

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.299

분할가변금형을 이용한 박판의 가변성형공정 연구

허성찬* · 구태완* · 송우진** · 김 정* · 강범수*†

* 부산대학교 항공우주공학과, ** 부산대학교 부품소재산업협력연구소

Study of Flexible Forming Process Involving the Use of Sectional Flexible Die for Sheet Material

Seong Chan Heo*, Tae Wan Ku*, Woo Jin Song**, Jeong Kim* and Beom Soo Kang**†

* Dept. of Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Industrial Liaison Innovation Cluster, Pusan Nat'l Univ.

(Received September 8, 2009 ; Revised January 11, 2010; Accepted January 11, 2010)

Key Words : Sectional Flexible Die(분할가변금형), Flexible Forming Process(가변성형공정), Urethane Pad(우레탄 패드), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 가변성형 공정에서 동일한 크기의 성형펀치 배열로 구성된 가변금형을 이용하는 경우 펀치의 크기가 일정하여 성형 가능한 곡률 반경이 제한되기 때문에 비교적 유연성이 낮다. 이에 본 연구에서는 가변금형의 유연성을 높이기 위하여 분할가변금형에 대한 개념을 제안하였다. 임의의 성형면을 형성하기 위하여 두 가지 크기의 펀치로 구성된 펀치 블록을 착안하였다. 상대적으로 큰 곡률 반경을 갖는 성형영역에 대해서는 크기가 큰 펀치 블록을 적용하였으며, 작은 곡률 반경을 갖는 성형영역에 대해서는 작은 크기의 펀치로 구성된 펀치 블록을 적용하였다. 해석적 연구를 토대로 성형된 제품의 단면 형상을 비교하였으며 이로부터 서로 다른 크기의 펀치 블록을 조합하여 구성한 분할가변금형을 이용한 판재의 성형공정이 비교적 복잡한 곡률 반경 분포를 갖는 곡면 가공에 적합함을 확인하였다.

Abstract: In general, the flexible forming die that has been used in the flexible forming process has the identical punch size; hence, its flexibility is relatively low because the range of allowable curvature radii is limited due to the uniform punch tip radius. Hence, a conceptual design of a sectional flexible die is presented for enhancing the flexibility of the forming process. Two punches of different sizes are used to configure the arbitrary forming surface. For a forming region with a relatively large curvature radius, a large punch array block is used; on the other hand, for the forming regions with small curvature radii, a small punch block is used. The cross-sectional profiles are compared with the target shape for evaluating the effectiveness of the process. Consequently, it is confirmed that the sectional flexible die can be used along with a combination of punch blocks of different sizes for manufacturing objective surfaces of complex shapes.

1. 서 론

가변성형기술(flexible forming technology)은 Fig. 1과 같이 구면 펀치를 다수 배열하여 일체형 금형의 효과를 낼 수 있도록 하는 유연성이 매우 높은 판재 가공 기술중의 하나이다.^(1,2) 가변성형기술은 다품종 소량 생산에 적합한 생산기술로서 성형장치의 유연성으로 인하여 조선분야에서는 완곡면으로 이루어진 선체용 곡판 가공에 현재까지 이용되고 있는 선상가열법(line heating method)을 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다. 뿐만 아니라 건축

용 구조물 등과 같이 대형 후판을 곡가공하여 이용하는 분야에서 부분적으로 적용되고 있다.^(3~5)

가변성형공정에서는 성형하고자 하는 목적곡면(objective surface)에 성형펀치가 접촉하는 높이에 펀치를 배치함으로써 성형면(forming surface)를 생성하여 일체형 금형을 대신하여 사용된다. 이는 Fig. 2(a), (b)에 도시한 바와 같이 분할성형(sectional forming)에 의한 순차성형(sequential forming)이 가능하기 때문이다. 도시한 바와 같이 분할성형공정에서는 가변금형으로 한 번에 성형 가능한 영역보다 큰 판재를 1회 성형 가능 영역을 기준으로 구획을 나누어 순차적으로 성형을 하며 구획마다 곡률분포가 다르더라도 각각의

† Corresponding Author, bskang@pusan.ac.kr

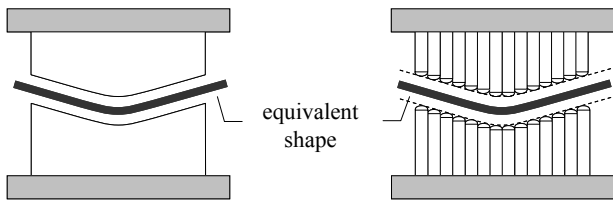
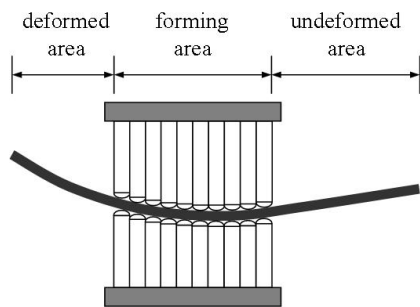
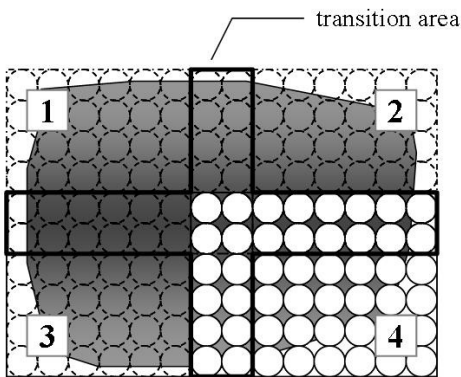


Fig. 1 Schematic diagram of flexible die equivalent to matched die



(a) Sectional forming process for thick plate



(b) Forming sequence based on once forming area

Fig. 2 Schematic diagram of sectional forming for thick plate forming process using flexible die

성형면에 대한 펀치 높이를 산출하여 해당 성형 영역에 적합한 금형 형상으로 변형이 가능하여 다중 곡률을 갖는 대형 판재의 성형이 용이하다.⁽⁶⁾ 그러나 박판의 성형 공정에서는 후판 성형과 달리 판재를 고정하지 않을 경우 주름이 쉽게 발생하므로 블랭크 홀더를 사용할 수 밖에 없다.^(7,8)

따라서 박판의 경우 내부 영역에 해당하는 펀치 배열이 갖는 크기 이상의 면적을 갖는 제품은 성형이 불가능하며, 또한 동일한 크기의 펀치를 사용하므로 성형 가능한 곡률 반경이 제한되는 등 유연성이 다소 부족해질 수 있다. 이에 본 연구에서는 박판의 가변성형공정의 유연성 향상을 위하여 후판의 분할성형 개념을 다른 관점에서 응용하여 박판의 성형 가능 영역을 확대할 수 있는 분할가변금형(sectional flexible die)을

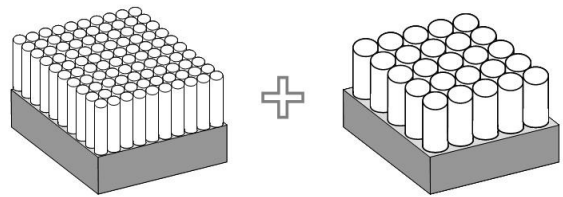


Fig. 3 Concept of sectional flexible die forming using different punch blocks

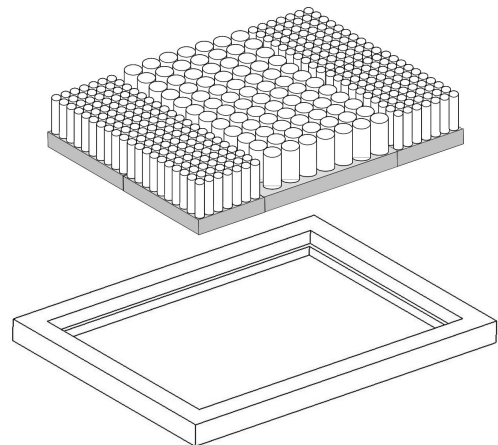


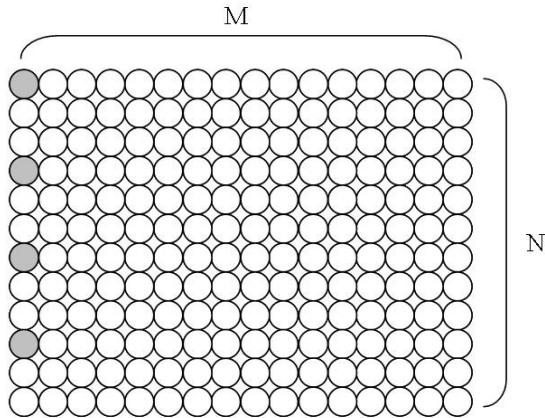
Fig. 4 Assembly of sectional flexible dies and die housing equipment

제안하고 이에 대한 수치적 연구를 수행하였다.

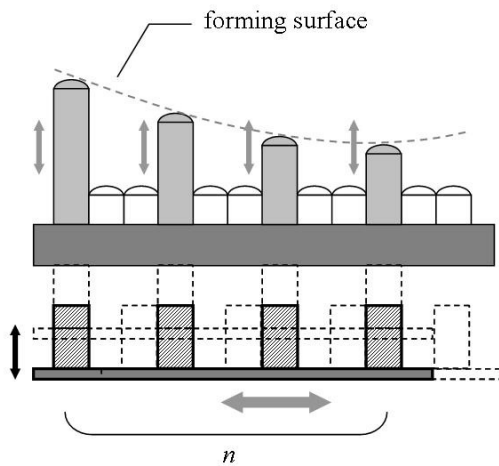
2. 분할가변금형

본 연구에서 제안한 박판용 분할가변금형은 성형 곡면의 곡률 반경 분포에 따라 구획을 나누어 이에 상응하는 펀치의 크기를 적절히 조합하여 배치함으로써 기존의 가변금형보다 좀 더 복잡한 곡면의 성형이 가능하다. 여기에는 Fig. 3 과 같이 지정된 단위 면적만큼의 성형 영역을 갖도록 구성된 펀치 블록(punch block)을 이용한다. 각각의 펀치 블록에는 동일한 크기의 펀치가 배치되어 있으며 각 블록은 서로 체결이 가능하여 조립 후 Fig. 4 와 같이 금형 하우징에 삽입이 가능하다. 기존의 가변 프레스 장치는 Fig. 5(a)와 같이 일정 간격으로 배치된 $M \times N$ 개의 동일한 크기의 펀치로 구성되어 있으며 금형의 하부에는 펀치 높이를 조절하기 위한 n 개의 모터가 등간격으로 배치된다.

n 개의 모터는 Fig. 5(b)와 같이 모듈화 되어 있으며 모듈 전체가 종횡으로 이동 가능하도록 설계되어 성형 펀치를 순차적으로 조절할 수 있다. 따라서 Fig. 5(c)와 같이 펀치 블록에 포함된 펀치의

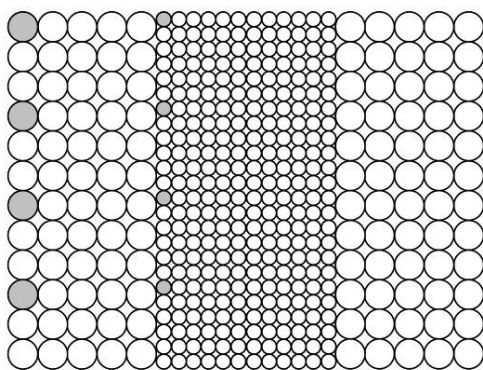


(a) Punch array of conventional flexible die



servo motors

(b) Punch control module for sequential adjustment



○ punch tip radius : r_1

○ punch tip radius : $r_2 (= m \times r_1)$

(c) Example of punch array of sectional flexible die

Fig. 5 Conceptual design of punch height control scheme for conventional flexible die and sectional flexible die

크기를 서로 정수(m) 배가 되도록 펀치의 크기를 정의함으로써 기존의 가변금형과 동일한 형태로 n 개의

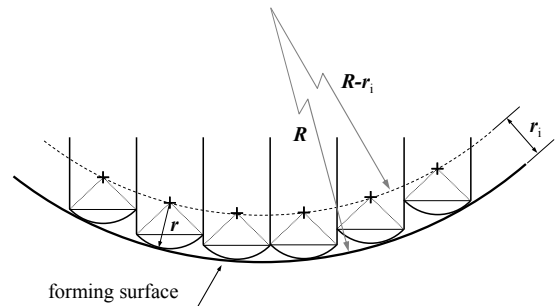


Fig. 6 Geometrical relationship between center of punches and offset surface

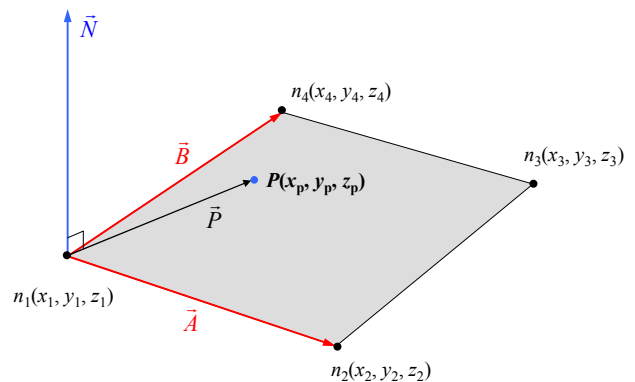


Fig. 7 Calculation of punch height using discretized rectangular patch element and relationship between arbitrary point and spatial plane

모터가 등간격으로 배치된 제어 장치 구조를 그대로 적용할 수 있다. 그 예시로 Fig. 5(b)에 도시한 바와 같이 4 개의 구동 모터 ($n=4$)를 이용할 경우 Fig. 5(a)에 도시한 바와 같이 첫 번째 열을 기준으로 1, 4, 7, 10 번째 펀치를 동시에 조절할 수 있다. 여기에 사용된 제어 모듈을 Fig. 5(c)와 같이 펀치 크기가 2 배($m=2$)인 펀치 블록의 조합으로 구성된 분할가변금형에 이용할 경우 작은 펀치(r_1) 배열 기준으로 해당 열을 기준으로 1, 7, 13, 19 번째 펀치를 동시에 구동할 수 있다.

3. 분할가변성형공정 설계 및 해석

3.1 분할가변성형 펀치의 위치 산출

분할가변금형에서는 먼저 성형면의 곡률 분포에 대한 펀치 블록 영역을 정의하고 해당 영역에 대한 펀치 위치를 산출한다. 본 연구에서 적용된 두 가지 크기의 펀치는 일반적으로 가변금형에 이용되고 있는 펀치와 마찬가지로 곡률 반경(r)을 갖는 부분적 구면을 가지는 형상으로 정의하였다 ($i=1,2$). 펀치의 위치를 산출하는 방법은 Fig. 6 과 같이 구면 펀치가 임의의 곡률 반경(R)을 갖는 곡면에 접촉하였을 때 각 펀치의 곡률중심점과 성형곡면으로부터 펀치의 곡률 반경

(r_i)만큼 움푹 시킨 면 즉, 곡률 반경 ($R-r_i$)를 갖는 가상의 면 상에 존재하게 된다. 따라서, 움푹된 곡면을 이산화시키고 이산화된 오프 셋 곡면에 속한 특정 패치 상에 펀치 중심점이 존재하도록 평면방정식을 도출하여 이를 만족시키는 펀치 중심점의 좌표, $P(x_p, y_p, z_p)$, 를 식 (1)과 같이 해당 패치의 절점(node) 좌표, $n(x_i, y_i, z_i)$ 를 이용하여 도출할 수 있으며 여기서 펀치는 X-Y 평면에 배열되어 있다고 가정하였다.

$$F(x-x_1)+G(y-y_1)+H(z-z_1)=0 \quad (1)$$

여기서, $F=(y_2-y_1)(z_4-z_1)-(y_4-y_1)(z_2-z_1)$,
 $G=(x_4-x_1)(z_2-z_1)-(x_2-x_1)(z_4-z_1)$,
 $H=(x_2-x_1)(y_4-y_1)-(x_4-x_1)(y_2-y_1)$ 이다.

$$z_p = \frac{-F(x_p-x_1)-G(y_p-y_1)+Hz_1}{H} \quad (2)$$

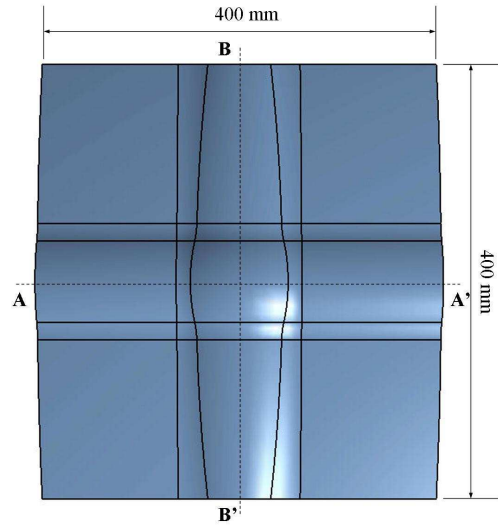
아울러, 성형 장치의 펀치 배열 위치는 결정되어 있는 값이므로 미지수는 펀치의 높이에 해당하는 z_p 만 남게 된다. 이를 정리하면 최종적으로 식 (2)와 같은 펀치 위치 산출식을 얻게 된다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 복합곡률을 가지는 목적곡면을 곡률 분포에 따라 구획을 나누고 이에 적합한 펀치 블록을 할당하여 각 펀치 블록에서의 펀치 높이를 산출하였다.

3.2 분할가변성형공정 해석 모델링

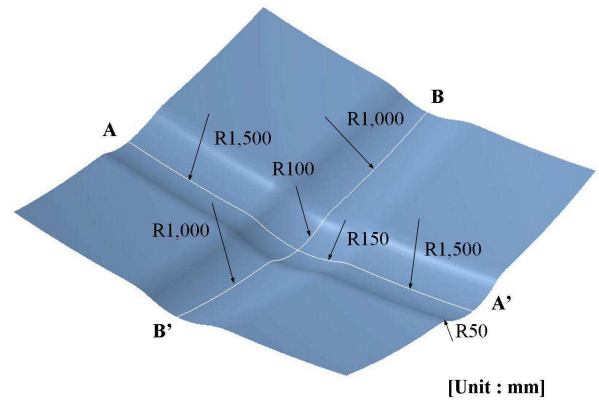
본 연구에서는 분할가변성형공정의 해석적 적용을 위하여 Fig. 8(a), (b)와 같이 폭, 길이가 각각 400mm 인 다중 곡면으로서 A-A' 방향에 대하여 전체적으로 곡률 반경 1,000mm, 가운데 구간에서는 100mm 곡률 반경을 가지며, B-B'방향에 대해서는 전체적으로 곡률 반경 1,500mm, 가운데 구간에서는 150mm 의 곡률 반경을 갖는다. 또한 가변성형에서 성형이 어려운 모서리를 제거하기 위하여 50mm 의 필렛을 부여하였다.

주어진 목적곡면의 성형에는 펀치 끝 반경이 각각 10mm, 20mm 인 두 가지 크기의 펀치를 적용하였으며 성형면의 곡률 반경 분포에 따라 Fig. 9(a)와 같이 펀치의 크기를 달리하여 배치하였다. 곡률 반경이 100mm 와 150mm 인 영역에 대해서는 펀치 끝 반경이 10mm 인 펀치를 배치시키고, 곡률 반경이 1,000mm 와 1,500mm 인 곡면에는 펀치 끝 반경이 20mm 인 펀치를 배치시켜 성형 구획에 따라 펀치 높이를 산출하였다.

해석상 편의를 위하여 성형펀치를 변형이 없는 강체로 가정하고 접촉이 발생하는 펀치 끝 면만



(a) Configuration of objective surface

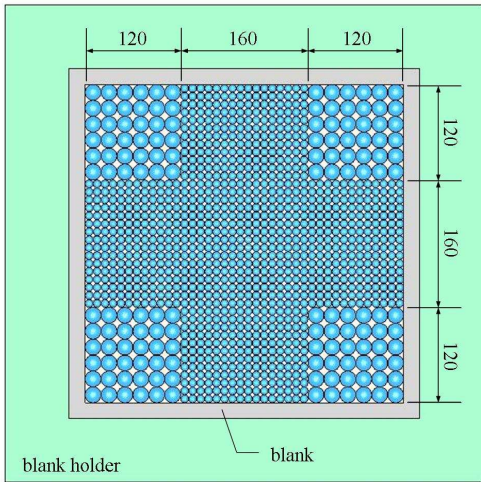


(b) Distribution of curvature radii

Fig. 8 Surface modeling for numerical simulation of sectional flexible forming process

고려하여 쉘 요소로 모델링하였다. 판재는 DP590을 적용하였고 이에 대한 물성 모델로는 가공경화식($\sigma = K\epsilon^n$)을 이용하였으며 단축 인장 시험으로부터 소성강도 계수(K)와 가공경화지수(n)을 각각 999.9MPa 과 0.155 로 획득하였다. 아울러 탄성계수(E)와 프와송 비(ν)는 각각 210GPa 과 0.29 를 이용하였다. 판재의 두께는 1.0mm 이며 판재의 크기는 블랭크 홀더를 충분히 크게 고려하기 위해 $600 \times 600 \text{mm}^2$ 의 크기로 쉘 요소(shell element)를 이용하여 모델링하였고 성형영역은 펀치 배열 면적에 해당하는 $400 \times 400 \text{mm}^2$ 이었다.

가변성형공정에서는 일체형 금형에서와 달리 불연속적인 성형면을 갖는 가변금형에 의한 압흔 및 주름 발생을 막기 위하여 높은 강도를 갖는 탄성 패드를 삽입하여 성형면을 부드러운 곡면으로 형성시킨다.^(8,9) 이에 본 연구에서는 성형해석 시



(a) Punch array with regard to given surface

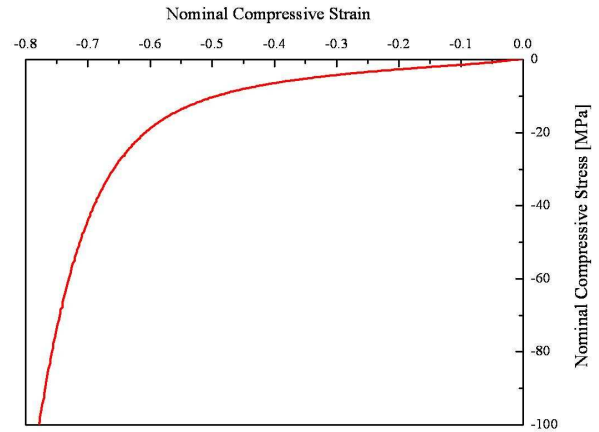
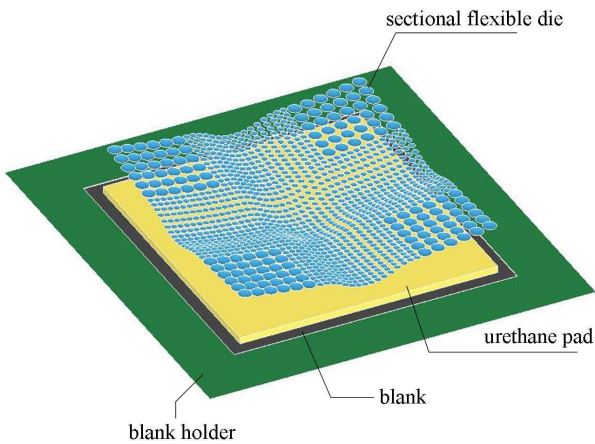


Fig. 10 Compressive stress-strain relationship of urethane



(b) Sectional flexible forming analysis model

Fig. 9 Constitution of sectional flexible forming analysis model

탄성 패드를 고려하기 위하여 탄성 패드 소재로 사용된 쇼어경도 A90의 우레탄 압축 시험을 수행하였으며, Fig. 10과 같은 응력-변형률 선도를 도출하여 유한요소해석에 반영하였다. 솔리드 요소 (solid element)로 구성된 두께 10mm의 우레탄 패드 모델을 삽입하였으며 성형해석에서 우레탄 패드를 초탄성체 (hyperelastic material)로 정의하여 사용하였다. 끝으로 펀치와 우레탄, 우레탄과 판재 사이에는 마찰이 없다고 가정하여 마찰계수를 0.01로 정의하였고 해석에는 외연적 기반의 LS-DYNA Solver를 이용하였다.

3.3 분할가변성형공정 해석 결과

본 연구에서는 상기와 같이 다중곡률을 갖는 곡면에 대하여 분할가변금형을 이용한 성형해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 Fig. 11과 같이 성형면 내에 주름이나 압흔이 형성되지 않고 비교적

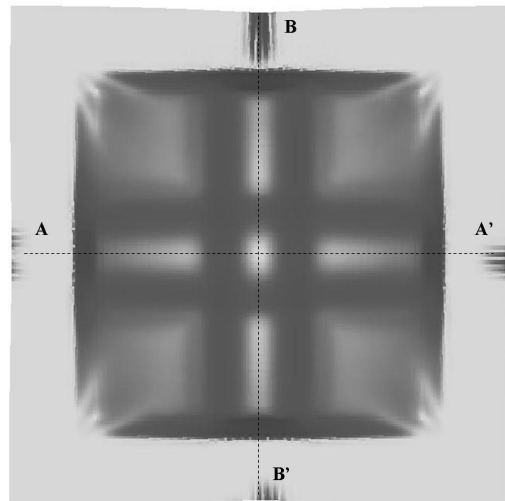
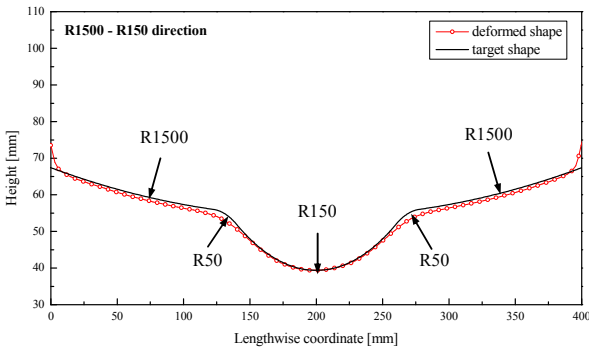


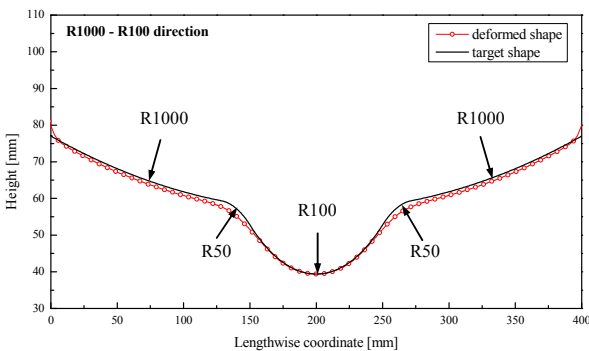
Fig. 11 Configuration of deformed blank in sectional flexible forming process

매끄러운 곡면으로 잘 성형됨을 확인하였다. 각 방향 및 곡률 분포에 따른 성형 정확도를 비교하기 위해 Fig. 11에 도시한 방향에 따라 단면 A-A', B-B'를 비교하였다.

먼저 단면 곡률 반경이 R1500-R150인 단면 A-A'를 살펴보면 Fig. 12(a)에 도시한 바와 같이 전체적인 형상은 유사하게 잘 나타나고 있다. 그러나 R50의 필렛을 부여한 영역을 중심으로 오차가 다소 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차는 단면 B-B'에 해당하는 Fig. 12(b)에서도 나타나고 있는데, 이는 곡률 반경이 작은 부위로 갈수록 구부러져 내려가는 형상을 갖는 필렛 부위에서 성형하중이 집중되면서 성형면을 고르게 하기 위하여 삽입한 탄성 패드가 두께 방향으로 과도하게 압축됨으로 인해 발생한 성형면 오차가 주변 영역의 패드 변형에도 영향을 미쳐서 나타난 것으로 보인다. 이로부터 가변성형공정에서는 작은 펀치를 사용하더



(a) R1500 - R150 direction (section A-A')



(b) R1000 - R100 direction (section B-B')

Fig. 12 Configuration of deformed blank in sectional flexible forming process

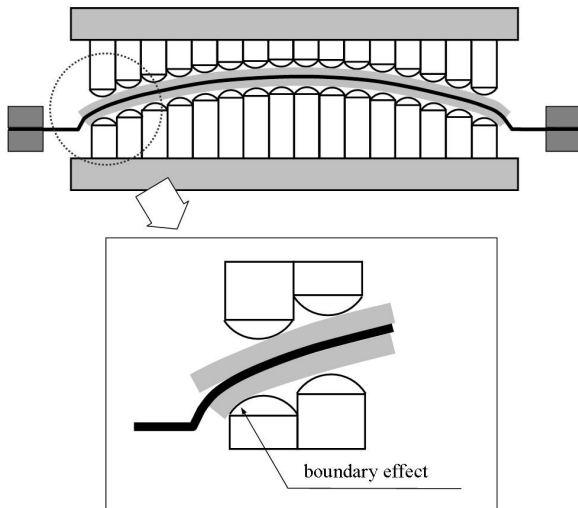


Fig. 13 Forming error zone in flexible forming process due to boundary effect

라도 국부적인 필렛을 갖는 형상을 성형하는데 어려움이 있음을 의미한다.

또한 판재의 가장자리에서는 목적형상과 약간의 오차를 나타내는데 이는 Fig. 13에 도시한 바와 같이 블랭크 홀더를 사용하는 박판용 가변성형 공정의 불가피한 특성인 경계효과(boundary effect)에 의한 것으로

보인다. 이처럼 박판용 가변성형공정 의 경우 적지 않은 오차 요인을 가지고 있으나, 자동차 외장재의 초기 설계 등과 같이 오차 허용 범위가 비교적 큰 판재성형 분야에 있어서는 높은 유연성을 갖는 분할가변성형공정의 활용이 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 박판용 가변성형공정의 유연성을 확대하기 위하여 동일한 펀치 배열로 구성된 펀치블록을 펀치 크기 별로 조합하여 일체형 금형 대신 사용할 수 있는 분할가변금형을 이용한 성형공정에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 분할가변금형은 후판용 가변성형공정에서 적용 가능한 대형 곡판의 분할성형공정을 응용한 것으로서 단일 크기의 성형 펀치를 이용하는 박판용 가변성형장치의 유연성을 향상시킬 수 있다.

분할가변성형공정의 적용 가능성 검증을 위하여 해석을 기반으로 한 복합 다중 곡률을 갖는 곡면의 성형공정에 대한 연구를 수행하였으며 목적곡면의 곡률분포에 따라 구획을 나누어 두 가지 크기의 펀치 블록을 이용한 분할가변금형 모델을 제시하였다. 펀치의 높이 조절을 위하여 순차적 펀치 위치 제어 모듈을 소개하였으며 제안된 제어 모듈은 단일 크기의 펀치로 구성된 가변금형과 정수배 크기의 펀치 블록의 조합으로 구성된 분할가변금형의 높이 조절에 동시에 적용이 가능한 구조를 가지고 있다.

다중 복합 곡률을 갖는 목적곡면에 대한 분할가변성형공정해석 결과로부터 박판용 가변성형에서 발생 가능성이 높은 주름과 압흔이 형성되지 않았으며 필렛을 부여하여 국부적으로 작은 곡률 반경을 갖는 부위를 제외한 대부분의 영역에서 목적곡면에 준하는 매끄러운 곡면을 형성함을 확인하였다. 필렛을 부여한 부위에서는 비교적 급격한 변화를 갖는 형상 특성 때문에 성형하중의 집중이 발생하였으며, 이로 인하여 성형면을 고르게 형성시키는 기능을 하는 탄성패드가 과도하게 압축되어 성형면의 오차를 발생시키는 요인으로 작용하였다. 이러한 성형오차는 블랭크 홀더를 사용하는 박판용 가변성형공정의 경계효과, 후판 성형공정의 직선효과 등과 같이 불가피한 성형오차로 판단된다. 그러나 가변성형공정의 큰 특징 중의 하나인 성형면 구현의 유연성으로 인하여 자동차 외장재 개발 단계에서 소요되는 초기 금형 개발에 적용하게 될 경우 금형 가공비 및 시간을 크게 절감할 수 있으리라 기대된다. 뿐만 아니라 향후 가변

성형공정이 자동차 산업에 활용될 경우 다변화되고 있는 자동차 소비자의 차체 디자인에 대한 요구를 충족시킬 수 있는 주문형 자동차 제작 등에도 이용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2008 년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-0200 2-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Pasch, K. A., 1981, "Design of a Discrete die Surface for Sheet Metal Forming," S.B. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- (2) Li, M. Z., Liu, Y. H., Su, S. Z. and Li, G. Q., 1999, "Multi-Point Forming: a Flexible Manufacturing Method for a 3-d Surface Sheet," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 87, Issues 1-3, pp. 277~280.
- (3) Wang, Z. R., and Yuan, S. J., 2006, "New Forming Technologies Used in Manufacturing Large Vessels," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 1180~1187.
- (4) Li, M. Z., Cai, Z. Y., Sui, Z. and Yan, Q. G., 2002, "Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 129, pp. 333~338.
- (5) Zhang, Q., Dean, T. A. and Wang, Z. R., 2006, "Numerical Simulation of Deformation in Multi-Point Sandwich Forming," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 699~707.
- (6) Li, M. Z., Cai, Z. Y. and Liu, C. G., 2007, "Flexible Manufacturing of Sheet Metal Parts Based on Digitized-Die," *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, Vol. 23, pp. 107~115.
- (7) Sun, G., Li, M. Z., Yan, X. P. and Zhong, P. P., 2007, "Study of Blank-Holder Technology on Multi-Point Forming of Thin Sheet Metal," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 187-188, pp. 517~520.
- (8) Tan, F. X., Li, M. Z. and Cai, Z. Y., 2007, "Research on the Process of Multi-Point Forming for the Customized Titanium Alloy Cranial Prosthesis," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 187-188, pp. 453~457.
- (9) Heo, S. C., Seo, Y. H., Park, J. W., Ku, T. W., Kim, J. and Kang, B. S., 2008, "Numerical and Experimental Study on Plate Forming Process using Flexible Die," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 17, No.8, pp. 570~578.