

CP-Ti의 동적거동에 미치는 온도의 영향

이수민* · 서승원* · 박경준* · 민옥기†

(2002년 12월 4일 접수, 2003년 5월 19일 심사완료)

Temperature Dependence of Dynamic Behavior of Commercially Pure Titanium by the Compression Test

Su-Min Lee, Song-Won Seo, Kyoung-Joon Park and Oak-Key Min

Key Words : SHPB(홉킨슨 압력봉 장치), Titanium(티타늄), High Temperature(고온), Strain-rate(변형률속도), Constitutive Equation(구성 방정식)

Abstract

The mechanical behavior of a commercially pure titanium (CP-Ti) is investigated at high temperature Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) compression test with high strain-rate. Tests are performed over a temperature range from room temperature to 1000 °C with interval of 200 °C and a strain-rate range of 1900 ~ 2000/sec. The true flow stress-true strain relations depending on temperature are achieved in these tests. For construction of constitutive equation from the true flow stress-true strain relation, parameters for the Johnson-Cook constitutive equation is determined. And the modified Johnson-Cook equation is used for investigation of behavior of flow stress in vicinity of recrystallization temperature. The Modified Johnson-Cook constitutive equation is more suitable in expressing the dynamic behavior of a CP-Ti at high temperature, i.e. about recrystallization temperature.

기호설명

ϵ : 변형률 (strain)
 $\dot{\epsilon}$: 변형률속도 (strain-rate)
 σ : 유동응력 (flow-stress)
 ρ, C_0, A_0, E : 탄성봉의 밀도, 탄성과 속도, 단면적, 탄성계수

1. 서론

구조재료 쓰이는 금속 재료들은 많은 경우 동적(dynamic) 또는 충격하중(impact load)을 받는다. 이러한 하중을 받는 재료들은 정적하중 상태와는 달리 기계적 특성이 변화하므로, 보다 정확한 설계와 해석을 위해서는 구조에 가해지는 실제 변형률

(strain)과 변형률 속도(strain-rate)하에서의 그 재료의 특성을 알아야 한다. 대부분 재료들의 기계적 특성이 변형률 속도에 어느 정도 영향받는다라는 것은 잘 알려진 사실이므로, 충격하중 하에서의 구조물 및 기계부품의 변형거동을 해석하기 위해서는 재료의 고변형률 속도(high strain-rate)에서의 특성분석이 필요하며, 변형률 속도의 범위에 따라 다양한 시험방법이 이용되어오고 있다.

1914년 Hopkinson은 압력봉(pressure bar)이 탄성 한계 내에 있을 때 압력봉의 변위는 응력에 직접적으로 비례한다고 발표하였다. 1940년대말 Kolsky⁽¹⁾는 시편의 응력과 변형률은 압력봉의 변위와 관계가 있음을 이론적으로 정리하고 2개의 압력봉 사이에 시편을 설치하는 시험방법을 제안하였는데, 이 장치는 Split Hopkinson Pressure Bar(이하 SHPB) 혹은 Kolsky Bar로 잘 알려져 있으며 $10^2 \sim 10^4/sec$ 의 변형률 속도범위에서 고분자재료나 복합재료 뿐 아니라 금속의 비탄성 유동을 연구하는데 가장 효과적으로 사용되고 있다. SHPB는 탄성과 전과 이론만으로 재료의 변형률 속도에 대한 동적 응력-변형률 관계를 직접 결정할 수 있

* 연세대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : minokey@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2817 FAX : (02)362-2736

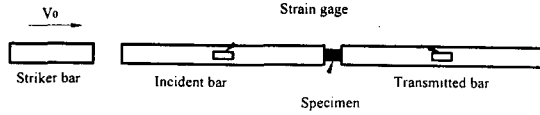


Fig. 1 Schematic of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

으므로 현재 재료의 동적 물성 연구에 가장 널리 이용되고 있다. SHPB 실험장치의 경우 확장성이 뛰어나 추가적인 장치를 장착함으로써 압축, 인장, 전단, 고온 및 저온 실험 등을 할 수 있다. 특히 고온 및 저온 SHPB 실험 장치의 경우 변형률과 변형률 속도뿐만 아니라 온도 변수에 대해서도 실험이 가능하다.

본 논문에서는 기존에 사용하던 SHPB 압축 실험 장치를 개선, 확장하여 새로운 고온장치와 시편 냉각 및 회수 장치를 추가 설치하였으며, 이를 이용해 고온에서 동하중이나 충격하중을 받는 구조물에 쓰이는 재료에 대해 실험적 연구를 진행하였다. 순수 티타늄인 CP-Ti (Commercially Pure Titanium) Grade 4를 재료로 고온 SHPB 실험 장치를 이용하여 온도에 따른 기계적 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험

2.1 이론

SHPB의 기본 개념은 다음과 같다. 이 실험 장치는 두 개의 탄성봉(elastic bar)으로 이루어지며 각각 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitter bar)이라 부른다. 충격봉이 주어진 속도 V_0 로 입력봉을 치면 입력봉을 통해 탄성 압축파가 전파된다. 이 탄성파가 입력봉과 출력봉의 사이에 있는 시편에 도달되었을 때 압축파의 일부는 임피던스 (impedance) 차에 의해 인장파로 반사되고 나머지 일부는 시편을 통해 출력봉에 압축파로 투과된다. 여기서 임피던스는 밀도(ρ)와 탄성파 속도(C_0)의 곱, ρC_0 로 정의된다.

입력봉과 출력봉에 위치한 스트레인 게이지에 의하여 입력파, 반사파, 투과파의 시간에 대한 변화를 측정할 수 있으며, 이 때 파의 상대적인 크기는 시편의 물리적인 특성에 의존한다. 이 신호를 통해 진응력-진변형률 관계를 얻을 수 있다.

충격파의 길이는 시편에서 파의 통과길이에 비해 길기 때문에, 짧은 시편에서 파가 투과되는 기간동안 많은 수의 내부 반사가 일어나게 된다. 이

러한 다수의 내부 반사파 때문에 짧은 시편에서의 응력분포는 매우 빠르게 평량화 되므로 파가 전파되는 효과를 무시할 수 있다. 입력파(ϵ_I), 반사파(ϵ_R), 투과파(ϵ_T)를 스트레인 게이지로 측정하여 시편과 탄성봉 사이의 조건을 결정한다.

SHPB에 대하여 응력-변형률의 관계를 얻어낼 때에는 다음 세 가지의 가정⁽²⁾을 전제로 한다.

- i. 입력봉, 출력봉 및 충격봉은 반드시 탄성영역 내에 있어야 한다.
- ii. 파의 전파는 1차원이다.
- iii. 시편은 균일하게 변형한다.

시편의 입자의 변위를 $u(x,t)$ 라 하고 입자의 속도를 $v(x,t)$ 라 하자. 축방향의 변형률(ϵ)과 입자속도(v)는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{and} \quad v = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

적합조건에 의하여 식 (1)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

시편이 입력봉 및 출력봉과 접촉하는 면에서 입자의 속도를 v_1 과 v_2 라 할 때, 시편의 길이 L 은 시간에 따라 줄어들게 되고 시편은 변형하게 된다. 변형되는 시편의 변형률 속도($\dot{\epsilon}$)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{L}, \quad (v_1(t) > v_2(t)) \quad (3)$$

접촉면 1과 2에서 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_I - \epsilon_R \quad (\text{입력봉과 시편의 접촉면}) \quad (4a)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_T \quad (\text{출력봉과 시편의 접촉면}) \quad (4b)$$

입자의 속도와 변형률은 다음과 같은 관계가 있다.

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \epsilon C_0 \quad (5)$$

식 (4)과 (5)를 통하여 입자의 속도 v_1 과 v_2 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1 = C_0(\epsilon_I - \epsilon_R) \quad (6a)$$

$$v_2 = C_0\epsilon_T \quad (6b)$$

식 (6)을 식 (3)에 대입하여 아래와 같이 변형률 속도를 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{L} [\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)] \quad (7)$$

시편에 가해지는 응력을 구하기 위하여, 시편의 양쪽 단면에 가해지는 압력을 각각 P_1 과 P_2 라 하면 Hooke의 법칙으로부터

$$P_1 = EA_0(\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (8a)$$

$$P_2 = EA_0\epsilon_T \quad (8b)$$

로 표현되고, A_0 는 입력봉 및 출력봉의 단면적이다. 따라서 시편에 가해지는 평균 응력 σ 는

$$\sigma(t) = \frac{(P_1 + P_2)}{2A} = \frac{E A_0}{2 A} [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (9)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 A 는 시편의 단면적이고 E 는 탄성봉의 탄성계수이다.

만일, 시편이 균일하게 변형된다면 시편의 접촉면 1 과 2 에서의 응력은 동일하다. 즉, $P_1 = P_2$ 이므로 식 (8)로부터

$$\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) = \epsilon_T(t) \quad (10)$$

식 (10)을 식 (7)과 (9)에 대입하여 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\text{변형률 속도 (strain-rate): } \dot{\epsilon} = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_R \quad (11)$$

$$\text{변형률 (strain): } \epsilon = -\frac{2C_0}{L} \int \epsilon_R dt \quad (12)$$

$$\text{유동응력 (flow stress): } \sigma = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T \quad (13)$$

식에서 알 수 있듯이 시편 내의 어떠한 파의 진행도 고려할 필요가 없으며, 입력봉과 출력봉의 스트레인 게이지에서 얻을 수 있는 $\epsilon_R(t)$ 와 $\epsilon_T(t)$ 를 통해 시편의 응력(σ)-변형률(ϵ) 곡선을 얻을 수 있다.

2.2 실험장치

2.2.1 충격봉 및 탄성봉

SHPB 실험은 탄성봉의 탄성과 해석에 의해서 시편의 진동력-진변형률의 관계를 구하는 것이므로, 충격봉과 탄성봉은 같은 재료를 사용하며 항상 탄성 한계 내에 있어야 한다. 또한 탄성봉에 나타나는 파의 크기는 충격봉의 속도에 비례하고, 변형률 속도는 반사파의 크기에 비례하므로, 높은 변형률 속도에서도 소성 변형이 일어나지 않을 만큼 항복강도가 충분히 커야 하며 충격봉에 의해 탄성봉에 발생한 탄성파가 시편에 투과되기 위해서는 시편의 임피던스(impedance)가 충격봉의 임피던스보다 작아야 한다 ($\rho_0 A_0 C_0 > \rho A C$). 이런 이유로 고강도 강이 사용되지만 시편의 항복 강도가 낮거나 높은 변형률 속도를 얻지 않아도 된다면, 소성 변형이 일어나지 않는 범위에서는 일반적인 구조용 강재를 사용해도 실험이 가능하다.

탄성봉에서 파의 거동이 1 차원에 가까워야 한다. 이를 위해서는 탄성봉이 충분히 길어야 하는데, 세장비가 20 이상이면 이를 만족하는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

본 실험은 고온에서 행해지므로 고온에서도 강도가 우수한 Inconel 718 니켈합금을 사용하였다. 충격봉과 탄성봉의 지름은 모두 13/16 inch 이고 길이는 충격봉이 500mm, 입력봉이 1400mm, 출력봉이 1500mm 이다.

2.2.2 시편

시편은 순수 티타늄인 CP-Ti(Commercially Pure Titanium) Grade 4 를 사용하며, ASTM 규격 B348 로 표시하고 공장의 방화벽과 같은 고온으로 인한 영향을 최소화 시키는 곳에 사용한다. 시편은 지름 7mm, 길이 8mm 로 가공하고 양끝단을 연마하여 사용한다.

2.2.3 가속장치

고압 질소가스의 팽창력을 이용한 공압 가속 장치는 충격봉(striker)을 가속시키는데 사용하며 지름 200mm, 길이 약 600mm 의 구조용 강관으로 제작하였다. 가속관은 직진도를 유지하고 내면 마찰을 줄일 수 있도록 가공하였으며, 내경 30mm, 길이 약 1000mm 로 제작하였다.

가속장치의 발사 속도는 충격봉의 재질과 길이에 따라 다르며, 직경 13/16inch, 길이 500mm 의 Inconel 718 로 제작한 충격봉은 약 10kgf/cm² 의 압력으로 약 20m/s 의 속도를 발생시킬 수 있다. 이 정도의 속도는 본 실험에 필요한 변형률과 변형률 속도를 발생시키는데 적당한 속도이다. 가스압을 이용한 가속 장치에는 디지털 압력 게이지를 장착하여 압력을 측정함으로써 세밀한 속도 조절 및 동일한 발사 속도의 재현을 가능하도록 하였다.

2.2.4 고온가열장치

본 실험에서는 기존의 가열 장치를 개선한 새로운 고온 가열 장치⁽⁹⁾를 장착하여 고온 SHPB 압축 실험 장치를 구성하였다. 할로겐 램프의 높은 복사열을 이용한 가열장치로서 타원체 초점의 특성을 이용하여 시편을 가열하는 방법을 택했다. 타원체의 한 초점에서 발생한 열은 다른 초점으로 모아지는 원리를 이용하였으며 수 십초 이내에 1000℃ 까지 가열이 가능하다. Fig. 2 는 할로겐을 이용한 고온 가열 장치의 원리를, Fig. 3 은 개발된 장치의 상세 구성도를 나타내고 있다.

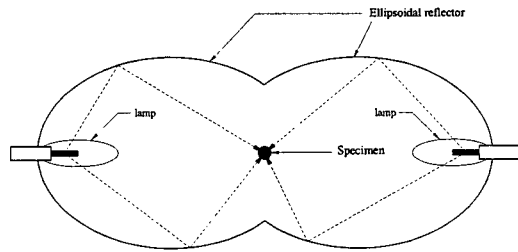


Fig. 2 Principle of heating by using of halogen lamp and ellipsoid cavity

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 탄성봉과 두 개의 알루미늄으로 만들어진 복사열 반사경과 할로젠 램프, 고온으로 가열할 때 시편의 위치를 유지하고 실험시에 탄성봉을 보호할 수 있는 세라믹 지지대, 그리고 가열되는 시편의 온도를 측정하기 위한 비접촉 온도계로 크게 구성되어 있다.

2.2.5 비접촉식 적외선 온도계

시편의 온도를 측정하기 위해 비접촉식 적외선 온도계(Raynger 3i, Raytek)를 사용하였으며, 이 장비로 0-1200℃ 범위의 온도를 측정할 수 있다. 이 장치는 대상에 대한 방사계수(emissivity)를 조절함으로써 재료마다 정확한 온도를 측정하도록 하고 있다. 일반적으로 방사계수는 재료의 모양, 표면 가공 상태, 온도별로 그 값이 틀리다. 본 실험에서는 온도별 방사계수가 필요하므로 방사계수 측정을 위해서 시편의 온도를 비접촉식 적외선 온도계와 삽입식 열전대로 동시에 측정하여, 삽입식 열전대의 온도를 기준으로 방사계수를 조정하였다.

2.3 실험시 유의점

본 실험과 같은 고온 SHPB 시험의 경우, 몇 가지 문제점이 발생하며 그 중 산화, 시편의 미세한 온도하강문제 등에 대한 주의가 필요하다.

2.3.1 산화

금속은 고온 상승시 주위의 산소와 반응하여 산화가 발생한다. 산화막은 고온의 시편 주위에 형성되는 얇은 막으로 탄성봉과 시편 사이의 탄성파 전파에 영향을 미치게 된다. 탄소강의 경우 고온 가열시 상당히 두꺼운 산화막을 생성하지만, CP-Ti의 경우에는 1000℃에서도 산화막은 거의 생기지 않았으므로 산화막에 의한 영향은 고려하지 않았다.

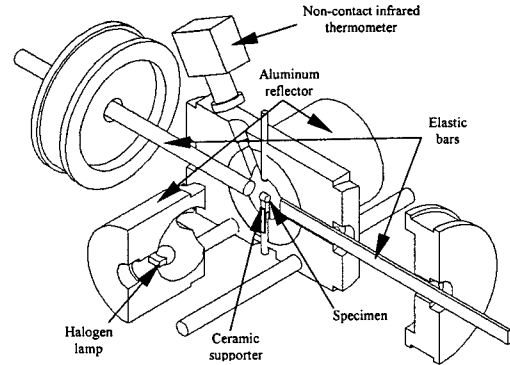


Fig. 3 The 3D phantom view of the radiant heating system

2.3.2 탄성봉과 접촉시 시편의 온도변화

시편을 목표온도까지 가열한 후 탄성봉과 접촉시킨다. 이 때, 접촉에 의한 열교환으로 인하여 시편의 온도 하강이 발생한다. 예비실험을 통하여 검증해본 결과 탄성봉과 접촉시킨 순간 1010℃였던 시편 온도가 하강하기 시작하여 접촉 후 1초 부근에서 약 920℃까지 하강하였다. 본 실험에서는 시편과 탄성봉이 접촉한 후 1초 내에 발사가 이루어지며 1000℃ 이하의 실험에서는 이러한 하강폭이 더 줄어들기 때문에 온도 하강에 의한 영향은 크게 고려하지 않고 실험을 수행하였다.

물론 온도 하강이 일어나지 않게 하는 것이 가장 이상적이지만 이것은 실제로는 불가능하기 때문에 시편과 탄성봉이 접촉한 후 최대한 빨리 발사하는 것이 현실적으로 온도 하강을 최소화하는 최선의 방법일 것으로 판단된다.

2.3.3 고온용 윤활제

시편 양 끝단의 윤활은 시편의 배부름 현상(barreling)을 완화시킬 수 있다. 배부름 현상은 시편 양끝단과 탄성봉간의 마찰로 인해 시편 내부에 전단력이 발생하여 시편의 중앙부가 볼록하게 되는 현상으로 이는 균일한 변형을 해야 한다는 가정에 위배되는 것이다.

압축 실험에서는 시편에 배부름 현상이 생겼을 때의 유동응력은 그렇지 않았을 때보다 높게 나타난다. 고온 실험의 경우 윤활제가 고온의 시편과 직접 접촉하므로 윤활제의 효과는 떨어지고 시편의 강도 역시 고온으로 갈수록 떨어진다. 이에 따라 고온에서 시편의 배부름 현상은 심해진다.

한편 과도한 윤활은 시편의 양 끝단에서 하나의 층을 형성하여 전달되는 응력파를 흡수함으로써 투과파의 앞부분이 왜곡되고 시간 지연 현상을 유발한다.

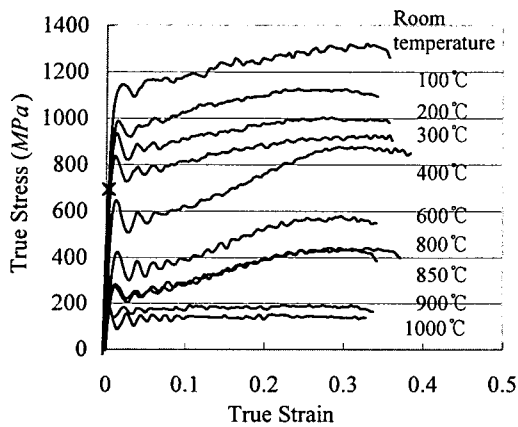


Fig. 4 The true flow stress-true strain relation of CP-Ti Grade 4 (×: static yield point)

본 논문에서는 고온 실험에서 시편에 발생하는 배부름 현상을 줄이기 위해 Super Lube 사의 다목적 그리스(grease)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

시편의 온도는 상온에서 1000°C까지 200°C간격으로, 변형률 속도는 1900-2000/sec의 범위 내에서 실험하였다. 비접촉식 적외선 온도계를 이용한 온도 측정을 위해 다른 실험온도를 적용할 때마다 그 온도에 맞는 방사계수를 적용하였다. 시편은 탄성붕괴 접촉되지 않은 상태에서 가열되며 시편이 실험 온도에 도달하면 탄성붕괴 접촉시켜 충격 붕괴를 발생한다. 각 탄성붕괴에서의 스트레인 변화는 디지털 오실로스코프로부터 측정한다.

3.1 진유동응력-진변형률 곡선

Commercially Pure Titanium Grade 4를 재료로 상온에서 1000°C까지의 온도범위에서 변형률 속도 2000/sec로 실험하였으며 진유동응력-진변형률 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 유동응력이 감소함을 알 수 있다.

특히, 400°C부터 재결정온도 직전인 850°C까지는 가공경화 현상이 급격하게 커지는 것을 알 수 있으며, 재결정 온도로 알려진 880°C를 넘어선 900°C와 1000°C에서는 유동응력이 전체적인 경향보다 급격하게 낮게 나타났다. Fig. 4에서 ×는 정적상태에서의 항복응력값을 나타내는데, 온도와 변형률속도에 따른 유동응력과 비교해 볼 수 있다.

Table 1 Five parameters of Johnson-Cook equation of CP-Ti

	σ_0 (MPa)	B (MPa)	n	C	m
RT-300°C	806.57	481.608	0.319	0.0194	0.655
400-850°C	359.034	667.316	0.49	0.0194	0.582

3.2 구성방정식 (constitutive equation)

실험으로 얻은 CP-Ti Grade 4의 진응력-진변형률 관계로부터 구성방정식을 유도하는데 Johnson-Cook이 제시한 구성방정식⁽⁴⁾의 형태를 이용하였다. Johnson-Cook 구성방정식은 식 (14)와 같이 표현되어진다.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})[1 - (T^*)^m] \quad (14a)$$

$$\text{여기에서 } T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (14b)$$

5개의 변수 (σ_0, B, n, C, m)는 실험값으로부터 구하며, 기준 변형률속도 $\dot{\varepsilon}_0 = 1/\text{sec}$, 기준온도 T_r 은 25°C 그리고 용융점인 T_m 은 1680°C로 하였다.

상온에서 300°C까지의 관계와 400°C에서 800°C까지의 진응력-진변형률의 관계가 서로 다른 경향을 보이는 관계도 구성방정식의 변수를 각각 다르게 취하여 표현하였다. 실험 데이터로부터 구한 5개의 변수값을 Table 1에 나타내었으며, 완성된 식을 식 (15)에 나타내었다.

Room temperature ~ 300°C ;

$$\sigma = (806.57 + 481.608\varepsilon^{0.319})(1 + 0.0194 \ln \dot{\varepsilon}) \times [1 - (T^*)^{0.655}] \quad (15a)$$

400°C ~ 850°C ;

$$\sigma = (359.034 + 667.316\varepsilon^{0.49})(1 + 0.0194 \ln \dot{\varepsilon}) \times [1 - (T^*)^{0.5816}] \quad (15b)$$

900°C와 1000°C에 대해서는 재결정 온도 이후 상변화에 의한 응력감소가 판단되므로, 재료의 재결정온도 이상에서의 상변화에 의한 영향을 고려한 Modified Johnson-Cook 구성방정식⁽⁵⁾을 도입하여 사용한다. U.R.Andrade와 M.A.Meyers에 의해 제시된 구성방정식으로 식 (16)과 같이 나타내어진다.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})[1 - (T^*)^m]H(T) \quad (16)$$

$H(T)$ 는 온도에 대한 감소함수로써 식 (17)과 같이 표현된다.

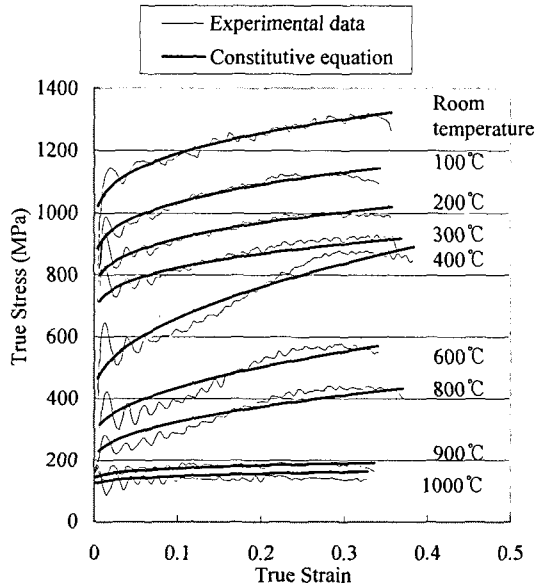


Fig. 5 Comparison of experimental data with constitutive equation of the flow stress-true strain relations of CP-Ti Grade 4

$$H(T) = \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{(\sigma_f)_{rec}}{(\sigma_f)_{def}} \right] \cdot u(T)} \quad (17)$$

여기서, $(\sigma_0)_{rec}$ 와 $(\sigma_0)_{def}$ 는 각각 재결정 온도 이전과 이후의 유동응력을 나타내며, $u(T)$ 는 단위계단 함수로 식 (18)과 같이 정의한다.

$$u(T) = \begin{cases} 0 & \text{when } T < T_C \\ 1 & \text{when } T > T_C \end{cases} \quad (18)$$

T_C 는 재료의 재결정이나 상변화가 일어나는 온도이다. CP-Ti의 재결정 온도는 880°C로 알려져 있으며 α - β 상에서 β 상으로 상변화를 하게 된다. 따라서 900°C와 1000°C에서의 구성방정식은 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = (806.57 + 481.608\varepsilon^{0.319})(1 + 0.0194 \ln \varepsilon) \times [1 - (T^*)^{0.655}]^{0.426} \quad (19)$$

식 (15)와 (19)에서 제시한 구성방정식을 실험값과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 세 가지 온도대별로 나누어 구성한 Johnson-Cook 구성방정식과 Modified Johnson-Cook 구성방정식이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 압축시험장치를 개선한 고온압축 SHPB 장치를 이용하여 CP-Ti Grade 4의 온도에 따른 진응력-진변형률 관계를 재측하였다.

실험 결과를 통해 CP-Ti Grade 4 재료는 전체적으로 온도가 증가함에 따라 유동응력이 뚜렷이 감소함을 알 수 있었다. 특히, 변형률에 따른 유동응력의 변화 경향이 크게 세 구간으로 구별되어 나타나는 현상을 보여주었다. 즉, 재결정 온도 이전인 400°C~재결정 온도 구간에서는 300°C이하에서와 다르게 변형률에 따른 가공경화 현상이 급격히 크게 나타났다. 재결정 온도 이후에는 상변화에 따른 응력감소를 제외하면 다시 300°C이하에서와 같은 경향을 보여주었다. 이는 CP-Ti Grade 4만이 갖는 독특한 특성이라 보여진다.

따라서, 세 구간의 거동특성을 묘사하기 위하여 재결정 이전 두 구간에서는 Johnson-Cook 구성방정식을, 재결정 이후 한 구간에서는 Modified Johnson-Cook 구성방정식을 도입하여 그 계수를 결정하였다. 결정된 세 개의 구성방정식은 CP-Ti Grade 4의 온도에 따른 유동응력 거동을 잘 묘사해줄 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 400°C-재결정 온도 범위에서 독특하게 나타나는 진응력-진변형률 관계는 차후 추가적인 연구를 통해 규명할 필요가 있다고 본다.

본 논문을 통해 결정된 CP-Ti Grade 4에 대한 구성 방정식은 유한요소법이나 hydrocode와 같은 수치 해석 프로그램을 통해 동적 거동을 묘사하고자 할 경우, 정적 자료를 이용한 해석 방법을 보완하여 좀 더 정확한 결과를 도출해 줄 수 있는 수치적 모델로 유용하게 사용될 수 있다고 본다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000-00390-0) 지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials very High Rates of Loading," *Proc. Phys. Soc. (London)*, B63, pp. 676~700.
- (2) Meyers, M.A. and Ravichandran, G., "Short Course in Dynamic Behavior of Materials," Center of Excellence for Advanced Materials, University of California, San Diego, March 6-10, 1989.
- (3) Macdougall, D., "A Radiant Heating Method for

- Performing High Temperature, High-Strain-Rate Tests," *Meas. Sci. Technol.*, 9, pp. 1657~1662, 1998.
- (4) Johnson, G.R., Cook, W.H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," in *Pro. 7th Intl. Sym. on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 541, 1983.
- (5) Andrade, U.R., Meyers, M.A., Chokshi, A.H., "Constitutive Description of Work and Shock-hardened Copper," *Scripta Met. Mat.*, Vol. 30, No. 7, pp. 933~938, 1994.
- (6) Seo Songwon, Min Oakkey, 1998, "Size Effects of Aluminum Compression Specimen in SHPB Test," *Proc. of the KSME 1998 Spring Annual Meeting A*, pp. 339~343.
- (7) Lim Jaeyoung, Min Oakkey, Lee Jeongmin, 1999, "Shear Behaviors at High-strain and High-Strain-rate of Tough-pitch Cooper," *Proc. of the KSME 1999 Fall Annual Meeting A*, pp. 395~400.
- (8) Yang Hyunmo and Min Oakkey, "The True Strss-Strain Relation of Aluminum Alloysin the SHPB Tension Test," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 8, pp. 1917~1922, 2000.
- (9) Yang Hyunmo, Min Oakkey, Park Kyoungjoon, "Temperature Dependence of Dynamic Behavior of Titanium by High Strain-rate Compression Test," *Proc. Of 4th Int. Symp. On Impact Engineering*, Vol. 2, 571~576, 2001.
- (10) Moon Wonjoo, Seo Songwon, Lim Jaeyoung, Min Oakkey, "Dynamic Shear Stress of Tough-pitch Copper at High Strain and High Strain-rate," *KSME inter. J.*, Vol. 16, pp. 1412~1419, 2002.
- (11) ASTM B-348-00 Certificate of Conformance, TIMET, 2002.
- (12) M. A. Meyer, "Dynamic Behavior of Materials," Willey-Interscience, John Willey & sons, inc. New York, 1994.