

이 논문은 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

단위체 격자 재구성법과 전문가 시스템을 이용한 2차원 냉간 단조의 유한 요소 해석

윤 회 도*, 김 영 태**, 이 낙 규**, 양 동 열**, 이 병 채***

Finite Element Analysis of Two-Dimensional Cold Forging By Using Modular Remeshing and Expert System

Hee-Do Yun*, Young-Tae Kim**, Nak-Kyu Lee**, Dong-Yol Yang**, Byung-Chai Lee***

ABSTRACT

A systematic method of remeshing is required due to severe mesh distortion after some finite deformation in the finite element analysis of practical forging processes. In order to cope with the problem of mesh degeneracy during deformation, the proper design of meshes plays an important role in the analysis. In so-called "Modular Remeshing", the physical characteristics of metal flow and geometric characteristics are incorporated in "Module", which can be applied to the mesh design for a certain mode of deformation in so far as the topology of deforming region remains the same. For the purpose of more effective and systematic use of the modular remeshing scheme, an expert system has been developed in the framework of the proposed remeshing scheme. In order to show the effectiveness of the method, the rib-web type forging with axial relief or radial relief and spike forging are simulated. It has been thus shown that the proposed method of automatic remeshing by using modular remeshing and expert system can be further extended and applied to various forging problems with complicated geometrical configurations.

1. 서 론

금속 성형 공정의 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 강소성 유한요소해석법이 많이 사용되고 있다. 강소성 유한요소법을 통한 해석으로부터 얻은 공정중 소재의 변형 유동, 성형하중, 변형도, 변형도율의 분포, 응력 분포 등은 단조공정을 설계하는데 매우 중요한 정보를 제공한

다. 그런데 비정상 상태(Nonsteady state)의 단조공정은 금형과 소재의 경계에서 소재의 심한 변형을 수반하기 때문에 컴퓨터에 의한 유한요소해석시에도 격자가 크게 찌그러져서 더 이상의 계산이 불가능한 경우가 발생하게 되며 이런 경우에 격자 재구성이 필요하다.

격자 재구성에 관한 연구로는 1982년 Roll과 Neizert [1]와 Gelten와 Konter[2]는 후방 압출(Backward

* (주)금성사 생산기술연구소 (정회원)
** 한국과학기술원 정밀공학과 (정회원)
*** 한국과학기술원 기계공학과 (정회원)

extrusion)과 업셋 단조(Upset forging) 등에 격자 재구성기법을 이용하였고 1984년 Oh et al. [3]가 여러가지 유연화기법(Smoothing Technique)을 이용하여 기어 블랭크 단조(Gear blank forging) 등의 몇가지 예를 해석한 바 있으며, 그후 Chen과 Kikuchi[4]가 유연화된 절점값으로부터 상태변수의 값을 사상(Mapping)하는 방법을 적용해서 압출을 해석하였다. Cheng[5]과 Baehmann[6], Habraken[7] 등이 격자 재구성의 자동화에 필수적인 격자 재구성 기준을 제안하여 격자 재구성 기법을 발전시켰고 Cescutti와 Chenot[8] 등은 일종의 격자 재구성이라고 할 수 있는 격자 규격화(Regularization)를 이용하여 2차원 기어 단조(Plain strain gear forging)를 해석 하였다. 1989년 Yoon과 Yang[9]은 격자 재구성 기법에 단위체의 개념을 도입하여 베벨기어 단조(Bevel gear forging)을 해석한 바 있다. 격자 재구성 과정에서 가장 중요한 과정중의 하나는 어떻게 자동적으로 새로운 격자를 생성하느냐 것인데 최근에 자동격자 발생법[6, 10-18]과 적응격자 설계법[19-21]에 대한 연구가 격자 재구성 기법에 적용되어지고 있다.

인공 지능(Artificial Intelligence, A.I.)에 대한 연구는 최근들어 활발히 진행되고 있으며 이 중에서 전문가 시스템이 경제성과 상업성에서 타당성을 지니고 어느 정도 실용화 되었다고 하겠다. 전문가 시스템의 특징은 종래의 일반 프로그램이 절차형 중심 시스템으로서 지식 베이스가 프로그램으로부터 독립적으로 구축되어 있는 것이 아니라 절차중에 일체화되어 있기 때문에 개개의 응용 프로그램을 개발해야 할 뿐만 아니라 논리 자체가 단순한데 반해서 전문가 시스템은 통상 전문가가 해결할 수 있는 전문영역의 문제를 해결하도록 설계된 컴퓨터 프로그램으로 일반적인 프로그램과는 달리 지식 베이스와 추론 부분이 서로 독립적으로 이루어져 있으며 관련 인자가 극히 다양하고 상호관계가 복잡하여 이러한 인자들의 조합수가 대단히 많을때에 사용자로부터 요구된 목표를 향해 프로그램 내부에서 스스로 데이터로부터 패턴 매칭(pattern matching)과 트래킹(tracking)으로 사용자가 요구하는 상황에 맞는 최적의 결론을 도출해 낼수 있다.

1970년대 중반 MYCIN 등의 의료 진단용 전문가 시스템의 개발로 고무된 전문가 시스템에 대한 연구는 최근에 설계 및 제어 분야까지 그 적용 범위를 넓히고 있다. 소성 가공에 관련된 전문가 시스템도 최근들어서

여러 연구 결과[23-28]가 발표 되었으나 대부분 공정 설계와 금형 설계에 편중되었으며, 유한요소법과 관련 연구로는 Hartly[23]가 재료의 유동을 유한요소법으로 시뮬레이션해서 금형설계와 접합한 연구와 Chen[28] 등이 일반적인 유한요소 해석 문제에서 요소의 크기와 형태 등을 결정한 연구가 있다.

현재까지 많은 연구가 격자 재구성법(Remeshing)에 대하여 이루어져 왔으나 대부분 계산시간의 절약과 문제의 물리적 특성을 모두 고려하여 다양한 단조문제에 응용하는데는 여러가지 어려운 점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 기존의 격자 재구성법의 방법과는 다른 체계적 접근으로 격자 재구성에 단위체 개념(Module concept)을 도입하여 2차원 단조 공정의 유한요소 해석을 하였다. 마찰이 있는 경계에서의 격자의 찌그러짐을 최대한 억제 하면서 일반성을 주기 위하여 표면에 수직인 변을 가지며 또한 두께가 일정한 요소(Element)를 경계를 따라서 유지시키는 것(표면적응층: Surface Adaptive Layer)을 격자 생성의 중요한 원칙으로 정하였다. 2차원 단조 공정의 응용 예제를 통하여 문제의 물리적 특성을 고려하는 여러 가지 단위체를 작성하여 데이터 베이스화 하고, 적용 경우에 맞는 단위체를 선택하여 2차원 단조 공정을 해석한다. 또한 유한요소 해석 과정에서 어느 시점에서 격자 재구성을 실시하여야 하는지를 판단하는 격자 재구성 조건을 적용하였다. 데이터 베이스화된 여러가지 단위체가 적용되는 주위 조건들의 공통적인 성질을 지식 베이스(Knowledge base)해서 단위체의 선택을 자동으로 하는 전문가 시스템(Expert system)을 개발하였다.

2. 유한요소 수식화

강소성 재료 모델에서 변분식은 다음과 같다.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \dot{\epsilon} H) \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{\Gamma_t} (f_i + \alpha \Delta f_i) \delta v_i dS = 0$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'}, \quad \dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}, \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{,ii} \quad (1)$$

여기서 $K, \sigma_{ij}, H, \alpha$ 는 벌칙 함수, 편차 응력, 가공 경화율, 가공 경화 효과를 고려하는 상수이다.

식(1)을 등계수 요소로 유한 요소화 한다.

경계에서의 마찰을 고려하기 위해서 다음 식을 적용한다.

$$f = -\frac{2}{\pi} m k \tan^{-1} \frac{|V_s|}{u_0} t \quad (2)$$

여기서 m 은 마찰 상수, k 는 전단응력, u_0 는 $|V_s|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이고, V_s 는 금형에 대한 소재의 상대 속도이다.

뉴턴-랩슨 방법으로 비선형 방정식을 풀 때에는 초기 추측이 필요하므로 선형 점성 재료 모델로 가정한 초기 추측법이 적용되었다.

3. 단위체 격자 재구성 기법 (Modular Remeshing Technique)

후방 압출과 같은 심한 변형 문제를 해석할 때 변형이 증가함에 따라 첫째, 금형 경계 형상을 유한요소 격자로 표시하기 어렵고 둘째, 한개의 격자로 심한 변형 모양을 나타내기가 어렵고, 셋째 커다란 국부 변형으로 인해 수용하기 어려운 유한 요소 격자구조의 형성에 따라 부정확한 해를 얻거나 수렴성이 나빠지게 되므로 격자 재구성이 필요하다. 종래의 일반적인 격자 재구성 과정은 Fig. 1에 보인 바와 같다.

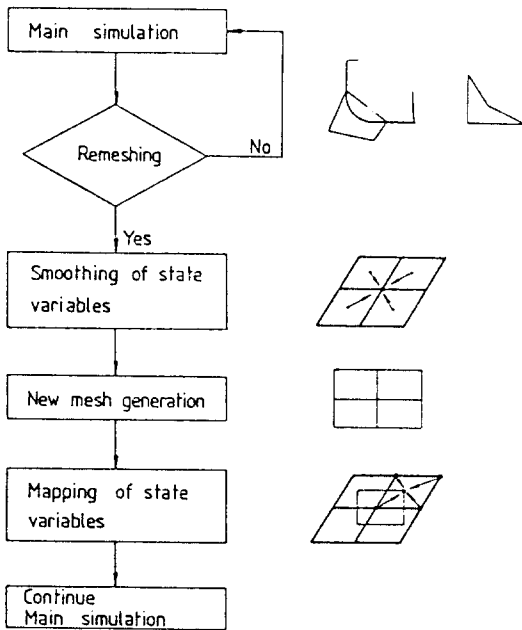


Fig. 1 Conventional remeshing algorithm

일반적으로 유한요소해석은 구간별로 다항식 형상 함수(Piecewise polynomial shape function) 들을 사용한다. 또한, 대부분의 유한요소 해석에 있어서 변형도와 응력량들은 함수들의 미분항을 포함한다. 따라서 이들 미분치는 인접요소들 사이에서 연속성을 유지하지 않으므로, 불연속인 이들 값을 유연화(Smoothing) 시키는데, 이를 상태 변수의 유연화(Smoothing of state variable)라고 한다. 본 논문에서는 Hinton and Campbell[22]에 의하여 제안되어진 국부 및 전역 최소자승 유연화(Local and global least square smoothing)를 사용한다.

최소자승 유연화(Least square smoothing) 프로그램에서 구하고자 하는 절점 값을 주어진 상태변수의 요소값 사이의 차이를 다음과 같이 최소화 함을 의하여 얻어질 수 있다.

$$I = \sum_{j=1}^n \int_{V_j} \left(\sum_{i=1}^{n_i} H_i \epsilon_i - C_j \right)^2 dV \quad (3)$$

여기서, n 는 총요소 수, n_i 는 한 요소내의 절점 수, C_j 는 j 번째 요소에서 상태변수의 알고 있는 값, H_i 는 요소의 형상함수, ϵ_i 는 결정되어야 할 값이다. 구해야 할 절점값은 범함수 I 를 ϵ_i 대하여 최소화 시킴으로써 얻어진다.

$$\frac{\partial I}{\partial \epsilon_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n_p \quad (4)$$

여기서, n_p 는 총 절점수이다. 이전격자(Old mesh)의 상태변수(State variable)들이 유연화되고 새로운 격자가 분할되어진 후, 이전 격자로부터 새로운 격자로 상태변수의 보간이 필요하다. 이 과정을 상태변수의 사상(Mapping of state variable) [5]이라 한다.

사상의 첫 단계는 새로운 격자의 한 절점이 속한 이전 격자의 요소를 결정하는 것이다. 사상(Mapping)의 두번째 단계는 새로운 격자에서의 절점들의 전역 좌표계 (x, y) 에 대응하는 이전 격자에서의 국부 좌표계 (r, s) 을 얻는 것이다.

본 논문에서는 계산 시간이 작고 알고리즘이 간단한 뉴턴-랩슨 방법을 사용함으로써 역전과정(inversion procedure)의 효율을 향상시켰다. 이전 격자에서의 역좌표 세트가 주어지고, 다음과 같은 연립방정식이 풀어야만 한다.

$$\sum_i H_i(r,s)x_i - x = 0 \quad (5a)$$

$$\sum_i H_i(r,s) y_i - y = 0 \quad (5b)$$

여기서, H_i 는 요소의 형상함수, n_i 는 그 요소에서의 절점 수이다. 방정식 (5a)와 (5b)는 (r, s) 에 관한 비선형 연립 방정식이기 때문에 국부좌표 (r, s) 는 뉴턴-랩슨 방법에 의하여 얻어질 수 있다. 국부좌표 (r, s) 가 얻어진 후 새로운 격자에서의 절점 상태변수는 이전 격자에서의 그 요소의 형상함수로부터 쉽게 결정지어질 수 있다. 그런 후 새로운 격자에서의 적분점(integration point)에서 요소의 상태변수들은 그 요소의 형상함수로부터 쉽게 얻어질 수 있다.

자동격자 재구성에 있어서 가장 중요한 단계 중 하나는 어느 시점에서 격자를 재구성해야 하는지를 결정하는 격자 재구성에 대한 판별 조건의 정의하는 것이다. Cheng[5]은 그 요소와 그 요소의 인접 요소 사이의 유효변형도(Effective strain) 차이로서 오차치(Error measure)를 근사적으로 정의함에 의하여 격자 재구성 조건을 정의하였는데 이 방법은 적응 격자 설계방법(Adaptive grid design method)에서는 유용하다. 그러나 근본적인 격자 재구성의 필요성은 금형과 요소사이의 기하학적 간섭(Interference)과 특별히 금형의 구석(Corner) 근처와 같은 곳에서의 격자의 찌그러짐 등이 더 큰 문제이다. 금속 성형에서의 유한요소 해석은 격자가 금형을 파고 들어가는 현상이나 격자가 금형을 뜨게되는 공간의 발생등은 해의 오차의 원인이 된다.

게다가 전달행렬(Transformation matrix)의 자코비안(Jacobian)의 행렬식(Determinant)이 음수이면 격자 재구성없이 더 이상의 계산이 불가능하다. 본 연구에서는 격자 재구성 조건을 다음과 같이 두가지로 분류하였다.

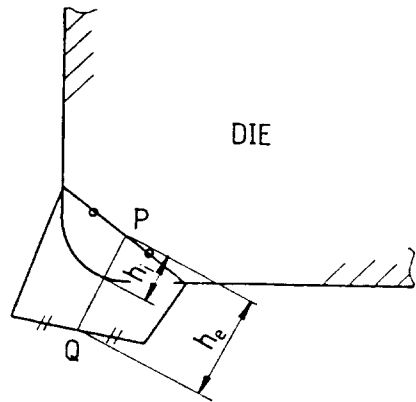
3-1 간섭 조건(Interference criterion)

2차원의 경우 Fig. 2의 (a)와 같이 유한 요소의 한면이 금형을 파고 들었을때는 간섭의 양이 많으면 많을수록 실제와 다른 해를 얻게된다. 그러므로 간섭량(amount of interference)이 어느 정도에 도달하면 격자 재구성이 필요하기 때문에 간단한 격자 재구성 조건이 만들어질 수 있다. 한 점P를 금형을 파고든 면의 중심이라고 하고, 한 점Q를 그 요소의 반대편 면의 중심점이라 하자. h_i 는 점P에서 점Q방향으로 점P에서

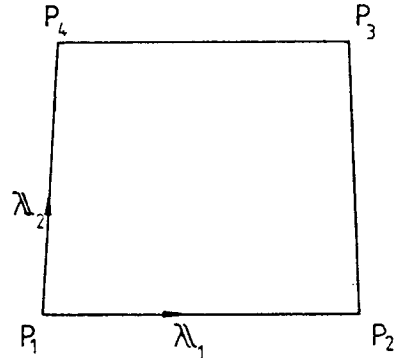
다이 표면위의 점사이의 거리이고 h_e 는 점P와 점Q사이의 거리이다. 이때, 판별기준은 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{h_i}{h_e} \geq C_i \quad (6)$$

여기서 C_i 는 사용자에게 의하여 결정 되어지는 간섭 기준의 상수이다. 본 연구에서는 C_i 를 0.3으로 정하였다.



(a) Interface criterion



(b) Mesh degeneracy criterion

Fig.2 Criteria for remeshing

3-2 격자 찌그러짐 기준(Mesh degeneracy criterion)

격자 찌그러짐 기준은 Fig. 2의 (b)에서 절점 사이의 내각이 180도 초과하여 변형이 진행되면 전달행렬이 결국 음의 자코비안(Jacobian)을 갖게 됨을 이용하여 다음과 같은 기준을 만들었다.

$$\lambda_1 \times \lambda_2 \leq C_d \quad (7)$$

여기서 C_i 는 찌그러짐 기준의 상수이고, λ_1 과 λ_2 는 점 P_1 에서 점 P_2 와 점 P_3 방향으로의 단위벡터이다. 위에서 언급한 기준들 중에 하나만 만족되면, 격자 재구성을 하여야 된다고 판단하고 격자 재구성을 한다. 본 연구에서는 C_i 는 0.1로 정하였다.

본 논문에서는 전체영역을 물리적 유동 특성과 기하학적 특성을 고려해서 몇개의 영역으로 분할하고 분할된 각각의 영역을 모듈(Module)이라고 부르는 개념의 격자 재구성 기법을 도입하고자 하며 이를 단위체 격자 재구성(Modular Remeshing)이라 부르겠다.

각 모듈은 기하학적 특성과 물리적 유동 특성을 고려하는 격자 구조를 가지고 있으며, 이때 각각의 모듈은 다른 모듈과 전역 번호 매기기(Global numbering)를 위한 연결의 융통성을 가지나 서로 독립적으로 만들어지고, 여러가지의 기준과 모듈 변수(Module parameter)등을 이용하여 기하학적 차이가 크지만 기하형상(Topology)이 유사한 경우에는 같은 모듈로 간주하여 응용할 수 있도록 한다. 위에서 작성한 모듈은 각 기하적 형상에 대한 라이브러리(Library)로서 사용되어진다. 또한 절점들의 배열은 격자의 찌그러짐(Mesh degeneracy)이 최대한 지연되도록 만드는데 특히 마찰이 있는 경계에서의 찌그러짐을 억제하기 위하여 표면에 대해서 수직하고 두께가 균일한 변을 가지는 요소를 표면에 배열하는데 이를 표면적응층(Surface Adaptive Layer)이라 부르기로 한다. 표면적응층의 생성 예를 Fig. 3에 보였다.

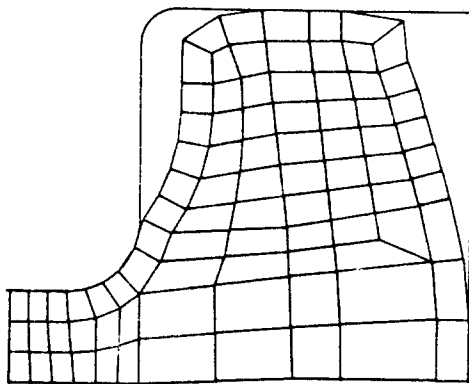


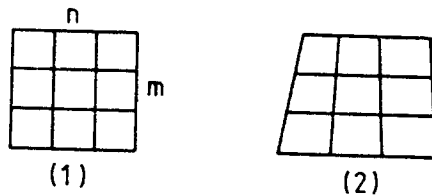
Fig. 3 Surface adaptive layer

단위체 격자 재구성법은 모듈을 선택함에 있어서 변형 모드(Mode of deformation)의 변화가 고려된다.

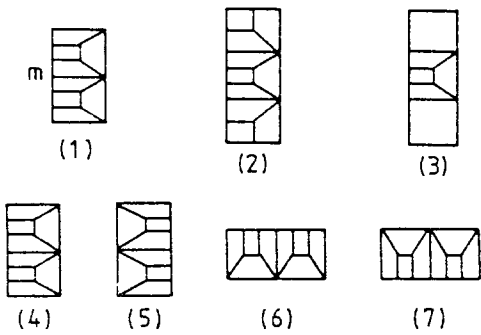
해석하고자 하는 대부분의 단조 공정들은 변형이 진행되는 변형 모드를 미리 알고있는 경우가 많다. 초기 시편으로부터 최종 제품까지 성형을 할 때 계속적으로 변형 모드를 변하며 이때 초기 상태 또는 변형 모드에 적합한 모듈을 구성하였더라도 그 다음 변형 모드까지는 하나의 모듈로 변형을 나타낼 수 없기 때문에 새로운 모듈의 선택 또는 모듈 격자의 재구성을 해 주어야만 한다. 그러므로 변형모드의 적절한 기하학적 기준(Geometric Criterion)을 도입하여 모드가 변화하면 자동적으로 모듈을 바꿔준다. 해석해야 할 문제의 초기와 최종 형상이 정해졌을때, 필요한 모듈의 선택을 변형 모드의 변화를 고려하여 작성된 여러가지 모듈의 메뉴(Menu) 가운데서 선택한다.

풀고자 하는 문제에 맞는 모듈이 선택 되어지면 절점 좌표의 생성과 요소의 연결이 이루어진다. 모듈 내에서 유한요소 격자의 국부적인 연결(Local connection)이 이루어지고 이를 통합한 전역 요소 연결(Global element connection)이 이후에 이루어지게 되며 전역 번호 매기기를 위하여 적합한 밴드폭 감소 알고리즘을 이용한다.

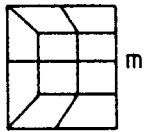
전체 계산은 격자 재구성이 필요한 단계에서 적절한 모듈을 선택하고 모듈 변수만 입력 데이터로 주면 자동적으로 계산이 진행되어 질수 있다. 여기서 단위체 격자 재구성법의 격자 생성 과정을 알아 보면, 새로운 격자를 만들기 위한 데이터로서 모듈의 종류를 선택하고 제어점(Control Point), 모듈변수(Module parameter), 모듈경계위의 좌표를 만들기 위한 데이터와 이전 격자(Old mesh)에 대한 정보 등이 필요하게 된다. 먼저 입력 데이터에서 제어점은 Fig. 4에 표시된 모듈로서 전체 영역을 몇개의 영역으로 나누어 줄때 필요한 데이터로서 주로 각 모듈의 모서리(Corner) 부분이다.



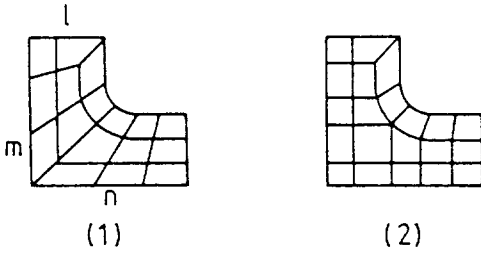
(a) Regular modul



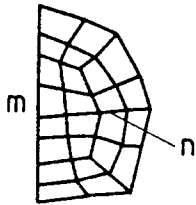
(b) Economic module



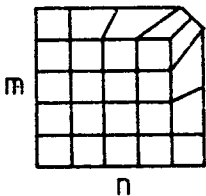
(c) Anti-fold module



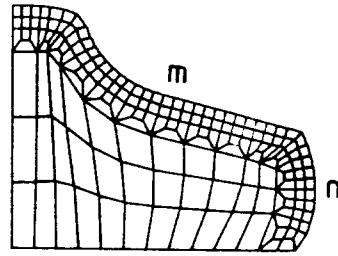
(d) Module for corner flow/cavity filling



(e) Circular end module



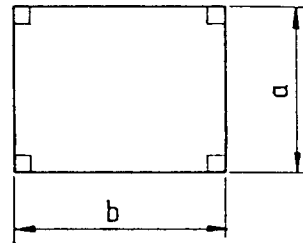
(f) Sharpe contact module



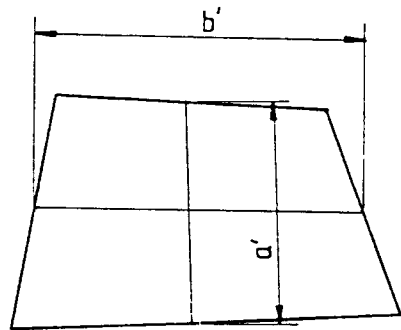
(g) Surface adaptive module

Fig. 4 Types of developed modules

모든 입력 데이터가 입력되면 각 모듈의 이전 격자 경계위의 좌표를 구하여야 한다. 다음에 모듈의 종류에 따라서 내부의 절점들을 구해서 격자 구성을 한다. 이때 만약 어떤 모듈이 경계면(금형과의 접촉면 또는 자유면)을 접하고 있다면 경계면에 표면적응층을 만든다. 또 되도록이면 요소의 등가 면비(Equivalent aspect ratio)를 β 에서 $1/\beta$ 사이의 값을 갖게 하였다. 여기서 등가 면비란 Fig. 5의 (a)에서 보는 바와 같이 마주 보는 변의 중심을 연결한 선분의 길이비를 말한다. Fig. 5의 (b)에서 직사각형에서 a/b 에 등가인 임의의 사각형에서의 비를 말하며, β 은 경험적인 값이다.



(a)



(b)

Fig. 5 Equivalent aspect ratio

위의 모든 작업이 끝나면 전역 번호 매기기(Global Numbering)를 하게 되는데 밴드폭 감소 알고리즘을 사용하여 전역번호 매기기를 최적화 하였다. 위의 전역 번호 매기기가 끝나면 새로운 격자의 생성은 끝난 것이다.

지금까지 개발된 모듈은 Fig. 4에 보여 주고 있다. 각각의 모듈에 대한 설명은 다음과 같다.

(i) Fig. 4의 (a)에 보인 모듈은 규격 모듈(Regular module)이다. 이 모듈은 기하학적으로 복잡하지 않은 부분에 일반적으로 간단히 사용할 수 있는 모듈이다. 제어점은 모서리 네 점이 되고 모듈변수는 가로와 세로의 요소 개수 m, n 이다.

(ii) Fig. 4의 (b)에 보인 모듈은 경제 모듈(Economic module)이다. 이는 한쪽은 변형이 심하거나 기하학적으로 복잡하여 격자를 잘게 나누는 경우이고 다른쪽은 변형이 심하지도 않고 기하학적으로도 복잡하지 않은 경우에 격자의 수를 절감하여 계산시간을 단축 시키기 위한 모듈이다. 제어점은 모서리 네점이 되고 모듈변수는 절점수가 많은 쪽의 절점수 m 이 된다. 이 m 값만 알고 난후, $m/3$ 의 나머지 정수값을 M 이라 하면 M 에 따라 다음과 같은 3가지 기하형상(Topology)을 갖는 경제 모듈이 만들어진다.

- 1) M 이 0인 경우에는 Fig. 4의 (b.1)과 같은 기하형상의 경제 모듈이 만들어진다.
- 2) M 이 1인 경우에는 Fig. 4의 (b.2)과 같은 기하형상의 경제 모듈이 만들어진다.
- 3) M 이 2인 경우에는 Fig. 4의 (b.3)과 같은 기하형상의 경제 모듈이 만들어진다.

이때 절점수가 적은변의 갯수는 m 값만 알면 자동적으로 결정 되어진다.

(iii) Fig. 4의 (c)에 보인 모듈이 접힘 방지 모듈(Anti-folding module)이다. 이 모듈은 자유 경계면과 다이의 접촉한 경계면이 만나는 곳에서의 격자의 한 평면으로의 접힘을 방지하기 위한 모듈이다. 제어점은 모서리에 네점이 되고, 모듈변수는 자유 경계면 반대쪽 면의 절점수이다.

(iv) Fig. 4의 (d)에 보인 모듈이 코너 유동 모듈(Corner flow module)이다. 이 모듈은 유동이 어떤 곡률 반경 R 를 가진 모서리 부분을 돌아 나가는 영역에 유효하다. 또한 길다란 형상을 가진 금형공간을 채우는데도 쓰인다. (cavity filling

module) Fig. 5의 (d.1)과 Fig. 5(d.2)는 다른 모듈과의 연결상태에 따라서 결정하게 된다. 이때 제어점은 모서리의 여섯개의 점이 되고 모듈변수는 $1, m, n$ 이다.

(v) Fig. 4의 (e)에 보인 모듈이 원형 단부 모듈(Circular end module)이다. 이 모듈은 다이 접촉 유무는 상관없이 재료의 형상이 반타원과 유사할 때 유용한 모듈이다. 제어점은 귀퉁이의 두 점이 되고 모듈변수는 장축의 절점수 m 과 단축의 절점수 n 이 된다.

(vi) Fig. 4의 (f)에 보인 모듈은 모서리 접촉 모듈(Sharp contact module)이다. 이 모듈은 재료의 모서리와 금형이 접촉할 때에 해의 원활한 수렴을 위해서 몇개의 절점을 미리 금형과 접촉시킬 때에 유효하다. 모듈변수는 가로와 세로의 절점수 m, n 이다.

(vii) Fig. 4의 (g)에 보인 모듈은 표면적용 모듈(Surface Adaptive Module)이다. 경계에 배치된 표면적용층으로 임의의 표면에 대해서 일반성을 가지고 적용되고 내부의 코아(Core) 부분으로 전체를 채우고, 그 사이에 경제 모듈을 배치하여 요소수를 줄여서 임의의 형상에 대해서 적용할 수 있는 모듈이다. 모듈변수는 m 과 n 이다.

Fig. 4의 (b)의 (4)에서 (7)까지의 경우에서 각 모듈은 기하형상(Topology)은 같으나 방향이 다르다. 이와 같이 모듈의 방향성을 해결하기 위하여 국부 좌표계 개념을 이용하였다.

4. 전문가 시스템(EXPERT SYSTEM)

전문가 시스템은 어떤 특정 분야의 지식을 컴퓨터라는 환경에서 구현하여 전문가 수준의 문제 해결을 제공하는 컴퓨터 프로그램이다. 이 전문가 시스템은 전문가의 지식으로부터 재구성된 지식 베이스(Knowledge Base)와 사용자와 질의 응답을 하면서 지식 베이스를 자동적으로 탐색해서 상황에 맞는 최적의 결론을 이끌어 내는 추론 엔진(Inference Engine)의 두 부분으로 크게 나타낼수 있다. 전문가 시스템의 특징은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 기존의 절차적 혹은 알고리즘(Algorithm) 제어적인 프로그램과는 달리 선언된 결론에 부합하는 조건을 찾아서 추론 엔진이 자동적으로 지식 베

이스를 탐색 하게된다.

- (2) 외부의 조건에 따라서 문제 해결에 적용된다.
- (3) 추론엔진부와 지식 베이스부가 서로 독립적이어서 확장 및 변동이 용이하다.
- (4) 전문가의 경험적 지식을 선택적으로 이용하게 된다.

단위체 격자 재구성법(Modular remeshing scheme)은 소성 변형시 발생하는 재료의 물리적 유동 특성을 잘 대변하는 적합한 격자 재구성 방법이지만 사용자의 많은 경험과 노력을 필요로 한다. 그래서 단위체 격자 재구성법을 보다 편리하게 사용하기 위하여 전-처리기(Pre-processor)로서 지식 기반과 사용자 인터페이스를 갖는 시스템을 개발하였다.

전체의 구성은 Fig.6과 같다. 만약 해결하려는 문제에서 일어나는 변형의 모드(Mode of deformation)가 지식 기반내에 있을 경우에는 자동적으로 모듈 생성 규칙을 적용하여 모듈의 종류와 제어점(control point), 모듈변수(Module parameter)들을 생성하고 만약에 아직 지식 베이스화 되어있지 않은 변형 모드를 갖는 문제일 경우에는 PC의 모니터상에 디스플레이된 형상을

보고 마우스와 키보드로부터 모듈변수를 사용자와의 대화식 작업을 통해서 입력 받게 된다. 이러한 모듈변수들은 단위체 격자재구성을 하는 프로그램의 입력형식에 맞게 고쳐서 출력하게 되고 이 결과를 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력으로 해서 격자 재구성을 하게 된다.

본 연구에서는 모듈변수의 실제적인 수치값을 구해야 하는 문제의 특성상 일어날 수 있는 변형 모드의 탐색에는 후진 추론을 하며 얻어진 변형모드를 구성하는 모듈에 대한 모듈변수의 선택을 위해서는 지식 기반을 전진 추론으로 탐색하고 이로부터 얻어진 값으로부터 구체적인 모듈변수값과 제어점의 위치를 구해내는 복합적인 추론과 제어를 하는 전용의 추론 엔진을 C언어로 제작하였다.

지식 베이스에는 각 공정에 따라서 일어날 수 있는 변형 모드와 각 변형 모드를 구성하는 모듈의 종류와 갯수에 대한 지식이 대상-속성-값(Object-Attribute-Value)의 형식으로 저장되어 있게 된다. 여기서 대상은 각 변형 모드가 되고 속성은 그 변형 모드를 구성하는 모듈의 종류이고 값은 모듈의 번호가 된다. 모듈변수를

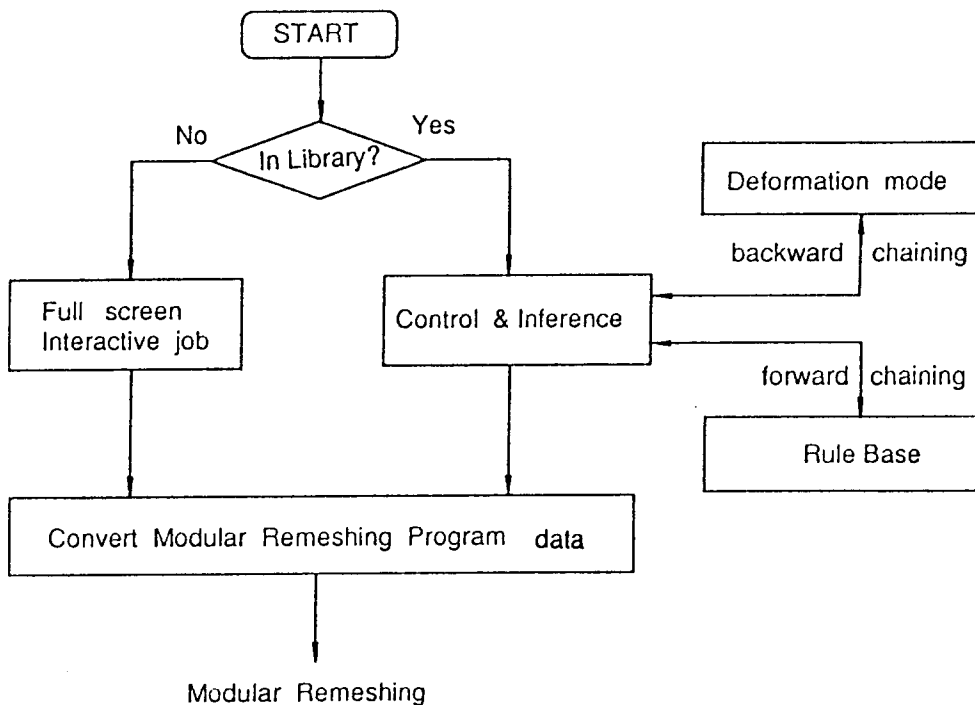


Fig. 6 Configuration of developed expert system

구하기 위해 적용하는 규칙은 "IF (가정) THEN (가설)"의 형식으로 표현하였다. 규칙의 일부를 소개하면 다음과 같다.

(1) 요소의 크기에 관한 규칙

최소(기준) 요소의 크기

- rule 1. IF (릴리이프가 있는 경우)
THEN (폭은 릴리이프 코너 반경이 1/3)
IF (릴리이프가 있는 경우)
THEN (높이는 최소 요소 폭의 3배)
- 전체의 격자구조의 기준이 되는 요소의 크기는 전체의 금형 형상이나 재료의 모양중에서 기하학적 모양이 가장 복잡한 곳을 기준으로 하였다. 그래서 릴리이프가 있을때는 릴리이프부를 기준으로 하였다.
- rule 2. IF (릴리이프의 코너부)
THEN (최소 요소를 배열한다)
- 릴리이프의 코너부는 복잡한 금형 부위로서 최소 요소가 배열된다.
- rule 3. IF (이동 금형의 코너부) AND (코너 반경의 45도 안쪽 부분)
THEN (최소 요소를 배열한다)
- 이동 금형의 코너 부위에서 일어나는 곡선 반경부를 지나는 변형모드에서는 반경의 45도 안쪽 부분에서는 주로 금형면과의 마찰에 의해서 심한 변형이 일어나므로 최소 요소를 배열한다.
- rule 4. IF (자유 표면과 인접 금형접촉부)
THEN (요소폭은 최소요소를 폭의 3배 크게 한다)
- rule 5. IF (기타의 금형접촉부)
THEN (rule 4. 크기의 배로한다)
- 기하학적 형상이 복잡한 곳에서 단순한 부분으로 갈수록 요소의 요소비(aspect ratio)를 3으로 해서 요소의 크기를 점차 크게해서 전체의 격자수를 줄인다.
- rule 6. IF (릴리이프 통과 부분)
THEN (최소 3개의 요소열을 배열한다)
- 릴리이프를 통과하는 부분의 형상을 충분히 표현하기 위해서는 최소 3개의 요소열이 있어야 하는 것으로 하였다.

- rule 7. IF (모서리 접촉이 있을때)
THEN (기준요소의 폭은 접촉 길이)
- 모서리 접촉을 하는 경우에는 모서리 부의 길이를 전체 요소의 기준으로 하였다.

(2) 변형모드에 대한 제어점(Control Point)의 위치에 관한 규칙

- rule 1. IF (릴리이프 변형 모드부)
THEN (반경의 중심에서 최소요소 1개폭 안쪽)
- 릴리이프가 있을때 그 릴리이프의 코너부를 지나는 변형의 시작은 반경 중심으로부터 약간 안쪽에서부터 시작하는 것으로 경험적으로 정하였다.
- rule 2. IF (코너 변형 모드부) AND (플랜지와 접촉했을때)
THEN (반경의 중심으로 최소요소 3개폭 만큼 내부로부터 시작)
- rule 3. IF (코너 변형 모드부) AND (플랜지와 접촉하지 않았을때)
THEN (반경의 중심에서 최소요소 6개폭 만큼 내부로부터 시작)
- 곡선 코너부를 지나는 변형모드에서 한쪽에서 변형이 구속되지 않은 경우에는 구속된 경우보다 금형과의 접촉면에서 변형과 함께 보다 큰 미끄러짐이 일어나므로 요소가 조밀하게 분할된 영역을 넓게 잡았다.
- rule 4. IF (릴리이프 변형 모드부)
THEN (최소 3개층의 최소요소를 배열를 배열한다)
- rule 5. IF (반경 변형 모드부)
THEN (최소 3개층의 최소요소를 배열한다)
- 이동 금형의 복잡한 형상과 직접 접촉한 곳에서는 최소요소의 3개층을 배열한 두께의 층이 있도록 하여서 심한 변형에 대비하면서 코너 유동 모듈간의 연결과 생성이 자연스럽게 한다.
- rule 6. IF (rule 4 & rule 5) AND (초기 격자)
THEN (최소 2개층의 최소요소를 배열한다)
- 초기 격자의 경우에는 2개층만 배열하여도 모듈간의 연결과 생성에 무리가 없이 심한 국부적 변형에 대응할 수 있다.

(3) 절점의 배열에 관한 규칙

- rule 1. IF (모서리가 있는 곳)
THEN (anti-folding요소 배치)
- 모서리부에는 접힘 방지(anti-folding) 요소가 배치되어 찌그러짐을 막는다.
- rule 2. IF (고정 금형과 수직한 변)
THEN (등비수열(geometric progression) 생성)
- rule 3. IF (금형 이동 방향과 수직한 변) AND (변형중)
THEN (등비수열의 기준길이는 접촉 요소의 길이*)
- rule 4. IF (rule. 3가 아니면)
THEN (등비수열의 기준길이는 접촉 요소의 길이)
- 기본적으로는 등비의 길이비로 절점을 배치하는 경우에는 연결 요소 길이를 등비로 분할 할때의 기준 거리로 하지만 변형이 진행중이고 이동금형의 이동 방향에 수직 할때는 더 넓게 분할해도 충분하다.
- rule 5. IF (릴리이프부(AND (반경의 중심을 통과한 부분)
THEN (등비수열 생성)
- 릴리이프부에서 릴리이프의 반경부를 통과한 영역은 거의 강체변형을 하므로 이부분에도 점차로 요소를 크게 배치한다.

(4) 변형모드의 변화에 대한 규칙

- rule 1. IF (H)R/2) AND (B/R/2)
THEN (코너 유동 모듈 사용)
- rule 2. IF (rule 1.의 경우가 아니면)
THEN (규격 모듈 사용)
- 곡선 반경부를 재료가 돌아서 나아갈 때 반경부를 지나간 높이와 반경부를 지날때의 간격과 반경 R을 비교해서 각 변형 모드에 적합한 모듈이 사용되게 된다. 만약 반경부에서 재료가 접촉한 높이가 반경의 절반 이상의 높이이고 재료가 빠져 나아가는 틈이 반경의 2배 이내이면 코너 변형모드가 시작된 것으로 하여서 규격 모듈 대신에 코너 모듈을 사용하게 하였다.
- rule 3. IF (rule 2.의 경우)

THEN (B-L/2 길이 안에 최소 요소폭의 배폭 요소 배열)

- 코너 유동 모듈이 사용되지 않는 경우에도 코너부의 복잡한 금형 형상과의 접촉을 예상하여서 장차 접촉이 예상되는 부분에 대하여 일정한 길이비로 조밀하게 격자를 생성 하였다.

5. 수치 해석

5.1 리브 웹브 단조(Rib-Web forging)

밀폐형 단조에서는 금형내의 과도한 압력 상승을 막고 재료가 금형내에 충만하도록 하기 위해서 여분의 재료가 유동할 수 있는 여유를 두는데 이를 릴리이프(relief)라고 한다. 현재 리브 웹브(Rib-Web) 형태의 단조에서는 단조축(forging axis)에 수직인 디스크(disk) 형태의 릴리이프(relief)를 사용하고 있으며 이를 플래시(flash)라고 부른다. 본 연구에서는 단조축에 평행한 튜브 형태의 릴리이프를 채택하여 이를 축방향 릴리이프(Axial relief)라고 하고 열간에서 주로 쓰이는 기존의 릴리이프와 비교하는 의미에서 플래시는 반경방향 릴리이프(Radial relief)라고 부르겠다. 본 논문에서는 축방향 릴리이프와 반경방향 릴리이프가 있는 경우에 대하여 각각 초기 재료의 크기를 같은 조건으로 해서 계산을 수행하였다.

시편의 초기높이는 21.77mm이고 반경은 19.49mm이다. 계산에 적용된 마찰 상수 m값은 0.1로 하였으며 매 충분마다 계산 단계의 크기는 0.2mm/step, 금형의 압속도는 0.5mm/sec로 하였다. 재료는 AISI 1015 steel로 선택하였으며 재질의 응력 변형도의 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 630.2 (\bar{\epsilon})^{0.116} \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

Fig. 7는 축방향 릴리이프의 초기격자 모양으로, 총 요소수는 135개, 총절점수는 161개이다. 이는 개발된 전문가 시스템이 축방향 릴리이프를 갖는 경우의 초기 격자 생성에 대한 규칙을 적용하여 모듈의 종류와 제어 점(Control point), 모듈변수(Module parameter)를 결정하여서 자동적으로 생성한 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터에 의해서 생성한 격자이다. 이때 선택한 모듈은 규격 모듈(Regular module)과 경제 모듈(economic module)이다. 상충부에서는 변형에 진행

에 따라 기하학적으로 복잡한 다이와의 접촉을 예상하여 잘게 분할 하였다. 그 외의 규격 모듈은 기하학적으로 복잡하지도 않고 예상되는 변형이 심하지도 않은 부분이므로 격자를 크게 분할하여 주면서 고정 금형과의 접촉 부에는 등비인 길이비로써 격자의 분할을 점차 크게하였다. 그리고 경계 모듈은 격자의 수를 줄여서 계산시간을 절약하기 위하여 사용하였다.

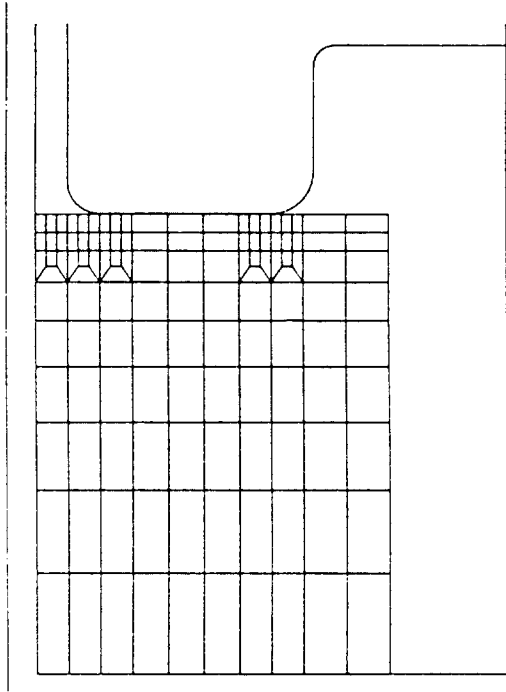
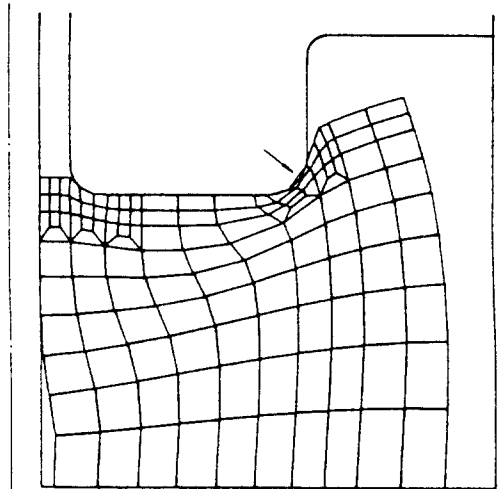
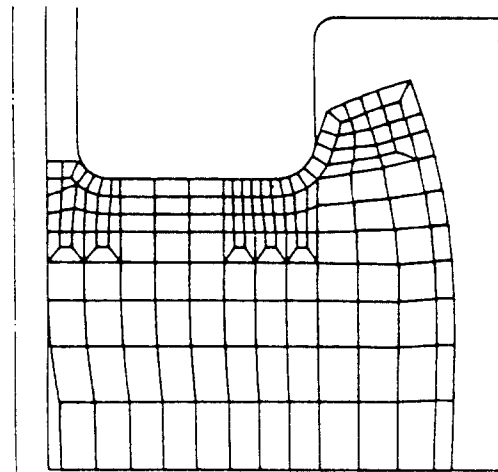


Fig. 7 Initial mesh configuration in axial relief

때 사용한 모듈은 코너 유동 모듈(Corner flow module), 규격 모듈과 경계 모듈등이다. 모듈 중 자유 표면 및 금형과의 접촉면이 있는 모듈은 그 표면에 표면적용층을 적용하여 면에 수직하고 두께가 일정한 요소를 표층에 생성하였다. 코너 유동 모듈은 코너가 있어서 코너부를 재료가 돌아서 진행되는 부분에 사용하였으며, 전체 변형 형상에서 모서리 부분에는 접합을 방지하기 위하여 접합 방지 형태로 요소가 배치되었다. 이때도 적절한 위치에 경계 모듈을 사용하여 총요소수를 줄임으로서 계산시간을 절약하였다.



(a) Before remeshing

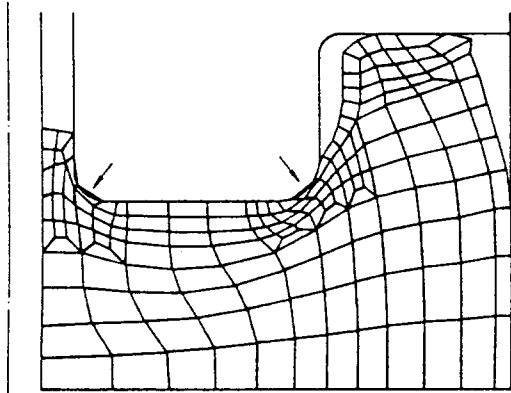


(b) After remeshing

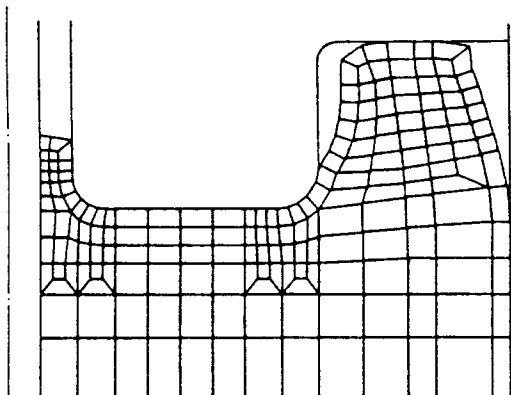
Fig. 8의 (a)는 축방향 릴리프의 33.4% 높이 감축률에서의 변형 형상으로 상부 다이 우측의 화살표 지시 부분에서의 격자와 금형간의 간섭(Interference) 때문에 격자 재구성을 하였다. 이때 이동 금형과의 접촉을 보면 조밀한 격자를 배열한 부분의 안쪽에서만 큰 변형이 생긴것을 볼 수 있어서 이로부터 규칙으로 정한 조밀한 격자를 생산하는 영역의 크기가 적절했음을 알 수 있다. 여기에서 재료의 안쪽 부분이 점점 벌어지는 현상을 볼수 있는데 이는 접촉면에서의 마찰이 작아서 미끄러짐이 일어나기 때문으로 생각된다. 링 압축 실험[29]에서 보면 마찰이 큰 경우에는 내경이 줄어들고 마찰이 작은 경우에는 미끄러짐이 생기며 내경이 커지는 현상이 일어난다. Fig. 8의 (b)는 첫번째 격자 재구성후의 격자 모양으로 총요소수는 166개, 총절점수는 196개이다. 이

Fig. 8 Mesh configurations at the height reduction of 33.4% for the first remeshing in axial relief

Fig. 9의 (a)는 축방향 릴리프의 58.3%높이 감축률에서 변형 형상으로 상부 다이 좌측의 화살표 지시부분에서의 간섭 및 우측의 화살표 지시부분에서의 간섭때문에 격자 재구성을 하였다. 재료가 릴리프부와 접촉하자마자 격자 재구성이 필요한 상황이 되었다. 규격 모듈로는 좁은 코너부를 지나는 변형 모드에 적용될 수 없음을 알 수 있다. Fig. 9의 (b)는 두번째 격자 재구성후의 격자 모양으로 총요소수는 183개, 총절점수는 219개이다.



(a) Before remeshing



(b) After remeshing

Fig.9 Mesh configurations at the height reduction of 58.3% for the second remeshing in axial relief

Fig. 10은 축방향 릴리프의 63.0% 높이 감축률에서 재료가 금형내를 완전히 충만한 모습이다.

Fig. 11은 반경방향 릴리프의 초기격자 모양으로, 총요소수는 95개 총절점수는 116개이다. 이도 역시 전

문가 시스템이 반경방향 릴리프를 갖는 경우의 초기 격자 생성에 대한 규칙을 적용하여 자동적으로 생성한 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터에 의해서 생성한 격자이다. 이 경우에도 축방향 릴리프와 동일한 이유에서 규격 모듈과 경제 모듈을 선택하였으며 고정 금형 접촉부는 등비인 길이비로 격자를 점차 크게 분할하였다.

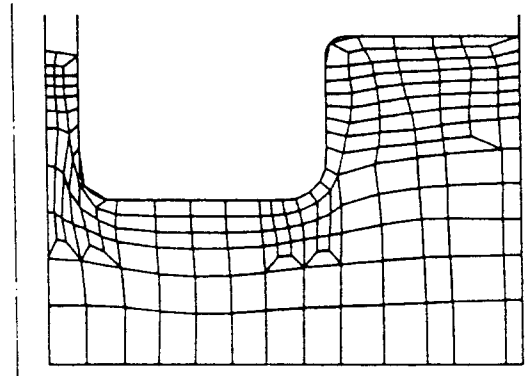


Fig.10 Mesh configuration at the complete filling in axial relief

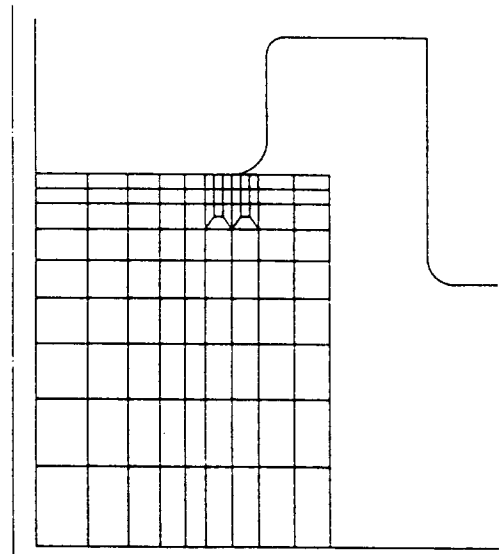
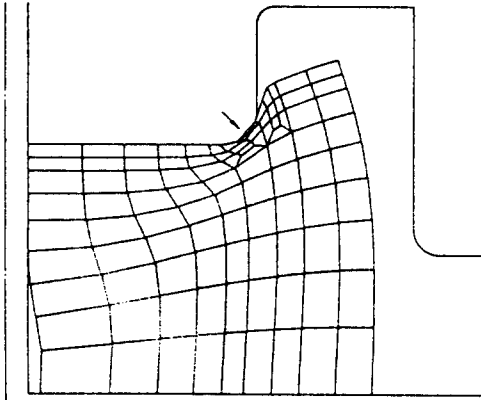


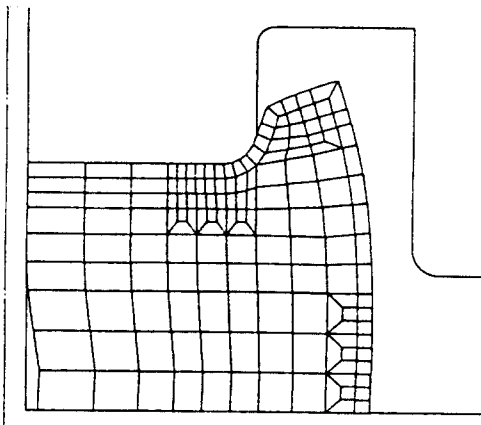
Fig.11 Initial mesh configuration in radial relief

Fig. 12의 (a)는 반경방향 릴리프의 33.4% 높이 감축률에서의 변형 형상이다. 상부 다이 우측의 화살표 지시부분에서의 간섭(Interference)때문에 격자 재구성을 하였다. Fig. 12의 (b)는 첫번째 격자 재구성후의

격자모양으로 총요소수는 154개, 총절점수는 183개이다. 이때도 코너 유동 모듈(Corner flow module), 규격 모듈과 경제 모듈을 변형의 특성과 계산시간의 절약을 위하여 적절히 사용하였다. 우하측 부분은 이동 금형의 형상이 복잡한 부분과의 접촉에 대비하여 조밀한 격자를 구성하였다. 역시 각 표면의 요소들은 표면적응층을 형성한다.



(a) Before remeshing

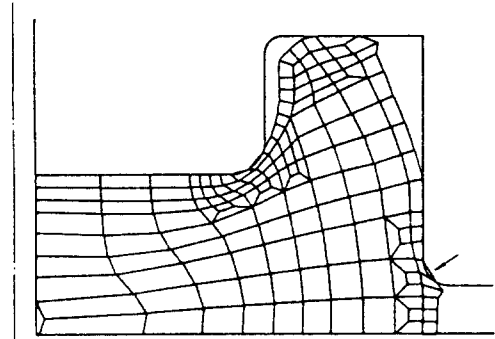


(b) After remeshing

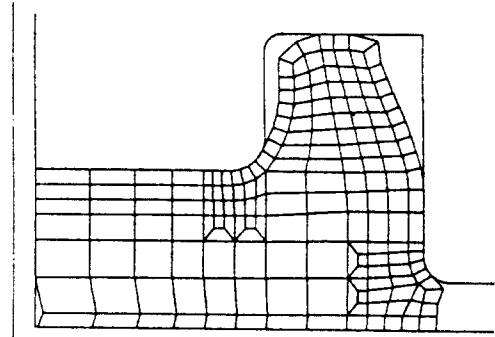
Fig.12 Mesh configurations at the height reduction of 33.4% for the first remeshing in radial relief

Fig.13의 (a)는 반경방향 릴리프의 57.9% 높이 감축률에서 변형 형상으로 상부 다이 우측 부분의 화살표 지시부분이 릴리프의 코너에서의 간섭때문에 격자 재구성을 하였다. Fig.13의 (b)는 두번째 격자 재구성후의 격자모양으로 총요소수는 179개, 총절점수는 211개이다.

이때도 마찬가지로 전문가 시스템으로부터 생성된 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터에 의해서 자동적으로 격자 재구성을 하였다.



(a) Before remeshing



(b) After remeshing

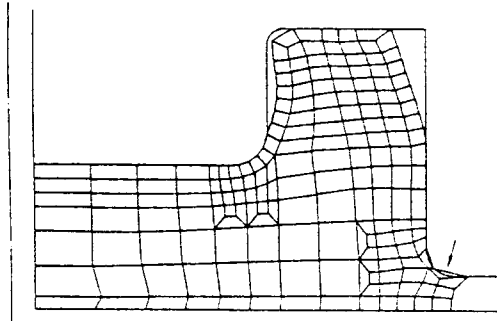
Fig.13 Mesh configurations at the height reduction of 57.9% for the second remeshing in radial relief

Fig.14의 (a)는 반경방향 릴리프의 61.3%높이 감축률에서 변형 형상으로 상부 다이 우측 부분의 화살표 지시부분에서의 간섭과 격자 퇴화(Degencracy)때문에 격자 재구성을 하였다. Fig.14의 (b)는 세번째 격자 재구성후의 격자모양으로 총요소수는 172개, 총절점수는 205개이다. 전문가 시스템으로부터 생성된 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터에 의해서 자동적으로 격자 재구성을 하였다.

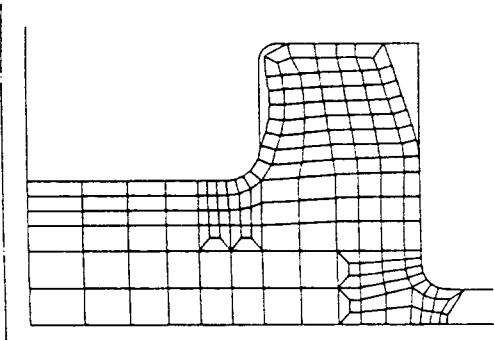
Fig.15는 반경방향 릴리프의 64.5% 높이 감축률에서 재료가 금형 내를 충만한 모습이다. Fig.24는 높이 감축율 64.5%에서의 반경방향 릴리프의 변형 모습이다. 이때 오른쪽 상단 구석 부분에서 격자의 한변이 금형의 양단에 걸려있게 되는데 실제 변형에서는 재료가

아래에서 위쪽으로 올라와야 하지만 선형 요소이므로 그와같은 변형을 하나의 변으로 나타낼수가 없다. 따라서 이 단계에서 중단된 것으로 하였다.

계산에 사용된 감속계수 β 는 0.1로 하였고 수렴서의 판별은 $|\Delta V/V|$ 가 10^{-5} 보다 작으면 수렴한 것으로 하였으며 보통 14-17번의 반복 계산이 필요하였다.



(a) Before remeshing



(b) After remeshing

Fig.14 Mesh configurations at the height reduction of 61.3% for the third remeshing in radial relief

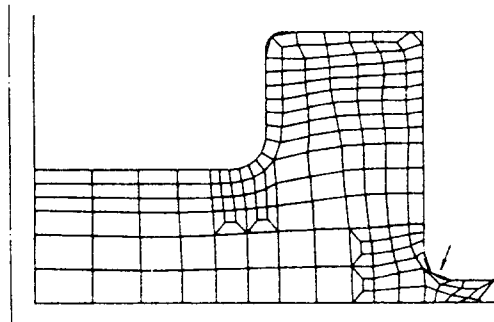


Fig.15 Mesh configurations at the complete filling in radial relief

Fig. 16은 축방향 릴리프의 58.3% 높이 감축률에서 격재 재구성 이전 격자와 새로운 격자에서의 유효 변형도 분포를 나타내는데 상태변수의 유연화(smoothign of state variable)와 상태변수의 사상(mapping of state variable)의 과정을 통해서 전달된 이전격자의 상태변수 값이 새로운 격자로 유사한 값으로 전달 되었음을 알 수 있다.

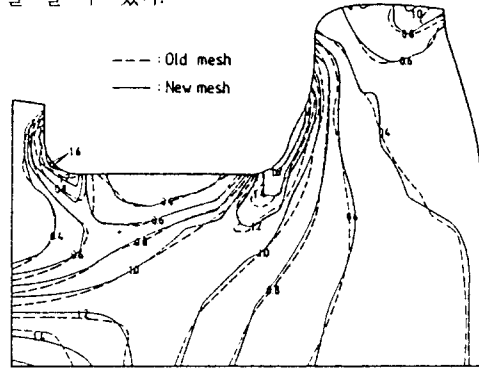
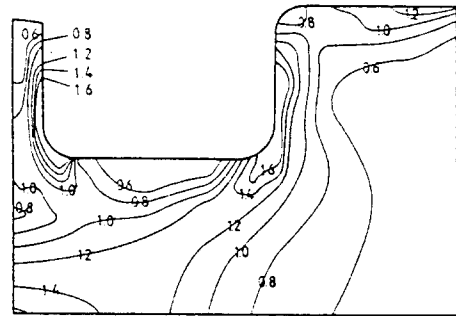
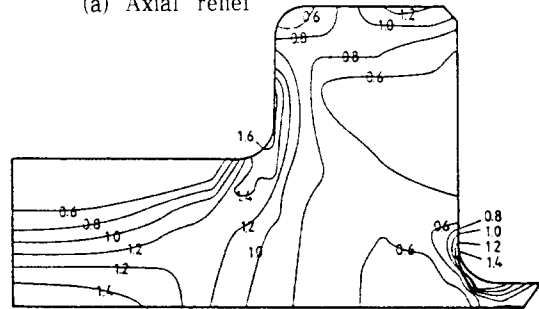


Fig.16 Comparison of distribution of effective strain at the height reduction fo 58.3% between before and after remeshing for axial relief



(a) Axial relief



(b) Radial relief

Fig.17 Comparison of distribution of effective strain between axial relief and radial relief

Fig. 17의 (a)와 (b)는 축방향 릴리프와 반경방향 릴리프가 금형내를 충전했을때의 유효 변형도의 분포이다.

Fig. 18은 축방향 릴리프와 반경방향 릴리프의 하중을 서로 비교한 것이다. 양자 모두 높이 감축률에 따라 하중이 증가하며, 재료의 안쪽 부분이 벌어 지면서 아랫면을 미끄러져 나아가다가 바깥 부분이 금형과 접촉하게 되어 미끄러짐이 구속되고 재료가 플랜지부를 충전하는 방향으로 변형이 생길때에 하중이 급격히 증가하기 시작하게 된다. 여기에서 진한 점선은 반경방향 릴리프의 하중인데 만약에 재료가 완전히 금형내에 충전된다면 연장된 흐린 점선 표시부까지 하중이 증가될 것으로 예상된다. 이 예상은 본 연구의 주요 주제인 전문가 시스템으로 하는 자동화된 격자 재구성을 하기전에 수동으로 격자 재구성을 하여서 테스트 실행을 한 결과로부터 나온 것이다.

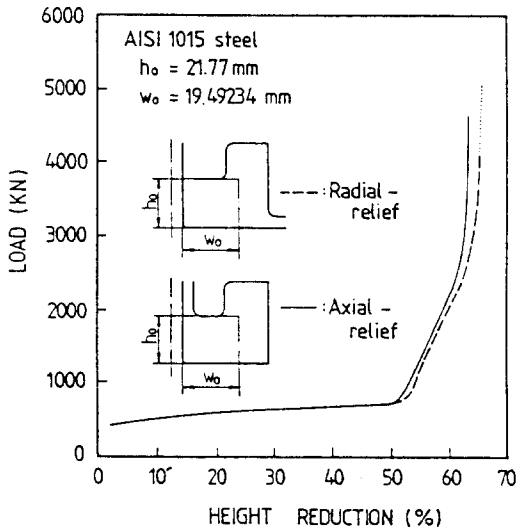


Fig. 18 Comparison of forging load between axial relief and radial relief

Table 1. Comparison of computational result between axial relief and radial relief

	Axial relief	Radial relief
충만까지의 압하율	62.95%	64.54%
체적손실	1.93%	4.56%
Remeshing횟수	2	3

Table 1.에서 보면 릴리프로 인한 체적손실량은 축방향 릴리프는 1.93%이고, 반경방향 릴리프가 4.56%로 두배 이상의 차이를 보이고 있으며, Fig. 19는 축방향 릴리프가 있는 경우에 완전히 금형내를 충전했을 때 동일 높이 감축률에서의 반경방향 릴리프가 있는 경우의 변형 모습이다. 반경이 작은 쪽에 릴리프가 있는 축방향 릴리프가 반경방향 릴리프보다 면적이 작으므로 빠져나가는 재료의 양이 적게 된다.

계산이 끝날 때까지 격자 재구성 횟수는 축방향 릴리프의 경우 두번 반경방향 릴리프의 경우 세번이었으며, 이상의 격자 재구성은 전문가 시스템에 의해서 자동으로 작성된 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터에 의해서 자동 격자 재구성을 한 것이다.

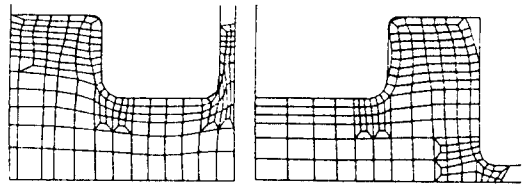
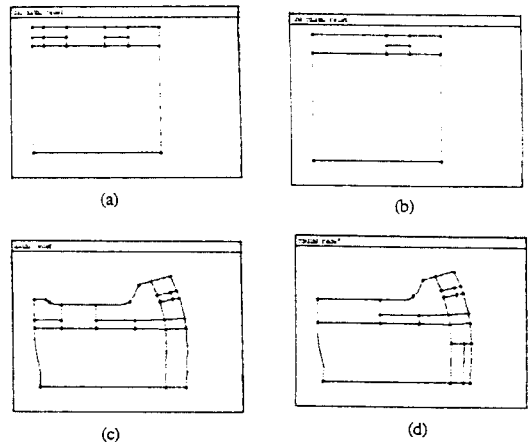


Fig. 19 Comparison of the deformed shape between axial relief and radial relief at the same height reduction at the complete die filling in axial relief

Fig. 20에 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터를 작성하기 위해 전문가 시스템으로 작업한 컴퓨터 화면이다. Fig. 20의 (i)는 만약에 지식 베이스화 되어 있지 않은 유동 모드일 경우에 사용자와의 대화식 작업을 할 때의 가상 화면이다.



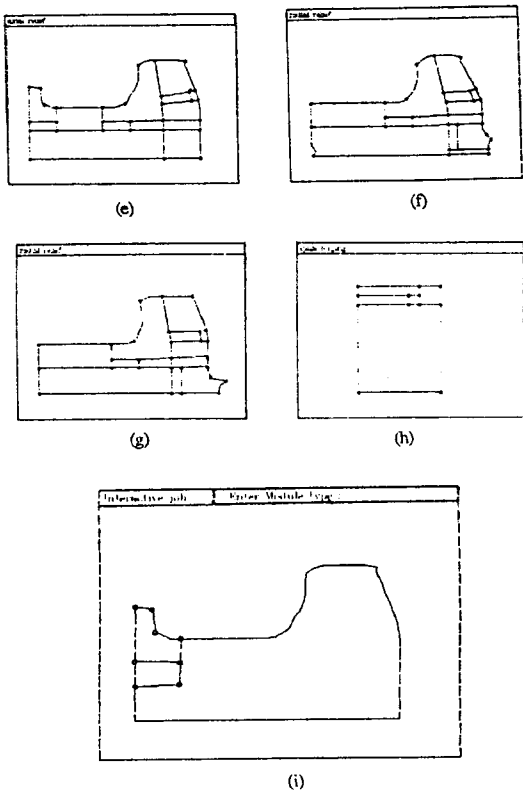


Fig. 20 Execution example of the expert system
(a)~(H) Automatic job (i) interactive job

5.2 스파이크 단조(Spike forging)

시편의 초기 높이는 30.0mm이고 반경은 20.0mm이다. 계산에 적용된 마찰 상수 m 값은 0.1로 하였으며 매층 분마다 계산 단계의 크기는 0.2mm/step, 금형의 압하 속도는 0.5mm/sec로 하였다. 재료는 A1100 알루미늄으로 선택하였으며 재료의 응력 변형도 관계식을 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 64.88 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.01} \right)^{0.98} \quad (9)$$

Fig. 21은 초기 격자모양으로 총요소수는 108개, 총절점수는 130개이다. 여기서 모서리 부분이 금형과 3점이 접촉하도록 하고 있는데 이는 첫단계에서 수렴을 위한 것이다. 이를 위해서 모서리 접촉 모듈(Sharp contact module)을 사용하였으며 규격 모듈을 사용하면서 적절한 위치에 경계 모듈을 삽입해서 요소수를 줄였다.

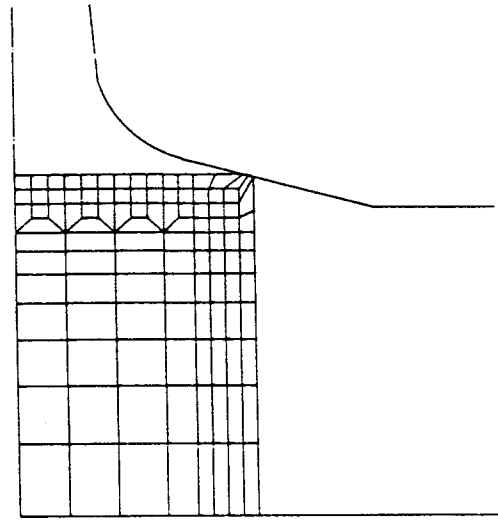
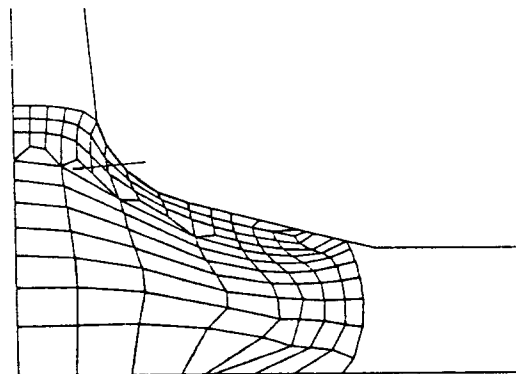
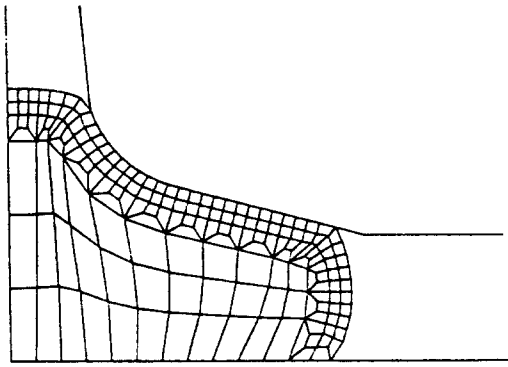


Fig. 21 Initial mesh configuration in spike forging

Fig. 22의 (a)는 53.0% 높이 감축률에서의 변형 형상으로 화살표 지시부에서의 격자의 찌그러짐 때문에 격자 재구성을 하였다. Fig. 22의 (b)는 격자 재구성후의 격자 모양으로 총요소수는 172개, 총절점수는 203개이다. 여기서는 적용 모듈(adaptive module)을 사용하여서 격자 재구성을 하였다. 복잡한 경계 형상은 표면적응층에 의해서 그 형상에 부합하는 요소가 만들어지고, 그 다음에 경계 요소층을 써서 요소수를 절약하고, 중심부는 경계의 형상을 적절하게 반영하여 절점을 생성하도록 사상(Transfinite mapping)을 한 영역을 두었을때, 임의의 형상에 대해서 한개의 모듈만을 사용하여도 손쉽게 경제적인 격자 재구성을 할 수 있었다.



(a) Before remeshing



(b) After remeshing

Fig. 22 Mesh configurations at the height reduction of 53.0% for the first remeshing in spike forging

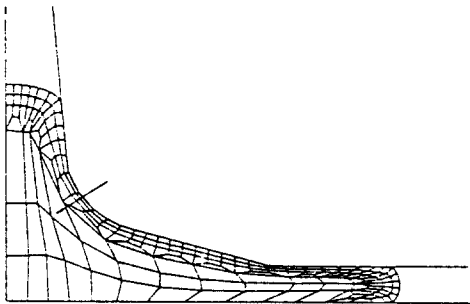


Fig. 23 Mesh configuration at the height reduction of 76.0% in spike forging

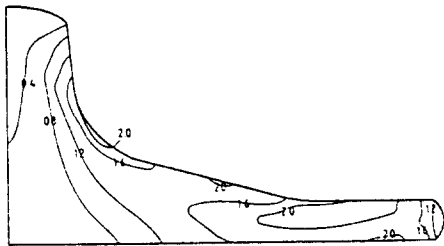


Fig. 24 Distribution of effective strain at the height reduction of 76.0%

Fig. 23은 76% 높이 감축률에서의 변형 형상으로 하살표 지시부에서의 격자 찌그러짐 때문에 계산을 끝마친 상태이다. 이동 금형과의 접촉면을 보면 양 끝단에서는 큰 변형이 생겼으나 중앙부는 변형이 적은 것을 알 수 있다. 서로 반대 방향으로 빠져나가는 변형의 중립점이

그 부근에 있다고 할 수 있겠다. Fig. 24는 최종 상태에서의 유효 응력 변형도의 분포이다. 여기에서도 중립점부근에서 변형량이 적었음을 알 수 있다. Fig. 25는 높이 감축률에 따른 하중의 분포이다.

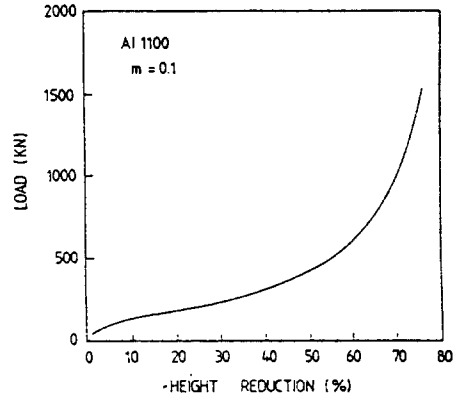


Fig. 25 Variation of forging load with respect to height reduction in spike forging

계산에 사용된 감속계수 β 는 0.1로 하였고 수렴성의 판별은 $|\Delta V/V|$ 가 10^{-5} 보다 작으면 수렴된 것으로 하였으며 보통 4-5번의 반복 계산이 필요하였다.

6. 결 론

본 연구에서 소성 문제의 특성을 잘 고려할 수 있는 단위체 격자 재구성법(Modular remeshing)과 그 전처리기(Pre-Processor)로서의 지식 기반 전문가 시스템(Knowledge Based Expert System)을 개발하여 2차원 냉간 단조의 유한요소 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단위체 격자 재구성법을 적용하여 2차원 냉간 단조를 유한요소 해석한 결과 격자 재구성 방법에 단위체의 도입이 방법론적으로 유효함을 보였다.
2. 2차원 단조 문제에 맞는 규격 모듈(Regular module), 경제 모듈(Economic module), 접침 방지 모듈(Anti-folding module), 원형 단부 모듈(Circular end module), 모서리 접촉 모듈(Sharp contact module), 적응 모듈(Adaptive module)을 개발하여 유한요소 해석에 적용하였다.
3. 표면적응층(Surface Adaptive Layer)을 격자 구

조에 도입한 결과, 격자의 찌그러짐(mesh degeneracy)을 지연해서 격자의 수명이 연장됨을 알 수 있었으며, 계산에서 수렴성이 좋아짐을 알게 되었다.

4. 지식 기반(Knowledge Base)을 갖는 전문가 시스템(Expert system)을 개발하여 격자 재구성시 자동화가 가능하게 하였다. 해석하려는 공정에서 생기는 변형 모드(Mode of deformation)가 지식 기반내에 있으면 자동으로 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터를 작성하게 하였다.
5. 지식 기반에 들어 있지 않은 변형 모드가 생기는 공정에 대해서 격자 재구성이 필요한 경우 사용자와 그래픽 화면에서의 대화식 작업으로 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터를 작성할 수 있게 하여 보다 편리하게 격자 재구성을 하게 하였다.
6. 모델 생성에 관한 규칙과 기준을 지식 기반화(Knowledge base)하고 이로부터 2차원 단위체 격자 재구성기법을 전문가 시스템화해서 효율적이고 편리한 격자 재구성이 가능하게 하였다.

참고문헌

- 1) K. Roll and Th. Neitzert, On the application of different numerical methods to cold forming processes, J. F. T. Pittmann et al. (eds.), Num. Meth. Ind. Form. Proc., Pineridge Press, Swansea, U.K., pp.97~107, 1982.
- 2) C. J. M. Gelten and A. W. A. Konter, Application of mesh-rezoning in the updated Lagrangian method to metal forming analysis, J. F. T. Pittman et al. (eds.), Num. Meth. Ind. Form. Proc., Pineridge Press, Swansea, U.K., pp.511~521, 1982.
- 3) S. I. Oh, J. P. Tang and A. Badawy, Finite element mesh rezoning and its applications to metal forming analysis, Advd. Tech. Plasticity 2, pp.1051~1058, 1984.
- 4) J. H. Cheng and N. Kikuchi, A mesh re-zoning technique for finite element simulations of metal forming processes, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 23, pp.219~228, 1986.
- 5) J. H. Cheng, Automatic adaptive remeshing for finite element simulation of forming processes, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 26, pp.1~18, 1988.
- 6) P. L. Baehmann, M. S. Shephard, R. A. Ashley, A. Jay, Automated metal forming modeling utilizing adaptive remeshing and evolving geometry, Computers & Structures, Vol. 30, pp.319~325, 1988.
- 7) A. M. Habraken and J. P. Radu, Simulation of forging applications with the finite element method, Numiform 89, pp.543~548, 1989.
- 8) J. P. Cescutti, N. Soyris, G. Surdon and J. L. Chenot, Thermo-mechanical finite element calculation of three-dimensional hot forging with remeshing, Advd. Tech. of Plasticity, Vol. 2, pp.1051~1058, 1987.
- 9) J. H. Yoon and D. Y. Yang, A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp.277~291, 1990.
- 10) P. L. Baehmann, S. L. Wittchen, M. S. Shephard, K. R. Grice and M. A. Yerry, Robust, geometrically based, automatic two-dimensional mesh generation, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 24, pp.1043~1078, 1987.
- 11) J. U. Brackbill and J. S. Saltzman, Adaptive zoning for singular problems in two dimensions, J. Comput. Phys., Vol. 46, pp.342~368, 1982.
- 12) E. A. Sadek, A Scheme for the automatic generation of triangular finite elements, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 15, pp.1813~1822, 1980.
- 13) Nguyen-Van-phai, Automatic mesh generation with tetrahedron elements, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 18, pp.273~289, 1982.
- 14) M. A. Yerry and M. S. Shephard, Automatic three-dimensional mesh generation by the modified-octree technique, Int. J. Num. Meth.

- Engng, Vol.20, pp.1965~1990, 1984.
- 15) M. A. Yerry and M. S. Shephard, Automatic mesh generation for three-dimensional solids, Computers & Structures, Vol. 20, pp. 31~39, 1985.
 - 16) J. C. Cavendish, D. A. Field and W. H. Frey, An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 21, pp. 329~347, 1985.
 - 17) S. Pissanetzky, KUBIK : An automatic three-dimensional finite element mesh generator, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 17, pp. 255~269, 1981.
 - 18) J. A. Talbert and A. R. Parkinson, Development of an automatic, two-dimensional finite element mesh generator using quadrilateral elements and bezier curve boundary definition, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 29, pp. 1551~1567, 1990.
 - 19) N. Kikuchi, Adaptive grid-design methods for finite element analysis, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng, Vol. 55, pp. 129~160, 1986.
 - 20) M. S. Shephard, M. A. Yerry and P. L. Baehmann, Automatic mesh generation allowing for efficient a priori and posteriori mesh refinement, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng, Vol. 55, pp. 161~180, 1986.
 - 21) N. Yukawa and N. Kikuchi, An Adaptive Remeshing Method for analysis of metal forming processes, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 4, pp. 1719~1728, 1990.
 - 22) E. Hinton and J. S. Campbell, Local and global smoothing of discontinuous finite element functions using a least squares method, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 8, pp. 461~480, 1974.
 - 23) P. Hartly, C. E. N. Sturgess, T. A. Dean and G. W. Rowe, Forging die design and flow simulation : their integration in intellegent knowledge based system, J. Mechanical working Technology, Vol. 15, pp. 1~13, 1987.
 - 24) K. Osakada, T. Kado and G. B. Yang, Application of A.I. Technique to process planning of cold forging, annals of the CIRP Vol. 37, pp. 239~142, 1988.
 - 25) J. Tang, S. I. Oh, T. Altan and R. A. Miller, A knowledge based approach to automatic forging design, J. Material Shaping Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 7~17, 1988.
 - 26) 최재찬, 김형섭, 허만조, 축대칭 다단 냉간단조의 공정 및 금형 설계 자동화에 관한 연구, 한국정밀공학회지, Vol. 6, pp. 84~93, 1989.
 - 27) G. Yang and X. Y. Ruan, Expert system for cold die design, Int. Conf. Die and Mold Design, pp. 477~481, 1990.
 - 28) J. L. Chen and P. Hajera, FEMOD : A consultive expert system for finite element modeling, Computers & Structure, Vol. 29, No. , pp. 99~109, 1988.
 - 29) T. Jimma, T. Aizawa, K. Kato, M. Kiuchi, S. Kuriyama T. Sawada, T. Tomita, Y. Yokouchi, Benchmark tests for the improvement of accuracy in the numerical analyses of metal-forming processes, Grant-in-aid for Co-operative reseach (A) 62302503 (1987-1989), pp. 190~201, 1990.