

재결정 및 결정립 성장이론에 기초한 Alloy 718의 조직예측 모델에 대한 재료상수 결정방법

염종택[#] · 홍재근¹ · 김정한¹ · 박노광¹

Determination of Material Parameters for Microstructure Prediction Model of Alloy 718 Based on Recrystallization and Grain Growth Theories

J. T. Yeom, J. K. Hong, J. H. Kim, N. K. Park

(Received August 18, 2011 / Revised October 7, 2011/ Accepted October 10, 2011)

Abstract

This work describes a method for determining material parameters included in recrystallization and grain growth models of metallic materials. The focus is on the recrystallization and grain growth models of Ni-Fe based superalloy, Alloy 718. High temperature compression test data at different strain, strain rate and temperature conditions were chosen to determine the material parameters of the model. The critical strain and dynamically recrystallized grain size and fraction at various process conditions were generated from the microstructural analysis and strain-stress relationships of the compression tests. Also, isothermal heat treatments were utilized to fit the material constants included in the grain growth model. Verification of the determined material parameters is carried out by comparing the average grain size data obtained from other compression tests of the Alloy 718 specimens with the initial grain size of 59.5 μm .

Key Words : Recrystallization, Grain Growth, Microstructure Prediction Model, Ni-Fe Superalloy Alloy 718, High Temperature Compression Tests

1. 서론

일반적으로, 열간 성형공정의 경우 고온에서 빠른 변형속도로 진행되기 때문에 냉간 혹은 온간성형에 비하여 조직 변화가 심하게 발생되며, 조직관리를 통하여 성형품의 특성을 최적화하기 위해서는 고온변형시 성형소재의 조직변화를 예측하는 것이 선행되어야 한다. 특히, 고온성형시에 발생하는 조직변화중 재결정 및 결정립성장거동에 기인한 결정립 변화는 제품의 특성과 직접적으로 연관되기 때문에 이를 예측하기 위한 모델 최적화 및 이러한 모델식을 활용한 예측의 정확도 향상 등에 대한 연

구가 꾸준히 지속되고 있다[1]. 지금까지 재결정과 결정립성장에 대한 모델식은 Sellars[2], Yada[3], Satio[4] 등에 의해 다양한 모델식이 제안되어 왔으며, 대부분 Avrami 형태의 관계식을 활용하고 있다. 이러한 모델식은 많은 재료상수들을 포함하고 있으며, 이러한 재료상수들의 결정은 모델의 신뢰성을 좌우하는 가장 중요한 일로, 모델의 충분한 이해 없이는 불가능한 일이다. 이러한 중요성에도 불구하고 지금까지 연구에서 재결정 및 결정립성장 모델과 관련된 재료상수들의 결정방법이 자세히 다루어지지 않아 왔으며, 일부 수학적 결정 방법[5]에 의한 재료상수 결정방법이 대부분을 차지하고 있다.

1. 재료연구소(KIMS), 특수합금연구그룹
교신저자: 재료연구소, E-mail:yjt96@kims.re.kr

따라서, 본 연구에서는 초내열합금, Alloy 718합금에 대하여 재결정 및 결정립성장 모델식에 포함된 재료상수들의 결정방법을 조직학적 의미와 함께 다루고자 하였으며, 이들 재료상수에 대한 결정방법을 단계별로 구체적으로 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재 및 관련시험

본 연구에서 재결정 및 결정립성장 모델식의 재료상수를 결정하기 위해서 선택된 소재는 Ni-Fe 기 초내열합금, Alloy 718합금으로 결정립크기가 기계적 특성에 직접적으로 영향을 미치는 합금이다. Fig. 1은 본 연구에서 최종 모델의 검증에 위해 활용된 Alloy 718합금의 초기 조직을 나타낸 것이다.

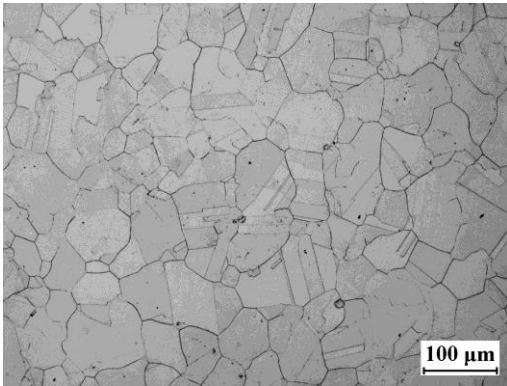


Fig. 1 Initial microstructure of Alloy 718

이 합금은 γ 기지에 미세한 강화상인 $\gamma'(Ni_3Al(Ti))$ 상과 $\gamma''(Ni_3Nb)$ 상 그리고 가열 및 성형시 결정립 성장을 억제하는 $\delta(Ni_3Nb)$ 상으로 구성되어 있다[6]. 또한, 본 연구에서 활용된 Alloy 718의 평균 결정립크기는 $59.5\mu m$ 로 측정되었다.

2.2 고온 압축시험

재결정 및 결정립성장 모델식의 재료상수들을 결정하기 위해서는 인장, 압축, 비틀림시험 등과 같은 고온 변형시험이 요구된다. 이러한 고온 변형시험중 단조, 압연, 압출 등의 소성가공공정에서 변형모드가 유사하고, 비교적 변형량을 많이 가할 수 있기 때문에 압축시험이 흔히 활용되고 있으며, 본 연구 또한 고온압축시험을 통한 조직

예측모델의 재료상수 결정방법에 대해 자세히 다루고자 하였다.

한편, 소재를 압축하는 경우 내부의 변형열이 발생하게 되며, 이로 인해 압축이 진행되는 동안 유동응력 변화에 영향을 미치게 된다. 따라서, 변형열에 의한 온도보정을 통해 유동응력 수정정보가 요구된다. 이때 변형열계산은 다음과 같은 식에 의해 이루어 진다[7].

$$\Delta T = 0.9 \int_0^{\epsilon} P \alpha d\epsilon / \rho C \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도(Alloy 718= $8.2g/cm^3$), C 는 비열을 의미한다.

한편, 재료상수들이 결정된 조직예측모델의 최종 검증을 위한 고온압축시험은 $1,000 \sim 1,100^\circ C$ 의 온도범위에서 변형속도 $0.01, 0.1, 1.0s^{-1}$ 의 조건으로 0.7 까지 변형되었다. 또한, 조직분석은 유한요소해석에서 유효변형률 0.7 에 해당하는 중심으로부터 $2/3$ 떨어진 부근에서 이루어졌으며, 이 부위의 결정립분포를 측정하여 예측결과와 비교하였다.

3. 조직예측모델 및 재료상수 결정

3.1 조직 예측 모델식

지금까지 재료의 고온변형시 조직, 특히 결정립 크기 및 재결정 분율 등을 예측하기 위한 모델로 Yada[3] 등에 의해 제안된 재결정식 또는 일부 수정한 식이 여러문헌[8, 9]에서 활용되어 왔다.

이러한 모델은 재결정분율을 Avrami 형태의 관계식으로 정의하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 Alloy 718합금에 적용된 동적재결정 및 결정립성장 등을 묘사하기 위한 모델식 역시 Yada식을 수정한 형태가 활용되었으며, 이전의 연구논문[10]에서 자세히 다루어졌다. 이러한 조직예측모델을 살펴보면, 동적재결정식의 경우 Zener-Holloman 변수(Z), 동적 재결정의 시작점(starting point)을 나타내는 변형량인 임계변형량, 동적 재결정된 결정립 크기 및 분율 등으로 구성되며, 결정립 성장식은 시간과 초기결정립크기의 변화에 따른 관계식을 활용하게 된다.

3.2 Zener-Holloman변수 결정

일반적으로 고온에서의 재료거동을 예측하기 위한 구성방정식은 변형속도와 응력의 관계에 따라 $\sigma^n, \exp(\alpha\sigma), [\sinh(\beta\sigma)]^n$ 등과 같은 여러 가지 유

동응력 관계식으로 표시되며, 이러한 표현식들 중에서 저응력에서 고응력까지의 넓은 응력조건에서 적용가능한 하이퍼 볼릭 사인 관계식[11]이 보편적으로 활용되고 있다.

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\beta\sigma_{\max})]^n \exp(-Q_{drx}/RT) \quad (2)$$

여기서, σ_{\max} 는 각 변형속도, 온도조건별 최대응력, Q_{drx} 는 동적재결정에 필요한 활성화에너지이며, A , β , n 은 재료상수들이다. 식(2)에 포함되어 있는 재료상수들은 $\beta \rightarrow Q_{drx} \rightarrow n$, A 순으로 결정되며, 식(2)의 양변에 \ln 을 취하여 식(3)과 같이 변환한 후 결정하게 된다.

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln[\sinh(\beta\sigma_{\max})] - Q_{drx}/RT \quad (3)$$

먼저 고온압축시험에서 얻어진 유동응력곡선에서 각각의 온도와 변형속도에 해당하는 최대 유동응력을 대입하고, 임의의 $\beta(\text{MPa}^{-1})$ 값을 0.001~0.01범위에서 직접대입법에 의해 입력한 후 $\ln[\sinh(\beta\sigma_{\max})]$ 와 $\ln \dot{\epsilon}$ 의 관계에서 가장 높은 정확도 즉, 가장 높은 상관계수(R^2)값을 나타내는 값을 β 로 결정한다. 그 후 Fig. 2에 제시된 바와 같이 결정된 β 값을 대입하여 각 온도조건별 $\ln[\sinh(\beta\sigma_{\max})]$ 와 $\ln \dot{\epsilon}$ 그래프의 평균 기울기는 n 값이 된다.

한편, Fig. 3에 나타난 바와 같이 일정한 변형속도조건별 $\ln[\sinh(\beta\sigma_{\max})]$ 와 $1/T(\text{K})$ 의 그래프상의 기울기는 Q_{drx}/nR 가 되며, 활성화에너지 Q_{drx} 는 이러한 기울기에 n 값과 R 값을 곱하여 구할 수 있다. 결국, 이러한 방법론을 통해 Zener-Holloman 변수(Z)를 얻을 수 있으며, Alloy 718합금에 해당하는 하이볼릭관계식의 재료상수는 표 1에 나타내었다.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_{drx}/RT) = A[\sinh(\beta\sigma_{\max})]^n \quad (4)$$

3.3 동적 재결정모델의 재료상수 결정

동적 재결정모델에서 임계변형량은 변형속도, 온도 뿐만 아니라, 초기 결정립크기에 의해서도 상당히 영향을 받는다. 즉, 초기 결정립이 작을수록 임계변형량은 낮아지며, 동적 재결정분율이 증가하는 경향을 가진다. 이는 동적 재결정의 경우 결정립내부에 비해 상대적으로 불안정한 결정립계가 일차적인 재결정 site이기 때문에 결정립크기가 작을수록 핵생성에 필요한 site를 더 많이 제공하기 때문이다. 또한, 재결정은 핵생성 및 성장기

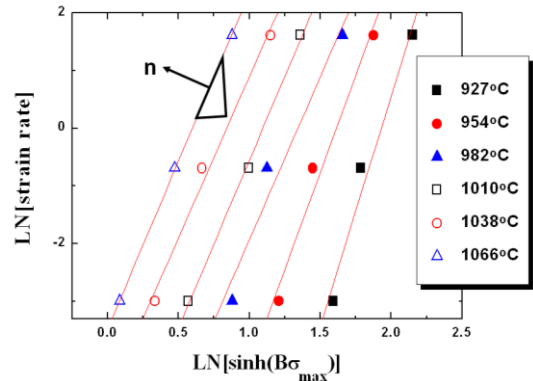


Fig. 2 Dependence of flow stress on strain rate at various temperatures

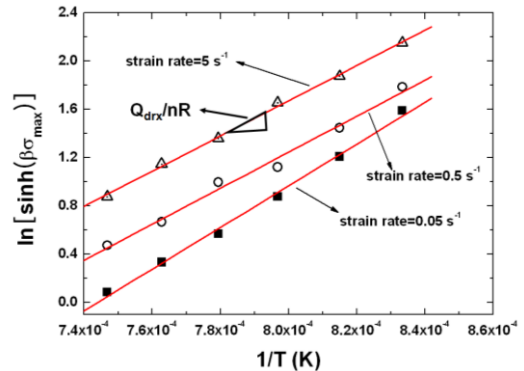


Fig. 3 The plot of $\ln[\sinh(\beta \sigma_{\max})]$ vs. $1/T$ for each strain rate

Table 1 Material parameters including the hyperbolic constitutive equation

β	Q_{drx}	A	n
0.0049	447.7	1.83E16	4.07

구로 시간에 의존하는 경향을 나타내며, 따라서 변형속도에 민감하게 작용된다.

먼저, 임계변형량을 구하는 방법은 고온압축시험의 유동응력곡선으로부터 각 조건별 가공경화속도($\theta=d\sigma/d\epsilon$)와 변형량에 따른 유동응력(σ)과의 관계를 나타내는 Fig. 4와 같은 곡선을 얻는다. 이러한 곡선으로부터 응력의 상승이 급격히 감소하는 변곡점이 재결정이 발생하는 임계변형량에 해당하게 된다. 즉, 재결정핵의 생성은 전위(dislocation)의 소멸을 의미하여 이 경우 응력의 급격한 감소가 곡선상에 반영되는 것이다. 이러한

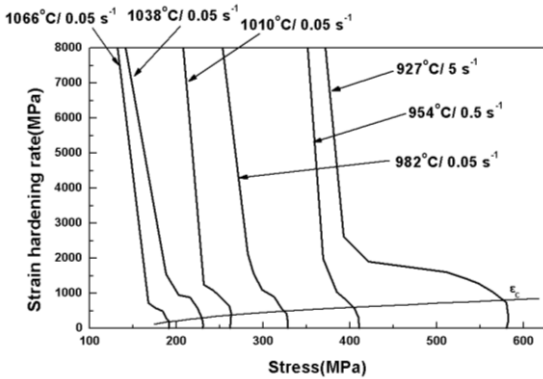


Fig. 4 Plot of work-hardening rate vs. flow stress for each temperature and strain rate

각 조건별 임계변형량값들을 활용하여 임계변형량과 관련된 재료상수들을 구하는 방법을 살펴보면, 먼저 초기 결정립크기와 관련된 지수값을 0으로 가정하여 초기 결정립크기의 영향을 무시하고, Zener-Holloman 변수의 지수값을 결정한 후 초기 결정립크기를 변수로 한 고온압축시험결과로부터 얻어진 임계변형량을 추가로 데이터화하여 최소자승법의 원리를 이용한 수학적 방법에 의해 재료상수들을 최종 결정하게 된다.

Alloy 718합금의 경우 변형속도조건에 따라 임계변형량의 차이가 크게 나타나, 다음과 같이 변형속도에 따라 임계변형량식의 재료상수들을 다르게 표현하였다.

$$\epsilon_C = 8.87E-04 \cdot d_0^{0.2} \cdot Z^{0.1} (\dot{\epsilon} \geq 0.01s^{-1}) \quad (5)$$

$$\epsilon_C = 9.57E-06 \cdot d_0^{0.196} \cdot Z^{0.167} (\dot{\epsilon} < 0.01s^{-1}) \quad (6)$$

한편, 재결정분율과 재결정된 결정립크기 관계식에 포함되어 있는 재료상수를 구하기 위해서는 Fig. 5에 나타낸 모식도에 따라 수행하게 된다.

먼저, 조직분석을 통해 각 조건에 해당하는 재결정분율 및 재결정된 결정립크기 등을 측정하게 되며, 각 조건별로 재결정이 50% 발생하는 시점의 변형량을 정량화한다. 이때 변형률을 변수로 한 고온 압축시험은 재결정이 50% 이상 발생할 수 있도록 실험계획을 수립하여 수행하여야 한다. 재결정 분율과 관련된 관계식의 재료상수는 먼저, 50% 재결정이 진행되었을 때의 변형량에 포함되어 있는 재료상수중 초기결정립에 포함된 지수값을 0로 가정하여 초기 결정립크기의 영향을 무시한

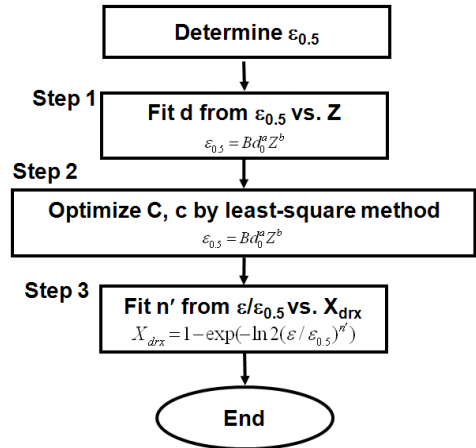


Fig. 5 Flow diagram showing the procedure for the determination of the material constants including recrystallized fraction relationships

후 $\epsilon_{0.5}$ 와 Z 의 관계로부터 Z 에 포함된 지수값을 구하고, 다른 초기 결정립크기로부터 얻어진 $\epsilon_{0.5}$ 값들을 추가로 활용하여 최소자승법의 원리를 통해 최종 재료상수들을 결정하게 된다.

이러한 방법에서 얻어진 Alloy 718합금의 재결정 분율에 대한 계산결과와 측정결과와의 비교는 Fig. 6에 나타내었으며, 재결정분율과 관련된 재료상수들은 재결정에 영향을 미치는 δ 상의 고용온도 ($\sim 1038^\circ\text{C}$)를 기준으로 다음과 같이 식(7)과 식(8)로 표현되었다.

$$X_{drx} = 1 - \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.9}\right)$$

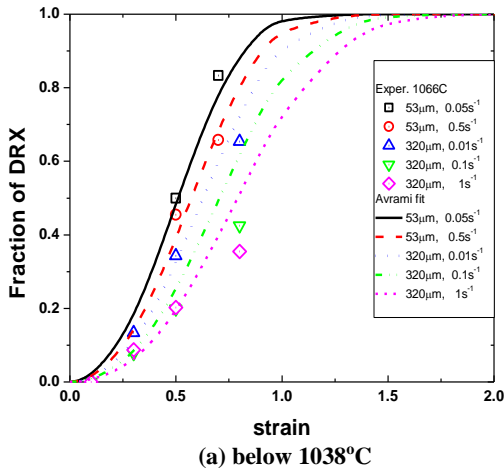
$$\epsilon_{0.5} = 0.029 \cdot d_0^{0.2} \cdot Z^{0.058} \quad (T \geq 1038^\circ\text{C}) \quad (7)$$

$$X_{drx} = 1 - \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.68}\right)$$

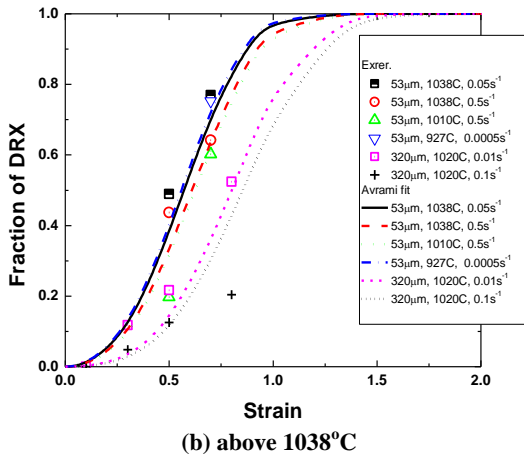
$$\epsilon_{0.5} = 0.037 \cdot d_0^{0.2} \cdot Z^{0.058} \quad (T < 1038^\circ\text{C}) \quad (8)$$

한편, 동적 재결정에 의한 결정립크기는 Z 값에 의존하며, Fig. 7에 제시된 d_{drx} 와 Z 의 관계로부터 재료상수들을 구할 수 있고, Alloy 718합금의 경우 다음과 같이 결과되었다.

$$d_{drx} = 1.301E03 \cdot Z^{-0.1243} \quad (9)$$



(a) below 1038°C



(b) above 1038°C

Fig. 6 Comparison of measured recrystallized fractions and predicted results

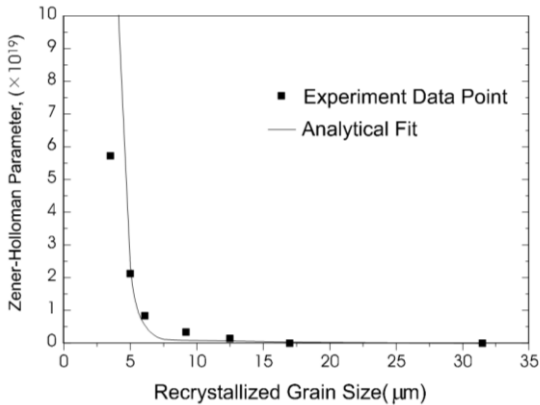


Fig. 7 Comparison of measured recrystallized grains and predicted results

3.4 결정립 성장모델의 재료상수 결정

일반적으로, 결정립성장의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$D^{m'} = D_0^{m'} + C \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{RT}\right) \quad (10)$$

여기서, Q_{gg} 는 결정립성장에 대한 활성화에너지이며, m' , C 등은 재료상수이다.

이때, 결정립 성장모델에서 중요한 변수는 m' 으로, 순수한 금속소재의 경우 통상 2정도의 값을 나타내지만, 합금의 경우 2~20까지의 값을 가지는 것으로 알려져 있다[12]. 결정립 성장모델식에 포함된 재료상수를 결정하기 위해서는 일정한 온도 조건에서 시간에 따른 등온열처리시험이 요구된다. 결정립 성장모델에 포함되어 있는 재료상수들은 $m' \rightarrow Q_{gg} \rightarrow C$ 순으로 결정되며, 결정립 성장속도가 느려지는 조건 또는 영역에서 2~20까지의 임의의 m' 값을 직접 대입하여 $\ln(d^{m'} - d_0^{m'})$ 과 $1/T$ 의 관계로부터 가장 높은 상관계수(R^2)값을 나타내는 m' 을 최종 결정한다. 그 후 결정된 m' 을 입력하여 $\ln(d^{m'} - d_0^{m'})$ 과 $1/T$ 의 관계로부터 Q_{gg} 와 C 값을 구할 수 있다.

Alloy 718의 결정립성장은 Zener pinning효과를 나타내는 δ 상과 밀접한 관계를 가지며, 이러한 δ 상을 고려한 모델식을 다음과 같이 표현하였다.

$$D_1^{15} = D_0^{15} + 5.63 \times 10^{20} t \cdot \exp\left(\frac{-115kJ}{RT}\right) \quad (11)$$

$(T \leq 1017^\circ C)$

$$D_{tr} = (D_1 - D_2) \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{T - 1017}{1050 - 1017}\right) \right\}^{(t/10^4)} \quad (12)$$

$+ D_2 \quad (1017^\circ C < T < 1050^\circ C)$

$$D_2^{15} = D_0^{15} + 8.05 \times 10^{36} t \cdot \exp\left(\frac{-115kJ}{RT}\right) \quad (13)$$

$(T \leq 1050^\circ C)$

3.5 조직예측모델의 검증

본 연구에서 얻어진 Alloy 718합금의 재결정 모델식을 활용하여 결정립 크기가 59.5µm인 Alloy

Table 2 Comparison of measured and calculated data for microstructure evolution of hot compressed Alloy 718

Temp (°C)	Strain rate (s ⁻¹)	d _{drx} (Exp) (μm)	d _{drx} (Cal) (μm)	X _{drx} (Exp)	X _{drx} (Cal)	d _{av} (Exp) (μm)	d _{av} (Cal) (μm)	SD
1000	0.01	11.1	12.0	0.54	0.46	14.9	17.3	2.9
1000	0.1	8.4	9.0	0.43	0.39	12.6	14.2	
1000	1	7.2	6.8	0.35	0.32	12.0	11.7	
1050	0.01	12.7	14.6	0.68	0.52	15.4	20.3	5.35
1050	0.1	11	11.0	0.52	0.45	15.2	16.3	
1050	1	10.5	8.3	0.48	0.39	15.1	13.2	
1100	0.01	15.4	17.6	0.71	0.74	18.3	20.4	2.61
1100	0.1	13.9	13.2	0.66	0.65	17.1	16.4	
1100	1	11.2	9.9	0.59	0.55	14.6	13.3	

* Exp : measured data, Cal : calculated data

718합금에 대해 1000~1100°C 온도범위, 0.01~1.0s⁻¹ 변형속도조건에서 압축된 sample의 재결정된 결정립 크기 및 분율 등을 측정하였고, 식(14)에 나타낸 바와 같은 평균 결정립 크기(d_{av}) 관계식을 활용하여 평균결정립 크기를 결정하였다.

$$\frac{1}{d_{av}^2} = \frac{X_{drx}}{d_{drx}^2} + \frac{(1 - X_{drx})}{d_n^2} \quad (14)$$

여기서, d_n은 재결정되지 않고 남아 있는 결정립을 의미하며, 결정립성장이 적용된 각 온도에서의 초기 결정립 크기이다.

계산결과와 측정결과와의 신뢰성 비교는 SD (standard deviation)에 의해 평가되었으며, 온도별 신뢰도가 평가되었다.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((d_{av,cal})_i - (d_{av,meas})_i)^2} \quad (15)$$

Table 2는 Alloy 718합금의 고온압축시험으로부터 측정된 재결정된 분율, 크기 및 평균결정립 크기와 함께 정립된 조직예측모델식으로부터 예측된 결과를 비교한 것이다. 각 온도 및 변형속도별 재결정된 결정립 크기, 분율, 평균결정립 크기의 예측결과를 살펴보면, 1050°C 조건에서의 결과는 다른 온도 조건(1000°C, 1100°C)의 결과에 비해 다소 SD값 즉, 신뢰도가 주어진 변형속도조건에서 떨어지는 결과를 나타내고 있으나, 전반적으로 예측결과는 측정결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 관찰된다. 이는

본 연구에서 제안된 조직예측 모델식의 변수 결정 방법이 우수한 신뢰성을 나타냄을 간접적으로 나타내는 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 변형시 조직변화를 예측하기 위한 조직예측모델에서 재결정 및 결정립성장모델식에 포함되어 있는 재료상수들의 결정방법을 고찰하였으며, Alloy 718합금에 대해 임계변형량, 재결정률, 동적재결정된 결정립 크기 및 결정립성장 등을 수식화하였다. 또한, 초기 결정립 크기가 59.5μm를 가지는 Alloy 718합금의 1000~1100°C 온도구간과 0.01~1.0s⁻¹ 변형속도조건에서 얻어진 고온 압축된 시험편의 동적재결정된 결정립 크기, 분율, 평균결정립 크기 등을 측정하고, 본 조직예측모델식을 활용하여 예측한 결과와 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 이는 본 연구에서 제시된 조직예측모델의 재료상수 결정방법이 신뢰할 수 있는 접근방법임을 검증하는 결과이다.

후 기

본 연구는 산업기술개발사업(지식경제부)과 일반 연구사업(과제번호: UCN248-2865.C)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] J. T. Yeom, C. S. Lee, J. H. Kim, N. K. Park, 2007,

- Finite-element Analysis of Microstructure Evolution in the Cogging of an Alloy 718 Ingot, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. A449~451, pp. 722~726.
- [2] C. M. Sellars, 1990, Modelling Microstructural Development during Hot Rolling, *Met. Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 11, pp. 1072~1081.
- [3] M. Suehiro, K. Sato, Y. Tsukano, H. Yada, T. Senuma, Y. Matsumura, 1987, Computer Modeling of Microstructural Change and Strength of Low Carbon Steel in Hot Strip Rolling, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 439~445.
- [4] Y. Saito, T. Enami, T. Tanaka, 1985, The Mathematical Model of Hot Deformation Resistance with Reference to Microstructural Changes during Rolling in Plate Mill, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol. 25, No. 11, pp. 1146~1155.
- [5] C. Devadas, I. V. Samarasekera, E. B. Hawbolt, 1991, The Thermal and Metallurgical State of Steel Strip during Hot Rolling: Part III. Microstructural Evolution, *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 22, No. 2, pp. 335~349.
- [6] J. T. Yeom, I. S. Kim, N. K. Park, 1997, Assessment of Grain Size Distribution in Hot Forged Alloy 718, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 35, No. 10, pp. 1424~1433.
- [7] J. T. Yeom, D. H. Kim, Y. S. Na, N. K. Park, 2001, Characterization of Hot Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 10, No. 4, pp. 347~354.
- [8] B. H. Lee, N. S. Reddy, J. T. Yeom, C. S. Lee, 2007, Flow Softening Behavior during High Temperature Deformation of AZ31 Mg Alloy, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187~188, pp. 766~769.
- [9] G. Shen, S. L. Semiatin, R. Shivpuri, 1995, Modeling Microstructural Development during the Forging of Waspaloy, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 26A, No. 7, pp. 1795~1803.
- [10] J. T. Yeom, N. K. Park, 1997, Assessment of Grain Size Distribution in a Hammer Forged Alloy 718 Disk, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 6, No. 3, pp. 250~256.
- [11] H. J. McQueen, N. D. Ryan, 1989, Dynamic Recovery, Strain Hardening and Flow Stress in Hot Working of 316 Steel, *Czech. J. Phys.*, Vol. 39, No. 4, pp. 458~465.
- [12] C. M. Sellars, J. A. Whiteman, 1979, Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling, *Met. Sci.*, Vol. 13, No. 3~4, pp.187~194.