

다점 무금형 2차원 곡면성형 최적화 연구

강동하* · 박종우** · 김태원*

Study on Optimization for 2-D Curved Surface Forming by Multi-point Dieless Elasto-forming

D. H. Kang, J. W. Park and T. W. Kim

Abstract

A new concept of multi-point dieless elasto-forming method has been developed to make various shape of curved surface without conventional dies. The developed dieless elasto-forming system consists of discrete punches controlled by servo motors and various kinds of elastomers(rubber and foam). To predict optimal position of punch elements, DTF(deformation transfer function) was introduced, and FEM analysis was carried out. The optimal arrangement of elastomer was selected considering characteristics of each elastomer, and a desired concave shape was formed. The experimental results were consistent with the numerical ones.

Key Words : Sheet forming, Dieless forming, Multi-point forming, Discrete transfer function, Elasto-forming

1. 서론

금속 판재 성형에서 현재 사용되고 있는 방법은 matched die forming 법이다. Matched die forming 은 성형하고자 하는 모양을 2 쌍의 금형으로 미리 제작하여, 이를 이용하여 성형하는 방법으로써, 이는 초기 금형 제작 시 많은 시간과 비용이 필요하다. 또한 활용도 측면에서도 제품 단종 시, 기존의 금형을 활용 할 수 없다는 점에서 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 현재 미국, 일본, 중국 등에서 Multi-Point Forming (MPF)을 이용한 판재 성형법이 연구되고 있다.⁽¹⁾

MPF 법은 상하 금형이 여러 개의 펀치요소로

구성되어 있다. 이 펀치요소의 위치를 조절하여 여러 가지 모양을 만들고 이를 가지고 성형을 함으로써 다양한 모양을 성형할 수 있다. 이러한 MPF 방식은 펀치요소를 능동형이나 수동형으로 작동시킴으로써 다양한 방법으로 활용되고 있다. 즉, 판재 성형 중에 펀치요소를 움직여 원하는 곡면의 모양을 형성하여 성형하는 방법과 성형 전에 펀치의 위치를 미리 결정하여 배열시켜 성형하는 방법으로 대표된다.⁽¹⁾ 그러나 어느 방식이던지 상하 모두 분리된 펀치 조합을 가지고 성형하기 때문에 펀치요소와 판재간의 접촉면적이 적고 이로 인하여 펀치자국이 판재에 찍히거나 판재에 주름이 생기는 결함이 나타난다. 또한 많은 수의

* 한양대학교 기계공학부

** 한국과학기술연구원 재료연구부

펀치요소를 배열하여 성형하고자 하는 형상을 만들어야 하기 때문에 위치제어 하기가 어렵고 초기시스템 구성 시에도 많은 제작 비용이 든다. 이러한 MPF 방식은 펀치요소가 판재와 접촉하는 면적을 넓혀 주거나 탄성체 패드를 이용함으로써 판재에 펀치 자국이 남거나 주름이 생기는 결함을 해결해 줄 수 있다.

본 연구는 기존의 MPF 방식을 응용하되, 하부 금형을 폼재와 고무 같은 탄성체 이용함으로써 판재와 펀치요소의 접촉면적을 넓히고 가격절감의 이득을 얻을 수 있는 MPEF(multi-point elasto-forming) 방식을 실제 알루미늄 판재에 적용해보았으며, 이를 위해 여러 폼의 종류에 따른 성형물을 알아보고 그 중 성형물이 좋게 나타내는 폼에 대하여 페루프방식⁽²⁾을 적용하여 판재성형 실험을 수행하였다. 이를 위해 Ousterhout의 변형 전달 함수⁽³⁾와 Valjavec의 방식⁽⁶⁾을 본 시스템에 맞게 적용하였다. 실험장비로서 20개의 펀치요소(2×10)를 가진 반자동식 시스템이 사용되었으며, 실험 결과는 유한요소 해석결과와 비교하였다.

2. 폼재의 성형해석

2.1 성형조건

폼재의 성형 해석은 폼의 대변형으로 인한 동적 비선형 해석이므로 외연적 시간 적분법(Explicit time Integration)을 이용한 ABAQUS Explicit (ABAQ US INC.)를 이용하였다. 폼과 고무를 이용한 MPEF 방법을 2차원 해석으로 수행하였으며, 최초의 펀치요소의 위치를 결정하기 위하여 펀치요소의 2차원 형상을 CAD 프로그램을 이용하여 각각의 펀치요소가 판재에 접하는 위치를 찾아내어 이를 성형 해석에 이용하였다. y축에 대해 대칭이기 때문에 해석 시 이를 이용하여 대칭 조건으로 해석을 수행하였다. 폼재(스폰지)의 밀도는 측정결과 22kg/m³이며, 고무의 밀도는 1391.12 kg/m³으로 측정되었다. 탄성체의 인장실험을 통하여 고무의 탄성계수는 35Mpa로 측정되었다. 해석 시 폼의 탄성계수를 여러 가지 값으로 변화시켰을 때 성형 정도를 파악하였다. 폼재는 부피변화가 크므로 푸아송비가 매우 작으며($\nu=0.1$), 고무는 압축해도 부피변화가 없기 때문에 푸아송비는 0.5에 가깝다. 또한 SHIMADZU사의 AG-10TE 인장시험기로 알루미늄 판재(두께-2mm)의 탄성계수는 72Gpa, 항복응력(YS)은 99.5MPa로 측정되었다.

폼재와 고무의 배열은 Fig. 1와 같이 배열되었으며 끝쪽으로 갈수록 폼재의 두께가 줄어드는 대신에 고무의 두께를 증가시켰다. 성형후의 결과를 비교하기 위하여 해석단계를 펀치요소의 하강단계와 상승단계의 두 단계로 나누어 해석하였으며, 펀치요소와 탄성체를 구속하는 하부금형은 강체로 가정하였다. 펀치요소의 형상은 R150($\Delta h \approx 50\text{mm}$)인 곡면에 펀치요소가 접하는 모양으로 정렬되었다.

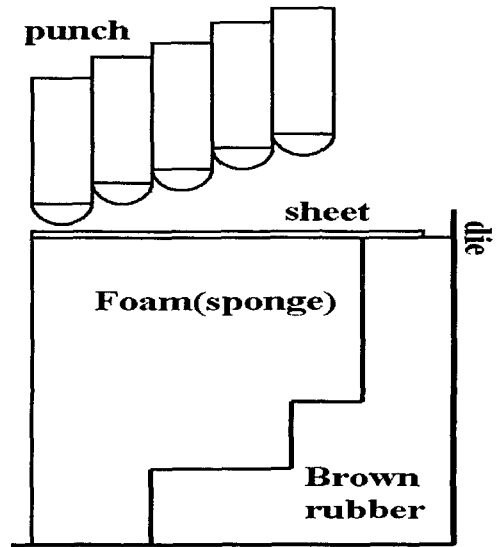


Fig. 1 Diagram of symmetric elastomer array

2.2 폼재의 종류에 따른 성형결과

폼재의 종류를 변화시켰을 때 성형물의 차이를 알아보기 위하여 고무의 탄성계수 및 탄성체의 배열, 펀치요소의 성형 시 이동거리는 일정하게 유지하고 폼의 탄성계수를 변화 시키면서 해석을 수행하였다. 펀치요소의 이동거리는 60mm로 설정하였으며, 폼재의 탄성계수는 0.01Mpa의 소프트한 폼과 2Mpa의 하드한 폼으로 구분하였다. Fig. 2는 폼재의 종류에 따라서 성형하는 과정을 보여준다. 1Mpa의 탄성계수를 가진 하드한 폼재일 경우에는 판재에 펀치요소의 자국이 찍히는 결과가 나타났다. 이에 반해 0.01Mpa의 탄성계수를 가진 소프트한 폼재에서는 비교적 완만한 곡면이 얻어졌으며, 좋은 성형물을 나타내었다. 탄성계수가 커질수록 하드한 폼이 되며 점차 고무의 특성을 띠고 있음을 알 수 있으며, 폼재의 적절한 선택이 MPEF 방식을 이용한 성형에서는 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

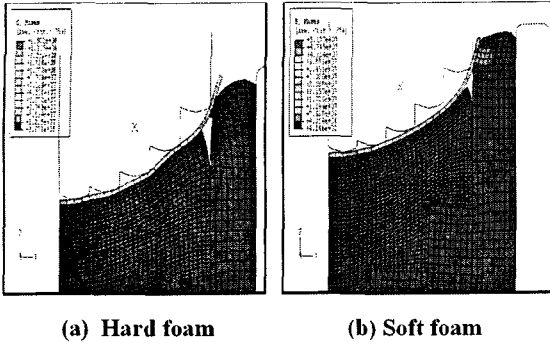


Fig. 2 Comparison hard foam with soft foam

3. 페루프 성형 시스템

3.1 성형 시스템의 구조

판재 성형 시스템은 상부 금형역할을 하는 2x10 개의 펀치요소 들과 하부 금형역할을 하는 탄성체의 배열로 이루어져 있다. 각 펀치 요소는 서보 모터를 통하여 위치가 제어되며 모터의 구동에 따라서 펀치요소의 위치가 실시간으로 표시되도록 프로그래밍 되어졌다. Fig. 3 은 판재성형 시스템의 블록선도 이다. 펀치요소의 형상과 결과물은 $p[n]$, $d[n]$, $e[n]$, $r[n]$ 의 각 점으로 정의되며, 이는 펀치 요소의 형상 변화나 성형 결과물의 형상변화는 공간상의 높이로 정의되는 것을 의미한다. 1 차원 이산공간에서 정의된 이들은 이산 시간 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)을 통해 얻어진다.^(2,3)

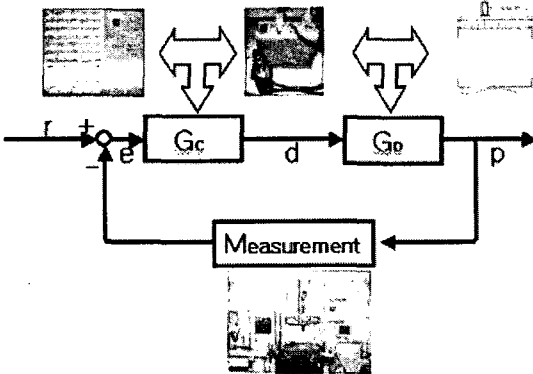


Fig. 3 Block diagram of the forming system

3.1 전달함수 추정치를 통한 펀치형상결정 비선형 시변 시스템은 일정 구간 내에서 선형화가 가능하기 때문에 선형 시스템으로 간주할 수 있고⁽⁹⁾, 상온에서 무시할 정도로 작은 변화를 일으키므로 시불변 시스템으로 간주하기로 한다. 즉 시스템의 플랜트 전달함수는 형상차에 관한 비로 나타내어야 한다.⁽⁴⁾

$$\hat{G}_p(e^{j\omega}) = \frac{\Delta P[k]}{\Delta D[k]} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad [1]$$

여기서, \hat{G}_p 는 플랜트 전달함수의 추정치이며, $\Delta P[k], \Delta D[k]$ 는 각각 성형품 모양 변화량과 펀치의 형상 변화량이다. 이는 성형품의 형상차에 대한 DFT 를 펀치의 형상차에 대한 DFT 로 나눠줌으로써 얻어질 수 있다.

$$\hat{G}_p(e^{j\omega}) = \frac{DFT\{\Delta p[n]\}}{DFT\{\Delta d[n]\}} \quad [2]$$

Central-difference Approach⁽⁶⁾를 이용하여 2번의 calibration을 통해서 변형 전달함수 (DTF)를 구할 수 있다. 이러한 전달 함수를 통해서 성형 시 원하는 곡면을 만들 수 있는 펀치의 모양을 결정할 수 있다. 식[1]은 식[3]으로 변형시킬 수 있다.

$$\Delta D[k] = [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \cdot \Delta P[k] \quad [3]$$

이를 성형 판재의 형상차와 펀치의 형상차로 각각 나누어 쓰면 식[4]와 같이 변형시킬 수 있다.⁽²⁾

$$\begin{aligned} \Delta D_{i+1}[k] - \Delta D_i[k] \\ = [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \cdot [\Delta P_{i+1}[k] - \Delta P_i[k]] \end{aligned} \quad [4]$$

식[4]의 $\Delta P_{i+1}[k]$ 은 성형하고자 하는 성형품의 모양 이므로 $R[k]$ 로 둘 수 있으며 성형 오차 $E[k]$ 는

$$E[k] = R[k] - P[k] \quad [5]$$

가 된다. 그러므로 식[4]는 식[6]과 같이 쓸 수 있다.

$$D_{i+1}[k] = D_i[k] + E[k] \cdot [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \quad [6]$$

식 [6]을 통해서 다음 성형에 사용될 펀치의 모양을 결정할 수 있다.

4. 실험결과 및 해석결과

성형 해석 시 펀치의 이동거리는 실제 실험에서와 같게 60mm 로 하였으며, DTF 을 통하여 예측된 펀치의 형상은 원하는 곡면 형상을 R 400 일 경우로 계산 되었으며, foam 의 탄성계수는 실험에서 구해진 $E=0.005\text{Mpa}$ 로 해석하였으며 이에 대한 성형해석 결과는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4 는 해석 결과를 실험 치와 실제 R400 인 곡률을 갖는 곡면의 형상을 비교하여 놓은 그래프이다. 가로축은 판재의 위치를 나타내며 세로 축은 중심의 위치를 0 으로 하였을 때의 높이 차이이다. R400 인 원하는 곡면 형상에 대해 실험값은 최대 0.47mm 의 높이차에 대한 오차가 있었으며 해석결과는 0.7mm 의 높이 차에 대한 오차가 발생하였다. 판재의 위치 100 이내부근까지는 실제로 펀치요소가 닿는 부분이기 때문에 비교적 오차가 적었다. 그러나 100mm 를 초과하는 알루미늄 판재는 끝 부분에서 휘어지는 경우가 발생하였기 때문에 비교적 큰 오차가 발생하였다. 성형 시 AI 판재로의 펀치의 자국이 생기는 것을 방지하기 위하여 펀치와 판재 사이에 탄성체를 사용하는 것이 보다 효과적이었다.

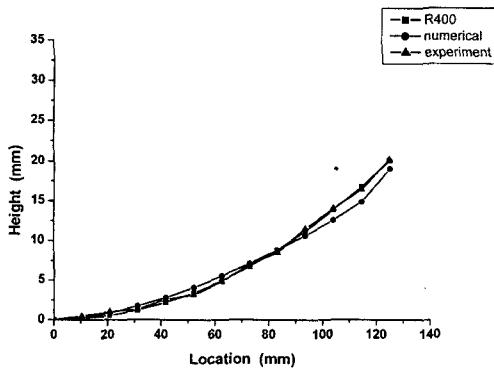


Fig. 4 Experimental and numerical result

5. 결론

폼재와 고무, 그리고 서보 모터를 이용한 펀치로 구성된 MPEF 시스템은 DTF 을 주파수 영역에서 해석하여 페루프 성형을 가능하게 하였으며 이에 대해 주어진 실험 조건에 따라 성형 해석을 수행하였으며, 이를 실험결과와 실제 원하는 형상과 비교하여 그 차이를 알아보았다. 또한 폼의 종류에 따라서 성형 형상의 차이가 생김을 알 수 있었다. 3 차원 곡면성형 예측 및 다양한 탄성체의 배열에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Li, M., Liu, Y. Su, S., Li, G., 1999, "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 87, pp.277 ~ 280.
- (2) S.H. Yang, J.W. Park, Y.S Hong and H.S. Yang, 2002, "Closed-loop Sheet Metal Forming Using Dieless Forming Apparatus", 한국 소성가공학회 2002년도 춘계학술대회
- (3) Ousterhout, K. B., "Design and Control of a Flexible Process for Three Dimensional Sheet Metal Forming", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1991
- (4) Webb, R. D., "Spatial Frequency Based Closed - Loop Control in Sheet Metal Forming", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1987
- (5) Cai, Z., Li, M., 2001, "Optimum path forming technique for sheet metal and its realization in multi-point forming", J. Mat. Proc. Tech. Vol. 110, pp.136 ~ 141
- (6) Valjavec, M., "A Closed-loop Shape Control Methodology for Flexible Stretch Forming Over a Reconfigurable Tool", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1999