

## 베어링강의 고온변형 특성에 관한 연구

문호근\* · 이재성\* · 유선준\*\* · 전만수†  
(2002년 10월 5일 접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

### A Study on Hot Deformation Behavior of Bearing Steels

Ho Keun Moon, Jae Seong Lee, Sun Joon Yoo and Man Soo Joun

**Key Words:** Hot Forging Process(열간단조공정), Bearing Steel(베어링강), Stress-Strain Curve(응력-변형률 곡선), Hot Compression Test(고온압축시험), Hot Tensile Test(고온인장시험), Rigid Thermo-Viscoplastic Finite Element Method(강열점소성 유한요소법)

#### Abstract

In this paper, the stress-strain curves of bearing steels at hot working conditions are obtained by hot compression test with a computer controlled servo-hydraulic Gleeble 3800 testing machine and elongations and reductions of area of the bearing steels are also obtained by hot tensile test with a Gleeble 1500 testing machine. Experiments are conducted under the various strain-rates and temperatures and their results are used to obtain the flow stress information. A rigid thermo-viscoplastic finite element method is applied to the multi-stage hot forging process in order to predict temperature distribution of workpiece. The experimental results and the analysis results are used to obtain an optimal hot forging condition.

#### 기호설명

- $\bar{\sigma}$  : 유효응력
- $\bar{\epsilon}$  : 유효변형률
- $\dot{\bar{\epsilon}}$  : 유효변형률속도
- $A_s$  : 단면감소율
- $T$  : 온도
- $C$  : 변형률속도 강도계수
- $m$  : 변형률속도 민감지수
- $\mu$  : 쿨롱마찰계수
- $h$  : 열전달계수

#### 1. 서론

베어링은 생산량이 많고, 소재의 냉간 가공 특성과 냉간에서의 기계적 성질 때문에 대부분 열간 단조로 생산되고 있다. 이러한 베어링용 소재는 열간 단조공정 중 심한 국부 변형에 의해 미세 균열이 발생할 수 있으며, 재료의 내·외부에 크랙이 발생할 수 있다.<sup>(1)</sup> 베어링은 대량으로 생산되므로 열간 단조조건 설정의 실패는 생산성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 하지만 베어링용 소재에 대한 고온변형 특성에 관한 자료의 부족으로 열간 단조공정 중 크랙발생 등의 원인 분석과 최적 열간 단조조건 설정에 어려움을 겪고 있다.

최근 고객의 품질검사에 대한 요구의 변화로 기존의 완제품에 대한 품질검사는 물론이고 제품의 제작공정까지 확대되어 단조공정의 검증에 필요한 자료를 요구하고 있지만 만족할만한 데이터를 고객에게 제시하지 못하고 있는 실정이다. 따

† 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : msjoun@nongae.gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-5316 FAX : (055)751-5316

\* FAG한화베어링(주) 연구소

\*\* 포스코(주) 기술연구소 후판연구팀

Table 1 Chemical composition of two bearing steels(wt, %)

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	-	-

로서 고객의 요구에 부응하고 최적 열간 단조조건을 설정하기 위해서는 열간 단조공정의 주요 변수인 온도, 변형률, 변형률속도 등이 소재의 물성치에 미치는 영향을 분석하기 위한 베어링강에 대한 고온시험이 필수적이다.

열간 단조공정 변수인 소재의 온도와 변형률속도가 유동응력에 미치는 영향을 조사하여 최적의 열간 가공조건을 예측하려는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. Altan 등<sup>(2)</sup>은 이와 관련된 논문을 분석하여 다양한 재료에 대한 유동응력 데이터를 제시하였다. Rao 등<sup>(3,4,5)</sup>은 저탄소강과 중탄소강에 대한 열간 변형시험을 실시하여 다양한 공정조건 하에서 유동응력을 결정하는 알고리즘과 고온압축시험방법 등을 제시하였다. Xia<sup>(6)</sup> 및 Ko 등<sup>(7,8)</sup>은 Al 합금의 고온변형시 동적재결정(dynamic recrystallization) 및 동적회복(dynamic recovery)의 고온연화 특성을 조사하여 최적의 열간 가공조건을 제시하였다. 그리고 변형저항을 낮추고 길질립 미세화를 추구할 수 있는 공정을 개발하기 위한 연구가 다양한 소재에 대하여 이루어지고 있으며<sup>(9-13)</sup>, 유한요소법을 이용하여 고온변형 시 싱형하중과 미세조직을 예측하려는 연구도 이루어지고 있다<sup>(14-16)</sup>.

기존의 연구는 고온압축시험, 고온인장시험, 고온비틀림시험 등을 실시하여 소재의 유동응력을 제시하고 동적연화기구와 미세조직 분포를 조사하여 최적 열간 가공조건을 제시하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 이러한 연구결과를 이용하여 베어링강의 고온소성변형 시 발생하는 재료의 내·외부 크랙의 발생원인을 규명하는 것은 용이하지 않다.

따라서 본 연구에서는 베어링강에 대한 고온압축시험을 실시하여 고온 유동응력선도를 구하고 고온인장시험을 실시하여 단면감소율을 구하고자 한다. 또 시험에서 얻은 유동응력선도를 기초 데이터로 하여 열간 단조공정에 대한 강열점소성 유한요소해석을 실시하여 공정중 소재의 온도분포를 예측하고자 한다. 시험결과와 해석결과를

바탕으로 베어링강의 고온변형 특성과 내·외부 크랙 발생원인 및 최적 열간 단조조건을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 베어링강의 열간 단조조건

본 연구에 사용된 베어링 소재는 고탄소크롬강(STB2)과 표면경화강(SCr420H)이며, 주요 화학성분은 Table 1과 같다.

베어링 소재는 주로 열간 단조에 의하여 생산되고 있다. 베어링 소재는 비교적 소형이면서 대량생산되기 때문에 자동단조기인 열간포머 단조기에 의하여 생산되는 것이 대부분이며, 가공 직경이 100mm 이상의 대형 베어링 소재는 열간 프레스에 의하여 생산된다.

본 연구에서는 고온압축시험과 인장시험의 조건을 결정하기 위하여 베어링 생산에 사용되는 열간포머 단조기와 열간 프레스의 가공조건을 조사하였다.

베어링의 열간 단조공정은 크게 단조 이전 예비단계, 성형단계, 단조 이후단계 등으로 나눌 수 있다. 단조 이전 예비단계는 초기 소재의 가열공정과 절단공정으로 이루어져 있으며, 성형단계에는 업셋팅과 성형공정으로 이루어져 있다. 단조 이후단계는 피어싱과 트리밍공정, 냉각 등의 공정으로 이루어져 있다.

초기 소재의 가열온도는 베어링강의 종류에 따라 다소 차이는 있으나 대략 1150℃~1200℃ 부근이며, 승온속도는 13~14℃/sec 범위이다. 그리고 성형단계에서의 평균성형속도는 500mm/sec이다. 성형공정에서 소재의 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ )는 1~50/sec의 범위에 속한다.

### 2.2 고온압축시험

일반적으로 고온상태의 재료를 실제공정으로 실험하기는 쉽지 않다. 압축시험은 소재의 변형 특성을 알기 위한 유용한 방법 중 하나이다. 본

**Table 2** Combination of temperatures and strain-rates sampled for the compression test

Temperature (°C) \ Strain-rate	900	1000	1100	1150	1200	1250	1300
1 /sec	●	●	●	●	●	●	●
5 /sec	●	●	●	●	●	●	●
10 /sec	●	●	●	●	●	●	●
50 /sec	●	●	●	●	●	●	●

연구에 사용된 시험기는 Gleeble 3800 장비이다. 압축시험에 사용된 시편의 지름은 10mm이며 높이는 12mm이다. 시험 중 시편과 금형의 용착을 방지하기 위하여 얇은 니켈판(Ni plate)이 사용되었으며, 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위해 고체 윤활제(MoS<sub>2</sub>)가 사용되었다. 정확한 온도 측정과 제어를 위해 시편의 중간에 열전대를 부착하였다. 시험장치의 개략도 및 시험절차에 대한 자세한 사항은 참고문헌<sup>(4)</sup>으로 대신한다.

기존의 열간 단조공정을 고려하여 고온압축시험을 여러가지의 온도(SCr420H : 900°C~1300°C, STB2 : 900°C~1250°C)와 변형률속도(1~50/sec)에 대하여 실시하였다. 고온압축시험에 사용된 온도 및 변형률속도의 조건을 Table 2에 정리하였다.

**2.3 고온인장시험**

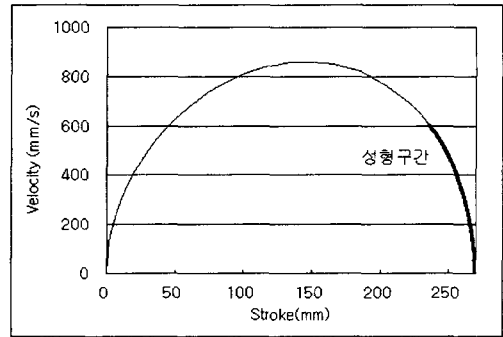
인장시험은 재료의 기계적 성질을 조사할 수 있는 유용한 방법이다. 일반적으로 인장시험은 열간가공에서 국부수축의 문제 때문에 사용상 제한이 있지만 재료의 연신율과 단면감소율을 구하는데 유용하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 소재시험 목적으로 많이 사용되고 있는 Gleeble 1500 장비가 사용되었다. 인장시험에 사용된 시편의 지름은 10mm이며 길이는 110mm이다. 기존의 열간 단조공정을 고려하여 고온인장시험을 실시하였으며, 고온인장시험에 사용된 온도 및 변형률속도의 조건을 Table 3에 정리하였다.

**2.4 강열점소성 유한요소해석**

열간 단조공정 중 소재의 유동특성과 온도분포를 예측하기 위하여 강열점소성 유한요소해석을 실시하였다. 이 기술에 관한 이론적인 배경은 참고문헌으로 대신한다.<sup>(17)</sup> 해석에 필요한 유동응력 정보는 고온압축시험으로 구한 결과값을 이용하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 다단 열간 단조

**Table 3** Combination of temperatures and strain-rates sampled for the tensile test

Temperature (°C) \ Strain-rate	900	1000	1100	1150	1200	1250
1 /sec	●	●	●	●	●	●
5 /sec	●	●	●	●	●	●
10 /sec	●	●	●	●	●	●
50 /sec	●	●	●	●	●	●



**Fig. 1** Forming velocity

공정도이다.

참고문헌<sup>(18-21)</sup>과 경험에 근거하여 결정된 공정 조건 및 변수는 다음과 같다.

- 소재의 초기온도 : 1150°C
- 금형의 초기온도 : 150°C
- 금형속도 : Crank mechanism (Fig. 1)
- 회전수 : 60 rpm
- 램행정 : 270 mm
- 램길이 : 810 mm
- 유동응력 : Table 4 참조
- 쿨롱마찰계수 :  $\mu = 0.3$
- 대류 열전달계수 :  $h_c = 2.95 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- 소재-금형 사이의 열전달계수 :  $h_c = 30.0 \text{ kW/m}^2\text{°C}$

**3. 실험결과의 고찰**

**3.1 고온압축시험 결과**

Fig. 3은 여러가지의 온도(1100°C~1250°C) 조건 하에서 일정한 변형률속도(10/sec)로 압축률 75% 까지 고온압축시험한 시편의 형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 소재의 온도가

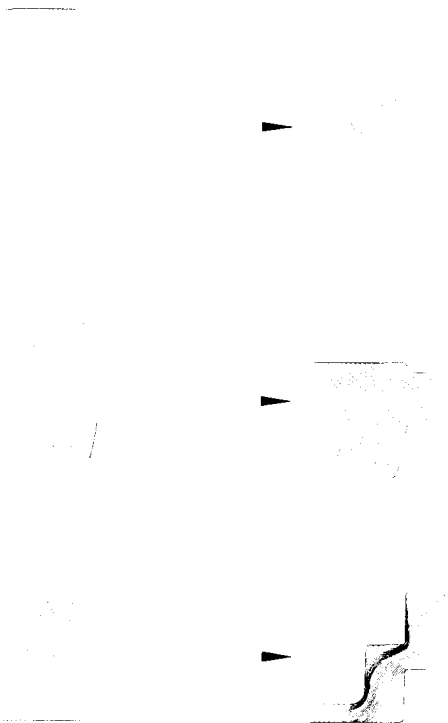


Fig. 2 Schematic description of a hot forging process and its analysis model

1200℃ 이상일 때 외경의 표면에 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. 1200℃의 경우 변형률속도가 10/sec, 50/sec에서는 외경표면에 균열이 발생하였으며, 1/sec, 5/sec에서는 표면균열이 발생하지 않았다. 1250℃의 경우 변형률속도가 1/sec을 제외한 나머지 변형률속도(5/sec, 10/sec, 50/sec)에서 외경표면에 균열이 발생하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 베어링강을 일정한 변형률속도(10/sec)에서 온도를 달리하여 고온압축시험을 실시하여 얻은 응력-변형률 선도이다. 고온압축시험으로 얻은 응력-변형률 선도는 상온에서의 응력-변형률 선도와 다르다는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 상승함에 따라 유동응력이 감소함을 알 수 있다.

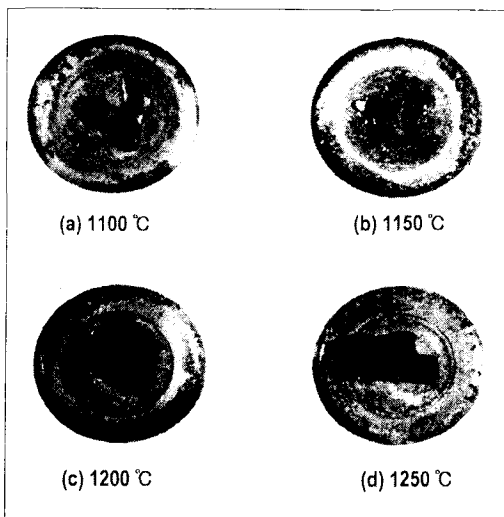


Fig. 3 Hot compression test(STB2)

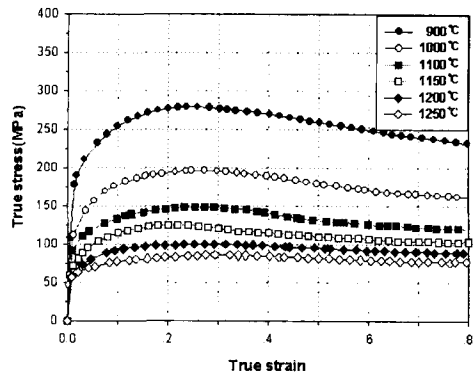


Fig. 4 True stress-strain curves at strain-rate 10/sec (STB2)

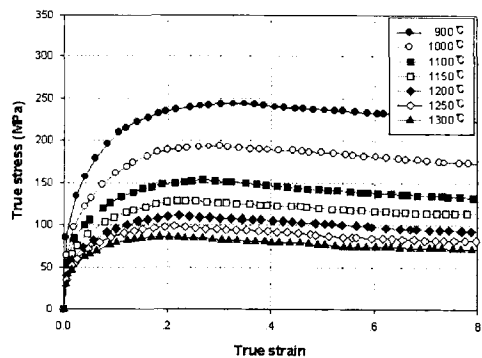


Fig. 5 True stress-strain curves at strain-rate 10/sec (SCr420H)

Fig. 6과 Fig. 7은 일정한 온도(1150℃-STB2, 1250℃-SCr420H)에서 여러가지 변형률속도(1, 5, 10, 50/sec)에 대하여 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 변형률속도가 증가하면 유동응력이 증가함을 알 수 있다. 응력-변형률 선도의 형태는 변형률이 증가함에 따라 유동응력이 크게 되고 최대응력을 나타낸 후, 점점 감소하다가 일정변형 이후에는 더 이상의 응력 저하가 없는 정상상태를 나타내고 있다. 응력-변형률 곡선은 전형적인 동적재결정 곡선의 형태를 보여주고 있다.

3.2 고온인장시험 결과

재료가 소성변형 될 수 있는 정도를 나타내는

척도로 연신율과 단면감소율( $A_s$ )이 사용되고 있다. 단면감소율은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $A_f$ 는 과단시의 단면적이다. Fig. 8과 Fig. 9는 일정한 변형률속도(10/sec)에서 여러가지의 온도(900℃~1250℃)로 고온인장시험한 시편의 과단 형상을 나타내고 있다. Fig. 8의 STB2 베어링강의 경우 온도가 상승함으로써 연성이 증가하다가 일정온도 이후 연성이 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 1100℃와 1150℃에서 단면감소율이 크게 나타났다. Fig. 9의 SCr420H 베어링강의 경우 온도가 상승함에 따라 연성이 계속 증가하였으며, 1200℃와 1250℃에서 단면감소율이 크게 나타났다.

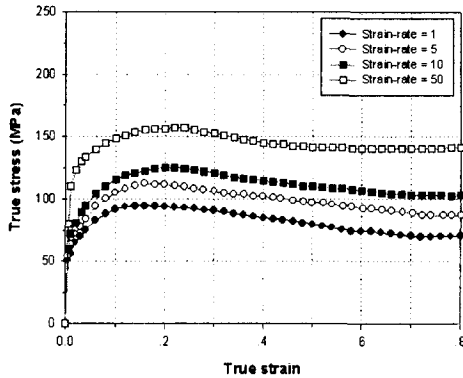


Fig. 6 True stress-strain curves at temperature 1150℃(STB2)

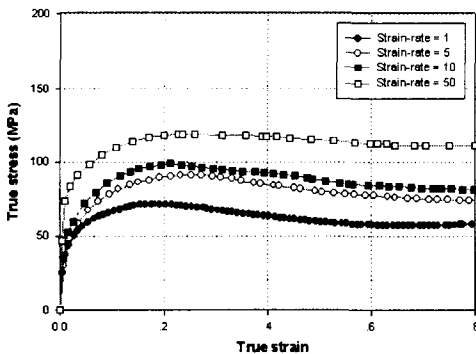


Fig. 7 True stress-strain curves at temperature 1250℃(SCr420H)



Fig. 8 Hot tensile test(STB2)

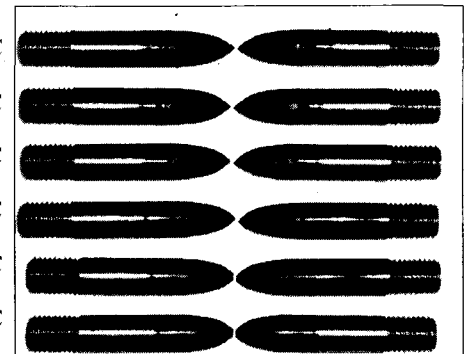


Fig. 9 Hot tensile test(SCr420H)

3.3 유동응력선도 및 단면감소를

Fig. 10과 Fig. 11은 고온압축시험에서 구한 응력-변형률 선도로부터 일정한 변형률( $\epsilon=0.3$ )과 온도(1150℃, 1250℃)에서 구한 유동응력선도를 나타내고 있다. 동일한 방법으로 다양한 온도와 변형률에 대한 응력-변형률속도 선도를 이용하여 곡선피팅법( $\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m$ )으로 변형률속도 강도계수  $C$ 와 변형률속도 민감지수  $m$ 를 구하여 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 온도변화에 따른 단면감소율의 변화를 여러가지 변형률속도에 대해 나타내고 있다. Fig. 12의 STB2 베어링강의 경우 특정온도(1000℃~1100℃)에서 단면감소율이 최대로

나타났으며, 특정온도(1200℃) 이후에 단면감소율이 급격하게 감소하였다. Fig. 13의 SCr420H 베어링강의 경우 특정온도범위 내에서 온도가 상승함으로써 단면감소율이 증가하였으며, 1200℃와 1250℃에서 단면감소율이 최대로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 STB2 베어링강의 경우 단면감소율이 온도에 따라 약간의 차이는 있으나 변형률속도가 5/sec에서 최대 단면감소율이 나타났으며, SCr420H 베어링강의 경우 변형률속도가 낮을수록 단면감소율이 높게 나타났다.

Table 4 Strain-rate strength coefficient  $C$  [MPa] and strain-rate sensitivity exponent  $m$ (STB2)

Temp.	900℃		1000℃		1150℃	
	C	m	C	m	C	m
0.1	182.2	0.151	142.0	0.124	89.05	0.123
0.3	190.2	0.151	151.6	0.126	88.40	0.136
0.5	176.6	0.154	138.8	0.123	78.20	0.149
0.7	168.5	0.145	126.0	0.130	69.01	0.178

Table 5 Strain-rate strength coefficient  $C$  [MPa] and strain-rate sensitivity exponent  $m$ (SCr420H)

Temp.	900℃		1100℃		1250℃	
	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

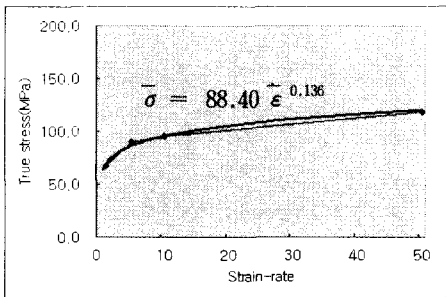


Fig. 10 The flow stress curve at 1150℃ ( $\epsilon=0.3$ , STB2)

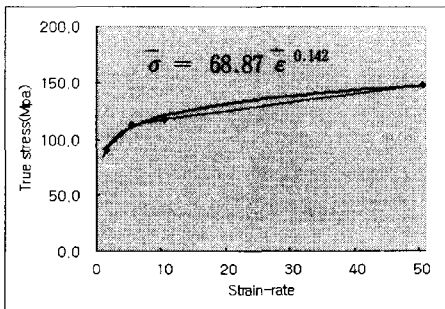


Fig. 11 The flow stress curve at 1250℃ ( $\epsilon=0.3$ , SCr420H)

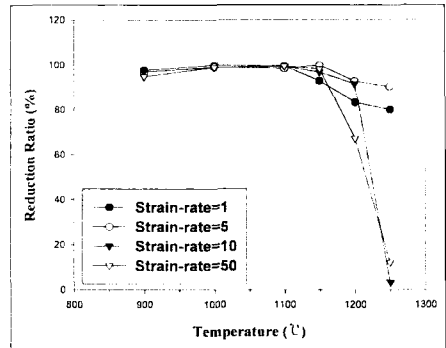


Fig. 12 Variation of reduction of area with temperature(STB2)

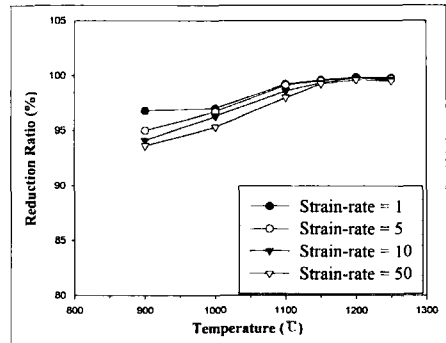


Fig. 13 Variation of reduction of area with temperature(SCr420H)

3.4 비등온 유한요소해석 결과

열간 단조공정 중 소재의 온도분포를 예측하기 위하여 강열점소성 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 14는 해석동안의 소재와 금형의 유한요소모델을 나타내고 있다. Fig. 15는 연계해석결과이며, 열간 단조공정 중 마지막 성형공정 직후 재료의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 16은 마지막 성형공정 직전 재료의 변형률속도 분포를 나타내고 있다.

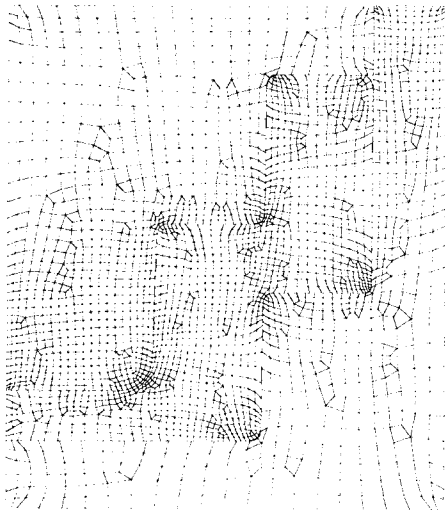


Fig. 14 A set of mesh systems during simulation

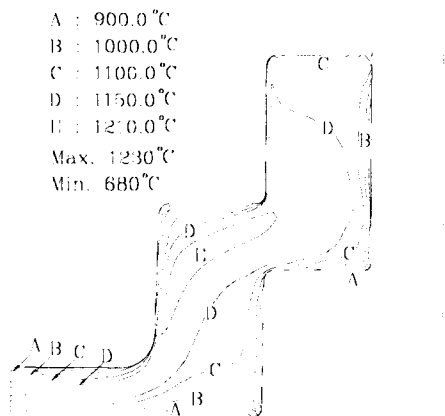


Fig. 15 Temperature distribution of the material (STB2)

Fig. 17에서 보는 바와 같이 금속유동선의 분포가 특정부분에서 심하게 변화하였음을 알 수 있다. 이것으로부터 열간 단조공정 중 소재에 심한 국부변형이 발생했음을 알 수 있다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 소재에 심한 국부변형이 일어난 부분에서 최대온도분포를 나타내었다.

연계해석결과 성형직전 소재온도는 자연공냉에 의해 10°C 낮아졌으며, 성형후의 소재 온도는 금형과 접촉한 부위에서는 급격하게 내려갔으며 (680°C), 소재의 내부에서는 소성열에 의하여 최

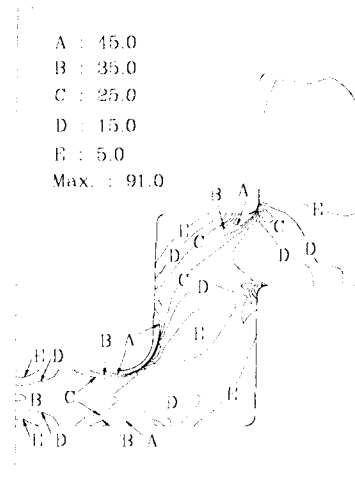


Fig. 16 Effective strain-rate distribution of the material (STB2)



Fig. 17 Metal flow lines

고 1230℃까지 상승하였다. 금형과 접촉이 일어난 영역중 일부분에서의 온도 하강이 상대적으로 작은 것은 그 주위에서 극심한 소성변형에 의한 소성열과 마찰열의 발생이 상대적으로 컸기 때문으로 판단된다. 해석결과 열간 단조공정 중 STB2 베어링강의 경우 심한 국부변형에 의해 초기가열 온도보다 최고 80℃까지 상승함을 알 수 있었으며, 이러한 온도상승이 Fig. 18에서 보는 바와 같이 소재의 내·외부 크랙의 발생 원인으로 판단된다.

#### 4. 결론

베어링강(STB2, SCr420H)의 고온 소성변형 특성을 얻기 위하여 여러가지 온도(900℃~1300℃)와 변형률속도(1~50/sec)에서 고온압축시험과 고온인장시험을 실시하였다. 열간 단조공정 중 소재의 온도분포를 예측하기 위하여 고온압축시험 결과를 입력데이터로 하여 다단 열간 단조공정에 대한 강열점소성 유한요소해석을 실시하였다. 고온압축 및 인장시험결과 STB2의 베어링강의 경우 1200℃ 이상에서 표면균열이 발생하였으며, 단면감소율이 급격히 떨어졌다. SCr420H의 베어링강의 경우 시험온도범위에서 표면균열이 발생하지 않았으며, 온도가 증가할수록 단면감소율이 증가하였다. 강열점소성 유한요소해석결과 소재의 온도는 심한 국부변형을 받을 경우 최고 80℃ 이상까지 상승하였다.

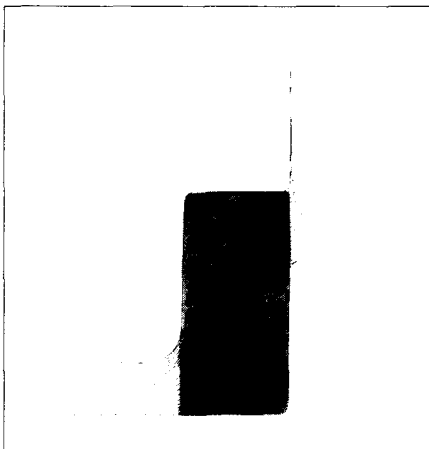


Fig. 18 Internal crack of the material(STB2)

이상의 결과로부터 베어링강(STB2, SCr420H)의 내·외부 크랙발생 원인은 온도에 의한 것으로 판명되었으며, 획득된 소재의 유동응력과 고온변형 특성을 바탕으로 최적 열간 가공조건을 설정할 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 BK21 지역대학 육성사업단의 지원으로 실시된 연구결과의 일부입니다.

#### 참고문헌

- (1) Moon, H. K., Chung, J. H., Yoo, S. J., Joun, M. S., 2001, "Analysis of Internal or External Crack of Bearing Steel during Hot Forging Process," *The KSTP 6th Forging Symposium*, pp. 9~20.
- (2) Altan, T., Boulger, F. W., 1973, "Flow Stress of Metals and Its Application in Metal Forming Analyses," *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, pp. 1009~1019.
- (3) 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.
- (4) Rao, K. P., Prasad, Y. K. D. V., Hawbolt, E. B., 1996, "Hot Deformation Studies on a Low-Carbon Steel : Part 1 - Flow Curves and the Constitutive Relationship," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 897~907.
- (5) Rao, K. P., Prasad, Y. K. D. V., Hawbolt, E. B., 1996, "Hot Deformation Studies on a Low-Carbon Steel : Part 2 - An Algorithm for the Flow Stress Determination under Varying Process Conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 908~917.
- (6) Xia, X., Sakaris, P. and McQueen, H. J., 1994, "Hot Deformation, Dynamic Recovery and Recrystallization Behavior of Aluminum 6061-SiCp Composites," *Mater. Sci. and Technol.*, Vol. 10, pp. 487~496.
- (7) Ko, B. C., Kim, J. H., Yoo, Y. C., 1998, "The Effects of Temperature and Strain Rate on Flow



- Stress and Strain of AA5083 Alloy during High Temperature Deformation," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 7, No. 2, pp. 168~176.
- (8) Ko, B. C., Kim, J. H., Yoo, Y. C., 1998, "High Temperature Deformation Behavior of Al 5083 Alloy Using Deformation Processing Maps," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 7, No. 5, pp. 450~458.
- (9) Lee, K. S., Huh, H., 1997, "Characterization of superplastic material SPF 8090 Al-Li with the variation of the strain rate and the temperature," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 6, No. 5, pp. 425~434.
- (10) Choi, M. S., Kang, B. S., Yum, J. T., Park, N. K., 1998, "Prediction of the Behavior of Dynamic Recrystallization in Inconel 718 during Hot Forging using Finite Element Method," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 197~206.
- (11) Han, H. K., Kim, S. I., Yoo, Y. C., 2000, "Prediction on Flow Stress Curves and Microstructure of 304 Stainless Steel," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 9, No. 1, pp. 72~79.
- (12) Han, H. K., Kim, S. I., Jung, T. S., Yoo, Y. C., 2000, "Effects of Process Variables on Static and Metadynamic Softening of SCM 440," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 9, No. 1, pp. 80~87.
- (13) Han, H. K., Yoo, Y. C., 2001, "The Evolution of Dynamically Recrystallized Microstructure for SCM 440," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 1, pp. 35~41.
- (14) Bang, W., Lee, C. S., Chang, Y. W., 2001, "Analysis of Hot Forming Process with Flow Softening by Dynamic Recrystallization," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 2, pp. 137~143.
- (15) Bang, W., Jung, J. Y., Chang, Y. W., 2001, "The Effect of Deformation Heat Compensation in the Hot Forging Analysis of SAF 2507 Stainless Steel," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 3, pp. 206~213.
- (16) Jeong, H. S., Cho, J. R., Cha, D. J., Bae, Y. B., 2001, "A Study on Dynamic and Static Recrystallization Behaviors and Microstructure Evolution Prediction of a Die Steel," *Official Journal of KSTP, Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 4, pp. 338~346.
- (17) 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.
- (18) Rebelo, N., and Kobayashi, S., 1980 "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer-II. Applications," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 22, pp. 707~718.
- (19) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, *Metal Forming and the finite Element Method*, Oxford University Press.
- (20) Cho, J. R., Park, C. Y. and Yang, D. Y., 1992, "Investigation of the Cogging Processes by Three-Dimensional Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.206, pp. 277~286.
- (21) Joun, M. S., Hwang, S. M., Moon, H. K., 1995, "Automatic Computer Simulation of Multi-Stage Hot Forging Processes-Flow Analysis, Temperature Analysis and Die Stress Analysis," *Proc. KSME Spring*, Vol. 1, pp. 337~340.