한국소성가공학회 2006년도 춘계학술대회 논문집 pp. 168~171

변형 공정지도를 활용한 A350 LF2 합금의 최적성형 조건설계에 대한 연구

정은정[1] · 염종택[1#] · 김정한[1] · 이동근[1] · 박노광[1]

Optimum forming design of A350 LF2 alloy using the deformation processing map

E. J. Jung, J. T. Yeom, J. H. Kim, D. G. Lee , N. K. Pak

Abstract

Hot deformation behavior of A350 LF2 alloy was characterized by compression tests in the temperature range of 800-1250℃ and the strain rate range of 0.001 – 10 s^{-1}. The microstructural evolution during hot compression was investigated and deformation mechanisms were analyzed by constructing processing map. Processing maps were generated using the dynamic material model (DMM). The combination of dynamic material model and Ziegler's instability criterion was applied to predict an optimum condition and unstable regions for hot forming.

Key Words : A350 LF2, Deformation Processing Map, Hot Compression, Dynamic Material Model (DMM)

1. 서 론

주요 ring 생산제품으로는 석유화학용 Flange, 발전설비 터빈용 Diaphragm, 풍력발전 Tower 용 Flange 등이 있으며, 현재는 이러한 부품들을 단순한 ring 형상으로 제작한 후 상당부분을 가공하고 있어 이들 부품을 profile ring rolling 공정으로 전환하고자 하는 노력이 이루어지고 있는 상태이다. profile ring rolling 공정은 간단한 링 형상을 제조하는 plane ring rolling 공정과 달리 부위별 온도 및 변형 등에 차이를 크게 나타낼 수 있으며, 성형 중에 fold, 표면균열 등의 결함을 유발할 수 있는 가능성이 높은 공정으로 성형결함이 없는 원하는 형상의 제품을 얻기 위한 방법으로 CDA/CAM 기술 유한요소 해석기술을 통한 최적 금형 설계 기술이 필요하다. 이를 위해 원소재에 대한 열간 성형 시뮬레이터를 이용하여 열간 성형성 시험을 통해 유한요소 해석에 활용할 유동응력곡선을 도출하여 고온변형거동을 이해하고 성형결함을 예측하는 일이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 고온압축시험을 통하여 저탄소강인 A350 LF2 합금의 고온의 변형거동을 연구하였고, 각 변형온도 및 변형속도의 조건에 따른 유동응력의 변화를 정량화 하였으며, 기본적인 변형기구를 분석하기 위해 Dynamic materials model(DMM) [1]을 도입하여, 고온압축조건에 따른 미세조직을 관찰함으로써 A350 LF2 합금의 고온변형특성과 미세조직과의 관계를 이해하고, 최적 성형 조건을 찾고자 한다.

1. 한국기계연구원
한국기계연구원, E-mail: yjt96@kmail.re.kr

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 A350 LF2 합금의 조성은 Table 1 과 같다. 한편 Fig. 1 은 A350 LF2 의 미세조직사진을 나타낸 것으로, 조질 처리 된 조직임을 관찰할 수 있다.

Table 1 Chemical composition of A350 LF2 used in this work

Element	C	Mg	P	S	Si
Wt. (%)	0.30	0.60-1.35	0.035	0.040	0.15-0.30
Element	Ni	Cr	Mo	Cu	Cb	V
Wt. (%)	<0.40	<0.30	<0.12	<0.40	<0.02	<0.08

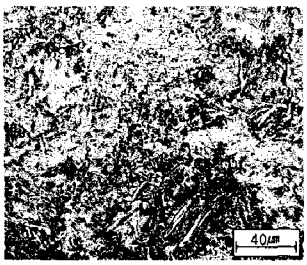

Fig. 1 As-received microstructure of A350 LF2

소재의 고온변형거동을 알아보기 위해 열간가공재현 시험기를 사용하여 압축시험을 수행하였다. 시편은 직경 8mm, 높이 12mm 의 원통형 시편을 사용하였고, 시편과 닿는 부분은 마찰과 열손실을 최소화하기 위해서 홀더와 시편 사이에 운모판을 넣고 시험하였다. 시험온도는 800~ 1250℃에서 50℃간격으로 변형속도는 10^{-3} ~$10^{1}s^{-1}$ 에서 10^{1} 간격으로 수행되었고 진변형률 0.7 까지 압축되었다. 압축시편 전과 후 시편 단면은 Nital 3% 용액(97ml 알코올 + 3ml 질산)을 이용하여 5~10 초 정도 부식시킨 후 광학 현미경으로 미세조직을 관찰하였다. 압축시험 후 조직 및 유동응력 곡선을 이용하여 고온변형거동에 대한 공정도를 작성하였고, 미세조직과 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압축시험에 따른 A350 LF2 의 고온 변형 거동 분석

일반적으로 주어진 재료에 대하여 고온 유동응력은 일정한 변형률 조건에서 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 K 는 강도상수로 변형률, 온도 등에 의존하며, m 은 변형민감도로 다음과 같이 나타낼수 있다. 변형속도민감도(m)는 안정한 재료유동에 대한 한가지 기준이 된다.

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

Fig.2 는 유동곡선들로부터 진변형률이 0.7 인 조건에서(a)는 온도에 따른 변형률 속도의 유동응력을 보여 주며, (b)는 여러 응력조건에 따른 1/T 과 ln? 의 관계 그래프를 나타낸 것으로, 변형률 속도를 변수로하여 Linear statistical regression 방법으로 값을 구하고 그 값을 이용하여 활성화에너지 ($Q = -R\left[\partial \ln(\dot{\varepsilon}) / \partial \ln(1/T)\right]_{\sigma}$, R: 기체상수)를 구하였다. 모든 응력조건에서 얻어진 활성화 에너지 Q 는 347KJ/mol 로 거의 일정한 값을 나타내었다.

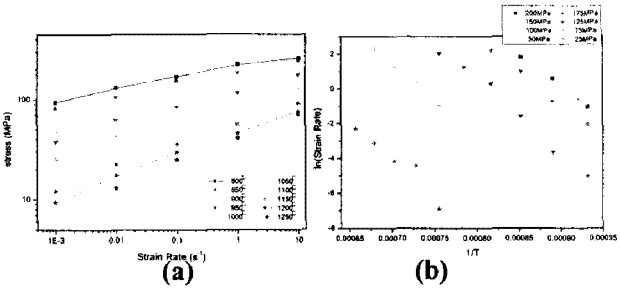

Fig. 2 (a) Variation of the flow stress with different strain rates and temperature (b) plot of ln(strain rate) vs. inverse temperature

A350 LF2 소재의 최적의 성형조건을 도출하기 위해 동적재료모델(Dynamic materials Model)을 활용하였고, 열간성형 중에 발생되는 전단 밴드, 내 외부 균열 등의 성형결함을 예측하기 위한 방법 Malas 등에 의해 제안된 4 가지 소성유동안정기준과 Ziegler[2]에 의해 제안된 소성불안정인자가 적용되었다. Prasad 와 Gegal[3] 등은 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 변형에너지 분산특성은 미세조직의 변화에 기인한다고 하였다. 재료의 소성변형에 대한 에너지분산 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법으로 식 (3)에 제시된 에너지분산 효율(η)을 활용하였다.

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

이러한 에너지 분산 효율(η)은 소재에 가해지는

총 에너지에 대해서 재료의 미세구조적 변화를 효과적으로 기술하는데 사용될 뿐만 아니라 안정 및 불안정 영역을 묘사하는 데에도 사용될 수 있다.[4] 에너지 분산 효율이 최대인 경우 동적 미시구조적 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다[5].

한편, Malas 등은 열간 성형시의 소성안정 기준으로 Liapunov 함수를 도입한 다음과 같은 4 가지 소성안정기준을 정의하였다.

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

$$m' = \partial m / \partial(\ln \dot{\varepsilon}) < 0 \tag{5}$$

$$s = \left[-\frac{1}{T} \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\varepsilon}\varepsilon} \ge 1 \tag{6}$$

$$s' = \partial s / \partial(\ln \dot{\varepsilon}) < 0 \tag{7}$$

이러한 조건들을 만족하는 경우 성형안정구간으로 정의 될 수 있다. 또한, Ziegler 는 고온변형 동안에 유동 불안정 구간을 정의하기 위하여 다음과 같은 소성 불안정 인자($\zeta(\dot{\varepsilon})$)을 제안하였다. 여기서 $\zeta(\dot{\varepsilon})$ 이 음의 값을 가질 때 소성불안정 구간으로 정의된다.

$$\zeta(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \tag{8}$$

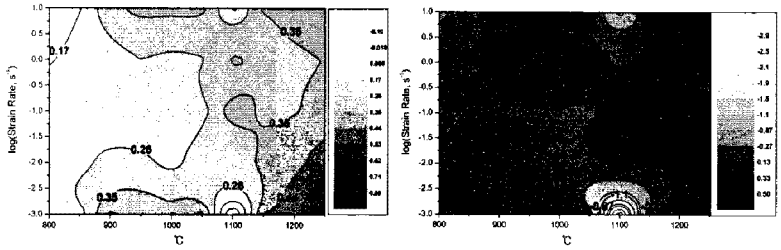

Fig. 3 Processing map of A350 LF2 alloy
(a) the efficiency of power dissipation (η)
(b) Ziegler's instability criterion (ζ)

Fig. 3 은 동적재료모델의 에너지 분산효율을 활용한 변형공정지도와 함께 Ziegler 의 소성불안정 지도를 나타낸 것이다. 에너지 분산효율치를 나타낸 변형공정지도에서 알 수 있는 바와 같이 1250℃의 변형속도가 느린 10^{-3} s^{-1} 영역에서 가장 높은 에너지 분산효율치를 나타내었으며, 결국 이러한 영역은 성형의 최적 조건임을 알 수 있다. 한편, Ziegler 의 소성불안정지도 상에서 1100℃ 온도, 변형속도가 느린 10^{-3} s^{-1} 조건과 변형속도가 빠른 10^{1} s^{-1} 조건을 소성불안정 영역으로 표시

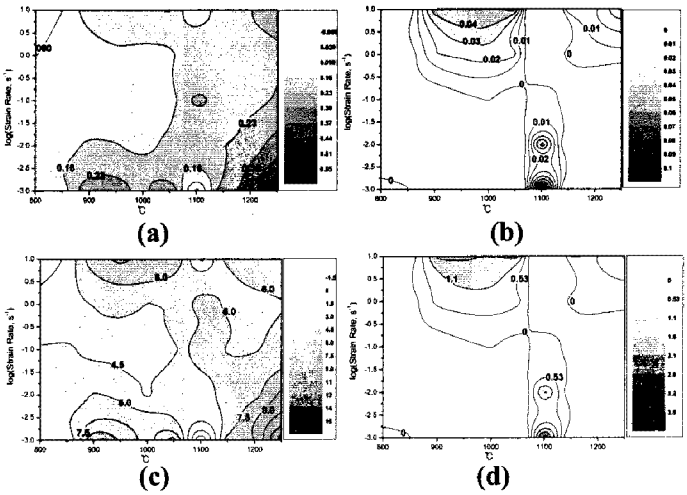

Fig. 4 Processing map of A350 LF2 alloy (ϵ=0.7)
(a) strain rate sensitivity (m) (b) m′
(c) temperature sensitivity (s) (d) s′

하고 있음을 관찰 할 수 있다. Fig. 4 는 Malas 등에 의해 제안된 4 가지 소성안정기준을 통해 얻어진 소성불안정지도를 나타낸 것이다. 지도들 중 m′ 과 s′ 의 지도에서 양의 값을 보이는 구간이 여러 영역에서 관찰되며, 결국 이러한 부분은 소성불안정영역으로 성형결함의 발생확률이 높은 것으로 간주될 수 있다. 여기서 특이한 사항은 Ziegler 소성불안정기준과 Malas 등의 4 가지 소성안정기준 모두 1100℃, 변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 조건을 소성불안정영역으로 표시하고 있는 것으로, 이 영역에 대한 조직적 고찰이 이루어졌다.

3.2 고온변형에 따른 미세조직 변화 및 고찰

앞에 언급 된 변형공정지도상의 최적조건과 소성불안정 영역에 대한 자세한 분석을 위해서 고온압축 후 온도와 변형속도에 따른 미세조직을 관찰하였다. 850~1000℃ 구간에서 미세조직을 관찰한 결과 변형온도가 높을수록 페라이트의 크기 및 부피분율이 감소하였고, 변형 속도가 느려짐에 따라 결정립 크기는 증가하는 경향을 보였다. 이것은 변형열(deformation heating) 에 의한 상분율의 변화와 함께 결정립 성장에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 5 은 진변형률 0.7 인 조건에서 에너지 분산효율 (η) 과 소성 불안정 구간을 나타낸 그래프에 주요 미세 조직을 나타낸 것이다. 소성불안정 구간은 빗금 친 부분으로 표시하였고, 이러한 소성불안정 구간 에서의 소성변형은 최종제품에 전단변형밴드, 내부 및 표면균열과 같은 변형결함이 발생될 가능성이 있음을 나타내는 것 이다[5].

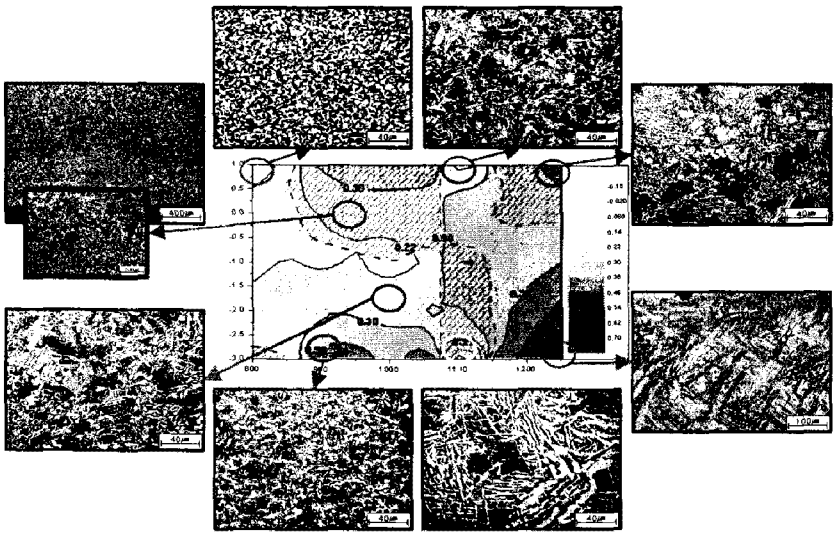

Fig. 5 Microstructure and hot deformation processing map of A350 LF2 alloy (ε =0.7)

미세조직 관찰 결과에서는 전단밴드나 내부균열은 보이지 않았으나, 가장 뚜렷한 불안정성을 보이는 구간인 1100℃, 변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 조건에서 미세조직을 관찰한 결과, 급격한 동적결정립 성장이 있음을 확인할 수 있었다. 또 다른 소성불안정 영역인 900~1050℃온도구간, 변형속도 10^{1}~$10^{-1}s^{-1}$ 사이에서의 미세조직 관찰결과, 비변형 영역(dead zone)과 다른 부위와의 조직적 불균일성이 관찰 됨을 확인할 수 있었다. 한편, 가장 높은 에너지 분산 효율을 보이는 구간은 1250℃, 변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 로 0.62(62%)값을 나타내었다. 이 영역에 대한 조직적 상이함이 명확하게 관찰되지 않으나, 미세한 페라이트 결정립이 관찰되는 것으로 보아 동적 재결정에 의한 미세화가 중요한 에너지 분산효율의 상승요인으로 판단된다. 결과적으로 에너지분산효율이 가장 높게 나타난 1250℃, 변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 구간이, 이 합금의 적정한 성형조건임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 A350 LF2 합금의 고온압축시험을 토대로 변형속도와 온도 및 유동응력 거동에 따른 고온변형거동을 조사하였다. 고온압축시험을 통하여 얻은 유동곡선들로부터 활성화 에너지를 계산한 결과 347KJ/mol 이었다. 동적 재료 모델과 Malas 등의 4 가지 소성안정기준, Ziegler 의 소성불안정기준을 기초로 변형공정지도와 주요영역에 대한 조직분석결과, 900℃~1050℃와 변형속도 10^{1}~$10^{-1}s^{-1}$ 사이 영역과, 1100℃변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 영역이 소성불안정 구간으로 관찰되었으며, 조직 분석에서 전자는 조직적 불균일을 나타내었고, 후자는 급격한 동적 결정립 성장이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 또한 가장 높은 에너지분산효율은 1250℃ 변형속도가 느린 $10^{-3}s^{-1}$ 으로, 이 영역을 A350 LF2 합금의 최적성형 조건으로 제시하였다.

후 기

본 연구는 부품소재기술 지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Y.V.R.K. Prasad and S.Sasidhara, *Hot Working Guide-a compendium of processing maps*, Materials Park OH 44073-0002, ASM International, 1997

[2] H.Ziegler, 1963, "Progress in Solid Mechanics", John Wiley and Sons. New York, NY, Vol.4, p,93.

[3] Y.V.R.K Prasad, et al, 1984, "Modeling of dynamic material behavior in hot deformation", Metal. Trans. A, Vol.15A, p. 1883.

[4] C. I. Garcia,et. Al., 1994, "Hot deformation behavior of superalloy 718", Superalloys 718, 635, 706, p. 293.

[5] J.T.yeom, Y.S.Na, 2002, Assessment of hot deformation and grain size distribution in a udimet 720Li Pancake, Transactions of Materials Processing, Vol.11, No.6 pp.539~541.