

롤포밍 공정에서의 롤 마모에 관한 연구

강 병 석* · 김 낙 수†

(2003년 1월 16일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

A Study on Roll Wear in the Roll Forming Process

Byungseok Kang and Naksoo Kim

Key Words : Wear(마모), Roll Forming Process(롤포밍 공정), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

This study shows a numerical method to predict roll wear in the roll forming process. Archard's wear model was reformulated in an elemental form to predict volume of roll wear and then wear depth on the roll was calculated using the results of finite element analysis. Abrasive wear occurs at contact area in the roll forming process and the results of simulation are compared with experimental data in production line. The wear simulation approach with 3-D FEM program for roll forming process, SHAPE-RF is in good agreement with it in tendency.

1. 서 론

마모란 물체 표면의 재료가 점진적으로 손실 혹은 제거되는 현상을 말한다.⁽¹⁾ 마모는 공구나 금형과 공작물 사이의 접촉면 형상에 변화를 주므로, 제조공정의 기술적, 경제적인 측면에서 큰 중요성을 가지고 있다. 롤포밍 공정에서의 마모를 형태상으로 분류하면 경하고 거친 표면 혹은 경한 돌출부가 있는 표면과 이보다 연한 표면이 서로 미끄럼 운동을 할 때 발생하는 연삭마모(Abrasive wear)로 간주 할 수 있다.

최근에는 컴퓨터를 이용한 각종 공정해석이 시도되고 있으며, 실제 공정의 설계에 있어서 많은 도움을 주고 있다. 이러한 성형해석의 방법에는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 해석이 주로 사용되고 있다. 이러한 유한요소법을 이

용한 시뮬레이션을 통해 미리 결함을 발견하고 설계를 수정한다면 기존의 설계자의 경험에 의한 설계의 시행착오로 인한 물적, 시간적 낭비를 줄일 수 있다.

Kiuchi 등^(2,3)은 해석적인 롤의 형상에 따라서 변형된 후의 판재 단면을 미리 가정한 후, 롤 스탠드에서 적당히 떨어진 강재운동 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. Bhattacharyya와 Pantan 등^(4,5)은 실험적인 결과를 바탕으로 변형영역을 몇 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. Jimma와 Ona⁽⁶⁻⁸⁾는 롤포밍 시 판재가 접혀지는 각도와 수를 롤 페이스 수와 연관하여 구분

* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

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

TEL : (02)705-8635 FAX : (02)707-0558

한 후, 필요한 패스 수를 형상 인자와 연관시킨 설계용 경험식을 개발하였다. Kim 등⁽⁹⁻¹²⁾은 3차원 강소성 유한요소법을 이용한 톨포밍 전용 시뮬레이션 프로그램(SHAPE-RF)을 개발하였다. SHAPE-RF는 자유표면의 초기 결정을 하기 위하여 일반화된 평면 변형률 조건을 사용하여 초기 경계 조건으로 사용되며, 3차원 동적 정상상태의 유한요소해석을 통한 속도장을 구하고 경계조건 및 자유표면을 보정하는 반복법을 통해 최종적인 형상을 결정한다. 또한 구해진 속도장을 기반으로 변형률 및 압력토크 등의 정보를 구할 수 있다.

본 연구에서는 SHAPE-RF를 시뮬레이션하여 얻은 압력분포를 마모식에 적용하여 톨 마모량을 근사하였고, 소재의 두께에 따른 마모량의 경향을 실험값과 비교해 보았으며 마모가 톨포밍 공정과 제품에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 마모 모델

일반적으로 두 미끄럼 접촉면 사이의 연삭 마모량을 예측하기 위한 식은 Archard의 식을 요소화하여 적용시킬 수 있다.⁽¹³⁾ 이식에 따르면, 마모체적은 접촉면에서의 하중 P와 미끄럼 거리 L이 마모량에 비례하고, 마모되는 재료의 표면 경도 H는 반비례하여 다음과 같이 표현된다.

$$W = K \frac{PL}{H} \tag{1}$$

여기서,

- W : 마모 체적
- K : 마모 계수
- H : 재료의 경도
- P : 수직 하중
- L : 미끄럼 거리

위와 같은 식을 요소수준의 마모식으로 변경하기 위해서는 유한요소 이산화를 수행한다. 단위 면적당 마모 체적의 변화율은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{w} = K \frac{pv}{H} \tag{2}$$

여기서,

- \dot{w} : 요소의 마모 체적 변화량
- K : 마모 계수
- H : 재료의 경도

- p : 접촉면의 압력
- v : 접촉면의 상대속도

시간에 대해서 마모체적 변화량을 적분하면 마모체적은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \int_t \dot{w} A_E dt = \frac{K}{H} \int_t pv A_E dt \tag{3}$$

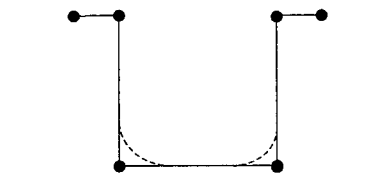
여기서, A_E 는 요소의 접촉 면적이다.

아울러 식 (4)는 단위 면적당 마모체적을 나타낸다.

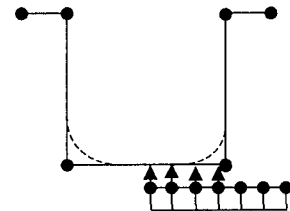
$$W_u = \frac{K}{H} \int_t pvd t \tag{4}$$

3. 톨 형상 업데이트

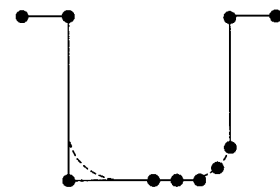
기존의 SHAPE-RF에서 톨의 표현은 형상정의 점(describing point)의 설정으로 되어 있으며 입력값(input file)에서 표현된 형상정의점으로는 필릿(fillet)부분의 마모에 의한 형상 변화를 표현할 수 없으므로 Fig. 1과 같이 최종 단면에 소재의 표면에 있는 절점수만큼 톨에 형상정의점을 매칭시켜



(a) Describing points of original roll



(b) Matching of exterior points of workpiece



(c) Roll expressed by added describing points

Fig. 1 Describing system of roll for wear volume update

곡선 부분을 여러 개의 직선으로 표현하였다. 새로 생성된 롤 데이터(roll data)는 Fig. 1(b)와 같이 곡선 부분이 직선으로 표현되어 최초 롤 데이터와는 관계없이 소재에서 매칭된 노드의 개수만큼 형상정의점으로 표현이 된다. 곡선 부분을 직선으로 표현을 하게 되면 마모 해석 시에 대부분의 마모가 일어나는 필릿 부분을 쉽게 업데이트 할 수 있다.

마모가 일어나는 부분은 소재와 롤이 접촉하는 지점에서 발생하므로 소재의 접촉 지점에서 절점력이 발생하게 되며 절점력으로부터 마모량을 계산하고 마모량을 롤에 업데이트하며 업데이트 방향은 Fig. 2와 같이 절점력의 방향과 같은 국부 영역에서의 수직(normal)방향이다.

4. 마모량 예측

4.1 절점력의 결정

롤을 강체라 가정했을 때 롤이 소재에 미치는 힘은 소재가 롤에 미치는 힘과 같다고 할 수 있다. 그러므로 유한요소해석으로부터 계산된 소재의 절점력을 Fig. 3과 같이 마모량 계산을 위한 소재가 롤에 작용하는 절점력으로 간주할 수 있다. 롤은 회전을 하고 회전하는 Z방향으로 마모가 일어나며 Fig. 4와 같이 Z라인상에 여러 접촉 영역이 생긴다면 절점력도 여러 개가 되는데 그 중에서 최대 절점력을 택하여 그 라인상의 대표 절점력으로 정하여 최대 절점력으로 해당 Z라인상의 대표 마모량을 계산하게 된다.

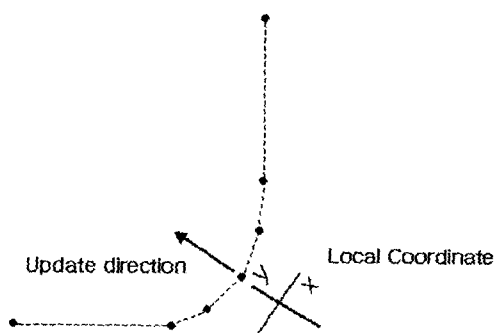


Fig. 2 Update direction of describing points

4.2 마모식의 적용

요소화시킨 마모식을 이용하여 SHAPE-RF에 적용을 하였고 대략적인 알고리즘은 Fig. 5에 나타내었다. SHAPE-RF에서 유한요소해석이 끝난 후 마모량을 계산하고 롤 형상을 업데이트 하며 업데이트된 롤형상으로 같은 소재를 반복하여 해석하도록 하였다. 미끄럼 속도는 대략적으로 롤속도와 소재 속도의 상대속도로 정의하여 식 (5)와 같이 근사할 수 있으며, 마모 계수 K값과 경도 H값은 롤과 소재 사이의 재질 차이와 소재의 특성에 따라서 결정을 하였다.

$$V_{sliding} = V_z - V_{roll} \quad (5)$$

Δt 의 계산은 접촉점(contact point)이 롤과 접촉하는 순간부터 접촉이 끝나는 순간까지의 시간으로 정의하여 접촉영역 내에서의 접촉 노드 사이의 이동 시간은 Fig. 6과 같다.

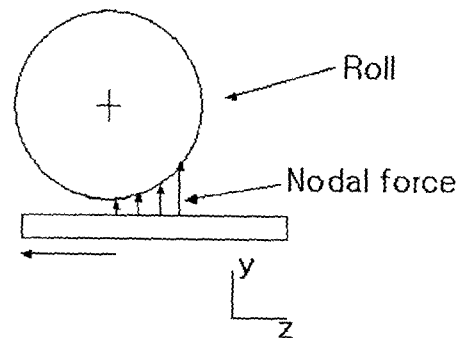


Fig. 3 Nodal forces for calculation of wear volume

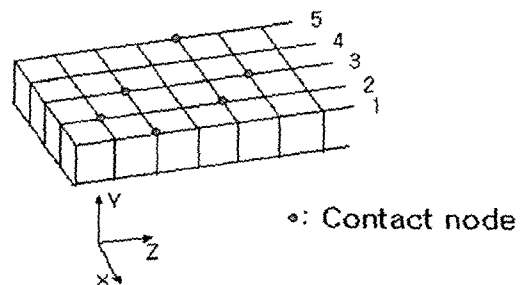


Fig. 4 Contact nodes on Z-line

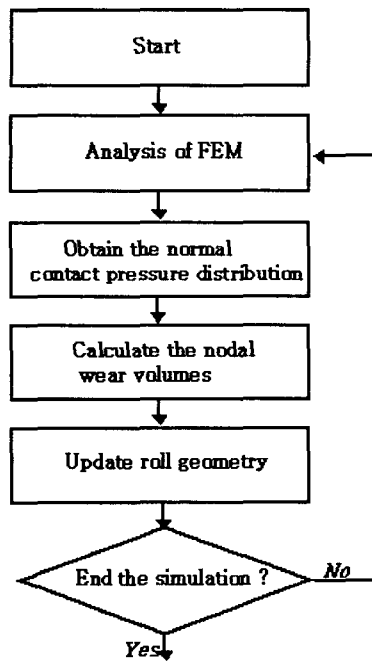


Fig. 5 Algorithm of calculation of wear volume

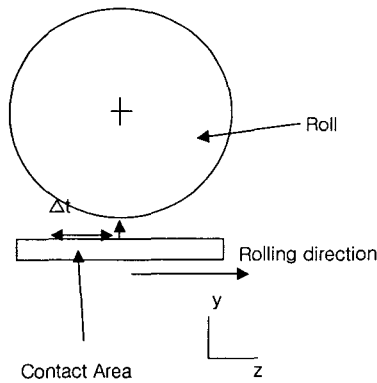


Fig. 6 Definition of Δt in control volume

4.3 W-굽힘(Bend) 성형공정에서의 마모량 계산

4.3.1 시뮬레이션(Simulation)

적용된 마모식을 검증하기 위해 W-굽힘 성형 공정(forming process)을 시뮬레이션하였다. 공정조건은 Table 1과 같으며 두께와 폭이 다른 세 가지 경우에 대하여 계산을 하였다. 모양은 같더라도 두께가 다른 제품을 생산하기 위해서는 롤 형상

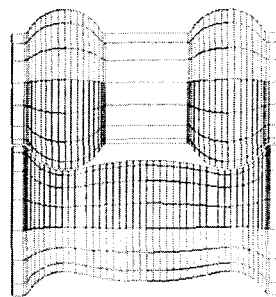
Table 1 Process Conditions of W-bend forming

Material	SS400
Thickness	2.9mm, 4mm, 4.5mm
Width	171mm, 220mm, 260mm
Roll Velocity	0.1m/s
Flow Stress	$\bar{\sigma} = 740.28 \bar{\epsilon}^{0.248}$ Mpa
Friction Factor	0.1
Wear Coefficient	10^{-5}
Hardness	200MPa



(a) 2.9mm

(b) 4mm



(c) 4.5mm

Fig. 7 Roll shape according to thickness of workpiece

도 달라야하기 때문에 Fig. 7과 같이 모양이 다른 롤을 사용하였다. 롤은 강체로 가정을 하였고 소재의 물성치만을 고려한 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다.

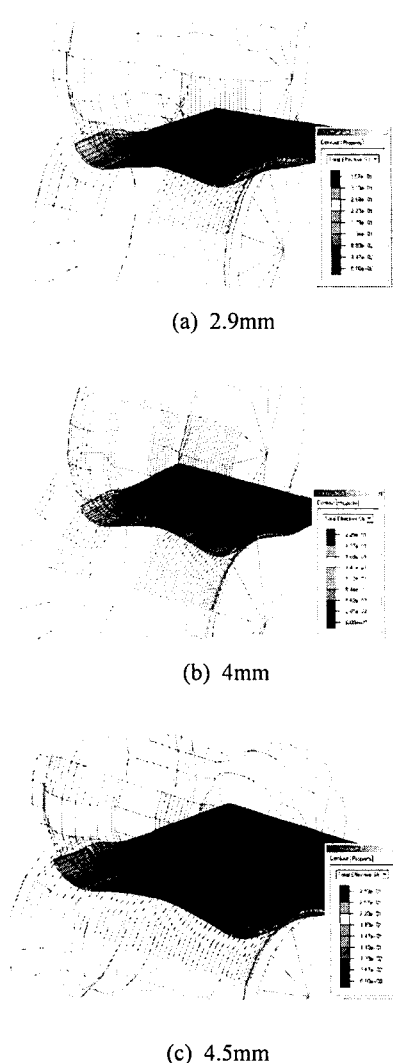
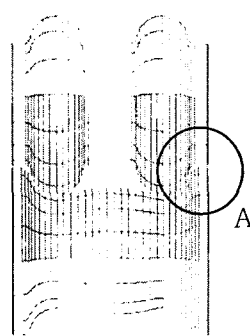


Fig. 8 Simulation results of W-bend forming

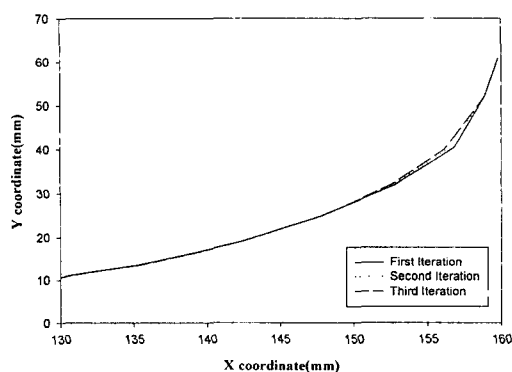
4.3.2 마모량 예측

실제 롤포밍 공정에서 롤 마모량의 임계치는 약 0.5mm로 사용하고 있다. 마모량이 임계치를 넘게되면 제품의 치수와 품질에 영향을 주기 때문에 그 전에 교체 혹은 가공하여 사용해야 한다. 그러므로 0.5mm에 도달할 때까지의 시뮬레이션 값과 실험값을 비교하기로 한다.

시뮬레이션시 마모량이 0.5mm에 도달할 때까지는 1만회 이상의 반복적인 계산이 필요하므로 다섯 번의 시뮬레이션을 통한 결과값을 이용하여 마모 예측식을 만들고 그 식을 이용하여 임계치에



(a) Area of roll wear



(b) Upper Roll Profile of area A

Fig. 9 Roll profile (2.9mm) after calculation of wear volume

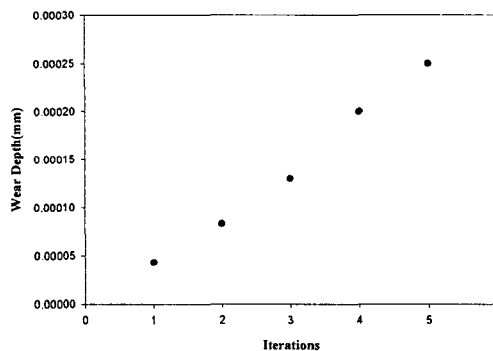


Fig. 10 Variations of wear depth according to iteration

도달하는 시간을 구하였다. Fig. 9는 2.9mm W-bend 성형공정 시뮬레이션 후 마모변화를 나타내었다.

Fig. 10과 같은 데이터를 이용하여 선형회귀(Li-

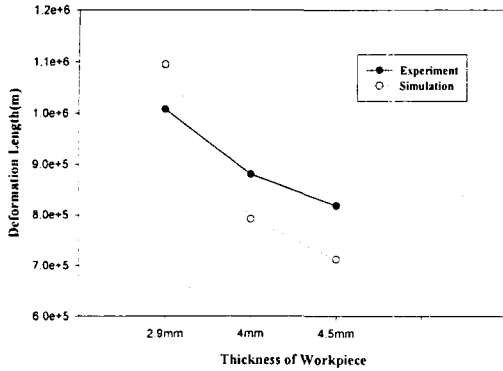


Fig. 11 Comparison of deformation length reaching critical value

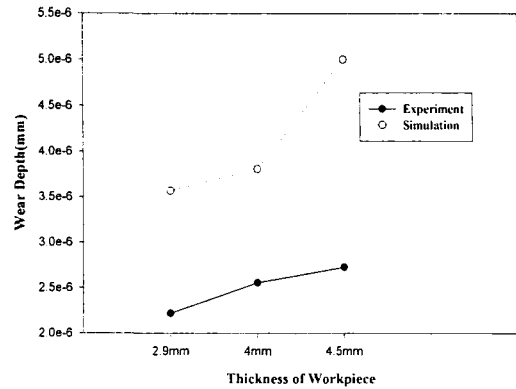


Fig. 12 Comparison of wear depth

near Regression)로 임계치의 마모량이 일어나는 반복횟수를 예측하였다. 각 경우에 대한 성형길이에 대하여 시뮬레이션 결과와 실험값을 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

시뮬레이션 결과와 실험값은 어느 정도의 오차가 있었으나 두께가 두꺼워짐에 따라서 임계치에 도달하는 성형길이가 줄어드는 경향은 일치했다. 오차의 발생은 여러 가지 요인이 있을 수 있겠으나 마모식에 가장 영향을 많이 미치는 마모계수 K값의 선정이나 경도 H값의 선정이 주된 원인으로 생각된다. K, H값은 롤과 소재의 재질 차이에 따라서 값이 틀려지는데 현재 계산된 값은 일정한 상수로 처리를 하였으나 시간에 대한 함수로 표현을 하여 가변적인 K, H값을 선정한다면 실험값에 좀 더 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 시뮬레이션에서는 롤을 강체로 가정하였으나 공정중의 롤은 탄성변형을 하므로 접촉영역에서의 압력분포는 실제와 달라질 것이며 롤의 마모량에 영향을 미치므로 롤의 탄성 변형을 고려하여 시뮬레이션한다면 실제에 좀 더 가까운 롤 보수시기(Repairing Time)를 알 수 있을 것이다.

5. 두께에 따른 마모량의 변화

소재의 두께가 두꺼워 질수록 접촉하는 지점에서의 수직력이 커지므로 수직력과 비례 관계에 있는 마모량이 커지게 된다. 이러한 현상은 임계치에 도달할 때까지 생산할 수 있는 생산량에 직접

적인 영향을 미치고 두꺼운 재질일수록 일찍 임계치에 도달하게 된다. Fig. 11로부터 이러한 현상을 확인할 수 있으며, Fig. 12와 같이 단위 성형길이에 대해서 마모량을 실험값과 비교하여 나타내었다.

6. 롤 마모에 따른 라인 설계

다단패스(Multi pass)라인 설계에 있어서 각 롤이 다단패스를 거치는 동안 롤에 걸리는 힘을 각 패스에 분산시키도록 설계되고 있다. 최초에 설계된 롤 라인 설계는 마모량을 고려하지 않았으므로 마모가 생겼을 경우 각 패스에 걸리는 힘은 달라지게 되며 이로 인해 제품에 영향을 미칠 수 있다. 다단패스의 대표적인 강관 공정을 시뮬레이션하여 마모량이 라인 설계에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

6.1 시뮬레이션

롤 마모량이 전체 라인에 미치는 영향을 알아보기 위해 11패스 강관 공정을 시뮬레이션하였다. 평평한 소재를 이용하여 강관을 만드는 공정으로서 5개의 브레이크 다운 롤, 3개의 클러스트러 롤, 3개의 핀패스 롤로 총 11패스로 구성되어 있으며 공정에서 사용된 재료와 공정 조건은 Table 2와 같다. 롤 속도와 마찰 인자값은 일반적으로 냉간 가공인 경우 0.05에서 0.2사이의 값 중에서 중간 값인 0.1을 택하였다. 해석 시간의 단축을 위해 소재는 1/2모델을 사용하였으며 단면

Table 2 Process conditions of 11-pass tube forming

Material	AISI1015
Thickness	3.2mm
Width	188.0mm
Roll Velocity	0.1m/s
Flow Stress	$\bar{\sigma} = 617.2(1.292 \times 10^{-4} + \bar{\epsilon})^{0.143}$ MPa
Friction Factor	0.1
Wear Coefficient	10^{-5}
Hardness	200MPa

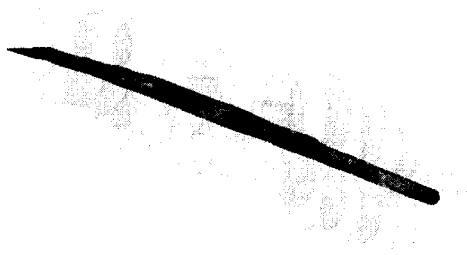


Fig. 13 Simulation result of 11pass tube forming

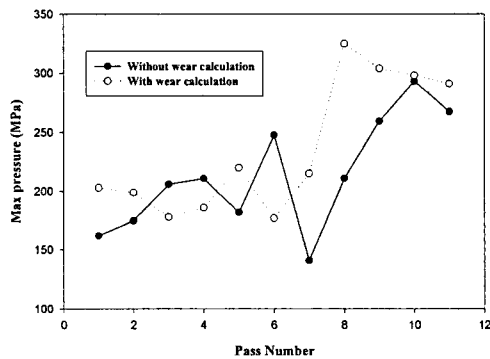


Fig. 14 Change of maximum pressure by wear occurrence

30개의 요소와 30개의 단면을 이용하여 900개의 요소를 사용하였다.

6.2 결과 및 고찰

위와 같은 공정 조건으로 시뮬레이션한 결과를

Fig. 13에 나타내었으며, 마모가 일어날 경우와 일어나지 않을 경우에 대하여 시뮬레이션하여 각 경우의 최대 압력을 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 다단 패스 공정을 설계 할 때에는 각 패스마다 균일한 압력분포를 얻도록 설계하는 것이 이상적이다. 하지만 공정 중에 롤 마모가 일어나면 접촉 영역의 변화로 인하여 롤에 걸리는 압력 분포는 최초 설계자의 의도와 달라지게 된다. 이러한 현상은 두 가지에 대하여 시뮬레이션한 결과를 비교한 Fig. 14에서와 같이 마모가 일어나지 않을 경우와 일어날 경우의 압력분포의 양상이 두 경우에 있어서 상당히 달라짐을 알 수 있고, 특히 8패스(핀패스) 이후부터는 압력분포 값이 매우 커져 실제 공정에 있어서 해당 롤의 과도한 마모현상과 더불어 제품의 품질과 형상에 영향을 미치게 된다.

이러한 현상을 시뮬레이션을 통해 미리 예측하여 압력 분포가 과도하게 걸리는 롤을 설계 변경하고 재배치하여 이러한 현상이 축소되도록 한다면 실제 공정에서 생길 수 있는 불량품의 생산, 시간적 낭비를 막을 수 있을 것이다.

7. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론 및 성과는 다음과 같다.

(1) 연삭마멸 모델로 Archard 식을 선택하고, 이를 이산화 시켜 W-굽힘 성형공정의 롤 마모량을 예측하고 실험값과 비교하였다. 몇가지 가정들과 변수 설정으로 인하여 다소 차이는 있었지만 그 경향에 있어서는 일치함을 확인하였다.

(2) 마모량 업데이트를 하기 위하여 필릿의 전호(Arc)표현 방식을 형상정의점으로 표현하여 필릿부의 형상 변화를 수월하게 표현할 수 있었다. 필릿부의 형상정의점의 개수는 소재의 외곽노드에 의존하며 국부좌표계(local coordinate)의 수직 방향으로 업데이트 되도록 하였다. 롤 형상의 업데이트를 통하여 마모에 의한 롤 형상 변화와 그로인한 접촉영역의 변화를 알 수 있었다.

(3) 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 수회 정도 반복하여 수행하고, 그 결과를 외삽하여 임계 마모량에 도달하는 성형 길이를 계산함으로써 소재의 두께별로 롤의 사용 수명을 예측하였다. 롤

의 사용수명은 대략 $\pm 15\%$ 의 오차로 실험결과와 일치하였다. 미리 짐작할 수 있지만, 소재가 두꺼울수록 마모량이 증가하였다.

(4) 다단패스 강관 공정을 마모가 일어나지 않을 경우와 일어날 경우에 대하여 시뮬레이션 하였다. 최대 압력값을 비교한 결과 양상이 매우 달라짐을 확인할 수 있었으며 이것은 최초 라인 설계 의도를 벗어나 제품에 영향을 끼칠 수 있다.

(5) 다단패스 조관공정을 한 예로 선택하여, 마모를 고려한 경우의 최고 접촉압력을 계산하여, 마모를 고려하지 않은 경우에 대하여 크기와 경향을 비교하였다. 본 연구에서 해석한 조관공정에서는 8패스에서 최고 접촉 압력이 65% 이상 증가함을 보였다. 이로부터, 롤의 마모가 진해됨에 따라 최초 라인설계 의도에서 벗어나 특정 패스에서 마모가 심해짐을 알 수 있으며, 초기 라인설계에 롤 마모를 고려한 시뮬레이션 결과를 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문 연구는 서강대학교 산업기술연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Serope, K., 2001, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," *Addison-Wesley*, pp. 151~155.
- (2) Kiuchi, M., 1973, "Analytical Study on Cold Roll Forming Process," *Report of the Inst. of Ind. Sci., Univ. of Tokyo*, 23(1):1.
- (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*, Kyoto, 423.
- (4) Bhattacharyya, D. and Panton, S. M., 1989, "Research and Computer-Aided Design in Cold Roll Forming," *Academic Publishers-Pergamon*, 464.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Ona, H., Jimma, T. and Fukoya, N., 1983, "Experiments into the Cold Roll Forming of Straight Asymmetrical Channels," *J. Mech. Working Technol.*, 8:273.
- (8) Ona, H., Jimma, T. and Kozono, H., 1984, "A Computer-Aided System for Cold Roll Forming," *Advanced Technology of Plasticity*, 1:508.
- (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) Hong, S. M. and Kim, N., 1999, "Finite Element Analysis Simulation for Roll Forming Process," *KSTP 1999 Spring annual Meeting*, 207.
- (11) Hong, S. M., Cho, H. J. and Kim, N., 1999, "Rigid-Plastic Finite Element Modeling of Roll Forming Process as a kinematically Steady State Condition," *KSME 99PD*, pp. 287~293.
- (12) Hong, S. M., Kim, D., Yun, H. and Kim, N., 2000, "Development of Roll Forming Simulation Program," *Society of CAD/CAM Engineers*, pp. 417~423.
- (13) Archard, J.F., 1986, "Friction between Metal surface," *Wear*, 113, pp. 3~6.