

외부에 둥근 홈이 있는 형상환상압연공정의 유한요소해석

김광희*·김병탁*·석한길**

Finite Element Analysis of Externally Round Grooved Profile Ring Rolling Process

K.H. Kim, B.T. Kim, and H.G. Suk

Abstract

Profile ring rolling process is simulated by using the general purpose commercial finite element analysis software MSC.Superform. Because the deforming region is restricted to the vicinity of the roll gap, only a ring segment spanning the roll gap is analysed in order to save computation time and cost. A profile ring with an external round groove is chosen as an example to be analysed. The rolls with and without groove were analysed to compare the amount of side spread. It is found that the grooves in the rolls reduce the amount of side spread.

Key Words : Profile Ring Rolling, Finite Element Analysis, MSC.Superform, Side Spread

1. 서 론

환상압연공정에서는 링(ring) 모양의 소재가 회전하면서 구동롤(driven roll)과 압력롤(pressure roll) 사이를 지나는 순간에만 미소한 3차원 소성변형을 받고 나머지 부분에서는 거의 강제회전 운동을 하므로 공정시간이 대부분의 다른 소성가공 공정에 비하여 상대적으로 길어서 이 공정을 매우 정확하게 유한요소해석하기 위해서는 막대한 기억 용량 및 계산 시간이 필요하다. 따라서 현재까지는 컴퓨터 성능 및 계산 비용의 한계로 인하여 공정의 처음부터 끝까지 완전히 3차원 해석하지 못하고 있다. 지금까지 시도된 3차원 해석 중에서 대표적인 2가지를 살펴보면, 먼저 김낙수¹⁾ 등은 두 롤 사이 근처의 영

역에만 해석용 공간 격자시스템을 도입하고 해석하여 그 결과를 이용하여 링 소재 전체의 격자시스템을 매년 갱신하는 방법으로 해석하였으나 계산 시간을 줄이기 위하여 공간 격자시스템의 요소 수를 줄여야 하고, 소재의 단면 변형 상태에 따라 격자를 재구성할 수 있는 기능을 아직 갖추지 못하여 아주 정확한 해석 결과는 아직 기대할 수 없는 실정이다. 링 소재는 공정 중에 두 롤 사이 근처의 영역에서만 소성 변형을 하고 나머지 영역에서는 거의 강제회전 운동을 하는 것에 주목하여 양동열²⁾ 등은 링 소재가 매회 완전히 1회전하는 순간마다 두 롤 사이 근처에 존재하는 링 소재의 영역만을 비연속적으로 해석하는 방법을 격자시스템을 재구성하면서 반복적으로 적용하여 T-형 단면을 해석하여 비교적 정확한 해석결

* 부경대학교 기계공학부

** 삼척대학교 금속공학과

과를 얻을 수 있었으나 아직 임의의 단면형상을 해석할 수 있는 기능은 갖추지 못하고 있다. 본 연구에서는 임의의 단면 형상을 비교적 수월하게 처리할 수 있는 범용 상용유한요소해석 프로그램을 이용하여 형상환상압연공정을 양동열 등의 방법을 적용하여 해석하는 방법을 개발하여 대형 형상 링 제품의 개발에 적용하고자 하였다.

2. 해석방법

본 연구에서는 회전과 직선운동을 하는 금형 등의 강체를 비교적 손쉽게 처리할 수 있는 기능을 갖춘 범용 상용유한요소해석 소프트웨어인 MSC.SuperForm을 이용하여 해석하였다. 계산 시간의 단축을 위하여 먼저 흠이 없는 일반적인 형상 롤을 사용한 경우에는 강소성(rigid-plastic)해석을 실시하였다. 소재는 SCM440으로 선정하였고 실제 형상환상압연공정이 1000~1200. C에서 수행되므로 1100. C에서의 응력-변형도 관계는 참고 문헌³⁾의 도표를 이용하였다.

흠이 없는 롤의 경우에는 폭방향의 퍼짐(side spread)이 과도하게 발생하여서 이를 억제하기 위하여 두 롤에 흠(groove)을 만들어 해석을 다시 시도하였다. 이 경우에 강소성해석을 시도하자 해가 수렴하지 못하는 현상이 발생하여 소프트웨어 자체에 내장된 SCM440의 물성 자료를 이용하여 탄소성(elastic-plastic)해석을 실시하였다.

위의 두 경우 모두 계산시간을 단축하기 위하여 우선 공정이 1100. C의 균일하고 일정한 온도에서 이루어지며 주위로의 열전달은 무시할만하다고 가정하였고, 두 개의 롤과 소재의 접촉면들에서의 마찰은 전단마찰로 가정하고 마찰상수(friction factor) m 은 0.3으로 택하였다.

3. 형상 링 제품의 예제와 블랭크 및 롤 형상

기계가공 후 모습이 Fig. 1의 점선으로 표시된 외부에 둥근 흠이 있는 링 제품을 예제로 선정하여 모든 면에 기계가공 여유를 약 3mm씩 준 실선으로 표시된 링 제품을 형상환상압연공정으로 제작할 경우를 해석하였다. 환상압연공정으로 생산할 형상 링의 외경, 내경 및 축방향의 높이는 각각 736mm, 610mm, 62mm이며 상하 대칭이므로 위쪽의 반만 해석하였다.

초기 링 블랭크(blank)로는 외경, 내경 및 높이가 각각 621.55mm, 473.33mm, 62mm가 되는 사각단면의 링을 선택하였고, 실험에 사용될 환상압연기의 사양에 맞춰 선정된 공정 변수는 다음과 같다. 구동롤의 최소 직경, 최대(돌출부) 직경 및 회전속도는 각각 800mm,

822.225mm, 33.729rpm(3.532rad/s)이고, 압력롤의 직경 및 진입 속도는 각각 110 mm, 1.0 mm/s이다.

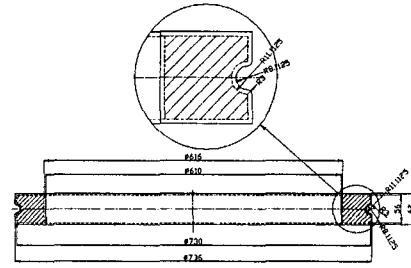


Fig. 1 Externally round grooved profile ring to be ring rolled

Fig. 2는 해석에 사용된 2가지 종류의 롤 형상이다. (a)는 흠이 없는 일반적인 형상 롤의 모습이고, (b)는 어미현상(fishtailing)을 완화하기 위하여 압력롤과 구동롤에 각각 10mm와 15mm 깊이의 흠을 가공하고 모서리 부분은 반경 3mm로 모따기한 형상 롤의 모습이다.

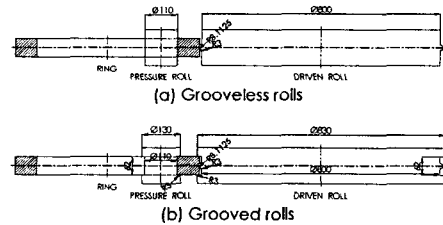


Fig. 2 Profile rolls (a) without grooves and (b) with grooves

4. 유한요소해석 모델

Fig. 3는 초기 유한요소해석 격자시스템 및 접촉면들의 모습이다. 중심각이 15. 가 되는 링 소재의 일부분만을 유한요소 모델링하였고 요소들의 왼쪽 부분이 두 롤 사이로 진입하는 소재의 선단 부분이고 구동롤의 돌출부와 접촉할 부분에서 변형이 많이 발생할 것이므로 이 부분의 격자 시스템을 조밀하게 잡았다.

뒤쪽 곡면이 구동롤을, 앞쪽 곡면이 압력롤을 나타낸다. 구동롤은 공간상에 고정된 축을 중심으로 일정한 각속도로 회전하고, 압력롤은 회전하면서 구동롤 쪽으로 전진할 수 있도록 하였다. 공정 시작 시각부터 소재가 완전히 1회전할 시간을 구동롤의 회전속도와 링 소재의 반경으로부터 계산하고 그 시간동안 압력롤이 이동할 거리를 계산하여 이동시킨 다음 해석을 시작하였다. 해석 시 접촉조건을 계산하는 시간을 단축하기 위하여 계산 중에 소재와 접촉이 예상되는 롤의 일부분만을 모델링하

였으며, 아래쪽 평면은 대칭면을 나타내고 우측의 평면은 초기에 소재를 롤 사이로 밀어 넣어주는 역할을 하면서 공정 중에 링 소재가 한쪽으로 쏠리지 않고 소재의 중심에 대하여 회전운동을 유지하도록 하는 역할을 하며 링의 중심에 대하여 회전운동을 하도록 하였다. 링 소재의 중심 위치는 단순 압입(indentation)으로 가정한 예비 성형 해석으로 결정하였다.

모든 접촉면들은 강체 공구(rigid tool)로 처리하였고, 소재와 구동롤의 접촉면에서 미끄러짐이 없는 것으로 가정하여 소재를 롤 사이로 밀어 넣어주는 우측면의 회전 속도를 계산하고, 이 회전 속도로부터 계산된 일정한 회전 속도로 압력롤이 회전하도록 하였다.

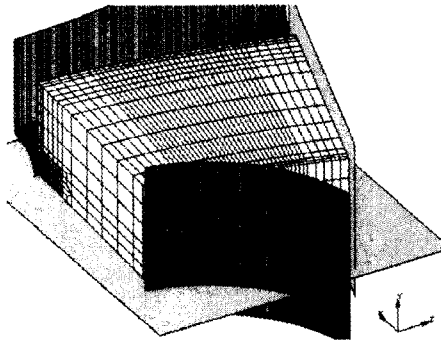


Fig. 3 Initial mesh system and contact surfaces

5. 해석 결과 및 검토

다음의 Fig. 4는 Fig. 3의 초기 격자시스템과 Fig. 2(a)의 흠이 없는 롤들을 이용하여 해석한 링 소재의 1회전 직후 변형된 모습과 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 구동롤 쪽으로부터 바라본 모습을 대칭면의 아래쪽까지 대칭 복사하여 함께 보여주고 있다. 예상했던 대로 구동롤의 돌출부와 접촉하는 부분에서 많은 변형이 발생함을 알 수 있다.

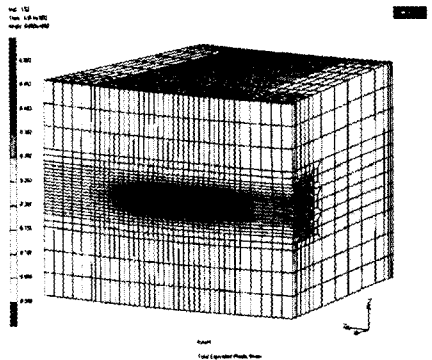


Fig. 4 Distribution of equivalent plastic strain after the first revolution of the ring

Fig. 5는 1회전 직후의 상당소성변형률속도(equivalent plastic strain rate)의 분포를 보여주고 있다. 변형이 두 롤과 접촉하는 부분의 근처에만 집중되고 나머지 부분은 거의 변형하지 않음을 확인할 수 있으며 따라서 본 연구에서의 해석 방법이 타당함을 확인할 수 있다.

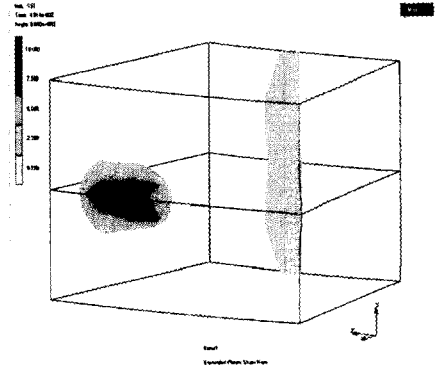


Fig. 5 Distribution of equivalent plastic strain rate after the first revolution of the ring

1회전 직후에 두 롤 사이를 막 빠져나온 링 소재의 단면 형상과 링 소재의 체적일정 조건으로부터 링 소재의 반경을 계산하고 이로부터 두 번째 회전을 해석하기 위한 격자시스템 및 접촉면들의 위치를 결정하여 해석을 반복하였다.

Fig. 6은 우리가 원하는 반경방향 두께를 얻게되는 16회전 직후 소재의 변형된 모습과 상당소성변형률의 분포를 보여주고 있다. 이 그림들로부터 소재의 폭방향으로의 유동으로 인한 어미현상이 심하게 발생하는 것을 알 수 있으며 이에 대한 대책이 필요함을 알 수 있다.

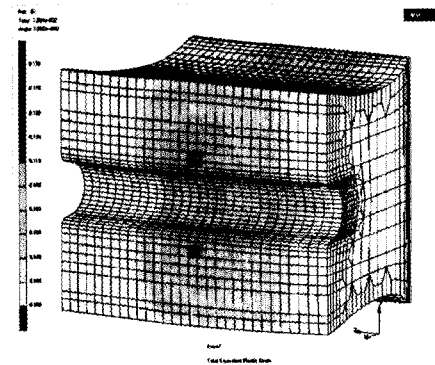


Fig. 6 Distribution of equivalent plastic strain after the 16th revolution of the ring

Fig. 7은 초기 블랭크로부터 16회전까지 대회 회전 직후 변형된 소재의 단면 모습들과 최종 제품의 단면 모습

을 압력롤과 접촉하는 면을 일치시켜 비교하여 보여주고 있다. 위쪽 반은 흠이 없는 롤들을 사용한 경우이고, 아래쪽 반은 흠을 가진 롤들을 사용한 경우이다. 구동롤에 둥근 돌출부가 있는 관계로 소재의 외부는 공정 초기에는 구동롤의 돌출부와만 접촉한다.

흠이 없는 롤들의 경우에는 16회전까지도 소재의 외부 상단부에는 구동롤과 접촉하지 못하는 부분이 있는 것을 볼 수 있고 16회전 후의 소재의 축방향의 두께는 원하는 두께와 거의 같아졌으나 소재의 축방향으로의 유동이 매우 많이 발생하여 압력롤과 구동롤 쪽으로 각각 한쪽 방향으로 최대 5.93mm, 5.37mm의 퍼짐이 발생하였다.

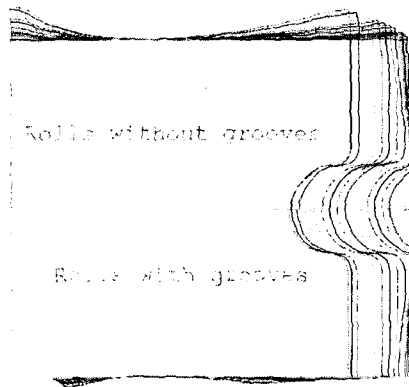


Fig. 7 Comparison of the cross-sections of the ring blank, desired ring product and the ring after each revolution

롤에 흠을 가공할 경우에는 Fig. 7의 아래쪽과 같이 12회전 직후 소재의 외부가 구동롤에 완전히 접촉하게 됨을 알 수 있다. 또한 어미 현상이 크게 감소하여 압력롤과 구동롤 쪽으로 각각 한쪽 방향으로 최대 1.96mm, 1.23mm의 퍼짐이 발생하였고, 특히하게 중앙부분에서는 원래보다 한쪽으로 0.3mm정도 높이가 감소하는 현상이 발생하였다. 완전하게 퍼짐 현상을 억제하기 위해서는 압력롤 쪽은 20mm, 구동롤쪽은 30mm 정도 깊이의 흠을 각각 가공하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 원하는 최종 제품(점선)과 16회전 직후의 링 소재(실선)를 비교하여 흠이 없는 롤의 경우는 위쪽에, 흠이 있는 롤의 경우에는 아래쪽에 각각 보여주고 있다. 롤에 흠이 없는 경우에는 축방향의 퍼짐에 의하여 직경이 원하는 크기까지 증가하지 못하고 흠이 있는 롤의 경우에는 퍼짐이 비교적 잘 억제되어 원하는 직경에 가깝게 증가함을 알 수 있다.

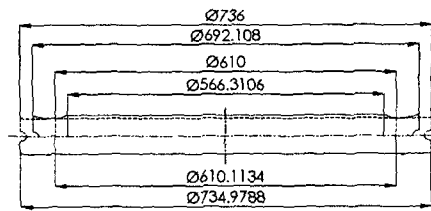


Fig. 8 Comparison of the desired ring product (dashed line) and the ring after the 16th revolution with grooveless rolls (upper side solid line) and with grooved rolls (lower side solid line)

4. 결 론

본 연구에서는 상용유한요소해석 소프트웨어인 MSC.SuperForm을 이용한 환상압연공정 해석을 시도하여 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있었으며 복잡한 단면 형상을 가진 대형 형상 링의 개발에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

예제로 택한 외부에 둥근 흠이 있는 형상 링은 흠이 없는 롤을 이용할 경우 축방향의 퍼짐이 많이 발생하였고, 이를 억제하기 위하여 구동롤과 압력롤에 흠을 만드는 방법을 도입한 결과 어미 현상의 완화 및 최종 제품 치수의 향상에 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구(R05-2002-000-00819-0)의 지원으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) N.S. Kim, S. Machida and S. Kobayashi, "Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 30, pp.569-577, 1990.
- (2) D.Y. Yang, K.H. Kim and J.B. Hawkyard, "Simulation of T-section profile ring rolling by the 3-D rigid-plastic finite element method", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 33, No. 7, pp.541-550, 1991.
- (3) 한형기, 김성일, 전태성, 유연철, "SCM 440 강재의 정적 및 준동적 연화에 미치는 공정변수의 영향", *한국소성가공학회지*, 제9권 제1호, pp.80-87, 2000.