

로터 폴 단조 공정의 정밀 삼차원 시뮬레이션 및 결과의 검증

고병호*, 이민철**, 제진수***, 전만수****

Three-Dimensional Simulation of a Rotor Pole Forging Process and Verification of the Results

Byoung Ho Ko*, Min Cheol Lee**, Jin Soo Je***, and Man Soo Joun****

ABSTRACT

In this paper, the usefulness of a three-dimensional forging simulation technique is verified through its application to process design in rotor pole forging. A simulator, AFDEX3D developed based on the rigid-plastic finite element method and hexahedral elements, is employed. The simulated results of an application example found in a precision forging company are compared with the actually forged ones in detail. It has been verified that the simulation results are in good agreement with the actual phenomena.

Key Words : Combined Forging(복합단조), Rotor Pole(로터 폴), Three-Dimensional Forging Simulation(3차원 단조 시뮬레이션), AFDEX3D

1. 서론

유한요소법을 이용한 단조 시뮬레이션 기술은 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)에 의해 발전되어 왔다⁽¹⁻¹⁴⁾. 시뮬레이션 기술의 적용은 2차원 및 축대칭 문제 중심으로 실시되어 왔으며, 최근까지만 하더라도 3차원 문제는 주로 2차원 문제로 근사화하여 해결되어 왔다. 최근에 베벨 기어 단조공정 해석^(12,13)이나 스파이더(spider) 단조 공정 해석⁽¹⁴⁾ 등과 같은 3차원 문제에도 시뮬레이션 기술이 적용되고 있으나 아직까지 산업 현장에서 여러 가지 이유로 그 적용이 많지 않은 것이 현실이다.

그리고 오일러리안 기법(Eulerian technology)과 유한 체적법(finite volume method)⁽¹⁵⁾에 바탕을 둔 상용 프로그램을 이용하여 크랭크축(crankshaft)이나 커넥팅 로드(connecting rods) 등과 같은 대형문제에 대한 컴퓨터 시뮬레이션이 시도되고 있다.

본 연구에서는 강소성 유한요소법에 바탕을 두고 개발된 AFDEX3D를 이용하여 자동차용 발전기(alternator)에 들어가는 로터 폴(rotor pole) 제조공정 중 굽힘 공정(bending process)과 사이징 공정(sizing process)을 해석하고 실제의 공정 결과와 비교하고자 한다.

2002년 7월 11일 접수

* 발레오만도전장시스템즈코리아

** 경상대학교, RRC/항공기부품기술연구소

*** 경상대학교, BK21사업단

**** 경상대학교, 경상대학교부속 공학연구원

2. 유동문제의 수식화

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계 S 로 나누어지며, 경계 S 는 표면력 (traction)이 $t_i = \bar{t}_i$ 로 주어진 S_t , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉, S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

비압축성 조건의 처리를 위하여 벌칙기법을 사용할 경우, 소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 를 구하자는 것이며, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega_{ij} dV + \int_V K \epsilon_{ij} \omega_{ij} dV - \int_V f_i \omega_i dV - \sum \int_{S_t} \bar{t}_i \omega_i dS - \int_{S_c} \sigma_i \omega_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 S_v 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

$$\omega_{ij} = \frac{(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})}{2} \quad (2)$$

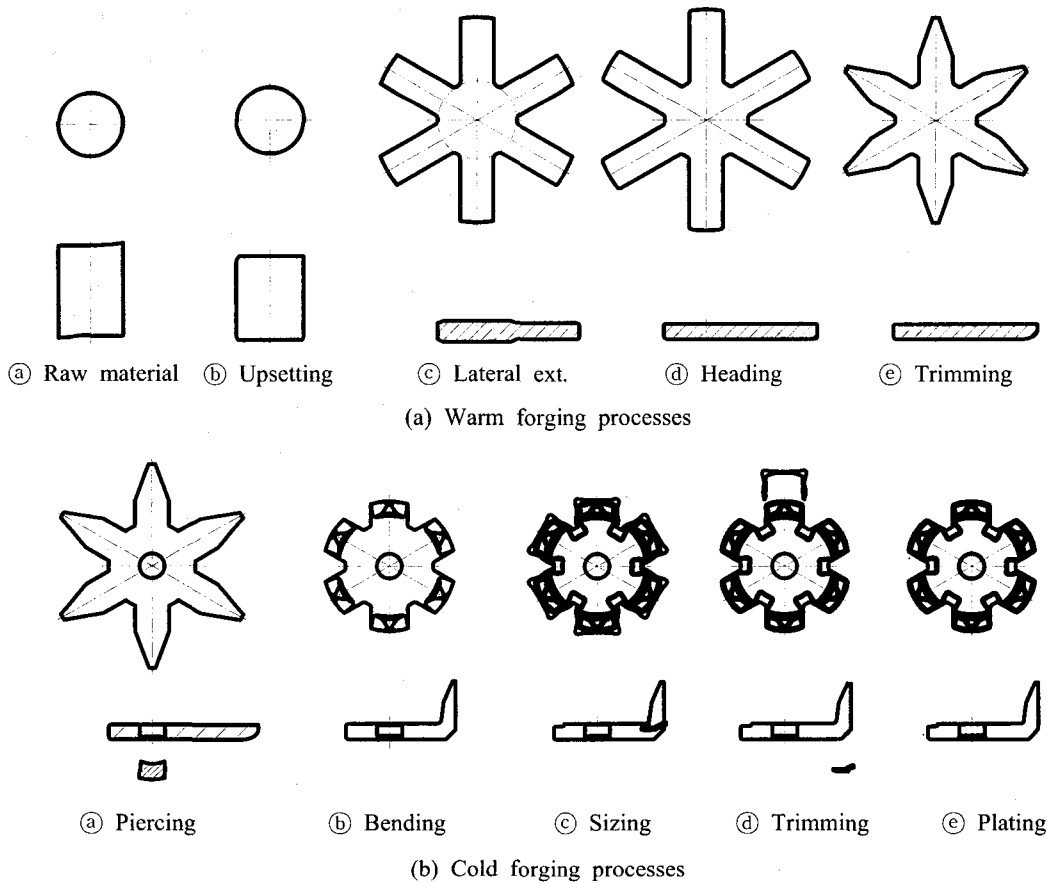


Fig. 1 Combined rotor pole forging processes

이며, ω_n 과 ω_i 는 각각 ω_i 의 법선성분과 접선성분을 나타낸다. 벌칙기법에서, 벌칙상수 K 는

$$K \epsilon_{ii} = \sigma_{ij} / 3 = -p \quad (3)$$

의 의미를 갖는다. 따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다.

따라서 전술한 경계치 문제를 푸는 것은 임의의 가중함수 ω_i 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장 v_i 를 구하는 문제로 수식화된다. 물론, 속도장은 S_v 와 S_c 의 필수경계조건을 만족해야 한다.

약형에는 속도장 v_i 와 가중함수 ω_i 가 바탕을 형성하고 있다. 그 이외의 것은 이들로부터 파생된 것이다. 따라서 이 두개의 함수를 보간하여 절점속도가 미지수인 비선형연립방정식을 얻을 수 있다. 유한요소방정식의 유도 및 해법에 관한 내용은 참고문헌⁽⁸⁾으로 대신한다.

3. 공정적용 및 결과의 검증

Fig. 1은 로터 폴의 제조공정을 도시한 것이다. 이 공정은 온간단조로 예비형상을 성형한 후 냉간단조로 최종 형상을 성형하는 복합단조공정으로 구성되어 있다. 이와같은 복합단조공정으로 제품을 생산할 경우, 초기 비용이 과대한 단점이 있으나, 냉간단조에서 힘든 난가공재의 단조가 가능하며, 일반적으로 제품의 인성이 향상되는 장점이 있다. 특히 온간단조에서는 공정중의 풀림처리 공정을 생략할 수 있어 효과적이다. 물론, 치수정도 등의 측면에서는 냉간단조보다 불리한 면이 있다.

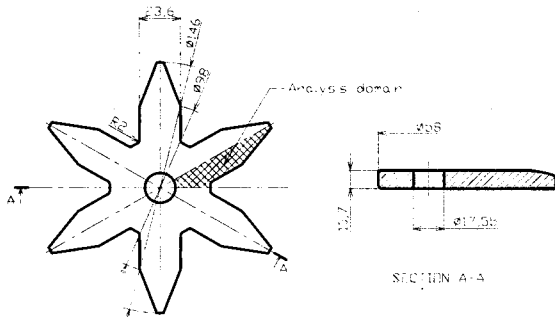
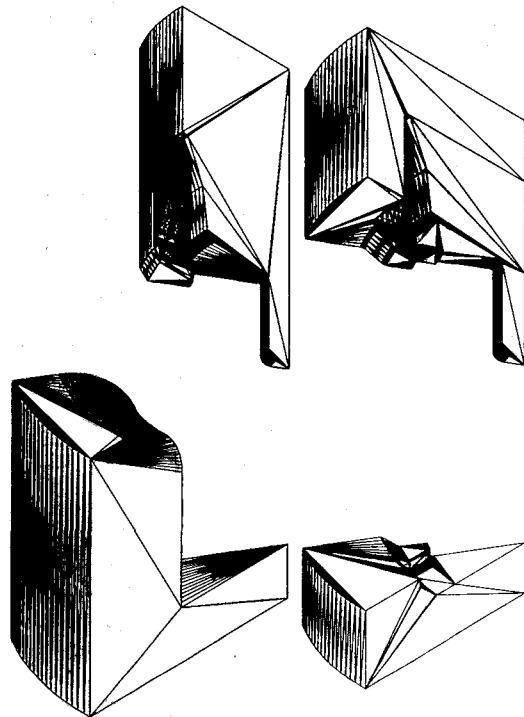


Fig. 2 Warm forged preform for a TG9 rotor pole

Fig. 2는 컴퓨터 시뮬레이션 기술의 공정 적용 목적으로 선택된 TG9 로터 폴의 초기 소재형상을 나타내고 있다. 소재의 재질은 AISI 1006이며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 온간단조 공정에 의하여 제조된 것이다. 이 소재는 상온에서는 피어싱 공정을 거친 후 굽힘 공정과 사이징 공정을 거치게 된다.

본 논문에서는 TG9 로터 폴 제조 공정상 가장 중요한 굽힘 공정과 사이징 공정을 해석하여 그 결과를 공정설계 목적으로 활용하였다. CATIA를 이용하여 소재 형상과 굽힘 및 사이징 공정의 금형형상을 모델링하였으며, Fig. 3은 해석에 사용된 금형을 나타내고 있다.



(a) Bending process (b) Sizing process

Fig. 3 Die geometries

Fig. 2에서 보는 바와 같이 대칭조건을 이용하여 로터 폴 전체의 1/12에 대하여 해석을 수행하였다. 소재의 정보는 참고문헌⁽¹⁷⁾에서 발췌하여 사용하였으며, 인산염 피막 윤활처리를 하기 때문에 마찰상수로 0.1을 사용하였다. 해석에 사용된 공정조건 및 소재 정보는 다음과 같다.

- 유동응력 : $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$
($K = 613.97 \text{ MPa}$, $n = 0.31$)
- 마찰상수 : 0.1
- 초기 항복응력 : 284.98 MPa

전공정의 해석을 위하여 PC에서 약 24시간이 소요되었으며, 다단공정의 자동해석 기능을 사용하여 사용자 개입을 배제시켰다. 요소망의 지나친 뒤틀림이 없었기 때문에 요소망 재구성을 실시하지 않았다.

Fig. 4는 TG9 로터 폴의 소성변형 과정을 가시화한 것이다.

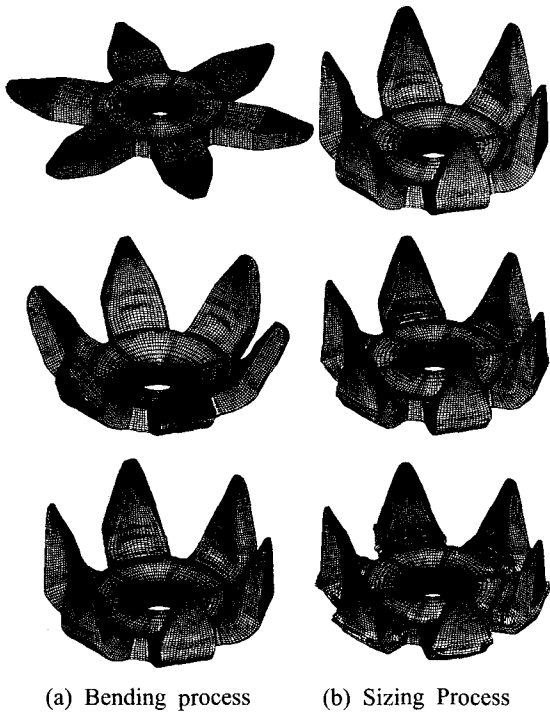


Fig. 4 Computer simulation results of the bending and sizing processes

Fig. 5는 실제 제품과 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 해석결과와 실제의 현상이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

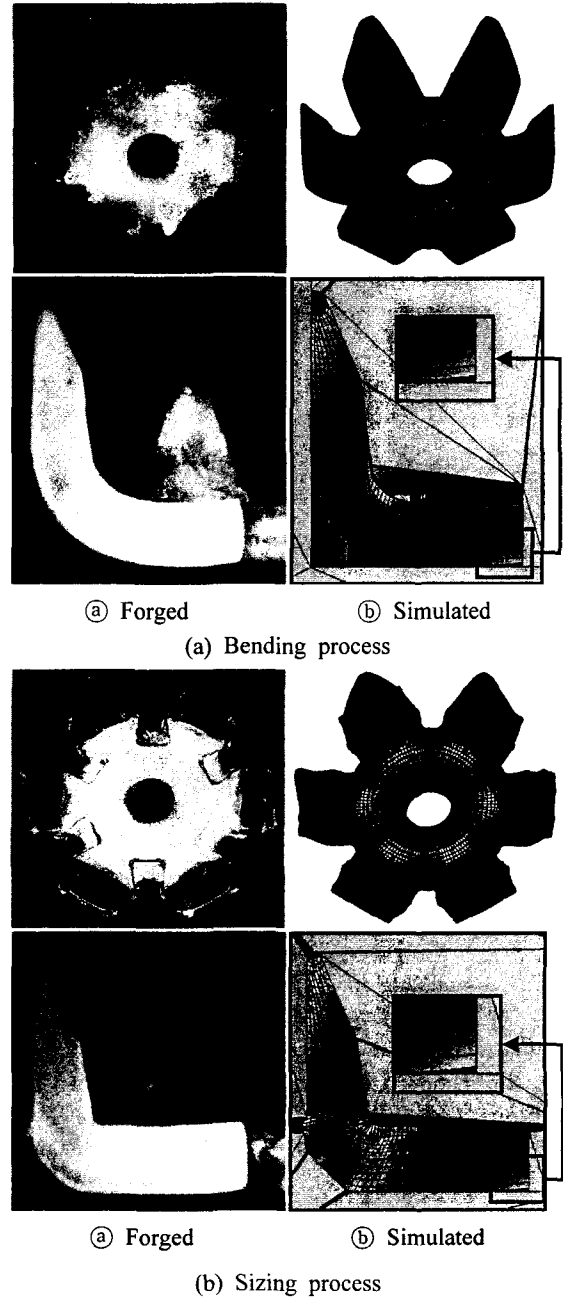


Fig. 5 Comparison of experiments with simulation results

4. 결론

본 논문에서는 AFDEX3D를 이용한 3차원 단조 시뮬레이션 기술을 실제 단조공정에 적용하여 결과의 타당성을 검증하였다. 실제 공정과 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

기존의 시행착오법에서는 약 1주일 가량의 금형제작 시간이 필요하고 프레스 사용일정과 금형교환 시간 등을 고려하면 한번의 초도품을 얻기 위한 테스트에서 실제 최소 10~15일 정도의 기간이 소요된다. 이에 비하여 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한다면 PC로도 하루면 유용한 정보를 획득할 수 있으며 주요 현상을 예측할 수 있다. 따라서 삼차원 단조 시뮬레이션 기술의 활용이 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 확산될 전망이다.

후 기

이 논문은 경상대학교 부속 공학연구원과 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. C. H. Lee and S. Kobayashi, "New Solution to Rigid Plastic Deformation Using a Matrix Method," *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 95, pp. 865-873, 1973.
2. O. C. Zienkiewicz and P. N. Godbole, "A Penalty Function Approach to Problems of Plastic Flow of Metals with Large Surface Deformation," *J. of Strain Analysis*, Vol. 10, No. 3, 1975.
3. S. I. Oh, N. Rebelo and S. Kobayashi, "Finite Element Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming," *IUTAM Symposium, Tutzing/Germany*, pp. 273-291, 28 August 3 September 1978.
4. K. Osakada, J. Nakano and K. Mori, "Finite Element Method for Rigid-Plastic Analysis of Metal Forming-Formulation for Finite-Deformation," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 24, pp. 459-469, 1982.
5. C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression," *Application of numerical methods to forming processes*, ASME, AMD, Vol. 28, pp. 163-174, 1978.
6. S. I. Oh, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrary Shaped Dies," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 24, pp. 479-493, 1982.
7. 전만수, "사각형 유한요소해석 모델의 자동생성 프로그램의 개발," *한국정밀공학회지*, 제11권, pp. 157-165, 1994.
8. S. M. Hwang, M. S. Joun and J. S. Park, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece Interface in Metal Forming," *Trans. of NAMRI of SME*, Vol. XVIII, pp. 13-19, 1990.
9. 전만수, 이민철, 류찬호, "단조시뮬레이션의 현재와 미래," *한국소성가공학회*, 제4회 단조심포지움, KIMM, 1999.
10. 전만수, *소성가공 CAE 기술 Workshop 2000*, 경상대, 2000.
11. 전만수, *소성가공 CAE 기술 Workshop 2001*, 경상대, 2001.
12. 전만수, 이민철, "베벨기어 단조공정의 정밀단조 시뮬레이션," *한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 128-133, 2000.
13. Y.K. Lee, S.R. Lee, C.H. Lee and D.Y. Yang, "Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 59-63, 2001.
14. J.R. Cho and D.Y. Yang, "Three-dimensional finite element simulation of a spider hot forging process using a new remeshing scheme," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, pp. 219-225, 2000.
15. 제정신, "유한체적법에 의한 3차원 단조가공해석," *대한기계학회 1999년도 추계학술대회논문집 A*, pp.413-417, 1999.
16. 전만수, "고체역학에서 유한요소법까지," *피어슨 에듀케이션 코리아*, 1999.
17. 전만수, "단조시뮬레이션 기술 현황과 발전방향," *월간 프레스 기술*, Vol. 14, No. 6, pp. 20-37, 2001.