

유동응력, 마찰, 온도, 속도 등이 단조 중 단류선의 유한요소예측에 미치는 영향

최무호¹ · 진호태² · 전만수[#]

Effect of Flow Stress, Friction, Temperature, and Velocity on Finite Element Predictions of Metal Flow Lines in Forgings

M. H. Choi, H. T. Jin, M. S. Joun

(Received January 5, 2015 / Revised April 15, 2015 / Accepted June 10, 2015)

Abstract

In this paper, the effect of flow stress, friction, temperature, and velocity on finite element predictions of metal flow lines after cylindrical upsetting is presented. An actual three-stage hot forging process involving an upsetting step is utilized and experimental metal flow lines are measured to study the effect of the various process variables. It was found that temperature and velocity for reasonable values of friction have little influence on metal flow lines especially those located deep within the cylinder but that flow stress has a direct influence on the flow lines. It was shown that a pure power law material model cannot reflect the real flow stress of hot material because it underestimates the flow stress especially around the dead-metal zone for the upsetting of a cylindrical specimen. It is thus recommended that a proper lower limit of flow stress be assumed to alleviate this issue.

Key Words : Metal Flow Lines, Forging Simulation, Flow Stress, Upsetting Process, Lower Limit of Flow Stress

1. 서 론

소성가공, 특히 단조에서 단류선은 제품의 건전성, 구조강도를 결정하는 중요 요소이다[1~10]. 따라서 제품의 품질 평가에서 단류선 검사는 필수적이다. 단류선은 기초재료가 열간압연 등을 거치는 과정에서 형성된 것으로 후속 소성가공 및 열처리 등의 공정에서 재료의 유동에 의하여 그 형상이 변화될 뿐이다. 따라서 단류선은 소성가공 이력을 저장하고 있다. 단류선을 통하여 거시적 및 미시적 변형 이력을 유추할 수 있으므로 단류선은 베어링 및 기어 등과 같이 극한의 하중을 지탱하는 기계부품의 내구성 등의 성능을 정성적으로 평가하는데 널리 사

용되고 있다.

단류선은 단조 시뮬레이션 기술에 의하여 예측되고 있다. 실제 이 기술의 활용은 선도 단조회사에서 일반화되어 있다고 해도 과언은 아니다. 그러나 대부분의 사용자들은 아직 정확도에 관한 회의를 가지고 있다. 그 원인은 실제의 단류선과 예측된 단류선 사이에 경우에 따라서는 상당한 차이를 보이고 있기 때문이다.

단류선의 예측에 미치는 영향을 살펴보면, 유한요소해석 기법, 단류선 예측기법, 공정 및 소재 정보 등으로 나누어 볼 수 있다. 유한요소해석 기법 자체에서 발생하는 오차는 절점 수를 적절한 수준으로 유지함으로써 피할 수 있다. 반면, 단류선 예측기법에

1. All Bearing Belover's Academy

2. 경상대학교 기계공학부

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang Nat. University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

따라 예측결과가 비교적 크게 영향을 받을 수 있다. 특히, 단류선의 추적 또는 계산 과정에서 요소망재 구성에 어떻게 대처하느냐에 따라 그 결과는 비교적 크게 영향을 받을 수 있다. 그리고 단류선 예측 결과에 직접적 영향을 미치는 요인으로 유동응력, 마찰, 온도, 속도 등을 비롯한 해석결과에 영향을 미치는 요소가 있다[5].

이 논문에서는 업세팅공정을 이용하여 요소망재 구성의 영향을 배제한 상태에서 유동응력, 마찰, 온도, 속도 등이 단류선에 미치는 영향을 분석한다. 그리고 예측결과와 실험결과를 비교함으로써 단류선의 형상에 가장 큰 영향을 미치는 유동응력에 관하여 고찰한다.

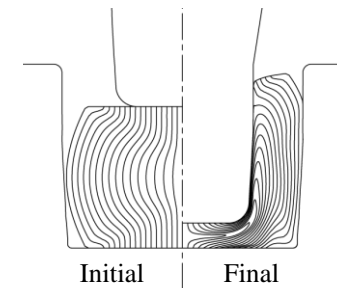
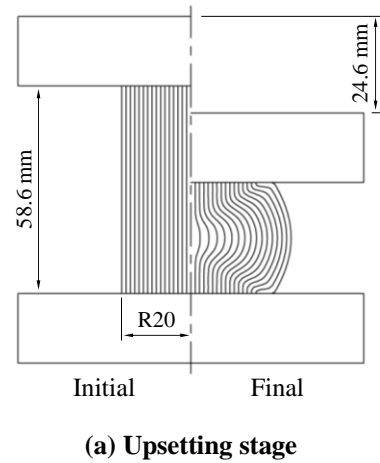
2. 대상 공정 및 해석 조건에 관한 설명

Fig. 1(a)는 이 연구에서 채택한 업세팅공정이며, 실험결과인 Fig. 1(d)는 중심단면에서의 단류선을 나타낸다. 이 공정은 베어링 레이저 단조공정의 일부이다. 후속된 후방압출 및 피어싱 공정은 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)에 나타내었다.

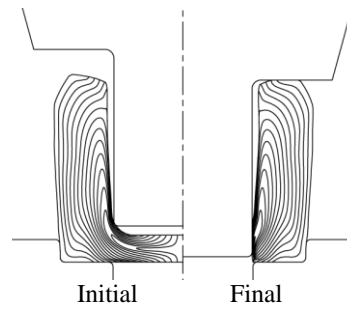
공정 및 해석조건은 다음과 같다. 재료는 STB2(KS D3525)이며, 이 연구에서 사용한 수식모델 $\bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon}, T) \dot{\bar{\epsilon}}^{m(\bar{\epsilon}, T)}$ 로 나타낸 이 재료의 유동응력은 Fig. 2와 같다. 업세팅공정 직전의 재료의 초기온도는 1130℃ 이다. 초기온도는 균일하게 분포되었다고 가정하였다. 업세팅공정 직전의 체류공정 소요 시간은 전체의 소요시간을 감안하여 0.1초로 가정하였다. 주요 열적 정보는 Table 1에 정리하였다[9].

단류선에 미치는 주요 인자, 즉 유동응력, 마찰 [11], 온도, 속도 등의 영향을 조사하기 위하여 다양한 조건하에서 단조 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다.

이 논문에서 사용한 단류선 예측기법은 해석초기에 정의된 그물망을 매 반복계산마다 갱신시켜서 단류선을 추적하기 때문에 오차가 개입될 수 없다[7]. 그리고 해석결과도 이론적 범위내에서 정답을 예측해 준다. 따라서 적절한 절점 수 이상의 요소망을 사용한다면, 예측된 단류선은 이론적으로 정답이다. 특히 이 연구에서는 요소망재 구성을 배제하였으므로 수치적 오류가 개입될 수가 없다.



(b) Backward extrusion stage



(C) Piercing Stage



(d) Experimental metal flow lines

Fig. 1 Definition of test process and experimental metal flow lines

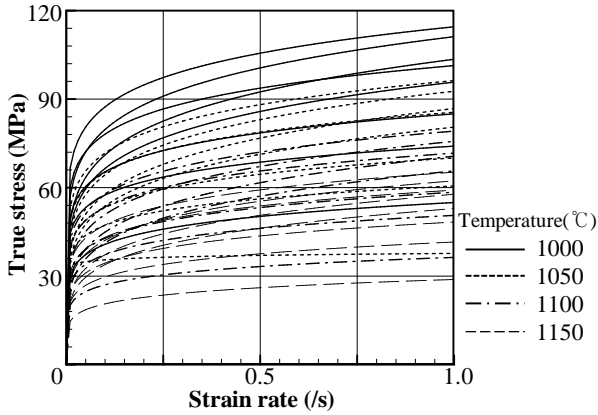


Fig. 2 Flow stress of material

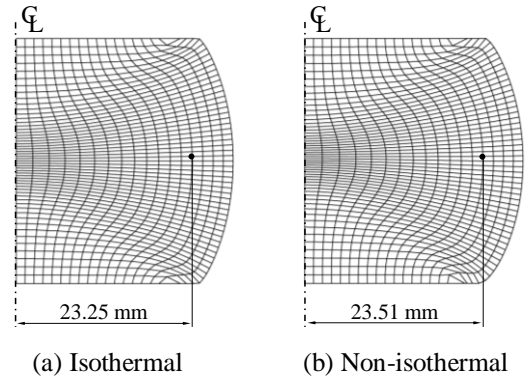


Fig. 3 Comparison of non-isothermal and isothermal simulations

Table 1 Thermal information[9]

Workpiece	
Ambient temperature	80°C
Heat transfer coefficient between die or material and environments	$2.95 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{°C}$
Stephan-Boltzmanm constant	$3.97 \times 10^{-14} \text{ W/mm}^2\text{°C}^4$
Dwelling time	0.1 s
Transfer time	0.5 s
Dies	
Initial temperature	150°C
Heat transfer coefficient between die and material	0.01 W/mm ² °C

3. 온도, 마찰, 속도의 영향

3.1 온도

온도가 단류선에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 2의 유동응력을 이용한 비등온 해석 결과와 온도 1130°C의 가정하에서의 등온해석 결과를 비교하였다. Fig. 3(a)는 등온해석 결과이고, Fig. 3(b)는 비등온 해석 결과이다. 마찰계수를 0.3으로 가정하였고, 펀치 속도를 200mm/s로 가정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 두 결과가 부분적으로 약간의 차이를 보이지만, 대체적으로 유사함을 알 수 있다. 물론 체류시간을 크게 하여 소재의 온도 차를 국부적으로 크게 할 경우에는 소재 표면 주위에서 단류선이 크게 변할 수 있다.

그러나 일반적인 단조공정에서와 같이 공정 사이가 짧은 시간일 경우에는 온도가 단류선에 큰 영향을 미치지 않는다.

3.2 마찰

마찰이 단류선에 미치는 영향을 조사하기 위해서 등온해석을 실시하였다. 이 조사 분석을 위하여 온도와 속도를 각각 1130°C, 200mm/s로 가정하였다. 마찰계수 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 하에서 해석을 실시하여, 단류선을 Fig. 4에 나타내었으며, 최대반경을 Table 2에 나타내었다.

해석결과로부터 열간단조에서 일반적으로 사용하는 마찰계수 0.3의 주위의 마찰계수에 대해서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다[11]. 0.5 이상의 마찰계수를 사용한 경우도 최대반경은 마찰계수 0.3의 경우와 동일하였다. 그러므로 0.3 이상의 경우는 대부분의 영역이 접촉조건에 속하게 된다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 접촉 영역에서의 접촉조건이 내부의 단류선의 형상 변화에 미치는 영향은 제한적이다.

3.3 속도

속도가 단류선에 미치는 영향을 조사하기 위해서 등온해석을 실시하였다. 이 조사 분석을 위하여 온도와 초기 유효변형률은 각각 1130°C와 0.0001로 가정하였으며, 마찰계수로는 0.3을 사용하였다. 속도는 기계식 프레스(220mm의 행정, 90rpm의 회전속도) 조건과 일정속도 200mm/s와 400mm/s의 두 조건을 사용하였다.

해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 세 가지의 해석 결과에서 내부의 단류선 차이는 크지 않다. 최대 반경도 28.57mm와 28.65mm 사이에 존재하므로 무시 가능한 수준이다. 물론 전술한 결과는 등온 해석 조건하에서 의미를 가지며, 비등온 해석의 경우 금형-

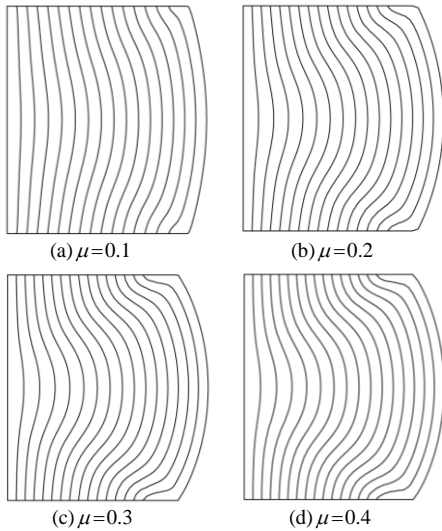


Fig. 4 Comparison of metal flow lines with various frictional coefficients

Table 2 Maximum radius with frictional coefficients

Frictional coefficient	Maximum radius(mm)
0.1	28.16
0.2	28.52
0.3	28.65
0.4	28.65

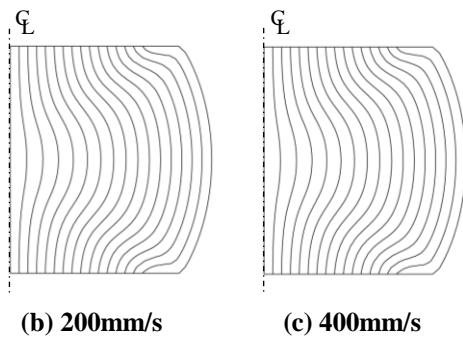
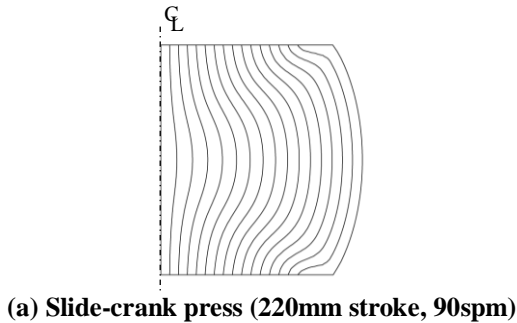


Fig. 5 Comparison of metal flow lines with various punch velocities

소재 접촉 시간에 따라 소재 표피에서 다소의 결과 차이를 유발할 수 있다.

3.4 검토

Fig. 3에서 Fig. 5까지의 예측결과를 종합적으로 검토하면, 마찰계수가 0.2 이상일 경우에는 단류선 관점에서 큰 차이를 발견하기가 쉽지 않다. 그러나 Fig. 1(d)의 실험결과와 비교해 보면, 대체적으로 유사하지만 분명한 차이를 발견할 수 있다.

대표적인 해석결과인 Fig. 4(c)를 실험결과와 비교해 보자. 접촉면 상의 동일 지점에서 발생한 단류선을 선택하여 Fig. 6에서 비교하였다. 이 비교에서 알 수 있는 바와 같이 예측된 단류선이 다소 평탄함을 알 수 있다. 이것은 접촉면과 대칭축이 만나는 지점 주위에서 생성되는 데드메탈 구간이 작게 예측된 결과이며, 궁극적으로는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 후속 공정에서 단류선의 차이를 발생시킨다. 예측된 단류선은 실험결과에 비하여 전반적으로 좌편으로 치우쳐 있다.

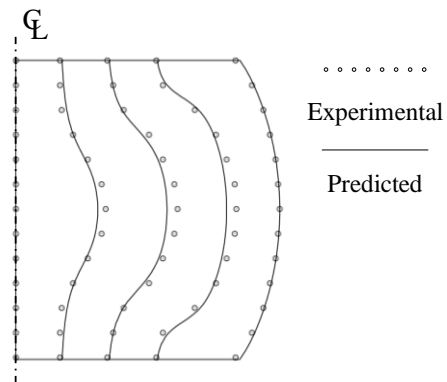
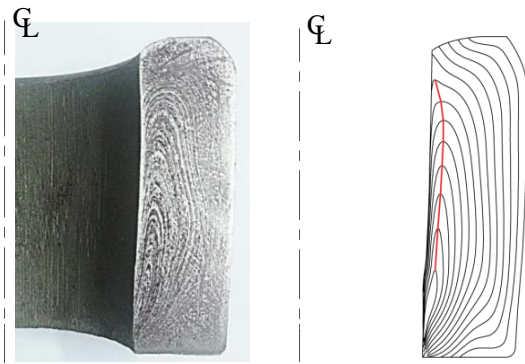


Fig. 6 Comparison of predicted metal flow lines and experiments

4. 유동응력의 영향

앞 장에서 유동응력을 속도의존 재료로 가정 하여 예측한 단류선과 실험으로 획득한 단류선 사이에는 온도, 마찰, 속도의 조건 변경으로 극복할 수 없는 차이가 존재함을 확인하였다. 그리고 단류선의 차이는 데드메탈 구역의 차이와 연계되어 있다고 판단되었다.

따라서 이 장에서는 데드메탈 구역의 크기에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 유동응력의 영향을 조사하였다. 이를 위하여 다양한 유동응력



(a) Experimental (b) Predicted

Fig. 7 Comparison of experimental and predicted metal flow lines at the second stage when the same conditions with Fig. 4(a) are employed

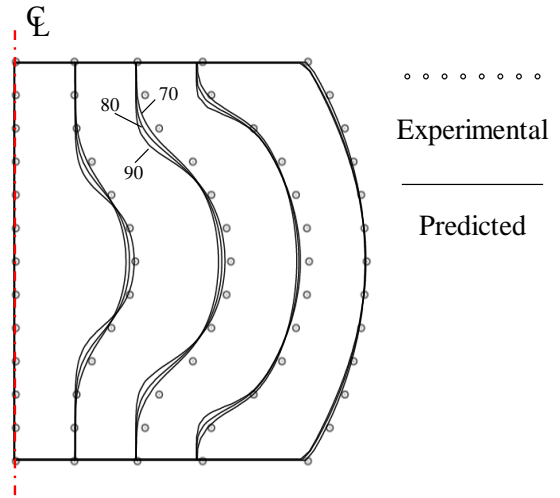
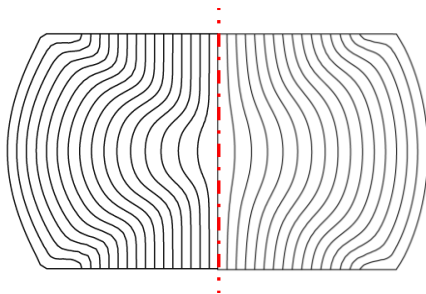


Fig. 9 Effect of lower limit of flow stress on metal flow lines



(a) Perfectly plastic (b) Flow stress in Fig. 2

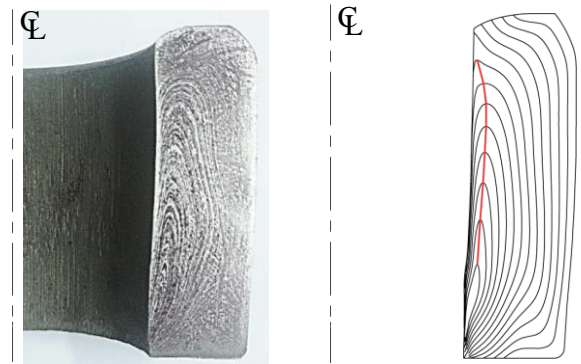
Fig. 8 Predicted metal flow lines using a perfectly plastic material and the flow stress in Fig. 2

조건하에서 단류선을 예측하고 그 결과를 비교함으로써 단류선 관점에서 유동응력의 영향을 규명하였다.

먼저 완전소성 재료의 가정하에서 단류선을 예측하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 완전소성 재료에 의한 단류선은 Fig. 4(c)의 단류선에 비하여 Fig. 7(a)의 실험결과에 보다 더 가깝지만, 다소 과도한 데드메탈이 형성되고 그 영향이 반영된 결과로 판단된다.

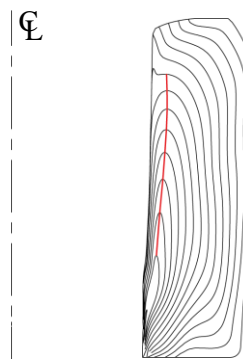
Fig. 2에서 보는 바와 같이 고온에서 유동응력의 속도의존성은 분명히 존재하므로 기존의 유동응력 정보를 사용할 경우에는 유동응력 하한치를 설정하는 경우를 손쉽게 생각할 수 있다. 즉 초기항복응력을 부여한 것이다.

Fig. 9는 완전소성재료를 사용한 경우와 유동응력에다 하한치 70MPa, 80MPa, 90MPa를 부과한 경우에 대한 예측된 단류선의 차이를 나타낸다. 비교결과, Fig. 2의 유동응력에다 80MPa의 하한치를 설정한

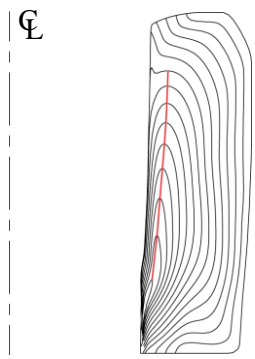


(a) Experiments

(b) Power law



(c) 80MPa limit Isothermal



(d) 80 MPa limit Non-isothermal

Fig.10 Comparison of metal flow lines

경우의 예측결과가 실험결과와 유사함을 알 수 있다. 해석결과로 예측된 공정 중 최대의 유효응력은 약 100MPa이었으므로 하한치는 공정 중 최대 유동

응력의 약 80%에 해당한다.

한편, Fig. 10에서 보는 바와 같이, 80MPa의 유동응력하한치를 부과한 상태에서 예측된 피어싱 종료 후의 단류선은 하한치 무부과 단류선에 비하여 실험결과를 보다 잘 반영한다.

5. 결론

이 논문에서는 유동응력, 온도, 마찰, 속도 등이 단류선의 예측결과에 미치는 영향을 실험결과와 해석결과와의 비교 분석을 통하여 조사하였다.

전통적인 단순 변형률 속도 의존 재료 유동응력 모델, 즉 멱법칙(Power law)모델 $\bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon}, T)\dot{\bar{\epsilon}}^{m(\bar{\epsilon}, T)}$ 이 널리 사용되고 있지만, 이 수식모델이 단류선을 정확하게 모델링하는 데는 한계가 있다는 것을 밝혔다. 그 원인은 멱법칙은 변형이 적은 영역에서의 유동응력을 과소평가하고 그 결과, 데드메탈 영역을 작게 한다. 이것은 원소재의 길이가 비교적 길 경우에 중간 지점에서 평탄한 단류선을 예측하는 결과로 나타났다. 이것은 베어링 내외륜 단조 시에 필수적인 후방압출 후의 단류선 모양에 비교적 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이 문제를 해결하는 방법으로 실험에 근거한 Cowper-Symonds 모델[12], Johnson-Cook 모델[13], Khan-Huang-Liang 모델[14] 등이 사용될 수도 있지만, 재료 상수의 획득이 용이하지 않은 문제가 있다. 반면, 멱법칙에 근거한 재료 물성치는 상대적으로 손쉽게 구할 수 있다.

따라서 현실적인 해결 방법은 멱법칙(Power law) 수식모델에다 적절한 유동응력의 하한치를 설정하는 방법, 즉 초기항복응력을 부과하는 방법이다. 실공정 적용에 있어 그 값에 따라서 비교적 민감하게 해석결과가 변하기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 물론 대부분 하한치를 설정하고 있지만, 적절한 값이 제시된 바가 없다. 이 연구에서는 그 하한치로, 업세팅공정의 경우, 공정 중 최대 유동응력의 약 70-80%가 바람직한 값으로 제안되었다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학협력기술개발사업과 BK plus 21사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] FAG Bearing Korea Corp., 2003, The History of FAG Bearing Korea Corp. Fifty years, FAG bearing Korea Corp., KOR., pp. 343~344.
- [2] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, 2005, Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications, ASM Int., Metals Park, Ohio 44073, U.S.A.
- [3] S. R. Lampman, B. R. Sanders, G. J. Anton, M. Tramble, J. Kinson, K. Muldoon, S. D. Henry, 2005, Metalworking: Bulk Forming, ASM Int., Metals Park, Ohio 44073, U.S.A.
- [4] S. I. Oh, W. T. Wu, J. P. Tang, A. Vedhanayagam, 1991, Capabilities and Applications of FEM Code Deform: the Perspective of the Developer, J. Mater. Process. Technol., Vol. 27, No. 1, pp. 25~42.
- [5] M. S. Joun, 2013, Forging Simulation, Jinsaem Media, Seoul, KOR.
- [6] M. S. Joun, H. K. Moon, R. Shivpuri, 1998, Automatic Simulation of a Sequence of Hot-former Forging Processes by a Rigid-thermoviscoplastic Finite Element Method, J. Eng. Mat. Tech., ASME, Vol. 120, No. 4, pp. 291~296.
- [7] M. S. Joun, S. W. Lee, J. H. Jung, 1998, Finite Element Analysis of a Multi-stage Axisymmetric Forging Process Having a Spring-attached Die for Controlling Metal Flow Lines, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 38, No. 7, pp. 843~854.
- [8] H. K. Moon, S. C. Moon, J. G. Eom, M. S. Joun, 2005, Optimization of a Hot Forging Process using Six Sigma Scheme and Computer Simulation Technology Considering Required Metal Flow Lines, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 9, pp. 798~803.
- [9] H. K. Moon, J. S. Lee, S. J. Yoo, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, Hot Deformation Behavior of Bearing Steels, J. Eng. Mat. Tech., ASME, Vol. 129, No. 3, pp. 349~355.
- [10] J. G. Eom, S.W. Jeong, M. S. Joun, 2013, Metal Forming Simulation with Emphasis on Metal Flow Lines and its Applications, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 6, pp. 323~327.
- [11] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of Friction Laws on Metal

- Forming Processes, Tribology Int., Vol. 42, No. 2, pp. 311~319.
- [12] N. Jones, 1989, Structural Impact, Cambridge University Press, Cambridge, GBR.
- [13] G. R. Johnson, W. H. Cook, 1985, Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, Eng. Frac. Mech., Vol. 21, No. 1, pp. 31~38.
- [14] H. J. Lee, J. H. Song, H. Huh, S. H. Park, 2007, Dynamic Constitutive Equations of Auto-body-steel Sheets with the Variation of Temperature(II), Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 31, No. 2, pp. 182~189.