

2010 년 2 월

석사 학위 논문

**냉장고용 고하중 슬라이드 레일의
롤포밍 공정 해석**

조선대학교 대학원

기계공학과

김재상

냉장고용 고하중 슬라이드 레일의 롤포밍 공정 해석

Analysis of Roll Forming Process
on Heavy Load Slide Rail for Refrigerator

2010 年 2 月 日

조선대학교대학원

기계공학과

김재상

냉장고용 고하중 슬라이드 레일의 롤포밍 공정 해석

지도교수 정 상 화

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함.

2009 年 11 月 日

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

김 재 상

김재상의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 규 태 印

위 원 조선대학교 교수 최 병 기 印

위 원 조선대학교 교수 정 상 화 印

2009 年 11 月 日

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLE	IV
LIST OF FIGURES	V
ABSTRACT	IX
제 1 장 서 론	1
제1절 연구배경 및 목적	1
제2절 연구동향	4
제3절 연구내용	6
제 2 장 롤 포밍 공정의 개요	7
제1절 롤 포밍 공정	7
제2절 롤 포밍 공정의 장단점	10
제3절 제품공차	12
제4절 롤 포밍 공정 설계시 고려할 사항	16
1. 성형롤 설계 이론	16
2. 롤 설계시 고려사항	21

제 3 장	재료의 특성	25
제1절	성형에 영향을 미치는 인자	25
제2절	냉간압연강판(SCP-1)의 특성	28
제 4 장	롤 포밍 공정 설계 및 해석	32
제1절	냉장고용 고하중 슬라이드 레일의 모델링	32
1.	냉장고용 슬라이드레일의 설계	32
2.	냉장고용 고하중 슬라이드레일의 구조해석	34
3.	고하중 슬라이드레일의 성형롤 설계	39
제2절	롤 포밍 공정 해석	45
1.	롤 포밍 공정의 해석 프로그램	45
2.	해석조건 및 실행	46
3.	롤 수정 후 재해석	55
4.	해석결과 및 고찰	62

제3절 냉장고용 고하중 슬라이드레일 금형제작 및	
제품성형	67
제 5 장 결 론	71
참 고 문 헌	72

LIST OF TABLES

Table 2-1 Effect of holes and notches(Z) on number of passes	23
Table 2-2 Effect of shape(s) on number of passes	23
Table 2-3 Effect of tolerance factor(F) on number of passes	24
Table 3-1 Chemical elements ratio of SCP-1	28
Table 3-2 Result of tensile tests and curve fitting for SPC-1	31
Table 4-1 Input conditions for FEA	35
Table 4-2 Input conditions of simulation	47
Table 4-3 Estimation tolerance of slide rail (remain +, empty -) ..	66

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	Various cross sections produced by cold roll forming process	2
Fig. 1-2	Slide rail applications	2
Fig. 1-3	Comparison between empirical design method and simulation design method	3
Fig. 1-4	Optimization of roll forming process	5
Fig. 1-5	Flow chart for roll forming process analysis	6
Fig. 2-1	Gradual forming of strip into finished section	8
Fig. 2-2	Schematic diagram of roll forming process	9
Fig. 2-3	Bending angle in roll forming process	11
Fig. 2-4	Elastic recovery in bending	13
Fig. 2-5	Buckling	14
Fig. 2-6	Wavy	15
Fig. 2-7	Flare	15
Fig. 2-8	Symmetry of slide rail	17
Fig. 2-9	Consideration when designing a part	18
Fig. 2-10	Grooving and beading	19
Fig. 2-11	Cracks at bend	19
Fig. 2-12	Maximum material thickness used for roll design	20
Fig. 2-13	Flower pattern	24
Fig. 3-1	Mechanical properties according to direction to rolling ..	25
Fig. 3-2	Stress-strain diagram	26

Fig. 3-3 Comparison between nominal stress-nominal strain diagram and true stress-true strain diagram	27
Fig. 3-4 Stress-strain diagram of SCP-1	29
Fig. 3-5 Curve fitting for SCP-1	31
Fig. 4-1 Slide rail used in refrigerator	33
Fig. 4-2 Slide rail meshing	36
Fig. 4-3 Boundary condition for FEA	36
Fig. 4-4 Static structure analysis of slide rail	37
Fig. 4-5 Modal analysis of slide rail	38
Fig. 4-6 Forming order of product	41
Fig. 4-7 Edge travel in roll forming process	41
Fig. 4-8 Horizontal vertical of bending forces in roll forming process	42
Fig. 4-9 Flower pattern of inner member	42
Fig. 4-10 Flower pattern of center member	43
Fig. 4-11 Flower pattern of outer member	44
Fig. 4-12 Deformation processes of inner member	49
Fig. 4-13 Deformation processes of center member	52
Fig. 4-14 Deformation processes of outer member	54
Fig. 4-15 Final cross-section of inner member predicted by 1st rigid-plastic FEA	55
Fig. 4-16 Modified workpiece processes of inner member	57
Fig. 4-17 Final cross-section of center member predicted by 1st rigid-plastic FEA	58

Fig. 4-18 Modified Workpiece processes of center member	61
Fig. 4-19 Finished product of inner member predicted by 2nd rigid-plastic FEA	63
Fig. 4-20 Total effective strain in inner member	63
Fig. 4-21 Comparison of longitudinal strain in inner member	64
Fig. 4-22 Comparison of width strain in inner member	64
Fig. 4-23 Comparison of thickness strain in inner member	65
Fig. 4-24 Assembled refrigerator's slide rail	66
Fig. 4-25 Prototype photograph	70

ABSTRACT

Analysis of Roll Forming Process on Heavy Load Slide Rail for Refrigerator

By Kim Jae Sang

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.
Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

Roll forming process is one of the most widely used processes in the world for forming metals. It can manufacture goods of the uniform cross section throughout the continuous processing. Roll forming is a very important process used in many industrial fields. It is difficult to predict the plastic deformation in roll forming process because of its inherent complexity. So, many forming roll designers still depend on his or her art, not the science in spite of technical process. This situation raises problems which take a long time and cost a lot of money. Computer analysis methods such as FEM(Finite Element Method) and the FDM(Finite Difference Method) help the forming roll designers to estimate the roll forming process easily.

In this thesis, the slide rail composed of inner member, center member and outer

member is designed as 3-dimensional model. The heavy load slide rail is used in the refrigerator. Tensile test is performed about SCP-1 to obtain material properties. Heavy load slide rail is simulated by static structural analysis to evaluate the structural defect. Curve fitting is executed by using the least square method to set up the flow stress equation which is the governing equation for rigid plastic FEA. The slide rail is designed using the constant arc length forming method. The inner member and the outer member are designed using the outside lip method, and the center member are designed using the center bead method. The forming roll of the inner member in the slide rail is designed as two types. TYPE A is formed by the upper roll and the lower roll, and TYPE B is added the side roll in last pass. Each types are simulated and compared with the longitudinal strain, width strain and thickness strain using SHAPE-RF software.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

롤포밍 공정은 연속으로 배치된 다단의 롤 스탠드 사이로 금속판재를 통과시키면서 단면형상의 변화를 유도하여 길이방향으로 일정한 생산 제품을 제조하는 공정이다. 롤포밍 공정은 Fig. 1-1과 같이 복잡한 단면형상을 갖는 제품 생산을 위해 사용되는 방법이다. 롤포밍 공정은 기존의 압출공정에 의해 생산되고 있는 제품의 생산에도 이용될 수 있다. 오늘날 산업의 하이테크화가 진전됨에 따라 슬라이드 레일은 컴퓨터를 시작하여 단말기, 통신기, 계측기, 복사기, 자동판매기의 정밀 기기로부터, 캐비닛, 사무책상, 금고 등의 사무가구, 목재 가구, 주방 가구, 가정용 가구 등 폭넓은 분야에 사용되고 있다. Fig. 1-2에 슬라이드 레일의 적용 예를 나타내었다. 슬라이드 레일의 주요 부분인 아웃터 멤버, 센터 멤버 그리고 인너 멤버는 주로 냉간 롤 포밍 공법이나 정밀 프레스 금형에 의해 성형된다. 본 논문에서는 더블 슬라이드 레일을 성형하기 위해 공정 설계를 위한 중요 변수를 선택하여 각각의 멤버들에 대한 성형률을 설계하고 강소성 유한요소법을 이용해 롤 포밍 공정을 시뮬레이션하였다. Fig. 1-3에 기존의 설계 방법과 시뮬레이션을 이용한 설계 방법을 비교하여 나타내었다. 기존의 설계 방법은 경험이나 시행착오에 의존하여 제품을 성형하기 때문에 제품의 결함 발생 시에는 수많은 롤들 가운데 어느 롤에 문제가 발생하였는지 판단할 수 없으며, 특히 신제품 개발이나 난소성 재료를 성형할 경우에는 많은 시간과 재료가 낭비될 수밖에 없었다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 롤 포밍 공정을 설계하고 시뮬레이션 하여 슬라이드레일을 개발할 경우 제품 성형에 소비되는 시간과 재료의 낭비를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 더 나아가서는 이와 유사한 성형제품의 개발에 있어서, 롤 성형을 위한 성형 공정 분석기술, 공정별 형상예측 기술, 성형률 설계 및 제작 기술을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

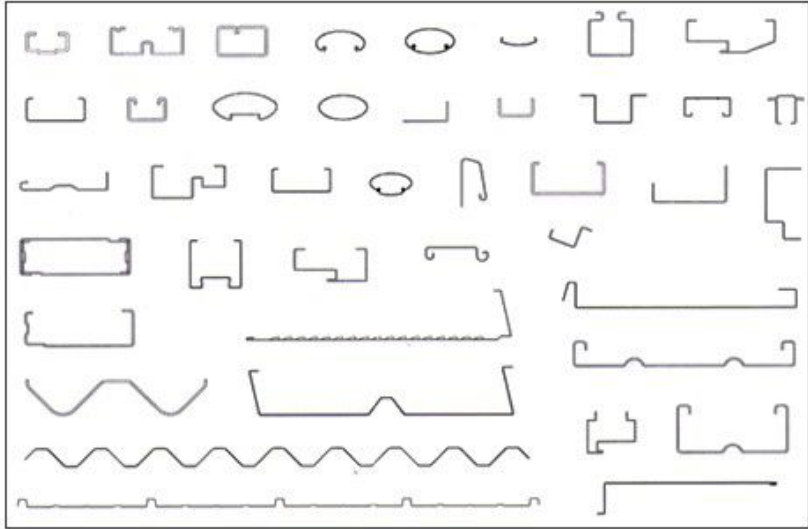


Fig. 1-1 Various cross sections produced by cold roll forming process^[1]

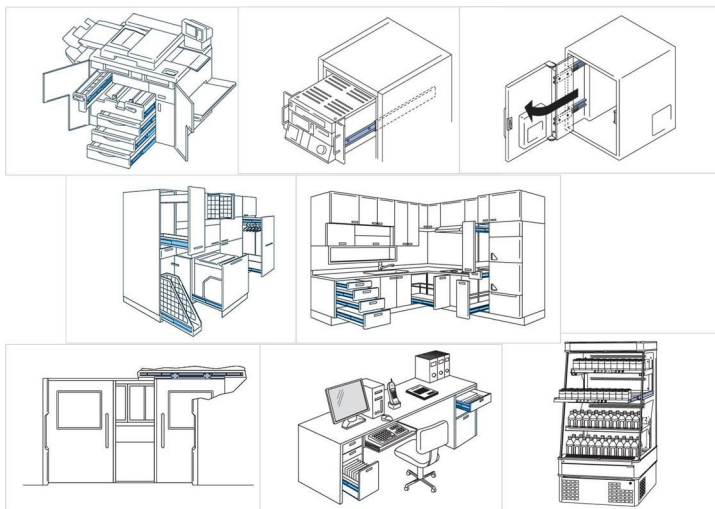


Fig. 1-2 Slide rail applications

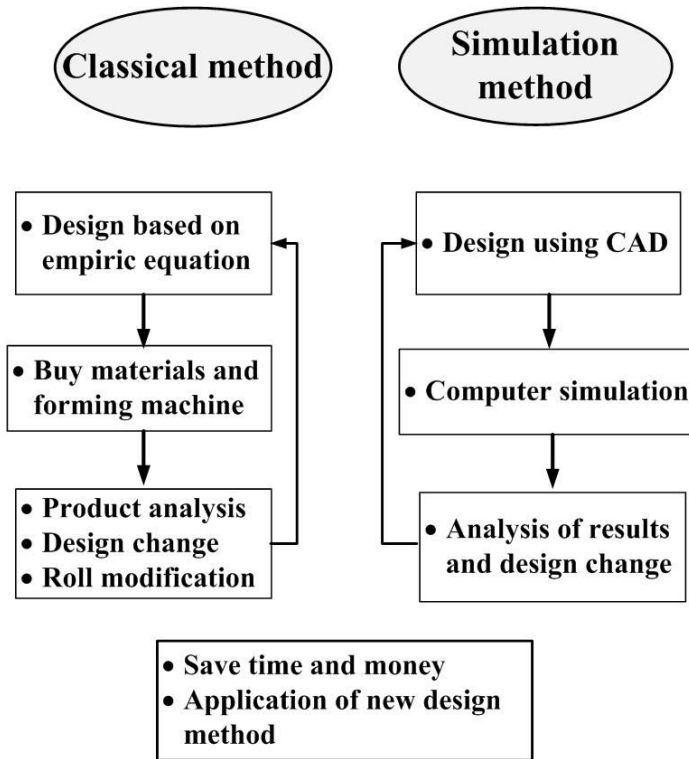


Fig. 1-3 Comparison between empirical design method and simulation design method

제 2 절 연구동향

냉간 롤 포밍은 서구에서는 약 1900년대 초에 도입되어 2차 대전 이전부터 산업에 적용하여 항공기부품이나 강판 등의 제조에 사용하였다. 이웃 일본에서는 1950년대부터 롤포밍 공법을 이용해 제품을 생산하였다. 이 공정은 이론적인 접근이나 정형화된 기술적 접근보다는 기술기능인의 경험에 의하여 발전하였다. 근래에는 이러한 기술검토 수준의 내용을 수집 편집하여 현장에서 실무 지도서가 되도록 하였다. 이와 더불어 연구자들의 중점적인 연구목표는 성형 후 제품 변형을 방지하는 방법에 대해서 연구하여 생산에 적용하였다. 현재에는 CAD 및 CAE를 이용해 성형과정을 시뮬레이션 할 수 있고 미리 문제점을 예견하여 롤 설계에 응용할 수 있는 소프트웨어의 개발로 롤 포밍 공정으로 생산된 제품의 품질과 제한조건들이 개선되고 있다.

롤 포밍 공정에 대한 연구는 동경대의 M.Kiuch^{[2][3][4]}에 의해 변형 영역에 있는 판재의 형상을 정현함수(sine function)에 한 개의 매개변수를 포함시켜 속도장을 계산한 후, 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다. 또한 롤 포밍 공정에 대한 해석과 길이방향 변형률을 계산하고 Fig. 1-4와 같은 공정의 최적화 알고리즘을 제안하였다. Ona와 Jimma^{[5][6]}는 직선형 비대칭 채널에 대한 휨이나 비틀림과 같은 변형을 방지하는 방법에 대해 실험을 하였는데, 실험은 스트레이트너, 롤의 압력 조정, 오버벤딩 롤, 트위스트 포밍 스탠드(twist forming stand) 등을 조합하여 실험하였다. 실험결과는 트위스트 포밍 스탠드를 사용할 경우 기존의 스트레이트너 보다 효과적임을 고찰하였다. 뿐만 아니라 롤 포밍 성형 시에 판재가 굽혀지는 부분인 플랜지의 굽힘 각과 패스 수를 연관시켜 롤 설계 시에 필요한 패스 수를 설정하는 경험식을 개발하였다. Battacharyy와 Smith^{[7][8]}는 롤 포밍에서 소재가 각각의 패스를 통과할 때 변형부의 길이를 예측하는 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 변형부의 길이는 소재의 기계적 성질과는 무관하게 소재의 두께, 플랜지의 길이, 굽힘 각에 영향을 받는다는 사실을 고찰하였다. 또 다른 연구는 롤 포밍 공정에서 롤 하중을 예측하는 연구를 하였는데, 이 연구에서는 롤의 압력을 예측하면 소재가 부드럽게 성형될 수 있도록 최적의 설계가 가능하다는 사실을 입증하였다. 또한 굽힘 하중(folding load)은 소재의 두께, 플랜지 길이, 단면계수와 재질의 항복응력과 같은 소재의 특성에 영향을 받으며, 소재의 최대 플랜지 변형과 탄성한계 변형과의 비에 영향을 받는다는 사실을 고찰하였다. Battacharyy와 Pantan^[9]은 롤 포밍 공정중의 각각의 변형영역에 대해 변형영역의 길이

및 굽힘 각을 예측하는 식을 개발하여 실험을 통해 소재의 길이방향 변형률을 예측하였다. Ona와 Ichikawa^[10]는 얇은 두 강판이 수직접촉으로 접합되어 소음이나 진동을 감쇠하는 목적으로 쓰이는 진동감쇄강판에 대한 롤 포밍 연구를 하였다. 이 연구를 통해 최적의 성형조건은 성형의 한계와 강도에 대한 한계가 일치한 범위 내에서 적절한 성형이 된다는 것을 고찰하였다. Grondin과 Rhodes^{[11][12]}는 롤 포밍 공정에 의해 생산된 제품에 대해 잔류응력이나 길이방향 변형률을 경계 조건화하여 구조재로서의 버클링 현상을 해석하였다. Senanayake^[13]는 대칭형의 모델을 유한요소법을 이용하여 패스수를 결정하고 컴퓨터비전 응용 기술로 소성변형을 측정된 것과 실험 및 유한요소법으로 예측한 변형이 유사함을 제안하였다.

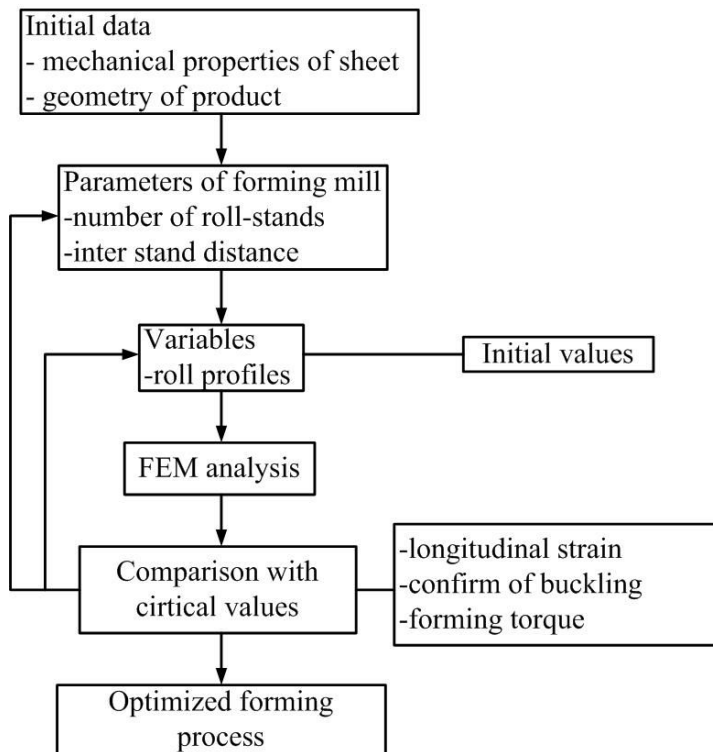


Fig. 1-4 Optimization of roll forming process

제 3 절 연구내용

롤 포밍 공정에 대한 연구는 Fig. 1-5와 같이 진행하였다. 냉장고용 슬라이드레일의 형상을 설계하고, 슬라이드레일에 사용될 재료인 냉간압연강판의 인장시험을 통해 재료의 기계적 특성을 파악하였다. 또한 인장시험을 통해 구한 응력-변형률 선도를 곡선 근사화하여 강소성 유한요소 해석에 필요한 유동응력 방정식을 유도하였다. 각 멤버들은 Halmos^[1]의 경험식을 바탕으로 공정의 중요 설계인자인 롤간 거리, 성형 단수, 굽힘 각 등을 결정하고 플라워 형태 또는 성형 방법에 따라 여러 종류의 성형 롤을 설계하였다. 냉장고용 고하중 슬라이드 레일을 성형하기 위해 각 멤버들의 성형 롤을 설계하고 강소성 유한 요소법을 이용하여 공정을 시뮬레이션하였다.

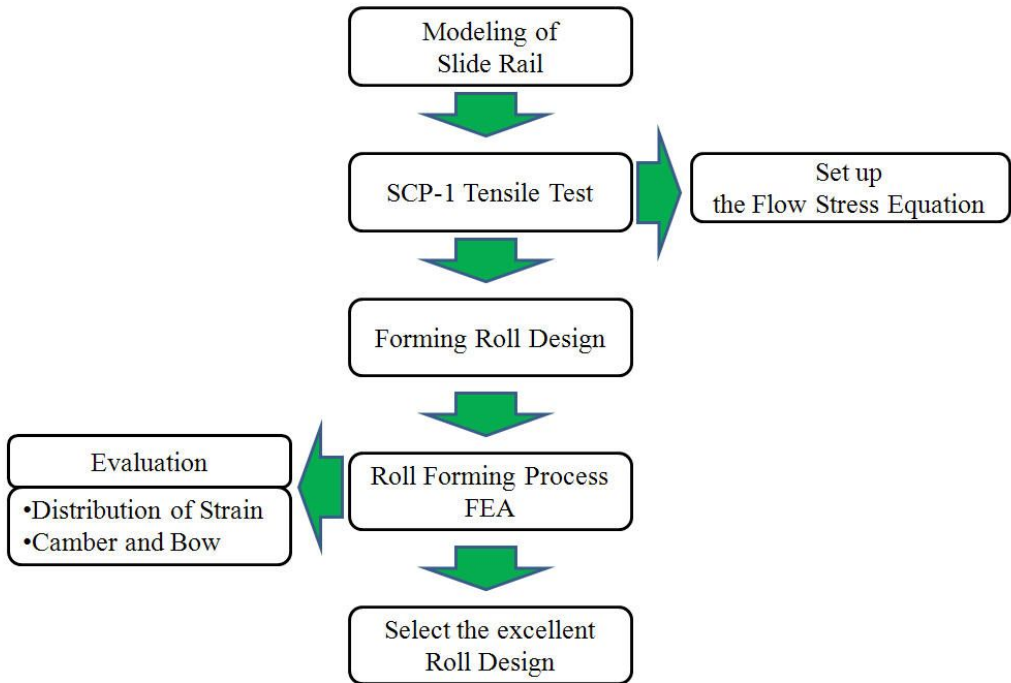


Fig. 1-5 Flow chart for roll forming process analysis

제 2 장 롤 포밍 공정의 개요

제 1 절 롤 포밍 공정

롤 포밍 공정은 얇은 판재나 스트립의 재료를 성형 소성 가공시켜 원하는 제품 형상으로 만드는 공정으로, Fig. 2-1과 같이 일렬로 연속된 형상이 다른 여러 롤 사이를 재료가 순차적으로 이송되면서 성형 가공되어 단면 형상이 일정하고 두께의 변화는 최소화하면서도 길이가 긴 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 2차 성형 가공 중의 하나이고, 소성가공법의 일종이다. 원하는 제품의 단면 형상이 성형될 때까지 여러 단의 롤 사이를 소재가 통과하면서 변형되며, 공정 과정 중에 굽힘을 받는 부분에서 약간의 두께 감소 현상을 제외하고는 소재의 두께 변화가 없으며 단지 굽힘 가공 공정에 의해 변형되는 특징을 갖는다. 일반적으로 열간가공(hot working)은 강괴, 반성품을 가열로에서 1,200 °C 정도의 온도로 재가열하여 압연 롤에 의해 일정한 치수로 성형 가공한 강을 이용하여 성형하는 가공법으로 성형은 쉬우나 조직이 치밀하지 못하고 가공경화 현상이 발생하지 않아 기계적 강도가 떨어진다. 이와는 다르게 냉간가공(cold working)은 열간압연강제를 상온 또는 상온에 가까운 온도에서 압연한 강을 이용하여 성형하는 방법으로 가열하지 않기 때문에 표면에 스케일이 발생하지 않고, 표면이 아름답다. 또한 가열이나 냉각에 의해서 일어나는 팽창이나 수축이 적으므로, 정확한 치수와 정밀한 형태의 제품을 성형할 수 있다. 성형 중에 소재는 가공경화가 발생하므로 조직이 치밀하고 경도나 인장강도가 우수한 제품을 성형할 수 있다. 이러한 성형상의 이점을 이용하기 위해 롤 포밍 공법은 냉간가공을 하며, 강관(tube)이나 채널, 앵글과 같은 이형재를 생산한다. Fig. 2-2에 롤 포밍 공정을 나타내었다. 롤 포밍 공정의 순서는 다음과 같다.

- 더블 언코일러 : 압연공법에 의해 두께가 일정한 판재를 원통형 언코일러에 감겨진 상태로 공급된다.
- 플레트너 : 소재는 압연 공정을 거쳐서 일정한 크기로 롤에 감싸여 공급되는데 이때 소재는 롤 포밍 공정 전부터 잔류응력이 남게 된다. 이러한 소재는 롤 포밍 공정이 끝난 후에 공정에 의한 버클링 현상이 나타나고, 이를 방지하기 위해 롤 성형기에 들어가기 전에 소재를 반듯이 펴주고 잔류응력을 감소시키기 위해

플래트너를 통과시킨다.

- 롤 성형기 : 롤 성형기에는 초기 소재의 위치를 잡아주기 위한 엔트리가이드를 설치한다. 소재의 형상을 점차적으로 변형시켜 주는 롤들과 롤들의 가장 마지막에는 냉간 성형의 버클링 현상중 하나인 플레어현상을 방지하고, 공차를 맞추기 위해 같은 공정을 몇 번 더 추가한 아이러닝 패스를 둔다. 또한 캠버나 보우 또는 비틀림(twist) 현상과 같은 휨 현상을 보상하기 위해 스트레이트너를 둔다. 휨 현상을 교정하기 위해 롤 사이에서 직접 구동하지 않고 소재가 통과하는 속도에 의해 롤의 속도가 좌우되는 아이들러 롤로 구성된다.
- 컷오브 프레스다이 : 연속적으로 생산되는 제품을 일정한 길이로 자르는 장치로써 단면재의 수직 부를 동시에 접촉하여 순간적으로 압축하듯이 절단하면 절단면이 나빠질 뿐만 아니라 절단 날이 손상되므로 절단 날을 경사지게 하여 사용하는 것이 일반적이다.
- 런아웃 테이블 : 컷오브 프레스다이에 의해 일정한 길이로 절단된 제품을 이송하여 제품의 결함이나 제품의 치수를 측정하는 테이블이다.

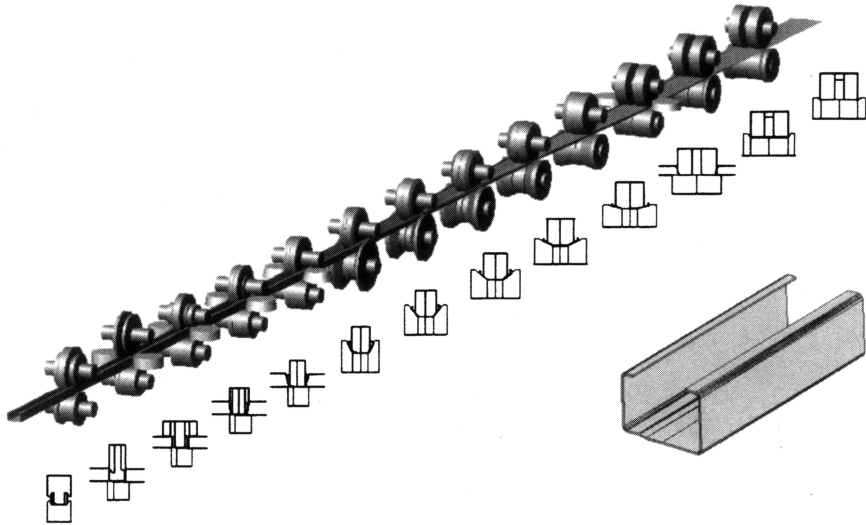


Fig. 2-1 Gradual forming of strip into finished section^[1]

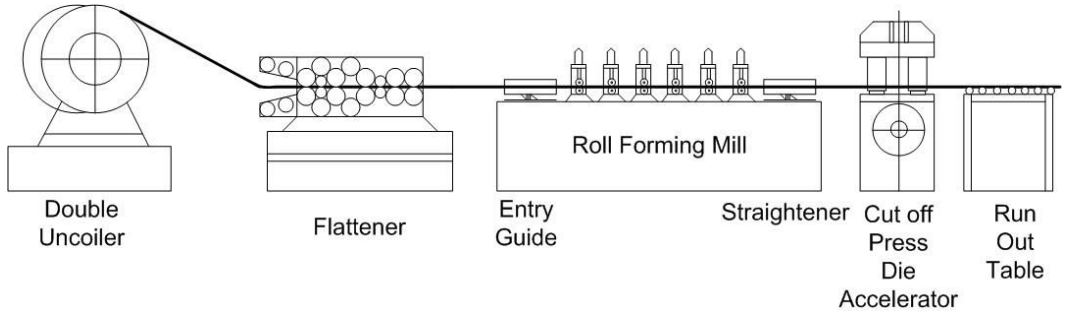


Fig. 2-2 Schematic diagram of roll forming process

제 2 절 롤 포밍 공정의 장단점

롤포밍 공정은 일정 단면의 정확한 치수를 갖는 제품의 대량생산방식으로 널리 이용되고 있으며, 생산속도는 거의 15-185m/min 까지도 얻을 수 있으나 일반적으로 30-55m/min으로 사용된다. 제품 생산 시 소재(coil)의 loading과 생산된 제품의 unloading 을 위한 인력만이 필요하기 때문에 다른 공정에 비해 작업인력을 대폭 줄일 수 있다. 제품 형상이 간단한 경우에는 금형 교체시간 및 공정 set-up 시간이 많이 소요되지 않고 제품 길이 제어가 용이하기 때문에 소량 다품종 생산에도 이용될 수 있다. 특히 다른 공정과의 연계를 통해 많은 제품생산에 유용하게 사용될 수 있으며 보수비용도 일반적으로 적게 든다. 또 다른 장점을 아래에 나타내었다.

- 프레스 가공에 의해 성형된 슬라이드 레일에 비해, 판 두께가 두꺼운 것이라도 Fig. 2-3과 같이 휨 각도가 충분히 작히므로 성형상 무리가 없고, 횡방향의 내하중(lateral load capacity)이 큰 폭으로 향상된다.
- 부품의 단면이 매우 높은 정밀도를 갖도록 가공할 수 있고, 제품을 조립했을 때, 오랜 시간동안 백래쉬 없는 움직임(backlash-free movement)을 유지할 수 있다.
- 동일 형상의 긴 단면 재를 연속적으로 대량생산하는데 적합하다. 또한 원하는 길이로 조절이 가능하다.
- 최소한의 인원으로도 원활한 생산을 할 수 있다. 일단 여러 패스의 금형 세팅이 완료되면 코일재(coil)의 로딩과 모든 공정을 마친 후 언로딩 하는 인원만으로도 생산이 가능하다.
- 다양한 재료를 사용하여 제품생산이 가능하며, 압연 띠판을 주로 사용하므로 정밀도가 높은 단면 형상의 제품을 생산할 수 있으며, 우수한 표면 상태를 얻을 수 있다.
- 타 공정과 연계하여 여러 단면의 형상을 쉽게 얻을 수 있고, 용접공정을 응용하면 폐쇄형의 제품생산이 가능하다.
- 유지 보수비가 일반적으로 낮다. 롤 포밍 기계의 기본구성이 간단하며 롤 금형도 여러 기계요소의 부품으로 이루어진 것이 아니라 보통 제품형상에 따른 여러 단의 원반 모양이므로 롤의 마멸 이외에는 고장이 거의 없다.

- 적절한 롤의 설계, 적합한 롤 재료 선택과 형상의 특성에 따른 제품의 소재 사용, 그리고 양호한 윤활유를 사용한다면 치수나 형상 오차의 문제가 거의 없이 제품 생산이 가능하다.

다음은 롤 포밍 공정의 단점들을 정리하였다.

- 복잡한 형상을 가진 제품의 경우 롤 설계는 기술적으로 상당히 어렵고, 풍부한 기술자가 필요하다.
- 복잡한 형상의 경우 단의 수가 증가하고 금형 교체시간과 만족할 만한 제품을 생산하기 위한 세팅 시간이 많이 소요된다.
- 정밀하고 결함이 발생하기 쉬운 제품을 고속 생산시에 롤의 마모가 심하여 수시로 롤을 교체해야 하므로 금형 교체시간, 세팅시간, 비용이 많이 든다.

롤 포밍 공정의 최대 장점은 단순한 설비로 치수 정밀도가 좋으며 형상이 일정하고 긴 단면을 연속적으로 생산 가능한 점이다. 롤 포밍 공정은 소재 두께가 거의 변화하지 않고, 길이 방향으로 동일한 두께와 단면형상을 가진 제품의 생산이 가능하다. 복잡한 형상이라도 적절한 롤 제작 및 성형 공정을 통해 생산이 가능하다. 또한 압출, 인발 혹은 프레스 공정으로 생산한 제품이라도 굽힘 반경 등의 조건을 만족하고 생산성이 고려되면 롤 포밍 공정으로 대체 가능하다.

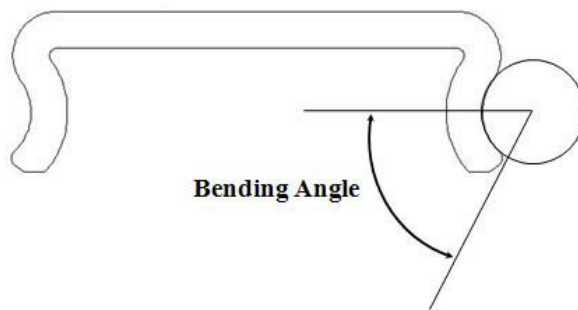


Fig. 2-3 Bending angle in roll forming process

제 3절 제품공차

롤 포밍 공정으로 생산된 제품은 일정형상이 연속되어 단면에 비해 상당히 긴 길이의 제품이 된다. 기본적으로 단면이 중요하나 같은 형상의 긴 재료의 필요성이 더 크므로 길이 또한 중요한 요소이다. 길이 치수는 적절한 절단 설비로 비교적 쉽게 만족할 수 있다. 문제는 단면 대비 길이가 긴 특성으로 나타나는 직진도와 스프링백, 끝단 벌어짐(end flare)현상이 발생한다. 직진도를 결정하는 주요 변수는 캠버, 보우 그리고 비틀림과 같은 휨 현상이다. 스프링백은 폭 방향의 잔류 응력으로 인해 발생하며 소재가 항복응력을 지나 변형이 될 경우 제품은 완전히 변형되지 않고 초기의 형태로 돌아가려는 성질에 의해 발생하는 탄성변형이다. 스프링백으로 인해 완성된 제품은 퍼지게 되어 제품의 치수 정밀도가 떨어지고 파이프 성형에서는 용접부가 찢어지는 현상이 나타난다. 스크래칭은 롤 포밍 공정 중에 롤과의 마찰로 인해 소재의 표면에 생기는 외관상의 결함이다. 이러한 결함 중에서 버클링 현상은 롤 포밍 공정 중에 소재가 받는 스트레칭, 압축 그리고 인장 과정을 거치면서 발생하는 압축 잔류응력이 소재가 지지할 수 있는 한계 이상일 때 나타난다. 제품에 버클링 현상이 발생할 경우, 제품의 치수 정밀도가 떨어지고 원활한 직선왕복 운동을 하지 못하며 외관상으로도 좋지 못하다. 다음은 롤 포밍 공정 중 발생할 수 있는 결함들에 대해 정리하였다.

- 스프링백 : 스프링백은 박판이 금형에 의해 강제적인 변형된 후 금형으로부터 이탈되었을 때 박판 내부의 응력이 정적 평형상태를 유지하기 위해 탄성적으로 재편되면서 발생하는 현상이다. 다시 말해, 금속에 탄성한도를 초과하는 외력을 가한 후 그 외력을 제거하면 소재 내부에 잔류하는 탄성복원력에 의해 원래상태로 되돌아가려는 재료 특유의 성질로 인해 발생한다. 제품에 스프링백이 일어나면 Fig. 2-4와 같이 최종 굽힘 각은 작아지고, 최종 굽힘 반경이 커져 제품의 정밀 성형을 어렵게 하는 요인으로 작용한다. 스프링백에 영향을 미치는 인자로는 재료의 항복강도와 탄성계수, 소재의 두께 등이 있다. 스프링백을 보상하기 위해 사용하는 방법은 과도 굽힘(overbending), 바토밍과 셋팅 그리고 신장 굽힘(stretch bending) 등이 있다^{[14][15]}. 과도 굽힘은 하형 다이에 여유 각을 두어 판재가 과다 굽힘 되게 하여 스프링백을 보정하는 방식이고, 바토밍과 세팅은 펀치 끝과 다이 면에서 높은 압축응력이 걸리도록 굽힘 부를 압축하는 방식이다. 신장

굽힘은 굽힘이 일어나는 동안 소재에 인장력이 작용하도록 하여 소재의 복합인장력이 증가하도록 한다. 이런 방법으로 소재가 소성 변형할 때 필요한 힘을 작게 하여 스프링백을 줄인다.

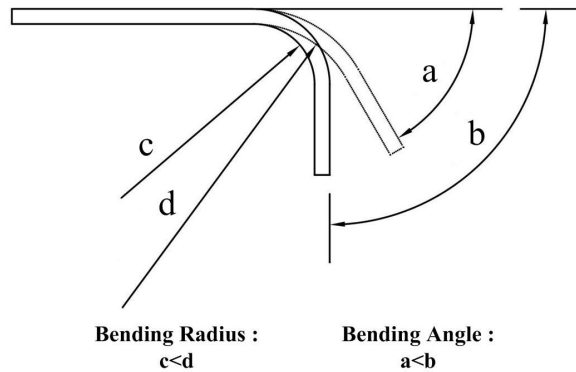
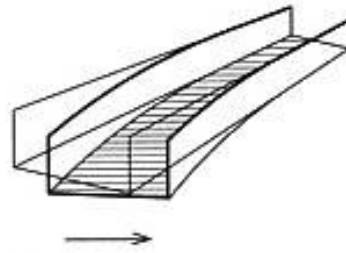
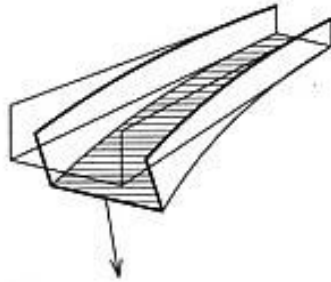


Fig. 2-4 Elastic recovery in bending

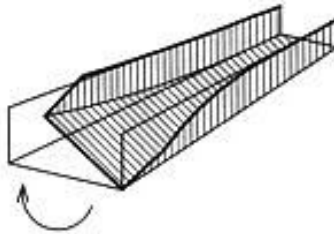
- 캠버, 보우 및 비틀림 : 이 현상은 제품의 직진도를 결정하는 주요 변수로써 성형이 끝난 후 최종제품에 휘어지거나 비틀러지는 현상으로 나타난다. Fig. 2-5(a)는 캠버 현상을 나타낸 것으로 성형된 제품을 수평면에 올려놓았을 때 수평면의 직선과 벌어진 정도이다. Fig. 2-5(b)는 보우 현상으로 성형된 제품이 수직 수평면 상에서 직선으로 얼마 정도 차이가 있는가의 정도이다. 마지막으로 비틀림 현상은 Fig. 2-5(c)와 같이 길이 방향에 걸쳐 나사처럼 비틀러지는 현상이다. 이러한 현상은 변형률 분포의 불균형으로 인해 길이방향 변형률의 연신과 수축 때문에 발생하며 길이방향 변형률 분포에 따라 결함의 크기와 방향이 결정된다. 특히 비대칭 단면의 경우 불균일한 성형면적으로 인해 대칭 단면의 경우보다 많이 발생한다. 일반적으로 캠버와 보우의 크기는 길이 30cm당 $\pm 3\text{mm}$ 이내로 유지해야 원활한 운동을 할 수 있다. 비틀림의 크기는 5° 이내로 유지해야 한다. 이런 현상을 방지하기 위해서는 적절한 패스라인의 설정과 각각의 패스별로 균일한 길이방향 변형률을 얻을 수 있도록 롤을 설계해야 한다. 또 다른 방법으로는 가이드 롤을 추가하여 길이방향 연신율을 감소시키고 소재의 이동을 원활하게 함으로써 내부 응력의 증가를 감소시키는 방법이 있다.



(a) Camber



(b) Bow



(c) Twist

Fig. 2-5 Buckling

- 스크래칭 : 스크래칭은 소재가 롤 입구 안쪽으로 들어가면서 롤에 의해 국부적인 변형을 받아 소재의 표면에 굽힘 흔적을 갖는 현상이다. 제품에 스크래칭이 발생하면 도색에 불균형을 초래하거나 외관상 보기 좋지 않아 제품의 질을 떨어뜨린다. 이러한 결함을 줄이기 위해서는 성형단수를 증가 시키거나 롤의 굽힘 각을 감소시켜 각각의 패스에서 소재가 받는 성형량을 감소시킨다.
- 웨이비 : 웨이비는 초기 상태의 소재가 롤에 의해 굽힘을 받으면서 소재의 가장자리 부분의 연신이 다른 부분보다 과도하게 증가하게 되는데 늘어난 가장자리 부분은 롤 출구를 지나면서 연신이 상대적으로 적게 발생한다. 이때 소재의 가장

자리는 다른 부분과 같은 속도로 유지되기 때문에 오히려 수축하게 되고, 소재에 가해지는 압축응력이 허용응력을 넘게 되면 Fig. 2-6과 같이 웨이비 현상이 발생한다. 웨이비 현상은 길이방향 변형률과 매우 밀접하게 관계되어 있으며 롤간 거리나 성형 각을 조정함으로써 줄일 수 있다.

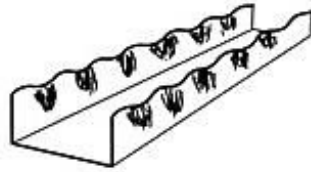


Fig. 2-6 Wavy

- 끝단 벌어짐(End flare) : 플레어는 스프링백의 일종으로 Fig. 2-7과 같이 제품의 끝단에서 변형되는 현상이다. 롤 포밍 공정에서 발생하는 내부응력은 여러 단의 상·하 롤 사이에서 소재가 압축하중을 받고 복잡한 응력들은 제품의 중앙보다는 양끝에서 더욱 커진다. 이러한 현상은 미리 잘려진 소재가 롤 포밍될 때나 성형 이후에 제품을 절단할 때 절단면에서의 회복현상으로 인해 제품의 양끝에서 발생한다. 특히 성형 이후에 제품을 절단할 경우는 제품의 양끝이 벌어지는 현상뿐만 아니라 뒤틀림 현상도 발생하는데 이는 두께방향 잔류 전단 응력에 의해 발생한다. 이때의 뒤틀림 현상은 입구 끝단의 경우 단면 가까이 수축하고, 출구 끝단은 바깥쪽으로 벌어진다. 플레어 현상을 방지하기 위해서는 성형 단수를 증가하거나 롤 설계를 수정하여 제품이 받는 응력을 골고루 분산한다. 또 다른 방법은 절단면이 예상된 지점에 사전 펀칭한 끝 면이 없도록 하거나, 연성이 좋은 소재를 선택하여 응력이 잘 분산되도록 한다.

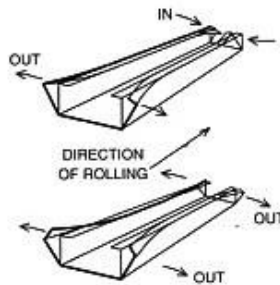


Fig. 2-7 Flare

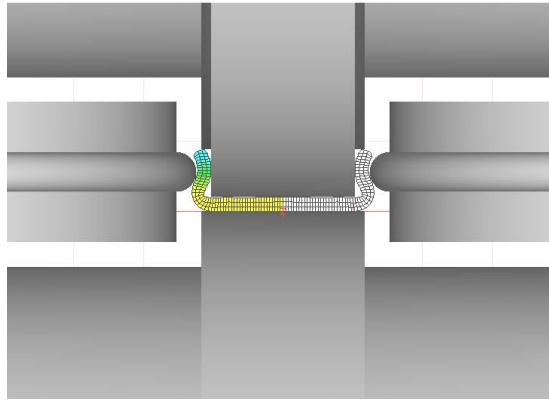
제 4 절 롤 포밍 공정설계시 고려할 사항

1. 성형롤 설계 이론

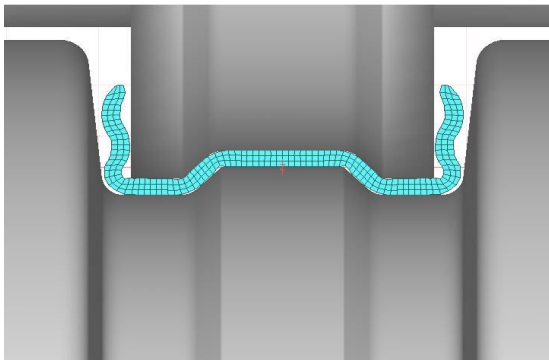
성형된 제품의 단면이나 형상은 사용된 소재의 재질에 따라 다양하게 설계할 수 있다. 롤 포밍 공정으로 제품을 생산하려면 가장 효율적이고 문제점을 최소화시키는 공정으로 형상이 설계되었는가를 염두에 두어야 한다. 종래의 프레스 절곡공정, 압출공정, 스탬핑 공정 등으로 생산되는 형상들도 약간의 공정변수와 이들의 영향을 고려하면 롤 포밍 공정으로 전환하여 제품을 생산할 수 있는 경우가 많아지고 있다. 다음은 본 논문에서 슬라이드레일의 성형롤 설계시 고려해야 하는 사항들이다.

가. 대칭성

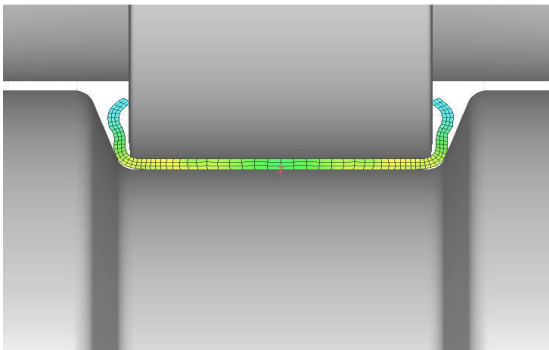
단면이 대칭인 경우는 이 공정을 적용한 생산이 아주 용이하다. 또한 비대칭 단면이라도 큰 어려움 없이 성형이 가능하다. 그러나 대칭 단면의 경우 즉, 성형 후 제품 단면을 기준한 수직 중심축에 대해 대칭 단면을 갖는다면 제품 끝 면에서 변형 량의 크기가 같게 되므로 성형에 의해 발생하는 응력의 크기가 같아져서 제품 소재에 작용하는 힘의 크기도 일정하여 제품생산이 용이하고 롤 설계나 롤 제작이 쉽다. 본 공정의 3개의 멤버 모두 대칭성을 고려하여 Fig. 2-8과 같이 설계하였다.



(a) Symmetry of inner member



(b) Symmetry of center member



(c) Symmetry of outer member

Fig. 2-8 Symmetry of slide rail

나. 단면 깊이

단면 깊이가 너무 깊은 제품은 이 공정에 적용하지 않는 것이 좋다. 롤 포밍 공정에서 생긴 응력은 다른 소성 굽힘 공정에서 보다 훨씬 복잡하기 때문이다. 너무 깊은 단면에서는 소재가 롤에 접촉하는 면적이 증가하여 응력 발생이 커지고 굽힘 반경 근처에서 띠판의 유동이 더욱 커진다. 따라서 소재의 에지 응력이 커지고 결국 결함발생의 원인이 된다. 단면의 깊이는 패스 수에 큰 영향을 준다.

다. 굽힘 반경

최소 굽힘 반경은 보통 성형할 소재의 연성에 의하여 크게 좌우한다. 일반적으로 롤 포밍 공정으로 다른 소성 공정보다 더 적은 반경을 가진 제품을 얻을 수 있다. 소재의 연성이 충분하면 굽힘 반경의 크기는 Fig. 2-9에서처럼 소재 두께와 같거나 조금 크게 하면 되고, 만일 소재 두께보다 적은 굽힘 반경으로 성형할 필요가 있을 때는 성형 전 Fig. 2-10와 같이 소재를 홈내기(grooving) 또는 비딩(beading)을 하여 방해 없이 원활히 서로 접촉하여 굽혀질 수 있도록 해야 한다. 그러나 Fig. 2-11에서 나타낸 것처럼 실제 굽힘 가공 시에 발생하는 두께 감소현상의 영향으로 굽힘 부분에서 소재 결함이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다.

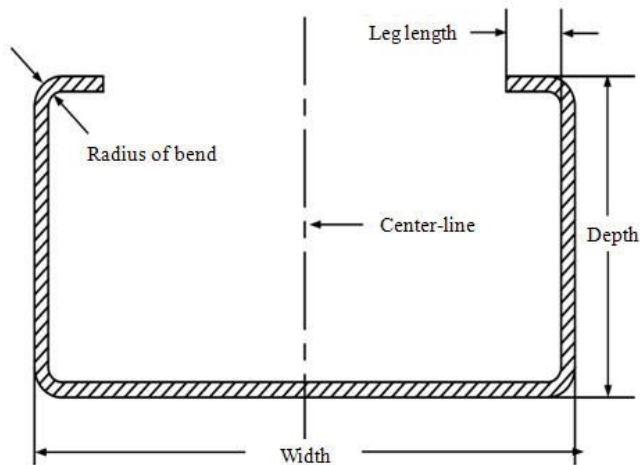


Fig. 2-9 Consideration when designing a part

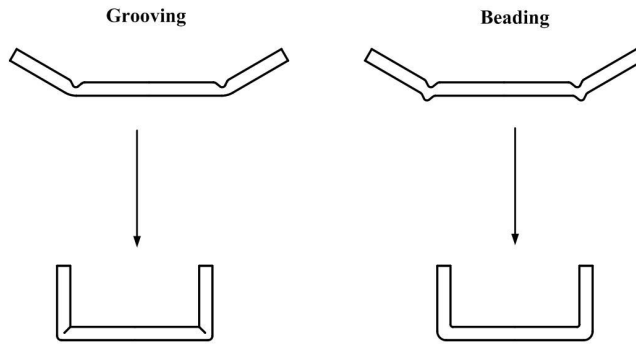


Fig. 2-10 Grooving and beading

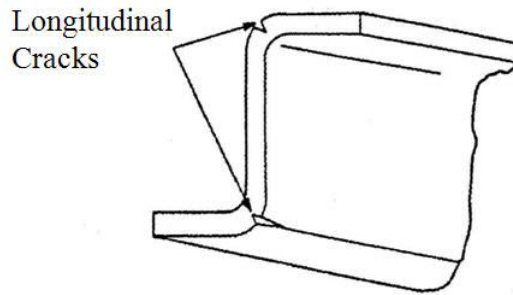


Fig. 2-11 Cracks at bend

라. 소재의 두께

소재는 두께의 감소 없이 롤 사이를 통과해야 한다. 롤 사이의 크기는 Fig. 2-12와 같으며, 다음의 식으로 나타낼 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} \text{Roll gap} &= \text{max. thickness} + \text{max. tolerance} + \text{max. coating thickness} \\ &+ \text{max. embossing depth} \end{aligned} \quad (2.1)$$

소재의 최대 두께보다 의도적으로 두께를 두껍게 하는 경우는 롤을 손상시키거나 장비를 마모시킬 수 있다. 또한 제품의 질을 낮게 하거나 웨이비나 스크래칭과 같은

제품의 결함을 발생할 수 있다.

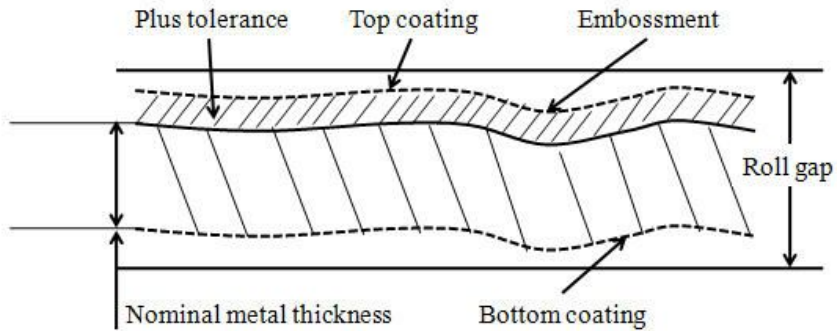


Fig. 2-12 Maximum material thickness used for roll design

마. 롤의 회전비율

롤의 직경을 설정하기 위해 롤 설계자는 상위롤과 하위롤의 회전비율을 알아야 한다. 보통 롤의 회전비율은 1:1, 1:1.33, 1:1.42로 하거나 구동 롤의 기어 비를 참고하여 설정한다. 즉 롤의 회전속도가 같거나 상위롤 보다 하위 롤이 1.33배 또는 1.42배 빨라야 한다. 이러한 방법은 U채널과 같이 제품의 다리부가 올라가는 형태의 제품에는 적합하지만 다리부가 아래로 내려가는 형태의 제품에는 적합하지 않다.

2. 롤 설계시 고려사항

롤 포밍에서 사용하는 작업공구는 성형시 직접 단면형상을 성형하는 롤, 보조가공작업을 하는 펀치 및 기타, 제품을 절단하는 절단 금형 등이 있다. 롤 포밍 공정에서 근본적으로 롤의 설계제작이 가장 중요하지만 확립되어 있는 이론적인 접근보다는 경험에 의한 기술기능적인 측면으로 다르고 있는 실정이다. 롤의 설계시 고려해야 할 요소는 성형의 순서, 성형 롤의 단수, 제품 단면형상을 고려한 성형 안내선, 소재의 폭 및 두께, 그리고 플라워 패턴 설계 등이 있고 그 외 여러 가지의 설계변수가 있다, 본 논문에서는 성형의 순서, 성형 롤 단수, 그리고 플라워패턴 설계에 대해서 간단히 알아보기로 한다.

가. 성형의 순서

단면을 고려하여 어느 위치에서 성형을 시작하여 진행할 것인가를 결정하는 것으로 보통은 소재의 중앙에서 시작하여 점차적으로 양끝으로 진행하면서 성형하고 굽혀지는 부분이 위로 향하도록 한다. 양끝 부분을 먼저 성형하는 경우도 있는데 나중에 양끝 모서리 부분을 성형할 수 없는 경우나 상하 롤 내부에 위치하여도 성형에 분제가 없다고 판단되면 이 방식을 채택할 수도 있다. 단면형상 성형과정 중 양 끝이나 중앙 부분을 동시에 성형하여도 서로 방해되지 않고 롤의 성형압력에 문제가 없을 때는 양끝과 중앙 부분을 동시에 성형할 수 있다. 소재 폭 전체를 순차적으로 성형하는 방식은 소재 두께로 보아 성형하중이 충분하며 전폭에 걸쳐서 한단의 여러 롤들이 서로 간섭을 받지 않으면 가능하다. 표면상태가 중요시 되어 이미 한쪽 면이 표면처리가 되었을 때 처리가 된 부분이 상부가 되도록 성형하는 것을 추천한다.

나. 성형 단수

롤 포밍 공정에 “과학”을 이용하려는 많은 시도가 있었고, 적어도 성형 단수를 계산하는 많은 가이드라인이 있어 왔다. 성형 단수를 계산하는 가장 쉬운 접근법은 다음의 식 (2.2)^[1]와 식 (2.3)^[1]을 이용하여 구할 수 있다.

$$p = \sqrt{2a^2} = a\sqrt{2} = 1.414a \quad (2.2)$$

만약 다리부의 길이 a 가 1.5라면 $p = 1.414 \times 1.5 = 2.12$ 가 된다.

$$\tan \alpha = \frac{p}{c}, \quad c = \frac{p}{\tan \alpha} \quad (2.3)$$

만약 굽힘 각이 $\alpha = 1.5^\circ$ 라고 하면 $\tan \alpha = 0.0262$ 가 되어 처음 패스부터 마지막 패스까지 거리 c 는 $2.12 \div 0.0262 = 80.96$ 이 된다.

만약 롤 사이의 수평거리가 10inch 라고 한다면 이 식에 의해 $(80 \div 10) + 1 = 9$ 패스가 된다. 위의 식은 간단한 형태를 설계하는 초보자에게는 길잡이가 되겠지만 롤 설계 시에 고려해야 할 많은 인자들을 고려하지 않은 방법이다. 패스수를 설정하는 또 다른 방법은 굽힘 부의 응력을 계산하는 것이다. 수많은 플라워패턴(flower pattern)을 그린 다음 각각의 플라워 패턴에서의 응력을 계산하는 것이다. 만약 롤 사이의 응력이 허용 수준 이상이라면 성형을 수정해야 한다. 이 방법은 다른 방법에 비해 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 본 논문에서는 다음의 경험식 (2.4)^[1]을 이용하여 패스수를 설정하였다.

$$n = \left[3.16h^{0.8} + \frac{0.05}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{40U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs \quad (\text{imperial}) \quad (2.4)$$

여기서 각각의 기호는 다음과 같다.

n =패스수(가이드라인만)

h =단면의 최대 높이

t =재료의 두께

α =최종형상에서의 굽힘 각의 총합

Y =항복강도(MPa)

U =최대인장응력(MPa)

z =노치(notch), 구멍(hole) 그리고 떠판의 연속계수 (0-2; Table 2-1)

s =형태 인자(shape factor)(1-1.6; Table 2-2)

e =여분의 패스

f =공차인자(0-2; Table 2-3)

Table 2-1 Effect of holes and notches(Z) on number of passes^[1]

y=height
t=thickness
v=distance from edge

Z

		Z	
		$\frac{y}{t} < 20$	$\frac{y}{t} \geq 40$
- Small perforation - Slotted { edge continuous limited edge continuity edge not continuous - Wire - Pre-cut		n_1	no hole 0 0
		n_2	a 0 0 b 0 0 c 0 0.07
		n_3	d 0.03 0.05 e 0.05 0.05 f 0.07 0.12 g 0.07 0.12 h 0.1 0.1 i 0.12 0.15
		n_4	j 0.12 0.15 (if $s \geq 5t$) k 0.15 0.2 - 0.4 (*) l 0.25 0.3 - 0.5 (*) m 0.5 0.6 - 0.7
		n_5	n_1 0 n_2 0.05 n_3 0.05 n_4 0.30 n_5 0.25
		p	p 0.18 0.18 (pre-cut)

Table 2-2 Effect of shape(S) on number of passes^[1]

	1	1	1.05	1.05	1~1.05	1.1~1.2	1.4	1.5
S Shape factor								

Table 2-3 Effect of tolerance factor(F) on number of passes^[1]

Tolerance factor	
Loose (construction)	0
Medium	0.5-1.0
Tight (automotive)	1.1-1.7
Extremely tight	1.9-(2)

다. 플라워 패턴 설계

롤 설계를 시작할 때 고려하는 항목으로 Fig. 2-13과 같이 마치 꽃봉오리에서 꽃이 피는 과정처럼 제품의 단면형상으로부터 평평한 소재의 단면이 되도록 성형과정을 반대 순서로 하여 구해진다. 롤 단수가 결정되면 성형 중간 각단에서 생성되는 중간 형상을 알 수 있다. 그러므로 설계자는 소재가 원활히 이동하는가, 성형의 순서를 어디서부터 시작할 것인가, 오버벤딩할 단이 있는지 그리고 치수를 잘 만족할 수 있는지 등을 쉽게 파악하여 롤 제작 전 야기할 수 있는 문제점을 다시 검토할 수 있다. 결국 각 단별 적절한 형상을 가진 롤 단수의 성형과정을 거쳐 제품을 생산할 수 있도록 한다.

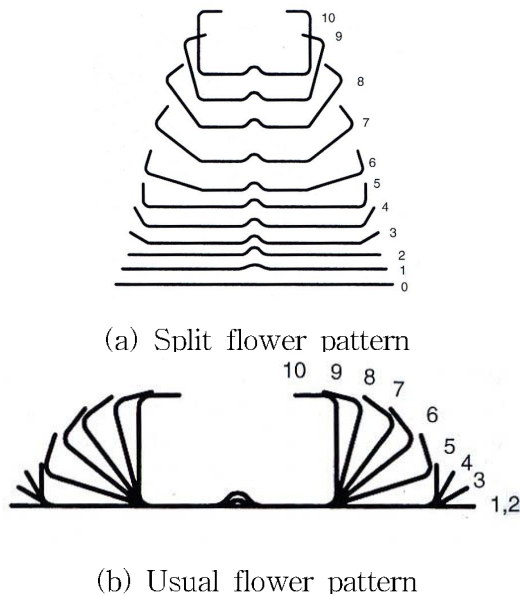


Fig. 2-13 Flower pattern

제 3 장 재료의 특성

제 1 절 성형에 영향을 미치는 인자

롤 포밍 공정에 사용되는 소재는 일반적으로 압연에 의하여 두께가 일정하고 길이가 매우 긴 형태로 사용되는데, 압연에 의해 소재는 이방성(anisotropy) 성질을 가지게 되고 회전방향에 따라 각기 다른 기계적 특성(mechanical property)을 갖게 된다. 금속은 일정한 슬립(slip) 면과 방향으로 슬립과 쌍정(twinning)에 의해 성형되는데 이것은 결정격자를 회전시킨다. 따라서 소성변형이 일어나는 동안 이방성은 증가한다. Fig. 3-1과 같이 압연방향에 따라서 연신율-응력의 관계가 다르게 나타난다. 일반적으로 제품의 성형 시에는 회전방향으로 성형이 되므로 압연 롤의 회전 방향(rolling direction)인 0°에서 시편을 만들어 인장시험을 한다. 인장시험을 하는 동안 압연 소재의 이방성에 의해 길이 방향, 넓이방향, 두께방향의 연신율이 다르게 나타난다. 이러한 특성을 이방성계수(R-Value or Lankford coefficient)로 나타낸다. 이방성 계수는 두께방향 연신율에 대한 넓이방향 연신율로서 R=1이면 등방성(isotropy)이고, R≠1면 이방성(anisotropy) 재료이다. 또한 성형성(formability)과 불안정성(instability)을 나타내는 지표로 사용된다.

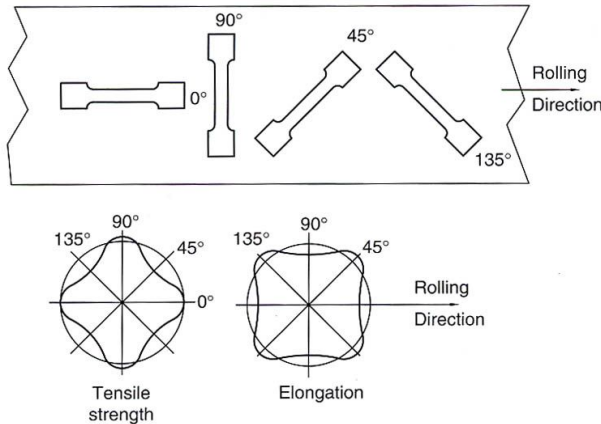


Fig. 3-1 Mechanical properties according to direction to rolling^[1]

Fig. 3-2에 일반적인 응력-변형률 선도(stress-strain diagram)이다. 항복응력(yield stress)보다 작은 응력으로 성형된 재료는 원래의 모양으로 복원된다. 영구변형을 주기 위해서는 항복응력 이상에서 성형되어야 하고, 인장응력(ultimate tensile stress)을 넘어서면 성형되는 동안 크랙이나 찢어짐 현상이 발생한다. 또한 항복응력과 인장응력의 차이가 크고, 연신율(Elongation)이 클수록 재료의 성형성이 좋아진다.

A점 : 비례한도(proportional limit) : 하중과 신장량의 관계가 직선적이고, 이 구간에서는 하중을 가했다가 제거할 경우 처음의 형태로 복원됨.

B점 : 상항복점(upper yield point) : 탄성변형의 종점이자 소성변형의 시점.

C점 : 하항복점(lower Yield point) : 상항복점을 지나 인장력을 더욱 가할 경우 하중이 급속히 감소하고 그 후 거의 일정한 하중하에 일정한 신장량을 나타냄.

\overline{CD} : 항복하중 하에서 인장의 불안정성(Lüder's line, Shock line)

\overline{DE} : 가공경화(work hardening) 또는 변형경화(strain hardening)에 의해 단면이 감소함에도 응력은 증가.

E점 : 최대하중(가공경화의 속도가 단면의 감소속도를 따르지 못하여 하중은 최대가 된다)

\overline{EF} : 국부적인 변형(necking)

F점: 파단(fracture)

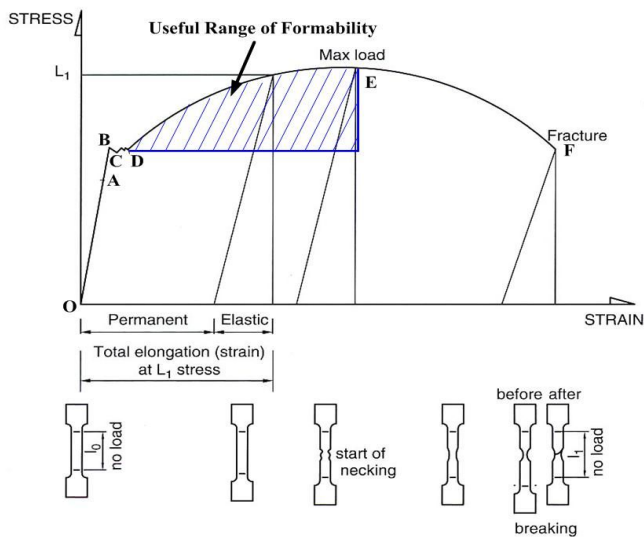


Fig. 3-2 Stress-strain diagram

하중 P를 최초의 단면적(A_0)으로 나눈 값을 공칭응력이라고 하고 하중을 어떤 순간의 단면적(A)으로 나눈 값을 진 응력이라고 한다. 일반적인 소성의 문제에서는 공칭응력보다는 진 응력 선도가 유효하다. Fig. 3-3는 공칭응력-공칭변형선도와 진응력-공칭변형률 곡선의 차이를 보여준다. 후자는 전자보다 항상 위에 있고 변형률이 커질수록 두 그래프의 차이는 커지게 된다. 진 응력을 사용하면 곡선은 E점을 지난 후에도 하강하지 않는다. 진 응력과 대수변형률은 다음 식 (3.1), (3.2)를 통하여 구할수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_n \times (1 + e) \quad (3.1)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (3.2)$$

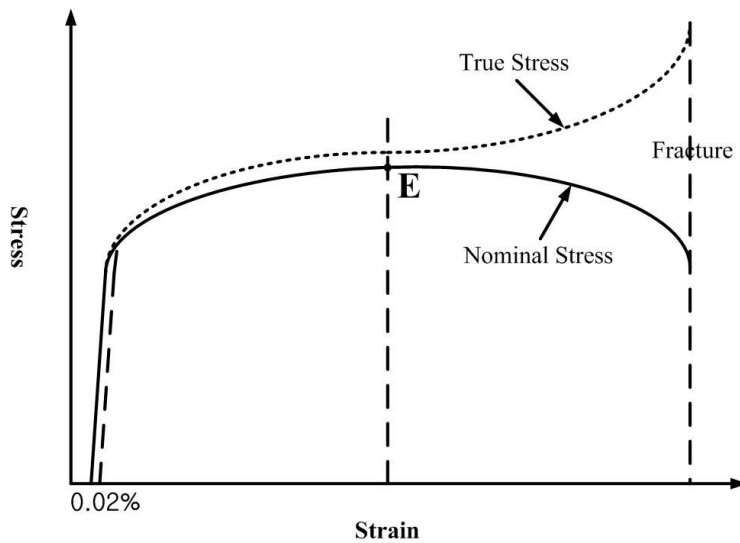


Fig. 3-3 Comparison between nominal stress-nominal strain diagram and true stress-true strain diagram

제 2 절 냉간압연강판(SCP-1)의 특성

슬라이드레일을 성형하기 위해서 냉간압연강판(SCP-1)을 사용하였다. 냉간압연강판(cold rolled carbon steel sheet, CR)의 화학성분을 Table 3-1에 나타내었다. 냉간압연강판은 열연코일을 소재로 표면스케일을 제거하고(산세공정) 두께 0.15~3.2mm 정도까지 압연한 후 소둔과 조질 압연을 거쳐 생산한다. 냉연강판은 열연강판에 비해 두께가 얇고 두께정도가 우수하며 표면이 미려하고 평활하며 가공성이 우수하다. 이러한 특성에 따라 자동차, 가전기기, 가구, 사무용품, 차량, 건축 등에 사용되거나 아연, 알루미늄, 주석, 크롬 등의 도금용 원판으로 사용된다. 냉연강판의 종류는 KS D 3512에서 규정된 1종(SCP1, 일반용), 2종(SCP2, 가공용), 3종(SCP3, 심가공용) 등이 있으며 KS에서 규정되어 있지 않으나 저항복점강판, 초심가공용강판(EDDQ)등이 있으며 특수냉연강판으로는 범람용 강판, 내식·내후성강판, 저급전기 강판, 표면피복강판, 경질강판, 고강도강판, 청열강판(Blue Sheet), 엠보싱강판등이 있고 도금원판으로는 아연도금강판, 석도원판 등이 있다. 1종(SCP1)은 일반용으로 표면이 미려하고 가장 수요가 많은 제품으로 벤딩이나 간단한 드로잉가공에 적합한 강판으로 자동차 차량외판, 세탁기 및 냉장고의 외판, 텔레비전, 캐비닛, 가벼운 가공용, 자동차부품, 철제가구, 배전반 등 주로 평판용으로 사용된다. 2종(SCP2)은 가공용으로 SCP1에 비해 우수한 가공성을 얻을 수 있는 강판으로 도어, 가솔린 탱크 등과 통신기 부품, 전기밥통외판 등에 사용된다. 3종(SCP3)은 심가공용으로 SCP2에 비해 우수한 심가공성을 갖고 있으며 야금학적으로 결정립을 조정하고 있기 때문에 심가공 후 아름다운 표면을 얻을 수 있다. 따라서 자동차용 Rear, Fender, Front Panel 등에 사용된다.

Table 3-1 Chemical elements ratio of SCP-1

구성성분	C	Mn	P	S	Fe
구성비(%)	0.12	0.5	0.04	0.045	99

냉간압연강판의 물성치를 분석하기 위하여 만능인장시험기(Universal Tensile Machine, Instron社)를 이용하여 측정하였다. 시험편은 KS D 3512(냉간압연강판 및 강대 규격)에 의해 KS B 0801(금속재료인장시험편 규격)을 참고하여 표준 시험편 5호로

제작하였다. 인장시험 결과를 Fig. 3-4에 나타내었다.

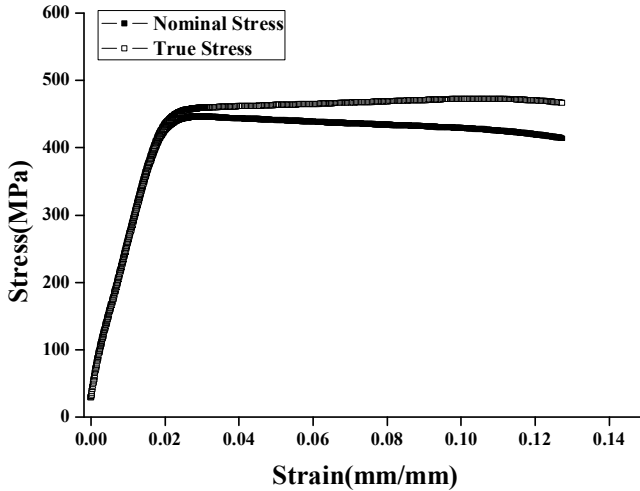


Fig. 3-4 Stress-strain diagram of SCP-1

재료의 항복강도를 구하기 위하여 0.2%(영구변형) 항복강도가 널리 이용되는데, 이것은 0.002의 변형률에 해당되는 점에서 곡선의 탄성 직선부분에 평행하게 직선을 그리고 이 직선과 응력-변형률 곡선과 만나는 점의 응력이다. 그러므로 이 항복응력은 0.2%의 소성변형을 일으키는 데 필요한 응력이라고 할 수 있다. 항복 이후의 소성 변형에서는 연속되는 항복응력에 해당하는 재료상수를 항복응력 대신 유동응력으로 나타낸다. 유동응력은 탄성변형시의 탄성계수처럼 재료가 가지고 있는 특성이며, 금속재료의 경우에는 변형률, 변형률 속도, 온도 등의 영향을 받는다. 즉

$$\sigma_f = \sigma_f(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T) \tag{3.3}$$

식 (3.3)에서 $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률, $\dot{\varepsilon}$ 는 유효변형률 속도, T 는 온도를 나타낸다. 유동응력은 소재가 보여주는 변형에 대한 저항이라고 볼 수 있으며 변형이 진행되어 총변형률이 증가함에 따라 유동응력이 커지는 현상을 재료의 가공경화 또는 변형경화라고 한다. 금속재료의 가공경화는 소재의 재결정온도 이하에서는 변형이 진행됨에 따라서 전위가

집적되고, 이로 인해 전위의 후속이동을 방해하기도 한다. 결국 전위의 이동에는 보다 많은 전단변형에너지 또는 보다 큰 전단응력이 필요하므로 현상적으로는 유동응력의 증가가 수반된다. 가공경화로 인한 유동응력의 증가현상을 수식으로 나타내는 방법은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ n제곱 경화형} \quad : \quad \sigma_f = K\bar{\epsilon}^n \quad (3.4)$$

$$\textcircled{2} \text{ Ludwick 형} \quad : \quad \sigma_f = Y + K\bar{\epsilon}^n \quad (3.5)$$

$$\textcircled{3} \text{ Swift 형} \quad : \quad \sigma_f = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (3.6)$$

$$\textcircled{4} \text{ 변형률속도 포함형} \quad : \quad \sigma_f = K\bar{\epsilon}^n \dot{\epsilon}^m \quad (3.7)$$

유동응력방정식에서 K 는 재료의 강도에 관계되는 비례상수로 강도계수라 하며, n 은 가공경화의 정도를 나타내므로 가공경화지수라 한다. 수치적인 방법을 통하여 소재의 변형을 모사할 경우 소재의 거동을 나타내는 방법은 위의 수식을 이용하며 본 연구에서는 수치적 해석에 최적화된 유동응력을 구하기 위하여 Swift형을 이용하였다. Swift식의 계수들을 구하기 위하여 파워커브를 이용하여 근사 함수로 표현하였다. 소성해석의 경우 소재의 유동은 탄성범위를 제외한 즉 항복응력에서부터 최대인장응력 사이의 값으로 근사 화한다. Fig. 3-5에 커브 피팅한 결과를 나타내었다. 인장시험결과와 커브 피팅을 통하여 얻은 유동응력방정식의 계수 값들을 Table 3-2에 나타내었고 식 (3.8)은 강소성 유한요소법으로 롤포밍 공정을 해석할 때 필요한 냉간압연강판(SCP-1)에 대한 유동응력방정식이다.

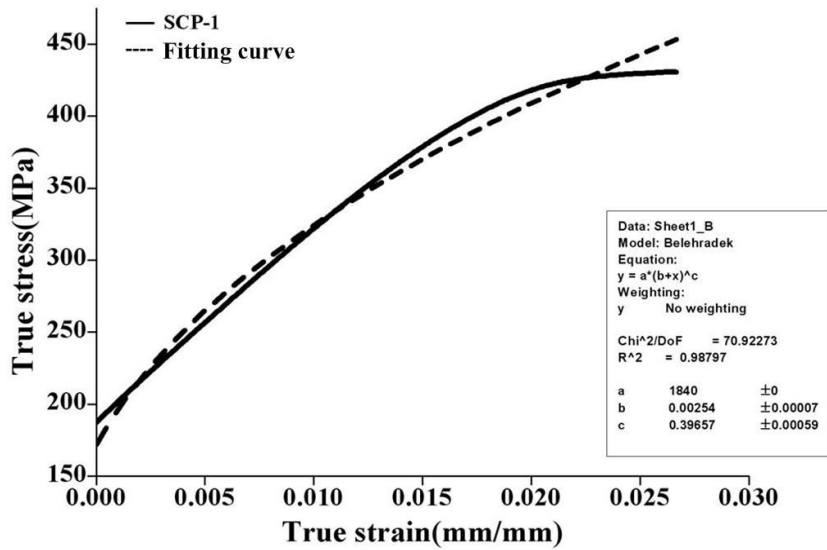


Fig. 3-5 Curve fitting for SCP-1

Table 3-2 Result of tensile tests and curve fitting for SPC-1

material	SCP-1	poisson's rate	0.3
young's modulus	210 GPa	strength coefficient(K)	1840 MPa
yield stress	158.12 MPa	initial strain($\bar{\varepsilon}_0$)	0.00254
ultimate tensile stress	480.40 MPa	work-hardening exponent(n)	0.39657

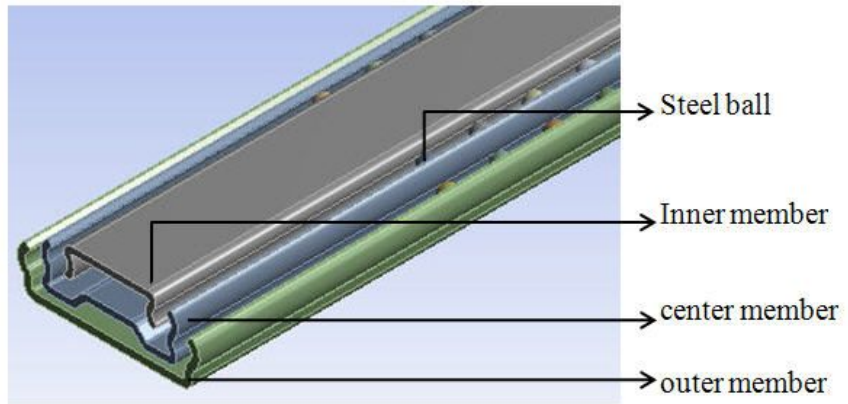
$$\sigma_f = 1840(0.00254 + \bar{\varepsilon})^{0.39657} \quad (3.8)$$

제 4 장 롤 포밍 공정 설계 및 해석

제 1 절 냉장고용 슬라이드레일의 모델링

1. 냉장고용 슬라이드레일의 설계

냉장고에 사용될 슬라이드레일의 형상은 Fig. 4-1과 같이 3개의 멤버로 구성되고, 각 멤버사이에는 스틸볼이 삽입된다. 냉장고용 슬라이드레일은 Fig. 4-1(a)와 같이 아웃터 버를 냉장고 본체에 고정하고 인너 멤버를 서랍에 부착하여 운동하도록 설계하였다. 롤 포밍 공정에서 최소 굽힘 반지름은 보통 성형할 소재의 연성에 의해 크게 좌우되는데, 일반적으로 롤 포밍 공정은 다른 소성 공정보다 더 작은 반경을 가진 제품을 생산할 수 있다. 실제 굽힘 가공 시에 발생하는 두께 감소현상의 영향으로 굽힘 부에서 크랙과 같은 소재의 결함이 발생할 가능성이 크기 때문에 본 논문에서는 소재의 두께가 인너 멤버와 센터 멤버가 2mm이고 아웃터 멤버가 2.3mm임을 고려하여 굽힘 반지름을 각각 2.85mm로 설계하였다. 또한 각각의 멤버는 반지름이 5.56mm인 스틸 볼에 의해 진동은 최소화하면서 부드러운 작동이 가능하도록 하였다.



(a) Heavy duty slide rail modeling



(b) Slide rail for refrigerator

Fig. 4-1 Slide rail used in refrigerator

2. 냉장고용 고하중 슬라이드레일의 구조해석

가. 입력조건

냉장고용 고하중 슬라이드 레일의 하중에 따른 응력 분포와 진동 해석을 수행하였다. 해석을 위한 입력조건을 Table 4-1에 나타내었다. 인너, 센터, 아웃터 멤버는 SCP-1을 사용하였고, 솔리드 요소를 적용하였다. 스틸 볼은 베어링강(bearing steel, AISI 304)을 사용하였고, 구성요소의 위치에 따른 특성을 정확히 나타내고, 설계위치에 정확하게 결합하기 위해서 솔리드 요소로 요소 분할하였다. Fig. 4-2에 요소 분할된 슬라이드 레일을 나타내었다. 스틸 볼과 각 멤버간의 연결부분은 결합(bonded)으로 접촉조건을 설정하였다. 경계 조건은 Fig. 4-3과 같이 아웃터 멤버의 하단 부를 6자유도로 구속하고 초기조건으로 인너 멤버의 상단부에 Y축 방향으로 100N의 하중을 가하여 응력분포와 슬라이드 레일의 진동 모드를 해석하였다.

Table 4-1 Input conditions for FEA

		Slide Rail	
Mesh	Mesh Type	Solid Mesh	
	Contact	Bonded	
	Node	25523	
	Elements	9546	
Properties	SCP-1	Elastic Modulus	2.1×10^{11} Pa
		Yield stress	158×10^6 Pa
		Tensile stress	418×10^6 Pa
		Poisson's Ratio	0.3
		Density	7872 kg/m^3
	AISI 304	Elastic Modulus	1.9×10^{11} Pa
		Yield stress	206×10^6 Pa
		Tensile stress	517×10^6 Pa
		Poisson's Ratio	0.29
		Density	8000 kg/m^3
Boundary Conditions		Fix : output member 6DOF constraint Force : inner member (0N, -100N, 0N)	

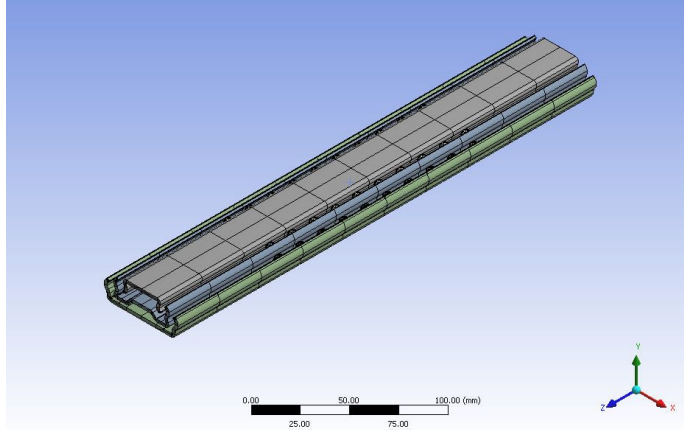


Fig. 4-2 Slide rail meshing

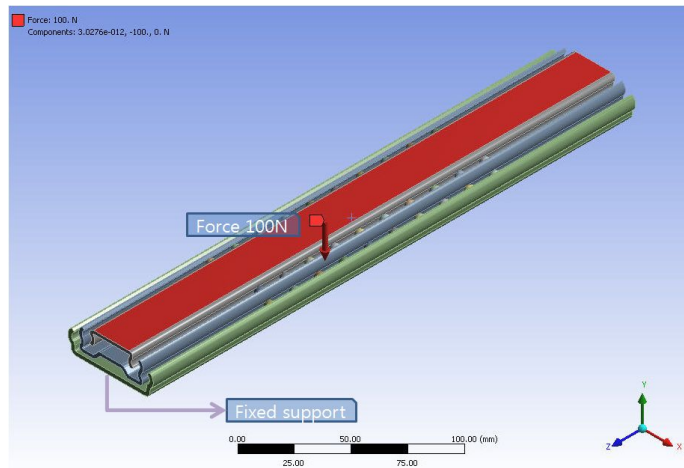
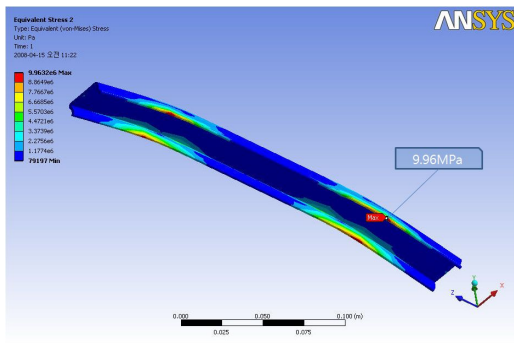


Fig. 4-3 Boundary condition for FEA

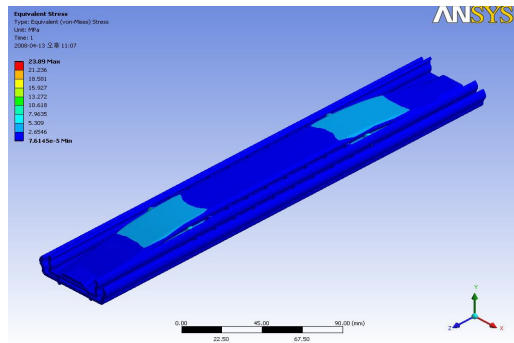
나. 응력해석

물체는 외부에서 힘을 받으면 외부 하중과 힘의 평형을 이룰 때까지 물체 내부에 힘(interior force)이 발생하게 되며, 변형이 일어나고 힘의 평형이 이루어지면 변형을 멈추게 된다. 선형응력 해석에서는 물체의 여러 부분에서 발생하는 내력의 세기를 구하는 것이 중요하다. 이때 단위면적당 작용하는 힘의 세기를 응력이라고 한다. 응력은 크게 수직응력과 전단응력으로 나눈다. 수직응력은 단위면적에 수직 방향으로 작용하는 힘을 말하며 인장응력과 압축응력이 있다. 또한 전단응력은 단위면적에 평행하게 작용

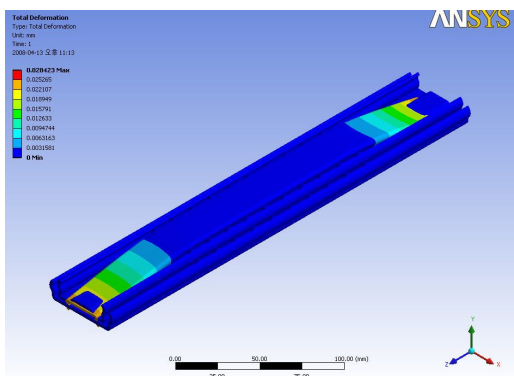
하는 힘을 말한다. 수직응력과 전단응력은 주로 동시에 발생하며 주응력이 벡터로서 크기와 방향을 가진다면 등가응력(equivalent stress, Von-Mises stress)은 스칼라로서 크기만 갖는다. 복잡한 3차원 모델에서는 주응력으로 항복이나 파단을 판단하기 힘들기 때문에 등가응력을 가지고 판단하고, 등가응력이라고도 하며, 구조물이 하중에 대해 안전한지를 판단하는데 중요한 역할을 한다. 등가응력의 최대값이 재료의 항복강도보다 작으면 이 모델은 하중조건에 대해 안전하다고 볼 수 있다. 그러나 등가응력이 항복강도보다 크면 소성변형이 일어난다. 100N의 하중이 가해질 때 Fig. 4-4(b)와 같이 인너 멤버와 센터 멤버사이의 양 끝에 위치한 스틸 볼에 23.89MPa의 최대 등가 응력이 발생했다. Fig. 4-4(c)에서와 같이 인너 멤버에서 0.028423mm의 변형이 발생했다. 또한, Fig. 4-4(a)에서와 같이 인너 멤버의 최대 등가 응력이 9.96MPa이 작용한다. SCP-1의 항복 응력이 158MPa이므로, 100N의 외부하중이 작용할 때 슬라이드 레일은 안정하다.



(a) Equivalent stress of inner member



(b) Equivalent(Von-Mises) stress

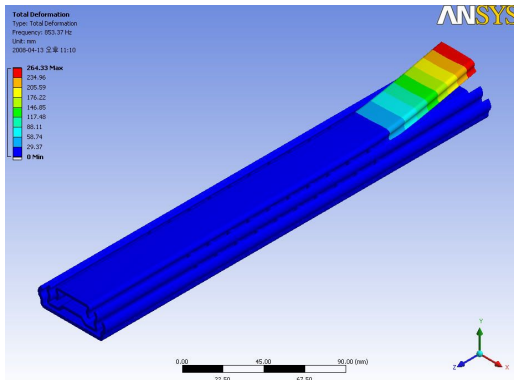


(c) Deformation

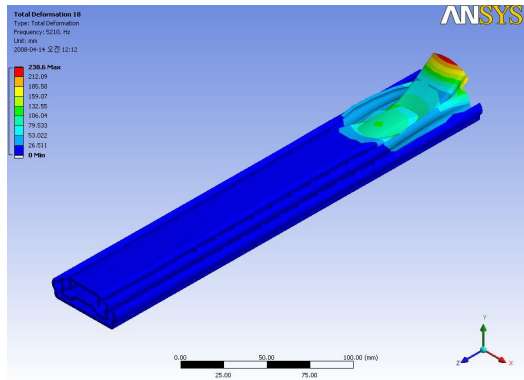
Fig. 4-4 Static structure analysis of slide rail

다. 진동 해석

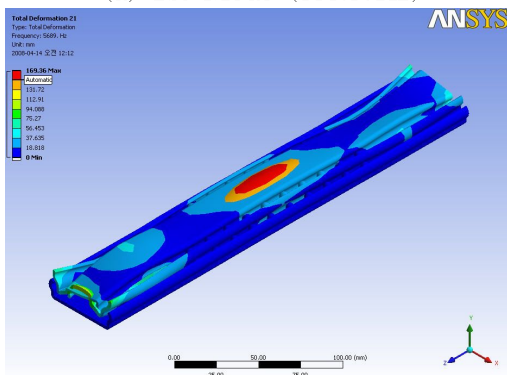
외부 진동원에 대한 슬라이드 레일의 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악하기 위해 진동해석을 수행하였다. 입력조건은 Table 4-1과 동일하게 선정하였다. 진동해석을 통해 구한 주요 모드형태(mode shape)를 Fig. 4-5에 나타내었다. 가장 큰 진동이 나타나는 1차 모드는 853.37Hz에서 인너 멤버에 발생하였다. 하중은 주로 스틸 볼이 삽입된 위치에서 발생하므로 인너 멤버의 중앙부에서 진동이 발생할 경우 이송대상이 되는 물체에 큰 진동을 줄 수 있다. 21차 모드에서 인너 멤버의 중앙부에서 진동이 크게 발생하였고, 이때 고유 주파수는 5689Hz이다. 이송 물체가 고정되는 중앙부에서 진동이 발생하는 주파수가 매우 크기 때문에 외부진동원에 대해 개발한 슬라이드 레일은 안정하다.



(a) 1st Mode (853.57Hz)



(b) 18th Mode (5210Hz)



(c) 21th Mode (5689Hz)

Fig. 4-5 Modal analysis of slide rail

3. 고하중 슬라이드레일의 성형롤 설계

가. 인너 멤버

인너 멤버의 총 성형단수는 경험식 (2.4)을 이용하여 다음과 같이 구하였다^[1].

$$n = \left[3.16h^{0.8} + \frac{0.05}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{40U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs \quad (4.1)$$

여분의 패스 및 형태인자, 공차인자를 제외하고 식 (4.1)에 의해 구해진 최소 성형단수는 5 pass이다. 하지만 여분의 패스나 형태인자 등을 고려하여 인너 멤버의 성형 단수를 10 pass로 설정하였다. 롤 포밍 공정에서의 신장량은 다음의 식 (4.2)과 같이 나타낼 수 있고, 롤과 롤 사이의 수평거리가 n 배 증가할 때 신장량은 2^n 배 감소한다^[1].

$$e = \frac{\sqrt{l^2 + 2.4674 h^2} - l}{l} \times 100 \quad (4.2)$$

여기서 l 은 롤과 롤 사이의 수평거리, h 는 단면의 높이이다. 소재의 신장량과 성형기의 성능을 고려하여 1패스부터 10패스까지는 롤간 거리를 330mm로 설정하였다.

롤 포밍 공정에서 굽힘의 순서는 Fig. 4-6(a)와 같이 소재의 중앙에서 시작하여 점차적으로 양끝으로 진행하면서 성형하고 굽혀지는 부분이 위로 향하도록 하는 센터 비드가 있다. 또 Fig. 4-6(b)와 같이 양 끝을 먼저 성형하는 경우도 있는데, 성형의 마지막 단계에서 제품의 양끝 모서리 부분을 성형할 수 없는 경우나 상·하 롤 내부에 위치하여도 성형에 문제가 없다고 판단되면 아웃사이드 립 방식을 이용한다. 롤 포밍 공정 중에 제품의 양끝이나 중앙 부분을 동시에 성형하여도 서로 방해되지 않고 롤의 성형압력에 문제가 없을 때는 양끝과 중앙 부분을 동시에 성형할 수 있다. 이러한 방식은 소재의 두께가 성형하중에 충분히 견딜 만하거나, 소재의 폭이 충분히 넓어 하나의 패스에서 모든 굽힘 부를 성형하여도 서로 간섭을 일으키지 않을 때 사용한다. 인너 멤버는 소재의 양끝부분만 성형하면 되기 때문에 아웃사이드 립 방식을 이용했다.

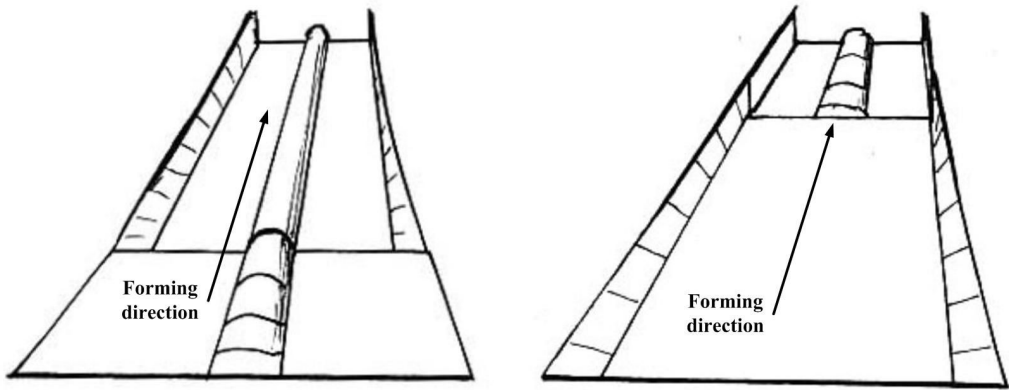
성형 롤을 설계할 때 패스수가 정해지면 먼저 수직 가이드 면의 위치를 결정해야

한다. 에지 응력은 플라워 패턴에서 나타나는 에지 운동 경로(ET ; Edge Travel)와 관련이 있다. Fig. 4-7과 같이 수직 가이드 면의 위치는 에지운동에 영향을 준다. 따라서 수직 가이드 면을 기준으로 좌우의 에지운동 경로가 비슷하도록 하여야 한다. 또한 Fig. 4-8과 같이 제품의 평행부가 지지되지 않은 경우는 소재의 양단에 굽힘을 가하면 굽힘력의 수평 벡터에 의해 평행부가 휘어지는 현상이 발생한다. 또한 Fig. 4-9에 인너 멤버의 플라워 패턴을 나타내었다.

다음의 식 (4.3)은 성형 공정중 굽힘 부가 받는 응력을 나타낸 식이다^[1].

$$\sigma = \frac{e^2 \times E \times (1 - \cos \alpha)}{l^2} \quad (4.3)$$

여기서 e 는 다리부의 길이, E 는 영률, α 는 굽힘 각, l 은 롤간 거리이다. 본 논문에서는 큰 성형각의 변화인 Jump현상을 줄이고, 각각의 굽힘 부가 받는 응력을 같게 하기 위해 다리부의 길이(e)가 같은 패스는 굽힘 각을 같게 하고, 다리부의 길이가 다를 경우에는 다리부의 길이에 따라 굽힘 각을 조절한다. 롤갭의 크기는 공차 및 코팅 크기, 엠보싱 크기 등을 고려하여 설계해야 하지만, 본 논문에서는 3개의 멤버 모두 유한요소 해석 시에 이런 인자들을 제외하고 오직 소재의 두께만을 고려하여 인너 멤버와 센터 멤버의 두께를 2mm로 하고 아웃터 멤버의 두께를 2.3mm으로 설정하였다. 또한 실제의 롤 포밍 공정에서는 소재가 다음 패스로 이동할 때 여러 가지 마찰인자로 인해 이동속도가 감소되어 소재의 중심부가 휘어지는 현상이 발생하게 된다. 따라서 성형 롤의 직경을 0.4-0.6mm 증가하여 소재가 휘어지는 현상을 방지하는데 본 논문에서는 3개의 멤버 모두 유한요소해석 시에 성형 롤을 강체로 설정하여 마찰계수 0.1μ 를 제외한 모든 마찰인자를 배제하여 롤의 직경은 증가시키지 않았다. 롤 설계 시에 리드인 플랜지를 추가하여 소재의 플랜지 부분이 다음 패스로 원활히 안내되도록 설계하였다.



(a) Center bead

(b) Outside lip

Fig. 4-6 Forming order of product^[1]

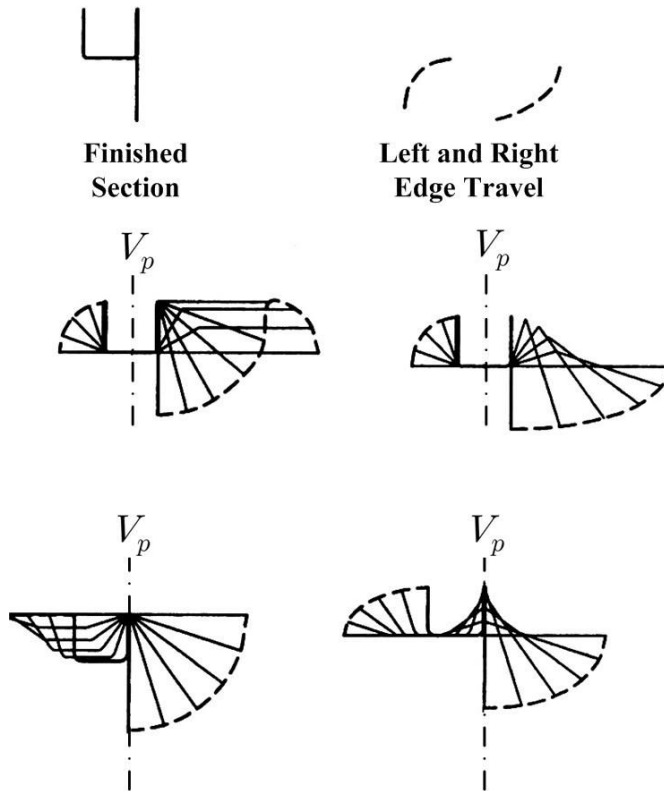


Fig. 4-7 Edge travel in roll forming process^[1]

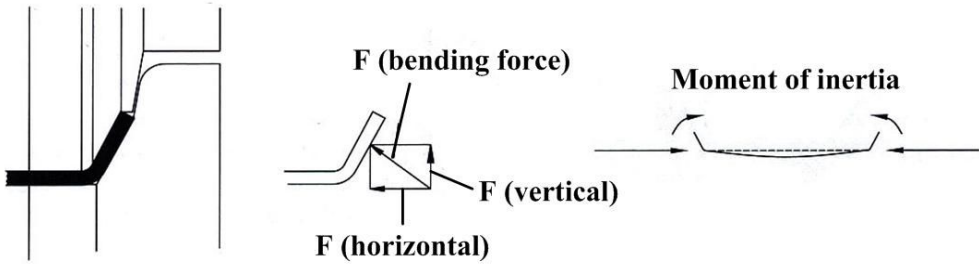


Fig. 4-8 Horizontal vertical of bending forces in roll forming process^[1]



Fig. 4-9 Flower pattern of inner member

나. 센터 멤버

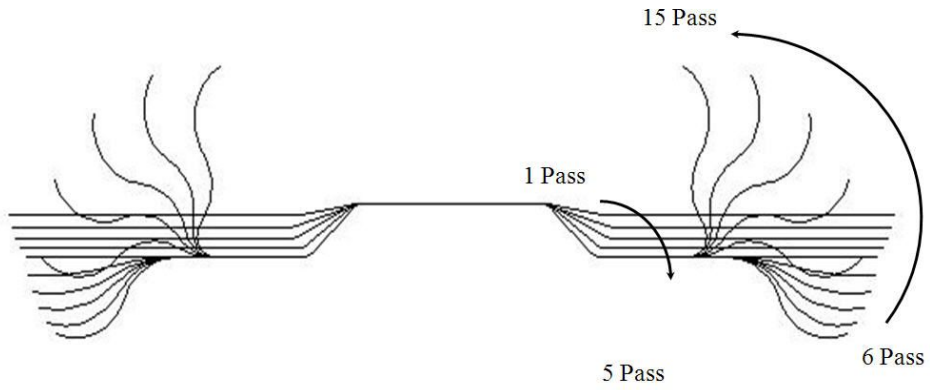
센터 멤버의 총 성형단수는 경험식 (2.4)을 이용하여 아래와 같이 구하였다^[1].

$$n = \left[3.16h^{0.8} + \frac{0.05}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{40U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs \quad (4.4)$$

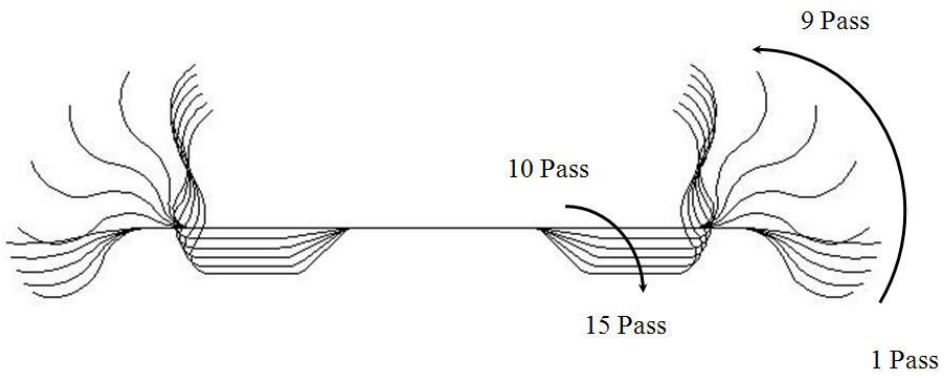
식 (4.4)에 의해 구해진 최소 성형단수는 7 pass이다. 총 성형단수는 여분의 패스 및 형태인자, 공차인자를 고려하여 15 pass로 설정하였다. 롤간 거리는 전체의 공정 모두 330mm로 설정하였다.

굽힘 부의 설계 방법에 따른 성형성을 비교하기 위해 TYPE-1과 TYPE-2로 설계하였다. Fig. 4-10(a)의 TYPE-1은 안쪽의 굽힘 부를 먼저 성형하는 설계하는 방법을 이용하였고, Fig. 4-10(b)의 TYPE-2는 바깥쪽 굽힘 부의 성형을 먼저하고 안쪽을 나중

에 성형하는 설계하는 방법을 이용하였다. 본 논문에서는 TYPE-2의 설계방법으로 설계하고 롤 포밍 공정 해석을 하였다.



(a) TYPE-1



(b) TYPE-2

Fig. 4-10 Flower pattern of center member

나. 아웃터 멤버

아웃터 멤버의 총 성형단수는 경험식 (2.4)을 이용하여 아래와 같이 구하였다^[1].

$$n = \left[3.16h^{0.8} + \frac{0.05}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{40U} \right]^{0.15} s(1+0.5z) + e + f + 5zs \quad (4.5)$$

식 (4.5)에 의해 구해진 최소 성형단수는 5 pass이다. 총 성형단수는 여분의 패스 및 형태인자, 공차인자를 고려하여 10 pass로 설정하였다. 물간 거리는 전체의 공정 모두 330mm로 설정하였고 Fig. 4-11에 아웃터 멤버의 플라워패턴을 나타내었다.



Fig. 4-11 Flower pattern of outer member

제 2 절 롤 포밍 공정해석

1. 롤 포밍 공정의 해석 프로그램

롤 포밍 공정을 해석하기 위한 많은 방법들이 제시되어 왔지만 최근 가장 범용 적으로 사용하는 방법은 비선형 유한요소법(non-linear finite element method)이다. 비선형 유한요소법은 다른 방법에 비해 적용범위가 넓고, 비교적 정확한 해석을 할 수 있다는 특징 때문에 박판 성형공정 해석에 주로 이용되고 있다. 본 논문에서는 비선형 유한요소법 중에서 롤 포밍 공정 해석에 유용한 해석 방법인 강소성 유한요소법을 이용하여 슬라이드레일의 성형 공정을 시뮬레이션 하였다. 롤 포밍 공정의 해석에 사용된 프로그램은 SHAPE-RF이며, 이 프로그램은 강소성 유한요소법을 통해 형상의 예측 및 버클링 현상을 예측한다^[16]. 롤 포밍 공정의 유한요소법은 시간에 따른 재료의 거동을 묘사하는 방법에 의해 정적-내연적 시간 적분법(static-implicit time integration method)과 동적-외연적 시간 적분법(dynamic-explicit time integration method)으로 나눌 수 있다. 외연적 시간 적분법은 작은 시간 간격을 가지고 각 단계에서 동적 평형방정식을 만족하는 해를 구하며 축차(iteration)를 하지 않는다. 축차를 사용하지 않는 대신에 내력(internal force)과 외력(external force)사이의 불균형으로 인한 (n)번째 상태에서의 추진력에 의해 ($n+1$)번째 상태의 해를 구한다. 외연적 시간 적분법은 시간 증분이 안정한계 이하로 유지하면서 항상 해를 구할 수 있기 때문에 해의 수렴성이 문제가 되지 않아 복잡한 형상이나 대용량의 문제에도 적용하여 정량적인 해를 구할 수 있다. 또한 해를 구할 때 강성행렬을 필요로 하지 않기 때문에 해석 시간을 단축시킬 수 있고 컴퓨터의 메모리 관리가 효율적이다. 하지만 정확한 해석을 할 수 없고, 비드와 같은 복잡한 접촉현상을 포함하는 정적인 문제에 적용할 경우에는 해석결과에 심한 진동을 야기 할 수 있다. 반면에 정적-내연적 시간 적분법은 큰 시간간격을 가지며 각 단계마다 힘의 평형을 맞추어 ($n+1$)번째 해를 구할 때 여러 번 축차 하여 수렴해 나간다. 이 방법은 축차에 소요되는 계산시간이 길고, 강성행렬을 필요로 하기 때문에 컴퓨터의 메모리 용량이 커야한다. 또한 기하학적 형상이 매우 복잡하거나 대용량의 문제에서는 해의 수렴성이 문제가 되어 정량적인 해를 얻을 수 없다는 단점이 있지만 비교적 정확한 해석을 할 수 있다는 장점이 있다^{[17][18]}.

공정 해석 시에는 정적-내연적 시간 적분법에 의해 해를 구하며, 기존의 상용 해석 프로그램과는 달리 금속 띠판을 연속체로 가정하고 해석하기 때문에 롤의 회전효과 및 롤의 당김 효과를 모두 구현하여 보다 정확한 해석이 가능하다.

2. 해석조건 및 실행

롤 포밍 공정 해석에 사용된 입력 조건은 Table 4-2와 같다. 접촉손실상수 (self-contact penalty constant)는 공정 해석 시에 소재가 롤을 침투하는 현상을 보상하기 위해 설정한 상수이다. 공정 해석 시에 한 공정씩 해석하지 않고 소재가 하나의 패스를 통과할 때 다음 공정에서 임의로 소재를 잡아당겨 실제의 공정과 유사한 효과를 내고, 보다 정확한 해석을 할 수 있도록 멀티패스해석을 하였다. 해석을 위해 사용된 컴퓨터는 Intel Pentium(R) D 3.00 GHz이고, 램은 1.50 GB이다. 강소성 해석이 탄소성 해석에 비해 높은 컴퓨터 성능을 요구하지만 본 공정의 해석에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 공정해석에 사용된 메쉬는 3차원 8절점 육면체 메쉬(hexahedral mesh)를 설정하고, 또한 해석 시간의 단축을 위해 각 멤버의 대칭조건을 적용하여 형상의 절반만 해석하였다. 상위 롤과 하위 롤의 회전비율은 1 : 1로 설정하여 롤의 회전속도 차이로 인한 내부 응력의 증가를 줄이고자 하였다. 롤의 회전속도는 3개의 멤버 모두 1 rad/sec로 동일하게 설정했다. 롤의 표면 온도는 3개의 멤버 모두 300K로 설정하여 산업현장에서 사용하는 롤의 표면 온도와 유사하게 설정하였다. 또한 성형 롤을 강체로 설정하여 성형 공정 중에 롤의 마모가 없게 하였으며, 마찰계수 이외의 마찰인자를 배제하여 성형 공정 중에 마찰의 증가로 인해 소재의 중심부가 휘어지는 현상을 방지하였다. 해석에 사용된 솔버는 일반적으로 안정적이고 해석 시간이 빠른 스파스 매트릭스 솔버를 사용하였다. 공정의 해석은 섹션으로 해석하였다.

Table 4-2 Input conditions simulation

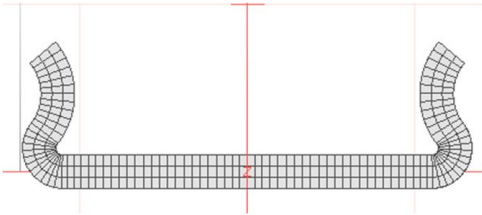
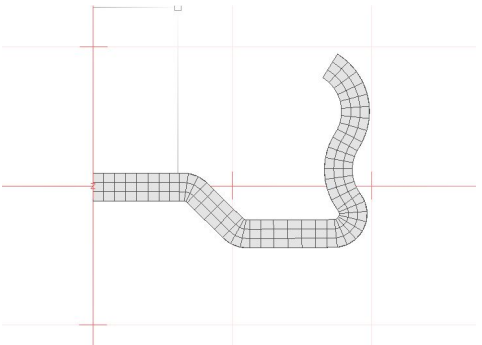
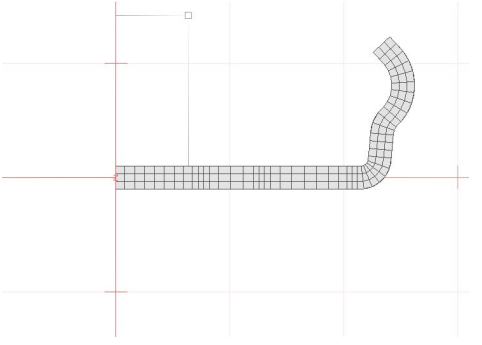
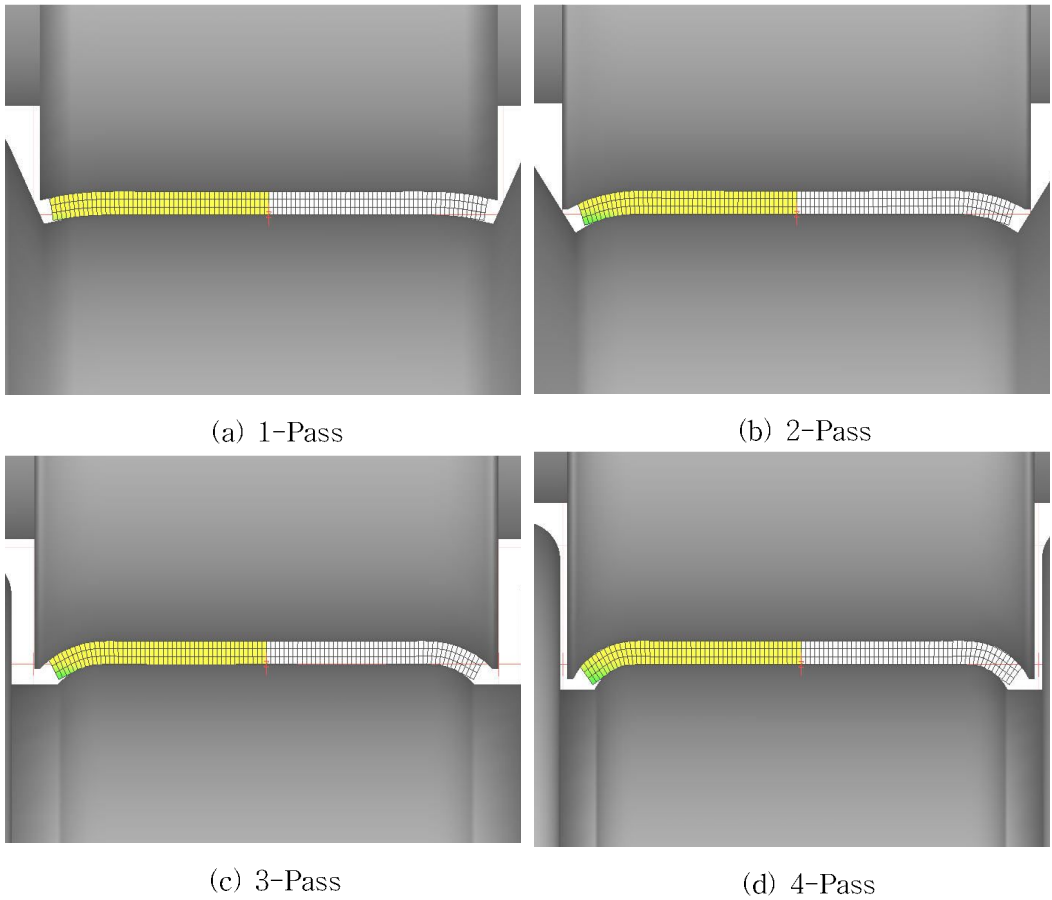
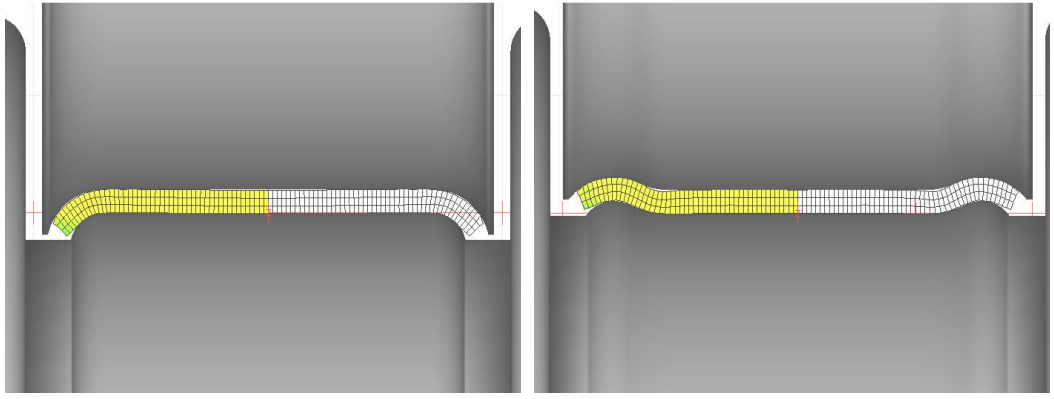
Inner Member	
	<ul style="list-style-type: none"> -Material : SCP-1 -Number of Elements in Width Direction : 40 -Number of Elements in Thickness Direction : 3 -Number of Elements in Rolling Direction : 20 -Friction condition : 0.1μ -Specify Self-Contact Penalty Constant : 10^6
Center Member	
	<ul style="list-style-type: none"> -Material : SCP-1 -Number of Elements in Width Direction : 48 -Number of Elements in Thickness Direction : 3 -Number of Elements in Rolling Direction : 20 -Friction condition : 0.1μ -Specify Self-Contact Penalty Constant : 10^6
Outer Member	
	<ul style="list-style-type: none"> -Material : SCP-1 -Number of Elements in Width Direction : 48 -Number of Elements in Thickness Direction : 3 -Number of Elements in Rolling Direction : 20 -Friction condition : 0.1μ -Specify Self-Contact Penalty Constant : 10^6

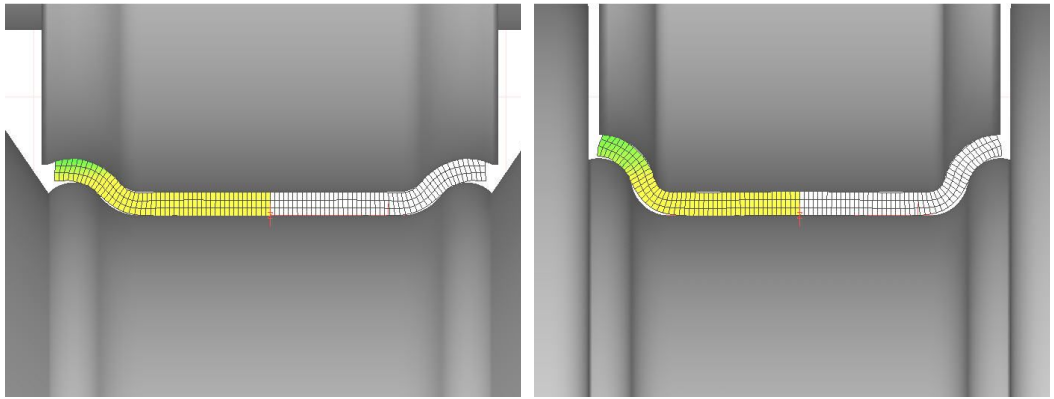
Fig. 4-12에는 인너 멤버의 패스별 형상을 나타내었고, Fig. 4-13에는 센터 멤버의 패스별 형상을 나타내고, Fig. 4-14에는 아웃터 멤버의 패스별 형상을 나타내었다. 언코일러에 소재가 감겨있어 발생하는 단면방향 휨(cross-bow)과 길이방향 휨(longitudinal bow) 현상을 보상하기 위하여 플레트너의 역할을 할 수 있도록 각 멤버의 롤을 설계할 때 첫 번째 패스를 평평하게 설계하였다. 시뮬레이션 과정에서는 소재가 이상적인 경우로 가정하기 때문에 각 멤버의 첫 번째 롤을 생략하였다.





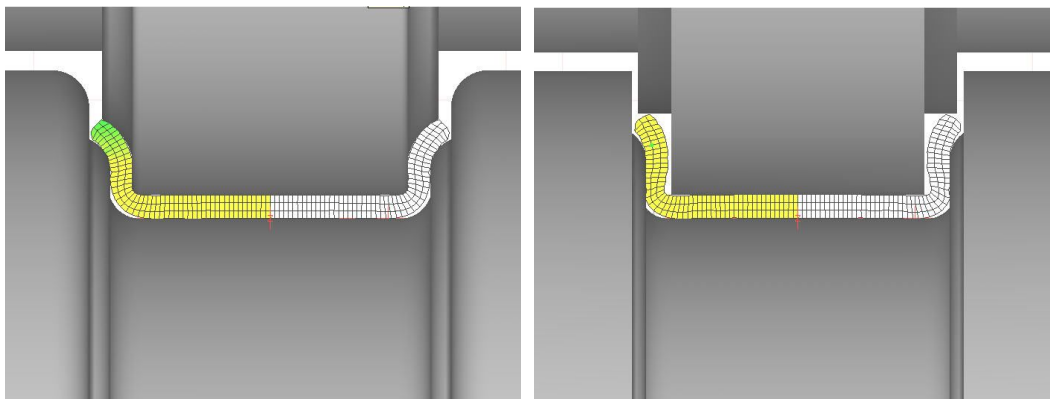
(e) 5-Pass

(f) 6-Pass



(g) 7-Pass

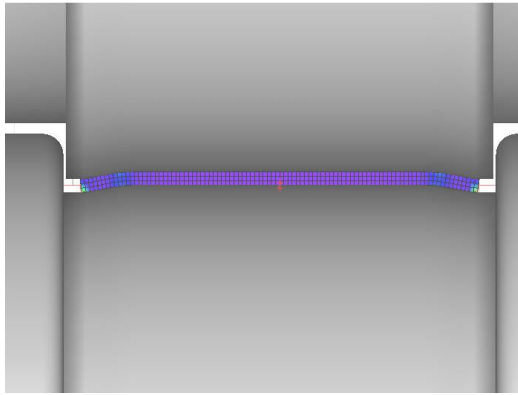
(h) 8-Pass



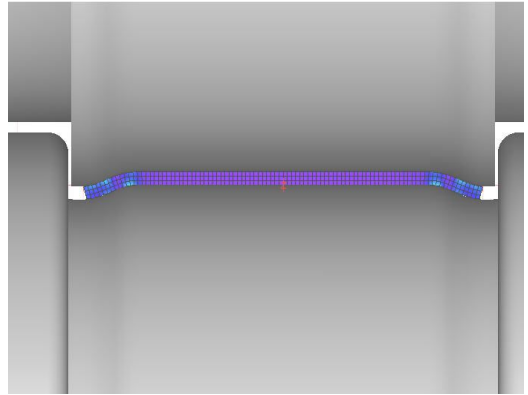
(i) 9-Pass

(j) 10-Pass

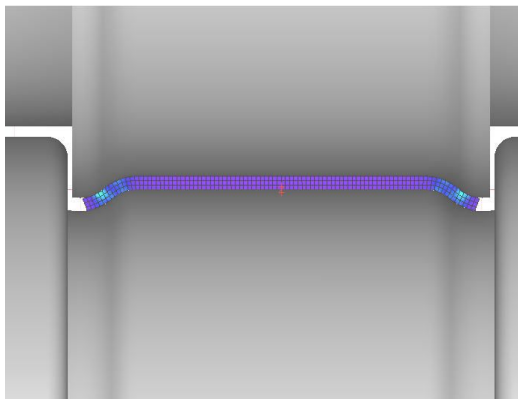
Fig. 4-12 Deformation processes of inner member



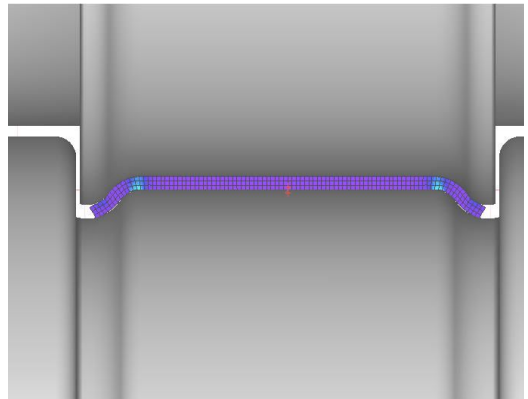
(a) 1-Pass



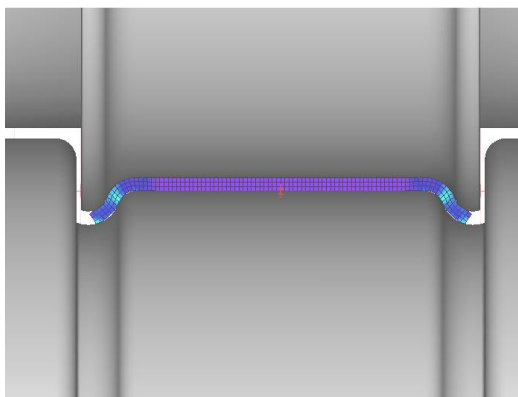
(b) 2-Pass



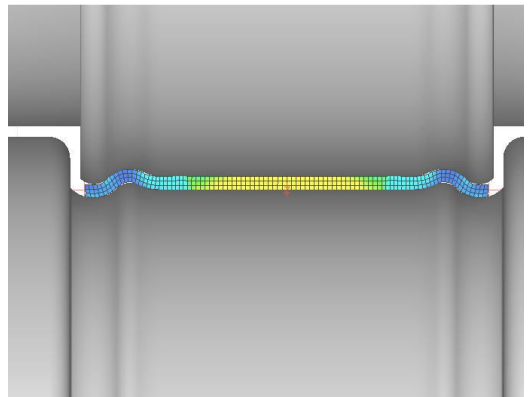
(c) 3-Pass



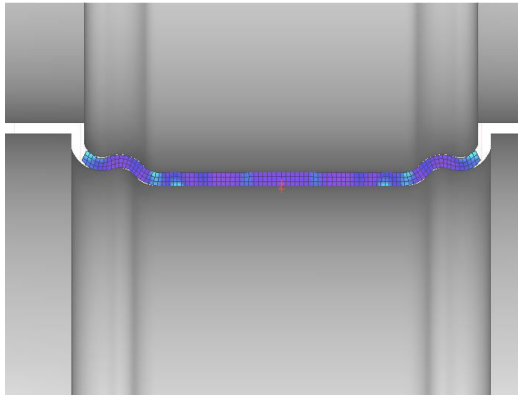
(d) 4-Pass



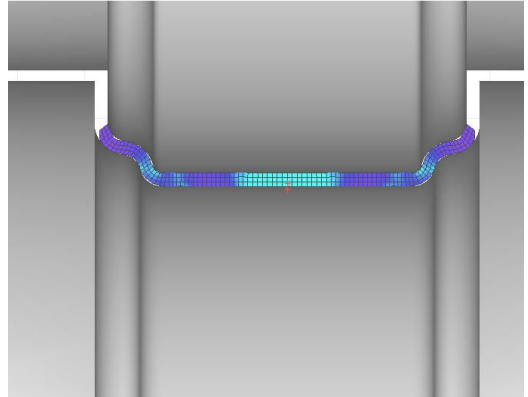
(e) 5-Pass



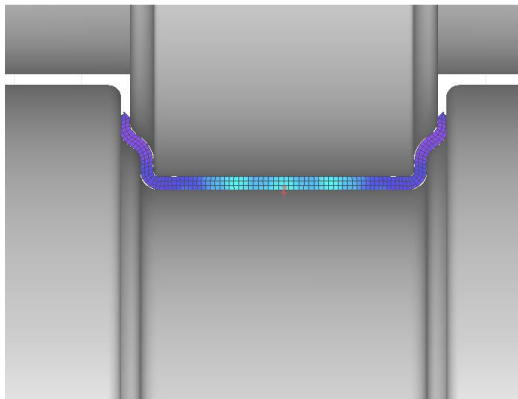
(f) 6-Pass



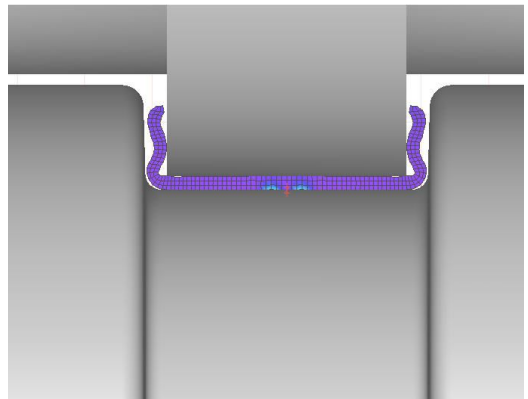
(g) 7-Pass



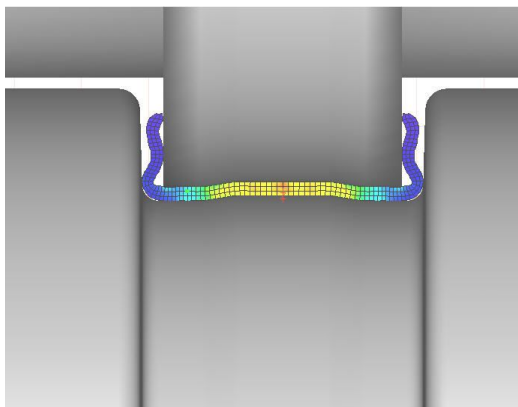
(h) 8-Pass



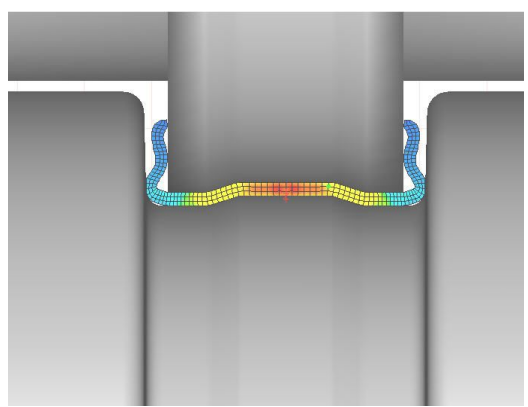
(i) 9-Pass



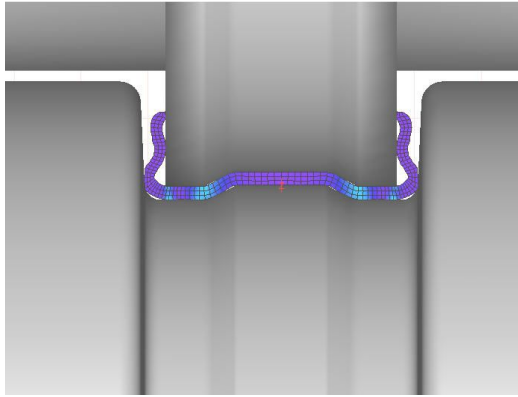
(j) 10-Pass



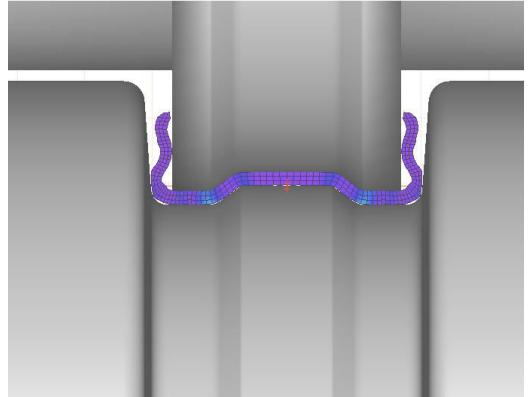
(k) 11-Pass



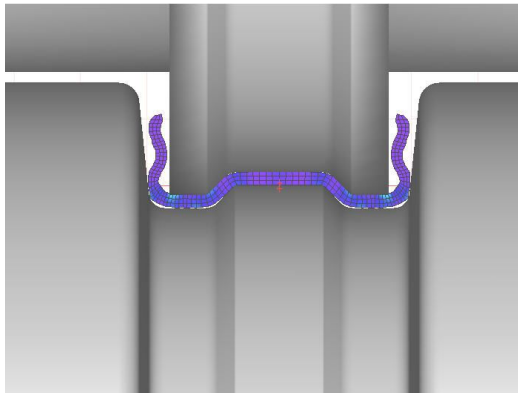
(l) 12-Pass



(m) 13-Pass

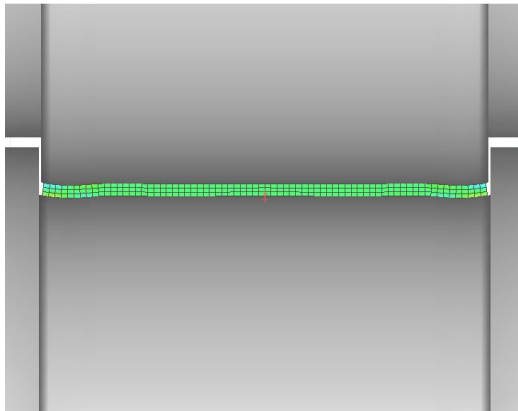


(n) 14-Pass

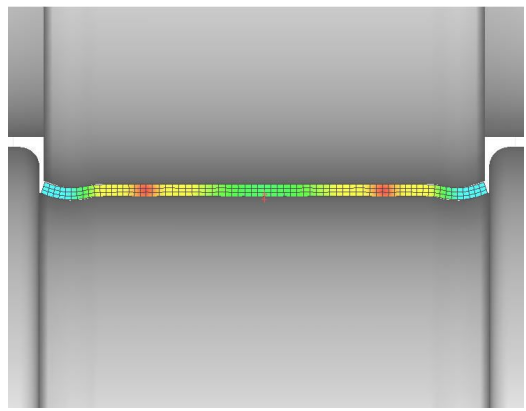


(o) 15-Pass

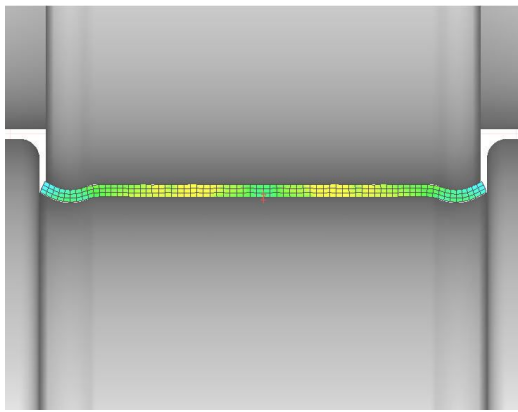
Fig. 4-13 Deformation processes of center member



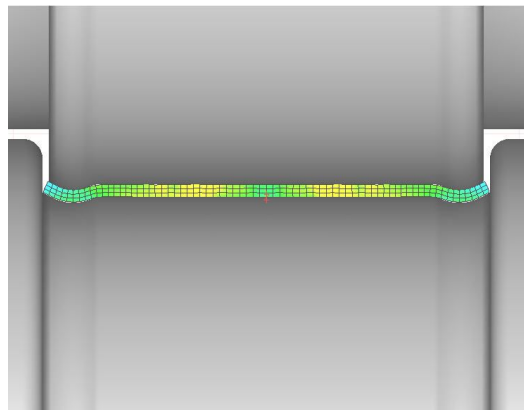
(a) 1-Pass



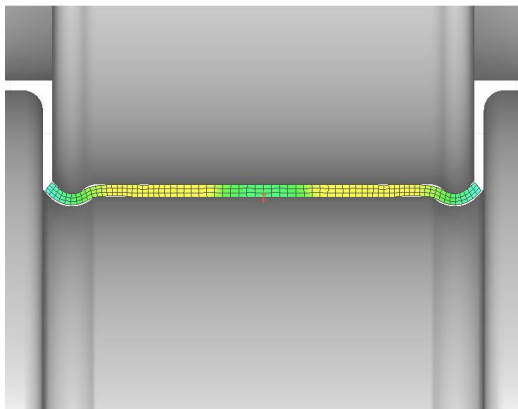
(b) 2-Pass



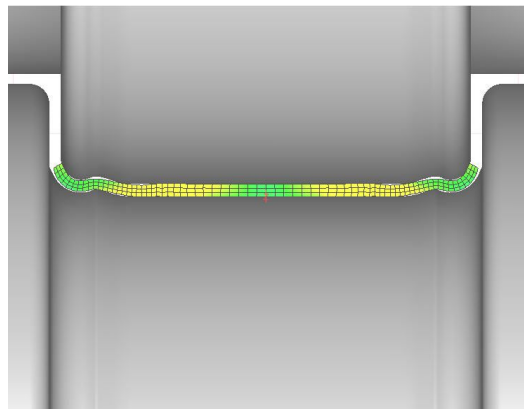
(c) 3-Pass



(d) 4-Pass



(e) 5-Pass



(f) 6-Pass

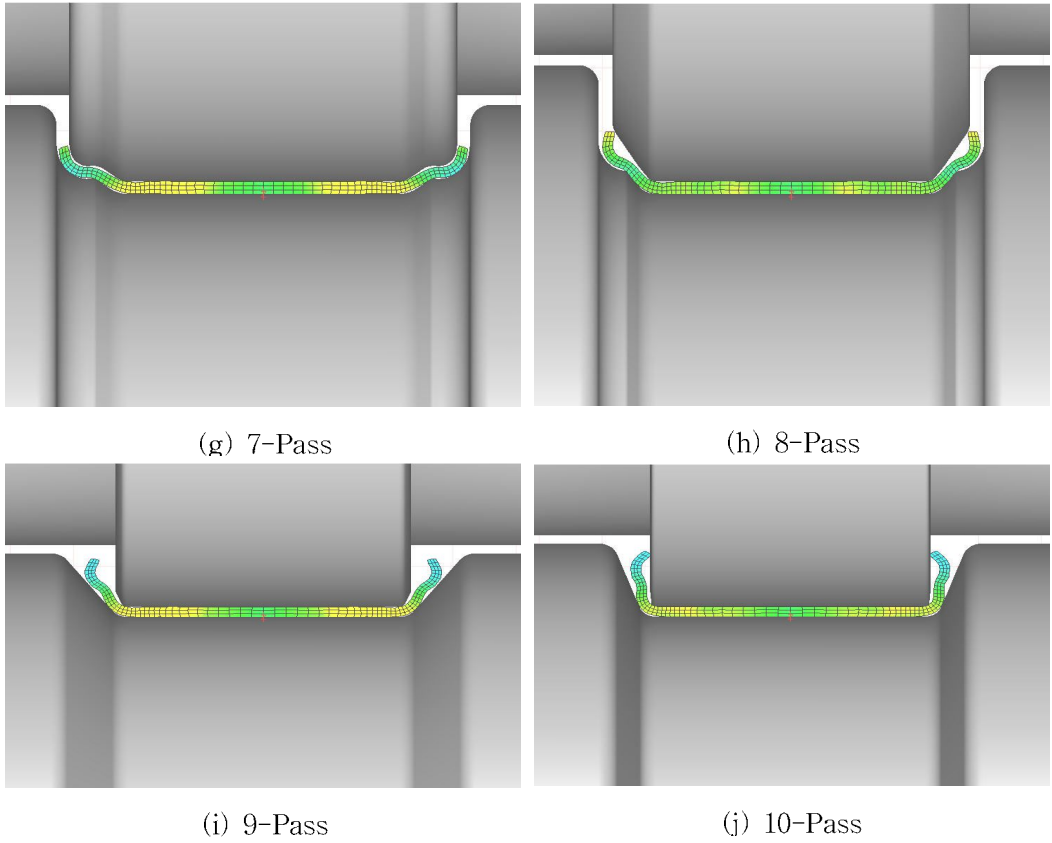


Fig. 4-14 Deformation processes of outer member

3. 롤 수정 후 재해석

시뮬레이션 수행 후 최종형상의 길이를 예측하기 위해 시뮬레이션에 의해 예측된 최종 제품의 평행부 길이와 형상을 비교 분석하였다.

가. 인너 멤버

Fig. 4-15과 같이 볼의 반지름을 제외한 평행부(L)의 길이는 27.1646mm로 예측되었다. 인너 멤버의 설계상 필요한 평행부 길이는 26.80mm이므로 평행부는 필요이상으로 성형되었다. 또한 굽힘 부(R_2)의 굽힘 각이 부족하게 성형되어 마지막패스에 사이드롤을 추가하여 설계하고, 굽힘 부(R_1)의 스프링백을 고려하여 2° 의 굽힘각을 더 주었다. Fig. 4-16에는 수정된 인너 멤버의 공정별 workpiece를 나타내었다.

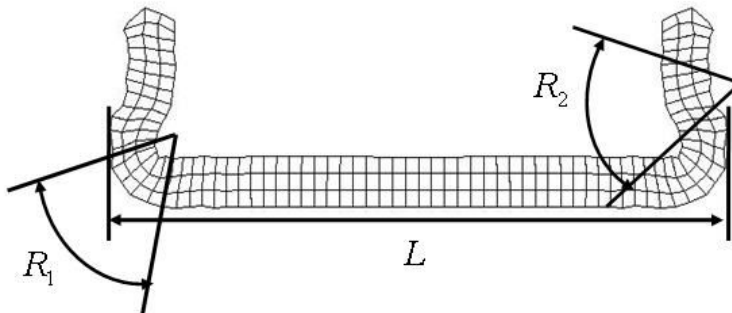
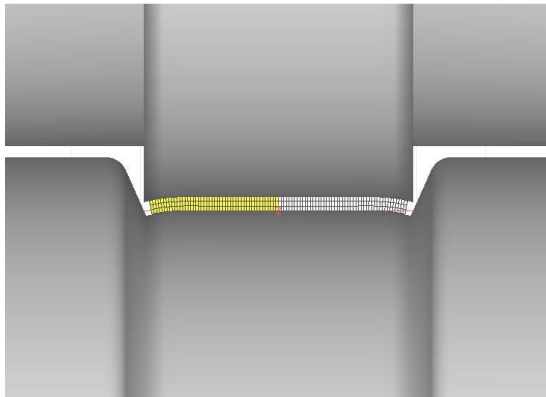
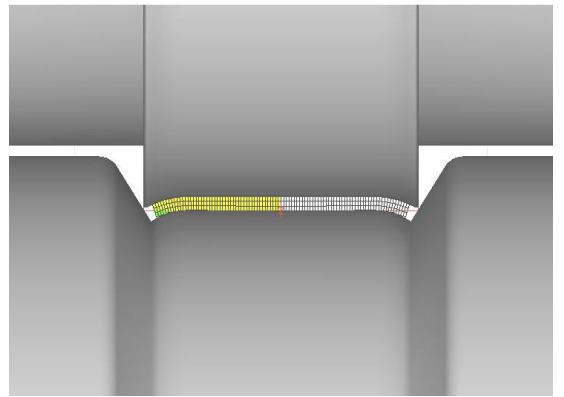


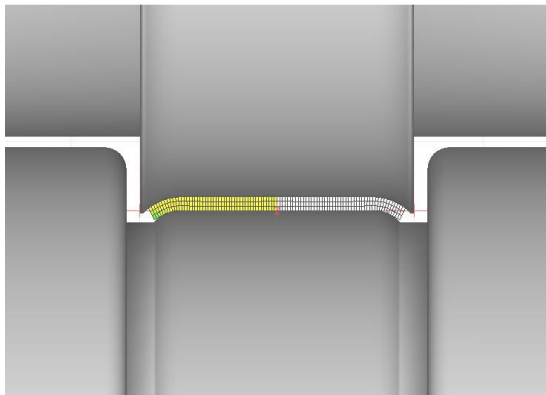
Fig. 4-15 Final cross-section of inner member predicted by 1st rigid-plastic FEA



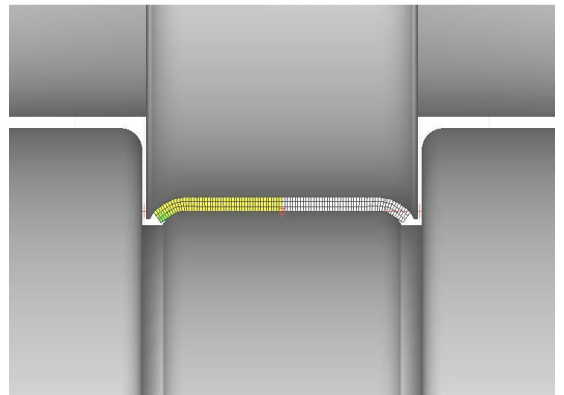
(a) 1-Pass



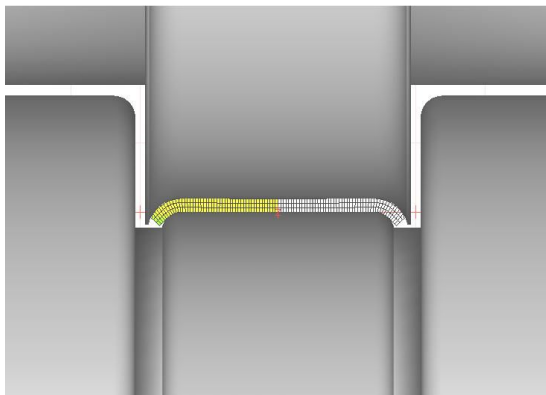
(b) 2-Pass



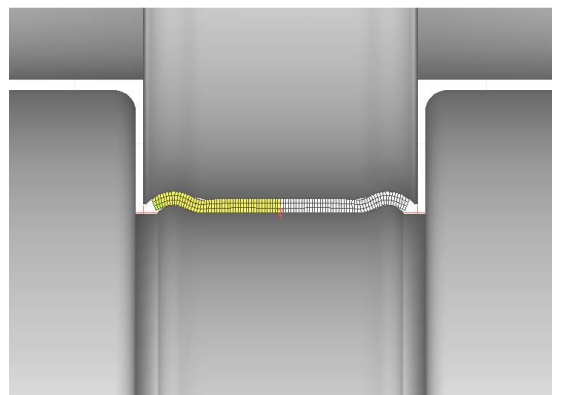
(c) 3-Pass



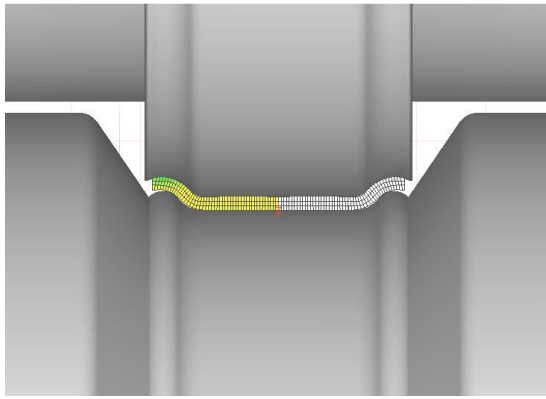
(d) 4-Pass



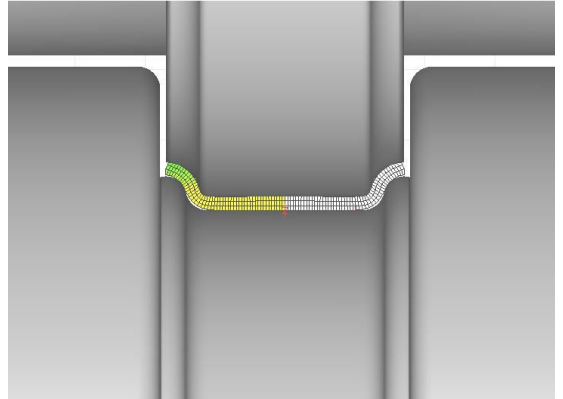
(e) 5-Pass



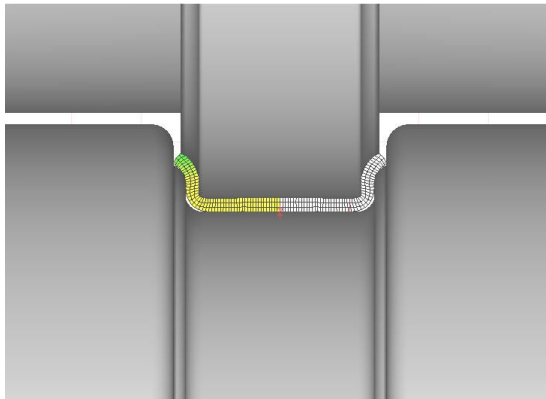
(f) 6-Pass



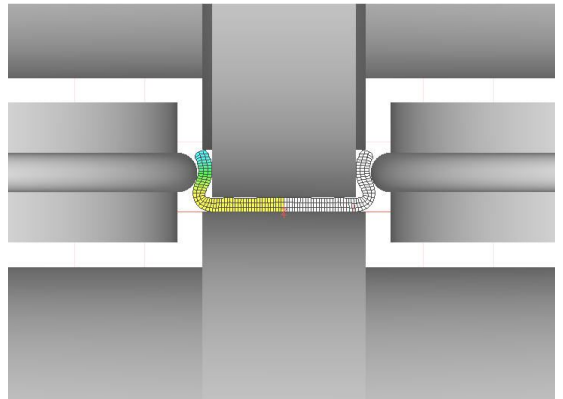
(g) 7-Pass



(h) 8-Pass



(i) 9-Pass



(j) 10-Pass

Fig. 4-16 Modified workpiece processes of inner member

나. 센터멤버

성형 중 굽힘 순서를 1패스부터 10패스까지 바깥쪽 굽힘 부를 먼저 성형하고 안쪽 굽힘 부를 11패스부터 15패스까지 굽히는 방식(TYPE-1)으로 설계하여 Fig. 4-17 같은 결과를 얻었다. 재료의 신장에 의해 굽힘 부(R_3)의 찌그러짐 현상을 볼 수 있었고, 굽힘 부(R_3, R_4, R_5)로 갈수록 두께 변화가 크게 생김을 예측할 수 있었다. 이를 보완하기 위해 안쪽 굽힘 부에서부터 바깥쪽 굽힘 부로 굽히는 방식(TYPE-1)으로 재설계하였다. Fig. 4-18에는 수정된 인너 멤버의 공정별 workpiece를 나타내었다.

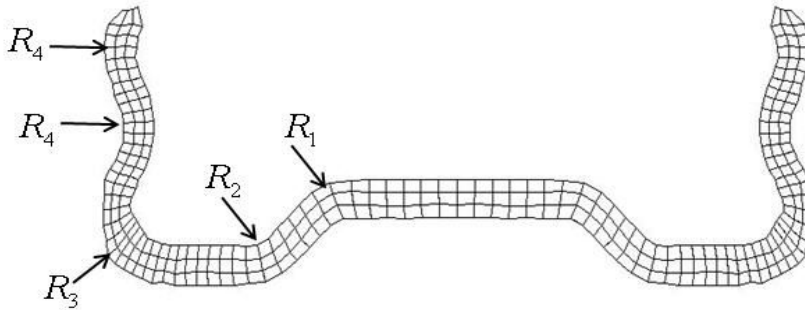
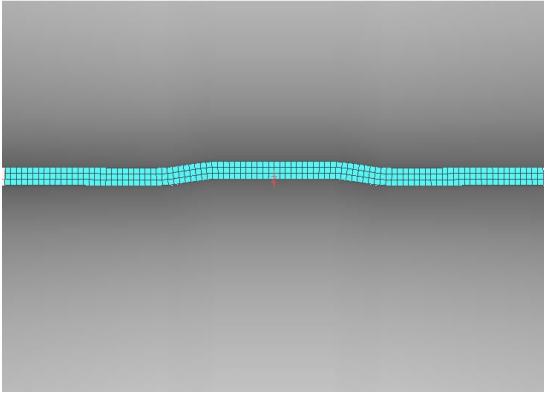
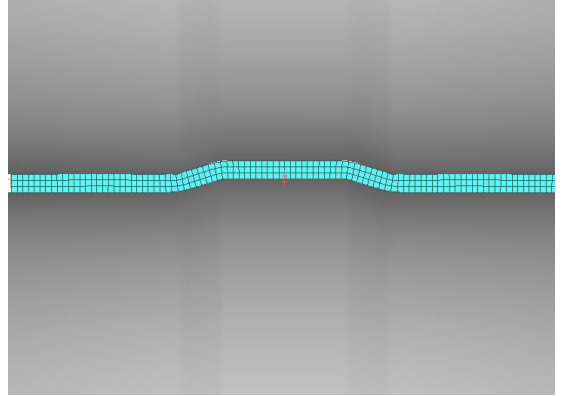


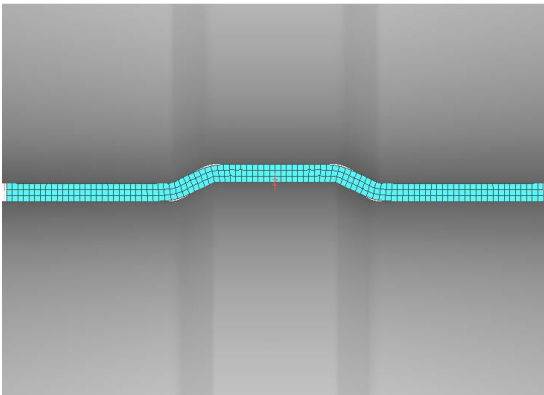
Fig. 4-17 Final cross-section of center member predicted by 1st rigid-plastic FEA



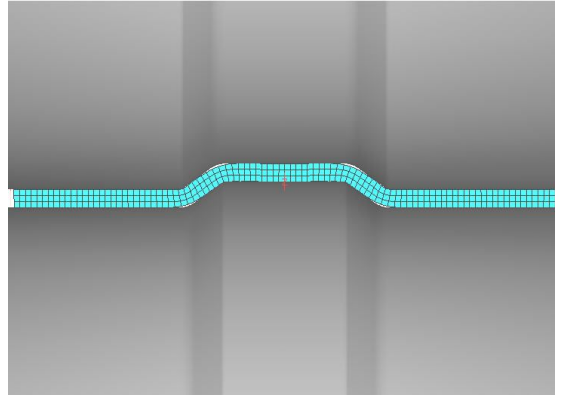
(a) 1-Pass



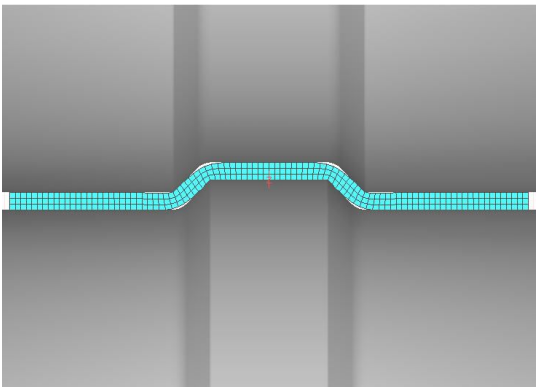
(b) 2-Pass



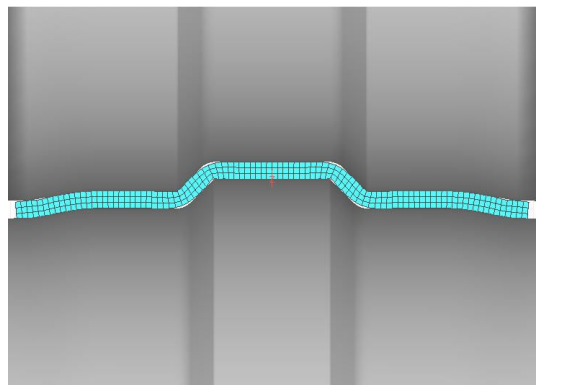
(c) 3-Pass



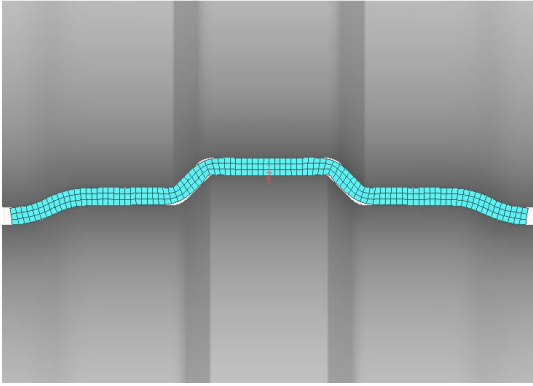
(d) 4-Pass



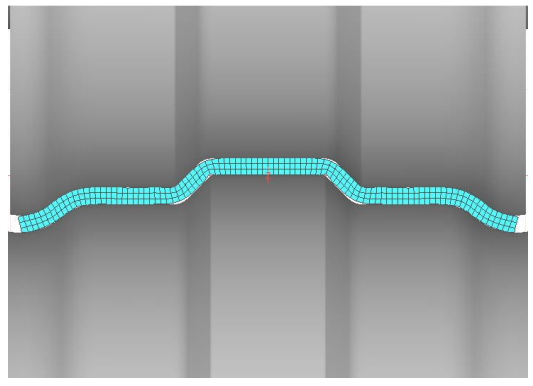
(e) 5-Pass



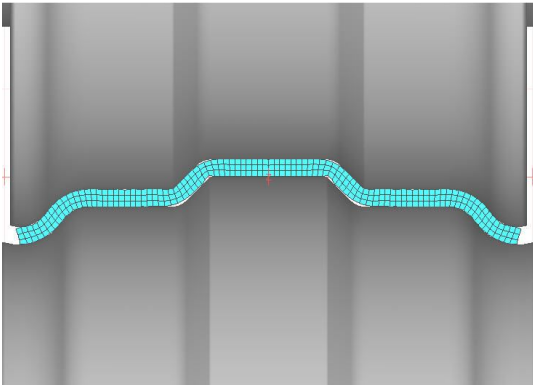
(f) 6-Pass



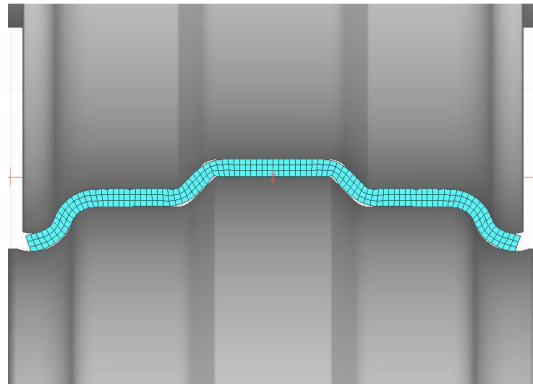
(g) 7-Pass



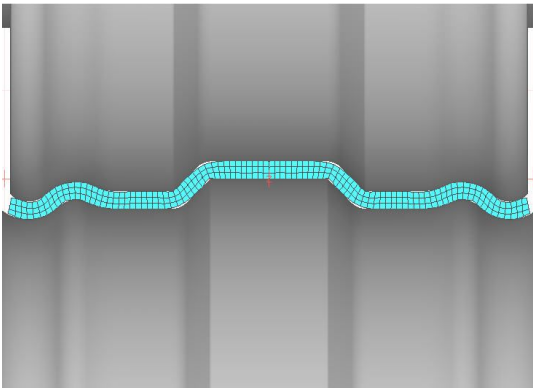
(h) 8-Pass



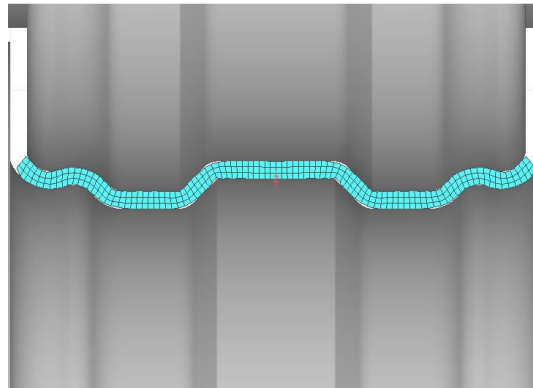
(i) 9-Pass



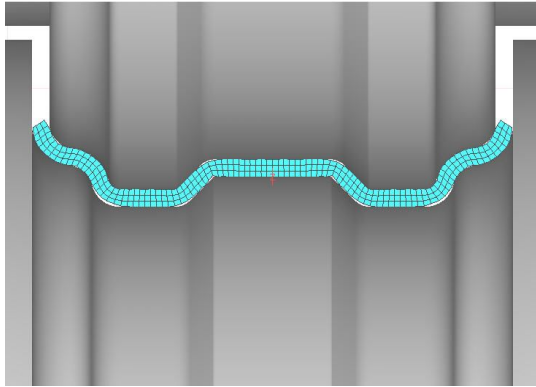
(j) 10-Pass



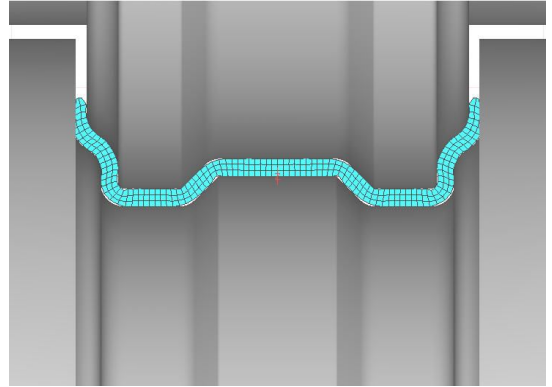
(k) 11-Pass



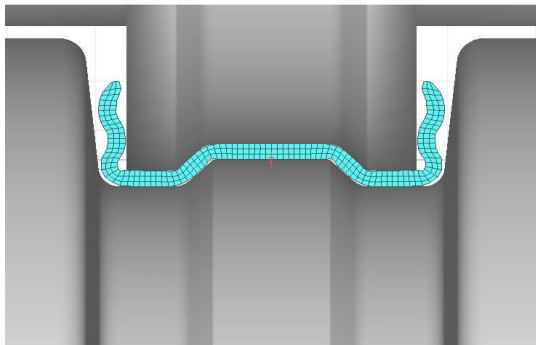
(l) 12-Pass



(m) 13-Pass



(n) 14-Pass



(o) 15-Pass

Fig. 4-18 Modified Workpiece processes of center member

4. 해석결과 및 고찰

롤 포밍 전용해석 프로그램인 SHAPE-RF를 이용하여 롤 포밍 공정을 시뮬레이션한 고, 가장 적절한 설계 방법을 선정하였다. 변형률 분포 및 형상을 상호 비교 검토하였고, Fig. 4-19는 인너 멤버의 최종형상을 나타내었다. Edge-1을 따라 각 노드에서의 총유효 변형률을 예측하여 Fig. 4-20에 나타내었다. 1차 설계를 TYPE A로 표기하였고, TYPE A의 해석을 통해 수정된 2차 설계를 TYPE B로 표기하였다. 두 TYPE 모두 굽힘부의 끝에서 가장 많이 변형되었는데, TYPE A에 비해 TYPE B가 변형률이 감소하였다. 길이 방향 변형률은 잔류 변형률을 예측할 수 있는 척도가 되는 변형률로서 길이방향 편차가 클수록 롤 포밍 공정중에 버클링 발생 가능성이 높아진다. Fig. 4-21에 최종형상의 단면에 대해 길이 방향 변형률 분포를 나타내었고, 여기서 알 수 있듯이 TYPE A가 TYPE B보다 길이방향 변형률 편차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 길이방향 변형률은 잔류 변형률을 예측할 수 있는 척도가 되는 변형률로서 길이방향 변형률의 편차가 클수록 롤 포밍 공정중에 버클링 발생 가능성이 높아지고 최종 제품의 품질에 좋지 않은 영향을 미친다. Fig. 4-22의 폭 방향 변형률은 각각의 굽힘부와 Edge-2부에서 가장 크게 나타났다. 두 타입 모두 굽힘부에서 변형률의 값이 (-)인 이유는 롤 포밍 공정을 통해 재료에 굽힘이 발생하면서 길이방향으로 신장되었고 상대적으로 폭 방향으로 압축되었음을 나타낸다. 굽힘부의 변형률 값이 TYPE A보다 TYPE B에서 크게 나타나는 데 그 이유로는 사이드롤을 사용하여 굽힘부의 성형각을 크게 하였기 때문이다. 또한 굽힘부가 TYPE B에 비해 TYPE A에서 변형률의 분포가 불균일할 것으로 예측되었고, 이는 TYPE A의 평행부가 굽힘력에 의해 발생한 모멘트로 인해 평행부가 휘어질 수 있다. 따라서 마지막 패스에 사이드 롤을 추가하여 평행부가 휘어지는 현상을 방지하고 수평방향 힘벡터가 굽힘력으로 작용할 수 있도록 하였다. Fig. 4-23은 두께방향 변형률을 나타낸 것이며, 두 TYPE 모두 굽힘부에서 다른 부분에 비해 큰 접촉압력이 발생하여 성형시 두께가 감소하는 것을 확인 하였다. 두께 방향 변형률은 크기보다는 일정한 값으로의 분포가 중요하고 이것은 제품의 내구성과 품질에 직접적인 영향을 미친다. 두께방향 변형률에서는 TYPE A보다 TYPE B에서 굽힘부의 변형률이 조금 크게 나타남을 알 수 있었다.

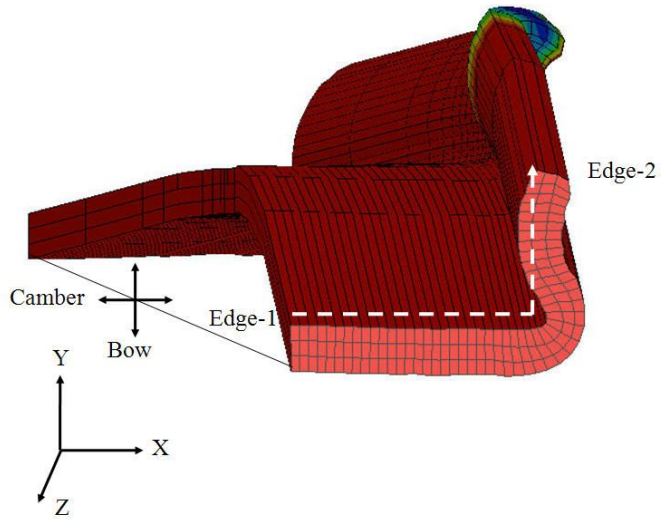


Fig. 4-19 Finished product of inner member predicted by 2nd rigid-plastic FEA

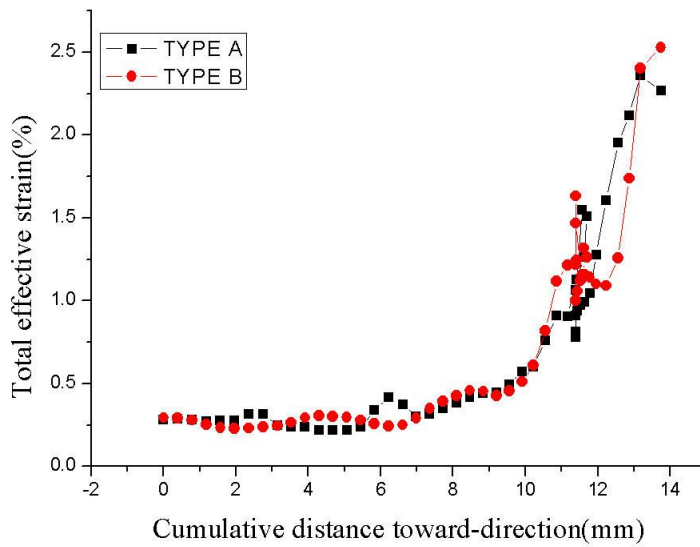


Fig. 4-20 Total effective strain in inner member

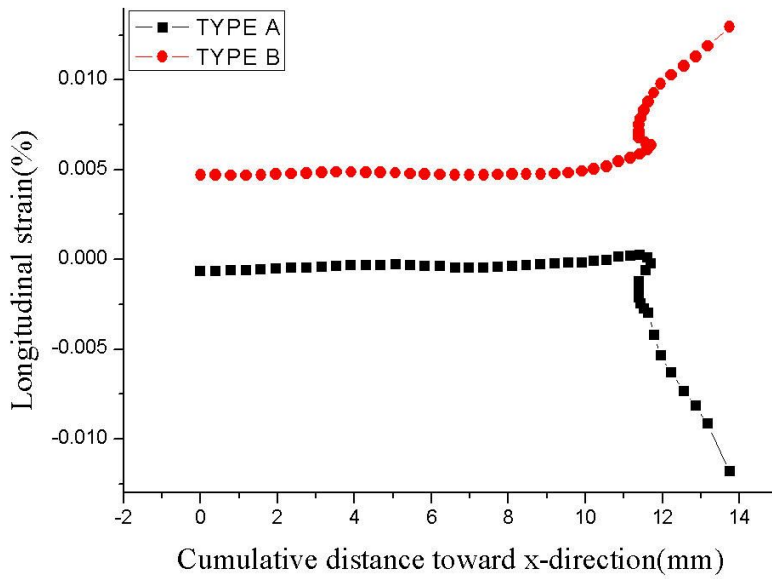


Fig. 4-21 Longitudinal strain in inner member

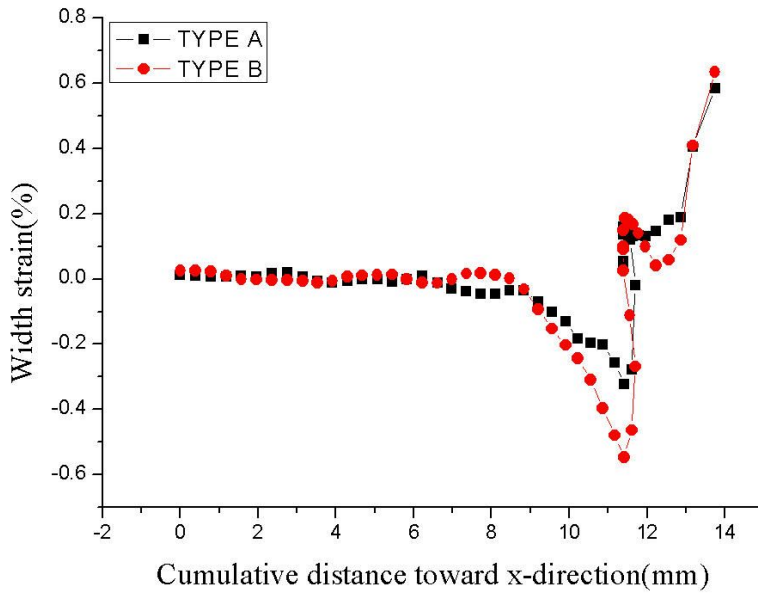


Fig. 4-22 Comparison of width strain in inner member

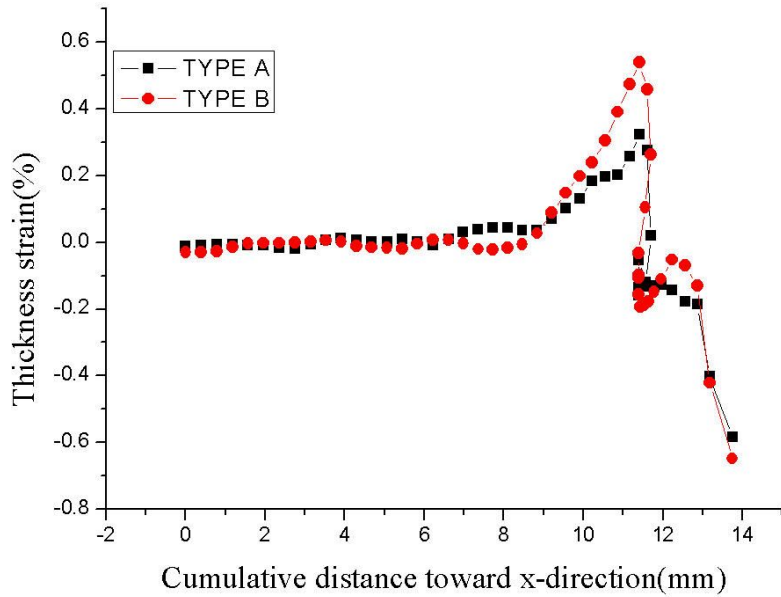
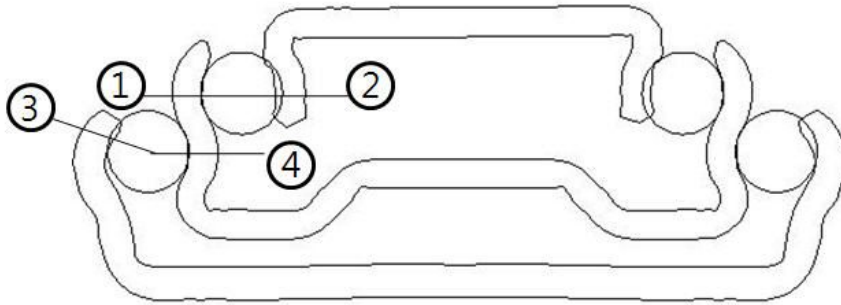
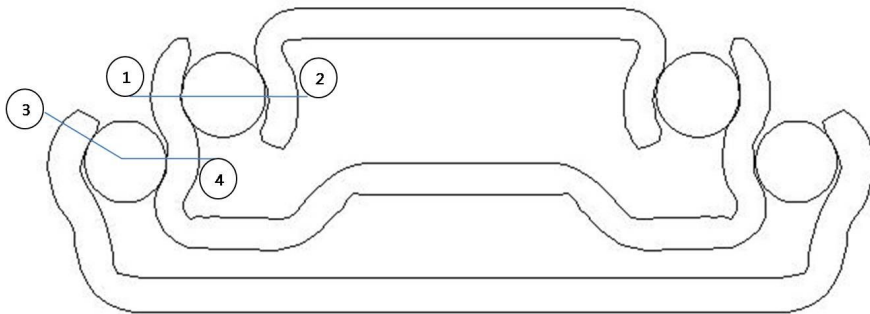


Fig. 4-23 Comparison of thickness strain in inner member

시뮬레이션한 후 결과를 CAD 프로그램을 이용하여 조립한 형상을 Fig. 4-24에 나타내었다. 조립된 형상으로부터 공차를 예측하여 Table 4-3에 나타내었다. 일반적인 제품의 공차가 $\pm 0.38 \sim \pm 1.52\text{mm}$ 임을 고려할 때 두 TYPE 모두 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 두 TYPE 중 변형률 분포 및 형상을 예측한 결과 사이드 롤을 추가한 TYPE B의 설계방법이 바람직하다고 예측할 수 있다.



(a)TYPE-A



(b) TYPE-B

Fig. 4-24 Assembled refrigerator's slide rail

Table 4-3 Estimation tolerance of slide rail (remain +, empty -)

		1	2	3	4
공차 (mm)	TYPE-A	+0.12	-0.46	-0.36	+0.06
	TYPE-B	+0.0018	-0.1101	+0.0157	-0.0543

제 3 절 냉장고용 고하중 슬라이드레일 금형제작 및 제품성형

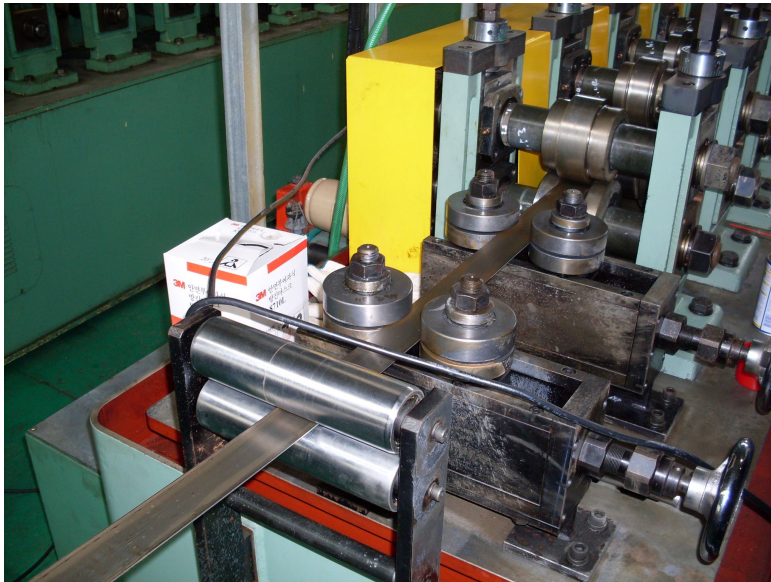
설계된 도면을 바탕으로 인너멤버는 총 10단, 센터멤버는 총 15단, 아웃터멤버는 총 10단으로 롤 포밍 밀을 제작하여 Fig. 4-25 (a)에 나타내었다. 가장 왼쪽의 밀부터 인너멤버, 센터멤버, 아웃터멤버를 성형하기 위한 밀이다. Fig. 4-25 (b)에 더블 언코일러의 모습을 나타내었다. 롤에 들어가는 소재의 위치를 바로 잡아 주기 위한 엔트리 가이드의 모습은 Fig. 4-25 (c)에 나타내었다. Fig. 4-25 (d)에는 설계를 바탕으로 제작한 롤의 형상중 인너멤버를 성형하기 위한 롤을 나타내었다. 성형하여 나온 제품을 일정한 길이로 절단하기 위한 프레스 다이의 모습을 Fig. 4-25 (e)에 나타내었다. 제작된 슬라이드레일을 냉장고용 슬라이드 틀에 부착하는 작업을 Fig. 4-25 (f)에 나타내었고, 슬라이드 틀에 슬라이드레일을 부착하여 완성된 제품의 사진을 Fig. 4-25 (g)에 나타내었다.



(a) Photograph of roll forming mill



(b) Photograph of double uncoiler



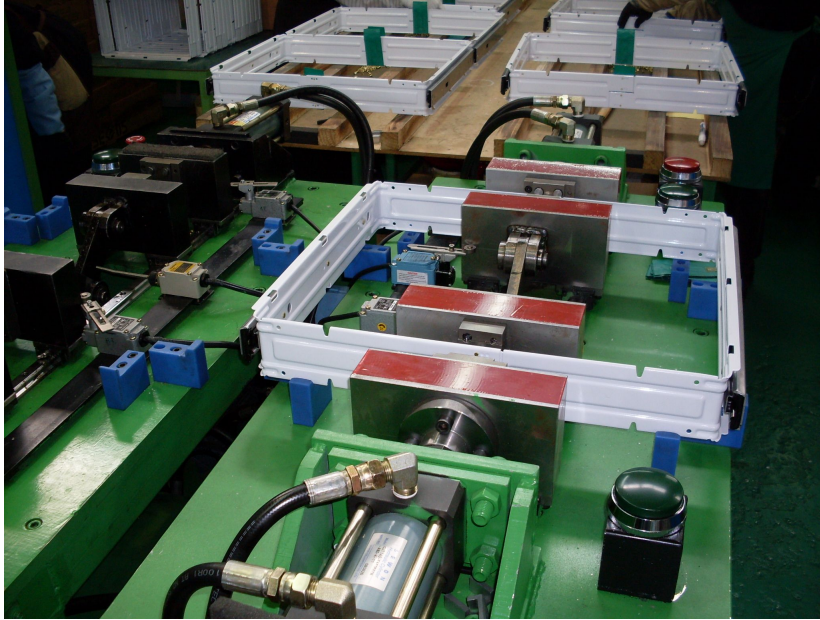
(c) Photograph of entry guide



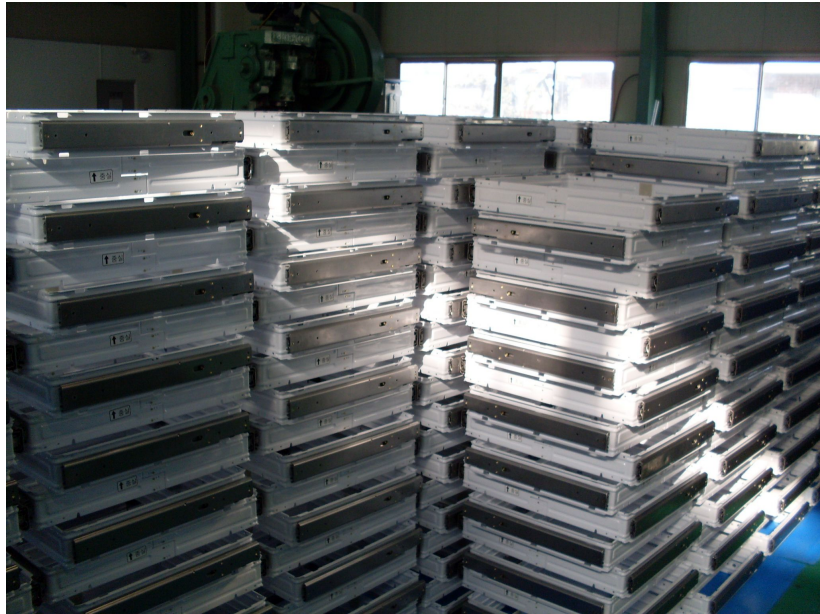
(d) Photograph of inner member



(e) Press die



(f) Process of slide frame assembling



(g) Slide frame assembly

Fig. 4-25 Prototype photograph

제 5 장 결 론

본 논문에서는 슬라이드 레일을 표면이 매끄럽고 굽힘이나 드로잉 가공에 가장 많이 이용되는 냉간압연강판(SCP-1)으로 사용하였다. 또한 SCP-1의 물성치를 측정하기 위해 인장시험을 하였고, 실험결과를 토대로 강소성 유한요소 해석에 필요한 유동응력 방정식을 구하였다. 유동응력 방정식은 가공경화 현상을 수치적으로 가장 잘 표현한 Swift식을 사용하였다. 냉간압연 강판이 슬라이드레일에 적합한 소재인가를 판단하기 위해 ANSYS 프로그램을 이용하여 응력분포 및 진동특성을 파악하였다.

슬라이드 레일은 일반적으로 100N 이하에서 사용되며, 해석결과 100N의 하중조건에서는 인너 멤버와 센터 멤버사이의 양 끝에 위치한 스틸 볼에 23.89MPa의 최대 등가 응력이 발생했다. 또한, 인너 멤버의 최대 등가 응력이 9.96MPa이 작용한다. SCP-1의 항복응력이 158MPa이므로, 100N의 외부하중이 작용할 때 슬라이드 레일은 안정하다. 냉장고용 고하중 슬라이드레일 개발을 위하여 이론식에 근거하여 인너멤버는 총 10단 센터멤버는 15단 아웃터 멤버는 10단의 성형단수를 설정하였고, 버클링이나 스프링백이 최소가 되도록 가장 적절한 형태의 플라워패턴을 설정하였다.

해석 과정은 롤 포밍 공정 전용 시뮬레이션 프로그램인 SHAPE-RF를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. SHAPE-RF 프로그램은 강소성 유한요소법을 이용하여 해석을 수행한다. 강소성 유한요소 해석은 시뮬레이션 후 최종 단면에 대한 총 유효변형률, 길이방향 변형률, 폭 방향 변형률, 두께방향 변형률 그리고 캠버와 보우의 수치적 크기에 대해 예측하여 각각의 TYPE을 비교하였다. 1차 롤 설계(TYPE A) 후 시뮬레이션 수행 결과를 분석하여 롤 수정 후 2차 롤 설계(TYPE B)하여 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 수행 후 예측된 최종형상을 CAD프로그램을 이용하여 어셈블리하고 공차를 측정된 결과 수정후 TYPE A의 경우 인너멤버와 센터멤버의 공차가 0.1101mm가 나왔는데 일반적으로 소재의 두께가 0.68mm이상일 경우 허용공차가 $\pm 0.38 \sim \pm 1.52$ mm임을 감안한다면 이 정도의 공차는 충분하다고 할 수 있고 인너 멤버의 마지막 패스에서 사이드 롤을 첨부하여 롤 설계를 했을 경우 버클링 현상이 적고, 좋은 형상의 제품을 성형할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Halmos, G. T., "Roll Forming Handbook", CRC Taylor & Francis, New York, chapter 5, 2005
2. Kiuchi, M., "Analysis Study on Cold Roll Forming Process", Report of the Inst. of Ind Sci., Vol. 23, pp. 1-23, 1973
3. 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
4. Kiuchi, M., "Recent Development of Roll-Forming in Japan", Int. J. Mach. Tools. Manufact., Vol. 29, No. 1, pp. 63-77, 1989
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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
9. Bhattacharyya, D. and Panton, S. M., "Research and Computer-Aided Design in Cold Roll Forming", Academic Publishers-Pergamon, Vol. 2, pp. 464-470, 1989
10. 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
11. 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
12. Rhodes, J., "A Semi-analytical Approach to Buckling Analysis for Composite Structures",

Composite Structures, Vol. 35, pp. 93-99, 1996

13. 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
14. Wick. C., Benedict. J. T. and Veilleux. R. F., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook", 4th ed., Society of Manufacturing Engineers, Michigan, Vol. 2, Chapter 8, 1984.
15. 전기찬, "박판금속의 성형", 반도출판사, 1993.
16. Hong, S. M., Kim, D. S., Yun, H. J. and Kim, N. S., "Development of Roll Forming Simulation Program", Society of CAD/CAM Engineers, pp. 647-652, 2000
17. Jeong, D. W. and Yang, K. B., "A Study the Criterion for Membrane/Shell Mixed Element and Application to the Rigid-Plastic/Elastic-Plastic Finite Element Analysis", The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 13, No. 2, pp.1~10, 1999
18. Ahn, D. G., Jung, D. W., Yang, D. Y. and Jung, W. J., "Rigid-Plastic Explicit Finite Element Formulation for Two-Dimensional Analysis of Sheet Metal Forming Processes", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 88~99, 1996

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20087076	과 정	(석사) 박사
성 명	한글: 김 재 상 한문 : 金 在 相 영문 : Kim Jae Sang				
주 소	광주광역시 북구 문흥동 문흥지구 우미2차 101동 407호				
연락처	E-MAIL : jsang2533@nate.com				
논문제목	한글 : 냉장고용 고하중 슬라이드 레일의 롤포밍 공정 해석 영어 : Analysis of Roll Forming Process on Heavy Load Slide Rail for Refrigerator				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2010년 2월

저작자: 김 재 상 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하