

알루미늄 이너 타이로드 소켓의 냉간다단단조 유효성 검증

박재욱*,***, 최종원*, 정의은*, 윤일채**, 강명창***, #

*대한메탈(주)기술연구소, **(재)대구기계부품연구원, ***부산대학교 융합학부

Effectiveness Validation on Cold Multi-Stage Forging of Aluminum Inner Tie Rod Socket

Jae-Wook Park^{*,***}, Jong-Won Choi^{*}, Enn-Eun Jeong^{*}, Il-Chae Yoon^{**}, Myungchang Kang^{***,#}

^{*}R&D Center, Daehan Metal Co. LTD, 39 Gongdan 8-ro, Jillyang-eup, Gyeongsan-si,
Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

^{**}Daegu Mechatronics & Materials Institute Center for Advanced Cutting Tools
3, Seongseogongdan-ro, Dalseo-gu, Daegu 42715, Republic of Korea

^{***}Graduate school of convergence science, Pusan National University, Busan 46241,
Republic of Korea

(Received 3 September 2021; received in revised form 16 October 2021; accepted 8 November 2021)

ABSTRACT

Recently, the automobile industry has continued to demand lighter materials owing to international environmental regulations and increased convenience. To address this demand, aluminum parts have increased in popularity and are mainly developed and produced through hot forging and cold pressing. However, because this method has low yield and low production efficiency, a new manufacturing method is desirable. In this study, the water capacity efficiency of an aluminum inner tie rod socket was investigated using cold forging that provided a high yield and excellent production efficiency. Mechanical properties were derived through tensile testing of 6110A aluminum materials, and critical fracture factor and process analysis based on experimental data were carried out. The optimized process was applied as a prototype using cold multi-stage forging, and based on the derived results, the formability, productivity, and material efficiency of aluminum inner tie rod socket parts using this cold forging process was verified.

Keywords : Steering(스티어링), Inner Tie Rod Socket(이너타이로드소켓), Cold Multi-Stage Forging(냉간다단단조), Critical Fracture Factor(임계파단계수), Weight Reduction(경량화)

1. 서 론

최근 국제 환경 규제 및 연비 규제 강화에 따른 친환경

경 미래자동차 시장으로의 트렌드 변화가 빠르게 진행되고 있다. 특히 전기차 배터리 용량 증가에 의한 차량의 중량 증가는 경량화 부품에 대한 연구를 더욱 가속화 시키고 있다. 차량부품의 경량화를 위하여 스틸 소재를 알루미늄으로 대체하고 있는 상황이며, 주로 열간단조 및 냉간 프레스에 의해 생산되고 있다.

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-518-3360

이는 Fig. 1과 같이 다공정에 의한 제조공정의 불합리함과 over flow에 의한 원소재 손실을 가져오고 있어 효율적 생산을 위한 냉간다단단조의 난성형 알루미늄 성형 공법에 대한 연구를 진행하고자 한다^[1].

냉간단조는 오래된 역사에 비해 노하우에 의존한 제조 시스템과 제한적 형상 구현과 소재 적용에 의해 기술 정보가 부족한 실정이며, 특히 알루미늄 소재의 경우 수소, 전기 자동차 연구개발과 함께 새롭게 대두되고 있는 분야로 선행 연구 개발에 의한 기술 데이터가 많이 부족한 실정이다.



Fig. 1 Inner tie rod socket manufacturing process comparison

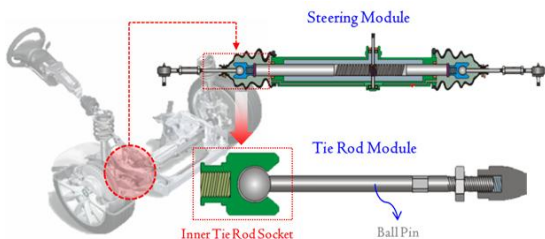


Fig. 2 Configuration and function of steering and tie rod sockets

스티어링 모듈 부품인 이너 타이로드 소켓은 구동 부품의 특성상 기능부 조도와 치수 정밀도가 요구되는 부품으로 상세 구조를 Fig. 2에 나타내고 있다.

본 연구에서는 원소재 분석을 통한 6110A(KS 및 ASTM 표준) 알루미늄 소재의 임계과단을 분석하였으며, 성형 예측 기술 및 예비 테스트(try out)을 통한 알루미늄 이너 타이로드 소켓 냉간다단단조 수용 가능성이 제시하였다.

2. 알루미늄 6110A 소재 특성평가

2.1 알루미늄 6110A 소재의 물성평가

해석 및 예측 설계를 위한 알루미늄 6110A 소재의 인장시험을 실시하였으며, 결과에 따른 항복강도, 인장강도 및 연신율을 Table 1에 나타내었다.

60 ton 만능재료시험기를 활용하여 3회의 반복 실험을 진행하였으며, 시험은 KS B 0801(4호) 규격에 맞게 실시되었다. 시험 결과는 임계과단예측 및 성형해석의 기초 데이터로 활용하였다. 6110A 알루미늄 소재의 화학조성은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 기준을 참고하였으며, Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties analysis results of aluminum materials through Tensile tests

No.	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	336	345	14
2	333	341	14
3	327	338	13
AVG	332	341	13

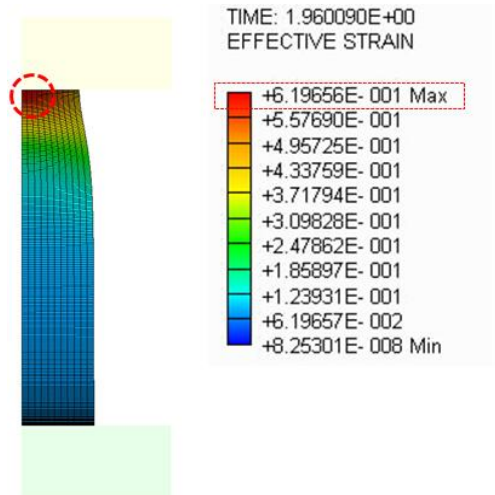
Table 2 Chemical composition of aluminium 6110A

Wt (%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
0.7	0	0.3	0.3	0.7	0.05	0	0	0
~	~	~	~	~	~	~	~	~
1.1	0.5	0.8	0.9	1.1	0.25	0.2	0.2	0.2

2.2 알루미늄 6110A 소재의 임계파단계수 도출

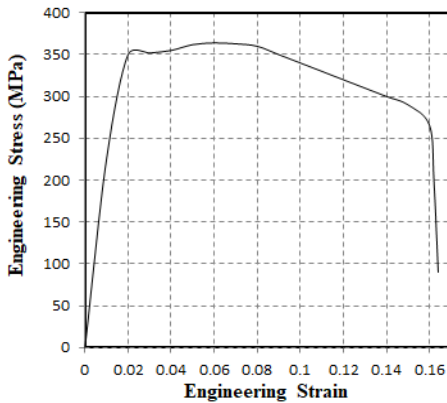
소성가공 중 파단은 매우 치명적인 문제를 야기할 수 있고 냉간성형 된 축류의 제품은 중심파괴의 위험에 노출되어 있다. 이너 타이로드 소켓의 경우 내경 압출의 높이 및 바닥부 집중 응력발생 구간, 즉 모재의 급격한 변형이 발생하는 부위에 치명적인 내부 파단 결함의 가능성에 노출되어 있다.

앞서 획득한 인장시험 결과를 AFDEX SW의 MAT 프로그램에 적용하여 공칭응력-공칭변형률 및 진응력-진변형률 곡선을 도출하였으며, Fig. 3 (a), (b)에 나타내었다. 해석 시 파단시점의 damage value를 도출할 수 있으며, 이때 최대 수치는 임계파단계수를 의미한다. Fig. 3(c)와 같이 0.61의 임계파단계수를 확인하였으며, 이는 기존 이너 타이로드 소켓 소재로 사용되어 오던 SWCH18A(1.3)의 절반 이하의 수준으로 냉간다단단조 공정별 적절한 분배가 필요하다^[2].

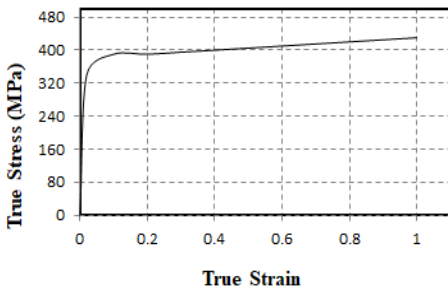


(c) critical fracture Factor

Fig. 3 Flow stress-strain curve and critical fracture factor of aluminium 6110A material



(a) Engineering Strain-Stress Curve



(b) True Strain-Stress Curve

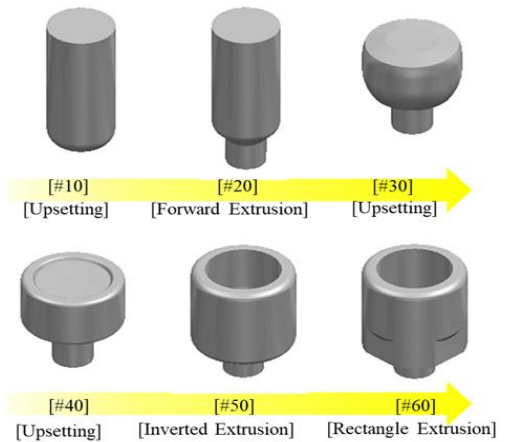


Fig. 4 Cold forging multi-step process design

3. 냉간다단단조 공정설계 및 검증

3.1 냉간다단단조 공정 설계

이너 타이로드 소켓 냉간다단단조 공정은 6단으로 분배하였으며, Fig. 4에 나타내었다^[3-6]. 소재의 파단과 내부결함 방지를 위하여 단면감소율(section reduction rate)의 한계를 고려하였으며, 주요 치수 및 공정별 단면감소율을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Design dimensions and section reduction rates of inner tie rod socket

	Outer Diameter	Tap	Inner Diameter	Body Length	Section reduction rate
Unit	mm	mm	mm	mm	%
# 10	25.6	-	-	57.5	-
# 20	25.7	15.30	-	54.6	64.3
# 30	37.0	15.35	-	29.5	45.9
# 40	38.8	15.37	-	27.2	-
# 50	38.9	15.41	28.3	35.5	53.2
# 60	39.0	15.52	28.2	36.7	-

단면감소율 R은 가공 방식에 따라 구분하여 계산할 수 있으며, 계산 인자 및 결과를 Table 3에 나타내었다.

압출 공정의 경우 압출 전/후 단면의 변화량을 이용하여 단면감소율을 구할 수 있으며, 식 (1)과 (2)를 통하여 계산할 수 있다^[7].

식 (1)은 전방압출에 대한 계산법으로 성형한계는 50~75% 이다. 여기서 A₀는 성형 전 외경의 지름이며, A₁은 성형 후 외경의 지름을 말한다.

$$R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100 = 50 \sim 75\% \quad (1)$$

식 (2)는 후방압출에 대한 계산법으로 성형한계는 30~75% 이다. 여기서 A₀는 성형 전 외경의 지름이며, a₁은 성형 후 내경의 지름을 말한다.

$$R = \frac{A_0 - (A_0 - a_1)}{A_0} \cdot 100 = 30 \sim 75\% \quad (2)$$

업셋팅 공정의 경우 식 (3)과 같이 포징 전/후 길이에 따른 변화량을 활용하여 계산할 수 있다. 여기서 h₀는 성형 전의 길이이며, h₁는 성형 후 길이를 말한다. 성형한계는 50~70% 이다.

$$R = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100 = 50 \sim 70\% \quad (3)$$

공정별 단면감소율을 Table 3에 나타내었으며, 수용 범위를 만족하는 것을 잘 알 수 있었다.

3.2 냉간다단단조 공정 유효성 검토

AFDEX SW를 활용하여 Table 4의 조건으로 공정 해석을 진행하였다. 소재 분석을 통하여 도출된 진응력-진변형률 커브를 원소재 라이브러리에 적용하여 공정 해석에 반영하였으며, 고응력 및 고마찰 예상 공정의 데미지 및 유동응력 결과를 Fig. 5에 각각 나타내었다.

Table 4 Boundary conditions for the FEA

Process Conditions	Value
AFDEX-3D	quarter (180°)
Initial specimen Diameter	25.5 mm
Initial specimen Length	58 mm
Friction μ	0.08
Punch velocity	150 mm/s
Temperature of Specimen	20 °C

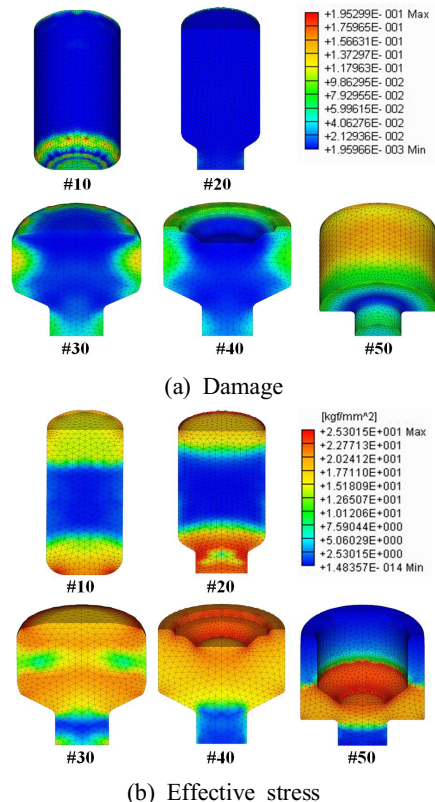


Fig. 5 Damage & Effective stress of cold forging process

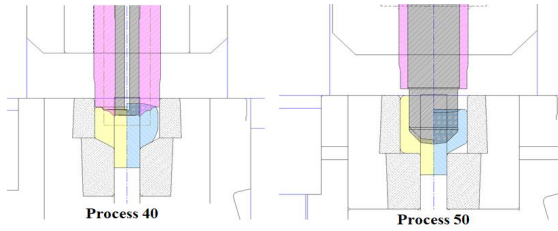


Fig. 6 The mold structure of #40 and #50

Fig. 5(a)는 공정별 데미지 해석값을 나타내었으며 임계과단계수인 0.61 이하로 확인되었다. #20공정의 일부 구간은 1.2의 데미지 값이 확인되었으나 이는 소재 끝단부의 플래시 발생으로 인한 과도한 변형이 발생하여 발생하는 국부적인 수치로 실제 유효 데미지는 0.1 이하로 무시할 수 있다.

특이한 점으로는 예비압출 공정인 #40공정(0.33)이 후방압출 27.5mm인 #50공정(0.19)이 보다 높은 데미지 값이 확인되었다. 이는 Fig. 6에 나타나는 공정별 특성에 의한 것으로 정형(net shape)을 위한 구속 성형의 경우 금형 경계면 이러한 국부적인 현상이 발생되며, 실제 유효 데미지 값은 0.13로 확인 되었다.

유동응력 분포의 경우 데미지 분포와는 상이한 경향을 나타내었다. #50공정에서 255MPa 수준으로 가장 큰 응력분포가 확인되었으며, Fig. 5(d)에 나타내었다. #20 공정의 경우 압출 표면 응력이 220MPa 수준으로 내부응력과 120MPa 수준의 차이가 남을 확인할 수 있다. 이는 세브론 크랙이나 기공 등의 제품 내부 결함을 유발할 수 있어 냉간단단조 실험 후 검증이 필요할 것으로 판단된다^[8].

3.2 냉간단단조 성형성 검증

Table 5의 단조 조건에서 실험을 진행하였으며, 리피딩 장치를 활용하여 Bar소재 투입을 실시하였다.

Table 5 Cold forging specifications

Specifications	Condition
Cold Former	CNP-276S
Lubrication	S800H (70.0 40°C, cSt)
Speed	40ea/min
material	6110A aluminum (Bar)

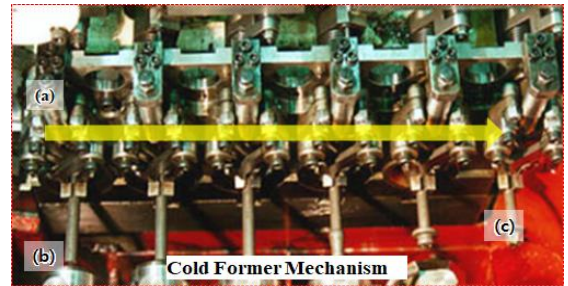


Fig. 7 Cold forging mechanism (a) Dies tool, (b) Punch tool, and (c) Product



Fig. 8 #10-#60 Cold forming process product

냉간단단조 성형 결과는 Fig. 8에서 나타내고 있으며, 해석결과와 비교하여 내/외부의 결함 여부를 검토하였다.

#20 공정 전방압출 공정의 경우 압출 시 발생하는 마찰에 의해 모재의 피막 손상이 확인되었으며, Fig. 9에 나타내고 있다. 이는 스틸 소재에서도 동일하게 발생하는 현상으로 금형의 표면처리를 통하여 보완 가능하며, 후공정(upsetting)에서 개선됨을 확인하였다. 또한 해석에서 확인되었던 내/외부의 유동응력의 편차에 의한 결함여부를 판단하기 위하여 metal flow를 확인하였으며, 세브론 크랙 및 버클링 현상 없이 압출되었음을 확인하였다^[9].

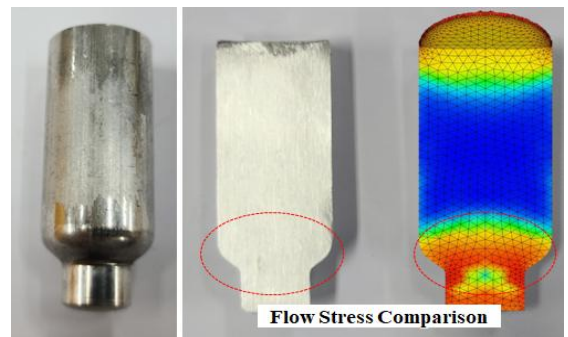


Fig. 9 Checking internal and external defects (#20)



Fig. 10 Check for orange peel and cracks of inverted and upsetting area (#40)

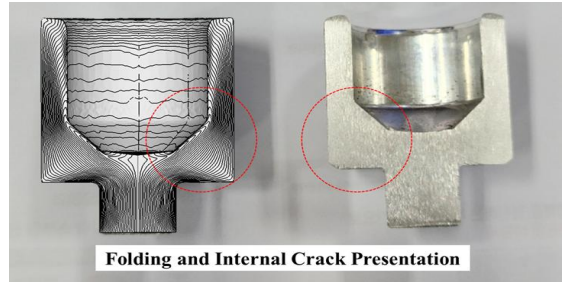


Fig. 12 Check the metal flow of the inverted extrusion process

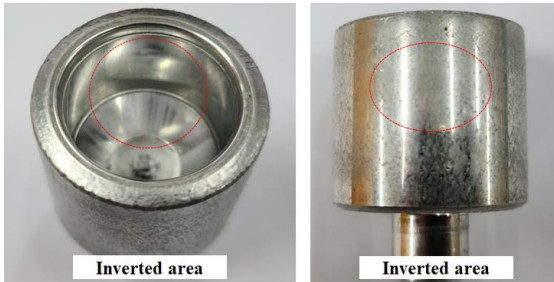


Fig. 11 Check for orange peel and cracks of inverted and upsetting area (#50)

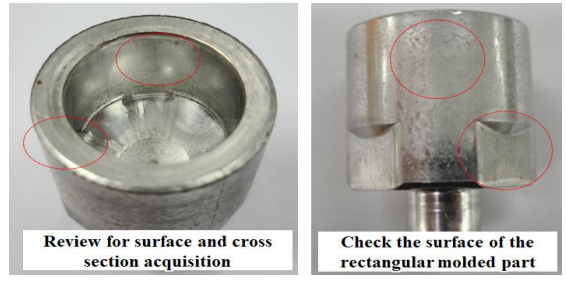


Fig. 13 Check for inspect the final prototype

Fig 10은 #40 공정의 검토 결과로 구속 상태의 업셋팅 성형에 의한 크랙 발생의 우려가 있다. 업셋팅 부위의 바닥 모서리의 미성형은 후공정(#50)의 집중응력 분산을 위해 유도한 것이며, 구속 성형부의 파단 및 크랙은 확인되지 않았다.

#50 공정의 경우 후방압출량이 많고 해석 검토 시 유동응력이 가장 높게 확인되었던 공정으로 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 후방압출시 발생하는 마찰에 의한 내/외경 표면 상태를 중점적으로 검토하였으며, 오렌지 필과 소재파단 없이 양호함을 확인하였다.

이너 타이로드 소켓과 같은 다단 후방 압출의 경우 전(前)공정의 핀의 압출 깊이가 후 공정 보다 깊게 되면 공간에 공기가 갇히는 air trap 현상이 발생되는데 이 경우 폴딩 현상이 발생되며, 이는 제품의 치명적인 파단을 불러일으키게 된다^[10].

폴딩 발생 유무를 확인하기 위하여 후방압출 공정의 단류선(Metal flow)을 확인하였으며, 해석 결과와 같이 끊어짐 없이 양호한 흐름을 가지는 것을 Fig. 12(b)에 나타내었다^[11].

#60공정의 사각 압출부의 표면 및 후방압출 단면을 검토 하였으며, 평가 결과를 Fig. 12(a)에 나타내었다. 사각 성형부의 압출면은 Scratch 및 소착 현상 없이 성형되었음을 확인할 수 있었으며, 상/하부 단면 또한 완벽하게 확보됨을 확인할 수 있다.

냉간다단단조 이너 타이로드 소켓의 냉간다단단조 성형성 평가 결과 over flow가 발생되지 않는 정밀 성형이 가능하였으며, 40ea/min의 생산속도로 기존 공정 대비 우수한 생산 효율을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 열간단조 및 프레스를 통하여 제조되고 있던 자동차 조향장치용 알루미늄 이너 타이로드 소켓을 냉간다단단조로 수용하기 위하여, 알루미늄 6110A 소재의 임계파단계수를 도출하였으며, 해석과 검증을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 인장시험 및 유한요소 해석을 통하여 소재 특성에 맞는 임계파단계수를 확보할 수 있으며, 소재 Lot에 따른 관리가 가능하다.

2. 6110A 알루미늄 소재의 임계과단계수는 0.61 수준으로 스틸소재(SWCH18A)의 절반 수준이며, 공정 설계 시 임계과단점의 관리를 통하여 결함/장애요소를 제어할 수 있다.
3. 유한요소 해석을 통하여 이너 타이로드 소켓의 예측설계가 가능하며, 냉간다단단조 평가를 통하여 제안된 공정이 적절함을 확인할 수 있다.
4. 6110A 알루미늄 공정설계는 응력에 의한 금형 파손의 영향은 미비하며 마찰에 의한 피막 손상과 압축률에 의한 소재의 과단이 고려되어야 한다.
5. 다단 후방압출 공정의 경우 air trap이 발생될 우려가 있으며, 예방을 위해 선행 공정이 후공정의 성형량을 초과하지 않아야 한다.
6. 냉간다단단조를 통한 알루미늄 이너 타이로드 소켓의 수용 가능성을 확인하였다. over flow가 없는 정밀성형이 가능 하였으며, 40ea/min이라는 우수한 생산 효율의 확보가 가능하였다.

후 기

“이 논문은 2019년 산업소재혁신기술개발사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음. (NO.20006979)”

REFERENCES

1. Lee, S. M., Wang, S. I., Kim, H. R., Bae, W. B., “A Study on the Production of a Compressor Piston for an Automobile Air-Conditioner using Aluminum casting/Forging”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17 No. 8, pp. 53-59, 2000.
2. Lee, S., K., Lee, I. K., Lee, S. Y., Lee, S. M., Jeong, M. S., “Evaluation of Flow Stress of Metal up to High Strain”, Journal of the Korean society for technology of plastics, Vol. 29, No. 6, pp. 316-322, 2020.
3. Hu, C., Ding, T., Ou, H., Zhao, Z., “Effect of tooling surface on friction conditions in cold forging of an aluminum alloy”, Journal of Tribology International. Vol. 131, pp. 353-362, 2019.
4. Kim, H. R., Seo, M. K., You, M. S., Bae, W. B., “A Study on the Manufacture of Aluminum Tie-Rod End by Casting/Forging Process”, Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 180-185, 2002.
5. Jo, A. R., Jeong, M. S., Lee, S. K., Moon, Y. H., Hwang, S. K., “Multi-Stage Cold Forging Process for Manufacturing a High-Strength One-Body Input Shaft”, Journal of the Materials, Vol. 14, pp. 532, 2021.
6. Kim, D. B., Lee, M. Y., Park, B. J., Park, J. k., Cho, H. Y., “Forging Process Design of Self-Piercing Rivet for Joining dissimilar Sheet”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 36, No. 6, pp. 802-807, 2012.
7. Kim, P. Y., “Compressed molds”, Daekwang seorim, pp. 33-35, 1984.
8. Kang, S. K., Lee, J. K., “A Study on the Forging Prototype Manufacture of Aluminium 7050 Alloys”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 39-45, 2012.
9. Hild, R., Bergs, T., Mattfelda, P., Trautha, D., Klockea, F., Hoffmannb, D. C., Kruppeb, N. C., Brögelmannb, T., Bobzinb, K., “Analysis of wear phenomena during forward extrusion under dry friction conditions”, Journal of the Wear, Vol. 426-427, pp. 1362-1370, 2019.
10. Ann, K. H., Kang, J. H., Heo, S. J., Shin, T. S., Cho, H. Y., “Multistage Cold Forging Process Design of Al6082 Considering Forming Limit”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 9, pp. 93-99, 2020.
11. Kim, Y. H., “Finite Element Simulation for Design of Compound Forging Process for Hollow Flanged Spindle”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 2, pp. 69-75, 2010.
12. Joun, M. S., “Forging simulation”, Jinsaem media, pp. 100-114, 2013.