

대형인곳의 업셋-블룸단조에서의 기공 압착 거동 예측

권일근* · 김경훈* · 윤영철* · 송민철*

Prediction of Void Crushing Behavior in Upset & Bloom Forging of Large Ingot

I.K. Kwon, K.H. Kim, Y.C. Youn, M.C. Song

Abstract

This paper deals with void crushing behavior by ingot forging process which consists of sequential operations of upset forging and bloom forging. The predicted results of void crushing behavior by the simplified global-local method using F.E. analysis showed that the inherent void at the top region of the ingots remains incompletely crushed even after several forging operations. From the results of the hot upset forging test using the billets with drilled voids, it was found that the bonding efficiency of the void after forging process increases with an increase in deformation, and a decrease of initial diameter of voids.

Key Words Ingot Forging, Void Crushing, F.E Analysis, Forging Test

1. 서론

고강도를 요구하는 선박용 대형 엔진의 축계 부품은 주물 상태의 인곳을 자유 단조 공정을 통하여 단련(Forging) 및 성형(Shaping)하여 제작한다. 인곳 단조의 단련효과는 주물 상태인 인곳에 고온 상태에서 변형에너지를 가하여 주조 조직을 제거하고 기지재에 변형을 가하여 내재하는 기공을 압착하여 제거하는 것을 들 수 있다. 단조 공정이 올바르게 못하면 최종 단조품에 주물 상태의 주조조직과 미압착 기공 등의 결합이 존재하여 부품의 강도특성을 저하시키게 된다. 특히, 단조품 내에 남아 있는 미압착 기공은 부품의 작동 시 응력 집중 요소로 작용하여 부품의 조기 파손의 원인이 된다.

인곳의 기공압착에 대한 기존의 연구 사례는

업셋단조나 블룸단조 등 개별 단조 작업에서의 기공 압착 거동에 국한되어 있다[1]. 실제 대형 부품의 인곳 단조 공정은 업셋단조와 블룸단조를 수 차례 반복하는 연속적인 작업으로 이루어지므로 기존의 연구 결과로는 실제 인곳 단조 공정에서의 기공 압착 거동을 평가하기가 어렵다. 본 연구에서는 업셋단조 및 블룸단조 작업이 반복적인 가해지는 대형 크랭크스로우의 인곳 단조 공정에서 있어서 축변형률을 매개변수로 하는 Global-local 접근법을 도입하여 인곳의 각 부위별 기공압착 거동을 예측하였다. 또한, 압착된 기공의 본딩 특성을 규명하기 위하여 드릴링 가공으로 기공을 부여한 빌렛에 대해 기공 압착 시험을 수행하여 업셋단조 공정에서 압하율과 기공의 크기에 따른 기공의 접합효율을 평가하였다.

* 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소

2. 인곳 단조의 기공압착 거동 예측

2.1 기공압착 거동 예측 방법

본 연구에서는 업셋단조와 블룸단조의 반복에 의해서 이루어지는 실제 인곳 단조 공정에서의 소재 각 부위별 기공압착 거동을 예측하기 위하여 Global-local 해석법을 이용하였다. Global-local 해석법은 인곳 단조 공정을 그대로 해석하는 전체해석(Global analysis)과 기공을 포함한 균질변형 단순화 모델을 이용하여 기공 주위를 해석하는 국부해석(Local analysis)으로 이루어진다(Fig. 1).

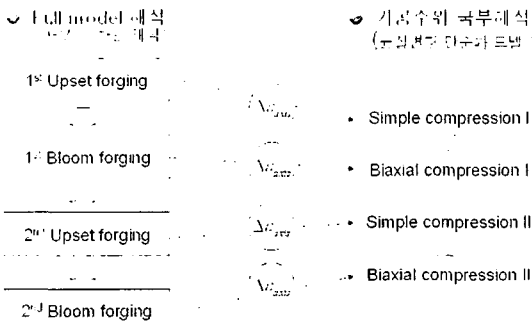


Fig. 1 Flow chart of global-local approach

Global-local 해석법은 먼저 실제 모델에 대한 인곳 단조 공정에 대해 3차원 유한요소해석을 수행하고 기공 압착 거동을 예측하고자 하는 위치의 단조 작업별 단조축 변형률을 추출하고 이렇게 추출된 단조축 변형률 값을 Fig. 2와 같은 균질변형 단순화 모델의 경계조건인 압하율로 환산하여 대입하여 단순화 모델 내에서의 기공압착 거동을 예측한다. 균질변형 단순화 모델의 장점은 단순히 다이의 압하량을 조절하는 것으로 소재내에 원하는 단조비나 단조축 변형률을 손쉽게 구현할 수 있다는 것이다.

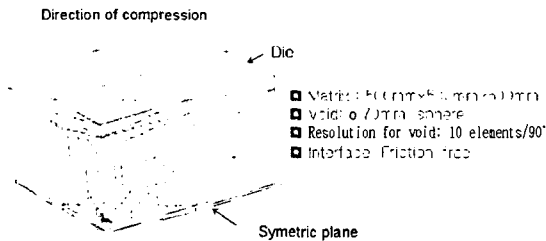


Fig. 2 Simplified model for local analysis

따라서, 본 연구에서는 기공의 포함한 균질변형

단순화 모델에 전체 해석으로부터 얻어진 개별 단조 작업에서의 소재 부위별 단조축 변형률 변화량을 구현하도록 다이의 압하량을 조절하여 기공의 압착거동을 평가하였다.

2.2 기공압착 거동 해석 결과

2.2.1 전체해석 결과

대형 크랭크스로우의 자유 단조 과정 중에 1차 업셋단조, 1차 블룸단조, 2차 업셋단조, 2차 블룸단조에 대하여 기공압착 거동을 예측하기 위하여 먼저 Fig. 3과 같이 전체해석을 수행하였다. 업셋단조에서는 작업지시서의 높이감소와 동일한 압하량을 가하였으며 블룸단조에서는 소재에 8번의 패스가공을 가하여 실제 단조작업과 거의 유사하게 모사해석을 수행하였다.

Table 1은 전체해석으로부터 얻어진 인곳 내부의 각 위치(Fig. 4)별 단조축 변형률을 나타낸 것이다. 단조 작업별로 살펴보면 업셋단조에서는 인곳의 상하부는 거의 0에 가까운 값을 가지는 반면 중앙부는 0.7이상의 매우 높은 값을 가진다. 업셋단조와 마찬가지로 블룸단조에도 위치별로 단조축 변형률 값이 어느 정도 차이를 보이지만 업셋단조의 경우보다는 그 편차가 작게 나타났다.

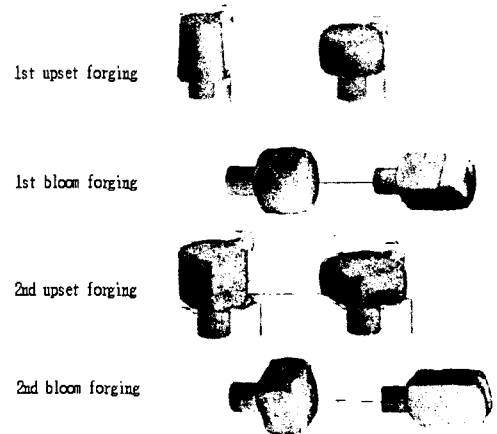


Fig. 3 Global analysis of ingot forging

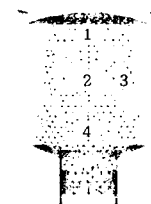


Fig. 4 Locations for inspection

Table 1 Strain of forging axis

#	1st Upset	1st Bloom	2nd Upset	2nd Bloom	Forging ratio
①	0.054	0.265	0.058	0.365	1.9S
②	0.768	0.56	1.165	0.653	3.4S
③	0.529	0.582	0.667	0.901	4.4S
④	0.0054	0.265	0.058	0.567	2.3S

2.2.2 국부해석 결과

전체해석에서 얻어진 단조축 변형률 변화값을 균질변형 단순화 모델의 경계조건으로 대입하여 국부해석을 수행한 결과 Fig. 5와 같이 연속 단조 공정에서의 소재 부위별 기공압착 거동을 얻을 수 있었다.

Fig. 5의 ②와 같이 인곳의 중앙에 존재하는 직경 70mm의 기공은 1차 업셋단조에서 완전히 압착되었다. Fig. 5의 ③과 같이 인곳의 측면에 위치하는 기공은 1차 업셋단조에서 0.529의 단조축 변형률로(Table 1 참조) 장축과 단축의 길이가 각각 110mm, 6.6mm인 얇은 원반 형상으로 압착되고 이어지는 1차 블룸단조에서 얇은 원반 형상의 기공은 단조축에 방향으로 다소 연신되지만 2차 업셋단조 초반부에 완전히 압착되었다. 그러나, Fig. 5의 (과 같이 인곳의 상부에 위치하는 기공은 1차 업셋단조에서 단조축 변형률 0.054로써 거의 압착이 일어나지 않았으며 1차 블룸단조에서 단조축 방향으로 변형을 받아 단조축을 장축으로 하는 럭비공 모양의 타원구로 변형되었다. 그리고, 2차 업셋팅에서도 인곳의 상부의 기공은 거의 변형을 받지 않고 2차 블룸단조에서 다시 단조축 방향으로 연신되어 거의 파이프 형상에 가깝게 변형된다. 인곳의 하부 역시 상부와 유사한 단조축 변형률 분포를 가지므로 기공의 압착 거동 역시 유사하다고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 인곳 상부 및 하부에 존재하는 기공은 두 번의 업셋단조-블룸단조공정을 거쳐도 완전 압착되지 않으며 초기 구형 기공보다 표면적이 65%정도 감소한 파이프 형상의 기공으로 잔존하게 됨을 알 수 있다. 이는 대형 단조품에서 황삭가공 시 상하부 표면에서 빈번하게 관찰되는 단조축 방향으로 길쭉한 형상의 기공성 결함과 유사하다.

앞의 예측결과를 비추어 볼 때 대형 단조품의 기공성 결함의 발생을 줄이기 위해서는 인

곳 주조 과정에서 기포가 포집되는 것을 억제하거나 단조 후 끝단부를 적정량 제거 하는 것이 필요하다.

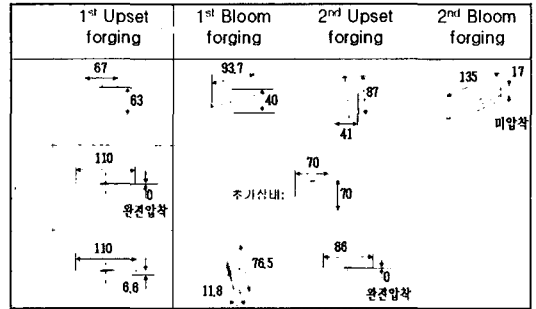


Fig. 5 Results of void crushing analysis

3. 기공 압착 시험

인곳 단조에서의 압착된 기공의 접합은 고온, 고압에 놓인 금속표면간의 확산접합기구 및 소재 표면의 소성 변형 효과가 복합적으로 작용하여 일어난다[2].

본 연구에서는 압착 기공의 접합 효율에 영향을 미치는 주요 인자를 업셋단조 공정에서의 압하율과 기공의 직경으로 두고 그 영향을 규명하기 위하여 다양한 조건 하에 기공 압착 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 시험에 사용된 $\phi 150\text{mm} \times 450\text{mm}$ 규격의 기공 압착 시험을 위한 빌렛 가공도를 나타낸다. 그림과 같이 원통형 빌렛의 측면에 드릴링 작업을 통하여 인위적으로 파이프 형상의 기공을 만들고 가열 중 외기의 유입을 방지하기 위하여 그 입구 부위를 압축 Glass wool로 밀폐하였다. 기공의 직경이 접합효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표면으로부터의 깊이가 120mm이며 직경(ϕ)이 7, 10 그리고 14mm인 기공을 90°간격으로 가공하였으며 압하율의 영향을 파악하기 위하여 업셋단조 시험시 두 개의 동일한 빌렛에 대하여 각각 45%와 55%의 압하율을 부여하였다. 사용한 시편의 재질은 HF601이며 1200°C 가열온도로 가열하여 압축한 후 노멀라이징 및 템퍼링 열처리를 수행하였다. 인장시편의 평형부 직경과 게이지 길이는 각각 $\phi 10$ 과 50mm이며 인장시편의 평형부의 중앙 단면 전체가 압착기공의 접합부가 되도록 시편을 채취하였다.

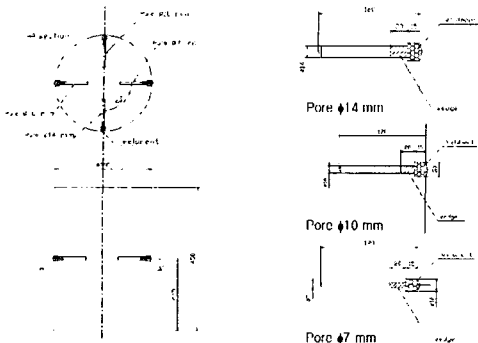


Fig. 6 Billet with drilled voids

Fig. 7은 압착기공 접합부의 미세조직 관찰 사진을 나타낸다. 압착된 기공은 접합면 상에 미접합 부위 없이 완전히 접합되었으며 접합면을 따라 폭이 약 100 μ m인 띠모양의 접합영향부가 관찰되었다. 접합영향부는 펄라이트가 주를 이루는 모재와 달리 페라이트가 주를 이루므로 접합부의 강도는 모재의 강도보다 낮을 것이라고 짐작할 수 있다.

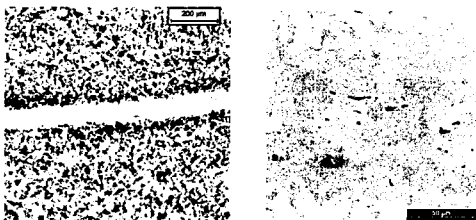


Fig. 7 Microstructure of bonded zone

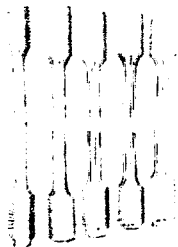


Fig. 8 Tensile tested specimens(first one from the left: regular specimen)

Fig. 8은 인장 시험에서 시편 중앙부의 파단 모양을 나타낸다. 모재 부 시편이 45° 방향으로 파단된 것에 비해 나머지 기공 접합부에서 채취한 시편은 접합면을 따라 파단되었다. Table 2의 인장시험 결과를 살펴보면 접합부의 강도가

모재의 강도보다 낮음을 알 수 있다. 압착 기공의 접합효율을 기공접합부 시편의 인장강도와 모재의 인장강도의 백분율로 나타낼 경우 시편의 접합효율은 50~88%로 나타났다. 또한, 기공의 직경이 작을수록 접합효율이 높으며 동일한 크기의 기공일 경우 압하율이 높을수록 접합효율이 높은 것으로 나타났다.

Table 2 Result of tensile test and bond efficiency

Specimen No.	σ _{UTS} (MPa)	σ _{UTS} (%)	η (%)	σ _{UTS} (100%)
1	1060	100	100	100
2	1040	98	100	100
3	1020	96	100	100
4	1000	94	100	100
5	980	92	100	100
6	960	90	100	100
7	940	88	100	100
8	920	86	100	100
9	900	84	100	100
10	880	82	100	100
11	860	80	100	100
12	840	78	100	100
13	820	76	100	100
14	800	74	100	100
15	780	72	100	100
16	760	70	100	100
17	740	68	100	100
18	720	66	100	100
19	700	64	100	100
20	680	62	100	100
21	660	60	100	100
22	640	58	100	100
23	620	56	100	100
24	600	54	100	100
25	580	52	100	100
26	560	50	100	100
27	540	48	100	100
28	520	46	100	100
29	500	44	100	100
30	480	42	100	100
31	460	40	100	100
32	440	38	100	100
33	420	36	100	100
34	400	34	100	100
35	380	32	100	100
36	360	30	100	100
37	340	28	100	100
38	320	26	100	100
39	300	24	100	100
40	280	22	100	100
41	260	20	100	100
42	240	18	100	100
43	220	16	100	100
44	200	14	100	100
45	180	12	100	100
46	160	10	100	100
47	140	8	100	100
48	120	6	100	100
49	100	4	100	100
50	80	2	100	100

4. 결론

대형 인곳의 업셋-블룸단조에서의 기공압착 거동 및 접합강도를 유한요소해석 및 고온 업셋단조 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인곳 상·하부의 기공은 두 차례의 업셋 단조 -블룸단조 작업을 거친 후에도 파이프 형상의 미압착 기공으로 남게 되며 기공 결합의 발생을 방지하기 위해서는 인곳 품질 관리 및 끝단부 제거 등의 적절한 대책에 요구된다.

(2) 압착 기공의 접합강도는 모재의 강도보다 낮으며 기공의 직경이 작을수록 증가하고 동일한 크기의 기공일 경우 압하율이 높을수록 증가한다.

참고 문헌

- (1) Tanaka, S. Ono, M. Tsuneno, and T. Iwadate, "An Analysis of Void Crushing during Flat Die Free Forging, Advanced Technology of Plasticity", vol. II, pp. 1035-1042.
- (2) C. Y. Park, D. Y. Yang, "A Study of Void Crushing in Large Forgings I: Bonding Mechanism and Estimation Model for Bonding Efficiency", Journal of Materials Processing Technology 57, pp. 129-140, 1996.