

단조용 금형세트 설계용 구조해석 시스템 AFDEX/DIE

전만수* · 이민철** · 류찬호*** · 조홍석***

(1999년 10월 25일 접수)

A Structural Analysis System for Forging Die Sets Design, AFDEX/DIE

M.S. Joun, M.C. Lee, C.H. Ryu and H.S. Cho

Abstract

In this paper, a general approach to structural analysis of forging die sets is presented and the related design system, AFDEX/DIE, is introduced. Structural analysis of die sets is conducted by the finite element method considering both contact problem and shrink fit. In the approach, amount of shrink fit is controlled by thermal load, i.e., temperature difference between die insert and shrink rings. The loading conditions are extracted automatically from the simulation results obtained by a rigid-thermoviscoplastic finite element method. Typical application examples are given, which show the applicability of the approach and the related program.

Key Words : Forging Simulation, Die Sets, Finite Element Method, Structural Analysis, Die Design System

1. 서론

단조공업에서 금형수명은 생산비용에 직접적 영향을 주고 있다⁽¹⁾. 예상치 않은 금형파손, 금형의 교체, 유지보수 등으로 인한 생산성 저하와 경제적 손실이 매우 크다. 단조금형의 수명은 주로 펀치와 다이블록의 균열, 소성변형, 마모 등에 영향을 받는다^(1,2). 이러한 금형수명 단축 현상들은 금형 구조역학과 불가분의 관계를 맺고 있다.

금형 구조역학 문제는 금형과 소재의 복잡한 접촉 문제와 함께, 열응력, 탄성 및 소성변형 문제를 포함할 뿐만 아니라 소재의 소성유동해석 문제와 직접적으로 연관되므로 아주 복잡하다. 이런 이유로 그 중요성에도 불구하고 금형의 구조해석 기술의 활용이 일반화되어 있지 않다. 그러므로 공정적용의 관점에서 볼 때, 금형구조해석 방법의 체계화와 기능의 편리성은 매우 중요한 문제이다. 최근 PC 환경하에서 사용자 개입 관련 기술이 크게 발전되어 실제 사용자가 큰 어려움 없이 금형의 구조

* 경상대 수송기계공학부, 생산기술연구소

** 항공기부품기술연구소

*** 경상대 수송기계공학부 대학원

해석 기능을 사용할 수 있는 환경이 갖추어졌다.

서대운 등⁽³⁾은 접촉문제와 쿨롱마찰법칙을 고려한 금형 구조해석 기법을 개발하여 실제의 공정 적용 가능성을 보인 바 있다. 본 논문에서는 기계발전 금형 구조해석 기법에 강화된 사용자 개입 기능을 접목시킴으로써 매우 복잡한 금형구조의 역학해석 문제를 손쉽게 해결할 수 있는 단조금형 해석 및 설계 시스템을 개발하여 그 적용성을 확인하고자 한다.

2. 금형 구조해석 문제의 수식화 소개

금형의 구조해석 문제는 기하학적 경계조건과 역학적 경계조건을 만족하는 변위장 u_i 와 이로부터 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 Ω , 표면력이 $\sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i$ 로 주어진 표면력지정경계 Γ_{t_i} , 변위가 $u_i = \bar{u}_i$ 로 주어진 변위지정경계 Γ_{u_i} , 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 물체

의 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.

Γ_c 에서의 역학적 및 기하학적 경계 조건은 다음과 같이 수식화된다. 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

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

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

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

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,

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

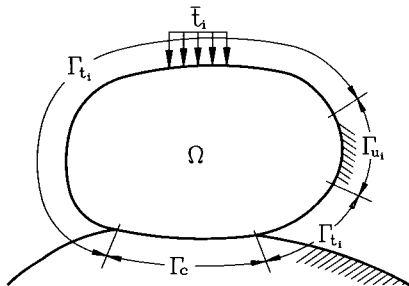
$$u_n^{-c} = u_i n_i, \quad \sigma_n^{-c} = \sigma_{ij} n_i n_j \quad \text{on } \Gamma_c^-$$

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 필수경계조건의 일부로 간주되고 그 때의 마찰력의 크기는 $\mu |\sigma_n|$ 보다 작게 된다.

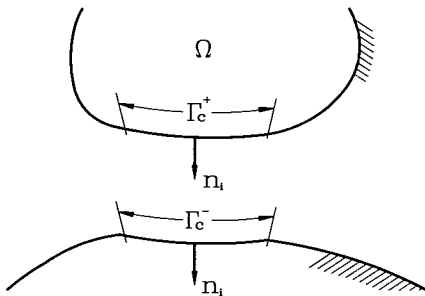
별첨기법을 이용하여 식 (1)의 조건을 다음 식에서 보는 바와 같이 가상일의 원리에 내포시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} &\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \delta u_i d\Omega - \sum \int_{\Gamma_{t_i}} \bar{t}_i \delta u_i d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_c^+} \beta (u_n^{+c} - u_n^{-c}) (\delta u_n^{+c} - \delta u_n^{-c}) d\Gamma \quad (6) \\ &- \int_{\Gamma_c^-} \sigma_t \delta u_t d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

여기서 $\Gamma_c' (\subset \Gamma_c)$ 는 $\sigma_n^{+c} < 0$ 인 역학적 접촉경계



(a) Problem description



(b) Contact surface

Fig. 1 Conceptual diagram of a contact problem

를 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 Lamé 상수이며, 탄성계수 E 및 포아송비 ν 와

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (9)$$

의 관계에 있다. α 는 열팽창계수이며, ΔT 는 현재온도와 기준온도의 차를 의미한다.

전술한 문제의 해법은 참고문헌⁽³⁾으로 대신한다.

3. 금형 구조해석 및 설계 시스템

Fig. 2는 단조금형 구조해석 프로그램 AFDEX⁽⁴⁾을 근간으로 하는 단조금형 설계 시스템의 개념도이다. 하중 정보와 금형의 기초형상 정보는 단조 시뮬레이션용 프로그램 AFDEX의 결과로부터 자동적으로 추출되며, 금형 정보는 사용자 개입에 의하여 실행되는 금형설계 모듈을 거쳐 요소망생성 모듈로 보내지게 된다. 금형설계 모듈은 IGES 및 DXF 파일로 AutoCAD 등의 상용 프로그램과 연결되어 있다. 금형설계 모듈을 이용하여 설계자는 금형의 분할 등에 관한 창의적인 아이디어를 손쉽게 반영할 수 있다. 분할된 금형은 전용 요소망생성 프로그램에 의하여 요소망으로 분할된다. 이 때 해석결과의 신뢰성을 높이기 위하여 접촉면에서 절점의 일대일 대응이 자동적으로 만족되도록 되어 있다. 생성된 요소망은 하중 및 경계 등의 해석정보와 융합되어 금형의 구조해석 입력 데이터로 만들어진다. 이 때 사용자는 각 금형요소의 열박음 정도 등 최소한의 정보를 대화식으로 입력하게 된다. 금형의 구조해석 결과를 바탕으로 설계 개선이 필요하다고 판단될 경우 금형설계 모듈로 되돌아 가서 설계변경을 실시한다.

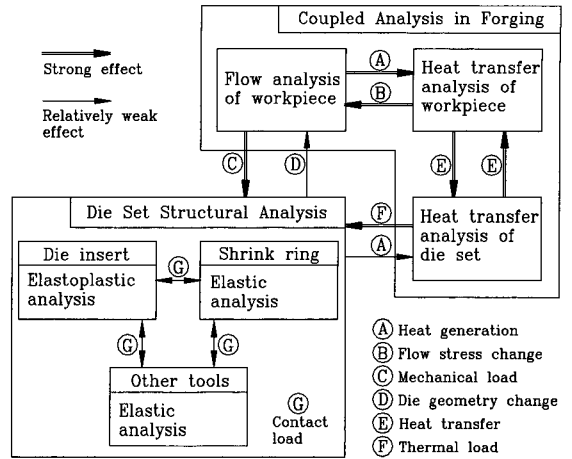


Fig. 2 Conceptual diagram of the design system of forging die sets

4. 공정적용

첫 번째의 적용예제로 VTR 헤드드럼(head drum) 냉간 알루미늄 단조 공정을 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. 3에 나타내었다.

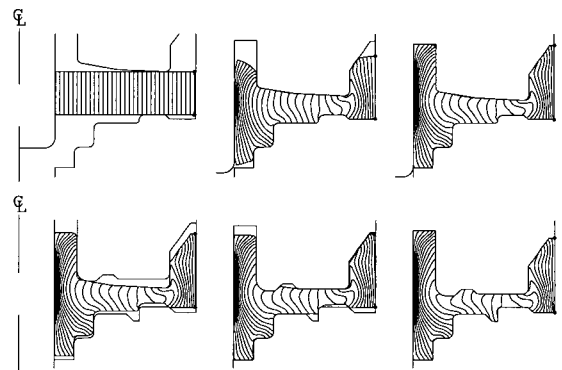


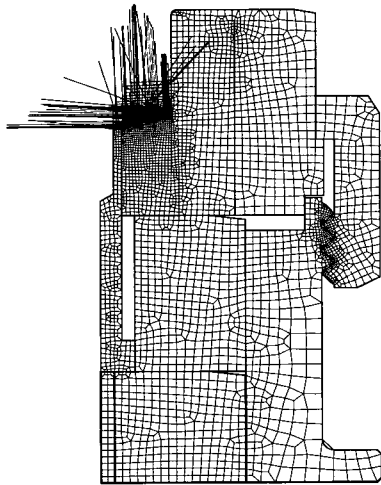
Fig. 3 Metal flows in aluminum cold forging of a VTR head-drum

단조공정 종료시점에서 금형에 작용하는 하중정보를 이용하여 금형의 구조해석을 실시하였다. 다이홀더, 체결

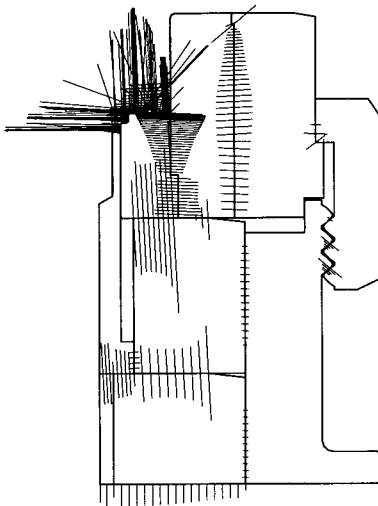
구, 압축링은 탄소강 또는 합금강을, 그 이외의 부품은 금형강을 사용하였다. 사용된 재료의 영률 및 포아송비는 큰 차이가 없으므로 동일하다고 가정한다. 금형 구조 해석에 사용된 소재의 기계적 성질과 마찰조건은 다음과 같다.

- 탄성계수 : $E = 210 \text{ GPa}$
- 포아송비 : $\nu = 0.3$
- 마찰계수 : $\mu = 0.1$
- 열팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

금형구조는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 3 조각으로 구성된 상부, 3 조각으로 구성된 하부, 상하부 체결부, 2



(a) Finite element model

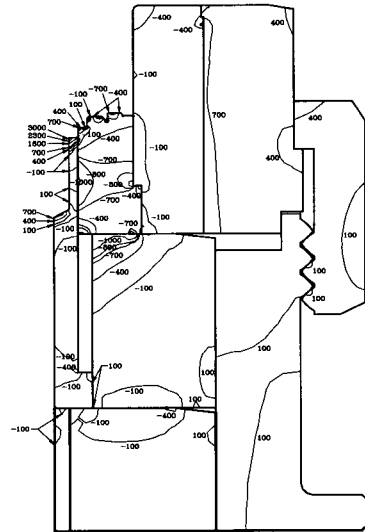


(b) Stress vectors

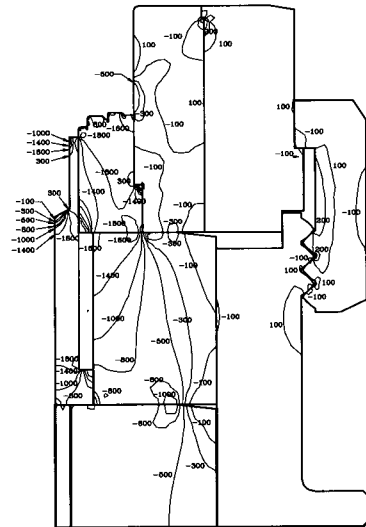
Fig. 4 Finite element model and stress vectors

조각의 토출부 등으로 구성되어 있다. 상부는 최외곽의 압축링에 의하여 400℃로 열박음되며, 하부는 열박음되지 않는다. 체결부의 체결력은 약 400℃의 열박음 효과가 있는 것으로 간주하였다. Fig. 4(a)는 금형의 구조해석 모델이며, 총 9 개의 조각으로 구성되어 있다.

금형의 구조해석 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 요약하였다. Fig. 4(b)는 접촉면에 작용하는 응력벡터를 나타내고 있다. Fig. 5는 응력성분 σ_θ 와 σ_z 의 분포를 나타내고 있다. Fig. 6에 유효응력을 나타내었다.



(a) σ_θ



(b) σ_z

Fig. 5 Stress distributions(MPa)

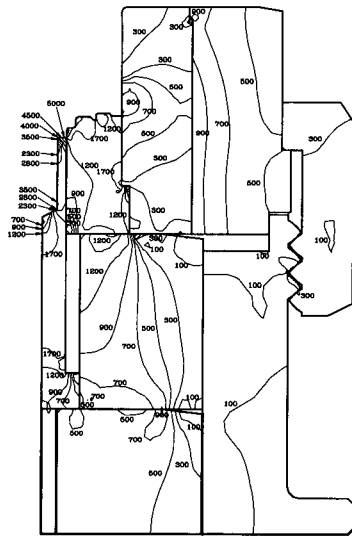


Fig. 6 Effective stress distributions(MPa)

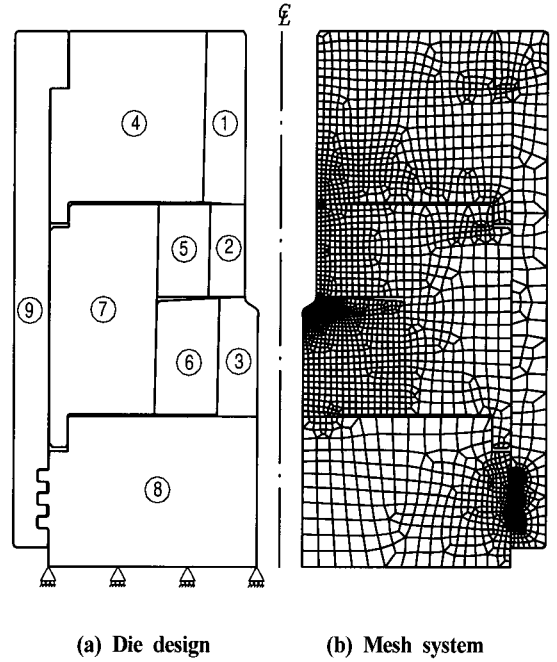


Fig. 7 Die design and mesh system of a die set

두 번째 적용예제로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 금형 인서트에 상하로 분할된 금형세트의 구조해석을 실시하였다. Fig. 7(a)에서 부품 ②, ③으로 표시된 금형인서트는 초경합금이며, 그 이외의 부품은 금형강이다. Fig. 7(b)는 유한요소 해석모델이다. 접촉면에서의 마찰계수는 $\mu = 0.1$ 이고, 해석에 사용된 금형 재료의 기계적 성질을 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 초경합금
 - 탄성계수 : $E = 540 \text{ GPa}$
 - 포아송비 : $\nu = 0.23$
- 2) 금형강
 - 탄성계수 : $E = 210 \text{ GPa}$
 - 포아송비 : $\nu = 0.3$
 - 열팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

부품 ④, ⑤, ⑥은 0.3% ($\Delta T = 250^\circ\text{C}$)의 열박음이 실시되고, 부품 ⑦은 0.4%의 열박음이 실시된다. 최외곽의 부품 ⑨는 금형세트를 기계식으로 체결하는 목적을 갖고 있다. 체결시 체결토크를 적절히 조절함으로써 예압되며, 직관적으로 예압량을 300°C의 열수축과 동일하다고 간주하였다.

해석결과를 Fig. 8~Fig. 9에 제시하였다. Fig. 8는 접촉면에서의 응력벡터를 나타내고 있으며, Fig. 9는 주응력의 분포를 나타내고 있다.

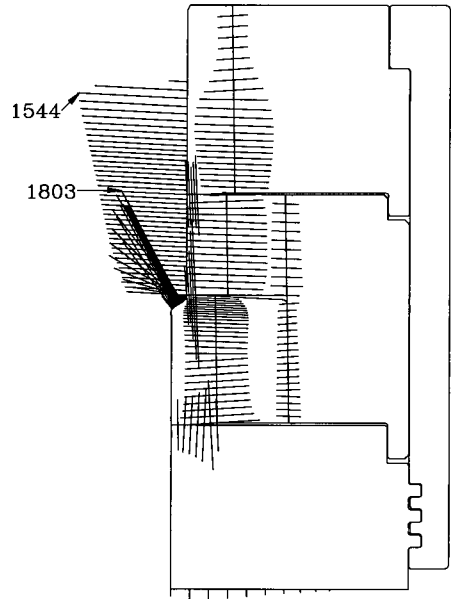


Fig. 8 Stress vectors(MPa) at the interfaces and the die cavity

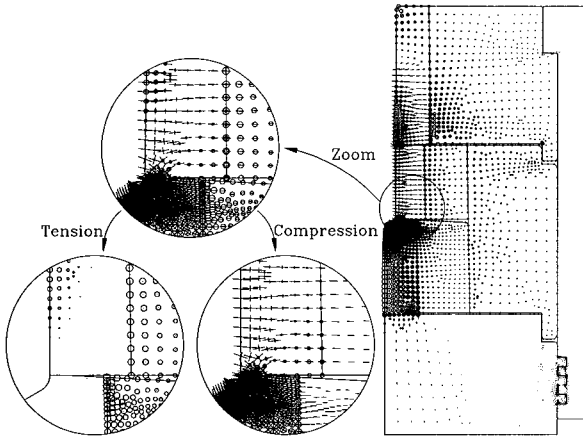


Fig. 9 Principal stresses

본 논문에서는 유한요소법을 바탕으로 한 단조금형 구조해석 및 설계의 통합적 접근방법을 제시하였고, 이를 바탕으로 단조금형 해석 및 설계 시스템을 개발하였다. 개발된 프로그램 AFDEX/DIE의 적용성을 검증하기 위하여 두 개의 금형구조 해석 문제에 적용하였다. 선택된 적용예제의 금형세트는 역학적으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 적용예제를 통하여 선행연구⁽³⁾에서 개발된 금형구조 해석 기능의 적용 가능성을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 유한요소법을 바탕으로 한 단조금형 구조해석 및 설계의 통합적 접근방법을 제시하였고, 이를

바탕으로 단조금형 해석 및 설계 시스템을 개발하였다. 개발된 프로그램 AFDEX/DIE의 적용성을 검증하기 위하여 두 개의 금형구조 해석 문제에 적용하였다. 선택된 적용예제의 금형세트는 역학적으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 적용예제를 통하여 선행연구⁽³⁾에서 개발된 금형구조 해석 기능의 적용 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) K. Lange, L. Cser, M. Geiger and J. A. G. Kals, 1992, "Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming", Annals of the CIRP, Vol. 41.2, pp. 667-676.
- (2) V. Vazquez, M. Knoerr, T. Altan and R. Shivpuri, 1996, "Determination of Fatigue Properties of Die Steels for Hot Forging", Trans. NAMRI of SME, Vol. XXIV, pp. 155-160.
- (3) 서대윤, 이민철, 전만수, 1998, "보강링에 의하여 예압된 냉간단조금형구조의 탄성유한요소해석", 한국소성가공학회, 제 7 권, pp. 347-353.
- (4) 전만수, 소성가공 CAE 기술 Workshop '98, 1998, 경상대학교 소성가공 CAE 실험실.