

3차원 강소성 유한요소법을 이용한 링 로울링 공정의 해석

김 낙 수
홍익대학교 기계공학과 교수



● 1959년생
● 소성가공 및 수치해석과 소성가공의 전산기원용설계에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

링 로울링(ring rolling)은 이음매 없는 링을 제작하기 위한 특수한 공정으로서, 제트엔진(jet engine)의 부품, 베어링 레이스(bearing race), 자건거의 림(rim) 등 많은 산업분야에서 널리 사용되고 있는 성형 가공방법이다.

링 로울링 공정을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점으로는,

- (1) 제작시간이 짧고,
- (2) 균일한 제품의 질을 얻을 수 있으며,
- (3) 작은 가공력으로도 큰 치수의 링을 제작할 수 있고,
- (4) 다른 성형가공방법에 비해 정밀도가 높으며,
- (5) 재료를 상당히 절약할 수 있다는 점 들 수 있다.

링 로울링공정 및 공정중 소재의 변형 그리고 최종제품의 결함 유무에 대한 관심은 최근에 들어 매우 높아지고 있다. 그 이유는 현재 및 장차에 쓰일 대부분의 기계들이 고강도, 고정밀도, 경량화를 요구하며, 특히 회전체를 포함하는 기계류, 예를 들면 제트 엔진, 터빈류, 베어링, 자건거들의 링 부품들이 링 로울링공정으로 제작되고 있기 때문이다. 링 로울링 공정의 이러한 중요성에 비추어 볼 때, 공정자체

와 소재의 변형거동에 대한 연구는 전세계적으로 매우 미흡한 실정이다.

링 로울링 공정은 일반적인 판재 압연가공과 유사한 듯 하나, 판재압연에 응용되었던 기존의 해석방법을 링 로울링 공정에 적용할 수 없는 다음과 같은 몇 가지의 큰 차이점이 있다.

링 로울링 공정에서는,

- (1) 소재는 곡률을 가지고 있으며 그 반경은 지속적으로 변화(증가)한다.
- (2) 구동 로울의 직경과 가압 로울의 직경이 다르다.
- (3) 가압 로울을 주로 공회전하며, 그 축은 구동 로울쪽으로 움직인다.
- (4) 재료(금속)의 유동은 근본적으로 3차원적이다.

이러한 이유들로 인하여 링 로울링 공정 및 제반 사항에 대한 이해 및 설계는 실험, 경험 또는 현장에서의 시행오차에 의해서만 이루어져 왔다.

현재 기계 및 부품의 성형제작의 세계적 추이는 고정밀도, 고강도 제품들이 요구되어, 꾸준히 제작기술이 발달하여 나아가고 있는 반면에 일반적인 해석방법 및 그에 근거한 설계기술은 현저히 뒤떨어져, 단순히 현장기술자들의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 특히 링 로울링 공정은 그 제작기술이 난해하나 현재까지 알려진 바로는 별 다른 해석방법이 존재하고

있지 않음에 따라 해석에 이은 설계기술이 뒤떨어져 있다고 할 수 있다. 이 점은 세계적으로 공통적인 상황이지만, 링 로울링 공정이 항공우주 산업의 핵심이 되는 제트 엔진의 부품제조에 기본적인 필수 공정임을 감안하여 볼 때 국내에서도 이 공정에 대한 보다 근본적인 해석 방법의 개발과 그에 보조하는 실험연구가 있어야 함은 매우 절실하다.

링 로울링에 대한 실험적 연구는 1970년대 중반에 영국의 W. Johnson 교수팀에 의하여 처음으로 수행되었고^(1~4), 이후 1980년대 중반에 한국과학기술원의 양동열 교수팀에 의하여 실험적 연구와 상계해법 및 2차원 유한요소법에 의한 해석의 시도가 이루어져 많은 주목을 받은 바 있다^(5~6). 이와는 별도로 몇몇 일본인 및 독일인 연구자들에 의하여 몇 가지 실험적 및 해석적 연구가 시도되었다^(7~8). 그러나 링 로울링은 본질적으로 재료의 3차원 유동에 바탕을 둔 공정이므로 현재까지 링 로울링시의 재료의 유동 즉, 변형에 따른 단면형상의 변형에 관한 연구는 극히 부족한 형편이다.

1989년에 저자와 S. Kobayashi에 의해 3차원 해석용 패키지인 "RING" 프로그램이 개발된 이후^(9~10), 링 로울링 업체 및 제트엔진 제작회사로부터 많은 관심을 받아왔다. "RING" 프로그램의 특징으로는 (1) 3차원 강소성유한요소법의 사용으로 실제 링 로울링 공정을 해석하며, (2) 2개의 메시 시스템을 이용한 독특한 updating 방법으로 계산량을 대폭 감소시켰으며, (3) 임의의 단면을 갖는 로울들에 대하여 해석할 수 있다는 점을 들 수 있다.

2. 해석 방법

2.1 링 로울링 공정의 개요

전형적인 링 로울링기에서는, 링 모양의 블랭크(blank, 소재)를 원하는 최종직경을 가지도록 팽창시키면서, 2조의 로울로 원하는 단면형상을 갖도록 성형한다. 소재의 반경방향으로 설치된 2개의 로울은 링 소재의 두께를 조절하

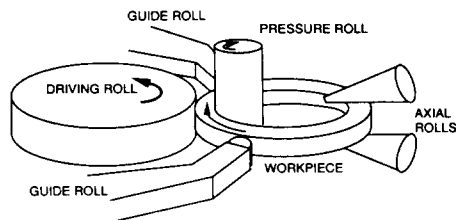


그림 1 링 로울링기의 개략도

며, 축방향으로 설치된 2개의 로울은 링의 높이(또는 폭)를 조절해 나간다. 링 로울링기의 주요부품 및 소재의 위치가 그림 1에 개략적으로 나타나 있다. 반경 방향 로울에는 구동 로울(main driven roll)과 가압 로울(pressure roll 또는 맨드렐, mandrel)이 있는데, 구동 로울의 축은 일정한 위치에 있도록 유지한 채 가압 로울을 구동로울 쪽으로 밀어서, 소재의 주요 변형역이 이 두 로울 사이에서 발생하도록 하여 결국 링의 직경을 증가시키도록 하고 있다. 축 방향 로울은 로울 면과 소재간의 상대속도차를 줄이기 위하여 테이퍼진 모양으로 되어 있으며 링의 축 방향으로 압력을 가함으로써 평탄한 면을 얻을 수 있게 한다.

2.2 해석의 가정

본 글에서 링 로울링 공정을 수치적으로 해석하는데 있어서는 몇가지 가정이 쓰이고 있다.

(1) 3차원 강소성 유한요소법의 사용

3차원 강소성 유한요소법을 사용함에 있어서, 방대한 계산량을 줄이기 위해 2가지 메시 시스템을 사용한다. 그 하나는 실제로 속도장을 구하기 위하여 사용되는 SMS(spatially-fixed mesh system)이고, 다른 하나는 실제로 변형정도 및 좌표 등의 재료에 의한 정보를 담고 있는 AMS(actually-rotating mesh system)이다. SMS와 AMS의 예가 그림 2에 도시되어 있다. 그림에 보여준 것처럼, 3차원 강소성 유한요소법이 실제로 적용되는 SMS의 구성은 소재의 변형이 집중되는 양 로울(구동로울과 가압로울)사이에서만 조밀한 메시를 잡고 그

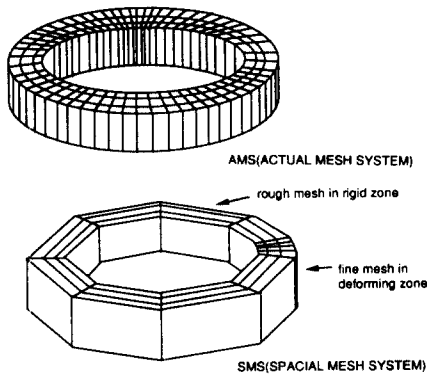


그림 2 메시 시스템 (mesh system)

의 영역에서는 거의 강제회전하는 점에 착안하여 매우 간단한 메시를 갖도록 한다. 2개의 메시 시스템을 사용함으로써 실제 계산시간을 상당히 절약하여, 실용적인 범위 내에서 3차원 강소성 유한요소법을 사용할 수 있게 된다.

(2) 속도장

SMS의 각 절점은 링의 원주방향으로 공간에 부착되어 있고, 그 단면의 형상은 SMS에서 강소성 유한요소법에 의해 얻어진 속도장에 바탕을 두고 변화한다. 주어진 시간 증분 Δt 동안에 속도장은 일정하다고 가정되며, AMS는 이 속도장에 따라서 변형 및 회전하게 된다.

(3) 공정의 시작

링 로울링 공정이 최초로 시작될 때에는 로울과 소재 간의 일정한 접촉면적을 주기 위하여, 가압 로울에 초기 행정을 적당량 주어 수치해석을 시작한다.

(4) 링 반경의 증가

공정이 진행됨에 따라서 전반적으로 링의 두께는 지속적으로 감소하고 링의 반경은 증가한다. SMS의 한정적인 조밀도로 인해 유한요소법으로 구하여진 속도장과 이에 근거하여 변형하는 링의 형상에는 오차가 따르므로, 매 시간 증분마다 소재의 부피를 재계산하여 링의 회전 중심축의 위치를 정확하게 보정하여 나간다.

2.3 속도장의 계산-3차원 강소성 유한요소법
일반적인 3차원 강소성 유한요소법에 대하여

는 여러 문헌에 나타나 있으므로 여기에서는 생략한다. 단, 강소성 유한요소법을 적용하여 얻어지는 비선형 연립방정식의 해(즉, 각 절점에서의 속도)를 구하는 방법과 소재와 공구면(여기에서는 로울면)간의 마찰에 대해서는 이미 참고문헌 (10)과 (11)에서 밝힌 바 있다. 프로그램 "RING"에서는 임의의 단면형상을 갖는 로울들에 대해서도 고려되어 이들을 유한요소법에서 필요로 하는 경계조건으로 줄 수 있다.

2.4 얻어진 속도장으로부터 변형된 형상의 결정

AMS절점의 속도는 SMS 절점에서 강소성 유한요소법으로 얻어진 속도를 그림 3과 같이 선형 보간함으로 얻을 수 있다. AMS의 점 P에서의 각속도 ω 를 구하려면 다음식을 사용한다.

$$\omega = -\frac{d\theta}{dt} = (\theta_A - \theta_B) \frac{d\alpha}{dt} = \omega_A + \alpha(\omega_B - \omega_A) = (1 + \epsilon)\omega_A$$

여기에서 $\alpha = \frac{\theta_A - \theta}{\theta_A - \theta_B}$ 이고, $\epsilon = \alpha(\frac{\omega_B}{\omega_A} - 1)$, $\epsilon \cong 0$ 이다.

윗식을 시간에 대하여 적분하면 변형영역에서는 SMS가 잘게 구성되어 있으므로 $\omega \cong \omega_A \cong \omega_B$ 이고, 비변형영역에서는 거의 강성회전운동을 하므로 역시 $\omega \cong \omega_A \cong \omega_B$ 이므로 $\epsilon \cong 0$ 임을 알 수 있다. 따라서 점 A로부터 P점까지의 재료의 절점이 움직이는데 걸리는 시간은

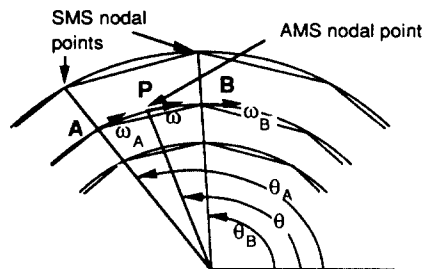


그림 3 선형보간을 이용한 AMS의 updating

$$\begin{aligned} \int_{t_A}^t dt &= \int_0^\alpha \frac{\theta_A - \theta_B}{\omega_A + \alpha(\omega_B - \omega_A)} d\alpha \\ &= \frac{\theta_A - \theta_B}{\omega_B - \omega_A} \ln(1 + \varepsilon) \\ &= \frac{\theta_A - \theta}{\omega_A} \frac{\ln(1 + \varepsilon)}{\varepsilon} \end{aligned}$$

즉, $t - t_A \approx \frac{\theta_A - \theta}{\omega_A} \left(1 - \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2 - \frac{1}{4}\varepsilon^3 \right)$

로 구할 수 있다.

주어진 시간증분에 대하여는, $\dot{\eta} : v_r, v_z, \dot{\varepsilon}$ 및 $\eta : r, z, \bar{\varepsilon}$ 라 할때, 재료의 질점의 위치 및 유효 변형률이 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\eta} = \dot{\eta}_A + \alpha(\dot{\eta}_B - \dot{\eta}_A) = \frac{d\eta}{dt}$$

$\beta = \frac{(\omega_B - \omega_A)(t - t_A)}{\theta_A - \theta_B}$ 라 하고, 윗식을 적분하

면,

$$\begin{aligned} \eta - \eta_A &= \dot{\eta}_A(t - t_A) + \frac{\dot{\eta}_B - \dot{\eta}_A}{\omega_A/\omega_B - 1} \left[\frac{\theta_A - \theta_B}{\omega_A - \omega_B} \right. \\ &\quad \left. (e^\beta - 1) - (t - t_A) \right] \\ &\cong (t - t_A) \left[\dot{\eta}_A + (\dot{\eta}_B - \dot{\eta}_A) \frac{\omega_A(t - t_A)}{\theta_A - \theta_B} \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6}\beta + \frac{1}{24}\beta^2 + \frac{1}{120}\beta^3 + \frac{1}{720}\beta^4 \right) \right] \end{aligned}$$

이 얻어지므로 이로부터 주어진 시간증분 후에 소재가 변형하여 질점이 움직인 후의 위치, θ, r, z 와 유효변형률 $\bar{\varepsilon}$ 을 알 수 있다. 따라서 SMS에서 구하여진 속도장으로 부터 AMS의 변형된 형상 및 기타 정보(유효변형률 등)를 구할 수 있고, 이들은 다음 시간단계에서 SMS를 구성하는 데 이용되어 3차원 강소성 유한요소법으로 속도장을 계산할 수 있으므로 지속적으로 링 로울링 공정을 수치해석할 수 있다.

3. 해석 결과

직사각형 단면을 갖는 링 소재(blank)를 회전 및 가압하였을 때는 소재측면에서의 불균일

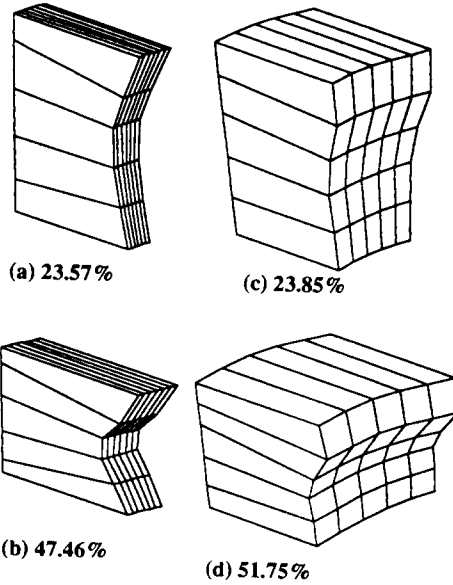
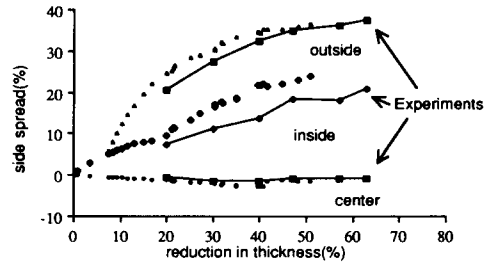
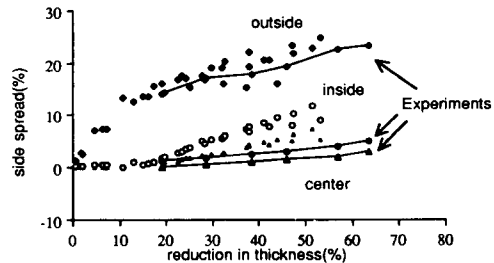


그림 4 단면이 직사각형인 링의 가공에 따른 변형(링의 일부만 나타내었음)



(a) 가압속도 0.007 in./rev.일 때의 측면변형량



(b) 가압속도 0.100 in./rev.일 때의 측면변형량

그림 5 단면이 직사각형인 링의 가공시 계산된 측면 변형량과 실험값과의 비교

한 속도장으로 인하여 fish tail 현상이 나타나며, 이는 많은 실험에서 확인되고 있다⁽²⁻³⁾. 이러한 fish tail 현상은 각재압연에서 나타나는 측면의 변형양상 즉, barrelling과는 정반대인데, 그 이유는 소재가 곡률을 가지고 있으며, 소재의 직경이 커짐에 따라 곡률이 지속적으로 증가한다는 데 있다. Fish tail은 평탄한 측면을 얻고자 하는 최종제품에서는 결국 결함으로 남게 된다.

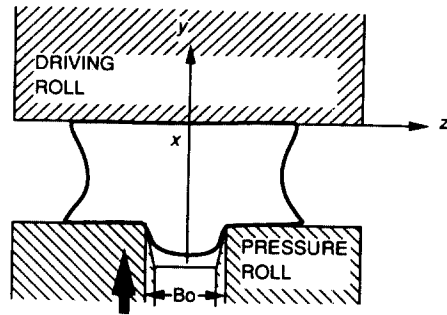
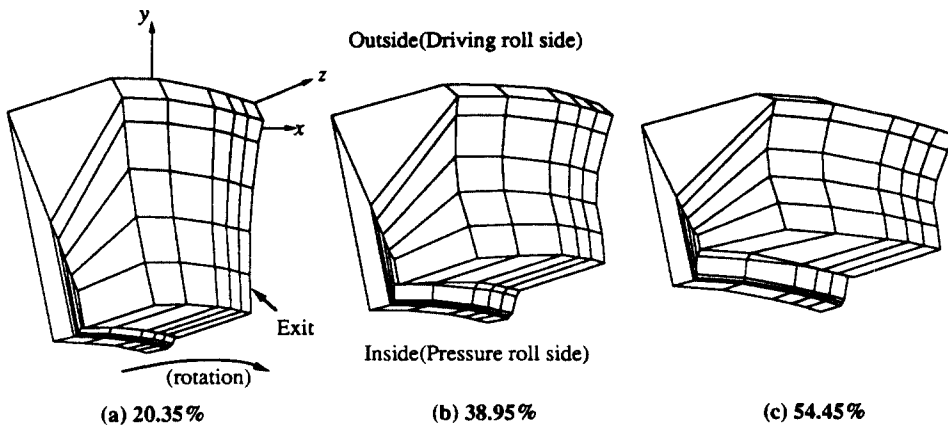
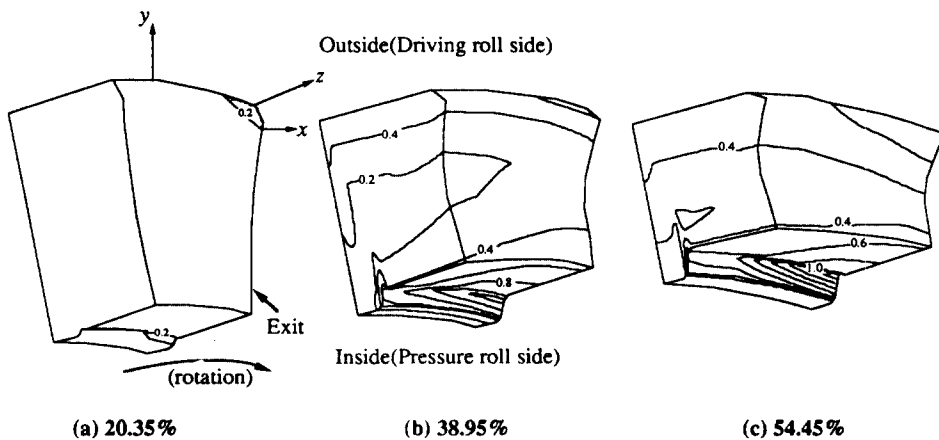


그림 6 T자형 단면을 가진 링 로울링 공정의 개략도



Part of ring (15 degree sector) in deforming zone.

($B_o/W_o = 0.25$, material: tellurium lead, Feedrate = 0.10 in./rev.)



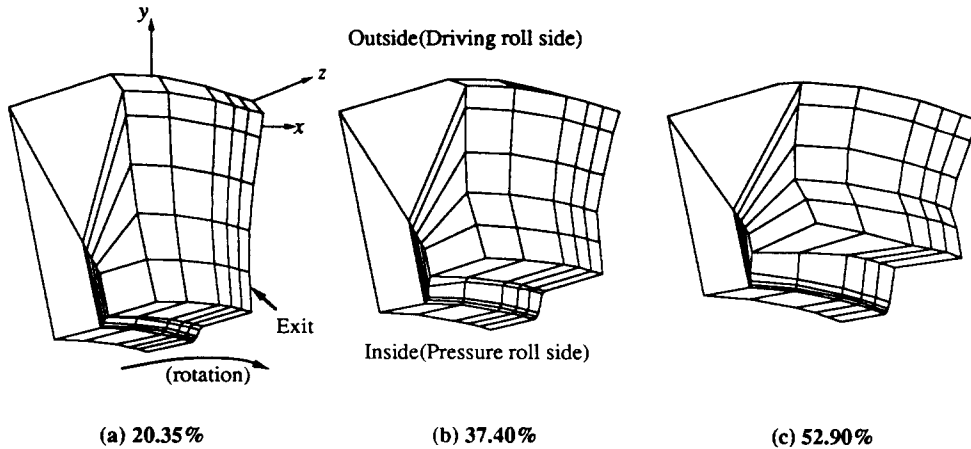
Effective strain distribution of a part of ring (15 degree sector) in deforming zone.

그림 7 소재의 폭에 대한 T자형 홈의 비가 0.25인 링의 변형과정과 변형률의 분포(링의 일부만 나타내 있음)

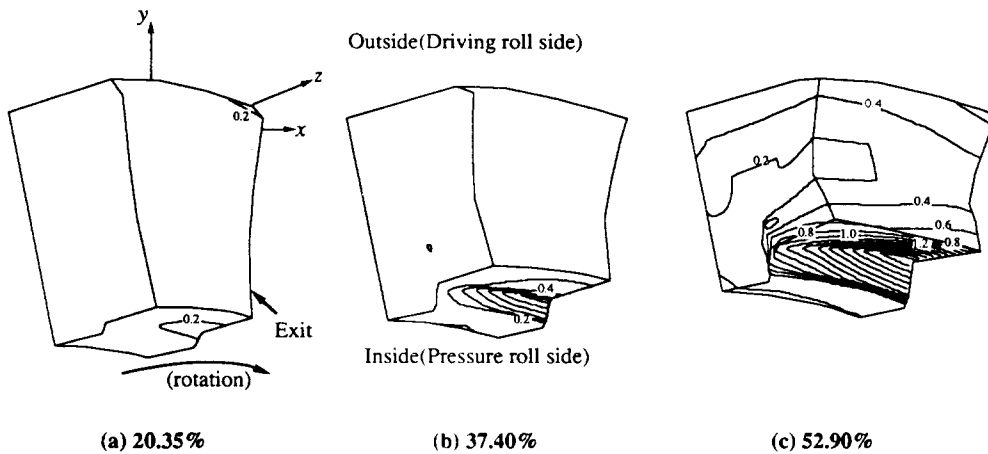
3.1 평탄한 로울을 사용한 경우

그림 4는 직사각형 단면형상을 갖는 링소재를 가압측과 구동측에 모두 평탄한 로울을 사용할 때 소재의 변형을 "RING" 프로그램을 사용한 결과를 이용하여 보여 주며, 가운데 부

분이 들어가고 로울들에 접한 쪽이 튀어 나오는 fish tail 현상을 잘 보여 주고 있다. 해석결과중 폭퍼짐 (side spread)을 W. Johnson 등이 tellurium lead를 사용한 실험결과와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 실험조건을 고려하여 표

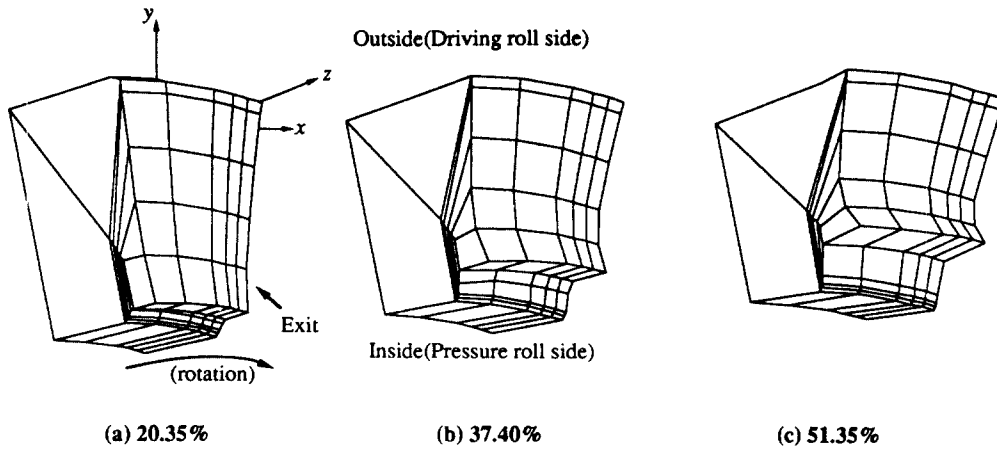


Part of ring (15 degree sector) in deforming zone.
 (Bo/Wo = 0.50, material: tellurium lead, Feedrate = 0.10 in./rev.)

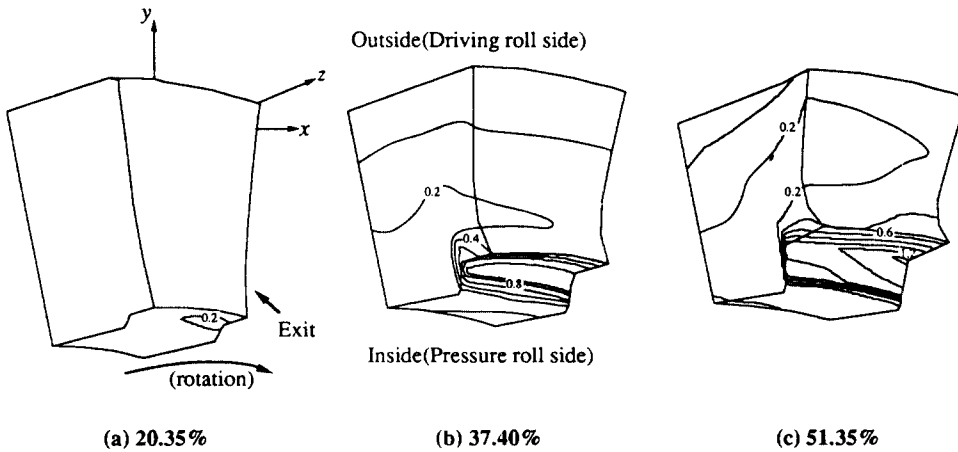


Effective strain distribution of a part of ring (15 degree sector) in deforming zone.

그림 8 소재의 폭에 대한 T자형 홈의 비가 0.5인 링의 변형과정과 변형률의 분포(링의 일부만 나타내었음)



Part of ring (15 degree sector) in deforming zone.
 (Bo/Wo = 0.75, material: tellurium lead, Feedrate = 0.10 in./rev.)



Effective strain distribution of a part of ring (15 degree sector) in deforming zone.

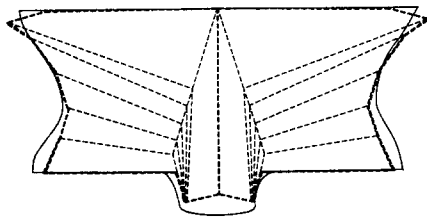
그림 9 소재의 폭에 대한 T자형 홈의 비가 0.75인 링의 변형과정과 변형률의 분포(링의 일부만 나타내었음)

면마찰인자를 $m=0.5$ 로 가정하여 해석하였음에도 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 가압로울에 홈이 있는 경우

T자형 단면을 갖는 제품을 만들기 위해서는 가압로울에 홈이 있으면 된다. 그림 6은 직사

각형 단면형상을 갖는 링으로부터 T자형 단면형상을 갖는 링의 제작을 개략적으로 보여주고 있다. 그림 7, 8, 9는 원래 소재폭에 대한(가압로울 축에 만든) 홈의 비가 각각 0.25, 0.5, 0.75인 경우에 대하여 소재의 변형과정 및 변형률의 분포를 나타낸 것이다. 각 경우에 있어



— Experiment: Total reduction 43.8%
 - - - - Simulation: Total reduction 43.52%

그림 10 T자형 단면을 가진 링의 단면형상의 계산결과와 실험결과와의 비교

서 흠이 시작되는 모서리 부분에서 큰 변형을 받았음을 알 수 있다. 소재로 알루미늄 합금 HE30(영국규격)을 사용하여 0.019in./rev.의 속도로 가압하여 44% 정도의 두께감소를 얻은 경우에 실험으로 얻은 단면의 형상과 해석결과를 그림 10에 나타내었다. 비교적 단순한 메시 시스템을 사용하였음에도 두 결과가 잘 일치하고 있다.

4. 맺음말

3차원 강소성 유한요소법과 독특한 updating 방법으로 실험결과와 잘 일치하는 실용적인 프로그램을 개발할 수 있었다. 몇 가지 해석결과의 예에서 알 수 있듯이 소재의 변형을 정확하게 예측할 수 있고, 임의의 단면현상을 가진 로울에 대하여도 해석이 용이하였다.

이와는 별도로, 현재 개발된 프로그램인 "RING"에는 후방추적기법(backward-tracing technique)이라는 수치적인 방법을 덧붙일 수 있다. 이것이 완료된 경우에는 물리적 또는 실험적으로 불가능한, 시간에 대한 역적분이 가능하며, 링 로울링의 경우, 완제품의 형상으로부터 전가공소재(preform 또는 blank)의 형상을 역으로 계산해 낼 수 있다. 따라서 링 로울링을 단순히 이해하는 차원을 넘어서서, 실제로 현장에서 최적 공정 및 전가공소재의 형상을 자동적으로 설계할 수 있다.

링 로울링의 제작공정을 3차원 강소성유한요소법으로 해석할 수 있고, 실험적으로 해석결과와의 타당성을 결정지움에 따라서, 링 로울링에 대한 연구결과는 보편적인 기대 이상으로 첨단산업분야에 기여할 수 있을 것으로 보여진다.

현재 링 로울링에 대한 국내에서의 관심은 비교적 적은 편이나, 항공우주산업 분야중 부품제작분야 및 제반 기계공업분야 특히 소성성형가공 분야에서, 해석적 방법의 지속적인 개발 및 실험적 연구와 뒷받침은 궁극적으로 이 분야의 공정 및 소재 설계의 자동화 내지는 전산화로 이끌 것이며, 장차 이 분야를 국제적으로 주도해 나가고자 하는 데 필수적인 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- (1) Hawkyard, J.B., Johnson, W., Kirkland, J. and Appleton, E., 1973, "Analyses for Roll Force and Torque in Ring Rolling, with Some Supporting Experiments", Int J. Mech. Sci., Vol. 15, pp. 873~893.
- (2) Mamalis, A.G., Hawkyard, J. B. and Johnson, W., 1975, "Cavity Formation in Rolling Profiled Rings", Int J. Mech. Sci., Vol. 17, pp. 668~672.
- (3) Mamalis, A.G., Hawkyard, J.B. and Johnson, W., 1976, "Spread and Flow Patterns in Ring Rolling", Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 11~16.
- (4) Johnson, W. and Mamalis, A.G., 1979, "Rolling of Rings", International Metals Reviews, No. 4, pp. 137~148.
- (5) Ryoo, J.S. and Yang, D.Y., 1986, "The Influence of Process Parameters on Torque and Load in Ring Rolling", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 12, pp.307~321.

- (6) Yang, D.Y. and Ryoo, J.S., 1987, "An Investigation into the Relationship Between Torque and Load in Ring Rolling", *Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME*, Vol. 109, pp.190~196.
- (7) Maekawa, Y., Hirai, T., Katayama, T. and Hawkyard, J. B., 1984, "Modelling and Numerical Analysis of Cross Rolling and Profile Ring Rolling Processes", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 930~935.
- (8) Koppres, U., Wiegels, H., Dreinhoff, P., Henkel, J. and Kopp, R., 1986, "Methods Applied to Reduce Material and Energy Expenditure in Ring Rolling", (English translation) *Stahl und Eisen*, Vol. 106, No. 14/15, pp. 789~795.
- (9) Kim, Naksoo., Machida, S. and Kobayashi, S., 1989, "Computer Simulation of Ring Rolling Process", Dept. of Mech. Eng., U.C. Berkeley.
- (10) Kim, Naksoo., Machida, S. and Kobayashi, S., 1990, "Analysis of Ring Rolling by the Three-dimensional Finite Element Method", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*.
- (11) Kim, Naksoo., 1989, "Computer-aided Preform Design in Metal Forming by the Finite Element Method", Ph. D. Dissertation, Dept. of Mech. Eng., U.C. Berkeley.

