

세장비가 큰 사각케이스 성형을 위한 초기 블랭크의 설계 및 개선에 관한 연구

구태완* · 박철성** · 강범수***

(2003년 9월 9일 접수)

A Study on Initial Blank Design and Modification for Rectangular Case Forming with Extreme Aspect Ratio

T. W. Ku, C. S. Park and B. S. Kang

Abstract

Rectangular drawn case with extreme aspect ratio is widely used for electrical parts such as a lithium-ion battery container, semi-conductor case and so on. Additionally, from the recent trend towards miniaturization of the multi-functional mobile device, demands for rectangular case with the narrow width are increased. In this study, numerical and experimental approaches for the multi-stage deep drawing process have been carried out. Based on the research results of the width of 5.95mm model, finite element analysis for storage case of rectangular cup type was verified to the width of 4.95mm. Also, a series of manufacturing experiments for rectangular case is conducted and the deformed configuration of the rectangular drawn case are investigated by comparing with the results of the numerical analysis. And the modification of the initial blank is performed to minimize the trimmed material amount. By the application of the modified blank, the sound shape of the deformed parts is improved.

Key Words : Multi-Stage Deep Drawing, Rectangular Case, Blank Design, Blank Modification, Finite Element Method

1. 서론

최근에 이르러 휴대용 이동 통신 기기 및 멀티 미디어 기기의 급격한 발달과 보급에 힘입어 이에 따른 부수적인 부품들의 수요도 매우 빠른 속도로 증가하고 있다.⁽¹⁾ 이러한 멀티미디어 이동 통신용 부품 중 가장 중요한 것 중의 하나가 구동 전원을 공급하는 리튬 계열의 2차 전지이다. 이 리튬 계열 2차 전지는 리튬 이온 전지, 리튬 폴리머 전지와 리튬 수소 전지 등이 있으나, 각 전지 종류 및 크기에 따라 용도와 용량 특성이 정해지기도 한다. 이중 리튬 이온 2차 전지는 최근 전해질 물질의 성

능 개선을 통해 이동 통신용 전원 공급원으로 각광받고 있으며, 다양한 분야의 전원 공급원으로도 적용이 확대되고 있는 추세이다.⁽²⁻³⁾ 그리고, 전해질 물질의 성능 개선에 의해 1회 충전시 장시간 이용이 가능하면서도 크기는 소형화 되고 있다. 이러한 전원 공급용 리튬 이온 2차 전지는 전해질 물질의 저장 용기 역할을 하는 사각형 케이스와 top-cap 부로 크게 나뉘어 진다. 이중 사각 케이스는 이동 통신 기기에 부착되는 형상의 특성상 세장비가 큰 직사각 형상을 가지게 된다. 이처럼 이동 통신용 부품 및 전자제품의 초경량 컴팩트화로 인하여 직사각형 케이스의 수요가 증가하고 있지만

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

** 부산대학교 항공우주공학과 대학원

*** 부산대학교 항공우주공학과

여전히 생산성 향상 및 공정수의 감소, 그리고 비용 절감을 위한 세장비가 큰 직사각형상의 다단 디프드로잉 공정 기술의 개발이 요구되고 있다.⁽⁴⁻⁵⁾

세장비가 큰 직사각형상을 가진 저장 용기를 성형하기 위한 다단 디프드로잉 공정은 전형적인 원통형 디프드로잉에 비해 더 복잡한 변형 형태를 보이고 있다.⁽⁶⁻⁹⁾ 이런 복잡한 변형 메커니즘으로 인하여 최종 형상의 기계적 성질을 예측하기가 어렵고, 원하는 최종 형상을 얻기 위한 다단 디프드로잉 공정 설계 또한 쉽지 않다. 이에 Toh⁽¹⁰⁾ 등은 사각형 컵의 드로잉 공정에 대한 변형 해석을 수행하였으며, Min⁽¹¹⁾ 등은 다단계 사각형 디프드로잉 공정에서의 성형성 향상을 위한 연구를 수행하였다. 그리고 Kishor⁽¹²⁾ 등은 디프드로잉 공정에서의 방향귀(earing)를 최소화하기 위한 초기 블랭크 형상을 연구하였고, Kim⁽¹³⁻¹⁴⁾ 등은 유한요소 역해석과 탄소성 유한요소법을 통해 타원형 컵에 대한 6 단계 디프드로잉 공정을 해석하였으며 다단 디프드로잉 공정에 대한 유한요소 역해석 기법을 제안하였다. 또한 최근에는 Ku⁽¹⁵⁻¹⁶⁾ 등이 폭 5.95mm 모델의 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스에 대한 성형 해석 및 성형 실험을 수행하였다.

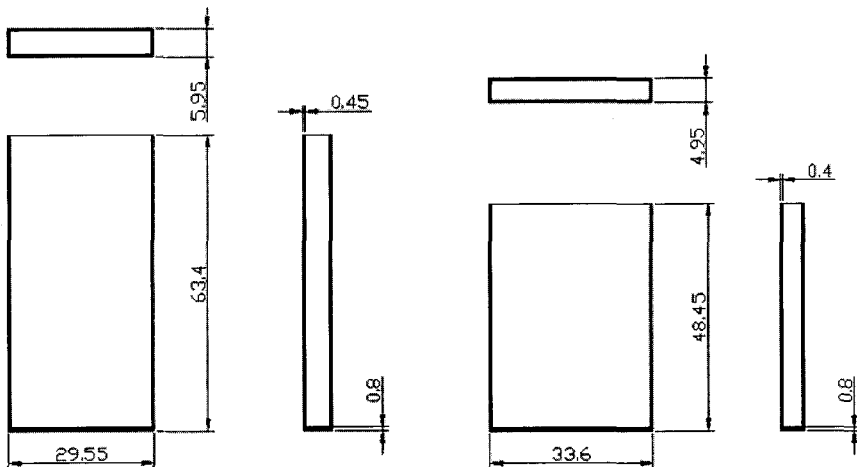
본 연구에서는 Ku 등이 수행한 폭 5.95mm인 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스의 세장비가 큰 다단 디프드로잉 성형 공정에 대한 연구 결과를 바탕으로 폭 4.95mm의 사각 케이스에 대한 초기 블랭크를 설계하여 이를 유한요소 해석 및 시제품 제작을 통해 성형 형상의 건전성을 평가하고, 또한

중간 과정에서 트리밍 공정에 의해 제거되는 소재의 트리밍량을 줄이기 위한 블랭크 개선에 관한 연구를 수행하였다. 그리고, 초기 블랭크와 개선된 블랭크를 적용하였을 때의 최종 성형 부품에 대한 유한요소 해석을 수행하여 그 결과를 비교·검토하였다.

2. 다단 디프드로잉 성형공정

2.1 성형공정

본 연구에서 적용된 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스의 성형 공정은 최종 제품 형상을 구현하기 위해 연속적으로 작업할 수 있도록 여러 개의 다이와 펀치를 갖추어 성형하는 순속식 가공 공정(progressive process) 방식으로 성형되며,⁽¹⁷⁾ 블랭킹, 아이어닝, 드로잉, 트리밍 등 네 공정이 주를 이루게 된다. 다단 디프드로잉 성형 공정으로 제작되는 사각 케이스의 성형 가공 시 가장 큰 특징 중의 하나는 교축 가공에 의해 그 최종 형상이 성형된다는 점이다. 이 교축 가공 중에 공정 설계 등의 오차가 발생하게 되면 최종 부품에 표면 크랙(crack) 등이 유발되며, 이는 최종 부품 조립 후 이동 통신 기기의 운용 중에 외부 충격에 의한 폭발의 위험이 있기 때문에 매우 까다로운 성형 공정을 내포하고 있다.⁽¹⁸⁾ 세장비가 큰 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스에 대한 이전 연구 모델(Type A)과 본 연구에서 대상으로 하는 모델(Type B)의 형상 및 치수를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 그리고



(a) type A

(b) type B

Fig. 1 Dimensions of rectangular cases (unit:mm)

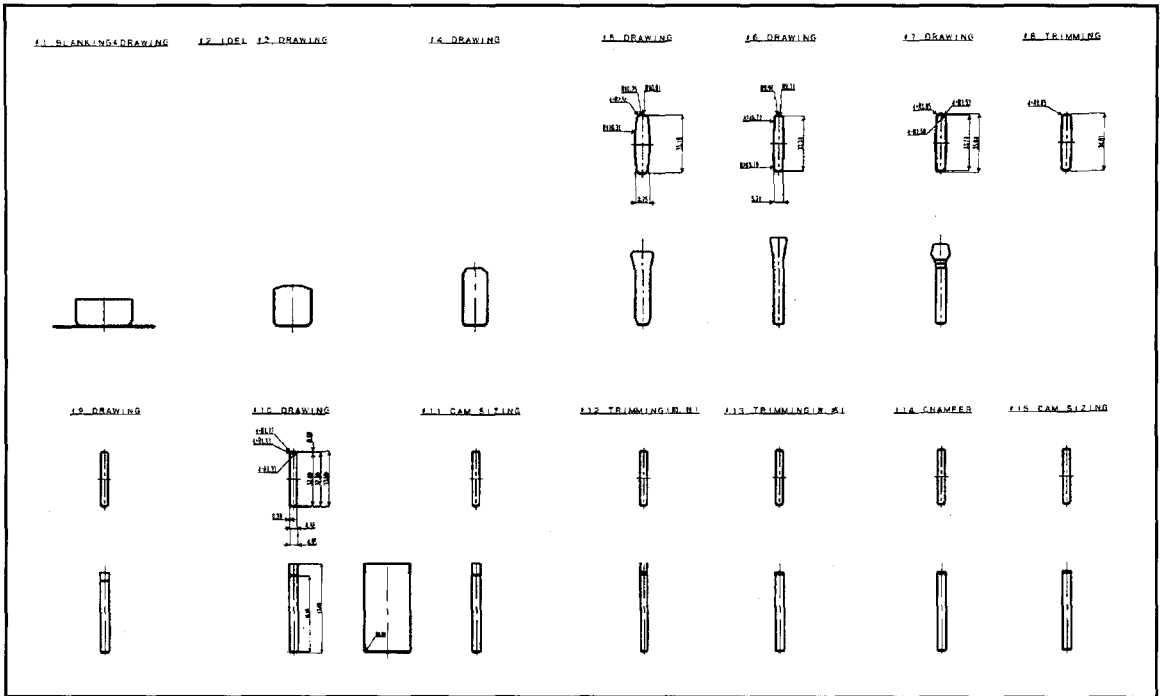


Fig. 2 Layout of the multi-stage rectangular deep drawing process with a width of 4.95mm

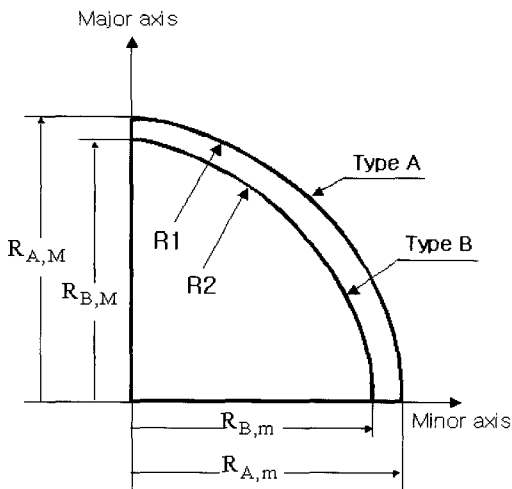


Fig. 3 Initial blank profiles for each model (unit:mm)

Table 1 Specifications of rectangular case(unit:mm)

	Length	Height	Width	AR(L/W)
Type A	29.55	63.40	5.95	4.37
Type B	33.60	48.45	4.95	6.79

사각케이스의 성형 과정에 대한 이해를 돕기 위해 폭이 4.95mm 인 Type B 모델에 대한 전체 성형 공정도(layout)를 Fig. 2에 나타내었다.

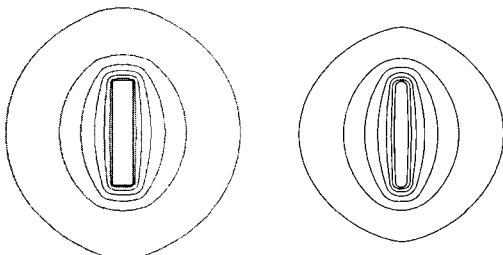
2.2 초기 블랭크 설계

다단 디프드로잉 공정으로 성형되는 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스의 폭이 각각 5.95mm와 4.95mm인 Type A, Type B의 두 모델에 대한 초기 블랭크를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 Type A 모델에 대해서 $R_{A,M}$ 은 장축 방향의 반경, $R_{A,m}$ 은 단축 방향의 반경을, Type B 모델에 대해서 $R_{B,M}$ 은 장축 방향의 반경, $R_{B,m}$ 은 단축 방향의 반경을 각각 나타내고 있다. Fig. 3에서는 이전의 연구에서 제시된 초기 블랭크 형상(Type A)과 본 연구를 위해 설계된 초기 블랭크 형상(Type B)을 대칭 조건에 근거한 1/4 블랭크 모델에 대하여 초기 블랭크의 대칭 형상을 비교하여 그 외형적 차이점을 나타내고 있다. Fig. 3에서의 Type A 모델의 초기 블랭크는 주축 방향의 호와 단축 방향의 호를 비롯하여 총 3개의 호를 가지는 타원형의 블랭크 프로파일(profile)을 가지고 있다. 또한 Type B 모델의 초기 블랭크도 총 3개의 호를 가지는 타원형의 블랭크 프로파일을 가지고 있으나 각 호의 반지름 크기가 각각 다르다

는 것을 알 수 있다.

Type A와 Type B 모델이 폭 5.95mm에서 폭 4.95mm로 축소되고 최종 제품 형상 및 치수 또한 변경되면서, 이에 따라 초기 블랭크 형상도 수정되었다. 사용된 소재는 모두 AA3003-H16 소재이지만, 최종 요구 형상에 따라 장축과 단축을 기준으로 블랭크 형상이 새로운 타원형 형상으로 개선되었음을 나타내고 있다. 이러한 원형 블랭크 형상이 아닌 타원형 블랭크 형상으로 설계된 이유는 장축과 단축 방향으로의 성형시 소재 유동 및 변형의 차이를 최소한으로 유도하여 원활한 성형 공정을 수행하기 위해서이다.

또한, 각 단계별 디프드로잉시 소재의 유동을 원활히 하고, 소재 두께 변화를 부품의 설계안과 동일하게 유도하기 위해 외형적 형상이 수정되었음을 알 수 있다. Fig. 3에서의 두 모델에 대한 초기 블랭크를 이용하여 다단 디프드로잉 성형시 각 단계별 블랭크의 단면 형상은 Fig. 4와 같이 정의하였고, 이를 바탕으로 유한요소 성형 해석에 적용하였다. 이 각각의 단면들은 다단 디프드로잉 성형시 각 단계에서의 다이와 펀치의 프로파일을 제공한다.



(a) type A (b) type B

Fig. 4 Cross-sectional blank profile of rectangular case

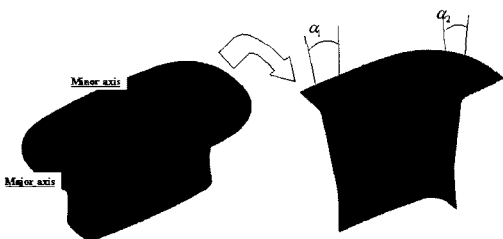


Fig. 5 Conceptual design of intake angle

2.3 입사각 설계

본 절에서는 Type A 모델과 Type B 모델에 대한 다단 디프드로잉 공정의 유한요소 성형 해석시 고려 되어져야 할 금형에서의 입사각(intake angle)에 대해 언급하고자 한다. 공정이 수행되는 과정에서 입사각은 소재와 금형 사이의 균일한 접촉을 유도하여 소재의 원활한 변형 및 유동을 유도하는 역할을 수행한다. 다단 디프드로잉 공정에 있어서 입사각을 고려하게 되면 소재와 금형간에 균일 접촉을 유도할 수 있게 되어 성형시 편치력을 상당부분 감소시킬 수 있으며, 접촉력을 감소시켜 블랭크의 변형 집중이 없이 균일한 변형을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

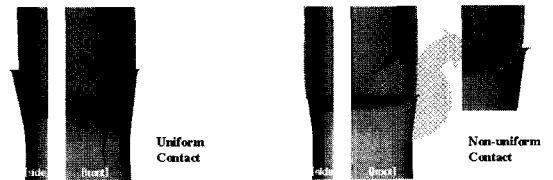
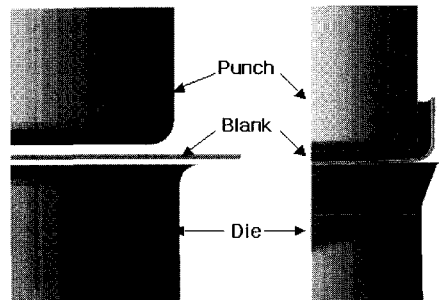
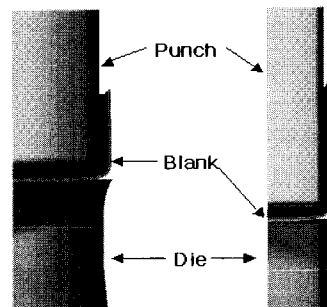


Fig. 6 Contact shape of blank and lower die



(a) the first step (b) the second step



(c) the third step (d) the fourth step
Fig. 7 Die design with intake angle for each step

Fig. 5에서는 장축 방향과 단축 방향에서의 입사각을 나타내고 있으며, 입사각을 고려한 균일 접촉 현상을 Fig. 6에 나타내었다. 입사각을 적용한 금형 설계에서 소재와 금형간의 디프드로잉시 균일 접촉을 이용한 제1단계에서 제4단계까지의 성형 해석과정을 위한 입사각 설계 결과를 도식적으로 Fig. 7에 나타내었다.

3. 외연적 유한요소법을 이용한 성형 해석

3.1 성형 해석 조건

본 연구에서는 다단 디프드로잉 공정으로 성형되는 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스의 유한요소 성형 해석을 수행하기 위해 외연적 유한요소 상용 코드인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 외연적 유한요소 해석 기법은 중앙 차분법(central difference method)과 편차력을 천천히 작용시키거나 소재의 밀도를 가상적으로 감소시켜 해석시 발생 가능한 동적문제를 해결하는데 적용하였다.⁽¹⁹⁻²¹⁾

해석에 사용한 블랭크 소재는 등방성 소재이며, 공정 중에 발생하는 열에 대한 효과는 무시할 수 있다고 가정하였다. 본 연구에서와 같은 판재성형에서 보다 정확한 이론적 접근을 위해서는 이방성 특성에 대해서도 고려를 하는 것이 바람직한 접근 방법이지만, 추후 언급되는 실제 성형 결과에서와 같이 플랜지부에서 발생하는 귀현상 등의 영향이 그다지 크지 않으며, 또한 입사각을 적용하여 각 단계에서의 편치 유입이 원활히 진행되고, 제 4 단계 이후에 플랜지부가 1차 트리밍 공정에 의해 제거되므로 실험적·해석적 접근을 용이하게 하기 위해 소재의 이방성 효과가 미약하다고 판단되어 앞서 언급한 바와 같이 소재를 등방성으로 가정하였다.

각 부분별 마찰 조건은 일정하게 쿨롱 마찰계수 0.1을 적용하였다. 또한, 블랭크를 제외한 펀치와 다이 및 블랭크 홀더 등은 4-절점 강체 쉘(shell) 요소로 정의하였으며, 블랭크는 성형 공정 과정에서의 소성 굽힘 변형과 아이어닝 효과를 고려하기 위해 8-절점 육면체 요소를 사용하였다.

리튬 이온 2차 전지 전해질 물질 저장용 사각 케이스는 내부식성과 성형성이 좋은 특성을 가진 두께 0.8mm의 AA3003-H16판재를 본 연구에 사용하였으며, Table 2에 A3003-H16 소재의 기계적 특성을 나타내었다.

3.2 유한요소 성형 공정 해석

Table 2 Mechanical properties of AA-3003-H16

Al. Alloy 3003-H16	
Young's Modulus (GPa)	70
Poisson's Ratio	0.33
Ultimate Strength (MPa)	180
Yield Strength (MPa)	170
Initial Strain	0
Strain Hardening	Perfect Plasticity
Avg. Elongation (%)	10.85

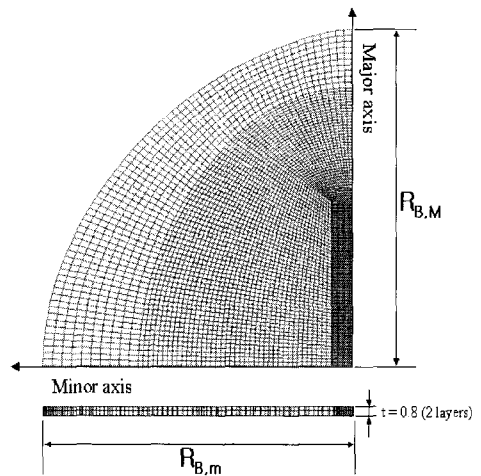


Fig. 8 Initial mesh system for the blank (unit:mm)

본 절에서는 최종 형상이 높이, 길이, 폭이 각각 33.60mm, 48.45mm, 4.95mm의 크기를 가지는 폭이 매우 좁은 직사각형인 Type B 모델에 대한 다단 디프드로잉 성형 공정 해석을 외연적 유한요소 기법을 이용하여 수행하였다.

본 연구에서는 세장비가 큰 사각 케이스의 다단 디프드로잉 공정 중 초기 블랭크에서 최종 제품까지의 형상 구현을 위해 중요한 초기 5단계까지의 성형 과정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 제5단계 이후에 트리밍 공정이 수행되므로, 유한요소 해석 결과는 제4단계까지의 결과에 대해서만 언급하였다. 다단 디프드로잉 성형 해석에 사용된 초기 블랭크는 Fig. 3에서의 Type B로 나타나 있는 형상을 바탕으로 Fig. 8에서와 같이 설계되었고, 이 초기 블랭크는 총 13,863개의 절점과 총 9,000개의 유한요소로 모델링하였다. 또한, 블랭크의 초기 두께는 0.8mm이며, 블랭크의 두께 방향으로 두 개의 층(layer)을 모델링하였다.

3.3 유한요소 성형 공정 해석 결과

폭 4.95mm인 Type B 모델에 대해 설계된 초기 블랭크를 이용하여 유한요소 성형 공정 해석 시뮬레이션에 적용하였다. 유한요소 해석 결과인 각 단계별 소재의 유효 변형률 분포는 Fig. 9에서 Fig. 12 사이에 걸쳐 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 제1단계 디프드로잉 성형 해석 결과 최대 유효 변형률은 약 0.648로 나타났으며, 바닥면의 경우 소재의 두께 변화가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10에서는 제2단계 디프드로잉 유한요소 해석 결과를 보여주고 있는데, 이 공정의 경우 디프드로잉 및 장축 방향 측면의 아이어닝 공정이 동시에 이루어진다. 이때 최대 유효 변형률은 0.498로 장축면에서의 아이어닝 효과로 인해 이후 제3단계와 제 4단계 공정에서 보다 상대적으로 큰 유효 변형률을 보이고 있다.

제3단계 공정의 경우 단축 방향 측면의 아이어닝 공정이 수행되어 소재의 두께 균일화를 유도하였다. Fig. 11에서 보여지는 바와 같이 최대 유효 변형률은 0.461로 나타났다.

제4단계 성형 공정은 Fig. 12에서와 같이 최대 유효 변형률이 0.363로 나타났으며, 아이어닝 공정과 디프드로잉 공정이 동시에 이루어지고, 이후 공정에서 최종 형상을 성형하기 위한 블랭크의 체적을 확보하고 다이 마찰력의 증대 등 불량을 야기할 수 있는 여유량을 절단하는 트리밍 공정을 위해 플랜지를 남기게 된다.

Fig. 13에서는 유한요소 해석 결과로부터 전체 다단 디프드로잉 공정중 트리밍 공정을 포함하는 초기 7단계까지의 블랭크의 변형 형상을 보여주고 있다. 상당량의 플랜지부 잉여 소재가 트리밍 공정에 의해 제거됨을 알 수 있고, 이는 추후 언급될 초기 블랭크의 개선이 필요함을 나타내고 있다.

4. 다단 디프드로잉 성형 실험

폭 4.95mm를 가지는 세장비가 큰 다단 디프드로잉 실험은 70톤(ton) 용량의 이송식 프레스(transfer press)를 사용하였다. 모든 공정은 두께 0.8mm인 AA3003-H16을 이용하여 수행되었으며, 드로잉, 아이어닝(ironing), 블랭킹(balnkng), 그리고 트리밍(trimming) 공정을 포함하여 총 14 공정으로 이루어진다. Fig. 14에서는 사각케이스 성형 실험을 통해 얻은 시제품의 각 공정에서의 변형 결과를 공정 순서대로 나타낸 것이다.

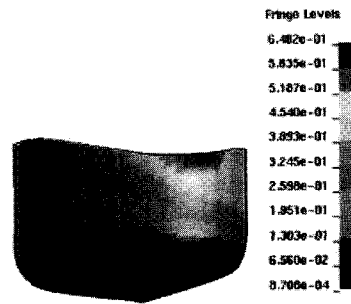


Fig. 9 Effective strain distributions of the first step

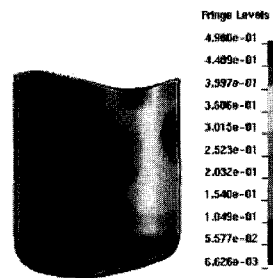


Fig. 10 Effective strain distributions of the second step

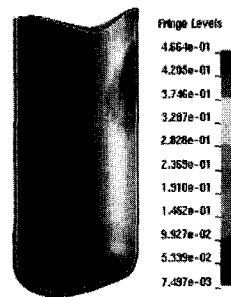


Fig. 11 Effective strain distributions of the third step

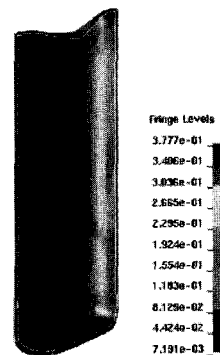


Fig. 12 Effective strain distributions of the fourth step

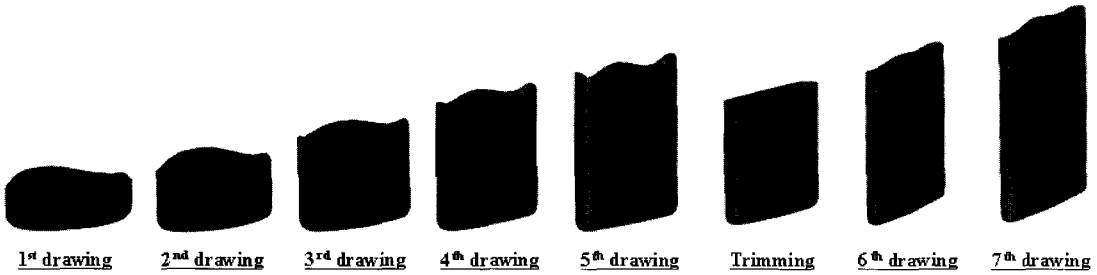


Fig. 13 Deformed shapes of the blank at each deep drawing stage with 4.95mm width

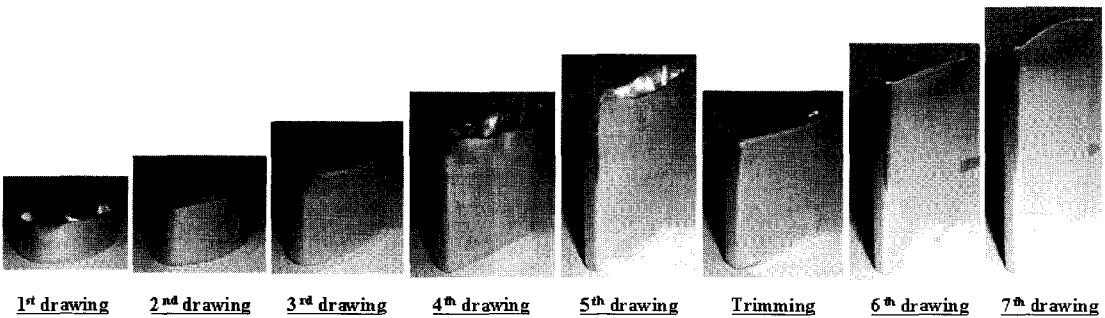


Fig. 14 Experimental result for rectangular case deep drawing with 4.95mm width

5. 블랭크 개선

5.1 초기 블랭크 개선 과정

본 절에서의 초기 블랭크 개선 및 수정 설계는 보다 정형의 세장비가 큰 사각 디프드로잉 케이스를 성형하는 것이 목적이다. 엄밀히 말하면, 성형 공정 후에 트리밍 공정이 필요치 않는 초기 블랭크를 설계하는 것이다.⁽²²⁾ 그러나, 단단계 디프드로잉 공정과 같은 판재성형에서 트리밍 공정을 배제하기란 쉬운 일이 아니다. 최종 제품의 형상은 판재성형중의 재료 물성치, 마찰계수, 공정시간, 블랭크 홀딩력 등과 같은 여러가지 변수의 작은 변화에도 영향을 받는다.

그러므로 단단계 디프드로잉 공정에서 원하는 최종 제품의 형상을 얻기 위해서는 트리밍 공정이 필요하다. 이런 부수적인 트리밍 공정으로 인하여 소재의 손실 및 생산원가의 증가가 초래되고 있다. 그러나 세장비가 큰 사각형 컵을 성형하기 위한 재료의 거동이 매우 복잡하므로 트리밍량을 최소화하는 초기 블랭크를 설계하기란 쉽지 않다. 최적 블랭크에 대한 대부분의 연구가 단공정에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 더욱 더 복잡한 성형 매커니즘을 가지는 단단계 디프드로잉 공정에 대해서는 연구가 부진한 실정이다.^(23~25)

본 절에서는 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하여 재료의 낭비를 최소화하기 위해 초기 블랭크를 수정·보완하였다. Fig. 15는 초기 블랭크 설계를 위한 순서도를 나타내고 있다. 초기 블랭크 설계 기준은 단단계 공정을 통해 발생하는 수치적 오차를 줄이기 위해 세 번째 디프드로잉 공정 후, 높이가 균일한 컵을 가지는 블랭크 형상을 채택하였다. 수치적 오차의 분포가 설계 기준 형상의 1%, 즉 0.32mm 이하일 때 만족한다고 설정하였다. 기존 블랭크로 세 번째 공정까지 성형해석 후, 설계 기준과 비교하여 그 편차만큼 기존 블랭크를 수정한다. 수정된 블랭크로 다시 세 번째 공정까지 디프드로잉 성형 후 설계 기준과 비교하여 만족할 때까지 블랭크 수정을 한다. Fig. 16에서는 초기 블랭크의 수정 절차를 보여주고 있다.

5.2 초기 블랭크 수정 전·후의 비교

유한요소 성형 해석을 통해 초기 블랭크 수정 전·후의 결과를 비교하였다. 성형 해석에 사용된 블랭크는 초기 블랭크 수정 전의 블랭크인 Fig. 8에서와 같은 형상의 블랭크(previous initial blank)이며, 개선된 블랭크는 Fig. 16에 도시되어 있는 최종 블랭크(final initial blank)이다. 이들 초기 블랭크와

개선된 블랭크를 사용하여 블랭크 개선 전·후의 각 단계별 소재의 변형 형상과 중간 공정인 1차 트리밍 공정에서의 소재 잉여량 및 이에 따라 제거되는 소재의 트리밍량을 비교하기 위해 앞 절에서 언급된 해석 조건을 동일하게 적용하였다.

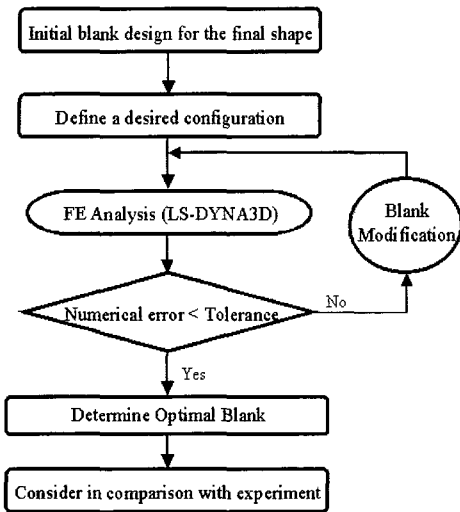


Fig. 15 Flow chart for initial blank modification

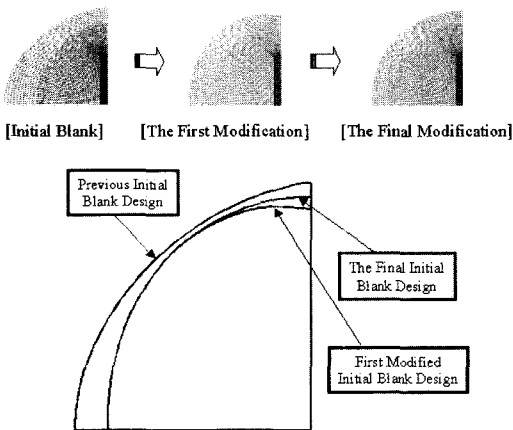


Fig. 16 Procedure of initial blank modification

개선된 블랭크를 적용한 유한요소 해석 결과로부터 각 단계별 유효 변형률 분포를 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서의 좌측 그림들은 블랭크 형상이 개선 되기 전·후의 각 단계별 변형 형상을 단축 방향의 단면에 대해서 비교하여 나타낸 것이며, 중간 그림들은 앞서 언급되었던 원래의 블랭크

를 적용하였을 경우의 단면 변형 형상을 나타낸 것이다. 그리고, 우측의 각 단계별 그림들은 블랭크의 형상을 수정한 결과를 이용하여 각 공정에 적용하였을 때 나타난 결과를 유효 응력 분포와 함께 나타낸 것이다.

각 단계에 있어서 블랭크 수정 전·후의 성형 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

개선되기 전의 초기 블랭크를 이용한 제1단계 디프드로잉 성형 해석 결과 최대 유효 응력은 약 345MPa 이었으나, 개선된 초기 블랭크를 적용한 결과 최대 유효 응력은 약 342Mpa로 거의 동일한 수준을 나타내고 있다. 그러나, 플랜지부에 발생하는 방향귀가 전체적으로 감소한 것을 알 수 있었으며, 또한 장축 방향보다는 단축 방향에서 상대적으로 많이 감소하는 것으로 나타났다.

제2단계 디프드로잉 유한요소 해석 결과로는 개선되기 전의 블랭크를 사용한 경우 최대 유효 응력은 약 387MPa로 나타났고, 개선된 블랭크를 적용한 경우 약 379MPa 이었다. 최대 유효 응력의 차이는 크지 않으나 플랜지부에 발생하는 방향귀가 장축 방향과 단축 방향에서 개선되기 전의 것보다 현저히 줄어들음을 알 수 있었다.

제3단계 공정의 경우 개선되기 전의 블랭크의 경우 최대 유효 응력이 약 409MPa로 나타나는 반면, 개선된 블랭크를 이용한 경우 약 314MPa로 나타나고 있다.

마지막으로, 제4단계 성형 공정에서 유한요소 성형 해석결과 개선되기 전의 블랭크의 경우 최대 유효 응력이 약 426MPa로 나타났지만, 본 연구에서 제시한 개선된 블랭크를 적용한 경우 최대 유효 변형률이 약 371MPa로 나타났다. 이는 제3단계에서부터 블랭크의 개선에 의한 효과, 즉 블랭크와 금형간의 마찰력 감소와 원활한 펀치 유입 및 소재의 유동, 가 나타나고 있음을 의미하며, 이에 따라 펀치의 유입을 방해하는 단축 방향에서의 플랜지부 방향귀 발생이 억제되어 플랜지부의 높이가 거의 균일하게 유지됨을 알 수 있었다.

블랭크 수정 후 방향귀의 감소로 인하여 블랭크와 금형간의 마찰력이 현저히 줄어들었고, 이로 인하여 각 단계별 유효 응력이 감소하였다. Fig. 18은 블랭크 수정 전·후의 초기 블랭크를 가지고 5단계 디프드로잉 성형 후 트리밍되는 양을 비교하여 보여주고 있다. 블랭크 수정 후, 트리밍량의 감소로 인하여 다단 디프드로잉 공정의 성형성이 향상되었으며, 버려지는 소재의 양을 최소화함으로써 생산비 또한 절감할 수 있다.

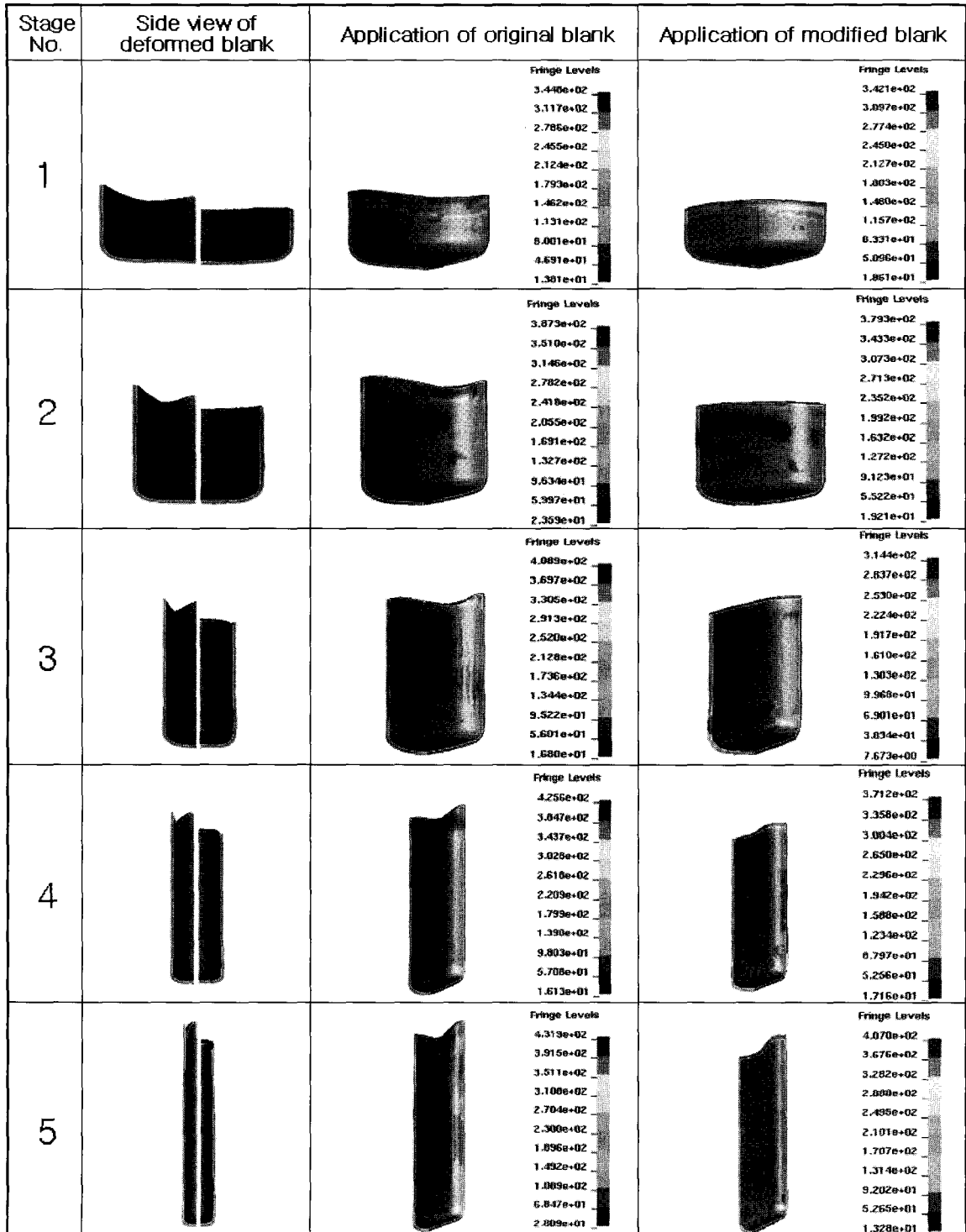


Fig. 18 Comparisons of the effective stress distribution and the deformed shape, before and after modification of the initial blank

Table 3 Height of the workpiece in the experiment and simulation before and after modification (unit:mm)

	Experiment values		Simulation values (before)		Simulation values (after)		Reduction (%)
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
1 st step	16.6	18.9	14.60	18.26	12.94	13.62	25.41
2 nd step	22.2	24.6	21.98	25.75	19.68	20.61	19.96
3 rd step	31.9	34.5	31.92	35.11	27.05	28.23	19.60
4 th step	40.4	43.1	39.41	43.26	33.54	35.51	17.91
5 th step	47.3	52.0	43.61	47.92	37.83	39.74	20.58

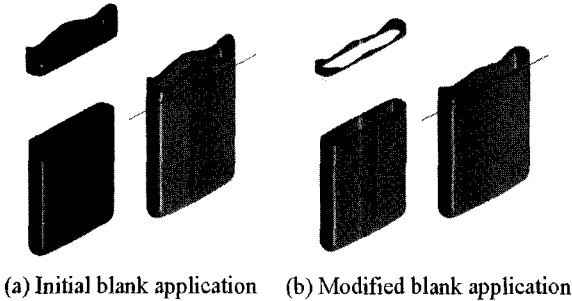


Fig. 18 Trimmed amount after the fifth deep drawing forming, before and after modification of the initial blank

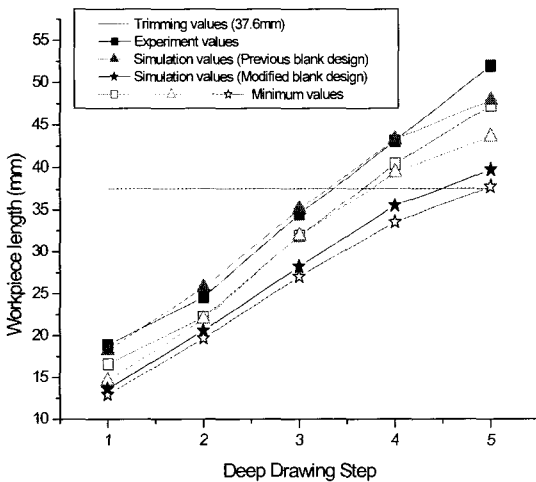


Fig. 19 Height distribution after the fifth deep drawing forming, before and after modification of the initial blank

6. 초기 블랭크 개선 결과 검토 및 고찰

앞 절에서는 폭 4.95mm 직사각형 케이스의 다단 디프드로잉에 대한 유한요소 해석과 실험을 통한 각 단계별로 변형된 형상과 높이에 대해 비교하였다.

Fig. 19와 Table 3에서 성형 실험과 수정 전·후의 초기 블랭크를 이용해 성형한 각 단계별 높이를 나타내었다. 그 결과 허용 가능한 오차를 보여주고 있으며, 5단계에서 수치적 해석과 실험사이에 약간의 차이를 보이고 있지만, 전체 각 단계별 공정에서는 만족할 만한 결과를 보여주고 있다.

또한, 트리밍 공정 후 버려지는 소재의 낭비를 최소화하기 위해서 초기 블랭크를 수정·보완하였다. 본 연구에서는 3단계 디프드로잉 성형 공정 후 균일한 높이를 가지는 사각 케이스를 기준으로 초기 블랭크를 수정·개선하였다.

개선된 초기 블랭크를 사용하여 유한요소 해석을 수행한 결과로는 플랜지부의 불필요한 방향귀의 발생 감소로 인해 각 단계에서의 블랭크와 금형사이의 마찰력이 감소함에 의해 성형성이 향상되어 보다 건전한 최종 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

만약 초기 블랭크를 최적화하기 위한 노력이 실험을 통해서 이루어진다면, 시행착오를 통하여 많은 인력의 낭비뿐만 아니라 시간적 손실도 막대할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 실험적 경험에 앞서 세장비가 큰 직사각 케이스의 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정에 대하여 5단계까지 수정된 블랭크를 가지고 유한요소 해석을 수행하였다. 그 결과 블랭크 수정 후 평균적으로 방향귀가 20.69% 감소하였으며, 이는 소재의 실수율이 증가함을 의미한다. 즉, 재료의 실수율 증가로 인해 재료비의

감소를 이끌 수 있으며 이는 생산성 및 경제성에 유효한 요소로 작용할 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 이동통신 단말기의 전원 공급용으로 사용되는 리튬 이온 2차 전지 사각 케이스인 폭 4.95mm 모델의 성형을 위한 다단 디프트로잉 성형 공정에 대한 초기 블랭크 설계 및 유한요소 해석을 수행하여 그 결과를 비교·검토하였다.

또한, 폭 5.95mm에서 폭 4.95mm로 사각 케이스의 소형화가 진전됨에 따라 성형 해석 과정이 더욱 복잡해질 것이라는 것을 예측할 수 있으나, 소재와 금형간의 균일 접촉 유도 및 저부성형 등의 방법을 적용하여 적절한 해석 결과를 유추할 수 있을 것이다.

본 연구에서의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 폭이 5.95mm에서 4.95mm로 좁아진 사각 케이스의 초기 블랭크 설계가 수행되었다. 수정된 초기 블랭크는 폭 5.95mm 모델에 비해 장축 방향과 단축 방향에 있어서 호의 반경 수정 비율이 다르게 설계되었다. 이러한 모델 변경 시에 있어서 초기 블랭크의 수정 및 설계는 좁아진 폭에 대한 소재의 변형 및 유동을 원활히 하고, 펀치 하중을 적절히 제어할 수 있게 된다.

(2) 앞서 설계된 초기 블랭크를 이용하여 제5단계까지의 유한요소 해석을 수행하였으며, 성형 해석 결과는 제4단계까지에 대해서만 언급하였다. 초기 블랭크를 이용한 유한요소 성형해석 결과 유효한 수치적 결과와 건전한 변형 형상을 얻을 수 있었다. 이는 설계된 초기 블랭크가 적절하게 설계되었음을 의미한다.

(3) 각 단계에서의 입사각은 블랭킹 공정과 1차 드로잉 공정인 제1단계에서는 고려되지 않았다. 그러나, 제2단계와 제3단계는 약 18도 정도에서 장축 방향의 입사각과 단축 방향의 입사각이 각각 금형 설계에 반영되었다. 제4단계에서는 장축 방향과 단축 방향에 있어서 입사각이 장축 방향은 약 16도, 단축 방향은 약 8도에서 설계 변수로 반영되었다.

(4) 디프트로잉 성형시 발생하는 플랜지부의 방향귀 발생을 억제하고 트리밍되는 소재의 양을 줄이기 위해 초기 블랭크의 수치적 방법을 통한 블랭크 수정이 수행되었으며, 각각의 블랭크로 성형 해석 전·후의 결과를 비교함으로써 블랭크 수정으로 인한 성형성 향상뿐만 아니라 변형 형상의 건전성 확보 및 소재의 낭비를 줄임으로써 생산비

절감효과도 할 수 있음을 알 수 있었다

(5) 실험 결과와 비교하여 유한요소 해석이 타당함을 입증하였다. 실험과 해석을 통해 얻어진 형상과 높이를 각 단계별로 비교하였으며, 수치적 해석 결과가 실험 결과와 거의 유사함을 알 수 있었다.

세장비가 큰 직사각 케이스는 리튬 이온 2차 전지 케이스와 반도체 케이스 등으로 전자 부품에 널리 이용되고 있다. 더욱이 멀티기능형 휴대용 전자 제품의 초경량 컴팩트화 경향에 따라 더욱 더 폭이 좁은 사각드로잉 케이스이 개발 요구가 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 세장비가 큰 직사각 케이스에 대한 다단 디프트로잉 공정을 해석적·실험적으로 접근하고자 하였다. 그 결과 폭 4.95mm의 직사각 케이스에 대해 성형 해석 수행하였으며, 각 단계별 실험결과와 유한요소 해석 결과가 매우 유사함을 알 수 있었다. 그러나, 보다 정확한 다단 디프트로잉 공정에서의 직사각 케이스의 성형해석을 수행하기 위해 소재의 이방성 효과가 추후 연구에서는 고려되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 부산광역시의 Brain Busan 21 사업과 한국과학기술재단의 해외 Post-Doc. 지원 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. Geiger, F. Vollertsen and R. Kals., 1996, "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts", *Annals of the CIRP*, Vol. 45, pp. 272 ~ 282.
- (2) K. Sven, A. M. Ahmetoglu, L. G. Kinzel and T. Altan, 2000, "Numerical and Experimental Investigation of Redrawing of Sheet Metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 17 ~ 24.
- (3) L. F. Menezes and C. Teodosiu., 2000, "Three-Dimensional Numerical Simulation of the Deep Drawing Process Using Solid Finite Element", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 97, pp. 100 ~ 106.
- (4) 박철성, 구태완, 강범수., 2002, "세장비가 큰 다 단계 초정밀 사각형 디프트로잉 성형공정해석," 한국소성가공학회 추계학술대회, pp. 171 ~

- 174.
- (5) 박철성, 구태완, 강범수., 2003, "세장비가 큰 다단계 초정밀 디프드로잉을 위한 블랭크 설계," 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 258~261.
- (6) 윤정환, 유동진, 양동열, 김석관., 1994, "축대칭 다단계 디프드로잉 공정의 유한요소 해석," 한국소성가공학회지, 제 3 권, 제 4 호, pp. 468~481.
- (7) 이승렬, 금영탁, 정관수, 박진무., 1995, "원통컵 디프드로잉 공정의 귀발생 예측," 한국소성가공학회지, 제 4 권, 제 3 호, pp.222~232.
- (8) 김두환., "타원형 다단계 디프드로잉 용기의 최적 예비형상 설계에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 4 호, pp.356~363.
- (9) M. A. Hassan, N. Takekura and K. Yamaguchi., 2002, "Friction Aided Deep Drawing of Sheet Metals Using Polyurethane Ring and Auxiliary Metal Punch. Part I: Experimental Observations on the Deep Drawing of Aluminum Thin Sheets and Foils", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 625~631.
- (10) C. H. Toh and S. Kobayashi., 1985, "Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 25, pp. 15~32.
- (11) D. K. Min, B. Y. Jeon, H. J. Kim and N. S. Kim., 1995, "A Study on Process Improvements of Multi-Stage Deep Drawing by the Finite Element Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 54, pp. 230~238.
- (12) N. Kishor and D. R. Kumar., 2002, "Optimization of Initial Blank Shape to Minimize Earing in Deep Drawing using Finite Element Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130~131, pp. 20~30.
- (13) 김세호, 김승호, 허훈., 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형컵 성형공정의 다단계 해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 313~319.
- (14) 김세호, 김승호, 허훈., 2001, "유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 금형설계-Part I 금형설계," 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 2 호, pp. 144~150.
- (15) 김홍주, 구태완, 강범수., 2001, "세장비가 큰 다단계 사각형 디프드로잉 성형공정해석 및 금형 설계," 한국소성가공학회지, 제10권, 제6호, pp. 456~464.
- (16) T. W. Ku, B. K. Ha, W. J. Song, B. S. Kang and S. M. Hwang., 2002, "Finite Element Analysis of Multi-Stage Deep Drawing Process for High Precision Rectangular Case with Extreme Aspect Ratio", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130~131, pp. 128~134.
- (17) 구태완, 강범수., "소형 부품의 사각 컵 드로잉 성형해석에 관한 실험적 연구," 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 6 호, pp. 471~477.
- (18) K. Mori, Y. Abe and O. Ebihara., 2003, "Prevention of Shock Lines in Multi-Stage Sheet Metal Forming", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1279~1285.
- (19) LS-DYNA 3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, 1997.
- (20) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan., Metal Forming and The Finite Element Method, Oxford University Press, NY, USA, 1989.
- (21) D. P. Flanagan and T. Belytschko., 1981, "A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control", International Journal of Numerical Method in Engineering, Vol. 17, pp. 679~706.
- (22) T. W. Ku, H. J. Lim, H. H. Choi, S. M. Hwang and B. S. Kang., 2001, "Implementation of Backward Tracing Scheme of the FEM to Blank Design in Sheet Metal Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 90~97.
- (23) S. D. Kim, M. H. Park, S. J. Kim and D. G. Seo., 1998, "Blank design and formability for non-circular deep drawing processes by the finite element method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 75, pp. 94~99.
- (24) W. B. Bae, B. W. Heo, H. Y. Kim and Y. S. Lee., 1998, "Experimental determination of the optimum blank shape in rectangular cup drawing", The Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 12.
- (25) H. B. Shim, K. C. Son and K. H. Kim., 2000, "Optimum blank shape design by sensitivity analysis", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 104, pp. 191~199.