

복합단조 공정의 유한요소해석

전만수*, 문호근**, 이민철**, 서대윤**

*경상대학교 기계공학과, **경상대학교 기계공학과 대학원

Finite Element Analysis of Compound Forging Processes

M. S. Joun, H. K. Moon, M. C. Lee and D. Y. Suh(Gyeongsang National University)

Abstract : A fully automatic computer simulation technique of axisymmetric multi-stage compound forging processes was presented in this paper. A penalty rigid-viscoplastic finite element method was employed together with an improved looping method for automatically remeshing with quadrilateral finite-elements only. An application example of six-stage axisymmetric forging processes involving one cold and two hot forging processes, two piercing processes and a sizing process was given with emphasis on automatically tracing the metal flow lines through the whole simulation.

Keywords : Fully Automatic Forging Simulation(완전자동 단조 시뮬레이션), Compound Forging Process(복합단조 공정), Penalty Rigid-Viscoplastic Finite Element Method(벌칙 강점소성 유한요소법), Metal Flow Lines(소성유동선도)

1. 서론

열간단조와 냉간단조는 서로 장단점을 지니고 있다. 열간단조 공정은 상대적으로 성형하중이 작고 큰 소성 변형을 허용하는 장점을 지니고 있다. 그러나 기계적 성질이 불량하며, 금형의 마모가 심하고 치수의 정도가 냉간단조 공정에 비하여 현저히 떨어지는 단점을 지니고 있다. 이와 반대로 냉간가공은 과도한 성형하중으로 대물의 성형이 불가능하고 금형의 파손이 잦다. 이 외에도 열간단조의 경우 작업환경이 불량하고 자동화가 비교적 어렵다는 문제점을 안고 있다. 이러한 냉간가공과 열간가공의 장점을 동시에 살리기 위하여 온간단조 공정과 복합단조 공정 등이 사용되고 있다[1].

현재 복합단조의 용어는 매우 포괄적인 의미로 사용되고 있다. 본 논문에서는 열간단조 후 냉간단조를 실시하는 공정을 칭한다. 즉, 열간단조의 고성형성을 이용하여 원하는 부품과 유사한 형태의 예비성형체를 생산하여 피어싱 공정(piercing process) 등의 전후처리 과

정을 거친 후, 냉간공정을 통한 치수 정밀화를 목적으로 하는 복합단조 공정에 연구의 초점을 맞춘다. 복합단조 공정은 생산성 향상의 차원에서 널리 행하여지고 있고, 그 적용범위가 지속적으로 확대되고 있다. 특히, 조립 생산성 향상과 가공공수의 최소화를 목적으로 단조품 수요자로부터 두 개 이상의 단조품의 일체화 요구의 증가추세와 절삭량의 최소화를 겨냥한 근접제품치수(near net shape) 요구 등을 감안할 때, 복합단조의 전망은 매우 밝다고 사료된다. 절삭에 전적으로 의존하여 생산하거나 열간단조 후 절삭가공에 의하여 생산해 오던 부품 업체는 점진적으로 경쟁력을 상실해 나아갈 것이라는 것이 일반적인 분석이다. 수십만 또는 수백만 개의 자동차 부품을 생산하기 위해서는 근접제품치수(near net shape)로 단조가공을 실시함으로써 절삭시간의 최소화가 불가피하며, 이 점에 관련 자동차 부품 산업의 사활이 걸려 있다고 해도 과언이 아니다.

단조공정의 컴퓨터 시뮬레이션 기술[2]은 단조 공정 설계자가 겪고 있는 난제의 해결에 효과적이며, 현재

공정적용이 확산되어 가고 있다. 복합단조 공정의 유한요소해석 기술은 기존의 컴퓨터 시뮬레이션 기술의 응용의 일부분에 속한다. 복합단조 공정의 유한요소해석은 해석중간에 온도변화에 따라 소재의 성질이 바뀌며, 피어싱 공정 및 트리밍 공정(trimming process) 등이 개입되는 경우가 많기 때문에 비교적 복잡한 문제에 속한다. 따라서 복합단조 공정의 완전자동 컴퓨터 시뮬레이션 기능은 필수적이다. 그러나 이에 관한 체계적 연구결과는 소개되어 있지 않다.

본 연구에서는 복합단조 공정의 컴퓨터 시뮬레이션의 자동화 원리 및 기법을 제시하였다. 적용 예제로 6단 (열간단조->열간단조->열간피어싱->냉간단조->냉간피어싱->사이징) 단조공정의 완전자동 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 벌칙강소성 유한요소법[3]과 회로법에 바탕을 둔 자동 사각형 요소망생성 기법[4]을 사용하였다.

2. 벌칙 강점소성 유한요소법

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 Ω 와 경계영역 Γ 로 나누어지며 경계영역 Γ 는 표면력(traction)이 주어진 Γ_h , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 Γ_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 Γ_c 등으로 세분화될 수 있다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening)의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 속도장 v_i 와 정수압 p 를 구하자는 것이며, 경계치문제[3]로 수식화된다. 이 경계치 문제의 약형(weak form)은 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} p \omega_{ii} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \int_{\Omega} v_i q d\Omega - \sum \int_{\Gamma_h} h_i \omega_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \sigma_n \omega_n d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \sigma_t \omega_t d\Gamma = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 Γ_v 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고, 가중함수 q 는 전 해석영역에서 임의의 값을 갖는 함수이다. 약형에서 $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})$

며, ω_n 과 ω_t 는 각각 ω_i 의 법선성분과 접선성분을 나타낸다. f_i 는 체적력(body force)이고, 벡터 n_i 는 해석경계에서 정의되며 외향단위법선벡터(outwardly directed unit normal vector)을 의미한다. 텐서량에서 상첨자 프라임(')은 편차성분(deviatoric component)을 나타내며, 하첨자 i 와 n 은 각각 접선과 법선성분을 의미한다. 그리고 하첨자가 두번 반복되는 것은 덧셈에 대한 규약을 따른 것이며, 콤마(,) 뒤의 첨자는 편미분을 의미한다.

3. 복합단조 공정의 자동해석기술

복합단조 공정의 유한요소해석시 고려해야 할 주요 사항에는 단조공정의 자동시뮬레이션 기술 이외에도 소성유동선도의 연속적 추적, 피어싱 공정 및 트리밍 공정의 처리, 소재 및 공정 조건의 자동 변경 등이 있다. 복합단조 공정설계시에 소성유동선도의 제어를 위하여 냉간단조 공정과 열간단조 공정이 동시에 설계상에서 고려되어야 한다. 그런데 일반적으로 냉간단조 회사와 열간단조 회사는 분리되어 전문화되어 있으며, 설계전문가 역시 냉간단조와 열간단조로 전문화되어 있다. 이런 이유로 복합단조 공정의 자동해석기술은 응용기술의 핵심중 하나이다.

최종 단조품의 소성유동선도는 설계이전에 규제되는 경우가 대부분이다. 소성유동선도는 인발, 압출, 압연 과정에서 생성된 것이며, 열간 또는 냉간 단조를 통하여 소성유동선도를 변화시키거나 제어할 수는 있으나 그 과정에서 새롭게 생성되지는 않는다. 따라서 복합단조 공정과 같이 단(stage) 수가 많을 경우, 소성유동선도의 연속적 추적은 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 해석과정에서 초기에 입력된 소성유동선도가 전공정을 통하여 추적되도록 하였다.

열간공정은 고온금속의 유체와 같은 유동특성으로 인하여 버(burr) 등이 발생하며, 냉간가공에 앞서 천공 등이 실시되는 경우가 매우 많다. 따라서 피어싱 및 트리밍 공정의 자동처리는 복합단조와 같은 연속단조공정의 자동해석에 필수적 기능이다. 최근 피어싱 및 트리밍 공정의 유한요소해석[5]에 관한 연구가 실시되었으나, 그 연구결과는 다만 복합단조 공정의 자동 유한요

소해석의 관점에서는 실용적이지 못하다. 실제, 현장에서는 천공에 대한 실험 공식을 사용하고 있다. 즉, 기하학적 여건에 따라 천공이 발생하는 스트로크가 예측되고 있다. 따라서 본 연구에서는 입력된 스트로크에 도달하면, 하나의 소재가 두 개의 소재로 분리되도록 하였다. 피어싱 금형의 두 모서리점을 연결하는 선을 소재 분리선으로 간주하였다. 본 연구에서는 냉간의 경우 두 모서리점 간의 간극이 약 1/3 감소되는 시점에서 분리가 되며, 열간의 경우 두 모서리점의 간극이 초기간극의 20% 이하로 감소되었을 때 분리된다고 간주하였다.

매 단계에서 사용하는 소재의 번호 또는 소재상수들 다르게 정의할 수 있도록 함으로써 매 단계에서 소재의

변경이 가능하도록 프로그램하였다. 열간의 경우, 온도가 공정 전체에 매우 큰 영향을 미치는 것이 사실이지만, 등온공정의 가정하에서 예측한 소성유동선도는 실제의 현상을 매우 잘 반영하는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 등온공정의 가정하에 해석을 실시하였다.

4. 공정적용 예제

적용예제로 6단 축대칭 복합단조 공정을 해석하였다. 처음 두 공정은 열간단조 공정이며, 세 번째 공정은

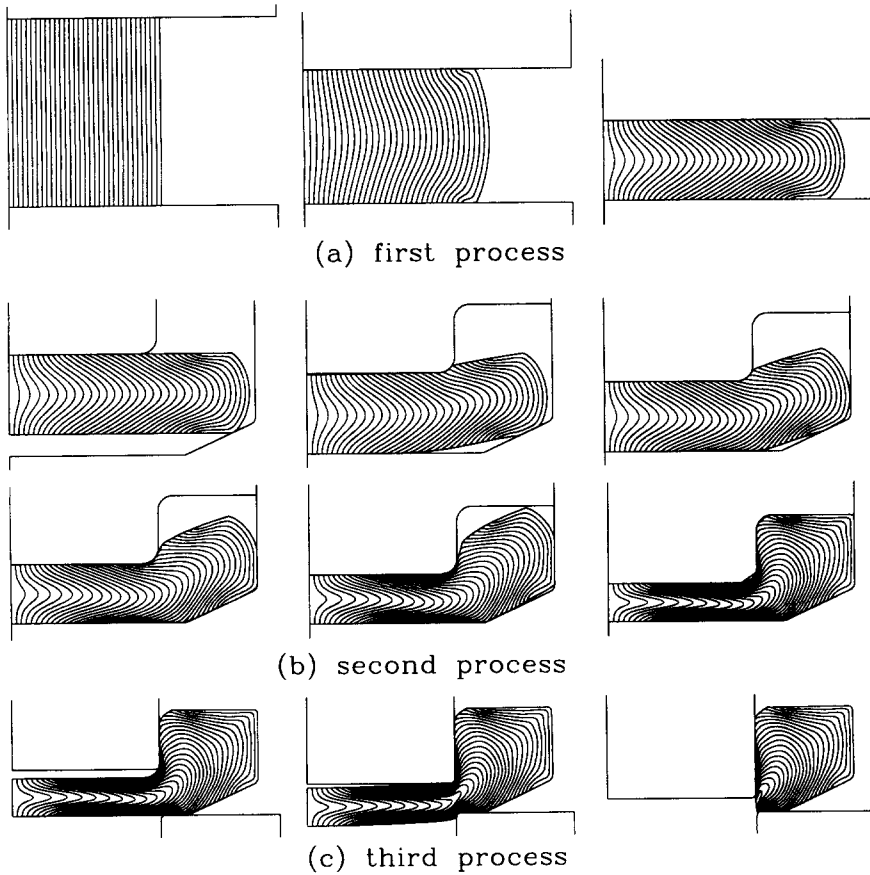


Fig.1 Finite element analysis of a sequence of compound forging processes

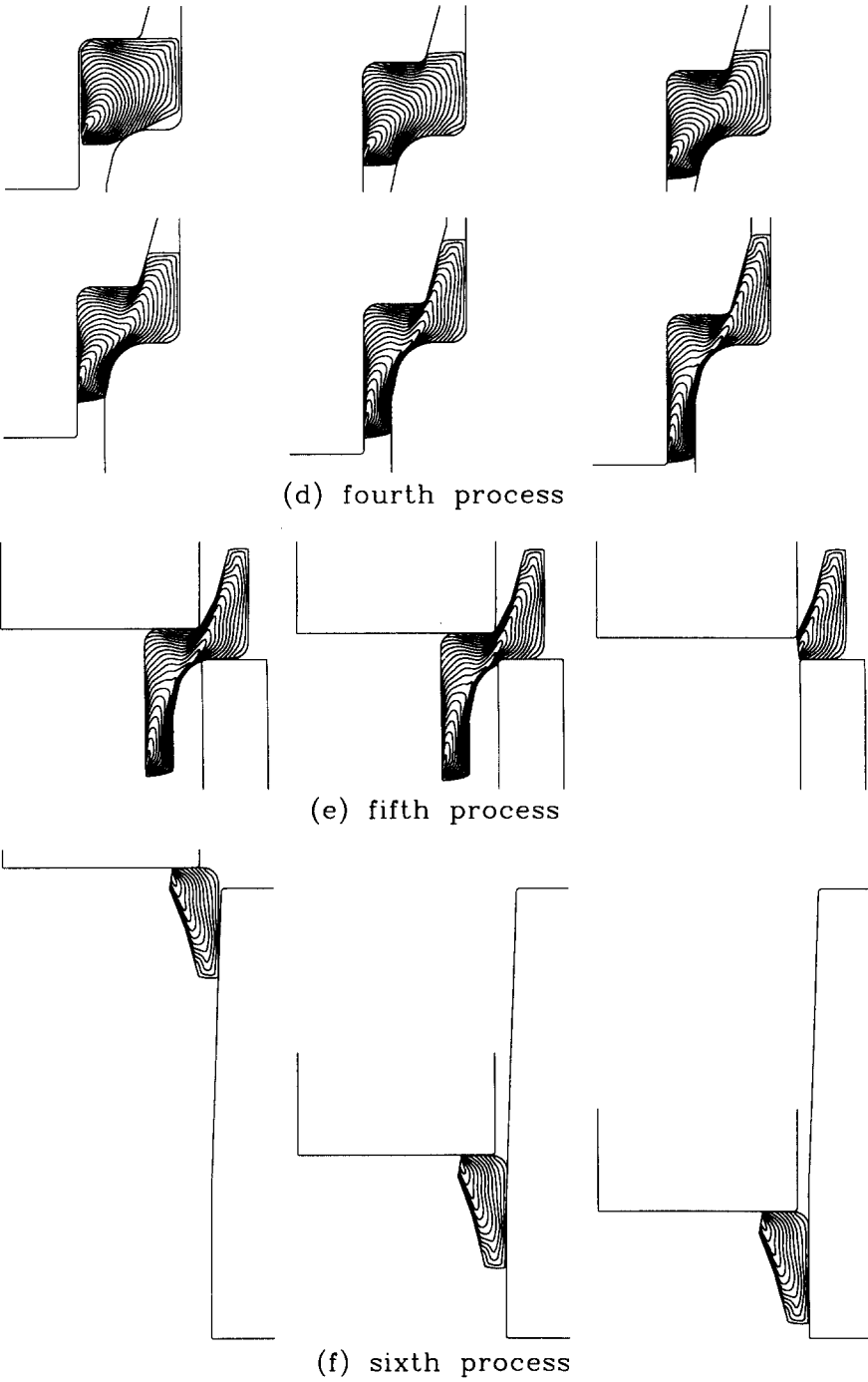


Fig.1 Finite element analysis of a sequence of compound forging processes(continued)

열간 상태에서의 피어싱 공정이다. 열간가공된 예비성형체(preform)는 냉간단조에 의하여 가공되고 다시 냉간피어싱 공정을 거쳐 두 개의 냉간단조품으로 분리된다. 그리고 마지막으로 사이징 공정을 거쳐 근접제품치수로 가공된다. 공정의 흐름도 및 기하학적 정보는 Fig.1에서 보는 바와 같다.

전반부의 3 단의 열간단조 공정 해석정보는 다음과 같다.

- 금형속도 : $\bar{V}_D = 300 \text{ mm/sec}$

- 쿨롱마찰계수 : $\mu = 0.3$

- 변형저항식 : $\bar{\sigma} = 62.0 \bar{\epsilon}^{0.18} \text{ MPa}$

마지막 3 개의 냉간가공 공정의 해석정보는 다음과 같다.

- 쿨롱마찰계수 : $\mu = 0.05$

- 변형저항식 : $\bar{\sigma} = 350.0 \left(1.0 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.05}\right)^{0.23} \text{ MPa}$

Fig.1은 소성유동선도를 추적한 것이다. 소성유동선도는 단조품의 강도와 직결되어 있다. 본 적용예제는 최종제품의 소성유동선도의 예측을 위한 자동해석 기능이 단조 시뮬레이터의 공정적용에 매우 중요하다는 점을 강조하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 복합단조 공정의 자동 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 소개하였다. 복합단조 공정의 중요성을 생산성 향상 측면에서 강조하였으며, 복합단조 공정의 유한요소해석에서 고려해야 할 중요점들을 개괄적으로 소개하였다.

적용예제로 6단 단조공정의 자동 유한요소해석이 실시되었다. 이 공정은 2단의 열간단조 공정, 2번의 피어싱 공정, 1번의 냉간단조 공정과 사이징 공정으로 이루어져 있는 비교적 복잡한 실제의 공정이다. 이 예제에 대한 유한요소해석 결과는 복합단조 공정의 소성유동상 특징과 근접제품치수의 생산 측면에서의 장점을 강조하고 있다. 공정적용 연구를 통하여 본 연구에서 제시된 복합단조 자동해석 기술의 우수성이 입증되었다.

참고문헌

- [1] 이항수, 전기찬, "자동차 구동부품의 정밀 단조기술", 제2회 단조심포지움, 한국소성가공학회, 단조기술의 진보(이동녕, 박종진 편집), pp. 124-134, 1995.
- [2] 이동녕 · 박종진 편집, 단조기술의 진보, 한국소성가공학회 제2회 단조심포지움, 1995.
- [3] 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.
- [4] 전만수, "사각형 유한요소 해석모델의 자동생성 프로그램의 개발", 한국정밀공학회, 제11권, 제 1호, pp.157-165, 1994.
- [5] 정성훈, 강정인, 오수익, "유한요소법을 이용한 전단 메카니즘에 관한 연구", 한국소성가공학회 '95춘계학술대회 논문집, pp.211-223, 1995.
- [6] 전만수, 이석원, 정재현, "스프링부착 금형을 가진 다단 축대칭 단조공정의 유한요소해석-단조시뮬레이터 공정적용 사례(3)", 한국소성가공학회 춘계학술대회, 금오공대, 1996.