

고온 SHPB실험에서 온도의 영향

박경준*·양현모*·민옥기**

The effect of temperature in high temperature SHPB test

Park Kyoungjoon, Yang Hyunmo and Min Oakkey

Key Words: SHPB(홉킨슨 압력봉), High strain rate(고변형률속도), High temperature(고온), Compression test(압축실험), Impact test(충격실험)

Abstract

The split Hopkinson pressure bar has been used for a high strain rate impact test. Also it has been developed and modified for compression, shear, tension, elevated temperature and subzero tests. In this paper, SHPB compression tests have been performed with pure titanium at elevated temperatures. The range of temperature is from room temperature to 1000°C with interval of 200°C. To raise temperature of the specimen, a radiant heater which is composed of a pair of ellipsoidal cavities and halogen lamps is developed at high temperature SHPB test. There are some difficulties in a high temperature test such as temperature gradient, lubrication and prevention of oxidation of specimen. The temperature gradient of specimen is affected by the variation of temperature. Barreling occurred at not properly lubricated specimen. Stress-strain relations of pure titanium have been obtained in the range of strain rate at 1900/sec~2000/sec and temperature at 25°C~1000°C.

기호설명

U_p : 입자속도

ϵ : 변형률(strain)

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(strain rate)

σ : 유동응력(flow stress)

ρ_0, C_0, A_0, E_0 : 탄성봉의 밀도, 탄성과 속도, 단면적, 탄성계수

ρ, C, A : 시편의 밀도, 탄성과 속도, 단면적

어떤 재료에 동하중이나 충격하중이 가해지면 기계적 특성이 바뀌게 되는데 이 때의 기계적 특성을 알아냄으로써 그 재료를 이용한 효과적인 설계 혹은 제작이 가능하다.

이러한 기계적 특성 변화의 주요한 원인으로는 대표적인 재료 구성방정식인 Johnson-Cook equation에서도 알 수 있듯이 변형률 속도(strain rate)와 온도가 있다.

이를 위해 동적 테스트를 하고 있으며 그 중에 SHPB(split Hopkinson pressure bar)와 RIT(rod impact test)가 가장 많이 쓰인다. SHPB 실험장치의 경우 확장성이 매우 뛰어나 약간의 개선으로 압축, 인장, 전단, 고온 및 저온 실험 등을 할 수 있으며 특히 고온 SHPB 실험장치의 경우 변형률 속도뿐만 아니라 온도 변수까지 실험할 수 있다.

1. 서 론

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자 공학부

E-mail : minokey@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2817, FAX : (02)362-2736

SHPB 실험장치는 1914년 Hopkinson에 의해 탄성파와 응력의 관계가 제시되었고 1949년에 Kolsky⁽¹⁾에 의해 이론적인 정리 및 실험방법이 제안되었다. 그 후 측정장치의 개발로 SHPB 실험 역시 많은 발전이 있었다.

고온 실험은 J. Lankford⁽²⁾ 등에 의해 행해졌다. 고온 가열 장치의 경우 D. Macdougall⁽³⁾에 의해 제시되었다. 이 고온 가열 장치는 할로겐 램프와 반사경을 이용하였으며 기존의 열선을 이용한 가열로를 이용하는 것보다 효율적이고 단시간 내에 고온까지 시편의 온도를 상승시킬 수 있다.

기존에 실험해왔던 SHPB 압축 실험 장치를 개선 및 확장하여 고온장치를 추가 설치하였고 이를 이용해 시편의 유동응력-변형률 곡선에 미치는 온도의 영향을 알아보려고 한다. 시편은 비행기 프레임이나 가스터빈의 고온부품 등으로 쓰이는 Titanium grade 2 를 사용하였다.

2. 실험장치 및 실험

2.1 이론

SHPB실험의 기본 개념은 다음과 같다. 충격봉(striker bar)이 입력봉(incident bar)에 충격을 가하면 입력봉에 충격봉보다 긴 압축탄성파를 발생한다. 이 탄성파는 입력봉을 지나 시편에 다다르고 이때 압축파의 일부는 투과하고 나머지는 임피던스(impedance) 차이에 의해서 입력봉으로 반사하게 된다.

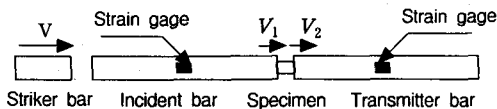


Fig. 1 Basic model of SHPB

Fig. 1은 SHPB 장치의 기본 구성을 나타내며 스트레인 게이지(strain gage)를 붙여서 입사파(incident pulse) ϵ_I , 반사파(reflected pulse) ϵ_R , 투과파(transmitted pulse) ϵ_T 를 측정하게 된다.

SHPB 시험을 통해 얻어지는 데이터를 계산하여 유동응력-변형률 곡선을 얻기 위해 다음 세가

지 가정⁽⁷⁾을 필요로 한다.

1. 충격봉과 탄성봉들은 항상 탄성영역 내에 있어야 한다.
2. 1차원 파의 전파 이론에 근거를 둔다.
3. 축방향의 응력분포가 균일하여 응력과 변형률이 시편 단면 전체에 대해 균일하다.

이론식의 전개는 변형률 속도의 정의로부터 시작한다. 변형률 속도는 시간에 따른 변형률의 변화로써 다음 식으로 표시된다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (1)$$

$$(V_1(t) > V_2(t))$$

여기서 V_1, V_2 는 Fig. 1에 설명한 시편 양끝단에서 봉의 속도이고 L은 시편의 길이이다.

$$\sigma = \rho U_p C \text{ 이고 } \frac{\sigma}{E} = \epsilon \text{ 이므로}$$

$$C\epsilon = U_p \quad (2)$$

이고, 시편의 양 경계면에서 속도는

$$V_1 = C_0 \epsilon_I \text{ (at } t=0) \quad (3-1)$$

$$V_2 = C_0 \epsilon_T \quad (3-2)$$

으로 주어진다.

충격이 시작되면 반사파(reflected wave)에 의해 속도가 감소한다.

$$V_1 = C_0(\epsilon_I - \epsilon_R) \quad (4)$$

위 식들을 정리하면 다음과 같은 세가지 결과식을 얻을 수 있다.

변형률 속도 (Strain rate) :

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_R \quad (5)$$

변형률 (Strain) :

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (6)$$

유동응력 (Flow stress) :

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (7)$$

위 식들에서 알 수 있듯이 시편 안에서 일어나

는 어떤 파의 진행도 고려할 필요가 없다.

탄성봉에 설치한 스트레인 게이지로부터 측정 한 스트레인 ϵ_R 및 ϵ_T 과 식(5)~식(7)으로부터 시편의 진유동응력-진변형률 곡선을 계산할 수 있다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 실험에 사용될 장치의 개략도이다.

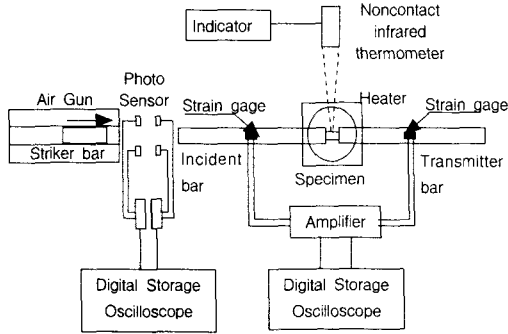


Fig. 2 Schematic of high temperature SHPB system

2.2.1 탄성봉과 충격봉

SHPB 실험은 탄성과 이론을 근거로 진행되기 때문에 충격봉과 탄성봉은 이론식에서 알 수 있듯이 같은 재료를 사용하며 소성변형이 생겨서는 안되고 실험 중에는 항상 탄성 영역 내에 있어야 한다⁽⁷⁾. 또한 충격봉에 의해 탄성봉에 발생한 탄성파가 시편에 투과되기 위해서는 충격봉의 임피던스(impedance)가 시편의 임피던스보다 커야 한다 ($\rho_0 A_0 C_0 > \rho A C$). 이러한 이유로 충격봉과 탄성봉은 고강도 강이 사용되지만 시편이 항복강도가 낮거나 변형률 속도가 높지 않다면 일반적인 탄소 공구강도 사용이 가능하다.

본 실험은 고온에서도 행해져야 하므로 고온에서도 강도가 우수한 Inconel 718 니켈합금을 사용하였다. 충격봉과 탄성봉의 지름은 모두 13/16 inch이고 길이는 충격봉이 500mm, 입력봉이 1400mm, 출력봉이 1500mm이다.

2.2.2 시편

순수 Titanium (Titanium grade 2) 시편은 Fig. 3처럼 지름 8mm, 길이 8mm로 가공하였다.

탄성봉과 접촉하는 양끝단은 가공에 의해 거칠음으로 연마하여 사용하였다.



Fig. 3 Dimension of specimen

2.2.3 발사장치

압축공기의 팽창력을 이용한 공압 발사장치는 충격봉(striker bar)를 발사하는데 사용되며 외경 200mm, 길이 약 600mm로 구조용 강으로 제작되었다. 가속관은 진직도를 유지하고 내면 마찰을 줄이기 위해 건드릴(gun drill)가공과 호닝가공을 하였으며 내경은 30mm, 길이는 약 1000mm이다.

이 발사장치는 충격봉의 질량과 길이에 따라 다르나 직경 20.64mm, 길이 500mm, 질량 0.137kg의 Inconel로 만들어진 충격봉을 약 27.4J의 운동에너지를 갖게 한다. 이 정도의 운동에너지는 본 실험에 필요한 변형률과 변형률 속도를 발생시키는데 충분하다.

공압을 이용한 발사장치에는 디지털 압력게이지를 장착하여 압력을 측정함으로써 세밀한 속도 조절 혹은 동일한 발사 속도를 재현하도록 하였다.

2.2.4 비접촉식 적외선 온도계

시편의 온도를 측정하기 위해 비접촉식 적외선 온도계(Raytek Raynger 3i)를 사용하였으며 이는 0~1200℃까지의 온도를 측정할 수 있다.

이 장치는 대상물체에 대한 방사계수(emissivity)를 조절함으로써 재료마다 정확한 온도를 측정하도록 하고 있다. 재료의 모양, 표면가공 상태, 온도별로 방사계수가 틀리다. 방사계수 측정을 위해서 시편의 온도를 비접촉식 적외선 온도계와 삼입식 열전대로 동시에 측정하여 삼입식 열전대의 온도를 기준으로 방사계수를 조정하였다.

2.2.5 고온 가열 장치

상은 SHPB 압축 실험장치에 고온 가열 장치를 추가하여 고온 SHPB 실험 장치를 구성하였다.

할로겐 램프의 높은 복사열을 이용한 가열장치로서 타원체 초점의 특성을 이용하여 시편을 가열하는 방법을 택한다. 수십초 이내에 상온에서 1200°C까지의 가열이 가능하며 Fig. 4는 고온 장치의 원리를 나타내고 있다.

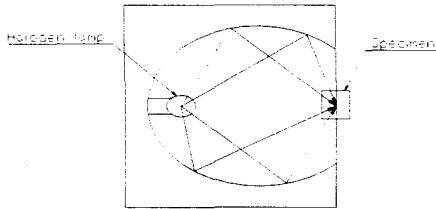


Fig.4 Principle of heating by using halogen lamp and ellipsoidal cavity

2.3 실험

시편의 온도를 가열장치를 이용해 상온에서부터 200°C 간격으로 1000°C까지 상승시키며 실험을 하였으며 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 탄성봉과 접촉되지 않은 상태에서 가열되며 시편이 실험 온도에 도달하면 탄성봉과 접촉시켜 충격봉을 발사한다. 각 탄성봉에서의 스트레인 변화는 디지털 오실로스코프로부터 측정한다.

고온 SHPB 시험의 경우 몇 가지 문제점이 있으며 그 중에 시편의 온도 변화, 윤활 및 산화문제에 대한 주의가 필요하다.

2.3.1 가열시 시편의 온도 변화

고온 실험을 하는 동안에는 시편 형상 전체에 대해 균일한 온도를 유지해야 한다. 실험에 필요한 온도까지 가열할 때 초기에는 시편의 내부의 온도가 외부의 온도보다 더디게 상승한다. 실험

온도에 도달하면 두 온도가 같아지면서 정상상태에 이르는데 이때의 시간 이후에 실험을 해야 한다. Fig. 5는 시편의 단면 외부와 내부에 삼입식 열전대를 이용하여 측정한 온도의 결과이다. Fig. 5에서는 계측기 자체 출력의 진동과 그래프상의 스케일 문제로 차이가 뚜렷하지 않으나 약간 위쪽에 나타난 그래프가 시편의 외부 온도이고 그 밑에 나타난 그래프가 시편의 내부 온도이다.

가열시작부터 25초까지는 전체 전력의 약 90%를 사용하였으며 25초부터 전체 전력의 약 70%만을 사용하였다. 약 40초까지는 20°C정도의 차이를 보이나 약 60초에서는 5°C정도의 차이를 보였다. 그러므로 시편 형상 전체에 대해 온도차가 거의 없어지는 시간인 60초 이후에 실험을 해야 한다.

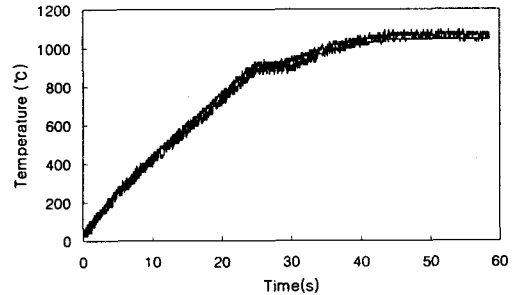


Fig. 5 The comparison of outside and inside temperatures of specimen after heating.

2.3.2 탄성봉과 접촉시 시편의 온도 변화

시편이 실험 온도까지 가열되면 시편과 떨어져 있던 탄성봉을 접촉시킨다. 이 때 탄성봉은 가열되지 않은 상태로서 시편에 비해 온도가 낮은 상태이다. 그러므로 시편과 탄성봉이 접촉하는 순간 열교환이 이루어져서 시편의 온도는 떨어지게 된다. 이 경우 시편의 양 끝단의 온도와 중심부의 온도차이가 많이 나면 응력차이에 의한 배부름 현상이 생기므로 이에 대한 예비실험이 필요하며 약 1030°C에서의 시편 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 온도가 하강하기 시작하는 부분이 탄성봉과 접촉시킨 순간이며 약 2초간 접촉 상태를 유지하였다. 접촉 후 1초 부근에서 시편의 끝단과 중심부의 온도를 비교해 보면 끝단에서는

약 945℃, 중심부에서는 약 980℃이다. 실제 실험에서는 1초 내에 접촉과 동시에 충격봉의 발사가 이루어지므로 실제로는 온도차가 이보다 적을 것으로 보인다. 또한 1000℃ 이하의 실험에서는 이 온도차들이 더욱 적어질 것으로 보인다. 그러므로 시편 내부의 온도차에 의한 영향은 없다고 보고 실험을 수행하였다.

시편의 탄성봉과의 접촉부와 중심부의 온도 차이를 없도록 하는 것이 가장 이상적이겠으나 이는 실제로 거의 불가능하며 접촉 후 발사하는 시간을 최대한 줄임으로써 온도차이를 줄이는 것이 현실적으로 최선의 방법으로 판단된다.

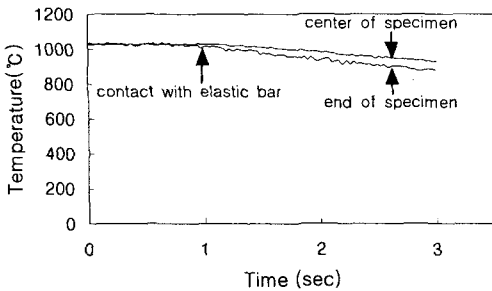


Fig. 6 The comparison of temperatures at the end and the center of bars after contacting with elastic bars.

2.3.3 윤활

시편 양 끝단의 윤활은 시편의 배부름 현상 (barreling)과 관련된 문제이다. 배부름 현상은 시편 양 끝단과 탄성봉간의 마찰로 인해 시편 내부에 전단력이 발생하여 시편의 중앙부가 볼록하게 되는 현상이며 이는 균일한 변형을 해야 한다는 가정에 위배되는 현상이다.

저변형률 속도에서의 상온실험의 경우 윤활제로 분말 형태의 흑연 그래파이트(carbon graphite)나 compound grease 혹은 고체형태의 테프론(teflon)등이 많이 사용되고 있으며 매우 좋은 효과를 내고 있다. 압축 실험에서는 시편에 배부름 현상이 생겼을 때의 유동응력은 그렇지 않았을 때보다 높게 나타난다.^(4, 5, 6)

그러나 여기서는 2000/sec의 고변형률 속도로 실험하였으며 Fig. 7에서 보이는 것처럼 윤활을 한 경우와 안한 경우의 응력차이는 거의 없다.

배부름 현상 역시 두 경우 모두 나타났으며 배부름의 정도는 거의 비슷하다.

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.

이와 같이 여러 가지 변수들에 의해 고온 SHPB 실험 시 윤활 및 배부름 현상 방지는 어려운 문제이다.

본 논문에서는 고온 실험에서 시편에 발생하는 배부름 현상을 줄이기 위해 몰리브덴이 함유된 그리스(grease)를 사용하였다.

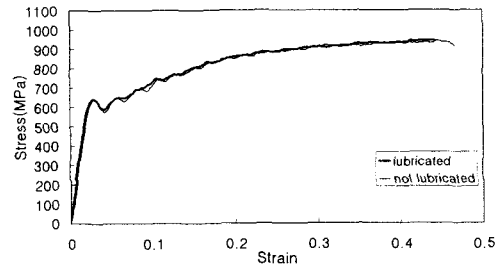


Fig. 7 The stress-strain comparison of lubricated specimen and not lubricated specimen at the room temperature with strain rate at 2000/sec.

2.3.4 산화

재료가 고온이 될수록 주위의 산소와 활발한 결합을 하여 산화막을 형성한다. 산화막은 고온의 시편 주위에 얇은 막을 형성하여 탄성봉과 시편 사이에서 탄성파가 전파되는데 영향을 미치게 된다. 순수 Titanium의 경우 1000℃에서도 산화막은 거의 생기지 않고 있으나 탄소강 같은 경우 산화막이 매우 두껍게 생기며 특히 절삭유 같은 이물질이 묻어 있을 경우 산화는 매우 심각할 정도로 발생한다.

시험장치의 특성상 가열장치의 완전 밀폐는 불가능하여 항상 산소에 노출되어 있어서 산화를 방지할 수 없으나 본 논문에 사용된 순수

Titanium 시편은 산화가 그리 심각하지 않으므로 특별한 산화방지 장치 없이 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

변형률 속도는 1900~2000/sec 의 범위에서 시편의 온도를 상온에서 200℃간격으로 1000℃까지 실험하였으며 그 데이터로부터 진유동응력-진변형률의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 유동응력은 급격한 감소를 보이고 있음을 알 수 있다. 가공경화의 정도 역시 고온으로 갈수록 감소한다. Fig. 8에서 표시된 온도는 모두 설정 온도로 상온(25℃)을 제외한 나머지는 고온 실험에서는 2.3.2절에서 언급했듯이 실제로는 설정 온도보다 약간 낮은 온도에서 실험되었다.

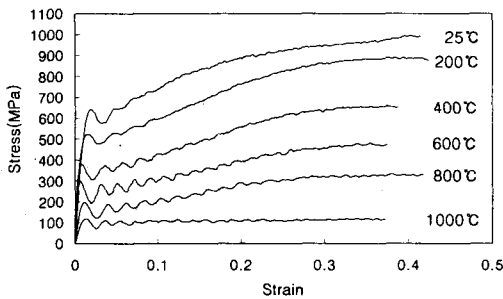


Fig. 8 The stress-strain relation of pure Titanium

4. 결론

본 논문에서는 기존의 압축시험장치를 개선한 고온 압축 SHPB 시험 장치를 이용하여 순수 Titanium의 온도에 따른 진유동응력-진변형률 관계를 계측하였다.

일정온도로 가열된 시편은 저온의 탄성봉과 접촉할 때 시편이 냉각되어 고온에서의 실험은 설정온도보다 약간 낮은 온도에서 실험이 되고 이에 따른 오차가 있을 것으로 보인다.

시편의 온도가 증가함에 따라 유동응력 및 가공경화의 정도가 감소한다.

시편과 탄성봉사이의 마찰에 의해 시편에 배부름 현상이 발생한다. 고온 시편에서는 이 배부름

현상이 심하게 나타나고 이를 완화시키기 위해 시편과 탄성봉 사이에 윤활이 필요하다.

고온 SHPB 실험에서는 시편의 온도변화를 고려하고 배부름 현상을 완화할 수 있는 방안에 주의가 필요하다.

후기

이 논문은 2000년도 연세 학술 연구비 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

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) Lankford, J., 1981, "Temperature-strain rate dependence of compressive strength and damage mechanism in aluminum oxide," J. Mat. Sci., Vol.16, pp. 1567
- (3) Macdougall, D., 1998, "A radiant heating method for performing high-temperature high-strain-rate tests," Meas. Sci. Technol., 9, pp. 1657~1662.
- (4) Zukas, J. A., 1982, Impact dynamics, John Wiley and Sons, Inc.
- (5) Davies, E. D. H. & Hunter, S. C., 1963, "The dynamic compression testing of solids by the method of the split hopkinson pressure bar," J. Mech. Phys. Solids, Vol.11, pp. 155~179.
- (6) Bertholf, L. D. & Karnes, C. H., 1975, "Two-dimensional analysis of the split hopkinson pressure bar system," J. Mech. Phys. Solids, Vol.23, pp. 1~19.
- (7) Meyers, M. A., & Ravichandran, G., 1989, "Short course in dynamic behavior of materials," Center of Excellence for Advanced Materials, University of California, San Diego, March 6~10.