

고변형률 압축/인장 하중에 대한 알루미늄 합금의 동적 변형 거동

이역섭*, 김면수**, 황시원***, 조규상***

Dynamic Deformation Behavior of Aluminum Alloys under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading

Ouk Sub Lee*, Myun Soo Kim**, Si Won Hwang***, Kyu Snag Cho***

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 these mechanical structures. The split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) technique with a special experimental apparatus can be used to obtain the material behavior under high strain rate loading conditions. In this paper, dynamic deformation behaviors of the aluminum alloys such as Al2024-T4, Al6061-T6, and Al7075-T6 under both high strain rate compressive and tensile loading conditions are determined using the SHPB technique

Key Words : SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), aluminum alloys(Al2024-T4, Al6061-T6, Al7075-T6), dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 선도), stress wave(응력파), high strain rate(고변형률 속도), dynamic yield stress(동적 항복 응력)

기호 설명

		A 압축봉의 단면적(cross-sectional area of the bar)
$\dot{\epsilon}$	변형률 속도(strain rate)	A_s 시편의 단면적(cross-sectional area of the specimen)
$\epsilon_{specimen}$	시편 변형률(specimen strain)	C_0 응력파속도(stress wave velocity)
$\sigma_{specimen}$	시편 응력(specimen stress)	C 바내의 응력파속도(stress wave velocity of prssure bar)
L	시편 길이(specimen length)	ϵ_I 입사 변형률(incident strain)
E	영 계수(Young's modulus)	ϵ_R 반사 변형률(reflected strain)
R	압축봉의 직경(radius of the bar)	ϵ_T 투과 변형률(transmitted strain)

* 2002년 7월 5일 접수
 * 인하대 기계공학부
 ** 인하대 대학원 기계공학과
 *** 동양대 기계공학과

1. 서론

고변형률 속도하에서의 압축과 인장 시험은 저변형률 속도일 때의 시험과는 구분되어야 한다. 고변형률 하중하에서의 시험에서 관성의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적인 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 나타낸다⁽¹⁾. 첫 번째로 관성은 어떠한 조건에서는 무시할 수 있는 반경성분을 가지게 된다. 두 번째로는 실험의 초기에서 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미치게 된다.

최근 기계 구조물들의 많은 경우는 높은 응력이나 순간에 작용하는 하중에 의해 특징지어지는 극한 작업 환경에 사용되고, 특히 단조와 압연과 같은 공정들은 고변형률 하중하에서 작업이 이루어진다. 이러한 극한 하중 상태에서 사용되는 구조물의 설계를 위해서는 고변형률 하중하에서 금속에 대한 기계적 변형 거동을 알아야 한다. 그러나 고변형률 하중하에서의 기계적인 특성을 얻기는 쉽지 않다.

변형률 속도가 10³/s 이상의 상태에서 충격에 대한 압축과 인장 하중하에서 동적 재료의 특성을 얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적으로 SHPB 장치는 10³~10⁴ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 SHPB 실험 기법을 이용하여 가지 알루미늄 합금재료(Al2024-T4, Al6061-T6, Al7075-T6)의 고변형률 인장/압축 변형 거동을 실험적으로 규명하고, 이들 재료의 고변형률 변형특성에 대하여 면밀한 고찰을 수행하였다.

2. 이론

2.1 기본 가정 및 이론

SHPB 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽²⁾와 Chree⁽³⁾ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB 기법에 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⁽⁴⁾. 압력봉 내에서 전

파하는 응력파의 중요한 성질은 축 방향으로의 응력과 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 일정한 시편의 변형

탄성파가 봉을 통해서 전파를 하지만, 마찰이나 소성 변형에 대한 영향 때문에 시편의 변형을 해석하기는 어려움이 있다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제를 사용하여 줄였다. 더욱이 시편의 변형은 일정하지만, 고변형률 속도에서는 갑작스런 입자들의 가속화 때문에 길이 방향이나 반경 방향의 관성이 발생하게 된다.

2.3 SHPB 에 대한 응력과 변형률 속도 측정

2.3.1 압축 실험

전통적인 SHPB 기법에서, 시편은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된다. Fig. 1 은 SHPB 에서 발생한 압축 탄성파의 전파 거동을 나타내었다. 충격봉(striker)이 입력봉에 충돌하게 되면, 응력파(stress wave)가 발생하고 시편까지 출력봉을 통해서 전파하게 된다. 입력된 응력파의 일부분은 물질의 임피던스(impedance) 차에 의해 봉과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시편으로 투과된다. 이러한 투과파는 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 이때 시편내의 응력, 변형률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력봉을 통해 다음과 같이 얻어진다⁽⁵⁾.

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

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

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

2.3.2 인장 실험

SHPB 기법을 이용한 실험에서의 시편은 입력

봉과 출력봉 사이에 위치하게 된다. SHPB 를 통한 인장 탄성파의 전파양상은 Fig. 2 에 나타나 있다.

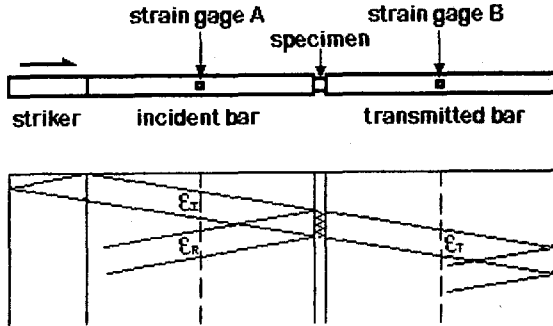


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive test

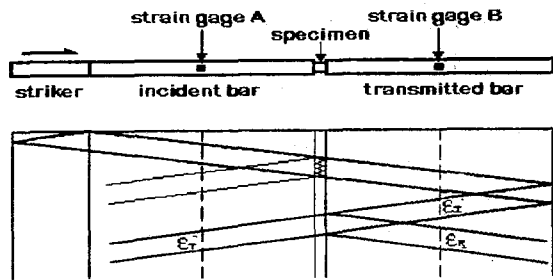


Fig. 2 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the tensile test

충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생한 압축파는 시편과 링(split ring)을 통과하게 된다. 이 파는 계속 전파하여 출력봉 끝단에 도달하게 되고, 이 압축파는 계면에서 반사되어 인장파로 다시 전파하게 된다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 반사된 파는 스트레인 게이지 B 에 기록이 된다. 이러한 인장파의 일부분은 시편을 지나 입력봉으로 전파하게 되고, 나머지는 다시 출력봉으로 반사하게 된다. 입력봉과 링에서의 계면에서 발생하는 의사인장파가 인장 응력파에 영향을 미치지 않게 하기 위해서는 스트레인 게이지의 위치가 중요하다. 이러한 의사인장파는 시편에 작용함으로써 결과에 좋지 않은 영향을 주게 된다. 그러나 이러한 현상은 고변형률 속도 실험에서는 불가피하다. 입력봉과 출력봉 사이에 위치한 링은 실험시 두 봉의 접촉에 의한 압축하중이 시편에 전달되는 것을 방지하고 인장 하중만 시편에 가해 주기 위한 장치이다. 두

봉과 시편에 있는 링은 또한 1 차원 전파를 유지하기 위한 장치이다.

3. 실험

3.1 하중장치와 충격봉

실험에서 사용된 입력봉, 출력봉과 충격봉의 재질은 모두 STB2 로서 항복 강도는 490MPa 이고, 탄성계수는 225GPa 이다. Photo 1 은 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm 이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Photo 1 에서 보듯이 건 배럴(gun barrel)을 설치하여 압력을 발생시키는 장치와 입력봉에 정확한 충격을 위한 장치를 설치하였다.

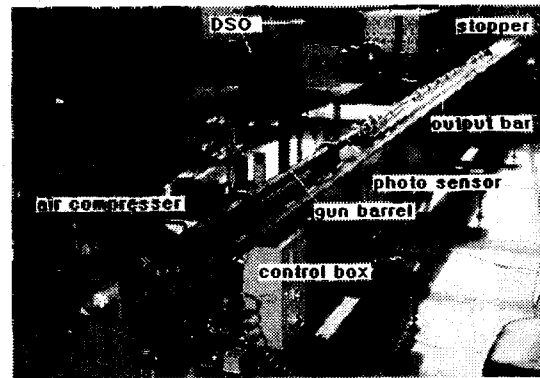


Photo 1 General view of SHPB experimental apparatus

3.2 입력봉과 출력봉

3.2.1 압축 실험

입력봉의 직경이 작을수록 좀더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 봉의 길이는 봉에서의 응력파의 길이(stress wavelength)의 최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L) 대 직경(D)의 비(L/D)는 100으로 하였다⁽⁴⁾. 이들 두 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질인 STB2 로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm 로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면을 시편과 완전히 접촉하도록 정밀 연삭하였다^{(6),(7),(8)}.

3.2.2 인장실험

인장 실험에서는 입력봉과 출력봉 사이에 시

편을 고정시키기 위해 시편이 접촉하는 한쪽에 나사 가공을 하였다. 입력봉과 출력봉에 시편을 고정시킬 때, 두 봉을 같은 방향으로 회전시킬 수 있게 한쪽은 왼나사, 다른 쪽은 오른나사로 가공하였다. 그리고 계속적인 충격에도 변형이 생기지 않게 나사 가공한 부분에 열처리를 하였다.

3.3 직진도 유지장치

실험 장치에서 중요한 문제점은 봉에서의 응력파가 일차원으로 전파하기 위해 봉의 직진도의 유지이다. 따라서 I-beam 을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 속도와 응력과 측정 장치

속도를 측정하기 위해, 건 배럴(gun barrel)의 끝단에 50mm 의 간격으로 3 개의 광센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광센서의 빛을 차단시킬 때, oscilloscope 와 Nicolet 410 에 전기적인 신호가 전달되게 된다. 봉의 중간에 부착된 스트레인 게이지로부터 응력파의 신호를 검출하게 된다.

3.5 시편(specimen)

Table 1 에 본 연구에서 사용한 재료의 기계적인 특성을 나타내었다.

Table 1 Mechanical Properties of specimen

Mechanical Properties	2024-T	6061-T6	7075-T6
Hardness(Brinell)	120	95	150
Tensile Strength Yield (0.2%)	325MPa	275MPa	505MPa
Modulus of Elasticity	72.4GPa	65GPa	72GPa
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.33
Fracture Toughness (TL orientation)	32MPa-m ^{1/2}	29MPa-m ^{1/2}	25MPa-m ^{1/2}
Shear Modulus	28GPa	26GPa	26.9GPa

3.5.1 압축 시편

시편의 형상은 충격의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 두께는 5mm 이고 직경은 10mm 로

하였다. 그 형상은 Fig. 3 에 나타내었다.

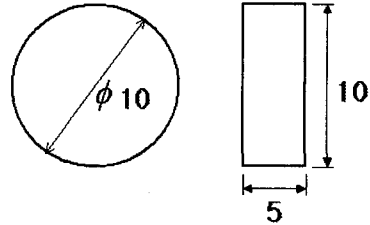


Fig. 3 Geometry of compressive specimen

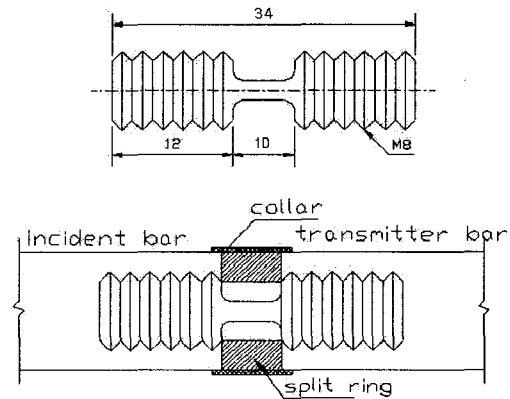


Fig. 4 Block specimen geometry and setting between incident and transmitted bar (dimension = mm)

3.5.2 인장 시편

시편의 전체 길이는 34mm 이고, 직경은 4mm, 평행부 길이 10mm 이다. 입력봉과 출력봉에 고정을 시킬 수 있게 시편의 양 끝에 나사가공을 하였다^{(9),(10)}.

링(split ring)의 단면적에 대한 압력봉의 단면적의 비는 3:4 이다. 그리고 링의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비는 12:1 이다. 이러한 형상은 초기 압축파가 시편에 어떠한 소성변형을 가하지 않고 온전히 출력봉으로 전달될 수 있는 조건이다. 링과 칼라(collar)의 형상은 Fig. 4 에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 오실로스코프(oscilloscope)에 검출된 결과는 Fig. 5 에 나타나있다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는

투과파와 반사파의 크기(amplitude)와 같아야 한다. 하지만 점차 감쇠 됨을 볼 수 있다.

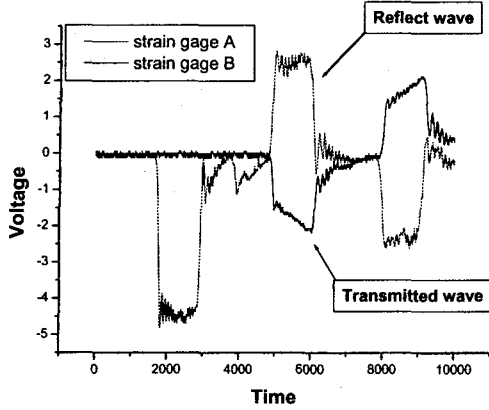


Fig. 5(a) Strain signal recorded at Oscilloscope under compressive loading for Al2024-T4

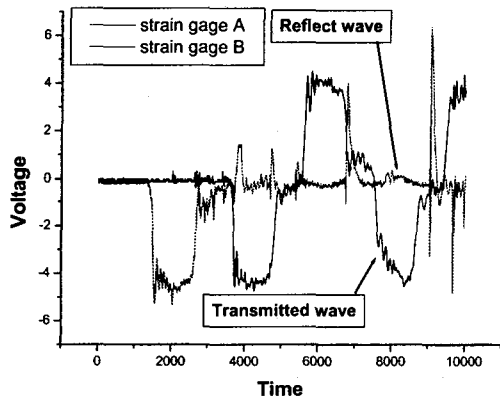


Fig. 5(b) Strain signal recorded at Oscilloscope for tensile loading for Al2024-T4

식(1), (2)와 (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축과 인장 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의 관계를 얻을 수 있다. Fig. 6 은 Al2024-T4 에서 변형률 0.25 까지의 동적 응력-변형률의 관계를 나타내었다. 본 연구에서는, 모든 영역의 관계보다는 Fig. 6 에서 타원으로 표시된 항복 점을 지나 최대 응력이 발생하는 초기 영역의 관계들을 비교해 보았다⁽¹¹⁾. 이러한 초기에 발생하는 관계들을 Fig. 7 에서의 그림과 같이 여러 가지 알루미늄 합금에 대해 응력-변형률 선도와 이것을 수치적으로 해석한 결과를 나타내었다. 알루미늄 합금에 대한 응력과 변형률 선도의 관계에서 변형률 속도에 대한 영향

을 압축 하중과 인장 하중에 대한 고변형률 속도 하에서의 기계적인 변형은 Fig. 7 에서 보듯이 각각 다르다는 것을 알 수 있다.

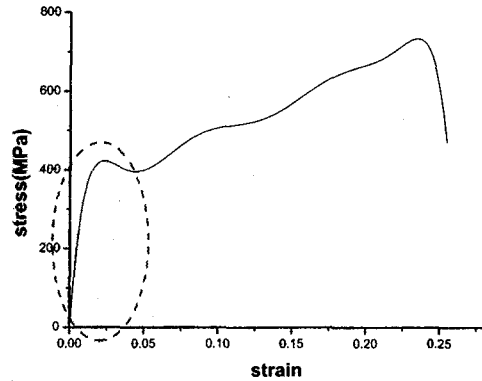


Fig. 6(a) Compressive stress-strain curve fitting for Al2024-T4

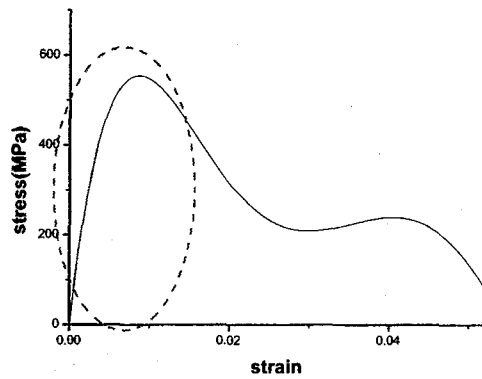


Fig. 6(b) Tensile stress-strain curve fitting for Al6061-T6

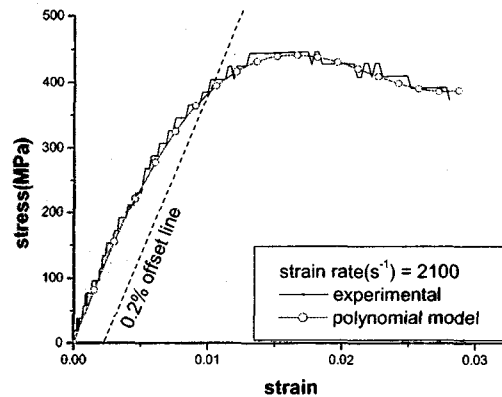


Fig. 7(a) Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Al2024-T4

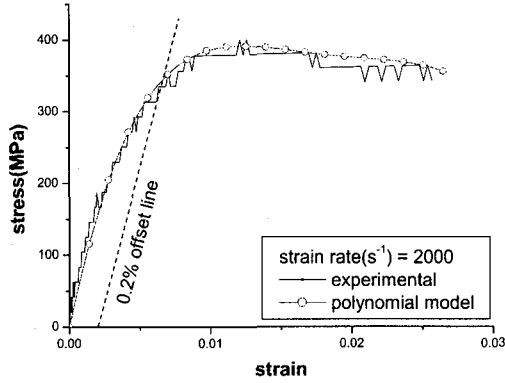


Fig. 7(b) Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Al6061-T6

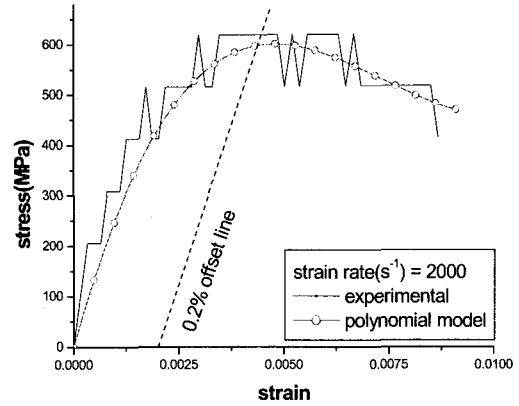


Fig. 7(e) Experimental and polynomial model of dynamic tensile stress-strain curve for Al6061-T6

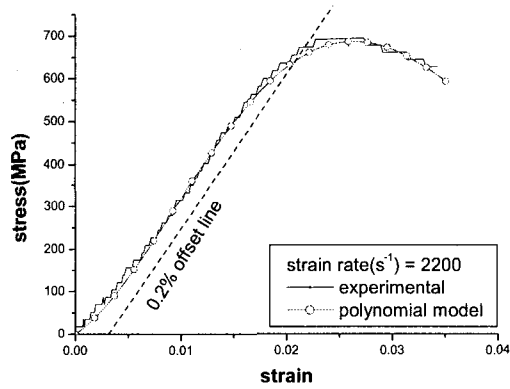


Fig. 7(c) Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Al7075-T6

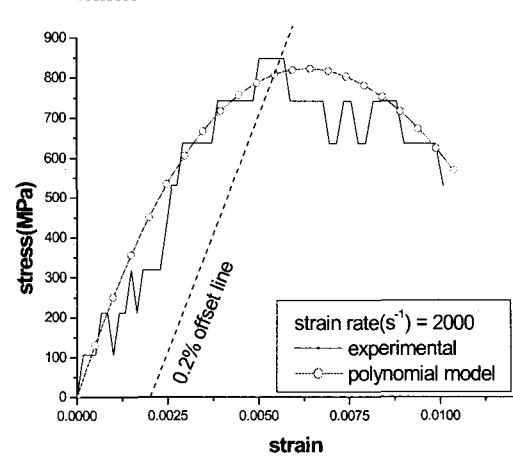


Fig. 7(f) Experimental and polynomial model of dynamic tensile stress-strain curve of Al7075-T6

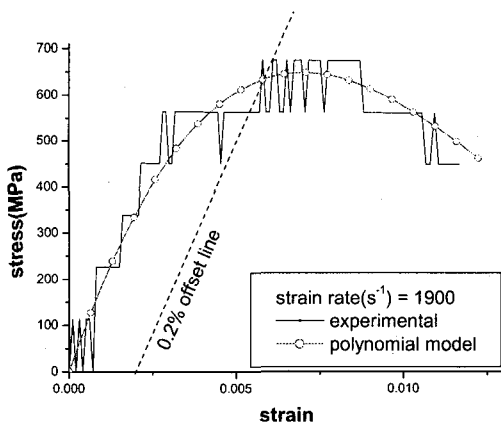


Fig. 7(d) Experimental and polynomial model of dynamic tensile stress-strain curve for Al2024-T4

유한요소법과 같은 수치적인 시뮬레이션에 대한 경우는 동적인 응력-변형률의 특성을 모델로 이용하였다.

압축과 인장에 대해서 4 와 3 차항의 식으로 가장 적절한 수치 해석을 하여 고변형률 하중하에서의 동적 응력과 변형률 사이의 관계를 나타내었다. 알루미늄 합금에 대한 3 차나 4 차항의 다항식의 계수를 Table 2 의 (a)와 (b)에 나타내었다.

항복 응력은 Fig. 7 에서 보듯이 뚜렷한 항복점이 나타나지 않으므로 strain 에 대한 0.2% offset line 으로 나타내었다. 항복 응력과 변형률 속도에 대한 관계에서 압축과 인장 하중 하에 대한 결과

가 서로 다르다는 것을 볼 수 있다.

이것은 3 장에서 설명한 실험 장치 구성의 차이에 설명할 수 있으며, 인장 하중에 대한 동적 응력과 변형률의 관계에서 압축에 비해 변형률이 매우 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 알루미늄 합금의 실험시에 서로 다른 하중하에서의 재료 특성을 나타내는 현상이라고 추측할 수 있다. 이러한 분야의 연구는 다른 관점에서 접근도 필요하다.

Table 2(a) Coefficients of the fourth order polynomials for compressive test

$$\sigma = a + b_1 \varepsilon^1 + b_2 \varepsilon^2 + b_3 \varepsilon^3 + b_4 \varepsilon^4$$

materials	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
2024-T4	0	5.66E4	-1.63E6	-3.10E7	1.24E9
6061-T6	0	9.38.E4	8.09E6	2.97E8	-4.01E9
7075-T6	0	3.07E4	4.08E6	-2.61E8	3.62E9

Table 2(b) Coefficients of the third order polynomials for tensile test

$$\sigma = a + b_1 \varepsilon^1 + b_2 \varepsilon^2 + b_3 \varepsilon^3$$

materials	a	b ₁	b ₂	b ₃
2024-T4	0	2.11E5	-2.06E7	5.29E8
6061-T6	0	2.99E5	-4.63E7	2.10E9
7075-T6	0	2.79E5	-2.66E7	4.84E8

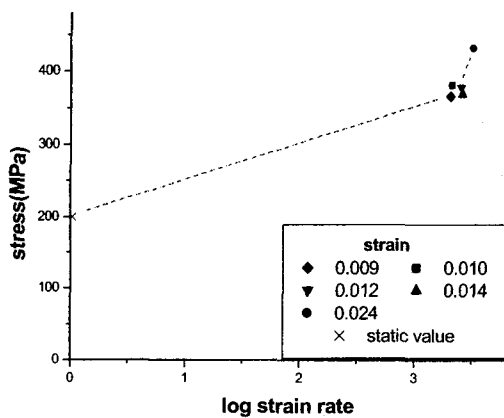


Fig. 8(a) Dynamic log strain rate-compressive yield stress curve for Al2024-T4

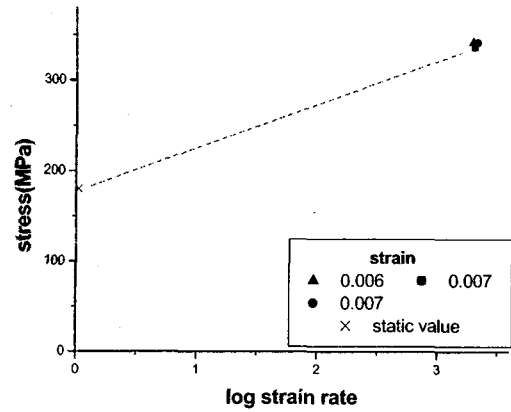


Fig. 8(b) Dynamic log strain rate-compressive yield stress curve for Al6061-T6

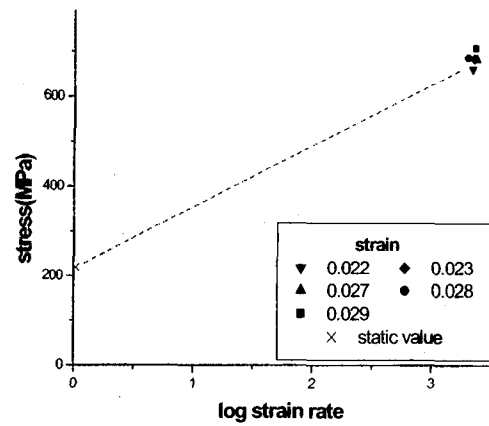


Fig. 8(c) Dynamic log strain rate-compressive yield stress curve for Al7075-T6

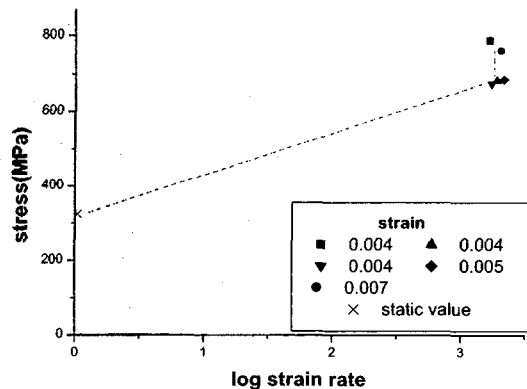


Fig. 8(d) Dynamic log strain rate-tensile yield stress curve for Al2024-T4

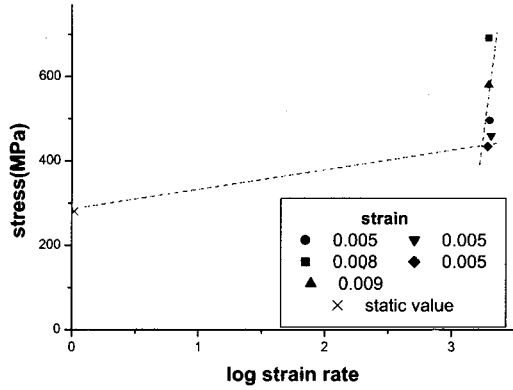


Fig. 8(e) Dynamic log strain rate-tensile yield stress curve for Al6061-T6

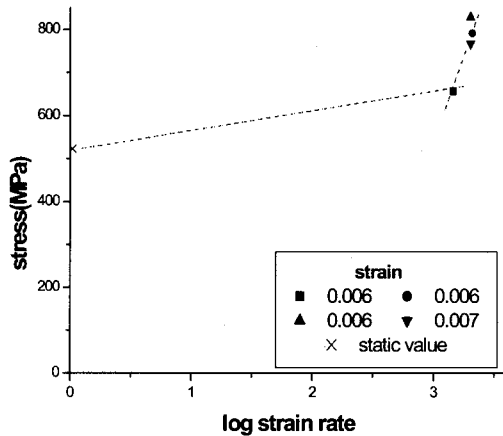


Fig. 8(f) Dynamic log strain rate-tensile yield stress curve for Al7075-T6

Al2024-T4, Al6061-T6, Al7075-T6의 인장강도에 대한 민감도 $[(\sigma_{dyn}-\sigma_{stat})/\sigma_{stat}]$ 는 압축 강도보다 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 그리고, 고변형률 하중하에서의 Al2024-T4에 대한 압축 항복 강도와 Al2024-T4, Al6061-T6와 Al7075-T6에 대한 인장 항복 강도는 대수 좌표계에서 이중 선형으로 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

압축과 인장 하중하에서 Al2024-T4, Al6061-T6 그리고 Al7075-T6에 대한 동적 변형 거동을 SHPB 기법을 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었

다.

1. Al2024-T4와 Al6061-T6에 대한 압축 항복 강도와 변형률 속도의 관계는 선형적임을 볼 수 있다. Al2024-T4와 Al6061-T6 그리고 Al7075-T6의 인장 항복 강도와 변형률의 관계, Al2024-T4의 압축 항복 강도와 변형률의 관계는 대수 좌표계에서 이중 선형의 재료 특성이 나타남을 알 수 있다.
2. Al2024-T4, Al6061-T6 그리고 Al7075-T6의 민감도 $[(\sigma_{dyn}-\sigma_{stat})/\sigma_{stat}]$ 는 압축 항복 강도에 대해서는 각각 93%, 89%, 211%, 인장 항복 강도에 대해서는 각각 120%, 90%, 45%가 되는 것을 알 수 있다.

후 기

여기에 본 연구는 2001년 인하대 연구기금의 지원을 받아 수행된 것입니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이역섭, 김면수, 백준호, "SHPB 테크닉을 이용한 Al5052-H32의 동적 인장 거동 규명," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 790~794, 2001.
2. Pochhammer, L., "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," J. Reine Angewandte Math, Vol. 81, p. 324.
3. Chree, C., "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.
4. Davies, R.M., "An critical study of the Hopkinson Pressure Bar," Phil. Tran. A, Vol. 240, p. 375, 1948.
5. Follansbee, P.S., "<The Hopkinson Bar>, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing," American Society for Metals, Vol. 8, pp. 198~203, 1985.
6. Lee, O.S., Lee, S.S., Chung, J.H. and Kang, H.S., "Dynamic Deformation Under Bar Experimental," KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149, 1998.

7. Lee, O.S., Lee, J.Y., Kim, G.H. and Hwang, H.S., "High Strain-rate Deformation of Composite Materials Using a Split Hopkinson Bar Technique, Key Engineering Materials," Vol. 183~187, Part 1, pp. 307~312, 2000.
8. Lee, O.S. and Kim, G.H., "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.
9. Bragow, A.M. and Lomunow., "Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method," *Int. J. Impact Energy*, Vol. 16, pp. 321~330, 1994.
10. Lee, O.S. and Kim, G.H., "Determination of Deformation Behavior of the Al6061-T6 under High Strain Rate Tensile Loading Using SHPB Technique," *Transaction of KSME (A)*, Vol. 24, No. 12, pp. 3033~3039, 2000.
11. Zukas, J. A., "High Velocity Impact Dynamics," John Wiley & Sons, Inc, 1990.
12. 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.
13. Hopkinson, B., "A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets," *Phil. Trans. A*, Vol. 213, p. 437, 1941.