

SHPB 테크닉을 이용한 Al5052-H32 의 동적 인장 거동 규명

이억섭*(인하대 기계공학과), 김면수**(인하대원), 백준호*** (인하대원)

Determination of Dynamic Tensile Behavior of Al5052-H32 using SHPB Technique

O. S. Lee*(Mechanical Eng, InHa Univ.), M. S. Kim**(Graduate School, InHa Univ.)

J. H. Baek*** (Graduate School, InHa Univ.)

ABSTRACT

Mechanical properties of the materials used for transportations and industrial machinery under high strain rate loading conditions such as seismic loading are required to provide appropriate safety assessment to those mechanical structures. The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique with a special experimental behavior under high strain rate loading condition In this paper, dynamic deformation behaviors of Al5052-H32 under high strain rate tensile loading are determined using the SHPB technique.

Key Words : Split Hopkinson Pressure Bar technique(SHPB 기법), high strain rate(고 변형률 속도), stress wave(응력파) dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 곡선), tensile loading(인장 하중), deformation behavior(변형 거동), dynamic maximum stress-log strain rate curve(동적 최대 응력-대수 변형률 속도 곡선)

기호 설명	
L	specimen length
$\epsilon_{specimen}$	specimen strain
$\sigma_{specimen}$	specimen stress
$\dot{\epsilon}$	strain rate
E	Young's modulus
A	cross-sectional area of the bar
A_s	cross-sectional area of the specimen
C_0	longitudinal wave velocity
ϵ_I	incident strain
ϵ_R	reflected strain
ϵ_T	transmitted strain
R	radius of the bar

1. 서론

고 변형률 속도 하에서의 인장 실험은 저 변형률 속도 하에서의 그것과는 분명하게 구분되어야 한다. 고 변형률 속도 하에서는 관성에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 나타낸다⁽¹⁾. 첫 번째로 관

성은 어떠한 조건 하에서는 무시할 수 있는 반경 방향의 성분을 나타나게 한다. 두 번째로 실험 초기에 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미친다.

최근 기계 구조물들은 높은 응력과 순간에 작용하는 하중에 의해 특징지어지는 극한 작업 환경에서 사용되고, 단조와 압연과 같은 가공 공정들은 고 변형률 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 구조물이나 작업환경에 대한 최적의 설계를 하기 위해서는 고 변형률 하중 조건 하에서의 물리적-기계적 재료 특성에 대한 광범위한 정보가 요구된다. 이러한 문제에 대한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고, 동적 실험에 대한 실험적 data 의 부족과 신 소재의 계속적인 개발에 의해 아직도 많은 연구가 필요하다.

변형률 속도가 $10^2 \sim 10^3/s$ 이상의 고 변형률 속도 하에서의 기계적 거동을 측정하기 위해 최근에 가장 널리 쓰이고 있는 방법은 Split Hopkinson Pressure Bar Technique 이다. 이 방법은 1949 년 Kolsky 의 의해 현재 사용되고 있는 장비가 개발되어 지금까지 많은 발전을 거듭하였다. 본 연구에 사용된 SHPB technique 은 Nicholas scheme⁽²⁾을 따른

방법이다.

본 연구는 내식성과 내해수성이 우수하며 성형성과 용접성이 양호하며 선박용 구조용 부품이나 항공기의 압력용기, 연료 탱크등에 사용되는 AI5052-H23 에 대한 고 변형률 인장 하중 하에서의 거동을 규명하였다.

2. 이론

2.1 기본 가정 및 이론

봉끼리의 완전 접촉조건, 길이방향과 반경방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽³⁾와 Chree⁽⁴⁾ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB technique 에 응용되었고, 응력파가 파장 λ 인 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R: 봉의 반경)일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다. 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 성질은 축 방향으로의 응력파 전파속도는 그 파장(Wavelength)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 악영향을 끼치게 되므로 유의해야 한다.

2.2 SHPB 실험방법에 의한 응력-변형률 결정

압력봉(incident bar), 출력봉(transmitted bar), 충격봉(striker bar)등으로 구성되어 있는 SHPB 에서는 시편을 압력봉과 출력봉 사이에 위치시킨다. 충격봉이 V 의 속도로 압력봉에 충돌하게 되면 봉의 밀도가 ρ_0 일 때 압력봉에는 $\rho_0 CV/2$ 의 크기를 갖는 응력파가 발생하게 되고 이 응력파는 시편을 거쳐 출력봉으로 전파된다. 이때 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스의 차이에 의하여 탄성 및 소성 변형을 하게 된다.

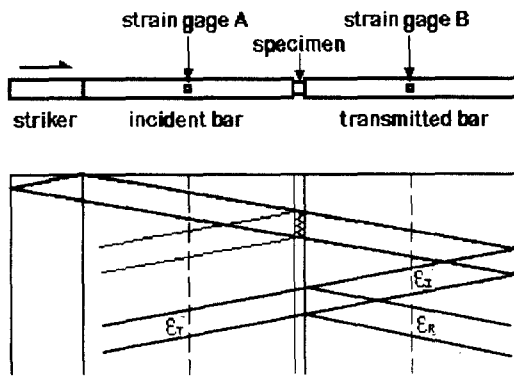


Fig. 1 A schematic diagram of elastic stress waves for the tensile test.

입력봉 및 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어지는 신호와 봉 내의 1 차원 탄성과 전파이론으로부터 시간에 따른 하중과 변형률을 결정할 수 있다. Fig. 1 에 인장 SHPB 실험에서 입력봉 및 출력봉에서의 탄성과 전파 형상을 나타내었다.

충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생한 압축 응력파는 본질적으로는 분산되지 않고 시편과 split ring(Fig. 3 참조)의 복합 단면을 통과한다. 이때 split ring 과 입력봉 및 출력봉 사이의 완벽한 접촉 정도, split ring 의 단면적에 대한 specimen 의 단면적의 비가 클수록 시편을 통해 탄성 범위를 넘어서는 어떠한 압축파도 전달되지 않는다는 조건이 확실해진다⁽⁶⁾ 결론적으로 모든 압축파가 시편이 존재하지 않는 경우와 마찬가지로 split ring 을 통해 전달된다.

Fig. 1 에 나타낸 것처럼 입력봉에 발생한 압축 응력파는 출력봉의 자유단에 도달 할 때까지 계속 전파된다. 출력봉의 자유단에 도달한 압축 응력파는 다시 출력봉으로 인장파(ϵ_T)의 형태로 반사되어 gage No. 2 에 기록된다. 시편에 도달한 인장파의 일부는 입력봉으로 ϵ_T 의 형태로 전달되고, 나머지는 다시 출력봉으로 ϵ_R 의 형태로 반사된다. 시편에서의 인장 응력을 계산하는데 사용되는 인장파(ϵ_T)가 입력봉으로 전달 될 때 입력봉과 split ring 사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파(spurious wave)가 ϵ_T 와 간섭이 발생되지 않도록 strain gage 를 위치시켜야 한다. Fig. 1 에 점선으로 표시된 부분이 입력봉과 split ring 사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파이다. 의사 인장파의 amplitude 는 Fig. 3 에서 보이듯이 매우 작으므로 시편에 큰 영향을 미치지 않는다.

Split ring 과 입력봉 및 출력봉의 정교한 연결은 압축파가 어떠한 형태의 분산없이 봉으로 전파되기 위한 매우 중요한 조건이다. 그리고 인장파가 시편에 도달했을 때 빠르고 완만한 하중을 얻기 위해서는 나사 가공된 시편이 봉에 정교하게 연결되어야 한다⁽⁷⁾. 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{specimen} = \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{-2C}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

여기서 E, A 와 C_0 는 각각 봉의 탄성계수, 봉의 단면적 및 봉에서의 종탄성과 속도를 나타내고, L

과 A_s 는 각각 시편의 gage length 와 단면적으로 나타낸다.

3. 실험 방법

3.1 하중 장치 및 충격봉

$10^2 \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도를 발생시키기 위한 충격하중을 주는 장치는 공기압을 이용하여 충격봉을 발사할 수 있도록 설계, 제작되었으며 충격봉, 입력봉 및 출력봉이 탄성한계를 벗어나지 않도록 충격속도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 각 봉의 소재로 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있으며 강도가 높은 고 탄소 베어링강을 사용하였다. 충격봉의 길이는 300mm 로 제작하였고, 표면에는 충격봉이 발사 될 때 gun barrel 과의 마찰을 줄이기 위하여 Teflon ring 을 장치하였다. 직경은 입력봉과 같은 16mm 이다. Fig. 2 에서 SHPB 실험장치의 전체적인 모양을 각각 나타내었다.

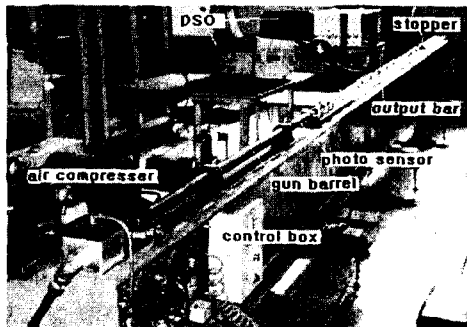


Fig. 2 General view of SHPB experimental apparatus.

3.2 입력봉 및 출력봉

변형률 속도를 결정하는 봉의 직경이 작을수록 고 변형률 속도를 얻을 수 있다. 그리고 봉 내부에서 응력파는 1 차원적으로 전파되어야 한다. 또한 시편의 변형률의 크기는 응력파의 파장과 관계가 있으므로 봉의 길이는 최소한 봉에 서의 응력과 파장의 2 배 이상이어야 한다. 이러한 조건과 25%이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L)에 대한 직경(D) 비율을 100 으로 하였다⁽⁵⁾. 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질이며 직경 역시 충격봉과 같은 16mm 로 하였다. 봉의 끝은 정밀 연마하여 표면의 정밀도를 유지하였으며 각 봉의 양끝은 서로 완전한 평면 접촉을 하도록 정밀 연삭하였다.

본 연구에서 사용된 충격봉 및 압력봉의 재질은 고탄소 크롬 베어링 강으로 항복강도는 452Mpa 이고, 탄성계수는 225Gpa 이다. 충격봉과 압력봉에 시편이 장착된 형상은 Fig. 1 윗부분에 나타나 있다.

3.3 직진도 유지 장치

실험 장치에서 중요한 요소 중 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전달되도록 하는 것이다. 직진도가 유지되지 못하면 시편을 각 압력봉에 장치할 때 매우 곤란할 뿐만 아니라 시편에 비틀림 또는 전단하중을 가하는 나쁜 영향이 발생한다. 또한 직진도를 유지시키기 위해서 I 빔을 정밀 평면 연삭 가공하였고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

충격봉의 속도를 측정하기 위해 충격봉이 지나가는 경로에 50mm 간격으로 3 개의 광센서를 설치하였다. 충격봉에 의해 광센서의 빛이 차단되는 순간이 전기적 신호에 의해 오실로스코프(oscilloscope; Nicolet 410)에 감지되도록 하였다.

응력파(ϵ_L , ϵ_T , ϵ_R)를 검출하기 위해 입력봉과 출력봉에 스트레인 게이지들을 부착하였다. 스트레인 게이지를 각 봉에 부착할 때에는 각각의 유효신호가 간섭되지 않도록 시편과의 접촉면으로부터 입력봉과 출력봉 각각 80mm 되는 거리에 부착시켰다.

봉의 길이방향의 응력파의 시간에 따른 변화는 스트레인 게이지에 미세한 저항으로 작용하며 이러한 미세한 변화는 증폭기(amplifier)를 거쳐서 오실로스코프(digital storage oscilloscope; Lecroy 9354A)에 기록되게 된다.

3.5 시편 및 split ring

본 연구에 사용된 시편의 재료는 A15052-H32 이다. 시편의 전체 길이는 34mm 이며, 지름은 4mm 이고, 양끝 12mm 의 길이에는 나사 가공을 하여 시편을 봉에 고정시킬 수 있게 하였다.

Split ring 의 단면적에 대한 압력봉의 단면적의 비는 3:4 이다. 그리고 split ring 의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비는 12:1 이다. 이러한 형상은 초기 압축파가 시편에 어떠한 소성변형을 가하지 않고 온전히 출력봉으로 전달될 수 있는 조건이다⁽⁶⁾.

입력봉에 발생된 초기 압축파가 출력봉에 완벽하게 전달될 수 있도록 입력봉과 출력봉 사이에 장치하는 split ring 은 외경 16mm, 두께 10mm 로 하였으며, 내경은 시편의 split ring 과 마찰을 일으키지 않고 움직일 수 있는 최소의 크기로 하였다. Split ring 은 각 봉과 같은 재질을 사용하였고 입력봉, split ring, 출력봉의 일직선 정렬을 위해 collar 를 사용하였다. Fig. 3 에 시편의 형상 및 collar 를 사용해 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 장치된 형상을 나타내었다.

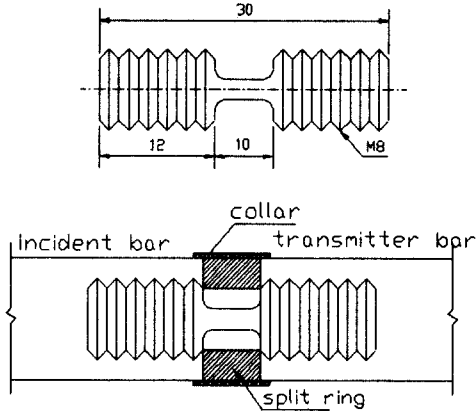


Fig. 3 Specimen geometry and setting between incident and transmitter bar.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4 에 SHPB 시험에서 입력봉과 출력봉에 부착한 스트레인 게이지로부터 얻어진 응력파의 전형적인 형태를 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출되는 입력파, 반사파의 크기(amplitude) 및 형상이 똑같아야 하나 실제 검출된 신호를 보면 점차 감쇠됨을 알 수 있다. 이러한 문제점은 더 정확한 data 를 얻기 위해 보정되어야 한다.

위에서 얻어진 결과를 식 (1), (2), (3)을 사용하여, Fig. 5 에서 Al5052-H32 의 동적 인장 하중 하에서의 응력-변형률 선도를 나타내었다. 그리고, Fig. 6 의 (a)와 (b)는 각각 응력-변형률 속도와 응력-대수 변형률 속도를 나타내었다.

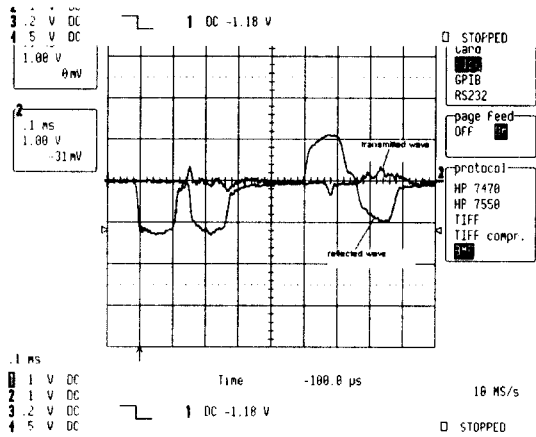


Fig. 4 General view of the signal obtained by the strain gage A and B.

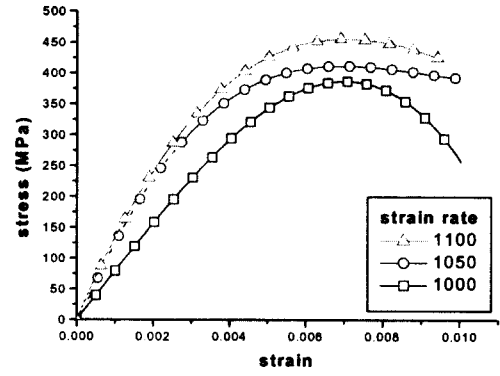


Fig. 5 Dynamic tensile stress-strain curve for Al5052-H32

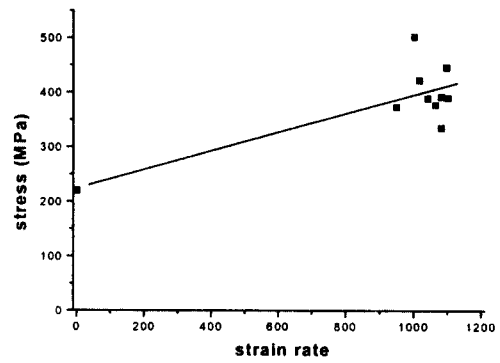


Fig. 6(a) Dynamic tensile stress-strain rate curve for Al5052-H32

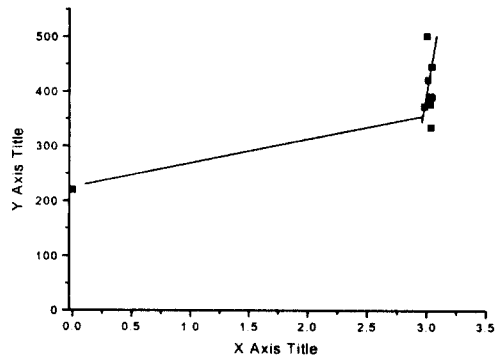


Fig. 6(a) Dynamic tensile stress-log strain rate curve for Al5052-H32

Fig. 6(a)에서는 인장 하중하에서 A15052-H32 의 동적 응력-변형률 속도의 관계가 선형적임을 나타내었고, Fig. 6(b)에서는 동적-대수 변형률 속도를 나타내었다. Fig. 6(b)에서 나타난 바와 같이 응력과 대수 변형률 속도의 관계가 쌍 1 차형식으로 증가함이 밝혀졌다.

5. 결론

본 연구에서는 여러 산업 분야에서 널리 사용되며, 내해수성, 성형성, 용접성이 우수하여 선박이나 항공기의 재료로 쓰이는 A15052-H32 를 SHPB 실험 장치를 이용하여 고속 인장 변형 시험을 수행하였다. 고 변형률 속도 하중으로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) A15052-H32 의 변형률이 0.005~0.010 의 부근에서 동적 최대 응력에 도달된다.
- (2) A15052-H32 의 인장 하중 하에서 동적 최대 응력과 변형률 속도의 관계는 선형적으로, 대수 변형률 속도에 대한 관계는 쌍 1 차형식으로 증가함을 밝혔다.
- (3) A15052-H32 의 인장 하중 하에서 고 변형률 속도 민감도 $\{(\sigma_{\text{dyn}} - \sigma_{\text{stat}}) / \sigma_{\text{stat}}\}$ 는 83%임을 밝혔다.

참고문헌

1. G. Regazzoni, P. S. Follansbee, "Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 53, pp.519~520.
2. American Society for Metals Hand Book 8th edition, Vol. 1, pp.947~949
3. L. Pochhammer, "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder", *J. Reine Angewandte Math.*, Vol. 81, p.324, 1876.
4. C. Chree, "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications", *Cambridge Phil. Soc. Trans.* Vol. 14, p.250, 1889.
5. C. H. Nguyen, H. J. Schindler, "On Spurious reflection Wave in Hopkinson Bar Tensile Tests Using a Collar", *Journal DE Physique IV*, pp.C3-85~C3-87, 1997.
6. T. Nicholas, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain", *Experimental Mechanics*, pp.179~180.
7. A. M. Bragov and A. K. Lomunov, "Mechodological Aspects of Studying Dynamic Mateiral Properties Using the Kolsky Method", *Int. J. Impact Energy*, Vol. 16, pp.321~330, 1994.
8. Ouk Sub Lee, Seung Suk You, Ju Ho Chung and Hee Soo Kang, "Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment", *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149 1998.
9. O. S. Lee, J. H. Chong, S. S. You, S. S. Choi, "Split Hopkinson Pressure Bar Technique", *Key Engineering Materials*, Vol. 145~149, pp.343~348.
10. O. S. Lee, G. H. Kim, S. W. Hwang, M. S. Han and J. S. Hwang, "High Strain-Rate Deformation of Polymeric Materials Using Split Hopkinson Pressure Bar Technique", *Department of Mechanical Engineering*, Vol. 1, pp. 307~312, 2000.
11. 이억섭, 김관희, 황시원, "SHPB 테크닉을 이용한 A16061-T6 의 고속 인장 변형 거동 규명", *재료 및 파괴 부문 학술 대회*, Vol. 1, pp. 161~166, 2000.
12. O. S. Lee, J. Y. Lee, G. H. Kim, H. S. Hwang, "High Strain-Rate Deformation of Composite Materials Using a Split Hopkinson Bar Technique", *Key Engineering Materials*, Vol. 183~187, Part1, pp. 307~312, 2000.
13. Ouk Sub Lee, Guan Hee Kim "Thickness effects on Mechanical behavior of a composite material(1001P) and polycarbonate in split Hopkinson Pressure Bar technique", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 19, pp. 1805~1808, 2000.