

대형 단조품 코깅 공정의 기공 압착 인자에 대한 연구

송민철[#], 권일근¹, 박연구²

A Study on the Parameters Contributing to the Void Crushing in the Cogging Process of Large Forged Products

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

Abstract

Effect of the forging process parameters on the void crushing in the cogging process has been studied in order to find the most effective factor. The process parameters used for this study are die width ratio, reduction ratio and pre-cooling time before cogging process. Void crushing analysis about the selected process parameters was carried out using FE analysis. The results of FE analysis were evaluated by Taguchi method. It was found that the efficiency of void crushing increases with an increase in the values of all selected process parameters and the principal factor controlling the void crushing was identified as the reduction ratio.

Key Words : Cogging, Void Crushing, Die Width ratio, Reduction Ratio, Pre-cooling Time, Taguchi Method

1. 서 론

선박용 엔진 부품과 같은 대형 단조품은 강괴(ingot)를 가열하여 열간 자유단조로 제작된다. 주조공정을 통해 제작된 강괴는 내부에 편석 및 기공이 존재하기 때문에 자유단조 공정을 통해 이러한 편석 및 기공을 제거하는 것은 단조품의 내부 품질 측면에서 중요한 문제이다.

단조품의 내부 품질 측면에서 중요한 자유단조공정은 업셋팅(upsetting)과 코깅(cogging)공정으로 자유단조 공정 초기에 수행되며, 단조품의 종류에 상관없이 수행되는 공통 공정이다. 업셋팅 공정은 상부와 하부 금형 사이에 강괴를 놓고 압축하여 중심부의 기공 및 편석을 제거하는 공정이다. 그러나, 업셋팅 공정만으로 강괴의 기공압착을 완전히 이루어내기에는 금형과 접촉하는 강체영역(dead metal zone)에서 기공 압착의 효율이 떨어지는 문제점이 있다[1]. 따라서, 이러한 문제점은 후속 공정인 코깅 공정에서 해결되어야 한다. 코깅

공정은 업셋팅 공정으로 늘어난 단면적을 감소시켜 길이를 늘리는 공정으로 단조비를 확보하고 업셋팅 공정에서 제거하지 못한 기공을 압착시키는 것을 목적으로 하고 있다. 코깅 공정의 공정 변수로는 금형형상, 소재 높이에 대한 금형 폭의 비인 금형 폭 비(die width ratio), 압하율(reduction ratio), 소재의 냉각 효과 등이 있으며, Park의 경우 공정 변수의 조합에 대한 해석을 통하여 기공 압착에 대한 최적의 조합을 도출하고자 하였다[2].

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 코깅 공정의 공정 변수 변화에 따른 기공 압착 거동을 평가하였다. 금형 형상의 경우 현장에서 대부분 평금형을 사용하므로 이를 검토 변수에서 제외하고 금형 폭 비, 압하율, 소재의 냉각효과를 변수로 선정하여 기공 압착에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 실제 현장 조건에서는 각 변수를 변화시키는데 제약이 다르므로 다꾸찌 방법을 이용하여 해석결과를 분석함으로써 기공 압착을 위한 코깅 공정 인자 제어의 우선순위를 정립하고자 하였다.

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

2. 공정변수 및 기공크기 영향 평가

본 연구에 사용된 소재는 AISI1045급의 단조강이며, 소재의 온도는 1200°C이다. Fig. 1은 코킹 공정 및 본 연구에서 공정 변수로 선정한 금형 폭 비 및 압하율의 정의를 나타낸 것이다. 금형 폭 비는 압하 전 소재 높이(H)에 대한 금형 폭(W)의 비이며, 압하율은 압하 전 소재 높이에 대한 압하량(ΔH)의 비로 정의하였다. 금형은 평금형을 사용하였고, 소재의 형상은 환봉 형상이다. 본 연구에서 고려하고자 한 소재의 냉각효과는 1200°C상태에서 단조 전까지 소요된 공냉 시간으로 나타내었다. 실질적으로 기공 압착에 영향을 미치는 인자는 소재의 온도 분포이나, 실제 현장에서는 동일 재질의 자유 단조품의 경우 가열 온도가 제품에 관계없이 동일하게 관리하고, 크기가 매우 커서 형상 변화가 표면과 심부의 온도 분포에 미치는 영향이 작기 때문에 예냉 시간을 온도 분포의 지표로 사용하는 것이 공정 관리측면에서 편리하다.

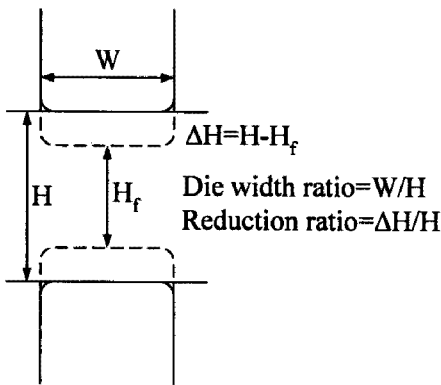


Fig. 1 Definition of process parameters

기공은 소재의 중심부에 존재하는 것으로 가정하였으며, 기공의 형태는 구(sphere)형으로 가정하였다. 본 연구에서는 각 공정 인자들의 기공 압착에 미치는 영향을 평가하기 위해 앞서 기공 크기의 변화가 기공 압착에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다. 소재의 직경은 2,000mm이고 압하량은 300mm로 동일하게 하였으며, 기공의 직경을 20 ~ 200mm까지 변화시켰다. 단조 후 기공의 압착비는 단조 전후 기공의 체적 비로 정의하였다.

Fig. 2는 구형 기공의 크기 변화에 따른 기공 압착비에 대한 해석 결과로 기공의 크기에 관계없이 거의 동일한 압착비를 보이므로 추후 기공 압

착측면에서 단조 공정 평가 시 기공 크기에 상관없이 기공 압착 정도를 평가할 수 있음을 알 수 있다.

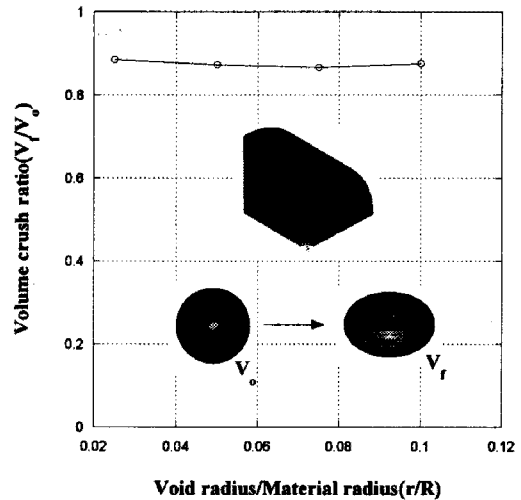


Fig. 2 Effect of void size on the void crushing of the spherical void

3. 기공압착에 대한 공정 변수 영향

기공 압착에 대한 금형 폭 비의 영향을 평가하기 위하여 압하율을 0.15와 0.2로 일정하게 한 후 금형 폭 비가 0.4 ~ 1.2범위에서 변화 될 때 구형 기공에 대한 압착 거동 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 V_0 는 초기 기공의 체적이며, V_f 는 압하 후 기공의 체적이다. Fig. 3과 같이 압하율이 0.15인 경우, 금형 폭 비 0.8이상에서는 더 이상 기공 압착이 진행되지 않으며, 금형 폭 비 1.2인 경우에는 기공 압착효과가 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 압하율이 0.2인 경우에는 0.15인 경우와는 달리 금형 폭 비가 증가함에 따라 기공 압착 효율이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이상으로부터 기공 압착 효율은 금형 폭 비에 따라 증가하지만 압하율에 따라 금형 폭 비에 의한 증가의 효과는 제한됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 압하율에 대한 기공 압착 거동 해석결과로 압하율의 증가에 따라 기공 압착 효율이 증가함을 알 수 있으며 압하율이 클수록 금형 폭 비의 차이에 따른 기공 압착율의 차이가 더 큼을 알 수 있다.

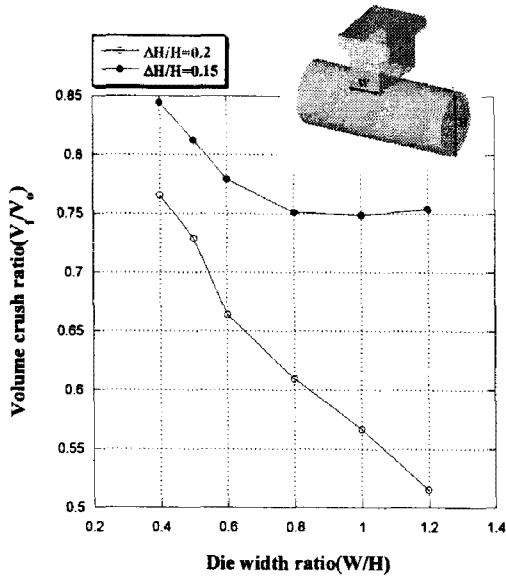


Fig. 3 Variation of void crushing ratio with die width ratio

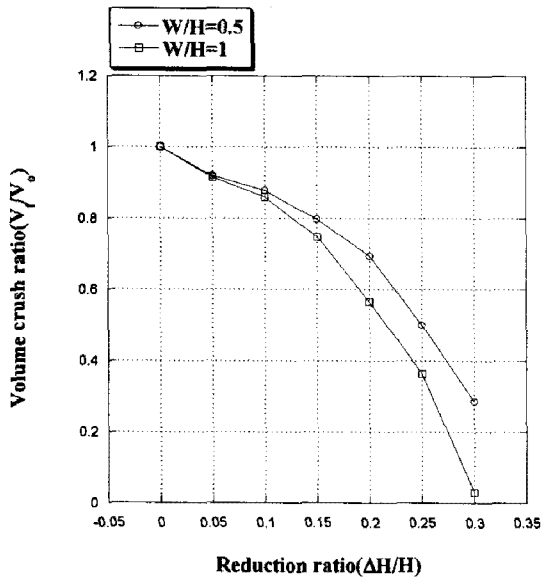


Fig. 4 Variation of void crushing ratio with reduction ratio

기공 압착에 있어서 표면과 중심부의 온도 구배는 기공 압착 효율을 증가시킨다. 표면이 냉각 될 경우 중심부에 비하여 유동응력이 증가하게 되고, 강체영역(dead metal zone)을 확대시켜 금형 압력이 중심부까지 더 잘 전달된다[3]. 본 연구에서는 이러한 온도 구배의 효과를 나타내는 지표로 단조 전 예냉 시간을 선정하였으며, 초기 소재 온도 1200°C에서 예냉 시간을 10 ~ 40분으로 한 경우에 대하여 코킹 공정의 기공 압착에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 5는 예냉 시간의 변화에 따른 구형 기공의 체적 압착비에 대한 해석결과로서 금형 폭 비는 0.5이며, 압하율은 각각 0.15와 0.2인 경우이다. Fig. 5에서 보여주듯이 예냉 시간이 증가함에 따라 체적 압착비가 선형적으로 감소하므로 기공 압착 효율이 증가함을 알 수 있다.

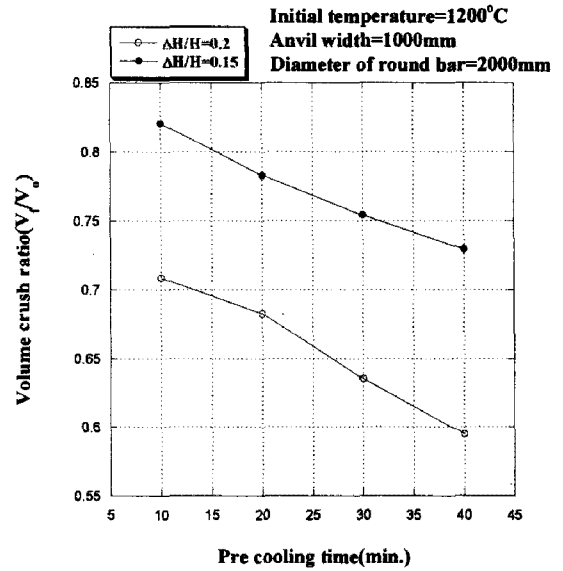


Fig. 5 Variation of void crushing ratio with pre-cooling time

이상과 같이 금형 폭 비, 압하율, 예냉 시간과 같은 코킹 공정의 공정 인자들이 기공 압착에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였으며, 본 연구에서 선정한 3가지 공정 인자는 전반적으로 기공 압착 효과와 비례하므로 각 공정인자를 최대화 할 경우 기공 압착 효과를 극대화 시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 압하율을 증가시킬 경우 패스간 소재의 겹침이 발생 할 수 있고, 예냉 시간이 증가하게 되면 표면 냉각에 따라 균열 발생이 증가하는 등 실제 공정에서는 각 공정 인자 별로 제약이 있다. 따라서, 공정 인자들의 기공 압착에 대한 상대적인 영향력을 평가하여 공정 인자 제어의 우선 순위를 결정하는 것이 필요하다.

4. 공정 인자 제어 우선순위 결정을 위한 다꾸찌 분석

본 연구에서는 다꾸찌 방법(Taguchi method)을 이용하여 3가지 공정 인자들의 기공 압착에 대한 상대적인 영향력을 평가하였다. Table 1은 직교 배열표에 의해 수립된 해석계획이며, 분산분석을 수행하여 주 공정인자를 평가하고자 하였다.

Table 1 Orthogonal array for the void crushing analysis

Factors & levels			Responses
W/H	$\Delta H/H$	Cooling time(min.)	Void crushing ratio(V_f/V_o)
0.5	0.10	10	0.882
0.5	0.15	20	0.783
0.5	0.20	30	0.635
0.8	0.10	20	0.631
0.8	0.15	30	0.596
0.8	0.20	10	0.455
1.0	0.10	30	0.783
1.0	0.15	10	0.686
1.0	0.20	20	0.408

Fig. 6은 Table 1에 대한 분산분석 결과로서 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: S/N ratio)값의 변화가 클수록 해당 공정 인자의 영향력이 크며, 기공 압착은 신호 대 잡음 비의 값이 최대 일 때 극대화 됨을 나타낸다. 참고로 3가지 공정인자가 기공 압착에 미치는 영향력의 합계를 100%로 하였을 때, 각 공정인자가 차지하는 비중을 Fig. 6에 나타내었다.

압하율의 경우 63%로 가장 영향력이 큰 공정인자이며, 단조 전 예냉 시간의 경우 5%로 가장 영향력이 적은 인자이다. Table 1의 해석 범위 내에서 각각의 공정 인자들에 대하여 신호 대 잡음 비의 값이 최대화되어 기공 압착이 극대화 되는 조건은 금형 폭 비(W/H)가 0.8, 압하율($\Delta H/H$)은 0.2 그리고, 예냉 시간 20분이다.

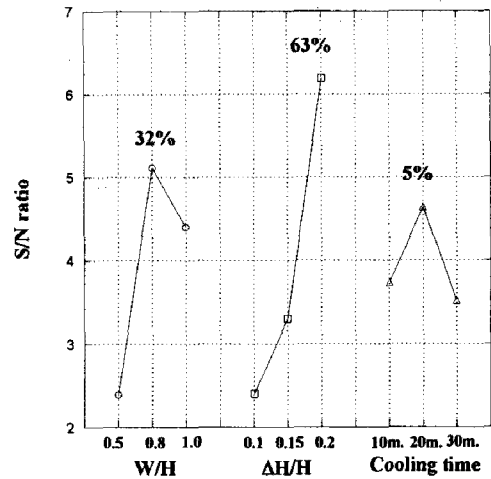


Fig. 6 Signal-to-noise ratio results for the void crushing analysis

5. 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 코킹 공정의 공정 변수 변화에 따른 기공 압착 거동을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기공의 크기에 따른 기공 압착 거동 해석 결과 기공 크기는 기공 압착 거동과 무관하다.
- (2) 코킹 공정의 공정 변수인 금형 폭 비, 압하율, 단조 전 예냉시간이 증가할수록 기공압착효율은 증가한다.
- (3) 금형 폭 비, 압하율, 단조 전 예냉시간 중 기공 압착에 대한 주인자는 압하율이며, 부인자는 영향력이 큰 순서대로 금형 폭 비, 단조 전 예냉 시간이다.

참고 문헌

- [1] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, 박일수, 1992, 대형강괴 업셋팅공정의 기공압착 해석, 대학기 계학회논문집, 제16권, 제10호, pp1877~1889.
- [2] 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.
- [3] 조종래, 김동권, 김영득, 이부윤, 1996, 열간 판재단조시 강괴 내부의 기공폐쇄에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제5권, 제1호, pp. 18~26.