



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2014년 8월
석사학위논문

상변태를 고려한 파이프의
용접잔류응력 해석

조선대학교 대학원
토목공학과
신대운

상변태를 고려한 파이프의
용접 잔류응력 해석

Welding Residual Stress Analysis considering
Phase Transformation on Steel Pipe

2014 년 8 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

신 대 운

상변태를 고려한 파이프의 용접잔류응력 해석

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2014 년 4 월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

신 대 운

신대운의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

위원 조선대학교 교수 김운중 (인)

위원 조선대학교 교수 박정웅 (인)

2014 년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	3
제2장 잔류응력과 상변태의 이론적 고찰	4
2.1 잔류응력의 개념	4
2.1.1 잔류응력의 생성	6
2.1.2 잔류응력이 강구조물에 미치는 영향	9
2.1.3 잔류응력 측정방법	13
2.2 금속의 상변태 및 영향	20
2.2.1 Fe-C 상태도	20
2.2.2 상변태의 유한요소 해석 정식화	25
2.3 열 탄소성이론	28

제3장 유한요소법에 의한 잔류응력 해석	30
3.1 입열량에 따른 영향	30
3.1.1 해석모델 및 경계조건	30
3.1.2 해석조건	33
3.1.3 입열량에 따른 응력의 영향	35
3.2 상변태 유무에 따른 응력의 영향	43
3.2.1 상변태를 고려하지 않은 Seam Welding	43
3.2.2 상변태를 고려하지 않은 Girth Welding	53
3.3 Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 잔류응력의 영향	69
3.3.1 상변태를 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접시 잔류응력변화	69
3.4 용접완료 후 내압이 작용한 경우	73
3.4.1 시험편의 내압이 작용할 경우	73
제4장 결 론	80
참 고 문 헌	82

그림 목 차

그림 1.1	강관을 사용한 교량	1
그림 2.1	초기의 응력상태에서 굽힘 모멘트 증가했을 경우	4
그림 2.2	굽힘 모멘트 제거 후	4
그림 2.3	조립 3부재의 잔류응력	6
그림 2.4	주변이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포	7
그림 2.5	구속된 용접이음에 생기는 잔류응력 분포	8
그림 2.6	용접잔류응력의 영향	9
그림 2.7	세로이음의 정적 인장에 의한 잔류응력 변화	10
그림 2.8	균열 부근의 용접 잔류응력 분포	11
그림 2.9	잔류응력 측정법	13
그림 2.10	Bragg Law에 따른 X-ray 회절	14
그림 2.11	X-ray 회절에 의한 잔류응력 측정 원리	15
그림 2.12	Bragg's Law	16
그림 2.13	중성자회절을 이용한 변형률 측정	16
그림 2.14	Deep hole drilling	18
그림 2.15	금속조직의 종류	20
그림 2.16	철-탄소계 상태도	20
그림 2.17	공석강의 항온변태 곡선	22
그림 2.18	S-곡선과 연속냉각곡선과의 관계	23
그림 2.19	AISI 4140강의 CCT선도	24
그림 2.20	냉각속도에 따른 팽창률	25
그림 3.1	파이프 시험편의 치수와 형상	31

그림 3.2	파이프 용접의 용접부 형상과 용접 패스 조건	32
그림 3.3	파이프 시험편의 경계 조건	32
그림 3.4	잔류응력 측정위치	33
그림 3.5	온도에 따른 재료의 물성치의 거동	34
그림 3.6	시험편의 기계적 성질의 온도의 의존성	34
그림 3.7	두께 19mm 시험편 시간에 따른 온도 변화	35
그림 3.8	1500℃일 때 전체응력분포	36
그림 3.9	1500℃일 때 단면의 응력분포	37
그림 3.10	1800℃일 때 전체응력분포	38
그림 3.11	1800℃일 때 단면의 응력분포	39
그림 3.12	2000℃일 때 전체 응력분포	40
그림 3.13	2000℃일 때 단면의 응력분포	41
그림 3.15	입열량에 따른 응력분포	43
그림 3.16	Seam용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	44
그림 3.17	Seam용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포	45
그림 3.18	Seam용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	46
그림 3.19	Seam용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포	47
그림 3.20	Seam용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	48
그림 3.21	Seam용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포	49
그림 3.22	상변태를(1500℃) 고려한 잔류응력 분포	50
그림 3.23	상변태를(1800℃) 고려한 잔류응력 분포	51
그림 3.24	상변태를(2000℃) 고려한 잔류응력 분포	52
그림 3.25	Girth 용접시 온도분포	53

그림 3.26	Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포	54
그림 3.27	Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포	55
그림 3.28	Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	56
그림 3.29	Girth용접시 상변태효과가 있는 경우 단면의 잔류응력 분포	57
그림 3.30	Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포	58
그림 3.31	Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포	59
그림 3.22	Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	60
그림 3.33	Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포	61
그림 3.34	Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포	62
그림 3.35	Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포	63
그림 3.36	Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포	64
그림 3.37	Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포	65
그림 3.38	Girth용접시(1500℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포	66
그림 3.39	Girth용접시(1800℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포	67
그림 3.40	Girth용접시(2000℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포	68
그림 3.41	용접완료 후 잔류응력 측정 위치	69
그림 3.42	150℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 살한 경우 용접 잔류응력 분포	70
그림 3.43	180℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 살한 경우 용접 잔류응력 분포	71
그림 3.44	200℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 살한 경우 용접 잔류응력 분포	72
그림 3.45	용접완료 후 Seam용접 Girth 용접 측정 위치	73
그림 3.46	용접완료(1500℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력	74
그림 3.47	용접완료(1800℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력	75
그림 3.48	용접완료(2000℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력	76

- 그림 3.49 용접완료(1500°C) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력 ... 77
- 그림 3.50 용접완료(1800°C) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력 ... 78
- 그림 3.51 용접완료(1800°C) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력 ... 79

표 목 차

표 3.1 시험편의 초기온도, 속도 및 용접재질	32
표 3.2 입열에 따른 용접의 최고 온도 조건	33

ABSTRACT

Welding Residual Stress Analysis considering Phase Transformation on Steel Pipe

Shin, Dae Woon

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

As for pipe line such as offshore construction or plant or nuclear reactor, one of the methods that is used widespread to combine the cylinder materials is circumference direction welding. And these cylinder materials are loaded repeatedly or affected by high temperature cycle in the big pressure or easily corroded situation. So it is required to solve the matters regarding safety like to stress corrosion, crack, brittle fracture, and defect size crystal. To solve the problems, fundamental study for residual stress distribution should be taken urgently.

The methods to measure and forecast welding residual stress are experimental and analytical ones. In the experimental method, inherent strain one, neutron one, supersonic one, deep hole drilling one, optic ones are being researched. Among these ways, we possess the measurement technique for remaining stress which is using inherent strain way, and we are able to gauge throughthickness residual stress.

Experimental measure method is able to calculate the residual stress based on thermalelasticplastic analysis as computer numerical calculation and its common code was developed. But the interpretation that is considered initial residual stress and welding transformation is being used restrictively as there is a difficulty of interpretation technique. In this study, we used finite element analysis program to gauge the change of remaining stress more exactly, which is generated by metal transformation according to temperature change by structural steel welding to improve the accuracy of pipe welding residual stress analysis.

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

원형 강관은 단면 특성상 역학적으로 많은 장점을 가지고 있으며 가공 및 용접 기술의 발달로 인해 강관의 제작과 접합이 비교적 용이해짐에 따라 강관구조의 사용이 증가하는 추세이다. 최근 교량설계, 시공분야에서는 강재와 콘크리트의 재료 특정을 효과적으로 이용하는 합성 복합교량을 선호하고 있다. 합성구조의 대표적인 형식은 콘크리트 충전 강관(CFT)의 강관내부를 콘크리트로 채워 넣은 합성구조재로, 지금까지 주된 구조재인 강재와 콘크리트의 단점을 보완하고 장점을 극대화하여 뛰어난 구조적 성능을 보여준다.



(a) 내부보강형 강관거더



(b) CFT 합성거더



(c) 강관거더교

그림 1.1 강관을 사용한 교량

또한 해양구조물이나 플랜트 또는 원자로 등의 배관계에 있어서 원통형부재들 사이의 결합 수단으로 널리 사용되는 방법 중 하나는 파이프의 원주방향용접이다. 그리고 이들 원통형 부재들은 매우 큰 압력이나 부식 환경에서 반복하중 또는 고온의 열사이클을 받는 것들이 대부분이기 때문에 응력부식, 크랙, 취성 및 피로파괴, 결함크기의 결정 등 안전에 관련된 문제들의 해결이 시급히 요구되고 있으며, 이를 위해서는 파이프용접부의 잔류응력분포특성에 대한 기초적 연구가 진행되어야 한다.

일반적으로 파이프의 용접 시 발생하는 잔류응력은 평판이나 각 주형 용접물 또는 파이프의 길이방향용접의 경우보다 매우 복잡한 양상을 나타내고 있는데, 그 특징을 살펴보면 원주방향의 수축변형과 Hoop응력을 발생하는 점, 파이프축에 대한 비틀림 변형이 생기고 원통면의 외표면과 내표면에서의 잔류응력이 서로 다르게 작용하는 점 등을 들 수 있다.

또한 강재의 고강도화에 따라 연강(mild steel)에서 비교적 작게 나타나는 상변태에 의한 금속체적의 변화가 강재가 고강도화 됨에 따라 크게 발생하여 용접잔류응력이 감소한다. 이러한 상변태에 의한 체적의 변화는 오스테나이트 변태와 마르텐사이트 변태가 있으며, 이중 용접잔류응력에 영향을 미치는 것은 저온에서 발생하는 마르텐사이트 변태이다. 이러한 마르텐사이트의 변태는 저온에서 발생하여 잔류응력을 감소시키는 역할을 한다. 따라서 피로파괴에 미치는 잔류응력의 영향을 예측하기 위해서는 이러한 잔류응력과 상변태를 고려하여 유한요소법에 의한 열 탄소성해석에 필요하다.

용접잔류응력을 측정하는 방법에는 실험적 방법과 해석적이 방법이 있다. 해석적인 방법은 컴퓨터 수치계산능력과 수치해석 코드의 발달로 열 탄소성해석에 잔류응력을 편하게 계산할 수 있다. 그러나 용접 시 발생하는 상변태를 고려한 해석은 해석기술의 어려움으로 제한적으로 사용되고 있다. 따라서 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 이러한 조건을 고려한 유한요소 해석기법이 필요하다. 실험에 의한 잔류응력측정 방법은 중성자법, Deep Hole Drilling법 등이 개발되고 있다. 본 연구실에서는 고유변형도법을 이용한 잔류응력측정방법을 보유하고 있는 기술로서 두께방향의 잔류응력을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 파이프 용접잔류응력을 보다 정확히 예측하기 위해 용접열에 의해 발생하는 용접금속의 상변태를 고려하여 유한요소법을 이용한 열탄소성해석을 수행하였다. 금속의 상변태에 따른 영향을 비교하기 위해 상변태의 영향의 유무에 따른 잔류응력을 비교하여 상변태에 따른 영향을 분석하였다. 또한, 파이프용접의 용접방향에 따른 Seam 용접과 Girth 용접에 따른 잔류응력분포를 비교, 검토하였다. 이러한 결과로 부터 용접 잔류응력이 피로강도 및 부식에 미치는 영향을 분석하는데 활용하고자 한다.

1.2 연구 동향

용접 잔류응력의 해석적인 연구는 유한요소법, 수치해석적 방법이 일반화 되면서 연구가 진행되었다. Murakawa 등(1996)은 유한요소법에 의한 용접부의 열 탄소성해석으로 잔류응력을 해석하였다. 박정웅 등(2009)은 두께의 용접 잔류응력의 영향에 대한 해석을 수행하였다. 이러한 유한요소법등의 수치해석적인 방법만으로는 신뢰성을 확인하기가 어렵기 때문에 실험적인 방법과 비교하여 연구가 수행되어지고 있다.

실험적인 방법은 고유변형도법(Inherent Strain Method), Deep Hole Drilling, Contour Method, 중성자 회절법(Neutron Method), 광학을 이용하는 방법등이 있다.

고유변형도법은 용접부의 근방에 분포하는 고유변형도를 구하고 용접 단면상에서 적분함으로써 잔류응력을 계산하는 방법으로, 이창현(1997)은 고유변형도법을 이용한 용접변형 예측에 대한 해석을 수행하였다 최근에는 박정웅(2013)등 25mm 맞대기 용접부의 두께방향의 잔류응력에 측정에 관한 연구 등 꾸준한 연구가 진행되고 있다.

중성자회절법은 중성자의 회절현상을 이용하여 측정하는 방법으로, 우완측 등(2013) 70mm두께 강재의 대한 두 가지 입열조건에 따른 두께방향 용접잔류응력분포에 대해서 연구가 수행되었다.

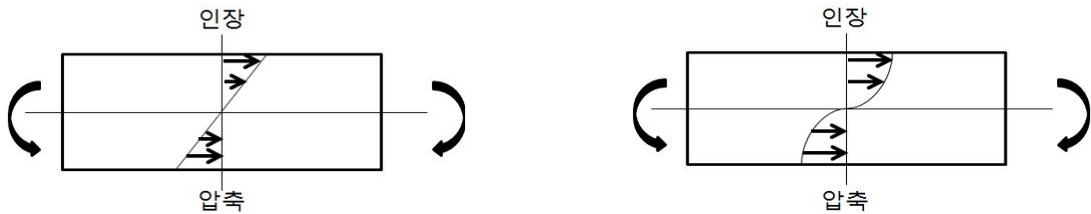
이러한 잔류응력의 분포뿐만 아니라 금속의 변태에 관한 연구 또한 활발이 진행되고 있다. 강성훈 등(2006)은 탄소상의 상변태 모사에 관한 유한요소 해석 프로그램 개발과 상의 핵의생성 시기를 예측하였다. 조시훈 등(2001)은 상변태를 고려한 탄소강 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구를 수행 하였다. 허승민(2014) 강재의 초기 잔류응력과 상변태를 고려한 용접잔류응력 해석에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

본 연구에서는 파이프용접잔류응력 분포를 보다 정확히 해석하기 위해 상변태를 적용하여 유한요소 프로그램을 사용하여서 상변태를 고려하지 않을 경우와 상변태를 고려하였을 경우에 잔류응력을 비교하고자 한다.

제2장 잔류응력과 상변태의 이론적 고찰

2.1 잔류응력의 개념

잔류응력이란 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력을 말한다.



(a) 초기의 응력분포 상태 (선형탄성)

(b) 굽힘모멘트가 증가했을 경우

그림 2.1 초기의 응력상태에서 굽힘 모멘트가 증가했을 경우

굽힘모멘트가 작용하는 초기에는 보의 응력 분포가 선형탄성 상태이다. 모멘트가 증가하면 보의 외측부터 항복하기 시작하여 변형경화재료의 경우에 응력분포는 궁극적으로 그림2.1의 (b)와 같은 상태가 된다. 굽힘 모멘트가 제거되는 것은 마치 (b)의 상태에서 크기가 같고 방향이 반대인 모멘트를 가하는 것과 같다.



(c) 두 응력분포의 차이

(d) 굽힘모멘트 증가시

그림2.2 굽힘 모멘트 제거 후

따라서 그림2.2에서 (c)에서 중립축에 대한 모멘트가 같아야 한다. (c)의 두 응력분포의 차이로 인하여 그림 (d)와 같은 인장잔류응력이 남게 된다. ad 및 oe 구간에서는 압축잔류응력이 남고, do 및 ef 구간에서는 인장잔류응력이 남는다.

잔류응력을 유발시키는 원인으로서는 금속의 가공 시나 가공 후에 금속 상(Phase)들 사이에 밀도차를 유발하는 상변화가 있다.

2.1.1 잔류응력의 생성

그림 2.3(a)의 초기 3부재에서 중간부재가 연결되어있지 않으나, 그림 2.3(b)에서와 같이 중간부재를 당겨서 접합하면, 구조물 외부에서 하중은 작용하고 있지 않으나 중간부재에서는 인장응력을, 양쪽 두 부재에서는 압축응력이 작용되고 있다. 이와 같이 외부에서 하중을 작용하지 않고 평형상태를 유지하고 있는 구조물 내부에 응력이 존재하는 것을 잔류응력이라 한다.

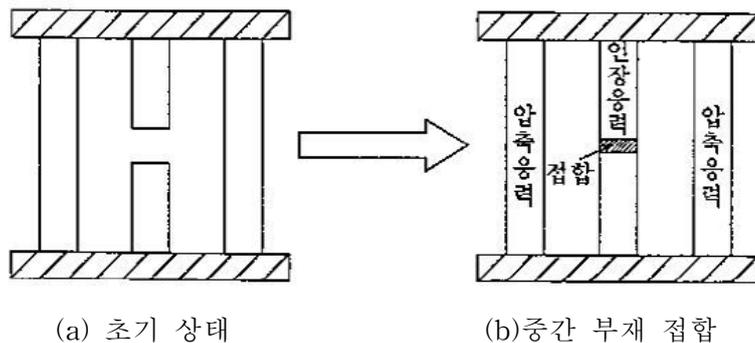


그림2.3 조립 3 부재의 잔류응력 (이승엽 ,2011)

잔류응력이 존재하는 구조물은 평형상태를 유지하기 때문에, 구조물 내부의 임의의 단면에 대하여 생성 되어있는 잔류응력은 반드시 힘의 평형과 모멘트 평형 조건을 만족 시켜야 한다. 즉, 임의의 주어진 단면에 생성된 인장 잔류응력과 압축 잔류응력의 합은 반드시 0이 되어야 한다.

용접잔류응력분포를 보통 주변이 자유로운 맞대기 용접이음에서 잔류응력 분포는 그림 2.4와 같다.

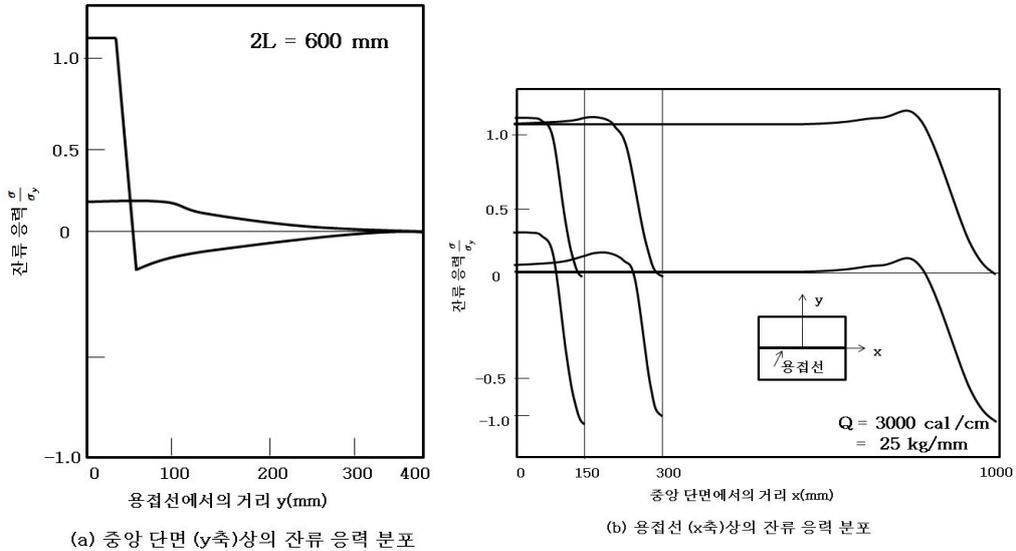


그림 2.4 주변이 자유로운 맞대기이음의 잔류응력 분포 (엄기원, 2010)

실제의 아크 용접이음에서 잔류응력분포는 용접하는 모재의 형상, 치수에 의해 다소 다르며, 용접길이가 긴 경우에는 용접 순서에 의해서도 다르며, 또한 용접봉의 이음 부근에서는 잔류응력이 불규칙하게 변동되므로 잔류 응력 분포는 더욱 복잡하게 된다. 그러나 맞대기이음의 잔류응력 분포는 대체적인 특성은 그림 2.4 나타낸 바와 같으며, 용접길이가 긴 경우에는 용접부 부근에 있어서 용접선 방향의 잔류응력(σ_x) 쪽이 용접선 직강방향의 잔류응력 (σ_y)보대 매우 크다. 용접부 부근에 있어서 종방향의 인장 잔류응력의 크기는 재료의 인장 항복 응력의 크기가 된다. 구조물의 용접이음에서 이음의 주변이 자유롭지 않고, 그림 2.5 (a)와 같은 모양을 하고 있다면 횡방향의 수축이 구속되어 있다.

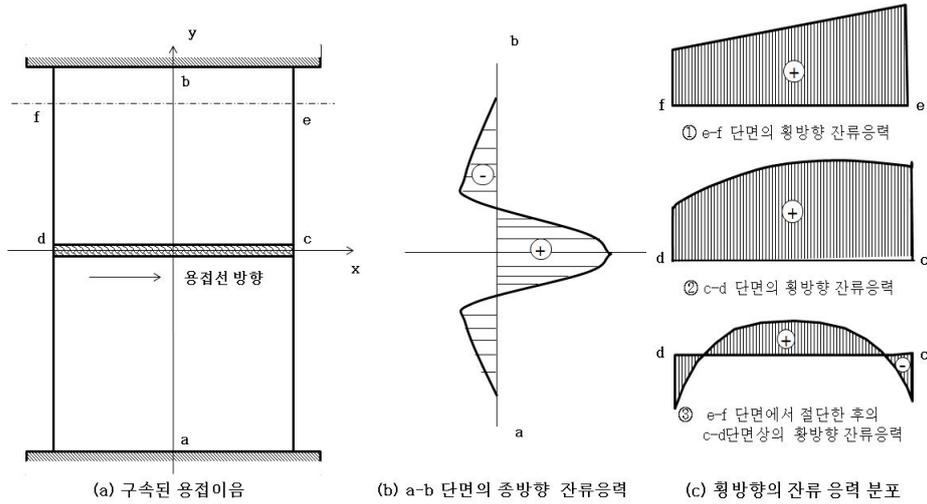


그림 2.5 구속된 용접이음에 생기는 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

(b),(c)는 구속되어 있는 용접이음에서의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. (b)에 표시된 종방향의 잔류응력과 그림(c)의 ③에 표시된 과정으로 구한 횡방향 잔류응력의 크기는 주변이 자유스러운 용접이음의 잔류응력과 거의 같음을 알 수 있다. 횡방향의 잔류응력은 수축을 구속하는데 따라 생긴다. 구속응력에서 특히 문제가 되는 것은 후판의 맞대기이음을 다층용접할 때 그의 초층 용접에서도 생기는 구속응력이다. 이 때에 수축은 구속되는 것에 의하여 생기는 변형도의 대부분은 단면이 작고 변형되기 쉬운 용접부에 집중되고 용접부의 구속응력이 매우 크게 되어 용접 균열의 원인이 되는 수가 있다.

2.1.2 잔류응력이 강구조물에 미치는 영향

가. 피로강도

피로는 인장응력의 반복에 의해 발생하나 외력으로서 압축응력만이 작용하는 부위에서도 인장잔류응력이 존재하면 피로균일 발생하는 경우도 있다. 그림 2.6과 같이 용접 부에는 용접시공 시 냉각과정에서 통상 항복점에 가까운 인장응력이 내부응력으로서 잔류하게 되는데, 이러한 용접부 압축응력이 반복적으로 작용하면 용접부의 내부응력과 중첩된 인장응력이 반복적으로 적용하게 된다.

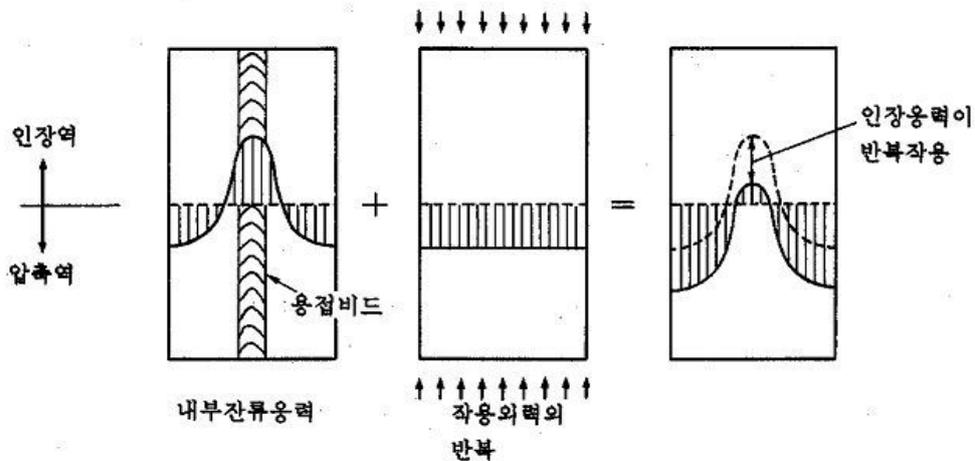


그림 2.6 용접잔류응력의 영향(박정웅 등, 2004)

일반적으로 소형 시험편에서는 주어진 피로강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로강도보다 크게 된다. 이러한 이유는 소형시험편의 용접 이음부에서 생기는 인장 잔류응력은 실물 크기의 보 시험편의 용접 이음부에서 발생하는 인장 잔류응력만큼 크지 않기 때문이다. 따라서 소형시험편 용접이음부의 응력비는 실물 크기의 보 시험편의 용접 이음부의 응력비보다 작게 된다. 응력비가 낮은 피로시험에 주어진 피로강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로강도보다 크다. 따라서 소형 시험편에서 주어진 피로강도는 실제 교량의 피로강도를 안전적으로 평가하지 않는다.

나. 정적강도

연성이 풍부한 연강 및 저합금강 등에서는 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하여도, 외력에 의해서 소성 변형이 진행하여, 잔류응력이 완화되므로, 과단 강도에는 영향이 없다고 생각해도 좋다. 그 이유는 그림 2.6 연강 맞대기 이음의 예와 같이, 비드근방에는 높은 인장응력이 잔류되었던 부분은 외력이 증가에 따라 즉시 항복하여, 그 부분은 소성변형을 시작하지만, 응력은 그다지 증가하지 않는다. 예를 들면, 이음 시험편 전체로서 0.18%의 연신 변형을 주면, 전 단면이 항복하여 abcde의 응력분포로 된다. 이 상태에서 만약 외력을 제거하면 잔류응력은 점선과 같이 대단히 작게 되고, 이음에 근소한 소성 변형을 주며 잔류응력이 경감된다. 그 후 시험편의 소성변형이 2~8%로 진행함에 따라 응력분포는 그림과 같이 거의 평탄하게 증가하며, 처음부터 잔류응력이 없을 때와 거의 같이 과단하게 되며, 강도에는 거의 차이가 나타나지 않는다.

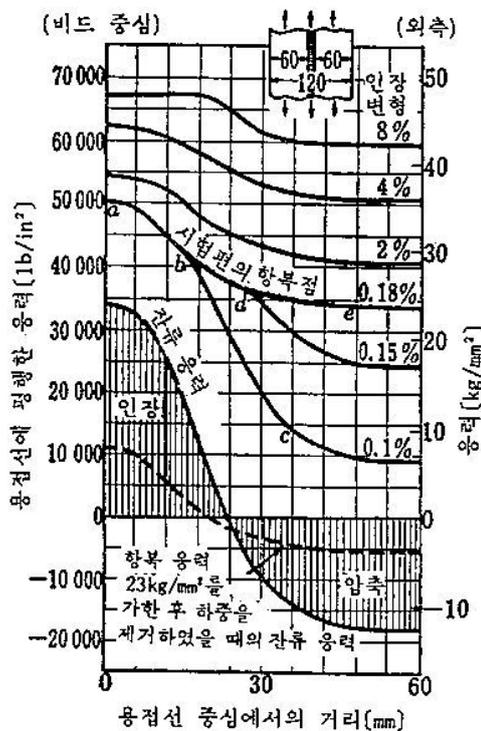


그림 2.7 세로이음의 정적 인장에 의한 잔류응력 변화(이승엽, 2011)

나. 균열

균열이 있는 판을 용접하면 균열 부근의 과도적 열응력과 잔류응력은 균열이 없는 판과 다르게 나타난다. 용접에 의한 인장 잔류응력장의 실온 부근의 온도에서 균열(용접 균열)이 발생하면, 균열 면에 작용한 인장잔류응력이 해방되어 균열 부근에서 잔류응력의 재분포가 일어난다. 그 결과 어느 경우에도 균열의 선단 부근에는 재료의 항복응력을 넘는 인장응력장이 형성되어 균열의 선단에는 소성 변형을 일으킨다.

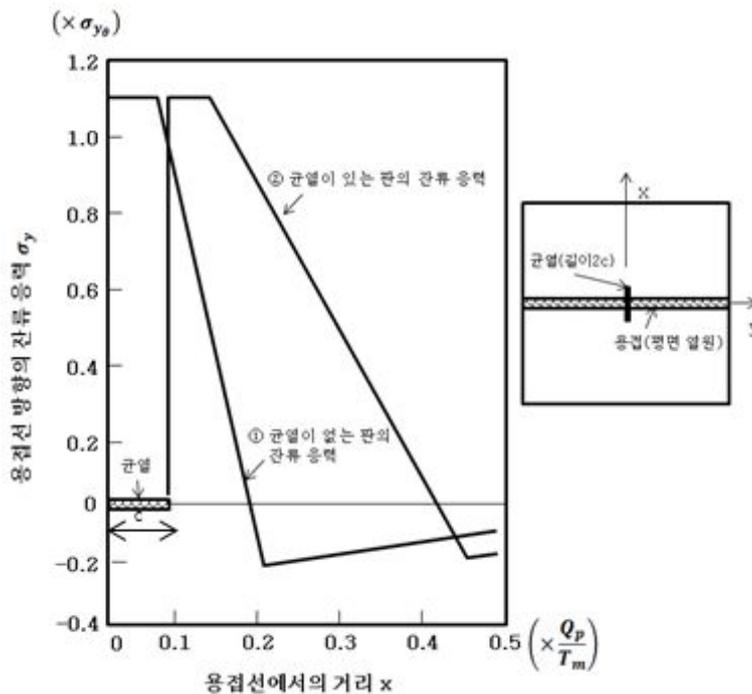


그림 2.8 균열 부근의 용접 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

그림 2.8은 x 축 상에 길이 c 의 균열을 갖는 어떤 너비가 넓은 2장의 판을 y 축 상에 순간 평면 열원을 주어 접합하여 길이 $2c$ 의 균열을 갖는 판을 만든 경우의 잔류 응력 포를 균열이 없는 판의 잔류 응력 분포와 비교한 것이다. 이와 같이 균열이 있는 판을 용접하면, 높은 인장 잔류 응력이 균열 선단 부근에 생겨, 인장 잔류 응력장의 범위(균열 선단으로부터의 거리)는 용접에 의한 균열 선단의 최고온도상승 T_m^o 에 의존한다.

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

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

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

식(2.2)에서는 T_{m^c}/T_e 이 큰 만큼 인장 잔류응력장의 범위는 크게 된다. 균열 선단부근에 잔류하는 소성 변형도(ϵ_p)는 근사치는 (2.3)과 같다

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

인장 잔류응력장이 실온부근에서 균열이 생긴 경우 재 분포후의 잔류응력분포에 대해서도 위와 같은 특성이 있어 균열 부근의 잔류 응력분포는 그림 2.8의 ②와 거의 일치 한다. 그러나 균열 선단 부근의 잔류 소성 변형도는 식(2.3)으로 계산되는 값보다 훨씬 작다.

다. 취성파괴

재료가 연성이 부족하여 거의 소성변형(plastic deformation)을 하지 않고 파괴되는 경우에는 잔류응력의 영향이 나타나며, 전단면이 항복하기 전에 파괴가 일어나면 잔류응력이 클수록 작은 하중에 파괴된다. 또한 연강은 저온에서 연성이 상실되므로 교량, 송급관 등은 겨울의 저온, 정적하중 하에서 갑자기 유리나 도자기와 같은 취성파괴(Brittle fracture)가 일어날 수 있다. 용접이음에 있어서는 용접부 부근에는 항복점에 가까운 큰 잔류응력이 존재하므로 강재의 온도가 전과정지온도보다도 낮을 경우에는 외부하중 또는 열응력에 의하여 약간의 응력이 용접부 잔류응력에 가산될 경우에도 취성파괴가 일어나게 된다.

2.1.3 잔류응력 측정방법

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 용접부 주위의 불균일한 온도분포에 기인한다. 이런 온도분포에 의해 용접부 부근에서는 복잡한 응력 변화가 발생하며 냉각 후에 응력이 잔류하게 되고 용접 변형이 발생하게 된다. 또한 용접에 의한 잔류응력은 용접변형, 저온균열, 취성과괴, 좌굴강도 등에 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 이러한 잔류응력에 재료의 기계적 성질이나 구조물의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하여야 한다. 잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 이론적 방법과 실험적인 계측방법이 있다.

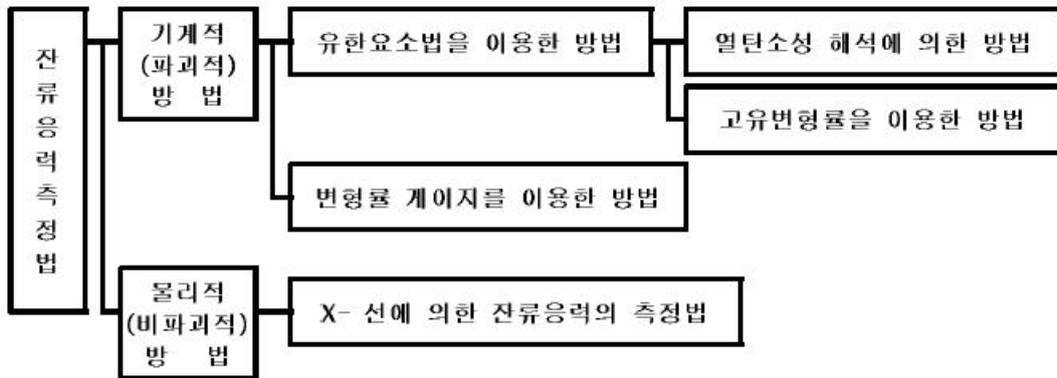


그림 2.9 잔류응력 측정법(이승엽, 2011)

이론적인 해석 방법은 우선 용접부의 온도분포를 정확히 알아낸 다음 응력-변형률과 탄성계수 등 필요한 물리상수를 이용하여 열응력을 계산할 수 있다. 이 이론적인 방법은 계산과정에서 사용되는 여러 가지 복잡한 온도 의존성 변수들에 의해 계산의 정도가 낮아지고 또한 해석하고자 하는 구조물의 기하학적, 역학적인 복잡성 때문에도 계산의 정도가 낮아질 수 있다. 이러한 여러 가지 요인 때문에 이론적인 해석방법은 복잡한 실제 구조물에서는 적용되어지지 못하고 있다. 이와 같은 이유 때문에 실험적인 방법에 의해서 잔류응력이 측정되는데 실험적인 잔류응력의 측정방법에는 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 다시 나누어지고 있다. 파괴적인 방법은 여러 가지 확립된 방법이 있으나 측정 대상체를 파괴시켜야 한다는 근본적인 문제점이 있는 반면 비파괴적인 방법은 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질을 측정함으로써 잔류응력을

측정하기 때문에 이 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들의 영향력을 배제시켜 줄 필요성이 있다. 한편 구멍 뚫기 방법과 같이 반 비파괴적인 방법도 많이 쓰이고 있으나 이는 두께 방향의 응력분포가 심하지 않아야 하며 존재하는 잔류응력이 항복응력의 반을 넘지 않아야 된다는 조건이 필요하고 미세한 구멍이나 측정대상물에 손상을 주어야 한다. 최근은 잔류응력의 측정은 비파괴적인 방법으로 나아가고 있으며 x-ray회절, 중성자회절, 초음파 방법 등이 다양하게 연구되고 있다.

가. X-선을 이용한 잔류응력측정

금속재료는 금속결합에 의해 원자들이 규칙적으로 배열되어 결정구조를 이루고 있다.

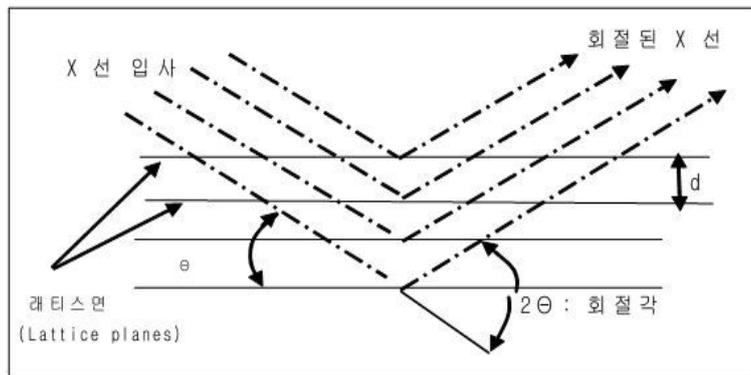


그림 2.10 Bragg Law에 따른 X-ray 회절

상온상태의 강은 체심입방구조로 되어있다. 그림2.10과 같은 금속표면에 X-선을 투사하면 일부는 내부로 침투하여 흡수되고 일부는 반사된다. 어떤 입사각에서는 각 격자면에서 반사하는 X-선의 행로차가 파장의 정수배가 될 때는 서로 겹쳐 강하게 된다. 그렇지 않으면 상쇄되어 버린다. X-선의 파장은 Bragg Law에 의하여 $n\lambda = 2d\sin\theta$ 의 조건을 만족시키면 방사선의 위상은 일치한다. 따라서 θ 를 측정하면 격자상수 d 의 변화를 θ 의 변화로써 측정하면 격자의 변형을 알 수가 있다. 금속재료에 응력이 작용되어 탄성변형이 일어나면 원자간의 간격이 변하게 되어 그림2.11과 같이 X-선 최대강도가 나타나는 반사각도 2θ 가 변하게 된다. 반사각도 2θ 의 변화에 따라 원자층 간의 거리변화를 구할 수 있기 때문에, 잔류응력이 존재하지 않는 표준시편의 원자층 간의 거리와 비교하면 잔류응력을 구할 수 있다.

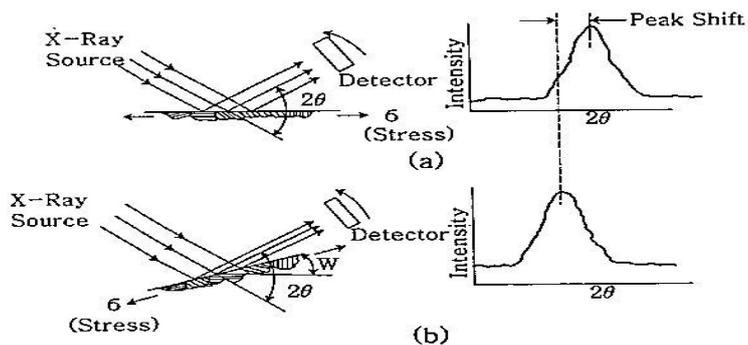


그림 2.11 X-ray 회절에 의한 잔류응력 측정 원리

이 방법은 표면응력 밖에 측정할 수 없지만, 대부분의 경우 최대응력 표면에 존재하게 되므로 중요한 가치가 있다. X-선법에 의한 잔류응력측정은 Barrett와 Massalski(1996), Klug와 Alexander(1974), Taylor(1961), Chrustenson(1960), Hilley(1971)등에 의해 연구되었다.

나. 중성자법(Neutron Method)

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

회절(diffraction)현상은 파동들이 진행할 때 물체의 모서리나 파동의 파장 정도의 크기를 갖는 구멍을 통과할 때 진행방향으로 파동들이 퍼지거나 일으키는 현상을 말한다. 회절현상은 브래그의 법칙(Bragg's Law)을 따르는데 결정과 같이 주기적인 구조를 가진 물에 대해 일정한 파장의 빛을 다양한 각도에서 비추어보면, 어느 각도에서는 강한 빛의 반사가 일어나지만 다른 각도에서는 반사가 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 물질을 구성하는 원자에 의해 산란된 빛이 결정구조의 반복에 의해 강해지거나 약해지기 때문이다. 브래그의 법칙은 빛의 파장과 결정구조의 폭, 혹은 반사면과 광선이 이루는 각도 사이의 관계를 설명한다.

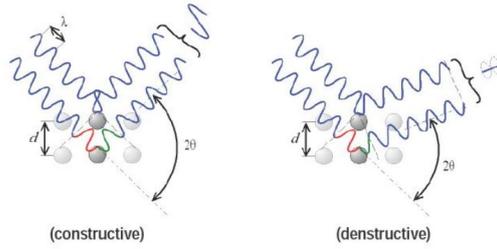


그림 2.12 Bragg's Law(허승민, 2014)

$$2d_{hkl} \cdot \sin\theta_{hkl} = n\lambda \quad (2.4)$$

식(2.4)는 브래그 조건으로 만족될 경우 빛은 회절하며, 입사각과 반사각은 같다. 여기에서, d 는 주기 구조의 폭, θ 는 결정면과 입사된 빛 사이의 각도, λ 는 빛의 파장 n 은 정수이다. 금속재료에 내부응력이 생기면 각 결정 안에서 격자면의 간격이 늘거나 줄어든다. 이 격자 간의 거리를 회절현상을 이용 측정하여 변형률을 측정할 수 있다.

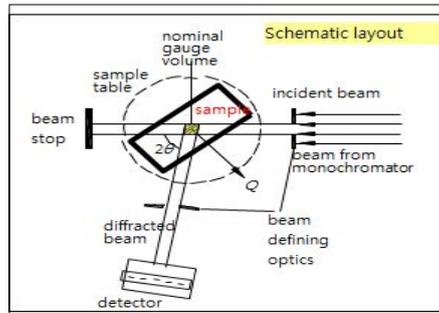


그림 2.13 중성자회절을 이용한 변형률 측정

응력측정은 회절을 이용한 변형률을 이용하여 구할 수 있다. 보통 응력은 재료가 등방성이라는 가정(즉, 재료의 전부피의 Young's Modulus(E)와 Poisson's ratio(ν)를 알고 있다.)하에 결정된다. 표면응력을 얻기 위한 X-선 응력측정법에서는 시료면 법선방향의 응력성분이 없다고 가정한다. ($\sigma_3=0$) 이 때, 임의방향의 변형률 $\epsilon_{\psi\psi}$ 는 탄성이론으로부터 시료평면상 임의의 방향 ϕ 의 응력성분 σ_ϕ 또는 $\sin^2\phi$ 와 선형함수의 관계를 갖는 다음 식으로 주어진다.

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

ψ 는 시료면의 법선과 회절면의 법선이 이루는 각이고, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 세 주축응력 (principal stress)이다. 위 식을 이용한 방법은 유일 축 응력상태(uniaxial stress state) 또는 양축응력상태(biaxial stress state)를 결정할 때에만 적용할 수 있다.

일반적으로 시료 내부의 일정한 점에서 시료의 좌표축 σ_{xyz} 에 관한 변형률텐서(ε)는 Q에 대하여 시료의 방위를 변화시켜 결정할 수 있다. 시료좌표축에 대한 Q의 방향 cosine이 ($l'm'n'$)이라고 하면 이 방향의 변형률은 (2.6)과 같다.

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

따라서, 변형률텐서(ε)를 결정하려면 적어도 6가지 서로 다른 방향의 변형률 e ($l'm'n'$)를 측정할 필요가 있다. 이렇게 한 좌표계에 대한 ε 의 성분이 결정되면 대칭텐서(ε)의 대각선화로 주축변형률(principle strain) ε^D 를 구할 수 있고, 주축응력(σ)는 재료의 Young's Modulus와 Poisson's ratio를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{E}{1+v} \begin{pmatrix} \varepsilon^{D_x} \\ \varepsilon^{D_y} \\ \varepsilon^{D_z} \end{pmatrix} + \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} (\varepsilon_x^D + \varepsilon_y^D + \varepsilon_z^D) \quad (2.7)$$

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

다. Hole drilling Method

잔류응력의 정량적 평가기법 중 신뢰성이 비교적 높은 홀 드릴링법은 고속의 제트류나 기계적 드릴링을 이용하여 잔류응력을 측정하기 위한 부분에 3축 스트레인 게이지를 부착하여 원형의 구멍을 형성하고 게이지의 각 축방향에 대한 변형률을 측정하여 주 응력의 크기를 결정한다. 천공법에 의해 잔류응력을 이완시킬 때 원형구멍 주위에서 스트레인 변화량을 계측하는 것이기 때문에 다른 요인에 의한 스트레인의 변화를 최소화하여야 한다.

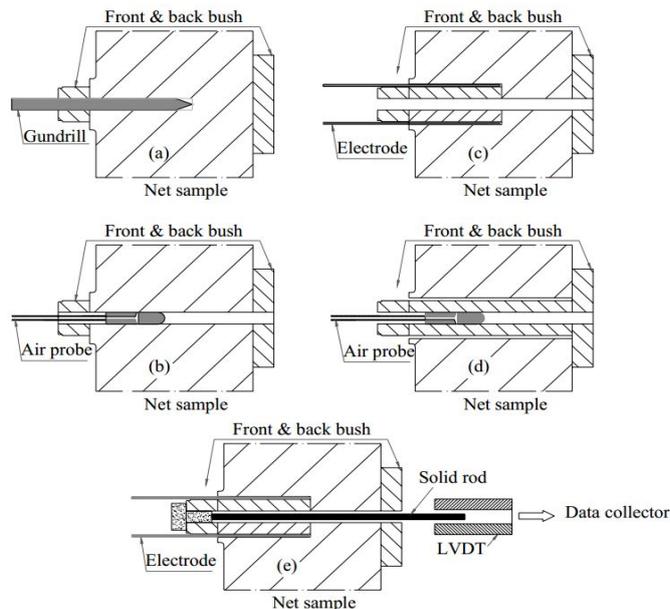


그림 2.14 Deep hole drilling (F.Hosseinzadeh 등, 2009)

먼저, Gundrill을 이용하여 시편의 두께 방향으로 기준 구멍을 뚫고(그림2.14 a), air probe를 기준구멍에 넣어 일정간격으로 구멍의 직경을 측정한다(그림2.14 b). 그 다음 그 기준구멍을 중심으로 전기 방전 가공하여 구멍을 뚫는다(그림2.14 c). 마지막으로 기준 구멍의 지름을 처음 측정 지점과 동일한 깊이 간격으로 채 측정한다(그림2.14 d).

위에서 측정된 기준구멍의 지름을 $d(\theta)$, 구멍을 뚫은 후 기준구멍의 지름을 $d'(\theta)$ 라 하고 각각 측정 위치 ' $\theta, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ '이라 하면, 지름의 변화는 $\Delta d(\theta) = d'(\theta) - d(\theta)$ 로 나타내며, 이를 이용하여 잔류응력을 계산할 수 있다. 변형 $\bar{u}_{rr}(\theta)$ 과 잔류응력($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ 그리고 σ_{zz})의 관계는 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{u}_{rr}(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d(\theta)} = -\frac{1}{E} \times [f(\theta)\sigma_{xx} + g(\theta)\sigma_{yy} + h(\theta)\sigma_{xy} - v\sigma_{zz}] \quad (2.8)$$

여기서, $f(\theta) = 1 + 2\cos 2\theta$, $g(\theta) = 1 - 2\cos 2\theta$, $h(\theta) = 4\sin 2\theta$ 이며, E 와 v 는 각각 Young's modulus와 Poisson's ratio 이다. 위에 식을 각각의 측정위치에 대한 행렬로 나타내면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{u}_{rr}(\theta) = \frac{1}{E} M\sigma \quad (2.9)$$

(2.9)를 축 방정식으로 나타내면, (2.10)과 같고, 여기서 $\Delta \varepsilon_{xx}$ 는 평면 변형률이다.

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_{rr}(\theta_1) \\ \bar{u}_{rr}(\theta_2) \\ \vdots \\ \bar{u}_{rr}(\theta_m) \\ \Delta \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \times \begin{pmatrix} f(\theta_1) & g(\theta_1) & h(\theta_1) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_i) & g(\theta_i) & h(\theta_i) & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_m) & g(\theta_m) & h(\theta_m) & -v \\ -v & -v & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

이렇게 구해진 변형을 이용 하여 잔류응력을 구할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = -EM^* \bar{u}_{rr} \quad (2.11)$$

$$M^* = (M^T M)^{-1} M^T \quad (2.12)$$

M^* 은 M 의 역행렬, M^T 는 M 의 전치행렬이다. (F.Hosseinzadeh 등, 2009)

2.2 금속의 상변태 및 영향

2.2.1 Fe-C상태도

상변태란 온도나 압력의 변화에 의해 결정 구조가 바뀌는 것으로 다양한 종류의 금속의 상이 존재 한다. 이렇게 변화하는 상에 따라 재료의 기계적 특성(강도, 경도, 연성, 인성 등)이 달라지므로 재료의 가공에서 중요하다.



그림 2.15 금속조직의 종류(금속용어사전편찬회, 1998)

그림2.15은 금속 조직을 확대하여서 보여 주고 있다. 오스테나이트는 철과 탄소의 고용체로 강을 A1변태점(726°C)이상으로 가열했을 때 얻어지는 조직이다. 베나이트는 탄소강 또는 합금강을 550~150°C담금질 하여 등온변태 했을 때 생기는 조직으로 마르텐사이트 보다 부식되기 쉬우며 경도가 적고 변태되는 온도에 따라서 고베나이트와 저베나이트로 나뉜다.

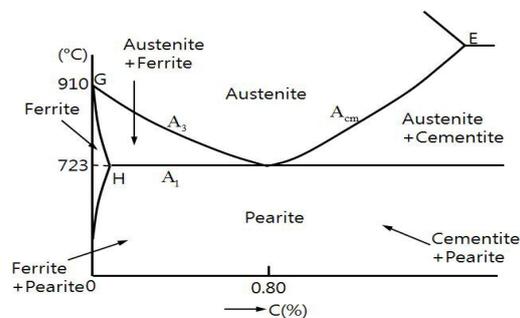


그림 2.16 철-탄소계 상태도

열간압연을 마친 철강 소재는 주로 오스테나이트 상태에서부터 냉각이 진행됨에 따라 페라이트, 펄라이트, 베이나이트 등의 다양한 조직과 특성을 가질 수 있는 상변태가 일어나게 된다. Fe-c 상태도는 이러한 상변태를 이해하는데 가장 근본이 되며 각종 상들이 안전한 온도-조성 영역과 각 상 사이의 평형 계경 등을 나타낸다. 그림2.16 같은 Fe-c상태도에서 각 상의 경계선들은 Fe-c 합금에서 일어나는 상변태온도를 나타낸다. 변태온도는 종종 임계온도라고 하기도 하며 시편을 가열 혹은 냉각시키면서 열전달 혹은 체적 등의 변화를 측정함으로써 관찰 할 수 있다. 냉각할 경우, 열이 방출됨에 따라 오스테나이트가 페라이트와 시멘타이트로 변태하여 시편의 팽창이 일어난다.

냉각 시 변태가 일어나면 시편의 시간-온도 곡선이 연속적인 모양에서 기울기가 바뀌거나 혹은 온도변화가 정지한다. 임계온도를 사용할 때 쓰는 "A"자는 온도정지를 나타내는 것이다. 강의 열처리와 관련하여 세 가지 임계온도가 있다. A_1 은 페라이트-시멘타이트영역과 오스테나이트와 페라이트, 혹은 오스테나이트와 시멘타이트를 포함하는 영역의 경계온도를 나타내며, A_3 는 페라이트-오스테나이트 영역과 오스테나이트 영역의 경계를 나타내며, A_{cm} 은 시멘타이트-오스테나이트 영역과 오스테나이트 영역의 경계를 나타낸다.

변태도를 잘 이용하면 페라이트와 시멘타이트를 조직을 만들거나 혹은 확산에 의한 변태를 방지하여 최대 경로를 마르텐사이트 조직을 만들 수 있다.

금속의 상변태는 냉각곡선을 통해 알아 낼 수 있다. 고온으로 부터 냉각시킬 때의 과정을 나타내는 곡선으로 세로축에 온도, 가로축에 시간을 나타내어 도시한다. 냉각 곡선은 항온냉각곡선(TTT-Curve)과 연속 냉각곡선(CCT-Curve)으로 나뉜다.

가. 등온냉각곡선(Time Temperature Transformation Curve)

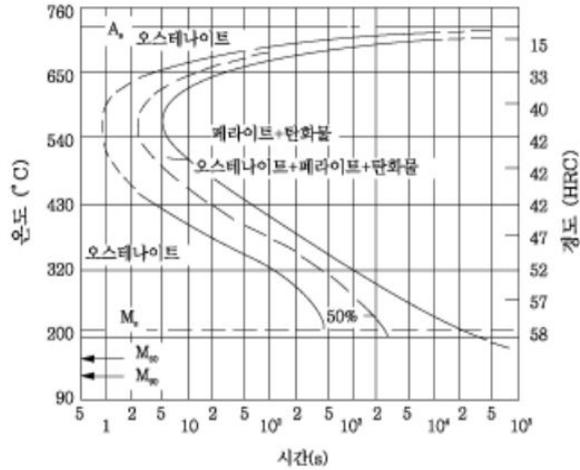


그림 2.17 공석강의 항온변태 곡선

등온냉각곡선(TTT-curve)는 공석강을 A1변태온도 이상으로 가열한 후 어느 정도의 시간을 유지하게 되면 단상의 오스테나이트가 되는데, 이와 같은 오스테나이트화한 후에 A1 변태온도 이하의 어느 온도를 급랭시켜서 이 온도에서 시간이 지남에 따라 오스테나이트의 변태를 나타낸 고석은 항온변태곡선(Isothermal transformation curve)이라 하고, 다를 용어로는 등온냉각곡선, C곡선, 또는 S곡선이라고 칭한다.

그림2.17는 공석강의 TTT curve를 나타낸 것이다. TTT curve는 2개의 C자 형상을 가진 곡선으로 구성되어 있는데, 왼쪽 곡선은 변태 개시선을, 오른쪽 곡선은 변태 종료선을 나타낸다. 또한 550°C 부근의 온도에서 곡선이 왼쪽으로 돌출되어 있는데, 이것은 변태가 이 온도에서 가장 먼저 시작되는 다는 것을 의미하는 것으로 이 곡선을 "nose"라고 부른다. TTT curve의 특징은 변태가 시작되는 시간과 종료되는 시간을 나타낸다는 것으로서, 일반적으로 nose온도 위에서 항온 변태시키면 펄라이트가 형성되고, nose 아래의 온도에서 항온 변태시키면 베이나이트가 형성된다.

나. 연속냉각곡선(Continuous cooling transformation Curve)

실제 열처리작업에서는 항온변태에 의해서 강을 열처리하지 않고, 오스테나이트 온도 영역에서 상온까지 연속적으로 냉각시키는 열처리를 사용하므로 항온변태곡선을 연속냉각변태곡선으로 전환시켜야 한다. 이를 위해서는 항온변태곡선 위에 연속냉각곡선을 그려서 구할 수 가있다. 세로축은 온도, 가로축은 시간 (log눈금)으로 정하여 항온변태곡선 위에 여러 가지 냉각속도로 냉각시켰을 때의 연속냉각곡선을 그림에 나타냈는데, 간단히 하기 위해서 냉각곡선을 직선으로 표시하였다.

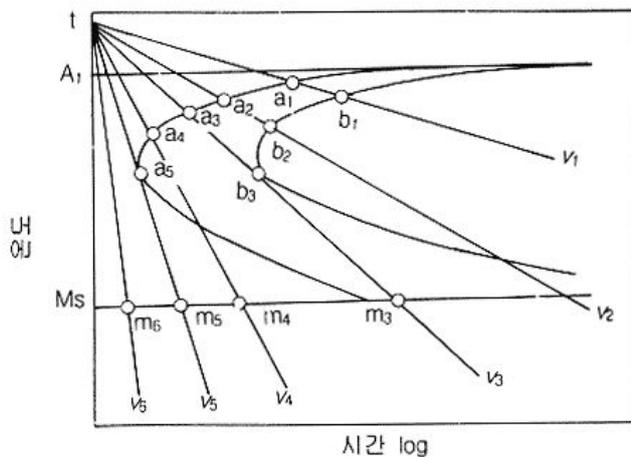


그림 2.18 S-곡선과 연속냉각곡선과의 관계

열처리 작업에서 가장 느린 냉각인 노냉(Furnace Cooling)을 V_1 으로 유냉(Oil Quenching)같이 더욱 빠른 냉각은 V_3, V_4 수냉(Water Quenching)과 같이 가장 빠른 냉각은 V_5, V_6 로 나타내진다. 제일 느린 냉각속도인 V_1 에서는 냉각선인 펄라이트 변태의 개시 및 종료선을 통과하고 있다. 즉 변태가시선과는 a_1 점에서, 종료선은 b_1 점에서 교차하고 있다. 이와 같이 노냉시에는 오스테나이트가 펄라이트로 변하게 된다.

마르텐사이트, 베이나이트, 펄라이트, 페라이트의 경도는 화학 조성과 냉각 속도의 함수로 계산된다.

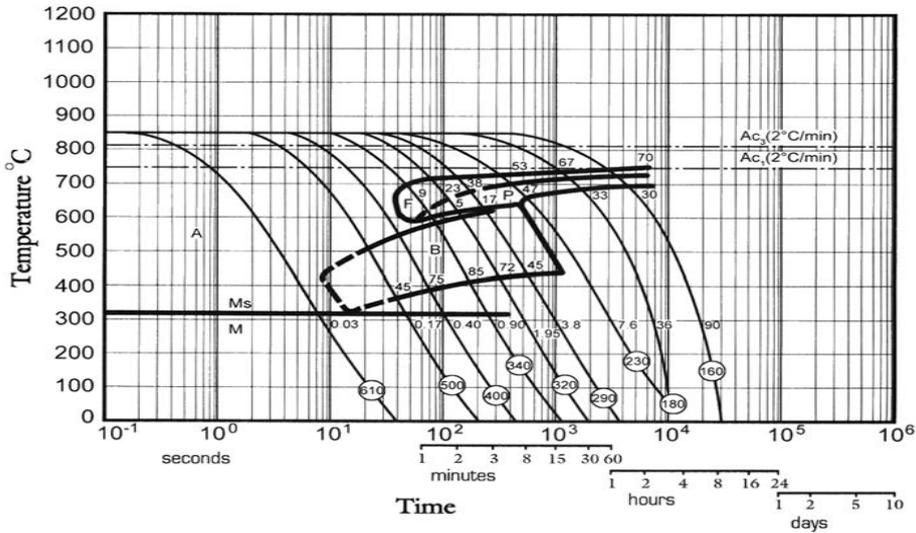


그림 2.19 AISI 4140강의 CCT선도 (Isfahan)

각 단계의 경도는 다음과 같다.

$$HV_M = 127 + 949(\%C) + 27(\%Si) + 11(\%Mn) + 8(\%Ni) + 16(\%Cr) + 21\log V_r \quad (2.13)$$

$$HV_B = 323 + 185(\%C) + 330(\%Si) + 153(\%Mn) + 65(\%Ni) + 144(\%Cr) + 191(\%Mn) + (89 + 53(\%C) - 55(\%Si) - 22(\%Ni) - 20(\%Cr) - 33(\%Mo))\log V_r \quad (2.14)$$

$$HV_{F-P} = 42 + 223(\%C) + 53(\%Si) + 30(\%Mn) + 12.6(\%Ni) + 7(\%Cr) + 19(\%Mo) + (10 - 19(\%Si) + 4(\%Ni) + 8(\%Cr) + 130(\%V))\log V_r \quad (2.15)$$

여기서 C : 탄소, Si : 규소, Mn : 망가니즈, Cr : 크로뮴, Ni : 니켈 HV_M , HV_B , HV_{F-P} 는 각각 혼합물의 경도, V_r 은 시간당 냉각속도이며, 총 강재의 경도 식은 (2.16)과 같다.

$$HV = F_M HV_M + F_B HV_B + (F_F + F_P) HV_{F+P} \quad (2.16)$$

2.2.2 상변태의 유한요소 해석 정식화

강재의 용접부에서 냉각 중에 발생하는 오스테나이트-마르텐사이트변태는 잔류응력에 영향을 미친다. 마르텐사이트는 무 확산변태로 탄소원자를 함유하고 있는 오스테나이트에서 형성되며 마르텐사이트가 형성될 때, 금속이 팽창하고 소성변형도 발생하게 된다. 용접과정에서 용접 열 영향부(HAZ)에 크기는 형성된 마르텐사이트의 분율에 따라 달라진다(Ravi Vishnu P, 1994).

아래 그림 은 각각 냉각 속도에 따른 팽창률을 나타 낸 것이다.

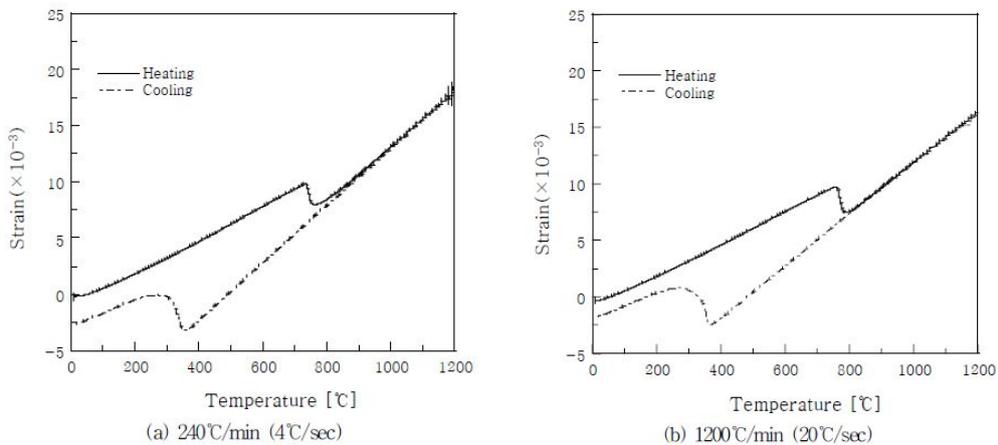


그림 2.20 냉각속도에 따른 팽창률(허승민 2014)

실험결과를 통해 열 변형율과 재료의 격자 상수들을 이용해 상변태 영역에서 온도에 따른 상분율을 계산할 수 있다. 마르텐사이트 변태 영역에서 상 변태의 상분율의 변화 식은 Koistinen-Marburger 식을 이용하여 나타 낼 수 있다.

$$f_m = 1 - \exp[-k(M_s - T)] \quad (T \leq M_s) \quad (2.17)$$

여기서 f_m 은 현재온도에서의 마르텐사이트의 체적분율, T 는 냉각시 현재 온도, M_s 는 마르텐사이트의 변태개시온도, K 는 온도에 따른 마르텐사이트 과정의 진화 특성 상수이다(이희태, 2007).

K는 아래와 같다.

$$K = 0.5 \left(\frac{-\ln(0.1)}{M_s - T^{90}} \right) + 0.5 \left(\frac{-\ln(0.5)}{M_s - T^{50}} \right) \quad (2.18)$$

여기서 T^{50} 과 T^{90} 은 각각 마르텐사이트 변태가 50% 및 90% 이루어 졌을 때 온도이다. 일반적으로 0.0011값을 사용 한다. 이러한 관계가 해석상에서 냉각 중 마르텐사이트의 형성을 추적하기 위해, JMak 모델 (2.19)을 미분방적식을 사용하면, (2.25)으로 나타낼 수 있고 ΔT 는 냉각중의 온도 증분이다.

$$\Delta f_m = \{-(k)\exp[k(T-M_s)]\}\Delta T \quad (T \leq M_s) \quad (2.19)$$

위 식을 이용하여 마르텐사이트 변태에 의한 체적변화에 대한 strain의 증가는 다음 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta \epsilon^{\Delta vol} = \Delta \epsilon^{\Delta vol*} \times \Delta f_m \quad (2.20)$$

$\Delta \epsilon^{\Delta vol}$: 체적변화에 의한 strain 증분 $\Delta \epsilon^{\Delta vol*}$: 완전 마르텐사이트 변태시 체적변화 strain

일반적인 완전 마르텐사이트가 변태되었을 때의 체적변화 strain($\Delta \epsilon^{\Delta vol*}$)은 연강인 경우 2.0×10^{-3} 또는 8.0×10^{-3} 이고 P91 carbon의 경우 3.75×10^{-3} 로 보고 있다.

오스테나이트변태는 마르텐사이트 변태보다 잔류응력에 미치는 영향이 작다. 이것은 온도가 상승하는 과정에 고온(820℃-920℃)에서 발생함으로 이때 재질의 기계적 값이 매우 작아 오스테나이트의 변태를 흡수하기 때문이다. 이러한 효과를 유한요소에서 고려하기 위해 단순선형관계로부터 체적변화를 고려한다. 오스테나이트가 완전 변태 했을 때 체적변화 strain은 -2.288×10^{-3} 로 가정할 수 있다.

용접부가 용접에 의해 열을 받으면 열 변형은 선팽창계수를 이용하여 나타 낼 수 있으며, 이것은 탄성과 소성변형이 추가된다. 상변태에 의한 체적변화는 추가 변형으로 고려해야 한다. 각각의 변형 성분을 전체 변형에 추가 함으로써 분해해서 표현할 수 있다. 그래서 상변태를 받는 강 전체 변형률은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}^{total} = \dot{\varepsilon}^E + \dot{\varepsilon}^P + \dot{\varepsilon}^T + \dot{\varepsilon}^{VOL} + \dot{\varepsilon}^{TRP} \quad (2.21)$$

$\dot{\varepsilon}^E, \dot{\varepsilon}^P, \dot{\varepsilon}^T, \dot{\varepsilon}^{VOL}, \dot{\varepsilon}^{TRP}$ 은 각각 탄성변형률, 소성변형률, 열 변형률, 체적 변형률과 변태소성 (transformation plasticity)을 나타낸다. 탄성변형 증분($\Delta\varepsilon^E$)은 포아송비와 Young's 계수의 온도 의존성을 고려한 등방 Hook's law에 의해 계산된다. 열변형 증분($\Delta\varepsilon^T$)은 온도에 따른 선팽창계수를 이용하여 계산된다. 소성변형($\Delta\varepsilon^P$), 즉 탄-소성 구성 방정식은 Von mises 항복조건, 온도의존 기계성질, 선형등방경화를 고려하여 계산된다. 체적변형증분($\Delta\varepsilon^{VOL}$)은 상변태 조건에 따라 계산되고 유한요소해석에 사용할 수 있다.

따라서 마르텐사이트 변태에 의한 변형은 온도하중과 체적변화를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 $\Delta\varepsilon^{\Delta VOL*}$ 를 3.75로 K를 0.11로 가정하면, Δf_m 와 M_s 를 대입한다.

$$\Delta\varepsilon^T + \Delta\varepsilon^{VOL} = \{\alpha - (3.75 \times 10^{-3} \times -0.011) \exp[0.011(T - M_s)]\} \Delta T \quad (M_f \leq T \leq M_s) \quad (2.22)$$

오스테나이트변태에 대한 온도하중과 체적변화에 의한 변형은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때, A3은 920°C 이고, A1은 820°C이라고 가정한다.

$$\Delta\varepsilon^T + \Delta\varepsilon^{VOL} = (\alpha - 2.288 \times 10^{-5}) \Delta T \quad (A1 \leq T \leq A3) \quad (2.23)$$

열과 체적변화에 의한 strain 증분성분은 (2.22)와 (2.23)에 의해 선형열팽창계수의 항으로 표현하여 나타내었다. 이러한 합성 항은 상태가 발생한 영역에서 본래의 선팽창계수의 선도에서 이를 중첩하여 체적의 변화를 나타낸다. 이것은 수치해석에서 상변태에 의한 체적의 변화효과를 선팽창계수에 수치적으로 변형하여 모델링함으로써 가능하게 한다. 재료의 항복응력은 상변태의 영향을 받는다.

2.3 열 탄소성 이론

용접은 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포가 각 위치마다 국부적으로 용융점 이상의 온도에 따른 열팽창향이 상이하여 소성변형의 발생을 일으키고 비선형성이 나타난다. 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 하기 때문에 냉각 후 잔류응력으로 남는다. 그러므로 수치해석을 위해서는 비선형 열탄소성 해석을 수행해야 한다. 비선형 열탄소성 문제를 설명하기 위하여 다음 과 같이 유한요소 수식화 과정을 행렬형태를 표시하였다

$$[\epsilon] = [\epsilon]_e + [\epsilon]_p + [\epsilon]_{th} \quad (2.24)$$

여기서 $[\epsilon]$: 전(total)변형률, $[\epsilon]_e$: 탄성변형률, $[\epsilon]_p$: 소성변형률, $[\epsilon]_{th}$: 열변형률

$$[\epsilon] = [B][U] \quad (2.25)$$

여기서 $[U]$: 변위, $[B]$: 변형률 - 변위 관계 행렬

$$[\sigma] = [C][\epsilon]_e = [C]([B][U] - [\epsilon]_p - [\epsilon]_{th}) \quad (2.26)$$

여기서 $[C]$: 응력 - 변형률 관계 행렬

가상일의 원리를 이용하여 유도된 유한수식화 방정식은 다음과 같다.

$$\int_v \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = \int_v f^b \delta U dV + \int_s f^s \delta U ds + \sum F_i \delta U_i \quad (2.27)$$

여기서 f^b : body force, f^s : surface tractions, F_i : concentration force

외부에서 작용하는 하중이 없고, 중력 등 체적력(body force)을 무시하면 다음과 같이 된다

$$\int_v \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = 0 \quad (2.28)$$

행렬 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\int_v [\delta \epsilon]^T [\sigma] dV = \int_v [\delta U]^T [B]^T [C] ([B][U] - [\epsilon]_p - [\epsilon]_{th}) dV = 0 \quad (2.29)$$

$$\int_v [B]^T [C] [B] dV [U] = \int_v [B]^T [C] ([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \quad (2.30)$$

$$[K][U] = [F] \quad (2.31)$$

여기서 $[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dV$: stiffness matrix

여기서 $[F] = \int_v [B]^T [C] ([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV$: force matrix

제3장 유한요소법에 의한 잔류응력 해석

본 장에서는 앞에 이론을 바탕으로 두께 19mm 파이프시험편에 대한 용접 잔류응력 해석을 유한요소 프로그램을 사용하여 상변태를 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우 응력집중부의 용접잔류응력을 측정하고자 한다. 유한요소 프로그램에서의 열 탄소성 해석에서의 변형률과 용접프로세스에 영향을 주는 인자에 따른 차이를 통해 발생하는 잔류응력의 크기에 대해 고찰하고, 내압이 작용할 경우 응력집중부의 용접 잔류응력을 측정하고자 한다.

3.1 입열량에 따른 영향

유한요소프로그램인 MSC.Marc를 이용하여 용접해석을 진행할 경우 잔류응력의 생성은 용접프로세스에 적용되는 용접 입열량에 따라 차이를 보인다. 여기서는 두께 19mm의 용접시험편에 각각 용접 입열량에 따른 응력크기를 고찰하였다.

3.1.1 해석모델 및 경계조건

그림 3.1은 해석에 사용된 파이프 시험편의 치수와 형상을 보여 주고 있다. (b)는 파이프 시험편의 중앙을 중심으로 절반 용접시험편의 형상을 보여주고 있으며, 시험편의 총 길이는 250mm, 지름 500mm이고, 두께 19mm에 대해 해석을 진행하였다.

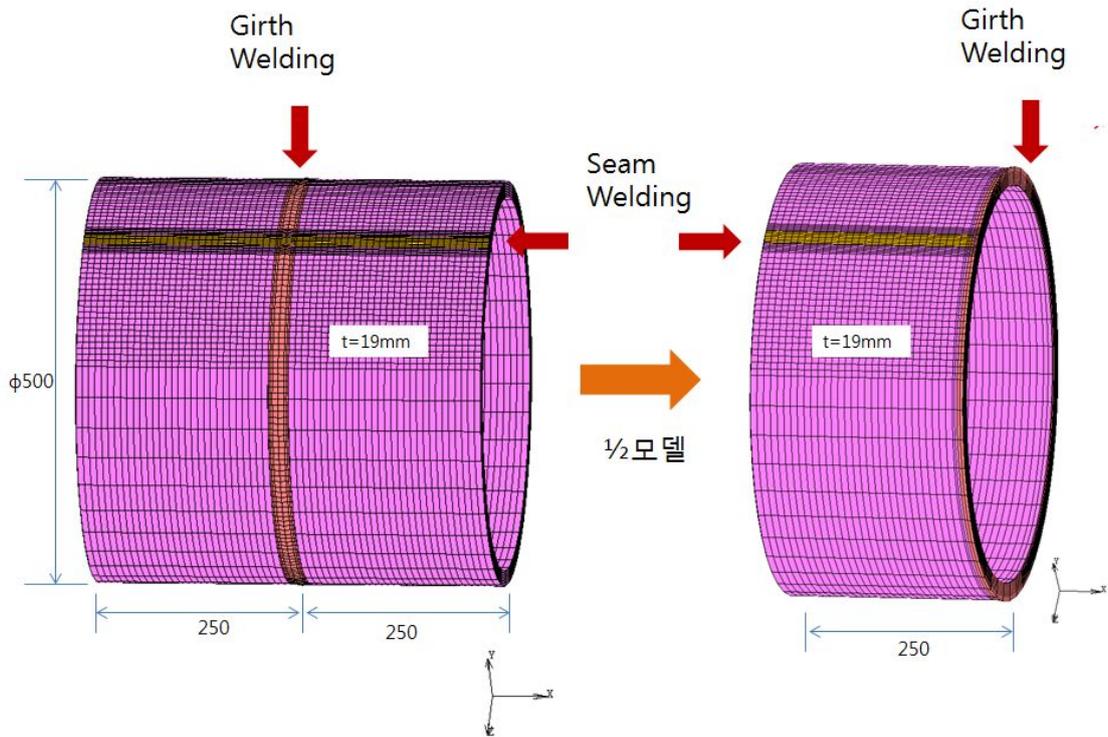
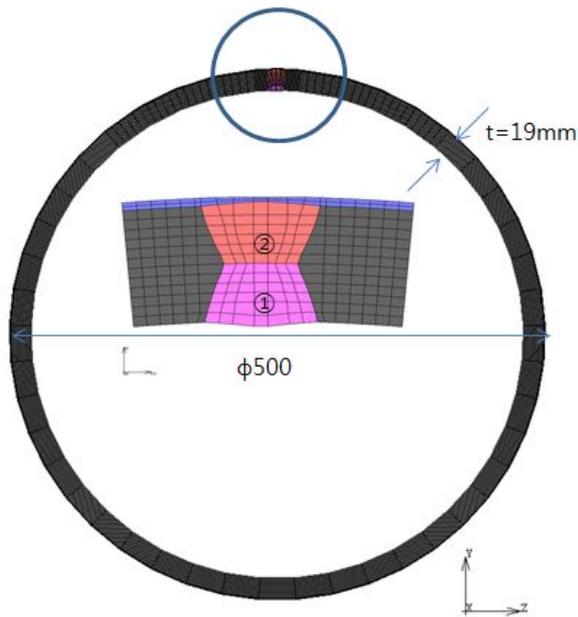
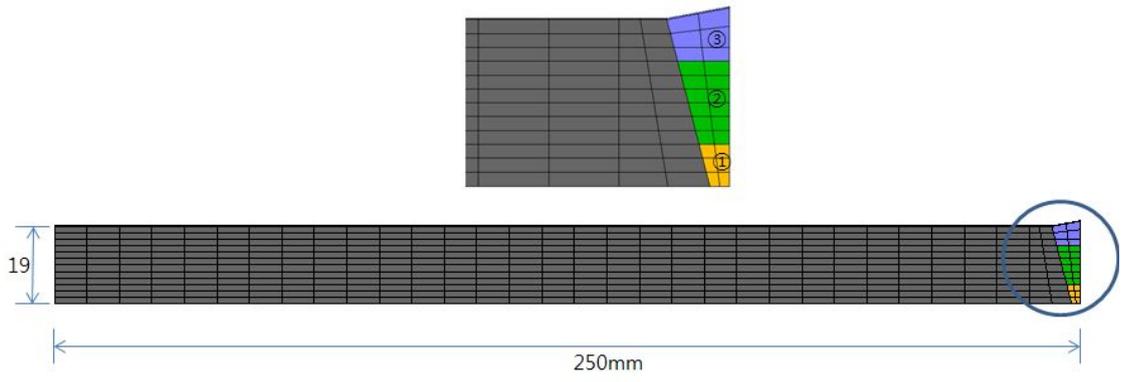


그림 3.1 파이프 시험편의 치수와 형상



(a) Seam Welding



(b) Girth Welding

그림 3.2 파이프 용접의 용접부 형상과 용접 패스 조건

Seam 용접해석 용접선방향(길이 방향)을 X, 폭 방향을 Z, 두께방향을 Y로 규정하여 해석을 실시하였으며, Girth용접해석 시 용접선방향(길이방향)을 Z, 폭 방향을 X, 두께 방향을 Y로 규정하여 해석을 실시하였다. 변형과 수축이완이 발생하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 그림3.3은 실제 해석 시 사용된 모델의 형상 및 경계 조건이다.

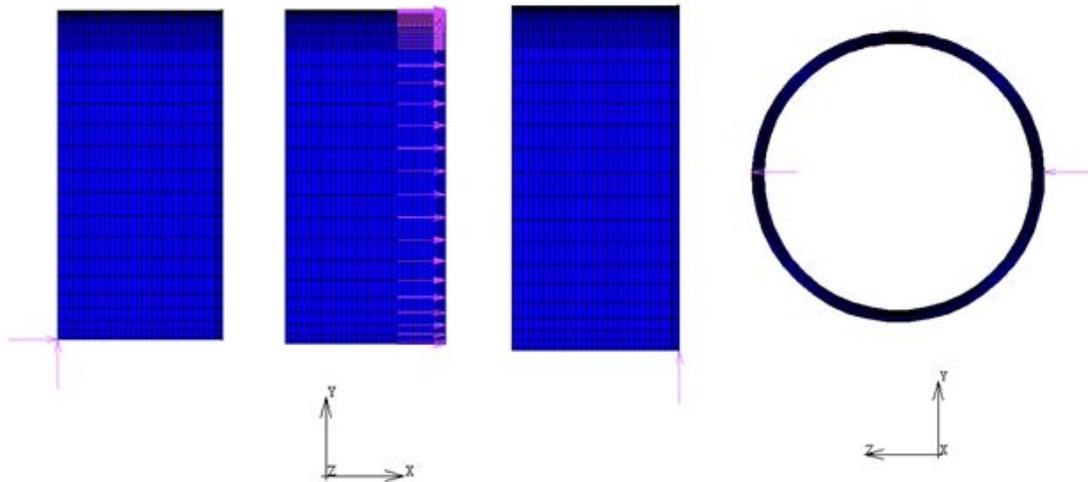
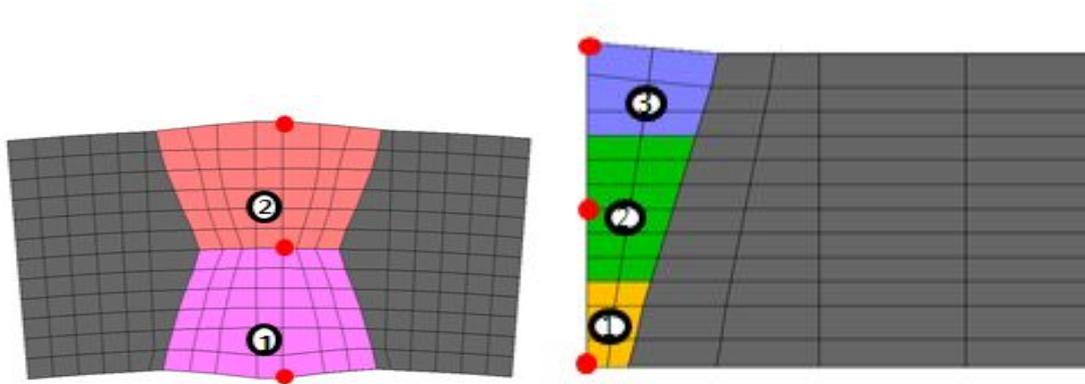


그림 3.3 파이프 시험편의 경계 조건

응력의 측정 위치는 Seam용접시 용접선 방향의 중앙의 응력집중이 발생하는 곳을 측정하였다. girth용접시 용접선 방향의 응력집중이 발생하는 곳을 측정하였다.



(a) Seam 용접 측정위치

(b)Girth 용접 측정위치

그림 3.4 잔류응력 측정위치

3.1.2 해석 조건

열탄소성해석 시 사용된 용접 초기온도와 용접 속도와 용접재질은 다음과 같다. 모재는 API_5L강재로 항복응력은 485MPa이고, 인장강도는 570MPa, Girth용접시 용착금속은 SM-80G이고 항복응력은 580MPa이고, 인장강도는 660MPa, Seam용접시 용착금속은 OP132이고 항복응력은 540MPa이고, 인장강도는 620MPa를 사용하였다. 모든 용착금속의 강도는 모재보다 더 큰 용접재료를 사용하였다.

표 3.1 시험편의 초기온도, 속도 및 용접재질

Specification	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Initial temperature	Speed(m/sec)
Base metal(API 5L)	485	570	25	-
Girth weld_Consumable (SM-80G)	580	660	25	0.02
Seam weld_Consumable (OP132)	540	620	25	0.011

열전달 해석 시 사용되는 재료의 물성치는 온도가 변함에 따라 그 값이 변하게 되는데 아래 그림 3.5와 3.6은 온도의 의존성과 기계성질의 온도의 의존성을 나타내고 있다. 이러한 온도에 따른 물성변화는 열 탄소성해석시 온도에 따라 자동으로 계산되도록 하였다.

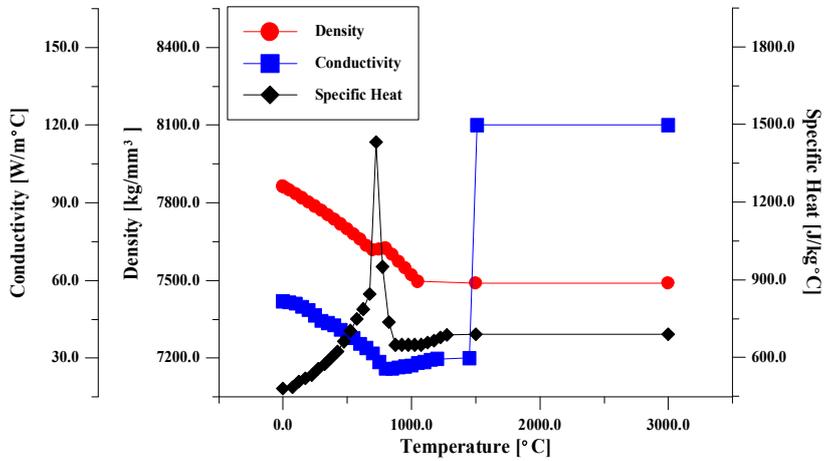


그림 3.5 온도에 따른 재료의 물성치의 거동 (용접강도연구위원회, 2005)

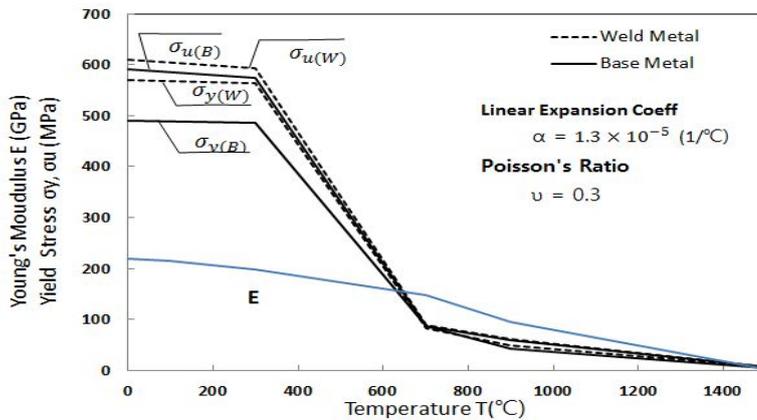


그림 3.6 시험편의 기계적 성질의 온도의 의존성(2014 허승민)

3.1.3 입열량에 따른 응력의 영향

위의 해석 모델에 용접프로세스 과정에서 열량에 따른 Base Metal, Girth Weld Metal, Seam Weld Metal의 최고온도를 조정하였고 재료의 정수 값은 표 3.1과 같다.

표 3.2 입열에 따른 용접의 최고 온도 조건

Material	Case 1 (°C)	Case 2 (°C)	Case 3 (°C)
Girth weld metal	1500	1800	2000
Seam weld metal			

그림 3.7은 시험편 중앙에서 각각 10mm, 35mm 떨어진 지점에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 용접부에서 가까울수록 온도에 대한 영향이 크며 냉각속도 또한 느리다.

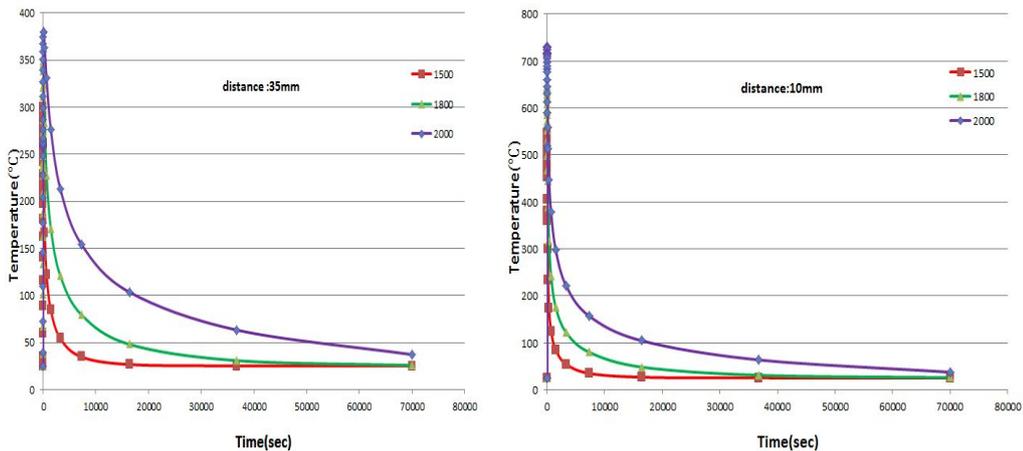


그림 3.7 두께 19mm 시험편 시간에 따른 온도 변화

위의 해석 모델 그림 3.1에 용접프로세스 과정에서 입열량에 따른 Seam-용접부에 열탄소성해석을 수행하여 도출된 결과로 부터 1500℃, 1800℃, 2000℃의 입열량에 따른 Seam 전체용접잔류응력(S_x , S_y , S_z)분포와 Seam 단면용접잔류응력을 그림3.7~3.12에 나타내고 있다.

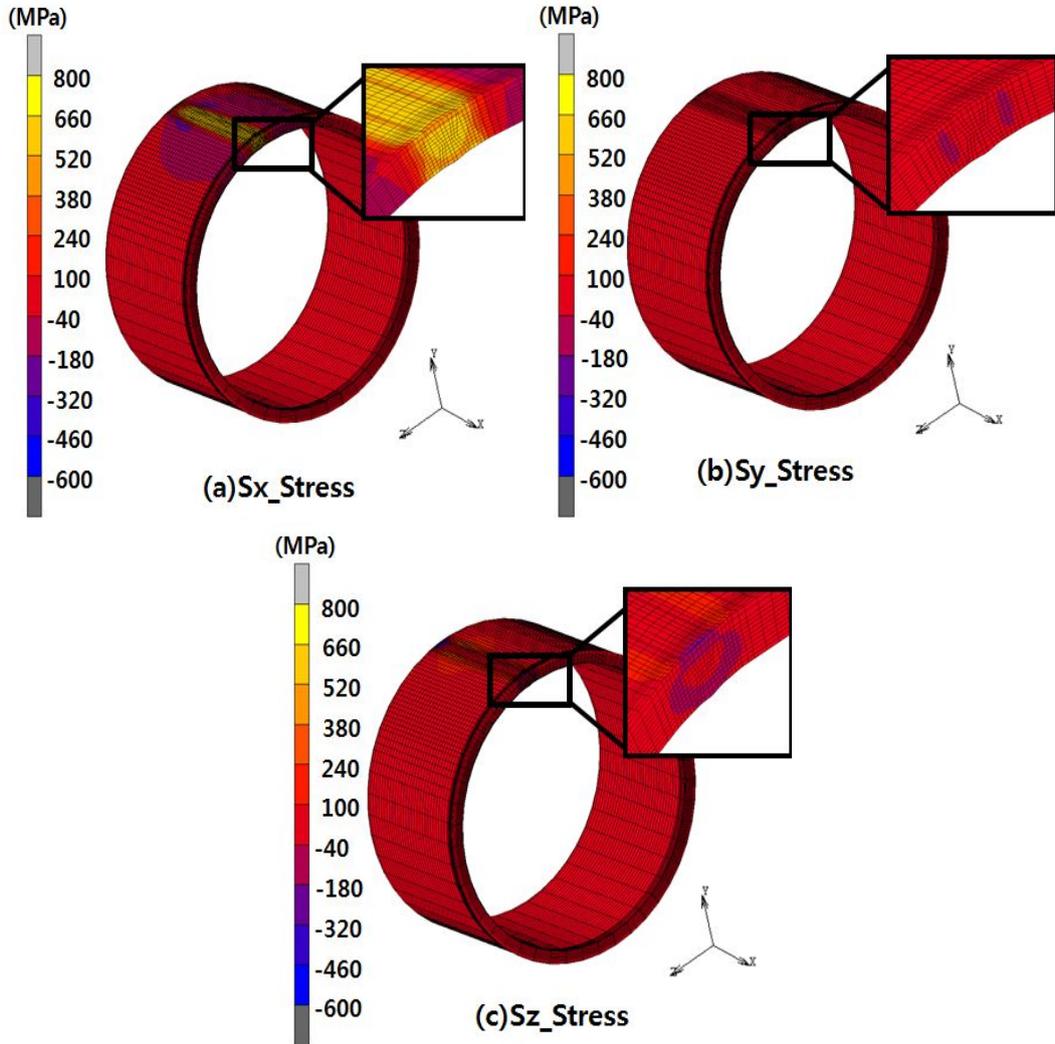


그림 3.8 1500℃일 때 전체응력분포

그림3.9는 Seam 용접부(1500℃)의 단면을 보여주고 있다. 용접부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

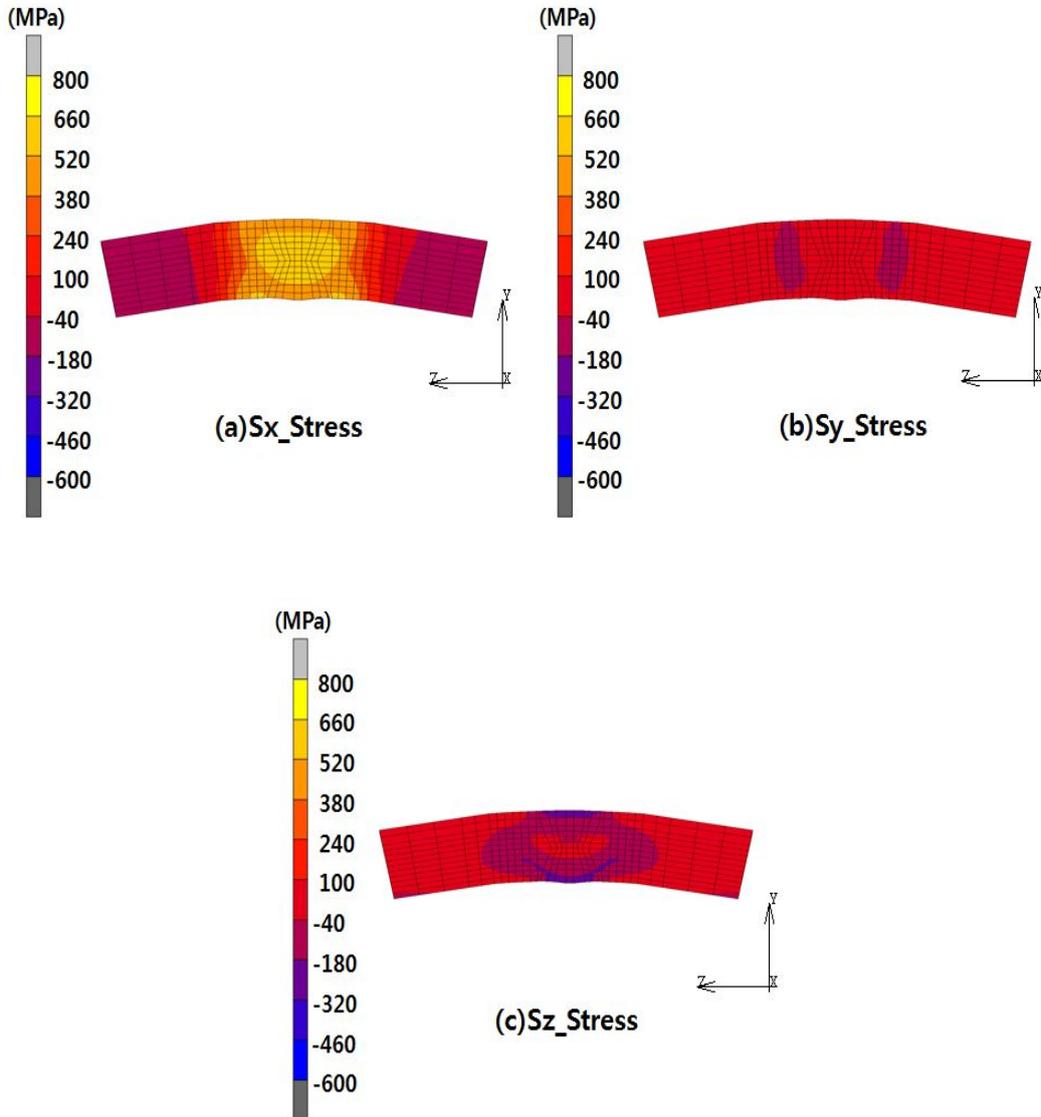


그림 3.9 1500℃일 때 단면의 응력분포

그림3.10은 Seam 용접부(1800℃)의 전체응력 분포를 보여주고 있다. 용접부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

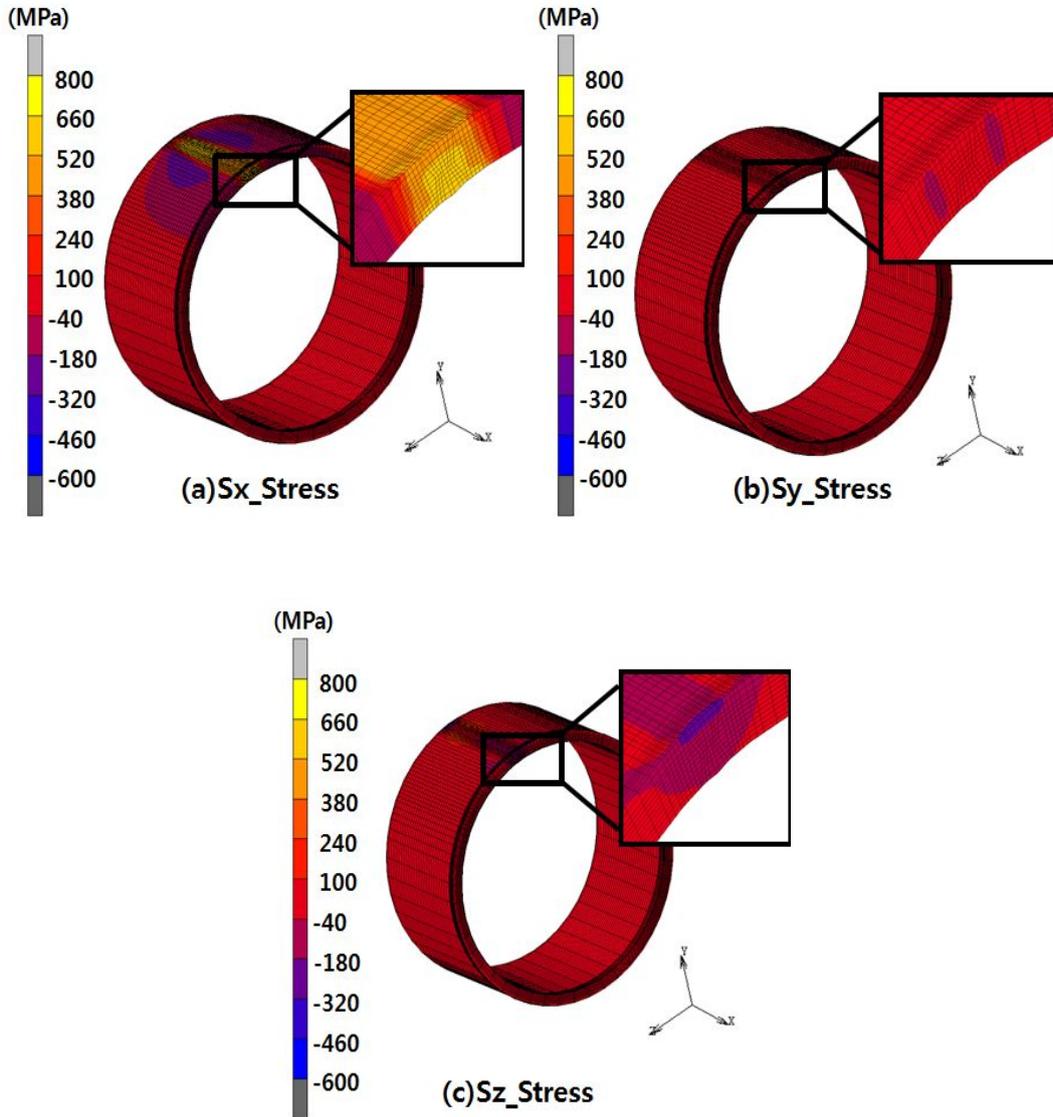


그림 3.10 1800℃일 때 전체응력분포

그림3.11은 Seam 용접부(1800℃)의 단면을 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

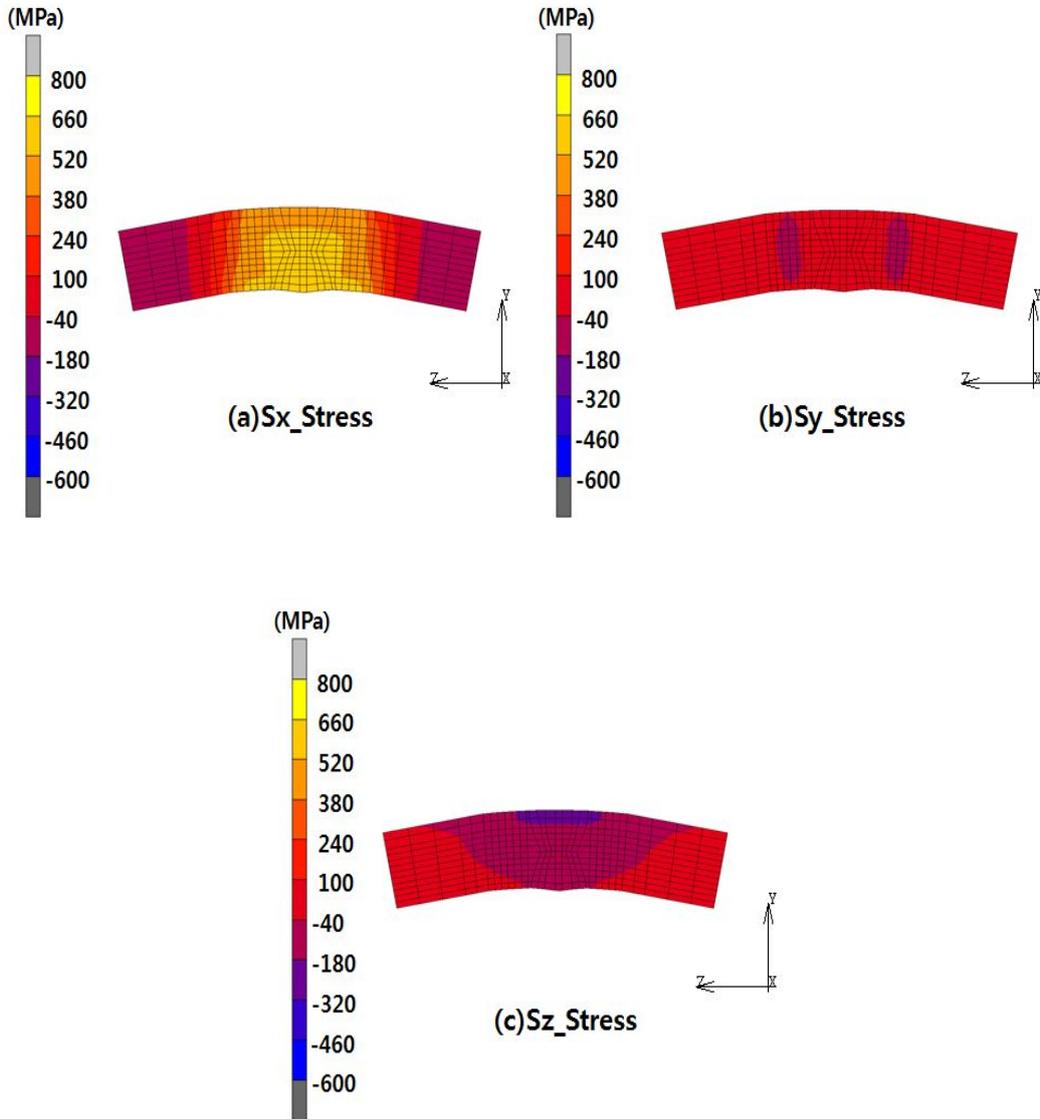


그림 3.11 1800℃일 때 단면의 응력분포

그림3.12는 Seam 용접부(2000℃)의 전체 응력분포를 보여주고 있다. 용접부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

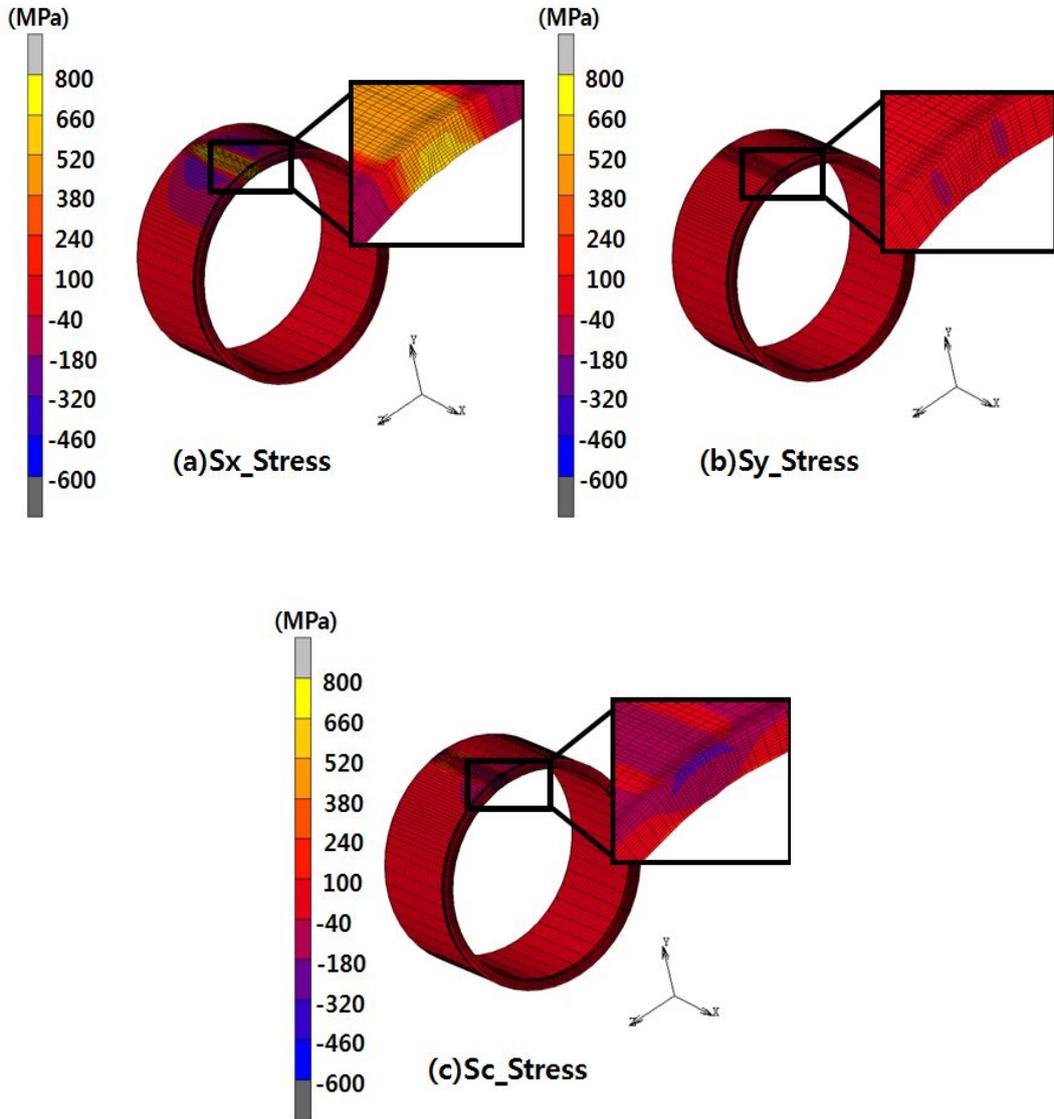


그림 3.12 2000℃ 일 때 전체응력분포

그림3.13은 Seam 용접부(2000℃)의 단면을 보여주고 있다. 용접부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

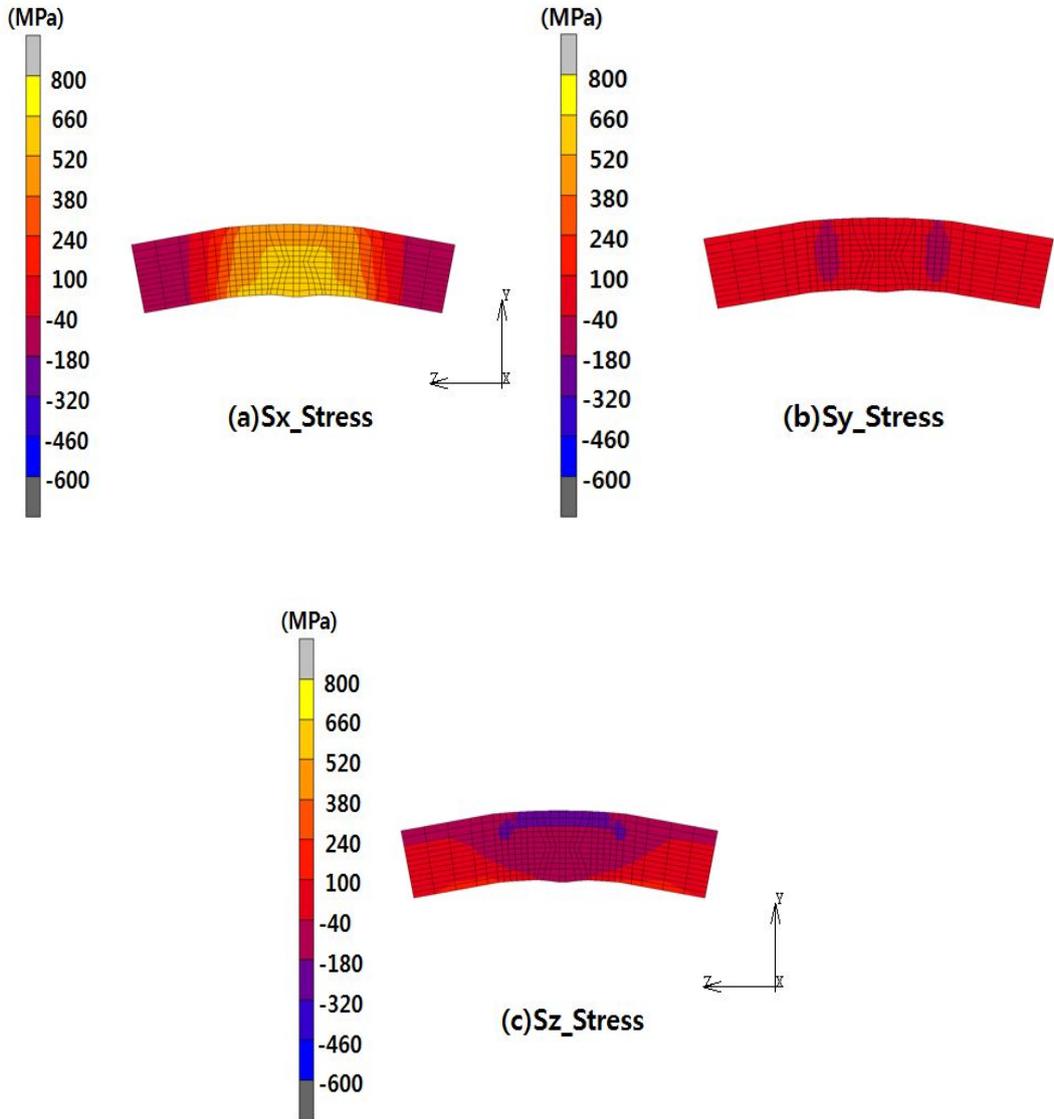
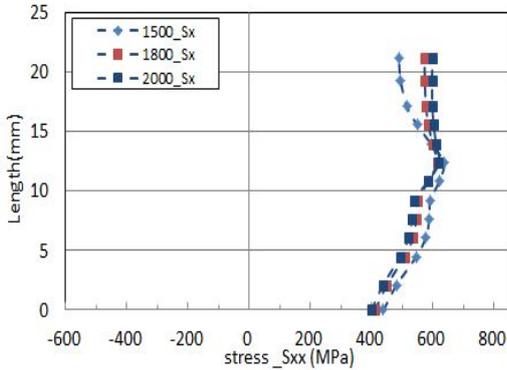
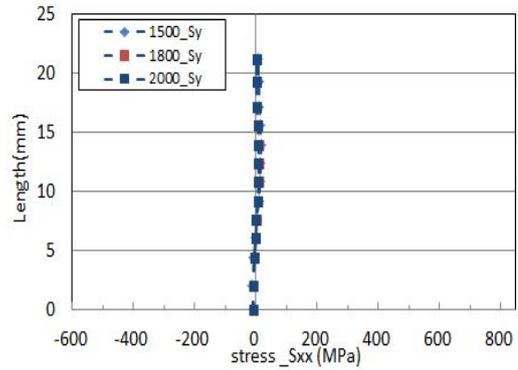


그림 3.13 2000℃일 때 단면의 응력분포

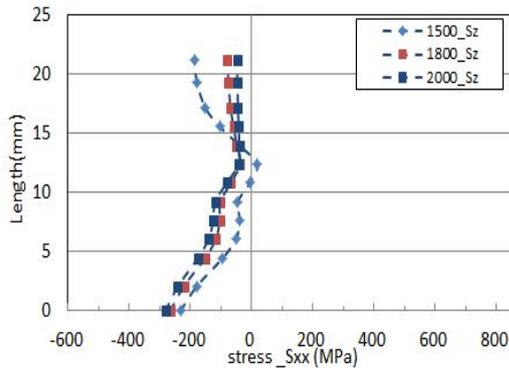
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.14 (a),(b),(c)는 Seam용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림에 나타나 있다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력



(c) Sz 잔류응력

그림 3.14 입열량에 따른 응력분포

Seam용접부의 용접잔류응력분포는 용접선방향의 잔류응력이 제일 크고, 다음으로 폭 방향 마지막으로 두께방향의 잔류응력 순으로 나타났다. 용접선방향의 잔류응력은 두께 중앙부에서 최대값을 나타냈고, 초층부 보다 최종 층에서 더 큰 잔류응력을 보여주고 있다. 이러한 현상은 초층부 보다 최종층에서 구속이 더 심하여 발생된 것으로 판단된다. 한편, 용접입열량이 커짐에 따라서 잔류응력의 크기가 1500℃, 1800℃, 2000℃는 거의 같은 모습을 나타내고 있다.

3.2 상변태 유무에 따른 응력의 영향

3.2.1. 상변태를 고려하지 않은 Seam Welding

그림3.1의 해석 모델과 같은 모델에 Seam weld metal과 Girth weld metal 온도를 1500°C, 1800°C, 2000°C로 조정하고 상변태를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 각각의 응력을 해석하였다.

그림3.15는 Seam용접시 용접열원의 진행에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 온도분포는 이동열원에 따른 가열과 냉각이 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

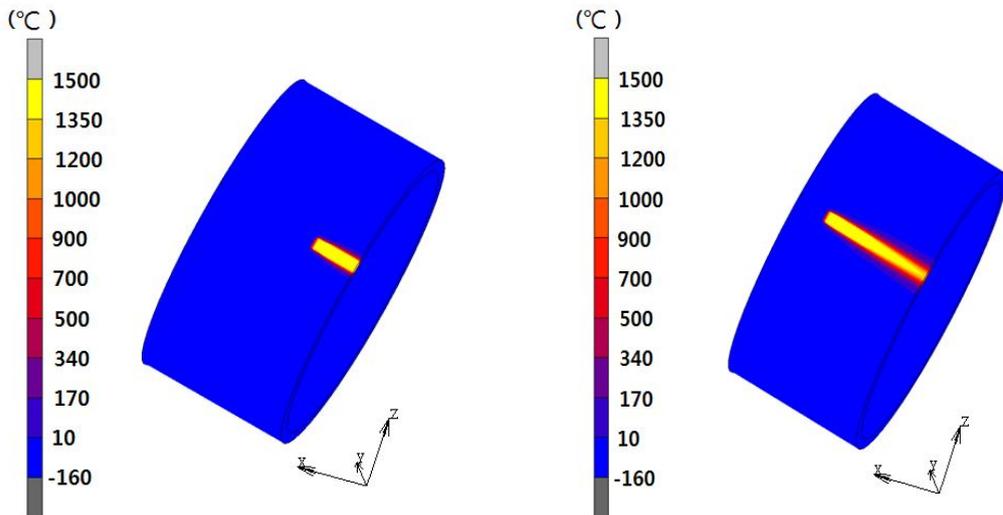


그림 3.15 Seam 용접시 온도분포

상변태를 고려하지 않는 Seam 전체용접잔류응력(S_x , S_y , S_z)분포와 Seam 단면 용접잔류응력은 그림3.7~3.12에 나타내고 있고, 상변태를 고려하였을 경우 Seam 전체용접잔류응력(S_x , S_y , S_z)분포와 Seam단면 용접잔류응력은 그림3.16~3.20에 나타나 있다.

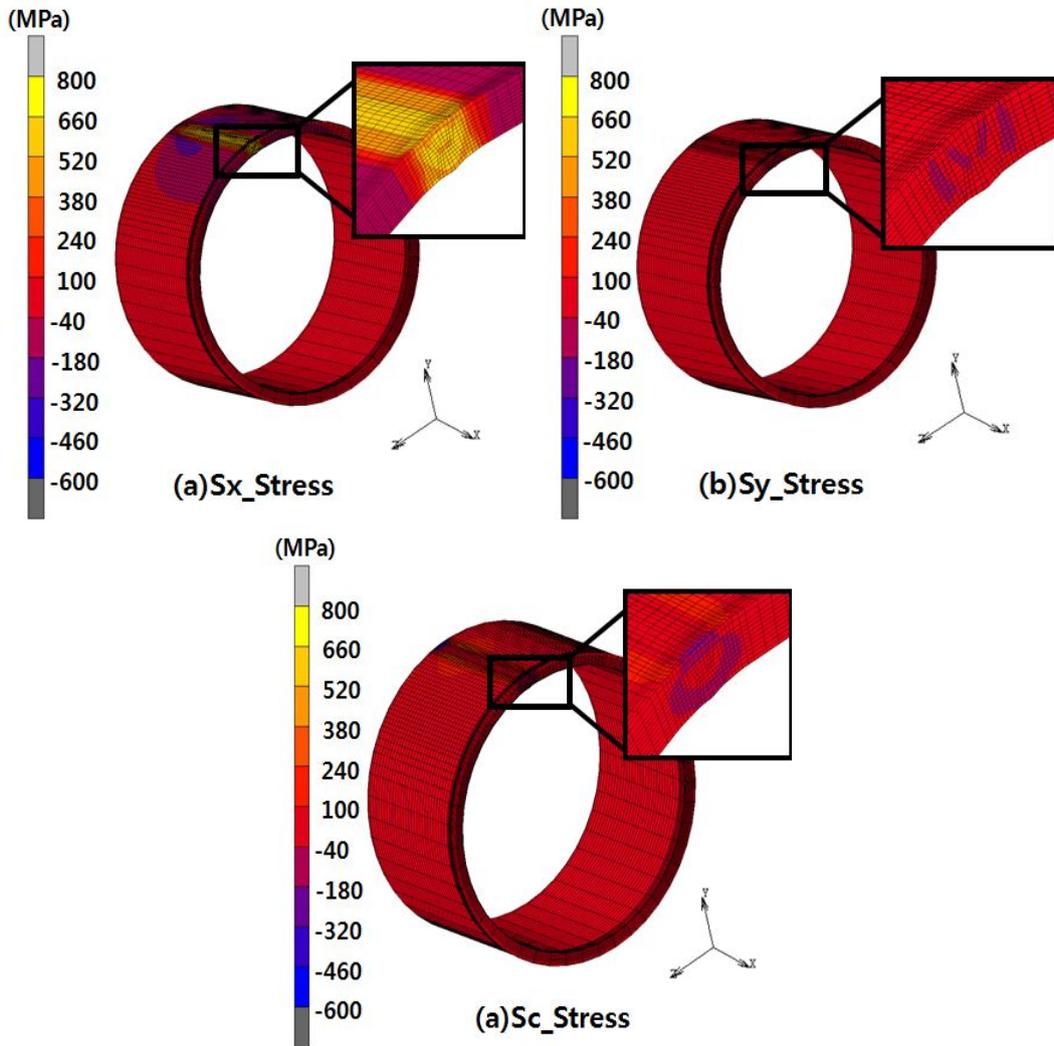


그림 3.16 Seam용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.17은 Seam 용접부(1500℃)의 상변태를 고려한 경우 단면을 보여주고 있다. 용접부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

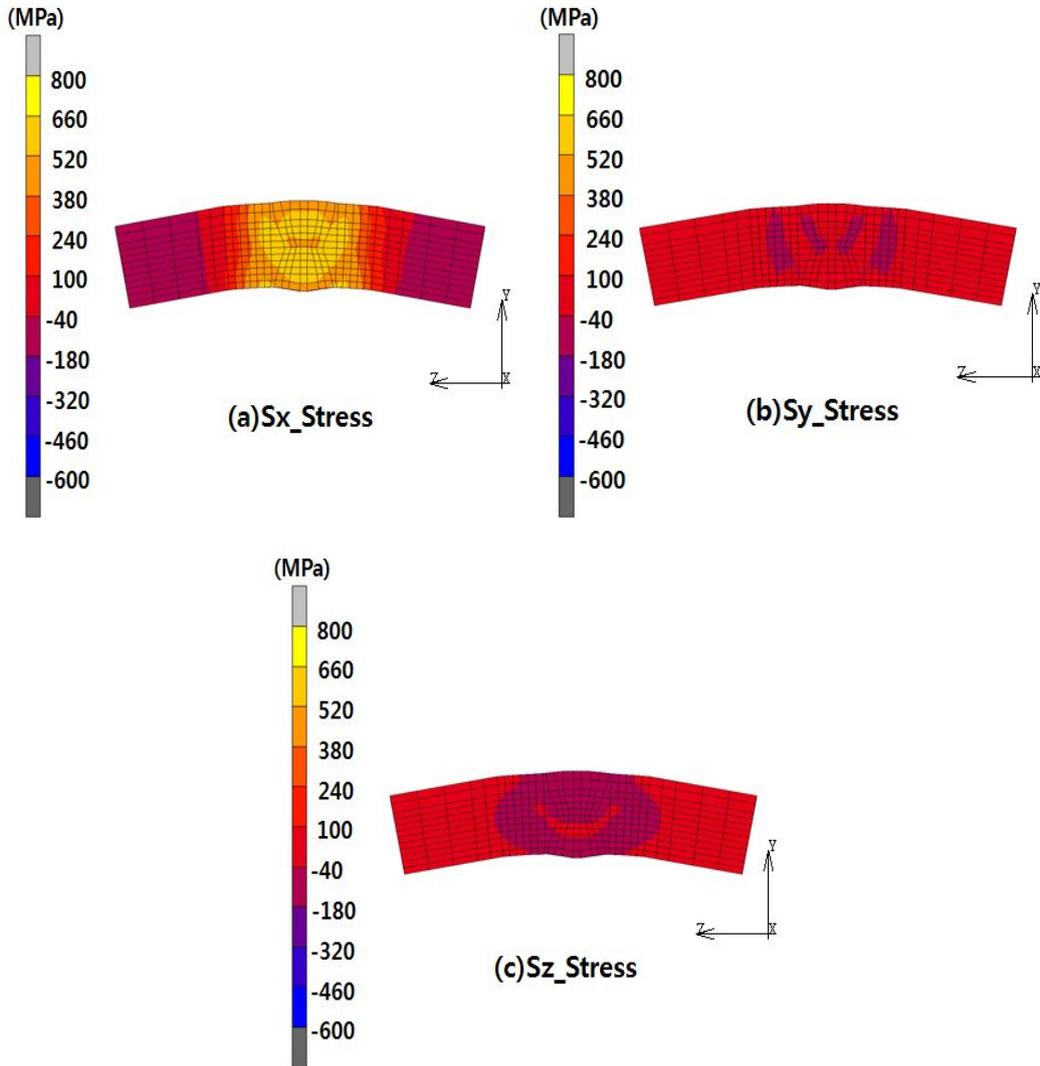


그림 3.17 Seam용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포

그림3.18은 Seam 용접부(1800℃)의 상변태를 고려한 경우 전체응력 분포를 보여주고 있다.

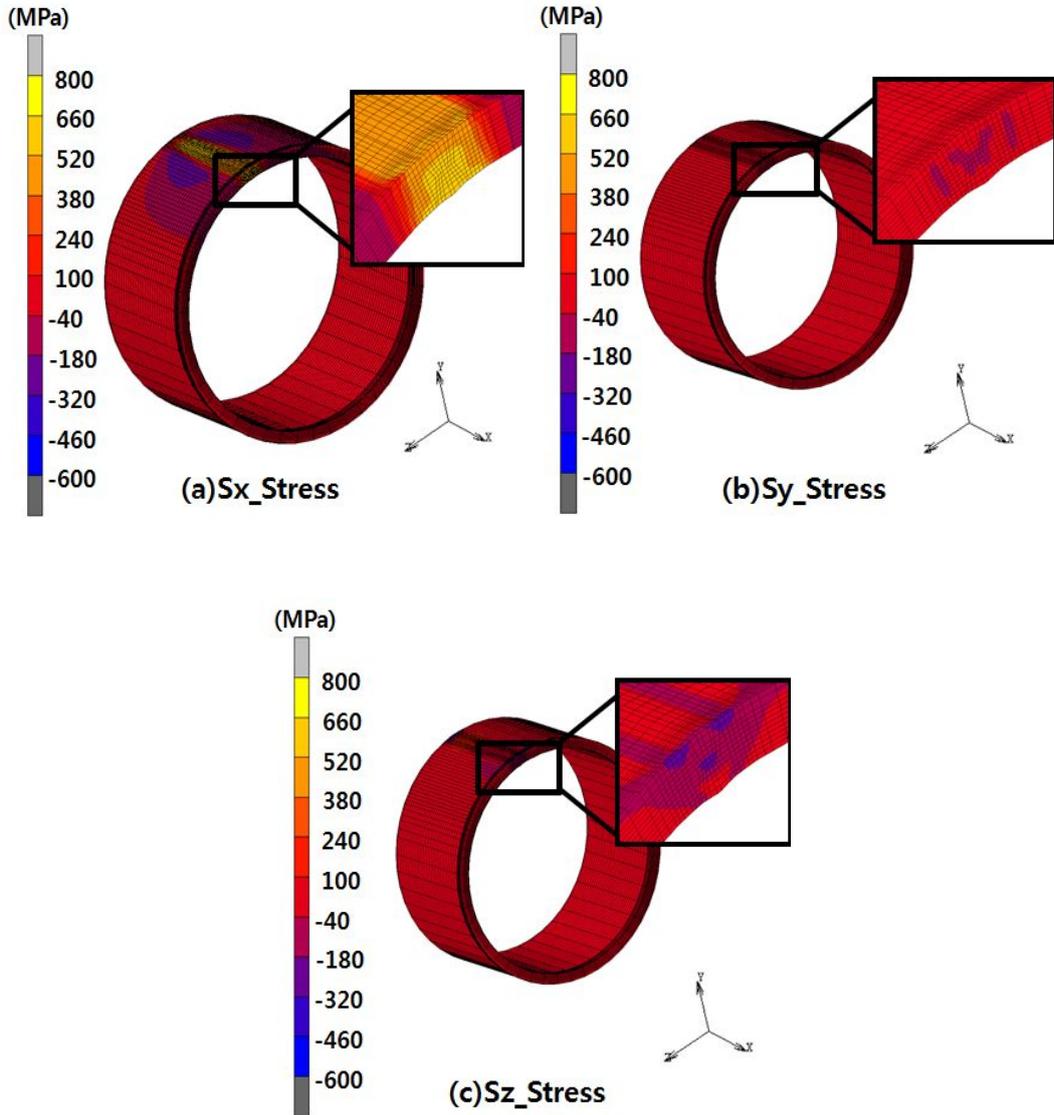


그림 3.18 Seam용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.19는 Seam 용접부(1800℃)의 상변태를 고려한 경우 단면의 응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 가장 큰 응력을 확인 할 수 있다.

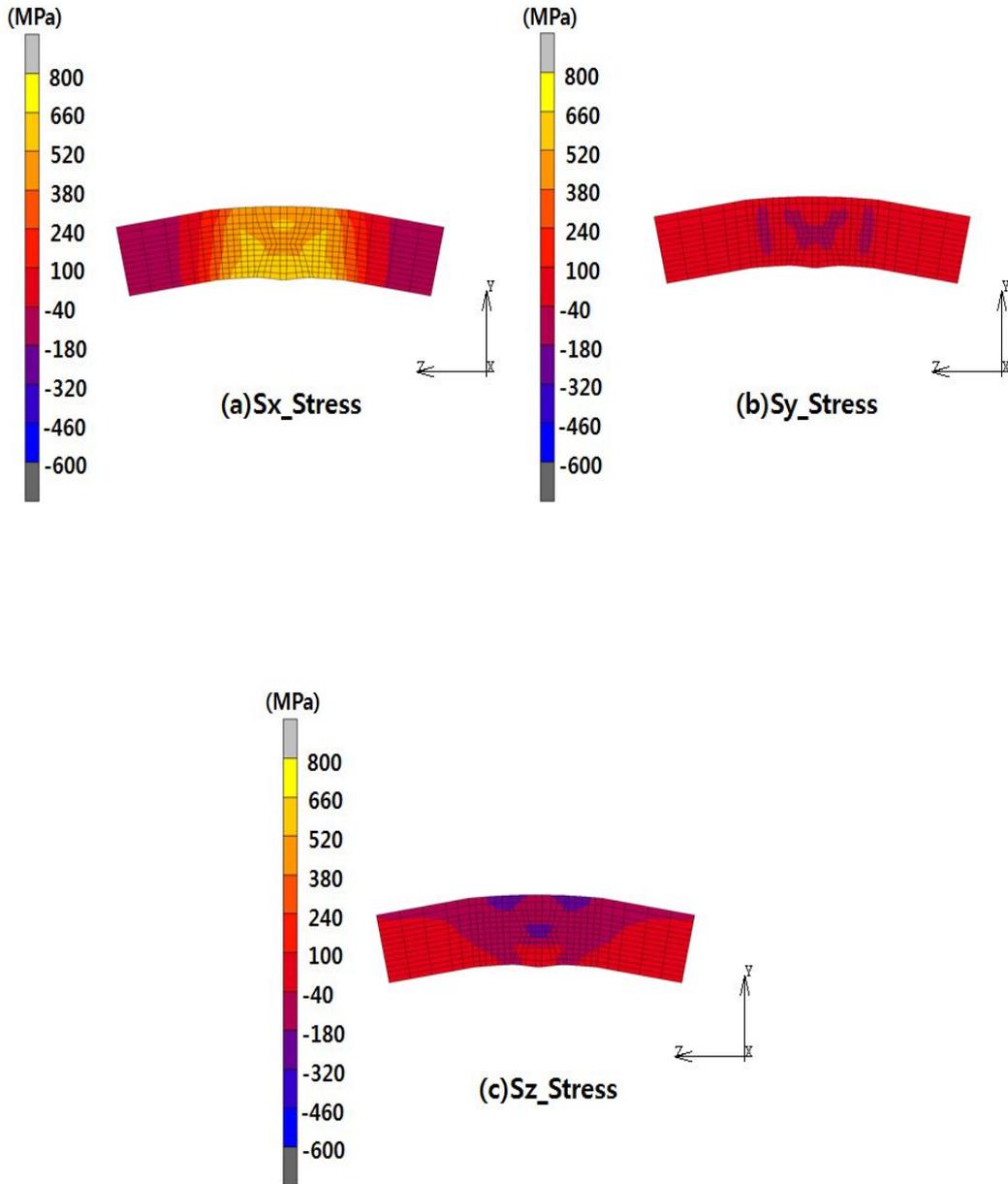


그림 3.19 Seam용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포

그림 3.20은 Seam 용접부(2000℃)의 상변태를 고려한 경우 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 가장 큰 응력을 확인 할 수 있다.

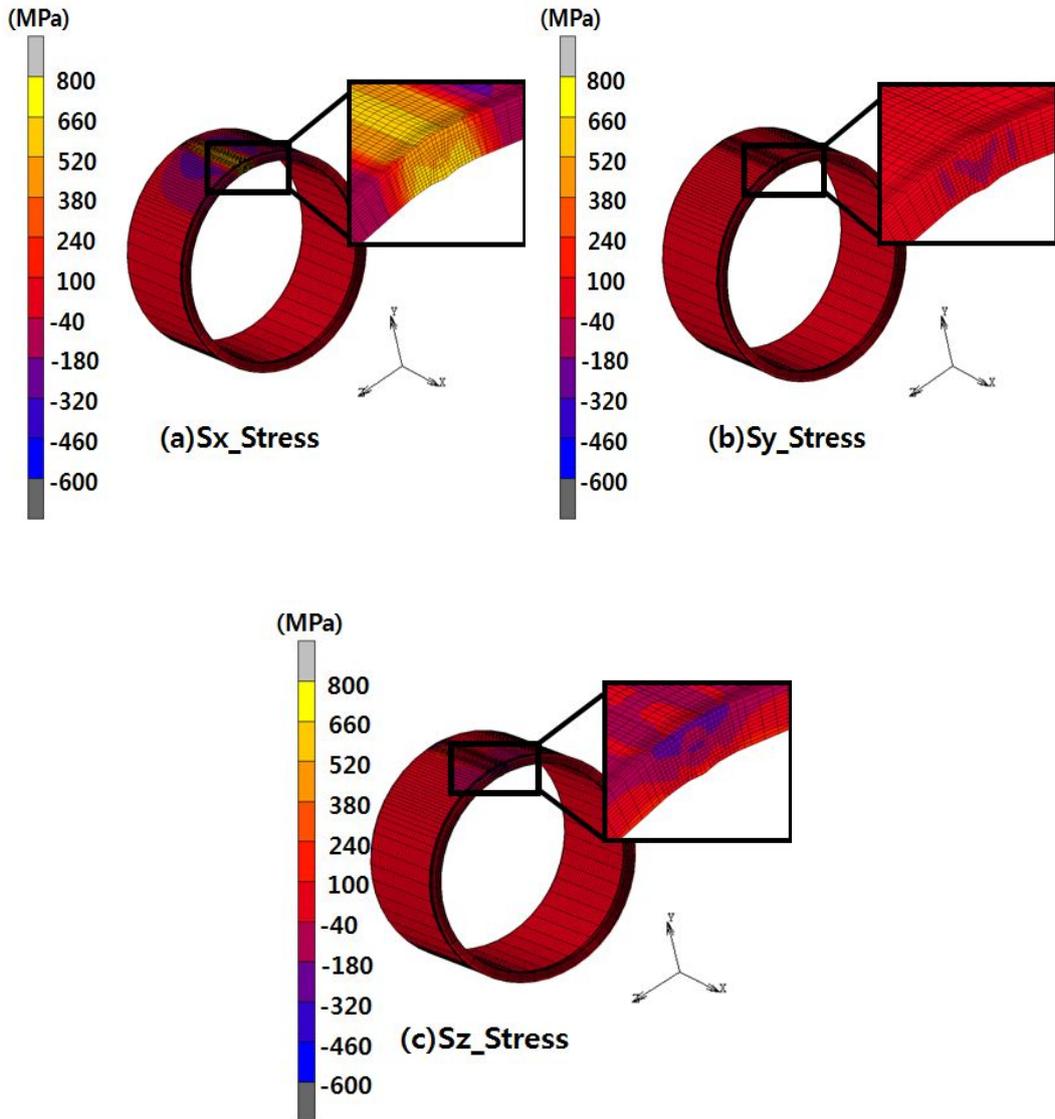


그림 3.20 Seam용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림 3.21은 Seam 용접부(2000℃)의 상변태를 고려한 경우 단면 응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 가장 큰 응력을 확인 할 수 있다.

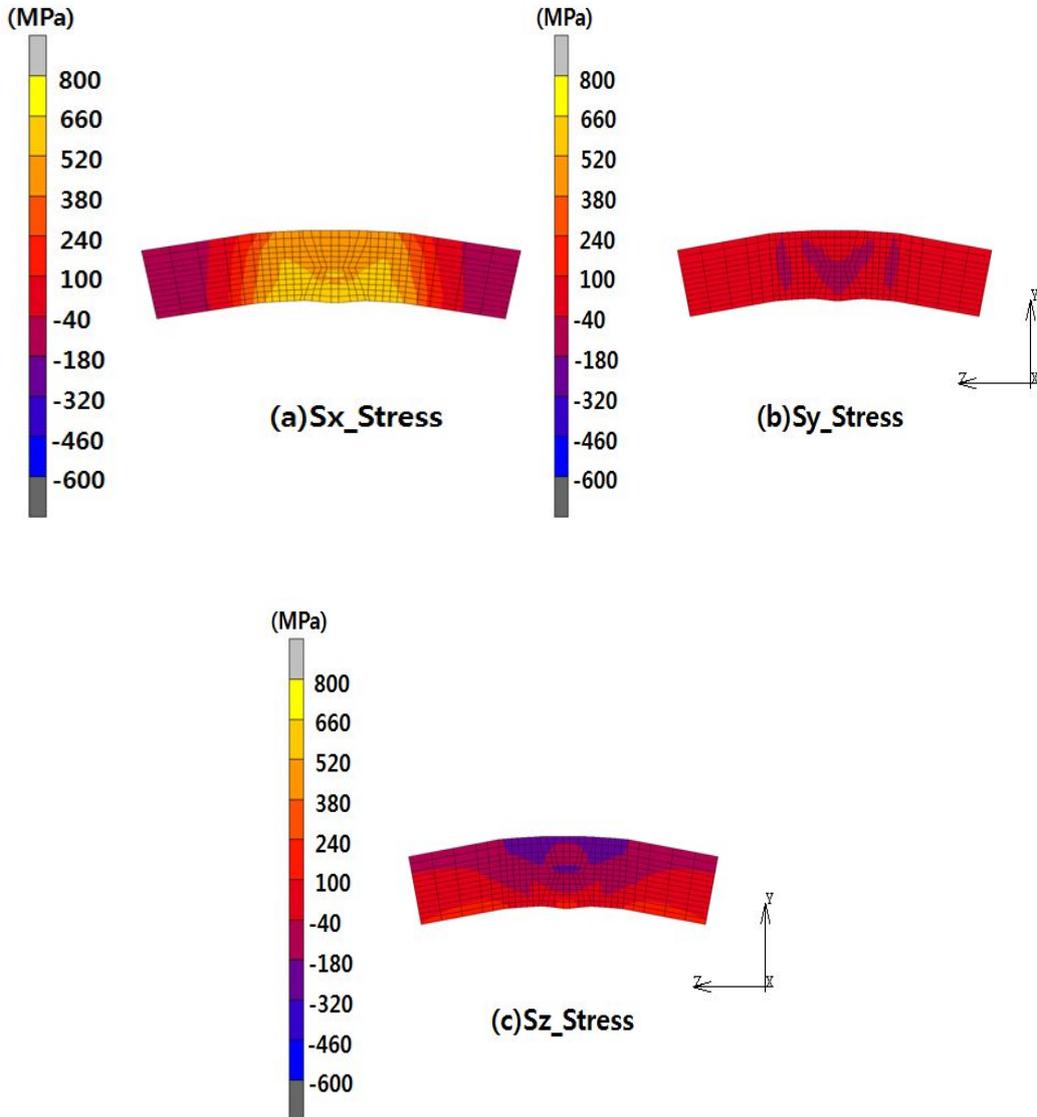
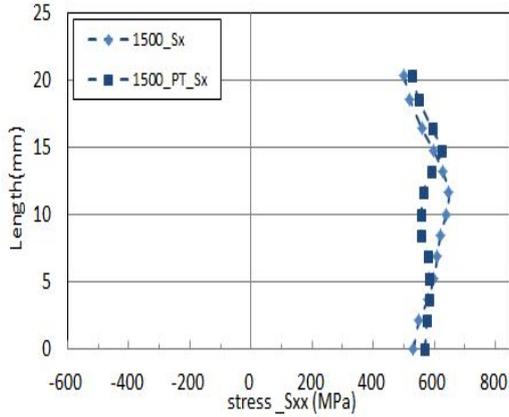
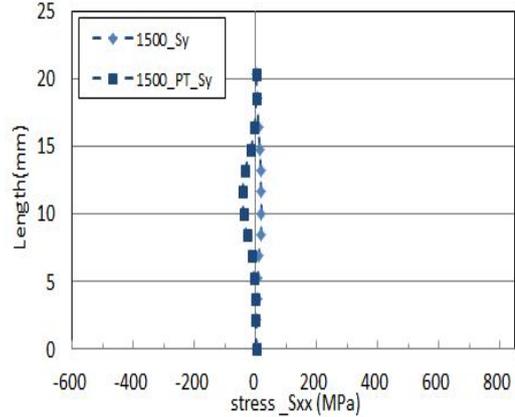


그림 3.21 Seam용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 단면 잔류응력 분포

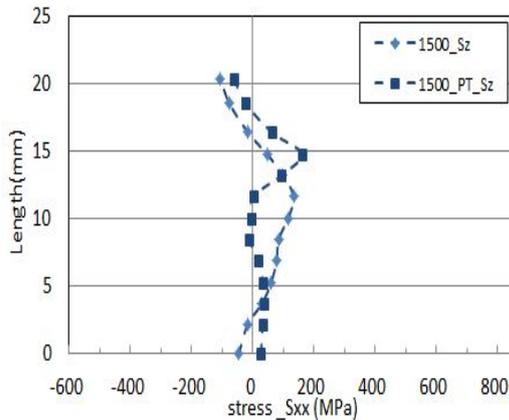
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.22 (a),(b),(c)는 Seam용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

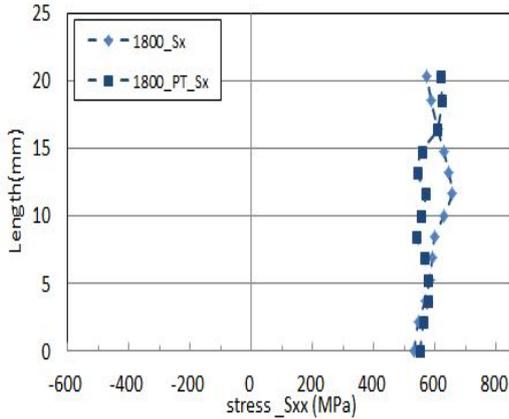


(c) Sz 잔류응력

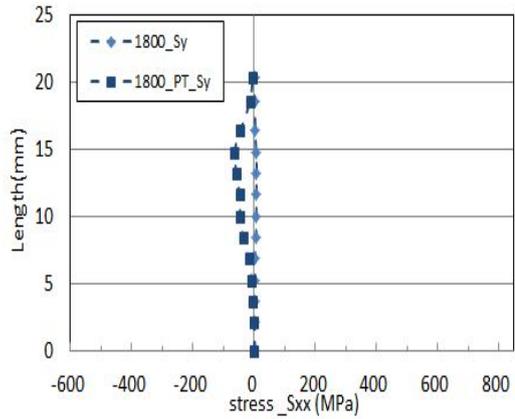
그림 3.22 상변태를(1500℃) 고려한 잔류응력 분포

상변태(Phase Transformation)를 고려하였을 경우 Sx, Sy, Sz 값은 비슷하나 측정범위 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다. (a)같은 경우는 5mm 까지는 거의 같은 잔류응력을 보이나 조금씩 응력이 감소하여 10mm 지점에 50MPa 정도 차이를 보인다. (b)도 (a)와 같이 5mm 까지는 거의 같은 잔류응력을 보이나 10mm 지점에서 30MPa 정도 차이를 보인다. (c)같은 경우도 10mm 지점에서 20~60MPa 정도 차이를 보인다

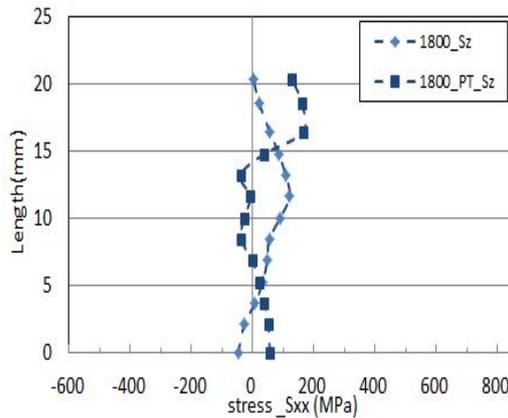
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.23 (a),(b),(c)는 Seam용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

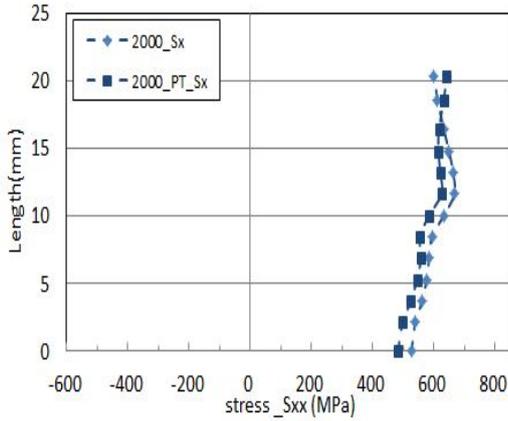


(c) Sz 잔류응력

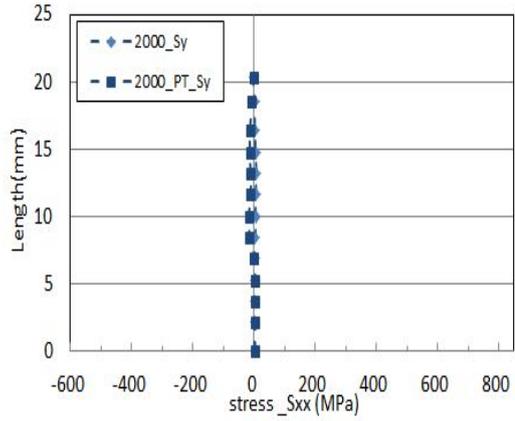
그림 3.23 상변태를(1800℃) 고려한 잔류응력 분포

상변태를(1800℃) 고려하였을 경우 Sx, Sy, Sz 값은 비슷하나 측정범위 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다. (a)같은 경우 상변태를 유무에 따라서 조금씩 차이가 보여주고 있으나 측정범위 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다. (b) 같은 경우 중앙에서 응력의 차이를 보여주고 있다. (c)같은 경우 (a)와 같이 조금씩 차이가 보여주고 있고 중앙부에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다.

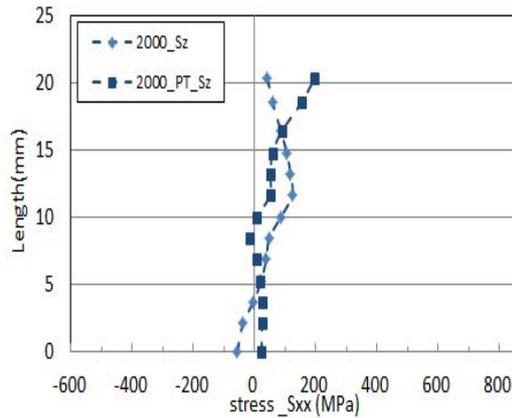
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.24 (a),(b),(c)는 Seam용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력



(c) Sz 잔류응력

그림 3.24 상변태를(2000℃) 고려한 잔류응력 분포

상변태를(2000℃) 고려하였을 경우 Sx, Sy, Sz 값은 비슷하나 측정범위 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다. (a)같은 경우 상변태를 유무에 따라서 조금씩 차이가 보여주고 있으나 측정범위 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주고 있다. (b) 같은 경우 중앙에서 응력의 차이를 보여주고 있으나 거의 비슷한 응력값을 나타내고 있다. (c)또한 역시 중앙부에서 응력의 차이를 보여주고 있다.

3.2.2. 상변태를 고려하지 않은 Girth Welding

그림3.1의 해석 모델과 같은 모델에 Seam weld metal과 Girth weld metal 온도를 1500℃,1800℃,2000℃로 조정하고 상변태를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 각각의 응력을 해석하였다

그림3.25는 Girth 용접시 용접열원의 진행에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 온도분포는 이동열원에 따른 가열과 냉각이 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

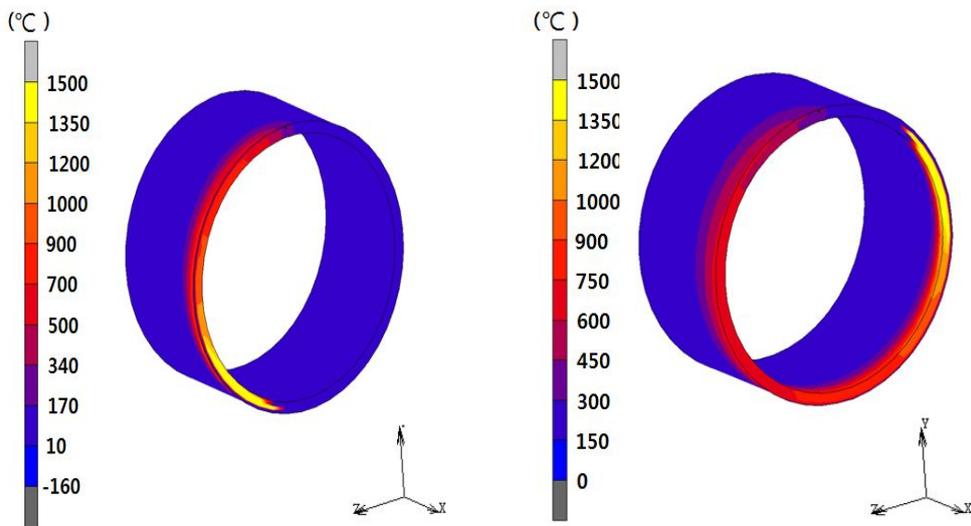


그림 3.25 Girth 용접시 온도분포

위의 해석 모델에 용접프로세스 과정에서 열량에 따른 Girth용접부에 대해 입열량에 따른 열 탄소성해석을 수행하여 도출된 결과로 부터 상변태 유무에 따른 1500℃, 1800℃, 2000℃의 입열량에 따른 Girth 전체용접잔류응력(S_x , S_y , S_z)분포와 Girth 단면용접잔류응력을 그림3.26~3.37은 각각 보여주고 있다. 모든 입열조건에 따른 응력분포의 형상은 유사하게 보여주고 있다.

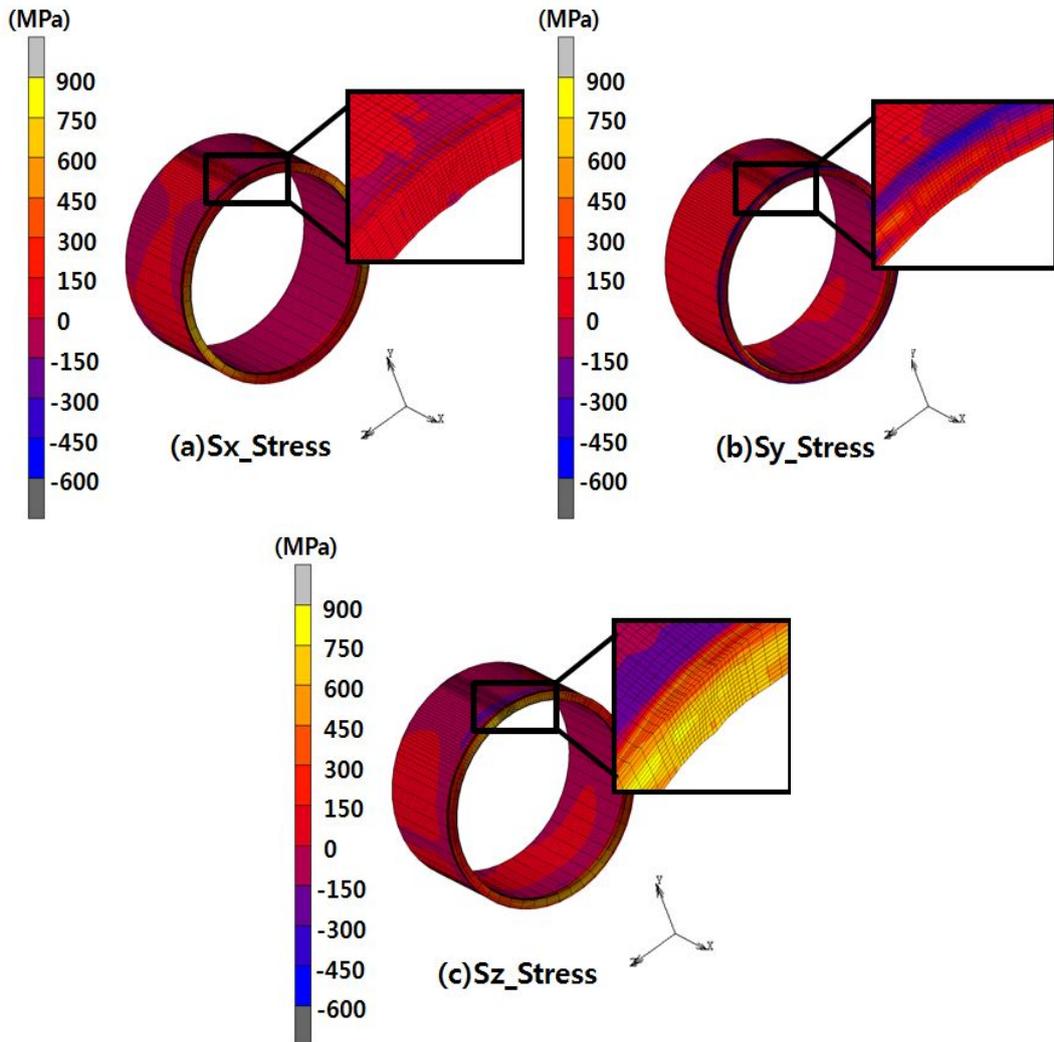


그림 3.26 Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.27은 Girth 용접부(1500℃) 단면의 응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

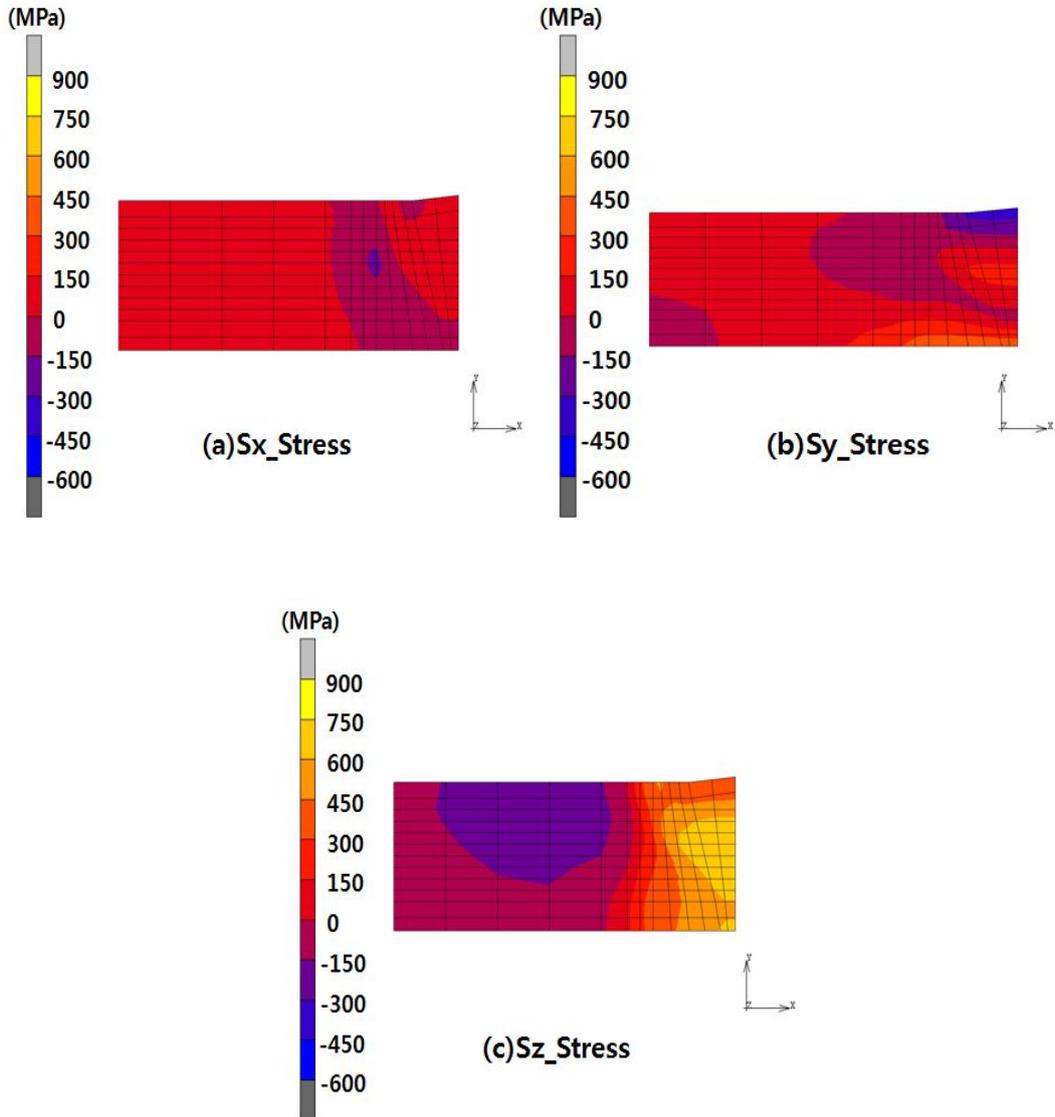


그림 3.27 Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포

그림3.28은 Girth 용접부(1500℃)의 상변태를 고려하였을 경우 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

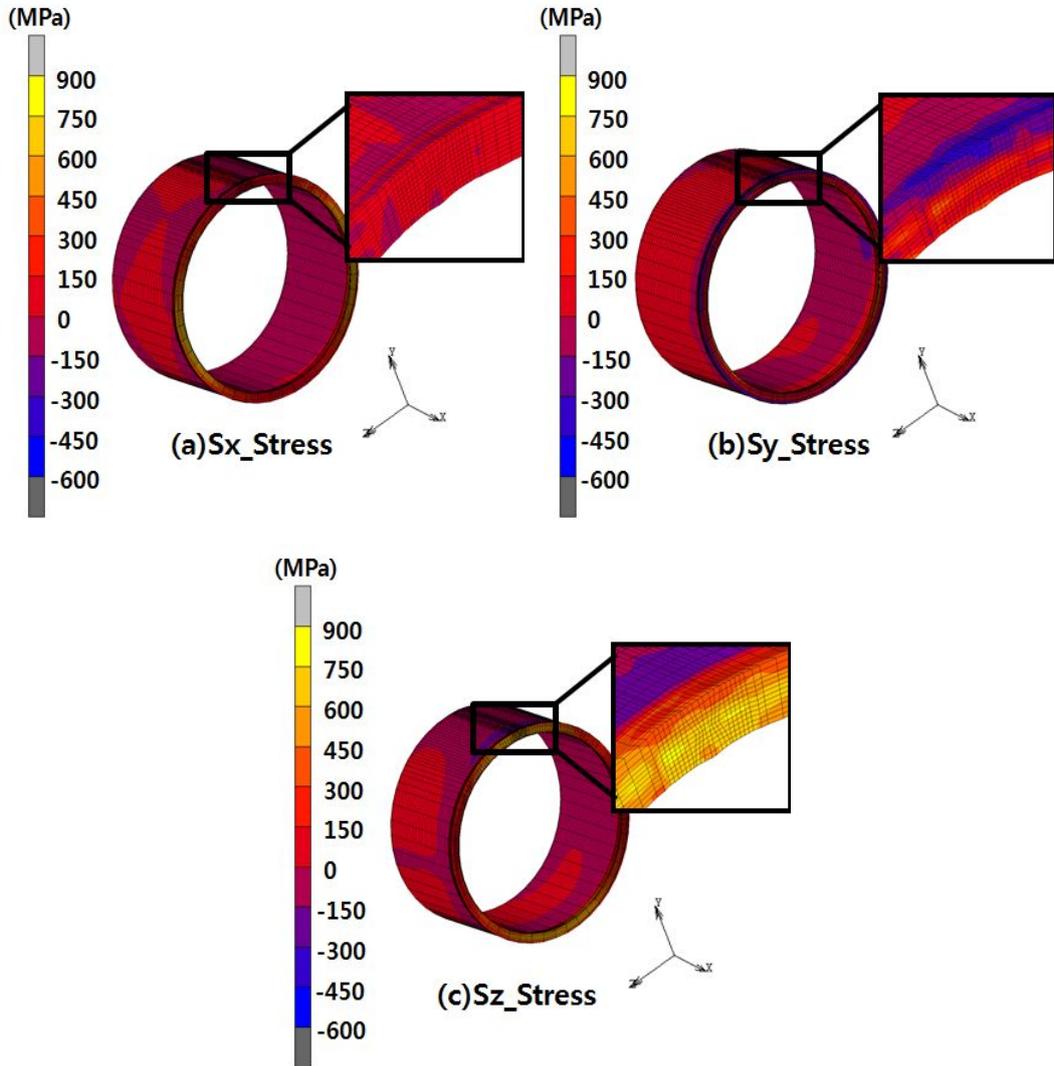


그림 3.28 Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.29는 Girth 용접부(1500℃)의 상변태를 고려하였을 경우 단면응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

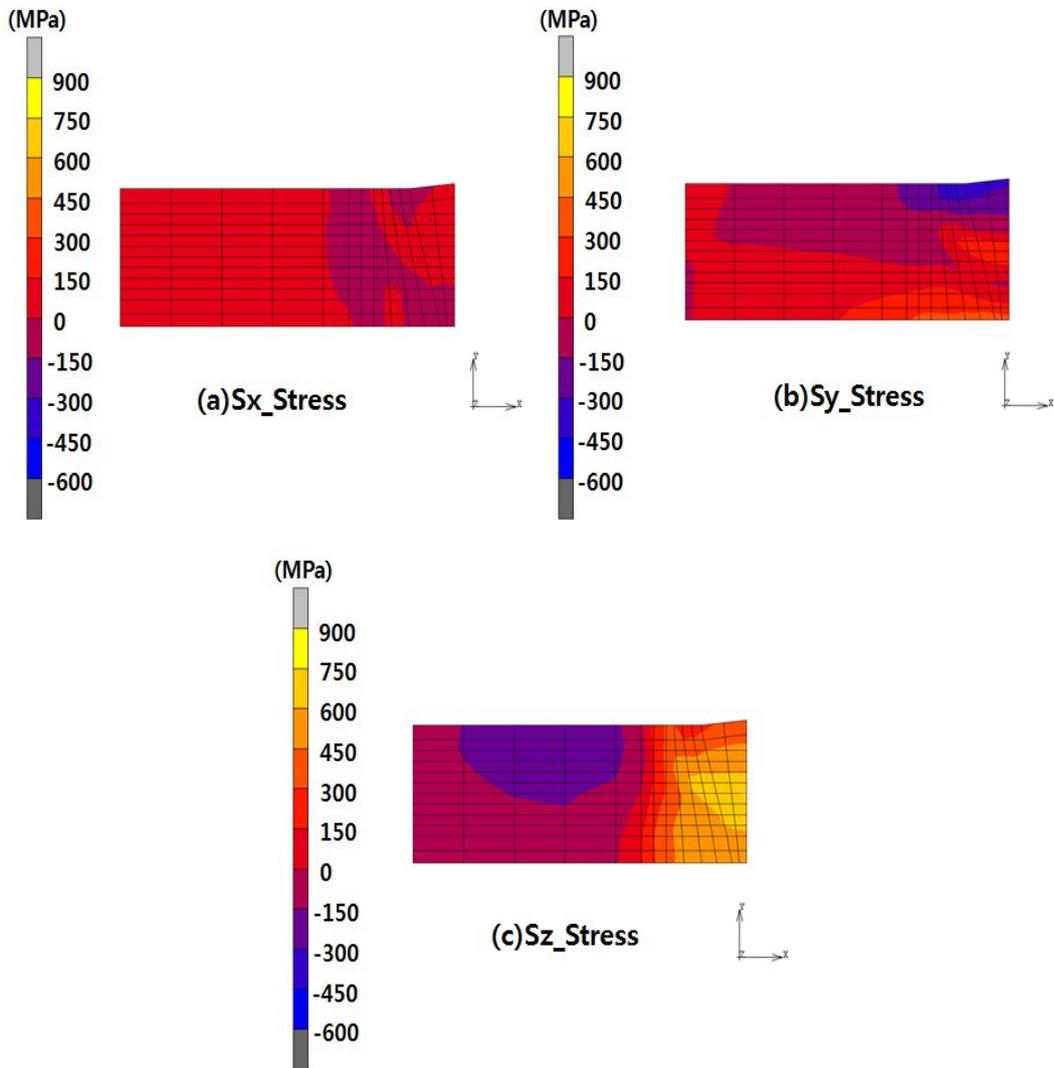


그림 3.29 Girth용접시(1500℃) 상변태효과가 있는 경우 단면의 잔류응력 분포

그림3.30은 Girth 용접부(1800℃)의 상변태를 고려하지 않을 경우 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

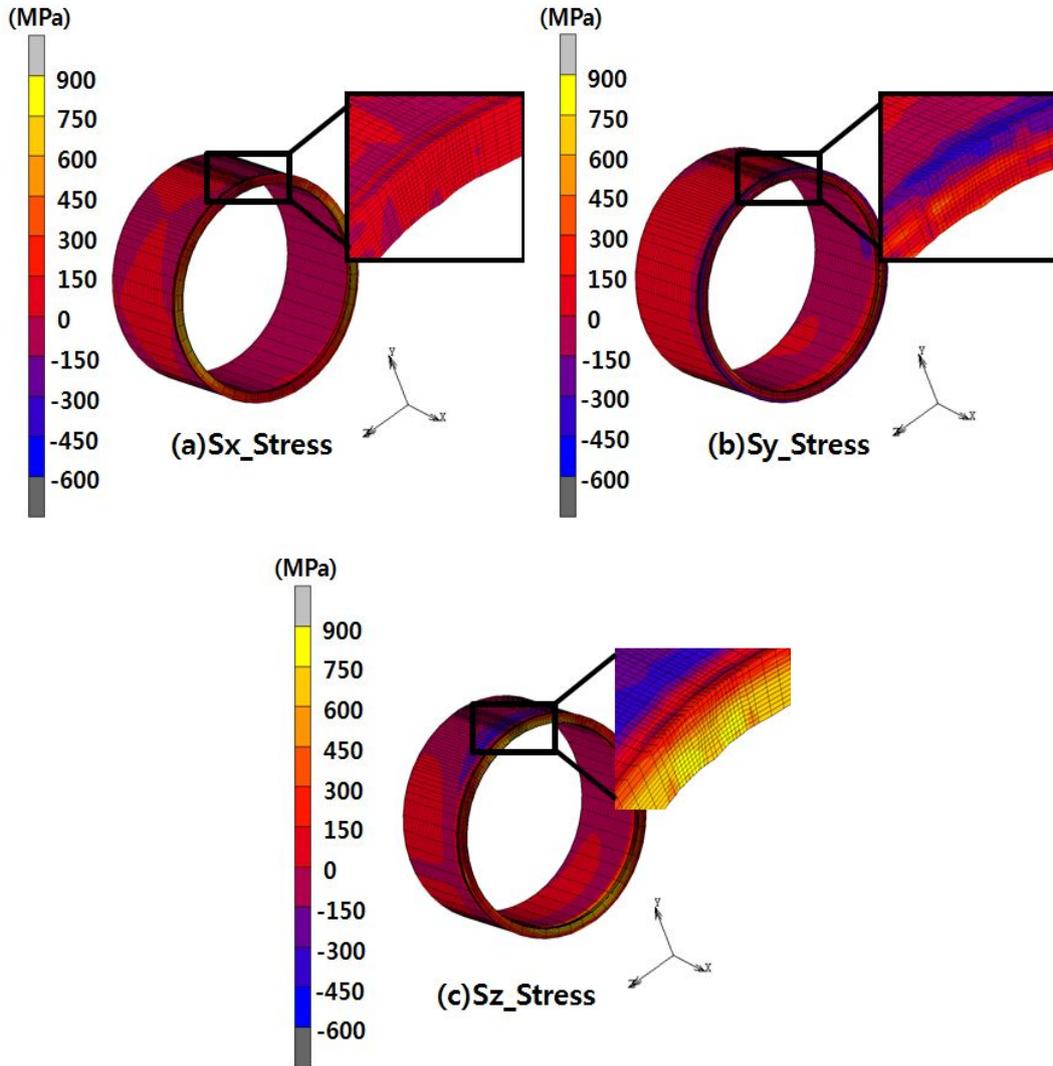


그림 3.30 Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.31은 Girth 용접부(1800℃)의 상변태를 고려하지 않을 경우 단면응력분포를 보여 주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

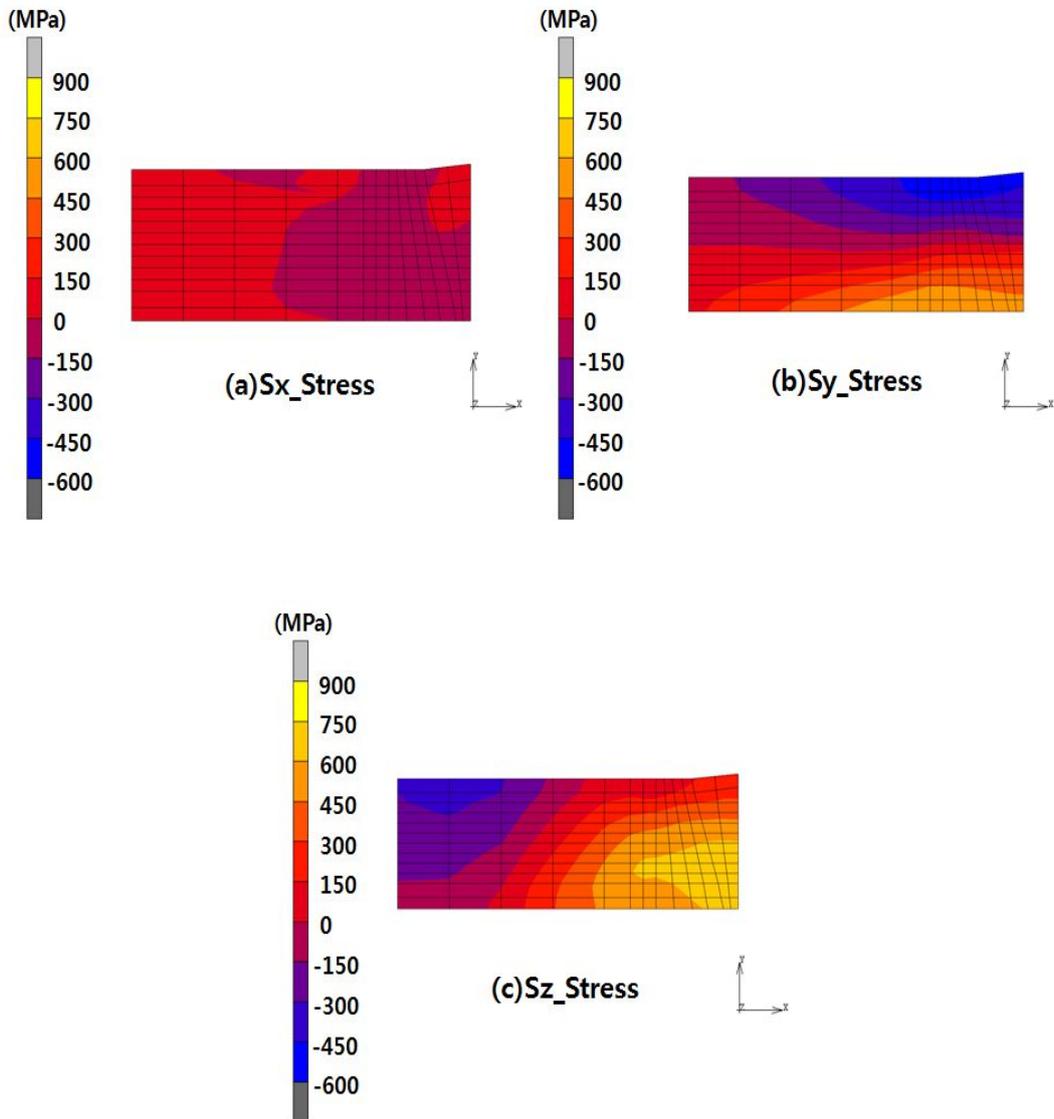


그림 3.31 Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포

그림3.32는 Girth 용접부(1800℃)의 상변태를 고려 할 경우 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

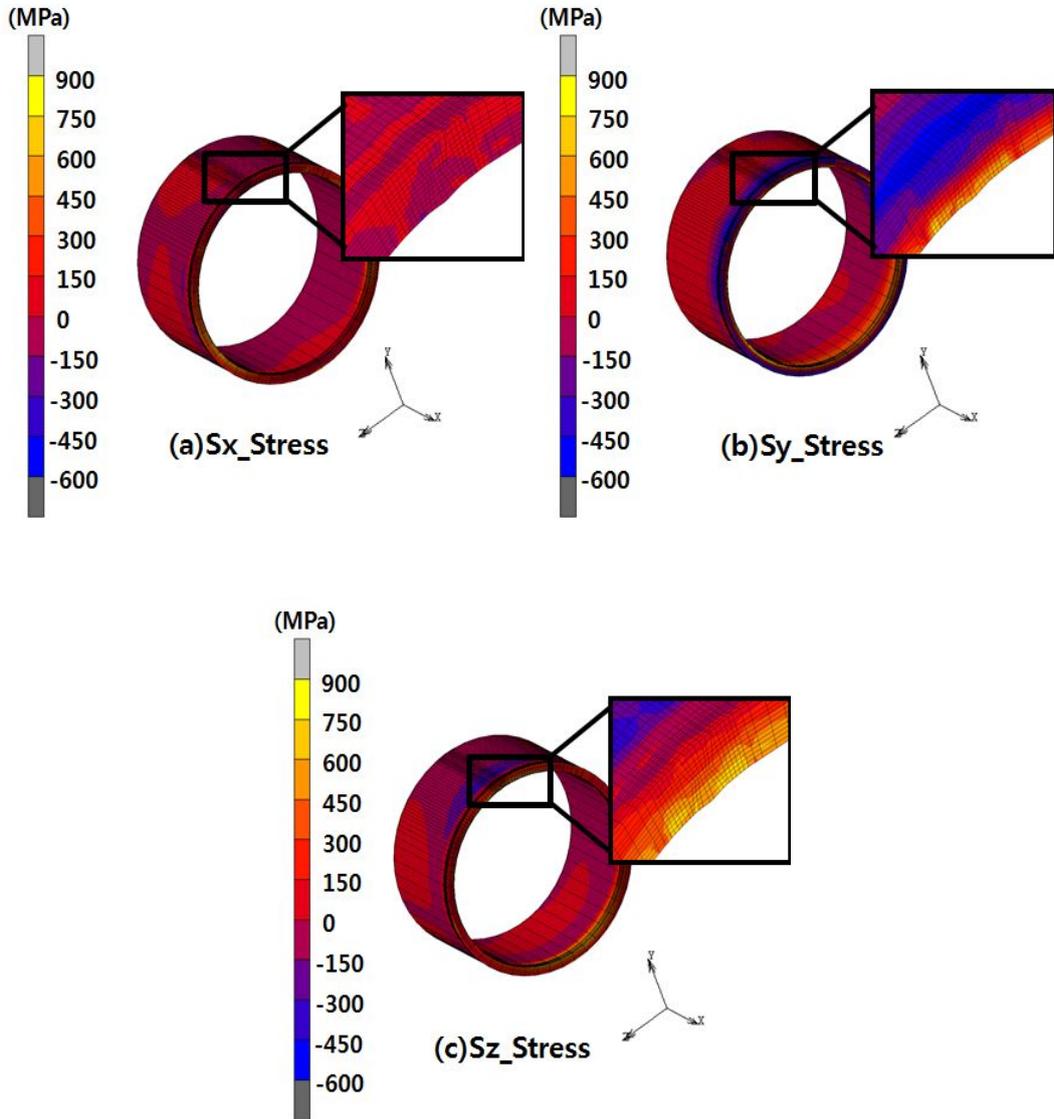


그림 3.32 Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림 3.33은 Girth 용접부(1800℃)의 단면응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

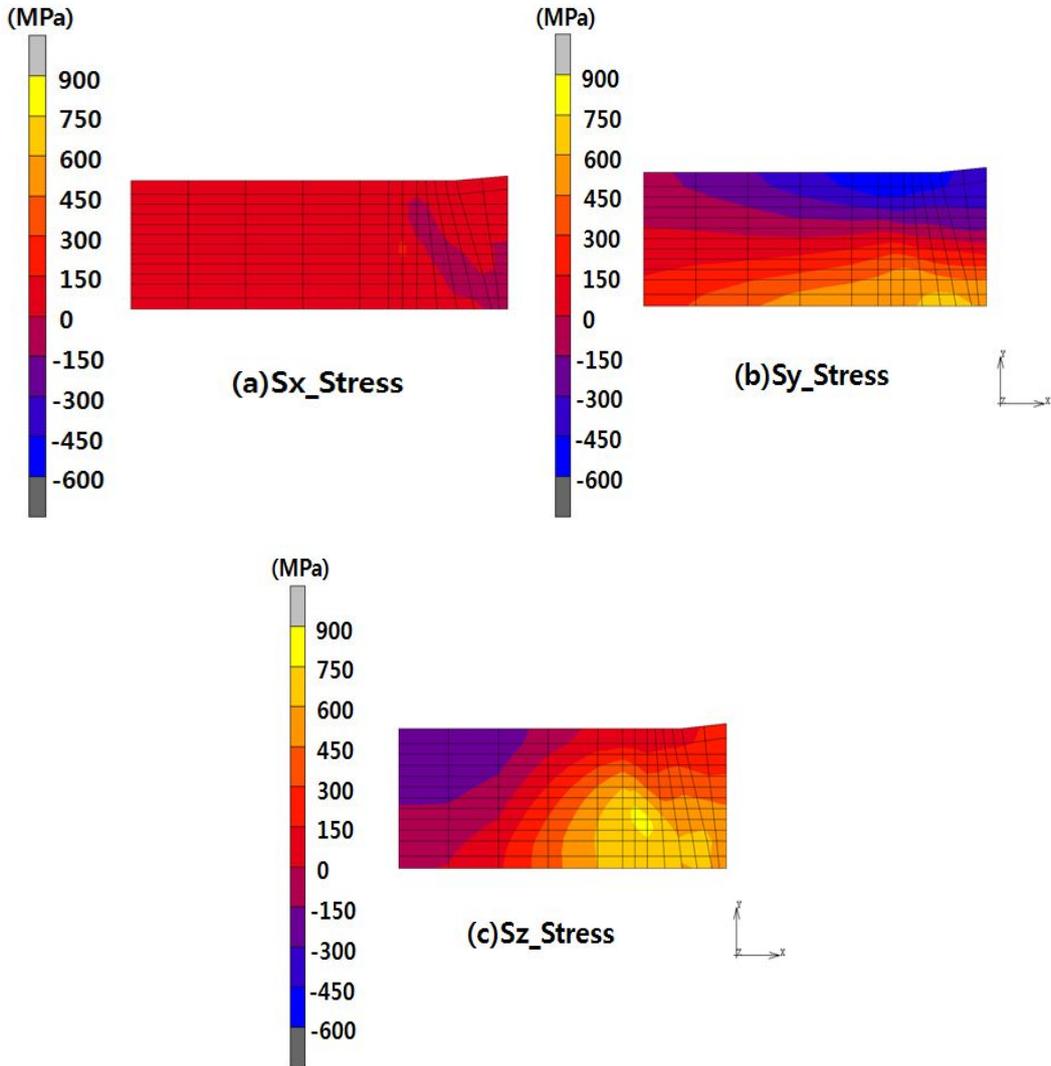


그림 3.33 Girth용접시(1800℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포

그림3.34는 Girth 용접부(2000℃)의 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

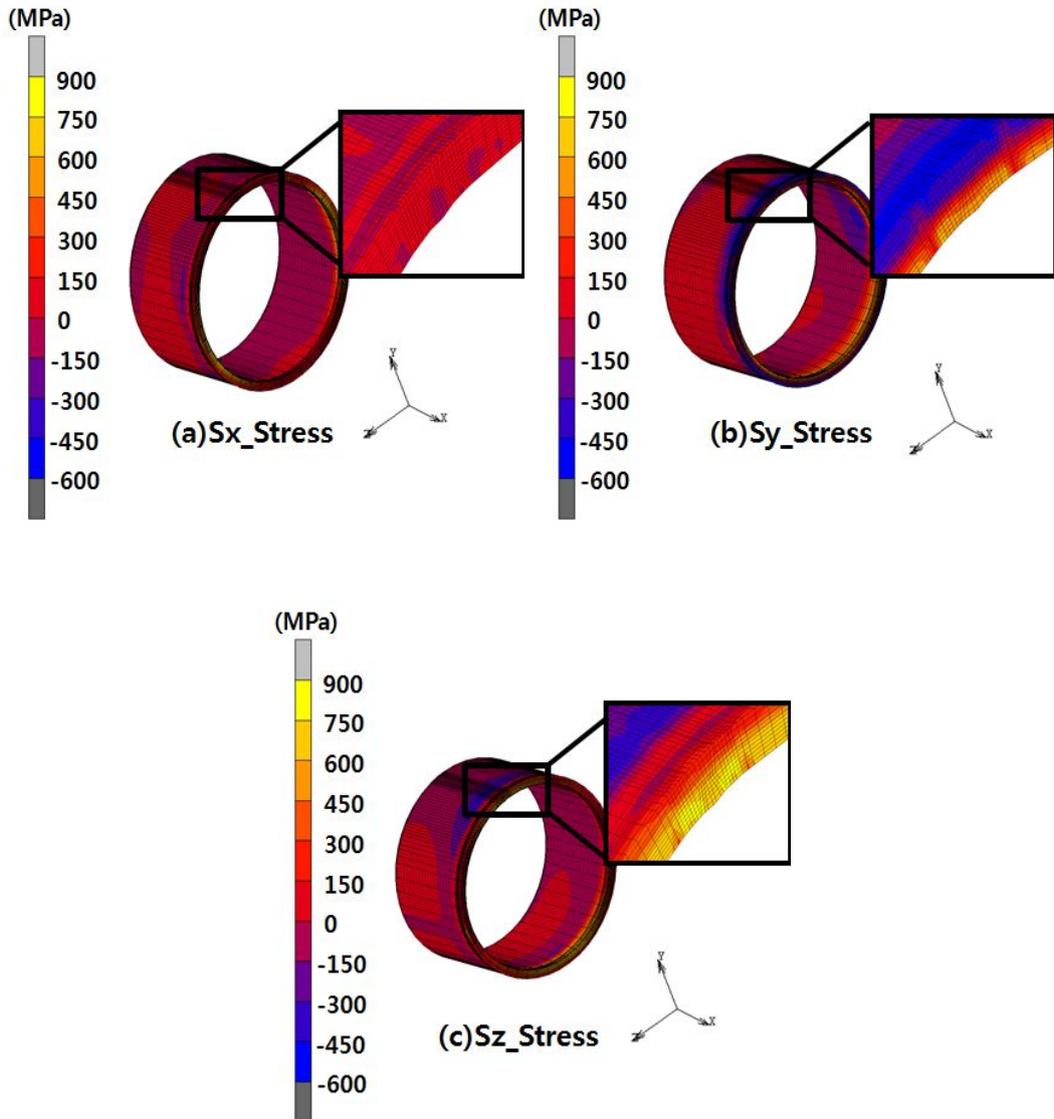


그림 3.34 Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 없는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.35는 Girth 용접부(2000℃)의 단면응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

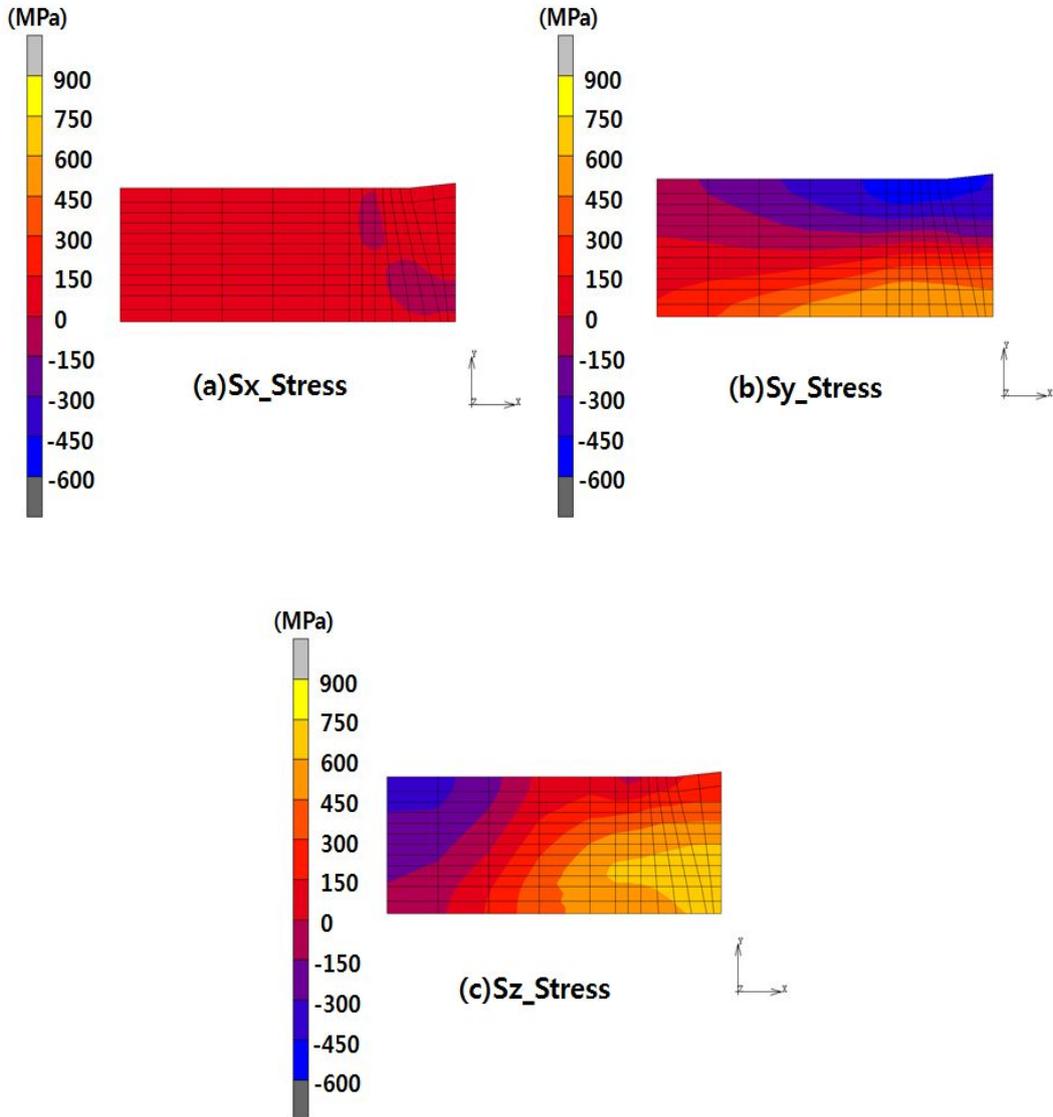


그림 3.35 Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 없는 경우 단면의 잔류응력 분포

그림3.36은 Girth 용접부(1800℃)의 상변태를 고려하였을 경우 전체응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

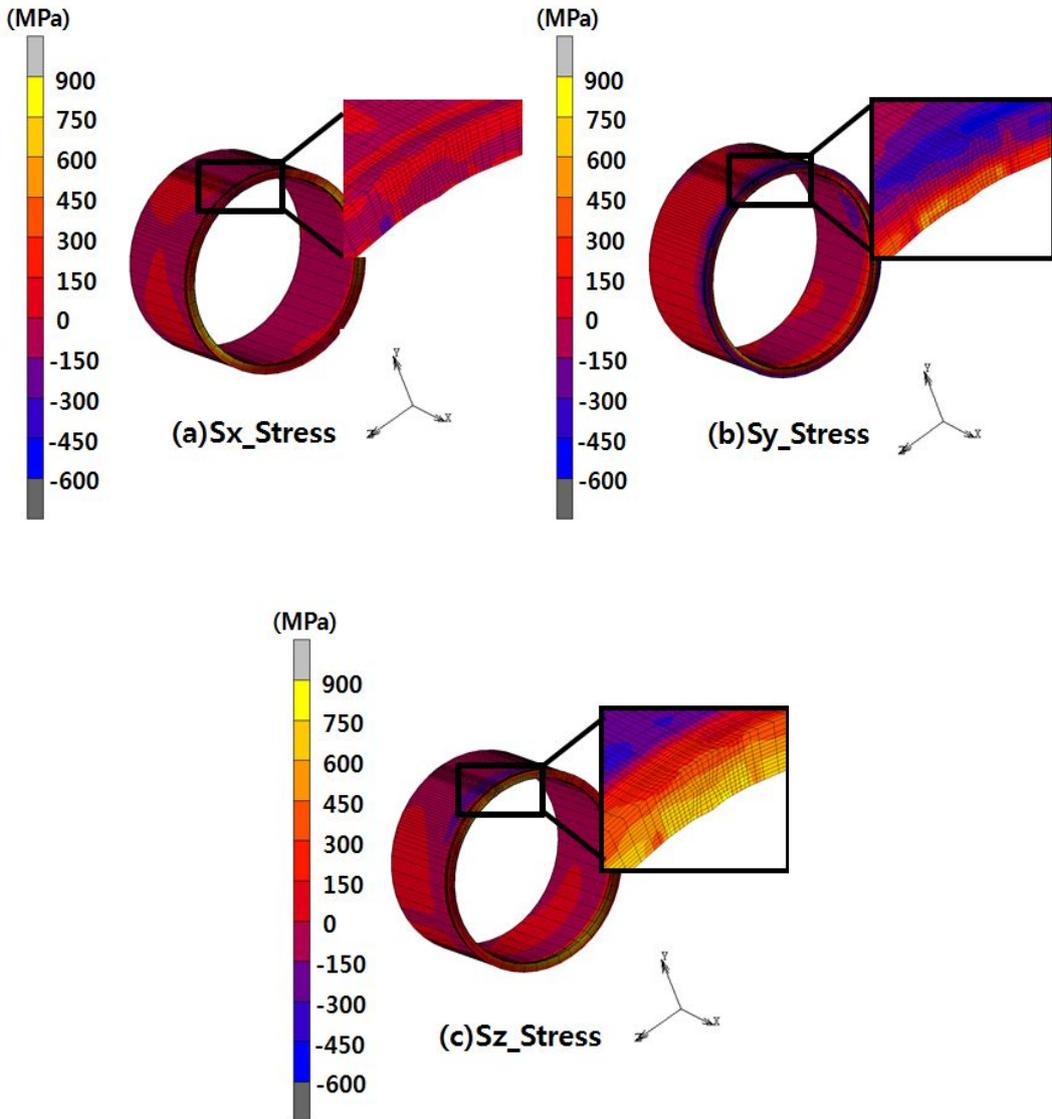


그림 3.36 Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 전체 잔류응력 분포

그림3.37은 Girth 용접부(1800℃)의 상변태를 고려하였을 경우 단면응력분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 응력이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

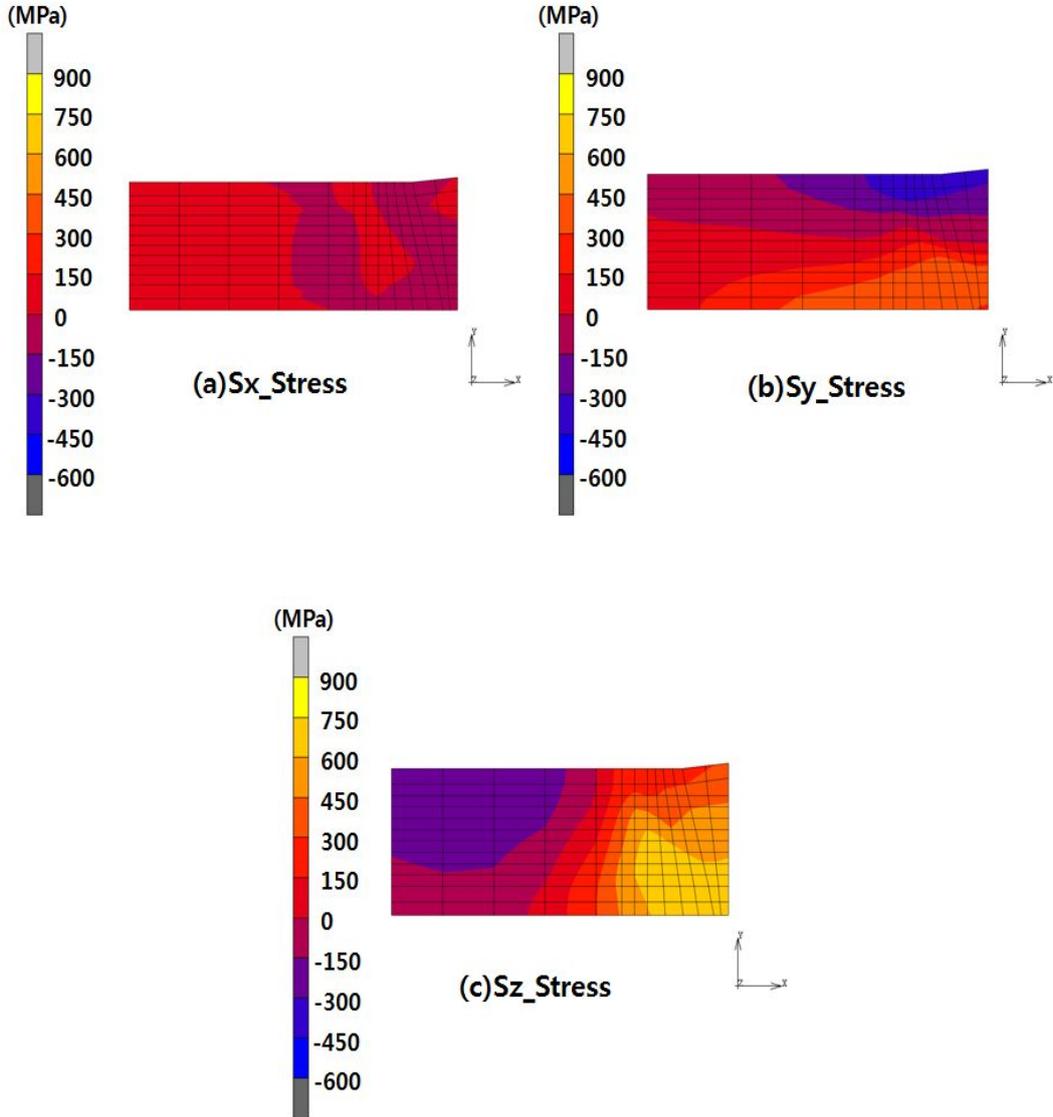
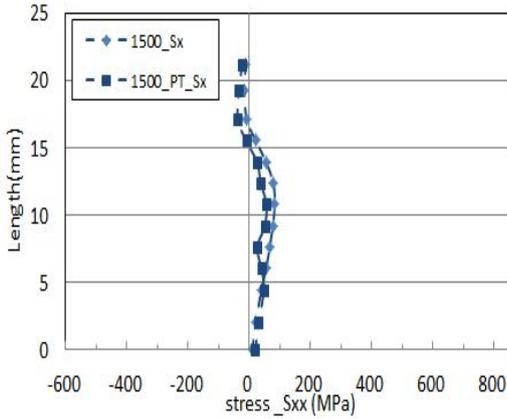
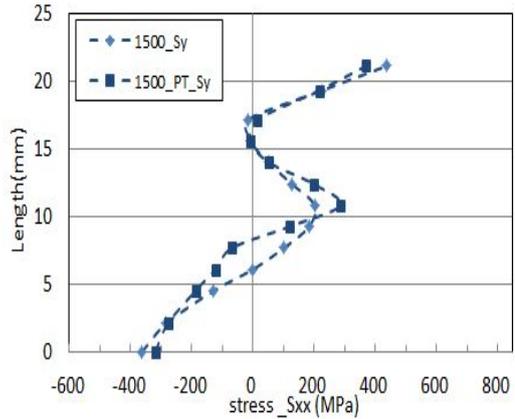


그림 3.37 Girth용접시(2000℃) 상변태효과가 있는 경우 단면의 잔류응력 분포

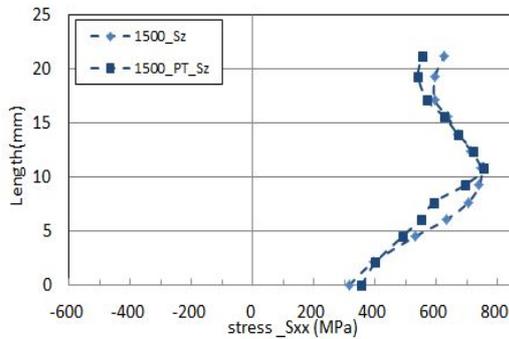
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.38 (a),(b),(c)는 Girth용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

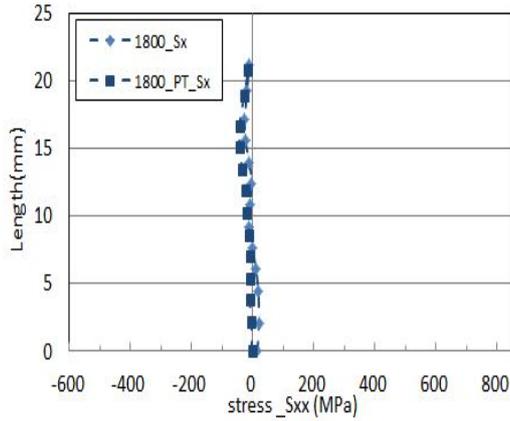


(c) Sz 잔류응력

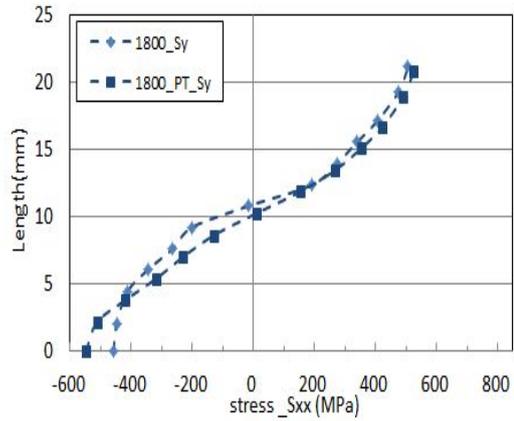
그림 3.38 Girth용접시(1500℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포

상변태 유무에 따라서 Sx, Sy, Sz 모두다 비슷한 형태의 잔류응력 분포를 보여주고 있지만 약간의 차이가 나타난다. (a)는 5mm 까지는 같은 응력값을 보이나 중앙부로 갈수록 응력의 차이가 보여진다.(b)는 상변태를 고려하였을 경우 압축응력에서 인장응력으로 바뀌는데 상변태에 유무에 따라서 응력의 차이를 보여주고 있다. (c)는 용접선 방향의 잔류응력은 두께 중앙부에서 최대값을 나타냈고, 초층부 보다 최종 층에서 더 큰 잔류응력을 보여주고 있다.

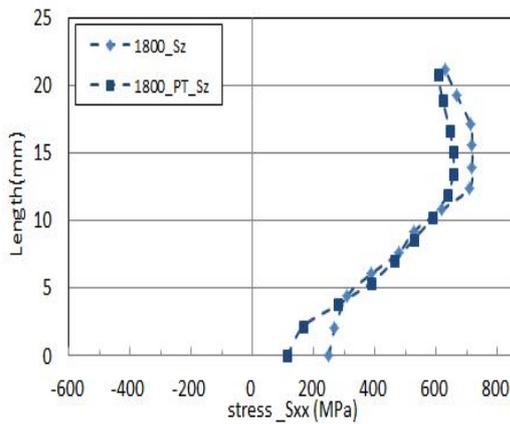
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.39 (a),(b),(c)는 Girth용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

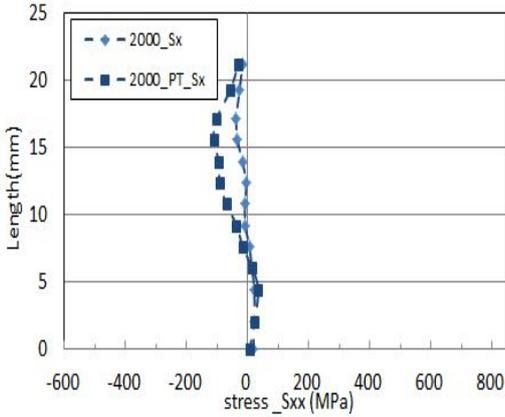


(c) Sz 잔류응력

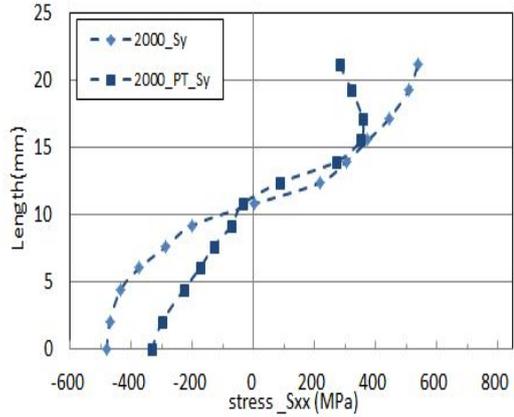
그림 3.39 Girth용접시(1800℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포

상변태에 유무에 따라서 Sx, Sy, Sz 모두 거의 유사한 형태의 그래프를 보여주고 있다. 용접선 방향의 잔류응력이 가장 큰 값을 나타내고 다음으론 폭방향, 두께방향의 순서대로 나타났다.

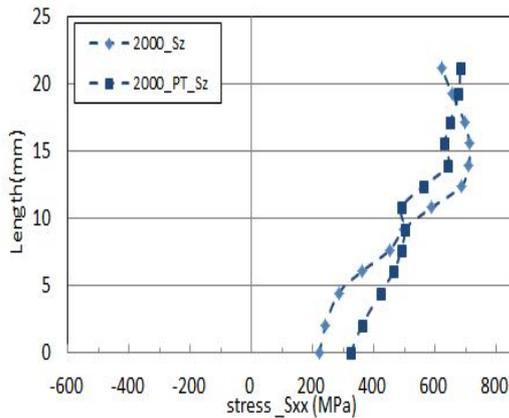
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.40 (a),(b),(c)는 Girth용접부 중앙에서의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력



(c) Sz 잔류응력

그림 3.40 Girth용접시(2000℃) 상변태효과의 유무에 따른 용접부 잔류응력 분포

상변태를 유무에 따라서 잔류응력의 차이는 20~50MPa 정도의 차이를 보인다. 입열량에 따라서 용접선 방향, 폭방향 두께방의 잔류응력들을 거의 유사한 형태로 나타내지만 두께방향의 잔류응력은 용접시 발생하는 팽창과 수축으로 인해 인장응력과 압축응력이 변화가 크게나타는 것으로 판단된다.

3.3 Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 잔류응력의 영향

3.3.1. 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접시 잔류응력변화

그림 3.1의 해석 모델과 같은 모델에 Seam용접후 Girth용접을 실시하고, Seam weld metal과 Girth weld metal 온도를 1500℃, 1800℃, 2000℃로 조정하고 상변태를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 각각의 응력을 해석하였다.

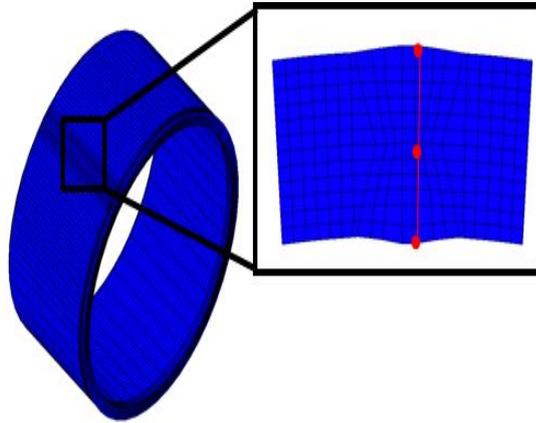
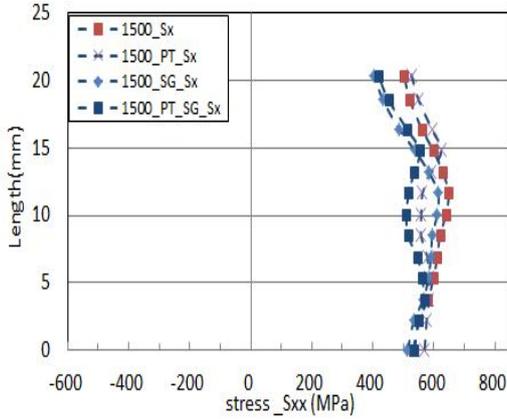
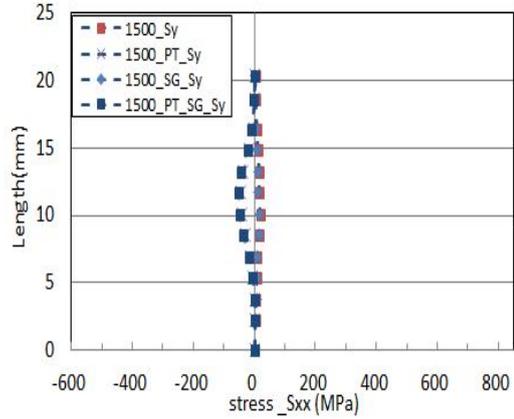


그림 3.41 용접완료 후 잔류응력 측정 위치

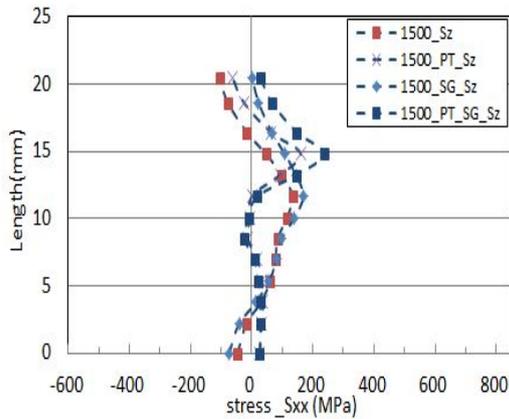
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.42 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

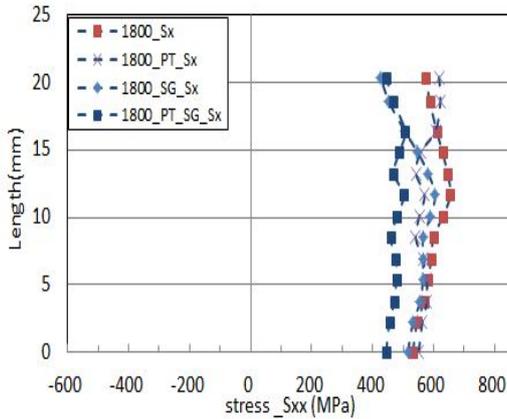


(c) Sz 잔류응력

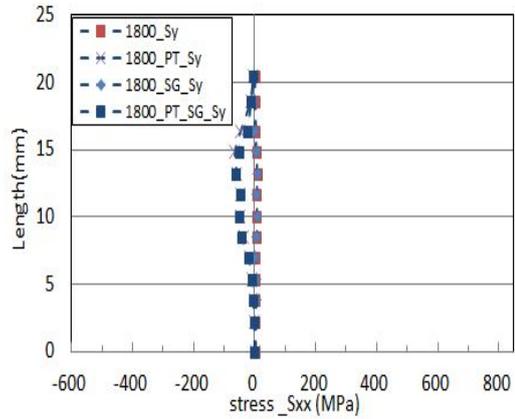
그림 3.42 1500℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 용접 잔류응력 분포

Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 잔류응력의 분포를 보여주고 있다. 용접선 방향의 경우 중앙부, 최종층, 초층부 순으로 응력의 크기가 나타나며 두께방향의 잔류응력의 차이가 미미한 것으로 보여진다. 두께방향 또한 용접선 방향과 마찬가지로 응력의 크기가 나타나지만, 압축응력과 인장응력이 모두 발생한다.

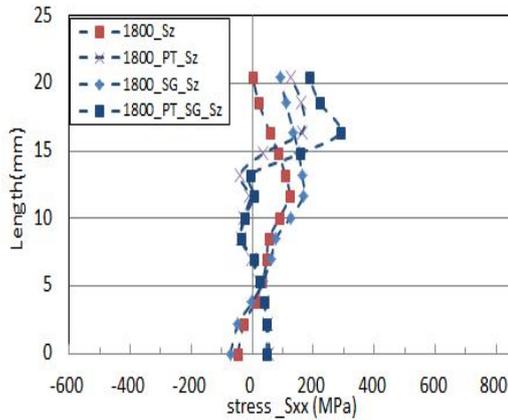
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.43 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

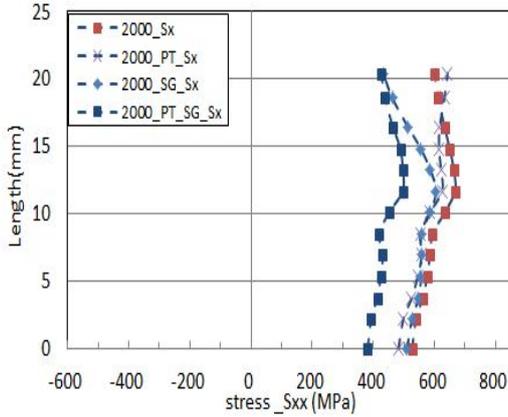


(c) Sz 잔류응력

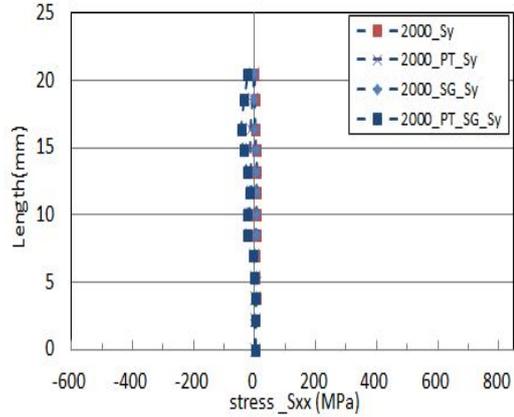
그림 3.43 1800℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 용접 잔류응력 분포

Seam 용접이 된 시험편에 Girth 용접을 할 경우 Seam 용접부에서 용접선방향은 응력의 차이를 보여주고 있으며 초층부로 갈수록 40~100MPa의 차이를 보여주고 있다. 폭방향의 잔류응력 또한 50~100MPa 차이를 보여주고 있다. 용접선 방향, 폭 방향, 두께방향의 순으로 응력의 크기가 나타난다.

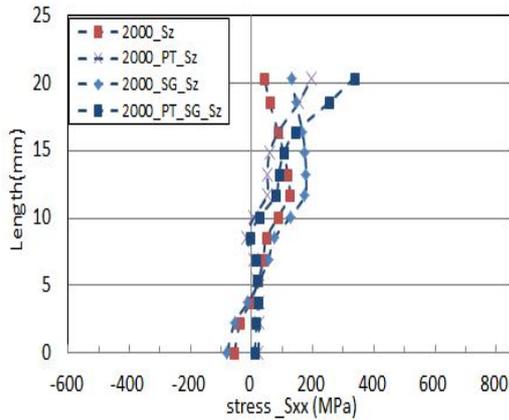
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.44 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력



(c) Sz 잔류응력

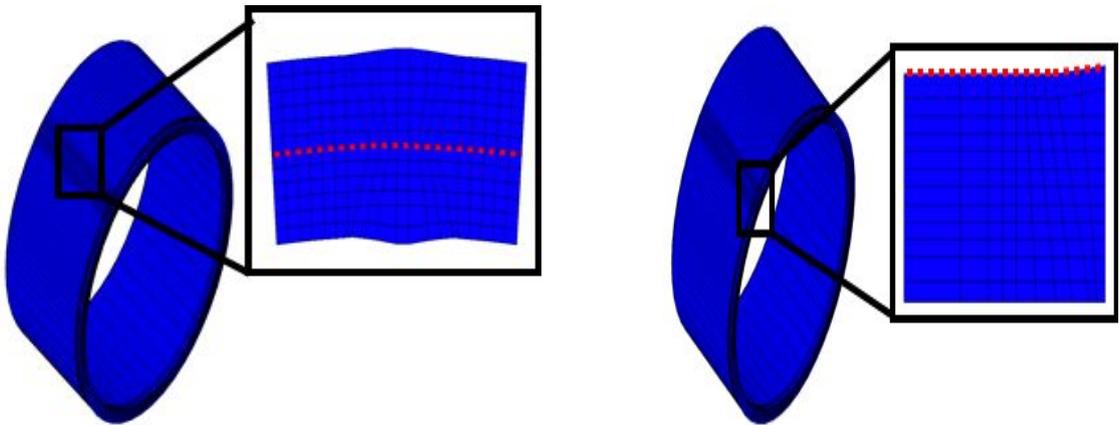
그림3.44 2000℃ 상변태 유무에 따른 Seam용접후 Girth용접을 실시한 경우 용접 잔류응력 분포

용접선 방향은 용접중심부 근처에서 가장 큰 잔류응력이 발생하였고 초층부로 갈수록 낮은 인장응력이 발생하였다. 용접을 하는 동안 팽창, 수축을 반복하게되면 폭 방향 잔류응력인 인장응력과 압축응력 발생하는 것으로 판단된다.

3.4 용접완료 후 내압이 작용한 경우

3.4.1. 시험편의 내압이 작용할 경우

Seam 용접 후 Girth 용접을 완료한 후 시험편 내압이 가해졌을 경우 상변태의 유무에 따라서 응력의 변화를 측정하였다. 아래의 그림 3.45는 Seam용접 Girth 용접 측정 위치를 나타내고 있다.

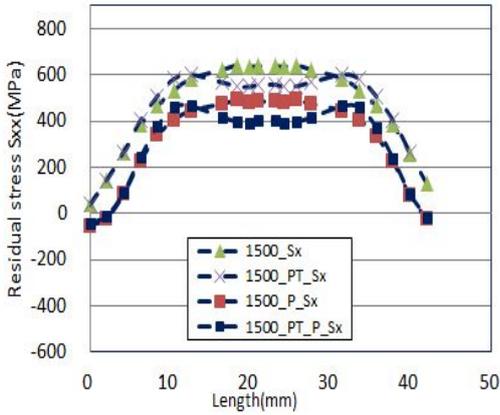


(a) Seam 용접

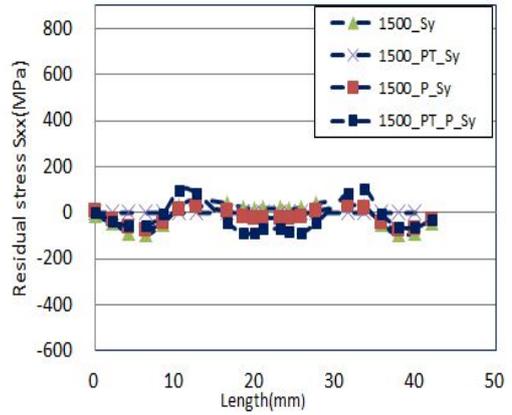
(b) Girth 용접

그림 3.45 용접완료 후 Seam용접 Girth 용접 측정위치

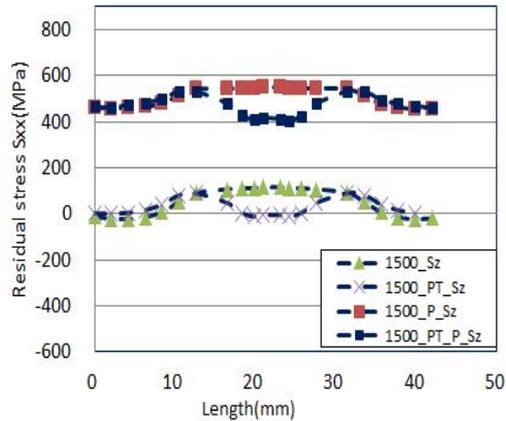
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.46 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

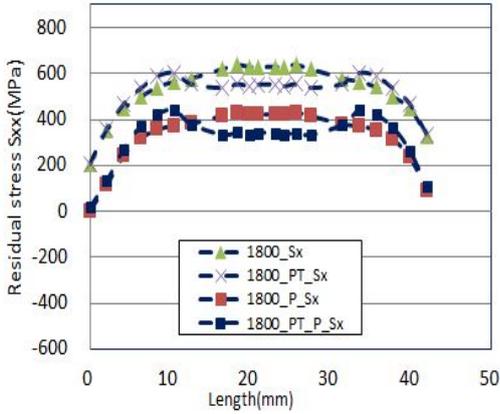


(c) Sz 잔류응력

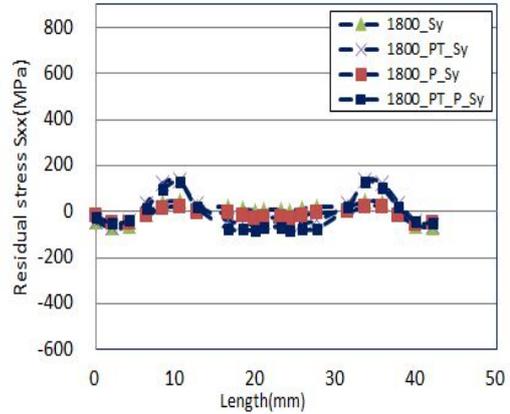
그림 3.46 용접완료(1500℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력

용접완료 후 내압이 가해질 경우 용접선방향의 잔류응력이 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 폭 방향 잔류응력은 내압이 가해질 경우 응력이 200Mpa 정도의 차이를 보여 주고 있다.

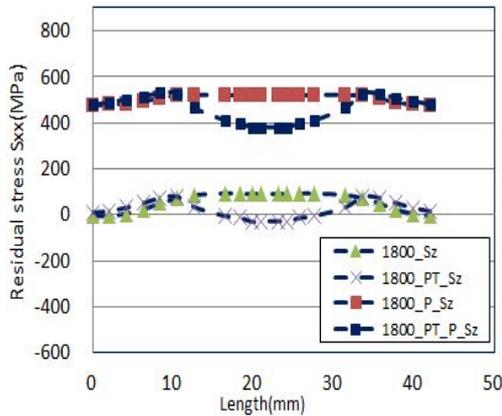
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.47 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포를 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

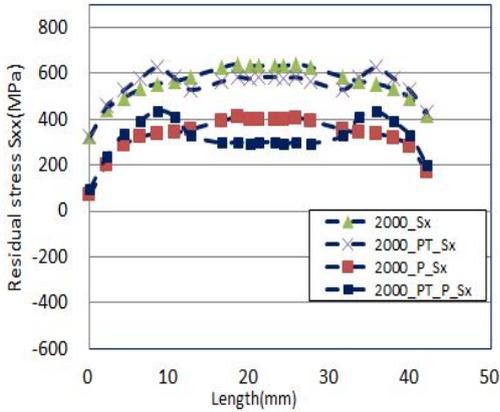


(c) Sz 잔류응력

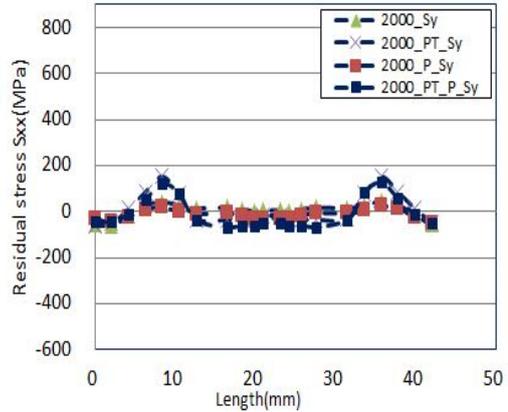
그림 3.47 용접완료(1800°C) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력

(a)같은 경우 상변태를 고려하여서 내압이 가해졌을 경우 그래프의 형상은 유사하지만 그값은 차이가 나타나는걸 확인할 수 있다. (b)같은 경우 거의 차이가 나타나지 않았다. (c)같은 경우 상변태를 고려하지 않을 경우 그래프의 형상은 유사하나 400MPa 차이를 보여주고 있다.

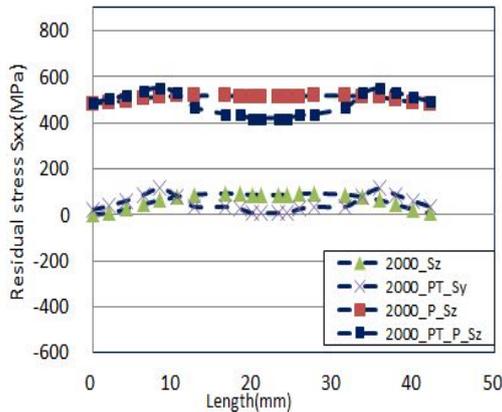
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림 3.48 (a),(b),(c)는 Seam용접부의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



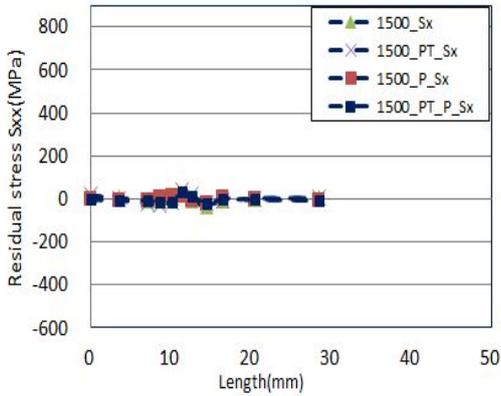
(b) Sy 잔류응력



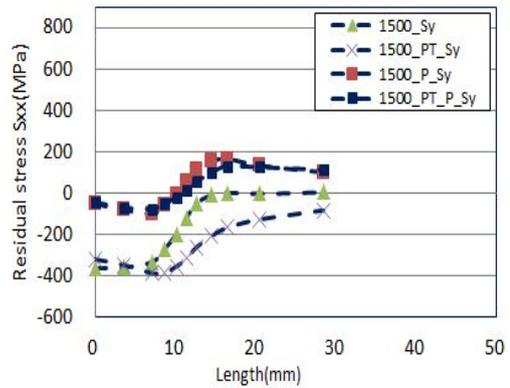
(c) Sz 잔류응력

그림 3.48 용접완료(2000℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Seam 용접부의 잔류응력 상변태가 적용되었을 경우 용접부 중심으로 가면서 응력의 차이가 보여진다. 상변태를 고려하였을때는 고려하지 않았을 때보다 잔류응력이 값이 20~60MPa차이를 보여준다. 마찬가지로 내압이 걸려있을 경우에도 상변태에 유무에 따라서 20~100Mpa 차이를 보여준다. 상변태를 고려할 경우 피로강도가 향상될 것으로 판단된다.

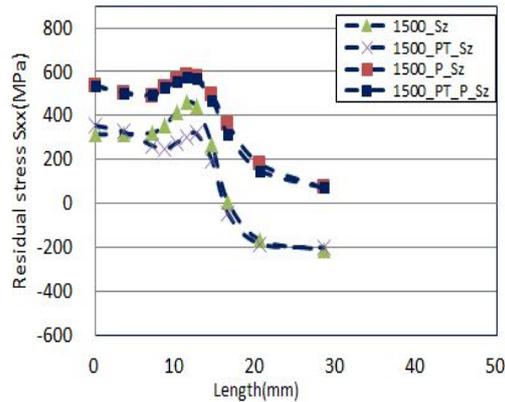
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.49 (a),(b),(c)는 Girth용접부의 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

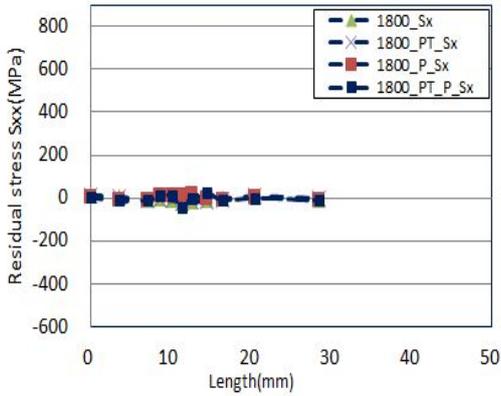


(c) Sz 잔류응력

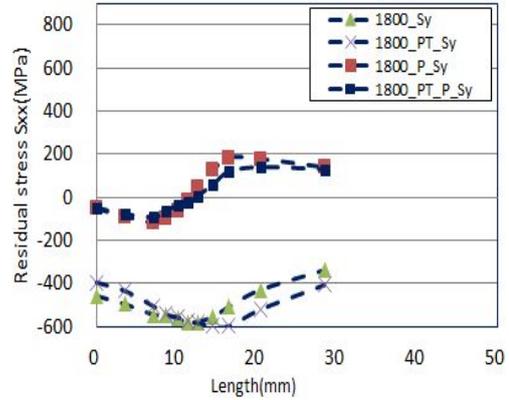
그림 3.49 용접완료(1500℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력

내압이 가해질 경우 용접선 방향에서 가장 큰 잔류응력이 나타나며, 내압이 가해짐에 따라서 응력이 증가함을 볼 수 있다. 상변태를 고려할 경우 용접부에 응력이 차이가 보여진다.

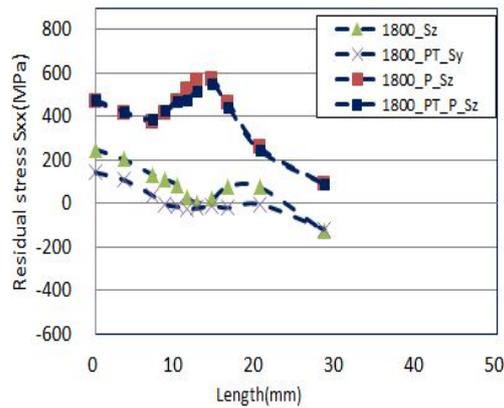
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.50 (a),(b),(c)는 Girth용접부 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력

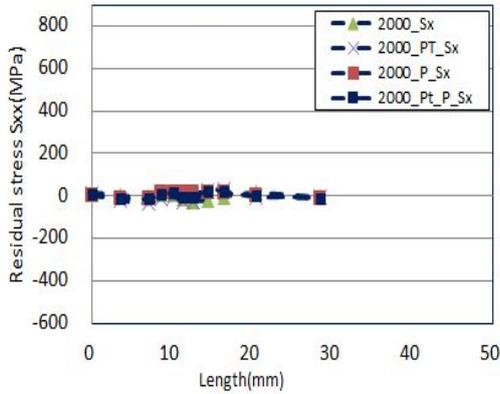


(c) Sz 잔류응력

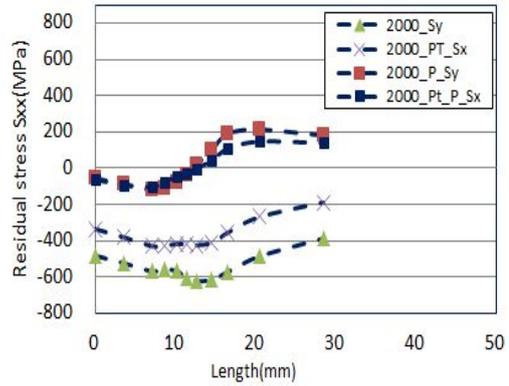
그림 3.50 용접완료(1800℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력

(a) 경우 그래프의 형상도 유사하며 잔류응력의 차이도 거의 나타나지 않는다. 단 용접선 방향과 두께 방향은 내압이 작용함에 따라서 응력의 크기는 차이 있지만 형상은 비슷하나 용접부에서 잔류응력이 더 증가하는 것을 볼 수 있다.

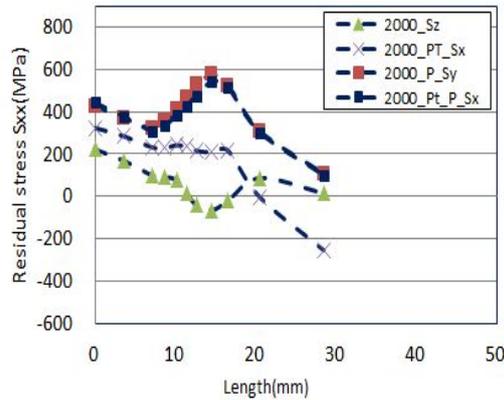
열 탄소성해석 결과로부터 구체적으로 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 그림3.51 (a),(b),(c)는 Girth용접부 잔류응력분포는 아래의 그림과 같다.



(a) Sx 잔류응력



(b) Sy 잔류응력



(c) Sz 잔류응력

그림 3.51 용접완료(1800℃) 후 시험편에 내압이 가해질 경우 Girth 용접부의 잔류응력

용접선방향의 잔류응력이 가장 크게 나타나면 두께방향, 폭방향 순으로 나타난다. 용접부 중앙에서 가장 큰 응력의 차이를 보여주는데 이러한 이유는 용접을 순차적으로 진행함에 따라서 용접부 중앙에서 응력집중이 발생하여 이러한 응력의 차이를 보여주는 것으로 판단된다.

제4장 결 론

강구조물의 용접부에서 발생하는 잔류응력은 부재의 피로강도, 좌굴강도, 부식 등에 큰 영향을 준다. 따라서 용접이음부의 안전한 설계를 위해서 용접잔류응력 분포를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 파이프 용접잔류응력을 보다 정확히 예측하기 위해 용접열에 의해 발생하는 용접금속의 상변태를 고려하여 유한요소법을 이용한 열 탄소성해석을 수행하였다. 금속의 상변태에 따른 영향을 비교하기 위해 상변태의 영향의 유무에 따른 잔류응력을 비교하여 상변태에 따른 영향을 분석하였다. 또한, 파이프용접의 용접방향에 따른 Seam용접과 Girth 용접에 따른 잔류응력분포를 비교, 검토하였다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 용접입열량이 증가하면 인장잔류 응력이 증가하는 경향을 보이고 있으나 최고온도가 1800℃ 이상이 되면 일정한 값을 보여주는 것을 알 수 있었다. 두께 방향에 따른 잔류응력의 크기는 용접선방향의 잔류응력이 제일 크게 발생하였고, 최고 발생응력은 두께의 중앙부에서 발생하였다.
2. 파이프 Seam용접시 상변태효과의 유무에 따른 열 탄소성해석을 실시하여 잔류응력을 계산 결과, 용접선방향의 잔류응력이 제일 크게 발생하고, 두께방향의 잔류응력이 제일 작게 발생하였다. 상변태의 효과는 용접부 직각방향 중앙에서 상변태에 유무에 따라서 50~120MPa 작게 발생하였다.
3. 파이프 Girth용접시 상변태효과의 유무에 따른 열 탄소성해석을 실시하여 잔류응력을 계산한 결과, Seam용접과 같이 용접선방향의 잔류응력이 크게 발생하였다. 상변태의 효과에 의해 용접선방향과 용접선 직각방향의 잔류응력이 상변태를 고려하지 않은 경우보다 작게 발생하였다. 용접선 방향에서는 10~50MPa정도 작게 발생하였고, 용접선 직각방향에서는 30~50MPa정도 작게 발생하였다.

4. 파이프 Seam용접 후 Girth용접시 Seam용접부의 잔류응력에 영향을 알아보기 위해서 열 탄소성해석을 실시하여 잔류응력을 계산한 결과, Seam용접선방향의 잔류응력은 초층부로 갈수록 감소하였고, 용접선 직각방향의 잔류응력은 증가하였으므로 Seam용접후 Girth용접을 할 경우 Seam 용접부의 잔류응력을 고려할 필요가 있다.
5. Seam용접 후 Girth용접이 완료된 후 파이프에 내압을 가해서 잔류응력을 계산한 결과 Seam용접부는 용접선 방향의 잔류응력은 줄어들고 용접선 직각방향 증가하였으며 상변태를 고려하였을 경우도 같은 현상이 발생되었고, Girth용접부 용접선 방향의 잔류응력은 증가하였고 두께방향의 잔류응력 또한 증가하였으며 상변태를 고려하였을 경우도 같은 현상이 발생하였다. 상변태를 고려할 경우 잔류응력의 값은 차이가 나타난다.
6. 이러한 결과로부터 상변태를 고려한 잔류응력을 해석하는 경우, 보다 정확한 잔류응력을 예측할 수 있어 구조물의 피로강도, 좌굴강도, 부식 등에 잔류응력의 영향을 합리적으로 고려함으로써 파이프 용접부의 강도설계에 적용되리라 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 이승엽 "강구조물에서 용접해석조건이 잔류응력분포에 미치는 영향" pp19-21, pp30-40, 2011.
- 2) 박정웅, 박연수, 경갑수, "강교의 피로와 보수보강", 구미서관, pp.17-20, 2004.
- 3) 허승민 "강재의 초기 잔류응력과 상변태를 고려한 용접 잔류응력 해석에 관한 연구" , pp12-14, pp23-26, 2014.
- 4) 이창현, "고유변형도법을 이용한 보강판의 용접변형 예측에 관한연구", 서울대학교 조선해양공학과 학위논문, pp.21-25, 1997.
- 5) 박정웅, 안규백, 우완측, 허승민, "고유변형도법에 의한 두께 25mm 맞대기용접부의 두께방향의 잔류응력측정", 대한용접·접합학회, 제 31권, 제4호, pp.67-72, 2013.
- 6) 우완측, 안규백, Kingston E.J, De Wald A.T, Smith D.J, Hill M.R, "극단적인 두가지 입열 조건에 따른 두꺼운 용접부의 두께방향 잔류응력 분포: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study" 약타 머티어리얼리아, 제 61권, pp.3564-3574, 2013.
- 7) 박정웅, 이승엽, "극후판 용접시 용접조건에 따른 잔류응력의 영향." 대한용접·접합학회 춘계 학술대회 제51집, p.105, 2009.
- 8) 조시훈, 김재웅, "상변태를 고려한 탄소강 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구" 대한기계학회논문집 A권, 제 25권 제3호, pp390-398, 2001.
- 9) 강성훈, 임용택, "연속적인 냉각공정에서 탄소강의 상변태 모사에 관한 유한요소 해석", KSME, 제 2006권 , 제6호 pp.497-502, 2006.
- 10) 박정은 "열간압연 직후 수분류에 의한 비등 냉각 과정에서 철강재의 상변태를 고려한 연전달 수치해석" pp7-8, 2012.
- 11) 이종석 "용접재의 잔류응력해석 관한 연구" pp16-20, 2011.
- 12) 박만지 "중성자 회절을 이용한 Stainless steel 용접부위의 잔류응력 측정" pp5-6, pp30-31, 2010.
- 13) 신은주, 김허준, T.M Holden, 이창희 , 성백석, 심해섭, "중성자회절에 의한 잔류응력측정법 개발" 한국원자력연구원, 1990.
- 14) 엄기원, "최신 용접공학", 동명사, pp.272-357, 2010.
- 15) 금속용어사전편찬회, "Total 금속용어사전", 성안당, 1998.

- 16) 이종석 "용접재의 잔류응력해석 관한 연구" pp16-20, 2011.
- 17) G.E. Bacon, "Neutron Diffraction, 3rd edition", Clarendon Press, Oxford, 1975.
- 18) F.Hosseinzadeh, A.H.Mahmoudi, C.E.Truman and D.J.Smith, "Prediction and Measurement of Through Thickness Residual stresses in Large Quenched Components", Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol.2, pp.978~988, 2009.
- 19) Murakawa H, Luo Y. and Ueda Y, "Prediction of welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain (first report) mechanism of inherent strain production, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.26 No.2 .pp49~58, 1997.
- 20) M. E. Hilley "Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction", Society of Automotive Information Report J784a, 1971.
- 21) C. S. Barrett, T. B. Massliski, "Structure of Metals(3rd ed.)", McGraw-Hill, 1996
- 22) A. L. Christenson, "The Measurement of Stress by X-rays", Society of Automotive Engineers Technical Report 182, 1960.
- 23) H. P. Klug, L. E. Alexander, "X-Ray Diffraction Procedures(2nd ed.)", 1974.
- 25) A. Taylo "X-Ray Metallography", 1961.

감사의 글

본 논문의 끝자락을 빌어 석사기간동안 관심과 격려를 보내준 많은 분들에게 감사의 말을 전하고자 합니다. 먼저 논문을 쓰면서 많은 도움과 격려를 해주시고 좋은 논문이 될 수 있게 해주신 박정웅 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 석사과정 동안 받은 관심과 애정 어린 관심을 잊지 않고 더욱더 발전하는 모습으로 보답 하겠습니다. 그리고 논문의 심사위원장과 심사위원을 맡아 많은 조언으로 본 논문의 완성에 큰 도움을 주신 박길현 교수님과, 김운중 교수님께 감사드립니다.

대학원 생활을 같이 재미있게 하고 많은 도움을 준 승민이형, 문석이형에게 고마움을 전하고 행복하길 바랍니다. 앞으로 강구조 연구실에 주축이 될 신성욱, 문민주, 최낙훈에게도 격려의 말을 전하며 논문을 쓰면서 격려해준 동기 태광이 그리고 많은 응원을 해준 홍욱이 의준이형, 나재선, 정중이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 강구조실험 준비실에서 미래를 향해 나아가는 장민기, 강민구, 박상원, 최용준, 김석환 후배들에게 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 항상 힘이 되어준 흠 동아리 재양이형, 보현이형, 정민이형, 형석이형, 김대원, 김영욱, 황승재에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 학부 생활 때부터 지금까지 항상 옆에서 철없는 황재윤, 서영준, 김광종 김건우, 원종수, 한승우에게 정말 큰 힘이 되었다고 전합니다.

끝으로 어려운 생활에서도 남들보다 조금 길었을 배움의 길에 항상 격려와 끝없는 믿음을 주신 부모님께 머리 숙여 깊은 감사의 말씀을 드리며, 논문을 쓰는데 있어서 도움을 준 하나 밖에 없는 내 동생에게 항상 미안하고 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 항상 옆에서 힘이 되어준 당신께 감사드립니다.

2014 년 5월
신 대 운 올림