

가변금형을 이용한 판재 성형에 대한 해석 및 실험

허성찬¹ · 서영호¹ · 박중원¹ · 구태완² · 김 정² · 강범수[#]

Numerical and Experimental Study on Plate Forming Process using Flexible Die

S. C. Heo, Y. H. Seo, J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang

(Received August 28, 2008)

Abstract

A flexible forming apparatus is composed a number of punches which have spherical pin tip shape instead of conventional solid die. The flexible forming tool consisted of punch array in a matrix form was proposed as an alternative forming method to substitute the conventional line heating method which use heat source to induce residual stress along specified heating lines. In this study, application of the flexible forming process to the small scale curved plate forming was conducted. Numerical simulations for both solid and flexible die forming process were carried out to compare the shape of the products between flexible and conventional die forming process. In addition, spring-back analysis was conducted to figure out the feasibility of the flexible forming process comparing with the die forming process in view of final configuration of the specimens. Moreover, experiment was also carried out to confirm the formability of the process. Consequently, it was confirmed that the flexible die forming method has capability and feasibility to manufacture the curved plates for shipbuilding.

Key Words : Flexible Die, Flexible Forming Process, Large Curvature Plate Forming, Elastic Recovery Simulation, Finite Element Analysis

1. 서 론

일반적으로 금형과 프레스를 이용한 금속재의 성형법은 양산을 기반으로 하는 소성가공 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 그러나, 금형과 프레스에 의한 성형 공정은 조선이나 항공 산업과 같이 다품종 소량생산을 기반으로 하는 부품의 가공에는 적합하지 않다. 특히, 조선 분야에서는 이러한 이유로 수작업과 현장경험에 의한 저효율의 선상가열(line heating)법이 아직까지 이용되고 있는 실

정이다[1~2]. 금형을 이용한 성형이 선상가열법에 비하여 생산성 및 환경적 측면에서 뛰어난에도 불구하고 현재까지 선체 가공 현장에서 이용되지 못하고 있는 것은 전술한 바와 같이 선체용 대형 곡판은 각 부위마다 곡률 분포가 다르며, 그 생산량 또한 매우 제한적이므로 금형을 이용한 성형 공정을 적용하기에는 경제성이 현저히 떨어지기 때문이다[3~4]. 그러나, 선상가열법은 숙련된 기술자의 경험에 의존적이고, 수작업에 의한 공정이므로 생산성이 떨어지며, 고온·소음·섭광 등이 발

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과

E-mail: bskang@pusan.ac.kr

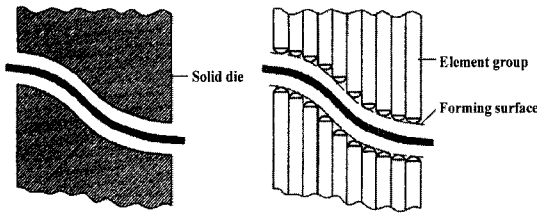


Fig. 1 Schematic diagram of flexible die equivalent to matched die [5]

생하는 등 작업환경이 열악하여 최근에는 신규 인력의 수급에도 차질을 빚고 있다. 따라서, 기존의 곡판 가공 공법을 대체할 새로운 기술에 대한 요구가 증가하고 있다.

이러한 관점에서부터 본 연구에서는 대곡률 곡판의 성형에 있어서 금형 및 프레스를 이용할 수 있는 성형공정을 제안하였다. 이는 Fig. 1 과 같이 상·하로 구성된 다수의 펀치(punch) 배열을 이용하여 단일 금형과 등가의 표면을 구현하여 단일 금형을 이용하는 효과를 낼 수 있는 가변성형공정(flexible forming process)이다[5~6]. 가변성형공정은 목적형상에 대하여 높은 유연성을 가지고 있으므로 다품종 소량생산에 적합한 프레스 성형방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 단일 금형의 곡면에 준하는 곡면의 형성이 가능한 가변성형공정의 적합성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 단일 곡률을 갖는 곡판의 성형에 대하여 기존의 상·하 금형을 적용한 경우 및 가변금형을 적용한 각 성형공정 및 이의 결과를 비교하였다. 또한, 후판의 경우 탄성회복(spring-back)의 영향이 크지 않지만 대곡률 곡판의 경우 적은 소성변형량을 갖기 때문에 비교적 변형량이 적어 탄성회복이 상대적으로 다소 크게 발생할 가능성이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 탄성회복을 고려한 해석을 추가로 수행하였으며, 이에 따른 결과를 실험에 의한 결과와 비교·검토하였다.

2. 가변성형공정

2.1 가변성형공정의 특징

가변금형(flexible die)의 펀치들은 수직방향으로의 위치 조절이 가능하며, 성형하고자 하는 목적곡면(objective surface)이 주어지면 모든 펀치의 끝부분이 목적곡면과 접하는 펀치의 위치를 산출

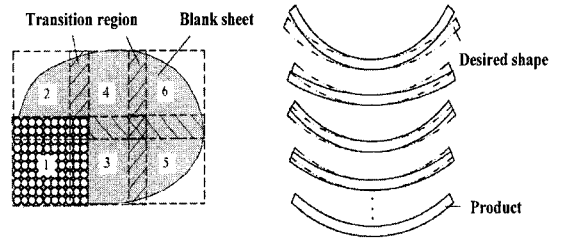


Fig. 2 Schematic view of sectional forming and repeated forming[6~7]

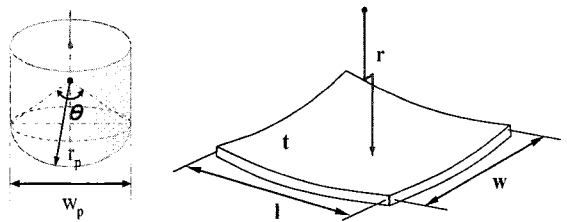


Fig. 3 Geometrical parameters in flexible forming process

하고, 이에 따라 펀치의 높이를 조절함으로써 목적곡면과 등가의 접촉면을 갖는 불연속 성형 곡면을 형성한다[7~8]. 가변성형공정은 임의의 곡률을 갖는 곡면을 가공하고자 할 때 형상에 대한 큰 제한없이 펀치의 위치만 조절함으로써 곡면을 형성할 수 있다.

가변성형공정은 하나의 성형장치만으로도 다양한 형상의 대곡률 곡판을 자유롭게 가공할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로, 단일 금형을 이용한 성형법과 비교할 경우 금형 개발에 소요되는 비용 및 시간적 측면에 있어서의 경제성이 우수하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 수작업을 기반으로 하는 선상가열법에 비하여 균질한 제품의 재가공이 원활히 이루어질 수 있으며 금형을 이용하는 프레스 성형의 특성상 생산성도 뛰어나다. 특히, 단일 금형의 가공 시 포함되는 시행착오 단계에 소요되는 시간 및 비용에 대한 부담 없이 현장에서 직접 펀치 위치의 제어를 통한 형상의 수정이 가능하다. 그리고, 일반적으로 단일 금형은 금형 형상에 대응하는 제품만 성형이 가능하나, 가변성형공정에서는 Fig. 2 와 같이 하나의 장치로 대형 곡면을 여러 개의 분할 곡면으로 나누어 성형하는 분할성형(sectional forming)법을 이용하여 단일 성형영역의 몇 배에 해당하는 판재를

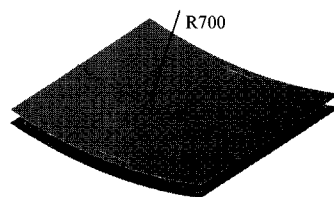
성형할 수도 있다[6]. 더군다나, 곡면의 변화가 용이하므로 반복성형(repeated forming)을 통하여 비교적 작은 곡률을 갖는 판재의 성형도 가능하다 [6~7].

이와 같이 가변성형공정은 조선 및 항공기 부품 산업과 같이 다품종 소량생산을 위해 특화된 성형공정이라 할 수 있다. 특히, 단일 금형을 이용하는 기존의 프레스 성형공정에 비하여 가공면의 구현 측면에 있어서 높은 유연성을 가지는 등 기존 성형공정의 특징 및 장점을 두루 갖춘 신성형 기술이라 할 수 있다.

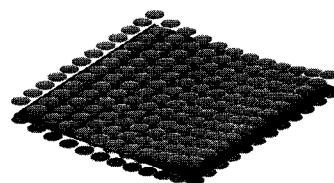
2.2 가변성형공정의 주요 성형인자

가변성형공정의 주요 성형인자로는 판재와 펀치의 소재물성(material properties), 형상치수, 곡판의 형태 및 곡률 등이다. 이 중에서 성형성에 큰 영향을 미치는 요소로는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 판재와 펀치의 치수와 이의 형상이다. 먼저 판재의 두께에 따라 성형하중 및 성형한계 곡률이 다르게 나타나는데, 판재가 두꺼울수록 성형하중이 증가하고 성형한계곡률이 감소한다. 이는 동일한 곡률을 갖는 판재에서 중심면(neutral surface)을 기준으로 멀어질수록 굽힘 가공의 경우에 변형률 및 응력이 증가하기 때문이다. 또한, 가변성형장치가 구성하는 면이 불연속적이므로 판재가 얇을 때 가장자리에서 발생하기 쉬운 압축응력에 의한 불안정적인 변형을 지지하지 못하여 주름이 쉽게 발생할 수 있다. 그리고, 동일한 판재를 다른 크기로 재단하여 동일한 곡률을 갖도록 성형할 경우 상대적으로 큰 판재에서 주름이 더 쉽게 발생하기도 한다.

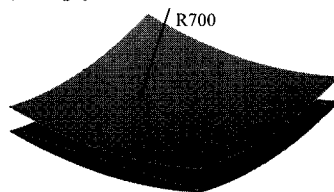
펀치 끝은 목적곡면과 펀치와의 접촉점 예측이 용이하도록 하기 위하여 구면의 일부를 이용하기도 한다. 펀치의 형상에 대하여서는 판재의 크기와 펀치 끝 반경(punch tip radius)이 성형성에 영향을 미치는 주요 인자이다. 펀치의 크기는 성형영역의 면적에 대한 펀치의 개수를 결정짓는 요소이기도 하다. 동일한 크기의 판재를 성형함에 있어서 펀치의 개수가 증가할수록(즉, 펀치의 폭이 줄어들수록) 펀치와 펀치 사이의 간격이 좁아지기 때문에 주름의 발생 가능성이 줄어든다. 펀치 끝 반경은 판재 표면의 딩플(dimple) 발생과 관련이 있는데 동일한 펀치 폭에 대하여 펀치 끝 반경이 작을수록 딩플이 발생하기 쉬우나 곡판의 성형한계 곡률을 줄일 수 있다.



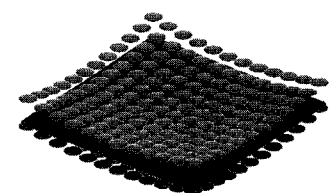
(a) simply curved matched die model



(b) simply curved flexible die model



(c) spherically curved matched die model



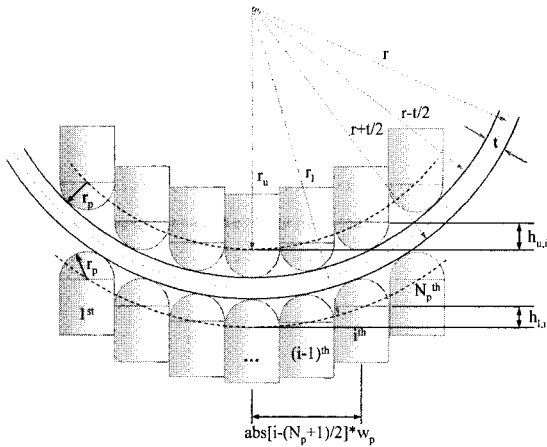
(d) spherically curved flexible die model

Fig. 4 Features of analysis model for comparative study between matched and flexible die forming process

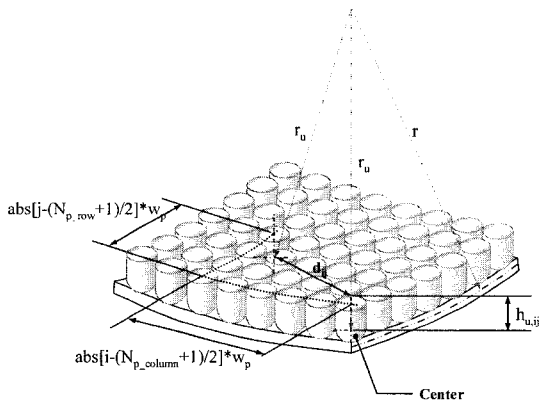
3. 대곡률 곡판 성형해석

3.1 해석 모델의 구성

본 연구에서는 모델 구성을 손쉽게 하기 위하여 Fig. 4와 같이 단일 곡률을 갖는 단순 곡판 및 구면 곡판을 선정하였다. 이어서 전술한 바와 같이 단일 금형과 가변금형을 이용한 성형해석을 수행하고 최종 형상에 대한 곡률을 비교하였다. 단일 금형 해석 모델은 Fig. 4(a), (c)와 같이 연속적인 면으로 이루어진 단일 곡면으로 구성되어 있으며, 모든 면에서 판재와의 면접촉에 의하여 성형된다. 반면 가변금형 모델은 Fig. 4 (b), (d)와 같이 다수의 펀치로 구성되어 성형곡면에 대해서



(a) simply curved plate forming



(b) spherically curved plate forming

Fig. 5 Geometrical relationship in curved plate forming using flexible die

는 불연속적인 접촉 조건을 가지며 각 펀치와의 점접촉에 의하여 성형된다.

판재는 알루미늄 소재로서 물성 모델은 가공경화식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 을 이용하였고 단축 인장시험을 통하여 도출된 소성강도계수(K)는 214.1 [MPa], 가공경화지수(n)는 0.07 이며, 펀치는 강체로 가정하여 해석을 수행하였다. 유한요소 성형해석에 사용된 판재의 크기는 가로 300mm, 세로 300mm 인 정사각형 형태이며 두께(t)는 4.5mm 이다. 펀치의 폭(w_p)과 펀치 끝 반경(r_p)은 25.0mm 로 동일하며, 펀치를 강체로 가정하였으므로 접촉이 발생하는 펀치의 끝 면을 모델링하였다. 펀치의 개수는 판재의 크기보다 조금 넓은 성형면적을 갖도록 하기 위하여, 상부 금형에 대하여 144(12×12)개의 펀치를 배열하여 총 288 개의 펀치를 상부 및 하부

에 배치하였다. 판재의 곡률 반경(r)은 700mm 로 동일하게 두고 해석을 수행하였다.

3.2 펀치 높이 산출 및 해석 모델링

가변성형공정에서는 펀치의 위치를 예측하는 것이 가장 중요하며 이는 설계된 곡면과 펀치 사이의 접촉점을 예측함에서 시작 된다. 본 연구에서 선정된 곡판의 경우 단일 곡률을 갖는 단순 곡면 및 구면으로 이루어져 있고 또한 펀치 끝 형상도 마찬가지로 구면이므로 Fig. 5와 같은 기하학적인 관계를 이용하면 접촉이 발생 하는 조건을 쉽게 알 수 있으며 이로부터 곡면 형상에 대한 펀치 위치를 산출할 수 있다. 여기서 판재의 윗면과 아랫면의 곡률 반경은 판재의 두께만큼 차이가 나므로 펀치의 위치 산출 시 이를 반드시 고려하여야 한다.

Fig. 5에서는 곡판의 중심면을 기준으로 한 곡률 반경(r), 판재의 두께(t), 펀치 끝 반경(r_p), 펀치 폭(w_p) 및 한 방향에 대한 펀치의 개수(N_p)로 각각을 표기하였다. 그리고, 곡면의 상·하부 면에서 펀치의 곡률 중심의 궤적이 이루는 면이 갖는 곡률을 각각 r_u 와 r_l 로 표기하면, 이들은 $r_u = (r - t/2) - r_p$, $r_l = (r + t/2) + r_p$ 의 관계를 가진다. 이에 따라 단순 곡면의 성형에서는 Fig. 5(a)와 같이 상·하부 면에 대한 i 번째 펀치의 수직위치 $h_{u,i}$ 및 $h_{l,i}$ 는 피타고라스 정리를 이용하여 펀치 끝 곡률 중심을 기준으로 상·하부 면에 대하여 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$h_{u,i} = r_u - \sqrt{r_u^2 - (\text{abs}[i - (N_p + 1)/2] \times w_p)^2} \quad (1)$$

$$h_{l,i} = r_l - \sqrt{r_l^2 - (\text{abs}[i - (N_p + 1)/2] \times w_p)^2} \quad (2)$$

여기서 각 펀치의 위치는 중앙에 있는 펀치의 위치를 기준으로 산출한 것이다. 유사하게 구면 곡판 성형에 대해서는 Fig. 5(b)와 같이 (i, j) 번째 배열에 위치한 펀치의 수직위치 $h_{u,ij}$, $h_{l,ij}$ 는 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

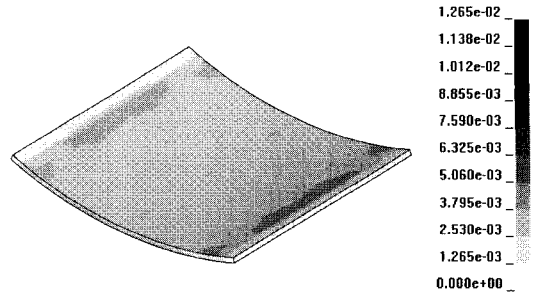
$$h_{u,ij} = r_u - \left[r_u^2 - \left\{ (\text{abs}[i - (N_{p,column} + 1)/2])^2 + (\text{abs}[j - (N_{p,row} + 1)/2])^2 \right\} \times w_p^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$h_{i,j} = r_i - \left[r_i^2 - \left\{ \left(\text{abs} \left[i - (N_{P_{column}} + 1) / 2 \right] \right)^2 + \left(\text{abs} \left[j - (N_{P_{row}} + 1) / 2 \right] \right)^2 \times w_p^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (4)$$

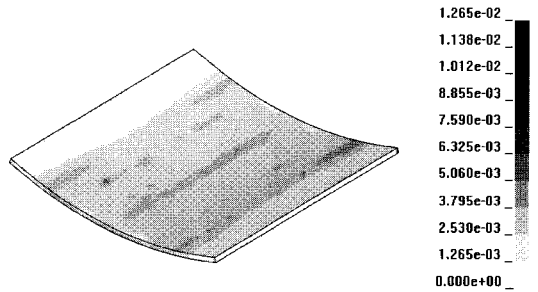
4. 성형해석 및 실험

4.1 변수 설계 기법을 활용한 모델링

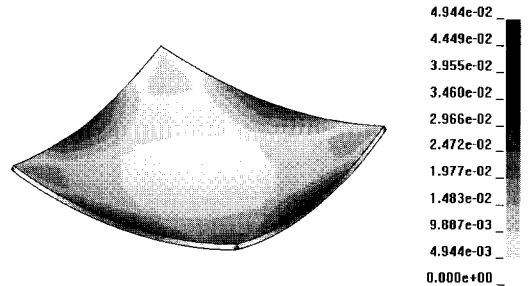
본 연구에서는 앞서 주어진 단순 및 구면 곡면에 대하여 산출된 편치의 위치 데이터를 이용하여 편치의 배열로 이루어진 해석 모델을 구성하였다. 전처리 프로그램으로는 ANSYS 를 이용하였다. 이는 자체적으로 지원하는 프로그래밍 언어 (ANSYS parametric design language, APDL)를 보유하고 있으므로 모든 편치의 위치 데이터에 대한 입력 및 출력에 용이하다. 따라서, 편치의 높이 데이터를 배열 데이터로 읽음으로써 편치 헤드의 위치 및 높이 데이터를 모델링 과정에서 직접 이용할 수 있다. 또한, 이를 이용하면 편치 폭, 편치 끝 반경, 편치 간의 간격 등과 같은 편치의 형상 인자와 재료의 물성 인자 및 해석 조건 등을 통합된 입력 조건으로 한 변수 설계가 가능하다. 이에 본 연구에서는 이를 이용한 변수 모델링 기법을 이용하였으며, 성형해석 후 수행한 탄성회복 해석을 통하여 탄성회복량을 예측하였다. 아울러 프로그래밍 기능을 이용함으로써, 최종적으로 탄성회복 후의 곡률 반경이 700mm 인 곡판을 얻기 위한 초기 성형 곡률을 도출하기 위해 요구되는 다수의 반복 해석 단계에서의 모델링 과정이 원활하도록 하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 최종적으로 준비된 각각에 대한 해석 모델은 Fig. 4 에 도시된 바와 같다. 재료의 물성 모델은 앞서 언급한 바와 같은 가공경화식 ($\sigma = K\epsilon^n$)을 이용하였으며, 탄성계수와 프아송 비는 각각 69GPa 와 0.33 이었다. 판재의 유한요소 모델링에서는 Solid 요소를 이용하였으며, 두께 변화가 거의 없을 것이라 판단하여 두께 방향으로 2 층의 요소로 구성하였다. 편치에 대해서는 변형이 발생하지 않는다고 가정하여 강체로 모델링하였다. 편치와 소재 간에는 점접촉에 의한 변형이 지배적이므로 마찰이 거의 없는 조건으로 가정하여 마찰계수를 0.01 로 두었다. 성형해석에는 외연적(explicit) 기법을 기반으로 하는 ANSYS LS-DYNA solver 가 이용되었으며, 탄성회복 해석에는 내연적(implicit) 기법의 ANSYS 가 이용되었다.



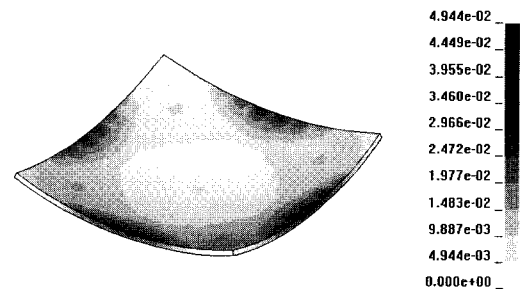
(a) simply curved matched die forming



(b) simply curved flexible die forming



(c) spherically curved matched die forming



(d) spherically curved flexible die forming

Fig. 6 Effective strain distribution on curved plates for matched die

또한, 성형해석 결과를 직접 사용하기 위하여 Explicit-to-Implicit Sequential Solution을 이용한 요소

변환을 통한 순차적 해석을 수행하였다. 끝으로 탄성회복 해석에서는 판재의 정중앙에 위치한 3개의 절점을 구속시켜 탄성회복 이외의 방향으로 발생할 수 있는 변위 발생 요인을 제거하였다.

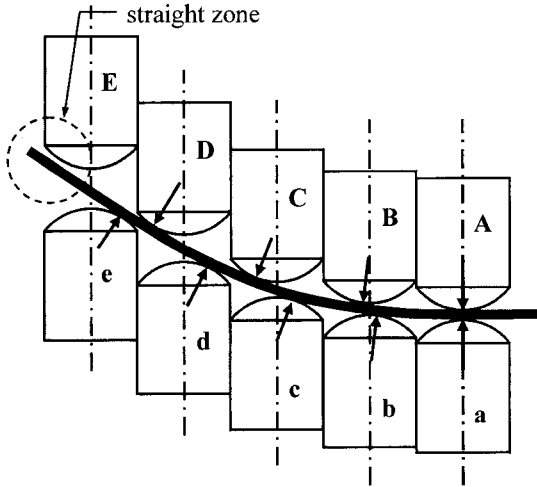
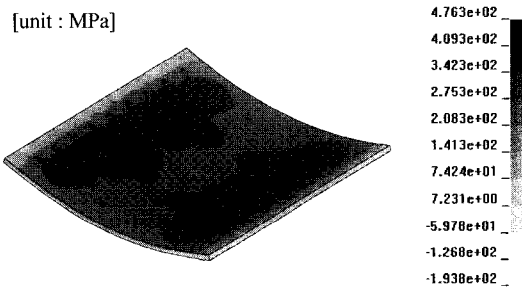
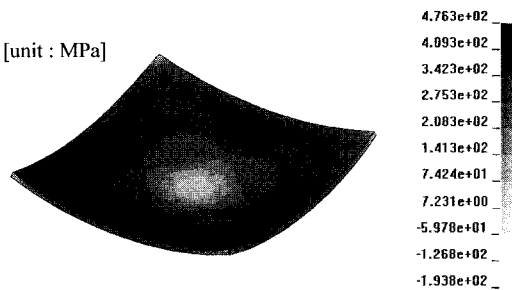


Fig. 7 Straight effect in flexible forming process due to discrete die surface



(a) pressure distribution in simply curved plate

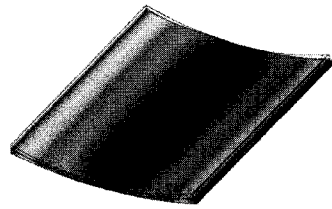


(b) pressure distribution in spherically curved plate

Fig. 8 Pressure distribution on blank surfaces in flexible forming process

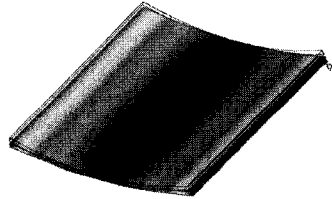
4.2 해석 결과

Fig. 6(a)~(d)에는 Fig.4 에 도시한 모델을 이용한 해석 결과를 도시하였다. 먼저 Fig. 6(a), (b)에 도시한 바와 같이 단순 곡면을 성형한 경우 가변금형을 이용한 경우 판재의 가장자리에서 변형이 다소 적게 발생함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6(c), (d)의 구면 가공 해석 결과에서도 마찬가지로 확



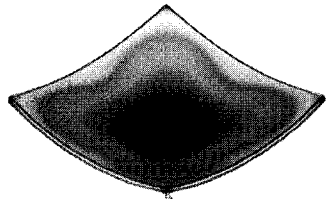
Max. : 29.0 mm

(a) simply curved matched die forming



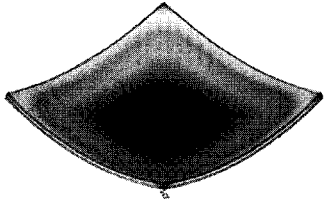
Max. : 31.9 mm

(b) simply curved flexible die forming



Max. : 8.5 mm

(c) spherically curved matched die forming



Max. : 9.8 mm

(d) spherically curved flexible die forming

Fig. 9 Spring-back amount for curved plates for matched die and flexible forming processes

인 할 수 있다. 이것은 Fig. 7 에 도시한 바와 같이 가변금형의 외곽에 위치하는 부위에서 변형에 요구되는 접촉점이 판재의 가장자리에 미치지 못하는 직선효과(straight effect)때문이다. 이러한 문제는 금형을 대체하는 펀치의 배열이 접촉면에 대하여 불연속적이기 때문에 이로 인하여 가장 자리의 변형을 지지하지 못하기 때문이다. 이는 펀치의 폭을 줄이면서 개수를 늘림으로써 오차를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 곡률 반경이 비교적 크며, 가장자리에서의 형상 오차가 판재의 크기에 비하여 크지 않을 것이라 판단하고 곡률의 오차를 비교하였다. Fig. 8(a), (b)는 가변성형공정에서 판재에 부여되는 압력 분포를 도시한 것이다. 두 가지 경우에 대해서 모두 펀치와의 접촉이 발생하는 점을 중심으로 압력이 분포하고 있으며 특히 판재의 가장자리가 가운데 부분에 비하여 표면에 큰 압력이 작용함을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 6(b), (d)의 결과를 보면 국부적인 변형이 관찰되지 않고 있으므로 점접촉 조건에 의한 국부적인 변형은 크게 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이는 비록 펀치와 소재간의 점접촉에 의해서 하중이 전달되지만 펀치의 수가 많기 때문에 하중이 분산되는 효과가 있으며 판재의 변형 정도가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 변형을 분포를 살펴보면 단일 금형을 이용한 성형해석 결과에서는 연속적인 경향을 나타내는데 반하여, 가변금형의 결과는 국부적으로 불연속적이며 부분적으로 변형이 집중되는 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나, 이러한 변형이 곡판의 형상에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 9(a)~(d)는 성형해석에 이어 수행한 탄성회복해석 결과를 도시하고 있다. 탄성회복 예측 결과 단순 곡면의 경우 단일금형에서 29.0mm, 가변성형에서 31.9mm 이 각각 예측되었다. 구면의 경우 단일 금형에서 8.5mm, 가변금형에서 9.8mm 으로 각각 예측되었다. Fig. 10(a), (b)는 각 성형법에 대한 곡판의 곡률반경을 성형해석과 탄성회복해석 후의 결과에 대하여 각각 측정 및 비교한 것이다. Fig. 10(a)는 단순 곡면에 대하여 가변금형과 단일 금형을 이용한 성형해석 결과의 곡률반경을 측정된 것이다. 결과로부터, 성형 후의 곡률 반경이 단일 금형에서는 700.5mm, 가변금형에서는 721.1mm 로 가변금형의 경우 목적 곡률 반경 700.0mm 에 대하여 약 2.9% 정도의 오

차를 가지는 것으로 나타났다. 그러나, 탄성회복 후의 곡률 반경은 두 가지 경우에 있어서 모두 1,200.0mm 에 근사한 곡률 반경을 보이며, 최종 형상에 있어서는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

마찬가지로 구면에서의 곡률반경을 Fig. 10(b)에 도시하였다. 성형 직후의 곡률 반경은 단일 금형에서 700.5mm로 목적 곡률에 매우 근사한 결과를 보였으나, 가변금형에서 731.9mm로 목적 곡률 반경 700.0mm에 대하여 약 4.6%의 곡률 반경 오차를 보임을 알 수 있었다. 또한, 탄성회복 후에는 가변금형에 대하여 976.0mm로 목적 곡률 반경 700.0mm에 대하여 약 39.4%의 오차가 예측되었으며, 단일 금형에서는 912mm로 약 30.3%의 오차를 나타내었다.

이와 같이 구면 성형 시 단일 금형과 가변금형에서 발생하는 형상 오차의 차이는 단순 곡면성형에서와 달리 변형이 발생할 때, 임의의 방향에

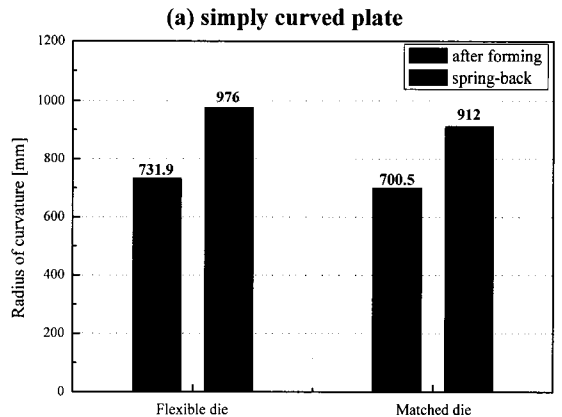
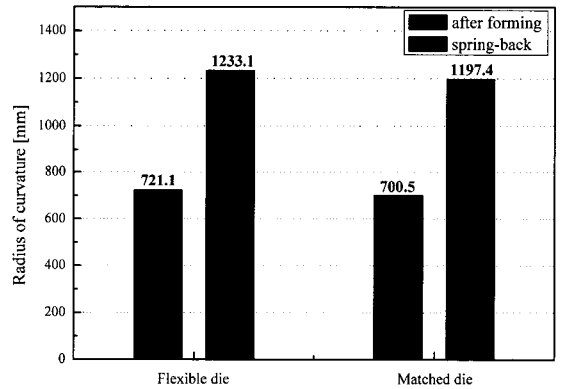


Fig.10 Comparison of curvature radius after forming and spring-back analysis

대한 변형량의 차이가 근접한 소재의 변형 거동에 간섭을 일으켰기 때문이다. 그러나, 비교적 곡률 반경은 변형량 차이에 대하여 민감하게 변화하는 수치이므로 판재의 크기에 대한 오차율을 감안하면 두 가지 성형법을 통하여 가공된 곡판의 형상은 크게 차이가 나지 않는다고 볼 수 있다.

끝으로 최종적으로 획득하고자 하는 곡률 반경 r 이 700.0mm 인 곡판을 얻기 위한 성형 곡률 반경을 도출하기 위하여 몇 번의 시행착오 해석을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 다이의 곡률 반경 r_0 를 700.0mm 로 둔 모델을 이용하여 성형해석과 탄성회복 해석을 수행하고 여기서 측정된 곡률 반경에 대한 비 $C(C = r_0 / r, C < 1.0)$ 를 이용하여

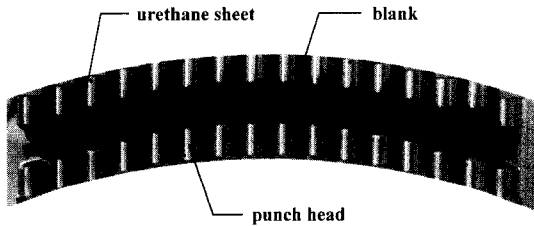
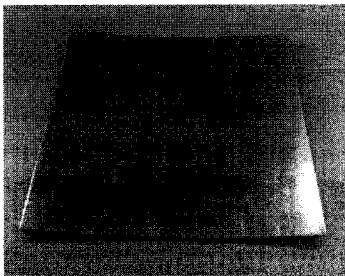
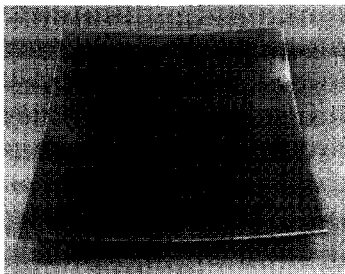


Fig.11 Feature of experiment using flexible forming apparatus



(a) simply curved plate



(b) spherically curved plate

Fig.12 Curved plates after flexible forming process

성형 곡률 $r_i (r_i = C \cdot r_0)$ 를 계산하는 과정을 반복하였다. 이를 통해 성형 후 곡률 반경 오차가 1.0% 이내에 드는 하는 성형곡률 반경을 산출하였으며 단순 곡면과 구면에 대하여 각각 331.0mm, 574.0mm 의 성형 곡률 반경을 얻었다. 아울러 해석을 통하여 예측한 성형 곡률 반경으로 성형할 경우 단순 및 구면 형상에 대하여 곡률 반경이 각각 698.2mm, 697.4mm 인 곡판을 얻을 수 있을 것으로 예측되었다.

4.3 가변성형 실험 및 검증

본 연구에서는 앞에서 산출한 펀치의 위치 정보와 해석 결과를 바탕으로 Fig. 11 과 같이 가변성형장치를 이용한 곡판 성형 시험을 수행하였다. Fig. 11 에 도시한 바와 같이 판재와 펀치 사이에는 펀치와 판재의 표면을 보호하기 위하여 고장력 우레탄 판을 삽입하였으며, 이에 따라 펀치의 위치 산출 시 우레탄 판의 두께도 동시에 고려되었다. 실험을 통하여 Fig. 12 와 같은 형상의 두 가지 곡판을 성형하였으며, 여기서 측정된 곡판의 곡률 반경은 각각 최종적으로 목표한 형상을 성형하였다. 시험편의 최종 곡률 반경을 측정된 결과 단순 곡면과 구면에 대하여 각각 721mm, 718mm 로서 목적 곡면의 곡률반경 700.0mm 에 가까운 형상을 얻을 수 있었다. 비록 수치적인 측면에서는 직선효과 등에 의하여 해석에서 예측한 성형결과와 다소 차이를 나타내지만 측정점의 좌표에 대한 곡률 반경의 민감도와 조선 분야에서 허용되는 오차 수준을 고려하면 적합한 수준의 성형 정도를 나타냈다고 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 조선 분야에서 이용되고 있는 전통적인 곡판 가공법인 선상가열법을 대체할 수 있는 가변성형법의 가용성을 확인하고자 하였다. 유한요소 성형해석 결과로부터 단일 금형과 가변금형을 이용한 제품의 최종형상이 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 가변성형장치는 본 연구에서 해석을 바탕으로 수행한 시행착오과정이 현장에서 실시간으로 곡면의 형상을 보정해가면서 시행할 수 있는 유연성을 가지고 있으므로, 기존의 비효율적인 생산 공정을 프레스 성형으로 대체하면서도 경제성 및 생산성을 높일 수 있는 가능성이 있을 가지고 있다. 끝으로 본 연구에서 제

안된 성형방법이 조선분야 등의 다품종 소량생산
관형 제품 가공에 적용된다면 생산성 및 품질 향
상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2008 년도 과학기술부의 재원으로 한국
과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.
R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재
단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)
의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관
계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. U. Odumodu, D. Shuvra, 1996, Forceless forming with laser. In: Advanced materials: development, characterization processing, and mechanical behavior, Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA., New York, pp. 169~170.
- [2] H. C. Kuo, L. J. Wu, 2002, Automation of heat bending in shipbuilding, Computers in Industry, Vol. 48, Issue 2, pp.127~142.
- [3] D. E. Ko, C. D. Jang, S. I. Seo, H. W. Lee, 1999, Realtime simulation of deformation due to line heating for automatic hull forming system, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp.116~127.
- [4] Y. S. Ha, C. D. Jang, 2004, The effectiveness of weaving motion and determination of optimal heating condition in line-heating, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 4, pp. 68~76.
- [5] K. A. Pasch, 1981, Design of a discrete die surface for sheet metal forming, S.B. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [6] M. Z. Li, Y. H. Liu, S. Z. Su, G. Q. Li, 1999, Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, Issues 1-3, pp. 277~280.
- [7] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui, Q. G. Yan, 2002, Multi-point forming technology for sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 333~338.
- [8] S. C. Heo, Y. H. Seo, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Study on Multi-point Dieless Forming Technology Based on Numerical and Experimental Approach, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 220~223.