

유한요소법을 이용한 롤포밍 공정에서의 버클링 해석

김영인*·김종현**·정영철**·김낙수†

(2002년 10월 16일 접수, 2003년 7월 5일 심사완료)

Buckling Analysis of Roll Forming Process using Finite element method

Young-In Kim, Jong-Hun Kim, Young-Chul Jeoung and Naksoo Kim

Key Words : Roll Forming(롤포밍), Finite Element Method(유한요소법), Buckling(버클링), Bowing(휩), Longitudinal Strain(길이방향 변형률)

Abstract

In cold roll forming processes, the sheet metal strip is gradually and successively bent into a desired profile. Occurrence of buckling is one of the major defects. Buckling may occur due to longitudinal stress and it is difficult to predict buckling behavior. In this study an analytical method for buckling behavior during roll forming is proposed. All numerical simulations are performed by finite element analysis. The behavior of buckling can be predicted with the simulation modeling of the finite element method.

1. 서 론

버클링은 스프링백, 스크래칭과 더불어 롤포밍 공정에서 자주 발생하는 큰 결함 중의 하나이다. 버클링은 성형공정 이후 압축 잔류응력이 소재가 지지할 수 있는 한계 이상일 경우, Fig. 1의 흡(Bowing)에서 나타난 것처럼 소재가 소재면에 수직한 방향으로 휘어지는 현상으로 발생시 외관상으로 좋지 않고, 차수 정밀도가 떨어지며, 파이프 성형의 경우 용접성이 떨어지게 된다. 따라서 생산 공정에서 생산성을 크게 저하시키는 요인으로 작용한다.

롤 포밍에서의 버클링이 발생하는 메커니즘은 초기 상태의 소재가 롤에 의해 굽힘을 받으면서 에지부분의 연신이 다른 부분보다 과도하게 증가하게 되는데 들어난 에지 부분은 롤 출구부를 지나며 연신이 상대적으로 적게 발생된 다른 부분과 같은 속도로 유지되기 때문에 오히려 수축을 하게

되는데 이러한 압축응력이 허용응력을 넘게 되면 주름이 잡히거나 휘어지거나 하는 버클링이 발생된다. 따라서 롤 출구에서의 잔류하는 길이방향 변형률의 차에 대해 가장 많은 영향을 받게 된다.

출구에서의 길이방향 변형률은 성형률의 형상과 소재의 유동응력, 두께, 롤 스탠드간의 간격 등 많은 인자들의 영향을 받기 때문에 정확한 버클링에 대한 발생 경향을 파악하기 어렵다. 따라서 롤포밍 공정에서의 버클링 현상에 대한 직접적인 연구는 거의 이루어지지 못한 실정이고 롤포밍 공정에서의 길이방향 변형률의 측정 수준에서 단순히 설계에서의 도움을 주는 수준 정도의 연구가 이루어진 상태이며, 거의 대부분이 현장의 경험에 의존하는 설계가 이루지고 있는 실정이다.

지금까지의 롤 성형공정에 대한 연구는 국외에선 일본 동경대의 M.Kiuchi^(1,2) 교수그룹이 많은 연구 결과를 발표했는데, 롤 형상에 따라서 변형 후의 판재 단면을 미리 가정한 후 롤 스탠드에서 적당히 떨어진 강체운동 영역에서는 판재 내 소재의 속도가 길이 방향 성분만을 갖고, 롤 출구부를 빠져 나오는 판재의 속도 성분도 역시 길이 방향 성분만을 갖는다는 점에 착안하여 변형 영역에 있는 판재의 형상을 정현함수(sine function)에 한 개의 매개변수를 포함시켜서 속도장을 계산한 후,

* 서강대학교 대학원 기계공학과

** (주) 쉐이프(SHAPE)

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : nskim@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8635 FAX : (02)712-0799

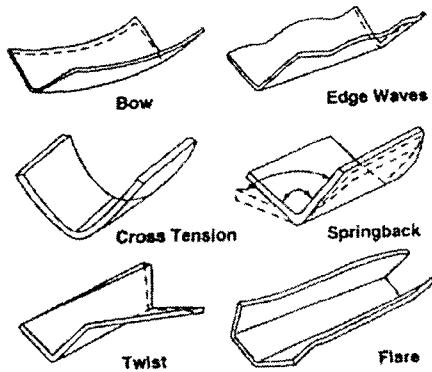


Fig. 1 The defects of the roll forming process

에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다. Battacharryy 와 Panton 등^(3,4)은 실험적인 결과를 바탕으로 변형영역을 몇 개의 구간으로 나눈 후 각 영역에 대하여 영역의 길이 및 굽힘 각도를 예측하는식을 개발하였다. 개발된 실험식에 실험 상수를 결정하여 단순한 형상의 롤포밍을 해석하고, 이에 근거하여 소재의 길이방향 변형률을 예측하였다. Jimma 와 Ona⁽⁵⁻⁷⁾는 롤포밍 시 판재가 접혀지는 각도와 수를 를 패스 수와 연관하여 구분한 후, 필요한 패스 수를 형상 인자와 연관시킨 설계용 경험식을 개발하였다. Farzin⁽⁸⁾은 비선형 유한요소법을 통해 롤포밍 공정에서 버클링 한계치를 제안하고 길이방향 변형률의 최대한계치를 제한함으로써 플라워패턴 설계에서의 결정치를 설정하였다. N.Kim⁽⁹⁻¹²⁾은 3 차원 강소성 유한요소법을 이용한 롤포밍 전용 시뮬레이션 프로그램을 개발한 예가 있다.

본 연구에서는 박판성형 공정에서 발생하는 큰 결합중의 하나인 버클링 현상을 유한요소해석으로 구명하고자 한다. 강소성 유한요소법을 이용하여 길이방향의 변형률을 구하고, 출구 단면에서의 각기 다른 크기의 길이방향 변형률이 단면별로 서로 평형을 이루며 소재를 성형하므로 잔류응력을 소재에 적용 시켜 유한요소해석으로 버클링 현상을 예측하고자 한다. 롤포밍 공정에서의 길이 방향 변형률의 크기에 대한 해석은 롤포밍 전용 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계산하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 버클링 현상의 유한요소 해석

버클링을 발생시키는 주 원인을 성형시 발생하는 소성 길이방향 변형률(plastic longitudinal strain)이라고 가정하였으므로, 이를 아래의 식에 적용하

기 위하여 길이방향 변형률을 잔류응력으로 환산하여 적용하였다. 아래의 식에서 잔류응력은 초기응력으로 적용하였다. 단, σ_y 는 코쉬(Cauchy) 응력텐서, ε_{kl} 는 변형률텐서, f_i 은 물체력(Body force), E_{ijkl} 은 탄성변형의 강성텐서, u_i 는 변위를 나타내고, S_f 는 외력의 지정된 경계면, S_u 는 변위가 지정된 경계면을 나타낸다.

$$\text{평형 방정식} : \sigma_{y,j} + f_i = 0 \quad (1)$$

$$\text{구성 방정식} : \sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \sigma_y^{(i)} \quad (2)$$

(단, $\sigma_y^{(i)}$ 은 initial stress)

$$\text{경계조건} : \sigma_{ij} n_j = f_i^{S_f} \text{ on } S_f$$

$$u_i = u_i^{S_u} \text{ on } S_u \quad (3)$$

위의 방정식과 경계조건을 가상 변위 원리(the principle of virtual displacement)에 다음과 같이 적용한다.

$$\int (\sigma_{y,j} + f_i) \bar{u}_i dV = 0 \quad (4)$$

절점에 작용하는 물체력이 존재하지 않으므로 $f_i = 0$ 이다. 여기서 \bar{u}_i 는 0 이 아닌 임의의 가상변위이다. 이 때, $\sigma_{y,j} \bar{u}_i = (\sigma_y \bar{u}_i)_j - \sigma_{y,j} \bar{u}_{i,j}$ 이므로 위의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int [(\sigma_y \bar{u}_i)_j - \sigma_{y,j} \bar{u}_{i,j}] dV = 0 \quad (5)$$

위의 식 중, 제일 앞의 항은 분산 정리를 사용하여 $\int_V (\sigma_y \bar{u}_i)_j dV = \int_S \sigma_y \bar{u}_i n_j dS$ 로 변환할 수 있다. 또한 $\sigma_y = \sigma_y$ 이므로,

$$\sigma_y \bar{u}_{i,j} = \sigma_y \left[\frac{1}{2} (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) \right] = \sigma_y \bar{\varepsilon}_{ij} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 결과적으로 위의 식은 다음과 같이 변환되어진다.

$$\int_V \sigma_y \bar{\varepsilon}_{ij} dV = \int_S f_i^S \bar{u}_i dS \quad (7)$$

위의 식에 앞서 언급한 구성방정식에 적용하면

$$\int_V [E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \bar{\varepsilon}_{ij} + \sigma_y^{(i)} \bar{\varepsilon}_{ij}] dV = \int_S f_i^S \bar{u}_i dS \quad (8)$$

절점에 작용하는 body force f_i 와 마찬가지로 버클링 해석에서 절점에 작용하는 외력(traction)은 존재하지 않는다. 즉 $\int_S f_i^S \bar{u}_i dS = 0$ 이다. 따라서 이를 정리하면

$$\int_V E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \bar{\varepsilon}_{ij} dV = - \int_V \sigma_y^{(i)} \bar{\varepsilon}_{ij} dV \quad (9)$$

된다. 버클링 발생의 주 원인을 성형시 발생하는

길이방향 변형률이라고 가정하였으므로, 이를 위의 식에 적용하기 위하여 길이방향 변형률을 재료의 강성에 맞추어 잔류응력으로 환산하면 최종적으로 식 (10)과 같이 된다. 여기서 \mathbf{K} 는 강성행렬, \mathbf{R} 은 하중벡터, \mathbf{U} 는 속도장이다.

$$\mathbf{KU} = \mathbf{R} \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C}^{(m)} \mathbf{B}^{(m)} dV^{(m)}$$

$$\mathbf{R} = -\sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C} \underline{\varepsilon}^{(m)} dV^{(m)}$$

2.2 결합 함수의 설정

일반적으로 등방성 재료의 해석에서는 동일한 크기의 외력이 가해질 경우 균일하게 두께방향으로 변형하게 되는데, 실제 관재재료의 경우 소재내에 미미한 결함이 존재하여 균일하게 변형하지 못하며 베클링과 같은 불균일 변형을 가져온다. 이러한 결함을 수치적으로 Sine 함수로 가정한 결함을 소재에 가정할 경우 베클링과 같은 불균일한 변형을 표현할 수 있다.

$$x_{i_new} = x_{i_org} + A \sin\left(\frac{z_i - z_0}{l} m\pi\right) \quad (11)$$

x_{i_org} 과 x_{i_new} 는 각각 결합함수를 부여하기 전과 부여한 후의 달라진 점의 x, y 좌표값이고, A 는 결합함수의 진폭, m 은 주기이다. l 과 z_i , z_0 는 각각 소재의 길이와 i 번째 단면에서의 z 좌표, 소재의 첫째단면의 z 좌표를 뜻한다. 롤 포밍 시 좌표 X, Y, Z는 포밍방향을 Z, 두께방향을 Y, 넓이 방향을 X 방향으로 설정하였다.

3. 베클링 해석 조건과 결과

3.1 공정 모델링

비대칭 U-channel 롤포밍 공정으로 전체 3 패스 (pass)로 이루어져 있으며 각 롤 스탠드는 30, 60, 90 도의 각도로 굽혀져 최종 U-channel 을 만드는 공정이다. Fig. 2 는 마지막 패스의 소재의 결과 그림으로 고정부(Fixed part)와 변화부(Changed part)로 나누어져 있으며 변화부의 크기를 조정하면서 베클링의 영향을 검증하고자 한다. Table 1 은 해석 공정 조건으로, 이를 토대로 롤포밍 해석을 수행하여 출구에서의 길이방향 변형률을 얻고 그 값을 토대로 각 요소에 잔류응력의 형태로 적용하여 베클링 해석을 하였다. 실험 결과와 유한요소법으로

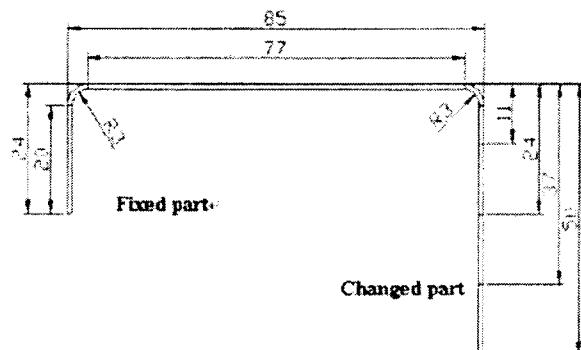


Fig. 2 Final section profile

Table 1 Process condition

Type	U-profile	
Flow stress	$\bar{\sigma} = 542.9946 \bar{\varepsilon}^{0.265}$ MPa	
Stand length	350mm	
Friction factor	0.1	
Strip width	Case 1 11mm (changed part)	114.7 mm
	Case 2 24mm (changed part)	127.7 mm
	Case 3 37mm(changed part)	140.7mm
	Case 4 50 mm(changed part)	153.7 mm
Strip thickness	1mm	

구한 베클링 해석에 대해 흔(Bowing)과 비틀림(Twist) 결과를 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하고자 한다.

3.2 흔(Bowing)과 비틀림(Twist)의 정의

실험과 베클링 해석의 비교를 용이하게 하기 위해 주어진 공정에 대해 흔(Bowing)의 크기를 수치적으로 정의하고 비교하였다.

Fig. 3 와 같이 각 벽면 상하부가 동일한 평면상에 존재하고, 동일한 곡률중심에서 연신한다고 가정할 경우, 산술적인 흔의 크기는 다음과 같이 계산될 수 있다. 먼저 벽면 상하부의 길이 l_1 , l_2 은 다음 식 (12),(13)와 같이 계산된다.

$$\rho_c \theta_c = l_2 \quad (12)$$

$$(\rho_c + h) \theta_c = l_1 \quad (13)$$

ρ_c : 벽면하부의 곡률반경

θ_c : 중심각 h : 벽면 높이

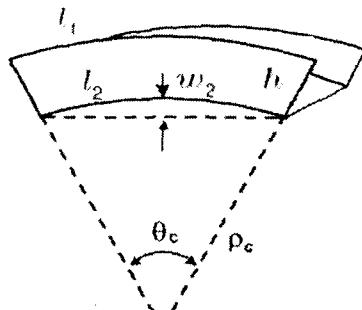


Fig. 3 Schematic diagram of Bowing

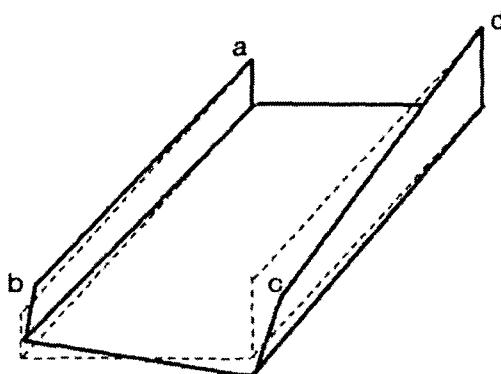


Fig. 4 Schematic diagram of Twist

l_1 : 벽면 상부 길이 l_2 : 벽면 하부 길이

식 (12), (13)를 이용하면 중심각 θ_c 는 다음과 같다.

$$\theta_c = \frac{l_1 - l_2}{h_c} \quad (14)$$

따라서 휨(Bowing)의 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$w_c = \rho_c \left(1 - \cos \frac{\theta_c}{2}\right) = \frac{l_2}{\theta_c} \left(1 - \cos \frac{\theta_c}{2}\right) \quad (15)$$

비틀림의 크기는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 비틀림이 있는 소재에 대해 절단을 한 후 a, b, c, d 중 세 개의 모서리를 하나의 평면 위에 놓았을 때 나머지 모서리가 평면과 떨어진 거리로 정의한다.

3.3 길이방향 변형률의 비교

Fig. 5와 Fig. 6은 버클링이 일어난 후 잔류응력이 해소된 길이방향 변형률의 실험값과 해석값에 대한 그래프로써 변화부의 크기가 11, 50mm일 경우에 대한 것이다. 실험값과 해석값 간의 차이는

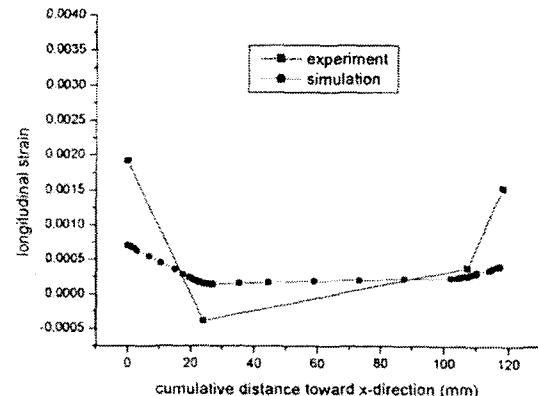


Fig. 5 Comparison of Longitudinal strain in Case 1

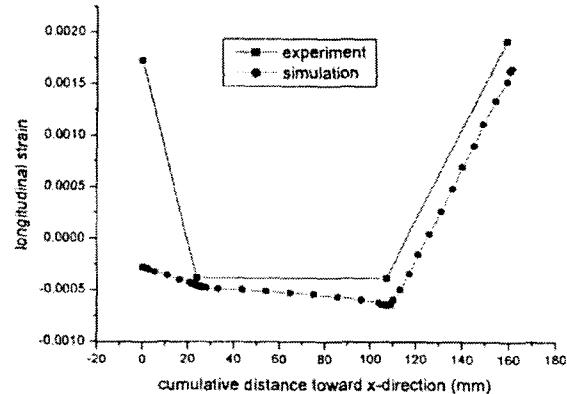


Fig. 6 Comparison of Longitudinal strain in Case 4

있으나 전체적인 경향은 동일하게 나타나며 롤포밍 공정에서의 잔류응력이 해소됨으로써 해석후의 길이방향 변형률이 전체적으로 증가하여 실험값에 근접함을 알 수 있다.

3.4 휨과 비틀림 변형 양상과 크기의 비교

Fig. 7은 롤포밍 공정을 거친 소재에 대해서 버클링 현상이 발생한 뒤의 변형 양상으로서 휨이 강하게 일어나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 8은 버클링 결과로서 비틀림이 주로 일어나고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 소재의 형상의 비대칭성과 단면에서의 길이방향 변형률의 불균일성으로 인해서 휨이나 비틀림이 독립적으로 단일하게 발생하는 것이 아니라 동시에 일어남을 볼 수 있다.

Fig. 9는 변화부의 크기가 11mm 일 때 산술적으로 계산된 휨의 크기와 실험값과의 비교 그래프로서 모든 경우에 대해서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 실제 버클링 현상은 구조적인 강성 등에 의하여 주름 등의 결함으로 나타나는데 반하여 산술



Fig. 7 Product shape with Bowing

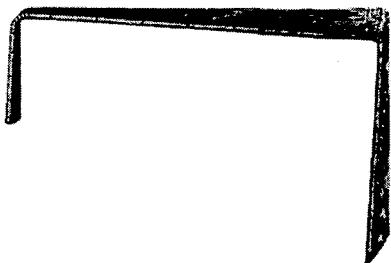


Fig. 8 Product shape with Twist

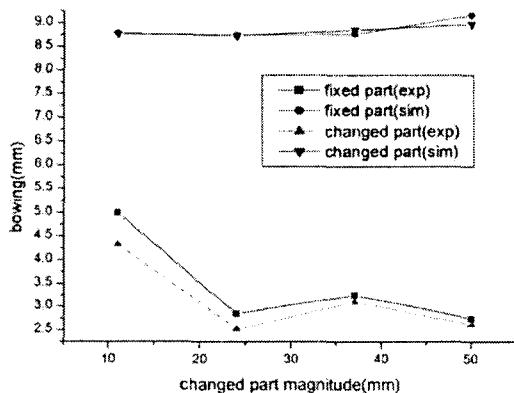


Fig. 9 Comparison of Bowing in Case 1

계산에서는 이러한 영향이 반영되지 못한 결과이다. 실제의 경우에 작은 주름이나 흔 등으로 잔류응력이 상쇄될 경우 발생하게 되나, 본 해석의 경우, 주름 등의 결함이 거의 발생하지 않았기 때문에 실험값과 비교적 큰 차이를 보인다고 판단된다.

Table 2에는 실측의 흔을 발생시키는 소재 끝단의 연신량을 산술적으로 계산하여 표시하였다. 이 때 각 꼭지부의 연신량은 실측결과로 사용하였다. 산술연산된 끝단 연신량은 실측치보다 작게 나타났다. 실측치와 산술연산치의 차이는 1~3mm로 미미하나 이러한 차이가 약 2~3 배의 흔을 야기시킨다고 판단된다. 이러한 연신량이 매우 작은 주름이나 흔 등으로 나타난다면 실험값과 비슷한 흔을 나타낼 것이다.

Fig. 10 는 변환부의 크기가 11mm 일 때 비틀림에 대한 실험값과 해석값에 대한 비교 그래프로서 해석결과와 실제 실험값과의 차이가 근소하게 나

Table 2 Reverse calculation of elongation

	Experiment (mm)		Simulation (mm)	
	Changed part	Fixed part	Changed part	Fixed part
Case 1	1302.5	1301.5	1300.9	1300.4
Case 2	1299.5	1300.0	1300.2	1299.9
Case 3	1300.5	1299.8	1300.3	1299.9
Case 4	1302.0	1301.5	1300.5	1300.2

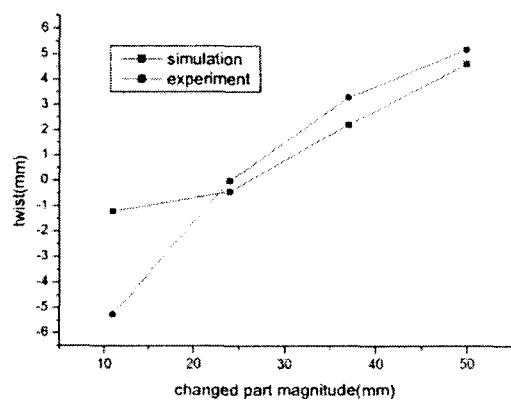


Fig. 10 Comparison of Twist in Case 1

타나고 있다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 그 경향성을 보기에 큰 무리가 없다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 롤포밍 공정에서 발생할 수 있는 비틀링 현상에 대해 수치해석적으로 해를 구하고 실험값과의 비교를 통해 검증을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

길이변형률의 실험값을 토대로 산술적인 계산을 수행하여 해석값과 비교한 결과, 흔(bowing)값의 경우 그 크기에 있어서 차이를 보이나 소재의 끝단의 연신량을 비교해본 결과 그 값의 오차가 미미함을 알 수 있었다. 흔(Bowing) 값에서의 오차는 해석 소재가 가지는 강성에 의해서 주름 형태의 결합으로 발생하지 않음으로 인해 과도하게 흔 현상으로 나타난 것으로 판단된다. 비틀림(Twist)에 대한 해석의 결과는 실험값과 해석값과의 차이가 거의 없으며, 경향 또한 유사하게 나타나고 있다.

롤포밍 공정의 수치 해석결과 주름의 발생이 비교적 적었다. 따라서 현재 비틀링 해석기능에서 보다 수월하게 주름을 발생시킬 수 있도록 개선하

여야 실제의 밀클링 현상에 근사한 해석을 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Kiuchi, M., 1973, "Analytical Study on Cold Roll Forming Process," *Report of the Inst. of Ind. Sci., Univ. of Tokyo*, Vol. 23, pp. 1~23.
- (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*, pp. 423~427.
- (3) Bhattacharyya, D. and Panton, S. M., 1989, "Research and Computer-Aided Design in Cold Roll Forming," *Academic Publishers-Pergamon*, Vol. 2, pp. 464~470.
- (4) 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.*, Vol. 9, pp. 181~191.
- (5) Jimma, T., Ona, H., 1980, "Optimum Roll Pass Schedules on the Cold Roll Forming Process of Symmetrical Channels," *Proc. 21st Int. M.T.D.R. Conf.*, pp. 63~67.
- (6) Ona, H., Jimma, T., Fukoya, N., 1983, "Experiments into the Cold Roll Forming of Straight Asymmetrical Channels," *J. Mech. Working Technol.*, Vol. 8, pp. 273~278.
- (7) Ona, H., Jimma, T., and Kozono, H., 1984, "A Computer-Aided System for Cold Roll Forming," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 508~514.
- (8) Farzin, M., Salmani Tehrani, M. and Shameli, E., "Determination of Buckling Limit of Strain in Cold Roll Forming by the Finite Element Analysis," *J. Materials processing Technology*, 2002, Vol. 125-126, pp. 626~632.
- (9) Kim, N. and Oh, S.-I., 1999, "Analysis Tool for Roll Forming of Sheet Metal Strips by the Finite Elements Method," *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 48, pp. 235~238.
- (10) Hong, S. M. and Kim, N. S., 1999, "Finite Element Analysis Simulation for Roll Forming Process," *Transactions of the KSTP Spring Annual Meeting*, pp. 207~212.
- (11) Hong, S. M., Cho, H. J. and Kim, N. S., 1999, "Rigid-Plastic Finite Element Modeling of Roll Forming Process as a Kinematically Steady State Condition," *Transactions of the KSME Annual Meeting*, pp. 287~293.
- (12) Hong, S. M., Kim, D. S., Yun, H. J. and Kim, N. S., 2000, "Development of Roll Forming Simulation Program," *Transactions of the Korean Society of CAD/CAM Engineers Annual Meeting*, pp. 417~423.