

〈논 문〉

## 정사각형 컵 디프드로잉의 탄소성 유한요소해석

서 의 권\* · 심 현 보\*

(1995년 7월 3일 접수)

### An Elastic-Plastic FE Analysis of a Square Cup Deep Drawing Process

E. K. Suh and H. B. Shim

#### Abstract

In the present study, SEAM (Shear Energy Augmented Membrane) elements have been developed. Maintaining the numerical efficiency of conventional membrane elements, the effect of out-of-plane deformation (transverse shear deformation) has been incorporated for the purpose of computational stabilization without introducing additional degrees of freedom. Computations are carried out for the deep drawings of square cup to check the validity and the effectiveness of proposed SEAM elements. The computational results are compared with both the existing results. And the effects of process variables like initial sheet thickness, punch & die round, and clearance are checked

**Key Words :** SEAM (Shear Energy Augmented Membrane, 전단에너지를 부가한 박막요소), Wrinkling (주름현상), Numerical Buckling (수치적 좌굴)

#### 1. 서 론

일반적인 디프드로잉 공정에 있어서 재료의 변형은 플랜지 (flange) 부에서는 다이 (die) 속으로 빨려 들어가면서 원주 방향으로 압축력을 받으며, 다이 반경 (die round) 부에서는 굽힘 (bending) 과 펴짐 (unbending) 이 이루어져 벽면을 형성한다. 그런데 가공소재로 사용되는 박판은 두께가 길이 혹은 폭에 비하여 치수가 훨씬 작기 때문에 압축력에 취약한 특성이 있어, 성형시에 인장력이 가해지는 부분은 대부분 성형이 잘 이루어지나, 압축력이 작용하는 부분은 주름현상 (wrinkling) 등의 발생 가능성이 높기 때문에 압축응력을 수반하는 디프드로잉 공정은 여타의 공정에 비하여 결함 발생의 가능성이 높은 편이다. 이러한 문제점은 수치해석에서도

그대로 나타나 수치적 좌굴 (numerical buckling) 을 발생시켜 더 이상의 해석을 불가능하게 함으로 이에 대한 대책이 필요하다. <sup>(1)</sup>

박판 성형공정의 유한요소해석에 있어서 박막 해석법은 평면 응력상태로 가정하고 굽힘 혹은 전단 응력과 같은 비평면 응력성분을 무시하는 방법으로 일반적으로 가장 많이 사용되고 있으나, 대체로 인장이 지배적인 공정에 적용할 경우, 정확한 해를 제공하는 것으로 알려져 있다. <sup>(2,3)</sup> 박막 해석법은 계산에 필요한 기억용량과 계산시간이 적게 든다는 장점이 있으나, 공정의 특성상 굽힘의 영향이 크게 작용하거나 압축응력이 발생하는 공정의 해석에는 부정확한 정보를 제공할 가능성이 많다. 따라서 굽힘의 효과를 고려하기 위해서는 연속체 해석법이나 쉘 해석법을 이용하거나, <sup>(4-6)</sup> 적절히 박막요소에 굽힘의 효과를 부가해주는 방법들이 제안되고 있다. <sup>(7,8)</sup>

\*영남대학교 기계공학과

본 연구에서는 박막 해석법의 장점을 유지하면서

디프드로잉 공정과 같이 큰 압축력에 의한 주름 발생이 쉬운 공정의 안정된 해석과 계산의 정확성을 높이기 위하여, 비평면 변형률 성분인 두께 방향의 전단 변형률을 고려하는 전단에너지를 부가한 박막 (shear energy augmented membrane; SEAM) 요소를 이용하여 정사각형 컵의 디프드로잉 공정을 탄소성 유한요소법으로 해석하여 박막해석 및 기존의 실험결과<sup>(9)</sup>와 비교함으로써 SEAM 요소의 타당성을 확인하였다. 또한 SEAM 해석을 통해서 여러 가지 성형 공정변수 중에서 초기 박판의 두께, 다이 및 펀치 반경, 펀치와 다이의 간격 (clearance) 등의 영향을 조사하였다.

## 2. SEAM 요소의 수식화

### 2.1 인접 요소간의 상대회전각

박판은 두께가 다른 치수에 비하여 훨씬 작기 때문에 박판에 Fig. 1(a)와 같이 평면 방향의 압축력이 가하여지면 Fig. 1(b)와 같이 주름현상 (wrinkling)이 쉽게 발생된다. 특히 디프드로잉 공정에서는 압축응력을 수반하는 공정으로 주름현상이 발생할 가능성이 매우 높은 특성을 지니고 있다. 또한 공정이 진행되는 동안 다이와 펀치사이의 좁은 구간내에서 굽힘 및 퍼짐이 발생하는 관계로 여타의 박판 성형공정에 비하여 상대적으로 좁은 거리에서 굽힘이 작용하게 된다. 보의 길이가 짧아질수록 굽힘의 영향보다는 단면방향의 전단 변형의 영향이 점차 증가하는 Timoshenko<sup>(10)</sup>의 굽힘이론을 좁은 구간에서의 판재의 굽힘에 적용할 경우, 전단변형의 영향이 적지 않을 수 있음을 시사하고 있다. 또한 주름에 의한 파형이 작아지면 작아질수록 곡률이 증가하여 전단변형의 영향이 증가될 수 있음을 유추할 수 있다.

따라서 기존의 박판성형공정의 해석에서 평면응력을 가정하는 박막해석법이나, 굽힘의 영향을 고려하는 쉘이론등은 디프드로잉 공정과 같이 좁은 영역에서 굽힘이 발생하는 문제에서는 해의 정확도를 저하시키는 결과를 야기하게 된다.

두께방향의 전단변형을 무시하는 박막 해석법에서는 주름현상이 Fig. 1(c)와 같은 변형모드로 가정된다. 이와 같은 변형모드는 주름발생에 수반되는 두께방향의 전단변형을 무시하고 평면방향의 응력 및 변형률 성분만을 고려하고 있다. 또한 주름이 발생할 경우, 박막해석법에서는 변형체에 축적

된 변형에너지가 실제보다 매우 낮게 예측됨에 따라 실제의 변형과는 많은 차이를 가져오고 있다. 이 이유는 실제로 존재하는 굽힘변형이나, 두께방향의 전단변형을 무시함에 따라 발생된 것으로 판단된다. 또한 Fig. 1(b)와 같은 변형모드로 해석하기 위해서는  $C^1$  이상의 고차 요소를 사용할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하여  $C^0$  요소를 사용하면서 압축력이 수반되는 공정에도 적용할 수 있기 위하여 박판의 변형모드를 Fig. 1(d)와 같이 가정하여 주름현상이 발생할 경우에 두께방향의 전단변형이 수반되도록 하였다. 즉 전단변형률을 인접한 두 요소 사이에서의 상대 회전각으로 부터 구하고 발생된 전단 변형률을 전단에너지로 변환하여 기존 박막요소에 첨가하였다.

Fig. 2는 변형중인 두 인접한 요소를 나타낸다. 점 a와 점 b는 두 요소의 중심이고 점 c는 절점 1과 절점 2가 이루는 경계의 중심이다. 두 요소에 압축력이 작용하면 절점 1과 절점 2로 이루어진 경계 (edge)를 중심으로 두 요소 사이에서 전단 변형이 발생하여 점 a, b, c가 이루는 각도가 변한다. 한 스텝 동안 점 a와 점 b로 구성된 선분 ab 부와 점 b와 점 c로 구성된 선분 bc 부사이에서의 상대 회전각  $\delta\theta$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>(7)</sup>

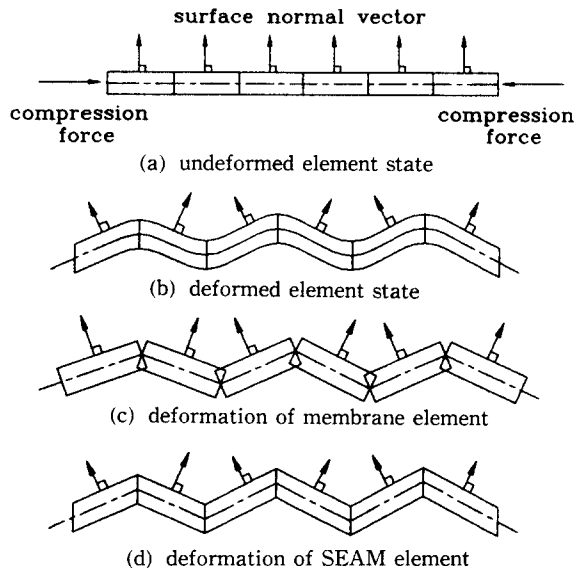


Fig. 1 Deformation of sheet metal under compressive force

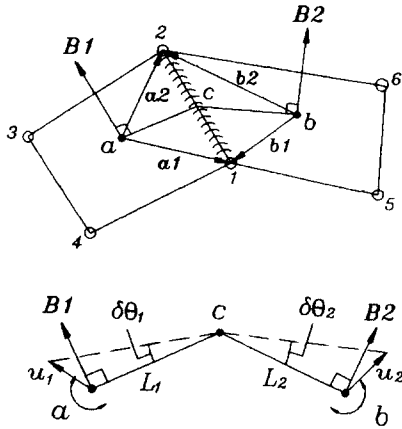


Fig. 2 Relative rotation angle between two neighboring elements

$$\begin{aligned} \delta\theta &= \delta\theta_1 + \delta\theta_2 \\ &= \frac{\mathbf{B1} \cdot \mathbf{u}_1}{L_1} + \frac{\mathbf{B2} \cdot \mathbf{u}_2}{L_2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $L_1, L_2, \mathbf{B1}, \mathbf{B2}$ 는 각각 두 선분의 길이와 요소 평면에 대한 수직 벡터이다. 그리고  $\mathbf{u}_1$ 은 점 c에 대한 점 a의 상대변위이고,  $\mathbf{u}_2$ 는 점 c에 대한 점 b의 상대변위이다. 그리고 두 수직 벡터의 Cartesian 성분을 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} \mathbf{B1} &= n_{ax}i + n_{ay}j + n_{az}k, \\ \mathbf{B2} &= n_{bx}i + n_{by}j + n_{bz}k \end{aligned}$$

식 (1)에서 구한 상대 회전각은 다음과 같은 행렬 식으로 표시할 수 있다.

$$\delta\theta = [\mathbf{N}] [\mathbf{U}]^T \quad (2)$$

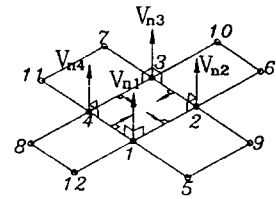
여기서

$$\begin{aligned} [\mathbf{N}] &= \left[ -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{ax}}{L_1} + \frac{n_{bx}}{L_2} \right), -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{ay}}{L_1} + \frac{n_{by}}{L_2} \right), \right. \\ &\quad \left. -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{az}}{L_1} + \frac{n_{bz}}{L_2} \right), -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{ax}}{L_1} + \frac{n_{bx}}{L_2} \right), \right. \\ &\quad \left. -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{ay}}{L_1} + \frac{n_{by}}{L_2} \right), -\frac{1}{4} \left( \frac{n_{az}}{L_1} + \frac{n_{bz}}{L_2} \right), \right. \\ &\quad \left. \frac{n_{ax}}{4L_1}, \frac{n_{ay}}{4L_1}, \frac{n_{az}}{4L_1}, \frac{n_{ax}}{4L_1}, \frac{n_{ay}}{4L_1}, \frac{n_{az}}{4L_1}, \right. \\ &\quad \left. \frac{n_{bx}}{4L_2}, \frac{n_{by}}{4L_2}, \frac{n_{bz}}{4L_2}, \frac{n_{bx}}{4L_2}, \frac{n_{by}}{4L_2}, \frac{n_{bz}}{4L_2} \right] \end{aligned}$$

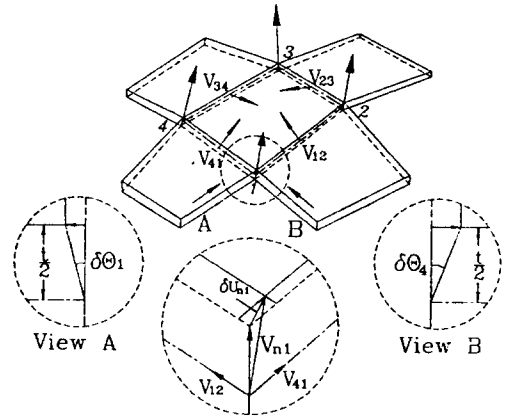
$$[\mathbf{U}] = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, u_3, v_3, w_3, u_4, v_4, w_4, u_5, v_5, w_5, u_6, v_6, w_6]$$

2.2 요소에 발생하는 전단변형을 및 전단에너지  
4절점 사변형 요소에서는 4 변에서 모두 서로 다른 요소와 인접하고 있으므로 각 변에서 발생하는 상대 회전각을 모두 고려하여야 한다. 인접 요소와의 상대회전각을 모두 구한 후 이를 이용하여 요소내의 두께방향의 전단변형을 구하도록 한다. 이 때 요소의 변을 경계로 발생된 상대회전각은 인접한 두 요소에 같은 크기로 분배되면서 요소평면에 대하여 수직인 벡터를 회전시키는 것으로 가정한다.

Fig. 3은 변형전과 변형후의 기준 요소(base element)의 형상을 나타내고 있다. 편의상 기준 요소와 인접 네 요소의 절점 번호를 1에서 12로 부여하자. 각 절점에서 요소평면에 수직된 단위 벡터를 각각  $\mathbf{V}_{n1}, \mathbf{V}_{n2}, \mathbf{V}_{n3}, \mathbf{V}_{n4}$ 라고 하자. 또한 각 변에 수직된 요소 평면방향의 단위 벡터를 각각  $\mathbf{V}_{12}, \mathbf{V}_{23}, \mathbf{V}_{34}, \mathbf{V}_{41}$ 이라고 하자. 단위 요소 내에서의 전단각의 분포를 구하기 위해 먼저 변형 후의 각 절점 변위를 구한다. Fig. 3에서와 같이 한 절점을 공유하는 두 변에서 발생된 상대회전각이 절점에 수직벡터를 회전시키고 이 수직벡터의 회전에



(a) undeformed configuration



(b) deformed configuration and details

Fig. 3 Transverse shear deformation in the SEAM element

의해 발생된 각 절점에서의 평면방향의 변위는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\delta U_{n1} = \frac{t}{2} (\mathbf{V}_{12} \frac{\delta \theta_1}{2} + \mathbf{V}_{41} \frac{\delta \theta_4}{2}) \quad (3a)$$

$$\delta U_{n2} = \frac{t}{2} (\mathbf{V}_{23} \frac{\delta \theta_2}{2} + \mathbf{V}_{12} \frac{\delta \theta_1}{2}) \quad (3b)$$

$$\delta U_{n3} = \frac{t}{2} (\mathbf{V}_{34} \frac{\delta \theta_3}{2} + \mathbf{V}_{23} \frac{\delta \theta_2}{2}) \quad (3c)$$

$$\delta U_{n4} = \frac{t}{2} (\mathbf{V}_{41} \frac{\delta \theta_4}{2} + \mathbf{V}_{34} \frac{\delta \theta_3}{2}) \quad (3d)$$

여기서  $\delta \theta_1, \delta \theta_2, \delta \theta_3$ 와  $\delta \theta_4$ 는 각각 기준 요소와 인접한 네 요소와의 상대회전각도이며  $t$ 는 박판의 두께이다. 식 (3)으로 부터 얻어진 각 절점에서의 평면방향의 변위와 형상 함수  $\mathbf{H}$ 를 이용하여 요소내부의 평면방향의 변위 분포, 즉 전단변위  $\delta U$ 를 구할 수 있다.

$$\delta U = \sum_{i=1}^4 \delta U_{ni} h_i \quad (4)$$

여기서  $\delta U_{ni}$ 는 식 (3)에 의한 각 절점에서의 절점변위이고,  $h_i$ 는 변위에 대한 형상함수  $\mathbf{H}$ 의 각 성분이다. 따라서 식 (4)로부터 요소내부의 두께방향의 전단변위를 구할 수 있고, 이를 이용하여 두께방향의 전단 변형률은

$$\delta \theta = [\mathbf{N}]_{1 \times 36} [\mathbf{U}]_{36 \times 1}^T \quad (5)$$

따라서 두께방향의 전단변형에 의해 발생된 전단 에너지는 다음과 같다.

$$\delta U_s = \int \frac{1}{2} \mathbf{K}_s \delta \theta^2 dV \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{K}_s$ 는 전단 강성계수이다. 이 때 전단 강성계수  $\mathbf{K}_s$ 는 두께방향으로 탄성 및 소성영역이 공존할 수 있어 정확히 결정하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는  $\mathbf{K}_s$ 값으로 편의상 전단항복 응력값을 택하였고, von Mises 항복조건을 사용할 경우에 재료의 단축인장 항복응력  $\bar{\sigma}$ 와의 관계에서 식 (7)과 같이 결정된다.

$$\mathbf{K}_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \quad (7)$$

식 (6)에서 한 스텝동안  $\mathbf{K}_s$ 와  $[\mathbf{N}]$ 이 각도의 작은 변화에 대해 독립적이라고 생각하면, 식 (6)에 식 (5)를 대입하고,  $[\mathbf{U}]$ 에 대해서 두번 미분을 하면 최종적인 요소의 전단 강성행렬이 다음과 같은 형태로 나타내어 진다.

$$[\mathbf{K}]_{36 \times 36}^{b.e} = \int \mathbf{K}_s [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dV \quad (8)$$

따라서 식 (8)의 강성 행렬을 기존의 박막 요소의 강성 행렬<sup>(1)</sup>에 추가하여 줌으로써 전단 에너지를 부가한 박막 요소, 즉 SEAM 요소가 만들어진다.

### 3. 계산결과 및 고찰

앞에서 유도된 SEAM 요소의 타당성을 알아보기 위해서 압축응력이 수반되는 것으로 알려진 정사각형 컵의 디프드로잉 공정을 해석하였고, 또한 해석 결과는 Yang등<sup>(9)</sup>의 실험 결과를 인용, 비교하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 디프드로잉 공정의 기하학적 형상을 나타내었으며, 사용된 재질과 기본 공정변수는 Table 1과 같다.

#### 3.1 정사각형 컵의 디프드로잉

Fig. 5는 펀치의 변위 대 하중의 결과를 실험치, 전단변형의 영향을 무시하는 박막 해석치와 비교해 보았다. 그림에서 보는 것과 같이 본 해석의 결과가 박막해석에 비하여 실험치에 가깝게 계산되었다. 심현보등이 지적한 바와 같이<sup>(1)</sup> 디프드로잉 공

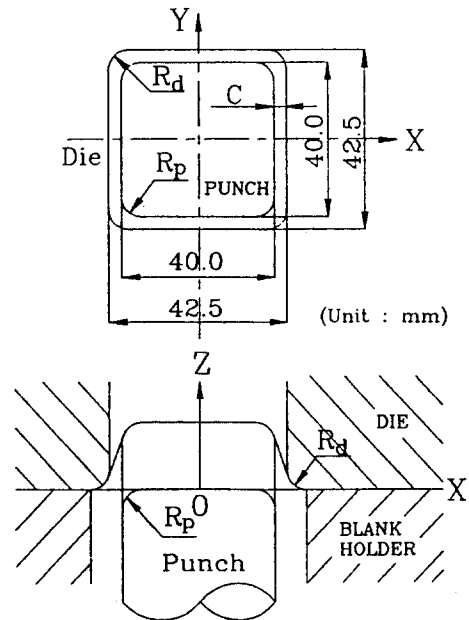


Fig. 4 Geometry of the tooling for deep drawing of a square cup

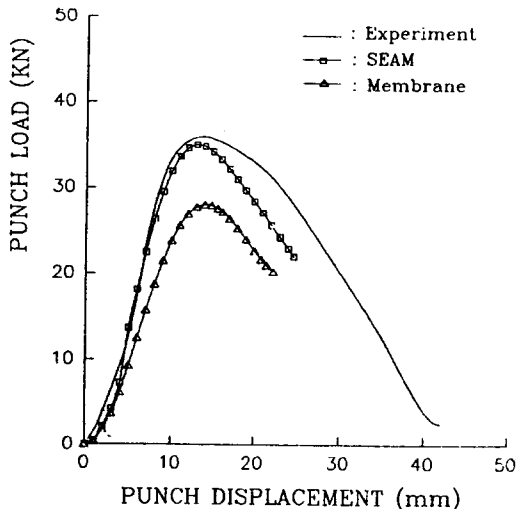
**Table 1** Material properties and process variables used in the analysis

Sheet material	aluminum-killed steel
Stress-strain curve	$\bar{\sigma} = 508.79(0.001 + \bar{\epsilon}_p)^{0.247} \text{MPa}$
Young's modulus	$E = 2 \times 10^5 \text{MPa}$
Lankford value	$R = 1.867$
Sheet thickness	$t_0 = 0.8 \text{ mm}$
Dimension of the blank	$\Phi 90 \text{ mm}$
Dimension of the punch	$40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$
Punch & Punch corner radius	$R_p = 5 \text{ mm}$
Die opening	$42.5 \text{ mm} \times 42.5 \text{ mm}$
Die & Die corner radius	$R_d = 5 \text{ mm}$
Clearance	$C = 1.25 \text{ mm}$
Coulomb coefficient of Friction	$\mu = 0.24$
Blank holding force	7840N

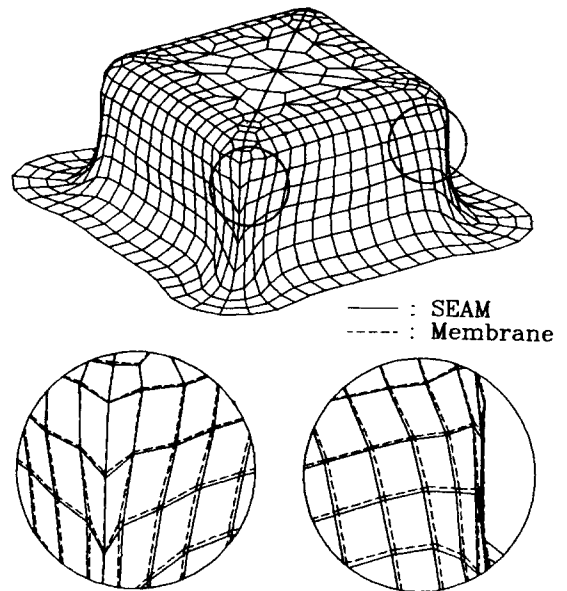
정에서는 굽힘 뿐만 아니라 전단변형의 영향이 동시에 작용하고 있어, 전단변형의 영향을 무시하는 박막해석은 계산 도중 강한 압축응력의 유발에 따른 수치적인 좌굴을 유발하고 있으나, 두께방향의 전단변형을 고려한 본 해석에서는 수치적인 좌굴의 발생을 방지하여 실제와 유사한 변형모드를 제공하

기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

Fig. 6은 펀치행정 22.0 mm에서의 본 해석에 의한 전체 변형 형상을 나타낸다. 펀치 모서리에서의



**Fig. 5** Comparison of drawing load between the computed results of the membrane element analysis and SEAM element analysis with the experiment



**Fig. 6** Computed deformed configuration of the sheet by SEAM element analysis for square cup deep drawing ( $h = 22 \text{ mm}$ ) and overlaid details of both membrane and SEAM element analyses

압축력에 의한 좌굴 현상을 알아보기 위해서 박막 해석의 결과를 본 해석의 결과와 함께 겹쳐 나타내었다. 수치적 좌굴은 특히 펀치의 모서리부에서 크게 나타나는 현상을 보이는 데, 본 해석의 결과는 박막 해석의 결과에 비하여 많이 개선되었음을 보여준다. Fig. 7은 변형된 플랜지의 윤곽으로 본 해석의 결과를 박막 해석 및 기존의 실험 결과와 비교해 보았다. 플랜지의 윤곽은 모서리 부위에서 두 해석 결과 모두 잘 일치하고 있다. 측벽부에서는 본 해석이 박막해석에 비해 좀 더 실험치에 가깝게 다이 속으로 적게 빨려 들어갔다. 이는 박막 해석에서는 수치적 좌굴의 발생으로 말미암아 벽면부위에 응력이 실제보다 작게 가해지고, 전단변형을 고려한 본 해석에서는 수치적 좌굴 현상이 완화됨에 따라 벽면부위에도 실제와 비슷한 응력이 가하여짐에 따라 변형이 쉽게 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 기존 박막 해석으로는 수치적 좌굴로 인해 24.0 mm에서의 해석이 불가능했으나 본 해석에서는 가능하여 계산이 더 안정적임을 알 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 두 변형 단계(펀치 행정 12.7 mm, 20.1 mm)에 대한 폭 방향과 대각선 방향의 두께 변형률의 분포를 나타내었다. Fig. 8의 폭 방향의 두께 변형률의 분포에서 보면 컵의 벽면인 20 mm에서 30 mm부근에서 본 해석이 박막해석에 비

해 두께 감소량이 약간 크게 나타나 실험치에 가까웠다. 이는 기존의 박막해석으로는 예측할 수 없었던 것으로 SEAM 해석이 수치적인 좌굴 현상을 방지하여 줌으로써 나타난 결과로 판단된다. 그렇지

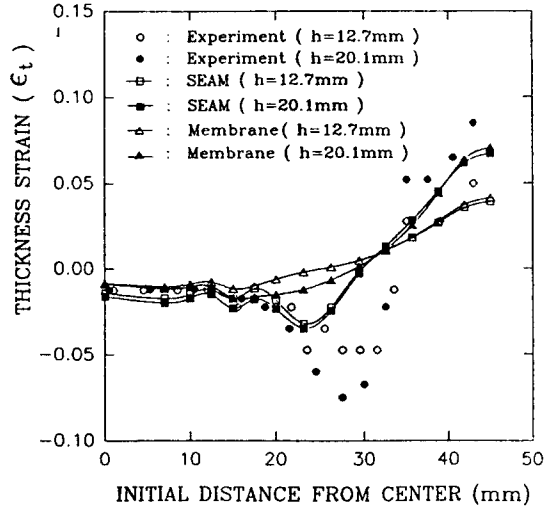


Fig. 8 Comparison of the thickness strain distribution between the computed results of the membrane element analysis and the SEAM element analysis with the experiment in the transverse direction

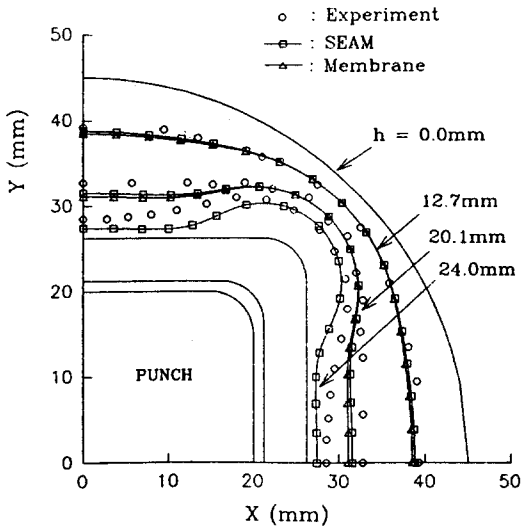


Fig. 7 Comparison of the computed results of the membrane element analysis and the SEAM element analysis with the experiment for the deformed edge contour

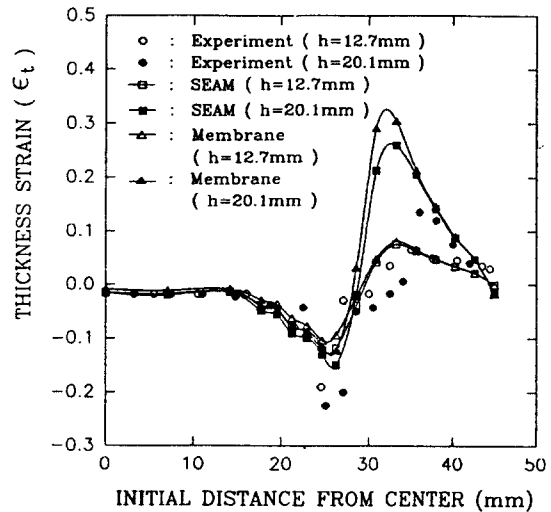


Fig. 9 Comparison of the thickness strain distribution between the computed results of the membrane element analysis and the SEAM element analysis with the experiment in the diagonal direction

만 기존의 발표된 실험 결과와는 아직 차이를 보인다. 이것은 실제 컵 드로잉 실험시에 다이 라운드 부근에서 윤활막이 파손된 흔적과 벽면 부근의 플랜지 부위에 들림현상(recoil)이 발생하는 것으로 기존 논문의 실험 결과<sup>(9)</sup>에서 보고되어 있고, 들림 현상이 발생되면 변형영역이 펀치의 바닥과 들림 현상이 발생된 구간에 국한되어 변형이 일어나기 때문에 인장변형이 국부적으로 일어나 두께 감소량이 커진다고 알려져 있다. Fig. 9의 대각선 방향의 두께 변형률의 분포는 변형이 작은 12.7 mm와 20.1 mm 단계에서 모두 기존 박막 해석과 SEAM 해석 모두 비슷하게 계산되었다. 벽면 부위를 제외한 펀치와 플랜지 부위에서의 두께 변형률의 분포는 실험 결과와 비슷하게 나타났다.

### 3.2 공정 변수의 영향

박판 성형공정에 있어서 성형의 가능여부를 좌우하는 중요한 공정변수로서는 펀치 및 다이 반경, 클리어런스, 판재의 두께, 블랭크 홀딩력, 윤활, 드로잉 속도 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 그 중에서 초기 박판의 두께와 펀치와 다이의 반경 및 펀치와 다이의 클리어런스 등의 공정변수 영향을 SEAM해석을 통해 알아보았다.

먼저 Table 1의 공정변수 중에서 클리어런스 및 다이와 펀치의 반경에 대한 값을 고정하고 박판의

두께( $t_0$ )만을 0.8, 1.0, 1.2 mm로 변화시켜 해석하였다. Fig. 10은 박판 두께의 변화에 따른 펀치의 변위 대 하중의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 박판의 두께가 두꺼워지면서 펀치와 다이의 반경에서 재료가 굽힘에 저항하는 힘의 커짐과 벽면에서의 인장에 저항하는 단면적의 증가로 성형에 필요한 하중이 커지는 것을 잘 나타내고 있다. Fig. 11과 12는 펀치 행정 20.1 mm에서의 초기 박판의 두께 변화에 따른 폭 방향과 대각선 방향의 두께 변형률의 분포를 나타내었다. SEAM 해석에서 박판두께의 변화에 따른 영향은 크게 나타나지 않고 있다. 이는 SEAM 해석에서 전단에너지가 두께에 선형적으로 비례하므로 큰 차이를 보이고 있지 않다. Han 등<sup>(8)</sup>은 단면 2차 모멘트와 곡률의 함수로 표현되는 굽힘에너지를 기존의 박막 수식에 추가함으로써 수치적인 좌굴을 방지하였고, 해석결과, 주름현상은 현저히 감소되었으며, 판재의 두께가 증가함에 따라 컵의 벽면에서 두께가 기존 박막해석에 비해 크게 줄어들고 있어 본 해석과는 차이를 나타내고 있다. 이 차이는 Han 등이 제안한 수식에서 굽힘에너지를 단면 2차 모멘트가 두께의 3승에 비례하게 되며 본 수식에서는 전단에너지가 두께에 선형적으로 비례하기 때문에 나타나는 결과로 생각되며, 이 현상에 대하여는 실험을 통하

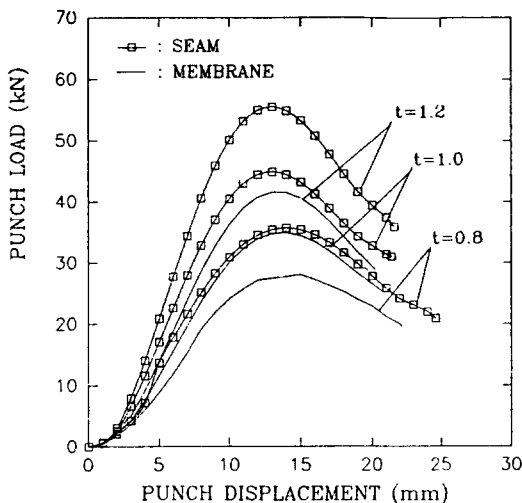


Fig. 10 Comparison of drawing load between membrane element analysis and SEAM element analysis with respect to various sheet thickness

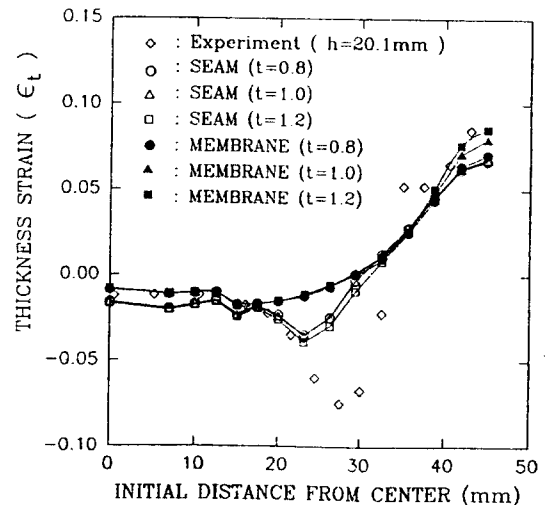


Fig. 11 Comparison of the thickness strain distribution between the membrane element analysis and the SEAM element analysis with respect to various sheet thickness in the transverse direction

여 검증할 필요가 있을 것으로 사료된다.

펀치와 다이 사이의 클리어런스(C)의 영향을 알아보기 위해 Table 1에서 클리어런스를 펀치의 치수는 고정하고 다이의 개구부 치수를 크게 하는 방식으로 1.0, 2.0, 3.0 mm로 변화시켜 해석하였다. Fig. 13은 클리어런스의 변화에 따른 변위 대 하중

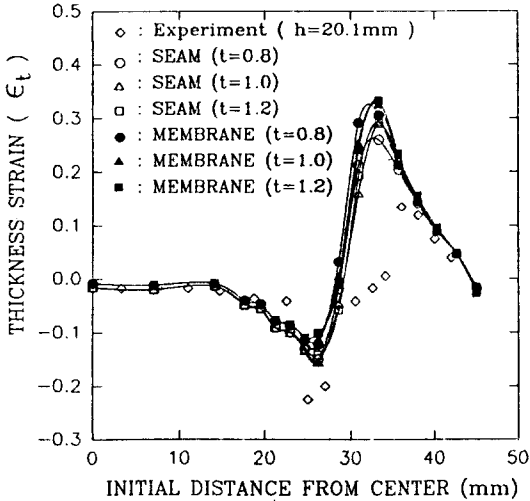


Fig. 12 Comparison of the thickness strain distribution between the membrane element analysis and the SEAM element analysis with respect to various sheet thickness in the diagonal direction

의 결과이다. 그림에서 보듯이 클리어런스가 커짐으로써 초기 성형에 필요한 하중이 줄어들음을 알 수 있다. 이는 플랜지에서 저항하는 재료의 면적이 줄어들고, 벽면에서 인장되는 부위가 증가하기 때문으로 생각된다. 그리고 Fig. 14는 두 변형 단계에서의 플랜지의 윤곽을 나타내는 것으로 클리어런스가 증가함으로써 폭 방향에서 다이 속으로 재료가

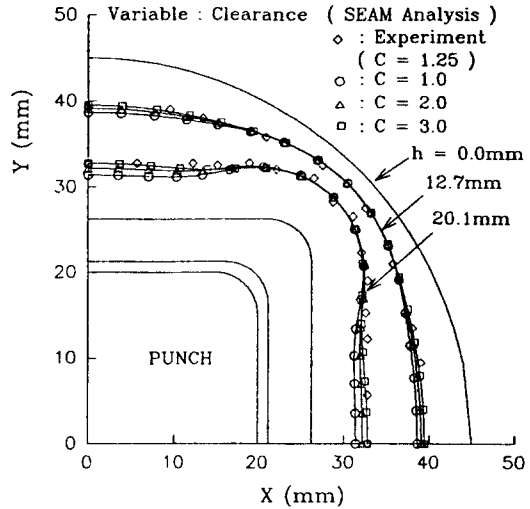


Fig. 14 Comparison of the deformed edge contour by SEAM element analysis with respect to various clearance

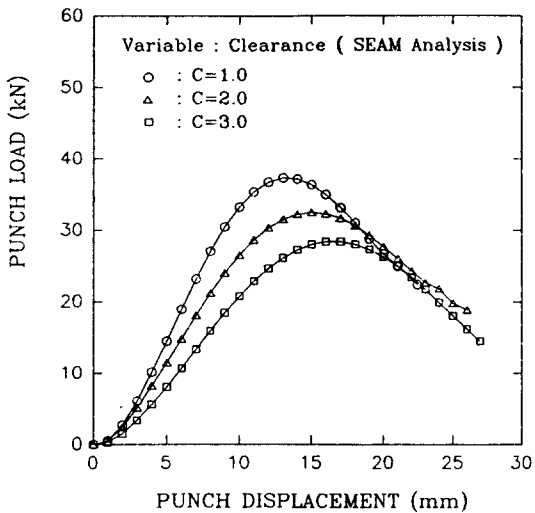


Fig. 13 Comparison of drawing load by SEAM element analysis with respect to various clearance

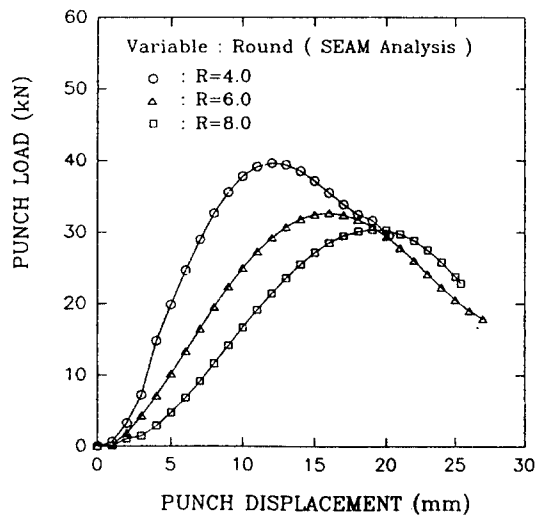


Fig. 15 Comparison of drawing load by SEAM element analysis with respect to various punch and die round



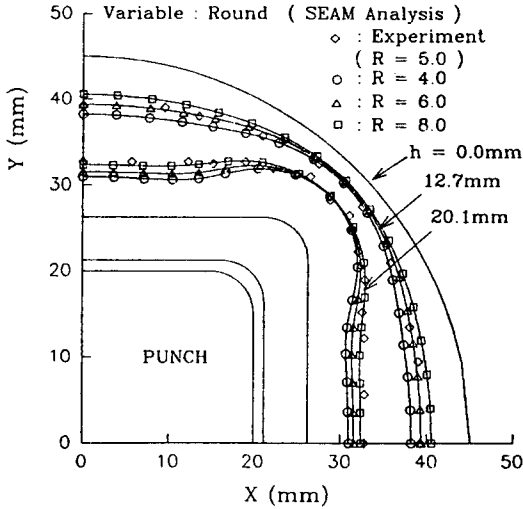


Fig. 16 Comparison of the deformed edge contour by SEAM element analysis with respect to various punch and die round

덜 빨려들어감을 알 수 있다.

Fig. 15는 Table 1에서 펀치와 다이의 외곽 치수 및 클리어런스를 고정된 상태에서 펀치와 다이의 반경 ( $R_p$ ,  $R_d$ )만을 4.0, 6.0, 8.0 mm로 변화시킬 때의 변위 대 하중의 결과이다. 다이 및 펀치의 반경이 커짐으로써 재료가 굽힘에 저항하는 힘이 줄어들기 때문에 하중이 작게 계산되는 경향을 알 수 있다. 또한 Fig. 16에서의 플랜지의 윤곽도 반경이 커짐으로써 다이 속으로 작게 빨려 들어갔다.

#### 4. 결 론

디프드로잉 공정의 해석에 있어서 두께 방향으로의 전단 변형을 고려한 전단 에너지를 부가한 박막 (SEAM) 요소를 이용하여 정사각형 컵의 디프드로잉 공정을 탄소성 유한요소법으로 해석하여, 기존의 실험 결과와 비교함으로써 그 타당성을 조사하였다.

드로잉 하중은 기존 박막 해석에 비해 SEAM 해석이 실험치와 더 잘 일치함을 보였다. 그리고 박막 해석법으로는 예측이 되지 않았던 컵벽면 부위에서의 두께 감소 현상도 SEAM 해석에서는 예측할 수가 있었다. 본 연구의 결과로부터 정사각형 컵의 디프드로잉 공정과 같이 큰 압축력이 작용하는 공정의 해석은 수치적인 좌굴 현상을 적절히 억

제할 경우 더 나은 결과를 제공할 수 있음을 알았고, 수치적인 좌굴현상이 두께방향의 전단 변형과 큰 관계가 있음을 알았으며, 또한 수치적인 좌굴의 억제가 해의 정확성의 향상 뿐만 아니라 계산의 안정화와 큰 관계가 있음을 알았다. 그리고 여러가지 공정변수 중에서 초기 박판의 두께와 다이와 펀치의 반경 및 클리어런스의 변화에 따른 영향을 하중과 두께변형률 및 플랜지의 윤곽을 통해 알아보았다. 두께의 변화에 따른 두께변형도의 경향이 기존의 해석결과와는 차이를 나타내고 있으며, 이러한 차이는 수정박막 해석법에서 채택하고 있는 두께방향의 처짐에 대한 강성을 부가해 주기 위하여 추가해 주는 에너지의 크기에 따라 나타나는 것이며, 좋은 해석 결과를 제공해 줄 수 있는 적정한 에너지의 크기에 대하여는 실험을 통하여 결정될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참 고 문헌

- (1) 심현보, 양동열, 1994, "굽힘을 고려한 원형 및 정사각형 딥드로잉 공정의 탄소성 유한요소 해석", 대한기계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1738~1750.
- (2) Wang N. M. and Budiansky B., 1978, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method", J. Appl. Mech., Trans. ASME, Vol. 45, pp. 73~82.
- (3) Arlinghaus F. J., Frey W. H. and Stoughton T. B., 1985, "Finite Element Modelling of a Stretch Formed Part", Computer Modelling of Sheet Metal Forming Process (Ed. N. M. Wang and S. C. Tang), AIME, pp. 51~64.
- (4) Makinouchi A., 1986, "Finite Element Modeling of Draw Bending Process of Sheet Metal", Proc. NUMIFORM'86, pp. 327~332.
- (5) Huang Y. M. and Lu Y. H., 1992, "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of V-Shape Sheet Bending", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 35, pp. 129~150.
- (6) Boisse P., Daniel J. L. and Gelin J. C., 1992, "Continuum Based Shell Elements For the Simulation of 3D Sheet Metal Forming", Proc. NUMIFORM'92, pp. 421~426.
- (7) 유동진, 송인섭, 양동열, "연속접촉처리 및

- BEAM요소를 이용한 3차원 박판 성형 공정 해석”, 대한기계학회 '93년도 춘계학술대회 논문집 (I), pp. 803~807.
- (8) Han S. S. and Huh H., 1995, “Modified-membrane finite-element simulation of square cup drawing processes considering influence of geometric parameters”, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 48, pp. 81~87.
- (9) Yang D. Y., Chung W. J. and Shim H. B., 1990, “Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes with Initial Guess Generation”, Int. J. Mech. Sci Vol. 32, pp. 687~708.
- (10) Timoshenko S. P. and Gere J. M., 1972, “Mechanics of Materials.,” Litton Educational Publishing, Inc., pp. 201~208.