

3차원 성형곡면 구현을 위한 가변금형의 펀치 및 제어시스템 설계

서영호¹· 혜성찬¹· 구태완²· 김 정²· 강범수[#]

Design of Flexible Die Punch and Control System for Three-dimensional Curved Forming Surface

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

(Received November 17, 2010 / Revised March 17, 2011 / Accepted April 1, 2011)

Abstract

A flexible die, which is composed of a number of punches with adjusted heights to form a three-dimensional curved surface, is a crucial part of a flexible forming technology. In this study, the punch and control system of the flexible die were designed. The flexible die is divided into three modules, namely, punch, control and joint, and the corresponding modules were developed. The punch module materializes a three-dimensional forming surface by the control module, which is composed of an AC servo motor set and a linear guide. The joint module is necessary for the sequential motion between the servo motor set and the punch module. A sequential motion algorithm for the AC servo motor set, that uses the data of the punch relative heights, was also proposed. Finally, a flexible stretch forming test was carried out using the presently designed flexible die.

Key Words : Flexible Forming Technology, Flexible Die, Three-dimensional Curved Forming Surface

1. 서 론

3차원 곡판에 대한 수요는 선박, 항공기, 자동차, 고속철도 등 다양한 산업에서 지속적으로 창출되고 있다. 지금까지는 단일금형(solid die)을 사용하여 하나의 금형으로 하나의 3차원 형상에 대한 판재를 생산하였고, 소품종 대량생산 체제에 기반을 두었던 종래의 산업에서는 무리 없이 사용되어 왔다. 소량생산이 필요한 부품의 가공분야에는 금형개발에 따르는 경제성을 만족시키기 위하여 수작업을 사용하여 왔다[1]. 조선업에서 많이 사용되고 있는 선상가열법(line heating method)이 대표적인 예이다[2]. 하지만 수작업에 따르는 열악한 작업환경은 개선되어야 하며, 자동차 산업에서도 자기 맞춤형 자동차에 대한 수요가 증가함에

따라 다품종 소량생산체제로 빠르게 산업구조가 전환될 것으로 예상된다. 또한 항공기 및 고속철도의 외피(skin structure)는 그 형상이 매우 다양하여 다품종 소량생산 구조에 적합한 산업형태로 지금까지 곡판 형상에 따라 소요되는 금형의 개발, 보관 및 설치 비용으로 인하여 경쟁력의 저하를 가져왔다[3, 4]. 따라서 산업구조의 전환기를 맞고 있는 현 시점에서 새로운 생산체제에 적합한 곡판의 성형공정이 필요하다.

본 연구에서는 가변금형[5, 6]의 설계 및 이를 이용하여 3차원 성형곡면을 구현하고자 한다. 가변금형은 다수의 펀치로 구성되어 있으며, 이들의 높이를 성형곡면과 부합하도록 조절함으로써 하나의 금형으로 다양한 성형곡면을 구현할 수 있다[1, 7]. 가변금형은 각각의 기능에 따라 크게 3개

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

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

의 모듈(편치, 제어, 체결)로 구성된다. 다수의 편치로 구성되어 있는 편치모듈은 3차원 성형곡면을 구현하며, 각각의 편치높이는 AC 서보모터와 리니어 가이드로 구성된 제어모듈에 의해 조절된다. 체결 모듈은 편치모듈과 제어모듈의 연결기능을 수행할 수 있도록 설계하였다. 또한 편치모듈이 성형곡면을 구현하기 위해서 최소의 서보모터로 다수의 편치를 제어하기 위한 순차적 제어 알고리즘을 개발하였다. 이 때 각 편치의 높이는 기개발된 편치높이 산출 알고리즘[1]에 의해 계산된다. 최종적으로 가변금형을 이용하여 3차원 성형곡면을 구현하였으며, 이를 이용하여 스트레치 성형실험을 수행하였다.

2. 하드웨어 설계

2.1 편치모듈

Fig. 1은 편치모듈의 설계도이다. 편치모듈은 세부적으로 편치, 편치배열, 사이드 프레임 그리고 하부 프레임으로 구분할 수 있다. 그 중 가변금형에서 가장 핵심적인 역할을 하는 편치에 대해 세부설계에 대해 우선적으로 설명한다. 편치는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 편치헤드(head), 스크류(screw), 캡(cap), 지지대(support), 조인트(joint) 총 5개의 부품으로 구성되어 있다.

성형공정 중 판재와 직접적으로 접촉하는 편치헤드의 형상은 Fig. 3과 같은 반구형상으로 결정하였다. 편치의 상대높이는 편치헤드의 형상과 편치

헤드와 판재가 접촉하는 접촉점에 의해 결정되므로 편치헤드의 형상에 대한 높은 가공 정밀도가 요구된다. 또한 편치의 높이는 나사운동에 의해 조절되므로 나사의 가공오차는 성형오차와 직결된다. 따라서 편치 스크류는 일반 체결용이 아닌 1급의 정밀도를 가진 수나사로 가공되었으며, 암나사로 가공된 편치 캡과 결합되어 서보모터의 회전에 의해 높이가 제어된다. 또한 나사 접촉 면적에 의해 발생하는 마찰을 최소화 하기 위하여 캡 내부의 나사 가공부는 최소의 면적을 갖도록 설계되었다. 마찰을 최소화 함으로써 편치제어 시 필요토크를 줄이며, 제작비용과 직결되는 서보모터의 용량을 줄일 수 있다. 편치 조인트는 체결모듈과 연결되어 서보모터 세트의 순차적 제어를 가능하도록 설계되었다. 마지막으로 편치 지지대는 편치모듈의 하부 프레임과 함께 성형공정에서 발생하는 하중을 지탱하는 역할을 한다.

편치배열은 성형면적과 편치크기에 따라 결정되며 목적곡면에 부합하는 3차원 성형곡면을 형성하게 된다. 200mm×300mm의 성형면적에 대하여 편치의 크기가 20mm인 경우 편치배열은 10×15로 결정된다. 사이드 프레임은 편치배열이 분산되어 성형곡면의 오차가 발생하지 않도록 성형하중을 지탱한다. 또한 성형공정에서 발생하는 하중은 각각의 편치에 작용하여 나사에 손상이 발생할

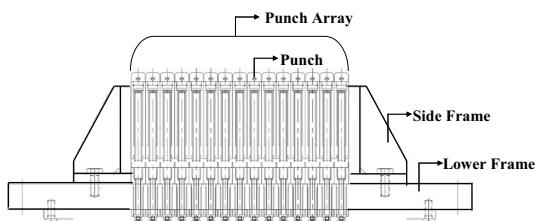


Fig. 1 Schematic diagram for flexible die

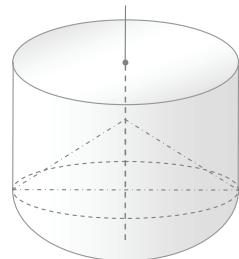


Fig. 3 Shape of punch head

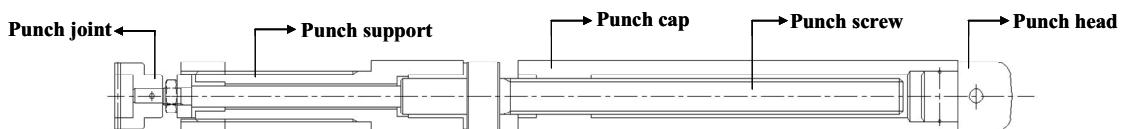


Fig. 2 Punch structure composed of five parts

수 있고 지속적인 하중에 의해 편치의 좌굴이 발생한다. 이는 성형오차의 원인이 되므로 하부 프레임과 편치 지지대를 설계하여 성형하중의 지탱 및 분산을 유도하였다.

2.2 제어모듈

편치모듈이 목적곡면과 부합하는 성형곡면을 형성하기 위해 각각의 편치높이는 3.1절의 편치높이 산출 알고리즘에 의해 계산되는 편치의 상대 높이에 따라 서보모터에 의해 조절되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 편치의 높이 조절을 위하여 편치구조는 수나사와 암나사의 결합으로 이루어져 있다. 즉 편치의 상대높이는 나사의 회전에 의해 조절되며, 식 (1)과 같이 나사의 피치와 회전 수에 의해 높이는 결정된다(Fig. 4).

$$h = rev \times pitch \quad (1)$$

여기서 *rev*는 회전수를 의미하며, *pitch[mm/360deg]*는 1회전당 이동거리를 의미한다. 즉 나사가 1회전 할 때마다 편치의 높이는 피치만큼 조절된다. 각각의 편치는 서보모터를 이용하여 제어하게 되는데, 모든 편치에 서보모터를 결합하여 동시에 높이를 조절함으로써 3차원 곡면 생성에 소요되는 시간을 크게 절감할 수 있다. 하지만 서보모터가 고가의 부품임을 감안하면, 성형면적이 커지고 편치크기가 작아짐에 따라 편치와 서보모터가 증가하게 되므로 편치와 모터의 1:1배치는 제작비용의 상승 및 생산단가 상승의 원인이 된다. 따라서

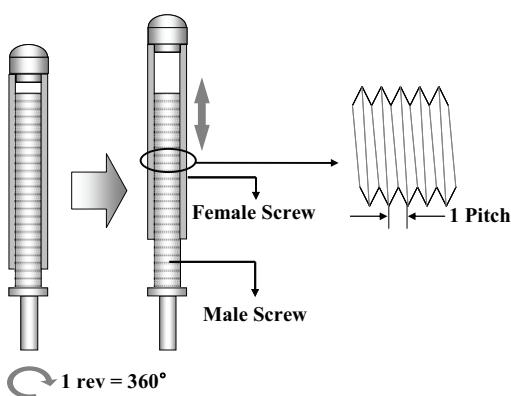


Fig. 4 Punch structure by combination of female and male screws

종횡방향의 움직임을 결정하는 모터와 편치의 높이 조절에 직접적으로 사용되는 모터로 구성된 서보모터세트를 활용하여 설계하였다. 제어모듈은 서보모터세트와 높이조절 모터의 종횡방향 모션을 위한 리니어 가이드로 구성된다.

서보모터를 사용하여 편치를 제어함에 있어서 편치와 모터를 1:1로 배치하는 것은 불가능하므로 Fig. 5와 같이 편치를 직접적으로 제어하는 소수의 Z-축 모터와 Z-축 모터위치의 종횡방향 움직임을 결정하는 X-, Y-축 2개의 모터로 구성된 서보모터 세트를 활용하여 다수의 편치를 제어한다. Z-축 모터가 임의의 편치에 대한 높이 제어를 마치게 되면 Y-축 모터가 Z-축 모터를 다음 행의 편치로 이송시키게 되며, 해당 열의 편치제어가 끝나게 되면 X-축 모터가 Y-, Z-축 모터를 다음 열로 이송시키는 방법으로 순차적으로 모든 편치를 제어한다. 서보모터의 사양 선정을 위하여 편치의 형상계수를 이용한 편치의 상하모션에 필요한 토크를 계산하였다. Fig. 6에 사각나사의 형상계수를 도시하였으며, 식 (2)에 형상계수를 대입하여 편치를 상승시키기 위한 필요토크(T_u)와 편치를 하강시키기 위한 필요토크(T_d)를 각각 산출하였다.

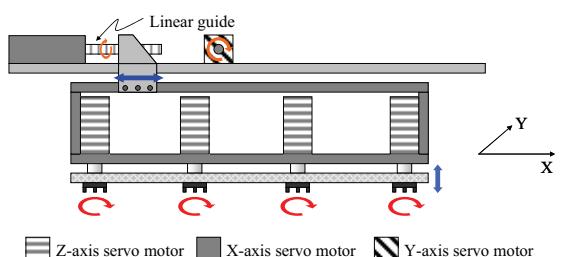


Fig. 5 Composition of servo motor set

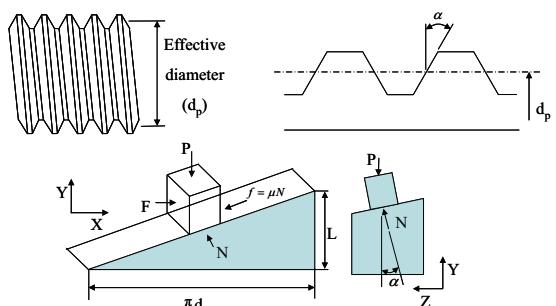


Fig. 6 Geometrical coefficient for rectangular screw

$$\begin{aligned} T_u &= \frac{Pd_p}{2} \frac{\mu\pi d_p + L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha - \mu L} \\ T_d &= \frac{Pd_p}{2} \frac{\mu\pi d_p - L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha + \mu L} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 체결모듈

2.2절에 언급한 바와 같이 서보모터 세트를 활용하여 순차적으로 편치를 제어함에 따라서 편치와 서보모터간의 탈착이 가능한 메커니즘을 설계해야 한다. Fig. 7과 같이 편치의 돌기 부분이 모터의 홈과 결합하여 모터의 회전운동을 편치에 부여하도록 설계하였다. 이에 따라 모터 제어 프로그램 구성 시 편치와 모터 결합 직전에 편치의 회전량 및 모터의 회전량에 따른 결합 회전각을 찾아내는 알고리즘을 추가하였다.

3. 알고리즘 개발

3.1 편치높이 산출 알고리즘

가변금형을 이용하여 3차원 곡판을 성형하기 위해서 목적곡면과 부합하는 3차원 곡면을 구현해야 하며 이를 위해서는 각각의 편치와 판재의 접촉점을 찾아내어 편치의 높이를 결정해야 한다. 이 과정에서의 오차는 성형오차와 직결되므로 정확한 편치높이의 산출이 요구되며 또한 정확한 서보모터의 제어가 필요하다. 본 연구에서는 편치헤드의 형상을 균일한 곡률반경을 가지는 반구로 가정하였으며, 편치높이 산출 알고리즘에서는 이러한 특성을 활용하여 편치높이를 산출한다[1].

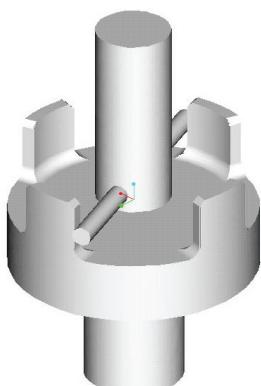


Fig. 7 Schematic diagram for joint module

편치헤드와 판재의 접촉은 곡면 형상에 따라 임의의 점에서 이루어지지만 접촉점은 곡면상에 존재하며, 편치헤드의 형상이 반구임을 고려하면 편치의 중심점은 편치의 접촉점과 상관없이 곡면에서 편치헤드의 곡률반경만큼 오프셋된 면상에 존재한다. 편치의 상대높이를 계산하기 위해서 우선적으로 오프셋된 곡면을 X-Y평면에 투영시켜 Fig. 8과 같이 작은 요소(element)로 나누어준 다음 편치의 중심이 존재하는 요소를 찾아낸다. 요소를 찾는 방법은 Fig. 8에 도시한 것처럼 편치중심이 요소 내에 존재한다면 요소의 면적과 편치중심에 의해 생성되는 네 개의 삼각형 면적의 합은 같은 조건을 사용한다. 요소 내에 편치 중심이 존재하지 않으면 삼각형 면적의 합은 요소의 면적보다 클 것이다. Fig. 9의 요소 평면방정식을 활용하여 편치높이를 식 (3)과 같이 계산할 수 있다[5].

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

$$F = (y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1) \quad (3)$$

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

$$H = (y_4 - y_1)(x_2 - z_1) - (x_4 - x_1)(y_2 - y_1)$$

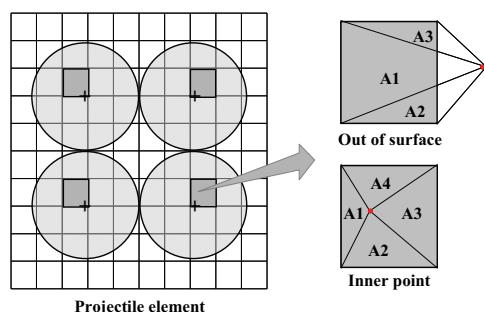


Fig. 8 Distinction of element including punch center

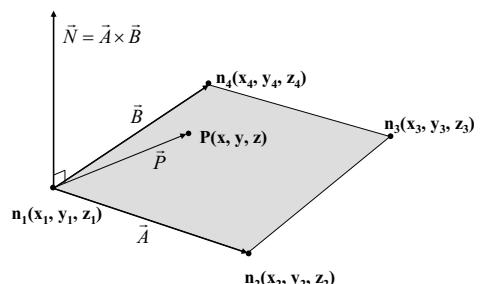


Fig. 9 Plane equation and geometrical information for element

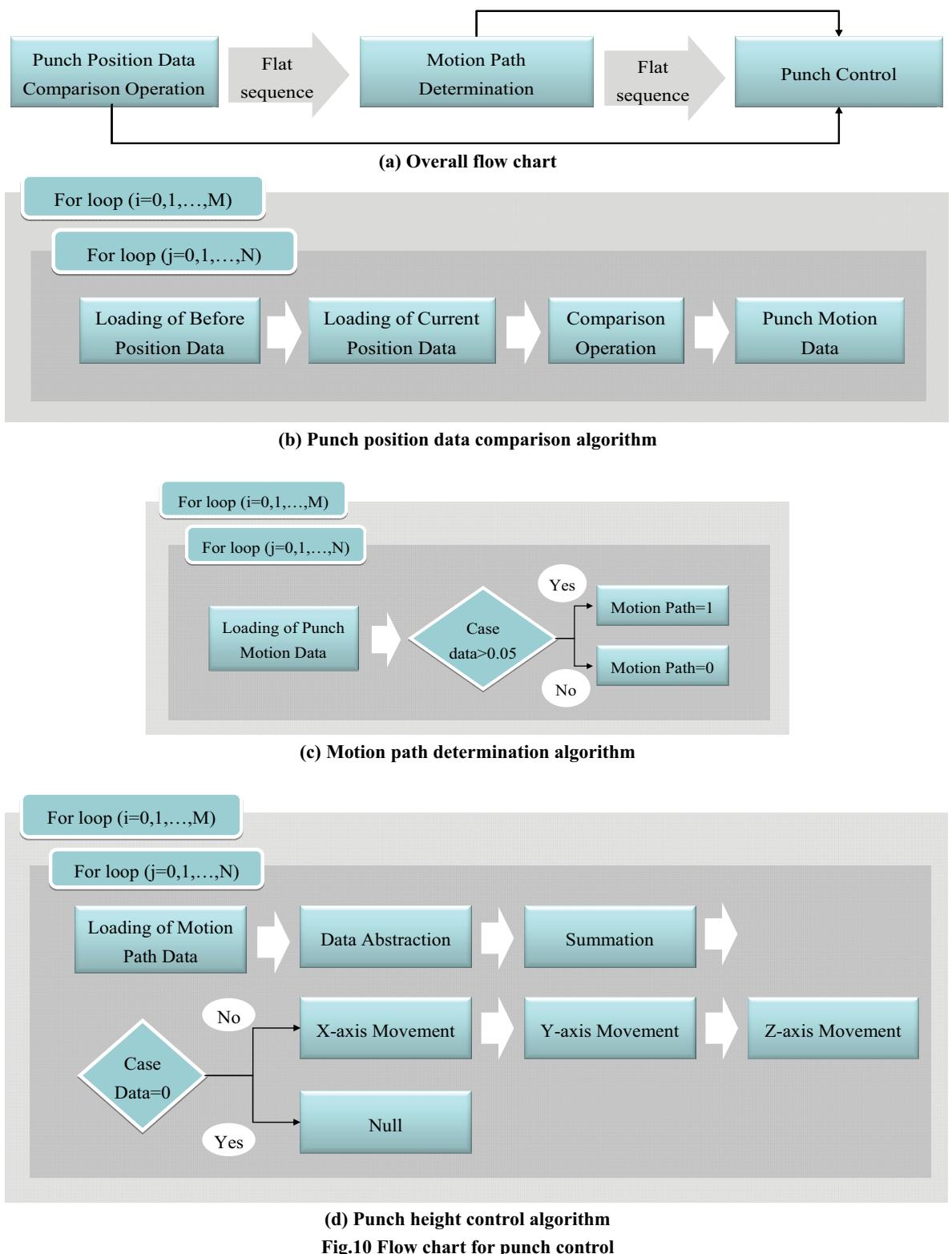


Fig.10 Flow chart for punch control

3.2 편치제어 알고리즘

편치제어 방식에는 고정식과 능동식 2가지의 타입이 있다[3]. 그 중 성형 시 소요되는 시간이 비교적 짧으며, 단순한 곡면 가공에 적합한 고정식 편치제어 방식을 사용하였다. 또한 모든 편치에 서보모터를 장착하게 되면 편치높이 제어에 소요되는 시간을 크게 절감할 수 있으나 서보모터가 고가의 부품이므로 모든 편치에 1:1로 서보모터를 배치하는 데는 비용적 측면에서 무리가 있으므로 종횡방향의 움직임을 결정하는 모터와 편치의 높이 조절에 직접적으로 이용되는 다수의 서보모터 세트를 활용하여 설계한다. 한 예로 편치크기가 25mm이고 성형면적이 250mm×500mm 일 경우 편치배열은 10×20의 형태가 되며, 상하부 가변금형에 1:1배치를 할 경우 총 400개의 모터가 필요하다. 또한 편치의 크기가 작아짐에 따라 서보모터의 공간이 줄어들어 제어모듈의 설계가 복잡해진다. 따라서 제한된 수의 모터를 활용하여 다수의 편치를 제어할 수 있는 서보모터 세트를 사용하였다.

전체적인 제어 흐름도를 Fig. 10(a)에 도시하였다. 크게 3개의 파트가 순차적으로 구성되어 있다. 현재 편치배열이 구현하고 있는 성형곡면에 대한 편치높이와 3.1절에서 제시한 편치높이 산출 알고리즘에 의해 계산된 성형곡면에 대한 편치높이를 비교하여 서보모터 세트의 구동방향(motion path)을 결정한다. 이는 3차원 성형곡면 생성 시간을 단축시키기 위함이다. 임의의 편치의 현재 편치높이와 구현되어야 할 편치높이가 일정 범위 내에서 일치한다면 구동방향에서 제외된다. 상기 조건을 만족하는 편치위치로 구성된 구동방향을 결정한 후 편치높이를 조절한다.

Fig. 10(b)는 편치높이 데이터를 비교/연산하는 알고리즘이다. $M \times N$ 의 편치배열에 대해서 모든 편치의 현재 높이와 구현되어야 할 높이 데이터를 로딩하여 차의 절대값을 편치 모션 데이터로서 저장한다. 편치 모션 데이터를 이용하여 구동방향을 결정하는 알고리즘은 Fig. 10(c)에 도시하였다. 편치 모션 데이터를 로딩하여 높이차가 0.05 이상인 편치에 대해서 구동방향의 값으로 1을 반환하고 0.05이하인 편치에 대해서 0의 값을 반환한다. 마지막으로 편치제어에 대한 알고리즘은 Fig. 10(d)에 도시하였다. k개의 편치높이 조절 모터가 있을 경우 각각의 Z-축 모터에 대한 구동방향 데이터를 로딩하여 편치에 대한 구동방향의

값을 합한다. 결과가 0일 경우 즉, 현재 제어대상인 k개의 편치에 대한 구동방향 데이터의 합이 0이면 해당편치에 대한 높이제어는 생략된다. 합산 결과가 0이 아닌 편치위치로 이동 후 체결 모듈의 결합을 위하여 회전각만큼 조절하며, 결합 후 편치높이를 제어한다. 편치높이 조절 알고리즘에는 조인트 모듈의 탈착공정이 포함되어 있으며, 상용 프로그램인 LABVIEW 8.6을 사용하여 구현하였다.

4. 가변금형개발



(a) Punch module



(b) Combination of joint module

Fig.11 Flexible die

4.1 가변금형 시제작

시제작된 가변금형의 편치크기는 20mm이고 성형면적은 200mm×300mm이다. 따라서 편치모듈은 10×15의 편치배열을 가진다. 서보모터 세트는 2개의 Z-축 모터와 이들의 종횡방향의 위치를 결정하는 X-와 Y-축 모터 총 4개의 서보모터로 구성되어 있다. 또한 체결 모듈의 탈착은 유압 제어방식으로 제작하였다. Fig. 11(a)는 본 연구를 통해 개발

된 가변금형의 편치모듈이다. 편치사이 간격이 너무 작으면 편치간의 마찰에 의해 서보모터에 과부하게 걸리게 되며, 반대로 편치간의 간격이 커지면 편치가 좌우로 흔들리게 되어 가변금형을 통해 구현된 3차원 성형곡면이 목적곡면과 일치하지 않아 성형오차를 발생시킨다. 따라서 편치간의 간격 및 사이드 프레임과 편치배열간의 간격오차를 최대한 줄여야 한다.

Fig. 11(b)는 체결 모듈과 편치 조인트 부분을 도시하고 있다. 3.1절에 언급된 편치높이 산출 알고리즘을 사용하여 편치 높이 데이터를 산출하며, 3.2절의 편치제어 프로그램과 서보모터 세트를 사용하여 3차원 성형곡면을 구현한다. 이 과정에서 체결 모듈은 편치와 서보모터간의 탈착을 가능하게 하여 서보모터 세트를 이용한 다수의 편치높이를 순차적으로 제어 가능하게 한다.

4.2 3차원 성형곡면 구현

Fig. 12와 같이 시제작된 가변금형을 이용하여 생성된 400mm의 단일곡률반경을 가지는 포물선 형태의 성형곡면을 이용하여 스트래치 성형실험을 수행하였다. 편치모듈과 1mm의 알루미늄 소재 사이의 접 접촉에 의한 스크래치 등의 결함을 최소화하기 위하여 5mm의 우레탄 패드를 사용한 결과 소재 표면의 결함은 생성되지 않았으며, 성형된 소재의 3차원 형상 측정 결과로서 인장방향으로의 곡률분포를 도시하였다. 또한 대칭면을 기준으로 한 성형영역에 대한 측정결과와 목적곡면의 인장방향 곡률분포를 Fig. 13에 비교하여 도시한 결과 목적곡면과는 다소 차이를 보이고 있다. 성형오차의 원인은 소재의 탄성회복 및 가변금형의 오차로 인해 발생한 것으로 예측된다. 따라서 가변금형의 정밀도 향상 및 탄성회복에 대한 보정설계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구를 통해 개발된 가변금형은 기존의 단일금형을 대체하여 단품종 소량생산 체제의 산업구조에 부합하는 다양한 성형공정 개발에 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 단품종 소량생산 체제로의 산업구조 전환에 따른 신 개념의 성형공정 개발을 위한 가변금형을 설계하였고 이를 이용하여 3차원 성형곡면 구현하였다.



Fig.12 Stretch forming test using flexible die

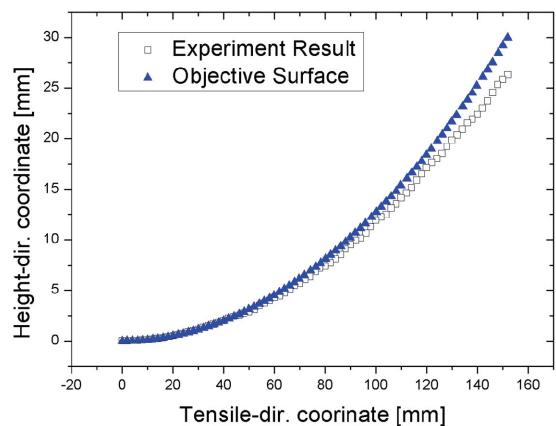


Fig.13 Comparison of sectional profiles in the tensile-direction

(1) 기능별로 구분 되어진 편치, 제어, 체결 모듈에 대한 세부적인 설계를 수행하였다. 편치모듈은 편치크기 및 성형면적에 의해 결정되는 편치배열과 성형하중을 지탱하는 사이드 및 하부 프레임으로 구성되었다. 제어모듈은 최소의 비용으로 다수의 편치를 효율적으로 조절하기 위해 서보모터 세트를 이용하였으며, 최소필요토크를 계산하여 서보모터의 사양을 결정하였다. 마지막으로 서보모터 세트의 순차적 제어를 위해 편치와 모터간의 탈착이 가능하도록 체결 모듈을 설계하였다.

였다.

(2) 하드웨어 설계에 이어서 편치모듈이 목적곡면과 부합하는 3차원 성형곡면의 구현을 위한 편치높이 산출 알고리즘을 제시하였다.

(3) 편치높이 산출 알고리즘에 의해 계산된 편치높이 데이터를 이용한 편치제어 알고리즘을 제시하였다. 편치높이 비교연산을 통해 구동방향을 결정하며, 이에 따라 순차적으로 편치를 제어하여 3차원 성형곡면 구현에 소요되는 시간을 최소화하였다.

(4) 편치, 제어, 체결 모듈로 구성된 가변금형을 시제작하였으며, 이를 이용하여 3차원 성형곡면의 구현 및 성형실험을 수행하였다.

후 기

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.

참 고 문 헌

- [1] 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.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, pp. 396~407.
- [5] K. A. Pasch, 1981, Design of a discrete die surface for sheet metal forming, S.B. Theis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [6] 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.
- [7] L. Li, Y. H. Seo, S. C. Heo, B. S. Knag, J. Kim, 2010, Numerical simulations on reducing the unloading springback with multi-step multi-point forming technology, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 48, pp. 45~61.