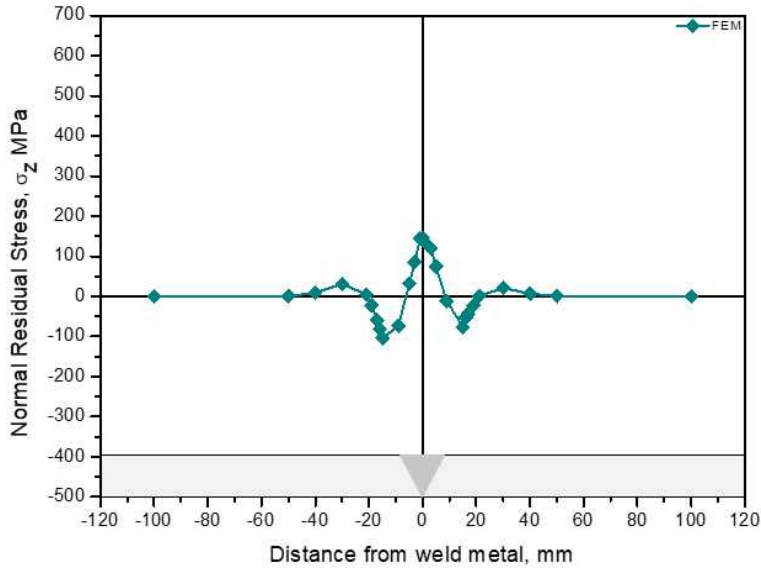
Figure. 3.50 에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 12.5mm 부분의 용접 잔류응력분포를 나타냈다. 유한요소해석 용접부의 중심으로 좌측, 우측을 분석하였고, 용접부로부터 폭방향 쪽으로 분석하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접부의 중앙에서 약 544MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 82MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -60MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 24MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -59MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 -18MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 -171MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 -145MPa 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 145MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서는 -104MPa 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 -75MPa의 압축잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



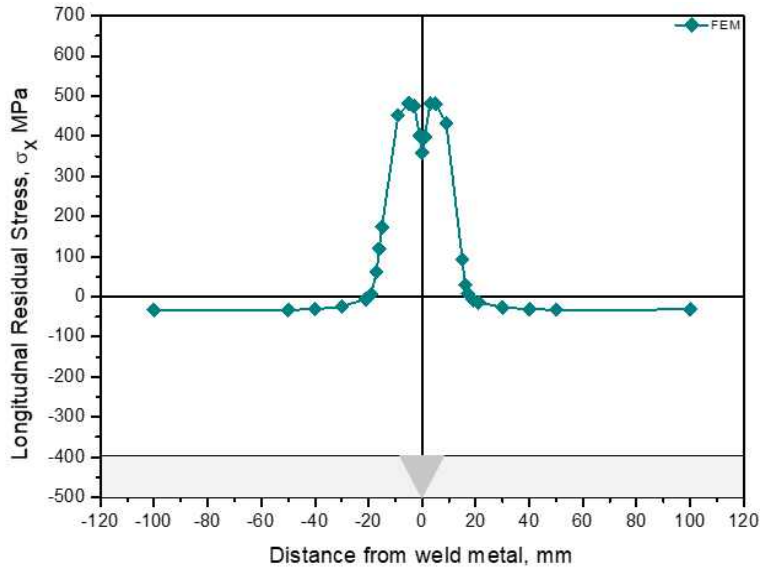
(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

Fig. 3.50 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by FEM

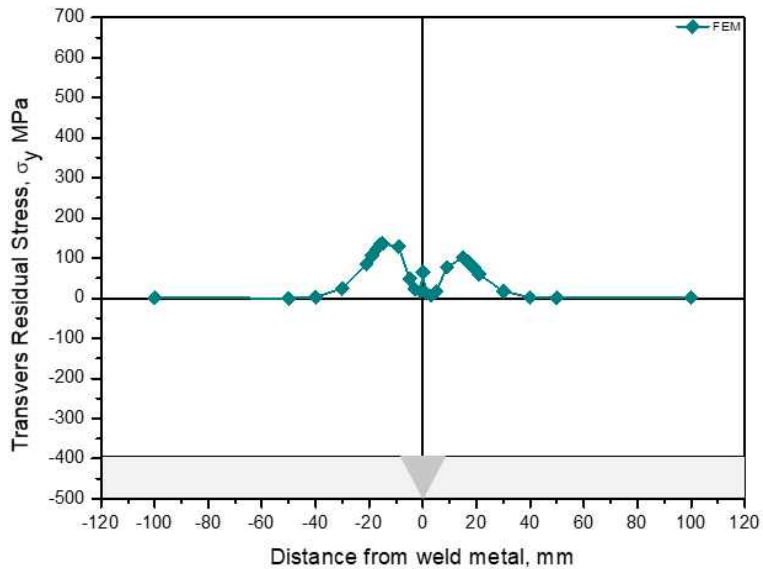
Figure. 3.51에는 완전비구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 22mm 부분의 용접잔류응력이다. 유한요소해석 용접부의 중심으로 좌측, 우측을 분포하였으며, 용접부로부터 폭방향 쪽으로 분석을 하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 359MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에는 173MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 -32MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서는 92MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 약 64MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서 135MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 101MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에서 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접부의 중앙에서 17MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 좌측 FL+1mm에서는 1MPa 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에 1MPa의 인장잔류응력이 분포하였다. 우측 FL+1mm에서 3MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm에는 -1MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. Root에서는 용접



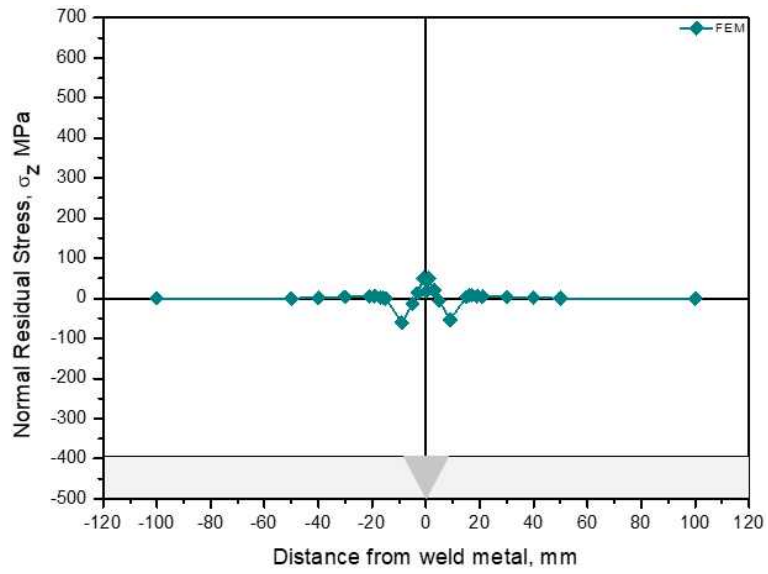
잔류응력이 거의 분포하지 않음을 확인하였다. 멀티패스 용접의 경우 대부분의 잔류응력이 최종패스에서 결정되는 특성과, 본 시험편의 경우는 완전비구속 상태이므로 초층 용접시 용접잔류응력이 거의 발생하지 않았을 것으로 유추 된다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 22mm



(b) transverse residual stress in surface + 22mm



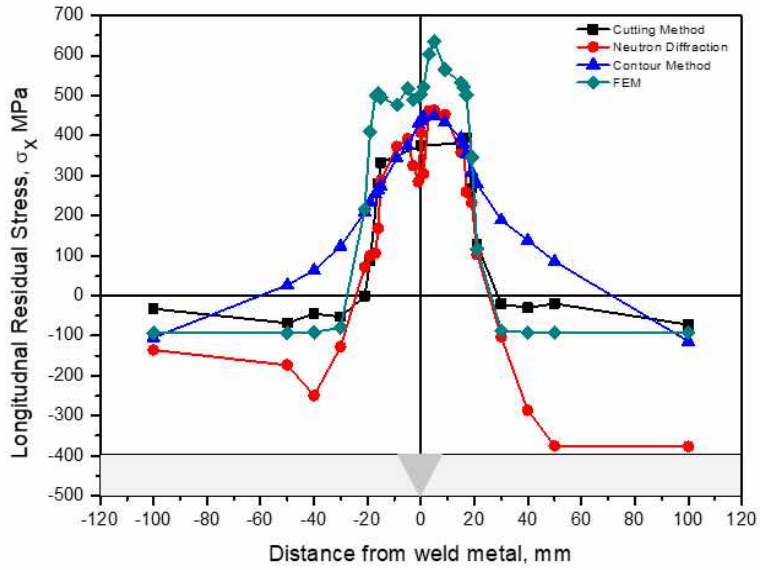
(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.51 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by FEM

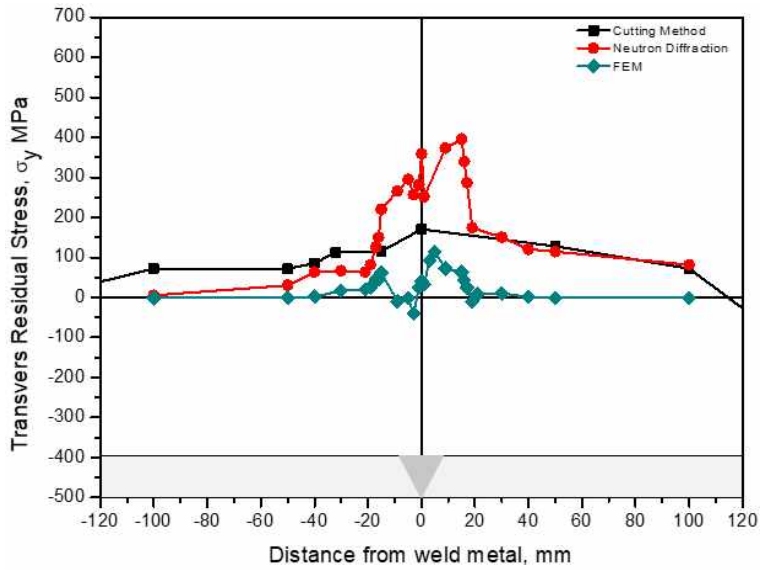
## 제5절 고찰

### 1. 완전구속과 완전비구속 상태의 잔류응력 분포 특성

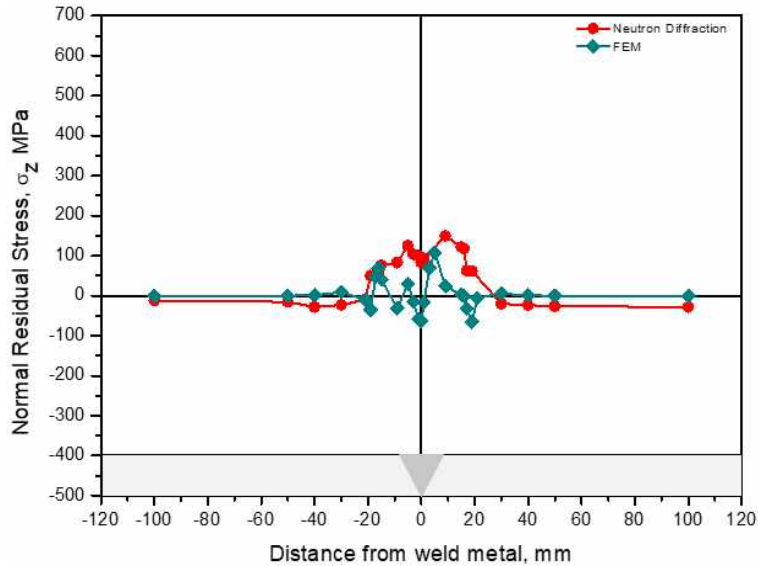
완전구속 시험편의 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 부분의 용접잔류응력분포를 Fig. 3.52에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력 특성을 절단법, 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 활용하여 검토한 결과를 비교하여 나타냈다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접선방향 잔류응력의 특성은 절단법과 중성자회절법에서 end tap 및 steel backing을 제거하는 과정에서 용접잔류응력이 완화되어 용접금속부에서 열영향부쪽 25mm 근방까지 인장잔류응력이 분포된 것으로 판단된다. 굴곡측정법은 steel backing을 제거하지 않고 분석을 실시 하였으므로 steel backing의 구속된 용접부에서 용접금속부에서 열영향부쪽 70mm 근방까지 인장잔류응력 분포한 것으로 판단된다. 유한요소법에서는 용접금속부에서 열영향부쪽 30mm 근방까지 인장잔류응력이 분포한 것으로 판단된다. 절단법, 중성자회절법, 굴곡측정법, 유한요소법에 의한 잔류응력 측정 결과 측정위치에 따른 차이가 있으나, 유사한 잔류응력 특성을 나타냈다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 절단법에 의한 용접선수직방향의 잔류응력 거동특성은 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 170MPa 정도 분포하였으며, 좌측 FL+100mm에서 20MPa의 인장잔류응력과 우측 FL+100mm에서 -77MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 좌측과 우측 FL+100mm까지 낮은 인장잔류응력이 분포하였으며, 절단법의 잔류응력 특성과 유사한 분포를 나타냈다. 유한요소법의 용접선수직방향 잔류응력의 분포는 정확한 비교 분석을 위한 용접 후 구속의 경계조건을 제거하는 해석이 수행되어야 한다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 용접선두께방향의 잔류응력은 중성자회절법과 유한요소법을 비교하였다. 중성자회절법과 유한요소해석의 용접선두께방향 잔류응력은 유사한 거동을 보였으며, 용접선방향, 수직방향에 비하여 낮은 잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress of in surface + 3mm



(b) transverse residual stress in surface + 3mm

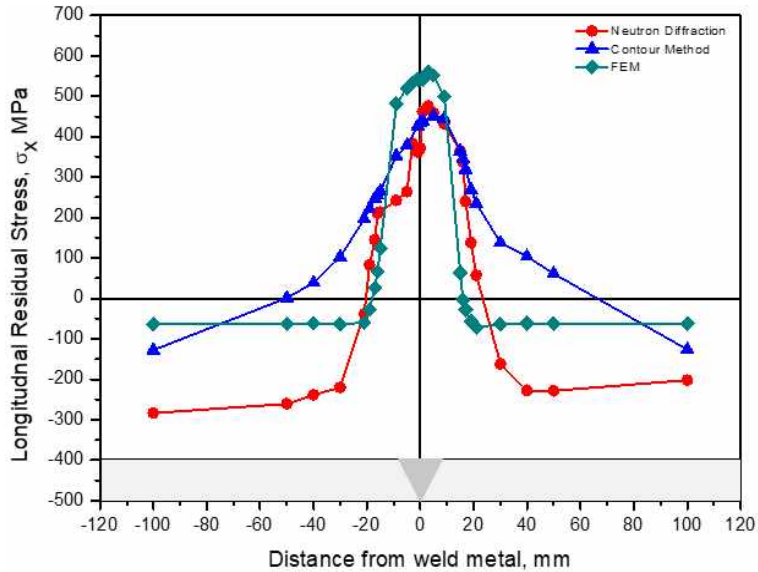


(c) normal residual stress in surface + 3mm

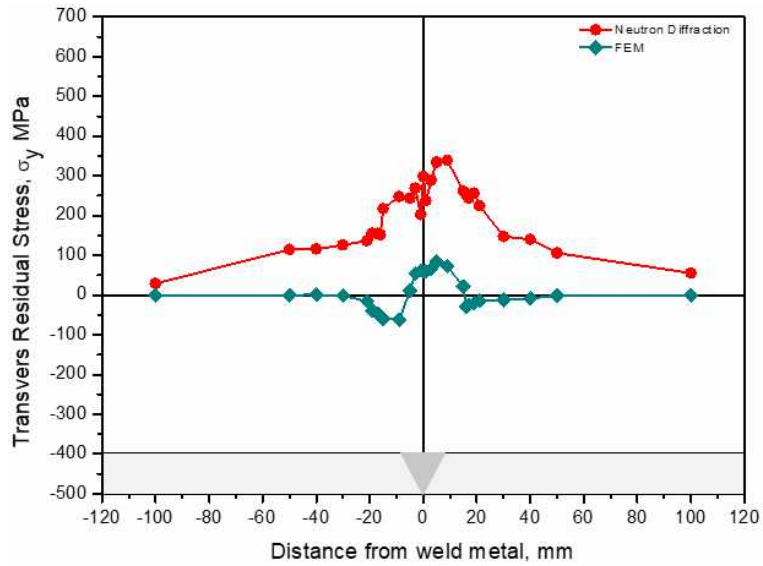
Fig. 3.52 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by cutting method, contour method, neutron diffraction, FEM

완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 12.5mm 부분의 용접잔류응력 분포를 Fig. 3.53에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력분포 특성을 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 통하여 비교, 검토하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법에 의한 잔류응력 측정결과 용접부에서 약 380MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+25mm 까지 인장잔류응력이 분포하였다. FL+100mm 에서는 인장잔류응력에 상응하는 압축잔류응력이 약 -250MPa 분포하였다. 유한요소법에 의한 잔류응력 측정결과 용접부에서 약 540MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm 에서는 -63MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 굴곡측정법에 의한 잔류응력 측정결과 용접부에서 약 435MPa의 인장잔류응력이 분포하였으며, FL+100mm 에서는 -110MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 최종 용접의 영향으로 우측에 최대 인장잔류응력이 분포하였다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법의 용접선수직방향 잔류응력 분포는 용접부에서 최대인장잔류응력이 분포하고, 폭방향 쪽으로 갈수록 미미한 인장잔류응력이 분포하였다. 유한요소법 잔류응력 측정결과 경계조건으로 인하여 용접금속부에서 열영향부쪽 40mm 근방까지 압축잔류응력이 분포된 것으로 판단된다. 용접선수직방향 잔류응력은 최종 용접의 영향으로 우측에 최대 인장잔류응력이 분포하였으며, 용

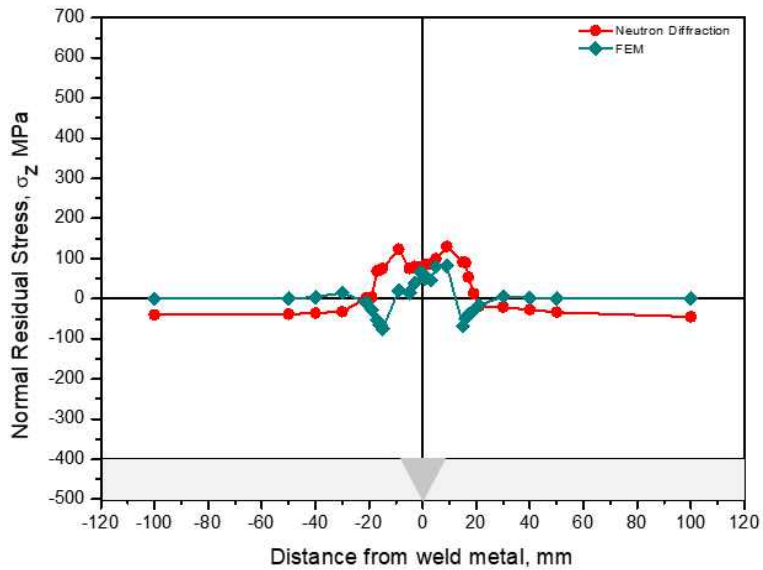
접선방향 잔류응력보다 약 200MPa 정도 낮은 인장잔류응력이 분포하였다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향으로 12.5mm 위치의 용접두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접선두께방향 잔류응력분포에 대한 중성자회절법과 유한요소법 결과값은 비교적 낮은 약 100MPa 이하의 잔류응력이 분포하였다. 표면으로부터 두께방향 3mm 부분의 잔류응력의 특성과 유사한 분포를 나타내고 있다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 12.5mm



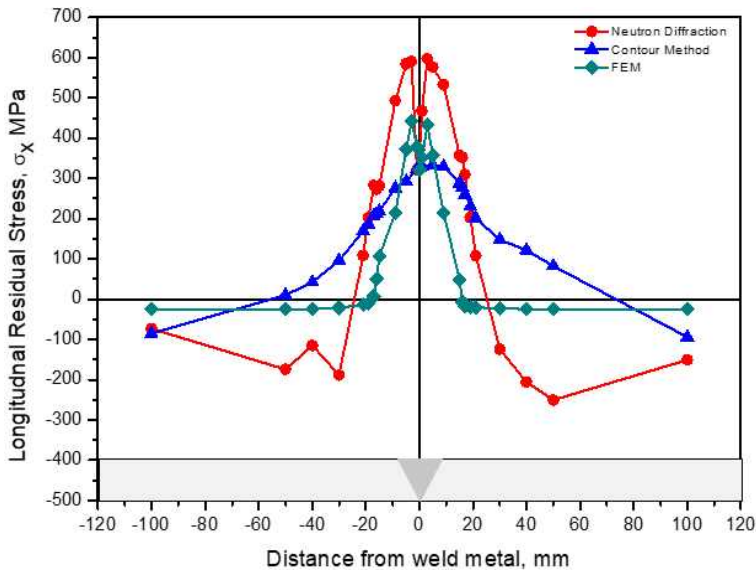
(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

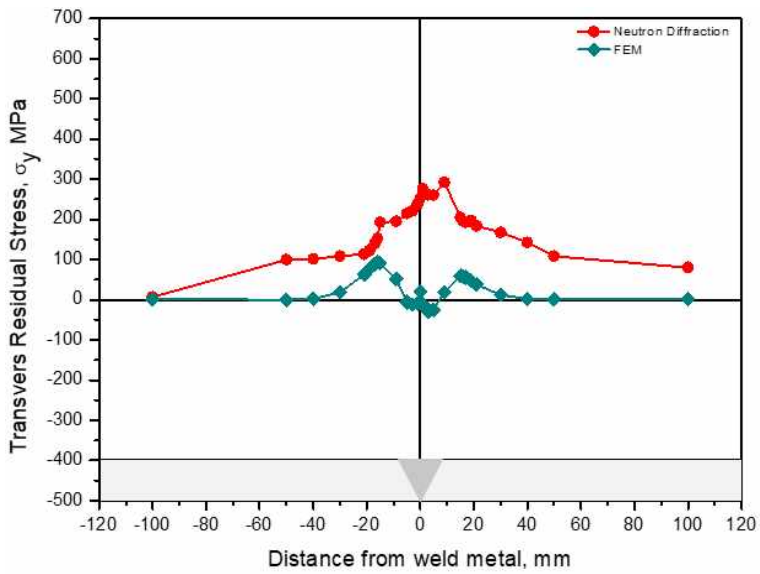
Fig. 3.53 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by contour method, neutron diffraction, FEM

완전구속 시험편의 표면으로부터 두께방향 22mm 부분의 용접잔류응력의 결과값을 Fig. 3.54에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력 특성을 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 통하여 비교, 검토하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법은 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 590MPa 정도 분포되었다. Surface + 3mm, 12.5mm에 비해 높은 잔류응력이 분포하였다. 유한요소법은 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 470MPa 정도 분포하였으며, Surface + 3mm, 12.5mm와 유사한 분포를 나타냈다. 굴곡측정법은 레이저 측정과정에서 steel backing의 영향으로 굴곡 왜곡 현상으로 에러가 발생하여 비교는 다소 어려움이 있는 것으로 판단된다. 그러나 용접부의 용접잔류응력의 경향은 비교적 잘 일치하고 있다. 유한요소법의 잔류응력 측정결과 steel backing를 고려한 해석과 2차원 해석으로 인해 차이가 발생한 것으로 판단한다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법과 유한요소법의 경우 2차원 해석이 아닌 3차원 해석을 통하여 정확한 비교 분석 가능할 것으로 판단된다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 용접선두께방향 잔류응력은 surface + 3mm, 12.5mm와 비슷한 특성을 나타내고 있다. 종래의 연구결과에서는 end tap 및 steel backing을 사용하여 용접을 진행할 경우 초층부에 최대잔류응력의 분포하였으며[51], 본 연구에서도 유사하게 완전구속 시험편의 경우 용접부에서 최종 용접층이 아닌 초층부에서의 최대잔류응력분포가 나타났다.

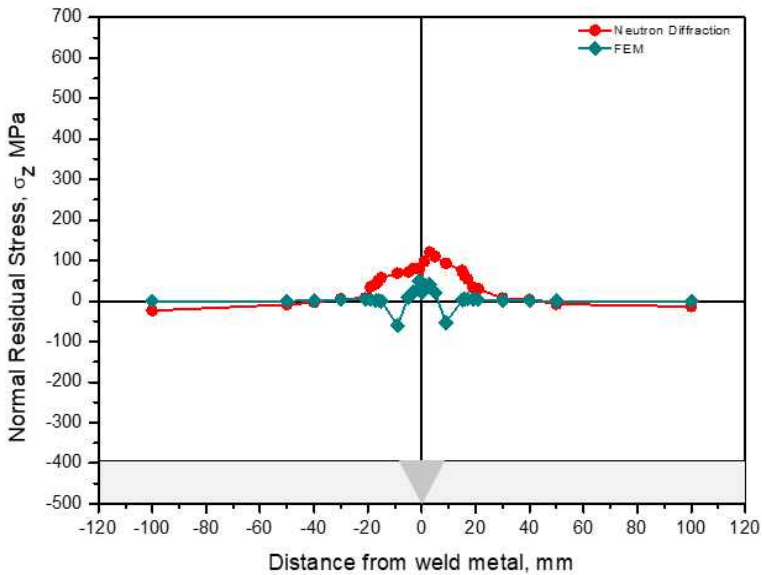


(a) longitudinal residual stress in surface + 22mm





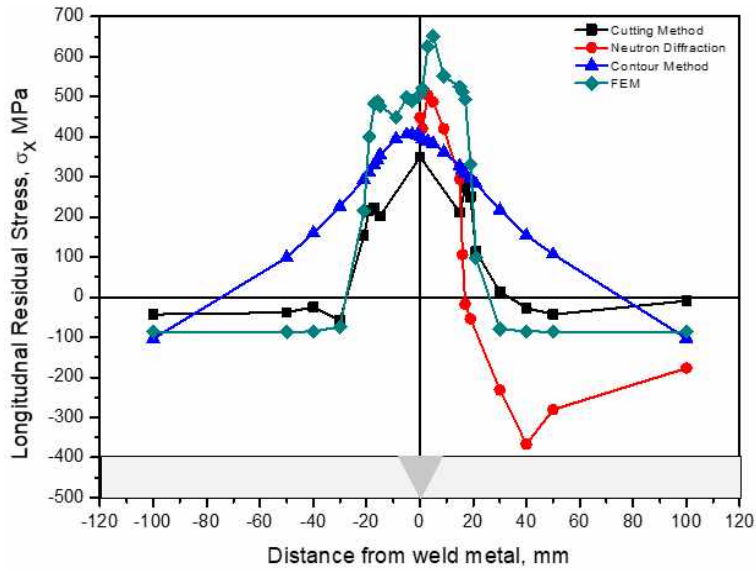
(b) transverse residual stress in surface + 22mm



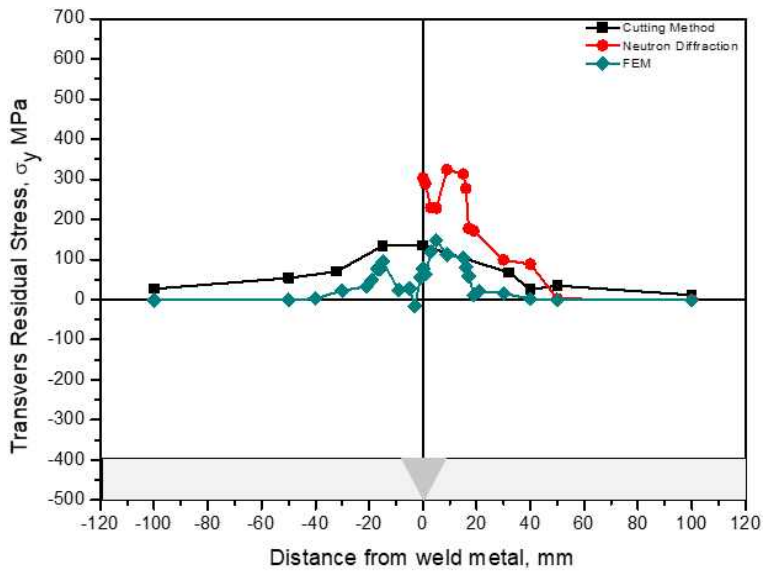
(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.54 Constrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by contour method, neutron diffraction, FEM

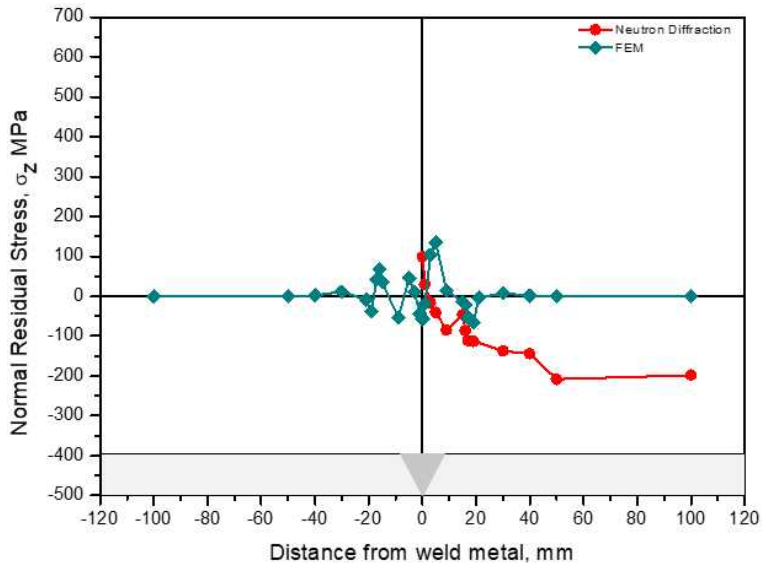
완전비구속 시험편의 표면에서 두께방향으로 3mm 들어간 부분의 용접잔류응력 분포를 Fig. 3.55에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력 특성을 절단법, 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 통하여 비교, 검토하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 절단법은 표면에서 측정한 결과값으로 surface + 3mm에 비해 비교적 낮은 잔류응력이 분포하였다. 용접부에서 최대인장잔류응력이 분포하였으며, FL+30mm 근방에서 압축잔류응력이 분포하였다. 중성자회절법은 용접부 중심으로 우측방향을 측정하였다. 용접부에서 최대인장응력 약 500MPa 정도 분포하였으며, FL+1mm에서 약 300MPa 정도의 인장잔류응력이 나타났다. 용접부로부터 멀어질수록 인장잔류응력이 감소하며 FL+40mm 부근에 약 -370MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 중성자회절법에서 사용한 Incident slit의 크기가 2x2를 고려하여 Surface + 2mm, 3mm, 4mm의 d-spacing을 측정하였다. 표면에 가까운 거리에 영향을 받아 절단법과 유사한 인장잔류응력의 분포를 나타냈다. 인장잔류응력 범위는 각변형의 발생으로 인하여 표면부에서 수축이 발생하여 인장잔류응력이 다소 감소되는 현상이 나타났을 것으로 생각된다. 유한요소법은 실제 완전비구속 시험편의 구속없이 진행된 용접조건 다르게 최소한의 경계조건을 통한 해석을 진행하였다. 해석에 경계조건을 포함하지 않으면 model의 분리현상 및 에러가 발생하여, 단순지지 조건으로 해석을 하였다. 굴곡측정법의 최대인장잔류응력은 용접부에서 약 400MPa 정도 분포했으며, 좌측, 우측에 약 80mm까지 인장잔류응력이 분포하였다. 전체적인 분포는 절단법, 중성자회절법과 유사하지만, FL+30mm 부근에서의 경향이 다소 높은 인장잔류응력이 분포하였다. 굴곡측정법, 유한요소법이 Surface + 3mm 지점의 결과값으로 표면에 영향을 받은 절단법과 중성자회절법의 결과값에 비해 높은 것으로 판단한다. (b)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 3mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 확인하였다. 절단법의 용접부 용접선수직방향 잔류응력은 중성자회절법에 비해 다소 낮은 인장잔류응력이 분포하였으며, Surface 와 Surface + 3mm 잔류응력 차이를 나타냈다. 유한요소법의 용접선수직방향 잔류응력 측정결과 중성자회절법에 비해 다소 낮은 잔류응력이 분포하였으나, 열영향부의 잔류응력 거동은 유사한 분포를 나타냈다. (c)의 그래프는 표면으로부터 두께방향으로 3mm 위치에서 용접두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법, 유한요소법은 항복강도 대비 낮은 잔류응력을 분포하였으며, 전반적인 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) longitudinal residual stress in surface + 3mm



(b) transverse residual stress in surface + 3mm

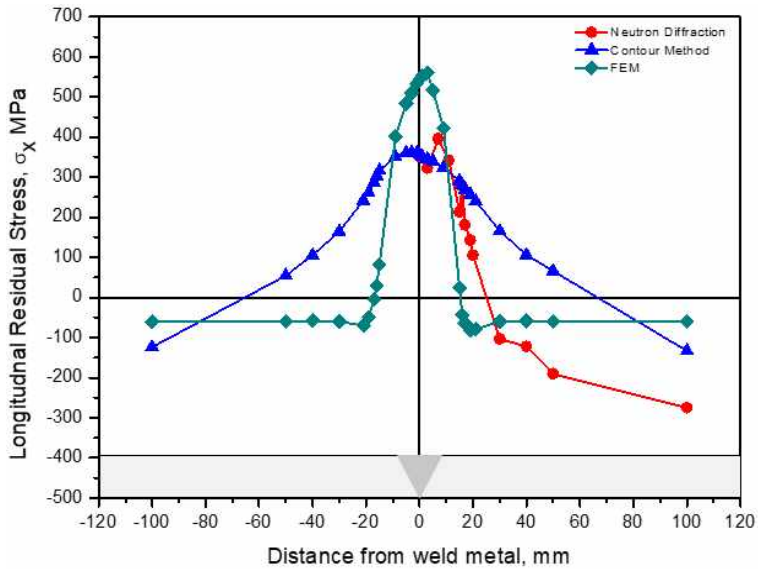


(c) normal residual stress in surface + 3mm

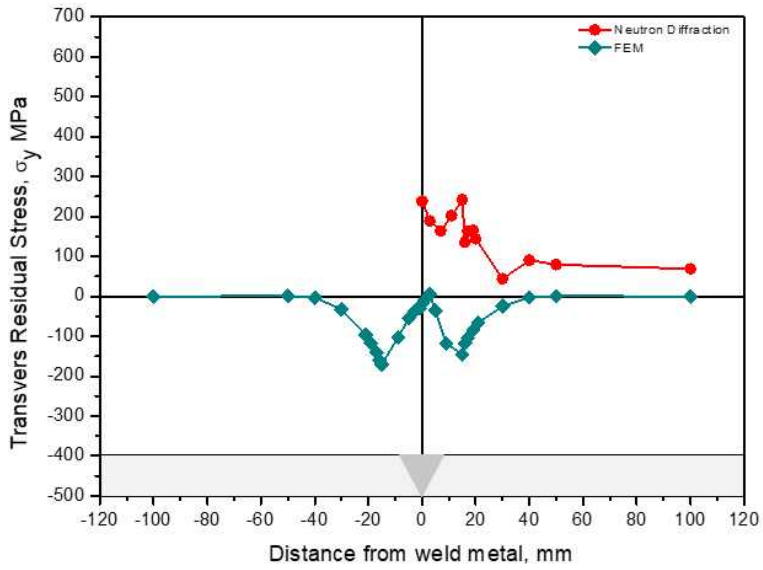
Fig. 3.55 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 3mm by cutting method, contour method, neutron diffraction, FEM

완전비구속 시험편의 표면에서 두께방향으로 12.5mm 들어간 부분의 용접잔류응력의 결과값을 Fig. 3.56에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력 특성을 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 통하여 비교, 검토하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법에 의하면 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 350MPa 정도 분포하였으며, FL+100mm 부근에서 약 -275MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 인장잔류응력 분포가 FL+25mm까지 분포를 하고 있다. 굴곡측정법의 용접부는 중성자회절법의 잔류응력과 유사한 분포를 나타내었고, FL+30mm에서 차이가 발생하였다. 굴곡측정법은 중성자회절법에 비해 다소 넓은 범위의 인장잔류응력이 형성되었다. 측정된 굴곡을 3차원 Spline fitting 과정에서 매듭간격의 차이에 따른 고유의 굴곡 특성이 사라지는 부분 언더피팅 현상이 발생한 것으로 판단한다. 유한요소법은 용접부에서 최대인장잔류응력이 분포하였으며, FL+20mm부터 압축잔류응력이 나타났다. (b)는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법에 의한 결과는 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 240MPa 정도 분포하였다. 우측 FL+1mm 지점의 인장잔류응력은 용접선방향 잔류응력 대비 약 150MPa 낮게 분포하였다. 유한요소법은 용접부에서 약 -20MPa의 압축잔류응력이 분포하였다. 유한요소법의 용접선수직방향 잔류응력 측정결과 각변형으로 인하여 용접선수

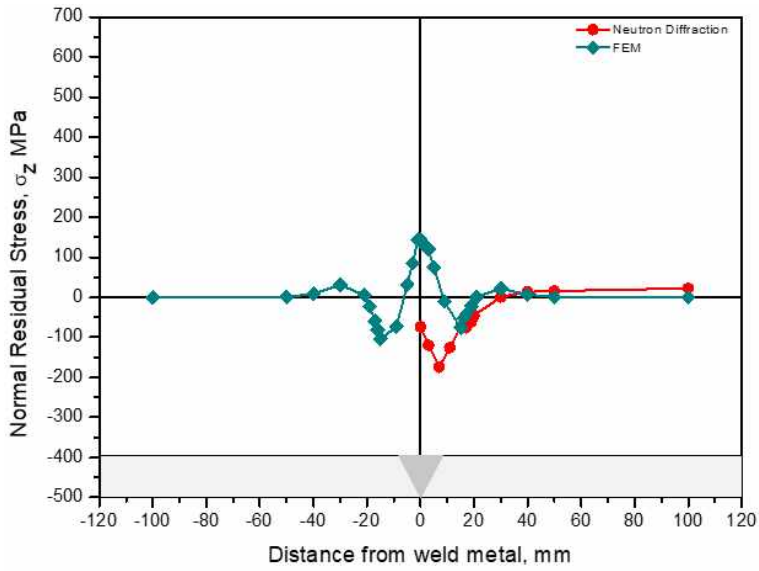
직방향의 요소에 압축현상으로 인하여 전반적으로 압축잔류응력이 분포 한 것으로 판단한다. (c)는 표면으로부터 두께방향 12.5mm 위치에서 용접두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법에서는 용접부와 모재부에서 압축잔류응력이 분포하였다. 유한요소법은 용접부에서 인장잔류응력이 분포하였고, 모재부에서 작은 압축잔류응력이 분포하였다. 중성자회절법과 유한요소법의 열영향부의 잔류응력 거동은 유사하였다.



(a) longitudinal residual stress of in surface + 12.5mm



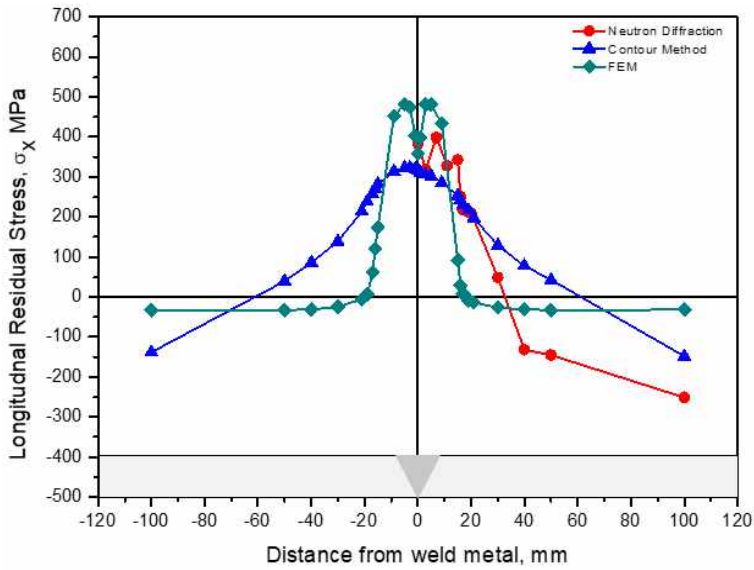
(b) transverse residual stress in surface + 12.5mm



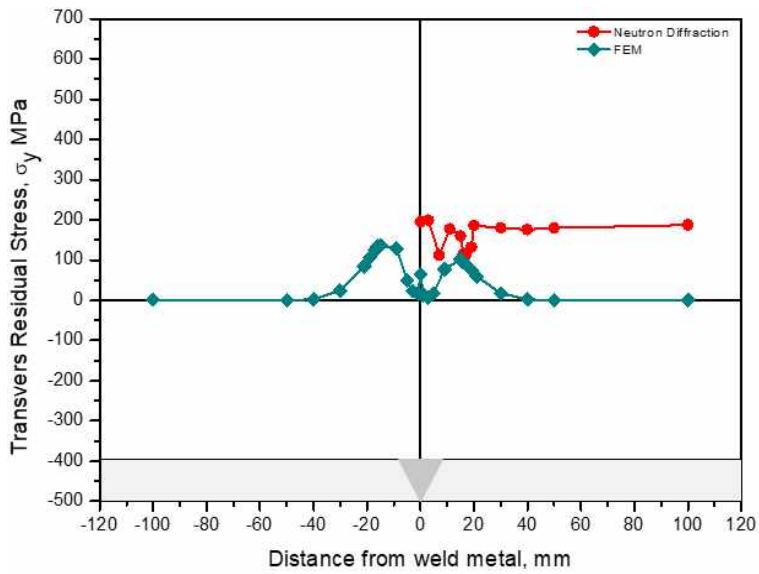
(c) normal residual stress in surface + 12.5mm

Fig. 3.56 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 12.5mm by contour method, neutron diffraction, FEM

완전비구속 시험편의 표면에서 두께방향으로 22mm 들어간 부분의 용접잔류응력의 결과값을 Fig. 3.57에 나타냈다. 각 방향 용접잔류응력 특성을 굴곡측정법, 중성자회절법, 유한요소법을 통하여 비교, 검토하였다. (a)의 그래프는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법의 경우 최대인장잔류응력은 용접금속에서 약 400MPa 정도 분포 되었으며, 인장잔류응력의 범위가 FL+30mm까지 증가하였다. 완전비구속 시험편의 경우 각 변형의 영향으로 인장잔류응력의 범위가 증가한 것으로 판단된다. 굴곡측정법은 Surface + 3mm와 비교하여 약 90MPa 정도의 인장잔류응력이 분포하였다. 중성자회절법과 굴곡측정법의 용접부 결과값은 유사한 분포를 나타냈다. 유한요소법은 용접부와 좌측, 우측 FL+20mm까지 인장잔류응력이 분포되면서 용접부로부터 멀어질수록 인장잔류응력이 감소하며 다소 작은 압축잔류응력이 분포하였다. (b)는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접선수직방향 잔류응력,  $\sigma_y$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 중성자회절법은 용접부에서 최대인장잔류응력이 약 200MPa 정도 분포하였고, HAZ에서 잔류응력이 감소하였으며 FL+20mm에서 100mm까지 200MPa 인장잔류응력이 분포하였다. 유한요소법은 완전비구속 시험편의 항복강도 대비 아주 작은 잔류응력이 분포하였다. (c)는 표면으로부터 두께방향 22mm 위치에서 용접두께방향 잔류응력,  $\sigma_z$ 의 좌측과 우측 용접잔류응력 거동을 나타냈다. 응력해방시험편은 용접선방향, 용접선수직방향에 대해 4mm 간격으로 방전가공 하였다. Surface + 16mm까지 방전가공 하였으며, Root + 4mm까지 방전가공을 하였다. 그러나, 각변형으로 인해 용접부에서 멀어질수록 Root부 방전가공 길이에 차이가 발생하였고, 응력완화시험편 모재부 Surface + 22mm 잔류응력이 완전히 응력완화가 이루어지지 않았다. 그러므로 용접부와는 다르게 모재부는 비교가 어렵다고 판단된다. 유한요소법은 용접선수직방향 잔류응력과 유사한 잔류응력이 낮은 분포를 나타냈다. 완전비구속 시험편은 완전구속 시험편과는 다르게 Ceramic backing을 사용하여 Surface + 3mm 부근에서의 최대잔류응력이 분포하였다. 전체적인 잔류응력의 특성은 외적인 요소의 영향을 받지 않고 수축과 팽창의 연속적 발생하여 항복강도와 유사하게 용접잔류응력이 분포하였다.

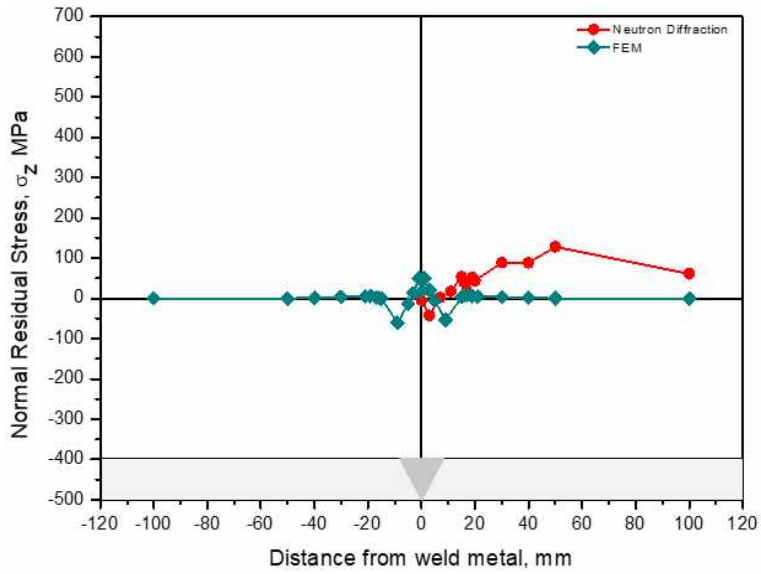


(a) longitudinal residual stress of in surface + 22mm



(b) transverse residual stress in surface + 22mm





(c) normal residual stress in surface + 22mm

Fig. 3.57 Unconstrained weld residual stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  of surface + 22mm by contour method, neutron diffraction, FEM

## 2. 요약

본 장에서는 구속도의 영향에 따른 두께 25mm 맞대기 이음부의 잔류응력 특성에 관한 절단법, 중성자회절법, 굴곡측정법과 유한요소법을 통하여 용접잔류응력분포를 비교 분석하였다.

- (1) 완전구속 시험편의 용접선방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 95% 까지 형성되었다. 전체적으로 용접부에서 인장잔류응력이 분포하였고, 용접부에서 멀어진 모재부에서는 압축잔류응력이 분포하였다. 용접선수직방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 약70% 정도형성되었으며, 용접부에서 인장잔류응력이 분포하였고, 모재부에서 비교적 낮은 인장잔류응력이 분포하였다. 용접선 두께방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 20% 형성되었다. 용접부에서 다소 작은 인장잔류응력이 분포하였고, 모재부에서도 낮은 잔류응력이 분포하였다.
- (2) 완전비구속 시험편의 용접선방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 95% 정도 형성되었다. 전체적으로 용접부에 인장잔류응력이 분포하였고, 모재부에서 압축잔류응력이 분포하였다. 용접선수직방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 60% 형성되었다. 용접선두께방향 잔류응력은 시험편의 항복강도 대비 최대 30% 형성되었다.
- (3) 완전구속 시험편과 완전비구속 시험편의 용접잔류응력 결과값은 본 연구에서 수행한 시험편의 조건에서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 용접변형을 방지하기 위한 구속조건의 차이로 인해 최대용접잔류응력 두께방향 분포 위치에 영향을 미쳤다.

## 제4장 결론

본 연구에서는 해양구조용 고강도강인 E500 강재에 대한 구속도의 영향에 따른 맞대기 용접이음부의 잔류응력분포 특성에 관하여 실험적인 방법과 해석적인 방법을 사용하여 정량적으로 평가하였다. 또한, 구속도의 영향에 따라 용접시 발생하는 각변형량을 정량적으로 검토 하였으며, 용접잔류응력에 미치는 영향에 대하여 고찰 하였다. 한편, 용접시 발생하는 각변형과 잔류응력 평가는 절단법, 중성자회절법, 굴곡측정법, 유한요소법으로 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 완전구속 시험편의 각변형은 완전구속의 영향으로 각변형이 거의 나타나지 않았다.
- (2) 완전구속 시험편의 용접잔류응력은 표면으로부터 두께 21~23mm인 초층 용접부에서 최대인장잔류응력이 분포하였으며, 구속도 효과를 부가한 steel backing의 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.
- (3) 완전구속 시험편의 용접선방향 최대인장잔류응력 크기는 E500강재의 항복강도의 약 95% 정도로 측정되었으며, 용접선수직방향 최대인장잔류응력 크기는 E500강재의 항복강도의 약 70% 정도로 측정되었고, 용접선두께방향 최대잔류응력 크기는 E500강재의 항복강도의 약 20% 정도로 측정되었다.
- (4) 완전비구속 시험편에서의 각변형은 최대 6° 정도의 각변형이 나타났다.
- (5) 완전비구속 시험편의 경우 용접잔류응력은 표면으로부터 두께 2~4mm인 최종용접층에서 최대인장잔류응력이 형성되었으며, 최종용접패스에서 생성되는 구속의 강화현상의 영향으로 판단된다.
- (6) 완전비구속 시험편의 용접선방향 최대인장잔류응력의 크기는 E500강재의 항복강도의 약 95%수준의 인장잔류응력이 분포하였으며, 용접선수직방향 최대잔류응력 크기는 항복강도의 약 60% 수준의 인장잔류응력이 분포하였고, 용접선두께방향 최대잔류응력은 항복강도의 약 30% 수준의 인장잔류응력이 분포하였다.
- (7) 완전구속 시험편과 완전비구속 시험편의 용접잔류응력은 종래의 연구결과와 유사하게 용접선방향 잔류응력이 지배적이었다.
- (8) 완전구속 시험편과 완전비구속 시험편의 용접잔류응력 측정결과 용접잔류응력 결과값은 본 연구에서 수행한 시험편의 조건에서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 용접변형을 방지하기 위한 구속조건의 차이로 인해 완전구속 시험편의 최대 용접잔류응력은 초층부에 분포하였고, 완전비구속 시험편의 최대용접잔류응력은 최종 용접층인 표면부에서 분포하였다.

## 참고문헌

- [1] Kim D.J., Offshore Plant Industry, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 12-16, June, (2013).
- [2] Kim Y.J., Technology Trend of Offshore Plants, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 53, No. 10, pp. 33-37, (2013).
- [3] Hong S.I., 해양구조물 분야의 시장확대와 대응전략, 산업경제분석, pp. 38-40, (2006).
- [4] Handbook of The Korean Welding and Joining Society, Volume 2, Construction of Inspection (in Korean), (2008).
- [5] Park J.U., Mechanism and Effects of Welding Residual Stress Mechanism of Welding Residual Stress, Journal of the KWS, 22-2, 1-2, (2004).
- [6] Kim J.S., Park J.S. and Jin T.E., Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses, Journal of the KWS, 23-6, 8-17, (2005).
- [7] Jin H.K, Lee D.J. and Shin S.B., Effect of Distance and Restraint Degree between Fillet and Butt Weldment on Residual Stress Redistribution at each Weldment, Journal of the KWJS, 28-3, 59-64, (2010).
- [8] Masaoka I., Yada M. and Sasaki R., Brittle Fracture Initiation Characteristics of Weld Joint for 80kg/mm<sup>2</sup> High Strength Thick Plate Steel(Report3) - Effect of Residual Stress and Repair Welding on Brittle Fracture Initiation from Surface Notch in Fusion Line of Welded Joints, Journal of the Japan Welding Society, 44(11)-914~9230, (2010).
- [9] Masubuchi K., Analysis of Welded Structures, New York, Pergamon, (1980).
- [10] Withers P.J. and Bhadeshia H.K.D.H., Overview Residual Stress Part 2 - Nature and Origin. Mater Sci Tech, 17, 366-375, (2001).
- [11] Lee S.Y., Tang J.G. and Kang J.S., Evaluation of Buckling Load and Specified Compression Strength of Welded Built-up H-section Compression Members with Residual Stresses, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 29, No. 1, pp. 81-88, (2017).
- [12] Han I.W., Park Y.H., An G.B. and An Y.H., Development Trends of Steel Plates for Ship Building and Off-shore Construction and It' s Weldability, Journal of KWJS, Vol. 27, No. 1, pp. 25-33, (2009).
- [13] Design of Offshore Steel Structures, General-LRFD Method, DNVGL-OS-C101

, (2017).

[14] Fabrication and Testing of Offshore Structures, DNVGL OS-C401, (2018).

[15] Park J.U. and An G.B., Fracture Toughness of Thick Steel Plate for Ship Building, Journal of KWJS, Vol. 25, No. 4, pp. 15-19, (2007).

[16] Park J.U., An G.B. and Woo W.C., Characteristic and Measurement Technology of Inner Welding Residual Stresses in Thick Steel Structures, Journal of Welding and Joining, Vol. 34, No. 2, pp. 16-21, (2016).

[17] Kim Y. and Lee J.H., Residual Stress Prediction in Multi-layer Butt Weld Using Crack Compliance Method, Journal of KWJS, 30, 74-79, (2012).

[18] An G.B., Woo W. and Park J.U., Brittle Crack-arrest Fracture Toughness in a High Heat-input Thick Steel Weld, Inter J Fract, 185, 179-184, (2014).

[19] Almer J.D., Cohen J.B. and Winholtz R.A., Metall. Mater. Trans. A, 29, 2127, (1998).

[20] Withers P.J. and Bhadeshia H.K.D.H., Mater. Sci. Technol., 17, 355, (2001).

[21] Hornbach D.J. and Prev y P.S., J. Press. Vessel Technol., 124, 359, (2002).

[22] Xu S., Wang C. and Wang W., Eng. Fail. Anal., 51, 1, (2015).

[23] An G.B., The proceedings of the Twenty-first(2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, (2011).

[24] An G.B., Woo W. and Park J.U., Int J fracture, 185, 179, (2014).

[25] Mathar J., Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes, Trans. ASME, Iron & Steel, Vol. 56, pp. 249-254, (1934).

[26] Rendler N. and Vigness I., Hole-drilling Strain-gauge Method of Measuring Residual Stresses, Experimental Mechanics, Vol. 6, No. 12, pp. 577-586, (1966).

[27] Jayarama Rao G., Ravi Sanker K. and Narayanan R., Determination of Calibration Constants for Hole Drilling Technique Using Special Strain Gauge Rostte, JTEVA, Vol. 14, No. 4, pp. 207-212, (1986).

[28] Kelsey R.H., Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method, Proceedings of SESA, Vol. 14, No. 1, pp. 181-194, (1956).

[29] Tall L., Residual Stresses in Welded Plates - A Theoretical Study, Welding Journal, Vol.43, (1964).

[30] Masubuchi K. et al., Analysis of Thermal Stresses and Metal Movements of Weldments : A Basic Study toward Computer Aided Analysis and Control of Welded Structure, SNAME Trans., Vol 82, pp. 143-167,(1974).

[31] Fujita Y. and Nomoto T., Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems,

Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 130, (1972).

[32] Ueda Y. and Yamakawa T., Analysis of Thermal Elasto-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method, Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 42, No. 6, (1973).

[33] Argyris J. H., Szimmat J. and Willam K. J., Computational Aspects of Welding Stress Analysis, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 33, pp. 635-666, (1982).

[34] Free J. A. and Porter Goff R. F. D., Predicted Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method, Computer & Structures, 32(2), pp. 365-378, (1989).

[35] Yasuhisa O., Simulation of Welding Deformation by FEM, TEAM '96 PUSAN, pp. 593-605, (1996).

[36] Galatolo R. and Lanciotti A., Fatigue Crack Propagation in Residual Stress Fields of Welded Plates, Int. J. Fatigue, Vol. 19, No. 1, pp 43-49, (1997).

[37] Hibbitt H. D. and Marcal P. V., A Numerical Thermo-Mechanical Model for the Welding and Subsequent Loading of a Fabricated Structure, Computers and Structures, Vol. 3, No. 5, pp. 1145-1174, (1973).

[38] Roelens J. B., Maltrud F. and Lu J., Determination of Residual Stresses in Submerged Arc Multi-pass Welds by Means of Numerical Simulation and Comparison with Experimental Measurements, Welding in the World, Vol. 33, No. 3, pp. 152-159, (1994).

[39] Rybicki E. F. and Stonesifer R. B., Computation of Residual Stresses due to Multi-pass Welds in Piping Systems, Journal of Pressure Vessels Technology, Trans. of ASME, 101, pp. 149-154, (1979).

[40] Leung C. K., Pick R. J. and Mok D. H. B., Finite Element Modeling of a Single Pass Weld, WRC Bulletin 356, pp. 1-10, (1990).

[41] Leung C. K. and Pick R. J., Finite Element Analysis of Multi-pass Welds, WRC Bulletin 356, pp. 11-33, (1990).

[42] Shim Y. L. and Lee S. G., Modeling of Welding Heat Input for Residual Stress Analysis, Journal of the Korean Welding Society, Vol. No 3, pp. 112, (1993).

[43] Withers P. J., Turski M., Edwards L., Bouchard P.J. and Buttle D.J., Recent advances in residual stress measurement, Inter J Pres Ves Pip, 85, pp. 118-127, (2008).

- [44] Schajer G.S., Practical Residual Stress Measurement Methods, John Wiley & Sons, Chichester, (2013).
- [45] Woo W. C., Em V., Seong B. S., Sing E. J., Mikula P., Joo J. D. and Kang M. H., Effect of wavelength-dependent attenuation on neutron diffraction stress measurements at depth in steels, *J Appl Cryst*, Vol. 44, pp. 747-754, (2011)
- [46] Birkholz M., Genzel C. and Jung T., X-ray diffraction study on residual stress and preferred orientation in thin titanium films subjected to a high ion flux during deposition, *Journal of Applied Physics*, Vol. 96, pp. 7202-7211, (2004)
- [47] Prime M. B., Cross-sectional Mapping of Residual Stress by Measuring the Surface Contour after a Cut, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123, 162-168, (2001).
- [48] Halabuk D. and Navrat T., The effect of third principal stress in measurement of residual stresses by hole drilling method, In *Proceeding of the 2018 3rd International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering*, Vol. 237, pp. 1-6, (2018).
- [49] Hosseinzadeh F., Mahmoudi A. H., Truman C. E. and Smith D. J., Prediction and Measurement of Through Thickness Residual stress in Large Quenched Components, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, pp. 978-988, (2009).
- [50] Woo W. W., Kim D. K. and An G. B., Residual stress measurements using neutron diffraction, *Journal of Welding and Joining*, Vol. 33, No. 1, pp. 30-34, (2015).
- [51] Snyder M. D. and Bathe K-J., A Solution Procedure for Thermo-Elastic-Plastic and Creep Problems, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 64, pp. 49-80, (1981)
- [52] Kim J. W. and Yang Y. S., Welding Residual Stress and Distortion, *The Korean Welding and Joining Society*, pp. 133-135, (2011)
- [53] Park J. U., An G. B., Woo W. C. and Heo S. M., Measurement of Welding Residual Stress in a 25-mm Thick Butt Joint using Inherent Strain Method, *Journal of the KWS*, Vol. 31, pp. 67-72, (2013)

## 연구실적

### <국내학회발표>

1. **성대희**, 박준수, 오세훈, 조원준, 최동기, 안규백, “해양구조용강의 두께 영향에 따른 파괴인성 예측”, 대한용접\*접합학회 2019 추계학술대회
2. **성대희**, 임웅택, 김진경, 한일욱, 박정웅, 안규백, “극저온강재 온도변화에 따른 용접부 응력분포 특성에 관한 연구”, 대한용접\*접합학회 2020 춘추계 통합 학술대회
3. **성대희**, 박정웅, 안규백, “강도변화에 따른 용접부 용접잔류응력 분포 특성” 대한용접\*접합학회 2021 춘계학술대회
4. **성대희**, 이지승, 박정웅, 이명수, 우완측, 안규백, “해양구조용 고강도강의 구속도의 영향에 따른 용접부 잔류응력 평가에 관한 연구”, 대한용접\*접합학회 2021 추계학술대회

### <수상>

1. **성대희**, 정태수, 선민정, 2019 모의 IMO 총회 한국해사안전국제협력센터이사장상, 한국해양수산연구원 주관, 해양수산부 주최
2. 오세훈, 박준수, **성대희**, 김진경, 정유리, 홍승래, 한일욱, 안규백, “극저온용 강재의 적합 설계응력에 관한 연구”, 대한용접\*접합학회 2019 추계학술대회 우수논문발표상
3. 김진경, 박홍규, **성대희**, 한일욱, 안규백, 박정웅, “슬러리 파이프용 고Mn강 FSW 특성에 관한 연구”, 대한용접\*접합학회 2021 춘계학술대회 우수논문발표상
4. **성대희**, 박정웅, 안규백, “강도변화에 따른 용접부 용접잔류응력 분포 특성”, 대한용접\*접합학회 2021 춘계학술대회 우수논문상



## 감사의 글

2년이라는 시간을 보내고 하나의 과정을 마치고자 이처럼 감히 감사의 글을 적어 봅니다.

본 연구와 논문이 완성되기 까지 수 많은 격려와 조언을 해주시고, 소중한 경험과 항상 믿어주시며 지혜로운 사람의 길로 이끌어 주신 지도교수님이신 안규백교수님께 머리숙여 감사의 인사를 드리겠습니다. 그리고 심사과정에서 많은 도움을 주신 조선대학교 토목공학과 박정웅교수님, 조선대학교 선박해양공학과 이명수교수님, 한국원자력연구원 우완축박사님, 올바른 학문의 길을 제시해주신 조선대학교 선박해양공학과 권영섭교수님, 윤덕영교수님, 정세민교수님, 주성민교수님께 감사드립니다.

모든 일을 함께하면서 동고동락한 우리 “용접 및 파괴연구실”의 원준, 진경, 원오, 유리, 지승, 상규에게 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 멀리 있으면서도 항상 부족한 후배인 저에게 아낌없이 도움을 주시는 든든한 홍승래선배님, 많은 격려를 해주신 박흥규선배님, 문주승선배님 감사드립니다. 그리고 타지생활에 많은 도움을 주신 신은주박사님, 김태주박사님, 백열박사님, 김유섭선배님, 원윤정선배님께 고마움의 뜻을 전합니다.

마지막으로, 어디서든지 항상 걱정해주시고, 응원해주시는 아버님, 어머님 은혜에 머리숙여 깊이 감사드리며, 저의 빈자리를 채워주는 동생 아연이 에게도 고맙고 미안하다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 오늘이 있기 까지 저에게 잊지 못할 가족의 따듯함과 행복을 알려주신 너무 보고 싶은 큰외삼촌 다시 만나는 그 날에는 감사하며 존경하고 사랑했다고 전하고 싶습니다. 저를 항상 사랑해주시는 외할아버지, 외할머니 건강하시고, 모든 일에 감사합니다. 그리고 언제든지 자식처럼 아껴주시는 큰외숙모에게도 감사드리며, 저의 부담을 줄여주고 항상 웃는 인영이, 원재에게도 고마움의 뜻을 전합니다. 끝으로 여러 힘들고 어려웠던 상황에 처할 때 마다 항상 큰 힘이 되어주고 용기를 잃지 않게 도와준 서연이에게 고맙고, 사랑한다고 전하고 싶습니다. 그리고 그동안 부족한 저에게 많은 도움을 주신 모든 분들과 이 작은 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

2022 년 2 월

성 대 희 올림