

# 대형 로터의 자유단조공정에서 기공압착 예측을 위한 유한요소해석

이경진<sup>1</sup>, 배원병<sup>2</sup>, 조종래<sup>#</sup>, 김동권<sup>3</sup>, 김영득<sup>3</sup>

## FE Analysis for the Prediction of Void Closure on the Free Forging Process of a Large Rotor

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

(Received November 14, 2006)

### Abstract

Voids in a large rotor are formed in solidification process of a cast ingot. The voids have to be eliminated from the rotor by a forming process, because they would become stress-intensity factors which suddenly fracture the rotor in the operation. Previous studies on void-elimination of a large rotor have mainly focused on finding the process variables affecting the void-closure. But the study on the amount of void closure in a large rotor has been very rare. This study was performed to obtain an equation which predicts the amount of void-closure in a forging process of a large rotor and to evaluate the availability of the void-closure equation through finite element analyses. Firstly, 2D FE analysis was carried out to find effects of time integral of hydrostatic stress and effective strain on void volume rate of a large rotor in the upsetting process for various diameters and shapes of void, and material temperature. From the 2D FE analysis, we found that effective strain was suitable for predicting the void-closure of a large rotor, because there was a constant relationship between void volume rate and effective strain. And a void-closure equation was proposed for predicting void-closure of a large rotor in the upsetting process. Finally, from the 3D FE analysis, the proposed void-closure equation was verified to be useful for upsetting and cogging processes.

**Key Words** : Void-Closure, Steel Ingot, Large Rotor, Free Forging, Finite Element Analysis

### 1. 서론

지난 20 여 년 동안 원자력 및 화력발전소의 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 로터(rotor)의 대형화 및 일체화가 추진되었기 때문에, 300ton 급 이상 대형강괴(steel ingot)의 주조 및 단조에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 대형 강괴는 자유 단조를 통해 제품을 형상화하는데, 이 때 자유단조의 목적은 제품 형상을 만들고 강괴의 제조 시 발생

하는 주조 조직을 없애는 데 있다. 편석이나 불순물 등 주조공정에서 발생하는 여러 가지 결함은 제품의 품질을 저하시키며, 특히 강괴내의 기공은 응력집중의 원인이 되어 예기치 못한 파손을 유발하므로 반드시 없애야 한다. 따라서 주조공정에서 발생하는 기공을 없애기 위한 적절한 자유단조공정을 설계할 필요가 있다[1~2].

300ton급 이상의 대형강괴의 자유단조 공정에 대한 기존 연구는 주로 기공압착에 영향을 주는

1. 부산대학교 정밀기계공학과  
2. 부산대학교 기계공학부  
3. 두산중공업(주) 기술연구원  
# 교신저자: 한국해양대학교 기계정보공학부, cjr@hhu.ac.kr

인자와 그 영향을 파악하기 위하여 수행되었다 [3~5]. 그러나 그러한 인자의 영향을 고려하여 대형강괴에 대한 자유단조를 수행한 후, 기공이 압착되었는지의 여부를 예측할 수 있는 기준에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 기공의 압착 여부에 대한 예측 기준을 확립함으로써 공정 변수 제어를 통한 불량방지 방안을 수립하는 것이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 기공의 압착 정도를 판단하기 위하여 기공 압착에 영향을 주는 인자를 2차원 유한요소해석을 통하여 확인하고, 그 인자를 공정 변수로 하여 기공의 압착 정도를 예측하는 식을 제안하고자 한다. 제안된 압착예측식의 적용범위를 파악하기 위하여 업셋팅과 코깅공정에 대한 3차원유한요소해석을 수행하고자 한다.

## 2. 모사 실험

### 2.1 실험조건

유한요소해석을 수행하기 전에 해석의 유효성을 입증할 필요가 있다. 고온의 강과 비슷한 거동을 보이는 납을 이용하여 1/25로 축소된 모사실험을 수행하였으며, 이때 적용된 실험조건은 Table 1에 제시하였다.

**Table 1 Process conditions used in simple upsetting**

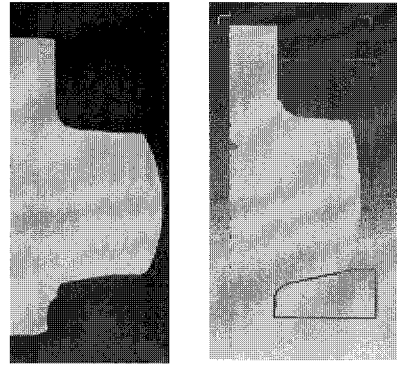
Material	Pure lead
Initial temperature(°C)	20
Ingot shape(mm)	Ø 119.5×L 179.2
Die shape	Ring die
Upsetting velocity(mm/s)	5.0
Friction coefficient	0.4
Upsetting stroke(mm)	92.1

유한요소해석에 사용된 프로그램은 소성가공 분야에서 일반적으로 사용되고 있는 DEFORM-2D Ver.8.0이다.

### 2.2 실험결과

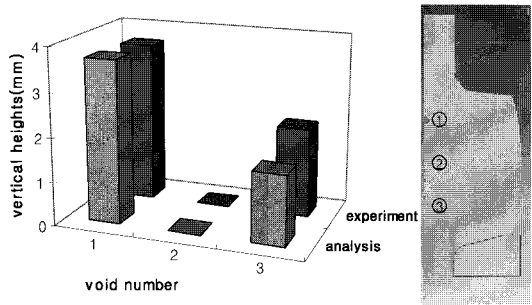
Fig. 1은 실험과 해석 결과를 나타내었고, Fig. 2는 수직방향 기공 압착 정도를 비교하였다.

압착 후 기공의 높이는 첫 번째, 세 번째, 두 번째 기공 순으로 나타났으며, 이에 대한 실험과 해석의 결과가 거의 일치함을 Fig. 2로부터 알 수 있다. 따라서 DEFORM을 이용한 유한요소해석은



(a) Experiment (b) FE analysis

**Fig. 1 The deformed shapes of ingot in the experiment and FE analysis**



**Fig. 2 Comparison of the vertical heights of voids between experiments and FE analyses**

실제 강괴의 거동을 잘 표현할 수 있음을 확인하였다.

## 3. 기공부피율-유효변형을 관계식

대형 로터의 자유단조공정은 업셋팅(upsetting)공정과 코깅(cogging)공정의 반복작업으로 이루어지며 공정흐름을 간략하게 나타내면 Fig. 3과 같다.

자유단조공정은 강괴의 상부와 하부에 금형을 놓고 축 방향으로 하중을 가하여 지름을 늘리는 업셋팅 공정과 횡 방향으로 하중을 가하여 길이 방향으로 강괴를 늘리는 코깅 공정이 교대로 행해지면서 강괴에 충분한 단조 효과를 부여한다. 따라서 대형강괴의 단조공정에서 기공의 압착에 주로 영향을 끼치는 공정은 업셋팅과 코깅 공정이다.

본 연구에서는 업셋팅공정에 대한 2 차원 유한요소해석 결과를 이용하여 기공부피율( $\alpha$ )과 유효

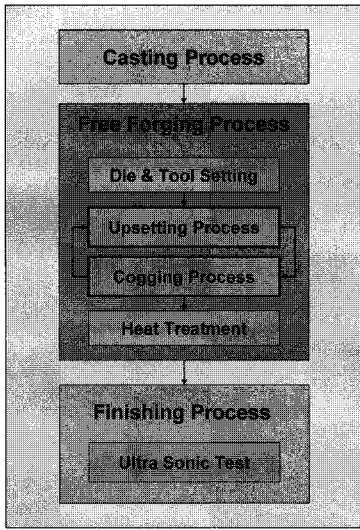


Fig. 3 A general process flow to manufacture the large rotor using steel ingot

Table 2 Process conditions used in 2D FE analysis for the upsetting process

Material	3.5%NiCrMoV steel
Initial temperature	1,250 °C
Ingot shape	Body : Ø 2,200×L 4,500 Holder : Ø 1,300×L 1,800
Upset velocity(mm/s)	5.0
Friction factor	0.4
Void diameter(mm)	20.0

효변형율( $\bar{\epsilon}$ )의 관계식을 제안하였고, 기공의 크기, 형상 등의 해석조건을 달리한 2 차원 유한요소해석을 통해 제안식의 적용범위를 검토하였다. 또한 업셋팅 및 코깅 공정에 대한 3 차원 유한요소해석을 통하여 그 결과를 검증하였다[6].

### 3.1 해석 조건 및 가정

Table 2에는 해석 조건을, Fig. 4에는 2차원 해석 형상을 나타내었다. Fig. 4와 같이 동일한 크기(Ø=20mm)의 원형 기공을 중심축을 따라 등간격으로 7개를 분포시켜 업셋팅 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다.

### 3.2 영향인자에 따른 해석결과

기공압착에 영향을 주는 주요 변수는 정수압응력의 시간적분값(G)과 유효변형율로 알려져 있다[7].

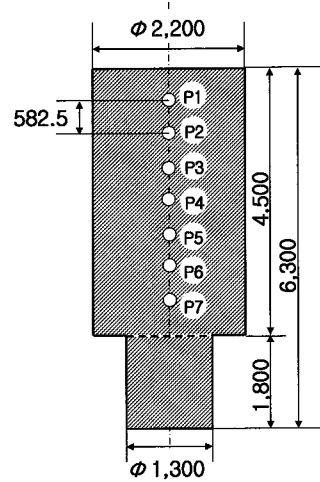


Fig. 4 The applied model in 2D FE analysis for the upsetting process

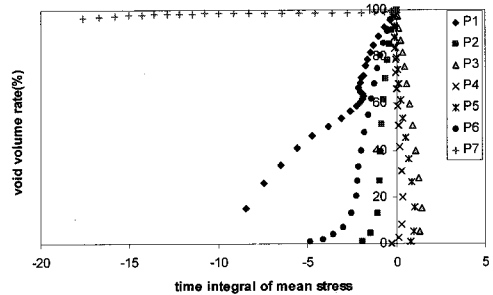


Fig. 5 Relation between time integral of mean stress and void volume rate in upsetting process

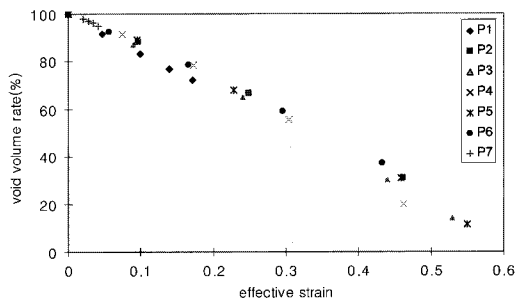


Fig. 6 Relation between effective strain and void volume rate in upsetting process

두 변수에 대한 유한요소해석을 수행하여 정수압응력의 시간적분값과 기공압착 정도의 관계를 Fig. 5에, 유효변형율과 기공압착 정도의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 기공압착 정도는 기공부피율로 나타내었으며, 이때의 기공부피율은 기공 초기 부피

를 100으로 압착시점의 기공 부피를 0으로 표현한 값이다.

정수압응력의 시간적분값과 기공부피율 사이에는 일정한 경향성이 없기 때문에 이를 이용하여 기공압착의 판단기준을 수립하는 것은 매우 어렵다는 것을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 반면에 Fig. 6에서 알 수 있듯이 기공부피율과 유효변형율 사이에는 기공의 위치와 상관없이 일정한 경향성을 나타내고 있기 때문에 적절한 관계식을 제안할 수 있다. 따라서 기공의 압착에 영향을 주는 주요 변수로 유효변형율을 선정하였고 이를 이용하여 유효변형율과 기공부피율 관계식을 유도하였다.

해석결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 기공부피율을 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 기공이 진원일 때, 기공부피율  $\alpha$  와 유효변형율  $\bar{\epsilon}$  관계는 식(1)과 같다.

$$\alpha = -169.2 \bar{\epsilon}^2 - 93.89 \bar{\epsilon} + 99.65, R^2=0.999 \quad (1)$$

식(1)에서  $R^2$ 은 그래프상의 데이터와 함수의 일치 정도를 나타내는 수치로 99.9%의 정확도를 보였다.

### 3.3 해석결과 적용

제안된 기공부피율-유효변형율 관계식의 유용성을 입증하기 위해 기공의 크기와 형상, 그리고 소재온도에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 각각의 경우 제시된 조건을 제외한 모든 해석조건은 Table 2와 같다.

#### 3.3.1 기공의 크기

기공의 크기를 현장 경험을 참조하여 직경 20, 40, 60mm 의 세 단계로 선정하고, 각각의 해석결과를 Fig. 7 에 나타내었다.

각 기공의 크기에 따른 차이가 거의 없기 때문에 기공의 크기가 20mm~60mm 의 경우, 기공의 크기가 기공부피율의 변화에 미치는 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

#### 3.3.2 기공의 형상

기공의 형상에 따른 기공부피율의 차이를 Fig. 8 에 나타내었다. 기공의 형상은 원형과 가로방향과 세로방향의 비가 1:2 와 1:3 인 타원형 두 가지를 비교하였다. 기공의 가로세로비(aspect Ratio)가 작을수록 기공부피율-유효변형율 곡선의 기울

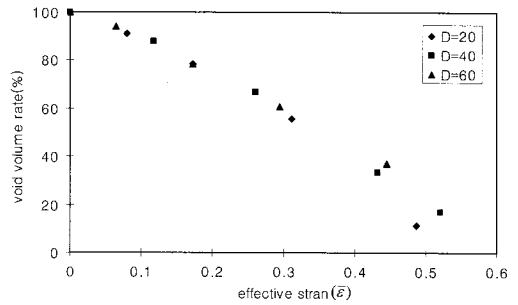


Fig. 7 Comparison of the relation between effective strain and void volume rate according to the variation of void diameter

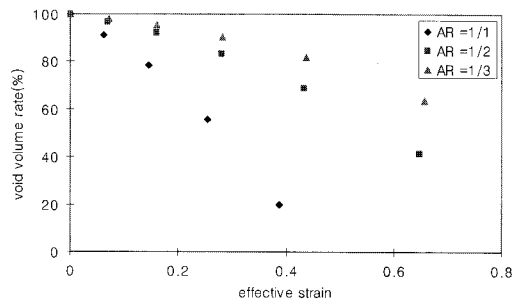


Fig. 8 Comparison of the relation between effective strain and void volume rate according to the variation of aspect ratio of voids

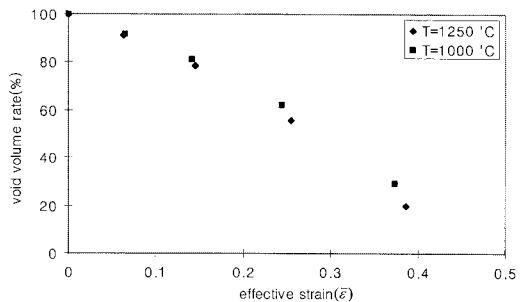


Fig. 9 Comparison of the relation between effective strain and void volume rate according to the variation of material temperature

기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 기공이 압착 방향, 즉 수직방향으로 길면 길수록 압착이 더 힘들어짐을 나타내며, 또한 기공의 형상이 진원과 크게 달라지면 식 (1)의 결과를 적용하기 힘들다는 것을 알 수 있다. 그러므로 기공의 형상에 따른 데이터를 확보하여 적절한 모델을 예측할 필요가 있다.

### 3.3.3 소재온도

유동응력의 차이에 따른 기공압착거동을 비교하기 위해 강괴의 온도를 달리 하여(1,250℃, 1,000℃) 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 동일 유효변형율에서 온도가 높은 쪽이 더 높은 압착 정도를 나타내었다.

## 4. 3차원 유한요소해석을 통한 관계식 검증

2차원 해석을 통해 얻은 기공부피율과 유효변형율의 관계식을 3차원 해석을 통해 검증하였다. 3차원 유한요소해석에 사용된 프로그램은 소성가공분야에서 일반적으로 사용되고 있는 DEFORM-3D Ver 5.0을 사용하였다.

### 4.1 업셋팅 공정

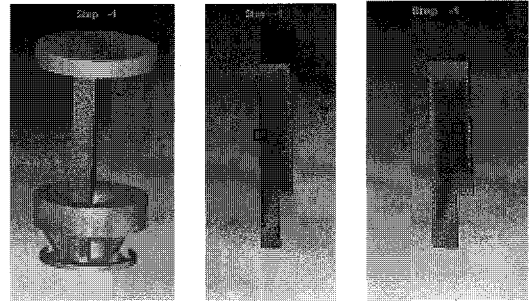
해석조건은 기본적으로 2차원 해석과 동일하며, 수평위치의 변화에 따른 변화를 확인하기 위하여 축 방향으로 동일한 위치에서 중심축 상의 기공과 중심축에서 벗어난 위치의 기공을 해석하여 비교하였다. 3차원 해석에 사용된 모델을 Fig. 10에 나타내었으며, Fig. 10(c)에서 중심축에 대한 기공의 오프셋 량은 733mm이다.

Fig. 11에서는 3차원 해석결과를 2차원 해석결과와 비교하였다. 2차원 중심축상의 기공과 3차원 중심축상의 기공, 그리고 3차원의 중심축을 벗어난 위치의 기공까지 모두 동일한 경향을 보이고 있다. Fig. 11에서 나타났듯이 잉곳 내 기공의 위치와 상관없이 기공부피율과 유효변형율 간의 관계가 거의 일정하기 때문에, 식 (1)은 기공의 위치와 상관없이 적용이 가능하다.

### 4.2 코깅 공정

코깅 공정에서도 식(1)을 적용할 수 있는지 확인하기 위하여 코깅 공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 코깅 공정은 압하량이 업셋팅 공정보다 훨씬 작고 공정상 다이의 형상에 영향을 받는다는 점에서 업셋팅 공정과는 다소 다르다. 그러나 업셋팅과 함께 기공압착에 영향을 주는 공정이기 때문에 같이 해석할 필요가 있다.

잉곳의 중심축상의 중간부분에 기공을 둔 1/8로 축소된 모델 해석을 수행하였으며 해석조건은 Table 3에, 해석에 적용된 모델은 Fig. 12에 나타내었다.



(a) 3D geometry (b) centered void (c) offset void  
Fig.10 Applied model in 3D FE analysis for the upsetting process

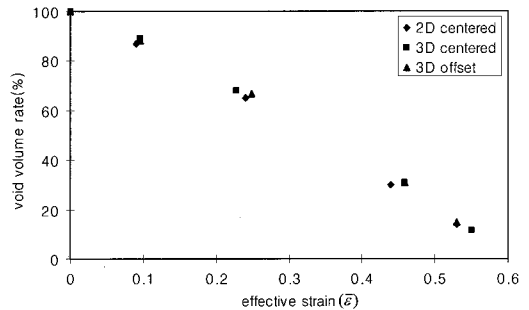


Fig.11 Comparison of the relation between effective strain and void volume rate according to the horizontal location of void

Table 3 Process conditions used in the 3D FE analysis for the cogging process

Ingot shape	Body : Ø2,200×L4,500
Die shape	Flat Die 1,400×2,500
Cogging speed(mm/s)	5.0
Cogging stroke(mm)	400.0(72.7%)
Temperature of material	1250℃

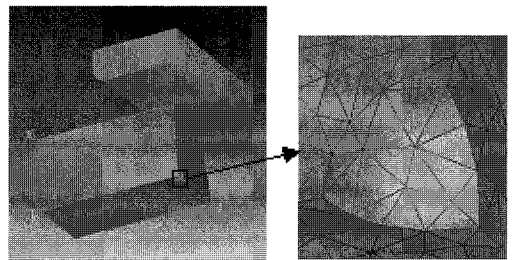
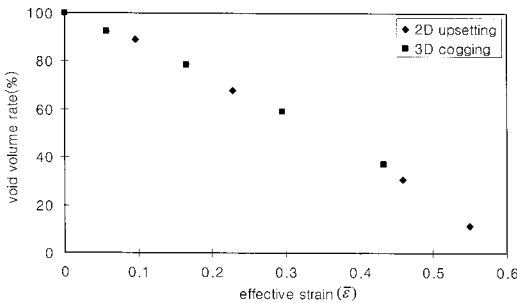


Fig.12 FE model used in 3D analysis for the cogging process



**Fig.13 Comparison of the relation between effective strain and void volume rate according to the forging process**

Fig.13에서 2차원 업셋팅 해석결과와 3차원 코깅 해석결과를 비교하였다. 코깅공정에서 기공부피율과 유효변형율의 관계는 업셋팅 2차원 해석결과와 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 코깅공정에도 기공부피율의 변화에 대한 상관관계를 식(1)을 이용하여 동일하게 표현할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 대형강괴의 자유단조에서 발생하는 기공의 압착에 주로 영향을 미치는 인자를 파악하고, 기공압착 예측식을 제안하여 그 적용범위를 알기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 정수압응력의 시간적분값으로 기공부피율 변화를 파악하기는 곤란하지만, 유효변형율은 기공의 압착을 파악하기에 적합하다.

(2) 유효변형율의 크기에 따라 기공의 압착 정도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다.

(3) 기공의 형상이 진원인 경우에는 기공의 크기와 위치에 상관없이 제안된 수식을 적용할 수 있다.

(4) 코깅공정에도 업셋팅 공정과 같이 기공부피율-유효변형율의 관계식을 적용할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] S. P. Dudra, Y. T. Im, 1990, Analysis of Void Closure in Open-Die Forging, Int. J. Mach. Tools Manufacture, Vol. 30, pp.65~75.
- [2] U. Stahlberg, H. Keife, M. Lundberg, 1980, A Study of Void Closure During Plastic Deformation, Journal of Mechanical Working Technology, pp. 5~62.
- [3] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, 1992, 대형강괴 업셋팅 공정의 기공압착 해석, 대학기계학회논문집 제16권 제10호, pp.1877~1889.
- [4] 권일근, 김경훈, 윤영철, 송민철, 2004, 대형강괴의 업셋-블롭 단조에서의 기공 압착 거동 예측, 한국소성가공학회 2004년도 추계학술대회 논문집, pp. 325~328.
- [5] 천명식, 류종훈, 문영훈, 2004, 사각 빌렛 자유단조 시 내부기공폐쇄거동 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제13권, 제2호, pp. 148~153.
- [6] 조종래, 김동권, 김영득, 이부윤, 1996, 열간 판재 단조 시 강괴 내부의 기공폐쇄에 관한 연구, 한국소성가공학회지 제5권 제1호, pp. 18~26.
- [7] M. Tanaka, S. I. Ono, M. Tsuneno, 1986, Factors contributing to crushing of voids during forging, Journal of the TSTP, Vol. 27, No. 306, pp. 852~859.