

SHPB 시험과 음향방출법을 이용한 알루미늄 합금의 압축 변형거동 분석[§]

김종탁* · 우성충** · 사공재* · 김진영*** · 김태원****†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 국방 생존성기술 특화연구센터,
*** 국방과학연구소, **** 한양대학교 기계공학부

Analysis of Compressive Deformation Behaviors of Aluminum Alloy Using a Split Hopkinson Pressure Bar Test with an Acoustic Emission Technique

Jong-Tak Kim*, Sung-Choong Woo**, Jae Sakong*, Jin-Young Kim*** and Tae-Won Kim****†

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

** Survivability Technology Defense Research Center, Hanyang Univ.,

*** Agency for Defense Development,

**** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 28, 2012 ; Revised May 14, 2013 ; Accepted May 15, 2013)

Key Words: Acoustic Emission(음향방출), SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), Deformation Behavior(변형거동), Strain Rate(변형률 속도), Impact(충격)

초록: 본 논문에서는, 고 변형률 속도에서의 알루미늄 합금의 압축 변형거동을 홉킨슨 압력봉 시험, SHPB 방법을 통해 연구하였다. 이와 함께 음향방출기법이 사용되었고, 웨이브 가이드선을 통해 시편에 연결된 AE 센서를 이용하여 충격 변형시 검출되는 AE 신호를 실시간으로 검출하였다. 검출된 AE 신호를 통해 진폭, 에너지 및 최대 주파수 특성을 분석하였다. 또한 손상 기구에 따른 음향방출신호의 특성을 분석하기 위하여 시험 수행 후 충돌 시험편 표면과 측면을 관찰하였다. 변형률이 높아질수록 AE 진폭과 AE 누적에너지는 증가하였고, AE 최대 주파수는 감소하였다. 각 신호의 특성은 재료의 손상 기구와 밀접한 관련이 있는 것으로 확인되었다.

Abstract: In this study, the compressive deformation behaviors of aluminum alloy under high strain rates were investigated by means of a SHPB test. An acoustic emission (AE) technique was also employed to monitor the signals detected from the deformation during the entire impact by using an AE sensor connected to the specimen with a waveguide in real time. AE signals were analyzed in terms of AE amplitude, AE energy and peak frequency. The impacted specimen surface and side area were observed after the test to identify the particular features in the AE signal corresponding to the specific types of damage mechanisms. As the strain increased, the AE amplitude and AE energy increased whereas the AE peak frequency decreased. It was elucidated that each AE signal was closely associated with the specific damage mechanism in the material.

- 기호설명 -

A : 시편 단면적
 A_0 : 압력봉의 단면적

C_0 : 압력봉의 탄성과 전파속도
 E : 탄성계수(GPa)
 G : 전단계수(GPa)
 L : 시편의 길이
 $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(s^{-1})
 ϵ_E : 공칭변형률
 ϵ_f : 최대변형률
 ϵ_T : 진변형률

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $\epsilon_r(t)$: 인장과 변형률
- $\epsilon_t(t)$: 압축과 변형률
- ν : 푸아송 비
- ρ : 밀도(g/mm³)
- σ_E : 공칭응력(MPa)
- σ_P : 최대응력(MPa)
- σ_T : 진응력(MPa)
- σ_U : 인장강도(MPa)
- σ_Y : 항복응력(MPa)

1. 서 론

재료나 구조물이 고속충격 하중을 받을 경우 매우 짧은 시간에 큰 충격하중이 작용됨에 따라 재료 내부에 단순 진동뿐만 아니라 복잡한 응력파가 발생한다.^(1,2) 이렇게 발생한 응력파의 크기와 종류는 재료의 다양한 손상기구와 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 응력파를 감지할 수 있는 센서를 시험편에 부착하여 충격시 측정된 음향방출신호 분석을 통해 손상과정과 손상기구를 규명할 수 있다면 기존의 충격시험보다 향상된 수단으로 정량, 정성적 고속충격 특성을 보다 명확히 규명을 할 수 있을 것이다. 이를 위하여 고속충격시 재료의 동적 특성을 안정된 방법으로 측정할 수 있는 홉킨슨 압력봉 시험(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)법을 기본 모듈로 사용하였으며,⁽³⁻⁵⁾ 고속충격시에 발생하는 응력파를 분석하기 위하여 음향방출(acoustic emission, AE)기법을 SHPB 시험과 연계하여 알루미늄 5083의 동적 압축 변형거동을 분석하였다. 음향방출법은 비파괴 측정기법 중 하나로서, 일반적인 재료 물성 시험과는 달리 재료의 미시적인 변형과 파괴 과정을 실시간으로 모니터링 할 수 있으며 다양한 소재에 적용되고 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 원통형 알루미늄 5083에 대해 고 변형률 속도에서 충격시험을 수행하고 변형률 속도의존성과 함께 진응력-진변형률 거동 및 최대응력을 평가하였다. 아울러 다양한 변형률 속도 하에서 AE 실험으로부터^(7,8) 얻은 진폭, 누적에너지, 최대 주파수의 특성을 분석하여, 충격 조건에 따른 알루미늄 5083의 음향방출 특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 SHPB 시험

Fig. 1은 SHPB와 AE 시험의 개략도를 나타낸다. SHPB 시험은 충격봉(striker bar), 입력봉(incident bar) 및 출력봉(transmission bar)으로 구성된다. 일정한 속도의 충격봉은 입력봉에 충격을 가하게 되며, 이로 인해 입력봉 내에 임의 변형률, ϵ_E 을 갖는 압축파가 발생된다. 이 압축파가 시편에 도달되면, 일부는 변형률 $\epsilon_r(t)$ 의 인장파로 반사가 되고, 나머지는 변형률 $\epsilon_t(t)$ 를 갖는 압축파로 투과된다. 이때 입력봉과 출력봉에 부착된 변형률 센서(strain gage)를 이용하여 각각의 입력파, 반사파 및 투과파를 시간에 대한 변화로 측정할 수 있다. 한편, 시편이 충격방향으로 균일하게 변형한다고 가정할 경우 시편내의 변형률 속도는 반사파의 크기에 비례하게 되고 또한 시편 내에 가해진 응력의 크기는 투과파의 크기에 비례하게 된다. 이와

Table 1 Material properties of maraging steel and aluminum 5083

Material	Aluminum 5083	Maraging steel
ρ (g/cm ³)	2.66	8.00
E (GPa)	70.0	183.0
G (GPa)	26.5	70.0
ν	0.33	0.3
σ_Y (MPa)	190.0	2620.0
σ_U (MPa)	300.0	2693.0

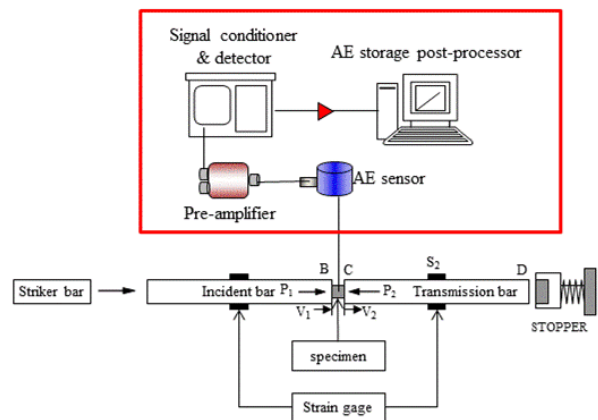


Fig. 1 Schematic diagram of the SHPB and AE test

관련된 식은 다음과 같다.

$$\frac{d\varepsilon_E}{dt} = \frac{-2C_0}{L} \varepsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\sigma_E = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_i(t) \quad (2)$$

여기서, C_0 는 압력봉의 탄성과 전파속도, L 은 시편길이, A 는 시편 단면적, A_0 는 압력봉 단면적 E 는 압력봉의 탄성계수이다. 실험측정을 통한 $\varepsilon_r(t)$ 및 $\varepsilon_i(t)$ 를 식 (1)과 (2)에 적용하여 공칭응력과 공칭변형률을 구한다.⁽⁹⁾ 1 차원 압축거동을 구현한 SHPB 시험을 통해 획득한 공칭응력과 공칭변형률을 바탕으로, 수학적 연산 즉, $\sigma_T = \sigma_E \cdot e^{\varepsilon_T}$ 및 $\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E)$ 을 이용하여 진응력-진변형률 곡선을 획득하였다.

한편 시편의 소재는 상용재료인 알루미늄 5083이며, SHPB의 구성요소인 입력봉, 출력봉 및 충격봉 소재는 마레이징강(maraging steel)을 사용하였다.^(9,10) 이들 재료에 대한 기계적 물성은 Table 1과 같다. 알루미늄 시편은 강도 및 SHPB 시험에서 모사될 수 있는 응력파의 1 차원 거동을 만족시키기 위하여 그 형상을 높이고, 지름이 각각 8 mm 인 1:1 원통형으로 제작하였다. 실험조건은 압력용기에 공기압 40, 60, 80 psi 로 초기 충격봉의 속도를 설정하였다. 또한 실험은 각 압력 조건으로 3 회씩 반복 수행하였으며, 흡킨슨 봉과 시편은 그리스를 이용하여 안착함과 동시에 표면 마찰을 최소화 시켰다.

2.2 음향방출 시험과 시편 분석

충격시험 동안 발생하는 AE 신호를 측정하기 위해 151 kHz 의 유효 주파수 범위를 갖는 압전형 AE 센서(R15, PAC)를 사용하였다. 일반적으로 센서는 시편에 접촉시켜 음향방출 신호를 감지하지만, 본 실험에서는 고속충격으로 인한 센서의 내구성의 문제로 인해 시편에 발생하는 음향방출 신호를 웨이브 가이드를 통해 AE 센서로부터 획득하였다. 웨이브 가이드선을 사용한 음향방출 특성 분석은 복합재료 및 금속재료 등 시편에 직접 센서를 접촉할 수 없는 환경에서 다양하게 사용되고 있다. 본 실험에서는 웨이브 가이드의 양 끝단을 접착 테이프를 이용하여 시편의 측면부 및 센서에 각각 부착하였다.⁽¹¹⁾ 충돌실험을 통해 발생된 AE 신호는 전자증폭기에 의해 증폭된 후 AE 본체 (AEWin, PAC)에 저장된다. Table 2 는 AE 측정을 위한 기본 설정 값을 나타낸 것이다.

한편 고속충격 시험 후 알루미늄 5083 시편 표면의 변형 및 손상 정도를 확인하기 위하여, 주사전자현미경(SEM, Nona NanoSEM 450, Philips)으로 시료를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 변형률 속도에 따른 동적 압축거동

SHPB 실험을 통해 얻은 A15083 의 동적물성을 Table 3 에 나타내었다. 변형률 속도가 1565 s⁻¹ 일 때, $\varepsilon_f=0.231$, $\sigma_Y=328.4$ MPa, 및 $\sigma_p=654.3$ MPa 가 됨을 확인할 수 있었으며 마찬가지로 변형률 속도 1972 s⁻¹ 에서는 $\varepsilon_f=0.293$, $\sigma_Y=334.9$ MPa, $\sigma_p=755.3$ MPa 그리고 2303.4 s⁻¹ 일 때 $\varepsilon_f=0.338$, $\sigma_Y=354.9$ MPa, $\sigma_p=837.7$ MPa 의 값을 각각 획득하였다. 이상의 결과로부터 변형률 속도가 약 400 s⁻¹ 씩 증가함에 따라 시험 종료시의 변형률은 약 20% 증가하였으며, 최대응력 또한 약 10% 증가하였음을 알 수 있다.

Table 2 Apparatus of the AE measurement system

Model of AE sensor	R15, PAC
Channel	1
Pre-amplifier gain	40 dB
Threshold	40 dB
High filter	< 600 kHz
Low Filter	> 40 kHz
Event lock out time	1 ms
Length of event	1 k (0.128 ms)

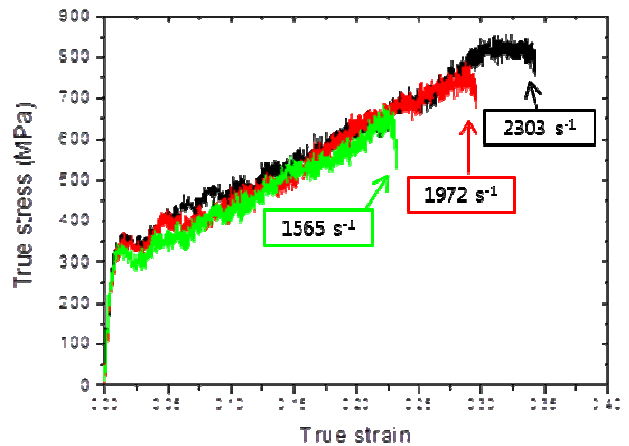
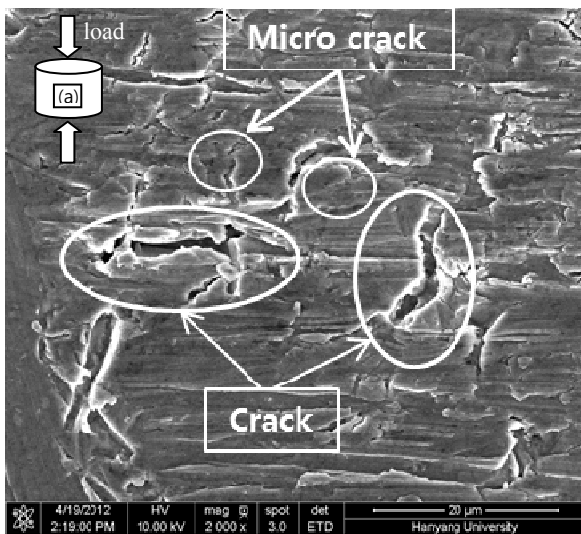


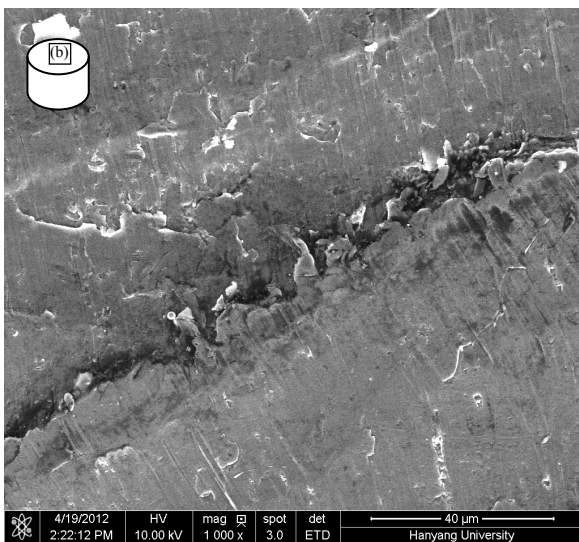
Fig. 2 True stress-strain curves for different strain rates (green line 1565 s⁻¹, red line 1972 s⁻¹, black line 2303 s⁻¹)

Table 3 Dynamic material properties of aluminum 5083

No.	Pressure (psi)	Initial length (mm)	Final length (mm)	Strain rate, $\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	Strain at the end of test, ϵ_f	Yield stress σ_Y (MPa)	Peak stress σ_p (MPa)
1	40	7.92	6.43	1565.1 ± 70	0.231 ± 0.012	328.4 ± 22	654.3 ± 35
2	60	7.86	5.40	1972.1 ± 89	0.293 ± 0.010	334.9 ± 18	768.5 ± 30
3	80	7.95	4.48	2303.4 ± 64	0.338 ± 0.022	354.9 ± 19	837.7 ± 32



(a)



(b)

Fig. 3 SEM micrographs of the impact area in aluminum 5083 specimen after the SHPB test showing a crack: (a) side surface, and (b) top surface

Fig. 2 는 변형률 속도의 변화에 따른 진응력-진 변형률 선도를 나타내며, 이들 결과로부터 Al5083 의 동적 거동은 변형률 속도에 상당히 의존적임을

알 수 있다.

3.2 알루미늄 5083 의 손상 표면 관찰

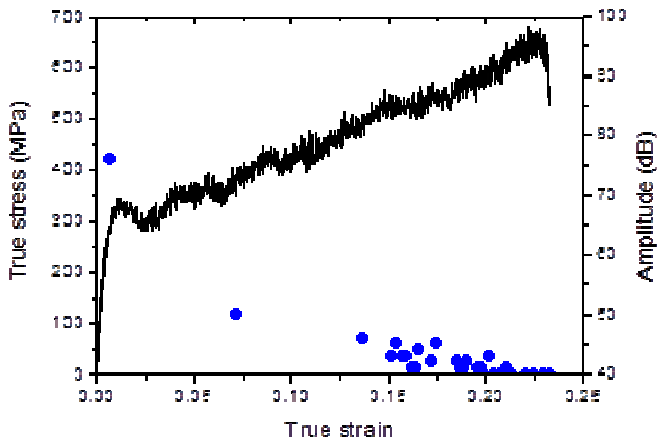
Fig. 3 은 충돌 실험 후 시편의 손상부위를 주사 전자현미경으로 관찰한 것이다. Fig. 3(a)는 시편의 측면 사진이며, 대변형시 충격방향의 수직 방향으로 균열이 발생됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3(b)는 입력봉과 접촉된 표면을 관찰한 사진으로서 다수의 미소균열을 포함한 조대 균열을 확인할 수 있다. 이는 시편이 압축 하중을 받는 동안 미소균열이 생성되고 성장하면서 주변의 다른 균열들과 합쳐된 것으로 보인다.

3.3 동적 압축거동에 따른 AE 진폭특성

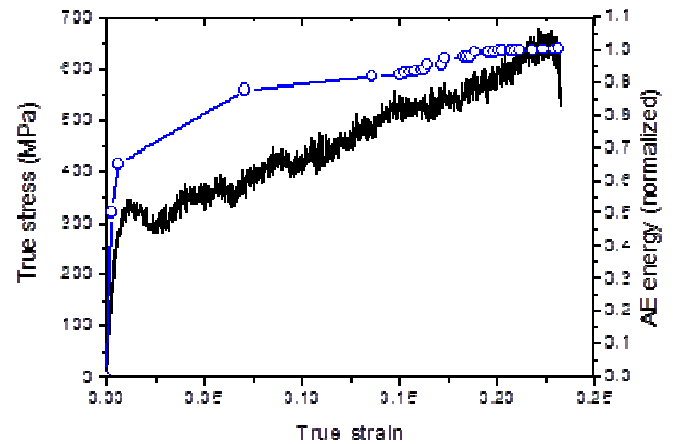
Fig. 4 는 알루미늄 5083 의 동적 압축거동에 따라 검출되는 AE 진폭특성을 나타낸다. 탄성영역에서는 AE 신호가 검출 되지 않았으며 이는 즉 탄성영역 내에서는 손상이 발생하지 않았음을 의미한다. 탄성영역 이후, 항복점에서 최초 AE 신호가 감지되었으며 가장 큰 진폭값을 나타내었다. 항복 이후 유동응력이 증가함에 따라 소성변형도 증가하였으며 이 구간에서 발생하는 진폭의 세기는 최대응력에 근접할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 반면에 AE 활성도는 증가하였다. 이러한 AE 거동은 소성변형이 증가할수록 재료 내부에 응력이 국부적으로 집중되어 전위의 이동이 발생하여 이로 인한 미소균열의 발생에 기인한 것으로 사료된다. 한편, 변형률 속도증가에 따라 최초 감지된 AE 신호의 진폭의 크기는 $1565 s^{-1}$ 일 때 76 dB, $1972 s^{-1}$ 일 때 80 dB, 그리고 $2303 s^{-1}$ 일 때 85 dB 로 확인되었다. 이 결과로부터 변형률 속도가 증가하면서 보다 강한 AE 신호가 발생함을 확인할 수 있었다.

3.3 동적 압축거동에 따른 AE 누적에너지 특성

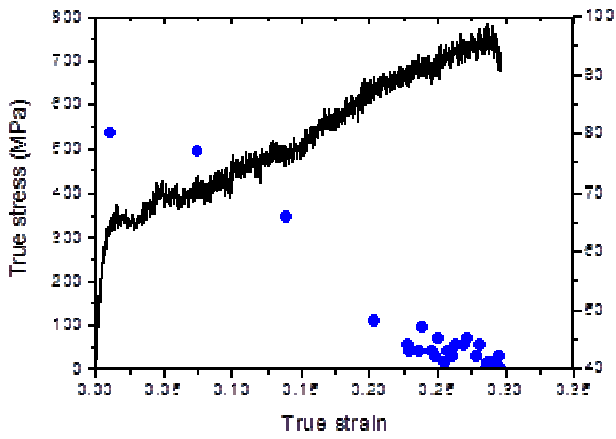
Fig. 5 는 재료의 변형시 측정된 AE 에너지를 누적하여 정규화시켜 나타내었다. AE 에너지는



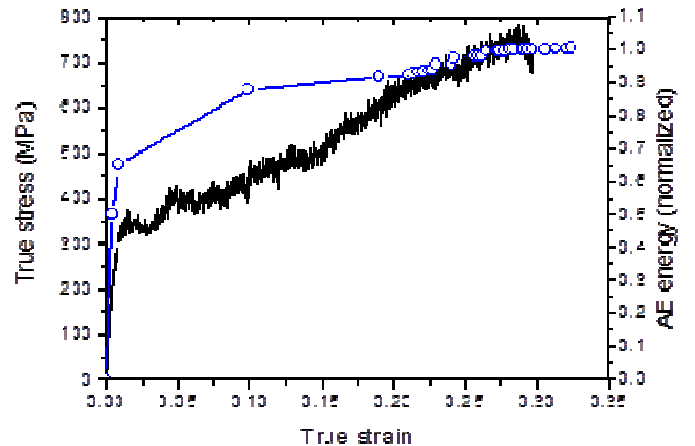
(a)



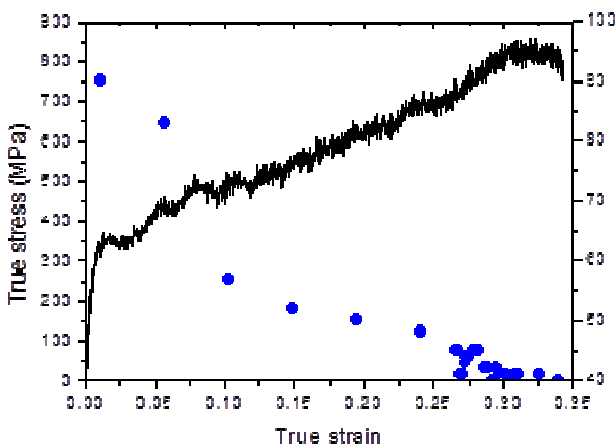
(a)



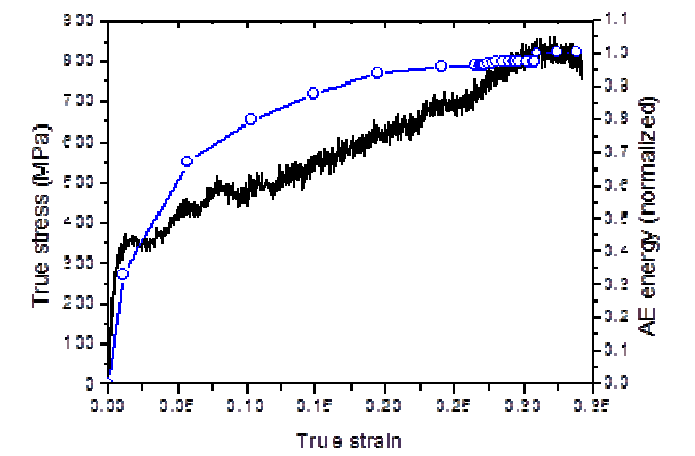
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 4 True stress (solid line) and AE amplitude (circular symbol) with increasing the strain for Aluminum 5083 specimen under the strain rate of (a) 1565 s^{-1} , (b) 1972 s^{-1} and (c) 2303 s^{-1} .

Fig. 5 True stress (solid line) and normalized cumulative AE energy (circular symbol with line) with increasing the strain for Aluminum 5083 specimen under the strain rate of (a) 1565 s^{-1} , (b) 1972 s^{-1} and (c) 2303 s^{-1} .

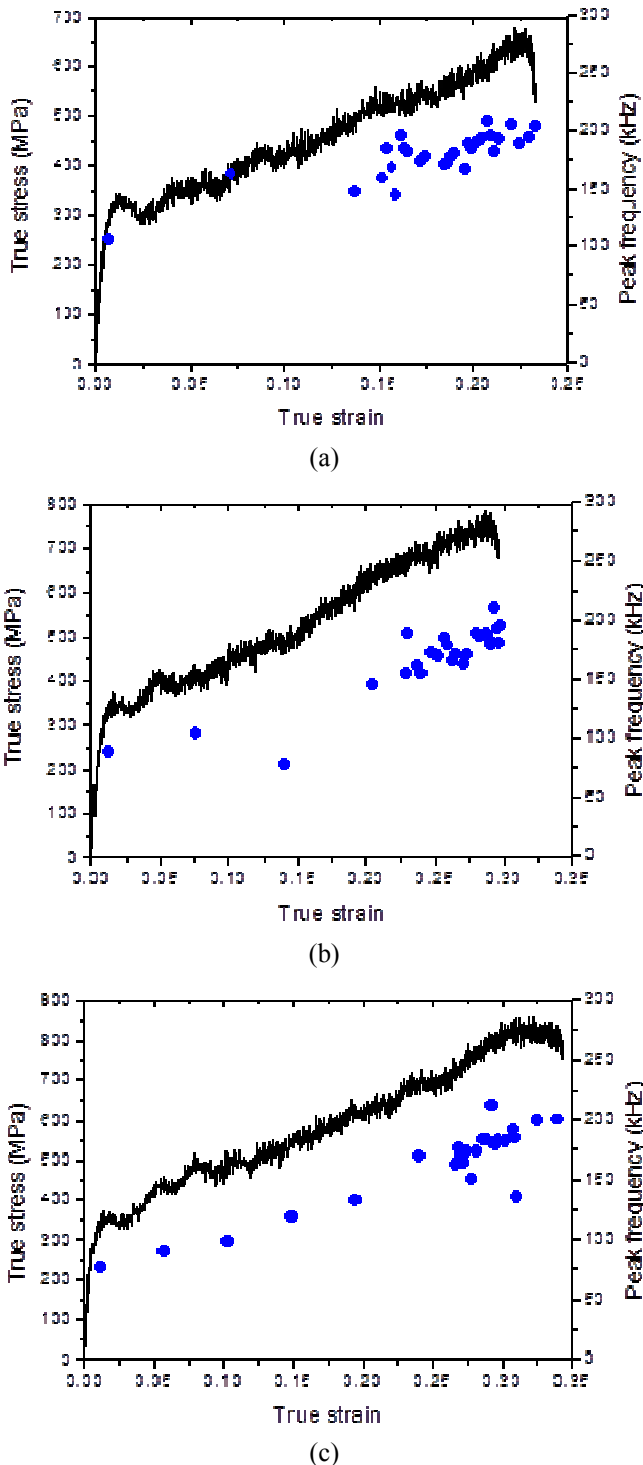


Fig. 6 True stress (solid line) and peak frequency (circular symbol) with increasing the strain for Aluminum 5083 specimen under the strain rate of (a) 1565 s^{-1} , (b) 1972 s^{-1} and (c) 2303 s^{-1}

AE 신호가 감지되는 동안 정류된 전압신호 전체로부터 비롯한 AE 파라미터로써, 전압-시간 단위(voltage-time units)이다. 재료 변형 초기에

높은 에너지가 검출되었으며, 점차 낮은 에너지가 검출되는 경향을 보였다. 따라서 본 논문에서는 낮은 에너지 범위를 효과적으로 분석하기 위해서 전체 변형구간 동안 검출된 에너지를 누적시켜 정규화한 곡선으로 나타내었다.

Fig. 5 에 나타내었듯이 항복점에서 알루미늄 5083 은 가장 가파른 에너지 증가를 보였는데 이는 재료 내부의 항복 발생에 기인된 전위가 급격하게 변동하거나 이동하면서 그 에너지의 일부가 탄성파로서 일시에 방출된 것을 의미한다. 이후, 유동응력이 증가할수록 AE 누적에너지의 기울기는 대체적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 시험이 종료된 시점에서는 AE 신호의 활성도는 증가하지만, 유지시간이 작고 낮은 진폭값을 갖는 신호 발생이 지배적이었다. 이는 앞서 언급한 다수의 미소균열에 성장 및 합체로 인한 AE 발생 특성을 보여주는 것으로 생각된다.

3.1 동적 압축거동에 따른 최대 주파수 특성

Fig. 6 는 재료 변형에 따른 AE 최대 주파수 특성을 나타낸 결과이다. 앞선 Fig. 4 와 Fig. 5 의 AE 진폭특성과 누적에너지의 특성과는 달리 항복점에서 발생한 최초 AE 신호의 최대 주파수는 100kHz 이하의 낮은 특성을 보였다. 반면에 이후 소성변형이 진행됨에 따라 발생한 AE 신호들의 최대 주파수 특성은 전반적으로 150kHz 이상의 높은 주파수 특성을 나타내었다. 이는 소성변형이 심화될수록 재료 내부의 미소균열이 발생됨으로써 높은 주파수의 신호가 검출되었음을 나타낸다⁽⁶⁾. 3.3 절과 3.4 절에서 확인한 결과와 종합해 볼 때 탄성구간에서는 알루미늄 5083 재료에 손상이 발생하지 않아 AE 신호는 감지되지 않았으며, 압축 소성변형이 점점 진행됨에 따라 재료 내부에 저장되어 있던 변형률 에너지가 균열 및 전위의 이동으로 인하여 나타난 것으로 볼 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 SHPB 시험 및 음향방출법을 연계한 기법을 통하여 알루미늄 5083 의 동적 압축 변형거동을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 변형률 속도가 약 400 s^{-1} 씩 증가함에 따라 시험 종료시의 변형률은 약 20%, 최대응력은 약 10% 증가되는 변형률 속도 의존 거동을 확인하였

다.

(2) AE 진폭 특성을 분석한 결과, 항복시에 가장 큰 AE 진폭 값을 나타내었으며, 소성변형이 진행됨에 따라 진폭의 크기는 대체적으로 감소하였지만 그 활성도는 증가하였다.

(3) 항복시 발생한 AE 신호의 에너지 값이 가장 컸으며 누적에너지의 기울기는 소성변형이 진행됨에 따라 점점 감소하는 경향을 보였다.

(4) 최대 주파수 특성은 AE 진폭과 AE 누적에너지의 특성과는 달리, 항복점에서 비교적 낮은 주파수를 특성을 보였으며, 유동응력이 증가함에 따라 150kHz 이상의 비교적 높은 주파수 특성을 보였다.

(5) 본 연구에서 활용된 SHPB 시험과 음향방출법을 연계한 재료거동 평가법은 타 소재의 동적 압축 변형거동의 분석에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD1200190D).

참고문헌

(1) Kim, J.T., Cho, C.H., Jeon, J.I., Gimm, H.K., Koo, M.H. and Kim, T.W., 2010, "A Study of the Projectile-Material Shape on Damage and Fracture Behavior of Aluminum Alloys Under High Velocity Impact," *Proceeding of 40th Anniversary Conference on the Establishment of Agency for Defence Development*, New Special Energy, pp. 371~374.

(2) Jena, P.K., Jagtap, N., Siva Kumar, K. and Balakrishna Bhat T., 2008, "Some Experimental Studies on Angle Effect in Penetration," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 489~501.

(3) Jeong, D.T., 1994, "Split Hopkinson Pressure Bar Technique for Stress-Strain Measurement," *The Korean Society of Mechanical Engineers Annuals Spring & Fall Conferences*, pp. 33~41.

(4) Kuhn, Howard, Medlin, and Dana, 1984, "ASM Handbook Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation," *ASM International Handbook Committee*, Vol. 8, pp. 462~476.

(5) Davies, E., 1948, "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar," *Philos. Trans. A*, Vol. 204, pp. 375~457.

(6) Jeong, H.D., 1994, "Fundamental of Acoustic Emission Technology for Engineering Applications," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 34, No. 1, pp. 20~32.

(7) Lugo, M., Jordon, J.B., Horstemeyer, M.F., Tschopp, M.A., Harris, J. and Gokhale, A.M., 2011, "Quantification of Damage Evolution in a 7075 Aluminum Alloy Using an Acoustic Emission Technique," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 6708~6714.

(8) Nixon, J.A., Phillips, M.G., Moore, D.R. and Prediger, R.S., 1988, "A Study of the Development of Impact Damage in Cross-ply Carbon Fibre/PEEK Laminates Using Acoustic Emission," *Composites Science and Technology*, Vol. 31, Issue 1, pp. 1~14.

(9) Shim, J.M. and Mohr, D., 2009, "Using split Hopkinson Pressure Bars to Perform Large Strain Compression Tests on Poluurea at Low, Intermediate and High Strain Rates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 1116~1127.

(10) Lee, O.S., Choi, H.B. and Kim, H.M., 2011, "High-Temperature Dynamic Deformation of Aluminum Alloys Using SHPB," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, pp.14~148.

(11) Gu, J.U. and Choi, N.S., 2011, "Analysis of Fracture Signals from Tooth/Composite Restoration According to AE Sensor Attachment," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol 30, No. 5, pp. 500~507.