

가변금형의 박판 성형공정 적용 연구

허성찬¹·서영호¹·구태완²·김정²·강범수[#]

Study on Application of Flexible Die to Sheet Metal Forming Process

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

(Received September 15, 2009 / Revised October 28, 2009 / Accepted October 30, 2009)

Abstract

Flexible forming process for sheet material using reconfigurable die is introduced based on numerical simulation. In general, this flexible forming process using the reconfigurable die has been utilized for manufacturing of curved thick plates used for hull structures, architectural structures and so on. In this study, numerical simulation of sheet metal forming process is carried out by using flexible dies model instead of conventional matched die set. The numerical simulation and experimental verification for sheet metal forming process using a flexible forming machine that is more suitable for thick plate forming process are carried out to confirm the appropriateness of the simulation process. As an elastic cushion, urethane pads are utilized using hyperelastic material model in the simulation for smoothing the forming surface which is discrete due to characteristics of the flexible die. In the flexible forming process for sheet metal, effect of a blank holder is also investigated according to blank holding methods. Formability in view of occurrence of dimples is compared with regard to the various punch sizes. Consequently, it is confirmed that the flexible forming for sheet material using urethane pad has enough capability and feasibility for manufacturing of smoothly curved surface instead of conventional die forming method.

Key Words : Flexible Die, Flexible Forming Process, Sheet Metal Forming, Urethane Pad, Finite Element Analysis

1. 서론

가변성형기술(flexible forming technology)은 Fig. 1과 같이 끝 부분에 부드러운 곡면을 가지는 다수의 성형펀치(forming punch) 배열을 이용하여 단일금형에 준하는 성형면(forming surface)을 구현하여 단일 금형 대신 이용함으로써 성형장치의 유연성을 극대화할 수 있는 기술이다[1~2]. 이와 같은 유연성으로 인하여 완만한 형상이 주를 이루는 조선 분야에서는 이를 응용한 선체 구조의 가공에 관한 연구가 일부 진행되고 있다. 이처럼 목적곡

면(objective surface)에 대하여 펀치를 적절히 배치함으로써 무수히 다양한 형태의 곡면 성형이 가능한 가변성형공정은 선체 구조물, 건축용 구조물 등과 같이 후판의 곡면 가공에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다[3~5]. 상기의 연구 분야는 주문 기반의 다품종 소량 생산에 의존적이다. 때문에 대부분 숙련된 전문가의 경험에 의존적이고 생산성과 재현성이 떨어지는 전통적인 가공방식을 벗어나지 못하고 있다[6~7]. 생산성과 제품의 품질 측면에서 볼 때 바람직하게는 금형을 이용한 가공 기술을 적용함으로써 이러한 문제 요인을

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

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

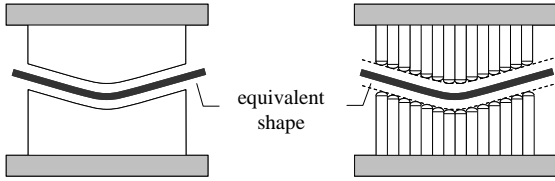


Fig. 1 Schematic diagram of flexible die equivalent to matched die

동시에 해결할 수 있으나, 해당 산업의 특성 상 이를 반영하는데 어려움이 있다. 이는 소요되는 제품이 대부분이 서로 다른 형상을 가지며 일반적으로 생산량 또한 소량이므로 이를 금형으로 가공하기에는 경제성이 현저히 떨어지는 등의 문제에서 기인한다[8~9].

이에 반하여 주로 박판을 많이 이용하는 자동차 산업과 같이 대량생산을 기반으로 하는 분야에서는 금형과 프레스를 이용한 성형 공정이 주를 이루고 있다. 특히, 자동차의 개발에 있어서 차체 형상 설계 단계에서는 초기 원형(prototype) 가공을 위하여 초도 금형을 제작하고 이를 수정하는 과정을 거치고 있다. 그러나 이와 같은 과정에서 불필요한 금형 가공으로 인한 비용과 매번 미미한 수정을 위하여 금형을 재가공하는데 적지 않은 시간이 소요된다. 따라서, 실시간으로 금형 형상의 조절이 용이한 성형장치로서 높은 유연성을 가지고 있는 가변금형을 이용한 박판의 곡면 성형 공정에 대한 적용 가능성을 고려해볼 수 있다.

이에 본 연구에서는 가변성형 공정을 박판의 성형 공정 적용하기 위하여 블랭크 홀더를 이용한 박판용 가변성형 공정에 대한 기반 연구를 수행하였다. 이를 위하여 박판용 성형 공정 연구에 앞서 실험을 통한 해석 결과 검증이 가능한 가변성형 장치를 활용하여 박판의 성형 형상을 비교하였으며, 해석 절차 및 조건의 적합성을 확인하였다. 이후 해석을 기반으로 한 박판용 가변성형 공정에 대한 연구를 수행하였다. 박판의 가변성형 공정에서는 펀치로 구성된 성형면을 부드럽게 구현하기 위하여 탄성 패드를 삽입하였으며, 펀치의 크기에 따른 성형성을 제품의 곡률에 준하여 비교하였다.

2. 가변금형의 펀치 위치 산출

가변성형 공정에서 펀치의 위치에 대한 예측은 단일 금형에 준하는 성형면을 형성함에 있어 가

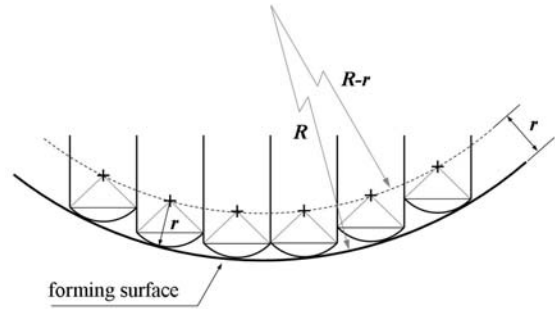


Fig. 2 Geometrical relationship between center of punches and offset surface

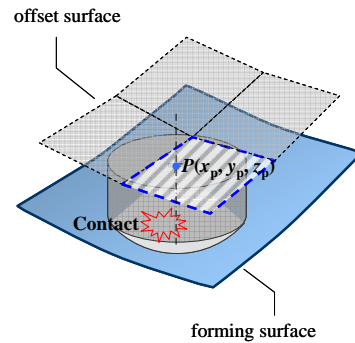


Fig. 3 A patch in which center of a punch is aligned under contacting with forming surface

장 중요한 요소이다. 일반적으로 펀치의 끝 형상은 균일한 곡률 반경(r)을 갖는 부분적 구면을 이용하며 이는 목적곡면에 대한 펀치의 위치 산출을 용이하도록 한다. Fig. 2는 구면으로 이루어진 펀치(펀치 끝 곡률 반경, r) 배열이 임의의 곡률 반경(R)을 갖는 곡면에 접촉하였을 때 기하학적인 관계를 도식한 것이다. 이 경우 펀치의 곡률 중심은 성형면으로부터 펀치 끝 반경(r)만큼 오프셋시킨 곡률 반경($R-r$)을 갖는 가상의 면 상에 존재하게 된다. 그렇게 되면 펀치 끝 곡면과 목적곡면 간의 접촉 문제가 펀치의 곡률 중심점과 오프셋된 가상의 곡면 간의 문제로 단순화될 수 있다. 아울러, 일반적으로 가변성형 공정에 적용되는 곡면은 비교적 완만한 곡면으로 이루어져 있으므로 오프셋된 가상면을 유한 개의 사각형 패치 요소(rectangular patch element)로 이산화하여도 곡면의 형상을 표현한다고 볼 수 있다. 따라서 Fig. 3에 도식한 바와 같이 이산화된 가상의 오프셋 곡면에 속한 특정 패치 상에 펀치 중심점이 존재하는

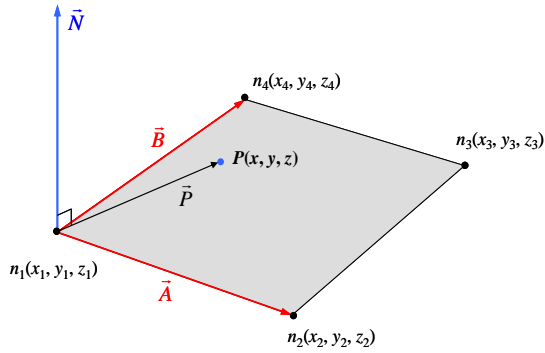


Fig. 4 Calculation of punch height using discretized rectangular patch element and relationship between arbitrary point and spatial plane

조건을 만족시키는 점의 위치로부터 펀치의 높이를 산출하게 된다. 그러면 Fig. 4 와 같이 펀치의 중심이 존재하는 패치를 추출하여 패치를 구성하는 절점(node)의 좌표, $n_i(x_i, y_i, z_i)$, 와 평면 상의 임의의 점, $P(x, y, z)$, 과의 관계를 이용하여 해당 패치의 평면 방정식을 도출할 수 있다.

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

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. 임의의 펀치의 중심점에 해당하는 좌표, $P(x_p, y_p, z_p)$, 를 식 (1)에 대입하여 이를 만족시키는 조건 즉, 펀치의 중심이 패치 상에 존재하는 높이, z_p , 를 찾게 된다. 성형 장치의 펀치 배열이 이미 결정되어 있으므로 x_p 와 y_p 는 주어지는 값이고 따라서 미지수는 z_p 만 남게 된다. 이를 정리하면 식 (2)와 같은 펀치 위치 산출 식을 얻게 된다.

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

이와 같은 관계로부터 펀치 중심점의 위치를 산출하게 되면 펀치 끝이 목적곡면과 항상 접촉하는 조건을 만족하게 된다.



Fig. 5 Uniaxial compression test of urethane using material test machine

3. 탄성 패드 물성 시험

일반적으로 가변금형을 이용한 곡면 가공 시 펀치와의 접촉점에서 국부적으로 발생할 수 있는 압흔(dimple)을 방지하기 위하여 높은 강도를 갖는 탄성 패드를 삽입하여 성형한다[10]. 박판의 경우 펀치의 형상에 따라 크게 생성되는 형태의 압흔이 발생한다. 뿐만 아니라 불연속적인 펀치 배열이 성형 하중을 고르게 지지하지 못하므로 펀치 사이의 공극 부근에서부터 주름(wrinkling)이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 가변금형을 이용한 박판 성형공정에서 탄성 패드는 판재의 성형성 및 성형면의 형성에 있어서 매우 중요한 기능을 한다.

본 연구에서 가변금형에 의한 성형면을 고르게 하기 위하여 사용한 탄성 패드는 주로 압축력을 지지한다. 이에 본 연구에서는 Fig. 5 에 도시한 바와 같이 탄성 패드 소재로 사용된 우레탄의 압축 시험을 수행하고 이를 유한요소해석에 반영하였다. 압축시험 규격은 KS M 6518 을 참조하였으며 이용된 탄성 패드 시편은 일반적으로 산업용으로 많이 사용되는 Shore A 90 경도의 우레탄이며 직경 27.0mm, 두께 10.0mm 이었다. 참조한 규격에 따라 우레탄의 압축 시험은 시편 하나 당 2 회의 압축력을 먼저 부여하여 소재의 조직을 안정화시킨 후 3 회 짜 압축 실험의 데이터를 획득하였다. Fig. 6 은 우레탄의 압축 시험으로부터 획득한 응력-변형률 선도를 도시하고 있다.

유한요소해석에서는 일반적으로 우레탄과 같은 소재를 초탄성체 재료(hyperelastic material)로 정의하여 사용한다. 본 연구에서는 상기와 같이 우레탄 소재의 압축 시험을 수행하여 획득한 물성 데이터를 고려하고 이를 Mooney-Rivlin 모델로 정

의하여 식 (3)과 같은 에너지 함수를 이용하였다.

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

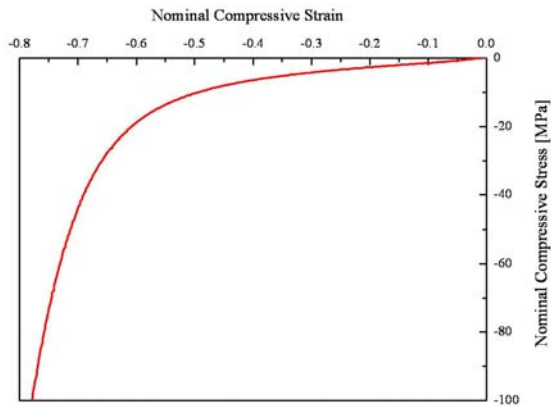


Fig. 6 Compressive stress-strain relationship of shore A 90 urethane

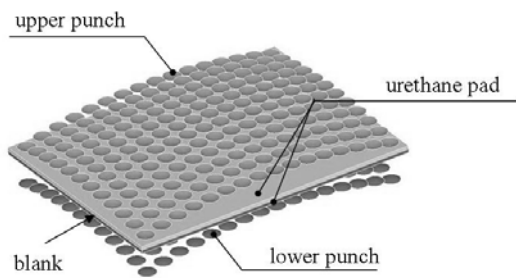


Fig. 7 Numerical simulation model of flexible forming process using thick plate forming machine model

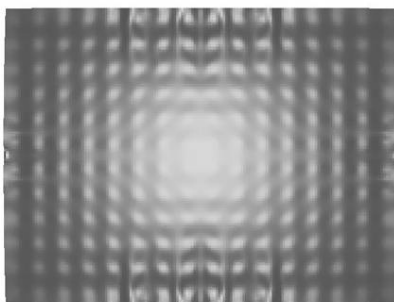


Fig. 8 Configuration of deformed result in numerical simulation for flexible forming process

4. 가변성형 장치를 이용한 프레스 성형

4.1 박판의 프레스 성형공정 해석

박판용 가변성형 공정에 대한 해석적 접근에 대한 적합성을 확보하기 위하여 성형시험이 가능한 가변성형 장치를 활용한 해석 및 실험을 수행하였다. Fig. 7에 도시한 바와 같이 해석에 적용된 후판용 성형장치는 펀치 끝 반경(r)이 50.0mm 인 구면 펀치가 상하부 금형에 각각 192 (16×12)개씩 배치되어 총 384 개의 펀치로 구성되어 800×600mm²의 성형면적을 갖는다. 성형곡률 반경은 1,500mm 이며 판재로는 DP590 의 물성을 적용하였다. 판재의 물성 모델로는 가공경화식($\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$)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 와 0.29 를 이용하였다. 두께가 1.0mm 인 판재를 800×600mm²의 크기로 모델링하였으며 셸 요소(shell element)를 이용하였다. 판재와 펀치 사이에는 솔리드 요소(solid element)로 구성된 두께 10.0mm 의 우레탄 패드 모델을 삽입하였으며 3장에서 수행한 물성 데이터를 이용하여 초탄성체로 정의하였다. 해석 모델의 간소화를 위하여 펀치를 변형이 없는 강체로 가정함으로써 우레탄과 접촉이 발생하는 펀치 끝 면만 고려하여 셸 요소로 모델링하였다. 아울러 펀치와 우레탄, 우레탄과 판재 사이에는 윤활조건으로부터 마찰이 거의 없다고 가정하고 마찰계수를 0.01로 두었으며 해석에는 LS-DYNA Solver를 이용하였다.

Fig. 8은 전술한 바와 같이 블랭크 홀더가 적용되지 않은 가변성형 공정을 박판의 구면 가공에 적용하여 해석한 결과 형상을 도시한 것이다. 박판의 가변성형에 있어서 블랭크 홀더가 적용되지 않은 경우 도시된 바와 같이 펀치의 형태가 판재의 전체 면에 돌출된 형태로 나타나는 압흔을 보이며 특히 가장자리에서는 큰 펀치로 구성된 가변금형의 넓은 공극 때문에 성형 하중이 고르게 분산되지 못하여 주름이 발생하게 될 것으로 예측되었다.

4.2 박판의 가변 프레스 성형 실험

박판의 가변성형해석에 대한 적합성 검토를 위하여 전술한 바와 같은 조건에 따라 성형 시험을 수행하였다. 이용된 성형장치는 2,000kN급 가변프레스 성형장치로서 강판의 곡면 가공이 가능한

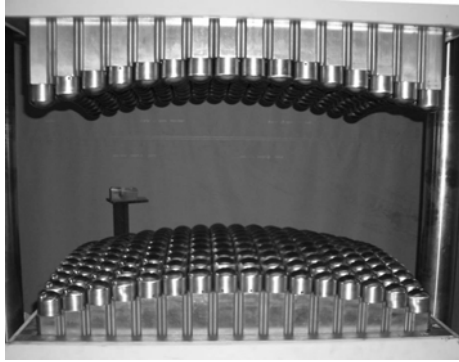


Fig. 9 Adjusted forming punches according to spherical shape(R 1,500)

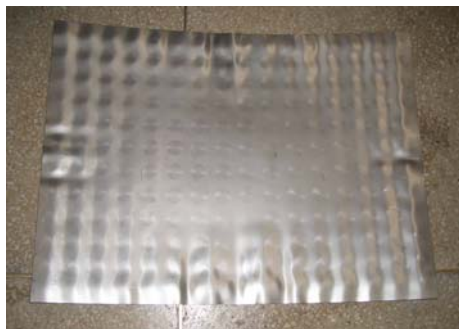
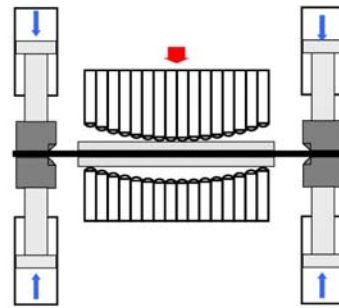


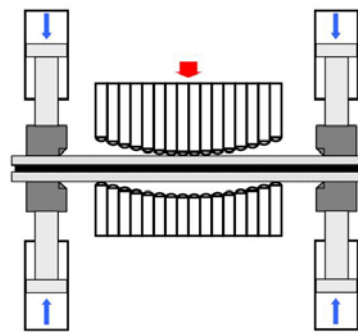
Fig.10 Configuration of deformed blank obtained from experiment using large flexible forming machine

장치이며 Fig. 9 는 목적형상인 곡률 반경(R)이 1,500mm 인 성형면을 형성한 모습을 도시하고 있다. 성형시험 으로부터 Fig. 10 과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 판재의 전면에서 유한요소해석과 유사한 압흔이 발생함을 확인하였다. 또한 가장자리에서 주름이 발생하는 경향이 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 판재의 주요 단면의 형상 비교가 더욱 적합하다고 판단되나 압흔과 주름이 전면에 분포되는, 목적형상에서 크게 벗어난 결과를 얻었으므로 전체적인 경향성만을 확인하였다.

이처럼 펀치의 크기가 큰 대형 가변성형 장치를 이용한 실험 및 해석 결과로부터 박판용 가변성형장치의 경우 펀치의 크기가 작아져야 하며 단순한 상·하부 금형을 이용한 성형공정 적용시 판재의 압흔과 주름의 발생이 불가피 할 것으로 판단되어, 블랭크 홀더를 고려한 박판용 가변성형공정에 대한 해석적 연구를 수행하였다.



(a) holding only blank



(b) holding blank and elastic pad together

Fig.11 Two kinds of blank holding methods in flexible forming process for sheet metal

5. 박판용 가변성형공정 설계

5.1 블랭크 홀딩 방식

일반적인 판재 성형 공정에 이용되는 블랭크 홀더는 판재를 고정시키고 금형 사이의 공극으로 소재의 유입을 적절히 조절하는 기능을 가지고 있다. 전술한 바와 같이 가변성형 공정에서는 불연속적인 펀치 배열로 구성된 점접촉 기반의 성형면을 부드러운 곡면으로 만들기 위하여 탄성 패드를 판재와 가변금형 사이에 삽입한다.

따라서 박판용 가변성형 공정에 블랭크 홀더를 적용할 경우 판재를 고정시키는 방식을 Fig. 11(a), (b)와 같이 크게 두 가지로 구분 지을 수 있다. Fig. 11(a)에 도시한 첫 번째 경우는 탄성 패드를 가변금형의 성형면을 대신하는 금형의 일부로 고려하여 일반적인 판재 성형 공정과 마찬가지로 판재만 고정하는 방식이며, 두 번째 는 Fig. 11(b)와 같이 가변금형 자체만을 금형으로 고려하고 탄성체 패드는 판재와 같이 변형이 되도록 하는

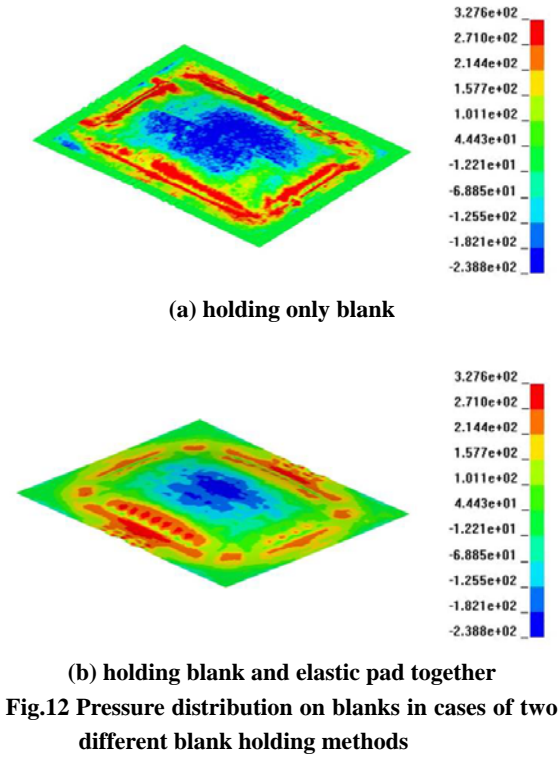
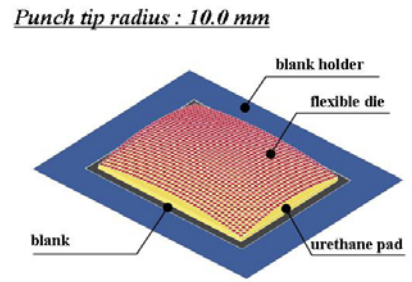


Fig.12 Pressure distribution on blanks in cases of two different blank holding methods

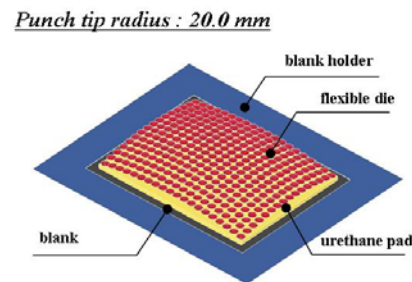
방식이다.

이에 가변금형에서 고려될 수 있는 두 가지 블랭크 홀딩 방식에 따른 영향성을 고려하기 위하여 각각의 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델은 성형 펀치의 끝 반경을 20.0mm 로 정의하였으며 상하부에 대하여 각각 150(15×10)개의 펀치를 배치하고 목적곡면의 성형곡률 반경을 1,000mm 로 두었다. 판재 및 우레탄 모델은 4 장에 서술한 물성을 그대로 이용하였다. 블랭크 홀더는 강체로 가정하고 판재 양면에 각각 접촉면만 고려하여 쉘 요소로 모델링하였다. 판재를 충분히 고정시키기 위하여 폭 100mm 로 두었으며 1kN 의 하중으로 고정하였다.

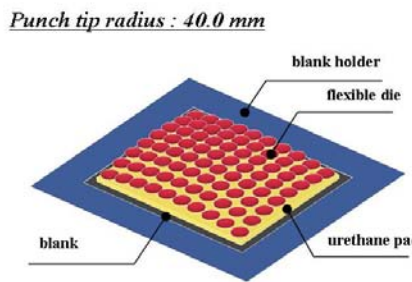
Fig. 12 (a), (b)는 각각의 경우에 대한 해석결과로부터 판재의 압력분포를 도시한 것이다. 판재만 고정시킨 Fig. 12(a)의 경우 블랭크 홀더 가장자리 부근에서 높은 압력 분포를 나타내고 있다. 이는 블랭크 홀더의 모서리에 의하여 국부적인 하중이 집중되기 때문이다. 이에 반하여 우레탄과 판재를 함께 고정시킨 Fig. 12(b)의 경우 가장 자리에서 비교적 고른 압력 분포를 나타내지만 우레탄 패드가 소재와 같이 연신되어 가변금형 펀치의



(a) punch tip radius, r_{10}



(b) punch tip radius, r_{20}



(c) punch tip radius, r_{40}

Fig.13 Numerical simulation models of flexible forming process for various punch sizes

Table 1 Determination of numerical simulation models according to various punch sizes

Variables	Punch tip radius (mm)	Array_column [M]	Array_row [N]	No. of punches [M×N]
Analysis Model	10	40	32	2,560
	20	20	16	640
	40	10	8	160

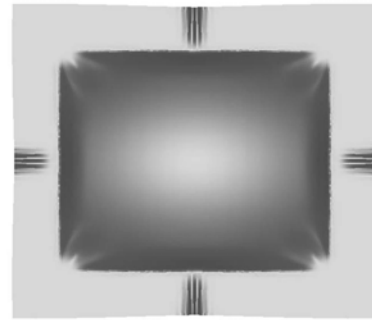
윤곽이 두드러지는 압흔이 발생하는 것으로 예상된다. 따라서 소재 유입부에서의 국부적인 변형 발생 가능성이 있더라도 우레탄 패드를 금형의 일부로 고려하여 판재만을 고정시키는 방식이 채택되어야 할 것으로 판단된다.

5.2 펀치 크기에 따른 성형성 비교

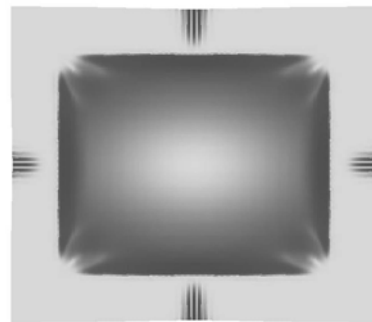
블랭크 홀더의 적용 방식에 대한 연구에 이어 박판용 성형장치에 적합한 펀치 크기를 도출하기 위하여 펀치 크기에 따른 성형성 비교 연구를 수행하였다. Fig. 13(a)~(c)는 각각 동일한 성형면적 $400 \times 320 \text{mm}^2$ 에 대하여 펀치의 반경 및 폭을 각각 10.0mm, 20.0mm, 40.0mm 로 두고 비교하기 위한 해석 모델을 도시한 것이며 각각의 경우에 따른 펀치 배열 수를 Table 1에 나타내었다. 여기서 성형면적은 각각의 펀치 크기에 대해서 정수로 나누어지도록 하기 위하여 펀치 크기에 대한 공배수를 고려하여 정의하였다.

해석 조건은 앞서 수행한 해석과 유사하게 부여되었다. 두께 1.0mm의 판재의 재료 모델로는 DP590 소재의 가공경화식을 이용하였고, 우레탄 패드 역시 경도 Shore A 90, 두께 10.0mm인 초탄성체로 정의하였으며 성형면의 곡률반경은 길이 방향으로 1,000mm, 폭 방향으로 600mm인 이중곡면으로 정의하였다. Fig. 14(a)~(c)는 각각의 펀치 크기에 대한 성형 후 판재의 형상을 도시한 것이다. Fig. 14(a)에 도시한 바와 같이 펀치 끝 반경이 10.0mm인 경우에는 가변금형과 우레탄 패드에 의하여 곡면이 매우 부드럽게 형성되어 판재에 압흔이 발생하지 않으며 펀치 끝 반경이 20.0mm인 Fig. 14(b)의 경우에도 부드러운 곡면이 성형되는 것으로 예측되었다. 이와 달리 펀치 반경이 40.0mm인 Fig. 14(c)의 경우 펀치 간의 공극이 너무 커서 이로 인하여 압흔이 판재의 전면에 발생함을 확인하였다. 또한 블랭크 홀더를 이용하여 판재를 고정시킴으로써 가변금형의 성형영역에서 주름은 발생하지 않았다.

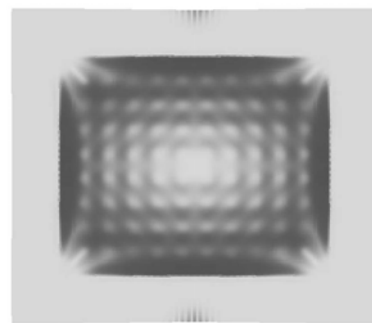
비교적 성형이 원활이 이루어진 두 가지 경우에 대한 성형 정확도를 조사하기 위하여 세 점의 좌표를 이용하여, Fig. 15에 도시한 바와 같은 길이 및 폭 방향의 곡률 반경(R_L 과 R_W)을 측정하였다. 펀치 끝 반경이 10.0mm인 경우 R_L 과 R_W 이 각각 1002.9mm와 601.7mm로 목적 곡률에 대하여 매우 근소한 차이를 나타냈으며 펀치 끝 반경이 20.0mm인 경우는 1006.5mm, 602.8mm로



(a) punch tip radius, $r10$



(b) punch tip radius, $r20$



(c) punch tip radius, $r40$

Fig.14 Configuration of deformed blank for various punch sizes in flexible forming process considering blank holder

각각 측정되었다. 비록 약간의 오차는 있으나 측정점의 값에 따라 곡률 반경이 민감하게 변화함을 고려하면 가변금형과 탄성체 패드를 이용한 박판용 성형공정이 적절하게 설계된 것으로 판단할 수 있다. 직관적으로 볼 때도 펀치의 크기가 작을수록 구현된 곡면이 더욱 매끄러울 것으로 예상할 수 있다. 그러나 가변금형은 임의의

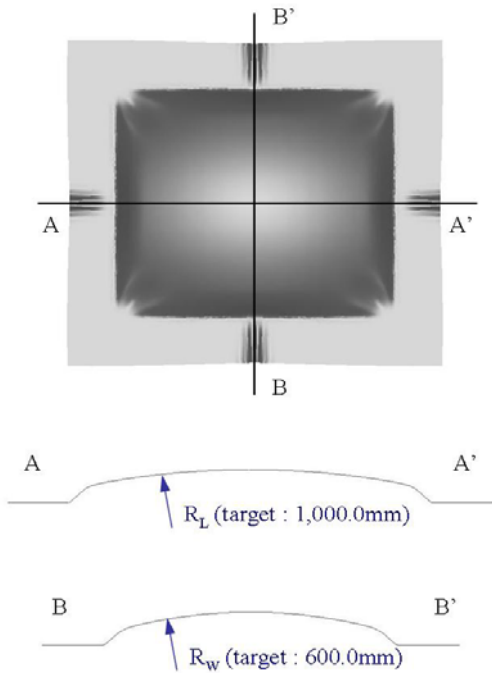


Fig.15 Investigation of curvature radii along two major cross sections and its target radii

목적곡면을 형성하기 위하여 모든 펀치가 적절한 높이로 조절되어야 하고 이를 기계적 장치로 구현하는데 적지 않은 비용이 소요된다. 또한 Table 1 과 같이 동일한 성형 면적에 대하여 펀치의 크기에 따라 사용된 펀치의 수를 살펴보면 펀치의 크기가 반으로 줄게 될 경우 펀치의 개수는 네 배로 늘어나게 되므로 펀치의 가공비용의 증가뿐만 아니라 모든 펀치에 조절 장치를 연결하지 않는 이상 높이 조절에 소요되는 시간 또한 크게 늘어나게 된다. 따라서 무한정 펀치의 크기를 줄일 수 없으며 이에 적절한 수준에서 펀치의 크기를 결정하여야 한다. 이에 본 연구에서 적용된 이중 곡면 형상에 대해서는 펀치 크기가 20.0mm 를 채택하고 우레탄 패드의 재질 및 두께를 달리함으로써 곡면을 부드럽게 형성할 수 있도록 하는 것이 적합한 설계 조건이 될 것이라 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 박판의 곡면 성형을 위한 가변 성형공정 개발 및 응용을 위하여 유한요소 해석 기반의 공정 설계 연구를 수행하였다. 해석적 연

구에 앞서 가변성형공정 해석의 적합성 검증을 위하여 블랭크 홀더가 적용되지 않은 성형장치를 이용한 실험과 해석을 병행하였으며, 이로부터 해석 조건의 적합성을 보였다. 또한, 실험으로부터 박판 성형 공정에서 블랭크 홀더가 필요할 것으로 예상되었으며 이를 반영하여 박판용 가변성형공정을 대략적으로 설계하였다.

일체형 금형이 아닌 가변금형을 이용할 경우 판재와 직접적인 접촉이 발생하는 탄성 패드를 금형의 일부로 고려해야 하는지 혹은 소재의 일부로 고려해야 하는지에 대한 문제를 해석을 통하여 조사하였다. 그 결과 판재의 압흔 발생 가능성 감소를 위하여 탄성체 패드는 불연속적인 가변금형의 곡면을 매끄럽게 하는 금형의 기능을 하는 금형의 일부로 고려하는 것이 적합함을 확인하였다.

아울러 펀치의 크기(펀치 끝 반경)에 따른 성형성을 비교하기 위하여 동일한 성형영역에 대하여 세 가지 펀치에 대한 비교 연구를 수행하였다. 해석결과로부터 가변금형의 특성상 펀치의 크기가 작을수록 성형면의 품질 향상에 유리하나 펀치의 제작비용 및 제어 메커니즘 등 실제 장치로 구현함에 어려움이 있으므로 펀치 크기를 20.0mm 전후로 선정하고 우레탄 재질 및 두께를 적절히 선정함으로써 성형면을 매끄럽게 보정하는 연구가 수반되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서 다루었던 가변성형기술은 시행착오에 의한 형상의 보정이 실시간으로 시행될 수 있는 유연성을 가지고 있어 박판을 이용한 자동차 외장재의 시행 착오를 통한 금형 설계 시 시제품 제작용 금형의 대체 등 다품종 소량 생산 기반의 판재 가공 분야에서 폭 넓게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 87, Issues 1-3, pp. 277~280.
- [3] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui Q. G. Yan, 2002, Multi-point Forming Technology for Sheet Metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 129, pp. 333~338.
- [4] Q. Zhang, T. A. Dean Z. R. Wang, 2006, Numerical Simulation of Deformation in Multi-point Sandwich Forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 699~707.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] H. C. Kuo, L. J. Wu, 2002, Automation of Heat Bending in Shipbuilding, *Comput. Ind.*, Vol. 48, Issue 2, pp. 127~142.
- [8] 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, *J. Soc. Naval Archit. Korea*, Vol. 36, No. 4, pp. 116~127.
- [9] Y. S. Ha, C. D. Jang, 2004, The Effectiveness of Weaving Motion and Determination of Optimal Heating Condition in Line-heating, *J. Soc. Naval Archit. Korea*, Vol. 41, No. 4, pp. 68~76.
- [10] M. Z. Li, Z. Y. Cai C. G. Liu, 2007, Flexible Manufacturing of Sheet Metal Parts based on Digitized-die, *Rob. Comput. Integr. Manuf.*, Vol. 23, pp. 107~115.