

## 비축대칭 디프 드로잉 제품의 박판 성형 해석

박동환\* · 배원락\* · 강성수\*\*\*

(2000년 10월 2일 접수)

### Analysis of Sheet Metal Forming for Non-Axisymmetric Deep Drawing Products

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

#### Abstract

In order to obtain the optimal products in deep drawing process, elliptical deep drawing tests were carried out with several shape radii of the punch and die. As parameters on testing, shape radii of the punch and die were selected. In addition, the conventional shape radii have been determined by trial-and-error using industrial experience and post processing test, and only approximate shape radii of the punch and die have been presented. The optimal shape radii of the punch and die in elliptical deep drawing process with biaxially symmetric blank shape are proposed. In this study, we suggest the appropriate conditions to be applicable to the actual manufacturing processes through the experiment and finite element method.

**Key Words** : Deep Drawing, Punch Shape Radius, Die Shape Radius, Finite Element Method

#### 1. 서론

오늘날 자동차 및 가전산업에서 금형 제작 기술은 전체 제품 개발의 40~50%의 비중을 차지하며, 제품의 외관과 품질 및 신제품 개발 주기에 결정적인 영향을 미치는 중요한 부분이지만, 이 분야의 연구는 취약한 상태이다. 현재까지 축대칭의 원통형 디프 드로잉 제품에 대한 연구는 많았지만, 타원형 블랭크의 성형을 비롯한 특수한 형상의 제품에 대한 연구 사례가 많지 않은 실정이다.<sup>(1,2)</sup>

디프 드로잉 공정에서 성형성을 향상시키기 위한 방

안은 여러 가지가 제안되고 있다. 먼저 하이드로성형 공법(hydro-forming method)이다.<sup>(3)</sup> 이 공법은 성형방법상 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 성형이 어려운 제품을 액압을 이용하여 성형함으로써 종래의 성형에서보다 월등한 성형성을 확보하는 것이고, 둘째는 원형 강판을 팽창 성형하여 원하는 모양의 제품을 제작하는 공법이다. 다음으로 온간 성형 공법(warm drawing method)이다.<sup>(4)</sup> 이 공법은 상온에서의 낮은 드로잉성을 향상시키기 위하여 다이 및 블랭크 홀더를 가열하여 제품의 플랜지에 변형저항을 낮추고, 펀치는 상온으로 유지하거나 냉각하여 펀치 어깨부에서의 파단저항을 높여 성형성을

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부

항상시키는 공법이다. 마지막으로 냉간 성형 공법(cold drawing method)이다. 이 공법은 가장 일반적 성형 공법으로써 펀치, 다이 등의 금형을 제작하여 상온에서 성형하는 공법이다.

성형성에 영향을 미치는 공정변수로는 펀치 및 다이의 형상반경(shape radius), 윤활조건, 가공속도, 플랜지 면의 주름을 억제하기 위해서 부과하는 블랭크 가압력(blank holding force)과 마찰계수, 클리어런스(clearance) 등이 있다.<sup>(5-10)</sup> 특히, 재료를 성형하기 위한 펀치와 다이의 형상반경이 성형성에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 여기서는 냉간 성형 공법으로 펀치 및 다이 형상반경을 공정변수로 하였다.

일반적으로 디프 드로잉 성형은 균일한 두께의 판재를 가공하여 소요 형상의 제품을 만드는 것이다. 단단계 공정에서는 최종 공정의 두께 균일도가 좋지 않게 될 수 있으므로 초드로잉에서 최종 공정까지의 두께 분포가 균일하게 되도록 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이다. 그리고 국부적으로 두께감소가 발생하면 성형 결함 등의 원인이 될 수 있다.

따라서, 본 연구는 비축대칭 블랭크의 디프 드로잉 성형성을 향상시키기 위한 방안으로 펀치 및 다이의 형상반경이 성형성에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 소재는 실제로 자동차 부품에서 사용빈도가 높은 전기아연 도금강판(SECE)이고, 두께는 1.6mm이다.

### 2.1 실험 장치

실험에 사용된 장비는 500ton 트랜스퍼 프레스(mechanical transfer press)로 블랭크 홀더 압력을 임의로 조절할 수 있는 다이쿠션(die cushion)과 제품 추출을 위한 녹아웃(knock out) 장치가 갖추어져 있다. 실험에 적용된 제품은 디프 드로잉 공정이 7공정, 후공정이 4공정으로 이루어져 총 11공정이다. Fig. 1은 프레스에 장착된 금형을 나타내고, Fig. 2는 모터 프레임(Motor Frame) 제품에 대한 디프 드로잉 공정을 나타낸다.

초드로잉 공정에서 펀치 형상반경(Rp), 다이 형상반경(Rd)과 클리어런스는 Table 1과 같다. 다이 형상반경을 16mm(10t)로 하고, 펀치 형상반경을 3가지 성형 조건으로 선정하였다. 이와 같이 선정한 이유는 기존 문헌에 제시된 초드로잉 공정의 펀치 형상반경의 범위(4t~10t)가 너무 광범위하고 실험을 통한 실제 데이터와 비교 검토하기 위하여 그 범위 내에서 선정하였다.

Table 1 Test conditions in first drawing process

Type	Rp [mm]	Rd [mm]	Clearance [mm]
A	6.4	16.0(10t)	2.0(1.25t)
B	9.6	16.0	
C	12.8	16.0	

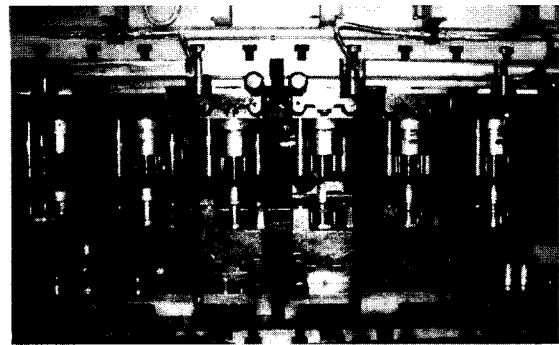


Fig. 1 Experimental equipment for deep drawing process

### 2.2 실험 방법

트랜스퍼 금형을 프레스에 클램핑(clamping) 하였으며, 성형속도는 8spm으로 일정하게 유지하였다. 블랭크 홀더력은 디프 드로잉 공정에서 최적의 제품을 성형하기 위해 실험을 통하여 다이쿠션에 걸리는 압력을 초드로잉 공정에서는 3kgf/mm<sup>2</sup>, 재드로잉과 타원형 드로잉 공정에서는 2kgf/mm<sup>2</sup>로 결정하였다. 윤활제는 수용성 소성가공유로서 일반적인 드로잉 유를 사용하였고, 소재를 드로잉 다이에 삽입할 때는 블랭크 중심을 다이 중심에 정확히 일치시킨 후 드로잉 하였다.

Fig. 3은 타원형 디프 드로잉 공정의 블랭크의 형상과 크기를 나타낸다. 장변이 118mm이고, 단변이 105mm인 블랭크는 산업현장의 시행착오를 통하여 최적의 블랭크 형상을 결정하였다. Fig. 4는 타원형 디프 드로잉 제품에서 해석에 사용된 초드로잉 금형의 기하학적 형상을 나타낸다. 초드로잉 및 재드로잉 공정에서 원통형으로 디프 드로잉 되고, 다음 공정인 타원형 드로잉 공정에서 타원형으로 제품이 성형된다. Fig. 5는 초드로잉 공정의 형상을 나타낸다. 여기서 중심선 왼쪽은 장변부를 나타내고, 오른쪽은 단변부를 나타낸다.

비축대칭 디프 드로잉 제품의 박판 성형 해석

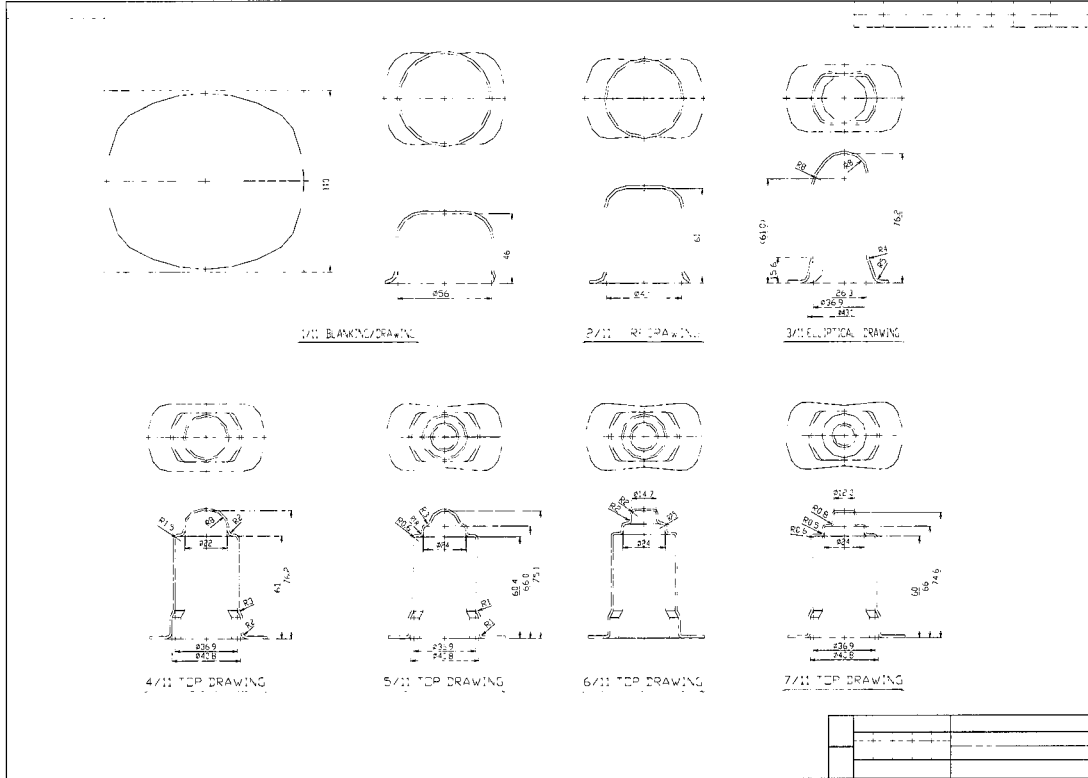


Fig. 2 Sequence drawing for the deep drawing product of the "Motor Frame"-Industrial practice

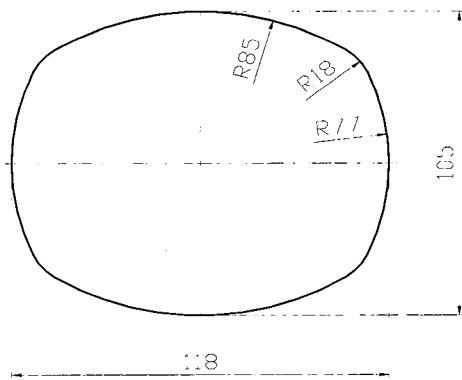


Fig. 3 Geometry of elliptical blank

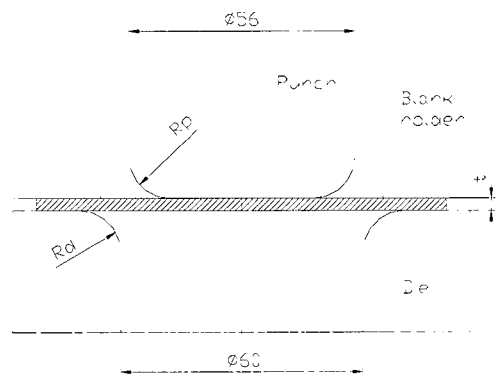


Fig. 4 Dimensions of the tools used for the simulation in the first drawing process

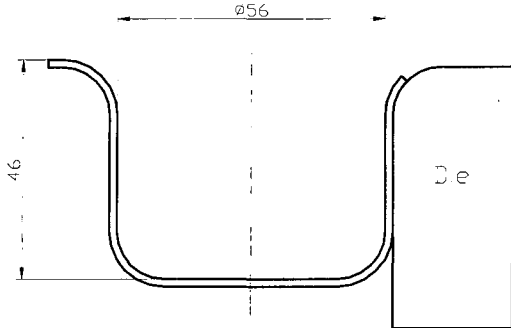


Fig. 5 Geometry of first drawing process

디프 드로잉 실험을 통하여 얻은 제품은 연삭 절단기로 절단하고, 포인트 마이크로미터(point micrometer)를 사용하여 두께를 각 공정별 장변부와 단변부로 나누어서, 제품의 중심에서 3mm 간격으로 플랜지(flange) 끝단까지 측정하였다.

### 3. 성형해석 결과 및 고찰

타원형 디프 드로잉의 성형성을 향상시키기 위한 방안으로 가공성과 현장 사용여부를 고려하여, 펀치 및 다이의 형상반경이 두께에 미치는 영향을 실험하여 얻은 결과와 해석한 결과를 비교하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소법(FEM) 해석코드인 MARC를 사용하여 해석하였다. 물성치는 단순인장 실험을 통해 구한 값들을 사용하였다.

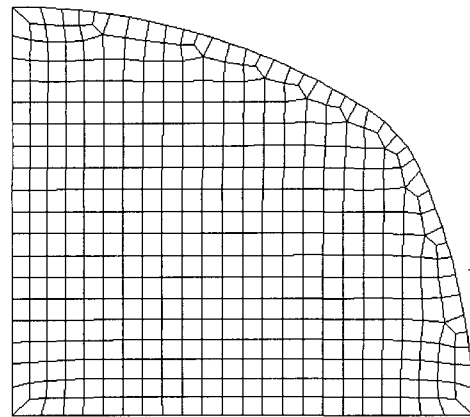
해석에 사용된 모터 프레임 제품은 자동차 파워 윈도우용 부품의 하나로서 타원형상의 다단계 디프 드로잉 제품이다. 이 제품은 박판 성형 과정 중에 복잡한 기하학적 형상과 드로잉 깊이가 깊기 때문에 재료의 미끄러짐과 재분포가 일어나서 성형하기가 매우 어렵고, 플랜지의 평탄도 및 동심도가 매우 중요한 부품이다. 금형은 AutoCAD 시스템에 의해 모델링 되었다.

Fig. 6은 유한요소격자로 요소(element)는 404, 노드(node)는 445개를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료와 공정변수들은 Table 2와 같다. 마찰계수( $\mu$ )는 펀치와 소재, 다이와 소재, 블랭크 홀더와 소재사이에 드로잉유를 주입하여 윤활시키므로 윤활 상태의 마찰계수로 0.04를 주었다.

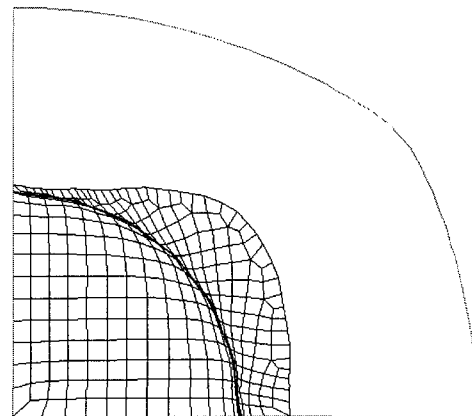
비축대칭의 특징을 고려하여 입력 형상은 블랭크의 1/4을 모델링하여 경계면에 구속을 주었고, 4-node shell

Table 2 Input data for calculation

Sheet thickness	1.6mm
Clearance	2.0mm
Young's modulus	$2.1 \times 10^5$ MPa
Blank holding force	9800N
Lankford value(R)	1.37
Plastic coefficient(K)	524MPa
Strain hardening exponent(n)	0.22
Friction coefficient( $\mu$ )	0.04



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Element mesh shape of the initial blank  
(b) The simulated result of elliptical deep drawing product

element로 해석하였다. 소재 물성은 인장시험으로 구한 응력-변형률 선도를 이용하였으며, 이방성은 인장시험에서 각 방향에 대하여 거의 비슷하게 나타나므로 고려하지 않았다. 펀치 및 다이 형상반경을 제외한 공정인자들은 동일한 조건으로 해석하였다.

디프 드로잉 공정은 펀치 어깨부에 가해지는 펀치력에 의해 간접적으로 전달되는 하중으로 성형이 이루어진다.

그러므로, 펀치 어깨부는 하중의 지지부가 되어서 심한 변형이 유발된다. 그 결과 두께 감소가 최대로 일어나게 된다. 그래서, 보통 펀치 형상반경은 초드로잉의 경우  $4t$  이상이 되어야 한다. 다이 형상반경이 크면 소재가 다이 공(die cavity)으로 원활히 유입되지만, 너무 큰 값은 소재가 다이를 벗어나는 경우에 지지부가 없어져서 주름이 발생한다. 그러므로, 펀치 형상반경과 다이 형상반경은 성형성에 있어서 매우 중요한 공정변수가 된다.

Fig. 7, 8, 9는 변형된 플랜지의 윤곽으로 본 해석 결과를 FEM 해석 및 디프 드로잉 실험 결과와 비교해 보았다. 즉, 펀치 행정 0, 11.5, 23, 34.5, 46mm에서의 초기 박판의 플랜지 변화에 따른 장·단변부의 플랜지 크기를 나타낸다.

Fig. 7은 금형의 형상을 Table 1의 A로 하였을 때 펀치 행정 46mm에서 플랜지의 윤곽은 장·단변부에서 실험과 해석 결과가 거의 일치하고, 모서리 부위에서 불일치하였다. 이것은 타원형 블랭크에서 장변부와 단변부의 유입저항 차이에 의한 영향이라고 판단된다.

Fig. 8은 펀치 행정 46mm에서 플랜지의 윤곽은 장변부에서 실험과 해석 결과가 모두 일치하고 있다. 타원형 블랭크에서 장변부는 다이 공으로 유입될 때 단변부보다 유입저항이 높고, 블랭크 홀더가 소재를 끝까지 잡고 있어 실제와 비슷한 조건으로 인하여 실험 결과와 일치한다고 판단된다. 반면, 단변부는 유입저항이 낮고 성형 후기에 플랜지가 자유상태로 개방되어 있어 주름 및 겹침 등이 발생되어 실험 결과와 불일치 하였다.

Fig. 9는 펀치 행정 46mm에서 플랜지의 윤곽은 특히 단변부와 모서리 부위에서 실험과 해석 결과가 불일치하고 있다. 이것은 장변부가 다이 공으로 유입될 때 단변부보다 유입저항이 높고, 블랭크 홀더가 소재를 끝까지 잡고 있으므로 실험 결과와 일치한다고 판단된다.

Fig. 10은 A type의 경우에 대한 유한요소해석 결과로 나온 썩의 두께 분포를 나타내고 있다. 단변부의 플랜지 끝단에서 두께가 2.65mm로 두께 증가가 나타난다. 이것은 유한요소해석 시에 플랜지 끝단은 성형 종료되기 전부터 블랭크 홀더가 개방상태로 되어 국부적인 두께 증가가 일어난다고 판단된다. 또한 장변부에서도

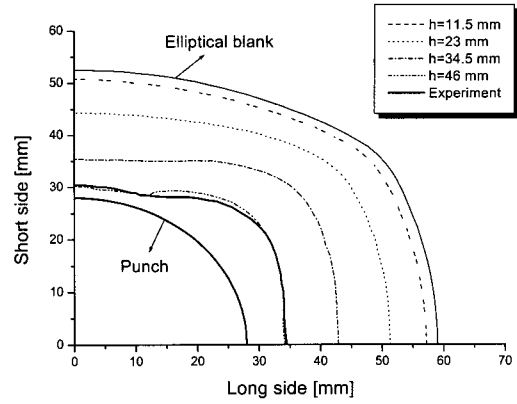


Fig. 7 Comparison of the computed results for the finite element method (A type)

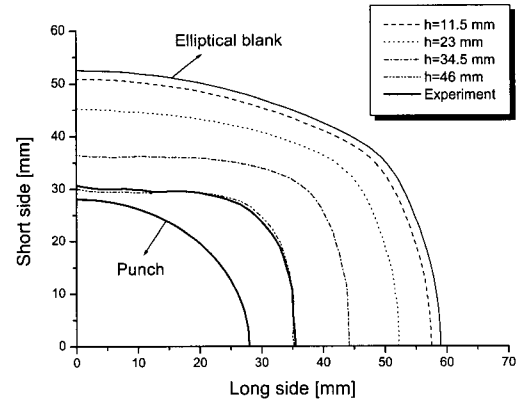


Fig. 8 Comparison of the computed results for the finite element method (B type)

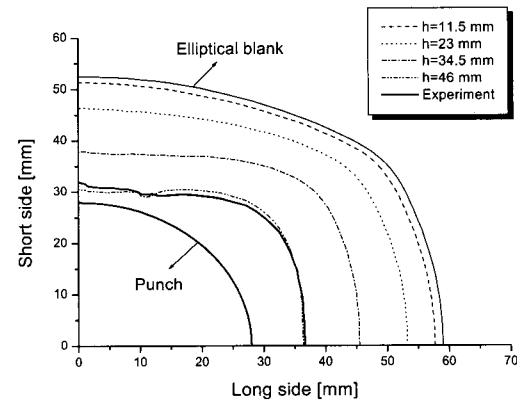


Fig. 9 Comparison of the computed results for the finite element method (C type)

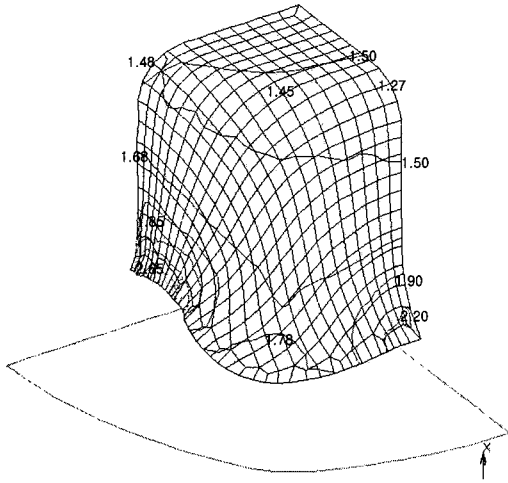


Fig. 10 Thickness distribution of A type for FEM

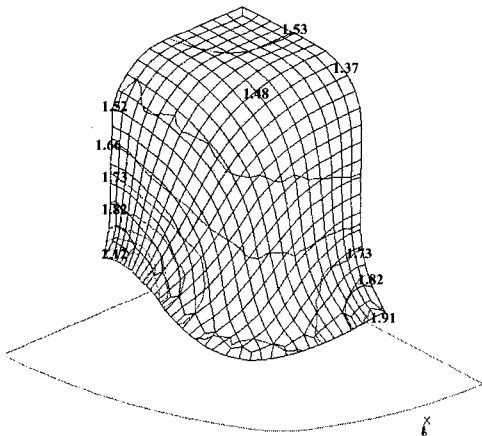


Fig. 11 Thickness distribution of B type for FEM

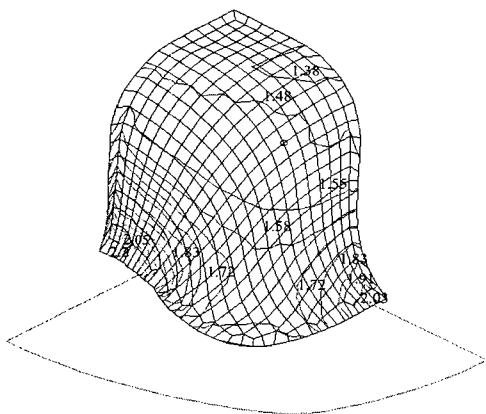


Fig. 12 Thickness distribution of C type for FEM

플랜지 끝단이 2.2mm로 두께 증가가 나타난다.

Fig. 11은 B type의 경우에 대한 유한요소해석 결과로 나온 컵의 두께 분포를 나타내고 있다. 단변부의 플랜지 끝단에서 두께가 2.12mm로 두께 증가가 나타난다. 이것은 A type와 마찬가지로 플랜지 끝단이 성형 종료되기 전부터 블랭크 홀더가 개방상태로 되어 국부적인 두께 증가가 일어난다고 판단된다.

Fig. 12는 C type에 대한 유한요소해석 결과로 나온 컵의 두께 분포를 나타내고 있다. 여기서 장변부는 펀치 어깨부에서 두께가 1.38mm로 두께 감소가 나타나고, 플랜지는 장·단변부 모두 두께 증가가 나타나고 있다. 또한, 장변부와 단변부 사이의 코너부 플랜지는 장·단변부만큼 두께 증가가 나타나지 않는다.

위의 Fig. 10, 11, 12의 결과를 비교해 보면, 펀치 머리부 주위에서는 A type의 장변부에서 1.27mm로 다른 것보다 두께 감소가 나타나지만, B type와 C type는 1.37, 1.38mm로 거의 비슷하게 나타난다. 또한, 플랜지 끝단에서는 B type이 두께 증가가 두꺼운 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 A type( $R_p=6.4$ ,  $R_d=16$ )일 때 두께 분포를 나타낸다. 성형해석과 실험 결과를 비교해 보면, 장변부의 펀치 어깨부에서 국부적으로 두께 감소가 나타나는데, 특히 해석 결과가 1.27mm로 더 낮게 나타난다. 반면, 펀치 머리부와 플랜지에서는 해석 결과가 더 높게 나타남을 알 수 있다. 단변부에서는 전체적으로 실험 결과보다 해석 결과가 두께 증가를 보인다. 이것은 펀치 형상반경( $R_p$ )이 6.4로 작은 경우에 펀치 어깨부에서 굽힘반경이 작아져 드로우-인 모드(draw-in mode)로 되어 펀치 어깨부에서의 국부적인 두께 감소가 나타난다고 판단된다.

Fig. 14는 B type( $R_p=9.6$ ,  $R_d=16$ )일 때 두께 분포를 나타낸다. 펀치 머리부에서 장변부와 단변부 모두 해석 결과가 1.55mm로 거의 일치하고, 펀치 어깨부에서는 A type와 달리 국부적인 두께 감소가 완만해짐을 알 수 있다.

Fig. 15는 C type( $R_p=12.8$ ,  $R_d=16$ )일 때 장, 단변부의 두께 분포를 나타낸다. 펀치 머리부에서 장변부와 단변부 모두 실험과 해석 결과가 1.48mm로 거의 일치하고, 펀치 어깨부에서는 B type보다 국부적인 두께 감소가 더욱 완만해짐을 알 수 있다. 이것은 펀치 형상반경( $R_p$ )이 12.8로 큰 경우에 펀치 어깨부에서 굽힘반경이 커져 스트레칭 모드(stretching mode)로 되어 펀치 어깨부에서의 국부적인 두께 감소가 둔화된다고 판단된다.

위의 3가지 해석과 실험을 통한 결과에서  $R_p$ 가 9.6이

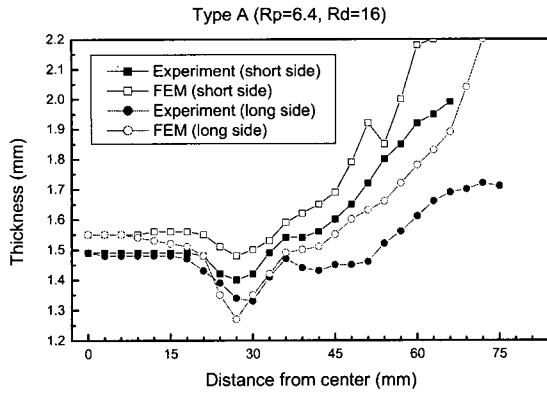


Fig. 13 Comparison of the experimental results and FEM in A type

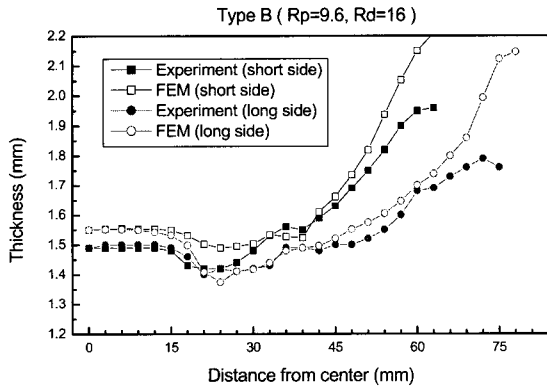


Fig. 14 Comparison of the experimental results and FEM in B type

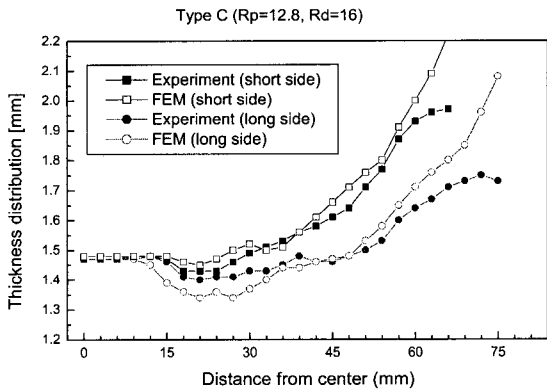


Fig. 15 Comparison of the experimental results and FEM in C type

고, Rd가 16인 경우, 즉 B type인 경우에 편치 머리부에서 플랜지까지 두께분포가 가장 양호하게 나타났다. 이것은 Rp는 너무 크거나 작으면 두께분포에서 불리하며, Rd는 큰 쪽이 두께분포에서 유리하다고 사료된다.

디프 드로잉 공정의 주변형 모드는 드로우-인 모드(draw-in mode)와 스트레칭 모드(stretching mode)로 구성되는데<sup>(11)</sup>, 이러한 양상은 편치형상 반경의 크기 변화에 따라 관찰되었다. 예를 들어, A type와 C type를 비교해 보면, A type의 경우는 드로우-인 모드의 양상이 뚜렷한 반면, C type는 스트레칭의 영향이 크다. 그래서, A type는 편치 어깨부의 두께가 가장 낮게 나타났고, 전체적으로 두께 감소가 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 공정상의 특징 때문에 두 가지 모드가 균형을 이루면서도 상호보완적인 값을 지니는 B type인 경우 좋은 결과가 나타남을 FEM 해석으로 확인하였다. 이러한 결과는 다이 형상반경은 클수록 재료의 유동을 원활히 해주고, 편치 형상반경은 드로우-인 모드와 스트레칭 모드가 절충되는 점에서 최적의 값을 가진다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 타원형 디프 드로잉 제품에서 최적의 두께 분포를 가지는 조건을 찾음으로써 형상반경이 성형성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이상의 해석 결과에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 다단계 공정의 타원형 디프 드로잉 금형에서 성형성 향상을 위한 초드로잉 공정의 편치 및 다이 형상반경을 도출하여 공정에 반영하였다.
- (2) 초드로잉 공정의 편치 형상반경 및 다이 형상반경을 결정할 때 편치 형상반경을 너무 작게 결정하면 편치 어깨부에서의 극부적인 두께감소가 나타나서 이 부분에서 파단이 발생할 가능성이 큼을 알 수 있었다.
- (3) 실험과 해석을 통하여 최적의 편치 형상반경을 검증할 수 있었고, 이 경우에 드로우-인, 스트레칭의 두 가지 모드가 절충되어 나타남을 알 수 있었다.

#### 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," J. of Eng. for Industry, pp. 615~619.
- (2) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, "Deep Drawing of Square-Shape Sheet Metal Parts, Part 2: Experimental Study," J. of Eng. for Industry, Vol. 115, pp. 110~117.
- (3) S. Thiruvarudchelvan, W. Lewis, 1999, "A note on hydroforming with constant fluid pressure," J. Mat. Pro. Tech. Vol 88, pp. 51~56.
- (4) 박동환, 박상봉, 강성수, 2000, "타원형 디프 드로잉 공정의 성형성 향상에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제9권 제2호, pp. 120~127.
- (5) 박동환, 최병근, 박상봉, 강성수, 1999, "비축대칭 디프 드로잉 제품에 대한 공정설계 시스템의 적용", 한국소성가공학회지, 제8권 제6호, pp. 591~603.
- (6) 橋本 明, 1974, "プレス絞り加工," 日刊工業新聞社, pp. 118~139.
- (7) Edward M. Mielnik, 1991, "Metalworking science and engineering," McGraw-Hill, New York, pp. 779~871.
- (8) 太田 哲, 1972, "プレス絞り加工 工程設計," 日刊工業新聞社, pp. 157~167.
- (9) 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.
- (10) T.H. Choi, C.H. Lee, H. Huh, 1998, "Sheet Metal Forming Analysis of Planar Anisotropic Materials with a Proper Numerical Scheme for the Blank Holding Force," METALS AND MATERIALS, Vol. 4, No. 3, pp. 408~419.
- (11) G. Eshel, M.M. Barash, W. Johnson, 1986, "Automatic generation of process outlines of forming and machining processes," Purdue Uni., pp. 70~163.