

축대칭 형상 자유단조품의 잔류응력 형성에 대한 유한요소해석

방원규 · 정재영* · 장영원

Analysis of Residual Stress Development in Open-Die Forged Axisymmetric Parts Using FEM

W. Bang, J. Y. Jung, and Y. W. Chang

Abstract

Residual stress in the forged parts affects the resistance to mechanical failure, dimensional uniformity, and the service life of the parts. In order to elucidate the development of residual stress in open-die forging process, elasto-plastic finite element analysis was implemented to radial forging process. Super duplex stainless steel SAF 2507 was selected as workpiece material and a series of mechanical tests followed by numerical compensation to deformation heating was conducted to obtain necessary flow data. The residual stress distributions were calculated using commercial 3-D FEM code and the effects of process design were evaluated from selected results.

Key Words : Residual Stress, Open-Die Forging, FEM

1. 서 론

고변형을 소성가공공정의 대표적인 예인 단조공정은 그 공정구조적 특성상 성형을 마친 제품의 조직이 치밀하고 소재의 유동선 절단이 최소화되어 일반적으로 우수한 기계적인 특성을 가지게 된다. 일반적으로 단조공정은 구속형태의 다이를 사용하는 형단조 공정과 개방형 다이를 사용하는 자유단조의 두가지로 크게 나뉘며, 이중 자유단조는 형단조에 비해 성형된 제품의 수직정밀도는 떨어지지만 설비의 운용이 보다 유연하며 상대적으로 큰 하중을 제어할 수 있기 때문에 선박용 샤프트와 같은

대형 단조품의 성형에 많이 적용되고 있다.

소성가공을 거친 제품에는 불균일한 변형을 분포와 소재의 탄성 복원력에 의해 잔류응력이 발생하게 되는데, 이와 같은 잔류응력은 부품의 수명과 사용 또는 추가적인 가공에서 나타나는 결함에 영향을 준다. 본 연구에서는 상용 3차원 탄소성 유한요소해석코드를 사용하여 최근 선박용 소재로 주목받고 있는 고내식 스텐레스강의 radial forging 공정조건에 따른 잔류응력의 분포 및 그 변화에 대해 해석하고자 하였다.

2. 실험과정

포항공과대학교 항공재료연구소

* 포항산업과학연구원 재료·공정연구소

2.1 소재 준비

사용된 SAF 2507 강은 50kg 급 진공용해로에서 제조, 1200℃에서 2.5시간 열처리후 수냉하였으며, 2상조직을 갖는 모재로부터 직경 10mm, 길이 12mm 의 원통형 시편을 제작하여 이후의 기계적 시험에 사용하였다.

2.2 기계적 시험

제작한 원통형 시편에 대하여 Gleeble-3800 Test Machine을 사용하여 초기온도 900~1250℃, 변형율속도 0.01~50/sec 의 변형율속도로 고온압축시험을 수행하였으며, 시편의 온도는 시편표면에 열전대를 부착하여 측정, 제어하였다.

2.3 변형열 보정

고온에서 일어나는 동적변형은 기계적으로는 급격한 소성변형량의 축적, 변환으로 인한 가공열의 발생 (Deformation Heating) 을 수반한다. 이는 조직의 변화와 무관하게 일어나는 부분으로 대개의 고변형을 속도 시험에서는 피할 수 없으며 (Systematic Factor), 결국 나타나는 유동곡선이 항온상태에서 상당히 벗어나게 되므로 가장 크게 유동응력에 영향을 준다.[1,2]

본 연구에서는 소성일의 미소증분을 수치적분하여 시편의 온도상승을 계산하고 유동응력을 보정함으로써 이와 같은 효과를 고려하였으며, 이러한 보정된 데이터를 이후의 유한요소해석에 적용하였다. 가공열 발생의 보정에 대한 보다 상세한 내용은 본 학회지에 기 발표된 논문에 언급되어 있다.[3]

2.4 유한요소해석

상용 유한요소해석코드인 DEFORM-3D를 사용하여 radial forging 의 유한요소해석을 실시하였다. 공정의 형태는 다음 fig.1 의 모식도에 나타낸 것과 같으며, 빌렛은 탄소성체, 다이는 탄성체를 가정하였다.

공정변수의 영향을 살펴보기 위하여 단면성형부의 길이 L 에 대한 스트로크당 진행거리 d 의 상대적인 비율과, 다이경사각 a를 각각 $d/L=0.1\sim0.5$, $a=10^{\circ}\sim30^{\circ}$ 로 변화시켜가며 성형이 완료된 제품의 해석결과를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제품내부의 잔류응력분포

탄소성 해석결과를 통하여 성형이 끝난 소재의 잔류응력을 반지름방향, 축방향, 원주방향으로 나누어 빌렛 끝

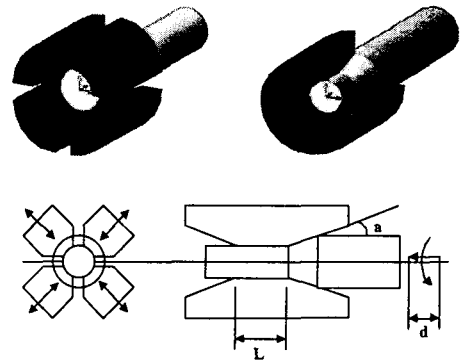


Fig. 1 Schematic diagram showing the configuration of radial forging process

에서부터의 거리에 따라 비교한 결과를 fig. 2에 예시하였다.

전체적으로 볼 때 radial forging 을 거친 소재는 표면부는 잔류인장응력이, 중심부는 잔류압축응력이 생기는 것을 알 수 있다. 빌렛의 끝부분을 제외하고는 약간의 유동은 있으나 전체 길이방향에 걸쳐 일정한 수준의 잔류응력을 유지하는 것을 확인하였으며, 이를 참고하여 공정조건에 따른 잔류응력 변화의 기준은 축방향 거리 5~10cm 범위의 잔류응력을 평균한 값을 사용하였다.

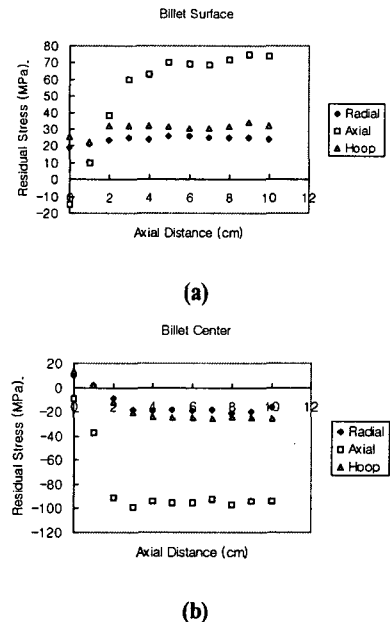


Fig. 2 Residual stress distribution of a forged part ($d/L=0.3$ $a=10^{\circ}$)

3.2 타격점 간격의 영향

다이의 타격점 간격, 즉 스트로크당 빌렛의 전진거리 는 그 값이 작을수록 보다 많은 스트로크에 걸쳐 최종 성형품을 만들어내므로 제품내부의 변형을 분포를 균일 하게 하는데는 효과가 있을 것으로 예측되나, 해석결과 잔류응력의 분포에는 fig.3과 같이 타격점 간격이 커질수록 잔류응력이 약간 증가하지만 현저한 영향은 주지 못하는 것으로 나타났다.

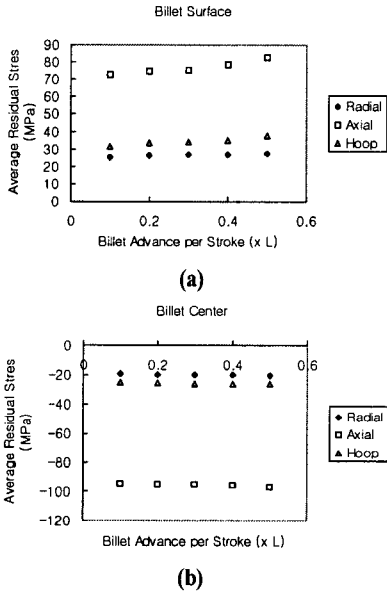


Fig. 3 Effect of billet advance per stroke to the residual stress development

3.3 다이 경사각의 영향

다이의 경사각과 평균 잔류응력의 크기를 fig.4 에 나타내었다. 타격점 간격의 변화와 달리 다이 경사각이 커질수록 잔류응력이 표면부와 중심부 모두 상당히 감소하는 것으로 나타났으며, 경사각이 커질수록 직경감소부에서 전단변형에 의한 재료유동이 유도되기 때문인 것으로 생각된다. 이는 Tseng 등이 윤활조건의 변화에 따른 radial forging 제품의 잔류응력해석에 대한 연구결과와도 간접적으로 일치하는 부분이다.[4]

단, 다이의 경사각이 커지면 모서리 부분에서 다이에 가해지는 응력집중이 심화될 것이 예측되므로, 실제 공정 최적화에 있어서는 대상제품의 이후 공정이나 치수정밀도 요구사항을 고려하여 적절한 수준의 경사각을 결정하는 것이 필요하다고 볼 수 있다.

4. 결론

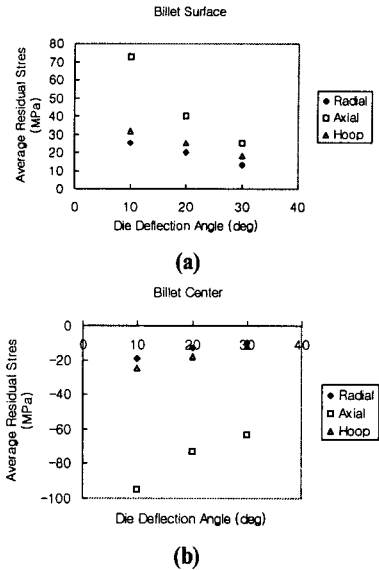


Fig. 4 Effect of die deflection angle to the residual stress development

본 연구에서는 자유단조공정의 한 예로 고내식 슈퍼 듀플렉스 스텐레스강의 radial forging 공정에 대하여 잔류응력발생을 중심으로 유한요소해석을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) Radial forging을 통해 성형된 제품 표면부에는 잔류인장응력이, 중심부에는 잔류압축응력이 작용한다.

(2) 동일형상에 대한 스트로크 분할 수는 잔류응력 발생에 큰 영향을 없는 것으로 나타났다.

(3) 다이의 경사각이 커질수록 잔류응력 발생이 현저히 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 변형되는 소재와 다이의 각도가 커져 전단변형이 상대적으로 많이 유도되기 때문으로 생각된다.

후기

본 연구는 1999년도 산업자원부 지원 민군겸용기술사업 "선박용 고강도.고내식 특수 주.단조품 개발" 연구결과 의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) J.H. Weiner, 1995, Trans. ASME, 77, pp. 1331
- (2) E.G. Lowen and M.C. Shaw, 1954, Trans. ASME, 76, pp. 217
- (3) 방원규, 정재영, 장영원, 2001, 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 206
- (4) T.C. Tszeng, 1987, Ph. D. thesis, U.C. Berkeley, CA, pp. 43