

열간 자유단조 공정시 내부 공극 압착 거동에 관한 연구

권용철¹· 이정환¹· 이승욱²· 정용수²· 김남수²· 이영선[#]

A study on Cavity Closure Behavior During Hot Open Die Forging Process

Y. C. Kwon, J. H. Lee, S. W. Lee, Y. S. Jung, N. S. Kim, Y. S. Lee

(Received May 10, 2007)

Abstract

Recently, there is a need to produce a large forged part for the flight, shipping, some energies, and military industries, etc. Therefore, an open die forging technique of cast ingots is required to obtain higher quality of large size forged parts. Cogging process is one of the primary stages in many open die forging processes. In the cogging process prior to some open die forging processes, internal cavities have to be eliminated for defect-free. The present work is concerned with the elimination of the internal cavities in large ingots so as to obtain sound products. In this study, hot compression tests were carried out to obtain the flow stress of cast microstructure at different temperature and strain rates. The FEM analysis is performed to investigate the overlap defect of cast ingots during cogging stage. The measured flow stress data were used to simulate the cogging process of cast ingot using the practical material properties. Also the analysis of cavity closure is performed by using the DEFORMTM-3D. The calculated results of cavity closure behavior are compared with the measured results before and after cogging, which are scanned by the X-ray scanner. From this result, the criteria for deformation amounts effect on the cavity closure can be investigated by the comparison between practical experiment and numerical analysis.

Key Words: Finite Element Method, Ingot, Cogging, Open Die Forging, Cavity, Hydrostatic Stress, Effective Stress

1. 서론

최근의 선박 산업과 풍력 발전의 급속한 발전으로 인하여 단강품의 생산이 급증하고 있으며, 생산성 및 품질 향상이 요구되고 있다.

단강품을 제조하기 위한 자유단조 공정은 주조 조직을 제거하고, 존재하는 공극을 압착시켜 제거하며, 편석을 소멸시키면서 최종 제품의 형상에 가깝게 만드는 것이 단조공정의 주요한 목적에 해당된다. 이러한 단강품에서 공극이나 편석을 제

거하기 위해서는 필요한 중요한 단조 공정 중 하나가 업셋팅(Upsetting)과 코깅(Cogging)작업이며, 본 연구에서는 대형 단강품 제조를 위해 필요한 열간자유단조공정(Hot die forging process)시 공극의 압착 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 자유단조 시 단강품의 품질 향상을 위한 연구로는, 대형 강괴의 공극압착에 대한 해석[1], 자유 단조 시 하중, 금속유동, 응력분포, 변형률 분포 등을 예측한 결과들이 대표적이다[2~10]. 본 연구에서는 해석에 의한 이론적 분석

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구센터

2. 포스코특수강(株) 기술연구소

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 소재성형연구센터,

E-mail: lys1668@kmail.kimm.re.kr

에 머무른 기존의 연구와는 달리 유한요소해석과 실제 실험을 통해 공극의 압착 거동을 분석함으로써 공극 압착여부를 예측할 수 있는 해석 방안을 제시하고자 하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM™-3D를 이용하여 강점소성변형거동을 기반으로 비등온 해석을 수행하였다. 또한, Fig. 1와 같이 실제 잉곳트를 이용하여 열간 자유단조 실험을 수행하였으며, 단조 전, 후의 공극 거동 분석을 위해 X선 회절분석기를 이용하여 실제 내부 공극의 형상을 관찰하였다.

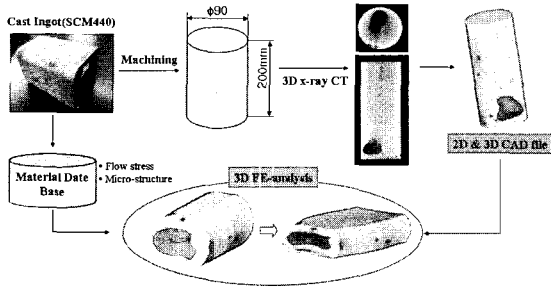


Fig. 1 Experimental and FE-analysis procedures to investigate the cavity closure behavior

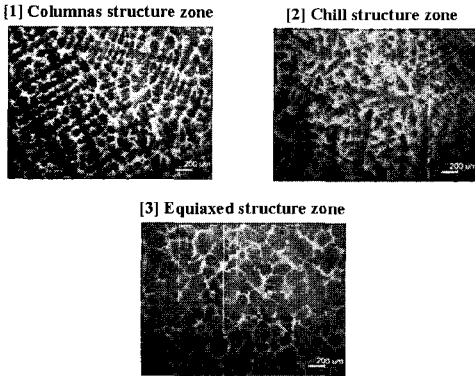
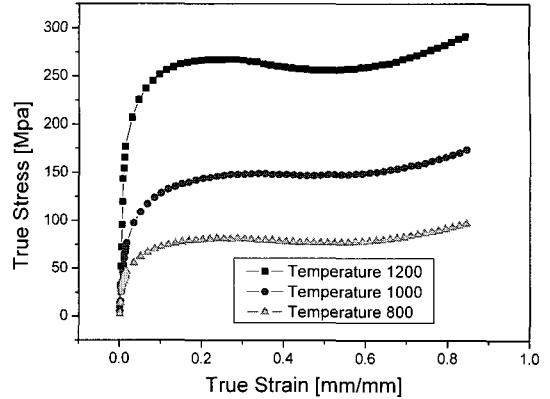


Fig. 2 Micro-structure of cast ingot

2. 물성치 정량 분석

2.1 소재의 특성 분석

본 연구에 사용된 소재는 SCM440(AISI 4140)이며, 주조 잉곳트의 물성치 정량화를 위해 부위별 내부 조직의 차이를 분석한 결과 Fig. 2와 같이 주상정대(Columnar structure zone), Chill층, 등축정대(Equiaxed structure zone)의 3가지 종류가 관찰 되었



Strain rate 40

Fig. 3 Flow stress of SCM440 cast ingot

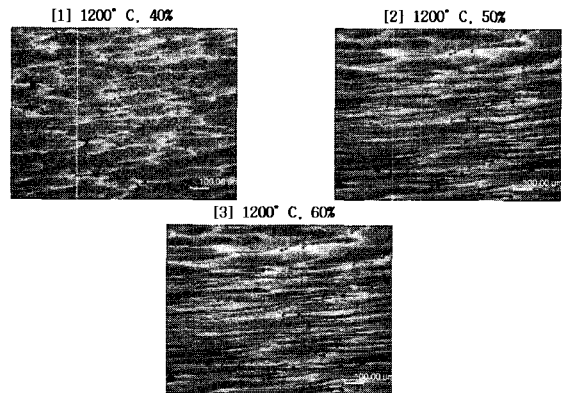


Fig. 4 Micro structure after hot compression test for equiaxed structure of cast ingot

다. 소형 잉곳트인 관계로 다양한 주조 조직들은 관찰되지 않았으며, 실제 대형 잉곳트에서 가장 많은 부분을 차지하는 등축정대에서 시편을 채취하여 열간 변형거동에 대한 데이터 확보를 위해 온도, 변형율 속도, 압하량에 따른 열간 압축시험을 수행 하였다.

열간 압축시험에서 고려된 조건은 온도 800, 1000, 1200°C에서 변형율 속도 0.8, 8, 40/sec에 대해 시편을 40, 50, 60%씩 압축하였다. 열간 압축 실험을 통해 각각의 조건별로 정량화된 소재의 유동응력은 Fig. 3에서 나타내고 있다. 또한 측정된 유동응력은 주조 조직의 열간 변형거동을 직접 고려할 수 있도록 해석 시 사용 되었다. Fig. 4는 소성 변형으로 인해 주조 조직이 미세화 되는 것을 확인 할 수 있다.

3. 실험 및 유한요소해석

3.1 열간 자유단조 실험

주조공정에서 생성된 공극이나 편석을 제거하기 위해서는 임계 변형율 이상의 소성변형이 가져야한다. 본 연구에서는 공극 제거를 위한 조건에 대한 기준을 설정할 수 있도록 열간 자유단조 모델을 이용한 실험과 해석을 통해 공극의 거동을 관찰하였다.

Fig. 5와 같이 실험에 사용된 잉곳트 소재는 SCM440이며, 소재 크기는 $\varnothing 90 \times 200$ 을 사용하였다. 또한 X 선 회절분석기를 이용하여 단조 전, 후의 공극 거동을 관찰하였다.

열간 자유단조시 사용한 장비는 800ton 유압 프레스를 사용하였으며, 소재의 초기 온도는 1100°C 까지 가열하여 길이 90mm를 45mm 될 때 까지 50%압축을 한 후 부위별 공극형상을 관찰한 결과 Fig. 6에 나타내었다.

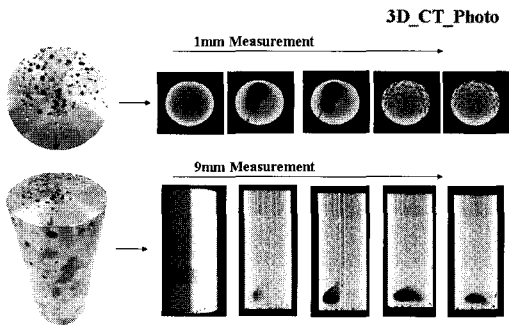


Fig. 5 Photograph of cast ingot and inner cavities used in experiment

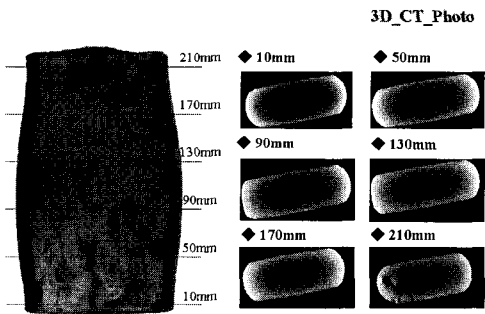


Fig. 6 Shape of inner cavities after hot open die forging

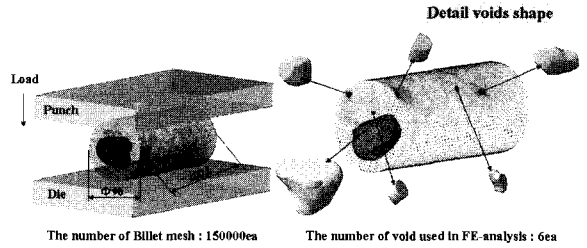


Fig. 7 The FE-model for hot open die forging process of cast ingot

3.2 업셋팅 공정시 공극압착 거동 해석

본 해석에서 사용된 모델은 실제 공극 형상을 X-ray로 분석된 형상과 동일하게 3D 모델링을 하였다(Fig. 7). 또한, 주조 잉곳트의 내부 공극 압착 거동을 분석하기 위하여 소재는 강점소성체(Rigid-visco-plastic model)로 다이와 펀치는 강체(rigid body)로 가정하고 강점소성 유한요소법을 사용하였다.

해석 시 잉곳트 내부의 공극 형상을 최대한 실제와 유사하게 고려하기 위하여 Hyper_Mesh 프로그램을 이용하여 요소를 구성하였다. 소재의 요소수는 150,000개를 적용하였으며, 해석 시 사용된 공극수는 총 6개를 이용하여 공극 압착 거동을 관찰하였다.

원통형 빌렛을 이용하여 실제 실험과 동일한 조건으로 해석을 수행한 결과 Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이 내부공극이 열간 압축과정 동안에 공극의 크기에 따라 변형의 크기가 다르게 나타나고 있다. Fig. 9는 최종 변형 후 제품에 대한 손상값(Damage value), 유효 변형율(Effective strain), 온도(Temperature)등의 분포를 나타내고 있다. Fig. 10은 성형하중에 대한 해석과 결과 값으로서 해석에서의 최고 하중값은 290ton, 실험에서는 270ton으로 미소한 차이가 있으나 동일 양상을 나타내고 있다. 실험과 해석에서의 최종 제품의 외부 형상이 공극이 존재하는 부위와 공극이 존재하지 않는 부위에서 서로 다르게 나타나고 있으며 공극의 존재에 의해 달라지는 변형 형태를 잘 예측하고 있다(Fig. 11). 결국, 공극이 존재하는 부위는 공극의 소멸시 까지 반경방향으로의 유동이 상대적으로 작게 됨을 뚜렷히 보여 주고 있다.

열간 압축공정을 거치는 동안 공극 폐쇄율 및 압착효과를 나타내는 정량적인 값을 찾기 위해 해석에 의해 계산 되어진 유효 변형율(Effective strain)와 정수압 응력(Hydrostatic stress)으로 하여 공극 폐쇄율과의 관계를 조사하였다.

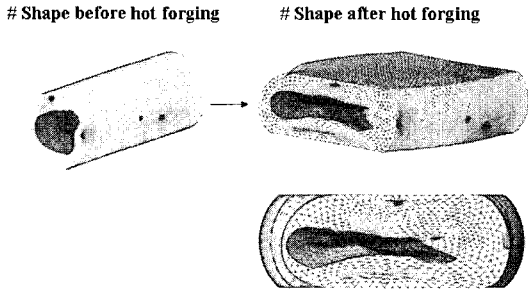


Fig. 8 Final shape after FE-analysis for hot open die forging

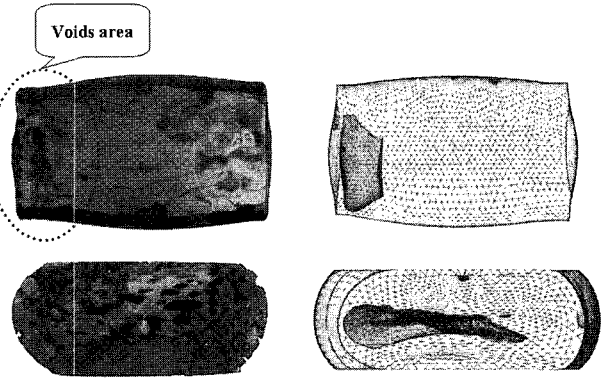


Fig. 11 The comparison of the final product on the experiment and FE-analysis

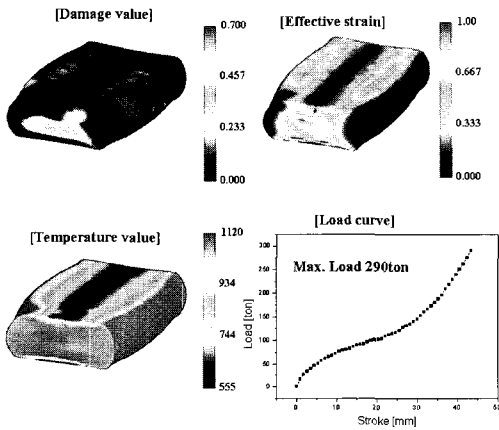
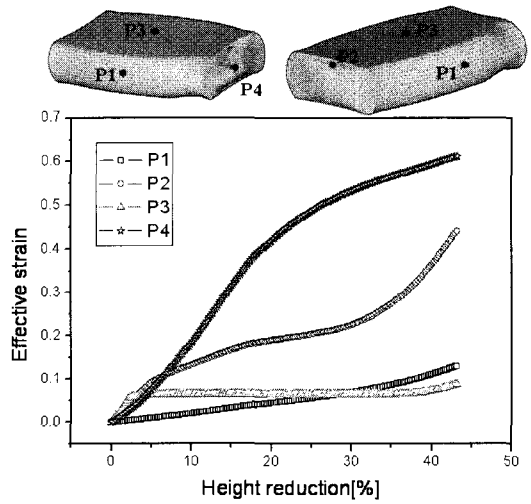


Fig. 9 The distributions of effective Strain, damage and temperature value in the final product



[a] Effective strain

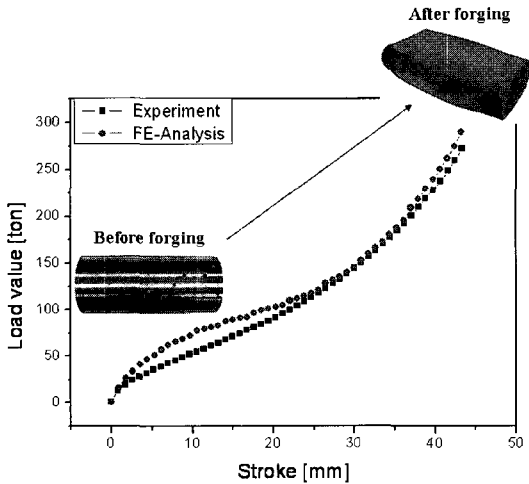
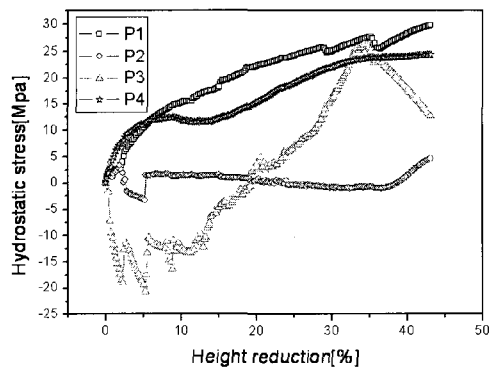


Fig. 10 Comparison of load value on the FE-analysis and Experiment



[b] Hydrostatic stress

Fig. 12 The influence of effective strain and hydrostatic stress at the outside position

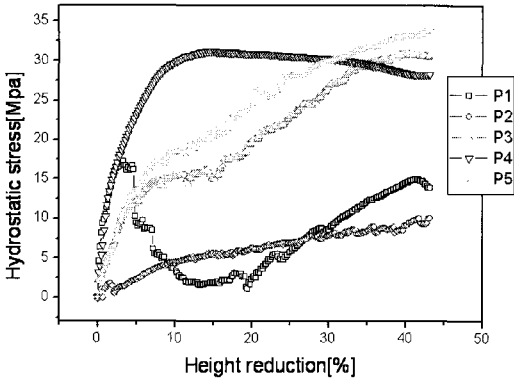
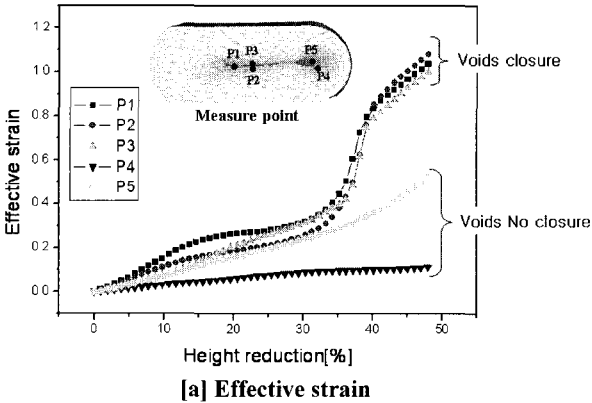
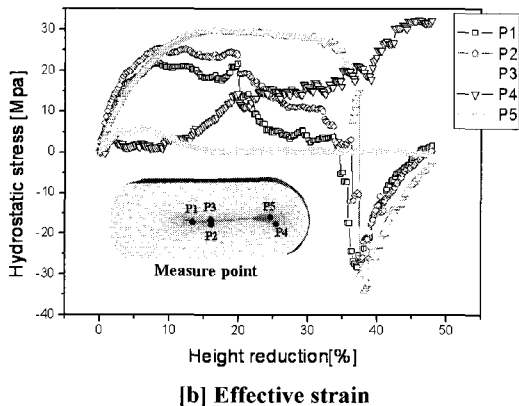


Fig.13 The influence of effective strain and hydrostatic stress at various cavities



[a] Effective strain



[b] Effective strain

Fig.14 The influence of effective strain and hydrostatic stress at various cavity positions

우선 압하율에 따른 공극 폐쇄율에 대한 정량적인 분석을 위해 최종 제품에서 외부 4곳에 대

해 정수압 응력과 유효 변형율을 측정 하였다. 측정 결과 Fig. 12와 같이 각 부위별 유효 변형율은 0.6이하, 정수압 응력은 3부위에서는 인장응력(+)이 1부위에서는 초기 압축응력(-)이 작용하였으나 압하량 20%이상에서 인장응력(+)이 측정되었다. 또한 각각의 내부 공극(6개)들에 대해서도 최종 제품에서 공극이 압착되는 부위와 미압착되는 부위에 대해서도 정량적인 분석을 하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 작은 미소 공극(5개)들은 최종 변형 후 공극이 미 압착 되었다. 유효 변형율은 0.6이하이며, 정수압 응력은 5개의 기공 모두 인장응력(+)이 측정되었다. 또한, 큰 기공에 대해서도 유효 변형율과 정수압 응력을 측정 해 본 결과 최종 제품에서 공극이 압착되는 3부위에서 유효 변형율은 0.6이상 공극이 미 압착되는 부위에서는 0.6이하로 나타났다. 정수압 응력은 초기 공극이 미 압착시 인장응력(+)이 작용하다가 압하량 35%이상에서 공극이 압착되면서 압축 응력(-)이 나타남을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 주조 후 단강품에 존재하는 내부 공극에 대해서 열간 압축실험과 열간점소성 유한요소해석을 통해 공극 압착 거동을 관찰하였다. 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SCM440 합금강의 물성치를 정량화 시키기 위해 주조 잉곳트의 각 부위별 조직을 분석하였다. 대형 잉곳트 부위에서 가장 많은 부위를 차지하는 등축정대 부위의 시편을 채취하여 온도, 변형율, 압축률에 따른 열간 압축실험을 통해 정량화된 유동응력을 측정하였다. 또한, 주조 조직이 소성 변형량에 따라 조직이 미세화 되는 것을 확인 할 수 있다.

(2) 주조 공정에서 생성되는 편석이나 공극을 제거하기 위해 업셋팅 공정에 의한 열간 자유단조 실험을 수행하였다. 단조 전, 후의 공극의 형상을 X 선 회절 분석기로 공극 압착거동을 관찰 하였으며, 업셋팅에 의한 공정만으로는 공극 압착은 불가능하며, 크징과 업셋팅 방법을 이용하여 단강품을 제조하여야 한다.

(3) 실제 잉곳트 내부의 공극을 동일하게 모델화하여 열간점소성 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과에 따르면 내부 공극으로 인해 공극 부위에서 손상값, 유효응력, 온도등이 높게 분포됨을

확인 할 수 있었다. 초기 온도 1100°C 에서 단조 공정 후 최종 제품이 최고 온도가 1120°C로 변화 되었다. 최고 하중값은 실험에서 270ton, 계산치에서 290ton으로 미소한 차이와 함께 동일 경향을 보이고 있다.

(4) 열간 압축 공정을 거치는 동안 공극의 폐쇄 및 압착효과를 정량적으로 분석하기 위해 최종제품에서 공극이 압착되는 부위 3 곳과 미 압착 부위 2 곳에 대해 유효 변형율과 정수압 응력을 분석하였다. 분석 결과 유효 변형율 0.6 이상에서 공극이 압착되며, 미 압착부위에서는 0.6 이하로 나타났다. 이는 공극이 압착되기 위해서는 유효 변형율이 0.6 이상이 되어야 한다는 것을 판단 할 수 있다. 정수압 응력은 초기 공극의 미 압착시 인장응력(+)이 작용하다가 압하량 35%이상에서 공극이 압착되면서 압축응력(-)이 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 확인한 공극압착 예측을 위한 정수압응력의 변화 특성과 함께 유효 변형율을 기준으로 예측할 수 있는 기초를 마련 하였다. 이는 실제 자유단조 공정에 대한 해석을 수행하는 동안에도 매번 공극을 측정하여 해석에 반영하는 것은 비현실적이므로 변형율을 기준으로 존재할 수 있는 공극이 제거되었음을 확인하고 단조공정설계에 반영할 수 있으므로 효과적이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. Y. Park, J. R. Cho, D. Y. Yang, D. J. Kim, I. S. park, 1992, Analysis of cavity Closure in the Upsetting Process of Large-Ingots.
- [2] S. Spencer et al, 1981, Mathematical Model for Simulation of solidification and cooling of cast rolls, Ironmaking and Steelmaking, No.3, pp. 129~136.
- [3] Toshihiko Oshima et al, 1985, Predication of the formation region of eutectic NbC in a large 12Cr-Mo-V-Nb steel ingot, Trans. ISIJ, Vol. 1, pp.78~84.
- [4] J. Ohnaka, T. Fukusako, 1981, Solidification Analtsis of steel ingots with consideration on fluid flow, Trans. ISIJ, Vol. 21, pp. 488~494.
- [5] S. P. Dudra, Y. T. IM, 1990, Investigation fo metal flow in open-die forging with different die and billet geometries, J. of Materials Processing Technology, Vol. 21, pp. 143~154.
- [6] B.V. Kiefer, K. N. Shah, 1991, Three dimensional simulation of open-die press forging, ASME Trans. J. of Eng. Mat. and Tech, Vol. 112, pp. 477~485.
- [7] J. H. Yoon, D. Y. Yang, 1990, Three dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using remeshing technology, Int. J. Mech. Sci, Vol. 32, pp. 277~291.
- [8] N. A. Wilkinson, 1989, Proceeding of the International Symposium on the Metal-lurgy and Applications of Superalloy 718, TMS, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 119.
- [9] D. Y. Yang, Y. Choi, J. H. Kim, 1991, Analysis of upset forging of cylindrical billet considering the dissimilar frictional conditions at two flat die surfaces, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 3, pp. 397~404.
- [10] Jong Taek Yoem, 2006, Finite-element analysis of microstructure evolution in the cogging of an Alloy 718 ingot.