



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2020년 8월

석사학위논문

맞대기용접에서 횡구속과 휨구속이  
용접잔류응력에 미치는 영향

조선대학교 대학원

토목공학과

문 주 승

# 맞대기용접에서 횡구속과 휨구속이 용접잔류응력에 미치는 영향

Effect of Transverse and Bending Restraints on  
Welding Residual Stress in Butt Welding

2020년 8월 28일

조선대학교 대학원

토목공학과

문주승

# 맞대기용접에서 횡구속과 휨구속이 용접잔류응력에 미치는 영향

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2020년 5월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

문 주 승

문주승의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수

鄭明薰 (인)

위원 조선대학교 교수

李喜寧 (인)

위원 조선대학교 교수

朴正雄 (인)

2020년 6월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 제1장 서론 .....                    | 1  |
| 1.1 연구 배경 및 목적 .....            | 1  |
| 1.2 연구 동향 .....                 | 3  |
| 1.2.1 용접잔류응력 .....              | 3  |
| 1.2.2 용접잔류응력에 미치는 구속도의 영향 ..... | 5  |
| 제2장 이론적 배경 .....                | 8  |
| 2.1 용접잔류응력 .....                | 8  |
| 2.1.1 잔류응력 생성원인 .....           | 8  |
| 2.1.2 잔류응력의 측정 .....            | 13 |
| 2.2 열탄소성해석 .....                | 16 |
| 2.3 구속도 .....                   | 21 |
| 제3장 연구방법 및 연구결과 .....           | 24 |
| 3.1 온도해석 .....                  | 24 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3.1.1 실험 및 해석 시험편           | 24 |
| 3.1.2 열탄소성해석 및 온도측정 결과      | 27 |
| 3.2 2차원해석의 신뢰성              | 33 |
| 3.2.1 해석모델                  | 33 |
| 3.2.2 잔류응력측정값과 열탄소성해석 결과 고찰 | 37 |
| 3.3 구속도가 용접잔류응력에 미치는 영향     | 39 |
| 3.3.1 구속도 계산                | 39 |
| 3.3.2 구속도 해석 모델             | 40 |
| 3.3.3 온도분포해석과 잔류응력분포        | 47 |
| 3.4 잔류응력 예측 모형 개발           | 55 |
| 3.4.1 잔류응력 영향 인자 분석         | 55 |
| 3.4.2 회귀분석                  | 57 |
| 3.4.3 예측식에 의한 잔류응력 비교       | 59 |
| <br>                        |    |
| 제4장 결 론                     | 62 |
| <br>                        |    |
| 참 고 문 헌                     | 64 |

## 그림 목 차

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 그림 2.1  | 조립 3가지 부재의 잔류응력 .....                              | 9  |
| 그림 2.2  | 구속이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포 .....                      | 10 |
| 그림 2.3  | 구속된 용접 이음에 생기는 잔류응력 분포 .....                       | 12 |
| 그림 2.4  | 측정법에 따른 측정 깊이 .....                                | 13 |
| 그림 2.5  | 중성자 회절법에 의한 잔류응력 측정 .....                          | 14 |
| 그림 2.6  | 양단 고정의 맞대기 용접이음에서<br>구속력과 모재, 용접 금속의 변형과의 관계 ..... | 22 |
| 그림 3.1  | 대상 모델 .....  | 25 |
| 그림 3.2  | 용접부 단면마크로 .....                                    | 25 |
| 그림 3.3  | FCAW 시험체의 온도측정 위치 .....                            | 27 |
| 그림 3.4  | FCAW 시험체에 대한 최고도달온도 .....                          | 28 |
| 그림 3.5  | FCAW 시험체 Fusion Line과 HAZ Line 비교 .....            | 29 |
| 그림 3.6  | SAW 시험체의 온도측정 위치 .....                             | 30 |
| 그림 3.7  | SAW 시험체에 대한 최고도달온도 .....                           | 31 |
| 그림 3.8  | SAW 시험체 Fusion Line과 HAZ Line 비교 .....             | 32 |
| 그림 3.9  | 두께 70mm 부재의 용접부 단면마크로 .....                        | 34 |
| 그림 3.10 | 두께 70mm 부재의 해석모델 .....                             | 35 |
| 그림 3.11 | 두께 70mm 기계적성질의 온도의존성 .....                         | 35 |



|  |    |
|--|----|
| 그림 3.12 두께 70mm 2차원해석의 경계조건  | 36 |
| 그림 3.13 두께 70mm 부재에서 용접잔류응력의 해석값과 측정값 비교                                 | 38 |
| 그림 3.14 강제변위와 구속응력   | 44 |
| 그림 3.15 구속 스프링과 경계조건   | 42 |
| 그림 3.16 두께별 용접부 형상과 용접패스   | 46 |
| 그림 3.17 용접잔류응력 분포  | 47 |
| 그림 3.18 횡구속도가 0 MPa/mm 일 때, 휨구속도에 따른<br>Center부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포       | 49 |
| 그림 3.19 횡구속도가 0 MPa/mm 일 때, 휨구속도에 따른<br>Toe부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포          | 50 |
| 그림 3.20 횡구속도가 300 MPa/mm 일 때, 휨구속도의 유무에 따른<br>Center부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포 | 52 |
| 그림 3.21 횡구속도가 300 MPa/mm 일 때, 휨구속도의 유무에 따른<br>Toe부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포    | 53 |
| 그림 3.22 위치별 $\sigma_{sm}, \sigma_{sb}$ 예측 모형                             | 57 |
| 그림 3.23 두께별 용접잔류응력 예측  | 61 |

## 표 목 차

|  |    |
|--|----|
| 표 3.1 FCAW 용접조건                        | 26 |
| 표 3.2 SAW 용접조건                         | 26 |
| 표 3.3 두께 70mm 부재의 기계적성질                | 34 |
| 표 3.4 두께 70mm 부재의 용접조건                 | 34 |
| 표 3.5 구속도 해석 조건                        | 41 |
| 표 3.6 센터부 모델 계수 $c_0 \sim c_6$ 회귀분석 결과 | 58 |
| 표 3.7 토우부 모델 계수 $c_0 \sim c_6$ 회귀분석 결과 | 58 |

## ABSTRACT

### Effect of Transverse and Bending Restraints on Welding Residual Stress in Butt Welding

Moon, Ju Seung

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Most of the joints connecting steel structures have been welded except for high tension bolt joints that are being used in the field. The disadvantage of welding joint is that it is more difficult to manage than high tension bolt joints and require qualified professionals to execute welding joint, but welding joint has more advantages than bolts if it is in accordance with specifications and proper joint design. Therefore, welding is widely used not only in construction but also in a variety of industries such as ships, atomic energy and aviation. The variables between the factors in the welding of the structure, the high temperature behavior of the material, local high temperature heating, cooling shrinkage and restraint conditions, etc. interact to produce residual welding stress. In particular, welding residual stress can affect the material yield strength, fatigue strength and brittle fracture crack advance path, thus

reducing the health and life of the structure. In addition, many studies are underway at home and abroad, and the welding residual stress is applied as a secondary load when assessing the safety of steel structures. For more accurate safety, we want to analyze and measure the residual stress more rationally.

Therefore, it is necessary to study the effect on welding residual stress according to the actual restraint and propose the distribution of reasonable welding residual stress applied to the part. The thermal elasto-plastic analysis using MSC MARC, which is a nonlinear finite element analysis program, is used to calculate weld residual stress with different thickness, yield stress, transverse and bending restraint and the linear regression results are analyzed. The structural models used in this study are complex and large in terms of analysis and require a lot of analysis time in 3D thermal elasto-plastic analysis, so 2D thermal elasto-plastic analysis is carried out and the results are correct.

As the restraint increases, the residual stress in the initial layer part of the welding becomes larger in the compression direction, and the stress in the tensile direction is larger in near the thickness center part. By restricting bending deformation, tensile stress generated in the initial layer part of the welding is suppressed, and stress is generated in the compression direction. A stress is generated in the tensile direction in order to maintain such balance of force in the center part.

An explanation ability of the prediction formula is judged to be high, the residual stress of welding in the center part of the welded part and the toe part can be calculated, and the prediction value is compared with the thermal elasto-plastic analysis result, and it is confirmed that they match well. Especially, by introducing not only general lateral restraint but also bending restraints for suppressing each deformation, fine residual stress prediction is made possible considering the dynamic restraint conditions of the actual structure.

# 제1장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

강구조물을 연결하는 이음방법으로는 현장에서 사용하고 있는 고장력볼트이음을 제외하고는 대부분은 용접이음을 적용하고 있다. 용접이음은 고장력볼트이음보다 관리가 까다롭고 자격증을 보유한 전문 작업자가 수행해야 한다는 단점이 있으나 시방서에 준한 충실한 용접작업관리 및 적절한 이음부 설계를 수행하면 볼트에 비해 많은 장점을 지니고 있다. 따라서 용접은 건설뿐만 아니라 선박, 원자력, 항공 등 다양한 산업분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 구조물의 용접에서 인자들 사이의 변수, 재료의 고온거동, 국부적 고온가열, 냉각 수축 및 구속 조건 등의 상호작용에 따라 용접잔류응력이 발생된다. 특히 용접잔류응력은 재료의 항복강도, 피로 강도 및 취성과파괴 균열진전경로에 영향을 미치고 구조물의 건전성 및 수명을 저하시킨다. 또한 용접잔류응력은 강구조물의 안전성 평가시 2차하중으로 적용되며, 보다 정확한 안전성 검토를 위해서 보다 합리적으로 잔류응력을 해석하고 측정하려는 많은 연구가 국내외에서 진행되어 왔다.

용접잔류응력을 측정하는 방법으로는 측정위치에 따라 표면측정법과 내부측정법으로 구별되다. 표면측정방법에는 XRD(X-Ray Diffraction), HD(Hole Drilling) 등이 사용되었다. 내부의 잔류응력을 측정하는 방법으로는 원통 또는 중공원통에 축대칭인 잔류응력의 측정에 용이한 Sachs법, 파괴법에 기초하여 측정 위치를 천

공해 구멍의 직경의 변화로부터 잔류응력을 측정하는 DHD(Deep Hole Drilling Method), 중성자의 회절을 이용한 비파괴법인 중성자 회절법(Neutron Method) 등이 있고, 준해석적 방법으로 표면굴곡 추정법(Contour Method)이 있다.

열탄소성해석법에 의한 잔류응력 예측방법은 컴퓨터 성능 발전과 더불어 범용적 수치해석 코드의 발전에 따라 유한요소법(FEM: finite element method)에 근거하여 용이하게 계산할 수 있다. 그러나 이 방법은 소형시험편의 경우 비교적 간단한 계산시간으로 예측할 수 있으나, 대상 구조물의 대형화에 따라 막대한 계산시간이 소요되어 간이해석법에 의한 방법이 대두 되고 있다. 이러한 간이해석방법은 해석 결과의 신뢰성을 실험적방법에 의해 검증할 필요가 있다.

이러한 열탄소성해석과 측정에 의해 산출한 용접잔류응력은 강제변형만을 허용한 자유 구속상태의 경계조건 하에서 발생한 것이다. 그러나 실구조물은 제작순서, 자체구속, 용접순서 등에 의해 필연적으로 구속상태가 된다. 구조물 안전성 평가에 일반적으로 널리 적용되고 있는 영국의 BS7910(British Standard) 뿐만 아니라 대부분의 Code에서는 구속이 존재할 때, 그 재료의 항복 강도를 용접잔류응력 값으로 사용하도록 권고하고 있다. 구속이 없는 용접잔류응력 분포와 항복응력 분포 사이에는 큰 차이가 있을 뿐 아니라 고강도강재가 사용된 대형구조물의 안전성 평가시에 2차하중으로 사용되는 용접잔류응력의 영향이 너무 크기 때문에 현실적인 안전성 평가에는 다소 한계가 있다.

따라서 실제 구속도의 크기별로 용접잔류응력에 미치는 영향을 연구하여 부재에

가해지는 합리적인 용접잔류응력의 분포를 제시할 필요성이 있기 때문에 본 연구에서는 비선형 유한요소 해석 프로그램인 MSC Marc를 이용한 열탄소성해석을 통해 구조물의 두께, 항복응력, 횡구속도와 휨구속도의 크기를 달리하여 용접잔류응력에 미치는 영향을 계산하고, 이 결과를 R을 이용한 선형회귀분석을 통해 횡/휨구속도와 잔류응력 사이의 관계식을 유도하였다. 본 연구에 사용된 구조물 모델은 해석상의 계산이 복잡하고 규모가 커서 3차원 열탄소성해석으로는 많은 해석시간이 요구됨으로 매쉬의 수가 적어 더 간결한 해석이 가능한 2차원 열탄소성해석을 실시해 결과를 검토하였다.

## 1.2 연구동향

본 연구는 비교적 두꺼운 부재의 맞대기 용접시 횡구속과 휨구속이 용접잔류응력에 미치는 영향으로, 용접잔류응력의 발생과 측정 및 해석방법에 대한 연구동향을 조사하였으며, 구속도는 균열과 변형에 적용되는 연구에 관하여 조사하였다.

### 1.2.1 용접잔류응력

용접잔류응력을 구하는 방법은 실험적 방법과 해석적인 방법이 있다. 용접 잔류응력의 해석적 연구는 컴퓨터 기술의 발달과 함께 시작되었으며, 특히 1960년대 유한요소법이 개발되면서 해석적 방법에 의한 연구가 활발히 진행되었다. Ueda 등(1975), Murakawa 등(1996)은 자체개발한 유한요소 프로그램을 이용하여 용접부의 열탄소성해석으로 잔류응력을 해석하였다. 박정웅 등(2009)은 용접구조물의 두께가 용접 잔류응력에 미치는 영향에 대해 해석을 수행하였다. 이러한 유한



요소법의 수치해석적인 방법만으로는 신뢰성을 확인하기가 어렵기 때문에 실험과 함께 비교하며 연구가 진행되고 있다.

실험적인 방법으로 잔류응력을 측정하는 방법은 측정위치에 따라 표면과 내부측정법으로 구분한다. 표면의 잔류응력을 측정하는 방법은 HD, XRD, 절단법 등이 일반적으로 많이 사용하고 있다. 여기서는 최근 연구가 진행되고 있는 내부 잔류응력측정방법인 고유변형도법(Inherent Strain Method), 중성자 회절법, DHD, 등고선법 등에 대해 연구동향을 기술하고자 한다.

중성자 회절법은 중성자를 물체에 조사하면 금속의 특성에 따라 회절하는 현상을 이용하여 측정하는 방법으로 Bragg의 조건식(K. Hemmes, 2017)을 만족시키는 회절선 변화로부터 기준격자면 간격과 응력부하시 격자면사이의 간격을 측정하여 훅의 법칙을 이용하여 잔류응력을 구하는 방법이다. 최근 두께 25mm를 벗어나 최대 두께 70mm까지 측정할 수 있는 기술이 한국에서 개발되었으며, 70mm두께 강재에 대한 두 가지 입열조건에 따른 두께방향 용접잔류응력분포에 대해서 연구가 수행되었다. (우완측, 2015)

고유변형도법은 용접변형과 잔류응력을 유발시키는 고유변형을 이용하는 방법으로, 용접 후 추가적인 소성변형을 유발시키지 않은 한 고유변형도는 변하지 않는 특성이 있다. 이러한 원리를 이용하여 스트레인 게이지를 시험체 표면에 부착하여 절단하여 용접부의 근방에 분포하는 고유변형도를 측정하고, 이를 역해석으로 잔류응력을 계산하는 방법이다. Deng(2012) 등은 박판구조물의 용접변형을 예측하

기 위해 고유변형도법을 이용하였다. 특히 필렛용접에 대한 고유변형도를 유도하고 실험과 비교하였다. 박정웅(2013) 등은 두께 25mm, 70mm 부재에 대해 용접 프로세스에 따른 잔류응력을 측정하였다.

### 1.2.2 용접잔류응력에 미치는 구속도의 영향

용접프로세스를 사용하면 용접잔류응력과 변형은 필연적으로 발생한다. 따라서 용접잔류응력을 효율적으로 통제하는 것은 생산성 향상 및 신뢰성 있는 설계와 매우 밀접한 관계가 있다. 이와 관련하여 구속은 용접변형과 잔류응력이 발생하는데 있어 하나의 중요한 매개변수이다. 구속도가 비교적 크면 용접변형이 작은 대신 용접잔류응력이 크게 발생하고 이보다 더욱 구속이 강해지면 용접부에 균열이 발생한다. 따라서 용접변형과 잔류응력을 연구하기 위해서는 구속도에 대한 연구가 필요하다.

Watanabe. M(1958) 등은 H형태의 구속도 시험체를 만들어 수동책으로 외력을 가하고 그 때 발생하는 용접부의 변위로부터 구속도를 추정하는 방법을 제안하였다. 구속도와 횡수축변형과의 상관 관계를 규명하고 이를 실제 선박용 강구조물에 적용하였다. 또한 다양한 선박에 대해 구속도를 측정하고 분석한 결과 약 60%가  $1\text{kg}/\text{mm}^2/\text{mm}$  이고  $10\text{kg}/\text{mm}^2/\text{mm}$ 를 넘는 구속도는 없다고 보고하였다.

Satoh. K(1977) 등은 용접부의 휨구속 강도는 각변형의 구속을 정량적인 수치로 계산하는 것으로 평가하였다. 구속 강도의 개념을 각변형을 다루기 위해 확장하였는데, 휨구속도  $K_b$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K_b = M/\theta \quad (1.1)$$

여기서  $M$  : 단위 용접 길이당 휨 모멘트

$\theta$  : 용접부에서 전체 각변형

김유일(1998) 등은 용접시 발생하는 구조물의 손상 및 파괴의 원인으로 용접조건이 영향을 미치고 그 결과로서 비교적 높은 온도에서 발생하는 고온균열과 낮은 온도에서 발생하는 저온균열로 분류하고 그 원인을 용접잔류응력과 구속도로 판단하고 연구를 진행하였다. 그 결과 용접금속에 발생하는 횡균열은 용접선방향의 응력이 지배적이고, 구속도에 큰 영향을 받지 않는다고 보고했다. 그리고 구속도에 영향을 받는 것은 HAZ(열영향부, Heat Affected Zone)에 발생하는 저온균열이라고 수치해석과 시험을 통해 그 연관성을 보고하였다.

박정웅(2002) 등은 구속이 용접변형에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 다양한 구속도를 가지고 있는 시험체를 만들고 이를 탄성해석하여 구속도와 용접변형과의 연관성을 분석하고, 맞대기용접과 필렛용접에 대해 구속도를 유도하였다. 이러한 구속과 용접변형과의 관계를 이용하여 대형 강구조물의 용접제작시 발생하는 변형을 예측하고 이를 실험결과와 비교하였다.

이제명 등(2003)은 기존 연구들이 실제 현장에 사용하기 위해서는 적용범위의 확장이나 간이화 기법 도입의 필요성을 주장하였다. 특히, 구속효과와 균열의 상관관계에 대해 명시적인 형태의 관계정립이 되어 있지 않고 기존 연구가 단편적으로 수행되었다고 지적했다. 그래서 그들은 일관적인 접근이 부족한 구속효과에 대해 정량적으로 접근하고, 나이가 예열온도, 확산성 수소 등을 고려한 균열발생 예측기법을 제시하였다.

나인태(2019)는 구속된 부재의 용접잔류응력은 BS7910에서 제시한 값과 많은

차이가 있기 때문에 용접구조물의 안정성 평가 시 더욱 합리적인 잔류응력 기준의 필요성을 주장하였다. 부재의 두께, 항복응력과 구속도에 따른 열탄소성해석의 결과를 바탕으로 용접 중앙부와 토우부에서 두께방향의 잔류응력을 예측하는 식을 제시하였다. 그러나 예측방법은 횡방향 구속조건에 대해서만 고려한 것으로 휨에 대한 구속은 고려하고 있지 않다.

앞에서 조사한 연구자료를 통하여 이제까지는 구속이 없거나 횡방향 구속만을 고려한 경우에 대해서만 연구가 수행되었다. 그러나 실제 구조물에서는 횡구속 뿐 아니라 휨구속도 작용하고 있기 때문에 보다 정확한 구속을 고려하기 위해서는 횡구속과 휨구속을 조합한 구속을 고려해야한다. 따라서 본 연구는 맞대기 용접에서 횡구속과 휨구속이 용접잔류응력에 미치는 영향을 예측하기 위하여, 용접부재의 두께, 항복응력, 구속도를 변경하며 다양한 조건에서의 열탄소성해석을 수행하고 상관 관계식을 도출하였다.

## 제2장 이론적 배경

### 2.1 용접잔류응력

잔류응력은 외부에 작용하는 하중을 모두 제거하여도 물체 내부에 존재하는 응력을 말한다. 특히 용접이음부에는 부재에 외적 하중이 없더라도 용접에 의한 국부가열에 따라 불균일한 온도분포로 급격한 팽창 및 수축 등이 이루어지며 소성변형이 발생하고 용접 후 부재가 냉각되어도 발생한 소성변형도가 잔류하여 인장 또는 압축 용접잔류응력(Weld residual stress)이 발생한다. 이 용접잔류응력은 용접 입열량, 부재 두께, 이음 형상, 용접 순서, 모재의 물성, 경계조건 등의 영향을 받으며 결과물의 피로강도, 좌굴강도, 파괴강도, 취성, 부식저항, 진동특성 등에 영향을 끼치는 중요한 요인으로 작용한다.

#### 2.1.1 잔류응력의 생성원인

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 크게 내적/외적 잔류응력으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 용접부와 그 주변에서 고온으로 발생하는 소성변성과 재료의 변태로 발생하는 국부적인 응력과 재료의 냉각으로 발생하는 수축에 의해 생기는 잔류응력으로 내적 구속에 의한 응력이고, 두 번째는 용접 진행 중에 부재의 자유로운 팽창 또는 수축을 구속당한 상태에서 발생하는 응력 즉, 외적구속에 의한 응력이 있다. 복잡한 구조물은 위의 두가지 형식의 응력이 동시에 발생하는 경우가 많은데, 실제 잔류응력이 발생하는 상황은 용접이 행해지는 부재의 치수, 용접진행 방향, 형상 및 용접방법에 따라 다르고 상당히 복잡하다.

그림 2.1(a)에서 초기상태의 3가지 부재 중 중간부재는 연결되어 있지 않다. 그림 2.1(b)과 같이 중간부재를 용접을 하면 구조물 외부에서 외력은 작용하지 않으나 중간부재에서는 인장응력이 발생되고, 양쪽의 부재에서는 압축응력이 작용된다. 그림2.1와 같이 구조물 내부에 응력이 존재하는데 이것을 잔류응력이라고 한다.

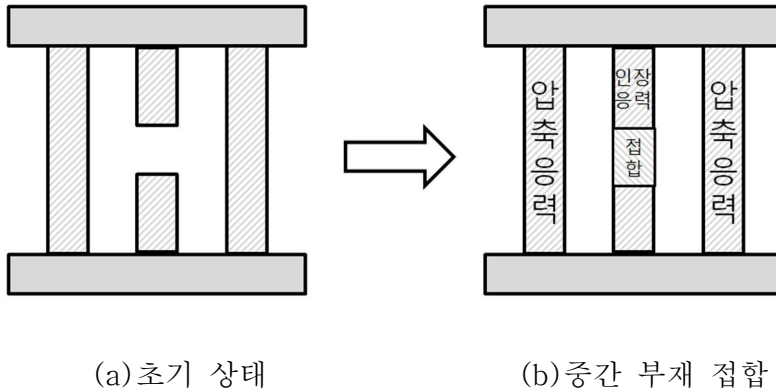
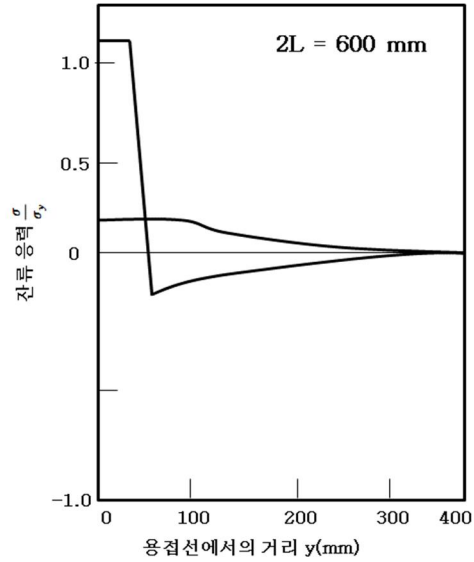


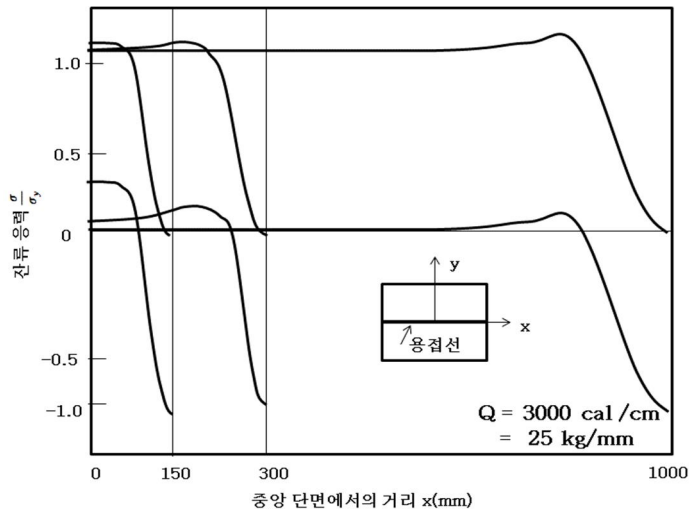
그림 2.1 조립 3가지 부재의 잔류응력(이승엽, 2011)

잔류응력이 존재하는 구조물은 평형상태를 유지하기 때문에, 구조물 내부의 임의의 단면에 대하여 생성되어 있는 잔류응력은 반드시 힘의 평형상태를 유지하여야 한다. 즉 구조물이 안정하기 위해선 주어진 단면에 분포하는 압축 잔류응력과 인장 잔류응력의 합력은 반드시 0이 되어야 한다.

일반적인 맞대기 용접이음에서 구속이 자유로운 상태에서의 용접잔류응력 분포는 그림 2.2와 같다.



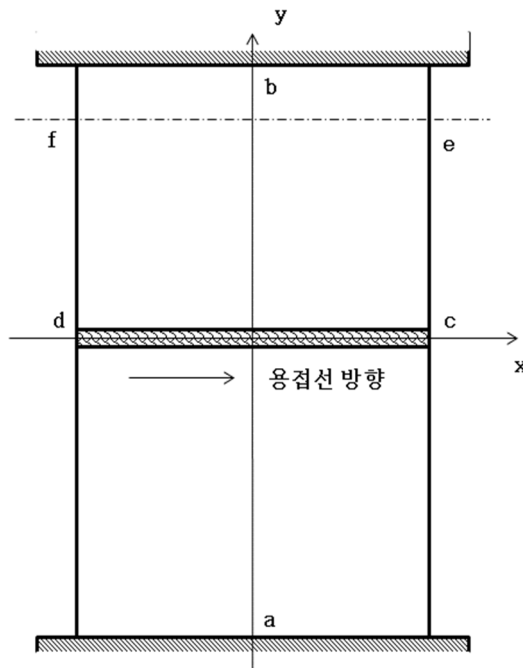
(a) 중앙단면(y축)상의 잔류응력 분포



(b) 용접선(x축)상의 잔류응력 분포

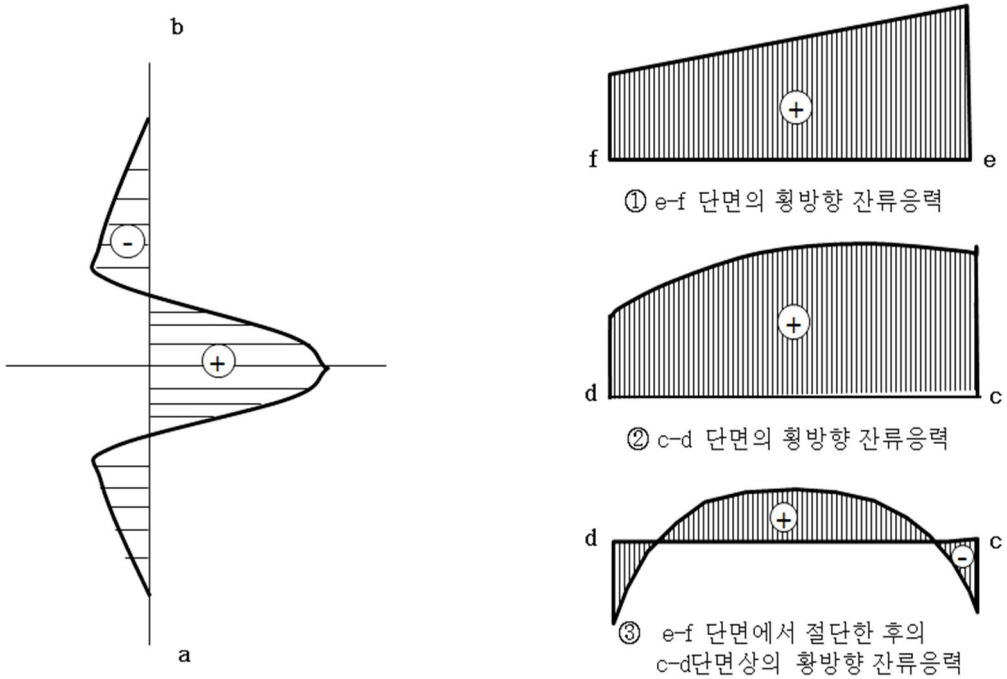
그림 2.2 구속이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포 (엄기원, 2010)

실제의 아크 용접이음에서 잔류응력분포는 용접하는 모재의 형상, 치수에 따라 다소 다르며, 용접이음부근에서 잔류응력이 불규칙하게 변동되므로 더욱 복잡하게 된다. 그러나 횡방향 구속이 작용하는 맞대기 용접이음의 잔류응력분포의 전반적인 특성은 그림 2.3과 같다. 용접 길이가 긴 경우에는 용접부의 근처의 용접선 방향의 잔류응력( $\sigma_z$ )쪽이 용접선 직각방향의 잔류응력( $\sigma_x$ )보다 매우 크다. 용접 부 근처에서는 종 방향의 인장 잔류응력의 크기는 재료의 인장항복응력의 크기가 된다.



(a) 구속된 용접이음





(b) a-b 단면의 종방향 잔류응력

(c) 횡방향의 잔류응력분포

그림 2.3 구속된 용접 이음에 생기는 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

그림 2.3(b), (c)는 횡방향 구속이 작용하는 용접이음에서의 잔류응력 분포를 보이고 있다. 그림 2.3(b)는 a-b 단면의 종 방향 잔류응력( $\sigma_x$ )을 나타내고 있다. 용접비드 주변에서는 큰 인장잔류응력이 발생하고, 비드에서 조금 떨어진 곳은 압축 잔류 응력의 형태로 나타나는 그래프이다. 그림 2.3(c)는 d-c 단면의 횡 방향 잔류응력( $\sigma_y$ )을 나타내고 있다. 횡방향의 잔류응력은 수축을 구속하여 생기게 된 잔류응력이다. 구속응력이 문제가 되는 이유는 후판의 맞대기이음을 여러층으로 용접할 때 처음 용접을하는 용접층에 생기는 구속응력이 대부분 단면이 작고 변형되기 쉬운 용접부에 집중되어 있으며 용접부의 구속응력이 매우 크게 집중되어 용접 균열의 원인이 되는 경우가 있다.

## 2.1.2 잔류응력의 측정

잔류응력을 측정하는 방법에는 실험적인 계측방법과 이론적인 방법 두 가지의 방법이 있다. 실험적인 계측 방법은 그림 2.4와 같이 측정부재의 파괴 정도와 측정할 수 있는 두께의 따라 나눌 수 있게 된다. 또 이론적인 방법은 수치해석적인 방법으로 유한요소해석을 이용한 프로그램을 이용하여 잔류응력을 측정할 수 있는 방법이다. 최근에 많이 사용되고 있는 내부 잔류응력을 측정할 수 있는 방법은 중성자 회절법, 고유변형도법, 등고선법(Contour Method), DHD 등이 있다. 본 연구에서 사용된 중성자 회절법에 관하여 간단한 설명을 추가하였다.

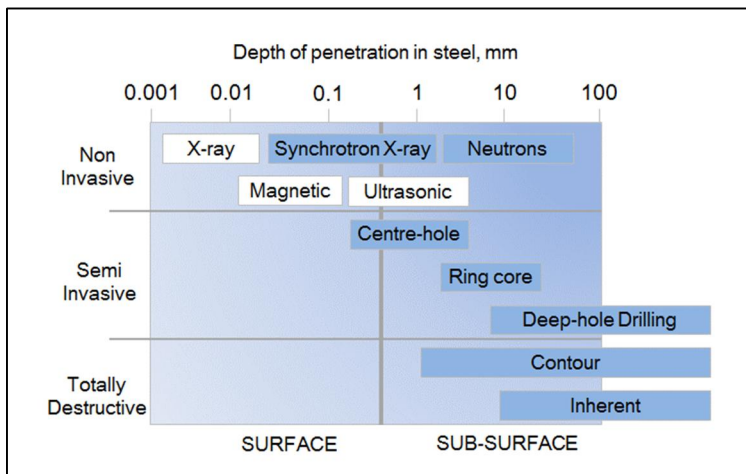


그림 2.4 측정법에 따른 측정 깊이

### 중성자 회절법 (Neutron Method)

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

일반적으로 중성자 회절법을 이용하여 잔류응력을 측정하는 기본적 원리는 다음과 같다. 원자로 내부에서 우라늄 등의 중성자 발생 물질이 핵분열을 일으키며 발생하는 다양한 파장의 중성자원을 단결정인 단색기(Monochromator)를 이용하여 일정한 파장( $\lambda$ )을 가진 중성자(Neutron)만을 선택하여 빔 가이드로 이동시킨다. 이러한 단파장 빔은 그림 2.5 처럼 그 크기를 결정하는 mm 폭의 빔 슬릿(Incident slit)을 통과하게 된다.

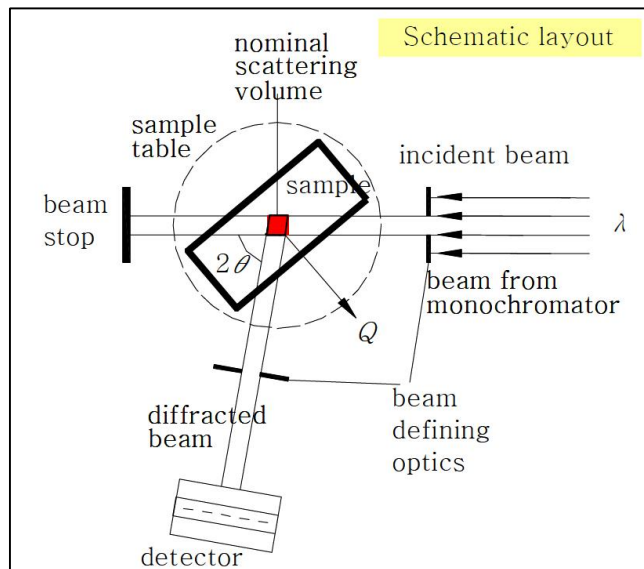


그림 2.5 중성자 회절법에 의한 잔류응력 측정

재료의 내부에 침투된 중성자는 원자핵으로부터 산란되며 이때 중성자는 입자의 회절각( $2\theta$ )에 따라 일정한 격자면 입자로부터 브래그의 법칙( $\lambda = 2d\sin\theta$ )에 따라 회절하여 입자의 면간 거리(Interplanar distance, d-spacing, d)에 따라 Peak의 위치가 결정된다.

회절 Peak의 위치변화에 따른 응력 계산법으로는

- 1) 증성자가 회절된 격자면의 면간거리( $d$ )를 고유한 변형계이지(Strain gauge) 값으로 가정하여 이로부터 기준 면간거리( $d_0$ , 잔류응력이 없는 Stress-free 상태) 값으로부터 변형 값(Strain,  $\varepsilon$ )을 식 (2.1)을 사용하여 계산한다. 즉, 회절 Peak 위치 변화로 변형을 계산한다.

$$\varepsilon = (d - d_0)/d_0 = -\cot(\theta) (\theta - \theta_0) \quad (2.1)$$

여기서,

$d$  : 측정된 면간거리

$d_0$  : 응력 없는 상태의 면간거리

$\theta$  : 측정된 회절 Peak 중심각도

$\theta_0$  : 응력 없는 상태의 Peak 중심각도

- 2) 잔류응력(Residual Stress,  $\sigma$ )은 훅의 법칙을 적용한 식 (2.2)를 이용해 계산하여 3축 주응력(Principal stress)을 결정한다.

$$\sigma_i = \frac{E_{hkl}}{1+\nu_{hkl}} \left[ \varepsilon + \frac{\nu_{hkl}}{1-2\nu_{hkl}} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right] \quad (2.2)$$

여기서,

$\sigma$  : 잔류응력

$E_{hkl}$  : 격자면의 회절 탄성계수

$\nu_{hkl}$  : 격자면의 포아송비

$\varepsilon$  : Strain 변형

## 2.2 열탄소성해석 (Thermal Elasto-Plastic Analysis)

구체가 주어진 물체력 및 경계조건을 만족함과 동시에 평형을 이루고 있다고 하면 평형방정식과 역학적 경계조건이 성립되게 된다. 이 상태에서 임의의 미소변위  $\delta u$ ,  $\delta v$ ,  $\delta w$ 를 주면 다음 식과 같다(이주성, 1985).

$$\begin{aligned}
 & - \int_V \left[ \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \bar{X} \right) \delta u + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \bar{Y} \right) \delta v + \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \bar{Z} \right) \delta w \right] dV \\
 & + \int_{S'} [(T_x - \bar{T}_x) \delta u + (T_y - \bar{T}_y) \delta v + (T_z - \bar{T}_z) \delta w] dS = 0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

여기서,

$\sigma$ : 면에 수직인 응력

$\tau$ : 면에 평행한 응력

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ : 체적력 행렬

$T$ : 온도함수

$\bar{T}$ : 변위, 하중, 강성의 변환행렬

$V$ : 전단력

$S$ : 표면적

식 (2.3)은 식 (2.4)과 같이 나타낼 수 있고 가상일의 원리(Principle of Virtual Work)이다.

$$\begin{aligned}
 & \int_V [\sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_y \delta \epsilon_y + \sigma_z \delta \epsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{zx} \delta \gamma_{zx}] dV \\
 & - \int_V (\bar{X} \delta u + \bar{Y} \delta v + \bar{Z} \delta w) dV - \int_{S'} (\bar{T}_x \delta u + \bar{T}_y \delta v + \bar{T}_z \delta w) dS = 0
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

식(2.4)을 정식화 하면,

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T\{\sigma\}dV - \int_V \delta\{U\}^T\{\bar{F}\}dV - \int_{S^r} \delta\{U\}^T\{\bar{T}\}dS = 0 \quad (2.5)$$

여기서,

$\{\sigma\}$  : 응력 벡터

$\{\varepsilon\}$  : 변형률-벡터

$\{U\}$  : 변위 벡터

$\{\bar{F}\}$  : 단위체적당 물체력 벡터

$\{\bar{T}\}$  : 단위체적당 표면력 벡터

변형률-변위 (Strain-Displacement) 관계식은

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, & \gamma_{zy} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.6)$$

이고 이것은 다시,

$$\{\varepsilon\} = [A]\{U\} \quad (2.7)$$

[A]는 미분 연산자를 가지고 있는 매트릭스이다.

위 식들로 응력-변형률 관계를 보면

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha T \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha T \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T \\
 \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}, \quad \gamma_{zy} = \frac{1}{G} \tau_{zy}, \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

여기서,

$\{\alpha\}T = \varepsilon^t$  : 열변형률,  $\alpha$  : 순간선팽창계수,  $T$  : 온도이다.

따라서 전변형률  $\{\varepsilon\}$ 은 탄성 변형률  $\{\varepsilon^e\}$ 와 열변형률  $\{\varepsilon^t\}$ 에 합으로 나타낸다.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \tag{2.9}$$

응력과 변형률은 후의 법칙으로부터

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\varepsilon^e\} \tag{2.10}$$

여기서,

$[D^e]$ : 탄성 응력-변형률 매트릭스이다.

식 (2.10)에 식 (2.9)을 대입하면 아래와 같다.

$$\{\sigma\} = [D^e] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^t\}) \tag{2.11}$$

위 식 (2.11)의 응력-변형률 관계식을 역행렬을 이용하여 나타내면

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = [D^e]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \\ \alpha T \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

또는,

$$\{\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{\sigma\} - \{\varepsilon^t\} \quad (2.13)$$

식 (2.10)을 증분형으로 다시 쓰면,

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon - d\varepsilon^t\} \quad (2.14)$$

식 (2.3)은 재료의 물리적 정수의 온도 의존성을 무시할 경우 응력-변형률 관계식이 된다. 온도의 의존성을 고려 할 경우 응력 증분의 영향을  $[C]dT$ 라고 하면,

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [C]dT \quad (2.15)$$

재료가 탄성거동을 하는 경우 식 (2.9), 식 (2.10)을 이용하여 증분형으로 쓰면

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\} \quad (2.16)$$

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon^e\} \quad (2.17)$$

여기서, 탄성 변형률은 응력 및 온도의 함수이므로, 탄성 변형률의 증분은

$$\{d\varepsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\varepsilon^e\}}{\partial T} dT \quad (2.18)$$



식 (2.14)을 식 (2.15)에 대입하여 정리하면

$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT \quad (2.19)$$

식 (2.19)을 식 (2.16)과 식 (2.14)에 대입하여 정리하면

$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \quad (2.20)$$

식 (2.20)을 식 (2.14)에 대입하면 탄성영역에서 응력증분에 대한 구성 방정식은 다음과 같이 구해진다.

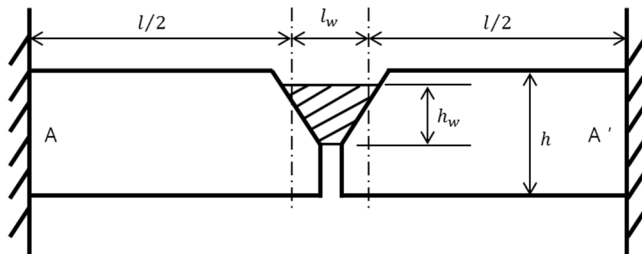
$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]^{-1}\{d\varepsilon\} - [D^e] \left( \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\} \right) dT \\ &= [D^e]^{-1}\{d\varepsilon\} - \left( [D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E} \frac{E - E_1}{\Delta T}\{\sigma\} \right) dT \\ &= [D^e]^{-1}\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \end{aligned} \quad (2.21)$$

## 2.3 구속도

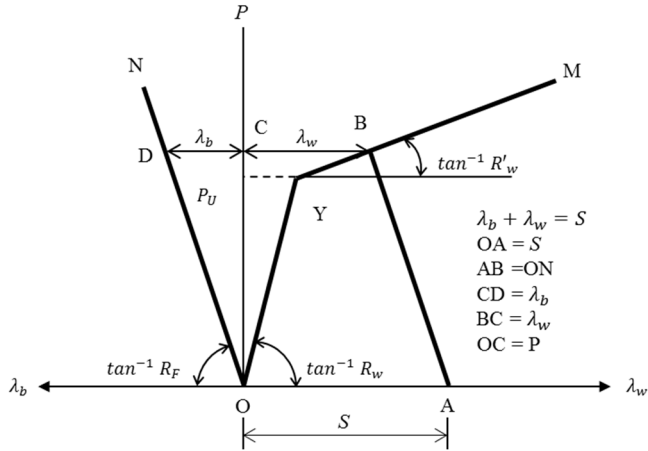
구조물의 용접이음에서 용접에 의한 팽창수축변형은 주변 부재로 인하여 구속되는 경우가 많은데 이 때문에 용접부에는 구속응력이 발생하게 된다. 특히 후판의 맞대기 다층용접에서 초층의 용접부 목두께가 모재의 판두께에 비하여 작으므로 수축은 변형이 발생하기 쉬운 용접부에 집중되고, 용접부에 큰 구속응력을 유발시켜 용접 균열의 원인이 된다. 실제의 용접구조에서 이음의 구속상태는 여러 가지 형식이 있으나 그림 2.7(a)에서 가장 기본적인 양단을 강체벽에 고정시킨 이음을 설명한다. 이와 같은 이음에서 양단 AA' 사이에 발생하는 자유수축 S가 구속되어 S의 일부는 모재의 변형  $\lambda_b$ 로 변하고 나머지는 용접부의 변형  $\lambda_w$ 로 변하여 다음 식과 같이 된다.

$$\lambda_b + \lambda_w = S \quad (2.35)$$

모재의 판두께  $h$ 가 용접부의 목두께  $h_w$ 에 비하여 충분히 클 때, 용접부에 균열을 발생시키는 구속력 P(단위 용접길이당의 구속력)가 작용하고 모재의 대부분이 탄성적인 거동을 나타내면 P와  $\lambda_b$ , 혹은 P와  $\lambda_w$ 의 관계는 각각 그림 2.8의 직선 ON 혹은 절선 OYM과 같은 모습으로 나타낼 수 있다.



(a) 양단고정의 맞대기 이음



(b)

그림 2.6 양단 고정의 맞대기 용접이음에서 구속력과  
 모재, 용접 금속의 변형과의 관계

용접 조건에 의하여 정해지는 자유구속  $S$ 가 주어지면 그림 중에 나타낸 순서에 의하여 구속력  $P$ , 변형  $\lambda_b$ ,  $\lambda_w$ 가 구해진다.  $P$ 와  $\lambda_b$ 의 관계를 나타내는 직선  $ON$ 의 구배가 작고, 그림 2.7(b)의  $B$ 점이 직선  $OY$ 상에 있는 경우, 즉 용접부의 변형이 탄성적인 경우에는

$$S = \lambda_b + \lambda_w = \left( \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_w} \right) F \quad (2.36)$$

$h/l$ 가 극단적으로 크지 않은 범위에서

$$R_F = \frac{Eh}{l} \text{ (직선 } ON \text{의 구배)} \quad (2.37)$$

$$R_w = \frac{Eh_w}{l} \text{ (직선 OY의 구배)} \quad (2.37)$$

단,  $E$ : 종탄성계수

따라서 구속응력  $\sigma_w$ 는

$$\sigma_w = \frac{P}{h_w} = \frac{S}{h_w} \left( \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_w} \right)^{-1} \quad (2.38)$$

그러나, 보통의 용접이음에서는  $R_F \ll R_w$ 이므로 구속응력  $\sigma_w$ 는 근사적으로 다음 식으로 나타낸다.

$$\sigma_w = \frac{S}{h_w} R_w = mR_w \quad (2.39)$$

즉, 구속응력  $\sigma_w$ 는 그림2.3 (b)의 직선 ON의 구배  $R_F$ 에 비례한다. 이  $R_F$ 는 이음의 루트간격을 단위량으로 좁히기 위하여 필요한 단위 용접길이당 힘에 상당하며, 이것을 구속도(Constraint intensity)라고 한다.

## 제3장 연구방법 및 연구결과

이번 장에서 비선형 유한요소 해석틀 MSC. Marc Mentat(2017)을 활용한 유한요소해석에 의해 횡구속과 휨구속이 부재의 용접잔류응력에 어떤 영향을 미치는지 연구하고 구속도, 두께, 부재의 항복강도에 따른 잔류응력을 예측하는 식을 유도하였다. 이를 위한 열탄소성해석을 신뢰성있게 수행하기 위하여 해석상 하중으로 작용하는 입열량에 따른 온도해석결과와 실험결과를 비교하여, 적절한 입열상태를 선정하였다. 또한 대상구조물의 규모와 복잡한 용접프로세스 때문에 3차원 열탄소성해석을 수행하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 2차원해석을 수행하고 결과의 신뢰성을 검토하였다.

### 3.1 온도해석

용접에 의한 열탄소성해석은 온도해석과 열응력해석으로 구분할 수 있는데 대부분 온도해석과 열응력해석을 동시에 실시하는 결합해석이다. 온도분포는 역학해석에서 하중과 같은 역할을 하기 때문에 정확한 온도해석은 비선형 열탄소성해석시 매우 중요한 역할을 차지한다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에서 실시된 두개의 온도측정결과를 인용하여 이를 해석 결과와 비교하였다.

#### 3.1.1 실험 및 해석 시험편

해석 및 실험에 사용한 모델은 그림 3.1와 같으며 현장에 가장 보편적으로 이용되고 있는 용접프로세스를 사용하였다. 그림 3.1(a)는 FCAW(Flux Core Arc

Welding) 용접프로세스이고 그림 3.1(b)는 SAW(Submerged Arc Welding) 용접프로세스를 사용하였다. 그림 3.1(a) FCAW 시험체는 두께가 12.1mm이고 폭 800, 길이 700mm이다. 총 용접패스는 3pass이고 자세한 용접조건은 표 3.1에 보여주고 있다. 용접부 단면형상은 그림 3.2(a)와 같다. 그림 3.1(b)는 SAW 시험체로서 SAW용접프로세스를 사용하였으며, 기존 SAW와 다르게 개선 홈에 supplemental cut wire를 채우고 SAW용접을 함으로서 용착량을 증가시키는 공법을 사용하였다. 대상시험편의 두께는 25mm, 폭 1000mm, 길이는 1000mm이며, 용접부 단면형상은 그림 3.2(b)와 같다. 용접패스는 single pass이고 용접조건은 표 3.2에 보여주고 있다.

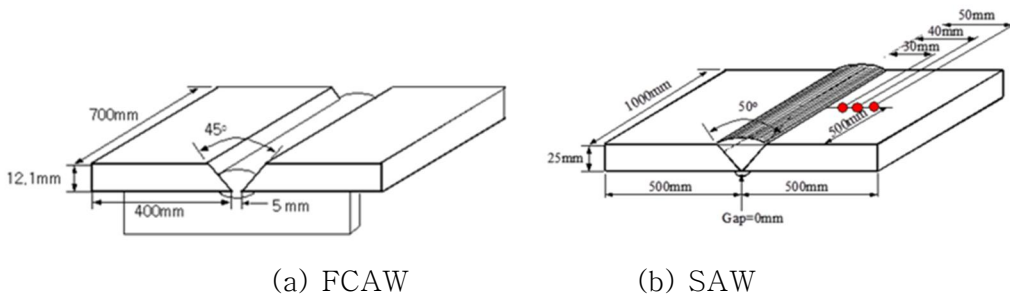
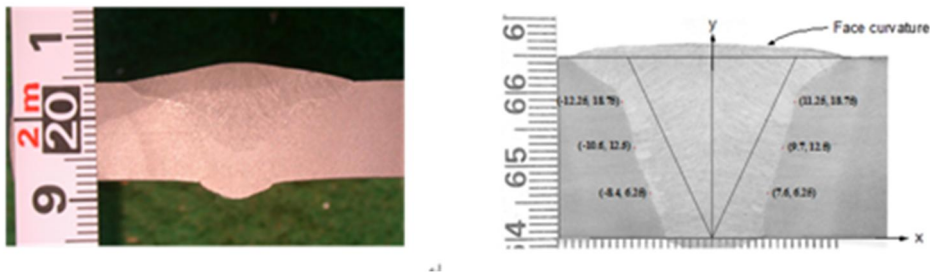


그림 3.1 대상 모델



(a) FCAW (b) SAW

그림 3.2 용접부 단면마크로

표 3.1 FCAW 용접조건

| Pass | Process                        | Initial and Interpass Temperature (°C) | Welding Condition |             |                |
|------|--------------------------------|--|-------------------|-------------|----------------|
|      |                                |  | Amperage (A)      | Voltage (V) | Speed (mm/min) |
| 1    | FCAW<br>( $\varnothing$ 1.4mm) | 27.0                                   | 240               | 27.5        | 207            |
| 2    | FCAW<br>( $\varnothing$ 1.4mm) | 27.0                                   | 300               | 32          | 300            |
| 3    | SAW<br>( $\varnothing$ 4.8mm)  | 27.0                                   | 650               | 32          | 325            |

표 3.2 SAW 용접조건

| Process                           | Initial and Interpass Temperature (°C) | Welding Condition |             |                |
|-----------------------------------|--|-------------------|-------------|----------------|
|                                   |  | Amperage (A)      | Voltage (V) | Speed (mm/min) |
| SAW<br>with supplemental cut wire | 10.5                                   | 1120              | 34.5        | 210            |

### 3.1.2 열탄소성해석 및 온도측정 결과

FCAW해석 모델에서 4가지 온도해석결과와 실험에 의해 측정된 결과를 비교하기 위해 그림 3.3과 같이 표면에서는 용접부 중심에서 15, 20mm 떨어진 2곳(top\_15, top\_20)과 하면에서는 용접부 중앙에서 10mm, 12mm 떨어진 곳(bot\_10, bot\_12)에서 열전대를 부착하여 측정하였다. 입열방법에 의한 입열량의 차이에 따라서 조건 A, B, C, D를 설정했다

그림 3.4는 용접패스별 측정와 해석의 최고도달온도를 보여주고 있다. 점선은 2회 측정된 값이고, 실선은 4개의 기관에 해석한 결과를 보여주고 있다. 조건 A, B, C의 해석결과는 실험결과와 유사한 결과를 보여주고 있으나 조건 D의 결과는 실험결과와 많은 차이를 보여주고 있다. 특히 첫번째와 세번째 패스에서 많은 최고도달온도의 크기에 차이가 있는 것을 보여주고 있다.

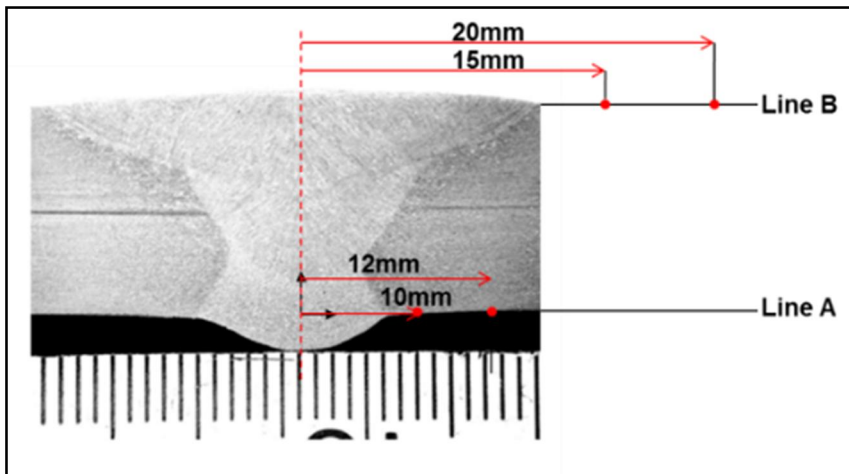


그림 3.3 FCAW 시험체의 온도측정 위치



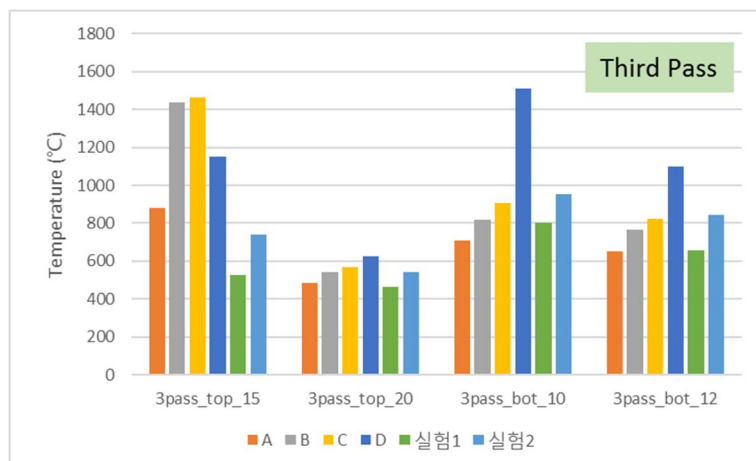
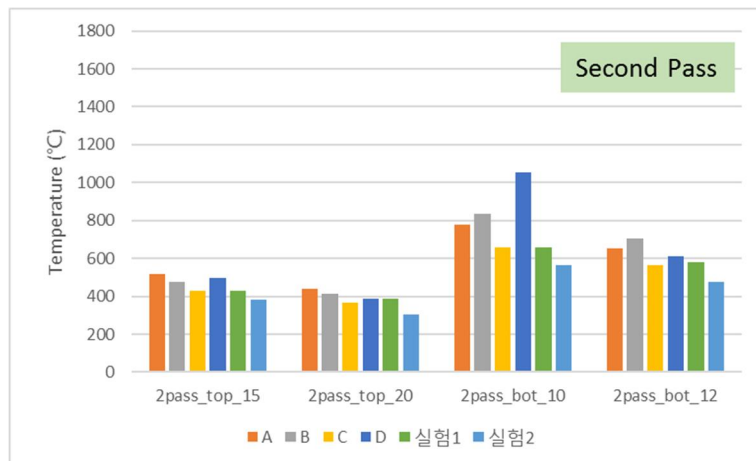
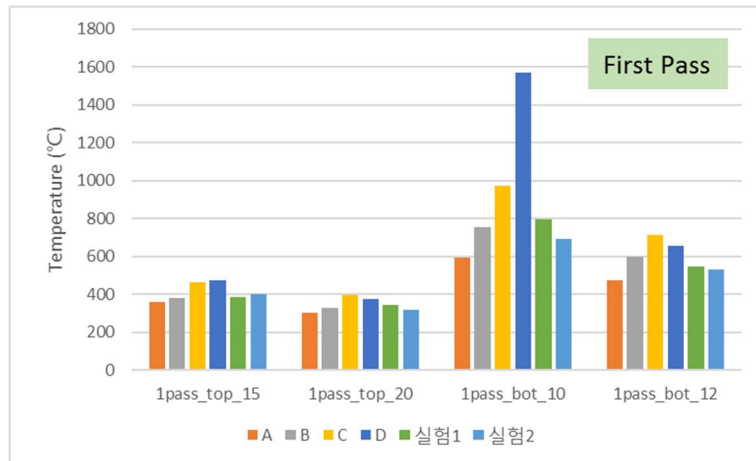
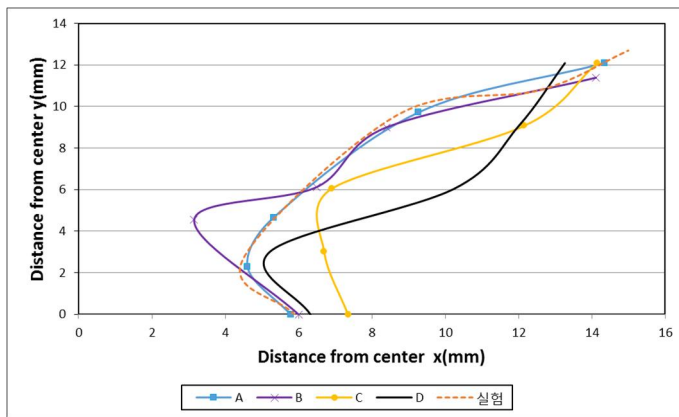
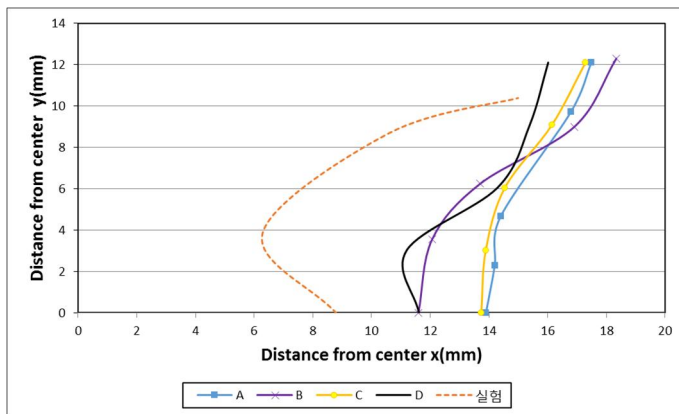


그림 3.4 FCAW 시험체에 대한 최고도달온도

이러한 현상의 원인을 파악하기 위해 그림 3.5에 실험체의 Fusion line과 HAZ line에서의 측정값은 점선으로 나타내고 해석에서 측정된 최고도달온도는 실선으로 보여주고 있다. 그림 3.5는 A3변태점에 도달한 온도를 의미하고 본 연구에서는 그 온도를 730℃ 로 가정하였다. HAZ line은 실험값에 비교해서 모든 기관에서 더 넓게 예측하였으며, Fusion line은 조건 D가 특별히 더 넓은 영역에 걸쳐서 입열량이 들어간 것을 알 수 있다. 따라서 조건 D의 결과에서 최고도달 온도가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 한편 Fusion line이 HAZ line보다 최고도달 온도에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.



(a) Fusion Line



(b) Haz Line

그림 3.5 FCAW 시험체 Fusion Line과 Haz Line 비교

SAW 해석 모델에서 참가한 기관의 온도해석결과와 그림 3.6과 같이 표면에서 용접부 중심에서 30, 40, 50mm 떨어진 3곳(top\_30, top\_40, top\_50)에 열전대를 부착하여 온도이력을 측정하였다.

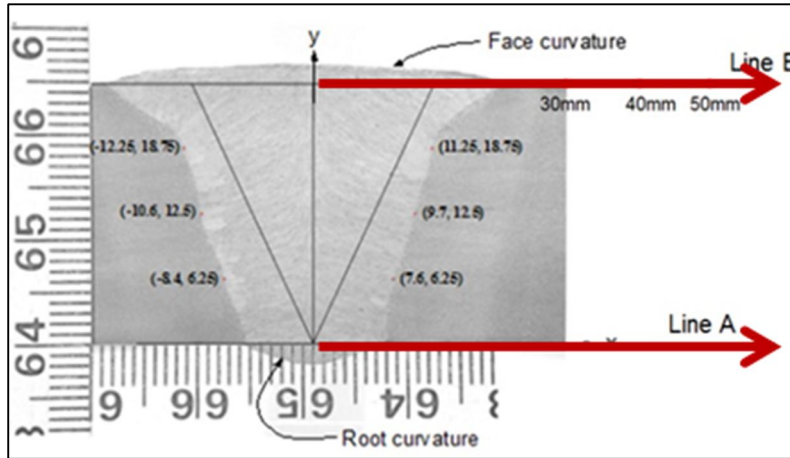


그림 3.6 SAW 시험체의 온도측정 위치

그림 3.7은 2회 측정된 결과와 3조건에서 해석의 최고도달온도를 보여주고 있다. 점선은 2회 측정된 온도이고, 실선은 3개의 조건으로 열전도 해석한 결과를 보여주고 있다. 전체적인 해석결과는 측정결과와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 단, 조건 A의 해석결과가 실험 및 다른 해석 결과가 약간의 차이를 보여주고 있다. 그 차이는 FCAW 시험체의 차이와 비교하면 매우 적다. 그 원인을 분석하기 위해 실험과 해석의 HAZ line과 Fusion line를 그림 3.8에서 비교해 보았다. 그 결과 Fusion line은 거의 비슷하였으나 조건 A의 HAZ line이 표면에서 급격히 넓어진 것을 확인하였다. 그 결과 조건 A의 최고 온도가 표면에서 더 높게 나타난 것을 알 수 있었다.

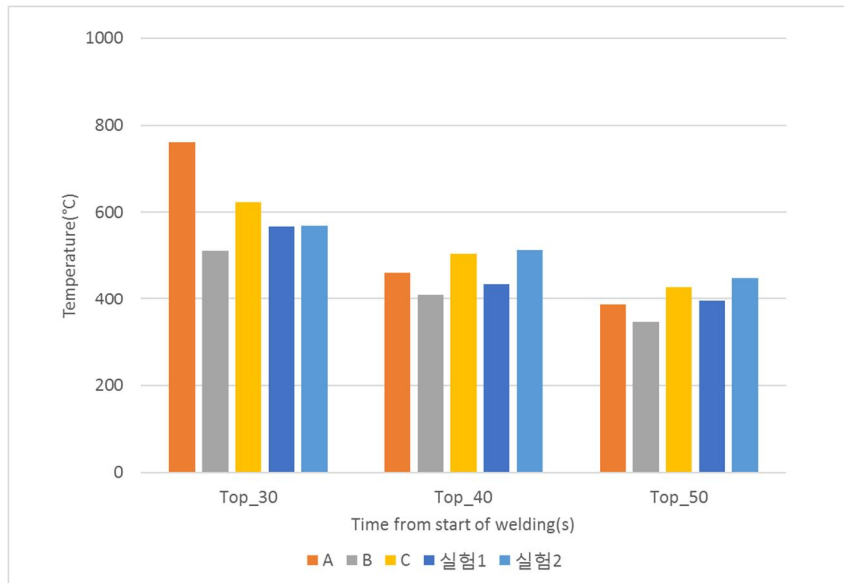
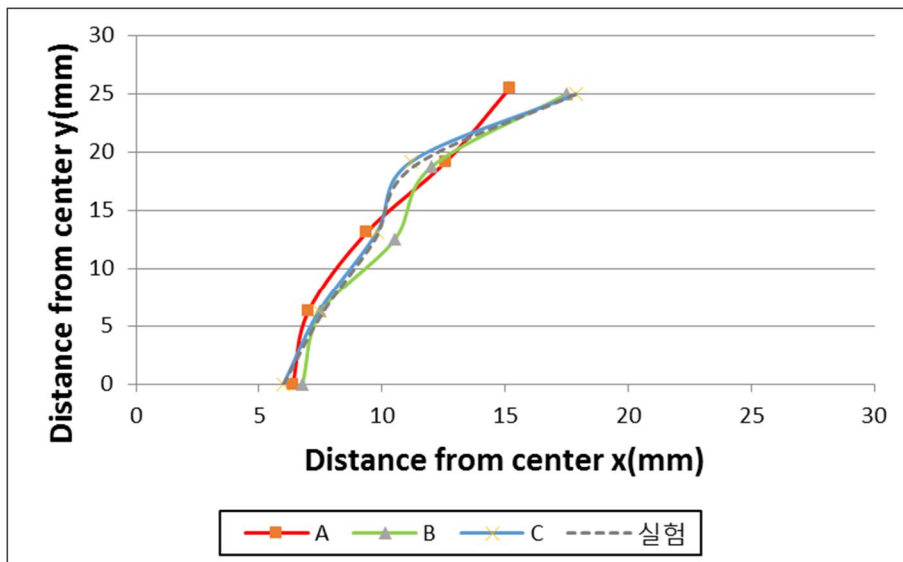
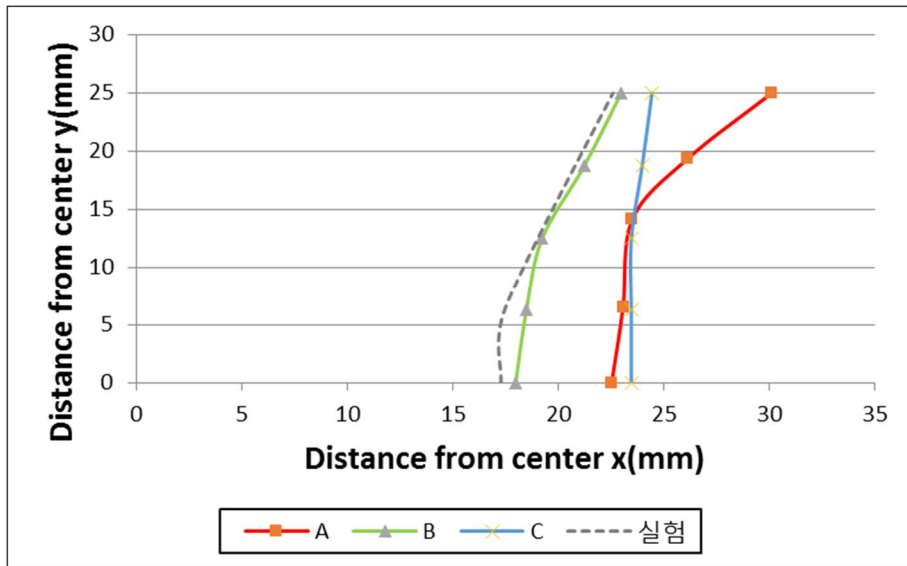


그림 3.7 시험체 SAW에 대한 최고도달온도



(a) Fusion Line



(b) Haz Line

그림 3.8 SAW시험체 Fusion Line과 Haz Line 비교

이상의 결과로부터 실험과 해석에 의해 구한 HAZ line과 Fusion line이 일치하는지를 확인하였다. 특히 온도해석의 정확도에는 Fusion line이 HAZ line보다 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

## 3.2 2차원해석의 신뢰성

본 연구의 해석 모델 기준으로 용접 대상의 두께가 70mm인 비교적 두꺼운 부재와 60번이 넘어가는 용접횟수, 용접길이 등을 고려하였을 때, 3차원 모델은 2 차원 모델에 비하여 막대한 양의 매쉬를 형성하게 된다. 또한 열해석과 구조해석이 동시에 진행되는 열탄소성해석기법에 비추어 보았을 때, 3 차원 해석은 2 차원 해석과 비교할 수 없을 정도로 막대한 계산 시간을 요구하게 된다. 최근 컴퓨터의 발전으로 수치 계산속도가 향상되었음에도 불구하고 3차원 열탄소성해석으로 많은 케이스의 해석을 실시하는 것은 현실적으로 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 2차원 열탄소성해석으로 구속이 잔류응력에 미치는 영향을 검토하기 위해 3차원 열탄소성해석시 길이방향의 구속효과를 적절히 고려할 수 있는 2차원해석방법에 대한 신뢰성을 확인할 필요가 있다. 2차원과 3차원 열탄소성해석에 대한 신뢰성은 선행연구에서 중성자 회절법으로 잔류응력을 측정된 모델을 바탕으로 3D, 2D 해석을 실시하고 비교, 분석하였다.

### 3.2.1 해석모델

그림 3.9는 실험과 해석에 사용한 단면마크로를 보여주고 있다. 실험에 사용된 강재는 항복응력이 500MPa인 EH40급 강재를 사용하였으며 물성치는 표 3.3에 보여주고 있다. 사용한 용접프로세스는 FCA 용접이고, 사용한 용접조건 및 용접와이어는 표 3.4와 같고, 총 용접패스는 60pass 이다. 그림 3.10은 해석에 사용한 2D와 3D에 모델로서, 두께가 70mm, 길이 300mm, 폭 300mm이다. 그림 3.11은 열탄소성해석에 사용한 기계적성질의 온도의존성을 보여주고 있다.

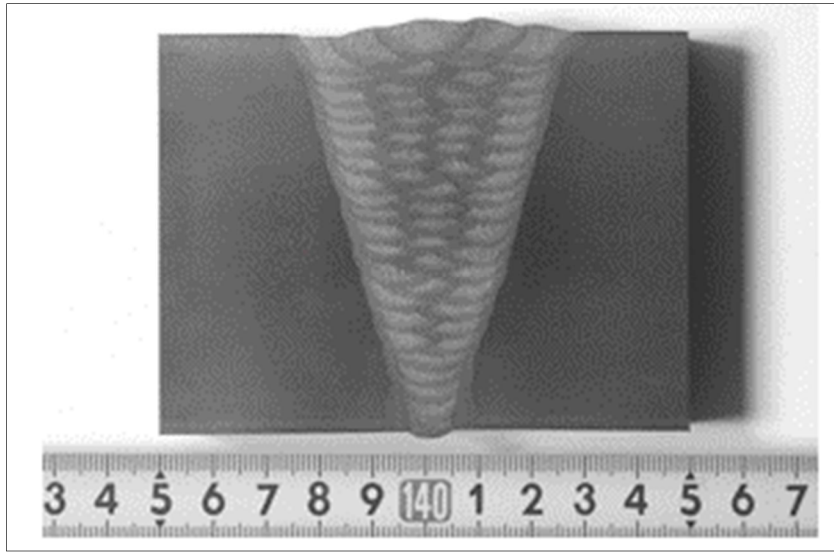


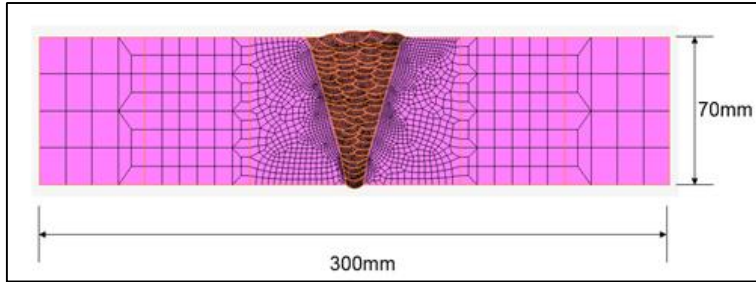
그림 3.9 두께 70mm 부재의 용접부 단면마크로

표 3.3 두께 70mm 부재의 기계적성질

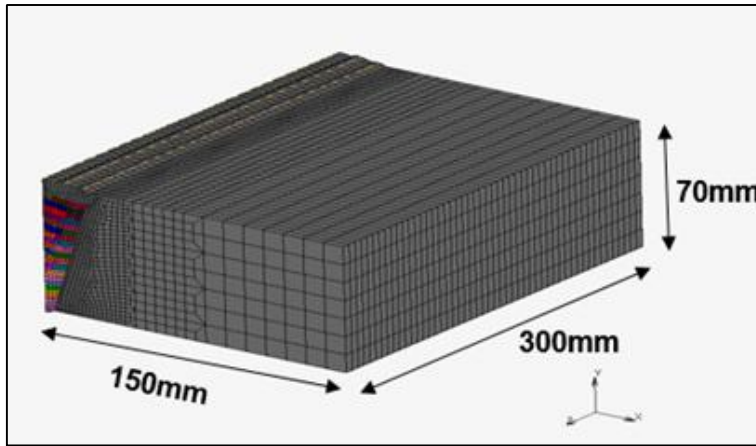
| Factors                | Base materials | Welding consumable |
|------------------------|----------------|--------------------|
|                        | EH40 TMCP      | SF-36E             |
| Yield Strength (MPa)   | 500            | 570                |
| Tensile Strength (MPa) | 604            | 610                |
| Young' s Modulus (GPa) | 206            | 206                |
| EL (%)                 | 21             | 29                 |
| Poisson' s Ratio       | (0.28)         | (0.28)             |

표 3.4 두께 70mm 부재의 용접조건

| Steel | Welding Process | Heat Input  | Consumables  | Shield Gas           | Current | Voltage | Speed | Pass /Layer |
|-------|-----------------|-------------|--------------|----------------------|---------|---------|-------|-------------|
| EH40  | FCAW            | 15~17 kJ/cm | ST-36EINSSWJ | 100% CO <sub>2</sub> | 255A    | 32V     | 30CPM | 60/21       |



(a) 2차원 해석모델



(b) 3차원 해석모델

그림 3.10 두께 70mm 부재의 해석모델

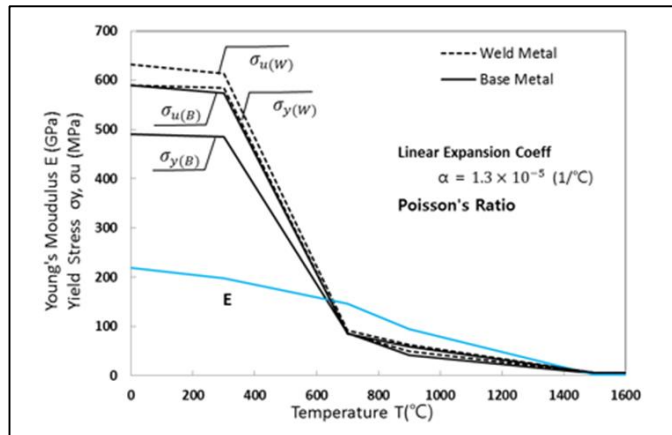
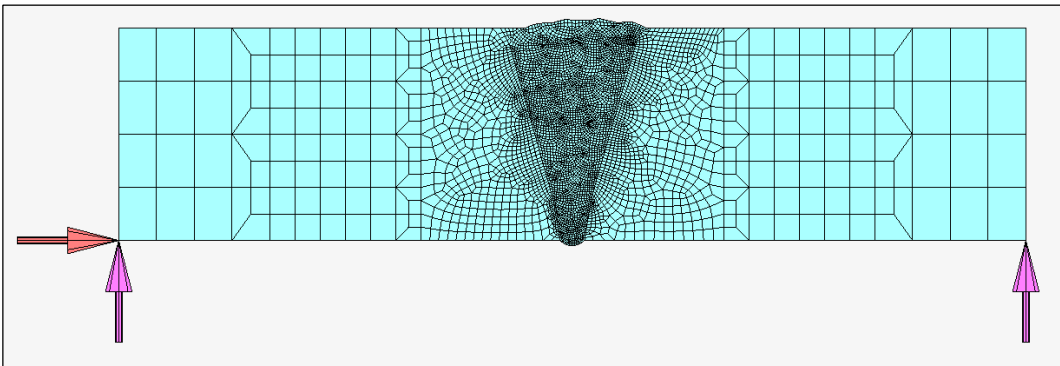


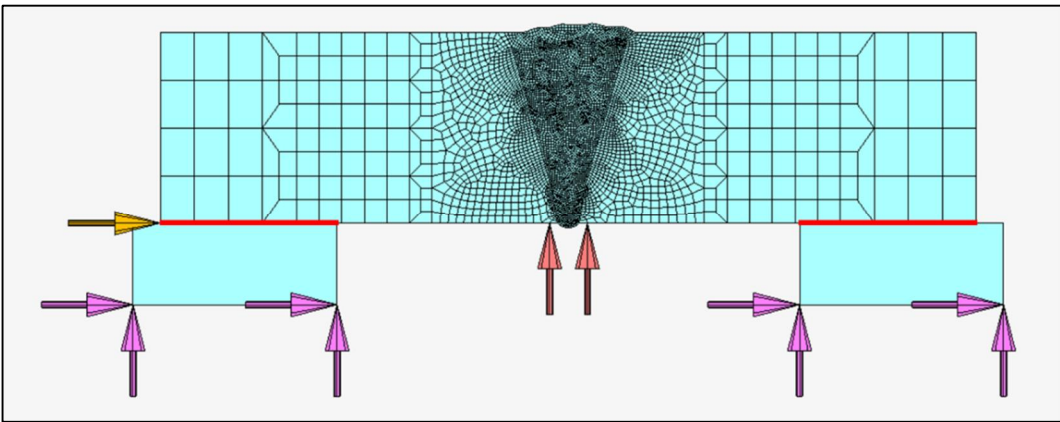
그림 3.11 두께 70mm 부재의 기계적성질의 온도의존성



그림 3.12는 2차원해석시 적용된 경계조건을 보여주고 있다. 그림 3.12(a)는 부재의 양단을 Y방향으로 구속시키고 한쪽만 X방향 구속을 시켜 자유로운 횡방향 변형을 허용해주는 일반적인 경계조건이다. 하지만 본 연구에서는 부재 양단의 각변형을 허용하고 용접초기의 중앙부의 과한 처짐을 방지하여 더 상세한 해석이 가능할 수 있도록 그림 3.12(b)에서 보는 바와 같이 Contact Support를 도입하였다. 3차원 해석모델의 경계조건은 강제변형이 발생하지 않도록 단순 지지조건이 되도록 설정하였다.



(a) 단순 경계조건



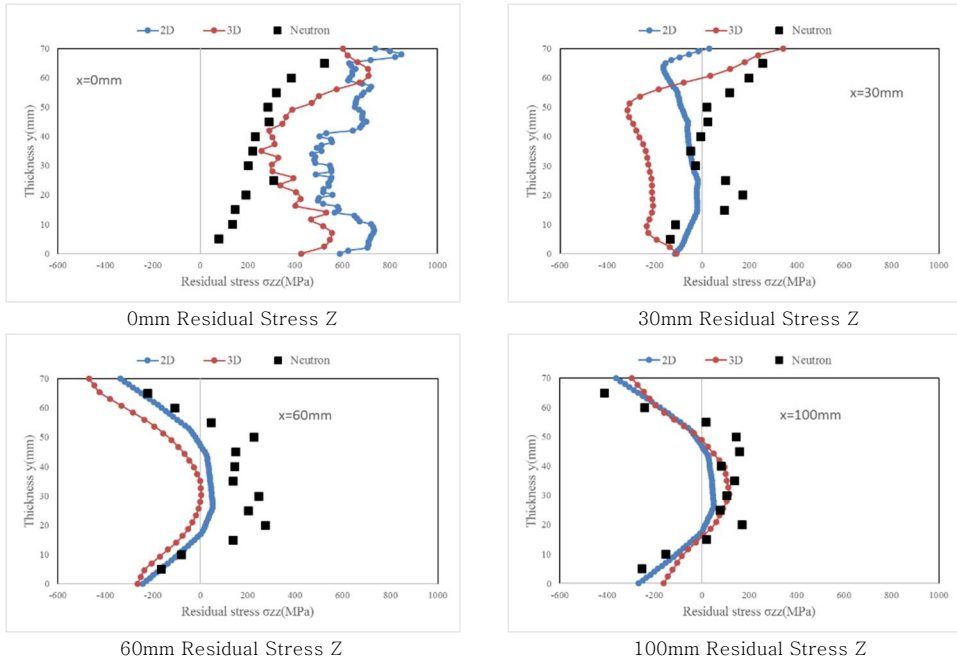
(b) Contact 경계조건

그림 3.12 두께 70mm 부재의 2차원해석의 경계조건

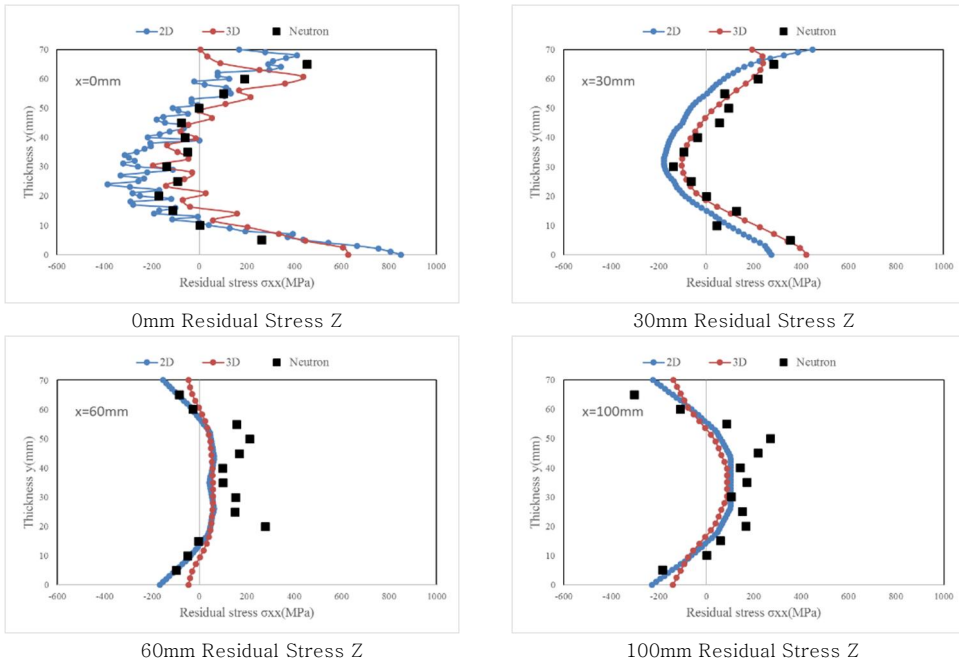
### 3.2.2 잔류응력측정값과 열탄소성해석 결과 고찰

그림 3.13은 용접부 중심에서 2.5mm, 30mm, 60mm, 100mm 떨어진 곳을 중성자 회절법에 의해 내부 잔류응력을 측정하고, 그 결과를 해석결과(2D, 3D)와 비교하여 보여주고 있다. 그림 3.13 (a)는 용접선 방향의 잔류응력이고, (b)는 용접선 직각방향의 잔류응력을 보여주고 있다.

2차원과 3차원 해석결과는 상당히 유사한 추세가 나타는 것을 알 수 있다. 따라서 3차원해석 결과 대신 2차원해석 결과를 사용하더라도 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 실험측정결과와 해석결과에 비교하면 그림 3.13(a)에서 용접선 근방인 0mm와 30mm의 경우 약간의 차이를 보이고 있으나 60mm와 100mm는 결과가 일치함을 볼 수 있다. 용접선 직각방향의 잔류응력은 용접부 중앙부터 외곽까지 전 범위에 걸쳐 값이 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 모델에 비하여 간결한 모델링이 가능하고, 짧은 해석 시간을 요구하는 2차원 모델을 사용하여 구속도가 잔류응력에 미치는 영향을 분석하였다.



(a) 용접선방향 잔류응력



(b) 용접선 직각방향 잔류응력

그림 3.13 두께 70mm 부재에서 용접잔류응력의 해석값과 측정값 비교

### 3.3 구속도가 용접잔류응력에 미치는 영향

#### 3.3.1 구속도계산

구속도는 내적구속과 외적구속으로 나누어지는데 내적구속은 입열량, 재료의 상변태 등에 영향을 받고, 외적구속으로는 구조물의 형상, 크기, 용접순서 등에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 용접부가 외적구속의 영향을 받아 용접잔류응력에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 이러한 구속에 대한 연구는 용접변형의 변형을 예측하는데 먼저 적용되었다. 외적구속은 구조물의 형상에 의해 크게 구별되는데 파이프구조물인 경우 구조물 자체의 직경과 두께에 의해 결정되지만, 평판구조물인 경우 매우 복잡한 구속조건을 가지므로 구속과 잔류응력과의 관계를 나타내는 것은 쉽지 않다.

본 연구에서 의미하는 구속은 두가지로 나뉘는데 첫번째로 횡구속은 용접선 직각방향으로 1mm 강제변위를 발생시킬 때 발생하는 용접부 응력이고 단위는 MPa/mm이다. 두번째 휨구속은 용접부를 중심으로 단위 모멘트 1° 만큼 강제회전시 발생하는 용접부의 응력을 의미하고 단위는 MPa/degree이다. 횡구속도의 크기는 Watanabe(1985)에 의하면 DWT 10,000 ton 화물선제작시 block 간 용접부 구속도를 측정한 결과 최대 100MPa/mm 측정되었고, 신은주(1990)에 의하면 22,000TEU의 deck top에서 측정한 횡구속도는 100 ~ 200MPa/mm 으로 계산하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 횡구속도의 크기를 최대 300MPa/mm이내로 결정하였다.

### 3.3.2 구속도해석 모델

구속도와 잔류응력과의 관계를 구명하기 위해 먼저 구속도를 산정하였다. 횡구속도의 크기는 0, 100, 200, 300 MPa/mm로 설정하였다. 횡구속도는 횡구속도의 크기가 0일 때 즉, 자유상태일때 용접 각변형량을 100%, 70%, 40%, 10% 로 감소시키는 횡구속 스프링 강성값을 사용하였고, 이때 용접부 중심에서 1° 회전시 발생하는 응력값을 구속도 값으로 사용하였다. 이는 부재의 두께에 따라 수치가 상이하다.

해석모델의 두께는 25, 50, 70mm이고, 강재의 강도의 항복강도는 330, 405, 460MPa이다. 온도해석시 계산되는 물성치는 온도의존성을 고려하였고 구속도의 영향력을 확인하기 위하여 총 72개의 열탄소성해석을 진행하였다. 전체 구속도 해석 조건은 표 3.5와 같다.

표 3.5 구속도 해석조건

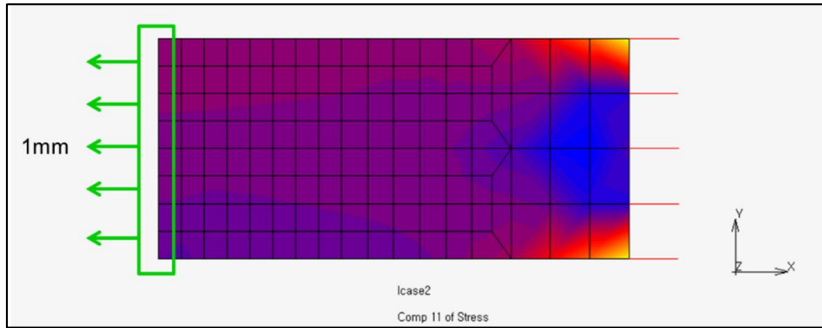
| 항복응력 (MPa) | 두께 (mm) | 횡 구속도 Ksm (MPa/mm) | 각변형 (mm) | 휨 구속도 Ksb (MPa/degree) |
|------------|---------|--------------------|----------|------------------------|
| 330        | 25      | 0                  | 3.79     | 0                      |
|            |         |                    | 2.8      | 29                     |
|            |         |                    | 1.67     | 125                    |
|            |         |                    | 0.42     | 468.1                  |
|            |         | 100                | 1.1      | 125.9                  |
|            |         | 200                | 1        | 28.98                  |
|            |         | 300                | 0.82     | 0                      |
|            |         |                    | 0.32     | 468.08                 |
|            | 50      | 0                  | 3.65     | 0                      |
|            |         |                    | 2.38     | 17.13                  |
|            |         |                    | 1.71     | 82.38                  |
|            |         |                    | 0.37     | 493.07                 |
|            |         | 100                | 0.99     | 186.16                 |
|            |         | 200                | 0.84     | 215.71                 |
|            |         | 300                | 0.71     | 282.2                  |
|            |         |                    | 0.22     | 462.74                 |
|            | 70      | 0                  | 4.12     | 0                      |
|            |         |                    | 2.93     | 9.4                    |
|            |         |                    | 1.68     | 86.02                  |
|            |         |                    | 0.46     | 649.81                 |
|            |         | 100                | 0.88     | 210.26                 |
|            |         | 200                | 0.54     | 246.59                 |
|            |         | 300                | 0.54     | 324.71                 |
|            |         |                    | 0.32     | 784.34                 |
| 405        | 25t     | 0                  | 4.73     | 0                      |

|      |      |        |      |        |
|------|------|--------|------|--------|
| 405  | 25   |        | 3.11 | 29     |
|      |      |        | 1.76 | 125    |
|      |      | 100    | 0.41 | 468.1  |
|      |      |        | 1.13 | 125.9  |
|      |      | 200    | 1.03 | 28.98  |
|      |      |        | 0.8  | 0      |
|      |      | 300    | 0.31 | 468.08 |
|      |      |        | 50   | 0      |
|      | 3    | 17.13  |      |        |
|      | 1.88 | 82.38  |      |        |
|      | 0.43 | 493.07 |      |        |
|      | 100  | 1      |      | 186.16 |
|      |      | 200    |      | 0.84   |
|      | 300  | 0.71   |      | 282.2  |
|      |      | 0.28   |      | 462.74 |
|      | 70   | 0      | 4.65 | 0      |
|      |      |        | 3.43 | 9.4    |
|      |      |        | 1.63 | 86.02  |
|      |      |        | 0.49 | 649.81 |
|      |      | 100    | 0.78 | 210.26 |
|      |      | 200    | 0.65 | 246.59 |
|      |      | 300    | 0.54 | 324.71 |
|      |      |        | 0.29 | 784.34 |
|      | 460  | 25     | 0    | 4.65   |
| 3.27 |      |        |      | 29     |
| 1.93 |      |        |      | 125    |
| 0.46 |      |        |      | 468.1  |
| 100  |      |        | 1.25 | 125.9  |

|                          |  |     |      |        |        |     |
|--------------------------|--|-----|------|--------|--------|-----|
| 460                      | 25   | 200 | 1.12 | 28.98  |        |     |
|                          |  | 300 | 0.91 | 0      |        |     |
|                          |  |     | 0.34 | 468.08 |        |     |
|                          | 50   | 0   |      | 4.73   | 0      |     |
|                          |  |     |      | 3.24   | 17.13  |     |
|                          |  |     |      | 2.01   | 82.38  |     |
|                          |  |     |      | 0.47   | 493.07 |     |
|                          |  | 100 | 1.12 | 186.16 |        |     |
|                          |  | 200 | 0.93 | 215.71 |        |     |
|                          |  | 300 | 0.79 | 282.2  |        |     |
|                          |  |     | 0.33 | 462.74 |        |     |
|                          |  | 70  | 0    |        | 4.81   | 0   |
|                          |  |     |      |        | 3.65   | 9.4 |
|                          |  |     |      | 1.97   | 86.02  |     |
|                          |  |     |      | 0.53   | 649.81 |     |
|                          | 100  |     | 1.13 | 210.26 |        |     |
|                          | 200  |     | 0.81 | 246.59 |        |     |
|                          | 300  |     | 0.6  | 324.71 |        |     |
|                          |  |     | 0.33 | 784.34 |        |     |
|                          | Young's Modulus : 219GPa, Poission Ratio : 0.3 |     |      |        |        |     |
| Total Anaylsis Case : 72 |  |     |      |        |        |     |

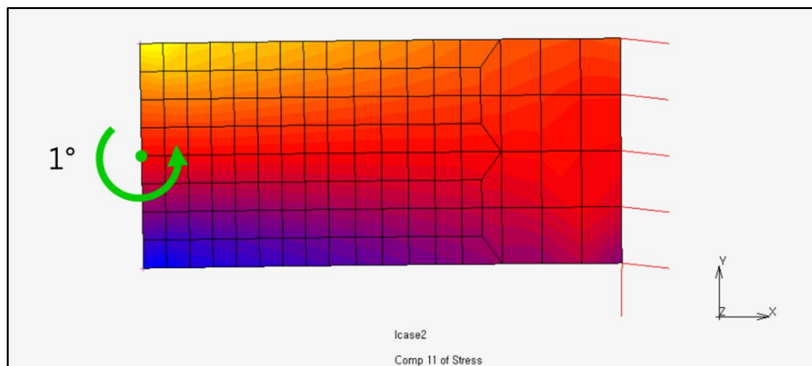


그림 3.14는 두께 70mm인 부재의 구속도 계산과정을 보여주고 있다. 그림 3.14(a)는 강제변위 1mm 발생시의 응력분포이고, 그림 3.14(b)는 1° 회전시의 응력분포를 보여주고있다.



(a) 1mm 강제변위시 X 방향 응력

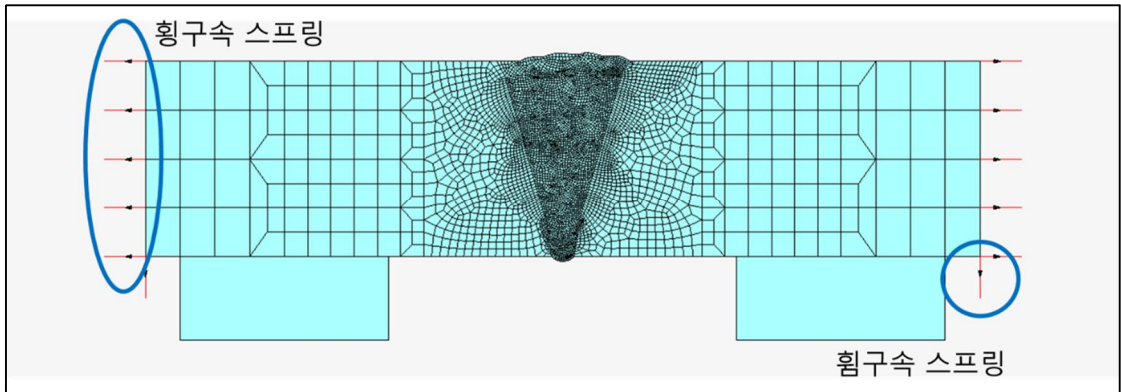
(b)



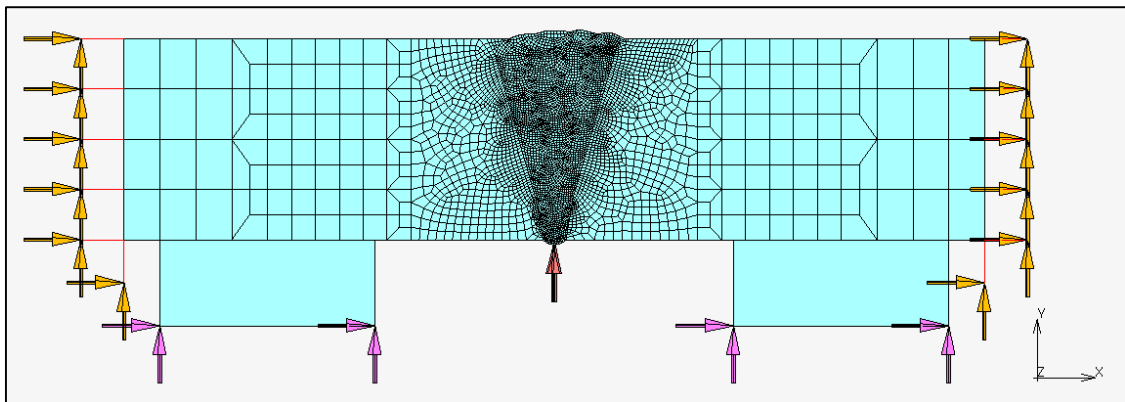
(c) 1° 강제변위시 X 방향 응력

그림 3.14 강제변위와 구속응력

그림 3.1(a)는 구속이 적용된 두께 70mm 모델의 모습을 보여준다. 부재의 양쪽 측면에서 스프링 요소를 생성하여 그 스프링의 강성을 이용하여 구속도의 크기를 조절한다. 경계조건은 양쪽 구속 스프링의 끝단이 변위가 생기지 않도록 고정시키고, 강제 반침을 만들어 열탄소성해석시 부재의 과도한 변형을 방지하였다.



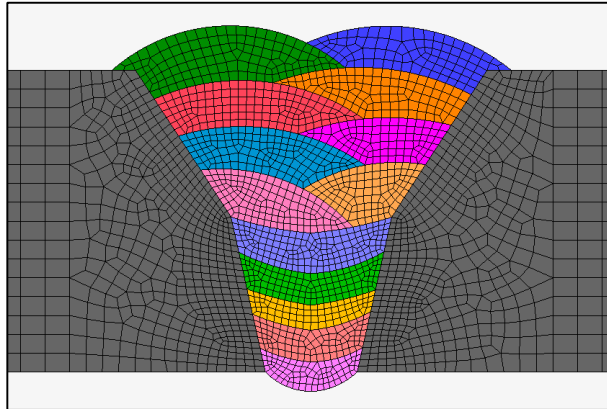
(a) 구속 스프링



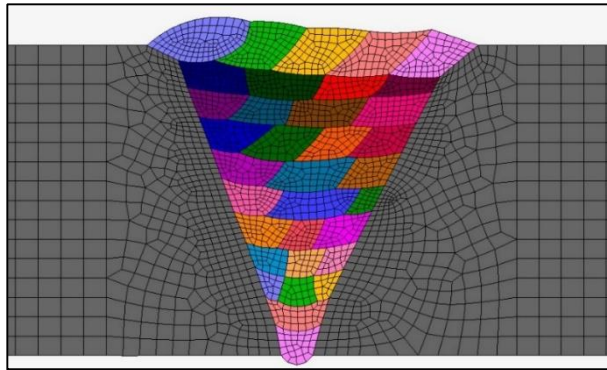
(b) 경계조건

그림 3.15 구속 스프링과 경계조건

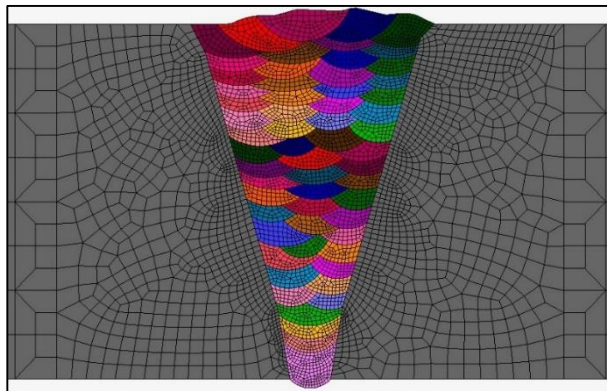
그림 3.16 은 두께별 용접부의 형상과 용접 횟수를 보여주고있다.



(a) 두께 25mm (13 pass)



(b) 두께 50mm (34 pass)

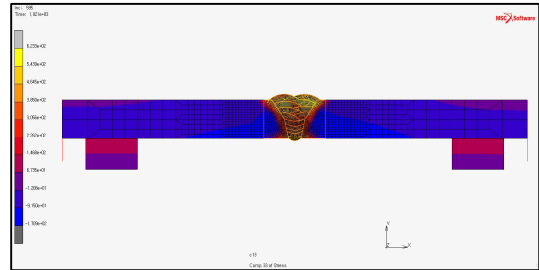
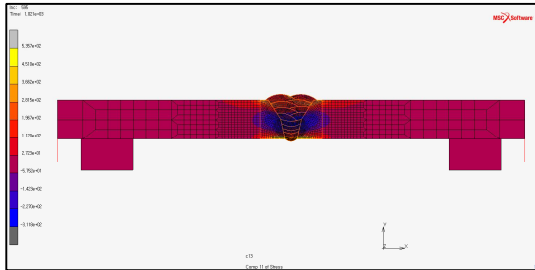


(c) 두께 70mm (60 pass)

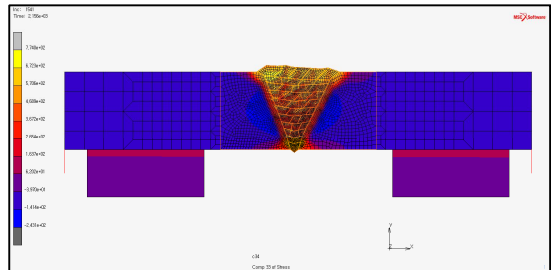
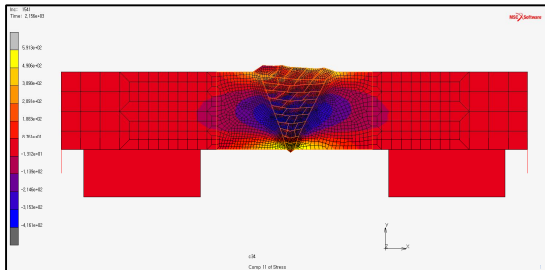
그림 3.16 두께별 용접부 형상과 용접패스

### 3.3.3 용접해석 결과와 잔류응력 분포

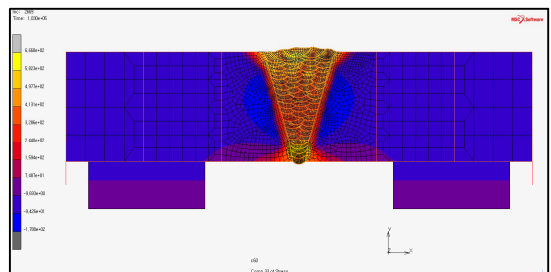
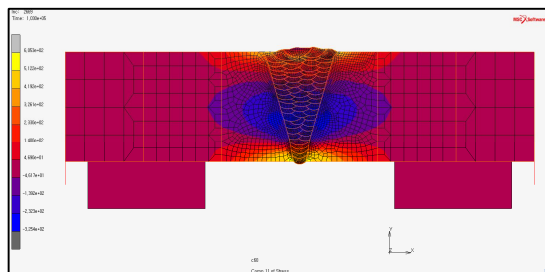
그림 3.17 은 항복응력 405MPa 에서 두께별 용접잔류응력 분포를 보여주고 있다. 각각의 왼쪽 그림은 용접선 직각방향 (X 방향), 오른쪽 그림은 용접선 방향 (Z 방향)을 의미한다.



(a) 두께 25mm,

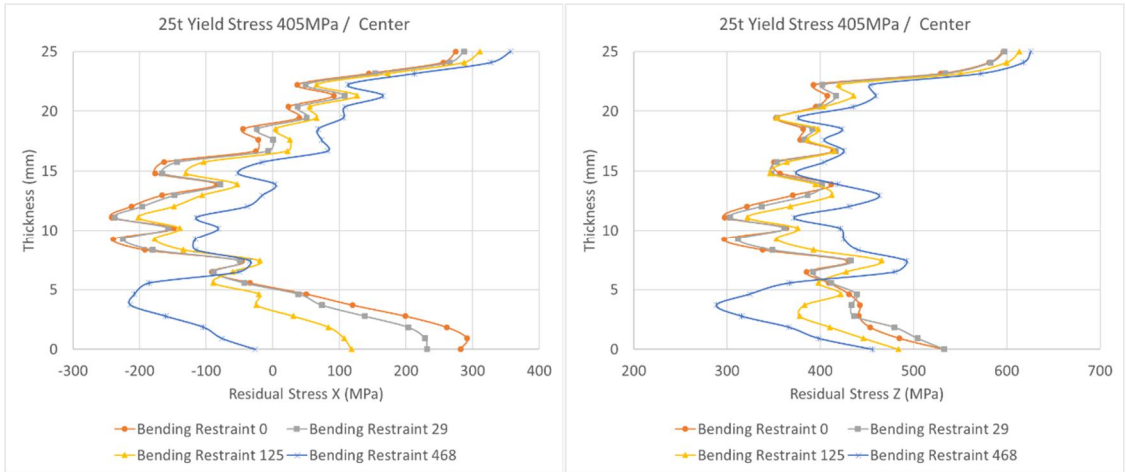


(b) 두께 50mm

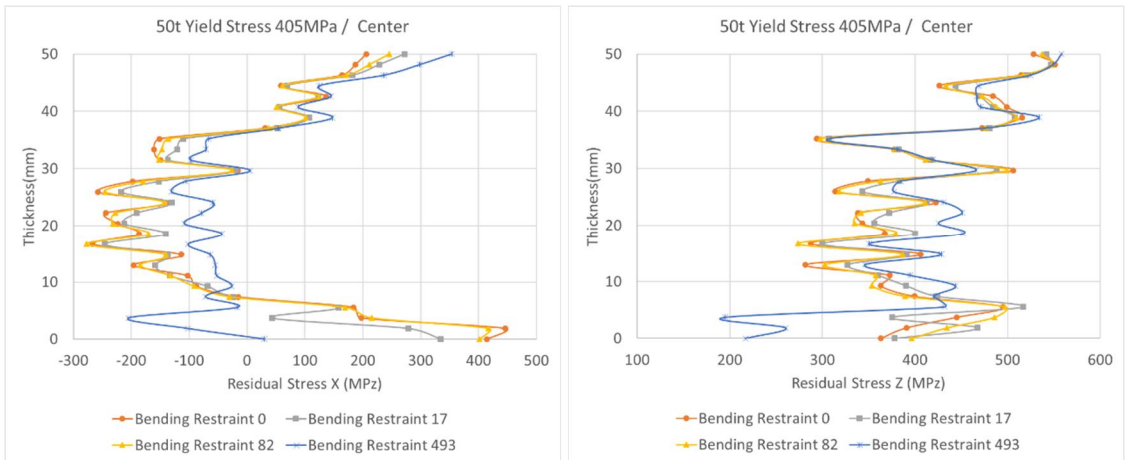


(c) 두께 70mm

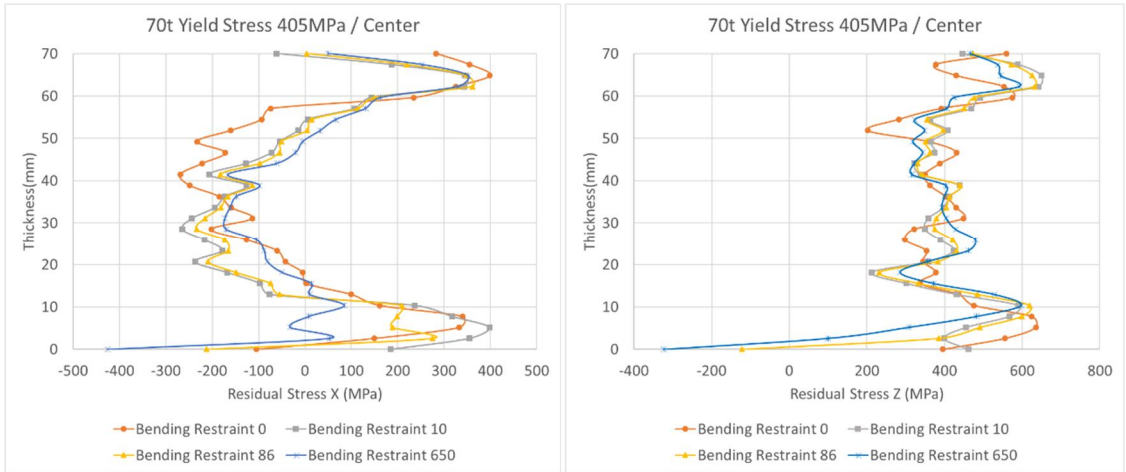
그림 3.17 용접잔류응력 분포



(a) 두께 25mm Center 부

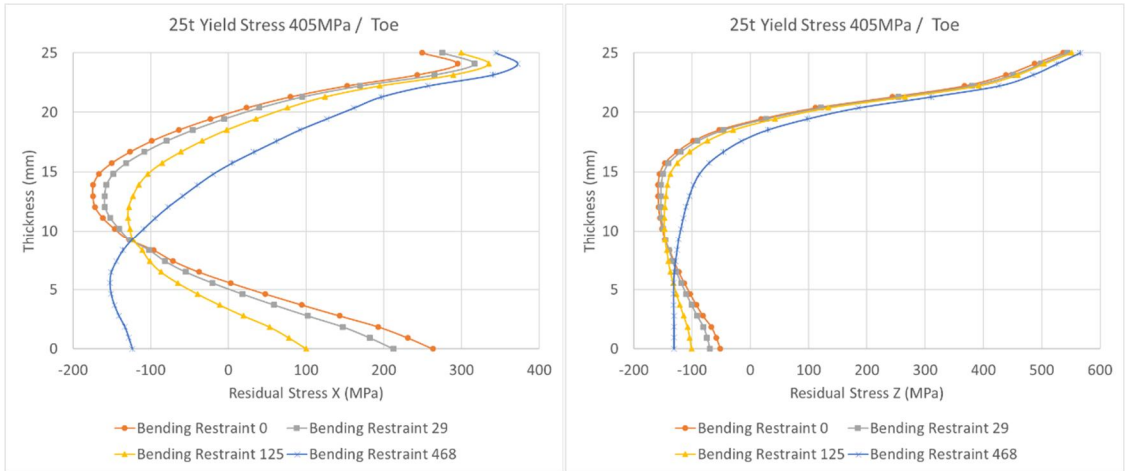


(b) 두께 50mm Center 부

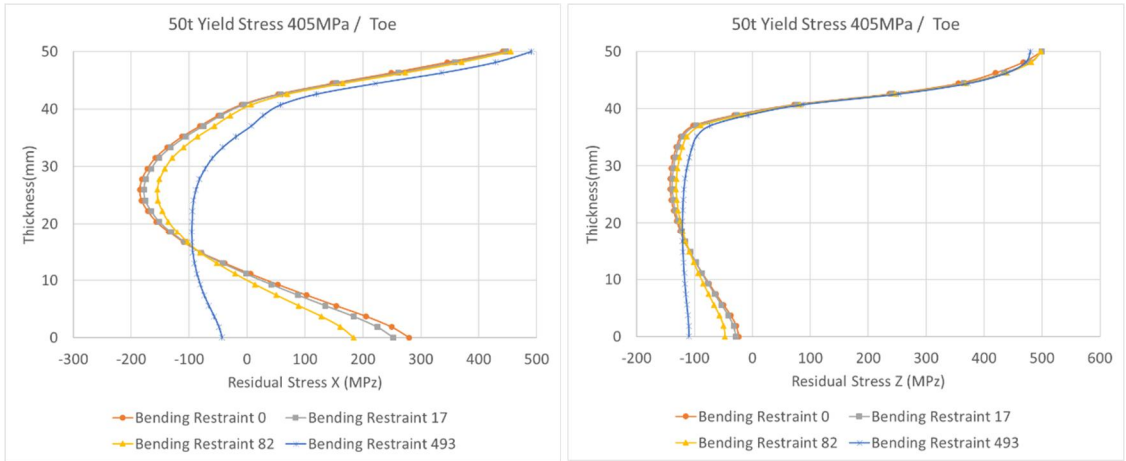


(c) 두께 70mm Center 부

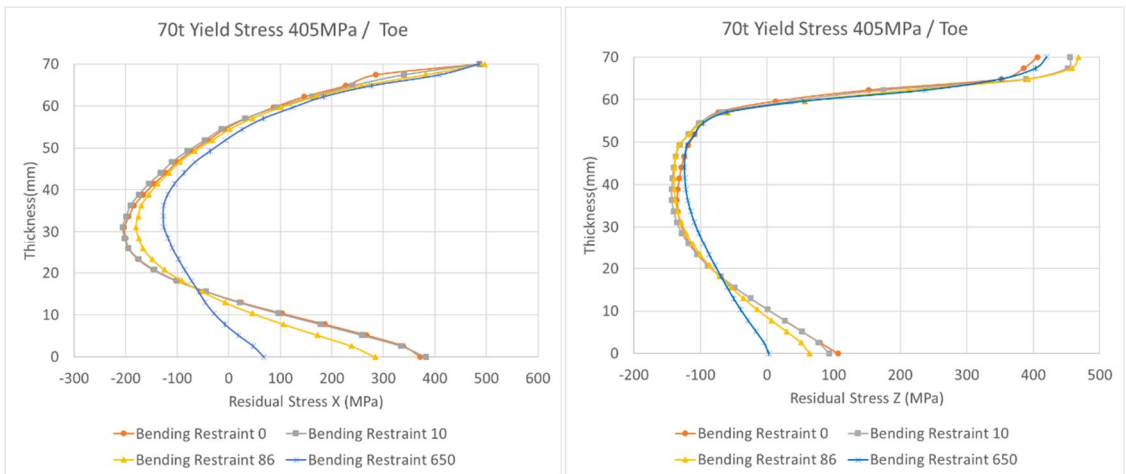
그림 3.18 횡구속도가 0 MPa/mm일 때, 휨구속도에 따른 Center부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포



(a) 두께 25mm Toe 부

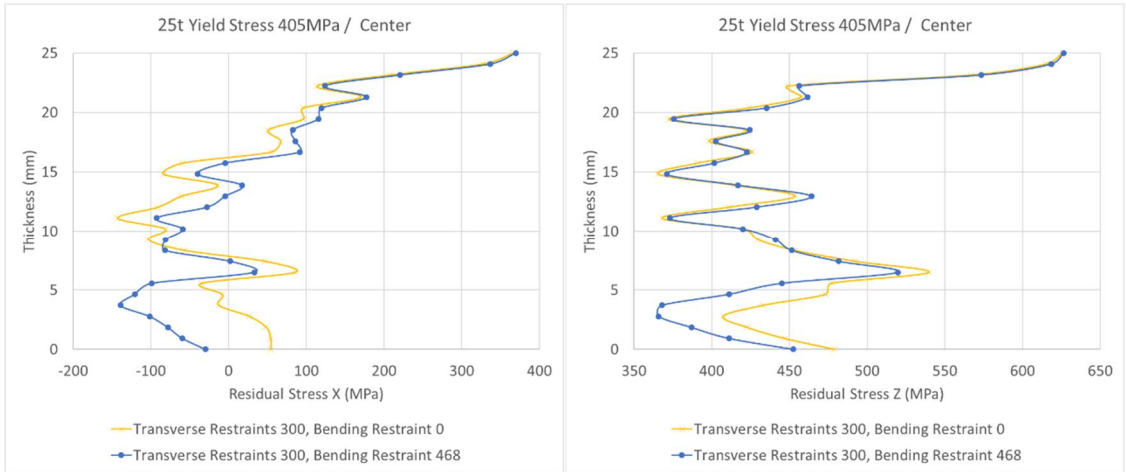


(b) 두께 50mm Toe 부

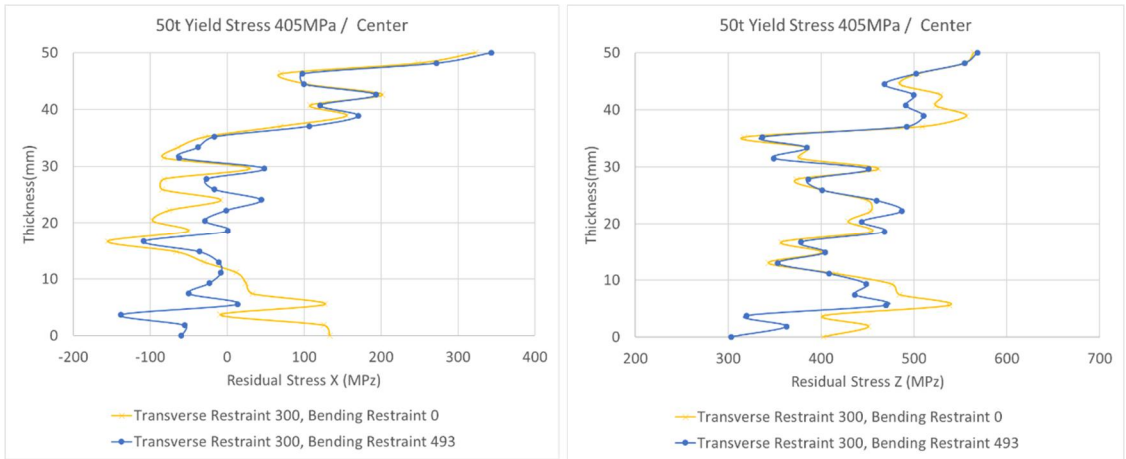


(c) 두께 70mm Toe 부

그림 3.19 횡구속도가 0 MPa/mm 일 때, 휨구속도에 따른  
 Toe부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포

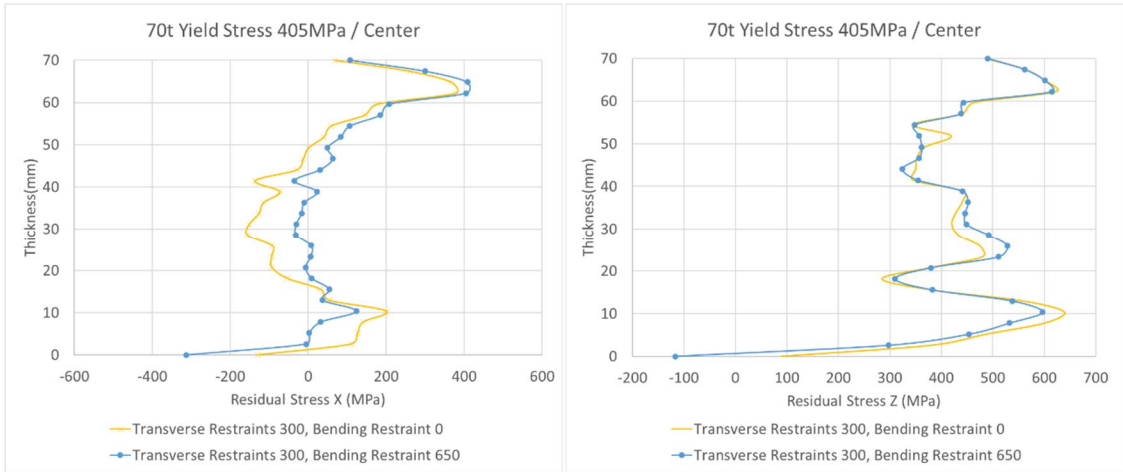


(a) 두께 25mm Center 부



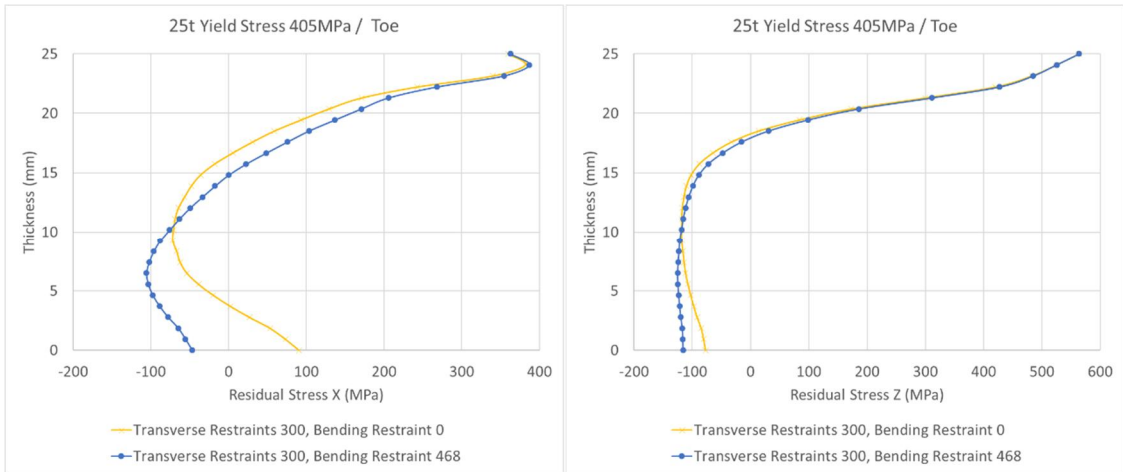
(b) 두께 50mm Center 부



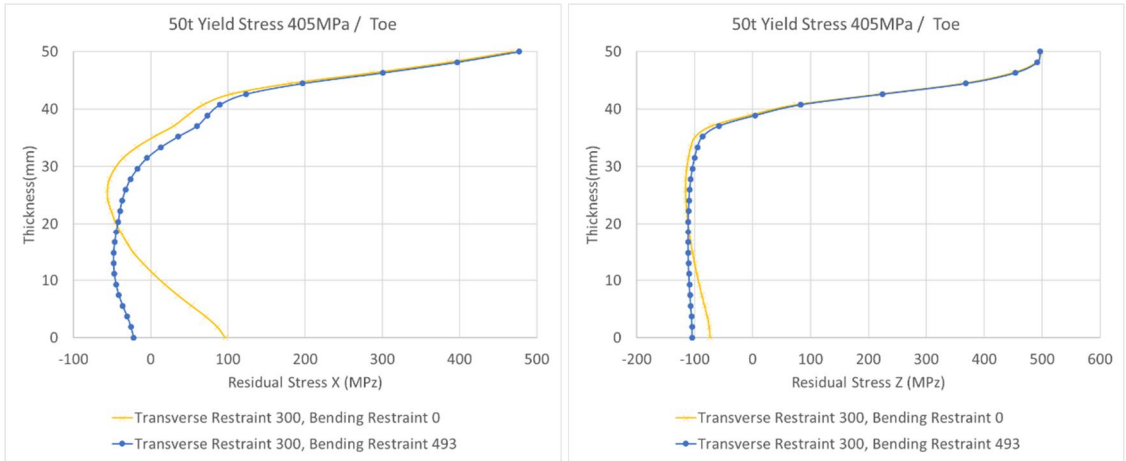


(c) 두께 70mm Center 부

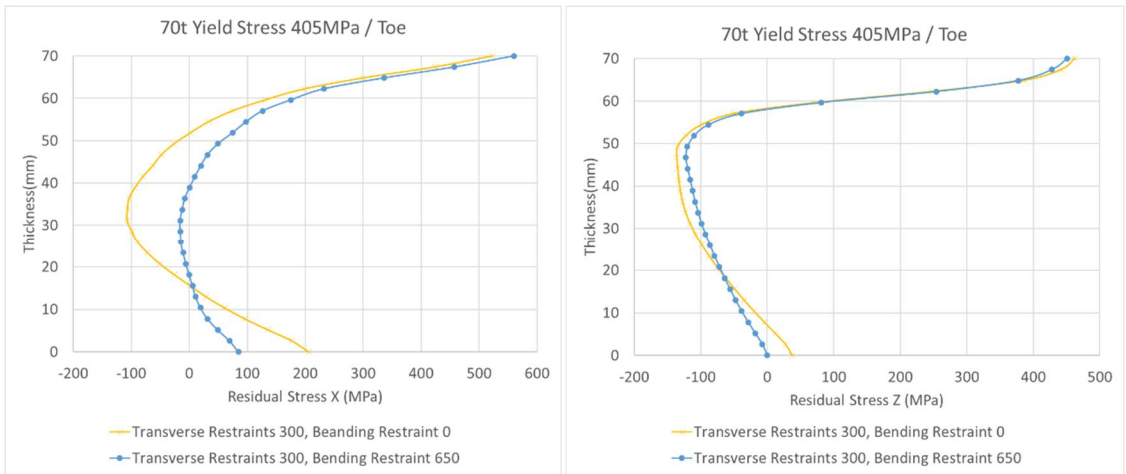
그림 3.20 횡구속도가 300 MPa/mm 일 때, 횡구속도의 유무에 따른 Center부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포



(a) 두께 25mm Toe 부



(b) 두께 50mm Toe 부



(c) 두께 70mm Toe 부

그림 3.21 횡구속도가 300 MPa/mm 일 때, 횡구속도의 유무에 따른  
 Toe부에서 X방향, Z방향 잔류응력 분포

해석에 사용된 3 가지 물성 중 대표적으로 항복응력 405MPa 인 부재의 용접선직각 방향의 잔류응력( $\sigma_x$ )과, 용접선 방향의 잔류응력( $\sigma_z$ )의 분포를 그림 3.18~3.20 을 통하여 나타내고 있다. 그림 3.18, 3.19 는 각각 부재의 횡구속도가 자유상태(구속도가 0 인 경우)일 때, 휨구속도의 증가에 따른 Center 부와 Toe 부에서 용접잔류응력분포의 차이를 보여주고 있다. 횡구속이 배제된 상태에서 휨구속이 잔류응력에 미치는 영향을 확인 할 수 있다.

그림 3.20, 3.21 은 횡구속도가 300MPa/mm 인 경우, 횡구속 자유상태의 각변형을 10%까지 구속하는 휨응력 사용 유무에 따른 용접잔류응력 분포를 나타내고 있다. 이때 사용된 횡구속도와 휨구속도는 본 연구에서 비교적 강한 구속도로 구분되는데, 강한 횡구속이 작용시 휨구속의 영향력을 확인 할 수 있다.

전체적으로 구속도의 변화에 따른 잔류응력의 변화는 용접선 방향의 잔류응력보다 용접선직각 방향의 잔류응력이 더 크음을 알 수 있다. 그 이유는 용접선 방향의 잔류응력은 부재 자체의 강성으로 충분한 구속을 하고 있기 때문에 영향력이 적지만, 해석 모델과 같이 양 측면에 Spring Element 를 통하여 구속을 제어하는 경우에는 고열의 출입에 따른 수축과 팽창이 자유롭게 활성화 되지 못하고 이는 잔류응력에 영향을 미친다. 특히 용접이 가장 먼저 시작되는 초층부에서 높이방향으로 2/3 지점까지 구속의 영향이 크지만, 그 이상의 높이에선 잔류응력의 두드러지는 변화는 보이지 않는다.

이처럼 용접 초층부가 구속도의 영향을 더 크게 받는 이유는 용접이 진행될수록 용착금속이 쌓여가며 자체구속이 증가하기 때문이다. 이 높이가 높아질수록 강성 또한 커져 구속도의 영향력이 적게 미치게 된다.

특히 용접선 직각방향 초층부에서 인장잔류응력의 크기는 휨구속도가 증가함에 따라 크기가 작아지며 압축잔류응력으로 변화하는 것을 알 수 있다. 반면에 두께 중앙부의 잔류응력은 휨구속도의 증가에 따라 압축잔류응력에서 인장잔류응력을 변화하는 차이를 보인다. 이러한 현상들은 부재 두께, 항복응력이 다르더라도 같은 경향을 나타내고 있다.

### 3.4 잔류응력 예측 모형 개발

#### 3.4.1 잔류응력 영향인자 분석

나인태(2019)는 다양한 부재 두께, 항복응력, 횡구속도로 유한요소해석을 실시하고 결과를 통해 계산된 평균잔류응력( $\sigma_{mr}$ , Mean Residual Stress)과 각 인자들 간의 관계를 잔류응력과 항복응력의 비를 구하는 식 (3.1)로 분석하여 수식을 이끌어내었다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_Y} = b_0 + b_1 \left(\frac{Z}{B}\right)^1 + b_2 \left(\frac{Z}{B}\right)^2 + b_3 \left(\frac{Z}{B}\right)^3 + b_4 \left(\frac{Z}{B}\right)^4 + b_5 \left(\frac{Z}{B}\right)^5$$

$$b_0 \sim b_7 = c_0 + c_1(\sigma_Y) + c_2(K_S) + c_3(\sigma_{mr}) + c_4(B)$$

(3.1)

용접선 직각방향의 변형에 영향을 미치는 횡구속만 고려한 기존 연구와 달리, 본 연구에서는 각변형에 대한 횡구속 개념을 추가해 평균잔류응력을 세분화하여 구조응력인 막응력(Membrance Stress)과 굽힘응력(Bending Stress)으로 분류하고, 각각에 영향을 미치는 횡구속도와 횡구속도 인자를 사용하여 식 (3.2)와 같이 수식을 확장시키고, 각 인자 사이의 관계를 통계 분석 프로그램인 R을 이용한 다중 선형 회귀법으로 분석하였다.

적용된 기본 수식은 식 (3.2)이며 사용된 변수는 아래와 같다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_Y} = b_0 + b_1 \left(\frac{Z}{B}\right)^1 + b_2 \left(\frac{Z}{B}\right)^2 + b_3 \left(\frac{Z}{B}\right)^3 + b_4 \left(\frac{Z}{B}\right)^4 + b_5 \left(\frac{Z}{B}\right)^5 + b_6 \left(\frac{Z}{B}\right)^6 + b_7 \left(\frac{Z}{B}\right)^7$$

$$b_0 \sim b_7 = c_0 + c_1(\sigma_Y) + c_2(K_{sm}) + c_3(K_{sb}) + c_4(\sigma_{sm}) + c_5(\sigma_{sb}) + c_6(B)$$

(3.2)

여기서

$\sigma_R$  : Transverse Residual Stress (MPa)

$\sigma_Y$  : Yield Stress (MPa)

$\sigma_{sm}$  : Membrane Stress (MPa)

$\sigma_{sb}$  : Bending Stress (MPa)

$K_{sm}$  : Transverse Restraint (MPa/mm)

$K_{sb}$  : Bending Restraint (MPa/mm)

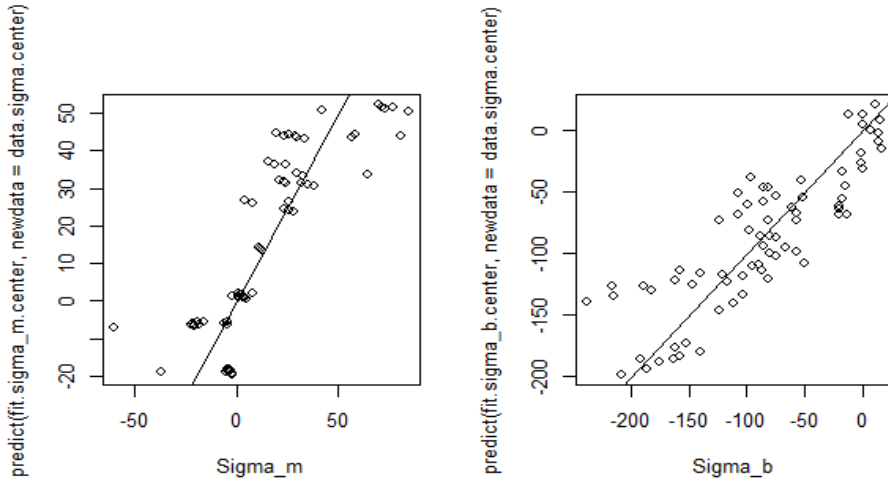
Z : Location in the Thickness Direction of Weld

B : Thickness of Weld

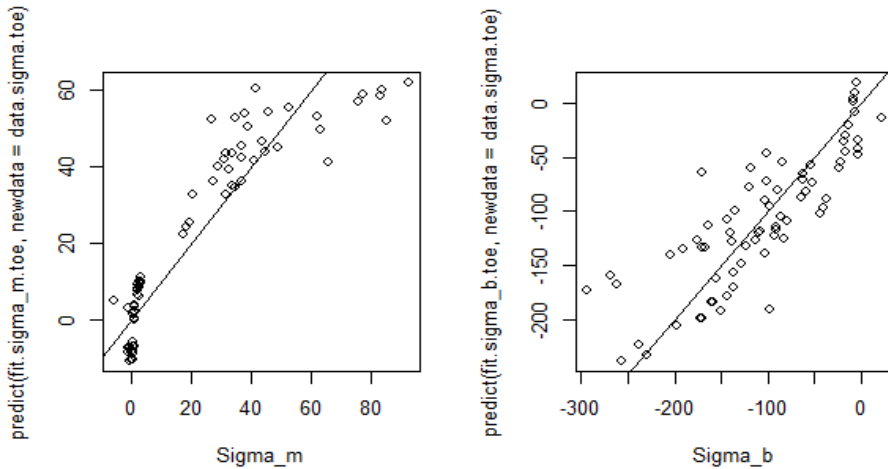
$c_0 \sim c_6$  : Model Coefficient

### 3.4.2 회귀분석

두께, 항복응력, 횡구속도, 휨구속도와 막응력, 휨응력 사이의 상관관계를 분석하여 그림 3.22에서 보이는 바와 같이 각각의 예측 모형을 만들고 이를 다시 변수로 활용하여 각각의 관계를 회귀모형을 통한 분석으로  $b_0 \sim b_6$ 의 계산에 사용되는 모델 계수  $c_0 \sim c_6$ 을 결과로 얻어내었다.



(a) 센터부  $\sigma_{sm}, \sigma_{sb}$  예측 모형



(b) 토크우부  $\sigma_{sm}, \sigma_{sb}$  예측 모형

그림 3.22 위치별  $\sigma_{sm}, \sigma_{sb}$  예측 모형

표 3.6 센터부 모델 계수  $c_0 \sim c_6$  회귀분석 결과

| Coef | c0           | c1           | c2           | c3           | c4           | c5           | c6           |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0    | 1.913818     | -0.001232963 | -0.001549628 | -0.000411317 | 0.004733172  | 0.003795435  | -0.01519647  |
| 1    | -50.703429   | 0.001732687  | 0.103192854  | -0.026177595 | -0.711817037 | -0.11240921  | 0.99222705   |
| 2    | 424.514232   | 0.081785075  | -1.037079412 | 0.302895676  | 7.774031624  | 1.03344215   | -9.76406801  |
| 3    | -1593.676494 | -0.41460089  | 3.984327399  | -1.161210867 | -30.37262754 | -3.919390729 | 37.43725962  |
| 4    | 2898.945364  | 0.844177761  | -7.165904447 | 2.041291054  | 54.82968055  | 7.029890061  | -68.16032862 |
| 5    | -2504.048613 | -0.799160022 | 6.094937132  | -1.695650233 | -46.66380236 | -5.974280811 | 59.10525736  |
| 6    | 825.245329   | 0.286851039  | -1.979966911 | 0.540073344  | 15.15768565  | 1.941659765  | -19.62287236 |

Adjusted R-squared : 0.7823

p-value : <2.2e-16

표 3.7 토우부 모델 계수  $c_0 \sim c_6$  회귀분석 결과

| Coef | c0           | c1           | c2           | c3           | c4          | c5           | c6           |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 0    | -0.1619012   | 0.000249874  | 0.001672852  | -0.001045338 | -0.01411211 | -9.0927E-05  | 0.014593261  |
| 1    | 2.4039969    | -0.003937987 | -0.000107242 | 0.001212445  | 0.01065929  | -0.004382763 | -0.053304129 |
| 2    | -19.1973611  | 0.035228961  | -0.131624442 | 0.044436798  | 0.99084165  | 0.1506086    | -0.208254396 |
| 3    | 65.4213089   | -0.143384067 | 0.643753467  | -0.20712729  | -4.70675879 | -0.8030007   | 0.99322477   |
| 4    | -132.7987655 | 0.301009023  | -1.258323552 | 0.388766376  | 9.0050503   | 1.712807     | -1.29919361  |
| 5    | 142.3877469  | -0.310475017 | 1.12810855   | -0.340076046 | -7.98184248 | -1.643182    | 0.565073678  |
| 6    | -56.9723061  | 0.120632663  | -0.384205776 | 0.11412644   | 2.7030953   | 0.5885104    | -0.005163608 |

Adjusted R-squared : 0.9395

p-value : < 2.2e-16

표 3.6, 3.7은 회귀분석 최종 결과물인 모델 계수를 측정위치별로 나타낸 것이다. 센터부 모형의 Adjusted R-squared는 0.7823이고 p-value는  $2.2e-16$  ( $<0.05$ ) 이고, 토우부 모형 Adjusted R-squared는 0.9395, p-value는  $2.2e-16$  ( $<0.05$ ) 으로 두 모형 모두 통계적으로 유의한 것으로 분석되었으며, 특히 토우부 모형의 정확도는 매우 우수한 것으로 분석되었다.

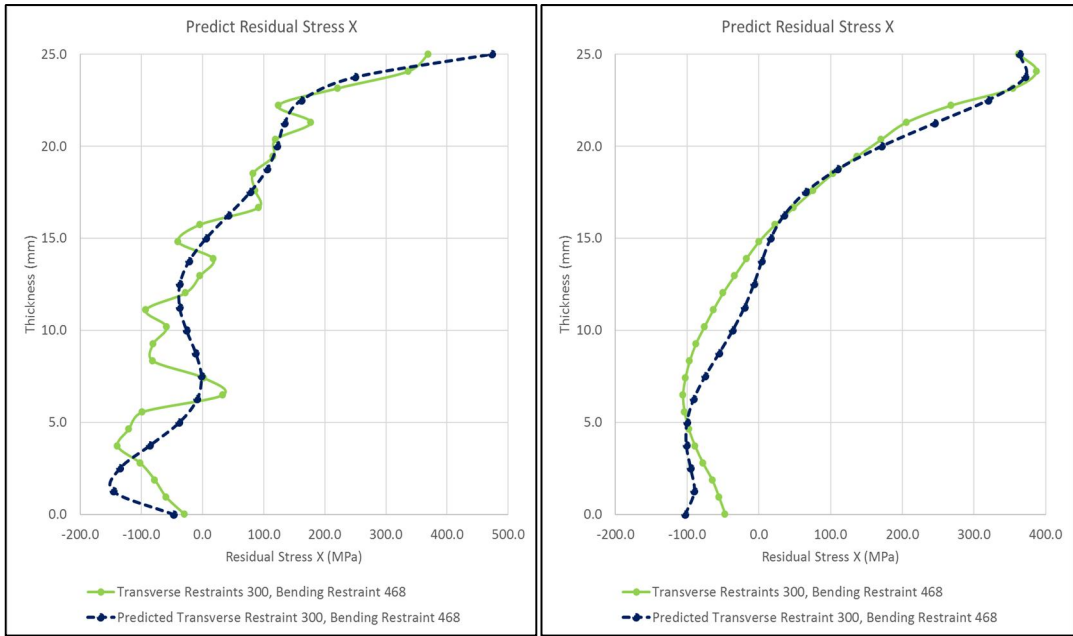
### 3.4.3 예측식에 의한 잔류응력 비교

앞서 구한 모델계수  $c_0 \sim c_6$ 을 각각 항복응력, 횡구속도, 휨구속도, 막응력, 굽힘응력, 두께와 계산하여  $b_0 \sim b_6$ 을 얻을 수 있었다. 이를 높이에 대한 비율인  $zb$ 와  $zb$ 의 거듭제곱값들과 계산을 통하여  $\sigma_R/\sigma_Y$ 의 얻어 용접잔류응력을 예측하는 식을 완성하였다. 식(3.2)는 센터부 모형의  $b_0 \sim b_6$  계산식이고, 식(3.3)은 토우부 모형의  $b_0 \sim b_6$  계산식을 보여주고 있다.

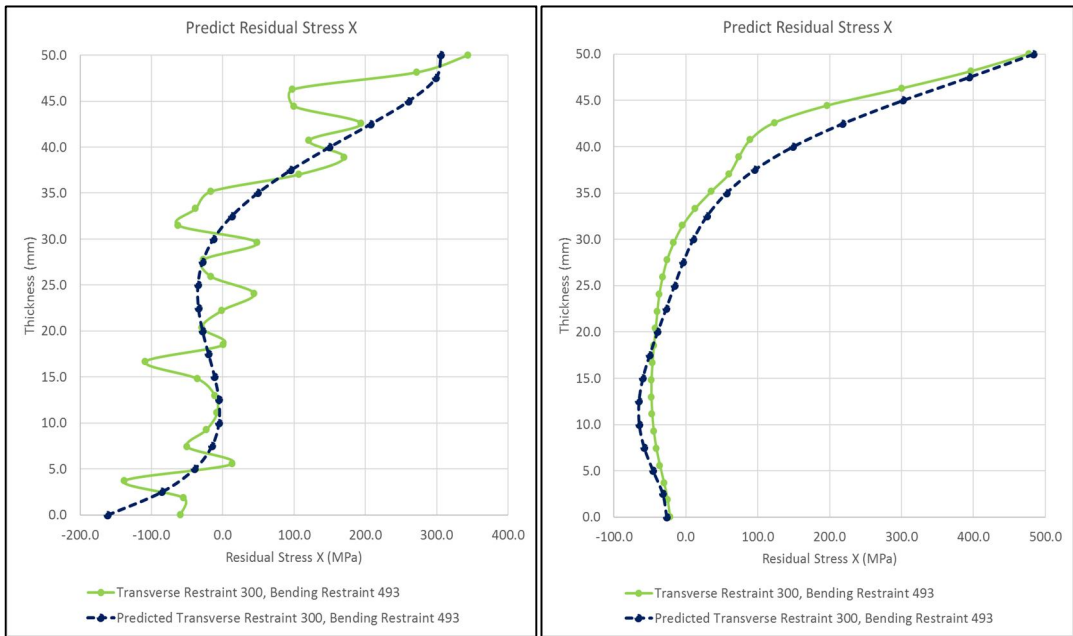
$$\begin{aligned}
 b_0 &= 1.9138 - 0.0012(\sigma_Y) - 0.0015(K_{sm}) - 0.0004(K_{sb}) + 0.0047(\sigma_{sm}) + 0.0038(\sigma_{sb}) - 0.0152(B) \\
 b_1 &= -50.7034 + 0.0017(\sigma_Y) + 0.1032(K_{sm}) - 0.0261(K_{sb}) - 0.7118(\sigma_{sm}) - 0.1124(\sigma_{sb}) + 0.9922(B) \\
 b_2 &= 424.5142 + 0.0818(\sigma_Y) - 1.0371(K_{sm}) + 0.3029(K_{sb}) + 7.7740(\sigma_{sm}) + 1.0334(\sigma_{sb}) - 9.7641(B) \\
 b_3 &= -1593.6765 - 0.4146(\sigma_Y) + 3.9843(K_{sm}) - 1.1612(K_{sb}) - 30.3726(\sigma_{sm}) - 3.9194(\sigma_{sb}) + 37.4373(B) \\
 b_4 &= 2898.9454 + 0.8442(\sigma_Y) - 7.1659(K_{sm}) + 2.0413(K_{sb}) + 54.8297(\sigma_{sm}) + 7.0299(\sigma_{sb}) - 68.1603(B) \\
 b_5 &= -2504.0486 - 0.7992(\sigma_Y) + 6.0949(K_{sm}) - 1.6957(K_{sb}) - 46.6638(\sigma_{sm}) - 5.9743(\sigma_{sb}) + 59.1053(B) \\
 b_6 &= 825.2453 + 0.2869(\sigma_Y) - 1.98(K_{sm}) + 0.54(K_{sb}) + 15.1577(\sigma_{sm}) + 1.9417(\sigma_{sb}) - 19.6229(B)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 b_0 &= -0.1619 + 0.0002(\sigma_Y) + 0.0017(K_{sm}) - 0.001(K_{sb}) - 0.0141(\sigma_{sm}) - 0.0001(\sigma_{sb}) + 0.0146(B) \\
 b_1 &= 2.404 - 0.0039(\sigma_Y) - 0.0001(K_{sm}) + 0.0012(K_{sb}) + 0.0106(\sigma_{sm}) - 0.0043(\sigma_{sb}) - 0.0533(B) \\
 b_2 &= -19.1974 + 0.0352(\sigma_Y) - 0.1316(K_{sm}) + 0.0444(K_{sb}) + 0.9908(\sigma_{sm}) + 0.1506(\sigma_{sb}) - 0.2082(B) \\
 b_3 &= 65.4213 - 0.1434(\sigma_Y) + 0.6438(K_{sm}) - 0.2071(K_{sb}) - 4.7068(\sigma_{sm}) - 0.803(\sigma_{sb}) + 0.9932(B) \\
 b_4 &= -132.7988 + 0.301(\sigma_Y) - 1.2583(K_{sm}) + 0.3888(K_{sb}) + 9.005(\sigma_{sm}) + 1.7128(\sigma_{sb}) - 1.2992(B) \\
 b_5 &= 142.3877 - 0.3105(\sigma_Y) + 1.1281(K_{sm}) - 0.3401(K_{sb}) - 7.9818(\sigma_{sm}) - 1.6432(\sigma_{sb}) + 0.5651(B) \\
 b_6 &= -56.9723 + 0.1206(\sigma_Y) - 0.3842(K_{sm}) + 0.1141(K_{sb}) + 2.7031(\sigma_{sm}) + 0.5885(\sigma_{sb}) - 0.0052(B)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

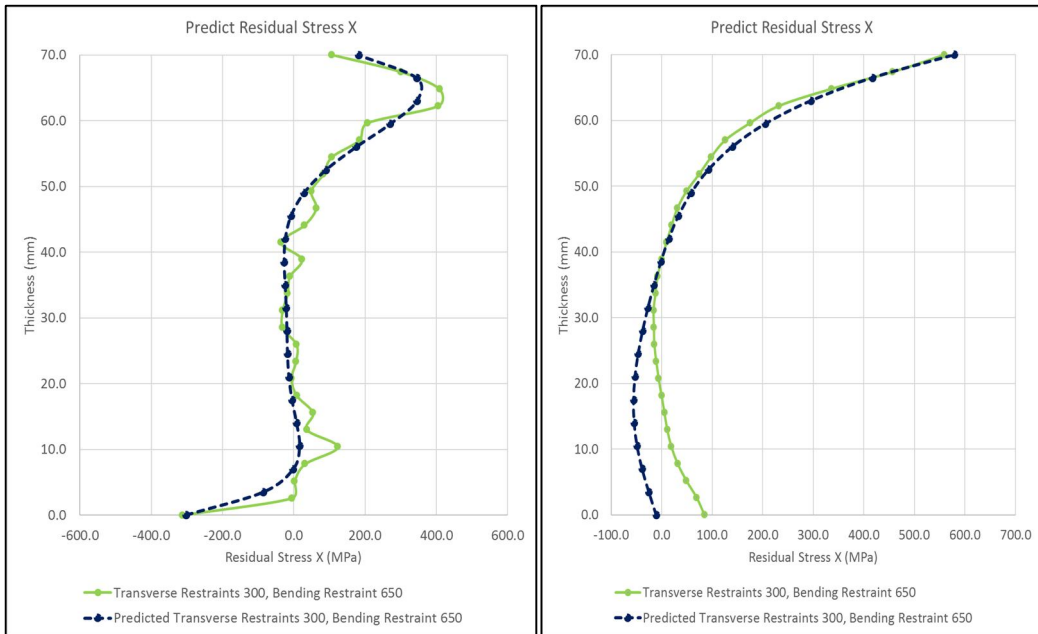




(a) 두께 25mm 용접잔류응력 예측



(b) 두께 50mm 용접잔류응력 예측



(c) 두께 70mm 용접잔류응력 예측

그림 3.23 두께별 용접잔류응력 예측

그림 3.23 에서 횡구속도 300MPa/mm, 각변형 10%까지 횡구속 상태일 때 용접 센터부와 용접 토우부에서 예측된 잔류응력과 열탄소성해석 결과값을 비교하였다. 전체적으로 계산된 예측값과 열탄소성해석 결과값이 그림 3.23(b) 왼쪽 그림과 그림 3.23(c) 오른쪽 그림처럼 용접 초층부의 잔류응력과 예측값이 다소 차이가 발생하는 부분을 제외하면 전반적으로 일치하는 상태를 확인 할 수 있다.

## 제4장 결 론

용접시 부재의 횡방향 인장수축을 제어하는 횡구속과 각변형을 제어하는 휨구속의 크기가 용접잔류응력에 미치는 영향을 분석하고 회귀분석을 통한 용접잔류응력 예측식을 산출하였다. 구속도에 따른 잔류응력을 부재 두께, 항복응력별 다양한 케이스로 열탄소성해석을 진행하였고 그 해석 결과로 선형회귀분석을 수행하여 용접잔류응력 예측식을 정립하였다. 도출한 예측식은 열탄소성해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 구속도의 크기에 따른 용접잔류응력 예측식을 포괄적인 범위내에서 사용하기 위하여 부재 두께, 항복응력, 구속도의 크기를 변화시키며 MSC Marc Mentat을 이용한 열탄소성해석을 진행하였다. 구속이 증가할수록 용접잔류응력은 용접 초층부에는 압축방향으로 잔류응력이 커지고, 두께 중앙부 근처에서는 인장방향으로 응력이 커지는 것을 확인하였다. 이는 굽힘변형을 구속함으로 인해서 용접 초층부에 발생한 인장응력이 억제되어 압축방향으로 응력이 발생한 것이다. 그리고 중앙부는 이러한 힘의 평형을 유지하기 위하여 인장방향으로 응력이 발생한다.
- 2) 열탄소성해석 결과값을 R프로그램 회귀분석을 통해 예측식을 도출하였다. 인자에 대한 상관관계를 분석하여 주요인자를 도출하고, 회귀분석시에 대한 신뢰성은 R-squared는 0.78 이상, p-value는 0.05보다 작은 값으로 나타나 예측식의 유의미한 결과를 내고 있음을 확인하였다.

- 3) 예측식은 용접부의 센터부와 토우부에서의 용접잔류응력을 계산할 수 있으며, 예측값을 열탄소성해석결과와 비교한 결과 잘 일치하는 것으로 확인되었다. 특히 일반적인 횡구속뿐만 아니라 각변형을 억제하는 횡구속을 도입함으로써 더욱 실제구조물의 역학적 구속조건을 고려한 섬세한 잔류응력 예측이 가능할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 강성원, 김영옥, 김화수, 김도현(2011), “*Padding plate* 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, pp.75-82
2. 강성원, 하우일, 신종석(1998), “필렛용접 이음부의 응력집중계수에 관한 연구”, Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 3
3. 경갑수, 김학수, 채원규(1998), “강교의 피로”, 도서출판 건설도서  
경남(2007), “TMC강재의 피로강도에 미치는 영향인자의 평가”, 충북대학교 구조시스템공학과 학위논문
4. 김문석(1997), “부재에 포함된 미소결합의 형상이 피로강도에 미치는 영향”, 계명대학교 토목공학과 학위논문
5. 김유일, 강중규, 허주호, 이성근(1998), “후판용접시 구속도와 잔류응력 및 저온균열의 상관관계규명”, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, pp.313-316,
6. 나인태(2019), “맞대기용접에서 횡구속이 용접잔류응력에 미치는 영향”, 조선대학교 대학원. 국내석사학위논문.
7. 박경도, 정찬기(2001), “DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축 잔류응력의 영향”, 한국해양공학회지, 제 15권, 제 3호, pp.93-99
8. 박정웅, 이해우, 이재원(2001), “용접 각변형에 미치는 구속도의 영향”, 한국강구조학회, Vol. 13, No. 5, pp.547-556
9. 박정웅, 박연수, 경갑수(2004), “강교의 피로와 보수보강”, 구미서관
10. 박정웅, 이승엽(2009), “극후판 용접시 용접조건에 따른 잔류응력 영향.” 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, pp.105-105
11. 박정웅, 안규백, 우완측(2014), “Residual stress measurement in an extra

- thick multi-pass weld using initial stress integrated inherent strain method*”,  
*Marine Structures*”, Vol.39, pp.424-437
12. 범현규, 엄윤용(1993), “ 보존적분을 이용한 응력강도계수와 T-응력의 계산”, 대한기계학회논문집, 제18권, 제1호, pp.121-126
  13. 서보성, 이광호(2016), “U-노치 및 균열을 갖는 보의 응력집중계수 및 응력 확대계수”, 경북대학교, 대한기계학회 논문집A권, 40(5), pp.513-523
  14. 송준혁, 김종규, 강희용, 양성모(1999), “체결력에 따른 볼트 결합부의 접촉 응력분포계수 평가”, 한국공작기계학회지, 제 8권, 제 2호
  15. 신상범, 윤중근(2001), “내·외적 구속에 의한 구조용강 용접부 변형 거동 특성에 관한 연구”, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 165-167
  16. 양용준, 양인영(2015), “CFRP 적층판의 충격손상이 잔류 굽힘 피로강도에 미치는 영향”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 3, pp. 7-12
  17. 엄기원(2010), “최신 용접공학”, 동명사, pp.272-357
  18. 엄동석, 강성원, 박재형, 하우일(1994), “유한요소법에 의한 튜블라 이음부의 응력집중계수 및 피로강도해석”, 대한해양공학회, 제8권, 제2호, pp.141-150
  19. 오정석, Jun Komotori, 이창규(2005), “스텔라이트 합금 용사 코팅의 피로 강도에 미치는 후열처리의 영향”, Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 12, No. 2
  20. 용접강도연구위원회(2005), “유한요소해석을 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준화”, 대한용접접합 학회지, Vol.23, No.6, pp.1-7
  21. 우완측, 안규백, 박정웅(2013), “극후판 FCAW 와 EGW 용접부의 파괴 및 비파괴 법을 이용한 잔류응력 측정결과 비교.” 대한용접학회 특별강연 및 학술 발표대회 개요집, pp.17-17
  22. 우완측, 김동규, 안규백(2015), “중성자법에 의한 잔류응력 측정법”, 대한용접 접합 학회지, Vol. 33, No. 1

23. 유승원(1992), “탄소섬유강화 복합재료의 피로강도에 미치는 모재의 영향”, 한국해양공학학회, 제 6권, 제 1호, pp.113-121
24. 이승엽(2011), “강구조물의 용접해석조건이 잔류응력분포에 미치는 영향” 조선대학교 토목공학과 학위논문, pp.16-17
25. 이승호, 김희송, 정성균, 문혁(1997), “고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향”, 한국공작기계기술학회, 97년도 추계학술대회 논문집, pp. 322-327
26. 이억섭, 전현선, 변귀환(1998), “노치선단(균열 주위)의 기하학적 형상이 동적 응력집중계수(동적균열전파)에 미치는 영향”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No. 4
27. 이의호(2007), “국내 강교량의 부식문제와 기본적인 방식대책”, 대한토목학회, 제 55권. 제 11호
28. 이주성(1985), “유한요소법입문”, 동명사
29. 이제명, 백점기, 윤동렬(2003), “용접구조물의 구속효과와 균열발생특성간 상관관계”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 17, No. 2, pp.14-20
30. 일본강구조협회(1993), “강구조물과 피로설계지침·동해설”
31. 임청권, 박문호(1998), “용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구”, 한국강구조학회논문집, 제10권, 제 4호
32. Bacon, G. E(1975)., “*Neutron diffraction, 3<sup>rd</sup> edition*”
33. Barsom J. M. and Novak S. R(1977), “*Subcritical crack growth and fracture of bridge steels*”, NCHRP Report 181, Transportation Research Borad, National Research Council
34. Brueckner H. F(1973), "*Field singularities and related integral representations*", Mechanics of Fracture G. C. Sih, ed.
35. D. Arola, C.L. Williams(2002), “*Estimatng the stress concentration factor of machined surfaces*”, International Journal of Fatigue, 24, pp. 923-930

36. D. Deng, H. Murakawa, N. Ma(2012), “*Predicting welding deformation in thin plate panel structure by means of inherent strain and interface element*” , Science and Technology of Welding and Joining, Vo. 17, No. 1, pp.13–21
37. E. Chang, W.D. Dover(1996), “*Stress concentration factor parametric equations for tubular X and DT joints*” , Int. J. Fatigue, Vol. 18, No. 6, pp. 363–387
38. Fujimoto. T(1970), "*A Method for Analysis of Residual Welding Stress and Deformations Based on the Inherent Strain*", Journal of the Japan welding society, vol.39, No.4
39. Fisher, J. S., Yen B. Y. and Wang D(1980), “*Fatigue Bridge Structures A Commentary and Guide for Design*” , Evaluation and Investigation of Cracking, ATLSS Report No.89–02, Lehigh Univ, pp. 80–92
40. Fisher, J. S., Mertz, D. R. and Zhong, A.(1983), “*Steel bridge members under variable amplitude long life fatigue loading*” , NCHRP Report 267, Transportation Research Board, National Research Council, USA
41. Gang Li, Shengguan Qu, Mingxin Xie, Zhaojun Ren and Xiaoqiang Li(2017), “*Effect of Multi-Pass Ultrasonic Surface Rolling on the Mechanical and Fatigue Properties of HIP Ti-6Al-4V Alloy*” , Materials, 10, 133
42. Galtier, A., Statnikov, E.(2004), “*The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behavior of welded joints in highstrengthstee*” , Weld World, 48 (5–6), pp. 61–66
43. F.Hosseinzadeh, A.H.Mahmoudi, C.E.Truman and D.J.Smith(2009), "*Prediction and Measurement of Through Thickness Residual stresses in Large Quenched Components*", Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol.2, pp.978–988
44. K. Hemmesi, M. Farajian, & M. Boin(2017), “*Numerical studies of welding*



- residual stresses in tubular joints and experimental validations by means of x-ray and neutron diffraction analysis* , Materials & Design, 126, pp.339–350
45. Lotfi Toubal, Moussa Karama, Bernard Lorrain(2005), “ *Stress concentration in circular hole in composite plate*” , Composite Structures, 68, pp. 31–36
46. Masubuchi.K(2007), “Analysis of Welded Structures”, Elsevier Science Ltd
47. I. Marines, X. Bin, C. Bathias(2003), “ *An understanding of very high cycle fatigue of metals*” , International Journal of Fatigue, 25, pp. 1101–1107
48. P. Pagliaro, M.B. Prime, J.S. Robinson, B. Clausen, H. Swenson, M. Steinzig, B. Zuccarello(2011), “*Measuring Inaccessible Residual Stresses Using Multiple Methods and Superposition*”, Society for Experimental Mechanics, vol.51, pp.1123–1134
49. R. E. Peterson(1974), “ *Stress Concentration Factors*” , John Wiley & Son, New York
50. Stephens, R.I., Fuchs, H. O.(2001), “ *Metal Ftigue in engineering*” Second Edition, New York, Wiley, pp. 401–406
51. Satoh, K., et al, (1977). “*Effect of intensity of bending restraint on weld cracking in multipass weld.*”, Transactions of the Japan Welding Society 8(1): 42–49.
52. Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho, & S. Endo(1975), “ *A new measuring method of residual stresses with the aid of finite element method and reliability of estimated values.*” Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 138, pp.499–507
53. [www.mscsoftware.com/kr/products](http://www.mscsoftware.com/kr/products)(2017), MSC Sofeware Corporation
54. Watanabe, M., Takagi, O., Satoh, K., & Aso, F.(1958), “ *External constraint and shirinkage of butt-welded joints in the erection of assemblies*

- on building way*” , Journal of Zosen Kiokai, 1958(104), pp.191–200
55. Y. Murakami, T. Nomoto and T. Ueda(1999), “*Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels*” , Blackwell Science Ltd, Fatigue Fract Engng Mater Struct 22, pp. 581–590
56. Yoshida, M. Inagaki, M. Kanao, E. Sasaki, M. Nihei, M. Kamakura(1978), “*Effect of size and frequency on fatigue properties of SM50B butt Weled joint*” , International Institute of Welding, Vol. 47, No. 9, pp. 627–632