

# 3 차원 유한요소법에 의한 롤 포밍 공정 해석 시뮬레이션 Finite Element Analysis Simulation for Roll Forming Process

홍석무\* 김낙수\*\*

\*서강대학교 대학원 기계공학과 \*\*서강대학교 기계공학과

Suk-Moo Hong\*, Naksoo Kim\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Sogang Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

## Abstract

A computational method based on the three-dimensional finite element method is developed for the deformation analysis of roll forming process. The method approximates the process as a kinematically steady state deformation of strip. For industrial usefulness of the simulation method, several rolls with arbitrary shapes in one stand can be considered. The shapes and the thickness distributions of strip after roll forming were examined by comparing computation results with experiments. It is concluded that the tool is useful enough to predict the process. The overall simulation method was integrated into a software package to help the industrial roll-pass design.

**Keywords:** roll forming, computer simulation, finite element method

## 1. 서론

최근 롤 포밍 공정은 많은 산업공정에 사용되고 있지만 그에 대한 이해와 실제 수행에는 어려움을 겪고 있다. 하지만 공정설계 효율성에 따라, 그리고 CAD/CAM 산업의 급속한 발달에 따라 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 프로그램이 더욱 발달하고 있다. Kiuchi [1] 등은 해석적인 롤의 형상에 따라서 변형된 후의 관재단면을 미리 가정한 후, 롤 스탠드에서 적당히 떨어진 강제운동 영역에서는 소재의 속도는 길이 방향 성분만을 갖고, 롤 출구부를 빠져 나오는 관재의 속도성분도 역시 길이 방향 성분만을 갖는다는 점에 착안하여 변형영역에 있는 관재의 형상을 정현(sine)함수에 한 개의 매개변수를 포함시켜서 속도장을 계산한 후, 에너지 소모를 최소화하는 매개변수를 결정함으로써 롤 포밍공정을 해석한 바가 있다. Jimma와 Ona는 롤 포밍시 관재가 접혀지는 각도와 수를 롤 패스 수와 연관하여 구분한 후, 필요한 패스 수를 형상인자와 연관시킨 설계용 경험식을 개발하였다[3][4]. Sticker 등은 유한요소 패키지인 MARK를 활용하여 롤 포밍 공정의 3차원 해석을 수행하고 이로부터 제품에 생기는 파형결함을 예측하

였다. 그러나 해석의 진행을 위해 관재와 롤 간의 마찰을 무시하고 롤의 전방에서 관재를 끌어내는 비현실적인 경계조건을 사용하였다.

CAD/CAM의 빠른 보급과 해석 툴에도 불구하고 롤의 설계와 굽힘 순서 등의 설계 전공정은 모두 설계자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 롤 포밍 공정해석 및 설계의 고효율화를 위해서 3차원 롤 포밍 유한요소 프로그램 TASKS(Three-dimensional Analysis of Shape forming in Kinematically Steady-state condition)를 개발하였으며, 개발된 프로그램으로부터 얻은 결과들을 실제 실험치와 비교함으로써 유용성을 확인하였다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 강소성 유한요소법

강소성 유한요소법에 근거한 식의 유도는 Kobayashi [9] 등이 자세히 유도한 바 있으므로 여기서는 지배방정식과 경계조건 등을 요약해서 정리하기로 한다.

- 평형방정식:  $\sigma_{ij,j} = 0 \text{ in } V \quad (1)$

- 상계 조건: 
$$\begin{aligned} v_i &= v_i^* \quad \text{in } S_u \\ t_i &= t_i^* \quad \text{in } S_f \end{aligned} \quad (2)$$

- 구성방정식: 
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}, \quad (3)$$

$$\text{단, } \dot{\bar{\epsilon}} = \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \bar{\sigma} = \left( \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

- 적합 조건: 
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

- 비압축성: 
$$\dot{\epsilon}_{kk} = 0 \quad (5)$$

- 항복함수와 유동응력:

$$f = \sqrt{J_2} = \bar{\sigma} / \sqrt{3} \quad \text{and} \quad \bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (6)$$

- 마찰조건(일정 마찰인자): 
$$f = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

식(1)과 (2)에서 제거된 경계치 문제는 약형에서 취해지며 다음과 같이 유도된 약형의 해를 구함으로써 풀이할 수 있다.

$$\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + k \int_V \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV - \int_{S_f} t_i^* \delta v_i dS = 0, \quad (8)$$

여기서 비압축성 조건은 벌칙상수  $k$ (매우 큰 양의 상수)에 의해 부여된다. 유동응력식 (6)과 마찰조건(7)은 외부 입력조건으로 주어진다.

## 2.2 초기형상의 결정

롤 포밍과 형상압연 공정은 일정한 속도를 가진 한 쌍의 롤 사이에 소재가 통과하면서 변형을 받는다는 점에서 수치적 해석조건이 매우 유사하나, 형상 압연이 진행되는 동안 소재가 롤 들과 접촉하기 전에 심하게 변형되는데, 이는 초기 추측 형상을 알 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 롤 포밍 공정에서는 입구측 스트립의 초기 추측 형상을 알 수 없다는 점이 두 공정 해석 간의 가장 큰 차이점이다. 따라서, 롤과 접촉하기 전 초기 형상을 얻기 위해서 다음과 같은 과정을 따른다.

- 압연방향으로 소재를 몇 개의 단면으로 구분한다.
- 이자원 각 단면마다 평면변형률 조건을 적용한 유한요소 해석을 통해 롤 출구의 변형 소재형상을 예측한다.
- 미정계수를 포함하는 6차 다항식 형태의 유선함수를 적용하여 미정계수를 구해내고 3차원 요소망을 구성한다. 유선함수에 관해서는 2.3절에서 자세히 설명하기로 한다.
- 에너지 최소법을 이용하여 계수를 결정한다.
- 전체에너지비율은 소성변형에너지율과 체적에너지율 그리고 마찰에너지율로 구성된다.

- 소성에너지율 
$$\dot{E}_p = \int_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV \quad (9)$$

- 체적에너지율: 
$$\dot{E}_v = \int_V \frac{1}{2} k \dot{\epsilon}_{kk}^2 dV \quad (10)$$

- 마찰에너지율: 
$$\dot{E}_f = - \int_{S_f} \tau_f |v_{rel}| dS \quad (11)$$

단  $\tau_f$  는 마찰응력을 말한다.

에너지율의 최소화로부터 유선함수를 찾기 위해 공약구배법(Conjugate gradient method)을 사용하였다

## 2.3 유선함수

롤 포밍이 진행되는 동안 스트립은 예비성형되며, 그림 1처럼 롤 입구측에서 유선함수는 예측할 수 있다. 따라서, 다음과 같은  $n$ 차 다항식의 형태로 유선함수  $x(t)$  를 가정하면,

$$x(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i (1-t)^{n-i} \quad (12)$$

여기서 입, 출구측 경계조건은 다음과 같다.

$$x(0) = a_0 = x_0, \quad x(1) = a_n = x_f \quad (13)$$

$$\frac{dx}{dt}(0) = \frac{dx}{dt}(1) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2}(0) = \frac{d^2x}{dt^2}(1) = 0 \quad (15)$$

식(14)는 압연방향 이외의 속도성분은 0임을 의미하고 식(15)는  $t = 0$  및 1에서 전단변형률비가 없음을 의미한다.

본 연구에서는  $n=6$ 으로 하였으며 6개의 경계조건(13)~(15)을 적용하고 유선마다 하나의 미정계수  $a_3$  를 구하기 위해 에너지 최소화법을 사용하여 각 단면마다 절점을 구하게 된다. 초기 형상을 구하고 난 후 3차원 모델 시스템을 구성한다. 속도장은 강소성 유한요소법에 구해지며, 스트립의 변형 형상은 정상상태의 속도장으로 구할 수 있게 된다.

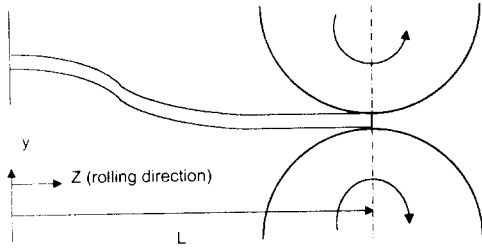


그림 1 롤을 통과하는 소재의 유선

### 3. 해석조건

해석은 박판 W 굽힘공정[10], 후판 W 굽힘공정[11] 및 4각 파이프 공정[12]에 대해서 수행하였으며 해석과 관련된 물성치는 표 1에 나타내었고, 롤 형상은 그림 2~4에 나타냈다. 각 해석에 있어 롤의 회전속도는 일정하고, 각 공정에 따른 적절한 미찰 조건이 적용되었다. 소재의 기하학적 대칭성으로 인해, case 1 and 2에서는 1/2 대칭 모델을, case 3에서는 1/4 대칭모델을 사용하였다.

롤 형상들과 공정 조건들은 전처리(pre-processor) 과정을 통해 컴퓨터 프로그램에 입력된다. 현재 전처리 프로그램은 윈도우 95/NT 프로그램과 Unix 플랫폼 모두에서 처리할 수 있도록 하였고, 3차원 요소망은 PC를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다.

표 1 소재의 유동응력 및 차원들.

Case	Strip 두께 (mm)	Strip 폭 (mm)	유동응력(Mpa)
Thin walled W-bend [10]	2.931	184.9	$\bar{\sigma} = 721.7(2.329 \times 10^{-4} + \bar{\epsilon})^{0.15}$
Thick walled W-bend [11]	25.0	314.1 6	$\bar{\sigma} = 309 + 210 \times 10^3 \bar{\epsilon}$
Square pipe [12]	3.0	89.3 ( $\phi$ )	$\bar{\sigma} = 728.3(0.0424 + \bar{\epsilon})^{0.221}$
Multi-pass tube forming	5.1	152.0	$\bar{\sigma} = 728.3(0.0424 + \bar{\epsilon})^{0.221}$

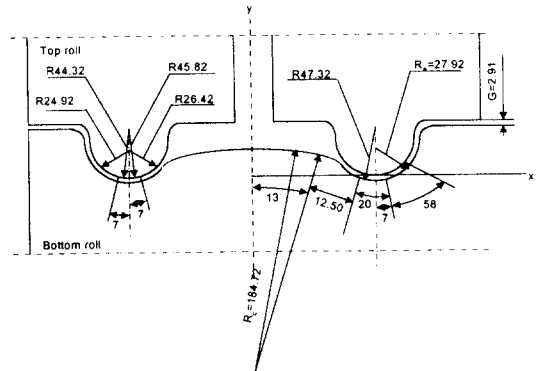


그림 2 박판 W-굽힘공정의 롤 프로파일

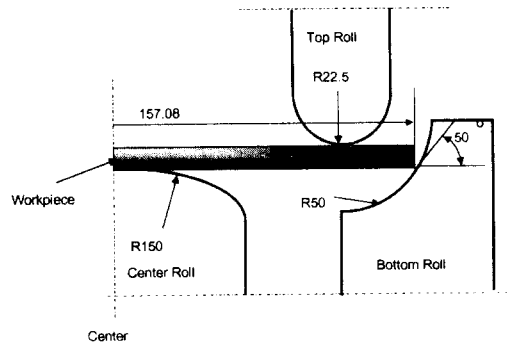


그림 3 후판 W 굽힘 공정의 롤 프로파일

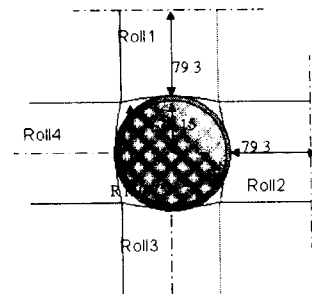


그림 4 Extrusion-forming of round to square pipe

### 4. 해석결과

박막 W-bend 공정은 얇은 튜브를 제조 하는데 사용된다. 그림 2에서는 여러 공정 중 첫 번째 튜브 성형공정을 나타내었고, 그림 5에 변형된 형상을 나타내었다. 롤 단면이 다수의 직선과 원호로 구성되어 있다는 가정에 의해서 임의의 형상의 롤 기하는 결정될 수 있다. 그림 5에서는 3차원 유한요소법에 의해 정상상태의 속도장이 얻어진 후의 변형된 스트립 형상이 잘 제시되고 있다.

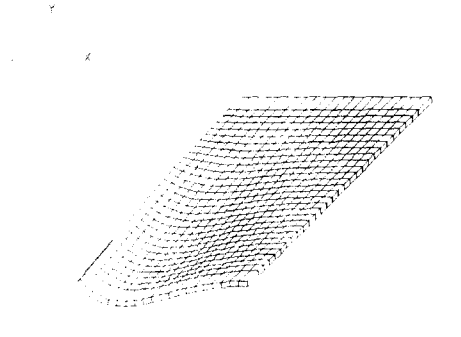


그림 5 박판 W 굽힘공정의 변형 형상

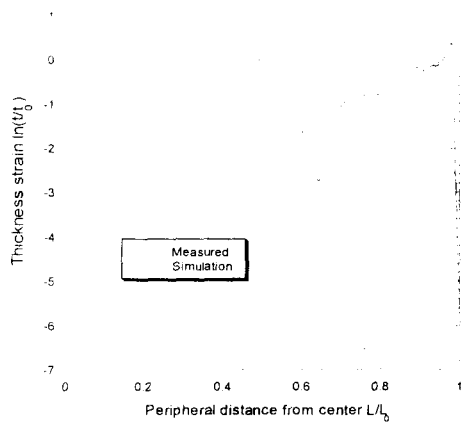


그림 6 박판 W 굽힘공정에서의 두께변형률(%)

폭 방향의 두께 변화는 Onoda[10]등에 의해서 측정되었으며, 그림6은 해석결과의 비교를 나타내는 그림이다. 시뮬레이션 변화의 크기가 실험치에 비해 약간 작은 것은 작은 수의 절점수가 충분치 못함에서 기인한 것으로 보인다.

후속 W-bend 공정은 두꺼운 튜브제조 초기 공정에 해당된다. 이러한 제품은 자동차 부품으로 중요하게 사용되는데, 파이프 모서리(edge) 부분의 예측은 용접을 원활히 하기위한 중요한 작업으로 알려져 있다. 종 유효 변형률 분포를 그림 7에 나타 내었으며 변형률 분포가 평면변형률 조건에서 Kiuchi 등이 제시한 결과와 매우 일치함을 알 수가 있었다. [11].

The Extroll-forming 재형상 공정에서 소재는 내부의 볼

마찰력보다는 외부물의 외력에 더 큰 지배를 받는다. 요소의 변형된 형상은 그림 8 에 나타내었으며 두께 변형률 분포는 그림 9에 나타내었다. Onoda 등[12]에 의해 제시된 것도 같은 경향을 띄고 있음을 확인할 수 있다.

다단 롤 포밍 공정은 4개의 성형 단계와 3개의 마무리 단계로 구성되어 있으며, 산업현장에서 실제 이루어 지고 있는 예를 적용하였다. 그림 10은 각 스탠드별 변형형상을 보여주고 있다. 그림 11은 실제 롤포밍 공정상의 소재를 비전시스템을 이용하여 변형률을 측정된 것을 나타내며, 그림12는 해석으로부터 얻은 종 유효 변형률 분포를 나타내는 그림이다. 이러한 실험치와 해석 결과는 그림 13에서 비교하였는데, 모서리 부분에서는 실험치와 해석결과가 양호한 일치율을 나타내었다. 여기서, 롤 중심부 근처에서는 실험적으로 측정된 값이 나타나지 않고 있는데, 이는 비전시스템의 화상포착 영역이 충분히 넓지 못했기 때문이다. 이상의 다단 롤 포밍의 해석 결과는 롤 포밍 공정을 연구하는데 있어서 중요한 자료로 이용될 것이다.

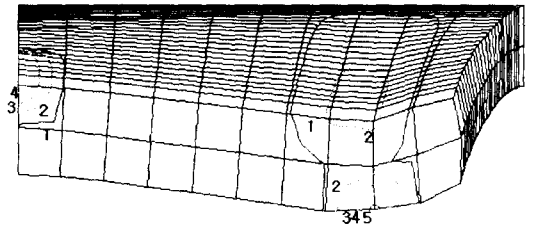


그림 7 후판 W 굽힘 공정에서의 종유효변형률

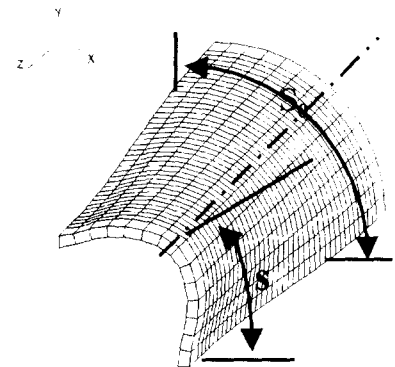


그림 8 4각 파이프 공정의 변형된 형상.

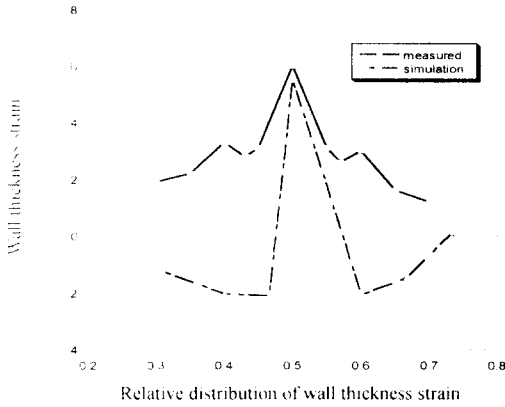


그림 9 출구주변 두께 변형률 분포



(a) pass1

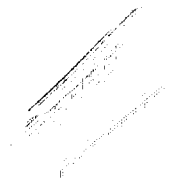
(b) pass2

(c) pass3

(d) pass4



(e) pass6



(f) pass7

그림 10 튜브 성형의 7 개의 순차적인 변형양상

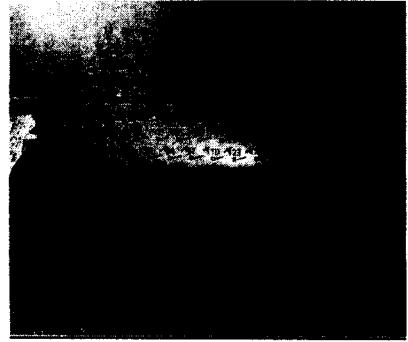


그림 11 그리드 마킹을 통한 변형률 측정

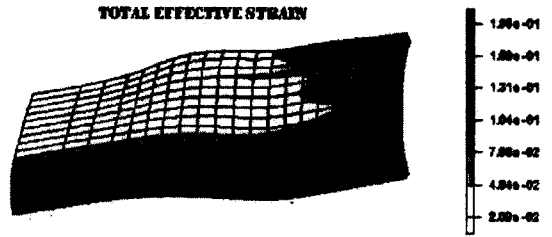


그림 12 TASKS 를 이용한 pass2 의 변형률 분포

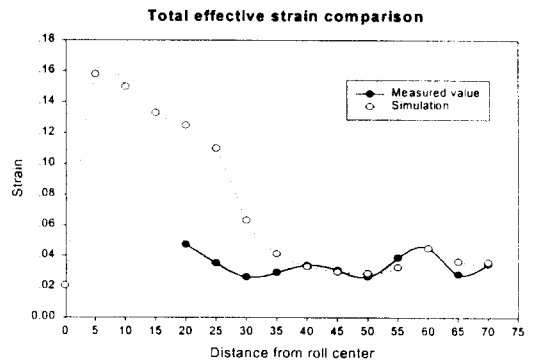


그림 13 실험치와 시뮬레이션의 변형률 분포 비교

## 5. 결론 및 향후과제

이상의 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 롤 입구 부분에 투입되는 예비변형소재의 형상은 유선함수를 통해 구할 수 있으며 출구단면의 형상은 2

치원 유한요소 해석에 의해서 구할 수 있었다.

- 3차원 유한요소 해석은 예비소재의 변형형상, 두께분포와 길이방향 분포 및 롤 회전력 등의 유용한 정보를 제공해 주었다.
- 본 연구에서 제안한 해석기법은 실험치와 비교적 양호한 일치율을 보였으며, 롤 포밍 공정에 유용하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 알고리즘을 통한 롤 포밍 공정 해석상의 집약된 코드는 사용자 편의적인 소프트웨어 패키지로 개발되었고, 이는 실제 산업현장에 적용될 것이다. 향후 다음과 같은 점에 중점을 두어 프로그램의 해석능력을 향상시키고자 한다.

- 롤 포밍 공정에서의 경계를 침범 않는 해석을 위한 self-folding 알고리즘의 개발 및 적용
- 길이 변형률의 결과로부터 제품의 파형 예측
- 단순화된 탄성회복 (spring-back)의 계산

#### 후기

관재의 변형률 측정에 많은 도움을 주신 강원대학교 김형중 교수님 및 소성가공실현실원들에 깊이 감사드립니다.

#### 6. 참고문헌

- [1] Kiuchi, M., 1973, "Analytical study on cold roll forming process", Report of the Inst. of Ind. Sci., Univ. of Tokyo, 23(1):1.
- [2] Kiuchi, M. and Koudobashi, T., 1984, "Automated design system of optimum roll profiles for cold roll forming", Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal Working Process, Kyoto, 423.
- [3] Jimma, T. and Ona, H., 1980, "Optimum roll pass schedules on the cold roll forming process of symmetrical channels," Proc. 21st Int. M.T.D.R. Conf., 63.
- [4] Ona, H, Jimma, T, and Fukoya, N, 1983, "Experiments into the cold roll forming of straight asymmetrical channels", J. Mech. Working Technol., 8: 273.
- [5] Bhattacharyya, D. and Panton, S. M., 1989, "Research and computer-aided design in cold roll forming", Academic Publishers-Pergamon, 464.
- [6] Ona, H, Jimma, T, and Kozono, H, 1984, "A computer-aided system for cold roll forming", Advanced Technology of Plasticity, 1: 508.

- [7] Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Yee, C. H., and Collins, I. F., 1984, "The prediction of deformation length in cold roll forming", J. Mech. Working Technol., 9:181.
- [8] Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Thadakamalla, S. K., and Collins, I. F., 1987, "The prediction of roll load in cold roll forming", J. Mech. Working Technol., 14: 363.
- [9] Kobayashi, S., Oh, S.-I. and Altan, T., 1989, Oxford University Press, "Metal Forming And The Finite Element Method."
- [10] Onoda, Y., Kawai, A., and Kobayashi, E., 1993, "Finite element simulation of deformation features of sheet metals formed by W-bend and U-bend forming rolls in ERW pipe mill", J. of JSTP, 34: 395.
- [11] Kiuchi, M. and Wang, F., 1997, "Numerical analysis of deformation behavior of edge portion of sheet metal at breakdown pass in roll forming process", J. of JSTP, 38: 1104.
- [12] Onoda, Y., Nagamachi, T., and Sugiyama, T., 1995, "Finite element simulation of deformation features of round welded steel pipes reshaped into square shape by extroll-forming", J. of JSTP, 36: 149.