

비축대칭 디프 드로잉 제품에 대한 공정설계 시스템의 적용

박동환* · 최병근* · 박상봉** · 강성수***

(1999년 7월 21일 접수)

Application of Process Planning System for Non-Axisymmetric Deep Drawing Products

D. H. Park, B. K. Choi, S. B. Park and S. S. Kang

Abstract

A computer-aided process planning system for rotationally symmetric deep drawing products has been developed. The application for non-axisymmetric components, however, has not been reported yet. Therefore, this study investigates process sequence design in deep drawing process and constructs a computer-aided process planning system for non-axisymmetric motor frame products with elliptical shape. The system developed consists of three modules. The first one is a 3-dimensional modeling module to calculate surface area for non-axisymmetric products. The second one is a blank design module that creates an oval-shaped blank with the identical surface area. The third one is a process planning module based on production rules that play the best important roles in an expert system for manufacturing. The production rules are generated and upgraded by interviewing with field engineers. Especially, drawing coefficient, punch and die radii are considered as main design parameters. The constructed system for elliptical deep drawing products would be very useful to reduce lead time and improve accuracy for production.

Key Words : Elliptical Shape, Production Rule, Process Plan, Preform

1. 서 론

디프 드로잉 제품은 그 형상에 따라 축대칭 원통형컵, 사각컵, 비축대칭컵 등으로 나누어진다. 현재까지 원통형 디프 드로잉 제품은 디프 드로잉 가공의 기본으로 많이 연구되었다. 그래서 많은 응용형상들이 이에 근거하여 제작되고 있다. 예를 들어, 타원형과 각형을 생각해 보면 원형에 장축과 단축의 호가 생기면 타원으로 되고, 장축과 단

축이 직선으로 되면 각형이 된다. 이런 개념을 적용하면 드로잉의 원칙은 응용형상이 되더라도 변하지 않는다.

제품이 결정되면 제품의 크기, 형상, 성형변수에 따라 공정설계가 이루어진다. 산업현장에서는 공정설계 시 숙련된 기술자의 경험, 기존의 작업 방식에 근거하여 공정을 설계하고 시험을 통하여 완성한다. 그 결과 시행착오를 되풀이하여 단납기에 대한 대응이 어렵고, 생산비용도 증가하게 된다.

* 부산대학교 대학원
** 동의공업대학 금형설계과
*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

그런데, 최근 컴퓨터의 발전과 더불어 소성가공 분야에
서 공정설계의 자동화에 관한 연구가 활발히 이루어지고
있다. 예를 들어, Park⁽¹⁾ 등은 축대칭 디프 드로잉 제품에
대한 공정설계 자동화 시스템을 개발하였고, T. Altan⁽²⁻³⁾
등은 축대칭 판재 성형에 있어서 지식베이스 시스템을 개
발하였다. 하지만, 모두가 축대칭 디프 드로잉 제품에 대
한 적용이며, 비축대칭에 관한 공정설계 자동화에 관한 연
구는 찾아보기 힘든 실정이다. 비축대칭 제품은 표면적 계
산이 어렵고, 참고할 만한 설계 데이터도 부족하다. 그러
나, 비축대칭 디프 드로잉 제품의 수요가 늘어나고 있으
로 공정설계 자동화에 관한 연구의 필요성은 크다.

본 연구는 비축대칭 형상 중에서 타원형 디프 드로잉 제
품에 대해 공정설계 자동화를 적용하였다. 제품의 몸통 형
상은 장변(Long Side)의 호와, 단변(Short Side)의 직선
으로 구성되며, 형상의 특징을 최대한 이용하여 시스템에
반영하였다. 그리고, 기본적인 디프 드로잉 기초이론과 헨
드북에 나와있는 경험식, 현장 생산자의 시행착오를 통한
경험지식 및 실험자료 등을 기준으로 생산규칙을 만들어
공정설계 자동화 시스템을 구축하였다.

2. 공정설계 규칙

본 연구에서는 축대칭 원통형 디프 드로잉 가공기술을
기본으로 하여, 관련논문과 기술서 등에 제시된 값을 이용
하였다. 하지만, 기존문헌에 나타나 있는 데이터가 너무나
제한적 이어서 현장 기술자와의 인터뷰를 통하여 타원형
제품에 대한 규칙으로 확장시켰으며, 실제 제작 공정을 최
대한 정량화 하는데 주안점을 두었다. 축대칭 원통 드로잉
과 구별되는 주요 규칙은 다음과 같다.

(규칙 1) 장변은 원형, 단변은 직선인 몸통을 타원형으
로 정의한다.

(규칙 2) 완제품 형상과 크기로부터 표면적(TA)을 계
산하는데, 표면적은 완제품을 두께의 중립면을 기준으로
3차원 모델링하여 계산한다.

(규칙 3) 소재의 형상은 판재이며, 블랭크는 원칙적으
로 타원형이다.

(규칙 4) 블랭크 결정 시 완제품에서 플랜지부의 크기는
장변, 단변 각각 소재 두께(t)의 1.25배의 트리밍 여유
를 고려한다.

(규칙 5) 표면적으로부터 등가 전개하여 블랭크 형상과
크기를 결정한다.

(규칙 6) 초드로잉률은 54% ~ 58% 내에서 적용한다.

(규칙 7) 마지막 원통형 드로잉이면, 다음 공정은 중간
형상으로 정의한다.

(규칙 8) 공정은 원통형, 중간형상, 그리고 머리부(top
part) 성형으로 구성된다.

(규칙 9) 중간형상 이전의 변형영역은 원통형으로서,
원통의 드로잉률을 적용한다.

(규칙 10) 중간형상을 설계하려면, 드로잉률은 장변 치
수 기준으로 87% ~ 90% 내에서 적용한다.

(규칙 11) 중간형상 공정에서 컵벽부와 머리부 사이의
반경값은 8R ~ 10R을 적용한다.

(규칙 12) 중간형상 공정에서 머리부는 컵벽에 대해 장
변은 15° ~ 45°, 단변은 0° ~ 5°경사진 직선으로 형상을
결정하고, 표면적일정조건으로 높이를 결정한다.

(규칙 13) 머리부 성형 첫 번째 공정이라면, 드로잉률
은 64% ~ 70 % 내에 있어야 하며, 이후 공정은 재드로
잉률을 적용한다.

(규칙 14) 머리부 마지막 드로잉 공정이면, 드로잉률은
95%로 한다.

(규칙 15) 초드로잉의 펀치 반경(R_p)과 다이 반경(R_d)
값은 재료 두께에 C_{fd} (상수)배를 취한다.

$$R_d = C_{fd} \times t, \text{ where } C_{fd} = 4.0$$

$$R_p = C_{fd} \times t, \text{ where } C_{fd} = 6.0$$

(규칙 16) 원통형 재드로잉에서의 펀치, 다이 반경은
편측 직경감소량의 C_{rd} (상수)배 만큼 취한다. (단, D_n 은
현재 컵 직경, D_{n-1} 은 한단계 이전 컵 직경)

$$R_d = \frac{(D_{n-1} - D_n)}{2} \times C_{rd}, \text{ where } (1.0 < C_{rd} < 1.4)$$

$$R_p = \frac{(D_{n-1} - D_n)}{2} \times C_{rd}, \text{ where } (1.5 < C_{rd} < 2.0)$$

(규칙 17) 중간형상 드로잉에서 펀치, 다이 반경은 장
변과 단변 각각의 편측 직경감소량에 C_{pr} (상수)배 만큼 취
한다. (단, D_{mL} 은 몸통 장변 직경, D_{mS} 는 몸통 단변 직경,
 D_{Cyl} 은 마지막 원통형 드로잉 컵 직경)

$$R_d = \frac{(D_{Cyl} - D_{mL})}{2} \times C_{pr} \text{ (for Long Side), where } (1.5 < C_{pr} < 2.0)$$

$$R_p = \frac{(D_{Cyl} - D_{mS})}{2} \times C_{pr} \text{ (for Long Side), where } (1.0 < C_{pr} < 2.0)$$

$$R_d = \frac{(D_{Cyl} - D_{mS})}{2} \times C_{pr} \text{ (for Short Side), where } (1.5 < C_{pr} < 2.0)$$

$$R_p = \frac{(D_{ml} - D_{ms})}{2} \times C_{pr} \text{ (for Short Side), where } (1.0 < C_{pr} < 2.0)$$

(규칙 18) 머리부 디프 드로잉에서 펀치, 다이 반경은 편측 직경감소량의 C_{id} (상수)배 만큼 취한다. (단, D_n 은 현재 컵 직경, D_{n-1} 은 한단계 이전 컵 직경)

$$R_d = \frac{(D_{n-1} - D_n)}{2} \times C_{id}, \text{ where } (1.0 < C_{id} < 1.5)$$

$$R_p = \frac{(D_{n-1} - D_n)}{2} \times C_{id}, \text{ where } (0.8 < C_{id} < 1.5)$$

(규칙 19) 타원형 제품은 마주보는 면으로 2축 대칭이다.
 (규칙 20) 타원형 컵의 각 공정은 중심을 직교하는 2축에 대해 단면도(측면도)를 나타낸다.

3. 시스템의 구성 및 특징

개발된 공정 설계 시스템은 AutoCAD가 지원하는 파일 형식으로 된 입력파일을 받아들여, 설계된 공정을 AutoCAD가 지원하는 파일 형식으로 출력할 수 있도록, AutoLISP 언어로 개발하였다.

시스템은 구축과 수정, 확장의 편이를 위해 모듈화(modularity)하였으며⁽⁴⁾, Fig. 1은 본 시스템의 모듈 구성을 나타낸다. Fig. 2는 시스템의 개략도를 나타낸다. 제품 형상을 자동 인식하여 3차원 모델링으로 면적을 계산한 다음 타원형 블랭크를 결정하였다. 그리고, 생산현장의

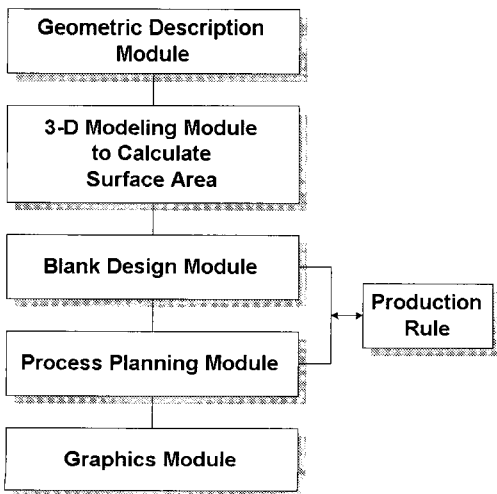


Fig. 1 Modularity of CAPP system

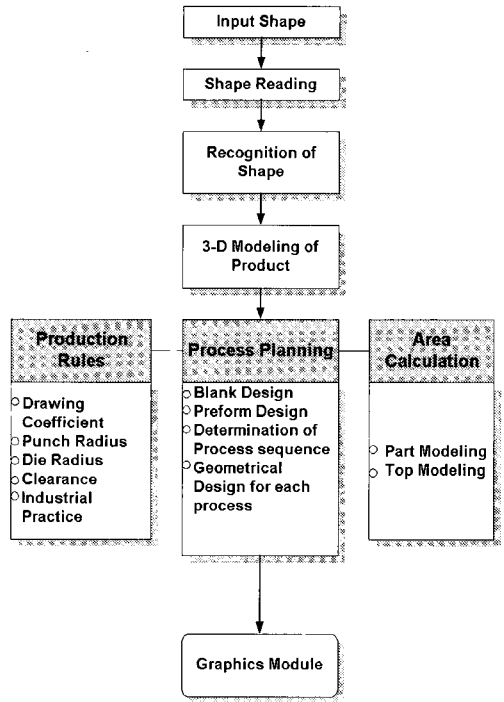


Fig. 2 Procedure of CAPP system for elliptical deep drawing product

결과가 충분히 반영된 공정설계 모듈에 의해 원통 드로잉, 중간형상, 머리부 드로잉의 직경과 펀치, 다이의 반경을 결정하였다. 각 모듈의 기능과 특징은 다음과 같다.

3.1 입력형상

시스템의 입력은 AutoCAD의 실제 도면으로 한다. 제품이 비축대칭 타원형이고, 기하학적으로 2축 대칭을 나타내므로, 기존의 축대칭 공정설계 시스템으로는 제품의 기하학적 특성을 받아들일 수 없다. 그래서, 본 연구에서는 AutoCAD 상에서 2개의 레이어(layer)에 장변과 단변을 각각 입력하고, 형상을 자동 인식하여 얻어진 데이터를 공정설계에 이용하였다. 이 방법은 기존의 축대칭 제품에 한정되어 있던 공정설계 시스템의 적용 범위를 확장할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3의 (a)는 제품의 내측 치수인 시스템의 입력 형상이고, (b)는 최종 제품의 중심을 직교하는 2축에 대한 측면도를 나타내며, (c)는 제품의 평면 단면도이다. 타원형 제품의 특징 치수 기호를 (b), (c)에 정의하였는데, D_{ml} 은 타원형 장변 직경이고, D_{ms} 는 직변 크기, D_f 는 최종 머리부 직경을 나타낸다.

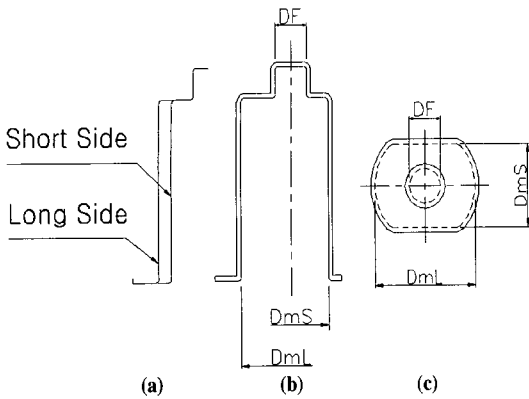


Fig. 3 Characteristics of product
 (a) Input modeling
 (b) Side view of products in orthogonal axes
 (c) Cross section of products

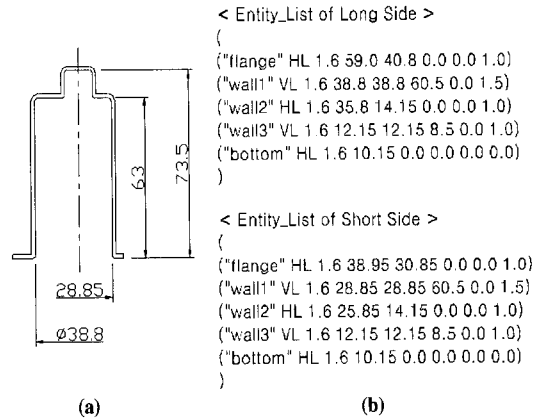


Fig. 4 Example of Entity_List
 (a) Product
 (b) Entity_List

3.2 형상인식모듈

형상자동인식은 Park⁽¹⁾과 T. Altan⁽²⁻³⁾ 등에 의해 축대칭 디프 드로잉 공정설계 자동화 시스템에 적용된 방법을 이용하였다. 즉, 각각의 레이어로부터 엔티티(entity)들의 속성을 인식하고, 설계에 필요한 도면요소를 추출하여 도면의 엔티티를 정렬한다. 도면요소의 형상데이터를 정렬하기 위해 좌표값의 최대값을 구하고 이를 이용하여 형상데이터를 정렬한다. 정렬된 데이터는 내측과 외측으로 구분되며, 내측 데이터를 이용하여 디프 드로잉 공정설계에 유용한 데이터로 활용하였다. 이를 본 시스템에서는 Enti-

ty_List라 하며, 그 구성과 항목은 Table 1과 같다. 제품 형상과 Entity_List의 적용 예를 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 3차원 모델링 모듈

디프 드로잉 공정에서 블랭크 설계 시 표면적일정조건에 근거하여 직경을 결정한다. 축대칭 원통 제품에 대한 표면적 계산은 공식이나 도표를 이용하고, 복잡한 형상인 경우는 그래프법을 이용하기도 한다.⁽⁵⁾ 하지만, 비축대칭 제품의 경우는 이런 구체적인 방법이 없기 때문에, 면적 계산이 가능한 요소로 분리하여 근사적인 계산을 하게 되는데, 이 경우 정확한 면적 계산이 이루어지지 않게 된다.

그래서, 이런 문제를 해결하기 위해서 3차원 모델링을 이용하였다. 두께 변화를 무시하고, 제품 형상을 받아들인 리스트를 두께의 중립면으로 3차원 모델링하여 AutoCAD에서 직접 표면적을 계산할 수 있는 기능을 이용하였다. Fig. 5는 3차원 모델링의 예를 나타낸다. 여기서 구한 표면적은 블랭크 설계 시에 유용한 값으로 사용된다.

Table 1 Definition of Entity_List

Constitutions	(Entity_name, Entity_type, T, OD, ID, H, N, FR)
Contents	▶ Entity_name : Feature that the entity represents (e. g. bottom, wall, flange)
	▶ Entity_type : Class of entity (e. g. HL, VL, TL) ※ (HL: Horizontal List, VL: Vertical List, TL: Taper List)
	▶ T : Thickness
	▶ OD : Outside Diameter of entity
	▶ ID : Inside Diameter of entity
	▶ H : Height
	▶ N : Null (not used in the system) ▶ FR : Fillet Radius of entity

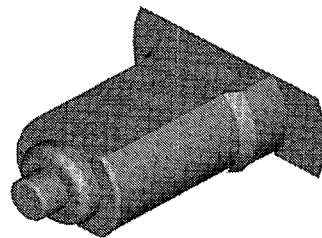


Fig. 5 3-d modeling of product to calculate total surface area

3.4 블랭크 설계 모듈

타원형 디프 드로잉 제품에 대해 현재까지 정식화된 블랭크의 형상은 제안된 것이 없으며, 현장 작업자의 오랜 경험과 축적된 노하우에 의해 플랜지 외관 및 성형성이 좋은 형상으로 결정되어 사용되고 있다.

일반적으로, 원통형 디프 드로잉의 경우 제품의 표면적을 계산하고 동일한 표면적의 원형블랭크를 설계한다. 직사각통의 블랭크 형상과 크기의 결정은 전개법이나 수식에 의해 결정된다.⁽⁶⁾ 이때 전체적인 변형을 분포와 편치력 감소를 위해 대각선 방향의 일부분을 제거한 블랭크를 적용한 경우가 있다.⁽⁷⁾ 이것은 과도한 변형이 발생하는 영역을 제거해줌으로써 변형을 상당히 감소시키며, 이로 인해 두께 감소를 억제하는 이점이 있다.

본 시스템에 적용된 블랭크는 타원형 제품의 치수 특성상 크기가 큰 장축과 작은 단축으로 이루어진 형상으로 설계하는데, 각통 제품의 블랭크에서의 코너부 형상이 잘려진 형태와 유사하게 적용되고 있다. 그래서, 성형조건과 후가공을 위한 플랜지부 성형에 유리하다고 판단된다. Fig. 6에 실제 적용한 블랭크의 형상을 나타낸다.

블랭크의 크기는 3차원 모델링 모듈에서 구한 표면적을 적용하여 결정하고, 직경을 공정설계의 변수로 사용하였다.

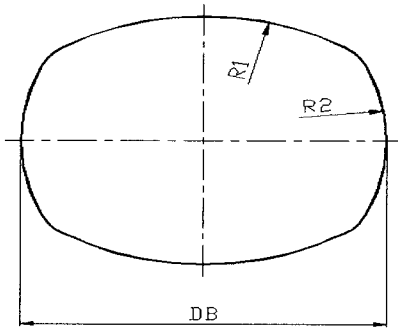


Fig. 6 Blank shape for elliptical deep drawing

3.5 공정설계(Process Plan) 모듈

디프 드로잉의 공정설계의 중요한 인자로 드로잉률, 재드로잉률, 다이 반경, 편치 반경 등을 고려하였다. 드로잉률에 의해서 공정수가 결정되면, 각각의 변형영역에 대한 직경을 결정하고, 편치와 다이의 반경은 직경 변화에 대한 비율로 적용하였으며, 표면적일정조건에 따라 높이를 계산한다.

실제 현장에서는 첫 공정부터 타원 형상으로 성형하지 않고, 원통 드로잉을 채용한 다음, 중간형상으로 정의된 공정에서 타원형 몸통을 성형한다. 그래서, 공정설계에서는 원통드로잉에서 타원형 몸통을 성형하는 중간형상 설계 시에 적절한 드로잉률의 결정이 매우 중요하다. 왜냐하면, 공정의 특징상 원통컵에서 직선부가 성형되므로 재료의 유동이 각 방향에 대해서 달라지기 때문이다. 즉, 직선부 재료는 압축할 필요가 없으며, 매우 급격한 유동특성을 나타내어 컵벽에 느슨한 재료를 남길 수도 있다. 이런 현상을 방지하기 위해 드로우 비드(draw bead)를 설계하여 유동을 제어하기도 한다.⁽⁸⁾ 이와 같은 성형특성을 고려하여, 일반적인 디프 드로잉 규칙과 생산자와의 인터뷰를 통해서 최적의 안을 확정하였다.

그래서, 공정설계는 다음과 같은 순서로 진행된다. 블랭크의 형상과 크기가 결정되면, 제품형상의 특징상 가장 알맞은 형태의 중간형상을 설계하고, 블랭크와 중간형상 사이의 원통 드로잉을 설계한 다음, 중간형상으로부터 최종형상까지의 머리부 성형공정을 설계한다. 구체적인 드로잉률 결정과 편치, 다이 반경의 결정방법은 다음과 같다.

3.5.1 드로잉률 결정방법

디프 드로잉 공정은 매우 많은 공정변수를 가지는 복잡한 가공방법이다. 이 변수들 중에서 가공결과에 가장 결정적인 영향을 주는 것은 드로잉률이다. 일반적인 축대칭 원통형 제품에 대해서는 Romanowski에 의해 작성된 드로잉률을 이용한다. 이것은 소재 두께와 직경의 비를 기준으로 하여 각 공정별로 드로잉률이 작성되었다. 비원형 컵에 대한 드로잉률은 수치적 표기에 대한 제안이 현재까지 명확하지 않지만, 정사각형과 직사각형에 대해서는 컵 장변과 단변의 치수와 소재길이의 비로 정의하는 경우도 있다.⁽⁹⁾ 즉, 비원형 제품에 대해 드로잉률로 정의된 형식은 없지만, 본 연구에서는 드로잉률을 이전 컵의 치수와 현재 컵의 치수의 비로 단순히 정의하였으며, 블랭크 크기는 장변의 치수를 이용하였다. 그리고, 중간형상공정에서는 원형의 장변과 직선의 단변을 가지므로, 각각 이전 원통형 컵과의 치수 비를 드로잉률로 정의하였다.

본 시스템에서는 초드로잉으로 원통 드로잉이 채용되므로 Romanowski의 데이터를 기본으로 하고, 현장에서 생산되는 유사한 제품의 공정설계 결과를 충실히 반영하여 2 가지 방법으로 작성하였다. 그리고, 2 가지 방법에 대해 공통적으로 원통형 드로잉 공정의 경우는 블랭크 직경과 몸통의 장변 직경, 중간형상 공정에서는 마지막 원통컵의 직경과 중간형상의 장

변 직경, 머리부 드로잉의 경우는 몸통 단변 직경과 제품의 최종 머리부 직경을 각각 비교 치수로 이용하였다. 이때, 드로잉률이나 공정수에 있어서 과도하거나, 과소한 공정이 발생하면 사용자에게 선택여부를 판단하게 함으로써 설계의 유연성을 증가시켰다. 예를 들어, 첫 번째 결정된 드로잉률 결과가 공정설계 규칙(규칙 6, 10, 13, 14)의 범위를 벗어나서 공정수가 결정되면, 전체적으로 드로잉률을 재분할하게 된다. 이때, 처음 결정된 공정수를 유지하면서 공정분할을 할 것인지, 아니면 공정수를 변화시켜서 분배할 것인지를 사용자 판단 창에서 질문함으로써, 사용자의 판단을 반영할 뿐만 아니라, 여러 가지 경우의 공정설계결과를 출력할 수 있도록 하였다.

구체적인 드로잉률 결정 방법은 다음과 같다.

① 방법 (I)

원통형 드로잉공정의 경우 Romanowski의 데이터를 이용하여 몸통의 장변 직경에서 이전 공정이 블랭크가 될 때까지 역방향으로 설계하고, 결과가 공정규칙을 만족하는지 여부를 정방향설계를 통하여 검증한다. 머리부 드로잉의 경우는 최종 머리부 직경으로부터 몸통 단변 직경 보다 작지 않게 역방향으로 설계하고, 다시 정방향으로 검증하는 절차를 거친다. 검증 단계에서는 초드로잉률, 중간형상 드로잉률, 머리부 초드로잉률, 최종 드로잉률 등을 검토하여 규칙에 위배되거나, 불합리한 경우를 배제하였다. Fig. 7은 원통형 드로잉에 대한 드로잉률 결정 순서도이며, Fig. 8은 머리부 드로잉에 적용된 드로잉률 결정 방법이다.

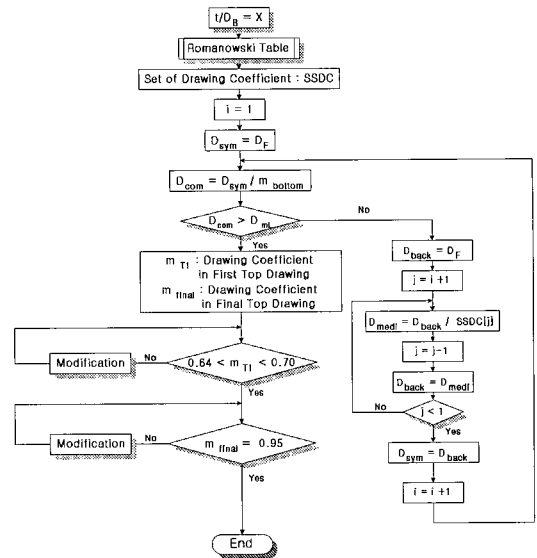


Fig. 8 Determination of drawing coefficient for top part drawing in Method (I)

② 방법 (II)

현재 생산공정에 적용되는 여러 가지 유사한 제품의 공정설계결과를 분석하여 드로잉률의 결정에 영향을 미치는 변수를 찾아서, 드로잉률과의 상관관계를 조사하였다. 원통 드로잉의 경우는 몸통 장변 직경과 블랭크 직경의 비, 머리부 드로잉의 경우는 제품의 최종 머리부 직경과 몸통의 단변 직경을 변수로 하는 것이 알맞음을 실제 결과를 토대로 확인하였다. 그래서 이 변수와 드로잉률간의 관계를 통하여 Romanowski Table의 값을 수정하였다. Table 2는 원통형 드로잉에 대해 수정된 드로잉률이고, Table 3은 머리부 드로잉에 대해 수정된 드로잉률이다. 이 결과는 이미 생산된 다른 유사한 타원형 제품의 실제 공정결과와 일치함을 확인하였다.

Table 2 Modified drawing coefficient for cylindrical deep drawing in Method (II)

Drawing Coefficient	D_{mL} / D_B		
	0.27~0.31	0.31~0.335	0.335~0.35
m1	0.53~0.55	0.55~0.58	0.58~0.60
m2	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80
m3	0.79~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82
m4	0.81~0.82	0.82~0.83	0.83~0.85
m5	0.84~0.85	0.85~0.86	0.86~0.87

Fig. 7 Determination of drawing coefficient for cylindrical deep drawing in Method (I)

Table 3 Modified drawing coefficient for top part deep drawing in Method (II)

Drawing Coefficient	D_F / D_{ms}		
	0.39~0.42	0.42~0.47	0.47~0.55
m1	0.64~0.65	0.65~0.67	0.67~0.70
m2	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80
m3	0.79~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82
m4	0.81~0.82	0.82~0.84	0.84~0.85
m5	0.84~0.85	0.85~0.86	0.86~0.87

3.5.2 펀치, 다이 반경 결정방법

펀치 반경에 대한 기존의 연구에 의하면 펀치 반경이 두께의 2배 이하가 되면, 컵은 성형될 수 없으며, 두께의 10배 이상이 되면 스트레칭 가공이 된다. 그리고, 펀치 반경이 작아질수록 더 큰 다이 반경이 요구되며, 일정한 펀치 반경값에서 다이 반경이 증가할수록 펀치력이 감소함을 보여준다. 하지만, 일정한 다이 반경값에서 최대 펀치력은 펀치반경의 변화와는 무관하며, 단지 하중의 전달방법에만 영향을 미친다.⁽¹⁰⁾ 그래서, 일반적으로 축대칭 원통형 디프 드로잉의 펀치, 다이 반경은 보통 소재 두께의 4~10배 내에서 초드로잉 공정에 적용하고, 재드로잉에 대해서는 이전 펀치, 다이 반경에 대해 계수(C)를 곱해서 적용한다. ($0.6 < C < 0.8$)

펀치, 다이 반경은 디프 드로잉 가공 조건 중 드로잉틀과 함께 공정의 성공에 크게 영향을 미친다. 그러나, 기존의 소성역학에서는 그 적용범위가 넓어 정확한 수치적 결정은 불가능하다. 단지, 안전한 영역만을 제시해주고 최종 치수결정은 현장 설계자의 판단에 의해 결정된다. 즉, 성형조건이 안전한 영역에서 가급적 작게 가공한 뒤 시험작업을 통해 재가공하여 적용함으로써 최종치수가 결정된다. 또한, 재드로잉의 경우 펀치, 다이 반경 중심은 직경감소와 관계된다. 그러므로, 기본적으로 펀치, 다이 반경값을 직경감소량에 의존하도록 설계하는 방법도 타당성이 있다고 판단된다. 현장설계 시에는 이 직경감소량에 일정한 상수를 곱해서 최종 펀치, 다이 반경을 결정하는데, 상수값의 결정은 지금까지 유사한 형상의 제품에 성공적으로 적용된 결과를 정량화하여 결정하였다.

본 시스템에서는 기존의 연구결과와 실제공정 결과물 바탕으로 초드로잉에 대해서는 두께의 상수배로 고정시키고, 재드로잉의 경우는 드로잉틀에 의해 결정된 직경의 감소량에 상수배를 취함으로써 펀치, 다이 반경을 결정하였다. 그리고, 상수값은 여러 제품의 생산 결과를 토대로 직경감소량과 상수의 관계식을 결정하여 생산규칙에 충실

히 반영하였다.(규칙 15, 16, 17, 18)

4. 적용 및 고찰

4.1 적용 제품의 예

적용되는 제품은 자동차에 장착되는 모터 프레임으로 디프 드로잉 공정 이후 피어싱, 트리밍 등 후가공을 거친다. 본 연구에서는 디프 드로잉 마지막 공정을 최종 형상으로 적용하였다. 일반적으로, 모터 프레임은 장착 위치에 따라서 몸통의 형상이 원통이 될 수도 있고, 공간이 좁을 경우 한쪽 면을 직변부로 만들어 장착한다. 실제 적용되는 타원형 제품의 예를 Fig. 9에 나타내었다. 로터(rotor)가 정확히 장착되어야 하므로 진원도가 우수해야 하고, 누수 방지를 위해서 평탄도가 매우 중요 시 되는 정밀 디프 드로잉 제품이다. Fig. 10은 시스템에 적용된 2가지 모델을 나타낸다.

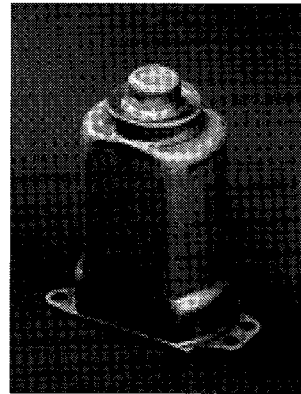


Fig. 9 Motor frame with elliptical shape

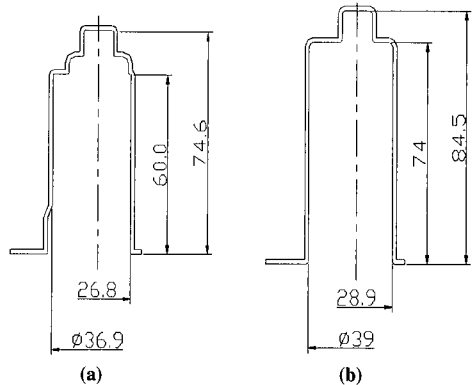


Fig. 10 Models of application (a) Model PX (b) Model PY

4.2 실제 생산공정

Fig. 11은 모델 PX의 실제 현장 공정을 나타내는데, 총 여섯 공정의 디프 드로잉과 리스트라이킹(restriking) 공정으로 구성된다. 사용된 소재는 전기아연도금강판(SECE)으로 20 μ m의 아연도금 되어있으며, 두께는 1.6 mm 이다. 정밀도 있는 최종제품을 가공하기 위해서는 중간 형상의 안정도가 매우 중요하다. 왜냐하면, 공정의 특징 상 원통형에서 타원형 몸통이 형성되고, 동시에 머리부를 만들기 때문이다. 즉, 직면부의 두께 확보를 위해서 적정한 드로잉률이 요구되며, 계속되는 머리부 드로잉의 변형영역 소재량 결정을 위해서 표면적이 일정해지는 높이로 결정되어야 한다. 하지만, 머리부가 높게 설계되면 재료 유입이 많아 이후 공정에서 머리부에 접힘이 발생하고, 낮게 설계되어도 재료가 부족하여 터짐이 발생한다. 이 현상은 시제품 트라이아웃(try out) 작업에서도 발견되었는데, 5공정 머리부 재료가 접힘 현상이 발생하여 그 원인을 찾던 중 중간형상 머리부 높이가 높은 것으로 판단되어 높이를 수정하였다. 그래서, 본 연구에서는 정확한 머리부 설계를 위하여 머리부를 3차원 모델링하여 계산된 면적으로 높이를 결정하였으며, Fig. 12에 머리부 모델링의 예를 나타내었다.

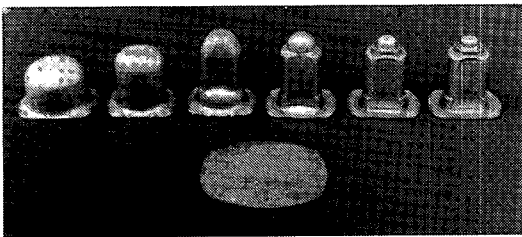


Fig. 11 Industrial practice for model PX



Fig. 12 Examples of 3-d modeling for top part

4.3 시스템의 결과 및 비교

단단계 디프 드로잉을 요하는 제품은 단지 몇 천개만 생산하기 위한 공정설계라면 최소드로잉 공정수 그대로 사용해도 무리가 없겠지만, 수십만 개 이상의 대량생산일 경우 공정설계는 보다 안전한 방향으로 이루어져야 한다.

즉, 생산성, 금형 수리비, 품질, 등 총 원가를 고려한 최적의 가공을 위해서는 공정간의 가공 균형성 유지 즉, 드로잉률 재분배와 드로잉성 향상을 위해 공정수를 최소공정수에 서 한 공정 정도 추가하여 가공하는 편이 바람직하다.⁽¹¹⁾

그런데, 실제 제작공정은 공정설계결과가 규칙성이 부족하고 많은 트라이아웃을 통해서 완성되었으며, 설계자의 판단에 크게 의존한다. 그리고, 이 결과는 제품 치수나 사양, 설계자에 따라 상이한 양상을 나타낸다. 성공적으로 생산이 완성되더라도 그것은 설계자의 자신의 노하우(know-how)로 저장될 뿐이다. 그래서, 타원형 제품의 공정설계에 일반적으로 적용하고, 초보자라도 쉽게 공정설계를 할 수 있는 지침을 마련하고자 공정설계규칙을 수립하였다. 유사한 제품에 대한 공정설계 결과와 현장설계자와의 인터뷰 등을 통하여 규칙성을 부여하고, 정량화하여 수립된 공정설계규칙의 설계 결과를 적정공정으로 명명하였다. 적정공정은 과도한 변형을 피하고 안정한 상태의 가공을 위해서 결정되었다. 방법(Ⅰ), (Ⅱ)는 적정공정의 생산규칙을 시스템에 반영하였다.

개발된 시스템의 현장 적용가능 여부를 검토하기 위해 이미 생산되고 있는 제품에 대해 실제 공정설계와 시스템의 결과를 비교하였다. 두 제품의 변형영역에 대한 공정설계결과를 Table 4, 5에 나타내었는데, A는 실제 제작공정, B는 적정공정, C는 방법(Ⅰ), D는 방법(Ⅱ)의 결과를 나타낸다. A와 B의 결과를 비교하고, B의 결과가 C, D에 충실히 반영되었는지를 검토하고자 한다. 세부적으로 중간형상까지의 공정수와 드로잉률, 그리고 중간형상의 설계, 머리부 드로잉, 총 공정수 등을 고찰하였다.

Table 4에서 모델 PX는 시스템의 블랭크 장축 직경이 4.6 mm 크게 나타났다. 이 결과는 설계자의 수작업 표면적계산과 시스템의 3차원 모델링을 통한 결과 차이에 크게 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 현장의 설계자는 비축대칭 형상 제품을 표면적 계산이 가능한 요소로 분리하여 각각의 결과를 합산하여 전체 표면적을 결정한다. 이런 과정에서 오차는 필수적으로 발생할 수 밖에 없으며, 시간도 많이 소요된다. 제품의 형상의 특징 상 수작업으로 완전한 표면적계산은 거의 불가능하다. 그러므로, 3차원 모델링으로 간단히 표면적을 계산하여 블랭크 설계에 이용하는 것이 시간 절약과 정확성을 기할 수 있는 방법이라고 판단되며, 트리밍 여유를 고려하여 블랭크 수정도 용이할 것으로 기대된다.

A는 원통 드로잉 공정수가 B에 비해 1공정 작았으며, 이는 초드로잉률이 0.5로 거의 한계치가 적용되어, 1공정

Table 4 The results of model PX

Model PX		No.	DB	1	2	3	4-0 (D _{ml})	4-1 (D _{ms})	5	6	7	8	9
A	Industrial practice	Dia.	111.5	56.0	43.0		36.9	26.3	22.0	16.2	13.8	12.4	12.0
		m		0.502	0.768		0.858	0.612	0.596	0.736	0.852	0.90	0.968
B	Proposed properly	Dia.	111.4	64.1	50.6	41.0	36.9	26.3	23.8	18.6	15.0	12.6	12.0
		m		0.575	0.79	0.81	0.9	0.641	0.645	0.78	0.81	0.84	0.95
C	System - Method(I)	Dia.	116.1	67.5	51.6	41.0	36.9	26.3	24.4	19.2	15.3	12.6	12.0
		m		0.58	0.764	0.795	0.9	0.64	0.66	0.786	0.80	0.824	0.95
D	System - Method(II)	Dia.	116.1	65.9	51.8	41.6	36.9	26.3	24.2	19.1	15.2	12.6	12.0
		m		0.567	0.786	0.80	0.89	0.63	0.656	0.79	0.80	0.83	0.95

Table 5 The results of model PY

Model PY		No.	DB	1	2	3	4-0 (D _{ml})	4-1 (D _{ms})	5	6	7	8	9	10
A	Industrial practice	Dia.	120.7	72.0	55.0	43.0	38.8	28.9	24.0	15.4	13.6	12.0		
		m		0.597	0.764	0.782	0.902	0.672	0.619	0.642	0.883	0.882		
B	Proposed properly	Dia.	120.3	67.4	53.2	43.1	38.8	28.9	25.0	19.3	15.4	12.6	12.0	
		m		0.56	0.79	0.81	0.9	0.67	0.645	0.77	0.80	0.82	0.95	
C	System - Method(I)	Dia.	127.2	72.9	55.0	43.2	38.8	28.9	27.2	22.2	18.0	15.1	12.6	12.0
		m		0.573	0.754	0.785	0.9	0.67	0.70	0.81	0.81	0.84	0.83	0.95
D	System - Method(II)	Dia.	127.2	70.2	55.4	44.8	38.8	28.9	25.0	19.1	15.3	12.6	12.0	
		m		0.55	0.79	0.81	0.87	0.65	0.64	0.764	0.80	0.824	0.95	

직경이 약 8 mm 정도 작게 성형된 것으로 판단된다. 그리고, 중간형상공정에서 마지막 원통형 공정과의 단변 치수 감소량이 커서 결국에는 단변방향의 재료가 원형과 직선부의 경계부로 유입되면서 직선부 소재의 두께감소가 나타날 것으로 판단된다. 그러므로, 중간형상 공정의 드로잉률을 공정설계규칙에 근거하여 장변 방향 치수 기준으로 0.9로 적용함으로써, 동시에 단변방향의 치수 감소량도 완화할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 15는 실제 공정의 초드로잉, 재드로잉, 그리고, 중간형상 공정까지의 편치단면만을 나타내었다. 편치 형상이 변화되는 중간형상 공정에서 위에서 언급한 결과가 확인될 수 있다. 그래서, B는 한 공정이 추가되더라도, 드로잉률을 분배하여 초드로잉률과 중간형상 드로잉률을 적용하였다. C는 D보다 초드로잉률은 크고, 재드로잉률은 낮게 적용되었다. 2, 3공정의 원통형 컵 직경은 거의 유사하나 재료의 가공경화를 고

려할 때 D가 C보다 안정하며, 적정공정 B의 결과가 잘 반영된 것으로 판단된다.

머리부 드로잉의 경우 공정수는 A, B, C, D 모두 같은 결과를 나타낸다. 하지만, A는 드로잉률이 5, 6공정에서 낮게 적용됨으로써 7, 8, 9공정에서는 거의 완전한 가공이 되고 있다. 그러므로, 5, 6공정의 드로잉률을 이후 공정과 분배함으로써 앞 공정의 가공 조건을 개선하는 것이 바람직하다. 공정분배 결과 B는 머리부 첫 공정에서 드로잉률을 0.645로 적용하여 전체적인 가공의 균형을 맞추었다. 시스템의 결과인 C, D 모두 드로잉률 측면에서 B와 유사하게 적용되었음을 확인하였고, 적정공정의 결과인 B가 시스템에 잘 반영되었음을 보여준다. Fig. 13, 14는 모델 PX의 방법(I), 방법(II)에 의한 출력결과를 나타낸다.

Table 5는 모델 PY의 공정설계 결과이다. 몸통의 크기가 모델 PX에 비해 크며, 몸통 아랫단이 없는 제품의 특

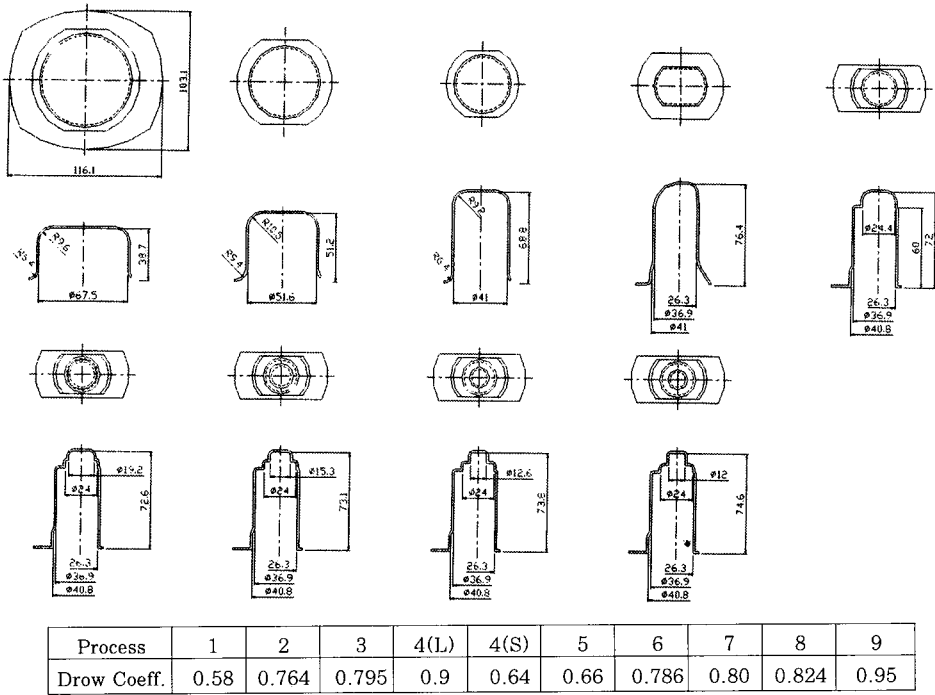


Fig. 13 Process sequence for model PX by method (I)

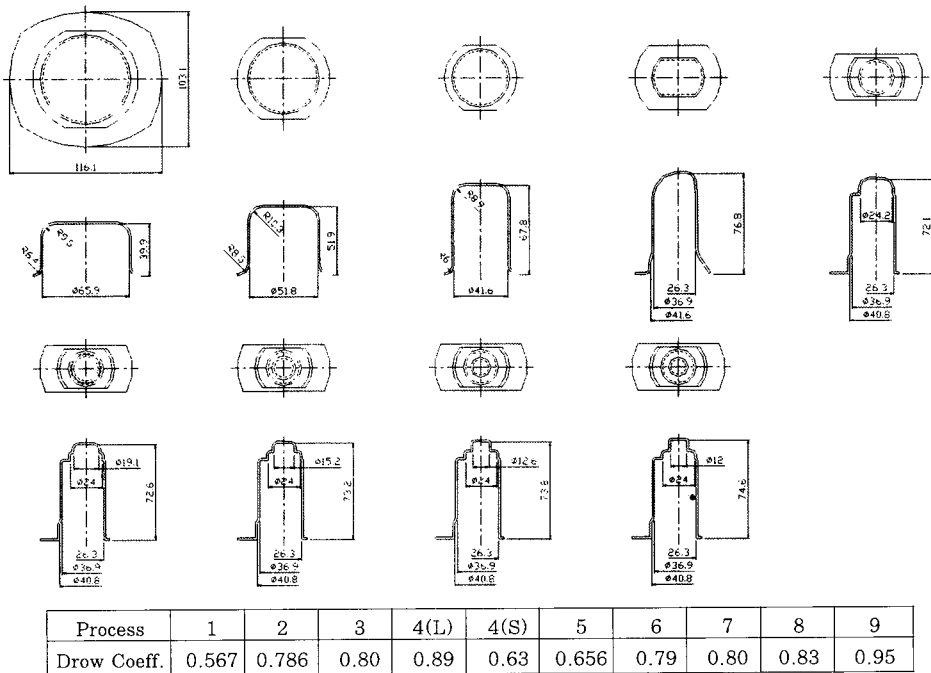


Fig. 14 Process sequence for model PX by method (II)

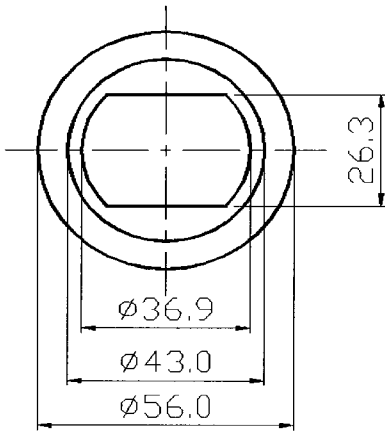


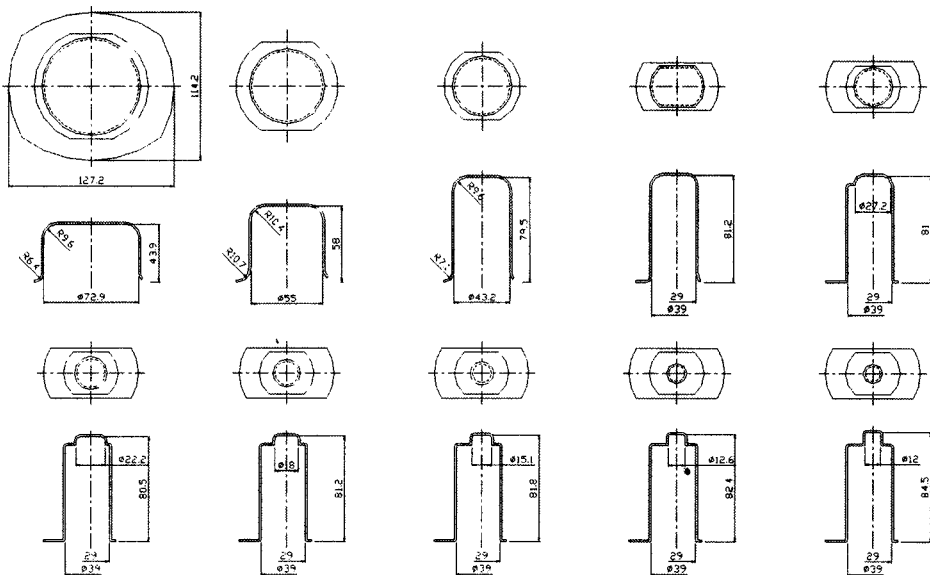
Fig. 15 Design of cross-section for model PX
- Industrial practice

정상 중간형상의 설계는 PX와는 차이가 있다. 하지만, 기본적인 드로잉률 규칙은 동일하게 적용된다. 블랭크 크기가 A, B에 비해 C, D가 6.5 mm크게 적용되었다.

원통 드로잉의 경우 A, B, C, D 모두 3공정으로 공정수가 일치하였다. 하지만, A의 경우 초드로잉률은 크고

재드로잉률은 상대적으로 낮게 적용되어, B에서 초드로잉률과 재드로잉률간의 공정분배를 적용하였다. 시스템 결과는 C가 D에 비해 원통 드로잉률이 낮게 적용되어 마지막 원통형 드로잉 직경이 1.6 mm정도 작게 나타났다. 하지만, 중간공정 드로잉률은 0.9와 0.87로 안정한 범위 내에 있음을 확인하였다.

그리고, 머리부 드로잉에서 A는 6공정에서 직경감소가 약 10 mm로 과도한 성형조건이 되므로, 공정을 추가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그래서, 적정 공정 B는 한 공정이 추가되었다. 시스템 결과는 C가 A에 비해 두 공정, D는 한 공정이 많게 설계되었다. 이 결과는 C가 첫 번째 머리부 드로잉률이 상한치인 0.7로 적용되었고, D가 하한치인 0.64로 적용된 데 기인한다. Fig. 16, 17은 모델 PY의 방법(I), 방법(II)에 의한 출력결과를 나타낸다. 그런데, Fig. 16의 5번째 공정은 너무 완만한 가공이 되어 공정수가 A 보다 2공정이 추가되어서, 수정이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 17은 A 보다 1공정 많게 설계되었다. 왜냐하면, 베어링이 장착되는 머리부의 정밀도를 유지하기 위해 마지막 공정의 드로잉률을 생산규칙에 따라 0.95로 적



Process	1	2	3	4(L)	4(S)	5	6	7	8	9	10
Draw Coeff.	0.573	0.754	0.785	0.9	0.67	0.70	0.81	0.84	0.84	0.83	0.95

Fig. 16 Process sequence for model PY by method (I)

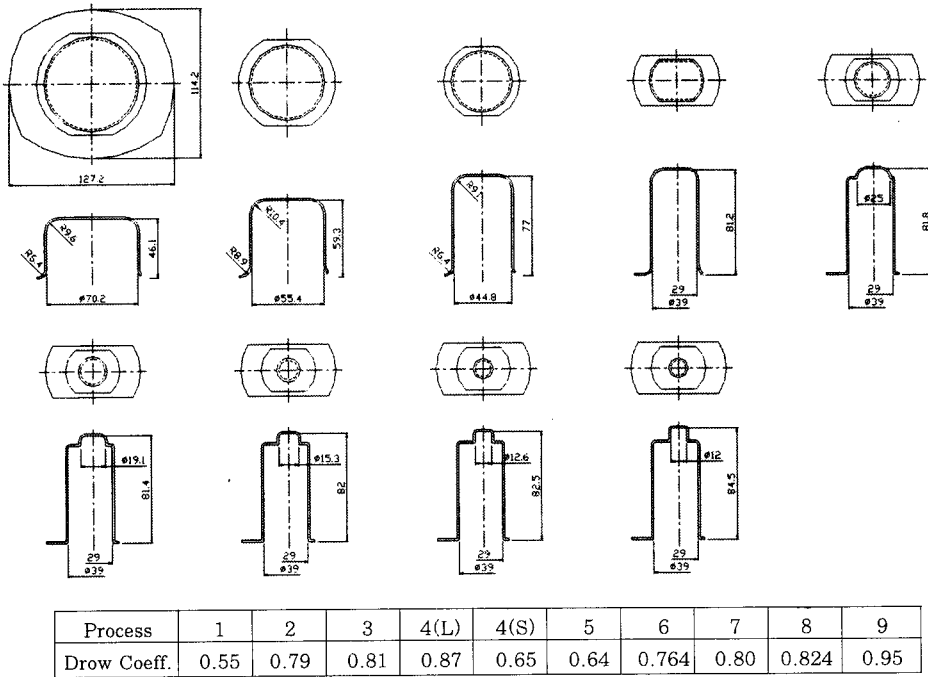


Fig. 17 Process sequence for model PY by method (II)

용하였기 때문이다. 머리부 첫 번째 공정과 마지막 공정의 결과를 비교할 때, D가 생산규칙을 잘 반영한 것으로 판단된다.

실제 현장의 생산과정에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 시스템에 수정하여 반영하였기 때문에, 본 연구의 결과를 바탕으로 유사한 형상의 제품에 대해 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 축대칭 디프 드로잉 공정에 제한되어 있던 공정설계 자동화를 비축대칭 제품에 확대 적용하였다. 그리고, 기존의 원통형 디프 드로잉과 다른 타원형 디프 드로잉 제품에 대한 드로잉 및 공정 진행에 대한 데이터 확립에 비중을 두었다. 비축대칭 형상의 특징상 문제가 되었던 표면적 계산을 3차원 모델링으로 실시하고, 타원형 블랭크를 설계하였다. 블랭크의 직경은 시스템의 결과가 4~6 mm 크게 나타났으나 드로잉률과 컵의 직경을 고려해 볼 때 중간형상 성형공정에 적합하며,

많은 블랭크 시험을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 타원형 제품에서 가장 중요한 중간형상의 설계 시에 드로잉률을 0.9로 크게 적용하여 직변의 두께 확보와 성형의 안정성을 유지하였으며, 전 공정에 대해서 표면적 일정조건에 맞게 머리부를 설계하여 재료의 과소를 방지하였다.

현재 생산되는 공정의 결과와 이를 개선한 적정공정을 비교해 전체 공정의 균형을 도모했으며, 시스템 결과는 방법 (II)가 적정공정과 좋은 일치율을 보임을 확인하였다. 그리고, 시스템은 사용자의 결정에 따라 적용 방법을 선택할 수 있도록 하였으며, 일반적인 결과를 도출하기보다는 설계자의 의견이 반영될 수 있도록 하여 시스템의 유연성을 확보하였다.

후기

본 연구는 산업자원부와 부산대학교 정밀정형 및 금형 가공 연구소(ERC/NSDM)의 지원 하에 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 박 상봉, 최영, 김병민, 최재찬, 김보환, 1996, "축대칭 디프 드로잉 제품의 공정설계 시스템에 관한 연구(I)", 한국소성가공학회지, 제5권, 제1호, pp. 27~36.
- (2) S. K. Sitaraman, G. L. Kinzel and T. Altan, 1991, "A knowledge-based system for process-sequence design in axisymmetric sheet-metal forming", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 25, No. 3, pp. 247~271.
- (3) S. K. Esche, S. Khamitkar, G. L. Kinzel, T. Altan, 1996, "Process and die design for multi-step forming of round parts from sheet metal", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 59, pp. 24~33.
- (4) M. Tisza, 1995, "EXPERT SYSTEMS FOR METAL FORMING", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 53, pp. 423~432.
- (5) 橋本 明, 1976, "프레스 드로오잉", 대광서림
- (6) 김세환, 한윤희, 이승희, 1998, "프레스 금형설계 자료집", 대광서림
- (7) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, "Deep Drawing of Square-Shaped Sheet Metal Parts, Part 2 : Experimental Study", Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 110~117.
- (8) D. F. Eary, E. A. Reed, 1974, "Techniques of press-working sheet metal", Prentice-Hall, pp. 171~172.
- (9) 신재현, 김민수, 서대교, 1994, "비원형 단면에 대한 판재 성형성(I)", 한국자동차공학회논문집, 제2권, 제1호, pp. 84~95.
- (10) M. M. Moshksar, A. Zamanian, 1997, "Optimization of the tool geometry in the deep drawing of aluminum", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 72, pp. 363~370.
- (11) 김두환, 1998, "원통형 용기의 다단계 딥드로잉 공정설계에 관한 사례 연구", 한국소성가공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 160~167.