

## 유한요소법을 이용한 다단계 디프 드로잉 공정에 관한 연구

최병화\*(한국기술교육대 대학원), 민동균(한국기술교육대), 박태종(한국코아(주))

### A Study on Multi-stage Deep Drawing Processes Using Finite Element Method

B. H. Choi (Korea University of Technology and Education),  
D. K. Min (Korea University of Technology and Education),  
T. J. Park (Han Kook Core Co.)

#### ABSTRACT

There have been many researches performed on the formability of axisymmetric or rectangular cup shapes in the deep drawing processes. But non-axisymmetric deep drawing processes rely upon empirical knowledge of experts in most cases. Especially, there have been few researches for multi-stage elliptical deep drawing processes. In this study, formability and thickness distributions of elliptical yoke products were predicted by using finite element analysis. The results of the analysis were compared with those of experiments for validity.

**Key Words** : Elliptical deep drawing (타원형 디프 드로잉), Non-axisymmetric (비축대칭), Multi-stage (다단계), Thickness distribution (두께분포), Finite element analysis(유한요소해석)

#### 1. 서론

판재성형에서 디프 드로잉은 압연 박판재로부터 컵, 주방용구, 자동차 및 항공기 부품 등의 제품을 생산하는 공정으로 그 동안 많은 실험적 연구 및 이론적인 연구가 행해져 왔으나 아직까지도 현장 기술자의 경험에 의존하고 있는 실정이다.

원통형 디프 드로잉 제품에 대한 연구는 모든 드로잉의 기본<sup>1)</sup>으로 활발히 연구되어 왔으나<sup>2)</sup> 이형상에 관한 연구는 그다지 많지 않으며 특히 다단계 이형상 디프 드로잉 제품에 관한 연구는 찾아보기 힘들다.<sup>3)</sup> 박판 성형은 재료 물성, 재료두께, 블랭크 형상, 펀치 및 다이의 형상, 블랭크 홀딩력 (blanking holding force), 마찰력, 윤활 조건, 틈새(clearance), 드로잉 속도 등에 의해 영향을 받는다.<sup>4)</sup> 이러한 공정 변수들은 서로 비선형적으로 연관되어 있어서 공정 변수가 성형성에 미치는 영향은 많은 실험(try-out)을 통해서 구해야 하며 공정변수의 수가 많을 경우에는 최적의 공정변수를 찾는 것은 상당히 어렵다.

일반적으로 유한요소법(finite element method)은 변형된 판재의 성형형상, 응력, 변형률 분포, 두께분포, 성형하중, 파단 및 주름발생 등을 비교적 정확하게 예측할 수 있어 최근 산업체에서 설계기간의 단

축으로 인한 납기단축, 공정 수 결정 및 비용의 절감의 목적으로 유용하게 적용되고 있다.

본 연구에서 적용된 제품은 자동차 구동용 모터 케이스(motor case)인 요크(yoke)이며 공정 순서는 블랭킹 금형으로 블랭크를 취출한 후 제 1, 2드로잉 공정이 원형으로 드로잉 작업이 이루어지고 제 3드로잉 공정이 타원형상으로 이루어진다.

본 연구에서는 판재성형 공정 해석 전용 프로그램인 PAM-STAMP를 이용하여 이방성을 가진 탄소성 재료의 성형후의 형상정밀도 및 재료 두께분포의 정확한 해석을 통한 예측을 하고 또한 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 금형 설계 및 제작으로 비교 분석하였다.

#### 2. 유한요소해석

##### 2.1 재료 시험

##### 2.1.1 인장 시험

본 연구에서 사용된 재료는 전기 아연도금강판으로 두께는 1.6mm이고 아연도금이 20 $\mu$ m 되어있는 소재이다. 유한요소해석에 사용될 재료의 물성치인 인장 응력-진변형률 곡선 및 항복응력, 가공경화 상수

및 지수를 산출하기 위하여 시편을 압연방향에 대해 0°, 45°, 90° 방향으로 와이어 커팅머신(wire utting machine)으로 각각 5개씩 제작하여 인장시험을 수행하였다.

인장시험기계는 유압식 만능시험기를 사용하였으며 인장속도는 1 in/min으로 유지하였으며 용량 10톤의 하중계와 표점거리 2 inch의 신장계를 통하여 PC로 입력되는 하중-변형률 데이터를 인장시험 분석용 프로그램을 이용하여 진 응력-진 변형률 곡선으로 변환하였다. Fig. 1은 재료에 대한 진 응력-진 변형률 선도를 나타낸다.

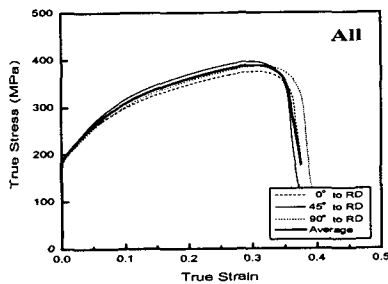


Fig. 1 Stress-strain curve of 0°, 45°, 90° direction SECD 1.6t

### 2.1.2 이방성 계수 측정

이방성 계수 측정을 위해 인장시험의 조건과 같은 방법으로 약 15%의 신장 실험을 실시하였다. 또한 Fig. 2와 같이 시편 표면에 3×3mm의 정사각형 격자를 실크스크린 법으로 인쇄하여 폭 방향의 변형률과 두께방향의 변형률을 공구 현미경을 사용하여 측정하였다.

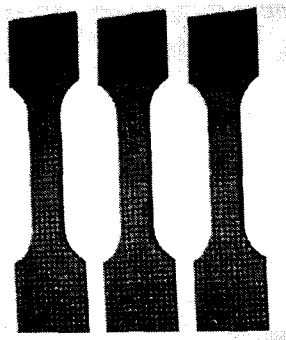


Fig. 2 Photograph of tensile specimens used to R-value

### 2.1.3 해석 조건

해석하려고 하는 이형상의 컵은 블랭크 공정을 제외하고 3단계의 공정에 의해 성형된다. 제 1, 2단계의 해석에서는 원통형 컵 모양이 성형되고 제 3단계에서는 타원형이 성형된다. 본 논문에서는 3단계의 해석을 실제 공정과 동일한 조건으로 해석하였다.

해석은 유한요소 해석프로그램인 PAM-STAMP을 사용하였다. 해석에 사용된 금형 조립단면도를 Fig. 3에 나타냈으며 해석에 사용된 재료는 전기아연 도금강판인 SECD이며 물성치는 인장시험으로부터 직접 구한 값을 아래 Table 1에 나타냈으며 모델해석조건 값은 Table 2에 나타냈다.

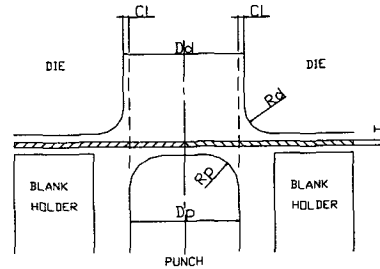


Fig. 3 Diagram of deep drawing process

Table 1 Mechanical properties of SECD1

Thickness (mm)	1.6
Yield strength (MPa)	188
Tensile strength (MPa)	386
Elongation	34.3
K Hardening (MPa)	504
n Hardening	0.213
Poisson's ratio	0.33
Frictional coefficient	0.1

제 1, 2 공정은 축 대칭으로 원주방향의 1/4만을 모델링 하였고 제 3 공정은 비축대칭으로 전체의 1/2만을 모델링하여 해석을 하였으며 소재는 탄소성체로 다이와 펀치는 강체로 가정하였으며 블랭크홀더(blank holder)는 제 1공정에만 사용하였다.

Process	Dp	Dd	Rp	Rd	Clearance (mm)	
First drawing	Φ 74.0	Φ 78.0	20	10	2.0	
Second drawing	Φ 52.0	Φ 55.0	15	10	1.8	
Third drawing	long	46.04	49.74	12	8	1.85
	short	37.04	40.74	12	10	

Table 2 The model conditions for FEM

### 2.1.4 해석 결과

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 최종성형해석완료 후의 제품형상을 나타낸다. 제 1드로잉 및 제 2드로잉은 양호한 정상상태의 해석결과를 보여주며 제 3드로잉은 타원형 제품으로 펀치와 다이의 접촉하는 플랜지부에서 약간의 이어링(earing)현상이 나타나며 이것은 소재가 단변부에서 장변부로 이동하게 되어 나타난 현상이다.

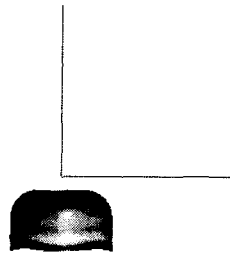


Fig. 4 Simulation result after the first drawing

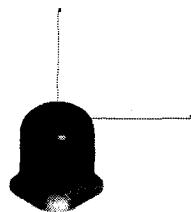


Fig. 5 Simulation result after the second drawing

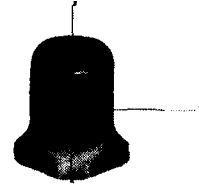


Fig. 6 Simulation result after the third drawing

## 3. 디프 드로잉 실험

### 3.1 블랭크(blank)작업

드로잉 금형에 사용된 소재는 SECD이며 두께는 1.6mm이며 원단폭은 135mm이며 이송피치는 134mm이다. 소재공급방식은 레벨러 피더(leveler feeder)방식이며 별도의 블랭킹 금형을 제작 하였다.

### 3.2 제 1, 2, 3 드로잉

#### 3.2.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 기계는 500톤 트랜스퍼(transfer) 드로잉용 프레스이다. 공정은 총 3공정의 다단계 디프 드로잉으로 초드로잉, 재드로잉, 타원형 드로잉으로 순차적으로 성형이 이루어진다. 프레스 타입은 Single action으로 제 1 드로잉 공정에만 블랭크 홀더를 사용했으며 블랭크 홀더 압력을 조절할 수 있는 다이쿠션패드(die cushion pad)가 있으며 제품 취출이 가능하도록 녹아웃(knockout) 장치가 있다. 제 2, 3 드로잉 공정에는 슬리브(sleeve)장치에 의해 드로잉 전에 제품 위치를 정확하게 잡아주도록 했다. 또한 드로잉 작업시 전.연성을 높이고 금형의 수명을 증가시키며 내모성을 증대시키기 위한 목적으로 소재유회를 하는데 본 연구에서는 유회성과 냉각성이 우수하며 금속을 변색시키지 않는 비수용성인 GRENVIS 5 오일을 사용하였다. 내마모성을 위해 펀치에는 TICN코팅을 했으며 다이에는 초경(T.C)을 인서트했다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각 드로잉 공정별 상형과 하형의 금형조립된 실험장치를 사진으로 나타낸다.

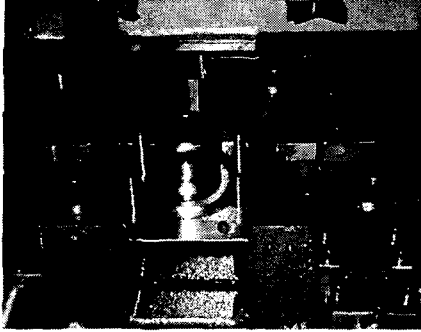


Fig. 7 Punch assembly of first drawing process

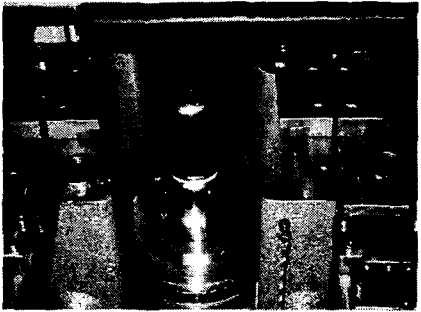


Fig. 8 Punch assembly of second drawing process

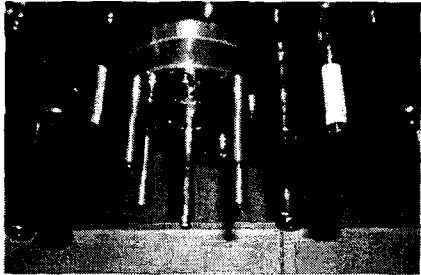


Fig. 9 Die assembly of third drawing process



Fig. 10 Punch assembly of third drawing process

각 공정별 트랜스퍼 드로잉 금형을 드로잉 순서대로 각각 트라이 아웃(try-out)을 실시 하였다. 제품 타발은 트랜스퍼 프레스에 3공정의 트랜스퍼 금형을 유압클램프로 장착한 후 램(ram)의 속도를 20 SPM으로 일정하게 유지한 후 타발했다. Fig 11 에서 (a) 블랭크 (b) 초드로잉 공정 (c) 재 드로잉 공정 (d) 타원형 드로잉의 제품사진을 보여준다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 11 Experimental results for each deep drawing

### 3.2.2 실험결과 및 고찰

본 연구에서 실험을 통한 제품외관 상태는 주름(wrinkling)이나 찢어짐이 없이 아주 양호하였으며 제 3드로잉 공정에서는 약간의 귀(earing)현상이 발생했다. 성형해석에서 판두께 변화값은 PAM - STAMP의 STRESS기능을 사용하여 제품을 전단면하여 구했다.

드로잉 실험 완료된 제품은 와이어 커팅기로 반단면으로 절단한 후 포인트 마이크로미터로 두께 분포를 3mm간격으로 나누어 측정하였다. 타원형 제품인 제 3 드로잉공정은 장변부와 단변부로 나누어 측정하였다.

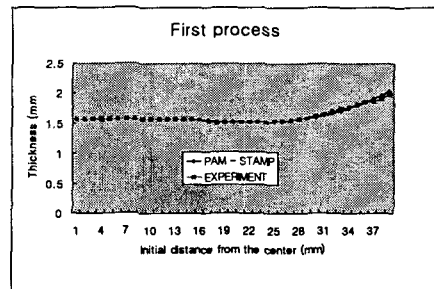


Fig. 12 Thickness distributions of first process

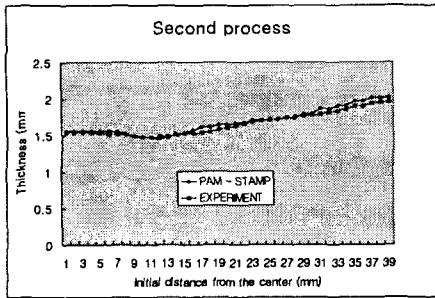


Fig. 13 Thickness distributions of second process

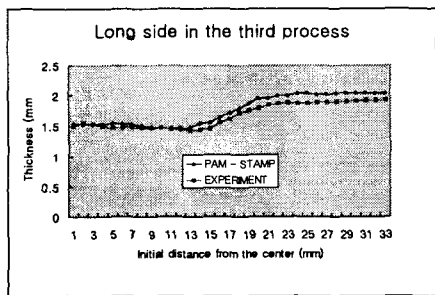


Fig. 14 Thickness distributions of long side in third process

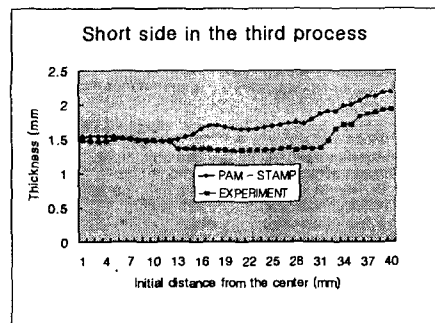


Fig. 15 Thickness distributions of short side in the third process

### 3.2.3 해석과 실험의 두께분포 비교

각 공정별 두께분포 비교를 해석과 실험으로 나타냈는데 Fig. 12은 제 1드로잉공정의 두께분포를 나타내며 Fig. 13은 제 2드로잉공정의 두께분포를 나타내며 Fig. 14은 제 3드로잉공정의 장변부의 두께분포를 나타내며 Fig. 15는 제 3드로잉공정의 단변부의 두께분포를 나타낸다.

제 1공정과 제 2공정에서는 해석과 실험이 일치하는 균일한 두께분포를 보이고 있으며 제 3공정에서는 장변부와 단변부의 두께차이가 발생하기 시작하는 공정이기 때문에 귀(earing)현상이 발생했지

만 후공정의 트리밍(triming)공정으로 제거되므로 여기서는 그다지 중요하게 고려하지 않았다. 제 3공정에서 측벽부와 플랜지 부에서 약간의 차이를 보이고 있다. 특히 단변부에서는 해석값과 실험값의 두께분포 차이가 다소 높게 나타났다. 최대 인장력을 받는 코너부에서는 전공정 모두 성형해석과 실험결과가 거의 일치하여 실험의 타당성을 입증하였다.

## 4. 결론

본 연구에서 자동차 구동용 모터 케이스인 요크(yoke)제품 성형을 위한 다단계 디프 드로잉 공정의 초기 3단계의 공정에 대한 유한요소해석과 실험을 통한 제품을 제작하였다.

금형개발 기간의 단축과 비용절감의 목적으로 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP를 이용하여 해석하고 그 결과를 실험과 비교 분석하여 향후 다단계 디프 드로잉 공정에 적용에 대한 신뢰성 확보를 도모했으며 향후 유사형상의 제품 개발시 유한요소해석 적용가능성을 제시하였으며 다소 두께편차를 보이고 있는 플랜지부에 대한 변수 값에 대한 연구는 향후 지속적으로 연구해야 한다.

## 후기

본 연구는 한국 E. S. I 에서 성형해석의 협조와 한국 코아(주)의 현장적용 실험에 의해 이루어졌다.

## 참고문헌

1. William F.Hosford and Robert M. Caddel, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", pp. 286-302, 1983.
2. 김두환, "원통형 닥드로잉 용기의 벽두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구," 한국소성가공학회지, 7권, 제4호, pp. 393-399, 1998.
3. 박동환, 박상봉, 강성수, "타원형 디프 드로잉 공정의 성형성 향상에 관한 실험적 연구," 한국소성가공학회지, 제9권, 제2호, pp. 120-127, 2000.
4. 전기찬, "박판금속의 성형," pp. 131-143, 1993.
5. 조용식, "프레스 금형설계 기술," pp. 217-290, 1994.