

대형 단조품 코깅 공정의 기공 압착 인자에 대한 연구

송민철[#] · 권일근¹ · 박연규²

A Study on the Parameters Determining the Void Crushing Ratio in the Cogging Process of Large Forged Products

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

(Received May 10, 2007)

Abstract

Effect of the process parameters of the cogging process on the void crushing has been studied in order to identify the most effective factor. The process parameters considered in this study are die width ratio, reduction ratio and pre-cooling time before cogging process. Void crushing analysis with 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 자유 단조로 제작된다. 주조 공정을 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 자유 단조 공정은 업셋팅(upsetting)과 코깅(cogging) 공정으로 자유 단조 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 기공 압착을 완전히 이루어내기에는 금형과 접촉하는 강

체 영역에서 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 금형 형상, 소재 높이에 대한 금형 폭의 비인 금형 폭 비, 압하율, 소재의 냉각 효과 등이 있으며, Park은 상기된 각 공정 변수의 조합에 대한 해석을 통하여 기공 압착에 대한 최적의 조합을 도출한 바 있다[2].

본 연구에서는 3차원 유한 요소 해석을 통하여 코깅 공정의 공정 변수 변화에 따른 기공 압착 거동을 평가하였다. 금형 형상의 경우 현장에서 대부분 평금형을 사용하므로 이를 검토 변수에서

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

제외하고 금형 폭 비, 압하율, 소재의 냉각 효과를 변수로 선정하여 기공 압착에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 실제 현장 조건에서는 각 변수를 변화시키는데 제약이 다르므로 다투찌 방법을 이용하여 해석 결과를 분석함으로써 기공 압착을 위한 코깅 공정 인자 제어의 우선 순위를 정립하고자 하였다.

2. 유한 요소 해석 모델 검증

2.1 모사시험

본 연구의 유한 요소 해석 모델을 검증하기 위하여 모사 시험을 수행하였다. 자유 단조로 제작되는 대형 단조품은 크기가 매우 크기 때문에 실제 제품을 대상으로 기공 압착 거동을 평가하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 본 연구에서는 대형 단조품의 소재인 AISI1045급 강의 1200°C 유동 응력과 유사한 거동을 상온에서 보이는 경납(hard lead)을 사용하여 실제 크기의 1/20로 축소한 모사 시험을 수행하였다. 시편은 Fig. 1과 같이 직경 100mm, 길이 200mm의 원기둥 형태이며, 중앙에 직경 10mm의 구멍을 가공하여 파이프 형태의 기공을 모사하도록 하였다. 실제 기공의 형태는 구(sphere)형이 더 현실적이나 구형 기공을 시편 내부에 가공하는 방법이 어렵기 때문에 파이프 형태로 가정하였다.

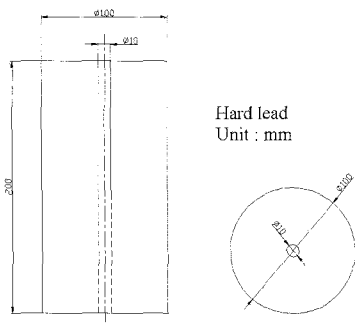


Fig. 1 Dimension of hard lead specimen for cogging simulation experiment

경납을 이용한 모사 시험은 Fig. 2와 같이 시편 단부를 압축하면서 중심부의 기공의 형상 변화를 측정하여 면적의 변화를 구하는 방식으로 이루어졌으며, 이때 적용된 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions used in cogging simulation

Material	Hard lead
Dimension(mm)	Φ100 X L200
Die shape	Flat die, width=50mm
Die speed(mm/sec)	0.5
Friction coefficient	m=0.2(shear model)
Die stroke(mm)	20.2

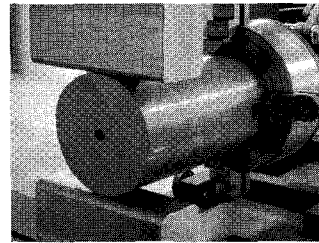
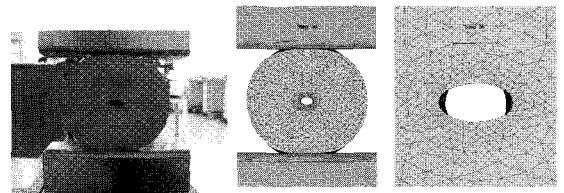


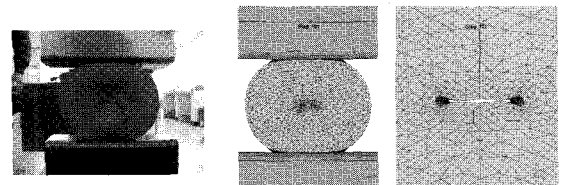
Fig. 2 Photograph of cogging simulation experiment

2.2 모사 시험 결과

Fig. 3은 시편 단부의 기공 형상 변화에 대한 유한 요소 해석과 실험 결과를 비교한 것이다. Fig. 3과 같이 본 연구의 유한 요소 해석 결과는 기공의 형상 변화를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.



(a) Stroke 11.2mm, $\Delta H/H=0.112$



(b) Stroke 20.2mm, $\Delta H/H=0.202$

Fig. 3 Comparison of the change of void shapes obtained by experiment and FE analysis

Fig. 4는 모사 시험 결과와 유한 요소 해석 결과의 기공 면적압착율($\Delta A/A_0$)을 비교하여 도시한 것

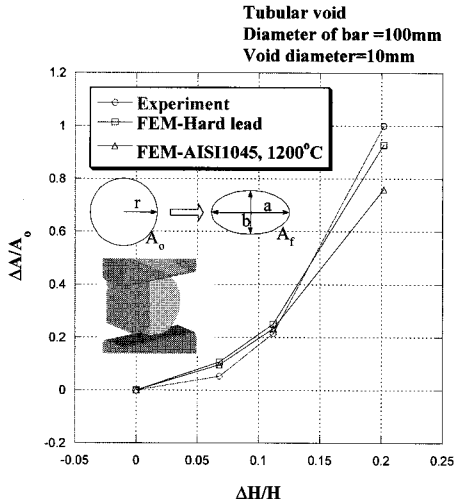


Fig. 4 Comparison of the area crush ratio($\Delta A/A_0$) between experiment and FE analysis using hard lead and AISI1045 at 1200°C flow stress

이다. 여기서 유한 요소 해석의 경우 유동응력을 경납과 1200 °C AISI1045급 강으로 변화시켜 가며 해석을 수행하여 경납의 실제 고온 소재 압착 거동의 모사 여부를 함께 평가하고자 하였다. Fig. 4 에서와 같이 경납을 이용한 모사 시험 결과는 압하율($\Delta H/H$) 0.2에서 기공이 완전 압착 되지만, 1200 °C AISI1045급 강의 유동응력을 이용하면 해석한 경우의 면적압착율은 다소 낮음을 알 수 있다. 그러나, 모사 시험과 동일 재료의 유동 응력을 이용하는 경우 전반적인 압하율에 따른 기공 압착 거동에 대한 모사 시험 결과와 유한 요소 해석 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

이는 본 연구에 사용된 유한 요소 해석 모델이 타당함을 의미한다. 그러나, 경납을 사용한 이러한 검증방법은 소재의 온도변화를 고려할 수 없는 단점이 있다. 실제 코킹 공정은 고온의 소재가 상온의 대기 중에 노출되어 냉각되면서 작업이 이루어 진다. 따라서, 본 연구에서는 기공의 압착 거동과 별도로 소재의 온도 변화에 대한 유한 요소 해석 모델의 검증을 수행하였다.

2.3 열 전달 해석 모델의 검증

열 전달 해석 모델을 검증하기 위해서 Fig. 5와 같이 실제 작업 현장에서 1250°C로 가열된 소재를 공냉시키면서 비접촉식 온도계를 사용하여 소재 표면의 온도를 측정하였다. Fig. 6은 본 연구에서 사용된 열 전달 해석 모델의 해석 결과와 실

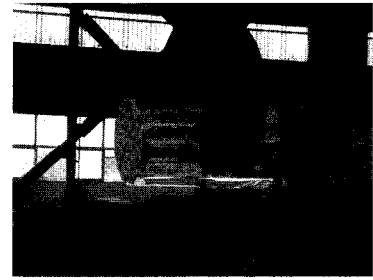


Fig. 5 Photograph of material in air cooling

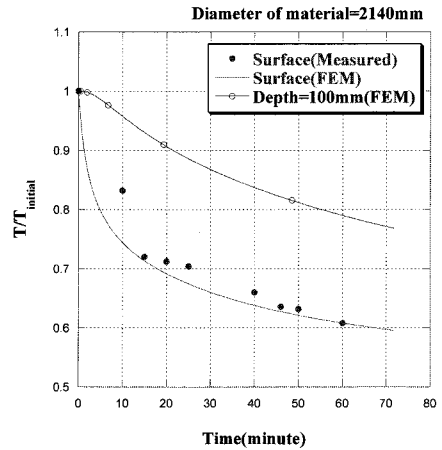
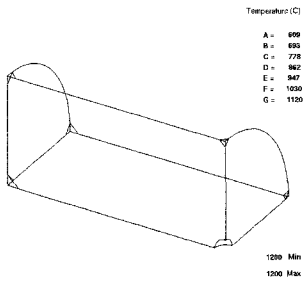


Fig. 6 Comparison of temperature variation of round bar heated at 1250°C in air cooling

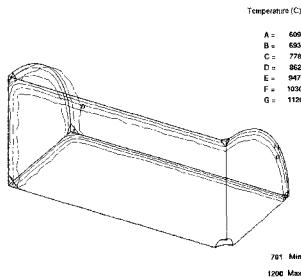
제 작업 현장에서 측정된 소재 표면의 측정 결과를 비교한 것으로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같이 본 연구에서 수립한 열 전달 해석 모델은 실제 온도를 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있으며, Fig. 7은 이러한 열 전달 해석 모델을 사용하여 초기 온도 1200°C로 가열된 직경 2000mm의 소재를 공기 중에서 10~30분까지 냉각시켰을 때, 소재의 온도 분포를 보여주는 해석결과이다.

3. 공정변수 및 기공크기 영향 평가

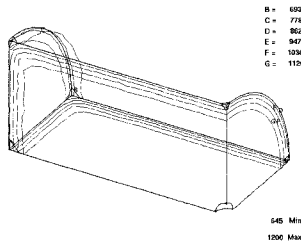
Fig. 8은 코킹 공정 및 본 연구에서 공정 변수로 선정된 금형 폭 비와 압하율의 정의를 나타낸 것이다. Fig. 8과 같이 금형 폭 비는 압하 전 소재 높이(H)에 대한 금형 폭(W)의 비이며, 압하율은 압하 전 소재 높이에 대한 압하량(ΔH)의 비로 정의하였다. 금형은 평금형을 사용하였고, 소재의 형상은 환봉 형상이다. 본 연구에서 고려하고자 한



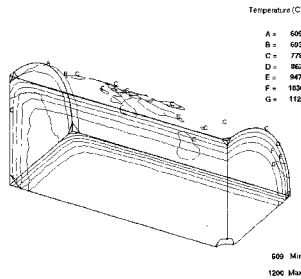
(a) Initial condition, 1200°C



(b) After 10 minute



(c) After 20 minute



(d) After 30 minute

Fig. 7 Temperature distribution of material heated at 1200°C in air cooling

소재의 냉각효과는 예냉시간 즉, 1200°C 상태에서 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 관리되고 소재의 크기가 매우

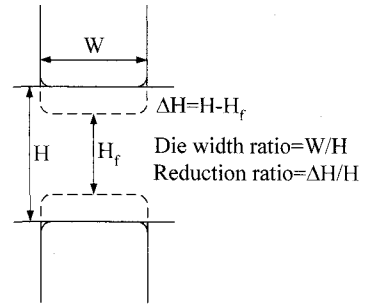


Fig. 8 Definition of process parameters

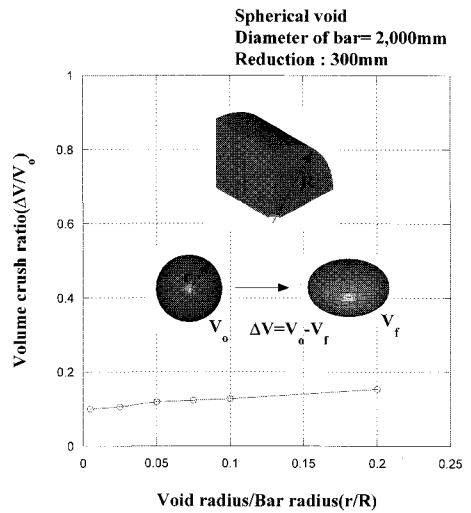


Fig. 9 Effect of void size on the void crushing of the spherical void in cogging process

커서 형상 변화가 표면과 심부의 온도 분포에 미치는 영향이 작기 때문에 예냉 시간을 온도 분포의 지표로 사용하는 것이 공정 관리측면에서 편리하기 때문이다.

기공은 소재의 중심부에 존재하는 것으로 가정하였으며, 기공의 형태는 파이프 형태로 가정된 모사 시험과 달리 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 10~400mm까지 변화시켰다. 단조 후 기공의 압착율은 초기 기공 체적(V_0)에 대한 기공 체적의 감소량(ΔV)의 비로 정의하였다.

Fig. 9는 구형 기공의 크기 변화에 따른 기공 압착율($\Delta V/V_0$)에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 V_0 는 초기 기공의 체적이며, ΔV 는 압하

에 의하여 기공 체적의 감소량이다. Fig. 9와 같이 기공 압착율($\Delta V/V_0$)은 기공 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 10~400mm까지 40배의 기공 크기 차이에 비하여 기공 압착율($\Delta V/V_0$)의 차이는 0.1에서 0.15로 0.05정도로 매우 작다. 이는 추후 기공 압착측면에서 단조 공정 평가 시 기공 크기에 상관없이 기공 압착 정도를 평가할 수 있음을 의미하는 것이다.

4. 기공압착에 대한 공정 변수 영향

기공 압착에 대한 금형 폭 비(W/H)의 영향을 평가하기 위하여 압하율($\Delta H/H$)을 0.15와 0.2로 일정하게 한 후 금형 폭 비(W/H)가 0.4~1.2범위에서 변화 될 때 구형 기공에 대한 압착 거동 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10과 같이 압하율($\Delta H/H$)이 0.15인 경우, 금형 폭 비(W/H) 0.8이상에서는 더 이상 기공 압착이 진행되지 않으며, 금형 폭 비(W/H) 1.2인 경우에는 기공 압착효과가 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 압하율($\Delta H/H$)이 0.2인 경우에는 0.15인 경우와는 달리 금형 폭 비(W/H)가 증가함에 따라 기공 압착율($\Delta V/V_0$)이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이상으로부터 기공 압착율($\Delta V/V_0$)은 금형 폭 비(W/H)에 따라 증가하지만 압하율($\Delta H/H$)에 따라 금형 폭 비에(W/H) 의한 기공 압착율($\Delta V/V_0$) 증가 효과는 제한됨을 알 수 있다. Fig. 11은 압하율($\Delta H/H$)에 대한 기공 압착 거동 해석 결과이다. Fig. 11과 같이 압하율($\Delta H/H$)이 증가함에 따라 기공 압착율($\Delta V/V_0$)이 증가함을 알 수 있으며 압하율($\Delta H/H$)이 클수록 금형 폭 비(W/H)의 차이에 따른 기공 압착율($\Delta V/V_0$)의 차이 또한 증가함을 알 수 있다. 기존의 연구 결과에 의하면 기공 압착에 있어서 표면과 중심부의 온도 구배는 기공 압착율($\Delta V/V_0$)을 증가시키는 것으로 알려져 있다[3]. 이는 표면이 냉각 될 경우 중심부에 비하여 유동응력이 증가함으로써 강체영역(dead metal zone)이 확대되어 금형 압력이 중심부까지 더 잘 전달되기 때문이다. 이에 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. 12는 예냉 시간의 변화에 따른 구형 기공의 기공 압착율($\Delta V/V_0$)에 대한 해석결과로서 금형 폭 비(W/H)는

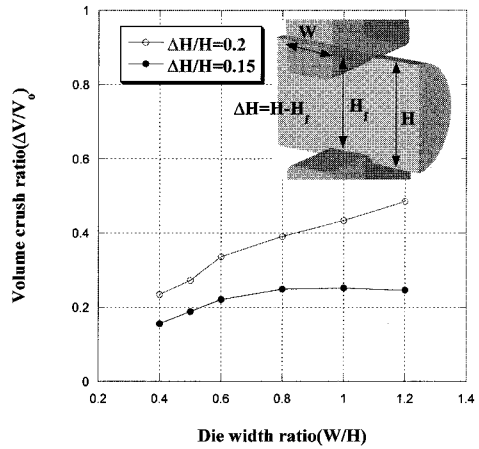


Fig.10 Variation of void crushing ratio with die width ratio

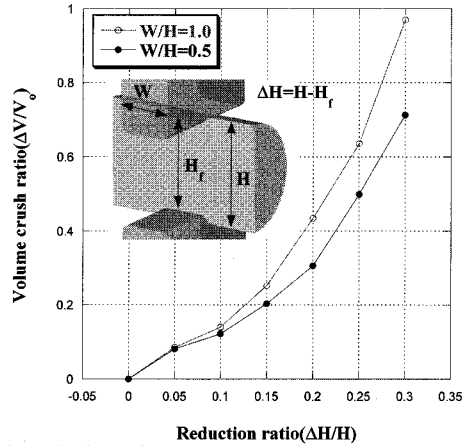


Fig.11 Variation of void crushing ratio with reduction ratio

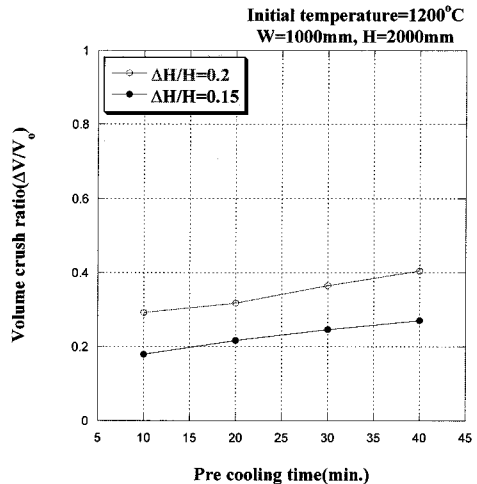


Fig. 12 Variation of void crushing ratio with pre-cooling time

0.5이며, 압하율($\Delta H/H$)은 각각 0.15와 0.2인 경우이다. Fig. 12에서 보여주듯이 예냉 시간이 증가함에 따라 기공 압착율($\Delta V/V_0$)이 증가함을 알 수 있다.

이상과 같이 금형 폭 비(W/H), 압하율($\Delta H/H$), 예냉 시간과 같은 코킹 공정의 공정 인자들이 기공 압착에 미치는 영향에 대한 평가 결과, 본 연구에서 선정한 3가지 공정 인자는 모두 기공 압착율($\Delta V/V_0$)과 비례하므로 각 공정인자를 최대화할 경우 기공 압착 효과를 극대화 시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 압하율($\Delta H/H$)을 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.

5. 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 2는 실험계획법에 의해 수립된 해석계획이며, 분산분석을 수행하여 주 공정인자를 평가하고자 하였다.

Fig. 13은 Table 2에 대한 분산분석 결과를 나타낸 것으로 Fig. 13에서 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: S/N ratio)값의 변화가 클수록 해당 공정 인자가 기공 압착에 미치는 영향력이 증가하며, 신호 대 잡음 비의 값이 최대 일 때 기공 압착율

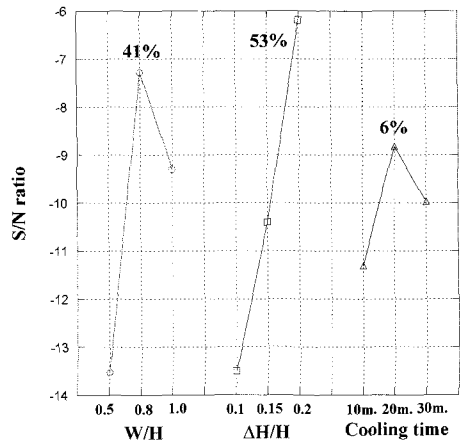


Fig.13 Signal-to-noise ratio as a function of process parameters

($\Delta V/V_0$)이 극대화 됨을 의미한다. Fig. 13의 결과는 3가지 공정인자가 기공 압착에 미치는 영향력의 합계를 100%로 하였을 때, 각 공정인자가 차지하는 비중이다.

Fig. 13과 같이 압하율($\Delta H/H$)의 경우 53%로 가장 영향력이 큰 공정인자이며, 단조 전 예냉 시간의 경우 6%로 가장 영향력이 적은 인자임을 알 수 있다. Table 2의 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.

6. 결론

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

- (1) 대형 단조품의 코킹공정에 대하여 3차원 유한 요소 해석 모델을 수립하였으며, 수립된 해석 모델은 모사 시험 및 실제 대형 단조품의 온도 측정을 통하여 타당성이 검증되었다.
- (2) 기공의 크기에 따른 기공 압착 거동 해석결과 초기 기공 크기의 차가 기공 압착률의 거동에 미치는 영향은 미미하다.
- (3) 코킹 공정의 공정 변수인 금형 폭 비(W/H), 압하율($\Delta H/H$), 단조 전 예냉시간이 증가할수록 기공압착율($\Delta V/V_0$)은 증가한다.
- (4) 본 연구에서 사용한 각 공정 변수의 범위 내에서 금형 폭 비(W/H), 압하율($\Delta H/H$), 단조 전

Table 2 Orthogonal array for the determination of the principal factor

Factors & levels			Responses
W/H	$\Delta H/H$	Cooling time(min.)	Void crushing ratio($\Delta V/V_0$)
0.5	0.10	10	0.118
0.5	0.15	20	0.217
0.5	0.20	30	0.365
0.8	0.10	20	0.369
0.8	0.15	30	0.404
0.8	0.20	10	0.545
1.0	0.10	30	0.217
1.0	0.15	10	0.314
1.0	0.20	20	0.592

예냉시간 중 기공 압착에 대한 주인자는 압하율 ($\Delta H/H$)이며, 부인자는 영향력이 큰 순서대로 금형 폭 비(W/H), 단조 전 예냉시간이다.

참 고 문 헌

- [1] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, 박일수, 1992, 대형강괴 업셋팅공정의 기공압착 해석, 대학기
- [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.