

## 특수합금 사각봉 모넬 소재의 탄성영역 압출 및 인발 특성 비교 해석

### Comparative Analysis on Characteristics of Extrusion and Drawing for Monel Material of Special Alloy with Rectangular Bar in Elastic Limit

양영준\*

Young-Joon Yang\*

#### 〈Abstract〉

Recently, the special alloy, for instance, such as Monel and Inconel, is used for valves, bolt/nuts, and fittings in semiconductor facility, FCEV(fuel cell electric vehicle) and hydrogen gas station, to reduce the hydrogen embrittlement. Even though the Monel material has high cost, it is recommended to use for the cases of ultra high pressure, ultra high leak-proof and so on. The purpose of this study is to investigate the characteristics of Monel material within elastic limit through the comparative analysis when Monel material is extruded or drawn. As the results, the deformation of Monel material was increased as the number of pass was increased, further, the deformation of Monel material by drawing was larger than that by extrusion. In the safety factor, the case that load is less than 420kN, the plastic deformation due to drawing could be happened faster than that due to extrusion. However, the case of more than 420kN, it showed that the plastic deformation for extrusion and drawing was almost similar.

*Keywords : Special Alloy, Extrusion, Drawing, Comparative Analysis,  
Monel Material, Hydrogen Embrittlement, Hydrogen Gas*

---

\* 정회원, 교신저자, 경상국립대학교 미래자동차공학과, 교수 \* Dept. of Future Automotive Engineering, Gyeongsang National University  
E-mail: yangyj@gnu.ac.kr

## 1. 서론

기존 반도체 설비나 발전소, 수소차 및 수소스테이션 등에 쓰이는 부품인 밸브, 볼트/너트, 피팅류 등에 알루미늄 및 SUS 등과 같은 소재가 사용되어져 왔다. 그러나 이와 같은 소재는 수소취성(hydrogen embrittlement) 문제가 발생하여 제품 수명 단축 및 안전성에 대한 우려가 지속되어 왔다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 최근 수소가스 접촉 관련 부품에 모넬(Monel), 인코넬(Inconel) 등과 같은 특수합금(special alloy) 적용이 연구되어 지고 있다. 그러나 특수합금은 초고내압, 초고기밀 등에는 적합하나 소재가 고가 및 고강도이므로 가공 시 큰 비용과 함께 높은 기술적 수준을 요구하고 있다. 이와 같은 특수합금의 압출(extrusion) 및 인발(drawing)과 같은 연구는 그리 많지 않다. 특수합금에 관한 연구로서, Song 등[1]은 고강도 강의 냉간압연 시 압연하중 예측 모델에 관한 연구를 수행하였으며, Yang 등[2]은 SUS용 인발성형 시스템을 특수합금 소재에 적용 시 필요로 하는 압연력을 예측하였다. 모넬 소재에 관한 연구로서, Choi 등[3]은 모넬 소재의 오버레이 용접을 통해 적층수에 따른 Fe 함량, 적층부위별 경도 등을 측정하여 그 특징을 조사하였다. Cho 등[4]은 Ni계 합금인 모넬 400 금속에 액상침적법으로 Al-Cu 합금 코팅층을 형성하여 이에 따른 조직 및 경도 분석 등을 수행하였다. 사각봉에 관한 연구로서, Kim 등[5]은 유한요소해석을 이용하여 원형봉에서 정사각재 및 직사각재의 인발공정에 대해 단면적 감소율과 다이(die) 반각이 재료의 금형 내부로의 코너 채움에 미치는 영향을 조사하였으며 또한 Kim 등[6]은 평판에 충돌하는 사각봉의 소성응력 변화를 해석하였다.

본 연구에서는 Ni계 특수합금인 모넬 소재를 대상으로 수치해석을 통해 모넬 소재의 압출성형

에 따른 특성을 인발 특성과 비교하고자 하였다. 즉 모넬 소재가 소성변형이 시작되기 직전의 탄성영역을 가정하여 변형량, 응력, 안전계수 조사를 통해 압출과 인발 특성 등을 비교하였다.

## 2. 모델링 및 수치해석 방법

특수합금 모넬 소재의 사각 성형 공정을 Fig. 1에 나타내었다[7]. Fig. 1(a)와 같은 거친 표면을 갖는 환봉은 필링공정(peeling process)을 통해 Fig. 1(b)와 같은 광택이 있는 고표면정밀도의 환봉이 된다. 이 환봉은 성형 시스템을 통해 Fig. 1(c)와 같은 사각봉으로 성형된다. 이 사각봉을 절단 및 가공함으로써 최종적으로 Fig. 1(d)와 같은 특수합금 재질의 사각밸브 및 피팅류가 된다. 이와 같은 특수합금 모넬 소재는 수소연료전지자동차, 수소충전소 및 반도체 제조 설비 등에서 수소용 밸브류의 수명을 단축시키는 수소취성(hydrogen embrittlement) 현상 억제에 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다.

압출 및 인발 공정의 예를 Fig. 2에 나타내었다



Fig. 1 Extrusion and drawing process ((b)→(c))

[8]. Fig. 2(a)는 인발에 관한 개략도, Fig. 2(b)는 실제 제작 사각형 롤링 유닛(rolling unit), Fig. 2(c)는 실제 제작 성형 시스템을 나타낸 것이다. 그림에서 롤링 다이(rolling die)에 사각형 롤링 유닛이 장착되어진다. Fig. 2(c)의 시스템은 환봉 진행방향의 롤링다이 앞에서 당기는 인발성형(drawing)과 환봉 진행방향의 롤링다이 뒤쪽에서 밀어내는 압출성형(extrusion)이 가능하다[9]. 특수합금 소재인 환봉의 모델은 성형 시스템에 의해 소성변형을 거쳐 사각봉이 된다. 이때 환봉은 사각 롤링 유닛의 한번의 통과(pass)만으로는 원하는 치수를 얻을 수 없기 때문에 통상 여러 번의 통과를 거치

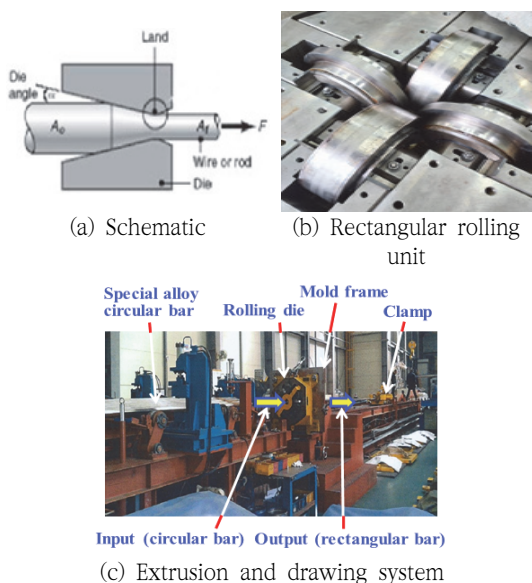


Fig. 2 System for extrusion and drawing

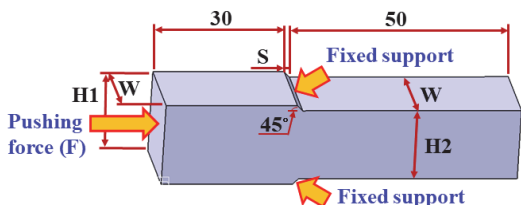


Fig. 3 Dimensions of rectangular bar and boundary condition

게 되며 본 시스템에서는 3번의 통과 공정을 수행하고 있다.

Fig. 3에 사각봉 치수 및 경계조건을 나타내었다. 성형되기 이전은 환봉이지만 2D로 설정하기 위해 사각 형태로 나타내었다. 그림에서 왼쪽 끝면에서 클램프(clamp)에 의해 사각봉을 밀게 되며(F, 이하 ‘압출력’으로 칭함), 사각 롤링 유닛에 의해 성형이 시작되는 상하 지점을 고정 지점(fixed support)으로 설정하였다. 본 연구에서 사각봉은 통과 수에 따라 수치가 변하므로 구체적 치수는 후술하기로 한다.

격자를 Fig. 4에 나타내었으며 격자 형태는 사면체(tetrahedron)이다. 총 3번의 롤링 다이 통과(이하 ‘패스(pass)’로 칭함)에서 각 패스마다 사각봉의 사이즈가 다르기 때문에 노드(node) 및 엘리먼트(element) 수도 다르다. 여기서 평균 노드 수는 207 만개, 평균 엘리먼트 수는 151 만개이다. 본 해석을 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다.

Table 1에 각 패스 수(pass number)에 따른 사각봉의 치수를 나타내었다. 비교를 위해 인발에 관한 이전 연구[7]와 동일한 치수를 사용하였다. 본 연구에서 패스 횟수는 총 3회(이하 1 번째 통과를 ‘패스 1’, 2 번째 통과를 ‘패스 2’, 3 번째

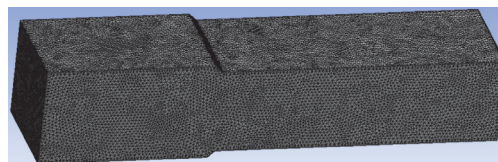


Fig. 4 Mesh

Table 1. Dimensions for each pass number

Conditions	Pass 1	Pass 2	Pass 3
H1 (mm)	19.0	16.4	15.1
H2 (mm)	16.4	15.1	14.0
W (mm)	19.0	16.4	15.1
S (mm)	1.3	0.65	0.55

Table 2. Material properties

Part	Density (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Special alloy (Monel)	8,910	169	0.295	689	758

Table 3. Analysis conditions

Conditions	1	2	3	4	5
Pass (number)	1	2	3		
F (kN)	10	140	280	420	560

통과를 ‘패스 3’로 칭함)이며, Fig. 3에서의 치수 변화를 각 패스 수에 따라 나타내었다. 패스를 거듭함에 따라 치수가 감소하는 것을 알 수 있다.

모델의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 모델은 니켈(약 50~70%)과 구리 등이 혼합된 합금이며 일반 강에 비해 상당히 고가이지만 강도 및 내식성 등이 우수한 것으로 알려져 있다.

해석조건을 Table 3에 나타내었다. 전술한 바와 같이 패스 수는 3회이며, 압출력(F)은 이전 연구[7]의 인발력과 비교하기 위하여 동일한 값으로 즉 인발력 실측값에 기초한 약 280kN을 기준으로 하였다. 이 기준값 전·후에 140kN 간격으로 정하고, 10kN은 미세 힘 작용 시의 특성을 살펴보고자 하였으며 총 15 조건을 설정하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 5에 패스 1, 압출력(F) 280kN으로 미는 압출 경우의 변형량 및 응력의 형상을 나타내었다. Fig. 5(a)의 경우 변형량은 압출력 작용지점과 고정지점 사이의 부분에 압축변형량이 발생하며,

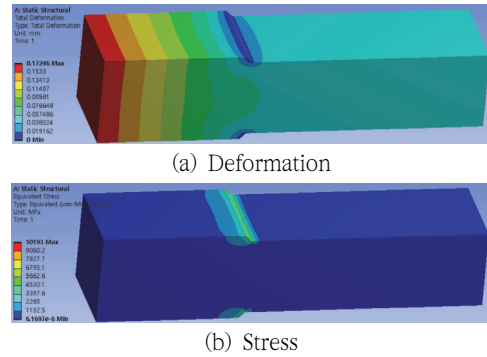


Fig. 5 Examples of image in cases of extrusion, pass 1, 280kN

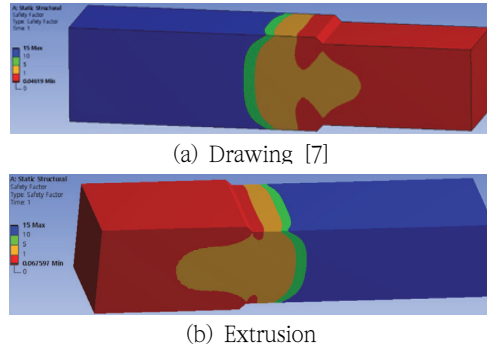


Fig. 6 Comparative image of safety factor in cases of pass 1, 280kN

Fig. 5(b)의 경우 응력은 압출력 작용지점과 고정지점 사이가 아닌 고정지점에 대부분 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

패스 1이며 인발력과 압출력이 280kN으로 동일한 경우의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 비교를 위해 이전 연구[7]인 인발의 경우, Fig. 6(b)는 본 연구인 압출의 경우의 안전계수 형상이다. 안전계수는 인발의 경우 인발 작용지점과 고정지점 사이, 압출의 경우 압출 작용지점과 고정지점 사이가 높은 값을 보인다. 또한 인장 및 압출 경우 모두 고정지점의 사각부 중앙부분이 외부 돌레 부분보다 안전계수가 낮은 특징이 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 280kN의 경우 패스 수에 따른 최대 변형량 및 최대응력을 인발과 압출에 대해 나타낸 것이다. 인발의 경우 이전 연구[7]의 결과(인발의 경우 이하 동일)를 사용하였다. 그림을 고찰하면 최대변형량의 경우 패스 수의 증가에 따라 인발 및 압출의 경우 모두 증가한다. 여기서 압출보다 인발의 경우가 더 큰 값을 보인다. 고정지점과 인발력 작용지점(Fig. 6(a))과 압출력 작용지점과 고정지점(Fig. 6(b))의 거리는 모두 30mm로서 동일함에도 불구하고 압출보다 인발의 경우가 더 큰 값을 보이는 이유는 단위면적당 작용하중에서 작용하중은 동일하므로 인발의 경우가 단위면적이 상대적으로 더 작기 때문인 것으로 판단된다. 즉 소재의 인발 또는 압출 시 모든 동일 조건에서 인

발과 압출을 비교하였을 때 인발의 경우가 더 큰 변형량을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 최대응력의 경우 인발이 압출보다 그 값이 더 크다. 이 결과 또한 최대변형량과 동일하게 단위면적당 작용하중에서 인발이 압출의 경우보다 단위면적이 상대적으로 더 작으므로 최대응력이 크다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 8은 280kN의 경우 패스 수에 따른 안전 계수의 평균값을 인발 및 압출에 대해 나타내었다. Table 3에 나타낸 바와 같이 작용하중은 10~560kN 까지 5 조건이 있으며 각 패스에 대해 안전계수 결과값을 평균하였다. 인발과 압출의 경우 패스 수가 증가함에 따라 안전계수 평균값은 감소한다. 이것은 Table 1에서와 같이 패스 수가 증가함에 따라 작용하중은 패스 3 경우 모두 일정하나 특수합금 모델 소재의 사각봉 단면적은 감소하고 있기 때문에 즉 결과적으로 단위면적당 작용하중이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 압출이 인발보다 안전계수가 더 높다. 즉 이것은 인발의 경우가 더 파괴될 가능성이 높다는 것을 나타내며 즉 인발이 압출보다 소성영역으로의 변형이 더 빨리 발생할 수 있음을 의미하는 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 7에서 인발이 압출보다 최대응력이 더 큰 것과 일치하는 결과를 나타낸다.

280kN, 압출의 경우 패스 수에 따른 사각봉

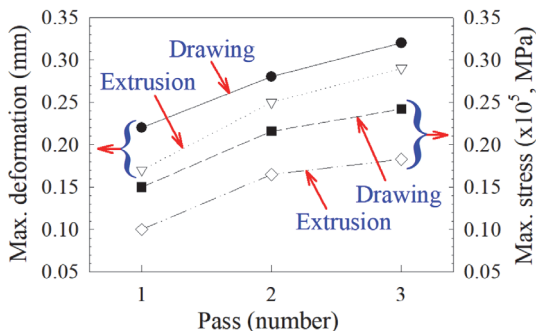


Fig. 7 Comparative results for extrusion and drawing according to pass number in case of 280kN

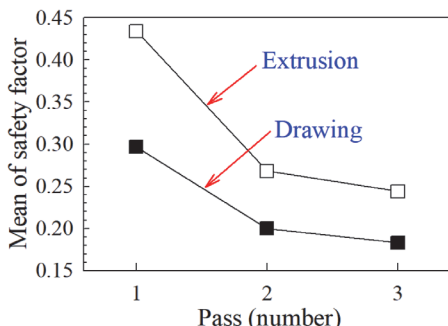


Fig. 8 Comparative results for mean of safety factor according to pass number in case of 280kN

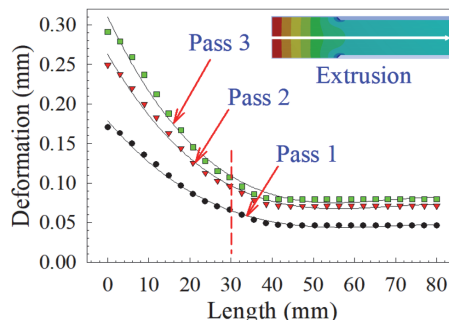


Fig. 9 Deformation in middle point according to pass number in case of extrusion, 280kN



모델 소재 중앙지점에서의 변형량을 Fig. 9에 나타내었다. 패스 수의 모든 경우에 압출력 작용 지점에서 길이의 증가에 따라 변형량은 점차 감소하지만, 길이 약 30mm(고정지점, 점선부분)를 지나 약 40mm 지점 이후는 거의 일정하다. 여기서 고정지점 약 30mm 지점에서 변형량은 감소경향을 보인다. 이것은 고정지점은 바깥쪽 경사부분이지만 측정점은 사각봉 단면의 중앙부분이므로 이 부분에서 변형이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 패스 수가 증가함에 따라 변형량도 증가한다. 이것은 앞에서 고찰한 바와 같이, 패스 수가 증가함에 따라 사각봉의 단위면적당 작용하중이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10에 280kN, 압출의 경우 패스 수에 따른 사각봉 단면에서의 변형량을 나타내었다. 이 그림은 Fig. 9에서의 고정지점 단면의 변형량을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 고정지점인 상하 끝단에서는 거의 변형량이 없으나, 압출력에 의해 중앙지점 단면의 변형량이 최대임을 확인할 수 있다. 패스 수가 증가함에 따라 변형량도 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9 및 Fig. 10에서는 특수합금 압출 시 합금 내부의 변형 형상 및 정도를 예측해 볼 수 있는 것에 의미가 있는 것으로 판단된다. 여기까지의 결과에 의하면 패스 3의 경우가 소성영역으로 가장 빠르게 이동될 가능성이 높다.

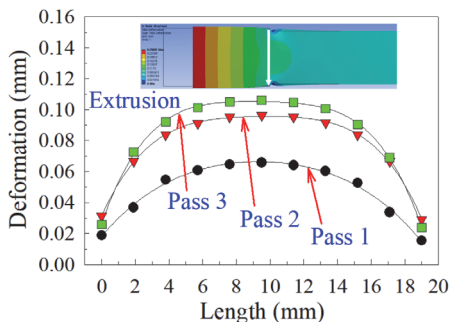


Fig. 10 Deformation in cross section according to pass number in case of extrusion, 280kN

따라서 패스 3의 경우에 대해 상세히 조사하고자 한다.

Fig. 11에 패스 3 및 압출의 경우 사각봉 중심 지점에서 길이 및 작용하중에 따른 응력을 나타내었다. 그림을 고찰하면, 10kN의 경우 응력변화가 거의 없다. 140kN부터 변화가 시작되며 작용하중의 증가에 따라 응력도 증가한다. 그러나 고정지점에 시작되는 30mm 지점(점선부분)까지 감소한 후 다시 증가하여 피크를 보인 후 다시 감소한다. 또한 작용하중이 클수록 피크 높이도 증가한다. 이와 같은 현상은 물러가 작용하게 되는 고정지점의 점진적인 단면 감소 및 중앙지점에서의 최대변형량 증가 등과 같은 영향에 의해 이와 같은 응력 분포가 발생하는 것으로 예상된다. 여기서는 이와

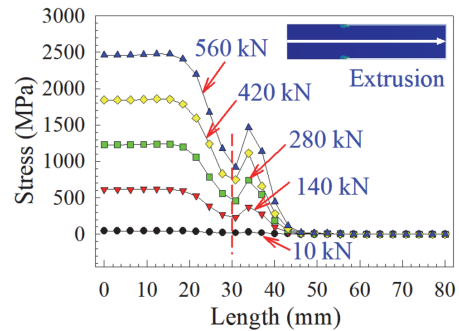


Fig. 11 Stress according to load in middle point in case of pass 3

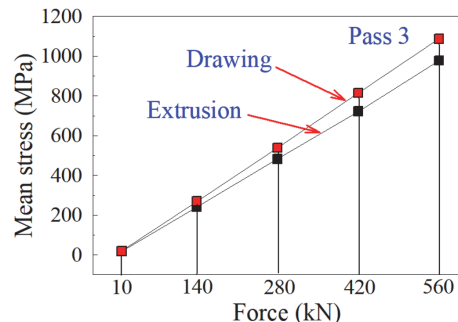


Fig. 12 Mean stress in middle point according to load in case of pass 3, extrusion, drawing

같이 압출되는 특수합금의 내부 거동(특성)을 파악할 수 있는 것에 의미가 있는 것으로 판단된다.

패스 3, 인발과 압출의 경우 작용하중에 따른 중심지점의 길이방향에 따른 평균응력을 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림은 Fig. 11의 응력을 평균한 것으로서 인발의 경우에도 동일하게 적용하였다. 그림을 고찰하면 압출 및 인발 모두 작용하중의 증가에 따라 평균응력은 선형적으로 증가한다. 또한 인발이 압출의 경우보다 더 큰 평균응력을 나타낸다. 작용하중이 증가할수록 압출과 인발의 평균응력 차이도 증가한다. 즉 작용하중이 클수록 압출보다 인발의 경우가 소재 내부에 더 큰 응력이 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 수치적으로 나타내기 위해 '(인발-압출)/인발'을 백분율로 나타내면 약 10.3%를 나타낸다. 즉 인발 평균응력과 압출 평균응력의 차이는 인발 평균응력의 약 10.3%라는 것을 알 수 있다.

Fig. 13에 패스 3, 인발과 압출의 경우 작용하중에 따른 중심지점의 길이방향에 따른 평균안전계수를 나타내었다. 평균값은 Fig. 12와 동일한 방법을 적용하였다. 위의 그림에서 작용하중 10kN의 경우는 모든 곳에서 안전계수가 15를 나타내었다. 작용하중이 증가함에 따라 안전계수 평균값은 감소한다. 이것은 하중이 증가함에 따라 소형변형

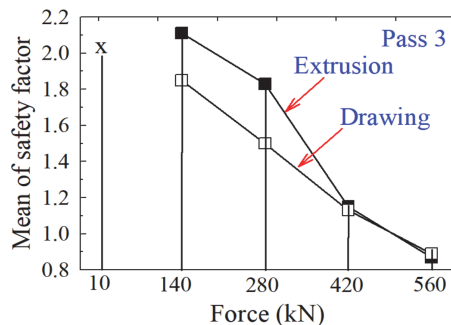


Fig. 13 Mean of safety factor in middle point according to load in case of pass 3, extrusion, drawing

가능성이 높아지는 것을 나타낸다. 여기서 작용하중 140kN, 280kN의 경우는 압출보다 인발의 경우가 소성변형으로 진행할 가능성이 더 높으나, 작용하중 420kN, 560kN의 경우는 압출과 인발은 거의 동일한 거동을 보인다. 즉 압출과 인발에서 어느 하중 이하에서는 소성변형으로의 변화가 인발이 압출보다 빨리 일어날 수 있지만 어느 하중 이상이 되면 거의 동일하게 소성변형이 발생할 것을 예측할 수 있다. 본 해석 조건에서는 420kN 이상부터 압출과 인발이 거의 동일하였다. 본 해석에서는 압출 및 인발이 각각 따로 작용한 경우를 비교하였으나 인발과 압출을 동시에 작용시켜 그 인발과 압출의 작용하중 비율에 따른 특수합금 소재의 특성을 조사하는 것도 흥미로운 것이다.

#### 4. 결론

Ni계 특수합금 모델 소재의 압출 특성을 변형량, 응력, 안전계수에 관한 수치해석을 통해 인발 특성과 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

변형량은 패스 수의 증가에 따라 증가하며 또한 인발의 경우가 압출보다 크다. 이것은 단위면적당 작용하중의 크기와 관계가 있다. 안전계수는 패스 수의 증가에 따라 압출과 인발 모두 감소하며 인발의 경우가 압출보다 안전계수는 낮다. 즉 패스 수가 클수록 또한 인발이 압출보다 소성영역으로의 변형이 더 빨리 발생할 수 있다.

패스 3 및 압출의 경우 사각봉 중심지점에서 길이방향에 따른 응력을 조사함에 의해 압출되는 특수합금 내부 특성을 파악할 수 있다. 작용하중이 클수록 압출보다 인발의 경우가 소재 내부에 더 큰 응력이 작용하며 수치적으로 인발은 압출보다 평균 약 10.3% 크다.

안전계수의 비교에 의해 본 해석에서는 작용하중 420kN 미만에서는 인발이 압출보다 소성변형이 빨리 발생할 가능성이 높으며 420kN 이상에서는 인발과 압출 모두 거의 동일함을 나타내었다.

## 후 기

본 연구에 사용된 관련 자료는 (주)한영기계에서 제공하였으며 이에 감사드립니다.

## 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 Academia-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] Y. C. Kim, D. J. Kim and B. M. Kim, "A Study on the Corner Filling in the Drawing of Quadrangle Rod from Round Bar," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 143-152, (2000).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] Y. S. Lee and Y. J. Yang, "Study on Analysis of Rolling Characteristics of Stainless Hexagonal Bar using Drawing System," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 234-241, (2019).
- [9] Y. S. Lee and Y. J. Yang, "Analysis on Characteristics of Drawing Plastic Deformation for Rectangular Monel Material with Special Alloy and Rollers," *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol. 25, no. 6, pp. 961-968, (2022).