

인발성형 시스템 고도화를 위한 특수합금 육각봉의 압연특성 비교 해석 연구

이영식*, 양영준**,#

* (주)한영기계, **경상국립대학교

Comparative Study on Rolling Characteristics of Hexagonal Bar with Special Alloy for Advancing Drawing System

Young-Sik Lee*, Young-Joon Yang**,#

*Han Young Machinery Co., Ltd., **Automotive Eng., Gyeongsang National University

(Received 13 December 2020; received in revised form 31 December 2020; accepted 11 January 2021)

ABSTRACT

Hexagonal bolt, nut, fittings, and high-pressure valves with special alloy play an important role in many industrial products. Numerical analysis was conducted to obtain data for designing a new drawing system. This study aims to predict the rolling force of the new drawing system compared to that of the established drawing system. The rolling force of the new drawing system was predicted using numerical analysis by assuming that it is in proportion to deformation. The rolling forces of Mo, Ti, and W were approximately 1.4, 0.5, and 2.5 times those of SUS. Because the values of ultimate strength of special alloys were more close to numerical analysis, the values of ultimate strength could be used to predict the rolling force of the new drawing system without numerical analysis in field.

Key Words : Design of Drawing System(인발성형시스템설계), Special Alloy(특수합금), Rolling Force(압연력), Hexagonal Bolt, Nut(육각볼트너트), Prediction(예측), Ultimate Strength(극한강도)

1. 서 론

스테인레스(산업현장에서 SUS 또는 STS로 표기, 이하 SUS로 표기) 소재는 육각형의 볼트, 너트 및 각종 피팅류(fittings) 제작에 사용되어진다. SUS 육각봉은 SUS 환봉으로부터 필링공정(peeling process)을 거친 후 인발성형 과정(drawing process)을 통해

육각 형상이 된다. 인발(drawing)이란 금속이 금형을 통과하는 동안 금속의 단면형상을 변화시키는 소성가공기술로서 소재의 입구 또는 출구방향에서 밀거나 당기는 힘을 이용한다^[1]. 이때 적용되는 압연(rolling) 기술로서, 조절 압연 시스템에서 압연 롤에 의해 소재에 가해지는 압하 하중 및 텐션 릴에 의한 장력이 소재 변형률에 미치는 영향에 관한 예측^[2], 철합금 소재의 유동 응력 모델링 및 열간 압연에 관한 유한요소 해석^[3], 비대칭 압연에 관한 소성변형비 변화에 관한 연구^[4] 등이 있다. 특수합금

Corresponding Author : yangyj@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-3646, Fax: +82-55-772-3649

(special alloy)이란 금속성분 중 목적에 맞는 특수성분을 함유한 금속 또는 특수성분 함량을 인위적으로 조절한 금속이다. 합금류로서 가장 많이 사용되는 재질은 SUS이며 그 외 니켈(Ni)합금, 티타늄(Ti)합금 등 사용 목적에 따라 많은 종류가 있다. 이와 같은 합금강은 가공용 초경공구^[5], 항공용 티타늄^[6] 및 자동차 자동변속기기어^[7] 등 폭넓게 쓰이고 있다. 본 연구의 목적은 기존의 SUS용 인발성형 시스템을 SUS보다 강도가 더 큰 특수합금용으로 고도화하기 위하여 필요한 설계 기초자료를 얻기 위한 것이다. 즉 제작하고자 하는 특수합금용 인발성형 시스템을 특수합금 종류에 따라 기존 SUS와 비교하여 어느 정도의 압연력을 필요로 하는가를 조사하고자 하였다. 이를 위해 수치해석을 통해 응력, 변형량, 안전계수 등으로 부터 필요한 압연력의 예측과 함께, 더 나아가 현장에서 수치해석 없이 압연력을 예상해 볼 수 있는 방법 등에 관한 연구를 수행하였다.

2. 인발공정(Drawing Process)

이전 연구에서 SUS 육각봉 제작을 위한 인발성형용 롤 유닛 연구^[8] 및 인발성형 시스템을 이용하여 SUS 육각봉을 압연할 때 발생하는 특성들에 관한 연구^[9] 등을 수행하였다. 이전 연구는 육각봉용 소재의 재질이 SUS인 경우였으나 본 연구는 소재의 재질이 특수합금인 경우이다. 본 연구의 인발성형에 관한 이해를 돕기 위해 이전 연구를 간략히 설명하고자 한다.

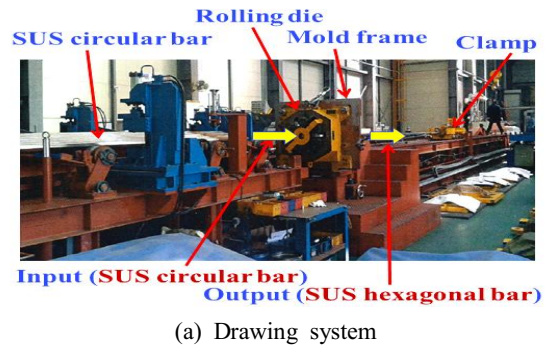
인발성형 과정을 Fig. 1에 나타내었다^[9]. Fig. 1(a)는 길이 약 6,000mm, 직경 약 5~420mm인 검은색 흑피의 SUS 재질 환봉이며, 필링공정을 통해 광택이 있는 고 표면정밀도를 갖는 Fig. 1(b)와 같은 환봉이 된다. 이 환봉은 인발성형 시스템을 통해 Fig. 1(c)와 같은 육각봉으로 성형된다. 이 육각봉을 절단 및 가공함으로써 최종적으로 Fig. 1(d)와 같은 SUS 재질의 육각 볼트/너트 및 각종 피팅류 등으로 제작된다. 본 연구는 Fig. 1(b)에서 Fig. 1(c) 단계의 공정에 관한 내용이다.

Fig. 2에 인발공정을 나타내었다^[9]. Fig. 2(a)는 실제 인발 시스템이며 크기는 길이 약 30,000mm, 폭

약 5,000mm이다. Fig. 2(b)는 SUS 환봉을 육각봉으로 성형할 때 사용되는 고정형 육각 롤링다이(fixed hexagonal rolling die)이다. SUS 재질의 환봉은 본 육각 롤링다이를 통과하여 육각봉으로 가공된다.



Fig. 1 Drawing process((b)→(c))



(b) Hexagonal rolling die fixed roll
Fig. 2 Drawing system for manufacturing SUS hexagonal bar

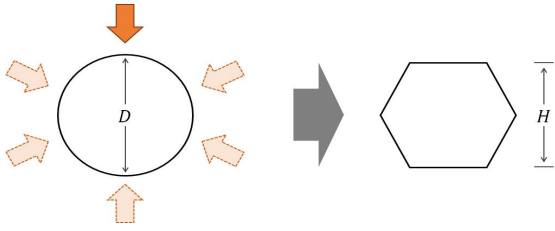


Fig. 3 Definition for diameter of circular bar(D) and height of hexagonal bar(H)

3. 모델링 및 수치해석 방법

이전 연구^[9]에서는 현장에서 많이 사용되는 SUS 소재의 환봉 직경 37.0, 42.5, 46.5, 53.5mm를 대상으로 하였다. 본 연구에서는 위의 SUS 소재에서 가장 큰 직경인 53.5mm에 대해 소재가 특수합금인 경우에 대해 조사하였다. 본 연구에서는 Fig. 3^[9]과 같이 직경 $D=53.5\text{mm}$ ($R=26.75\text{mm}$)를 가지는 환봉을 육각 롤링다이를 이용하여 면과 면사이의 높이가 $H=44.75\text{mm}$ 인 육각봉으로 가공 시 소재가 특수합금인 경우에 대해 수치 해석하고자 한다. 물론 형상이 환형에서 육각형으로 변화하므로 소성가공에 해당하지만, 여기서는 탄성한도 내에서 변형을 준 형상에 힘을 가해 SUS와 특수합금 간의 상대적인 비교를 통한 해석을 수행하여 그 오차를 줄이고자 하였다. 본 연구는 인발성형 시스템을 이용하여 환봉을 육각봉으로 압연하는데 있어 특수합금용 인발성형 시스템이 기존 SUS용 인발성형 시스템과 비교하여 필요로 하는 압연력을 조사하는 것이다. 육각봉 형상은 대칭이므로 육각봉의 1/6 형상만을 해석하였다.

Fig. 4에 육각봉 1/6 형상 격자(mesh)의 일례를 나타내었다. 각 Case마다(Fig. 5에 후술) 형상이 일부 다르므로 격자수 차이가 약간 있지만 여기서는 무시하였다. 본 해석에 솔리드 요소(solid element)를 사용하였으며, Fig. 4 형상의 격자는 사면체(tetrahedron), 노드(node) 수는 약 65만개, 엘리먼트(element) 수는 약 46만개로 하였다. 본 구조해석을 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다.

경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. 1/6의 육각봉 상면에 인발성형 시스템의 롤러가 힘을 가하는 경우에 대해 4개의 Case를 설정하였다.

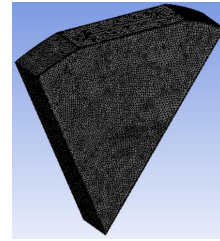


Fig. 4 Examples of mesh

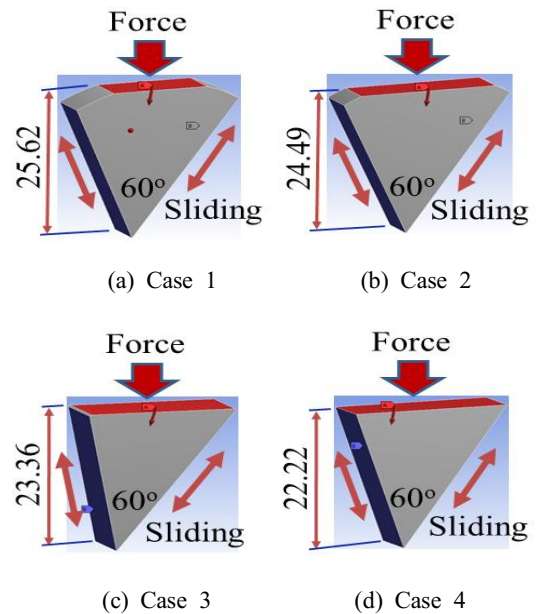


Fig. 5 Boundary conditions of Case 1, 2, 3, 4, respectively

즉 $D(53.5\text{mm}) - H(44.75\text{mm})$ 를 4 간격씩 일정하게 분할(2.2625mm)하여 각각의 조건을 Case 1, Case 2, Case 3, Case 4로 하였다. 또한 힘(F)이 가해졌을 때 선택한 측면(그림에서 2개의 경사면)은 측면과 수직방향으로 고정되고 평행방향으로 이동 및 회전이 가능한 frictionless support로 설정하였다. Table 1에 해석조건을 나타내었다. 이전 연구의 결과^[9]에 의하면 6개의 롤러는 최대 약 158톤의 반력이 생겼다. 이를 근거로 본 해석에서는 1개의 롤러에 생기는 반력 즉 158톤의 1/6인 26.3톤($F=257,740\text{N}$)이 1/6 육각봉 상면에 작용하는 것으로 하였다.

Table 1 Analysis conditions

Conditions	1	2	3	4
Force (N)	257,740			
Cases	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Materials	SUS	Mo	Ti	W

Table 2 Material properties

Part	Density (kg/m ³)	E (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
SUS 316	7750	193	0.31	210	505
Monel 440	8910	169	0.295	689	758
Titanium (Ti 100%)	4500	116	0.34	140	220
Tungsten (W 100%)	1930	400	0.28	750	980

Case는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 4 경우이다. 소재로서 기존 연구 대상이었던 SUS를 기준으로, 본 비교 대상인 모넬(monel, Mo), 티타늄(titanium, Ti), 텅스텐(tungsten, W)을 서로 비교하였다. Table 2에 본 연구 대상인 특수합금 소재의 물성치를 나타내었다. 산업용으로 많이 사용되는 SUS 316 계열과, 니켈(63%이상)과 구리(28~34%) 등의 혼합물이며 니켈의 내식성을 개량하여 해수관련 플랜트나 선박 부품 및 볼트, 너트 등에 많이 쓰이는 모넬합금(Mo 440), 강도는 철의 2배이나 무게는 절반이며 항공기 등에 많이 사용되는 티타늄(Ti 100%), 절삭공구 등에 많이 쓰이는 텅스텐(W 100%)을 해석 대상으로 하였다. 여기서 티타늄 자체 성분이 대부분 99% 이상(제1종~제3종의 티타늄 성분 : 99.6~99.8%)인 티타늄 및 시중 판매제품의 대부분이 99.75~99.99%의 텅스텐 자체 성분을 갖는 텅스텐의 경우는 물성치가 명확히 제시되어 있는 100%의 물성치 값을 사용하였다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 6에 육각봉 상면에 인발성형 시스템의 롤러가 힘(F=257,740N)을 가했을 때 특수합금으로서 Mo인 경우 각 Case에 따른 응력변화를 나타내었다. 그림에서 관측되는 바와 같이 Case 1인 경우 최대응력은 상면에서 형상이 변화하는 부분에서 발생되며

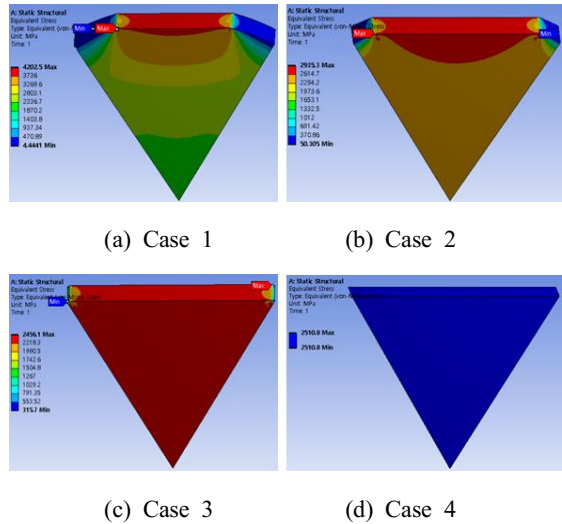


Fig. 6 Stress distributions depending on Cases in case of Mo

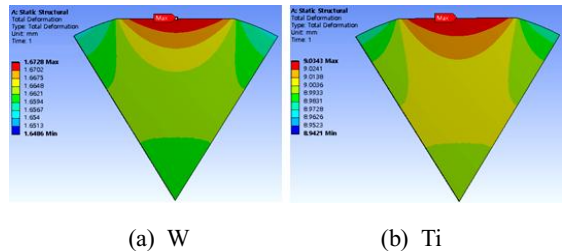


Fig. 7 Deformation distributions in case of Case 1

하부로 갈수록 응력은 점점 감소한다. 또한 최소응력은 하부가 아닌 상면 옆의 경사 부분에서 발생되고 있음을 확인할 수 있다. Case 2의 경우는 Case 1과 비슷하나 동일한 응력을 받는 부분이 증가하며 이와 같은 현상은 Case 3 및 Case 4로 갈수록 동일한 응력을 받는 부분이 많아지는 것을 확인할 수 있다.

변형량의 변화를 알아보기 위해 Case 1의 경우에 대해 W와 Ti의 예를 Fig. 7에 나타내었다. W와 Ti의 변형량 분포는 일부 차이는 있으나 거의 유사함을 알 수 있다. 즉 모두 육각봉 상면이 가장 큰 변형량을 보이며 상면 옆의 경사부분과 하부에서 변형량이 가장 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 모든 Case에 따른 최대응력 변화를 나타내었다. 각 Case에 있어서 특수합금 최대응력 간의

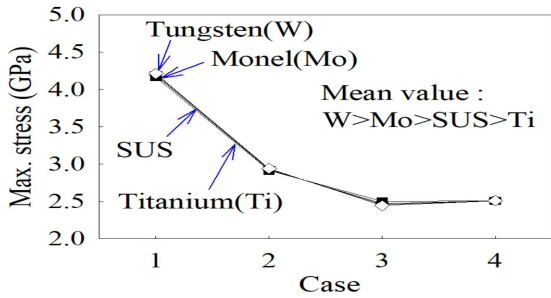


Fig. 8 Variation of maximum stress depending on all cases

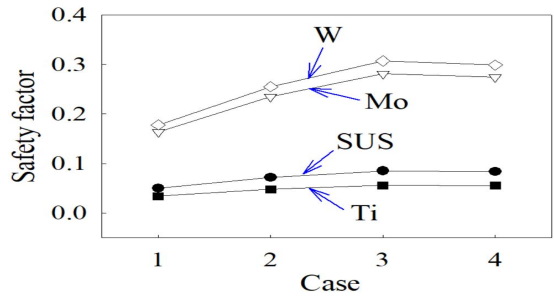


Fig. 11 Variation of safety factor depending on all cases

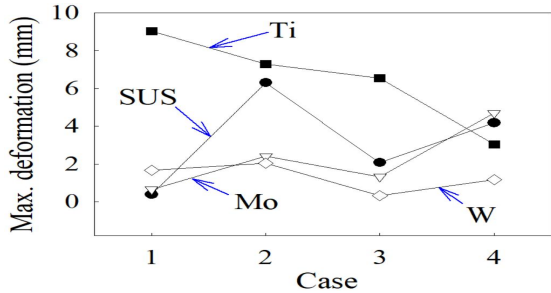


Fig. 9 Variation of maximum deformation depending on all cases

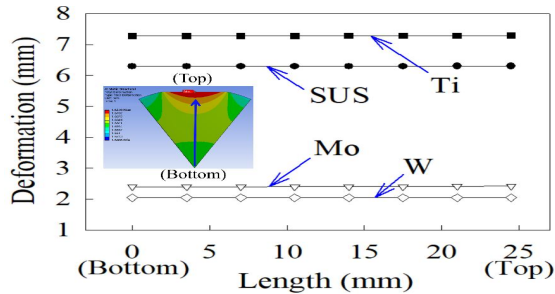


Fig. 10 Examples of deformation distribution in case of Case 2

큰 차이는 관측되지 않지만, 각 Case의 최대응력 평균값의 크기는 $W > Mo > SUS > Ti$ 를 나타내었다. 또한 육각봉을 압연하는데 있어 Case 1의 경우가 가장 큰 힘이 필요하며 Case 3에서 가장 작은 힘이 든다. Case 4의 경우가 Case 3 보다 미소하지만 더 큰 힘이 필요하다. 이것으로부터 환봉에서 육각봉으로 압연 시 이때 필요한 힘의 변화를 관측할 수 있으며 롤러가 육각봉 압연 시 그 형상의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 Case에 따른 최대 변형량 변화를 나타낸 것이다. Ti는 변형량이 전반적으로 가장 크고 W은 가장 작다. SUS, Mo 및 W은 각 Case에 따른 변화가 Ti과 다르며 서로는 거의 동일하게 변화한다. 이것은 특수합금 재질의 차이에 기인하며 각 특수합금의 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 10에 Case 2의 경우 하부(bottom)에서 상면(top)까지의 변형량 분포의 예를 나타내었다. 4 금속 모두 하부에서 상면으로 갈수록 변형량은 증가하지만 재질 모두 0.02mm 이내로서 작게 변화하는 것이 관측된다. 변형량은 $Ti > SUS > Mo > W$ 의 크기를 갖는다. 여기서 Ti과 SUS가 상대적으로 변형량이 크고 W과 Mo이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 각 Case에 따른 안전계수(safety factor) 변화를 나타낸 것이다. Ti와 SUS는 0.1 이하의 낮은 값을 보이며 W과 Mo과 비교하여 더 취약함을 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11을 함께 고찰하면, 수치적 차이에 의해서도 확인되는 것과 같이 W과 Mo 및 SUS와 Ti이 서로 각각 비슷한 거동을 한다. 즉 W과 Mo 및 SUS와 Ti이 유사한 재질 특성을 가지고 있는 것으로 예상할 수 있다.

본 연구의 목적은 이전 연구의 대상이었던 SUS 소재와 비교하여 특수합금인 Ti, Mo, W의 소재가 인발성형 시 어느 정도의 압연력을 필요로 하는가를 조사하는 것에 있다. 따라서 지금까지 조사한 응력, 변형량, 안전계수에 대해 SUS 소재를 기준으로 그 비율을 나타낸 것이 Fig. 12이다. X축은 최대 응력, 최대변형량, 안전계수에 대해 각 4 Case들에 대한 평균값을 기준으로 하고 Y축에 SUS와의 비율(object/SUS)을 백분율로 나타내었다. 최대응력의 경

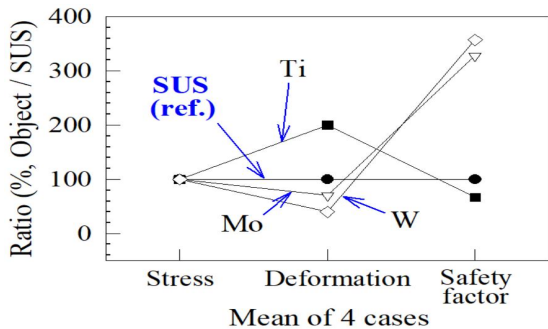


Fig. 12 Ratio comparison between special alloys and SUS for stress, deformation and safety factor

Table 3 Comparison of forces ($F \propto \delta$)

Part	F_{SUS}	F_{Mo}	F_{Ti}	F_W
F_{SUS} / F_{Object}	1	1.4	0.5	2.5

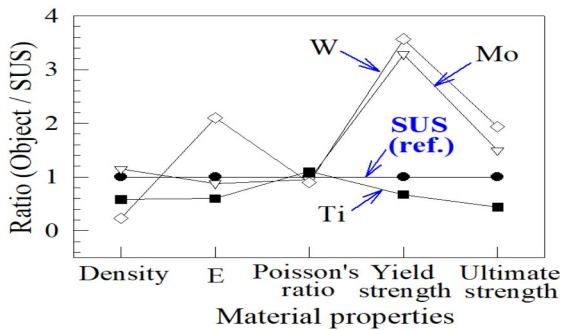


Fig. 13 Comparison for ratios of material properties on SUS

우는 거의 동일한 비율을 나타낸다. 그러나 변형량의 경우 동일한 힘에 대해 SUS가 100%의 변형이 발생했을 때 Mo는 약 70%, W는 약 40%의 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 안전계수의 경우 변형량과 정반대의 경향이 관측된다. 즉 특수합금에 대한 인발성형 시스템을 제작하고자 할 때 위의 변형량과 안전계수 각각의 % 수치를 기준으로 압연 시의 강도(필요로 하는 힘)를 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

여기서 Fig. 12의 그래프는 동일한 힘에 대한 변형량의 관계를 나타내었으나 반대로 동일한 변형량에 대해 각 소재마다 어느 정도의 힘이 필요할 것

인가 예상해 보는 것도 흥미로울 수 있다. Fig. 12의 변형량 항목에서 동일한 변형량에 대한 각각 소재의 힘에 대한 계산이 가능하다. 힘이 변형량에 선형적으로 비례($F \propto \delta$) 한다는 가정 하에 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. 위의 결과에 의하면 동일한 변형량에 대해 SUS가 받는 힘이 1이라면 Mo는 SUS의 약 1.4배, Ti는 약 0.5배, W는 약 2.5배의 힘을 필요로 한다. 이 결과는 새로운 특수합금용 인발성형시스템 제작 전에 필요로 하는 압연력을 예측할 수 있는 설계 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

지금까지는 수치해석을 통한 결과를 토대로 특수합금용 인발성형 시스템이 필요로 하는 힘(압연력)을 예측하고자 하였으나, 수치해석 없이 현장에서 용이하게 예측할 수 있는 방법에 대해 고찰하고자 한다. 본 연구에서 Table 2에 나타낸 물성치 값을 토대로, Fig. 13에 SUS를 기준으로 한 특수합금의 물성치 비율을 나타내었다. 그래프에서 관측되는 바와 같이, 밀도(density)와 영의 계수(E, Young's modulus)는 예측 기준으로 삼기 어렵다. 왜냐하면 W와 Mo의 비가 SUS의 기준값 1 보다 상하 위치를 반복하며 특히 W 및 Mo 특수합금 간의 상호 규칙성이 관측되지 않기 때문이다. 또한 프와송의 비(Poisson's ratio)도 구별이 확실하지 않다. 그러나 항복강도(Yield strength) 및 극한강도(Ultimate strength)는 그 비율이 명확히 구분되며 더 나아가 본 연구의 수치해석 결과와도 잘 부합된다. 더 구체적으로 항복강도는 그 비율이 Mo의 경우 3.28, Ti의 경우 0.67, W의 경우 3.57이며, 극한강도는 그 비율이 Mo의 경우 1.5, Ti의 경우 0.44, W의 경우 1.94를 나타내었다. 항복강도와 극한강도의 평균값은 그 비율이 Mo의 경우 2.4, Ti의 경우 0.56, W의 경우 2.8을 나타내었다. 본 연구의 해석 결과인 Table 3의 값과 비교해 보면 다소 차이는 있으나 극한강도 값의 비율이 가장 근접한 것으로 판단된다. 따라서 현장에서 수치해석 없이 용이하게 특수합금용 인발성형 시스템의 압연력에 관한 예측이 필요한 경우, 특수합금 소재의 물성치 중에서 극한강도 값을 파악하고 기존의 알고 있는 값과의 비율을 조사하여 압연력을 예측해 보는 것도 현장에서는 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

특수합용용 인발성형 시스템을 제작하기 전에 설계에 필요한 기초자료를 얻기 위해 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 특수합금 육각봉 소재는 압연 시 변하는 형상에 따라 응력 및 변형량이 다르며 필요로 하는 힘 또한 육각봉 형상의 영향을 받는다.
2. 수치해석 결과로서 나타나는 변형량과 안전계수를 이용하여 W, Mo, SUS 및 Ti의 소재 특성을 일부 파악할 수 있다.
3. 수치해석을 통해 힘이 변형량에 선형적으로 비례($F \propto \delta$) 한다는 가정 하에, 동일 변형량을 이용하여 압연 시 특수합금이 필요로 하는 힘을 예측할 수 있으며 설계 시 기초자료로 활용될 수 있다. 본 해석에서는 Mo은 SUS의 약 1.4배, Ti은 약 0.5배, W은 약 2.5배의 힘이 필요하다.
4. 현장에서 수치해석 없이 용이하게 특수합금용인발성형 시스템의 압연력을 예측할 수 있는 방법을 모색하였다. 그 결과 특수합금 소재의 물성치 중에서 극한강도 값의 비율이 수치해석 값에 가장 근접하였다. 본 연구에서 극한강도값의 비율은 Mo은 SUS의 1.5배, Ti은 0.44배, W은 1.94배였다.

후 기

“이 논문은 2020년도 경상국립대학교 대학회계 연구년 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Lee, K., Lee, I. K. and Kim, B. M., “Review on Profile Drawing Process,” The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 25, No. 1, pp. 67-74, 2016.
2. Jeong, J. H., Ko, S. H., Kim, M. J., Hwang, W. B. and Park, H. C., “Estimation of Strain at Skin Pass Rolling Under Rolling Force and Back Tension Conditions,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 44, No. 4, pp. 281-290, 2020.
3. Byon, S. M., “Flow Stress Modeling of Ferrous Alloys and Comparative Study of Dynamic Recrystallization Behaviors during Hot Rolling,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 44, No. 6, pp. 421-428, 2020.
4. Lee, C. W., Lee, D. N. and Kim, I., “Changes of Texture and Plastic Strain Ratio of Asymmetrically Rolled and Annealed Cu Sheet(I),” Transactions of Materials Processing, Vol. 28, No. 6, pp. 354-360, 2019.
5. Lee, I. S. and Kim, H. J., “A Study on the Optimum Shape of MQL Carbide End-mill for Machining of Aluminum Lithium Alloy,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 159-166, 2013.
6. Lee, J. H., Kim, H. Y. and Yoon, H. S., “Sustainability Analysis in Titanium Alloy Machining,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 12, pp. 73-81, 2019.
7. Kim, H. J., Kim, Y. J. and Kim, H. S., “Effect of Changes in Metal Characteristics of Hot-Forged Alloy Steel on Mechanical Properties of an Automotive Automatic Transmission Gear,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 135-146, 2016.
8. Lee, Y. S. and Yang, Y. J., “Study on Structural Analysis of Variable Roll Unit for Drawing Process of SUS Hexagonal Bar,” Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 19, No. 6, pp. 827-833, 2017.
9. Lee, Y. S. and Yang, Y. J., “Study on Analysis of Rolling Characteristics of Stainless Hexagonal Bar using Drawing System,” Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 21, No. 2, pp. 234-241, 2019.