

L형상 프로파일 링롤링 공정의 하부면 그루브 결함 분석

오일영¹ · 황태우¹ · 강필규¹ · 문영훈^{2#}

Analysis of the Bottom Groove in L-shaped Profile Ring Rolling

I. Y. Oh, T. W. Hwang, P. G. Kang, Y. H. Moon

(Received May 23, 2018 / Revised July 25, 2018 / Accepted August 22, 2018)

Abstract

The profile ring rolling process can realize various ring shapes unlike conventional rectangular cross-sectional ring products. In this paper, the defective groove in the bottom surface of L-shaped ring products was analyzed. Grooves are generated by non-uniform external forces due to profile main roll and initial blank shape. Process parameters such as the motion of dies and working temperature were determined. Mechanism of groove formation was analyzed by FE simulation on the basis of local external forces acting on the blank. Analysis results were similar to the groove actually occurring in the production line. Based on results of the analysis, two solutions were proposed for the groove. The position of the base plate supporting the blank was adjusted and edge length of the main roll was extended to suppress growth of grooves. It has been verified that groove was improved by applying two proposed methods in the shop-floor.

Key Words : Profile Ring Rolling, L-shaped, Surface Defect, FE Simulation

1. 서론

링형상의 소재를 점진적으로 변형시켜 이음매가 없는 다양한 단면을 갖는 링 제품을 제작하기 위해 링롤링 공정이 사용된다. 이러한 제품들은 일반 단조 및 절단가공으로 제작된 링형상 제품보다 기계적 물성치가 뛰어나고 생산성에 유리하기 때문에 항공우주, 자동차, 플랜트 산업등 다양한 분야에서 활용되고 있다[1-2].

링롤링 공정은 일반적으로 메인롤, 맨드렐, 상하축롤과 가이드롤로 구성되어 있다. 메인롤과 맨드렐 사이에 소재가 회전하면서 점진적으로 단면이 변형된다[3]. 다양한 프로파일 단면을 갖는 링롤링은 일반적인 사각단면의 링롤링에 비해 제작이 다소 어렵다. 단차, 경사면, 그루브 등 소재에 국부적으로

특정 형상이 있는 경우, 소재에 작용하는 외력이 일정하지 않기 때문에 여러가지 결함들이 발생하게 된다[4]. 이러한 결함들은 추가적인 가공을 통하여 극복이 가능하지만 재료 손실에 따른 수율 저하가 발생하게 된다. 열간 가공의 특성상 표면처리를 위해 황삭 및 정삭가공을 거치게 되는데, 결함으로 인해 가공 깊이가 증가할 수 있으므로 결함의 개선이 생산성 및 가격 경쟁력 측면에서 중요하다고 할 수 있다. 현재 링롤링 공정은 제품의 완성도 및 경쟁력을 향상시키기 위해서 최적 공정 조건과 공정 메커니즘에 대한 광범위한 연구가 필요하다.

공정 결함이 없이 매우 높은 치수 정밀도와 링형상을 제작할 수 있는 롤 설계 방법 등이 제안됐다[5]. 블랭크의 축방향으로의 소재 유동이 균일하지 않으면 공동(cavity)이나 랩(lap)과 같은 결함이 발생

1. 부산대학교 대학원생

2. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공 교수

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University, Professor, Email : yhmoon@pusan.ac.kr

할 수 있다. 또한 두께 감소에 따라 발생하는 상부 및 하부 피쉬테일(fishtail)은 강소성 유한요소해석을 통해 예측할 수 있음이 연구되었다[6]. 프로파일 링의 일종인 그루브 섹션 링의 3 가지 유형의 기하학적 특성과 각 유형의 제안된 링롤링 방법이 분류되었다[7]. 방사형 링 제품 제작시 롤링 갭에서 발생하는 경사면으로의 링 이동 문제를 링 측면의 정보를 기록하는 장치를 설치하여, 경사면 방향으로의 링 이동을 분석하고 억제하는 방법이 연구되었다[8]. 금속 분말로 제조된 합금 소재의 대형 링롤링 제품 제작의 가능성이 연구되었다[9]. 링롤링 시 예비성형품의 변형 및 응력, 온도 이력을 고려하여 최종 링 제품에서의 다공질 조직 및 공정변수의 관계에 대해 연구되었다[10]. 상계해석(Upper Bound Technique)을 이용하여 링롤링 시뮬레이션의 해석결과 정확도를 높이고, 해석시 발생하는 비용과 시간을 단축시킬 수 있는 산업 애플리케이션이 개발되었다[11].

본 논문에서는 플랜지 산업에 주로 쓰이는 L형상 플랜지 링 제품의 결함에 대해서 분석하였다. L형상의 링제품은 허브와 플랜지 부분으로 구성되어 있다. 맨드릴과 메인롤 사이에서 상대적으로 압축을 받는 플랜지 부분은 허브에 비해 국부적으로 많은 변형이 발생하게 된다. 이로 인해 Fig. 1과 같이 플랜지 하부면에 의도하지 않은 그루브가 발생하게 된다. 그루브의 깊이가 깊을수록 가공해야 될 소재의 양이 증가하게 되므로 이를 개선하는 것이 중요하다.

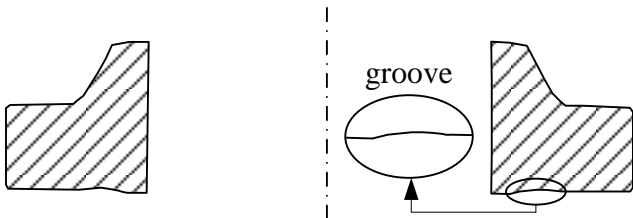


Fig. 1 Groove on bottom surface of profile ring rolling

L형상 링롤링의 유동 특성을 분석하여 플랜지와 허브 사이에 발생하는 벤딩이 결함의 원인임을 도출하였다. 이는 플랜지와 허브 사이에서 발생하는 벤딩은 블랭크를 지지하는 바닥면(base plate)과 블랭크 사이의 유격을 발생시킨다. 그리고 블랭크 플랜지에 작용하는 압축력과 유격으로 인해 블랭크 하부면에 그루브를 발생시키게 된다.

따라서 그루브를 개선하기 위해 2가지 방법을 제안하였다. 블랭크 하부를 지지하는 바닥면의 위치를 상승시켜 유격의 높이를 줄이고, 굽힘을 줄이기 위해 메인롤의 하부를 연장시켰다. 2가지 방법을 적용한 온라인(On-line) 검증을 수행하여 실제 공정에서의 효과를 검증하였고, 기존보다 유격 높이와 그루브의 깊이를 개선할 수 있었다.

2. 링롤링 공정의 유한요소해석 조건

2.1 FE 모델

링롤링의 공정의 메커니즘을 분석하기 위해 유한요소해석을 활용하여 공정을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션의 설계는 Forge NXT라는 상용 소프트웨어로 수행되었다. 본 소프트웨어 안에 있는 링롤링 템플릿은 소재가 회전할 때 자동적으로 중심을 유지해주는 옵션이 있기 때문에 일반적으로 링롤링 공정에서 적용되는 가이드롤의 모델링은 생략되었다. 따라서 해석시간을 단축시킬 수 있다. Fig. 2는 링롤링 공정의 3D 모델링 설계를 나타낸다. 유한요소해석에 사용된 각 파트의 요소의 수는 Table 1에 나타내었다. 금형과 소재의 마찰조건(쿨롱마찰)은 0.4의 마찰계수를 사용하였다. 또한 베이스 플레이트는 슬라이딩 마찰 조건(무마찰)을 사용하였다.

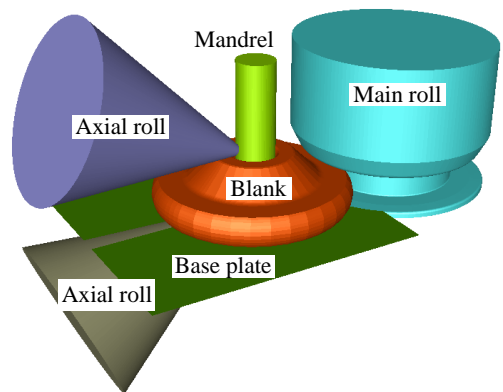


Fig. 2 Schematic diagram of profile ring rolling process

Table 1 Number of elements in parts

Main roll	Mandrel	Axial roll	Base plate	Blank
16248	4014	9142	210	22926

본 논문에 사용된 소재는 SUS304L이며, 변형률 속도에 따른 1100℃에서의 응력-변형률 그래프를 Fig. 3에 나타내었다.

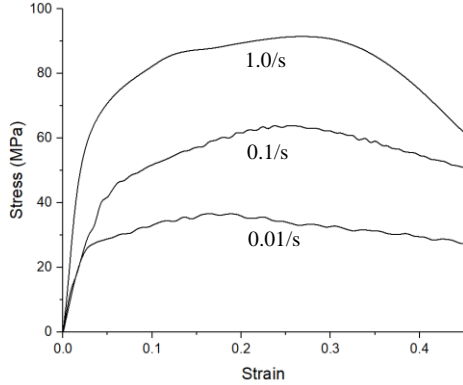


Fig. 3 Strain-stress curves of SUS304L at 1100℃

2.2 링롤링 공정의 공정 변수

링롤링 공정의 공정변수는 메인롤의 회전속도, 맨드렐과 상하 축롤의 이송경로, 소재의 온도가 있다. 메인롤의 회전속도는 25RPM으로 설정하였다. 맨드렐의 경우 Fig. 4과 같이 선형 경로와 비선형 경로가 있다. 일반적으로 단순한 사각 단면의 링 성형에서 비선형 경로를 사용하여 공정 초기에 소재의 두께를 반경방향으로 최대한 변형시킨 후, 공정 후반에 상하 축롤의 압하력으로 링의 높이를 조절하게 된다. 본 연구의 L형상 링의 경우, 초기 블랭크의 높이가 최종 형상에 비해 6mm 정도로 차이가 미비하고, 허브와 플랜지 사이의 안정적인 변형을 고려하여 선형 경로로 설정하였다.

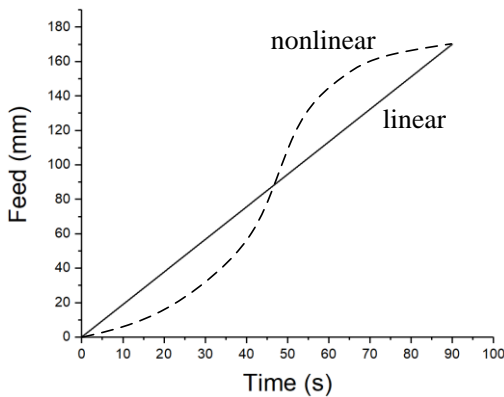


Fig. 4 Mandrel feed path

맨드렐은 공정시간 90초 중 80초 동안 총 111mm로 이동한다. 상부 축롤은 맨드렐의 이송경로와 같이 선형적으로 소재의 상부를 압하하며, 6mm를 이동하게 된다. 소재의 온도는 1100도로 설정하였다.

3. 링롤링 공정의 FE 해석 결과

3.1 소재 유동

Fig. 5와 같이 블랭크는 메인롤과 맨드렐에 의해 점진적으로 단면이 변형된다. 맨드렐의 이송으로 블랭크의 플랜지는 압축력을 받아, 두께는 증가하고 반경방향 길이는 점차 감소하게 된다. 블랭크의 허브는 플랜지의 반경방향 길이가 일정부분 감소된 후 메인롤과 접촉하게 된다. 블랭크의 외면이 메인롤의 프로파일 형상과 완전히 접촉하면서 목표 형상으로 단면이 성형된다. 각 스텝의 유효변형률은 Fig. 6과 같다.

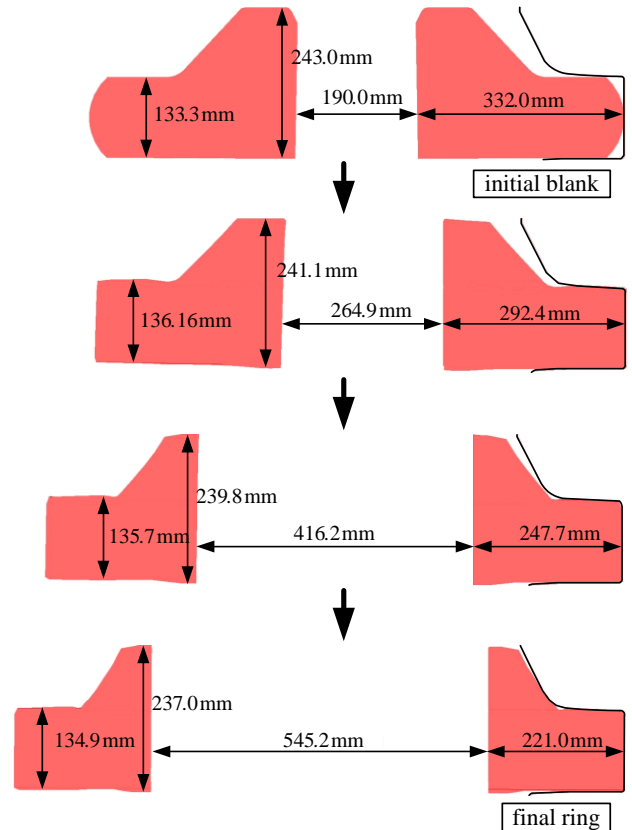


Fig. 5 Dimensional variations during ring rolling

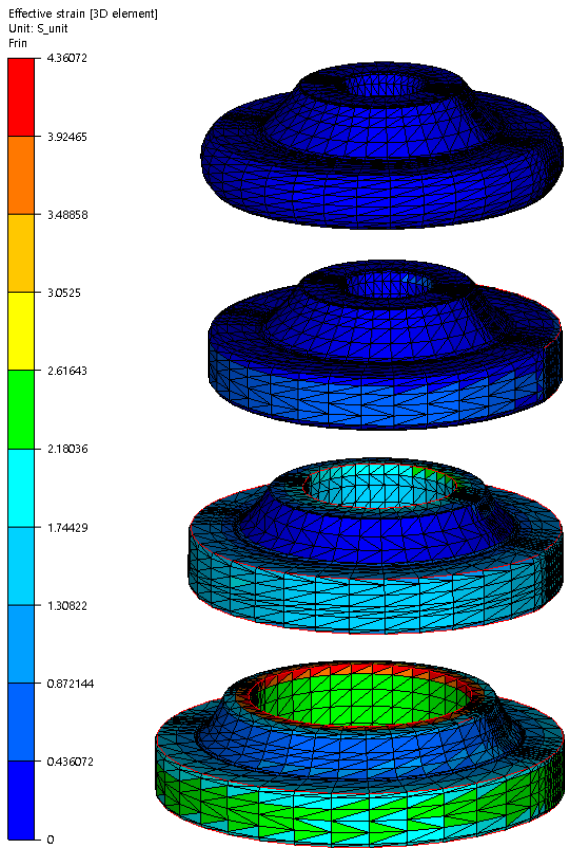


Fig. 6 Variations in effective strain distribution

3.2 결함 분석

Fig. 7은 L형상 링롤링 공정시 실제 생산라인에서 발생하는 하단부 결함을 나타낸다. 유한요소해석 결과 블랭크의 하부면의 A 위치가 Fig. 8과 같이 바닥면과 유격되는 것을 확인할 수 있다. 이는 메인롤이 블랭크의 허브와 접촉하지 않은 상태에서 플랜지를 지지함으로써 플랜지와 허브 사이에서 벤딩이 발생됨을 유추할 수 있다.



Fig. 7 Groove of L-shaped ring rolling in process line

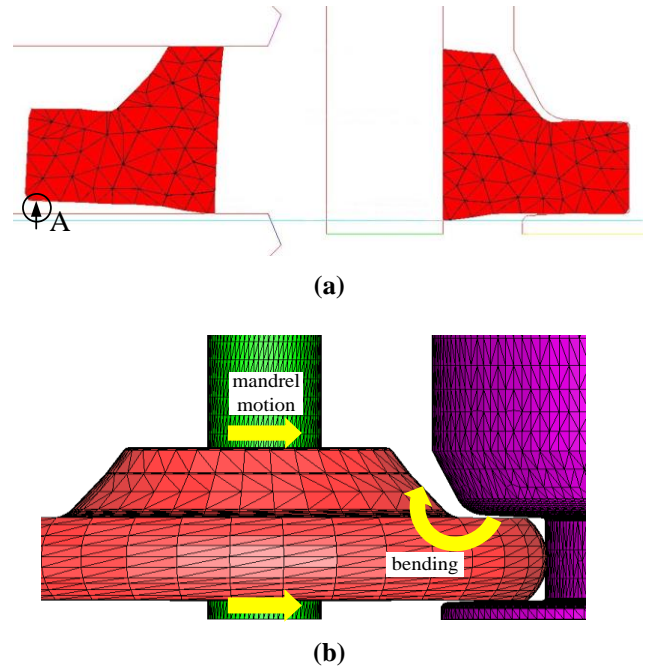


Fig. 8 Lifting of lower surface of the blank; (a) lifting (b) bending

Fig. 8(a)와 같이 바닥면과 유격된 플랜지 부분은 블랭크가 메인롤과 다시 접촉할 때 아래로 굽혀지며, 이러한 과정이 여러 번 반복되면서 하부면에 굴곡을 만들게 된다. 그와 동시에 플랜지는 압축을 받기 때문에 결함은 더욱 성장하게 된다. 따라서 블랭크 하단부와 바닥면 사이의 유격을 줄이고 벤딩을 최소화하면 결함이 줄어들 것으로 예상된다.

4. 결함 개선 및 검증

4.1 바닥면의 위치 변경

결함을 개선하기 위해서는 Fig. 8(a)와 같이 블랭크의 하단부와 바닥면 사이의 유격을 줄여야 한다. 따라서 기존의 바닥면의 높이를 변화시켜 유한요소해석을 수행하여 그 효과를 검증해보았다. +5mm 이상 바닥면을 상승시키면 플랜지의 두께가 감소되기 때문에 기존 위치에서 ±5mm 만큼 변화시켜 해석을 수행하였다.

Fig. 9와 같이 공정 도중 블랭크 하단부와 바닥면의 최대 유격 높이를 비교했을 때, 기존의 경우 약

11.0mm 정도 상승하였다. 반면 바닥면을 5mm 상승시켰을 때 최대 유격 높이가 3.8mm로 기존보다 7.3mm 감소한 것을 확인할 수 있다. 해석결과 바닥면을 상승시켰을 때 하부면 결함의 깊이가 약 52% 감소하는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

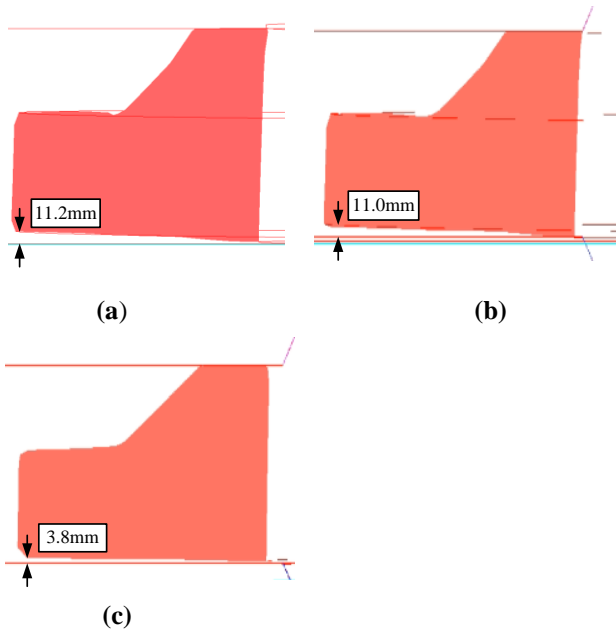


Fig. 9 Flange lifting amount; (a) position = -5mm (b) position = 0mm, (c) position = +5mm

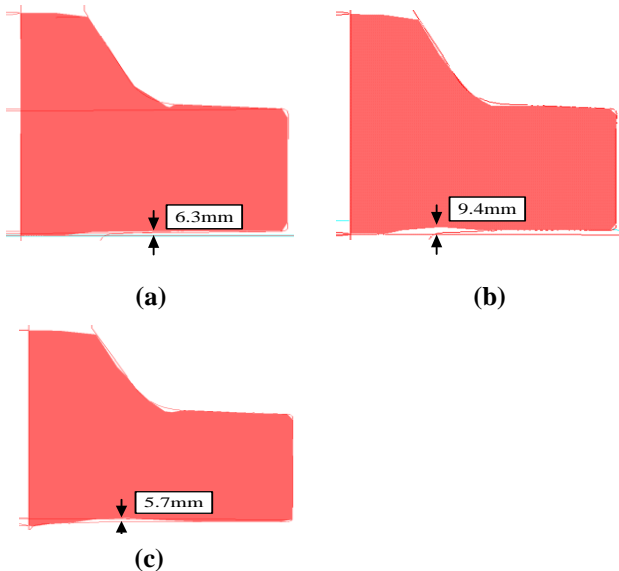


Fig. 10 Groove depth according to position of base plate; (a) position = -5mm (b) position = 0mm, (c) position = +5mm

4.2 메인롤 엷지길이 연장

플랜지와 허브 사이에서 발생하는 벤딩을 줄이기 위해 Fig. 11과 같이 메인롤 형상을 변경하였다. Fig. 11(a)는 기존 메인롤에 비해 블랭크와 접촉하는 면적이 넓고 벤딩라인이 더 길기 때문에 블랭크의 벤딩에 대한 저항을 높일 수 있다. 따라서 하단부 그루브의 성장을 억제할 수 있다.

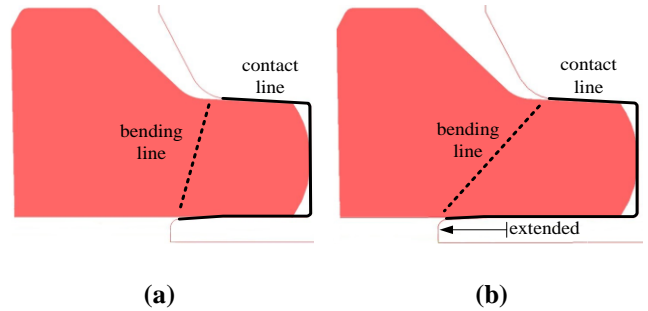


Fig. 11 Comparison of bending line and contact line by main roll modification; (a) conventional, (b) modified

Fig. 12와 같이 메인롤의 하부 엷지 길이를 공정완료시점에 맨드릴이 메인롤에 닿을 정도로 최대한 연장한 경우 그루브의 깊이가 5.7mm로 기존과 비교했을 때 3.7mm의 개선 효과가 있다.

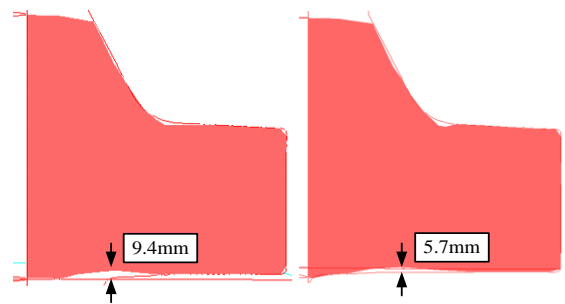


Fig. 12 Comparison of groove depth by main roll modification; (a) conventional, (b) modified

4.3 On-line 검증

유한요소해석의 결과를 검증하기 위해 Fig. 13와 같이 Ø3000급 링롤링 장비를 이용하여 테이블 위치 변경 및 수정된 메인롤을 적용한 프로파일 링롤링을 수행하였다. 블랭크는 1250℃까지 가열한 후 업

세팅, 코깅, 편칭공정을 거쳐 제작되었다. 링롤링 공정에 사용되는 블랭크의 경우 초기 블랭크 제작시 조직 결정의 미세화 및 결정조직을 균질화를 위해 KS 규정을 고려하여 4S 정도의 단조비(변형된 단면적/초기 단면적=단조비)를 적용하여 제작된다.

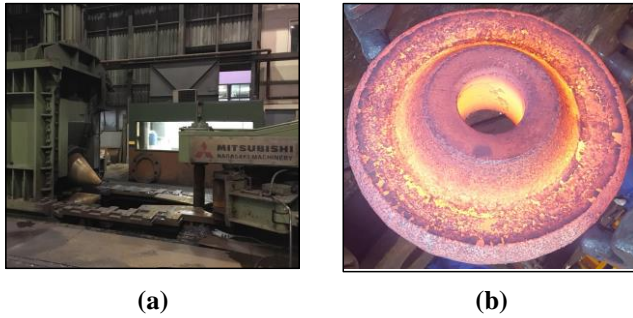


Fig. 13 Experimental equipment and blank used in On-line; (a) \emptyset 3000 ring rolling mill machine, (b) initial blank

Fig. 14과 같이 기존 최종 형상과 제안된 방법으로 제작된 최종 형상을 비교하였다. 기존의 그루브 깊이가 9.1mm인 반면, 2가지 제안된 방법을 적용한 최종 형상의 그루브 깊이는 5mm 정도로 기존보다 4.1mm 개선되었음을 확인할 수 있다. 또한 4.1mm 만큼 면가공의 여유치를 확보할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 제안한 바닥면 위치 수정 및 메인롤 하부 엣지길이 연장 방법은 실제 공정에서 유효한 것을 확인할 수 있었다.

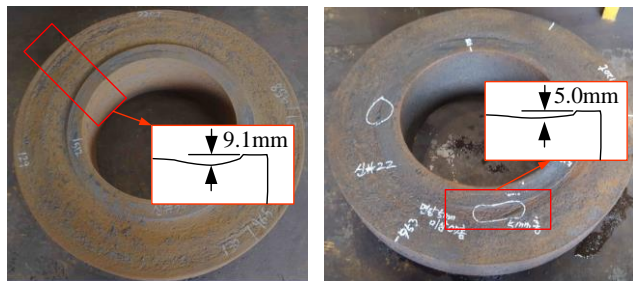


Fig. 14 Comparison of final shapes before and after applying the proposed method; (a) before, (b) after

5. 결론

(1) 블랭크를 국부적으로 지지하는 메인롤의 형상

에 의해 허브와 플랜지 사이에서 벤딩이 발생하며, 벤딩에 의해 휘어진 플랜지는 다시 메인롤에 의해 펴지게 된다. 블랭크가 회전하는 동안 플랜지는 굽힘과 펴짐을 반복하게 되면서 플랜지의 하부면에 결함을 발생시킨다.

(2) L형상 링롤링의 하부면에 발생하는 그루브를 개선하기 위해 바닥면의 높이를 기존보다 높게 설정함으로써, 바닥면과 벤딩으로 인해 유격된 플랜지 사이의 간격을 줄여, 반복적인 플랜지의 굽힘/펴짐으로 인한 결함을 개선한다. 또한 허브와 플랜지 사이의 벤딩을 줄이기 위해 메인롤 하부의 엣지길이를 연장시켜 벤딩에 대한 저항력을 증가시킨다.

(3) 단순 사각단면 링롤링에 비해 L형상 프로파일 링롤링은 허브와 플랜지로 나뉘어져 있기 때문에 외력이 소재에 균일하게 작용하지 않으므로 소재 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다.

(4) 본 연구에서 제안된 방법을 현장에 적용시켜 기존의 하부면 그루브의 깊이가 45% 정도 개선되는 것을 검증하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- [1] Z. W. Wang, S. Q. Zeng, X. H. Yang, C. Cheng, 2007, The Key Technology and Realization of Virtual Ring Rolling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 182, No. 1~3, pp. 374~381.
- [2] Z. M. Hu, I. Pillinger, P. Hartley, S. McKenzie, P. J. Spence, 1994, Three-dimensional Finite-element Modelling of Ring Rolling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, No. 1~4, pp. 143~148.
- [3] J. B. Hawkyard, W. Johnson, J. Kirkland, E. Appleton, 1973, Analyses for Roll Force and Torque in Ring Rolling, with some Supporting Experiments, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 15, No. 11, pp. 873~893.
- [4] K. H. Kim, H. G. Suk, M. Y. Huh, 2007, Development of the Profile Ring Rolling Process for Large Slewing Rings of Alloy Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187-188, pp. 730~733.

- [5] K. H. Lee, 2014, Design Method for Intermediate Roll in Multi-stage Profile Ring Rolling Process: The Case for Excavator Idler Rim, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 3, pp. 503~512.
- [6] D.Y. Yang, K. H. Kim, 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.
- [7] D. Qian, J. Deng, S. He, 2018, Precision Rolling Methods for Groove-section Ring based on Different Contact and Feed Mode, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 95, pp. 3953~3968.
- [8] S. Husmann, B. Kuhlenkötter, 2017. Investigation for an Automated Avoidance of Ring Climbing in Radial-Axial Ring Rolling, *Procedia Eng.*, Vol. 207, pp. 1242~1247.
- [9] R. P. Guo, L. Xu, B. Y. Zong, R. Yang, 2016, Preparation and Ring Rolling Processing of Large Size Ti-6Al-4V Powder Compact, *Mater. Des.*, Vol. 99, pp. 341~348.
- [10] C. Wang, H. J. Geijselaers, E. Omerspahic, V. Recina, A. H. van den Boogaard, 2016, Influence of Ring Growth Rate on Damage Development in Hot Ring Rolling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 227, pp. 268~280.
- [11] A. Parvizi, K. Abrinia, 2014, A Two Dimensional Upper Bound Analysis of the Ring Rolling Process with Experimental and FEM Verifications. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 79, pp. 176~181.