한국소성가공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집 pp.159~162

베어링강의 고온변형특성과 열간 단조조건에 관한 연구

문호근* · 이재성* · 유선준** · 전만수***

Hot Deformation Behavior of Bearing Steels and Their Optimal Hot Forging Conditions

H. K. Moon, J. S. Lee, S. J. Yoo and M. S. Joun

Abstract

In this paper the stress-strain curves of bearing steels at hot working conditions are obtained by compression test with a computer controlled servo-hydraulic Gleeble 3800 testing machine and elongations and reductions of area of the bearing steels are obtained by tensile test with a computer controlled servo-hydraulic Gleeble 1500 testing machine. These tests have been focused to obtain the flow stress data and optimal hot forging conditions under various conditions of strain rates and temperatures. The strain rate sensitivity exponent and reduction of area of the materials are evaluated. Experimental results are presented for various conditions of temperatures and strain rates.

Key Words : Hot Deformation, Computer Controlled Servo Hydraulic Gleeble 3800 Testing machine, Bearing Steel, Stress-Strain Curves, Hot Forging

1. 서 론

구름베어링(rolling bearing)은 축(shaft)에 작용하는 하중을 지지하면서 회전을 원활하게 하는 중요한 기계요소중의 하나이다. 일반적으로 베어링은 운전중 높은 접촉압력을 반복적으로 받으면서 미끄럼을 수반하는 구름접촉을 한다. 이러한 특성 때문에 베어링에 사용되는 재료에는 기계적 강도및 구름피로 강도가 크고, 우수한 내마모성 및 내충격성 등이 요구된다. 이와 같은 요구조건을 만족하는 베어링강으로 고탄소 크롬강(STB2)과 표면경화강(SCr420H) 등이 있으며 베어링강의 주요화학성분은 Table 1과 같다.

베어링의 성형공정은 대부분 재료의 기계적 성질 및 소성 변형특성 때문에 열간 단조로 제작되고 있다. 하지만 베어링강에 대한 고온에서의 기계적 성질에 대한 자료가 부족하여 베어링강의 최적 열간 단조공정의 설정에 어려움을 겪고 있다.최근 고객 품질검사시스템의 변화로 기존의 완제품에 대한 품질검사에서 제품의 제작공정에

* FAG한화베어링(주) 연구소
** 포스코(주) 기술연구소 후판연구팀
*** 경상대학교 수송기계공학부

Table 1 Chemical composition of bearing steels

기 호	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
STB2	0.95~1.1	0.15~0.35	≤0.5	≤0.025	≤0.025	1.3~1.6	≤0.025	≤0.08
SCr420H	0.17~0.23	0.15~0.35	0.55~0.9	≤0.03	≤0.03	0.85~1.25	-	-

까지 확대되어 각 공정에 대한 검사를 요구하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 베어링강의 고온인장 및 압축시험을 실시하여 그 결과로부터 고온 유동선도 및 단면감소율 등을 구한 후, 그 결과를 분석하여 고객의 요구에 대응할 수 있는 자료를 획득하고 베어링강의 고온 소성 변형 특성과 최적 열간 단조공정을 설정하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 열간 단조공정

베어링강의 소성가공은 소재의 특성상 주로 열간 단조공정으로 이루어진다. 베어링강의 열간 단조에 많이 사용되는 장비는 열간 포머 단조기이다. 본 연구에서는 열간 포머 단조기 중 연구의 목적에 적합한 AMP50[1]기종을 선택했다. AMP50 열간 포머 단조기는 가공능력이 최대 ϕ92mm이며, 800톤급이다. 열간 포머 단조공정은 크게 단조이전 예비단계, 성형단계, 단조이후 단계 등으로 나눌 수 있다.

단조 이전의 예비단계에는 초기 소재의 가열공정과 절단(cutting)공정이 있으며, 성형(forming)단계에는 업셋팅(upsetting)과 성형(forming)공정으로 이루어져 있다. 단조이후 단계에는 피어싱(piercing)과 트리밍(trimming), 냉각(cooling) 등의 공정으로 이루어져있다.

초기 소재의 가열온도는 베어링강의 종류에 따라 다르며, 대략 1200℃ 부근이며 승온속도는 13.8℃/sec이다. 그리고 성형단계에서의 성형속도는 Fig. 1에 도시하였다. 성형공정에서의 소재 변형율속도($\dot{\bar{\varepsilon}}$)는 1~20s^{-1} 범위이다.

2.2 고온압축시험

압축시험은 소재의 소성가공 특성을 알기 위한 유용한 방법 중 하나이다. 일반적으로 고온상태의 재료를 실제 공정으로 실험하기는 쉽지 않다. 본 연구에 사용된 시험기는 최근 개발된 소재 시험기로 Gleeble 3800 장비이다. 압축시험에 사용된 시편의 크기는 지름 10mm이며 높이

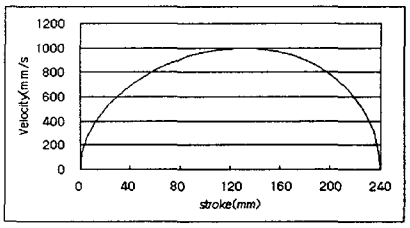

Fig. 1 Forming velocity

12mm이다. 시험 중 시편과 금형의 융착을 방지하기 위하여 얇은 금속판(Ni plate)이 사용되었으며, 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위해 고체 윤활제(MoS_2)가 사용되었다. 정확한 온도 측정과 제어를 위해 시편의 중간에 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 시험장비개략도 및 시험절차에 대한 자세한 사항은 참고문헌[2]으로 대신한다.

고온압축시험을 여러가지의 온도(900 ~ 1300℃)와 변형율속도(1 ~ 50s^{-1})에 대하여 실시하였다. 고온압축시험에 사용된 온도 및 변형률속도에 대한 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Summary of temperature and strain-rate conditions employed for compression tests.

Classification		Temperature(℃)						
Material	Strain -Rate	900	1000	1100	1150	1200	1250	1300
SCr420H STB2	1 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	●
	5 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	●
	10 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	●
	50 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	●

2.3 고온인장시험

인장시험은 재료의 기계적 성질을 조사할 수 있는 유용한 방법이다. 일반적으로 인장시험은 열간가공에서 국부수축의 문제 때문에 사용상 제한이 있지만 재료의 연신율(elongation)과 단면감소율(reduction of area)을 구하는데 유용하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 최근 소재시험 목적으로 많이 사용되는 Gleeble 1500 장비가 사

용되었다. 본 장비는 시험중 시편의 정확한 온도를 제어하고 측정할 수 있으며, 다양한 온도조건 및 변형률속도 조건에 대하여 시험할 수 있도록 되어 있다. 고온인장시험에 사용된 온도 및 변형률속도에 대한 조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Summary of temperature and strain-rate conditions employed for tensile tests.

Classification		Temperature(℃)						
Material	Strain -Rate	900	1000	1100	1150	1200	1250	1300
SCr420H STB2	1 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	x
	5 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	x
	10 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	x
	50 s^{-1}	●	●	●	●	●	●	x

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온압축시험 결과

고온압축시험으로 얻은 응력-변형률선도는 상온에서의 응력-변형률선도와 다르다는 것을 알 수 있다. Fig.2는 고탄소크롬강(STB2)을 일정한 변형률속도($10s^{-1}$)에서 온도를 달리하여 고온압축시험한 후의 응력-변형률선도을 나타낸 것이다. Fig.3은 일정한 온도(1250℃)에서 표면경화강(SCr420H)을 여러가지 변형률속도에 대해 고온압축시험한 후의 응력-변형률선도을 나타낸 것이다.

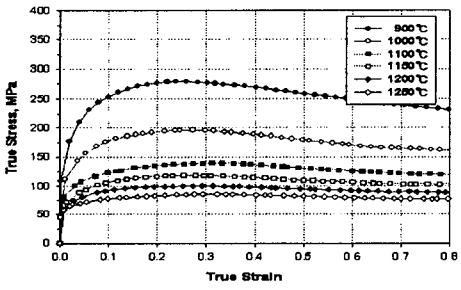

Fig. 2 True stress-strain curves at strain-rate $10s^{-1}$ (STB2)

선도에서 보는 바와 같이 일정한 변형률속도에서 온도가 상승함에 따라 유동응력이 감소하며, 일정온도에서 변형률속도가 증가함으로써 유동응력이 증가하였다. 응력-변형률선도의 형태는 변형이 증가함에 따라 유동응력이 크게 되고 최대응력을 나타낸 후, 점점 감소하다가 일정변형 이후에는 더 이상의 응력저하가 없는 정상상태를 나타내었다.

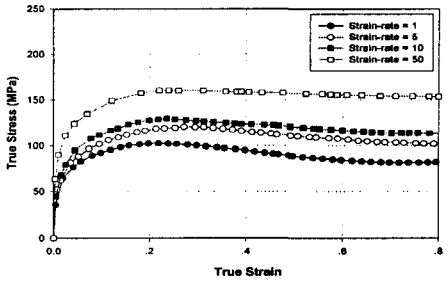

Fig. 3 True stress-strain curves at temperature 1250℃ (SCr420H)

3.2 고온인장시험 결과

고온인장시험에서 재료가 소성변형될 수 있는 정도를 나타내는 척도로 연신율과 단면감소율(A_s)이 있다. 일반적으로 단면감소율(A_s)이 더 유용하게 사용되고 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$A_s = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

Fig.4는 일정한 변형률속도($10s^{-1}$)에서 여러가지의 온도로 고온인장시험한 시편의 형상을 나타내고 있다. 그림에서 시편의 시험온도는 위가 높고 아래가 낮다. 그림에서 온도가 상승함으로써 연성이 증가하다가 일정온도 이후 연성이 급격이 감소하는 것을 알 수 있다.

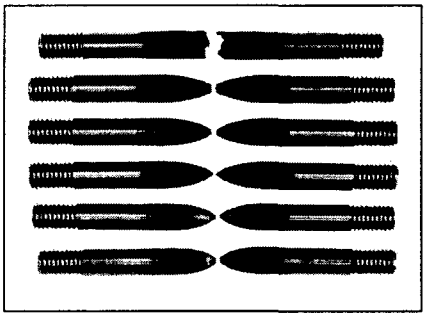

Fig. 4 Hot Tensile Test(STB2)

3.3 유동응력 곡선 및 단면감소율

Fig.5은 고온압축시험에서 구한 응력-변형률 선도로부터 일정한 변형률과 온도에서 구한 응력-변형률속도 선도를 나타내고 있다. 다양한 온도와 변형률에 대한 응력-변형률속도 선도를 구하고 변형률속도 의존성 방정식으로 표현되는 계수 즉, 강도계수(strength coefficient)와

변형률속도 민감지수(strain-rate sensitivity exponent)를 구하여 Table 4에 나타내었다. Fig.6에 고온인장시험 후 시편의 단면적을 측정하여 식(1)로부터 구한 단면감소율을 나타내었다.

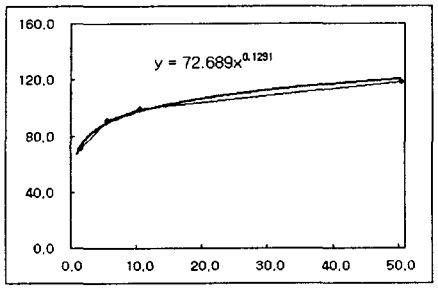

Fig. 5 The flow stress curve at the temperat -ure 1250℃ (SCr420H)

Table 4 Strength coefficient(C) and strain-rate sensitivity exponent(m)

Temperature	900℃		1100℃		1250℃	
Strain	C	m	C	m	C	m
0.1	169.5	0.096	101.7	0.120	65.84	0.125
0.3	194.2	0.099	113.7	0.124	68.87	0.142
0.5	184.0	0.110	101.4	0.142	60.02	0.167
0.7	177.0	0.110	92.79	0.158	56.63	0.170

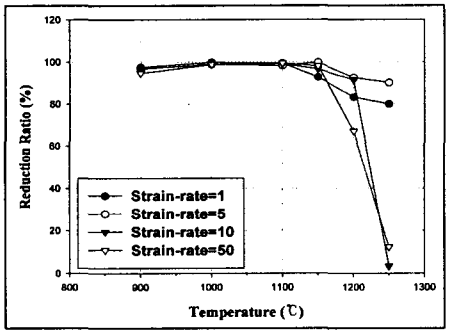

Fig. 6 The reduction of area curves (STB2)

4. 결 론

베어링강(STB2, SCr420H)의 고온소성변형특성을 얻기 위하여 고온압축시험과 인장시험을 여러가지 온도(900~1300℃)와 변형률속도(1~50s^{-1})에서 고온변형시험을 실시한 후 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베어링강(STB2, SCr420H)의 응력-변형률선도로부터 일정 변형률속도에서 온도가 증가하면 유동응력이 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 일정 온도에서 변형률속도가 증가하면 유동응력이 증가한다는 것을 알 수 있었다.

(2) 응력-변형률속도 선도를 변형률속도 의존성 방정식으로 표현하여 방정식에 사용되는 계수를 구하여 검토한 결과 강도계수는 온도가 증가함으로써 감소하고 변형률이 증가함으로써 증가하다가 감소하였다. 변형률속도 민감지수(strain-rate sensitivity exponent)는 온도와 변형률이 증가함으로써 증가하였다.

(3) 베어링강의 단면감소율을 분석한 결과, STB2의 경우 일정온도이후에서 단면감소율이 급격히 떨어진다는 것을 알 수 있었으며, SCr420H의 경우 시험온도범위에서 온도가 증가함으로써 단면감소율[3]이 증가한다는 것을 알 수 있었다.

(4) 이상의 결과로부터 베어링강(STB2, SCr420H)의 최적 열간 가공조건을 설정하는데 필요한 온도, 변형률속도의 조건을 구할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Joun, M. S., Moon, H. K., Shivpuri, R., 1998, "Automatic Simulation of a Sequence of Hot-Former Forging Processes by a Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method", Trans. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 120, pp. 291~296.

(2) Rao, K. P., Hawbolt, E. B., 1992, "Development of Constitutive Relationships Using Compression Testing of a Medium Carbon Steel", Trans. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 114, pp. 116~123.

(3) 문호근, 정재헌, 유선준, 전만수, 2001, "베어링의 열간 단조공정 중 내외부 크랙 발생 원인 분석", 한국소성가공학회, 제6회 단조심포지엄, pp. 9~20.

(4) 고병철, 김종현, 유연철, 1988, "변형가공도를 이용한 AL 5083 합급의 고온변형거동", 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 5, pp. 450~458.