

## 특수합금 사각봉 모넬 소재의 인발 소성변형 및 롤러 특성 해석

### Analysis on Characteristics of Drawing Plastic Deformation for Rectangular Monel Material with Special Alloy and Rollers

이영식<sup>1</sup>, 양영준<sup>2\*</sup>

Young-Sik Lee<sup>1</sup>, Young-Joon Yang<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Hydrogen embrittlement leads to the damages in bolts, nut, especially, high pressure valves, in the semiconductor facilities, hydrogen vehicles, hydrogen stations and so on. Monel material has higher strength than SUS material. Therefore, even though Monel material with special alloy is usually used to prevent the hydrogen embrittlement, it needs powerful drawing system to manufacture the rectangular or hexagonal bar using circular bar. The purpose of this study is to investigate the characteristics of plastic deformation of Monel material and 2 rollers of rolling unit in plastic limit through numerical analysis. As the results, it was predicted that, based on mean stress, as the rolling step was increased, the rolling force of rolling unit was decreased. In addition, the heat treatment for Monel material was needed because of residual stress due to plastic deformation. As for rollers, the roller was safe about 1.86 times compared with that of ultimate strength. In this study, as the roller 2 showed larger stress than roller 1, thus, roller 2 should be designed carefully to guarantee the safety. Further it was confirmed that the reaction force of roller could be helpful in bearing design.

*Keywords : Drawing, Hydrogen Embrittlement, Monel Material, Plastic Deformation, Roller, Rectangular Bar, Special Alloy*

---

1 (주)한영기계, 대표이사

1 Han Young Machinery Co., Ltd., CEO

2\* 정회원, 교신저자, 경상국립대학교 자동차공학과, 교수

2\* Dept. of Automotive Engineering, Gyeongsang National University

E-mail: yangyj@gnu.ac.kr

## 1. 서론

SUS 소재는 큰 장점에도 불구하고 최근 반도체 설비, 수소자동차 및 수소충전소 등 초고내식성, 초고내밀, 초고내압 등의 부품 적용에 한계를 나타내고 있다. 수소(H<sub>2</sub>) 가스와 접하는 부품은 수소취성(hydrogen embrittlement) 현상이 발생하여 표면의 특성 변화로 인한 가스누출 등 안전에 위험이 있어 Ni 계의 특수합금인 모넬(Monel), 인코넬(Inconel) 등과 같은 특수합금(special alloy)을 수소 가스용의 볼트, 너트 및 고압밸브류 등에 적용하고 있다. 특수합금에 관한 연구로서, Song 등 [1]은 고강도 강의 냉간압연 시 압연하중 예측에 관한 연구를 수행하였으며, Lee 등[2]도 일반 인발성형 시스템을 특수합금과 같은 고강도의 소재를 적용할 경우 필요한 압연력에 대해 해석적 방법을 이용하여 조사하였다. 모넬 소재에 관한 연구로서, Choi 등[3]은 모넬 소재의 오버레이 용접을 통해 적층수에 따른 Fe 함량, 적층 부위별 경도 등을 조사하여 이에 따른 특징을 조사하였다. Cho 등[4]은 Ni기 초합금인 모넬 400 금속에 액상 침적법으로 Al-Cu 합금 코팅층을 형성하여 이에 따른 조직 및 경도 분석 등을 수행하였다. 또한 Kim 등[5]은 소성응력 변화에 관한 해석으로서 평판에 충돌하는 사각봉에 관한 연구를 수행하였다.

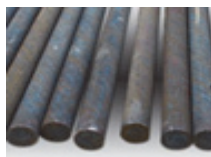
본 연구에서는 수치해석을 통해 특수합금 모넬

소재의 소성변형 및 모넬 소재를 압연하는 롤링 유닛 장치의 특성 등에 관한 조사를 수행하고자 한다. 즉 인발성형 시스템을 이용한 특수합금 모넬소재 압연 시 소성변형 특성, 이로 인한 핵심부품인 롤러의 영향 및 롤러 베어링 설계에 필요한 기초자료 취득을 본 연구의 목적으로 하였다.

## 2. 모델링 및 수치해석 방법

본 연구는 특수합금 모넬 440 소재의 환봉에서 사각봉으로의 소성변형 등에 관한 것이며 Fig. 1에 환봉 원자재(a)에서 최종 제품인 사각형의 밸브 및 피팅류 제품(d)까지의 과정을 나타내었다 [2],[6].

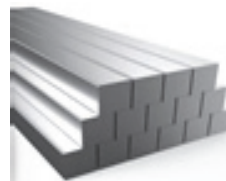
Fig. 1(a)는 길이 약 6,000mm, 직경 약 수십 mm인 검은색 흑피의 환봉이며 필링공정을 통해 광택이 있는 고 표면정밀도를 갖는 Fig. 1(b)와 같은 환봉이 된다. 이 환봉은 인발성형 시스템을 통해 Fig. 1(c)와 같은 사각봉으로 성형된다. 이 사각봉은 절단 및 가공함으로써 최종적으로 Fig. 1(d)와 같은 모넬 소재의 사각형 밸브, 피팅류 등으로 제작된다. 본 연구는 Fig. 1(b)에서 Fig. 1(c) 단계의 공정에 관한 것이다. 이전의 연구[2]는 SUS 소재의 육각 인발공정이었으나 본 연구는 SUS 보다 높은 강도를 갖는 특수합금 모넬 소재를 대상으로 하였다.



(a) Raw bar



(b) Circular bar



(c) Rectangular bar



(d) Rectangular valve, fittings

Fig. 1 Drawing process((b)→(c))

Fig. 2에 인발공정의 예[2]를 나타내었다. Fig. 2(b)에 본 연구 대상인 사각형 롤링 유닛(rolling unit), Fig. 2(c)에 인발성형 시스템을 나타내었다. 그림에서 롤링 다이(rolling die)에 사각형 롤링

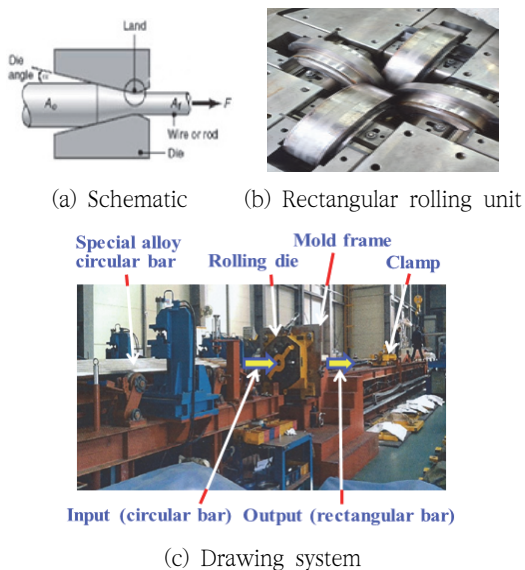


Fig. 2 Example of drawing system

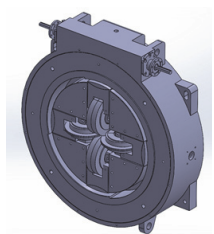


Fig. 3 Modeling of rectangular rolling unit

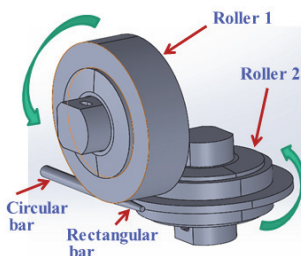


Fig. 4 Parts for numerical analysis

유닛이 장착된다.

사각형 롤링 유닛 Fig. 2(b))의 3D 모델링을 Fig. 3에 나타내었다. 본 그림은 불필요한 부품들이 많으므로 수치해석을 위해 필요한 부분만을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 봉(bar)과 롤러 1 및 롤러 2가 관측된다. Fig. 2(b) 및 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이, 롤러의 형태(롤러 1 및 롤러 2)가 다르다. 대형 사이즈의 특수합금의 압연은 쉽지 않다. 롤러가 크면 큰 압연력을 가할 수 있지만 사각형의 소형 사이즈에 대응하기 어렵다. 이와 같은 이유로 롤러가 크면서 사각형의 소형 사이즈를 압연하기 위해 롤러 2와 같은 형상의 롤러를 적용하였다. 해석에 사용된 모델은 상하좌우 롤러 및 환봉의 1/4만을 사용하였다.

Fig. 5에 격자를 나타내었다. 격자는 Hexa dominant, 노드 수는 약 4만개, 엘리먼트 수는 약 1만개로 하였으며 이는 롤러는 10mm, 환봉은 2mm에 해당한다. 본 해석을 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다.

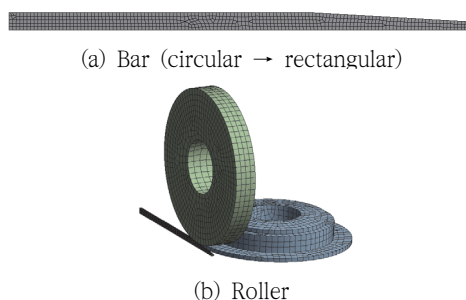


Fig. 5 Mesh

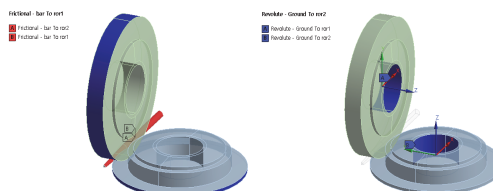


Fig. 6 Boundary conditions

경계조건을 Fig. 6에 나타내었다. 해석은 전체 모델의 1/4로 하였기 때문에 각각의 대칭면에 symmetry 조건을 설정하였다. 해석 진행은 롤러 1쌍 및 환봉 총 3 파트로 구성되어 있으므로 각각 파트 간의 접촉을 정의하여야 한다. 각 롤러 면과 환봉 표면은 서로 마찰이 존재하여야 환봉 이동 시에 회전이 이루어지므로 frictional 조건으로 마찰계수 0.01로 설정하였다. 또한 롤러는 중심축으로 회전이 발생되므로 joint 조건에서 body to ground-revolute로 설정하여 롤러 내측면이

회전할 수 있도록 하였다. 인발력은 당기는 힘, 인발 시 속도 등을 적용할 수 있다. 여기서는 10 초 동안에 200mm를 전진하여 인발이 이루어지는 것으로 하였다. 또한 환봉의 끝부분은 인발 전진 방향을 제외한 나머지 방향으로의 변위가 발생하지 않도록 설정하였다.

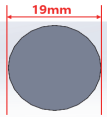
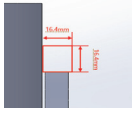
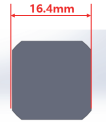
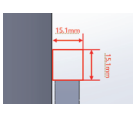
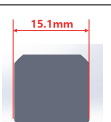
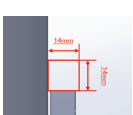
Table 1에 환봉 소재인 모델 440 및 롤러 소재인 SKD 11의 물성값을 나타내었다. 실제 롤러는 열처리 후 HRC 58~60에서 운전하게 된다.

Table 2에 해석 조건을 나타내었다. 인발과정은 1회만으로 불가능하기 때문에 총 3회에 걸쳐 환봉 단면을 사각단면으로 변형시킨다. 그림에서와 같이 1차 인발(Case 1 또는 압연 1단계) 시는 환봉 직경 19mm를 각각 사각변 길이 16.4mm로 압연시키며, 2차 인발(Case 2 또는 압연 2단계) 시는 사각변 길이 16.4mm를 15.1mm로, 3차 인발(Case 3 또는 압연 3단계) 시는 사각변 길이 15.1mm를 14mm로 압연하여 공정을 마치게 된다.

Table 1. Material properties

	Circular bar (Monel 440)	Roller (SKD 11)
Density(kg/m <sup>3</sup> )	8910	7850
E (GPa)	169	200
Poisson's ratio	0.295	0.3
Yield strength (MPa)	689 (tensile)	2538 (compressive)
Ultimate strength (MPa)	758 (tensile)	3257 (compressive)

Table 2. Analysis conditions

Conditions	Circular bar	Roller
Case 1 (mm)		
	19 → 16.4	
Case 2 (mm)		
	16.4 → 15.1	
Case 3 (mm)		
	15.1 → 14	

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 환봉의 경우

Fig. 7에 각 경우 시간의 경과에 따른 환봉의

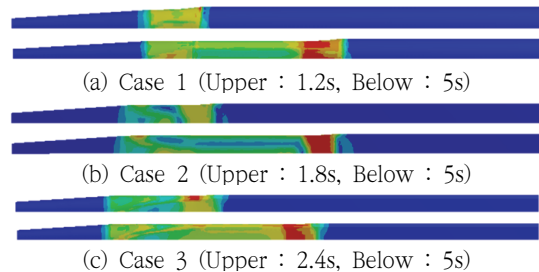


Fig. 7 Stress images of monel material with time series in each case

응력분포 형상을 나타내었다. 시간 1.2~5초 사이의 결과이며 시간에 따라 상이한 응력 분포를 확인할 수 있다. 여기서는 환봉의 응력 분포 형상만 알 수 있을 뿐 다른 결과는 알기 어렵다.

각 경우 시간의 경과에 따른 환봉의 응력 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 환봉의 최대 응력을 3 경우에 대해 10초 동안 시간에 따른 변화, Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 최대 및 평균값을 나타내었다. Fig. 8(a)에서 3 경우 모두 약 2~3초

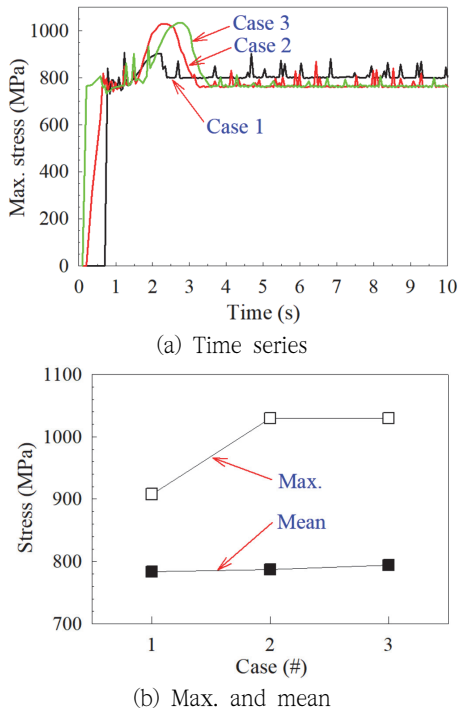


Fig. 8 Stresses of monel material with time series in each case

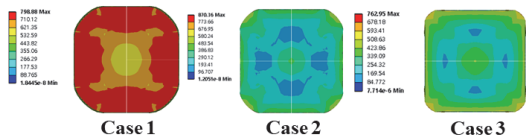


Fig. 9 Stress images of cross sectional area in each case

사이 최대응력이 피크값을 보인 후 감소하여 이후 거의 일정한 안정된 값을 나타낸다. 이것으로부터 환봉의 소성변형은 안정화 단계에 진입하기 전 초기에 큰 응력이 짧은 시간 동안 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 소성변형 초기 소재 내 가공경화 현상 발생에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 8(b)에서 최대응력은 Case 1의 경우 908MPa, Case 2 및 3은 각각 1030MPa로서 동일하다. 평균값은 784~794MPa 사이의 값으로 압연 단계가 증가함에 따라 평균응력값도 작게 증가한다. 또한 Table 1에서 모델 440 소재의 극한응력이 758MPa 인 것으로부터 압연되는 환봉 소재는 소성변형이 확실히 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9에 약 10초 경과 시 각 경우 환봉의 응력 단면 형상을 나타내었다. 롤러 1과 롤러 2의 형상 차이에 의해 소성 변형된 환봉의 응력 형상도 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 환봉의 내부는 완전한 대칭이 아니며 또한 각 부위마다 분포 차이가 있으므로 불균형적인 잔류응력(residual stress)을 예상할 수 있다. 따라서 소성 변형된 본 소재를 이용하여 제품용 밸브류 등으로 가공 시 사전에 열처리(heat treatment) 공정이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 롤러의 경우

여기서는 롤러 1 및 롤러 2의 경우에 대해 조사하고자 한다. Fig. 10은 각 경우 롤러 1의 응력 형상을 나타낸 것이다. 모든 경우 환봉 소재와 맞는 롤러 1의 접촉 부위에 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에 각 경우 롤러 1의 응력을 나타내었다. Fig. 11(a)는 롤러 1의 최대응력을 3 경우에 대해 10초 동안 시간에 따른 변화에 대해 커브 피팅을 적용한 결과를, Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)의

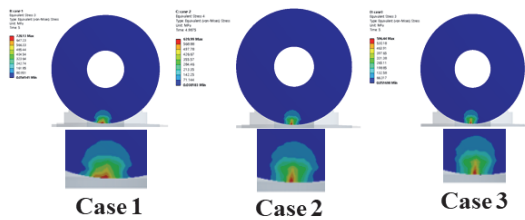
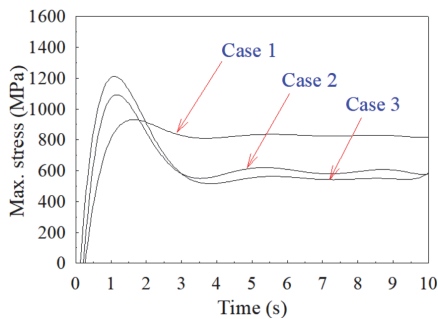
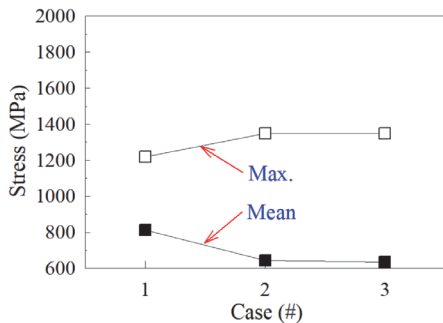


Fig. 10 Stress images of roller 1 in each case



(a) Time series



(b) Max. and mean

Fig. 11 Stresses of roller 1 in each case

최대 및 평균값을 나타내었다. Fig. 11(a)에서 알 수 있는 바와 같이, 롤러 1의 최대응력은 압연단계가 증가할수록 피크값도 증가한다.

Fig. 12는 각 경우 롤러 2의 응력 형상이며, Fig. 4에서 롤러 2를 정면에서 관측한 것이다. Fig. 10과 동일하게 환봉 소재와 맞닿는 롤러 2의 접촉 부위에 응력이 집중되고 있다.

각 경우 롤러 2의 응력을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a) 및 Fig. 13(b)는 Fig. 11(a) 및 Fig.

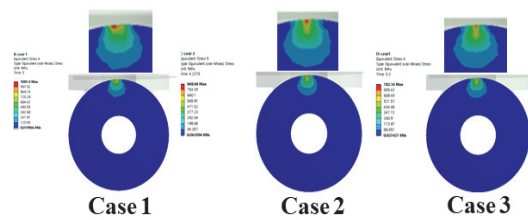
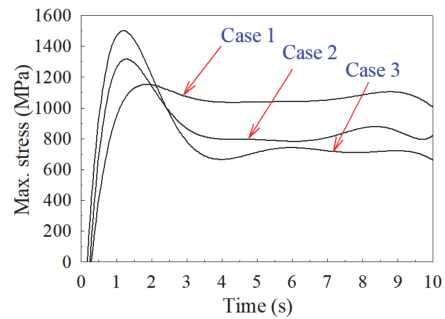
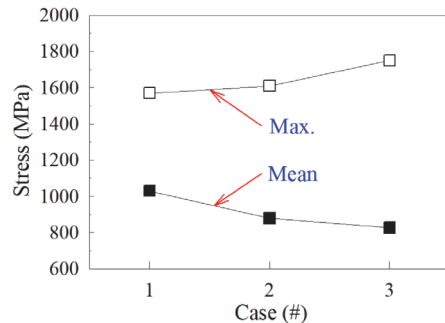


Fig. 12 Stress images of roller 2 in each case



(a) Time series



(b) Max. and mean

Fig. 13 Stresses of roller 2 in each case

11(b)와 그 경향이 유사하다. 롤러 2의 최대응력은 1570~1750MPa이며 평균응력은 1030~827MPa 사이의 값을 보인다. Table 1에서 롤러의 극한강도가 3257MPa인 것을 고려하면 Fig. 11 및 Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이, 롤러 1 및 롤러 2의 강도는 모델 소재를 압연하는데 문제가 없는 것으로 판단된다. 최대응력이 롤러 2, Case 3의 경우이며 그 값이 1750MPa인 것을 고려하면 롤러의 극한강도와 비교할 때 롤러는 약 1.86배 안전한 강도



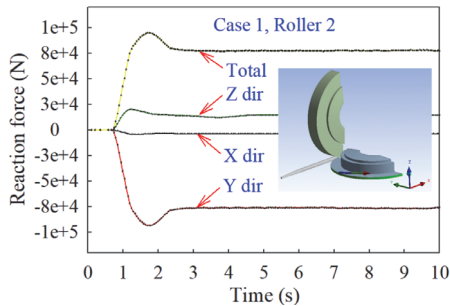


Fig. 14 Reaction force of roller in case of case 1 and roller 2

를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

여기서 Fig. 13(롤러 2)과 Fig. 11(롤러 1)을 비교하면, 롤러 2는 롤러 1보다 모든 경우 10초 동안 대부분 큰 값을 보인다. 또한 최대응력과 평균응력도 롤러 2가 더 크다. 이것은 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, 비교적 작은 사이즈의 모델 소재를 압연하기 위해 롤러 2를 롤러 1보다 하중을 지지하는 면적을 작게 제작하기 때문인 것으로 예상된다. 즉 본 연구대상과 같은 형상을 갖는 롤링 유닛 제작 시 롤러 1보다 롤러 2의 안전 설계에 더 주의해야 할 것으로 판단된다. 본 연구 대상의 모델 소재는 최대 6m의 길이이므로 압연 작업은 보통 수분동안 이루어진다. 내구성 측면에서 최대응력값보다 평균응력값이 중요할 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 13(b) 및 Fig. 11(b)의 평균응력값 기준 시, 롤러가 받는 힘은 압연단계가 증가함에 따라 압연력의 감소가 예상된다.

롤러의 안전 설계 후 다음 단계로서 롤러를 지지하는 롤러 베어링에 관한 연구가 필요하다. Fig. 14에 Case 1의 경우 롤러 2가 받는 반력 분포를 나타내었다. 전체(total) 반력은 초기 피크값을 보인 후 거의 일정한 경향을 보인다. 또한 최대 반력은 94.9kN, 평균 반력은 74.4kN으로 관측되었다. 이러한 결과는 베어링 설계 시의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 SUS 소재보다 더 큰 고강도 특성을 갖는 특수합금 모델 소재를 압연하기 위하여 필요한 사각형 롤링 유닛 장치의 기초자료 취득을 위해 수치해석을 통해 모델 소재 및 2개의 롤러 특성 등에 관한 조사를 수행하였다.

그 결과, 특수 합금 모델소재의 소성변형 특성으로서 모델소재는 큰 응력이 짧은 시간동안 먼저 발생한 후 일정한 형상을 보였다. 소성변형된 모델소재는 잔류응력이 존재하므로 제품용 밸브류 등의 가공 작업 전 열처리가 필요함을 알 수 있었다. 모델소재를 압연하는 롤러 특성으로서 롤러의 최대 및 평균응력을 조사하였다. 그 결과 롤러가 받는 최대 힘과 롤러의 극한강도를 비교할 때 롤러는 약 1.86배 안전하였다. 또한 평균응력값 기준 시 롤러는 압연단계가 증가함에 따라 압연력의 감소가 예상되었다. 본 연구대상과 같은 형상의 경우 롤러 2의 안전 설계에 더 주의할 필요가 있었으며 반력에 관한 조사는 베어링 설계에 도움이 될 수 있음을 나타내었다.

## 후 기

본 논문은 중소벤처기업부 지원 2021년 중소기업기술혁신개발사업(No.S3147357)의 지원에 의한 연구수행 결과입니다.

## 참고문헌

- [1] G. H. Song and J. C. Jung, "Roll Force Prediction of High-Strength Steel using Foil Rolling

- Theory in Cold Skin Pass Rolling,” Transaction of Korean Society of Mechanical Engineering A, vol. 37, no. 2, pp. 271-277, (2013).
- [2] Y. S. Lee and Y. J. Yang, “Comparative Study on Rolling Characteristics of Hexagonal Bar with Special Alloy for Advancing Drawing System,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 20, no. 5, pp. 96-102, (2021).
- [3] H. Choi and J. H. Park, “Experimental Research on the Effect of the Number of Layers by Overlay Welding of Monel-Clad Pipe on Weldability,” Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society, vol. 17, no. 11, pp. 42-50, (2016).
- [4] S. W. Cho and R. Y. Lee, “Microstructure and Hardness of Al-Cu Alloy Coating on Monel 400 by Hot Dipping,” Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, vol. 29, no. 4, pp. 278-285, (1996).
- [5] K. S. Kim, J. U. Cho and D. S. Choi, “An Analysis of Plastic Stress in Square Bar Impacting Plate,” Transaction of Korean Society of Automotive Engineering, vol. 12, no. 5, pp. 198-204, (2004).
- [6] Y. J. Yang, “Analysis on Drawing Characteristics of Monel Material of Special Alloy with Rectangular Bar in Elastic Limit,” Journal of Korean Society of Mechanical Technology, vol. 24, no. 4, pp. 605-611, (2022).

---

(접수: 2022.09.15. 수정: 2022.10.13. 게재확정: 2022.10.18.)