직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정의 실험적 연구

구태완¹ · 박중원² · 허성찬² · 강범수[#]

Experimental Study on Non-Axisymmetric Rectangular Cup using Multi-Stage Deep Drawing Process

T. W. Ku, J. W. Park, S. C. Heo, B. S. Kang

(Received March 26, 2010 / Revised June 7, 2010 / Accepted June 8, 2010)

Abstract

For multi-stage deep drawing process including ironing operation and biaxial forming in this study, tool developments are achieved, and the developed tool sets are applied to experimental investigations. In process and tool designs, a contact condition between intermediate blank and lower die is considered as the sequential one. In this study, the material used is cold-rolled thin sheet (SPCE) with the initial thickness of 0.4mm. From the experimental approaches, several failures such as tearing, localized thickening and thinning, are observed. To solve these failures, the contact surface on the lower die is modified. As the experimental results by applying the modified lower die, it is investigated that the failures are not occurred, and the excessive deformation behavior due to the thinning and thickening effects are decreased. Furthermore, the thickness distributions on the major axis and the minor axis of each intermediate blank are investigated to be already satisfied the target (ironing) thickness, respectively. By this systematic approach, it is confirmed that the experimental results show good agreements with the designed and required configuration of each deformed and final products.

Key Words : Non-Axisymmetric Rectangular Cup, Multi-Stage Deep Drawing Process, Ironing, Biaxial Forming, Tool Design, Tool Fabrication, Thickness Distribution

1. 서 론

국내뿐만 아니라 전세계적으로 기존의 산업적 수요와 이동통신 단말기의 대중화에 따른 다양한 형태의 컵 부품에 대한 꾸준한 수요 증가와 더불어 최근의 전기자동차 및 하이브리드 자동차용 에너지 저장장치 부품으로써의 적용 분야 확대가 지속되고 있다. 일반적으로 에너지 저장장치용 핵심 구성품에 있어서 컵 부품은 원형 단면 혹은 직사각 단면 형태를 가지며, 리튬-이온 및 니켈-수소 2차 전지 등의 2차 전지용 전해질 저장 용기로 활용되고 있다.

이들 2차 전지용 컵 부품은 고집적 · 고효율 및 공간 활용 극대화 등의 목적을 달성하기 위해 세장비(Aspect Ratio)가 큰 직사각 형태의 컵 부품이 주로 사용되고 있다. 세장비가 큰 비축대칭형 직사각 컵 형상을 성형하기 위해서는 초기 평판 소재를 이용하여 여러 단계의 디프드로잉 공정을 거쳐 원하는 형상으로의 판재 성형을 수행하는 다단 디프드로잉 공정(Multi-Stage Deep Drawing Process)이 주로 활용되고 있다. 다단 디프드로잉 공정은 성형 과정에 있어서 판재의 과도한 변형에 의한 국부적 두께워짐 혹은 얇아짐, 찢어짐, 주름 등의 발생없이 초기 평판재로부터 원하는

1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 부산대학교 대학원 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, bskang@pusan.ac.kr

형상의 컵을 성형하는 공정 중의 하나이다[1]. 이러한 다단 디프드로잉 공정에 있어서, 공정설계에는 원소재의 특성, 금형과 블랭크 사이의 접촉 조건, 소성변형 메커니즘, 금형을 포함하는 실험 장치 특성 등의 다양한 조건에 대한 고려가 필수적이다. 특히, 디프드로잉 공정의 원활한 수행을 좌우하는 인자(Parameter)로는 금형의 코너 반경, 성형 편치와 금형 사이의 클리어런스, 윤활조건 및 재료 유동 등의 제한조건들을 들 수 있다[2].

디프드로잉 공정을 적용한 다양한 형태의 컵 성형에 대한 관련 연구가 다수 수행된 바 있다. 원형 단면을 갖는 컵에 대한 연구로는 알루미늄 합금 소재[3], 냉간압연 소재[4] 및 마그네슘 합금 소재[5] 등의 다양한 소재를 이용한 수치적·해석적 연구가 수행된 바 있으며, 타원 및 정사각 단면 형상을 갖는 컵에 대한 연구로는 연신 특성이 좋은 알루미늄 합금 소재[6]와 냉간압연 소재[7]를 이용한 해석적·실험적 연구가 수행된 바 있다. 또한, 최근에는 직사각 단면 형상을 갖는 고세장비의 비축대칭 형상의 컵 성형을 위해 연신 특성이 좋은 얇은 판재를 이용한 다단 디프드로잉 공정을 적용한 유한요소 해석 및 실험에 관한 연구가 진행되기도 하였다[8~11].

본 연구에서는 길이와 폭의 비로 정의되는 세장비가 약 5.76인 직사각 컵에 대한 다단 디프드로잉 공정을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 다단 디프드로잉 실험에 앞서, 공정설계·금형설계·디프드로잉 편치 및 하부 금형 제작을 수행하였다. 특히, 다단 디프드로잉의 공정설계 및 금형설계 그리고 금형제작에 있어서, 최종 성형품 획득을 위한 원활한 공정 수행을 위해 세장비와 드로잉 비를 고려하여 중간성형품이 하부 금형의 장축 및 단축 방향으로 순차적으로 접촉되도록 설계하였다. 이는 이전의 연구[9~10]에서와는 달리 본 연구에서의 최종 성형품 형상이 약 5.76의 세장비와 약 2.53의 드로잉 비를 가짐에 의해 장축 방향으로의 성형 길이가 85.90mm로 상대적으로 길기 때문에 소재의 변형 과정에서의 소재 유동을 보다 원활히 하기 위해 적용되었다. 이러한 준비 과정을 거쳐 다단 디프드로잉 실험을 수행하였다. 또한, 본 연구에서 고려된 다단 디프드로잉 공정의 공정 수는 총 5공정이며, 블랭킹·디프드로잉·아이어닝 공정 등이 주된 성형 공정으로 적용되었다. 본 연구에서 사용된 초기 블랭크 소재는 드로잉용 강으로 많이 활용되는 냉간압연

소재(SPCE, 초기 두께 0.4mm)를 사용하였다. 또한, 각 공정별 장축(길이 방향, Major Axis)과 단축(폭 방향, Minor Axis)에서의 아이어닝 공정이 서로 다르게 정의됨에 따라, 제1공정부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉 공정 적용에 의한 초기 블랭크와 중간성형품의 성형 건전성을 조사하기 위해 각 공정에서의 장축과 단축 방향으로의 두께 분포를 조사하였다. 실험에 의해 도출된 두께 분포는 목표 두께 분포인 아이어닝 두께 분포와 이전의 해석적 연구 결과[11]에서 도출된 두께 분포를 상호 비교하였다.

2. 금형설계

2.1 교축가공

원형 혹은 정사각 형태의 대칭형 단면 형상을 갖는 컵을 성형하는 경우와는 달리 세장비가 큰 직사각 단면 형상을 가지는 컵을 성형할 경우에 있어서, 장축과 단축 방향으로의 접촉 순서를 조절함에 의해 원활한 성형 및 소재의 변형을 유도하는 것을 교축가공(Biaxial Forming)이라 한다. 교축가공에 있어서, 세장비의 크기와 성형 깊이(즉, 요구되는 컵의 형상)에 따라 장축과 단축 방향으로의 블랭크와 하부 금형의 초기 접촉이 동시에 이루어지는 경우를 동시접촉(Simultaneous Contact) 혹은 균일접촉(Uniform Contact) 조건이라 하며, 블랭크와 하부 금형의 접촉이 동시에 이루어지지 않고 장축과 단축 방향으로 접촉 순서를 달리할 경우를 순차접촉(Sequential Contact) 조건이라 한다. 이러한 접촉의 순서를 제어하는 이유는 직사각 컵을 성형함에 있어서, 소재의 유동에 의한 귀(Earing)의 발생을 최소화하고 중간성형품의 국부적 과도 변형 등을 방지하기 위해 주로 활용되고 있다.

2.2 공정설계

본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 길이가 89.50mm, 폭이 14.90mm 및 높이가 39.30mm인 세장비가 약 5.76인 직사각 단면 형상을 갖는 컵에 대한 공정설계를 우선적으로 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 다단 디프드로잉 공정에서 균일접촉 혹은 순차접촉 조건을 어떠한 경우에 적용하는 것이 바람직한가에 대한 고려를 통해, 본 연구에서의 직사각 컵은 세장비는 비록 약 5.76으로 고세장비인 반면 드로잉비는 약 2.63의 낮은

값을 가지므로 순차접촉을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단되었다. 이에 대한 근거로, 이전의 연구에서의 접촉순서에 대한 접근방법[9~11]을 Table 1에 요약하여 나타내었다. 즉, 접촉순서를 결정함에 있어, 세장비 뿐만 아니라 성형 깊이와 폭의 비로 정의되는 드로잉비에 대한 고려가 반영되어야 한다. 이는 세장비와 성형 깊이가 크면 클수록 동시접촉 조건을 고려하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있으며, 상대적으로 성형 깊이가 작으면서 세장비가 클 경우에는 순차접촉 조건을 고려하는 것이 유효하다는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 순차접촉 조건을 교축가공에 의한 접촉

Fig. 1 Final dimensions of rectangular cup

조건으로 고려하였으며, 이러한 순차접촉 조건을 제1공정에서부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉 공정에 적용하였다.

Fig. 1에 제시된 직사각 컵에 대한 성형실험을 수행하기에 앞서, 제1공정부터 제5공정까지의 중간성형품에 대한 다단 디프드로잉 공정의 수행과정에 있어서의 변형 이력 및 장축과 단축 방향으로의 변형 과정을 예측하기 위해서는 공정설계가 일차적으로 우선되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 세장비가 약 5.76인 직사각 컵 성형공정에 대한 공정설계를 수행하였다. 본 연구에서 수행된 공정설계에 있어서, 각 공정별로 내부 프로파일 성형 및 디프드로잉용 펀치의 단면 형상 정보를 포함하고 있으며, 외부 프로파일은 하부 금형의 단면 형상 정보를 포함하고 있다. 또한, 성형 펀치의 상세 치수를 내부 프로파일에 도시하였다.

Table 1 Summary of contact conditions

No.	Final Dimension (L×W×H)	AR (L/W)	DR (H/W)	Contact Condition
1	33.70× 3.46×48.30	9.73	13.95	Simultaneous
2	33.60× 4.95×48.45	6.78	9.78	Simultaneous
3	29.55× 5.95×63.40	4.96	10.65	Simultaneous
4	85.90×14.90×39.30	5.76	2.63	Sequential

Fig. 2 Schematic view of process design and tool layout for multi-stage deep drawing from stage 1 to stage 5

2.3 금형설계

Fig. 2에서와 같이 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정의 공정설계 결과로부터 얻어진 각 공정별 성형용 펀치와 하부 금형의 프로파일 정보를 이용하여 제1공정에서부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉 금형을 설계하였다. 금형설계에 있어서 우선적으로 고려해야 하는 공정 인자들 중의 하나로는 Fig. 3에서와 같이 중간성형품이 성형 과정에서 하부 금형과 초기 접촉할 때의 하부 금형의 성형면과 접촉하는 접촉면에서의 입사각(θ , Intake Angle)을 들 수 있다. 이 입사각은 직사각 컵의 형상(즉, 세장비) 정도에 따라 장축과 단축 방향에서 서로 다르게 적용하는 것이 일반적이다. 이러한 입사각의 크기는 통상적으로 5° 에서 25° 사이의 각도를 가지게 된다. 본 연구에서의 직사각 컵과 같이 세장비가 큰 경우에 있어서, 장축 방향으로의 입사각(θ_M)은 보통 15° 에서 20° 사이의 값이 주로 적용되며, 단축 방향으로의 입사각(θ_m)은 18° 에서 22° 사이의 값이 적절한 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 원소재로부터 초기 블랭크를 블랭킹 공정에 의해 가공하고 제1차 디프드로잉 공정을 수행하는 제1공정을 제외한, 제2공정에서부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉 공정에 대해 장축과 단축방향으로의 입사각을 Table 2와 같이 금형설계 및 제작에 적용하였다.

본 연구에서는 Fig. 3의 입사각 설정에 대한 개념을 바탕으로 Fig. 4와 같이 금형설계를 수행하였으며, 장축 및 단축 방향으로의 금형 단면도를 보여주고 있다. 이러한 금형설계 과정에는 Fig. 2에서의 공정설계에 따른 금형 프로파일이 반영되어 있을 뿐만 아니라 장축과 단축 방향으로의 금형 단면이 정면도와 측면도에 나타나 있다. 또한, 이 정면도와 측면도에는 각 공정에서의 블랭크가 하부 금형으로 원활히 인입되기 위한 입사각과 Fig. 1에 도시된 목적 형상에 있어서 장축부와 단축부의 최종 성형 두께를 달성하기 위한 아이어닝 공정을 고려한 금형설계 결과를 보여주고 있다. 또한, Table 2에서는 본 금형설계에 있어서 각 공정별로 적용된 공정의 종류, 목표 두께 및 입사각 등의 공정 변수를 장축과 단축 방향으로 구분하여 요약한 것이다. 본 연구에서의 다단 디프드로잉 공정은 Fig. 1과 같은 최종 성형품의 측벽 두께를 얻기 위해 주로 단축 방향에서의 측벽에 대한 아이어닝 공정이 이루어지며, 이에 따른 두께 감소가 해당 측벽에서 주로 이루어짐을 알 수 있다.

Table 2 Summary of process parameter in tool design

Stage No.	Procedure		Ironing(mm)		Intake Angle($^\circ$)	
	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor
1	D	D	0.40	0.40	-	-
2	D	D + I	0.40	0.38	17.1	20.5
3	D + I	D + I	0.36	0.37	17.2	21.1
4	D	D + I	0.36	0.36	19.7	21.2
5	D	D + I	0.36	0.34	18.0	21.2
Note	D : Drawing Process, I : Ironing Process

Fig. 3 Schematic view of sequential contact condition of multi-stage deep drawing process

3. 다단 디프드로잉 실험

3.1 금형제작

앞서 언급된 공정설계 및 금형설계 결과를 바탕으로 직사각 컵 성형 실험을 위해 제1공정부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉용 성형 펀치 및 하부 금형을 각각 제작하였다. Fig. 5는 제작된 제1공정에서부터 제5공정까지의 성형 펀치를 보여주고 있다. 중간성형품과 직접 접촉하는 성형 펀치 끝단의 코너 반경 및 형상을 보다 상세히 나타내기 위해 해당 부분을 확대시켜 나타내었다. 또한, Fig. 6은 다단 디프드로잉용 하부 금형의 시제품을 보여주고 있다. 본 연구에서 제작된 각각의 하부 금형은 내부에 녹-아웃(Knock-out) 장치를 포함시켜 각 공정에서의 디프드로잉이 수행되고 난 뒤, 변형된 중간성형품이 자동으로 취출될 수 있도록 하였다. 또한, 이와 같이 제작된 제1공정부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉용 금형과 성형 펀치들을 이용하여 성형 실험에 적용하였다.

Fig. 4 Design results of lower die for multi-stage deep drawing from stage 1 to stage 5

Fig. 5 Development of forming punch used for multi-stage deep drawing from stage 1 to stage 5

3.2 다단 디프드로잉 실험

본 연구에서 개발된 제1공정부터 제5공정까지의 다단 디프드로잉용 성형 펀치와 하부 금형을 활용하여 성형 실험을 수행하였다. 세장비가 약 5.76인 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 실험에 사용된 소재는 초기 두께가 0.4mm인 냉간 압연 소재를 사용하였으며, Table 3에 이의 재료 물성을 요약하였다. 또한, 본 연구에서의 다단 디프드로잉 실험을 위한 초기 블랭크는 Fig. 2의 공정 설계 결과에서 제시된 바와 같이 세 개의 호(Arc)를 가지며, 그 치수는 각각 장축 반경 68.05mm, 단축 반경 54.81mm 그리고 제3의 호의 반경 67.62mm로 설계 및 제작되었고, 이를 본 다단 디프드로잉 실험에 적용하였다. 다단 디프드로잉 실험은 앞서 언급된 바와 같이 제1공정에서부터 제5공정까지 순차적으로 수행되었으며, 실험과정의 예를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7은 제2공정에서 얻어진 중간성형품을 이용하여 제3공정의 디프드로잉 실험을 수행하는 과정을 디프드로잉용 펀치의

(a) Stage 1

(b) Stage 2

(c) Stage 3

(d) Stage 4

(e) Stage 5

Fig. 6 Development of lower die for multi-stage deep drawing from stage 1 to stage 5

Table 3 Mechanical properties of cold-rolled thin steel

Young's Modulus (GPa)	207
Yield Strength (MPa)	152
Ultimate Strength (MPa)	268
Poisson's Ratio	0.28
Elongation (%)	30~36
Density (Kg/mm ³)	7.83×10^{-6}

(a) Stroke : 0% **(b) Stroke : 50%** **(c) Stroke : 100%****Fig. 7 Experiments for multi-stage deep drawing at stage 3 using obtained intermediate blank from stage 2**

이송 거리(0%, 50% 및 100%)에 따라 나타난 것이다. 본 연구에서 수행한 다단 디프드로잉 공정 실험에 있어서, 초기 실험 과정에서 중간성형품에 성형 불량 발생함을 알 수 있었으며, 해당 성형 불량의 예를 Fig. 8에 나타내었다. 이러한 성형 불량의 발생 원인으로는 각 공정에서 이루어지는 디프드로잉과 아이어닝에 의해 재료 유동(Metal Flow)이 장축 방향의 측벽부와 코너 상단부에 국부적으로 집중됨에 따른 변형 소재의 국부적 두께 증가에 의한 것으로 조사되었다. 즉, 국부적으로 증가된 두께를 가지는 중간성형품이 성형 펀치와 하부 금형 사이에 위치함에 의해 해당 부위가 과도한 변형에 의해 찢어짐(Tearing) 등이 성형 불량의 주된 원인으로 파악되었다. 이는 제2공정에서부터 제5공정까지의 디프드로잉용 하부 금형에 있어서 금형면을 구성하는 곡물들이 서로 만나는 부위에서의 미세한 요철이 존재함에 따른 원인으로 파악되었다. 이를 해결하기 위해, 해당 요철이 존재하는 금형면에서의 중간성형품 입사면과 아이어닝 공정이 수행되는 구간 사이의 곡물을 완만하게 수정하였다. 이러한 금형 수정을 통해 본 연구에서의 다단 디프드로잉 공정에 대한 성형 실험을 성공적으로 수행할 수 있었으며, 그 결과로써 얻어진 제1공정에서부터 제5공정까지의 중간성형품의 시제작 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8 Failure examples by excessive deformation at upper corner region **Fig. 9 Deformed configurations of intermediate blank from stage 1 to stage 5**

4. 다단 디프드로잉 실험 결과

제1공정에서 제5공정까지의 중간성형품의 장축과 단축 방향으로의 두께를 측정하여, 각 공정에서 요구되는 두께와 비교하였다. 즉, 직사각 컵에 대한 설계 두께와 실험으로부터 얻어진 중간성형품에 대한 실측 두께, 그리고 이전의 해석적 연구 [11]에서 예측된 두께 분포를 상호 비교하였다. 두께 분포 비교를 위해 Fig. 10에 제시된 바와 같이 두께 측정 위치를 두 축이 교차하는 중심점을 기준으로 장축 및 단축 방향으로 각각 5mm의 등간격 위치에서의 두께를 측정하였으며, 해당 두께 측정에 사용된 장치는 최대 분해능이 0.001mm인 초음파 두께 측정기(Panametrics-NDT社 Model 25DL)를 활용하였다.

Fig.10 Thickness measuring position with deep-drawn cup at stage 1

본 연구에서 수행한 다단 디프드로잉 공정을 이용한 직사각 컵에 대한 성형 실험을 통해 얻어진 각 공정별 중간성형품에 대한 장축과 단축 방향에서의 두께 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었으며, 단축 방향으로의 두께 분포는 실측 결과와 목표 두께를 유사한 분포를 보임을 알 수 있었고, 상대 두께 편차는 약 5% 정도로 나타났다. 단축 방향으로의 두께 분포와는 달리 장축 방향으로의 두께 분포는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 장축 방향으로의 두께 분포에 있어서, 제1공정과 제2공정에서는 성형 편차와 중간성형품이 초기 접촉하는 코너 부위와 장축 방향으로의 측벽부에서 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 두께 분포의 차이에 대한 분석 결과를 Table 4에 요약하였다. Table 4에서와 같이 장축 방향으로의 두께 분포에 있어서 최소 두께 분포를 목표 두께 기준으로 각

공정별로 정리한 것이다. 여기서, 음의 부호는 두께가 상대적으로 감소를 의미하며, 양의 부호는 두께의 상대적 증가를 나타낸다. Fig. 11에서의 두께 분포와 Table 4에 정리된 두께 변화를 고려해 볼 때, 제1공정에서의 중간성형품의 바닥부 코너 부위에서 목표 두께를 기준으로 실측 두께가 약 15% 정도 감소한 것으로 나타났으며, 해석 결과 [11]에서는 약 13% 정도 감소한 것으로 조사되었다. 이러한 두께 분포의 차이는 제2공정에서의 중간성형품의 경우에 대해서도 매우 유사한 결과를 나타내었다. 이는 중간성형품이 변형되는 과정에 있어서 변형 소재의 재료 유동이 플랜지(Flange) 부근으로 이동됨에 의한 것으로 파악되었으며, 이에 의해 플랜지부의 두께는 약간 증가함을 알 수 있었다. Table 2에서 정리된 바와 같이, 주축 방향으로의 아이어닝 공정은 제3공정에서만 이루어지며, 이에 의해 제1공정과 제2공정에서 누적되어왔던 과도한 두께의 변화를 완화시켜주는 효과를 유도하게 됨을 Table 4에서 확인할 수 있었다.

Table 4 Thickness changes by thinning on major axis of intermediate blank (unit:mm)

Stage No.	Target Thickness	Simulated Thickness	Measured Thickness	Thinning		
				TNR	TNE	TNF
1	0.40	0.35	0.34	-0.01	-0.06	-0.05
2	0.40	0.34	0.35	+0.01	-0.05	-0.06
3	0.36	0.34	0.35	+0.01	-0.01	-0.02
4	0.36	0.28	0.35	+0.07	-0.01	-0.08
5	0.36	0.30	0.34	+0.04	-0.02	-0.06
Note	TNR = (Measured Thickness) - (Simulated Thickness) TNE = (Measured Thickness) - (Target Thickness) TNF = (Simulated Thickness) - (Target Thickness)					

Table 5 Thickness changes by thickening at upper corner flange on major axis (unit:mm)

Stage No.	Target Thickness	Simulated Thickness	Measured Thickness	Thickening		
				TCR	TCE	TCF
1	0.40	0.49	0.47	-0.02	+0.07	+0.09
2	0.40	0.52	0.49	-0.03	+0.09	+0.12
3	0.36	0.49	0.49	0.00	+0.13	+0.13
4	0.36	0.49	0.48	-0.01	+0.12	+0.13
5	0.36	0.47	0.47	0.00	+0.11	+0.11
Note	TCR = (Measured Thickness) - (Simulated Thickness) TCE = (Measured Thickness) - (Target Thickness) TCF = (Simulated Thickness) - (Target Thickness)

Fig.11 Comparison results of thickness distributions from stage 1 to stage 5

또한, 제4공정과 제5공정에 대한 두께 변화에 있어서는 해당 두께 분포가 목표 두께에 거의 근접하게 분포함을 Fig. 11과 Table 4에서 확인할 수 있다. 또한, 중간성형품에 있어서 두께의 증가는 주로 장축 및 단축 방향으로부터 변형된 소재가 유입되는 중간성형품의 코너 플랜지부에서 집중적으로 발생함을 알 수 있었으며, 이를 Table 5에 정리하였다. 앞서 요약한 바와 같이 플랜지부에서의 두께 증가는 중간성형품이 변형됨에 있어서, 소재 유동이 플랜지부로 국부적으로 집중됨에 따른 것으로 파악되었으며, 단축 방향으로 순차적 아이어닝 공정과 더불어 주축 방향으로 아이어닝 공정이 적용되는 제3공정에서 목표 두께 대비 최대 약 36%의 두께 증가가 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 길이가 89.50mm, 폭이 14.90mm 및 높이가 39.30mm인 세장비가 약 5.7인 직사각 컵 성형을 위한 초기 두께 0.4mm인 냉간압연 판재를 이용한 다단 디프드로잉 공정의 공정설계, 금형설계 및 제작, 그리고 실험적 연구를 수행하였다. 목적 형상을 얻기 위해 본 연구에서의 다단 디프드로잉 공정은 총 5공정이 적용되었으며, 세장비 및 드로잉비를 고려하여 중간성형품과 하부 금형 사이의 초기 접촉은 순차접촉에 의해 각 공정이 수행되는 것으로 설계되었다. 또한, 초기 평판 소재의 각 공정별 변형 이력과 변형 형상, 성형 편치 및 하부 금형의 설계·시제작·개발을 위해 내부 프로파일 및 외부 프로파일 등에 각종 정보를 포함하도록 공정설계가 이루어졌다.

더욱이 금형설계에 있어서는, 앞서 수행된 공정 설계 결과뿐만 아니라 중간성형품이 하부 금형의 성형면상에 초기 접촉할 때의 입사각을 각 공정별로 적용하였다. 이를 바탕으로 성형 편치와 하부 금형 등의 금형이 개발되었으며, 이를 다단 디프드로잉 실험에 적용하였다. 다단 디프드로잉 성형 실험에 있어서, 금형면을 구성하는 곡물들이 만나는 영역에서의 요철 존재에 의한 하부 금형의 불균일한 성형면에 의해 중간성형품에 있어서의 찢어짐 등의 성형 불량 발생하였다. 이러한 성형 불량을 해결하기 위해 성형면을 보다 매끄럽게 재가공하였으며, 이를 통해 성형 불량이 없는 건전한 중간성형품을 각각 얻을 수 있었다.

본 실험적 접근을 통한 연구 결과를 요약하면

다음과 같다.

1. 중간성형품에 대한 두께 측정 결과, 단축 방향으로의 두께 분포는 실측 결과와 목표 두께가 서로 유사한 분포를 보였으며, 상대 두께 편차는 약 5% 정도로 나타났다.
2. 단축 방향으로의 두께 분포와는 달리 장축 방향으로의 두께 분포는 다소 차이가 있음을 알 수 있었으며, 제1공정에서의 중간성형품의 바닥부 코너부위에서 목표 두께를 기준으로 실측 두께가 약 15% 정도 감소한 것으로 나타났다. 이러한 두께 분포의 차이는 제2공정에서의 중간성형품의 경우에 대해서도 매우 유사한 결과를 나타내었다.
3. 장축 방향으로의 두께 감소는 중간성형품이 변형되는 과정에 있어서 변형 소재의 재료 유동이 플랜지(Flange) 부근으로 이동됨에 의한 것으로 조사되었다.
4. 또한, 중간성형품에 있어서 두께의 증가는 주로 장축 및 단축 방향으로부터 변형된 소재가 유입되는 중간성형품의 코너 플랜지부에서 집중적으로 발생함을 알 수 있었으며, 단축 방향으로 순차적 아이어닝 공정과 더불어 주축 방향으로 아이어닝 공정이 적용되는 제3공정에서 목표 두께 대비 최대 약 36%의 두께 증가가 나타났다.
5. 이러한 플랜지부의 두께 증가는 중간성형품이 변형됨에 있어서, 소재 유동이 플랜지부로 국부적으로 집중됨에 따른 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 다단 디프드로잉 공정에 대한 공정설계 결과를 바탕으로 금형 설계 및 제작, 그리고 직사각 컵의 시제작이 성공적으로 수행되었다. 본 연구에서 개발된 직사각 컵 생산 기술은 니켈-수소 2 차 전지용 각형 케이스 부품의 설계 및 개발에 활용 가능할 것으로 예상됨과 동시에 관련 각형 컵 부품의 개발에도 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2008년 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-313-D00052)을 받아 수행된 연구입니다. 또한, 한국과학재단의 부분적 지원(R0A-2008-000-20017-0)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. H. Moon, Y. K. Kang, J. W. Park, S. R. Gong, 2001, Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminium 1050 sheet, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 41, pp. 1283~1294.
- [2] J. Wang, A. Goel, F. Yang, J. T. Gau, 2009, Blank optimization for sheet metal forming using multi-stage finite element simulation, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 40, pp. 709~720.
- [3] M. A. Hassan, N. Takakura, K. Yamaguchim, 2002, Friction aided deep drawing of sheet metal using polyurethane ring and auxiliary metal punch. Part 1: experimental observations on the deep drawing of aluminium thin sheets and foils, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, pp. 625~631.
- [4] N. Kishor, D. R. Kumar, 2002, Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 130-131, pp. 20-30.
- [5] H. G. Kim, J. W. Bae, D. K. Choo, C. G. Kang, 2006, A study on the deep drawing of AZ31B magnesium sheet at warm and hot temperature, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 7, pp. 504~511.
- [6] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, 2000, Multi-stage analysis of elliptic cup drawing processes with the large aspect ratio by an explicit elasto-plastic finite element method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 3, pp.313~319.
- [7] D. L. Ko, D. W. Jung, 2009, A study on the behavior of wrinkling in the square cups deep drawing of Al alloy, *Trans. KSME(A)*, Vol. 33, No. 3, pp. 276~281.
- [8] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, 2002, Optimum tool design in a multi-stage rectangular cup drawing and ironing process with the large aspect ratio by the finite element analysis, *Trans. KSME(A)*, Vol. 26, No. 6, pp. 1077~1084.
- [9] H. J. Kim, T. W. Ku, B. S. Kang, 2001, FE analysis and die design of the multi-stage rectangular deep drawing process with the large aspect ratio, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 10, No. 6, pp. 456~464.
- [10] T. W. Ku, C. S. Park, B. S. Kang, 2004, A study on initial blank design and modification for rectangular case forming with extreme aspect ratio, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 13, No. 4, pp. 307~318.
- [11] T. W. Ku, H. Y. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2008, Process design and finite element analysis of rectangular cup used for Ni-MH battery with high aspect ratio, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 3, pp. 107~181.