

# 알루미늄, 마그네슘과 구리합금의 비정형롤판재성형 공정 적용성 비교에 관한 연구

길민규<sup>1</sup> · 윤준석<sup>1</sup> · 박지우<sup>1</sup> · 강범수<sup>#</sup>

## Comparative Study of Applicability of Aluminum, Magnesium and Copper Alloy Sheets using Flexibly-reconfigurable Roll Forming

M. G. Kil, J. S. Yoon, J. W. Park, B. S. Kang

(Received April 3, 2017 / Revised May 23, 2017 / Accepted May 24, 2017)

### Abstract

A new sheet metal forming process, called flexibly reconfigurable roll forming (FRRF), is expected to resolve the economical limitation of the existing 3D curved sheet metal forming processes. The height-controllable guides and a couple of flexible rollers are utilized as the forming tool. Recently, as the 3D curved sheet metal is increasingly demanded in various fields, the application of FRRF to diverse materials is necessary. In addition, the formability comparison of several materials is needed. Therefore, in this study, we investigated the applicability of FRRF for different materials such as aluminum, magnesium, and copper alloys, and also the formability of these materials was compared using FRRF. The numerical simulation was conducted using ABAQUS, the commercial software, and the experiments were carried out using an FRRF apparatus to validate the simulation results. Finally, the applicability of FRRF for the chosen materials and the formability of these materials on FRRF process were confirmed by comparing the simulation and experimental results.

**Key Words:** Flexibly-reconfigurable Roll Forming, FE Simulation, Comparative Study

## 1. 서 론

최근 건물 외피, 항공기, 자동차 등 다양한 분야에서 목적에 맞는 형상의 판재성형을 필요로 하는 추세이나, 프레스 공정, 스트레치 성형공정, 선상 가열법 등으로 이루어진 기존의 성형 공정은 다양한 목적형상이 요구되는 다품종 소량생산 체제에서 제작비의 증가, 생산성 저하 등 경제적인 제약이 따른다[1]. 이러한 기존 성형방법의 단점을 극복하기 위하여 가변성형기술이 연구 중에 있으며, 다점성형공정(multi-point dieless forming, MDF), 비정형롤판재성형(flexibly-reconfigurable roll forming, FRRF) 등이 제

시되었다[2, 3]. FRRF는 Fig. 1과 같이 롤러 가이드를 원하는 형상에 맞게 배열 한 후 휘어지는 롤러를 이용하여 곡률을 가진 형상의 판재를 성형하는 방법으로서, 목적에 맞는 형태의 결과물을 제작할 수 있어 다품종 소량생산 체제에서 생산설비 비용을 줄일 수 있다.

FRRF는 현재 알루미늄 합금에 대한 회귀분석을 활용한 공정의 형상 예측, 판재 성형을 위한 형상설계변수에 대한 연구 및 장비 개발 등 다양한 연구가 진행 중이며, 최근 다양한 분야에서 곡률 형상의 판재를 요구하는 만큼, 여러 재질의 FRRF에서 적용 가능성 및 재질 별 곡면구현성의 비교에 대한 연구

1. 부산대학교 항공우주공학과

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

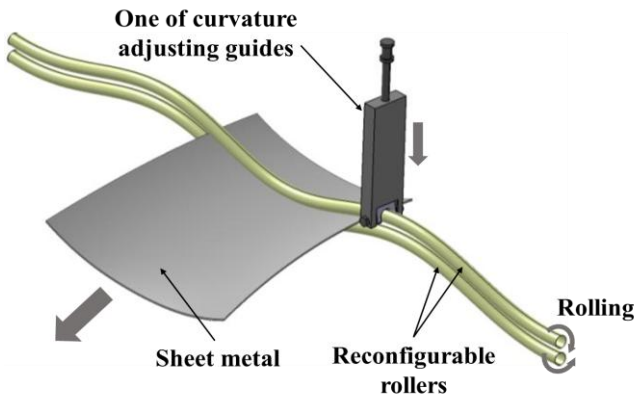


Fig. 1 Graphical explanation of FRRF process

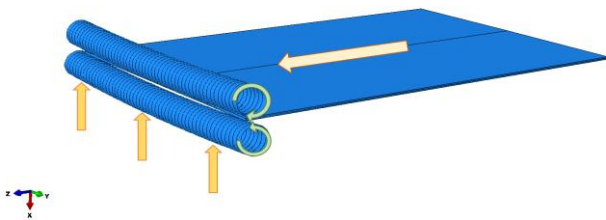


Fig. 2 Procedure of FRRF process using FE simulation

도 필요하다[4~6].

본 논문에서는 마그네슘 및 구리 합금에 대한 FRRF에서의 적용가능성을 판단하고 기존에 연구되고 있던 알루미늄 합금과 다른 두 합금의 곡면구현성을 비교하였다. 먼저, 마그네슘 합금은 비교적 비강도가 높으며, 차폐능, 열전도성이 우수하여 생활용품, 자동차, 항공기 산업 등에서 그 수요가 매년 증가하고 있다. 하지만, 조밀 육방 격자 (Hexagonal close packed, HCP) 구조의 특성상 변형이 일어나는 슬립면이 한정되어 있어 상온에서 파단이 쉽게 발생한다. 이러한 단점에 의해 온도 별 피로 강도, 재료특성에 관해 연구가 이루어지고 있다[7, 8]. 반면, 상온에서 다른 성형기법을 활용한 가공에 대한 연구는 이루어지지 않고 있어, 새로운 성형기법인 FRRF를 통해 마그네슘 합금의 상온에서의 성형 가능 여부 및 성형성을 확인해 볼 가치가 있는 것으로 판단된다. 구리 합금은 대기에서 산화되어 녹청의 색상변화로 의장성이 뛰어나 별도의 도색이나 코팅이 필요 없고, 내부식성이 우수해 반영구적으로 사용할 수 있다는 장점이 있어 건축물의 지붕이나 외벽 등에 많이 사용되고 있다[9]. 최근 다양한 형태의 건축물을 건설하고 있으며, 그에 따른 다양한

Table 1 Material properties

Materials	Al2024	AZ31B	C1220
Density ( $Kg / m^3$ )	2,705	1,770	8,940
Young's modulus ( $GPa$ )	69	45	115
Yield strength ( $MPa$ )	352	150	69
Tensile strength ( $MPa$ )	469	255	221
Poisson's ratio	0.33	0.35	0.31
Strength coefficient, K ( $MPa$ )	709	424	382
Work-hardening exponent, n	0.14	0.19	0.42

형상의 판재가 필요할 것으로 판단되어 구리 합금은 FRRF에 적용할 가치가 있는 것으로 보인다. 아직 물성치가 다른 재질에 대한 FRRF에서 곡면구현성을 비교한 연구가 없어 물성이 다른 세 재질이 FRRF에서의 곡면구현성을 비교해 보고자 한다. 따라서, 본 논문은 마그네슘, 구리합금에 대한 FRRF에서의 적용 가능성을 알아보고 알루미늄과 마그네슘, 구리합금의 곡면구현성을 비교하기 위하여 유한요소해석 및 시제작 된 FRRF 장비를 사용하여 실험을 수행하였다.

## 2. 유한요소해석 및 결과

### 2.1 각 소재의 물성치

본 논문에서 알루미늄합금은 Al2024-T4, 마그네슘 합금으로는 AZ31B-O, 구리합금으로는 연질의 인탈 산동 UNS C12200 (JIS C1220)을 사용하였으며, 각 소재의 주요 물성치는 Table 1에 도시하였다[10, 11]. 탄성계수는 Al2024, AZ31B, C1220 순으로 69, 45, 115  $GPa$  이며, 인장강도는 352, 150, 69  $MPa$  이다. 소성 영역에서의 물성치는 Hollomon의 가공 경화식 ( $\sigma = K\epsilon^n$ )을 사용하였다. 물성치를 살펴보면, Al2024가 가장 단단하고, C1220이 가장 무른 재질로서, 곡면구현성은 C1220이 가장 좋을 것으로 보인다.

### 2.2 유한요소해석 조건

유한요소 해석은 상용 해석 프로그램 ABAQUS를 사용하였다. 실제 실험장비와 동일한 해석 조건으로 모사하기 위하여 Fig. 2와 같이 너비 2 mm, 지름 10 mm의 단위롤러 (Unit roller)를 너비 방향으로 나열하여 롤러형태로 곡률을 구현했다. 첫 번째 단계에선 위 아래 롤러 사이의 거리를 좁혀 판재를 삽

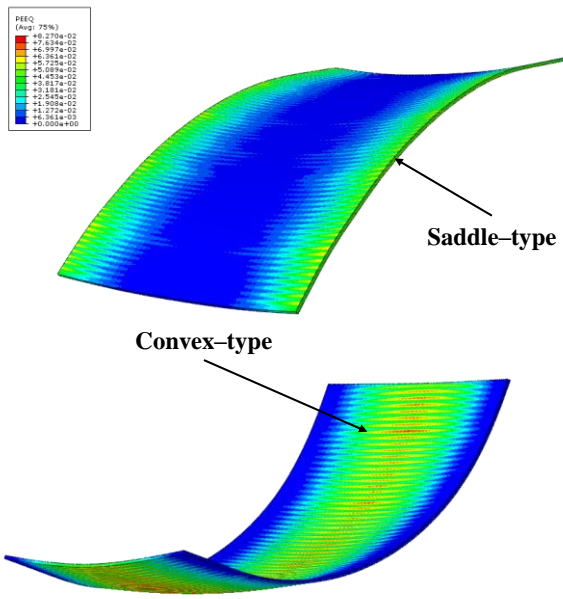


Fig. 3 Strain distribution of convex and saddle-type

입 및 압축하고, 두 번째 단계에서 롤러를 회전시켜 판재를 밀어낸다. 판재의 크기는  $100 \times 150 \times 1 \text{ mm}^3$ 으로 설정하였다. 단위롤러와 판재의 요소 크기는 각각 0.5, 0.4 mm로 설정하였으며, 판재는 두께방향으로 4개의 요소로 구성하였다. 또한, 판재의 횡방향 중심선을 기준으로 하는 곡률반경은 1,000 mm로 해석을 수행하였다. 대표적인 곡면 형상은 볼록형 (Convex-type)과 안장형 (Saddle-type)이 있다. 볼록형은 변형률이 가장자리 보다 중앙에서 더 큰, 즉 판재의 중앙에서 더 높은 압축률이 적용되어야 하며, 안장형은 볼록형과 반대로 압축률이 가장자리에서 더 크게 적용되어야 한다. Fig. 3에는 볼록형과 안장형 형태의 유한요소해석 결과 중 하나이다. 볼록형은 판재의 중심 부분에서 변형률이 크며, 안장형은 판재의 끝부분에서 변형률이 크음을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 각 재료에 대한 성형성을 비교하기 위하여 같은 압축비 (Compression ratio) 조건인 3% 볼록형에서 판재의 물성치 별로 해석을 실시하였다. 여기서 3% 볼록형이란, 가장자리의 압축률이 1%이고, 중앙 부분의 압축률이 3%인 볼록형을 의미한다.

### 2.3 유한요소해석 결과

Al2024, AZ31B와 C1220의 곡면구현성을 비교하기 위하여 동일한 압축비인 3% 볼록형에서 재질별 유한요소해석을 수행하였다. 해석상에서 곡률이 어떻

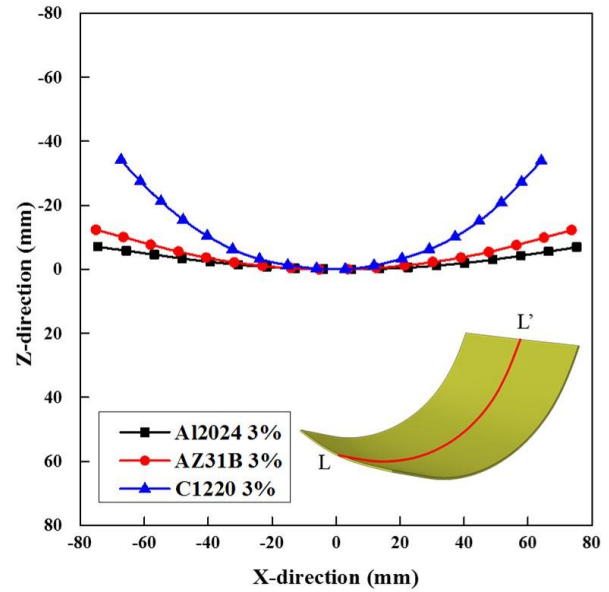


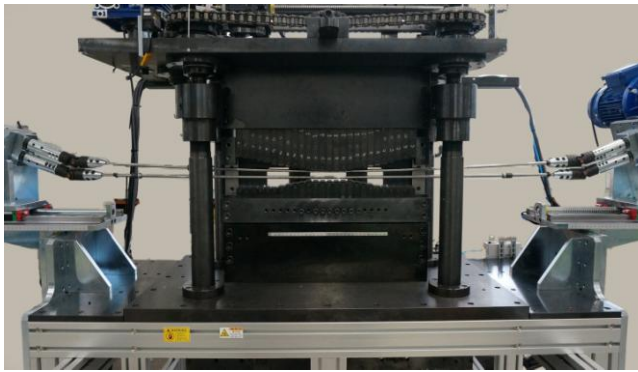
Fig. 4 Comparison of curvatures of AZ31B and C1220 under same compression ratio

게 나오는지 확인하기 위하여 판재의 종방향 중심선의 각 노드 좌표를 추출하여 Fig. 4에 도시하였다. 곡률반경은 Al2024, AZ31B, C1220순으로 크며, 최대 변형률은 0.023, 0.035, 0.082로 곡률반경과는 반대의 양상을 띠었다. 이는, Al2024, AZ31B, C1220 순으로 인장강도가 높고, C1220의 탄성계수가 가장 높기 때문으로 판단된다. FRRF는 변형률로 판재를 성형하는 기법으로, 유한요소해석 수행 시, 초기 판재가 롤러 사이에서 구속되어 있는 상황에선 동일한 변형률로 성형이 이루어진다. 하지만 롤러가 회전하여 판재를 밀어내는 순간 정해진 변형률로 성형이 수행되어 판재가 롤러에 의한 구속이 풀리며 탄성회복을 하게 된다. 이 때, 인장강도가 높은 순인 Al2024, AZ31B 그리고 C1220 순으로 탄성회복이 많이 이루어진다. 이런 탄성회복의 차이에 의해 성형이 완료되었을 때 최대 변형률과 곡면구현성이 결정되는 것으로 사료된다. 인장강도가 비슷한 재질일 경우, 탄성계수가 클수록 탄성회복량이 작아져, 곡면구현성이 더 커지게 된다. 따라서 FRRF에서의 곡면구현성은 재질의 탄성계수와 인장강도에 따라 결정 되는 것으로 판단된다.

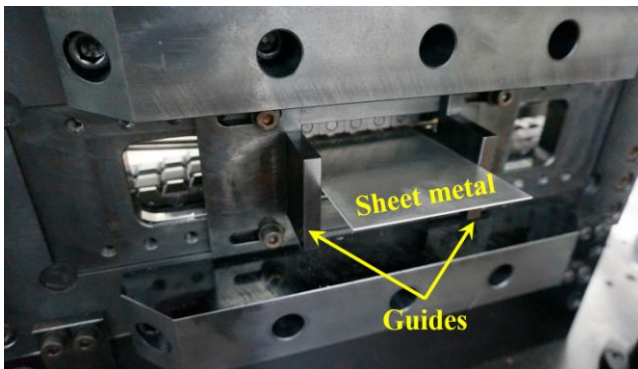
## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험 장비

Fig. 6(a)에 도시한 것과 같이, 시제작 된 FRRF 장



(a) Front view



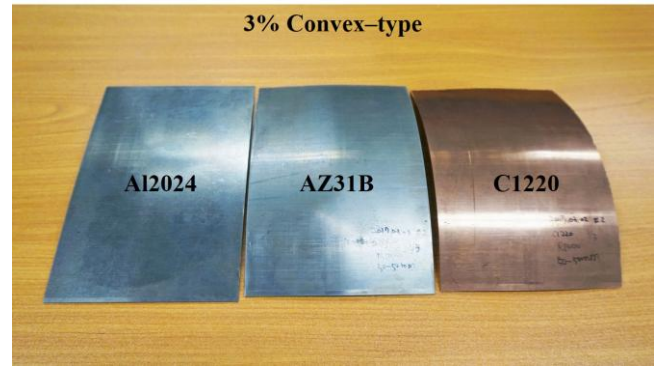
(b) Rear view

Fig. 5 Experiments using devised FRRF apparatus

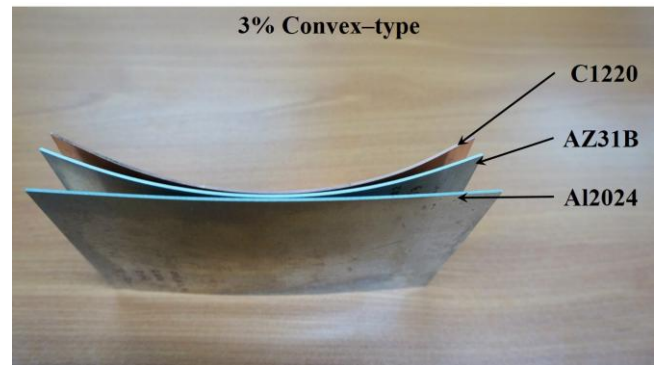
비로 실험을 수행하였다. FRRF 장비는 크게 비정형 롤러, 좌우 롤러 구동부와 상하부 각각 곡률가이드 모듈과 곡률가이드를 포함하고 있는 상하판으로 구성된다. 곡률가이드모듈로 곡률가이드의 높이를 조정하여 곡률을 결정한다. 상판이 아래로 내려오며 비정형롤러에 곡률을 적용하며, 롤러 사이에 판재를 삽입해 압축을 가한다. 판재가 삽입된 상태의 성형롤러를 회전시켜 판재를 곡면으로 성형한다. 장비의 뒷면에 Fig. 6(b)와 같이 판재의 고정을 돕기 위한 가이드를 설치하여 성형 도중 발생할 수 있는 사행을 방지하였다. 롤러구동부를 유니버설 조인트로 구성하였고, 상하 자유도를 주어 롤러의 곡률이 자연스럽게 적용되도록 하였다.

### 3.2 실험 조건

실험을 통해 FRRF 장비에서 AZ31B와 C1220이 결함 없이 성형이 잘 이루어 지는지를 가늠하였고, Al2024와 두 재료의 곡면구현성을 비교하였다. 실험에서의 재료별 곡면구현성이 유한요소해석과 유사



(a) Top view



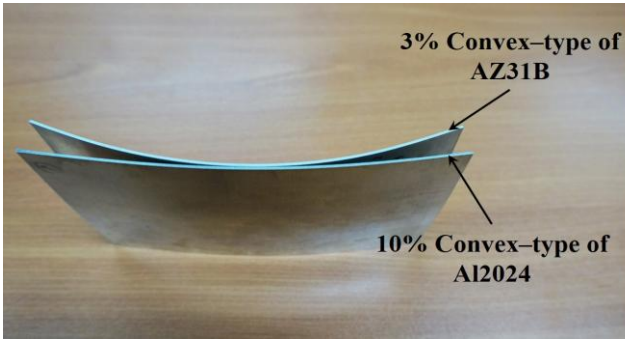
(b) Side view

Fig. 6 Experimental results for comparison of curvature under same compression ratio

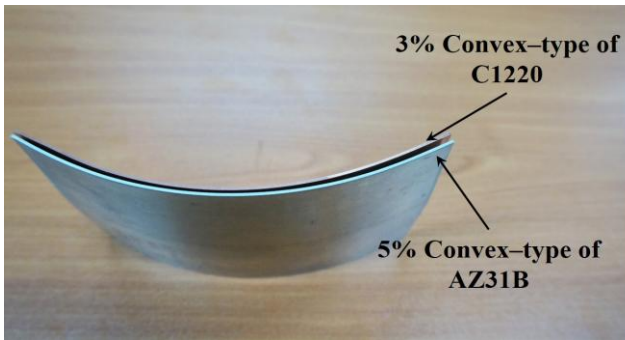
한 경향성을 띠는지 확인하기 위하여 실험조건을 유한요소해석과 같게 하여 실험을 수행하였다. 판재의 크기는  $100 \times 150 \times 1 \text{ mm}^3$ , 실험 조건의 압축비는 3% 볼록형으로, 판재의 횡방향 중심선 곡률반경은  $1,000 \text{ mm}$ 로 하였다.

### 3.3 실험결과

Al2024, AZ31B, C1220을 FRRF 장비를 사용하여 실험을 수행하였다. 성형이 완료된 시점에서 판재에 국부적인 파단이나, 과도 변형 등의 문제점 없이 성형이 이루어졌다. AZ31B는 HCP 구조로서 소성변형이 일어나는 슬립 면이 한정되어 있어 상온에서의 프레스 가공, 압출 등에서 파단이 쉽게 일어나는 특성이 있다. FRRF는 하중 구도가 일반적인 프레스가 공이나 압출가공과는 달라 HCP 구조도 성형이 가능한 것으로 판단된다. C1220은 재료의 특성상 성형성이 뛰어나 예상대로 FRRF에서 성형이 잘 이루어졌다. 각 재료의 같은 압축비 조건인 3% 볼록형에서



(a) Compare AZ31B and Al2024



(b) Compare AZ31B and C1220

**Fig. 7 Experimental results for comparison of curvature under different compression ratio**

의 실험결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)는 모든 재질이 FRRF에서 성형이 잘 이루어 졌음을 보였으며, Fig. 6(b)는 종방향 곡면구현성을 도시하였다. 유한요소해석의 결과와 유사하게 Al2024, AZ31B, C1220 순으로 종방향 곡률반경이 높게 성형되었다. 이는 Al2024보다 AZ31B가, AZ31B보다 C1220이 FRRF에서 곡면구현성이 우수함을 의미한다.

### 3.4 유한요소해석과 실험결과 비교

AZ31B와 C1220 재질의 FRRF에서의 적용 가능성을 알아보고 Al2024와 다른 두 재질별 곡면구현성을 비교하기 위하여 유한요소해석과 시제작된 장비를 통한 실험을 수행하였다. 유한요소해석과 실험결과 두 재질이 성형함에 있어 파단 혹은 과도변형이 일어나는 등의 문제가 발견되지 않는 것으로 보아 AZ31B와 C1220은 FRRF에 적용이 가능한 것으로 판단된다. 세 재질의 FRRF에서 곡면구현성을 비교하기 위하여 같은 압축비 조건인 3% 볼록형으로 유한요소해석과 실험을 수행하였다. Al2024, AZ31B, C1220 순으로 판재의 종방향 기준으로 곡률반경이

더 큰 형상으로 성형되었다. 재질별 곡면구현성에 대한 유한요소해석결과와 실험결과가 유사한 경향성을 띠는 보임으로써, 유한요소해석결과와 신뢰성을 확보하였다. 이는 유한요소해석결과에서 기술한 탄성회복이 판재의 성형에 미치는 영향이 실험에서도 적용이 되는 것으로 사료할 수 있다. 따라서, AZ31B와 C1220은 FRRF이 적용가능하며, Al2024, AZ1B, C1220순으로 곡면구현성이 열등함을 보였다. 추후 Al2024, AZ31B, C1220 외에 다른 재질을 FRRF에 적용할 경우, 인장강도로 곡면구현성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 재질별 다른 조건에서 곡률 비교

동일한 조건에서의 곡면구현성 비교뿐만 아니라 유사한 곡률을 가지는 조건을 도출할 필요가 있다. Al2024, AZ31B, C1220 순으로 곡면구현성이 열등하다는 결과를 바탕으로 유사한 곡률을 가지는 조건을 예측해 보았다. 먼저, Al2024는 실험에서 다른 재질보다 곡면구현성이 뒤떨어져 장비로 구현 가능한 최대 압축비 조건인 10% 볼록형으로 성형하여 AZ31B 3% 볼록형 결과와 비교하였다. 실험결과를 Fig. 7(a)에 도시하였으며, Al2024의 곡률이 더 낮음을 확인하였다. 이는 Al2024의 인장강도가 AZ31B에 비하여 2배 이상 높아 곡면구현성이 낮기 때문으로 판단된다. 본 논문에서는 Al2024는 다른 두 재질과 유사한 곡률의 조건을 도출하기 난해할 것으로 판단하여, AZ31B와 C1220에 대해서만 유사한 형태로 성형이 가능한지 가늠하여 보았다. AZ31B에 5% 볼록형으로, C1220을 3% 볼록형으로 성형하여 Fig. 7(b)에 도시하였다. 결과 종방향 곡률이 유사함 확인하였으며, AZ31B와 C1220은 유사한 곡률로 성형이 가능함을 보였다. 이는 재질별 구현 가능한 곡률의 범위가 있으며, 재질에 따라 원하는 곡률을 도출하지 못할 수도 있다고 판단할 수 있다. 추후 Al2024와 같이 인장강도가 높은 재질을 AZ31B와 유사한 수준의 곡률로 성형할 수 있는 방법이 필요하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 AZ31B, C1220의 FRRF에서의 적용 가능성과 그에 따른 Al2024와 두 재질의 곡면구현성 비교를 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하였

다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) AZ31B와 C1220을 FRRF에서의 적용가능성을 판단해 보았다. HCP 구조의 특성상 상온에서 연성이 낮은 AZ31B를 유한요소해석 및 실험을 수행하여 FRRF에서 성형이 잘 이루어지는지 확인해 보았다. 5% 볼록형의 압축비까지 판단 없이 성형이 잘 이루어졌다. FRRF의 하중구도가 일반적인 프레스 가공과 다르기 때문으로 보인다. C1220은 재질의 특성상 성형성이 우수해 FRRF에서도 성형이 잘 이루어졌다.

(2) Al2024, AZ31B 그리고 C1220의 FRRF에서 곡면 구현성을 비교하기 위하여 같은 압축비 조건인 3% 볼록형으로 유한요소해석 및 실험을 수행하였다. 인장강도는 Al2024, AZ31B, C1220 순으로 높으며 실험 및 유한요소해석결과 곡면구현성은 C1220, AZ31B, Al2024 순으로 우수하였다. 이는 변형률로 판재를 성형하는 FRRF에서 판재에 작용되는 톨러의 구속이 풀리는 순간 탄성회복이 발생하며 탄성회복의 정도에 따라 곡면구현성이 결정되기 때문인 것으로 사료된다.

(3) Al2024, AZ31B와 C1220을 유사한 곡률로 성형하기 위한 조건을 찾아보았다. Al2024는 장비로 구현 가능한 최대 압축비 조건인 10% 볼록형으로 성형을 하였다. 하지만, AZ31B의 3% 볼록형보다 낮은 곡률을 가져 유사한 형태로 성형이 난해할 것으로 판단하였다. 따라서, AZ31B와 C1220에 대해서 유사한 곡률반경을 가지는 조건을 예측하였으며, AZ31B의 5% 볼록형과 C1220의 3% 볼록형에서 유사한 곡률반경을 가지는 것을 확인하였다. Al2024와 유사하게 인장강도가 높은 재질을 FRRF에서 성형 할 경우, 비교적 무른 재질과 유사한 곡률로의 성형에 대한 연구도 필요하다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자는 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- [1] T. J. Kim, D. Y. Yang, 2000, Improvement of Formability for the Incremental Sheet Metal Forming Process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, No. 7, pp. 1271~1286.
- [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, No. 1, pp. 277~280.
- [3] 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.
- [4] S. E. Son, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Effect of Design Variables on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming of Multi-curved Sheet Metal, *Trans. Mater. Process*, Vol. 23, No. 2, pp. 103~109.
- [5] J. W. Park, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Shape Prediction of Flexibly-reconfigurable Roll Forming Using Regression Analysis, *Trans. Mater. Process*, Vol. 25, No. 3, pp. 182~188.
- [6] J. S. Yoon, J. Kim, H. H. Kim, B.S. Kang, 2014, Feasibility Study on Flexibly Reconfigurable Roll Forming Process for Sheet Metal and Its Implementation, *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 2014, Article ID 958925, p. 9.
- [7] K. Tokaji, M. Kamakura, Y. Ishiizumi, N. Heseqawa, 2004, Fatigue Behavior and Fracture Mechanism of a Rolled AZ31 Magnesium Alloy, *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, No. 11, pp. 1217~1224.
- [8] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, 2007, Experiments for Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperature, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 5, pp. 364~369.
- [9] C. H. Park, K. S. Oh, N. G. Lim, 2010, A Study on Application and Performance Evaluation of Copper Plate as Root Barrier for Green Roof System, *J. Archit. Inst. Kor. Struct. Constr.*, Vol. 26, No. 9, pp. 111~118.
- [10] R. P. Reed, R. P. Mikesell, 1967, National Bureau of Standard Directed by A. V. Astin, United States Department of Commerce, United States, pp. 6~7.
- [11] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta, 1999, Finite-element Analysis of the Formability of a Magnesium-based Alloy AZ31 Sheet, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.89, No.90, pp. 135~140.