

단조중 냉간단조 금형세트의 구조해석

이민철*, 조홍석**, 류찬호**, 최원석***, 전만수****

Structural Analysis of Die Sets in Cold Forging

(M. C. Lee, H. S. Cho, C. H. Ryu, W. S. Choi and M. S. Joun)

Abstract

Structural analysis of die set in cold forging is conducted by the finite element method and the results are introduced in this paper. The problem formulation is introduced in detail. In the approach, amount of shrink fit is controlled by thermal load, i.e., temperature difference between die insert and shrink fits. The loading conditions are extracted automatically from a forging simulator. An application example is given.

Key Words: Aluminum Forging(알루미늄 단조), Forging Die(단조금형), Finite Element Method(유한요소법), Structural Analysis(구조해석)

1. 서론

단조공업에서 금형수명은 생산비용에 직접적 영향을 주고 있다⁽¹⁾. 금형 제작비용뿐만 아니라 예상치 않은 금형균열, 금형의 교체, 유지보수 등으로 인한 경제적 손실이 매우 크다. 단조금형의 수명은 주로 펀치와 다이블록의 균열, 소성변형, 마모 등에 영향을 받는다^(1,2). 이러한 금형수명 단축 현상들은 단조 공정설계 및 금형역학과 불가분의 관계를 맺고 있다. 금형역학은 금형과 소재의 복잡한 접촉문제와 함께, 열응력, 탄성 및 소성변형문제를 포함할 뿐만 아니라 소재의 소성유동해석문제와 직접적으로 연관되므로 아주 복잡하다. 이런 이유로 공정적용의 관점에서 볼 때, 금형역학문제 해석방법의 자동화와 강력화가 매우 중요하다.

저자들은 접촉문제와 쿨롱마찰법칙을 고려한 금형 구조해석 기법을 개발하여 실 공정 적용 가능성을 보인 바 있다⁽³⁾. 본 논문에서는 기개발된 기법을 강화된 사용자 개입 기능을 바탕으로 복잡한 금형구조의 역학해석에 적용함으로써 그 적용성을 보이고자 한다.

2. 문제의 수식화 소개

금형의 구조해석 문제는 기하학적 경계조건과 역학적 경계조건을 만족하는 변위장 u_i 와 이로 부터 파생되는 응력을 비롯한 각종 기계량을 구하는 것으로 설명된다.

Fig. 1은 기하학적 및 역학적 경계조건과 두 물체의 접촉문제를 개념적으로 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 해석문제는 해석영역

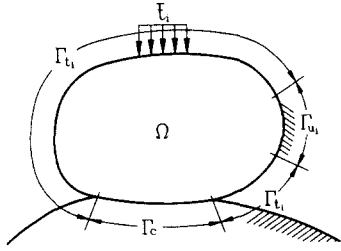
* 항공기부품기술연구소

** 경상대 대학원

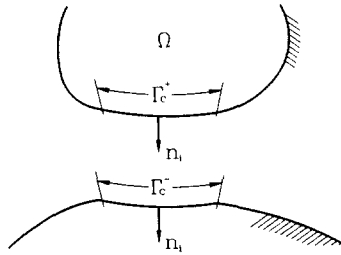
*** 회성정밀(주), 기술개발연구소

**** 경상대 기계공학과, 항공기부품기술연구소

Ω , 표면력이 $\sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i$ 로 주어진 표면력지정 경계 Γ_t , 변위가 $u_i = \bar{u}_i$ 로 주어진 변위지정 경계 Γ_u , 두 물체의 접촉면 Γ_c 로 구성되어 있다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 두 물체의 접촉면에서 법선벡터를 동일한 법선벡터 n_i 로 정의한다. 법선벡터 n_i 가 물체의 외향이면 그 물체의 접촉경계를 Γ_c^+ 로 정의하고 반대로 내향인 접촉경계를 Γ_c^- 로 표시한다. 즉, 접촉경계에서 동일한 법선벡터를 사용하므로, 접촉경계에서는 항상 Γ_c^+ 와 Γ_c^- 가 존재한다. Γ_c 는 Γ_c^+ 와 Γ_c^- 를 대표하는 의미로 사용한다. 두 물체간의 접촉부의 Γ_c 에서의 역학적 및 기하학적 경계 조건은 다음과 같이 수식화된다.



(a) Problem description



(b) Contact surface

Fig. 1 Conceptual diagram of a contact problem

접촉경계의 법선방향으로는

$$u_n^{+c} = u_n^{-c} \quad \text{if } \sigma_n^{+c} < 0 \quad (1)$$

$$\sigma_n^{+c} = 0 \quad \text{if } u_n^{+c} - u_n^{-c} < 0 \quad (2)$$

이고, 접선방향으로는

$$\sigma_t^{+c} = -\sigma_t^{-c} = \mu |\sigma_n| \frac{(u_t^{-c} - u_t^{+c})}{|u_t^{-c} - u_t^{+c}|} \quad (3)$$

if $u_t^{-c} \neq u_t^{+c}$

$$u_t^{-c} = u_t^{+c} \quad \text{if } |\sigma_t| < \mu |\sigma_n| \quad (4)$$

이다. 여기서 하첨자 n 과 t 는 각각 법선성분과 접선성분을 의미하며, 상첨자 $+c$ 와 $-c$ 는 각각 Γ_c^+ 과 Γ_c^- 에서의 성분을 의미한다. 즉,

$$u_n^{+c} = u_i n_i \quad \text{and} \quad \sigma_n^{+c} = \sigma_{ij} n_i n_j \quad \text{on } \Gamma_c^+ \quad (5)$$

$$u_n^{-c} = u_i n_i \quad \text{and} \quad \sigma_n^{-c} = \sigma_{ij} n_i n_j \quad \text{on } \Gamma_c^-$$

로 표현된다. 식(3)은 접촉면에서 미끄러짐이 발생하면 미끄러짐을 방해하는 방향으로 Coulomb 마찰법칙에 의하여 마찰력이 작용한다는 의미를 내포한다. 미끄러짐이 발생하지 않으면 접선방향의 경계조건은 식(4)에 의하여 지배되고, 즉 필수 경계조건의 일부로 간주되고 그 때의 마찰력의 크기는 $\mu |\sigma_n|$ 보다 작게 된다.

벌칙기법을 이용하여 식(1)의 조건을 다음 식에서 보는 바와 같이 가상일의 원리에 내포시킬 수 있다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \delta u_i d\Omega - \sum \int_{\Gamma_t} \bar{t}_i \delta u_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \beta (u_n^{+c} - u_n^{-c}) (\delta u_n^{+c} - \delta u_n^{-c}) d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \sigma_t \delta u_t d\Gamma = 0 \quad (6)$$

여기서 $\Gamma_c^<$ ($\subset \Gamma_c$)는 $\sigma_n^{+c} < 0$ 인 역학적 접촉경계를 의미하며, 그 자체가 미지수이다. 이 표현은 비록 기하학적으로 붙어 있다고 해도 경계에 압력이 작용하지 않으면 자유표면이 된다는 의미를 내포하고 있다. 즉, Γ_c 는 기하학적 접촉경계를 의미한다. 벌칙상수 β 는 매우 큰 양의 상수로써 $\sigma_n^{+c} = -\beta (u_n^{+c} - u_n^{-c})$ 의 물리적 의미를 갖는다.

응력-변형률 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} - (3\lambda + 2\mu) \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (7)$$

여기서 μ 와 λ 는 *Lame* 상수이며, 탄성계수 E 및 포아송비 ν 와 $\mu = E/2(1 + \nu)$, $\lambda = \nu E/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$ 의 관계에 있다. α 는 열팽창계수이며, ΔT 는 현재온도와 기준온도의 차를 의미한다.

전술한 문제의 해법은 참고문헌[3]으로 대신한다.

3. 공정적용

VTR 헤드드럼(head drum) 냉간 알루미늄 단조 공정을 적용 예제로 선택하였다. 시뮬레이션에 사용된 재료의 변형저항식과 마찰계수는 다음과 같다.

- 유동응력 : $\bar{\sigma} = 352.5 \bar{\epsilon}^{0.232}$ MPa
- 마찰계수 : $\mu = 0.05$

단조시뮬레이션 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

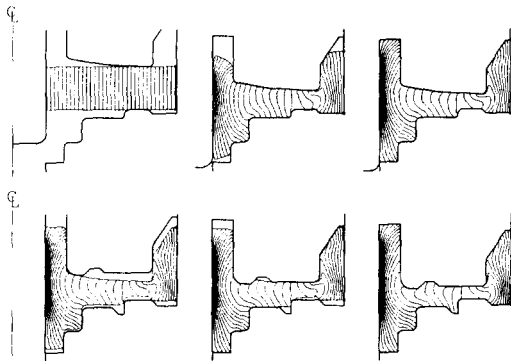


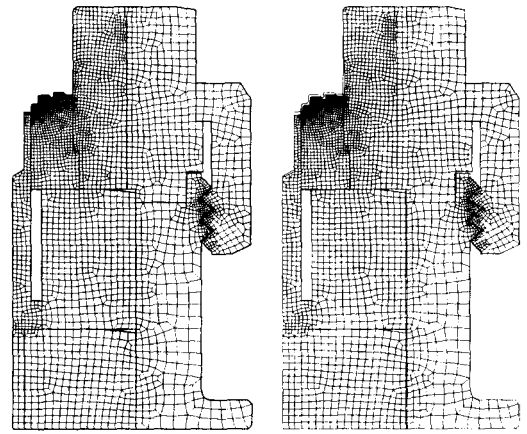
Fig. 2 Simulation results of an aluminum cold forging process

단조공정 종료시점에서 금형에 작용하는 하중 정보를 이용하여 금형의 구조해석을 실시하였다. 금형 구조해석에 사용된 금형의 기계적 성질과 마찰조건은 다음과 같다.

- 탄성계수 : $E = 210$ GPa
- 포아송비 : $\nu = 0.3$
- 마찰계수 : $\mu = 0.05$
- 열팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

금형구조는 3 조각으로 구성된 상부, 3 조각으로 구성된 하부, 상하부 체결부, 2 조각의 토출부 등으로 구성되어 있다. 상부는 열박음되지 않으며, 하부는 열박음된다. 체결부의 체결력은 약 250°C의 열박음 효과가 있는 것으로 간주하였다. Fig. 3의 좌편은 금형의 구조해석 모델이며, 총 9개의 조각으로 구성되어 있다.

금형의 구조해석 결과를 Fig. 3~Fig. 5에 요약하였다. Fig. 3의 우측은 금형의 변형된 모양을 나타내고, Fig. 4는 접촉면에 작용하는 하중을 나타내고 있다. Fig. 5에 유효응력을 나타내었다.



(a) Mesh generation (b) Deformed shape

Fig. 3 Result of the die insert-shrink analysis

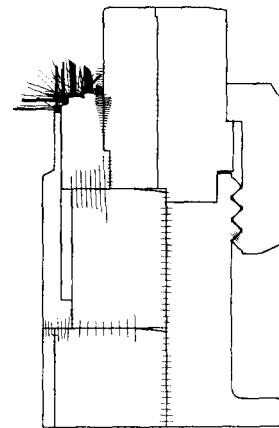


Fig. 4 Stress vectors at the die insert-shrink ring interface

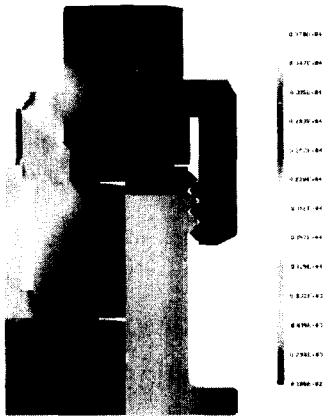


Fig. 5 Distributions of effective stress

4. 결론

본 논문에서는 금형구조 해석 기술의 적용사례를 소개하였다. 선택된 예제는 VTR 헤드드럼 알루미늄 단조공정이며, 금형세트가 역학적으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 적용예제를 통하여 단조공정 설계에서 금형의 구조해석 기술의 유용성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] K. Lange, L. Cser, M. Geiger and J. A. G. Kals, "Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming", *Annals of the CIRP*, Vol. 41.2, pp. 667-676, 1992
- [2] V. Vazquez, M. Knoerr, T. Altan and R. Shivpuri, "Determination of Fatigue Properties of Die Steels for Hot Forging", *Trans. NAMRI of SME*, Vol. XXIV, pp. 155-160, 1996.
- [3] 서대윤, 이민철, 전만수, "보강링에 의하여 예압된 냉간단조금형구조의 탄성유한요소해석", 한국소성가공학회, 제 7 권, pp. 347-353, 1998.