

알루미늄 박판 미세 V-notching 가공부위의 성형 Parameter 관한 연구

김상목¹, 박중원¹, 이현민¹, 구태원², 김 정², 강범수[#]

Study on Design Parameter of Aluminum Micro V-notched Component with Thin Sheet Metal

S. M. Kim, J. W. Park, H. M. Lee, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang

Abstract

Micro V-notching process has been used to manufacturing the safety component in Li-Ion battery. These kinds of safety component in Li-Ion battery plays an important role in the explosion from excessive overheating. Therefore, it is very crucial to estimate accurately the working pressure range of the safety component with micro V-notch. In this study, the relationship with the working internal pressure in Li-Ion battery and fracture phenomenon in micro V-notch was investigated through the numerical analysis. The numerical analysis is especially adopted the finite element method with ductile fracture criteria.

Key Words : Micro V-notched Component, Finite Element Method, Ductile Fracture Criteria

1. 서 론

이동통신 단말기와 노트북 PC 등 휴대기기의 보급이 급격히 증가하였고 성능이 점차 고성능화됨에 따라 고용량 배터리에 대한 관심이 높아지고 있다. Li-Ion 2차 전지는 기존의 Ni-Cd 전지나 Ni-MH 전지에 비하여 높은 출력과 용량을 가지며 친환경성, 장수명, 부피와 무게가 작은 장점을 가지기 때문에 휴대기기에 주로 사용되고 있다.

Li-Ion 2차 전지는 유기 전해액과 같은 구성물질과 높은 작동전압으로 인하여 과충전이나 과방전 시에, 또는 과전류가 흐를 때에는 전지의 특성이 현저하게 저하하거나 발열, 발화 또는 폭발의 위험성이 매우 높아진다. 따라서, 전지 내부에는 PTC나 안전변과 같은 기계적인 안전장치를 설치하며, 전지팩 내부에는 전기적인 보호회로나 전류 휴즈 등 2중 3중의 보호기능을 도입하여 사용자의 안전을 확보하고 있다.

본 연구는 각형 Li-Ion 2차 전지 케이스 표면에

V-notch를 성형하여 전지 내부에 압력이 발생할 때 V-notch 성형 부위에서의 파단 발생에 관한 것이다. 전지 케이스 내부의 압력 발생으로 인한 폭발의 위험성을 제거하기 위하여 V-notch 성형으로 낮은 압력에서 파단 발생을 유도하여 내부 압력을 낮추고자 하는 것이다.

박판 금속의 Fracture와 Necking을 예측하는 것은 쉽지 않다. 최근에 여러 연구자들은 연성과파괴 이론(ductile fracture criteria)을 사용하여 성형한계(forming limit)를 예측하는 시도를 하고 있다. Takuda et al.[1]는 유한요소 해석을 적용한 원통형 딥 드로잉에 대하여 Cockcroft and Latham[2], Brozzo et al., Oyane, and Clift et al. 제시한 연성과파괴 이론을 이용하여 성형성 연구를 하였다. 다양한 알루미늄 합금과 스틸 박판에 대하여 딥 드로잉 유한요소 해석을 실시하였고, 연성과파괴 이론을 적용하여 성형한계와 파단 시작부위를 예측하였다.

본 연구에서는 Cockcroft and Latham이 제안한 Ductile fracture criteria를 적용하였다. 단축 인장 실험

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,

E-mail: bskang@pusan.ac.kr

험을 통하여 실험적으로 연성 파괴상수를 도출하였다. 상용 유한요소 코드인 ABAQUS/Standard를 이용하여 전지 케이스 내부에 압력이 작용하는 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 각 Increment에서 모든 절점(node)의 응력과 변형률 data를 구할 수 있었고 연성 파괴상수를 계산할 수 있었다. 실험적으로 구한 연성 파괴상수와 시뮬레이션을 이용하여 계산된 연성 파괴상수를 비교하여 파단 압력과 파단이 발생하는 특정 부분을 예측 할 수 있었다. 최종적으로, V-notch 성형 Parameter 변화에 따라서 파단이 발생하는 내부 압력과 경향성을 파악하여 V-notch 성형의 Guide-Line을 제시하고자 하였다.

2. 연성파괴 이론 적용

2.1 연성파괴 이론

연성파괴는 응력과 변형률이 임계수준에 도달할 때 국부적인 영역에서 발생된다. 박판 금속의 성형 한계는 시간에 따른 변형 경로에 의존하는 것으로 잘 알려져 있다. 그러므로, 응력과 변형률 경로는 연성파괴 이론에 고려되어야 한다. 다양한 가설을 바탕으로, 연성파괴 이론은 경험적으로 제안이 되거나 이론적으로 제안이 되어왔다.[3,4] 본 연구에서는, 연성파괴의 발생에 영향을 주는 응력과 변형률 경로를 적용하는 Cockcroft and Latham이 제안한 이론을 사용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{\max} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

위의 이론 식을 다시 정의 해보면, 다음과 같은 적분 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$I = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{\max} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

수식(2)를 적분 상수 값으로 정의를 하고 $I > 1$ 이면 파단이 발생했음을 의미한다. 재료 인장 실험을 통하여 연성파괴 상수를 구할 수 있다. 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 전체 절점(node)의 응력과 변형률 경로를 파악할 수 있으며, Trapezoidal rule[5]을 적용하여 각각의 절점과 각 변형 단계에서의 I 값을 구하여 특정 부위에서 파단이 발생했음을 판단할 수 있다.

Table 1 Material properties of the Al 3005

Material	Al 3005
K-value ($\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n$) (MPa)	263
Work-hardening exponent, n	0.054
Tensile strength (MPa)	156
Fracture strain, $\bar{\epsilon}_f$	0.035
Young's Modulus, E(GPa)	60
0.2% Yd stress (MPa)	195

여기서, $\bar{\epsilon}_f$: 파단이 발생하는 등가 변형률 (equivalent strain), σ_{\max} : 최대 응력 (maximum normal stress), $\bar{\epsilon}$: 등가 변형률, C: 연성파괴 상수(material constants), I: 적분 상수(integral constant)를 의미한다.

2.2 재료 물성 및 연성파괴 상수 계산

각형 Li-Ion 2차 전지 케이스는 박판 알루미늄 합금인 Al 3005가 사용되었다. 재료 거동 특성을 파악하기 위하여 INSTRON 8516장비를 사용하였으며, ASTM 규격[6,7]을 참고하여 단축 인장실험을 실시하였다. Table 1은 Al 3005 재료의 인장 특성을 나타낸다.

연성파괴 상수는 단축 인장 실험에 의해서 결정 된다. 재료는 등방성(isotropy)으로 가정하였으며, 수식(1)과 Table 1에서 결정된 K, n ($\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n$), $\bar{\epsilon}_f$ 값으로 연성파괴 상수를 계산하였다. 연성파괴 상수는 7.3으로 계산 되었다.

2.3 유한요소 시뮬레이션

상용 유한요소 코드인 ABAQUS/Standard를 이용하여 각형 전지 케이스 내부에 임의의 압력을 적용하는 시뮬레이션을 하였다. Fig. 1은 전지 케이스에 적용된 구속조건과 전지 케이스 표면에 성형

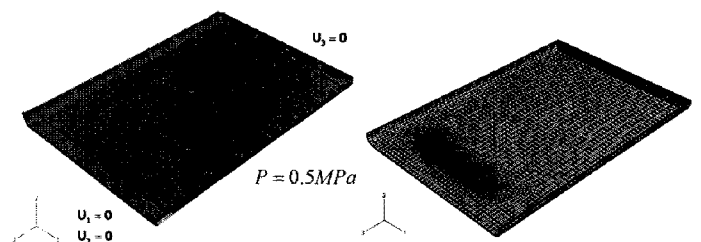


Fig. 1 Boundary condition and finite element meshing

된 V-notch의 유한요소 모델링을 나타내고 있다. Notch부분에 요소(element)를 조밀하게 하였으며, 내부 압력은 0.5MPa를 적용하였다. 파단이 발생하지 않으면 더 높은 내부 압력을 적용할 수 있다. 재료는 등방성으로 가정 하였고 Increment 개수를 20개로 정하였다.

유한요소 시뮬레이션을 통하여 얻은 각 절점의 응력과 변형률 data를 바탕으로 Trapezoidal rule을 이용하여 연성과파괴 상수를 계산할 수 있었다. 단축 인장시험으로 결정된 연성과파괴 상수와 유한요소 시뮬레이션으로 결정된 연성과파괴 상수를 비교하여 각 Increment 마다 적분 상수 값을 계산 하였으며, 이것을 이용하여 파단이 발생하는 압력과 파단이 발생하는 부위를 예측할 수 있었다.

3. 성형 Parameter

3.1 V-notch 위치 변화

각형 Li-Ion 2차 전지 케이스 표면에 성형이 되는 V-notch의 위치를 Fig. 2와 같이 정의하여 유한요소 모델링을 하였다. Notch의 형상은 모두 동일하며, 임의의 형태로 설계하였다. 케이스의 우측 부분은 대칭 형상이므로 notch의 성형을 고려하지 않았다. 각각의 성형 위치에 대하여 내부 압력이 작용할 때 파단이 발생하는 부위와 그때의 내부 압력을 비교 하였다.

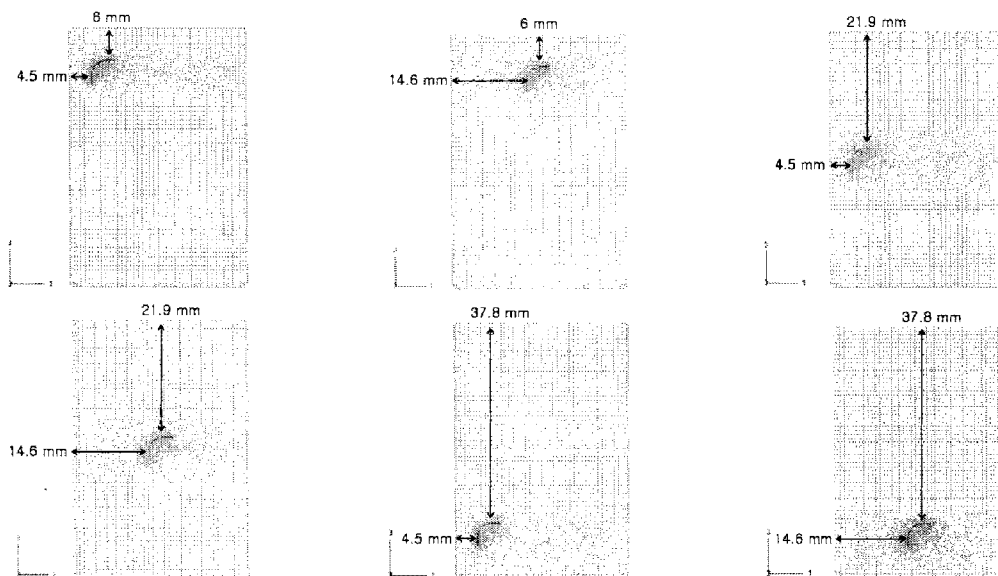


Fig. 2 Various V-notch position

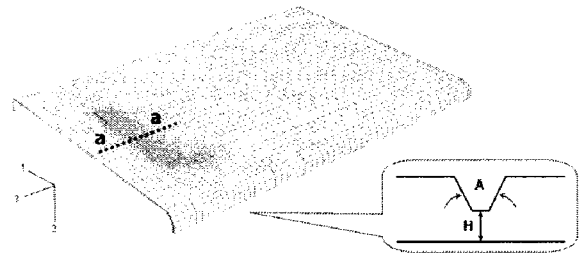


Fig. 3 Cross section of the V-notch component (a-a)

3.2 V-notch 성형 깊이 변화

Fig. 3은 V-notch가 성형된 전지 케이스의 유한요소 모델링 형상과 notch의 단면(a-a) 형상을 나타내고 있다. Notch의 성형 깊이 변화에 따라서 notch부분의 파단 압력 변화를 파악해 보았다. Notch 각도(A)를 20 deg.로 고정하고 성형 깊이(H)를 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm로 변화시켜 notch 부분에서 파단 발생 유무를 확인하였으며, 파단 압력 변화를 비교하였다.

3.3 V-notch 성형 각도 변화

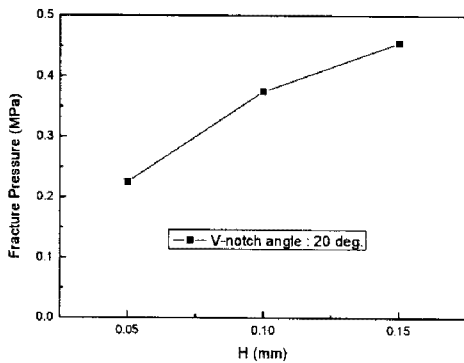
Notch의 성형 각도 변화에 따라서 notch부분의 파단 압력 변화를 파악해 보았다. Notch 성형 깊이(H)를 0.1mm로 고정하고 V-notch 성형 각도(A)를 10deg., 20deg., 30deg.로 변화시켜 notch 부분에서 파단 발생 유무를 확인하였으며, 파단 압력 변화를 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

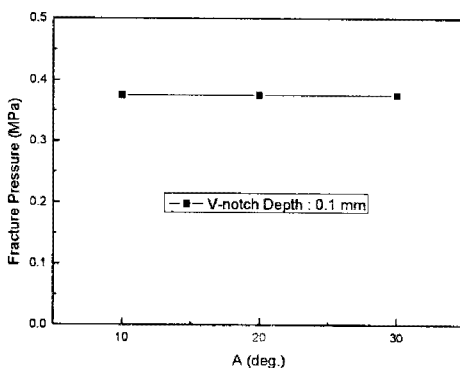
V-notch의 성형 위치 변화에 따라서 notch 부위에서 파단이 발생함을 확인할 수 있었고, 파단 발생이 예측 되는 압력을 Table 2에 나타내었다. 각형 Li-Ion 2차 전지 케이스의 모서리 부분에 V-notch가 성형 될 경우 파단 압력이 낮게 나타났으며, 전지 케이스의 상단 중앙부와 하단 중앙부에 notch가 성형 되면 notch 부분에서 파단이 발생하지 않았다. V-notch의 성형 깊이(H)가 증가 할수록 파단 압력은 증가 하였고, 성형 각도(A) 변화에 따른 파단 압력의 변화는 없었다.

Table 2 Fracture pressure with V-notch position change

Angle (deg.)	Depth (mm)	Position (mm)		Pressure (MPa)
		w	h	
20	0.1	4.5	6	0.35
20	0.1	14.6	6	-
20	0.1	4.5	21.9	0.65
20	0.1	14.6	21.9	0.67
20	0.1	4.5	37.8	0.46
20	0.1	14.6	37.8	-



(a) V-notch depth change



(b) V-notch angle change

Fig. 4 Comparison of the fracture pressure

5. 결론

(1) 각형 전지 케이스의 모서리 부분에 V-notch가 성형되어야 적당한 내부 압력 하에서 파단이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) V-notch의 성형 깊이에 따라서 파단 압력이 달라지기 때문에 성형 공정 변수로 고려되어야 한다.

(3) V-notch의 성형 각도에 따른 파단 압력의 변화는 없기 때문에 성형 각도는 고려하지 않아도 된다.

후 기

이 논문은 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-0200 2-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Takuda, K. Mori, N. Hatta, 1999, The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals, J. Mater. Process. Technol., Vol. 95, pp. 116~121.
- [2] M.G Cockcroft, D.J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Met., Vol. 96, pp. 33~39.
- [3] S.E. Clift, P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G.W. Rowe, 1990, Fracture prediction in plastic deformation processes, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 1~17.
- [4] A.S. Wifi, A. Abdel-Hamed, N. El-Abbasi, H. Harmoush, 1996, Advances in Engineering Plasticity and its Applications, Pergamon, pp. 197~202.
- [5] R.L. Burden, J.D. Faires, 1997, Numerical Analysis, Brooks/Cole Publishing Company
- [6] Standard test methods for tension tension wrought and cast aluminum- and magnesium-alloy products, ASTM
- [7] Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n-values) of metallic sheet materials, ASTM