

점진단조에 대한 기초 연구

조재현¹, 박종진¹

A basic study on incremental forging

J. Cho, J. J. Park

Abstract

Large load is required in forging of large-scale components, which becomes a critical restriction in practice. However, the load can be greatly reduced by adopting incremental forging technologies. In the present study, two methods of incremental forging were investigated for the purpose of reducing the load required. One was to use nine strokes with a flat die and the other was to use three strokes with a curved die. The die moves vertically in the former while it moves vertically as well as rolls horizontally in the latter. Deformation of the slab in each case was analyzed by rigid-plastic finite element method and as a result, variations of load and distributions of effective strain were predicted.

Key Words : incremental forging, plastic deformation, forging load, finite element method

1. 서론

일반적으로 단조는 금형을 사용하여 소재에 소성변형을 발생시켜 성형을 하는 기술이다. 따라서 소재의 크기가 크면 소재를 일시에 성형시키는데는 단조 장비나 금형 크기의 제한을 받을 수 있다. 이러한 경우에는 소재에 부분적 성형을 연속적으로 시행하여 전체적인 형상을 이루는 기술을 사용할 수 있는데, 평단조 또는 자유단조가 이에 해당된다. 최근에는 소재의 최종 형상과는 무관한 크기가 작고 모양이 단순한 공구를 사용하여 점진적으로 성형하는 기술이 개발되었으며, 주로 판재에 적용되고 있다. 이 기술은 소재에 미세한 국부적 소성변형을 연속적으로 발생시켜 전체적인 형상을 이루는 기술이다. 이는 점을 연결하여 선을 이루고, 선을 이웃하여 면을 이루는 개념에 기인한다. 이 기술의 장점은 상부 또는 상하부 금형을 사용하지 않고 작은 공구로 적은 하중을 사용하여 성형을

할 수 있다는 것이며, 단점은 형상 전체의 치수를 맞추기 어렵고 생산에 소요되는 시간이 많이 필요하다는 것이다. 이러한 장단점과 관련하여 다음과 같은 연구들이 진행되었다.

Mori 등은 점진단조로 판재에 임의의 곡률을 발생시켜야 하는 경우에 적합한 단조 순서를 유전 알고리즘을 통하여 예측하였다. [1] Liu 등은 점진성형 기술 중 하나인 로터리단조에서 소재에 나타나는 버섯 모양의 불균일 변형의 발생 원인을 연구하여 규명하였다. [2] Choi 등은 회전단조를 통해서 사각 바에서 둥근 바를 생산하는 경우에 대하여 연구하였으며, 대하여 연구하였으며, 결과로써 적절한 압하량, 회전각 그리고 피치량 등을 구하였다. [3] Ghaei와 Movahhedy는 중공축 소재의 두께를 감소시키기 위한 맨드렐을 이용한 회전 단조에서 금형 내부각의 크기가 변형 및 하중에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. [4]

본 연구에서는 슬래브 두께의 압축에 적용이 가능한 점진단조 기술에 대하여 연구하였다. 슬래브

1. 홍익대학교 기계시스템디자인 공학과
교신저자: 박종진, E-mail: jjpark@hongik.ac.kr

단조가 실제적으로 가능하기 위해서는 하중을 줄이는 것이 가장 중요하다고 판단되었으며, 이에 따라 평금형과 곡면금형을 사용하는 두 가지 방안을 구상하고 검토하였다.

2. 연구의 대상 및 방법

본 연구에서 다루는 슬래브는 길이가 2900 mm, 폭이 2400 mm, 두께가 300 mm 이다. 이 슬래브의 두께를 10% 압축시키기 위해서는 이에 필요한 단조 하중을 줄이는 것이 가장 중요하다고 판단하였다. 따라서 접촉 면적을 줄여 하중을 줄일 수 있는 두 가지의 점진성형 방안을 고안하고 검토하였다. 하나는 슬래브의 상부와 하부에 각각 단면이 800 mm X 1000 mm 사각형인 평금형을 사용하여 아홉 번의 수직 운동 스트로크를 시행하는 것이다. 또 다른 하나는 슬래브를 상부와 하부에 길이 2500 mm, 폭 800 mm인 곡면금형을 각각 사용하여 세 번의 스트로크를 시행하는 것이다. 평금형의 경우에는 금형이 수직 운동만을 하는 반면에 곡면금형의 경우에는 금형이 수직 운동에 이어서 굴림 운동을 한다. 수직 운동의 속도는 700 mm/sec이었으며, 굴림 운동의 선속도는 700 mm/sec이었다.

상용 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하여 두 가지의 경우를 해석하였고, 단조 하중의 변화, 유효 변형률 분포 등을 구하였다. 해석 중 요소망 재구성이 발생하게 되면 유효 변형률과 슬래브 두께의 분포에 오차가 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 해석 초기에 매우 세밀한 요소망을 구성하여 사용하였다. 소재의 변형은 열간 등온에서의 강소성으로, 금형과 슬래브 접촉면에서의 마찰계수 m 은 0.7로 가정하였다.

3. 평금형을 이용한 점진단조

Fig. 1에 평금형 점진단조에서의 스트로크 순서를 나타내었다. 스트로크는 슬래브의 중앙에서 시작하여 슬래브를 좌우로 이송하고, 상부로 이송한 후 좌우로 이송하면서 총 아홉 번을 시행하였다. 금형 하부의 변과 모서리는 곡면으로 되어 있어 이 면과 접촉하는 부위는 압축이 불충분하게 되기 때문에 이를 극복하기 위하여 스트로크간에 발생하는 접촉면이 겹치도록 좌우 방향으로의 이송 피치는 800 mm로, 상부 방향으로의 이송 피치는 600mm로

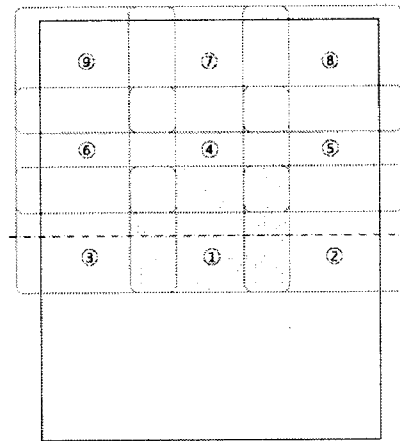


Fig. 1 Sequence of forging strokes with a flat die

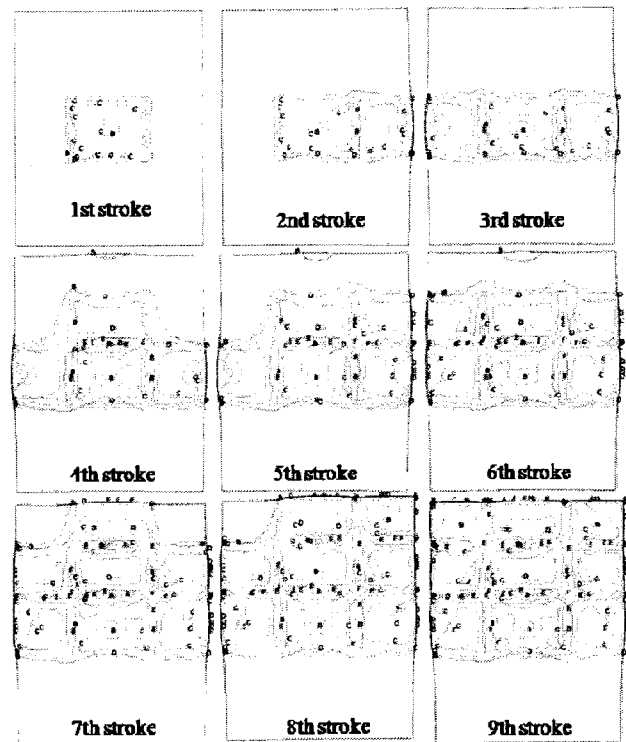


Fig. 2 Variations of effective-strain distribution from 1st to 9th stroke: A=0, B=0.07, C=0.13, D=0.2, E=0.27, F=0.34, G=0.4, H=0.47, I=0.54

하였다.

Fig. 2에 아홉 번의 스트로크에 의해서 발생되고 축적되는 유효 변형률의 분포를 나타내었다. 유효 변형률은 전반적으로 0.12 정도로 분포되어 있으나, 금형의 중앙 부위는 데드메탈 존(dead-metal zone)이 형성되기 때문에 0.07 정도의 낮은 값을 나타내고 있다. 하지만 접촉면이 겹치는 부위는 추가로 전단 변형을 반복하여 받기 때문에 0.2 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 그림에는 표시하지 않았지만 슬래브 하단부에서는 네 번째부터 아홉 번째까지의

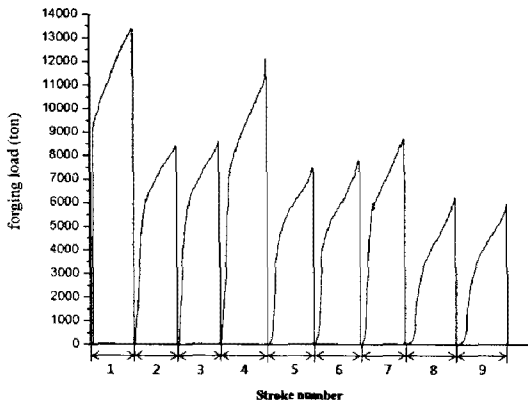


Fig. 3 Variation of forging load from 1st to 9th stroke

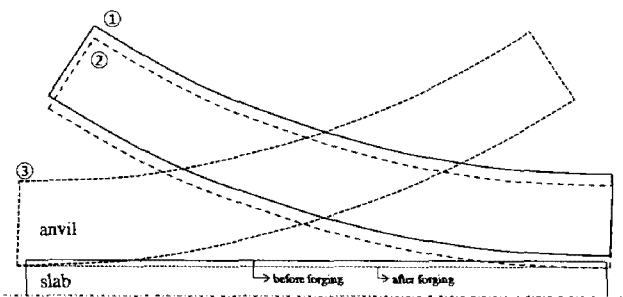


Fig. 4 Positions of a curved die during a stroke, consisting of vertical and rolling motions

스트로크를 대칭적으로 사용하게 된다.

Fig. 3에 각 스트로크에서 필요한 하중을 나타내었다. 첫 번째 하중이 두 번째와 세 번째에 비하여 큰 이유는 정수압 응력과 접촉 면적이 상대적으로 크기 때문이다. 네 번째가 다섯 번째와 여섯 번째에 비하여 큰 것과 일곱 번째가 여덟 번째와 아홉 번째에 비하여 큰 것도 동일한 이유에서이다. 각 스트로크에서의 하중은 초반에는 급격히, 후반에는 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 접촉 면적이 초반에는 급격히, 후반에는 서서히 증가하는 사실에 기인한다. 소재의 가공경화 효과도 하중의 증가에 크게 영향을 미친다.

4. 곡면금형을 이용한 점진단조

Fig. 4에 곡면금형을 이용하여 슬래브를 우측에서 좌측으로 점진적으로 단조하는 방안을 도시하였다. 위치 ①에서 시작하여 위치 ②까지 금형을 수직으로 하강시키면서 슬래브의 우측을 단조한 후, 위치 ③까지 금형을 좌측으로 굴림 운동시키면서 슬래브를 점진적으로 단조시킨다.

Fig. 5에 곡면금형 점진단조에서의 단조 순서를 나타내었다. 스트로크 (1)과 (3)에서는 슬래브의 좌

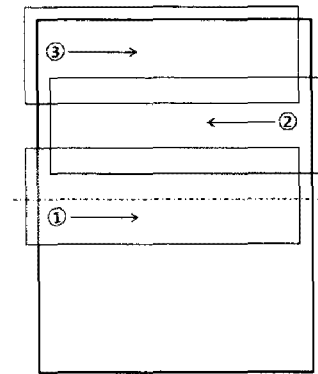


Fig.5 Sequence of forging strokes with a curved die

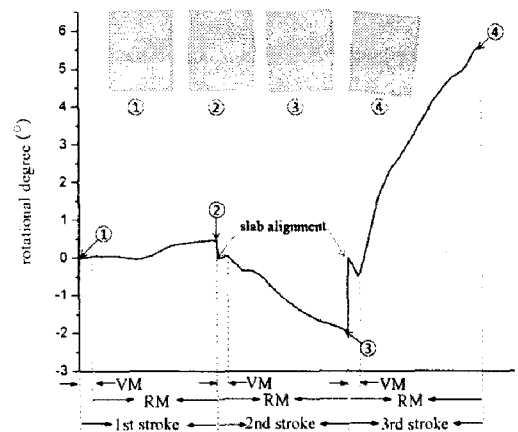


Fig. 6 Variation of rotational angle from 1st to 3rd stroke

측에서 우측으로, 스트로크 (2)에서는 우측에서 좌측으로 점진적으로 단조가 진행된다. 곡면금형의 상하 폭은 800 mm이며 스트로크 사이의 슬래브의 상하 이송 피치는 600 mm로써 접촉면이 충분히 접치도록 하였다.

Fig. 6에 곡면금형 점진단조 중에 발생하는 슬래브의 회전량을 각도로 나타내었다. 시계 방향의 회전을 양으로, 반대 방향의 회전을 음으로 정의하였다. 이러한 회전은 굴림 운동 중 물의 상하부에서 슬래브의 좌우 방향으로 발생하는 신장량이 불균일하다는 사실에 기인한다. 스트로크가 끝날 때마다 회전된 슬래브를 바로 위치시킨 후 다음 스트로크를 수행하였다. 첫 번째 스트로크에서는 신장량이 물의 상하부에서 거의 균일하게 발생하여 회전이 $+0.5^\circ$ 로 작게 나타났다. 하지만 두 번째 스트로크에서는 우측에서 좌측으로 구르면서 상부의 신장량이 더 크게 발생하여 -2° 의 회전이 발생한 반면에, 세 번째 스트로크에서는 좌측에서 우측으로 구르면서 상부의 신장량이 더 크게 발생하여 $+5.5^\circ$ 의 회전이 발생하였다.

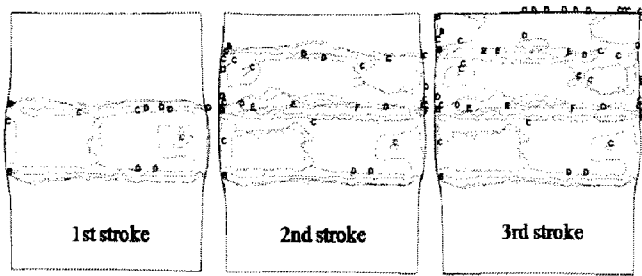


Fig. 7 Variations of effective-strain distribution from 1st to 3rd stroke: A=0, B=0.09, C=0.17, D=0.26, E=0.34, F=0.43, G=0.51, H=0.6, I=0.68

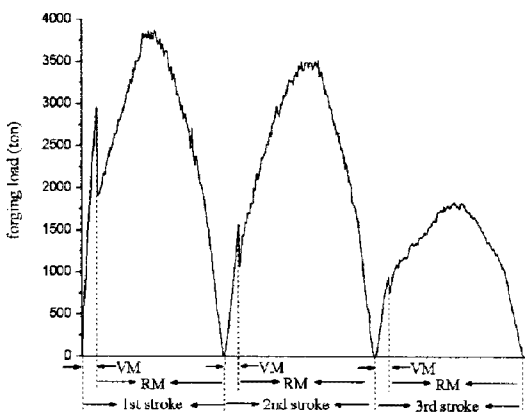


Fig. 8 Variation of forging load from 1st to 3rd stroke; VM and RM stand for vertical motion and rolling motion, respectively.

Fig. 7에 첫 번째부터 세 번째 스트로크까지 발생하고 축적되는 유효변형률의 분포를 나타내었다. 전반적으로 유효변형률은 약 0.12 정도의 분포를 나타내고 있지만, 접촉면이 겹쳐지는 부위는 반복적인 전단 변형을 추가로 받으므로 0.2 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 또 슬래브의 가장자리에서도 0.2 이상으로 나타났다.

Fig. 8에 스트로크의 진행에 따른 단조 하중의 변화를 나타내었다. 금형과 슬래브 사이의 접촉 면적은 첫 번째 스트로크에서 가장 크고, 두 번째와 세 번째 스트로크로 가면서 작아지므로 하중의 크기도 감소하게 된다. 각 스트로크에서의 하중의 변화는 초반에 급격히 상승하였다가 급격히 하강한 후, 서서히 상승하였다가 서서히 하강하는 양상을 나타내고 있다. 이는 금형이 수직으로 하강할 때는 약 5/sec의 높은 변형률속도로 소재에 변형을 가함으로 높은 유효응력이 나타나는 반면, 금형이 구를 때는 약 0.2/sec의 낮은 변형률속도로 소재에 변형을 가함으로 낮은 유효응력이 나타나기 때문이다. 또 하중에 큰 영향을 미치는 정수압응력은 접촉면

이 슬래브의 중앙에 있을 때 가장 높다가 가장자리로 갈수록 낮아지기 때문이다.

5. 결론

평균형과 곡면금형을 이용하여 수행하는 슬래브의 점진단조를 삼차원 강소성 유한요소법으로 해석하고, 해석 결과로부터 하중, 유효변형률 분포 등을 구하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

점진단조 기술을 이용하여 하중을 크게 감소시킬 수 있었다. 온도가 균일한 경우의 단조 하중은 접촉면적, 변형률속도 그리고 단조위치에 따라 크게 차이가 나는 정수압응력에 주로 의존한다.

접촉면이 겹쳐지는 부위의 유효변형률은 평균값의 두 배 이상으로 크게 나타나는데, 이는 압축변형률 외에 추가로 발생하는 전단변형률에 기인한다.

곡면금형을 이용한 점진단조에서는 슬래브가 회전하는 현상이 발생하는데, 이는 굴림 운동 중 롤의 상하부에서 발생하는 폭 방향으로의 신장량이 불균일하기 때문이다.

후기

본 연구는 2008학년도 홍익대학교 학술 연구 진흥비에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

- [1] K. Mori, M. Yamamoto and K. Osakada, "Determination of hammering sequence in incremental sheet metal forming using a genetic algorithm", JMPT, 60 (1996) 463-468
- [2] G. Liu, S. J. Yuan, Z. R. Wang and D. C. Zhou, "Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of a cylinder", JMPT, 151 (2004) 178-182
- [3] S. K. Choi, M. S. Chun, C. J. Van Tyne and Y. H. Moon, "Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis", JMPT, 172 (2006) 88-95
- [4] A. Ghaei and M. Movahhedy, "Die design for the radial forging process using 3D FEM", JMPT, 182 (2007) 534-539