

유도가열을 고려한 반용융 재료의 성형공정에 관한 유한요소 시뮬레이션

A FE-simulation for forming process of semi-solid material considering induction heating

최 원도*, 고 대철(부산대 대학원), 김 병민, 최 재찬(부산대, 정밀정형 및 금형가공 연구센터)

Wondo Choi, Daechul Ko(Graduate School, Pusan National Univ.),
Byungmin Kim, Jaechan Choi(ERC for NSDM, Pusan National Univ.)

ABSTRACT

The objective of this study is to consider the induction heating process and to develop the finite element program to analyze the behaviour of semi-solid materials. The semi-solid material is assumed to be composed of solid region as rigid visco-plastic model and liquid region following Darcy's law. Induction heating process is analyzed using finite element software, ANSYS, and also the behaviour of a semi-solid material considering induction heating is analyzed using developed finite element program.

Key Words : Semi-solid material(반용융 재료), Induction heating(유도가열), Rigid visco-plastic model (강점소성 모델), Darcy's law(Darcy의 유동법칙), Solid fraction(고상률)

1. 서 론

반용융 가공(semi-solid forming)이란 소재를 고상성분과 액상성분이 공존하는 상태까지 가열하여 반용융 상태에서 성형하는 방법이다. 고가인 경량 소재의 제조비용을 절감하고 난가공재의 성형을 위해 원소재로부터 최종제품 형상에 가깝게 성형하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1,2).

반용융 가공은 변형저항이 낮아 작은 하중으로도 성형이 가능하며 기계설비의 소형화가 가능하다. 유동성이 양호하여 형상이 복잡한 난가공 부품의 제작이 용이하므로 단 공정으로 정형가공(net shape)이 가능하다. 또한 다이캐스팅이나 주조에 비해 구상화된 미세한 결정 조직을 균질하게 얻을 수 있으므로 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 급속용탕에 비해 성형온도가 낮기 때문에 급형 및 공구에 미치는 열적부하가 작고 수명을 향상시킬 수 있으며, 주조 등에 비해 에너지 절약 및 생산비용의 절감을 도모할 수 있다.

반용융 가공은 크게 다이캐비티의 예열 및 소재의 가열과정, 성형과정 그리고 가압 및 응고과정으로 나눌 수 있으며 각 과정은 일련의 작업으로 이루어진다. 따라서 초기 가열조건은 다른 과정에 직접적인 영향을 준다. 그러나 실험으로 이러한 영향을 정량적으로 파악하기 어려우므로 이에 대한 해석적인

연구의 확립이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 반용융 재료의 변형거동 및 하중을 예측하기 위하여 유한요소 프로그램을 개발하고 유도가열 해석과 성형해석을 연계하여 반용융 재료에 대한 해석절차를 정립하는 것이다. 가열 해석으로부터 소재의 온도분포와 초기 고상률분포를 구한 후 성형해석과 연계하여 일련의 작업에 대한 해석을 수행하고자 한다. 이를 위하여 가열해석은 유도가열 방식에 대해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석하였다. 온도의 함수로 정의되는 재질은 ANSYS Parametric Design Language를 도입하여 시간에 따라 변화하는 소재의 온도분포 및 고상률의 분포를 구하였다. 또한 강-점소성 거동을 하는 고상영역과 Darcy의 다공질체에 대한 유동법칙을 따르는 액상영역이 공존하는 반용융재료의 성형해석을 위한 유한요소 프로그램을 개발하고 가열해석과 연계하여 단순 압축공정을 해석하였다.

2. 해석 이론 및 검증

2.1 유도가열 공정의 해석절차

유도가열이란 고주파 전류가 흐르는 코일속에 있는 도전체가 전자유도 작용에 유기되는 와전류(eddy current)에 의해 급속히 가열되는 현상을 말한다. 유도가열은 소재의 균일 가열이 가능하며 임의의 가열

온도로 간단하게 조정할 수 있고 스케일이 생기지 않아 금형의 마모가 적다. 또한 생산관리가 자동으로 이루어질 수 있으며 열손실이 적어 대량생산에 적합하다. 이러한 이유로 종전의 증유로, 가스रो에 의한 가열방식 대신 유도가열이 일반적인 열처리방식이 되고 있다.

유도가열해석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 지배 방정식은 아래의 식 (1)~(3)과 같으며, ANSYS를 이용한 유도가열해석 절차는 Fig.1과 같다.

Maxwell 방정식 :

$$(\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_d\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (1)$$

생성열 관계식 :

$$\dot{q} = Re \left[\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_e\} \cdot \{J_e\}^* \right] \quad (2)$$

열전달 방정식 :

$$\nabla(k \nabla T) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

유도가열해석을 위해 먼저 온도의 함수로 주어지는 물성치를 정의하고 요소를 분할한다. Maxwell 방정식(1)에 의한 전자기장의 해석으로부터 유도된 와전류(induced eddy current)에 의해 발생하는 열 발생량을 식(2)와 같이 구할 수 있다. 전자기장 해석으로부터 구한 열공급량을 식(3)의 열전달 방정식을 이용하여 온도분포를 구한다. 변화된 온도에 의하여 소재의 물성치가 변화하므로 이를 고려하기 위하여 ANSYS Parametric Design Language를 이용하여 다시 피트백시퀀다⁽³⁾.

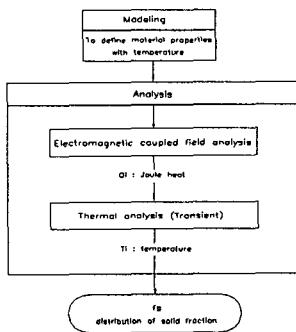


Fig.1 Analysis procedure for induction heating using ANSYS

2.2 반응용 재료의 상형 해석절차

압축성 재료에 대해 Kuhn⁽⁴⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며, 고상영역에 대한 평형방정식은 다음과

같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) = 0 \quad (4)$$

경계조건 :

$$v_{si} = \bar{v}_{si} \quad \text{on } S_v$$

$$(\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) n_j = \bar{t}_i \quad \text{on } S_F$$

또한 액상영역에 대한 지배 방정식은 다공질체를 통한 유체유동법칙인 Darcy의 유동법칙으로 표현할 수 있다.

Darcy의 유동방정식 :

$$u_L \cdot f_L = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$v_L \cdot f_L = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}$$

이때 연속방정식 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \bar{U}_s + \nabla \cdot (f_L \bar{U}_L) = 0 \quad (6)$$

경계조건 :

$$p = p_0 : \text{자유 표면}$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 : \text{다이와 접촉하는 면}$$

위의 식(5)와 식(6)은 유한요소 분할화 과정을 거치면 다음과 같은 유한요소 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{S1} & K_{S2} \\ K_{L1} & K_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_s \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s \\ Q_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 유도가열해석 절차의 검증

Fig.1에 제시한 유도가열해석 방법을 검증하기 위하여 Wang⁽⁵⁾의 결과와 비교해 보았다. 소재는 AISI 1080을 사용하였으며, 모델 및 경계조건은 Fig.2와 같다. Wang은 무한히 긴 실린더를 모델링하였으나, 본 연구에서는 이를 고려하기 위하여 L/D=8인 실린더를 모델링하였다.

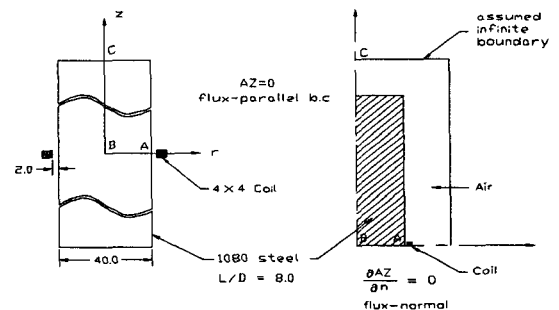


Fig.2 Model and boundary condition for induction heating

Fig.2에 나타낸 점 A, B, C에 대한 온도의 변화율

Fig.3에 Wang의 결과와 본 연구의 해석결과를 비교하여 나타내었다. 점 A, B에 대한 온도의 변화는 Wang의 결과와 본 연구의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 AISI 1080의 Curie's temperature인 725°C이후부터 다소 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이러한 차이는 Wang은 AISI 1080에 대해 다상(multi-phase)의 물성치를 실험으로 결정된 계수식으로 표현하였으나⁽⁶⁾, 본 연구에서는 평균적인 값⁽⁶⁾을 사용하였기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 점 C에 대한 온도변화의 차이는 Wang이 무한히 긴 실린더를 사용한 반면 본 연구에서는 이를 고려하기 위하여 L/D=8인 실린더를 모델링하였기 때문에 기인한 결과라고 생각된다.

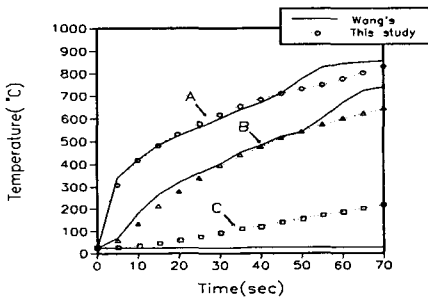


Fig.3 Temperature histories of three points

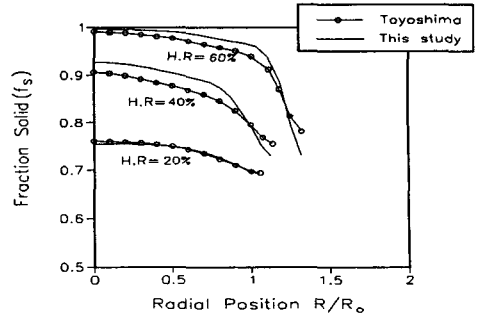
2.4 성형해석 절차의 검증

본 연구에서는 반응용 재료의 성형공정해석을 위하여 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 이를 Toyoshima⁽¹⁾의 결과와 비교하였다.

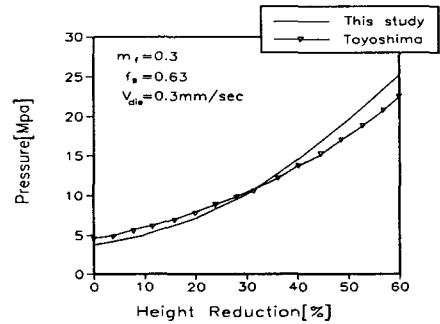
Toyoshima는 초기 고상율이 0.63($T=184^{\circ}\text{C}$)인 Sn-15%Pb에 다이속도가 0.1mm/sec와 0.3mm/sec일 때에 고상률의 분포 및 하중을 수치해석하였다. Fig.4는 Toyoshima의 해석 결과와 개발된 프로그램에 의한 해석결과를 비교한 것이다. Fig.4(a)는 실린더형 소재의 높이감소율(H.R)의 변화에 따라 중심에서 원주방향으로 고상률의 변화를 나타낸 것이며, Fig.4(b)는 높이 감소율이 변화에 대해 다이면에 작용하는 압력의 변화를 나타낸 것이다. Fig.4에서 Toyoshima와 본 연구의 결과가 다소 차이는 있지만 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig.4(a)와 (b)에 나타난 차이는 상호간의 마찰 모델의 차이에서 비롯된 것으로 생각된다.

3. 유도가열을 고려한 단순 압축공정의 해석

본 연구에서는 A356에 대해 유도가열 과정의 해석



(a) Solid fraction at radial position



(b) Load and stroke

Fig.4 Comparison between Toyoshima and this study

결과로부터 초기 고상율 분포를 구한 후, 이를 성형해석과 연계하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig.1에 제시한 절차에 따라 A356에 대한 유도가열 해석을 수행하였다. 해석에 필요한 A356 재료에 대한 물성치는 온도 함수로 정의하였다.

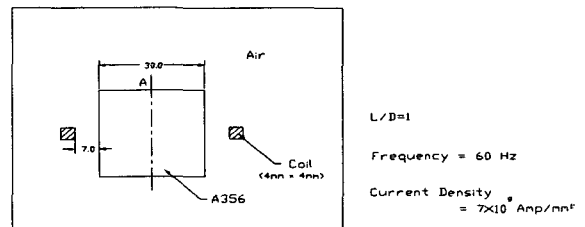


Fig.5 Model for induction heating

해석 모델은 Fig.5와 같으며, 코일에 걸리는 주파수와 전류밀도(current density)는 각각 60 Hz, 7×10^9 Amp/mm²이다. 대류에 의한 열손실을 고려하기 위하여 대류 열전달 계수를 30W/mm²로 하였다. 기준점 A의 온도가 고상률 70%에 도달하는 온도까지 유도가열한 후, 온도분포 및 고상률 분포를 구하였다. 단, 온도와 고상률의 관계는 선형으로 가정하였다.

단순 압축공정에 대하여 고상률이 70%로 균일한 경우와 가열과정을 거쳐 기준점(Fig.5의 A점)의 고상률이 70%에 도달한 경우에 대해 성형해석을 수행하였다. 또한 편치의 속도는 0.3mm/sec이며, 금형과 소재접촉면 사이의 마찰상수는 0.3으로 두었다. 기타 해석에 이용된 재료 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of A356

재료	A356
응력-변형률속도 관계식	$\bar{\sigma}_0 = 24.43 \bar{\epsilon}^{0.23}$
초기 투과율과 점성계수의 비	$k_0 / \mu_L = 6.95 \times 10^3$ [mm ² /Mpa·sec]
액상의 점성계수	$\mu_L = 0.17$ [cP]
투과율과 고상률 관계식	$k = k_0 \cdot f_L^2$
초기 고상률	$f_s = 0.7$
마찰 계수	$m_f = 0.3$

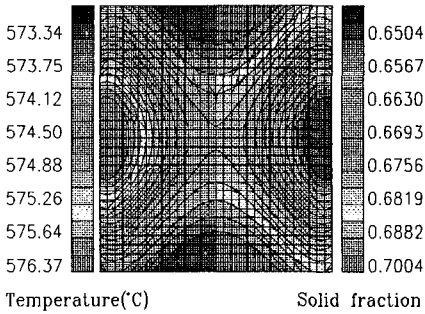


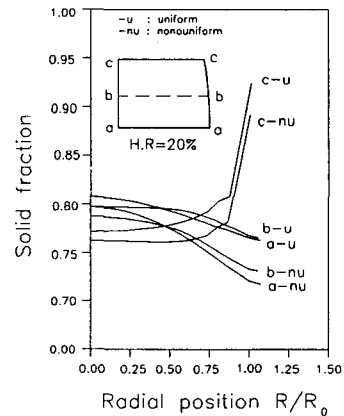
Fig.6 Distribution of temperature and solid fraction for A356 ($\phi=30$ mm, $h=30$ mm) after induction heating during 350 sec.

4 결과 및 고찰

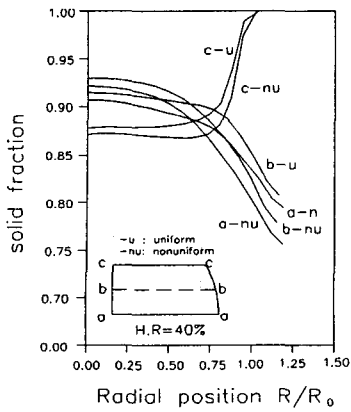
Fig.6은 350초간 유도가열 후 소재의 온도분포와 고상률의 분포를 나타낸 것이다. 이 때 온도 분포는 기준점이 약 573°C이고 벽면으로부터 약 5mm 주위에서 약 576°C로 최고온도를 보이고 있다. 또한 대후열손실이 고려되었으므로 시편의 모서리 부분에서는 온도가 낮음(edge effect)을 알 수 있다. 따라서 유도가열 후 온도분포는 불균일하게 되며, 이로부터 성형해석을 위한 초기 고상률의 분포를 구하였다.

Fig.7은 초기 고상률이 70%로 균일한 경우(uni-

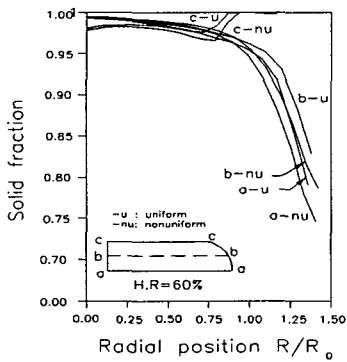
form)와 기준점의 고상률이 70%로 초기고상률이 불균일(nonuniform)하게 분포하는 경우에 대한 해석결과이다. Fig.7(a), (b), (c)는 각각 높이 감소율이 20%, 40%, 60%일 때 소재 단면에 대해 중심부를 a-a, 금형접촉부를 c-c, 중심부와 접촉부의 중간 위치를 b-b라 정하여 반경방향으로 고상률의 변화를 나타낸 것이다. Fig.7에서 고상률이 균일한 경우와 불균일한 경우 모두 높이감소율이 증가함에 따라 전체적으로 고상률이 증가함을 알 수 있으며, 소재 내부에서는 중심부 a-a의 고상률이 금형접촉부 c-c보다 높으나, 자유표면 부근에서는 금형접촉부인 c-c에서 가장 높게 나타났다. 따라서 단순 압축공정에서 변형이 심한 중심부와 금형접촉부 및 폴딩이 일어나는 부위에서 고상률의 높은 값이 분포하며 자유표면의 중심에서 고상률이 가장 낮음을 알 수 있다. 또한 초기 고상률이 균일한 경우와 불균일한 경우 각 위치에 대해 고상률분포의 차이는 변형의 초기 단계에서 뚜렷이 나타나며, 변형이 진행됨에 따라 이러한 차이는 감소한다. 그러나 두 경우의 각 위치에 대한 고상률의 편차는 폴딩이 일어나는 부위를 제외한 대부분의 영역에서 어느정도 유지됨을 알 수 있다. 높이감소율이 60%일 때 변형된 형상과 변형의 진행에 따른 응력-변형률 관계를 고상률이 균일한 경우와 불균일한 경우를 비교하여 Fig.8, 9에 나타내었다. Fig.8에서 자유면 중심부의 변형이 최대 0.80166mm정도 차이가 남을 볼 수 있으며, 응력-변형률 관계를 나타낸 Fig.9에서 동일한 변형률에 대한 응력의 차이가 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 위에서 언급한 결과로부터 가열과정에서 발생한 불균일한 고상률의 분포는 소재의 변형거동 및 성형하중과 밀접한 연관성이 있음을 볼 수 있다.



(a) Height Reduction = 20 %



(b) Height Reduction = 40 %



(c) Height Reduction = 60 %

Fig.7 Solid fraction at radial position R/R_0

5. 결론

이상의 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반응용 재료의 변형거동 및 하중을 예측하기 위한 유한요소 프로그램을 개발하고, 이를 유도가열 해석과 연계하여 반응용 재료에 대한 해석절차를 확립하였다.
2. 유도가열해석 후 고상률은 전자기파의 침투깊이, 대류열전달 등에 의하여 약 5%의 편차가 발생하였으며 불균일한 고상률 분포를 나타내었다.
3. 가열과정에서 발생한 불균일한 고상률 분포는 소재의 변형거동 및 성형하중과 밀접한 관련성이 있음을 볼 수 있었다.

참고 문헌

- (1) S.Toyoshima, "A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials", The 3rd INT'L Conf. On Semi-Solid

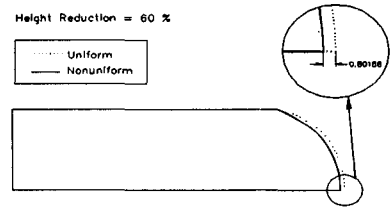


Fig.8 The comparison between uniform and nonuniform cases at H.R=60%.

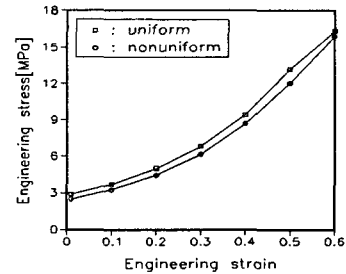


Fig.9 Engineering stress and strain

Processing of Alloys and Composites, pp.47-62, 1994

- (2) D.B.Spencer, R.Mehrabian, and M.C.Flemings, "Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Range", Metallurgical Transactions vol.3, pp.1925-1932, 1972
- (3) ANSYS Users's Manual, Revision 5.1
- (4) H.A.Kuhn and C.L.Downey, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", International Journal of Power Metallurgy Vol.7 No.1, pp.15-25, 1971
- (5) K.F.Wang, S.Chandrasekar, H.T.Y.Yang, "Finite Element Simulation of Induction Heat Treatment and Quenching of Steels", Transactions of NAMRI/SME, Vol.20, pp.83-90, 1992
- (6) Ph.Masse, B.Morel, Th.Breville, "A Finite Element Prediction Correction Scheme for Magneto-thermal Problem during Curie Transition", IEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-21, No.5, pp.1871-1876, 1985
- (7) Munir H.Nayfeh and Morton K.Brussel, "Electricity and Magnetism", JOHN WILEY & SONS, 1985
- (8) John Davies and Peter Simson, "Induction Heating Handbook", McGRAW-HILL, 1979