

언더레일의 롤포밍 공정 시뮬레이션에 관한 연구

정상화*, 이상희⁺, 김광호⁺⁺, 김재상⁺⁺, 김종태⁺⁺⁺

(논문접수일 2008. 1. 7, 심사완료일 2008. 4. 3)

A Study on Roll Forming Simulation of Under Rail

Sang Hwa Jeong*, Sang Hee Lee⁺, Gwang Ho Kim⁺⁺, Jae Sang Kim⁺⁺, Jong Tae Kim⁺⁺⁺

Abstract

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. However, process analysis is very difficult because of the inherent complexity. Therefore, time is consuming and much money are needed for manufacturing goods. In order to overcome this difficulty, a new computational method based on the rigid-plastic finite element method is developed for the analysis of roll forming process. In this paper, the design of roll forming process and the simulation are performed to manufacture the upper member at under rail composed of three members. The cold rolled carbon steel sheet(SCP-1) is used in this simulation, and a flow stress equation is set up by conducting the tensile test. The upper member is designed using two types of design for a excellent design. Each types are simulated and compared with the strain distribution using SHAPE-RF software. In addition, the numerical magnitude of bow and camber which are the buckling phenomenon is estimated.

Key Words : Roll forming process(롤 포밍 공정), Flow stress equation(유동 응력 방정식), Optimum design(최적설계), Longitudinal strain(길이방향 변형률), Computer simulation(컴퓨터 시뮬레이션)

1. 서론

기계 부품중에서 슬라이드 레일은 소재를 U자 형태로 성

형하여 판재와 판재 사이에 볼이나 로울러 베어링을 삽입하여 마주보는 판재가 서로 부드럽게 상대 이송하는 LM(Linear Motion)가이드와 유사한 역할을 하도록 하는 이송부품 중의

* 조선대학교 기계공학과 (shjeong@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대 대학원 기계공학과

++ 조선대 대학원 기계공학과

+++ 재영엠티에스(주) 광주공장

하나이다. 슬라이드 레일은 프레스 공법에 의해서도 성형되지만, 형상이 복잡하거나 정밀도를 요구하는 제품은 롤 포밍 공법에 의해 성형한다. 롤 포밍 공법은 Fig. 1과 같이 연속된 금속의 띠(strip)이 다단의 롤을 통과하면서 단면의 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 효율적으로 생산하는 공법이다⁽¹⁾.

롤 포밍 공정은 압축과 인장이 복합적으로 나타나기 때문에 각각의 패스(pass)를 통과하는 형상의 예측이 어렵다. 뿐만 아니라 여러 패스를 통과한 후 최종형상에는 잔류 변형률이 남게 되고, 이러한 영향으로 인해 최종 제품은 주름이 잡히거나 휘어지는 버클링(buckling)현상이 발생한다. 이러한 버클링 현상은 소재의 유동응력(flow stress), 소재의 두께, 롤간 수평거리(HD: Horizontal Distance), 굽힘각 등 많은 인자에 영향을 받기 때문에 정확한 버클링 현상을 예측하기가 어렵다. 일본 동경대의 M. Kiuchi 는 판재의 형상을 정현 함수화하여 속도장을 계산한 후, 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법과 같은 공정의 최적화 알고리즘을 제안하였다^(2,3). Farzin은 간단한 모델을 설정하여 비선형 유한요소법(non-linear FEM)을 통해 롤 포밍 공정에서 버클링에 대해 해석하였다⁽⁴⁾. Cheng, Rhodes 등은 롤 포밍 공정에 의해 생산된 제품에 대해 잔류응력이나 길이방향 변형률을 경계 조건화하여 구조재로서의 버클링 현상을 해석하였다^(5,6). 그러나 대부분의 연구가 간단한 형상의 모델 또는 대칭형의 제품을 대상으로 연구해왔기 때문에 복잡하거나 비대칭 제품의 해석에는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 더블 슬라이드 레일의 한 종류인 언더레일(under rail)중에 상위멤버의 롤 포밍 공정을 설계하였다. 공정해석에 사용된 재료는 냉간압연강판(SCP-1)이며 소재의 인장시험을 통해 재료의 기계적 특성을 파악하였다. 또한 강소성 유한요소 해석에 필요한 유동응력 방정식을 세우기 위해 인장시험을 통해 구한 응력-변형률 선도를 근사 곡선화하였다. 상위 멤버는 롤 포밍 성형 이론에 근거하여 롤간 거리,

성형 단수, 굽힘각 등을 설정하였다. 상위 멤버의 플라워 패턴은 U채널 설계시에 가장 많이 사용되는 플라워 패턴과 단면의 회전 관성 모멘트를 최소화하기 위해 단면을 회전한 플라워 패턴을 이용하여 설계하였다. 이러한 성형물 설계를 바탕으로 롤 포밍 공정을 시뮬레이션하였고, 변형률 분포 및 버클링의 크기를 비교하였다.

2. 냉간압연강판(SCP-1)의 특성

2.1 인장시험 결과

언더레일을 성형하기 위해 냉간압연강판을 사용하였으며 화학성분은 Table 1과 같다. 냉간압연강판은 열연강판에 비해 두께가 얇고 표면이 매끄러우며 가공성이 우수하다. 냉간압연강판의 종류는 KS D 3512에서 규정된 1종(SCP-1, 일반용), 2종(SCP-2, 가공용), 3종(SCP-3, 심가공용) 등이 있다. 본 논문에서 사용한 냉간압연강판 1종은 일반용으로 표면이 미려하고 가장 수요가 많은 제품으로 굽힘이나 간단한 드로잉(drawing)가공에 적합한 강판이다. 냉간압연강판의 재료적 특성을 분석하기 위해 만능인장시험기(Universal Testing Machine, Instron Co.)를 이용하여 측정하였다. 인장시험에 사용된 시험편은 KS D 3512(냉간압연강판 및 강대 규격)에 의해 KS B 0801(금속재료인장시험편 규격)을 참고하여 표준 시험편 5호로 제작하였다. 인장시험 결과 얻어진 냉간압연 강판의 기계적 특성을 Table 2에 나타내었으며, 소성해석에 유용한 값인 진응력-진변형률의 값으로 변환하였다.

2.2 유동응력 방정식

항복 이후의 소성 변형에서는 연속되는 항복응력(yield

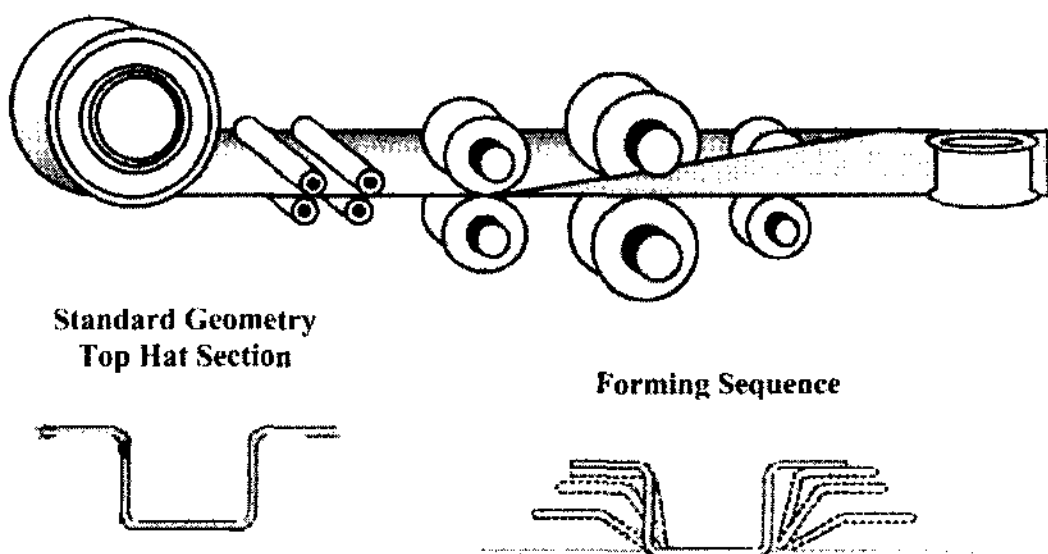


Fig. 1 Roll forming work process

Table 1 Chemical component ratio of SCP-1

Component	C	Mn	P	S	Fe
Component ratio(%)	0.12	0.5	0.04	0.045	99

Table 2 Material properties of SCP-1

Material	SCP-1
Young's modulus	210GPa
Ultimate tensile stress	430.69MPa
Yield stress	187.32MPa
Poisson' ratio	0.3

stress)에 해당하는 재료상수를 항복응력 대신 유동응력으로 나타내며, 유동응력은 탄성변형시의 탄성계수처럼 재료가 가지고 있는 특성이다. 유동응력은 소재가 보여주는 변형에 대한 저항이라고 볼 수 있으며 변형이 진행되어 총변형률이 증가함에 따라 유동응력이 커지는 현상을 재료의 가공경화(work hardening) 또는 변형경화(strain hardening)라고 한다. 금속재료의 가공경화는 소재의 재결정온도 이하에서 변형이 진행됨에 따라 전위가 직접되고, 이로 인해 전위의 후속이동을 방해한다. 또한 결정립의 변형으로 인해 결정립계가 전위이동을 방해하기도 한다. 따라서 전위의 이동에는 많은 전단변형에너지 또는 전단응력이 필요하므로 현상적으로 유동응력의 증가가 수반된다. 가공경화로 인한 유동응력의 증가현상을 나타내는 Swift식을 이용하여 해석하였다.

$$\sigma_f = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

여기서 K 는 소재의 강도에 관계되는 비례계수로 강성계수(stiffness coefficient), $\bar{\epsilon}_0$ 는 초기변위(initial strain), n 은 가공경화지수(work hardening exponent)이다. Swift식의 계수들을 구하기 위해 파워커브를 이용하여 근사 함수로 표현하였다. 근사 함수는 인장시험 결과로부터 탄성구간을 제외한 항복응력부터 최대인장응력 사이의 값으로 근사화하였다. Fig. 2에 근사곡선화한 결과를 나타내었다. 인장시험 결과와 근사곡선화를 통해 얻은 유동응력 방정식의 계수값들을 이용하여 강소성 유한요소 해석시에 필요한 냉간 압연강판(SCP-1)의 유동응력 방정식을 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\sigma_f = 1840(0.00254 + \bar{\epsilon})^{0.39657} \quad (2)$$

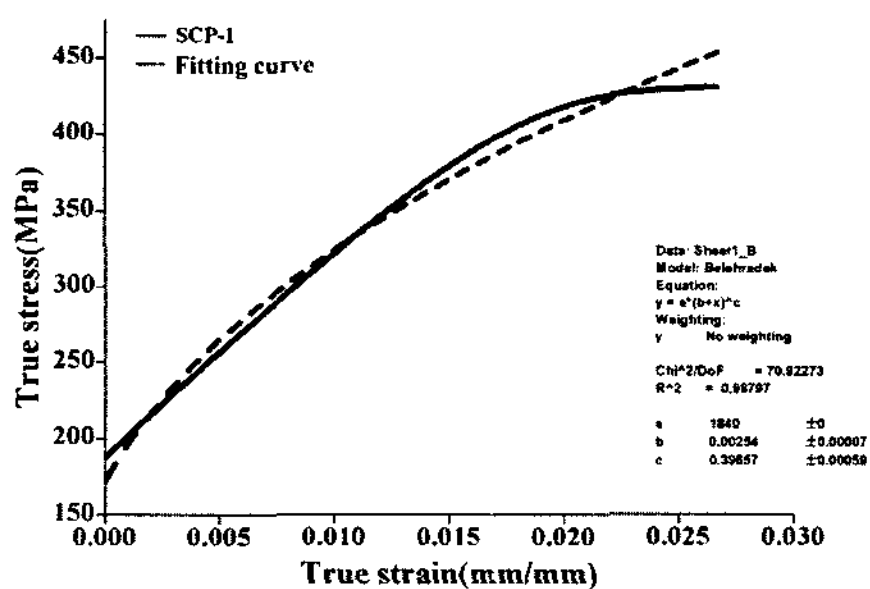


Fig. 2 Curve fitting for SCP-1

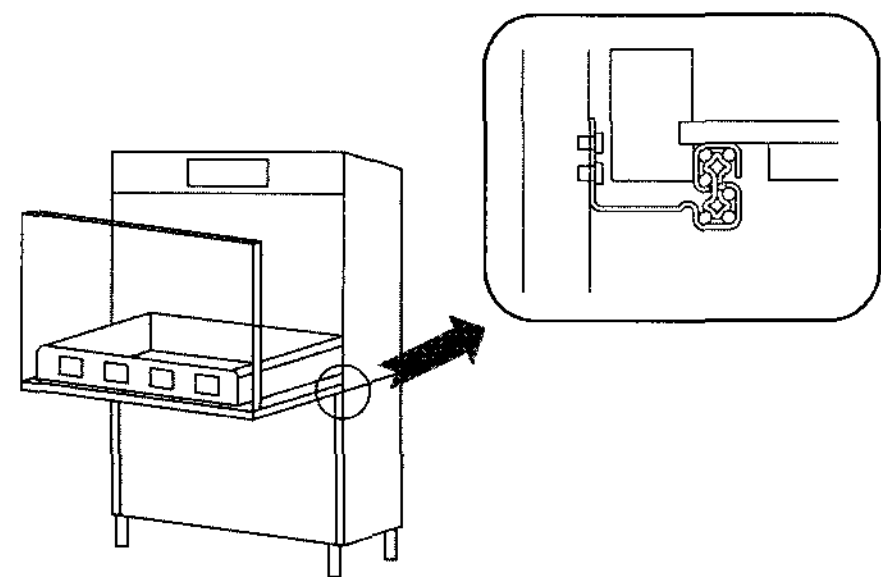
3. 롤 포밍 공정 설계

3.1 언더레일의 모델링

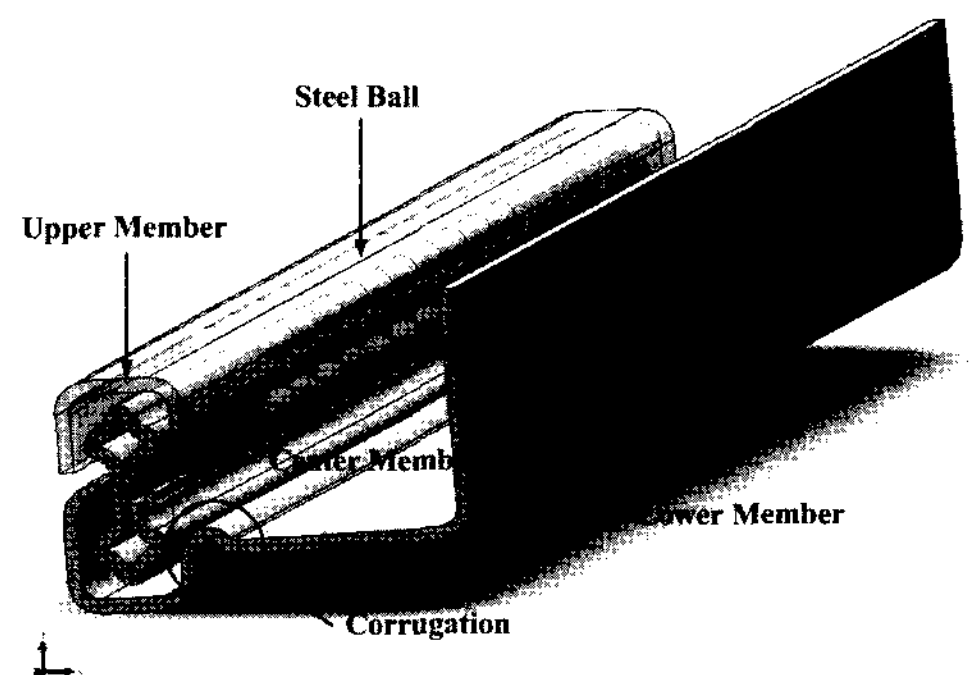
식기세척기에 사용되는 언더레일의 형상은 Fig. 3과 같다. 언더레일은 하위 멤버를 고정하고 상위 멤버에 임의의 케이스를 부착하여 운동한다. 언더레일은 각각의 멤버 사이에 지름이 4mm인 스틸볼을 삽입하여 진동을 최소화하고 부드러운 작동이 가능하다. 스틸볼이 들어가는 굽힘부와 굽힘부 사이의 평행부의 길이는 7.2mm로 설계하였다. 하위 멤버는 세 개의 멤버중 가장 많은 하중을 받을 것으로 예상되므로 하위 멤버에 주름(corrugation)을 주어 강도를 강화할 수 있게 설계하였다.

3.2 상위 멤버의 성형롤 설계

상위 멤버는 반지름이 2mm인 굽힘 부가 3개 있으며, 각각의 굽힘 부를 연결하는 직선부의 길이는 7.2mm 이다. 상위 멤버의 총 성형단수는 Halmos의 경험식을 바탕으로 여분의 패스 및 형태인자 등을 고려하여 9패스로 설정하였다⁽⁷⁾. 롤



(a) Dishwasher



(b) Under rail

Fig. 3 Modeling of under rail

포밍 공정에서의 신장량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, 롤과 롤 사이의 수평거리가 n 배 증가할 때 신장량은 2^n 배 감소한다.

$$e = \frac{\sqrt{l^2 + 2.4674h^2} - l}{l} \times 100 \quad (3)$$

여기서 l 은 롤과 롤 사이의 수평거리, h 는 단면의 높이이다. 롤 포밍 공정의 롤간 거리는 1패스부터 6패스까지 330mm로 설정하고, 7패스부터 9패스는 많은 변형이 예상되므로 롤간 거리를 660mm로 설정하여 신장량을 줄이고자 하였다. 비대칭 단면의 경우는 단면의 수직 중심축으로부터 양끝의 변형량의 차이로 인해 버클링이 발생할 가능성이 크다. 따라서 플라워 패턴(flower pattern) 설계시에 대칭성을 갖도록 설계하면 에지에서 변형량의 크기가 같게 되므로 성형에 의해 발생하는 응력의 크기가 같아져서 제품에 작용하는 힘의 크기도 일정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 비대칭인 상위 멤버가 대칭성을 갖도록 플라워 패턴을 설계하였다. 성형롤을 설계할 때 패스수가 정해지면 먼저 수직 가이드면 (vertical guide plane, V_p)의 위치를 결정해야 한다. 에지 응력(edge stress)은 에지 운동 경로(ET ; Edge Travel)와

관련이 있다. 따라서 수직 가이드면을 기준으로 좌우의 에지 운동 경로가 비슷하도록 설정해야 에지 응력을 최소화할 수 있다. 플라워 패턴의 수직 가이드면을 Fig. 4 (a) 같이 평행부의 중앙에 둘 경우 에지 운동 경로의 비는 1 : 1.6이다. ET-1과 ET-2의 길이의 비가 유사하도록 Fig. 4 (b)와 같이 수직 가이드면의 위치를 바꾸면 에지 운동 경로의 비는 1.2 : 1이 된다. 또한 소재의 양단에 굽힘을 가하면 굽힘력의 수평 벡터에 의해 평행부가 휘어지는 현상이 발생한다. 따라서 상위 멤버의 평행부가 휘어지는 현상을 방지하기 위해서 단면의 굽힘 강성 계수(flexural rigidity coefficient)가 최소가 되도록 플라워 패턴의 단면을 회전한다. Fig. 4 (b)의 최종형상의 단면을 원점을 기준으로 10° 씩 시계방향으로 회전하여 최종 제품의 단면의 회전에 따른 관성모멘트를 구하여 Table 3에 나타내었다. 각각의 관성모멘트를 구한 결과 20° 와 30° 를 회전했을 때 관성모멘트가 작다.

최종형상의 단면을 20° 회전하였을 경우와 30° 회전하였을 경우 성형롤을 설계하여 Fig. 5에 나타내었다. 성형롤이 플라워 패턴의 원점을 기준으로 소재와 접촉하는 길이를 비교한 결과, Fig. 5 (a)와 같이 단면을 20° 회전하였을 때, $L_1 : L_2$ 는 1.44 : 1이었고, Fig. 5 (b)와 같이 단면을 30° 회전하였을 때, L_1 과 L_2 의 길이비는 1.27 : 1이다. 단면을 20° 회전한 경우에 회전 관성모멘트가 최소가 되지만 성형롤과 소재의 접촉 길이를 고려하여 최종제품의 단면을 30° 회전하였다.

성형 공정중 굽힘부가 받는 응력은 식 (4)와 같다.

$$\sigma = \frac{e^2 \times E \times (1 - \cos \alpha)}{l^2} \quad (4)$$

여기서 e 는 다리부의 길이, E 는 영률, α 는 굽힘각, l 은 롤간 거리이다. 본 논문에서는 큰 성형각의 변화인 "Jump" 현상을 줄이고, 각각의 굽힘부가 받는 응력이 유사하도록 다

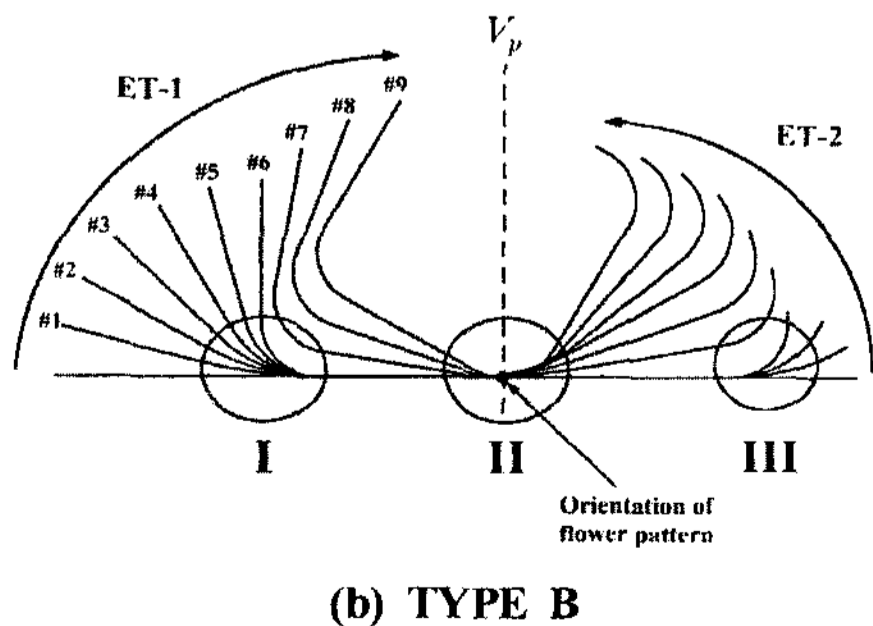
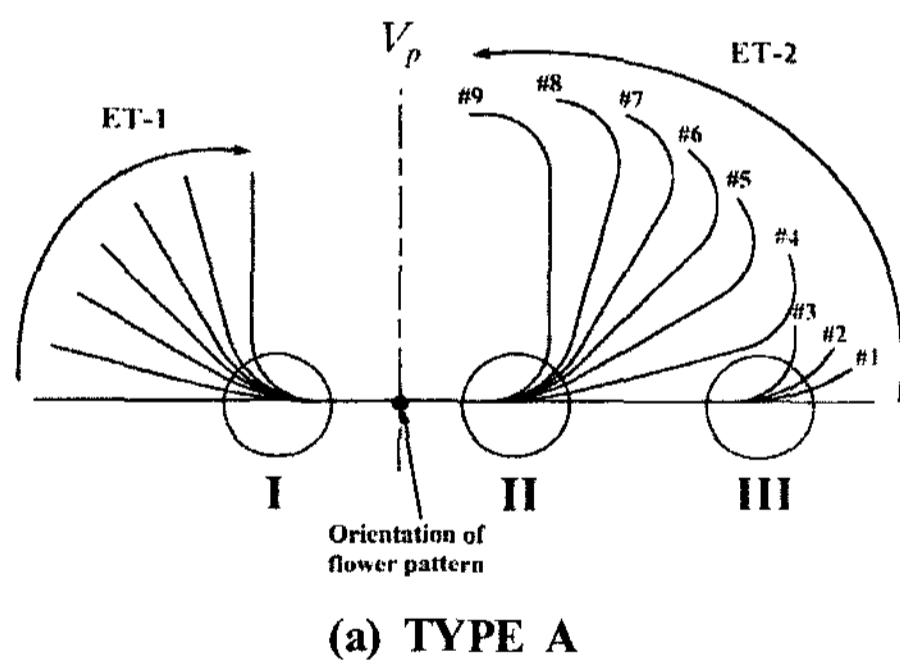


Fig. 4 Two types of flower pattern for upper member

Table 3 Moment of inertia according to rotation of cross-section

Rotation angle	I_{xx}
0°	$1054.32mm^4$
10°	$964.44mm^4$
20°	$928.79mm^4$
30°	$937.79mm^4$
40°	$993.86mm^4$

리부의 길이가 같은 패스는 굽힘각을 같게 하고, 다리부의 길이가 다른 경우에는 다리부의 길이에 따라 굽힘각을 조절했다. TYPE A의 경우, I의 굽힘부에서 다리부의 길이는 11.598mm이고 II의 굽힘부에서는 15.996mm로써 다리부의 길이는 다르지만 대칭성을 이용하기 위해 굽힘각을 15°씩 일정하게 증가하였고, III의 굽힘부는 다리부의 길이가 0.6mm로 매우 짧으므로 굽힘각을 30°로 하였다. TYPE B의 다리부 길이는 I의 굽힘부에서 11.598mm, II의 굽힘부에서 18.798mm, III의 굽힘부에서 0.6mm로 II의 굽힘부가 가장 크고 다음은 I, III 순이다. 따라서 굽힘각의 증가는 I에서 15°, II에서 10°, III에서 30°씩 일정하게 증가하였다. 롤갭(roll gap)의 크기는 공차 및 코팅 크기, 엠보싱 크기 등을 고려하여 설계하지만, 본 논문에서는 이런 인자들을 제외하고 오직 소재의 두께만을 고려하여 1.6mm로 설정하였다. 또한 성형롤에 리드인 플랜지(lead-in flange)를 추가하여

소재의 플랜지 부분이 다음 패스로 원활히 이동하도록 설계하였다.

4. 롤 포밍 공정 해석

4.1 해석조건

롤 포밍 공정을 해석하기 위한 많은 방법들이 제시되어 왔지만 최근 가장 범용적으로 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 유한요소법중에서 롤 포밍 공정 해석에 유용한 해석 방법인 강소성 유한요소법을 이용하여 언더레일의 성형 공정을 시뮬레이션하였다. 롤 포밍 공정의 해석에 사용된 프로그램은 SHAPE-RF이며, 이 프로그램은 강소성 유한요소법을 통해 형상의 예측 및 버클링 현상을 예측한다⁽⁸⁾. 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 단축할 수 있고 컴퓨터의 메모리 관리가 효율적이다. 하지만 정확한 해석을 할 수 없고, 비드(bead)와 같은 복잡한 접촉 현상을 포함하는 정적인 문제에 적용할 경우에는 해석결과에 심한 진동을 야기할 수 있다. 반면에 정적-내연적 시간 적분법은 큰 시간간격을 가지며 각 단계마다 힘의 평형을 맞추어 (n+1)번째 해를 구할 때 여러 번 축차하여 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^(9,10). 본 논문에서는 롤 포밍 공정을 보다 정확히

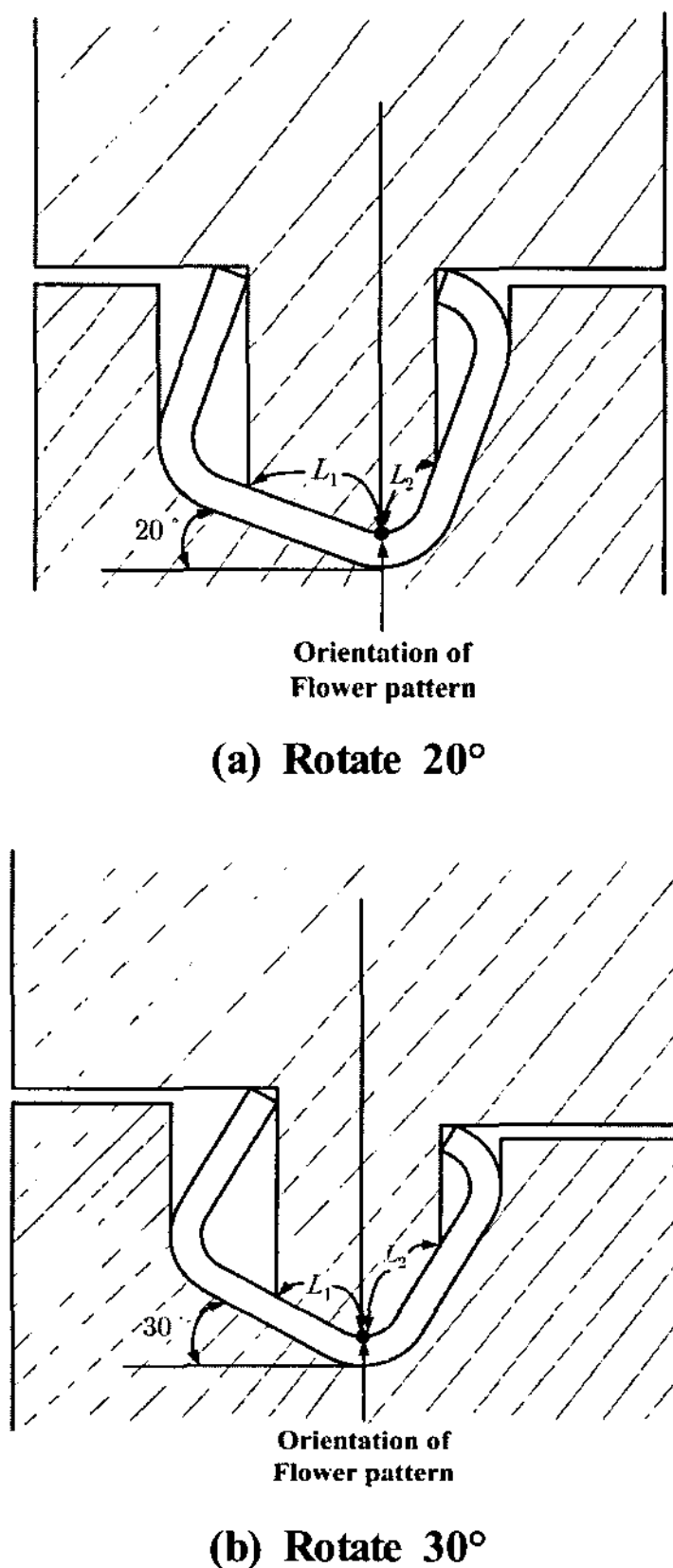


Fig. 5 Shape of forming roll according to rotation of cross-section

해석하기 위해 정적-내연적 시간 적분법에 의해 해를 구하였고, 금속 띠판을 연속체로 가정하고 해석하였다.

롤 포밍 공정 해석에 사용된 입력 조건은 Table 4와 같다. 공정 해석시에 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 멀티패스해석(multi pass analysis)을 하였다. 해석을 위해 사용된 컴퓨터는 Intel Pentium(R) D 3.00GHz이고, 램은 1.50GB이다. 공정해석에 사용된 메쉬는 3차원 8절점 육면체 메쉬(hexahedral mesh)를 설정하고, 해석 시간을 줄이기 위해 굽힘부에는 메쉬를 많이 생성하고 평행부에는 메쉬를 적게 하였다. 상위롤과 하위롤의 회전비율은 1 : 1로 설정하여 롤의 회전속도 차이로 인한 내부 응력의 증가를 줄이고자 하였다. 롤의 회전속도는 1 rad/sec로 설정했다. 롤의 표면 온도는 300K로 설정하여 산업현장에서 사용하는 롤의 표면 온도와 유사하게 설정하였다. 또한 성형률을 강제로 설정하여 성형 공정중에 롤의 마모가 없게 하였으며, 마찰계수 이외의 마찰인자를 배제하여 성형 공정중에 마찰의 증가로 인해 소재의 중심부가 휘어지는 현상을 방지하였다. 해석에 사용된 솔버는 일반적으로 안정적이고 해석 시간이 빠른 스파스 매트릭스 솔버(sparse matrix solver)를 사용하였다.

4.2 해석결과 및 고찰

시뮬레이션을 통해 구한 각 패스에서의 단면 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 실제의 공정에서는 언코일러에 소재가 감겨있어 발생하는 단면방향 휨(cross-bow)과 길이방향 휨(longitudinal bow)현상을 보상해 주기 위해 플래트너 역할을 할 수 있도록 각 멤버의 롤을 설계할 때 첫 패스를 평평하게 설계한다. 하지만 해석과정에서 소재를 이상적인 경우로 가정했기 때문에 각 멤버의 첫 번째 롤은 생략하고 해석하였다. 상위 멤버의 설계상 필요한 L, M의 평행부 길이는 11.25mm이다. 해석결과로부터 예측된 평행부의 길이(L, M) 및 굽힘

각(I, II, III)을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 알 수 있듯이 평행부의 길이는 TYPE B의 경우 최초 설계한 길이를 만족했으며, 굽힘각은 TYPE A, B에서 스프링백 현상으로 $\pm 1 \sim 2^\circ$ 정도의 오차를 보였지만 언더레일의 조립에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 상위 멤버의 최종 형상을 나타낸 것으로 점선과 같이 Edge-1에서부터 Edge-2까지 단면 외곽부의 변형률 분포를 예측하였다. Fig. 8은 상위 멤버의 총 유효변형률을 나타낸다. 두 개의 TYPE 모두 양끝의 에지에서 가장 많이 변형되었는데, 단면을 회전하지 않은 TYPE A의 에지부에 비하여 단면을 회전한 TYPE B가 에지부에서 변형률이 감소

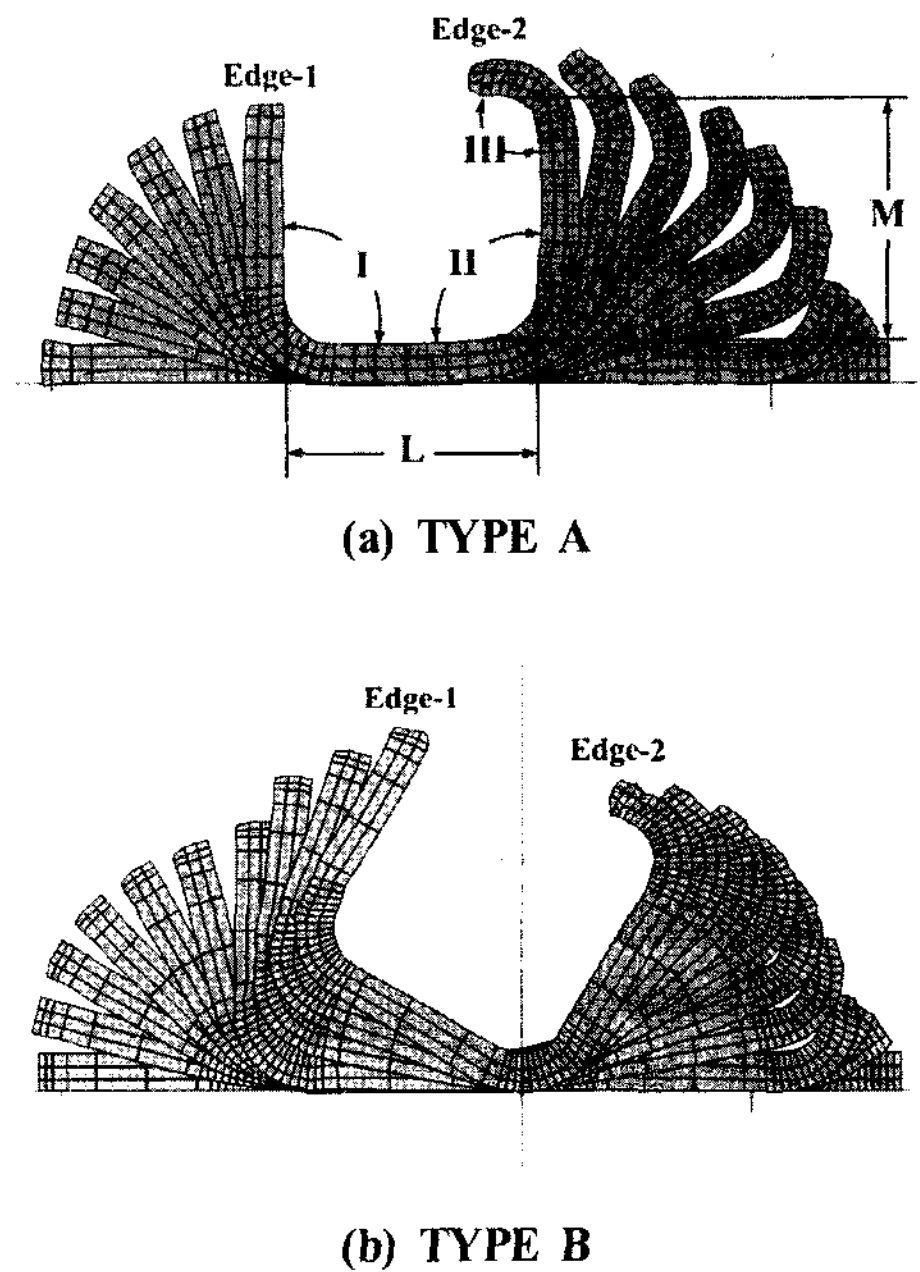


Fig. 6 Flower pattern of upper member estimated after the 9-pass

Table 5 Estimation of straight element and curved element

	Design	TYPE A	TYPE B
L	11.25mm	10.56mm	11.29mm
M	11.25mm	10.24mm	11.27mm
I	90°	92°	89°
II	90°	91°	90°
III	90°	95°	93°

함을 확인할 수 있다. 또한 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. 9에 최종형상의 단면에 대해 길이방향 변형률의 분포를 나타내었다. 최대 길이방향 변형률의 편차는 TYPE A에서 0.092%, TYPE B에서 0.032%로써 TYPE A가 TYPE B에 비해 약 3배 이상 크게 나타났다. 최대 길이방향 변형률의

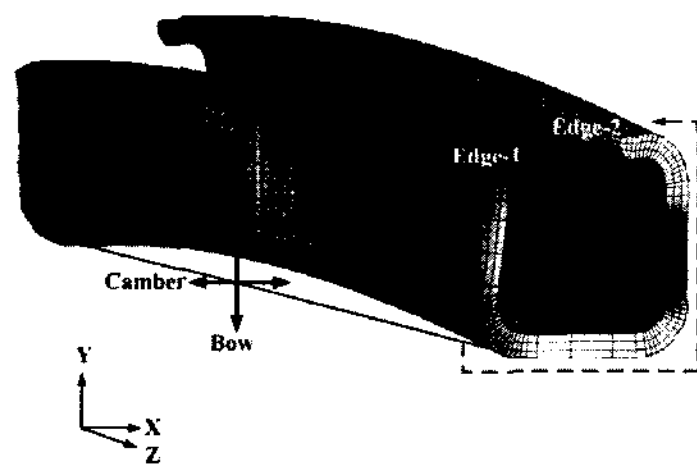


Fig. 7 Predicted finished shape of upper member

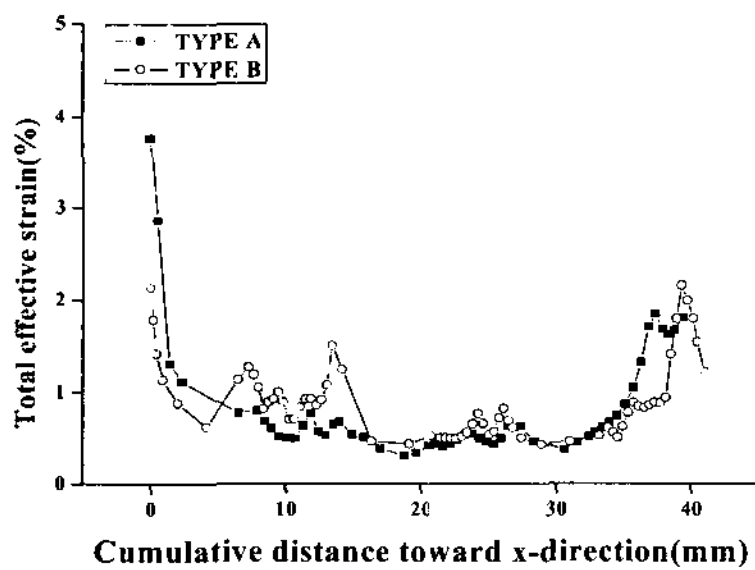


Fig. 8 Comparison with total effective strain between two types

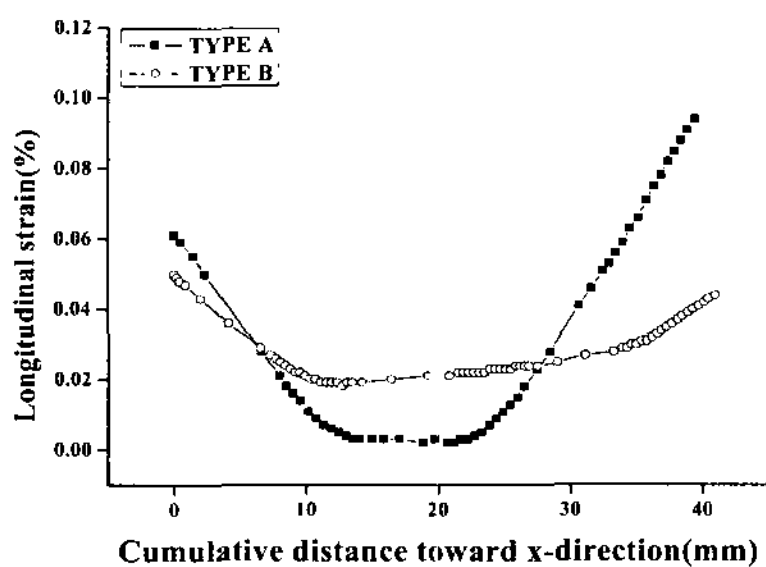
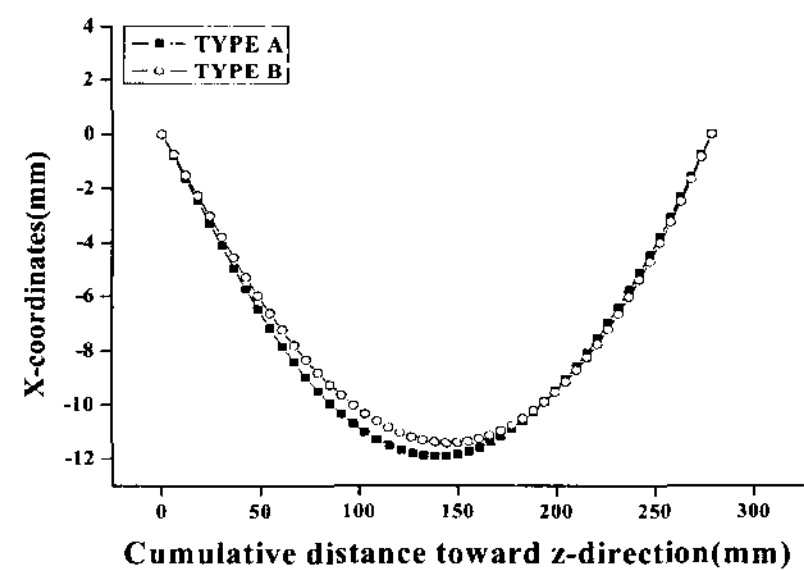


Fig. 9 Comparison with longitudinal strain between two types

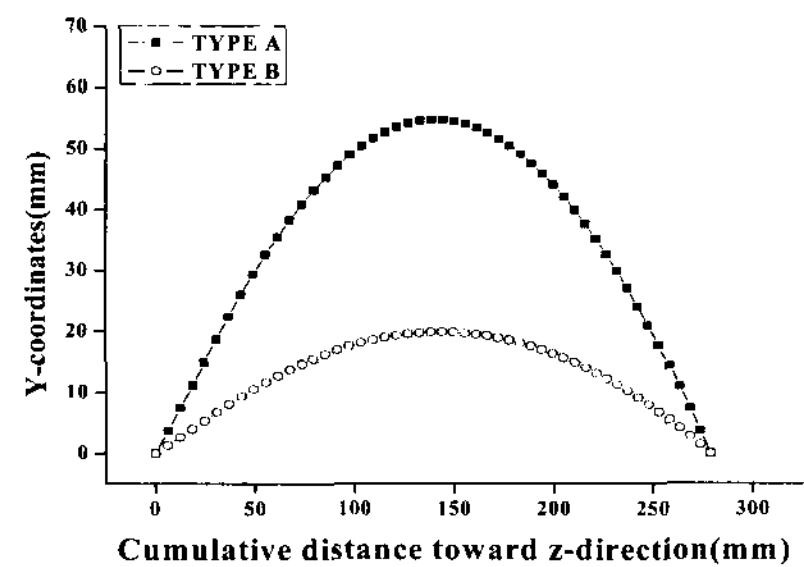
차이가 클수록 버클링현상에 큰 영향을 주므로 TYPE A가 TYPE B에 비해 더 크게 나타날 것으로 예측되었다. 양끝의 에지부에서 길이방향 변형률의 차이 또한 TYPE A에서 0.033%, TYPE B에서 0.006%로 TYPE A에서 크게 나타났다. 이와 같은 길이방향 변형률의 차이를 고려할 때 TYPE A가 TYPE B에 비해 버클링 현상이 크게 나타날 것으로 예측되었다.

변형률 분포에 따른 결과와 버클링의 상호 관계를 알아보기 위해 프로그램의 후처리 과정(post-process)을 통해 캠버와 보우의 크기에 대해 예측하여 Fig. 10에 나타내었다. 캠버는 수평면에 대해 X축 방향으로의 힘량이고, 보우는 Y축 방향으로의 힘량이다. 캠버의 크기는 TYPE A에서 11.905mm, TYPE B에서 11.416mm로 예측되었다. 보우의 크기는 TYPE A에서 54.575mm, TYPE B에서 19.828mm로 예측되었다. 이는 길이방향 변형률의 편차가 크게 나타났던 TYPE A에서 모두 크게 나타났으며, 길이방향 변형률의 편차가 클수록 버클링현상도 크게 나타남을 확인하였다.

이상의 고찰을 통해서 상위 멤버의 성형시에 TYPE A의 플라워 패턴 보다 TYPE B의 플라워 패턴을 이용하여 제품



(a) Camber



(b) Bow

Fig. 10 Comparison with buckling between two types

을 성형했을 때 원하는 제품 형상에 가장 적합하고, 버클링 현상이 작은 제품을 성형할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 언더레일을 설계하고, 강소성 유한요소법을 이용하여 상위멤버를 시뮬레이션하였다. 유한요소 해석에 사용된 재료는 냉간압연강판이고, 인장시험을 통해 재료의 특성을 파악하였다. 냉간압연강판(SCP-1)의 강소성 유한요소 해석을 위해 Swift식을 이용하여 유동응력 방정식을 구하였다. 상위 멤버의 성형 단수는 성형기의 성능을 고려하여 총 9개의 패스로 설정하였다. 굽힘각은 "Jump"현상의 발생을 최소화하기 위해 균등하게 설정하였다. 또한 플라워 패턴은 U-채널 설계시에 사용되는 일반적인 형태(TYPE A)와 회전관성 모멘트를 최소화하기 위해 단면을 회전한 형태(TYPE B)의 두 가지 형태로 설계하였다. 두 TYPE에 대해 시뮬레이션한 후 변형률 분포와 버클링현상을 비교하였다.

- (1) 최종 제품의 단면 형상이 비대칭일 경우 관성모멘트가 최소가 되도록 단면을 회전하여 설계하면 에지에서의 변형률이 작고, 길이방향 변형률이 작다.
- (2) 변형률 분포가 버클링에 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위해 캠버와 보우의 크기에 대해 예측한 결과 총 유효변형률 및 길이방향 변형률의 편차가 작았던 TYPE B가 TYPE A에 비해 버클링이 작게 발생하였다.
- (3) 언더레일의 상위멤버는 단면을 회전하지 않은 TYPE A에 비해 단면을 회전한 TYPE B로 설계하면 더욱 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Wick, C., Benedict, J. T., and Veilleux, R. F., 1984, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*,

Society of Manufacturing Engineers, Michigan, Vol. 2, Chapter 8.

- (2) Kiuchi, M., 1973, "Analysis Study on Cold Roll Forming Process," *Report of the Inst. of Ind Sci.*, Vol. 23, pp. 1~23.
- (3) 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*, pp. 423~427.
- (4) Farzin, M., Salmani, M., and Shameli, E., 2002, "Determination of Buckling limit of Strain in Cold Roll Forming by the Finite Element Analysis," *Materials Processing Technology*, Vol. 125~126, pp. 626~632.
- (5) Grondin, G. Y., Elwi, A. E., and Cheng, J. J., 1999, "Buckling of Stiffened Steel Plates-A Parametric Study," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 50, pp. 151~175.
- (6) Rhodes, J., 1996, "A Semi-analytical Approach to Buckling Analysis for Composite Structures," *Composite Structures*, Vol. 35, pp. 93~99.
- (7) Halmos, G. T., 2005, *Roll Forming Handbook*, CRC Taylor & Francis, New York, Chapter 5.
- (8) Hong, S. M., Kim, D. S., Yun, H. J., and Kim, N. S., 2000, "Development of Roll Forming Simulation Program," *Society of CAD/CAM Engineers*, pp. 647~652.
- (9) Jeong, D. W. and Yang, K. B., 1999, "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.
- (10) Ahn, D. G., Jung, D. W., Yang, D. Y., and Jung, W. J., 1996, "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.