

합금강 대형 선회링의 형상환상압연공정 개발

김광희* · 석한길**

Development of the Profile Ring Rolling Process for Large Slewing Rings of Alloy Steels

K. H. Kim and H. G. Suk

Abstract

Profile ring rolling process for large slewing rings of alloy steels are developed. A profile ring with a round groove located asymmetrically on the outer surface is rolled. The process is simulated by the finite element method. The general-purpose commercial finite element analysis software, MSC.Superform, was used. Experiments are carried in the ring rolling machine and compared with the analysis.

Key Words : Profile Ring Rolling(형상환상압연), Large Slewing Ring(대형 선회링), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서론

건설기계 등 대형 중장비의 선회축을 지지하는 대형 선회링 베어링(Slewing Ring Bearing)은 고도의 안전성과 신뢰성이 요구된다. 이러한 대형 링을 이음매가 없이 제작하기는 어렵지만 균일한 물성을 유지할 수 있으므로 큰 하중과 정밀한 운동을 내구성 있게 지지할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 이러한 대형 링들은 내·외부에 특정 형상(Profile)을 가지게 된다. 특정한 단면형상을 가진 고강도·고품질 대형 선회링을 이음매 없이 가장 경제적으로 제작할 수 있는 공정으로 환상압연(Ring Rolling)공정이 있다. 환상압연공정으로 대형 형상링을 제작하는 경우 내·외부의 형상을 가공하는 방법에는 두 가지가 있다. 한가지 방법은 환상압연공정에서 내·외부를 평탄한

형상으로 제작한 후 절삭 등의 방법을 이용하여 형상을 가공하는 방법이다. 이 방법은 환상압연공정 자체는 쉽지만 환상압연공정에서 형성된 치밀하고 연속된 조직이 절삭공정으로 제거되고 소재가 낭비되는 단점이 있다. 다른 한가지 방법은 형상환상압연(Profile Ring Rolling)공정으로 내·외부의 형상을 직접 성형해 내는 방법이다. 이 방법은 전자에 비하여 소재비가 절감되고 우수한 조직의 제품을 짧은 시간 내에 얻을 수 있는 장점이 있으나 정확한 공정변수를 찾아내지 못하면 접힘(Folding)이나 어미현상(Fishtailing) 등의 결함이 빈번하게 발생하여 공정 개발이 비교적 어려워서 국내에서는 아직 널리 이용되지 못하고 있다.

형상환상압연공정으로 형상링을 제작하기 위해서는 일반적으로 구동롤(driven roll)에 소재를 전부 가둘 수 있는 홈을 가공하여 축방향의 유동을 억

* 부경대학교 기계공학부

** 삼척대학교 금속공학과

제시키는 방법이 사용된다. 이 방법에서는 압력롤 (pressure roll)의 돌출부가 구동롤의 홈 속으로 들어 가야 하므로 압력롤의 최대 직경이 증가되며 따라서 블랭크의 내측 반경이 커지게 된다. 이로 인하여 링 블랭크 제작 단계에서 많은 재료의 손실이 발생한다. 이 손실을 최소화시키고 우수한 제품을 얻는 방법으로는 일반환상압연(plain ring rolling)으로 링 블랭크의 직경을 적절한 크기로 증가시킨 후 형상환상압연을 수행하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 먼저 형상이 없는 구동롤과 압력롤을 이용하여 모든 링 블랭크들을 적절한 직경의 반제품으로 만든 후 형상을 가진 롤들로 교체한 후 다시 형상환상압연을 수행하여야 하는 번거로움이 있다. 이러한 번거로움을 피하려면 두 대의 환상압연기가 필요하게 되어 많은 시설비가 요구된다. 현재 국내에서는 각 생산품의 수량이 많지 않아서 위의 방법은 별로 경제적이지 못하여 한 대의 환상압연기에서 한번에 초기 링 블랭크로부터 완성된 형상링 제품을 얻는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 초기 블랭크의 축방향 높이를 제품보다 높게 설정하고 공정 중에 원추롤(conical roll)을 이용하여 이를 낮추는 방법으로 한 대의 환상압연기에서 한번에 대형 선회링을 제작하는 공정을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 유한요소법으로 공정을 해석하고 실제 형상링 제작 실험을 수행하였다.

2. 형상링 제품 및 공정변수

그림 1에서 점선과 빗금으로 표시된 단면형상을 가진 대형 선회링을 제작하기 위해 기계가공 여유를 모든 면에 약 7.5mm씩 비교적 넉넉하게 준 실선으로 표시된 형상링을 형상환상압연 공정에 의해 제작하고자 하였다. 이 형상링의 외경은 1237mm, 내경은 1068mm, 축방향 높이는 109mm로 비교적 대형이다. 외부의 둥근 홈의 위치가 한 쪽으로 치우쳐 있는 상하 비대칭 형상이므로 전체의 단면에 대한 유한요소해석이 필요하여 많은 해석시간이 필요하였다.

유한요소해석 및 링 제작 실험에 사용된 공정 변수는 다음과 같다.

구동롤의 최소 직경 : 700mm
 구동롤의 최대(돌출부) 직경 : 738mm

구동롤 회전속도 : 37 rpm (3.87 rad/s)
 압력롤 직경 : 110 mm
 압력롤 진입 속도 : 3.0 mm/s

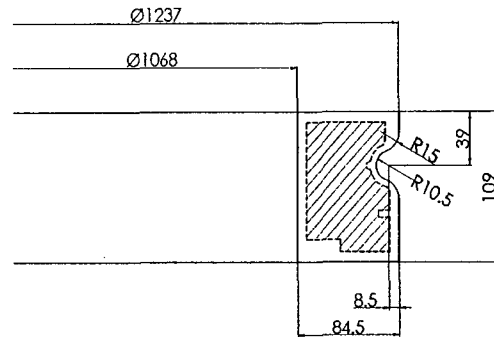


Fig. 1 Profile ring for large slewing ring bearing

압력롤의 진입 속도로 일반적인 값인 1~2mm/s를 선택하면 유한요소 해석 시간이 과도하게 길어지므로 해석 시간의 단축을 위하여 우선 3mm/s로 비교적 빠르게 설정하였다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 방법

상용유한요소해석 소프트웨어인 MSC.SuperForm을 이용하여 형상환상압연공정을 해석하였다. 구동롤과 압력롤 사이에서의 소재의 변형은 이미 개발된 방법⁽¹⁾을 이용하였고, 두 원추롤 사이에서의 변형을 해석하는 방법이 필요하여 새로 개발하였다. 소재는 SCM440으로 선정하였고 실제 형상환상압연공정이 1000~1200°C에서 수행되므로 공정이 1100°C의 균일하고 일정한 온도에서 이루어진다고 가정하고 열전달 문제는 해석에서 제외하였다.

롤과 소재의 접촉면에서의 마찰은 전단마찰로 가정하고 마찰 상수(friction factor) m 은 강재의 열간 압연에서 일반적으로 선택하는 값인 0.3으로 선정하였다.

먼저 원추롤은 사용하지 않고 구동롤과 압력롤만으로 형상환상압연을 수행하는 경우를 해석하여 여기서 얻은 정보를 바탕으로 링 블랭크의 축방향 높이를 결정하여 두 원추롤까지 사용하는 공정을 해석하였다.

3.2 원추를 사용 안하는 환상압연

그림 2 에서 보인 바와 같이 링 블랭크의 축방향 높이는 제품의 높이와 같도록 109mm 로 잡고, 외측 직경은 626.75mm, 내측 직경은 150mm 로 잡았다.

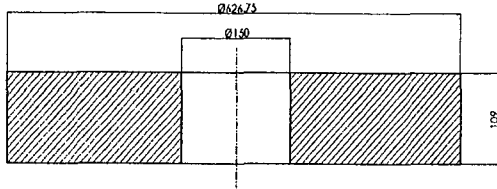


Fig. 2 Ring blank for the profile ring rolling process not using conical rolls

그림 3 은 초기 링 블랭크로부터 24 회전 직후 링 소재의 변형된 모습과 상당 소성변형률 (equivalent plastic strain)의 분포를 구동롤쪽으로부터 바라본 모습을 보여주고 있다. 구동롤의 돌출부와 접촉하는 부분에서 많은 변형이 발생하였음을 볼 수 있고 축방향으로의 유동이 제한되지 않아서 이 유동이 누적되어 어미현상이 상당히 많이 진전되었음을 알 수 있다.

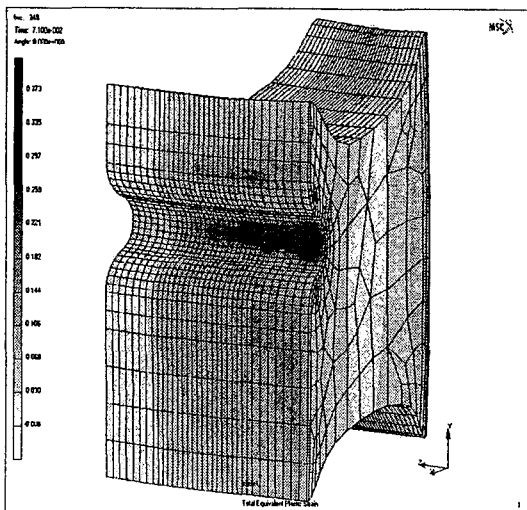


Fig. 3 Distribution of equivalent plastic strain after the 24th revolution of the ring

그림 4 에서는 초기 블랭크로부터 24 회전을 종료할 때까지 매회전 직후의 변형된 소재의 단

면 모습들을 비교하여 보여주고 있다. 공정이 진행됨에 따라 어미 현상이 심하게 발생하여 더 이상의 해석은 의미가 없어 해석을 중단하였다.

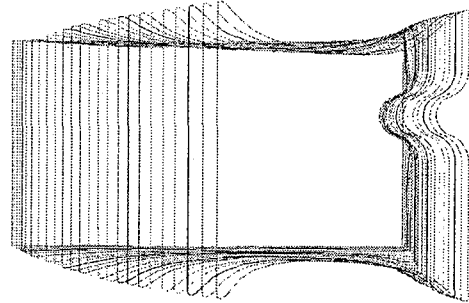


Fig. 4 Comparison of the cross-sections of the ring after each revolution of the ring

그림 5 에서는 소재의 반경방향 두께 감소에 따른 축방향으로의 퍼짐량의 변화를 보여주고 있다. 구동롤의 돌출부 위치가 위쪽 면에 가깝게 위치하는 관계로 실선으로 표시된 위쪽 방향 퍼짐량 보다 점선으로 표시된 아래쪽 방향 퍼짐량이 약간 더 큰 경향을 보이고 있으며 중앙부에서는 축방향 높이가 오히려 감소하는 현상이 발생함을 볼 수 있다. 따라서 이 방법에서는 축방향으로의 유동을 억제하는 적절한 대책을 강구하지 않으면 만족스러운 제품을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

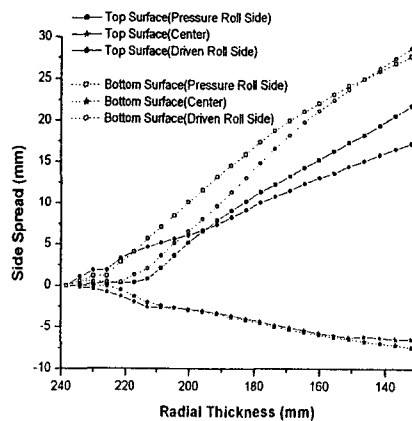


Fig. 5 Variation of the side spread with respect to the radial thickness of the ring workpiece

그림 6에서는 링 소재의 반경방향 두께가 감소함에 따라 외측 및 내측 반경이 증가하는 모습을 보여주고 있다. 실선으로 표시된 내측 반경은 목표치인 최종 제품의 내측 반경값(● 표)을 향하여 비교적 만족스러운 경향으로 증가하고 있으나, 점선으로 표시된 외측 반경은 심한 어미현상으로 인하여 목표치인 최종 제품의 내측 반경값(■ 표)을 향하여 충분히 증가하지 못하고 있음을 알 수 있다.

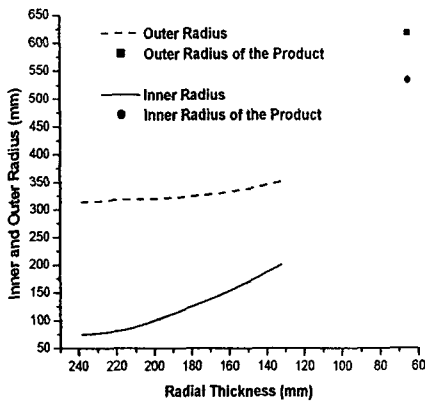


Fig. 6 Variation of the inner and outer radius with respect to the radial thickness of the ring workpiece

3.3 원추롤까지 사용하는 환상압연

링 블랭크의 축방향 높이는 제품의 높이보다 위아래로 각각 20mm 씩 더 크게하여 149mm로 결정하고 두 원추롤을 사용하여 공정 중에 점진적으로 감소시키도록 하였다. 그림 7에 보인 바와 같이 링 블랭크의 외측 직경은 547.54mm, 내측 직경은 170mm이다.

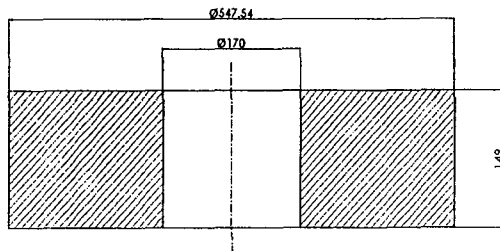


Fig. 7 Ring blank for the profile ring rolling process using conical rolls

원추롤을 사용하는 경우를 유한요소 해석하는 방법으로는 먼저 최초의 1회전 동안 구동롤과 압

력롤 사이에서만 소재가 변형을 하고 다음의 1회전 동안은 두 원추롤 사이에서만 변형을 하고 이를 반복한다고 가정하여 교대로 해석하는 방법이 있다. 이 경우 해석에 필요한 시간이 너무 길어지므로 2~3회전 동안 구동롤과 압력롤 사이에서만 변형을 하고 1회전 동안 두 원추롤 사이에서만 변형을 하는 것을 반복하는 방법을 선택하였다. 압력롤의 진입속도는 공정 초기에는 3mm/s로 시작하고 공정 후반에 너무 직경이 빨리 증가하여 공정이 불안정해지므로 2mm/s 및 1mm/s로 점차 줄였다. 소재의 축방향 높이는 공정 중에 압력롤의 진입량에 비례하여 줄어들도록 선택하였다.

그림 8은 소재가 초기 링 블랭크로부터 최초의 3회전을 하면서 구동롤과 압력롤 사이에서만 변형을 한 후에 두 원추롤 사이에서 처음으로 변형을 하는 것을 해석하기 위한 유한요소해석 격자 시스템 및 접촉면들의 모습이다. 상하의 두 원추롤의 일부만 모델링 하였다. 아래쪽 원추롤은 일반적으로 공회전을 하도록 되어 있으나 해석을 간단하게 하기 위하여 두 원추롤이 모두 구동되는 것으로 가정하였다. 두 원추롤은 링 소재의 순간 원주 속도로부터 계산된 회전 속도로 각각의 순간 회전축을 중심으로 회전하는 것으로 모델링하였다. 구동롤과 압력롤 사이에서의 변형 해석과 마찬가지로 각 순간의 링 소재의 중심에 대하여 회전운동을 하는 평판이 소재를 두 원추롤 사이로 밀어 넣어주면서 공정 중에 소재가 한쪽으로 쏠리는 것을 방지하는 역할을 하도록 하였다.

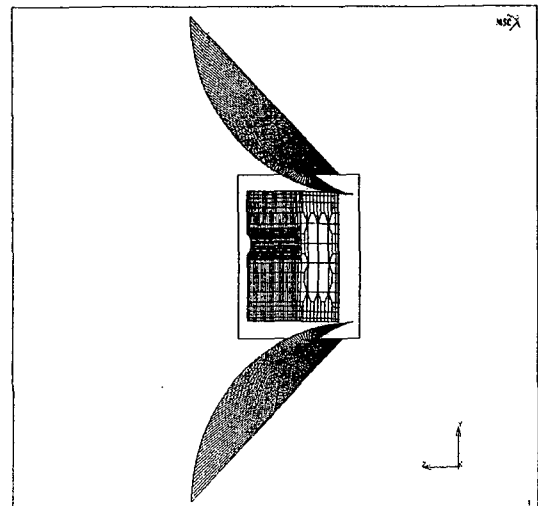


Fig. 8 Initial mesh system and contact surfaces for the analysis of the deformation between two conical rolls

그림 9 는 두 원추를 사이에서만 변형을 하는 52 번째의 회전이 끝난 후 소재의 변형된 모습과 상당소성변형률의 분포를 보여주고 있다. 직전 회전까지 발생한 어미 현상이 제거됨으로 인하여 상하면의 가장자리 부분에 변형이 많이 발생함을 알 수 있고, 단면의 상하 비대칭으로 인하여 위쪽이 바깥쪽으로 기울어지는 현상이 발생함을 볼 수 있다. 이 현상으로 인하여 공정 중에 링이 구동롤과 압연롤 사이에서 위쪽으로 상승하게 될 것이므로 대책이 요구된다.

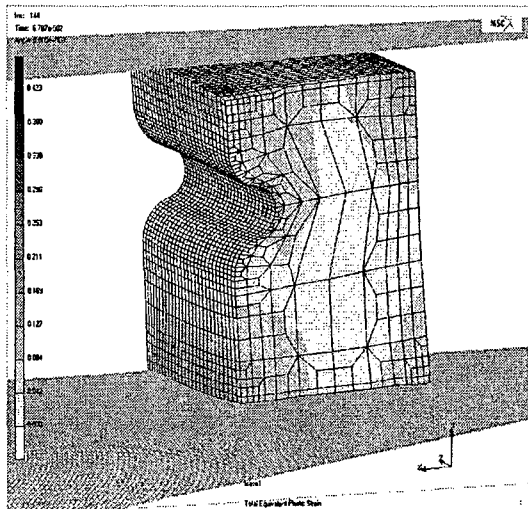


Fig. 9 Distribution of equivalent plastic strain after the 52nd revolution of the ring

그림 10 은 초기 블랭크로부터 52 회전을 종료 할 때까지 매회전 직후의 변형된 소재의 단면 모습들을 비교하여 보여주고 있다. 52 회전 후 맨 오른쪽에 점선으로 표시된 원하는 최종 제품의 단면형상에 거의 근접하였으나 동근 홈 부분의 위치가 약간 아래쪽으로 이동된 것을 볼 수 있다.

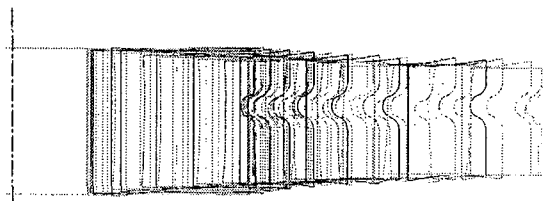


Fig. 10 Comparison of the cross-sections of the ring after each revolution of the ring

4. 대형 선회링 제작 실험

그림 11 은 실험에 사용된 환상압연기의 모습이

다. 왼쪽에 동근 돌출부가 있는 구동롤이 위치하고 있고 앞쪽의 안내롤에 약간 가려져 있다. 중앙에 압력롤이 위치하고 있으며 오른쪽에 두 개의 원추롤이 위치하고 있다.

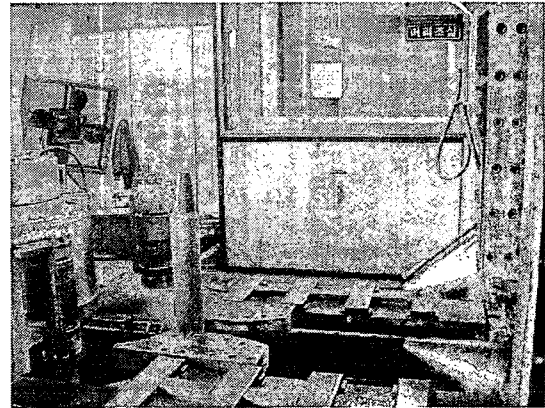


Fig. 11 Ring rolling machine

그림 12 는 형상환상공정이 진행 중인 모습으로, 동근 홈 부분이 아래쪽으로 약간 이동되는 현상이 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 유한요소해석에서 예측된 즉 링 소재가 위로 상승하는 현상에 의한 것으로 판단되며 따라서 본 연구에서의 유한요소해석 방법이 실제 현상을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

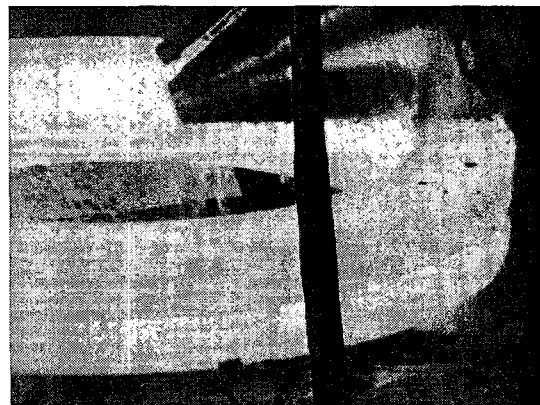


Fig. 12 Profile ring rolling process

그림 13 은 외측 직경이 1222mm, 내측 직경이 1083mm 로 최종 가공된 선회링의 절단 단면 모습이다. 내측 직경은 목표치 1068mm 보다 약간 더 커졌으나 외측 직경은 목표치 1237mm 에 약간 못

미쳤다. 또 외부의 둥근 홈의 위치가 아래쪽으로 상당히 많이 이동된 현상이 발생한 것을 볼 수 있다. 또 해석에서 예측된, 위쪽이 바깥쪽으로 더 많이 이동되어 측벽이 약간 기울어지는 현상이 발생함도 확인 할 수 있으나 접힘 등에 의한 결함은 미미하여 단면의 조직 상태는 매우 양호한 것으로 판단된다.

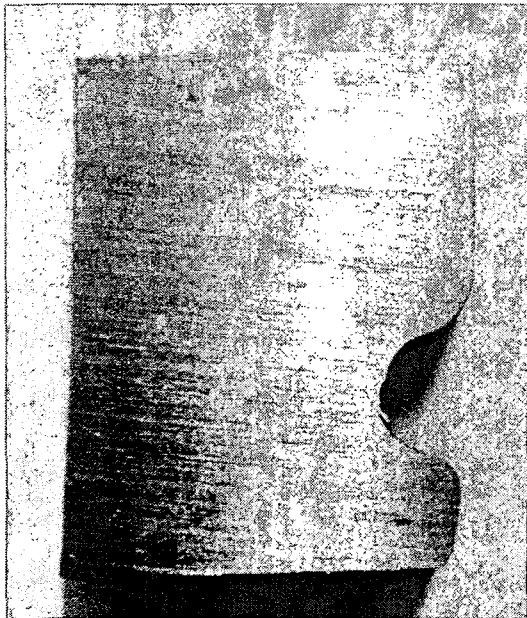


Fig. 13 Cross-section of the profile ring

본 실험에 사용된 환상압연기에서는 공정 중에 링의 직경 변화를 감지하는 납작한 롤러가 두 원추를 사이에서 아래쪽에 위치하므로, 링의 외부에 형성되는 둥근 홈에 롤러가 밀려 들어가는 현상이 발생하기 쉽다. 이를 방지하기 위하여 홈이 위쪽에 위치하도록 하였다. 그러나 이 경우 소재가 공정 중에 위쪽으로 이동되어 결국 둥근 홈의 위치가 아래쪽으로 이동되는 현상이 발생하므로 직경 감지 롤러를 개조하고 홈의 위치를 아래쪽으로 다시 변경하는 것이 바람직하다. 그러면 소재가 아래쪽으로 밀려도 공정 중에 소재를 받치고 있는 밀판에 닿아서 더 이상 이동이 되지 않을 것이므로 정확한 위치의 홈을 가진 링을 성형할 수 있을 것으로 판단된다.

또 링 블랭크의 축방향 높이를 제품의 높이보다 위아래로 각각 20mm 씩 균등하게 크게 하였으나 홈의 위치가 한쪽으로 치우쳐 있으므로 이를

고려하여 각각의 적절한 값을 찾는 추가적인 해석이 필요하며 압력롤의 진입 속도가 빠르므로 이를 낮추어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

외부에 둥근 홈이 비대칭적으로 위치한 대형 선회링을 초기 링 블랭크의 축방향 높이를 제품보다 높게 설정하고 공정 중에 원추롤을 이용하여 이를 낮추는 방법에 의하여 한 대의 환상압연기에서 한번에 성형하는 공정을 개발하기 위하여 유한요소해석과 실제 링 제작 실험을 수행하였다. 외부의 둥근 홈의 위치를 위쪽으로 할 경우 홈의 위치가 아래쪽으로 이동되고 측벽이 기울어지는 현상이 발생하였다. 이 현상은 유한요소해석에서 비교적 잘 예측되었다.

링의 홈이 아래쪽에 위치하도록 바뀌서 성형하는 것이 바람직하며 추가적인 해석 및 제작 실험이 요구된다.

후 기

본 연구는 과학재단 지역대학 우수과학자 지원 연구(R05-2002-000819-0)의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) 김광희, 김병탁, 석한길, 2003, "외부에 둥근 홈이 있는 형상환상압연공정의 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 7 호, pp. 631~639.
- (2) D.Y. Yang, K.H. Kim and J.B. Hawkyard, 1991, "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.
- (3) N.S. Kim, S. Machida and S. Kobayashi, 1990, "Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, pp.569~577.
- (4) 김광희, 양동열, 1992, "환상압연공정에서 측면 유동에 의한 어미현상의 예측에 관한 연구", 유변학회지, 제 4 권, 제 1 호, pp. 35~45.