論文 한국정밀공학회지 제10권 제2호 1993.6
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 10. No.2 Jun. 1993.

원추형금형을 통한 비 등온 열간 콘테이너 압출의 비정상상태 유한요소해석

강 연 식*, 양 동 열*

Non-steady State Finite Element Analysis of Nonisothermal Hot Container Extrusion through Conical Dies

Yean-Sick Kang*, Dong-Yol Yang*

ABSTRACT

The study is concerned with the thermo-viscoplastic finite element analysis of nonisothermal hot container extrusion through conical dies. The problem is treated as a non-steady state incorporating the nonisothermal heat transfer analysis. The analysis of temperature distribution includes heat transfer through the boundary surface including conduction, convection and radiation. The analysis of heat transfer is decoupled with the analysis of deformation and the material interaction is considered through iteration procedure. The effect of important process parameters including die angle and extrusion ratio in the process is investigated. Due to the geometric feature for the container extrusion through conical dies, automatic remeshing is mandatory. Automatic remeshing is achieved by introducing the modular remeshing technique.

Key Words : Extrusion through Conical Dies(원추형금형을 이용한 압출), Thermo-viscoplastic Finite Element Analysis(열-점소성 유한요소해석), Automatic Remeshing for Extrusion(압출을 위한 자동 격자재구성)

Nomenclaure

c	: 비열(Specific Heat) (N/mm.s.°K⁴)	J	: 열의 일당량
f	: 금형과 소재의 마찰력	K	: 열전도 계수(Thermal Conductivity) (N/s.°K)
f_i	: 접촉력(Traction)	k_y	: 재료의 전단 항복 강도
h	: 대류 열전달 계수(N/mm.s.°K⁴)	m_f	: 마찰 상수
h_{lub}	: 윤활면에 전도열전달 계수 (overal heat transfer coefficient)	R.A.	: 단면 감소율(Reduction of Area) (%)

* 한국과학기술원 정밀공학과(정회원)

T	: 절대 온도(Absolute Temperature) (°K)	ρ	: 밀도(Mass Density) (kg/mm^3)
T_a	: 주변 온도(ambient temperature)	$\bar{\sigma}$	: 유효 응력(Effective Stress)
T_s	: 표면 온도(surface temperature)	σ	: Stefan-Boltzmann 상수
T_1	: 인접면에서 어느 한쪽면의 온도	$\dot{\bar{\varepsilon}}$	: 유효 변형율속도(Effective Strain Rate)
T_2	: 인접면에서 다른 한쪽면의 온도	$\dot{\varepsilon}_v$	: 체적 변형율속도(Volumetric Strain Rate)
Δt	: 비정상 상태의 단계당 시간 간격 (Non-steady State Time Step)	ε	: 표면의 확산 계수(Emissivity)
$v, v\alpha$	: 속도장(Velocity Field) 및 그 성분		

1. 서 론

원추형 금형은 금형제작이 쉽고 평금형 압출에 비해 작은 힘으로 소재가공을 할 수 있다. 대부분의 경우 냉간에서 행해지고 있으나 압출비와 재료에 따라서 열간 압출도 많이 이뤄지고 있다. 원추형 금형을 통한 압출은 원추각과 압출비에 따라 제품의 성질과 공정효율이 달라진다. 압출공정을 해석함으로써 이러한 공정변수에 대한 영향을 알 수 있고 나아가서 이에 따른 제품의 기계적성질을 조정할 수 있게된다. 원추형 금형을 이용한 압출은 형상의 간단함 때문에 해석예제로 많이 이용되어져 왔고 기초적인 문제는 Lange[1], Kobayashi[2] 등의 여러 책에 기록되어 있다. 소성공정의 해석을 위한 근사해법중 최근에는 유한요소법이 많이 이용되고 있다. 이 방법으로 금형설계를 위한 자료와 제품의 기계적 성질에 대한 비교적 정확하고 상세한 정보를 얻을 수 있다. 유한요소법을 이용한 원추형금형의 압출은 Iwata등[3]이 정수압 압출을 해석하였고 Chen등[4]이 연성파괴에 대한 해석을 하였다. 그리고 Yang[5]등은 강소성 유한요소법을 사용하여 해석을 하였고 Choi등[6]은 속도의존성재료의 경우를 등온 가정하에서 해석하였다. 압출을 열간에서 수행하면 냉간 압출에 비해서 다양한 재료를 사용할 수 있고 드로잉등의 공정에 비해서 원하는 어떤 형상의 단면을 갖는 제품을 생산 할 수있는 장점이 있다. 또한 작은 하중으로 가공을 할 수 있다. 열을 고려한 압출의 해석은 Johnson과 Kudo[7]가 상계해법으로, Altan과 Kobayashi[8]가 유한차분법으로 해석하였다. Zienkiewicz등[9]은 점성유동으로 보고 해석한바 있다. 1990년에 Sailer등[10]은 변형해석은 유한요소법으로 하고 온도해석에는 유한차분법을 이용하였다. 유한요소법을 사용하여 열간공정을 해석하는 방법은 열점소성해석이 많이 쓰인다. 이 해석은 점소성이론에 열역학적이론을 도입한 것이다. 압출의 해석은 종전에는 주로 정상상태의 해석을 하여왔다. 그러나 근본적으로 콘테이너를 이용한 열간 압출공정은 비정상상태의 문제이므로 비정상상태(nonsteady state)의 해석이 요구되어진다. 특히 열간에서는 비정상상태의 특성이 중요하다. 비정상상태의 해석은 kanetake[11], Bae[12]등이 수행한 바있다. 다른 해석방법으로는 Eulerian과 Lagrangian묘사를 결합하여 사용하는 방법이 있다. 이 방법을 최근 Ghosh[13]가 압출에 적용해 유한폭을 가진 준 평면압출을 해석하였다. 본 논문에서는 열전달을 포함한 온도해석과 더불어 변형해석도 비정상상태해석을 하였다. 비교적 잘 배열된 격자구조를 사용하더라도 계산종료까지는 격자재구성이 여러번 필요하게 된다. 특히 압출비와 원추각이 클수록 평금형에 가까워져 잦은 격자재구성이 필요하게 된다. 따라서 모듈화된 격자구조를 사용한 자동격자재구성(automatic remeshing) 방법을 사용하였다. 변형과 온도의 해석방법은 계산결과 정확도와 경제성을 고려[14]하여 비연계(decoupled)방식을 채택하였다. 본 논문에서 축대칭의 경우에 한정하여 강-열점소성 유한요소법으로 해석하였다. 급격한 코너부에 따른 유한요소해석결과는 변동때문에 코너부에 곡률을 주어 해석하였다. 원추형금형을 규정하는 두 인자인 압출비와 원추각에 따른 변화를 살펴보았다.

2. 이론해석

2.1 변형 해석

변형해석은 강-점소성(rigid-viscoplastic) 수식화에

근거를 두었다. 하중의 내력과 시간에 대한 종속성을 모두 고려하기 위하여 점소성 이론을 도입한다. 소재는 등방성(Isotropic)이고 von Mises 항복 조건을 따른다고 가정한다. 비압축성 조건을 만족하기 위하여 벌칙상수(Penalty constant) K*를 고려하면 변형해석을 위한 변분식[15]은 다음과 같이 나타난다.

$$\int_V \bar{\sigma}\delta\dot{\bar{\varepsilon}}dV + K^*\int_V \dot{\varepsilon}_v\delta\dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i\delta v_i dS = 0 \tag{1}$$

금형과 소재의 마찰을 고려할 때는 마찰면에서 상대운동이 없는 중립점에서 특이성을 피하기 위해 다음 식을 사용한다.

$$\underset{\sim}{f} = -\frac{2}{\pi} m_f k_y \tan^{-1}\frac{|\underset{\sim}{V}_{dw}|}{a}\,\underset{\sim}{t} \tag{2}$$

이때, V_{dw}는 금형 면에 대한 소재의 상대 속도이고 t는 V_{dw}방향으로 단위벡터이다. a는 금형의 크기 보다 훨씬 작은 양(Positive)의 상수이다. 본 논문에서 초기 속도장은 선형 점성물체를 가정하여 생성하였다. 접촉문제는 Yoon[16] 등이 사용한 연속적인 접촉 알고리즘을 사용하여 처리 하였다. 식(1)에 식(2)를 대입하여 유한요소 분할화하면 비선형 연립방정식이 얻어지는데 이를 Newton-Rapson 방법을 사용하여 변형해석을 하였다[15].

2.2 온도 해석

소재와 금형의 온도분포는 다음과 같은 에너지 평형 관계식을 풀어 쉽게 얻을 수 있다[17].

$$k\,T_{,ii} - \rho c\dot{T} + \dot{r} = 0 \tag{3}$$

여기에서 세째항은 소성변형으로 인한 열 발생을 나타내고 아래식과 같이 주어진다.

$$\dot{r} = k^*\bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}} \tag{4}$$

여기에서 k*는 변형 에너지가 열로 변형되는 비율이다. 실험결과에 의하면 0.85 와 0.95 사이에 존재[18]한다. 본 논문에서는 k*를 중간값인 0.9 로 취했다. 식(3)는 가중잔류항법을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V k\,T_{,i}\delta T_{,i}dV + \int_V \rho c\dot{T}\delta T dV - \int_V k^*\bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}\delta T dV - \int_{S_q} q_n\delta T dS = 0 \tag{5}$$

윗식의 마지막항은 경계에서 열유량을 나타냈으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{S_c} h(T_a - T_s)\delta T dS + \int_{S_r}\sigma\varepsilon(T_a^4 - T_s^4)\delta T dS + \int_{S_d} h_{lub}(T_1 - T_2)\delta T dS + \int_{S_f} m_f k_y v/J\,\delta T dS \tag{6}$$

이때 S_c와 S_r는 대류와 복사가 발생하는 자유표면이고 S_d와 S_f는 금형과 소재의 접촉면에서 전도와 마찰열 유량이 일어나는 표면이다.

본 논문에서는 열 유량을 구할때, 소재의 변형으로 인해 금형과 소재의 절점이 어긋난 경우에도 금형의 격자 재구성없이 계산할 수있는 방식[19]을 사용한다. 온도는 식(5)을 유한 요소 분할화한 뒤 유한 차분근사에 의해 선형화시키면 다음식과 같이 쓸 수 있다[19].

$$\left[\theta K + \frac{1}{\Delta t}C\right]T_{n+1} = \left[-(1-\theta)K + \frac{1}{\Delta t}C\right]T_n + (1-\theta)Q_n + \theta Q_{n+1} \tag{7}$$

여기에서 θ는 0과 1사이의 양수값이다.

2.3 압출을 위한 자동격자 재구성

원추형금형 압출의 해석은 여러차례 격자재구성이 요구되고 특히 반원추각이 클때는 자주 격자재구성을 하여야 한다. 따라서 전체 계산시간과 인력의 낭비를 줄이기 위해 자동격자 재구성방법을 도입한다. 원추형 금형 압출은 압출비와 반원추각(semi-coneangle)이 주어지면 압출금형을 묘사 할 수 있다. 본 방식은 이 두 인자가 주어지면 프로그램내에서 소재와 금형의 격자를 생성하게 된다. 자동 격자재구성에서는 어느때 격자재구성을 할 것인가를 판별하는 것이 중요하다. 판별 기준에 걸렸을 경우 새로운 격자생성과 정보를 구격자에서 신격자로 전달하는 과정[20]이 진행된다. 본 해석에 사용된 자동 격자재구성방식에 대한 흐름도는 Fig. 1과 같다.

2.3.1 격자재구성 판별조건

본 해석에서 사용한 격자재구성 판별조건은 격자 찌그러짐 조건과 소재와 금형간의 간섭조건이다. 먼저 격자 찌그러짐 조건은 내각기준과 절점사이의 거리기준으

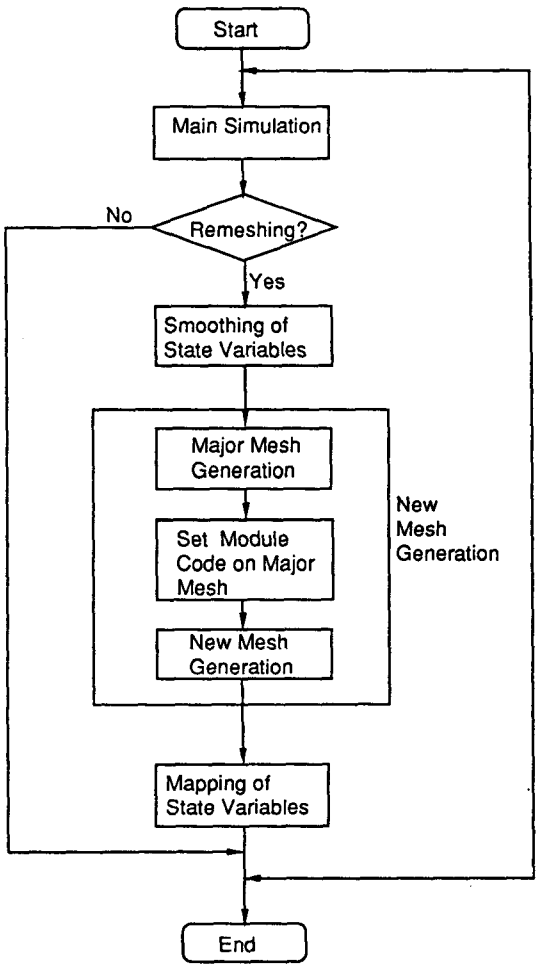

Fig. 1 Flow chart for automatic remeshing

로 나눌 수 있다. 내각기준은 Fig. 2의 b)에서 u_1과 u_2를 절점1에서 절점2와 4방향으로 단위 벡터라할때 다음과 같다.

$$\vec{u_1} \times \vec{u_2} < c_d \tag{8}$$

여기서, c_d는 각 기준 격자 찌그러짐 상수이다. 절점 사이의 거리 기준은 Fig. 2의 c)와 같이 격자 각변의 길이가 초기 격자변의 길이보다 어느 정도 이하가 되는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_i / l_{om} < c_1 \tag{9}$$

여기서, l_i은 변형후의 격자변의 길이이고, l_{om}은 초기 격자변의 길이이며, c_1은 길이 기준 격자 찌그러짐 상수로써 여기서는 0.2를 사용하였다. 간섭조건은 Fig. 2의 d)와 같이 소재 격자가 금형을 파고 들었을때 간섭량이 어느정도 이하가 되는것으로 다음과 같다.

$$h_i / h_e \geq C_i \tag{10}$$

여기서 C_i는 사용자에 의해서 결정되는 간섭기준 상수이며 0.4를 사용하였다.

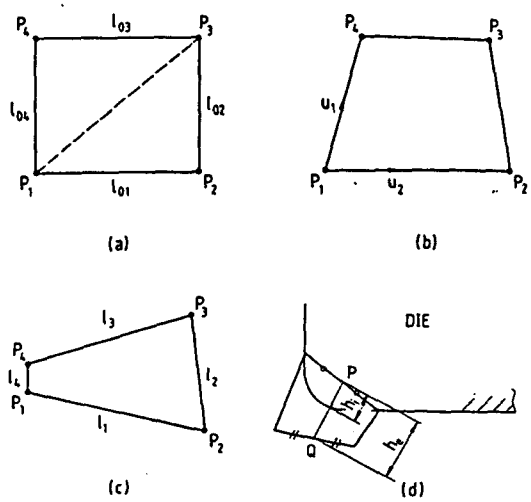

Fig. 2 Criterion for remeshing
a) initial mesh
b) mesh degeneracy criterion (angle check)
c) mesh degeneracy criterion (length check)
d) interference criterion

2.3.2 격자 생성

이때 새로운 격자는 금형간의 간섭량과 경제적인 배치를 고려한 단위체 개념(Modular Concept)를 이용한 격자 구조를 사용한다. 새로운 격자 생성은 우선 주어진 반원추각과 압출비에 따라 경제적 격자(economic mesh)를 사용하지 않은 주요격자틀을 생성한다. 다음 프로그램내에 데이타화된 경제적 격자 모듈을 주요격자틀에 지정하고 이에따라 최종적인 새로운 격자가 생성된다. Fig. 3은 간단하게 금형안의 격자를 생성하는 예를 나타냈다. a)에서 적당한 간격으로 주요격자를 생성하고 b)와 같이 데이타화된 모듈을 선택해서 a)의 격자틀에 배정한다. 배정후 절점번호와 요소내 절점의 연결을 재지정한다. 새로이 생성된 격자를 밴드폭감소를 시켜 사

용하게 된다. 이 방법은 일반성은 떨어지지만 프로그램으로 구현이 쉽고 경제적 격자 모듈의 재지정만으로 격자구조를 고칠 수 있다.

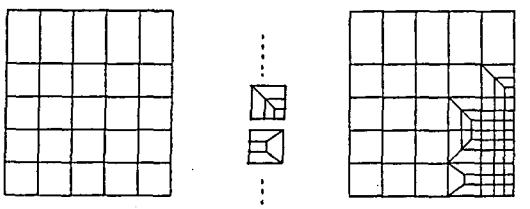

Fig. 3 Example of mesh generation
a) major mesh structure
b) economic mesh
c) new mesh

3. 수치해석

계산에 사용된 소재와 금형의 재료는 AISI1015와 AISA1430이다. 사용된 소재의 유동곡선 관계식은 다음과 같다[21].

$$\bar{\sigma} = C(T)(\dot{\bar{\varepsilon}})^{m(T)} \tag{11}$$

C와 m은 다음식과 같은 온도의 3차식으로 fitting하여 사용하였다.

$$C(T) = 2977.4003 - 9.0766T + 0.0097T^2 - 3.492 \times 10^{-6}T^3$$
$$m(T) = -1.862 + 0.0077T - 9.663\times10^{-6}T^2 + 3.875\times10^{-9}T^3 \tag{12}$$

Table 1. Thermal properties and heat transfer coefficients for AISI1015 and AISI4130

Coeff	k N/(sec·℃)	ρc N/(mm²·℃)	h N/(sec·mm·℃)	ε
DIE. (AISI4130)	27.8	4.08	0.0033 /15.0	0.6
W.P. (AISI1015)	36.8	4.0		

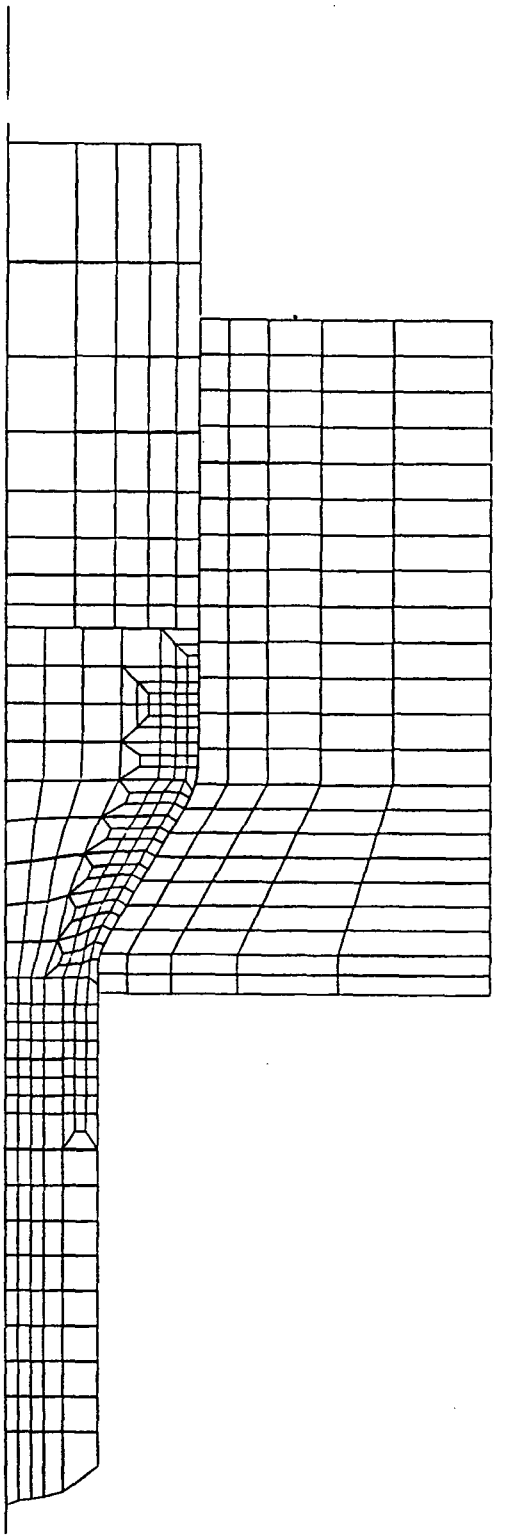

Fig. 4 Mesh configuration

초기 빌렛은 크기가 ϕ29×29mm인 원통형이다. 소재와 금형의 열적성질과 열전달계수는 Table 1에 나타냈다. 윤활면에서의 열전달계수(overal heat coefficient)에 영향을 미치는 것은 접면에서의 압력과 온도의 변화이다. 이 중에서 접면에서의 압력이 주요 인자이다. 열전달계수는 압력이 어느 기준값이상을 초과하면 일정한 값을 유지하는 데[22] 본 논문에서는 대부분의 경우 접면에서의 압력이 이 기준값 이상이다. 그래서 본 논문에서는 일정한 열전달계수를 사용하였다. 해석에서 대기의 온도는 20℃이고 램속도는 10mm/sec로 일정하게 선택하였다. 해석중간에 격자재구성이 필요한 경우가 자주 있으므로 module개념을 이용한 압출전용 자동 격자재구성기법을 사용하였다. 이때 계산에 사용된 격자구조는 Fig. 4와 같다.

4. 결과 및 토론

유한요소법을 사용하여 압출공정을 비정상상태문제로 해석하다 보면 격자재구성이 여러차례 요구된다. 냉간해석의 경우는 격자재구성시 전달되는 정보인 유효변형율의 오차축적이 문제가 될수 있다. 그러나, 열간 성형에서는 유효변형율의 영향이 유효변형율 속도에 비해 매우 적으므로 계산정도에는 문제가 되지 않는다. 본 해석에서는 Fig. 5과 Fig. 6에서만 해석특성을 규정하기 위해서 AI-1100을 사용하고 나머지 부분에서는 AISI1015 소재를 사용했다. AI-1100의 열적성질과 유동응력식은 Kang등[23]의 경우와 같이 선택하였다. 금형은 원추부분의 양끝에 곡률을 갖는 형상을 택하였다. 실제로 날카로운 코너부를 사용하였을 경우와 곡률을 주어 계산한 경우의 하중비교를 Fig. 5에 나타냈다. a)는 곡률을 주지않은 경우로 하중의 진동이 크므로 계산 결과의 사용에 문제가 많다. 이렇게 하중이 진동하는 것은 원추부분과 랜드(land)부에서 격자의 quality가 좋아졌다 나빠졌다 하는 경향이 크기 때문이다. 그래서 a)의 경우와 하중이 비슷하고 비교적 결과가 smooth한 곡률을 준 b)의 경우를 선택하여 본 논문의 해석을 하였다. b)의 경우 하중의 변동이 큰 부분은 격자재구성의 영향으로 본다. 그러나 이 변동은 다음의 AISI소재의 해석에서는 비교적 진폭이 작은 것으로 나타났다.

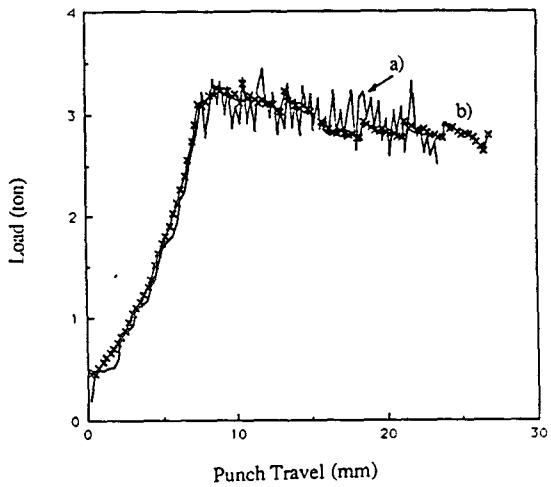

Fig. 5 Comparison of the load curve between two types of dies

4.1 비 등온 해석

등온해석과 비 등온해석시 하중을 Fig. 6에 나타냈다.

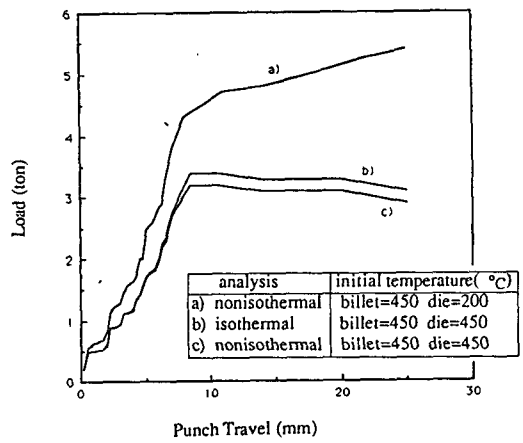

Fig. 6 Comparison of the load between isothermal analysis and nonisothermal analysis

금형과 소재의 초기온도가 다를 경우는 하중의 차이가 매우 큼을 볼 수 있다. 그리고 온도의 차이가 같을 경우에도 비등온 해석은 등온해석을 했을때 보다 7~8%가 낮게 나타났다. 이는 금형과 소재의 초기온도가 같으므로 소재는 금형으로 열의 방출이 거의 없고 변형에 의한 열의 발생으로 온도가 오르기 때문이다. 온도가 오르면 경화지수가 떨어지므로 변형이 쉬워져 하중이

낮아진것이다. Fig. 6에서 a)의 경우는 소재가 금형과 초기온도차가 커서 소재의 온도가 내려감에 따른 가공경화지수의 증가가 하중에 지배적인 영향을 미친다. 따라서 하중이 계속해서 증가함을 볼 수 있다. 변형과 마찰에 의한 열발생과 미끄러짐이 어느정도 진행되면 마찰력이 감소하는 성질은 하중의 감소를 가져온다. b)와 c)의 경우는 이러한 성질들이 보다 지배적이므로 하중이 감소하는 경향을 보인다. Fig. 7에는 금형의 초기온도만이 다를 경우 펀치의 하강량이 10.6mm일때 온도분포를 나타냈다. 소재의 초기온도는 1000℃이고 금형은 a)의 경우 250℃이고 b)의 경우 100℃이다. 두 경우 유효변형율 속도의 분포는 거의 같게 나타났다. 그러나 b)의 경우가 온도가 더 많이 낮아졌다. 그래서 하중을 비교해보면 b)의 경우가 10%정도 높음을 볼 수 있다. 이상에서 살펴봤듯이 비교시 조건의 차이는 온도뿐이었음을 고려할때 정확한 하중과 응력상태를 알기 위해서는 비등온의 해석이 반드시 필요하다고 볼 수 있다.

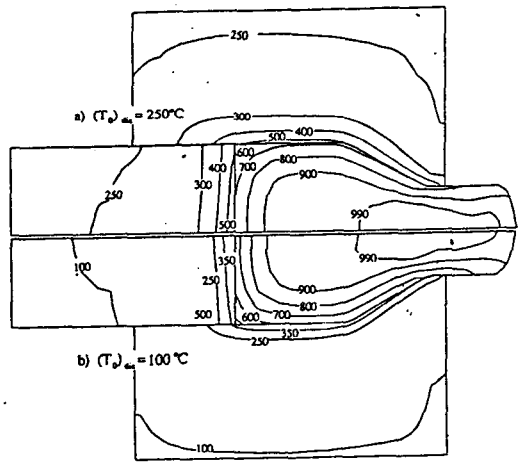

Fig. 7 Comparison of the temperature between two initial die temperatures

4.2 비 정상상태해석

펀치의 이동거리가 7.5, 15.0 그리고 22.5mm일때 유효변형률 속도분포와 온도분포를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타냈다. 그리고 펀치의 이동에 대한 하중곡선을 Fig. 10에 나타냈다. 이때 단면감소율이 76.7%이고 마찰 계수는 0.3이다. 그리고 반원추각은 30(deg)이고 소재와 금형의 초기온도는 1000℃와 250℃이다. 원추형

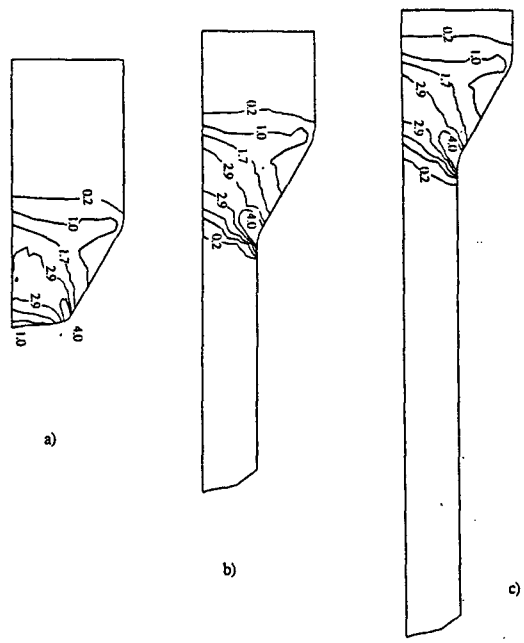

Fig. 8 Distribution of effective strain rate at the punch travel of a) 7.5mm, b) 15.0mm, c) 22.5mm

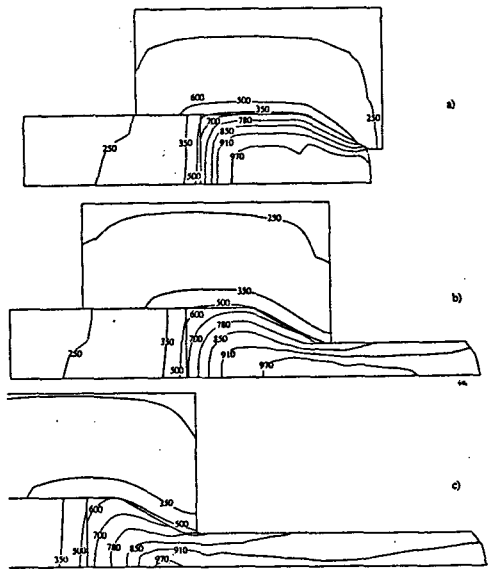

Fig. 9 Distribution of temperature at the punch travel of a) 7.5mm, b) 15.0mm, c) 22.5mm

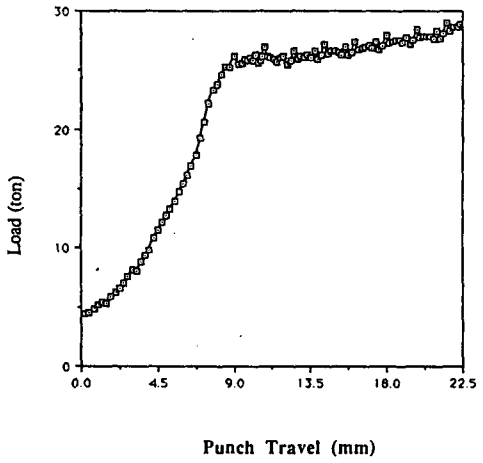

Fig. 10 Variation of extrusion load with respect to punch travel

부분의 끝에서 속도의 변화가 크므로 이곳에서 유효변형율속도가 제일 크게 나타났다. 원추형부분에서 유효변형율속도는 압출시작과 끝을 제외하고는 거의 같게 나타났다. 온도분포를 살펴보면 전도의 열유량에 비해 공기와의 대류와 복사량은 매우 적음을 알 수 있다. 소재의 온도분포는 금형과의 접촉부분에서 안으로 갈수록 높아짐을 볼 수 있다. 이는 금형과 소재의 초기온도가 차이가 크기 때문에 접촉부분에서 소재로부터 금형으로 열유량이 많기 때문이다. 계속해서 온도가 내려가기 때문에 Fig. 10에서 보듯이 하중은 준 정상상태에서도 떨어짐이 없이 올라간다. 압출되어져 나온 제품을 보면 반경방향으로 온도차가 많이 남을 볼 수 있다. 유효변형율 속도가 같더라도 온도가 다르기 때문에 온도변화에 인해 시간에 따라 물성치가 변한다. 즉 식(12)에서 c와 m값이 달라져 응력상태가 달라지게 된다. 콘테이너압출은 근본적으로는 비정상상태이지만 이러한 이유로 비정상상태해석이 열간공정에서는 특히 필요하다.

4.3 압출 조건에 따른 변화

원추형 금형에서 금형의 형상을 결정하는 두가지 요소는 원추각과 단면감소율이다. 원추각과 단면감소율이 다를 때 유효변형도율 분포를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타냈다.

Fig. 11은 펀치의 이동거리가 11.0mm일때 반원추각이 35°, 25°인 경우이다. 원추각이 작은 경우가 속도가 완만하게 변하므로 원추형부분의 끝에서 유효변형도율이

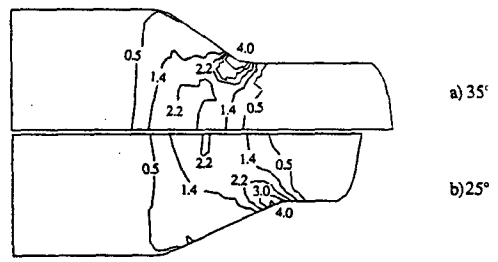

Fig. 11 Comparison of the effective strain strain rate for two cone angles

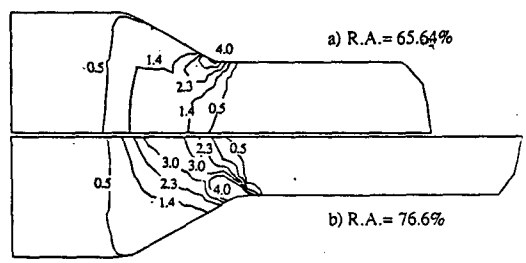

Fig. 12 Comparison of the effective strain rate for two reductions of area

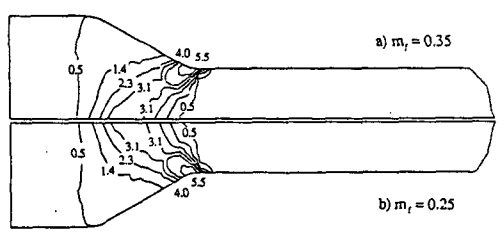

Fig. 13 Comparison of the effective strain rate for two friction factors

보다 작게 나타났다. 또한 중앙부에서도 작게 나타났다. 유효변형율속도의 증가에 의한 하중의 상승량과 접촉면적의 증가에 의한 하중의 증가량이 서로 상충되어 두 경우 하중은 비슷하게 나온다. Fig. 12에는 단면감소율이 65.64%와 76.7%인 경우를 비교하였다. 단면감소율이 큰 경우가 유효변형도율이 상당히 크고 따라서 요구되는 하중도 많은 차이가 있을 것이다. 본 해석에서 계산된 하중은 Fig. 12에 대응되는 시간에 21.1톤과 26.3톤으로 큰 차이가 나타났다. 마찰계수가 다를 경우 유효 변형율속도분포와 온도분포를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타냈다. 유효변형율분포는 두 경우가 거의 같음을 볼

수 있다. 따라서 유효변형율속도는 마찰계수에 거의 영향을 받지 않는다고 할 수 있다. 소재의 온도분포를 살펴보면 펀치와 접하는 부분과 상단부분은 마찰의 영향이 그렇게 크지 않으므로 차이가 거의 없다. 그러나 원추형부분과 그 아래부분의 소재온도는 마찰의 영향에 의해 마찰계수가 큰 경우가 온도가 높음을 알 수 있다. 마찰계수에 따른 하중을 Fig. 15에 나타냈다. 이때 하중은 준 정상상태가 시작되는 부분의 평균치이다. 랜드부의 길이에 대한 변화는 축대칭의 경우이므로 제품의 성질에는 크게 영향을 주지 못하는 것으로 해석되었다. 다만 랜드부의 길이가 3mm와 5mm일때의 하중변화량이 6% 정도인 것으로 나타났다.

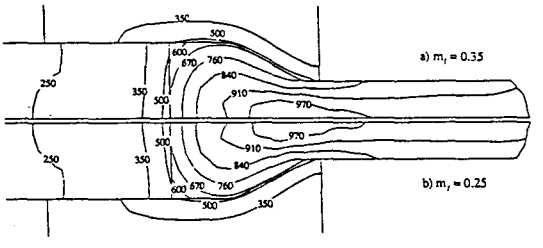

Fig. 14 Comparison of the temperature for two friction factors

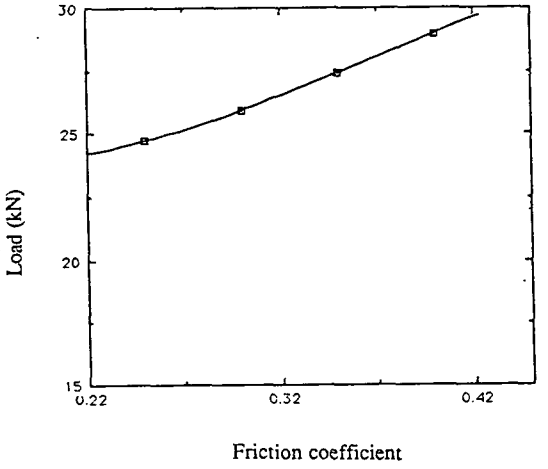

Fig. 15 Variation of extrusion load with respect to friction factor

5. 결 론

강-열점소성 유한요소법을 사용하여 변형과 온도의 해석을 여러조건하에서 수행하였다. 해석결과를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 열간압출에서 유동응력과 하중등의 정확한 예측을 위해서는 비 등온 해석을 하여야 한다. 그리고 시간에 따라 온도가 변하고 이에 따라 재료의 물성치가 다르기 때문에 유효변형을 속도 분포가 비슷하더라도 비 정상상태해석을 하여야 한다.
2. 본 해석에서 제안한 모듈을 이용한 원추형 금형을 이용한 콘테이너압출을 위한 자동 격가재구성법은 실제공정의 작업완료까지 계산을 가능하게 하고 인력과 시간이 절약을 가져옴을 확인되었다.
3. 유효변형율 속도는 단면감소율과 원추각등의 기하학적인 변화에 민감하게 변하지만 온도의 변화와 마찰의 변화에는 상대적으로 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, 1985
2. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altam, T., Metal forming and the Finite Element Method, Oxford Univ. Press, 1989
3. Iwata, k., Osakada, k. and fujino, S., "Analysis of Hydrostatic Extrusion by the Finite Element Method", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., May, pp. 697~703, 1972
4. Chen, C. C., Oh, S. I. and Kobayashi, S., "Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and drawing", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 101, Feb., pp. 23~35, 1979
5. 양동열, 오병수, 이중홍, "강소성 유한요소법을 이용한 전방압출의 해석", 대한기계학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 452~462, 1985
6. 최재찬, 김병민, 최인근, 이종수, 홍성석, 조남춘, "속도의존성 재료에 대한 축대칭 전방압출의 유한요소해석", 대한기계학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 537~543, 1991

7. Johnson, W. and Kudo, H., "The Use of Upper-Bound Solutions for the Determination of Temperature Distributions in Fast Hot Rolling and Axi-Symmetric Extrusion Processes", Int. J. Mech. Sci., Vol. 1, pp. 175~191, 1960
8. Altan, T. and kobayashi, S., "A Numerical Method for Estimating the Temperature Distributions in Extrusion Through conical Dies", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., February, pp. 107~118, 1968
9. Zienkiewicz, O. C., Jain, P. C. and Onate, E., "Flow of Solids during Forming and Extrusion : Some Aspects of Numerical Solutions", Int. J. Solids Structures, Vol. 14, pp. 15~38, 1978
10. Sailer, C., Lippmann, H. and Mannl, V., "Two-Dimensional Forward Process of Axisymmetric Workpieces of A199.5 including Temperature Calculations in the Tools", Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Technology of plasticity, Kyoto, July 1/6, pp. 491~496, 1990
11. Kanetake, N. and Lange, K., "Metal Flow in the Rod Extrusion of Rate Sensitive Materials", Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Technology of plasticity, Stuttgart, August 24/28, pp. 493~498, 1987
12. Bae, W. B. and Yang, D. Y., "An Upper-Bound Analysis of the Backward Extrusion of Internally Elliptic-Sharped Tubes from Round Billets", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 26, 1991
13. Ghosh, S., "Finite Element Simulation of Some Extrusion Process Using the Arbitary Lagrangian-Eulerian Description", J. Mater. Shaping Technol., Vol. 8, No. 1, pp. 53~64, 1990
14. 조종래, 박치용, 천명식, 윤정호, 양동열, "2차원 열간 단조에서의 변형과 온도의 연계 해석과 비연계 해석 비교", 대한기계학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 839~849, 1990
15) 이낙규, 윤정호, 양동열, "강소성 유한요소법을 이용한 냉간단조 금형 및 가공 공정해석", 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 433~443, 1989
16. Yoon, J. H. and Yang, D. Y., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three-Dimensional Forging by considering Friction on considering friction on Continuous curved Dies with Initial Guess Generation", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 30, No. 12, pp. 887~898, 1988
17. Farren, W. S. and Taylor, F. R. S., The heat developed during plastic extension of metals, Proc. Royal Soc. Series A. Vol. 107 : 422, 1925
18. Greenfield, P., and Bever, M. B., Acta Met, Vol. 4, pp. 443, 1956
19) 박치용, 조종래, 양동열, "열간반경단조의 2차원 유한요소해석", 대한기계학회논문집, 제14권, 제5호, pp. 1166~1180, 1990
20. Yoon, J. H. and Yang, D. Y., "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, pp. 277~291, 1990
21. Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., Metal Forming : Fundamentals and Applications, American Society for metals, chapter 4, 1983
22. Burte, P. R., Im, Y. T., Altan, T. and Semiatin, S. L., "Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging", Trans. ASME., J. of Engng for Ind., Vol. 112, Nov., pp. 332~339, 1990
23. 강연식, 박치용, 조종래, 양동열, "평금형을 이용한 축대칭 열간압출의 유한요소해석", 대한기계학회논문집, 제16권, 제2호, pp. 207~225, 1992