

베어링강 SUJ2의 냉간 단조성 향상을 위한 열처리에 관한 연구

김해지[#]

A Study on Heat Treatment for Improving Cold Forgeability of a Bearing Steel, SUJ2

Hae-Ji Kim[#]

(Received 18 February 2009; received in revised form 25 March 2009; accepted 27 March 2009)

ABSTRACT

In this paper, the effect of heat treatment on forgeability is investigated and an improved heat treatment cycle is proposed for the bearing steel, SUJ2. An application example of a bearing inner race cold forging, which has small cracks in the bottom after backward extrusion and piercing, is found from a cold forging industry. The process is evaluated by finite element analysis and several heat treatment cycles are examined in order to propose an improved heat treatment cycle. The effect of heat treatment on material hardness and tool life, dimensional accuracy and forming load is revealed through experiment

Key Words : Bearing Steel(베어링강), Heat Treatment(열처리), Cold Forgeability(냉간단조성)

1. 서 론

자동차 산업의 발전과 더불어 단조 기술은 지속적으로 발전되어 왔다. 최근에는 피삭재의 절삭량을 최소화시키고, 후처리 가공 공정을 없애기 위한 정밀 정형 성형기술에 관한 연구가 지속되고 있다. 성형 공정 개발의 혁신을 위하여 CAD/CAM/CAE 기술^[1~3]의 접목이 지속되고 있으며, 산업적 측면에서 보면 요소기술로써 다이

세트 및 금형 설계 기술, 표면의 내마모성 향상을 위한 코팅 기술, 열처리 등의 소재 기술, 품질평가 및 보증 기술 등의 발전을 위하여 다양한 시도들이 이루어지고 있다. 소재기술측면에서는 제품의 내마모성, 내피로성 등의 향상을 위하여 합금강의 사용이 증가하고 있으나, 열악한 냉간 단조성에 기인한 불량률 및 생산비 증가 등의 문제점들을 야기 시키고 있다. 이러한 합금강에 대한 열악한 단조성의 개선을 위한 연구^[4~6]가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 베어링 내륜의 냉간단조 공정 조건을 찾기 위하여 단조공정 시뮬레이션을 통해 공정의 건전성을 평가하고, 베어링강 SUJ2의 단조성향상을 위한 열처리 공정을 개선하고자 한다.

[#] 교신저자 : 진주산업대학교 자동차공학과
E-mail : khji@jinju.ac.kr

2. 냉간단조 공정 및 문제점

자동차용 타이밍 벨트 풀리 베어링 내륜의 재료는 SUJ2이며, 냉간단조에 의하여 생산되고 있다. 베어링강 SUJ2는 냉간단조성이 비교적 떨어지지만, 내구성을 비롯한 베어링 부품에서 요구하는 재료학적 성질을 충족한다. 베어링강 SUJ2의 화학적 조성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1 Chemical composition of SUJ2 (wt,%)

| C | Si | Mn | P | S | Cr |
|------|------|------|-----|------|-----|
| 0.98 | 0.21 | 0.33 | 0.1 | 0.02 | 1.4 |

한편, 제조공정은 Fig. 1에서 보는 바와 같고, 단조공정 관련 정보는 Table 2에서 보는 바와 같다. 단조공정은 전형적인 후방압출공정과 피어싱 공정으로 이루어져 있다. Fig. 2에서는 후방압출공정과 피어싱 공정을 수행한 후의 내륜에서 발생된 균열의 사진을 나타내고 있다. Fig. 3에서는 Fig. 2의 균열 부분의 확대 사진을 나타내고 있다. Fig. 4에서는 후방압출공정과 피어싱 공정을 수행한 후 정상적인 내륜의 조직사진을 나타내고 있다.

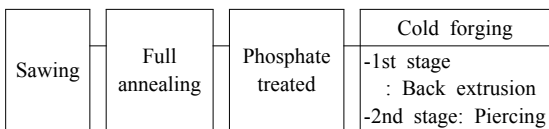


Fig. 1 Process

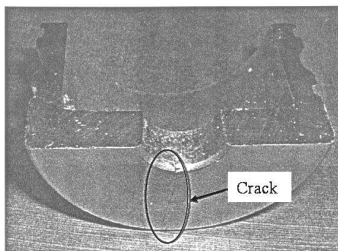


Fig. 2 The crack on current process

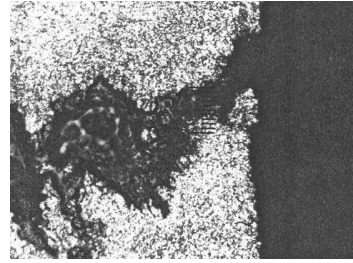


Fig. 3 Image of crack(×200)

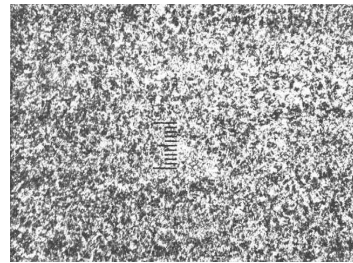


Fig. 4 Normal surface structure after cold forging(×200)

내륜의 제조공정에서 발생된 균열의 원인을 해석적 측면에서 파악하기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 AFDEX/2D^[7],⁸⁾를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

공정 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- Software: AFDEX2D
- 강소성(Rigid-plastic) 유한요소법 사용
- 소재: SUJ2
- 소재의 변형저항식으로 Hollomon의 구성방

정식, 즉 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ($K=949\text{MPa}$, $n=0.179$)를 사용하였다.

Fig. 5에서는 내륜의 후방압출 공정의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서는 후방압출 공정의 시뮬레이션에 의하여 예측된 소성유동선도를 나타내었다. 소성유동선도의 결과에서 보는 바와 같이 접힘현상(folding)이 발생하지 않고 있다. Fig. 5(b)에서는 유효변형률을 도시하고 있다. 성형이 진행됨에 따라 펀치의 끝단부와 마찰되는 내륜의 내경에서 유효변형률이 크게 작용하고, 피어싱 부분에서는 유효 변형률의 영향이 없음을 확

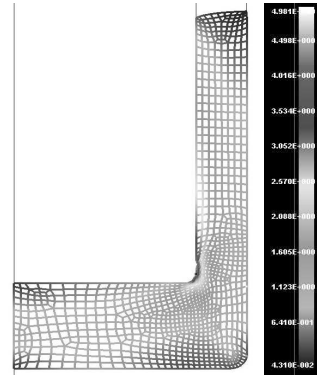
인할 수 있었다. Fig. 5(c)에서는 내륜의 후방압출 공정에서 발생하는 단조하중의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 8mm 이상의 스트로크 이후에는 단조하중이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다. Fig. 6에서는 피어싱 공정의 시뮬레이션에 의하여 예측된 응력분포를 나타내었다.

시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이, 이 공정은 형상이 비교적 단순하면서도 실공정에서 단조 후 균열과 치수불량이 발생하였으므로 열처리 등의 효과를 다방면에서 조사하기에 적합하다고 사료된다.

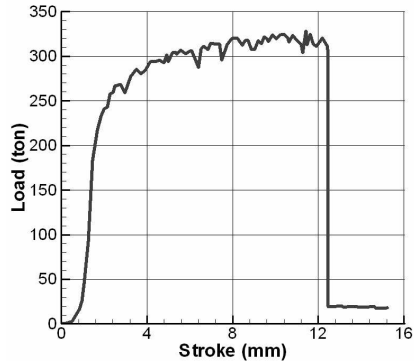
따라서 본 논문에서는 열처리의 개선을 통하여 균열과 치수불량의 발생 문제를 해결하고자 한다.

Table 2 Cold forging conditions

| | |
|-------------------|---|
| Machine | KOMATSU MKN-360 |
| Specimen | Bearing steel (SUJ2) : Ø42×20.7 mm (≒226g) |
| Fluids | No |
| Surface treatment | MoS ₂ : 20 μm |
| Load(max) | 350 ton |

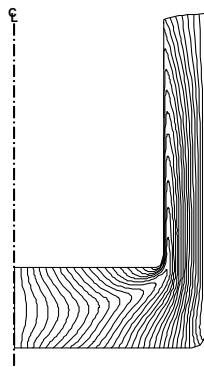


(b) Effective strain distribution



(c) Forming load variation

Fig. 5 1st stage(Back extrusion)



(a) Predicted metal flow

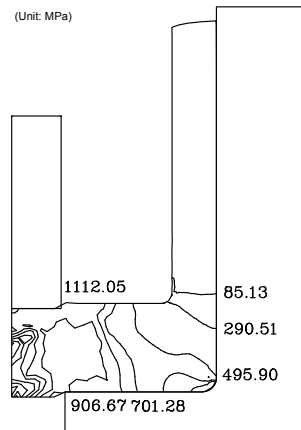


Fig. 6 2nd stage(Piercing)

3. 베어링강의 구상화 풀림 처리 사이클

베어링강은 소둔(annealing), 소입(quenching), 소려(tempering) 등의 열처리 공정에 의해 경도(H_{RB}) 100 이상(JIS G 4805)으로 생산되고 있어 내륜에 요구되는 경도와 제품치수 등을 만족시키기 위하여 구상화 풀림⁹⁾ 열처리 공정을 수행하여야 한다.

Fig. 7에서는 내륜에 요구되는 치수의 도면을 나타내고 있다. 냉간단조 후의 내륜에 요구되는 경도(H_{RB})는 80~84이며, 바닥부와 코너부의 조직은 균열 및 접합 등이 없어야 한다. 그리고 내륜의 바닥부는 다른 가공공정 없이 냉간단조 후의 치수가 그대로 적용되기 때문에 바닥부 치수는 9.2±0.3 mm로 규정되고 있다. 따라서 내륜에 요구되는 결과를 만족시키기 위하여 베어링강의 열처리공정을 개선하고자 하였다.

Fig. 8에서는 열처리 Cycle I인 완전소둔(full annealing) 열처리 사이클 공정을 나타내었다. 베어링강을 ACM 부근 온도로 가열하여 오스테나이트(austenite)화 시킨 후 600℃ 온도까지 노(爐)냉 하였다. 본 열처리 사이클에서는 시간적, 경제적 부담을 줄이기 위해 최소한의 온도와 유지 시간을 부여하고자 하였다.

Fig. 9의 Cycle II에서는 열처리 Cycle I에 비하여 베어링강의 연화를 향상시키기 위해 유지시간과 노냉 시간을 증가시켰다.

Fig. 10의 Cycle III에서는 구상화 풀림 사이클을 제안하였다. A1 이하 온도로 예비 가열 한 후 A1~ACM 사이의 온도로 승온하여 장시간 유지시켜 온도 550℃ 까지 충분히 노냉하였다.

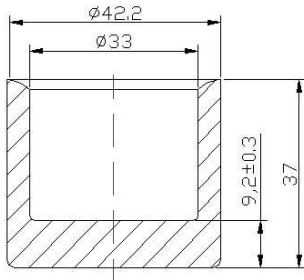


Fig. 7 Dimensions of inner ring

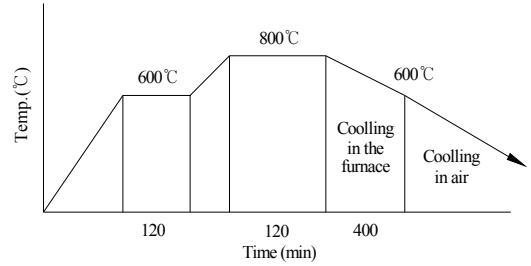


Fig. 8 Heat treatment cycle I

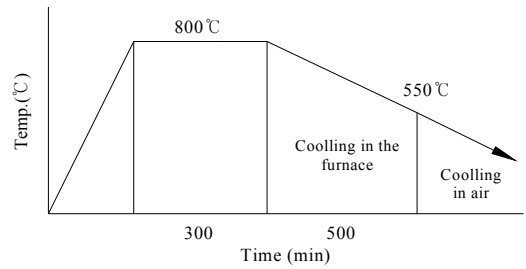


Fig. 9 Heat treatment cycle II

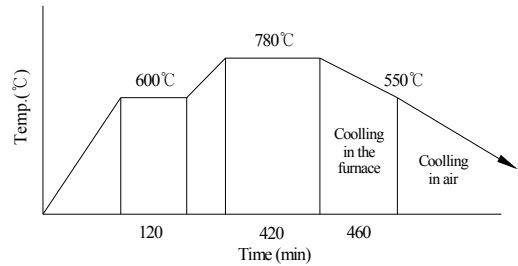


Fig. 10 Heat treatment cycle III

4. 실험결과 및 고찰

베어링강의 연화를 위해 제시된 열처리 사이클의 타당성을 검증하기 위해 경도, 조직사진, 바닥부 치수측정 등을 실시하였다. 경도는 로크웰 B 스케일, 바닥부 치수는 하이트게이지를 사용하였다. 열처리 후 재료의 조직사진은 주사전자 현미경(SEM)과 냉간단조 후의 표면결함 확인을 위해 금속현미경을 사용하여 측정하였다.

Fig. 11에서는 열처리 사이클별 경도측정 결과를

그래프로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 열처리 Cycle I에서의 경도 값은 89.9 ± 1.66 으로 측정되었으며, 열처리 Cycle II에서의 경도 값은 87.0 ± 2.00 으로 측정되었다. 그리고 열처리 Cycle III에서의 경도 값은 82.8 ± 1.03 으로 측정되었으며, 열처리 Cycle III에서 내륜에 요구되는 경도 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 12에서는 열처리에 따른 냉간단조 후의 바닥부의 치수 정밀도를 그래프로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 열처리 Cycle I에서의 바닥부의 치수는 $9.53 \pm 0.24\text{mm}$ 로 측정되었으며, 열처리 Cycle II에서의 바닥부의 치수는 $9.40 \pm 0.17\text{mm}$ 로 측정되었다. 그리고 열처리 Cycle III에서의 바닥부의 치수는 $9.29 \pm 0.04\text{mm}$ 로 측정되었으며, 내륜에 요구되는 바닥부의 치수는 열처리 Cycle III에서 가장 양호한 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서는 베어링강의 열처리 전의 조직사진을, Fig. 14에서는 각 열처리 사이클별 조직사진을 나타내고 있다. Fig. 13의 조직사진에 비교 할 때, Fig. 14(a)와 Fig. 14(b)는 비슷한 조직사진을 나타내고 있고, Fig. 14(c)는 구상화가 고르게 잘 되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 15에서는 열처리 Cycle III을 적용하여 냉간단조 후 내륜의 중심부와 코너부의 내부결함 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 개선된 구상화 풀림 공정에서는 냉간단조 시 발생될 수 있는 과공석강의 크랙이나 접힘 등의 내부 결함이 발생되지 않았다.

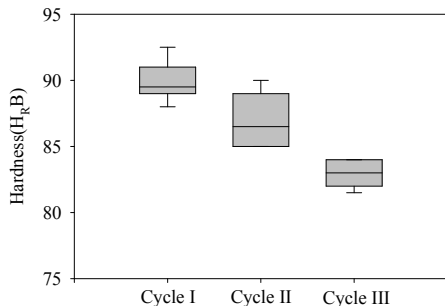


Fig. 11 Comparison of the hardness in the heat treatment

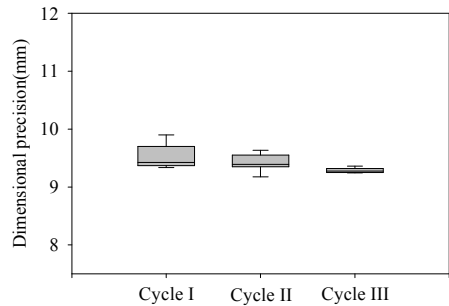


Fig. 12 Dimensional precision of the heat treatment

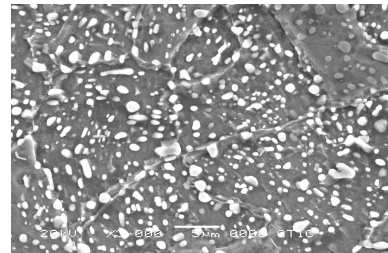
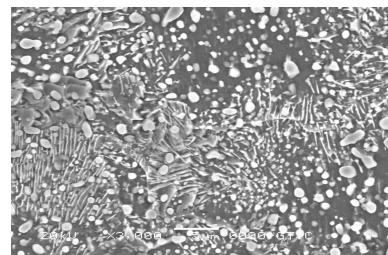
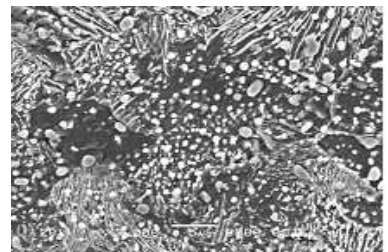


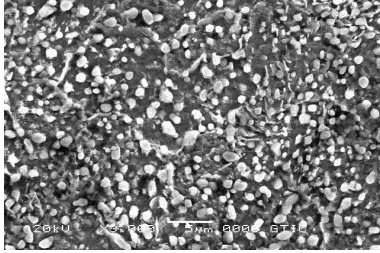
Fig. 13 Surface structure of raw material ($\times 3,000$)



(a) Cycle I

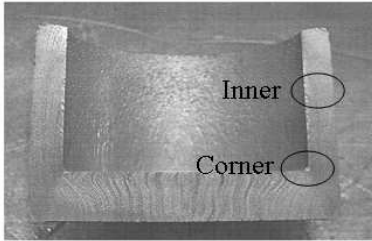


(b) Cycle II

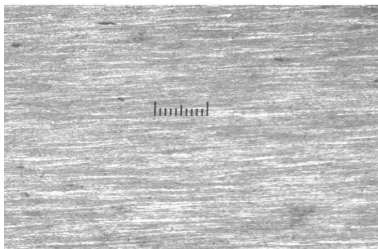


(c) Cycle III

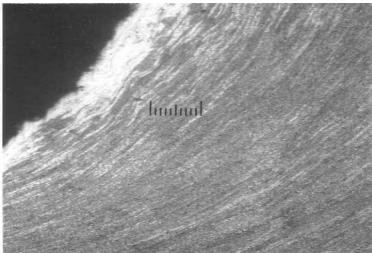
Fig. 14 Microstructure of cycle I, II, III(×3,000)



(a) Cross-section of inner ring



(b) Inner



(c) Corner

Fig. 15 Metal flow lines after a cold forging(×200)

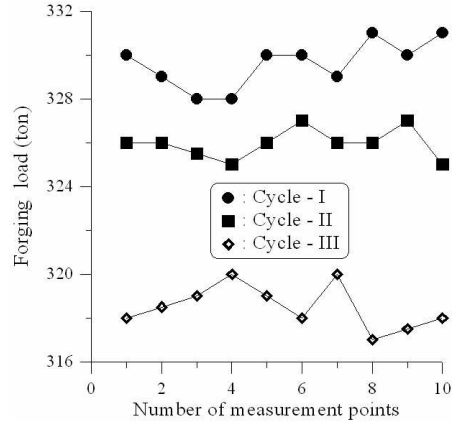


Fig. 16 Comparison of the forging load in the heat treatment cycle

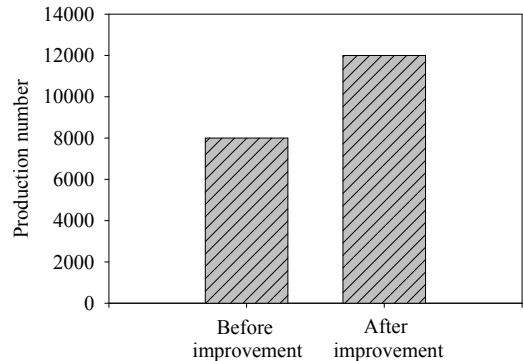


Fig. 17 Punch life

Fig. 16에서는 프레스기에 장착된 디지털 하중센서를 사용하여 열처리 Cycle I, Cycle II, Cycle III의 냉간단조 공정 후 최대 단조 하중의 변화를 그래프로 나타내었다. Cycle I과 Cycle II의 평균 하중은 329.6 ton, 325.9 ton이었고, Cycle III의 평균하중은 318.5 ton으로 Cycle I과 비교할 때 약 3.2%의 단조 하중이 감소하였다.

Fig. 17에서는 베어링강의 열처리 개선 전과 개선 후의 펀치에 대한 수명관계를 그래프로 나타내었다. 제안된 Cycle I의 펀치수명은 약 8,000 개, Cycle III의 펀치 수명은 약 12,000 개로 나타났으며, Cycle III에 의해 펀치의 수명이 향상되었음을 확인하였다.

따라서 이상과 같은 실험을 통하여 내륜에 요구되는 경도, 바닥부 치수정밀도 및 안정된 조직을 얻기 위하여 제안된 열처리 사이클 공정에서 Cycle III이 베어링강 SUJ2의 단조성향상을 위한 열처리 조건임을 확인할 수 있었다.

5. 결론

자동차 타이밍 벨트 풀리 베어링의 소재인 베어링강의 냉간 단조성 향상을 위한 열처리를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

내륜의 냉간 단조성 향상을 위하여 개선된 열처리 조건인 Cycle III을 적용함으로써 내륜에 요구되는 경도, 바닥부 치수, 내부결함, 안정된 조직 등의 개선이 이루어졌다. 그리고 내륜에 요구되는 경도를 유지함으로써 단조하중은 개선전과 비교하여 약 3.2% 감소하였으며, 금형의 내구성 측면에서도 개선효과를 확인하였다.

후 기

이 논문은 진주산업대학교 2008년도 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. H.Kudo, 1992, "Academic- Industrial Cooperation to Improve and Expand Cold-Forging Technology in Japan ", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 35, pp. 259-274.
2. M.S.Joun and M.C.Lee, 1997, "Quadrilateral Finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation", Int. J. Num. Methods Eng., Vol. 40, pp. 4059-4075.
3. M.S.Joun, H.K.Moon and R.Shivpuri, 1998, "Automatic Simulation of a Sequence of Hot - Former Forging Processes by a Rigid- Thermoviscoplastic Finite

- Element Method," ASME Trans., J. Eng. Mat. Tech., Vol. 120, pp. 291-296.
4. 이광오, 진민호, 제진수, 남원수, 강성수, 2003, "OP Shaft용 냉간 단조 성형 공정 개발 및 SNCM 강의 단조성 향상에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제 12권, 제 5호, pp 472-478.
5. 김영석, 김현수, 김찬일, 2000, "토크 컨버트 임펠러 허브의 냉간 단조 공정 설계," 한국정밀공학학회지, 제 17권, 제 11호, pp 213-219.
6. 오승환, 공형걸, 강정호, 박영철, 2007, "DACE 모델을 이용한 게이트벨브 단조공정의 최적설계화," 한국기계가공학회지 제6권 제1호, pp. 71~77.
7. C.H.Ryu and M.S.Joun, 2000, "Finite Element Analysis of a Cold Forging Process Having a Floating Die," Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 2, pp.159-164.
8. M.S.Joun, M.C.Lee, C.H.Ryu and H.S.Cho, 2000, "A Structural Analysis System for Forging Die Sets Design, AFDEX/DIE," Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 2, pp.165-170.
9. 남원종, 2002, "구상화 열처리 기술의 발전 동향", 한국소성가공학회지, 제11권 제5호, pp. 381~387.