

Thixoforming 공정설계 자동화를 위한 프로그램 개발에 관한 연구

김남석*, 정홍규*, 강충길*

A Study on Development of Program for an Automated Thixoforming Process Design

Nam Seok Kim*, Hong Kyu Jung*, and Chung Gil Kang*

ABSTRACT

The flow behavior of semi-solid materials (SSM) is required to assist the industrial application of thixoforming technology. Particularly, to reduce many lead times, many numerical analysis packages have been developed to simulate required metal forming processes. The objectives of the development of SEMI-FORM for thixoforming process design are to predict the effect of various process variables such as pressing force, die temperature, and die velocity. However, there have not been any reports which adapt these packages to the specific characteristics of SSM. So, this paper presents an overview of the development of thixoforming simulator of SEMI-FORM. The solver and post-processor of SEMI-FORM S/W for an automated thixoforming process design with arbitrarily shaped die are composed of FORTRAN Power Station 4.0 and Visual Basic 5.0, respectively. This developing SEMI-FORM S/W would be very useful for thixoforming practitioners and engineers to select the optimal process conditions to produce automotive parts with high quality.

Key Words : Thixoforming technology (반용융 성형기술), SEMI-FORM S/W, Preprocessor (전처리기), Postprocessor (후처리기), Automated thixoforming process design (thixoforming 공정설계 자동화)

1. 서론

Thixoforming 공정에서 수치 해석 및 시뮬레이션 기법들은 반용융 성형공정을 이용하여 다양한 제품을 설계하는데 사용되고 있으며, 이러한 기법들은 설계자가 가상적인 환경에서 반용융 재료의 변형거동 파악^{(1)~(5)} 및 다양한 공정 변수들의 영

향을 예측하는데 도움이 되고 있다.

반용융 재료를 이용한 수치 해석적인 방법에 관한 연구로서 Bolmaro 등⁽⁶⁾은 2상 유동(two-phase flow)에 관한 유한요소 기술을 이용하여 항복 응력비, 변형을 분포 및 고상율 사이의 관계를 연구하였다. Toyoshima 등^{(7)~(8)}은 FEM에 의한 등온 조

* 부산대학교 기계공학부,
정밀정형 및 급형가공 연구센터 (ERC/NSDM)

건하에서 반응용 금속 (SSM)의 변형에 대한 수치적 시뮬레이션을 수행하였다. Koç 등⁽⁹⁾은 DEFORMTM을 사용하여 A356 재료의 반응용 단조에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하였으며, 강 등⁽¹⁰⁾은 압축성형시 변형율의 증가에 따라서 응력이 항상 일정하게 증가되지 않고 변형율의 증가에 따라서 응력이 증가 또는 감소되는 현상이 일어나기 때문에 분리계수를 도입하여 새로운 응력과 변형율의 관계를 제안하였으며, 또한 압축해석 결과를 실험결과와 비교검토 하였다. 정 등^{(11)~(13)}은 유도코일 설계와 재가열 실험을 토대로 한 유도가열 공정의 FEM 시뮬레이션을 통하여 유도코일 설계의 타당성을 입증하였다.

Shima & Oyane⁽¹⁴⁾이 제시한 다공질 재료의 항복 조건식이 실험치와 근접하게 나타나기 때문에 본 연구에서는 다공질 재료의 항복 조건식을 사용하여 재료의 변형거동을 예측하고자 한다.

Thixoforming 공정 설계 자동화를 위해서는 반응용 소재의 특성을 고려한 새로운 유한요소 알고리즘의 개발이 요구되며 임의의 형상을 가진 부품의 thixoforming 공정을 전산모사하기 위한 전처리기 (pre-processor)의 기능과 후처리기 (post-processor)의 기능을 갖춘 S/W의 필요성이 대두되고 있다. 고상율이 55% (반응용 단조의 경우, 일반적으로 고상율이 55%인 상태까지 소재를 재가열한 후 성형을 함)인 반응용 소재의 성형공정 해석 패키지를 개발하기 위해서는 관련 알고리즘, SSM의 D/B 구축이 필요하나 연구결과가 발표되지 않고 있다.

따라서 본 논문은 SSM의 고상입자의 변형과 더불어 충전 결합 및 액상 편석^{(11), (15)}을 예측하기 위한 새로운 유한요소 프로그램인 SEMI-FORM S/W 개발의 과정을 제안한다. 임의의 이차원 형상의 다이에 대한 thixoforming 공정해석이 가능하도록 전처리기 (SEMI-PRE)와 후처리기 (SEMI-POST)는 Visual Basic으로, solver는 FORTRAN Power Station으로 각각 구성하였다. 또한, 분리계수의 함수로 표시한 유동 응력식을 이용하여 thixoforming 공정에 있어서 고상율의 분포 및 재료의 변형 등을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.⁽¹⁰⁾

2. SEMI-FORM S/W 개발을 위한 FEM 알고리즘

다공질체의 공간을 흐르는 액상의 유동저항이 액상의 속도에 비례한다고 가정하면 단순한 형태의 Darcy's Law를 적용할 수 있다. 고상에 관한 액상의 상대적인 운동은 다음 식으로 표시된다.^{(10), (16)}

$$u_{Li} \cdot f_L = \frac{\kappa}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (1)$$

여기서, u_{Li} , f_L , κ , μ_L 은 각각 액상 속도, 액상 율, 투과율 그리고 액상의 점성계수이다.

고상 다공질체의 체적 변화량과 액상체의 유출량은 일치하므로 다음의 연속 방정식이 성립한다.

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_L \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

액상에 작용하는 압력의 경계조건은 다음의 방정식에 의해 설정될 수 있다.

$$p = p_o : \text{자유 표면} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 : \text{금형과 접촉하는 면} \quad (4)$$

여기서, n 은 금형과 접촉하는 면에서의 접선 방향을 나타낸다.

Thixoforging 공정에서 재료는 대부분 대변형을 하기 때문에 탄성변형을 무시한 응답해석만으로 성형공정을 해석해 왔다. 그래서 기존의 성형공정에서 사용된 재료들은 강소성 재료로 가정하여 비압축성 조건과 강체영역 등을 고려하여 변분법의 원리를 사용하여 유한요소 해석을 하였다. 반응용 단조해석을 위하여 점성을 포함한 압축성 점소성체로 가정하여 해석하였다. 점소성체는 속도 민감성 재료로서 변형율 속도, 총 변형율, 온도 등의 함수인 유동응력에 의존하며 압축성 재료로 가정하였다.

SSM에 대한 지배 방정식을 단순화하기 위하여 고상은 액상과 동일한 밀도를 가지며, 기공이 존재하지 않는다고 가정하면 힘의 평형 방정식과 연속 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) = 0 \quad (5)$$

여기서, σ_{ij} , δ_{ij} 은 각각 응력 텐서와 크로네커 델

타 (Kronecker delta)이다.

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_L \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

식 (5), (6)의 고상-액상 혼합물에 대한 지배 방정식들은 변형과정동안 압력의 변화가 힘의 평형 관계에 영향을 미치게 된다. 그 결과로서 고상의 응력과 변형을 속도는 체적변화, 조밀화를 유발시키며, 액상의 유동은 구상화 조직 사이의 공간에서 일어난다. 고상의 조밀화는 액상의 유동율에 영향을 미치는 침투성과 체적 변형을 속도에 관련되어 있다. 따라서 정수압 응력이 높거나 유효 변형율속도가 높을 경우 조밀화가 일어날 수 있다.

반응용 재료의 압축성형시 재료의 온도분포를 고려하기 위한 비정상 상태의 열전도 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \nabla^2 T + f \quad (7)$$

재료가 액상에서 고상으로 응고가 될 때 잠열이 방출된다. 응고 잠열의 방출은 비선형적으로 일어나기 때문에 해석적으로 해를 구하기가 어렵기 때문에 수치적인 방법이 널리 이용되고 있다. 잠열 방출을 취급하는 방법으로는 등가 비열법, 엔탈피법, 온도 회복법 등이 있다.⁽¹⁷⁾ 등가 비열법과 온도 회복법은 프로그램이 용이하고 계산속도가 빠르지만 시간간격이 작아야 정해에 가까운 해를 얻을 수 있는 단점이 있고, 엔탈피법은 비교적 정확한 해를 구할 수 있지만 프로그램이 어렵고 계산속도가 많이 걸린다. 따라서 본 연구에서는 등가 비열법을 사용하여 잠열 방출에 따른 온도를 보정 하였다.

등온 해석시는 다이의 온도 분포가 균일하다고 가정하고 소재의 온도 분포를 계산하였으며, 비등온 해석의 경우 소재의 온도 해석시 다이의 온도 분포의 영향을 고려해야 하므로 다이의 온도 해석 경계조건을 크게 대칭 경계, 다이 접촉 경계, 소재 접촉 경계, 외부 대류 경계, 내부 대류 경계 등으로 나누어 계산을 수행하였다.

SSM의 성형공정에 대한 유한요소 형태의 지배 방정식에서 우선적으로 구하는 것은 재료의 각 절점에서의 고상의 가용속도장 (admissible velocity) 과 액상의 압력인데, 각 요소에 걸쳐 연속적인 속도와 압력을 정의하기 위해 형상함수를 도입하여 구체화시킨다. SSM과 같은 압축성 점소성 문제에

서 미지수는 속도와 압력인데, 일차 미지수 (primary unknown)는 속도이다. Thixoforming 공정을 해석할 때는 속도장을 먼저 구한 다음 만족할 만한 속도장에 대한 압력장을 구하여 전 영역에 대해 속도와 압력이 연계된 강성 행렬과 힘벡터를 조합하여 전체적인 유한요소 방정식을 구한다.

고상영역과 액상영역을 동시에 고려한 SSM에 대한 유한 요소 방정식의 행렬 형태는 다음과 같이 연립 일차 방정식으로 간단하게 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{bmatrix} [K_s(U_s)] & [H_p] \\ [H_v] & [K_L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_s\} \\ \{p\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_s\} \\ \{Q\} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 $K_s(U_s)$ 는 압축성 다공질체의 요소 강성 행렬이며, K_L 은 액상체의 유출량에 의한 압력의 영향을 나타낸 행렬이다. H_p 는 액상의 압력을 나타내는 행렬이고 H_v 는 다공질체의 체적 변화량을 고상의 속도에 대한 함수로 나타낸 행렬이다. 그리고, U_s , p , F_s , Q 는 각각 고상의 절점 속도, 압력, 절점력 및 액상의 유출력 체적 속도이고, $K_s(U_s)$, H_p , H_v , K_L , F_s 및 Q 는 다음과 같다.

$$K_s(U_s) = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \hat{v}^T B^T D B dV \quad (9)$$

$$H_p = \int_V f_L q^T N dV \quad (10)$$

$$H_v = \int_V q^T N dV \quad (11)$$

$$K_L = \int \frac{\kappa}{\mu_L} \left[\frac{\partial q_i}{\partial x} \frac{\partial q_j}{\partial x} + \frac{\partial q_i}{\partial y} \frac{\partial q_j}{\partial y} \right] dV \quad (12)$$

$$F_s = \int_{S_r} t^T N dS_F \quad (13)$$

$$Q = \int_V q_i Q_i dV \quad (14)$$

식 (9)에서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효 변형율 속도와 유효응력을 나타낸다.

식 (8)의 비선형 방정식을 풀기 위한 방법으로 직접 반복법과 뉴우튼-랩슨법의 두 가지 방법이 있다. 직접반복법은 수렴성이 좋으나 해를 구하는데 속도가 느리고, 뉴우튼-랩슨법은 수렴의 속도는 빠르나 발산의 우려가 있다. 그러므로 두 방법의 장점을 이용하기 위해 초기 속도장의 발생은

직접 반복법을 이용하였고, 그 이후의 계산은 뉴턴-랩슨법을 이용하였다.

유한 요소법에 의한 금속 제조공정의 실제적인 해석에 있어서는 금형 경계조건에 대한 특별한 주의가 요구된다. 왜냐하면 마찰응력의 방향은 성형되는 재료와 금형 사이의 상대속도의 방향에 대해 반대이기 때문이다. 링 압축, 압연, 단조와 같은 문제에 대해서 금형-재료 경계면 사이에서 상대속도의 방향은 간단한 방법으로 처리하기에는 어려움이 있다. 이런 문제의 주요 특징은 금형-재료 경계면을 따라 금형에 대한 재료의 속도가 영이 되는 중립점이 발생하게 되어 해석이 곤란하게 된다. 따라서 중립점을 처리하기 위해 속도 의존성 마찰력을 고려하여 해석할 수 있도록 Chen과 Kobayashi⁽¹⁸⁾가 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f_{\text{fric}} = -m_f k \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{a} \right) \right] \frac{v_r}{|v_r|} \quad (15)$$

여기서 v_r 은 금형과 재료의 상대 속도, m_f 는 마찰 계수, a 는 속도의 차원을 가지는 상수로써 본 연구에서는 유한요소 해석에서 일반적으로 이용되어지는 5×10^{-3} 으로 하여 계산하였다. 다이와 소재 사이의 열전달에 의하여 소재의 온도가 변화하므로 전단항복응력 k 는 반응용 재료의 실험에서 구한 2.25 MPa⁽¹⁶⁾을 사용하였다.

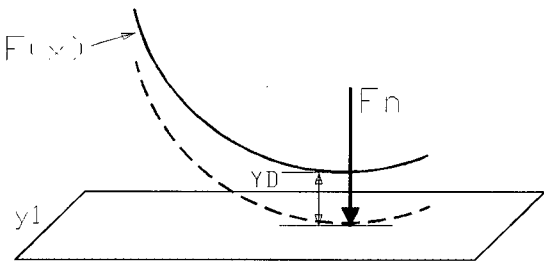


Fig. 1 Schematic diagram for contact condition between die and workpiece.

Fig. 1과 같이 시간 $t + \Delta t$ 에서 변형하는 재료인 $y1$ 이 $F(x)$ 의 함수로 표시된 금형과 접촉되어 있을 때 두 물체 사이의 y 축 거리를 YD 라고 하고 접촉에 의하여 발생하는 수직 접촉력을 F_n 이라 하면 $t + \Delta t$ 일 때 접촉 표면에서 수직방향으로의 접촉조

건은 다음과 같다.

$$F_n \cdot YD = 0, YD \geq 0, F_n < 0 \quad (16)$$

위의 식은 접촉하는 두 물체 사이에 작용하는 수직력과 두 물체 사이의 거리 중에서 하나는 영이 되어야 한다는 것을 의미하며 두 물체 사이의 거리가 영보다 커야 하는 것은 금형이 변형하는 재료를 뚫는 것을 방지하기 위해서이다. 또한 접촉면에서의 수직력은 압축력이어야 한다.

임의의 금형 형상의 경계면상에서 금형과 요소 간의 접촉을 판정하는 방법에 오류가 있을 경우에는 재료의 전체적인 요소 뒤틀림에 큰 영향을 주고 해의 신뢰성도 떨어지게 된다. 본 논문에서는 경계면상에서 금형과 재료의 접촉판단을 식 (16)을 만족하도록 프로그램화시켰다.

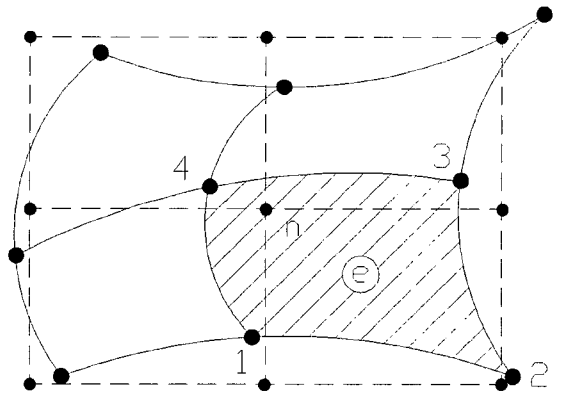


Fig. 2 Locating a node in an element for remeshing.

일단 이전의 유한요소 체계에서 절점 값이 구해지면 새로운 유한요소 체계의 절점 값으로 변환하는데 Fig. 2는 이전 절점 값을 새로운 절점 값으로 변환하는 과정을 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 새로운 유한요소 체계의 절점이 이전의 유한요소 체계에서 어느 요소에 포함되는가를 결정한 후에, 그 요소의 절점 값을 이용한 보간식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_n^N = \sum_{\beta=1}^4 N_{\beta}^O(x_n, y_n) \cdot q_{\beta}^O \quad (17)$$

여기서, q_n^N , N_{β}^O , q_{β}^O 는 각각 격자 재구성후의

새로운 요소에서의 n 절점 값, 격자 재구성전의 β 절점에서의 형상함수, 격자 재구성전의 요소에서의 n 절점 값이다.

이 결정은 isoparametric mapping을 이용하여 구하였다. 공간상의 한 점이 요소에 포함되었는가의 결정이 실제 좌표계에서는 어려우나, 국부 좌표계에서 쉽게 결정할 수 있다. 다만 이전의 유한요소 체계에서의 절점은 간혹 컴퓨터의 계산상의 오차(round-off error)로 인해 어느 요소에도 포함되지 않는 결과를 가져오기도 한다. 이런 경우에는 절점과 요소의 변화의 거리를 구해 이 거리가 아주 작으면 (10^{-9} 정도) 변위에 위치한 점으로 가정하여 절점 값을 계산하였다.

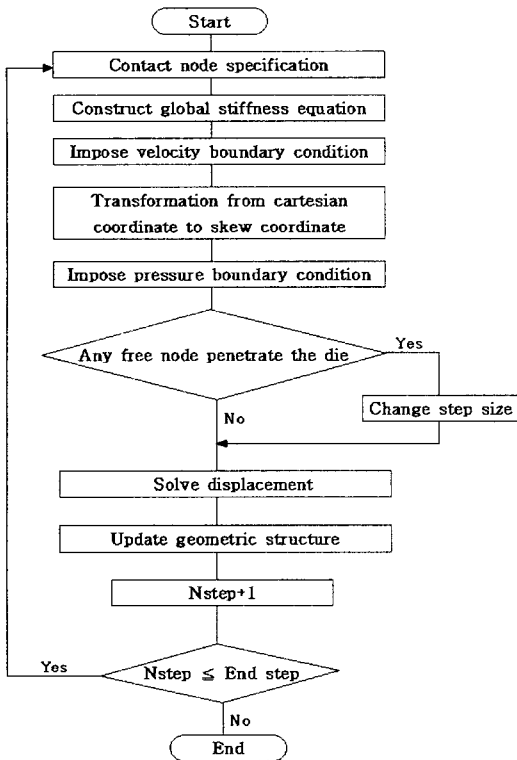


Fig. 3 Computational flow chart for arbitrarily shaped dies.

임의의 금형 형상에 대한 thixoforming 공정을 해석하기 위해서는 여러 가지 해결해야 할 점들이 많은데, 우선 금형과 재료가 접하는 부분에서 재료의 속도 및 압력을 구하기 위하여 경사 좌표계가 도입되어야 한다. 또한 초기에 금형에 접해 있지 않은 표면에 있는 절점이 재료의 변형에 의하여 금형에 닿는 순간을 찾을 수 있는 알고리즘이 필요하다. Fig. 3은 임의 형상의 단조 금형에 있어서 thixoforming 공정 해석을 위한 SEMI-FORM S/W 개발의 순서도를 나타낸 것이다.

3. SEMI-FORM S/W 개발

본 연구에서는 SSM의 D/B, 액상의 편석^{(19)~(22)}, 고상율 제어^{(11)~(12)} 및 유동 제어^{(23)~(24)} 등이 고려된 SEMI-FORM S/W 개발의 연구 결과를 정리하였다.

반용융 재료의 압축에 대한 유한요소 해석을 위하여 사용된 소재는 프랑스 Pechiney사에서 구매한 A356이며 해석에 필요한 물성치는 Table 1과 같다. A356 소재의 고상선 온도 (T_s) 및 액상선 온도 (T_L)는 각각 555°C 및 615°C 이다.

Table 1 Thermal mechanical properties of A356 alloy.

Parameters	Symbol	Unit	Values
Thermal conductivity in liquid	k_L	W/m K	58.66
Thermal conductivity in solid	k_s	W/m K	161
Specific heat in liquid	C_L	kJ/kg K	0.734
Specific heat in solid	C_s	kJ/kg K	0.963
Average density	ρ_{ave}	g/cm ³	2.5
Latent heat	H	kJ/kg	389
Heat transfer coefficient (free surface)	h_{air}	W/m ² K	26
Heat transfer coefficient (die)	h_{cont}	W/m ² K	10^4

Fig. 4는 임의의 형상 금형의 thixoforming 공정 해석 자동화를 위한 SEMI-FORM S/W의 구성도를

나타낸 것이다. 전처리기 (SEMI-PRE)와 후처리기 (SEMI-POST)는 Visual Basic으로, solver는 FORTRAN Power Station으로 각각 구성하였다.

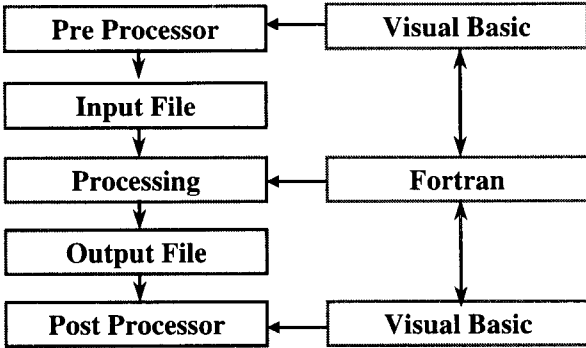
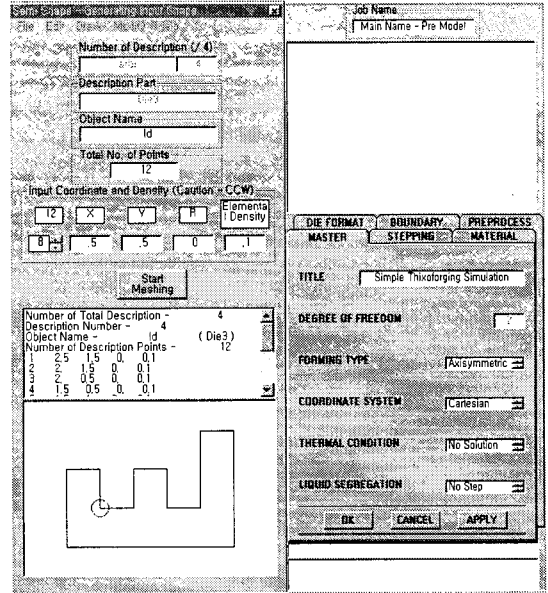


Fig. 4 Constitutive diagram of SEMI-FORM S/W.

Fig. 5와 Fig. 6은 SEMI-FORM S/W의 메인 프레임 (main frame) 및 전처리기의 프레임 (frame)을 각각 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 금형 형상 및 초기 소재 형상에 대한 입력 파일을 읽어 들여서 격자를 나누고 소재 및 금형의 경계조건을 설정하여 단계별 제어 (stepping control)가 가능하도록 하였다. 특히 DEFORM™이



(a) (b)
Fig. 6 Pre-Processor of SEMI-FORM S/W (SEMI-PRE); (a) is SEMI-SHAPE which is generating initial shape file and (b) SEMI-MODEL which is making input one for numerical solving.



Fig. 5 Main frame of SEMI-FORM S/W.

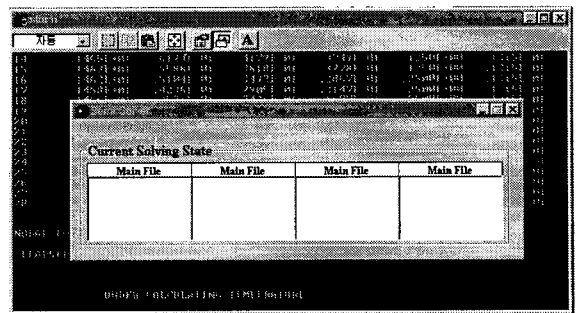


Fig. 7 Numerical analysis part (SEMI-SOLV).

나 ANSYS™같은 기존의 상용 패키지들은 격자를 많이 나누는 경우, 절점에 따라 경계조건을 설정하기 위해서는 zoom 기능을 이용한 후 영역을 선택해야 하는 번거로움이 있다. 그러나, 본 연구에서 개발한 SEMI-FORM S/W의 전처리기에서는 단지

가시화된 절점을 마우스로 클릭하기만 하면 알고자 하는 절점의 번호 및 절점에 관한 정보들을 알 수 있도록 하였다.

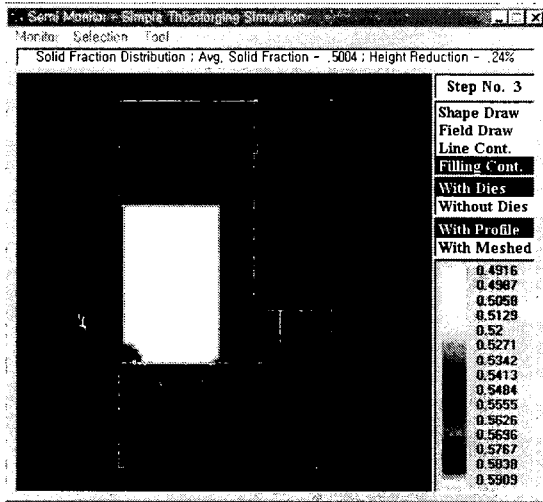


Fig. 8 Monitoring process during numerical analysis (SEMI-MONI).

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 수치해석부 (SEMI-SOLV)와 변형 중 감시 기능 (SEMI-MONI)을 나타낸 것이다.

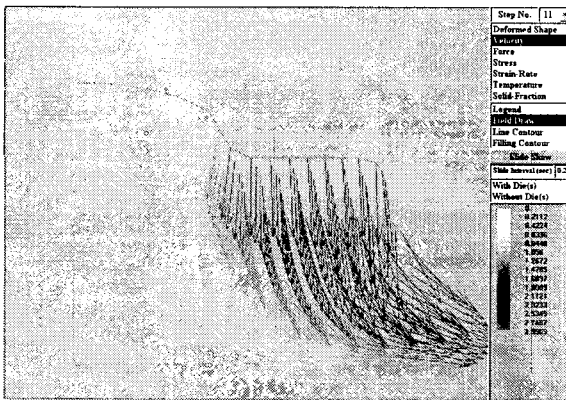


Fig. 9 Visualization of velocity field in SEMI-POST.

Fig. 9~Fig. 15는 후처리기에서 소재의 속도장 분포, 등가 응력 및 등가 변형률 속도의 양상을 나타낸 것이다. 본 연구에서 개발한 SEMI-FORM S/W는 각 단계마다 소재가 변형되는 과정, 속도장 및 압력장 분포의 변화를 연속적으로 볼 수 있는 slide show 기능을 가지고 있으며, 그래픽 분야에서는 기존의 상용 패키지 및 Adobe Photo Shop과 같은 강력한 그래픽 툴(tool)의 장점을 추가하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 2단 다이의 속도장과 1단 다이의 등가 응력 분포를 line contour와 filling contour로 나타낸 것이다. Fig. 11과 Fig. 12는 다이와 격자가 있을 때 소재의 속도장과 고상율 분포를 filling contour로 나타낸 것이다.

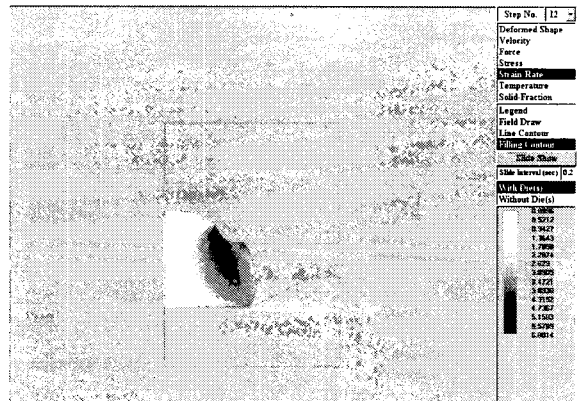


Fig. 10 Filling contour of equivalent strain-rate in SEMI-POST (with dies).

Fig. 13~Fig. 15는 다이를 나타내지 않았을 때 각각 속도장과 고상율 및 등가 응력의 filling contour를 나타낸 것이다. 고상율의 분포를 변형율 비 민감성으로 가정한 유동 응력식⁽²³⁾과 분리계수를 사용한 유동 응력식을 비교했을 때 분리계수를 도입한 유동 응력식을 사용했을 때의 고상율의 분포가 더 균일함을 알 수 있다. 위의 원인은 변형을 민감성 재료로 가정했을 때의 재료는 체적 변형을 속도에 영향을 많이 받기 때문에 작은 변형에서도 재료 내부까지 고상율의 분포가 영향을 받아 재료의 각 부분마다 고상율의 구배가 심하고 값들이 차이가 나는 반면 분리계수를 도입하여 유

동 응력식을 표현했을 때에는 고상입자의 변형을 기하학적 형상으로 가정하여 액상의 유출 등을 고려하기 때문에 고상율이 균일하게 분포한다고 사료된다.

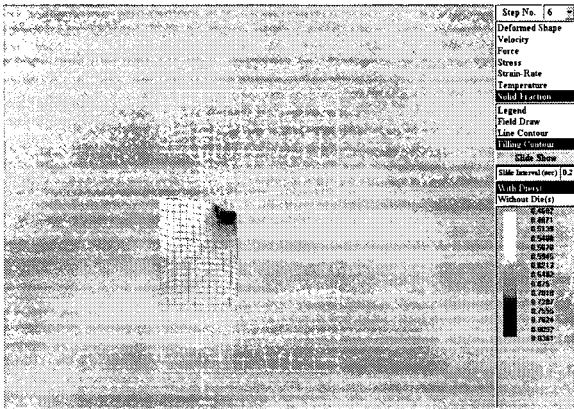


Fig. 11 Meshed filling contour for solid fraction distribution in SEMI-POST (with dies).

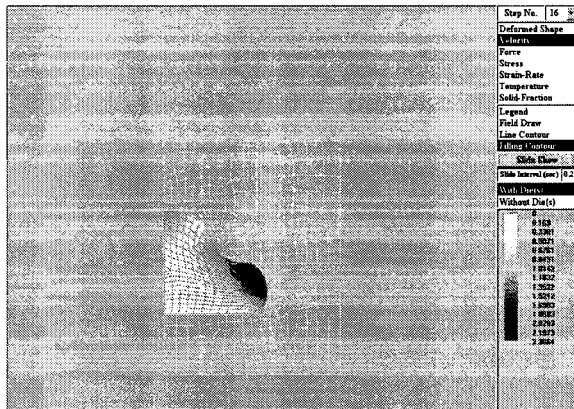


Fig. 12 Meshed filling contour for velocity field in SEMI-POST (with dies).

기 발표된 연구⁽²³⁾에서는, 금형온도의 영향을 무시한 등온 (isothermal) 조건에서 해석을 하였기 때문에 반응용 재료의 단조공정에서 유동결함으로 나타나는 표면결함을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 편석현상이 발생하는 위치를 정확히 파악할 수 없

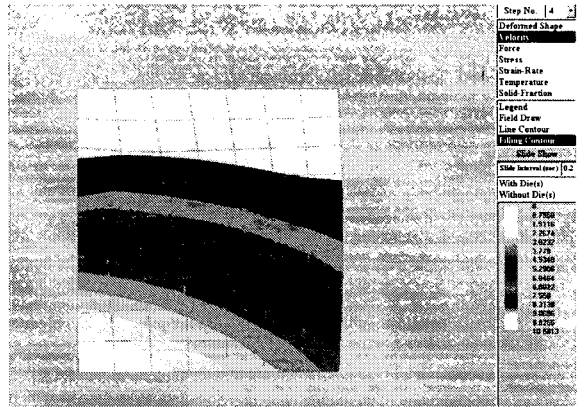


Fig. 13 Filling contour for velocity field in SEMI-POST (without dies).

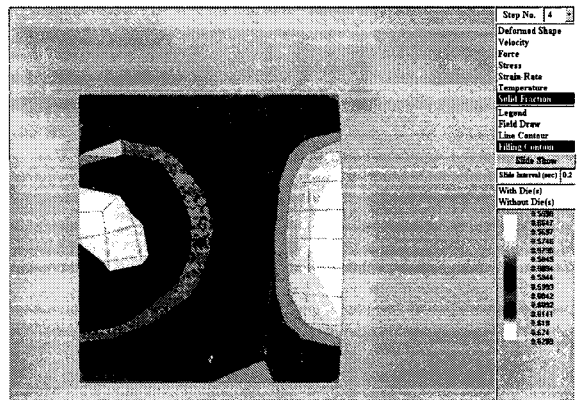


Fig. 14 Filling contour for solid fraction in SEMI-POST (without dies).

었다. 반응용 재료의 충전동안 유동결함을 예측하기 위해서는 금형온도를 고려한 열전달 해석이 병행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 금형의 온도를 고려한 비등온 (non-isothermal) 해석을 수행하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 단순 압축 성형의 비등온 해석시 상부 다이의 온도 분포와 하부 다이의 온도 분포를 각각 filling contour와 line contour로 나타낸 것이다.

Fig. 18과 Fig. 19는 단순 압축 성형시 각각 같은 성형 조건에서 등온 해석시의 소재 온도 분포

와 비등온 해석시의 소재 온도 분포를 나타낸 것이며, 등온해석보다 비등온 해석시에 소재와 다이의 접촉 부위에서의 온도분포가 약간 높게 나타났다.

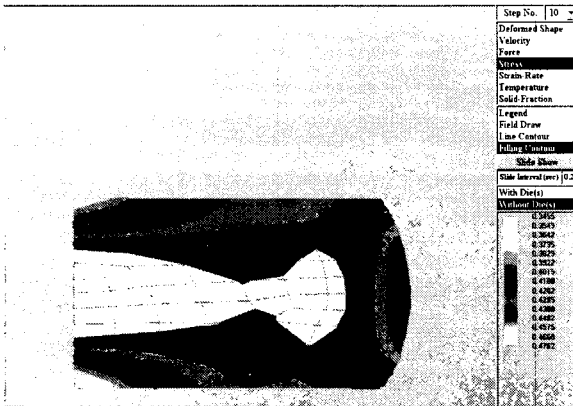


Fig. 15 Filling contour of equivalent stress in SEMI-POST (without dies).

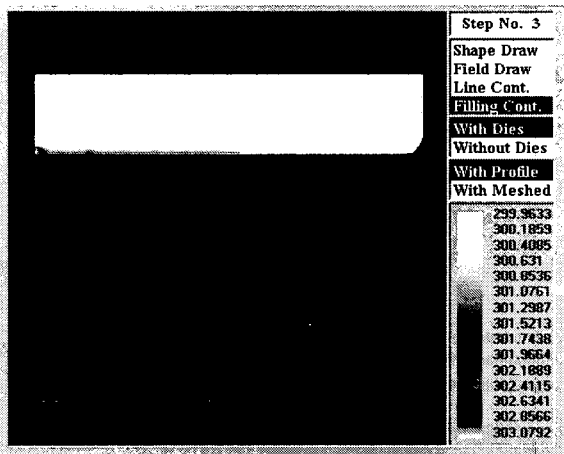


Fig. 16 Filling contour of temperature distribution for upper die (Non- isothermal analysis).

본 연구에서는 임의의 이차원 형상의 다이에 대한 thixoforming 공정해석을 위한 SEMI-FORM S/W의 FEM 알고리즘, 전처리 및 후처리에 대해서 소개하였다. 자동격자 생성 및 격자 재구

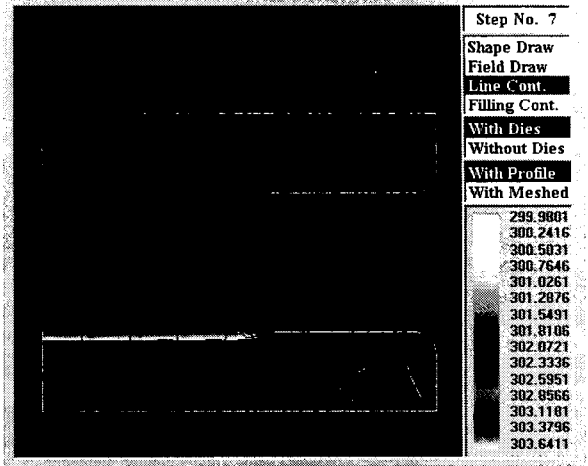


Fig. 17 Line contour of temperature distribution for lower die (Non- isothermal analysis).

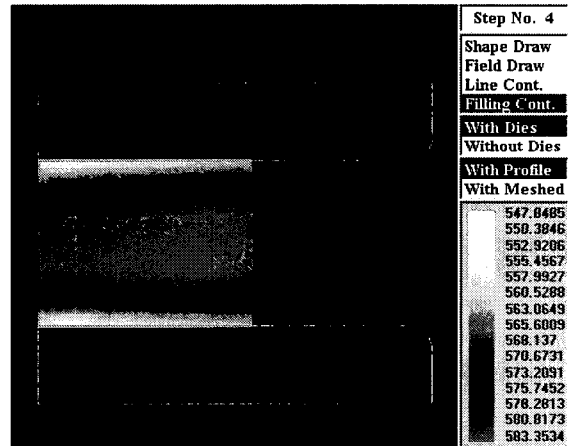


Fig. 18 Filling contour of temperature distribution for material (Isothermal analysis).

성이 필요한 반응용 단조 (semi-solid forging) 및 thixoforming 공정에 적용하였다. 소재와 다이에 있어서 온도 경계조건을 부여함으로써 비등온 해석을 수행하였다.

한편, 반응용 재료의 변형특성 및 전산모사에 관한 연구는 주로 특정 범위의 고상율 ($f_s \geq 0.6 \sim 0.7$)에 대해서 수행되어 왔지만 반응용 재료의 유동결합 및 변형특성에 대한 보다 신뢰성 있는 예

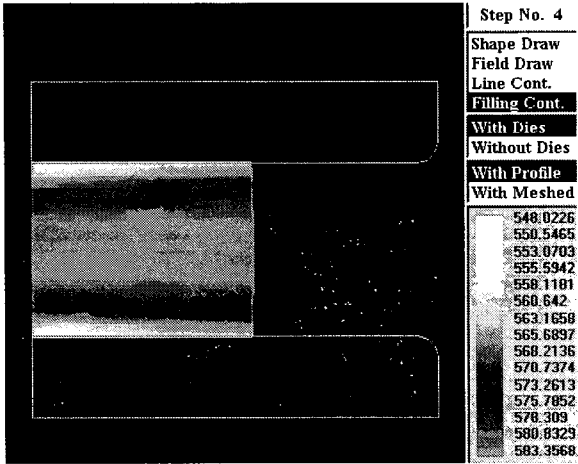


Fig. 19 Filling contour of temperature distribution for material (Non-isothermal analysis).

측을 위해서는 전 범위의 고상율에 대해서 적용 가능한 모델이 개발되어야 할 것으로 사료된다. 아울러 금형온도, 가압력, 고상율과 같은 직접 측정 가능한 공정변수뿐만 아니라 초정 α 와 공정조직의 변화 같은 미시적인 측면이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

SSM의 고상입자의 변형과 더불어 충전 결함, 항복조건, 액상의 편석, 고상율 등을 예측하기 위한 새로운 구성 방정식의 개발 및 온도와 점도의 영향⁽²⁵⁾을 고려한 non-isothermal coupled analysis에 대한 연구가 진행중이다.

현재까지 thixoforming용 금형설계는 주로 설계자의 경험과 직관에 의해서 금형을 제작하여 실험을 수행함으로써 설계의 타당성을 검증하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되었다. 본 연구에서 개발한 자동 격자생성 프로그램을 잘 활용하여 리드 타임 및 생산비용을 효과적으로 절감할 수 있을 것으로 기대되며, 격자 재구성이 필수적인 입의 형상의 다이에 대한 thixoforming 공정설계 자동화에 크게 기여할 것으로 사료된다.

4. 결론

Thixoforming 공정 설계 자동화를 위한 프로그램 개발을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수

있었다.

1. Thixoforming 시뮬레이터 SEMI-FORM의 개발을 위한 FEM 알고리즘을 개발하였다.

2. 전처리기에서는 금형 형상 및 초기 소재 형상에 대한 입력 파일을 읽어 들여서 격자를 나누고 소재 및 금형의 경계조건을 설정하여 단계별 제어 (stepping control)가 가능하도록 하였다.

3. 후처리기에서는 각 단계마다 소재가 변형되는 과정, 속도장 및 압력장 분포의 변화를 연속적으로 볼 수 있는 slide show 기능 및 기존의 상용 패키지 및 Adobe Photo Shop과 같은 강력한 그래픽 툴(tool)의 장점을 추가하였다.

4. 금형온도의 영향을 무시한 등온 (isothermal) 조건에서는 반응용 재료의 단조공정에서 유동결함으로 나타나는 표면결함을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 편석현상이 발생하는 위치를 정확히 파악할 수 없다. 반응용 재료의 충전동안 유동결함을 예측하기 위해서는 금형온도를 고려한 열전달 해석이 병행되어야 하기 때문에 소재와 다이에 있어서 온도 경계조건을 부여함으로써 비등온 해석을 수행하였다

5. 단순 압축 성형시 각각 같은 성형 조건에서 등온 해석시의 소재 온도 분포와 비등온 해석시의 소재 온도 분포를 비교했을 때, 등온해석보다 비등온 해석시에 소재와 다이의 접촉 부위에서의 온도분포가 약간 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터 (ERC/NSDM)를 통한 한국과학기술재단 우수 연구센터의 지원에 의한 연구의 일부분입니다.

참고문헌

1. Laxmanan, V. and Flemings, M. C., "Deformation of Semi-Solid Sn-15 Pct Pb Alloy," Metallurgical Transactions A, Vol. 11A, pp. 1927-1932, 1980.
2. Turng, L. S. and Wang, K. K., "Rheological Behavior and Modeling of Semi-Solid Sn-15%Pb Alloy," Journal of Materials Science, Vol. 26, pp. 2173-2176, 1991.
3. Pinsky, D. A., Charreyron, P. O. and Flemings,

- M. C., "Compression of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates," Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, pp. 173-177, 1984.
4. Suéry, M. and Flemings, M. C., "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys," Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, pp. 1809-1819, 1982.
 5. Kumar, P., Martin, C. L. and Brown, S., "Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries," Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Tokyo, Japan, pp. 37-46, 1994.
 6. Bolmaro, R. E., Browning, R. V., Guerra, F. M. and Rollett, A. D., "Finite Element Method Simulations for Two-Phase Material Plastic Strains," Materials Science and Engineering A, Vol. 196, pp. 53-63, 1995.
 7. Toyoshima, S. and Takahashi, Y., "A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-Solid Materials," ISIJ International, Vol. 31, pp. 577-582, 1991.
 8. Toyoshima, S., "A FEM Simulation of Densification in Forming Process for Semi-Solid Material," Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Tokyo, Japan, pp. 47-62, 1994.
 9. Koç, M., Vazquez, V., Witulski, T. and Altan, T., "Application of the Finite Element Method to Predict Material Flow and Defects in the Semi-Solid Forging of A356 Aluminum Alloys," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, pp. 106-112, 1996.
 10. Kang, C. G. and Jung, H. K., "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modelling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1423-1445, 1999.
 11. Jung, H. K. and Kang, C. G., "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloy for Thixoforming," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, No. 11, pp. 2967-2977, 1999.
 12. Jung, H. K. and Kang, C. G., "Finite Element Thermal Analysis of Induction Heating Process in Hypoeutectic Al-Si Materials for Semi-Solid Forming," Proceedings of the 8th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Applications (PLASTICITY2000), Vancouver, Canada, pp. 240-242, 2000.
 13. Jung, H. K. and Kang, C. G., "Finite Element Numerical Simulation Modeling for Reheating Process of Semi-Solid Forming," Key Engineering Materials, Vol. 177-180, pp. 571-576, 2000.
 14. Shima, S. and Oyane, M., "Plasticity Theory for Porous Metals," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 18, pp. 285-291, 1976.
 15. Kang, C. G., Jung, K. D. and Jung, H. K., "Control of Liquid Segregation of Semi-Solid Aluminum Alloys during Intelligent Compression Test," Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (IPMM'99), Hawaii, USA, pp. 593-599, 1999.
 16. Kang, C. G. and Yoon, Y. H., "A Finite Element Analysis on the Upsetting Process of Semi-Solid Aluminum Materials," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 66, pp. 76-84, 1997.
 17. Kang, C. G. and Kim, Y. D., "A Thermal Elastic-Plastic Finite-Element Analysis to Roll-Life Prediction on the Twin Roll Strip Continuous Casting Process," Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 28B, pp. 1213-1225, 1997.
 18. Chen, C. C. and Kobayashi, S., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression," Applications of Numerical Methods to Forming Process, ASME, AMD, Vol. 28, pp. 163-174, 1978.

19. Kang, C. G., Jung, H. K. and Jung, K. W., "Thixoforming of Aluminum Component with Designed Die by Process Simulation," Proceedings of the Int. Symposium on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology (AFDM'99), Paradise Beach Hotel, Korea, pp. 83-88, 1999.
20. Jung, H. K. and Kang, C. G., "Effect of Alloying Element on the Mechanical Behavior and Superficial Defects in Thixoforged Components of Al-Si Alloys," Key Engineering Materials, Vol. 177-180, pp. 565-570, 2000.
21. 정 홍규, 강 충길, "Thixoforging 공정에 있어서 반응용 알루미늄 합금의 충전거동과 기계적 성질," 한국 주조 공학회지, 제19권, 제4호, pp. 330-340, 1999.
22. Kang, C. G., Kang, S. S. and Jung, H. K., "Influence of Process Parameters on the Defects in Thixoforming of Cast and Wrought Aluminum Alloys," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 3, pp. 1701-1706, 1999.
23. 강 충길, 김 남석, "임의 형상의 다이틀 이용한 반응용 단조공정의 유한요소 해석," 한국정밀공학회지, 제16권, 제9호, pp. 123-134, 1999.
24. Kim, N. S. and Kang, C. G., "An Investigation of Flow Characteristics Considering Effect of Viscosity Variation in Thixoforming Process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp. 237-246, 2000.
25. Jung, K. W., Kang, C. G. and Moon, Y. H., "Two-Phase Numerical Modeling for Rheology Forming Process of Aluminum Alloy and Its Experimental Investigation," Proceedings of Int. Conf. on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2000), Las Vegas, USA, in Press, 2000.