

동적재료모델을 활용한 열간 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브의 성형결합 해석

염종택* · 심인규* · 박노광* · 홍성석** · 심인옥**

(2003년 7월 21일 접수)

Assessment of Forming Defects in Hot Backward Extruded Ti-6Al-4V Tubes using Dynamic Materials Model

J. T. Yeom, I. K. Shim, N. K. Park, S. S. Hong and I. O. Shim

Abstract

The metal forming behavior and defect formation in Ti-6Al-4V tube during hot backward extrusion were investigated. Dynamic material model(DMM) including Ziegler's instability criterion was employed to predict the forming defects such as shear band, inner and/or surface cracks. This approach was coupled to the internal variables generated from FE analysis. The simulation results for the backward extrusion were compared with the experimental observation. The chilling effect and friction indicated a great influence on the deformation mode of the tube and the formation of surface cracks. The formation of forming defects in the extruded tube was attributed to non-uniform distribution of strain, strain rate and temperatures in the extruded tubes for the given test conditions.

Key Words : Ti-6Al-4V Alloy, Forming Defects, Dynamic Material Model, Instability Criterion, FE Analysis

1. 서론

최근 단조, 압연, 압출 등의 소성가공시 발생되는 성형결합(전단밴드, 기공, 내부 또는 표면균열 등)과 결정립크기, 조직변화 등의 재질예측을 통해 최적공정을 얻기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.⁽¹⁾ 특히 $\alpha+\beta$ 형 티타늄합금과 같이 가공열처리공정에 따라 조직의 변화가 다양하게 나타나는 경우 재료의 가공성 및 공정변수에 따른 조직변화를 예측하는 것은 상당히 중요한 일이다. 티타늄합금 중 가장 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V(Ti-64)합금은 높은 비강도와 우수한 파괴인성 및 부

식저항성 등과 같은 특성을 가지고 있는 전형적인 $\alpha+\beta$ 형 티타늄합금으로 300°C까지의 비교적 고온에서 견딜수 있기 때문에 항공기용 엔진 및 기체구조 재료로 많이 사용되고 있다. 그러나, 일반적인 금속부품에 비해 티타늄합금으로 제조된 부품의 경우 고가이며, 고온에서의 높은 유동응력과 온도 의존성으로 인하여 가공성이 떨어지기 때문에 산업용 부품에 적용하기 위해서는 많은 제약이 있다. 티타늄합금의 산업용부품으로는 튜브형상이 주를 이루며, 일반적으로 이러한 부품의 성형은 압출공정이 이용된다. 압출공정에 의해 티타늄합금의 튜브형상을 성형할 경우 표면 균열을 피

* 한국기계연구원 공정연구부

** 국방과학연구소 기술연구본부

하기 어려운 것으로 알려져 있으며, 이러한 결함을 최소화하기 위해서는 많은 실험과 시행착오를 요구한다.⁽²⁾ 최근 FE 해석기술의 발달과 함께 최소한의 비용으로 공정최적화를 얻기 위한 노력이 이루어지고 있으나, 성형결합을 예측함으로써 형상 정밀도 만족 뿐만 아니라 제품의 품질을 향상 시키고자 하는 연구는 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 후방압출된 Ti-64 튜브형상에 대해 성형결합을 예측하기 위하여 한가지 모델로 소성 불안정기준을 결합한 동적재료모형⁽³⁻⁵⁾을 검토하고, FE 해석과 연계할 수 있는 방법을 모색함과 동시에 후방압출된 Ti-64 튜브에서 발생하는 성형결합을 예측함으로써 신뢰성 있는 성형결합 예측방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 고온 압축시험

본 연구에서 사용된 Ti-64 원소재는 704°C 에서 2 시간 가열한 후 공냉된 annealing 상태로, 조직은 미세한 등축 α 상과 공냉 중에 β 상으로부터 석출한 α 상과 잔류 β 상으로 구성된 β 변태상으로 되어 있으며, 등축 α 상의 평균분율은 0.85 로 측정되었다.(Fig. 1 참조)

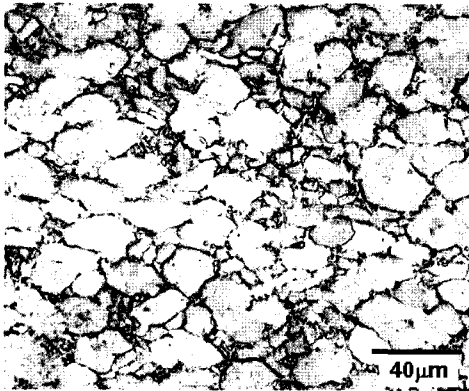


Fig. 1 Microstructure of Ti-6Al-4V

이 합금의 유동응력 데이터와 고온 재료거동을 파악하기 위해서 고온 압축시험을 수행하였고, 시험장비로는 전용 고온 압축시험기인 GLEEBLE 을 사용하였다. 이때 시험편 형상은 지름 10mm× 높이 12mm 의 원통형으로 제작하였다. 시험편과 다이 사이에 sticking 을 방지하기 위해서 0.1mm 두께의 tantalum foil 이 사용되었고, 마찰을 최소화하기 위

해서 흑연 foil 이 사용되었다. 또한 압축시험조건은 $\alpha+\beta$ 영역인 시험온도 850~ 1000°C 구간과 변형률속도 $10\sim 10^{-3} s^{-1}$ 구간에서 압축율 65%(진변형률 1.0)까지 수행하였다.

2.2 열간 후방압출

Ti-64 합금의 후방압출에 의한 튜브형상의 성형은 150 톤 유압프레스가 이용되었으며, 후방압출의 금형 및 punch형상은 Fig. 2 에 도식적으로 나타내었다. 소재 가열시 산화방지를 위하여 Deltag-laze #151 코팅제를 사용하였으며, 소재가열온도는 β -변태점(~1000°C)보다 20~30°C정도 낮은 970°C로 설정하였다. punch와 하부금형의 가열은 밴드히터를 이용하여 350°C로 가열하였고, 가열후 oil-base 흑연윤활제로 도포되었다. 후방압출시 압출속도는 30mm/s로 약 75%까지 성형되었다. 한편, 후방압출을 위한 초기 빌렛형상은 Fig. 3 에 나타내었으며, 초기 성형시 편치의 위치 선정을 위하여 빌렛 상단에 안내홈을 가공하였다.

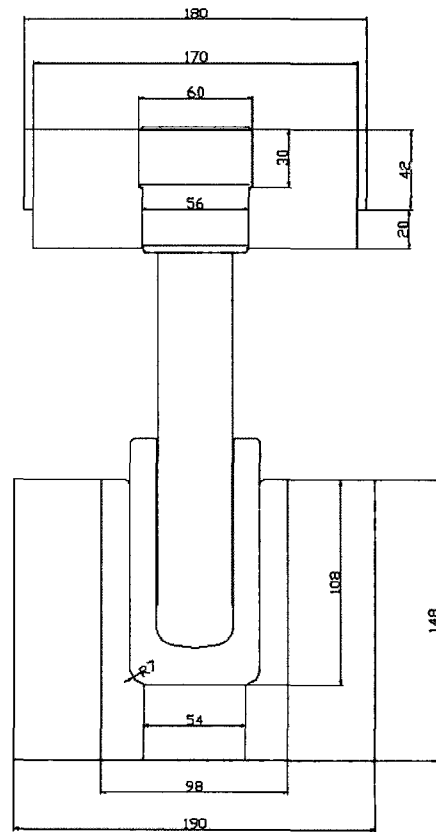


Fig. 2 Schematic illustration of fixture used to backward extrusion for Ti-6Al-4V

3. 실험결과 및 고찰

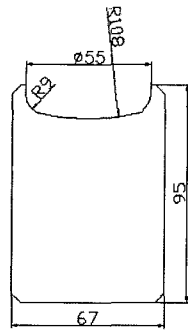


Fig. 3 Initial billet shape of the backward extrusion

2.3 후방압출에 대한 FE 해석

후방압출공정에 대한 변형률, 변형속도, 온도분포와 같은 공정변수들을 얻기 위해서 상용 FE코드인 DEFORM -2D가 이용되었다. 이때 해석에 필요한 열전달 및 유동응력 데이터는 이전에 보고된 논문⁽⁶⁾을 활용하였다. 또한 금형과 소재사이의 계면열전달계수는 하중에 따라 달리 나타나며, 비등온 열전달 측정실험에서 직접적으로 측정된 값을 이용하였다.⁽⁷⁾ 즉, 하중이 가해지지 않은 경우 0.07kW/m²°C, 성형이 이루어져 하중이 가해지는 경우 3kW/m²°C를 사용하였다. 또한 경계면 마찰계수는 0.3으로 입력하여 해석하였다. Fig. 4는 Ti-64 후방압출에 대한 초기 FE해석 모델링을 나타낸 것으로 소재의 변형이력에 대한 중요성을 감안하여 소재에 fine mesh를 적용하였고, 앞서 언급된 후방압출의 실험조건에 따라 FE해석되었다. 결국, 이러한 FE해석을 통해 얻어진 변형률, 변형속도, 온도분포는 성형결함예측모델과 연계되어 Ti-64합금의 후방압출시 발생하는 성형결함을 예측하는데 활용하였다.

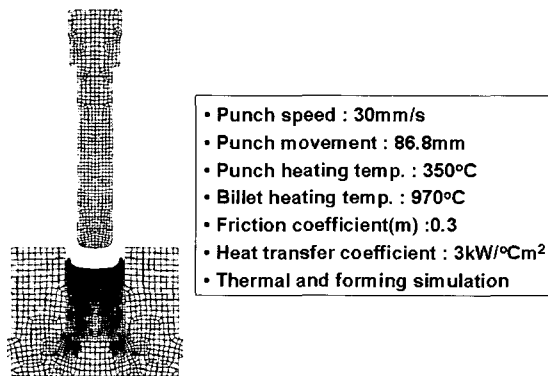


Fig. 4 Initial mesh for the backward-extrusion simulation

3.1 소성불안정인자를 포함한 동적재료모델

동적재료모델(Dynamic Materials Model)은 재료의 조성적 거동, 열간 성형성 및 미세조직적 변화사이의 관계를 연계시킨 것으로, 열간가공시 복잡한 재료들의 가공성, 파괴 및 유동 거동을 거시적으로 표현하기 위한 방법으로 개발되었다. Prasad⁽⁸⁾ 등은 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지 분산특성은 고온에서 재료를 변형시킬 때 재료의 소성변형에 의해서 소모되는 에너지와 미세조직적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지에 기인한다고 하였으며, 결국 이러한 미세조직적 변화는 온도와 변형속도의 함수로 얻어지는 변형속도민감도를 통해서 예측이 가능함을 입증한바 있다. 가공성 또는 가공 효율을 극대화하기 위해서는 가공중 외부에서 유입된 power 가 열적 방출보다는 변형되는 재료의 미세조직적 변화에 소모되는 것이 유리하게 되며, 이를 정량적으로 표현하기 위해서 식(1)에 나타낸 에너지 분산 효율(η)을 제시하였다.

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \quad (1)$$

여기서, 변형속도 민감도계수 m 은 통상 다음과 같이 표현된다.

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right)_T = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_T \quad (2)$$

결국, 에너지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미세조직 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다. 한편, Ziegler⁽⁹⁾는 고온 변형동안 소성 유동 불안정성을 평가하기 위한 continuum criterion으로 다음과 같은 소성 불안정인자(ξ)를 제안하였다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (3)$$

여기서 ξ 이 음의 값을 나타내는 경우 유동불안정구간으로 정의된다. 이러한 모델들을 실제 후방압출공정시 Ti-64 튜브에서 발생하는 성형결함을 예측하는데 이용하기 위해서는 변형속도, 온도 등

의 성형변수에 따른 공정지도(Processing Map)가 요구되며, 고온압축시험 결과의 분석을 통해 얻을 수 있다.

3.2 Ti-64 고온압축시험결과 분석

본 연구에서는 고온압축시험결과에서 얻어진 유동응력곡선과 조직관찰결과를 토대로 공정지도를 작성하여 성형결합예측에 활용하였다. 먼저, 변형률속도와 온도의 함수로서 변형속도 민감도 계수(m)를 얻기 위해서 Fig. 5 와 같은 변형률속도와 응력에 대한 log-log 그래프가 이용되었으며, 이때 유동응력은 주어진 변형온도에 대하여 다음과 같은 다항식(polynomial equation)으로 표현할 수 있다.

$$\ln(\sigma) = a + b\ln(\dot{\epsilon}) + c(\ln(\dot{\epsilon}))^2 + d(\ln(\dot{\epsilon}))^3 \quad (4)$$

여기서, a, b, c, d 는 상수로서 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Constants of equation (4)

T(°C)	a	b	c	d
850	5.5087	7.81E-2	-1.87E-2	9.68E-4
875	5.2021	1.12E-1	-1.40E-2	7.45E-4
900	4.9868	1.55E-1	-1.74E-2	-5.44E-4
925	4.6864	2.03E-1	-1.11E-2	-4.54E-4
950	4.4397	1.98E-1	-1.03E-2	-1.74E-4
975	4.0564	2.33E-1	-8.82E-3	-4.87E-4
1000	3.8807	2.59E-1	-2.17E-2	-2.67E-3

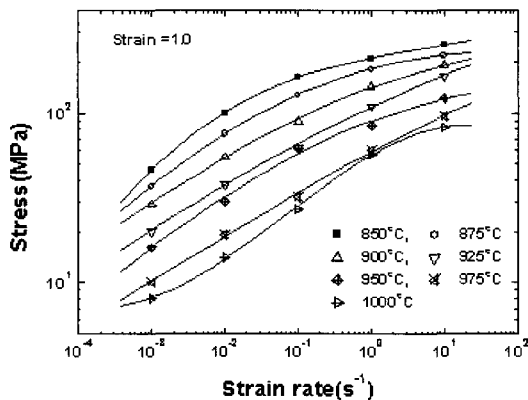


Fig. 5 Flow stress versus strain rate for different temperatures

변형률속도 민감도계수(m)는 식(2)와 식(4)를 이용하여 얻을 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$m = b + 2c \cdot \ln(\dot{\epsilon}) + 3d \cdot (\ln(\dot{\epsilon}))^2 \quad (5)$$

또한, Ziegler 의 소성불안정기준은 식(3)과 식(5)를 통하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

Fig. 6 은 Ti-64 합금에 대하여 진변형률이 1.0 인 조건에서 변형률속도와 온도에 따른 에너지 분산 효율(η)과 Ziegler 의 소성불안정기준을 적용한 변형공정지도(Processing Map)를 나타낸 것이다.

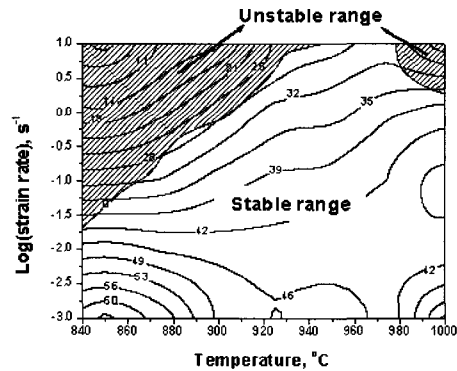


Fig. 6 Power dissipation efficiency map obtained from Ti-6Al-4V alloy (ε=1.0)

Fig. 6 에서 알 수 있는 바와 같이 에너지분산 효율은 변형속도가 감소할수록 증가함을 관찰할 수 있으며, 최대 에너지분산 효율은 온도 850°C, 낮은 변형속도인 10⁻³ s⁻¹ 조건(η=60%)임을 알 수 있다. 결국, 이러한 조건은 가장 적합한 소성가공 조건이다. 또한, 변형공정지도에서 빗금친 부분은 소성불안정구간을 의미하는 것으로 대부분의 구간에서 전단밴드와 균열 등의 성형결합이 관찰되었다.

3.3 Ti-64 튜브의 조직관찰 및 FE 해석

Fig. 7 은 후방압출된 Ti-64 튜브의 마크로조직 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 튜브의 하부다이와 접촉된 표면부에 표면균열이

발생되어 있음을 알 수 있다. 이러한 표면균열은 다리와 소재사이의 계면에서 발생하는 마찰과 열 전달에 의한 불균일 변형과 함께 후방압출시 표면부 인장응력의 유발에 기인한 것으로 판단된다.

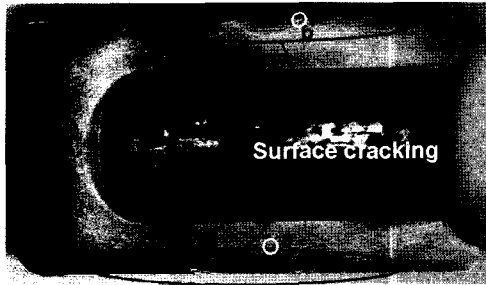


Fig. 7 Macrograph of backward extruded Ti-64

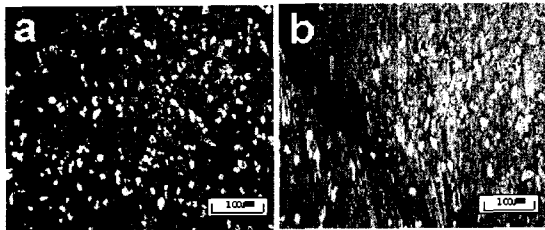


Fig. 8 Microstructure of backward extruded Ti-64 tube observed at (a) inside and (b) surface

Fig. 8은 Fig. 7에 나타난 a와 b 부위 즉, Ti-64 튜브의 내부에서 관찰되는 전형적인 조직과 표면균열을 나타낸 표면부위의 미세조직을 나타낸 것이다. 내부의 미세조직은 후방압출전 970C로 소재를 가열함에 따라 등축정 α 조직(equiaxed α)이 다소 감소하였으며, 변태된 β 상의 비율이 증가된 조직을 보이고 있다. 한편, 하부금형과 접촉된 표면부위에서의 균열은 마찰과 표면 열손실에 기인한 lap 형태의 성형결함이 진전된 것으로 판단된다.

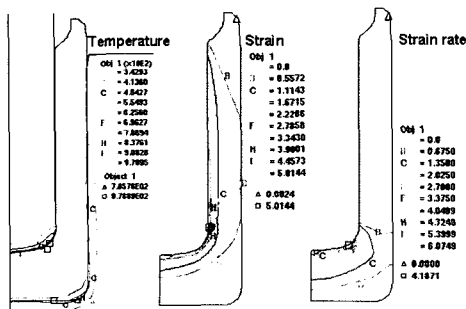


Fig. 9 Simulation results of the extruded Ti-64

Fig. 9는 Ti-64 후방압출 해석에서 얻어진 온도, 변형율, 변형속도분포 등을 나타낸 것이다. 온도 분포 해석결과는 하부금형과 접촉되어 있는 소재의 표면에서 약 200°C 정도의 온도하강이 발생하였고, 변형율에 의한 소재내부의 온도상승은 약 9°C 정도로 β 변태온도를 초과하지 않는 것으로 해석되었으며, 이것은 조직관찰 결과와 잘 일치한다. 유효변형률은 튜브의 안쪽 부위가 높음을 알 수 있으며, 최대 유효변형량은 안쪽 punch 와 인접한 모서리부위로 약 5.0 정도로 나타났다. 한편, 변형속도분포는 유효변형률분포와 같이 상부편치의 모서리부위에서 약 4.18 s⁻¹ 정도의 최대 변형속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 결국, 후방압출된 Ti64 튜브의 부위별 상이한 온도, 변형율, 변형속도 분포는 성형결함 발생에 직접적인 요인으로 작용할 수 있을 것이다.

3.4 성형결함예측 및 검증

Fig. 10은 실제 Ti-64 튜브에서 관찰된 표면균열의 도식적 그림과 함께 Ziegler의 소성불안정기준에 대한 성형결함예측 해석결과를 나타낸 것이다.

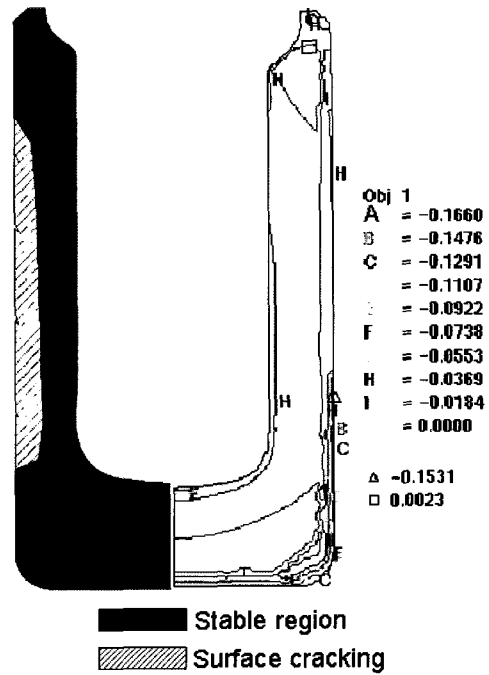


Fig. 10 The comparison of experiment and prediction of the forming-defect for backward extruded Ti-64

이미 앞서 관찰된 바와 같이 Ti-64 튜브에서 주로 나타나는 성형결합은 하부다이와 접촉된 표면에서 발생하는 균열이며, Fig. 10의 오른쪽에 나타낸 해석결과는 소성불안정구간(음의 값을 나타내는 구간)이 실제 표면균열 발생부위 뿐만 아니라 튜브의 안쪽 일부 부위까지 확대 해석하고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 이 모델이 성형결합을 다소 과대평가하고 있음을 의미하는 것이다. 그러나, 이러한 성형결합예측 모델은 성형품의 내부 또는 표면에 발생할 수 있는 전단밴드, 균열 등의 성형결합 발생여부를 절대적인 값에 의해서 예측할 수는 없으나, 성형결합 발생에 대한 가능성을 제시할 수 있기 때문에, 향후 단조, 압연, 압출 등의 소성가공분야의 공정설계시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Ti-64 합금의 열간 후방압출시 발생하는 성형결합을 예측하기 위해서 Ziegler 의 소성불안정인자를 결합한 동적재료모델을 이용하였으며, 실제 후방압출된 Ti-64 튜브의 조직관찰결과와 비교 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온압축시험결과의 분석을 통하여 Ti-6Al-4V 합금의 변형공정지도(processing map)를 작성하였고, 최적 소성가공구간은 온도 850°C, 느린 변형속도인 $10^{-3}s^{-1}$ 이며, 소성 불안정구간은 변형속도 $10^{-1}s^{-1}$ 이상의 전 실험온도구간 (850~1000°C)에서 얻어졌고, 이 구간에 대한 조직관찰에서 전단밴드와 균열 등의 성형결합이 관찰되었다.

(2) 열간 후방압출된 Ti-64 튜브에서 관찰되는 성형결합은 하부다이와 접촉되어 있는 튜브의 벽면에 발생하는 표면균열로, 이러한 결함은 마찰과 함께 다이와 소재사이의 열전달에 의한 chilling 효과에 기인한 lap 형태의 결함에서 진전된 것으로 판정되었다.

(3) Ziegler 의 소성불안정인자에 의한 성형결합 예측은 실제 표면균열이 발생한 Ti-64 튜브 벽면 뿐만 아니라 튜브의 안쪽 일부면도 소성불안정구간으로 해석하는 다소 성형결합을 과대평가하는 경향이 있으나, 성형결합의 발생 가능성을 제시할 수 있는 모델로 향후 성형결합의 발생을 최소화하기 위한 금형 또는 공정설계시 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Semiatin S. L., Seetharaman V. Weiss I., 1998, "Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys, Mater. Sci. Eng. A243, pp. 1~24.
- (2) Udagawa T., Kropp E., and Altan T., 1992, "Investigation of metal flow and temperatures by FEM in the extrusion of Ti-64 tubes", J. Mater. Proc. Tech., Vol.33, pp. 155~174.
- (3) Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara, 1997, "Hot Working Guide", ASM International.
- (4) Y.V.R.K. Prasad, T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier, "Influence of oxygen content on the forging response of equiaxed ($\alpha+\beta$) perform of Ti- 6Al-4V", J. Mater. Proc. Tech., Vol.108, pp. 320~327.
- (5) 염종택, 김두현, 나영상, 박노광, 2001, "Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명", 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 4 호, pp. 347~354.
- (6) Park N. K. Yeom J. T., Na Y. S., 2002, "Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-64 using processing maps", J. Mater. Proc. Tech., Vol.130-131, pp. 540~545.
- (7) 염종택, 임정숙, 나영상, 박노광, 신태진, 황상무, 심인옥, 2003, "Ti-6Al-4V 합금의 열간성형공정에 대한 계면열전달계수의 결정", 한국소성가공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 299~302.
- (8) Prasad Y., Gegel H. L., 1984, "Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242, Metall. Trans., A15, pp. 1883~1892.
- (9) 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.