

주단조품의 기공형태에 따른 기공압착거동에 관한 연구

이영선^{1#}, 권용남¹, 이정환¹, 이승욱², 김남수²

FE-Analysis on void closure behavior during hot open die forging process

Y.S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, S. W. Lee, N. S. Kim

Abstract

The studies for internal void closure have been conducted experimentally and numerically for open die forging. The FEM analysis is performed to investigate the deformation behavior of some internal voids in cast ingots during two upsetting stages. The calculated results of void closure behavior are compared with the measured results before and after upsetting. The shapes and sizes of each internal void are scanned by the X-ray scanner. From this result, the criteria for deformation amounts effect on the void closure can be investigated by the types of void. Closed voids could be compressed and eliminated after forging when the applied deformation amounts were larger than the critical effective strains. On the other hand, open voids could not be compressed and removed.

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Ingot(강괴), Open die forging(자유단조), Void(기공)

1. 서론

최근들어 대형 자유단조품의 수요가 선박산업과 풍력산업의 급속한 발전으로 인해 급증하고 있어 열간자유단조품의 생산성 및 품질향상에 대한 관심이 증대되고 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

단강품을 제조하기 위한 열간자유단조 공정은 1)주조조직을 제거하고, 2)주조 과정에서 흔히 발생하는 내부기공을 압착시켜 제거하며, 3)편석을 소멸시키면서 4)최종 제품의 형상에 가깝게 만드는 것이 공정의 주요한 목적이다. 열간자유단조 공정은 대형단조품을 제조하는데 많이 이용되며 공정변수의 자유도가 형단조에 비해 상대적으로 높기 때문에 단조품의 형상부여 조차 공정설계의 최적화가 곤란하며 크기효과로 인해 다양한 실험적 연구를 통한 공정변경이 용이하지 않

다. 그러므로, 대부분 신기술 개발보다는 오래전부터 사용되고 있는 관습적 기술에 의존도가 높은 실정이다.

대형 자유단조공정기술에 대한 요구는 오래전부터 지속되어 왔으나 크기(대형)효과로 인해 공정변수에 대한 영향분석과 최적화는 아직도 진행중이라 하겠다.[1-5]

기공압착에 대한 연구 또한 유한요소해석의 발전과 함께 변형거동에 대한 예측과 공정변수의 영향에 대한 연구가 진행되었다.[6-10] Im[6]등은 유효변형율이 정수압응력에 비해 기공압착을 예측하는데 좋은 척도이며 V-다이(die)가 평다이(Flat die)보다 중심부 기공의 압착에 더 효과적임을 해석을 통해 입증하였으며, Moon[8]등은 단조피치, 금형폭, 금형형상(코너 반경, 측면부 경사각)이 기공압착율에 미치는 영향에 대해 분석

1. 회원, 한국기계연구원 부설 재료연구소

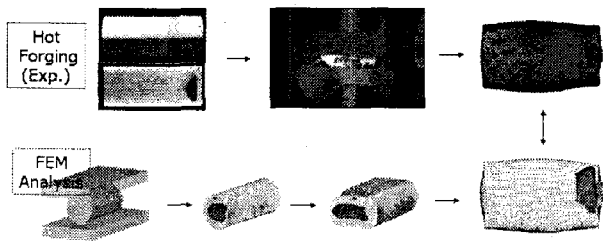
2. 창원 특수강주 기술연구소

교신저자: 이영선, lys1668@kmail.kimm.re.kr

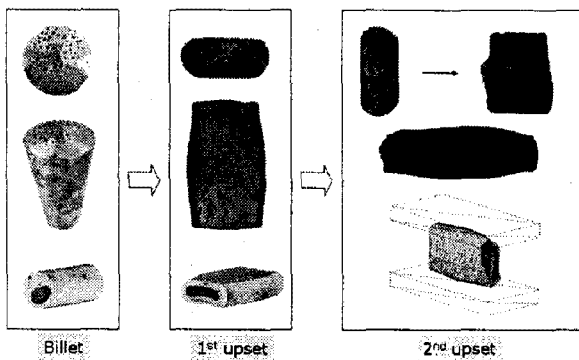
TEL : (055)280-3522 FAX : (055)280-3393

하였으며, Bae[9]등은 초대형 단조품의 기공압착에 대한 유한요소해석을 통해 업세팅시 내부기공 크기가 기공압착효과에 영향을 미치고 업세팅시 미변형부(DMZ)는 후공정인 코깅공정에서 단조효과를 부가해야 함을 분석하였다. 또한, Lee[10]등은 내부에 존재하는 기공을 X-ray분석을 통해 실측하고 소성변형에 의한 압착거동을 모델실험과 유한요소해석을 통해 비교 분석함으로써 기공압착시 변화되는 정수압응력과 유효변형율에 대한 정량적 분석을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 주조잉곳 내부에 존재하는 기공의 형태에 따른 기공압착거동의 영향을 분석하기 위해 2 단계의 업세팅 공정 시 기공압착에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 단조 전과 후의 기공 형상 및 치수는 X-ray Scanner를 통해 μm 단위까지 분석하였다. 1차 업세팅 전후의 내부기공에 대한 분석은 참고문헌[10]에서 기술한 바 있으며 2차 실험과 본 연구의 흐름은 Fig.1에 나타내었다.



(a) 1st upsetting procedure



(b) 2nd upsetting procedure

Fig.1 Experimental and FEM analysis procedure for two upsetting process

2. 기공형태에 따른 기공압착 유형분석

잉곳 내부에 존재하는 기공은 잉곳의 크기와 주조/응고 조건 등에 따라 그 크기와 형상이 서로 상이하게 존재한다. 따라서, 내부 기공의 압축거동에 대한 분석이 일반화 되기 위해서는 기공의 종류에 따른 압착형태에 대한 분석이 필요하다. Fig. 2는 1차와 2차에 걸친 업세팅 공정시 원소재에서 부터 업세팅후의 내부 기공의 변화에 대한 일례를 보여주고 있다. 사진에서 알 수 있듯이 소재 내부에 존재하는 기공은 그 크기와 형상이 매우 다양하다. 또한 기하학적인 형상뿐만 아니라 표면의 산화유무에 따라서도 압착거동에 대한 반응이 서로 동일하지 않게된다.

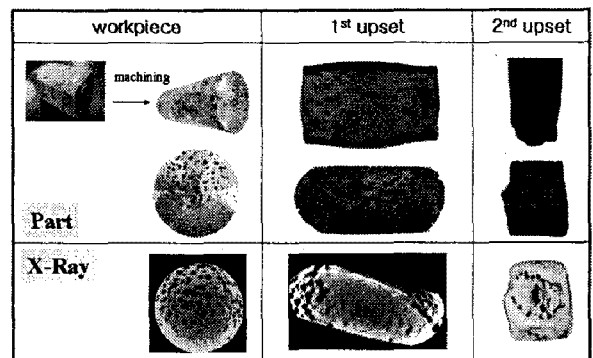


Fig.2 Deformation behavior of void during two upsetting process

소재표면에 존재하는 기공은 기공 표면에 대기와의 접촉에 의한 산화막이 존재하게 되며 압착거동에 영향을 미치게 될 것이다. 마찬가지로 내부에 존재하는 기공 또한 표면에서부터 연결된 기공(계 기공, Open Void)과 연결되지 않고 폐쇄되어 있는 기공(폐 기공, Closed Void)으로 구분할 수 있다. 계 기공은 내부에 존재하고는 있지만 기공표면에 산화막이 형성되어 있을 것이기 때문에 내부에 존재하더라도 표면에 존재하고 있는 기공과 동일한 거동을 할 것으로 판단된다.

기공형태에 따른 내부기공의 압착거동에 대한 유형을 분석하기 위해 Table 1과 같이 4가지 경우에 대해 내부기공의 거동을 분류한 후 압축 전후의 X-ray 사진을 분석하여 계기공과 폐기공의 압착거동에 대한 유형을 비교하였다.

Table 1. Various cases of void deformation behavior according to the void forms during two upsetting process.

Case No.	Workpiece	1 st upset	2 nd upset	present
Case 1	Closed void	VC	VC	O
		VC	VO	-
Case 2	“	VO	VO	O
Case 3	Open void	VC	VC	-
		VC	VO	-
Case 4	“	VO	VO	O

(VC : Void Closed, VO : Void Opened, O : present)

크게 4가지 유형으로 구분하여 분석한 기공 유형별 압착거동의 형태는 다음과 같다.

● Case 1 ; 폐기공/1차단조시 압착

내구 기공 가운데 폐기공으로 1차 단조시 임계 변형율 이상으로 소성변형이 발생되어 기공이 압착된 경우는 90도 회전 후 2차 압축 후에도 기공은 압착된 상태를 유지함으로써 기공제거가 가능 [Fig. 3]

폐기공으로 1차 단조시 압착 후 2차 단조 후 기공이 다시 재 생성된 경우는 관찰되지 않았음.

● Case 2 ; 폐기공/1차단조시 미압착

내구 기공 가운데 폐기공으로 1차 단조시 임계 변형율 이하로 소성변형이 발생되어 기공이 압착되지 않은 경우, 2차 압축 후에도 임계변형율 이상으로 변형되지 않을 경우 기공압착은 불가함. [Fig. 4]

● Case 3 ; 계기공/1차단조시 압착

원소재 내구기공 가운데 계기공으로 존재하고 있는 기공은 1차 단조시부터 2차에 걸쳐 압착되지 않고 있음.

● Case 4 ; 계기공/1차단조시 미압착

내구 기공 가운데 폐기공으로 1차 단조시 미압착된 기공은 2차 단조 후에도 미압착됨. [Fig. 5]

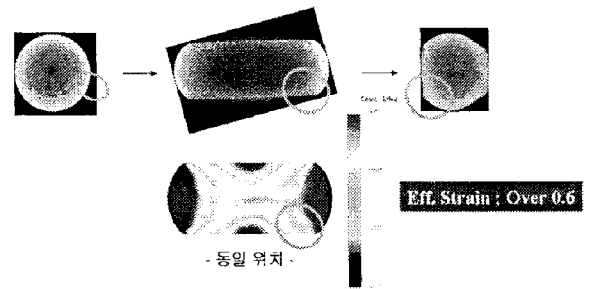


Fig.3 Deformation behavior of closed void [case 1]

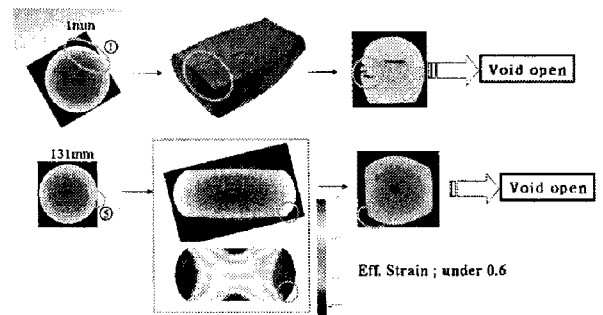


Fig.4 Deformation behavior of closed void [case 2]

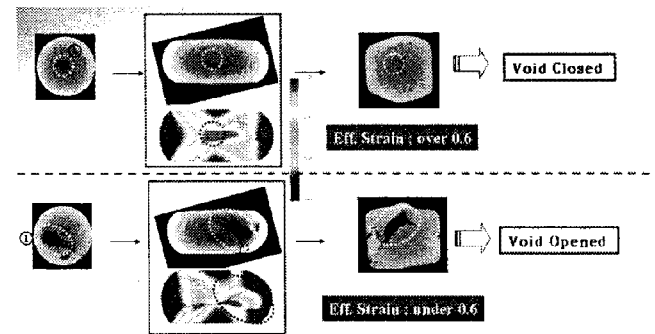


Fig.5 Deformation behavior of open void [case 3]

2차례의 업세팅 가공과 X-ray 분석결과에 의하면 Fig. 3, 4, 5에서 알 수 있듯이 폐기공의 경우는 임계변형량 이상의 압착이 가해지면 기공이 폐쇄되어 내부기공의 제거가 가능함을 알 수 있다. 임계변형량은 유효변형율과 정수압응력을 비교한 참고문헌[10]에 나타나 있는 바와 같이 유효변형율을 기준으로 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있으며 참고문헌[6]의 결과와도 같은 경향이다.

그림 6은 1차 단조시 압착된 부위와 미압착된 부위의 정수압응력변화와 동일 시편에 대한 2차 단조시 정수압응력과 유효변형율 변화를 나타내

는 그래프로서 1차단조시에 압착된 부위는 2차단조시에 소성유동이 일어나고 있음으로 알 수 있다. 따라서, 임계변형율의 지수로서 유효변형율 0.6의 의미를 더욱더 높여주고 있다.

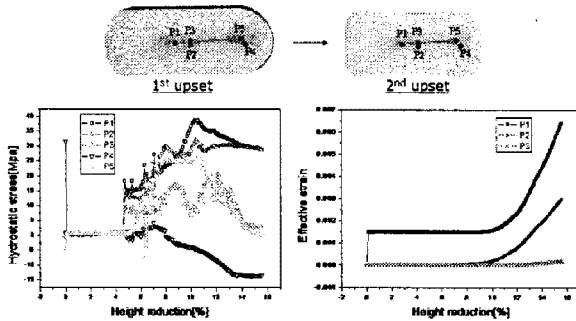


Fig.6 Hydrostatic stress and effective strain after 2nd upsetting

3. 결론

본 연구에서 주조 후 단강품에 존재하는 내부 기공압착 거동에 대해 기공형태의 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 내부 기공형태에 따라 계기공과 폐기공은 서로 다른 압착거동을 나타내고 있어, 폐기공의 경우는 임계 변형 이상에서 기공압착과 제거가 가능함을, 계기공은 소성변형에 의해 압착이 불가능함을 알 수 있었다.

(2) 폐기공의 경우에도 임계 변형량 이하에서는 압착되지 않는 기공이 지속적으로 남게되어 결함으로 잔존할 수 있었다.

(3) 임계변형량으로 제시된 유효변형율은 현재까지 연구결과로서는 0.6이상을 제시할 수 있으며 향후 보다 일반적인 기준값 설정을 위하여 연구가 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] S.P. Dudra and Y.T. IM, 1990, "Investigation fo metal flow in open-die forging with different die and billet geometries", J. of Materals Processing Technology, Vol. 21, pp.143~154.
- [2] Kiefer. B.V, and Shah. K.N, 1991, "Three dimensional simulation of open-die press forging", ASME Trans. J. of Eng. Mat. and Tech, Vol. 112, pp.477~485.
- [3] Yang. D.Y, Choi. Y and Kim. J.H, 1991, "Analysis of upset forging of cylindrical billet considering the dissimilar frictional conditions at two flat die surfaces", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No 3, pp397~404.
- [4] K.Tamura, J. Tajima, 2000, "Optimisation of open die forging condition and tool design", Ironmaking Steelmaking, Vol.30, No.5, pp.405~412
- [5] S.K. Choi, M.S. Chun, C.J. Van Tyne, Y.H. Moon, 2006, "Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis", J. of Materials Processing Technology", Vol.172, pp.88~95
- [6] S.P. Dudra and Y.T. IM, 1990, "Analysis of void closure in open-die forging", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.30, No.1, pp.65-75
- [7] C.Y. Park, J.R. Cho, D.Y. Yang, D.J. Kim and I.S. park, 1992, "Analysis of void Closure in the Upsetting Process of Large-Ingot",
- [8] M.S. Chun, J.S. Ryu, Y.H. Moon, 2004, "FEM analysis of void closure behavior during open die forging of rectangular billets", Trans. of Materials Processing, Vol.13, No.2, pp.148~153
- [9] Y.D. Kim, D.K. Kim, D.Y. Kim, W.B. Bae, 2006, "Analysis of inner void behavior in ultra large forgings", Proc. of KSTP Fall Annual Meeting, pp396~399.
- [10] Y.S. Lee, Y.C. Kwon, Y.N. Kwon, J.H. Lee, S.U. Lee, N.S. Kim, 2007, "Analysis on void closure behavior during hot open die forging", Advanced Materials Research, Vol.26, No. 28, pp.69~72