

# 열간 선재 압연기에서 작업롤 베어링의 외측링 파손에 관한 연구

변상민\*<sup>#,</sup>

\*동아대학교 기계공학과

## Study on Failure in Outer Ring of Work Roll Bearing in Hot Rod Rolling Mill

Sang-Min Byon\*<sup>#,</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, DONG-A UNIV.

(Received 9 May 2017; received in revised form 4 June 2017; accepted 7 June 2017)

### ABSTRACT

A finite element analysis-based approach which investigates the causes of the breakdown in the outer ring of the choke at hot rod rolling mill is presented. Two-dimensional drawings of the whole vertical-type mill stand are transformed into three-dimensional CAD models. Non-linear elasto-plastic deformation analysis of material at the roll gap is performed for computing roll force and torque of the work roll. Then, the reaction forces of the bearing rings together with a set of roller bearings that support the work roll are obtained by means of rigid body motion analysis. Finally, stress behaviors in the bearing rings together with a set of roller bearings that support the work roll are investigated by linear elastic analysis. Results reveal that stress at the contact area between the outer ring and roller bearing is extraordinary high when an internal gap between an external surface of the outer ring and the internal surface of the chock due to wear of the inside of the chock occurs.

**Key Words :** Rod Rolling Mill(선재압연기), Bearing(베어링), Outer Ring(외측링), Failure(파손)

### 1. 서 론

열간 선재압연(Hot rod rolling)은 주조(Casting)로부터 생산된 빌렛(Billet)을 고온(950~1050℃)에서 연속적으로 설치되어 있는 압연기를 통해서 원하는 크기의 원형 단면 와이어(Wire)를 생산하는 공정이다.<sup>[1]</sup> 각 압연기를 통과할 때의 소재의 형상은 작업롤(Work roll)에 가공되어 있는 공형에 의해 결정된

다. 소재의 압연에 의해 발생한 하중은 작업롤의 양 끝에 장착된 초크(Chock)를 통해 압연기 하우스(Housing)에 전달된다. 초크는 압연하중 전달 체계에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 초크는 내측링(Inner ring)과 외측링(Outer ring) 그리고, 그 사이에 롤러 베어링으로 구성되어 있다. 최근에 새로운 강종개발에 따라 저온(850~950℃) 압연 및 고강도강 압연이 요구되는데, 이와 같은 경우에 초크 내부의 외측링 파손이 빈번하게 발생하고 있다.

내측링과 외측링으로 구성되어 있는 베어링 링에 관한 기존의 연구는 크게 두 가지 부분으로 나누어

# Corresponding Author : smbyon@dau.ac.kr

Tel: +82-51-200-7639, Fax: +82-51-200-7656

볼 수 있다. 첫 번째는 베어링 링 표면에 발생하는 피로 파괴를 고찰하는 부분<sup>[2-5]</sup>이고, 두 번째는 기계 진동에 의한 베어링 링의 결함 검사 및 진단에 관한 부분<sup>[6-8]</sup>이다. Kabo<sup>[2]</sup>는 과도한 하중이 작용할 때 베어링과 베어링 링 사이의 구름접촉에 의해 유발되는 베어링 링의 파손에 대해 고찰하였다. Huang 등<sup>[3,4]</sup>은 베어링 링에서의 크랙(Crack) 발생과 전파에 대해서 연구를 수행하였다. Tabacaru 등<sup>[5]</sup>은 베어링 링의 주행 트랙에서 발생하는 베어링 링의 거칠기 및 형상 변화에 대해 고찰하였다. Brusa 등<sup>[6]</sup>은 동적 시뮬레이터를 사용하여 구름 하중의 변화에 따른 베어링 결함을 예측하였다. Kappaganthu 등<sup>[7]</sup>은 압연에서 작업롤과 내측 링의 축 중심 편차가 베어링 링의 진동을 유발함을 보였다. Farina 등<sup>[8]</sup>은 측정 데이터 분석을 통해서 베어링 링의 표면 결함을 예측하였다.

상기의 연구결과<sup>[2-8]</sup>들은 베어링부의 구름 동작이 정상적으로 이루어 질 때 베어링 링의 표면 결함과 손상을 고찰하는데 초점이 맞추어져 있다. 그러나, 비정상적인 동작 상태에서의 베어링 링의 결함과 손상에 관해서는 잘 알려지지 않았다. 본 연구에서는 열간 선재압연에서 발생할 수 있는 비정상적 베어링부의 구름 동작을 제시하고 유한요소해석을 통해 이 상태에서의 베어링 링의 파손을 고찰하고자 한다.

본 연구대상인 열간 선재압연기는 복잡한 구조로 이루어져 있기 때문에 베어링부를 해석하기 위해서는 베어링부에 연결되어 있는 부분을 함께 고려해야 한다. 이를 위해서 하중전달법을 도입하여 베어링부와 관련되어 있는 각 부분을 연결 해석하였다. 먼저, 압연기의 각 부분(즉, 압연기 하우징, 작업롤, 구동축, 쇼크, 롤러 베어링, 내측 및 외측링 등)을 도면에 기초하여 삼차원 CAD 모델링을 수행하였다. 압연하중이 최초로 유발되는 부분인 작업롤 사이의 롤갭(Roll gap)에서 소재의 탄-소성 해석을 수행하였다. 이 때 계산된 압연하중 및 압연토크를 작업롤의 강제해석에서 외력으로 작용시켜 작업롤을 지지하고 있는 쇼크내의 베어링 링에 작용하는 반력을 계산하였다. 베어링 링의 선형 탄성해석을 통해서 베어링 링의 응력 및 파손 상태를 고찰하였다.

## 2. 공정 분석 및 문제 정의

### 2.1 열간 선재압연 공정과 압연 스탠드

열간 선재압연은 관압연과는 다르게<sup>[9]</sup> 빌렛을 롤 표면에 가공된 공형을 통과시켜 단면을 점진적으로 줄여가면서 형상을 구현하는 공정이다. Fig. 1(a)은 실제 열간 선재압연기를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 압연기 내부에 장착되어 있는 롤의 공형을 개념적으로 나타낸 것이다. 즉, 원형 단면의 소재가 타원형 공형을 통과하고 다시 원형 공형을 통과 하면서 소재의 형상 변화와 단면적의 축소가 이루어지는 과정이다. 이때, 롤의 배치가 상-하로 이루어진 경우와 좌-우로 이루어진 경우를 볼 수 있다. 전자를 수평 스탠드(Horizontal stand)라고 하고 후자를 수직 스탠드(Vertical stand)라고 한다. 본 연구에서는 베어링 링 파손이 빈번하게 일어나는 수직 스탠드를 연구의 대상으로 선정하였다.

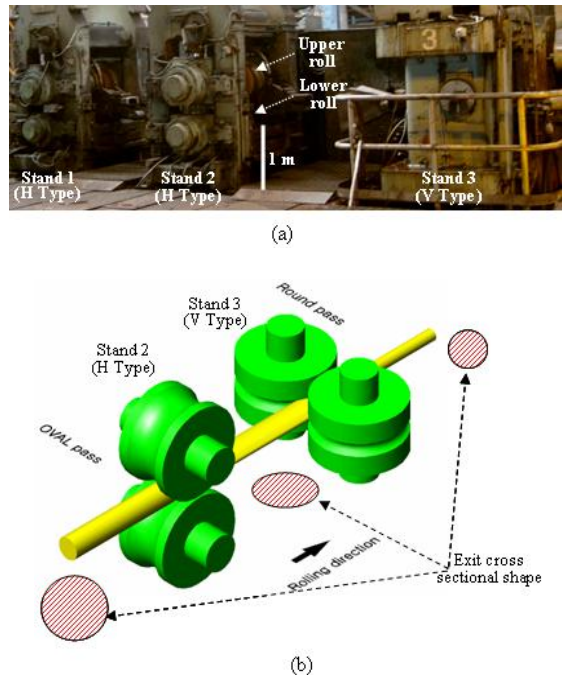


Fig. 1 (a) Actual scenery of the hot rod rolling mill  
(b) schematic deformation of workpiece in round-to-oval-to-round groove rolling

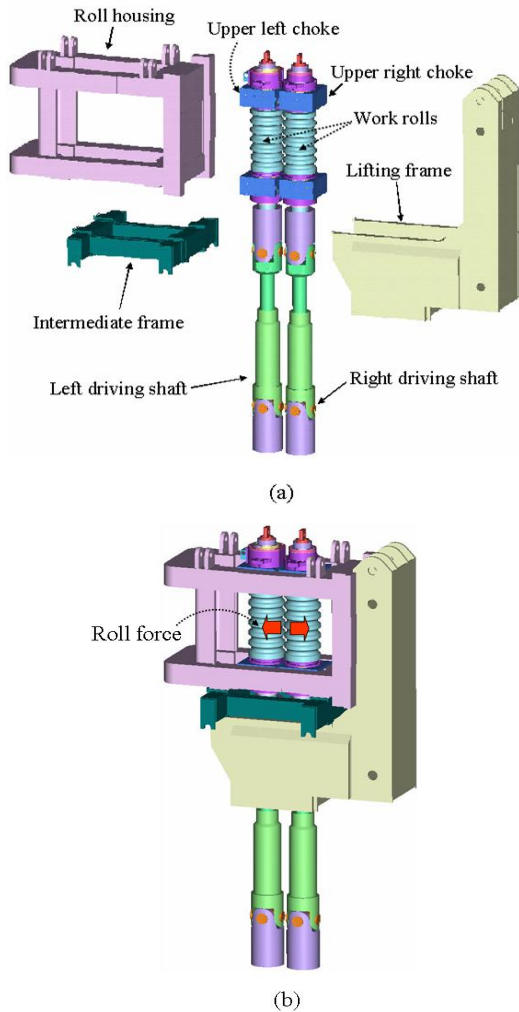


Fig. 2 3D modeling of the actual hot rod mill. (a) representative components of a vertical-type stand (b) 3D modeling of the whole vertical-type stand assembled

## 2.2 수직 스탠드의 3차원 CAD 모델링

Fig. 2(a)는 고찰의 대상인 수직 스탠드 초크 내부의 베어링부에 하중을 전달하는 각 부분을 3차원 모델링한 그림이다. 모터로부터 회전 동력이 구동축(Driving shaft)에서 작업롤(Work roll)로 전달되면 좌·우 작업롤 사이의 롤 갭(Roll gap)에 소재가 취입되어 압연이 이루어진다. 이 때 압연력은 작업롤의 양 끝에 장착된 초크에 전달되고 이 힘이 롤 하

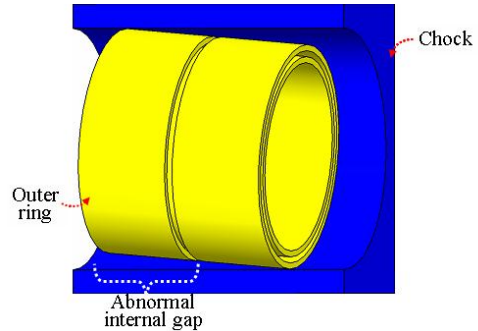


Fig. 3 Abnormal internal gap between chock and outer ring caused by negative tolerance and wear

우징에 전달되어 지지된다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 각 부분을 조립하여 나타낸 그림이다. 본 조립도에 서 하중 전달 과정을 명확하게 파악할 수 있다.

## 2.3 CAD 모델 고찰에 의한 베어링부 비정상 접촉 상태 도출

막대한 압연하중을 전달하는 압연 스탠드 설계에 사용되는 안전율은 10 이상이다. 따라서, 정상적인 정적 하중 상태에서 스탠드 내부의 기계요소가 파손되는 경우는 거의 없다. 또한, 정상적인 압연 온도 및 소재 특성 범위 내에서 예상 가능한 모든 압연하중을 고려해도 기계요소가 파손 영역 내에 들어가기 쉽지 않다. 따라서, 비정상적 기계요소의 조립과 이 상태 하에서 압연이 압연 스탠드의 베어링부 파손의 원인이 될 것으로 예상된다.

기계요소를 조립할 때 각 요소들은 공차(Tolerance)를 가지고 있다. 양의 공차는 규정 크기보다 더 크게 가공되는 것을 의미하고, 음의 공차는 규정 크기보다 더 작게 가공되는 것을 의미한다. 실제 작업 현장에서는 짧은 정비시간으로 인해 요소 교체가 용이한 음의 공차가 선호된다. 또한, 음의 공차부의 간극에 상호운동이 있는 경우는 과도한 마모가 유발된다. 본 연구에서는 실제 정비도면 분석과 실측, 그리고 이에 기초한 3차원 CAD 모델링을 통해 초크의 내부와 외측링의 표면에 음의 공차와 마모량을 구현하였다. Fig. 3은 초크의 내부와 외측링 표면 사이에 음의 공차와 마모량에 의해 발생된 간극을 확대하여 나타내었다.

Analysis objects	Analysis type and procedure	Output
Material at roll gap	Non-linear elasto-plastic analysis	Rolling force Rolling torque
Structural parts of rolling mill	Rigid body motion analysis	Reaction force Reaction moment
Structural parts of rolling mill	Linear elastic structural analysis	Stress distribution Strain distribution

Fig. 4 Analysis procedure to calculate stress and strain distribution of bearing ring

### 3. 압연 스탠드의 유한요소해석

#### 3.1 해석절차

본 연구는 소재가 작업롤 사이의 롤갭을 통과하면서 소성 변형될 때 초크 내에 위치한 외측링의 파손을 고찰하는 것이다. 따라서, 소성 변형부에 발생한 하중이 외측링까지 도달하도록 하는 하중전달법이 필요하다. 이것을 위해 Fig. 4에 제시된 3가지 해석 단계를 설정하고 유한요소해석(Finite element analysis)을 수행하였다. 첫 번째 단계로, 작업롤의 압연하중과 토크를 계산하기 위해서 작업롤 사이의 롤갭에서 소재의 비선형 탄-소성 해석을 수행하였다. 두 번째 단계로, 작업롤을 지지하고 있는 초크 내의 베어링의 반력을 강제운동해석으로 계산한다. 세 번째 단계로, 베어링 링의 선형 탄성해석을 통해서 베어링 링의 응력과 변형률 및 파손 여부를 해석한다.

#### 3.2 유한요소모델

Fig. 5(a)는 하우징, 작업롤, 구동축, 초크, 몰러 베어링, 내측 및 외측링을 포함하는 전체 압연기 스탠드의 유한요소격자를 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 작업롤 및 베어링부를 포함하고 있는 초크의 유한요소격자를 보여주고 있고, Fig. 5(c)는 베어링부의 내측링, 외측링, 몰러베어링 세트를 확대하여 보여주고 있다. 베어링부로 갈수록 높은 응력 수준을 효과적으로 모사하기 위해서 좀 더 조밀한 유한요소격자 모델을 도입하였다. Table 1에 각 해당 기계

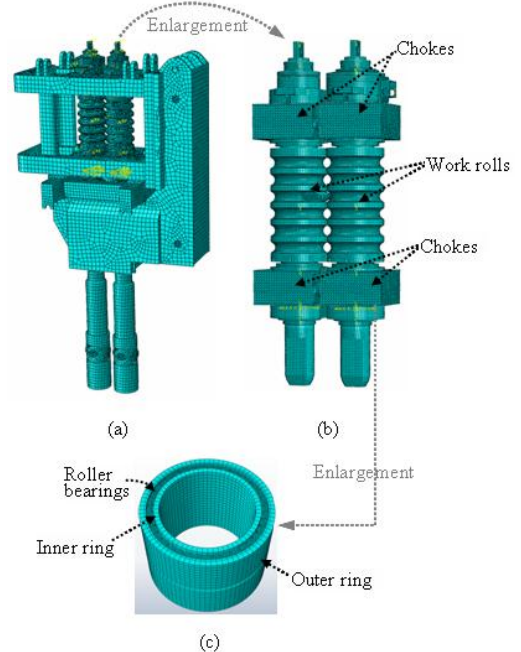


Fig. 5 (a) FE mesh of actual stand of hot rod mill (b) FE mesh of work roll and choke structure (c) FE mesh of the inner ring, outer ring and roller bearing

구조물에 사용된 재료와 유한요소 종류를 나타내었다.

소재가 작업롤 사이의 롤갭을 통과하면서 변형될 때 작업롤에 걸리는 압연하중과 토크를 탄-소성해석을 통해서 계산할 수 있다. 이 해석을 수행하기 위해서는 변형저항식이 필요한데 본 연구에서는 Shida 식<sup>[10]</sup>을 사용하였다. 이 식은 고온에서 소성변형하는 소재의 온도와 변형률 속도에 의존하는 응력과 변형률 사이의 관계식이다. 작업롤, 하우징,

Table 1 Element type used for material and corresponding parts

Name of parts	Material	Type (No.) of elements
Roll	42CrMo4	Hexahedral solid(18,315)
Roller bearing	42CrMo4	Hexahedral solid(3,116)
Choke	GS45	Hexahedral solid(45,913)
Roll housing	GS45	Hexahedral solid(6,852)

**Table 2 Mechanical properties of materials of mill stand**

Properties	GS45	42CrMo4
Mass density	7850 kg/m <sup>3</sup>	7620 kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	210 GPa	220 GPa
Poisson's ratio	0.30	0.287
Ultimate strength	450 MPa	900 MPa
Yield strength	230 MPa	460 MPa

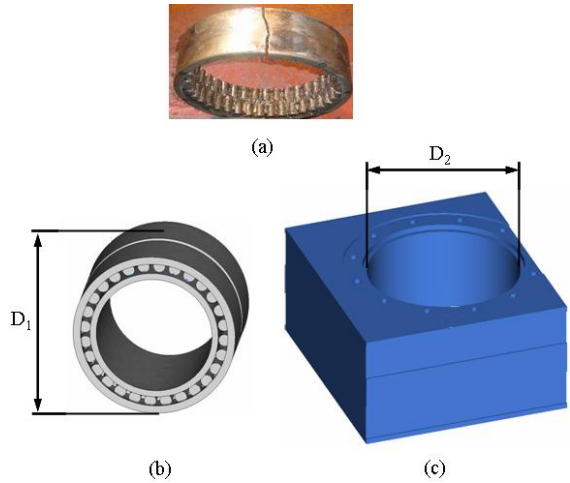
쇼크, 내측링, 외측링, 롤러베어링 등은 압연 중에 소성변형하지 않기 때문에 선형 탄성해석<sup>[11]</sup>이 적합하다. 본 해석에 필요한 영 계수, 프와송비, 항복강도 등은 Table 2에 나타내었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 현장 테스트

Fig. 6(a)는 압연 현장에서 파손된 외측링의 실제 형상을 보여주고 있다. 본 파손은 쇼크의 내경과 외측링의 외경 사이의 간섭에 의한 것으로 관찰된다. 2.3절에서 논의된 베어링부 비정상 접촉상태 공차인지를 확인하기 위해서 외측링의 외경(Fig. 6(b)에서  $D_1$ ) 및 쇼크의 내경(Fig. 6(c)에서  $D_2$ )을 측정하였다. 측정결과는 Table 3에 요약되어 있다. 조립 도면에서의 규정 크기와 실제 측정치를 비교해 놓았다.

외측링의 외경( $D_1$ )은 419.95mm로 측정되었고, 이것은 규정 외경인 420mm보다 작은 값이다. 쇼크의 내경( $D_2$ )은 421.04mm로 측정되었고, 이것은 규정 내경인 420mm보다 큰 값이다. 즉, 외측링의 외경과 쇼크의 내경 사이에는 음의 공차가 존재하는 것을 알 수 있다. 초기에는 허용 범위내의 음의 공차라고 하더라도 간극에 상호운동이 있는 경우는 과도한 마모가 유발된다. 본 측정에서도 이러한 현상으로 인해 쇼크의 내경에 과도한 마모가 관찰된다. 실제 압연 현장에서 압연을 어느 정도 이상 사용하게 되면 사용한 롤러베어링은 새 것으로 교체되지만, 작업롤과 쇼크는 교체를 빈번하게 하지 않는다. 따라서, 쇼크의 내경은 쉽게 규정 내경보다 크게



**Fig. 6 (a) Actual scenery of fractured outer ring and key dimensions to observe abnormal condition (b) in bearing ring (c) in chock (nominal and measured dimensions are described in Table 3)**

되는 것으로 판단된다. 결과적으로, Fig. 3과 같은 유형의 쇼크 내부와 외측링 표면 사이에 음의 공차와 마모량에 의한 비정상적 접촉상태가 유발되는 것을 알 수 있다.

### 4.2 베어링 링에 가해지는 최대 외력

압연 중에 외측 링의 파손은 외측 링에 가해지는 외력이 최대가 될 때 발생할 것이기 때문에 베어링 링에 가해지는 최대 외력의 경우를 고찰하였다. Fig. 7은 작업롤의 공형 번호(Groove number)를 나타내고 있다. 베어링 링(즉, 베어링 링을 포함하고 있는 쇼크)에 가해지는 외력은 왼쪽 작업롤과 오른쪽 작업롤 사이의 공형에서 소재가 소성 변형될 때 발생하는 압연하중의 반력으로 계산된다. Fig. 8에

**Table 3 Nominal and measured dimensions in outer ring and chock**

Dimensions	External diameter ( $D_1$ ) in outer bearing ring	Internal diameter ( $D_2$ ) in chock
Nominal value	420.00 mm	420.00 mm
Measured value	419.95 mm	421.04 mm

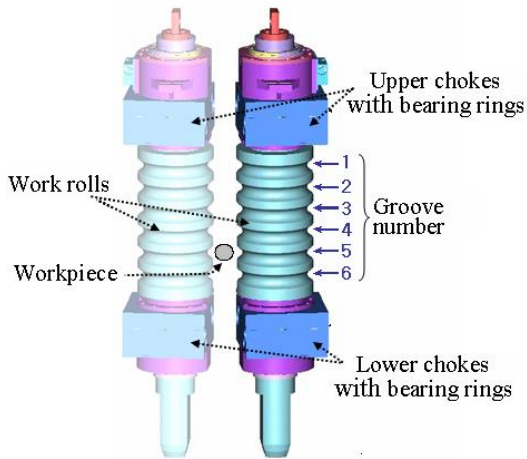


Fig. 7 Groove shapes on work rolls and groove numbers on them in vertical rod rolling mill

서 위쪽 베어링 링에 가해지는 외력과 아래쪽 베어링 링에 가해지는 외력을 비교해 놓았다. 위쪽 베어링 링의 경우에는 공형 1번을 소재가 통과할 때 최대 외력이 작용하고, 반대로 아래쪽 베어링 링의 경우에는 공형 6번을 소재가 통과할 때 최대 외력이 작용하는 것을 알 수 있다. 두 경우가 대칭이기 때문에 최대 외력은 300kN으로 동일하였다. 따라서, 베어링 링에 가해지는 외력으로 300kN을 주어서 베어링 링의 해석을 수행하였다.

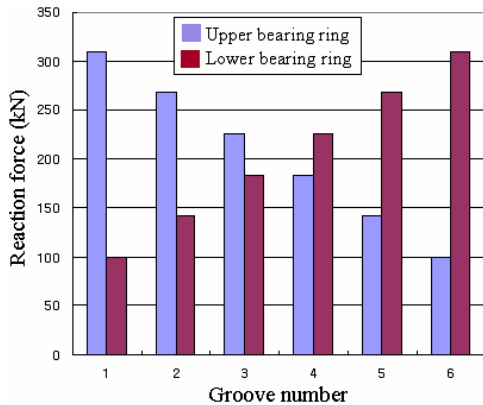


Fig. 8 Roll forces acting on the upper and lower bearing ring when the workpiece is deformed in the roll gap of various grooves

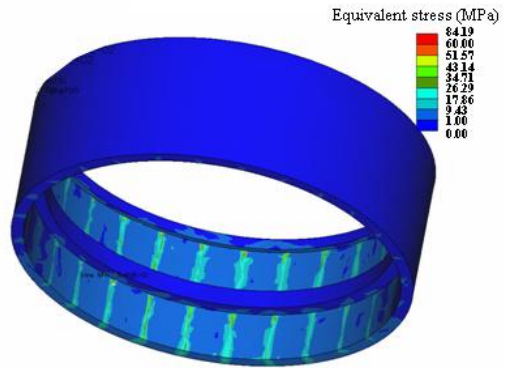


Fig. 9 Distribution of equivalent stress of outer ring at the normal condition

### 4.3 정상 및 비정상 접촉상태에서 베어링 링의 응력 분포

Fig. 9는 정상 접촉상태에서 외측 링에서의 등가 응력(Equivalent stress) 분포를 보인 것이다. 정상 접촉상태는 외측 링이 쇼크 내부와 면접촉을 통해서 압착됨을 의미한다. 최대 등가 응력은 외측 링의 모서리 부분에서 롤러베어링과 접촉하는 부분을 따라 규칙적으로 발생함을 알 수 있다. 외측 링에 작용하는 최대 등가 응력은 외측 링 소재(42Cr-Mo4 steel) 항복강도의 13% 정도로 매우 낮음을 알 수 있다.

Fig. 10은 비정상 접촉상태에서 외측 링에서의 등가 응력(Equivalent stress) 분포를 보인 것이다. 비정상 접촉상태는 Fig. 3에서와 같이 외측 링의 외경과 쇼크의 내경 사이에 음의 공차 및 마모로 인해서 외측 링의 모서리와 쇼크 내부가 점접촉으로 압착됨을 의미한다. 정상 접촉상태에서는 외측 링이 쇼크 내부와 밀착하고 있기 때문에 소재가 압연될 때 작업물의 벤딩이 발생하더라도 접촉에 변화가 없다. 그러나, 비정상 접촉상태에서는 Fig. 3과 같이 작업물의 벤딩이 외측링과 쇼크 내부 사이에 삼각형 간극을 유발하여 외측링 옛지가 쇼크 내부와 점접촉을 형성하게 된다.

Fig. 10에서 외측 링의 최대 등가 응력을 살펴 보면, 외측 링 소재 항복강도의 98%에 도달하는 것을 알 수 있다. 비정상 접촉상태에서의 최대 응력 지점은 외측 링의 안쪽 및 바깥쪽 모서리에서

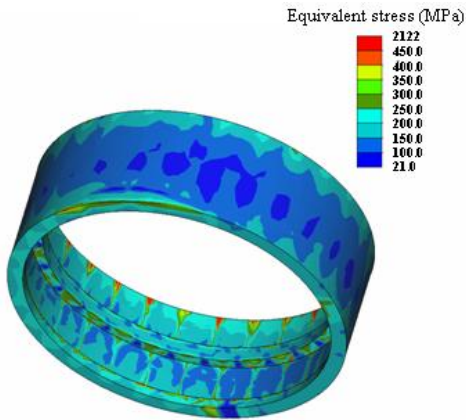


Fig. 10 Distribution of equivalent stress of outer ring at the abnormal condition

발생하는 것을 알 수 있다. 정상 접촉상태에서의 최대 응력 지점은 안쪽 모서리 부분에만 있었지만, 비정상 접촉상태에서는 점접촉이 발생하는 바깥쪽 모서리 부분에서도 발생하는 것을 알 수 있다. 실제 현장에서는 작업롤에 소재가 항상 물려 있는 것이 아니고, 작업롤이 소재를 압연할 때와 다음 소재 취입 시까지 공회전할 때가 서로 교번된다. 따라서, 베어링 링에도 반복 동하중 상태가 유발되고 또한 소재 취입 시에 작업롤에 충격력까지 가중되기 때문에 베어링 링에 걸리는 응력은 항복응력보다 매우 낮아야 한다. 일정 정하중 상태 하에서 계산된 항복 강도 수준의 최대 응력은 실제 압연 시에 외측 링 파손을 유발하는 정도의 충분히 큰 응력으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 열간 선재압연기에서 쇼크 내의 외측링의 파손을 고찰하기 위한 체계적인 유한요소 해석 기법을 제시하였다. 본 기법은 외측 링과 관련된 압연기의 각 부분을 하중 최초 발생 부분(즉, 소재의 소성변형이 발생하는 작업롤)을 시작점으로 하여 하중전달을 통해 순차적으로 연결 해석하는 것이 특징이다. 쇼크와 외측링이 정상적인 접촉을 하는 경우와 비정상적인 접촉을 하는 두 가지 경우

에 대해 본 해석 기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 쇼크와 외측 링이 정상적으로 밀착하여 면 접촉을 하는 경우는 외측 링에 작용하는 최대응력은 항복응력의 13%정도로 외측 링 파손과 관련성이 없다.
2. 압연 현장에서 파손된 외측 링의 외경과 쇼크의 내경을 실측하여 음의 공차와 마모가 존재하는 것을 관찰하였고, 압연 중에 작업롤의 벤딩 시 외측 링과 쇼크 사이에는 비정상적인 점 접촉이 발생할 수 있음을 고찰하였다.
3. 쇼크와 외측 링이 비정상적으로 점 접촉을 하는 경우는 외측 링에 작용하는 최대응력은 항복응력의 98%정도로 반복 동하중과 충격하중이 작용하는 현장 하중 조건하에서는 외측 링의 파손을 유발하기에 충분한 수준임을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

1. Byon, S. M., Na, D. H. and Lee, Y., "Effect of Roll Gap Adjustment on Exit Cross Sectional Shape in Groove Rolling-Experimental and FE Analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4465-4470, 2009.
2. Kabo, E., "Material Defects in Rolling Contact Fatigue-Influence of Overloads and Defect Clusters," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 8, pp. 887-894, 2002.
3. Hua, L., Deng, S., Han, X. and Huang, S., "Effect of Material Defects on Crack Initiation under Rolling Contact Fatigue in a Bearing Ring," *Tribology International*, Vol. 66, pp. 315-323, 2013.
4. Deng, S., Qin, X. and Huang, S., "A Study on

- the Effect of Subsurface Crack Propagation on Rolling Contact Fatigue in a Bearing Ring," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 1029-1038, 2015.
5. Tabacaru, L., Pruteanu, O., Carausu, C. and Gramescu, T., "Influence of the Driving Roll Speed on the Roughness and Shape Deviations of the Running Tracks of Cold Worked Bearing Rings," *Metalurgia International*, Vol. 14, pp. 18-22, 2009.
  6. Brusa, E., Lemma, L. and Benasciutti, D., "Vibration Analysis of a Sendzimir Cold Rolling Mill and Bearing Fault Detection," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C - Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 224, No. 8, pp. 1645-1654, 2010.
  7. Kappaganthu, K. and Nataraj, C., "Modeling and Analysis of Outer Race Defects in Rolling Element Bearings," *Advances in Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 371-384, 2012.
  8. Farina, M., Osto, E., Perizzato, A., Piroddi, L. and Scattolini, R., "Fault Detection and Isolation of Bearings in a Drive Reducer of a Hot Steel Rolling Mill," *Control Engineering Practice*, Vol. 39, pp. 35-44, 2015.
  9. Byon, S. M., "A Study on the Dynamic Setup of a Side Guide to Reduce Bar Camber at the Roughing Train in a Hot Strip Rolling Mill," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 34-41, 2016.
  10. Shida, S., "Empirical Formula of Flow Stress of Carbon Steels - Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature," *J. the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 10, pp. 610-617, 1969. (in Japanese)
  11. Han, M. and Cho, J., "Structural Durability Analysis of Bike Hub Bearing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 99-104, 2015.