

타원형 디프 드로잉 공정에서 블랭크 형상의 영향에 관한 연구

박동환* · 배원락* · 박상봉** · 강성수***

(2000년 2월 2일 접수)

A Study on the Influence of Blank Shape in Elliptical Deep Drawing Process

D. H. Park, W. R. Bae, S. B. Park and S. S. Kang

Abstract

Most of researches have been performed on the formability of axisymmetric shape, but it is insufficient that the study on process variables of elliptical deep drawing product. There are many process variables exerted influence on the formability of products. Particularly, blank shape is more important than the others in elliptical deep drawing process. In this study, blanks of three types were proposed and compared using thickness distribution and movement of sheet during the process. The aim of a paper is to obtain optimal blank shape through experiment and finite element analysis(FEA).

Key Words : Elliptical Deep Drawing, Process Variables, Blank Shape, Finite Element Analysis, Thickness Distribution and Strain, Movement of Sheet

1. 서론

축대칭 원통형 드로잉이나 사각형 드로잉의 제품에 관한 연구는 드로잉 공정의 기본으로 산업현장, 연구기관에서 활발히 연구되어 왔다.^(1~6)

그러나, 최근에는 박판성형 제품이 더욱 많은 분야에 이용되고 있어 복잡한 형상을 지닌 고정밀도의 제품을 요구하고 있다. 또한 제품의 단납기로 인해 성형예측 및 공정변수들의 영향에 대한 연구가 필수적이다.

그러나, 적용된 타원형 다단계 디프 드로잉 제품의 경우는 연구가 미비한 실정이고, 아직 현장에서는 기존의 지식을 이용하거나 현장실무자들의 경험에 의존하여 설계하고 있다.

디프 드로잉 제품을 설계하는데 있어서 관여하는 요인에는 여러 가지 요소가 있다. 블랭크 형상, 성형 후의 형상, 소재 자체의 성형성, 펀치 및 다이의 형상반경, 윤활 조건, 가공속도, 블랭크 홀딩력(blank holding force), 펀치와 다이의 클리어런스(clearance) 등 매우 많은 공정

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 동의공업대학 금형설계과
*** 부산대학교 기계공학부

조건들을 고려하여야만 한다. 그 중에서도 특히 블랭크 형상이 성형성에 영향을 준다. 이는 블랭크와 접촉하는 블랭크 홀더 및 다이와의 접촉면적 크기를 좌우하므로 마찰력, 블랭크 홀딩력 등의 여러 가지 공정변수들과 관련이 깊기 때문이다. 블랭크에서 다이와 블랭크 홀더 사이의 접촉면적이 증가하면 블랭크 홀딩력과 성형하중이 증가한다. 이 현상은 블랭크에 있어서 변형저항이 증가하게 만들어 성형결함의 원인이 되기도 한다.^(7,8) 이러한 결함을 해결하기 위하여 원형 및 사각형 디프 드로잉 공정에 사용될 블랭크 형상에 관한 연구는 많았다.⁽⁹⁻¹²⁾

적용된 제품은 1, 2공정이 원형으로 드로잉 되고, 이후 공정은 타원형으로 드로잉 된다. 비록 1, 2공정의 펀치 형상이 원형이지만 블랭크 형상이 비축대칭이어서 원주방향과 축방향의 응력상태가 매우 복잡하다. 이로 인해 적용된 제품의 경우 소재이동(movement of sheet)이 매우 불균일하게 된다. 이와 같은 이유로 비축대칭 형상 특징을 가지는 제품은 성형예측 및 공정설계가 매우 어렵다. 그래서, 현장에서는 정밀 디프 드로잉 제품은 공정설계를 마치고 금형 제작 후 시행착오법(trial-error method)으로 블랭크를 설계하고 있는 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 타원형 다단계 디프 드로잉 제품의 공정에서 블랭크 형상이 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위해 제안된 3가지의 블랭크의 형상에 따라 실험과 유한요소해석을 통해 성형 후의 두께분포, 소재이동 등을 비교·고찰하여 실제 현장에서 사용 가능한 데이터를 구축하는데 그 목적이 있다.⁽¹³⁾

2. 실험

2.1 실험방법 및 장치

본 연구의 실험에 사용된 소재는 전기아연 도금강판(SECE)으로 소재두께(t)는 1.6mm이고 20 μ m의 아연도금이 되어 있는 소재를 사용하였다. 소재 자체의 성형성을 파악하기 위해 KS B 0801 5호 시편으로 인장시험을 수행하였다. 또한 디프 드로잉의 경우 대부분의 성형이 스트레칭(stretching)형태이므로 SECE의 기본적인 성형성 평가를 위해 에릭슨 테스트를 수행하였다. 에릭슨 값은 11.4mm로서 재료의 기계적 특성 측면에서의 성형성은 양호한 것으로 판단된다.⁽¹⁴⁾

실험에 적용된 제품은 디프 드로잉 공정(6공정)과 트리밍(trimming) 및 리스트라이킹(restriking)공정을 포함한 후가공(5공정)으로 이루어져 총 11공정으로 이루어져 있다. Fig. 1은 디프 드로잉 공정을 보여준다. Fig. 2는 적용된 제품의 공정 설계도이다.

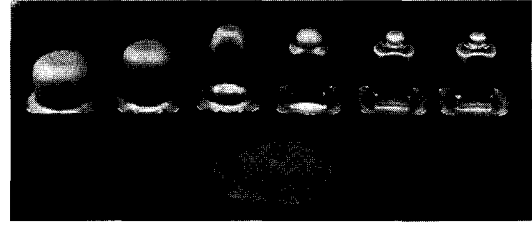


Fig. 1 Industrial practice for elliptical deep drawing

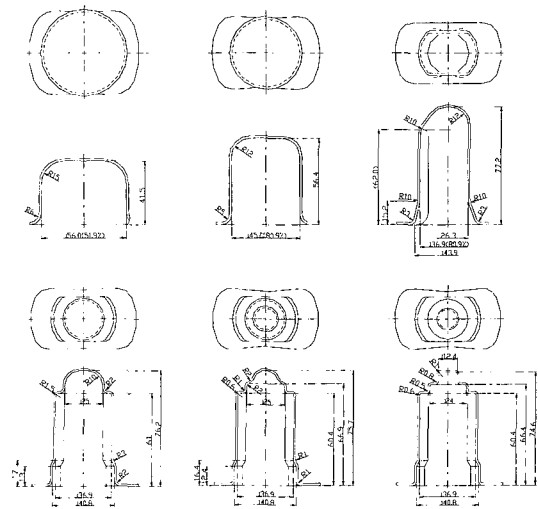


Fig. 2 Process design of elliptical deep drawing

실험에 사용된 장비는 300ton 기계식 프레스로 블랭크 홀딩력을 인의로 조절할 수 있는 다이 쿠션(die-cushion)과 제품 추출을 위한 녹아웃(knock-out)장치가 갖추어져 있고, 다단계 디프 드로잉 제품을 생산하기 위하여 트랜스퍼 금형으로 구성되어 있다.

펀치 및 다이는 열처리(H_RC60)되어진 합금 공구강(STD11)으로 제작되었고, 다이세트(die-set)는 주물(FC25)로 제작한 후 연삭가공하여 사용했다. 윤활은 수용성 소성가공유로서 일반적인 드로잉유를 사용하였고, 트랜스퍼용 금형을 프레스에 클램핑(clamping)하여, 램(ram)의 속도를 8SPM으로 일정하게 유지하면서 실험을 수행하였고, 공정별 실험조건은 Table 1과 같다.

2.2 블랭크 형상 설계

다음과 같이 3가지 종류의 블랭크 형상을 정의하여 실험하였다.

(1) 시행착오(trial-error)로 완제품 표면적을 대략적으로 계산하여 블랭크를 간이로 제작해서 후공정 시험 후에

수정하고 또 다시 반복하여 블랭크의 크기를 결정하였다. (A type)

(2) 사각통 드로잉을 기본으로 한 블랭크는 타원형 디프 드로잉 제품의 몸통부를 단면적이 같은 사각통으로 등가하고 사각통으로부터 식(1)을 이용 장변의 길이(L)와 단변의 길이(Dz)를 구하여서 블랭크를 전개하였다. Fig. 3은 구체적인 작도방법을 보여준다. (B type)

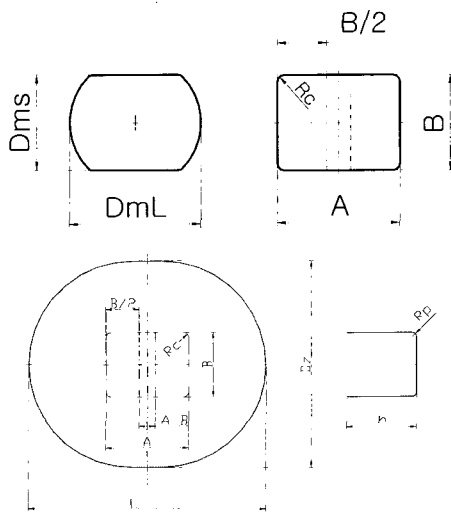


Fig. 3 Design of blank shape based on rectangular cross section (B type)

$$D_z = 1.13\sqrt{B^2 + 4(h - 0.43Rc)(B - 2Rc) + 2.38R^2}$$

$$R^2 = Rc^2 + 2hRc - 0.86Rp(Rc + 0.16Rp)$$

$$L = D_z + (A - B) \quad (1)$$

(3) 타원형 드로잉을 기본으로 한 블랭크는 B type과 동일하게 먼저 타원형 디프 드로잉 제품의 몸통부를 단면적이 같은 가상 타원형상으로 등가하고 블랭크를 전개하였다. 이 블랭크는 Fig. 4에서 나타내듯이 작도에 의해 M과 N을 찾아 d와 c를 구하고 식(2)을 통해 R1과 R2결정한 후 전개하였다. (C type)

B type 과 C type의 변수 h값은 3-D 모델링을 이용하여 최종 드로잉 제품의 표면적과 가상의 표면적을 등가 하여 구한다. 이러한 방법은 A type에 비해 블랭크 설계시간이 매우 짧은 이점이 있다.

Fig. 5는 위의 3가지 방법에 의해 적용 된 제품의 블랭크

$$R_1 = \sqrt{(d - Rs)^2 + Rs(d - Rs) + 2Rs^2 + 2d(h - Rs)}$$

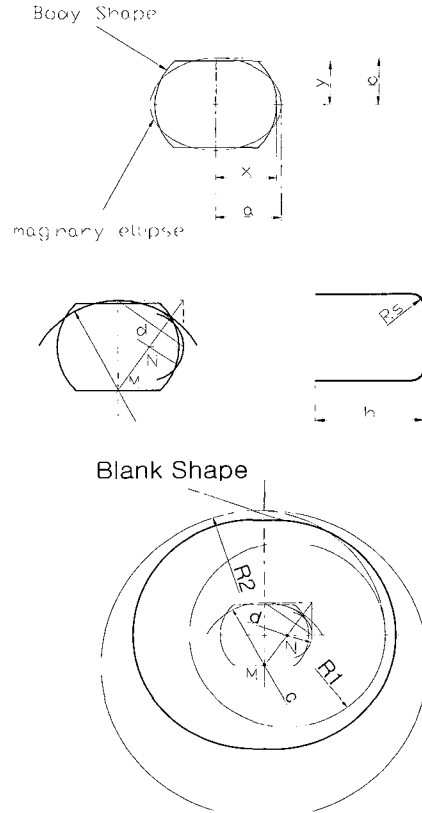
$$R_2 = \sqrt{(c - Rs)^2 + Rs(c - Rs) + 2Rs^2 + 2c(h - Rs)} \quad (2)$$


Fig. 4 Design of blank shape based on elliptical cross section (C type)

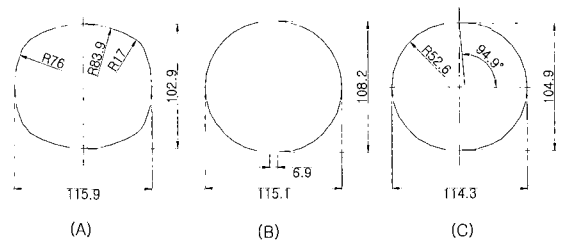


Fig. 5 Dimensions as type of blanks

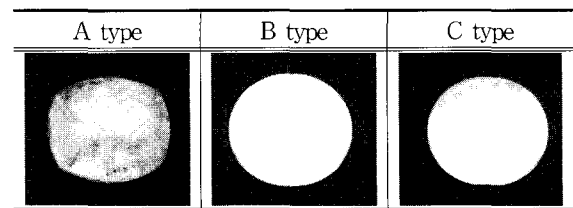


Fig. 6 Blank shapes of three types

랭크들의 형상치수를 보여주고 있고, Fig. 6은 이를 바탕으로 실제 제작한 실물 사진이다.

Fig. 7은 3가지 블랭크의 1/4를 기하학적으로 비교한 것으로 A type의 블랭크는 모서리부가 타 블랭크에 비해 크다. B type은 단변부의 길이가 길고 직변으로 이루어졌고, C type은 단변부에서 불연속 구간을 지니는 특징을 가진다.

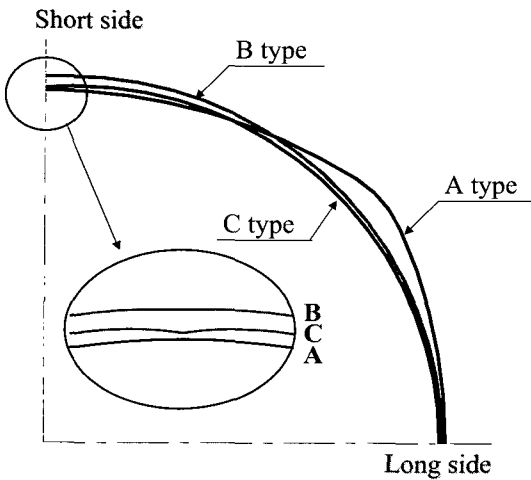


Fig. 7 Geometry of blank shapes

2.3 실험결과

양호한 두께분포라는 것은 국부적인 두께감소가 없고 전체적인 두께분포가 소재두께에 가까운 것을 의미한다.

Fig. 8, 9는 블랭크에 따른 1공정의 두께분포를 나타낸다. 공통적인 것은 B type의 두께감소가 측벽부에서 다른 블랭크보다 심하게 나타나는 것이다. 그러나 Fig. 8의

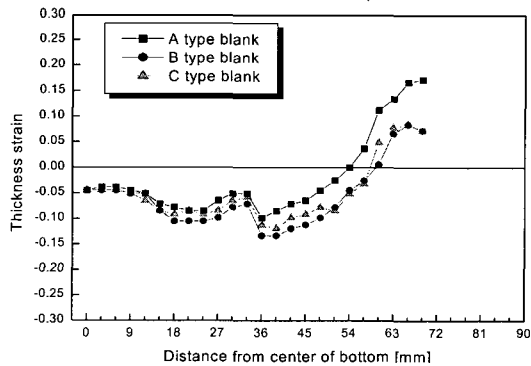


Fig. 8 Thickness distributions of long side in first process

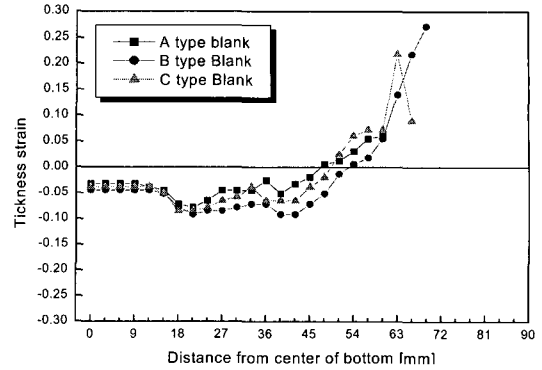


Fig. 9 Thickness distribution of short side in first process

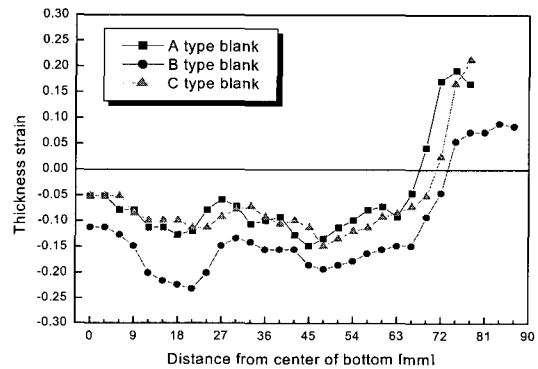


Fig. 10 Thickness distribution of long side in second process

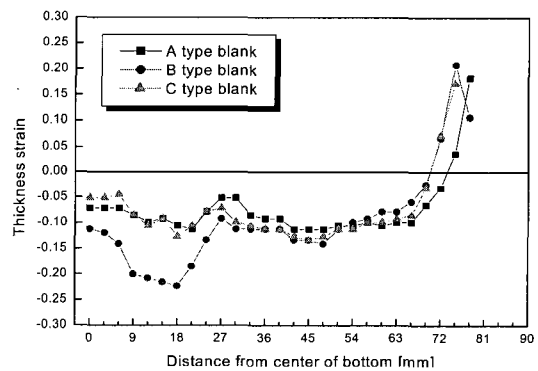


Fig. 11 Thickness distribution of short side in second process

단변부 두께분포에서는 플렌지(flange)의 두께가 다른 블랭크 보다 많이 증가한다. 이것은 Fig. 7에서 보여주는 B type의 기하학적인 특징에서 기인한다고 사료된다.

Fig. 10, 11은 2공정의 두께분포 결과이다. B type의 경우에 두께감소가 가속화되었음을 보여준다. 이 결과로부터 1공정에서의 두께감소 최소화가 공정설계에서 중요함을 알 수 있다. 이런 두께분포의 차이가 심화되는 것은 장변부의 두께분포를 공정별로 나타낸 Fig. 12~Fig. 15에서 알 수 있다.

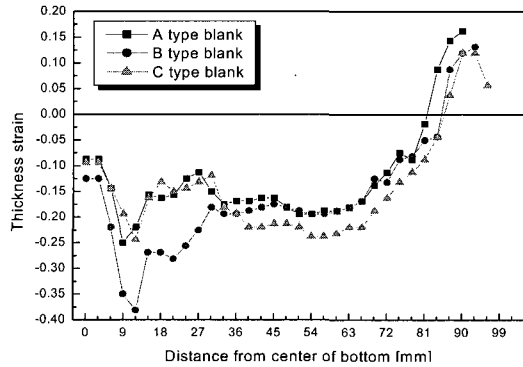


Fig. 12 Thickness distribution of long side in third process

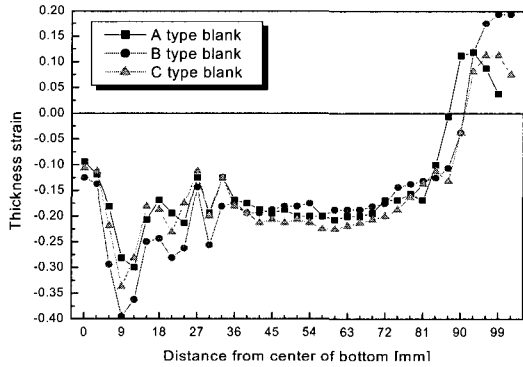


Fig. 13 Thickness distribution of long side in fourth process

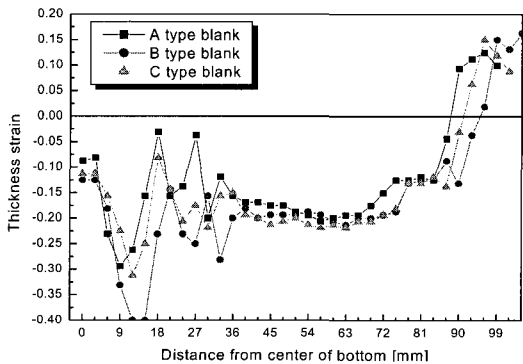


Fig.14 Thickness distribution of long side in fifth process

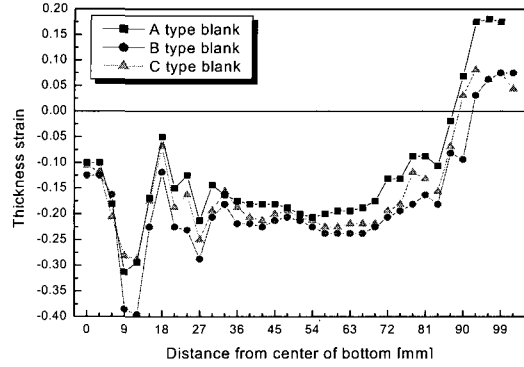


Fig.15 Thickness distribution of long side in sixth process

실험에 의해 측정된 두께분포 측면에서 블랭크에 따른 영향을 고찰해 보면 B type보다 A, C type이 우수하게 나타난다.

3. 유한요소해석

3.1 전처리 과정

유한요소해석은 상용해석프로그램인 코드인 MARC를 이용하였다. Fig. 16은 1공정을 모델링(modeling)한 형상으로 블랭크를 제외한 나머지 요소들은 변형이 없는 강체(rigid body)로 설정하였다. Table 1은 강체들의 설정 값이고, 강체부분은 곡면의 집합으로 형성된다.

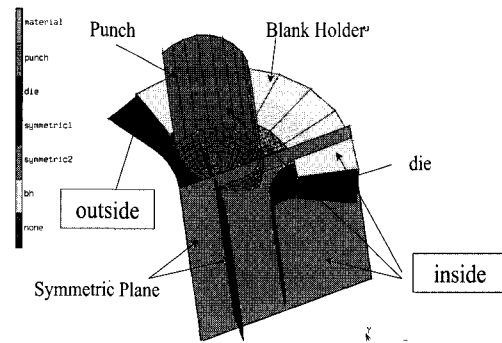


Fig. 16 Modeling of deep drawing process

변형체(deformable body)부분인 블랭크는 4-노드 셀 요소(4-node shell element)를 이용하여 메쉬 생성(mesh generation)을 했으며 그 형상은 Fig. 17~Fig. 19와 같다. Table 2는 블랭크별로 노드(node)와 요소(element)의 수를 나타내었다. 마찰상수(μ)는 윤활상태를 고려하여

$\mu=0.04$ 로 하고, 소재물성은 인장실험을 통해 구한 응력 변형률 선도를 이용하였으며, 이방성은 고려하지 않았다. Table 3은 유한요소해석 시뮬레이션을 위한 재료변수와 공정변수이다. 특이할 점은 블랭크의 형상이 2축 대칭이

므로 전체형상의 1/4 모델링 되었고, 경계조건은 MARC의 조건(option)인 축평면(Symmetric Plane)을 이용하여 단변부에 z방향, 장변부에 y방향으로 구속한 것이다.

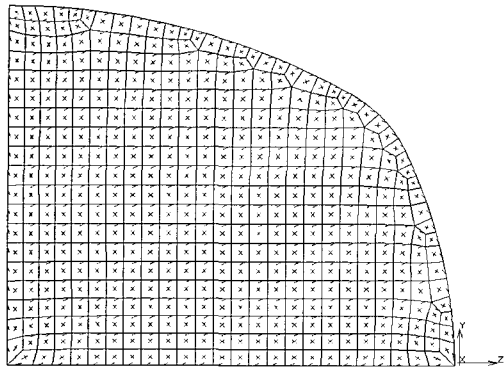


Fig. 17 A type blank for FE analysis

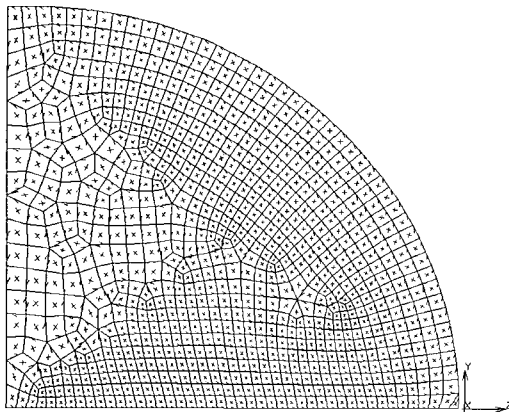


Fig. 18 B type blank for FE analysis

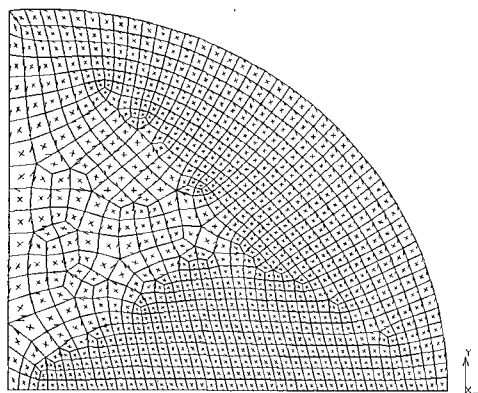


Fig. 19 C type blank for FE analysis

Table 1 Contact body

	Form of surface	Number of surface	Method of control
Punch	NURB ⁽¹⁶⁾	72	Load
Blank holder	NURB	10	Displacement
Die	NURB	30	Fixed
Symmetric plan	NURB	2	

Table 2 Number of node & element

	A type	B type	C type
Number of node	435	823	823
Number of element	482	878	883

Table 3 Material & process variables

Default thickness [mm]	1.6
Stress-strain curve [MPa]	$\sigma = 524 \epsilon^{0.247}$
Blank holding force [kgf]	1000
Clearance [mm]	2.0
Frictional coefficient	0.04

3.2 해석 결과

Fig. 20~Fig. 21은 두께분포와 성형 후의 형상을 초기 블랭크 형상에 대비해서 각 type 별로 보여주고 있다. 여기서 공통점은 앞의 실험 결과에서도 보여 주듯이 단변부의 두께증가가 있었고 장변부의 펀치 어깨 부에서 두께감소가 3mm (18.75%)이상인 부분이 많이 존재함을 보여준다.

A type인 경우는 플랜지형상을 볼 때 45° 방향의 기하학적인 특징에 의한 영향이 크다. 이러한 특징에 의해서 이 부위는 성형이 끝날 때까지 블랭크 홀딩력을 받게 된다. 그래서 Fig. 20에서 보여주듯이 같은 성형깊이의 다른 부분보다 두께가 낮게 나타난다.

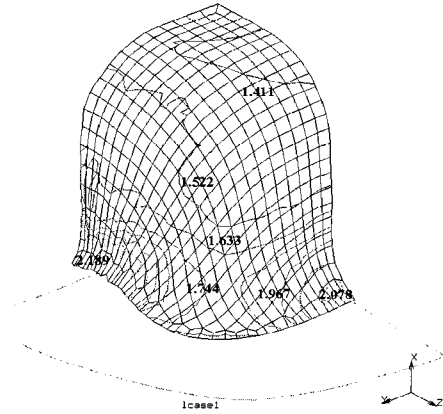


Fig. 20 Deformed shape of A type obtained by using FE analysis

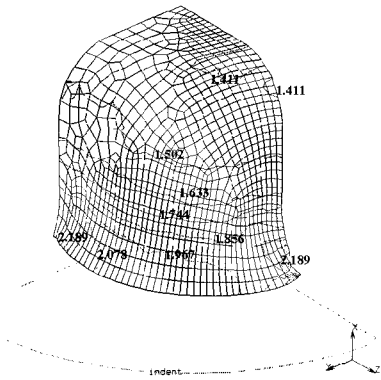


Fig. 21 Deformed shape of B type obtained by using FE analysis

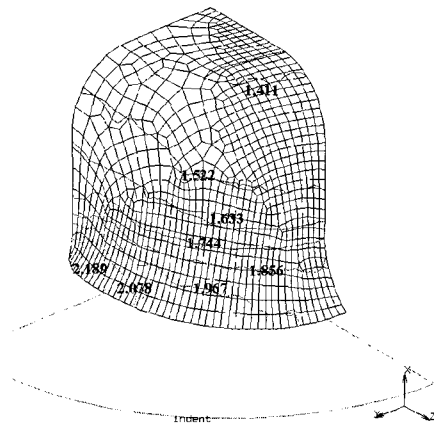


Fig. 22 Deformed shape of C type obtained by using FE analysis

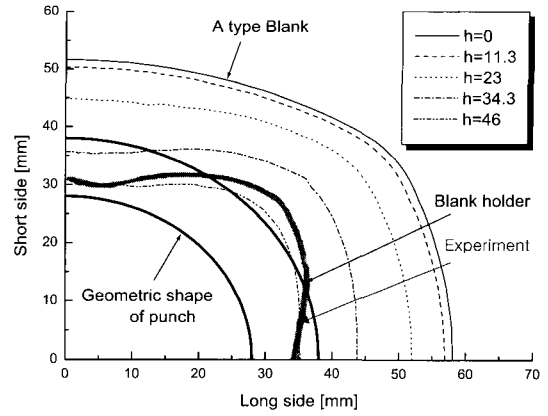


Fig. 23 Flange contour-line by deformed-height ; A type

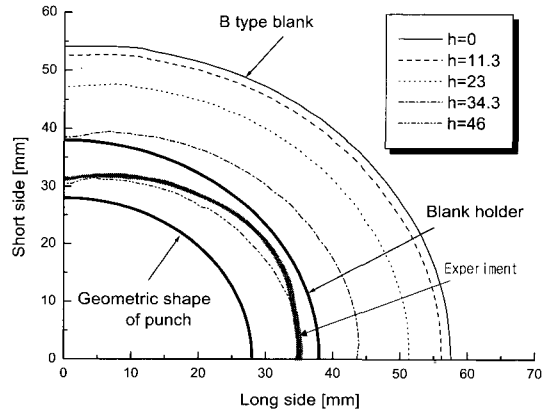


Fig. 24 Flange contour-line by deformed-height ; B type

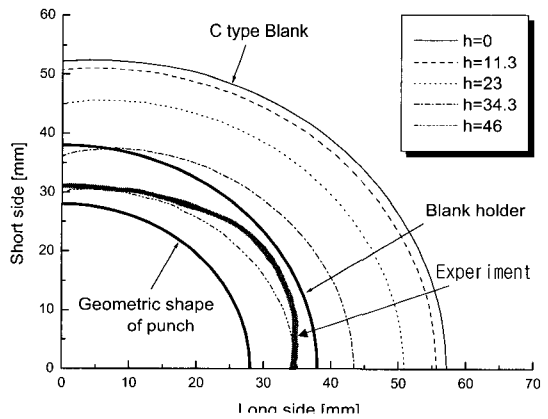


Fig. 25 Flange contour-line by deformed-height ; C type

또한, 다른 형상보다 A type인 경우는 두께분포가 장변부에서 초기 두께 값보다 낮은 부분이 바닥중심으로부터 멀리까지 나타나 있음을 관찰 할 수 있다.

Fig. 21의 B type인 경우는 같은 성형 깊이에서 장·단변부의 두께차이는 없지만 전체적으로 초기 블랭크의 두께 값보다 낮은 부분이 상당히 존재하고, 펀치 어귀에서 두께가 국부적으로 매우 낮은 곳이 존재한다. 또한 단변부에서 직변을 가지는 기하학적인 특징에 의해서 전체적으로 유입저항이 증가하여 플랜지의 두께증가가 다른 블랭크보다 높게 나타난다.

Fig. 22의 C type은 다른 블랭크보다 단변부와 장변부의 차이가 거의 없이 두께분포는 매우 양호하게 나타났다.

Fig. 23~Fig. 25는 블랭크 형상의 영향을 성형 중에 알아보기 위해 실험에서 얻기 어려운 공정 중의 데이터를 유한요소해석을 통해 나타내었다.

Fig. 23의 A type인 경우는 단변부 주위에서 많은 부분이 블랭크 홀더를 벗어나 소재유입이 원활하지만 모서리부위에서 블랭크가 이탈하지 못하고 이로 인해 장변부의 두께감소가 나타나는 원인이 된다.

Fig. 24의 B type인 경우는 성형깊이($h=34.5\text{mm}$)가 완전성형 후의 3/4이 되었을 때에도 단변부가 블랭크 홀더를 벗어나지 못하였다. 이것은 B type의 형상 특징에 기인한다고 사료된다. 이로 인해 단변부에서 유입저항이 커지고 그 만큼 소재이동도 원활하지 못하게 된다. 이것이 B type이 두께감소가 심한 이유가 된다.

Fig. 25의 C type에서 블랭크 홀더 주위에서 플랜지의 형상을 다른 블랭크와 비교해보면 재료의 유입이 다른 블랭크보다 원활한 것을 알 수 있다. 이런 이유로 인해 C type이 다른 블랭크보다 두께분포가 양호하게 나타난다.

성형 후의 플랜지 외곽형상에서 실험 데이터와 유한요소해석 결과를 비교하여 보면 45° 방향으로 실험데이터가 값이 높게 나타났다. 이 이유는 유한요소해석을 할 때 평면 이방성(planar anisotropy)을 고려하지 않았기 때문이라고 사료된다.

Fig. 26은 성형 깊이 별로 플랜지의 형상을 나타낸 것이다. 초기 성형이 진행이 될 때에는 재료유입이 미미하다. 이것은 성형 메커니즘 초기에는 펀치력이 드로잉에 쓰여지지 않고 다이 형상반경(profile radius)에서 발생하는 굽힘 작용에 사용되고 있기 때문이라고 사료된다. 성형높이가 $h=11.5\text{mm}$ 이상부터 소재이동이 증가하고 있음을 보여준다.

Fig. 27의 단변부에서 보면 재료유입 양상이 블랭크 홀더를 떠난 이후 달라지게 되는데, 이것은 블랭크 홀더에 의한 압축력이 없어지고 성형하중에만 의해서 변화되기 때문이라고 사료된다.

이러한 결과들로부터 블랭크의 형상에 따라서 유입저항이 변화되어 소재이동이 달라지고 두께분포가 달라짐을 확인하였고, 타원형 디프 드로잉에서 최적의 블랭크 형상을 제시할 수 있었다.

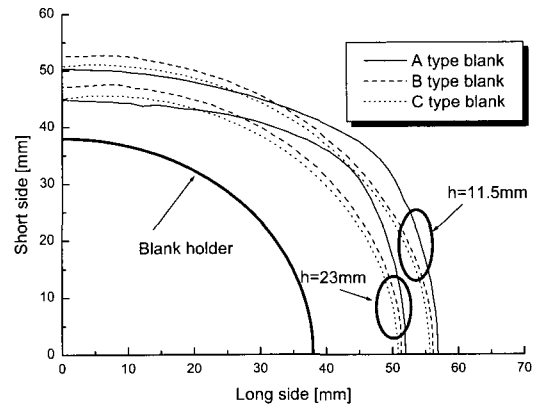


Fig. 26 Flange contour-line by deformed-height ; $h=11.5, h=23$

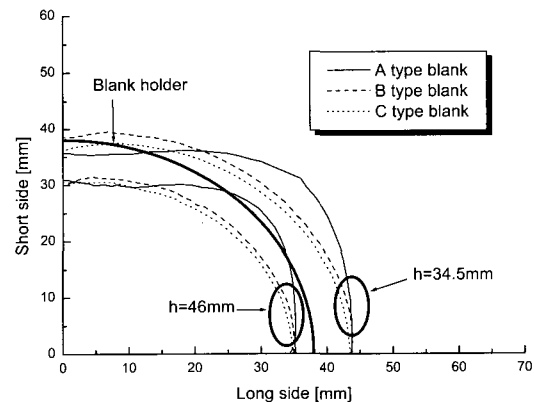


Fig. 27 Flange contour-line by deformed-height ; $h=34.5, h=46$

4. 결론

본 연구는 비축대칭 디프 드로잉 제품에서 타원형상의 블랭크가 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험과 유한요소해석을 함으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 타원형을 기본으로 한 블랭크(C type)는 다른 블랭크(A, B type)보다 제품의 두께 변화가 비교적 균일하고, 국부적인 두께 감소가 작으므로 성형성에서 우수하였다.

(2) 성형깊이에 따른 소재이동과 플랜지 형상변화가 관찰 가능하여 블랭크 외곽형상의 기하학적인 특성이 성형초기의 유입저항을 좌우하는 것을 알 수 있었고, 이것이 제품의 성형성에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T. C. Hsu, S. Y. Lee, 1977, "On the drawability of sheet metal in noncircular cups", ASME J. of Eng. for Industry, pp. 615~619.
- (2) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, "Deep drawing square-shape sheet metal parts, Part 1 : Finite Element Analysis", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 115, pp. 102~109.
- (3) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, "Deep drawing square-shape sheet metal parts, Part 2 : Experimental study", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 115, pp. 110~117.
- (4) 김두환, 1998, "원통형 용기의 다단계 딥드로잉 공정 설계에 관한 연구", 한국소성학회지, 제7권, 제3호, pp. 225~232.
- (5) 김두환, 1998, "원통형 딥드로잉 용기의 벽 두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구", 한국소성학회지, 제7권, 제4호, pp. 393~399.
- (6) 최영, 이규호, 외 3인, 1998, "성형한계를 고려한 디프 드로잉 공정설계에 대한 유한 요소 해석", 한국소성학회지, 제7권, 제6호, pp. 562~569.
- (7) 전기찬, 1993, "박판금속의 성형", 반도출판사, pp. 131~177.
- (8) 太田 哲 著, 1972, "프레스絞り加工工程設計", 日刊工業新聞社, pp. 157~167.
- (9) J. Ronda, C. D. Mercer, A. S. Bothma, G. J. Oliver, K. W. Colville, 1995, "Simulation of square-cup deep-drawing with various friction and material models", J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 50, pp. 92~104.
- (10) M. Kawka, A. Makinouchi, 1995, "Shell-element formulation in the static FEM code for the simulation of sheet stamping", J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 50 105~115.
- (11) S. H. Park, J. W. Yoon, D. Y. Yang, Y. H. Kim, 1999, "Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method", Int. J. of Mech. Sci., Vol 41, pp. 1217~1232.
- (12) 정동원, 양동열, 1995, "딥드로잉에서 박판두께를 고려한 블랭크홀딩력을 가하는 개선된 방법" 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 89~96.
- (13) 양동열, 1993, "박판성형에서의 CAD/CAM/CAE", 대한기계학회지, 제33권, 제3호, pp. 231~241.
- (14) G. Eshel, M. M. Barash, W. Johnson, 1986, "Automatic generation of process outlines of forming and machining processes", Purdue Uni., pp. 70~163.
- (15) 中 川 威 雄, 1993, "新プレス加工データブック", 新プレス加工データブック編集委員会編, pp. 241~267.
- (16) 이건우, 1998, "컴퓨터 그래픽과 CAD", 영지문화사, pp. 235~257.