

온, 열간 단조의 구성방정식에 관한 연구

강 종 훈* · 박 인 우** · 제 진 수*** · 강 성 수****

A Study on Constitutive Equations for Warm and Hot Forging

Jong Hun Kang*, In Woo Park**, Jin Soo Jae***, Seong Soo Kang****

ABSTRACT

Simulations of warm and hot forming processes need reliable expressions of flow stress at high temperatures. To get flow stress of the materials usually tension, compression and torsion tests are conducted. In this study, hot compression tests were adopted to get flow stress of medium carbon steel. Experiments have been conducted under both isothermal, near constant strain rate in the temperature ranges 650~1000°C. Phase transformation takes place by temperature changes for steels in hot and warm forging stage. So Constitutive equation are formulated as the function of strain, strain rate and temperature for isothermal conditions and phase transformation.

Key Words : Hot Forging(열간단조), Warm Forging(온간단조), Constitutive Equation(구성방정식), Phase Transformation(상변태), Recrystallization(재결정)

1. 서 론

산업현장에서 적용범위를 넓혀가고 있는 유한요소법에 의해 보다 정밀한 결과를 얻기 위해서는 소재의 물성치를 정확하게 구하는 것이 중요하다. 하지만 냉간 유동응력식과는 달리 온, 열간의 경우 유동응력은 변형률 속도, 변형률, 온도와 성형시 상변태 등의 복잡한 변수에 의하여 영향을 받기 때문에 지금까지의 연구결과는 한정된 영역에서 적용 가능한 것이 대부분이었다.

일반적으로 구성방정식은 재료의 소성거동을 지배하는 내부인자와 변형률, 변형률속도, 온도등과의 관계를 말한

다⁽¹⁾. 이러한 고온 상태에서 소재의 구성방정식에 대하여 Sellars⁽²⁾는 열간 롤링공정에서의 정상상태 금속유동응력식을 제안하였고, Rao⁽³⁾⁻⁽⁵⁾는 열간단조에서 적용이 용이한 중탄소강을 압축실험하여 Arrhenius 형태의 구성방정식을 제안하고, 변수를 제어하여 이전의 변형이력을 다음의 변형에 영향을 미치도록 하였다. Wahlen등⁽⁶⁾은 구리합금을 이용하여 고온상태의 구리유동에 대해 연구하였다. Lin등⁽⁷⁾은 냉간상태에서 저탄소강의 냉간성형공정에 의한 발열을 고려하기 위하여 상온에서 청열취성 아래 온도까지의 재료거동을 변형률속도, 온도에 의한 영향을 고려하여 나타내었다.

* (주)센트랄
** 부산대학교 대학원, 정밀기계공학과
*** (주)만도기계
**** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

Yada⁽⁸⁾는 복잡해지는 롤링공정에서 소재의 거동을 보다 정밀하게 예측하기 위하여 야금학적인 연구 결과를 토대로 전위의 이동, 열연화, 합금원소의 확산 등의 미시적인 연구와 압축실험에서 구한 거시적인 연구내용을 접목시켜 전단계 롤링공정에서의 변형이력을 다음단계에서 적용코자 하였다. Yoshino⁽⁹⁻¹¹⁾는 스테인레스강을 이용하여 α 와 γ 철의 2상영역에서의 회복, 변태, 온도, 변형률속도, 변형의 이력을 고려한 구성방정식을 도입하였다.

위에서의 연구자들은 주로 같은 상의 조직이나 2상영역에서의 재료거동을 수식화하였다. 하지만 이러한 구성방정식은 성형중 발생하는 온도변화로 인하여 상변태가 발생하는 경우의 재료물성을 정확하게 기술하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 변태점 전후에서 성형이 시작되는 중간단조와 1000℃이상의 온도에서 성형되는 열간단조에서 적용될 수 있는 구성방정식을 상변태를 기준으로 구분하여 구성방정식을 정식화하는 것에 주안점을 두었다.

2. 고온 압축 실험 및 결과

고온상태의 물성을 얻기 위하여 공시재인 SM45C를 이용하였다. SM45C의 성분은 Table 1과 같다. 고온압축실험은 $\phi 5 \times h 7(mm)$ 로 가공된 시편을 이용하여 MTS(Material Test System)에 전기로를 부착하여 시험하였다. 실험과정은 Fig.1과 같이 1000℃로 가열하고 5분 동안 유지한 후, 시험온도까지 로냉하여 압축하였다. 시험은 변형률 민감도를 고려하기 위하여 변형률속도 0.1/s, 4/s로 압축하였으며, 온도는 변태점 전후의 유동응력을 고려하기 위하여 650, 675, 700, 725, 750, 775, 800, 900, 1000℃로 하였다.

공시재인 SM45C를 이용한 압축실험의 결과를 온도와 변형률속도에 따라 Fig.2에 정리하였다. Fig.2의 결과는 탄소강의 평형상태도를 참조하면 650, 675, 700℃는 α 철의 영역에 있고, 725, 750, 775℃는 $\alpha+\gamma$ 철의 2상영

역에 있다. 그리고 800, 900, 1000℃의 결과는 γ 철의 영역에 존재하여 철의 상변태에 따른 유동응력의 변화를 볼 수 있다. 각 온도와 변형률속도에 따른 유동응력의 전체적인 변화를 살펴보기 위하여 주어진 온도와 변형률속도에서의 유동응력의 평균치와 압축 시편의 미시조직을 Fig.3(a), (b)에 나타내었다. Fig.3(a), (b)에서 SM45C의 유동응력은 α 와 γ 철의 경우 온도가 증가함에 따라 전체적으로 감소하고, 변형률속도가 증가할수록 증대됨을 알 수 있다. 하지만 $\alpha+\gamma$ 의 2상영역에서는 온도가 증가함에 따라 유동응력이 증대되는 현상이 나타나고 있다.⁽¹²⁾

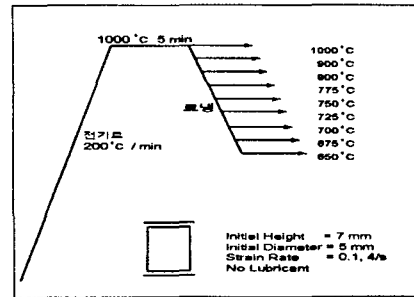


Fig. 1 Schematic diagram of thermal -mechanical test conditions

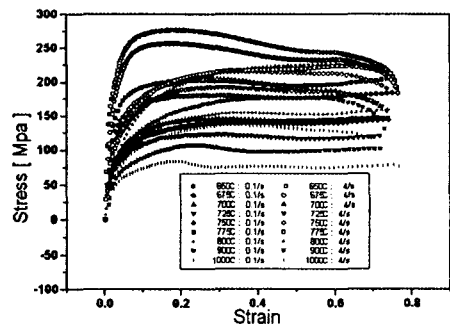


Fig. 2 Stress-strain curves for various temperature and strain rate

Table 1 Chemical Composition of SM45C (wt %)

Material	Chemical Composition					Mechanical Properties		
	C	Si	Mn	P	S	Y.P (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	Hardness (H.B)
SM45C	0.42 ~ 0.48	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.96	≤0.03	≤0.035	35	58	167~229

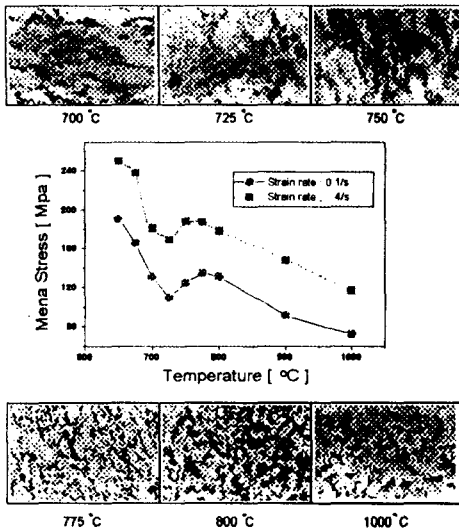


Fig. 3(a) Mean stress diagram and mirco structure for various temperature (0.1/s)

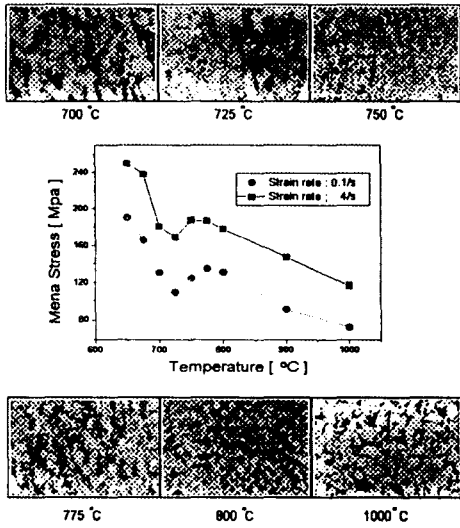


Fig. 3(b) Mean stress diagram and mirco structure for various temperature (4/s)

3. 구성방정식의 전개

본 연구에서 적용한 구성방정식은 α 와 γ 철의 단상영역에서는 Arrhenius형태의 구성방정식으로, 열간성형공정에서 Sellars, Targart와 Rao가 주장한 형태를 채택하였다. $\alpha+\gamma$ 의 2상영역에서는 Yoshino가 제안한 수식을 이용하여 725°C에서의 유동응력을 기준으로 하였다.

3.1 단상에서의 구성방정식의 전개

Arrhenius형태의 구성방정식⁽³⁻⁵⁾은 Hyperbolic sine의 형태로 응력의 크기를 조절하여 소재의 초기변형에서의 응력 변화를 정확하게 예측할 수 있고, 제안된 수식에서의 변수를 동일한 형태로 전개할 수 있다는 이점이 있다.

일반적으로 정상상태 유동응력과 피크응력에 대한 온도와 변형률속도의 영향은 다음과 같은 형태로 표현이 가능하다.

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

식(1)은 온도와 변형률속도에 따른 파라메타인 제너홀로만 파라미터(Z)로 용이하게 나타낼 수 있다.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (2)$$

활성화 상수인 A, n, Q는 실험적으로 구한 응력 - 변형률 data에서 다음과 같은 방법으로 구할 수가 있다.

① 식(1)에 자연로그를 취한다.

$$\ln(\dot{\epsilon}) = \ln(A) + n\ln(\sinh(\alpha\sigma)) - \frac{Q}{RT} \quad (3)$$

② 주어진 온도와 변형률속도에서 $\ln(\dot{\epsilon})$ versus $\ln(\sinh(\alpha\sigma))$ 로부터 속도민감계수(n)을 구한다.

$$n = (d\ln\dot{\epsilon})/(d\ln\sigma) \quad (4)$$

③ 식(3)을 1/T에 대하여 미분하면 주어진 변형률속도에서 온도민감계수(T_p)를 얻을 수 있고 이를 이용하여 활성화에너지(Q)를 구한다.

$$T_p = (d\ln\sigma)/d(1/T) \quad (5)$$

$$Q = Rn \frac{d\ln(\sinh(\alpha\sigma))}{d(1/T)} \quad (6)$$

④ 상수 $\ln(A)$ 는 앞에서 구한 수식을 대입함으로써 구할 수 있다.

⑤ 앞에서 구한 수식을 이용하여 구성방정식을 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \text{Ln}\left(P + \sqrt{P^2 + 1}\right) \quad (7)$$

where, $P = \sinh(\alpha\sigma) = \left[\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT} - \text{Ln}(A)\right)\right]^{\frac{1}{n}}$

3.2 단상에서의 구성방정식의 정식화

단상의 구성방정식은 일정한 속도민감계수, 활성화에너지, 상수 Ln(A)의 값을 식(8)의 형태로 놓을 수 있다. 3.1절에서 제시한 순서에 따라서 α상과 γ상에서의 구성방정식을 구하였다.

$$Y = \frac{A_i}{\epsilon^{B_i}} + C_i \quad (8)$$

650, 675, 700℃와 800, 900, 1000℃에서 압축실험한 결과를 총 21개의 변형률 표점에 대하여 속도민감계수를 구하였다. 식(4)에 의하여 구한 결과는 α상과 γ상에 대하여 Fig.4(a),(b)와 같다. 구한 결과를 식(8)과 같은 형태로 나타내면 α상과 γ상에 대하여 각각 식(9),(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_\alpha = \frac{0.0341}{\epsilon^{1.4162}} + 5.008 \quad (9)$$

$$n_\gamma = \frac{0.2340}{\epsilon^{1.1108}} + 4.066 \quad (10)$$

식(9)와 식(10)을 이용하여 식(6)과 같이 활성화 에너지를 구하면 Fig.5(a),(b)와 같이 나타낼 수 있고 식(8)과 같은 형태로 나타내면 식(11),(12)와 같다.

$$Q_\alpha = \frac{14.4232}{\epsilon^{1.0821}} + 308.171 \quad (11)$$

$$Q_\gamma = \frac{0.01142}{\epsilon^{2.4283}} + 157.475 \quad (12)$$

앞에서 구한 식(9)~(12)을 식(3)에 대입하면 α상과 γ상에 대하여 Ln(A)의 값을 Fig.6 (a),(b)로 각각 나타낼 수 있고, 그 결과는 식(13),(14)와 같다.

$$\text{Ln}(A)_\alpha = \frac{2.4921}{\epsilon^{1.0886}} + 45.284 \quad (13)$$

$$\text{Ln}(A)_\gamma = \frac{0.0343}{\epsilon^{1.7876}} + 18.243 \quad (14)$$

식(9)~(14)의 결과를 식(7)에 대입하면 α상과 γ상의 유동응력식을 구할 수가 있다. 구한 식에 의하여 변형률속도, 온도, 변형률에 대하여 계산된 결과와 실험에 의하여 구한 결과를 비교하면 α상에 대하여 Fig.7과 같고, γ상에 대하여 Fig.8과 같다.

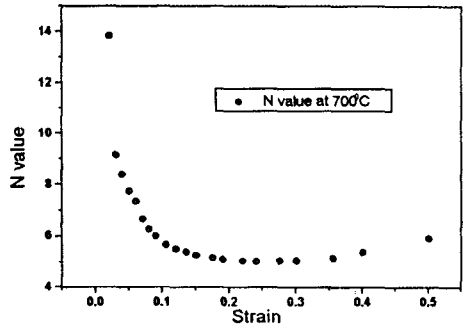


Fig. 4(a) Variation of strain rate sensitivity parameter n at α phase of SM45C

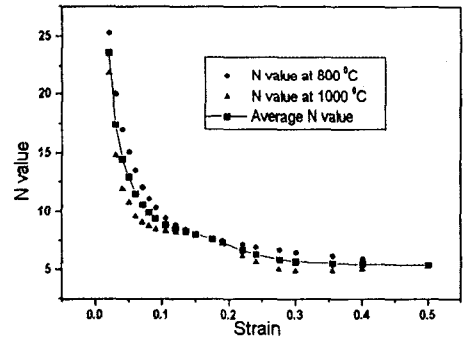


Fig. 4(b) Variation of strain rate sensitivity parameter n at γ phase of SM45C

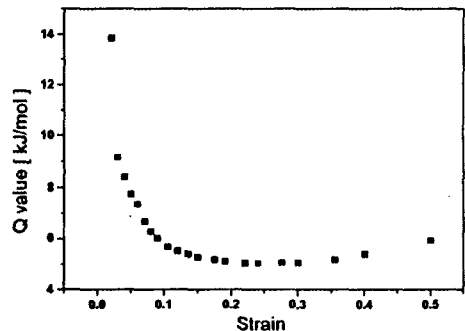


Fig. 5(a) Variation of activation energy (Q) at α phase

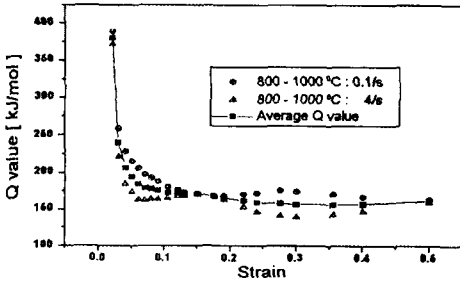


Fig. 5(b) Variation of activation energy (Q) at γ phase

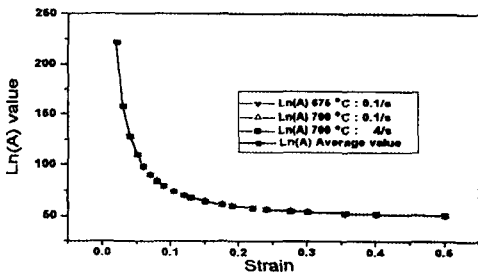


Fig. 6(a) Variation of Ln(A) at α phase

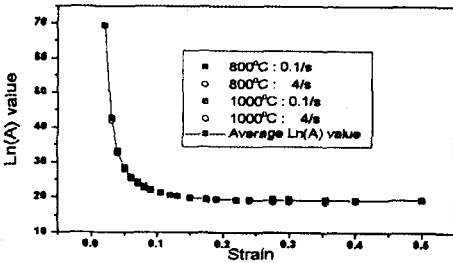


Fig. 6(b) Variation of Ln(A) at γ phase

3.3 2상에서의 구성방정식의 구성

$\alpha + \gamma$ 의 2상영역에서의 유동응력의 거동은 온도와 변형률속도가 증가할수록 증대되고 있어 단상영역에 적용된 구성방정식의 형태로는 정식화하는 것이 불가능하다. 따라서 2상에서의 구성방정식은 변형률속도와 온도의 영향을 동시에 고려하면서 온도의 증가에 의하여 유동응력이 증가됨을 나타내어야 한다. 따라서 725℃의 유동응력의 상태를 2상영역의 기준으로 하고, Fig.3에서 구한 온도에 따른 평균유동응력의 변화를 수식화하여 그 변수에 의하여 온도의 영향을 나타내도록 식(15)의 형태로 2상영역에서의 구성방정식을 전개하였다⁽⁹⁻¹¹⁾.

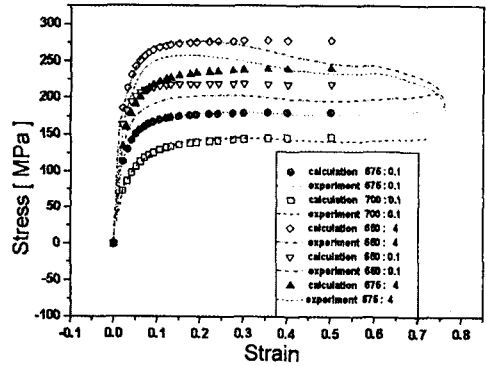


Fig. 7 Comparison of experimental results and calculated results at α phase

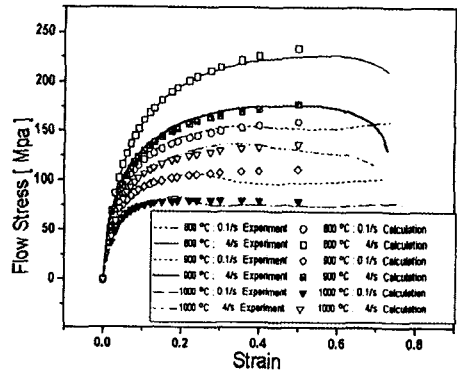


Fig. 8 Comparison of experimental results and calculated results at γ phase

$$\sigma_{\alpha+\gamma} = \sigma_{st} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)^m \frac{A(T)}{A_{st}} \quad (15)$$

변형률속도 민감계수 m의 값은 동일한 온도에서 평균응력의 크기의 비로 구할 수 있고, A(T)는 평균응력의 온도에 의한 3차식으로 나타내었다. 725℃에서의 평균응력 σ_{st} 는 109.6 [MPa]로 A_{st} 와 동일한 값이다. 앞에서 설명한 바와 같이 속도 민감계수를 구하면 $m=0.1175$ 이고, A(T)는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(T) = 114353.7 - 455.7 T + 0.605 T^2 - 0.00027 T^3 \quad (16)$$

따라서 2상영역에서의 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_{st} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.1} \right)^{0.1175} \frac{A(T)}{109.6} \quad (17)$$

여기서, σ_{st} 는 온도 725℃, 변형률속도 0.1/s에서의 유동응력이다.

따라서, 식(17)에 의하여 구한 구성방정식의 결과와 실험에서 구한 결과를 비교하면 Fig.9와 같이 나타나고 실험치와 근사함을 알 수가 있다.

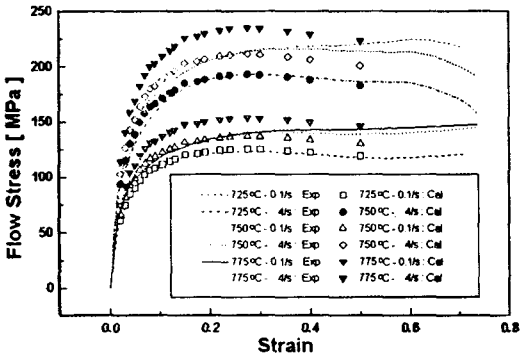


Fig. 9 Comparison of experimental results and calculated results at $\alpha+\gamma$ phase

4. 구성방정식의 고찰

상변태에 따른 구성방정식을 구하기 위하여 실시한 압축실험을 통한 전체적인 응력 평균치의 추이 및 압축시편의 조직사진을 Fig.3(a),(b)에 나타내었다. 본 연구에서의 추이를 살펴보면 γ 상의 영역인 800℃ 이상의 경우에는 온도가 증가할수록 유동응력이 점차적으로 감소하고 있음을 발견할 수가 있다. 또한 α 상의 영역에서도 온도가 증가함에 따라 감소하고 있다. 따라서 α 상과 γ 상의 경우 일반적으로 적용되고 있는 온도와 변형률속도, 변형률의 함수로 구성방정식을 정립할 수가 있다. 하지만 $\alpha + \gamma$ 상의 경우에는 온도가 증가함에 따라 유동응력의 평균치가 증가하고 있다.

이와 같이 α 상과 γ 상에서 온도가 증가함에 따라 유동응력이 감소하는 경향은 전위의 이동으로 설명이 가능하다. 상변화를 포함하지 않는 온도구간에서 온도에 의한 원자의 활성화에너지의 증가에 의하여 원자의 진동수가 상온에 비하여 높아지고, 높은 활성화에너지에 의하여 원자간의 결합에너지가 감소함으로 인하여 낮은 하중에서도 전

위의 이동이 용이하여 유동응력이 낮아지게 된다. 또한 온도가 증가함에 따라 일반적으로 원자의 크기가 증가하므로 전위의 이동을 억제하는 효과가 낮아지기 때문이다.

α 와 γ 의 2상영역에서 유동응력이 온도가 증가함에 따라 증가하는 현상은 단일상에서와 같이 전위의 이동과 압축시편의 단면조직을 살펴보면 설명이 가능하다. Fig.3(a),(b)는 온도와 변형률속도에 따른 평균유동응력과 변형부의 미시조직을 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 조직의 평균 직경이 작아지고 있음을 볼 수가 있고 위치별 변형률에 따른 미시조직은 변형률이 많을수록 미세함을 알 수가 있다. $\alpha + \gamma$ 상에서 동일한 위치에서 온도가 증가할수록 전체적으로 조직이 미세함을 볼 수가 있다. 또한 750, 725℃에서의 조직이 국부적으로 아주 미세하기는 하지만 넓은 영역에 걸쳐 넓은 페라이트조직이 형성되어져 있어 전체적으로는 775℃가 가장 미세함을 볼 수가 있다. 이러한 미시조직의 변화는 초석페라이트가 석출되고 성장하는 메카니즘에서 $\alpha + \gamma$ 상으로 진입한 지 얼마되지 않은 775℃의 경우 미세한 초석페라이트가 오스테나이트 입계에 미세하게 석출되지만 성장할 시간적인 여유가 없어 석출된 입계에서 응력장이 형성되어 성형중 동적재결정이 용이하게 된다. 이러한 미세조직의 변화는 성형중에 나타나는 동적재결정에 의한 것으로 판단된다. 동적재결정은 전위의 축적이나 미세한 석출물에 의하여 조직내에 나타나는 응력장과 변형에너지에 의하여 성형 도중에 발생하는 새로운 결정립의 생성을 말한다. 750, 725℃의 경우 석출후 페라이트가 성장할 수 있는 시간적 여유가 있기 때문에 성장된 페라이트 입자가 나타나게 된다. 따라서 재결정의 핵으로 작용하게 되는 전위에 응력장으로 작용하게 되는 석출물이 오스테나이트 입계에 집중적으로 분포하고, 또한 상대적으로 낮은 온도로 인하여 초석페라이트가 성장하는 것보다 주위에 동적재결정이 발생하여 아입계가 생성되는 것이 용이하기 때문에 부분적으로 아주 미세한 아입계가 형성되게 된다. 조직사진으로 보아 750, 725℃에서 국부적으로 아주 미세한 입계가 나타나기는 하지만 성장된 초석페라이트가 조대화되어 있기 때문에 전체적인 평균 입경은 775, 750, 725℃순으로 증가하게 된다. 이러한 미시조직의 변화를 이용하여 거시적인 유동응력의 추이를 설명하기 위하여 식(18)로 표현되는 Petch의 이론⁽⁶⁾을 적용할 수 있다.

$$\sigma_s = K \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (18)$$

여기서, σ_s 는 정상상태 유동응력, K는 재료상수이다. 식(18)은 입경의 크기가 증가할수록 유동응력이 증가한다는 것을 정량화시킨 수식으로 정성적으로 미시조직이 미세한 775℃가 평균입경이 보다 큰 750, 725℃보다 유동응력이 크다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

공시재료 열간 및 온간단조에 널리 적용되는 SM45C를 사용하여 고온 압축실험을 실시하고, 온·열간단조 공정해석에 적용할 수 있는 구성방정식을 구하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 소재가 변형중 상변태를 동반하게 되면 변태에 의하여 유동응력의 특성이 다르게 나타나게 되고, 고온 구성방정식을 얻기 위하여는 변태온도를 고려하여 수식을 정리하여야 한다.

(2) 고온 압축실험을 실시하여 변형률속도, 온도, 변형률에 의하여 유동응력이 결정되도록 정식화하였고, 상변태를 고려하기 위하여 변태구간을 실험변수로 설정하였다.

(3) 고온상태의 유동응력은 그 조직적 특성과 변형이력에 상당한 영향을 받게 되므로 보다 정확한 유동응력을 측정하기 위하여는 변형중의 조직예측에 의한 미시조직의 입경을 해석적 기법을 통하여 정량화할 필요가 있다.

(4) 기존의 고온 구성방정식은 주로 다항식으로 전개되고, 그 적용범위도 아주 좁은 영역에 한정되는 것이 일반적이었으나, 본 연구에서 제안된 구성방정식은 금속의 상변태를 동시에 고려한 수식으로 보다 넓은 범위에서 정도있는 유동응력을 얻을수 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. F. Grosman, "Application of a flow stress function in programmes for computer simulation of plastic processes," J. Matrl. Proc.

Tech. Vol. 64, pp. 169-180, 1997.
 2. J.J. Urcola, C.M. Sellars, "Influence of changing strain rate on microstructure during hot deformation," Acta Metall., Vol. 35, pp. 2649-2657, 1987.
 3. K.P. Rao, "Development of Constitutive Relationships Using Compression test of a medium carbon steel," Transcations of the ASME, Vol. 114, pp. 116-123, 1992.
 4. K.P. Rao, "Hot deformation studies on a low-carbon steel flow curves and the constitutive relationships," J. Matrl. Proc. Tech., Vol. 56, pp. 897-907, 1996.
 5. K.P. Rao, "Hot deformation studies on a low-carbon steel: Part 2," J. Matrl. Proc. Tech., Vol. 56, pp. 908-917, 1996.
 6. A. Wahlen, U. Feurer, "Computer controlled Measurement and Analytical Modelling of Flow Stresses During Hot Deformation of the Copper Alloy CuZn42Mn2," J. Matrl. Proc. Tech., Vol. 63, pp. 233-237, 1997.
 7. M.R. Lin, "Effect of Temperature, strain and strain rate on the tensile flow stress of I.F. steel and stainless steel type 310," Scripta Metalurgica, Vol. 20, pp. 143-148, 1986.
 8. 失田 浩, "鋼の熱間變形抵抗," 塑性と加工, 第27卷, 第300, pp. 34-44, 1986.
 9. 吉野雅彦, "α/γ二相域における回復考慮した熱間流動應力特性," 塑性と加工, 第33卷, 第372, pp. 69-74, 1992.
 10. 吉野雅彦, "變態による組織變化およびその流動應力特性の豫測手法," 塑性と加工, 第33卷, 第372, pp. 75-80, 1992.
 11. 吉野雅彦, "ひずみ速度と温度の履歴依存性を導入した流動應力式," 塑性と加工, 第35卷, 第407, pp. 1386-1393, 1994.
 12. 失田 茂, "炭素鋼の變形抵抗に及ぼす炭素含有量・温度・ひずみ速度の影響," 塑性と加工, 第9卷, 第85, pp. 127~132, 1968.