

# 대형 단조품 환봉 코깅 공정의 기공 압착 거동 예측에 관한 연구

송민철<sup>#</sup>, 권일근<sup>1</sup>, 박연구<sup>2</sup>

## A Study on the Prediction of Void Closure in the Cogging Process of a Large Round Bar

M. C. Song, I. K. Kwon, Y. G. Park

### Abstract

The predictive equation of void-closure was developed to evaluate void crush ratio with respect to the process variables in the cogging process of a large round bar. The comprehensive finite element analysis with the process variables such as reduction ratio and die width ratio was carried out. The predictive equation of void-closure for cogging process was established on the basis of the regression analysis with the extensive FE analysis results and verified by comparing the predicted results with FEA results with various forging passes.

**Key Words** : Cogging(코깅), Void Closure(기공압착), Die Width ratio(금형 폭 비), Reduction Ratio(압하율), Round bar(환봉)

### 1. 서론

선박용 엔진의 축계류 및 터빈 로터와 같은 대형 단조품은 강괴(ingot)상태에서 열간 자유 단조 공정으로 제작된다. 주조 공정을 통해 제작된 강괴는 내부에 기공이 존재하는데, 이러한 결함은 응력집중의 원인이 되므로 반드시 제거되어야 한다. 결함을 제거하기 위한 자유 단조 공정으로는 업셋팅 공정과 코깅 공정이 있다. 일반적인 자유 단조 공정은 강괴를 가열하여 업셋팅 공정을 통해 단면적을 늘리고 다시 코깅 공정을 수행하여 단면적을 줄여가면서 길이를 늘리는 작업이 뒤따르게 된다. 그러나, 업셋팅 공정만으로는 중심부의 기공을 제거하기에는 공정 중 필연적으로 발생하는 강제영역 때문에 한계가 있다[1]. 따라서 업셋팅 공정에서 제거하지 못한 기공은 코깅 공정을 통해 제거해야만 한다.

코깅 공정으로 이루어지는 자유 단조공정의 단련 효과를 나타내는 지표로는 초기 형상과 최종

형상의 단면적의 비인 단조비가 있으나, 단조비가 동일하더라도 어떠한 단조 패스를 거치는가에 따라 기공 압착률과 같은 내부 품질에 차이가 있음이 밝혀졌다[2]. 따라서 효율적인 기공압착을 위해서는 적절한 코깅 공정의 설계가 필요하다. 그러나 코깅 공정에 대한 기존의 연구는 주로 기공 압착에 미치는 공정 인자에 대한 연구와 그 영향을 평가하는 연구가 수행되었으며, 수많은 단조 패스로 이루어진 코깅 공정을 수행한 후 내부의 기공 압착 정도를 판단 할 수 있는 기준에 대한 연구는 미흡한 편이다[3]. 따라서 보다 안정된 단조품의 품질 확보를 위해서 공정 설계 단계에서 효과적으로 공정 변수를 제어하여 불량 방지 방안을 수립하는 것이 반드시 필요함을 의미한다.

본 연구에서는 현장에서 쉽게 파악할 수 있는 공정 변수를 통하여 기공 압착 정도를 예측 할 수 있는 식을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 기공 압착에 미치는 인자들을 평가, 분석하고 기공 압착 인자에 대한 변수별 성형해석 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였다.

1. 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소  
2. 현대중공업 엔진기계사업본부  
# 교신저자: 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소,  
E-mail: kalsong@hhi.co.kr

## 2. 기공 압착 인자

### 2.1 금형 폭 비, 압하율

Fig. 1과 같이 정의되는 금형 폭 비(W/H)와 압하율( $\Delta H/H$ )은 많은 연구자들에 의하여 기공 압착 및 단조 효과에 영향을 미치는 공정 변수로 주목되어 그 영향이 연구되어 왔다[4,5]. Fig. 2는 금형 폭 비(W/H), 압하율( $\Delta H/H$ ), 단조 전 예냉 시간의 기공 압착에 대한 영향력의 상대적인 크기를 비교한 결과로서, 예냉 시간의 효과는 압하율( $\Delta H/H$ )과 금형 폭 비(W/H)에 비하여 상대적으로 기공 압착에 미치는 영향력이 적음을 알 수 있다. 그리고 예냉 시간, 즉 단조품의 온도 구배를 고려하지 않은 경우 실제보다 기공 압착률을 낮게 예측하므로 이는 본 연구에서 개발하고자 하는 기공 압착 예측식이 실제 현상을 보수적으로 예측할 것으로 유추할 수 있음을 의미한다.

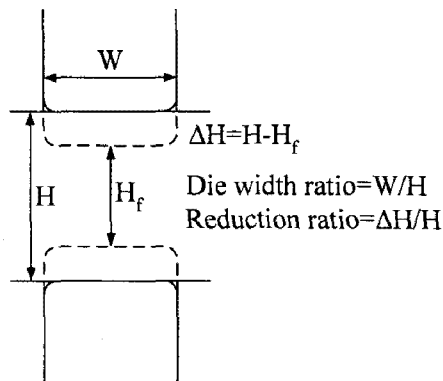


Fig. 1 Die width ratio(W/H) and reduction ratio( $\Delta H/H$ )

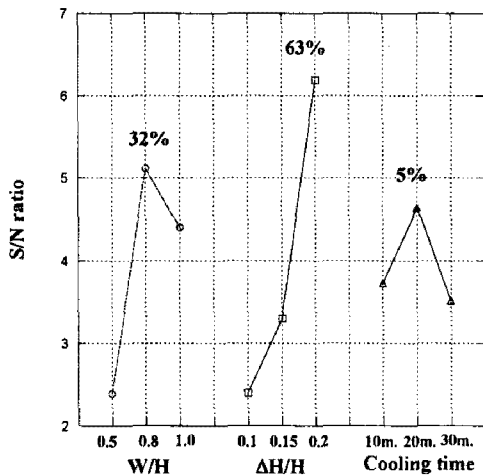


Fig. 2 Signal-to-noise ratio of forging variables[5]

### 2.2 기공 형성

조종래는 Tanaka[6]가 제시한 유효변형률과 정수압 응력의 시간 적분값을 이용하여 기공 압착 예측식을 개발하는 과정에서 정수압 응력의 시간 적분값이 기공 압착률과 일정한 연관성이 없음을 파악하고 유효변형률의 함수로 기공 압착 예측식을 제안한 바 있다[7]. 이때 초기 기공의 형상을 구형으로 한정함에 따라 제안된 예측식은 엷셋팅과 같이 하중방향이 일축인 경우에 한하여 적용가능함을 밝히고, 코킹 공정과 같이 하중방향이 다축이고, 기공 형상이 변화되는 경우 기공 형상을 고려한 예측식이 필요함을 주장하였다.

따라서, 본 연구에서는 환봉 코킹 공정에서 기공형상의 변형 특성을 우선 파악하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 환봉 코킹 공정에서 소재 단면 및 초기 형태가 구형인 기공의 형상변화를 나타낸 것으로 단조 공정이 진행됨에 따라 소재 단면의 변화는 원형→8각→16각이 반복되면서 축의 길이 방향으로 신장된다. 이때 기공의 단면 형상은 초기에는 거의 원형에 가까운 형태로 크기만 축소되며 축의 길이 방향으로 신장된 타원체 형상을 보인다.

본 연구에서는 이러한 소재 단면 및 기공의 형상변화 특성을 고려하여 기공 압착 예측식을 개발하고자 하였다. 환봉 코킹 공정에서 초기 구형인 기공은 단면의 형상이 원형을 유지하며 축방향으로만 신장되는 경향을 보이므로 기공의 축방향 신장도에 따른 기공 압착 거동의 차이를 고려하였다.

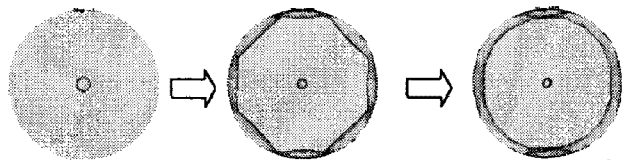


Fig. 3(a) Change of configuration of cross section of round bar in cogging process



Fig. 3(b) Change of void shape of round bar in cogging process

### 3. 기공 압착 예측식

#### 3.1 환봉 코킹 공정의 변수별 해석

금형 폭 비(W/H)와 압하율( $\Delta H/H$ )을 변화시켜가며 구형 기공의 압착률에 대한 변수별 해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 4와 같이 1/2모델이며, 초기 기공은 구형으로 반경은 100mm이다. Z축 방향은 소재의 축방향, Y축 방향은 하중 방향이다. 기공 형상은 전체 좌표축에 따라 X축 방향의 최대 반경은 a, Y축 방향의 최대 반경은 b, Z축 방향의 최대 반경은 c로 표기하였다.

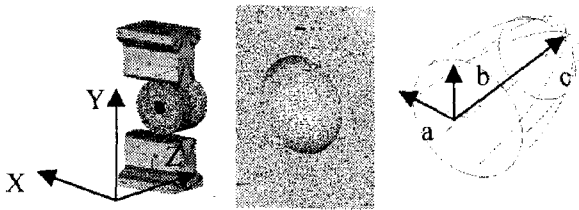


Fig. 4 FE model and configuration variables of void

Table 1은 금형 폭 비(W/H)와 압하율( $\Delta H/H$ )에 따른 기공의 치수 변화 및 기공 압착률 해석결과이다. X축, Y축 방향의 기공 반경인 a와 b는 초기 값 100mm보다 감소하여 기공의 단면적이 감소하는 것을 알 수 있으며, Z축 방향의 치수인 c는 증가하여 기공의 형상이 환봉의 축방향으로 신장되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Change of void crush ratio with W/H and  $\Delta H/H$  obtained by FEA

W/H	$\Delta H/H$	Dimension of void (mm)			$\Delta V/V$
		a	b	c	
0.5	0.10	82	85	135	0.882
0.5	0.15	67	69	170	0.783
0.5	0.20	56	51	209	0.635
0.75	0.10	74	71	149	0.631
0.75	0.15	61	51	177	0.596
0.75	0.20	44	28	228	0.455
1.0	0.10	77	71	139	0.783
1.0	0.15	56	50	167	0.686
1.0	0.20	45	25	190	0.408

Table 1의 결과는 1개의 단조 패스가 완료된 후의 결과로서 예측식은 1개의 단조 패스가 아닌 점진적인 변형이 이루어지는 코킹 공정을 대상으로 하므로 기공 압착률은 누적 계산되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 금형 폭 비(W/H)와 압하율( $\Delta H/H$ )의 함수로 기공의 국부변형률을 구하여 기공 압착률을 계산하는 방식을 도입하였다. 식(1)은 기공의 X축 방향 국부변형률을 금형 폭 비(W/H)와 압하율( $\Delta H/H$ )의 함수로 나타낸 것으로 구체적인 함수는 회귀분석을 이용하여 구하였으며, Y축과 Z축 방향의 국부변형률 또한 동일한 방법을 적용하였다.

$$e_{xm} = \ln\left(\frac{a_n}{a_{n-1}}\right) = f\left(\frac{W_{n-1}}{H_{n-1}}, \frac{\Delta H_{n-1}}{H_{n-1}}\right) \quad (1)$$

$e_{xm}$  : n번째 패스에서 기공의 X축 국부변형률  
 $a_n$  : n번째 패스의 기공의 X축 방향의 최대반경  
 $W_n$  : n번째 패스에서 금형 폭  
 $H_n$  : n번째 패스에서 소재 직경  
 $\Delta H_n$  : n번째 패스에서 압하량

#### 3.2 환봉 단조 공정의 기공 압착식

기공을 타원체로 가정하면 임의의 n번째 패스에서 기공의 체적( $V_n$ )은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$V_n = \frac{4}{3} \pi a_n b_n c_n \quad (2)$$

$a_n, b_n, c_n$  : n번째 패스에서 기공의 X, Y, Z축 방향의 최대 반경

식(2)를 이용하면 n번째 패스 전후 기공의 체적 변화비( $V_{n-1}/V_n$ )는 식(3)과 같은 과정을 통해 식(1)과 같은 기공의 국부변형률로 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{V_{n-1}}{V_n}\right) = \ln\left(\frac{a_{n-1}}{a_n}\right) + \ln\left(\frac{b_{n-1}}{b_n}\right) + \ln\left(\frac{c_{n-1}}{c_n}\right) = e_{xn} + e_{yn} + e_{zn} \quad (3)$$

$e_{xn, yn, zn}$  : n번째 패스에서 기공의 X, Y, Z축 방향의 국부변형률

따라서 단조 패스 전후 기공의 체적 변화비( $V_{n-1}/V_n$ )는 식(4)와 같다.

$$\frac{V_{n-1}}{V_n} = \exp(e_{x_n} + e_{y_n} + e_{z_n}) = \exp(e_{v_n}) \quad (4)$$

$e_{v_n}$ : n번째 패스에서 기공의 체적변형률

본 연구에서 구하고자 하는 기공 압착률은 여러 패스를 거친 최종 기공 압착률로서 기공 형상에 따른 압착률 차이를 각 단조 패스별로 기공 형상에 대한 가중함수( $S_n$ )로 고려하였다. 식(5)는 누적된 체적변형률( $e_{v_n}$ )과 기공형상에 대한 가중함수( $S_n$ )를 고려하여 최종 기공 압착률을 구하는 식이다.

$$\frac{\Delta V_f}{V_0} = 1 - \frac{V_f}{V_0} = 1 - \frac{V_1}{V_0} \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdots \frac{V_n}{V_{n-1}} \quad (5)$$

$$= 1 - \exp(e_{v_0} + e_{v_1} + \dots + e_{v_n}) \times$$

$$S_0\left(\frac{c_0}{a_0}\right) \cdot S_1\left(\frac{c_1}{a_1}\right) \cdots S_{n-1}\left(\frac{c_{n-1}}{a_{n-1}}\right)$$

$V_f$ : 최종 패스후 기공의 체적

$a_{n-1}$ : n번째 패스에서 기공단면의 평균 반경

개발된 예측식의 타당성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 4의 해석모델에 대하여 2개의 단조 패스를 가지고 압하량 및 압하량 순서가 다른 4가지 경우의 환봉 코깅 공정에 대한 해석결과와 기공 압착 예측식의 결과를 비교하였다. Fig. 5는 기공 압착 예측식과 성형해석 결과를 비교한 것으로 예측식은 성형해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안된 예측식이 타당함을 의미한다.

#### 4. 결론

대형 환봉 단조품의 코깅 공정에서 기공 압착 거동 예측 기법을 개발하기 위한 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석 및 회귀분석을 이용하여 금형 폭 비(W/H), 압하율( $\Delta H/H$ ) 및 기공 형상의 변화를 고려한 여러 개의 단조 패스를 가지는 환봉 코깅 공정의 기공 압착률을 예측할 수 있는 기공 압착 예측식을 개발하였다.

(2) 3차원 유한요소해석을 이용하여 다양한 단조 패스에 대한 기공 압착 거동 특성을 평가하고 이를 예측 결과와 비교함으로써 개발한 예측 기법의 타당성을 검증하였다.

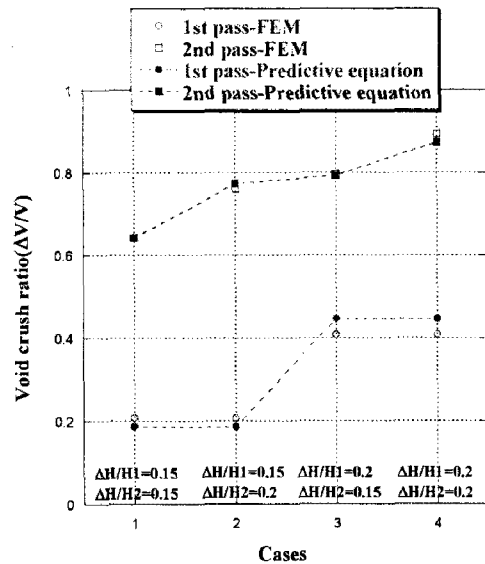


Fig. 5 Comparison between developed void-closure equation and FE analysis results

#### 참고 문헌

- [1] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, 박일수, 1992, 대형강괴 업셋팅공정의 기공압착 해석, 대학기 계학회논문집, 제16권, 제10호, pp.1877~1889.
- [2] 조종래, 김동원, 이부윤, 양동열, 1995, 평다이를 사용하는 자유 단조 공정의 최적 단조 조건에 관한 연구, 제4권, 제2호, pp.141~150.
- [3] 권일근, 김경훈, 윤영철, 송민철, 2004, 대형 잉곳의 업셋-블룸 단조에서의 기공 압착 거동 예측, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.325~328.
- [4] C.Y. Park, D.Y. Yang, 1997, Modeling of void crushing for large-ingot hot forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 195~200.
- [5] 송민철, 권일근, 박연구, 2007, 대형 단조품 코깅 공정의 기공 압착 인자에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제16권, 제7호, pp.502~508.
- [6] Tanaka, M., Ono, S., Tsuneno, M. and Iwade, T., 1987, An analysis of void crushing during flat die free forging, Advanced Technology of Plasticity, Vol.11, pp.1035~1042.
- [7] 조종래, 이경진, 배원병, 김동권, 김영득, 2007, 대형 로터의 자유단조 공정에서 기공 압착 예측을 위한 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제16권, 제2호, pp.126~131.