



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

디자인해석법과 유한요소법을
이용한 롤 포밍 공정에 대한 연구

濟州大學校 大學院

機 械 工 學 科

尹 大 歡

2016年 2月

디자인해석법과 유한요소법을 이용한 롤 포밍 공정에 대한 연구

指導教授 鄭 東 垣

尹 大 歡

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015年 12月

尹大歡의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 ----- (인)

委 員 ----- (인)

委 員 ----- (인)

濟州大學校 大學院

2015年 12月

Study on Roll Forming Process Using Design Analysis Method and Finite Element Method

Dae-Hwan Yoon

(Supervised by professor Dong-Won Jung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Engineering

2015. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Dong-Won Jung, Prof. of Mechanical Engineering

.....
.....
.....
.....
(Name and signature)

.....
Date

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	iv
ABSTRACT	v
I. 서 론	1
1.1 연구배경 및 현황	1
1.2 연구내용	3
II. 롤 포밍 공정	4
2.1 롤 포밍 공정의 장점	4
2.2 롤 포밍 공정의 단점	5
III. 유한요소해석 및 검증	8
3.1 재료의 시험	8
3.1.1 시험 방법	8
3.1.2 시험 결과	10
3.2 해석 모델 및 조건	12
3.2.1 해석 조건 설정	14
3.2.2 해석 결과	15
3.2.3 해석 결과 검증 및 비교	31
3.2.4 해석결과에 따른 추가 해석	35
3.2.5 오버 밴딩을 통한 개선	37
IV. COPRA RF와 ABAQUS를 이용한 설계 및 해석	39
4.1 COPRA RF를 통한 공정 설계 위한 모델 설정	39
4.2 COPRA RF를 통한 공정 설계	40

4.2.1 COPRA RF를 통한 공정 1차 설계	40
4.2.2 COPRA RF를 통한 공정 2차 설계	41
4.2.3 COPRA RF를 통한 공정 3차 설계	42
4.3 COPRA RF 설계 결과를 통한 해석 조건 및 결과	43
4.3.1 ABAQUS를 통한 1차 해석	43
4.3.2 ABAQUS를 통한 2차 해석	45
4.3.1 ABAQUS를 통한 3차 해석	47
V. 결론	49
참고문헌	51

LIST OF FIGURES

Fig.1 Camber	6
Fig.2 Wavy	7
Fig.3 Tensile test specimen	9
Fig.4 Tensile test	9
Fig.5 Result of tensile test	10
Fig.6 Copper alloy steel of stress-strain curve	10
Fig.7 Stainless steel of stress-strain curve	11
Fig.8 Mild steel of stress-strain curve	11
Fig.9 3-Pass Roll forming machine	12
Fig.10 3-Pass flower pattern	12
Fig.11 3-Pass roll forming process	13
Fig.12 Spring-back	15
Fig.13 Strain distribution of copper alloy steel CASE-1	16
Fig.14 Strain distribution of copper alloy steel CASE-2	16
Fig.15 Strain distribution of copper alloy steel CASE-3	16
Fig.16 Strain distribution of copper alloy steel CASE-4	17
Fig.17 Strain distribution of copper alloy steel CASE-5	17
Fig.18 Strain distribution of copper alloy steel CASE-6	17
Fig.19 Strain distribution of copper alloy steel CASE-7	18
Fig.20 Strain distribution of copper alloy steel CASE-8	18
Fig.21 Strain distribution of copper alloy steel CASE-9	18
Fig.22 Strain distribution of copper alloy steel CASE-10	19
Fig.23 Strain distribution of copper alloy steel CASE-11	19
Fig.24 Strain distribution of copper alloy steel CASE-12	19
Fig.25 Strain distribution of copper alloy steel	20
Fig.26 Spring-back of copper alloy steel	20
Fig.27 Strain distribution of stainless steel CASE-1	21
Fig.28 Strain distribution of stainless steel CASE-2	21
Fig.29 Strain distribution of stainless steel CASE-3	21

Fig.30 Strain distribution of stainless steel CASE-4	22
Fig.31 Strain distribution of stainless steel CASE-5	22
Fig.32 Strain distribution of stainless steel CASE-6	22
Fig.33 Strain distribution of stainless steel CASE-7	23
Fig.34 Strain distribution of stainless steel CASE-8	23
Fig.35 Strain distribution of stainless steel CASE-9	23
Fig.36 Strain distribution of stainless steel CASE-10	24
Fig.37 Strain distribution of stainless steel CASE-11	24
Fig.38 Strain distribution of stainless steel CASE-12	24
Fig.39 Strain distribution of copper alloy steel	25
Fig.40 Spring-back of stainless steel	25
Fig.41 Strain distribution of mild steel CASE-1	26
Fig.42 Strain distribution of mild steel CASE-2	26
Fig.43 Strain distribution of mild steel CASE-3	26
Fig.44 Strain distribution of mild steel CASE-4	27
Fig.45 Strain distribution of mild steel CASE-5	27
Fig.46 Strain distribution of mild steel CASE-6	27
Fig.47 Strain distribution of mild steel CASE-7	28
Fig.48 Strain distribution of mild steel CASE-8	28
Fig.49 Strain distribution of mild steel CASE-9	28
Fig.50 Strain distribution of mild steel CASE-10	29
Fig.51 Strain distribution of mild steel CASE-11	29
Fig.52 Strain distribution of mild steel CASE-12	29
Fig.53 Strain distribution of mild steel	30
Fig.54 Spring-back of mild steel	30
Fig.55 Result of roll forming experiment about stainless steel	31
Fig.56 Spring-back of roll forming experiment about stainless steel	32
Fig.57 Result of roll forming experiment about copper alloy steel	32
Fig.58 Spring-back of roll forming experiment about copper alloy steel	33
Fig.59 Result of roll forming experiment about mild steel	33
Fig.60 Spring-back of roll forming experiment about mild steel	34

Fig.61 Spring-back of additional analysis.....	35
Fig.62 Spring-back of gap between rolls: 0mm.....	36
Fig.63 Spring-back of gap between rolls: 0.1mm.....	36
Fig.64 Spring-back of gap between rolls: 0.2mm.....	36
Fig.65 Spring-back of roll forming experiment and analysis about overbending	37
Fig.66 Strain distribution of roll forming experiment about copper alloy steel overbending.....	38
Fig.67 Strain distribution of roll forming experiment about stainless steel overbending.....	38
Fig.68 Strain distribution of roll forming experiment about mild steel overbending.....	38
.....	38
Fig.69 Shape of design using COPRA RF.....	39
Fig.70 3-pass flower pattern about COPRA RF.....	40
Fig.71 Longitudinal strain of 3-pass.....	40
Fig.72 4-pass flower pattern about COPRA RF.....	41
Fig.73 Longitudinal strain of 4-pass.....	41
Fig.74 6-pass flower pattern about COPRA RF.....	42
Fig.75 Longitudinal strain of 6-pass.....	42
Fig.76 3-pass modeling for analysis.....	43
Fig.77 3-pass Strain distribution about COPRA RF.....	44
Fig.78 4-pass modeling for analysis.....	45
Fig.79 4-pass Strain distribution about COPRA RF.....	46
Fig.80 6-pass modeling for analysis.....	47
Fig.81 6-pass Strain distribution about COPRA RF.....	48

LIST OF TABLES

Table 1 Standards of tensile test specimen.....	8
Table 2 Material properties.....	11
Table 3 Analysis boundary condition of copper alloy steel.....	14
Table 4 Analysis boundary condition of stainless steel.....	14
Table 5 Analysis boundary condition of mild steel.....	15
Table 6 Spring-back of copper alloy steel.....	20
Table 7 Spring-back of stainless steel.....	25
Table 8 Spring-back of Mild steel.....	30
Table 9 Result of roll forming experiment about stainless steel.....	31
Table 10 Result of roll forming experiment about copper alloy steel.....	32
Table 11 Result of roll forming experiment about mild steel.....	33
Table 12 Spring-back of roll forming experiment about overbending.....	37
Table 13 Boundary condition of analysis about COPRA RF.....	43
Table 14 3-pass spring-back about COPRA RF.....	44
Table 15 4-pass spring-back about COPRA RF.....	45
Table 16 6-pass spring-back about COPRA RF.....	47

ABSTRACT

Study on Roll Forming Process Using Design Analysis Method and Finite Element Method

Dae-Hwan Yoon

Major of Energy & Mechanical Engineering
Graduate school Jeju National University

The roll forming process is used to Building industry, aerospace industry and shipbuilding industries, etc. However roll forming process has many boundary conditions. so The industry has relied on its own experiments and experiences. but This method has many defects. And are time-consuming and expensive.

Recently, it has been used to design using the CAD/CAM. Especially Software for the roll forming process has been developed to know the results of the strain and the spring-back, as well as design.

In this paper, verified by comparing the roll forming experiments and interpret results, and verify the results using the roll forming software COPRA RF and interpreted through ABAQUS software. The spring-back and strain was confirmed by the results, be aware of the values of variables.

I. 서론

1.1 연구배경 및 현황

롤 포밍 공정은 연속적으로 배치된 롤 사이로 금속 판재를 통과시켜 점진적인 굽힘 가공을 통하여 형상을 변화시켜 원하는 형상의 제품을 제조하는 공정이다. 롤 포밍 공정은 건축, 조선, 항공, 자동차 등 넓은 분야에서 사용되는 공정이다. 복잡한 단면 형상의 제품을 생산하고 있어 롤 포밍 공정은 기존의 압출 공정에 의해 생산되고 있는 제품도 생산이 되고 있다.

롤 포밍 공정은 롤 패스간 거리, 롤 포밍 공정 속도, 롤 포밍 상하 롤 금형의 거리, 패스별 굽힘 각도 등과 같은 경계 조건과 롤 포밍 공정에 사용되는 금속 판재 종류나 두께에 따라 결과가 달라지는 등 많은 변수로 인하여 공정을 설계하는데 많은 어려움을 가지고 있다.

이제까지 롤 포밍 공정에 대한 기술은 유럽에서 많이 이루어졌으며 특히 스웨덴과 독일에 집중되었다. 특히 스웨덴의 경우는 압연 강판의 수요가 다른 유럽 국가들에 비해 수배이상 되었다. 1980년대 캐나다의 경우 강제 생산량의 22%가 롤 포밍 공정을 통해 소비되었을 정도로 유럽 및 북미, 일본 등지에서 매우 널리 사용되고 있지만, 롤 포밍 공정은 성형에 따른 어려움 때문에 현장에서는 자제적인 실험과 설계자의 경험에 의존하고 있다.

롤 포밍 공정은 용접기술의 개발과 함께 파이프나 튜브 생산에 주로 응용되었고, 이 후 제품의 품질 향상 및 생산성을 향상시키기 위해 지속적으로 연구가 되었다. 유럽이나 북미에서는 20세기 초에 롤 포밍 공정이 도입되어 항공기 부품이나 강관 등의 제조에 사용되었다. 일본은 2차 세계대전 이후 롤 포밍 공정이 도입되었고, 이에 대한 연구로 동경대의 M.Kiuch^{[1][2][3]}에 의해 변형 영역에 있는 금속 판재의 형상을 정현 함수(sine function)에 매개변수를 포함시켜 속도장을 계산한 뒤에 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다. Ona와 Jimma^{[4][5]}는 직선형의 비대칭 형상에 대한 냉간 롤 포밍에서 비틀림이나 휨과 같은 변형을 방지하기 위한 방법에 대해서 실험을 하였다. 실험은 스트레이트너(straightener), 롤의 압력 조정, 오버 밴딩 롤, 트위스트 포

밍 스텐드(twist forming stand) 등을 각각 조합하여 그 효과에 대하여 확인하였다, 여기서 개발된 트위스트 포밍 스텐드의 적용은 기존의 스트레이트너를 사용하는 것 보다 효과적이고 롤 압력 조정과 롤의 횡방향의 변위를 사용하면서 최종 롤 패스 전에서 트위스트 포밍 스텐드를 사용하면 효과가 증가하는 것을 확인하였다.

Battacharyy와 Smith^{[6][7]}는 롤 포밍에서 각각의 롤 패스를 통과할 때 변형부의 길이(deformation length)와 냉간 롤 포밍에서 롤 하중을 예측하는 연구를 하였다. 변형 길이를 계산하여 롤 패스간의 간격을 결정할 수 있는데 변형 길이는 생성된 형상의 물리적 변수에 의해서 결정되는 것으로 예상되지만 실제로는 소재의 기계적 성질과는 무관하고 소재의 두께, 플랜지 길이, 한 단에서의 룽힘 각도에 대한 영향을 받는 것으로 확인되었다. 다른 연구에서는 성형의 복잡성으로 인하여 롤 압력을 예측하면 소재가 부드럽게 성형 될 수 있게 롤의 최적 설계를 할 수 있다. 경험 방법으로 접는 하중(folding load)은 소재의 두께, 플랜지 길이, 접히는 각도와 단면 변수와 금속 관재의 항복 응력과 같은 재질의 특성에 영향을 많이 받는다. 그 외에 굽힘 하중은 재질의 영계수(Young's modulus)와 차후에 롤 간에서 소재가 수직으로 세워지는 단면변수, 롤 간의 간격, 롤 직경, 재질의 최대 플랜지 변형 과 탄성한계 변형의 비에 영향을 받는다.

Battacharyy와 Panton^[8]은 롤 포밍 공정에서 각각의 변형 영역에 대한 변형 영역의 길이 및 굽힘 각을 예측하는 식을 개발하여 실험을 통해 소재에 대한 길이방향 변형률을 예측하였다. Ona와 Ichikawa^[9]는 소음이나 진동을 감쇄하는 목적으로 쓰이는 진동감쇄강판(vibration-damping steel sheet)의 성형하기 어려운 소재를 이용한 롤 포밍 연구를 하였다. 진동감쇄강판은 얇은 두 강판이 수직접착으로 접촉되어 있어 소음과 진동을 감쇄하는 용도로 쓰이고 있다. 성형 후 플랜지 잔주름, 폭 방향의 상승 그리고 표면의 분리와 같은 결함으로 인하여 롤 포밍 공정에서 작업이 어려운 소재로 꼽힌다. 결함의 발생 원인을 확인하여 표면과 뒷면의 항복응력이나 두께를 변화시켜 해결하였고 최적의 성형조건을 성형성과 강도에 대한 한계를 확인하였다. Grondin^[10]는 롤 포밍 공정에 의해 생산된 제품에 대해 잔류응력이나 길이방향 변형율을 경계 조건하여 버클링 현상을 해

석하였다. Senanayake^[11]는 유한요소법을 이용하여 대칭형 모델에 롤 패스 수를 결정하고, 컴퓨터 비전 응용 기법을 이용하여 소성변형을 측정하는 것은 실험과 유한요소법을 이용한 예측한 변형이 거의 유사하다는 것을 확인하였다.

1.2 연구내용

본 논문에서는 롤 포밍 공정에서의 금속 판재와 경계 조건에 따른 영향을 알아보기 위해 실험과 롤 포밍 전용 소프트웨어와 범용 해석 소프트웨어를 이용하여 공정을 시뮬레이션 하였다. 롤 포밍 공정에 대한 연구는 Fig.1-1과 같이 진행하였다. 실험 및 시뮬레이션을 통한 결과를 쉽게 확인 가능한 형상인 V 형상을 이용하여 금속 판재의 최종 형상은 90° 형상으로 할 것이며, Roll Forming Hand Book^[12]을 참고하여 롤 포밍 전용 소프트웨어를 이용하여 플라워 패턴을 설계하고 이를 이용하여 롤 금형을 설계하여, 범용 해석 소프트웨어를 이용하여 해석을 진행하였다. 해석을 진행하기 위해 유한요소해석에 필요한 금속 판재를 인장 시험을 통해 응력-변형율 선도를 곡선화하였다. 인장 시험을 진행한 금속 판재는 성형 가공에 많이 쓰이는 동합금, 스테인리스스틸, 연강을 이용하였다. 경계 조건은 롤 포밍 공정 속도, 상하 롤 간 거리, 굽힘 밴딩 순서를 적용하여 진행하였다. 롤 포밍 공정 속도와 상하 롤 간 거리는 V 형상을 통해 실험과 범용 소프트웨어 ABAQUS를 이용하여 결과를 확인하였고, 이 결과를 통하여 롤 포밍 전용 소프트웨어인 COPRA RF^[13]를 이용하여 설계를 진행하고, ABAQUS를 이용하여 해석을 진행하여 스프링백과 변형율을 확인하여 적절한 공정을 설계하였다.

II. 롤 포밍 공정

롤 포밍 공정은 얇은 금속 판재나 금속의 띠판을 다단의 롤 사이를 통과시켜 점진적인 굽힘을 가하는 공정이다. 연속된 형상이 다른 롤 사이를 재료가 순차적으로 이동하면서 성형 가공되어 단면 형상은 일정하고 두께의 변화는 최소화하면서 길이가 긴 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 가공 중 하나이고, 소형가공법의 일종이다. 성형 중에 소재는 가공경화가 발생하여 조직이 치밀하고 경도나 인장강도가 뛰어난 제품을 성형할 수 있다. 이런 성형과정의 이점을 이용하여 튜브나 채널, 앵글 등을 생산한다.

2.1 롤 포밍 공정의 장점

롤 포밍 공정의 장점은 다음과 같다.

- 롤 포밍 공정은 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 생산 할 때 매우 유리한 성형 방법이다.
- 롤 포밍 공정은 인력이 롤의 설치나 제품이 완성될 때만 필요하고 나머지는 공정이 자동으로 진행되기 때문에 인력을 줄일 수 있다. 제품 생산 시 소재의 loading 시와 unloading에만 작업자가 필요하기 때문에 많은 인력이 필요하지 않는다.
- 다양한 형상의 제품을 생산 가능하고 타 공정과 연계가 가능하여, 용접 공정을 응용하면 폐쇄형의 튜브와 같은 제품을 생산할 수 있다.
- 롤 포밍 공정은 구성이 복잡하지가 않고 롤 금형의 형상에 따라 제품 형상을 변화 가능하다. 기존의 롤 포밍 공정 구성으로도 다양한 형상이 가능하여 공정의 초기 비용을 제외하면 형상 변경을 위한 비용은 많이 필요로 하지 않는다.
- 롤 포밍 공정을 진행시 롤 금형의 마멸 이외에는 고장이 거의 없다. 마멸을 줄이기 위해 윤활유를 사용하면 줄일 수도 있고, 치수나 형상의 오차 문

제를 줄일 수도 있다.

롤 포밍 공정은 일정하고 긴 다면을 연속적이고 빠르게 생산이 가능하고, 제품 형상에 대한 제한이 거의 없어서 다양한 제품 생산이 가능한 것이 가장 큰 장점이다. 프레스 공정으로 생산하는 제품이라도 롤 포밍 공정으로도 대체 가능하다.

2.2 롤 포밍 공정의 단점

롤 포밍 공정은 많은 장점도 가지고 있지만 단점도 가지고 있다. 롤 포밍 공정의 단점을 다음과 같이 정리하였다.

- 공정을 위한 초기 롤 금형 설계가 어렵고, 경험이나 기술이 없다면 롤 금형 설계를 위한 다양한 실험이 필요해 시간과 비용이 필요하다.
- 롤 포밍 공정은 형상에 대한 제한이 많이 없지만 복잡한 형상 같은 경우는 롤 금형 형상 설계가 상당히 어렵기 때문에 경험과 기술이 풍부한 기술자가 필요하다.
- 롤 포밍 공정의 단의 수가 많은 경우 제품 생산을 위한 셋팅 시간이 많이 필요하다.
- 제품이 복잡한 형상 같은 경우는 제품에 많은 결함이 생겨 이를 해결하기 위해 롤 금형 형상을 변경하고, 변경 뒤에는 공정을 셋팅하기 위한 시간이 많이 걸리게 된다.

롤 포밍 공정에서 공정 중 발생하는 결함으로는 스프링백, 버클링(buckling)과 같은 휨 현상, 스크래칭(scratching), 웨이비(wavy) 플레어(flare) 등과 같은 현상^[12]이 있다. 스프링 백은 박판이 금형에 의해 변형된 후에 내부 응력에 의해 발생하는 현상이다. 금속에 탄성한도를 초과하는 외력을 받은 후에 외력을 제거하면 탄성복원력에 의해 원래 상태로 되돌아가려는 성질이다. 이런 스프링 백은 과도 굽힘(overbending)을 통하여 스프링 백을 줄일 수 있다. 과도 굽힘

은 롤 금형의 여유각을 두어 판재를 과다 굽힘하게 하여 스프링 백을 보정하는 방식이다.

비틀림 현상은 휨 현상으로 대표적으로 캠버(camber), 보우(bow) 및 비틀림(twist)가 있다. 이런 현상은 변형률 분포의 불균형으로 인해 길이 방향 변형률의 연신과 수축 때문에 발생하여 길이방향 변형률 분포에 따라 결함의 크기와 반향이 결정된다. 비대칭 단면인 경우에는 불균일한 성형 단면으로 인해 대칭 단면보다 많이 발생한다. 이런 현상을 방지하기 위하여 각각의 패스별로 균일한 길이 방향 변형률을 얻을 수 있도록 롤을 설계하여야 하고, 가이드 롤을 추가하여 길이방향 연신률을 감소시키고 판재의 이동을 원활하게 함으로써 내부 응력을 감소시키는 방법이 있다.

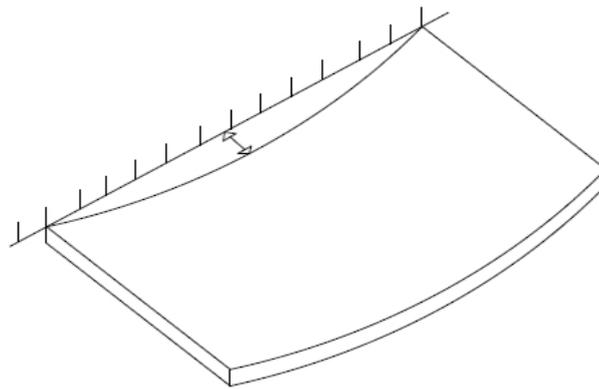


Fig.1 Camber

스크래칭은 판재가 롤 포밍 공정에 들어가면서 롤에 의해 국부적인 변형을 받아 판재 표면에 굽힘 흔적을 갖는 현상이다. 이로 인해 도색하는데 불균형을 초래하여 외관상 보기 좋지 않아 제품의 질을 떨어뜨리게 된다. 이를 방지하기 위해 롤 포밍 공정의 성형 각을 감소시켜 패스별로 판재가 받는 성형량을 감소시킨다.

웨이비는 초기 상태의 판재가 굽힘을 받으면서 소재의 가장자리 부분의 연신이 다른 부분보다 과도하게 증가하게 되어 늘어난 가장자리 부분은 롤의 출구를

지나면서 연신이 다른 부분보다 상대적으로 적게 발생하게 된다. 이때 판재의 가장자리 부분은 다른 부분과 같은 속도로 유지되기 때문에 오히려 수축하게 되고, 소재에 가해지는 압축응력이 허용응력을 넘게 되어 발생된다.

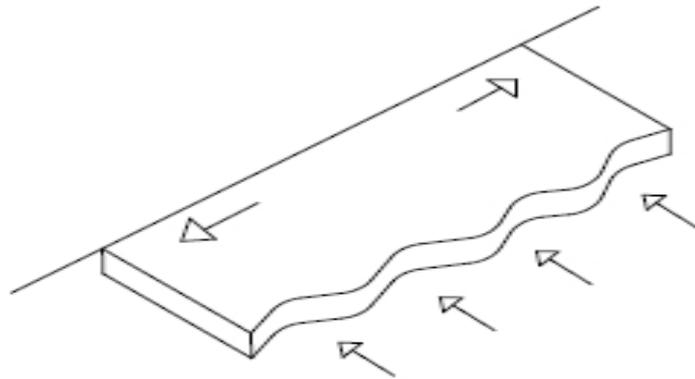


Fig.2 Wavy

플레어는 스프링백의 일종으로 판재가 롤 포밍 공정에서 성형이 될 때나 성형 후 제품을 절단할 때 양끝이 벌어지거나 뒤틀리는 현상이다. 이는 두께 방향의 잔류 전단 응력에 의해 발생된다. 이를 방지하기 위해서는 성형 단수를 증가하여 제품이 받는 응력을 분산하거나 연성이 좋은 소재를 선택하는 방법이 있다.

Ⅲ. 유한요소해석 및 검증

3.1 재료의 시험

본 연구의 해석에 적용한 재질은 동합금, 스테인리스 스틸, 연강으로 롤 포밍 공정에서 흔히 사용되는 재료이다.

3.1.1 시험 방법

재료의 물성치를 알아보기 위한 인장 시험 재료 시편의 규격은 KS B 0802: 2003 금속 재료 인장 시험 방법을 이용하여 각 재질의 따른 규격은 Table 1 과 같고 각 재료의 시편은 Fig.3과 같다.

Table 1 Standards of tensile test specimen

	Thickness (mm)	Width (mm)	Gage length (mm)
Copper alloy steel	1.5	24.98	50
Stainless steel	1.6	24.96	50
Mild steel	1.64	25.01	50

롤 포밍 공정 해석은 재료의 소성 변형 후 스프링 백을 중점적으로 고려하기 위한 결과를 얻기 위해 Fig.4와 같이 실험을 진행하였다.

시험을 통해 탄성계수를 측정한 후 각 재료의 응력-변형을 선도를 측정하였고 이를 진응력-진변형을 선도로 전환하여 유한요소해석 프로그램을 이용하여 해석을 진행할 때 사용한다.



Fig.3 Tensile test specimen

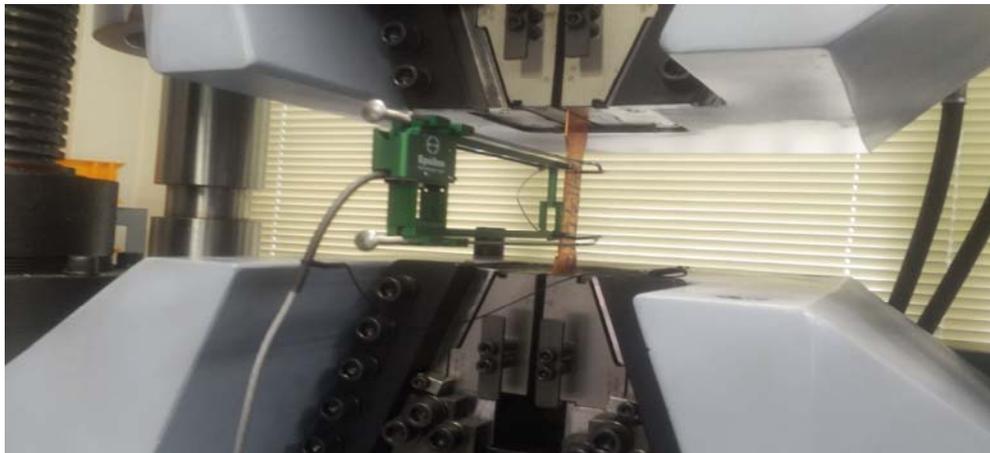


Fig.4 Tensile test

3.1.2 시험 결과

각 재료의 인장시험 결과는 Table 2 , Fig.5와 같이 파단 되었고, 응력-변형을 선도는 Fig.6 ~ Fig.8과 같다.



Fig.5 Result of tensile test

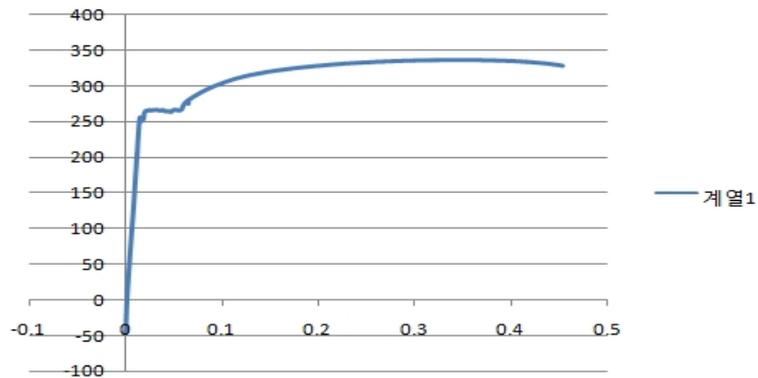


Fig.6 Copper alloy steel of stress-strain curve

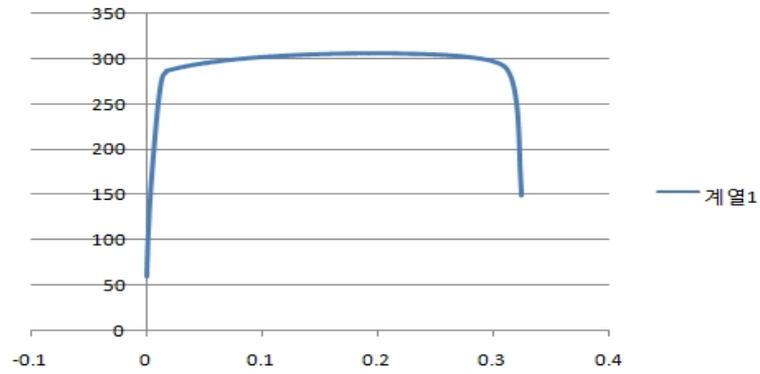


Fig.7 Stainless steel of stress-strain curve

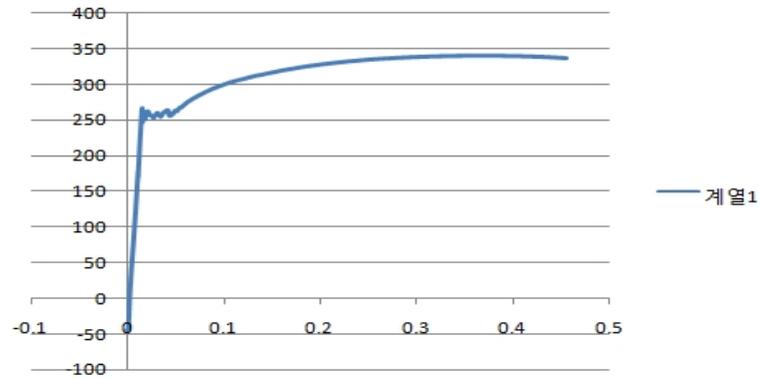


Fig.8 Mild steel of stress-strain curve

Table 2 Material properties

	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation(%)
Copper Alloy steel	281	261	30
Stainless steel	336	252	43
Mild steel	340	251	46

3.2 해석 모델 및 조건

범용 해석 소프트웨어 ABAQUS에서 해석을 진행하기 위하여 Fig.9을 참고 하여 롤 포밍 전용 소프트웨어인 COPRA RF를 이용 플라워 패턴을 Fig. 10과 같이 설계하였다. 플라워 패턴은 3Pass이며, 패스별 밴딩 각도는 15° , 30° , 45° 이다. 플라워 패턴을 통하여 ABAQUS에서 롤 포밍 공정을 Fig.11과 같이 설계하였고 패스별 거리는 230mm로 해석 결과의 검증에 위한 실험과 동일하게 하였다.



Fig.9 3-Pass Roll forming machine

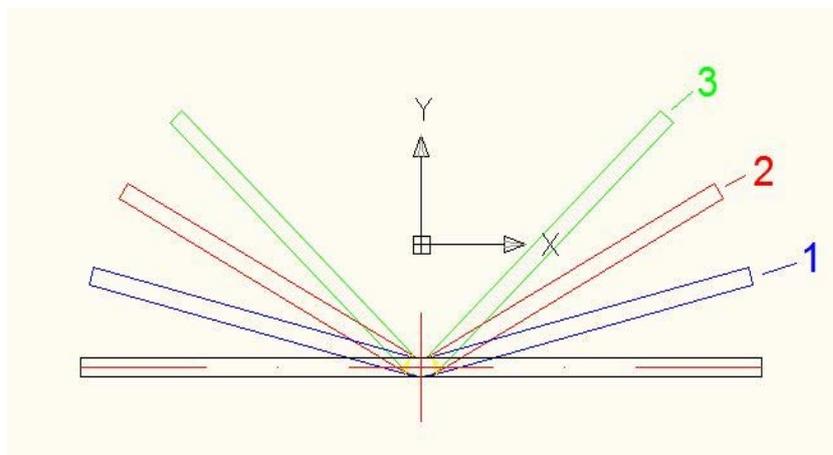


Fig.10 3-Pass flower pattern

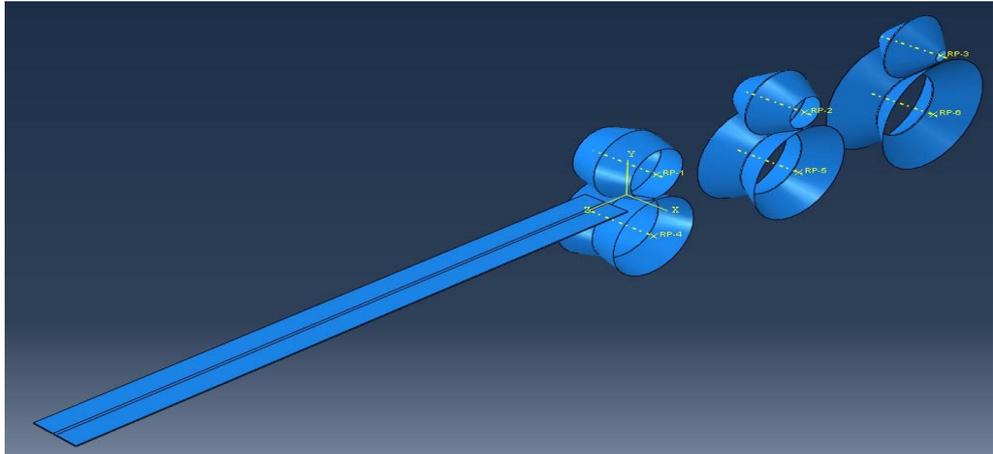


Fig.11 3-Pass roll forming process

3.2.1 해석 조건 설정

해석을 진행하기 위하여 롤 포밍 공정 속도와 롤 금형의 상하 거리(Gap)의 따른 영향을 알아보기 위하여 Table 3 ~ Table 5와 같이 진행하였다.

Table 3 Analysis boundary condition of copper alloy steel

Material		Gap(mm)	Speed(mm/s)
Copper alloy steel(1.5)	CASE-1	1.8	10.35
	CASE-2		24.86
	CASE-3		36.35
	CASE-4		54.2
	CASE-5	2.1	10.35
	CASE-6		24.86
	CASE-7		36.35
	CASE-8		54.2
	CASE-9	2.4	10.35
	CASE-10		24.86
	CASE-11		36.35
	CASE-12		54.2

Table 4 Analysis boundary condition of stainless steel

Material		Gap(mm)	Speed(mm/s)
Stainless steel(1.6)	CASE-1	1.9	10.35
	CASE-2		24.86
	CASE-3		36.35
	CASE-4		54.2
	CASE-5	2.2	10.35
	CASE-6		24.86
	CASE-7		36.35
	CASE-8		54.2
	CASE-9	2.5	10.35
	CASE-10		24.86
	CASE-11		36.35
	CASE-12		54.2

Table 5 Analysis boundary condition of mild steel

Material		Gap(mm)	Speed(mm/s)
Mild steel(1.64)	CASE-1	1.94	10.35
	CASE-2		24.86
	CASE-3		36.35
	CASE-4		54.2
	CASE-5	2.24	10.35
	CASE-6		24.86
	CASE-7		36.35
	CASE-8		54.2
	CASE-9	2.54	10.35
	CASE-10		24.86
	CASE-11		36.35
	CASE-12		54.2

3.2.2 해석 결과

ABAQUS 프로그램을 통한 해석 결과를 통하여 변형율과 스프링 백을 확인하였으며, 스프링 백은 Fig.12와 같이 결과 값 θ_s 를 목표 값 θ_f 와 관계^[14]를 이용하여 확인하였다.

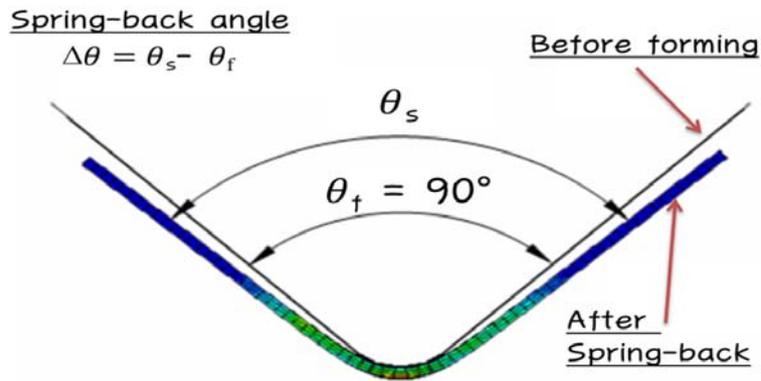


Fig.12 Spring-back

동합금의 변형율 결과는 Fig.13 ~ Fig.25, 스테인리스 스틸은 Fig.27 ~ Fig.39, 연강은 Fig.41 ~ Fig.53이고, 스프링 백은 Table 6 ~ Table 8과 같다.

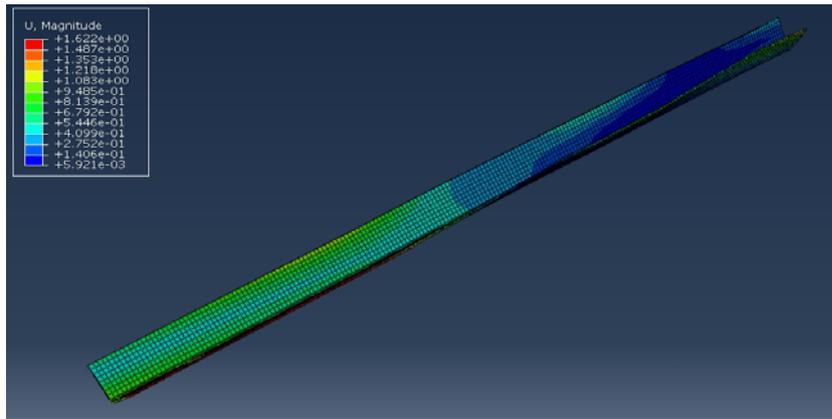


Fig.13 Strain distribution of copper alloy steel CASE-1

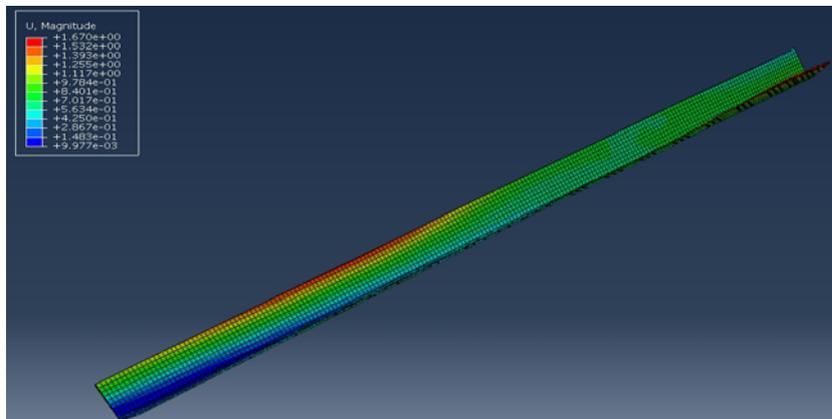


Fig.14 Strain distribution of copper alloy steel CASE-2

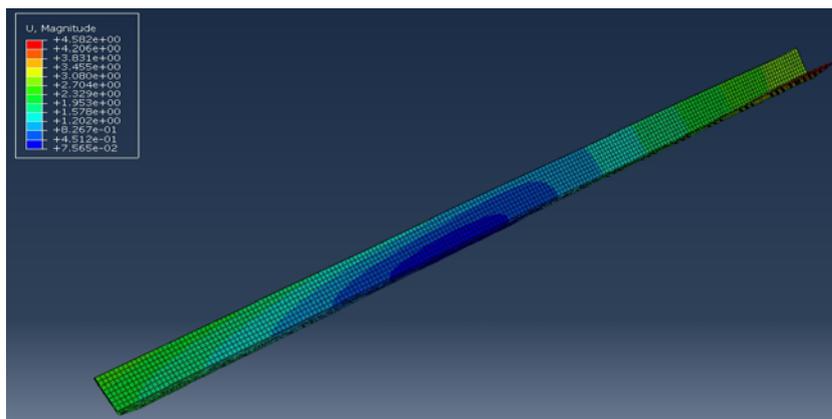


Fig.15 Strain distribution of copper alloy steel CASE-3

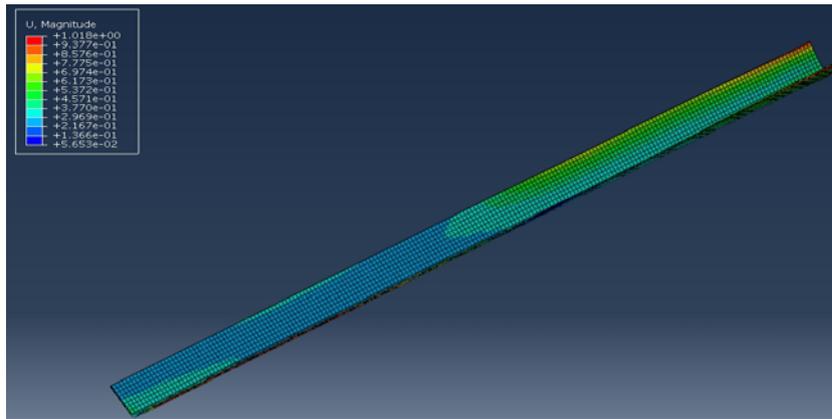


Fig.16 Strain distribution of copper alloy steel CASE-4

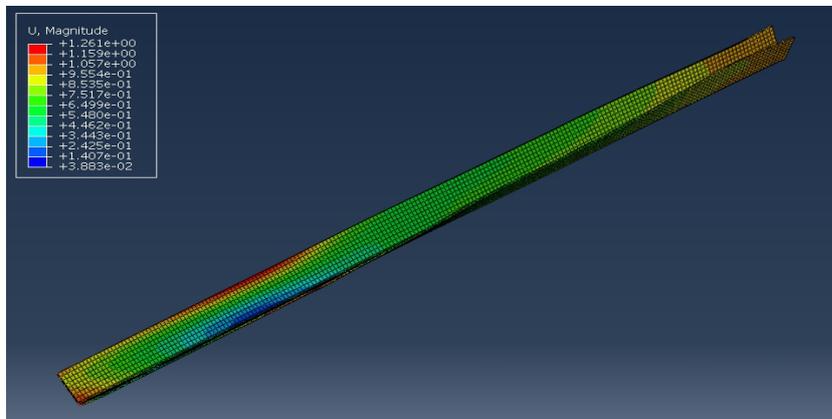


Fig.17 Strain distribution of copper alloy steel CASE-5

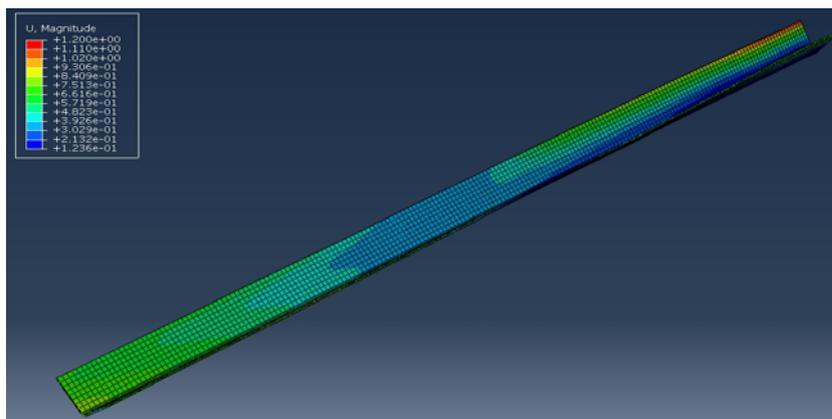


Fig.18 Strain distribution of copper alloy steel CASE-6

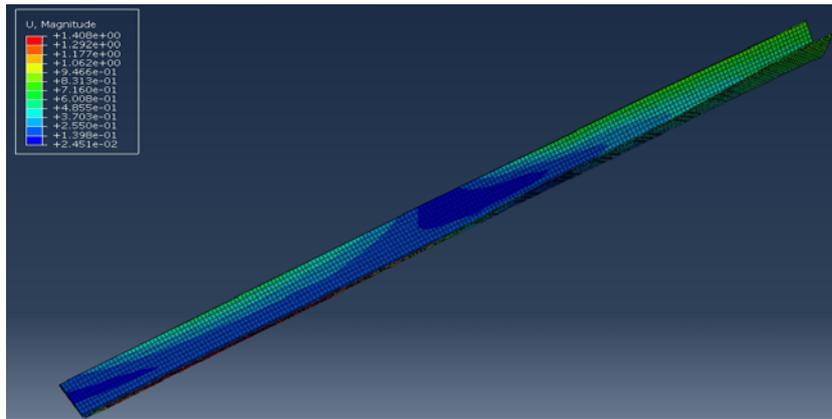


Fig.19 Strain distribution of copper alloy steel CASE-7

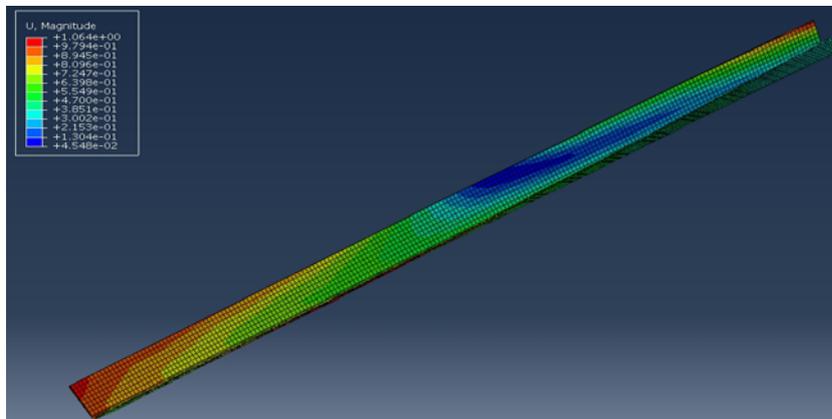


Fig.20 Strain distribution of copper alloy steel CASE-8

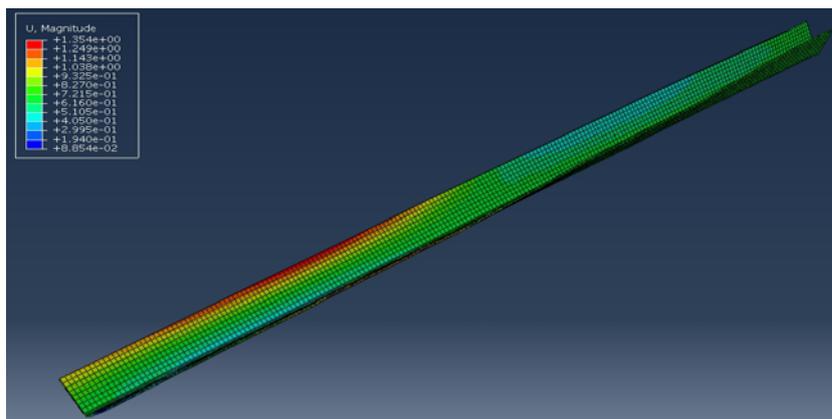


Fig.21 Strain distribution of copper alloy steel CASE-9

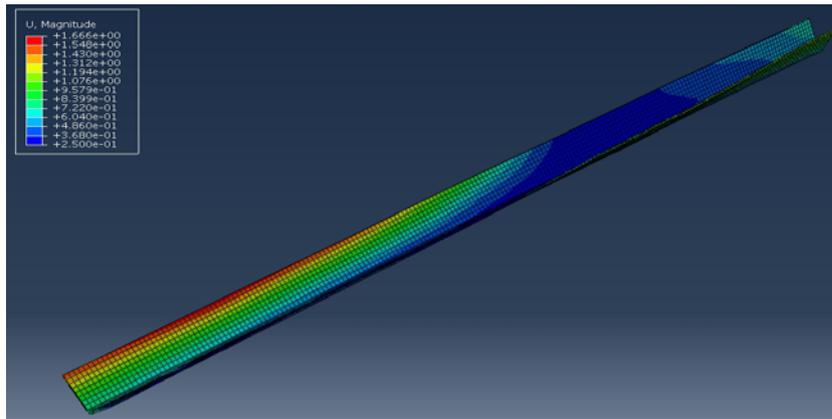


Fig.22 Strain distribution of copper alloy steel CASE-10

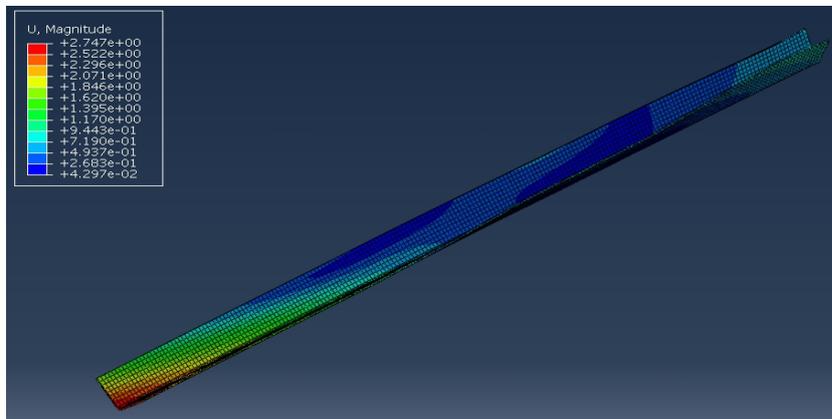


Fig.23 Strain distribution of copper alloy steel CASE-11

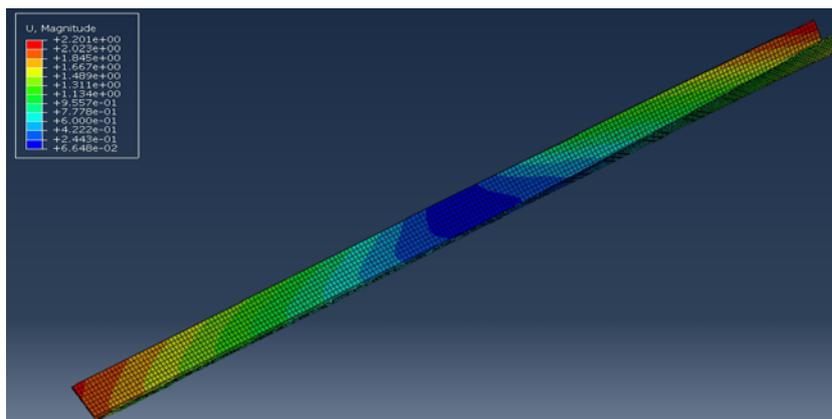


Fig.24 Strain distribution of copper alloy steel CASE-12

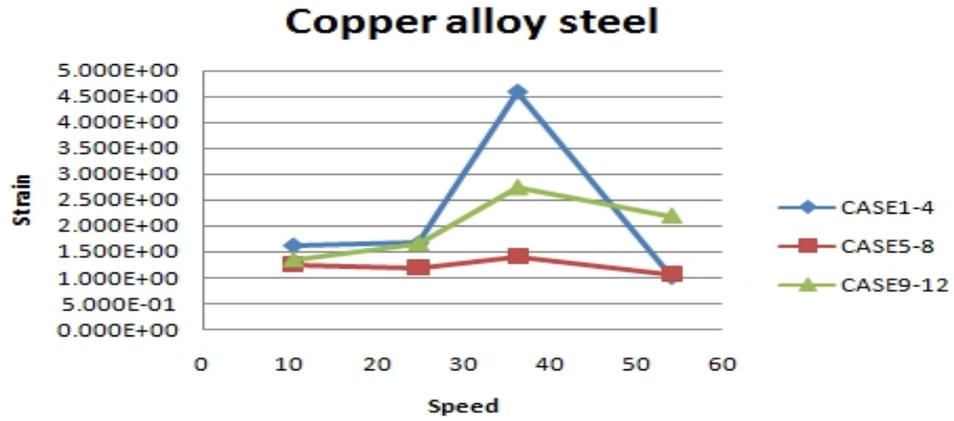


Fig.25 Strain distribution of copper alloy steel

Table 6 Spring-back of copper alloy steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprinback(°)	3	3.1	3.3	3.2	5.3	5.8
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprinback(°)	8.5	8	8.8	9.3	9.8	9.3

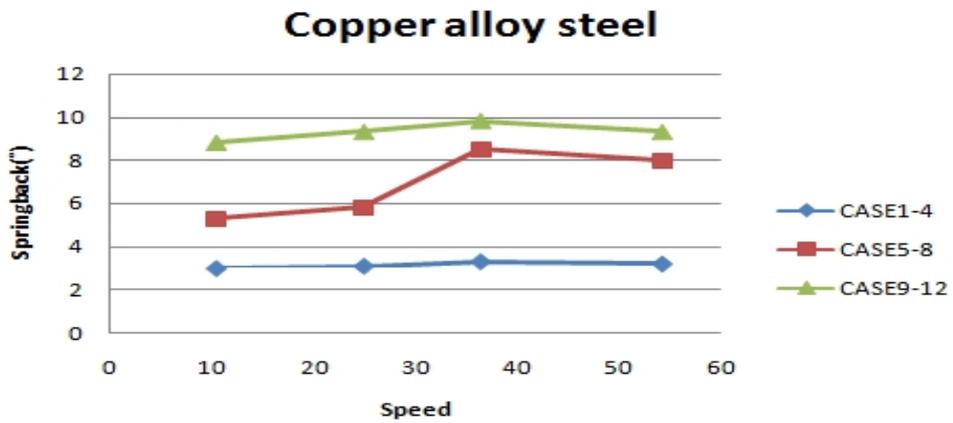


Fig.26 Spring-back of copper alloy steel

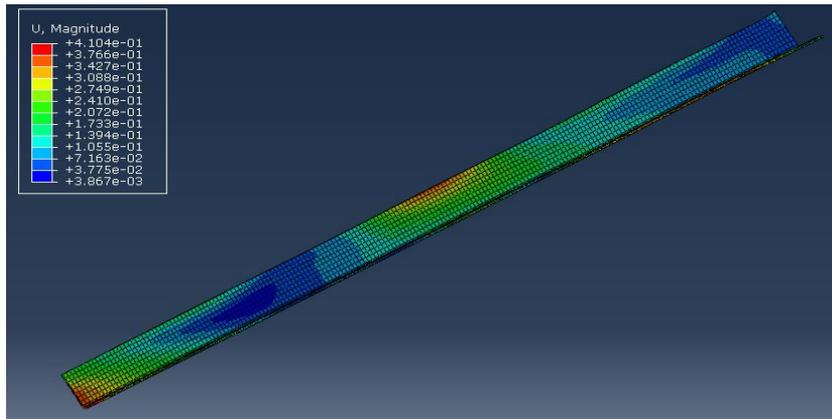


Fig.27 Strain distribution of stainless steel CASE-1

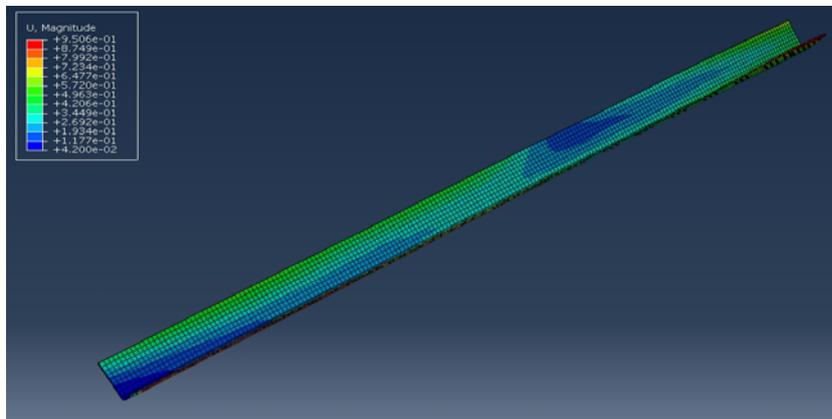


Fig.28 Strain distribution of stainless steel CASE-2

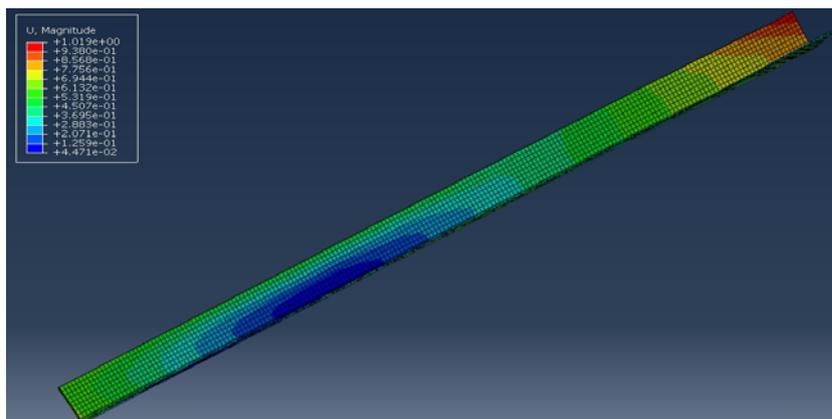


Fig.29 Strain distribution of stainless steel CASE-3

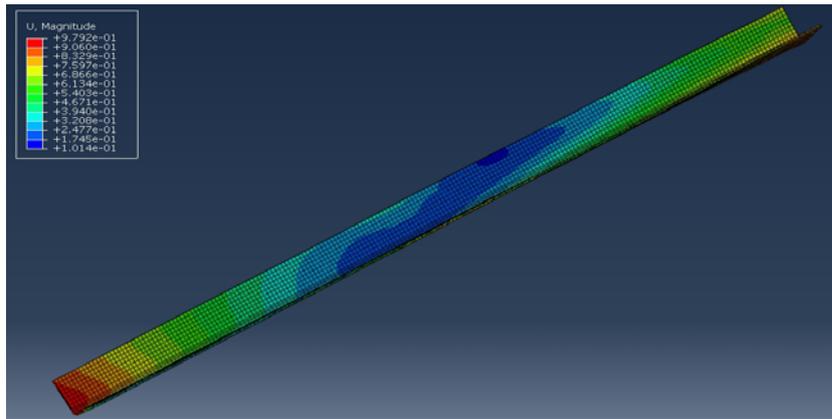


Fig.30 Strain distribution of stainless steel CASE-4

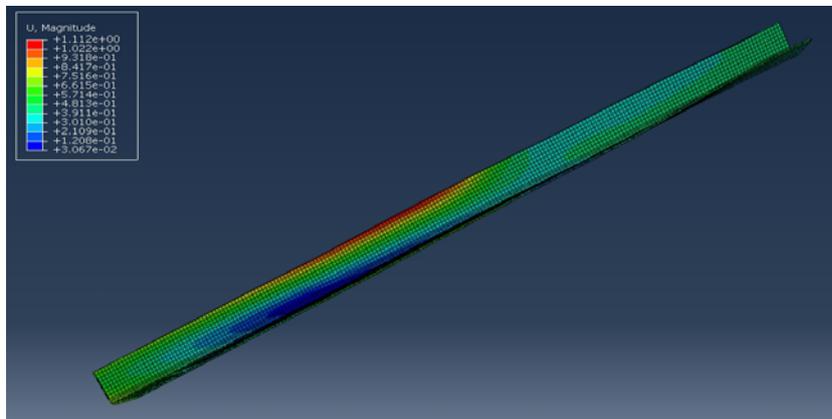


Fig.31 Strain distribution of stainless steel CASE-5

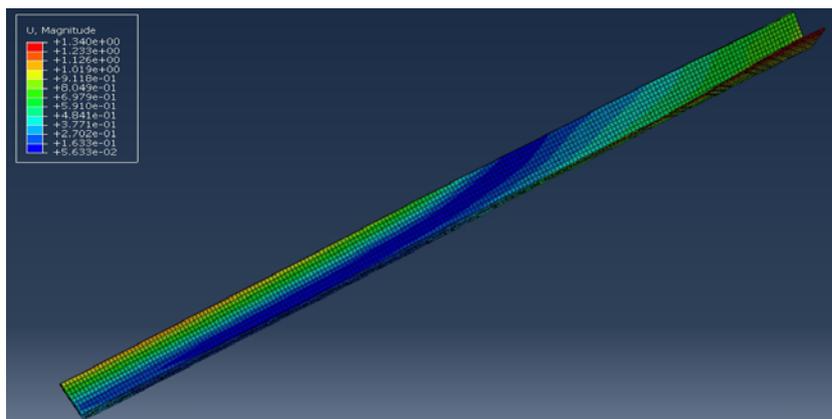


Fig.32 Strain distribution of stainless steel CASE-6

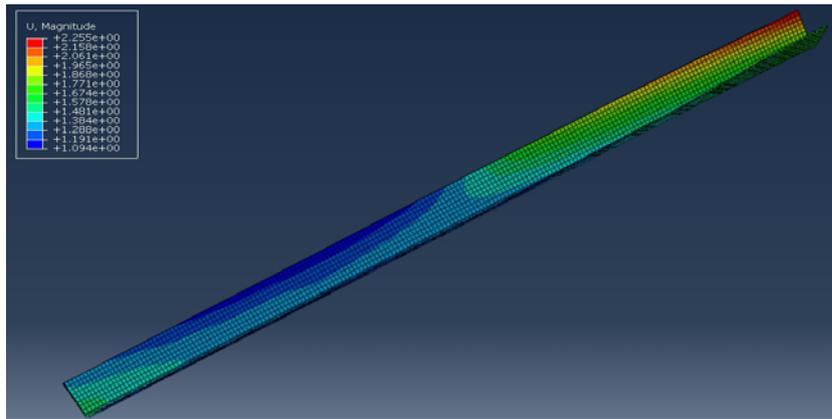


Fig.33 Strain distribution of stainless steel CASE-7

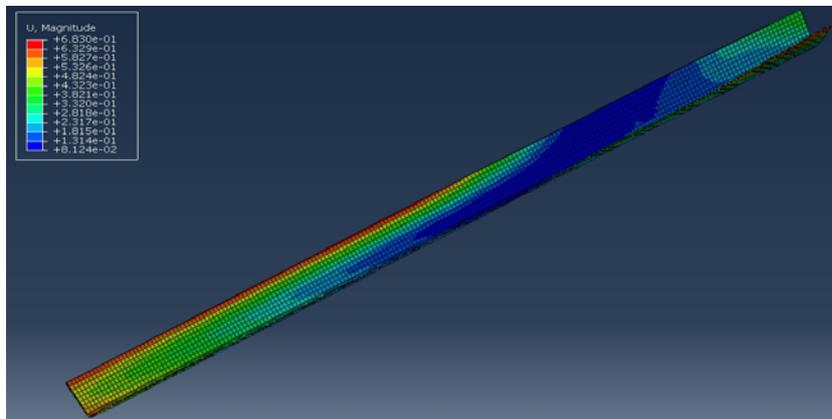


Fig.34 Strain distribution of stainless steel CASE-8

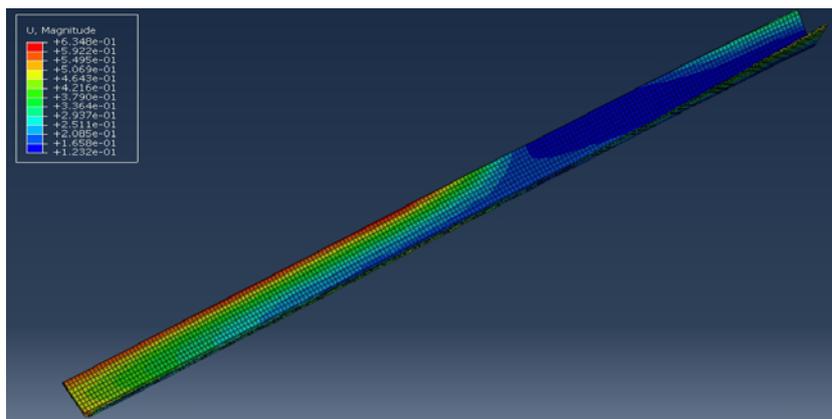


Fig.35 Strain distribution of stainless steel CASE-9

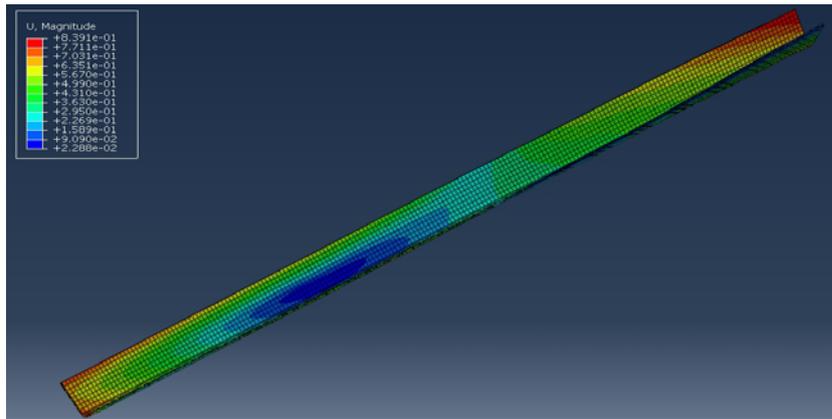


Fig.36 Strain distribution of stainless steel CASE-10

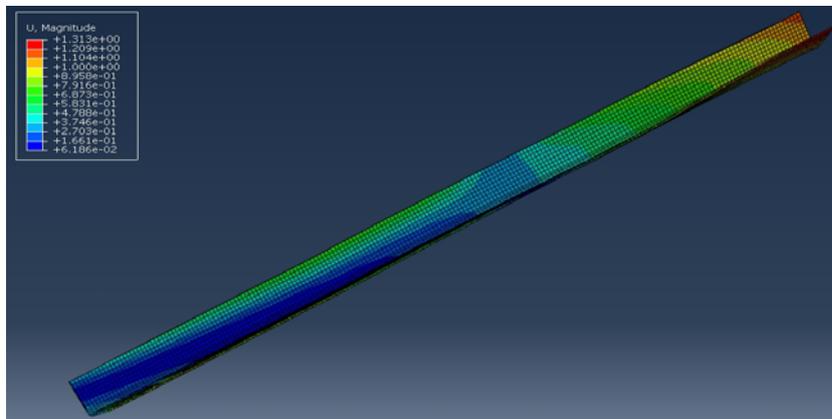


Fig.37 Strain distribution of stainless steel CASE-11

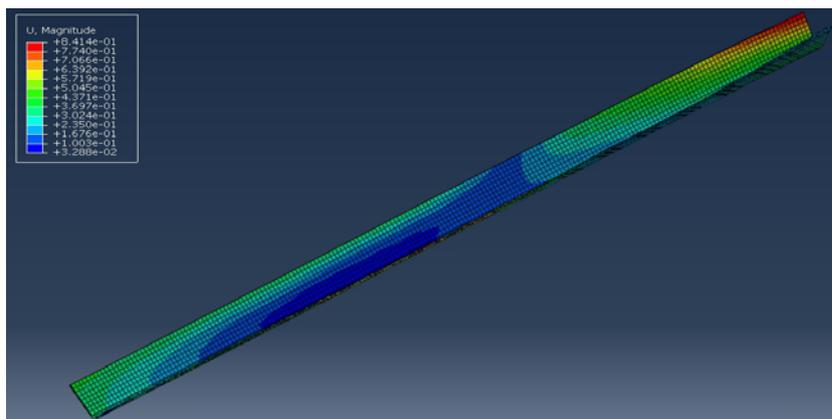


Fig.38 Strain distribution of stainless steel CASE-12

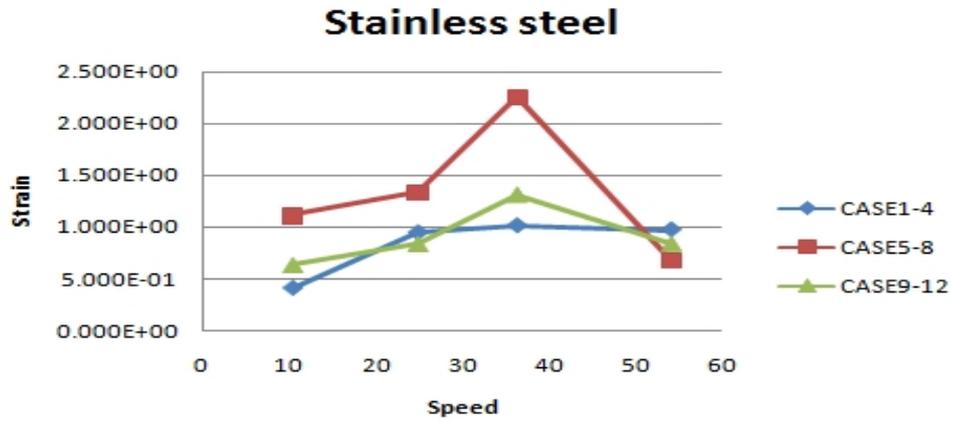


Fig.39 Strain distribution of copper alloy steel

Table 7 Spring-back of stainless steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprinback(°)	1.5	2.1	2.4	2.2	4	5.5
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprinback(°)	6.2	5	5.05	5.2	6	5.5



Fig.40 Spring-back of stainless steel

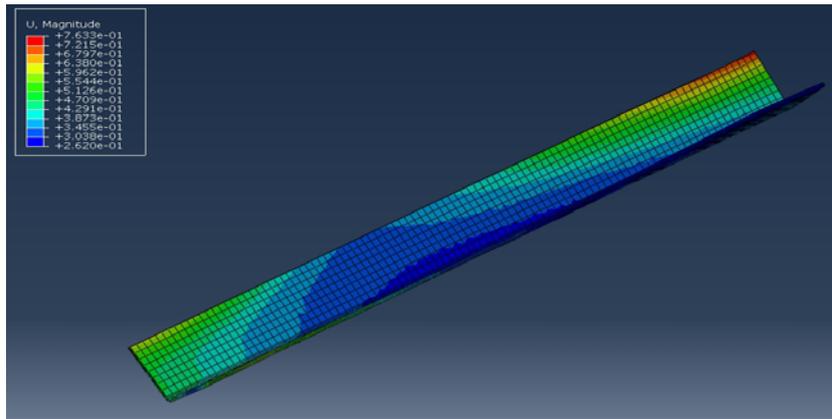


Fig.41 Strain distribution of mild steel CASE-1

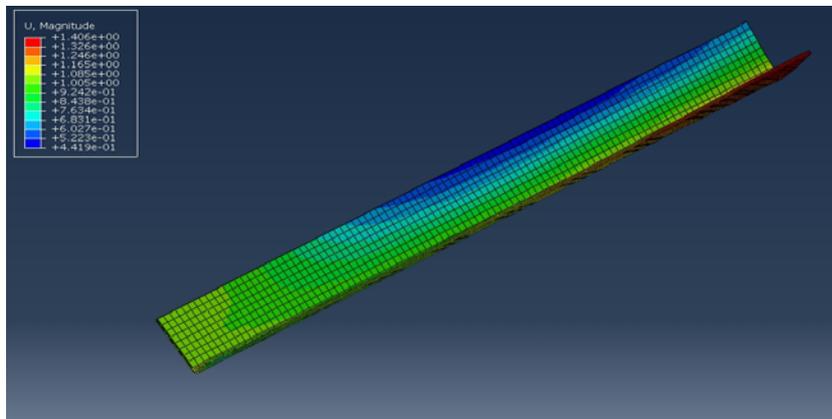


Fig.42 Strain distribution of mild steel CASE-2

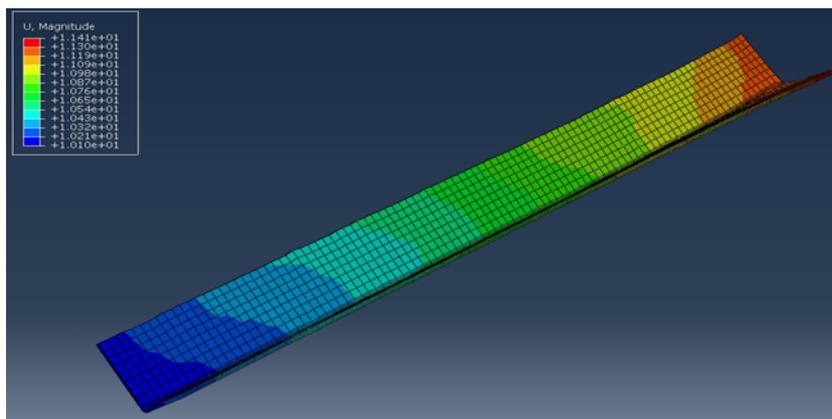


Fig.43 Strain distribution of mild steel CASE-3

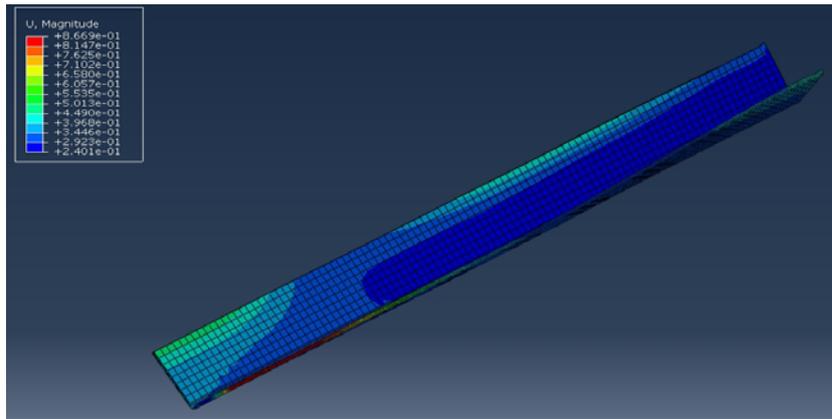


Fig.44 Strain distribution of mild steel CASE-4

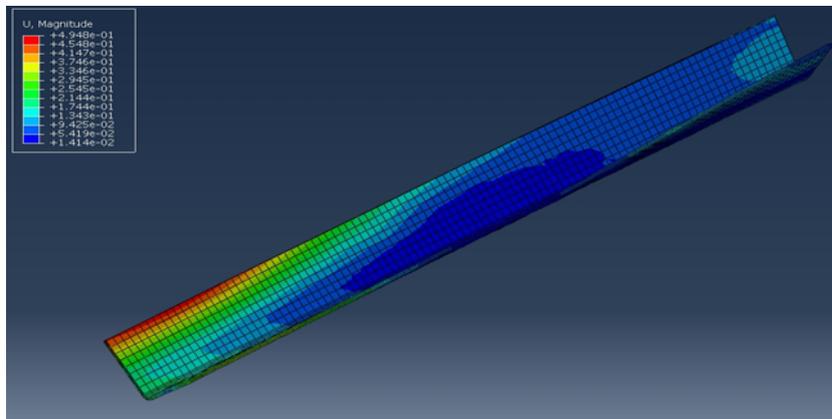


Fig.45 Strain distribution of mild steel CASE-5

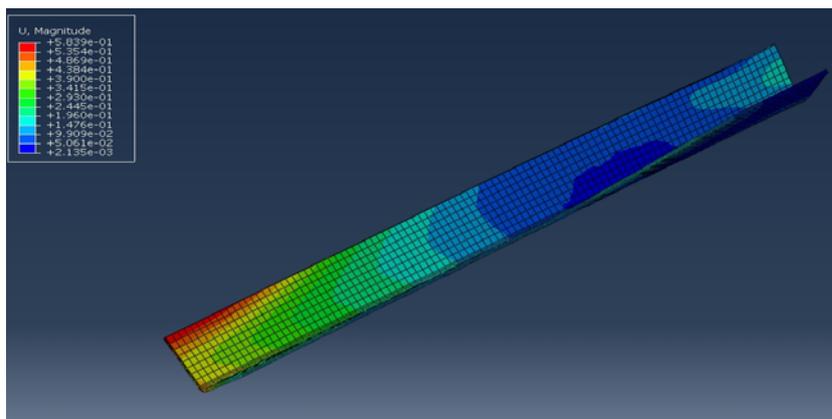


Fig.46 Strain distribution of mild steel CASE-6

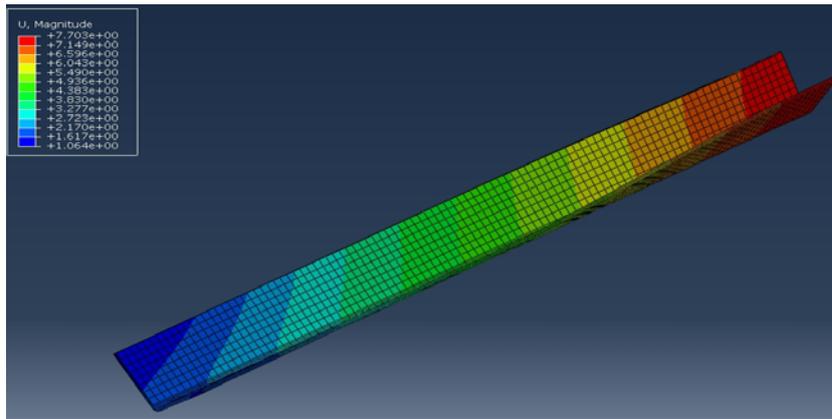


Fig.47 Strain distribution of mild steel CASE-7

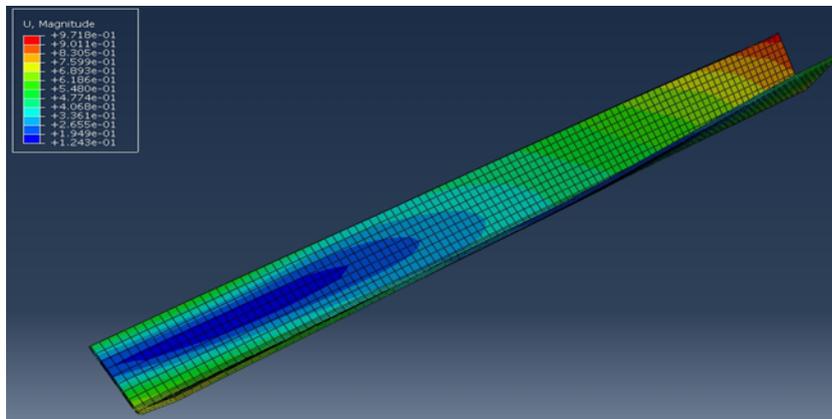


Fig.48 Strain distribution of mild steel CASE-8

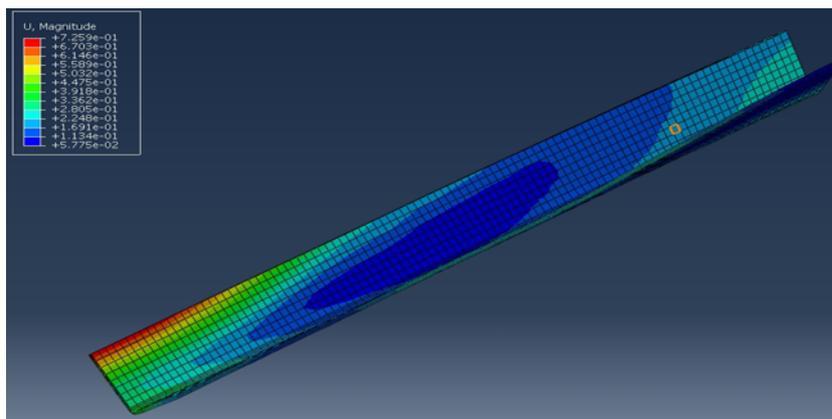


Fig.49 Strain distribution of mild steel CASE-9

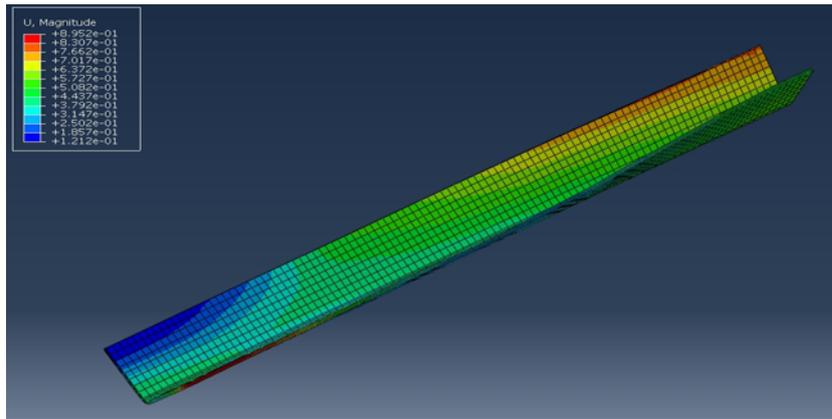


Fig.50 Strain distribution of mild steel CASE-10

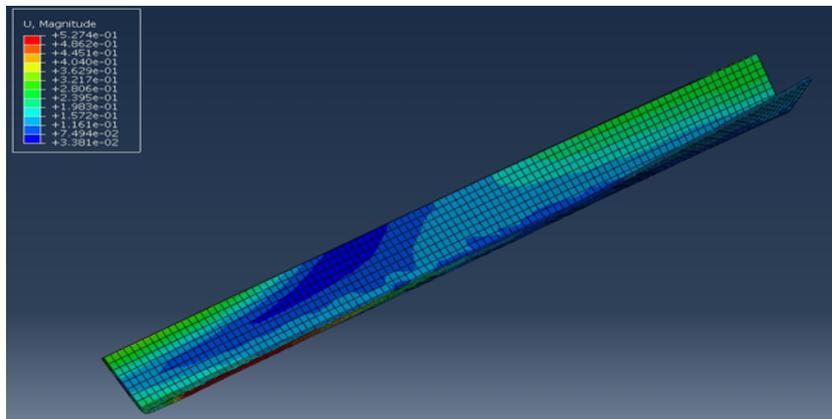


Fig.51 Strain distribution of mild steel CASE-11

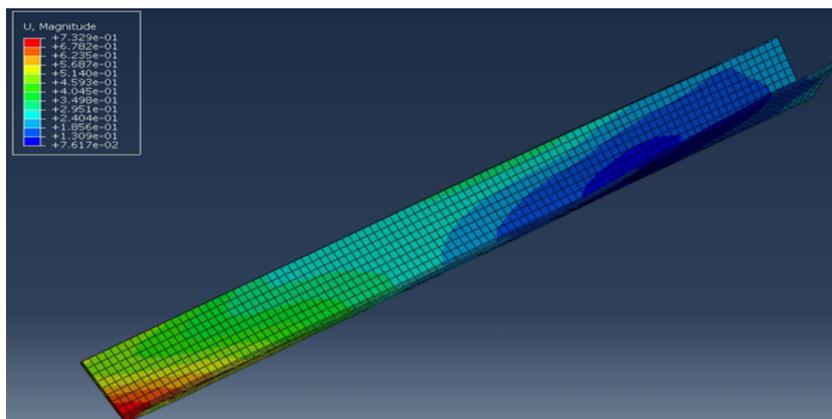


Fig.52 Strain distribution of mild steel CASE-12

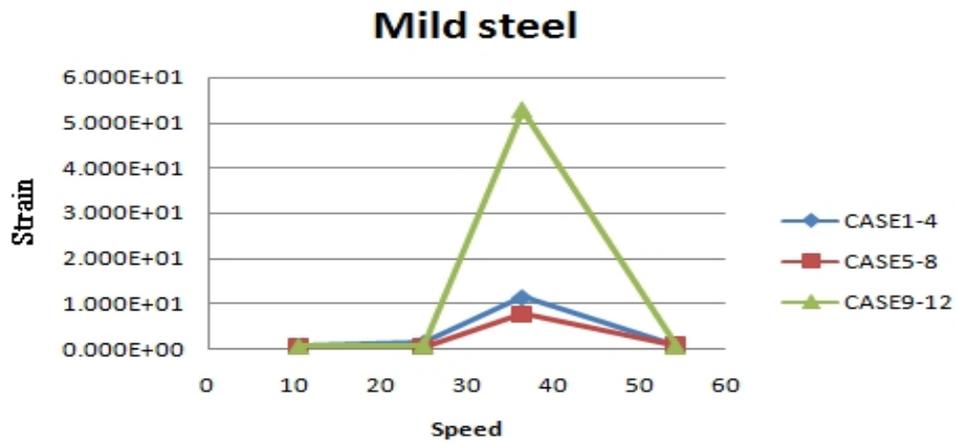


Fig.53 Strain distribution of mild steel

Table 8 Spring-back of Mild steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprinback(°)	3.2	3.4	3.6	3.4	4.5	4.9
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprinback(°)	5.1	4.7	4.7	5.3	5.5	4.9

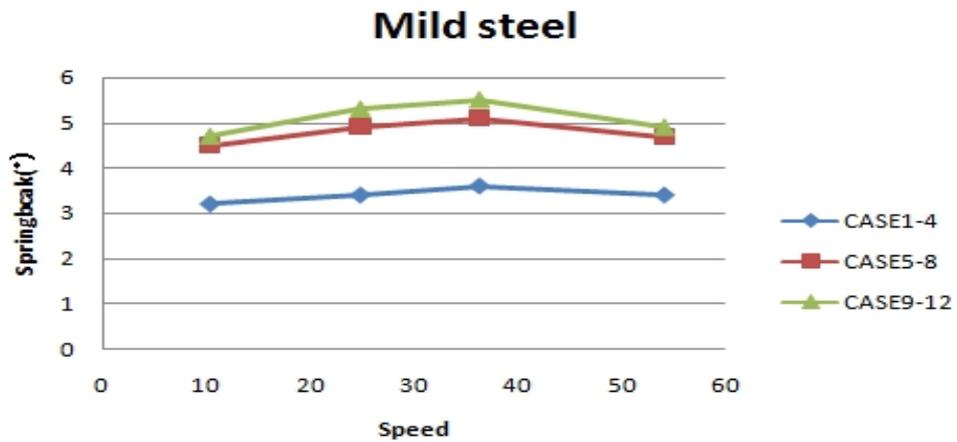


Fig.54 Spring-back of mild steel

3.2.3 해석 결과 검증 및 비교

해석 결과의 검증은 롤 포밍 해석과 같은 조건을 이용하여 롤 포밍 실험을 진행하였다. 실험 결과 Fig.55 ~ Fig.59 같고 과 같은 방법으로 스프링 백을 측정된 값을 해석 결과로 측정된 스프링 백과 비교하였다.



Fig.55 Result of roll forming experiment about stainless steel

Table 9 Result of roll forming experiment about stainless steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprinback(°)	1.8	2.05	2.4	2.1	4.7	5
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprinback(°)	5.55	5	5.1	5.15	5.8	5.45

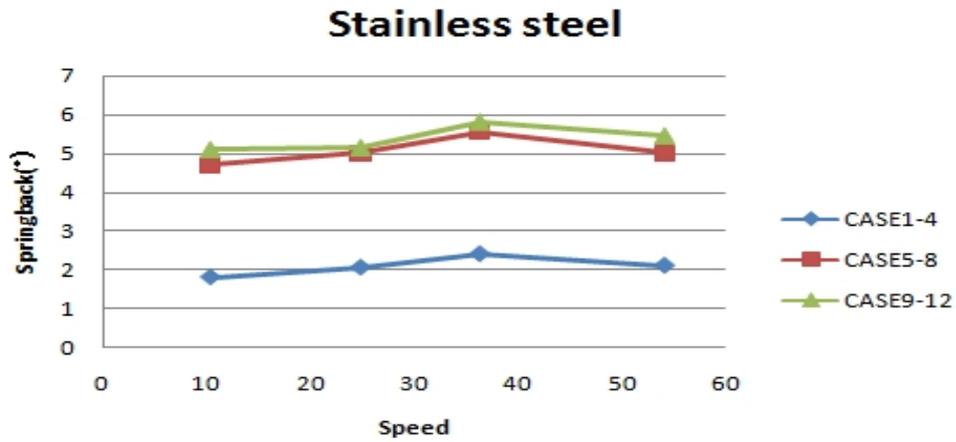


Fig.56 Spring-back of roll forming experiment about stainless steel

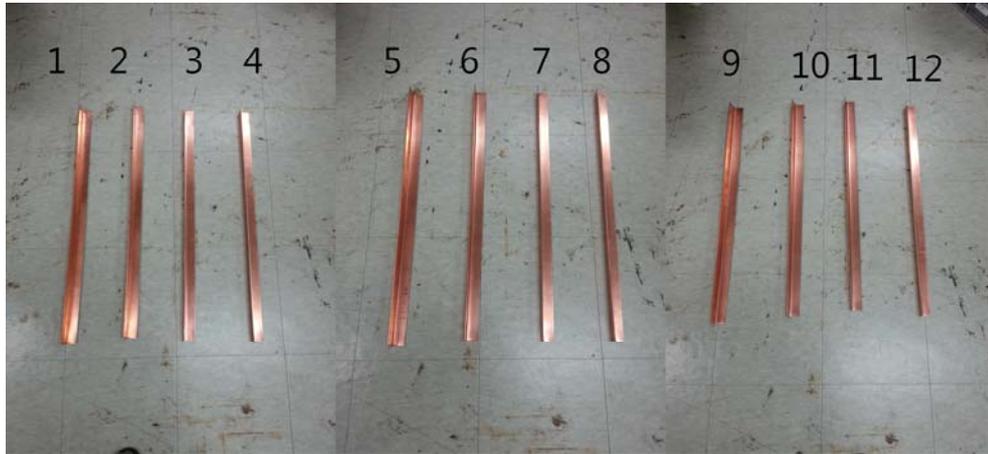


Fig.57 Result of roll forming experiment about copper alloy steel

Table 10 Result of roll forming experiment about copper alloy steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprin-back(°)	3.3	3.4	4.5	4.1	5.1	5.8
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprin-back(°)	8	7.3	9	9.5	9.8	9.2



Fig.58 Spring-back of roll forming experiment about copper alloy steel

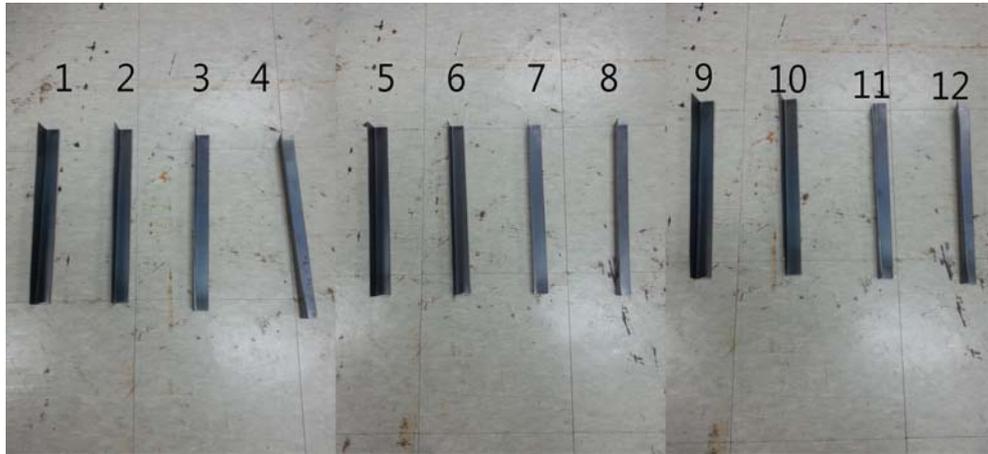


Fig.59 Result of roll forming experiment about mild steel

Table 11 Result of roll forming experiment about mild steel

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
Sprin-back(°)	3	3.35	3.85	3.2	4.3	4.8
CASE	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11	CASE-12
Sprin-back(°)	4.95	4.65	4.5	5	5.2	5

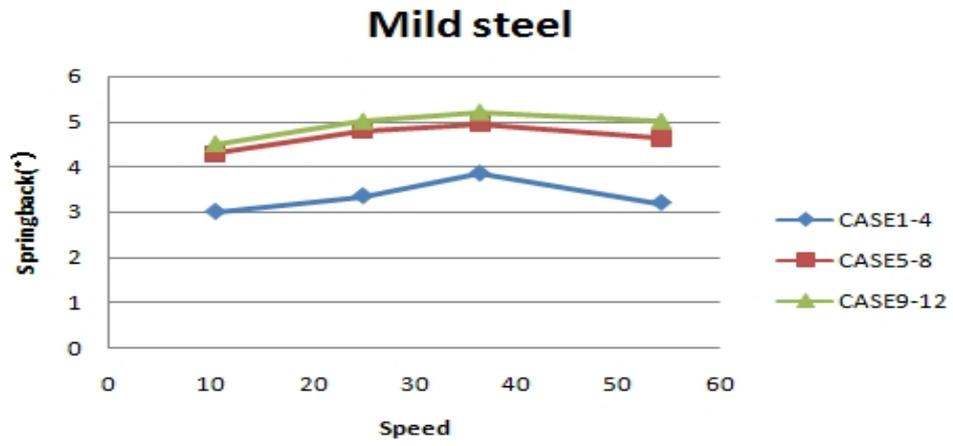


Fig.60 Spring-back of roll forming experiment about mild steel

3.2.4 해석 결과에 따른 추가 해석

재료에 따른 스프링 백을 확인한 결과 공정 속도보다 롤 포밍 상하 롤 금형 거리(GAP)에 따른 차이가 많이 나는 것을 확인 할 수 있다. 결과에서는 해석 조건에서 가장 적은 거리인 0.3mm에서 스프링 백이 가장 적었다.

해석 결과에 따른 추가 해석에서 상하 롤 거리 0mm, 0.1mm, 0.2mm 3가지 거리를 이용하였다. 해석에 쓰일 재료 물성치는 앞서 진행했던 해석에서 각 재료에 따른 스프링 백 해석 결과 그래프 형상이 유사 하므로 연강을 사용하여 진행하고 공정 속도는 79.25로 하였다. 이를 통해 결과로 스프링백을 확인하였다.

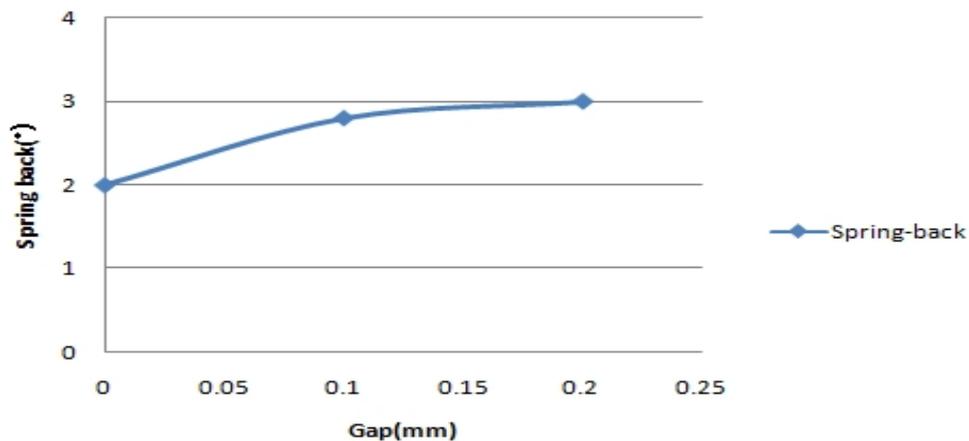


Fig.61 Spring-back of additional analysis

해석 결과는 Fig.61과 같이 상하 롤 간 거리가 줄어들수록 스프링 백이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig.62 ~ Fig.64와 같이 해석 후 형상을 확인한 결과 상하 롤 간 거리가 줄어들수록 플레어 형상이 증가하고, 0mm 일 때 플레어가 가장 많이 나타나는 것을 볼 수 있다. 롤 간 거리가 0mm일 때도 실험을 진행하려 했으나 판재가 롤 포밍 공정 진행 중에 중간에서 끼이는 형상이 나타나서 결과를 확인 할 수 없었다.

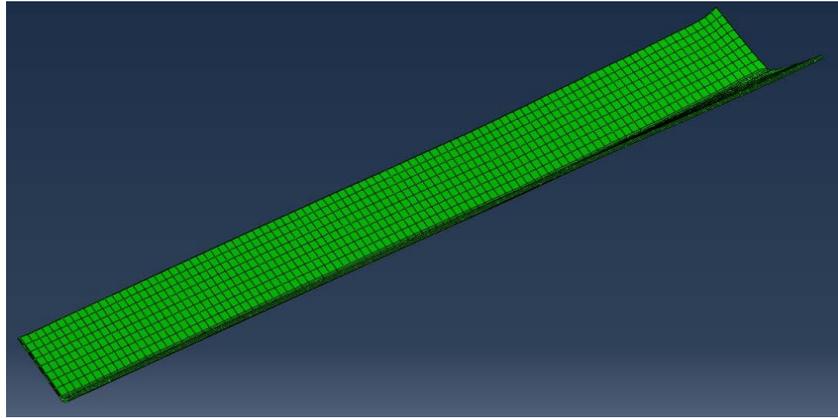


Fig.62 Spring-back of gap between rolls: 0mm

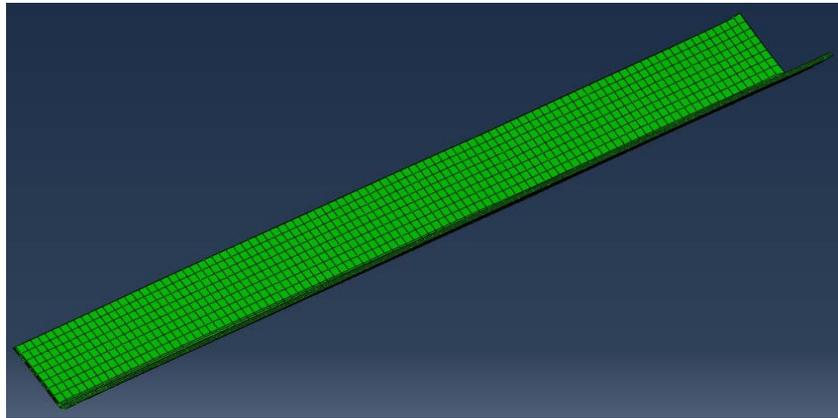


Fig.63 Spring-back of gap between rolls: 0.1mm

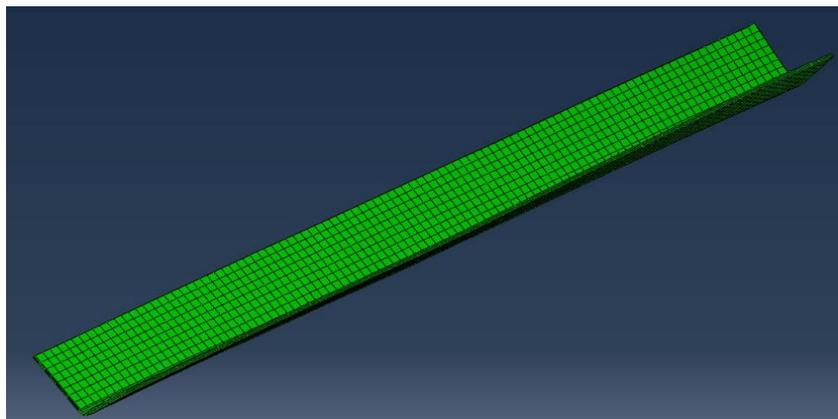


Fig.64 Spring-back of gap between rolls: 0.2mm

3.2.5 오버 밴딩을 통한 개선

해석과 실험의 결과를 통하여 나온 결과를 가장 쉽게 개선하는 방법으로 오버 밴딩을 이용한다. 조건은 속도는 10.35mm/s, Gap은 동합금은 1.8mm, 스테인리스 스틸 1.9mm 그리고 연강은 1.94mm로 하였고 나머지는 앞서 진행했던 해석과 실험과 동일하다. 3패스 실험과 해석에서는 45° 이고, 오버 밴딩을 위해 패스를 추가하여 최종 4패스는 46.5° 로 목표 각도 90° 보다 3° 더 추가하였다.

Table 12 Spring-back of roll forming experiment about overbending

	Copper alloy steel	Stainless steel	Mild steel
Experiment	1.9	2	0.4
Anaysis	1.2	1.7	0.1

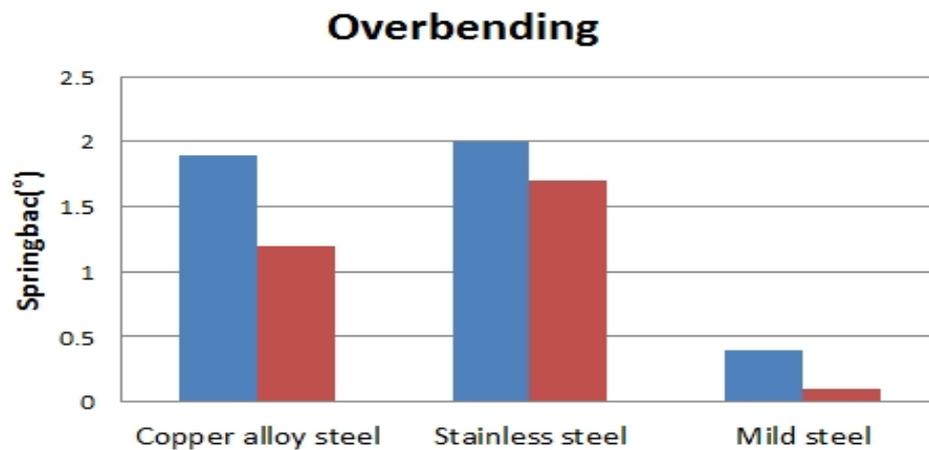


Fig.65 Spring-back of roll forming experiment and analysis about overbending

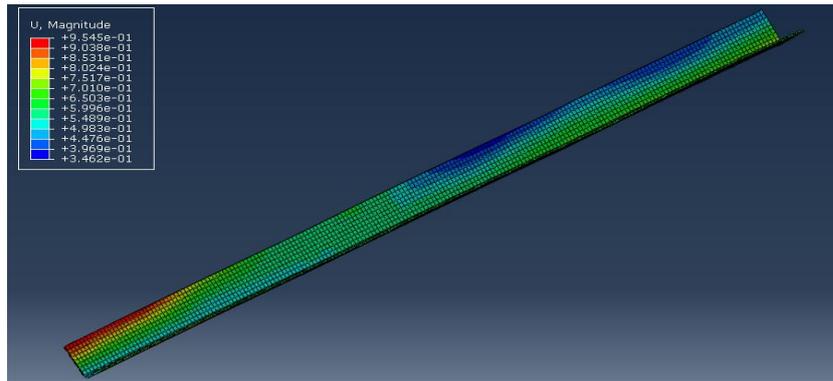


Fig.66 Strain distribution of roll forming experiment about copper alloy steel overbending

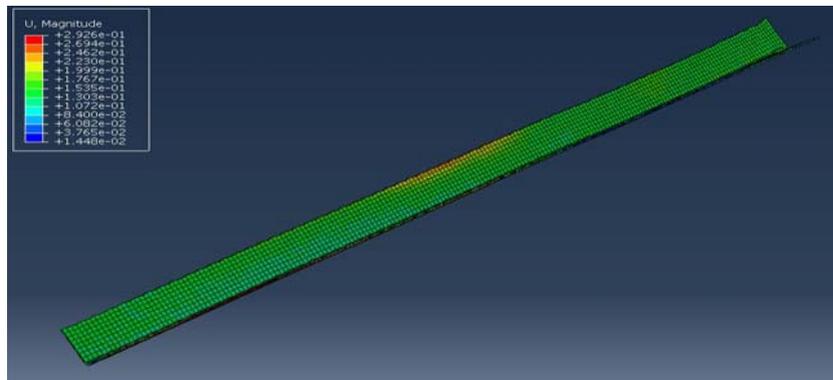


Fig.67 Strain distribution of roll forming experiment about stainless steel overbending

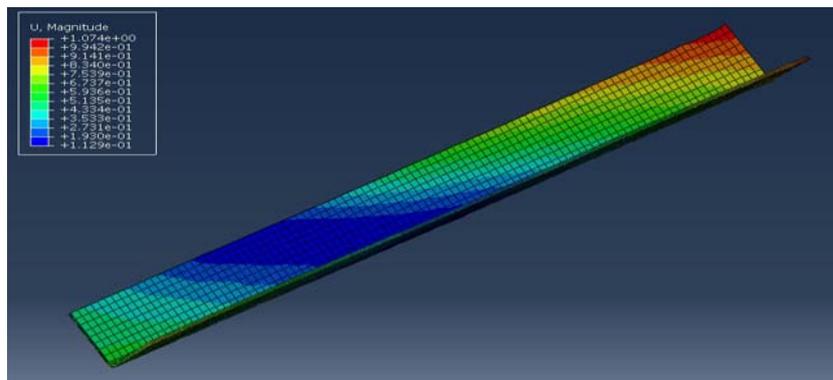


Fig.68 Strain distribution of roll forming experiment about mild steel overbending

IV. COPRA RF와 ABAQUS를 이용한 설계 및 해석

COPRA RF는 롤 포밍 전용 소프트웨어로 롤 포밍을 위한 형상을 설정한 후, 패스별 밴딩 각도를 설정하여 플라워 패턴을 설계 할 수 있다. 이를 통하여 각 패스별 길이방향 변형율(longitudinal strain) 확인 할 수 있다. 이를 통하여 최적의 밴딩 각도와 패스 수를 확인하기 수월해진다. COPRA RF를 이용한 설계를 통하여 ABAQUS를 이용하여 설계를 통하여 스프링 백을 확인하여 실험을 통하지 않고 프로그램만을 이용하여 진행하였다.

4.1 COPRA RF를 통한 공정 설계 위한 모델 설정

COPRA RF을 통한 공정 설계를 위해 Fig.69 과 같은 형상으로 롤 포밍 공정 설계를 진행하고 길이방향 변형율을 확인하기 위해 물성치는 앞서 사용했던 연강 물성치를 이용하였고 두께는 1.64mm이다. 각 부분의 밴딩 부분의 R값은 3이고, 밴딩 부분간 거리는 각 10mm이고 총 성형 각도는 45° 이다. 그림에서 A~F 부분에서 스프링 백을 확인한다.

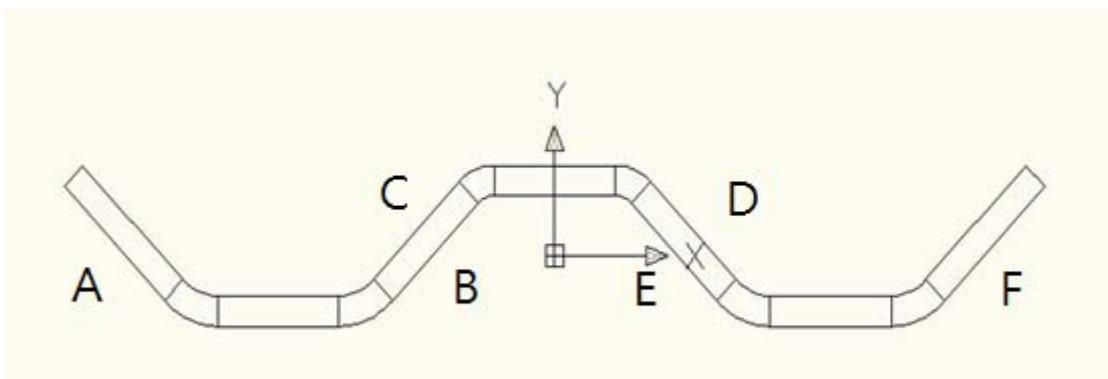


Fig.69 Shape of design using COPRA RF

4.2 COPRA RF를 통한 공정 설계

4.2.1 COPRA RF를 통한 공정 1차 설계

처음은 밴딩 각도를 15° 씩 3패스로 Fig.70 과 같이 플라워 패턴을 설계하였다. 설계 후 Fig.71와 같이 각 패스 별 길이방향 변형율을 확인한 결과 2패스에서 3패스로 넘어가는 순간 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

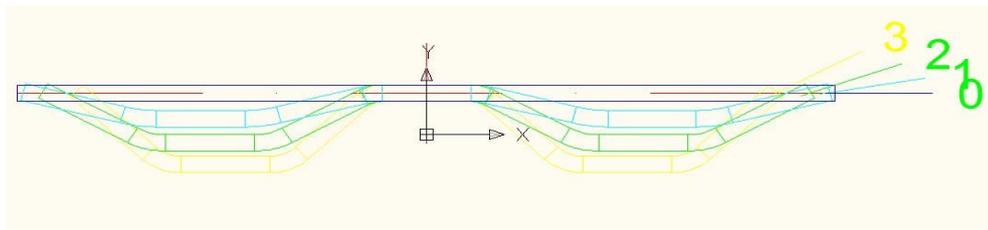


Fig.70 3-pass flower pattern about COPRA RF

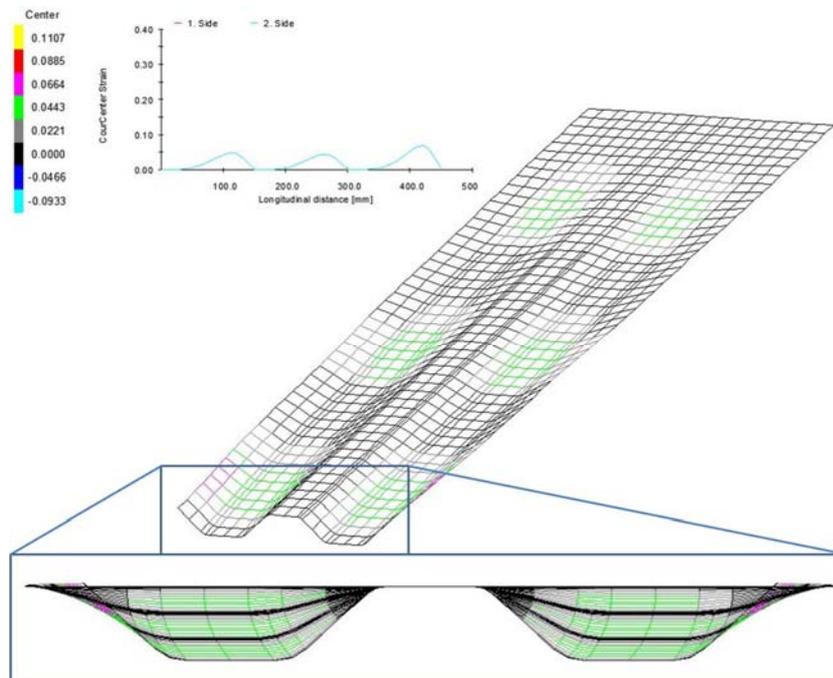


Fig.71 Longitudinal strain of 3-pass

4.2.2 COPRA RF를 통한 공정 2차 설계

증가한 부분을 보정하기 위하여 2패스와 3패스 사이에 밴딩 각도 22.5°의 패스를 추가하여 Fig.72 플라워 패턴을 설계하였고, Fig.73와 같이 길이방향 변형율을 확인한 결과 3~4패스는 길이방향 변형율은 감소하였지만 1~2패스와의 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다.

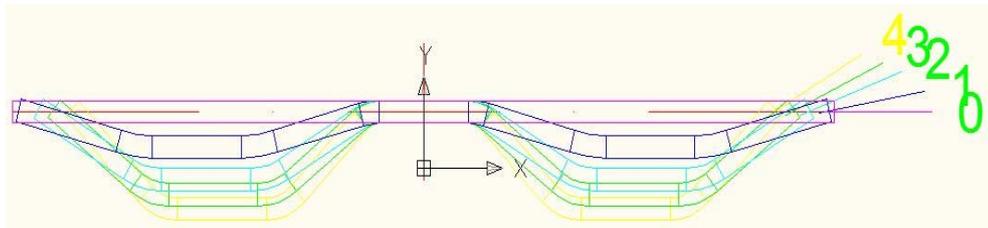


Fig.72 4-pass flower pattern about COPRA RF

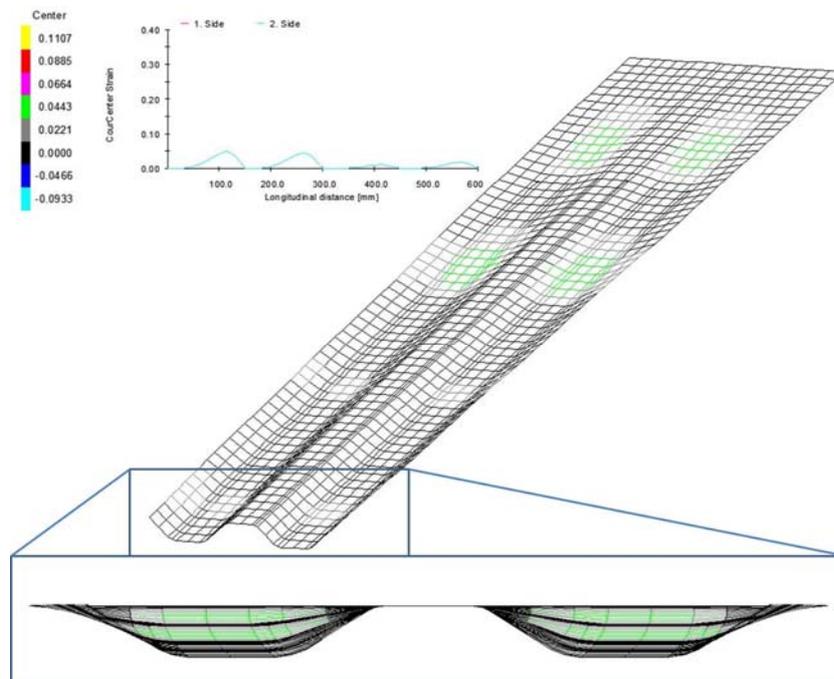


Fig.73 Longitudinal strain of 4-pass

4.2.3 COPRA RF를 통한 공정 3차 설계

이를 보정하기 위해 1패스 앞 부분과 1패스와 2패스 사이 부분에 패스를 추가하여, Fig.74 같이 총 6패스의 플라워 패턴을 설계하여 Fig.75 길이방향 변형율을 확인하여 1~6패스 각 부분의 길이방향 변형율이 거의 일정한 것을 확인할 수 있었다.

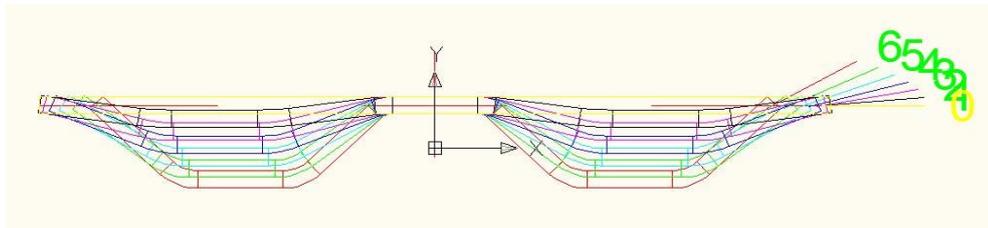


Fig.74 6-pass flower pattern about COPRA RF

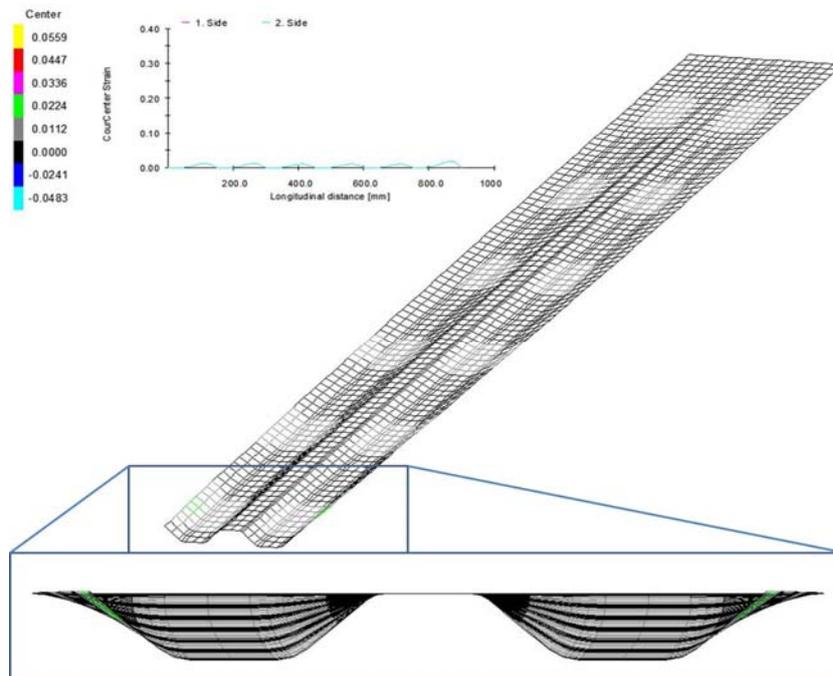


Fig.75 Longitudinal strain of 6-pass

4.3 COPRA RF 설계 결과를 통한 해석 조건 및 결과

COPRA RF를 이용한 3차레 설계 Table 13을 공정 조건으로 하여 ABAQUS를 이용한 해석을 진행하였다.

Table 13 Boundary condition of analysis about COPRA RF

	Material	Pass distance	Total passes	Speed (mm/s)	gap(mm)
1	연강	150	3	10.35	1.94
2			4		
3			6		

4.3.1 ABAQUS를 이용한 1차 해석

COPRA RF를 이용한 1차 설계에서 설계했던 플라워 패턴을 이용하여 Fig. 72 과 같이 롤 포밍 공정 모델링을 하였다. 해석 결과는 Table 14, Fig. 73 과 같다.

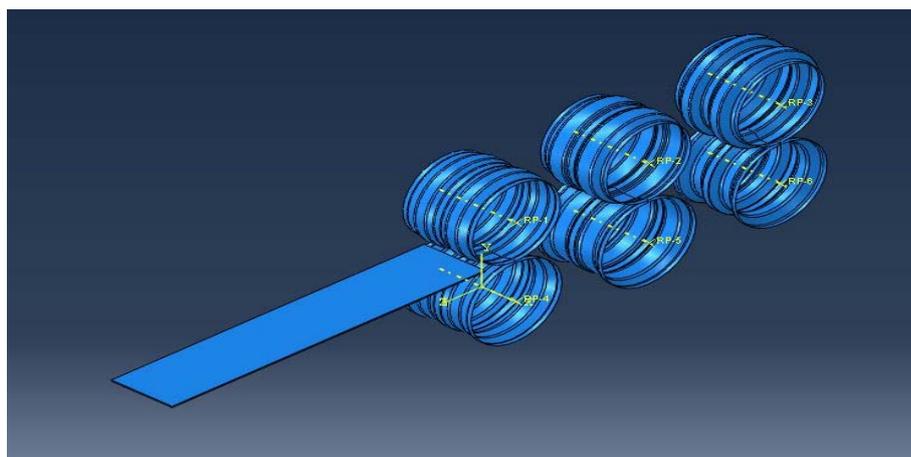


Fig.76 3-pass modeling for analysis

Table 14 3-pass spring-back about COPRA RF

	A(°)	B(°)	C(°)	D(°)	E(°)	F(°)
스프링백	4	4	4	3	3	3

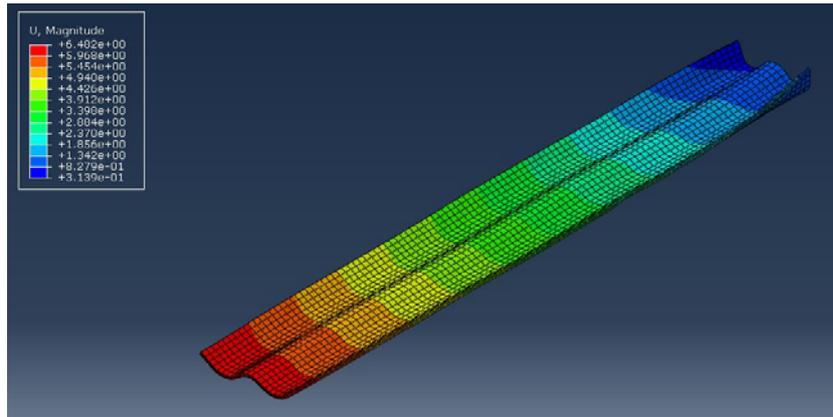


Fig.77 3-pass Strain distribution about COPRA RF

4.3.2 ABAQUS를 이용한 2차 해석

COPRA RF를 1차 설계를 통한 Fig.78과 같이 모델링을 진행하였고, 1차 해석에서 3패스 부분에 밴딩 각도가 37.5° 인 롤 금형 모델을 추가하였다.

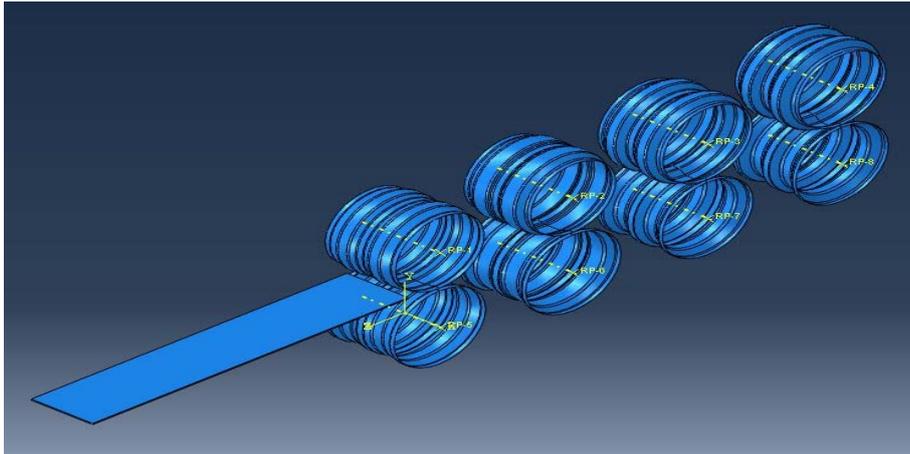


Fig.78 4-pass modeling for analysis

Table 15 4 pass spring-back about COPRA RF

	A(°)	B(°)	C(°)	D(°)	E(°)	F(°)
스프링백	3	4	4	4	4	4

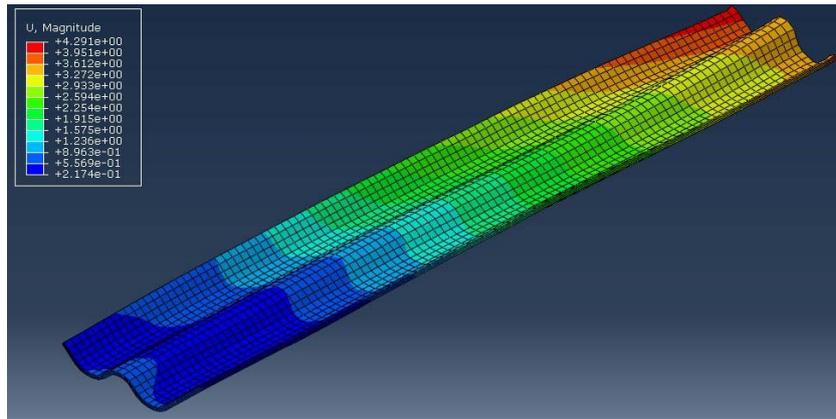


Fig.79 4-pass Strain distribution about COPRA RF

4.3.3 ABAQUS를 이용한 3차 해석

1차 설계를 통하여 1패스와 3패스에 7.5° 와 22.5° 의 롤 금형 모델을 추가하였고 경계 조건은 이전과 같다. Fig.80과 같이 모델링을 하였고, 해석 결과로 Table 16, Fig.81과 같이 스프링 백과 변형율을 확인하였다.

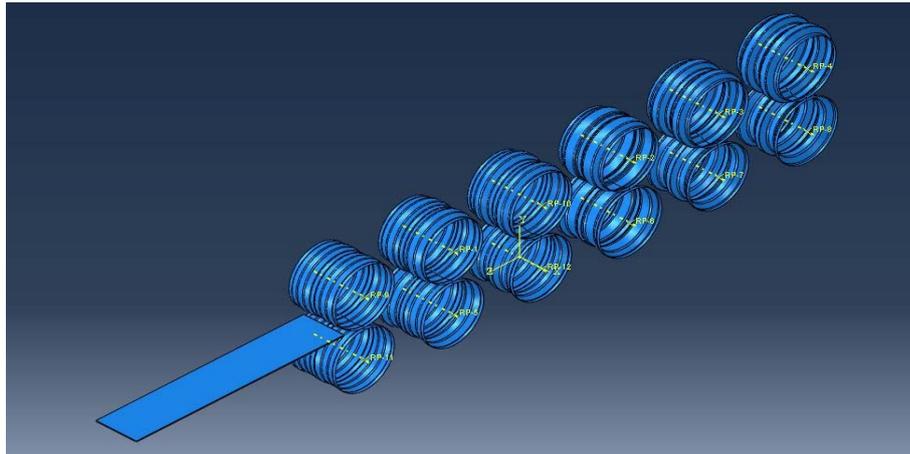


Fig.80 6-pass modeling for analysis

Table 16 6-pass spring-back about COPRA RF

	A(°)	B(°)	C(°)	D(°)	E(°)	F(°)
스프링백	1	3	4	4	2	2

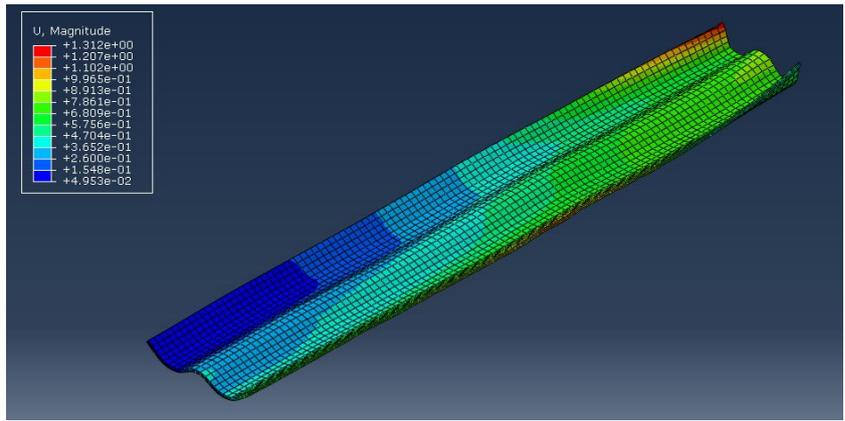


Fig.81 6-pass Strain distribution about COPRA RF

V. 결론

롤 포밍 공정에서의 경계 조건에 따른 영향을 알아보기 위해 롤 포밍의 상하 롤 거리(Gap), 공정 속도를 경계조건으로 두었고 공정에 흔히 쓰이는 동합금, 스테인리스 스틸, 연강을 이용하여 V 형상 15°, 30°, 45° 의 3패스 공정으로 실험과 범용 해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 해석을 진행하였다.

3패스 해석과 실험 결과의 스프링 백을 비교한 결과 동합금 0.1° ~ 1.2°, 스테인리스 스틸 0.05° ~ 0.65°, 연강 0.05° ~ 0.3° 정도의 근소한 차이가 나고 있다. 3패스에서 스프링 백을 개선하기 위하여 오버 밴딩을 통하여 실험과 해석을 진행하여 실험으로는 최대 0.4°, 해석 결과에서는 0.1° 까지 줄어드는 것이 보이고 차이가 상당히 근소하였다.

해석에 따른 결과에서 스프링 백이 가장 적었던 것은 해석 조건 중에서 상하 롤 간 거리 중 가장 적은 0.3mm였고, 이보다 롤 간 거리가 적었을 때에 대한 영향을 알아보기 위해 0mm, 0.1mm, 0.2mm에 거리였을 때에 대한 추가적인 해석을 진행하였다. 이 해석의 결과로 롤 간 거리가 0mm일 때 스프링 백 가장 적게 나타났지만 롤 포밍 공정에서 대표적인 결함인 플레어 형상이 나타나고 있다.

실험이 아닌 롤 포밍 전용 디자인 해석 프로그램인 COPRA RF와 ABAQUS를 이용한 설계 및 해석을 통하여 결과를 확인하고, 결과를 보완하기 위해 실험이 아닌 COPRA RF를 이용하여 재설계를 하고 이를 해석을 진행하여 결과에서 스프링 백을 확인한 결과 세 번의 해석을 진행함에 따라 감소하는 것을 확인하였다.

롤 포밍 공정의 실험과 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 롤 포밍 공정의 실험과 해석을 통하여 상하 롤 금형의 거리(Gap)과 공정 속도가 늘어날수록 스프링 백이 증가한 것을 알 수 있다.
- 2) 실험과 해석에서 롤 금형의 거리를 경계 조건 중 가장 적은 0.3mm보다 적게 했을 경우 스프링 백은 적게 나타나지만 롤 포밍 공정에서 대표적인 결함 중 하나인 플레어 형상이 많이 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 3) 상하 롤 간 거리가 적을수록 스프링 백이 적게 나타나지만 롤 간 거리가 판

재 두께와 같을 경우에는 결함이 나타나는 것을 확인하였고, 상하 롤 간 거리는 일정한 거리를 확보하여야 한다고 판단된다.

- 4) 공정 속도에 따른 스프링 백 증가보다 상하 롤 금형의 거리(Gap)에 따른 스프링 백 증가 더 큰 것을 알 수 있었다.
- 5) 이를 통해 적당한 상하 롤 금형의 거리를 설정한 후 공정 속도는 롤 포밍 기기의 모터와 원하는 생산 속도에 따라 설정해야 한다고 판단된다.
- 6) 롤 포밍 해석에서 길이방향 변형율의 최대값이 일부 조건에서 증가하는 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 대부분 재료의 굽힘부 중 앞부분에 집중 되어 있어 약간의 결함이 나타나있는 것을 확인하였고 이를 통해 이 조건은 공정 조건으로 맞지 않는 것으로 판단된다.
- 7) 범용 해석 프로그램인 ABAQUS와 롤 포밍 실험에 따른 스프링 백 차이가 1° 안팎으로 차이가 상당히 근소한 것으로 확인되었다.
- 8) 롤 포밍 공정을 설계하기 위하여 COPRA RF나 ABAQUS 소프트웨어 같은 설계 및 해석 프로그램을 이용하여 스프링 백 및 길이방향 변형율을 확인하여 이를 통해 더 나은 공정을 설계하여 이를 통해 개발 시간 및 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kiuchi, M., "Analysis Study on Cold Roll Forming Process", Report of the Inst. of Ind Sci., Vol. 23, pp. 1-23, 1973
2. Kiuchi, M. and Koudobashi. T., "Automated Design System of Optimum Roll Profiles for Cold Roll Forming Proc", 3rd Int Conf. on Rotary Metal Working Process, pp. 423-427, 1984
3. Kiuchi, M., "Recent Development of Roll-Forming in Japan", Int. J. Mach. Tools. Manufact, Vol. 29, No. 1, pp. 63-77, 1989
4. Ona, H. and Jimma, T., "Experiments into the Cold Roll-Forming of Straight Asymmetrical Channels", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 8, pp. 273-291, 1983
5. Ona, H., Jimma, T. and Kozono, H., "A Computer Aided Design System for Cold Roll Forming", Advanced Technology of Plastic, Vol. 1, pp. 508-513, 1984
6. Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Yee, C. H. and Collins, I. F., "The Prediction of Deformation Length in Cold Roll-Forming", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 9, pp. 181-191, 1984
7. Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Thadakamalla, S. K. and Collins, I. F., "The Prediction of Roll Load in Cold Roll-Forming", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 14, pp. 363-379, 1987
8. Bhattacharyya, D. and Pantan, S. M., "Research and Computer-Aided Design in Cold Roll Forming", Academic Publishers-Pergamon, Vol. 2, pp. 464-470, 1989
9. Ona, H. and Ichikawa, S., "Research into The Cold Roll-Forming of Vibration-Damping Steel Sheet", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 23, pp. 7-20, 1990
10. Grondin, G. Y., Elwi, A. E. and Cheng, J. J., "Buckling of Stiffened

- Steel Plates-A Parametric Study” , Journal of Constructional Steel Research, Vol. 50, pp. 151-175, 1999
11. Senanayake, R. S., Cole, I. M. and Thiruvarudchelvan. S., “The Application of Computational and Experimental Techniques to Metal Deformation in Cold Roll Forming” , J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 155-160, 1994
 12. George T. Halmos, “Roll Forming Handbook”
 13. 트리니티 엔지니어링(주), “COPRA RF Roll Forming Design & Analysis Software Training Manual”
 14. 김동홍, 정동원, 윤대환, 장야, "롤포밍 공정에서 국부가열에 따른 스프링백 영향 연구", 한국정밀공학회 2015년도 춘계학술대회 논문집, pp.519-519, 2015
 15. 김영석, “소성역학과 응용”, 시그마프레스, 2014
 16. Lee, T. S. and Kim, G. W., “Finite Element Analysis for Precision Roll Forming Process of Stainless Slide Rail” , Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, pp. 96-103, 2009
 17. 김형종, 최두선, 제태진, 박재현, 정동원, “롤포밍을 위한 박판 미세구조물 기초 연구, 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 257-257, 2004
 18. 정상화, 이상희, “FEM을 이용한 롤 포밍 공정의 3차원 모델링”, 한국공작기계학회 2007 춘계학술대회 논문집, pp. 733-738, 2007
 19. 정상화, 이상희, 김광호, 김주환, 신상문, “강소성 유한요소법을 이용한 롤포밍 시뮬레이션”, 한국공작기계학회 2006 추계학술대회 논문집, pp.398-403, 2006
 20. 정동원, 박상후, 정지현, “18단 롤 포밍 공정의 최적화를 위한 롤포밍 성형해석”, 한국동력기계공학회 한국동력기계공학회지, Vol. 17, pp.65-71, 2013
 21. 정동원, 김동홍, 김봉천, “롤포밍 공정을 이용한 고장력강 재질의 범퍼보강 차체판넬 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회 한국정밀공학회지, Vol. 29, pp. 841-845, 2012
 22. 정상화, 이상희, “언더레일 성형을 위한 성형 롤의 설계 및 형상예측”, 한국정

- 밀공학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp. 407-408, 2007
23. 김동규, 김영수, 이규현, 이문용, “다단 성형기술을 이용한 고강도 자동차 차체 부품개발에 관한 연구”, 대한기계학회 부산지부 2007년도 춘계학술대회 논문집, pp. 41-45, 2007
 24. 김광희, 정동원, “롤 성형공정의 컴퓨터 이용 플라워 설계”, 한국동력기계공학회 학술대회 논문집, pp. 167-171, 1997
 25. 김광희, “유한요소해석을 이용한 성형 롤 설계”, 한국해양공학회지, Vol. 13, pp. 75-81, 1999
 26. 김철홍, 한창우, 장은실, 손재화, “멀티 롤 포밍 공정의 품질 안정성에 대한 해석 및 실험적 연구”, 한국정밀공학회 2012년도 추계학술대회 논문집(상), pp. 401-402, 2012
 27. 정동원, 김봉천, 김동홍, “고장력강 범퍼 빔의 롤 포밍 해석”, 한국기계가공학회 2011년도 추계학술대회 논문집, pp. 150-150, 2011
 28. 윤재정, 박동환, 김근영, 1180MPa급 고장력 강판의 롤포밍 성형성 및 레이저 용접성“, 한국생산제조시스템학회 2012 춘계학술대회 논문집, pp. 9-9, 2012
 29. 정진호, 김동규, 이규현, 이문용, “가변 롤 포밍 공정을 이용한 1GPa급 이형 단면 차체부품 개발”, 한국생산제조시스템학회 2011 KSMTE 추계학술대회 논문집, pp. 14-14, 2011
 30. 김봉수, 전만수, “롤포밍 공정의 플라워패턴의 평면변형 유한요소해석”, 2012년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 512-515, 2012
 31. 김동규, 김영수, 이규현, 이문용, “범퍼 레일용 롤포밍 성형의 공정 변수 영향도 해석”, 대한기계학회 2006년도 부산지부 춘계학술대회 논문집, pp. 19-23, 2006
 32. 김근영, 장순근, 정현섭, 오강세, 윤재정, 박순달, “롤포밍 공정을 이용한 고강도 차체 실사이드 개발”, 한국자동차공학회 2011년 대구경부지부 춘계학술대회, pp.29-34, 2011
 33. 손희진, 김성욱, 오범석, 김기선, “고장력 소재로 롤-포밍 공법에 의한 자동차 도어 사이드 임팩트 빔 개발”, 한국기계가공학회지, Vol. 11, pp. 82-87, 2012