

## 유한요소해석을 이용한 후육관 롤포밍에서의 초기소재 에지 형상 예측과 설계

이 승 윤\* · 김 낙 수†

(2001년 5월 7일 접수, 2002년 1월 24일 심사완료)

### Prediction and Design of Edge Shape of Initial Strip for Thick Tube Roll Forming using Finite Element Method

Seungyoon Lee and Naksoo Kim

**Key Words :** Rigid Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), 2nd-Degree Polynomial Regression Method(2차 다항식 회귀분석), Thick Tube Roll Forming(후육관 롤포밍), Edge Shape(에지 형상), Electric Resistance Welding(전기저항용접)

#### Abstract

Increasing demands for Electric Resistance Welded pipes of high quality with thick wall require close investigations in edge deformation by slitting, strip deformation during break down forming, and difference of circumferential length. In order to obtain good quality of a welding zone, it is necessary to predict the edge shape of the initial strip. The modeling of the multi-pass thick tube roll forming process with rigid plastic finite element method and the edge shape prediction of an initial strip with 2nd-degree polynomial regression method are presented. Edge shapes of initial strip have been analyzed by the finite element method and designed by the regression method to satisfy the requirements in target fin pass. It is concluded that the proposed edge design method results in optimal edge shapes satisfying the design requirements.

#### 1. 서론

롤포밍 공정은 연속으로 배치된 다단의 롤 스탠드 사이로 금속판재를 통과시키면서 단면형상의 변화를 유도하여 길이방향으로 일정한 생산 제품을 제조하는 공정이다.

일반적인 후육관 롤포밍 공정 순서는 다음과 같다[Fig. 1]. 언코일링(uncoiling) 공정을 지나 레벨링(leveling)에서는 소재의 평탄화 역할을 하며, 에지 밀링(edge milling) 공정은 용접성을 높이기 위해 초기 소재의 에지 부분을 적절한 절삭각도로 절삭 한 후 브레이크 다운 롤(break down roll), 클러스터 롤(cluster roll), 핀 패스 롤(fin pass roll)로 구성된 성형(forming) 공정을 한다 [Fig. 2 (a),(b),(c)].

최근에는 컴퓨터를 이용한 각종 공정해석이 시도되고 있으며, 실제 공정의 설계에 있어서 많은 도움을 주고 있다. 이러한 성형해석의 방법에는 FEM(Finite Element Method : 유한요소법)을 이용한 해석이 주로 사용되어지고 있다. 이러한 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해 미리 결함을 발견하고 설계를 수정한다면 기존의 설계자의 경험에 의한 설계의 시행착오로 인한 물적, 시간적 낭비를 줄일 수 있다.

Kiuchi 등<sup>(1,2)</sup>은 해석적인 롤의 형상에 따라서 변형된 후의 판재 단면을 미리 가정한 후, 롤 스탠드에서 적당히 떨어진 강제운동 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, 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다. Battacharyy와 Pantan 등<sup>(3,4)</sup>은 실험적인 결과를 바탕으로 변형영역을 몇

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과  
E-mail : nskim@ccs.sogang.ac.kr  
TEL : (02)705-8635 FAX : (02)707-0558

개의 구간으로 나눈 후 각 영역에 대하여 영역의 길이 및 굽힘 각도를 예측하는 식을 개발하였다. 개발된 실험식에 실험 상수를 결정하여 단순한 형상의 롤포밍을 해석하고, 이에 근거하여 소재의 길이 방향 변형률을 예측하였다. Jimma 와 Ona<sup>(5-7)</sup>는 롤포밍 시 판재가 접혀지는 각도와 수를 톨 패스 수와 연관하여 구분한 후, 필요한 패스 수를 형상 인자와 연관시킨 설계용 경험식을 개발하였다. Yazava<sup>(8)</sup>은 일반적인 전기 저항 용접 롤포밍 공정보다 소재의 폭과 파이프 외경의 비가 20% 이상인 Ultra heavy wall 파이프에 대한 새로운 공정 방식과 공정 가능 영역에 관하여 소개하였다. N.Kim<sup>(9-12)</sup>은 3 차원 강소성 유한요소법을 이용한 롤포밍 전용 시뮬레이션 프로그램(SHAPE-RF)을 개발하였다.

SHAPE-RF 는 자유 표면의 초기 결정을 하기 위하여 일반화된 평면 변형률 조건을 사용하여 초기 경계 조건으로 사용되며, 3 차원 동적 정상상태의 유한 요소 해석을 통한 속도장을 구하고 경계조건 및 자유표면을 보정하는 반복법을 통해 최종적인 형상을 결정한다. 또한 구해진 속도장을 기반으로 변형률 및 압력토크 등의 정보를 구할 수 있다.

후육관에서 적절한 용접영역을 형성하기 위한 초기 소재의 폭과 에지 형상을 예측하기 위해 SHAPE-RF 의 후육관 모듈을 개발했으며, 이러한 시뮬레이션 결과로부터 에지 밀링 공정에서의 적절한 절삭각도와 균일 두께의 후육관을 확인하고자 한다.

## 2. 후육관 에지 형상에 관한 문제점

롤포밍 공정에서는 소재를 슬리터(slitter)라고 하는 설비를 사용하여 원하는 소재 폭을 절단한다. 이 경우 슬리팅(slitting)시 나이프(knife)로 절단되기 때문에 상단부에 버(burr)와 두께 중앙에 파단면이 발생되어 용접성에 악영향을 미치므로 에지 셰이버(edge shaver) 또는 에지 밀링(edge milling)공정에서 초기 소재의 에지 면을 다듬어 주거나 절삭을 하여 용접성을 좋게 한다.

일반적인 원형관 롤포밍 공정과 비교할 때 후육관 롤포밍 공정에서의 문제점들은 다음과 같다. 첫째로 소재가 두꺼운 경우에는 슬리팅시 에지 부분의 두께가 감소하며 에지 부분에 변형이 발생하여 용접성에 악영향을 미치게 된다. 그러므로 적절한 용접 영역을 형성하기 위하여 소재의 에지 면에 에지 밀링 공정으로부터 절삭이 필요하게 된다[Fig. 3]. 두 번째로 초기의 브레이크 다운 포밍시 에지 포밍의 부족으로 인해 소재의 에지 두께가 감소하게 된다. 이러한 현상의 원인은 소재의 두께와 파이프의 외경의 비가 큰 경우 하부 롤에

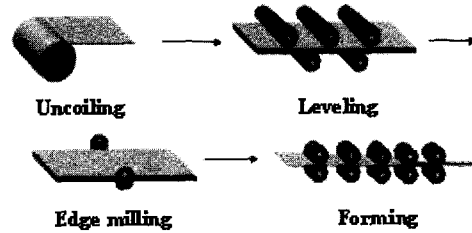
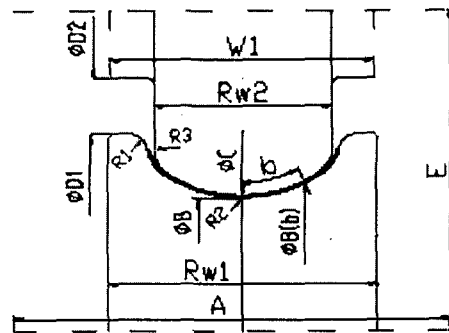
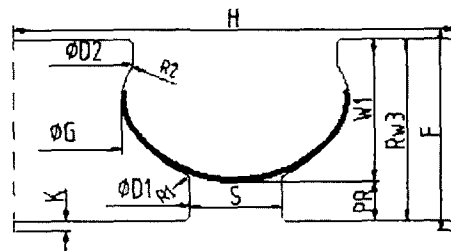


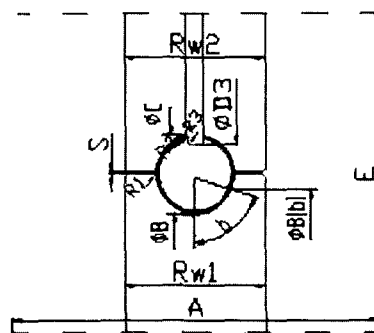
Fig. 1 Sequence of roll forming process for thick tube



(a) Break down roll



(b) Cluster roll



(c) Fin pass roll

Fig. 2 Forming roll types

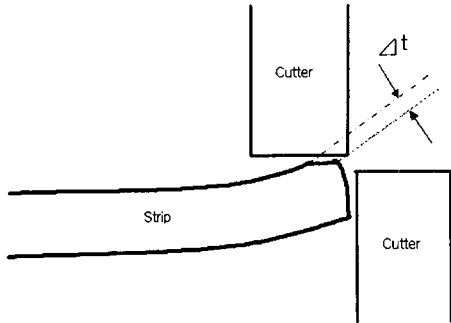


Fig. 3 Deformation at the strip edge affected by slitting

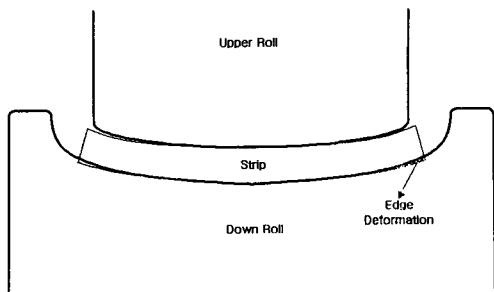


Fig. 4 Deformation at the strip edge affected by break down forming

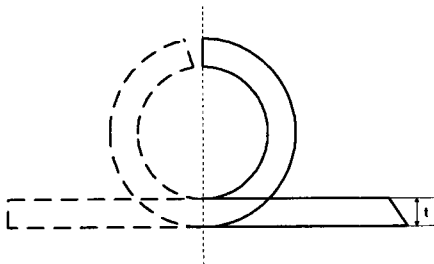


Fig. 5 Difference of circumferential length between inside diameter and outside diameter

소재가 심하게 접촉하여 압력을 하는데 지배적인 역할을 하며 상대적으로 상부 롤과의 접촉은 줄어들어 에지 포밍 부족이 발생하게 된다[Fig. 4]. 마지막으로 소재의 두께와 파이프 외경의 비가 크면 클수록 원주길이의 차이가 크게 발생하여 용접시 적절한 하지 못한 용접영역을 형성한다 [Fig. 5]. 이는 전기 저항 용접에서 소재의 에지 표면에 흐른 고주파 전류의 표피효과(skin effect)와 두 도체 사이에 반대 방향으로 흐르는 전류 사이에 작용하는 인력으로 인해 발생하는 근접효과(proximity effect)로 인한 소재 단면만을 효율적으로 용융시키기 위하여 용접시 I 형태의 용접영역을 형성하는 것이 용접성이 우수하다. 따라서 위의 문제점

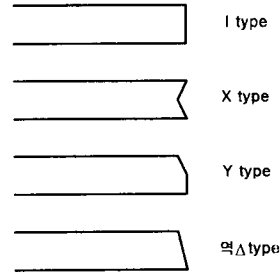


Fig. 6 Cutting types of edge milling

을 고려한 초기 소재의 에지 형상을 예측하고 에지 밀링의 절삭각도를 예측한다면 적절한 I 형태의 용접영역을 형성할 수 있을 것이다 [Fig. 6].

### 3. 이론

#### 3.1 강소성 유한요소법

롤포밍 해석을 위한 시뮬레이션 프로그램에는 3차원 강소성 유한요소법을 사용하였으며, 지배방정식과 경계조건 등을 요약해서 정리하였다.

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

• 경계조건:  $v_i = v_i^*$  in  $S_u$   
 $t_i = t_i^*$  in  $S_f$  (2)

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

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

• 적합조건:  $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i})$  (4)

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

• 항복함수와 flow stress:  $f = \sqrt{J_2} = \bar{\sigma} / \sqrt{3}$  and  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, T)$  (6)

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

식 (1)과 (2)에서 제기된 경계치 문제는 약형으로 변환되고, 식 (3)과 (4)을 고려하면 다음과 같이 유도할 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. 유동 응력식 (6)과 마찰조건 (7)은 외부 입력조건으로 주어진다.

3.2 2차 다항식 회귀분석

유한요소법을 이용하여 롤포밍 공정을 시뮬레이션 할 수 있게 됨에 따라서, 핀 패스에서의 소재의 에지 형상을 파악할 수 있으므로, 계산 결과로부터 초기 소재의 최적 에지 형상을 찾아낼 수 있도록 회귀분석을 이용하였다. 이를 프로그램화하여 후육관 모듈을 개발하였으며, 회귀분석은 다음과 같다. 최소제곱 과정은 데이터를 2차 다항식으로 적합 시키도록 다음과 같이 쉽게 확장될 수 있다.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \tag{9}$$

이 경우 잔차의 제곱 합은 다음과 같다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2 \tag{10}$$

다항식의 각 미지계수에 대해 식 (2)을 미분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_r}{\partial a_0} &= -2\sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_1} &= -2\sum x_i(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_2} &= -2\sum x_i^2(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \end{aligned} \tag{11}$$

이들 방정식은 0 과 같게 되며 다음의 정규방정식을 구하기 위해 재정리 하면,

$$\begin{aligned} a_0 + a_1\sum x_i + a_2\sum x_i^2 &= \sum y_i \\ a_0\sum x_i + a_1\sum x_i^2 + a_2\sum x_i^3 &= \sum x_i y_i \\ a_0\sum x_i^2 + a_1\sum x_i^3 + a_2\sum x_i^4 &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned} \tag{12}$$

따라서 최소제곱 2차식은 다음과 같다.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \tag{13}$$

3.3 후육관 모듈 모델링

폭 방향으로 구속되어 있는 핀 패스 롤을 거치면서 초기 소재의 폭과 에지 형상을 예측하지 못한 경우에는 핀 패스의 상부를 지느러미 혹은 모서리 부분에 과도하게 압축력을 받아 롤이 파손되는 일이 발생한다. 그러므로 후육관인 경우 적절한 용접영역을 형성하기 위하여 초기 소재의 에지 형상의 관리가 필요하게 된다. 초기 소재의 에지 형상을 예측하기 위한 후육관 모듈을 모델링하기 위하여 용접 영역을 형성하기 위한 가이드 역할을 하는 다단의 핀 패스중 목표 핀 패스(target fin pass)를 결정하게 된다[Fig. 7]. 그러므로 첫 패스부터 사용자가 결정한 목표 핀 패스까지 반복적이 시뮬레이션을 통하여 초기 소재의 에지 형상을 최적화 하게 된다. 소재의 에지 부분의 변형 양상을 확인하기 위하여 해석시 소재의 두께 방향으로의 여러 층의 요소망이 필요하다.

초기 소재의 에지 형상을 최적화 하기 위하여 목표 핀 패스의 상부를 지느러미 혹은 모서리 부분의 롤 정보  $(x_1, y_1)$ 와  $(x_2, y_2)$ 로부터  $y = b_0 + b_1x$ 의 식과 목표 핀 패스에서 소재의 각 층의 폭 방향으로의 절점들의 좌표 값으로부터 2차 다항식 회귀 분석을 이용하여  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ 을 얻을 수 있다. 이 두 식으로부터 교점을 구할 수 있으며 그 차이 만큼 초기 소재 에지 부분에 고려하여 변경된 초기 소재로 반복적인 시뮬레이션이 진행을 수행하게 된다. 만약 목표 핀 패스에서 소재의 에지 면의 절점들이 모두 접촉을 하여 압축력이 발생을 한다면 이는 폭 방향으로 소재가 구속이 되었으며, 또한 핀 패스에서 소재의 가이드 역할을 하고 있다고 판단하여 목표 핀 패스 이후 공정을 수행하게 된다[Fig. 8].

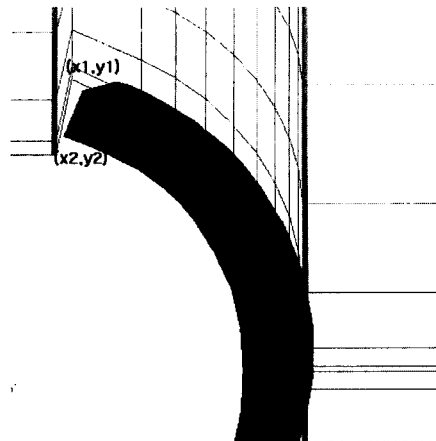


Fig. 7 Target fin pass

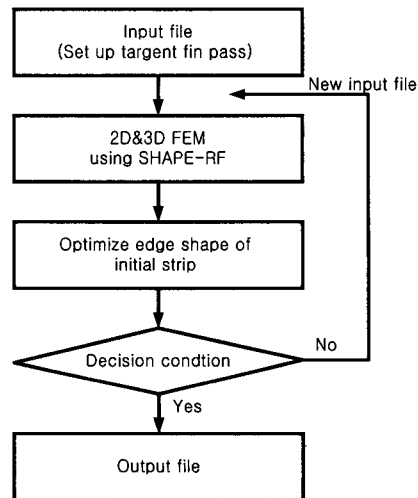


Fig. 8 Algorithm of thick module in SHAPE-RF

Table 1 Mechanical property of materials

	Specimen 1	Specimen 2
항복강도 (Mpa)	198.9	316.1
유동응력 (Mpa)	$\bar{\sigma} = 500.2(\bar{\epsilon} + 0.0044)^{0.17}$	$\bar{\sigma} = 837.9(\bar{\epsilon} + 0.0119)^{0.22}$

Table 2 Conditions of simulation

	Case 1	Case 2
파이프 외경(mm)	165.2	267.4
초기소재두께(mm)	6(t/D : 3.6%) 10(t/D : 6.0%) 16(t/D : 9.7%) 20(t/D : 12.1%)	10(t/D : 3.7%) 16(t/D : 6.0%) 26(t/D : 9.7%) 32(t/D : 12.0%)
총 패스	11	11
축간 거리(mm)	680	1100
롤 속도(m/s)	0.1(assumed)	0.1(assumed)
마찰 인자	0.2(assumed)	0.2(assumed)

#### 4. 초기 소재의 에지 형상 예측

##### 4.1 후육관 롤포밍 공정 모델링

본 연구에 사용된 시뮬레이션 프로그램은 강소성 유한요소법을 이용한 롤포밍 전용 해석 프로그램 SHAPE-RF 를 사용하였으며, 이 시뮬레이션 프로그램은 참고문헌<sup>(9-12)</sup>을 통하여 신뢰성을 검증 받은 바 있다. 초기 소재의 에지 형상을 예측하기 위해 SHAPE-RF 의 후육관 모듈을 사용하였으며, 사용된 재료인 Specimen 1 과 Specimen 2 로서 일반 구조용과 압력 배관용 강관에 주로 사용되는 재료이며, 재료의 기계적 성질은 Table 1 에 나타내었다.

후육관 롤포밍 공정의 성형 단수는 5 개의 브레이크 다운 롤, 3 개의 클러스트러 롤, 3 개의 핀 패스 롤로 총 11 패스로 모델링을 했으며, 패스별 축간거리는 롤의 최대 직경을 고려하여 680mm 와 1100mm 를 사용하였다[Fig. 9]. Case 1 과 Case 2 는 각 패스별 더블 레디어스 굽힘(double radius bending)으로 굽힘 각도는 균등 배분하여 Fig. 10 에서와 같은 플라워 패턴으로 설계하였다. Table 2 에서는 해석에 필요한 시뮬레이션 조건 중 롤 속도와 마찰인자 등은 가정된 값을 사용하였고, 해석 시간의 단축을 위해 대칭조건을 적용하여 1/2 모델을 고려하였으며 최대 각 패스별로 단면 60 개의 요소와 21 개의 단면을 사용하였으므로, 3 차원 요소 망 1260 개가 사용되었다.

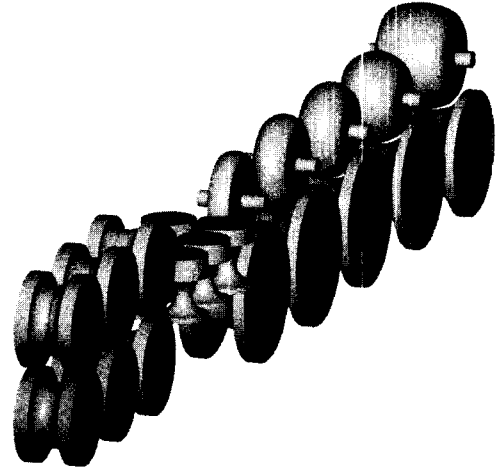


Fig. 9 Roll forming process modeling for thick tube

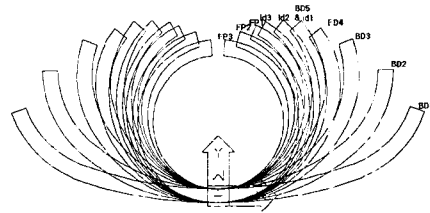


Fig. 10 Flower pattern for Case 1(t/D : 12.1%)

##### 4.2 에지 형상 예측 결과

총 11 패스 중 에지 형상을 예측하기 위해 첫 에지 부분을 가이드 하는 제 9 패스를 목표 핀 패스로 설정하였다.

반복적인 에지 형상의 최적화로 Fig. 11 에서와 같이 전체 11 패스의 소재의 변형 양상을 확인할 수 있었으며, Fig. 12 의 (a)와 (b)에서는 각 case 별 초기 소재의 두께의 변화에 따른 용접 이전 패스인 11 패스에서의 소재 형상을 보여준다. 에지 형상의 최적화로 모든 경우에 적절한 I 형태의 용접 영역을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 각 case 별 t/D 의 비율이 4%이내의 경우에는 초기 소재의 에지 형상의 최적화가 없이 I 형태의 용접 영역을 형성 하였지만 t/D 의 비율이 커질수록 에지 형상을 최적화하기 위한 시뮬레이션의 반복 횟수가 증가하였다.

파이프의 외경이 267.4mm 이고 초기 소재 폭과 두께가 각각 382.76mm, 32mm 인 경우 Fig. 13 의 (a)와 같이 소재의 에지 면이 지느러미 부분에서 압축력을 받지 못해 에지 형상의 최적화 없이

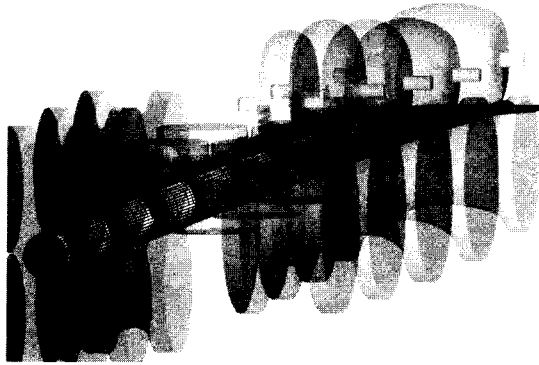


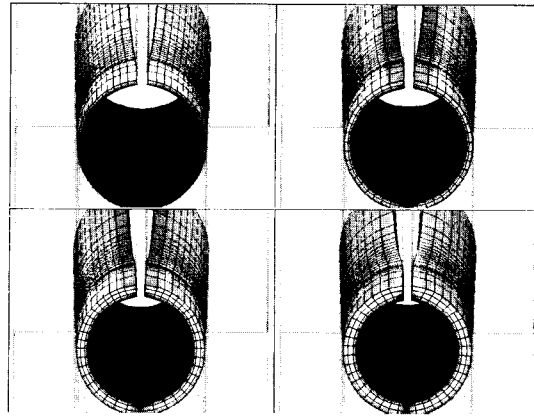
Fig. 11 Simulation results of 11-pass thick tube forming process

시뮬레이션을 진행한다면 적절하지 못한 용접영역을 형성할 것이다. 반복적인 에지 형상의 최적화로 Fig. 13의 (b)와 같이 소재의 에지 면이 핀 패스의 지느러미 부분에 접촉하여 적절한 에지 면을 형성하고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 에지 형상 최적화를 고려한 목표 핀 패스에서의 두께 분포와 고려하지 않은 경우를 비교하였다[Fig. 14].

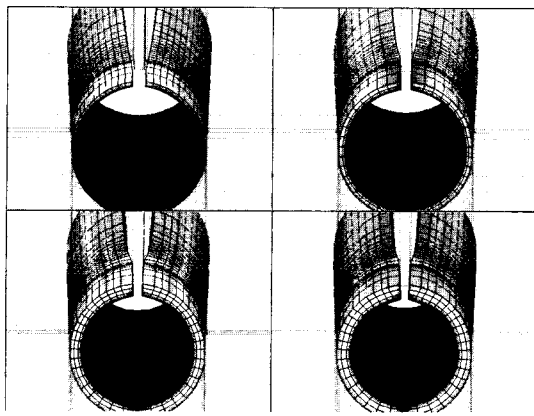
해석 결과로부터 에지 형상을 최적화한 후 에지 부분의 두께 분포가 에지 형상 최적화를 고려하지 않은 것에 비해 두께 감소가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 15에서와 같이 반복적이 초기 소재의 에지 형상의 최적화로 소재 폭과 에지 밀링 공정에서 에지 면의 절삭 각도와 깊이를 알 수 있는 정보가 된다. 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 현재 유한요소 해석시 8 절점 입방체 요소를 형상함수로 하였지만, 좀 더 고차함수로 형상함수를 정의하고 조밀한 요소망을 사용하여 해를 구하면 오차를 줄일 수 있다고 생각한다.

4.3 t/D 비의 변화가 초기 소재에 미치는 영향  
외경이 165.2mm 인 중구경과 267.4mm 인 대구경 파이프에 관하여 소재의 물성에 대한 변화와 t/D의 비율이 변화함에 따라 초기 소재의 에지 형상과 최대 초기 소재의 폭을 예측하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 16의 (a)와 (b)에서는 파이프의 직경에 대하여 t/D의 비율이 증가함에 따라 초기 소재의 에지 형상의 변화를 보여준다. t/D의 비율이 4% 이하인 경우에는 에지 형상이 변화가 없지만 t/D의 비율이 4% 이상인 경우에는 초기 소재의 에지 형상이



(a) The final fin pass of Case 1(D : 165.2mm)



(b) The final fin pass of Case 2(D : 267.4mm)

Fig. 12 Simulation results of edge shape for final fin pass

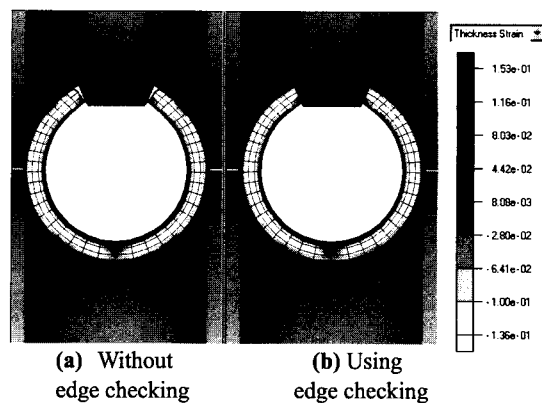


Fig. 13 The results of target fin pass (D : 267.4mm, t : 32mm, Specimen 1)

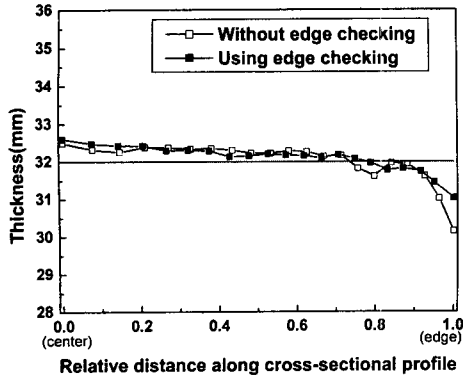


Fig. 14 Thickness distribution of target fin pass (D : 267.4mm, t : 32mm, Specimen 1)

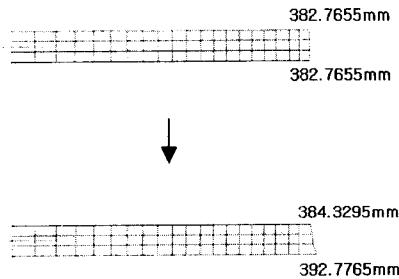


Fig. 15 Changed edge shape of initial strip (D : 267.4mm, t : 32mm, Specimen 1)

역 삼각형 형태임을 알 수 있었다. 파이프의 성형 방법에 따라 초기 소재의 에지 형상의 달라지게 된다. 본 연구에는 더블 레디어스 굽힘 성형을 사용하였으며, 이 성형 방법의 특성은 에지 굽힘 성형(edge bend forming)과 원형 굽힘 성형(circular bend forming)의 조합형으로써 일반적으로 후속관 제조시 많이 취하고 있는 방식이다. 그러므로 굽힘 성형 방법과 굽힘 각도의 배분에 따라 초기 소재의 에지 형상의 형태는 달라지게 된다.

각 파이프의 직경에 대하여  $t/D$ 의 비율이 4% 이상인 경우에는 역 삼각형의 에지 형상이 점점 내각이 감소하는 형상을 보였다. 본 연구에서는  $t/D$ 의 비율은 변화에 따라 적절한 I 형태의 용접 영역을 형성하기 위해 핀 패스의 지느러미 형상의 각을 고정하여 설계를 하였다. 그러므로 I 형태의 용접 영역을 형성하기 위하여  $t/D$ 의 비율이 증가할수록 외경과 내경의 원주길이의 차이로 인하여

역 삼각형의 내각이 감소하는 에지 형상을 얻는 것이다.

소재의 물성의 변화에도 에지 형상이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 여러 소재의 물성에 관하여 시뮬레이션을 하지 못하여 어떤 경향은 알 수는 없었지만 소재의 물성도 초기 에지 형상을 예측하는데 중요한 공정 변수임을 알 수 있었다.

이러한 정보는 후속관 공정라인을 계획할 때 다 단 패스의 변형양상 예측을 가능하게 함으로써 어떤 패스에서 문제가 발생하는 것을 확인하고, 또한 공정 설계의 변경을 용이하게 함으로써 개발 비용 및 시간을 줄이는 효과가 있다.

용접성의 안정을 위한 전기 및 물리적인 몇 가지의 용접조건 중 가장 중요한 설계 요소로서 핀 패스에서의 소재의 실제적인 외폭이다. 아울러 핀 패스에서의 소재의 외폭을 잘못 계산한다면 용접 품질의 저하뿐 아니라 대강폭의 낭비 요인이 된다. 또한 앞에서 서술하는 에지 형상관리를 최적의 상태로 유도 시킬 수 없게 된다. Fig. 17의 (a)와 (b)에서는 파이프의 외경에 대하여  $t/D$ 의 비율이 증가함에 따라 최대 초기 소재 폭의 변화를 보여준다. 파이프의 외경에 따라 소재의 두께가 증가하면 초기 소재 폭이 감소하는 것을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다. 이는  $t/D$ 의 비율에 따라 용접성을 고려한 초기 소재 폭을 미리 예측 함으로써 원재료인 코일로부터 제품에 필요한 소재 폭을 슬리팅시 유용한 정보가 되며, 또한 에지 밀링 공정시 절삭 깊이를 결정하는데 도움이 될 것이다.

Fig. 18의 (a)와 (b)에서는 각 파이프 외경에 관하여 마지막 핀 패스인 11 패스에서의  $t/D$ 의 비율에 따라 두께 편차를 보여준다. 시뮬레이션을 통해  $t/D$ 의 비율이 6%이상인 경우 두께 편차가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 처음 후속관 롤포밍 공정 모델링시 모든 경우에 관하여 파이프 성형을 위한 굽힘 각도에 관하여 일치된 설계를 하였다. 그러므로  $t/D$ 의 비율에 큰 경우 성형 단수의 조절, 성형 굽힘각도의 변화, 굽힘 성형방법에 변화를 준다면 균일한 두께를 가지는 후속관 제조가 가능하다고 생각한다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 강소성 유한요소법과 2 차 다항식 회귀분석을 이용하여 후속관 롤포밍 공정에서의 소재의 두께( $t$ )와 파이프의 외경( $D$ )의 비에 따라 초기 소재의 에지 형상, 최대 초기 소재 폭, 두께 분포에 대해 연구하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

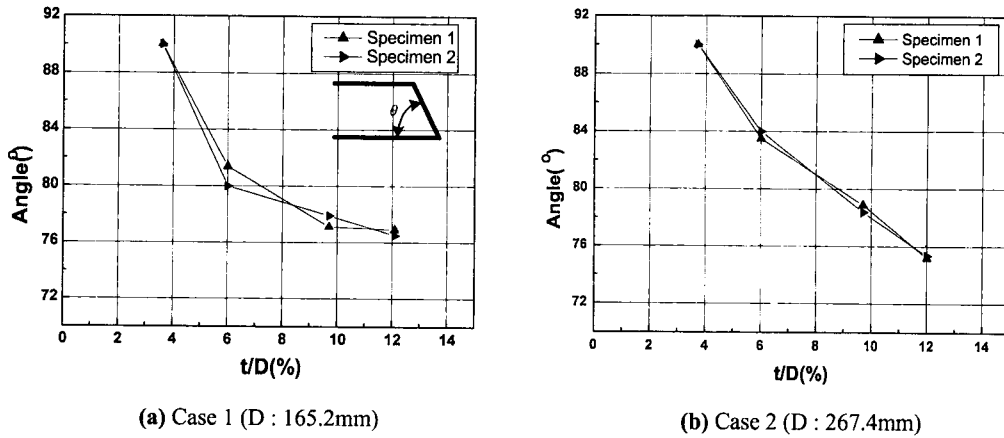


Fig. 16 Effect of thickness of diameter ratio ( $t/D$ ) to edge shape

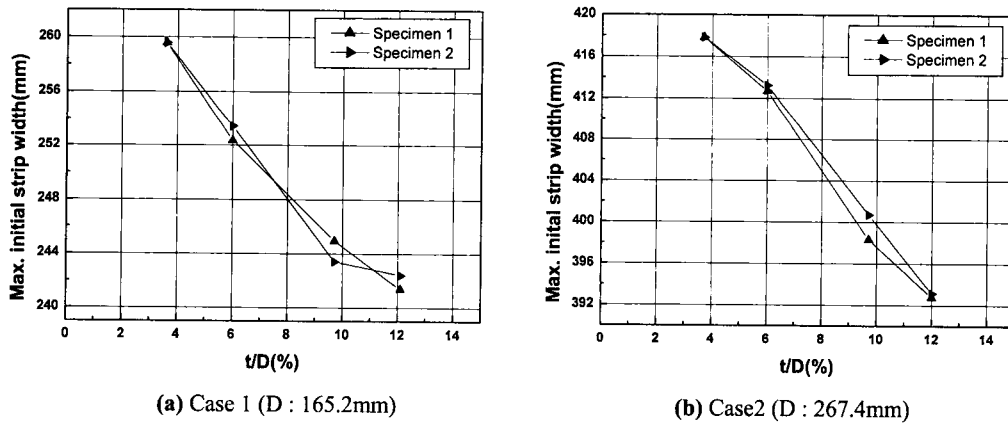


Fig. 17 Effect of thickness of diameter ratio ( $t/D$ ) to max. initial strip width

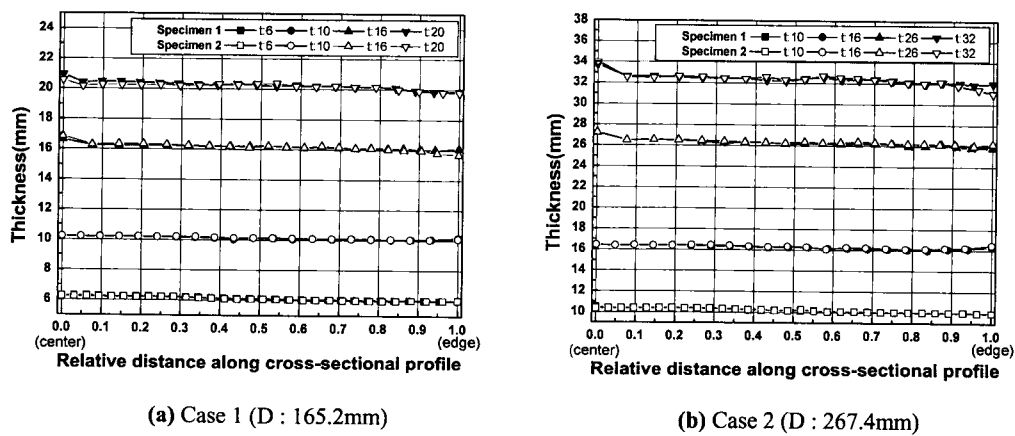


Fig. 18 Simulation results of thickness distribution for final fin pass



(1) SHAPE-RF 후육관 모듈을 이용하여 파이프 성형 방법이 더블 레디어스 굽힘 성형인 경우 초기 소재의 에지 형상이 역 삼각형의 형태이며,  $t/D$  비가 크면 클수록 역 삼각형의 내각이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 소재의 종류가 다름에 따라 각도가 차이가 있었다. 이는 초기 소재의 에지 형상이 여러 공정 변수들에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 후육관 공정라인을 설계 시 유용하게 적용이 될 수 있으며, 그 응용 범위 또한 넓을 것이다.

(2) 소재의 두께( $t$ )와 파이프의 외경( $D$ )비에 따라 최대 초기 소재 폭의 경향을 파악 할 수 있었다.  $t/D$  비가 크면 클수록 최대 초기 소재 폭이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 소재 폭을 미리 예측함으로써 원재료인 코일로부터 제품에 필요한 소재 폭을 슬리팅시 유용한 정보가 될 것이다.

(3) 후육관 모듈을 이용하여 성형단 수의 조절, 성형 굽힘각도의 변화, 굽힘 성형방법에 변화하여 시뮬레이션을 통해 문제점을 파악하고 설계 변경을 통해 두께분포가 균일한 제품의 생산에 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2000 년도 서강대학교 교내연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 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. 3<sup>rd</sup> 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. 21<sup>st</sup> 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 Pantou, 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) Yazava, T., Sugayoshi, T., Ohwaki, J., Hagahama, Y., and Sugimoto, Y., 1990, "Development of New Manufacturing Technology for Ultra Heavy Wall and Small Diameter HF-ERW Pipe," *Advanced Technology of Plasticity*, pp. 865~869.
- (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.*, 235.
- (10) 홍석무, 김낙수, 1999, "3 차원 유한요소법에 의한 롤포밍 공정 해석 시뮬레이션," 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, 207.
- (11) 홍석무, 조현중, 김낙수, 1999, "롤포밍 공정의 강소성 유한요소 모델링," 대한기계학회 학술대회, pp. 287~293.
- (12) 홍석무, 김두수, 윤환진, 김낙수, 2000, "롤포밍 시뮬레이션 프로그램 개발," 한국 CAD/CAM 학회, pp. 417~423.