

가변금형 성형에서 탄성회복 제어 연구

하석문^{1,2} · 박종우[#] · 김태원²

Study on Springback Control in Reconfigurable Die Forming

S. M. Ha, J. W. Park, T. W. Kim

(Received April 28, 2008)

Abstract

Springback is one of the most difficult phenomena to analyze and control in sheet forming. Most of traditional springback control methods rely on experiences of skilled workers in industrial fields. This study focuses on prediction and generation of optimum reconfigurable die surfaces to control shape errors originated by springback. For this purpose, a deformation transfer function(DTF) was combined with finite element analysis of the springback in the 2D sheet forming model of elastic-perfectly plastic materials under the condition without blank holder. The results showed shape errors within 1% of the objective shape, which were comparable with analytically predicted errors. In addition to this theoretical analysis, DTF method was also applied to 2D and 3D sheet forming experiments. The experimental results showed ± 0.5 mm and ± 1.0 mm shape error distribution respectively, demonstrating that reconfigurable die surfaces were predicted well by the DTF method. Irrespective of material properties and sheet thickness, the DTF method was applicable not only to FEM simulation but also to 2D and 3D elasto-reconfigurable die forming. Consequently, this study shows that springback can be controlled effectively in the elasto-RDF system by using the DTF method.

Key Words : Reconfigurable Die Forming, Springback Control, Sheet Metal Forming, Deformation Transfer Function

1. 서 론

판재성형에서 필연적으로 발생하는 탄성회복은 금형설계와 제작에 있어서 매우 중요한 문제가 되고 있다. 재료의 물성, 마찰, 금형의 형상 등이 탄성회복에 영향을 미치는 주요 인자로 알려져 있으며[1], 이 인자들의 상호 작용은 탄성회복을 더욱 예측하기 어렵게 만든다. 탄성회복의 이론적 해석의 경우 순수 굽힘 변형모드가 지배적인 경우, 평면변형을 혹은 평면응력 상태 등의 경우에는 비교적 잘 예측되나, 복잡한 판재성형에서는 정확한 결과를 얻기 힘들다[2]. 탄성회복을 고려한 금형설계에서는 고비용 및 장시간이 소요되는 실

험적 시행착오법이 주로 사용되었으나, 최근에는 FEM(finite element method)의 정밀도가 향상됨에 따라 FEM을 활용한 시행착오를 반복함으로써 기존의 실험적 방법에 비해 시간과 비용을 크게 줄이고 있다[3]. 그러나 이 방법 역시 FEM 숙련자의 경험에 의존하는 경향이 있다.

가변금형 성형(reconfigurable die forming: RDF)법은 이산 핀의 조합으로 금형을 대체하고, 핀 각각의 위치를 조절함으로써 금형의 형상을 손쉽게 변경할 수 있는 성형법이다. 이 성형법은 비교적 단순한 곡면의 성형에 적합하지만 금형의 형상을 신속하게 바꿀 수 있으므로 탄성회복으로 인한 성형오차의 보정이 용이하다. Qian 등은[4] 금형의

1. 한국과학기술연구원, 재료기술연구본부
2. 한양대학교 자동차공학과
교신저자: 한국과학기술연구원, 재료기술연구본부,
E-mail: jwpark@kist.re.kr

형상 변경이 용이한 가변금형 성형의 장점을 이용해 다단 성형(multi-step forming)으로 탄성회복을 점차 줄여나가는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 경험에 의존하여 수 많은 성형을 반복해야 하는 단점이 있다. 또한, Hardt 등은[5] 가변금형 성형과 신장성형을 결합한 방법에 공간-주파수 이론에 기반을 둔 변형 전달함수(deformation transfer function: DTF)를 적용하여 탄성회복을 제어하고자 하였다. 이 방법은 블랭크 홀더(blank holder)를 사용하는 신장성형으로, 판재의 폭 혹은 길이방향 인장력으로 인해 탄성회복이 줄어든 상황에서 DTF를 적용해 탄성회복을 제어하였기 때문에 탄성회복이 비교적 큰 경우에 대해 DTF의 타당성을 입증하지 못하였다.

이 연구에서는 상하 가변금형 중 한 쪽을 탄성체로 대체한 탄성체-가변금형 성형(elasto-RDF)을 사용하여[6] 판재의 구속이 없고 탄성회복이 훨씬 큰 조건에서 탄성회복 제어를 위해 DTF 를 도입할 때, 탄성회복의 예측과 제어가 가능한지 조사하고자 하였다. 또한 새로운 시도로서 먼저 탄성-완전소성 재료의 2 차원 판재성형에 대해 FEM 과 DTF 를 결합하여 탄성회복을 제어하였으며, 이를 이론적 해석 결과와 비교하여 DTF 법과 FEM 이 결합된 탄성회복 제어 기법의 타당성을 검증하였다. 이와 함께 탄성체-가변금형 성형에 DTF 를 적용하여 탄성회복을 실험적으로 제어함으로써 가변금형 성형의 실제 판재성형 적용 가능성도 살펴보았다.

2. 해석적 탄성회복 제어

2.1 변형 전달함수법

공간-주파수 이론을 기반으로 푸리에 변환을 이용한 탄성회복 제어이론은 Webb 과 Hardt 에[7] 의해 제안되었다. 그들은 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform: DFT)을 이용하여 성형 전후 판재의 형상을 주파수 영역에서 표현하고, 전달함수를 계산하여 탄성회복 제어에 사용하였다. 이 방법을 변형 전달함수법이라 한다. 이후 Ousterhout 는[8] 전달 함수의 편차를 줄이기 위해 Welch 의[9] 방법을 사용하여 스펙트럼 분석(spectral analysis)법으로 전달함수를 계산하였다.

공간 영역에서 판재의 폭 방향과 길이 방향으로 각각 M, N 개의 등 간격으로 측정된 금형의 형상과 성형품의 형상을 $d[n_1, n_2]$, $p[n_1, n_2]$ 라 하자. 단, n_1, n_2 는 점의 번호를 의미하며, $0 \leq n_1 \leq M-1$ 과

$0 \leq n_2 \leq N-1$ 의 범위를 가진다. d 와 p 를 선형 시불변 시스템의 입력과 출력으로 가정하면, 이 시스템의 정상상태 응답에 대한 전달함수는 푸리에 변환을 이용해 표현 가능하다. n_1, n_2 에 대응하는 주파수 성분을 $\omega_1 = 2\pi n_1/M$, $\omega_2 = 2\pi n_2/N$ 라 하면, 주파수 영역에서 d 와 p 의 DFT 를 각각 $D[\omega_1, \omega_2]$ 와 $P[\omega_1, \omega_2]$ 로 표현할 수 있다. 또한, 이 시스템의 제어 파라미터로 형상의 변화량(Δd , Δp)을 사용하면, 변형전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{G}_p = \frac{\text{DFT}(\Delta p[n_1, n_2])}{\text{DFT}(\Delta d[n_1, n_2])} = \frac{\Delta P[\omega_1, \omega_2]}{\Delta D[\omega_1, \omega_2]} \quad (1)$$

이 식에서 i 번째 성형에 대한 형상의 변화량은 각각 $\Delta d = d_i - d_{i-1}$, $\Delta p = p_i - p_{i-1}$, $\Delta D = D_i - D_{i-1}$, $\Delta P = P_i - P_{i-1}$ 을 의미한다.

식(1)의 분모와 분자에 분모의 켈레 복소수를 곱하면 전달함수는 자기상관(auto correlation, $R_{xx}[n_1, n_2]$) 과 상호상관(cross correlation, $R_{xy}[n_1, n_2]$)을 이용해 계산 가능하다.

$$\hat{G}_p(\omega_1, \omega_2) = \frac{\Delta P \cdot \Delta D^*}{\Delta D \cdot \Delta D^*} = \frac{\text{DFT}(R_{xy}[n_1, n_2])}{\text{DFT}(R_{xx}[n_1, n_2])} \quad (2)$$

이 연구에서는 전달함수 계산을 위해 FFT (fast Fourier transform) 기반으로 컴퓨터 환경에서 매우 빠른 연산이 가능한 Welch 방법을 사용하였다.

두 번의 예비성형으로부터 계산된 변형 전달함수를 이용하여 다음 금형 형상(d_{i+1})을 구하기 위해 전달함수의 정의를 이용해 식을 풀어 쓰고, 하첨자 i 를 하나씩 증가시키면($i = i+1$) 주파수 영역에서 다음 금형 형상은 식(3)으로 표현된다.

$$D_{i+1} = D_i + \hat{G}_p^{-1}[P_{i+1} - P_i] \quad (3)$$

위 식에서 $P_{i+1}[\omega_1, \omega_2]$ 은 성형품의 다음 형상, 즉, 얻고자 하는 최종 성형품의 형상을 의미하므로 $R[\omega_1, \omega_2]$ 로 나타내도록 한다. 또한, 형상오차 $E[\omega_1, \omega_2]$ 를 성형하고자 하는 형상과 현재 성형된 형상의 차($E = R - P_i$)로 정의하면, 주파수 영역에서 다음 금형 형상은 식(4)로부터 구할 수 있다.

$$D_{i+1} = D_i + E \cdot \hat{G}_p^{-1} \quad (4)$$

여기서 얻어진 $D_{i+1}[\omega_1, \omega_2]$ 를 역 이산 푸리에 변환하면 실수 영역에서 다음 금형 형상을 의미하는 $d_{i+1}[n_1, n_2]$ 을 구할 수 있다.

이상의 DTF 를 이용한 탄성회복 제어 이론은 두 번의 예비성형(calibration forming)에서 얻은 금형의 형상(d_1 과 d_2)과 성형품의 형상(p_1 과 p_2)을 이용해 푸리에 변환으로 전달함수 \hat{G}_p 를 구하고, 그

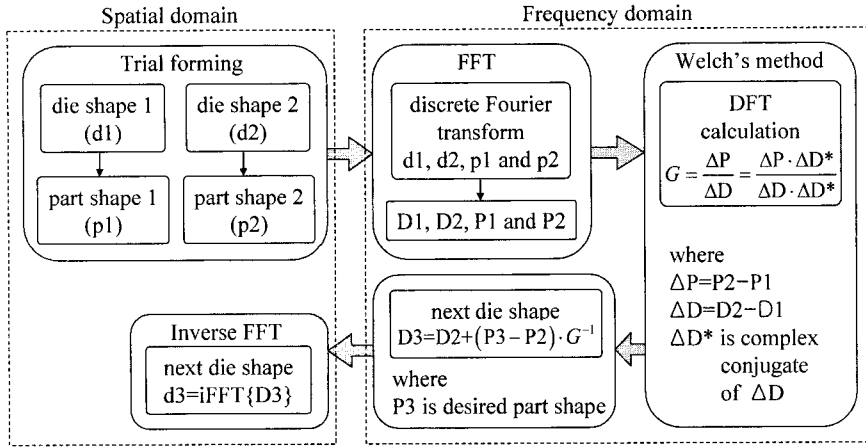


Fig. 1 Flow chart of application of DTF method

역수와 전달함수의 정의를 이용해 다음 금형 형상 (d_3)을 예측하는 방법이다. 이 과정을 순서대로 나타내면 Fig. 1 과 같다. 예측된 금형 형상을 이용한 성형품의 형상(p_3)이 오차 범위를 벗어날 경우 d_2 , p_2 , d_3 , p_3 를 이용하여 새로운 금형 형상(d_4)을 얻음으로써 성형 정밀도를 향상시킬 수 있다. 예비성형 횟수를 증가시켜 Fig. 1 의 과정을 반복할수록 오차는 점차 감소하지만 시간과 비용이 증가하므로 가급적 적은 횟수의 예비성형으로 최적금형을 예측할 수 있어야 한다. 이 연구에서는 Mathworks 사의 Matlab 으로 Fig. 1 의 과정을 프로그래밍하여 가변 금형 성형에 적용하였다.

2.2 해석방법

DTF 를 이용해 탄성회복 제어가 가능함을 알아보기 위한 새로운 시도로서, 2 차원 형상의 목적곡면을 선정하여 FEM 해석으로 Fig. 1 의 과정을 적용하였고, 그 결과를 이론 값과 비교하였다.

성형 전후의 곡률반경을 R_i , R_f 로 정의하고, 탄성회복 제어를 위한 두 번의 예비 성형해석으로부터 금형의 형상(d_1 , d_2)과 성형품의 형상(p_1 , p_2)을 얻었다. 각각의 예비성형에서 얻은 금형과 성형품의 형상으로부터 DTF 법을 이용해 최종 금형 형상(d_3)을 구하였다. 이를 다시 FEM 으로 해석하여 최종 성형품 형상(p_3)을 얻었으며, 이 결과를 목적 곡률반경(R_0)과 비교하였다. 또한, 탄성회복 비를 이용한 이론 식과 DTF 를 결합한 해석을 병행함으로써 FEM 해석 결과를 검증하였다.

재료는 탄성-완전소성 재료로 가정하였고, 판재의 두께는 1t와 2t 두 가지를 사용하였으며, 항

복강도(σ_y)는 각각 50 MPa과 80 MPa로 가정하였다. 각 두께에 대해 목적 곡률반경은 R140과 R200을 대상으로 하였고, 1t 판재의 예비성형 곡률반경 R100과 R120, 2t 판재의 예비성형 곡률반경은 R140과 R160으로 선정하였다. 또한, 탄성계수 (E)는 70 GPa을, 푸아송 비(ν)는 0.33을 사용하였다. 이론 식은 식(5)와 같이 탄성-완전소성 재료에 대한 탄성회복 비(δR)에 대한 식을 사용하였다 [10].

$$\delta R = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_y R_f / E}{t/2} \right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_y R_i / E}{t/2} \right) \quad (5)$$

유한요소법은 상용 소프트웨어 ABAQUS version 6.6 을 이용해 적용하였으며, 성형과 탄성회복 과정 모두 내연적 시간 적분법으로(ABAQUS 에서는 Standard 로 표기함) 해석하였다. 평면 변형률 상태는 2 차원으로 해석이 가능하므로, 판재에는 4-절점 감차적분 평면 변형률 요소를(ABAQUS 에서는 CPE4R 로 표기함) 사용하였다. 판재는 원의 일부분에 해당하는 대칭 형상으로 성형되므로, 판재의 중앙에 대칭조건을 부여하여 해석을 단순화하였다. 두께 방향으로 9 개의 요소를 사용하였고, 길이방향으로는 100 개의 요소를 사용해 총 900 개의 요소로 판재를 모델링하였다. 금형은 재료에 비해 항복강도와 탄성계수가 매우 크다고 가정하여 강체를 사용하였다. 하형은 성형하고자 하는 곡률반경(R)을, 상형은 판재의 두께(t)만큼 크게 한 곡률반경($R+t$)을 적용하였다. 하형은 고정되어 있고, 상형이 y 방향으로 일정한 변위만큼 아래로 내려와 성형이 진행되도록 모델링 하였다.

2.3 해석 결과 및 검토

Table 1 은 FEM 과 이론식을 이용한 2 차원 판재 성형의 탄성회복 제어 결과를 나타낸 것이다. 여기서 오차는 성형하고자 하는 목적 곡률반경(R_0) 과 DTF 법으로 예측된 최적 금형으로 해석된 성형품의 곡률반경(R_{pd}) 간 차이의 백분율($|R_0 - R_{pd}| / R_0 \times 100$)을 의미한다.

Table 1 Springback control verification results.

Objective shape	Final part shape		Error (%)
R140 (1t)	Analytic+DTF	R139.5	0.33
	FEM+DTF	R141.1	0.80
R200 (2t)	Analytic+DTF	R198.4	0.78
	FEM+DTF	R198.0	0.96

두께 1mm 인 판재를 $R_0=R140$ 으로 성형하기 위한 첫 번째 예비성형인 $d_1=R100$ 으로 해석한 경우, FEM 으로는 약 R124, 이론적으로는 약 R127 로 첫 성형품의 해석 결과를 얻을 수 있었다. 두 번째 예비성형에서 $d_2=R120$ 으로 해석한 경우, FEM 에서는 약 R158, 이론적으로는 약 R161 을 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 전달함수를 계산하고 DTF 법을 적용하여 최적 금형 형상을 예측하여 다시 FEM 해석한 결과 최종 성형품의 형상은 약 R141, 반경의 오차는 0.80%로 나타났다. 두께 2mm 인 판재에 대해서도 역시 같은 과정으로 해석한 결과 오차는 0.96 %로 나타났다.

즉, FEM 과 DTF 법을 결합하여 2 번의 예비 해석으로 예측된 금형으로 성형한 경우, 탄성회복 후 성형품의 곡률반경이 목적 곡률반경의 1%이 내의 차이를 나타내었다. 또한, 이론적 해석을 DTF 법과 결합한 결과와도 크게 다르지 않았다. 이는 공간-주파수 이론을 기반으로 한 DTF 법이 평면 변형을 가정에서 최적 금형 형상을 잘 예측하고 있음을 의미한다. 그리고 이론적으로 계산이 어려운 복잡한 판재성형 과정을 FEM 으로 실제와 유사하게 해석 가능하다면, 여기에 DTF 법을 적용하여 두 번의 예비 해석으로 탄성회복을 제어함으로써 FEM 해석 횟수를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 좀 더 복잡한 판재성형에서도 FEM 해석과 DTF 법을 결합하여 검증하는 연구가 필요하다.

3. 탄성회복 제어이론의 실험적 적용

3.1 실험 방법

KIST 에서 개발한 가변금형 성형장치는 Fig. 2 와 같이 상부 금형은 가변금형을 이용하고, 하부 금형은 유체를 저장할 수 있는 용기(container)로 되어있어 액압 성형(hydro forming)이 가능하도록 구성되어 있다. 유체 용기로부터 유체를 제거하고 탄성체를 적층하면 탄성체 성형(elasto-forming) 또한 가능하다. 상부 금형은 가변금형으로 제작되어 있으며, 100(10×10)개의 사각형 단면을 가진 핀이 빈틈없이 배열되어 있다. 상부 금형의 핀은 컴퓨터에 의해 제어되는 서보 모터를 이용해 각각의 위치를 조절할 수 있으며, 핀의 단면 치수는 □20 mm 이다(□: 정사각형 기호).

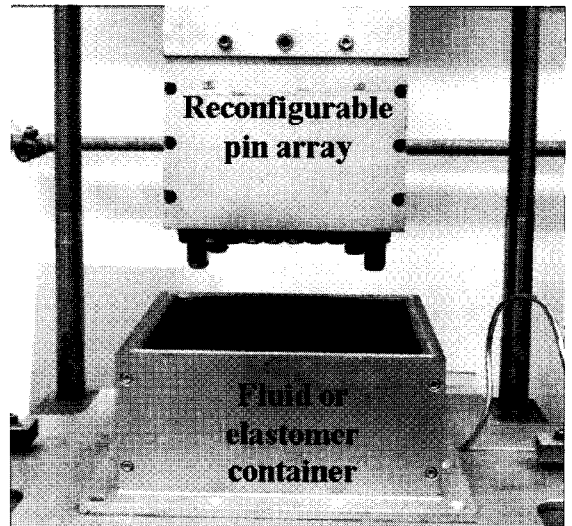


Fig. 2 RDF sheet metal forming apparatus in KIST: hydro- or elasto-RDF

목적곡면으로부터 핀의 위치좌표를 산출하는 것은 자체 개발한 CATIA V5 자동화 코드를 이용하였다. 2 장에서 제시한 푸리에변환을 이용한 변형 전달함수 법을 실험적으로 검증하기 위해 2 회의 예비 성형을 통해 계산한 변형 전달함수로부터 최종 금형 형상을 계산하였으며, 계산된 금형 형상으로 핀의 위치를 조절하여 최종 성형을 수행하였다.

2 차원 판재성형 실험은 길이 180mm, 폭 40mm 인 재질과 두께가 서로 다른 A5052 1t와 A1050-0 2t 를 사용하였다. 상형은 가변 금형을 사용하고,

하형은 폭 40mm, 두께 2.4t 의 고무를 적층하여 사용하였다. 판재와 상형 사이 그리고 판재와 고무급형 사이에는 5mm 두께의 폴리우레탄(polyurethane: PU)을 사용하였다. 이것은 편과 고무로 인한 판재 자국(indentation) 발생을 방지하기 위해서이다. 또한 판재 쪽 PU 와 고무급형 사이에는 9mm 두께의 압축성 폼재를 삽입하여, 폼재가 고무급형의 빈틈을 메워줌으로써 보다 부드러운 성형품을 얻을 수 있도록 하였다. PU 를 삽입함으로써 인해 가변 급형의 편 위치좌표 산출을 위한 곡면은 바깥쪽(R 이 커지는 방향)으로 5mm 이동하고, 고무급형 제작을 위한 곡면은 안쪽(R 이 작아지는 방향)으로 5mm 축소 이동하였다. 또한 판재는 구부러진 안쪽의 위치좌표를 측정할 것이므로 가변 급형은 추가로 판재의 두께(1 혹은 2mm)만큼 더 R 을 크게 하였다. 최종적으로 모든 정렬이 끝난 후 A1050-O 2t 사진은 Fig. 3 과 같다.

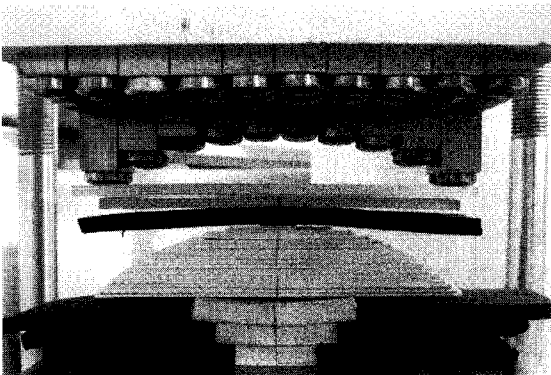


Fig. 3 An example of elasto-RDF arrangement

A5052 1t 는 최종 형상을 R300 으로 설정하고, 첫 예비성형은 R120 으로, 두 번째 예비성형은 R90 으로 성형하였으며, A1050-O 는 R200 으로 설정하고, 첫 번째는 R200, 두 번째는 R180 으로 성형하였다.

3 차원 판재성형 실험은 이중 곡률을 갖는 곡면에 대해 실험하였다. 여기서 이중 곡률은 XZ 평면과 평행한 면으로 곡면을 잘랐을 때 생기는 단면의 반경(R_1)과 YZ 평면과 평행한 면으로 곡면을 잘랐을 때 생기는 반경(R_2)이 서로 다른 곡면을 의미하며, 이 때 반경을 R_1 - R_2 로 표기하였다. 이 실험에서는 R400-500 곡면을 대상으로 하였으며, PU 는 가변 급형 편 쪽에는 10t 를, 고무급형 쪽에는 5t 를 사용하였다. 또한, 2 차원 성형에서와 동

일하게 판재의 두께와 PU 의 두께를 고려해서 증감된 곡면을 이용해 편 위치좌표와 고무 배열을 결정하였다. 첫 번째 예비성형은 R400-500, 두 번째 예비성형은 R340-400 으로 성형하였고, 판재는 A1050-O 2t □180mm 를 사용하였으며, 3 차원 측정은 Solutionix 사의 REXCAN III 를 이용하였다.

3.2 실험 결과

2 차원 판재 성형 실험에서 A1050-O 2t 판재에 대한 두 번의 예비성형을 통해 Fig. 4 와 같이 급형의 형상과 이에 대응하는 성형품의 형상을 얻을 수 있었다. 이 데이터를 탄성회복 제어를 위한 DTF 법에 적용하여 목적곡면 성형을 위한 최종 급형 형상을 산출할 수 있었다. Fig. 5 는 산출된 최종 급형의 형상과, 이 급형으로 성형한 최종 성형품의 형상을 나타낸 것이다. A5052 1t 판재에 대한 실험 결과도 역시 같은 방법으로 Fig. 6 에는 예비성형 결과를, Fig. 7 에는 최종 성형품의 형상을 나타내었다. 또한 최종 성형품이 목표 형상과 얼마나 차이가 나는지 알아보기 위해 판재의 중심(가장 오목한 부분)을 기준으로 하여 성형품의 형상과 목적곡면의 형상 차로 형상오차를 정의하고 그 값을 Fig. 8 에 나타내었다. 여기서 양(+)의 형상오차는 목적곡면보다 많이 성형된 것을 의미하며, 음(-)의 형상오차는 적게 성형된 것을 의미한다.

3 차원 판재성형의 경우 최종 성형품과 3 차원 측정결과를 Fig. 9 에, 형상오차를 Fig. 10 에 각각 나타내었다.

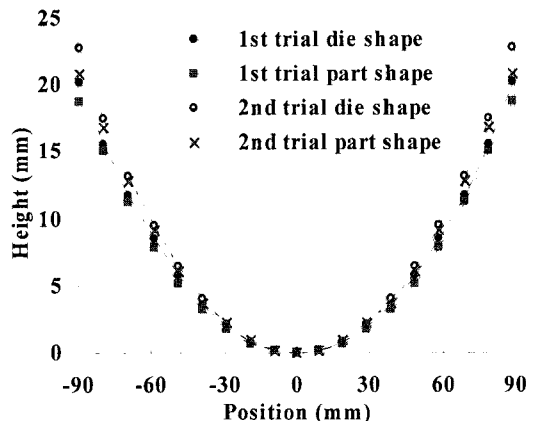
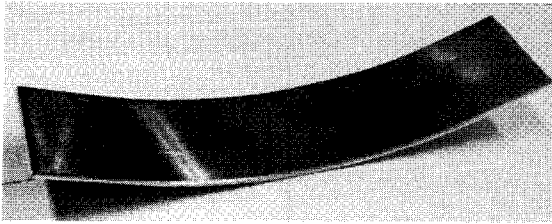
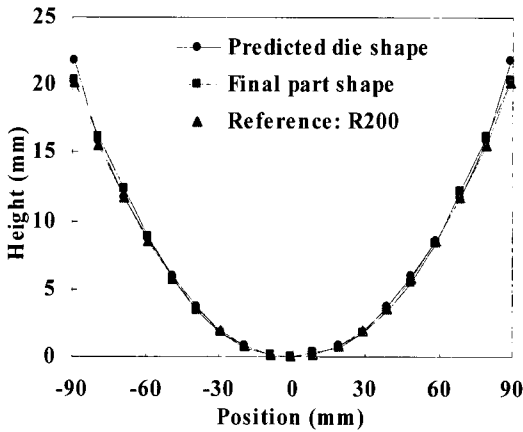


Fig. 4 A1050-O 2t trial forming results of 2D sheet forming

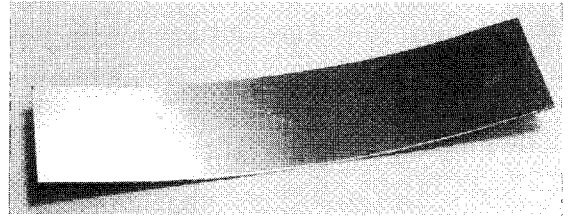


(a) Final formed part

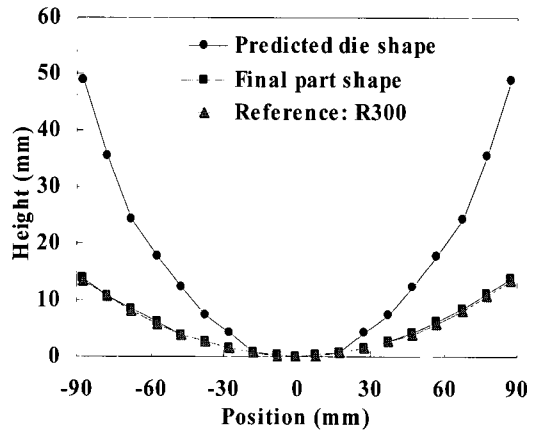


(b) Measured data

Fig. 5 A1050-O 2t predicted die shape and final formed part shape of 2D sheet forming



(a) Final formed part



(b) Measured data

Fig. 7 A5052 1t predicted die shape and final formed part shape of 2D sheet forming

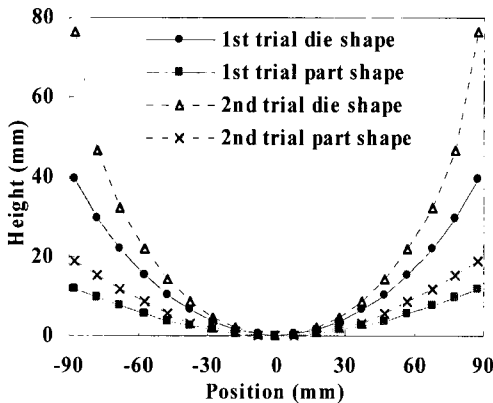


Fig. 6 A5052 1t trial forming results of 2D sheet forming

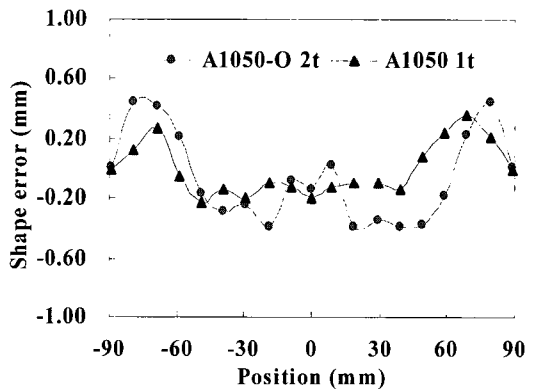


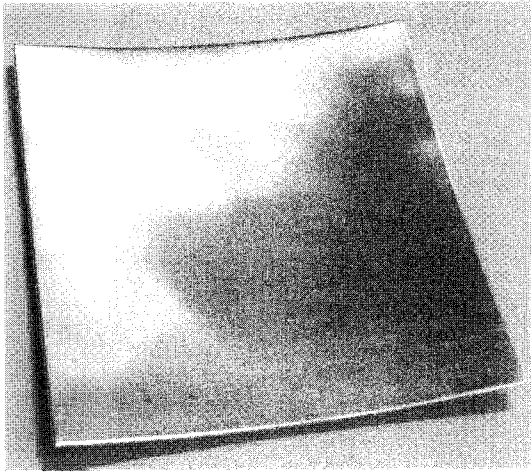
Fig. 8 Shape error distribution of 2D sheet forming

3.3 토의

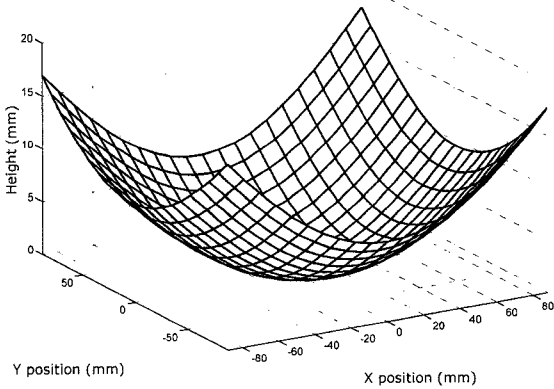
2 차원 판재성형에서 A1050-2t 판재의 형상오차는 약 $\pm 0.5\text{mm}$ 이내에서 분포하며, 오차의 분포로 볼 때 판재의 중앙부는 성형이 덜 되었고, 바

깁쪽은 성형이 더 되었다는 것을 알 수 있었다.

탄성회복이 큰 A1050-1t 판재 역시 최종적으로는 A1050-O 2t 판재와 유사한 형상오차 분포를 보여주었다. 오차의 크기는 약 $\pm 0.4\text{mm}$ 사이 분포하여 2t 판재에 비해 비슷하거나 혹은 더 작은



(a) Final formed part



(b) Measured data

Fig. 9 Final formed part shape of 3D sheet forming

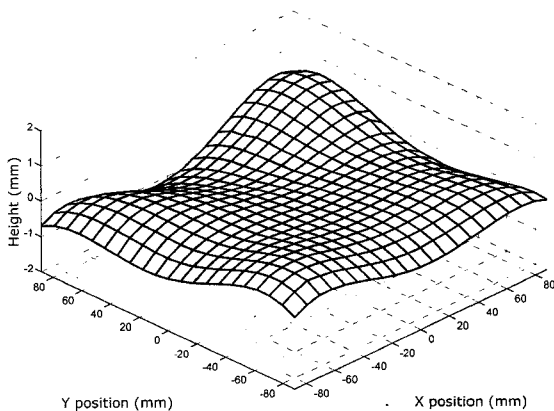


Fig.10 Shape error distribution of 3D sheet forming

값을 보였다. 오차의 분포 형태를 보면, 2t 판재와 매우 유사하게 중앙부에는 성형량이 부족하고, 외곽부에는 성형량이 과도한 것이 관찰되었다. 이것은 탄성체-가변금형 성형에서 중앙부의 성형량 부족을 해결하기 위해 고무금형 아래에 추가된 바닥재(Fig. 3 참조)의 영향으로 추측되었다. 즉, 바닥재의 추가로 중앙부에서 부족하던 성형량은 보상되었으나, 역 삼각형 형상의 고무 바닥재에서 발생하는 반력으로 판재의 외곽부는 과도하게 성형된 것이다. 또한, 판재의 최 외곽부에서는 고무 바닥재 바깥쪽의 폼재와 접촉하기 때문에 반력이 줄어들어 오차도 다시 줄어드는 것으로 예상되었다. 따라서 판재 중앙부의 성형량 부족과 외곽부의 과도한 성형량 발생 문제를 해결하기 위해 바닥재 고무의 두께, 길이, 배치, 재질 등을 종합적으로 검토할 필요가 있다.

가변 금형을 이용한 3 차원 R400-500 곡면의 경우 약 $\pm 1.0\text{mm}$ 이내의 분포를 나타내었다. 2 차원 및 3 차원 결과 모두 판재의 모서리에서 오차가 크게 발생하는 것이 관찰되었다. 이것은 핀 자극방지를 위해 삽입한 PU 가 성형 말기에는 바닥과 닿아 곡률 반대 방향으로 휘어져 판재의 모서리에 영향을 미치는 것으로 예상되었다. 이것을 방지하기 위해서는 금형의 크기와 일치하는 PU를 사용하거나, 하형의 높이를 더 높이는 등의 방법을 사용해야 할 것으로 예상되었다.

2 차원 및 3 차원 곡면성형의 결과로 볼 때, DTF 법을 탄성체-가변금형 성형에 적용할 경우 단순 형상에 대해 비교적 정확하게 탄성회복을 제어할 수 있었다. 다만 본 연구는 핀의 수와 밀도가 크지 않은 탄성체-가변금형을 사용하였기 때문에 곡률이 일정한 단순 형상에 대한 DTF 법의 적용성을 조사한 것이 한계이다. 따라서 향후 곡률이 반전하는 안장(saddle) 형 혹은 비틀림(twist) 형을 포함하여 형상이 복잡하거나 소재의 변형 거동이 심하게 비선형적인 경우에도 DTF를 이용하여 효율적인 탄성제어가 가능한지 연구할 필요가 있다.

4. 결론

(1) 탄성회복 제어 이론인 변형 전달함수법을 이론적 해석법과 유한요소법에 결합한 방법은 두 번의 예비 해석을 통해 탄성회복을 1% 이내에서 제어할 수 있었다.

(2) 블랭크 홀더가 없는(springback 이 큰) 탄성체-가변금형을 이용한 2 차원 단일곡률 판재성형에서 변형 전달함수법을 적용한 결과 성형소재의 두께나 물성에 관계없이 최종 성형품의 오차는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이내로 나타났다.

(3) 탄성체-가변금형을 이용한 이중 곡률 볼록 형에 대한 3 차원 판재성형에서 변형 전달함수법을 적용한 결과 오차는 $\pm 1.0\text{mm}$ 이내로 측정되었다.

(4) 탄성체-가변금형 성형에 푸리에변환과 변형 전달함수법을 적용하면 단순 형상에 대해 금형을 새로 만들지 않고 핀 위치제어만으로 효율적인 탄성회복 제어가 가능하다.

후 기

이 연구는 KIST 에서 수행된 연구로서 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] K. P. Li, W. P. Carden, R. H. Wagoner, 2002, Simulation of Springback, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, No. 1, pp. 103~122.
- [2] Y. E. Ling, H. P. Lee, B. T. Cheok, 2005, Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology Vol. 168, No. 2, pp. 296~302.
- [3] A. Andersson, 2004, Comparison of sheet-metal-forming simulation and try-out tools in the design of a forming tool, J. Eng. Design, Vol. 15, No. 6, pp. 551~561.
- [4] Z. R. Qian, M. Z. Li, F. X. Tan, 2007, The analysis on the process of multi-point forming for dish head, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 471~475.
- [5] D. F. Walczyk and D. E. Hardt, 1998, Design and Analysis of Reconfigurable Discrete Die for Sheet Metal Forming, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 17, No. 6, pp.436~454.
- [6] J. W. Park, 2004, Multi-Point Sheet Forming Using Elastomer, Transactions of Materials Processing, Vol. 13, No. 2, pp. 129~136.
- [7] R. D. Webb and D. E. Hardt. 1991, A Transfer Function Description of Sheet Metal Forming for Process Control, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, pp. 44~52.
- [8] K. B. Ousterhout, 1991, Design and Control of a Flexible Process for Three Dimensional Sheet Metal Forming, Ph.D. Thesis, MIT.
- [9] P. D. Welch, 1967, The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms, IEEE Trans. Audio, Vol. 15, No. 2, pp. 70~73.
- [10] A. Parris, 1987, Precision stretch forming of metal for precision assembly, Ph.D. Thesis, MIT.