

세장비가 큰 다단계 사각형 디프드로잉 성형공정해석 및 금형설계

김홍주* · 구태완 · 강범수**

(2001년 3월 16일 접수)

FE Analysis and Die Design of The Multi-stage Rectangular Deep Drawing Process with the Large Aspect Ratio

H. J. Kim, T. W. Ku and B. S. Kang

Abstract

Deep drawing and ironing are the major process today in manufacturing of aluminum alloy battery case used in cellular phone. Most of these processes require multi-stage ironing following the deep drawing and redrawing processes. The practical aspects of this technology are well known and gained through extensive experiment and production know-how. However, the fundamental aspects of these processes are relatively less known. Thus, it is expected that process analysis using FEM techniques would provide additional detailed information that could be utilized to improve the process condition. This paper illustrates the application of process modeling to deep drawing and redrawing operations. To verify the simulation results, the experimental investigations were also carried out on a real industrial product. The numerical analysis by FEM shows good agreement with the experimental results in view of the deformation shape of the product. A commercially available finite element code LS-DYNA3D was used to simulate deep drawing and redrawing operations.

Key Words : Battery Case, Rectangular Deep Drawing, Redrawing, FE Analysis

1. 서 론

금속성형방법 중의 하나인 소성가공은 초기소재에서 재료의 제거 없이 소성변형을 통해 형상과 소재의 성질을 변화시키는 일련의 작업으로 소성가공 중에 소재의 기계적 성질이 향상된다. 그리고, 이러한 소성가공은 정

형이나 정형에 가까운 제품을 만들 수 있고 표면 정밀도와 기계적 성질이 향상되며 재료와 에너지를 절약할 수 있다는 장점이 있다.⁽¹⁾ 최근에 생산되고 있는 전자제품들은 초소형화 되어 가는 추세에 있으며 동시에 경량화, 슬림(slim)화 및 대용량 고기능화에의 요구가 급증하고 있는 실정이다. 이에 따라 전자제품 내부에 장착되는 전

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 부산대학교 항공우주공학과

자 부품 및 기타 구성부품들도 초소형, 초정밀화 되어가고 있다⁽²⁾.

국내에서는 대부분의 프레스 성형공정 설계가 숙련자의 경험적 지침 및 직관, 실험에 의해 수행되고 있으므로 다단계의 성형공정을 거쳐 생산되는 복잡한 형상의 제품을 개발하는 경우 공정동안 소재가 받는 여러 형태의 변형으로 인한 시행착오로 시간소비 및 단가상승을 초래한다. 따라서 실제 금형을 제작하여 시험을 행하기 이전에 전 공정에 걸친 소재의 변형양상과 결합생성의 여부 등을 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 등에 의해 미리 예측하는 것이 필요하다^(3,4).

Hora⁽⁵⁾ 등은 MARC를 활용하여 드로잉이 지배적인 복잡한 형상의 자동차 패넬을 해석하여 실험과 비교하였고, Honecker와 Mattiasson⁽⁶⁾은 ABAQUS와 LS-DYNA3D를 사용하여 반구형 펀치 디프드로잉을 해석하여 그 결과를 서로 비교하는 등 이들 패키지에 의한 연구가 점차 증가하고 있는 추세이다. 본 논문에서는 29.55×5.95×63.4mm(가로×세로×높이)모델의 휴대폰용 리튬이온 배터리 케이스의 성형공정에 대하여 범용 외연적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 트리밍 이전 단계인 제4차 디프드로잉 공정까지 해석하고 그 결과를 실험과 비교·분석하여 향후 다단계 사각 디프드로잉 공정의 적용에 대한 신뢰성 확보를 도모하고자 하였다.

2.1 성형공정

본 논문에서 적용된 배터리 케이스의 성형 공정은 Fig. 1에서 나타나는 바와 같이 하나의 다이와 펀치에서 연속적으로 작업할 수 있도록 여러 개의 다이와 펀치를 갖추어 작업하는 순층식 가공(progressive forming) 방식으로 성형된다.

본 연구에서 수행하는 성형 공정에 있어서 배터리 케이스의 성형 가공 시의 가장 큰 특징 중의 하나는 성형 가공 시 교축가공에 의해 그 최종 형상이 성형된다는 점이다. 이 교축가공 중에 공정 설계 등의 오차가 발생하게 되면 최종 부품에 표면 크랙(crack)등이 유발되며, 이는 최종부품 조립 후 휴대폰 및 통신기기 등의 운용 중에 외부 충격에 의한 폭발의 위험이 있기 때문에 교축가공 시 조건이 매우 까다로운 성형 공정을 내포하고 있다. 휴대폰용 배터리 케이스 성형 공정에서 1차 공정에서는 스트립(strip)으로부터 블랭킹과 벽의 두께변화가 거의 없는 싱킹(sinking)작업으로 수행되며, 블랭킹 펀치가 드로잉 작업에서 스트리퍼(stripper)와 같은 역할을 하게 된다.

2차 디프드로잉 공정의 경우 장축(major axis)방향의 측벽의 아이어닝(ironing)을 동반한 드로잉 작업으로 설계되었다. 2차 드로잉 공정에서부터는 교축가공이 이루어지기 때문에 펀치와 소재의 접촉 순서 및 방향과 거리가 정해져야 하며 이는 금형 설계에 있어서 입사각(intake angle)을 사용함에 의해 문제 해결을 꾀하였다.

2. 배터리 케이스의 시제품 제작

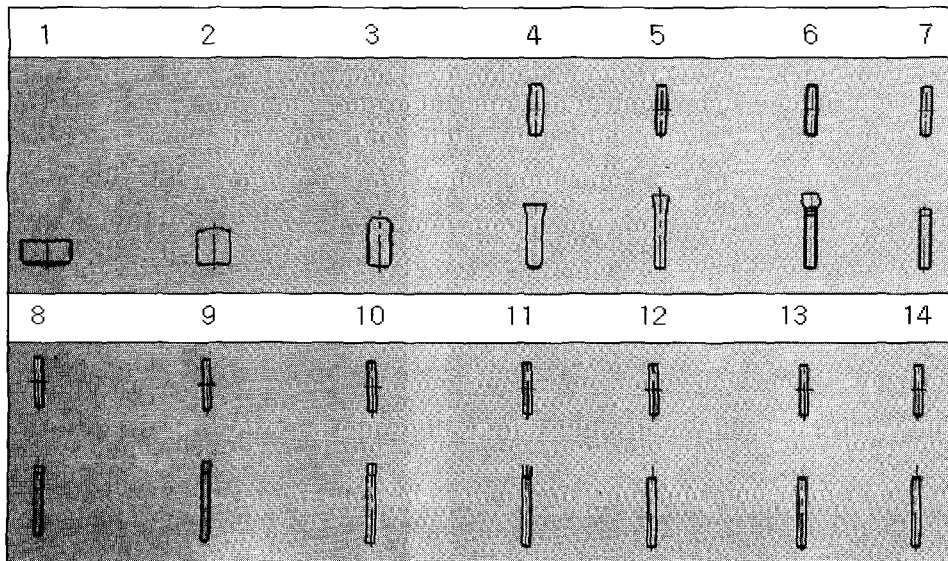


Fig. 1 The layout of the battery case forming process

3차 공정은 단축(minor axis) 방향의 아이어닝을 동반한 드로잉 작업으로 설계되었으며, 4차 공정의 경우 최종 성형제품의 밑면 형상을 가지는 테이퍼(taper)진 펀치 형상으로 성형함으로써 최종형상까지 성형할 때 가능한 재료를 무리하지 않으면서 가공경화를 방지하는 데 주의하면서 되도록 드로잉 한계의 가까이 드로잉 가공을 하여 공정을 줄이기 위한 목적으로 설계되었다.

5~6차 공정에서 최종성형 제품의 형상 구현과 아이어닝을 통한 두께의 균일화를 하고 7차 공정에서 플랜지부의 트리밍(trimming)을 통하여 30.96×7.9×54mm(가로×세로×높이)의 중간단계 제품을 성형하게 된다. 9차~14차 공정을 통해 다시 아이어닝을 동반한 드로잉과 장축과 단축 방향의 트리밍을 통해 29.55×5.95×63.4mm의 최종 성형제품의 성형공정을 마무리하게 된다. 이 후 초음파를 이용한 후처리를 통해 최종제품이 완성된다.

각 공정은 1차 공정을 제외하고 나머지 공정 모두 스트리퍼가 없는 공정으로 다이로부터 완성된 블랭크를 이송다이(transfer die)로 위치시키기 위한 녹아웃(knock-out)에 의해 드로잉 시 발생하는 밑면의 두께변화를 감소시키는 것은 물론 밑면이 다소의 압축력을 받으면서 블랭크의 측면 성형성의 향상을 유도한다.

2.2 시제품 제작

2.2.1 금형 제작

본 논문에서 시제품 제작을 위해 사용한 프레스는 Fig. 2에 나타나있는 일본 아사히-세이키사(Asahi-Seiki 社)의 TP-65D모델이며, Table 1은 그 사양을 보여준다. 앞서 설명된 공정순서를 토대로 제작한 금형을 순차이송 프레스에 장착한 형상을 Fig. 3에서 보여주고 있다.

Table 1 Transfer Press Specification

Rated capacity (ton)	65
Recommended capacity(ton)	45
Standard ram stroke(mm)	177.8
Max. ram stroke(mm)	203.2
Shut height(mm)	508.0
Main motor(kw)	15.0(4P)
Operating speed(spm)	25-100

배터리 케이스 성형 공정은 주로 블랭킹, 싱킹, 아이어닝-드로잉, 트리밍의 네 공정이 주를 이루며 총 16공정으로 최종 성형제품이 완성된다. 각 공정에서 사용되는 하부 다이는 스트레스 링(stress ring)과 고강도, 조정밀 형상 유지를 위해 분말하이스 금형을 제작하여 조립한 후 시제품 제작에 사용하였으며, 디프드로잉을 위한

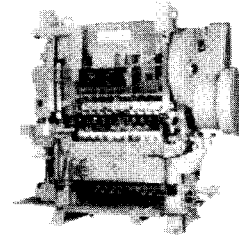


Fig. 2 Transfer Press : Asahi-Seiki TP-65D

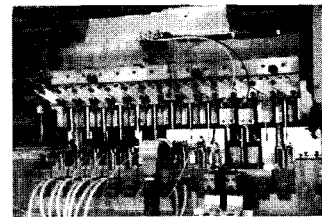


Fig. 3 Punch and Die shape

펀치는 세장비가 매우 큰 로드(rod) 형상을 나타내기 때문에 좌굴(buckling)과 비틀림(torsion)등을 방지하기 위하여 티타늄(titanium) 합금 재료를 사용하여 제작하였다.

최종 부품의 형상이 복잡하고 세장비가 큰 다단계 디프드로잉 공정을 수행하기 위한 초기 금형 설계에 있어서, 초기 블랭킹 공정에서는 2개의 호를 가지는 타원형의 펀치와 다이 프로파일(profile) 적용하였으며, 제1차 디프드로잉 공정 이후의 펀치와 다이의 프로파일은 소재의 균일한 변형을 유도하기 위해 3개의 호를 가지는 타원형으로 설계하였다. 공정이 진행될수록 이들 펀치와 다이는 직사각형에 가까운 형상을 가지도록 설계하였으며, 이를 토대로 금형제작에 적용하였다.

2.2.2 배터리 케이스 시제품 제작

휴대폰용 배터리 케이스 시제품 제작을 위해 본 논문에서는 순차이송 금형을 시제작하여, 최종 부품의 치수가 29.55× 5.95× 63.4mm 이고, 세장비가 약 10.6인 시제품을 제작하였다. Fig. 4는 각 공정별로 성형된 제품의 형상을 나타내고 있다. 최종 성형제품은 Fig. 5에 나타내었다. 윤활제는 드로잉 공정 내에서 소재가 받는 면압에 따른 윤활제와 금속의 탄화로 인해 나타날 수 있는 스크래치(scratch), 충격선(shock wave) 및 크랙(crack) 등의 결함을 줄이고, 열전달 특성이 매우 좋아 냉각 효과가 뛰어난 드로잉 유(drawing oil)를 사용하였다.

Fig. 6은 성형 중 발생한 불량 예를 보여 준다. Fig. 6

과 같은 표면 크랙과 충격선 등은 소재의 거대 변형으로 인한 재료적 성질의 변화와 디프드로잉 공정 동안 소재가 받는 면압에 의해 주로 발생하게 된다⁽⁷⁾. 성형 후 최종 성형제품에 남아 있는 오염물질을 제거하기 위한 후처리 공정으로 초음파를 성형 제품에 주사하는 방법을 이용하였다. 또한 표면 거칠기를 나타내는 표면조도에 따라 배터리 내부의 전지 극판 압력에 의한 영향에 의해 생기는 배터리의 파손(폭발에 의한 파손)을 유발할 수 있다. 따라서 앞으로 표면조도 향상을 위한 기술 개발이 요구되고 있다.

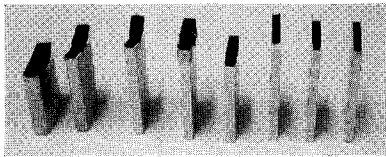


Fig. 4 The products from each step for the battery case

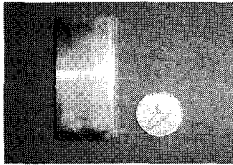


Fig. 5 The final product of the battery case

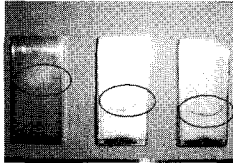


Fig. 6 Crack failure on the surface

3. 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

휴대폰용 배터리 케이스의 제품 형상이 Fig. 7에 도식적으로 나타나있다. 초정밀 배터리 케이스의 최종 형상은 각 측벽의 두께가 서로 다른 특징을 가지고 있으며, 성형 시 소재흐름 및 가공경화에 대한 예측이 어려워 금형의 설계가 매우 어렵다. 본 논문에서 사용된 소재는 알루미늄 합금(Al. Alloy) 3003-H16 판재(0.8mm)를 사용하였으며, Table 2에 소재의 물성치를 간단하게 나타내었다. 유한요소해석은 블랭크에서 최종제품까지의 형상구현을 위해 중요한 초기 4단계에 대하여 수행되었다.

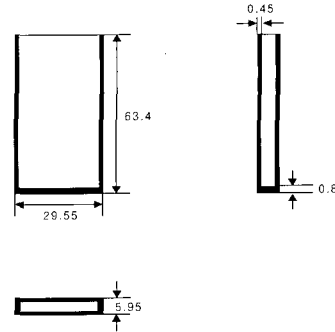


Fig. 7 The final product geometry of a rectangular battery case(AR≒10.6, unit : mm)

Table 2 Material parameters

	Al. Alloy 3003-H16
Density(Mg/m ³)	2.73
Young's modulus(GPa)	70
Poisson's ratio	0.33
Yield strength(MPa)	187
Initial strain	0
Strain hardening	Perfect plasticity
Elongation(%)	5~14

1차 공정을 위한 다이 코너 반경은 7.2mm로 설계하였으며, 녹아웃(Nock-out) 장치에 의해 밑면의 두께변화를 방지하였다. 2차 이후의 재드로잉 공정에서는 다이 코너 반경이 아닌 18°의 경사각에 소재와 다이 균일 접촉을 유도하기 위한 다이 곡률 수정으로 설계되었다.

Fig. 8에는 제1차 드로잉 공정에서 제4차 공정까지의 펀치와 다이의 프로파일 나타내었다. 초기 블랭크 및 단계별 3차원 금형과 유한요소해석을 위한 모델링 형상을 Fig. 9에 도시하였다. 앞서 2.1절에서 언급된 바와 같이 초기 블랭킹 공정을 제외한 각 공정에서 펀치와 다이의 프로파일은 3개의 원호의 조합으로 이루어져 있으며, 또한 균일 접촉을 위한 3차원 형상 구현이 어려워, 본 논문에서는 범용 3차원 형상 모델링 프로그램인 Pro Engineer 2000i를 이용하여 형상구현 후 전/후처리 프로그램인 FEMB를 이용하여 요소와 노드를 생성하였다. 펀치, 다이, 녹아웃에 대한 유한요소 모델은 모두 강체의 4-절점 사각 쉘(shell) 요소(element)를 사용하였다.

Table 3은 각 공정 단계에서의 펀치, 다이, 녹아웃에 대한 요소와 절점의 수를 나타낸다. 블랭크 모델링에서는 과도한 변형과 뒤틀림에 대해서도 정확한 해석이 가능하도록 하기 위해서 지감적분 Belytschko-Wong-

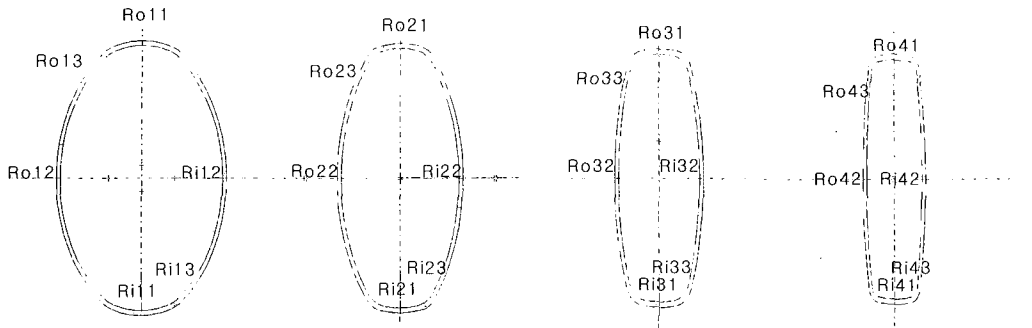


Fig. 8 The profile of the punch and die from the first to the fourth deep drawing processes

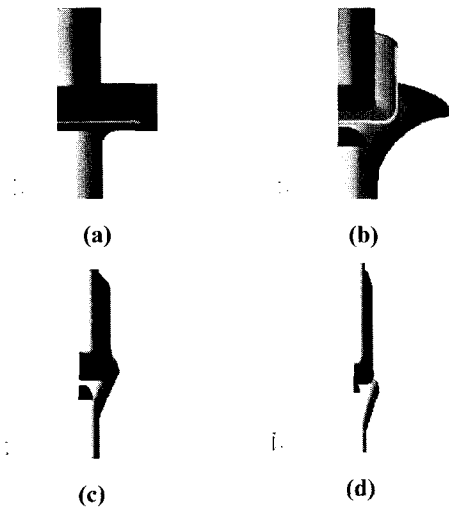


Fig. 9 FE Model for each drawing step
 (a) The first drawing step
 (b) The second drawing step
 (c) The third drawing step
 (d) The fourth drawing step

Chiang 쉘 요소를 사용하였으며, 이러한 요소들이 가지는 축소적분의 형태는 Flanagan 등이 제안한 무에너지 제어기법을 포함하고 있다^(8,9). 최종 제품의 크기가 29.55 × 5.95 × 63.4mm로 1차 드로잉에서의 단면과 최종 제품의 단면의 차이 때문에 최종제품의 해석을 고려하여 중심부의 요소를 세밀하게 하였다. 재드로잉 시 블랭크는 이전 드로잉에서의 형상 및 변형응력, 변형률의 값을 유지하며 공정해석에 적용되어진다. 금형 및 소재의 유한요소 모델은 대칭 조건 하에서 1/4모델을 적용하였으며, 녹아웃 장치에 대하여 하중조건이 적용되었다. Fig. 10은 해석에 적용된 블랭크의 경계조건을 도식적으로 보여주고 있다.

각 부분별 마찰조건은 펀치와 블랭크의 접촉면의 경

우 쿨롬(Coulomb) 마찰 계수를 0.1로 적용하였으며, 그 외의 다이와 블랭크 등의 접촉면은 0.05를 적용하였다⁽¹⁰⁾.

Table 3 The Simulation parameter of each step

		1st	2nd	3rd	4th
Blank	No. of elements	2420	2420	2420	2420
	No. of nodes	5002	5002	5002	5002
Blank Holder	No. of elements	15	-	-	-
	No. of nodes	31	-	-	-
Punch	No. of elements	160	128	170	100
	No. of nodes	170	224	269	118
Die	No. of elements	105	180	170	153
	No. of nodes	127	268	255	235
Knock-Out	No. of elements	16	28	48	8
	No. of nodes	17	30	51	14

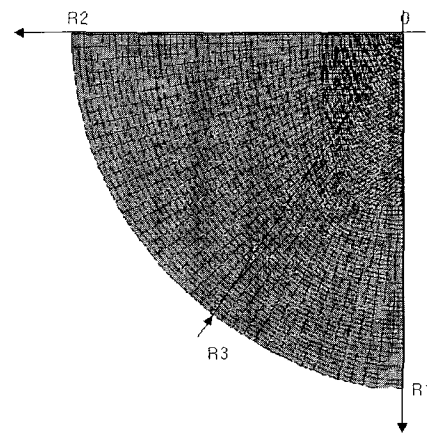


Fig. 10 The blank model and boundary conditions

3.2 해석 결과

3.2.1 1차 드로잉 공정의 해석 결과

Fig. 11(a)은 성형해석 결과 나타난 형상을, Fig. 11(b)는 시제품의 형상을 나타낸다.

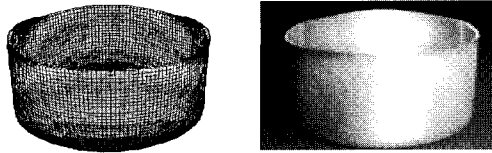


Fig. 11 The result after the first drawing
(a) Simulation result
(b) Experimental result

Fig. 12(a)에서 제1차 디프로잉 해석 결과 최대 유효 변형률은 0.9102로 나타나며, 성형 시 다이의 곡률 반경이 크게 변화되는 위치, 즉 초기 블랭크의 설계시 각형의 모서리에 해당되는 부분에서 소재의 유입이 집중되어 나타나고 있다. 또한 성형 시 측면의 끝단으로 갈수록 유입되는 소재의 양이 증가하여 초기 블랭크두께에 비해 다소 두께가 증가하고 있다. 밑면의 경우 편차력에 의해 대략 5% 정도의 두께가 감소를 나타낸다.

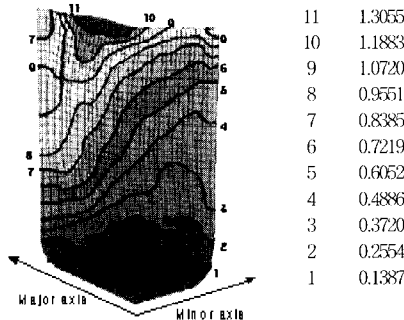
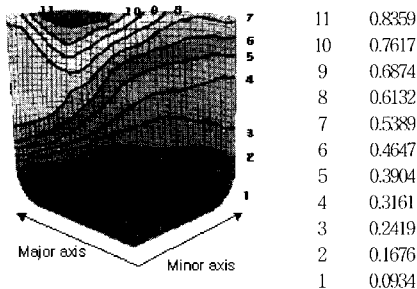


Fig. 12 The effective stress distributions of the first and the second deep drawing processes
(a) the first deep drawing
(b) the second deep drawing

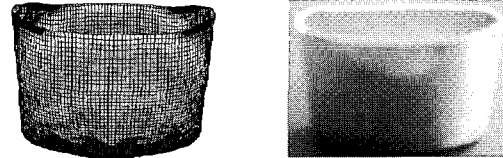


Fig. 13 The result after the second drawing
(a) Simulation result
(b) Experimental result

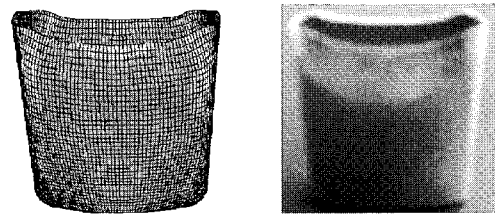


Fig. 14 The result after the third drawing
(a) Simulation result
(b) Experimental result

3.2.2 2차 드로잉 공정의 해석 결과

2차 공정의 경우 아이어닝-드로잉 공정으로 장축 방향 측면의 아이어닝이 수행되었다. Figure 13(a)은 성형 해석 결과 나타난 형상을, Fig. 13(b)은 시제품을 나타낸다. Fig. 12(b)에서 최대 유효 변형률은 0.5791로 나타나며, 장축 면에서 아이어닝으로 인해 큰 유효변형률 분포를 나타낸다.

3.2.3 3차 드로잉 공정의 해석 결과

3차 공정의 경우 단축 방향 측면의 아이어닝이 수행되어 소재의 두께 균일화를 수행하였다. Fig. 14(a)는 성형 해석 결과 나타난 형상을, Fig. 14(b)는 시제품을 나타낸다. Fig. 15(a)에서 최대 유효 변형률은 0.5859로 나타나며, 펀치 코너부위에서의 두께 감소가 두드러짐을 알 수 있다. 단축방향의 아이어닝을 통한 성형제품의 두께 균일화를 수행하였다. 장축 방향의 유효변형률의 경우 다소 진동하며 불안정한 값을 나타내고 있다.

3.2.4 4차 드로잉 공정의 해석 결과

4차 공정 역시 아이어닝-드로잉 공정으로 이 후 공정에서 최종 제품을 성형하기 위한 블랭크의 체적을 확보하고 다이 마찰력의 증대 등 불량률 야기할 수 있는 여유량을 절단하기 위해 플랜지(flange)를 남기게 된다.

Fig. 16(a)은 성형해석 결과 나타난 형상을, Fig. 16(b)

은 시제품을 나타낸다. 4차 공정의 경우 최종 성형제품의 밑면 형상을 가지는 테이퍼 펀치 형상으로 성형함으로써 최종형상까지 성형할 때 가능한 재료를 무리하지 않으면서 가공경화를 방지하는 데 주의하면서 되도록 드로잉 한계의 가까이 드로잉 가공을 하여 공정을 줄이기 위한 목적으로 설계되었다. Figure 15(b)에서 최대 유효 변형률은 0.8847로 장축 방향의 모서리 부위에서 나타나고 있다. 그러나 단축 방향의 모서리의 경우 오히려 두께가 두꺼워 지는 양상을 나타내고 있으며, 또한 펀치의 테이퍼 부분에서 소재가 완전한 접촉을 하지 않는 현상이 나타났다. 이는 시제품 제작에서도 나타나고 있으며, 이를 보정하기 위한 펀치와 다이의 수정이 요구된다.

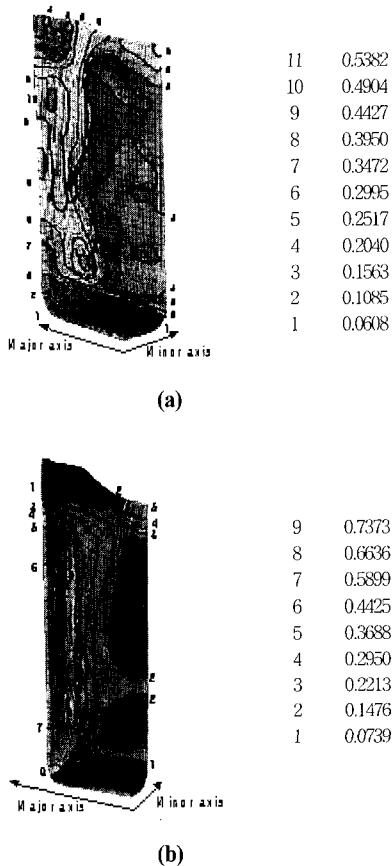


Fig. 15 The effective stress distributions of the third and the fourth deep drawing processes
(a) the third deep drawing
(b) the fourth deep drawing

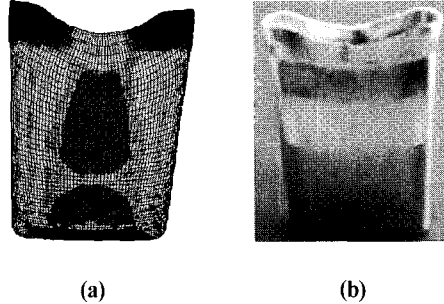


Fig. 16 The result after the fourth drawing
(a) Simulation result
(b) Experimental result

4. 시제품과 해석 결과의 비교

4.1 형상의 비교

휴대폰용 배터리 케이스의 시제품 제작과 유한요소해석의 각 단계별 형상에 대한 비교를 수행하였다. 측정 장비의 부재와 충분하지 못한 실험여건 상 전체적인 형상의 비교와 특정 위치에서의 높이 및 두께 비교를 통해 유한요소해석과 실험 결과를 간접적으로 비교하였다.

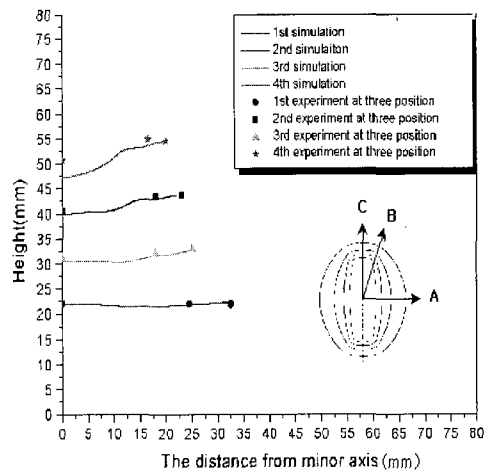


Fig. 17 The height distribution after each drawing

비교를 위한 시제품의 측정 위치는 Fig. 17의 오른쪽 공정 단계별 단면도에서의 단축 끝단(A), 모서리 부(B) 그리고 장축 끝단(C)의 세 곳이고, Fig. 14에서 실선으로 나타난 것이 해석에 의한 결과이다. 각 공정별 형상에 있어서 오차는 7%이하로 전체적인 신뢰성을 확보하였다. 오차의 경향에 있어서는 공정이 진행될수록 점점 커

지고 있는데 이것은 연속적인 성형공정 상에서 고려되어야 할 온도 상승에 따른 물성의 변화와 해석상에서 허용 접촉 범위에 따른 아이어닝 공정해석에서의 오차에 의해 유발된 것이다.

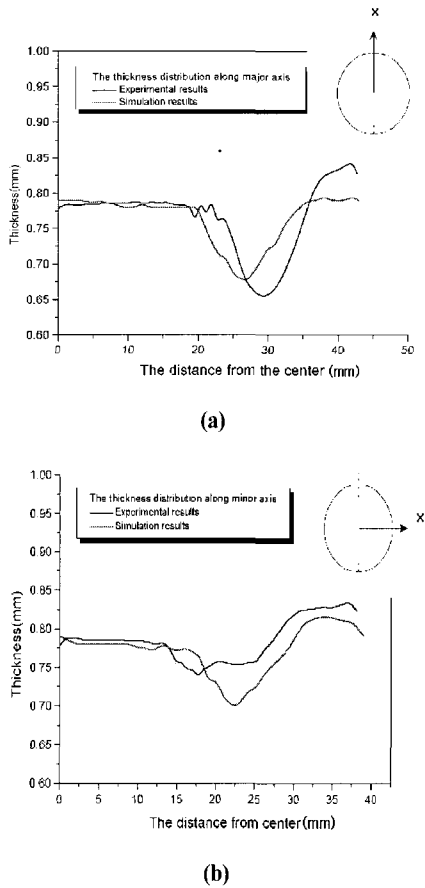


Fig. 18 The thickness distribution after the first deep drawing process (a) along major axis, (b) along minor axis

4.2 두께분포의 비교

1차 및 3차 디프드로잉 공정에 대하여 두께 분포를 비교하였다. 두께비교는 장축과 단축 방향의 두께를 성형 제품의 중심에 대하여 측정하였다. Figure 18은 1차 공정에 대한 두께 분포를 나타내며, Fig. 19는 3차 공정에 대한 두께 분포를 보여준다. 1차 공정에 대한 두께 분포의 경우 실험과 유사한 경향성을 나타내고 있다.

1차 공정에서의 두께 변화를 살펴보면 1차 드로잉비는 약 1.6정도이지만, 장·단축의 두께 차이가 발생하기 시작하는 공정이기 때문에 장축 방향(폭이 좁은 방향)으로 소재가 이동하게 되어 귀현상이 발생하고 있다. 이

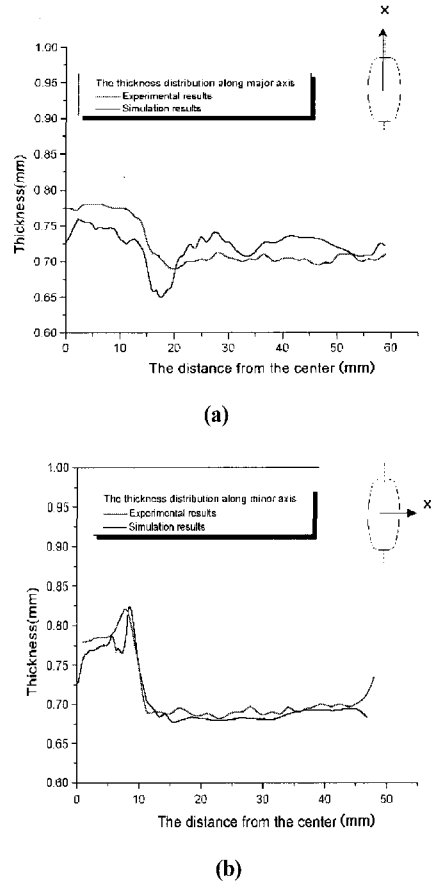


Fig. 19 The thickness distribution after the third deep drawing process (a) along major axis, (b) along minor axis

귀현상은 1차 공정이외에도 발생하고 있으며, 발생하는 부위는 나중에 트리밍 공정으로 제거되는 부위이기 때문에 편치의 유입을 방해하지 않는 한 중요한 요소로 취급하지는 않았다. 그리고, 두께의 변화가 장축 방향에서 크게 발생하고 있는데, 이는 드로잉 시에 바닥면의 코너부에서 급격한 두께 변화가 발생하고 있으며, 단축 방향보다 장축 방향에서 큰 두께 차이를 보이는 이유는 소재가 단축 방향에서 장축 방향으로 이동하지만 편치와 금형이 장축 방향에서 먼저 소재와 접촉이 일어나기 때문에 장축 방향의 바닥면 코너부의 두께가 급격한 변화를 나타낸다고 볼 수 있다.

그러나, 3차 공정에 대한 두께 분포의 경우 해석치가 장축 방향의 경우 크게 진동하고 있으며, 단축 방향의 경우에는 균일한 접촉이 이루어지지 않기 때문에 두께가 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 단순한 접촉 순서의

문제 뿐만아니라, 이전 공정에서의 최소 두께 부위에 대한 두께 보정이 재드로잉시 완전하게 되지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 전체적인 단축 방향의 두께 분포의 경우 실험과 유사한 경향성과 크기를 나타내고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 휴대폰용 배터리 케이스 성형을 위한 다단계 사각 드프트로잉 성형공정의 초기 네 단계의 공정에 대하여 시제품 제작과 유한요소해석을 수행하였다. 시제품 제작은 5.95×29.55×63.4mm 크기의 휴대폰용 배터리 케이스 성형 공정에 대하여 수행되었다. 초정밀 부품에 대한 아이어닝을 동반한 드로잉 공정에 대한 유한요소해석 시 기존의 큰 부품에 대한 해석 요소, 특히 접촉에 대한 허용정도의 보정이 반드시 요구된다. 본 논문에서는 1차 공정에 대해 시행착오법을 통해 해석 요소의 값을 결정하고 이 후 공정에 대하여 적용하였다. 시제품과의 형상비교와 1차 및 3차 공정에 대한 두께 분포를 비교하여 배터리 케이스 성형 공정에 대한 유한요소해석의 신뢰성을 확보하여, 향후 제품 개발 시 유한요소해석 적용 가능성을 제시하였다.

후 기

이 논문은 1999년도 부산대학교 연구지원 프로그램의 지원받아 수행된 연구이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, 1983, "Metal Forming : Fundamentals and Application", ASME series in Metal Processing.
- (2) T. Jimma and T. Adachi, 1993, "Recent Trends in

Precise-Working of Electronic Components", Advanced Technology of Plasticity.

- (3) 김세호, 김승호, 허 훈, 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형컵 성형공정의 다단계 해석", 한국소성가공학회지, 제9권 제3호, pp.313~319.
- (4) 김세호, 김승호, 허 훈, 2001, "유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각형 다단계 성형공정의 금형설계 - Part I. 금형설계", 한국소성가공학회지, 제10권 제2호, pp.144~150.
- (5) P. Hora, T. C. Vu, P. M. Wollrab and J. Reissner, 1987, "Simulation of the Forming Process for Irregularly Shaped Auto Body Panels", Advanced Technology of Plasticity, Proc. of 2nd ICTP, edited by K. Lange, Stuttgart, West Germany, Springer-Verlag, pp.633~640.
- (6) A. Honecker and K. Mattiasson, 1989, "Finite Element Procedures for 3D Sheet Forming Simulation", Proc. NUMIFORM '89, pp.457~463.
- (7) G.E. Dieter, 1989, "Mechanical Metallurgy 3rd edition", McGraw-Hill Book Co.
- (8) T. Belytschko, B.L. Wong and H.Y. Chiang, 1992, "Advanced in One-point Quadrature Shell Elements", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 96, pp.93~107.
- (9) D.P. Flanagan and T. Belytschko, 1981, "A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control", Int. J. of Numer. Meth. Eng., Vol. 17, pp.679~706.
- (10) S.H. Zhang, L.H. Lang, D.C. Kang, J. Danckert and K.B. Nielsen, 2000, "Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Parabolic Workpieces - Experiments and Numerical Simulation", Int. J. of Mach. Tools and Manufact. Vol. 40, pp.1479~1492.