

기공닫힘부 폐쇄정도 결정을 위한 평가방법 연구

최익준^{1,2} · 최호준² · 윤덕재² · 이근안² · 임성주[#]

Evaluation methods for Void Closing Behavior in Large Ingot

I. J. Choi, H. J. Choi, D. J. Yoon, G. A. Lee, S. J. Lim

(Received March 30, 2011 / Revised July 12, 2011 / Accepted July 12, 2011)

Abstract

This paper presents methods for analyzing the extent of cylindrical-shaped void closure. In addition, a quantitative relationship between change in void fraction and height reduction ratio of a compressed specimen is proposed. The height reduction ratio, number of deformation steps and billet rotation were chosen as key process parameters influencing the void closing behavior, namely, the changes in void shape and size during hot open die forging of a large ingot. The extent of void closure was analyzed from microscopic observations and estimated from tensile test results. The tensile strengths of specimens with closed voids and those without were compared for various reduction ratios in height. The results confirmed that void closure occurs at reduction ratios greater than 30 %. The void closing behavior could be expressed as a hyperbolic tangent function of reduction ratio in height, number of paths, and billet rotation. The knowledge presented in this paper could be helpful for optimizing deformation paths in open die forging processes.

Key Words : Hot Open Die Forging, Void Closing, Reduction Ratio in Height, Tensile Strength

1. 서 론

대형 축류품이나 로터 등 대형 부품을 제조하는 경우 원소재인 대형 잉곳(ingot)은 대부분 주조 공정에 의해 생산된다. 이러한 잉곳 제조 시 주형에 주입된 용탕은 냉각이 진행되면서 표면 및 주형의 계면에서 열의 방출과 동시에 응고가 진행된다. 응고과정 중 잉곳의 형상과 부위별 냉각 온도 편차에 의하여 체적 수축과 함께 부분적으로 다양한 형태의 기공이 발생하게 된다. 발생된 기공은 주조공정의 대표적인 결함이며 최종 제품으로 사용하기에는 부적합한 원인이 되므로 최소화 하거나 폐쇄하는 것이 필요하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 업셋팅(upsetting) 및 코깅(cogging)과 같은 단련공정이 진행되고 있다. 단

련공정의 주요 공정변수로는 상·하 금형 형상, 잉곳의 직경에 대한 높이 비, 압하 속도, 압하 깊이, 온도 분포 등을 예로 들 수 있다[1~3].

최근 선박, 풍력 산업 등 관련 부품의 대형화에 따른 자유단조품의 수요가 급증함에 따라 이와 관련된 기공압착(void closure)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 대부분 2 차원 모델에 한정되어 적용하고 있어 실제 산업 현장에 적용하기에는 한계가 있다[4~6].

본 논문에서는 대형 잉곳의 기공압착 효과 향상을 위한 폐쇄조건 연구[6] 자료를 바탕으로 패스 스케줄(path schedule)에 따른 연구를 수행하였으며, 그 결과 기공의 압착 및 폐쇄 조건을 예측할 수 있고 보다 정밀한 폐쇄정도 검증을 위한 실험을 수행하였다. 또한 기존의 전자현미경을

1. 인하대학교 대학원 금속공학과

2. 한국생산기술연구원

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail: lim@kitech.re.kr

사용하여 기공의 직접적인 관찰과 함께 인장시험을 통한 단련부위와의 단합 강도를 비교 분석하였으며, 이를 통하여 기공의 폐쇄 여부를 증명할 수 있었다.

또한 이와 같은 결과를 바탕으로 하이퍼볼릭탄젠트 (hyper-bolic tangent) 함수를 이용하여 패스 스케줄 관련 변수에 따른 폐쇄 정도를 도시하였으며 제한적이거나 실제 산업현장에서 효과적인 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 패스 스케줄에 따른 기공거동 분석

2.1 실험방법

대형 잉곳의 기공압착 효과 향상을 위한 폐쇄 조건 연구[6]의 결과를 바탕으로 초기 기공비율 8%, 압하율 30% 이상의 기공 단합조건에서 기공이 폐쇄 되는 현상을 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 사용한 잉곳 소재는 탄소강으로 직경 50mm, 길이 200mm이며 기공비율(void ratio)은 단조 시편의 초기 직경에 대한 기공크기의 비율을 나타낸다[6]. 여기에서 압하율은 펀치가 내려오는 방향에서의

소재 높이 변화율로 정의한다. 물론 소재를 90° 회전시켰을 때에도 펀치가 내려오는 방향에서 압하율을 그대로 적용하였고, 180° 회전에 대해서도 마찬가지로의 정의를 사용하였다.

단련 공정변수로는 초기 기공비율을 8%로 하고 Table 1에 나타낸 바와 같이 각각의 압하율을 적용하였다. 본 실험에서 임의로 가공한 기공의 위치는 소재의 중심에 위치토록 하였으며[6], 이는 금형폭 비(W/H, W: 소재의 길이방향의 금형 폭, H: 소재 높이)가 일정 값 이상으로 크게 되면 소재의 중심부에 가장 많은 변형률을 부가할 수 있기 때문이다[7]. 본 논문에서 사용한 금형폭 비는 0.8이다.

Table 1 Process parameters in hot open die forging

Parameters	Values		
Temperature (°C)	1,250		
Void ratio (%)	8		
Rotation angle (°)	0	90	180
Reduction ratio in height (%)	15, 20, 25, 30, 40, 45	10, 20, 30	10, 20, 30

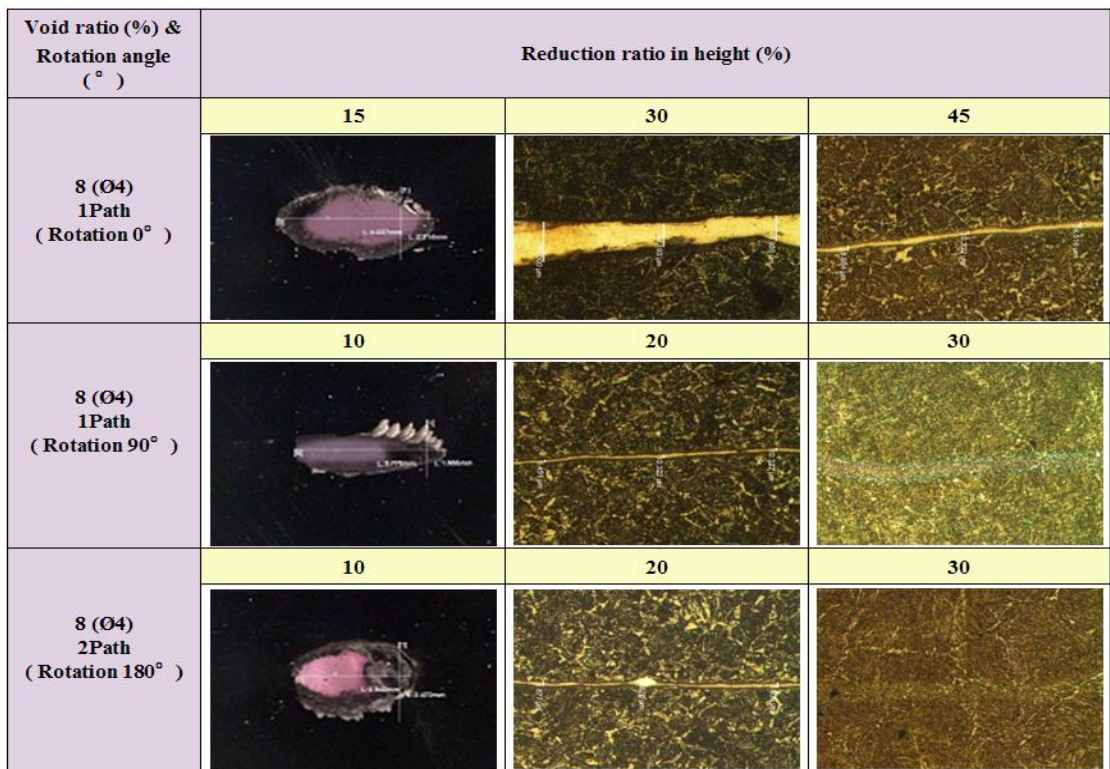


Fig. 1 Change of void shape with respect to rotation and path schedule of the specimens [6]

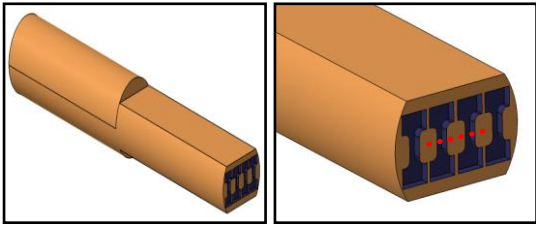


Fig. 2 Preparation of specimens for the hot open die forging

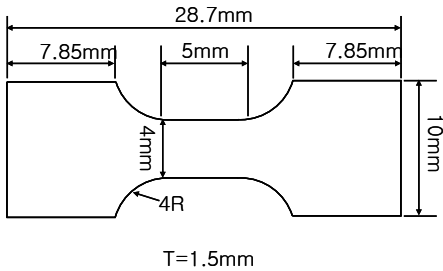


Fig. 3 Dimensions of the specimen for tensile test

2.2 기공압착 분석방법

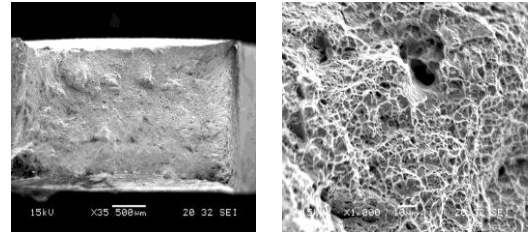
패스 스케줄 관련변수에 따른 단조 실험 후 기공의 단협 여부를 현미경을 통하여 예측할 수 있지만 단협 정도를 확인할 수 있는 정확한 기준이 없었다. 따라서 단련부위와 기공압착이 이루어진 부위에서 인장시편을 채취하여 단협 강도를 비교 분석함으로써 기공의 폐쇄 유무 및 단협 정도를 평가하였다.

우선 단조 실험 후 기공압착이 이루어진 부위에서 인장시편을 Fig. 2 와 같이 채취하였으며 인장시편의 표점 거리 중심부에 기공압착 부위가 위치하게 Fig. 3 과 같이 시편을 제작하여 기공압착 정도를 확인 하였다.

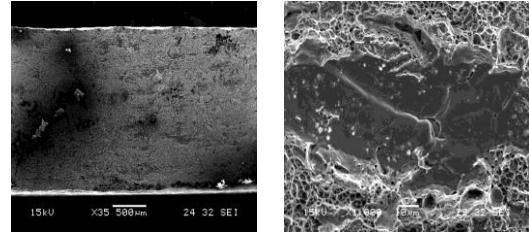
3. 기공압착에 따른 단협강도 분석

대형 잉곳의 기공압착 효과 향상을 위한 폐쇄조건 연구[6] 결과에서 기공압착이 이루어졌다고 판단되는 부위를 채취하여 단련공정의 시편에 대한 인장시험을 수행한 결과, 기공이 존재하지 않은 단련 부위와 비교하였을 때 약 90%의 인장강도를 가지는 것으로 확인되었다[1].

인장시험 후 Fig. 4에서 관찰할 수 있듯이, 기공압착 정도에 따라 각각 연성파괴(a), 취성파괴(b)로 파단이 이루어지며 기공이 압착 됨에 따라



(a) After void closing (45 %)



(b) Before void closing (15 %)

Fig. 4 S.E.M. image of fracture surfaces of tensile specimens

파단면에 존재하는 딴플(dimple)의 크기가 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 소재 회전과 압하율 부에 따른 실험 결과를 분석함으로써, 매번 현미경을 통한 기공의 직접적인 관찰을 통해 단련부위에서의 기공압착 및 폐쇄정도를 확인하지 않고도 채취한 시편의 인장강도를 평가함으로써 기공압착여부를 판단하여 좀 더 용이하게 기공의 폐쇄 정도를 평가 및 분석하고자 하였다.

Table 2에서는 압하율 변화에 따라 기공이 압착되고 폐쇄되어지는 과정에서 인장시험을 통해 분석한 인장강도를 나타내고 있다. 또한 이러한 값들의 변화를 그래프로 Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 압하율 20%, 25%의 공정에서는 기공 압착이 이루어지지 않고, 압하율 30%의 공정에서부터 기공의 폐쇄가 이루어진 것을 알 수 있으며 압하율 25%~30%의 공정에서 기공압착 현상이 급격히 일어남을 확인할 수 있었다.

따라서 압하율 30%이상의 단련공정 조건에서부터 기공의 압착이 이루어지며 인장시험을 통하여 기공압착 부위의 인장강도 값이 단련부위의 인장강도의 약 90%이상 일 경우, 시편의 파단면이 Fig. 4의 (a)와 같이 나타나며, 이러한 경우에는 기공폐쇄가 이루어졌다고 Table 2 및 Fig. 5를 근거로 명확히 판단할 수 있다.

Table 2 Comparison of tensile strengths with respect to reductions ratio in height

Reduction ratio (%)	Tensile strengths (MPa)		Relative ratio (%)
	Without void	With void	
20	735.85	381.38	51.82
25	737.27	525.12	71.22
30	738.10	679.21	92.02
40	744.20	758.50	101.92

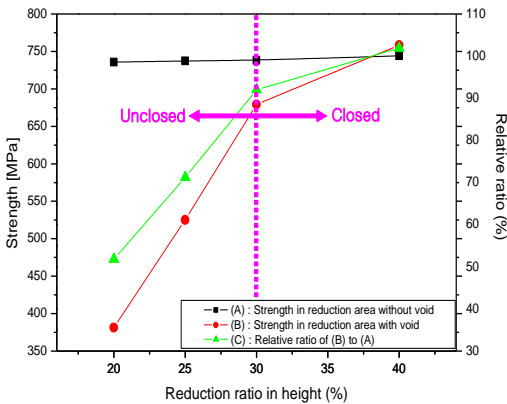


Fig. 5 Comparison of tensile strengths between unclosed and closed void

4. 결과

패스 스케줄에 따른 기공압착 실험 후 인장강도와 파단면 분석을 통하여 기공의 압착 정도에 따른 단합 강도를 분석하였다.

Fig. 6 에서 압하율과 압하율 부여에 따른 기공의 단면적 변화율을 본 실험에서 얻어진 값들로 그래프에 점을 찍어 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 압하율 10%까지는 기공 형상에 있어서 단면적 변화가 거의 없으며, 압하율이 30% 이상인 경우에는 압하율 부여에 따라 기공 단면적의 변화가 급격히 이루어져 기공폐쇄가 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 또한 회전각도 및 패스 수가 증가함에 따라 보다 작은 압하율에서도 기공 폐쇄가 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

또한 이렇게 실험에서 얻어진 값들을 가지고 압하율 변화와 기공크기에 따른 기공의 단면적 변화를 기공의 폐쇄 정도를 가장 잘 표현할 수

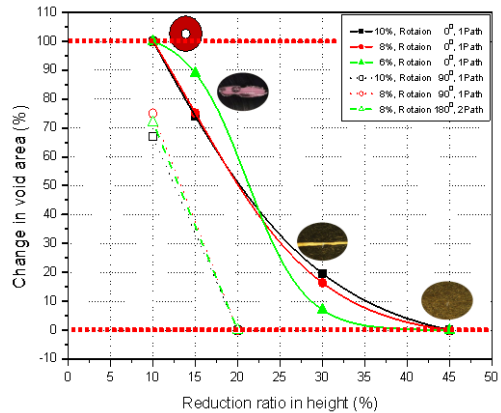


Fig. 6 Relationship between change in void area and reduction ratio in height

Table 3 Parameters of fitting curves of change in void area

Parameter	Void (%)		
	10	8	6
a	735.85	381.38	51.82
b	737.27	525.12	71.22
c	738.10	679.21	92.02
d	744.20	758.50	101.92

있는 곡선의 식으로 유도하였다.

따라서 위의 설명처럼 기공 단합 정도를 표현하기 위해서 식 (1)과 같은 하이퍼볼릭 탄젠트 (hyperbolic tangent function)를 지수함수로 표현한 식이 필요하며, 이 때 각 기공크기에 따라 식 (1)의 상수 값을 Table 3에 정리하였다.

$$y = \frac{a-b}{1+e^{(x-c)/d}} + b \quad (1)$$

여기서 x 는 Fig. 6 에 나타낸 것처럼 압하율을 의미하며, y 는 압하율이 가해짐에 따라 기공의 단면적 변화량을 표현하고 있다. 즉, y 축은 기공의 단면적 변화율로써 초기 단면적과 압하율 부여에 따라 변화된 단면적과의 차이를 백분율로 표현한 값들이다. 물론 기공 단면적의 변화는 초기 기공의 단면적을 기준으로 하여 100%를 넘지 않으며 이를 하나의 점근선으로 간주할 수 있다. 또한

0%는 기공의 단면적이 압하율 변화에 따라 완전하게 닫혀진 상태를 표현한 것으로 또 다른 접근선으로 취급할 수 있게 된다. 따라서 이렇게 두 개의 접근선을 가진 함수로써 이미 언급된 실험값들을 적절하게 표현할 수 있는 곡선의 식으로 하이퍼볼릭 탄젠트 함수이며 이를 통해 압하율 부여에 따른 기공 단면적의 변화율을 나타낸 것이 Fig. 6의 그래프이다. 또한 그림에서 직선으로 표현한 실험 값들은 소재의 회전과 패스 수의 증가에 따라 기공 단면적 변화율이 급격히 증가하여 기공 폐쇄가 발생하고 있음을 명확히 나타내고 있다.

Table 3에 나타낸 값들은 기공의 크기에 따라 기공 단면적 변화율을 나타내는 하이퍼볼릭 탄젠트 함수들을 최종 결정하기 위한 상수 값들을 나타낸 것이다. 기공이 소재 크기의 8% 이상 되는 즉 잉곳 제조 후 현장에서 발견되는 기공 중에 상당히 큰 것에 해당되는 기공에서는 초기 패스에서 압하가 이루어짐에 따라 기공의 단합이 급격히 이루어지고, 추가 압하가 이루어짐에 따라 완만하게 기공폐쇄가 일어남을 알 수 있다. 6% 이하의 초기 압하에서는 기공의 단면적 변화율이 그리 크지 않아 기공 폐쇄가 점진적으로 이루어지고, 추가 압하량이 부여됨에 따라 급격히 기공 폐쇄가 일어남을 알 수 있다.

5. 결론

패스 스케줄 관련 변수에 따른 압하율, 회전각도 및 패스 수에 따른 기공압착 실험 후, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기공압착 부위의 인장 시험을 진행 후, 기공 크기 비율에 따른 인장강도의 차이를 확인할 수 있었고 단련 부위와의 강도 비교 및 파단면 관찰 통하여 기공의 압착 여부를 증명할 수 있었다. 따라서 현미경을 사용하여 기공의 직접적인 관찰을 수행하지 않고도 기공의 압착 진행 과정 및 폐쇄정도를 예측하는 것이 가능하다.

(2) 기공압착 실험 결과를 바탕으로 초기기공비율, 압하율, 회전각도 및 패스 수에 따른 기공압착 여부를 하이퍼볼릭 탄젠트 함수를 이용하여 곡선접합(curve fitting)하였고 실제 기공압착 및 폐쇄가 이루어지는 일련의 과정을 논리적으로 제시

하였으며 본 논문의 연구 결과를 바탕으로 실제 산업 현장에서 효과적인 작업계획을 성립하기 위한 중요한 자료로 판단되며, 향후 활용성이 클 것으로 사료된다.

또한 기존의 유한요소법에만 의존하던 연구결과를 실제 실험을 통하여 검증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Song, I. K. Kwon, Y. G. Park, 2008, A Study on the Prediction of Void Closure in the Cogging Process of a Large Round Bar, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, May, pp. 75~78.
- [2] Xiao-Xun Zhang, Zhen-Shan Cui, Wen Chen, Yan Li, 2007, A criterion for void closure in large ingots during hot forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 1, pp. 1950~1959.
- [3] Morihiko Nakasaki, Ichiro Takasu, Hiroshi Utsunomiya, 2006, Application of hydrostatic intergration parameter for free-forging and rolling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1, pp. 521~524.
- [4] Zhenhuan Li, Minsheng Huang, 2005, Combined effects of void shape and void size-oblate spheroidal microvoid embedded in infinite non-linear solid, International Journal of plasticity, Vol. 21, No. 1, pp. 625~650.
- [5] G. Banaszek, A. Stefanik, 2006, Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1, pp. 238~242.
- [6] I. J. Choi, H. J. Choi, D. W. Kim, S. Choi, S. J. Lim, 2010, Void closing conditions of large ingot by path schedules, Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 19, No. 8, pp. 480~485.
- [7] I. Tamura, S. Watanabe, K. Watanabe, K. Nakajima, 1984, Development of New Processes for Control of Internal Deformation and Internal Stress in Hot Free Forging of Heavy Ingots, Trans. ISIJ, Vol. 24, pp. 101~106.