

스프링부착 금형을 가진 다단 축대칭 단조공정의 유한요소해석 -단조시뮬레이터 공정적용 사례(3)

전만수(경상대학교 기계공학과), 이석원(경상대학교 기계공학과 대학원)
정재현(한화기계주식회사 연구소)

Finite Element Analysis of a Multi-Stage Axisymmetric Forging Process Having a Spring-Attached Die

M. S. Joun, S. W. Lee(Gyeongsang National University)
and J. H. Chung(Hanwha Machinery Co., Ltd.)

Abstract : In this paper, a computer simulation technique for the forging process having a spring-attached die was presented. The penalty rigid-thermoviscoplastic finite element method was employed together with an iteratively force-balancing method, in which the convergence was achieved when the forming load and the spring reaction force are in equilibrium within the user-specified allowable accuracy. The force balance was controlled by adjusting the velocity of the spring-attached die. To minimize the number of iterations, a velocity estimating scheme was proposed. Two application examples found in the related company were given. In the first application example, the predicted metal flow lines were compared with the actually forged ones. In the second example, a hot forging process with a spring-attached die was simulated and the analyzed results were discussed in order to investigate the effects of spring-attached dies on the metal flow lines and the forming loads.

Keywords : Forging Simulation(단조 시뮬레이션), Spring-Attached Die(스프링부착 금형), Penalty Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method(벌칙 강열점소성 유한요소법), Iteratively Force-Balancing Scheme(축차적 하중 균형 기법)

1. 서론

단조의 가장 중요한 목적은 기계적 성질의 향상, 즉 각종 강도의 개선에 있다. 열간 단조 품의 경우, 기계적 성질은 소성유동선도(metal flow lines)에 매우 큰 영향을 받는다. 비록, 결모양의 성형은 성공했으나, 소성유동선도의 부적합으로 공정설계에 실패하는 경우가 종종 발생하고 있다. 열간단조에서 소성유동선도의 제어는 원소재의 반경과 블로커(blocker) 형상

설계에 의존하는 경우가 대부분이다. 소성유동선도를 보다 정교하게 세어하기 위한 목적으로 스프링부착 금형이 널리 사용되고 있다.

한편, 단조시 금형의 구석 부위에서의 결속결합이 문제가 되는 경우가 빈번하다. 비록 처음에는 결합이 발생하지 않았거나 무시할 정도로 작았다고 하더라도, 단조 찌꺼기의 부착으로 생산중에 결합이 성장하는 것으로 보고되고 있다. 특히, 높이에 비하여 폭이 상대적으로 작은 리브(rib)부의 소성유동은 매우 어렵기 때문에 결속 결합이 발생할 가능성이 매우 높다. 이러한 결속결합을 없애기 위하여 무리하게 성형할 경우, 소재의 과다 손실과 과대한 성형하중을 초래하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 스프링부착 금형이 종종 사용되고 있다.

단조공정의 컴퓨터 시뮬레이션 기술은 단조 공정설계자가 겪고 있는 난제의 해결에 효과적이며, 현재 공정적용이 확산되어 가고 있다[1]. 그러나 단조 시뮬레이션을 위한 해석기술의 발전에도 불구하고 스프링부착 금형을 가진 단조공정 해석에 관한 연구 결과를 관련 문헌에서 찾기가 쉽지 않다. 대부분의 유한요소해석에서 금형의 속도가 일정하거나 시간의 함수로 주어진 문제들이 취급되었다. 스프링부착 금형의 속도는 미지수이며, 그 크기는 성형하중과 스프링반력의 균형에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 기존의 단조 시뮬레이션 기술[2,3]을 이용한 스프링부착 금형을 가진 단조공정의 유한요소해석 기법을 제시하였다. 유한요소해석의 관점에서 스프링부착 금형의 개념을 소개하였고, 축차적 하중 수렴 기법을 제안하였다. 그리고 스프링 부착의 효과를 소성유동선도와 성형하중의 비교를 통하여 가시화하였다.

2. 스프링부착 금형을 가진 단조공정의 유한요소해석 기법

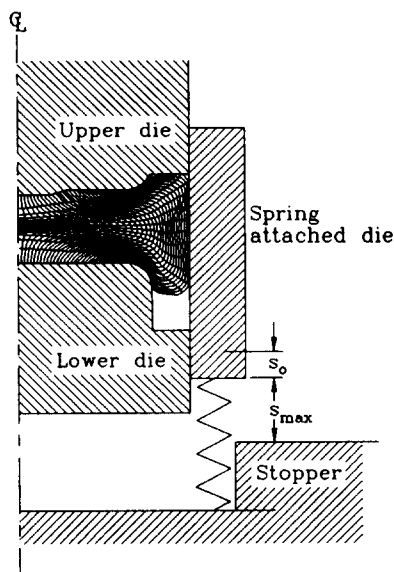


Fig.1 Conceptual diagram of a forging process having a spring-attached die

Fig.1은 스프링부착 금형을 가진 단조공정의 개념도이다. 일반적으로 스프링은 초기에 예압량 s_0 만큼 예압이 되며, 설계시에 스프링부착 금형의 최대허용 스트로크 s_{max} 는 규제된다. 스프링부착 금형은 예압하중 $P_0 (= k s_0)$ 보다 작은 하중이 작용하면 정지해 있다가 그 이상의 하중이 작용하면 성형하중과 스프링하중이 균형을 이루는 방향으로 움직이게 된다.

기존의 유한요소법을 이용하여 스프링부착 금형을 지닌 단조공정을 해석할 경우, 성형하중과 스프링반력의 균형을 이루기 위한 축차적 접근방법이 불가피하다. 문제는 어떠한 방법으로 고정도의 해를 최소의 비용으로 구하는냐에 있다. 본 연구에서는 고속수렴과 수렴성 보장을 위하여 다음과 같은 방법을 제안하였다.

성형하중-스프링반력 균형 기법: 전 단계에서 구한 성형하중이 스프링반력에 비하여 작고 스프링부착 금형의 스트로크가 0일 경우, 스프링의 속도를 0으로 두어 해석을 실시한다. 해석결과, 성형하중 F^i 가 스프링하중 S^i 에 비하여 크고, 하중균형오차 $E^i = F^i - S^i$ 가 허용범위 밖에 있으면, 즉 $|E^i| > \varepsilon |S^i|$ 이면, 오차를 줄이는 방향으로 편치의 속도를 감안하여 스프링부착 금형의 속도 V^i 를 V^{i+1} 로 조절한 후, 성형하중 F^{i+1} 과 스프링반력 S^{i+1} 을 구한다. 이러한 계산 과정에서 오차허용한계 이내에 들어오면 수렴한 것으로 간주한다. 수렴이 되지 않은 경우에는 성형하중 및 스프링반력의 계산 과정을 다음의 조건이 나올 때까지 반복한다.

$$E^i E^{i+1} < 0 \quad (1)$$

이 부등식이 성립하면 V^{i+2} 를

$$V^{i+2} = \frac{V^i E^{i+1} - V^{i+1} E^i}{E^{i+1} - E^i} \quad (2)$$

로부터 계산하고 해석결과로부터 F^{i+2} , S^{i+2} , E^{i+2} 를 구한다. E^{i+2} 가 허용오차범위에 들어오면 수렴한 것으로 간주한다. 그렇지 않을 경우, $E^j (j=1, 2, \dots)$ 중에서 음수중 최대값과 양수중 최소값을 선택하여 해당지수를 각각 i 와 $i+1$ 로 대치하여 식(2)로부터 새로운 속도 V^{i+2} 를 구한다. 이러한 과정을 반복하여 수렴조건에 들어오면, 반복계산을 종료한다.

3. 적용예제

3.1 다단 열간단조공정의 소성유동선도 예측과 검증

본 예제는 3단 열간단조공정의 해석에 관한 것으로 단조공정 설계시 소성유동선도의 중요성을 강조하기 위한 것에 목적을 두고 있다. 결국 결합이 없는 모양내기 단조공정의 설계는 상대적으로 쉽지만, 내부의 금속유동선도의 제어까지 고려하기란 쉽지 않다. 이러한 경우에 단조 시뮬레이터의 활용은 특히 유용하다. 설계의 시행오차를 줄일 수 있으며, 시험타격으로 인한 생산성의 저하를 막을 수 있기 때문이다. 일반적으로 열전달과 소성유동을 동

시에 고려하는 연계해석 기술[2]은 크게 활용되지 못하고 있는 실정이다. 첫번째 원인은 설계 기술자의 주요관심사가 금속유동선도이며, 등온공정 가정하에서도 금속유동선도의 예측이 비교적 정확하다는 사실에 있다. 그리고 고온 상태에서의 재료의 기계적 성질이 명확하게 알려져 있지 않으며, 특히, 접촉부위의 열적 경계조건이 사실상 자료화되어 있지 않기 때문이다. 본 연구에서는 등온가정하에서 해석을 실시하였다. 사용된 공정조건은 다음과 같다.

- 금형속도 : $\bar{V}_D = 300 \text{ mm/sec}$
- 쿨롱마찰계수 : $\mu = 0.3$
- 변형저항식 : $\bar{\sigma} = 62.0 \bar{\epsilon}^{0.18} \text{ MPa}$

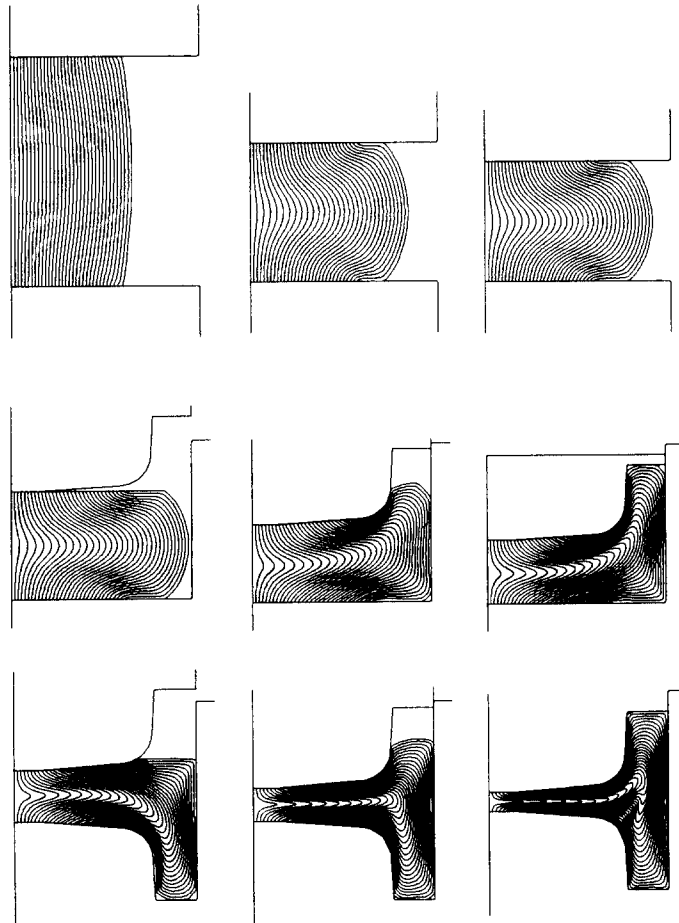


Fig.2 Variation of metal flow lines and defect formation in the metal flow lines.

Fig.2는 금속유동선도의 변화과정을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 금속유동선도 결함의 발생 구조와 과정을 상세히 알 수 있다. 따라서 이 예측결과로부터 설계수정 정보를 과

학적으로 얻을 수 있으며, 시행오차적 접근방법에서 불가능한 공정최적화가 가능하다. Fig.3은 실공정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 시뮬레이션 결과는 실공정 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

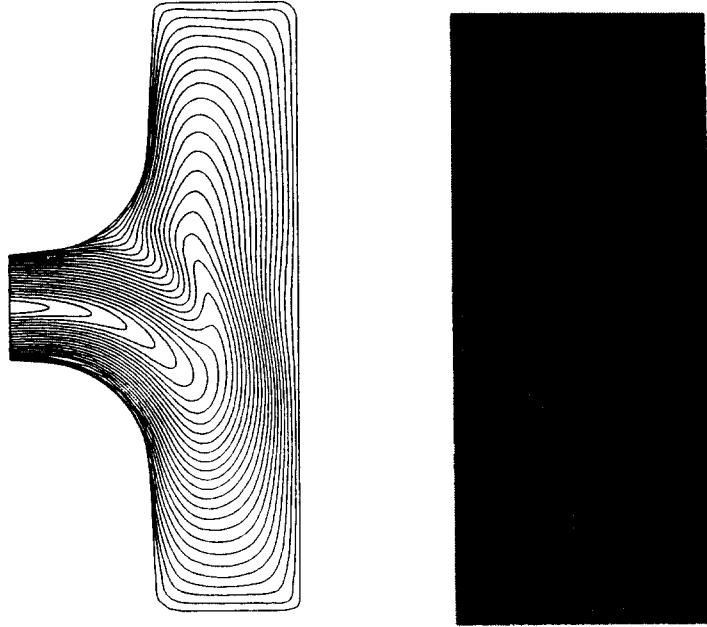


Fig.3 Comparison of the actually forged and the predicted metal flow lines

3.2 스프링부착 금형을 가진 단조 공정의 해석 및 스프링의 효과

스프링부착 금형이 금속유동선도와 성형하중에 미치는 영향을 고려하기 위하여 스프링부착 금형을 사용한 경우와 고정 금형을 사용한 경우에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 본 해석에 사용된 공정조건 및 재료의 기계적 성질은 예제 1과 동일하다.

Fig.4-5는 스프링부착 금형을 가진 단조공정의 유한요소해석 결과이다. Fig.4의 제2단에서 우측금형은 스프링부착 금형이다. 초기의 예압하중이 3000N, 스프링상수를 160 N/mm, 최대허용 스트로크를 100 mm, $\epsilon = 0.01$ (1%의 오차허용)로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 성형하중에 의하여 스프링부착 금형이 아래로 움직였음을 알 수 있다. Fig.5의 성형하중선도에서 스프링부착 금형에 작용하는 하중의 증가가 거의 직선에 가까우며, 증가율이 다른 금형의 하중증가율에 비하여 현저히 작음을 알 수 있다.

Fig.6-7은 스프링부착 금형 대신 고정금형을 사용한 경우의 해석결과이다. Fig.6-7과 Fig.4-5의 해석결과는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 금속유동선도에서 큰 차이가 있으며, 성형하중도 스프링부착 금형을 사용함으로써 약 1/3 정도 줄어들었음을 확인할 수 있다.

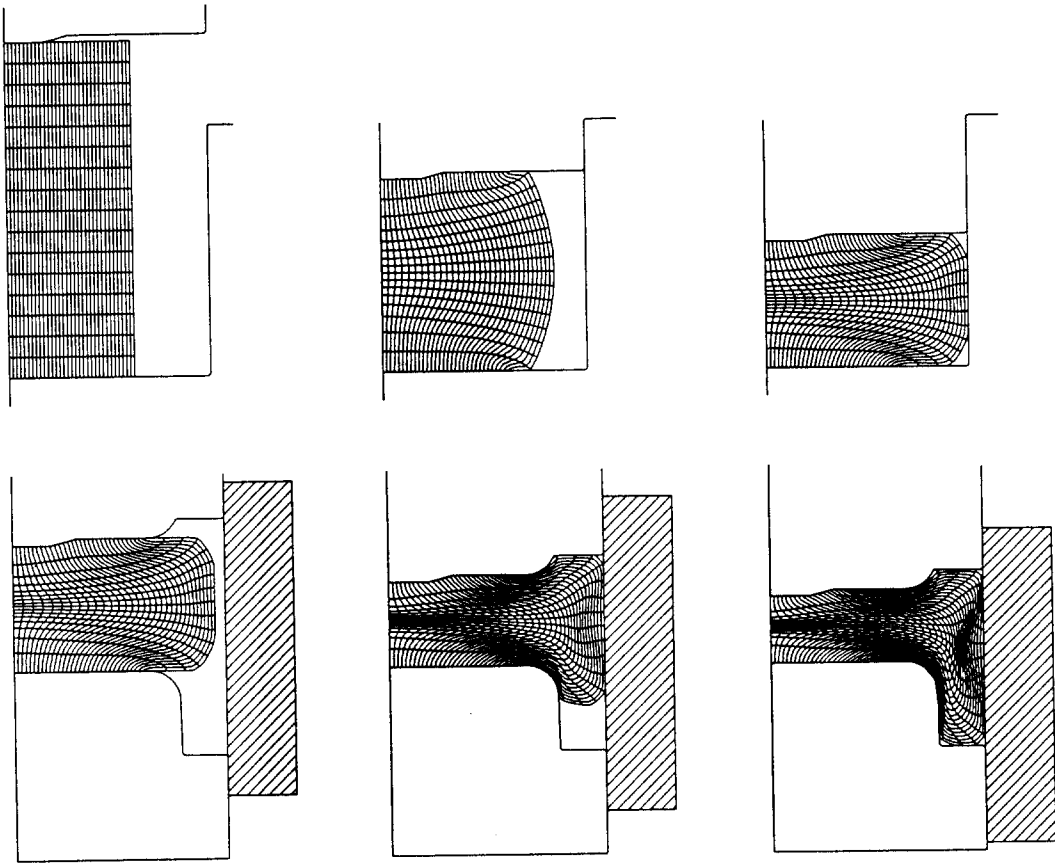


Fig.4 Visualization of metal flow lines of the forging process having a spring-attached die

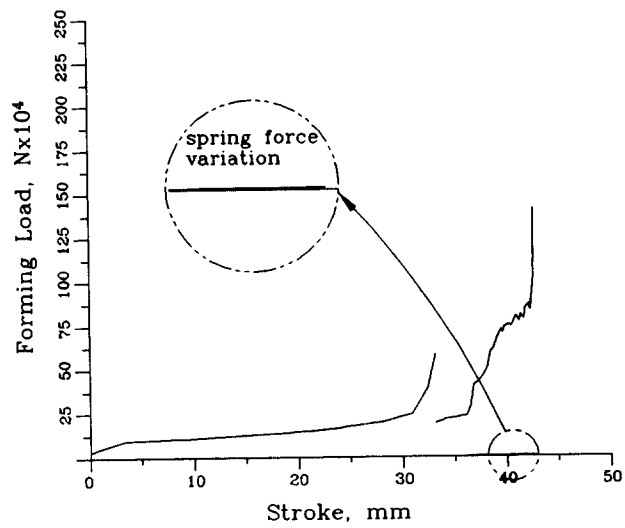


Fig.5 Forming load variation of the forging process having a spring-attached die

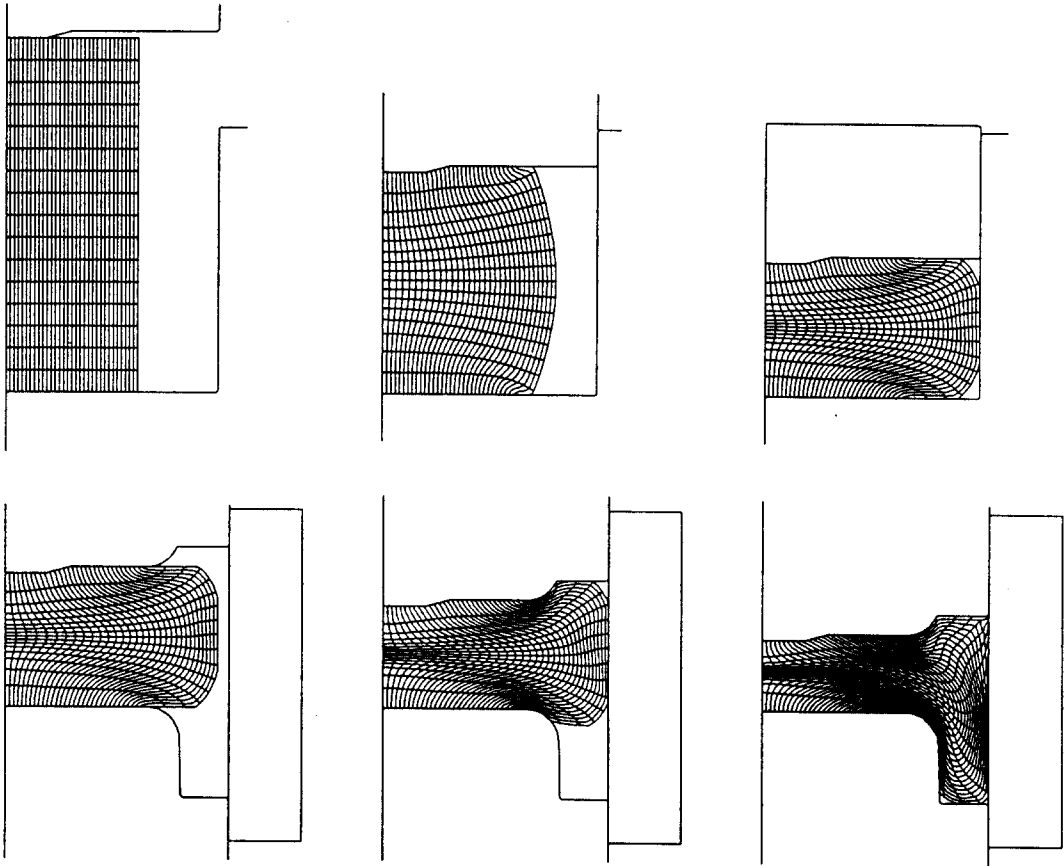


Fig.6 Visualization of metal flow lines of the forging process without spring-attached dies.

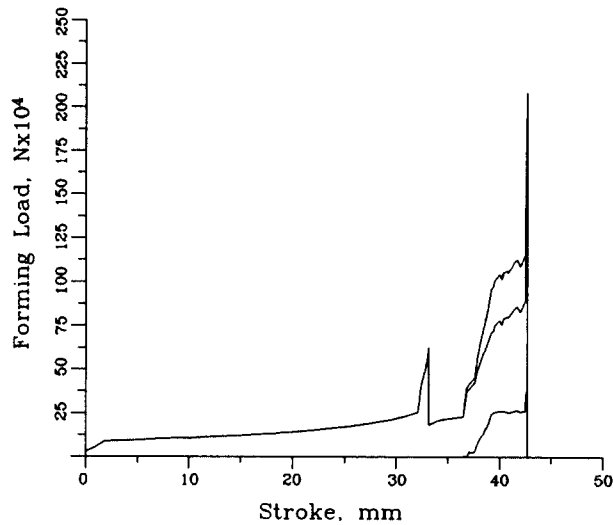


Fig.7 Forming load variation of the forging process without spring-attached dies.

4. 결론

본 연구에서는 스프링부착 금형을 가진 단조공정의 자동해석 기술을 제시하였다. 별칭 강열접소성 유한요소법이 사용되었으며, 스프링부착 금형의 속도를 효과적으로 구하기 위하여 축차적 하중 균형 기법이 제안되었다. 반복계산을 통하여 성형하중과 스프링반력이 허용오차 이내에 들어오도록 유도하는 스프링부착 금형의 속도 예측 방법을 제안하였으며, 적용예제를 통하여 제시된 접근방법의 적합성이 입증되었다.

스프링부착 금형은 금속유동선도의 제어, 결육 결함의 방지, 성형하중의 감소 등의 목적에 매우 효과적임이 입증되었으며, 금속유동선도 제어의 중요성과 금속유동선도 예측결과의 정확성이 적용 예제를 통하여 강조되었다.

참고문헌

- [1] 이동녕, 박종진, 단조기술의 진보, 한국소성가공학회
- [2] 황상무, 전만수, "POSFORM-자동차 부품 단조공정 해석 및 설계용 CAE 시스템," 한국자동차공학회 '94춘계학술대회논문집, pp.577-582, 1994.
- [3] 전만수, 문호근, 황상무, "다단열간단조공정의 자동 컴퓨터 시뮬레이션-유동해석, 온도해석, 금형해석," 대한기계학회 1995년 춘계학술대회 논문집(I), pp.337-340, 1995.