

소형 구를 이용한 박판 성형에서의 변형특성

심명섭* · 박종진**

(2000년 9월 27일 접수)

Deformation Characteristics in Sheet Metal Forming with Small Ball

M. S. Shim and J. J. Park

Abstract

Recently, the technology of incremental forming for sheet metal components has drawn attention for small-batch productions. In the present investigation, a forming tool containing a freely-rotating ball was developed and applied to forming of various shapes with full annealed Al 1050 sheet. Deformation characteristics occurring during forming with this tool was examined through FEM analysis and grid measurement. It was found that deformation modes developed along a straight path and around a corner are close to those of plane-strain and equi-biaxial stretching, respectively, and that cracks occur mostly at corners for the same depth of tool. FEM analysis was successfully applied to this special type of forming process and provided comparable results to the measurements from experiment.

Key words : Incremental Forming, Deformation Characteristics, Finite Element Method, Crack

1. 서론

판재를 이용하여 부품을 만드는 판재 성형법은 주로 부품의 형상대로 가공된 금형을 사용하여 부품을 성형한다. 이러한 성형방법은 주로 소품종 대량생산에 적합한 방법으로써 금형의 설계 및 제작에 소요되는 비용을 감당할 수 있는 자동차 및 가전제품의 부품생산에 응용되어왔다. 그러나 최근에 생산자의 입장에서 여러 분야에서 다양한 형상의 제품을 요구하는 시장의 요구에 대비하여 다품종 소량생산에 대처할 수 있는 박판성형 기술을 개발하기 시작하였다. 즉, 부품의 형상을 가진 금형을

사용하는 것이 아니라 일정한 형태의 공구가 판재 위를 이동하면서 판재의 형상을 점진적으로 성형하는 기술이다.

본 연구와 관련된 연구들은 주로 일본 연구자들에 의하여 수행되었는데, 이를 요약하면 다음과 같다. Iseki 등^(1,2)은 금형과 블랭크홀더에 의해 고정된 얇은 알루미늄 판재에 구형 롤러 공구를 사용하여 다양한 형상을 성형하였다. 성형한계는 판재두께가 일정한 값에 도달하는 것으로 판단하였으며, 간단한 해석방법을 사용하여 판재에 발생하는 변형을 예측하였다. 판재 지지용 롤러를 사용하여 성형성을 증가시키고 성형형상을 다양화할 수 있

* 홍익대학교 대학원 기계공학과

** 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

음을 보여주었다. Matsubara⁽³⁾는 반구형 형상의 공구를 사용하였으며, 공구경로를 변화시켜 각 진 모서리를 갖는 부품을 성형할 수 있음을 보여주었다. 깊은 용기를 성형하기 위하여 판재의 중심부에 고정공구를 설치하고 블랭크홀더를 상하로 이동하면서 성형하는 방법을 제안하였다. Kitazawa 등⁽⁴⁾도 반구형 형상의 공구를 사용하였는데, 공구경로를 변화시켜 예리한 단면을 갖는 축대칭 형상을 성형하였다. 이러한 방법은 예리한 금형을 사용하지 않으므로 판재를 파단시키지 않고 성형할 수 있음을 보여주었다. 최근 국내에서도 유사한 연구가 수행되었다. 김태정^(5,6) 등은 반구형 형상을 가진 공구를 사용하여 타원형과 클로바 형상 등을 성형하였으며, 진단변형을 가정하여 성형시 발생하는 두께변화를 예측하고 성형한계도 등 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 성형시 판재와 공구와의 마찰에 의한 파단을 최소화하기 위하여 Iseki의 제안을 기본으로 하여 구형 롤러 공구를 설계하여 제작하였으며, 공구경로의 제어를 위하여 CNC 머쉬닝 센터를 사용하였다. 이러한 공구에 의하여 판재에 발생하는 변형의 특성을 정밀히 분석하기 위하여 공구경로를 수평경로와 수직경로로 구분하고, 각각을 상용 프로그램인 PAM-STAMP를 사용하여 해석하고 실험결과와 비교하였다. 그리고 성형형상을 단층, 이중, 원추형 형상으로 구분하여 성형실험을 수행하고 각각의 경우를 파단의 관점에서 관찰하였다.

2. 점진적 성형에서의 변형 특성

Fig.1에 구형 공구에 의한 판재의 점진성형법 개념이 도시되어 있다. 얇은 판재가 금형과 블랭크 홀더에 의하여 둘레가 구속되어 있는 상태에서 자유회전하는 볼을 장착한 공구가 판재 위에서 이동하면서 성형하는 방법이다. 공구의 수평경로는 주로 폐곡선으로 나타나며, 수직경로에 따라 성형깊이를 제어한다. 이러한 장치에 의하여 발생하는 판재의 변형은 볼과 접촉하는 부위에 국부적인 집중되며, 공구의 이동에 따라 점진적으로 발달된다. Fig.2는 CNC 머쉬닝 센터의 공구대에 장착되어 있는 공구가 이동하면서 판재에 점진적인 변형을 가하여 성형하고 있는 모습이 나와있다. 본 연구에서 설계하고 제작한 공구는 지름이 9.525mm인 볼이 공구하단에 자유회전할 수 있도록 장착되어 있다. 이 공구는 사용자가 입력하는 공구이동경로 프로그램에 의하여 수직운동과 수평운동을 하며 성형을 하게 되어있다. 판재면에는 윤활유를 충분히 발라서 볼 이동 중에 판재에 작용되는 마

찰효과를 가능한 감소시키도록 하였다.

Fig. 2의 장치를 사용하여 판재를 성형할 때 공구의 경로는 폐곡선으로 나타나는 수평경로와 성형깊이를 증가시키는 수직경로로 구분할 수 있다. 따라서 공구의 수직경로와 수평경로 이동시 판재에 발생하는 변형의 특성을 알아보고자 실험과 이에 따른 유한요소해석을 수행하였다.

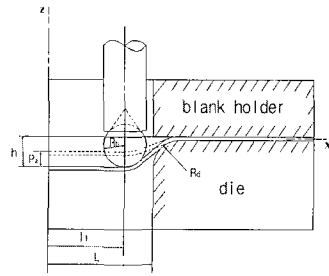


Fig. 1 Schematic of incremental forming

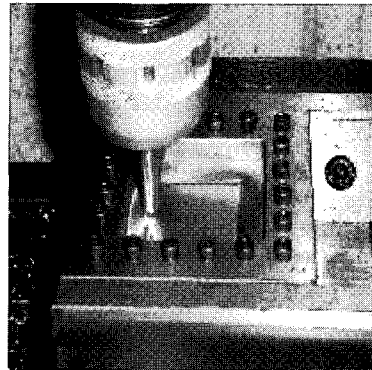


Fig. 2 Ball tool loaded on a machining center

실험에서 사용한 소재는 0.3mm 두께의 1050 알루미늄 판재로써 350°C에서 2시간 동안 어닐링 처리를 하였다. 이 소재에서 시편을 채취하여 인장실험을 수행하였고, 탄성계수 $E=70\text{GPa}$, $R_0=0.51$, $R_{0.5}=0.75$, $R_{0.2}=0.48$, 유동응력 $\bar{\sigma}=140 \bar{\epsilon}^{0.25} \text{MPa}$ 을 구하였다. 성형 전 판재에 지름이 2.54mm인 구형 그리드를 전기화학적 방법으로 에칭하고, 성형 후 그리드 측정자를 사용하여 주변형률과 부변형률을 측정하였다. 성형특성 실험에 사용한 판재의 크기는 길이가 130mm, 폭이 40mm이었다.

2.1 수직경로에서의 변형

판재가 길이방향의 양단은 블랭크 홀더에 고정구에 의

하여 고정되어 있는 상태에서 공구가 판재의 중심을 누르는 경로이다. Fig. 3(a)는 성형장치의 1/4에 대한 유한요소 해석 모델을 보여주고 있으며, Fig. 3(b)는 공구의 깊이가 14mm일 때의 유한요소 해석결과를 보여주고 있다. 해석과 그리드 측정으로부터 구한 폭방향 변형률과 길이 방향 변형률을 각각 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 비교하였다. 길이 방향 변형률의 경우에는 값의 차이는 약간 나타나지만 경향은 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 볼 중심에서의 변형은 매우 크지만, 중심에서 거리가 멀어질수록 급격히 감소한다. 폭 방향 변형률의 경우에는 변형률의 크기가 매우 작음으로 인하여 측정의 정확성은 크게 신뢰할 수 없지만 경향은 대체적으로 일치하고 있다. 폭 방향 변형률도 역시 중심에서 가장 크고 거리가 멀어질수록 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 실험과 해석에서 모두 중심에서의 길이방향 변형률은 폭방향 변형률의 약 2배로 나타나고 있는데, 이는 판재가 길이방향에 대해서만 구속을 받고 있기 때문이다.

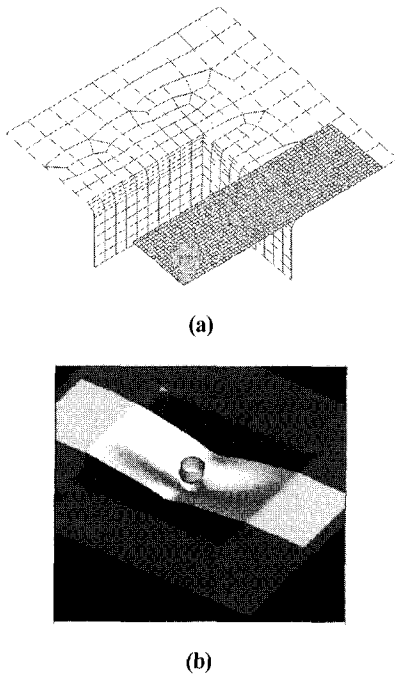


Fig. 3 Model and result of FEM analysis

2.2 수평경로에서의 변형

판재가 길이방향의 양단은 블랭크 홀더에 고정구에 의하여 고정되어 있는 상태에서 공구가 판재의 중심에서 폭 방향으로만 직선운동을 반복할 때 발생하는 변형을 조사하였다. 하나의 직선운동이 종료되면 다음 직선운동

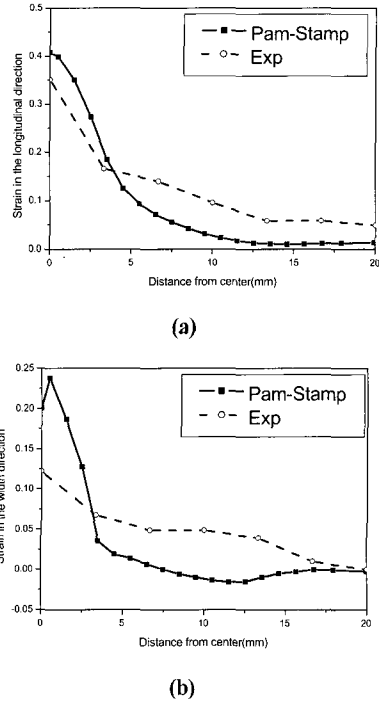


Fig. 4 Strain predicted by FEM analysis

시작 전에 공구의 깊이를 0.5mm씩 증가시켰다. Fig. 5(a)는 성형장치의 1/2에 대한 유한요소 해석 모델을 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 공구 깊이가 4mm일 때의 유한요소 해석결과를 보여주고 있다. 유한요소 해석과 그리드 측정으로부터 구한 공구 깊이가 2mm와 4mm가 되었을 때의 패스의 수직방향 변형률과 패스방향 변형률을 각각 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 비교하였다. 패스의 수직방향 변형률 및 패스 방향 변형률 모두 해석결과가 측정결과보다 크게 나타났으나, 경향은 일치하였다. 양 끝 부분에서의 변형이 내부에서의 변형보다 매우 크게 발생하였으며, 공구의 깊이가 증가할수록 이러한 경향은 두드러졌다. 실험결과와 해석결과와의 차이는 그리드 측정에서의 오차, 유한요소해석의 오차 등도 있지만 주로 다음의 원인에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 유한요소해석에서는 공구가 판재를 누르기 시작하면서 변형이 발생되지만, 실험에서는 판재가 수직방향으로의 약간의 유격을 나타내고 있어 판재가 실제로 변형을 받기 시작하는 시점은 해석에서의 시점보다 늦기 때문이다.

2.3 정사각형 수평경로에서의 변형

평면상에서의 공구의 경로는 보통 폐곡선으로 나타나고 있다. 이러한 경우에 판재에 발생하는 변형의 특성을 알아

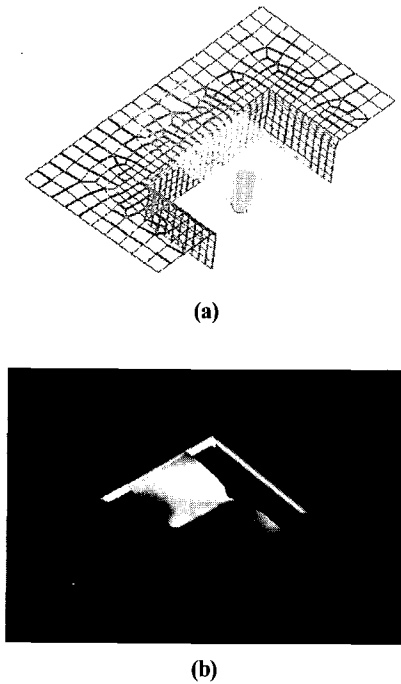


Fig. 5 Model and result of FEM analysis

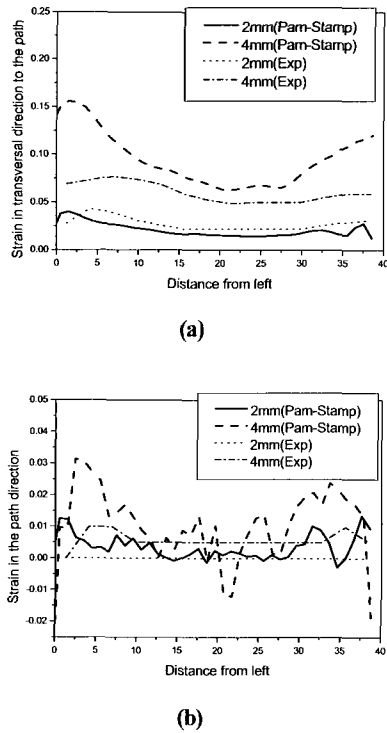


Fig. 6 Strain predicted by FEM analysis

보기 위하여 한 변의 길이가 55mm인 정사각형 수평경로를 선택하였다. Fig. 7(a)은 해석에 사용된 유한요소 모델을 보여주고 있고, Fig. 7(b)는 공구경로를 보여주고 있다. 공구는 A 점에서 수직경로 0.5mm를 가하여 판재를 누른 후 수평경로 A-B-C-D-A 순서로 이동하게 된다. 이후 공구는 A 점에서 수직경로 0.5mm를 더 가한 후 동일한 수평경로를 따르게 된다. 공구깊이가 0.5mm와 1mm 일 때, 해석으로부터 두께 분포를 각각 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 나타내었다. 두께감소를 보면 점(또는 코너)들 중에는 A점이 가장 작고, B점과 D점이 비슷하게 증가하였고, C점이 가장 크게 나타났다. 이러한 현상에 대한 원인은 다음과 같다. 공구가 A점을 누름으로 인하여 A점의 수직위치에 비하여 B점과 D점은 높게, C점은 더 높게 위치하게 된다. 즉, 공구가 A점에서 B점으로, 또 C점으로 이동하면서 판재에 가하여지는 국부적인 변형은 더욱 증가하기 때문이다. 하지만변(또는 직선경로)에서는 두께감소가 크게 작아지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 점과 변에서의 상이한 변형 특성은 공구깊이가 1mm로 증가하면서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

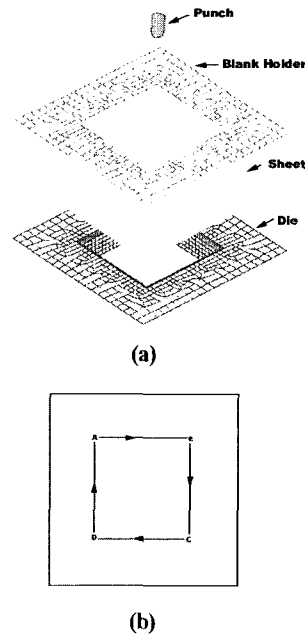


Fig. 7 Model of FEM analysis and tool path used for FEM analysis

공구깊이가 1mm 일 때, 해석으로부터 구한 패스의 수직방향 변형률과 패스방향 변형률을 각각 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 나타내었다. 패스의 수직방향 변형률은 A 점에서 가장 낮게, C 점에서 가장 높게 나타나며, 코너

와 직선경로에서의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 부변형률을 보면 직선경로내에서는 작은 값을 나타내며 A 점에서 가장 낮게, C 점에서 가장 높게 나타나며, 코너와 직선경로에서의 차이가 뚜렷하게 나타나고 내며 큰 변화를 보이고 있지 않지만, 특히 코너에서의 부변형률은 거의 주변형률과 비슷한 값으로 급격히 증가하고 있다. 이로부터 코너에서의 변형은 등이축인장에 가까운 변형이, 직선경로에서는 부변형률이 매우 작아 평면변형률에 가까운 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다.

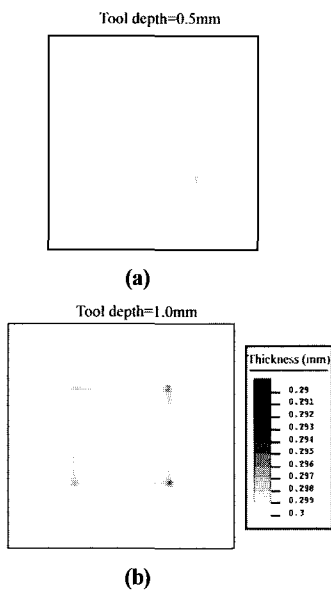


Fig. 8 Thickness distribution predicted by FEM analysis

3. 여러 형상의 성형실험

3.1 단층 형상의 성형

동일한 구형 공구를 이용하여 여러 가지 형상을 성형하면서 파단을 포함한 판재의 성형특성을 관찰하였다. 이 실험에서는 한 번의 길이가 130mm인 정사각형인 판재를 사용하였는데, 사각 둘레는 블랭크 홀더에 고정구로써 고정시켰다.

Fig.10에 보여지듯이 판재의 중앙부에 삼각형, 사각형, 오각형, 육각형, 팔각형, 원형, 코너 반경을 갖는 사각형의 형상을 성형하여 보았다. 모든 경우에서의 공구의 수직피치는 0.5mm로 고정시켰다. 코너가 없는 원형을 제외한 모든 경우에서 파단은 코너 부위에서 발생하였다. 각 변의 그리드는 평면변형률 변형의 양상을 띄고 있으며, 코너의 그리드는 축대칭 변형의 양상을 띄고 있는

것을 측정을 통해 발견할 수 있었다. 원형의 경우에는 코너가 존재하지 않으므로 성형 깊이가 크게 증가할 것으로 예상했으나 이러한 현상은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 측정과정에서 나타난 사실 중 하나는 원형의 경우로써 경로 전체에서 부변형률이 다른 형상의 직선 변에서의 부변형률보다 크게 나타난 점이다. 각각의 경우에서의 성형깊이는 Table 1에 정리하였다.

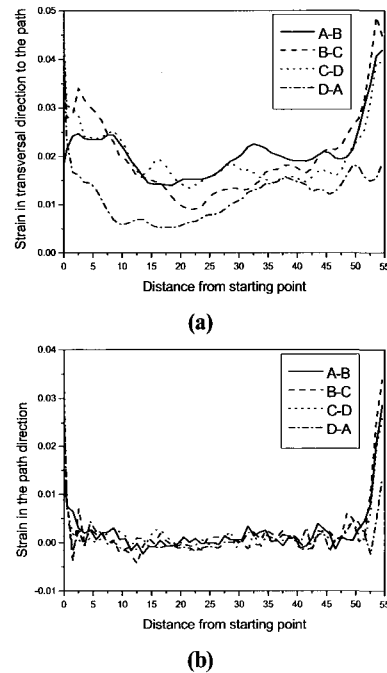


Fig. 9 Strain predicted by FEM analysis at 1.0mm

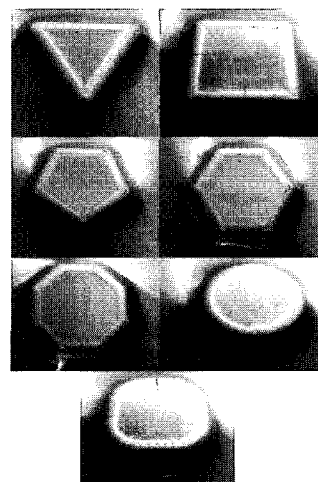


Fig. 10 Various shapes formed by ball tool

Table 1 Forming depths for various 1 layer shapes

| Shape | Triangle | | Square | | Pentagon | | Hexagon | | Octagon | | Circle | | Square with RC | |
|-----------------|----------|-----|--------|-----|----------|-----|---------|-----|---------|------|--------|-----|----------------|-----|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Tool Depth (mm) | 10.0 | 9.5 | 9.5 | 9.0 | 10.0 | 9.5 | 10.0 | 9.5 | 10.5 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 9.5 | 9.0 |
| Crack | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | No | Yes | No | Yes | Yes | Yes | No | Yes | No |

* RC; round corner

3.2 이중 형상의 성형

Fig.11에 보여지듯이 상부와 하부의 단면의 크기는 다르지만 동일한 형상을 갖는 이중 형상에 대하여 성형실험을 수행하였다. 단면은 정사각형과 원형을 선택하였다. 사각형 형상은 두 경우로 나뉘서 실험하였다. A는 하부 정사각형의 변이 30mm, 상부 정사각형의 변이 15mm이고, B는 각각 40mm와 10mm인 경우이다. B에는 하부 성형 후 상부를 성형한 B-1과 역으로 성형한 B-2와 B-3이 있다. 원형의 경우에는 하부 원의 지름이 30mm, 상부 원의 지름이 15mm이다.

정사각형 형상 중 A의 경우에는 하부를 깊이 9mm까지 성형 한 후 상부를 성형하였는데, 상부 성형 중 깊이 6.5mm에서 파단이 발생하여 최종 높이는 15.5mm가 되었다. 동일한 방법으로 성형한 B-1에서는 하부를 깊이 9mm까지 성형한 후, 상부 성형 중 깊이 8.0mm에서 파단이 발생하였다. 따라서 최종 공구의 깊이는 A에 비하여 1.5mm 증가하였으나 상부 성형 중 하부 사각형의 변이 안쪽으로 함몰되는 현상이 발생하였다. 이것은 상부를 성형할 때 사각형의 변을 가로지르는 방향으로 발생하는 과도한 인장 응력에 기인한다. 반대로 상부를 먼저 성형하고 하부를 나중에 성형한 B-2에서는 이러한 함몰 문제는 해결되었으나, 상부의 높이가 현저히 작게 나타났다. 상부의 깊이를 10mm로 증가시켜 성형한 경우에서도 B-1 보다 낮게 나타났다. 이것은 상부 성형시 공구가 볼랭크 홀더에서 멀리 떨어져 있어 공구가 판재를 누를 때, 판재 전체에 소변형 대변위의 변형 모드를 발생시키며 따라서 성형 후 탄성회복이 크게 발생하기 때문이다. 원형 형상의 경우에는 하부를 먼저 깊이 9mm까지 성형한 후 상부를 깊이 6.5mm로 성형하였다.

3.3 원추형 형상의 성형

Fig.12에 보여지듯이 원추형 형상은 하부의 가장 큰 원에서 상부의 가장 작은 원 차례로 지름을 줄여나가면서 성형하였다. 밑면의 지름이 30mm인 C 경우와 밑면

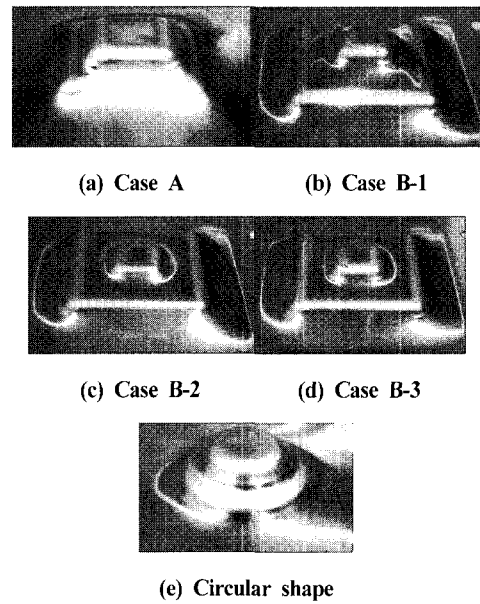


Fig. 11 2 layer shapes formed by ball tool

의 지름이 50mm인 D 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 초기 지름에서의 수평경로들을 path 1, 다음 지름에서의 수평경로들을 path 2, ...으로 호칭하였다. 수평경로 사이의 수직경로는 0.5mm로 일정하게 유지하였다.

C 경우에는 세 가지 실험을 수행하였다. C-1은 path 1에서의 깊이를 9mm로, 이 후 path에서의 깊이는 동일하게 3mm로 설정하였다. 성형 중 path 2에서 성형 깊이가 2.5mm 도달했을 때 path 2의 원에서 파단이 발생하였다. C-2는 path 1에서의 깊이를 5mm로, 이 후 path에서의 깊이를 동일하게 3mm로 설정하였는데, 여기서는 path 4의 성형이 끝나는 깊이에서 path 4의 원에서 파단이 발생하였다. C-3에서는 path 1에서의 깊이를 5mm로, 이 후 path에서의 깊이는 2mm로 설정하였는데, path 6 즉, 안지름이 10mm가 될 때까지 성형하였지만 파단은 발생하지 않았다. 이 때의 성형된 컵의 높이는

15mm이었다.

D경우에서도 세 가지 실험이 수행되었다. 이 세 가지 실험, 즉 D-1, D-2, D-3에서는 모두 path 1의 깊이를 5mm로 통일했고, path 2부터 각 path의 깊이를 각각 2mm, 2.5mm와 3mm로 설정하였다. D-1 및 D-2에서는 파단이 발생하지 않고 각각 최종 성형 깊이인 25mm와 30mm까지

성형되었다. 반면에 D-3은 최종 path의 성형 중에 파단이 발생하였다. 하지만 파단이 발생한 원인은 성형깊이의 증가하면서 판재의 기울기도 증가하여 공구의 측면이 판재를 심하게 긁게 되기 때문으로 관찰되었다.

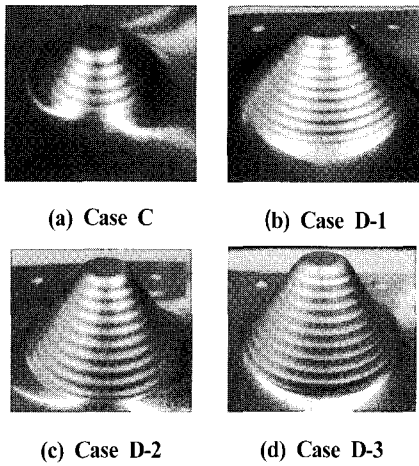


Fig. 12 Cone shapes formed by ball tool

4. 결론

본 연구에서는 점진성형법에 대한 기초연구로써 자유회전하는 소형의 구형 공구를 설계, 제작하고 이를 CNC 머쉬닝 센터에 장착하여 수평경로 및 수직경로를 가함으로 박판을 성형하여 보았다. 본 연구를 통하여 구형공구에 의하여 판재에 발생하는 변형의 특성, 유한요소법의 적용, 점진성형법에서의 성형성 등을 조사하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 소형공구의 이동에 의한 판재변형도 유한요소법으로 해석이 가능하였다. 따라서 유한요소해석을 사용하여 변형경로의 설계가 가능함을 알 수 있었다.

(2) 수직변형과 수평변형 모두 공구와 접촉하는 부위에서 변형이 국부적으로 크게 나타나며, 이 부위에서 거리가 멀어질수록 변형은 급격히 감소한다.

(3) 공구경로가 수평경로인 경우에는 평면변형률 변형

에, 수직경로인 경우에는 축대칭(또는 등이축인장) 변형에 가까운 변형이 발생한다. 여러 형상의 성형실험에서도 나타났듯이 경로가 직선일 경우에는 전자에, 코너인 경우에는 후자에 가까운 변형이 발생하였다.

(4) 파단은 거의 코너에서 관찰되었다. 동일한 공구 깊이에서는 코너에서의 변형이 등이축인장에 근사하므로 직선부위보다 변형량이 크기 때문이다. 따라서 파단을 방지하기 위해서는 가능한 코너를 없애거나 코너의 반경을 증가시켜 평면변형률 변형으로 유도하는 것이 좋다.

(5) 다단 형상을 성형할 경우에는 가장 깊은 부분부터 성형하는 방법과 가장 낮은 부분부터 성형하는 방법이 있다. 전자의 경우에는 성형 중 이미 성형된 부분이 함몰되는 위험성은 낮으나 형상치수를 맞추기 어렵고, 후자의 경우에는 반대의 현상이 관찰되었다.

본 연구를 통하여 점진 성형법에서는 종래의 금형을 사용하는 성형법에 비하여 금형의 설계와 제작에 소요되는 비용과 시간이 거의 필요하지 않음을 알 수 있었다. 형상이 복잡하여 질수록 점진성형법의 적용은 제한을 받게 되지만, 성형 장치의 개선으로 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 점진성형법에서의 성형한계도를 추출하고 이를 이용하여 공구의 경로를 체계적으로 설계하고자 한다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Iseki, H., Kato, K. & Sakamoto, S., 1992 "Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging using a Path-controlled Spherical Roller". Transaction of JSME, Series C, Vol.58, No.554 p.3147
- (2) Iseki, H., Kato, K., Kumon, O. & Ozaki, K., 1993 "Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging using a Few Spherical Rollers" Transaction of JSME, Series C, Vol.59, No.565 p.2849
- (3) Matsubara, S., 1994 "Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool", J. of JSTP. Vol.35, No.406, p.1311
- (4) Kitazawa, K., Wakabayashi, A., Murata, K. & Seino, J., 1994 "A CNC Incremental Sheet Metal

- Forming Method for Producing the Shell Components Having Sharp Corners", J. of JSIP. Vol.35, No.406, p.1348
- (5) Kim, T. J., Cho, C. H., Park, S. K. & Yang, D. Y., 1998 "Multi-pass Forming Method of Incremental Sheet Metal Forming Process" Proc. Fall Conference of KSPE. p.583
- (6) Kim, T. J. & Yang, D. Y., 2000 "Improvement of Formability for the Incremental Sheet Metal Forming Process" J. of IJMS. Vol. 42, p.1271