

대형 잉곳의 업셋 단조에서의 기공 압착 거동에 관한 연구

이경진¹ · 배원병² · 조종래³ · 김동권⁴ · 김정태⁴

The Study of Void Closing Behavior in Upset Forging of Large Ingot

K. J. Lee, W. B. Bae, J. R. Cho, D. K. Kim, J.T. Kim

Abstract

In the forging operation of large ingot two break-down process are upsetting and cogging. The first purpose of upsetting is to ensure sufficient forging ratio for subsequent cogging operations and consolidate the voids along the centerline. The second purpose is related to improve the physical properties for a final product. Voids which are generated during the casting process can be one of the decisive defects of materials. So it is necessary to know the standard of judgment for void-closure in upsetting operation. In practical conditions, FEM analysis(DEFORM 2D 8.1) was carried out to decide how much effective strain has influence on void-closure. It is finally suggested that the function consists of the effective strain of analysis data and the area rate of void.

Key Words : Void-closure, Large ingot, FEM analysis, Open-die forging, Effective strain

1. 서 론

지난 20 여년 동안 원자력 및 화력발전소의 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 로터(rotor)를 대형화 하거나 일체형으로 만드는 추세이기 때문에 주조 공장에서는 대형강괴(steel ingot)의 제조가 요구되고 있고, 단조 공장에서는 대형강괴의 단조 기술이 필요하게 되었다. 대형 강괴는 자유 단조 작업을 통해서 제품을 형상화하는데, 이 때 자유 단조의 역할은 최종 제품형상을 구현하는 것 외에 강괴의 제조시에 발생하는 주조 조직을 없애는 것이다.

이러한 목적을 달성하기 위한 중요한 작업이 업셋팅(upsetting) 작업이다. 업셋팅은 강괴의 상부와 하부에 금형을 놓고 축 방향으로 하중을 가하면서 직경을 늘리는 작업이다. 이것은 중심부의 기공을 압착시키고 주조 조직의 방향성을 없애며

물성치를 향상시키고, 코깅(cogging) 작업 등 후속 공정에서 원하는 단조비를 얻기 위한 목적으로 하고 있다.[1~2]

주조 조직 중 가장 치명적인 결함으로 작용하는 기공을 없애기 위해 적절한 단조 공정설계가 필요하다. 이때 기공의 압착 여부를 판단하는 기준은 단조 공정설계에 반드시 필요한 부분이다. 따라서 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 통하여 기공의 압착에 영향을 주는 인자를 밝혀내고 그와 기공의 압착 정도와의 상관관계를 규명하여 정량적인 판단 기준을 제시하고자 한다.[3~4]

본 연구에서는 기공이 주로 발생하기 쉬운 강괴 중심 내부에 대해서 DEFORM-2D 8.1 software를 이용하여 기공의 위치, 기공의 크기, 기공의 형상, 소재온도 등 여러 조건에 따른 영향 및 거동을 분석 하였다. 기공 압착에 영향을 주는 인자

1. 부산대학교 대학원 정밀기계과
2. 부산대학교 기계공학부
3. 한국해양대학교 기계정보공학부
4. 두산중공업(주) 기술연구원

로 유효변형률(effective strain)을 이용하였으며 공정변수에 따른 해석결과들에 대해 그래프를 그리고 각각의 함수식을 구하였다. 이 그래프와 함수식을 통해 실제 기공압착의 정량적인 평가 및 해석이 가능함을 보였다.

2. 기공 압착 거동 해석

2.1 해석조건

소재와 다이의 크기와 형태(Fig. 1), 그리고 소재의 초기온도와 물성치, 마찰 조건, 업셋팅 속도나 압하량 등의 해석에 사용한 공정변수는 현장에서 쓰이고 있는 조건을 가능한 그대로 사용하였다.(Table 1)

기본적으로 소재의 Body부의 높이를 8부분으로 나누어 7개의 기공을 소재 중심부에 위치시켜 위치에 따른 각각의 기공 압착 변화를 구현하였고, 기공의 크기에 따른 영향을 분석하기 위해 기공의 지름을 20, 40, 60mm으로 나누어 해석하였고, 또한 기공의 형태를 타원으로 바꾸어서 다시 해석하여 형태에 대한 압착거동 변화를 살펴보았다.(Table 2)

Table 1 Conditions of analysis

Material	3.5%NiCrMoV steel
Initial temperature	1250 °C
Ingot shape	Body : $\phi 2200 \times 4500$, Holder : $\phi 1300 \times 1800$
Die shape	Flat die
Upset velocity(mm/sec)	100 ~5
Friction faction	0.7

Table 2 Shape and position of voids

Position of voids	7
Void diameter (mm)	20, 40, 60
Shape of voids	Ellisoid 1:2, 1:3

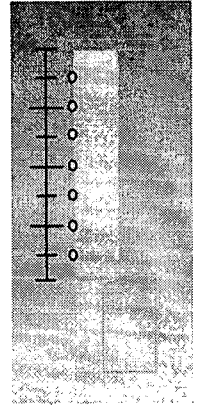
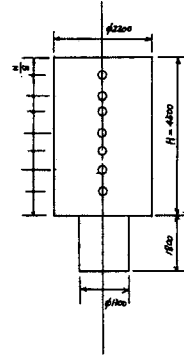


Fig. 1 Configuration of ingot and geometry in analysis

2.2 해석과정

소재 중심부에 상하의 위치가 다른 여러 개의 기공을 한꺼번에 구현하면 mesh의 집중을 초래하여 remesh 과정을 필연적으로 거치게 되어 정확한 결과를 얻기 힘들게 된다. 따라서 중심부 7개의 기공은 각각을 따로 해석하게 되었다. 아래의 그림은 7개의 기공 중 가장 하단에 위치한 기공을 구현하여 mesh를 나눈 모습이다.(Fig. 2)

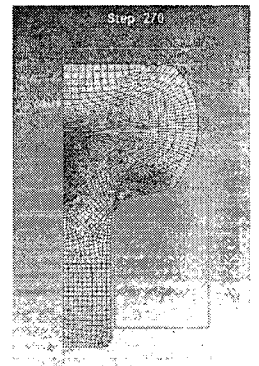
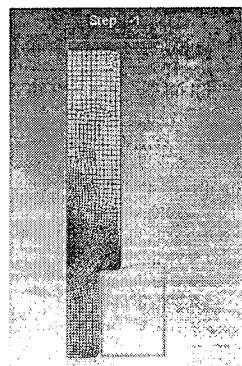


Fig. 2 FE Mesh of ingot

3. 해석 결과 및 분석

3.1 위치

각 위치별로 기공의 유효변형률과 기공의 면적 변화율을 그래프로 나타내었다.(Fig. 3) 입력값을

유효변형율(ϵ)로, 출력값을 면적비(γ)로 두었고 면적비(Area rate)는 기공의 초기 면적을 100으로 놓고 기공이 압착되어 단면이 사라질 때를 0으로 놓은 면적변화율로 표현하였다.

그래프의 우측의 번호는 기공의 위치별로 위에서 서부터 1~7번을 정한 것이다. 그래프를 보면 유효변형율과 면적비와의 관계는 소재 중심부에서 기공의 상하 위치와 관계없이 동일한 것을 알 수 있다.

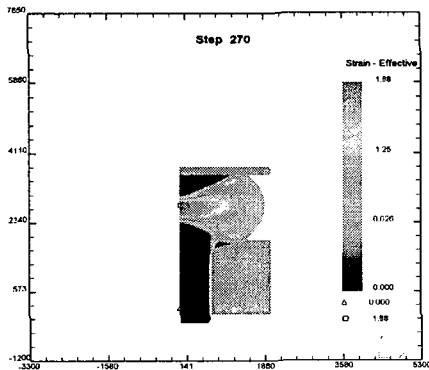


Fig. 3 Results of 2D analysis (effective strain)

수식에서 R^2 값은 점좌표와 일차함수 그래프가 얼마나 서로 일치하는 가를 나타낸 값이며 그 값이 1에 가까울수록 그래프가 점좌표를 잘 표현했다고 할 수 있다. 각 기공의 크기 조건에 따른 수식의 차이가 거의 없는 것으로 보아 기공의 크기가 면적비의 변화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 알 수 있다.

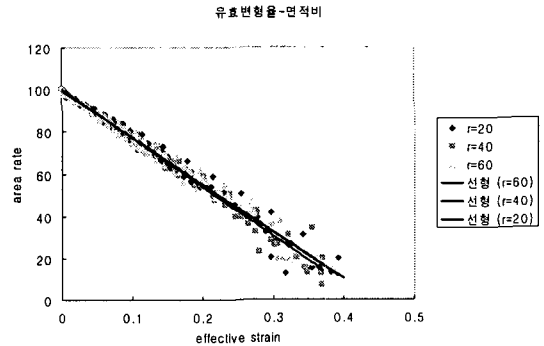


Fig. 4 Effective strain - Area rate graph (7 location, diameter = 20, 40, 60mm)

Table 3 Function for each spherical voids

Void diameter (mm)	Regression function
20	$\gamma = -225.39 \epsilon + 99.769$ $R^2 = 0.9878$
40	$\gamma = -232.74 \epsilon + 100.28$ $R^2 = 0.977$
60	$\gamma = -225.39 \epsilon + 99.769$ $R^2 = 0.991$

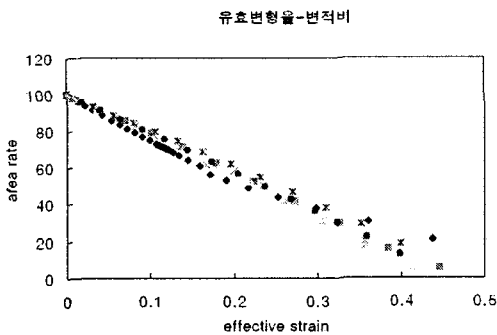


Fig. 3 Effective strain - area rate graph (7 locations, diameter = 20mm)

3.2 크기

Table 2에 나오듯 기공의 크기를 20, 40, 60 mm로 나누어 각각을 해석하였다. 그에 따른 결과를 Fig. 4의 그래프에서 선형으로 나타내었다.(Table 3) 입력값으로 유효변형율을, 출력값으로 면적비를 대입하였다.

3.3 모양

기공의 모양은 타원으로 하여 해석하였다. 수평 방향의 짧은 지름은 20 mm로 하고 수직 방향의 긴 지름은 40, 60 mm로 한 새로운 형태의 기공을 해석 함으로써 기공 형태의 변화가 기공의 압착에 미치는 영향을 보이려 하였다.(Table 4)

종횡비(aspect ratio)가 커질수록 기울기가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Table 4 Function for ellipsoidal voids

Shape of void	Regression function
20:20(mm)	$\gamma = -225.39 \epsilon + 99.769$ $R^2 = 0.9878$
20:40(mm)	$\gamma = -126.96 \epsilon + 99.31$ $R^2 = 0.9924$
20:60(mm)	$\gamma = -89.756 \epsilon + 98.762$ $R^2 = 0.9902$

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

지금까지 수식을 정리하여 보면(Table 5) 먼저 잉곳 중심부에서 기공의 수직방향의 위치 변화에 따른 유효변형율과 면적비와의 관계를 나타낸 그래프에서 기공의 수직방향의 위치변화는 유효변형율과 면적비간의 상관관계에 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다. 다음은 기공의 크기의 변화에 따른 함수의 변화를 조사한 결과, 주어진 조건에서 기공의 크기가 20~60(mm) 이내 일때는 기공의 크기는 유효변형율과 면적비와의 관계를 나타낸 함수에는 영향을 미치지 않았다. 마지막으로 기공의 모양을 변화시킨 결과, 원의 형태가 종횡비가 커지면 함수의 기울기가 작아지는 것으로 보아 유효변형율이 면적비에 미치는 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

또한 정수압응력은 기공의 압착에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

잉곳 중심부의 기공은 크기나 수직방향 위치와 관계없이 유효변형율과 면적비의 관계를 정의할 수 있으나 기공의 형태에 따라 두 인자의 관계를 정의해주는 함수의 기울기가 변할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 대형 잉곳의 주조공정에서 발생

하는 기공이 적절한 단조공정으로 제거되도록 하기 위하여 기공의 압착과 일차적인 영향을 끼치는 알려진 유효변형율과, 기공이 압착되는 정도를 표현한 면적비간의 관계를 여러가지 조건하에서 함수로 표현, 유효변형율과 면적비간의 관계를 정량적으로 밝혀 간단한 해석으로 구할 수 있는 유효변형율로 기공의 압착정도를 판단할 수 있도록 하였다.

(1) 잉곳의 중심부에서 기공압착에 영향을 미치는 변수는 유효변형율이며 정수압응력은 거의 영향이 없다.

(2) 잉곳의 중심부에서 기공의 수직방향 위치와 기공의 크기는 유효변형율이 면적비에 미치는 영향과 관계가 없다. 기공의 위치와 크기와 상관없이 유효변형율과 면적비간의 함수를 정의할 수 있다.

(3) 기공의 모양에서 가로와 세로의 비가 커질수록 유효변형율이 면적비에 미치는 영향이 줄어들었다. 수직방향으로 긴 형태의 기공은 보다 많은 유효변형율이 가해져야 압착이 되므로 보다 압착이 어렵다. 주조공정에서 생성되는 기공의 모양을 예측하도록 하여 기공압착정도를 판단할 수 있다.

참고문헌

- [1] Steve P. Dudra, Y. T. Im, "Analysis of Void Closure in Open-Die Forging", Int. J. Mach. Tools Manufacture., Vol. 30, pp.65-75, 1990.
- [2] U. Stahlberg, H. Keife, M. Lundberg, "A Study of Void Closure During Plastic Deformation", Journal of Mechanical Working Technology, pp.51-62, 1980
- [3] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, "대형강괴 업셋탕공정의 기공압착 해석", 대학기계학회논문집, 제 16 권 제 10 호, pp.1877-1889, 1992.
- [4] 권일근, 김경훈, 윤영철, 송민철, "대형인곳의 업셋-블룸단조에서의 기공 압착 거동 예측", 한국소성가공학회 2004 년도 추계학술대회 논문집, pp.325-328, 2004