

유한요소법을 이용한 가변 스트레치 성형공정의 적합성 검증

서영호¹, 허성찬¹, 박중원¹, 송우진², 구태완³, 김 정³, 강범수[#]

Usefulness Verification for Flexible Stretch Forming Process using Finite Element Method

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

Abstract

This paper deals with a usefulness verification of stretch forming process using flexible die. The stretch forming method is widely used in aircraft and high-speed train industries for manufacturing of skin structure, which is made of sheet metal. A great number of solid dies are originally used and developed for specific shapes with respect to different curvature radii of the skin structures. Accordingly, flexible stretch forming process is proposed in this study. It replaces the conventional solid dies with a set of height adjustable discrete punches. A usefulness of the flexible die is verified through extensive numerical simulations of the stretch forming process for simply curved sheet plate. The elastic recovery is considered and formability evaluations are conducted through a comparison of symmetry plane configurations.

Key Words : Stretch Forming, Flexible Forming Technology (FFT), Flexible Die, Sheet Forming, Elastic Recovery Estimation, Finite Element Analysis

1. 서 론

박판을 성형하는데 있어서 굽힘 공정만으로는 판재의 변형상태가 탄성영역 내에 존재하게 되므로 탄성회복이 필연적으로 발생한다. 따라서 판재의 변형을 소성영역으로 유도하기 위한 방법으로 스트레치 성형공정(stretch forming process)이 널리 사용되고 있으며 [1-3], 구조물의 최종 형상 및 곡률분포에 따라 각각의 단일금형을 사용한다. 따라서 다수의 금형 제작으로 인하여 생산 비용이 증가하게 되며, 하나의 성형공정에서 다른 성형공정으로의 전환 시 금형의 교체 시간 및 노동력의 소모가 요구된다. 또한 금형 보관에 따른 공간상의 제약이 있다. 이는 생산비용의 증가뿐만 아니

라 생산성 저하의 요인이 된다. 특히, 항공기 및 고속철도 차량의 외피 구조물(skin structure)과 같이 다양한 곡률분포를 가지는 박판성형 시 앞서 언급한 요인들로 인하여 생산성이 저하되므로, 다 품종 소량생산의 특성에 부합하는 새로운 개념의 박판 성형공정의 개발이 필요하다.

최근 3차원 곡면을 가공함에 있어서 일정하게 배열된 다수의 펀치와 결합된 유압프레스를 이용하여 다양한 형상의 곡면을 가공하는 가변성형공정이 개발 중에 있다 [4]. Fig. 1과 같은 가변금형은 기존의 단일금형을 여러 개의 펀치로 분할하여 각 펀치의 높이를 조절함으로써 3차원 곡면을 자유롭게 구성하여 판재를 성형할 수 있다. 따라서 하나의 금형으로 다양한 형상의 곡면성형이 가능하다.

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 산학협력단

3. 부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, bskang@pusan.ac.kr

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 가변금형을 이용한 가변 스트레치 성형공정을 제시하였고, 유한요소 해석을 통하여 기존의 단일금형을 대체하기 위한 가변금형의 적합성에 관한 연구를 수행하였다. 또한 성형성을 향상시키기 위하여 고강도 우레탄 패드를 사용하였고, 이에 대한 영향성 또한 평가하였다.

2. 가변금형의 적합성 검증

2.1 펀치위치 산출원리

가변금형을 스트레치 성형공정에 적용하기 위해서 우선적으로 펀치모듈이 목적곡면과 등가인 곡면을 형성하도록 펀치의 상대적인 위치가 결정되어야 한다. 스트레치 성형공정을 통하여 생산되는 박판 구조물은 주로 단일 곡률을 가지는 단순한 형상이므로 본 연구에서는 단일 곡률을 가지는 곡면에 국한하여 펀치위치 산출원리를 적용하였다.

펀치 끝의 형상은 Fig. 2와 같이 구면의 일부로 이루어져 있으며, 펀치의 폭(w_p)은 펀치반경 R 과 펀치반경 중심에서의 θ 의 관계에 의하여 식 (1)과 같이 정의된다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 곡판의 중심면을 기준으로 한 곡률 반경 r , 판재 두께 t , 펀치 폭 w_p , 펀치의 개수 N_p , 판재 윗면의 펀치의 곡률 중심이 이루는 곡률 r_u 를 정의하면 피타고라스 정리에 의해 곡면 상부의 i 번째 펀치의 위치는 식 (2)에 의해 결정된다.

$$w_p = 2R \sin(\theta/2) \quad (1)$$

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

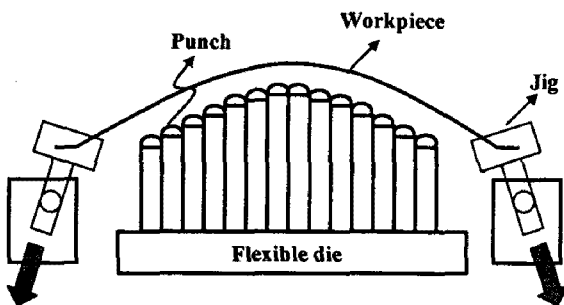


Fig. 1 Stretch forming process using flexible die

2.2 유한요소모델

단일 곡률을 가지는 박판소재의 성형해석에 사용된 해석 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 성형방법은 판재의 양 끝단에 인장력을 부여함과 동시에 상단의 금형을 Z-방향으로 변위하중을 주었다. 단일금형 및 가변금형을 사용한 두 가지 모델의 목적곡면은 500mm의 단일 목적곡률을 가진다. 박판소재는 AA 2024-O이며, 물성 모델로는 가공 경화식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ (소성강도계수 $K = 320.9 \text{ MPa}$, 가공경화지수 $n = 0.21$)을 사용하였다. 가변금형에 사용된 펀치 폭은 20mm로서 펀치배열은 15×9 이다. 해석 모델은 대칭을 이루고 있으므로 해석의 편의성을 위하여 1/4모델을 사용하였으며, 유한요소 해석 시 탄성회복을 고려하였다.

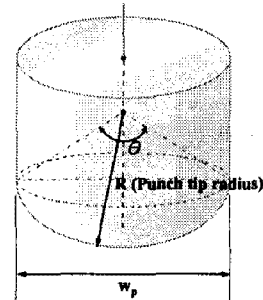


Fig. 2 Schematic view of punch tip

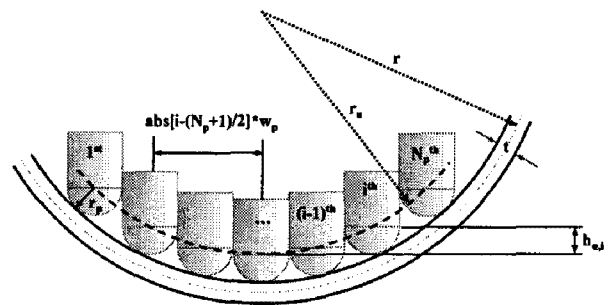


Fig. 3 Geometrical relationship in simply curved plate

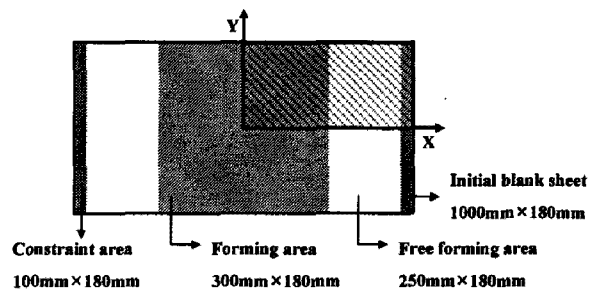
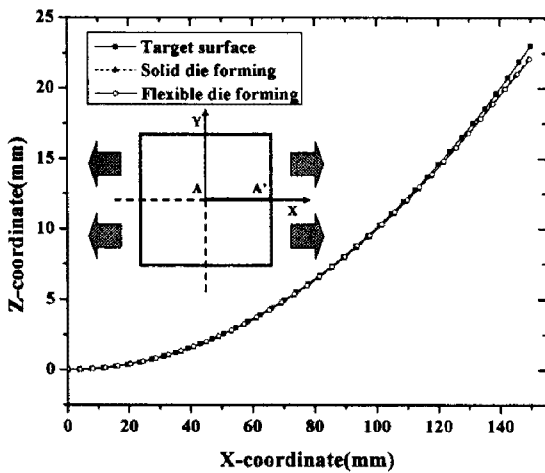


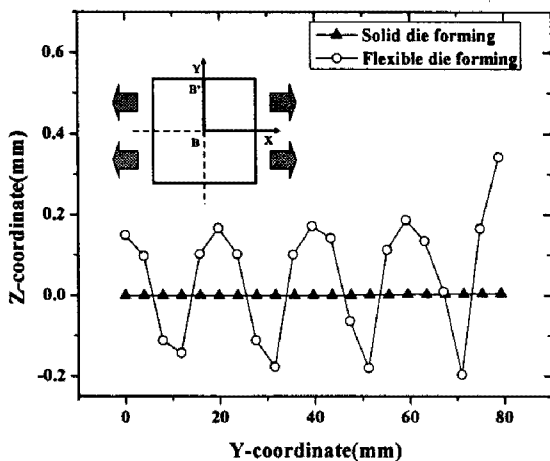
Fig. 4 Analysis model

2.3 해석결과 및 적합성 검증

단일 혹은 가변금형과 접촉하여 성형이 이루어지는 구간 즉, 길이방향의 대칭면 A-A'의 곡률분포를 Fig. 5(a)에 도시하였다. 목적곡률 반경이 500mm인 반면 탄성회복 후의 곡률반경은 단일 및 가변금형을 사용하였을 경우 약 520mm로 예측되었다. 비록 탄성회복에 의하여 20mm의 곡률반경 오차가 발생하였지만, 박판성형 시 크게 발생하는 탄성회복 특성을 감안하면 길이방향의 소재의 연신에 의하여 회복량이 감소하였다고 판단된다. 또한 단일금형에 대한 가변금형의 적합성을 검증할 수 있으며, 앞서 제시한 단순곡면에 대한 편치위치 산출원리를 성형해석 모델링에 적용할 수 있음을 확인하였다.



(a) Along the symmetric axis A-A'



(b) Along the symmetric axis B-B'

Fig. 5 Sectional profile configuration

하지만 길이방향에서 소재의 인장이 발생하는 반면 폭 방향에 대해서는 소재의 수축이 발생한다. 따라서 가변금형 사용 시 소재의 국부적인 수축 거동과 편치 사이의 공극에 의한 소재의 폭 방향으로의 성형결함을 예측할 수 있다. Fig. 5(b)에 폭 방향으로의 곡면 형상을 도시하여 검토한 결과 가변 스트레치 성형공정에서 편치의 윤곽에 따라 주름이 발생함을 확인하였다. 따라서 편치의 영향을 최소화하기 위한 방안으로 고강도 우레탄 패드의 사용을 제시하였으며 이에 대한 영향성을 평가하였다.

3. 우레탄 패드의 효용성 검증

성형불량을 억제하기 위하여 본 연구에서는 판재와 가변금형 사이에 고강도 우레탄 패드를 사용하는 대안을 제시하였다. 이에 대한 검증을 위하여 우레탄 패드를 사용한 가변 스트레치 성형공정에 대한 유한요소해석을 추가적으로 수행하여 길이 방향 및 폭 방향의 성형성을 비교하였다. 유한요소해석 시 고강도 우레탄의 거동을 나타내기 위하여 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다. 초탄성체의 거동을 표현하는 변형 에너지 함수는 다음과 같은 식으로 표현되며, C_{10} 및 C_{01} 은 Mooney-Rivlin 상수로서 압축실험을 통하여 구하였다.

$$\omega = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

고강도 우레탄을 이용한 가변 스트레치 성형해석 모델을 Fig. 6에 도시하였다. 우레탄은 가변금형과 소재간의 접촉이 없도록 400mm×180mm의 크기로 모델링 되었으며, 두께는 10mm이다. 편치위치는 우레탄 두께를 고려하여 10mm만큼 오프셋(offset)시켜 계산하였다.

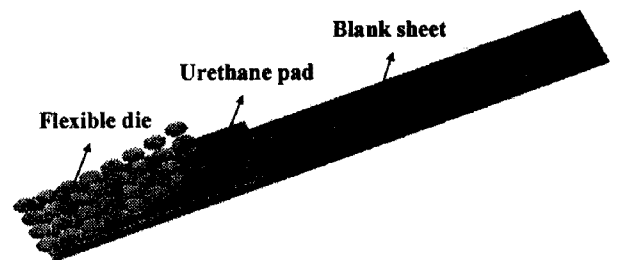


Fig. 6 Analysis model of flexible stretch forming using urethane pad

탄성회복 후의 길이방향의 대칭면 A-A'에 대한 형상을 목적곡면과 비교하여 Fig. 7(a)에 도시하였다. 앞선 결과와 마찬가지로 곡률반경 오차가 발생하였지만 그 양은 미비하며, 유한요소해석을 이용한 시행 착오법을 통하여 최종 곡률반경이 500mm가 되도록 목적곡물의 설계가 가능할 것으로 판단된다 [4]. 마지막으로 Fig. 7(b)에 나타낸 바와 같이 폭 방향의 대칭면 B-B'의 형상을 확인한 결과 편치 사이의 공극에 의한 영향이 크게 줄어들음을 확인할 수 있다. 하지만 우레탄 패드를 사용한 결과 단일금형 해석 결과에 비해 여전히 굴곡이 존재한다. 이에 대한 원인은 우레탄 패드가 가변금형의 공극을 완전히 상쇄시키지 못하기 때문이라고 판단할 수 있다. 따라서 우레탄 패드의 영향성에 대한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 항공 및 고속철도 산업 등의 다 품종 소량생산 특성에 부합하는 신 개념의 스트레치 성형공정의 개발을 위하여 가변 스트레치 성형공정의 적합성에 대한 검증을 하였다.

(1) 단일곡률을 가지는 곡면에 대한 편치위치 산출기법을 개발하였으며, 유한요소 모델링에 적용하였다.

(2) 탄성회복을 고려한 유한요소해석을 수행하여 성형 후 곡률분포 비교를 통한 단일금형에 대한 가변금형의 적합성을 검증하였다.

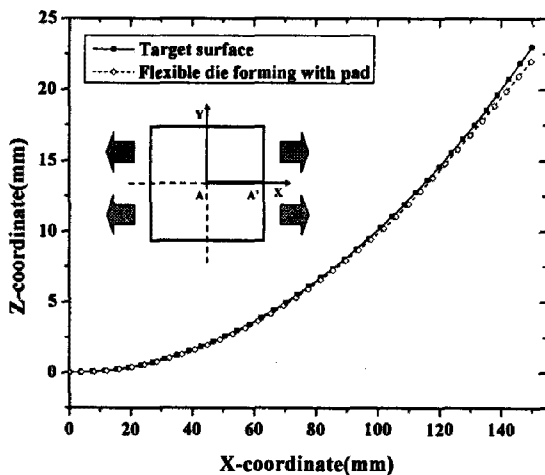
(3) 편치사이의 공극으로 인한 폭 방향으로의 성형불량을 억제하기 위하여 고강도 우레탄 패드를 사용하였으며, 이에 대한 효용성을 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

후기

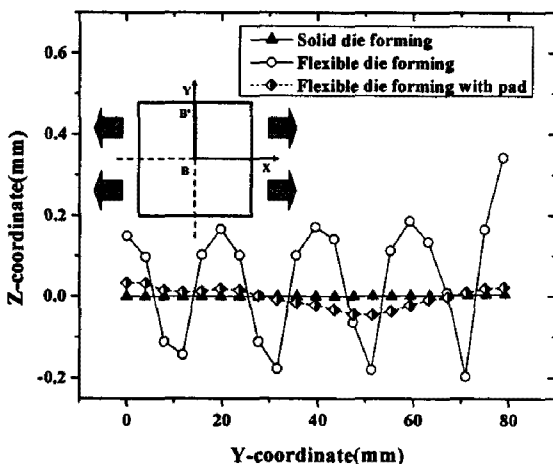
이 논문은 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (No. R15-2006-022-02002-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Y. H. Seo, S. C. Heo, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Flexible forming process analysis for sheet material curved surface forming, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 118~121.
- [2] D. W. Kim, I. S. Kwon, 1983, A study on the pure stretch forming of Al sheet, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 7, No. 1, pp. 64~72.
- [3] B. S. Kang, J. Y. Lim, J. Y. Bae, 1997, Process sequence design of the inner skin of landing gear using stretch forming process, Trans. Mater. Process., Vol. 6, No. 4, pp. 291~299.
- [4] S. C. Heo, Y. H. Seo, J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Numerical and experimental study on plate forming process using flexible die, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 570~578.



(a) Along the symmetric axis A-A'



(b) Along the symmetric axis B-B'

Fig. 7 Sectional profile configuration