한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집 pp.190~193

Udimet 720L i합금의 항온단조 변형특성

염종택* · 나영상* · 박노광*

Deformation Characteristics of Udimet 720Li during Isothermal Forging

J. T. Yeom. Y. S. Na and N. K. Park

Abstract

Hot deformation behavior of Udimet 720Li was characterized by compression tests in the temperature range of 1025℃ to 1150℃ and the strain rate rage of $0.0005s^{-1}$ to $5s^{-1}$. In order to characterize the dependence of flow stress on strain, strain rate and temperature, a constitutive equation based on hyperbolic sine formation was used. Isothermal forging of Udimet 720Li was performed in the temperature range 1050-1150℃ at strain rates of $0.05s^{-1}$ and $0.005s^{-1}$. FE simulation was also carried out to predict deformation microstructures during isothermal forging.

Key Words : Udimet 720Li, Isothermal Forging, Hyperbolic Sine Formation, Dynamic Recrystallization, FEM Simulation

1. 서 론

Udimet 720Li합금은 Special Metals 사에서 디스크용으로 설계된 Ni기 초내열합금으로 높은 강도와 피로저항성 및 우수한 내식성으로 인해 항공기 가스터빈용 소재로 적용하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있으며, 가공열처리기법을 이용한 결정립크기를 제어함으로서 원하는 제품의 특성을 얻고자 하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.[1] 이 합금의 주강화기구로는 기지와 정합을 이루는 γ' 상을 석출시키는 석출경화와 결정립크기의 제어를 통한 강화기구 등이 있다. 특히 이 합금에 존재하는 primary γ' 상의 경우 결정립성장을 억제하는 중요한 상으로 알려져 있다.[2] 이러한 강화효과를 극대화하기 위한 방법으로 단조온도, 변형속도 및 업셋률 등의 단조공정변수들을 적절히 조절하는 가공열처리기법을 개발하는 것은 필수적으로 요구되는 사항이며, 이에 따라 최적의 단조조건을 찾기 위한 연구가 수행되고 있다. 항온단조는 여타 단조법에 비해 성형시간이 길어지고 작업성이 떨어지지만 20-40% 낮은 하중으로 정밀성형이 가능하고 품질관리가 상대적으로 용이한 near net shape 성형기술로서, 항온단조시 소재의 고온변형 특성과 미세조직의 변화를 파악하는 것은 최종제품의 기계적 특성 뿐만아니라 변형저항에도 큰 영향을 미치므로 이들을 이해하는 것이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 고온압축시험을 통하여 Udimet 720Li합금의 고온변형거동을

* 한국기계연구원 재료공정연구부 소성응용그룹

이해하고 processing map을 기초로 최적성형조건을 수립함과 동시에 결정립분포를 예측하기 위한 금속학적모델식을 유도하여 항온단조시 고온 변형거동 및 각 온도와 변형속도에 따른 미시구조적 변화를 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

항온단조와 고온압축시험에 사용된 빌렛은 Special Metal사에서 제작된 Udimet 720Li합금으로 이들의 조성은 표1에 나타내었고, 초기 빌렛의 미세조직관찰은 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Udimet720Li (wt%)

C	B	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Zr	Ni
0.015	0.014	16.22	14.52	3.02	1.22	4.97	2.49	0.03	Bal.

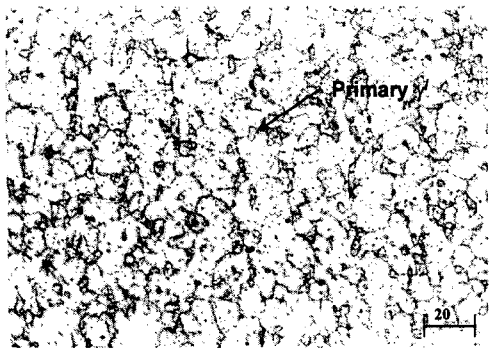

Fig. 1 As-received microstruture of Udimet720Li

조직관찰에서 결정립크기는 약 15㎛ - 20㎛(ASTM 9) 정도이며, 결정립계를 따라 3-5㎛ 정도의 크기를 가진 조대한 γ'상이 석출되어 있음을 관찰할 수 있다. 압축시험은 지름 6mm, 길이 9mm의 원통형 시편을 사용하여 1025-1150℃의 온도구간과 0.0005 - $5s^{-1}$의 변형속도구간에서 변형량 0.5까지 수행되었다, 항온단조의 경우 500 ton 용량의 프레스를 사용하였으며, 지름 50mm, 길이 75mm의 원통형 시편을 이용하여 1050℃-1150℃의 온도구간과 $0.05s^{-1}$와 0.005s-1의 변형속도조건에서 변형량 1.2까지 수행하였다.

3. 압축시험에 따른 Udimet 720Li의 고온 변형거동 분석

3.1 Udimet 720Li의 유동응력곡선 및 열간성형성

고온압축시험에서 얻어진 Udimet 720Li합금의 유동응력곡선을 살펴보면, 대부분의 시험조건의 경우 변형초기에는 변형량이 증가함에 따라 유동응력이 급격히 상승하여 최대응력을 나타내고 최대응력 후 유동응력이 감소하는 가공연화 현상이 관찰된다. 이러한 가공연화 현상은 동적재결정에 의하여 재료가 연화되는 현상으로 최대응력에 도달한 후 일정한 유동응력을 나타내는 동적회복과 구분된다.

일반적으로 주어진 재료에 대하여 고온유동응력은 일정한 변형률조건에서 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$\sigma = K\,\dot{\varepsilon}^{m} \tag{1}$$

여기서 K는 강도상수로 변형률, 온도등에 의존하며, m은 변형민감도로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \left[\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\varepsilon}}\right]_{T,\varepsilon} \tag{2}$$

Prasad와 Gegal[3] 등은 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지 분산특성은 미세조직의 변화에 기인한다고 하였다. 이들은 소성변형에 의해서 분산된 에너지(G)와 동적인 미세조직의 변화에 의해 분산된 에너지(J)를 정의하고 재료의 소성변형에 대한 에너지분산 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법으로 식 (3)에 제시된 에너지분산 효율(η)를 표현하였다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \tag{3}$$

이러한 에너지분산 효율(η)은 소재에 가해지는 총에너지에 대해서 재료의 미시구조적 변화를 효과적으로 기술하는데 사용될 뿐만 아니라 안정 및 불안정 영역을 묘사하는데에도 사용될 수 있다. 즉, 안정한 재료유동에 대한 변형속도민감도(m)의 범위는 다음과 같이 정의된다.

$$0 < m \leq 1 \tag{4}$$

Fig. 2는 진변형률이 0.5인 조건에서 변형속도와 온도에 따른 에너지분산 효율(η)을 나타내는 processing map을 나타낸 것이다.

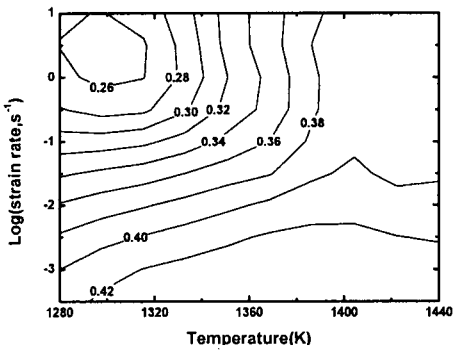

Fig. 2 Constant efficiency contours of hot deformation processing map for Udimet 720Li(strain =0.5)

변형속도가 증가하고, 온도가 감소함에 따라 에너지분산 효율은 감소하고 있음을 알수 있으며, 가장 높은 에너지분산 효율은 변형속도가 느린 5×10^{-4}과 5×10^{-3}에서 나타났음을 관찰할 수 있다. 에너지분산 효율이 높다는 것은 재료내 미시구조의 동적변화가 가장 활발함을 의미하는 것으로 동적재결정의 진행 및 primary γ' 상의 용융으로 인한 결정립성장 등에 의한 영향이 작용한 것이라 할 수 있다.

3.2 구성방정식

재료가 주어진 온도에서 변형될 때 변형속도에 대응하는 변형에 대한 저항응력은 잘 알려진 Zener-Hollomon 인자를 이용한 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$Z=\dot{\varepsilon}(\frac{Q}{RT})=F(\sigma_{\max}) \tag{5}$$

여기서 Q는 변형 활성화 에너지이다.

또한 Jonas, Sellars, Tegart 등[4]은 열간가공 조건에서 응력, 온도 및 변형속도의 상관관계를 크리프 변형에 대한 현상학적 접근방법을 기초로 $F(\sigma_{\max})$를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$F(\sigma_{\max})=A[\sinh(B\sigma_{\max})]^n \tag{6}$$

여기서 A, B, n은 상수이며, 이들 값들과 Q는 회귀분석(Regression) 프로그램을 이용한 통계학적 방법을 사용하여 얻을 수 있다. 계산된 값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material constants of Udmet 720Li alloy for high tempertature deformation

Q(KJ/mol)	n	A	B(MPa^{-1})
695	3.56	1.98×1025	5.5×10-3

3.3 임계변형률 및 동적재결정된 결정입도

일반적으로 고온변형거동에서 관찰되는 가공연화 현상은 불균일 소성변형 혹은 압축파단 등과 같이 국부적으로 소성변형되거나 파단되는 경우를 제외하고는 동적재결정에 기인한 것으로 알려져 있다.[5] 이러한 재료의 동적재결정 현상에 기인한 결정립 미세화와 함께 열간성형 공정시 소재의 결정립분포를 예측하기 위해서는 재결정 핵이 발생하는 시점인 임계변형률(ε_C), 변형량에 따른 재결정분율, 재결정된 결정입, 결정립성장 등과 관계된 식들을 유도해야 한다. Udimet 720Li합금의 경우 primary γ'상의 용융온도(~1155℃)이상의 온도범위에서 상당한 결절립성장을 유발하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이 온도범위이하에서의 관계식을 유도하였다.

임계변형량

$$\varepsilon_C=7.1813\times10^{-6}\times Z^{0.13527} \tag{7}$$

동적재결정된 결정립크기

$$d_{rex}=461.79\times Z^{-0.071} \tag{8}$$

결국 이러한 관계식을 통하여 초기 동적재결정시점 및 이때 생성된 재결정된 결정립크기를 예측할 수 있다.

4. Udimet 720Li합금의 항온단조

4.1 항온단조 시뮬레이션

항온단조에 대한 유한요소해석은 DEFORM-2D에 의해 수행되었다. 해석결과의 metal flow를 살펴보면 변형률 0.3에서부터 금형과 소재의 마찰과 소성가공으로 인한 온도상승의 원인으로 인한 barreling현상이 관찰됨을 알 수 있었다. 또한 1050℃와 1100℃에서 γ' 용융온도에서 유도된 재결정시작점을 나타내는 임계변형량식을

적용한 결과 모든 조건에서 임계변형량을 초과하는 것으로 해석되었다. Fig. 3은 1050℃와 1100℃의 온도조건과 $0.005s^{-1}$, $0.05s^{-1}$의 변형속도조건에서 시편의 중심부에 대해 유효변형량에 따른 동적재결정된 결정립크기를 예측한 그래프이다. 해석결과의 관찰에서 온도의 영향보다는 변형속도의 영향에 따라 더 큰 결정립차이를 나타냄을 알수 있으며, 실제로 측정된 재결정된 결정립크기가 6-7㎛정도임을 감안하면 상당히 잘 일치하는 결과임을 알수 있다.

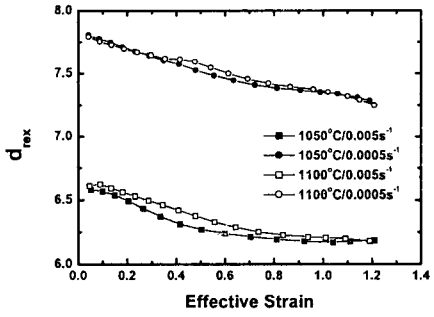

Fig. 3 Variations of dynamic recrystallized grain size with effective strain at center position

4.2 항온단조된 Udimet 720Li의 미세조직 분석

항온단조된 Udimet720Li합금의 경우 1050℃와 1100℃에서 부위별 미세조직을 관찰한 결과 모든 부위에서 비교적 균일한 결정립을 가지는 조직을 얻을 수 있었으며, 변형속도가 느린조건에서 약간 미세한 결정립을 얻을 수 있었다. 이러한 경향은 해석결과에서도 잘 나타나는 결과이다. 그러나, 1150℃에서 항온단조된 경우 primary γ'의 용융으로 인한 급격한 결정립성장을 나타냈으며(Fig. 4 참조), 표면부보다 중심부의 결정립성장이 더욱 크게 나타났다. 이러한 경향은 내부의 온도상승효과를 잘 반영하는 것이다.

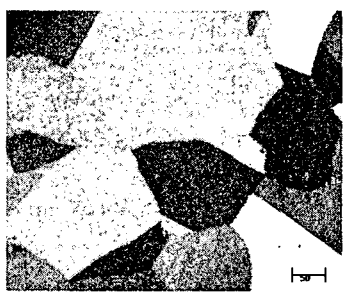

Fig. 4 Microstructure of isothermal forged Udimet 720Li at 1150℃

4. 결 론

Udimet720Li합금의 항온단조의 성형성연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 항온단조에 앞서 압축시험을 통한 고온성형성연구에서 변형속도가 느린 5×10^{-4}과 5×10^{-3}에서 재료내 미시구조의 동적변화가 가장 활발하게 나타났다.

(2) 고온압축시험의 유동응력곡선분석과 미세조직의 관찰을 통해 임계변형량과 동적재결정된 결정립크기와 관련된 금속학적모델식을 수립하였다.

(3) 1050℃와 1100℃에서 항온단조된 Udimet720Li의 경우 동적재결정으로 인해 미세한 결정립분포를 나타냈으며, 실제로 6-7㎛정도로 측정된 결정립분포와 해석결과가 잘 일치함을 알수 있다.

(4) 1150℃에서 항온단조된 경우, primary γ'의 용융으로 인한 급격한 결정립성장을 나타냈으며(Fig. 4 참조), 내부의 온도상승효과로 인해 표면부보다 중심부의 결정립성장이 더욱 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 특정연구사업의 일환으로 이루어 졌으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) K.R. Bain, et al, 1988, "Development of damage tolerant Microstructure in Udimet720", Superalloy 1988, p. 13.

(2) F.E. Screrzenie and G.E. Maurer, 1984, "Development of Udimet720 for high strength disk application", Superalloy 1984, p. 573.

(3) Y.V.R.K. prasad, et al, 1984, "Modelling of dynamic material behavior in hot deformation", Metall. Trans. A, Vol. 15A, p. 1883.

(4) J.J. Jonas, et al, 1969, "Strength and structure under hot-working conditions", Met. Rev., Vol. 14, p. 1.

(5) 염종택, 김인수, 박노광, 1997, "열간단조된 Alloy718의 결정립분포 해석", 대한금속학회지, 제35권 제10호, p. 1424.