

사각 빌렛 자유단조시 내부기공폐쇄거동 유한요소해석

천명식** · 류종수* · 문영훈*
(2003년 11월 18일 접수)

FEM Analysis of Void Closure Behavior during Open Die Forging of Rectangular Billets

M. S. Chun, J. S. Ryu and Y. H. Moon

Abstract

Finite element analysis of open die forging process to make rectangular billet has been performed in this study. Three dimensional rigid-plastic finite element method was used to analyze the effects of process variables, forging pass design and die configurations on the void closure phenomena to maximize the internal deformation for better structural homogeneity and center-line consolidation of the rectangular billet. The effect of anvil width ratio, anvil pitch, anvil shape and number of pass has been estimated by the degree of void closure ratio. Although it is difficult to optimize process parameters in the operational environments, favourable process conditions are suggested for better product quality.

Key Words : Finite Element Method, Open Die Forging, Rectangular Billet, Void Closure Ratio

1. 서론

열간자유단조공정(hot open die forging process)은 대형이거나 비교적 단순형상의 제품을 간단한 다 이 시스템을 이용하여 열간에서 제조하는 공정으로서 발전설비나 제철설비의 모터축, 터빈축, 압연기 보강롤, 전단기 등이 주로 이러한 공정을 통해 만들어 진다.⁽¹⁻³⁾ 열간자유단조를 위한 대형잉곳(ingot)은 잉곳을 만드는 주조과정에서 불가피하게 형성되는 중심부 기공이 최종 단조품의 내질 불량을 야기할 수 있으므로, 주조과정 중 발생하는 기공은 단조공정시 압착시켜 기공을 제거하는 것이 무엇보다도 중요하다. 대형잉곳 내부의 기공은 단조공정중 많은 가공변수에 의해 압착거동에

영향을 받게 되는데, 단조설비 측면에서 살펴보면 기본적으로는 대폭압하를 실시하여 큰 소성변형을 줄 수 있는 대용량의 프레스가 필요하며 앤빌 금형(anvil, 또는 die)의 모양, 금형의 종류(평형, V형, V형의 경우, 경사각) 및 금형 폭 등을 들 수 있고 조업측면에서 살펴보면 소재의 온도관리, 단조순서, 단조방법, 압하스케줄관리 등이 기공압착에 중요하게 작용하는 요소이다.⁽⁴⁻⁸⁾

단조공정은 우선 잉곳에서 사각단면형상과 팔각단면형상의 중간과정을 거쳐 최종적으로 원형 단면형상을 갖는 환봉으로 제조되는데 최종 제품까지 다단계의 복잡한 공정을 거치게 되므로 특정 단위공정이 기공압착특면에서 효과적인지 여부를 실험으로 규명하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기공압착효과가 큰 사각

* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터
** 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀

단면형상의 빌렛 단조공정을 대상으로 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 이용하여 금형조건, 단조조건 및 단조방법에 따른 내부기공의 압착거동을 분석하고자 한다.

2. 사각 빌렛 자유단조 공정개요

사각 빌렛의 자유단조 도식도를 Fig. 1에 나타내었다. 빌렛의 한쪽 끝을 조정장치(manipulator)를 이용하여 빌렛의 위치를 조정하고 또 상하 및 좌우방향으로 회전해서 빌렛과 금형과의 접촉할 부분을 결정하고 금형을 이용하여 반복적으로 단조하여 최종 제품을 생산한다.

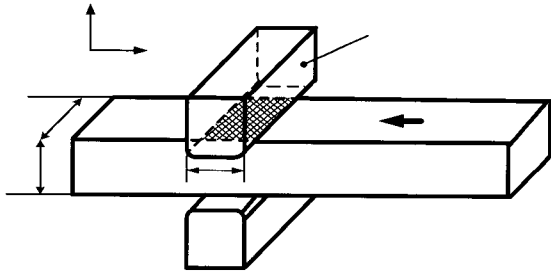


Fig. 1 Open die forging of rectangular billet

본 연구에 사용된 소재는 SKD61 이며 유동응력을 계산하기 위한 유동식은 다음과 같으며 Table 1에 SKD61의 대표물성치를 나타내었다.

$$K_m = (0.009128 \epsilon^{0.14294}) \exp\left(\frac{10052}{T}\right) \text{kg/mm}^2$$

Table 1 Materials properties for SKD61

Thermal conductivity	24.3~24.7 W/m·k
Heat capacity	3.588 N/mm ² °C
Thermal transfer coefficient	0.004 N/sec·mm °C
Shear friction coefficient	0.3
Temperature	1000 °C

Fig. 2는 사각빌렛 단조공정에 사용한 기공의 모양을 나타낸 도식도이다. 여기서 a₀, b₀, c₀는 각각 기공의 폭, 높이, 길이를 의미한다.

기공의 형태는 실린더형 기공으로 크기는 직경 12mm, 길이 60mm로 가정하였다. 사각빌렛 단조해

석은 1 패스 압하를 실시한 후 90° 회전하여 2 패스 압하한 경우까지 시뮬레이션을 하였으며 압하 위치는 중앙부만을 실시하였다. 사각빌렛 단조 해석에 사용한 소재 및 표준치수는 Table 2와 같다.

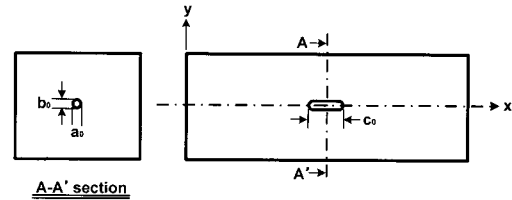


Fig. 2 Schematic drawing of 'simulative void' for the analyses

Table 2 Test conditions

Size of billet	Number of void	Shape of void	Number of pass
200~780mm	1	12*60 (cylinder type)	1~2

Fig. 3에는 3차원 해석에 대한 유한요소 초기격자를 530x530mm 사각빌렛의 예들들어 나타내었는데 삼차원 hexahedron요소를 사용하였고 mesh수는 50730를 적용하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 엔빌 금형을 나타낸다.

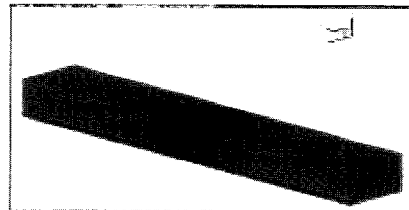


Fig. 3 Initial mesh of rectangular billet for 530 x 530mm

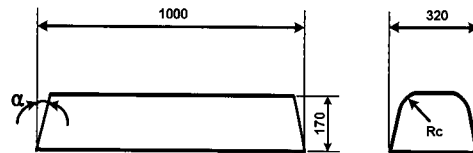
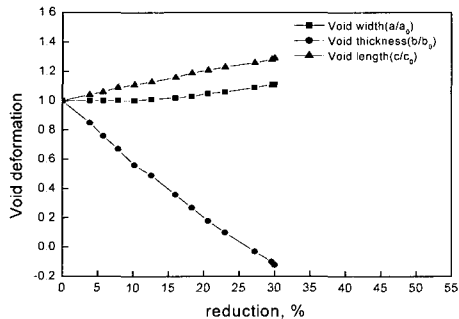


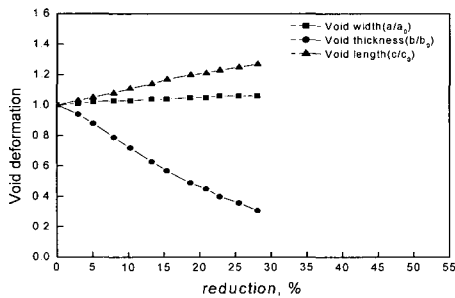
Fig. 4 Schematic drawing of anvil

3. 자유단조 해석 결과

3.1 기공 변형거동



(a)



(b)

Fig. 5 The dimensional variation of void after 15% red-uction for (a) 300x300mm and (b) 530x530mm rectangular billets

사각빌렛을 30% 압하한 후의 기공주변의 변형 형상을 300x300mm와 530x530mm에 대해 기공의 압착거동을 해석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 압하율에 따라서 기공의 두께방향 및 길이방향 변위가 크게 증가하는 반면에 폭방향으로는 상대적으로 변위량이 작다. 즉 두께압하시 재료가 대부분 길이방향으로 연신되고 폭방향으로는 상대적으로 소성변형량이 작기 때문으로 판단된다. 530x530mm의 해석결과도 300x300mm의 결과와 변형형상은 거의 동일하지만, 250x250mm와 다른 점은 530x530mm의 경우 소재두께가 크므로 중심부에 미치는 소성변형의 크기가 250x250mm 보다 상대적으로 작아서 기공압착율이 감소한다.

3.2 금형폭 비

Fig. 6은 사각빌렛의 크기를 200x200~780x780mm 까지 1 패스 압하한 후의 기공의 압착정도를 기공압착률(Void closure ratio)로 나타낸 결과이다.

기공압착률은 초기 체적에 대해 줄어든 기공의 체적비를 의미한다. 금형폭 비(에빌 폭/사각빌렛 높이)가 큰 조건에서 기공의 압착능력이 우수함을 알 수 있다. 300x300mm 이하의 경우는 압하율이 30% 이내에서 모두 기공 닫힘현상이 일어나고 그 이상의 조건에서는 소재의 초기두께조건에 따라서 많은 차이를 보인다. 즉 소형강괴에 대한 기공결함은 통상의 단조공정으로 완전압착이 가능하다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 금형폭 비에 따라서 기공의 단면적변화율을 나타낸 것이다. 금형폭 비가 증가할수록 기공압착율이 증가하는데 금형폭 비가 0.7~0.8 이상의 조건에서는 압하량이 증가하여도 기공압착율은 일정하다. 즉, 금형폭 비가 0.8 이상이고 25% 압하량의 경우에 기공의 압착효과가 없으므로 이 조건내에서 기공압착율을 최대로 하는 압하량을 결정해야 한다.

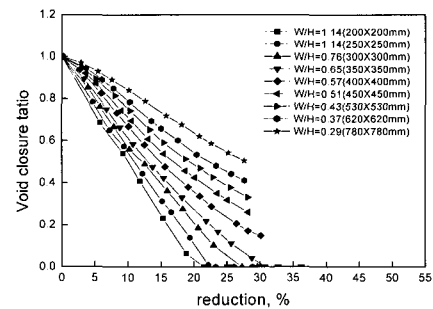


Fig. 6 The void closure ratio with reduction at various billet sizes

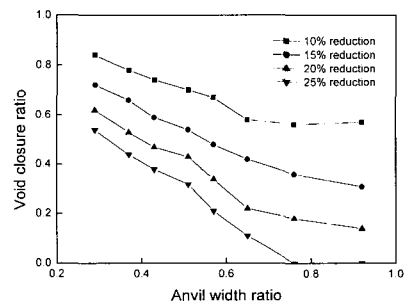


Fig. 7 The void closure ratio at various anvil width ratios

3.3 압하패스 수

Fig. 8은 300x300mm와 780x780mm 조건에 대해서 Fig. 9에 보인바와 같이 1 패스 압하한 후 다시 90도 회전한 상태에서 2 패스 압하한 경우의 기공의 압착상태를 평가한 것이다.

여기서, 1 패스 압하의 경우는 초기 소재조건의 두께방향의 압하량을 의미하고 2 패스 압하의 경우는 초기 소재조건의 폭방향 압하량을 의미한다. 1 패스 압하량이 작을수록 2 패스 압하량을 증가시키면 기공압착율은 급격히 증가한다. 또한가지 중요한 사실은 1 패스 압하량을 증가하여 기공압착율을 크게 하였다 하더라도 이를 회전하여 폭방향으로 압하를 실시하면 압하량이 증가하여도 기공압착율은 크게 감소하지 않으며 사각빌렛 소재의 크기에 관계없이 비슷한 경향을 보인다. 이러한 현상은 패스당 압하량을 과대하게 부여하면 폭퍼짐량이 증가하여 차기패스 금형폭비를 작게 하는 요인이 되므로 기공압착율을 감소시킨다. 따라서 적절한 금형폭비를 유지하면서 1 패스 압하량을 증가시켜야 한다.

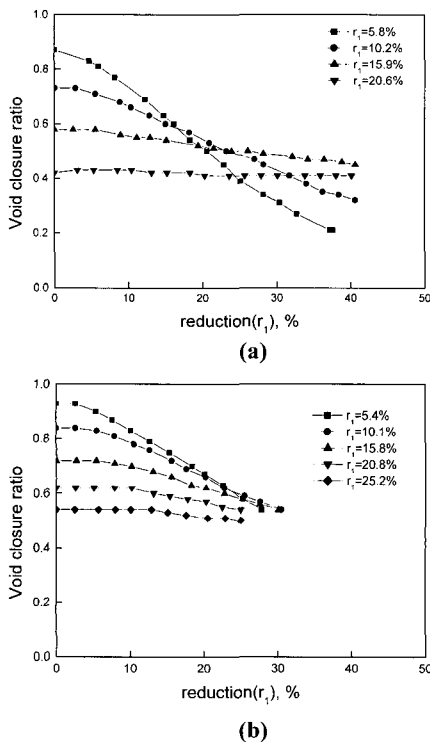


Fig. 8 The void closure ratio after second pass reduction at various first pass reduction (a) 300x300mm and (b) 780x780mm

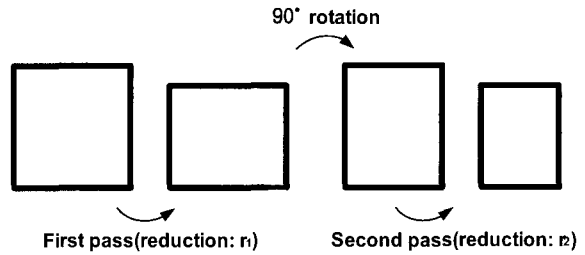


Fig. 9 Pass series for the forging of rectangular billet

3.4 단조피치

단조피치가 기공의 압착정도에 미치는 영향을 알아보기 위해 단조피치별 시뮬레이션을 실시하였다. 기공의 형태는 실린더형으로 가정하였으며 초기 1 회 압하를 제외하고는 Table 3에 제시한 단조피치(금형이동거리)를 사용하였다.

Table 3 Test conditions

Size of billet	Shape of void	Reduction per pass	Pitch	Width
500x530 mm	Φ12 hollow	20%	160, 240, 320mm	320 mm

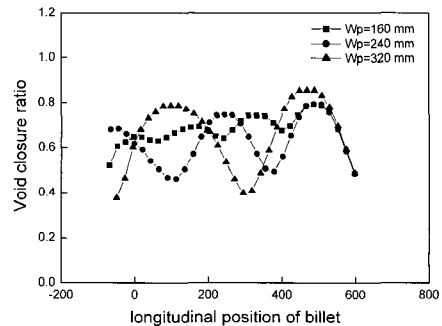


Fig. 10 The void closure ratio at various anvil pitches

Fig. 10은 20% 압하한 후 사각빌렛의 위치별 기공의 단면적변화를 나타낸 것이다.

결과에서 보듯이 단조피치가 작을수록 압착능

력이 감소함을 알 수 있다. 단조피치가 크면 금형과 소재간의 접촉면적이 증가하여 변형영역을 크게 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 단조피치가 금형의 폭과 동일하면 피치와 피치간의 재료의 겹침부(overlap)가 발생하여 표면품질을 손상시키는 부가적인 문제점이 발생한다. 따라서 적정한 단조피치는 금형폭의 치수보다는 작은 금형폭의 0.8배 정도인 250mm 근방에서 사용하는 것이 효과적이다.

3.5 금형의 형상

금형의 형상에 따라서 기공압착율이나 금형측면부 재료의 변형상태를 알아 보기 평균형조건에서 Fig. 4에 나타낸 금형하단 측면부의 라운드 값(Rc)과 금형경사각을 변화시킨 해석조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Test conditions

Size of billet	Reduction per pass	Shape Of void	Corner Roundness (R _c)	Inclination angle(α)
530x530 Mm	35%	12*60 (cylinder type)	50, 70, 100mm	0, 3, 5, 7, 10

그 결과를 Fig. 11와 Fig. 12에 나타내었다. 라운드 값이 작으면 기공압착율이 저하함을 알 수 있는데 이와 반대로 단조하중은 금형과 소재간의 접촉면적이 증가하므로 다소 증가하게 된다.

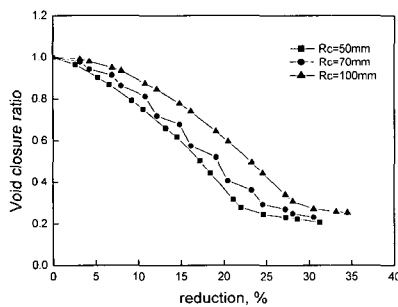


Fig. 11 The void closure ratio at various corner radii

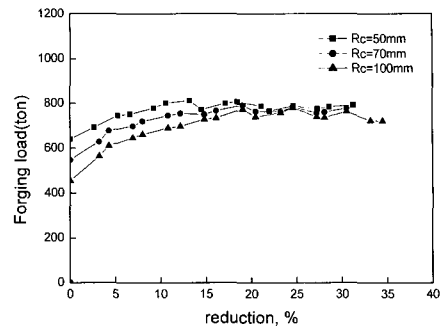


Fig. 12 The forging load at various corner radii

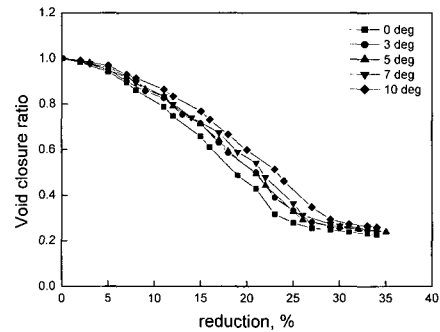


Fig. 13 The void closure ratio at various inclination angles

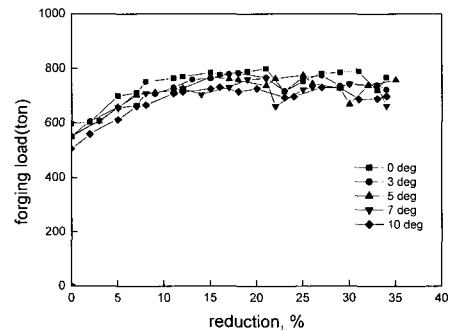


Fig. 14 The forgine load at various inclination angles

Fig. 13과 Fig. 14는 금형경사각에 따라 기공의 압착율과 단조하중의 결과를 나타내었다. 소재규격 530x530mm, 압하율 30% 조건에서 금형측면부의 경사각에 따른 변형거동은 경사각이 증가함에

따라 기공 압착율은 증가하였으며 단조하중은 감소하는 경향을 보였다.

4. 결론

주조공정에서 발생한 기공이 단조공정에서 미압착된 상태로 존재하게 되면 단조품의 내질불량을 발생하게 되므로 본 연구에서는 이를 개선할 목적으로 사각 빌렛 자유단조공정에 대한 유한요소해석을 통해서 단조공정 변수별 기공의 압착거동을 조사하였으며 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 1 패스 단조후 90도 회전하여 2 패스 압연을 하는 경우, 1패스 압연량이 작을수록 2 패스 압연의 기공압착효율이 증가한다.
- (2) 단조피치는 금형폭 320mm 보다 작은 금형폭의 0.8배 크기로 관리하는 것이 기공압착율 측면에서 효율적이며 금형폭 비를 고려한 최대 압하량 조건에서 패스스케줄을 설계해야 한다.
- (3) 기공압착율을 최대로 할 수 있는 이상적인 금형폭 비(=입측두께/금형 폭)는 0.7~0.8 범위이며 이를 초과하여 압하하는 경우는 추가적인 기공압착을 기대할 수 없다.
- (4) 금형 코너부 라운드가 작을 수록 또는 금형 측면부의 경사각이 클수록 기공압착율이 증가한다.

참 고 문 헌

(1) M. Tanaka, S. Ono and M. Tsuneno, 1986, "Factors Contributing to Crushing of Voids during Forging",

Journal of the JSTP, Vol.27, No.306, pp. 852~859.
 (2) K. Nakajima, K. Watanabe, S. Watanabe and K. Nakajima, 1982, "Characteristics of Closing and Consolidation of Central Cavity in Hot Steel", Journal of the JSTP, Vol.23, No.256, pp. 403~409.
 (3) M. Tanaka, S. Ono and M. Tsuneno, 1987, "A Numerical Analysis on Void Crushing during Side Compression of Round Bar by Flat Dies", Journal of the JSTP, Vol.28, No.314, pp. 238~244.
 (4) W. Zutang and R. Heng, 1993, "Investigation of the mechanism of void closing and optimization of forming procedure for large forging", Advanced Technology of Plasticity, Proc. 4thICTP, pp. 1181~1186.
 (5) C. Y. Park and D. Y. Yang, 1997, "A Study of void crushing in large forging: II-Estimation of bonding efficiency by finite element analysis", J. Materials Processing Technology, 72, 1997, pp. 32~41.
 (6) 조종래, 김동권, 이부윤, 양동열, 1995, "평다이를 사용하는 자유 단조 공정의 최적 단조 조건에 관한 연구", 한국소성가공학회지 제 4 권 제 2 호, pp. 141~150.
 (7) J. R. Cho, W. B. Bae, Y. H. Kim, S. S. Choi, D. K. Kim, 1998, "Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modelling method", Journal of Materials Processing Technology 80~81, pp. 161~165.
 (8) Joseph P. Domblesky, Rajiv Shivpuri, 1995, "Development and validation of a finite-element model for multiple-pass radial forging", J. of Materials Processing Tech. 55, pp. 432~441.