

곡면성형을 위한 비정형롤판재성형 장비 개발

윤준석¹ · 박지우¹ · 손소은² · 김형호¹ · 김 정¹ · 강범수[#]

Development of a Flexibly-reconfigurable Roll Forming Apparatus for Curved Surface Forming

J. S. Yoon, J. W. Park, S. E. Son, H. H. Kim, J. Kim, B. S. Kang

(Received January 29, 2016 / Revised May 19, 2016 / Accepted May 20, 2016)

Abstract

Sheet metals are often required to be formed into three dimensional curved shapes for use as skin structures. As a result various sheet metal forming methods, such as press die forming, stretch forming, and line heating have been used over the years in industrial production lines. Although they are extensively used in industry, these methods are not suitable for small quantity batch productions. Studies have been conducted to improve or replace these methods with plausible flexible forming technologies. As a part of these studies, we developed a new and more efficient forming device named flexibly-reconfigurable roll forming (FRRF). The current study presents the process development and experimental verification for the applicability of this device. To improve the efficiency of the FRRF apparatus, several hardware components were invented and a suitable operating program was developed using MFC of visual C++. The ways to make the FRRF apparatus fully functional are also described. Sheet metal was formed into three dimensional shapes using the FRRF apparatus and the final products are presented as evidence for the applicability of the developed device.

Key Words : Flexible Forming Technology, Curved Surface, Sheet Metal Forming, Flexibly-reconfigurable Roll Forming

1. 서 론

다품종 소량생산방식이 주로 사용되는 항공기 및 조선산업에서는 비정형 곡면을 성형하기 위하여 일반적으로 프레스 성형법과 스트레치 성형공정, 선상가열법(line heating) 등이 이용되고 있다. 스트레치 성형공정은 항공기용 외피구조물(skin structure) 제작에 주로 사용되며, 다수의 금형이 필요하므로 금형 제작비가 많이 들고, 공정의 특성상 다중곡률의 판재를 성형하기 어려운 단점이 있다. 선상가열법은 숙련된 기술자의 경험에 의존적이고, 수작업과 열악한 작업환경으로 인하여 생산성이 떨어진다. 이러한

기존 성형공정의 단점을 보완하기 위하여 점진적롤 성형법(incremental roll forming), 다점샌드위치성형법(multi-point sandwich forming), 다점성형공정(multi-point dieless forming process) 등의 단일 금형을 활용한 가변성형기술(flexible forming technology)이 개발되었다[1~5]. 점진적롤성형법은 선박의 외피 구조물의 곡면가공 등에 적용되고 있으나 작업시간이 길고, 부정형 형상의 경우 복잡한 성형공정을 거쳐야 한다. 다점성형공정은 공정시간이 짧고 비정형 형상의 성형이 쉬운 장점이 있으나 소재표면에 딩플(dimple)이나 주름(wrinkle)이 발생하지 않도록 탄성 패드를 사용하거나 정밀도 향상을 위해서 매우 많은 수량

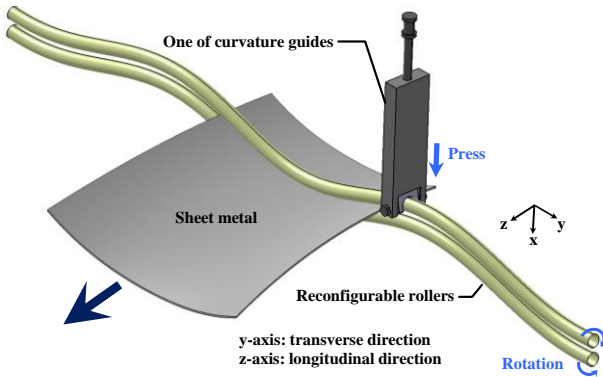
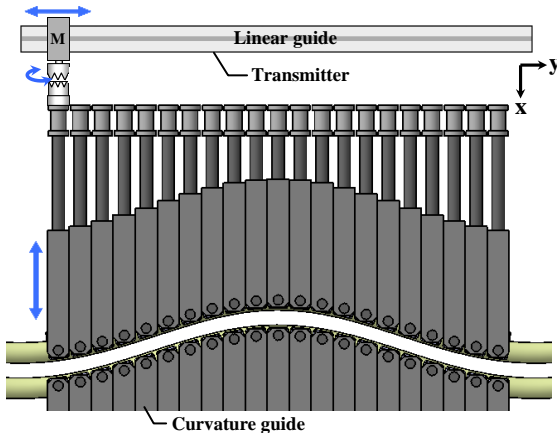
1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 국방과학연구소 제3기술연구본부 1부

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

Table 1 Desirable requirement of FRRF apparatus

Roller diameter	8 ~ 20 mm
Sheet width	100~300 mm
Sheet thickness	1~5 mm
Forming height (max.)	50 mm
Guide bar stroke (max.)	50 mm
Roller curvature (min.)	1000 mm
Power source	AC 220 V

**Fig. 1 Graphical explanation of FRRF process****Fig. 2 Transmitter and curvature guide assembly**

의 펀치(punch)가 필요하다[5].

본 연구에서는 기존의 공정을 보완하기 위하여 제안된 비정형롤판재성형(flexibly-reconfigurable roll forming, FRRF) 공정을 위한 성형 장비의 설계 및 이를 이용한 3차원 곡면성형을 구현하고자 한다 [6~9]. Fig. 1과 같이, 비정형롤판재성형은 일반적인 롤성형 과 유사하지만, 판재의 길이 방향의 변형률을 조절함으로써 3차원 형상의 곡면을 성형하는 방법이다. 길이 방향의 변형률은 두께 방향으로 가해

지는 압축률의 차이에서 기인하며 이러한 성형기법을 구현하기 위하여 FRRF성형장비를 설계하였다 [6~9, 12, 13]. Fig. 2는 FRRF성형장비의 구성에 앞서 각 장비의 구동형태를 도시하였으며, 이를 바탕으로 Fig. 3과 같이 FRRF성형 장비를 구성하였다. 장비는 크게 성형롤러모듈(forming rollers module), 상하로 배치된 곡률가이드어셈블리(curvature guide assembly), 이송장치 및 가이드높이조절모듈(transmitter & guide height adjusting module), 제어장치(controller) 등의 4가지와 기타 장치들로 구성되어 있다. 성형롤러모듈은 곡률가이드어셈블리에 의해 일정한 곡률을 유지한 상태에서 성형롤러에 회전력을 공급함으로써 판재를 밀어내도록 한다. 곡률가이드어셈블리는 상하 성형롤러의 곡률을 유지하기 위한 장치로서, 각각의 롤러가이드는 나사운동에 의해 높이가 조절되며, 이는 체결부에 연결된 모터의 회전수에 의해 결정된다. 상하의 각각의 이송장치 또한 모터의 회전수에 의해 제어된다. Table 1은 본 연구에서 구성하고자 하는 성형장비의 요구조건이며, 최종적으로 구성된 성형장비를 이용하여 대표적인 3차원 성형곡면인 볼록형(convex-type), 안장형(saddle-type) 형상의 성형면을 구현함으로써 장비의 가용성을 확인하였다.

2. 하드웨어 설계

2.1 부하조건

FRRF 성형장비의 설계를 위해 우선적으로 고려되어야 하는 것은 부하조건이다. 본 연구에서는 볼록형, 안장형 형상을 기본형상으로 성형변수에 따라 다양한 형상을 구현하도록 설계하였다. 성형공정 시 FRRF 장치에 걸리는 부하는 롤러의 회전에 의한 토크(torque), 곡률을 유지하기 위해 가해지는 각각의 롤러가이드의 압력에 의한 반력으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 안장형에 비하여 상대적으로 큰 부하가 작용하는 볼록형 형상의 성형 시 발생하는 반력을 추정된 결과를 반영하였다. 성형롤러의 직경이 20mm이고, 2024-T4 알루미늄 판재의 폭이 300mm이라 가정하였을 때, 최대반력인 270kN을 고려하여 성형장치를 설계하였다[8]. 성형공정 중 반력부하를 받는 상하부 프레임(frame)은 충분히 큰 단면계수를 갖도록 설계하였다. 각 프레임은 성형소재의 두께 및 재질에 따른 성형장치별 보정계수를 활용하여 지지구조물 및 재질 등을 고려한 해석 결과를 바탕

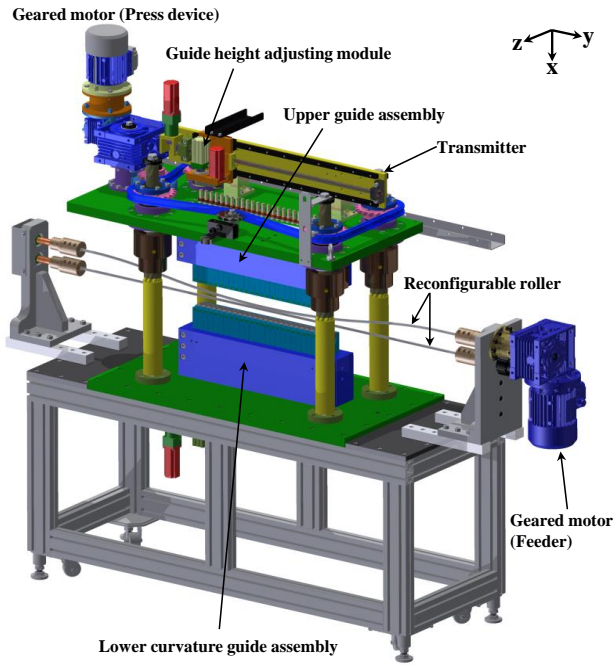


Fig. 3 Schematic diagram of FRRF apparatus

으로 정확한 요구조건을 산출하는 것이 타당하나, 시간절약 측면에서 정확한 설계를 수행하기 어려우므로 부하에 의한 프레임의 변형의 영향을 성형공정에서 예측하여 직접 반영하는 것은 제외하였다. 하지만, 각 프레임과 Post는 성형공정 중에 주로 인장하중을 받으므로 항복강도기준 안전율(safety factor) 4이상(실제 안전율 4.5이상, KS D 3752, SM45C 이용)으로 설계 제작하였다.

2.2 성형롤러

성형롤러는 성형공정 시 지속적인 비틀림(torsion)과 굽힘(bending)으로 인한 조합응력(combined stress) 상태를 겪게 되며, 이에 대한 충분한 내구성을 유지할 수 있는 재질을 선정하였다. 본 연구에서는 Martensitic stainless steel (STS440C, E: 200GPa), High carbon chromium bearing steel (STB2, E: 207GPa) 등을 성형롤러로 선정하여 고주파 열처리를 하였으며, 소재와 접촉하는 표면은 표면 거칠기(surface roughness)를 $0.4\mu\text{m(Ra)}$ 로 가공하여 성형소재 표면에 긁힘(scratch)이 발생하지 않도록 하였다. 성형롤러의 직경은 8mm로 조합응력을 고려하여 소재의 부하가 허용하는 범위 내에서 시험장치의 구동부 요구동력을 가능한 한 작게 설계할 수 있도록 하였다. 8mm의 성형롤러를 적용하면, 하나의 성형롤러에 가해지

는 최대토크(T)는 $\mu \times 0.004 \times F_{resultant}$ 가 된다. 최대반력 $F_{resultant}$ 는 성형롤러와의 접촉호의 길이에 따라 단순하게 추정하면, 직경 20mm 성형롤러 대비 63.3%로써 170kN, 성형롤러와 롤러가이드의 마찰계수(μ)는 0.05이므로, 예상되는 토크는 34Nm 수준이다. 본 연구에서는, 판재의 재질을 바꾸어 성형하더라도 충분한 토크를 제공할 수 있도록 최대가용토크의 값이 130Nm인 기어드모터를 부착하였다. 또한, 성형롤러는 곡률반경이 1000mm로 휘어진 상태에서 회전으로 인한 비틀림 하중을 받을 시 가해지는 조합응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{My}{I} = \frac{r_{roller\ section}}{R_{curvature}} E \left(\because M = \frac{EI}{R_{curvature}} \right) \\ &= \frac{4 \times 10^{-3} m}{1m} (207 \times 10^9 Pa) = 0.828 GPa \\ \tau_{max} &= \frac{Tr_{roller\ section}}{J} = \frac{30Nm \times 0.004m}{0.402 \times 10^{-9} m^4} = 0.3 GPa \\ \sigma_{combined} &= (\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2)^{1/2} = 0.978 GPa\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 M , I , $R_{curvature}$, E 은 각각 모멘트, 관성모멘트, 롤러곡률반경, 탄성계수를 의미한다. 또한, 계산에서 T , $r_{roller\ section}$, J 는 각각 가해지는 토크, 롤러반지름, 극관성모멘트를 의미한다. 계산에서 토크는 장비에 장착된 인버터의 전류값을 통해서 도출하였다[12]. 그러므로 식(1)과 같이, Martensitic stainless steel(YS: 1.28GPa)이나 High carbon chromium bearing steel(YS: 1.37GPa)의 항복응력에 미치지 못하므로 성형롤러는 탄성영역에서 구동하게 된다. 성형롤러의 표면경도는 전단력과 항복응력을 고려하여 HRC 58~64로 설계 제작하였다.

2.3 곡률가이드어셈블리

Fig. 4와 같이, FRRF 공정의 특성상 상부 성형롤러는 x 방향으로 구속될 수 없고, 하부 성형롤러는 $-x$ 방향으로 구속될 수 없게 되어 있으나 소재와 접촉부의 면압의 증가로 인해 충분한 힘으로 해당 자유도를 구속하는 것으로 간주할 수 있다. 또한, 상하부 성형롤러는 정확한 성형을 위해서는 $\pm y$, $\pm \theta_y$ 방향만 자유상태로 두는 것이 좋으나 엄밀하게는 y 방향의 자유도가 구속될 수 없는 구조이다. $\pm y$ 방향은 성형롤러의 곡률이나 위치 조정 등으로 인하여 세팅 공정시 어느 정도의 움직임을 흡수할

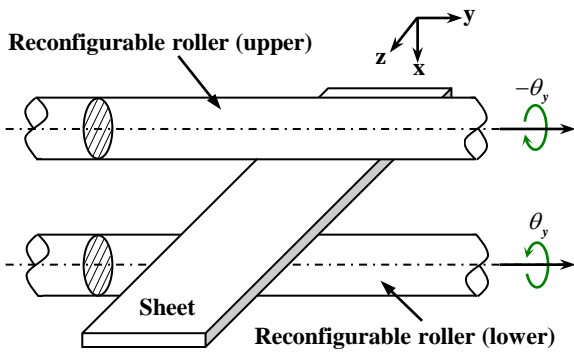


Fig. 4 Degree of freedom of reconfigurable rollers

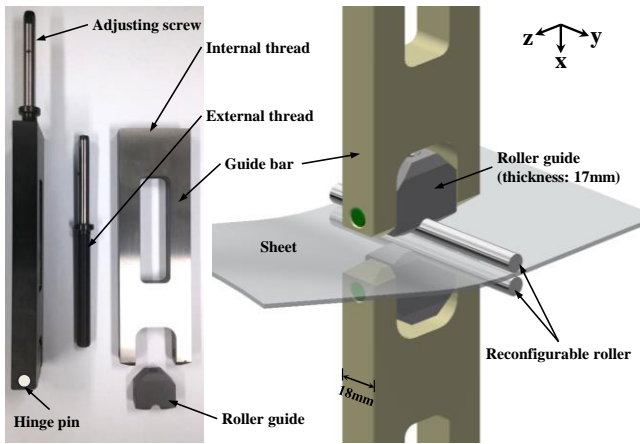


Fig. 5 Setup of curvature guides

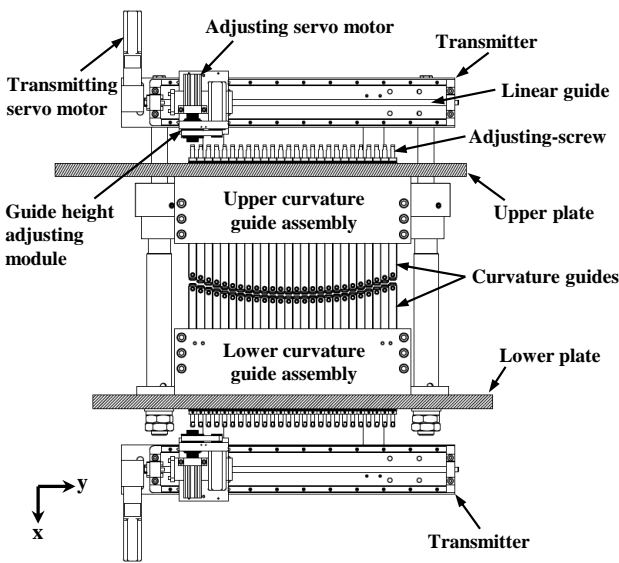


Fig. 6 Front view of FRRF apparatus with detail description

수 있도록 구성하여야 한다. 물론 성형공정 시 소재 자체의 좌굴이나 비틀림, 좌우 길이 및 부하 비대칭 등의 영향으로 미세한 움직임이 발생할 수 있으나 정상적인 성형작업 시는 정하중 상태로 볼 수 있으므로 $\pm y$ 방향의 자유도가 구속된 것으로 볼 수 있다.

성형롤러의 회전시 곡률을 일정하게 유지하고 구속시켜주는 역할을 하는 곡률가이드어셈블리는 Fig. 5와 같은 다수의 곡률가이드(curvature guide)로 구성된다. 각각의 곡률가이드는 롤러가이드(roller guide), 가이드바(guide bar), 조절나사(adjust screw) 등으로 구성된다. 성형롤러의 곡률 형상에 따라 롤러가이드의 홈부(grooved section)의 표면이 자연스럽게 접촉하도록 가이드바의 끝단에 힌지핀(hinge pin)으로 고정시켰다. 롤러가이드의 홈부와 성형롤러의 표면은 곡률의 크기에 따라 1개 또는 2개가 선 접촉하는 구조이므로 가능한 롤러가이드의 폭을 작게 하는 것이 정확한 곡률형상을 구현하는데 유리하나, 조립구조와 힌지핀, 롤러가이드의 부하조건, 롤러가이드 회전으로 인한 간섭조건, 제작비용 등을 고려하여 롤러가이드의 두께는 17mm로 설계하였다. 롤러가이드의 수량은 성형판재의 폭이 300mm까지 성형할 수 있도록 하고, 성형롤러의 곡률형상을 자연스럽게 구현하기 위하여 여유를 두어 Fig. 6과 같이, 상하부 각각 26개씩 배치하였다. 가이드바의 두께는 롤러가이드가 힌지핀을 중심으로 회전하므로 인접하는 롤러가이드와의 간섭을 피하기 위하여 18mm로 설계하였다. 가이드바의 한쪽 끝단은 Fig. 5와 같이 내부나사(internal thread)를 구비하여 조절나사의 회전운동에 따라 가이드바가 상하운동을 할 수 있도록 하였다. 조절나사는 회전운동 제외한 나머지 자유도는 구속되도록 상판(upper plate)과 하판(lower plate)에 베어링으로 지지하였고, 롤러가이드에 작용하는 대부분의 반력이 조절나사에 전달되므로 충분한 압축강도를 갖도록 하였으며, 좌굴로부터 안전하게 설계하였다. 또한 조절나사의 나사정밀도는 롤러가이드의 높이 정밀도에 영향을 미치고 최종적으로 성형롤러의 형상오차에 영향을 미치게 되므로 NC선반을 이용하여 정밀가공 하였다. 가이드바, 핀 등의 주요부품은 구조해석을 통하여 안전율 1.5 범위 내에서 적합한 재료로 선정하였다. 성형롤러와 직접적으로 접촉하는 롤러가이드는 마찰의 영향으로 인해 토크가 급격하게 증가할 수 있고, 발열이나 손상 등의

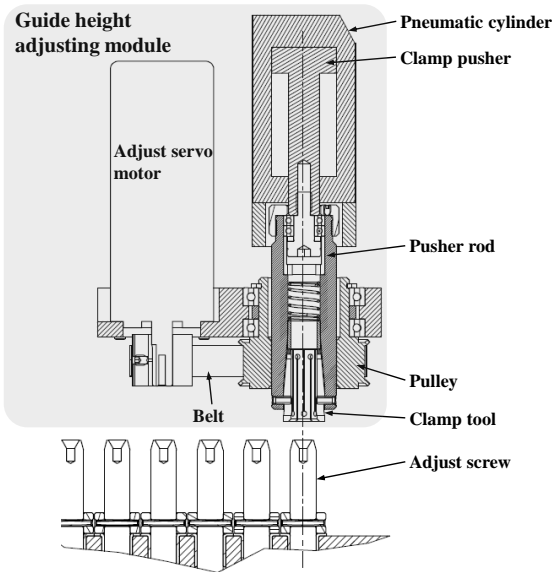


Fig. 7 Schematic diagram of guide height adjusting module

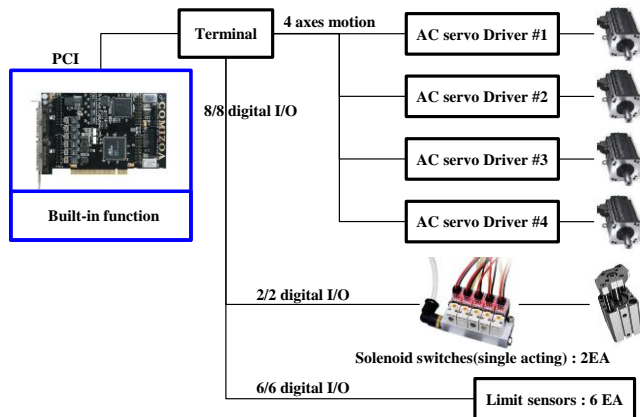


Fig. 8 Structural connectivity of electronic devices

문제가 야기될 수 있으므로, 롤러가이드의 홈부에 국부적으로 저마찰 코팅을 적용하여 운동마찰계수를 0.05 정도로 줄일 수 있도록 하였다[10].

2.4 이송장치 및 가이드높이조절모듈

성형롤러의 곡률은 곡률가이드의 길이조절을 통해서 이루어진다. 모든 곡률가이드에 1:1로 모터를 연결하여 길이를 조절하는 것이 가장 이상적이며 정밀도를 향상 시킬 수 있다. 하지만, 조절나사간 공간이 협소하고 다수의 모터를 필요로 하므로 구조가 복잡해지고, 비용적 측면에서 무리가 있다. 이러한 문제를 극복하고자, Fig. 6과 같이 이송장치와 가이드 높이조절모듈을 고안하였다. 이송장치는 가이

드 높이 조절모듈의 수평적 위치를 조절하는 장치로서, 상판과 하판에 각각 부착하였다. 이송장치는 리니어 액추에이터로 구성하였으며, 상하부에 동일 간격으로 배열된 모든 조절나사의 위치에 따른 가이드높이조절모듈의 이송을 수행한다. 리니어 액추에이터는 이송서보모터(transmitter servo motor)와 리니어가이드(linear guide)로 구성되어 있으며, 서보모터의 엔코더를 통하여 조절나사의 위치를 감지한다. Fig. 7은 가이드높이조절모듈의 구성도로서 조절나사와 연결되어 롤러가이드의 높이를 조절한다[11]. 조절나사와 체결 및 분리를 수행하는 연결부위는 정밀한 동력전달 및 차단을 위하여 임의의 위치 체결 구조인 무단정밀커플링(non-stepped precision coupling) 방식으로 구성하였다. 이는 체결 및 분리시 발생할 수 있는 조절나사의 헛뜸을 방지하기 위해서다. 먼저, 공기압으로 인하여 Clamp piston이 하강하면, Pusher rod와 Clamp tool이 하강하게 되고, Clamp tool은 조절나사의 끝단을 강하게 파지하게 된다. 이후, 높이 조절용 서보모터(adjust servo motor)는 지령 받은 회전각만큼 풀리(pulley)를 회전시키게 되고, 파지한 조절나사의 회전을 통해서 곡률가이드의 롤러가이드의 높이를 조절하게 된다.

다수의 곡률가이드 길이를 조절하는 것은 정밀함을 요구하며, 미흡한 체계 관리는 과도한 운용시간을 필요로 하게 되며, 빈번한 구동으로 인한 누적 오차는 성형정밀도를 떨어뜨리게 된다. 그러므로, 가이드높이조절모듈 및 롤러가이드와 관련된 부품들은 제작 및 조립시 공차(tolerance), 클리어런스(clearance), 백래시(backlash) 등을 엄밀하게 살펴야 한다.

3. 제어시스템 설계

제어시스템은 Fig. 8과 같이 구성되어 있으며, 각각의 곡률가이드 길이를 산출하고 실제적인 구동명령을 내리는 소프트웨어와 전기적 신호를 전달하기 위한 부수적인 장치들로 이루어져 있다.

각각의 곡률가이드의 길이를 산출하기에 앞서, Fig. 9와 같이 판재의 성형이 이루어지는 부분에 대해 살펴보면, 유입되는 판재와 상하로 배치되어 휘어지는 성형롤러 등의 2차곡선(conic section)으로 도시할 수 있다. 각각의 2차곡선에 따라 이심률(e)과 포축(latus rectum, L)의 값이 결정되며, 식(2)와 Fig. 9를

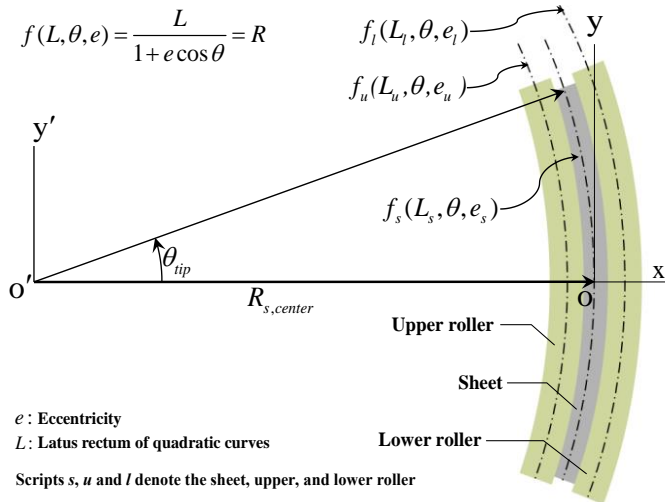


Fig. 9 Geometric relationship between rollers and sheet

통해서 곡률가이드의 길이를 산출하게 된다.

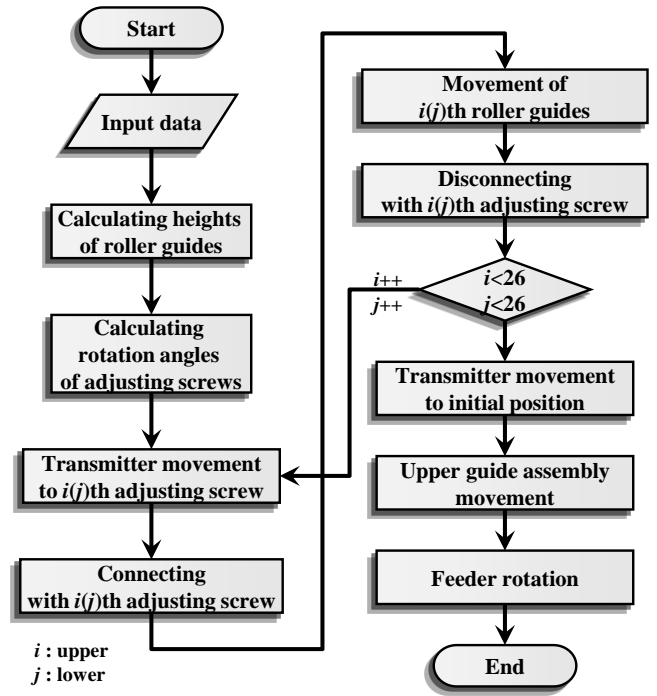
$$f(L_i, \theta, e_i) = \frac{L_i}{1 + e_i \cos \theta} = R_i$$

$$R_i = \frac{2L_i \pm \sqrt{4L_i^2 - 4(1 - e_i^2)(L_i^2 + y_i^2 e_i^2)}}{2(1 - e_i^2)}$$

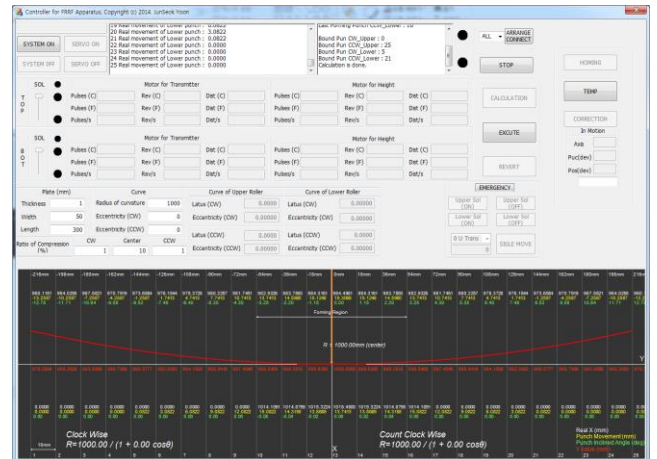
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{y_i}{R_i} \right)$$

$$x_i = R_i \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{y_i}{R_i} \right) \right) \quad \text{with } i = l, u$$

이때 y_i 의 값은 동일한 간격으로 배치된 조절나사의 위치 또는 각각의 곡률가이드의 위치가 된다. 반면에 x_i 의 값은 곡률가이드와 성형롤러의 중심선이 만나는 지점에 의해 결정된다. 하지만, x_i 의 값은 곡률가이드의 길이 또는 롤러가이드의 위치에 해당하는 x 값과는 일치하지 않으며, 곡선인 성형롤러의 결면을 따라 접촉함으로써 회전하는 롤러가이드의 회전각까지 고려하여 결정하게 된다. 이를 결정하기 위해서 롤러가이드와 직접적으로 접촉하는 상하부 성형롤러의 결면에 해당하는 추가적인 가상의 곡선이 1개씩 더 필요하다. 즉, 상부 성형롤러의 상부결면에 해당하는 곡선과 하부 성형롤러의 하부결면에 해당하는 곡선이다. 최종적으로 가상의 곡선, 롤러가이드, 2차곡선인 판재의 횡방향의 길이를 고려하여 반복적 알고리즘을 통하여 최종적으로 롤러가이드의 x 값을 결정하게 된다. 2차곡선들은 이심률



(a) Flow chart



(b) FRRF operating program

Fig.10 Flow chart and operating program for control of FRRF apparatus

이나 표측의 값이 변하더라도 장비의 성형이 이루어지는 부분을 항상 지나야 한다. 따라서, 곡률가이드의 길이를 산출하는 과정에서 가상의 중심 좌표 O' 는 좌표변환을 통해서 이동할 수 있다. 전체적인 제어흐름도를 Fig. 10(a)에 도시하였다. 성형하고자 하는 판재의 폭이 장비의 요구성능인 300mm보다 작을 때는 모든 곡률가이드가 성형롤러를 지지할 필요가 없으므로, 판재 폭의 크기에 따라 지지하는

곡률가이드의 수량이 달라지도록 하였다. 이는 지지하는 곡률가이드의 수량에 따라 성형롤러에 가해지는 토크에 의한 마찰력과 불필요한 세팅 시간을 줄이기 위함이다. Fig. 10(b)는 곡률가이드 길이를 산출하고 구동명령을 내리는 운영 프로그램(operating program)을 나타낸 것으로 사용자가 편리하도록 Visual C++를 활용하여 다이얼로그 방식으로 구성하였다. 성형롤러의 곡률 등의 정보를 입력하고 높이 산출을 수행한 후, 구동명령버튼을 클릭하는 방식이다. 운영프로그램은 다이얼로그 상에 산출된 곡선에 관한 정보 등이 표시되며, 장비에 부착된 곡률가이드 길이 및 각종 신호들을 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다.

4. 장비시스템 구동 및 성형실험

비정형롤판재성형 공정에서 판재의 휘방향의 곡률은 성형롤러의 곡률의 의해 결정된다. 반면에 종방향의 곡률은 휘방향으로 달리 적용되는 두께 방향 변형률의 차이에 의해 결정되며, 두께 방향 변형률의 차이는 상하 성형롤러의 사이의 간격의 차이에서 기인한다. 대표적인 3차원 곡면 형상의 판재를 예를 들면, 볼록형 형상은 판재의 휘방향으로 양쪽 가장자리보다 판재 중앙에 두께 방향 변형률을 크게 함으로써 성형된다. 반면에 중앙보다 양쪽 가장자리에 변형률을 더 크게 함으로써 안장형 형상의 판재를 성형할 수 있다[6~9, 12, 13]. Fig. 11은 시제작된 비정형롤판재성형 장비를 나타낸 것으로 이를 이용하여 볼록형과 안장형 형상의 판재에 대한 성형실험을 수행하였다. 성형소재는 알루미늄 1050을 사용하였으며, 판재의 초기 크기는 $150 \times 100 \times 1$ mm이다. Fig. 12는 제작된 장비를 활용하여 3차원 곡면형상의 판재를 성형하는 모습이다. 성형소재의 중심선을 기준으로 곡률반경과 이심률이 각각 1000mm, 0이 되도록 롤러가이드의 높이를 통하여 상하부 성형롤러를 곡률을 형성을 하도록 하였다. 볼록형 형상의 판재는 휘방향 양쪽 끝의 두께 방향의 압축률을 1%, 중심부는 5%로하여 성형실험을 수행하였으며, 안장형 형상은 볼록형 형상과는 반대로 중심부를 1%, 휘방향의 양쪽 끝은 5%의 두께 방향 압축률을 적용한 결과이다. 종방향의 곡률은 소재의 종류, 두께 등에 따라서도 달라질 수 있다. 따라서 소재의 종류, 두께 등에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으

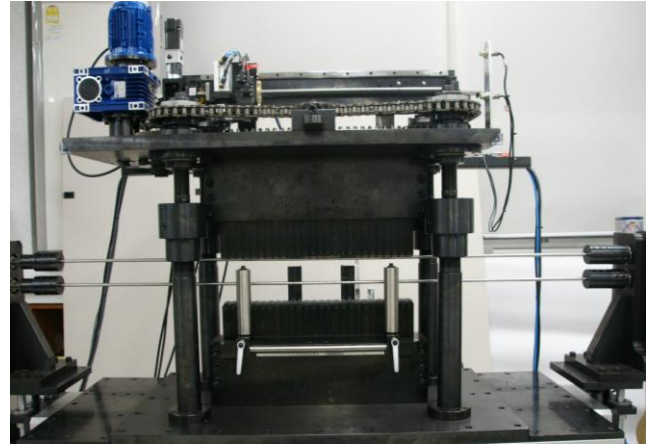


Fig.11 Prototype of FRRF apparatus

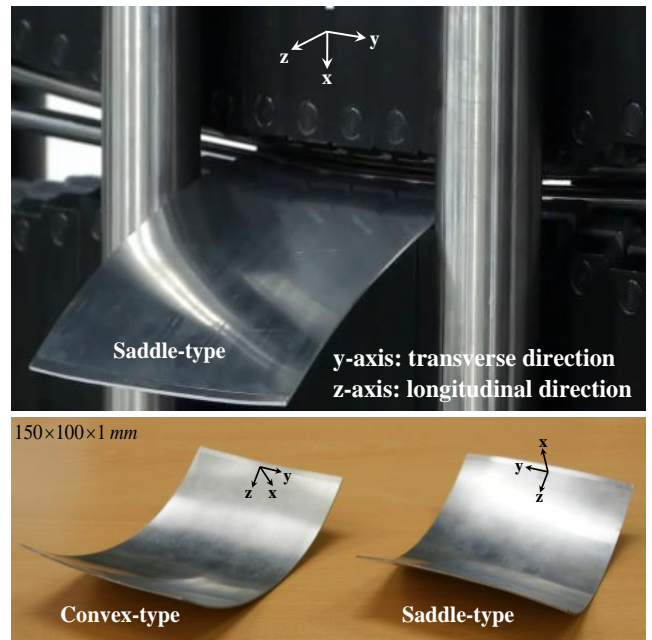


Fig.12 3D curved sheet metal product using FRRF apparatus

로 판단된다. 하지만 본 연구를 통해 개발된 장비는 기존의 가변성형공정에서 발생하는 압흔, 주름 등의 소재 표면 결함을 생성하지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 곡면성형을 구현함으로써 장비의 가용성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 신개념의 성형공정 개발을 위하여 비정형롤판재성형 장비를 개발하였고 이를 이용하여 3차원 곡면형상의 판재성형을 구현하였다. 하드

웨어 구성을 위하여 성형공정시의 부하조건 등을 고려하여 성형롤러, 롤러가이드 등의 재질을 결정하였으며, 추가적으로 고주파 열처리, 저마찰 코팅 등을 통하여 장비의 구동이 적절하게 이루어지도록 하였다. 또한, 적절한 이송장치를 고안하여 소량의 모터만으로 다수의 롤러가이드의 높이를 효율적으로 조절할 수 있도록 하였다. 임의위치 체결구조인 무단정밀커플링방식을 적용하여 가이드높이조절모듈을 개발함으로써 롤러가이드의 높이 조절 정밀도를 크게 향상시켰으며, 토크 전달이 원활하게 이루어지도록 하였다. 소프트웨어 측면에서는, 다이얼로그 방식으로 성형롤러의 곡률 등의 파라미터 입력을 통하여 각각의 곡률가이드의 길이를 산출하고 구동명령을 내리는 운영프로그램을 개발하였다. 본 연구를 통해서 개발된 장비를 활용하여 3차원 곡면형상의 판재를 성형하였으며, 이를 통하여 장비의 가용성을 확인할 수 있었다. 향후에는 본 장비를 활용하여 보다 다양한 소재에 대한 성형실험을 수행할 것이며, 정밀한 성형을 위한 추가적인 연구와 장비개선이 이루어질 수 있도록 할 것이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(NRF-2012 R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행된 연구임. 또한, 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015 H1C1A1035499).

REFERENCES

- [1] Q. Zhang, Z. R. Wang, T. A. Dean, 2007, Multi-point Sandwich Forming of a Spherical Sector with Tool-shape Compensation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 194, Issues 1-3, pp. 74~80.
- [2] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2005, An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheets Form General Quadrilateral Sheet Blanks with Enhanced Process Features, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 54, No. 1, pp. 221~224.
- [3] M. Li, Y. Liu, S. Su, G. 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.
- [4] V. Paunoiu, P. Cekan, E. Gavan, D. Nicoara, 2008, Numerical Simulations in Reconfigurable Multipoint Forming, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 1, No. 1, pp. 181~184.
- [5] J. W. Park, Y. B. Kim, J. Kim, K. H. Kim, B. S. Kang, 2013, Manufacturing of Architectural Skin-structure with a Double Curved Surface using Flexible Stretch Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 4, pp. 196~203.
- [6] B. S. Kang, J. S. Yoon, 2013, Sheet Forming Apparatus with Flexible Rollers, KR Patent: 10-1309228.
- [7] J. S. Yoon, S. E. Son, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2013, Flexibly Roll Forming Technology for Multi-Curved Sheet Metal Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 5, pp. 243~249.
- [8] S. E. Son, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Effect of Shape Design Variables on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming of Multi-curved Sheet Metal, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 2, pp. 103~109.
- [9] J. S. Yoon, S. E. Son, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Study on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming Process for Multi-curved Surface of Sheet Metal, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 6, pp. 1069~1074.
- [10] T. Spalvins, 1991, Lubrication with Sputtered MoS₂ Film: Principles, Operation, Limitations, NASA Technical Memorandum 105292.
- [11] H. H. Kim, B. S. Kang, J. S. Yoon, 2014, Dieless Forming Apparatus, KR Patent: 10-1420588.
- [12] S. E. Son, J. S. Yoon, H. H. Kim, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Evaluation of Formability Dependent on Reconfigurable Roller Types for 3D Curved Sheet Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 1, pp. 12~20.
- [13] J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Deformation Analysis and Shape Prediction for Sheet Forming using Flexibly Reconfigurable Roll Forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 233, pp. 192~205.