

열간 자유단조 공정시 내부 기공 압착 거동에 관한 해석

권용철¹, 이정환¹, 이승욱², 정용수², 김남수², 이영선[#]

FE-Analysis on void 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

Abstract

In the steel industry, there is a need to produce large forged parts for the automobile industries, the flight and shipping industries and military industries. In the steel-industry application, a cogging technique for cast ingots is required, because the major parts are needed as one large body in order to obtain higher quality. Therefore, cogging process is the primary step in manufacturing of practically large open-die forging. In the cogging process, internal voids have to be eliminated as defects. The present work is concerned with the elimination of the internal voids in large ingots so as 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 are performed to investigate the overlap defect of cast ingots during cogging stage. The measure flow stress data were used to simulate the cogging process of cast ingot using the practical material properties. Also the analysis of void closure are performed by using the DEFORMTM-3D. The calculated results of void 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 void closure can be investigated by the comparison of practical experiment and numerical analysis.

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Ingot(강괴), Cogging(코깅), Open die forging(자유단조), Void(기공)

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 기공을 압착시켜 제거하며, 편석을 소멸시키면서 최종 제품의 형상에 가깝게 만드는 것이 공정의 주요한 목적에 해당된다. 이러한 단강품에서 기공이나 편석을 제거하기 위해서는 중요한 작업이 업셋팅(Upsetting)과 코깅(Cogging)작업이며, 본

연구에서는 대형 단강품 제조를 위해 필요한 열간자유단조공정(Hot die forging process)시 기공의 압착 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 선행 연구자들이 자유단조 시 단강품의 품질 향상을 위한 공정 변수들에 대해 연구를 수행하였다. 대형 강괴의 기공 압착에 해석⁽¹⁾, 자유 단조 시 하중, 금속유동, 응력분포, 변형률 분포 등을 예측 하였다.⁽²⁻¹⁰⁾ 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 업셋팅 공정 시 기공압착에 대한 예측을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORMTM-3D를 이용하여 수행하였다. 또한, Fig. 1와 같이 실제 잉곳트를 이용하여 열간 자유단조 실험을 수행하

1. 회원, 한국기계연구원 소재성형연구센터
2. 창원 특수강㈜ 기술연구소
교신저자: 이영선, lys1668@kmail.kimm.re.kr
TEL : (055)280-3522 FAX : (055)280-3393

였으며, 단조 전, 후의 기공 거동 분석을 위해 X선 회절분석기를 이용하여 실제 내부 기공의 형상을 관찰하였다.

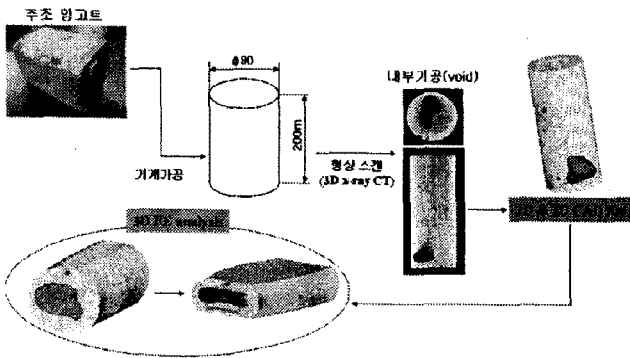


Fig. 1 Experimental and FE-analysis procedures to investigate the void closure behavior

2. 물성치 정량 분석

2.1 소재의 특성 분석

본 연구에 사용된 소재는 SCM440(AISI 4140)이며, 주조 잉고트의 물성치 정량화를 위해 부위별 내부 조직의 차이를 분석한 결과 Fig. 2와 같이 주상정대(Columnar structure zone), Chill층, 등축정대(Equiaxed structure zone) 3가지 종류가 관찰되고 있다. 소형 잉곳트인 관계로 다양한 주조 조직들은 관찰되지 않았으며, 실제 대형 잉곳트에서 가장 많은 부분을 차지하는 등축정대에서 시편을 채취하여 열간 변형거동을 직접 고려할 수 있도록 온도, 변형율, 변형율 속도에 따른 열간 압축 시험을 수행 하였다.

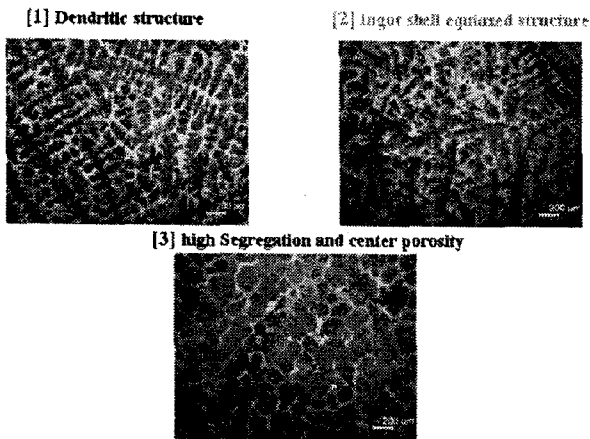


Fig. 2 Macro-structure of cast ingot

열간 압축실험에서 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. 4은 소성 변형에 의해 압착된 변형 후 조직을 나타내고 있다.

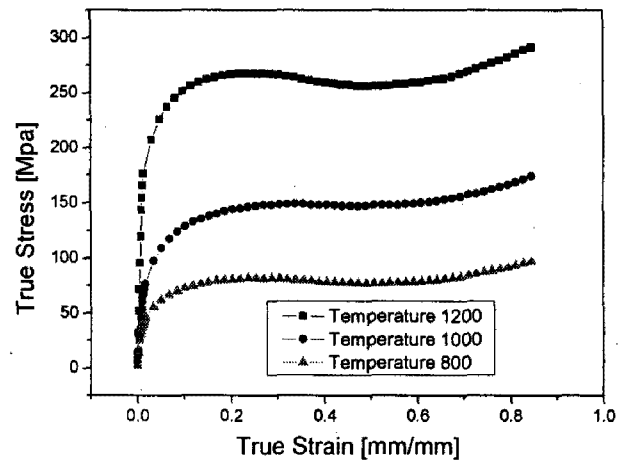


Fig. 3 Flow stress of SCM440 cast ingot

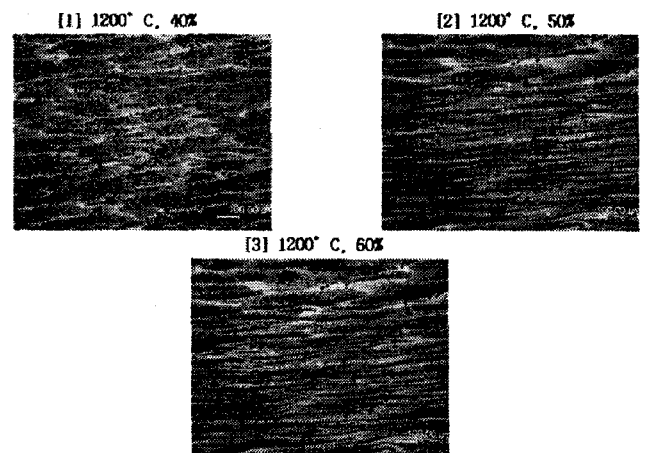


Fig. 4 Micro structure after hot compression test for equiaxed structure of cast ingot

3. 실험 및 유한요소해석

3.1 열간 자유단조 실험

주조공정에서 생성된 기공이나 편석을 제거하기 위해서는 중요한 작업이 업셋팅과 코킹 작업이며, 본 실험에서는 열간 자유단조실험을 통해 기공의 거동을 관찰하고자 수행하였다.

Fig. 5와 같이 실험에 사용된 잉곳트 소재는 SCM440이며, 소재 사이즈는 $\phi 90 \times 200$ 을 사용하였다. 또한 X선 회절분석기를 이용하여 단조 전, 후의 기공 거동을 관찰하였다.

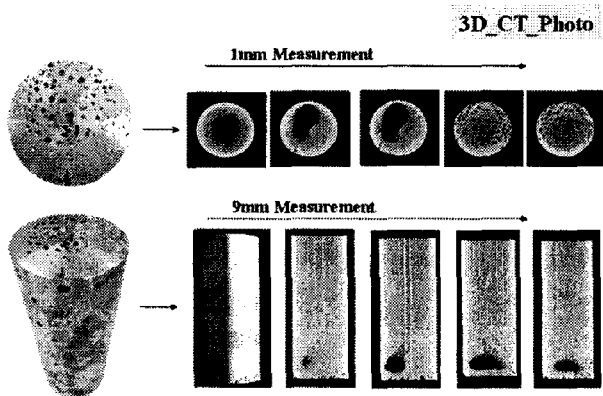


Fig. 5 Photograph of cast ingot and inner voids used in experiment

열간 자유단조시 사용한 장비는 800ton 유압 프레스를 사용하였으며, 소재의 초기 온도는 1100°C 까지 가열하여 길이 90mm를 45mm 될 때 까지 50%압축을 하였다. Fig. 6은 열간 단조 후의 기공의 형상을 나타내고 있다.

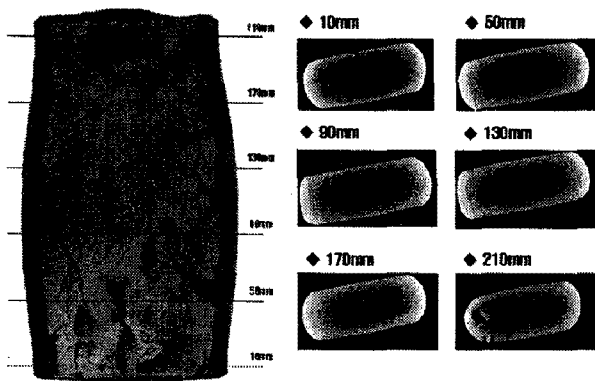


Fig. 6 Shape of inner voids after hot open die forging

3.2 업셋팅 공정시 기공압착 거동 해석

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

해석 시 잉곳트 내부의 기공 형상을 최대한 고려하기 위하여 Hyper_Mesh 프로그램을 이용하여 요소를 구성하였다. 소재의 요소수는 150,000개를 적용하였으며, 해석 시 사용된 기공수는 총 6개를 이용하여 기공 압축 거동을 관찰하였다.

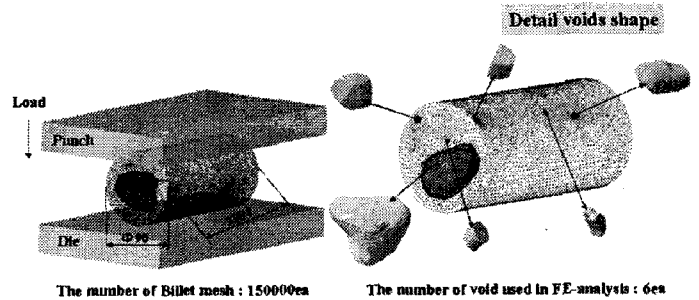


Fig. 7 The FE-model for hot open die forging process of cast ingot

원통형 빌렛을 이용하여 실제 실험과 동일한 조건으로 해석을 수행한 결과 Fig. 9에 나타나 있는 바와 같이 내부기공이 열간 압축공정 동안에 일부 기공이 거의 압축됨을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 최종 제품에 대한 손상값, 유효 변형율, 온도등의 분포를 나타내고 있다.

또한 열간 압축공정을 거치는 동안 기공 폐쇄 및 압착효과를 나타내는 정량적인 값을 찾기 위해 해석에 의해 계산 되어진 유효 변형율(Effective strain)와 정수압 응력(Hydrostatic stress)으로 하여 기공 폐쇄율과의 관계를 조사하였다. Fig. 12는 압하율에 따른 기공의 각 위치에서의 유효 변형율 및 정수압 응력과의 차이를 나타내고 있다.

Fig. 11은 해석과 실험에서의 하중값을 비교 분석하였다. 해석에서의 최고 하중값은 290ton, 실험에서는 270ton 이었다. 실험과 해석에서의 최종 제품의 외부 형상이 기공이 존재하는 부위와 기공이 없는 부위에서 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.(Fig. 13)

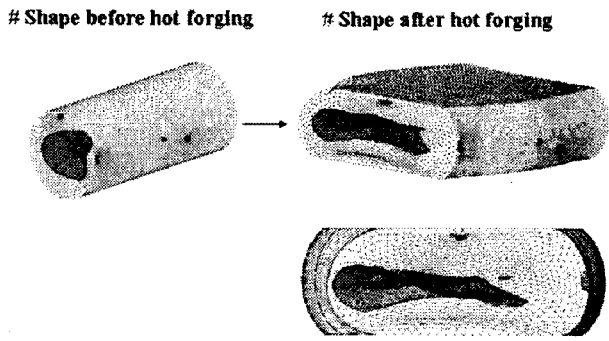
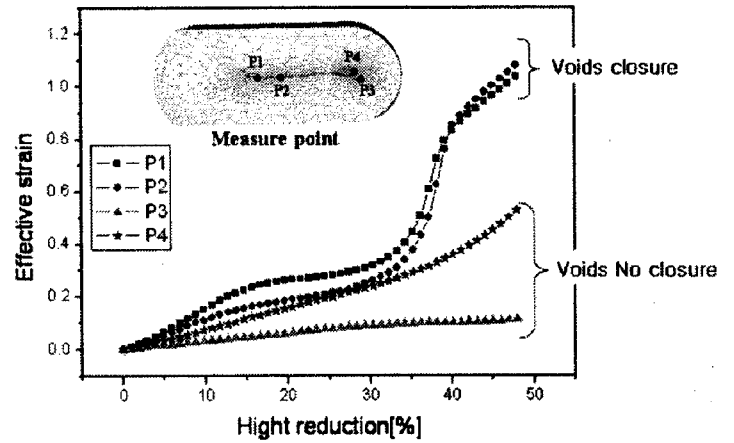


Fig. 9 Final shape after FE-analysis for hot open die forging



[a] Effective Strain

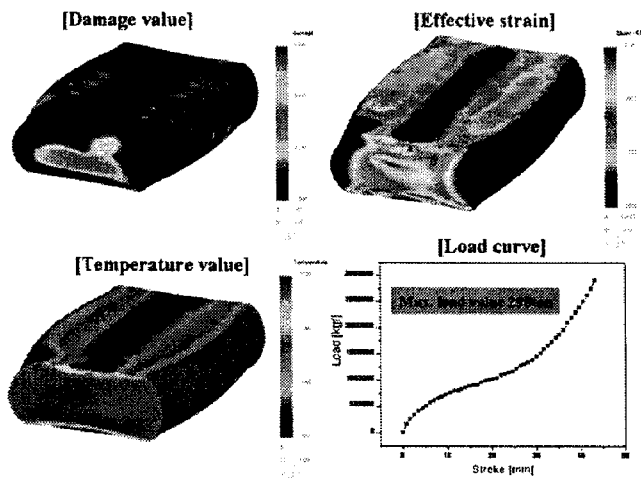
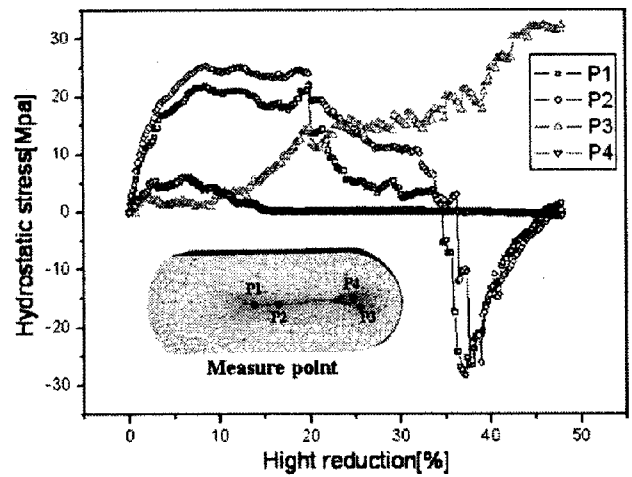


Fig. 10 The distributions of effective Strain, damage and temperature value in the final product



[b] Hydrostatic Stress

Fig. 12 The influence of effective strain and hydrostatic stress at various void positions

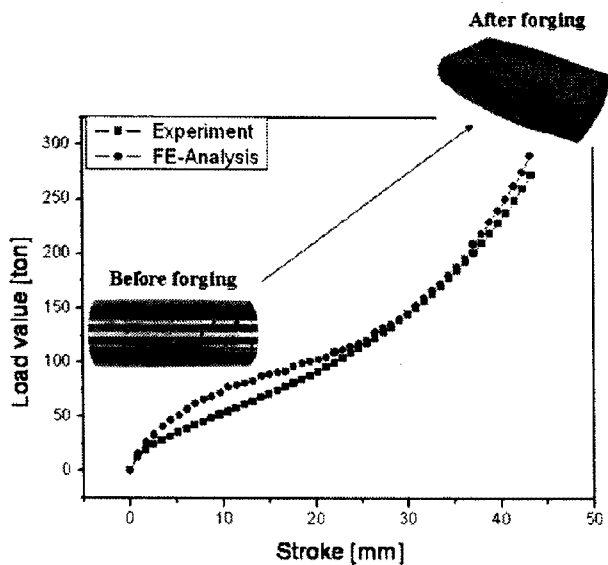


Fig. 11 Comparison of load value on the FE-analysis and Experiment

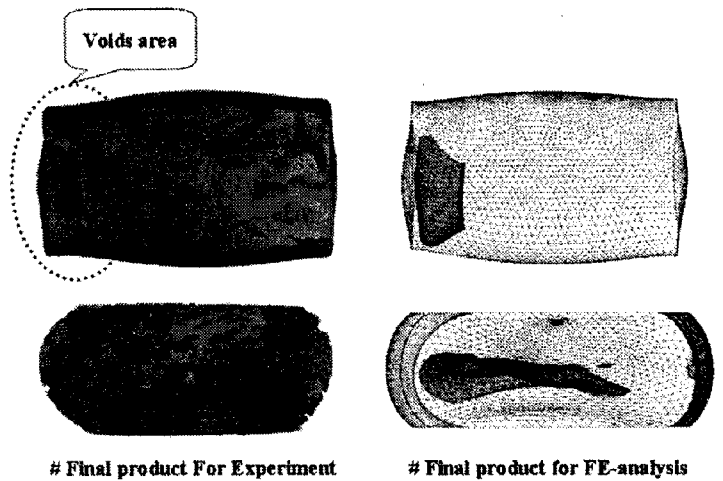


Fig. 13 The comparison of the final product on the experiment and FE-analysis

4. 결 론

참 고 문 헌

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

(1) SCM440 합금강에 대해 물성치를 정량화시키기 위해 잉곳트의 각 부위별 조직을 분석하였다. 등축정대 부위의 온도와 변형을 열간 압축 실험을 통해 유동응력을 측정하였다. 또한 주조 조직이 소성 변형량에 따라서 변화되는 조직을 확인 할 수 있었다.

(2) 주조 공정에서 생성되는 편석이나 기공을 제거하기 위해 업셋팅 공정에 의한 열간 자유단조 실험을 수행하였다. 단조 전, 후의 기공의 형상을 X 선 회절 분석기로 기공 압착거동을 관찰 하였으며, 업셋팅에 의한 기공 압착은 불가능함을 알 수 있었다.

(3) 실제 잉곳트 내부의 기공을 동일하게 모델화하여 열간점소성 유한요소해석을 수행하였다.

그 결과에 따르면 내부 기공으로 인해 기공 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. 하중값은 실험와 계산치가 동일하였다.

(4) 열간 압축 공정을 거치는 동안 기공의 폐쇄 및 압착효과를 정량적으로 분석하기 위해 최종단계에서 기공이 압착되는 부위 2곳과 미 압착 부위 2곳에 대해 유효 변형율과 정수압 응력을 분석하였다. 분석 결과 유효 변형율 0.4, 압하량 35%이상에서 기공이 압착되며, 미 압착부위에 비해 변형율이 높게 나타남을 확인 할 수 있었다. 정수압 응력은 초기기공의 미 압착시 인장응력(+)이 나타나다가 압하량 35%이상에서 기공이 압착되면서 압축응력(-)이 나타남을 알 수 있다.

따라서 기공 압착은 유효 변형율과 정수압 응력이 기공 폐쇄 과정에 크게 관계가 있음을 알 수 있다.

- [1] C.Y. Park, J.R. Cho, D.Y. Yang, D.J. Kim and I.S. park, 1992, "Analysis of void 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, pp129~136
- [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 and T. Fukusako, 1981, "Solidification Analtsis of steel ingots with consideration on fluid flow", Trans. ISIJ, Vol. 21, pp.488~494.
- [5] Dudra, S.P and IM, Y.T, 1990, "Investigation fo metal flow in open-die forging with different die and billet geometries", J. of Materals Processing Technology, Vol. 21, pp.143~154.
- [6] kiefer. B.V, and Shah. K.N, 1991, "Three dimensional simulation of open-die press forging", ASME Trans. J. of Eng. Mat. and Tech, Vol. 112, pp.477~485.
- [7] Yoon. J.H, and Yang. D.Y, 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 Metallurgy and Applications of Superalloy 718", TMS, Pittsburgh, Pennsylvania, p.119.
- [9] Yang. D.Y, Choi. Y and Kim. J.H, 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, pp397~404.
- [10] Jong Taek Yoem, 2006, " Finite-element analysis of microstructure evolution in the cogging of an Alloy 718 ingot"