

# 외경이 큰 환형 부품의 다중형상 열간 링 롤링 공정의 개발

김경률<sup>1</sup>, 김영석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 대학원(한호개발), <sup>2</sup>경북대학교 기계공학부

## Development of the hot ring rolling processes for multilayered ring parts with a large outer diameter

Kyung-Ryool Kim<sup>1</sup>, Young-Suk Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Kyungpook National University(Hanho),

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

**요약** 열간 링 롤링 공법은 열간단조 후의 잠열을 이용하기 때문에 가공 부하가 적고 최종 환형제품에 가까운 제품을 제조하는 장점이 있다. 본 연구에서는 열간 링 롤링 공법에 의한 대형 직경의 환형 부품의 다중형상 링 제조를 목표로 AFDEX2D 및 AFDEX3D/HEXA/RING 시뮬레이터(simulator)를 이용하여 열간 단조공정부터 링 롤링 공정까지 연계된 공정을 유한요소 해석하였다. 또한 링 롤링공정의 유한요소해석 시간을 줄이기 위해 소성변형이 일어나고 있는 영역에서만 요소망을 조밀하게 재구성하는 이중요소 시스템을 적용하였다. 이 유한요소해석 결과를 바탕으로 실제 공정을 설계하고 실험하여 개발된 제품이 품질 규격을 만족하는지를 확인하였다. 또한 링 롤링 실험 완성품을 통하여 부품의 품질수준 및 공정능력을 평가하였다.

그 결과, 개발된 환형 부품은 40%의 투입재료 감소와 최종 제품의 원소재 회수율이 24% 증가하였다. 또한 링 롤링 제품은 내, 외경의 진원도가 0.5mm로 우수하였으며 공정능력 분석결과 외경 Cpk 1.49, 내경 Cpk 0.85를 확보하여 환형 부품의 다중형상 열간 링 롤링 공정의 최적화를 실현하였다.

**Abstract** In this study, multilayered rings with a large outer diameter have been developed using a hot ring rolling process. The ring rolling process has been analyzed by rigid plastic finite element analyses (FEA) using the AFDEX2D and AFDEX3D/HEXA/RING simulators, where the finite element meshes received severe plastic deformation are remeshed into a fine mesh-size using a dual-mesh system.

According to the simulated results, the design variables of the multilayered rings were determined and real tests were conducted to check the validity of the simulation results. By adopting the hot ring rolling process, the input weight of raw materials was reduced by 40% against the conventional hot forging process and that the recovery rate was increased by 24%. The measurement of the averaged roundness was satisfied within 0.5 mm for both the inner and outer diameters. Moreover, the hot ring rolling processes yielded 1.49 Cpk for the outer-diameter and 0.84 Cpk 0.84 for the inner-diameter.

**Key Words** : AFDEX2D, Multilayered Ring, Process Capability, Rigid Plastic Finite Element Analysis, Ring Rolling

### 1. 서론

상온(냉간) 혹은 고온(열간)에서 이루어지는 링 롤링 (ring rolling)공법은 소성가공의 일부로서 환형 부품을

성형하기에 적합한 제조 공법이다.

최근 수송기계, 산업기계의 고효율, 고출력화 추구 경향에 따라 고속 다단변속기에 사용되는 환형 부품의 대형화가 요구되고 있다. 그러나 기존에는 가열한 원형 블

이 논문은 2013년도 경북대학교의 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

\*Corresponding Author: Young-Suk Kim (Kyungpook National Univ.)

Tel:+82-53-950-5580 email: caekim@knu.ac.kr

Received August 20, 2014

Revised October 21, 2014

Accepted February 12, 2015

랭크와 단조 프레스를 이용한 열간 단조공정에서 제품의 최종 외경까지 성형한 후 중간 슬러그(slug)를 분리하여 버리는 방식이 사용되고 있는데, 이 제조 방법은 낮은 재료 이용률에 의한 환경오염과 추가 기계가공에 따른 제조 비용 상승 등의 여러 가지 문제들을 안고 있다. 따라서 열간 단조공정에서 적당한 크기의 외경을 갖는 제품을 성형 후 중간 슬러그를 제거하고 링 롤링 공정을 통해 최종 외경 치수까지 확장해가는 방법이 대안으로 제시되고 있다.

이 링 롤링 공법은 Fig.1에 나타나 것과 같이 단조 프레스를 이용하여 블랭크를 성형하고, 이를 이용하여 원주 방향으로 직경을 늘려가며 단면적을 감소시키는 공법이다. 이 링 롤링 공법은 소성변형이 국부적으로 이루어지기 때문에 가공하중이 적으며 최종 제품의 형상에 가깝게 성형이 가능하므로 추가 기계가공을 최소화하여 재료의 회수율을 높이는 장점이 있다. 이 링 롤링 공법은 가공온도에 따라 냉간 링 롤링가공과 열간 링 롤링가공으로 구분한다.[1][2]

냉간 링 롤링가공은 제조방식이 상온에서 이루어지는 관계로 링 롤링 장비의 한계성에 부딪혀 제품의 형상과 크기에 큰 제약을 받고 있어 통상 외경 160mm, 폭 45mm 이하의 환형 제품의 생산에 이용되고 있으며, 열간 링 롤링가공은 외경 160mm 이상에서 500mm 이하의 대형 환형 제품의 생산에 이용되고 있다. 열간 링 롤링가공에서는 열간 단조 후 그 잠열을 이용하기 때문에 재료의 확장성이 용이하고 제품의 형상 및 크기에 유연하게 대응할 수 있어 에너지 효율이 높을 뿐만 아니라 소음과 분진을 저감시키는 등 제조현장 녹색화 효과도 높다.

열간단조를 포함한 많은 소성가공공정의 해석과 공정 최적화에 유한요소해석을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 활발히 적용되고 있지만[3] 링 롤링가공 공정의 경우는 링 롤링 공정의 복잡성과 과도한 계산시간 문제 등에 의해 아직도 해결해야 할 많은 문제점을 내포하고 있다.

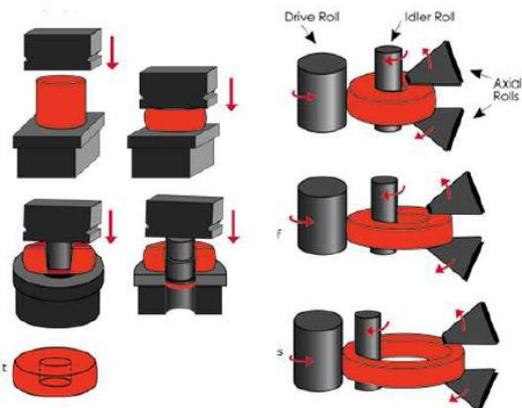
Joun 등[4], Sawamiphakdi 등[5], Pauskar 등[6], Doege 등[7], Kim 등[8]은 강소성 유한요소법을 활용하여 링 롤링 공정에 대한 해석을 수행하였으며, Yang 등[9] T자형 단면의 오픈패스 프로파일 링 롤링에 대한 연구를 하였다.

특히 Kim 과 Joun 등 [12]은 열간 링 롤링공정의 유한요소해석을 통해 볼 베어링 외륜(ball bearing outer race)

가공을 위한 예비성형체의 형상, 멘드렐 이송속도 등을 최적 설계할 수 있는 기반을 확보하였다.

또한 Hamzah 등[10]은 무거운 링의 두 종류 세공폐쇄에 대하여 분석하였고, Xie 등[11]은 강점소성 동적 변형으로 묘사된 일반화 에너지 기능을 새롭게 제안하였다. Davey 등[13], Davey 등[14]은 프로파일 링 롤링에 대한 해석을 수행하였고, Ko와 Kim 등[15]은 SHAPE-RR™ 상용 FEM코드로 일반 링 압연 공정에서 압력분포와 롤의 힘을 예측하였다. Parvizi 등[16]은 수정된 슬래브법을 이용한 링 롤링공정을 이론해석을 통해 응력분포, 가공하중 등을 계산하였으며 마찰, 롤 회전속도 등의 영향을 검토하였다. 또한 Koo 등[17]은 알루미늄 링 압연공정에 대한 강-열점소성 유한요소해석을 통해 온도분포를 예측하여 링 압연 종료시점에서 과도한 온도강하는 재료의 파손으로 연결될 수 있음을 보였고, Moon 등[18]은 링 롤링 공정의 결함에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 대형 직경의 환형 부품의 다중형상 링 롤링 공정개발을 목적으로 열간단조 블랭크 형상을 설계하여 유한요소해석을 실시하고, 실제 금형제작을 통하여 상호결과들을 비교 분석한다. 또한, 그 결과물인 링 롤링 제품으로 최종 품질과 공정능력을 확인하고 링 롤링 실험품을 기준으로 일반 열간단조 방식의 제조공정과 링 롤링 제조공정과 항목별 특성을 비교 분석하여 링 롤링 공법의 강점을 고찰하였다. 열간 링 롤링 공정의 해석에는 강소성 유한요소해석을 기반으로 한 AFDEX2D 및 AFDEX3D/HEXA/RING 시뮬레이터(simulator) [12, 20]를 이용하였다.

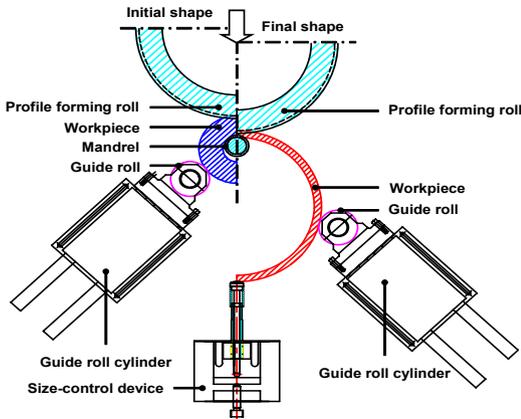


[Fig. 1] Manufacturing of ring type's products using the sequential process of the hot forging and the hot radial-axial ring rolling processes

## 2. 해석이론

### 2.1 링 롤링 공정의 해석모델

Fig.2는 본 연구에서 해석의 대상으로 하는 링 롤링 공정의 개념도로, 링 롤링 공정의 주요 요소는 동력을 전달하는 작업 롤(work-roll), 내경을 지탱하는 멘드렐(mandrel)과 링의 균형을 잡아주는 가이드 롤(guide-roll) 등으로 구성된다.[19]



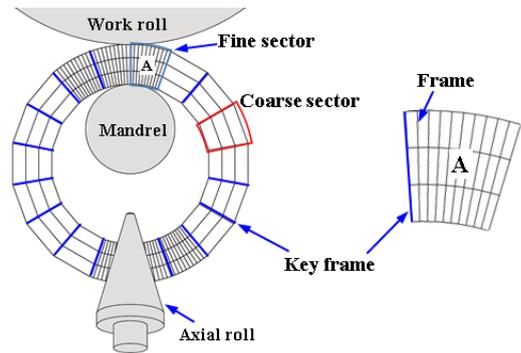
[Fig. 2] Conceptual diagram of ring rolling

링 롤링 공정의 해석에서 멘드렐은 회전방향으로는 무마찰이라고 가정한다. 그러나 반경방향으로의 마찰력은 작용한다. 이 가정이 없으면, 멘드렐의 회전속도가 미지수가 되므로 문제의 난이도가 크게 증가하게 된다. 한편 통상의 압연공정에서와 같이 링 롤링공정에서 압연이 이루어지기 위하여 작업 롤의 원주방향 속도가 표면 소재의 원주방향 속도와 같은 중립점을 결정하여야 한다. 은 소재와 어떤 영역에서 동일한 원주속도로 운동해야 한다. 본 연구에서는 압축응력이 최대인 지점에서 중립점이 발생하는 것으로 간주하였다. 따라서 하나의 절점을 중립점으로 결정한 후 이 절점과 그에 대응하는 작업 롤 상의 점의 원주방향의 속도를 일치시켰고, 다른 절점에서는 일정전단마찰법칙을 적용하여 마찰응력을 고려하였다.

### 2.2 요소망재구성 기법

링 롤링 공정은 점진성형 공법으로 소재와 금형간의 상대 운동량이 매우 크기 때문에 해석 시간이 많이 소요

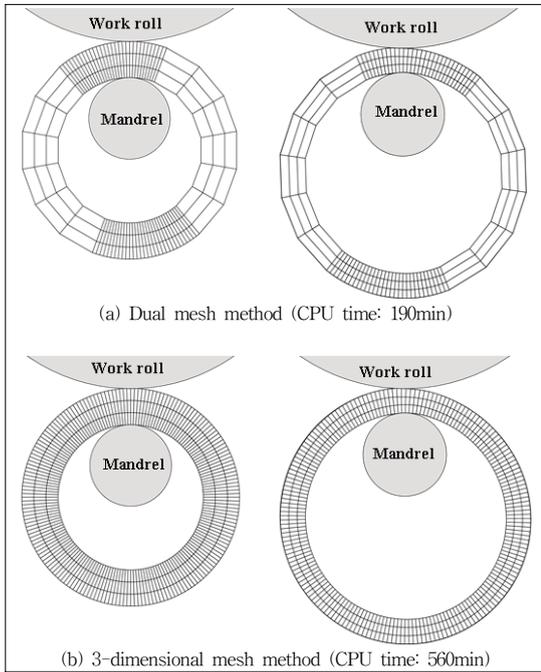
되는 문제를 안고 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여 산업용 목적으로 개발된 시뮬레이터에서 성형 구간을 상대적으로 조밀하게 이산화 시키는 방법과 구조요소(structured mesh)을 채택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 사용한 해석 프로그램은 AFDEX3D/HEXA/RING으로 성형구간 조밀 구조요소 방식을 채택하고 있다.[20] 여기서 소재는 각도 기준으로 등간격의 구역(segment)으로 구성되고 각 구역은 조밀요소 구간과 조대요소 구간으로 구분된다. 작업 롤 주위와 축롤(axial-roll) 주위에서는 조밀요소로 이산화하고, 그 이외의 영역에서는 조대요소로 이산화한다. 기본적으로 구역 내의 요소는 구역의 경계에서 생성된 동일한 사각형 요소망을 연결하여 만들어진다. Fig.3은 링 롤링 공정의 해석 모델과 이중요소시스템(dual-mesh system)을 보여주고 있다. 여기서 링은 두 개의 키 프레임으로 정의된 몇 개의 구역으로 나누어지며 링은 조밀 요소망 구역과 조대 요소망 구역으로 구성된다.



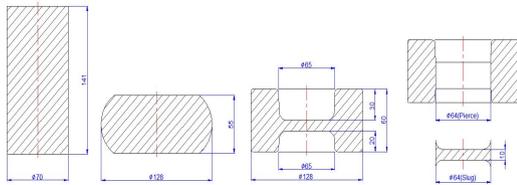
[Fig. 3] Analysis model of ring rolling process and dual mesh system

성형구간 조밀 구조요소 방식에서 요소망 재구성은 크게 세 가지의 목적으로 이루어진다.

첫째, 조밀 요소망 구간이 작업 롤과 멘드렐 사이의 주성형 구간을 벗어날 때, 둘째, 성형 해석 중에 절점의 접촉 등을 고려하여 구역의 수를 늘리거나 조밀요소의 구역의 세부 분할의 수를 변경할 필요가 있을 때, 셋째, 요소망의 찌그러짐 문제를 해소하기 위하여 불가피하게 구역의 단면에서의 사각형 요소망 정보를 변경할 필요가 있는 경우에 실시한다. [4,9]



[Fig. 4] Calculation efficiency of dual mesh technique



[Fig. 5] Hot forging process diagram for a manufacturing of blank (a) as-received specimen (b) upsetted specimen (c) finished specimen (d) pierced specimen

이중요소시스템의 CPU 시간의 효율성을 평가하기 위하여 동일한 공정에 다른 두 가지 방법으로 해석을 진행하였다. Fig.4에서 보는 바와 같이 이중요소시스템이 3차원 해석모델 접근방식보다 계산시간이 약 3배 빠르다는 것을 알 수 있다.

### 3. 유한요소해석

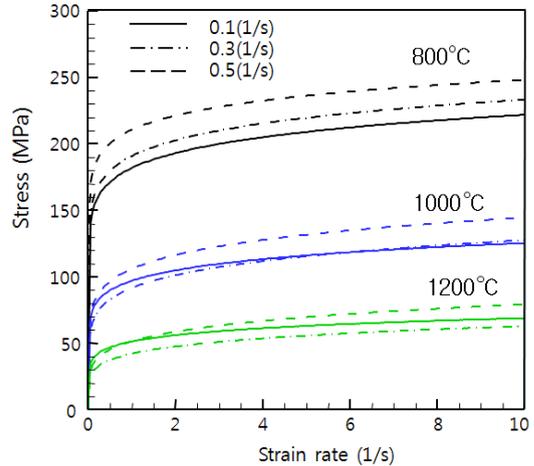
#### 3.1 블랭크(blank) 열간단조 공정

Fig.5는 열간 링 롤링 전 공정인 블랭크 제작을 위한 블랭크 제작 공정도를 나타낸다. (a)는 원형 블랭크를 열

간 단조하기 위한 외경 70mm, 높이 141mm의 소재를, (b)는 업세팅(upsetting)을 통하여 산화스케일을 제거하고 외경 128mm, 높이 55mm의 예비 형상을, (c)는 외경 128mm 높이 60mm 그리고 내경 65mm으로 블랭크 형상 마무리를 위한 다듬질(finisher) 모양을 나타낸다.

마지막으로 (d)는 피어싱(piercing) 공정에서 최종 형상으로의 열간 링 롤링을 위해 맨드릴(mandrel)이 삽입되는 공간인 중간 슬러그를 제거하는 모양을 나타낸다.

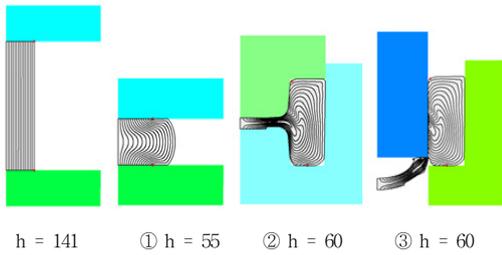
본 연구에서는 링 롤링 소재로 S45C를 사용하였으며 소재와 공구와의 마찰계수로는 쿠룸마찰계수 0.3을 적용하였다. 공구의 이송속도는 -200mm/s로 하였다. Fig.6에 재료의 온도별, 변형률 속도별 유동곡선(응력-변형률 곡선)을 나타내었다.



[Fig. 6] Flow stress-strain curve of S45C material for various temperatures and strain rates

Fig.7은 단조공정의 해석결과로 각 공정에서 재료의 소성유동이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

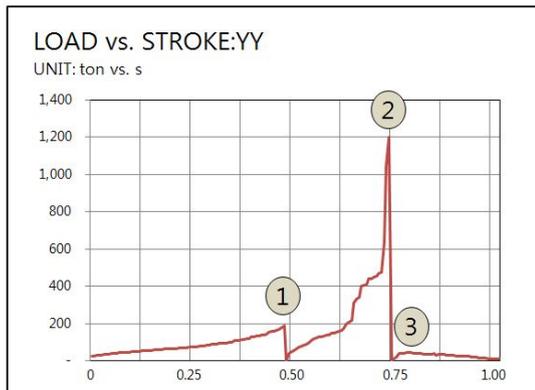
Fig.8에 각 공정에서 성형하중-변위 선도를 나타내었다. 성형하중이 ①의 업세팅 공정에서는 190톤, ②의 다듬질 공정에서는 1200톤, 마지막 ③의 중간 슬러그를 제거하는 피어싱 공정에서는 42톤으로 나타났으며, 해석 결과를 기준으로 본 연구에서는 1600톤 용량의 단조프레스를 선정하였다.



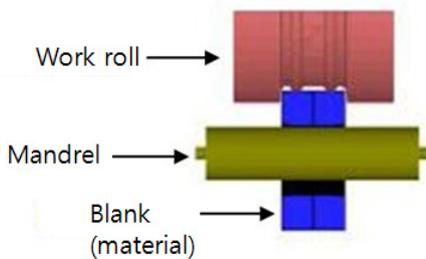
[Fig. 7] Plastic flow(step by step)

### 3.2 열간 링 롤링 공정

Fig.9는 열간단조에서 만들어진 블랭크를 이용하여 맨드릴과 작업롤(Work-roll)로 링 롤링하는 공정에 대한 해석모형을 나타내고 있고, Fig.10은 열간단조 블랭크 및 링 롤링 후의 완성된 치수와 형상을 나타낸다.



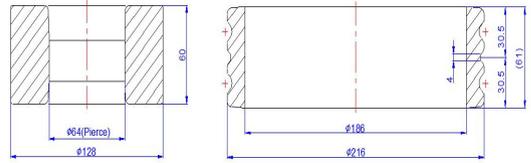
[Fig. 8] Forming load-stroke curve for each forming process



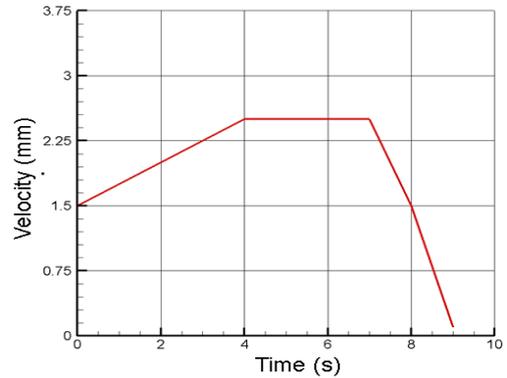
[Fig. 9] Model for finite element analysis of hot ring rolling process

이 공정의 해석을 위해서 소재의 유동곡선은  $\bar{\sigma} = 144 \epsilon^{0.193}$  (MPa), 워크 롤의 회전속도는 60rpm,

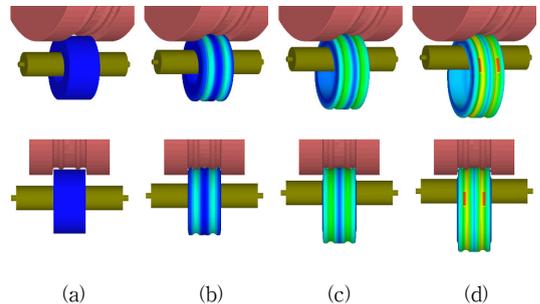
워크 롤과 소재의 전단마찰계수  $m=0.6$ , 맨드릴과 소재의 전단마찰계수  $m=0$  그리고 맨드릴 이송속도는 Kim 과 Joun 등의 연구결과[12]를 참고하여 Fig.11 과 같이 부여 하였다.



[Fig. 10] Dimension of blank and final ring rolling



[Fig. 11] Feeding velocity of mandrel



[Fig. 12] History of plastic deformation in hot ring rolling at (a) 1 step (b) 8000 step (c) 16000 step (d) 24000 step

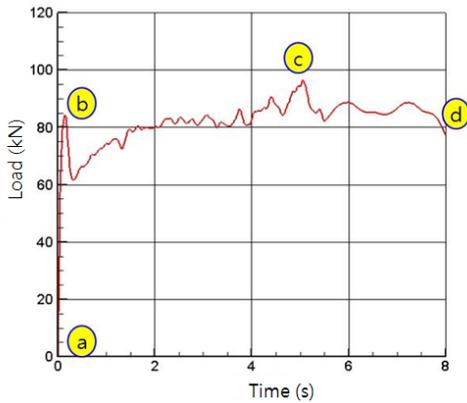
Fig.12에 블랭크로부터 링이 점차적으로 확장되어지는 변형이력과 변형률 분포를 나타내었다. 그림에서 (a)는 단조에서 만들어진 블랭크가 작업 롤에 안착된 1 스텝에서의 모양이며, (b)는 링 롤링이 시작되면서 맨드릴이 1차 전진하여 제품을 넓혀가는 8000 스텝에서의 모양이며, (c)는 맨드릴이 2차 전진하여 제품을 넓혀가는 16000

스텝에서의 모양이다. 마지막 (d)는 24000 스텝에서 외경 교정 및 완성된 링 모양을 나타낸다.

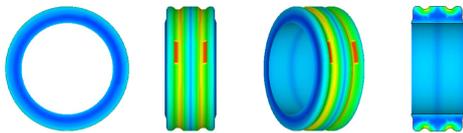
Fig.13에 링 롤링공정에서 성형하중-변위 선도를 나타내었다. Fig. 12와 연계하여 보면 멘드렐이 1차 전진하여 링을 확장시키는 첫 단계인 (b)에서는 성형 하중이 85kN, 멘드렐이 2차 전진하면서 점차적으로 링을 확장시켜 나가는 구간 (c)에서는 성형 하중이 95kN, 마지막으로 최종 링 롤링 완성 단계인 (d)에서는 성형하중이 75kN으로 나타났다.

그림의 (b)구간에서는 멘드렐이 블랭크에 접촉되면서 작업 롤과 멘드렐 사이에서 강한 압하력으로 링을 확장시키는 시작점이기 때문에 하중이 순간적으로 급상승되고 링이 확장을 하기 시작하면서부터 조금 감소했다가 서서히 증가하는 형태를 보여 준다.

Fig.14는 열간 링 롤링 후 최종형상의 해석결과이다.



[Fig. 13] Forming load graph in hot ring rolling



[Fig. 14] Predicted shape of multilayered ring (two rings)

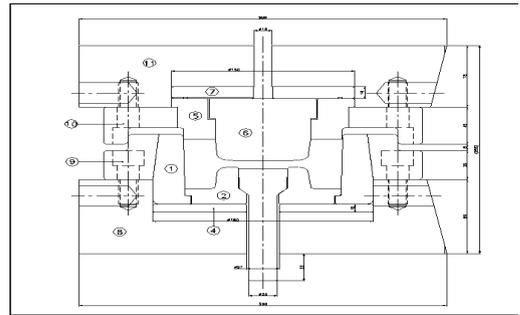
## 4. 성형 실험방법 및 결과

### 4.1 블랭크 열간단조 실험

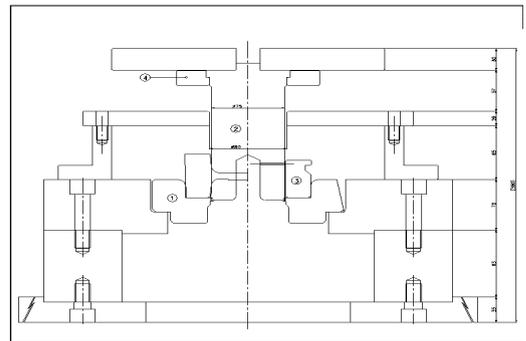
Fig.10에서와 같이 내경 186mm, 외경 216mm, 높이 61mm의 다중형상 환형 부품의 열간 링 롤링 실험품 성

형을 위한 열간단조 블랭크 성형 공정 설계 및 실험을 수행하였다. 열간단조 공정에서는 외경 70mm, 높이 141mm, 중량 4,843g으로 설정된 S45C 재료를 이용하여 1200℃로 가열한 다음, 업세팅으로 예비형상을 만들고 블랭크 형상 마무리를 위한 다듬질을 거쳐 마지막으로 중간 슬러그를 제거하기 위한 피어싱공정으로 실험을 수행하였다. 사용된 장비는 크랭크 방식의 1600톤 단조프레스이다.

Fig.15와 Fig.16에 열간단조 실험용 다듬질 금형셋트의 조립도와 슬러그 제거용 피어싱 금형셋트의 조립도를 각각 나타내었다.



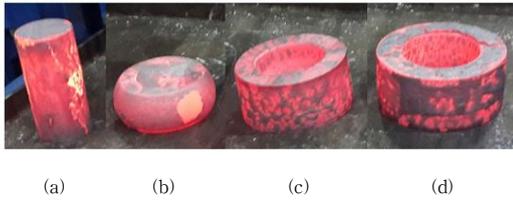
[Fig. 15] Assembly drawing for blank finisher die set in hot forging process



[Fig. 16] Assembly drawing for piercing die set of blank slug removing in hot forging process

Fig.17에 열간단조 블랭크 제작 실험품의 공정별 제품을 나타내었다.

(a)는 원소재 절단 후 가열된 소재, (b)는 업세팅의 예비형상, (c)는 블랭크 형상 마무리를 위한 다듬질 모양, 마지막으로 (d)는 중간 슬러그를 제거한 피어싱된 제품의 모양이다.



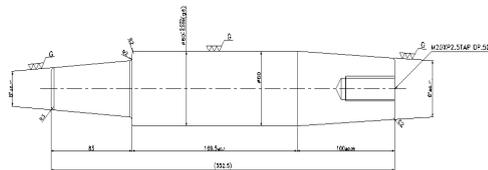
[Fig. 17] Parts of work-in process in hot forging process (a) heated specimen (b) upsetted specimen (c) finished specimen (d) pierced specimen

### 4.2 열간 링 롤링 실험

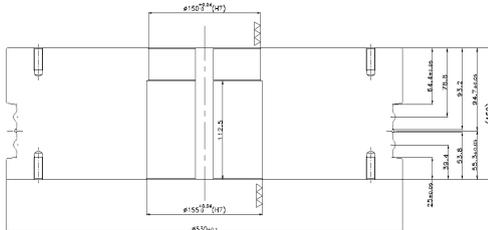
블랭크 열간 단조가 완료되면 제품의 온도는 약 1000℃ 정도이다. 열간 링 롤링 공법은 블랭크에서 남아있는 잠열을 이용하기 때문에 적은 압력으로 링 롤링성형이 가능하다. 링 롤링 실험품 제작을 위하여 멘드렐과 작업롤을 설계, 제작 한 후 실험을 수행하였다.

Fig. 5에 나타난 멘드렐과 작업롤의 구체적인 형상을 Fig.18과 Fig.19에 각각 나타내었다.

Fig.20은 열간 링 롤링 공법으로 완성된 다중(2개)형상 환형 링의 모습이다. (a)는 열간 링 롤링 후 약 800℃의 열을 가지고 있는 상태이며, (b)는 냉각이 완전히 완료된 상온 상태이다.



[Fig. 18] Mandrel



[Fig. 19] Work-roll

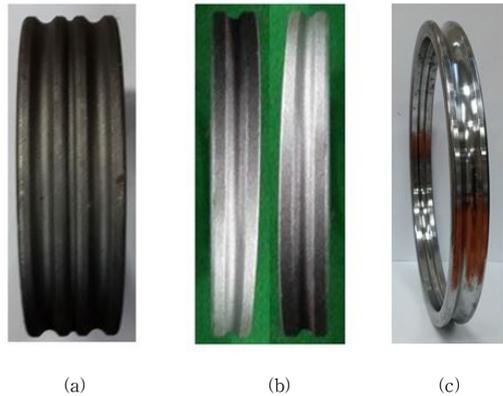
본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 열간 링 롤링 공정에서 소재의 회수율을 극대화 하기위하여 2개의 제

품을 동시에 성형한 후 기계가공에 의해 분리하여 2개의 완성품을 얻는 방법을 채용하였다.

Fig.21의 (a)는 다중형상의 링 롤링 완성품, (b)는 링 롤링 완성품을 두 개로 분리한 모양, (c)는 최종 가공 완성된 부품의 모양이다. 기존 열간단조 방식으로 동일한 제품의 형상을 얻기 위해서는 중간 슬러그부의 재료 손실이 많지만 본 연구에서는 다중형상 즉, 두 개의 제품을 동시에 링 롤링한 후 분리 공정을 통하여 소재 회수율을 극대화 할 수 있었다.



[Fig. 20] Finished test samples (a) after hot ring rolling (b) in cold state



[Fig. 21] Parts separated and turned with multilayered rings (a) multilayered ring obtained from hot ring rolling (b) separated two ring (c) final ring product

### 4.3 실험결과 분석

Fig.22는 열간단조 블랭크 제작 실험품의 실제 단류선(metal flow)을 나타낸다. 다중형상 링의 특성상 Fig.21에서 링 롤링 후 두 개의 링으로 분리하여 최종 제품이 만들어지므로 각각의 제품에 대한 내구성을 고려하면 단류선은 상, 하 대칭으로 형성되어야 하지만 블랭크 해석에서 나타난 것과 동일하게 다소 하 형상 쪽으로 약간의 치우침이 발생한 것을 알 수 있다.

Fig.23은 링 롤링으로 완성된 링의 단류선의 모습이다. 링 롤링 공법이 원주 방향으로 단면적이 점차적으로 감소되며 성형되기 때문에 블랭크에서 나타난 단류선보다 더욱 조밀한 형태를 갖추고 있으며, 단류선의 결함으로 지적되는 끊어짐이나 겹침이 없이 양호한 것으로 관찰되었다.



[Fig. 22] Metal flow for a blank in finishing process



[Fig. 23] Metal flow of completed part after a hot ring rolling and heat treatment

Fig.24는 링 롤링 완성품의 열처리(Q/T)후 브리넬 경도값을 측정된 결과이다. 완성품의 단면을 절개한 후, 두 개의 시편에서 총 10곳을 측정된 결과 모든 위치에서 품질규격 목표값을 만족하였다.

또한, Fig.25에서 알 수 있듯이 열처리 후 금속조직을 500 배율과 100 배율로 확대하여 관찰한 결과 링 롤링 공법의 장점중 하나인 조직의 조밀성을 확인할 수 있었다.



Size	HB	HBS	Mark	Check Size
106.0	293			
105.5	285			
104.5	277			
104.0	269			
103.0	262			
102.0	255			
101.0	248			
100.0	241			
99.0	235			
98.2	229			
97.3	223	//	2	
96.4	217	////	4	
95.5	212	////	4	
94.6	207			
93.0	200			
92.8	197			

[Fig. 24] Brinell hardness after heat treatment



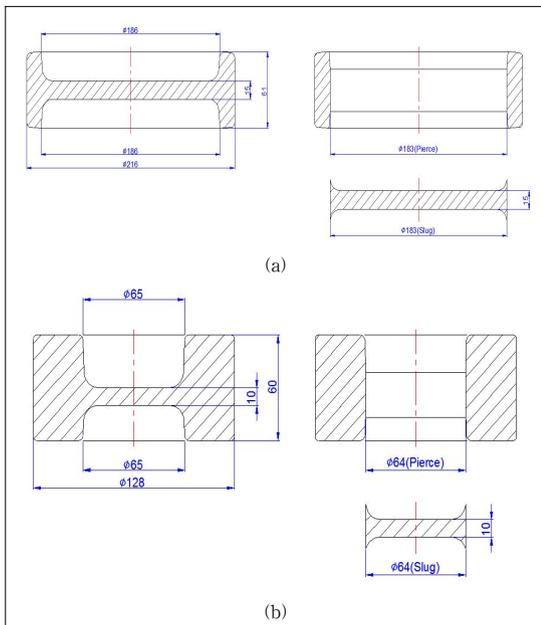
[Fig. 25] Micorstructure after heat treatment (Q/T)

Fig.26에서는 일반 열간단조 공법과 열간 링 롤링 공법의 차이를 고찰하기 위하여 초기 선정된 모델을 기준으로 완성된 실험품과 비교 분석하였다. (a)는 일반 열간단조 공법으로 선정된 모델의 링을 제작할 때 공정도이며, (b)는 본 연구에서 사용한 링 롤링 공법의 전 단계인 블랭크 형태를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 중간 슬러그 부위의 중량차이가 소재 회수율 및 초기 투입증량에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 1은 환형 부품의 다중형상을 링 롤링 공법으로 제조 시 일반 열간단조 공법과의 차이를 항목별로 나타내고 있다.

열간 링 롤링 완성품의 품질수준을 평가하기 위하여 30개의 샘플을 준비하여 3차원 측정기(CMM)로 측정하였다.

내경은 186.63mm~186.23mm 범위 (평균 185.80mm)에 존재하여 규격 186±1.2mm를 만족하고, 외경은 216.68mm~216.51mm 범위(평균 216.51mm)에 존재하여 규격 216±1.0mm를 만족함을 확인하였다.



[Fig. 26] Design specification of blanks for (a) the conventional hot forging and (b) the hot ring rolling

[Table 1] The comparison between the conventional hot forging and the hot ring rolling

items	Hot forging	Hot ring rolling	Difference
Input weight (g)	8059	4843	40%
Yield ratio (%)	59	83	24%
Forging force (kN)	28714	11760	59%
Forging machine capacity (kN)	34300	15680	54%

또한, 링 롤링 완성품의 공정능력을 알아보기 위하여 미니탭13(Minitab13)을 사용하여 분석하였다.

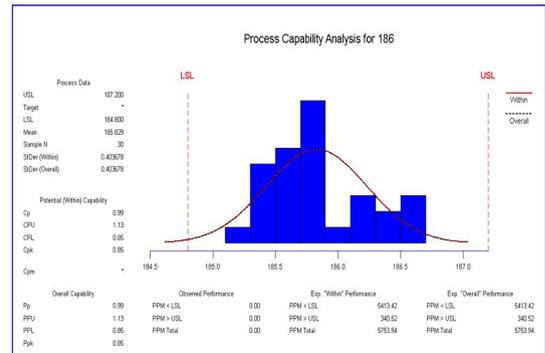
열간 링 롤링 완성품의 품질수준을 평가하기 위하여 30개의 샘플을 준비하여 3차원 측정기(CMM)로 측정하였다.

내경은 186.63mm~186.23mm 범위 (평균 185.80mm)에 존재하여 규격 186±1.2mm을 만족하고, 외경은 216.68mm~216.51mm 범위(평균 216.51mm)에 존재하여 규격 216±1.0mm을 만족함을 확인하였다. 또한, 링 롤링 완성품의 공정능력을 알아보기 위하여 미니탭 13(Minitab13)을 사용하여 분석하였다. Table 2는 내경

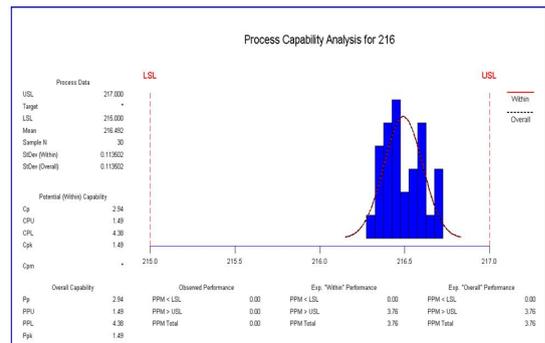
에 관련된 공정능력 분석 결과이며, Table 3은 외경에 관한 공정능력 분석 결과이다. 시험 제작한 샘플의 진원도 수준은 내경이 평균 0.52mm, 외경이 평균 0.45mm이었으며 초기에 목표한 1.0mm 이하 보다 낮은 평균 0.5mm 이내에 존재하여 아주 양호한 것으로 평가되었다.

또한 링 롤링 공정의 신뢰성을 판단하는 공정능력 (Cpk) 분석 결과는 외경이 Cpk 1.49, 내경이 Cpk 0.85로 외경이 내경 보다 훨씬 높게 나타났다. 이는 초기 투입수량에 대한 산포와 블랭크 열간단조 성형 시 단조 프레스의 압하량에 의한 블랭크의 두께 산포로 인하여 체적의 변화에 따른 요인으로 판단되며, 링 롤링 공법의 특성상 성형 종료 기준이 제품의 외경 치수에 맞추어지므로 상기 요인에 의해 내경 치수에 좀 더 큰 치수 산포가 나타난 것으로 사료된다.

[Table 2] Process capability analysis for inner diameter



[Table 3] Process capability analysis for outer diameter



## 5. 결론

본 연구에서는 내경 186mm, 외경 216mm, 폭 61mm의

다중형상을 가진 환형 부품의 열간 링 롤링 공정을 개발하였다. 선정된 부품의 모델을 기준으로 블랭크 형상을 설계하고 단조 및 링 롤링 공정을 해석하였으며, 실제 열간 단조금형을 제작하여 블랭크를 성형한 다음, 열간 링 롤링 장비를 이용하여 최종 실험품을 제작하여 원재료 투입중량, 원재료 회수율, 단조하중, 열간단조 장비 등을 비교 분석하였다.

또한, 링 롤링 후 기계가공 여유의 최소화를 실현하기 위한 중요 인자인 제품의 외경 진원도를 측정하여 열간 링 롤링 실험품의 품질을 검증하였다. 마지막으로 링 롤링 후 다중형상의 실험품을 최종 제품화하기 위하여 두 개로 분리한 다음, 기계가공을 실시하여 링 롤링 실험품의 표면에서 나타나는 결함 유무를 확인하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 유추하였다.

- (1) 열간 링 롤링 전 단계인 블랭크의 내, 외경 치수의 변수는 링 롤링 작업시 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단되었으나, 폭 치수의 변수는 다중형상 링 작업일 경우 좌, 우 형상이 대칭이 되어야 하므로 작업물의 내측 치수 보다 편측으로 0.5mm의 여유를 가지는 치수로 블랭크가 제작되어야만 작업물에 블랭크 안착의 안정성 확보 및 링 롤링 성형시 다중형상의 좌, 우 치우침을 막을 수 있었다.
- (2) Table 1과 같이 다중형상 환형 부품의 경우 기존 열간단조 방식의 제조공법 보다 열간 링 롤링 공법을 적용할 때 원재료 초기 투입중량이 약 40% 감소하였으며, 블랭크 열간단조 하중의 약 59% 감소로 블랭크 제작에 필요한 단조프레스의 소형화 및 에너지 감소 효과가 있었으며, 최종 링 롤링 완성품 대비 원소재 회수율이 24% 증가하는 것을 확인하였다.
- (3) 열간 링 롤링 실험결과, 링 롤링 후 내, 외경 진원도가 평균 0.5mm로 아주 양호하게 평가되어 기계가공의 여유를 최소화 할 수 있었고, 또한, 공정능력 분석결과 외경 Cpk 1.49, 내경 Cpk 0.85를 확보하여 환형 부품의 다중형상 열간 링 롤링 공정의 최적화를 실현하였다.

## References

[1] R. Bolin, *Ring rolling*, ASM Handbook, Vol. 14A, Metalworking; Bulk Forming, ASM Int., Materials Park,

OH 44073-0002(2005), pp. 136-155, 2005.

- [2] M.H. Akcan, Analysis of profiled ring rolling, MS thesis, Atilim University, 2009
- [3] H.Y. You, "A study on the forming conditions of a forging piston by using the finite element simulation and the taguchi method, J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc., Vol.13, No.5, pp1990-1995, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.1990>
- [4] M. S. Joun, H. K. Moon, J. M. Park, J. H. Chung, C. N. Park, "Three dimensional rigid-plastic finite element analysis of a ring rolling process", Int. J. Mech. Tools and Manuf., Vol. 40, pp.81-93, 2001.
- [5] K. Sawamiphakdi, P. M. Pauskar, D. G. Jin, G. D. Lahoti, "Ring rolling process modelling using explicit finite element analysis", Proc. 7th ICTP, pp. 28-31, 2002.
- [6] P. M. Pauskar, K. Sawamiphakdi, D. Q. Jin, "Static implicit vs. dynamic explicit finite element analysis for ring rolling process modeling", NUMIFORM 2004, pp. 412-417, 2004.
- [7] E. Doege, M. Aboutor, "Simulation of ring rolling process", Adv. Tech. Plast., Vol. 2, Stuttgart, pp. 817-824, 1987.
- [8] N. S. Kim, S. Machida, S. Kobayashi, "Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method", Int. J. Mech. Sci., Vol. 30, pp. 569-577, 1990.
- [9] D. Y. Yang, K. H. Kim, 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, pp. 541-550, 1991.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403\(91\)90016-V](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403(91)90016-V)
- [10] S. Hamzah, B. Stahlberg, "A study of pore closure in the manufacturing of heavy rings", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 84, pp. 25-37, 1998.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00075-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00075-2)
- [11] C. L. Xie, X. H. Dong, S. J. Li, and S. H. Huang, Rigid-viscoplastic dynamic explicit FEA of the ring rolling process, Int. J. Mech. Tools and Manu., Vol. 40, pp. 81-93, 2000.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00043-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00043-7)
- [12] B.S. Kim, I.S. Choi, M.H. Choi, G.M. Lee, M.S. Joun, "Finite element analysis of a hot profile ring rolling process of the ball bearing outer race", J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng., Vol.11, No.6, pp. 164-168, 2012.
- [13] D. Davey, M. J. Ward, "The practicalities of ring rolling simulation for profiled rings", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 125-126, pp. 619-625, 2002  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00356-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00356-4)

- [14] K. Davey, M. J. Ward, "A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 165-190, 2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00080-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00080-7)
- [15] Y. S. Ko, H. J. Yoon, N. S. Kim, "Prediction of spread and contact region in ring rolling process using rigid-plastic finite element method", *Trans. Korean Soc. Mech. A*, Vol. 26, pp. 2670-2677, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2002.26.12.2670>
- [16] A.Parvizi, K. Abrinia, M. Hamed "An analytical approach to ring rolling using modified slab method", *Adv. Mater. Research*, Vol.383-390, pp.4634-4641, 2012.
- [17] S. W. Koo, J. C. Lee, S. J. Yoon, N. S. Kim, "Analysis of aluminum ring rolling process using thermo-rigid-plastic finite element", *Trans. Korean Soc. Mech. A*. Vol. 27, pp. 815-822, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2003.27.5.815>
- [18] H. K. Moon, M. S. Joun, J. H. Chung, C. N. Park, "Prediction of defect formation in ring rolling by the three-dimensional rigid-plastic finite element method", *Trans. Korean Soc. Mech. A*, Vol. 28, pp. 1492-1499, 2004  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2004.28.10.1492>
- [19] B.S. Kim, E.J. Kim, K.R. Kim, M.H. Choi, M.S. Joun, "Finite element analysis of warm or hot ring rolling processes for small and medium size rings with profile in the inner or outer diameter", *Proc. Fall Conf. KSTP*, pp. 322-32, 2013.
- [20] B. S. Kim, H. K. Moon, E. Z. Kim, M. H. Choi, M. S. Joun, "A dual-mesh approach to ring-rolling simulations with emphasis on remeshing", *J. Manuf. Proc.*, Vol.15, No.4, pp. 635-643, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.05.002>

---

**김 경 루(Kyung-Ryool Kim)**

[정회원]



- 2014년 8월 : 경북대학교 산업대학원 (공학석사)
- 2011년 10월 ~ 현재 : 한호산업기술연구소 소장

<관심분야>

열간단조, 링롤링 공정설계개발 및 생산공정관리

---

**김 영 석(Young-Suk Kim)**

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 4월 : 일본 Kobe 대학교 기계공학 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1994년 2월 : 포항 산업과학연구원 연구실장
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

생산공학, 소성역학, 나노/마이크로역학, FEM 및 Biomechanics