가변성형기술을 이용한 대곡률 곡판 성형공정의 해석 및 검증
Numerical Analysis and Validation for Large Curvature Plate Forming Process using Flexible Forming Technology

*허성찬 [1], 서영호 [1], 박중원 [1], 구태완 [2], 송우진 [3], 김 정 [2], #강범수 [2]
*S. C. Heo[1], Y. H. Seo[1] , J. W. Park[1], T. W. Ku[2], W. J. Song[3] , J. Kim[2], #B. S. Kang[2] (bskang@pusan.ac.kr)
[1] 부산대학교 항공우주공학과 대학원, [2]부산대학교 산학협력단, [3]부산대학교 항공우주공학과

Key words : Flexible Forming, Dieless Forming, Finite Element Analysis

1. 서론

금형을 이용한 금속재의 성형법은 단조(forging), 스탬핑(stamping), 드로잉(drawing), 액압성형(hydro-forming)과 같은 형태로 소성가공 분야에서 폭넓게 이용되고 있다.(1) 그러나 금형에 의한 성형은 대량생산에 적합한 방법으로서 조선이나 항공기 부품의 가공과 같이 다품종 소량 생산을 기반으로 하는 산업에는 적합하지 않다. 특히, 조선 분야에서는 이러한 이유로 수작업에 전적으로 의존하는 선상가열(line heating)법이 아직까지 이용되고 있는 실정이다.(2,3) 금형을 이용한 성형이 선상가열법에 비하여 생산성, 환경적 측면에서 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 현재까지 선체가공 현장에서 이용되지 못하고 있는 것은 전술한 바와 같이 선체용 대형 곡판의 경우 각 부위마다 곡률이 다를 뿐만 아니라 생산량 또한 매우 제한적이므로 금형을 이용한 성형법을 이용하기에는 경제성이 현저히 떨어지기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 관점으로부터 Fig. 1 과 같이 상하로 구성된 다수의 펀치(punch) 배열을 이용하여 단일금형과 등가의 표면을 구현하는 가변성형(flexible forming)기술(4,5)을 제안하였다. 이는 다품종 소량 생산에 적합한 프레스 성형방법으로서 표면 형상을 자유롭게 변형시킬 수 있는 가변금형(flexible die)을 이용한 성형기술이다. 본 연구에서는 단일금형의 곡면에 준하는 곡판을 가공할 수 있는 가변금형성형법의 적합성을 검증하기 위하여 두 가지 성형방법에 대하여 곡판의 성형해석과 성형시험을 수행하고 그 결과로부터 형상 및 곡률을 비교하였다.

2. 가변성형공정 해석모델의 구성

본 연구에서는 모델구성을 손쉽게 하기 위하여 Fig. 2 와 같은 단일 곡률을 갖는 단순 곡면 및 구면 곡판을 선정하였다. 판재는 알루미늄을 이용하였으며 이에 대한 물성모델은 가공경화식 $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ (K=214.1[MPa], n=0.07)을 이용하였다. 판재는 가로 300mm, 세로 300mm 의 정사각형이고 두께는 4.5mm 이다. 펀치의 폭 25.0mm, 펀치 반경 25.0mm 로 두었으며 접촉이 발생하는 펀치의 끝 부분만 고려하였다. 또한 펀치의 개수는 판재의 크기보다 조금 넓은 성형면적을 갖도록 하기 위하여 121(11×11)개의 펀치배열을 아래위에 배치하여 모두 242 개의 펀치를 모델링하였다. 끝으로 곡판의 곡률반경은 모든 경우에 대하여 판재의 중간면을 기준으로 하여 700mm 로 정하여 해석을 수행하였다.

가변성형공정에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 단일금형과 등가의 곡면을 이루는 펀치의 높이를 산출하는 것이며 이는 펀치와 소재 간의 접촉점을 계산하여 도출된다.

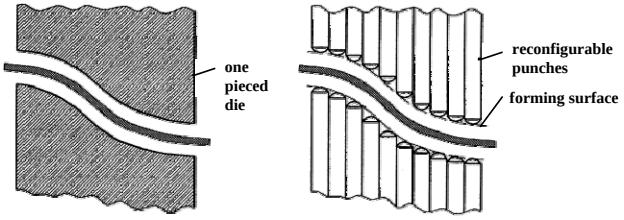


Fig. 1 Schematic view of flexible die equivalent to matched die

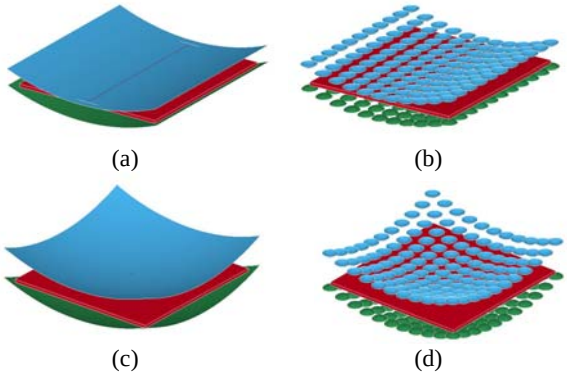


Fig. 2 Analysis models for simply curved plate forming : (a) conventional die forming – simply curved and (c) spherically curved surface, and (b) flexible forming process (FFP) – simply curved and (d) spherically curved surface.

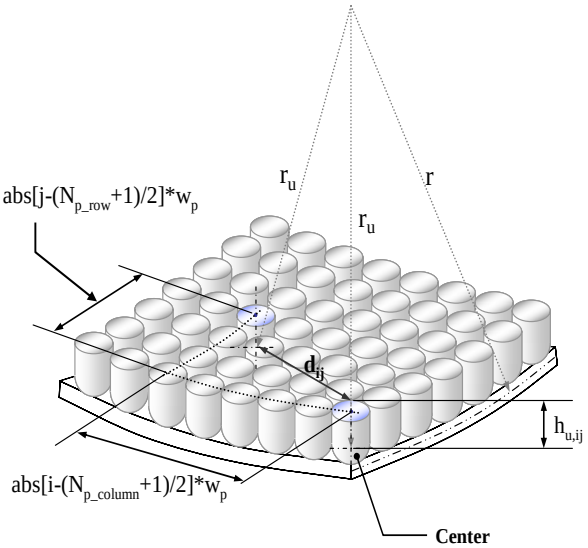


Fig. 3 Determination of vertical punch locations for spherically curved surface using geometrical relationship.

본 연구에서 선정한 단순곡면 및 구면은 기하학적인 관계로부터 접촉점의 위치를 어렵지 않게 예측할 수 있으며 이로부터 펀치의 높이를 산출할 수 있다. Fig. 3 은 구면 형상에 대한 펀치의 위치 산출 개략도를 도시하고 있다. 이와 같은 관계를 이용하여서 단순곡면에 대한 i 번째 펀치의 높이 $h_{u,i}$, $h_{l,i}$ 를 산출하였다.

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

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

여기서, 곡판의 중심면을 기준으로 한 곡률 반경 r, 판재의 두께 t, 펀치 끝 반경 r_p, 펀치 폭 w_p, 한 방향에 대한 펀치의 개수 N_p, 곡면의 위아래 면에서의 펀치의 곡률 중

심이 이루는 곡률 r_u, r_l 이다. 마찬가지로 Fig. 3 과 같은 구면 곡판에 대하여 펀치 배열의 (i, j) 번째 위치에 대한 펀치의 높이 $h_{u,ij}$, $h_{l,ij}$ 를 다음과 같이 도출하였다.

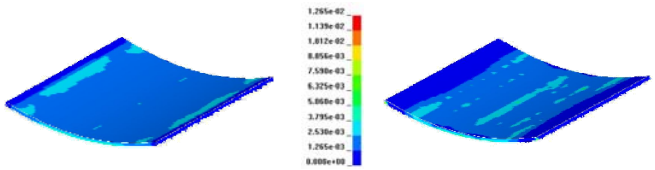
$$h_{u,ij} = r_u - \left[r_u^2 - \left\{ \left(\text{abs}\left[i - (N_{p_{column}} + 1)/2 \right] \right)^2 + \left(\text{abs}\left[j - (N_{p_{row}} + 1)/2 \right] \right)^2 \right\} \times w_p^{\,2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

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

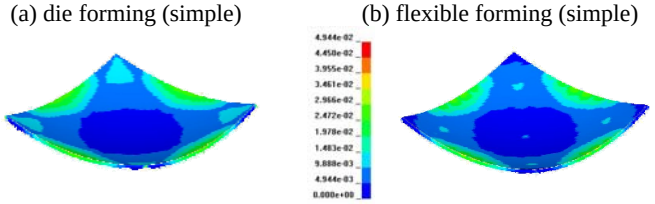
이를 토대로 ANSYS 의 프로그래밍 기능(APDL) 이용하여 Fig.2 와 같은 해석 모델을 구성하였다. 소재는 육면체(solid) 요소를 사용하였으며 펀치는 면(shell) 요소로 모델링하고 강체로 가정하였다.

3. 성형해석 및 시제품 제작 검증

각 공정에 대한 성형해석은 외연적 코드인 LS-DYNA를 이용하였다. Fig. 4는 성형 직후 변형률 분포를 도시하고 있으며 결과로부터 가장자리 부분에서 다소 상이한 분포를 보이나 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 성형 정밀도 비교를 위하여 각각에 대한 곡률반경을 측정하였다. 단순 곡면의 경우 단일 금형에 대하여 700.5 mm, 가변 금형에 대하여 721.1mm 이었으며, 구면의 경우



(a) die forming (simple) (b) flexible forming (simple)



(c) die forming (spherical) (d) flexible forming (spherical)

Fig. 4 Strain distributions of simply and spherically curved surfaces for flexible and conventional die forming methods

Fig. 5 Plate forming test using flexible press forming apparatus

(a) simply curved plate (b) spherically curved plate

Fig. 6 Deformed plates through flexible forming process

단일 금형 사용 시 700.5mm, 가변 금형 사용 시 731.9mm 로 예측되었다. 내연적 코드 ANSYS 를 이용한 탄성회복 해석 결과로부터 이들의 최종 곡률반경은 순서대로 1197.4 mm, 1233.1mm, 912mm, 976mm 로 예측되었으며 약 4.8% 이내의 성형오차를 나타냈다. 곡률에 대해서는 다소 큰 오차가 발생하나 곡률반경이 변형량에 민감하게 변화하는 수치이므로 실제 변형 형상은 거의 유사하다고 볼 수 있다. 이로부터 최종 목적 곡면의 곡률반경 700mm 을 얻기 위해 탄성회복을 고려한 성형곡률을 단순 곡면과 구면에 대하여 각각 331mm, 574mm 과 같이 예측하였다. 이에 대한 검증을 위하여 Fig. 5 와 같이 가변금형 장치를 이용한 성형시험을 수행하여 Fig. 6 과 같은 시제품을 획득하였다. 최종 시제품의 곡률 반경을 측정한 결과 단순 곡면과 구면에 대하여 각각 721mm, 718mm 로서 목적 곡면의 곡률반경 700mm 에 가까운 형상을 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 조선분야에서 현재까지 이용되는 선상가열법을 금형을 이용한 프레스 성형으로 대체할 수 있는 가형성형법의 가용성을 확인하였다. 성형해석 결과로부터 단일 금형과 가변금형을 이용한 제품의 최종형상 및 곡률이 거의 동일함을 알 수 있다. 이로부터 가변성형공정이 다품종 소량생산에 적합한 금형 성형법이라 할 수 있다. 끝으로 본 연구에서 제안된 성형방법이 조선분야의 선체 가공 등에 에 적용된다면 생산성 및 품질 향상에 기여할 것이다.

후기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다. 또한 본 연구는 2단계 BK21사업, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Y. M. Heo, J. J. Kang, K. H. Shin and Y. H. Lee, “The Present and the Future for Dies and Molds Industry in Korea”, Transactions of Materials Processing, **13**, 5, 421-432, 2003.
2. Odumodu KU, Shuvra D., “Forceless forming with laser. In: Advanced materials: development, characterization processing, and mechanical behavior”, Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 169-170, 1996.
3. H. C. Kuo and L. J. Wu, “Automation of heat bending in shipbuilding”, Computers in Industry, **48**, 2, 127-142, 2002.
4. K.A. Pasch, “Design of a discrete die surface for sheet metal forming”, S.B. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1981.
5. Mingzhe Li, Yuhong Liu, Shizong Su and Guandgquan Li, “Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet”, Journal of Materials Processing Technology, **87**, 1-3, 277-280, 1999.