

성형실험을 통한 냉간단조 공정의 단축 유한요소 시뮬레이션

이 충 호*

(1997년 5월 9일 접수)

Reduced Finite Element Simulation of Cold Forging Processes Based on the Forming Experiment

Chung-Ho Lee

Abstract

There exists a certain functional relation between Vickers hardness and flow stress in the strain-hardened material. Using this relation, the Vickers hardness values in the strain-hardened material can be converted into the flow stress values in good approximation. Therefore, the information about the flow stress distribution in the material can be easily acquired through a forming experiment. That makes it possible to simulate the process state for a critical moment of cold forging under the given boundary conditions very quickly without calculating the foregoing history of the actual deformation from the beginning.

1. 서 론

신제품 개발 과정에서 첫 성형실험을 하기 전에 초기 금형 설계를 되도록 간편한 계산으로 빠르게 수행하기 위해 상계법^(1, 2, 3)의 원리를 유한요소 해석법^(4, 5)과 결합시켜 소위 상계유한요소 시뮬레이션 방법⁽⁶⁾이 개발되었다. 그러나 이 방법 적용시 필요한 재료내의 유동응력 정보는 간단한 추정을 통해서 얻어진다. 따라서 이 시뮬레이션 방법은 간단한 대신 그 정확도가 떨어진다. 그러나 일단 금형이 만들어지고 성형실험이 가능해지면 성형된 재료내의 비커스 경도 분포를 측정함으로써 유동응력에 관한 비교적 정확한 정보를 얻을 수 있으므로 간단하면서도 충분히 정확한 FE 시뮬레이션이 가능해진다.

2. 본 론

위에서 언급한 바와 같이 관찰하고자 하는 순간의 성형상태를 정확히 시뮬레이션 하려면 먼저 그 상태에서의 재료내 유동응력 정보를 정확히 알아야 한다. 이 문제를 해결하는 한 가지 방법은 비커스 경도와 유동응력 사이의 관계식을 이용하여 비커스 경도 측정을 통해서 유동응력 분포 상태를 간접적으로 알아내는 것이다. 이와 관련하여 본 연구에서 이용할 비커스 경도와 유동응력 사이의 관계식은 일반 탄소강 및 저합금강 재료에 대하여 다음과 같이 주어진다.⁽⁷⁾

충분히 소성경화가 진행된 재료영역 ($\bar{\epsilon} > 0.3$) 에 대해서는 다음 식을 이용한다:

$$\bar{\sigma} = C(HV_{\text{perfect}}/C)^{1/n} - \Delta\bar{\epsilon}^m; (HV > HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)}; \Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4)$$

* 만도기계 생산기술원 기반기술실

여기서 C와 n은 Ludwik의 실험식 $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^n$; ($\bar{\epsilon} > 0.3$)을 구성하는 매개변수이고 β_{perfect} 는 $\beta_{\text{perfect}} \approx \bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}^* + \Delta\bar{\epsilon})} / HV_{(\bar{\epsilon}^*)}$; ($\bar{\epsilon}^* > 0.3$; $\Delta\bar{\epsilon} \approx 0.4$)로부터 결정되는 재료 상수이다.

그러나 소성경화가 적은 재료영역 ($\bar{\epsilon} < 0.3$)에 대해서는 다음 식을 이용한다:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 + C_k (HV - HV_0) / C_H)^{n_k / n_H}; (HV < HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)})$$

여기서 $\bar{\sigma}_0$ 와 HV_0 는 초기상태 ($\bar{\epsilon} = 0$)에서의 데이터 값이고 n_k, C_k, n_H, C_H 는

$$n_k = \ln \{ (\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - \bar{\sigma}_0) / (\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.15)} - \bar{\sigma}_0) \} / \ln 2 ;$$

$$C_k = (\bar{\sigma}_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - \bar{\sigma}_0) / (0.3)^{n_k}$$

$$n_H = \ln \{ (HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - HV_0) / (HV_{(\bar{\epsilon}=0.15)} - HV_0) \} / \ln 2 ;$$

$$C_H = (HV_{(\bar{\epsilon}=0.3)} - HV_0) / (0.3)^{n_H}$$

로서 $\bar{\epsilon} = 0, 0.15, 0.3$ 에서의 데이터 값으로부터 쉽게 결정된다.

따라서 비커스 경도와 유동응력 사이의 관계식을 결정하려면 일축 압축시험(compression test)을 통해서 재료의 유동응력 곡선을 측정하는 것 외에 유효변형을 $\bar{\epsilon} = 0, 0.15, 0.3$ 의 상태에 대해서 시편의 비커스 경도를 측정하면 된다. 이어서 본래의 냉간 성형 실험을 수행하고 나중에 수행될 FE 계산의 정확도를 확인하기 위하여 성형력(forming force)을 측정해 둔다. 성형실험이 끝나면 성형된 피가공물의 내부 경도 분포를 측정하기 위해 축대칭형의 경우 대칭축을 따라 반쪽을 절삭하고 가공력에 의한 표면 경화를 최소화 하는 방향으로 절삭면을 조심스럽게 연삭한 후 연마(polishing)하여 경도 측정 시편을 완성한다. 이어서 측정면에 격자망을 구성하여 경도 측정을 위한 준비를 하는데 이 때 원칙적으로 검사하중이 작을 수록 보다 밀도 높게 경도를 측정할 수 있으나 믿을 만한 측정 결과를 얻기 위해서는 시험규정에 따라 최소 시험하중을 준수하여야 한다. 따라서 철강재료의 경우 보통 10 kgf의 시험하중을 사용하고 1 mm×1 mm 크기의 격자들로 망을 구성하면 된다. 그러나 이 때 경도 시험 압인자국 중심이 가능한 한 시편 가장자리에 가깝도록 하되 가장자리로부터 최소한 압인자국 대각선 길이의 1.5배 거리를 유지하도록 하여야 한다. 이것은 같은 소성변형 상태에 대해 금형 접촉면에서의 응력 크기는 유동응력 크기에 의해 결정되므로 특히 중요하다. 그리고 이 때 만들어진 격자망을 나중에 가급적 그대로 FE 시뮬레이션용으로 사용할

수 있도록 미리 성형 기하학적 특성을 고려하여 격자망을 구성한다. 경도 측정이 완료되면 측정된 경도 값들은 변환 공식을 이용하여 유동응력 값으로 바뀐 후 경계조건과 함께 FE 계산의 물성치로 입력된다. 이어서 탄소성 모델을 사용하여 소성회복(recovery of plastic deformation state) 과정에 대한 FE 시뮬레이션이 수행된다. 여기서 소성회복이라 함은 관찰하고자 하는 성형부하 상태에서 펀치를 약간 후진시켜 완전 무부하상태로 만든 후 다시 펀치를 전진시켜 원래의 부하상태로 만들었을 때 (unloading and reloading) 재료가 초기 탄성변형 상태에서 출발하여 원래의 소성변형 상태를 회복하는 과정을 의미한다. 물론 이 때 초기 잔류응력 상태가 이러한 소성회복 과정에 영향을 줄 수 있으나 일단 소성회복 과정이 완료되면 일반적으로 탄성변형에 소모되는 에너지는 소성변형에 소모되는 에너지의 1/1000 정도로서 전체 변형율속도 분포 및 응력 분포에 더 이상 영향을 미치지 못한다. 이 때 필요한 시뮬레이션 변위는 대개 1 mm 이내 즉 피가공물의 활성 스프링 길이(active spring length)의 1~3%에 해당하는 미소 변위로 충분하고 소성회복이 완료되면 재료 내의 물질유동은 준정상상태(quasi-steady state)에 도달하게 된다. 그리고 여기에 소요되는 계산시간은 아주 적기 때문에 이러한 종류의 시뮬레이션은 일종의 측정 데이터 후처리로 간주될 수 있다. 또한 이 때 시뮬레이션 특성상 격자 요소의 변형이 아주 작기 때문에 격자망의 유연성을 높이기 위해 2차 함수형 요소(quadratic element)를 선택하는 것이 좋다. 이러한 계산의 결과는 관찰하고자 하는 순간의

- 성형력
- 물질 유동
- 재료내 응력 분포
- 금형부하

등에 관한 정보를 제공한다. 물론 계산 결과의 정확도는 성형력에 대한 실험치와 계산치를 서로 비교함으로써 쉽게 확인될 수 있다. 한편 비커스 경도 측정에 의한 유동응력 결정의 정확성은 측정 경도치의 산포(5% 내외)에 의해 불리한 쪽으로 영향 받을 수 있다. 그러나 이것은 FE 계산 자체의 오차 고름(error smoothing) 효과 때문에 그것이 계산 결과에 미치는 영향은 크지 않을 것이므로 실용상 별로 문제되지 않는다. 이러한 단축 FE 시뮬레이션 방법은 원칙적으로 모든 성형단계에 적용 가능하지만 재료 전체의 탄성 변형 에너지량이 소성 변형 에너지량에 비해 무시할 수 없는 정도의 치수교정(sizing) 단계에 대해

서는 잔류응력의 크기가 계산결과에 미치는 영향이 클 것
이므로 적용이 곤란하다.

3. 응용예

단축 FE 시뮬레이션 방법의 한 가지 응용예로서 봉재를 소재로 한 축대칭형 티(T)형 부품의 냉간 단조 공정 (Fig.1)을 관찰해 보았다. 먼저 성형 실험을 위해 봉재를 가공하여 Fig. 2의 왼쪽과 같이 높이 18 mm, 직경

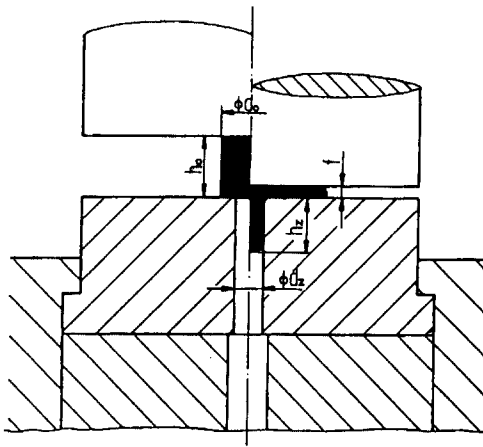


Fig. 1 Schematic drawing for cold forging of a T-shaped workpiece

17.3 mm 의 원통형 시편(재료: SMnC420) 을 제작하고 annealing 열처리 후 인산염 표면 처리를 행하였다. 그리고 나서 준비된 시편에 MoS_2 가루를 윤활재로 바르고 샤프트 성형부 구멍 직경이 8 mm 인 다이를 이용하여 플랜지 두께 2.83 mm 까지 성형하였다. Fig.2 의 오른쪽은 이미 성형한 후 반쪽에 대해서 비커스 경도를 측정한 시편의 모습을 보여준다. Fig.3 는 측정된 재료내의 비커스 경도 분포를 나타낸다. 소성회복 과정은 ABAQUS 를 이용하여 2차 함수형 요소(quadratic element)를 FE 격자 단위로 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 마찰 계수는 $\mu = 0.08$ 로 하였는데 이 값은 링 압축 시험을 통해서 결정되었다. 시뮬레이션 변위를 0.01 mm 간격으로 증가시킨 결과 대략 0.05 mm 후 소성회복이 완료되었음을 알 수 있었다. Fig.4 는 이 때의 힘-변위 관계를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 계산된 힘은 실험치 보다

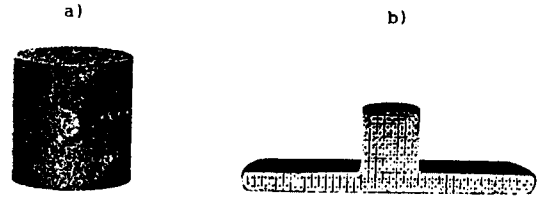


Fig. 2 Workpiece for the forming experiment (left: before forming, right: after forming)

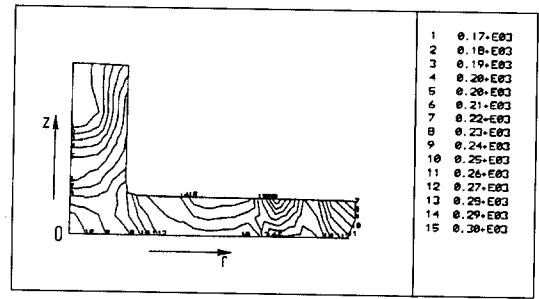


Fig. 3 Vickers hardness distribution in the workpiece

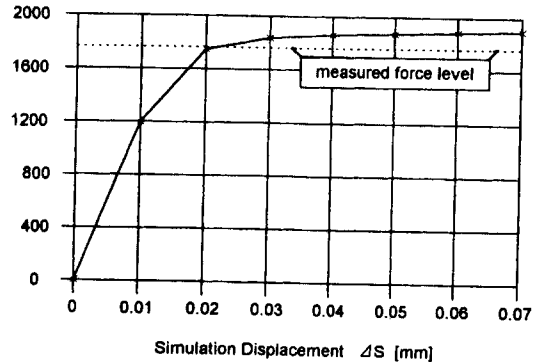


Fig. 4 Force-displacement diagram of the simplified FE simulation

5% 가량 높게 나타났다. 이러한 소성회복 과정은 재료내 응력분포 변화의 추적을 통해서도 쉽게 확인될 수 있는데 Fig.5 는 이 때의 축방향 응력 분포 변화를 보여 준다. 또한 Fig.6 는 시뮬레이션 변위 0.05 mm 후의 FE 격자 변형 상태를 보여 준다. 마지막으로 Fig.7 은 성형시 기계적 부하에 의한 금형 변형 상태와 이로 인하여 예상되는 제품 치수 오차를 보여준다. 금형의 탄성 변형량 계산 결과 플

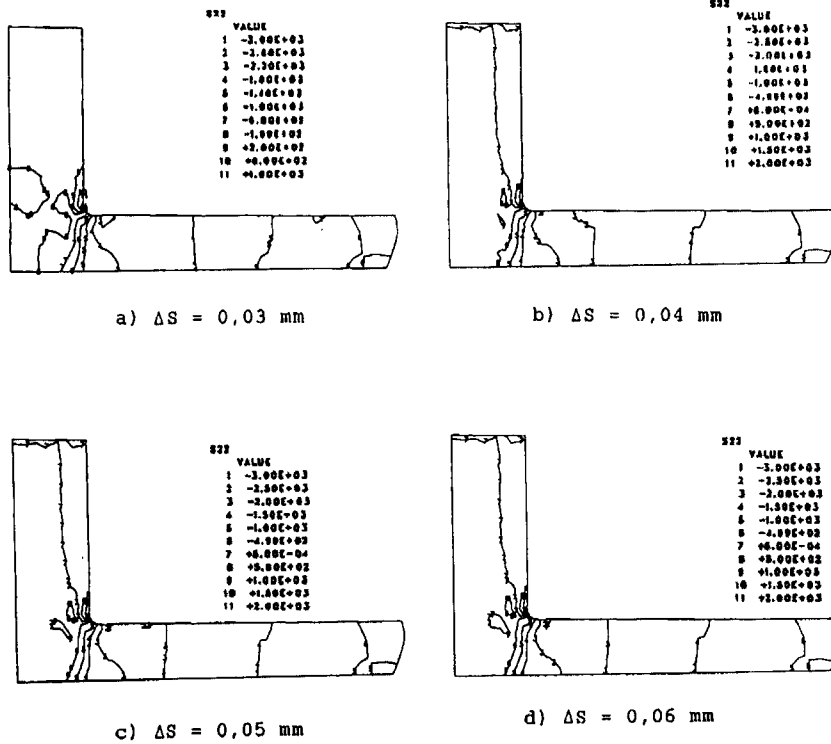


Fig. 5 Change of axial stress distribution at the simplified FE simulation

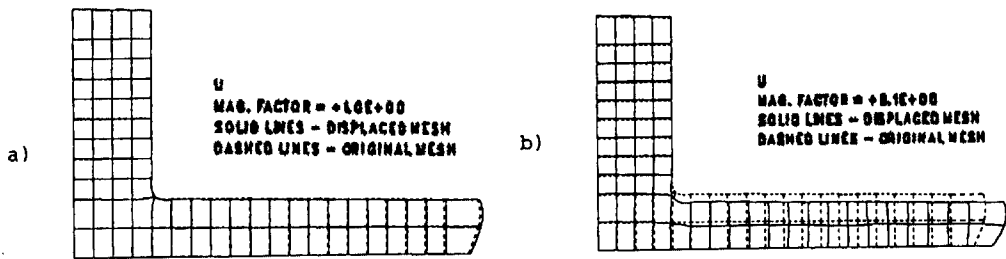


Fig. 6 FE-mesh for the simplified FE simulation
(left: unmagnified view of deformation, right: magnified view of deformation)

랜지 부분에서의 제품 치수 오차는 $\Delta l = 0.2$ mm, 샤프트 부분에서의 제품 치수 오차는 $\Delta d_s = 0.04$ mm 정도 되는 것으로 추정되었다. 실제로 이러한 계산 결과는 성형된 제품에 대한 측정 결과와 거의 일치하였다. 이와 같이 성형 부하에 의한 금형 변형과 이로 인한 제품 치수 오차를 정확히 예측하는 것은 냉간 단조에 의한 near-net shape 가공에 필수적이다.

4. 결 론

소성 경화된 재료의 유동응력과 비커스 경도 사이에는 일정한 함수 관계가 있다. 따라서 냉간 성형된 재료에 대해서 비커스 경도 분포를 통하여 재료내의 유동응력 분포를 알면 단축 FE 시뮬레이션 방법을 이용하여 간단히 성형 상태를 분석할 수 있다. 이 방법은 축대칭형 등 2차원

문제에 대해서는 적용이 쉬우나 일반적인 3차원 문제에 대해서는 비커스 경도 분포 측정에 필요한 시간 및 비용의 과다로 적용이 매우 제한적이다. 그러나 다른 방법들과 마찬가지로 이 방법도 이용하기 따라서는 충분히 실용적 가치가 있다고 판단된다.

참고 문헌

- (1) Blazinsky, T.Z., 1989, "Plasticity and Modern Metal-Forming Technology", Elsevier Science Publishers.
- (2) Avitzur, B., 1980, "Metal Forming: the Application of Limit Analysis", Marcel Dekker, New York.
- (3) Lippmann, H., 1977, "Engineering Plasticity: Theory of Metal Forming Processes", Springer-Verlag, Vol.1.
- (4) Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., 1989, "The Finite Element Method", McGraw-Hill, New York.
- (5) Kobayashi, S., Oh, S.I., Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press.
- (6) 이충호, 1997, "상계유한요소 시뮬레이션 방법", 한국소성가공학회지, 제6권, 제3호.
- (7) 이충호, 1997, "유동응력과 비커스경도의 관계 실험적 연구", 한국소성가공학회 '97 춘계 학술 대회 논문집 pp.65~68.

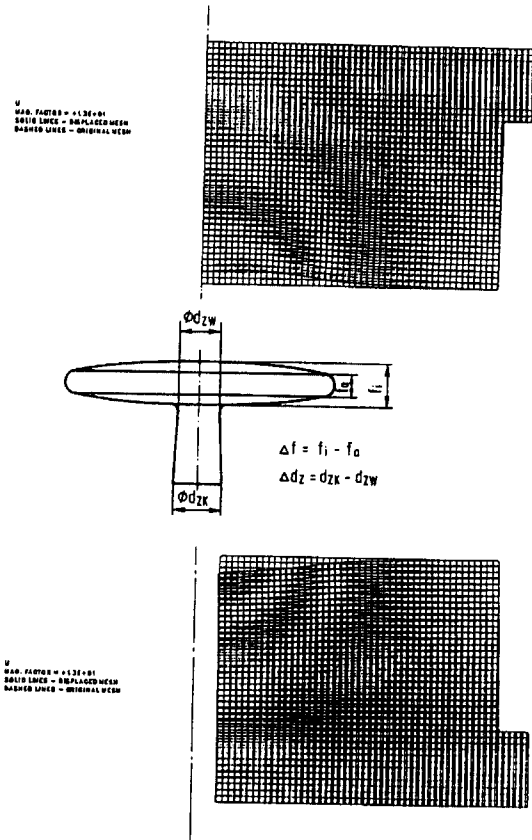


Fig. 7 Deformation of the die and punch