

정사각용기 성형에서 변형률완화에 관한 연구

김진무*, 유호영**

A Study on Strain Relief in a Square Cup Drawing

Jin-Moo Kim*, Ho-Young You**

ABSTRACT

Square cups have been drawn to 20mm~60mm in depth and displacements and strains have been analysed by FEM and experiment. Displacements and strains on the corner flange of square cups have been compared with those of cylindrical cups.

The results have shown that shear strains take place on corner flanges of square cups, it is necessary to adopt effective strain for comparing of strains and the effective strains on the corner flange in square cups are smaller than those in cylindrical ones.

Key Words : strain relief(변형률 완화), corner radius(코너반경), shape factor(형상계수), drawing ratio(드로잉비), effective strain(유효변형률)

1. 서론

금속박판의 deep drawing분야에서 축대칭형상의 용기성형에 관해서는 이론과 실험의 양면으로 많은 연구가 이루어졌고, 비대칭형상의 용기성형에 관해서는 주로 정사각용기의 성형에 관한 연구가 계속 진행중에 있다.^{1),2)}

그러나 실제 프레스제품의 형상은 복잡하고 다양해서 축대칭형상 및 정4각형용기의 성형에서 얻은 결과를 실제 성형에 어떻게 적용할 것이며, 새로운 어떤 인자가 어떻게 영향을 미칠 것인가에 대해서 역시 분명하지 않다.

성형이 비축대칭일 때는 축대칭인 경우와는 달

리 성형윤탁의 위치에 따라 변형상태가 다르고 재료의 유동이 구심적이지 않다. 그로 인해 편치어깨에 하중을 부담하는 부분에서 파단균열이 발생하게 될 때에 인접부분으로부터 억제작용을 받는 것과 같은 효과가 나타나고, 플랜지에서는 둘레방향으로 재료의 이동이 발생하여 변형률의 완화가 일어난다. 플랜지의 변형률완화는 비대칭용기의 성형성에 큰 영향을 미치지만 이에 관한 연구³⁾⁻⁷⁾는 미진하여 비대칭용기의 성형시 플랜지에서 변형률의 완화에 관한 규명은 정사각용기이외의 비대칭용기는 물론 승용차의 차체부품을 포함한 비대칭형상의 제품을 성형할 때 유용한 자료가 될 것으로 생각한다.

본 연구에서는 FEM과 실험해석을 통해서 정사

* 울산대학교 기계공학과

** 울산대학교 대학원

각용기의 플랜지상에서 변위를 검토하여 재료의 이동과 변형상태를 고찰하고, 그 결과를 정사각용기의 코너반경과 동일한 원통을 성형할 때 플랜지의 변위와 변형률과 비교하여 정사각용기의 플랜지에서 변형률완화에 대해서 유효변형률을 이용하여 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치는 프레스(Side Frame Type, PDH-250-100, 복동, 250Ton, 120Ton, 동성개발^㉔)에 펀치, 다이, 블랭크홀더, 펀치력과 블랭크홀더력을 측정하는 2개의 로드셀등을 설치하여 구성하였다.

2.2 실험조건

실험에 사용한 판재의 재질은 냉간압연강판(SPCC)이고, 두께는 0.85mm이며, 소재의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of material

material	tensile strength	elongation	hardening coefficient(n)	mean R-value
SPCC	36kgf/mm ²	37%	0.26	1.73

다이의 형상과 치수는 Fig. 1과 같이 한변의 길이가 200mm인 정4각단면이고 다이의 코너반경은 30mm이고 형상계수(shape factor, SF, 코너반경/변의 길이)는 0.15이다. 펀치와 다이의 틈새는 1.4mm(판두께 t_0 의 약1.6배)이며 펀치와 다이의 어깨반경은 각각 10mm(약12 t_0)와 12mm(약14 t_0)이다. 시험에 사용된 판재의 표면상태는 포토에칭 후 세척하고 윤활은 하지 않았으며 블랭크홀더압력은 0.35(kgf/mm²)로 하였다.

2.3 실험방법

시험편의 크기는 352mm×352mm이고 드로잉비(drawing ratio, DR)는 (블랭크의 단면적/펀치의 단면적)^{1/2}의 정의로 1.78이다. 블랭크의 직변플랜지는 5mm간격의 정4각격자 무늬를 포토 에칭하였고 코너플랜지는 5mm간격의 원호와 4.5° 간격의

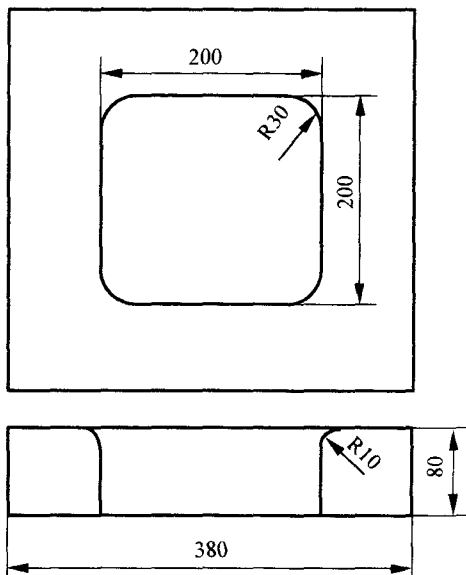


Fig. 1 Shape and dimension of a die

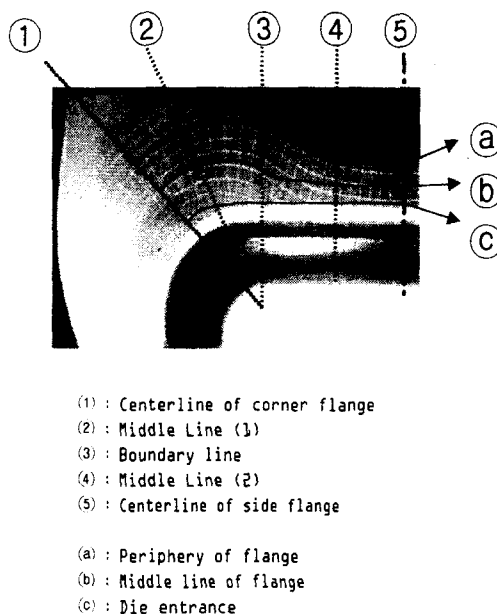


Fig. 2 Shape of a deep-drawn cup

방사선무늬를 새겨 넣었다. 정사각용기의 성형은 성형깊이를 20mm에서 60mm까지 각각 10mm간격으로 하여 플랜지상의 변위는 각 단계별로 Fig. 2에 나

타낸 코너플랜지의 중심선, 중앙선(1), 경계선, 중앙선(2), 직변플랜지의 중심선 등 5개의 선과 플랜지의 중간선, 다이입구부근의 둘레, 플랜지끝의 둘레 등 3개의 선에서 다이구멍에 수직하게 유입하는 변위(유입변위)와 다이구멍에 접선방향으로 유동하는 변위(접선변위)를 측정하였다. 두께변형의 측정에는 전자마이크로메타를 사용하였고, 변위와 각도는 확대경(배율, $\times 10$)을 사용하여 측정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구의 해석은 FEM해석과 실험을 병행하여 시행하였으며 FEM해석은 판재성형해석 전용프로그램인 PAM-STAMP을 이용하였다.

FEM해석은 드로잉비가 1.78이고 형상계수가 0.075, 0.1, 0.15 및 0.3인 경우에 대해서 수행하였고, 실험은 형상계수가 0.15에 대해서 드로잉비가 1.78 일 때에 대해서 하였다. 그 중에서 개재한 변위와 변형률의 해석은 블랭크의 크기가 가장 큰 $352\text{mm} \times 352\text{mm}$ 에 대한 것이며 형상계수는 0.15이고, 드로잉비는 1.78이다.

변위의 측정과 해석은 Fig. 2에 나타난 코너플랜지의 중심선, 중앙선(1), 경계선, 중앙선(2), 직변플랜지의 중심선 등 5개의 선상에 있는 교차점에서 유입변위와 접선변위에 대해서 하였다. 또한 변형률의 측정과 해석은 Fig. 2에 표시한 플랜지의 중간선, 다이입구부근의 둘레, 플랜지끝부근의 둘레 등 3개의 선상에 있는 격자를 따라서 행하였다. 유입변형률과 접선 변형률은 성형깊이마다 변형된 격자에서 측정된 길이로부터 각각 진변형률을 구한 값이고, 전단변형률은 변형된 격자에서 측정된 각도로부터 구한 것으로 측정된 변형률은 모두 전변형률로 나타냈다.

변위는 각 단계별 펀치의 하강거리로 나누어서 변위비로 표시하였고, 측정된 변형률은 각 단계별로 변위로부터 구한 전변형률이다.

정사각용기의 코너반경과 크기가 같고 나머지 성형조건이 같은 원형용기(이하 상당원형용기라고 부른다.)가 파단되지 않는다고 가정하여 상당원형용기를 성형할 때 플랜지에 발생하는 변위와 변형률을 구하고, 정사각용기의 경우와 비교·검토해서 정사각용기의 플랜지에 발생한 유효변형률의 변화를 고찰하여 정사각용기의 플랜지에서 변형률의 이

완현상을 규명하려고 한다.

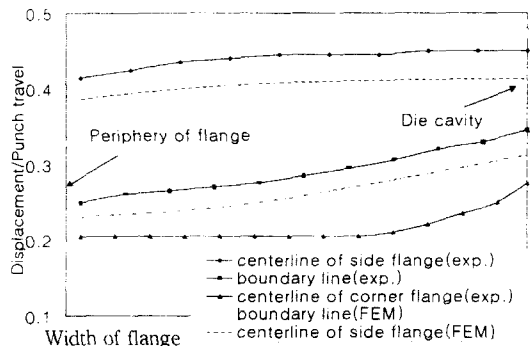
3.1 유입변위

Fig. 3은 성형깊이에 따라 플랜지상에 있는 교차점들의 유입변위비를 나타낸 그림이고 그림(a)는 용기의 성형깊이가 20mm인 경우로서 아직 용기의 벽이 성형되지는 않고 주로 펀치와 다이의 어깨부에 의해 용기바닥의 모서리와 플랜지의 모서리가 성형되고 있는 상태에서의 변위비를 나타낸 것이다. 변위비는 모두 1보다 훨씬 작은 값을 나타내고 있으며 경계선에서 변위비도 코너플랜지의 변위비와 큰 차이가 없다.

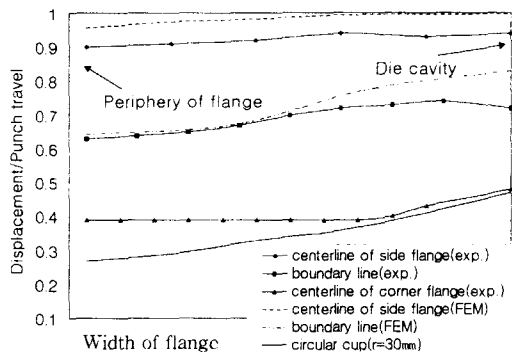
그림(b)는 용기벽이 약18mm 성형된 상태로 용기의 깊이가 40mm일 때 변위비를 나타낸 그림이다. 코너플랜지 중심선의 변위비가 다이입구부근에서는 상당원형용기측과 크기가 비슷하지만 플랜

지끝으로 갈수록 그 차이가 커지고 특히 크기의 변화가 거의 없다. 이것은 코너플랜지에서 두께변형이 작은 것을 감안한다면 다이구멍에 반경방향과 접선방향으로 변형이 거의 발생하지 않는 것을 나타내고 있다. 경계선과 코너플랜지 중심선의 변위비는 직변플랜지의 큰 유입변위로 인해서 상당히 커졌고, 경계선과 코너플랜지 중심선과의 변위비차이도 크다. 코너플랜지의 중심선과 경계선사이에서 변위비의 차이는 경계선부근의 재료가 직변플랜지측으로 이동하였고 코너플랜지측으로 전단변형이 발생할 것을 알 수 있다. 코너플랜지 중심선의 다이입구부근에서 상당원형용기와 변위비 차이가 거의 나타나지 않는 것은 재료가 다이구멍으로 유입할 때 수축과 성형된 용기벽으로 인해서 다이구멍의 접선방향으로 유동을 억제하기 때문이다. 경계선과 직변플랜지의 중심선사이에도 변위비의 차이가 있으므로 이 영역에도 전단변형이 발생할 것이다.

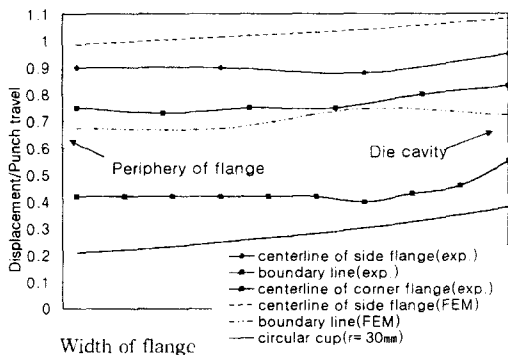
그림(c)는 트리밍을 감안해서 용기의 플랜지폭을 15mm정도 남겨두는 것으로 하고 깊이를 60mm로 성형하였을 때 변위비를 나타낸 그림이다. 변위비는 전체적으로 성형깊이 40mm일 때보다 조금 증가하였으며, 코너플랜지 중심선과 경계선사이의 변위비차이는 조금 더 커졌다. 코너플랜지 중심선의 변위비가 조금 더 커진 것은 그 만큼 접선방향으로 코너플랜지에서 경계선을 지나서 직변플랜지로 재료의 이동이 많아져서 반경 방향으로의 유입저항의 감소하였기 때문이고 코너플랜지 중심선과 경계



(a) 20mm in depth



(b) 40mm in depth



(c) 60mm in depth

Fig. 3 Displacement normal to die cavity of flange(SF:0.15, DR:1.78)

선사이의 변위비 차이가 커진 것은 코너플랜지에 전단변형이 커진 것을 나타낸 것이라고 할 수 있다.

Fig. 3으로부터 FEM해석결과는 동일조건으로

실험한 결과와 그 경향은 비슷하였으나, 용기벽이 성형된 후 변위의 크기는 약 10%이내의 차이를 나타냈다.

변위변화량은 성형깊이가 증가하면 코너플랜지 중심선과 직변플랜지 중심선보다 경계선 부근에서 더 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 변형 중에는 대칭축선상보다 천이영역인 경계선 부근에서 변형이 활발히 일어나고 있음을 의미한다.

3.2 접선변위

Fig. 4는 성형깊이에 따라 경계선, 중앙선(1) 및 (2)부근에 있는 교차점의 재료가 이들 선을 지나서 다이구멍에 접선방향으로 이동한 변위(접선변위)를 변위비로 나타낸 것이다. 그림(a)는 성형깊이 20mm 일 때 접선변위비를 나타낸 그림으로서 용기벽이 성형되지 않은 상태에서도 코너플랜지에서 경계선을 지나 재료의 이동이 발생하고 있다.

그림(b)는 용기를 깊이 40mm로 성형할 때 접선 변위비인데 크기가 상당히 증가한 것으로부터 코너 플랜지에서 변형저항이 작은 직변플랜지로 재료의 이동이 활발하게 이루어지고 있다는 것을 알 수 있고 이로 인해서 코너플랜지에서의 접선방향 압축 변형은 상당원형용기보다 작게 발생한다. 다이입구부 근에서 접선변위비가 작은 것은 소재가 다이구멍내로 유입할 때 수축과 성형된 용기벽으로 인해서 접선방향으로 재료의 이동을 억제하기 때문이고, 플랜지끝부분에서 변위비가 큰 것은 변형이 거의 발생하지 않는 코너플랜지의 모서리부분이 접선변위에 영향을 미쳤기 때문이다.

그림(c)는 성형깊이를 60mm로 하였을 때 접선 변위비를 나타낸 것인데 성형깊이 40mm일 때와 비교할 때 전체적으로 조금 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 코너플랜지에서 직변플랜지로 재료의 이동은 성형이 종료될 때까지 계속 이루어지고 있다는 것을 의미한다.

이상 유입변위비와 접선변위비의 검토로부터 원형용기의 성형인 경우와는 다르게 코너플랜지의 재료가 직변플랜지측으로 이동하여 코너플랜지에는 다이구멍의 접선방향으로 압축이 작게 이루어지고 있다는 것과 코너플랜지 중심선과 경계선사이의 유입변위비와 접선변위비의 차이로 인해서 전단 변형이 발생할 것이라는 것을 알 수 있다.

3.3 변형률

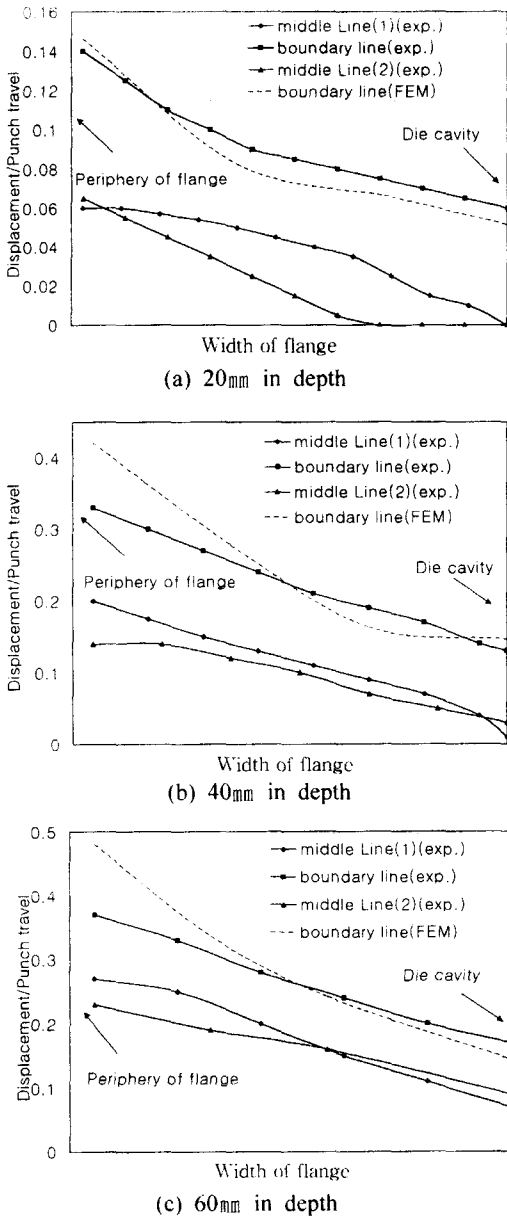


Fig. 4 Tangential displacement of flange (SF:0.15, DR:1.78)

Fig. 5는 형상계수가 0.15이고 드로잉비가 1.78 일 때 성형깊이에 따라 유입변형률, 접선변형률 및 전단변형률을 전변형률로 나타낸 그림이다. 변형률의 측정위치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 플랜지의

중앙에서 다이구멍을 따른 중간선상이다.

그림(a),(b) 및 (c)는 성형깊이가 30mm, 40mm, 60mm로 점차 증가할 때 플랜지 중간선상의 변형률과 상당원형용기의 접선변형률을 대표적으로 나타낸 것이다. 코너플랜지에서 접선변형률의 절대값은 성형깊이가 커지면 조금씩 증가하며 상당원형용기인 경우와의 차이는 더 커진다. 직변플랜지의 접선변형률은 성형깊이가 증가하면 경계선에서 직변플랜지의 중심선측으로 크기가 커지고 성형깊이가 60mm일 때는 직변플랜지의 중앙선에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이것은 코너플랜지에서 경계선을 지나서 변형저항이 작은 직변플랜지측으로 재료가 계속 이동하고 직변플랜지의 폭이 경계선이나 코너플랜지의 폭보다 작아졌기 때문이다. 코너플랜지에도 힘의 평형을 이루기 위한 접선변형률이 조금씩 증가하지만 코너부로 인한 변형저항으로 코너플랜지의 중심선과 경계선과의 사이에서 커지다가 성형깊이가 더 커지면 코너플랜지 중심선부근의 접선변형률도 조금씩 증가하는데 이것은 직변플랜지의 변형저항이 상당히 증가하였음을 나타내는 것이다. 이러한 결과로부터 코너플랜지와 직변플랜지의 상대적인 크기가 코너플랜지의 변형률완화에 영향을 미치고 있다는 것과 주로 경계선에서 코너플랜지측의 재료가 직변플랜지측으로 이동함을 알 수 있다.

그림에서 원형용기의 플랜지에서는 발생하지 않는 전단변형률이 발생한 것은 코너플랜지와 직변플랜지와 사이에서 유입변위의 차이가 생기기 때문이며 성형초기에는 경계선부근에만 발생하지만 성형깊이가 증가하면 점차 조금씩 커지면서 발생영역이 코너플랜지의 중심선측으로 영역이 넓어진다.

직변플랜지측에는 경계선부근에만 발생하며 이것은 성형깊이의 증가에 따라 경계선의 유입변위가 직변플랜지의 중심선과 중앙선(2)와 함께 증가하기 때문이고 이로 인해서 코너플랜지에는 경계선을 지나서 더 많은 재료가 직변플랜지측으로 이동한다.

이 결과로부터 경계선부근에만 전단변형이 발생하는 영역으로 보고된 연구결과^{[3],[4]}와는 달리 전단변형이 발생하는 영역은 코너플랜지의 전체 영역이라는 것을 알 수 있다.

이상 변형률의 고찰로부터 성형깊이가 증가하면 코너플랜지에서 접선변형률은 상당원형용기측보다 작아지는데 이것은 경계선을 지나서 코너플랜지의 재료가 직변플랜지측으로 계속 이동하기 때문이다. 직변플랜지측의 접선변형률이 성형깊이에 따

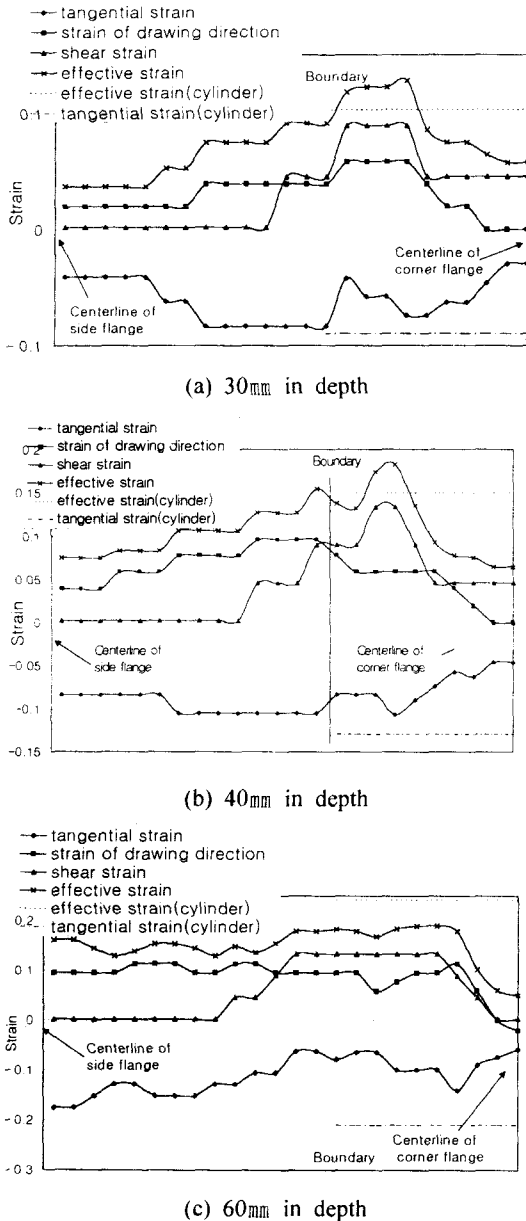


Fig. 5 Strains on middle line of flange (SF:0.15, DR:1.78)

라 커지고 직변플랜지의 중앙선에서 가장 큰 값을 나타내는 것으로부터 이러한 사실을 더욱 명확히 알 수 있다. 또한 원형용기의 플랜지에서는 발생하지 않는 전단변형률이 성형깊이가 증가하면 코너플

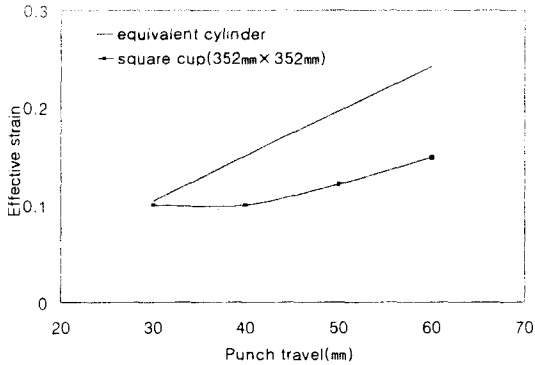
랜지의 전체에 상당한 크기로 발생한다. 그래서 정사각용기의 코너플랜지에서 접선변형률이 상당원형용기축보다가 감소되었다고 하여도 반경과 접선 변형률의 비교만으로는 실제로 코너플랜지에서 발생한 변형률의 증감여부를 알 수 없으므로 유효변형률을 이용하여 그 크기를 비교할 필요가 있다. 코너플랜지의 전체영역에서 발생한 상당한 크기의 전단변형률을 고려하지 않고 코너플랜지의 반경과 접선변형률이 감소한 것만으로 변형률이 이완된 것으로 연구보고된 결과^{[3],[4],[5]}는 재고되어야 한다. 접선변형률의 검토로부터 성형깊이가 증가하면 코너플랜지보다 변형저항이 작은 직변플랜지가 다이구멍에 접선방향으로 압축변형이 발생할 때 코너플랜지에도 직변플랜지보다는 작지만 동시에 압축변형이 일어나고 있다.

3.4 유효변형률의 평균값

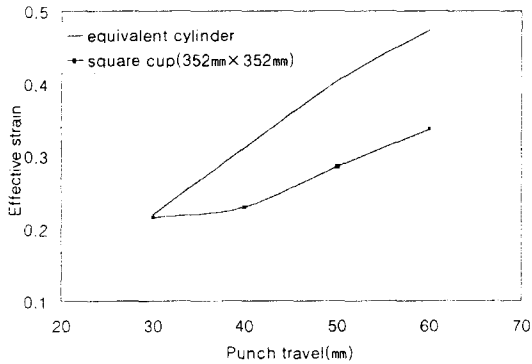
Fig. 6은 형상계수가 0.15이고 드로잉비가 1.78인 정사각용기의 코너플랜지와 상당원형용기(블랭크 지름, 212mm)의 플랜지에 발생한 유효변형률(Mises항복조건에 따름)을 성형깊이에 따라 나타낸 것이다.

그림(a), (b) 및 (c)는 각각 코너플랜지의 중간선, 다이입구둘레, 플랜지끝부분의 둘레 등에서 성형깊이의 변화에 따라 유효변형률의 평균값을 나타낸 것이다. 해석위치나 성형깊이와 관계없이 공히 정사각용기축의 유효변형률의 평균값이 상당원형용기축보다 상당히 작다는 것으로부터 코너플랜지의 변형률이 상당원형용기축보다 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 이 결과는 정사각용기를 성형할 때 코너플랜지에 전단변형률이 발생하지만 반경변형률과 접선변형률의 감소가 더 커졌기 때문이다. 이것은 정사각용기를 성형할 때 코너부에 걸리는 하중이 상당히 경감된다는 것을 의미하며, 이로 인하여 정사각용기를 성형할 때 상당원형용기의 드로잉비가 3.5이어서 성형이 불가능한데도 코너부가 안전하게 성형될 수 있었다.

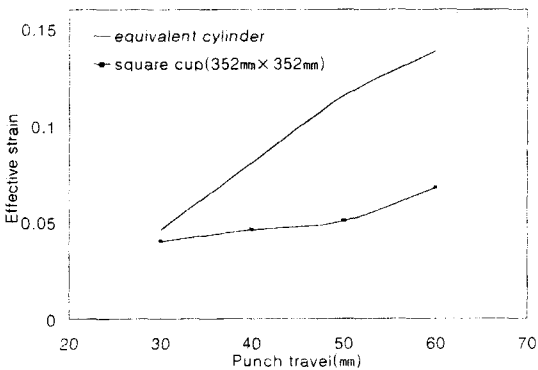
그림에서 유효변형률의 평균값의 크기는 다이입구에서 가장 큰 데 이것은 성형된 용기벽이 다이구멍의 접선방향으로 재료의 이동을 억제하여 접선 변형률이 커진 것이 주된 원인이고 플랜지끝부분에서 유효변형률이 작은 것은 플랜지의 모서리부가 변형이 거의 발생하지 않아서 접선변형률이 작아진 것으로 생각한다.



(a) middle line



(b) die entrance



(c) periphery of flange

Fig. 6 Mean value of effective strains on corner flange (SF:0.15, DR:1.78)

3.5 형상계수(SF)의 영향

Fig. 7은 드로잉비가 1.78인 블랭크로 정사각용

기를 성형할 때 형상계수가 코너플랜지의 유효변형률에 미치는 영향을 검토하기 위하여 성형깊이에 따라 FEM해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 성형초기인 성형깊이 30mm부근을 제외하면 형상계수가 커지면 유효변형률의 평균값은 감소하고 형상계수가 0.15와 0.3인 경우에는 거의 비슷한 크기이며 그 차이는 작다.

현재까지 보고된 연구결과^[4]에 의하면 펀치단부에 윤활이 잘된 경우는 형상계수가 0.1부근에서 한계드로잉비를 최대로 할 수 있으며 윤활상태가 좋지 않아서 마찰계수가 큰 경우에는 형상계수가 0.2부근에서 한계드로잉비가 가장 크지만 한계드로잉비의 크기는 윤활이 잘된 경우보다는 작다.

본 연구가 펀치단면과 다이에 윤활을 하지 않은 경우에 관한 해석결과임을 감안한다면 성형성을 평가하는데 사용한 척도만 다를 뿐 보고된 연구결과와 동일한 결과라고 생각하며, 유효변형률의 값이 변형률이완을 검토하는 유용한 기준이 될 수 있으며 일반적인 프레스성형품인 비축대칭형상을 성형할 때 성형성을 평가하는데 유효변형률에 관한 연구결과들은 유용한 자료가 될 것으로 생각한다.

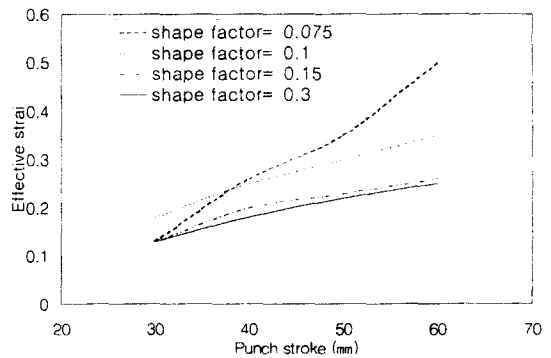


Fig. 7 Variation of mean value of effective strains on corner flange with respect to punch travel for shape factors(DR:1.78)

4. 결론

- (1) 정사각용기를 성형할 때 전단변형은 코너플랜지와 적변플랜지의 경계선부근에만 발생하는 것으로 연구보고되어 있으나, 코너플랜지 전체 영역에 상당히 크게 발생하였다.
- (2) 코너플랜지에는 상당원형용기를 성형할 때보다

접선변형률은 작게 발생하지만 대신 상당히 큰 전단변형률이 발생하여 접선변형률의 감소만으로 코너플랜지의 변형률이 감소되었다고 할 수 없다. 그래서 변형률의 증감 여부를 판단하기 위한 방안으로 유효변형률을 도입하여 그 결과를 비교하였다.

- (3) 유효변형률을 이용하여 정사각용기의 곡변플랜지와 상당원형용기의 플랜지에 발생한 변형률을 비교하면 정사각용기측이 훨씬 작아서 정사각용기의 코너플랜지의 실질적인 변형률의 완화가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 그로 인해서 상당원형용기의 드로잉비만 고려할 때 성형이 불가능한 정사각용기의 코너부의 성형이 가능하였다.
- (4) 형상계수가 커지면 유효변형률의 평균값은 작아지고 형상계수가 0.15와 0.3인 경우는 크기가 거의 비슷하였다.

참고문헌

1. T.S.Hsu and Lee,S.Y., "On the Draw ability of Sheet Metal in Noncircular Cups," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.99, pp.615-619, 1977.
2. 平巖, 近藤, "角筒絞りの 特性について," 機論 C 49-440, pp.695-703, 1983.
3. N.Kawai et al., "Effects of Punch Cross-Section on Deep-Drawability of Square Shell of Aluminum Sheet," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.109, pp.355-361, 1987.
4. 河合 外 3人, "マルミニウム薄板の正4角筒深絞り," 機論C 52-484, pp.3317-3323, 1986.
5. 日本塑性加工學會 編, プレス絞り加工, コロナ社, pp.24-25, 1994.
6. T. Mizuno and Er D., "Experiment on Rectangular Cup Drawing of Sheet Metal," J. of JSTP, 38-435, pp.372-376, 1997.
7. T. Mizuno and Er D., "Deformation of Corner Region and Forming Limit in a Square Cup Drawing," J.of JSTP 38-440, pp.844-846, 1997.