

Ti-6Al-4V합금의 열간 후방압출에 대한 성형 안정성 평가모델의 고찰

Investigation of Forming Stabilities Criteria in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V

염종택* Yeom, Jong-Taek	박노광* Park, Nho-Kwang	이유환** Lee, You-Hwan	신태진** Shin, Tae-Jin
황상무** Hwang, Sang-Mu	홍성석*** Hong, Sung-Suk	심인옥*** Shim, In-Ok	이종수** Lee, Chong-Soo

ABSTRACT

The metal forming behavior of Ti-6Al-4V tube during hot backward extrusion was investigated with various forming stabilities or instabilities criteria. that is, Ziegler's instability criterion, dynamic materials model(DMM) stability criteria and Rao's instability criterion. These approaches also were coupled to the internal variables generated from FE simulation. In order to validate the reliabilities of three criteria, hot backward extrusions for Ti-6Al-4V tube making were carried out with different backward extrusion designs. The useful model for predicting the forming defects was suggested through the comparison between experimental observations and simulation results.

주요기술용어(주제어) : Forming Stabilities Criteria(성형 안정기준), Hot Backward Extrusion(열간 후방압출), Ti-6Al-4V Alloy(Ti-6Al-4V합금), Forming Defects(성형결함)

1. 머리말

최근 유한요소해석기술의 발달과 함께 단조, 압연, 압출 등 소성가공분야에서 최소한의 비용으로 성형공정 최적화를 얻기 위한 노력이 이루어지고 있으며,

특히 열간성형공정시 과거 형상제어에 국한된 공정 최적화에서 벗어나 성형 중 발생할 수 있는 성형결함과 미세조직적 변화를 고려함으로써 제품의 품질을 향상시키고자 하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.^[1] 일반적으로 열간성형시 금형과 소재사이의 마찰과 die chilling에 의한 소재 표면과 중심의 온도불균일에 기인하여 전단밴드, 공공생성 및 V자형 크랙과 같은 내부균열과 표면균열 등의 성형결함을 일으키는 것으로 알려져 있다.^[2] 이러한 성형결함은 난성형재인 티타늄 및 니켈합금에서 자주 발생되며, 특히 티타늄 합금과 같이 가공열처리공정에 따라 조직의 변화가

† 2004년 5월 13일 접수~2004년 7월 20일 심사완료

* 한국기계연구원(KIMM)

** 포항공대(Pohang University of Science And Technology)

*** 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : yjt96@kmail.kimm.re.kr

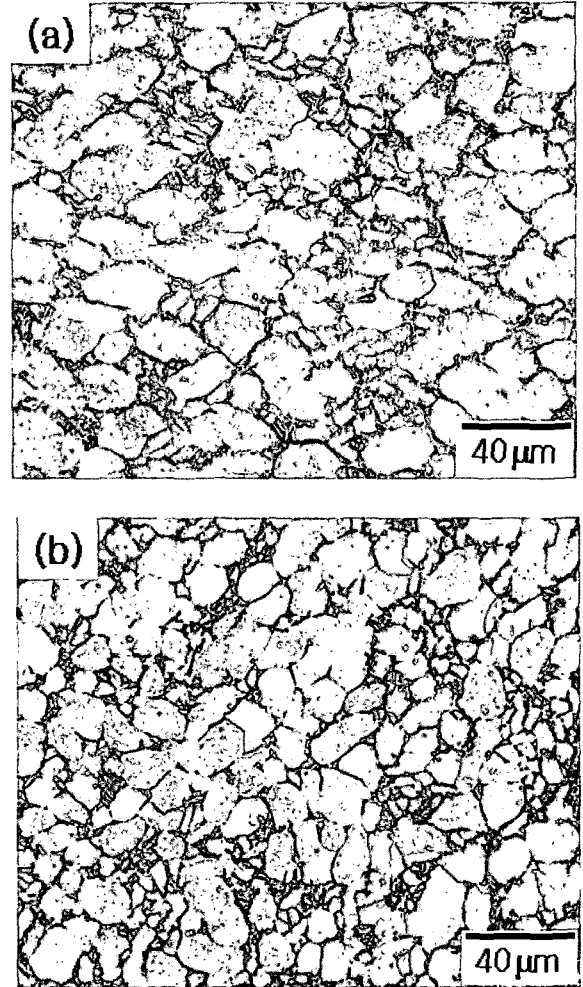
다양하게 나타나는 경우 부품의 열간성형공정에 앞서 재료의 가공성 및 공정변수에 따른 성형결함 발생여부와 조직변화를 예측하는 일은 상당히 중요하다. 지금까지 열간성형시 발생하는 성형결함을 예측하기 위한 연구들은 Prasad, Gegle^[3] 등에 의해 제안된 동적재료모델(Dynamic Materials Model)로 부터 Ziegler^[4], Malas^[5]의 소성불안정 및 안정기준 등 다양한 방법이 연구되어 왔으며, 이러한 접근방법들은 $\alpha+\beta$ 티타늄합금, β 티타늄합금 등에 적용하여 신뢰성을 입증한 바 있다. 그러나 아직까지 열간 성형공정설계에서 이러한 모델들이 광범위하게 사용되기 위해서는 많은 검증이 요구된다. 본 연구에서는 150톤 유압프레스를 이용하여 외경이 약 65mm정도인 Ti-6Al-4V 튜브형상을 금형과 소재형상, 금형온도 등의 성형변수에 따라 열간 후방압출공정으로 제조하였고, 이때 발생할 수 있는 표면균열, 전단밴드 등과 같은 성형결함을 예측하기 위한 동적재료모델, Ziegler 및 Rao 소성불안정기준, 동적재료모델 소성안정기준 등을 검토하였다. 또한 이 모델들을 FE해석과 연계하여 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브에서의 성형결함을 예측함과 동시에 이들 모델을 상호 비교하여 신뢰할 수 있는 성형결함 예측모델을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

가. Ti-6Al-4V 원소재 및 유동응력데이터

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V합금은 704℃에서 2시간 가열후 공냉된 Annealing상태의 조직으로 그림 1에 축방향과 횡방향의 조직사진을 나타내었다. 그림에 나타낸 조직사진에서 알 수 있는 바와 같이 약 85%정도의 등축 α 상과 공냉중에 β 상으로부터 석출한 α 상과 잔류 β 상으로 구성되어 있으며, 빌렛의 내·외부가 균일한 조직인 건전한 초기조직상태를 나타내었다.

이 합금의 유동응력 데이터와 고온 재료거동을 파악하기 위한 조직관찰결과들은 전에 보고된 연구결과^[6]를 참고로 얻어졌다. 기 보고된 유동곡선 데이터는 티타늄합금의 ($\alpha+\beta$)영역인 시험온도 850~1000℃ 구



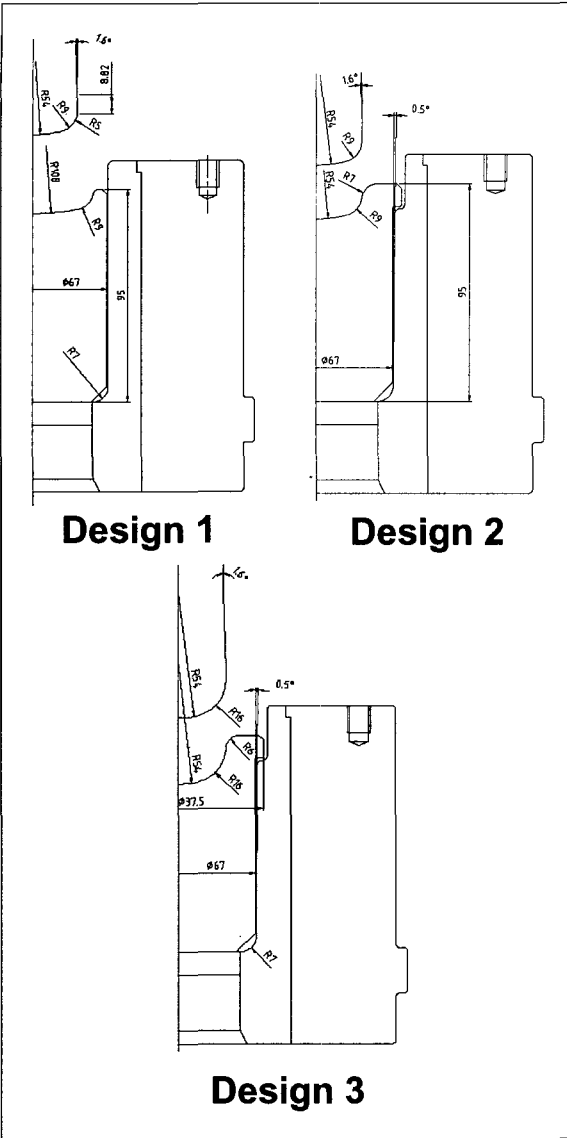
[그림 1] Ti-6Al-4V 빌렛의 (a)축방향과 (b)횡방향에서 관찰된 미세조직

간과 변형속도 $10^{-3} \sim 10s^{-1}$ 구간에서 압축율 65%(진변형량 1.0)까지 고온 압축시험한 결과이며, 고온압축시험은 전용 고온압축시험기인 Gleeble장비를 이용하여 수행된 결과이다.

나. Ti-6Al-4V합금의 열간 후방압출

여러 성형 안정성 평가모델들의 신뢰성을 검증하기 위하여 열간 후방압출공정을 통한 Ti-6Al-4V합금의 튜브형상을 성형하였다.

성형에 사용된 장비는 150톤 유압프레스를 이용하였고, 펀치와 하부금형의 형상 및 이에 따른 초기소



[그림 2] Ti-6Al-4V합금 열간 후방압출에 대한 금형 및 초기빌렛 형상 설계

재 형상, 금형온도 등의 성형변수에 따라 수행하였다. 그림 2는 본 연구에서 제시된 3가지 금형 및 초기형상 설계를 나타낸 것이고, 표 1은 3가지 설계모델에 대한 후방압출조건을 나타내었다.

설계(Design) 1은 마찰과 chilling 측면에서 가혹한 금형설계에 따른 후방압출거동을 살펴보기 위한 것으로 하부금형에 draft angle없이 설계되었고, 일반 열

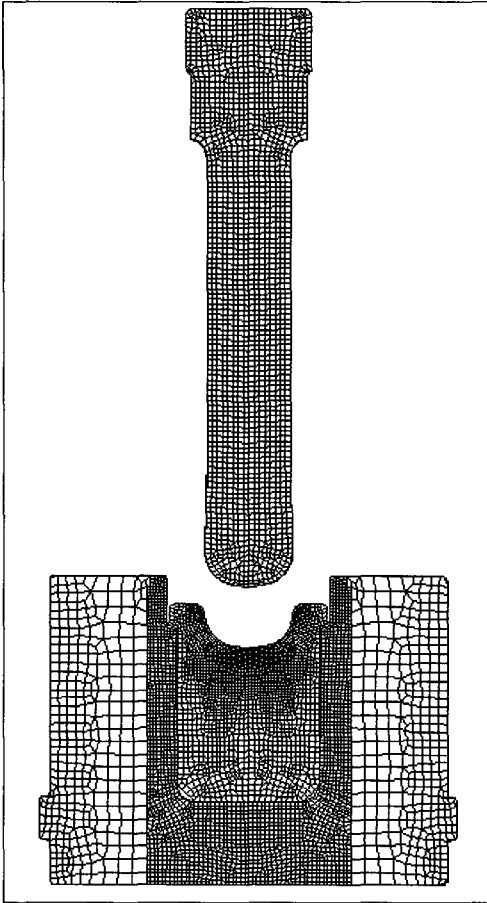
[표 1] Ti-6Al-4V합금의 후방압출조건

	후방압출조건
Design1과 Design2	<ul style="list-style-type: none"> • 하부다이 및 punch 가열온도 - 350℃ • 소재가열온도 - 970℃
Design3	<ul style="list-style-type: none"> • 하부다이 온도 - 600℃ • punch 가열온도 - 500℃ • 소재가열 온도 - 970℃

간성형조건에 따라 수행된 것이다. 설계 2의 경우 설계 1의 하부다이를 수정하여 0.5°의 draft angle을 주어 압출중 소재와 하부다이간의 마찰과 chilling을 최소화하도록 설계되었으며, 특히 성형후 stripper를 통해 시편을 잘 분리할 수 있도록 초기 빌렛 상부형상의 수정이 이루어 졌다. 설계 3은 펀치와 소재사이의 고착문제를 최소화하기 위해 설계 2에서 펀치 하부 코너의 radius를 R9에서 R16으로 증가시켰으며, 특히 하부다이와 펀치 가열온도를 설계 1과 2에 비해 더욱 높게 상승시켜 고착문제와 표면결함 등을 최소화하고자 하였다. 소재 온도의 경우 통상적으로 티타늄합금의 (α+β) 열간성형에 대해 β 변태점을 기준으로 약 30℃정도 낮은 가열온도에서 수행하며, Ti-6Al-4V합금의 β 변태점이 약 1000℃임을 감안하여 970℃로 소재 가열온도를 선정하였다. 또한 소재 가열시 산화방지를 위하여 Deltaglaze #151 유리(glass) 코팅제를 사용하였다. 금형가열 후 oil-base 흑연윤활제를 도포하여 마찰을 최소화하고자 하였고, 후방압출시 압출속도는 30mm/s로 약 75%까지 성형되었다.

다. 후방압출에 대한 FE해석

Ti-6Al-4V합금의 후방압출시 부위별 변형률, 온도, 변형속도 등의 내부변수들을 얻기 위해서 상용 유한요소해석코드인 DEFORM-2D가 이용되었으며, 이때 해석은 열과 변형해석이 연계되어 이루어 졌다. 금형과 소재사이의 계면열전달계수와 마찰계수 등은 실험적으로 얻어진 값들인 5kW/m²℃와 0.3을 사용하였다.^[7] 그림 3은 설계 3에 대한 초기 FE해석모델



[그림 3] Ti-6Al-4V합금 열간 후방압출에 대한 FE 초기 모델링

[표 2] Ti-6Al-4V 후방압출의 FE해석 조건

	설계1	설계2	설계3
압출속도(mm/s)	30		
램이동 거리(mm)	86.8		
금형 및 펀치온도(°C)	350	펀치-500 금형-600	
마찰계수	0.3		
열전달계수(kW/°Cm ²)	5.0		
소재의 이송시간(sec)	5		
금형과 소재사이의 접촉시간(sec)	8		

을 나타낸 것으로 소재의 변형이력에 대한 중요성을 감안하여 소재에 fine mesh가 적용되었으며, 표 2에 제시된 조건에 따라 성형해석이 수행되었다. 결국, Ti-6Al-4V합금의 후방압출 FE해석을 통해 얻어진 내부변수들은 성형안정성 평가모델과 연계되어 성형 결함의 예측에 활용하였다.

3. Ti-6Al-4V합금의 성형안정성평가 모델들의 검토

가. 동적재료모델 및 성형안정성 평가 기준

본 연구에서 후방압출에 의한 Ti-6Al-4V 튜브 성형시 성형성 평가를 위해서 가장 먼저 고려된 모델은 동적재료모델(dynamic materials model)^[3]이다. 이 모델은 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지 분산특성은 재료의 소성 변형에 의해서 소모되는 에너지(G)와 미세조직적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지(J)에 기인한다는 것으로, 소성변형동안 흡수된 power는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P = G + J \tag{1}$$

$$\sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \tag{2}$$

이 모델에 따르면 가공성 또는 가공효율을 극대화 하기 위해서는 가공 중 외부에서 유입된 power가 열적 방출보다는 변형되는 재료의 미세조직적 변화에 소모되는 것이 유리하게 되며, 이를 정량적으로 표현 하기 위해서 식 (3)에 나타낸 에너지 분산 효율(η)을 제시하였다.

$$\eta = 2m / (m + 1) \tag{3}$$

$$m = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{T, \epsilon} \tag{4}$$

여기서, m은 변형속도 민감도계수이다. 결국, 에너지

지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미세조직적 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다. 그러나, 이러한 동적재료모델은 재료의 최적성형조건을 도출하는데는 활용될 수 있으나, 성형안정성을 평가하는데는 효과적으로 이용될 수 없는 단점이 있다. 따라서, 열간성형 중에 발생될 수 있는 전단밴드, 균열 등의 성형결함을 예측하기 위해서는 이를 판단할 수 있는 기준들이 요구되며, 본 연구에서는 Ziegler^[4], Malas^[5], Rao^[8] 등에 의해서 제안된 방법을 사용하였다. 먼저, Ziegler에 의해 제안된 소성불안정기준 (instability criterion)은 불안정한 소성유동에 대하여 다음과 같은 조건을 제시하였다.

$$\frac{dD}{d\dot{\epsilon}} < \frac{D}{\dot{\epsilon}} \quad (5)$$

여기서, D는 분산함수(dissipative function)이며, 분산되는 power에 의해 주어지는 특성인자이다. 만일 전체 power가 앞서 언급된 G와 J로 양분된다면, D는 J로 표현할 수 있으며, 다음과 같은 소성불안정성 인자(ξ)를 정의할 수 있다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln [m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (6)$$

여기서, 무차원 인자(ξ)은 온도와 변형속도의 함수로써 음의 값을 나타내는 경우 유동불안정구간으로 정의된다. 이러한 소성불안정성 인자(ξ)는 열역학적 비가역성을 표현하는 것으로 적어도 계(system)에 가해지는 속도에 해당하는 속도로서 엔트로피(entropy)를 발생할 수 없다면, 이것은 재료내부에 축적되어 소성 불안정을 일으킬 수 있음을 의미한다. 한편, Malas 등은 변형속도 민감도계수(m)와 온도민감도계수(s)의 의미와 함께 Liapunov function에 기초한 기준들을 도입하였으며, 소성안정구간에 대해 다음과 같은 4가지 조건을 제시하였다.

$$0 < m \leq 1 \quad (7)$$

$$m' = \partial m / \partial (\ln \dot{\epsilon}) < 0 \quad (8)$$

$$s = \frac{1}{T} \frac{\partial (\ln \sigma)}{\partial (1/T)} > 1 \quad (9)$$

$$s' = \partial s / \partial \ln \dot{\epsilon} < 0 \quad (10)$$

여기서, 이들 영역들의 정의는 에너지가 안정기구로 소모되는지 불안정기구로 소모되는지를 의미한다.

Murty와 Rao^[8]는 Ziegler의 소성불안정기준의 이론적 고찰을 통해 불안정 소성유동에 대한 새로운 기준을 제시하였으며, 그 기준은 다음과 같다.

$$\xi_1 = 2m/\eta - 1 < 0 \quad (11)$$

여기서, m은 변형속도민감도계수이고 η 는 에너지 분산 효율을 의미하며, 만일 동적재료모델과 연계된다면 $\xi_1 = m$ 의 관계가 성립되고, $m < 0$ 인 조건이 소성 불안정조건임을 알 수 있다.

나. Ti-6Al-4V 고온압축시험 데이터 분석

그림 4는 기존에 수행된 고온압축시험에서 얻어진 유동응력데이터를 변형률 1.0에서 변형속도와 1/T (°K)의 함수로 각각 표현한 것으로, 이들 관계 그래프를 통해 앞서 언급된 성형 불안정 및 안정기준을 얻을 수 있다. 이때 이들 관계곡선의 plotting에 활용된 방법은 다항식(polynomial equation) 형태가 이용되었다.

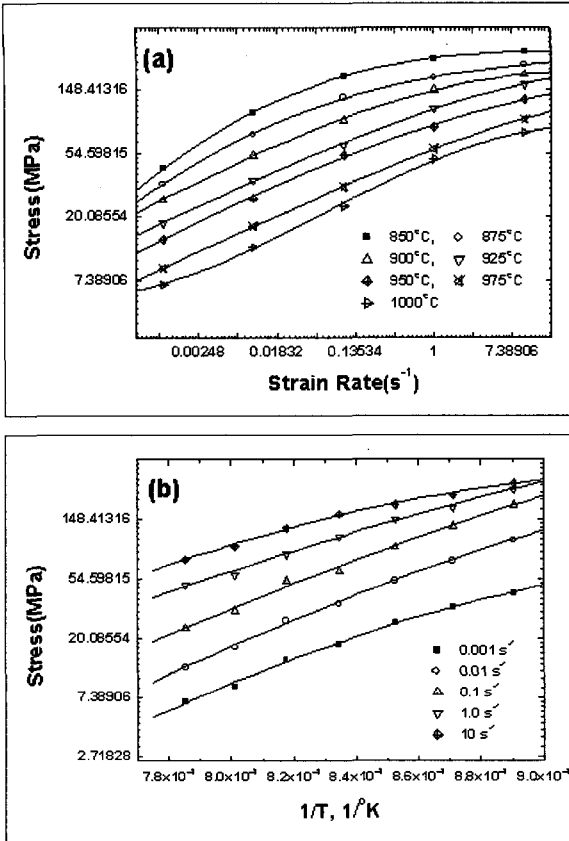
$$\ln(\sigma) = a + b \ln \dot{\epsilon} + c (\ln \dot{\epsilon})^2 + d (\ln \dot{\epsilon})^3 \quad (12)$$

$$\ln(\sigma) = a + b'(1/T) + c'(1/T)^2 \quad (13)$$

여기서, a, b, c, a', b', c' 등은 변형속도 혹은 온도에 의존하는 상수들이다.

이러한 유동응력에 대한 변형속도와 온도의 관계식을 이용하여 앞서 언급된 Ziegler, Malas, Rao의 성형안정성 평가모델 들에 필요한 변수들을 구할 수 있다. 변형속도 민감도계수(m)는 식 (4)와 식 (11)에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m = b + 2c \ln(\dot{\epsilon}) + 3d (\ln(\dot{\epsilon}))^2 \quad (14)$$



[그림 4] Ti-6Al-4V합금의 (a) 응력-변형속도 및 (b) 응력-온도(1/T)곡선

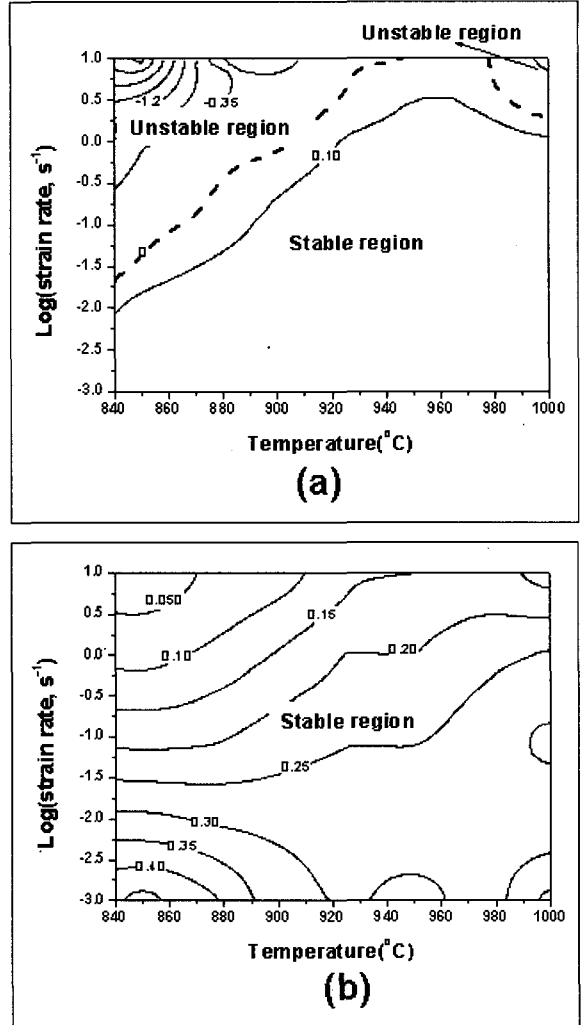
또한, Ziegler의 소성불안정기준은 식 (6)과 식 (14)를 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{2c + 6d \ln(\dot{\epsilon})}{m(m+1)} + m \quad (15)$$

한편, 동적재료모델의 성형 안정기준에서 사용된 변수인 온도민감도계수(s)는 식 (9)와 식 (13)을 결합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

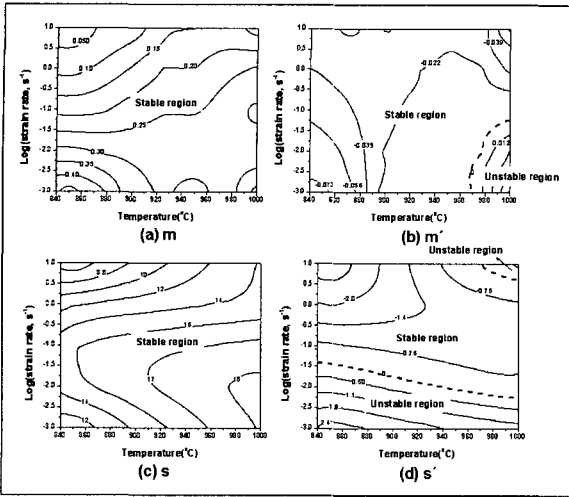
$$s = \frac{b'}{T} + \frac{2c'}{T^2} \quad (16)$$

그림 5는 Ziegler와 Rao의 성형불안정기준에 의해 얻어진 contour map들을 나타낸 것으로 무차원



[그림 5] Ti-6Al-4V합금에 대한 (a) Ziegler와 (b) Rao 성형 불안정 기준들에 의한 Contour map

변수인 ξ 또는 ξ_1 이 음의 값을 나타내는 영역은 소성 불안정구간을 의미한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Rao의 contour map에서는 주어진 온도 및 변형속도조건에서 모두 안정한 성형구간임을 나타내고 있는 반면, Ziegler기준에 의한 결과는 변형속도가 빠른조건에서 대부분 소성불안정구간임을 나타내었다. 실제 조직관찰에서 Ziegler기준에서 성형불안정구간은 대부분 전단밴드와 표면터짐현상이 발생됨을 확인할 수 있었고, 이는 Ziegler기준이 성형결함을 예측함에 있어 보다 우수한 접근방법임을 의미한다.



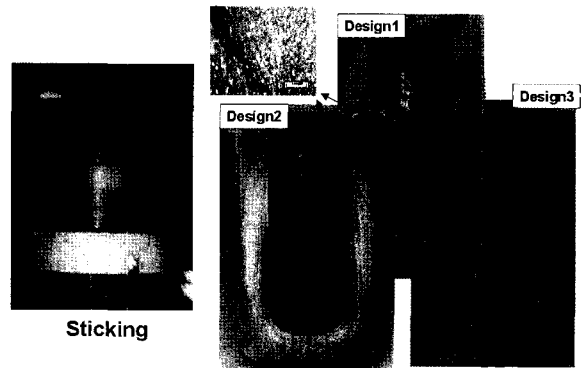
[그림 6] Ti-6Al-4V합금에 대한 동적재료모델 4가지 성형 안정 기준들에 의한 Contour map

그림 6은 Malas 등에 의해 제안된 동적재료모델의 4가지 성형 안정기준에 의해 얻어진 contour map을 나타낸 것이다. 성형안정기준 중 m과 s는 주어진 변형속도와 온도조건에서 모두 성형 안정구간임을 나타내는 반면, Liapunov function에 의해서 도출된 m'과 s' 등의 기준은 Ziegler기준과 달리 변형속도가 느린구간에서 대부분 소성불안정영역을 나타내고 있다. 이러한 결과는 Seetharaman와 공동연구자들^[9]에 의해 발표된 Ti-6Al-4V합금의 고온변형거동에 대한 연구와 유사한 것으로 그들의 연구에서 이러한 낮은 변형속도 조건의 소성불안정성은 동적 결정립성장과 초칭 α상의 동적구상화 등에 기인한다는 것으로 설명한 바 있다. 결국, 이러한 영역에서 변형이 이루어질 경우 대부분 균열 및 미세조직적 불안정 등이 발생하여 효과적인 변형이 이루어지지 않을 것으로 예상된다.

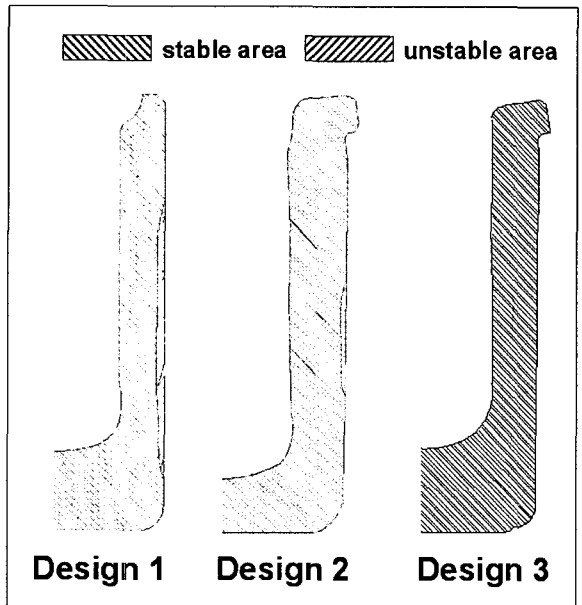
4. Ti-6Al-4V 튜브의 조직 및 성형결함 분석

그림 7은 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브들의 매크로 조직사진과 함께 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브에서 관찰되는 문제점인 표면균열과 소재와 다이사이의 고착문제 등을 나타낸 것이다. 설계 1과 설계 2는 모두

표면균열과 고착문제가 발생한 반면, 설계 3은 표면이 양호하며, 고착문제 또한 발생하지 않았다. 이러한 표면균열은 금형과 소재 간 계면의 마찰과 함께 열전달로 인한 온도 불균일에 기인한 것이며, 고착문제는 주로 소재의 열팽창과 함께 온도하강에 따른 수축에 기인한 것으로 설계 3과 같이 펀치(punch)와 하부다이 쪽의 초기 가열온도의 상승을 통해 해결할 수 있는 것으로 분석되었다.



[그림 7] 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브들의 매크로 조직사진 및 후방압출성형시 문제점

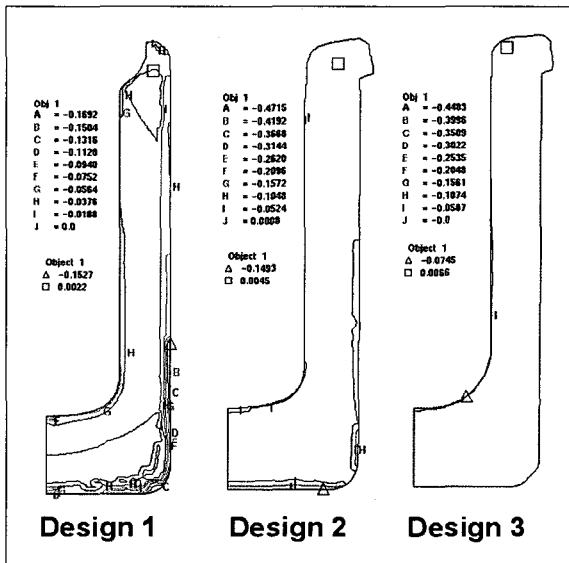


[그림 8] 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브들에서 관찰되는 소성안정영역과 불안정영역

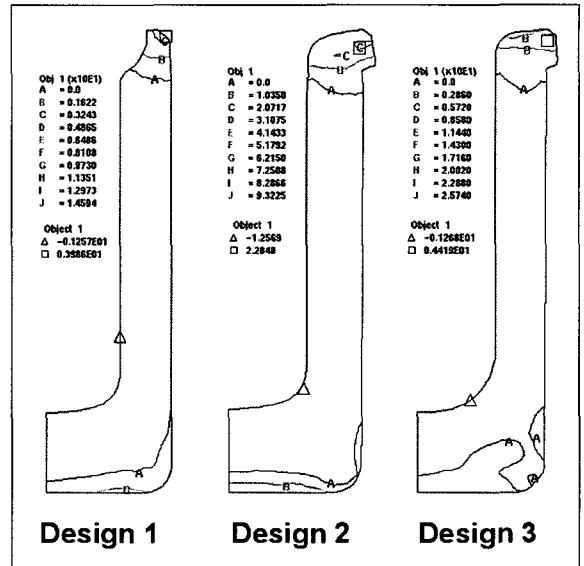
그림 8은 각 설계조건에 따라 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브들에서 관찰되는 표면결합의 발생부위와 영역을 도식적으로 나타낸 것이다. 설계 1과 설계 2의 표면결합 조직 분석결과, 설계 1이 설계 2에 비해 보다 광범위한 영역과 깊은 표면균열의 두께를 나타내는 것으로 관찰되었다. 이러한 설계 1과 2의 차이는 후방압출중 소재와 하부다이 벽면사이의 마찰과 chilling에 기인한 것으로, 후방압출 금형설계시 하부다이에 draft angle의 적용이 필수적으로 요구됨을 의미한다. 반면, 설계 3은 성형결합이 없는 건전한 Ti-6Al-4V 튜브임을 확인할 수 있었다.

그림 9는 Ziegler의 성형불안정기준을 토대로 해석된 각 후방압출조건들에 대한 성형결합 해석결과를 나타낸 것이다. 설계 1에 대한 성형불안정 해석결과는 실제 Ti-6Al-4V 튜브에 나타났던 표면균열 발생부위 뿐만 아니라 튜브 안쪽의 일부분 또한 소성 불안정영역으로 다소 과대평가하는 경향을 가지나, 설계 2에서 성형불안정영역의 감소와 함께 설계 3에서 거의 대부분이 소성안정영역으로 해석된 결과는 실제 조직관찰결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, Rao의 성형불안정기준을 도입하여 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브의 성형결합을 해석한 결과는 모



[그림 9] Ziegler의 소성불안정기준에 의한 각 설계조건에 따른 해석결과



[그림 10] 동적재료모델의 소성안정기준(s')에 의한 각 설계조건에 따른 해석결과

든 조건에서 안정한 것으로 나타나 실제 성형결합의 예측에서 상당한 오차를 나타내고 있음을 알 수 있었고, 그림 10에 제시된 Malas 등의 4가지 성형안정기준을 도입한 성형결합해석결과에서는 s'기준만이 성형결합부위를 나타내고 있으며, s' > 0인 영역이 성형 불안정영역을 의미한다. 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 s'기준은 온도하강이 많이 일어나는 튜브의 밑부분과 상단부분을 성형불안정구간으로 평가하였다. 이러한 결과는 실제 표면결합이 발생된 부위와 비교시 상당히 벗어나는 결과로서, s'기준의 경우 변형속도의 변화보다 급격한 온도상승 또는 하강에 더욱 민감한 변수로서 후방압출시 발생하는 표면결합을 효과적으로 설명할 수 없음을 알 수 있다.

이상의 결과를 토대로 Ziegler에 의해 제안된 소성 불안정기준이 Ti-6Al-4V 튜브의 성형결합 특히 표면균열 발생의 해석시 가장 신뢰도가 높은 성형결합 예측 모델임을 알 수 있었다.

5. 맺음말

본 연구에서는 Ti-6Al-4V합금의 열간다이 후방압

출시 발생되는 성형결함을 예측하기 위해서 Ziegler, Malas, Rao 등이 제안한 성형불안정 및 안정기준을 적용하였고, 실제 금형 및 초기빌렛형상과 금형온도의 변화에 따라 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브들의 조직관찰결과와 비교 분석하였다. 실제 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브의 경우 3가지 설계모델중 금형온도가 350℃로 낮은 설계 1과 2에서 표면균열과 함께 소재와 펀치사이의 고착문제가 발생한 반면, 금형온도가 높은 설계 3에서는 이러한 결함들이 발생되지 않고 건전한 튜브가 성형되었다. 이러한 실제 튜브들에서 발생되었던 성형결함의 예측에서, Ziegler의 성형불안정기준을 통한 해석결과는 다른 Malas, Rao 등에 의해 제안된 성형안정 및 불안정기준에 의해 해석된 경우에 비해 더욱 신뢰할 수 있는 결과를 제시하였다. 결론적으로, 이러한 모델은 향후 소성가공분야의 공정설계시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD)의 연구비 지원과 함께 2003년 국가지정연구실사업(NRL)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. L. Semiatin, V. Seetharaman and I. Weiss, "Hot Workability of Titanium and Titanium Aluminide Alloys", Mater. Sci. Eng. A243, 1998, pp.1~24.
- [2] S. L. Semiatin and J. J. Jonas, Formability & Workability of Metals, ASM, 1984.
- [3] Prasad Y., Gegel H. L., 1984, "Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242", Metall. Trans., A15, p.1883.
- [4] Ziegler, H., 1965, "Some extremum principles in irreversible thermodynamics with application to continuum mechanics", in Prog. Solid Mech., Sneddon, I. N., and Hill, R.(eds.), Vol. 4, Wiley, New York, p.93.
- [5] J. C. Malas and V. Seetharaman, "Using Material Behavior Models to Develop Process Control Strategies", JOM, June 1992, pp.8~13.
- [6] N. K. Park, J. T. Yeom, Y. S. Na, "Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-6Al-4V using processing maps", J. Mater. Process. Technol. Vol. 130~131, 2002, pp.540~545.
- [7] 염종택, 임정숙, 박노광, "Ti-6Al-4V합금의 열간 성형에 대한 계면열전달계수의 결정 및 분석", 한국소성가공학회지, 12권 4호, 2003, pp.370~375.
- [8] S.V.S. Narayana Murty and B. N. Rao, "Hot working characteristics of Zr-2.5Nb using processing maps", Mat. Sci. Tech., Vol. 14, 1998, p.835.
- [9] V. Seetharaman, L. Boothe and C. M. Lombard, Microstructure/Property Relationships in Titanium Aluminides and Alloys(Eds. Y. W. Kim, R. R. Boyer), The Minerals, Metals & Materials Society, 1991, pp.605~622.