

# 롤포밍공정에서의 스크래치 결함에 대한 연구

홍 석 무\* · 김 낙 수†

(2000년 10월 10일 접수, 2001년 6월 9일 심사완료)

## Study on Scratch Defect of Roll Forming Process

Suk-Mu Hong and Naksoo Kim

**Key Words :** Roll Forming(롤포밍), Rigid plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Forming Length(성형길이), W-Bend Forming(W-형 굽힘), Scratch(스크래치)

### Abstract

In this paper, modeling of the multi-pass roll forming process with the finite element method and defect prediction in roll forming process are presented. In the roll forming process, there occurs the defect of scratch. It appears on tubes because of the friction between the strip and the roll, the unexpected sliding velocity and the contact pressure when fabricating the tubes. The surface of the product will be not uniform due to the defect. The scratch can be predicted with the simulation modeling of the finite element method, and can be avoided by modifying the design.

### 1. 서 론

롤포밍공정은 단조나 프레스 공정에서 생산할 수 없는 길이가 같고 단면이 복잡한 형상의 제품을 패스별로 한 쌍 이상의 롤을 사용하는 성형패스를 거쳐 최종제품에 이르기 까지 제조하는 공정을 말한다. 이처럼 롤포밍공정으로는 다양하고 복잡한 단면 형상의 제품을 만들어 낼 수 있기 때문에 특히 파이프 생산이나 건축 이형재 및 자동차, 항공 산업에 이르기 까지 광범위하게 이용되고 있다(Fig. 1). 하지만 산업현장에서 요구하는 만큼 충분한 이해가 수반되지 않았기 때문에 새로운 제품의 설계와 응용에는 많은 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 문제를 해결함과 더불어 공정설계의 효율성을 높이기 위해 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 프로그램이 더욱 발달하고 있다. 특히 근래에 유한

요소해석을 이용하여 정확하고 효과적인 해석을 시도하고 있다.

Kiuchi 등은 해석적인 롤의 형상에 따라서 변형 후의 판재 단면을 미리 가정한 후, 롤 스탠드에서 적당히 떨어진 강제운동 영역에서는 판재 내 소재의 속도가 길이방향 성분만을 갖고, 롤출구부를 빠져 나오는 판재의 속도 성분도 역시 길이방향 성분만을 갖는다는 점에 착안하여 변형 영역에 있는 판재의 형상을 정현함수(Sine function)에 한 개의 매개변수를 포함시켜서 속도장을 계산한 후, 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다.<sup>(1,2)</sup> 이 방법은 적은 계산량으로도 적절한 변형형상의 예측이 가능한 장점을 갖는다. 그러나 응력, 변형률과 같은 역학적 변수를 계산할 수 없고, 변형 후의 최종형상이 롤형상에 맞추어 미리 가정된 상태이므로, 결함 예측이 불가능하다는 한계를 가지고 있다.

Bhattacharyya 와 Pantan 등은 실험적인 결과를 바탕으로 변형영역을 몇 개의 구간으로 나눈 후 각 영역에 대하여 영역의 길이 및 굽힘 각도를 예측하는 식을 개발하였다.<sup>(3,4)</sup> 이 방법은 개발된 실험식에 실험상수를 결정하여 단순한 형상의 롤포

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

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

TEL : (02)334-0560 FAX : (02)334-0561

밍을 해석하고, 이에 근거하여 소재의 길이방향 변형률을 예측하였기 때문에 사전 실험을 통하여 실험식에 사용되는 상수를 결정하지 못하면 금형 설계에 도움을 줄 수 없고 복잡한 형상의 롤포밍 공정에는 적용이 불가능한 단점을 지닌다. Jimma와 Ona는 롤포밍 시 판재가 접혀지는 각도와 수를 롤 패스 수와 연관하여 구분한 후, 필요한 패스 수를 형상 인자와 연관시킨 설계용 경험식을 개발하였다.<sup>(5-7)</sup>

근래 롤포밍에 관한 광범위한 연구에도 불구하고 실제 현장에서의 롤설계와 급힘 순서 등의 대부분의 설계 과정은 롤설계자의 경험에 의존하는 실정이다. 도면상의 설계와 실제 공정에서 생기는 차이를 극복하지 못해 설계-제작-설계변경을 반복하면서 새로운 라인을 제작하게 되는데 이러한 시행착오는 성형 롤의 단수가 증가함에 따라 또는 작업자의 숙련 정도에 따라 엄청난 물적 시간적 낭비를 초래하게 된다. 제품 결함 중 잔류 응력으로 인한 굽힘, 뒤틀림 등은 제품이 출시된 후에야 알 수 있기 때문에 시뮬레이션을 통해 미리 결함을 발견하고 설계를 수정한다면 이러한 시행착오에 따른 낭비를 막을 수 있을 것이다.

롤포밍공정에서 발생하는 여러 결함들 중 스크래치(scratch)라 불리는 결함은 소재가 포밍 입구 안쪽으로 들어 가면서 국부적인 변형을 받아 표면에 굽힘 흔적을 갖는 것이다. 이러한 결함으로 인해서 도색의 불균형을 가져오거나 특히 도색 없이 최종제품으로 출하될 때 외관상 큰 결함으로 작용된다. 그러나 스크래치 결함에 대한 연구는 현재 알려진 바 없다.

스크래치 결함의 경우 성형 도중 발견할 수 있기 때문에 현장에서는 단순히 성형 단수를 증가시켜서 1 패스 당 성형량을 감소시켜주는 방법을 주로 사용하고 있다.

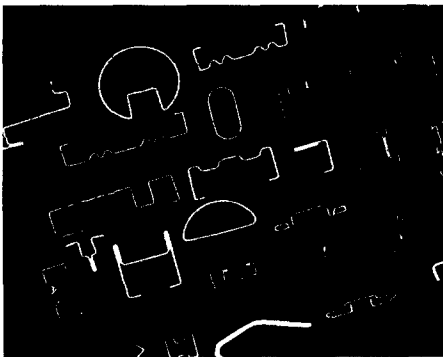


Fig. 1 Products using roll forming

본 연구에서는 롤포밍 전용 유한요소해석 프로그램 “COPRA FEA RF”을 원형 파이프 공정에 적용하여 시뮬레이션 하였고, 시뮬레이션 결과로부터 스크래치의 발생 위치를 예측하고 포밍 각도 및 곡률을 적절히 재배치하여 성형 단수의 증가 없이 최적의 성형 롤설계를 제시하고 스크래치 결함을 제거할 수 있음을 제안하고자 한다.

## 2. 수치 해석 방법

롤포밍 해석을 위한 시뮬레이션 프로그램에서는 3 차원 강소성 유한요소법<sup>(8)</sup>을 사용하였다. 각 패스를 하나의 검사체적으로 가정하여 동적 정상상태 해석을 수행하였다.

비정상 상태 해석 시는 소재 표면의 변화를 바로 알 수가 있으나 정상상태 해석에서는 형상을 미리 알 수가 없으므로 일정 자유표면을 가정하여 해석을 수행하고 해석 결과를 바탕으로 자유표면을 보정하여 해석을 반복하는 기법을 주로 사용한다.

시뮬레이션에서는 자유표면의 초기 결정을 위하여 일반화된 평면 변형률 조건을 사용하여 압연 방향의 속도장을 가정하고 얻어진 경계조건을 초기 경계조건으로 사용하였다. 그리고 3 차원 정상상태의 유한요소 해석을 통해 속도장을 구하고 경계조건 및 자유표면을 보정하는 반복법을 통해 최종적인 형상을 결정할 수 있다. 또한 구해진 속도장을 기반으로 변형률, 압력, 토크 등의 정보를 얻는다.<sup>(9-12)</sup>

## 3. 롤포밍공정에서의 스크래치 결함의 해석

### 3.1 파이프 제조 공정

본 연구에서 제시된 롤포밍공정의 예는 W-굽힘 성형(W-bend Forming)을 이용한 파이프 제조 공정이다. 알려진 바와 같이 W-굽힘 성형이란 W 모양의 단면을 얻기 위해 성형 롤 #1 패스에서 굽힘을 가해 소재의 중심부에서는 역굽힘 모양을 갖고 에지(edge) 부근에서는 다른 공정 보다 작은 곡률 변화를 갖도록하여 스프링 백을 방지하며 에지 부근의 두께 변화를 최소화 시키는 공정이다 (Fig. 2).

일반적인 롤포밍공정은 브레이크 다운 (break-

down)패스, 핀(fin)패스, 스퀴징(squeezing) 등으로 구성되며 용접 후에는 형상 및 치수 정밀도를 주기 위해 사이징(sizing) 패스를 거치게 한다. 용접 직전까지 전체 10~20 패스 정도의 롤포밍 라인이 구성되는데, 본 연구에서는 스크래치의 발생을 보기위해 전체 라인을 15 패스로 임의로 설정하였으며, #1~#4 패스까지는 브레이크 다운 타입으로 8 패스를 설계하였고, 이후 #F1 패스~ #F2 패스에도 사이드 패스를 포함시켜 4 패스로 만들었으며, 이후 스퀴징, 심가이드(seam guide) 패스 등의 3 패스로 설정하였다(Fig. 2).

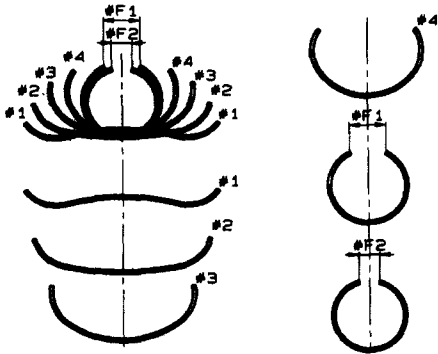


Fig. 2 W-bending procedure

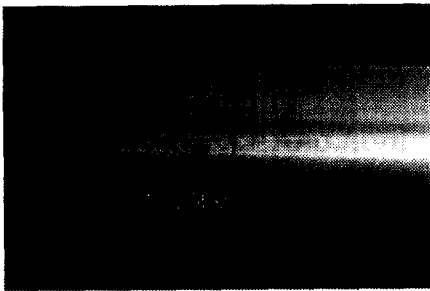


Fig. 3 Defect of scratch at final product (The arrows show the defect of scratch.)

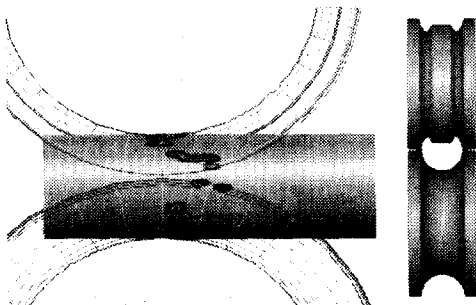


Fig. 4 #F1 pass (HR case)

### 3.2 스크래치 결함의 발생 원인과 특성

#### 3.2.1 스크래치의 발생

Fig. 3 과 같이 롤포밍공정에서 생길 수 있는 결함 중 스크래치 결함은 롤 입구에 진입하는 소재가 롤 중심에서 멀리 떨어진 지점에서 롤과 과도하게 밀착할 때 롤에 의해 굽힘으로써 발생한다. 튜브 생산라인의 경우 몇 단의 성형 롤 패스와 핀 패스 그리고 용접 패스 등으로 공정이 크게 구분되는데, 스크래치 결함은 소재 폭 방향의 구속이 적은 개방된 단면의 패스에서 폭 방향 구속이 되는 폐쇄 단면의 패스를 거치면서 발생하게 된다. 즉, 일반적으로 #F1 패스에서 주로 발생하게 된다 (Fig. 3, Fig. 4).

#### 3.2.2 스크래치 발생 원인

튜브 공정 설계에서 각 성형패스를 통해 굽힘부분을 미리 설정하고 패스별로 각도를 분배하고 있다. 그러나 롤설계자는 소재가 각 패스별 롤들을 통과하면서 생기는 3 차원 변형을 미리 예측하지 못하기 때문에 실험 결과와 현장 경험을 토대로 하고 단순 기하학적 계산을 통해 롤포밍 라인을 설계한다. 소재의 실제 거동은 소재의 특성에 따라 또는 라인 세팅에 따라 설계자의 의도와 틀릴 수 있다. 따라서 롤설계자가 설계 시 굽힘을 예상하지 않았던 부분에서 롤과 소재가 접촉할 수 있다. 롤과 소재가 닿았을 경우에는 소재에 압력이 증가하게 되고 그 부분에는 상대적인 속도 차이가 생기게 되며 소재는 압연 방향으로 굽힘-퍼짐-굽힘의 과정을 반복함에 따라 변형률이 누적되게 된다. 따라서 이와 같은 스크래치는 예상하지 않은 굽힘부에서 국부적인 유효 변형률의 증가와 상대 속도의 급한 증가 등으로부터 발생 위치를 예측할 수 있다. 또한 롤포밍공정의 접촉 영역 특성에 따라 스크래치 발생 지점을 예측할 수 있다.

#### 3.2.3 롤포밍공정의 접촉 특성

일반적인 롤포밍공정의 접촉 특성은 Fig. 5 를 통해 나타내었다. 롤포밍공정과 형상압연(Shape rolling)의 접촉 특성에 대한 비교에서, 형상압연은 면 접촉 특성(b)을 갖고 롤포밍에서는 라인 접촉의 특성(a)을 갖게 된다. 이와 같은 특성은 형상압연이 단면 변화를 통해 형상을 만들어가는 것을 목적으로 하는 반면 롤포밍은 연속적인 굽힘작업으로 두께 변화를 최소화 하며 최종 형상을 얻고자 하기 때문이다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 접촉 지점들 중에서 롤포밍 접촉 특성상 가질 수 있는 접촉라인에서 벗어난 접촉점들은 접촉 가능성

을 고려하지 못하여 발생하는 것으로 보인다.

위에서 구별된 접촉점들은 속도 편차와 압력 분포에 있어 주변의 다른 점들과 큰 차이를 보이는 특성을 갖는다(Fig. 6).

3.3 재료의 성질 및 공정 조건

본 연구에 사용된 시뮬레이션 프로그램은 강소성 유한요소법을 이용한 롤포밍 전용 해석 프로그램 “COPRA FEA RF”을 사용하였으며, 이 시뮬레이션 프로그램은 참고문헌(9-12)을 통하여 신뢰성을 검증한 바 있다. 본 연구를 위해 시뮬레이션에 사용된 재료는 HR(열연 코일)과 STS 409(스테인레스강 409)를 사용하였으며, 두 재료는 일반적인 파이프 제조공정에서 주로 사용되는 재료이며, 재료의 성질은 Table 1 에 나타내었다. 해석에 필요한 시뮬레이션 조건 중 롤속도와 마찰계수 등은 가정된 값을 사용하였다. 해석 시간의 단축을 위해 대칭조건을 적용하여 1/2 모델을 고려하였으며 각 패스별로 단면 70 개의 요소와 31 개의 단면을 사용하였으므로, 3 차원 요소 망 2100 개가 사용되었다. 해석을 위해 사용된 컴퓨터는 500MHz 의 CPU 를 이용하였으며 각 패스의 해석에는 대략 2 시간 가량이 소요되었다. 성형 단은 #F1 에서 결정되는 핀 패스 각도를 각 패스에 균등 배분하여 사용하였으며, 패스별 축간거리는 롤의 최대 직경을 고려하여 300mm 을 사용하였다.

3.4 시뮬레이션을 통한 스크래치 결함 예측

롤포밍공정의 해석은 연속 굽힘 공정이므로 변형률은 #1 패스에서 최종 패스까지 누적이 되므로 시뮬레이션에서는 전체 15 패스에서 각 패스별로 하나의 검사체적(Control volume)으로 보고 연속 해석을 하게 된다. 전체 15 패스 중 9 패스까지의 연속 굽힘 공정을 Fig. 7 에 나타내었다.

시뮬레이션을 통해 설계 시 굽힘 영역 설정에서 벗어난 접촉점과 상대 속도차이가 커서 변형률

이 누적되는 지점을 근거로 스크래치를 예측하였다.

3.4.1 굽힘 영역 설정에서 벗어난 접촉점

앞에서 제시한 롤포밍공정의 라인 접촉의 경향을 참조하면 물설계 시 #F1 패스에서 굽힘 영역으로 설정하지 않은 부분을 찾을 수 있다. 굽힘 영역 설정에서 벗어난 접촉점을 스크래치의 발생 영역으로 가정하면 실제 튜브 제품에서 스크래치의 발생 부분과 일치함을 확인할 수 있었다(Fig. 3, Fig. 6).

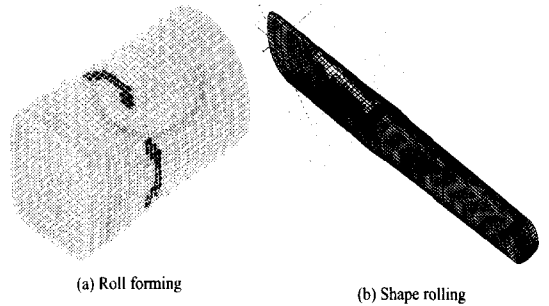


Fig. 5 Characteristic of contact area in roll forming



Fig. 6 Deformed shape does not agree with initial design in the contact area

Table 1 Conditions of Simulation

Material	HR	STS
Initial thickness (mm)	2.0	2.0
Initial width(mm)	78.75	78.75
Roll velocity(m/s)	0.1	0.1
Flow stress, $(\bar{\sigma})$ (Mpa)	$629.21 \times (0.0109 + \bar{\epsilon})^{0.17}$	$689.45 \times (0.00337 + \bar{\epsilon})^{0.22}$
Friction coefficient (assumed)	0.1	0.1

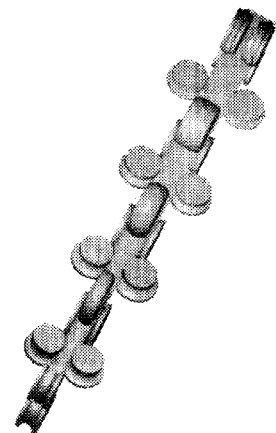


Fig. 7 Continuous simulation of roll forming form #1 to #F1

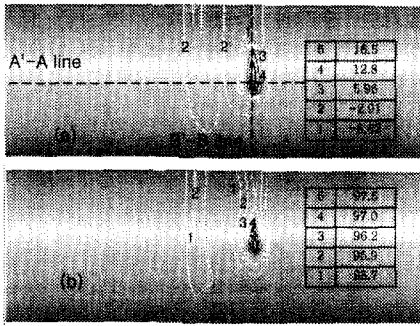


Fig. 8 Velocity distribution at #F1 pass  
(a) Velocity of x-direction  
(b) The magnitude of velocity

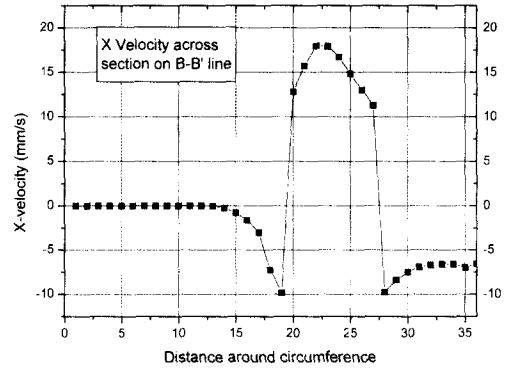


Fig. 10 X-direction velocity along B-B' line

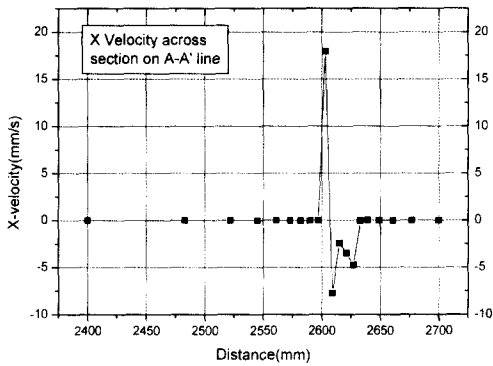


Fig. 9 X-direction velocity along A-A' line

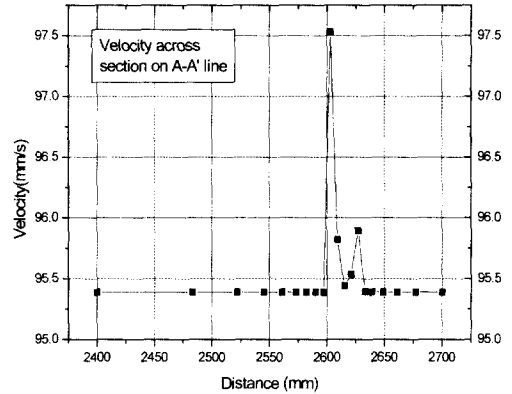


Fig. 11 Velocity along A-A' line

3.4.2 상대속도차이에 의한 변형을 추적

Fig. 8 ~ Fig. 10를 통해 #F1 패스에서 스크래치가 발생하는 부분의 압연 방향과 원주 방향 속도 분포를 제시하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 A-A' 라인을 따라 스크래치 발생 가능 지점 주위에서 상하의 두개의 롤로 Y 방향으로 구속이 되기 때문에 Y 방향으로의 속도차이가 작은 반면, X 방향 즉, 폭 방향으로 큰 속도차이를 보이고 있다. 이러한 속도차이로 인해 접촉 지점 앞뒤에서 A-A' 라인에서 좌, 우로 큰 상대 속도를 갖게 된다. 따라서 압연방향으로 굽힘-펴짐-굽힘의 변형 메커니즘을 겪으며 변형률이 누적되는 3 차원 변형을 하게 된다. 원주 방향에 대한 속도 분포에 따르면 스크래치로 간주되는 두개의 점으로 인해서 X 방향 속도가 큰 진폭을 갖는 것을 볼 수 있었고 원주 방향으로 갖는 속도 분포와 압력 분포가 틀려짐에 따라 원하는 형상 즉, 일정한 두께 분포를 갖는 튜브를 제조할 수 없게 된다. 따라서 스크래치로 간주되는 점들을 제거할 수 있도록 롤설계 변경을 한다면 스크래치 결함 뿐만 아니라 일정한 두께 분포의 제품을 얻을 수 있을 것이다.

3.4.3 소재 특성에 따른 스크래치 발생 경향

본 연구에 사용된 두 소재 HR 과 STS 의 특성을 비교하면 HR 의 경우는 상대적으로 STS 에 비해 저탄소강으로 성형길이(Forming Length)가 짧아지게 된다.

소재의 특성에 따라 굽힘 저항이 다르기 때문에 변형이 최초 시작하는 점들도 압연방향을 따라 각각 다르게 된다. 이처럼 소재가 변형을 일으키는 점에서부터 다음 롤 스탠드 중심까지의 거리를 성형길이라고 정의한다. 성형길이 내에서 소성변형을 받는 소재는 각종 변수의 영향에 따라 다른 변형 특성을 갖게 된다. 성형길이에 영향을 미치는 변수 중 재료의 두께, 폭, 굽힘각도, 판재 굽속의 특성, 형상단면의 직경, 진입조건 등이 영향을 미치게 된다. 동일한 폭 굽힘각도와 형상단면의 직경과 진입조건 등이 결정되면 즉, 롤설계가 완성되고 성형 롤이 제작 된 후에는 오직 재료의 두께, 판재 굽속의 성질 등이 성형성과 성형길이를 결정하는 중요 변수로 작용하게 된다. 참고문헌<sup>(13)</sup>을 통해 성형길이에 영향을 미치는 변수들을 제시

하였다. 특히 가공경화지수는 성형길이에 영향을 크게 작용한다. 가공경화지수의 값이 증가함에 따라 성형길어도 증가함을 즉, 예변형 정도가 커짐을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

성형길이가 다른 소재는 동일한 롤을 사용하더라도 접촉 영역이 틀릴 수 있다. 시뮬레이션 비교를 통해 본 결과로 HR 은 롤 중심 부근에 근접해서 급하게 변형을 시작하면서 접촉 영역이 발생하는 반면 STS 의 경우 접촉지점이 집중적으로 롤 중심 부근에 발생하게 된다(Fig. 12).

롤 마크의 가능성은 HR 의 경우 발생할 가능성이 클 수가 있다. 하지만 롤 중심에서 집중적인 하중을 받는 STS 의 경우 압력분포가 고르지 못한 관계로 성형성이 저하될 수 있다. 따라서 한 개의 롤 세트로 서로 다른 소재를 가공하려고 할 때는 성형길이와 같은 소재의 특성을 고려하여 설계 및 제작에 임해야 할 것으로 판단된다.

3.5 롤설계 변경과 결과

시뮬레이션을 통해 기존 설계에서 #F1 패스의 성형 각도를 그대로 유지시키면서 동일한 수의 롤 스탠드를 가지고 롤 마크를 최소화 시킬 수 있도록 #4 의 사이드 롤 곡률을 #F1 패스의 곡률에 근사화 시키도록 롤설계를 변경하였다. 이러한 설계 변경의 근거는 총유효 변형률의 증가량이 전체 패스에 고르게 되도록 하기 위함이며, 전체라인의 롤들을 모두 교체하지 않고 단지 #4 패스의 사이드 롤의 곡률 변화를 주어 롤설계 변경을 최소화 하였다.

비교 기준이 되는 핀 패스(#F1) 1 번 롤의 성형 각도는 대칭 라인을 기준으로 147°를 유지하도록 하였으며, #4 패스의 사이드 롤의 곡률은 반경 23.64mm, 31.15 mm 에서 22.9mm , 31 mm 로 변경되었다. 변경된 설계는 동일 각도 성형에서 #4 의 사이드롤만 성형 각도를 증가시킨 것이며 설계 변경에 따른 플라워 패턴의 변화는 Fig. 13 에 제시되고 있다.

위와 같은 롤설계 변경에 따라 #F1 패스 입구 부에서 국부적인 변형을 분산시켜 각 패스를 지나면서 유효 변형률은 일정하게 증가함을 확인할 수 있었다(Fig. 14). Fig. 15 에서는 유효변형률 분포가 감소함으로 해서 스크래치 발생을 막을 수 있을 것이라고 예상할 수 있다.

반면, 롤설계의 변경은 #4 패스에서 토크 및 압력의 증가를 초래할 수 있으나 시뮬레이션 결과에 의한 토크의 증가량 차이가 크지 않았다. 그리고 롤설계 변경 시 본 연구처럼 마지막 패스의 롤설계 변경만 고려할 것이 아니라 전체적으로 선형적인 변형률 증가와 하중의 증가를 유도한다면 하중

의 급격한 증가와 스크래치의 발생을 모두 막을 수 있는 최적의 롤설계를 구현할 수 있을 것이다.

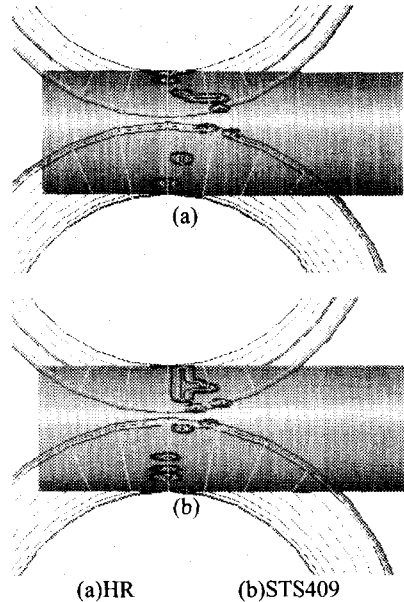


Fig. 12 Contact area of different materials at #F1 pass

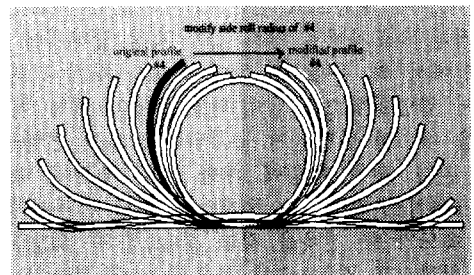
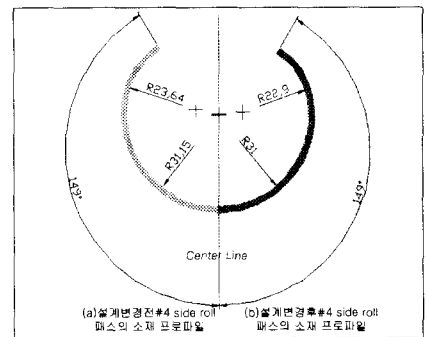


Fig. 13 Modify the radius of side roll(#4) and Compare flower pattern between original and modified profile

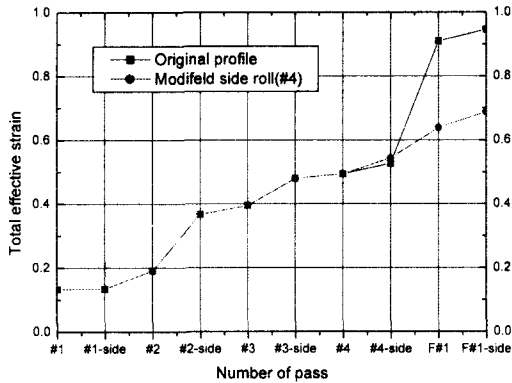


Fig. 14 Total effective strain as modified roll design (HR case)

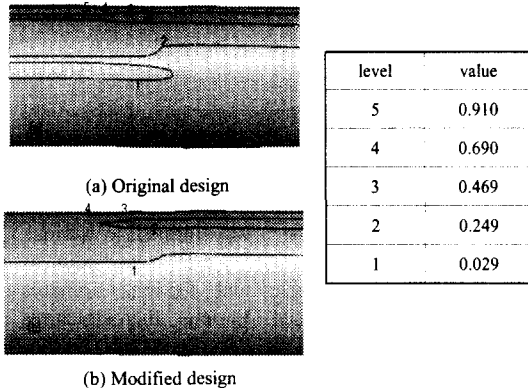


Fig. 15 Distribution of total effective strain (#F1 pass)

#### 4. 결론

본 연구에서 강소성 유한요소법을 통해 롤포밍 공정의 전체 라인을 효과적으로 모델링 할 수 있었고 롤포밍공정에서 발생하는 스크래치 결함의 발생을 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있었다. 스크래치의 발생은 최초 2 차원 단면 설계와 실제 3 차원 거동에 있어 접촉지역이 틀림으로 발생할 수 있으며 스크래치가 발생하였을 경우 압력의 증가와 변형률의 급한 증가 그리고 속도 분포의 불균일함을 가져올 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

시뮬레이션을 통한 결함 예측으로 롤설계를 변경하였고 설계 변경 후에 각 패스별로 고른 변형률 분포를 얻을 수 있으며, 스크래치 발생 가능성 역시 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

향후 유한요소법을 이용한 다양한 롤포밍공정 모델링을 시도하고 이를 시뮬레이션을 통해 스크

래치 결함의 원인을 분석하고 발생 위치 등을 예측하여 접촉 지역과 압력 분포의 재배치를 통해 스크래치를 제거할 수 있도록 롤설계의 방향을 제시한다면 최적화된 롤포밍 제품의 생산에 크게 기여할 것으로 기대된다.

#### 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. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Rotary Metal Working Process*, Kyoto, pp. 423~427.
- (3) Bhattacharyya, D., Panton, S. M., 1990, "Production of Strain development while Roll Forming Fundamental Sections," *Advanced Technology of Plasticity*, 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. and Ona, H., 1980, "Optimum Roll Pass Schedules on the Cold Roll Forming Process of Symmetrical Channels," *Proc. 21<sup>st</sup> Int. M.T.D.R. Conf.*, pp. 63~67.
- (6) Ona, H., Jimma, T., and 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) Kobayashi, S., Oh, S.-I. and Altan, T., 1989, *Metal Forming And The Finite Element Method*. Oxford University Press, pp. 73~130.
- (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) 홍석무, 김낙수, 1999, "3 차원 유한요소법에 의한 롤포밍 공정 해석 시뮬레이션," 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 207~212.
- (11) 홍석무, 조현중, 김낙수, 1999, "롤포밍 공정의 강소성 유한요소 모델링," 동역학 및 제어부분-생산 및 설계부분 공동학술 대회 논문집, pp. 287~293.
- (12) 홍석무, 김두수, 윤환진, 김낙수, 2000, "롤포밍 시뮬레이션 프로그램 개발," 한국 CAD/CAM 학회 학술 발표회 논문집, pp.417~423.
- (13) Sukmoo Hong, Seungyoon Lee, Naksoo Kim, 2001(예정), "A Parametric study on forming length in the roll forming," *The 5th Asia Pacific Conference on Material Processing*.