

대형 크랭크샤프트 단조 공정의 컴퓨터 시뮬레이션

박정휘¹ · 이민철² · 박태현³ · 조범제³ · 전만수[#]

Finite Element Simulation of Hot Forging of Special Purpose Large Crankshafts

J. H. Park, M. C. Lee, T. H. Park, B. J. Cho, M. S. Joun

Abstract

In this paper, a simple and computationally efficient approach to non-isothermal three-dimensional analysis of hot forging processes is presented based on rigid-thermoviscoplastic finite element method. In the approach, the temperatures of dies are considered to be constant. Two hot forging processes of large crank shafts ranging from 800 to 1000 kg are simulated using the simple approach.

Key Words : Large Crankshaft, Closed Die Forging, Forging Simulation

1. 서론

선박, 산업기계, 발전설비, 항공기 부품 등에 대형 단조품이 사용되고 있다. 대형 단조품은 주로 자유단조 공법으로 주문 제작되고 있다. 대형선박용 엔진과 같은 초대형 단조품의 제작은 자유단조에 의존할 수밖에 없다. 대형선박용 크랭크샤프트의 제작에 이용되는 RR 및 TR 단조도 자유단조의 변형된 공법이다[1,2]. 그리고 현대중공업에서 개발한 HCG 단조 공법[3]도 자유단조의 변형된 공법에 속한다. TR, RR, HCG 단조 공법은 형단조의 장점을 일부 활용하고 있으나 근본적으로 전통적인 형단조와 비교적 큰 차이가 있다.

동일한 제품을 자유단조와 전통적인 형단조로 생산했을 경우, 일반적으로 형단조가 여러가지 면에서 유리하다. 우선 품질 측면에서 유리하다. 형단조는 자유단조에 비하여 소재가 고압 상태에서 변형되기 때문에 기공의 압착 측면과 소성유동선의 치밀도 등에서 유리하다. 또한 생산성 측면

에서도 형단조가 훨씬 유리하다. 문제는 형단조로 제작할 수 있는 제품의 크기가 한정되어 있다는 것이다. 그러므로 대형 단조품의 제작에는 해머단조가 유리한 면이 있다.

우리나라의 중형엔진 시장이 조선산업과 발전산업에 힘입어 급성장하고 있으며, 대형 크랭크샤프트의 단조 수요를 충족하는데 애로를 겪고 있다. 이러한 애로를 극복하고 엔진의 소형화 요구에 부응하기 위하여 중대형 단조품의 형단조 기술의 개발이 절실한 시점이다.

국내에서 많은 연구자들에 의하여 단조 시뮬레이션 기술이 연구되었지만, 크랭크샤프트 단조 공정은 비교적 난해한 문제에 속하므로 아직 국내에서 개발된 기술로 실 공정 적용 목적으로 크랭크샤프트 단조 공정을 해석한 사례는 찾기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 단조품 기준으로 850 kg의 중량을 지닌 발전기용 크랭크샤프트의 형단조 공정과 선박의 중형엔진용 크랭크샤프트 형단조 공정의 개발을 위한 단조 시뮬레이션 기술의 적용 사례를 제시한다.

1. 경상대학교 기계공학과 대학원

2. 기계공학과 대학원

3. 대창단조㈜

경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소

Email: msjoun@gnu.ac.kr

2. 단순 비등온해석 기법

비등온해석은 이론적으로 명확하지만, 실공정 문제의 적용에는 다소의 문제점이 있다. 첫째, 온도의 변화가 소재와 금형의 표면에서 급격하게 일어나기 때문에 이러한 변화를 반영하기 위해서는 금형과 소재의 요소망 생성 단계에서 이러한 문제의 특성을 반영해야 한다. 그러나 2 차원과 3 차원 모두 이러한 특성을 반영한 요소망의 자동 생성이 용이한 것이 아니다. 3 차원의 경우, 자유도의 증가로 계산시간에도 상당한 영향을 미치게 된다. 둘째, 비교적 정확한 해를 얻기 위해서는 축차적인 접근이 불가피하며, 이 때 3 차원의 경우 계산시간의 문제에 봉착하게 된다. 이러한 문제로 인하여 대부분의 상용 S/W에서는 사용자가 요구하는 계산시간의 한계를 타결하기 위하여 정확한 계산보다는 계산 효율을 중시하는 방향으로 프로그램의 개발이 이루어질 것으로 사료된다.

실제, 소재의 표면에서 발생하는 급격한 온도의 강등도 문제이지만, 대부분의 문제는 소재 내부에서 발생하는 소성열이 문제가 되는 경우가 빈번하다. 소재 표면의 온도 강등은 소재의 유동저항의 상승을 유발하지만 이는 마찰계수의 조절을 통하여 어느 정도 흡수가 가능하다. 따라서 계산효율과 소성열의 발생으로 인한 소재 내부의 온도상승의 예측을 고려할 때, 금형의 온도를 일정하다고 가정한 해석이 실용적일 수 있다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 금형온도를 일정하다는 가정하에 비등온해석을 실시하였으며, 이 방법을 단순 비등온해석 기법(simple non-isothermal analysis)이라고 칭하였다.

3. 적용 예제

2.1 공정 1의 비등온해석

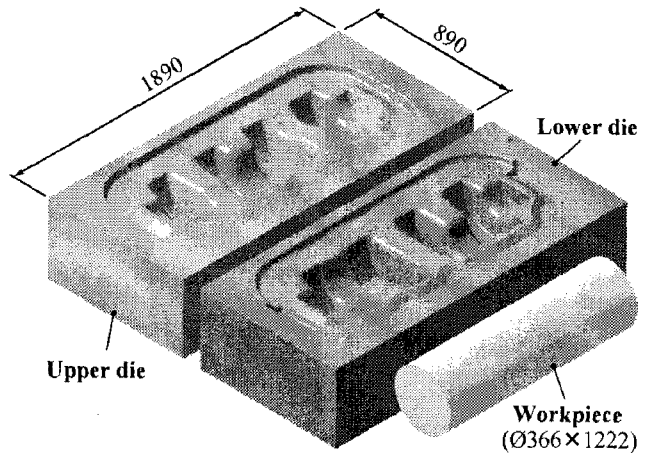
Fig. 1 은 개발하고자 하는 단조품의 형상을 나타내고 있다. 이 단조품은 기계 가공된 후 발전기의 크랭크샤프트로 사용된다. 단조품의 중량은 약 850 kg 에 달하며, 초 대용량(40000 톤급 이상) 기계식 또는 유압식 프레스가 아니면 프레스 단조가 불가능하다. 본 연구에서는 대장단조(주)가 확보하고 있는 40 톤 카운터블로헤머로 Fig. 1 의 대형 단조품을 형단조 공법으로 개발하는 과정에서 적용한 단조 시뮬레이션 기술을 소개하고자 한다.

이미 이에 관해서는 선행연구 [*]에서 상세하게 소개하였으므로 여기서는 온도해석 결과를 중심 결과를 정리한다.

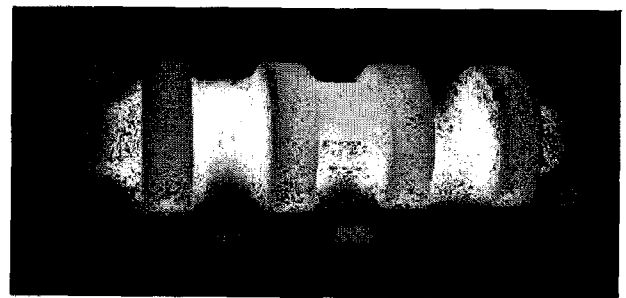
공정설계를 최종적으로 확정하기에 앞서 유한요소해석을 실시하여 형단조 가능성을 검토함으로써 설계의 최적화를 실시하였다. 초기소재와 금형의 형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 해석을 위하여 사용한 단조 시뮬레이터는 AFDEX 3D[4]이다.

사용된 재료는 SCr420 이고, 소재의 초기온도는 1250 °C 이며, 유동응력은 $\sigma = 74.9\bar{\epsilon}^{0.199}$ MPa 이다. 일정전단마찰모델이 사용되었으며, 마찰상수로 0.6 이 사용되었다. 금형의 온도는 500 °C 로 일정하다는 가정하였다. 그 이외의 공정조건 및 열적 조건은 참고문헌 [5]으로 대신한다.

Fig. 2에 공정해석 결과로 획득된 단조 중 온도 분포의 변화 과정을 나타내었다. 그 이외의 결과는 참고문헌 [6]으로 대신한다.

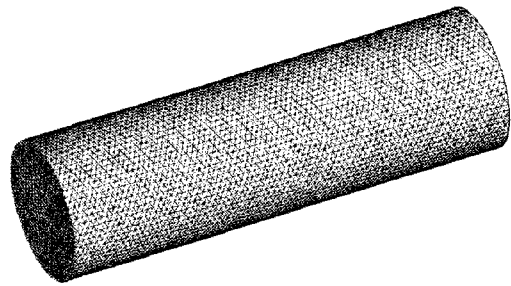


(a) Geometries of dies and workpiece

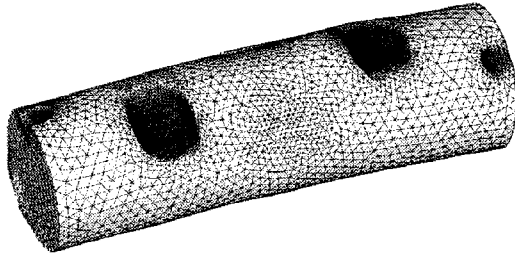


(b) Forging

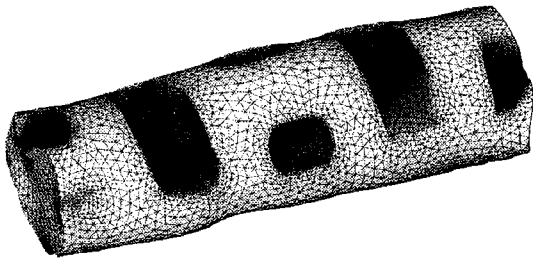
Fig. 1 Schematic description of the process 1



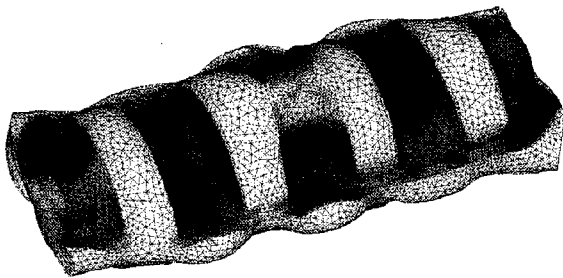
(a) 0% stroke



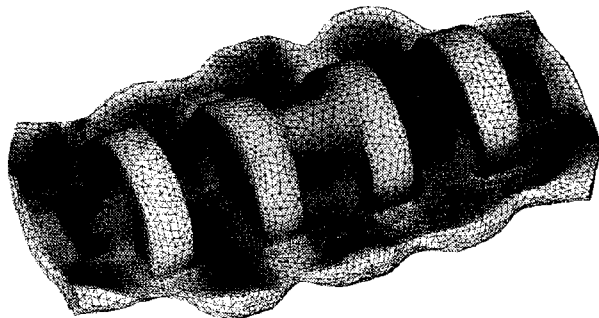
(b) 25% stroke



(c) 50% stroke



(d) 75% stroke



(e) 100% stroke

Fig. 2 Temperature variation with stroke of the process 1

2.1 공정 2의 비등온해석

Fig. 3 은 선박용 중형엔진의 크랭크샤프트의 열간단조를 위한 금형설계를 나타내고 있다. 이 제품은 단조품 기준으로 1000kg 에 육박하며, 하형의 무게가 9000kg 에 이르는 형단조로서는 매우 큰 제품에 속한다.

단조 시뮬레이션에 사용된 조건은 제 2 장의 공정 1 의 조건과 동일하다.

해석 결과로 얻은 온도의 분포를 Fig. 4 에 나타내었으며, 최종 상태에서 변형률 분포를 Fig. 5 에 나타내었다.

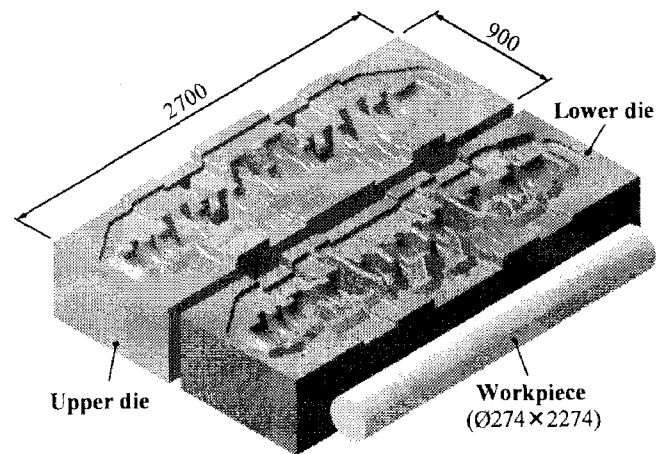
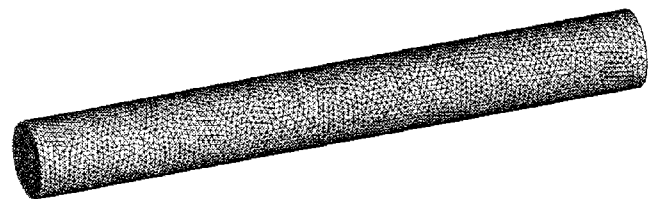
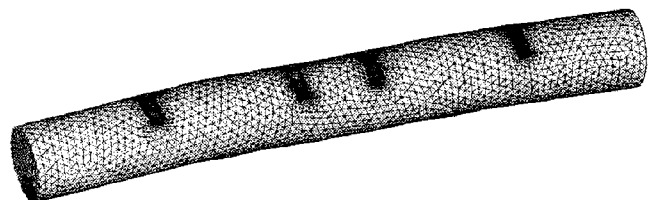


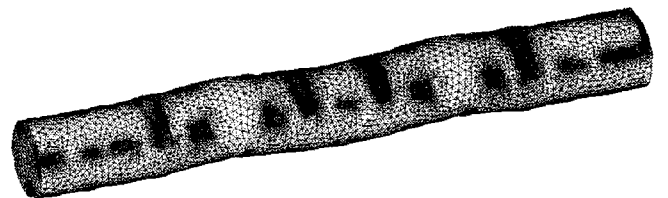
Fig. 3 Schematic description of the process 2



(a) 0% stroke



(b) 20% stroke



(c) 40% stroke

기존의 비등온해석과 차이가 없다.

제시된 기법은 화공설비의 발전기용과 선박의 중형엔진용 대형 크랭크샤프트의 열간단조공정의 해석 목적으로 사용되었다. 화공설비의 발전기용 단조품의 중량은 850 kg이며, 이미 대창단조주에서 개발에 성공하여 수출 중에 있다. 그리고 선박용 중형 엔진 중에서 소형 엔진에 소요되는 크랭크샤프트의 개발이 진행되고 있다.

본 연구에서는 개발 리스크가 큰 대형 크랭크샤프트 단조공정의 최적설계 목적으로 적용한 단조 시뮬레이션의 기술과 결과를 제시 또는 소개하였다. 이 결과는 국내에서 개발된 단조 시뮬레이터로 실공정 적용 수준의 크랭크샤프트의 시뮬레이션의 실현이라는 측면에서 나름대로의 의의가 있다고 사료된다.

후 기

본 논문은 2단계 BK21 사업 및 산업자원부의 지역산업공통기술개발사업의 일환으로 실시된 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

- [1] T. Rut, "Multi-connector equipment for forging crankshafts and upsetting bar stock by the TR-method", Pergamon Press, Elmsford, N.Y., 1968.
- [2] "A new forging method for crankshafts bars", Machinery, Vol. 76, No. 6, 1970.
- [3] 박승희, 윤성만, 신상엽, 박래원, 박종국, 이응기, 김대두, 1999, "선박 중형엔진용 일체형 Crankshaft 단조장치에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제8권 제3호, pp. 237~244.
- [4] www.afdex.com
- [5] H. K. Moon, J. S. Lee, S. J. Yoo, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, "Hot deformation behavior of bear steels", ASME Trans. J. Eng. Mat. And Tech. Vol. 129, pp. 349~355
- [6] 조범재, 이민철, 김홍태, 박태현, 재갈영진, 최인수, 전만수, 2008, "대형 크랭크샤프트의 형단조에 관한 실험적 및 수치적 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 263~266.

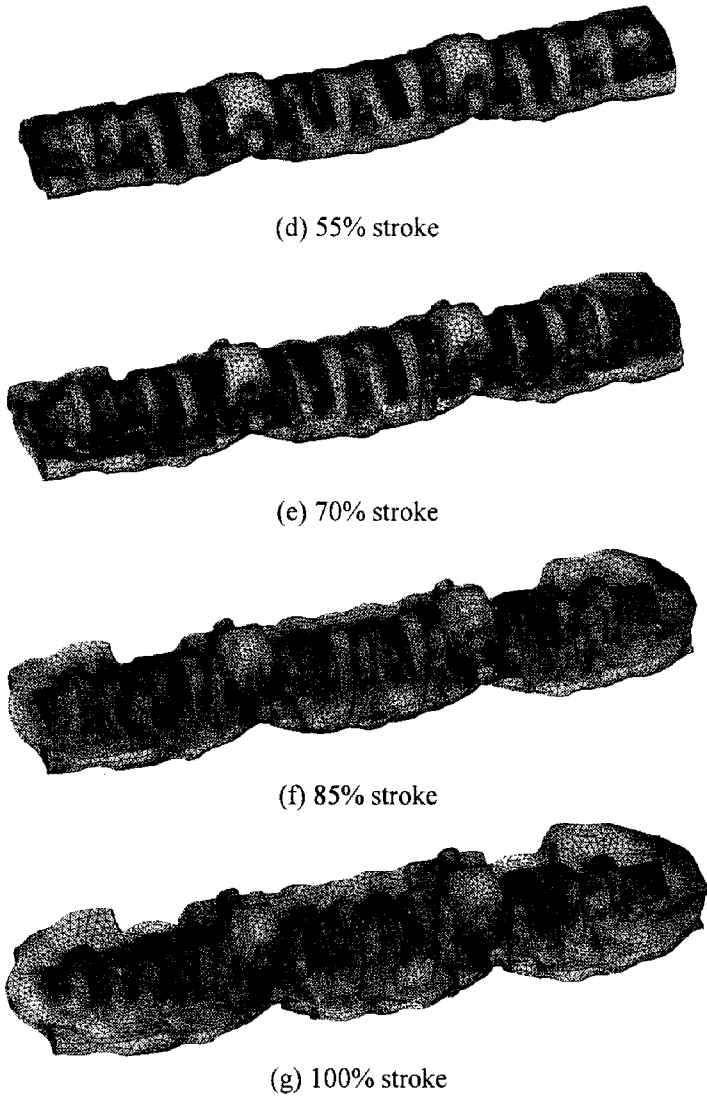


Fig. 4 Temperature variation with stroke of the process 2

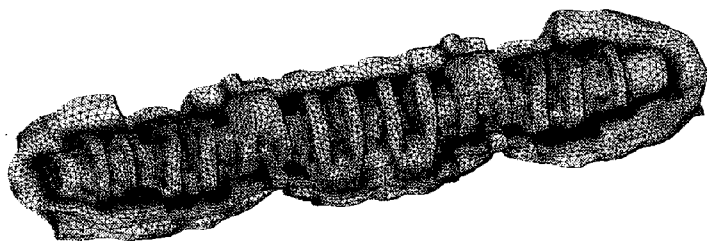


Fig. 5 Effective strain distribution at the final stroke

4. 결 론

본 연구에서는 계산 효율을 고려한 단순 비등온해석 기법이 제시되었다. 이 기법에서는 금형의 온도는 일정하다고 가정하였으며, 다른 조건들은