

통계적 기법을 활용한 플랜지형 휠베어링의 열간단조 공정 최적화

이재성[#] · 문호근¹ · 송복한¹ · 허보영²

Optimization of Hot Forging Process of Flange Type Wheel Bearings by Statistical Technique

J. S. Lee, H. K. Moon, B. H. Song, B. Y. Hur

Abstract

Due to the shape of spindle with small diameter and heavy section, rapid cooling is difficult. It is difficult to fabricate the tapered wheel bearings with fine microstructure. Thus, their mechanical characteristics, such as yield strength and fatigue resistance, decrease. Producing the tapered wheel bearings with good workability during orbital forming after hot forging, hot forging process with several process parameters was optimized by means of statistical technique of Six-Sigma scheme. As a result, the lower heating temperature is, the lower the hardness and yield strength of forgings are. Also, the faster conveyer velocity is, the lower the hardness and yield strength of forgings are. To avoid therefore occurrence of the surface rupture during orbital forming, the heating temperature should be controlled as low as possible and the conveyer velocity should be controlled as fast as possible.

Key Words : Tapered wheel bearing ; Orbital forming ; Heating temperature ; Hot forging.

1. 서론

구름베어링과 같은 단위부품들은 여러 기계요소에 필수불가결한 존재이며 다양한 산업분야에 널리 사용되고 있다. 따라서, 이들의 기능 및 성능과 관련한 다양한 요구사항이 존재하며, 설계와 재료적 특성에 대한 요구사항은 그들의 응용부품과 베어링 종류에 따라 다르다. 이러한 환경 하에서, 생산기술자들은 이러한 요구사항들을 만족시킬 수 있는 낮은 제조원가의 제품을 생산하기 위한 기술개발의 임무에 직면하고 있다.

따라서, 휠과 브레이크 디스크 또는 엑슬 하우징과 드라이브 샤프트에 직접 조립되는 휠 베어링들은 이들 주변부품들과 일체화 시킨 모듈화

방식에 의해 주로 생산되고 있다. 이러한 휠 베어링은 주변 부품들과의 결합 방식에 따라 1~6 세대까지 다양하게 구분될 수도 있지만, 베어링의 주요 구성 부품인 내 외륜과 플랜지의 결합형태에 따라 크게 3종류 정도로 구분된다[1].

특히, 테이퍼형 롤러와 내외륜 및 허브플랜지로 구성되는 3세대형 테이퍼드 휠 베어링은, 기존의 볼형 휠 베어링에 비하여, 대체적으로 살두께가 두껍고 내륜의 내경이 작기 때문에 열간단조 후 빠른 냉각이 어렵다. 따라서, 휠 베어링 플랜지의 제조에 널리 사용되는 일반 중탄소 계열의 합금강재들에서는 열간가공 중에 2차 재결정에 의한 조대한 결정립이 발생할 가능성이 높다. 또한, 이러한 부적절한 냉각조건과 재료적인 특성에 의해

1. FAG Bearings Korea Corp. R&D Center

2. K-MEM R&D Cluster, Division of Advanced Materials Engineering, GyeongSang National University.

FAG Bearings Korea Corp. R&D Center, jaeseong.lee@kr.fag.com

재료강도를 포함한 기계적 특성들이 취약해지기 쉽다.

따라서, 열간단조 후 안정적인 미세조직과 양호한 기계적 특성을 얻기 위하여, 노멀라이징이나 헨칭 및 템퍼링과 같은 추가적인 열처리 공정이 널리 적용되고 있다. 특히, 열간가공 후 냉간재도전조 방식에 의한 마무리 가공이 이루어지는 휠 베어링의 제조공정에는 이러한 후열처리의 추가가 상당히 효과적일 수 있다. 그러나, 일부 제조원가의 상승은 피할 수 없다. 그래서, 열간단조 후 이러한 추가적인 열처리 공정 없이 휠 베어링을 제조할 수 있도록 생산공정을 설계하고 주요 품질특성을 최적화하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 제 3 세대 휠 베어링용 플랜지 단조품들의 기계적 특성에 미치는 열간단조공정 변수들의 영향을 통계적 기법을 사용하여 조사하였다. 그리고, 기계적 특성 변화에 대한 각 공정 변수들의 영향과 최적조건을 SSRED 프로그램을 사용하여 분석 및 추정하였다. 최종적으로 회귀분석을 통하여 조사된 공정변수별 최적조건을 확인한 다음, 열간단조공정을 포함한 전체 생산공정을 강건하게 디자인하였다.

2. 통계적 기법의 활용 및 실험방법

열간단조공정으로 제조되는 테이퍼드형 휠 베어링 단조품의 기계적 특성을 최적화시키기 위한 도구로써 Six-Sigma 기법[1]을 적용하였다. 품질개선과 공정설계단계에 적용되는 일반적인 프로세서 단계별 주요지표를 서술하고 적용방법을 기술한다.

본 연구의 주요품질특성(CTQ, Critical To Quality)은 열간단조품의 기계적 특성치 즉, 단면경도와 항복강도로 설정되었다. 또한 연구의 목표는 이러한 품질특성인자들의 최적화에 의해 최종적인 냉간재도전조 공정에서 불량발생을 방지하는 것이다.

그림 1의 열간단조품들은, SAE1055 소재를 계산된 중량으로 절단 및 고주파 가열 후, 1600 톤 수직형 프레스 단조기를 사용하여 제조하였다. 이후, 메쉬벨트의 이동속도가 제어되는 연속냉각라인을 통과한 다음, 최종적으로 철회박스 속에서 상온까지 냉각된다.

이러한 단조품들의 단면경도는 브리넬경도기(HB30)에 의해 측정되었다. 그리고, 항복강도는

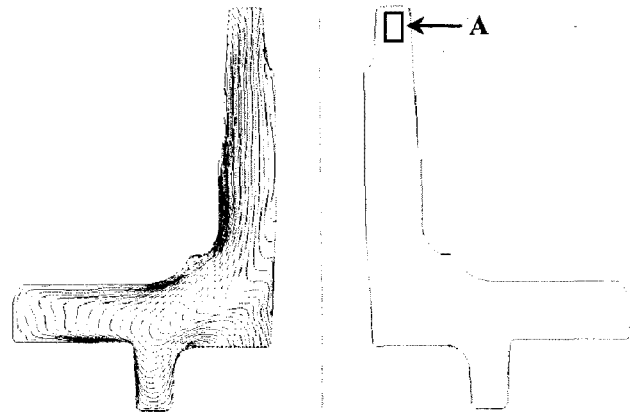


Fig.1 Schematic illustration showing the shape and metal flows of hot forging product.

실제 단조품의 오비탈 가공부위로부터 그림 1의 A와 같은 원기둥 형태의 압축시험편을 가공한 다음, 약 10% 압축변형을 통하여 얻어진 변위-하중곡선으로부터 계산된 0.2% Offset 강도였다.

일반적으로 제조공정을 최적화 하기 위해서는 우선적으로 공정변수를 잘 설정해야 한다. 이후, 주요품질특성에 미치는 이들의 영향을 고찰하여 실험계획법으로 최적화 실험을 진행하게 된다.

열간단조품의 단면경도와 항복강도에 미치는 주요 공정변수들은 단조가열온도, 냉각라인의 벨트이동속도 즉 냉각속도, 그리고 최종 철회박스 속에 적재된 단조품의 박스 내 위치별 온도 등이다. 실제 단조품의 연속냉각공정에서 냉각시작온도와 냉각종료지점의 온도가 주요변수로 취급될 수 있다. 그러나, 냉각시작온도는 가열온도에 따라 950-1050℃ 정도의 온도구간에서만 변화된다. 따라서 단조품의 기계적 특성에 미치는 영향은 거의 미미한 수준이다. 또한, 냉각종료온도는 벨트속도에 따른 종속변수이므로 제어 가능한 공정변수로서 선택되지 않았다.

본 연구의 열간단조공정으로부터 조사된 주요 품질특성에 미치는 공정인자의 수준별 영향을 그림 2에 나타내었다.

가열온도가 높을수록 단면경도와 항복강도가 증가하였다. 그리고, 냉각속도 즉, 벨트이동속도가 빠를수록 기계적 특성 값들이 증가하였다. 또한, 철회박스 내의 중심부로부터 샘플링 된 단조품의 표면경도와 항복강도는 표면부의 샘플에 비하여 낮았으며, 산포 또한 증가하였다. 박스 내부의 샘플들로부터 이러한 결과는 단조품들의 자열에 의한 보온 효과 때문인 것으로 판단된다.

또한, 이러한 공정변수들의 선정이 타당함을 추정통계(Inferential statistics)[2]를 통하여 확인하였다.

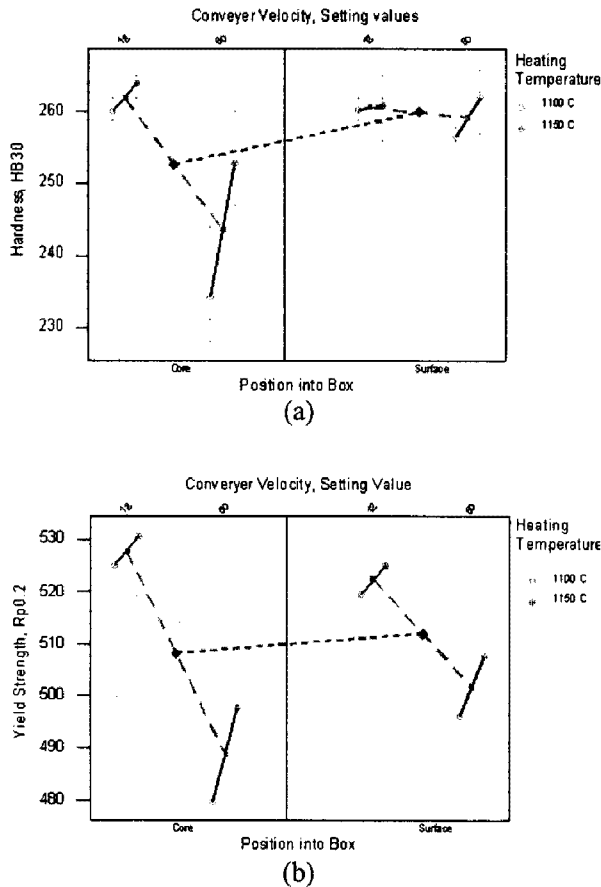


Fig.2 The effect of process parameters on the hardness(a) and yield strength(b).

부호(수준)	인자	수준1	수준2
1 A(2)	가열온도	1150	1100
2 B(2)	컨베이어 속도	12	60
3 AxB	가x온		
4 C(2)	박스위치	내	외
5 AxC	가x박		
6 BxC	컨x박		
7 e(2)	?		

가열온도	컨베이어 속도	박스위치	가속	감속	?	
A	B	AB	C	AC	BC	e
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2
4	1	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1
6	2	1	2	2	1	2
7	2	2	1	2	2	1
8	2	2	2	1	2	2

Fig.3 Table of Orthogonal Arrays L8[2(7)] and data input for optimization of mechanical characteristics.

앞서 기술된 공정변수들의 수준을 2 수준으로 설정하고, 직교표의 작성과 평균분석(ANOM, Analysis of Mean) 및 분산분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 지원하는 SSRED 프로그램[3]을 사용하여 L8[2(7)] 직교표를 그림 3 과 같이 작성하였다. 그리고 각각의 실험조건별로 열간단조품을 제작한 다음, 경도와 항복강도를 측정하여 데이터를 입력하였다.

3. 결과 및 고찰

SSRED 를 활용한 분산분석의 결과로 얻어진 최적단조조건을 그림 4 에 나타내었다. 평균경도에 대한 컨베이어 속도의 기여율은 29.3% 로써 다른 공정변수에 비해 높은 영향을 미치는 것이 확인되었다. 또한, 경도의 산포 증가에 대한 컨베이어 속도의 기여도도 41.4%로써 매우 높다. 평균경도와 산포에 대한 박스 내 위치의 기여도도 각각 12.1%, 17%로써 가열온도보다 높은 값을 나타내었다. 따라서, 적절한 평균경도와 낮은 산포를 가지는 양호한 단조품을 제조하기 위해서는 가열온도를 낮추고, 컨베이어 속도와 박스 내 위치별 냉각속도 차이를 줄일 수 있도록 공정을 설계하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

한편 그림 4 에서 e(2)로 표시된 실험 내 오차변동값이 약 33.1%로써 비교적 높게 나타났다. 이것은 시험시 공정인자별 수준 수, 실험 데이터의 측정방법 등에 의한 오차변동이 포함될 수 있다. 이러한 실험 내 오차변동을 줄이기 위해서는 특히, 단조 설비 주변의 외부온도와 철제박스의 형상과 크기에 의한 영향을 신중히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

그림 5 는 항복강도의 평균값과 산포에 대한 공정변수들의 영향을 보여준다. 두 통계값들에 대한 컨베이어 속도의 기여율은 각각 48.8%, 77.6%로써, 항복강도가 경도보다 훨씬 더 컨베이어 속도에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 항복강도에 대한 실험 내 오차변동도 경도와 비교하여 높게 나타났다. 즉, 컨베이어의 속도의 증가에 따라 단조품의 경도보다는 오히려 항복강도의 감소폭과 산포가 증가함을 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 단조품의 자열에 의한 응력완화 현상 때문인 것으로 판단된다.

분산분석 표 (경 내미터)							
종류	구분	평균	표준 편차	F값	유의성	최적화	
가열 온도	가열 온도	437.76	17.8	6.3 %		□	
A	1	437.76	437.76	17.8	***	6.3 %	□
B	1	1935	1935	78.8	***	29.3 %	□
컨베이어 속도	컨베이어 속도	810.84	33.0	12.1 %		□	
C	1	810.84	810.84	33.0	***	12.1 %	□
박스 위치	박스 위치	90.088	23.465	33.1 %		□	
A(C)	1	52.851	52.851	-	-	-	□
e(1)	1	90.088	90.088	-	-	1.4 %	-
e(p)	2	79.6042	39.8021	-	-	1.3 %	-
e(2)	88	2064.9	23.465	-	-	33.1 %	-
(e)	(91)	(2234.61)	(24.5562)	-	-	(35.8 %)	-
전체	95	6518.5	-	-	-	100.0 %	-

최적 조건에 추정 (경 내미터)

가열 온도 (2) 1100
 컨베이어 속도 (2) 60
 박스 위치 (1) 내

평균/표준편차 (경 내미터) 평균
 258.792

평균/표준편차 (경 내미터) 표준
 255.073

추정된 최적 조건의 예측된 평균 값
 245.542 (+/- 6.96) (기존 공정/실험 보다 5.12% 향상된 평균 값)

(a)

분산분석 표 (SN 배)							
종류	구분	평균	표준 편차	F값	유의성	최적화	
가열 온도	가열 온도	0.043543	7.1	8.5 %		□	
A	1	0.043543	0.043543	7.1	**	8.5 %	□
B	1	0.18884	0.18884	30.7	***	41.4 %	□
컨베이어 속도	컨베이어 속도	0.081131	13.2	17.0 %		□	
C	1	0.081131	0.081131	13.2	***	17.0 %	□
박스 위치	박스 위치	0.0095	0.0095	5.0 %		□	
A(C)	1	0.009533	0.009533	-	-	-	□
e(1)	1	0.0095	0.0095	-	-	5.0 %	-
e(p)	2	0.00994342	0.00447171	-	-	4.7 %	-
(e)	(3)	(0.0184434)	(0.0061478)	-	-	(9.8 %)	-
전체	7	0.44077	-	-	-	100.0 %	-

최적 조건에 추정 (SN 배)

가열 온도 (2) 1100
 컨베이어 속도 (2) 60
 박스 위치 (1) 내

평균/표준편차 (SN 배) 평균
 -48.258

평균/표준편차 (SN 배) 표준
 -48.132

추정된 최적 조건의 예측된 SN 배 [dB]
 -47.804 (+/- 0.176) (기존 공정/실험 보다 0.455[dB] 증가와 5.12%의 산포 감소)

(b)

Fig.4 Results of optimization on hardness of forging products.

또한, 항복강도에 대해서는 박스 내 위치보다 가열온도의 영향이 더 높았다. 따라서 항복강도를 일정 범위 내로 관리하기 위해서는 빠른 컨베이어 속도와 함께 낮은 가열온도가 유리하다는 사실이 확인되었다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열간단조 후 냉간 제도 전조에 적합한 정도와 항복강도를 얻기 위해서는 컨베이어 속도를 빠르게 하고, 가열온도를 높여야 한다.

분산분석 표 (인 내미터)							
종류	구분	평균	표준 편차	F값	유의성	최적화	
가열 온도	가열 온도	1250.5	5.9	4.8 %		□	
A	1	1250.5	1250.5	5.9	**	4.8 %	□
B	1	10710	10710	50.4	***	48.8 %	□
컨베이어 속도	컨베이어 속도	31.702	370.438	7.2 %		□	
C	1	31.702	370.438	-	-	-	□
박스 위치	박스 위치	201.279	212.547	39.1 %		□	
A(C)	1	1481.75	201.279	-	-	-	□
e(1)	1	31.702	31.702	-	-	0.2 %	-
e(p)	4	1481.75	370.438	-	-	7.2 %	-
e(2)	40	8051.2	201.279	-	-	39.1 %	-
(e)	(45)	(9564.61)	(212.547)	-	-	(46.4 %)	-
전체	47	21525	-	-	-	100.0 %	-

최적 조건에 추정 (인 내미터)

가열 온도 (2) 1100
 컨베이어 속도 (2) 60

평균/표준편차 (인 내미터) 평균
 528.333

평균/표준편차 (인 내미터) 표준
 510.188

추정된 최적 조건의 예측된 평균 값
 490.146 (+/- 18) (기존 공정/실험 보다 7.23% 향상된 평균 값)

(a)

분산분석 표 (SN 배)							
종류	구분	평균	표준 편차	F값	유의성	최적화	
가열 온도	가열 온도	0.062511	10.6	8.7 %		□	
A	1	0.062511	0.062511	10.6	**	8.7 %	□
B	1	0.51236	0.51236	87.2	***	77.6 %	□
컨베이어 속도	컨베이어 속도	0.009641	1.7	0.6 %		□	
C	1	0.009641	0.009641	1.7	-	0.6 %	□
박스 위치	박스 위치	0.018669	0.018669	0.7 %		□	
A(C)	1	0.018669	0.018669	-	-	-	□
e(1)	1	0.018669	0.018669	-	-	0.7 %	-
e(p)	2	0.0157552	0.00787759	-	-	5.6 %	-
(e)	(3)	(0.0176221)	(0.00587402)	-	-	(6.3 %)	-
전체	7	0.65286	-	-	-	100.0 %	-

최적 조건에 추정 (SN 배)

가열 온도 (2) 1100
 컨베이어 속도 (2) 60
 박스 위치 (1) 내

평균/표준편차 (SN 배) 평균
 -54.459

평균/표준편차 (SN 배) 표준
 -54.153

추정된 최적 조건의 예측된 SN 배 [dB]
 -63.776 (+/- 0.172) (기존 공정/실험 보다 0.683[dB] 증가와 7.59%의 산포 감소)

(b)

Fig.5 Results of optimization on yield strength of forging products.

참고 문헌

- [1] Keiji Morita, 2001, Trend of Production Engineering for Bearing and Unit Product, Koyo Engineering Journal English Edition, No. 195E, pp 31-36.
- [2] 창원특수강 6 시그마 연구회, 2002, “실행하기 쉬운 6 시그마 기법” 한국능률협회
- [3] 한국생산기술건설팅㈜, 2000, “6 시그마 성공을 위한 Expert training course 분석단계” KSSC, pp. 1-32
- [4] 한국생산기술건설팅㈜, 2000, “6 시그마 성공을 위한 Expert training course 설계/개선단계” KSSC, pp.1-36