

금형 냉각을 고려한 다단 열간 단조 공정의 유한요소해석

최두순^{*,#}, 강형부^{**}

^{*}한국교통대학교 기계공학과, ^{**}(주)케이피에프

Finite Element Analysis of Multistage Hot Forging Process During Mold Cooling

Du-Soon Choi^{*,#}, Hyoungboo Kang^{**}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, ^{**}KPF LTD.

(Received 18 March 2020; received in revised form 28 March 2020; accepted 3 April 2020)

ABSTRACT

Multistage hot forging process enables mass production of various parts at a high speed, wherein, it is important to design the forging steps in an optimal way. Finite element methods are widely applied for optimizing the forging process design; however, they present inaccurate results due to the rapid change in the mold temperature during multistage hot forging. In this study, the temperature distributions of the mold in a steady state were calculated via heat transfer analysis during mold cooling. The flow stress and friction coefficient of the material were measured according to the temperature and were applied for numerical analysis of the multistage hot forging process. Eventually, the accuracy of the analysis results is verified by comparing these results with the experiments.

Key Words : Multi-Stage Hot Forging(다단열간단조), Mold Cooling(금형 냉각), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서 론

단조가공은 우수한 기계적 성질의 제품을 대량생산할 수 있는 가공법으로 자동차, 산업기계 등의 주요 부품을 제조하는 데 널리 사용되는 가공법이다. 특히 볼트나 베어링 등의 생산량이 크게 요구되는 부품의 경우, 고속생산을 위하여 자동화된 장비를 사용하는 다단자동단조(automatic multi-stage forging)를 사용한다. 이 중, 다단 열간 단조의 경우, 재결정온도 이상으로 가열된 소재를 성형하므로,

상대적으로 적은 성형하중으로 큰 변형을 발생시킬 수 있다는 장점을 갖는 반면, 금형의 온도상승을 방지하기 금형 냉각이 필수적이다. 금형의 냉각은 금형에 구멍을 뚫어 냉각수를 순환시키는 방식이 일반적이거나, 다단 열간 단조의 경우 고속 냉각을 위하여 금형에 직접 냉각수를 분사하는 방식이 많이 사용된다.

일반적으로 단조공정의 설계에는 공정설계에 요구되는 비용과 시간을 단축시키기 위해서 CAE 해석을 통한 시뮬레이션 기법이 널리 활용되고 있다^[1-3]. 그러나 다단 열간단조의 경우 공정 수가 많고, 자동화와 금형의 고속 냉각을 고려해야 하기 때문에 공정 설계가 일반 단조에 비하여 훨씬 복잡하

Corresponding Author : dschoi@ut.ac.kr

Tel: +82-43-841-5128, Fax: +82-43-841-5120

고, 이에 따라 CAE 해석 역시 복잡해지며^[4-6], 해석 결과와 실제 단조 결과와의 비교정확도가 높지 않아 실제 설계에 활용하는 데에는 한계가 있다. 해석 결과의 정확도가 낮은 이유는 성형 시 소재의 온도변화 폭이 크고, 온도에 따라 유동응력과 마찰계수가 변화하나, 이것을 해석에 정확히 반영하기가 어렵기 때문이다. 따라서, 정확도 향상을 위해서는 공정 중의 소재 및 금형의 온도분포가 정확히 예측되어야 하고, 온도에 따른 소재의 유동응력과 접촉면에서의 마찰계수를 측정하여 해석에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 다단 열간 단조 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 금형 냉각을 고려한 열전달 해석을 통하여 정상상태에서의 금형의 온도분포를 계산하고, 온도별로 측정된 소재의 유동응력과 마찰계수를 다단 열간단조 공정의 해석에 적용하였다. 또한 해석 결과를 실험결과와 비교하여 해석 결과의 정확도를 검증하였다.

2. 열간단조 공정의 CAE 해석

2.1 대상 공정

본 연구의 대상 공정은 Fig. 1과 같은 다단자동단조기(automatic multi-stage forging machine)을 이용한 다단 열간 단조 공정을 통한 캠 로브(cam lobe)의 성형공정이다. 소재는 1160 °C로 가열되어 설정된 크기로 절단된 후, 1단 업세팅, 2단 단조성형을 거쳐 3단 피어싱 공정에 의해 최종 제품이 완성된다. 단조용 소재는 100Cr6이 사용되었다.

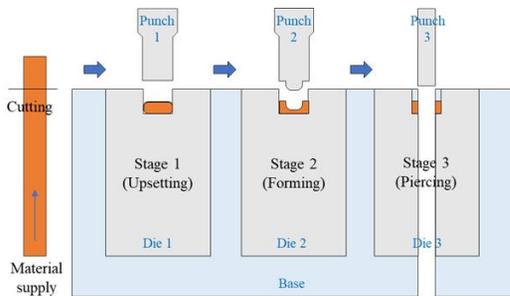
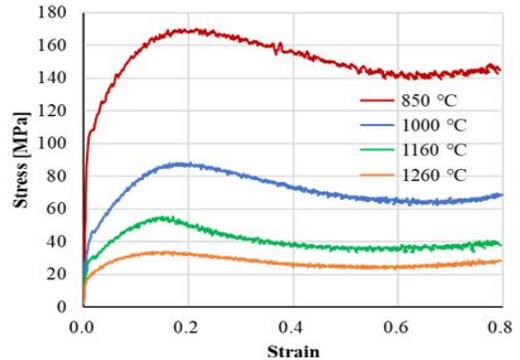


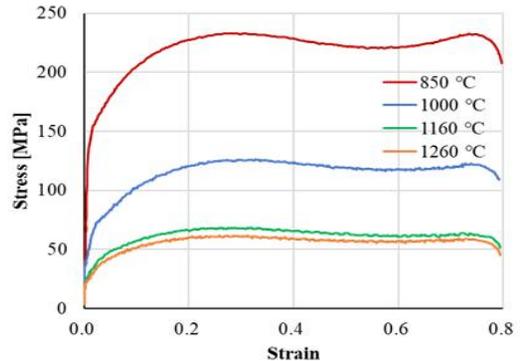
Fig. 1 Schematic diagram of automatic multi-stage hot forging machine in this study

2.2 소재 물성 측정

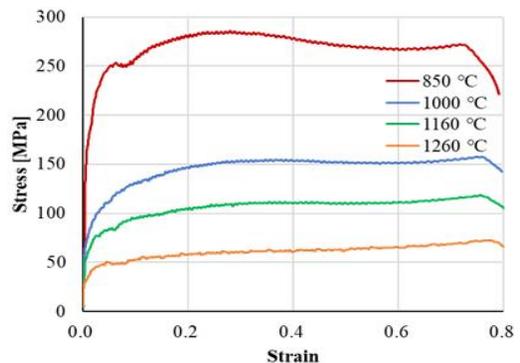
소재의 유동응력을 측정하기 위하여 다양한 온도 (800°C, 1000°C, 1160°C, 1260°C) 및 변형률속도(0.1/s, 1.0/s, 5.0/s)에 대한 고온압축실험을 실시하였다.



(a) Strain rate 0.1 /sec



(b) Strain rate 1.0 /sec



(c) Strain rate 5.0 /sec

Fig. 2 Stress-strain curve with different temperature and strain rate

Table 1 Friction coefficient according to the temperature

Temperature (°C)	Friction coefficient
600	0.374
700	0.356
800	0.517

압축 시편은 직경 10 mm, 길이 15 mm의 크기로 제작되었다. 시편의 온도제어를 위해 열전대를 부착하였고, 시편 양면에 전류를 통전시켜 가열하였다. 가열 시 승온 속도는 10 °C/sec, 온도유지시간은 180 sec로 설정하였다. 측정된 응력-변형률 선도 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 소재의 유동응력은 온도가 증가함에 따라 감소하였는데, 특히 850 °C와 1000 °C 사이에서 변화의 폭이 컸다. 또한 변형률 속도가 작을 경우에는 가공연화 특성을 나타내다가 변형률 속도가 증가할수록 가공경화의 특성을 나타내었다.

2.3 고온 마찰계수 측정

열간 단조에서 소재와 금형 사이의 마찰은 소재의 충전과 금형하중^[7] 뿐 아니라 금형수명^[8,9]에도 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 열간 단조가 수행되는 고온 상태에서의 마찰계수를 측정하기 위하여 핀온디스크(Pin-on disk) 방식의 마찰/마모시험기를 이용하여 고온 마찰시험을 수행하였다. 이 때, 디스크 시편은 실제 금형과 동일하게 질화 처리된 DH32 소재를 사용하였고, 핀 시편은 단조 소재인 100Cr6으로 제작하였다. 열간단조 시 소재는 1260 °C까지 가열되나, 시험기의 한계로 인하여 시험 온도는 600 °C, 700 °C, 800 °C의 세 경우에 대하여 수행하였다. 핀 시편의 하중은 4 kg, 디스크 시편의 회전속도는 50 rpm으로 설정하였다. 온도에 따른 마찰계수의 측정 결과를 Table 1에 나타내었다.

2.4 금형 냉각 해석

열간 단조 공정 시 고온의 소재로부터 저온의 금형으로 열이 전달되어 소재는 냉각되고 금형은 가열되는 현상이 동시에 발생한다. 이에 따라 성형 중 소재는 냉각되고, 금형은 가열된다. 일반적인 단

조 소재는 온도에 따라 유동응력이 달라지기 때문에 열간단조 공정의 정확한 해석을 위해서는 소재^[10]와 금형^[11]의 온도변화를 고려한 해석이 필요하다. 그러나, 소재의 초기온도는 비교적 쉽게 예측되는 반면, 금형의 초기온도는 공정이 반복됨에 따라 계속 변화하고, 충분한 시간이 지난 후에야 정상상태에 도달한다. 따라서 해석 시에도 정상상태의 온도 분포를 반영하여 해석의 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 여러 기존 연구^[12,13]에서 정상상태의 온도분포를 예측하기 위하여 단조 공정 해석을 반복적으로 수행하였다. 그러나 단조 공정 해석은 비선형 해석으로 한번의 해석에도 많은 시간이 소요되므로, 반복 해석에는 매우 많은 시간이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 금형의 정상상태 온도분포를 도출하기 위하여 금형부의 열전달 해석만을 반복수행하고, 그 결과 얻어진 금형온도를 단조해석에 적용하는 방법을 채택하였다.

본 연구의 열간 단조 공정에서는 하부 금형의 이젝터 핀 내부에 냉각 유로가 설치되어, 이젝터 작동 시 금형 표면에 직접 냉각수를 분사하는 냉각 방식이 사용된다. Fig. 3의 (a), (b)와 같이 이젝터 핀이 후퇴한 상태에서는 공급된 냉각수가 금형과 이젝터의 틈새인 A 영역으로 배출되고, (c), (d)와 같이 이젝터 핀이 전진한 상태에서는 냉각수가 금형 표면인 B 영역으로 직접 분사되어 금형 표면을 냉각한다. 금형 표면에 분사된 냉각수의 일부는 금형 표면에 남아 다음 사이클에서 소재와 접촉하기도 하고, 일부는 증발하며, 또 일부는 표면을 타고 흘러 내려간다.

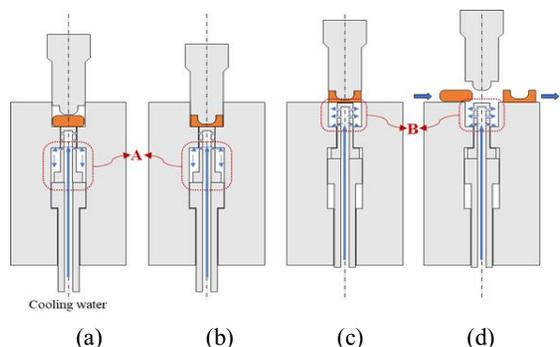


Fig. 3 Schematic diagram of the cooling process during 1 cycle of forging process

이러한 현상들을 모두 정확하게 열전달 해석에 고려하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 몇 가지 가정을 통하여 해석을 단순화시켰다. 먼저 성형 중 소재의 온도는 초기 가열온도 1160 °C가 그대로 유지된다고 가정하고, 소재와 금형 사이의 열전달을 계면열전달 계수^[14]를 이용하여 계산하였다. 또한 금형과 냉각수 사이의 열전달, 금형과 대기 사이의 열전달은 대류열전달 계수^[15]를 이용하여 계산하였다.

열전달 해석은 다음과 같이 수행하였다. 먼저, 이젝터가 후퇴상태인 (a)→(b)→(c)의 성형 과정 중에는 B 영역에서의 소재로부터 금형표면으로의 열유입과 A 영역에서의 냉각수로 인한 열배출을 고려하였다. 다음으로, (c)→(d)→(a)의 이젝터 전진 및 이송 단계에서는 B 영역에서의 냉각만을 고려하였다. 또한 전체 주기 동안 대기와 접촉한 면에서는 자연대류로 인한 열방출을 고려하였다.

실제 단조공정은 1단 업세팅, 2단 단조성형, 3단 피어싱 공정으로 이루어져, 각 단계 별 열전달량이

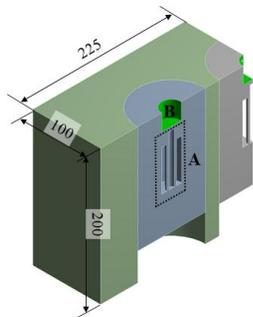


Fig. 4 Analysis model of 1/4 symmetric region and its dimensions (mm)

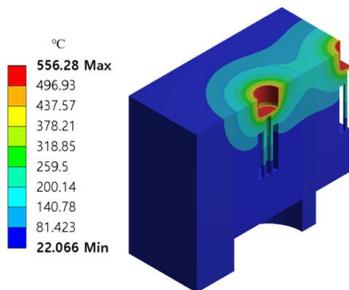


Fig. 5 Final temperature distribution

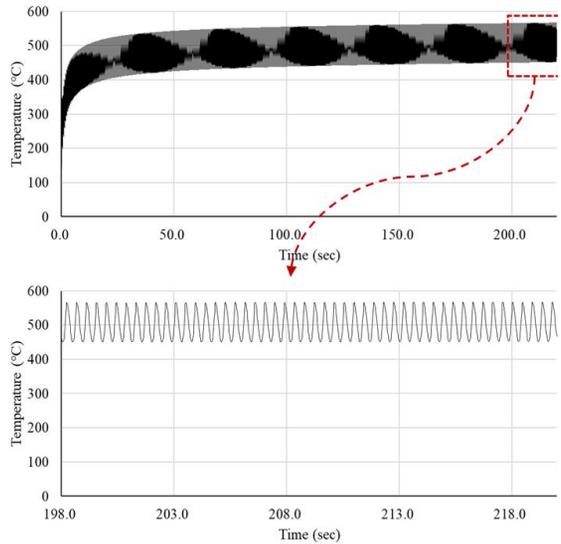


Fig. 6 Change of the average temperature in region B over time

다르나, 해석의 단순화를 위하여 동일한 열전달이 발생한다고 가정하고, Fig. 4와 같은 1/4 대칭영역을 해석영역으로 선정하였다. 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS를 이용하여 수행하였고, 소재와 금형 사이의 계면열전달계수는 $0.01 \text{ W/mm}^2\text{C}$, 금형과 대기와의 대류열전달 계수는 $5.0 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{C}$, 금형과 분사된 냉각수 사이의 열전달계수는 $0.003 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 를 적용하였다. 전체 사이클 타임은 0.44 sec 이고, 이젝터 핀의 후퇴시간 0.22 sec와 전진시간 0.22 sec 으로 구성된다. 해석은 초기에 상온(20°C) 상태인 금형이 500회의 반복성형을 수행하는 동안의 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 5에 금형의 최종 온도 분포 결과를 나타내었고, 시간에 따른 B 영역의 평균 온도를 Fig. 6에 나타내었다. 결과에서와 마찬가지로 500회 성형 후에는 금형 온도가 거의 정상 상태에 도달하였고, 이 때의 한 사이클에서의 온도는 450 ~ 567 °C 의 영역에 있음을 알 수 있다.

2.5 열간단조 해석

3D CAE해석을 위하여 해석 대상인 다이(die), 펀치(punch), 소재(workpiece)를 3D 모델링하였고, 1단 업세팅과 2단 단조성형을 연계하여 비등온 해석을 수행하였다.

소재의 유동응력과 마찰계수는 2.1절과 2.2절에 기술된 측정값을, 펀치속도는 실제 속도인 513 mm/sec를 적용하였고, 상용 소프트웨어 Deform 3D를 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 7에 실제 공정에서의 결과와 해석 결과의 성형품 형상을 나타내었다.

3. 해석 결과 및 검증

단조 성형 해석 결과의 정확도를 검토하기 위해서는 성형 하중이나 소재의 중간 성형품 형상 등을 실험 결과와 비교하는 방식이 많이 사용된다. 그러나 본 연구의 다단 열간 단조 성형은 성형속도가 매우 빠른 양산용 장비이므로 성형 하중을 측정하거나 중간 성형품을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 성형품의 형상을 이용하여 해석 결과의 정확도를 검토하였다. 밀폐단조에서 성형품의 형상은 금형 내부의 캐비티 형상을 따라가기 때문에 Fig. 7과 같이 실험과 해석의 전체적인 형상은 대부분 잘 일치한다. 그러나 금형의 초기 온도에 따라 성형품의 열팽창 및 열수축량이 달라지기 때문에 최종 제품의 치수는 달라진다.

본 연구에서는 2.4절에서 얻어진 금형 온도를 초기온도로 반영하여 해석을 수행하고, Fig. 8에 나타낸 성형품의 세 가지 치수를 실제 성형품의 치수와 비교하여 금형 온도에 따른 해석의 정확도를 분석하였다.

금형의 초기온도가 상온 20 °C인 경우와 2.4절에서 얻어진 정상상태 온도범위 (450~567 °C)에 속하는 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C에 대하여 해석을 수행하고, 각 경우에 얻어진 성형품의 치수를 Table 2에 나타내고, 실제 성형품과의 오차를 Fig. 9에 나타내었다.

결과를 살펴보면 금형 초기 온도가 상온인 경우보다 정상상태 온도범위에 있을 경우에 모든 치수 오차가 감소하였고, 특히 금형 초기 온도가 550 °C인 경우에는 모든 치수오차가 최소가 되는 최적의 결과를 나타내었고, 이는 2.4절의 정상 상태의 금형 표면 온도와 정확히 일치한다.

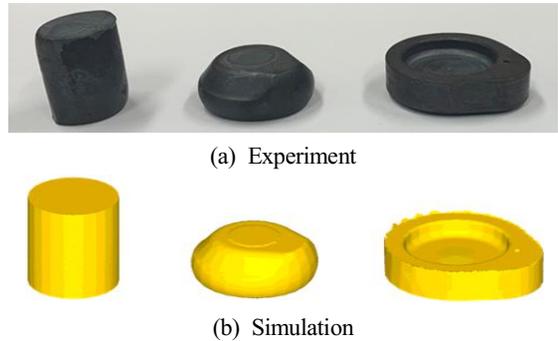


Fig. 7 Geometry of the forged part at each stage

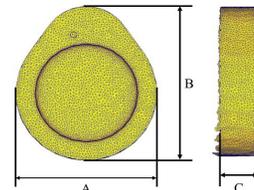


Fig. 8 Three dimensions of forged part

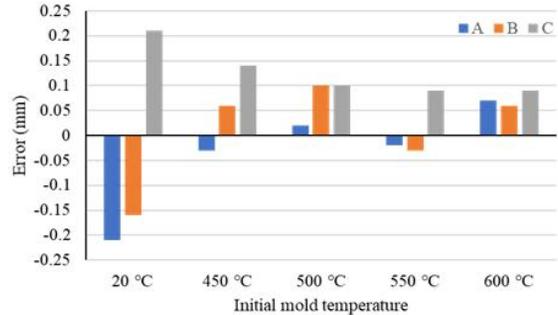


Fig. 9 Dimensional error of final forged part according to the initial mold temperature

Table 2 Dimensions of final forged part according to the initial mold temperature

	Mold temp.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Err
CAE	20	33.05	37.85	9.11	0.61
	450	33.23	38.07	9.04	0.23
	500	33.28	38.11	9	0.22
	550	33.24	37.98	8.99	0.14
	600	33.33	38.07	8.99	0.22
Experiment		33.26	38.01	8.9	0

따라서, 냉각 해석으로 얻어진 금형의 온도를 단조 성형 해석에 반영할 때 더욱 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 다단 열간 단조의 유한요소 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

1. 열간 단조 성형 시 온도 변화에 따른 소재의 성질 변화를 고려하기 위하여 소재의 유동응력과 마찰계수를 온도별로 측정하였다.
2. 냉각을 고려한 금형의 열전달 해석을 반복수행하여 정상상태에서의 금형의 온도분포를 계산하였다.
3. 계산된 금형의 온도분포를 적용하여 다단 열간 단조 성형 해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 정확도가 향상되었음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2019년도 교육부의 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINK+) 육성사업의 지원을 받아 수행됨.

REFERENCES

1. Kim, H. J. and Jin, C. K., "Process Design Molding with Precision Hot Forging of One-Way Clutch Inner Race," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 83-90, 2018.
2. Moon, H. K., Kim, M. C., Joun, M. S., "Optimal design of forging process of the first generation hub bearing outer race considering the symmetry of metal flow lines," Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 24-25, 2018.
3. Park, M. C., Ryu, H. Y., Ku, S. M., Lee, J. H., C. Lee, J. K., "Forging Process for Improving Tool Life in Hot Forging," Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 190-191, 2015.
4. Gangopadhyay, T., Ohdar, R. K., Pratihari, D. K. and Basak, I., "Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 1, pp. 301-312, 2010.
5. Joun, M. S., Hwang, S. M., Moon, H. G., "Automatic Computer Simulation of Multi-Stage Hot Forging Processes - Flow, Temperature and Die Analyses," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp. 337-340, 1995.
6. Moon, H. G., Chung, J. H., Joun, M. S., "Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Analysis of Hot-Former Forging Processes," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp. 749-753, 1998.
7. Ahn, M., Cho, Y., Park, J., "A Study on the Influence of Friction Coefficient on Filling Ratio and Die Load in Heading Process Using FEM Analysis," Proc. of the Korean Society Of Tribologists And Lubrication Engineers, pp. 144-145, 2019.
8. Choi, C. H., Jung, K. B., Kim, Y. J., "Finite Element Simulation on Prediction of an Asymmetric Hot Forging Die Life Based on Wear," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 4, pp. 47-54, 2013.
9. Kim, Y. J., "FE Analysis of Forging Process for Improving Tool Life in Hot Forging of CV Joint Outer Race," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 56-62, 2014.
10. Bang, W., Jung, J. Y., Chang, Y. W., "The Effect of Deformation Heat Compensation in the Hot Forging Analysis of SAF 2507 Stainless Steel," Transactions of Materials Processing, Vol. 10, No. 3, pp. 206-213, 2001.
11. Lee, S. C., Kong, J. H., Hur, K. D., "Hot Forging Analysis of Rotor Grip with Titanium

- Alloy for Unmanned Helicopter,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 96-103, 2011.
12. Song, H. N., Kim, G. M., Kim, T. S., M. S. Joun, “Estimation of temperature change of mold during forging by repeated analysis,” Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 64-65, 2017.
 13. Kim, K. M., Yoo, J. D., Joun, M. S., “FE prediction of temperature variation of material and dies with number of strokes in aluminum yoke cold forging,” Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 105-106, May 2019.
 14. Kwon, J. W., Lee, J. H., Lee, Y. S., Kwon, Y. N., Bae, W. B., “A Study on Interface Heat Transfer Coefficient Between Die and Workpiece for Hot Forging,” Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No. 5, pp. 460-465, 2005.
 15. Kang, J. H., Ko, B. H., Jae, J. S., Kang, S. S., “Heat transfer coefficients for F.E analysis in warm forging processes,” Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 138-143, 2005.