대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A pp. 268~273 KSME 00F030

상용 알루미늄 합금의 고속 인장/압축 변형거동 규명

이억섭[1], 김관희[2]*, 김면수[2], 황시원[3]

Dynamic deformation behavior of aluminum alloys under high strain rate compressive/tensile loading

O. S. Lee(Inha Univ.), G. H. Kim, M. S. Kim(Inha graduate school) and
S. W. Hwang(Dongyang Univ.)

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), snug fit(정교한 접촉), spurious wave(의사 인장파)

ABSTRACT

Mechanical properties of the materials used for transportations and industrial machinery under high strain rate loading conditions are required to provide appropriate safety assessment to these mechanical structures. The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique, a special experimental apparatus, can be used to obtain the material behavior under high strain rate loading condition. In this paper, dynamic deformation behaviors of the aluminum alloys, Al2024-T4, Al6061-T6 and Al7075-T6, under high strain rate compressive and tensile loading are determined using SHPB technique.

1. 서론

고 변형률 속도 하에서의 압축/인장 실험은 저 변형률 속도 하에서의 그것과는 분명하게 구분되어져야 한다. 고 변형률 속도 하에서는 관성에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적 실험에서 관성은 다음의 3가지 영향을 나타낸다[1]. 첫 번째로 관성은 어떠한 조건하에서는 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 사용되어지고 있다. 그리고 단조, 압연과 같은 가공 공정들은 고 변형률 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 구조물이나 작업환경에 대한 최

1 인하대학교 기계 · 항공 · 자동화공학부 교수
2 인하대학교 대학원 기계공학과
3동양대학교 기계 설계학과

적의 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 data의 부족과, 동적 하중 하에서 사용되는 구조물의 재료로 쓰이는 신 소재의 계속적인 개발에 의해 아직도 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 높은 강도, 좋은 용접성, 높은 부식 저항성이 있어 파이프, 대포, 수송 장비, 평저 보트 등에 사용되는[2] 알루미늄 합금, A16061-T6, 와 항공기 구조물에 많이 사용되고있는 A12024-T4 와 A17075-T6 에 대해 고 변형률 압축/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 technique에 응용되었고, 응력파가 파장 λ인 순수 코사인파(cosine wave)라면 R/λ ≪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

2.2.1 압축

충격봉에 의해 입력봉이 충격을 받으면, 수직 응력파가 발생하고 이 응력파는 입력봉을 따라 시편까지 전파하게 된다. 시편에 도달한 응력파는 봉과 시편의 임피던스 차이에 따라 일부는 다시 입력봉으로 반사하게 되고, 나머지는 계속해서 출력봉으로 전파하게 된다. 시편이 입력봉과 출력봉사이에 위치하기 때문에 응력파는 시편의 양쪽 끝을 평형상태에 도달할 때까지 계속해서 왕복하게 된다. 출력봉으로 전달된 응력파는 출력봉의 끝단까지 계속해서 전파되었다가 반사된다. 입력봉과 출력봉은 각각의 스트레인 게이지가 부착된 곳에서 끝단으로부터 반사된 반사파의 영향을 최소화할 수 있도록 충분히 길어야 한다. 시편은 시편내의 반사파가 충분히 왕복한 후 평형상태에 도달할 수 있도록 충분히 작아야 한다. 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음의 관계를 이용하여 얻어진다.

$$\sigma_{specimen} = E(\frac{A}{A_s})\varepsilon_T \tag{1}$$

$$\varepsilon_{specimen} = -\frac{2C_0}{L}\int_0^t \varepsilon_R dt \tag{2}$$

2.2.2 인장

충격봉의 충돌에 의해 입력봉에 발생된 응력파는 시편과 split ring의 복합 단면(composite section)을 거쳐 출력봉으로 전파된다. 이때 입력봉과 출력봉은 탄성한도 내에 있도록 충격봉의 속도가 조절되지만 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스의 차이에 의하여 탄성 및 소성 변형을 하게 된다.

충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생된 압축 응력파는 본질적으로는 분산되지 않고 시편과 split ring의 복합 단면(composite section)을 통과한다. 이 때 split ring과 입력봉 및 출력봉 사이의 완벽한 접촉 정도, split ring의 단면적에 대한 specimen의 단면적의 비가 클수록 시편을 통해 탄성 범위를 넘어서는 어떠한 압축파도 전달되지 않는다는 조건이 확실해 진다[5]. 결론적으로 모든 압축파가 시편이 존재하지 않는 경우와 마찬가지로 split ring을 통해 전달된다.

입력봉에 발생된 압축 응력파는 출력봉의 자유단에 도달 할 때까지 계속 전파된다. 출력봉의 자유단에 도달한 압축 응력파는 다시 출력봉으로 인장파(ε_1)의 형태로 반사되어 gage No. 2에 기록된다. 시편에 도달한 인장파의 일부는 입력봉으로

ε_T의 형태로 전달되고, 나머지는 다시 출력봉으로 ε_R의 형태로 반사된다. 시편에서의 인장응력을 계산하는데 사용되는 인장파(ε_T)가 입력봉으로 전달 될 때 입력봉과 split ring사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파(spurious wave)가 ε_T와 간섭이 발생되지 않도록 strain gage를 위치시켜야한다. 의사 인장파는 시편에 pretension을 가하여 시편에 나쁜 영향을 미치지만, 현재 고속 인장 응력을 구하기 위한 SHPB technique에서는 불가피한 현상이다. 그러나 의사 인장파(spurious wave)의 amplitude는 매우 작으므로 시편에 큰 영향을 미치지는 않는다.

입력봉과 출력봉 사이의 split ring은 두 봉의 어느 쪽에도 연결되어 있지 않기 때문에 어떠한 인장하중에도 영향을 미치지 못한다. split ring과 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[6]. 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 압축에서 사용된 관계를 이용하여 구할 수 있다.

3.실험방법

3.1 하중 장치 및 충격봉

압축시험과 인장시험에 사용된 하중 장치와 충격봉은 그 재질 및 형상이 동일하다.

$10^2 \sim 10^4$/s의 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 크롬 베어링강을 사용하였다. 충격봉의 길이는 300㎜로 제작하였고, 직경은 압력봉과 같은 16㎜이다.

3.2 입력봉 및 출력봉

3.2.1 압축

압축 시험에 사용된 입력봉 및 출력봉은 고탄소 크롬 베어링강으로 항복강도는 452MPa이고 탄성계수는 225GPa이다.

3.2.2 인장

인장 시험에 사용된 입력봉 및 출력봉은 압축 시험에 사용된 봉과 같은 재질이다. 각 봉에는 시편을 고정시킬 수 있도록 나사산을 가공하였다. 입력봉 및 출력봉에 나사산을 가공할 때 시편을 한 방향으로 돌려서 각각의 봉에 장치하여야 하므로 한 쪽은 오른 나사로 다른 쪽은 왼 나사로 가공하였다. 또한 각 봉의 끝단은 계속적인 충격하중에 의한 변형을 방지하기 위해 고주파 열처리를 하였다.

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.

직진도를 유지하기 위해서 I 빔을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

충격봉의 속도를 측정하기 위해 충격봉이 지나가는 경로에 50㎜ 간격으로 3개의 광 센서를 설치하였다. 충격봉에 의해 광 센서의 빛이 차단되는 순간이 전기적 신호에 의해 오실로스코프(oscilloscope ; Nicolet 410)에 감지되도록 하였으며 충돌시의 속도를 정밀하게 검출하기 위해 입력봉 앞부분에 설치하였다.

봉의 길이방향의 응력파의 시간에 따른 변화는 스트레인 게이지에 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)회로에 의해 전압변화로 나타나게 된다. 이러한 전압의 미세한 변화는 증폭기(amplifier)를 거쳐서 오실로스코프(digital storage oscilloscope ; Lecroy 9354A)에 기록되게 된다.

3.5 시편

3.5.1 압축

압축 시험에 사용된 시편들은 관성의 영향을 최소화 할 수 있는 형상으로 가공되었다. 입력봉 및 출력봉과 접촉하는 양 끝단에는 압축시의 마찰을 줄이기 위해 윤활제를 사용하였다.

3.5.2 인장

본 연구의 인장시험에 사용된 시편의 형상은, 전체 길이는 34㎜이며, 양 끝 12㎜의 길이에는 나사가공을 하여 시편을 봉에 고정시킬 수 있게 하였다. 시편의 gage length는 10㎜이며 지름은 4㎜이다.

split ring의 단면적에 대한 압력봉의 단면적의 비는 3:4이다. 그리고 split ring의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비는 12:1이다. 이러한 형상은 초기 압축파가 시편에 어떠한 소성변형을 가하지 않고 온전히 출력봉으로 전달될 수 있는 조건이다[7].

입력봉에 발생된 초기 압축파가 출력봉에 완벽하게 전달될 수 있도록 입력봉과 출력봉 사이에 장치하는 split ring은 외경 16㎜, 두께 10㎜로 하였으며, 내경은 시편이 split ring과 마찰을 일으키지 않고 움직일 수 있는 최소의 크기로 하였다.

Figure 1에 시편의 형상 및 collar를 사용해 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 장치된 형상을 나타내었다.

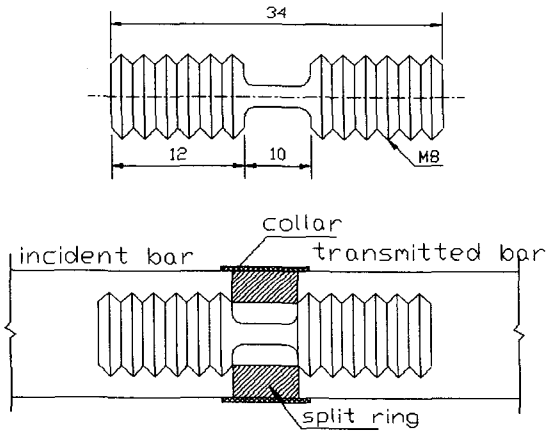

Fig. 1 Specimen geometry and setting between incident and transmitter bar

4. 결과 및 고찰

4.1 압축

Figure 2에 oscilloscope에서 얻어진 strain signal을 나타내었다. Reflected wave는 입력봉에서, transmitted wave는 출력봉에서 검출된 신호이다. Figure 2의 가로축은 시간을 세로축은 voltage 값을 나타낸다.

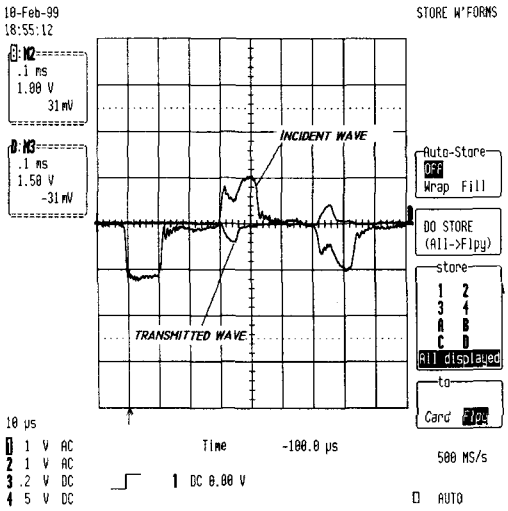

Fig. 2 Strain signal recorded at D.S.O

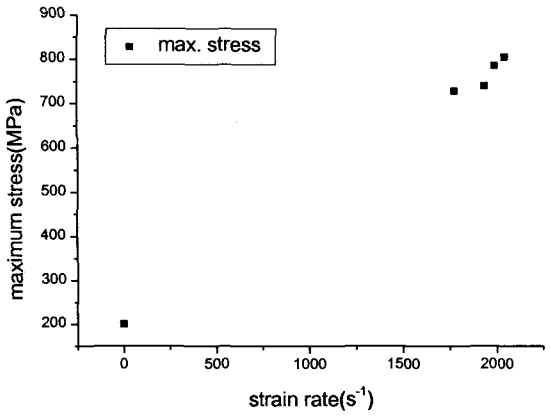

Fig. 3 Strain rate versus maximum stress for 2024-T4

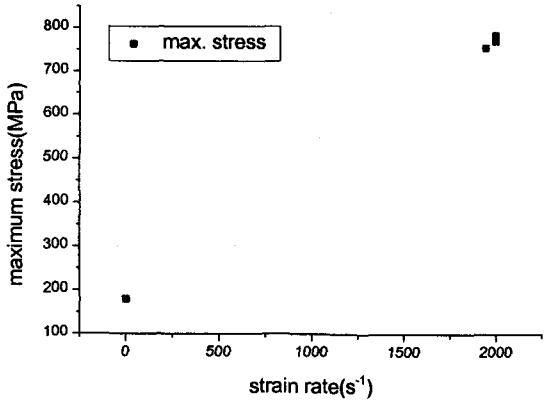

Fig. 4 Strain rate versus maximum stress for 6061-T6

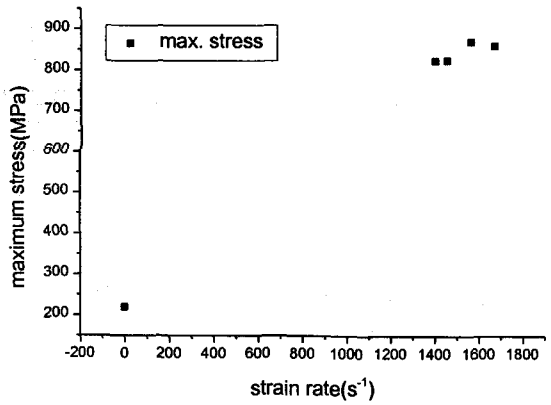

Fig. 5 Strain rate versus maximum stress for 7075-T6

위의 결과들에서 알 수 있는바와 같이 알루미늄 합금의 최대 압축 강도는 strain rate에 매우 민감함하며, 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

4.2 인장

Figure 6에 oscilloscope에서 얻어진 변형률 신호를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 인장실험의 변형률 신호는 압축 실험에서 얻어진 변형률 신호와는 뚜렷하게 구분됨을 발견할 수 있다. 인장실험에서 reflected wave는 출력봉에서 검출되고, transmitted wave는 입력봉에서 검출된다.

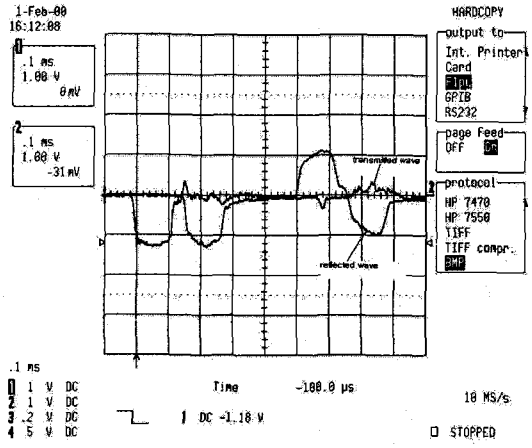

Fig. 6 Strain signal recorded at D.S.O

Figures 7, 8, 9 에 각각 A12024-T4, A16061-T6와 A17075-T6의 strain rate에 대한 최대 인장강도와 압축강도를 함께 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 합금의 최대 인장강도는 최대 압축 강도에 비해 strain rate에 대한 민감도가 작음을 알 수 있다. 최대 압축 강도는 strain rate에 대해 선형선적으로 증가하는 반면, 인장강도는 bilinear한 형상을 나타낸다.

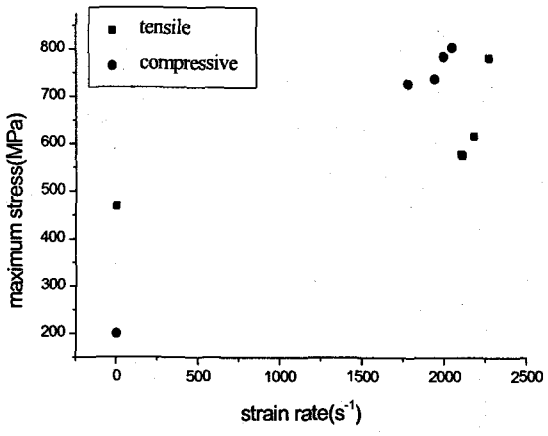

Fig. 7 Dynamic strain rate versus maximum stress for A12024-T4

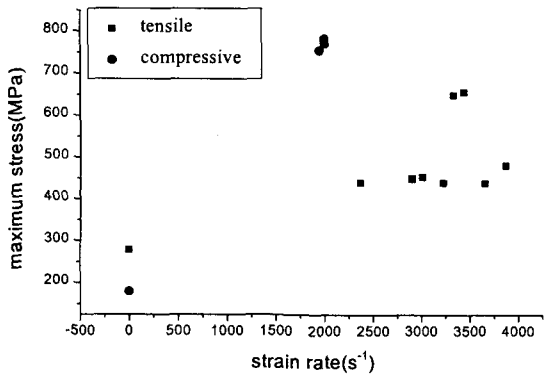

Fig. 8 Dynamic strain rate versus maximum stress for Al6061-T6

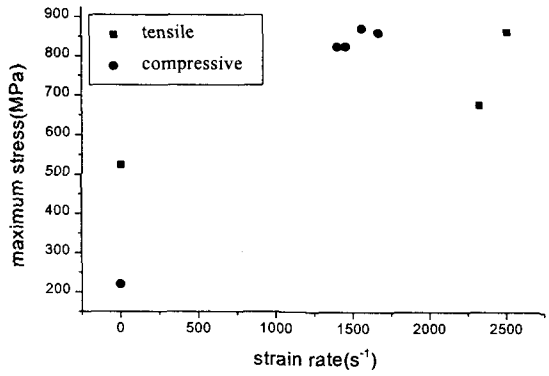

Fig. 9 Dynamic strain rate versus maximum stress for Al7075-T6

5. 결론

본 연구에서는 SHPB 기법을 이용한 Al2024-T4, Al6061-T6 와 Al7075-T6의 고속 압축 및 인장 하중 하에서의 변형 거동을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 알루미늄 합금 Al2024-T4, Al6061-T6와 Al7075-T6의 고변형률 속도 민감도 $\{(\sigma_{dyn}-\sigma_{stat})/\sigma_{stat}\}$는 압축 강도에 대해서는 각각 301%, 336%, 295% 이고, 인장 강도에 대해서는 각각 67%, 136%, 64.7% 임을 밝혔다.

(2) 알루미늄 합금 Al2024-T4, Al6061-T6와 Al7075-T6의 압축강도는 고 변형률속도 strain rate에 대해 선형적으로 증가하는 반면, 인장강도는 이중 직선 모양으로 증가함을 밝혔다.

참 고 문 헌

(1) G. Regazzoni, P. S. Follansbee, 1986, "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. 947-948

(3) L. Pochhammer, 1876, "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder", J. Reine Angewandte Math., Vol 81, p. 324.

(4) C. Chree, 1889, "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications", Cambridge Phil. Soc. Trans. Vol 14, p. 250.

(5) C. H. Nguyen, H. J. Schindler, 1997, "On Spurious reflection Waves in Hopkinson Bar Tensile Tests Using a Collar", Journal DE Physique Ⅳ, pp. C3-85~C3-87

(6) T. Nicholas, 1981, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain", Experimental Mechanics, pp. 179~180.

(7) A. M. Bragov and A. K. Lomunov, 1994, "Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method", Int. J. Impact Energy, Vol. 16, pp. 321~330.