

## 중탄소계 열간단조품의 미세조직과 구름피로거동

이재성\* · 손찬현\* · 문호근\* · 송복한\* · 박창남\*

### Rolling Contact Fatigue Behavior and Microstructure Control to Medium Carbon Steel Base Hot Forgings

J. S. Lee, C. H. Son, H. K. Moon, B. H. Song, C. N. Park

#### Abstract

Once hot forgings for automotive parts such as wheel bearing flange to which cyclic asymmetric bending stress is continuously applied are produced, it is necessary to control their microstructure to obtain superior mechanical properties. It is however hard to control the microstructure uniformly because the strength is reduced as coarsening of ferrite grains. To investigate the microstructural alteration according to process variables during hot working, the variation of the ferrite grain size was studied by utilizing of the computer aided servo-hydraulic Gleeble tester which is hot deformation behavior reproduction equipment. In addition, the effect of the ferrite grain size of raw material on the austenite grain behavior of hot forgings was also examined. The rolling contact fatigue resistance of the induction hardened SAE1055 steel was compared with the occasion of the same condition of SAE52100 bearing steel. As a result, it was confirmed that the ferrite grain sizes of the forgings depend on the heating temperature and cooling start temperature during hot forging and cooling processes. The induction hardened SAE1055 steel showed a superior rolling contact fatigue resistance to the induction hardened SAE52100 steel. The reason is that SAE1055 steel is freer from the material defect such as segregation than the comparative steel.

**Key Words** : SAE1055, SAE52100, Gleeble Tester, Fatigue resistance, Ferrite Grain Size

#### 1. 서론

자동차의 브레이크 장치와 구동륜에 직접 조립되는 휠 베어링들은 생산공정의 단순화와 효율성을 위하여, 주변부품들과 일체화 시킨 모듈화 방식에 의해 주로 생산되고 있다. 이러한 휠 베어링은 주변 부품들과의 결합 방식에 따라 1~6 세대까지 구분될 수 있지만, 베어링의 주요 구성 부품인 내 외륜과 Hub 플랜지 부품의 형태에 따라 크게 3 종류로 구분된다.

이러한 휠 베어링들은 사용 중 지속적으로 급힘응력을 받고 있고, 급출발이나 급정지와 함께 급선회 조건에서도 자주 사용된다. 따라서, 베어링의 품질을 보증하기 위해서는 모든 부품들을 강건하게 설계하고 그것의 제조공정을 최적화 하는 것이 중요하다.

휠 베어링용 단조품의 인성이나 피로저항과 같은 기계적 특성을 보증하기에 유용한 다음의 제조방식, 즉 단조방식들이 있다. 1) 약 900℃ 전후의 온도에서 실시되는 온간단조, 2) 약 1130℃-

\* FAG Bearings Korea Corp. R&D Center

1200℃ 정도의 고온영역에서 변형 후 제어냉각을 실시하는 방법, 3) 재결정온도와 재결정립 성장속도가 억제된 강재를 사용하는 방법[1,2] 등이 있다.

마지막 3)의 작업방식은 우선적으로 적합한 특성을 가지는 합금소재의 개발이 뒷받침 되어야 하며 이 경우에는 생산비용이 상승할 가능성이 있다. 또한 방식 1)은 2 차 재결정온도 이하의 비교적 낮은 온도영역에서 단조작업을 진행해야 하므로 높은 하중을 가할 수 있는 대형 프레스가 필수적으로 사용된다. 따라서, 생산성의 저하로 인하여 제품의 생산비가 상승하기 때문에 휠 베어링의 생산에는 대부분 2)번의 방식이 널리 사용되고 있다.

그러나 복열 테이퍼 롤러형의 제 3 세대 휠 베어링들의 생산에 있어서 열간단조 후 냉각공정의 공정변수들을 효율적으로 제어하는 것은, 제품 경량화를 위한 부단한 노력에도 불구하고, 일반적인 복열 앵글러형 휠 베어링 부품들에 비하여 단조품의 살 두께와 무게가 더 크고 많기 때문에 매우 어렵다.

또한 통상적으로 휠베어링 플랜지의 제조에 널리 사용되는 중탄소 계열의 합금강재들에서는 열간가공 중에 2 차 재결정에 의해 조대한 결정립이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 열간단조품에서 부적절한 내부조직, 즉 앞서 기술한 비정상 거대 결정립의 발생에 따라서 재료강도를 포함한 기계적 특성들이 취약해지기 쉽다.

단조품에서 부적절한 미세조직의 제어는 피로 저항의 감소와 기계적 특성의 악화를 유발할 수 있기 때문에, 제품의 신뢰성을 보증하기 위해 열간가공 공정에서 재료의 변형거동에 따라 단조와 냉각조건을 선택하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 열간단조공정에 있어서 제 3 세대형 휠 베어링용 플랜지(Flange)의 결정립 거동과 미세조직에 미치는 공정변수들의 영향을 조사하였다. 또한, 휠 베어링 제조에 폭 넓게 사용되는 SAE1055 환봉을 고주파 유도 경화 처리한 다음, 회전 접촉 피로거동과 파손 양상을 조사함으로써, 휠 베어링 제조 공정기술과 베어링 열화기구에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 결과 및 고찰

### 2.1 휠베어링 단조품의 결정립 조대화 및 열간가공성 평가

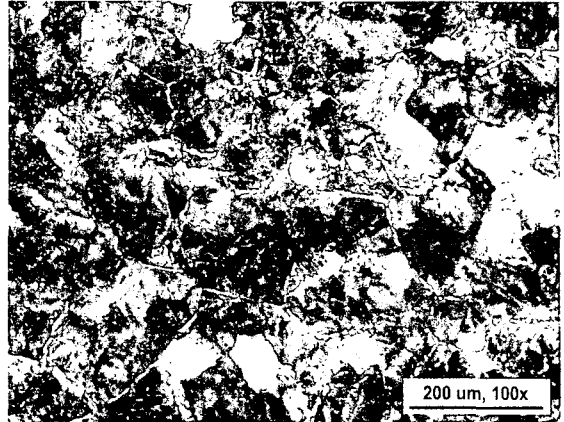


Fig.1 Coarse grains surrounded by ferrite grains at the core of a wheel bearing flange.

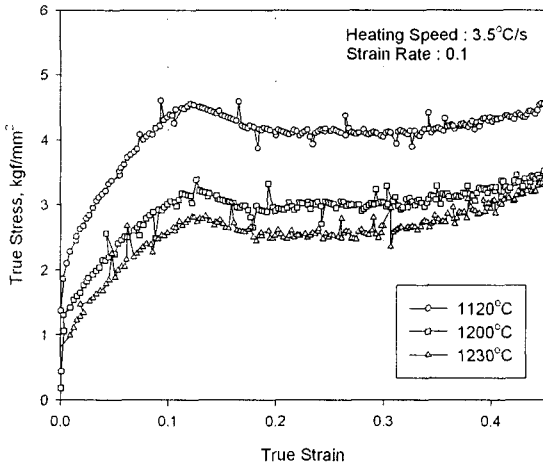
본 연구에 사용된 휠 베어링용 소재는 (주)세아베스틸에서 제조된 SAE1055 환봉 압연재였다. 허브 플랜지 단조는 1600 톤 기계식 프레스를 사용하였다. 이때 단조 가열온도 범위는 1130~1200℃의 범위에서 조절되었다. 단조가공 방식은 업세팅, 성형, 피어싱으로 구성되었다. 그리고 피어싱 후 단조품의 최종온도는 약 1000℃ 정도 였다. 모든 단조품들은 송풍장치에 의해 신속하게 공냉되었으며, 냉각마무리온도는 약 600℃ 이하로 하였다.

그림.1 은 위의 방식으로 제조된 휠베어링 단조품에서 관찰되는 초석 페라이트로 둘러 싸인 입자의 형상과 크기를 보여준다. 이러한 조대한 결정립은, 단조품의 변형량이 상대적으로 높은 부위인 심부와 스피들 홀 표면부에서 주로 발견된다.

특히, 스피들 홀 내경 표면부는, 내경 홀의 직경이 비교적 작고, 길이가 길어서 신속한 냉각이 어렵기 때문에 냉각이 지연되게 된다.

한편, 고온변형시 소재의 결정립 거동을 파악하기 위해서는 먼저 소재의 고온 변형특성을 조사하여야 한다. 본 연구에 사용된 SAE1055 강재의 고온압축시험시 변형율과 유동응력과의 관계를 그림.2 에 나타내었다. SAE1055 강재는 전형적인 동적재결정형의 변형거동을 보이는 소재이다.

이와 같은 실험 결과들을 종합해 보면, 열간 단조 후 냉각의 지연에 의하여 동적재결정 단계에서 정적재결정으로 바뀐 후 결정립 성장이 빠르게 일어나게 된다. 결과적으로, 휠베어링 플랜지의 심부와 스피들 내경 홀 부위에서 조대결정립의 발생은 변형시 고온가공에 따른 동적복구과정과



변형 후 냉각과정에서 냉각의 지연에 의한 정적 복구과정 모두에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

## 2.2 페라이트 결정립 크기 (FGS)에 대한 가열온도의 영향

고온으로 재료를 가공하면, 가공경화와 연화가

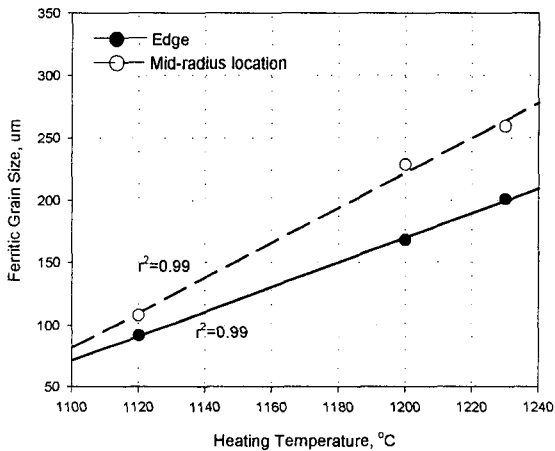


Fig.3 The relationship between FGS and heating temperatures.

Heating speed : 3.5°C/s, Stain rate : 0.1/s,  
Cooling start temp.: 840°C, Cooling rate : 0.35°C/s

복잡한 미세조직을 나타내게 된다. 그림 3 은 본 연구의 고온변형거동 재현시험의 결과로서, 가열 온도에 따른 페라이트 결정립 크기의 변화를 나타낸다. 단조품의 FGS 는 가열온도의 상승에 따라 비례적으로 증가하였다. 그리고, 두함수 사이의 결정계수,  $r^2$  는 0.99 로써 긴밀한 관계가 있음을 알 수 있다.

## 2.3 페라이트 결정립 크기에 대한 냉각조건 영향

클리블 시험기에 의한 고온변형거동 재현시험의 결과로서, 페라이트 결정립 크기에 대한 냉각 시작 온도의 영향을 그림 4 에 나타낸다. 그것은 냉각시작 온도가 낮아짐에 따라 페라이트 결정립이 미세해지는 경향을 보여준다. 이때, 냉각시작 온도와 페라이트 결정립 크기사이의 결정계수는 0.99 로써 매우 높은 연관성을 보여준다. 따라서, Hall Patch eq.을 통하여 임의의 제품의 강도가 그

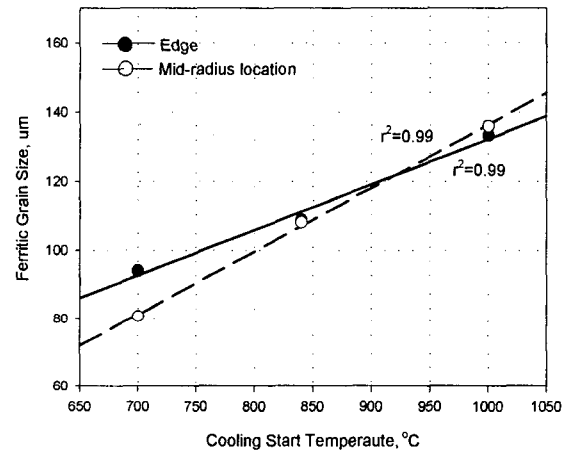


Fig.4 The relationship between FGS and cooling start temperature.

Heating speed : 3.5°C/s, Stain rate : 0.1/s,  
Heating temp.: 1120°C, Cooling rate : 0.35°C/s

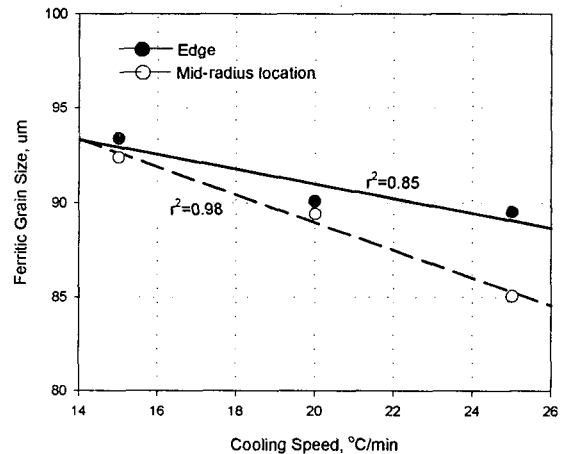


Fig.5 The relationship between FGS and cooling rate.

Heating speed : 3.5°C/s, Stain rate : 0.1/s,  
Heating temp.: 1120°C, Cooling start temp.: 840°C

것의 결정입도와 반비례 관계가 있음이 알려져 있기 때문에, 열간단조품에서 미세한 페라이트 결정립과 우수한 강도를 얻기 위해서는 가급적 낮은 온도에서부터 냉각을 실시하는 것이 유리함을 알 수 있다.

그림.5 은 냉각속도에 따른 페라이트 결정립 크기의 변화를 보여준다. 이들간의  $r^2$  값은 0.85 ~ 0.98 정도로서, 페라이트 결정립 크기는 냉각속도와 반비례 관계가 있다. 그러나 이러한 결정계수는, 그림 3, 4 에 비하여 비교적 작은 값이다. 따라서, 임의의 단조품을 열간단조로 가공할 경우, 미세한 페라이트 결정립을 얻기 위해서는 가능한 단조 가열온도를 낮추고, 냉각속도 보다는 오히려 냉각시작 온도를 적절히 제어하는 것이 보다 효율적이다.

### 2.4 구름 접촉 피로거동

휠 베어링용 허브플랜지는 반복적인 비대칭 굽힘응력에 견딜수 있는 충분한 부하성능과 인성을 달성하기 위하여 주로 고주파 열처리 된다. 그림.6 은 고주파 열처리된 SAE1055 와 SAE52100 시험편들의 청정윤회환경하 구름접촉피로시험의 결과를 보여준다. SAE1055 시험편의 경우, 기존 SAE52100 고주파품에 비하여 우수한  $L_{10}$  수명을 나타내었다. 이러한 SAE1055 소재의 우수한 수명은 미세조직의 상대적 우수성에 기인한 것으로 판단된다.

### 3. 결론

SAE1055 강재와 열간단조 방식으로 제조된 제 3 세대형 Wheel 베어링 플랜지의 가공조건에 따른 재료특성과 고주파 경화된 시험편들의 구름피로 수명을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Wheel 베어링 플랜지의 조대 결정립들은 변형시 고온가열에 따른 동적복구과정과 단조 후

냉각과정에서 냉각의 지연에 의한 정적 복구과정 모두에 의해 발생된다.

(2) 열간단조품의 페라이트 결정립 크기는 단조 전 가열온도와 냉각시작온도가 낮을수록 감소하였다.

(3) 청정윤회환경하에서 SAE1055 고주파품은 SAE 52100 고주파품 보다 뛰어난 피로수명을 나타내었으며, 이는 SAE52100 에 비하여 적은 재료 결함의 존재와 관련이 있다.

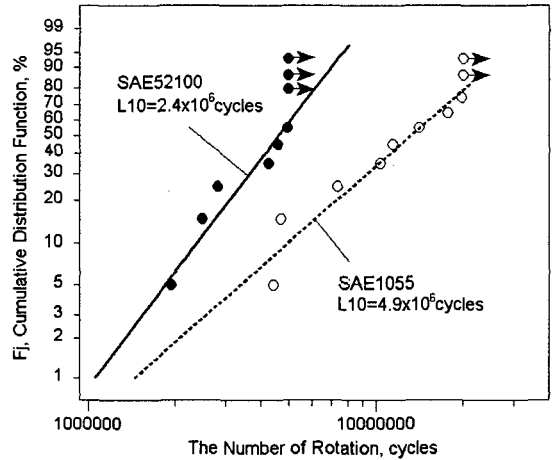


Fig.6 Comparison of fatigue resistance between conventional SAE52100 steel and SAE1055 steel  
Contact stress : 595kgf/mm<sup>2</sup>, case depth : 2.5mm

### 참 고 문 헌

- [1] G. Krauss, 1987, Microalloyed Bar and Forging Steels, in Proceedings of 29th Mechanical Working and Steel Processing Conference, ISS, Warrendale, PA, pp. 67 ~ 77
- [2] P.A. Oberly, C.J. Van Tyne, and G. Krauss, 1991, Grain Size and Forgeability of a Titanium Microalloyed Forging Steel, SAE Technical Paper Series No. 910146, SAE, Warrendale, PA.