

# 직사각형 전지 케이스의 V-notch부 터짐 예측에 관한 연구

김상목<sup>1</sup> · 송우진<sup>2</sup> · 구태완<sup>3</sup> · 김 정<sup>3</sup> · 강범수<sup>#</sup>

## Study on Bursting Prediction of Rectangular Battery Case with V-Notch

S. M. Kim, W. J. Song, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang

(Received November 24, 2009)

### Abstract

In this study, V-notch part has been considered as one of safety components in rectangular cup used for mobile device. This kind of safety component in rectangular cup with the V-notch part, which controls adequately the increased internal pressure in the rectangular cup, plays an important role to prevent the explosion from the excessive internal pressure. The protecting mechanism on the mobile device against the explosion is that a series of fracture on the V-notch part at the critical internal pressure level occurs. Therefore, it is very crucial to estimate accurately the working pressure range of the safety device. Relationship between the working internal pressure and fracture phenomenon at V-Notch part was investigated through numerical analysis using ductile fracture criteria. Integral value,  $I$ , of the used ductile fracture criteria was calculated from effective stress and strain, and then the bursting pressure of the V-notch part was extracted. Comparisons between the estimated and experimental results show that this systematic approach to predict bursting pressure using the ductile fracture criteria gives fairly good agreements.

**Key Words** : Ductile Fracture Criteria, Finite Element Simulation, V-Notch Part, Bursting Pressure Prediction

### 1. 서 론

이동통신 단말기와 노트북 PC 등 휴대기기의 보급이 급격히 증가함과 동시에 성능이 점차 고 성능화됨에 따라 대용량 전지에 대한 관심이 높아지고 있다. 리튬-이온(Li-Ion) 2차 전지는 기존의 니켈-카드뮴(Ni-Cd) 전지나 니켈-수소(Ni-MH) 전지에 비하여 높은 출력과 용량을 가지며 친환경, 장수명, 부피 및 무게의 감소 등과 같은 여러 장점을 가지고 있어 휴대기기에 주로 사용되고 있다.

리튬-이온 2차 전지는 유기전해액과 같은 구성 물질과 높은 작동 전압으로 인하여 과충전·과방

전·과전류에 의한 전지의 특성이 현저하게 저하하거나, 발열·발화·폭발의 위험성이 매우 높아지게 된다. 따라서, 일반적으로 2차 전지의 안전성을 확보하기 위해 전지 내부에 PTC 소자나 안전변과 같은 기계적인 안전장치(safety device)를 장착하며, 전지팩 내부에는 전기적인 보호회로나 전류휴즈 등 2중, 3중의 보호기능을 도입하여 사용자의 안전을 확보하고 있다. 또한, 최근에는 이외에도 각종 전지 케이스의 외부 표면에 미세한 V-notch를 인위적으로 성형하여, 전지 내부의 온도 증가에 따른 내부 압력 증가로 인한 전지의 폭발을 방지하기 위한 장치가 새롭게 도입되기도 하

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원  
2. 부산대학교 산학협력단  
3. 부산대학교 항공우주공학과  
# 교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,  
E-mail: bskang@pusan.ac.kr

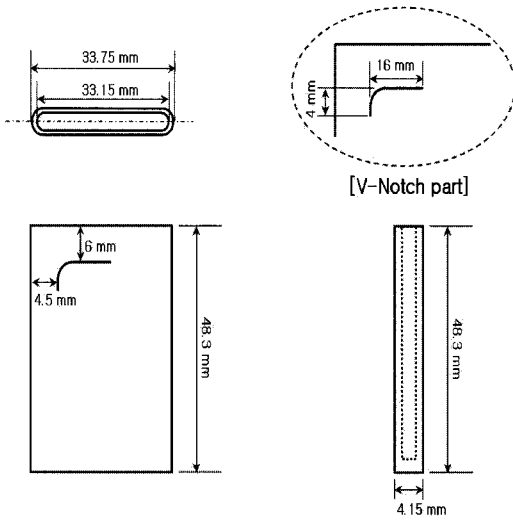


Fig. 1 Layout of rectangular cup with V-notch

였다. 이러한 미세 V-notch가 존재하는 경우, 내압 증가에 따른 V-notch부의 파단에 대한 고려가 필요하게 된다. 금속 성형 공정에서 성형한계 예측을 위해 연성파괴이론(ductile fracture criteria)을 적용하는 시도가 많이 이루어 지고 있다. 박판 금속 성형 공정에서는 소성변형이 크게 발생하고, 성형성이 국부적인 necking 발생에 의해서 제한되기 때문에 응력이나 변형률이 임계 수준에 도달하게 되면 국부적인 영역에서 파단이 발생하게 된다. 연성파괴기준에 대한 연구로서, 파단이 발생하는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 둔 연성파괴기준 및 다공질 재료에 대한 연성파괴기준 등이 있다[1~2]. 또한, 파단 발생시 소성변형률 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 연성파괴기준이 제시되기도 하였으며[3], 유한요소 해석을 적용한 원통형 디프 드로잉 공정에 있어서의 성형한계에 대한 연구가 이루어지기도 하였다[4].

V-notch를 가지는 직사각 컵 형태의 안전장치로는, Fig. 1에서와 같이 전지 케이스 표면에 정밀 성형된 V-notch 부위가 안전장치로서의 역할을 하게 된다. Fig. 1에서 제시된 안전장치로서의 작동 원리로는, 전지 내부에 압력이 발생하게 되면 전지가 서서히 팽창하게 되고 V-notch 부위에서 터짐이 발생하여 내부 압력을 낮추게 되는 것이다. 낮은 압력에서 터짐이 발생되어야 폭발의 위험성을 제거할 수 있고, 사용자들의 안전을 확보할 수 있다.

따라서, 전지 내부에 압력이 작용될 경우 V-notch 부위의 터짐 압력을 예측하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 직사각 형태의 리튬-이온 2차 전지에 적용 가능한 안전장치로써, V-notch를 가지는 직사각 컵을 Fig. 1에서와 같이 설계 및 시제작하였으며, 이를 바탕으로 직사각 컵에 있어서의 터짐 압력을 예측하고자 하였다. 시행 착오에 드는 노력과 시간을 줄임과 동시에 효과적으로 터짐 예측을 위해, 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard을 이용하였으며, 해석상에서 터짐 발생여부를 판단하기 위하여 연성파괴이론(ductile fracture criteria)을 적용하였다. 그리고, 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 터짐 시험(bursting test)를 실시하였으며, 단면 형상과 터짐 압력, 그리고 터짐 발생 부위를 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연성파괴이론

연성파괴는 큰 소성 변형을 수반하여 가늘게 늘어나면서 파괴가 일어나는 현상을 일컫는다. 직사각 컵 형태의 전지 내부에 압력이 작용하여 V-notch 부위에서 터지는 현상은 연성파괴 현상중의 하나이며, 연성파괴이론에 의해 설명되고 예측 가능하다. 연성파괴의 시작은 응력과 변형률 경로에 좌우되므로, 대부분의 연성파괴기준식은 응력과 변형률의 적분 형태로 나타낸다. 본 연구에서는 Cockcroft와 Latham이 제안한 연성파괴기준을 근거로 하여 터짐 압력과 터짐 발생부위를 예측하였다. Cockcroft와 Latham의 연성파괴기준은 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이하며, 최대 주인장응력에 의해 축적된 에너지가 임계값을 초과하면 파단이 발생하는 것으로 가정하고, 이는 식 (1)과 같이 표현 가능하다[5].

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

여기서,  $C$ 는 단축 인장시험을 수행한 후 한계 변형률로부터 산출되는 재료상수이다. 식 (1)을 다시 정의의 해보면, 다음과 같은 적분형태의 식 (2)를 얻을 수 있다[6].

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

여기서,  $I$ 는 적분 상수로 정의되고 유효변형률이 변형 경로를 따라 적분되며,  $I$ 의 값이 1에 도달하면 파단현상이 발생하는 것으로 판단한다. 식 (2)는 증분 개념으로 다음의 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \frac{1}{C} \left\{ \sum_{i=1}^n (\sigma_{\max} \Delta \bar{\epsilon})_i \right\} = \frac{G}{C} \quad (3)$$

여기서,  $G$ 는 유한요소 해석에서 산출되는 손상지수(damage coefficient)로 정의되고 Trapezoidal rule[7]을 적용하여 계산된다. 식 (3)은 소재의 전 영역에 대하여 각 절점에서 계산되고, 변형의 전 과정 동안 식 (3)의 값은 누적되고, 이때 손상지수( $G$ )가 재료상수( $C$ )에 도달하게 되면  $I = 1$ 이 되어 연성파괴가 발생하는 것으로 가정한다.

### 2.2 재료의 물리적 특성

직사각 컵 형태의 전지 케이스에 사용된 소재는 박판 알루미늄 합금 소재인 AA3005이며, 초기 소재의 두께는 0.5mm이었다. 재료의 응력-변형률 관계 및 물리적 특성을 파악하기 위하여 단순인장시험을 수행하였다. ASTM 규격[8,9]을 참고하여 단축 인장시험을 실시하였으며, 해당 시험에 사용된 장비는 동적재료시험기인 INSTRON 8516을 이용하였다. 단축 인장시험을 통해 얻어진 시험 결과를 Table 1에 요약하여 나타내었으며, 유한요소 해석에 사용된 응력-변형률 관계는 식 (4)와 같다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

본 연구에서의 재료상수( $C$ )는 재료의 터짐 발생을 좌우하게 되며, 유한요소해석에 있어서의 파단(즉, 터짐) 발생의 기준이 되는 중요한 인자가 되며, 재료의 인장특성에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 재료를 등방성(isotropy)으로 가정하였으며, 단축 인장상태에서 식 (1)의 구성요소는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{\max} = \bar{\sigma}, \quad \bar{\epsilon} = \epsilon_1 \quad (5)$$

이에 따라 본 연구에서는 재료의 터짐 발생의 기준이 되는 재료상수( $C$ )를 산출하였으며, 그 값은 약 7.3이었다.

Table 1 Material properties of AA3005

Material	Al 3005
K-value (MPa)	263
Work-hardening exponent, $n$	0.054
Tensile strength (MPa)	156
Fracture strain ( $\epsilon_{1f}$ )	0.035
Young's Modulus, E (GPa)	60
Yield stress (MPa)	195

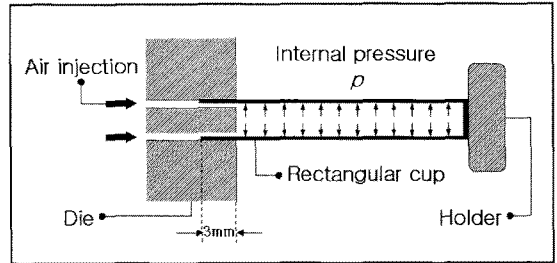


Fig. 2 Schematic illustration of bursting test

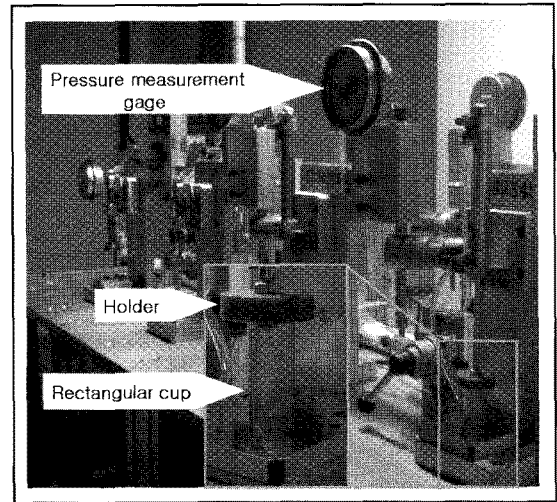


Fig. 3 Bursting test equipment

### 3. 터짐(Bursting) 시험

직사각형 전지 케이스의 터짐 거동 특성을 파악하기 위한 시험장치의 구성 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 각형 전지 케이스를 공기 주입구에서 3mm 지점에 위치시키고 홀더로 고정하여 공기가 주입되면, 전지 케이스가 터질 때까지 배터리 케이스 내부에 균일한 압력이 작용하게 된다. 직사각 컵 형태의 전지 케이스의 실제 터짐 거동 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 시험장치를 구성하였다.

시험장치는 직사각형 전지 케이스 내부에 공기 압력을 주입하는 공기 주입구 부분, 전지 케이스를 고정하는 홀더, 그리고 전지 케이스 내부의 공기 압력을 측정하는 압력 게이지 등 크게 3 가지 부분으로 구성된다. 압력 게이지는 2.5MPa 까지 측정 가능하며, 이는 대기압의 25 배에 해당된다.

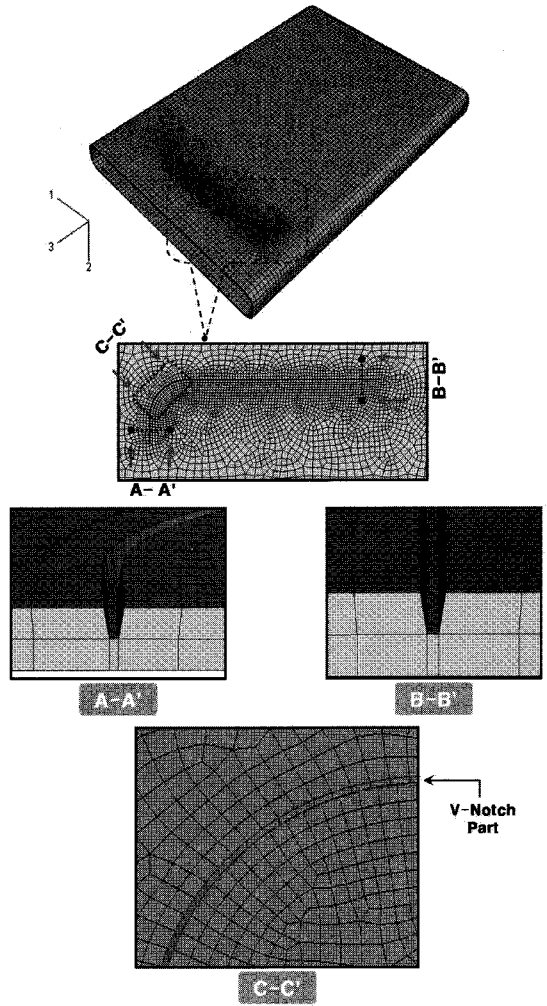
#### 4. 유한요소 해석

##### 4.1 유한요소 모델링

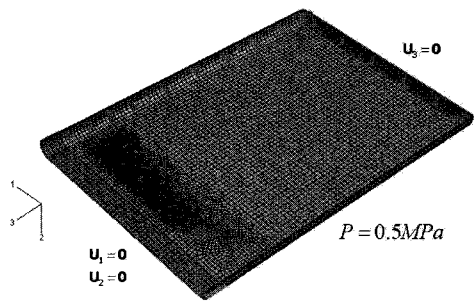
직사각형 전지 케이스의 터짐 현상을 수치적인 방법으로 접근하여 터짐 압력과 터짐 부위를 예측하기 위해 유한요소 모델을 Fig. 4와 같이 정의하였다. Fig. 1의 목표형상을 바탕으로 V-notch가 포함된 직사각형 전지 케이스를 25,000개의 8절점 육면체 요소로 모델링 하였다. V-notch 부위는 터짐이 예상되는 중요 영역이므로 상대적으로 요소 밀도를 조밀하게 구성하였다. 실제 터짐 시험을 시뮬레이션 하기 위해 공기 주입구 부분과 홀더 부분에 동일한 구속조건을 설정하였고, 내부에 압력을 0.5MPa로 적용하였다. 입력 하중경로는 전체 해석시간을 20개의 시간 증분(time increment)으로 나누어 Fig. 5 에서 나타낸 것처럼 내부 압력이 선형 증가하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 내연적 탄-소성 유한요소법(implicit elastic-plastic finite element method)를 적용하였다.

##### 4.2 유한요소 해석 결과

직사각형 전지 케이스 내부에 임의의 압력을 적용하여 해석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 유효 응력과 유효 변형률 분포를 각각 나타내고 있으며, 전지 케이스의 양쪽 측면과 모서리 부위에서 응력과 변형률 집중이 나타나고 있음을 확인할 수 있었으며, 내압에 의해 전지 케이스가 부풀어 오르면서 변형되는 형상을 파악할 수 있었다. 일반적으로 재료 인장 시험에서 인장 하중을 증가시키면 국부 네킹(necking)이 발생하고, 네킹 현상과 같이 변형이 많이 발생하는 부위에서 파단 현상이 나타난다. 본 연구에서 사용된 AA3005 소재의 인장시험 결과에 있어서 네킹 현상이 발생하지 않았지만, 해석 결과에서 알 수 있듯이, V-notch는 변형이 크게 발생하는 상단 모서리 부위에 위치하여 내부 압력 증가시 터짐이 발생할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.



(a) mesh system for FE analysis



(b) boundary condition

Fig. 4 Finite element model of rectangular cup for bursting simulation

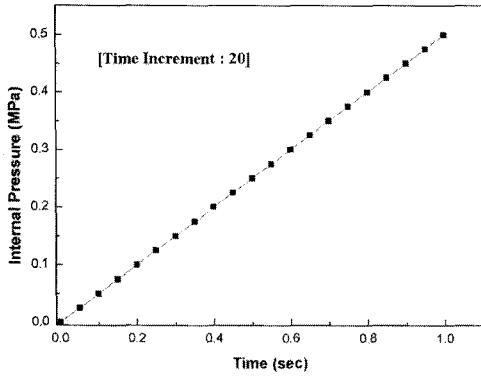


Fig. 5 Input load path in FE Simulation

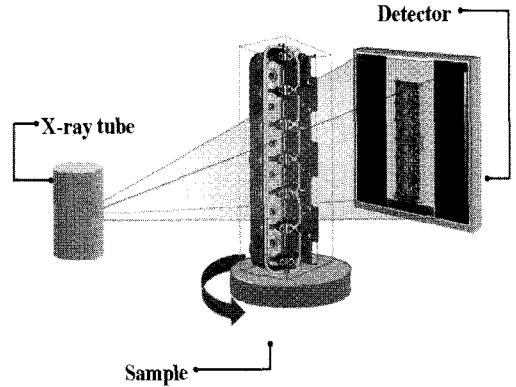
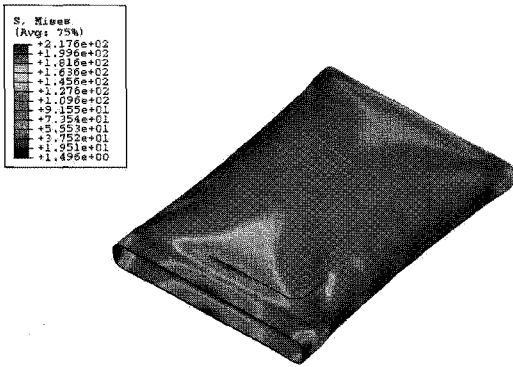
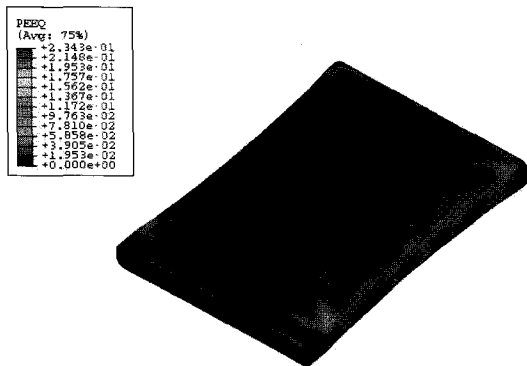


Fig. 7 Schematic illustration of X-ray CT



(a) Effective stress distribution



(b) Effective strain distribution

Fig. 6 FE Simulation result of rectangular cup for bursting process

## 5. 결과 및 고찰

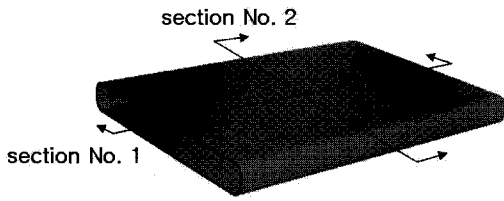
### 5.1 X-ray CT 촬영 시험

터짐 시험을 실시 한 후 직사각형 전지 케이스

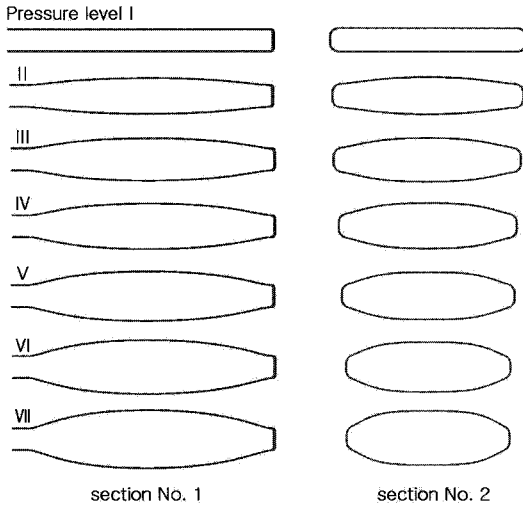
의 단면 형상 및 변위를 측정하기 위하여 X-ray CT 장비를 활용하였다. Fig. 7은 X-ray CT 장비의 개념도를 나타낸 것이다. 측정 원리는 X-ray 튜브에서 발생한 X-ray가 샘플을 투과하게 되고 이렇게 투과된 이미지는 감지장치에 의해 획득된다. 이 과정은 설정된 각도 단위마다( $0.125^\circ \sim 4^\circ$ ) 반복되며, 프로그램 상의 보정과정을 거쳐 3차원 형태를 구성하게 된다. X-ray로 구현된 3차원 이미지를 통하여 단면 형상 및 변위를 파악할 수 있었다.

### 5.2 단면 형상 비교

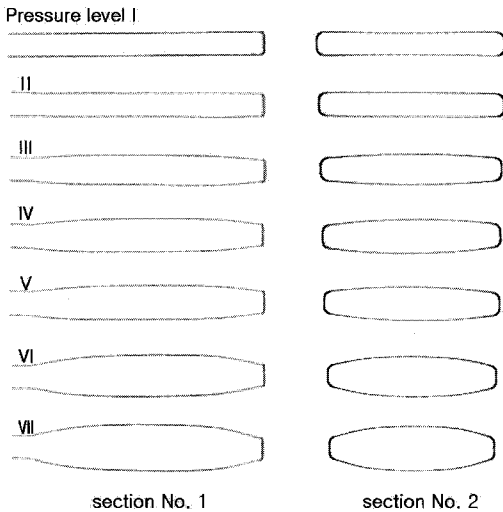
본 연구에서는 직사각형 전지 케이스의 내부 압력에 의한 터짐 현상에 대한 유한요소 해석 결과를 검증하기 위하여 앞서 제시한 제 3장에서 터짐 시험 방법으로 시험한 결과와 단면 형상을 비교 하였다. 전지 케이스 내부에 작용하는 공기 압력을 Table 2와 같이 7단계로 구분하여 각각의 압력 단계에서 유한요소해석결과와 시험 결과의 단면 형상을 비교하였다. 비교 단면 영역은 Fig. 8의 (a)에서 전지 케이스의 장축 중심부분(section No. 1)과 단축 중심부분(section No. 2) 단면으로 정의하였다. Fig 8의 (b)는 유한요소 해석에 의한 각 압력 단계에서의 단면 형상을 도시한 것이며, Fig. 8(c)는 터짐 시험에 의한 각 압력 단계에서의 단면 형상을 나타낸 것이다. Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)에서 알 수 있듯이, 내부 압력이 작용할 때 부풀어 오르는 경향이 유사함을 확인 할 수 있었다. 또한, 동일 압력 단계에서 해석 결과의 단면이 약간 더 부풀어 오르는 경향이 존재함을 파악할 수 있었다. 이는 터짐 시험에 있어서 각 압력 단계까지



(a) investigated sections



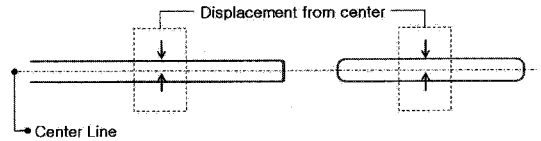
(b) sectional views of rectangular cup from simulation



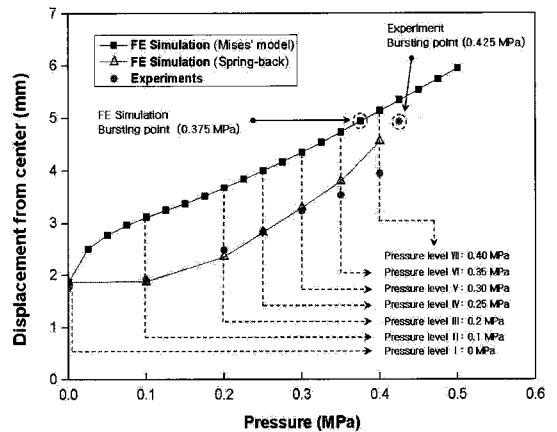
(c) sectional views of rectangular cup from experiment  
 Fig. 8 Sectional view of rectangular cup at each pressure level

Table 2 Pressure level (MPa)

I	II	III	IV	V	VI	VII
0.0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4



(a) definition of displacement from center



(b) relationship between displacement and pressure level  
 Fig. 9 Relationship between displacement from center and pressure level

압력 하중을 가한 후 압력 하중의 제거에 의해 탄성회복(spring-back)이 발생하였음을 의미하며, 해석에 있어서는 각 압력 단계에서 탄성회복을 고려하지 않고 압력 하중이 적용된 상태에서의 단면 형상에 있어서의 변형 결과를 도출함에 의해 발생한 차이라고 할 수 있다.

### 5.3 변위 비교

본 연구에서는 직사각형 전지 케이스의 유한요소 해석 결과를 검증하기 위하여 케이스의 중심으로부터 변위(displacement from center)를 Fig. 9(a)에서와 같이 정의하고 터짐 시험 결과와 비교하였다.

Fig. 9(b)에서 유한요소 해석 결과는 Fig. 5에서 정의한 각각의 시간 증분에서 적용된 내부 압력과 Fig. 9(a)에서 정의된 변위와의 관계를 나타낸 것이고 Table 2에서 정의한 각 압력 단계에서 탄성

회복을 나타낸 것이다. 터짐 시험 결과는 Table 2에서 정의한 압력 단계와 6.2절에서 X-ray CT를 이용하여 촬영한 단면 형상으로부터 측정된 변위와의 관계를 나타낸 것이다. 압력 단계 I은 내부 압력이 0.0MPa인 상태이며, 실제 직사각형 전지 케이스에서 측정된 거리가 유한요소 해석 결과로부터 얻어진 변위보다 0.1mm 정도 작게 나타났다. 이는 측정 오차로 판단되며, 무시할 수 있을 만큼 작은 값이라 판단되었다. 압력 단계 II ~ VII은 내부 압력이 0.1MPa에서 0.4MPa까지 적용된 상태이며, 실제 직사각형 케이스에서 측정된 거리가 유한요소 해석 결과로부터 측정된 변위보다 약 1.2mm 정도 작게 나타났으나, 유한요소 해석에서 탄성회복을 고려하였을 때 실제 변형 형상에 근접함을 확인할 수 있었다.

5.4 터짐 압력 및 터짐 부위 비교

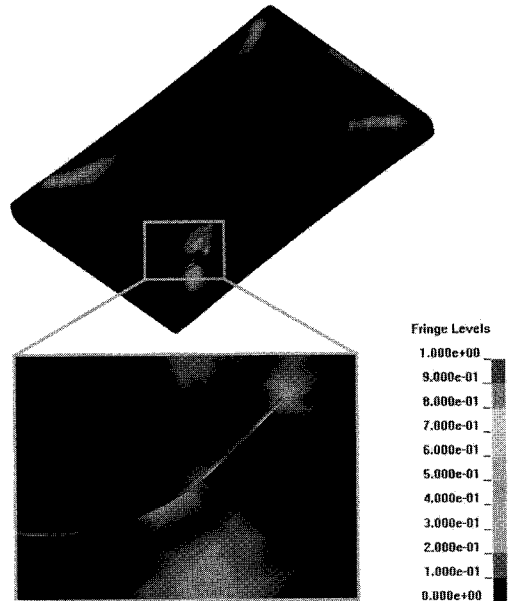
본 절에서는 유한요소 해석 결과와 연성파괴이론을 결합시켜, 직사각형 전지 케이스의 터짐 압력과 터짐 부위를 예측하였으며, 이를 검증하기 위하여 시험 결과와 비교하였다. 유한요소 해석 결과와 연성파괴이론을 이용하여 Fig. 10(a)와 같이 적분 상수( $J$ ) 분포를 나타내었고, V-notch 부위에서  $I = 1$ 로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 유한요소 해석에 있어서 적용된 내부 압력은 0.375MPa로 나타났다. 터짐 시험 결과에서는 내부 압력이 0.425MPa이 작용할 때 V-notch 부위에서 터짐이 발생하는 것으로 나타났으며, 이를 Table 3에 요약하였다. 직사각형 케이스에 대한 내부 압력 하중에 의한 터짐 시험 결과를 X-ray CT 촬영을 통해 Fig. 10(b)와 같이 도시하였다. 수치적 기법으로 예측된 결과는 실제 터짐 압력보다 약 12% 정도 낮게 형성되었으나, 터짐 부위는 V-notch 부위로 유사하게 예측되었으며, 오차는 직사각 케이스를 가공할 때 발생하는 가공경화를 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

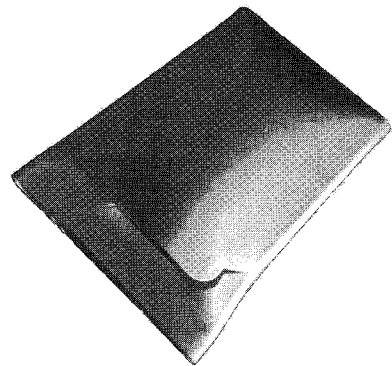
본 연구에서는 리튬-이온 2차 전지의 직사각형 전지 케이스 표면에 적용할 수 있는 V-notch 형태의 안전장치를 제안하였으며, 수치적 기법을 통해 터짐 압력과 터짐 부위를 예측하고 시험 결과와 비교하여 수치적 기법의 적용 가능성을 확인해 보았다. 수치적 기법은 유한요소 해석과 Cockcroft

Table 3 Comparison of bursting pressure

Bursting pressure (MPa)		Error(%)
Simulation	Experiment	
0.375	0.425	12



(a) calculated distribution of integral I



(b) observed fracture site by X-ray CT

Fig.10 Comparison of fracture site between FE simulation and experiment

와 Latham이 제시한 연성파괴이론을 결합한 것으로 배터리 케이스 내부에 압력이 작용할 때 터짐 압력과 터짐 부위를 예측하는데 적용되었다. 유효 변형을 분포를 통하여 변형이 크게 발생하는 모서리 부위에 V-notch가 적절하게 위치하였음을 판

단할 수 있었고 연성파괴의 기준이 되는 적분 상수( $J$ )를 각 시간 스텝, 각 절점에 대하여 응력과 변형률로부터 도출하였다. 적분 상수를 토대로 터짐 압력과 터짐 가능성이 높은 부위를 예측할 수 있었다. 수치적 기법으로 예측된 터짐 압력은 시험 결과보다 약 12% 낮게 나타났으나, 터짐 부위는 시험 결과와 유사하게 나타났다. 이러한 오차는 유한요소 해석 과정에 있어서 가공경화 및 재료 이방성을 고려할 경우 해당 오차가 줄어 들 것으로 예상되며, 시험 결과와 유사한 결과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 리튬-이온 2차 전지의 직사각 컵 형태의 전지 케이스 외부 표면에 성형된 V-notch 형태의 안전장치는 기존의 안전장치와 더불어 사용자의 안전을 보장하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 논문은 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업의 지원(No. R0A-2008-000-20017-0)을 받아 수행되었으며, 또한 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] F. A. McClintock, 1968, A criterion for ductile fracture by the growth of hole, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 363~371.
- [2] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, 1980, Criteria of ductile fracture and their application, *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 4, pp. 65~81.
- [3] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductile and the workability of metals, *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 96, pp. 33~39.
- [4] 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, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, pp. 116~121.
- [5] Y. M. Won, K. H. Oh, 1996, The elasto-plastic finite element analysis of ductile fracture in shape rolling, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 5, No. 1, pp. 72~80.
- [6] Y. K. Ko, J. S. Lee, H. Huh, H. K. Kim, S. H. Park, 2005, Prediction of fracture in hub-hole expansion process using ductile fracture criteria, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 7, pp. 601~606.
- [7] R. L. Burden, J. D. Faires, 1997, *Numerical Analysis*, Brooks/Cole Publishing Company
- [8] Standard test methods for tension wrought and cast aluminum- and magnesium-alloy products, ASTM, B 557M-06.
- [9] Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n-values) of metallic sheet materials, ASTM, E 646-07.