

부유금형을 가진 냉간단조 공정의 유한요소해석

류찬호* · 전만수**

(1999년 10월 4일 접수)

Finite Element Analysis of a Cold Forging Process Having a Floating Die

C.H. Ryu and M.S. Joun

Abstract

In this paper, a computer simulation technique for the forging process having a floating die is presented. The penalty rigid-plastic finite element method is employed together with an iteratively force-balancing method, in which the convergence is achieved when the floating die part is in force equilibrium within the user-specified tolerance. The force balance is controlled by adjusting the velocity of the floating die in an automatic manner. An application example of a three-stage cold forging process is given.

Key Words : Forging Simulation, Floating Die, Rigid-Plastic Finite Element Method, Iteratively Force-Balancing Scheme

1. 서론

단조품의 최대 수요처는 자동차산업이며, 자동차의 주요 동력전달 장치는 철단조품이다. 철단조의 주요 목적은 양질의 부품을 값싸게 대량생산하는 것에 있다. 환경오염 및 에너지 소비에 관한 국제적 규제 움직임, 자동차 시장의 치열한 국제경쟁, 자동차의 보급 확산 등에 힘입어 국제단조시장은 꾸준한 성장을 이룩하고 있으며, 우리나라는 자동차산업과 기계산업의 급속한 발전으로 단조산업이 외형적으로 크게 성장하였다.

최근의 단조공업의 특징은 후속 기계가공 공수의 최

소화, 자동화 및 고속생산, 정밀단조, 신공정 및 관련장비의 개발 등으로 요약될 수 있다. 후속 기계가공 공수의 최소화와 치수정밀도에 대한 단조품 수요자의 지속적인 요구로 냉간단조 생산량이 상대적으로 크게 증가하고 있고, 열간단조는 주조 등의 영역을 잠식함으로써 전체 생산량의 꾸준한 증가 추세를 유지하고 있다. 특히, 정밀 냉간단조 분야에서는 무절삭에 도전하고 있으며 열간단조에서 무플래쉬단조(flashless forging)의 비중이 증가하고 있는 등 완제품과 유사한 단조품을 생산하기 위한 다양한 노력들이 시도되고 있다. 그 결과, 단조공업에서 소재의 실수율이 점진적으로 증가하고 있는 것이 사실이

* 경상대학교 수송기계공학부 대학원

** 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터

다. 저자들⁽¹⁾은 베어링 강구 제조공정을 최적화함으로써 소재의 실수율을 3% 이상 개선시키는 효과를 경험한 바 있다.

이렇과 같은 I 형 단면을 지닌 축대칭 단조품은 소재의 측면 열간단조를 통하여 생산되고 있다. 축방향으로 단조하는 기존의 방법으로 I 형 단면의 단조품을 생산하고자 할 경우, 분리가능한 부유금형(floating die) 등을 사용해야 한다. 부유금형은 소재와 소재간의 접촉력에 의하여 구동되므로 공정개발 및 금형구조설계시에 부유금형의 속도 예측은 매우 중요한 문제이다. 그러나 현재까지 이러한 문제의 해결을 위한 유한요소법의 적용은 실시되지 않았다. 본 논문에서는 부유금형을 지닌 단조공정에 대한 유한요소법을 제시하고 전형적인 적용예제를 소개하고자 한다.

2. 강소성 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 있고, von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 Coulomb 마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 를 구하자는 것이며, 벌칙기법을 이용하여 비압축성 조건을 처리하면, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij}' \omega_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} K \epsilon_{ii} \omega_{ii} d\Omega - \sum \int_{\Gamma_h} \bar{t}_i \omega_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \mu \sigma_n g(v_t) \omega_t d\Gamma = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 Γ_{v_i} 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

$$\omega_{ii} = \frac{1}{2} (\omega_{i,j} + \omega_{j,i}) \quad (2)$$

이다. 벌칙상수 K 는 매우 큰 값의 양수이며, 다음의 물

리적 의미를 갖는다.

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

따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다. 식 (1)에서 σ_n 은 법선응력이며 필수경계조건의 결과인 절점치로부터 구해진다⁽²⁾. μ 는 마찰계수(frictional coefficient)이고, 함수 $g(v_t)$ 는 상대속도가 마찰에 미치는 영향을 고려하는 역할, 수치적 문제점을 완화시키는 역할, 쿨롱마찰법칙의 경우 고착상태($v_t = \bar{v}_t$)를 만들어 줌으로써 전단응력이 이론적 한계를 못넘게 하는 역할 등을 수행하는 함수로써, Chen과 Kobayashi⁽³⁾가 제안한 다음의 함수가 가장 널리 사용되고 있다.

$$g(v_t) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{v_t - \bar{v}_t}{a} \quad (4)$$

여기서 v_t 와 \bar{v}_t 는 각각 소재와 금형의 접선속도성분을 나타내며, a 는 아주 작은 양의 상수이다.

한편, 식 (1)에서 텐서량의 상첨자 프라임(')은 편차성분(deviatoric component)을 나타내며, 하첨자 t 와 n 은 각각 접선성분과 법선성분을 의미한다. 그리고 하첨자가 두번 반복되는 것은 덧셈에 관한 규약을 따른 것이며, 콤마(,) 뒤의 첨자는 편미분을 의미한다.

전술한 경계치 문제를 푸는 것은 임의의 가중함수 ω_i 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장 v_i 를 구하는 문제로 수식화된다. 물론, 속도장은 Γ_{v_i} 와 Γ_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 두 개의 함수를 보간하여 속도와 압력이 미지수인 비선형연립방정식을 얻을 수 있다. 유한요소방정식의 유도 및 해법에 관한 내용은 참고문헌⁽⁴⁾으로 대신한다.

3. 축차적 하중 균형 유지 기법

전만수 등⁽⁵⁾은 스프링부착 금형을 가진 열간단조공정

해석 기법을 제안하여 실공정 적용을 성공적으로 실시한 바 있다. 부유금형은 스프링상수가 0인 스프링부착 금형의 특수한 형태로 볼 수 있다. 본 논문에서는 기 개발된 기법을 응용하여 부유금형을 가진 냉간단조 공정의 유한요소해석을 실시하고자 한다.

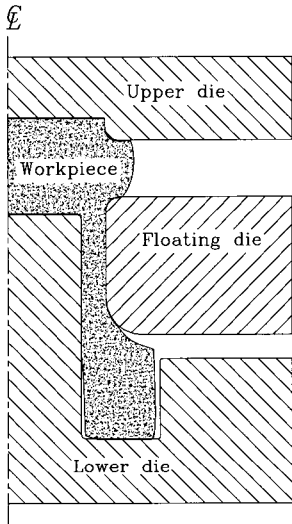


Fig. 1 Conceptual diagram of a forging process having a floating die

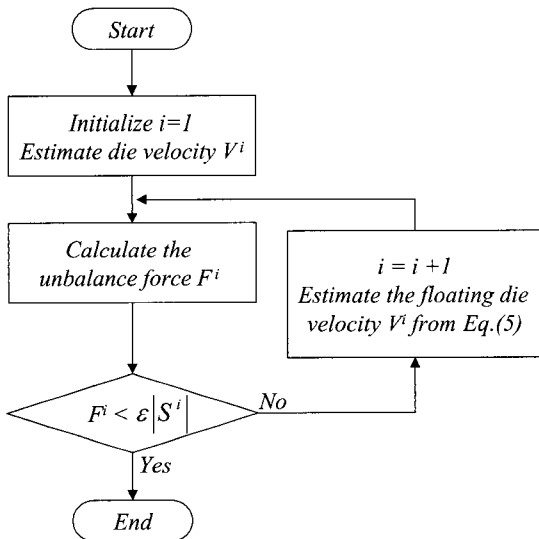


Fig. 2 Procedure of a scheme for reducing the unbalance force

Fig. 1은 부유금형을 개념적으로 도시한 것이다, 부유금형의 이동가능 거리는 규제될 수 있다.

기존의 유한요소법을 이용하여 부유금형을 지닌 단조 공정을 해석할 경우, 해석도중에 부유금형에 작용하는 하중이 일정한 값 이내에 존재하도록 축차적 접근방법으로 속도를 구하여 조절해야 한다. 본 연구에서는 고속수렴과 수렴성 보장을 위하여 Fig. 2의 성형하중-반력 균형 기법을 사용하였다. 이 기법의 단계별 상세 접근 방법은 다음과 같다.

단계 1. $i = 0, j = 0, k = 0$ 으로 둔다.

단계 2. $i = i + 1$ 로 두고, 부유금형에 작용하는 하중 F^i 를 구한다. 이 하중이 일정한 값 이하의 크기이면, 속도를 그대로 두고 해석을 실시한다. 그렇지 않으면, 단계 3으로 간다.

단계 3. 하중균형오차 $E^i = F^i$ 가 허용 범위($\epsilon |S^i|$, ϵ = 입력상수, $|S^i|$ = 최대하중)에 들어오면, 즉 $|E^i| < \epsilon |S^i|$ 이면, 수렴한 것으로 간주한다. 그렇지 않을 경우, 단계 4로 간다.

단계 4. 음수의 $E^l (l = 1, 2, \dots, i)$ 중에서 최대치 E^j 와 이에 해당하는 금형의 속도 V^j 를 저장하고, 양수의 $E^l (l = 1, 2, \dots, i)$ 중에서 최소치 E^k 와 이에 해당하는 V^k 를 저장한다. 그리고 $i = i + 1$ 로 두고 다음 단계로 간다.

단계 5. j 와 k 중 어느 하나라도 0이면, 즉 $E^l (l = 1, 2, \dots, i-1)$ 이 모두 양수이거나 모두 음수일 경우, 수렴역사 (E^l, V^l)를 고려하여 V^i 을 추정한다. 만약 j 와 k 가 모두 0이 아니면, 다음의 식

$$V^i = \frac{V^j E^k - V^k E^j}{E^k - E^j} \quad (5)$$

으로부터 V^i 를 계산한다. 그리고 새로운 V^i 에 대한 E^i 를 유한요소해석을 통하여 구한 후 단계 3으로 간다.

4. 공정적용 예제

Fig. 3은 예제로 선택된 공정의 흐름도이다. 그림에서 부유금형은 고정되어 있지 않고 소재와 접촉에 의하여 움직인다. 제품이 확대칭이므로 성형한 후 분리될 수 있도록 부유금형은 두 조각 이상으로 이루어져 있다.

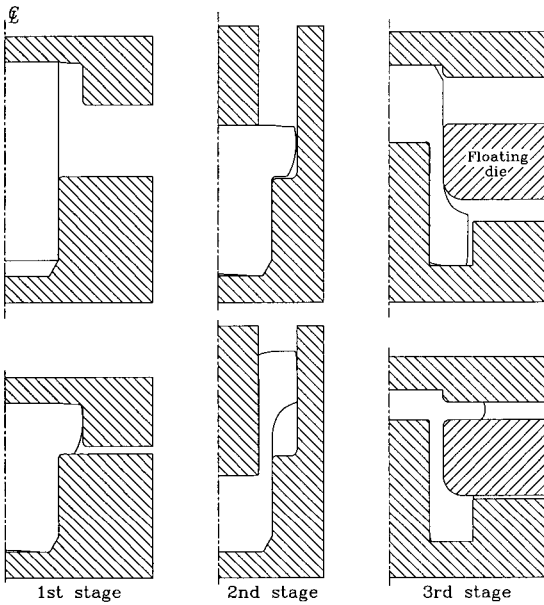


Fig. 3 Sequence of a cold forging process having a floating die

사용된 공정조건과 소재의 변형저항식은 다음과 같다.

- 쿨롱마찰계수 : $\mu = 0.05$
- 변형저항식 : $\bar{\sigma} = 324.0(1 + \bar{\epsilon}/0.052)^{0.295} \text{ MPa}$
- 편치속도 : $\bar{v}_n = -1.0 \text{ mm/sec}$

부유금형에 작용하는 하중이 최대성형하중의 0.2% 이내에 존재하면, 수렴한 것으로 간주하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 성형하중곡선과 금속유동선도를 나타내고 있다. 성형하중곡선으로부터 해석결과에서 부유금형의 불균형하중은 성형하중에 비하여 충분히 작음을 알 수 있다.

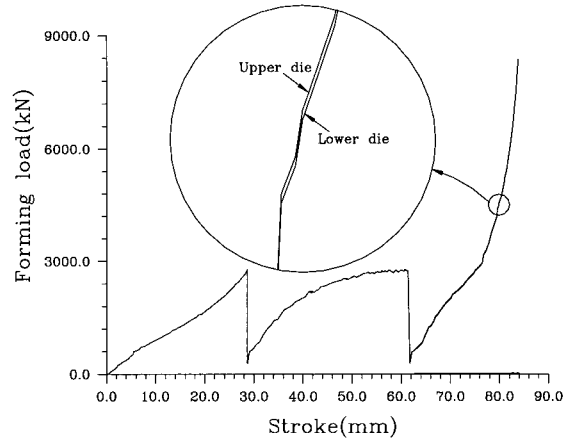


Fig. 4 Variation of forming load with the accumulated stroke

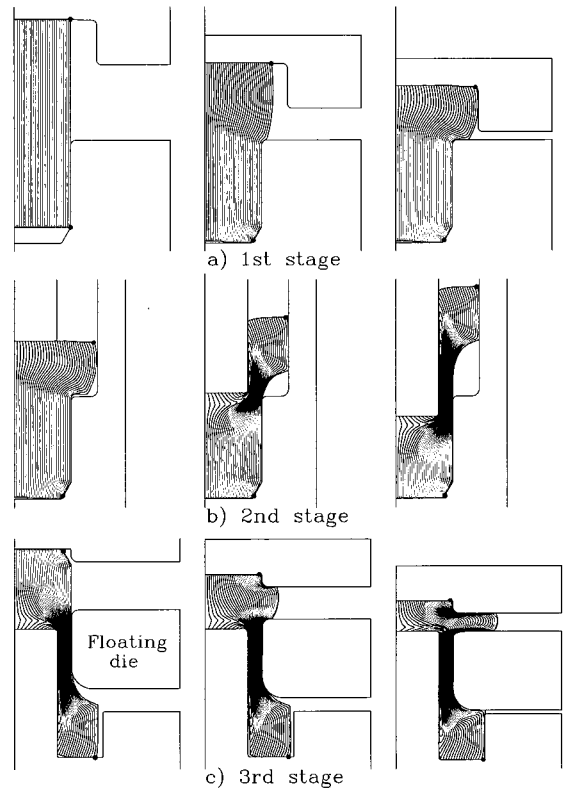


Fig. 5 Variation of metal flow lines

Fig. 6은 부유금형의 속도분포를 나타내고 있다. 부유금형의 속도는 점진적으로 증가하다 갑자기 떨어지는 현상이 반복되고 있다. 급격한 속도 변화의 원인은 두 가지로 설명된다. 대부분의 급격한 속도 감소는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 하부의 금형에 새로운 절점이 추가되면서 순간적으로 상하 접촉면적의 변화가 크게 발생하는 것에 기인한다. Fig. 7은 점 A와 점 B 사이의 표면력벡터를 비교한 것으로 대부분의 속도 급감 지점에서 이와 유사한 현상이 발생하였다. Fig. 8은 Fig. 6에서 점 C와 D 사이의 변형률속도 패턴을 나타내고 있다. 점 C 이전의 변형률속도 패턴은 Fig. 8(a)와 유사하고 점 D 이후의 변형률속도 패턴은 Fig. 8(b)와 유사하다. Fig. 6과

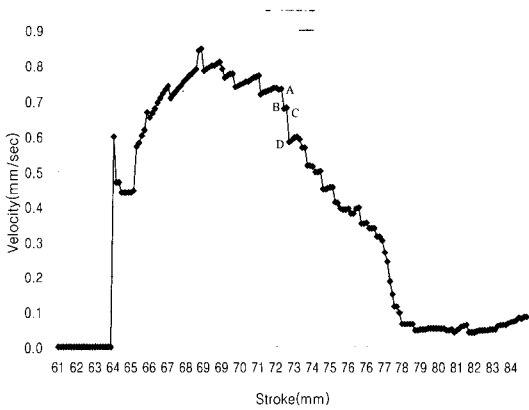


Fig. 6 Variation of the floating die speed with the stroke

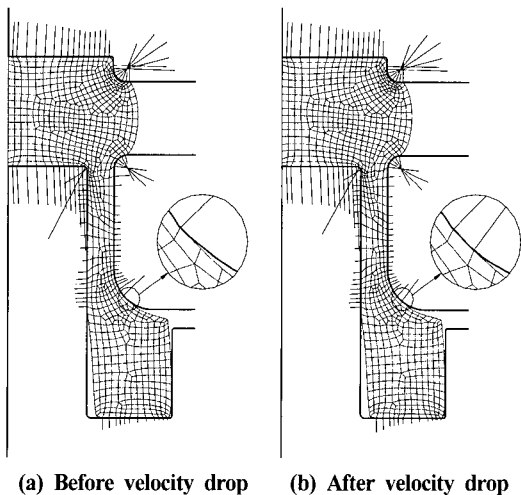


Fig. 7 Change of contact stresses at the moment of a velocity drop

Fig. 8로부터 변형률속도 패턴의 변화도 속도의 급격한 변화를 야기함을 알 수 있다. 한편, 속도의 급감 이후의 점진적인 속도 증가는 상부의 소재가 바깥으로 계속적으로 퍼져 나가면서 상부의 접촉면적이 꾸준히 증가하기 때문이다.

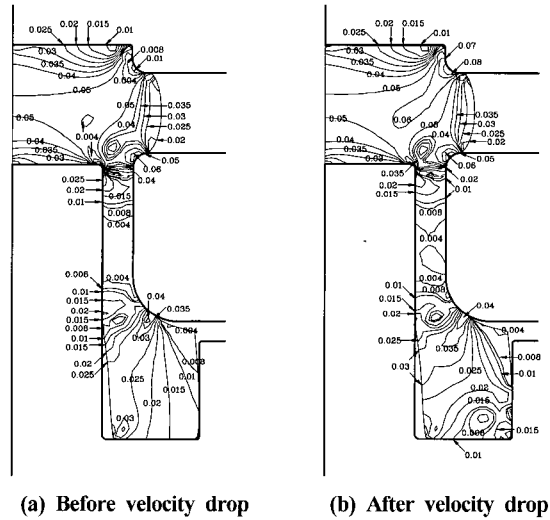


Fig. 8 Change of effective strain-rate at a moment of a velocity drop

4. 결론

본 연구에서는 부유금형을 가진 단조공정의 자동해석 기술을 제시하였다. 강소성 유한요소법이 사용되었으며, 부유금형의 속도를 효과적으로 구하기 위하여 축차적 성형하중 균형 기법이 제안되었다. 적용예제를 통하여 제시된 접근방법의 실용 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) 김기곤, 전만수, 1999, "강구압조공정 설계 개선 사례", 제4회 단조 심포지엄(유연철 나경환 편), pp. 163~167.

- (2) M. S. Joun, 1999, "Iterative and Non-Iterative Schemes for Coulomb Frictional Law in Metal Forming Simulation and Their Numerical Characteristics", *Comm. Num. Methods Eng.*, Vol. 15, pp. 515~525.
- (3) C. C. Chen and S. Kobayashi, 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", *Appl. of Num. Methods to Forming Process*, ASME, AMD 28, pp. 163~174.
- (4) S. M. Hwang and M. S. Joun, 1992, "Analysis of Hot Strip Rolling by a Penalty Rigid-Viscoplastic Finite Element Method", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.34, pp. 971~984.
- (5) M. S. Joun, S. W. Lee and J. H. Chung, "Finite Element Analysis of a Multi-Stage Axisymmetric Forging Process Having a Spring-Attached Die", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 38, pp. 843~854, 1998.