

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

반응용 단조에서 응고 현상을 고려한 가압유지 단계의 유한요소해석

최재찬*, 박형진**, 이병목**, 조해용***

Finite Element Analysis of Compression Holding Step Considering Solidification for Semi-Solid Forging

Jae Chan Choi*, Hyung Jin Park**, Byung Mok Lee**, Hae Yong Cho***

ABSTRACT

The technology of Semi-Solid Forging (SSF) has been actively developed to fabricate near-net-shape products using light and hardly formable materials. Generally, the SSF process is composed of slug heating, forming, compression holding and ejecting step. After forming step in SSF, the slug is compressed during a certain holding time in order to be completely filled in the die cavity and be accelerated in solidification rate. This paper presents the analysis of temperature, solid fraction and shrinkage at compression holding step for a cylindrical slug, then predicts the solidification time to obtain the final shaped part. Enthalpy-based finite element analysis is performed to solve the heat transfer problem considering phase change in solidification.

Key Words: Semi-Solid Forging(반응용 단조), Compression Holding Step(가압유지 단계), Solidification Time(응고 시간), Solid Fraction(고상률), Shrinkage(수축), Enthalpy Method(엔탈피법)

1. 서론

자동차 및 항공기 산업의 급속한 발전으로 인하여 고강도의 경량 부품(light product of high strength)에 대한 수요가 급증하고, 이와 관련한 새로운 가공법에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 기존의 경량 소재는 난가공성 소재이므로 제조 비용이 증가한다. 따라서 이러한 난가공성 소재의 성형성을 높이고, 고강도의 경량 부품을 정형(near-net-shape)으로 성형하기 위한 방법으로 반

응용 단조(semi-solid forging)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반응용 단조란 소재를 고상과 액상이 공존하는 영역으로 가열하여 구상화 조직(globular microstructure)으로 만든 후 성형하는 새로운 단조 기술이다. 반응용 단조를 가공 특성상 주조와 비교해 보면, 기공이나 편석과 같은 내부 결함이 없고 결정립이 미세한 조직을 가진 제품을 얻을 수 있고, 동시에 조직의 구상화로 인해 기계적 성질이 향상되며, 성형 재료의 온도가 상대적으로 낮으므로 생산 주기가 단축되고 다이의 수명이

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터.
** 부산대학교 대학원 기계설계공학과
*** 충북대학교 정밀기계공학과

길어지는 장점이 있다. 그리고 냉간이나 열간 단조와 비교해 보면, 성형 압력이 낮으므로 가공 설비의 소형화가 가능하며, 복잡한 형상을 가진 제품에 대하여 후가공으로 인한 가공 공정수를 줄일 수 있다.

반용융 단조의 세부 단계(step)는 소재의 가열(slug heating), 성형(forming), 가압유지 (compression holding), 이젝팅(ejecting)으로 구분할 수 있다.

반용융 단조에 대한 성형 해석으로는 Kang⁽¹⁾등이 응고 현상을 고려하여 업셋팅 공정에 관한 유한요소 해석을 하였다. Altan⁽²⁾등은 반용융 단조에서 접힘(folding)과 같은 제품 결함과 열전달 해석을 하여 소재와 다이의 온도 분포에 대해 상용 유한요소 코드를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 가압유지 단계에 관한 연구로서 Choi⁽³⁾ 등은 스퍼어 기어의 반용융 단조 실험에서 가압유지 시간이 성형성에 미치는 영향을 확인하였는데, 다이 온도 400 ℃, 가압유지 시간 10 초 일 때, 가장 양호한 제품을 얻을 수 있었다. Nicholas⁽⁴⁾등은 반용융 단조에서 성형 후, 소재를 일정 시간 가압유지 하므로써 소재 내부의 잔류 액상(residual liquid)의 수축으로 인하여 다이 내부에서 소재의 불완전한 충전(filling)을 제거할 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 반용융 단조 공정 중의 가압유지 단계에서 A356 재료에 대한 온도, 고상률, 수축량 그리고 충전 현상을 유한요소법으로 해석하여 최종 제품을 얻기 위한 가압유지 시간을 예측하고자 한다. 응고시 상변화를 수반하는 열전달 문제에서 잠열을 고려하는 방법으로는 온도 회복법(temperature recovery method)⁽⁵⁾, 등가비열법(equivalent specific heat method)⁽⁶⁾, 엔탈피법(enthalpy method)⁽⁷⁾ 등이 있는데, 잠열을 온도의 함수로 하여 온도-엔탈피 관계식으로부터 잠열엔탈피를 얻을 수 있는 엔탈피법을 이용하였다^(7,8).

2. 이론 해석

반용융 단조의 가압유지 단계에서 소재의 응고와 수축 그리고 충전 현상에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화하였다.

- 1) 반용융 단조에서는 고상과 액상의 분리를 방지하기 위하여 성형 속도를 매우 빠르게 하므로 성형 단계후의 소재와 다이의 온도는 균일하다.
- 2) 고상과 액상이 공존하는 영역에서 잠열 엔탈피는 온도에 대해 선형적이다.

- 3) 소재와 다이, 다이와 주위(surrounding) 사이의 열 전달은 표면에 수직이며 다이 표면의 열 방출은 자연 대류에 의해서만 생긴다.
 - 4) 소재와 다이 사이의 열전달 계수는 일정하다.
 - 5) 소재의 선팽창 계수는 고상과 액상이 공존하는 영역에서 일정하며 소재는 온도에 대해서 등방성 재료이다.
- 그리고 Fig.1은 반용융 단조에서 가압유지 단계의 유한요소해석을 하기 위한 소재와 다이의 수학적 모델이다.

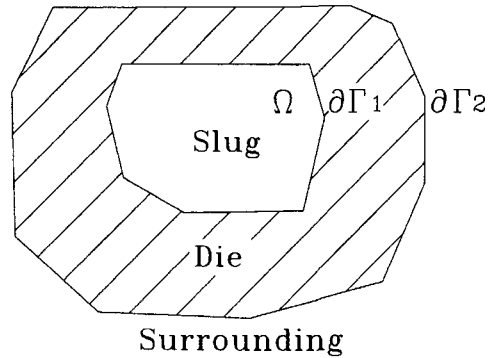


Fig. 1 Mathematical model of compression holding step for Semi-Solid Forging

2.1 열전달 유한요소 정식화

비정상 상태의 열전달 문제는 다음과 같은 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (k \bar{\nabla} T) + Q \quad (1)$$

주어진 지배방정식에 대해서 Galerkin 방법을 이용하여 다음과 같은 약분형(weak form)을 얻을 수 있다.

$$\left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j d\Omega \right] \frac{\partial H}{\partial t} + \left[\int_{\Omega} k \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \right) d\Omega \right] T - \int_{\Gamma} \phi_i \bar{q} \cdot \bar{n} d\Gamma = 0 \quad (2)$$

$$T(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(\bar{x}) T_i(t) \quad (3)$$

경계 조건 :

$$-k \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = h(T_{slug} - T_{die}) \quad , \Gamma_1 \quad (4)$$

$$q_n + q_c + q_r = h_{conv}(T_{die} - T_{sur}) \quad , \Gamma_2 \quad (5)$$

여기서 H 는 현열 엔탈피, K 는 소재 혹은 다이의 열전도 계수, n 는 소재 혹은 다이의 요소당 절점 개수, $\phi_i(\bar{x})$ 는 형상함수, h 는 소재와 다이 사이 열전달계수, q_n, q_c 그리고 q_r 은 주위로의 대류와 복사에 의한 열유동을 표현하며 h_{conv} 는 다이의 대류 열전달 계수, $T_i(t)$ 는 절점의 온도이다.

식(2)의 첫 번째 항은 상(phase) 변화시 잠열 에너지에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j d\Omega \right] \frac{\partial H}{\partial t} = \left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j \left(\rho c + \frac{\rho L}{T_i - T_s} \right) d\Omega \right] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, L 는 상변화시 발생하는 소재의 잠열, T_s 는 고상 온도, T_i 는 액상 온도이다.

식(2)에 대한 시간이산화(time discretization)를 위하여 θ 법을 이용하였고, 비제약적 안정성(unconditional stability)을 고려한 Crank-Nicolson법($\theta = 1/2$)을 채택하여 다음과 같은 식을 구하였다.

$$\bar{C} \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} + \bar{K} \frac{T^{n+1} + T^n}{2} + \bar{Q} = 0 \quad (7)$$

소재의 고상률 계산을 위해서는 Kiuch⁽⁹⁾등이 제안한 방정식을 사용하는 경우도 있는데, 고상과 액상기 공존하는 영역의 온도 구간이 좁은 A356과 같은 합금에 대해서 고상률 52% 이상에서는 실험치와 일치하지 않는 결과를 나타낸다⁽³⁾. 그리하여 Hirt⁽¹⁰⁾가 A356에 대해서 실험으로 제안한 값을 온도에 따라 선형 보간하여 사용하였고, Table 1에 그 값을 나타내었다.

Table 1 Temperature related to the solid fraction for A356⁽¹⁰⁾

Solid fraction (%)	Temp. (°C)	Solid fraction (%)	Temp. (°C)	Solid fraction (%)	Temp. (°C)
0	615.1	35	600.1	70	565.1
5	614.3	40	596.1	75	565.0
10	613.9	45	589.6	80	564.9
15	612.4	50	583.1	85	562.9
20	610.2	55	576.3	90	558.8
25	608.9	60	567.4	95	554.9
30	604.2	65	566.1	100	555.0

2.2 수축량 계산

축대칭 형상에 대하여 수축량은 소재의 열팽창 계수와 온도 차이를 이용하여 각 절점에 대해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} n'_r &= n_r - n_r \cdot \alpha \cdot \Delta T \\ n'_z &= n_z - n_z \cdot \alpha \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, α 는 소재의 선폽창 계수, ΔT 는 시간에 대한 소재의 온도차, n_r 과 n_z 는 반경 방향과 높이 방향에서의 절점 좌표값, n'_r 과 n'_z 는 각 방향에서 선폽창 계수와 온도차에 의해 소재가 축대칭에 대하여 수축한 절점 좌표값을 의미한다.

2.3 이론 해석의 검증

반응용 단조에서 소재와 다이의 온도 분포에 대한 본 연구의 유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 Altan⁽²⁾등이 제시한 디스크 형상의 제품에 대한 유한요소해석 결과와 비교하여 보았다. 검증에 사용된 A356 소재의 물성치와 고온용 합금 공구강인 AISI H13의 물성치는 Table 2에 나타내었고, Fig.2는 디스크 형상의 제품과 다이에 대한 치수를 나타내었다. 그리고 Fig.3은 Altan등이 해석한 다이와 소재의 온도 분포를 나타내고 있다.

Table 2 Properties and initial condition of slug and die

Specification	Value
Initial slug temperature(°C)	580
Initial die temperature(°C)	250
Emissivity of A356	0.1
Emissivity of AISI H13	0.6
Heat transfer coefficient (W/m ² K)	35000
Surrounding temperature(°C)	20

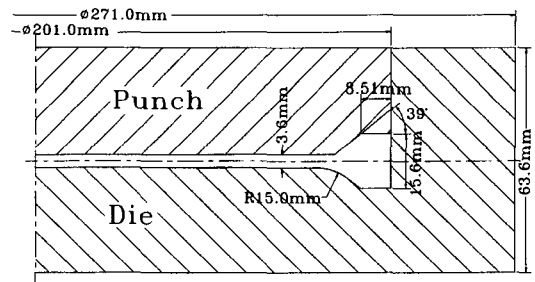


Fig. 2 Shape and dimensions for the disk shaped part

본 연구에서 수행한 다이와 소재의 온도 분포에 대한 해석 결과는 Fig.4에 나타내었다. 0.1 초 경과 후, 소재의 온도 분포를 Altan등이 해석한 결과와 비교하면, 다이와 접촉하는 경계부분의 550°C와 내부의 570°C와 580°C

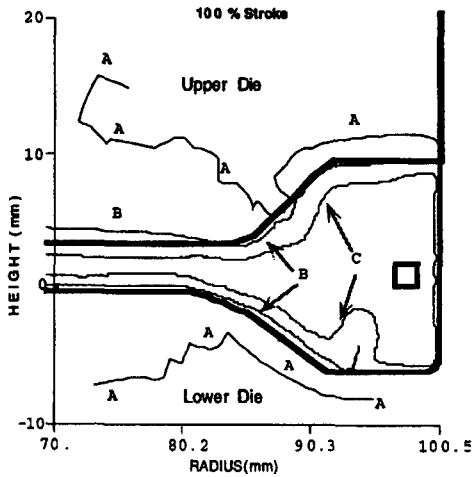


Fig.3 Distribution of temperature(°C) for die and slug of disk type⁽²⁾

Forging A:530, B:550, C:570, □:580, △:527
Die A:250, B:300, C:350, □:495, △:249

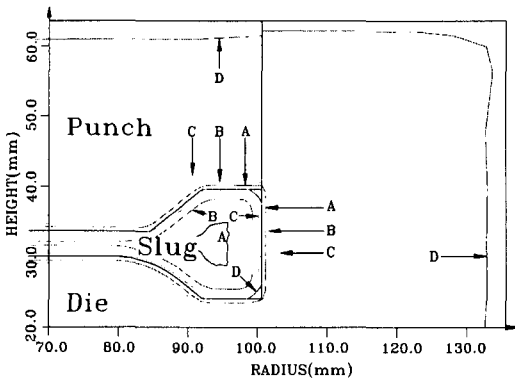


Fig.4 Distribution of temperature (°C) for die and slug of disk type by finite element analysis (elapsed time = 0.1 sec)

Forging A:580, B:570, C:550, D:530
Lower Die A:495, B:350, C:300, D:250
Upper Die A:495, B:350, C:300, D:250

영역이 유사함을 알 수 있다. 다이의 온도 분포는 소재와 접촉하는 경계에서는 550°C로 유사하였으나, 다이 내부의 온도 분포는 다소 차이가 남을 알 수 있는데 그것은 Altan 등의 논문에서 다이의 치수가 정의되지 않아서 본 논문에서 정의한 다이 치수와 차이를 인하여 발생하였다고 생각한다. 그리고 Fig.5는 그때의 소재에 대한 고상률 분포를 나타낸다.

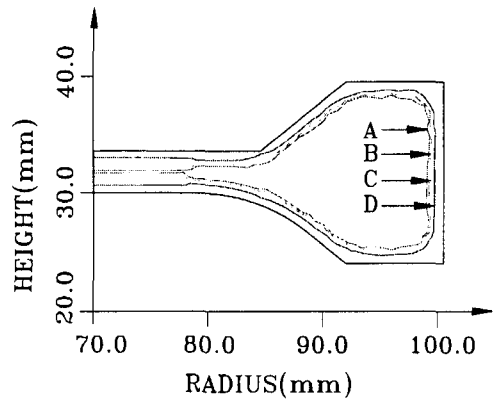


Fig.5 Distribution of solid fraction (%) for slug of disk type by finite element analysis (elapsed time = 0.1 sec)
A:60, B:70, C:80, D:90

3. 실린더형 제품에 대한 가압유지 단계의 유한요소해석

본 연구에서는 실린더형의 제품을 반응용 단조하는 데 있어서 가압유지 단계의 응고 현상을 규명하고자 하는데, 해석에 사용된 소재와 다이 그리고 펀치의 형상과 치수는 Fig.6에 나타내었다. 소재, 펀치 그리고 다이는 4각형 4절점 isoparametric 요소를 사용하였고, 소재와 다

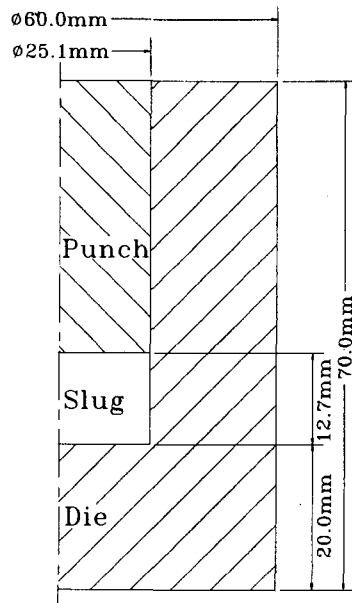


Fig.6 Shape and dimensions of slug, die and punch for finite element analysis

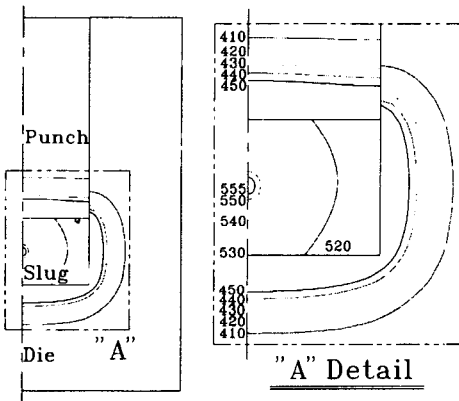
이, 소재와 펀치 그리고 다이와 펀치의 경계에서는 선형 요소를 사용하였다. 요소수는 소재가 992개, 펀치는 990 개 그리고 다이는 1208개이고, 절점수는 소재가 1056 개, 펀치는 1064개 그리고 다이는 1299개이다. 유한요소 해석을 위한 시간 증분은 0.005초로 하였으며 계산 시간은 IBM PC(CPU : pentium133, RAM : 16MB)를 이용하여 약 30분 정도 소요되었다.

반응용 단조의 가압유지 단계는 소재 내부의 잔류 액상이 응고하면서 수축하는 현상을 방지하고 제품을 원하는 형상과 치수로 만들기 위하여 필요한 공정이다. 그러므로 이에 대한 정성적이고 정량적인 해석이 필요한데, 열전달 해석 및 고상률 계산과 수축량 계산을 하여 가압유지 시

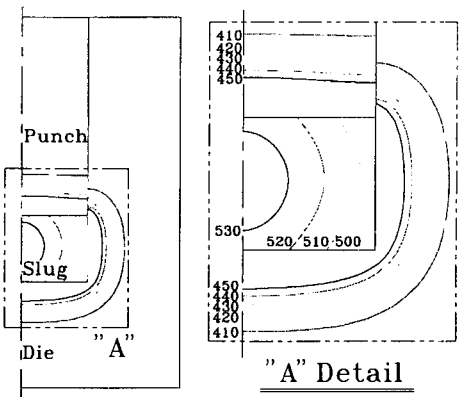
간을 예측하였다. 다이와 소재의 물성치는 Table 2와 같고, 소재의 잠열은 389000 J/kg, 열팽창 계수는 $23.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이며, 다이와 펀치의 온도는 400 $^{\circ}\text{C}$ 이고 소재의 온도는 580 $^{\circ}\text{C}$ 로 하였다.

3.1 열전달 및 고상률

해석 결과, 시간이 1.65 초 일 때 소재의 고상 영역이 전체에 대해 약 99 %이고, 1.7 초가 되어서 100 %가 되었다. Fig.7(a)는 1.65 초 일 때, 그리고 Fig.7(b)는 1.7 초 일 때의 소재와 다이 그리고 펀치의 온도 분포이다. 또한, Fig.8(a)와 Fig.8(b)는 각각 그때의 소재 내부의 고상률 분포를 나타낸다. Fig.7(a)에서는 소재의 중심부를 제외하고는 대부분의 영역에서 고상온도 555 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 분포를 나타내고, Fig.7(b)에서는 소재 전체의 온도가 고상온도 이하의 분포를 나타낸다. 이와 같은 온도 분포는 앞에서 언급한 바와 같이 고상률 분포의 계산에 직접적인 관련이 있으므로, 온도 분포를 통하여 고상률 분포를 예측할 수 있다.

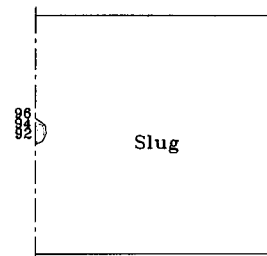


(a) Elapsed time = 1.65 sec

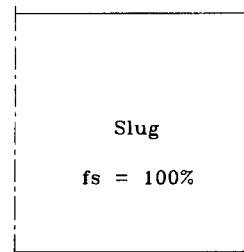


(b) Elapsed time = 1.70 sec

Fig.7 Distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) for slug, die and punch of cylindrical shape by finite element analysis



(a) Elapsed time = 1.65sec



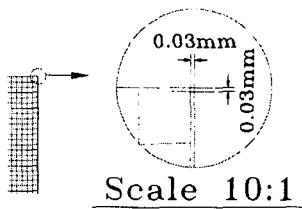
(b) Elapsed time = 1.70 sec

Fig.8 Distribution of solid fraction (%) for slug

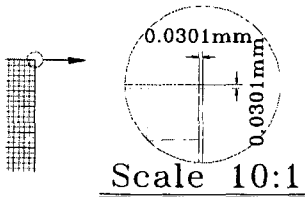
3.2 수축량

소재는 가압유지 단계에서 내부의 온도 차이에 의하여

수축하게 된다. Fig.9(a)는 1.65초 일 때, Fig.9(b)는 1.7 초 일 때 소재의 반경 방향과 높이 방향의 수축량을 나타낸다. 고상률이 100%가 되는 최종 단계에서 반경 방향으로의 수축량은 0.0301mm로서 가압유지 전에 비하여 0.240%가 감소하게 되고, 높이 방향의 수축량은 0.0301mm로서 0.237%가 감소하게 된다. 이러한 수축량은 전체의 치수 정밀도 면에는 크게 영향을 미치지 않지만, 반응용 단조 제품의 품질에는 영향을 미치리라고 생각된다. 또한 소재의 체적이 커질수록 이 양은 증가할 것이고 제품에 미치는 영향도 증가하므로, 가압유지 단계를 통하여 이러한 영향은 줄이는 것이 바람직함을 알 수 있다.



(a) Elapsed time = 1.65 sec



(b) Elapsed time = 1.70 sec

Fig.9 Shrinkage of slug of cylindrical shape

3.3 가압유지 시간

반응용 단조에서 소재를 다이에 충전시킨 후, 잔류 액상의 응고에 의한 수축으로 인하여 다이 내부에 불완전한 충전이 발생한다. 따라서 수축으로 인한 불완전한 충전을 없애기 위해 일정 시간의 가압유지가 필요하다. 즉, 응고에 의하여 수축된 소재는 가압유지에 의하여 다이에 재충전된다. 이러한 과정은 소재 내부의 잔류 액상이 완전히 없어질 때까지 계속 반복된다고 볼 수 있다.

Choi⁽³⁾ 등이 스피어 기어에 대한 반응용 단조의 성형성 실험에서 다이 온도 400 °C, 가압유지 시간이 10 초 일 때 가

장 양호한 제품을 얻을 수 있다고 제안하였듯이 가압유지 단계는 제품의 성형성에 영향을 미친다고 할 수 있다.

본 연구에서 해석한 실린더 형상의 제품은 1.7 초 후에 고상률이 100 %가 되어 잔류 액상에 의한 응고가 일어나지 않으므로 이 시간을 제품 성형 후의 가압유지 시간이라고 할 수 있다.

4. 결론

반응용 단조에서 응고 현상을 고려한 가압유지 단계의 유한요소해석을 하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발한 유한요소해석 프로그램을 이용하여 실린더 형상의 제품에 대한 온도, 고상률, 수축량 그리고 가압유지 시간을 정성적으로 또는 정량적으로 예측할 수 있다.
- (2) 반응용 단조에서 가압유지 단계는 성형 후 잔류 액상의 응고에 의한 수축으로 발생하는 불완전한 충전을 제거하기 위하여 필요하고, 소재의 고상률이 100% 될 때까지 가압유지 해야 함을 알 수 있다.
- (3) A356 재료를 사용하여 직경이 25.1mm이고 높이가 12.7mm인 실린더 형상의 제품을 반응용 단조로 성형할 때, 가압유지 시간은 1.7초임을 알 수 있다.
- (4) 소재와 펀치 그리고 소재와 다이의 접면열전달 계수는 소재, 펀치 그리고 다이의 온도와 가압력에 영향을 받으므로, 실험을 통하여 보정할 필요가 있다.

참고 문헌

1. 김기훈, 강충길, 김영도, "응고 현상을 고려한 Semi-Solid 재료의 압축공정에 관한 유한요소해석", 대한기계학회, 춘계학술대회논문집(A), pp.641-646, 1996.
2. Muammer Koc, Victor Vazquez, Thomas Witulski, Taylan Altan, "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 59, pp.106-112, 1996.
3. 최재찬, 조해용, 민규식, 박형진, 최중용, "난가공성 경량소재의 반응용 단조에 관한 기초 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 제7호, pp.29-35,

- 1996.
4. Norman Nicholas, Warren Haws, Larry Lane, and James Marder, "Semi-Solid Metal(SSM) formed small components of aluminum and aluminum-beryllium alloys", The 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.215-224, 1996.
 5. T. C. Tszeng, Y. T. Im, and S. Kobayshi, "Thermal Analysis of Solidification by the Temperature Recovery Method", International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol.29, no.1, pp.107-120, 1989
 6. 大中逸雄, "コンピュータ 伝熱 凝固解析入門, 鑄造プロセスへの 応用", 丸善株式會社, 1984
 7. Yin-Heng Chen, "Study of Solidification, Shrinkage and Natural Convection in Casting Processes", Ph. D. Dissertation, The Ohio state Univ., 1990.
 8. K. S. Chen, "Hydrothermomechanical Response Investigations Associated with Elastic Porous Media", Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, 1986.
 9. 木内學, 杉山澄雄, "半鎔融 · 半凝固金屬の固相率の測定法-1", 第42回 塑性加工聯合講演會, 日本塑性加工學會, pp.647-650, 1991.
 10. G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Tecnology 45, pp.359-364, 1994.