

가변성형 공정에서 탄성 패드의 영향에 관한 수치적 연구

허성찬* · 서영호* · 노학곤* · 구태완* · 강범수*†

* 부산대학교 항공우주공학과

Numerical Study on Effect of Using Elastic Pads in Flexible Forming Process

Seong Chan Heo*, Young Ho Seo*, Hak Gon Noh*, Tae Wan Ku* and Beom Soo Kang*†

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

(Received September 8, 2009 ; Revised March 16, 2010 ; Accepted March 19, 2010)

Key Words : Flexible Forming Process(가변성형공정), Sheet Metal Forming(박판성형), Elastic Pad(탄성 패드), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 가변성형공정에서는 형상 변형이 가능한 가변금형의 성형면을 고르게 형성하기 위하여 일반적으로 우레탄, 고무 등 같은 탄성체 패드를 가변금형과 소재 사이에 삽입하여 이용한다. 이에 본 연구에서는 이러한 탄성 패드가 성형성에 미치는 영향에 대한 조사를 위하여 탄성체의 경도 및 두께를 주요 변수로 고려한 수치해석적 연구를 수행하였다. 탄성패드 소재로는 우레탄을 이용하였으며, 이의 물성 획득을 위한 압축시험을 수행하였고, 초탄성체 재료 모델로 가정하여 가변성형공정해석에 적용하였다. 탄성체의 경도와 두께의 변화에 따른 해석 결과로부터 성형 정확도를 조사하기 위하여 주방향의 단면형상을 비교하였으며, 목적형상에 대한 오차를 비교하였다. 이로부터 가변성형공정에 이용되는 탄성 패드가 적절히 선정되어야 함을 확인하였으며, 패드의 경도 및 두께 선정에 대한 기준을 제안하였다.

Abstract: In general, materials that can be used to form elastic pads, such as urethane and rubber, are often used in flexible forming processes by inserting the pads between a blank and flexible die for smoothing the forming surface that is formed by a reconfigurable die. In this study, the effects of the elastic pad on formability in the flexible forming process for sheet metals are investigated by performing numerical simulations. In the simulation, the hyperelastic material model is used, where the urethane elastic pads serve as elastic cushions. Case studies are carried out for elastic materials with different hardness values and thicknesses. The results are used to evaluate formability by comparing the configuration of the deformed blank and its major cross-sectional profiles. It is verified that the elastic pad used in the flexible forming process for sheet materials should be hard and that its thickness should be chosen appropriately.

1. 서론

가변금형(flexible die)을 이용한 박판 성형 공정은 스트레치 성형(stretch forming) 공정과 블랭크 홀더 및 상·하부 금형을 이용한 프레스 성형 공정으로 구분지을 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 이 중 프레스 성형 공정에서는 Fig. 1 과 같이 가변금형을 일체형 금형 대신 상·하부에 배치시키고 주름 발생 방지를 위하여 블랭크 홀더를 이용한다. 이와 같은 박판용 가변성형기술은 끝 부분에 부드러운 곡면을 가지는 다수의 성형펀치(forming punch)를 배열시키고 단일 금형과 같은 성형면(forming surface)을 구현하도록 적절한 높이로 배치하여 단일 금형 대신

이용한다.^(4,5) 가변성형공정에서는 Fig. 1 에 도시한 바와 같이 펀치 배열로 구성된 불연속적인 가변금형의 성형면이 매끄러운 곡면을 형성하도록 하기 위하여 비교적 강도가 높은 탄성체를 판재와 가변금형 사이에 삽입하기도 하며,⁽⁶⁻⁸⁾ 일반적으로 탄성체로는 고강도 우레탄이 주로 이용되고 있다.⁽⁹⁾ 우레탄은 일반 고무 소재에 비하여 강도가 높아 변형 저항력이 크기 때문에 판재 성형 시 부여되는 큰 압축 하중에도 가변금형 펀치의 불연속적인 곡면 형상을 매끄럽게 유지할 수 있으며, 내열성·내마모성·내유성 등이 고무에 비하여 우수하여 산업용 자재로도 다양하게 이용되고 있다. 또한 복원력이 좋기 때문에 큰 하중에 의한 대변형 후에도 하중 제거 시 원형으로 복원되어 오랫동안 재사용이 가능하다.

† Corresponding Author, bskang@pusan.ac.kr

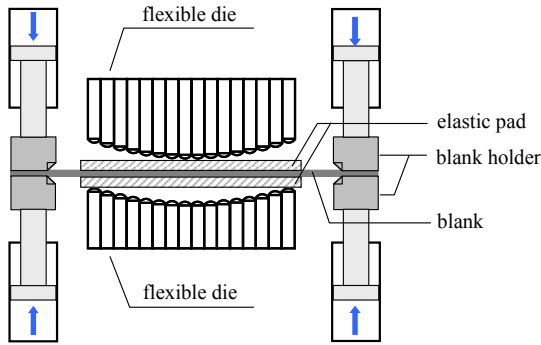


Fig. 1 Schematic diagram of flexible forming process for sheet metal using blank holder

가변성형공정에서 우레탄 패드는 소재와 직접 접촉하면서 성형면을 형성하는 금형과 유사한 기능을 하므로 우레탄의 물성 및 두께는 제품의 성형성에 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는 우레탄의 경도와 두께에 따른 성형성을 조사하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 우레탄 경도에 따른 물성을 유한요소해석에 반영하기 위하여 우레탄 소재의 압축시험을 수행하고 우레탄의 거동을 초탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한 우레탄 두께의 영향성을 평가하기 위하여 일반 산업용 소재로 많이 이용되는 경도의 우레탄을 두께별로 모델링하여 해석을 수행하였으며 상기 해석 결과를 이용하여 우레탄 경도와 두께에 따른 성형성을 비교하였다.

2. 펀치 위치 산출 기법

가변금형은 일체형 금형에 준하는 성형면을 형성하기 위하여 부드러운 곡면을 갖는 펀치를 다수 배열하여 각 펀치의 접촉점이 성형면을 형성하도록 하는 원리를 이용한 것이다. 따라서 펀치의 위치는 성형면에 대한 접촉을 고려하여 산출된다. 일반적으로 가변금형의 성형 펀치는 균일한 곡률 반경을 갖는 구면의 일부를 사용하며 따라서 펀치 위치를 손쉽게 산출할 수 있다.

이를 위해 Fig. 2 와 같이 임의의 곡률 반경(R)을 갖는 성형면에 곡률 반경(r)을 갖는 성형펀치가 접해 있는 조건을 고려하면, 펀치의 곡률 중심점이 성형면으로부터 r 만큼 오프셋 되어 곡률 반경($R-r$)인 가상의 면 상에 정렬됨을 알 수 있다. 그리고 오프셋 된 가상면을 유한 개의 사각형 패치 요소 (rectangular patch element)로 이산화시키고 Fig. 3 에 도시한 바와 같이 오프셋 곡면에 속한 특정 패치 위에 펀치 중심점이 존재하는 조건식을

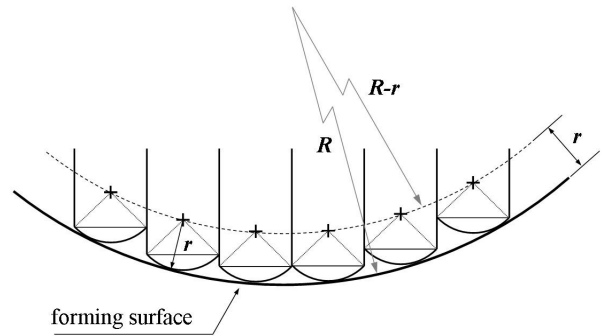


Fig. 2 Geometrical relationship between center of punches and offset surface

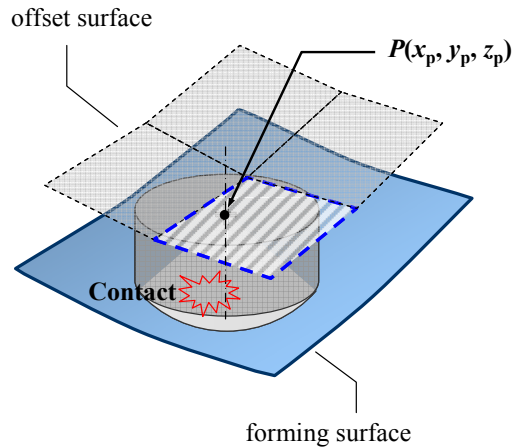


Fig. 3 A patch that center of a punch is aligned under contacting with forming surface

정의함으로써 펀치 위치를 산출하게 된다. 이는 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.

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

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. 여기에 Fig. 3 에 표기한 임의의 펀치의 중심점에 해당하는 좌표, $P(x_p, y_p, z_p)$, 를 식 (1)에 대입하여 펀치의 중심이 패치에 존재하는 높이(z_p)를 식 (2)와 같이 산출할 수 있다.

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

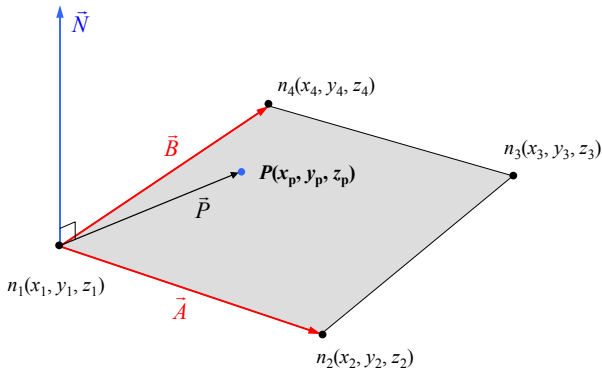


Fig. 4 Calculation of punch height using discretized rectangular patch element and relationship between arbitrary point and spatial plane

여기서, x_p 와 y_p 는 펀치의 배열에 의하여 결정되는 좌표이다. 본 연구에서는 펀치의 중심점이 존재하는 패치를 추출하고 식 (2)와 같은 관계식을 이용하여 목적곡면을 형성하는 각각의 펀치 위치를 산출하였다.

3. 탄성 패드 물성 시험

탄성 패드는 가변금형이 형성한 불연속적인 접촉점으로 구성된 성형면을 부드러운 곡면으로 형성하여 일체형 금형과 동일한 효과를 내도록 하기 위하여 가변금형과 판재 사이에 삽입된다. 따라서 성형 공정 중 탄성 패드는 높은 압축력을 받게 되고 이에 따른 압축변형이 지배적인 거동을 보인다. 이에 본 연구에서는 여러 가지 경도별 우레탄 소재의 물성을 유한요소해석에 반영하기 위한 압축 시험을 수행하였다.

우레탄 경도는 쇼어(shore) A 70, 80, 90, 95 의 네 가지로 구분하여 준비하였으며, 시험편은 KS M 6518 규격을 참조하여 준비하였다. 압축시험용 시험편은 규격에 따라 Fig. 5 에 도시한 바와 같이 직경 27.0mm, 두께 10.0mm 인 실린더 형태로 제작되었다. 우레탄의 압축 시험에는 동적재료시험기를 이용하였으며, Fig. 6 과 같이 상·하부의 평판 지그(jig)를 활용하였다. 평판 지그와 우레탄 소재 사이의 마찰에 의하여 압축 시 전단변형이 발생하는 것을 방지하기 위하여 오일을 이용하여 윤활처리를 하였다. 규격에 명시된 바에 따라 초탄성체의 압축 시험에서는 시편 하나 당 2 회의 압축력을 먼저 부여한 후 3 회째의 실험 데이터를 이용하였다. 경도별 우레탄의 압축시험으로부터 획득한 응력-변형률 선도를 Fig. 7 에 도시하였다. 시

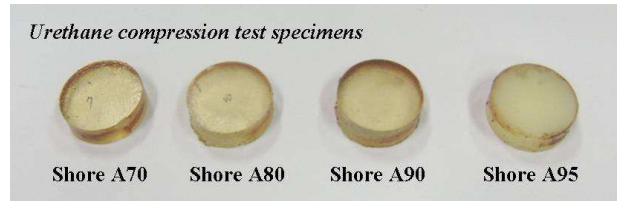


Fig. 5 Specimens for compression test of various hardness of urethane

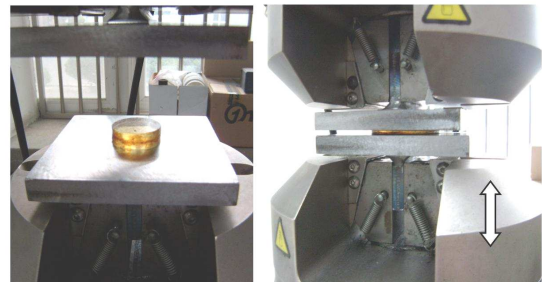


Fig. 6 Uniaxial compression test of urethane pad materials using material test machine

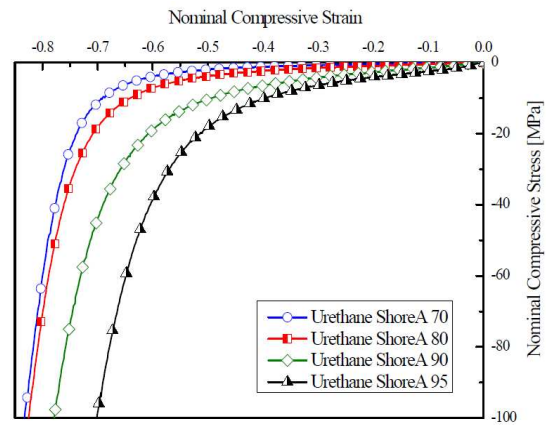


Fig. 7 Compressive stress-strain relationship of various urethane materials

험결과로부터 우레탄은 초기 압축 구간에서는 변형량에 대하여 선형으로 응력이 증가하며 압축량이 증가할수록 응력이 비선형적으로 급격히 증가하는 경향을 보인다. 또한 경도 70 에서 95 로 증가함에 따라 변형 저항력이 높아지며 경도가 낮을수록 압축량이 증가함을 확인하였다.

가변성형공정해석에는 우레탄 소재의 압축시험 결과를 이용하였으며 초탄성체(hyperelastic material)로 정의하여 사용하였다. 본 연구에서는 상기와 같이 우레탄 소재의 압축 시험을 수행하여 획득한 물성 데이터를 고려하고 이를 초탄성체 모델로 정의하여 가변성형해석을 수행하였다.

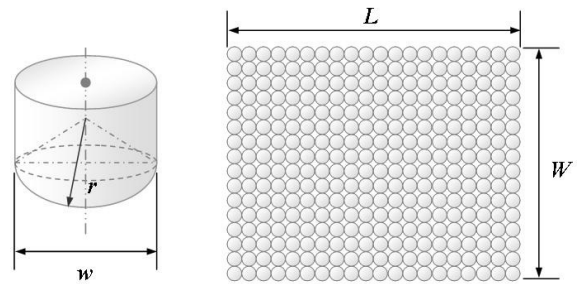
4. 탄성 패드에 의한 성형성 비교

4.1 가변성형공정 해석 모델링

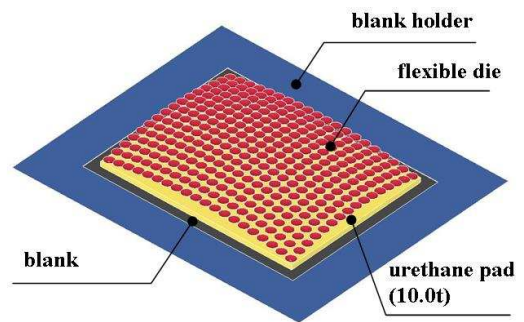
박판용 가변성형공정에 탄성 패드의 경도와 두께가 미치는 영향에 대한 조사를 위하여 우레탄 물성을 고려한 해석적 연구를 수행하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 8(a)에 도시한 바와 같이 해석에 적용된 가변금형은 펀치 끝 반경(r)과 폭(w)이 20.0mm 인 구면 펀치가 상·하부 금형에 각각 320(20×16)개씩 배치되어 총 640 개의 펀치로 구성되어 400×320mm²의 성형면적을 갖는다. 목적형상의 성형곡률 반경은 Fig. 8(b)와 같이 길이(L) 방향으로 1,000mm, 폭(W) 방향으로 600mm 인 이중 곡률을 갖는 곡면으로 정의하였다. 판재는 DP590 의 물성을 적용하였으며 물성 모델로는 가공경화식($\sigma = K\epsilon^n$)을 이용하였고 단축 인장 시험으로부터 소성강도 계수(K)와 가공경화지수(n)를 각각 999.9 MPa 과 0.155 와 같이 획득하였다. 아울러 탄성계수(E)와 프와송 비(ν)는 각각 210GPa 와 0.29 를 이용하였다. 두께가 1.0mm 인 판재는 블랭크 홀더를 적용하기 위하여 성형 면적보다 넓은 크기로 모델링하였으며 3 차원 쉘 요소(shell element)를 사용하였다. 우레탄 패드는 10.0mm 의 두께로 솔리드 요소(solid element)를 이용한 초탄성체로 구성하였고 해석 상에서 경도에 따른 물성을 달리 부여하였다. 펀치는 강체로 가정하여 접촉이 발생하는 펀치 끝 면만 고려하여 쉘 요소로 모델링하였다. 두께를 갖는 판재를 굽힐 경우 판재의 윗면과 아랫면의 곡률 반경은 서로 다르다. 따라서 탄성 패드의 두께에 따른 해석 모델은 각각 다른 곡률의 펀치 배열을 가지며, 가변금형 모델링 과정에서도 이를 반영하여 가변금형의 성형면에서 곡률 반경이 다른 해석 모델을 구성하였고 Fig. 8(c)는 탄성 패드의 두께가 20.0 mm 인 해석 모델의 예를 도시하고 있다. 끝으로 각 소재 간의 마찰이 거의 없다고 가정하고 마찰계수를 0.01 로 두었으며 해석에는 LS-DYNA Solver 를 이용하였다.

4.2 탄성 패드의 경도에 따른 성형오차

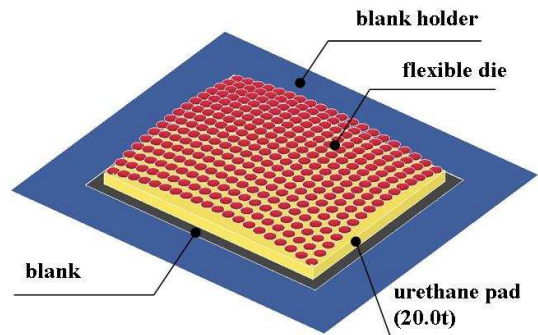
전술한 바와 같이 박판용 가변성형공정에서 탄성 패드의 경도가 미치는 영향을 조사하기 위하여 쇼어 A 경도 70, 80, 90, 95 인 네 가지 우레탄 소재의 물성을 고려한 성형해석을 수행하였으며 성형성 판단 기준으로서 목적형상과의 오차를 조사하였다. Fig. 9(a)~(d)는 각각의 경도에 따른 성형해석 결과를 도시한 것이다. 먼저 경도 70 우레탄을 적



(a) Flexible forming punch and punch array



(b) Simulation model of flexible forming process – pad thickness : 10.0mm



(c) Simulation model of flexible forming process – pad thickness : 20.0mm

Fig. 8 Configuration of punch and its array used in flexible forming analysis

용한 Fig. 9(a)의 경우 강도가 낮아 상하부 펀치의 배열 형태가 그대로 판재에 두드러지는 압흔이 성형 영역 전체에 드러나 매끄럽게 성형된 영역이 발견되지 않았다. 경도 80 인 우레탄의 경우 Fig. 9(b)에 도시한 바와 같이 경도 70 우레탄의 경우보다 상당히 매끄러운 곡면을 형성하나 펀치 사이의 공극을 따라 압흔과 주름이 열게 생성됨을 알 수 있다. 더군다나 길이 방향으로 판재의 가장자리에서 판재에 압흔이 생성된 것이 확인되었다. 이에 반하여 비교적 강도가 높은 경도 90, 95 우레

탄의 경우 Fig. 9(c), (d)와 같이 매끄러운 곡면을 잘 형성하였다.

각각의 탄성패드에 의한 성형오차 비교를 위하여 길이 방향의 단면을 Fig. 10 과 같이 비교하였다. 목적 형상과 비교하여 볼 때 경도 90, 95 우레탄을 이용한 경우 일체형 금형과 거의 유사한 성형면을 형성함을 알 수 있다. 이에 반해 경도 70 우레탄은 경도가 너무 낮아 자체 변형량이 커서 성형면을 제대로 형성하지 못하고 대부분 영역에서 큰 오차를 보인다. 경도 80 우레탄의 경우는 경도 70 의 경우에 비하여 성형오차가 적으나 블랭크 홀더에 의하여 고정된 관재가 연신되는 가장자리에서 높은 압축력을 받게 되어 우레탄 자체 변형에 의하여 목적 곡면을 완만하게 구현하지 못한 다. 이러한 형상오차에 대한 정량적인 비교를 위하여 식 (3)을 이용하였다.

$$Err = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - z_{ref})^2} \quad (3)$$

여기서, N 은 곡판의 단면에 위치한 절점(node)의 수, z_i 는 각 절점의 높이, z_{ref} 는 목적형상의 절점 좌

표이며, X-Y 방향의 변위 오차는 무시할 수 있는 수준으로 가정하였다.

식 (3)을 이용하여 경도 70, 80, 90, 95 인 우레탄 패드를 이용한 형상으로부터 형상오차를 산출한 결과를 Fig. 11 에 도시하였다. 결과로부터 경도가 높아질수록 오차가 크게 줄어드는 경향을 나타냄을 확인하였으며 쇼어 경도 90 인 우레탄을 이용할 경우 경도 80 이하의 패드를 이용할 경우에 비하여 오차가 큰 폭으로 작아짐을 볼 수 있다. 또한 경도 95 인 우레탄을 사용할 경우 가장 적은 오차 0.026 를 나타냄을 예측하였다.

4.3 탄성 패드의 경도에 따른 성형오차

박판의 성형을 위한 가변성형공정에서 탄성 패드의 두께가 미치는 영향을 조사하기 위하여 우레탄 패드 모델을 5.0mm, 10.0mm, 15.0mm, 20.0mm 두께로 각각 구분하고, 이를 이용한 성형해석을 수행하였다. 앞선 결과로부터 성형오차가 크게 완화되는 쇼어 A 90 경도의 우레탄을 이용하였다. 또한 우레탄 패드의 두께에 의한 곡률 반경의 차이를 고려하기 위하여 각각의 경우에 대하여 펀치 위치를 산출하였다. Fig. 12(a)~(d)는 각각의 두께에

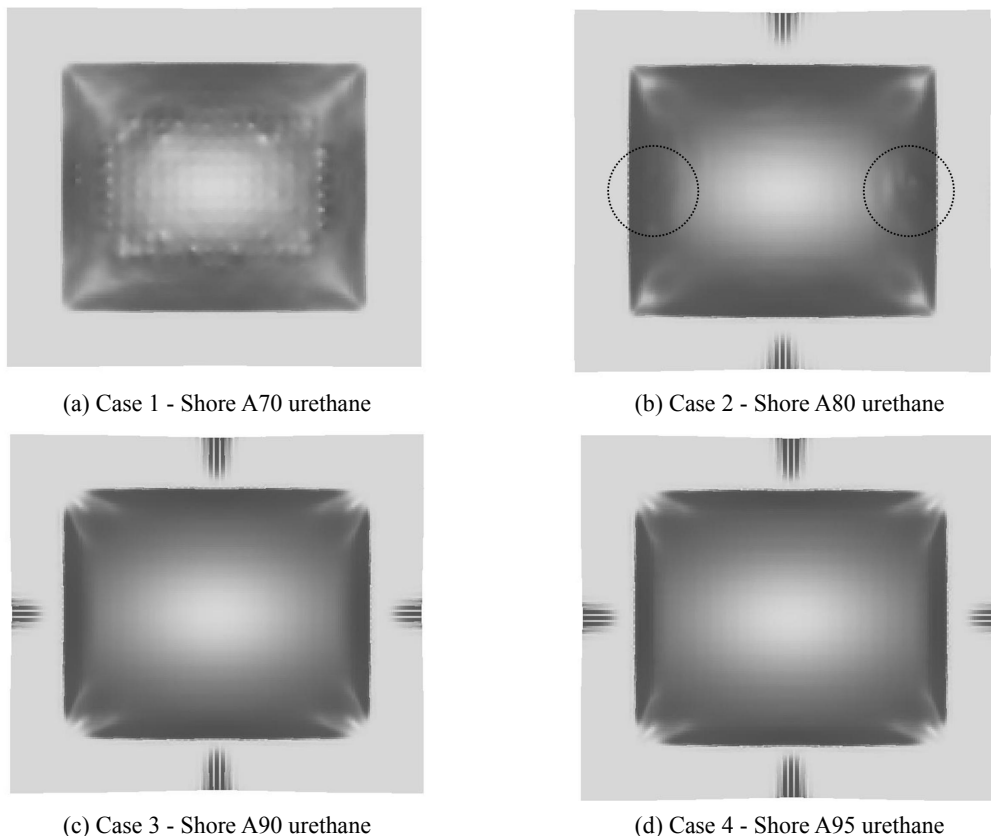


Fig. 9 Configuration of deformed blank for various hardness of urethane pad in flexible forming process

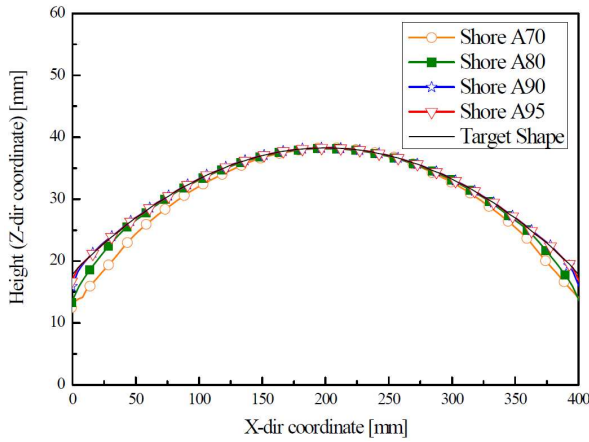


Fig. 10 Cross-sectional profiles along longitudinal direction for various profiles hardness of urethane pads adopted in flexible forming simulation

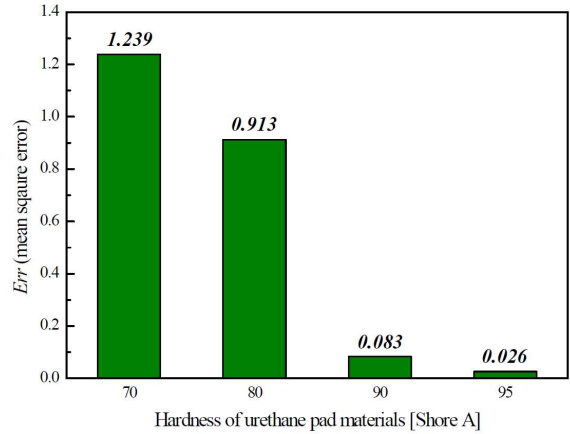
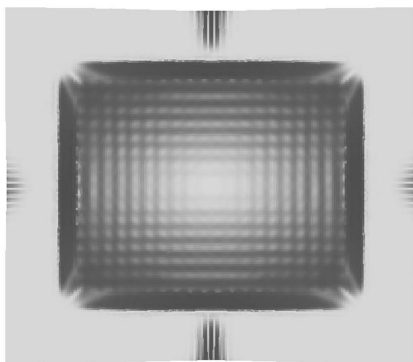
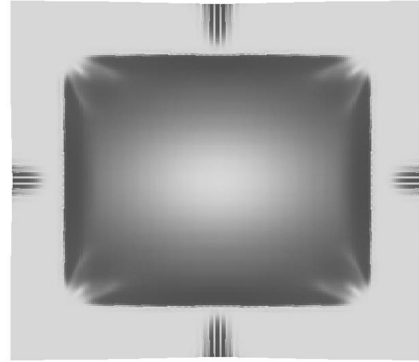


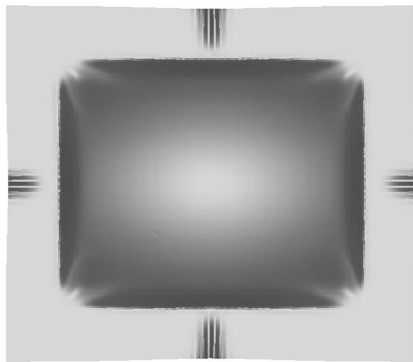
Fig. 11 Mean square errors in coordinates of product according to various hardness of urethane pad materials



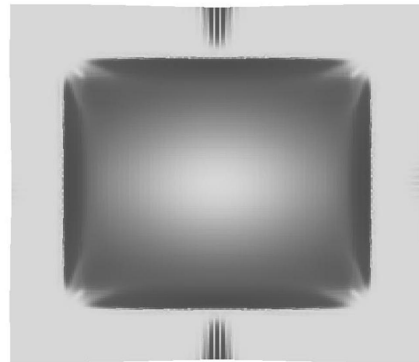
(a) Case 1 – Thickness : 5.0mm



(b) Case 2 – Thickness : 10.0mm



(c) Case 3 – Thickness : 15.0mm



(d) Case 4 – Thickness : 20.0mm

Fig. 12 Configuration of deformed blank for various thickness of urethane pad in flexible forming process

따른 해석 결과를 도기한 것이다. 두께 5.0mm의 패드를 이용한 Fig. 12(a)의 경우 얇은 패드가 가변 금형과의 접촉면에서 불연속적인 금형형상을 충분히 흡수하지 못하여 판재와의 접촉면에 펀치의 압흔이 펀치 배열 모양대로 형성됨 알 수 있다. 두께 10.0mm의 탄성 패드를 적용하였을 경우 Fig. 12(b)와 같이 미세하게 표면이 고르지 못한 경향

을 나타내나 15.0mm 이상의 두께를 갖는 탄성 패드 적용 시 Fig. 12(c), (d)와 같이 일체형 금형의 효과를 잘 나타내었다. 아울러 각각의 성형오차 비교를 위하여 Fig. 13과 같이 길이 방향 단면을 도시하였다. 두께 5.0mm의 패드를 이용한 경우 Fig. 12(a)와 같이 압흔이 발생하였으나 그 깊이가 비교적 얇아서 전체적인 형상에서는 다른 경우와

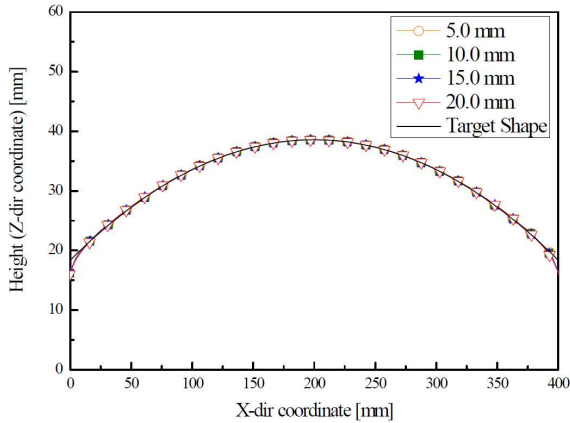


Fig. 13 Cross-sectional profiles along longitudinal direction for various thickness of urethane pads adopted in flexible forming simulation

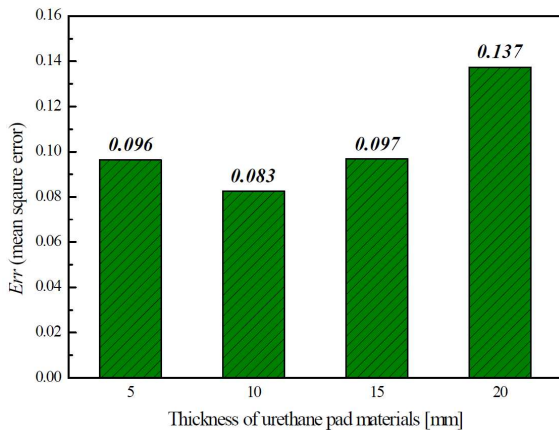


Fig. 14 Mean square errors in coordinates of product according to various thickness of urethane pad materials

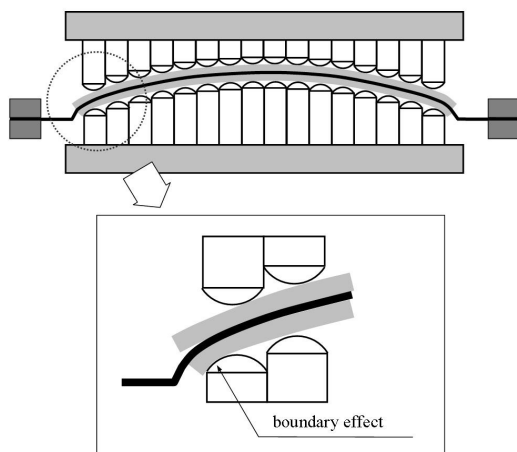


Fig. 15 Forming error zone in flexible forming process due to boundary effect

큰 차이를 보이지 않았으며 나머지 경우에는 목적 형상과 비교적 잘 일치하는 곡면을 잘 형성함을 알 수 있다. 정량적인 조사를 위하여 이 경우에도

마찬가지로 식 (3)을 이용하여 산출한 성형오차를 Fig. 14에 도시하였다. 두께 변화에 따른 성형오차는 경도의 변화에 따른 경향과는 달리 두께 10mm의 패드를 이용하는 조건에서 가장 적은 오차 값인 0.083이 예측되었다. 전술한 바와 같이 5mm의 패드에서는 불연속적인 가변금형의 형상을 보정할 만큼의 충분한 두께가 되지 않아 육안으로 확인이 가능한 압흔이 형성되는 것으로 확인되었으며, 두께가 두꺼워질 경우에는 탄성패드의 압축 변형량이 상대적으로 증가하면서 패드 자체의 변형에 의한 오차가 발생한 것으로 보인다.

이는 Fig. 15에 도시한 바와 같은 가변금형에서 불가피한 경계효과(boundary effect)에서도 추측할 수 있다. 도시한 바와 같이 가장자리 상·하부 펀치의 접촉점 바깥 영역에서는 블랭크 홀더에 의하여 판재가 굽은 방향으로 굽혀지게 되며 이 때 판재는 펀치를 감싸는 형태로 변형하게 된다. 이는 다수의 구면 펀치로만 구성된 불연속적인 성형면을 갖는 가변금형의 불가피한 특성에서 기인한 것이며 후판 성형에 있어서 직선효과(straight effect)와 유사한 성형 오차다.⁽⁸⁾

5. 결론

본 연구에서는 박판용 가변성형공정에서 탄성패드가 성형성에 미치는 영향을 조사하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 탄성 패드는 불연속적인 펀치 배열로 구성된 가변금형과 판재 사이에 삽입되어 부드러운 곡면을 형성하도록 하는 기능을 한다. 따라서 일체형 금형의 접촉면 역할을 하는 탄성패드의 경도 또는 두께에 따라 제품의 성형성이 좌우된다.

탄성 패드의 경도가 높아질수록 성형오차 정도가 향상되는 경향을 보인다. 쇼어 A 70, 80의 낮은 경도를 갖는 패드의 경우 펀치의 접촉점을 중심으로 변형된 탄성 패드의 접촉면에 의하여 전달되는 성형 하중을 고르게 분산시키지 못하여 판재에 압흔이 뚜렷하게 형성되었다. 그러나 쇼어 A90, 95의 비교적 높은 경도의 탄성 패드 적용 시 성형면이 고르게 형성되어 형상 오차가 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인하였다. 특히, 가변성형공정의 특성상 가장자리에서 불가피하게 나타나는 성형 오차가 낮은 경도에서 좀 더 넓게 분포됨을 확인하였다.

아울러 탄성 패드의 두께에 따른 영향성을 조사하였다. 경도 90인 탄성 패드에 대하여 두께에 의한 영향은 다소 적게 나타났으나 5.0mm의 경우

탄성패드가 가변금형의 불연속면을 부드럽게 할 수 있을 만큼의 두께 방향 변형이 부족하여 얇은 압흔이 성형면 전역에 분포하였다. 그러나 두께 10.0mm 이상의 탄성 패드에서는 압흔이 발생하지 않았으며 성형 후 단면 형상에 있어서도 동일한 형상을 나타냈다. 그러나 패드의 두께가 과도하게 두꺼운 경우 패드 자체의 변형에 의한 성형면 오차가 발생하여 오히려 성형오차가 증가하는 것을 확인하였다.

물론 목적형상에 따라 어느 정도 차이는 보일 수 있으나 본 연구 결과로부터 박판용 가변성형에 있어서 탄성 패드의 소재는 쇼어 A 90 이상의 높은 경도를 가져야 하며 적어도 10.0mm 내외의 두께를 갖도록 하여야 할 것으로 보인다. 끝으로 가변금형을 이용한 성형 공정에서는 가장자리에서 경계효과가 불가피하게 나타나는 성형 오차가 발생하므로 이를 고려한 펀치의 위치 산출 등이 수반되어야 할 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) 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.
- (2) 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.
- (3) Cai, Z. Y., Wang, S. H., Xu, X. D. and Li, M. Z., 2008, "Numerical Simulation for the Multi-Point Stretch Forming Process of Sheet Metal," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 209, No. 1, pp. 396~407.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Qian, Z. R., Li, M. Z. and Tan, F. X., 2007, "The Analyse on the Process of Multi-Point Forming for Dish Head," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 187-188, pp. 333~338.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Heo, S. C., Seo, Y. H., Ku, T. W., Kim, J. and Kang, B. S., 2009, "Study on Application of Flexible Die to Sheet Metal Forming Process," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 18, No.7, pp. 556~564.