creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:21031-200000182760

공학석사 학위논문

JCO공정에 의한 고망간강 파이프 굽힘강도 해석

2019년 2월

부경대학교 대학원

마린융합디자인협동과정

변 정 훈

공학석사 학위논문

JCO공정에 의한 고망간강 파이프 굽힘강도 해석

지도교수 손 정 민

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 2월

부경대학교 대학원

마린융합디자인협동과정

변 정 훈

변정훈의 공학석사 학위논문을 인준함.

2019년 1월 18일

위 원 장 디자인학박사 조 정 형 (인)

위 원 공 학박사 김 동 준 (인)

위 원 공 학박사 손 정 민 (인)

목 차

그림 목록 ····· iii
표 목록 ····· iv
약어 설명 ····· vi
기호 설명 ····· vii
영문 초록 ····· ix

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. 인장강도시험 ····· 4
1. 서론 ····· 4
2. 시험 시편 ····· 4
3. 인장 시험 ····· 5
4. 인장 시험 결과 ····· 6

Ⅲ. JCO공정해석 ····· 8
1. JCO공정해석 ····· 8
2. 2차원 성형공정해석 ····· 9
가. 서론 ····· 9
나. 유한요소모델 ····· 11

다. 하중 및 경계조건 ····· 11
라. 접촉 영역 ····· 13
마. 공정시뮬레이션 ····· 15
바. 곡률계산 ····· 17
3. 3차원 성형공정해석 ····· 21
가. 서론 ····· 21
나. 수렴도조사 ····· 21
다. 길이에 대한 영향 조사 ····· 23
라. 공정시뮬레이션 ····· 24

Ⅳ. 좌굴 및 굽힘강도해석 ····· 34
1. 서론 ····· 34
2. 모델링 ····· 35
3. 초기처짐 ····· 37
4. 잔류응력에 의한 굽힘해석 ····· 40

Ⅴ. 결론 및 고찰 ····· 47

참고문헌 ····· 48

그림 목록

Figure 1 World petroleum and other liquids consumption····· 1
Figure 2 JCO forming process····· 2
Figure 3 Tensile test specimens····· 5
Figure 4 Tensile test by the universal testing machine····· 5
Figure 5 Defect on No.1 specimen····· 6
Figure 6 True stress-strain curves····· 7
Figure 7 JCO forming process····· 8
Figure 8 Principle dimension for JCO forming process····· 9
Figure 9 Neutral axis on the cross section of the pipe····· 10
Figure 10 Overall modeling for 2D analysis····· 11
Figure 11 Pre-bending process····· 12
Figure 12 Punching process····· 12
Figure 13 Penetration on the contact region····· 13
Figure 14 Definitions of contact conditions····· 14
Figure 15 2D analysis of JCO forming process····· 16
Figure 16 Three points for estimating curvature····· 17
Figure 17 Curvatures and diameters after analysis (18t)····· 18
Figure 18 Curvatures and diameters after analysis (25t)····· 19
Figure 19 Curvatures and diameters after analysis (30t)····· 19
Figure 20 Curvatures and diameters after analysis (35t)····· 19
Figure 21 Curvatures and diameters after analysis (40t)····· 20
Figure 22 Curvatures and diameters after analysis (45t)····· 20
Figure 23 Curvatures and diameters after analysis (50t)····· 20
Figure 24 The results of mesh size study····· 22

Figure 25 Equivalent stress after JCO forming process····· 23
Figure 26 Overall modeling for 3D analysis····· 24
Figure 27 3D analysis of JCO forming process····· 25
Figure 28 Comparison of the results of forming analysis by element types····· 26
Figure 29 The results of 3D analysis (18t)····· 27
Figure 30 The results of 3D analysis (25t)····· 28
Figure 31 The results of 3D analysis (30t)····· 29
Figure 32 The results of 3D analysis (35t)····· 30
Figure 33 The results of 3D analysis (40t)····· 31
Figure 34 The results of 3D analysis (45t)····· 32
Figure 35 The results of 3D analysis (50t)····· 33
Figure 36 Boundary conditoin (Sadowski, et al., 2013)····· 35
Figure 37 3D modeling of case 4····· 36
Figure 38 Shape of the first eigenmode imperfection (European Commision, 2014) 38
Figure 39 Shape of the first eigenmode imperfection····· 38
Figure 40 The results of imperfection influence study····· 39
Figure 41 The process to import residual stress on pipe model····· 40
Figure 42 Longitudinal residual stress distribution····· 41
Figure 43 Influences of residual stress (Case 1)····· 43
Figure 44 Influences of residual stress (Case 2)····· 44
Figure 45 Influences of residual stress (Case 3)····· 45
Figure 46 Influences of residual stress (Case 4)····· 46

표 목록

Table 1 Principle dimension of specimens ····· 4
Table 2 The results of tensile test ····· 6
Table 3 Principle dimension of plates (unit: mm) ····· 10
Table 4 Types of contact regions ····· 13
Table 5 Normal stiffness factor ····· 14
Table 6 y displacement of crimp_d and x displacement of plate ····· 15
Table 7 x displacement of plate ····· 15
Table 8 Required y displacement of punch and force for OD533 ····· 18
Table 9 The results of pipe length study ····· 23
Table 10 The results of 3D analysis ····· 24
Table 11 Principle dimension of pipe ····· 36
Table 12 The results of imperfection influence study ····· 39
Table 13 The results of bending analysis ····· 42

약어 설명

EIA	=	U.S. Energy Information Administration
OECD	=	Organization for Economic Cooperation and Development
JCOE	=	J-shape, C-shape, O-shape, and Expansion
OD	=	Outer diameter

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

기호 설명

L	=	Length of plate
t	=	Thickness of plate or pipe
W	=	Width of plate
H_{1-2}	=	Horizontal length of cut area for welding
V_{1-2}	=	Vertical length of cut area for welding
D	=	Outer diameter of pipe
D_0	=	Diameter of pipe at neutral axis
$D_{\max}$	=	Maximum diameter of deformed pipe
$D_{\min}$	=	Minimum diameter of deformed pipe
D_{req}	=	Required outer diameter of pipe
κ	=	Curvature after JCO forming process or after bending analysis of pipe
κ_1	=	Curvature for normalization when pipe bending analysis
M	=	Global bending moment when pipe bending analysis
M_0	=	Global bending moment for normalization when pipe bending analysis
δ_0	=	Amplitude of wrinkled wave
Δ_0	=	Ovaility of pipe

a	=	x coordinate of center of curvature after JCO forming analysis
b	=	y coordinate of center of curvature after JCO forming analysis
r	=	Radius of curvature after JCO forming analysis
x_{1-3}	=	x coordinate of any points for estimation of curvature
y_{1-3}	=	y coordinate of any points for estimation of curvature

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Numerical Analysis of JCO Forming Process on the Bending Capacity of High Manganese Steel Pipe

Jung Hoon Byeon

Program of Marine Convergence Design,
The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

With development of non-OECD countries, worldwide oil and gas consumption has gradually increased. Hence, not only the prices of energy have raised but also depth of subsea well has been further and deeper than before. Because of that, pipelines which have higher performance and larger diameter were needed to convey producte d oil and gas from the well to the land. Corrosion resistance is one of the critical requirements for subsea pipelines since it takes tremendous expenses for replacement or maintenance of old pipelines. Therefore, high-manganese steel can be a proper m aterial which has high corrosion resistance and reasonable price. Also, for manufactu ring the large diameter pipelines, JCO process is mostly considered because of its e conomic feasibility. This process can produce large diameter pipelines in lower price s comparing with seamless pipes. However, cold forming which trigger residual stres ses after process is main procedure so it is important understanding the effects of f orming process on the structure.

In this research, a tensile test was performed since it is essential obtaining mechan ical properties for nonlinear analysis. Then, finite element analysis of JCO forming process for OD533 pipe was also performed based on the data from the tensile test. The residual stress after forming was imported to cylindrical tube for evaluating the effects of forming process. Though considerable residual stress remained from formi ng but there was a negligible effect on the ultimate strength of the pipe.

I. 서 론

미국 에너지 정보청인 EIA(U.S. Energy Information Administration)의 조사에 의하면 OECD 비 가입 국가들의 경제성장으로 인하여 2015년까지 석유 및 에너지자원의 사용이 꾸준히 증가되어 왔으며, 앞으로도 그 소비량은 증가할 것으로 예상된다. 이러한 에너지 수요의 증가와 석유자원의 고갈로 인하여 해양플랜트를 이용한 에너지 자원 개발이 활발하게 진행되어왔다. 이를 위하여 해양 유전의 깊이와 규모도 점차 증가하는 추세이며, 이러한 해양자원들의 생산지역에서 생산된 원유 및 천연가스 자원들을 육지로 안전하게 수송하기 위해서 많이 선택되는 방법들 중 한 가지는 바로 해양파이프이다. 최근에는 해양플랜트뿐만 아니라 심해저설비를 이용한 유전개발 또한 증가하는 추세이며, 해양파이프라인은 특별한 해상환경에 설치되기 때문에 부식문제는 파이프의 유지 및 보수에 있어 주요한 부분 중 한 가지이다 (Kim, 2014).

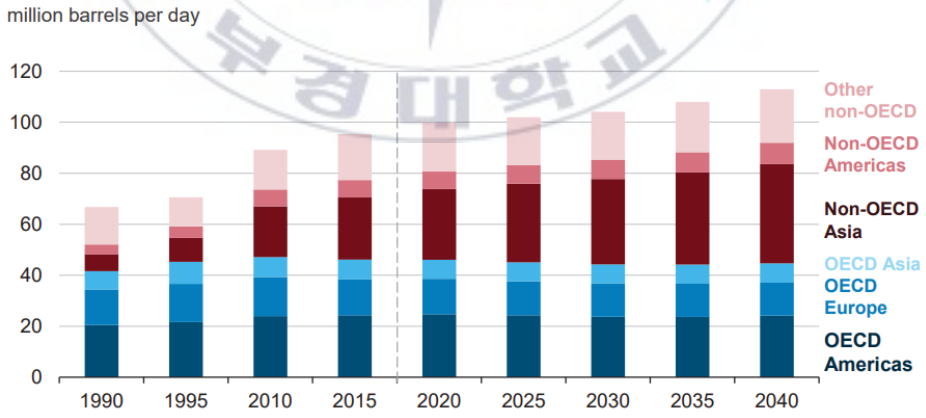


Figure 1 World petroleum and other liquids consumption

이번 연구에 사용된 고망간강의 경우 기존에 사용되던 API 5L 강재들보다 내마모성과 내부식성이 뛰어나고, 가격이 비싼 니켈과 같은 금속 대신 망간의 비율을 늘림으로써 가격 또한 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

심해에서 생산된 해양 자원들의 운송 효율을 높이기 위하여 대구경, 고인성 파이프들의 생산이 요구되고 있다. 대구경 파이프의 생산을 위한 대표적인 공정으로 JCO공정이 있으며, 공정 이름의 유래는 파이프를 생산하는 과정에서 판재의 형상에서 유래되었다. JCO공정은 Figure 2에서 1~4 공정과 같이 판재를 “J”의 형태와 “C”의 형태로 성형하는 공정과 5~7 공정과 같이 용접과 추가성형작업을 통해서 “O”의 형태로 성형하는 공정들로 크게 구성된다. 이렇게 생산되는 JCO파이프의 경우 재료를 고온상태로 유지하여 생산해야 하는 심리스파이프(Seamless pipe) 보다 생산단가가 저렴하다는 장점이 있다.

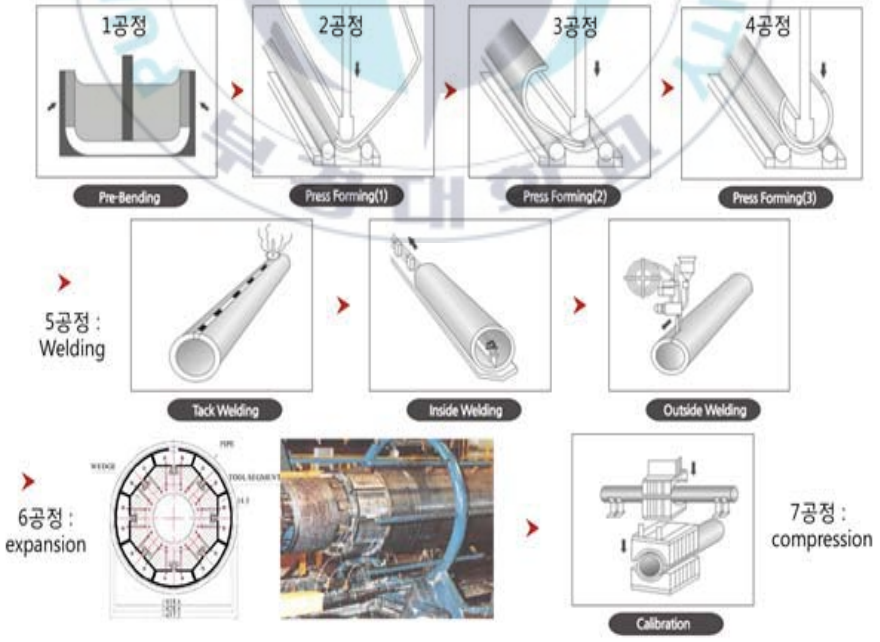


Figure 2 JCO forming process

그리고 JCO공정의 경우 만톤 프레스를 이용하여 수차례의 소성 변형이 일어나는 공정을 거치기 때문에 이러한 냉간성형(cold forming)에 의한 스프링 백 효과(spring-back effect)와 성형을 위해 요구되는 힘들을 예측하기 위하여 수치 시뮬레이션이 요구된다. Gao, 등 (2010)와 Fan, 등 (2016)에 의하면 공정 이후의 굽힘각을 결정짓는 요소는 굽힘을 가하는 펀치(punch)의 가압깊이이다. 또한, 파이프의 강도 및 거동에 영향을 줄 수 있는 인자들은 진원도(ovality), 용접과 소성 변형에 의한 잔류응력(residual stress) 등이 있다.

따라서, 본 연구에서는 고망간강의 인장시험을 통해 얻어진 기계적 특성을 바탕으로, JCO공정의 수치시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 수치시뮬레이션을 통해 발생한 잔류응력을 파이프에 적용하여 굽힘해석을 수행하고, 그 거동을 조사하여 공정을 통해 발생한 잔류응력의 영향을 분석하였다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Ⅱ. 인장강도시험

1. 서론

파이프를 성형하는 과정에서 소성변형은 필연적으로 발생하며, 정확한 재료의 기계적인 성질을 구조거동에 반영하기 위해서는 인장시험을 바탕으로 한 응력-변형률 선도가 요구된다. 따라서 재료시험기를 통하여 인장강도시험을 진행하였으며, 총 5개의 시편을 활용했다.

2. 시험시편

시편은 성형공정 이전의 평판에서 길이방향으로 5개의 시편을 제작하였으며 시편은 평균두께 18mm, 표점거리 50mm로 개별치수는 Table 1에 정리했다.

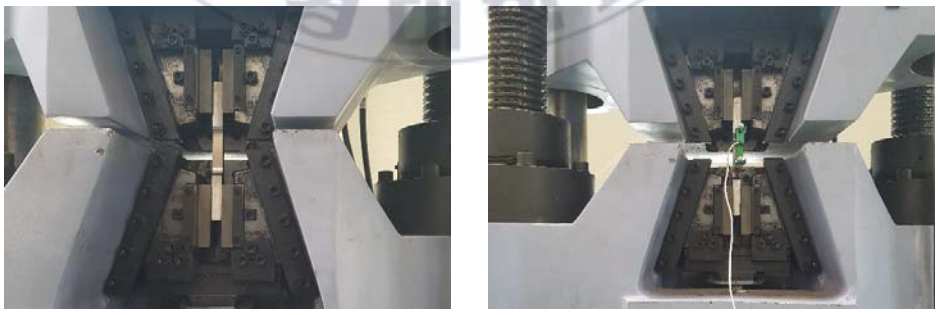
Table 1 Principle dimension of specimens

Data / No.	Specimens			
	Thickness (mm)	Width (mm)	Area (mm^2)	Gage length (mm)
1	18.09	19.24	348.05	50.00
2	18.04	19.21	346.55	50.00
3	17.97	19.30	346.82	50.00
4	18.08	19.15	346.23	50.00
5	18.07	19.15	346.04	50.00
Avg.	18.04	19.20	346.41	50.00
Max.	18.08	19.30	346.04	50.00
Min.	17.97	19.15	346.82	50.00

Figure 3 Tensile test specimens

3. 인장시험

인장시험은 허용하중 1,000kN의 만능재료시험기를 통해 진행하였다. Figure 4에서와 같이 시편의 길이로 인해 전면에 신장계의 설치가 어려워 측면에 설치하였지만, 두께와 폭의 차이가 크지 않아 결과에 크지 않은 영향을 미칠 것으로 판단하였다. 또한, 탄성계수는 포스코(POSCO)에서 제공하는 값인 175GPa으로 0.2% 오프셋 방법을 사용하여 항복응력을 계산하였다.



(a) Before attaching extensometer (b) After attaching extensometer

Figure 4 Tensile test by the universal testing machine

4. 인장시험결과

시험 전 Figure 5에서와 같이 1번 시편에서 균열이 발견되었으며, 이로 인하여 다른 시편에 비하여 상대적으로 짧은 연신율(27.40%)을 보였다. 따라서 실제 해석에서는 1번 시편의 결과를 제외한 나머지 2-5번 시편의 평균과 가장 유사한 항복응력과 신장률을 가지는 2번 시편의 결과를 실제 해석에 사용하였다. 각 시편의 인장시험의 결과는 Table 2에 나타내었다. 실제 구조해석에 사용된 2번 시편의 인장시험 결과를 통해 진응력-진변형률 선도를 계산하였으며 Figure 6에 나타내었다.

Figure 5 Defect on No.1 specimen

Table 2 The results of tensile test

Data / No.	Specimens		
	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
1	535.86	850.87	27.40
2	548.46	930.88	57.23
3	536.30	922.67	55.69
4	547.49	930.22	54.65
5	542.82	935.36	58.03
Avg.	543.77	929.78	56.40

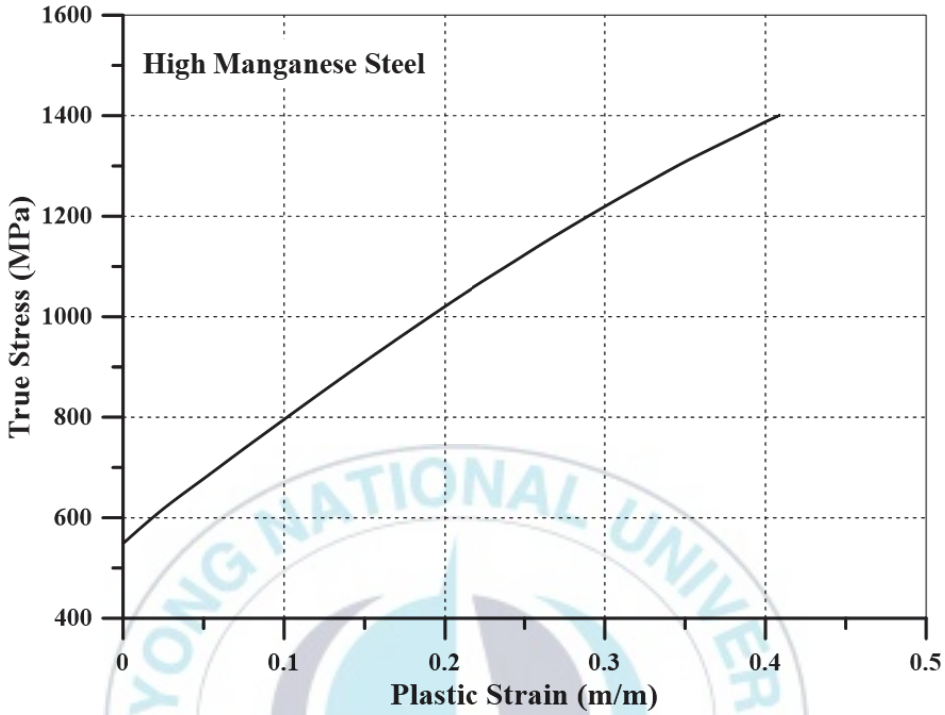


Figure 6 True stress-strain curves

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Ⅲ. JCO공정해석

1. JCO공정해석

대구경, 고인성 해양파이프를 효율적으로 생산하기 위하여 주로 선택되는 공정 중 한 가지는 JCO공정이다. JCO(E) 공정은 Figure 7에서와 같이 판재의 끝 부분을 굽혀 “J”의 형태로 만들어주는 초기공정(pre-bending process)과 펀치로 수차례 가압하여 “C”의 형태로 만들어주는 가압공정(punching process), 다듬기 및 용접을 통해서 “O”의 형태를 만들어주는 공정과 마지막으로 확장공정(expansion process)을 이용하여 불완전한 형태의 파이프를 완전한 원의 형태로 만들어주는 공정들을 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 두께를 가지는 판재를 초기공정과 가압공정을 통해서 목표직경인 OD533의 파이프를 만들기 위한 펀치의 가압깊이와 성형을 위해 요구되는 힘을 상용프로그램인 ANSYS workbench를 이용하여 구조 시뮬레이션을 수행하였다 (ANSYS Inc., 2018).

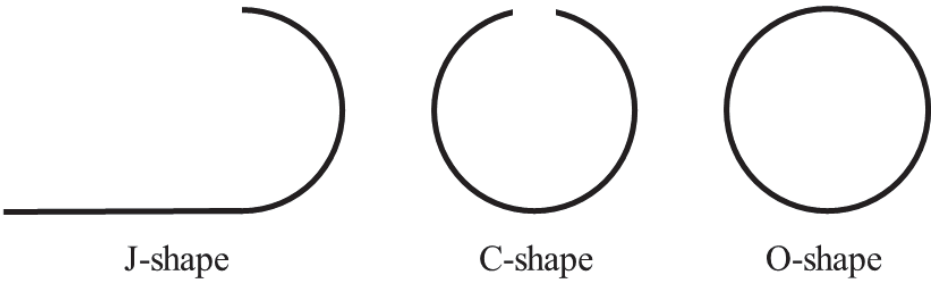
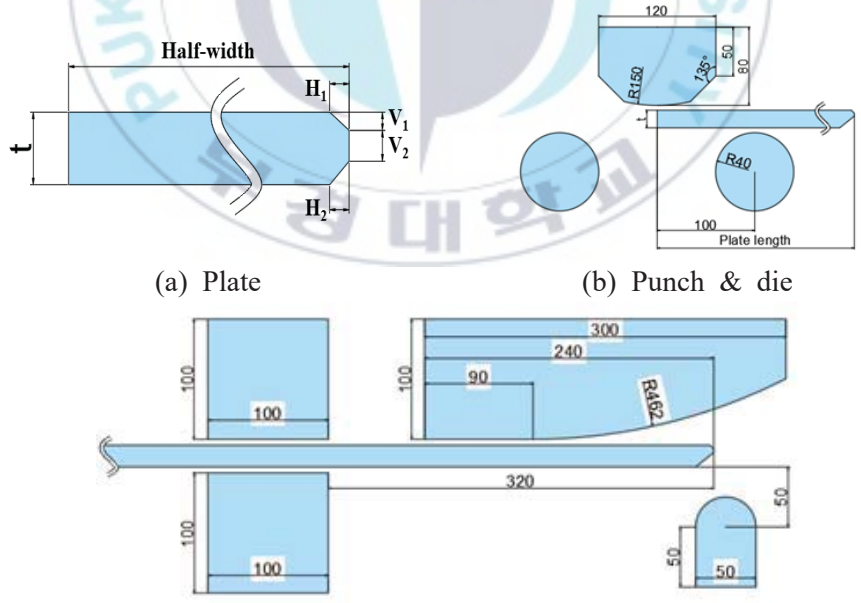


Figure 7 JCO forming process

2. 2차원 성형공정해석

가. 서론

JCO공정을 유한요소해석에서 구현하기 위해 기하학적인 형상을 Figure 8과 같이 성형공정의 대상이 될 판재, 가압공정을 수행하기 위한 펀치와 다이(die), 초기공정을 수행하기 위한 클램핑(clamping)과 크림핑(crimping)으로 구성하였으며, 판재를 제외한 세부제원들은 실제 공정 장비를 바탕으로 모델링했다. 판재의 경우 파이프의 대칭성을 고려하여 1/2모델을 사용하였으며, 용접비드를 위치시키기 위해 끝단을 일정부분 절단 하였다.



(a) Plate (b) Punch & die

(c) Clamping & crimping

Figure 8 Principle dimension for JCO forming process

공정시뮬레이션을 통해 외부직경(D_{req}=533mm)의 형상을 얻기 위해 판재의 폭(W)의 길이를 Figure 9과 같이 중립축이 중앙에 위치한다는 가정 하에 계산을 하였다. 판재의 길이와 절단된 단면들에 관한 제원들은 Table 3에 정리하였다.

$$\frac{W}{2} = \frac{(D_{req} - t)\pi}{2} \tag{1}$$

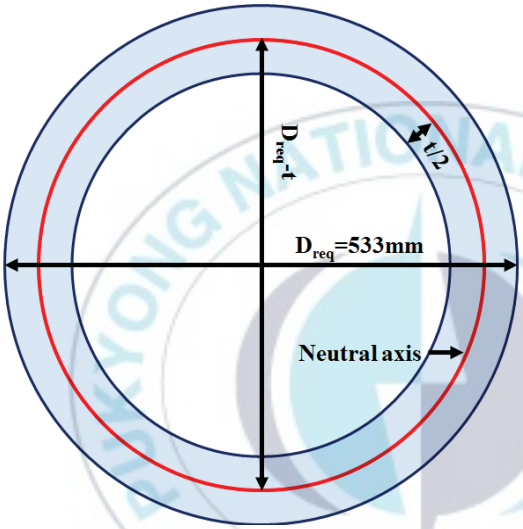


Figure 9 Neutral axis on the cross section of the pipe

Table 3 Principle dimension of plates (unit: mm)

t	L	W/2	H_1	H_2	V_1	V_2
18.0	12000.0	810.0	3.0	15.0	3.0	3.0
25.0	12000.0	797.5	6.0	15.0	6.0	7.0
30.0	12000.0	790.0	9.0	15.0	9.0	9.0
35.0	12000.0	782.0	12.0	15.0	12.0	11.0
40.0	12000.0	774.0	15.0	15.0	15.0	13.0
45.0	12000.0	766.0	15.0	15.0	15.0	15.0
50.0	12000.0	758.0	17.0	17.0	17.0	17.0

나. 유한요소모델

2차원 요소를 활용하여 Figure 10와 같이 판재 및 금형들을 모델링했다. 유한요소해석에서 요소의 크기를 작게 하면 보다 정확한 해에 수렴하지만, 이에 따른 절점의 수와 미지변수의 수가 함께 증가하기 때문에 더 많은 계산 시간이 소요된다. 효율적인 계산시간을 가지면서 오차범위를 줄일 수 있는 요소크기를 산정하기 위해 수렴성조사가 요구되지만 2차원 모델의 경우 계산시간 차이가 크지 않아서 10mm의 크기로 모델링하였으며, 곡선부는 보다 세밀하게 구성하여 접촉조건에서의 해석수렴이 원활하게 했다.

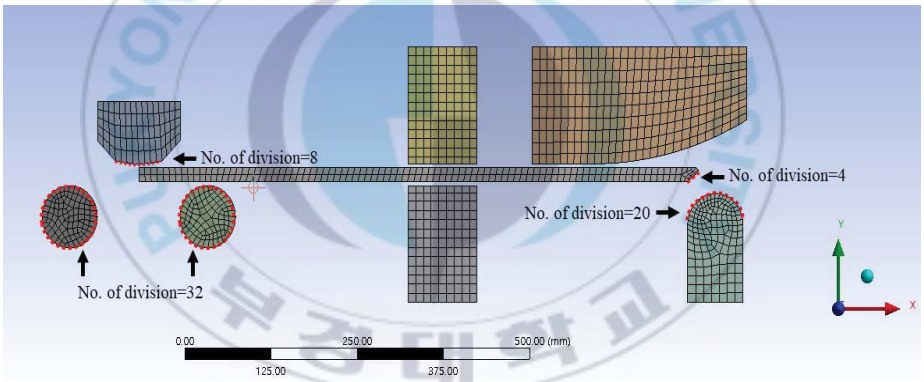


Figure 10 Overall modeling for 2D analysis

다. 하중 및 경계조건

본 연구를 통해 시뮬레이션 했던 JCO공정은 크게 두 단계로 나뉘며, 초기공정과 가압공정이다. 초기공정의 경우 Figure 11에 보이는 클램핑을 이용하여 판재를 고정하고 크림핑을 이용하여 판재의 끝부분을 성형하는 역할을 수행한다. 공정 수행 시 판재의 왼쪽 끝단의 x방향 변

위는 고정되며, 상하부의 클램프과 상부의 크림프는 판재에 밀착 후 고정된다. 그리고 하부의 크림프를 y방향으로 수직이동 하여 초기굽힘을 수행한다.

가압공정의 경우에는 Figure 12에 보이는 판재에 펀치를 수차례 가압하여 곡률을 구현하는 공정으로써, 초기굽힘이 구현된 모델을 펀치의 중앙 위치로 수평이동 하여 다이를 모든 방향의 변위에 대해 고정하고 펀치를 수직방향으로 이동시켜 판재를 가압한다. 판재의 왼쪽끝단의 x 방향 변위를 50mm씩 수평이동 하여 판재의 가압위치를 제어한다.

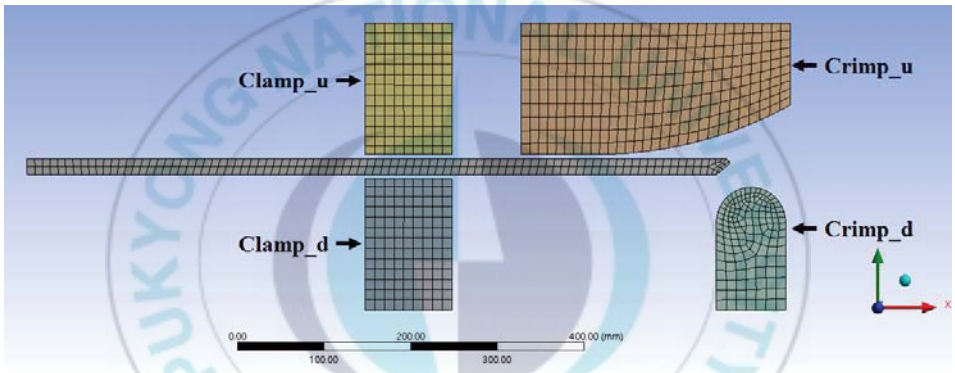


Figure 11 Pre-bending process

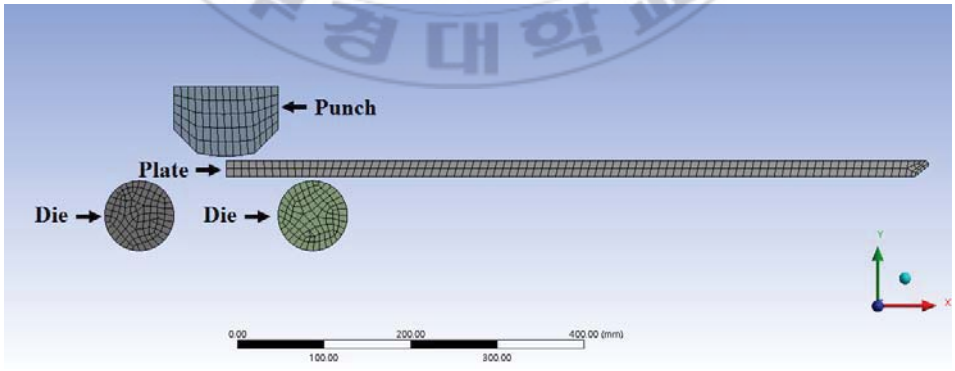


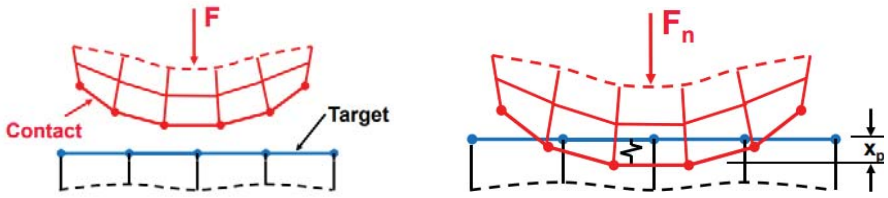
Figure 12 Punching process

라. 접촉영역

JCO공정은 각각의 금형들이 판재와 접촉하여 일어나는 공정이기에 접촉영역을 정의하지 않는다면 해석을 진행할 경우 Figure 13와 같이 요소의 침투가 발생하게 된다. 이때 요소의 침투 이후에 침투량과 강성에 비례하여 반력이 결정되고 변형이 일어나는 형식으로 반복계산이 수행된다. 이러한 접촉을 정의하기 위하여 접촉구역(contact region)을 설정하였다. 접촉구역의 설정을 위해 Workbench에서 제공하는 접촉정의는 Table 4에 정리하였으며 모든 조건에서 동일하게 “frictionless”를 사용했다.

Table 4 Types of contact regions

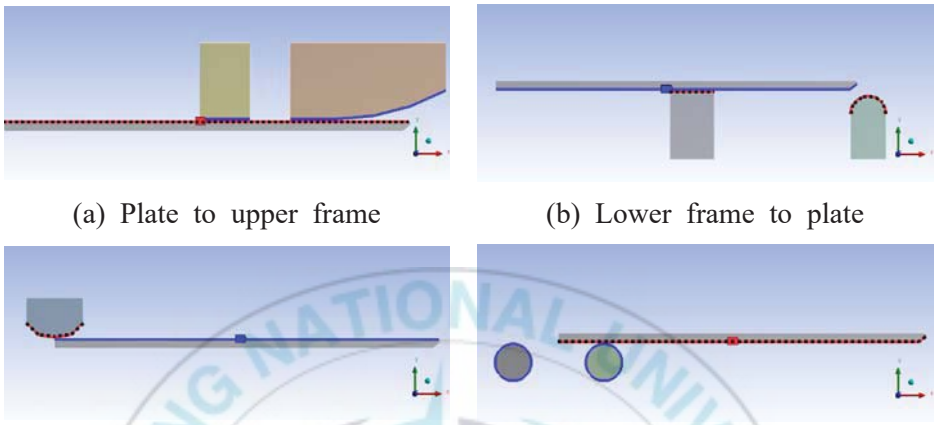
Types	Description
Bonded	용접 또는 완전 접착과 같은 접촉상태
No separation	접촉면 방향의 작은 슬라이딩 허용
Frictionless	하중에 따라 접촉간격이 변할 수 있고, 마찰계수가 0에 가까워 슬라이딩을 허용
Rough	분리 상태도 가능하며 접촉면의 마찰계수가 무한대로 슬라이딩 불가
Frictional	마찰계수를 입력하는 비선형 접촉정의
Spot weld	surface 모델인 경우, 정점에 대해서 스폿 용접 정의



(a) Before penetration (b) After penetration

Figure 13 Penetration on the contact region

접촉조건은 판재 및 금형의 왼쪽 끝 부분을 contact(점선)과 target(실선)으로 Figure 14과 같이 정의하며, 수렴성을 고려하여 normal stiffness factor를 Table 5와 같이 조정하였다.



(a) Plate to upper frame (b) Lower frame to plate

(c) Punch to plate (d) Plate to die

Figure 14 Definitions of contact conditions

Table 5 Normal stiffness factor

t (mm)	Plate to upper frame	Lower frame to plate	Punch to plate	Plate to die
18.0	0.01	0.01	0.002	0.002
25.0	0.01	0.01	0.001	0.001
30.0	0.01	0.01	0.001	0.001
35.0	0.01	0.01	0.002	0.002
40.0	0.01	0.01	0.001	0.001
45.0	0.01	0.01	0.002	0.002
50.0	0.01	0.01	0.002	0.002

마. 공정시뮬레이션

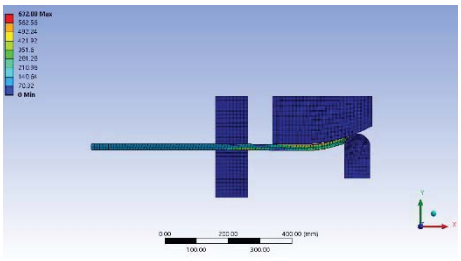
초기공정은 금형의 밀착, 가압, 이완으로 3단계로 구성되며 가압공정은 판재의 이동, 펀치의 가압, 이완의 3단계로 구성되며 가압횟수만큼 반복된다. 두께 별 가압 횟수와 위치가 다르므로 Tables 6-7 및 Figure 14에 과정을 요약했다.

Table 6 y displacement of crimp_d and x displacement of plate

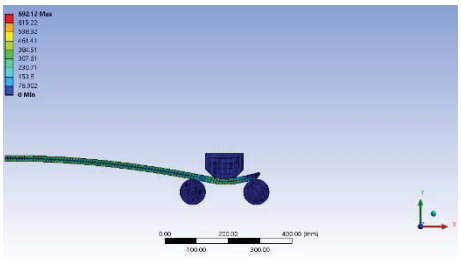
t	Pre-Bending	x displacement of plate						
		1	2	3	4	5	6	7
18.0	65.0	690.0	662.5	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5
25.0	63.0	690.0	662.5	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5
30.0	62.0	690.0	662.5	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5
35.0	59.0	662.5	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5	362.5
40.0	58.0	662.5	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5	362.5
45.0	58.0	645.0	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5	362.5
50.0	58.0	640.0	612.5	562.5	512.5	462.5	412.5	362.5

Table 7 x displacement of plate

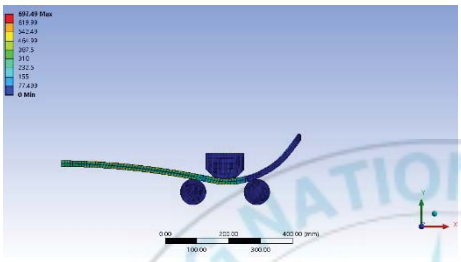
t	x displacement of plate							
	8	9	10	11	12	13	14	15
18.0	362.5	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5
25.0	362.5	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5
30.0	362.5	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5
35.0	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5	-
40.0	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5	-
45.0	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5	-
50.0	312.5	262.5	212.5	162.5	112.5	62.5	12.5	-



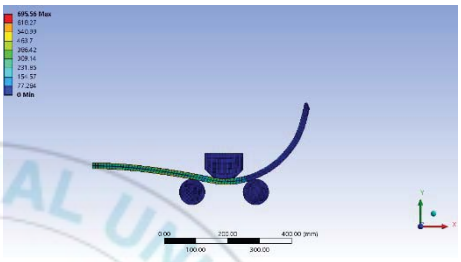
(a) Pre-bending



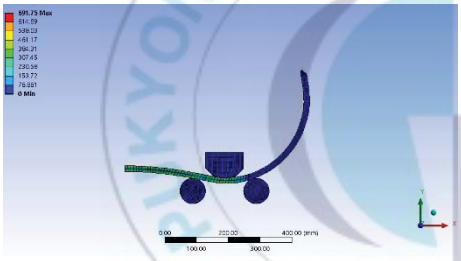
(b) Punching-1



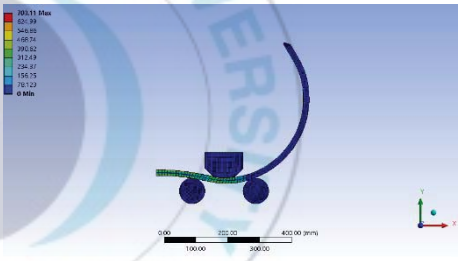
(c) Punching-3



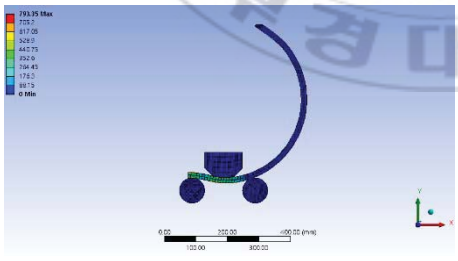
(d) Punching-5



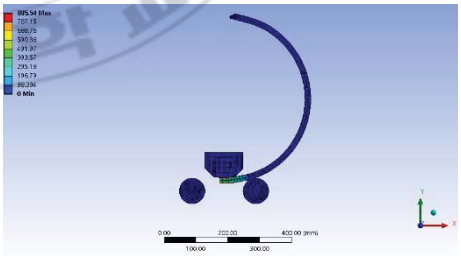
(e) Punching-8



(f) Punching-11



(g) Punching-13



(h) Punching-15

Figure 15 2D analysis of JCO forming process

바. 곡률계산

성형된 파이프의 곡률을 계산하기 위하여, Figure 16와 같이 임의의 세 점을 선택하여 세 점을 지나가고 중심의 x 좌표가 a이고 y 좌표가 b인 원의 방정식을 구성하는 방법으로 곡률반지름(r)과 곡률(κ)을 정의하였다.

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \tag{2}$$

$$a=\frac{(x_3+x_2)(x_3-x_2)+(y_3+y_2)(y_3-y_2)-2b(y_3-y_{2)}}{2(x_3-x_2)} \tag{3}$$

$$b=\frac{\begin{array}{r}(x_3-x_2)(x_2-x_1)(x_3-x_1)+(y_3+y_2)(y_3-y_2)(x_2-x_1)\\-(y_2+y_1)(y_2-y_1)(x_3-x_2)\end{array}}{2(y_3x_2-y_3x_1+y_2x_1-y_2x_3+y_1x_3-y_1x_{2)}} \tag{4}$$

$$r=\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2)} \tag{5}$$

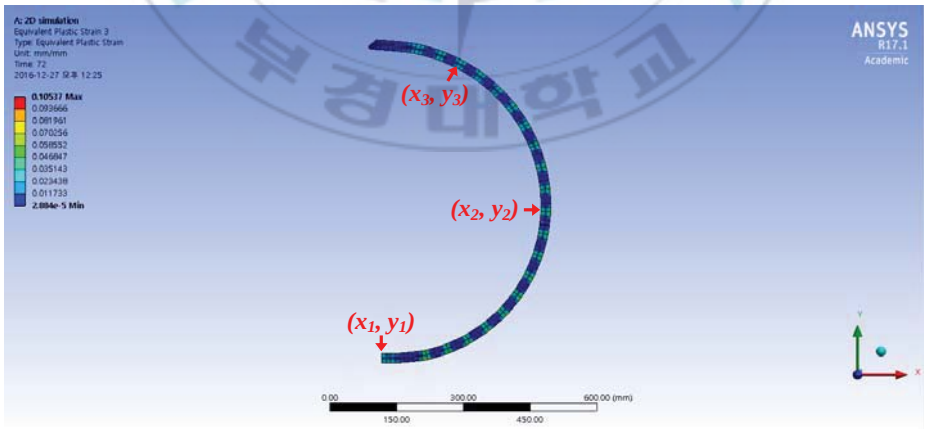
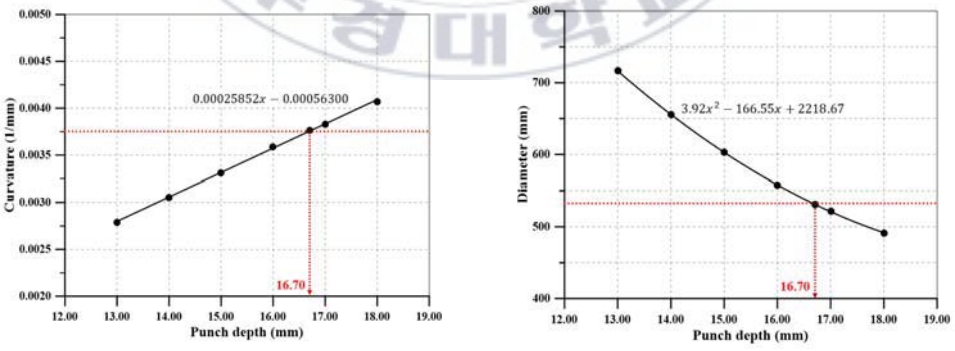


Figure 16 Three points for estimating curvature

가압깊이(펀치의 y방향 수직이동변위)를 변화시켜가며 목표직경을 탐색하였으며, 정확한 값을 도출하기 위하여 2종류(곡률, 직경)에 대해 검토했다. 해석결과 곡률은 1차, 직경은 2차 다항식으로 추산식이 제시되었으며, 이를 통해 계산된 수직방향의 변위제어값은 Table 8에 정리했다. 최종적으로는 13~18mm의 변위제어를 수행했으며, 두께별 변위제어에 따른 곡률과 직격의 추산식 및 변위제어값들을 Figures 17-23에 나타냈다.

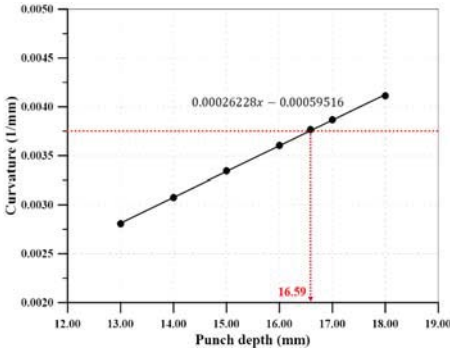
Table 8 Required y displacement of punch and force for OD533

t (mm)	y displacement (mm)	D (mm)	κ (1/mm)	Differential (%)	Force (N)
18.00	16.70	531.19	0.003765	0.33	2227
25.00	16.59	531.14	0.003765	0.34	4528
30.00	16.25	532.13	0.003758	0.16	7053
35.00	16.49	530.32	0.003772	0.50	10408
40.00	16.22	529.60	0.003776	0.64	14557
45.00	16.83	531.53	0.003762	0.28	18724
50.00	16.92	532.36	0.003756	0.12	22990

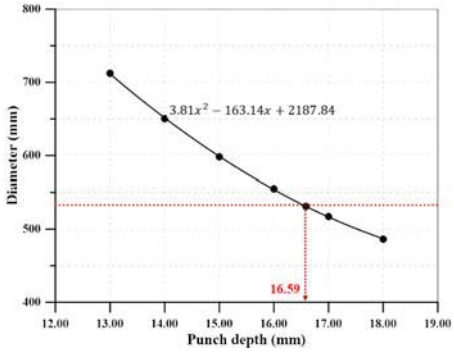


(a) Displacement versus curvature (b) Displacement versus diameter

Figure 17 Curvatures and diameters after analysis (18t)

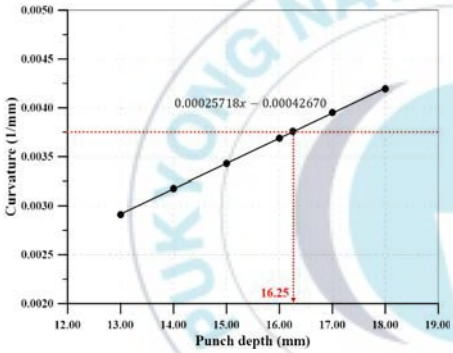


(a) Displacement versus curvature

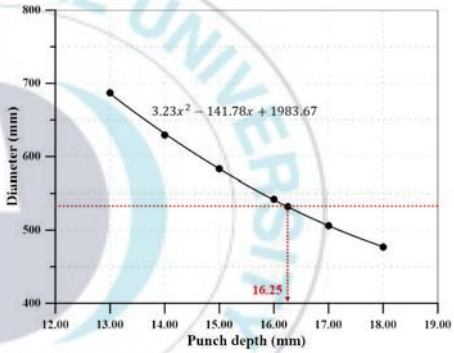


(b) Displacement versus diameter

Figure 18 Curvatures and diameters after analysis (25t)

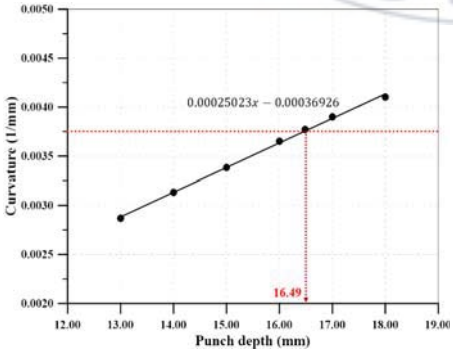


(a) Displacement versus curvature

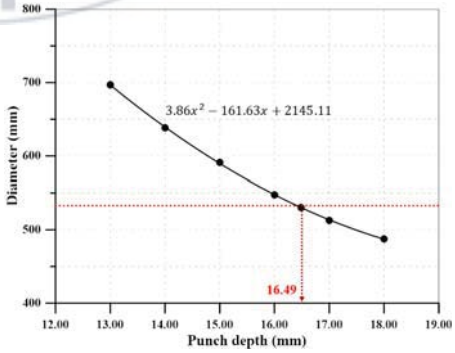


(b) Displacement versus diameter

Figure 19 Curvatures and diameters after analysis (30t)

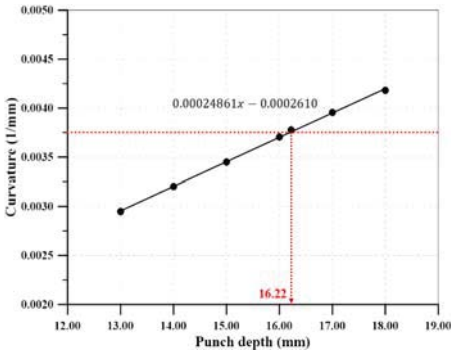


(a) Displacement versus curvature

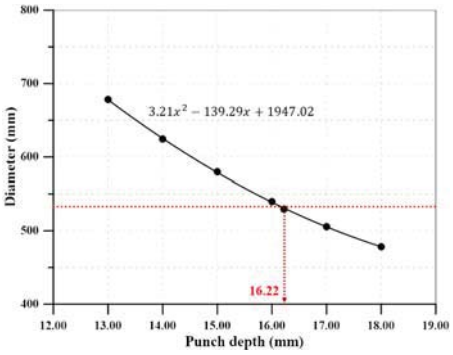


(b) Displacement versus diameter

Figure 20 Curvatures and diameters after analysis (35t)

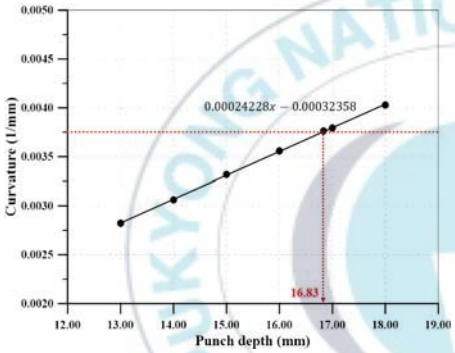


(a) Displacement versus curvature

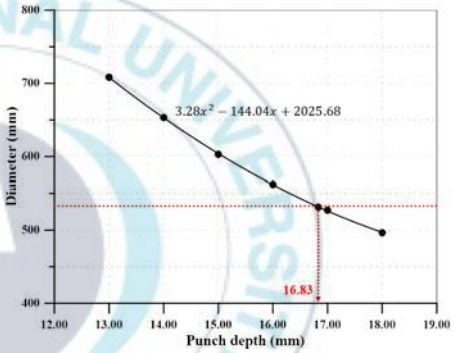


(b) Displacement versus diameter

Figure 21 Curvatures and diameters after analysis (40t)

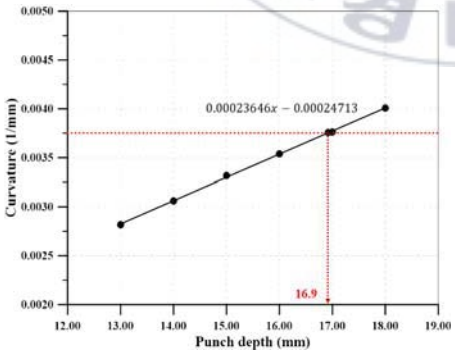


(a) Displacement versus curvature

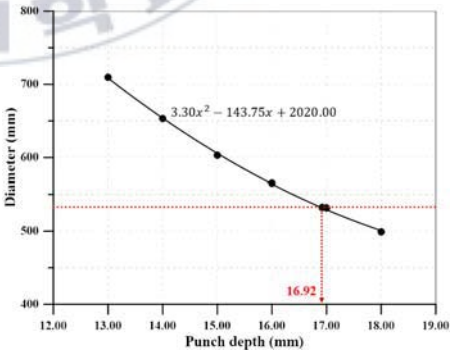


(b) Displacement versus diameter

Figure 22 Curvatures and diameters after analysis (45t)



(a) Displacement versus curvature



(b) Displacement versus diameter

Figure 23 Curvatures and diameters after analysis (50t)

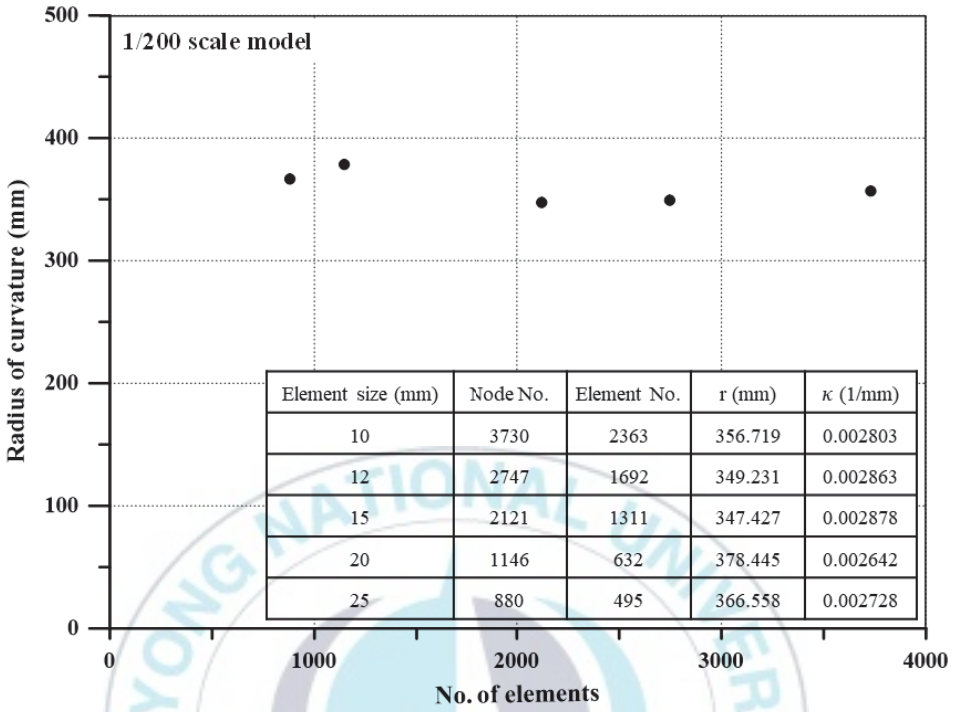
3. 3차원 성형공정해석

가. 서론

3차원 성형공정해석은 2차원 모델과 동일한 모델을 사용하였으며, 길이방향으로 돌출하여 공정시뮬레이션을 수행하였다. 비선형변형이 일어나는 판재의 경우는 Solid185(8-node bricks)를 사용하였고, 강체로 가정한 금형의 경우에는 접촉면의 형상을 Shell181(4-node shell)을 사용하여 모델링하였다. 길이방향에 따라 동일한 힘을 가지고 성형됨에 따라 길이방향에 대하여 응력 및 변형률이 균일하게 분포될 것으로 예상되며, 요소의 크기가 매우 세밀하기 때문에 해석에 소요되는 시간이 방대할 것으로 예상되어 축소모델(L=100mm)로 대체했다.

나. 수렴도조사

3차원 모델의 경우 요소의 개수가 요소의 크기에 따라 급증함에 따라 효율적인 계산시간을 가지면서 오차범위를 줄일 수 있는 요소크기를 탐색했다. 판재의 경우 성형가공을 위해 최대한 세밀한 요소가 필요하며, 가압하는 펀치 또한 접촉요소의 수렴을 위해 판재의 요소크기와 상응하는 크기가 요구된다. 요소크기 결정을 위해 길이방향의 축소모델(L=60.1mm)을 사용하였으며, 총 5개의 모델에 대해 곡률과 곡률반지름을 조사하였으며, 최종적으로 해석시간과 결과를 종합하여 12mm로 요소크기를 결정하였다. 수렴도조사의 결과는 Figure 24에 정리하였다.



Element size (mm)	Node No.	Element No.	r (mm)	κ (1/mm)
10	3730	2363	356.719	0.002803
12	2747	1692	349.231	0.002863
15	2121	1311	347.427	0.002878
20	1146	632	378.445	0.002642
25	880	495	366.558	0.002728

Figure 24 The results of mesh size study

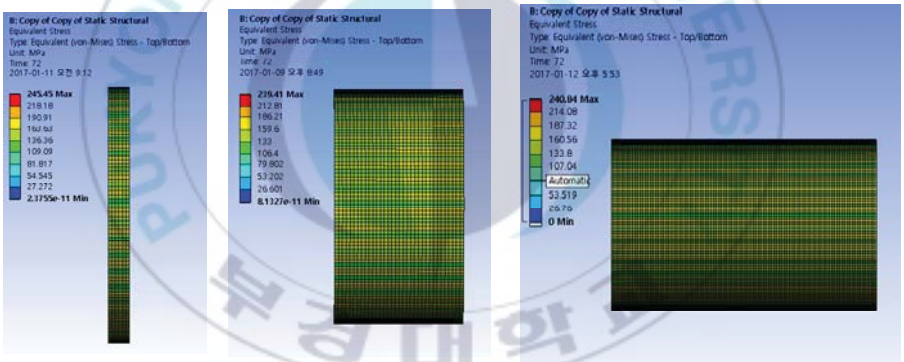
다. 길이에 대한 영향조사

12mm의 요소크기로 실제 파이프의 길이(L=12,026mm)를 유한요소모델을 생성할 경우 약 30만개의 요소가 필요하지만 공정시뮬레이션의 경우 가공과정을 묘사하기 위해 다중스텝을 수행하기 때문에 지나치게 긴 해석시간이 예상되었다. 하지만 길이방향으로는 균등한 구조응답이 예상되기 때문에 모델을 축소하면서도 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 3차원 모델의 길이에 대한 영향을 조사하였다. 길이방향으로 총 6가지의 경우를 검토하였으며, 응력분포는 길이가 길어질수록 커지는 경향을 보였지만 그 크기는 미미하였으며, 곡률과 곡률반지름도 오차범위 0.5%내외를 보였으므로 파이프의 길이(L=100mm)를 고정하고 대

칭조건을 사용하였다. 판재의 길이별 요소 개수와 결과 값들은 Table 9에 정리하였으며, 응력분포는 Figure 25와 같다.

Table 9 The results of pipe length study

Scale factor	L (mm)	Node No.	Element No.	r (mm)	κ (1/mm)
5	2405.2	82958	61453	347.509	0.002878
10	1202.6	38562	27665	347.516	0.002878
20	400.9	15435	11390	349.523	0.002861
50	240.5	9702	7035	349.101	0.002865
100	120.3	5292	3685	349.230	0.002863
200	60.1	2747	1692	349.231	0.002863



(a) L=60.13mm (b) L=400.9mm (c) L=1202.6mm

Figure 25 Equivalent stress after JCO forming process

라. 공정시뮬레이션

2차원 해석과 동일한 가압깊이로 구조해석을 수행하였다. 해석결과 파이프의 직경 및 공정에 필요한 최대 힘의 크기가 2차원 해석과 비교하여 12% 이내의 오차를 가지며, 각 두께별 해석 결과는 Table 10에 정리하였다. 이때 반력의 경우는 파이프성형에 필요한 단위길이 당 필요한 힘으로 나타내었다. 3차원 해석에 사용된 모델과 해석절차는 Figures 26-27에 나타내었다.

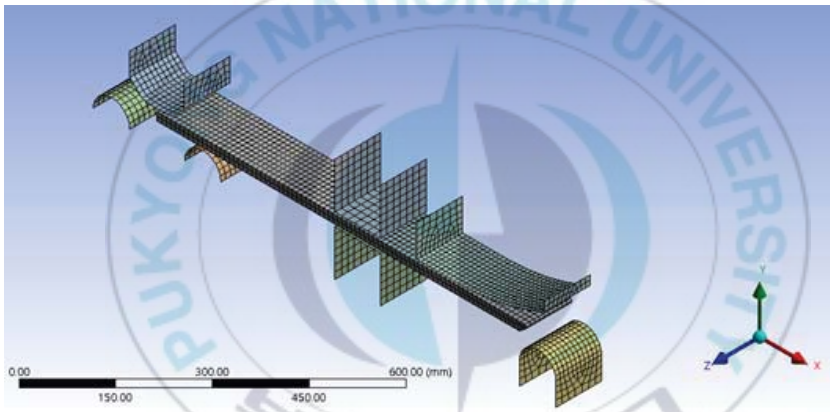
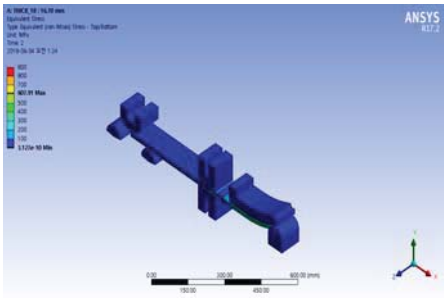


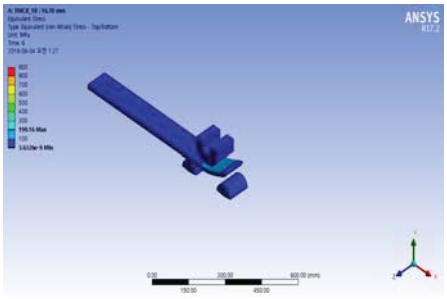
Figure 26 Overall modeling for 3D analysis

Table 10 The results of 3D analysis

t (mm)	Diameter (mm)	Differential (%)	Reaction force (N/mm)		
			2D	3D	Differential (%)
18.00	533.76	0.48	2227	2243	0.72
25.00	532.63	0.28	4528	4779	5.55
30.00	532.84	0.03	7053	7697	8.36
35.00	529.60	0.14	10408	11159	7.22
40.00	532.80	0.04	14557	15107	3.64
45.00	533.05	0.01	18724	19728	5.09
50.00	535.14	0.40	22990	26093	11.89



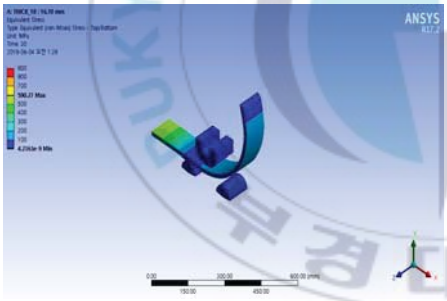
(a) Pre-bending



(b) Punching-1

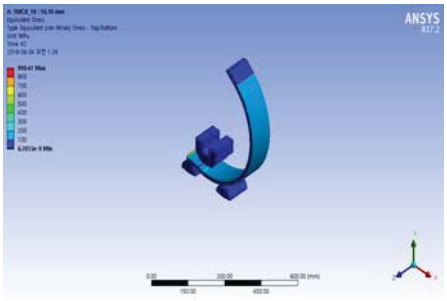
(c) Punching-3

(d) Punching-5

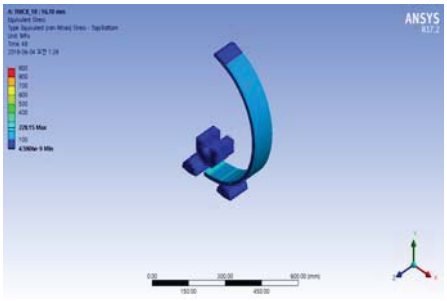


(e) Punching-9

(f) Punching-11



(g) Punching-13



(h) Punching-15

Figure 27 3D analysis of JCO forming process

2차원과 3차원 성형공정해석에서 각 두께별 필요한 단위길이 당 힘은 Figure 28에서 비교하였다. 2차원 요소보다 3차원 요소로 해석할 경우 조금 더 변형이 적게 일어나는 경향이 있으며, 후판으로 갈수록 두 가지 요소의 차이로 인한 전단잠금(shear locking)현상이 나타나 3차원 요소에서 굽힘이 적게 발생함에 따라 요구되는 힘이 2차원 요소로 해석할 때 보다 크게 예측되었다고 판단하였다.

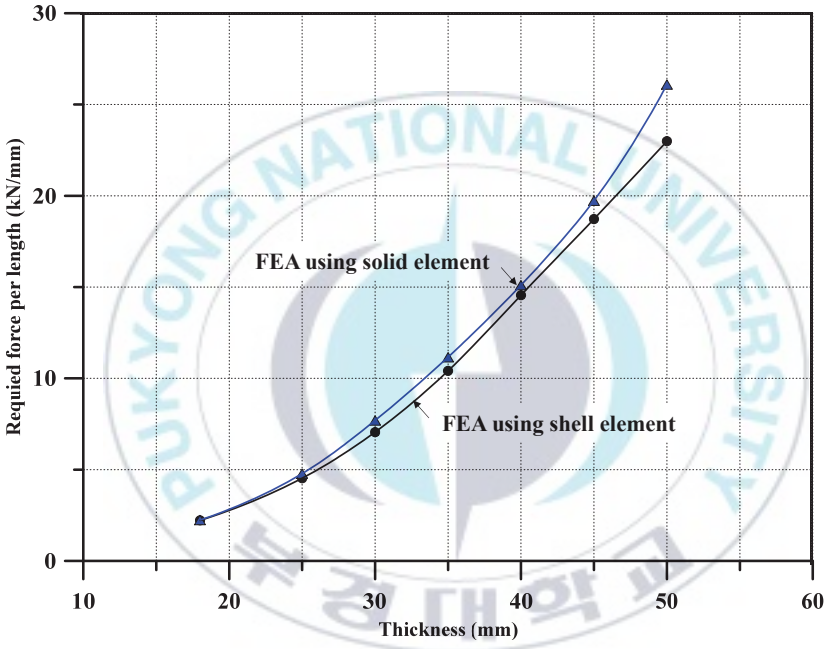
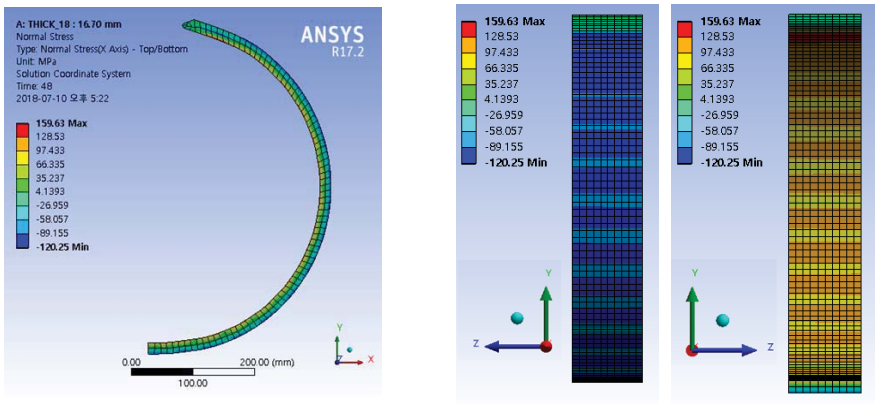
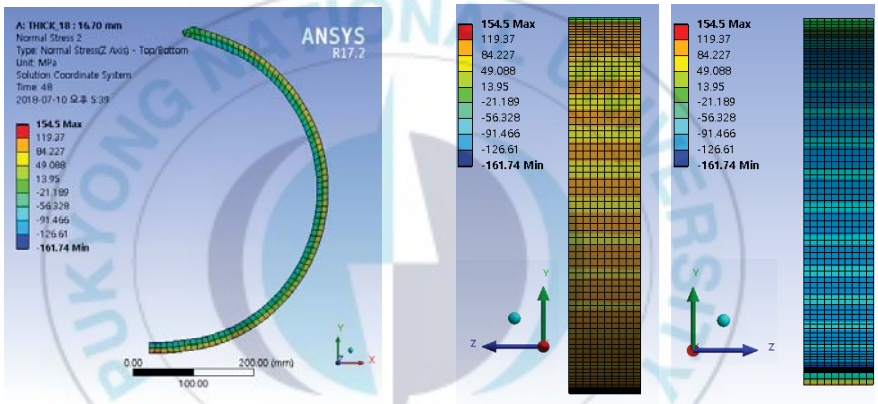


Figure 28 Comparison of the results of forming analysis by element types

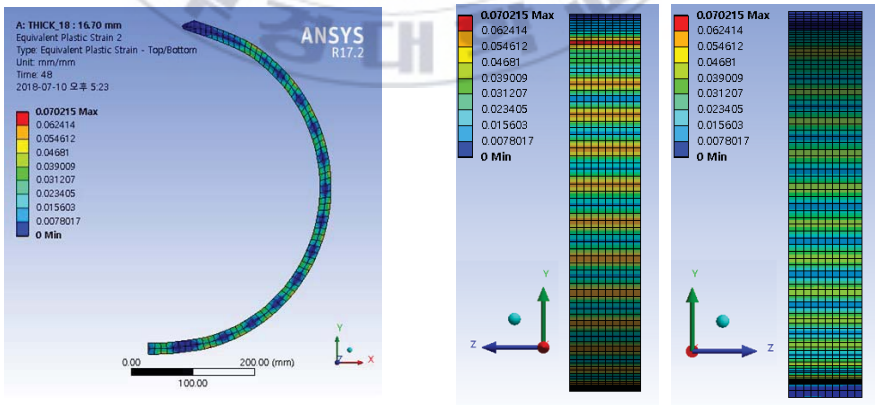
Figures 29-35는 두께별 성형공정 완료 후 원주 및 길이방향의 잔류응력과 소성변형률이다. 모든 응력은 절점을 공유하는 절점응력들의 평균값을 이용하여 나타내었으며, 두께별 요소개수에 따라 상이한 결과를 보인 경우도 있었다.



(a) Circumferential residual stress

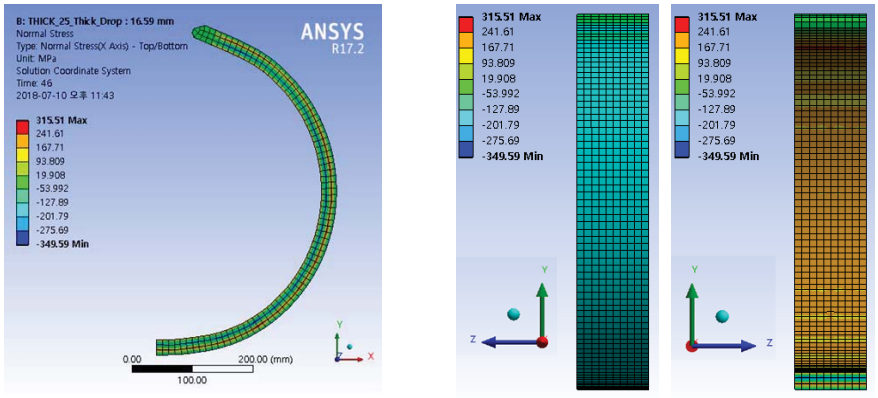


(b) Longitudinal residual stress

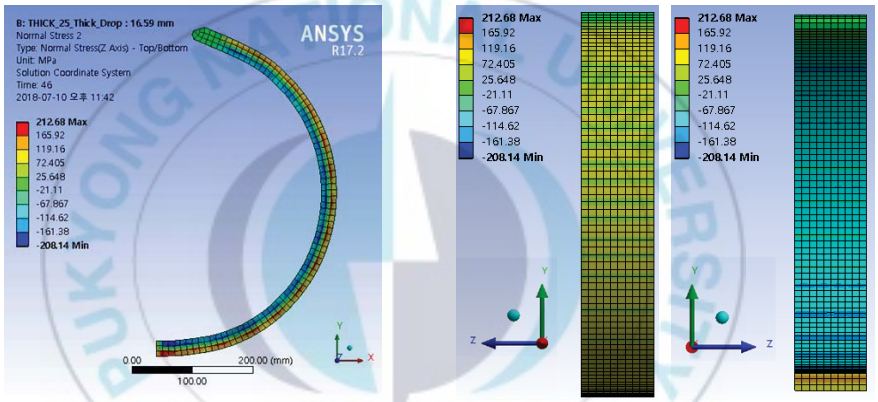


(c) Equivalent plastic strain

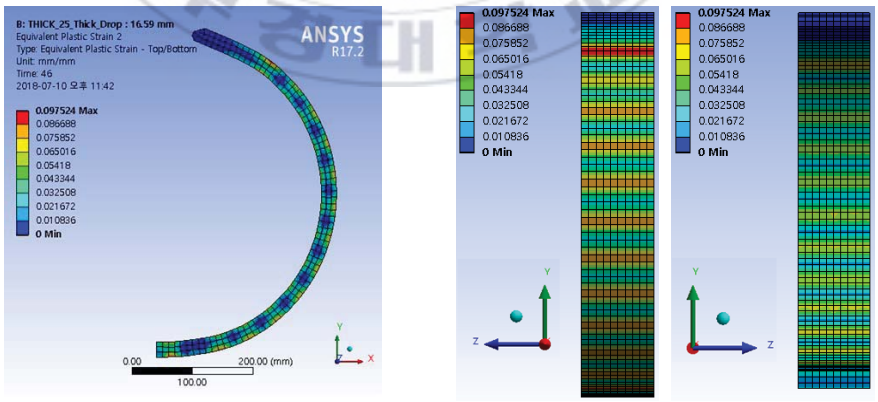
Figure 29 The results of 3D analysis (18t)



(a) Circumferential residual stress

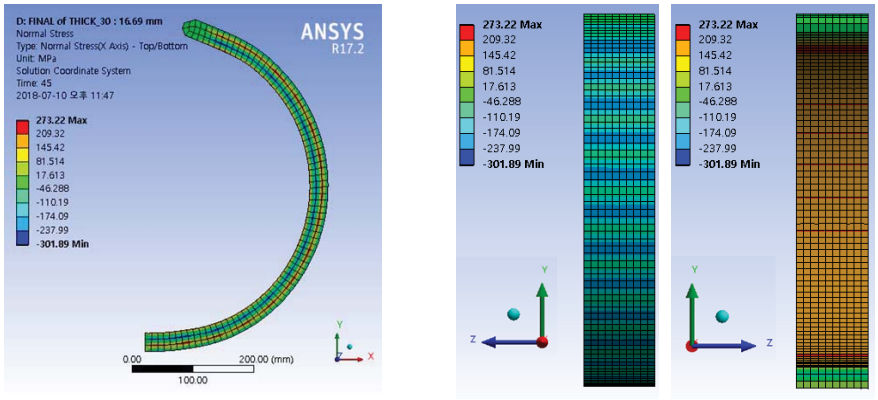


(b) Longitudinal residual stress

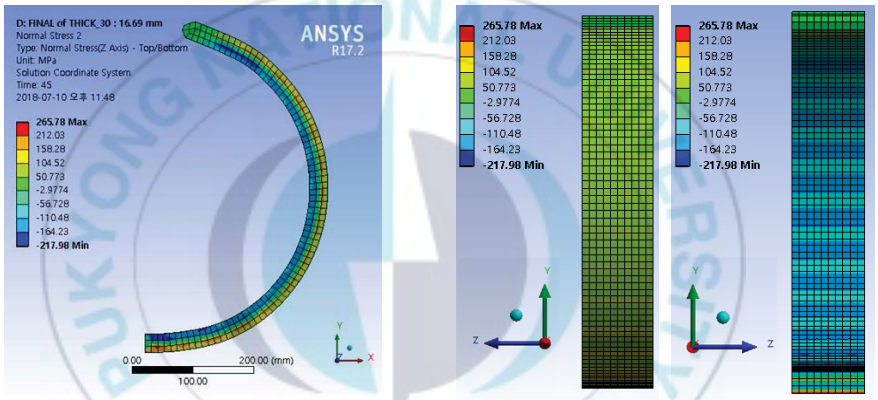


(c) Equivalent plastic strain

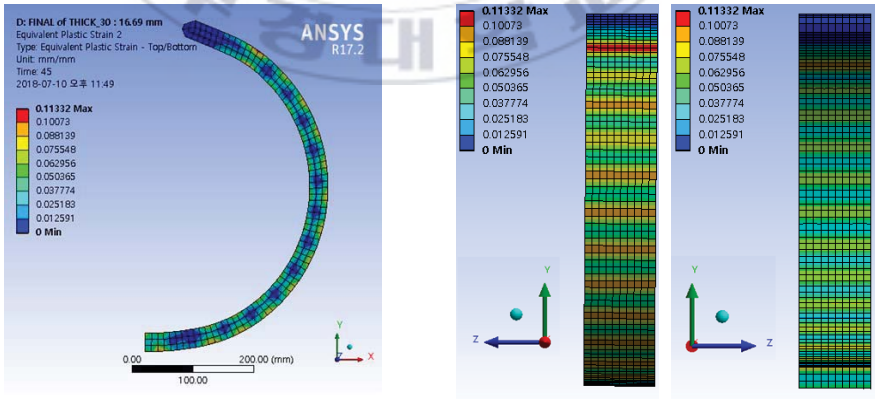
Figure 30 The results of 3D analysis (25t)



(a) Circumferential residual stress

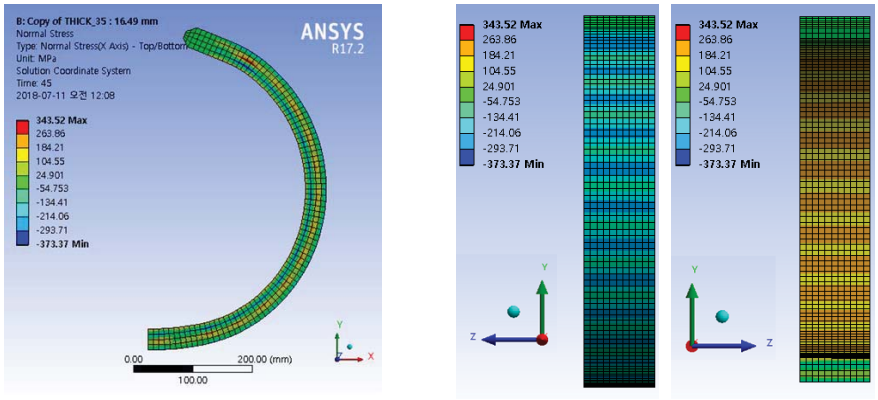


(b) Longitudinal residual stress

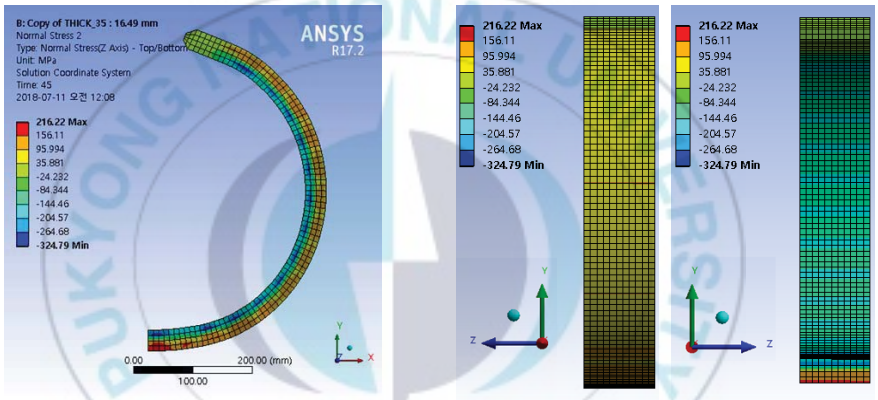


(c) Equivalent plastic strain

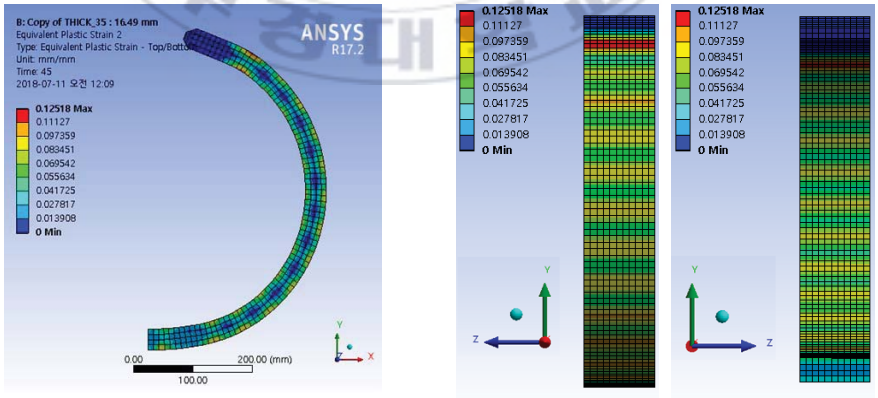
Figure 31 The results of 3D analysis (30t)



(a) Circumferential residual stress

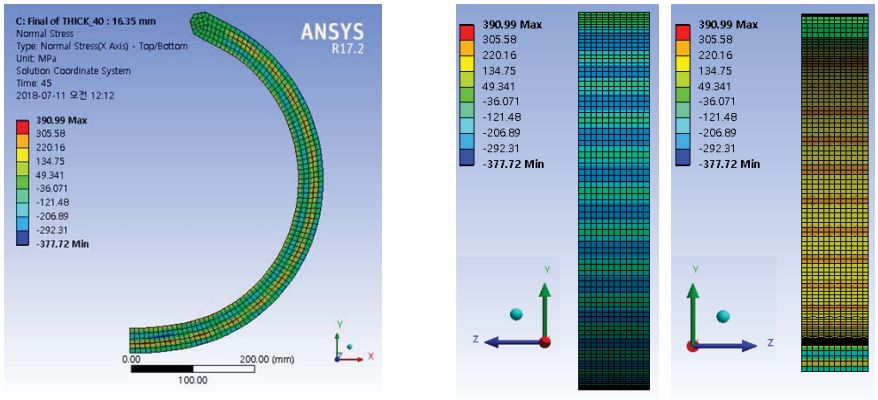


(b) Longitudinal residual stress

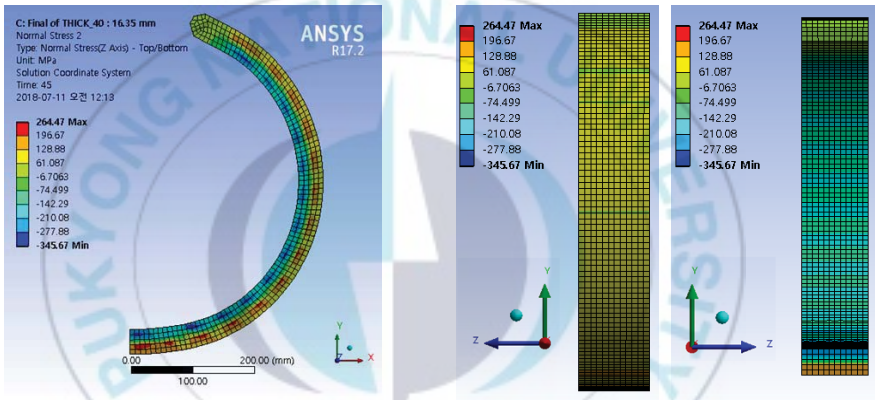


(c) Equivalent plastic strain

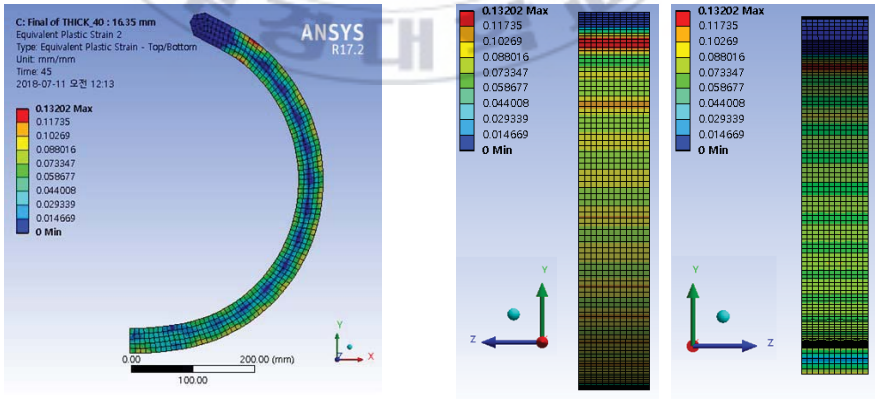
Figure 32 The results of 3D analysis (35t)



(a) Circumferential residual stress

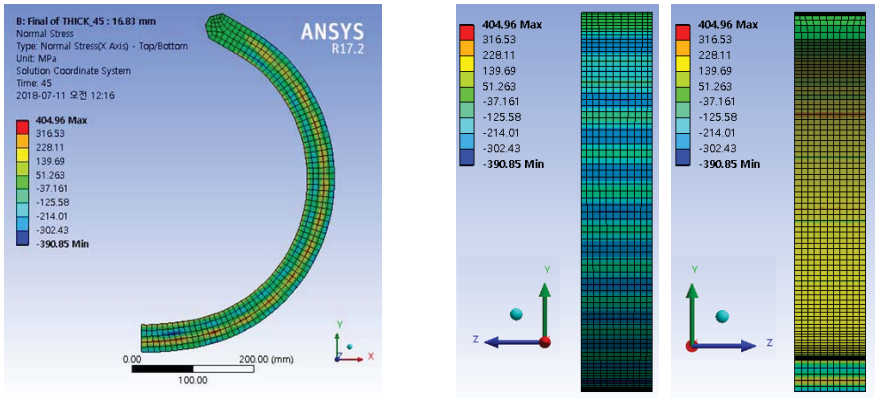


(b) Longitudinal residual stress

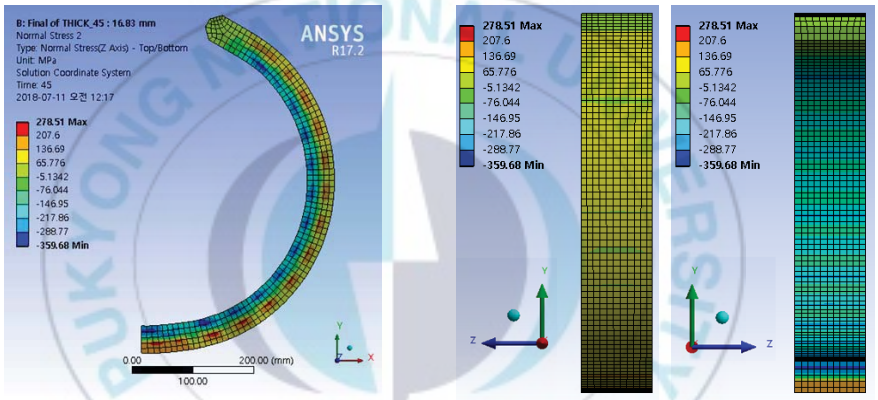


(c) Equivalent plastic strain

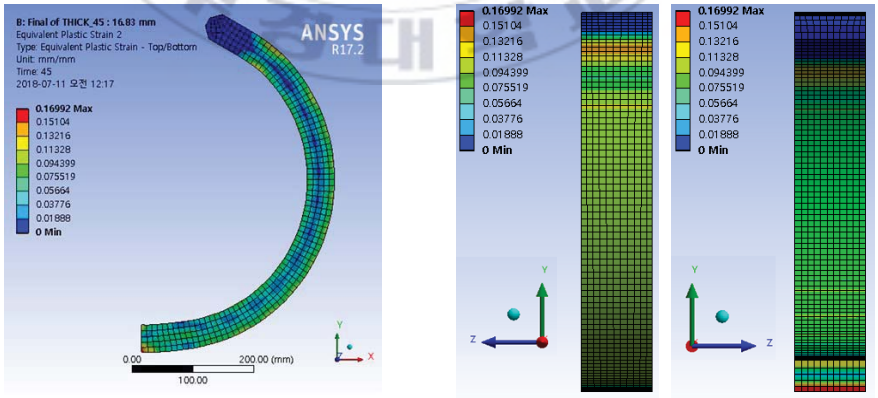
Figure 33 The results of 3D analysis (40t)



(a) Circumferential residual stress

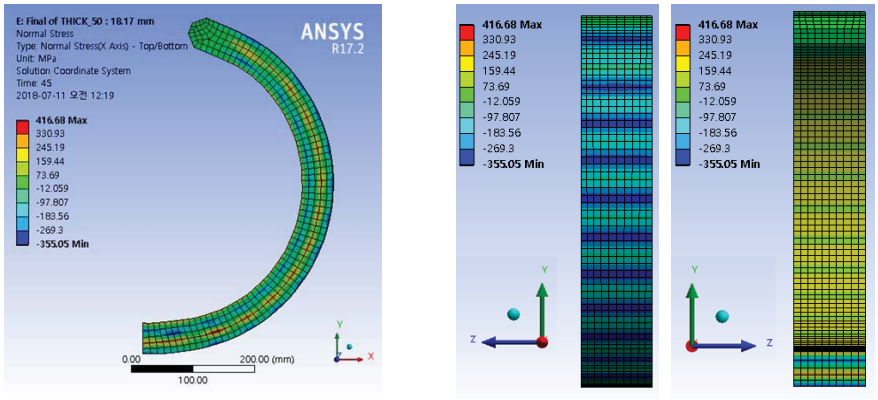


(b) Longitudinal residual stress

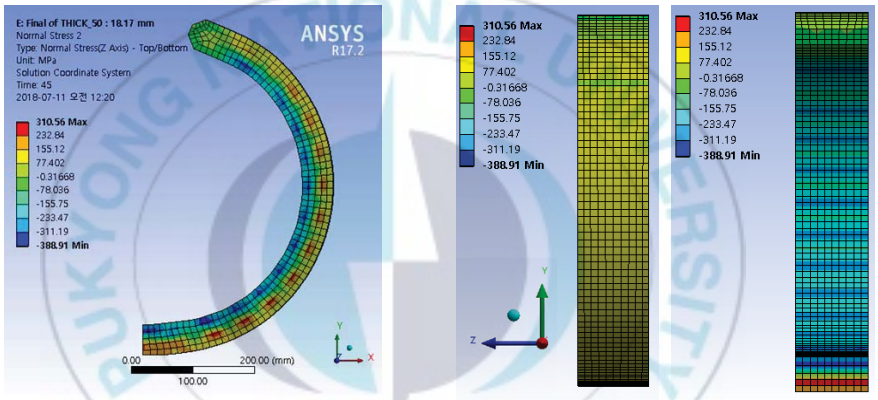


(c) Equivalent plastic strain

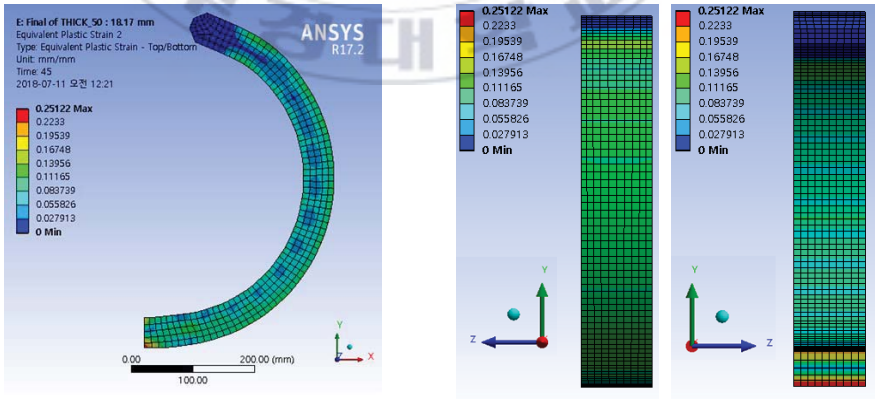
Figure 34 The results of 3D analysis (45t)



(a) Circumferential residual stress



(b) Longitudinal residual stress



(c) Equivalent plastic strain

Figure 35 The results of 3D analysis (50t)

IV. 굽힘강도해석

1. 서론

굽힘하중(global bending moment)은 해양파이프라인의 설치 및 원유 운송 중에 받는 하중 중에서 가장 지배적인 하중 중 한 가지이다 (Kyriakides & Corona, 2007). 예를 들어, 해저파이프 부설선(pipe lying vessel)을 통해 파이프를 설치하는 경우에 1~2회의 상당한 크기의 굽힘 하중이 발생한다. 또한, 설치 이후에도 지형조건에 따라서 굽힘하중이 지속적으로 작용하는 구간이 발생할 가능성도 존재한다. 그러므로 파이프의 굽힘성능을 평가하는 것은 매우 중요한 과정이다.

JCO공정과 같은 냉간성형은 재료의 소성변형에 의한 잔류응력을 남긴다. Jandera, 등 (2014)에 의하면 중간이 비어있는 정사각형 단면의 구조물의 경우 냉간성형을 통해 발생한 잔류응력이 구조물의 굽힘강도에 어느 정도 영향을 미칠 가능성이 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서 이 장에서는 재료의 소성변형에 의해 발생한 잔류응력의 영향을 검토하기 위하여 공정해석을 통해 발생한 잔류응력의 데이터들을 파이프에 불러온 뒤 굽힘강도해석을 수행하는 방식으로 연구를 진행하였다.

굽힘강도해석은 ANSYS APDL을 이용하여 수행하였으며, 하중증분법인 뉴턴-랩슨 방법을 사용하여 임계점을 탐색하였고, 임계점 이후의 비선형경로를 포함한 구조물의 거동을 조사하기 위하여 Riks 구속조건식을 사용하여 접선강성벡터가 원호를 그리며 비선형경로에 접근해 가는 Arclength 기법을 사용하였다 (ANSYS Inc., 2018).

2. 모델링

대상구조물은 ANSYS APDL을 이용하여 모델링하였다. 공정해석에 사용 된 요소와 동일한 Solid185(8-node brick)를 사용하였으며, 각 절점과 요소들은 기하학적인 형상을 고려하여 엑셀을 이용하여 절점의 좌표를 계산하고 요소를 모델링하였다. 실제 해상환경에서의 파이프의 길이는 수 천 킬로미터에 달하지만 미소구간의 연속체로 고려되기에 해석범위를 3000mm로 축소하여 해석을 진행하였다. 또한, 파이프의 기하학적인 대칭성을 고려하여 1/4모델을 사용하였으며 x방향과 z방향에 대칭조건을 부여하였다. 파이프의 경계조건은 Sadowski, 등 (2013)와 동일한 경계조건을 사용하였으며 Figure 36에 나타내었다. 실제모델은 Figure 37에 나타내었으며, 파이프의 두께별 세부제원들은 Table 11에 나타내었다.

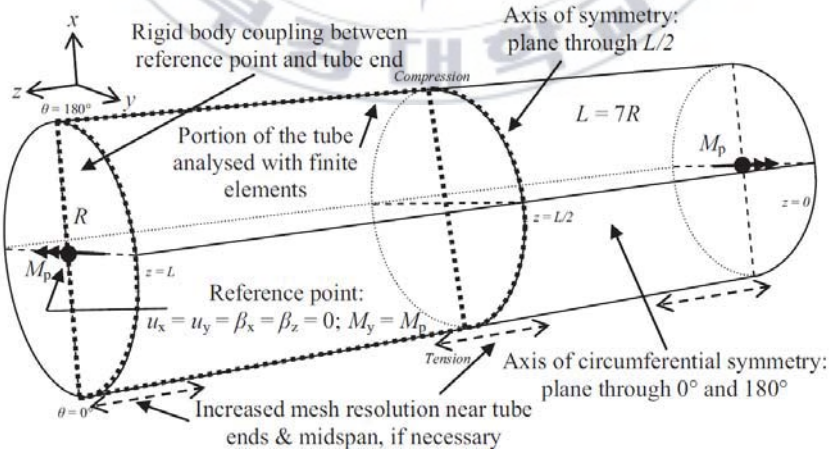


Figure 36 Boundary condition (Sadowski, et al., 2013)

Figure 37 3D modeling of case 4

Table 11 Principle dimension of pipe

Case	D/t	D (mm)	t (mm)	L/2 (mm)	Node No.	Element No.
1	59.2	533.0	9.0	1500	43,941	28,800
2	29.6	533.0	18.0	1500	43,941	28,800
3	17.8	533.0	30.0	1500	73,235	57,600
4	13.3	533.0	40.0	1500	73,235	57,600

3. 초기처짐

본 연구의 해석대상인 파이프는 세장비가 큰 장주로 탄성좌굴에 의해 파단이 발생함으로 압축력, 굽힘하중 등의 작용으로 인해 좌굴이 발생할 가능성이 높으며, 이는 면내 강성저하를 유발하여 구조물의 최종강도에 영향을 미친다. 좌굴은 거의 대부분 물체의 형상이나 하중조건의 불완전성에 기인하며, 실제 파이프는 완전한 원형단면이 아니며, 이러한 기하학적인 불완전성으로 인해 횡방향의 변위가 발생한다. 굽힘하중에 의한 1차 좌굴모드인 파형타입(wrinkling)의 기하학적 불완전성(geometric imperfection)을 고려해야 하며, 이때 Figure 38과 같이 파형의 진폭과 동일한 초기처짐량(δ_0)은 실제 측정값을 토대로 계산할 경우 두께에 대한 초기처짐량의 비(δ_0/t)의 범위는 약 2%에서 10% 사이에 존재한다 (European Commission, 2014).

파이프의 1차 좌굴모드를 얻기 위하여 선형좌굴해석을 우선적으로 수행하였으며, 이 결과를 토대로 탄소성대변형해석을 수행하였다. 또한, 초기처짐량에 따른 파이프의 강도변화를 조사하기 위하여 영향조사를 수행하였으며 그 결과는 Figure 40 및 Table 12에 나타내었다. 하중(M)과 곡률의 무차원화를 위해 Kyriakides, 등 (2007)가 제시한 변수들을 사용하였다.

$$D_0 = D - t \tag{6}$$

$$M_0 = \sigma_0 D_0^2 t \tag{7}$$

$$\kappa_1 = t / D_0^2 \tag{8}$$

최종적으로 M_0에 가장 유사한 7%를 비선형해석에 고려하였다.

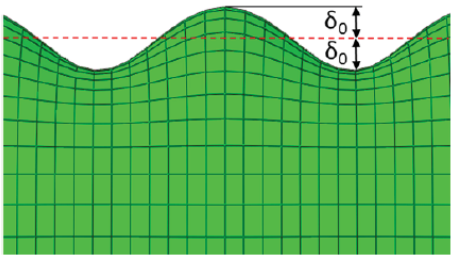
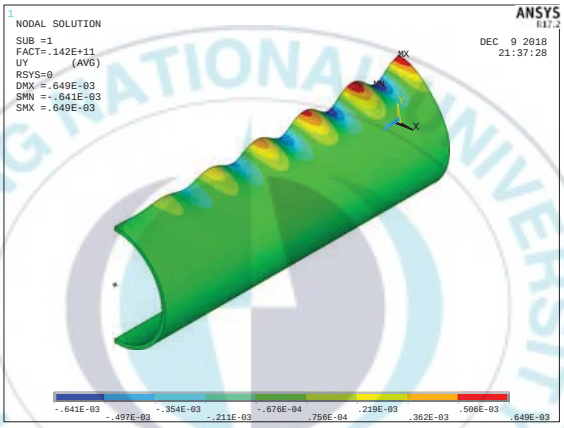
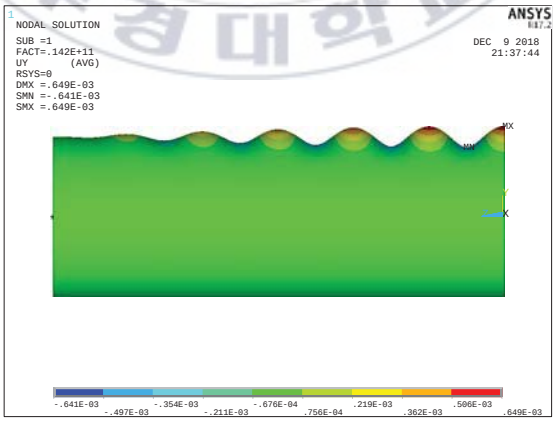


Figure 38 Shape of the first eigenmode imperfection (European Commission, 2014)



(a) Iso view



(b) Side view

Figure 39 Shape of the first eigenmode imperfection

Table 12 The results of imperfection influence study

δ_0/t	M/M_0	Angle of rotation	κ/κ_1	Δ_0
0.00	1.02296	0.11597	1.13668	0.04859
0.01	1.02102	0.10908	1.06942	0.04270
0.02	1.01736	0.10033	0.98394	0.03695
0.03	1.01355	0.09173	0.89986	0.03160
0.04	1.00988	0.08520	0.83590	0.02800
0.05	1.00638	0.08065	0.79140	0.02603
0.06	1.00310	0.07626	0.74839	0.02396
0.08	0.99695	0.06960	0.68313	0.02127
0.10	0.99116	0.06498	0.63790	0.02008

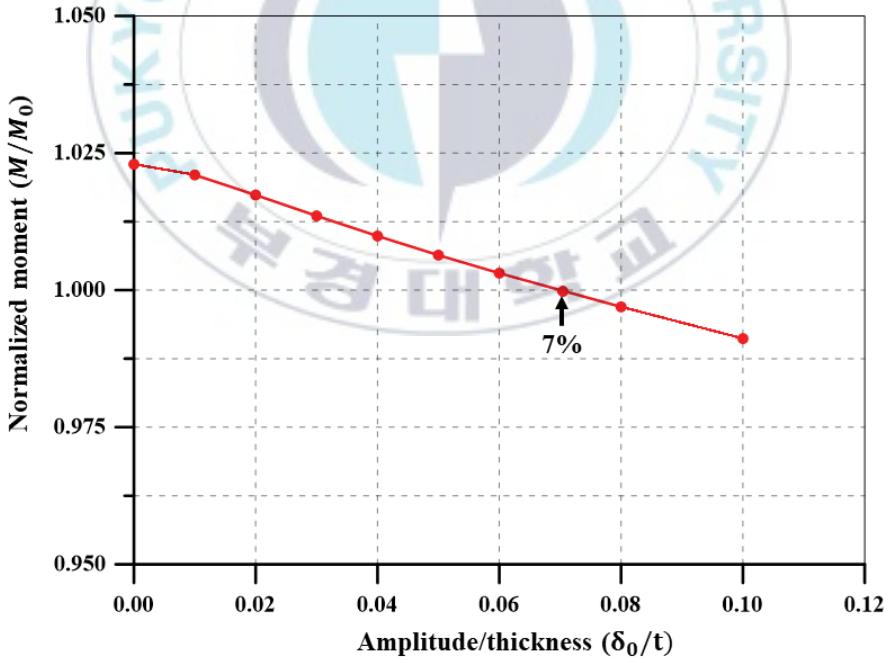


Figure 40 The results of imperfection influence study

4. 잔류응력에 의한 굽힘해석

냉간성형에 의해 발생한 잔류응력의 영향을 고려한 굽힘해석을 수행하기 위하여 INISTATE 기능을 이용하여 Figure 41에 나타낸 순서에 따라 JCO공정해석 이후의 잔류응력들을 변환하였다 (ANSYS Inc., 2018).

우선, 공정해석 이후 발생한 잔류응력을 출력파일 형식으로 출력하였다. 그리고 판재의 요소번호와 파이프의 요소번호는 각각 다르기 때문에 상대적인 위치에 맞도록 잔류응력 파일(residual stress file)의 요소번호를 재배치(rearrangement)하였다.

JCO공정해석의 경우 판재의 길이가 100mm인 축소모델이므로 잔류응력 데이터를 연장(Extending)하는 과정이 필요하다. 3장 3절에서 언급한 바와 같이 축소모델의 잔류응력은 길이방향으로 거의 동일하다는 사실을 알 수 있었기 때문에 공정해석을 통해 발생한 잔류응력 데이터를 길이방향으로 복사하였다.

최종적으로 복사된 잔류응력 데이터들을 입력파일(input file)의 형식에 맞게 출력하였다. 또한, 하나의 예시로 두께 18mm의 파이프에 길이방향 잔류응력을 가져온 결과를 Figure 42에 나타내었다.

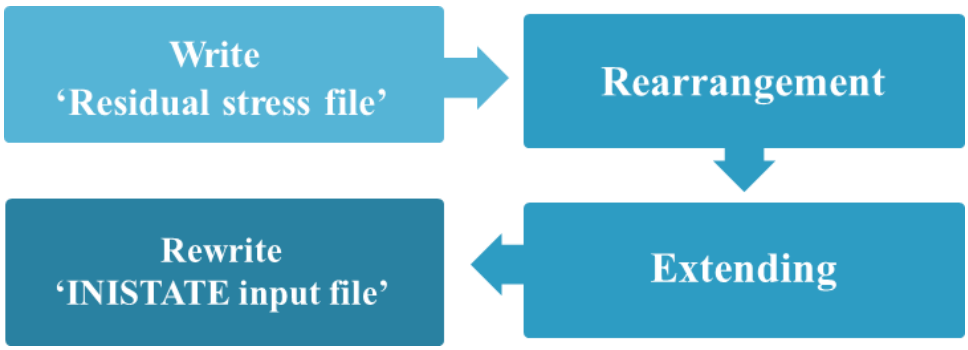
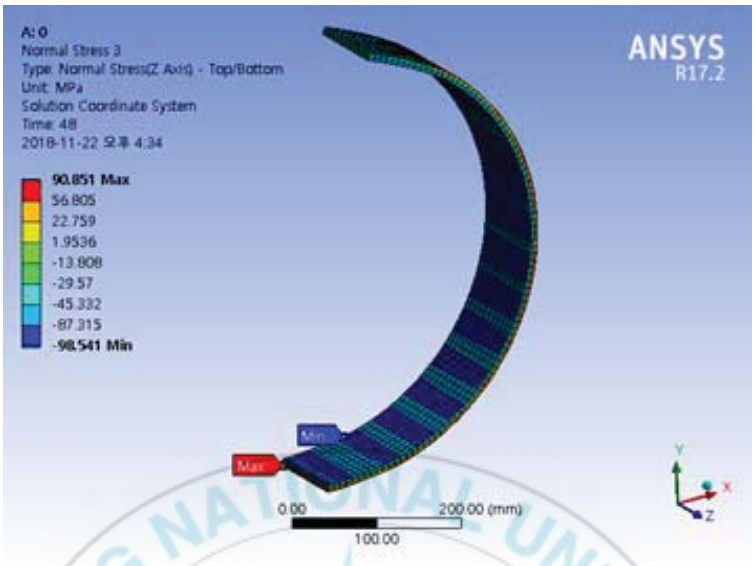
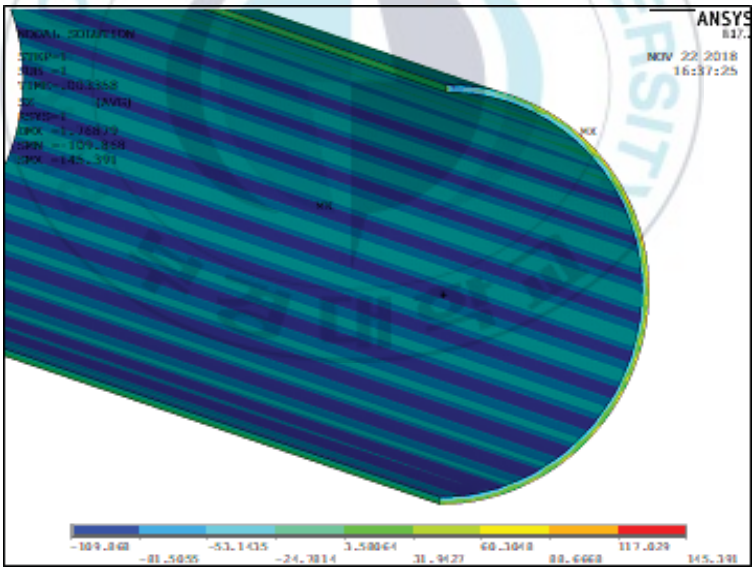


Figure 41 The process to import residual stress on pipe model



(a) Longitudinal residual stress after forming analysis



(b) Imported longitudinal residual stress on pipe

Figure 42 Longitudinal residual stress distribution

네 가지 모델에 대한 잔류응력의 여부에 따른 파이프의 굽힘강도에 영향 검토결과를 비교하기 위하여 굽힘강도해석을 수행하였으다. 그리고 결과의 비교를 위하여 한계상태에서 무차원화된 하중과 가로($D_{\max}$)와 세로($D_{\min}$)직경의 합차의 비인 진원도(Δ_0)를 무차원화된 곡률에 대하여 비교를 하였다.

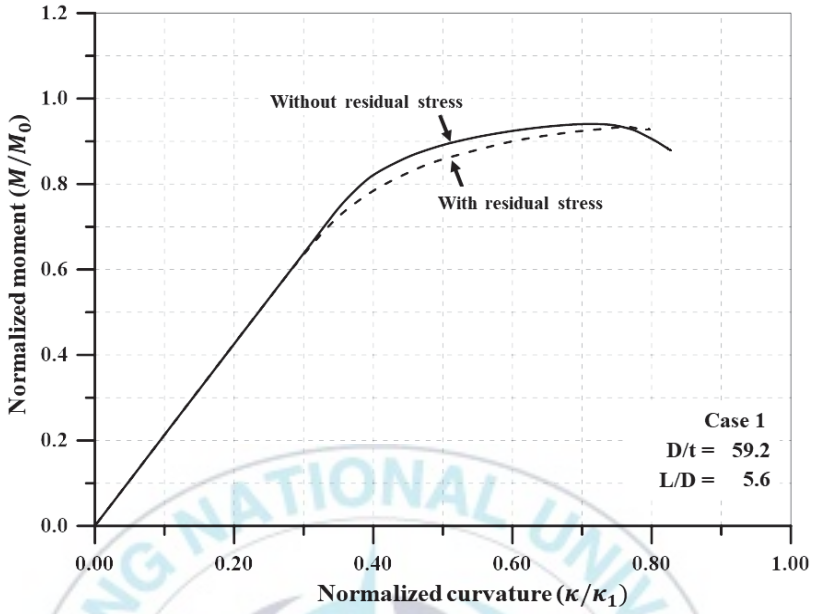
$$\Delta_0 = (D_{\max} - D_{\min})/(D_{\max} + D_{\min}) \tag{9}$$

각 케이스별 결과 요약은 Table 13에 나타내었으며, 각 두께별 무차원화된 곡률에 대한 하중 및 진원도의 비교를 위한 그래프는 Figures 43-46에 나타내었다.

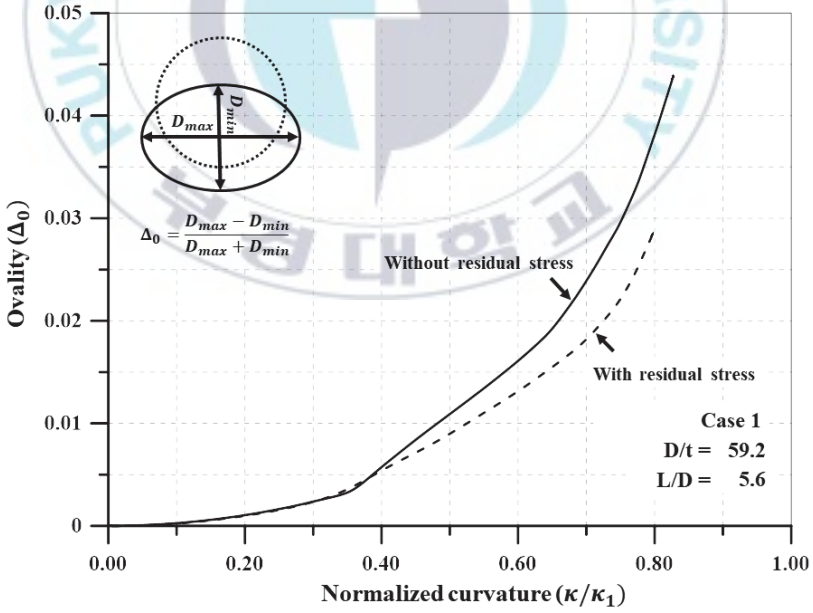
결과를 통해서 잔류응력이 파이프의 강도는 미미하지만 파이프의 굽힘강성 및 거동에는 어느 정도 영향을 준다는 사실을 알 수 있었다. 진원도를 비교하였을 경우 동일한 곡률에서 잔류응력이 없는 케이스의 진원도가 상대적으로 크게 나타나는 경향이 있지만, Table 13에서와 같이 한계상태에서의 진원도를 비교할 경우에는 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 잔류응력에 의해 생기는 굽힘거동의 차이들은 파이프의 두께가 두꺼워 질수록 점차 작아짐을 알 수 있었다.

Table 13 The results of bending analysis

Case	Residual stress	D/t	t (mm)	κ/κ_1	M/M_0	Δ_0
1	w/.	59.2	9.0	0.77138	0.93274	0.02465
1	w/o.	59.2	9.0	0.71642	0.94059	0.02568
2	w/.	29.6	18.0	0.74474	0.99780	0.01693
2	w/o.	29.6	18.0	0.70662	0.99692	0.02180
3	w/.	17.8	30.0	0.85774	1.05012	0.02017
3	w/o.	17.8	30.0	0.84038	1.05006	0.02039
4	w/.	13.3	40.0	0.79355	1.07061	0.01475
4	w/o.	13.3	40.0	0.77952	1.07313	0.01485

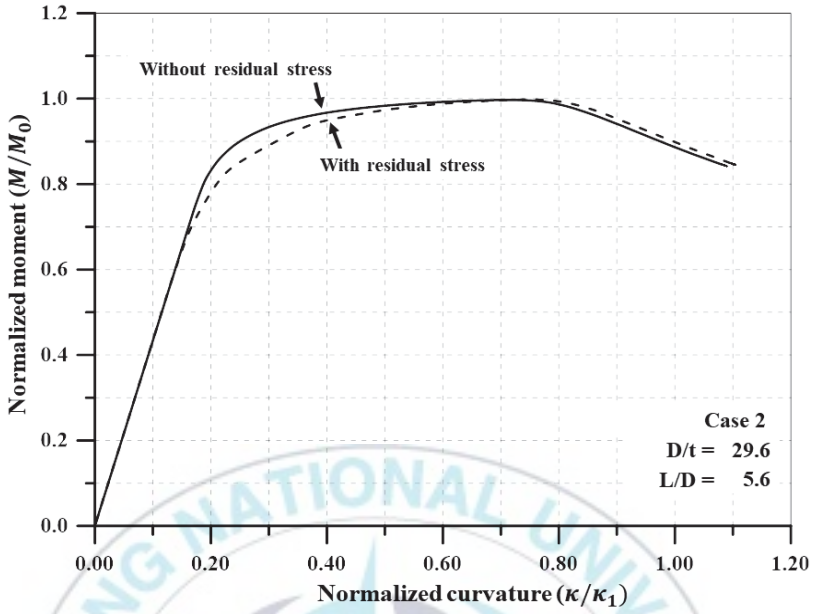


(a) Normalized curvature versus normalized moment

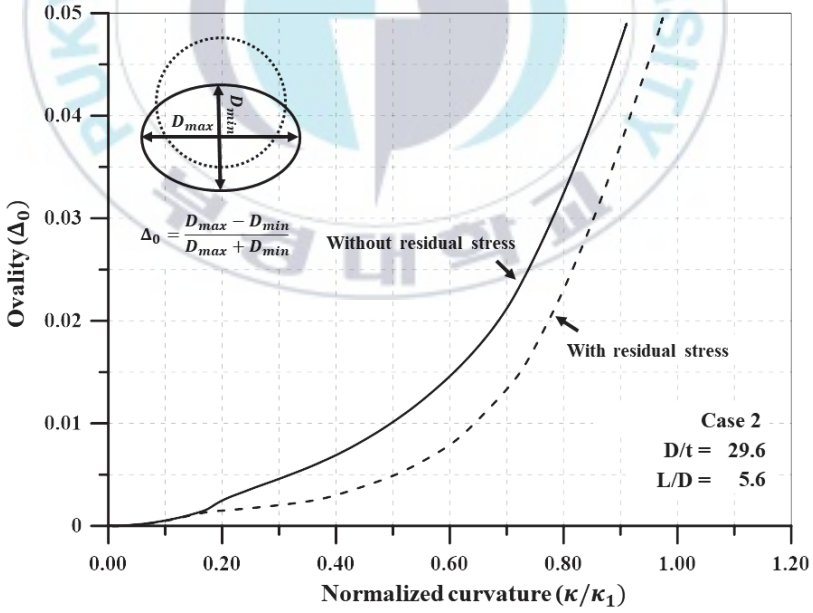


(b) Normalized curvature versus ovality

Figure 43 Influences of residual stress (Case 1)

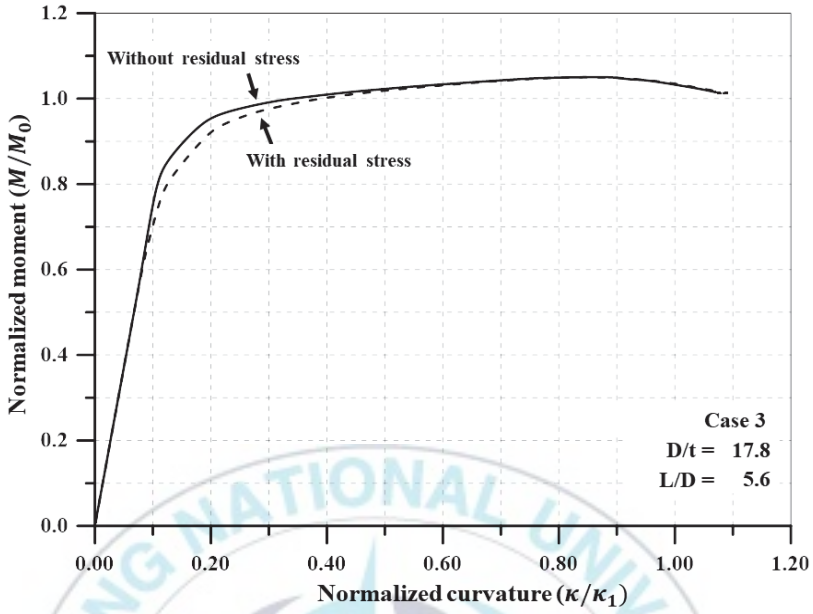


(a) Normalized curvature versus normalized moment

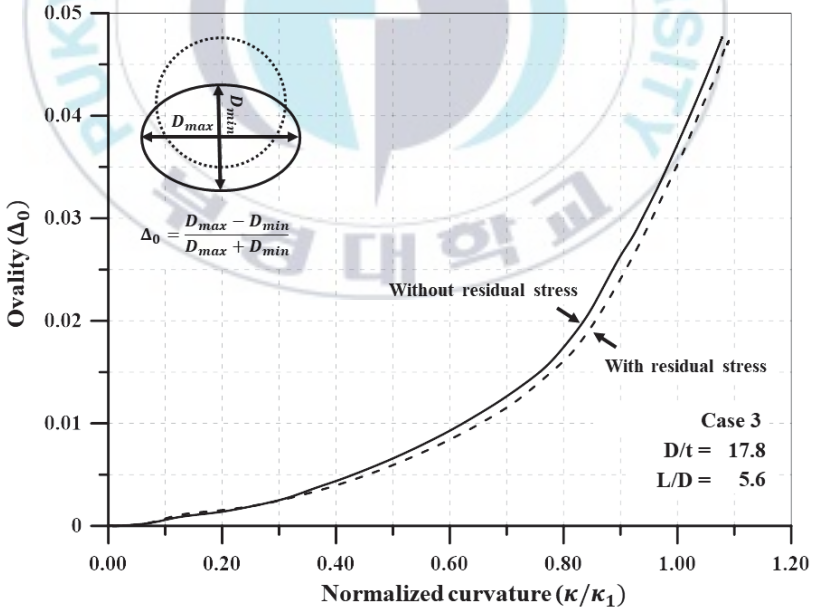


(b) Normalized curvature versus ovality

Figure 44 Influences of residual stress (Case 2)

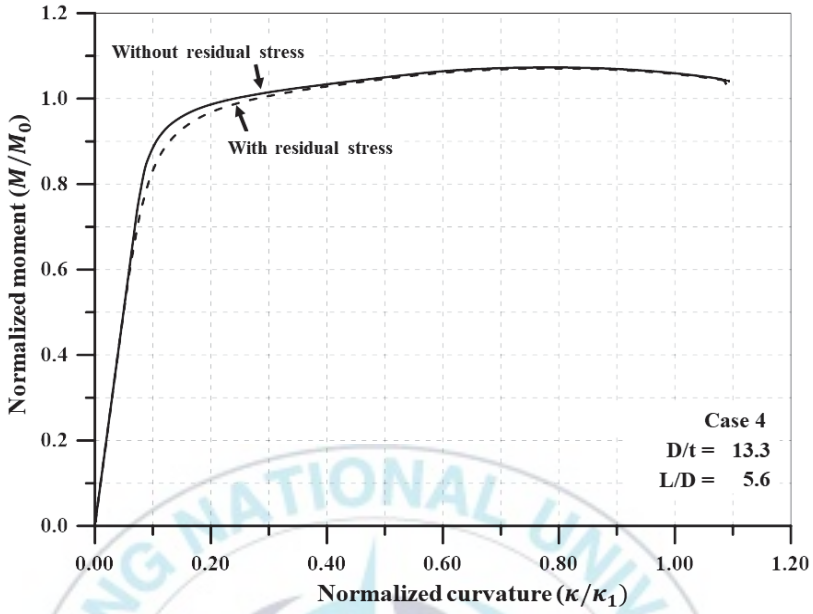


(a) Normalized curvature versus normalized moment

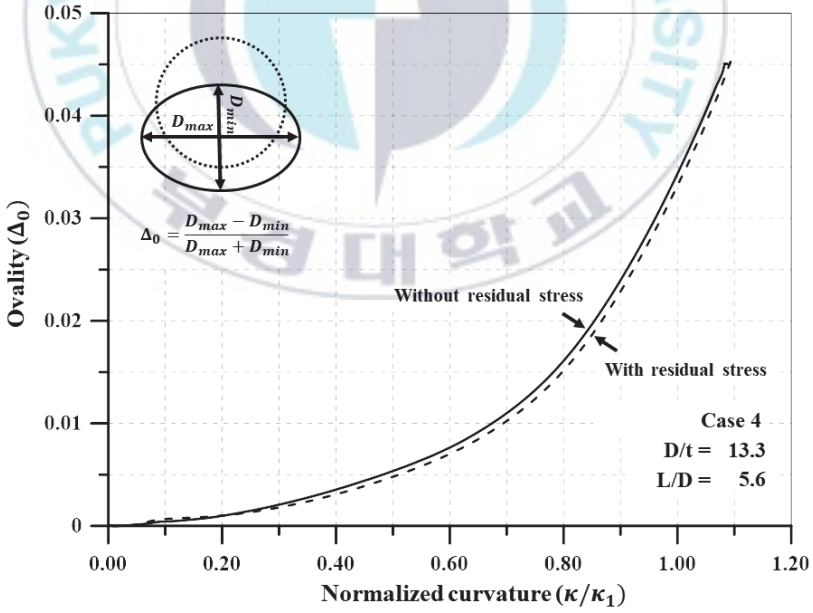


(b) Normalized curvature versus ovality

Figure 45 Influences of residual stress (Case 3)



(a) Normalized curvature versus normalized moment



(b) Normalized curvature versus ovality

Figure 46 Influences of residual stress (Case 4)

V. 결론 및 고찰

본 연구의 목적은 JCO공정 시뮬레이션을 통하여 목표직경인 533mm의 파이프 형상을 만들기 위한 가압깊이를 계산하고 공정에 필요한 하중을 계산하는 것이 목적이다. 또한, 공정 중에 소성변형에 의한 잔류응력은 필연적으로 발생하기 때문에 잔류응력이 파이프의 강도나 거동에 미치는 영향에 대한 평가하고자 한다.

소성변형이 발생하는 공정의 특성상 재료의 기계적인 거동을 정확하게 반영하여야 한다. 이를 위하여 5개의 시편을 이용하여 인장시험을 시행하였으며, 이를 토대로 구조 시뮬레이션을 수행하였다.

공정시뮬레이션 결과, 두께 18mm부터 50mm까지 총 7가지 두께의 판재들을 평균 직경 533mm으로 성형하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 이때 필요한 금형의 가압깊이와 요구되는 하중들을 계산할 수 있었다.

공정 중에 발생한 잔류응력의 영향을 검토하기 위하여 1/4 모델의 파이프에 성형공정에 의한 잔류응력 데이터를 불러들였고, 이를 통해 두께 9mm부터 40mm까지 길이 3000mm의 파이프에 대하여 잔류응력의 영향에 대한 굽힘해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 잔류응력이 파이프의 거동에는 어느 정도 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 또한 이러한 영향은 두께가 얇은 파이프에서 더욱 두드러졌다. 해양파이프의 경우 굽힘뿐만 아니라 인장과 외부압력 또한 작용하므로 복합하중에 대한 평가 또한 후행연구로써 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

ANSYS Inc., (2018). "ANSYS Mechanical APDL Theory Reference"

API. Production Dept., (1991). "Specification for line pipe", American Petroleum Institute, Washington, U.S.A

Chatzopoulou, G., Antoniou, K., & Karamanos, S. A., (2017). “Numerical simulation of JCO pipe forming process and its effect on the external pressure capacity of the pipe”, In ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 25-30June, Trondheim, Norway

EIA, (2017). “International energy outlook 2017”, U.S. Energy Information Administration, Washington, U.S.A

European Commision, (2014). “Bending resistance of steel tubes in combiwalls (COMBITUBE)”, Publications Office, Luxembourg

Fan, L. F., Yan, J. X., Gao, Y., & Yun, J. B., (2016). "Research on deformation characteristics of JCOE forming in large diameter welding pipe", Advances in Manufacturing 4(3), 268-277

Gao, Y., Li, Q., & Fan, L., (2010). “Finite element analysis of JCO forming process for longitudinal seam submerged arc welded pipes”, International Journal of Modeling, Identification and Control 11(3/4), 239-249

Jandera, M., Gardner, L., & Machacek, J., (2008). "Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow sections", Journal of Constructional Steel Research 64(11), 1255-1263

Kim, D. W., (2014). “The effect of corrosion defects on the burst strength capacity of aging subsea gas pipelines”, Master Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

Kyriakides, S., & Corona, E., (2007). “Mechanics of offshore pipelines: volume 1 buckling and collapse”, Elsevier, Oxford, UK and Burlington, Massachusetts

POSCO, “New materials: High Mn steels”, Pohang Iron and Steel Company, Pohang, Korea

Sadowski, A. J., & Rotter, J. M., (2013). “Solid or shell finite elements to model thick cylindrical tubes and shells under global bending”, International Journal of Mechanical Sciences 74, 143-153