

〈論 文〉

축대칭 냉간단조의 유한요소해석에서 퍼지로직을 이용한 전방투사법

정낙면* · 이낙규** · 양동열**

(1992년 2월 28일 접수)

Forward Projection Using Fuzzy Logic in Axisymmetric Finite Element Simulation for Cold Forging

N.M. Jung, N.K. Lee and D.Y. Yang

Key Words : Rigid-Plastic Finite Element Analysis(강소성 유한요소 해석), Forward Projection(전방 투사법), Linear Inter-/Extrapolation(선형 내-외삽법), Fuzzy System(퍼지 시스템)

Abstract

In the present paper forward projection is proposed as a new approach to determine the preform shape in rib-web type forging. In the forward projection technique an optimal billet is determined by applying some mathematical relationship between geometrical trials in the initial billet shape and the final products. In forward projection a volume difference between the desired product shape and the final computed shape obtained by the rigid-plastic finite element method is used as a measure of incomplete filling of working material in the die. At first linear inter-/ extrapolation is employed to find a proper trial shape for the initial billet and the method is successfully applied to some cases of different aspect ratios of the initial billet. However, when the initial guesses are not sufficiently near the optimal value linear inter-/ extrapolation does not render complete die filling. For more general application, a fuzzy system is used in the forward projection technique in order to determine the initial billet shape for rib-web tpe forging. It has been thus shown that the fuzzy system is more reliable for the preform design in the rib-web type forging process.

기 호 설 명

f, f_i : 표면 장력(surface traction) 및 그 성분
 H' : 가공 경화율(work-hardening rate)
 k : 전단 항복 응력(shear yield stress)
 K : 벌칙 상수(penalty constant)
 m : 마찰 상수(friction factor)
 S_r, S_v : 힘 경계조건(traction boundary condition)과 속도 경계조건(velocity boundary condition)이 명시 되어진 표면

$t, \Delta t$: 시간(time)과 시간 증분(time increment)
 α : 가공 경화를 고려하기 위한 상수
 $\epsilon_{ij}, \bar{\epsilon}$: 변형률속도(strain rate component) 및 유효 변형률속도
 $\bar{\epsilon}$: 유효 변형률(effective strain)
 $\sigma_{ij}, \sigma'_{ij}$: 응력(stress) 및 편차응력(deviatoric stress)
 $\bar{\sigma}$: 유효 응력(effective stress)
 $\Omega, \Delta\Omega$: 최종 형상에서의 미 충만 부피와 그 변화량
 $\Psi, \Delta\Psi$: 형상비(aspect ratio)와 그 변화량
 Γ : 리브(Rib)의 높이 대 폭의 비

*정회원, 대우자동차(주)

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 가장 기본적인 금속 성형 방식이다. 소성가공의 일종인 단조는 상부 금형과 하부 금형 사이에서 소재를 누름으로써 행해진다. 단조를 함으로서 제품의 기계적 성질이 크게 향상되므로 매우 튼튼한 기계 부품을 만들 수 있다. 특히 냉간 단조는 자동차 부품이나 각종 기계 요소와 같이 비교적 작고 정밀한 부품을 생산하는데 직접 이용되기도 하며, 열간 단조나 다른 초기 공정으로 예비형상을 성형한 후 마무리 작업에 많이 적용된다.

최근 기계 제품의 경량화, 고 강도화 추세에 부응하기 위해서 금형의 설계 및 가공에 대한 연구가 필수적이나, 형단조 금형 설계는 경험이나 실험에 의지해 왔다. 그러나 복잡한 형상에 대해서는 이러한 방법들에 한계가 있다. 최근에는 컴퓨터에서 금형을 마음대로 바꾸어 시뮬레이션을 하여서 원하는 제품의 성형이 가능할 때 실제로 금형을 제작하는 연구가 진행중이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는데 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 방법중의 하나가 유한요소법(finite element method, FEM)이다. 그런데 비정상 상태(nonsteady state)의 단조 공정은 금형경계에서 심한 변형이 일어나기 때문에 유한요소 격자가 크게 찌그러져서 더 이상의 계산이 불가능하게 된다. 따라서 이에 대처하기 위해 격자 재구성이 필요하다.

소성 공정의 가장 큰 장점 중의 하나가 재료의 손실 없이 좋은 기계적 성질을 얻을 수 있다는 것이나 그러한 조건을 만족하기 위해서는 초기 형상을 어떻게 결정하느냐에 따라 좌우 된다고 하겠다. 결국 금속 유동을 공정중에 제어하기가 곤란하므로 초기 형상으로 금속 유동을 가장 적당하게 제어하게 된다.

인공 지능(artificial intelligence, A.I)에 대한 연구는 최근들어 활발히 진행되고 있으나 아직까지는 실험실에서의 적용 단계에 있지만 이 중에서 전문가 시스템과 퍼지 시스템이 경제성과 실용성 면에서 타당성을 가지고 실용화 되고 있다. 전문가 시스템(Expert system)은 퍼지 시스템(fuzzy system)의 특별한 경우라고 할 수 있다. 퍼지 논리란 인간 사고를 컴퓨터로 실현하고자 하는 것으로 인

간의 논리를 언어적으로 표현함으로써 이해하기 쉽고 수식화 할 수 없는 복잡한 문제에도 쉽게 적용할 수 있다. 이러한 의미에서 전문가 시스템 및 퍼지시스템은 경험적인 노-하우(know-how)가 많은 소성가공 분야에 효과적으로 적용되어 질 수 있다.

유한요소법을 이용한 금속 성형 해석방법에는 탄소성 해석(elastic-plastic analysis), 강소성 해석(rigid-plastic analysis)과 주로 열간 가공 해석에 이용되고 있는 열-점소성(thermo-viscoplastic analysis) 해석 등이 있다. 탄소성 해법은 보다 믿을만한 응력과 변형도 분포를 얻을 수 있지만 매 변형 단계마다 항복 상태에 도달 하였는지 검사 하여야 하며 정상 상태 해석시 변형 증분량을 한꺼번에 늘릴 수 없는 단점이 있으나, 소성 변형도의 크기가 탄성에 비해 그다지 크지 않은 구조물, 파피 역학 등의 해석에는 정확한 해를 준다. 그러나 단조나 압출같은 소성 문제에서는 소성 변형량에 비해 탄성 변형량이 매우 작을 때 강소성으로 다루는 것이 계산시간에 있어서 효과적이다. 강소성 유한요소법은 변형 증분량을 크게 잡을 수 있어 계산 시간이 짧아지고 해의 수렴성이 좋다는 장점이 있다. 이러한 장점들 때문에 금속성형 공정의 해석에 강소성 해석이 주로 많이 사용되어져 왔다.

강소성 유한요소법은 1973년 Lee와 Kobayashi⁽¹⁾가 강소성 유한요소법의 기초가 되는 행렬방법(matrix method)을 수식화한 이후에 복잡한 금속 성형 문제의 해석에 이 방법이 적용되어 왔다. Lee와 Kobayashi⁽¹⁾가 비압축성조건을 고려하기 위하여 Lagrange 승수를 도입한데 비해, 1975년 Zienkiwicz⁽²⁾는 벌칙함수(penalty function)를 도입하여 수식화 하였다. 그후 지난 십여년 동안 강소성 모델이나 성형공정의 근본적인 특성으로부터 발생하는 문제를 해결하기 위하여 여러가지 효과적인 기법들이 개발 되어 왔다. 그중에서 몇가지 중요한 기법들을 살펴보면 강제영역을 처리하는 기법^(3,4)과 곡면상의 마찰 경계조건을 처리하는 기법^(5,6), 초기 속도장 발생법⁽⁶⁾ 등이 이에 해당된다. 이와 같이 실질적으로 중요한 기법들은 여러 소성가공 공정을 해석하는데 유용하게 적용 되어 왔다. 정상 상태(steady-state)의 문제에서 유도된 변분식은 비정상상태(non-steady-state)의 문제에 합당하게 고려될 수 없다는 Hill의 제안⁽⁷⁾에 따라, Kim과 Yang⁽⁸⁾은 비정상 상태 해석을 개선하기 위해 가공 경화 효과(work-hardening effect)를 고려한 방법을 제

안하고 몇가지 예에 대해 수치해석을 하여 그 방법의 타당성을 검증한 바 있다.

그러나 대부분의 실제적인 소성 가공에서는 변형이 매우 크므로 유한요소 격자가 심하게 왜곡(distortion)되어 더이상의 계산이 불가능하게 되는 경우가 발생하게 된다. 이때 더많은 시뮬레이션을 진행시키기 위해서는 계산도중 새로운 격자를 구성하여야하고 이를 격자 재구성이라 한다.

1982년 Roll과 Neizert⁽⁹⁾와 Gelten와 Konter⁽¹⁰⁾는 후방 압출(backward extrusion)과 업셋단조(upset forging) 등에 격자 재구성기법을 이용하였고 1984년 Oh 등⁽¹¹⁾이 여러가지 유연화기법(smoothing Technique)을 이용하여 기어 블랭크 단조(gear blank forging) 등의 몇가지 예에 대하여 비교 해석한바 있으며, 그후 Cheng과 Kikuchi⁽¹²⁾가 유연화된 절점값으로 부터 상태변수의 값을 사상(Mapping)하는 방법을 적용해서 압출을 해석한바 있으며, Cheng⁽¹³⁾과 Baehmann,⁽¹⁴⁾ Habraken⁽¹⁵⁾ 등이 격자 재구성이 자동화에 필수적인 격자 재구성 기준을 제안하여 격자 재구성 기법을 발전 시켰고 Cescutti와 Chenot⁽¹⁶⁾ 등이 일종의 격자 재구성이라고 할 수 있는 격자 규격화(regularization)를 이용하여 기어 단조(gear forging)를 해석 했다. 1989년 Yoon과 Yang⁽¹⁷⁾은 격자 재구성기법에 단위체의 개념을 도입하여 베벨기어 단조(bevel gear forging)을 해석한바 있다. 이와같이 소성 가공에 있어서 격자 재구성기법에 대한 연구가 상당히 진행되어 왔으나 격자 재구성 기준이나 격자 발생법 등에 아직도 개발 및 개선의 여지가 있다.

초기 형상의 결정에 있어서는 1973년 Altan⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 등이 금속 유동을 압출형과 업셋형으로 분류하고 금속 유동면과 유동 방향에 따라서 초기형상을 결정하였고, 1977년 Lange 등⁽²¹⁾은 H형 단면 제품을 경험을 토대로 해서 복잡한 정도에 따라 예비 가공형을 분류하였다. 1984년 Osman 등⁽²²⁾은 UBET법을 이용하여 금형각, 빌렛 치수 그리고 플래쉬 치수에 따른 예비 형상을 분류하였다. 그렇지만 초기형상의 결정에 있어서는 거의 전문가의 경험이나 실험 결과 또는 시행착오에 의해서 결정 되어오다가, 최근에 Park 등⁽²³⁾에 의해 최종 제품에서 부터 역으로 계산하는 역추적법(backward tracing)이라는 새로운 방법이 개발되어 많은 소성가공 공정의 초기 형상을 결정하는데 적용하였다.⁽²⁴⁻²⁶⁾ 그러나 이 방법은 복잡한 형상에 적용하기에는 여러가

지 문제점이 있으므로 아직도 발전의 여지가 많다.

1960년대 중반 Zadeh 교수에 의해 제안된 퍼지 이론⁽²⁷⁻²⁸⁾이 최근에 와서 설계 및 제어 분야에 많이 이용되고 있다. 특히 전문가 시스템의 추론에 있어서 애매성을 보완하기 위하여 퍼지 논리를 이용하고 있다.⁽²⁹⁾ 1990년 Cheng 등⁽³⁵⁾이 전단 공정에 퍼지 시스템을 사용하였고 소성 가공 공정에 관련된 많은 연구가 이루어 지고 있다.

현재까지 초기형상을 결정하는 많은 연구가 이루어져 왔으나 주로 설계자의 경험이나 실험에 의해서 결정되었고 다양한 문제에 적용가능한 체계적인 방법이 개발되어지지 않았다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용해서 초기형상을 결정하는 새로운 방법으로서 전방 투사법을 제안하고자 한다. 전방 투사법으로서 선형 보간을 이용한 방법과 소성 문제의 물리적인 특성을 고려하여 퍼지 로직을 도입한 퍼지시스템을 개발하려고 한다. 선형보간을 이용한 전방투사법은 임의의 초기 형상에 대한 유한 요소 해석 결과 얻어진 최종 형상에서의 미 층만 부피를 선형 보간하여 초기 형상에 적용함으로써 최적 초기형상을 결정하는 방법이다. 그러나 미 층만 부피의 변화가 미소할때에는 쉽게 최적 초기 값을 찾지 못하는 경우가 발생하므로 유동 특성을 고려한 퍼지 로직을 구성하여 퍼지 시스템을 개발하였다. 이 방법을 리브-웹(rib-web) 형태의 축대칭 단조 문제에 적용하고 유한 요소법에 의한 해석중 격자 재구성의 필요에 의해 단위체 격자 재구성법을 이용한다. 결정해야될 초기 형상의 변수로서는 형상비(aspect ratio=높이/지름)를 고려하기로 한다.

2. 단조 공정의 유한요소 해석

소재는 강소성체(rigid-plastic)로 탄성 변형은 무시하고, 소재는 등방성이며, 변형중 체적 변화는 없으며, von-Mises 항복 조건을 따르고 공정중 온도 변화는 무시한다. 또한 금형은 완전 강체로서 변형하지 않는다고 가정하고 비압축성 조건을 만족하기 위하여 벌칙함수 K^* 를 고려하면 변형해석을 위한 변분식을 다음과 같이 나타낸다.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \dot{\epsilon} H') \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} (f_i + \alpha \Delta f_i) S V_i dS = 0 \quad (2a)$$

식(2a)에서 $\alpha=0$ 로 놓으면, 시간 t 에 대한 변분방

정식인데 α 및 가공경화계수 H' 를 도입한 이유는 Kim과 Yang⁽⁶⁾이 제시하였듯이 수치해석의 수렴성이 좋기 때문이다. α 의 값은 본 논문에서는 0.5로 하였다.

금형과 소재의 마찰을 고려할 때는 마찰면에서 상대 운동이 없는 중립점에서의 특이성(singularity)을 피할 목적으로 다음식을 사용한다.⁽⁵⁾

$$f = -\frac{2}{\pi}mk \left(\tan^{-1} \left| \frac{V_{dw}}{a} \right| \right) \frac{V_{dw}}{|V_{dw}|} \quad (2.b)$$

여기서 m 은 마찰 상수, k 는 전단 응력, a 는 $|V_{dw}|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이며, V_{dw} 는 금형에 대한 소재의 상대 속도이다.

유한 요소 해석을 하다보면 심한 변형으로 인해서 더 이상의 계산이 불가능하게 된다. 이 때에는 새로운 격자를 구성하여 계산을 진행 시켜야 하는데,

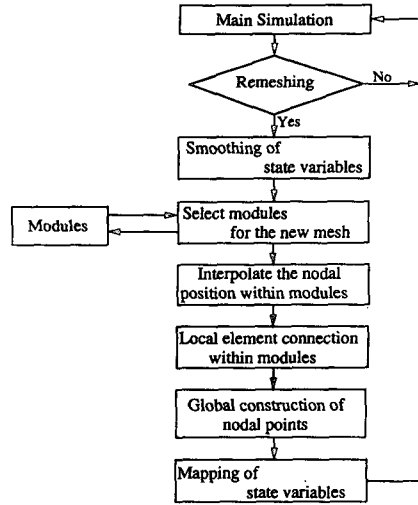


Fig. 2 Modular remeshing algorithm

이를 격자재구성 이라한다.

지금까지 격자재구성에 대한 몇가지 기법들이 개발되었으나, 복잡한 단조공정 해석시 계산시간상의 경제성과 물리적 특성을 고려하는 격자를 설계하는데 실질적으로 적용하기 곤란한 점들이 많이 있다. 이와 같은 문제들을 보완하기 위해 전체영역을 물리적 유동 특성과 기하학적 특성을 고려해서 몇개의 영역으로 분할하고 분할된 각각의 영역을 모듈(module)이라고 부르는 새로운 개념의 격자 재구성 기법, 즉 단위체 격자 재구성(modular remeshing)^(17,31)이 개발되었으며, 본 논문에서는 2차원 단위체 격자 재구성 기법이 도입되었다. 본 논문에서 문제 해석을 위해 개발된 모듈들은 Fig. 1에 나타내었으며, 단위체 격자 재구성 기법의 전 과정은 Fig. 2에 나타내었다.

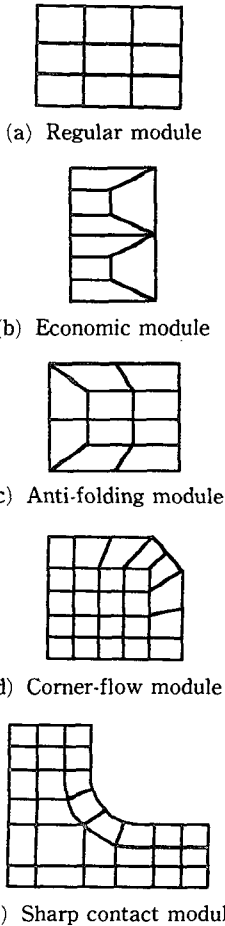


Fig. 1 Types of developed modules

3. 전방투사법(Forward Projection)을 위한 퍼지논리(Fuzzy Logic)의 적용

금속 성형 공정에서 고려해야 하는 가장 중요한 것 중의 하나가 초기형상(preform)의 설계이다. 밀폐형 단조에서 초기형상의 설계 목적은 완전한 금형내 충만, 결함없는 단조, 플래쉬(flash)의 최소화 또는 플래쉬 없는 단조, 금형 마멸의 최소화, 기계적 성질의 향상 등이다.

지금까지 초기형상을 결정하는 새로운 방법론이 개발되지 못하였으나 Park 등⁽²³⁾이 현재의 주어진

형상으로 부터 전단제를 추적해 가는 방법으로서 역추적법을 제안하였으나 계산시간이 길고 복잡한 형상에는 적용이 곤란하다.

초기 형상 결정의 새로운 방법론으로서 임의의 초기형상과 유한요소 해석에 의해서 구한 최종 단계에서의 최종 형상간의 수학적 관계를 구하고, 이 관계를 초기형상에 다시 반영해 나감으로서 최적의 초기형상을 결정해 해는 방법을 제안하고자 하며 이 방법을 전방투사법이라고 부르기로 한다. 전방투사법으로서 선형 보간법과 이를 보완한 퍼지 시스템을 제안하고자 하다.

3.1 선형 보간을 이용한 전방 투사법

임의의 초기형상 Ψ_1 에 대해서 유한요소 해석 결과 최종형상이 Ω_1 이고, 또하나의 초기형상 Ψ_2 에 대한 최종형상을 Ω_2 라고 할때, 우리가 원하는 최종 제품의 형상을 Ω_3 라고 하면 Ω_3 와 Ω_1, Ω_2 의 관계가 존재 할것이다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\Omega_3 = f(\Omega_1, \Omega_2) \tag{3a}$$

이 함수를 이용해서 초기 형상 Ψ_3 를 다음식과 같이 결정한다.

$$\Psi_3 = f(\Psi_1, \Psi_2) \tag{3b}$$

(1) 함수의 정의

본 논문에서 해석한 문제가 리브-웹(Rib-Web)형태의 단조품이고 축대칭 형상이다. 이 제품의 초기형상을 지름에 대한 높이의 비인 형상비로서 나타내며 초기 형상을 대표하는 이 형상비의 최적 값을 구하고자 한다. 그러므로 초기 형상의 변수 Ψ 값은 형상비이다. 그리고 최종 형상의 변수 Ω 로서는 완제품과 임의의 형상비 값에 대해서 구한 최종 형상과의 차이를 사용하였다.

본 논문에서는 전방투사법에 대한 이론 전개를 위해 초기형상의 변수 Ψ 값을 축대칭 문제에관한 가장 대표적인 초기형상비, 즉 지름에대한 높이의 비 로써 잡았으며, 만약 초기형상이 원통형이 아니면 형상비는 그에 따른 변수로 정의되어야 한다. 따라서 다른 형태의 형상비에 대한 연구가 계속 되어야 할 것이다.

본 연구에서 사용한 함수를 정의 하면 다음과 같다.

$$\Omega_3 = \Omega_1 \lambda + \Omega_2(1-\lambda) \tag{3c}$$

먼저 최종 형상에 대한 변수에 적용하고 윗 식으로부터 λ 를 구한다. 식 (3c)으로부터 구한 λ 값을 갖고 초기형상을 다음과 같이 정의한다.

$$\Psi_3 = \Psi_1 \lambda + \Psi_2(1-\lambda) \tag{3d}$$

이 작업을 반복해서 최종 제품과 충분히 근접할때 까지 수행하여 최적의 초기형상을 결정한다. 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다.

(2) 결과 및 토론

초기형상을 결정하는 새로운 방법론으로 제안한 선형 보간을 이용한 전방투사법을 리브-웹(rib-web)의 단면을 가진축대칭 부품의 단조 공정에 대하여 적용해 보았다. 본 연구에서는 리브의 돌출 높이 대 폭이 비가 1보다 작거나 같은 경우에 대해서 적용해 보았다. 리브의 돌출 높이 대 폭의 비가 1보다 작은 경우에 대해서는 초기형상의 변수로서 높이 대 지름의 비인 형상비를 고려의 대상으로 하였다. 리브의 돌출 높이 대 지름의 비를 Γ 로 나타내기로 하겠다.

유한요소해석을 하는 도중 격자가 심하게 찌그러지거나 급형을 파고 들어가서 격자 재구성 판별 기준에 걸린 경우에 단위체 격자 재구성 프로그램으로 격자 재구성을 하였다. 이때 단위체 격자 재구성 프로그램의 입력 데이터인 모듈의 종류와 제어점, 그리고 모듈변수를 자동적으로 결정하는 프로그램을 개발하여 자동적으로 격자재구성을 하였다.

계산에 적용된 마찰수수는 0.1로 하였으며 급형

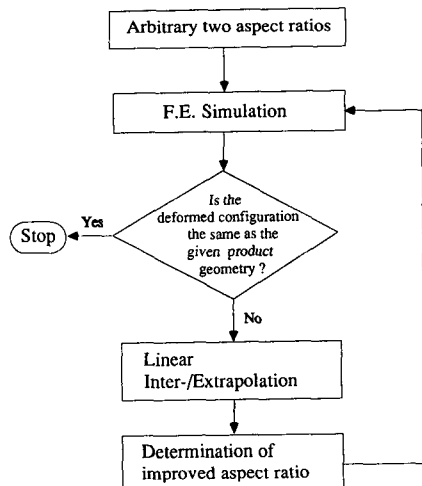


Fig. 3 Configuration of linear inter-/extrapolation

의 압하속도는 0.5 mm/sec로 하였다. 재료는 AISI1015로 선택하였으며 재질의 응력 변형률의 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 630.2(\bar{\epsilon})^{0.116} \text{ N/mm}^2 \quad (3e)$$

(1) 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 0.8인 경우

금형 형상과 소재의 초기 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 첫번째 시도로서 형상비(Ψ)가 0.4일 때, 유한 요소 해석을 해 보았다. 이때의 초기형상을 Fig. 5(a)에 나타내었고 시편의 초기 높이는 17.876 mm이고 반경은 22.469 mm이다. 격자의 수는 118개이고 총절점수는 141개이다. 심한 변형이 예상되는 부분에는 격자를 조밀하게 분할하였고 나머지 부분은 격자를 크게 하였다. 또한 격자의 수를 줄임으로서 계산 시간을 줄이기 위하여 경제 모들을 사용하였다. Fig.5(b)는 초기형상비 0.4일 때 높이 감축률 25%, 39%에서 격자 재구성을 한 후 얻어진 최종단계에서의 변형형상이다. 금형내에 소재가 완전히 충만되지 않았다.

형상비(Ψ) 0.4일 때 금형에 완전히 충만되지 않았으므로 두번째 시도로서 형상비 0.534일 때 해석을 해보았다. Fig. 6(a)에 형상비 0.534일 때의 초기격자 모양을 나타내었다. Fig. 6(b)에 높이 감축

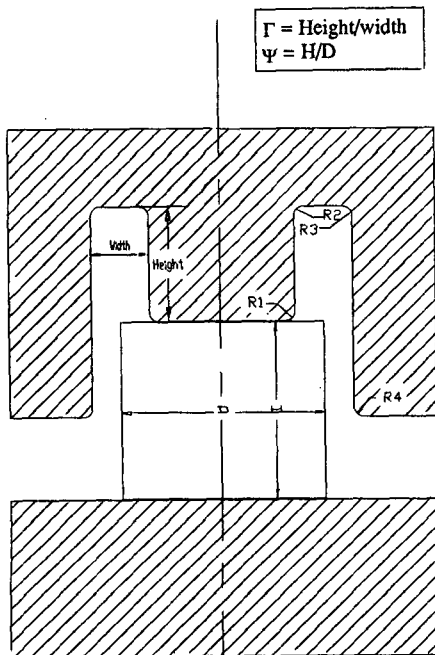
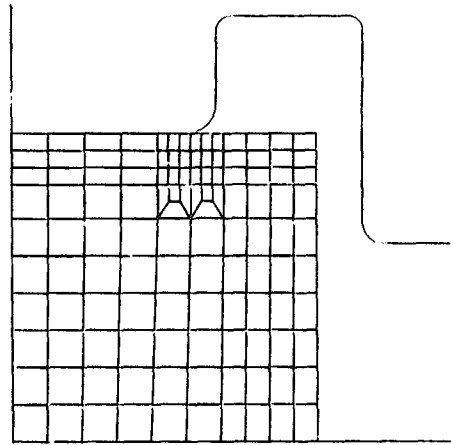
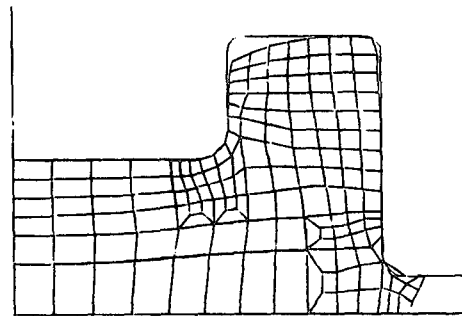


Fig. 4 Die configuration and initial workpiece



(a)

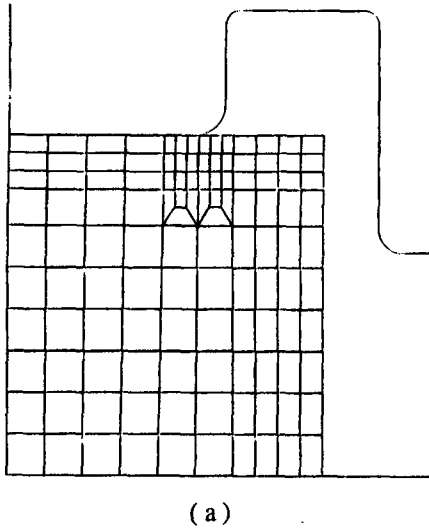


(b)

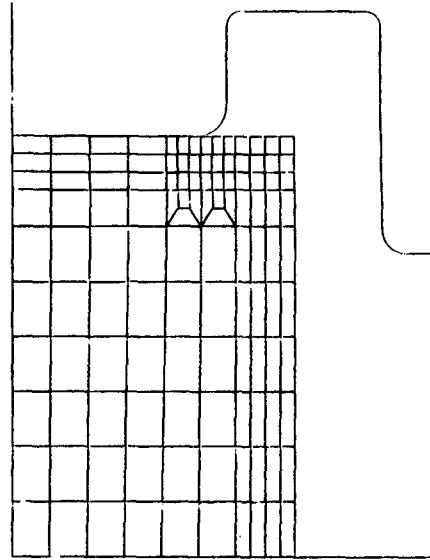
Fig. 5 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step($\Gamma=0.8, \Psi=0.4$)

률 17%, 37%, 53%일 때 격자 재구성을 수행 후 얻어진 최종단계에서의 변형형상을 나타내었다. 이때 금형에 소재가 완전히 충만되지 않았음을 볼 수 있다.

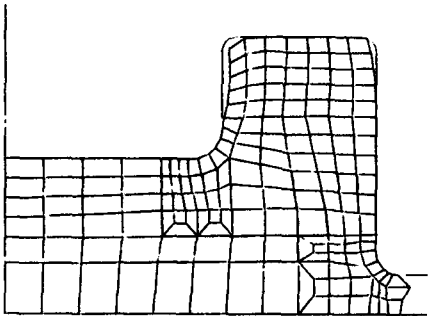
형상비(Ψ) 0.4와 0.534일 때 최종형상은 각각 Fig. 5, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 소재가 금형에 완전히 충만되지 않았다. 그래서 이 두 경우에 대해 선형 보간법을 적용하여 구한 초기형상의 비는 0.735이며 이에 대한 초기 격자모양과 최종단계에서의 변형형상을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 선형보간법을 사용하여 구한 형상비



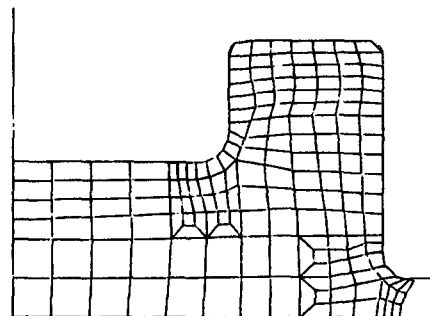
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 6 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=0.8$, $\Psi=0.534$)

Fig. 7 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=0.8$, $\Psi=0.735$)

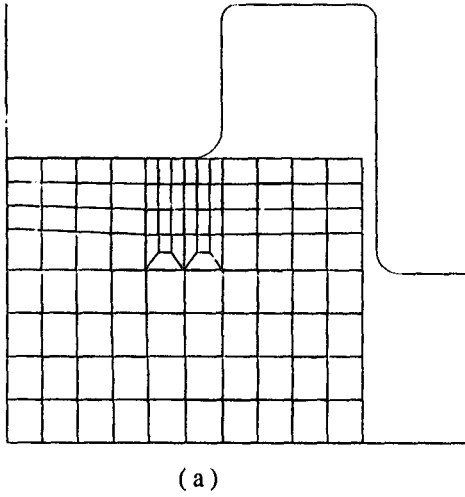
0.735를 초기형상으로 하면 최종적으로 소재가 금형에 완전히 충만 됨을 알 수 있었다.

(2) 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 1인 경우

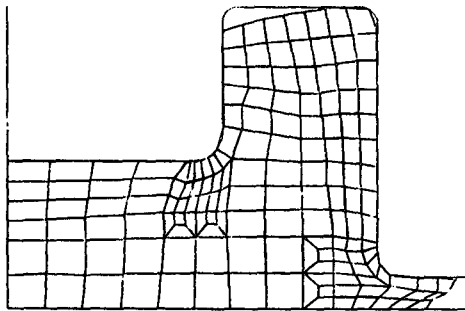
금형 형상은 Fig. 4와 같고 리브의 높이만을 20%증가 시켰다. 첫번째 시도로서 초기 형상비 (Ψ) 0.4일때, 유한 요소 해석을 해 보았다. 이때의 초기 격자 모양은 Fig. 8(a)에 나타내었고 초기 높이는 81.464 mm이고 초기반경은 23.080 mm이다. 이때에도 자동적으로 격자 재구성을 했으며 심한 변형이 예상되는 부분에는 조밀하게 구성하였고

계산 시간을 줄이기 위하여 경계 모듈을 사용하였다. 높이 감축률 28%, 34%, 40%, 46%에서 격자 재구성을 하였다. Fig. 8(b)에 최종단계에서의 변형형상을 나타내었고 금형에 완전히 충만되지 않았다.

형상비(Ψ) 0.4일때 금형에 완전히 충만되지 않았으므로 두 번째 시도로서 형상비 0.5에 대해서 해석하였다. Fig. 9에 형상비 0.5일때의 초기 격자 모양과 최종 변형 형상을 나타내었다. 이때에도 소재가 금형에 완전히 충만되지 않았다.



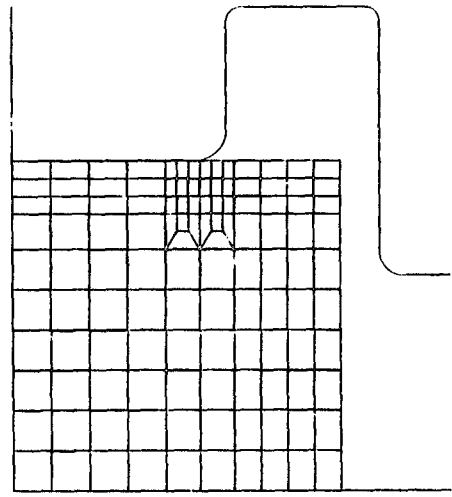
(a)



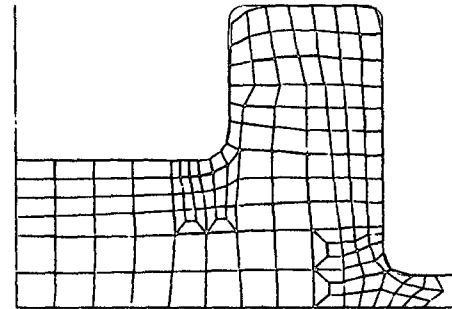
(b)

Fig. 8 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1$, $\Psi=0.4$)

형상비(Ψ) 0.4와 0.5일때의 최종형상이 각각 Fig. 8, Fig. 9와 같이 소재가 금형에 완전히 충만되지 않았다. 이 두 형상비의 최종형상에서의 미충만 부피를 변수로하여 선형보간법을 이용하여 얻은 초기 형상비가 0.601이다. 이때의 초기 형상과 최종 변형 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 최종 단계에서의 형상이 금형에 완전히 충만되었다. 위에서 해석 순서와 전방 투사법을 적용한 순서를 간략하게 Table 1(a)에 나타내었다.

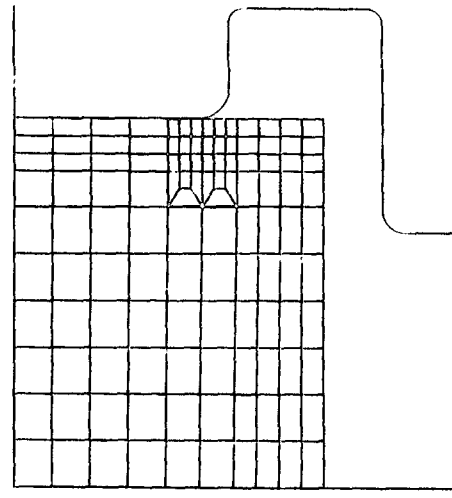


(a)

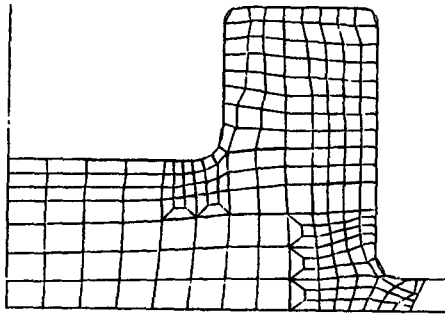


(b)

Fig. 9 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1$, $\Psi=0.5$)



(a)



(b)

Fig. 10 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1, \Psi=0.601$)

위에서 선형보간법을 이용한 방법을 예제에 적용한 결과 좋은 결과를 보였다. 그러나 선형 보간법은 최적 값과 근사한 경우에는 결과를 쉽게 구할 수 있지만 초기 형상에 대한 형상비의 증가가 최종 형상에서 미 충전 부피의 변화가 작을 경우에는 쉽게 최적 값을 구하지 못한다. 선형 보간을 한후에도 금형에 완전히 충전되지 않는 경우를 리브의 높

이 대 폭의비(Γ)가 0.8인 경우와 1인 경우에 대한 결과를 정리하여 Table 1(b)에 나타내었다.

Table 1(b)에서 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 1 일때 첫번째 시도로서 초기 형상비(Ψ)가 0.4일때를 해석하였으며, 충전되지 않았다. 두번째 시도로서 이번에는 형상비를 0.45로 하여 해석을 해 보았다. 이때의 초기 형상과 최종 형상을 Fig.11에 나타내었다.

Fig.11에서 볼 수 있듯이 소재가 금형에 완전히 충전 되지 않았다. 이 두 형상비에 대한 해석 결과 금형에 충전 되지 않았으므로 선형 보간법을 적용하였다. 선형 보간한 결과 형상비가 0.531이었으며 이를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 이번에도 소재가 금형에 충전되지 않았음을 알 수 있었다.

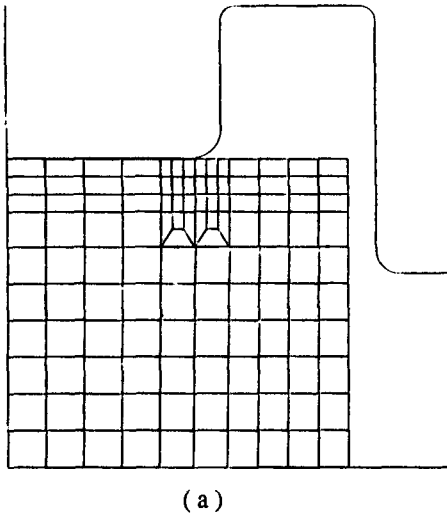
위의 예에서 볼 수 있듯이 선형 보간법의 적용에 있어서 미 충전 부피의 차가 극히 적을 때에는 쉽게 최적 초기 형상비를 구할 수 없으므로 미 충전 부피를 변수로 포함하는 새로운 방법론으로서의 퍼지 논리를 이용한 전방 투사법을 개발하였다.

Table 1 Applying sequence of inter-/extrapolation
(a) Complete filling

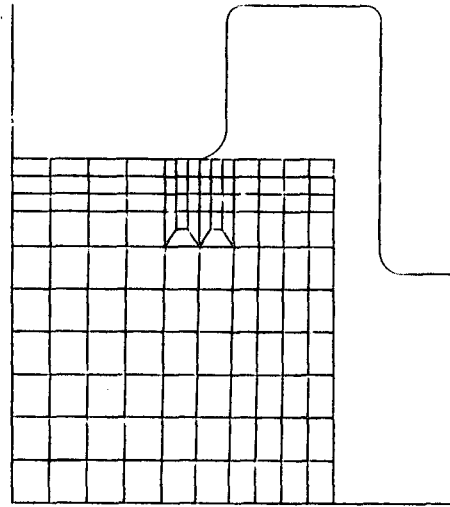
	Ratio of rib height to rib width	aspect ratio	Ratio of ribheight to	aspect ratio
First trial	0.8	0.4	1	0.4
Second trial	"	0.534	"	0.5
After inter-/extrapolation	"	0.735	"	0.601

(b) Incomplete filling

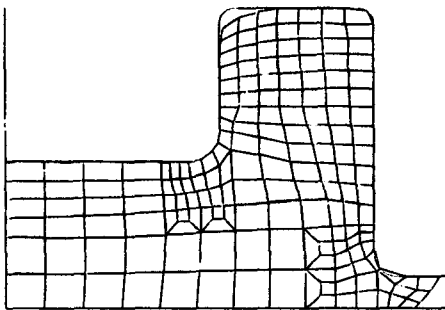
	Ratio of rib height to rib width	Aspect ratio	Ratio of rib height to rib width	Aspect
First trial	0.8	0.4	1	0.4
Second trial	0.8	0.5	1	0.45
After inter-/extrapolation	0.8	0.534	1	0.531



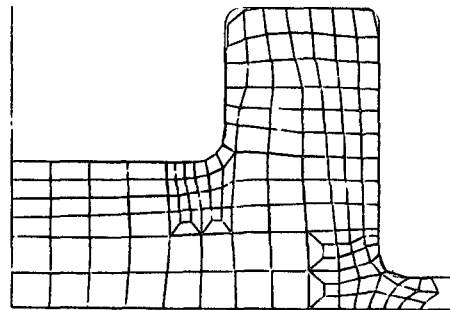
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 11 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1$, $\Psi=0.45$)

Fig. 12 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1$, $\Psi=0.531$)

3.2 퍼지 논리를 이용한 전방 투사법

퍼지 시스템의 특징은 퍼지 제어 규칙이 IF ~ THEN... 형식의 조건부 명제로 논리적이고, 하나의 수식으로서 전체적인 규칙을 나타내는 것이 아니라 복수개의 규칙을 이용하는 병렬형이다. 또한 퍼지 규칙이 IF ~ THEN... 형식의 규칙의 언어를 사용하여 쓰여져 있으므로 오퍼레이터와의 대화형 제어가 실현될 수 있다. 언어를 매개로 하므로 이해하기 쉽고 학습효과를 높일 수 있으므로 성능

을 개선하기가 용이하다. 퍼지 시스템의 구성은 크게 퍼지 화(fuzzification), 퍼지 추론(fuzzy reasoning), 비퍼지화(defuzzification)으로 나눌 수 있다.

(1) 퍼지 시스템의 개발

유한요소해석 결과를 이용하여 초기 형상을 결정하는 새로운 방법론으로서 선형 보간법을 이용한 전방 투사법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 어떤 경우에는 해를 찾지 못하는 경우가 있으므로 이를

보완하여 퍼지 논리를 이용한 퍼지 시스템을 개발하였다.

(가) 전체시스템의 구성

전체 시스템의 구성은 Fig. 13과 같다. 처음 두 번의 유한요소 해석을 행하고 그 유한요소 해석의 결과 금형에 완전히 충만되지 않았을 경우 그 충만되지 않은 부피(volumetric deviation from filling)를 하나의 전체부의 변수(Ω)로하고 또 하나는 이 두개의 부피의 차로써 두번째 전체 조건의 변수($\Delta\Omega$)로 한다. 결론부의 변수로는 증감될 초기 형상비($\Delta\psi$)로 하였다. 각각의 변수에 대한 형상함수를 정의하고 이 시스템의 핵심부인 퍼지 규칙을 결정하고 추론에 의해 최적의 초기 형상을 결정한다.

(나) 형상 함수의 정의

형상함수는 이등변 삼각형 법으로 하였으며 전체 영역을 4구간으로 분할하였으며 각 구간을 각각 ZERO, SMALL, MEDIUM, LARGE로 나타내기로 하겠다. Fig. 14에 각각의 변수들의 멤버십 함수를 도시하였고 그 의미를 살펴보면 첫번째 전체조건의

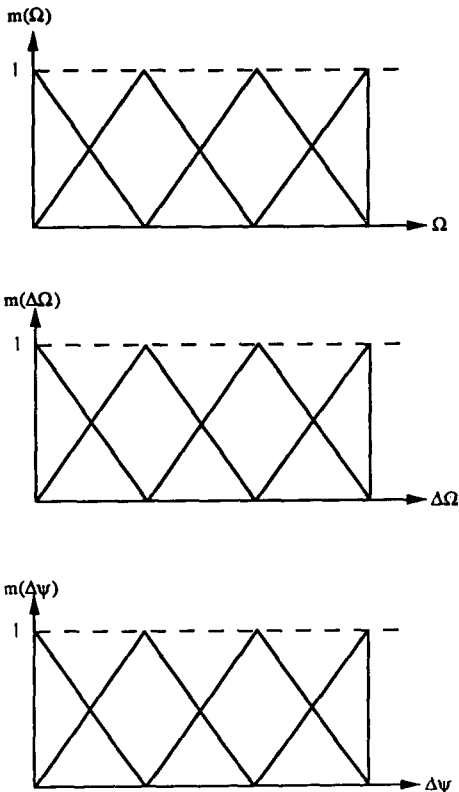


Fig. 13 Configuration of fuzzy system

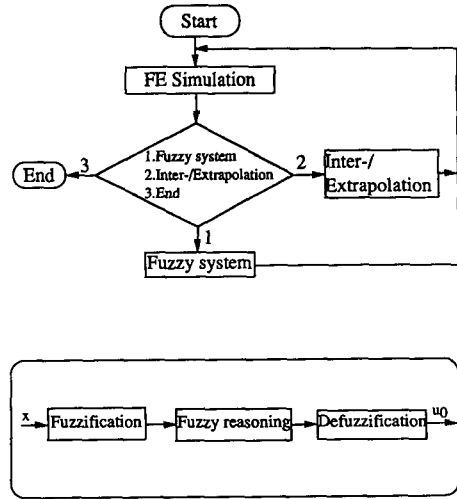


Fig. 14 Definition of membership function

변수로서 사용된 미충만 부피의 전체 영역을 X라고 하면 충만되지 않은 부피가 거의 없으면 상징적으로 ZERO라고 하고, 비교적 적으면 SMALL, 중간 정도의 값이면 MEDIUM, 많으면 LARGE로 나타내었다. 또한 두번째 전체 조건의 변수에 전체 영역을 Y라고 하고 전체 영역 Y를 4구간으로 분할하였다. 마찬가지로 결론부의 변수의 전체 영역을 Z라고 하고 전체 영역 Z를 4구간으로 분할하였다.

(다) 퍼지 규칙의 표현

본 퍼지 시스템에서 적용된 규칙은 IF(전제부) THEN(결론부) 형식으로 표현하였다. 전제부의 변수는 미충만 부피(Ω)와 이 부피의 차($\Delta\Omega$)로 하였으며 결론부의 변수는 증감될 형상비($\Delta\psi$)로 하였다.

- RULE1 : IF(Ω 가 ZERO이고 $\Delta\Omega$ 가 ZERO) THEN($\Delta\psi$ 또는 ZERO)
- RULE2 : IF(Ω 가 SMALL이고 $\Delta\Omega$ 가 ZERO) THEN($\Delta\psi$ 는 ZERO)
- RULE3 : IF(Ω 가 MEDIUM이고 $\Delta\Omega$ 가 ZERO) THEN($\Delta\psi$ 는 ZERO)
- RULE4 : IF(Ω 가 LARGE이고 $\Delta\Omega$ 가 ZERO) THEN($\Delta\psi$ 는 ZERO)
- RULE5 : IF(Ω 가 ZERO이고 $\Delta\Omega$ 가 SMALL) THEN($\Delta\psi$ 는 ZERO)
- RULE6 : IF(Ω 가 ZERO이고 $\Delta\Omega$ 가 MEDIUM) THEN($\Delta\psi$ 는 ZERO)

Table 2 Fuzzy logics

Ω \ $\Delta\Omega$	ZERO	SMALL	MEDIUM	LARGE	
ZERO	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO	
SMALL	SMALL	SMALL			
MEDIUM	MEDIUM		MEDIUM		
LARGE	LARGE	LARGE		SMALL	

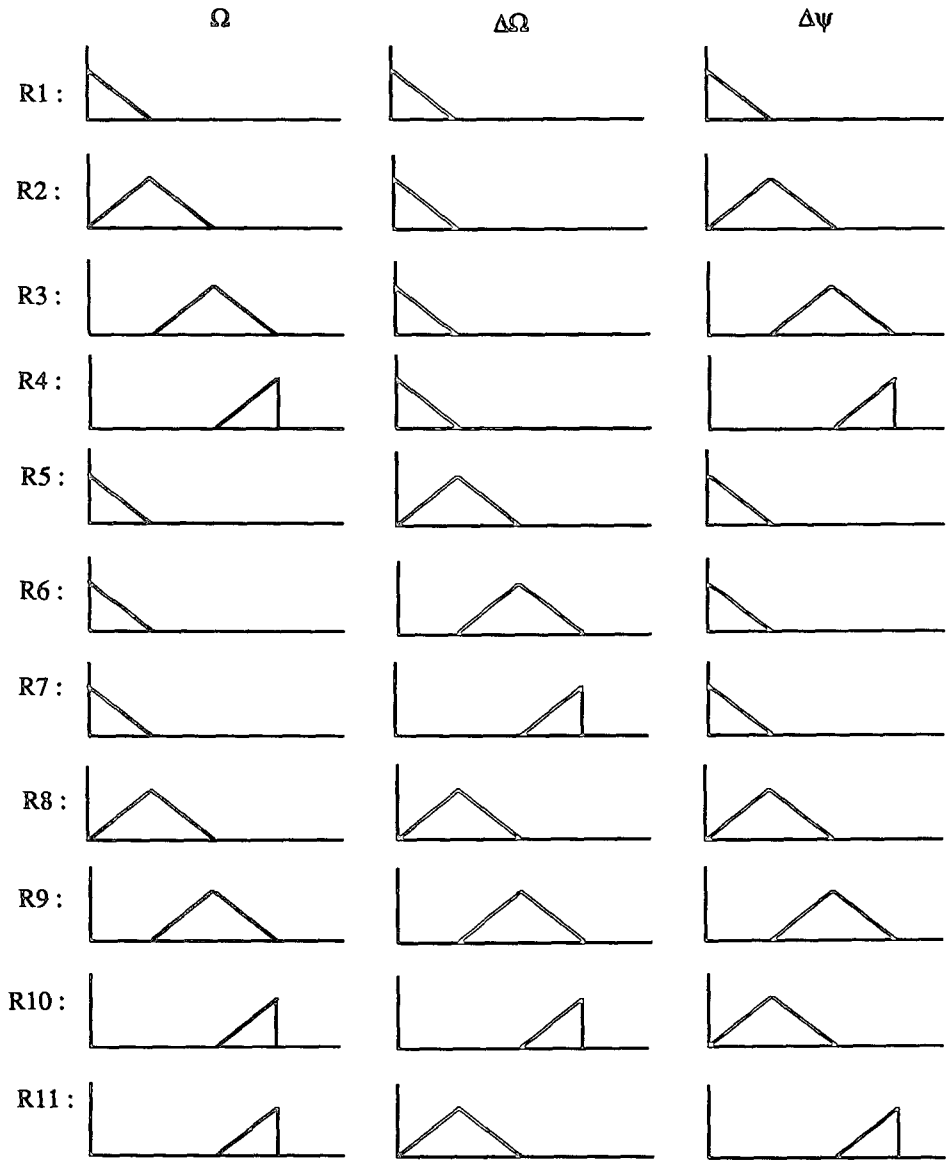


Fig. 15 Schematic representation of fuzzy logics

- RULE7 : IF (Ω 가 ZERO이고 $\Delta\Omega$ 가 LARGE)
THEN ($\Delta\psi$ 는 ZERO)
- RULE8 : IF (Ω 가 SMALL이고 $\Delta\Omega$ 가 SMALL)
THEN ($\Delta\psi$ 는 SMALL)
- RULE9 : IF (Ω 가 MEDIUM이고 $\Delta\Omega$ 가 MEDIUM)
THEN ($\Delta\psi$ 는 MEDIUM)
- RULE10 : IF (Ω 가 LARGE이고 $\Delta\Omega$ 가 LARGE)
THEN ($\Delta\psi$ 는 SMALL)
- RULE11 : IF (Ω 가 LARGE이고 $\Delta\Omega$ 가 SMALL)
THEN ($\Delta\psi$ 는 LARGE)

이 퍼지 규칙을 표로 나타낸 것은 Table 2과 같고 도식적으로 나타내면 Fig. 15과 같다.

(라) 퍼지 추론

입력 값과 퍼지 관계를 멤버쉽 함수로 나타내고 퍼지 추론을 하게된다. 이러한 퍼지 추론의 과정을 그림으로 나타내면 Fig. 16과 같다. 입력 값 Ω , $\Delta\Omega$ 에 대하여 각각의 퍼지 관계로 정의된 멤버쉽 함수내의 분할된 영역에서 영역내에 있을 경우 각각의 영역값 $m_i(\Omega)$, $m_i(\Delta\Omega)$ 을 구하고 이 값들의 교집합, 즉 최소값을 구한다. 이 과정을 전체의 퍼지 규칙에 대하여 적용하여 Fig. 16에서 보듯 각각

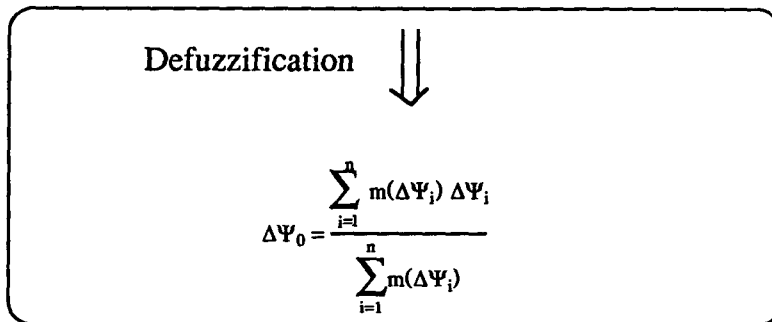
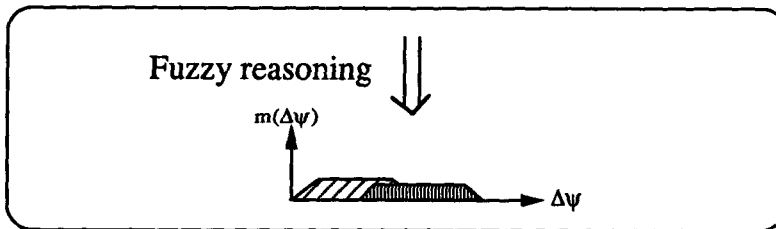
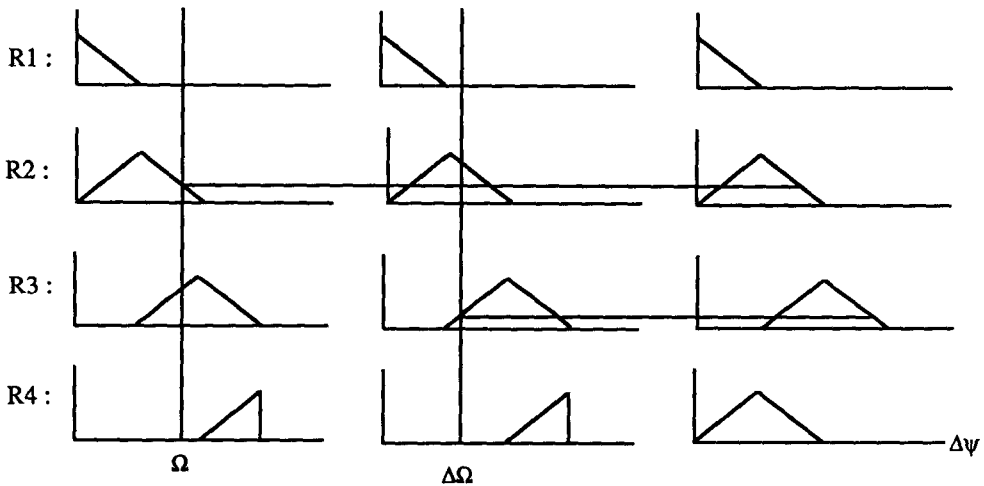


Fig. 16 Fuzzy reasoning process

의 퍼지 규칙에 대한 함집합을 구한다. 여기서 구한 값은 퍼지 집합이며 이것을 크리스프(crisp) 값 또는 비 퍼지 값으로 바꾸어 준다.

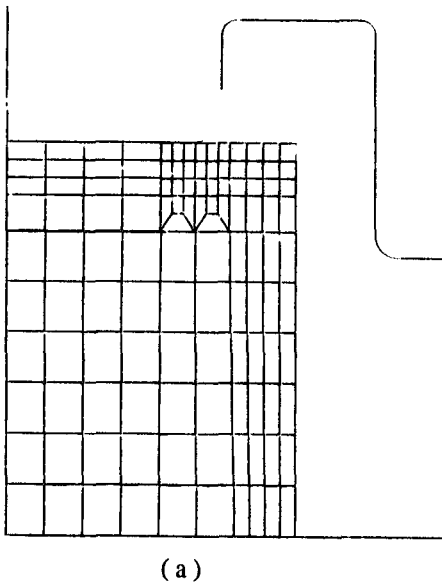
이렇게 해서 구한 초기 형상비를 데이터화 하여 유한요소 해석을 하고 이 해석 결과 변형 형상이 금형에 완전히 충만되었을 때, 즉 최종형상과 같을 때 이 초기 형상비가 최적 초기값이 된다.

(2) 결과 및 토론

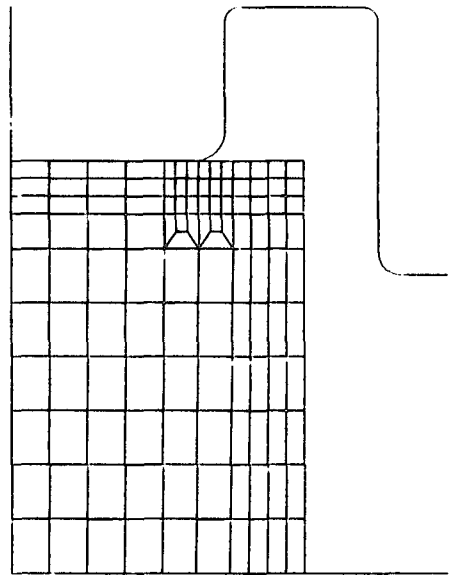
초기형상을 결정하는 새로운 방법론으로 퍼지 논

리를 이용한 전방투사법을 리브-웹(rib-web)의 단면을 가진 축대칭 부품의 단조 공정에 대하여 적용해 보았다. 모든 해석 조건은 전방투사법을 적용한 경우와 같고 리브의 높이 대 폭의 비가 0.8일때와 1인 경우에 적용해 보았다.

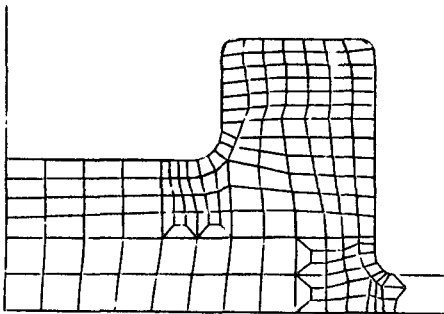
유한요소해석을 하는 도중 격자가 심하게 찌그러지거나 금형을 파고 들어가서 격자 재구성 판별 기준에 걸린 경우에 단위체 격자 재구성 프로그램으로 격자 재구성을 하였다.



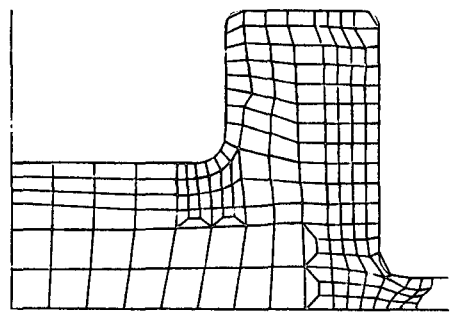
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 17 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=0.8$, $\Psi=0.698$)

Fig. 18 Initial mesh and deformed mesh configuration at the final step ($\Gamma=1$, $\Psi=0.705$)

Table 3 Applying sequence of fuzzy system

	Ratio of rib height to rib width	Aspect ratio	Ratio of rib height to rib width	Aspect ratio
First trial	0.8	0.4	1	0.4
Second trial	0.8	0.5	1	0.5
After applying fuzzy system	0.8	0.698	1	0.705

(가) 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 0.8인 경우
금형 형상과 소재의 초기 형상은 Fig. 4에 나타내었다. Table 1(b)에 의하면 형상비가 0.4일때와 0.5일때 금형내에 소재가 완전히 충전되지 않았다. 또한 선형 보간법에 의해 구한 형상비 0.534도 완벽한 충만을 얻을 수 없었기에 퍼지 논리를 이용한 전방투사법을 사용하게 되었다. 그래서 형상비 0.4와 0.5 일때의 결과를 가지고 퍼지 논리를 이용한 전방 투사법으로 구한 초기 형상비가 0.698이며 이때의 초기 격자와 최종 변형형상을 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서 볼 수 있듯이 소재가 금형에 완전히 충전되는 결과를 얻었다.

(나) 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 1인 경우
금형 형상은 Fig. 4와 같고 리브의 높이만을 20% 증가 시켰다. 리브의 높이 대 폭의 비(Γ)가 0.8인 경우와 마찬가지로 Table 1(b)에서 형상비가 0.4일때와 0.5일때 나타난 최종형상의 미 충전 부피 그리고 이 두 부피의 차를 변수로 하여 퍼지 논리를 이용한 전방투사법을 적용하여 얻은 결과 초기 형상이 0.705이다. 이때의 초기 형상과 최종 변형 형상을 Fig. 18에 나타내었다. 이때에도 소재가 금형에 완전히 충전 되었음을 알 수 있다. 이상의 결과를 통해 선형보간법에 의해서는 형상비를 완벽히 구할 수 없는 경우에 대해서도 퍼지 논리에 의한 전방투사법은 완벽한 결과를 제공함을 알 수 있었다.

위에서 해석 순서와 퍼지 논리를 이용한 전방투사법의 적용 결과를 간단히 Table 3에 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석 결과를 이용하여

초기형상을 결정하는 새로운 방법론으로서 선형보간을 이용한 전방투사법과 퍼지 시스템을 개발하여 축대칭 리브-웹(rib-web) 형태의 냉간단조 공정에 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임의의 두 초기 형상에 대한 유한요소 해석 결과를 이용하여 선형보간을 이용한 전방 투사법을 적용하여 구한 초기 형상비를 이용하여 유한요소해석 결과 쉽게 해에 접근함을 보았다.

(2) 축대칭 리브-웹 형태의 냉간단조공정의 특성과 여러 경우에 대한 해석결과를 이용하여 논리를 구성하고 퍼지화 함으로써 전방투사법에 이를 응용하여 좋은 결과를 얻었다.

(3) 초기 형상을 결정하는 새로운 방법론으로서 퍼지시스템을 개발하여 축대칭 단조 공정에 적용하여 타당성을 입증하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, C.H. and Kobayashi, S., 1973, "New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method," Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.95, pp. 865~873.
- (2) Zienkiewicz, O.C. and Godbole, P.N., 1975, "A Penalty Function Approach to Problems of Plastic Flow of Metals with Large Surface Deformation," Int. J. Mech. Sci., Vol.24, pp. 459~468.
- (4) Oh, S.I., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1978, "Finite Element Formulation for the Analysis of

- Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming," IUTAM Symposium, Tutzing/Germany, 28 August-3 September, 1978, pp. 273~291.
- (5) Chen, C.C. and Kobayashi, S., 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression," Applications of Numerical Methods to Forming Processes," ASME, AMD, 28, pp. 163~174.
- (6) Oh, S.I., 1982, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies," Int. J. Mech. Sci., Vol.24, pp. 479~493.
- (7) Hill, R., 1956, "On the Problem of (niqueness in the Theory of a Rigid-Plastic Solid-I," J. Mech. Phy. Solids, Vol.4, pp. 247~255.
- (8) Kim, Y.J. and Yang, D.Y., 1985, "A Formulation for Rigid-Plastic Finite Element Method Considering Work-Hardening Effect," Int. J. Mech. Sci., Vol.27, pp. 487~495.
- (9) Roll, K. and Th. Neitzert, 1982, "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.
- (10) Gelten, C.J.M. and Konter, A.W.A., 1982, "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.
- (11) Oh, S.I., Tang, J.P. and Badawy, A., 1984, "Finite Element Mesh Rezoning and its Applications to Metal Forming Analysis," Advd. Tech. Plasticity 2, pp. 1051~1058.
- (12) Cheng, J.H. and Kikuchi, N., 1986, "A Mesh re-zoning Technique for Finite Element Simulations of Metal Forming Processes," Int. J. Num. Meth. Engng, Vol.23, pp. 219~228.
- (13) Cheng, J.H., 1988, "Automatic Adaptive Remeshing for Finite Element Simulation of Forming Processes," Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 26, pp. 1~18.
- (14) Baehmann, P.L., Shephard, M.S., Ashley, R.A. and Jay, A., 1988, "Automated metal Forming Modeling Utilizing Adaptive Remeshing and Evolving Geometry", Computers & Structures, Vol.30, pp. 319~325.
- (15) Habrken, A.M. and Radu, J.P., 1989, "Simulation of Forging Applications with the Finite Element Method," Numiform 89, pp. 543~548.
- (16) Cescutti, J.P., Soyris, N., Surdon, G. and Chenot, 1987, "Thermo-Mechanical Finite Element Calculation of Three-Dimensional Hot Forging with remeshing," Advd. Tech. of Plasticity, Vol.2, pp. 1051~1058.
- (17) Yoon, J.H. and Yang, D.Y., 1990, "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.
- (18) Altan, T., et al, 1973, Forging Equipment, Materials and Practices, MCIC Handbook 3, Battel-Columbus Laboratories, Columbus, OH.
- (19) Akgeman, N., Beeker, J.R. and Altan, T., 1973, "Preform Design in Close_Die Forging." Metall. Metal Forming, Vol.40, p. 135.
- (20) Altan, T., Oh, S.I. and Gegel, H.L., 1983, Metal forming-Fundamentals and Applications, American Society of Metals
- (21) Lange, K. and Meyer-Nolkemper, H., 1977, "Close-Die Forging," Springer-Verlag, Berlin.
- (22) Osman, F.H., Bramley, A.N. and M.I. Ghobrial, "Forging and Preform Design Using UBET," Advanced Technology Plasticity, Vol. 1.
- (23) Park, J.J., Rebelo, N. and Kobayashi, S, 1983, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.23, p. 71
- (24) Hwang, S.M. and Kobayashi, S. 1986, "Preform Design in Disk Forging." Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.26, pp. 231~243.
- (25) Kang, B.S., Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade., "Int.J. Mach. Tools and Manufacture, pp. 43~52.
- (26) 김현영, 1991, Preform Design in Closed-die

- Forging by Upper Bound Elemental Technique, 박사학위논문, 서울대학교.
- (27) Dieder, D. and Henri, P. 1980, Fuzzy Sets and Systems : Theory and Applications, Academic Press, pp. 36~66.
- (28) Tanaka, H., Uejima, S. and Asai, K., 1982, "Lineer Regression Analysis with Fuzzy Model," IEEE, Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-12, Nov./Dec., pp. 903~907.
- (29) Zadeh, L. A., 1983, "The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert System," Fuzzy Sets and Systems, Vol.11, pp. 199 ~227.
- (30) Guo Cheng, Zhuang Da, Chu Jia-you, and Shi She-hau, 1990, "A Fuzzy Synthetical Judgement-making System for Shearing Die Clearence," Die & Mould Technolgoy Technolgoy, pp. 23 ~29
- (31) Yang, D.Y., Lee, N.K., Yoon, J.H., Chenot, J. L. and Soyris, N., 1991, "A three-dimensional Rigid-plastic Finite Element Analysis of Spur Gear Forging Using the Modular Remeshing Technique," Instn. Mech. Engrs., part B : J. of Engng Manufacture, Vol.205, pp. 111~121.