

스테인리스 슬라이드 레일의 정밀 롤 포밍을 위한 유한요소해석

Finite Element Analysis for Precision Roll Forming Process of Stainless Slide Rail

이택성^{1,✉}, 김건완²
Taek Sung Lee^{1,✉} and Gun Wan Kim²

¹ 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

² 한국산업기술대학교 기계설계공학과 대학원 (Graduate School, Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

✉ Corresponding author: lts724@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0423

Manuscript received: 2009.1.23 / Revised: 2009.3.26 / Accepted: 2009.4.24

The roll forming process is commonly used for the conventional 'Fe' metal products such as a furniture drawer guide or an up-down slide guide. Recently its applications are variously expanded to the sanitary facilities or electronic devices. It is essentially required the cleanness for the high technology application and any corrosion or rust are not allowed. Therefore, in those applications the stainless steel materials are strongly demanded as the substitution of 'Fe' steel. However the mechanical properties of stainless steel are not suitable for forming process compared with those of 'Fe' steel. Up to now, the conventional F.E.M.(Finite Element Method) has been used to analyze and design the roll forming process. The purpose of this research is to obtain the proper production process and the shape of rolls to manufacture the high precision slide rails made of stainless steel material. The commercial program, SHARPE-RF, is used to analyze the entire roll forming process. The results show that the rolling process and the roll design by F.E.M. are useful from the good agreement between the shapes of products estimated by F.E.M. and those of the actual products.

Key Words: Precision Roll Forming (정밀 롤 포밍), Roll Design (롤 설계), Spring Back (스프링 백), FEM (유한요소법), Stainless Steel (스테인리스 강)

1. 서론

롤 포밍(roll forming) 공정은 Fig. 1 과 같이 연속적으로 설치된 여러 쌍의 성형 롤 사이로 금속 띠판(strip)을 순차적으로 통과시키면서 점진적 굽힘(incremental bending) 가공을 가하여 평판으로부터 원하는 단면형상을 얻는 소성가공법이다. 정밀도가 높은 냉간 압연 띠판(cold rolled strip) 등을 소재로 사용하여 냉간 성형을 하므로 열간 압연(hot rolling)이나 열간 압출(hot extrusion) 등에 의한 방법보다 치수 정밀도가 높은 단면 형상을 가진 제품을 얻을 수 있으며 표면상태도 더 우수하다. 소

량생산의 경우에는 프레스 가공 등이 더 경제적이지만 대량 생산의 경우에는 많은 롤을 사용하여 각 성형 롤에서 소재의 변형량 및 성형 하중을 비교적 낮게 분산시켜 소재의 성형성이나 표면 상태를 좋게 하고 롤 구동에 필요한 동력을 낮출 수 있다.¹

롤 포밍 공정으로 생산된 슬라이드 레일(slide rail)은 일반 가구 등의 서랍 또는 상하 조정시 가이드의 역할을 하는 이송부품 중의 하나로써 생활속에서 많이 접하게 되는 제품이다. 최근에는 사용범위가 넓어져 냉장고, 오븐, 김치냉장고, 주방용품 등 다양한 생활 가전제품과 자동화기기 등에

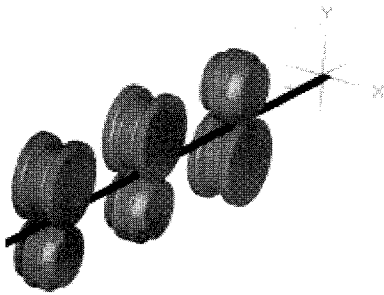


Fig. 1 Roll forming process

도 적용되게 되었다.

그런데 국내제품의 정밀도가 떨어져 부드러운 구동이 지속적으로 일어나지 못하는 등의 문제가 발생하고 있으며, 특히 김치냉장고에 사용되는 제품의 경우 김치의 발효와 함께 배출되는 초산이 김치냉장고 내부에 장착되어 있는 슬라이드 레일을 급속히 부식시키는 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 Fe 판재를 이용한 레일이 아니라 녹이 슬지 않는 스테인리스 슬라이드 레일의 적용이 요구되고 있다.

그러나 스테인리스 판재의 경우, Fe 판재와 비교하여 소재의 가공특성이 나쁘고, 스프링 백 (spring back) 현상이 심하여 원하는 치수정도를 얻기가 어렵고, 판의 표면에 균열이 보다 쉽게 발생하는 특성이 있다.

냉간 롤 포밍은 1930 년대 말 AISI(American Iron & Steel Institute) 지원하에 코넬 대학의 Gerge Winter 교수에 의해 롤 포밍 공정에 의한 구조물 용소재의 생산에 관한 연구가 시작된 이래 1946 년에 최초로 체계적인 연구결과가 발표되었다. 이 공정은 이론적인 접근보다는 기술·기능인의 경험에 의하여 발전되어 왔으며 근래에는 FEA(Finite Element Analysis)를 이용한 시뮬레이션 기법을 롤 설계 공정 설계에 적용하고 있다.

Senanayake² 는 냉간 롤 포밍에서 금속소재가 변형하는 것에 대해서 유한요소법과 실험적인 기법을 적용하여 해석하였다. 1980 년 중반에 금속 성형에 3 차원 강소성 유한요소법을 적용한 사례가 많이 수행되었으며 Park, Shiau 그리고 Huisman 등에 의해 발표되었다.^{3,6}

이 연구들은 비정상상태의 3 차원 유한요소해석이 갖는 과도한 계산시간으로 인하여 실용적인 측면에서 문제가 있었다. 3 차원 압연해석의 경우

김낙수 등⁷ 은 검사체적내의 동적 정상상태를 가정하여 해석시간을 단축하였다.

본 연구에서는 실제 제품으로 사용될 재료의 소성변형 거동을 파악하기 위한 재료실험을 수행하였고 롤포밍 전용 유한요소해석 프로그램인 SHAPE-RF⁸ 를 사용하여 롤 포밍 공정을 해석함으로써 롤 포밍 공정의 설계시 제작 이전에 미리 결함을 발견하고 설계를 수정하여, 물적·시간적 낭비를 줄일 수 있는 롤포밍 공정의 설계 방법을 제시하고자 하였다.

2. 유한요소해석

생산하고자 하는 슬라이드 레일은 Fig. 2 와 같으며 inner rail 과 outer rail 로 구성된다. 본 연구에서는 inner rail 의 롤 포밍공정을 대상으로 하였다.

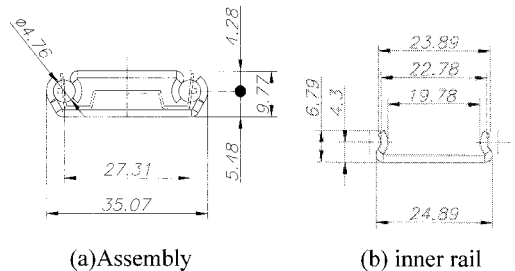


Fig. 2 Product shapes

2.1 재료 물성실험

슬라이드 레일의 재질은 스테인리스 강판 STS304 이며, 유한요소해석에 사용할 물성치를 얻기 위한 인장시험편은 KS B 0801 금속인장 시험편 5 호(두께=1.5mm, 폭=30mm, 표점거리=50mm) 규격으로 제작하였다.

탄성계수를 얻기 위하여 extensometer 을 부착하여 시험하였으며 시험 결과를 Table 1, Fig. 3 에서 보인다.

Table 1 Results of tensile experiment

Specimen No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)
1	666	175,117	56
2	666	144,206	58
3	647	158,867	57
Ave.	657	159,662	57

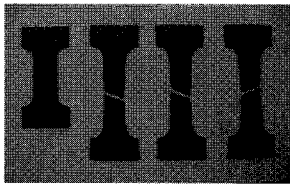


Fig. 3 Fractured specimens

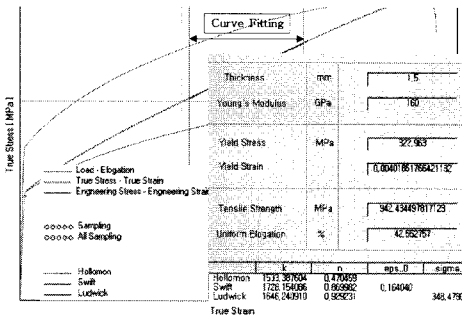


Fig. 4 Curve fitting

강소성 해석을 위한 유동응력(flow stress)과 변형율(true strain) 관계식은 실험 데이터를 Fig. 4 와 같이 curve fitting 하여 식(1)과 같이 얻는다.

$$\bar{\sigma} = 1728(0.16 + \bar{\epsilon})^{0.87} \quad (1)$$

2.2 유한요소모델

국내에서 개발된 롤 포밍 전용 유한요소해석 프로그램인 SHAPE-RF 에서는 유한요소모델을 생성하기 위해서 Fig. 5 와 같이 초기 소재의 형상을 입력하여 초기 단면과 최종 단면 형상을 입력한다. 최종 단면 형상을 입력하면 Fig. 6 과 같이 굽힘이 많이 발생하는 부분에서 요소의 크기가 작게 분할 된다.

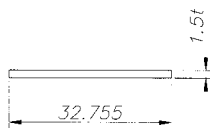


Fig. 5 Raw material

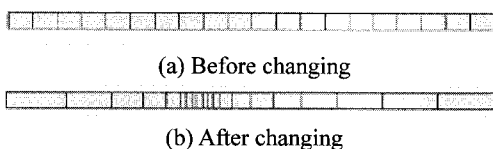


Fig. 6 Comparison of the element configuration

롤 포밍 공정에서 성형단계는 13 패스(pass)로 구성하였고 각 패스별로 설계된 롤 형상을 입력한다. 롤은 강체(rigid body)이고 마찰계수와 각속도를 정의할 수 있다. Fig. 7 과 같이 하부 롤이 구동 롤이며 상부 롤은 마찰에 의해서 회전한다.



Fig. 7 Classification of rolls

요소는 1 차형상함수를 갖는 육면체요소를 사용하였으며 요소생성은 Table 2 와 같이 하였다. 소재와 롤이 접촉되는 부위를 세밀하게 나눌 수 있는 자동요소생성(auto mesh generation)기능을 사용하였고, 또한 롤을 지나간 소재 부분에 요소를 만들기 위해 연장요소(extended element)를 설정하고, 공정 해석시 한 공정씩 해석하지 않고 소재가 하나의 패스를 통과할 때 다음 공정에서 임의로 소재를 잡아당겨 실제의 공정과 유사한 효과를 내고, 해석의 정밀도를 높이기 위해 멀티패스해석(multi pass analysis)기능을 설정하였다.

멀티패스의 기본 개념은 앞 뒤로의 해석을 함께 고려하는 것으로, Fig. 8 은 왼쪽으로 소재가 진행되는데, 오른쪽 구간이 실제 해석 패스가 되고 왼쪽 구간은 새로운 요소수를 설정하여 실제 해석 패스와 함께 해석된다.9

Table 2 Mesh generation

Parts	No. of elements
Thickness	3
Section	40
Length	45
Extended part	7
Multi pass part	25

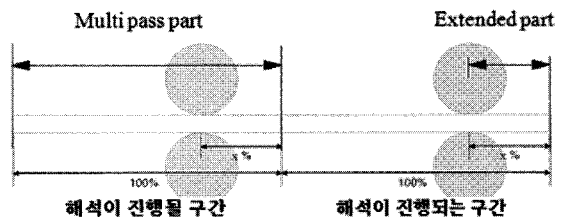


Fig. 8 Parts for element generation

2.3 공정 조건

롤 포밍 수행 중의 공정조건은 Table 3 과 같고, 성형 롤의 배열은 Table 4 와 같이 하였다. 이중 패스 8 의 롤은 아이들 롤(idle roll)로 하였다.

Table 3 Process conditions

Items	Details
Flow stress (MPa)	$\bar{\sigma} = 1728(0.16 + \bar{\epsilon})^{-0.87}$
Initial thickness (mm)	1.5
Strip width (mm)	32.755
Friction coefficient	0.1 (coulomb friction)
No. of roll stands	13
Angular Velocity (rad/sec)	1

Table 4 Arrangement of rolls

No. of stands	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Distance (mm)	303	303	303	303	303	303	151.5	151.5	303	303	303	303	303

2.4 해석 결과

1 차 시뮬레이션 결과 각 패스별로 소재의 성형된 형상을 얻었으며 Fig. 9 는 각 패스에서 생성된 소재의 flower pattern 이다. 최종 패스 13 에서 성형된 소재의 형상과 롤의 배치는 Fig. 10 에서 보인다.



Fig. 9 Flower patterns



Fig. 10 Final configuration of material and rolls

2.4.1 롤이 받는 힘

재료를 성형할 때에 롤이 받는 힘 등의 정보를 얻기 위해 각 패스별로 롤의 번호를 Fig. 11 과 같이 부여하였고, 롤에 작용하는 힘들을 Fig. 12 와 같이 구분하였다. 유한요소해석에 의하여 얻은 각 롤에 작용하는 힘은 Fig. 13 과 같다.

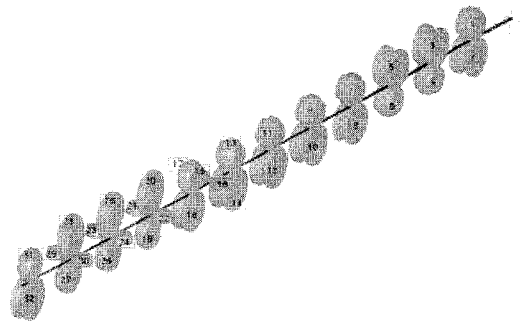


Fig. 11 Number for forming rolls

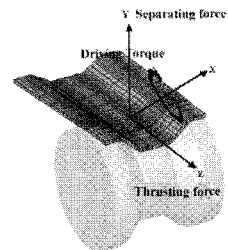


Fig. 12 Various forces

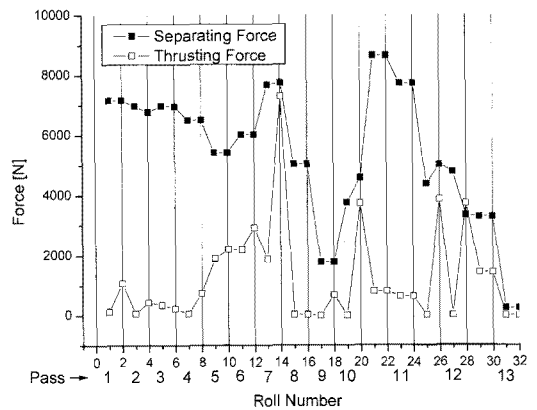


Fig. 13 Roll informations during roll forming process

2.4.2 폭방향 변형

슬라이드 레일의 유한요소해석결과 최종단면 형상은 Fig. 14 와 같다. 각각의 결과는 제품 단면의 중심을 원점으로 하여 폭의 오른쪽방향의 누적된 거리(cumulative distance)로 나타내었다.



Fig. 14 Last section

시뮬레이션 결과로 계산된 최종단면에서 레일의 두께를 Fig. 15 에 나타내었고 제품의 윗면에 대한 변형률과 응력의 분포를 Fig. 16 과 Fig. 17 에 나타내었다. 최대 180% 정도의 변형률이 소재의 끝부분에서 발생하였는데, 이 부분은 설계자가 원하지 않는 부분이 성형된 것이며, 유한요소 해석상에서 성형된 형상을 보면 소재의 끝이 롤과 간섭되어 발생된 변형이며 실제 롤 포밍과정에서도 이와 같은 소재끝과 롤과의 간섭이 관찰된다.

Fig. 18 에서는 각 패스의 단면에서 레일의 길이

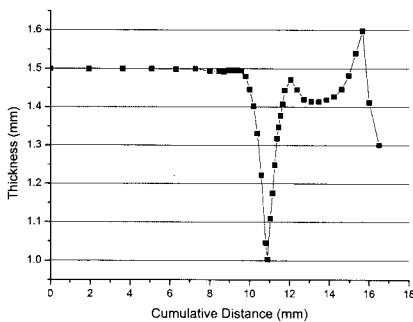


Fig. 15 Thickness in the last section

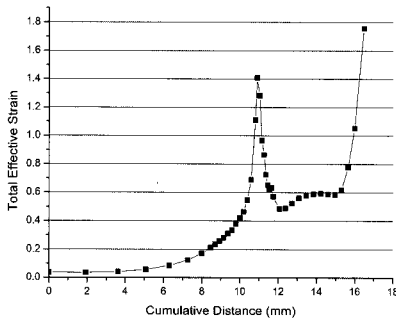


Fig. 16 Strain in the last section

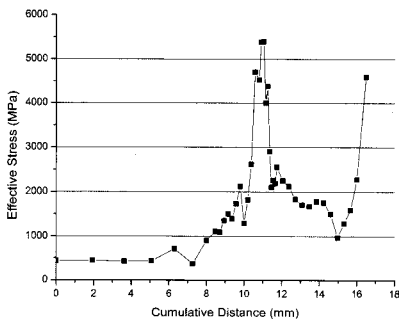


Fig. 17 Stress in the last section

방향 변형률을 나타내었다. 길이방향 변형률은 패스 사이에서의 공정 결함이나 스프링 백을 유발시키는 주된 인자로서 단면에서의 길이방향 변형률 차이가 적을수록 잘 설계된 공정이다. 대부분의 패스에서 공정이 잘 설계되었으나 패스 7 에서 급격히 변형이 증가한 것을 알 수 있으며, 공정 중에서 발생하는 변형의 적절한 분배를 위해 패스 7 의 롤 설계는 개선의 여지가 있다.

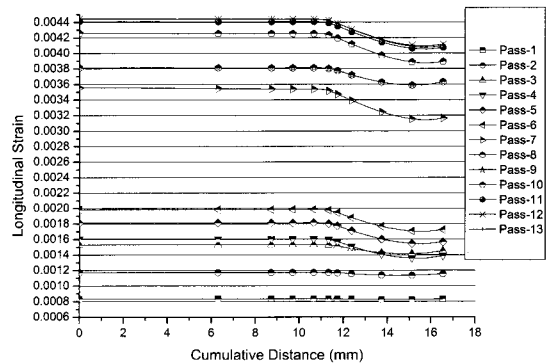


Fig. 18 Longitudinal strain of section

2.4.3 포밍단계별 변형

소재가 포밍되는 길이방향을 따라 각 패스의 변형률과 변형률 속도를 Fig. 19 와 Fig. 20 에 나타내었다. 그림에서 점선은 각 패스의 경계이다. 특히 Fig. 19 는 전체공정에 대한 총 유효 변형률을 나타낸 것으로 소재 끝의 변형률이며, 패스 7 에서의 변형률과 변형률 속도가 가장 크게 나타났다. 패스 7 의 변형률을 분산시키기 위해서 공정을 더 추가하거나 패스간의 간격을 넓히는 것이 필요하다.

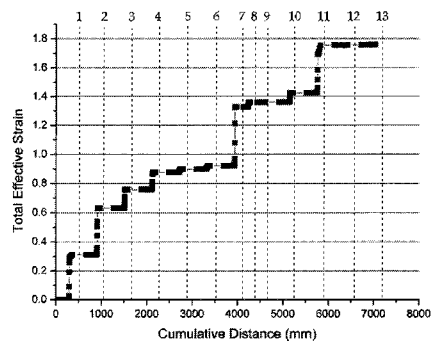


Fig. 19 Strain along the rolling direction

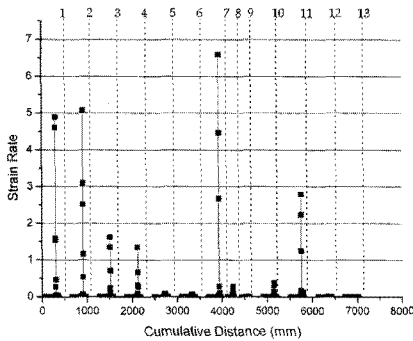


Fig. 20 Strain rate along the rolling direction

2.4.4 스프링 백

제품의 설계 치수는 Fig. 2 에 나타내었는데, 해석 최종 패스의 결과 치수는 Fig. 21 의 왼쪽과 같고, 스프링 백을 고려한 해석 결과의 치수는 Fig. 22 의 오른쪽에 나타내었다.

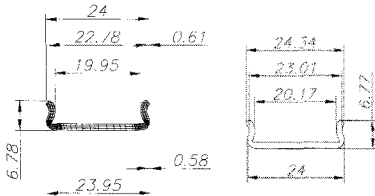


Fig. 21 Spring back in section

제품의 길이는 655mm 이며, 스프링 백에 의한 레일 길이방향에 따른 변형량(bow)을 Fig. 22 에 나타내었는데, Y 축 방향의 값은 제품의 길이방향 휨(longitudinal bow)이고, X 축 방향(X, Y 좌표는 Fig. 12 참조)의 값은 단면방향 휨(cross bow)를 나타낸다.

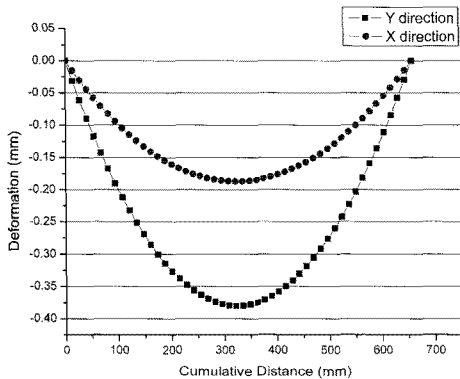


Fig. 22 Spring back in length

2.4.5 롤 포밍 공정의 수정

2.4.4 항까지의 해석결과로부터 롤포밍 공정의 수정이 필요한 부분을 찾을 수 있다. 특히, 소재 끝 부분은 성형을 원하는 부분이 아닌데 롤과 간섭이 생기는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 13 의 롤의 하중과 Fig. 20 의 변형률 속도에서도 확인할 수 있으며 Fig. 24(a)에서도 패스 1 공정의 롤과 소재 끝의 간섭을 볼 수 있으며 그 외 패스 7, 10, 13 에서도 소재 끝과 롤사이의 간섭을 볼 수 있다.

이를 개선하기 위하여 롤을 수정하여 문제를 해결할 수 있겠으나, Fig. 5 의 원소재의 폭을 Fig. 23 과 같이 0.4 mm 줄여 소재 끝과 롤의 간섭을 방지함으로써 각 공정에서 변형률과 힘의 변화를 보고자 하였다.

그 결과로 Fig. 24(b)와 같이 소재 끝이 롤과 간섭되는 것이 방지되었다.



Fig. 23 Modification of the raw material dimension

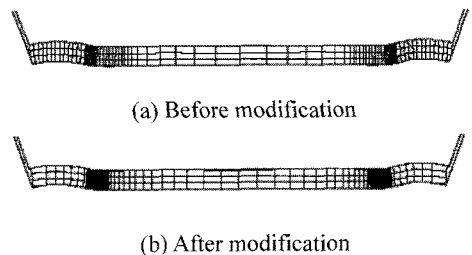


Fig. 24 Comparison of deformation in pass 1

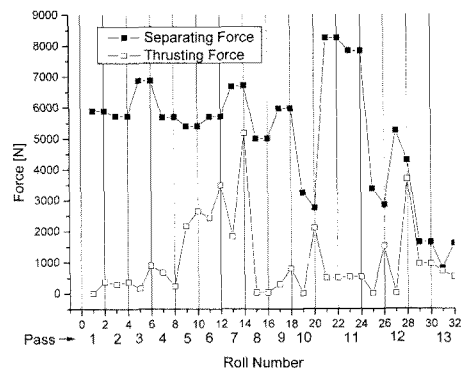


Fig. 25 Roll informations during roll forming process

Fig. 23 과 같이 수정후 유한요소해석에 의하여 얻은 각 롤에 작용하는 힘은 Fig. 25 와 같다. 수정 전보다 롤에 작용하는 힘이 전체적으로 작아지고 고르게 된 것을 볼 수 있다.

최종단면에서의 결과를 보면 수정 전에는 Fig. 16 에서와 같이 180%정도의 변형률이 발생하였으나, 소재의 수정으로 Fig. 26 과 같이 150%정도의 변형률이 발생됨을 볼 수 있다. 특히 소재 끝에서의 변형률은 80%로 현저히 감소된다.

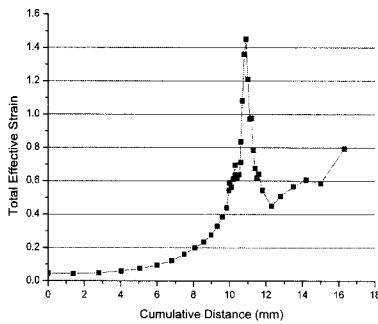


Fig. 26 Strain in the last section(after modification)

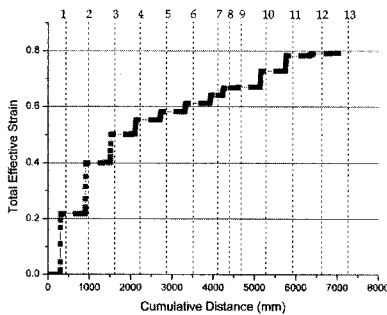


Fig. 27 Strain along the rolling direction (after modification)

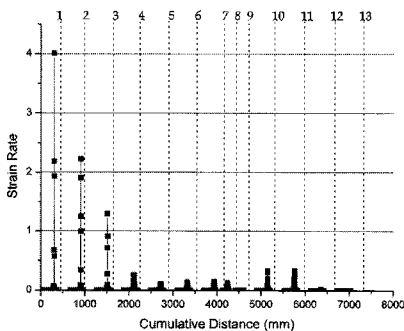


Fig. 28 Strain rate along the rolling direction (after modification)

롤링 방향을 따라서 계산된 결과를 보면 Fig. 27~28 과 같이 변형률과 변형률 속도가 소재를 수정하기 전의 결과인 Fig. 19~20 에 비해 작아지고 균등해져서 보다 개선된 것을 볼 수 있다.

3. 해석 검증

제품의 측정을 위해 먼저 Fig. 29 와 같이 길이 655mm 인 inner rail 2 개와 outer rail 2 개를 준비하여 제품 길이방향의 치짐량을 측정하였고, 와이어 커팅으로 inner rail 을 절단하여 오른쪽 사진과 같은 측정시편 2 개를 준비하고 단면의 치수를 3 차원 비접촉식 측정기로 측정하였다.

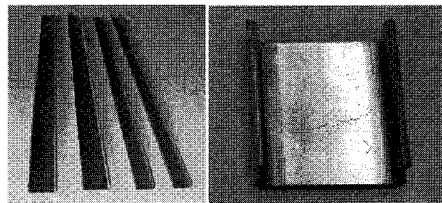


Fig. 29 Manufactured products

제품 단면을 실측한 결과는 Fig. 30 과 같고, 시뮬레이션 결과와 생산된 제품의 치수를 Table 5~6 에서 비교하였다. 유한요소법에 의한 결과는 최종 제품의 실측치수와 길이방향으로 3~4%의 오차를 보이고 단면에서는 1%이내의 오차를 보인다. 이는 실 치수로 봤을 때 길이방향으로 약 0.1mm, 단면에서 약 0.2mm 의 오차 이내이다.

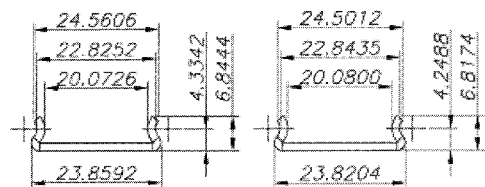


Fig. 30 Measured dimensions of the final products

Table 5 Comparison of deflections along the rolling direction

Max. deflection measured (mm)	Max. deflection calculated by FEA(mm)	Difference (%)
-0.367	-0.38	3.42

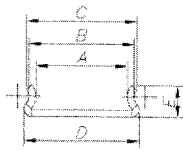


Fig. 31 Cross section symbol

Table 6 Comparison of dimensions in cross section

	Dimension on draft(mm)	Calculated dimension (mm)	Measured dimension(mm)	Difference (calculated-measured)/measured(%)
A	19.78	20.17	20.073	0.49
B	22.78	23.01	22.825	0.81
C	23.89	24.34	24.561	0.90
D	24.89	24.00	23.859	0.59
E	6.79	6.77	6.844	1.09

슬라이드 레일의 설계형상과 생산제품의 형상 그리고 유한요소해석의 결과 형상을 Fig. 32 에서 비교하였다. 실선은 측정 결과이고 점선은 해석 결과이며 이점쇄선이 설계 형상이다. 이 그림에서 시뮬레이션 결과가 생산된 레일의 형상을 상당부분 예측할 수 있음을 볼 수 있다.

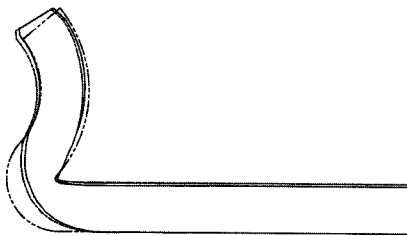


Fig. 32 Comparison of section shapes

4. 결론

정밀도가 높은 스테인리스 슬라이드 레일을 생산하기 위한 롤포밍공정을 대상으로 유한요소해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션하고, 실제로 설계한 롤형상과 배치 그리고 원자재에 의하여 생산된 제품과 결과를 비교하여, 롤 포밍 공정 설계에 유한요소법을 적용하는 것에 대한 유용성을 고찰하였다.

시뮬레이션 결과와 생산공정에서 제조된 제품의 치수는 3~4% 이내의 오차를 보이며 제품의 끝에서 소재와 롤의 간섭도 잘 예측하였다.

참고문헌

1. Wick, C., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook 4th edition (Vol. 6: Design for Manufacturability)," Society of Manufacturing Engineers, Chapter 8, 1992.
2. Senanayake, R. S., Cole, I. M. and Thiruvarudchelvan, S., "The Application of Computational and Experimental Techniques to Metal Deformation in Cold Roll Forming," J. of Materials Processing Technology, Vol. 45, No. 1-4, pp. 155-160, 1994.
3. Park, J. J. and Oh, S. I., "Application of Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Forging," Int. J. Mesh. Sci., Vol. 26, No. 3, pp. 165-176, 1984.
4. Park, J. J. and Oh, S. I., "Application of Three-Dimensional Finite Element Analysis to Metal Forming Processes," Proc. of 15th NAMRC, ASM(American Society for Metals), pp. 296-303, 1987.
5. Shiau, Y. C., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Open-Die Forging and Plate Rolling," Ph. D. Dissertation, Dep. Mechanical Eng., University of California, 1987.
6. Huisman, H. J. and Huetink, J., "A Combined Eulerian-Lagrangian Three-Dimensional Finite Element Analysis of Edge-Rolling," J. of Mechanical Working Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 333-353, 1985.
7. Kim, N. and Oh, S. I., "Analysis tool for roll forming of sheet metal strips by the finite elements method," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, No. 1, p. 235, 1999.
8. SHAPE-RF "Users manual," SHAPE Corporation, 2003.
9. Jeong, S. H. and Lee, S. H., "A Study on Simulation and of Straightness Prediction of Roll Forming Process," Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 589-590, 2007.