

## 열간압출품의 미세조직 균일화를 위한 최적 금형설계

이상곤\* · 고대철\*\* · 류경희\* · 이선봉\* · 김병민\*\*\*

(1999년 3월 29일 접수)

## Optimal Die Design for Uniform Microstructure in Hot Extruded Product

Sang-Kon Lee, Kyung-Hee Ryu, Seon-Bong Lee, Dae-Cheol Ko and Byung-Min Kim

### Abstract

The properties of deformed products are generally dependent upon the distribution of microstructure. It is, therefore, necessary to make the distribution of microstructure uniform in order to achieve the best balance of properties in the final product. This is often a demanding task, even for conventional materials. It is become essential to achieving mechanical integrity and a desired combination of microstructure and properties. The objective of this study is to design the optimal die profile which can yield more uniform microstructure in hot extruded product. The microstructure evolution, such as dynamic and static recrystallization as well as grain growth, is investigated using the program combined with Yada and Senuma's empirical equations and rigid-thermoviscoplastic finite element method. The die profile of hot extrusion is represented by Bezier-curve to define all available profile. In order to obtain the optimal die profile which yields uniform microstructure in the product the FPS(Flexible Polyhedron Search) method is applied to the present study. To validate the result of present study the experimental hot extrusion is performed and the result is compared with that of simulation.

**Key Words** : Hot extrusion, Optimal die design, Dynamic recrystallization, Static recrystallization, Grain growth, Rigid-thermoviscoplastic finite element method

### 1. 서 론

가장 기본적인 소성가공법의 하나인 단조가공에서 소재 손실을 최소화하면서 정도가 우수한 제품을 보다 효율적으로 제조하는 정밀정형(net shape or near net shape)

기법이 중요하다. 또한 최근에는 형상이나 치수 정밀도뿐만 아니라, 저비용으로 기계적 성질이 우수한 제품의 생산에 많은 관심이 집중되고 있다. 따라서 정밀정형과 우수한 기계적 성질을 동시에 요구하는 추세로 가고 있는 실정이다. 단조제품의 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 방법은

\* 부산대학교 대학원  
\*\* 양산대학 메카트로닉스과  
\*\*\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

첫째, 새로운 소재를 개발하는 것이며, 이것은 사용용도에 따라 요구되는 기계적 성질을 만족하기 위하여 그에 적합한 새로운 합금소재를 개발하는 것이다. 둘째, 가공열처리를 하여 기계적 성질을 향상시키는 것이다. 이것은 소성가공과 열처리를 조합해서 행하는 것을 말하며, 소성가공만으로는 얻을 수 없는 개선된 미세조직을 얻을 수 있기 때문에 제품의 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 셋째, 단조공정에 따른 소재내부의 미세조직을 변화시켜 더 나은 기계적 성질을 가진 제품을 얻는 것으로써 앞의 두 방법에 비하여 비용절감 및 공정수 측면에서 최근 들어 가장 많은 관심이 집중되고 있다.

일반적으로 금속의 미세조직은 합금의 조성비, 성형조건 및 온도 등의 열적-기계적 공정변수들에 많은 영향을 받는다. 따라서 미세조직의 변화에 대한 열적-기계적 공정변수들의 영향을 파악하고 적절한 공정변수 조합을 설정함으로써 미세조직변화의 예측과 제어가 가능하다. Sellars 등<sup>(1)</sup>은 열간압연공정에서 탄소강과 알루미늄합금의 미세조직 변화를 모델링하였고, Yada와 Senuma<sup>(2)</sup>는 Mn이 1% 미만 함유된 탄소강에 대하여 재료의 미세조직 변화를 예측하기 위한 모델을 제시하였다. Kwak 등<sup>(3)</sup>과 Jang 등<sup>(4)</sup>은 Yada 등이 제시한 재결정 거동 모델을 수정하여 열간압연공정에서 강의 재결정 거동을 해석하였다. 그러나 현재까지 수행된 대부분의 연구들은 주어진 공정조건에서 단지 재료의 미세조직을 예측하는 것에만 국한되어 있다.<sup>(5-7)</sup> 따라서 단순히 예측에만 그치지 않고 공정변수나 금형형상 등을 변화시켜 요구되는 기계적 성질을 만족하는 미세조직을 얻는 것이 보다 중요하다고 생각된다.<sup>(8-9)</sup>

따라서 본 연구의 목적은 미세조직 제어의 한 방법으로 탄소강 열간압출품의 미세조직분포를 균일하게 하여 기계적 성질을 향상시키기 위한 최적의 금형형상을 설계하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 베지어곡선(Bezier-curve)을 이용하여 정의된 금형형상에 대하여 미세조직변화 모델과 강-열점소성 유한요소법을 연계하여 열간변형동안 재료의 동적·정적재결정 거동 및 결정립 성장을 해석하였으며,<sup>(4)</sup> 열간압출품의 미세조직을 균일하게 하기 위한 최적의 금형형상은 최적설계기법인 FPS법을 이용하여 구하였다. 해석결과의 유용성을 검증하기 위하여 설계된 금형형상을 이용하여 열간압출실험을 수행하였으며, 미세조직의 균일화 정도를 해석결과와 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 강-열점소성 유한요소법

변형해석 및 온도해석을 위하여 강-열점소성 유한요소법을 이용하였다. 유한요소 수식화 과정은 이미 여러 문헌에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.<sup>(10)</sup>

비압축성조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function)  $K$ 를 도입하면 강-열점소성 재료에 대한 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_i \delta \dot{\epsilon}_i dV - \int_{S_f} F_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률속도,  $\dot{\epsilon}_i$ 는 체적 변형률속도,  $\delta v_i$ 는 임의의 변분이고,  $\delta \bar{\epsilon}$ 와  $\delta \dot{\epsilon}_i$ 는  $\delta v_i$ 로부터 유도되는 변형률속도의 변분을 나타낸다. 식(1)은 유한요소 이산화과정에 의해 비선형 대수방정식으로 변환되며, 비선형 대수방정식을 풀기 위해 뉴턴-랩슨법(Newton Raphson method)을 이용하였다.

온도해석의 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 평형방정식이다.

$$xT_{,ii} + \dot{q} - \rho c \dot{T} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $xT_{,ii}$ 는 열전달율,  $x$ 는 열전달계수,  $\dot{q}$ 는 열발생율,  $\rho c \dot{T}$ 는 내부에너지율을 나타낸다. 식(2)는 약적분형(weak integral form)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_V xT_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k(\bar{\sigma} \bar{\epsilon}) \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $\dot{T}$ 는 온도변화율,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $k$ 는 총에너지가 열로 바뀌는 비율을 나타내는 상수,  $q_n$ 은 경계면  $S_q$ 를 가로지르는 열유동을 나타낸다.

위의 식(3)을 유한요소 이산화과정을 거친 뒤 유한차분근사에 의해 선형화하여 온도장을 구한다. 온도변화는 재료의 성질에 영향을 미치므로 변형해석과 연계하여 계산하였다.

### 2.2 미세조직변화

본 연구에서는 C-Mn강의 조직변화를 예측하기 위해서 Yada와 Senuma<sup>(2)</sup>가 제안한 다음의 미세조직변화 모델을 사용하였다

2.2.1 동적재결정 모델

동적재결정은 주로 변형이 재결정을 일으키는 구동력으로 작용하며, 임계변형률 ( $\epsilon_c$ ) 이상의 변형을 받을 때 일어난다. 그 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_c = 4.7 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \quad (4)$$

$$d_{dyn} = 22600Z^{-0.27} \quad (5)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

$$X_{dyn} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^2\right] \quad (7)$$

$$\epsilon_{0.5} = 1.144 \times 10^{-3} d_0^{0.28} \dot{\epsilon}^{0.05} \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \quad (8)$$

여기서,  $\epsilon_c$ 는 동적재결정이 일어나기 위한 임계변형률,  $Z$ 는 Zener-Holloman 파라미터,  $d_{dyn}$ 은 동적재결정이 일어난 결정립 크기 ( $\mu m$ ),  $X_{dyn}$ 은 동적재결정률,  $\epsilon_{0.5}$ 는 재결정이 50% 발생했을 때의 변형률,  $d_0$ 는 초기 결정립 크기이다.

2.2.2 정적재결정 모델

정적재결정은 이전단계의 가공도와 온도에 주로 영향을 받으며, 그 모델은 다음과 같다.

$$X_{st} = 1 - \exp\left[-0.693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^2\right] \quad (9)$$

$$t_{0.5} = 2.2 \cdot 10^{-12} S_v^{-0.5} \dot{\epsilon}^{-0.2} \cdot \exp\left(\frac{30000}{T}\right) \quad (10)$$

$$S_v = \frac{24}{\pi d_0} (0.419e^\epsilon + 0.155e^{-\epsilon} + 0.1433e^{-3\epsilon}) \quad (11)$$

$$d_{st} = \frac{5}{(S_v \cdot \epsilon)^{0.6}} \quad (12)$$

여기서,  $X_{st}$ 는 정적재결정률,  $t_{0.5}$ 는 50%의 재결정이 일어날 때까지의 시간,  $S_v$ 는 단위체적당 차지하는 결정립 경계면적,  $d_{st}$ 는 정적재결정이 발생한 결정립의 크기( $\mu m$ )를 나타낸다. 위의 식에서 정적재결정은 초기 결정립 크기, 온도, 시간, 변형률 등에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

2.2.3 결정립 성장

재결정이 진행되면 재결정에 의한 새로운 입자 생성에 의해 조직이 미세하게 되고 입자들의 경계면적이 넓어지

므로 이를 유지하는데 높은 에너지가 요구된다. 따라서 이 에너지를 줄여 보다 안정한 상태로 변화하기 위하여 결정립 성장이 일어난다.

본 연구에서는 재료의 재결정이 일어난 후 재결정률이 95% 이상( $X_{dyn}, X_{st} \geq 0.95$ )인 경우에 결정립 성장이 일어난 것으로 고려하였다. 결정립 성장의 해석을 위해 다음과 같은 수식을 이용하였다.

• 동적재결정 후의 결정립 성장

$$d = d_{dyn} + 1.1y(d_{pd} - d_{dyn}) \quad (13)$$

$$y = 1 - \exp\left[-295\dot{\epsilon}^{0.1} \exp\left(\frac{-8000}{T}t\right)\right] \quad (14)$$

$$d_{pd} = 5380 \cdot \exp\left(\frac{-6840}{T}\right) \quad (15)$$

• 정적재결정 후의 결정립 성장

$$d^2 = d_{st}^2 + 1.44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (16)$$

2.3 미세조직 해석 및 균일화 판단

2.3.1 미세조직변화의 해석

열간압출에서 재료의 미세조직 변화를 해석하기 위해서는 열적-기계적 변수의 이력과 금속학적 인자에 대한 영향들을 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 강-열 점소성 유한요소법과 미세조직변화 예측모델을 연계하여 해석을 수행하였으며, 이러한 해석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 변형공정중의 유효변형률을 기준으로 동적재결정과 정적재결정을 판단하였다. 즉, 유효변형률값이 임계변형률값 이상에서는 동적재결정이, 임계변형률값 미만에서는 정적재결정이 일어나는 것으로 고려하였다. 따라서 변형공정동안의 매 스텝마다 임계변형률값을 기준으로 동적재결정과 정적재결정을 계산하였고, 재결정률에 따라 입자성장을 고려하였다. 각 스텝동안에 온도, 변형률, 변형률속도 등이 완전한 재결정이 일어날 정도로 충분하지 못할 경우에는 부분적인 재결정(partial recrystallization)이 일어나게 되어 미세조직은 재결정이 일어난 부분( $X_{rep}$ )과 일어나지 않은 부분( $1-X_{rep}$ )으로 분리된다. 이런 경우 다음 해석단계에서의 결정립 크기는 하나의 대표값으로 표현하여 해석된다.

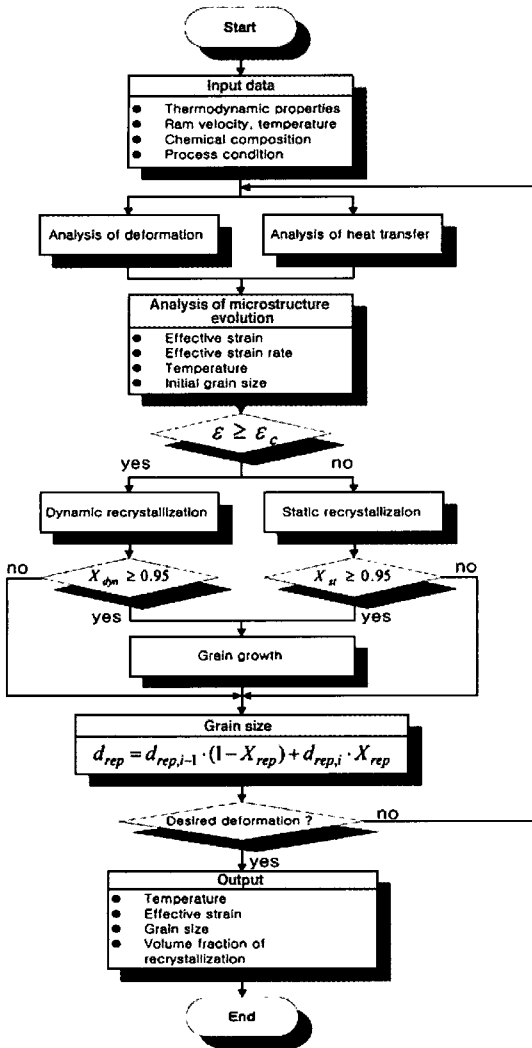


Fig. 1 Analysis procedure to predict microstructure evolution by the FEM

2.3.2 미세조직 균일화 판단

축대칭 열간압출에서 제품의 미세조직 균일화 정도를 판단하기 위해 압출된 부분에 일정 크기의 검사체적을 설정하여 체적에 대한 평균입경과 검사체적에 대한 결정립의 편차량(volume deviation : G)을 이용하였다. 즉, 평균입경은

$$d_{avg} = \frac{\sum d_i V_i}{V_{total}} \quad (17)$$

여기서,  $d_p$ ,  $V_i$ 는 각각 요소  $i$ 의 입경과 체적을 나타내고,

$V_{total}$ 은 검사체적의 전체 체적을 나타낸다. 따라서 검사체적에 대한 결정립크기의 편차량은 다음과 같이 표현하며, 이 값은 결정립의 균일화 정도를 나타낸다.

$$G = \frac{\sqrt{\sum (d_i - d_{avg})^2 \cdot V_i}}{V_{total}} \quad (18)$$

2.4 최적 금형형상의 설계

미세조직 균일화를 위한 최적 열간압출금형의 형상을 설계하기 위한 절차는 Fig. 2와 같다. 설계된 금형에 대하여 먼저 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 검사체적내 결정립의 편차량을 이전의 금형형상에 대한 결과와 비교·분석한 후, 금형의 형상을 수정하여 반복횟수에 따른 편차량의 변화가 거의 일정하게 되는 설계조건을 만족할 때까지 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 금형의 설계구간은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 소재의 변형이 일어나는 부분으로 설정하였다.

이상의 절차를 간략하게 나타내면 다음과 같다.

- 단계1: 초기 설계변수( $P_{(i,1)}$ ,  $P_{(i,2)}$ ,  $P_{(i,3)}$ ,  $i=1, 2, 3$ )들의 값을 가정하여 초기 금형형상들을 정의한다.
- 단계2: 생성된 초기 금형형상들에 대한 목적함수( $G_{1,j}$ ,  $1=$ 초기 금형형상,  $j=1, 2, 3$ )값을 계산한다.
- 단계3: 계산된 목적함수( $G_{1,j}$ )들의 값을 비교하여 최대값과 최소값을 찾고, 최적설계기법을 이용하여 새로운 금형형상을 정의한다.

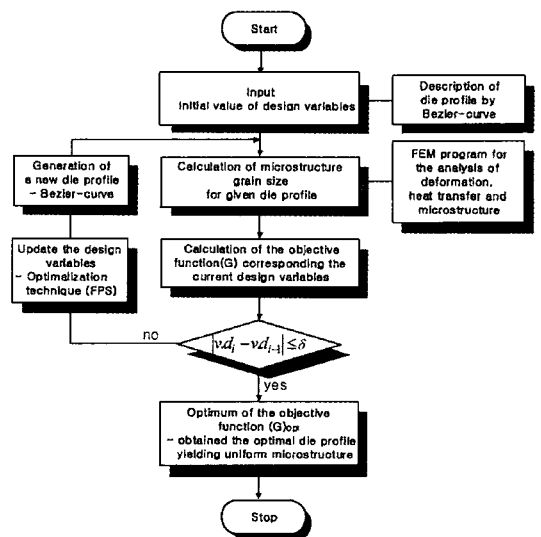


Fig. 2 Searching procedure of optimal die profile for the uniform microstructure

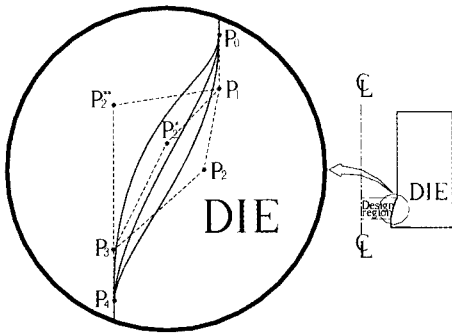


Fig. 3 Design region of die and change of Bezier-curve due to the location of a control point ( $P_i, P_i'$  : control point)

단계4: 새롭게 생성된 금형형상에 대한 목적함수( $G_i$ )값을 계산하여 이전의 목적함수값과 비교해,  $|G_i - G_{i-1}| \leq \delta$  ( $\delta$ 는 임의의 작은 양수)이면, 목적함수값이 수렴하였다고 판단하고 이때의 금형형상을 최적의 금형형상이라고 판단하였다.

단계5: 단계4의 조건이 만족되지 않을 경우, 단계3~단계4 과정을 적용하여 위의 조건이 만족 될 때까지 반복한다.

압출금형의 형상을 정의하기 위하여 주어진 초기소재의 치수와 압출품의 치수에 대하여 제어점(control points)과 직선요소(line segments)로 금형의 형상을 정의할 수 있는 베지어 곡선을 이용하였다.<sup>(12)</sup> 베지어 곡선은 제어점, 즉 곡선을 근사화하는 순서적인 점들의 집합을 사용하며, 이 점들은 사용자가 곡선을 예측 가능한 형상으로 조절할 수 있도록 한다.  $n+1$ 개의 제어점에 의하여 정의되는  $n$ 차의 베지어 곡선은 다음과 같은 형태의 매개변수 함수이다.

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t) \quad (19)$$

여기서, 벡터  $P_i$ 는  $n+1$ 개의 제어점을 나타낸다. 함수  $B_{i,n}(t)$ 는 베지어 표현을 위한 블렌딩 함수인데 번스타인 다항식(Bernstein polynomial)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (20)$$

여기서,  $n$ 은 다항식의 차수이다.

Fig. 3에서 하나의 제어점을 움직임으로써 베지어 곡선의 최종 형상에 의해 압출금형의 형상이 변화되는 것을 볼

수 있다.

최적의 금형형상을 찾는 최적설계기법으로는 목적함수가 최소가 되게 하는 벡터  $x$ 를 구하기 위해 심플렉스(simplex)가 목적함수  $f(x)$ 의 공간에서 목적함수를 더 작아지게 하는 쪽으로 이동해 가는 FPS법을 사용하였다.<sup>(11)</sup>

### 3. 유한요소 시뮬레이션

본 연구의 시뮬레이션에서는 미세조직 예측모델과 강-열점소성 유한요소법이 연계된 프로그램을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 시뮬레이션에 사용된 소재는 AISI 1030이며, 이러한 소재의 유동응력식은 Shida가 제안한 탄소강에 있어서 탄소의 함유량의 영향을 고려하여 열간평균변형저항을 변형률, 변형률속도, 온도의 함수로 표현한 식을 사용하였다.<sup>(13)</sup> 소재의 치수는 직경이 14 mm, 높이가 15 mm이며, 초기 온도는 1200℃로 균일하다고 가정하였다. 금형의 재질은 SKD 61이고, 초기 온도는 모두 300℃로 예열된 상태에서 시뮬레이션을 수행하였다. 펀치의 속도는 30 mm/s이고, 소재와 금형사이의 마찰을 고려하기 위해 마찰상수는 0.3으로 두었다. 이상의 시뮬레이션 조건과 소재 및 금형에 대한 열적 물성치들을 Table 1에 나타내었다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 압출

Table 1 Process parameters and properties

Process parameters and properties	Value
Dimension of workpiece	14 x h15 (mm)
Material of workpiece	AISI 1030
Material of die	SKD 61
Temperature of workpiece	1200 ℃
Temperature of dies	300 ℃
Ram velocity	30 mm/s
Reduction in Area	38.3 %
Friction factor (m)	0.3
Temperature of surrounding medium	20 ℃
Thermal conductivity of workpiece	36.8 N/(s · K)
Thermal conductivity of dies	28.4 N/(s · K)
Material property of workpiece( $\rho_c$ )	3.77 N/(mm <sup>2</sup> · K)
Material property of dies( $\rho_c$ )	4.0 N/(mm <sup>2</sup> · K)
Heat Trans. Coeff. during extrusion	4.0 N/(s · mm · K)
Heat Trans. Coeff. during medium	0.0029 N/(s · mm · K)
Radiation property ( $\sigma\epsilon$ )	$8.5 \times 10^{12}$ N/(s · mm · K)

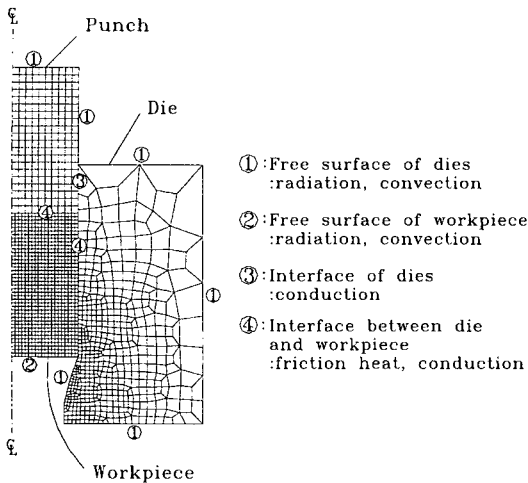


Fig. 4 Initial mesh system and temperature boundary conditions

금형의 형상 변화에 따른 미세조직의 균일화정도를 파악하기 위해 금형형상 이외의 다른 공정변수들은 일정하게 유지하였다.

열간압출품의 미세조직을 해석하기 위해 본 시뮬레이션에서 사용한 유한요소 격자시스템과 그에 따른 온도 경계조건은 Fig. 4에 나타내었다. 또한 시뮬레이션에 이용된 소재의 초기 결정립 크기는 1200℃로 20분간 유도가열한 뒤, 바로 수냉시킨 후 전체단면에 대한 평균 결정립크기를 취하였으며, 그 크기는 300 $\mu$ m이다. 시뮬레이션은 비정상상태의 열간압출공정이 정상상태에 도달할 때까지 수행하였다.

#### 4. 열간압출실험

열간압출공정에서 설계된 금형에 대한 해석결과를 검증하기 위하여 실제 열간압출실험을 실시하였다. 압출실험에 사용된 장치는 Photo. 1과 같이 유압식 25ton MTS(Material Test System)를 사용하였으며, 기타 조건들은 시뮬레이션조건과 동일하게 하였다. 소재는 유도가열로를 이용하여 1200℃로 가열되었고, 펀치와 금형은 MTS에 부착된 노를 사용하여 300℃로 예열되었다. 실험은 최적의 금형형상을 찾아가는 과정을 보여주기 위하여 Photo. 2와 같이 금형을 초기, 중간단계, 그리고 최종으로 설계된 마지막 단계의 세 가지에 대하여 실시하였으며, 각각의 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

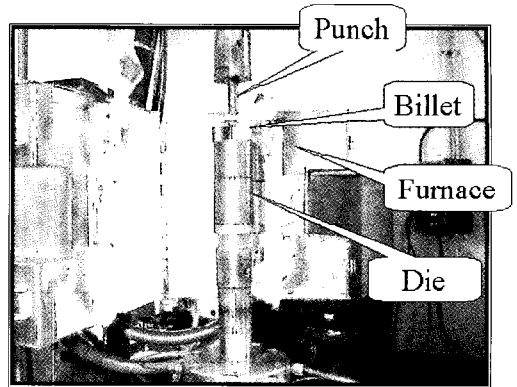


Photo. 1 Experiment equipment of hot extrusion

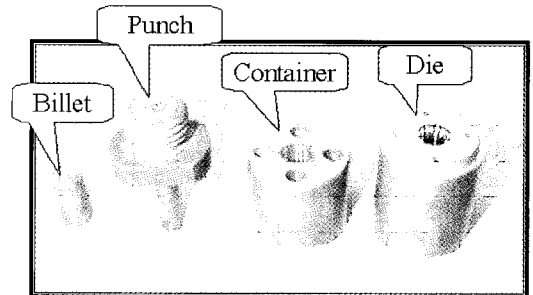


Photo. 2 Die-set for hot extrusion

### 5. 결과 및 고찰

앞서 언급한 Fig. 2의 최적설계절차를 이용하여 반복횟수에 따른 검사체적내의 결정립크기의 초기 금형형상에 대한 상대편차량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 반복횟수가 증가함에 따라 상대편차량이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 반복횟수 13번째 이후에는 거의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 반복횟수 15번째의 금형형상이 미세조직을 가장 균일하게 하는 최적의 압출금형형상으로 판단하였다.

비정상상태의 열간압출공정이 정상상태(편치행정: 약 13 mm)에 도달했을 때 반복횟수에 따른 변형된 유한요소격자와 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 중심부는 약간의 변화가 있지만 금형의 형상에 따른 온도분포는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 초기 소재의 치수에 비해 펀치의 속도가 상당히 빨라 성형시간이 짧으므로 열전달현상이 거의 비슷하게 일어나기 때문에 나타난 결과라고 생각된다.

Fig. 7은 반복횟수에 따른 변형률속도와 변형률의 분포를 나타내었다. Fig. 7에서 최적의 금형형상으로 접근할수록 압출금형의 출구부에서 변형률속도 분포가 더 균일해 짐을 알 수 있고, 변형률 또한 압출된 영역에서 보다 더 균일해 짐을 알 수 있다. 변형률의 분포는 반복횟수에 상관없이 압출품의 중심부보다 표면에서 더 높음을 알 수 있으며, 최적의 금형형상으로 접근할수록 높은 변형률을 나타내는 영역이 표면쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 본 연구에서 금형의 랜드부를 빠져 나온 부분의 유효변형률 분포로부터 정상상태의 변형거동을 확인할 수 있으므로 이 영역에 검사체적을 설정하여 결정립의 균일화 정도를 판단하였다.

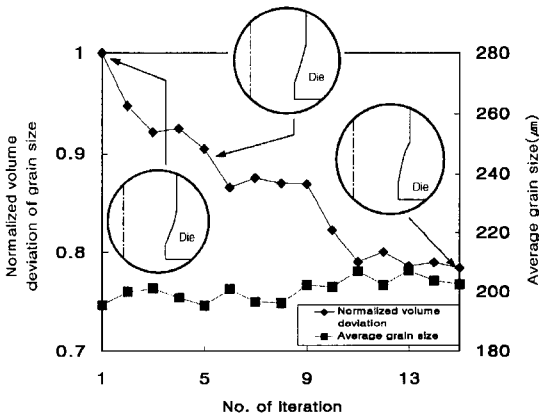


Fig. 5 Variation of normalized deviation of grain size with the corresponding die profile and average grain size for No. of iteration

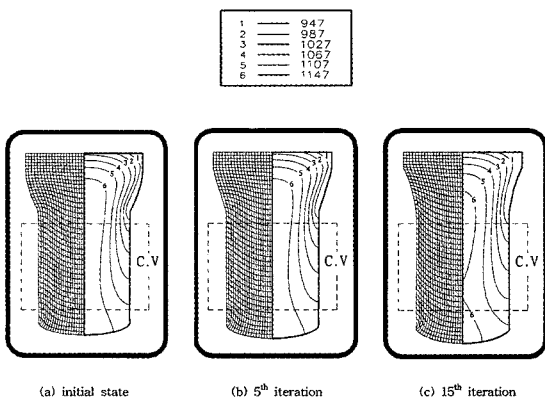


Fig. 6 Deformed mesh[on left] and distribution of temperature(°C)[on right] D.V:Control volume

Fig. 8에 각각의 반복횟수에 따른 재결정률과 재결정된 결정립 크기의 분포를 나타내었으며, 압출품 표면의 재결정률이 중심부에서의 재결정률 보다 더 높음을 알 수 있다. 또한 높은 재결정률에 의해 결정립 크기가 작아진 영역이 표면으로 이동하며 재결정률의 분포와 결정립 크기의 분포가 잘 일치함을 알 수 있다. 압출품의 중심부에서 변형률과 변형률속도는 작지만 높은 온도에 의하여 발생한 재결정률보다 상대적으로 온도는 낮지만 큰 변형률과 변형률속도에 의하여 발생한 표면의 재결정률이 더 높음을 알 수 있다. 따라서 압출품 표면의 변형률과 변형률속도의 재결정에 대한 영향이 중심부의 온도가 재결정에 미치는 영향보다 더욱 크게 작용하여 표면부에서 높은 재결

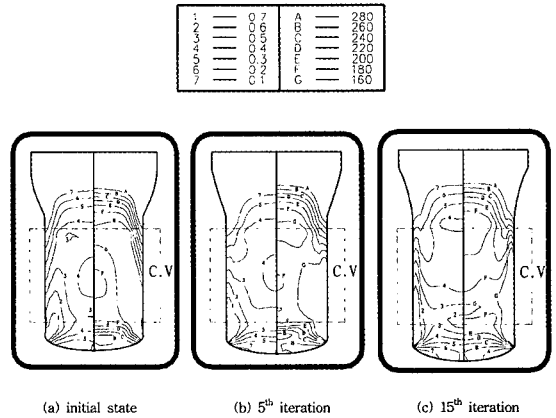


Fig. 7 Distributions of strain rate[on left] and retained strain[on right] D.V:Control volume

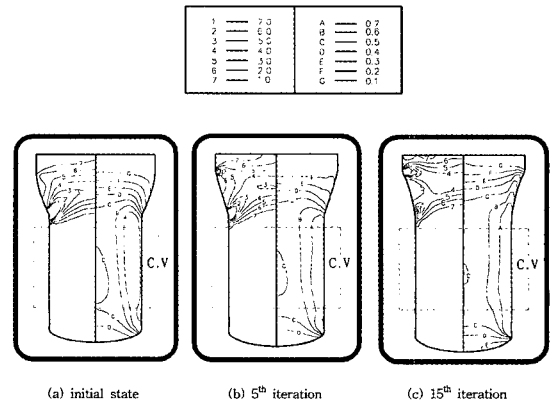


Fig. 8 Distributions of volume fraction of recrystallization[on left] and grain size[on right] D.V:Control volume

정률이 존재함을 알 수 있다. 본 시뮬레이션 조건하에서는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 금형형상에 따른 온도분포는 거의 비슷하였으나, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 변형률분포와 특히 변형률속도분포에는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 주어진 압출공정중의 재결정거동은 온도보다도 변형률과 변형률속도분포 차이에 의해 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 압출금형 출구부의 변형률속도가

보다 균일하고, 압출품에서 변형률의 분포가 보다 균일할수록 더욱 균일한 미세조직을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

모든 시뮬레이션결과에서 검사체적내 미세조직의 평균 결정립 크기는 Fig. 6에서 보듯이 195  $\mu\text{m}$ ~207  $\mu\text{m}$ 사이의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이로부터 같은 공정조건하에서도 금형의 형상변화만으로는 평균결정립의 크기에는 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Photo. 3은 열간압출실험으로 가공된 소재를 나타내며, Photos. 4~6은 세 가지 금형형상에서 가공된 압출품의 부위별 미세조직을 나타낸 사진들이다. Photo. 4는 초기 금형형상에 대한 결과로서 온도가 높은 내부영역(③)과 변형량이 많은 표면부(④, ⑥)에서의 결정립의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있고, 부분과 부분도 Fig. 9의 시뮬레이션결과와 같이 낮은 재결정률에 의하여 결정립의 크기가 큰 것을 확인할 수 있다. Photo. 5는 반복횟수 5번째의 금형형상에 대한 결과로서, Photo. 4의 결과에 비해 결정립의 크기에는 다소 차이가 있지만, 그 경향은 비슷하다. Photo. 6은 최적이라고 판단된 금형형상에 대한 결과로서 부분의 결정립의 크기가 나머지 부분에 비하여 상대

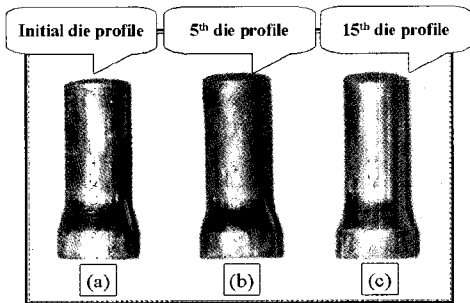


Photo. 3 Hot extruded product at each iteration  
 (a) Initiate state  
 (b) 5th iteration  
 (c) 15th iteration

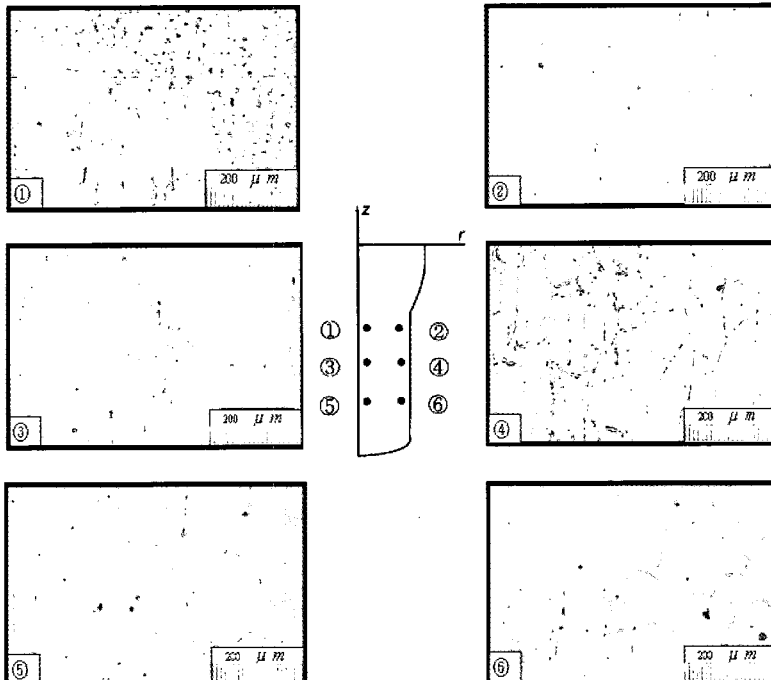


Photo. 4 Microstructure of initial die profile



열간압출품의 미세조직 균일화를 위한 최적 금형설계

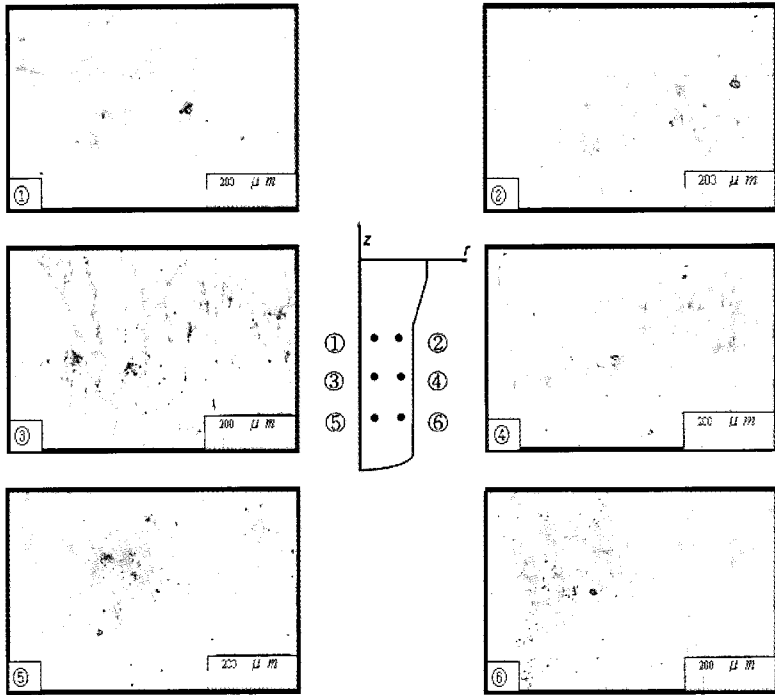


Photo. 5 Microstructure of 5th die profile

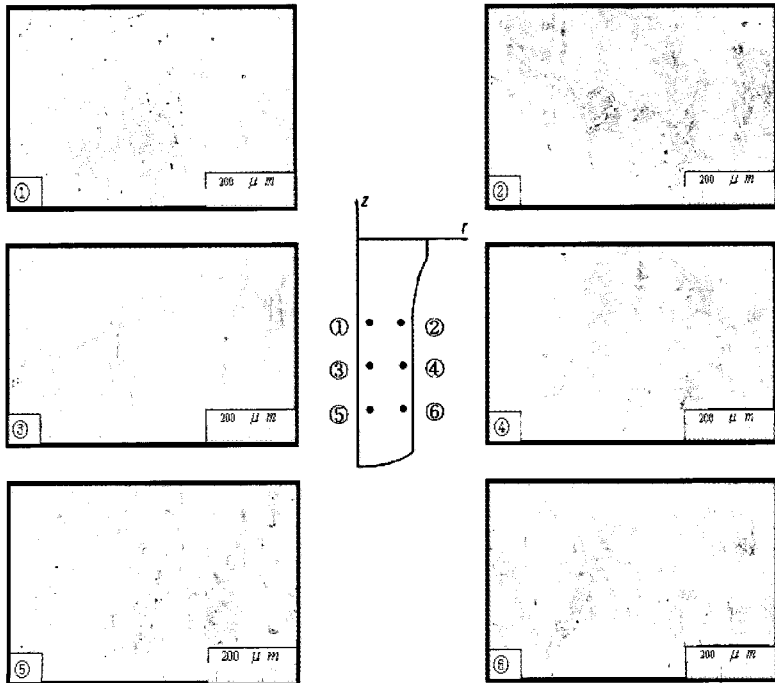
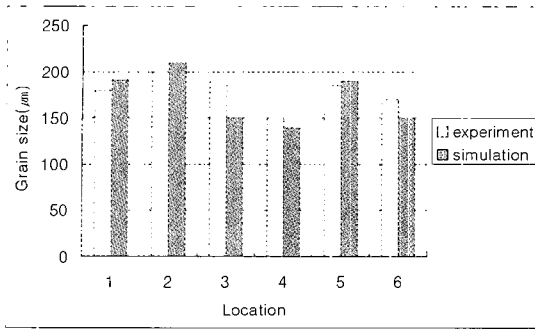
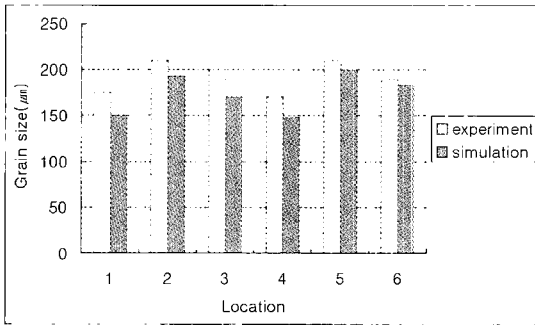


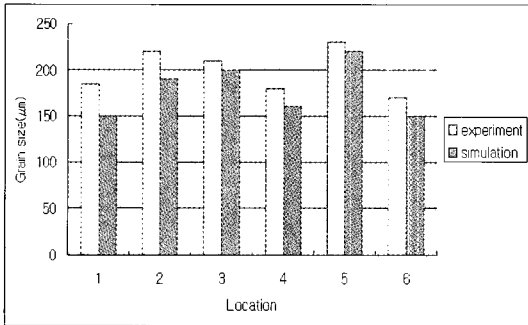
Photo. 6 Microstructure of 15th die profile



(a) grain size for initial die profile



(b) grain size for 5th die profile



(c) grain size for 15th die profile

Fig. 9 Comparison of grain size between simulation and experiment at each portion

적으로 크게 나타났지만, 결정립 크기의 분포는 나머지 두 금형형상의 결과보다 더 균일하다는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 각각의 부위별 미세조직은 와 부분이 높은 재결정률에 의하여 결정립의 크기가 다른 영역에 비하여 작아진 것을 볼 수 있고, 이는 앞서 언급한 시뮬레이션 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9에 각각의 금형형상에 따른 결정립 크기를 각 부위별로 시뮬레이션결과와 실험결과를 정량적으로 비교하여 나타내었다. 초기 금형형상의 ①, ②, ⑤부분을 제외한 나머지 부분과 5번째, 15번째의 금형형상에 대한 모든 부분에서 실제 실험에 의한 결정립의 크기 보다 시뮬레이션 결과에 의한 결정립의 크기가 더 작음을 알 수 있다. 그 이유는 시뮬레이션시에는 소재를 가열장치에서 금형으로 이동할 때 발생하는 냉각효과를 고려하지 않았기 때문에 실제 실험조건보다 소재의 온도가 더 높아 재결정이 보다 활발하게 진행되었기 때문에 나타난 결과로 사려된다. 실험결과와 시뮬레이션결과와의 차이는 약 40 μm이내의 값을 나타내었으며, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 그 경향은 잘 일치함을 확인할 수 있다.

실험결과에서도 알 수 있듯이 소재내에서 변형률이 높고 변형률속도가 큰 부분이 보다 재결정률이 높아 결정립의 크기가 더 작아짐을 확인할 수 있었다. 수치 시뮬레이션결과와 정량적인 측면에서 정확하게 일치하지는 않았지만, 어느 정도 타당한 결과를 확인할 수 있었으며, 정성적인 측면에서는 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 열간압출품의 미세조직을 균일하게 하여 기계적 성질을 향상시키기 위한 한 방법으로 재결정 모델과 강-열점소성 유한요소법을 연계한 프로그램으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 열간압출 실험결과와 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 재결정모델, 강-열점소성 유한요소법, 최적설계기법, 그리고 금형형상을 정의하기 위한 베지어 곡선을 이용하여 보다 균일한 미세조직을 가진 제품을 생산할 수 있는 열간압출금형의 형상을 설계할 수 있었다.

(2) 압출품 표면의 변형률과 변형률속도의 재결정에 대한 영향이 중심부의 온도가 재결정에 미치는 영향보다 더욱 크게 작용하여 표면부에서 높은 재결정률이 존재하였다.

(3) 압출금형 출구부의 변형률속도가 보다 균일한 내부로 불룩한 형상의 금형에서 미세조직이 더욱 균일하다는 것을 알 수 있었다.

(4) 열간압출공정의 공정조건이 일정한 상태에서 금형의 형상변화는 미세조직의 평균결정립 크기에는 커다란 영향을 미치지 않지만 그 분포에는 상당한 영향을 미침을 알 수 있었다.

(5) 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위하여 열간 압출 실험을 수행하였으며, 실험결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(6) 본 연구에서 적용한 해석방법은 제품의 미세조직을 균일하게 하여 기계적 성질을 더욱 향상시키기 위한 여러 가지 다른 공정에도 유용하게 적용될 수 있으므로 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) C. M. Sellars and J. A. Whiteman, 1979, "Recrystallization and grain growth in hot rolling", *Metal Science*, Vol. 13, pp. 187~194.
- (2) H. Yada and T. Senuma, 1986, "Resistance to hot deformation of steel", *J. JSTP*, Vol. 27, pp. 34~44.
- (3) 광우진, 이경종, 권우준, 황상무, 1996, "열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석", *한국소성가공학회지*, Vol 7, pp. 305~319.
- (4) 장용순, 고대철, 김병민, 1998, "유한요소법에 의한 열간성형공정에서 강의 미세조직변화 예측", *한국정밀공학회지*, Vol. 15, pp. 128~138.
- (5) M. Pietrzyk, Z. Kedzierski, J.G. Lenard, M. Tajima, J. Majta, 1994, "Multistage compression of microalloyed steels - FE simulation and measurements of grain size", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, pp. 509~514.
- (6) S. G. Xu, and Q. X. Cao, 1994, "Numerical simulation of the microstructure in the ring rolling of hot steel", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 43, pp. 221~235.
- (7) 조현중, 김낙수, 1995, "열간압연중 발생하는 미세조직 변화에 관한 연구", *한국소성가공학회 '95추계 학술대회 논문집*, pp. 16~29.
- (8) J. C. Malas, R. D. Irwin and R. V. Grandhi, 1993, "An innovative strategy for open loop control of hot deformation processes", *JMEPEG*, Vol. 2(5), pp. 703~714.
- (9) H. Cheng, R. V. Grandhi and J. C. Malas, 1994, "Design of optimal process parameters for non-isothermal forging", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 37, pp. 155~177.
- (10) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, *Metal forming and the finite element method*, Oxford University Press.
- (11) D. M. Himmelblau, 1972, *Applied nonlinear programming*, McGraw-hill.
- (12) V. B. Anand, 1996, *Computer graphics and geometric modeling for engineers*, John Wiley & Sons.
- (13) S. Shida, 1969, "Empirical formula of flow stress of carbon steel-resistance to deformation of carbon steels at elevated temperature", *J. JSTP*, Vol. 10, pp. 610~617.