

가변 스트레치 성형공정을 활용한 건축외피 구조물의 비정형 곡면 제작

박지우¹ · 김유범¹ · 김정¹ · 김광호² · 강범수[#]

Manufacture of Architectural Skin-structure with a Double Curved Surface Using Flexible Stretch Forming

J. W. Park, Y. B. Kim, J. Kim, K. H. Kim, B. S. Kang

(Received March 11, 2013 / Revised April 25, 2013 / Accepted May 3, 2013)

Abstract

Flexible stretch forming is an appropriate process for manufacturing of components for aerospace, shipbuilding and architecture structures. Flexible stretch forming has several advantages including that it could be applied to form various shapes such as ones with double curved surfaces. In this study, a systematic numerical simulation was conducted for forming double curved surfaces using flexible stretch forming. The desired surface had a saddle type configuration. It had two radii one of 2500mm and the other of 2000mm along its length and width. In the simulation, the decrease of elastic recovery due to the stretching was confirmed. Experiments were also conducted to confirm the viability of the process. By comparing the simulation to the experiment results, the suitability of flexible stretch forming for double curved surfaces was verified. From the results, the maximum error from desired surface was confirmed at about 1.3mm at the edge of the surface. Hence, it is confirmed that flexible stretch forming has the capability and feasibility to manufacture curved surfaces for architectural skin-structures of buildings.

Key Words : Flexible Stretch Forming, Double Curved Surface, Elastic Recovery, Architectural Skin-structure

1. 서론

프레스와 금형으로 구성된 프레스 성형(Press Forming)은 일반적으로 소성가공 분야에 폭넓게 활용되고 있다. 이러한 성형공정은 소품종 대량 생산에 최적화된 공정이다. 최근 급격히 발달하고 있는 항공 및 조선 산업은 다품종 소량생산을 기반으로 하고 있으며, 일반적인 프레스 성형은 이러한 산업에 적합하지 않다. 선박의 외장재 가공의 경우 선상가열법과 같은 수작업에 의존하고 있으며[1~2], 항공기 외피용 다중곡률 박판은 형상

에 따른 다수의 금형을 사용하여 생산단가가 높은 단점이 존재한다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 최근에는 다양한 곡률을 가지는 곡판들을 하나의 성형장치를 이용하여 성형하는 가변성형 기술이 각광 받고 있다. 이러한 가변성형기술은 다수의 펀치열을 사용한 각 펀치의 높이조절을 통해 다양한 곡률을 구현함으로써 수많은 형태의 곡판들을 가공할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 가변성형 공정은 다품종 소량생산체계에 알맞은 공정으로 최근의 경향에도 부합되는 성형공정법이다[3~7].

1. 항공우주공학과, 부산대학교

2. 연구소, ㈜스틸플라워

Corresponding Author: Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

한편, 건축산업에 있어서도 합리적이고 기능적인 형태의 효율성을 추구하여 장식과 같은 미학적인 요소들을 철저히 배제한 모더니즘에 반발하여 감성과 개성을 중시 여기는 포스트-모더니즘이 발달함에 따라, 종전 보다 감성적이고 정형을 벗어난 비정형 형상의 건축물이 나타나는 경향을 보이고 있다[8~9]. 최근 서울에 건설된 ‘동대문 디자인 플라자’와 부산의 ‘영화의 전당’ 등이 대표적인 비정형 형상 건축물이다. 이러한 비정형 건축물들은 다양한 곡률의 평판, 1 차 곡판 및 2 차 곡판으로 이루어져 있으며, 이러한 곡면들을 조합하여 비정형 형상의 외피를 형성하게 된다. 이러한 건축산업에도 가변성형기술을 접목시켜 하나의 가변금형으로 다양한 형상의 곡판을 성형할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 박판 성형시 탄성회복을 최소화하기 위한 스트레치 성형공정과 하나의 금형으로 다양한 형상의 곡면을 성형할 수 있는 가변성형 공정을 복합적으로 활용한 가변스트레치 성형 공정을 이용하였다. 스트레치 공정의 효과를 알아보기 위해 스트레치 유무에 따른 탄성회복 정도를 비교하였으며, 하나의 곡면에 2 개의 곡률을 가지는 2 차곡면판 성형공정을 수행하고, 실제 가변성형장치를 이용하여 동일한 곡률을 가지는 곡면의 실험을 수행하여 비교하였다. 또한, 보다 정확한 연구를 위하여 곡면의 중심점을 기준으로 하여 길이방향과 두께 방향의 곡률좌표를 추출하여 정확한 곡률형상을 비교 및 확인하였다.

2. 펀치 위치 산출

가변 성형 기술은 다수의 펀치열을 사용하여 각각의 펀치 높이가 변화에 의하여 다양한 곡률이 구현되므로 펀치 위치 산출은 가장 중요한 공정 중 하나이다. 펀치 위치는 성형할 판재의 성형성에 매우 중대한 영향을 미치므로 목적 곡면에 보다 정확히 부합되는 금형을 만들어 주어야 한다.

펀치 위치 산출 방법은 다음과 같다. 펀치가 임의의 형상을 가지는 곡률면(R)과 만나게 될 때, 그 곡률 면으로부터 펀치의 곡률반경(r)만큼 오프셋(Offset) 시킨 거리(R-r)만큼 떨어진 위치에 펀치 중심점들이 존재하게 된다. 이에 대한 개략도는 Fig. 1 에 나타나있다. 여기서 성형면의 균일성을 위하여 우레탄 패드(Urethane Pad)를 사용할 경우, 그 우레탄 패드의 두께만큼의 거리를 더하여 오

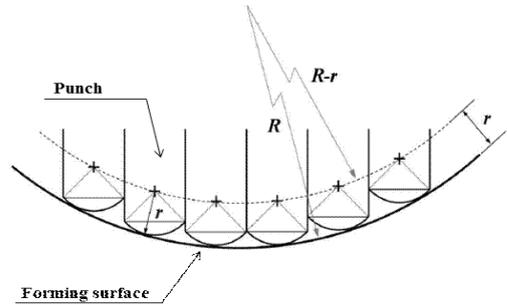


Fig. 1 Geometrical relationship between center of punches and offset surface

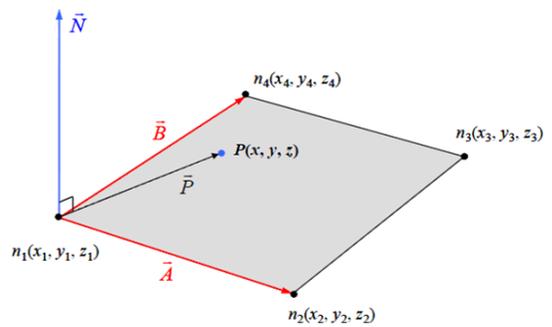


Fig. 2 Relationship between center of punch and element

프셋 하여야 한다.

이렇게 오프셋 하여 만들어진 임의의 곡면을 사각형 요소로 이산화시킨 후 이중 펀치의 중심점(P)이 존재하는 요소면을 추출하여 해당 면의 절점좌표 $n_i(x_i, y_i, z_i)$ 를 이용하여 평면 방정식을 도출할 수 있다. Fig. 2 는 이산화 시킨 요소들 중 펀치의 중심점이 존재하는 한 요소를 나타낸 그림이다. 펀치 중심점의 x 좌표와 y 좌표는 정해진 값이기에 구해낸 평면 방정식을 이용하여 펀치 중심점의 높이를 계산 할 수 있다. 유도된 평면 방정식과 펀치높이 계산식은 아래와 같다.

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

$$z = \frac{-F(x-x_1)-G(y-y_1)+Hz_1}{H} \quad (2)$$

여기서, F, G, H는 다음과 같이 표현된다.

$$F = (y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1)$$

$$G = (x_4 - x_1)(z_2 - z_1) - (x_2 - x_1)(z_4 - z_1)$$

$$H = (x_2 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_2 - y_1)$$

3. 가변 스트레치 성형 공정의 유한요소해석

3.1 성형 해석 조건 및 해석 모델 구성

유한요소 해석을 위해 해석공정에 이용되는 재료의 물리적 특성을 구하기 위한 단축인장시험을 수행하였다. 사용한 소재는 4mm의 초기 두께를 가지는 알루미늄 합금 소재 Al 3003-H14이며, 이 소재는 탄성계수 68.9GPa, 포아송비 0.33, 밀도 2.73g/cc의 물성치(Material Property)를 가진다. 또한, 소재의 변형 거동은 인장 시험에서 획득한 데이터로부터 $\bar{\sigma} = 189.46\bar{\epsilon}^{0.10}$ 와 같은 n승 가공 경화 모델을 사용하였다. 수행한 단축인장시험을 통하여 초기판재(Initial Blank)에서의 유동응력곡선을 추출하여 Fig. 3에 도시하였다. 소재의 물성치는 Table 1에 정리하였으며, 마찰계수(Friction Coefficient)는 0.1로 가정하였다. 효율적인 해석수행을 위하여 1/4 모델링을 사용하였다. 본 연구의 가변 스트레치 성형에 관한 시뮬레이션을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS의 Dynamic Explicit FEM을 사용하였으며, 해석조건은 지그(Jig)부분에서 항복이 일어나는 변형량 이상의 인장이 가해지도록 하여 스트레치(Stretch)를 주었으며, 펀치이동량은 상하부 금형의 최대길이에서 초기판재의 두께와 우레탄 패드의 두께만큼을 빼준 거리를 계산하여 설정하였다.

3.2 유한 요소 모델

사용한 판재가 4mm의 두께를 가지기 때문에 탄성회복 효과를 최소화 하기 위하여 앞서 설명한 대로 스트레치 성형(Stretch Forming) 공정을 사용하였다. 스트레치 성형 공정은 양쪽에서 지그(Jig)가 잡아당긴 상태에서 하부금형(Lower Die) 없이 상부 펀치(Upper Punch)만 이용하여 성형을 하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에서 해석에 적용한 곡면이 2차 곡률을 가지기 때문에 상부 펀치만으로는 원활한 성형이 되지 않으므로 하부 금형도 같이 복합적으로 사용하였다. 해석에 사용한 가변성형장치는 20mm의 펀치 곡률 반경(r)을 가지는 펀치를 19×19의 배열로 배치하였으며, 총 722개의 펀치가 존재한다. 또한, 판재면의 성형성을 위하여 탄성패드를 펀치와 판재 사이에 넣어 주었으며, 탄성패드의 두께는 20mm로 가정하였다. 탄성패드는 Shore A90의 경도를 가지며, 1.30g/cc의 밀도를 가진다. 패드를 해석에 적용하기 위해 식 (3)의 Mooney-Rivlin 초탄성체(Hyperelastic Model)

모델을 사용하여 물성데이터를 고려하였다[5,10]. 목적곡면은 가로 세로 길이가 약 700mm이며, 곡률반경이 각각 길이 방향으로 2000mm, 폭방향으로 2500mm인 2차 곡면으로, 가장 다양하게 사용되는 안장(Saddle) 형태의 곡면이다. 초기 판재는 700mm×1400mm의 크기로 모델링 하였으며, 양 끝단의 지그에 해당하는 영역의 면적은 700mm×100mm으로 가정하였다. 성형영역은 700mm×700mm이며, 탄성패드는 성형영역을 모두 포함하는 700mm×750mm로 모델링 하였다.

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) \quad (3)$$

Table 1 Material properties of the Al 3003-H14

Material properties		Values
Young's modulus (GPa)		68.90
Poisson's ratio		0.33
Yield strength (MPa)		120.00
Ultimate strength (MPa)		161.00
Density (g/cc)		2.73
Flow stress curve ($\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$)	K (MPa)	189.46
	n	0.10

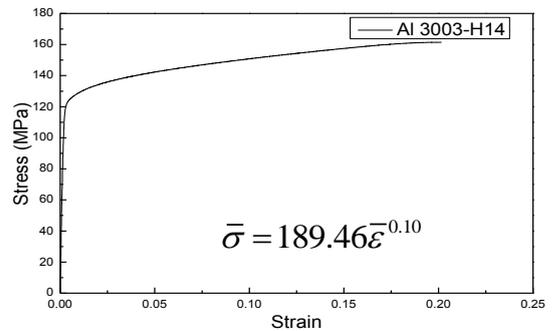


Fig. 3 Stress-Strain curve about Al 3003-H14

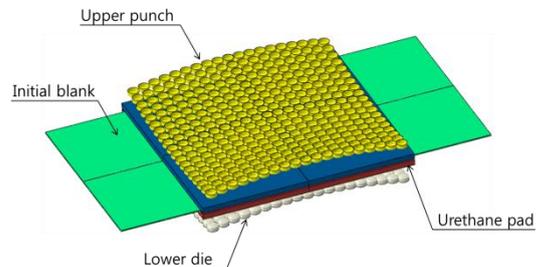
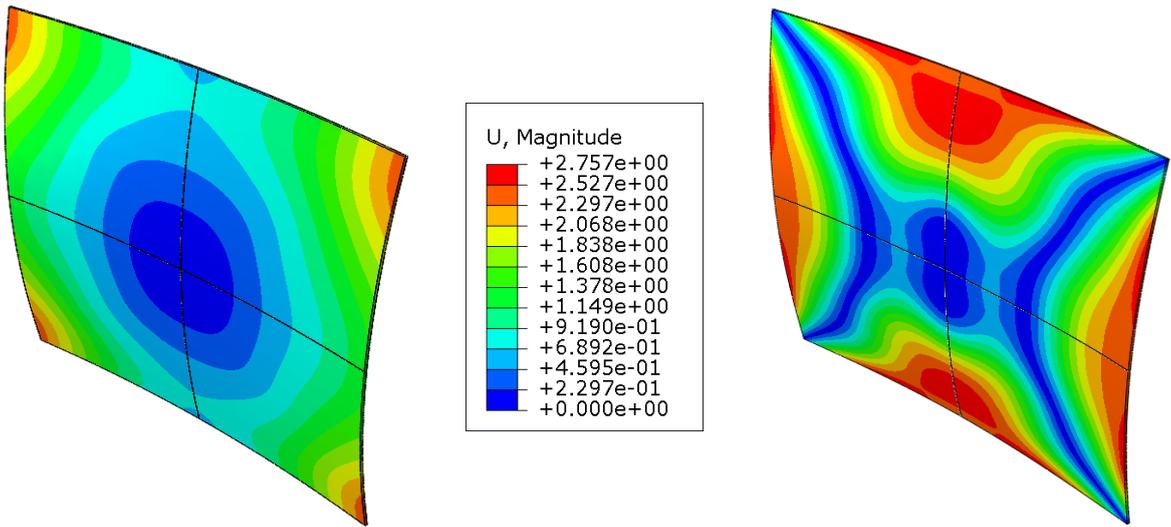


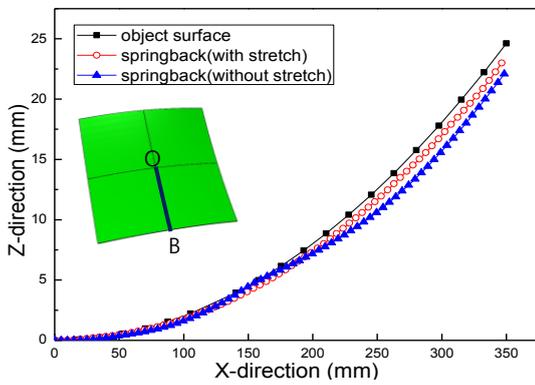
Fig. 4 Full model shape of simulation



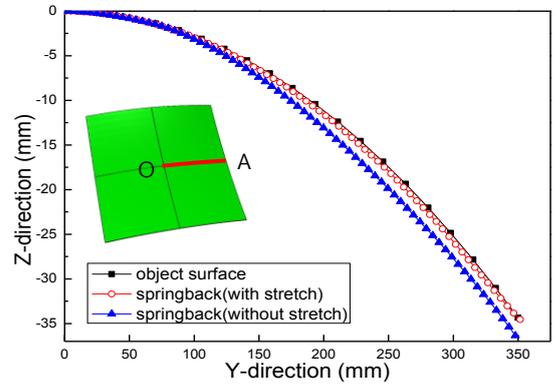
(a) With stretch forming process

(b) Without stretch forming process

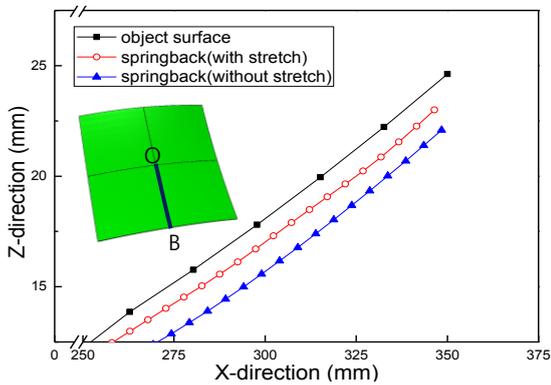
Fig. 5 Spatial displacement distribution after spring-back analysis



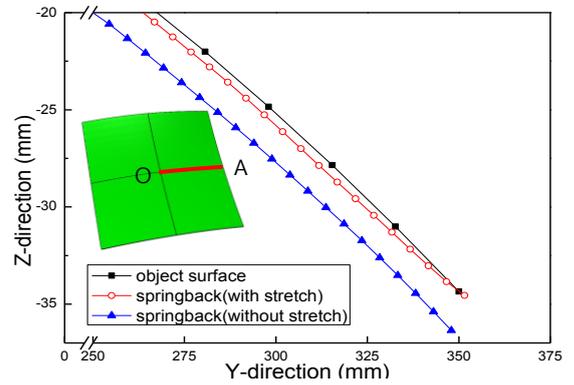
(a) Section O-B



(b) Section O-A



(c) Edge part of section O-B



(d) Edge part of section O-A

Fig. 6 Sectional profiles of object surface, simulation results (stretch forming process)

판재와 탄성패드는 각각 4mm, 20mm의 두께를 가지는 8절점 육면체 요소(Solid Element)로, 상하부 금형은 강체요소(Rigid Body)로 정의하였으며, 완성된 모델의 형상은 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 유한 요소 해석 결과

3.3.1 스트레치 성형 공정의 효과

본 연구에서는 가변 성형 공정에 스트레치 성형 공정을 접목시킨 가변 스트레치 성형 공정을 적용하였다. 이는 성형 후의 발생하는 탄성회복(Elastic Recovery) 효과를 최소화 시키기 위함이다. 스트레치의 유무에 따라 성형품의 탄성복원량을 해석적 기법을 통해서 확인하여 비교하였다. Fig. 5(a)는 스트레치 공정이 들어간 해석의 탄성복원량이고, (b)는 스트레치 공정 없이 순수 가변성형 공정만 수행한 해석의 탄성복원량이다. 비교를 위하여 동일한 범례값을 적용하였다. (a)의 경우 전체적으로 연속적인 분포를 보이고, 대부분의 영역에서 낮은 값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 반면 (b)의 경우 전체적으로 높은 변형량을 보이며, 가장자리 부분에서 최대 변형량을 나타낸다. 정확한 비교를 위해 곡면의 중심을 기준으로 하여 y축과 x축 방향의 단면을 O-A와 O-B로 설정하여 좌표를 측정하였다. Fig. 6은 측정된 좌표를 목적곡면의 단면과 비교하여 나타낸 그래프이다. (a)와 (b)의 경우 해당 단면의 전체적인 그래프를 도시하였다. 이 그래프를 통하여 중심을 기준으로 100mm 이내에서는 탄성회복이 크게 발생하지 않았으나, 100mm 이후 탄성회복이 나타나기 시작하였으며, 250mm 부분부터 확연하게 변형을 관찰할 수 있다. 최대변형을 확인하기 위하여 끝부분의 좌표를 확대하여 (c)와 (d)에 나타내었다. 이 그래프의 좌표를 통하여 스트레치 공정의 탄성복원량 감소효과를 확인할 수 있다.

3.3.2 가변스트레치성형 공정 해석

스트레치 공정의 유무에 따른 탄성회복량의 비교를 통해 스트레치 공정이 탄성복원감소에 효과적임을 확인하였다. 이를 가변성형공정에 적용한 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 먼저 Fig. 7(a), (b)에는 각각 응력 분포와 변형률분포를 나타내었다. 응력분포의 경우 판재의 거의 모든 영역에서 항복강도(Yield Strength)를 넘어서는 응력을 가지는 것을 확인하였다. 이는 Pre-tension을 주어 탄성회복을 적게 일으키는 스트레치 성

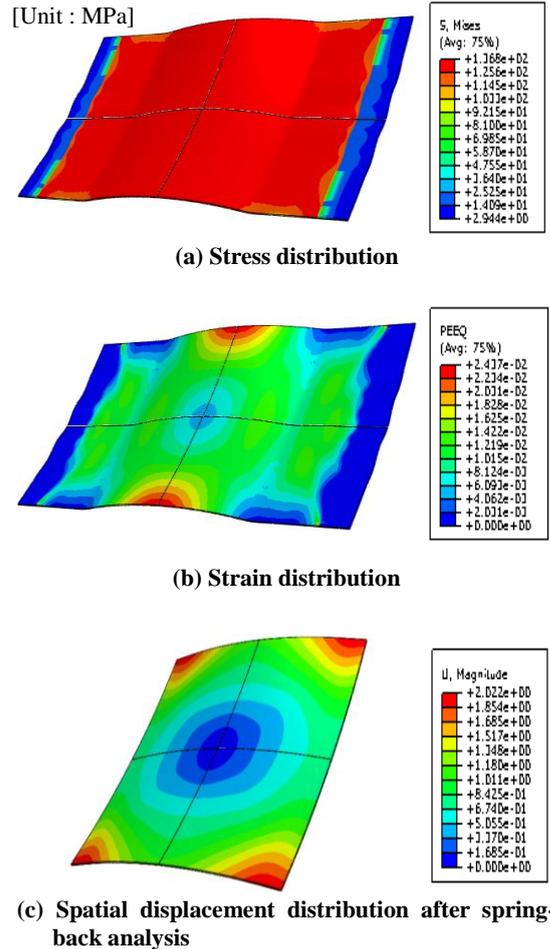


Fig. 7 Numerical simulation results

형공정의 효과라 예상할 수 있다. 최대 응력은 약 137MPa로 극한강도(Ultimate Strength)에 못 미치는 결과값으로 파단이 일어나지 않음을 예측할 수 있다. 변형률 분포는 x축 가장자리 부분에서 최대 약 0.024의 값을 가지며 평균적으로 약 0.015 정도로 나타났다. 또한, 실제 실험을 고려하여 탄성회복 공정(Spring-back Analysis)을 수행하여, 결과를 Fig. 7(c)에 도시하였다. 탄성회복 후 판재의 성형 영역의 최대변형량은 각 모서리 부분에서 약 2mm 정도로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 성형 후의 곡률을 비교하기 위해 판재의 중심점을 기준으로 x축 방향과 y축 방향의 단면좌표를 측정하였다. Fig. 8은 탄성회복 전과 후, 그리고 목적곡면(Object Surface)의 좌표를 비교한 그래프이다. x축 방향의 단면(O-B)은 탄성회복전 목적곡면

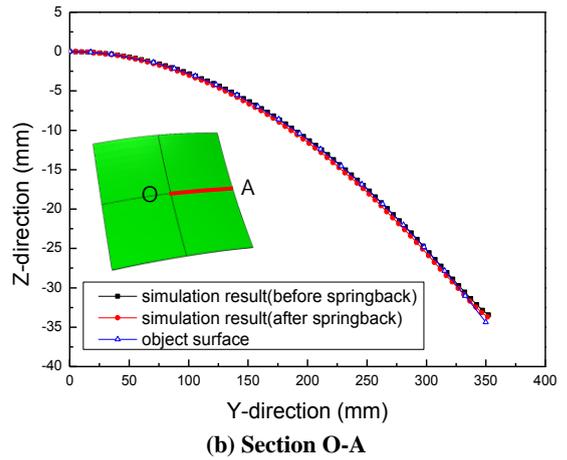
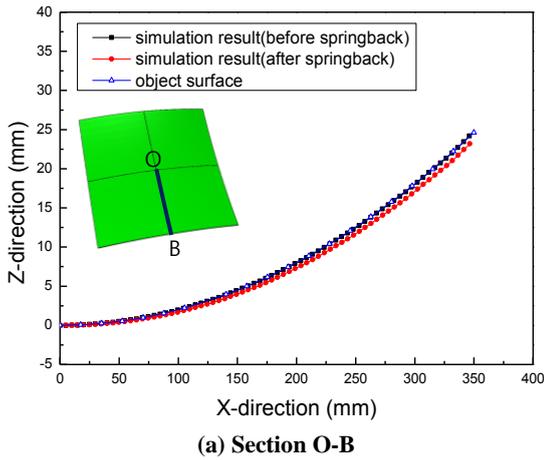


Fig. 8 Sectional profiles of object surface, simulation results

과 평균적으로 약 0.2mm이내의 오차를 나타내고, 탄성회복 공정 후의 경우에는 평균 1mm 정도의 오차를 보인다. y축 방향 단면(O-A)은 목적곡면과 맨 끝 지점에서 약 1mm 정도의 최대오차가 발생하며 그 외의 지점에서는 0.5mm이내의 오차를 나타낸다.

4. 가변스트레치 성형 실험 및 비교

Fig. 9 에 나타난 가변스트레치 성형장치를 이용하여 앞에서 수행한 해석과 동일한 형상인 안장 형태의 2차 곡면 성형 실험을 수행하였다. 실험조건은 해석을 토대로 적용하였으며, 해석과 마찬가지로 20mm의 곡률반경을 가지는 펀치를 사용하였고, 판재와 펀치 사이에는 해석에 사용한 것과 동일한 두께의 우레탄패드를 삽입하여 판재면의 성형성을 확보하였다. 가변성형기술에서 가장 중요한 요소인 펀치 높이는 곡률, 판재두께, 탄성패드의 두께를 모두 고려하여 산출하였다. 또한, 스트레치 공정을 수행하기 위해서는 성형영역보다 넓은 초기 판재가 필요하기 때문에 가변성형 후 목적곡면만을 따로 잘라내 주어야 한다. 이러한 목적곡면을 자르기 위해서 Fig. 10 과 같이 레이저 절단기(Laser Cutter)를 사용하여 목적곡면의 형상을 추적하여 절단하였다. 절단까지 완료한 가변스트레치 성형 실험의 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 우레탄 패드를 사용하였기 때문에 판재면에서 압흔(Dimple) 및 주름(Wrinkling)이 전혀 생기지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 해석 결과와의 비교를



Fig. 9 Flexible stretch forming apparatus

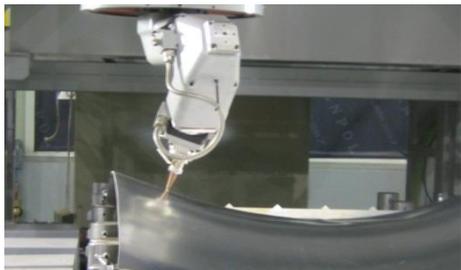


Fig.10 Laser cutting for object shape

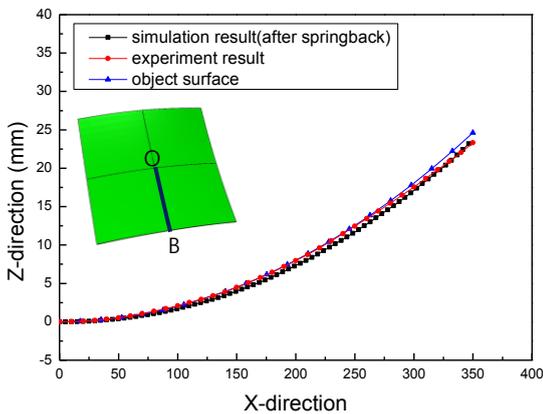


Fig.11 Curved sheet shape after experiment

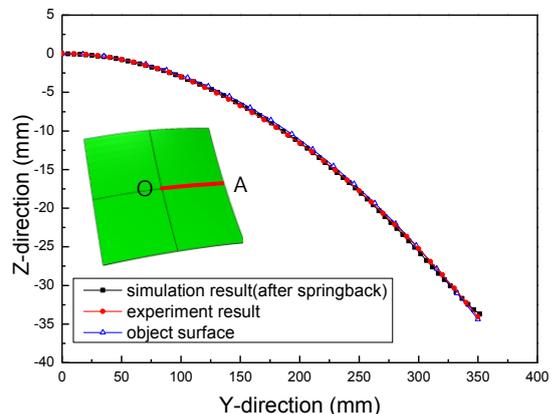
위하여 실험 결과는 3D scanner를 활용하여 형상을 측정하였다. 해석을 통해서 얻은 결과 형상과 실험결과 형상 모두 안장형태의 2차곡면으로 성형됨을 확인할 수 있다. 해석 결과를 토대로 추출한 O-A, O-B 단면의 좌표와의 비교를 위하여 실험 결과를 3D scanner로 측정하여 동일한 위치에 있는 좌표를 추출하였다. 실제 실험의 경우 필히 탄성회복이 발생하므로 탄성회복 전의 해석데이터와의 비교는 무의미하다고 판단하고 탄성회복 후의 해석데이터만을 비교하였다. Fig. 12 에 목적곡면과 탄성회복 후의 해석 결과, 그리고 실험 결과 좌표를 추출하여 도시하였다. Fig. 12 (a) 는 O-B 구간의 단면을 나타내고 있다. 해석 및 실험 결과 모두 탄성회복을 고려하였기 때문에 목적곡면과 비교해서 차이를 확인할 수 있다. 해석결과의 경우 100mm 지점에서부터 탄성복원이 일어나는 반면, 실험결과는 250mm 지점까지는 목적곡면과 거의 동일한 분포를 보이다 탄성복원이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 가장 큰 끝부분에서 해석과 실험 결과 모두 약 1.3mm의 높이 오차를 확인할 수 있다. Fig. 12 (b) 는 O-A구간의 단면을 나타내고 있다. O-A구간의 단면은 대부분의 구간에서 목적곡면과 동일한 분포를 보인다. 또한 끝부분에서의 0.6mm 이내의 오차를 확인할 수 있는데, 여기서는 O-B 구간과는 달리 해석과 실험 결과 모두 전구간에서 동일한 거동을 나타내고 있다. 이러한 O-A구간과 O-B구간의 거동차이는 스트레치를 주는 방향에 의한 차이로 예측된다. 따라서 추후에 스트레치의 방향이 관재 성형성에 미치는 영향에 관한 후속연구가 필요할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 가변성형기술을 이용한 안장 형태의 2차 곡면성형에 관한 연구를 수행하였다. 박관성형의 경우 탄성회복이 크게 일어나기 때문에 가변성형기술에 스트레치 성형 기술을 접목시킨 가변 스트레치 성형 공정을 이용하였다. 연구에 사용한 재료는 4mm의 두께를 가지는 Al3003-H14 알루미늄 합금 재질이며, 해석적 연구를 위한 물성치를 단축인장시험을 통하여 획득하였다. 먼저 스트레치 공정의 유무에 따른 탄성회복 공정결과를 비교하여 스트레치 공정의 탄성복원량 감소 효과를 확인하였다. 유한요소해석 결과, 모든 성형영역에서 항복강도 이상의 응력이 발생함을 확인하였고, 이는 스트레치 공정에 의한 Pre-tension의 효과라 예상할 수 있다. 실제공정의 탄성회복 효과를 고려해서 탄성회복공정도 수행하였으며, 최대 탄성복원량은 각 모서리 부분에서 약 2mm로 나타났다. 관재의 중심점을 기준으로 각 축방향 단면의 프로파일 좌표를 추출하여 목적곡면과 비교하였으며, 탄성회복을 고려하여 목적곡면과 약 1mm 정도의 오차가 나타남을 확인하였다. 해석적 연구 후 이를 토대로 한 가변스트레치 성형 실험을 수행하였으며, 성형결과물을 3D scanner를 이용하여 형상을 측정하였다. 해석적 연구에서 얻은 프로파일과의 비교를 위하여 동일한 위치에서의 단면을 측정하여 목적곡면과 비교하였다. 이 과정에서 x방향과 y방향의 프로파일 거동의 차이를 확인하였고, 이는 스트레치 방향에 의한 결과라고 예상하였으며, 추후에 이에 관련된 후속적



(a) Section O-B



(b) Section O-A

Fig.12 Sectional profiles of object surface, simulation and experiment results (after spring-back)



Fig.13 Dongdaemoon design plaza

연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 결과를 통해 2차곡면의 성형이 가변 스트레치 공정을 활용하여 가능할 것으로 예상되며, Fig 13에 나타난 동대문 디자인 플라자와 같이 최근 각광받고 있는 비정형건축물의 외피 구조물 성형에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(No.2012H1B8A2026095)과 선도연구센터지원사업(NRF-2012R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

[1] K. U. Odumodu, D. Shuvra, 1966, 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.

- [2] H. C. Kuo, L. J. Wu, 2002, Automation of Heat Bending in Shipbuilding, *Comput. Ind.*, Vol. 48, No. 2, pp. 127~142.
- [3] 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.
- [4] Y. H. Seo, S. C. Heo, J. W. Park, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2010, Development of Stretch Forming Apparatus using Flexible Die, *Trans. Mater. Process*, Vol. 19, No. 1, pp. 17~24.
- [5] S. C. Heo, Y. H. Seo, H. G. Noh, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, Numerical Study on Effect of Using Elastic Pads in Flexible Forming Process, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 34, No. 5, pp. 549~556.
- [6] Y. H. Seo, S. C. Heo, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2002, Tendency Analysis of Shape Error According to Forming Parameter in Flexible Stretch Forming Process Using Finite Element Method *Trans. Mater. Process*, Vol. 19, No. 8, pp. 486~493.
- [7] S. C. Heo, Y. H. Seo, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2009, Study on Application of Flexible Die to Sheet Metal Forming Process, *Trans. Mater. Process*. Vol. 18, No. 7, pp. 556~564
- [8] S. C. Shin, D. H. Jun, 1992, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea(J. S. Song), Architectural Institute of Korea, Seoul, pp. 43~46.
- [9] J. W. Jang, N. U. Kim, 2007, A Study on the Tendency as Digital Media of Contemporary Building Surface, *J. Architectural Inst. Kor.*, Vol.23, Issue 4, pp. 93~100.
- [10] Z. Y. Cai, S. H. Wang, X. D. Xu, M. Z. Li, 2009, Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 1, pp. 396~407.