

반용융단조 공정의 유한요소해석에 관한 연구

이주영* 김낙수** 김중재***

*서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

***한라공업대학교 자동차공학과

A Study of Finite Element Analysis for Semi-Solid Forging

Ju-young Lee* Naksoo Kim** Joong-jae Kim***

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Sogang University

** Dept. of Mechanical Engineering, Sogang University

***Dept. of automobile Engineering, Halla Institute of Technology

Abstract

The optimal conditions were investigated in order to manufacture the light automotive body parts using the semi-solid forging process by the finite element analysis. Considering about macro-segregation cause to difference of relative velocity between solid phase and liquid phase, solidificational phenomenon cause to heat transfer from die and export of the latent heat, so solid fraction updating algorithm can be proposed. The rigid thermo-viscoplastic finite element analysis was carried out according to die temperature with proposed algorithm, so availability of forming part were understood. The finite element program can be used to the analysis of semi solid forging process.

Key Words 반용융단조(semi-solid forging), 고상율증분 알고리즘(solid fraction updating algorithm), 강-열점소성 유한요소법(rigid-thermoviscoplastic finite element analysis)

1. 서론

반용융가공은 고상결정립 사이를 액상성분이 채우고 있는 상태에서 압연, 압출 및 단조등과 같은 기존의 가공을 행하는 방법으로서, 액상성분의 존재로 인하여 낮은 성형하중을 나타낼 뿐만 아니라 재료의 유동성이 매우 좋기때문에 한 번의 공정으로써 최종형상 또는 준최종형상에 가까운 부품을 제조할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 이로 인하여 에너지가 절약되며 주조공정보다 소재의 온도가 낮기 때문에 금형의 열피로현상이 줄어들어 금형수명이 연장되는 등 많은 장점을 가지고 있는 차세대

가공법이라 할 수있다. 이와 같은 반응용가공의 장점으로 인하여 반응용가공에 관한 많은 연구결과가 보고되고 있다[1-4].

본 연구에서는 소재의 응고현상 및 소재-금형간의 열전달을 고려한 고상율증분 알고리즘(solid fraction updating algorithm)을 제안하였으며, 이와 더불어 문헌[1]에서 제안한 유동응력식을 사용하여 자동차부품으로 사용되는 ball-joint case의 반응용단조공정에 관한 강-열점소성(rigid-thermoviscoplastic) 유한요소해석을 수행하므로써, 반응용단조 공정해석에 관한 기초를 마련하고자 하였다.

2. 강-열점소성 유한요소해석

2.1 반응용재료의 유동응력식

금속재료의 경우, 열간상태에서는 대체적으로 변형률속도에 의존하는 점소성(viscoplastic)변형거동을 나타내게 되므로, 소재의 온도가 고상선온도(solidus temperature) 보다 높아서 고상(solid phase)과 액상(liquid phase)이 혼재하는 반응용상태의 경우에도 점소성거동을 나타낸다고 가정한 후, 김낙수등[1]이 고상율, 임계변형률 및 붕괴율의 함수의 형태로 제안한 반응용상태의 재료(이하 반응용재료, semi-solid material)에 관한 유동응력식을 사용하였으며, 그 형태는 표 1에 나타내었다. 한편, 소성가공 공정해석에 관한 유한요소관련 이론들은 Kobayashi[5] 등에 의해 자세히 기술되었으므로 여기서는 생략하기로 한다.

2.2 고상율증분 알고리즘

온도의 함수로 정의되는 고상율은 반응용재료의 변형거동을 지배하는 요인중의 하나이므로 이에 대한 정량적인 고려가 필요하다. 반응용재료내의 임의의 영역에서 고상율의 변화를 유발하게 되는 원인은 변형과 온도이력 두 가지로 구분할 수 있다. 즉, 압축변형을 받게되는 반응용재료는 고상과 액상의 상대속도 차이에 의하여 고-액상의 거시적인 분리현상이 발생하게 되며 그 결과 재료 내부의 고상율이 변하게 된다. 또한, 합금의 응고시 잠열(latent heat)방출현상에 의하여 고상율이 증가하게 된다.

고상과 액상의 상대속도 차이에 기인하는 고상율변화는 임의의 절점으로 대표되는 검사체적에 관하여 D'Arcy 법칙을 적용한 후 액상의 체적유량을 구하게 되면 그 절점에서의 고상율변화를 계산할 수 있다[1].

식(1)의 에너지보존 방정식을 풀이하므로써 잠열방출에 의한 소재의 고상율변화를 계산하였고 고상율과 온도의 함수관계는 식(2)[1]와 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

ρ : 밀도, C_p : 정압비열, T : 온도, t : 시간,

k : 열전도율, (x, y) : 좌표계, L : 잠열, f_s : 고상율

$$f_s = 237.49 - 1.2756 T + 2.2929 \times 10^{-3} T^2 + 1.3734 \times 10^{-6} T^3 \quad (2)$$

이상에서 서술한 내용을 바탕으로 강-열점소성 유한요소해석과정을 그림 1의 흐름도에 나타내었다.

2.3 해석조건

반응융단조 공정으로 부품을 성형함에 있어서 고려될 수 있는 공정변수로는 소재의 초기고상율(f_{s0}), 금형예열온도(T_m), 성형속도(V_{die}) 및 예비성형체의 크기등이 있으며, 본 연구에서는 금형예열온도가 부품성형의 가능성을 결정하는데 가장 큰 영향을 미칠것이라고 판단하였기 때문에 금형예열온도만을 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였다. 그림 2에 초기소재와 금형의 유한요소망을 나타내었다. 또한, 해석과정 중 요소망 재구성을 통하여 원활한 해석이 수행될 수 있도록 하였다.

해석에 사용된 소재는 구상조직을 갖는 AI2024합금이며 그 물성치, 해석에 사용된 구체적인 공정조건 및 값들을 표 2[6]와 표 3에 각각 나타내었다. 이때 소재의 초기조직이 구상이므로 초기붕괴율은 $S_0=0$ 의 값을 갖는다[1].

3. 해석결과 및 고찰

그림 3(a)~(c)는 펀치의 변위가 약 $u_p=16\text{mm}$ 일 때, 금형의 예열온도가 각각 $T_m=600^\circ\text{C}$, 550°C , 500°C 인 경우에 대하여 소재의 유동양상(flow-net)를 나타내는 그림으로써, 펀치와 접촉하는 부분의 재료들이 하부 금형면과 접촉하는 부분에 비하여 많은 변형을 받고 있음을 알 수 있다.

그림 4(a)~(c)는 펀치의 변위가 약 $U_p=16\text{mm}$ 일 때, 금형예열온도가 각각 $T_m=600^\circ\text{C}$, 550°C , 500°C 인 경우에 대하여 고상율 분포를 나타내는 그림이다. 전체적으로는, 펀치와 금형의 모서리 부분의 압력으로 인하여 액상이 소재의 중심쪽과 금형벽면쪽으로 유동하였고, 금형벽면으로의 열전달과 자유표면에서 공기로의 열전달로 인하여 내부보다 높은 고상율을 나타내었음을 알 수 있다. 즉, 금형벽면 및 공기와 접촉하는 부분에서 응고층형성이 진행됨을 알 수 있다. 그러므로, 금형의 온도가 소재의 초기고상율에 가까울수록 고-액상의 거시적인 분리현상으로 인하여 소재표면쪽에서의 액상증가와 더불어 소재표면쪽에서의 응고층형성이 지연되어 액상의 유출현상이 두드러지게 됨을 예측할 수 있다. 하지만, $T_m=500^\circ\text{C}$ 의 경우처럼, 금형예열온도가 너무 낮게 되면 성형완료 이전에 소재의 과다한 영역에 걸쳐 응고층이 형성되므로써, 성형에 실패할 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 성형도중 액상의 유출현상을 방지함과 동시에 양호한 성형을 하기 위해서는 금형예열온도가 소재의 고상선온도 부근의 값이어야 한다.

그림 5(a)~(c)는 그림 4(a)~(c)와 동일한 경우에 대하여 소재내부의 온도분포를 나타낸 것으로서, 소재의 고상율분포와 같은 형태를 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 액상유동 및 잠열방출을 고려한 열전달해석과 연계한 변형해석이 적합함을 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 연구를 통하여 고-액상의 거시적인 분리현상과 응고현상을 함께 고려한 고상율증분 알고리즘을 제안하였으며, ball-joint case의 반응융단조공정의 강-열점소

성 유한요소해석에 적용하였다. 개발된 프로그램은 반응용단조 공정해석에 유용하게 사용되어 질 수 있을 것이다.

향후, 완벽한 반응용단조 공정해석을 위해서는 본 연구결과의 3차원에서의 확장이 수행되어야 할 것이다.

후기 : 본 연구는 G7 차세대자동차기술 개발사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 김낙수, 김현영, 김중재, 경량차체설계기술, 제4회 G7차세대자동차기술 Workshop, 통상산업부, pp.446-451, 1996,
- [2] M. Kiuchi, S. Sugiyama, A New Method to Detect Solid Fractions of Mushy/Semi-Solid Metals and Alloys, Annals of the CIRP vol. 43,pp.271-274, 1994.
- [3] J. S. Gunasekera, Development of A Constitutive Model for Mushy(Semi-Solid) Materials, Proceedings of 3rd International Conference on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, pp.211-222, 1992.
- [4] M. Suery and M. C. Flemings, Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys, Metallurgical Trans., 13A, pp.1809-1819, 1982.
- [5] S. Kobayashi, S. I. Oh, and T. Altan, Metal Forming and Finite Element Method, Oxford University Press, pp.54-88, 1989.
- [6] American Society for Metals, Metals Handbook, 1985.

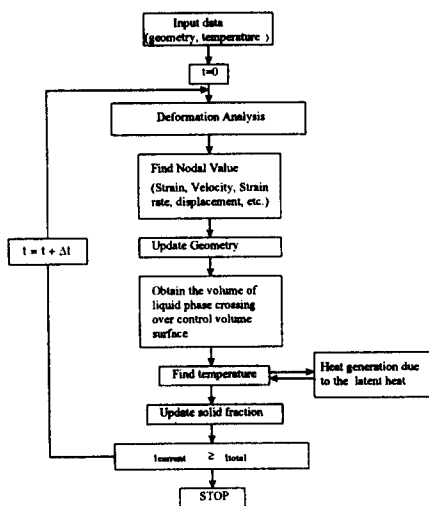


그림1. 유한요소 해석 절차

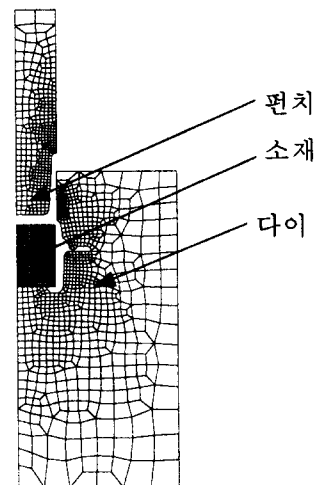


그림2. 초기소재와 금형의 유한요소망

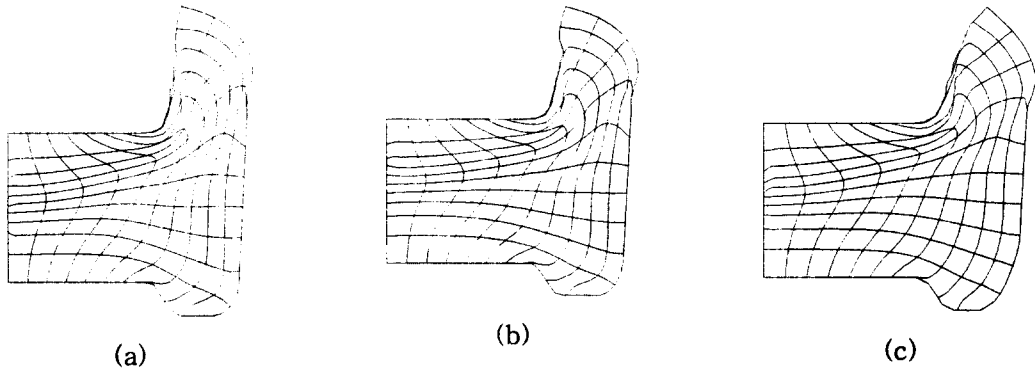


그림3. 소재의 변형양상 ($u_p=16\text{mm}$) (a) $T_m=873\text{K}$, (b) $T_m=823\text{K}$, (c) $T_m=773\text{K}$,

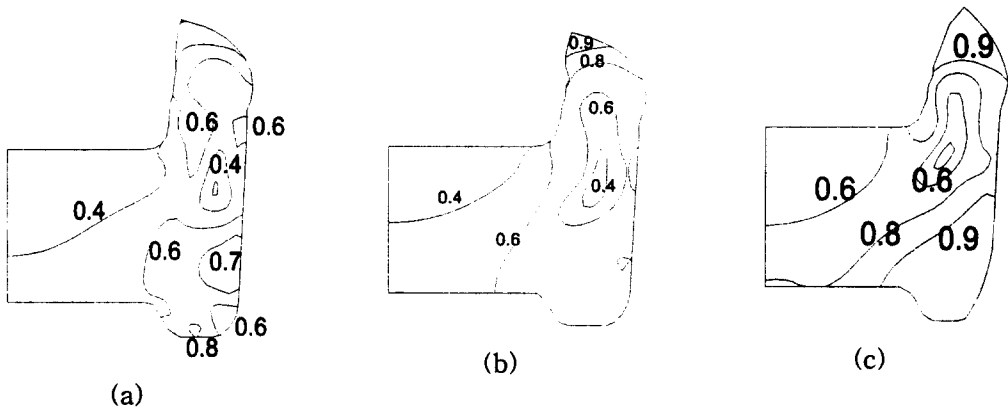


그림4. 금형온도에 따른 소재내의 고상율 분포($u_p=16\text{mm}$) (a) $T_m=873\text{K}$, (b) $T_m=823\text{K}$, (c) $T_m=773\text{K}$,

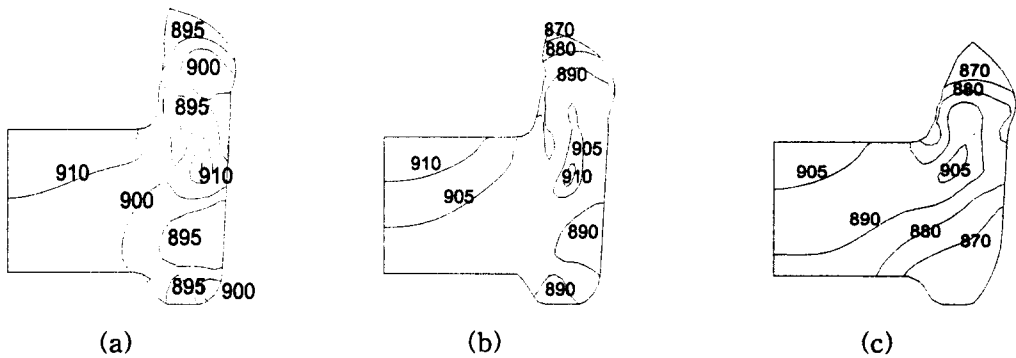


그림5. 금형온도에 따른 소재내의 온도 분포($u_p=16\text{mm}$) (a) $T_m=873\text{K}$, (b) $T_m=823\text{K}$, (c) $T_m=773\text{K}$,

표1. 수지상구조의 파괴와 고상율을 고려한 유동응력식[1].

flow stress, σ		coefficient	
$\epsilon < \epsilon_{cr}$	$\sigma = K \epsilon^n \exp(b) \dot{\epsilon}^m$	$f_s < f_{cr}$	$K = K_0 \exp[4.2(f_s - f_{cr})]$
$\epsilon \geq \epsilon_{cr}$	$\sigma = K \epsilon_{cr}^n \exp\left[b \frac{(\epsilon - \epsilon_{st})}{\epsilon_{cr} - \epsilon_{st}}\right] \dot{\epsilon}^m$	$f_s \geq f_{cr}$	$K = K_0 \frac{[1 - (\beta_L)^{\frac{2}{3}}]}{[1 - (\beta_L)^{\frac{2}{3}}]_{f_t = f_{cr}}}$

※ $b = 2.85(1 - S_0)$

표2. 소재, 다이 및 펀치의 열적 물성치

Conductivity of workpiece	1.463×10^2 [W/m K]
Conductivity of die and punch	3.3×10 [W/m K]
Latent heat of workpiece	3.8874×10^2 [J/kg]
Heat transfer coefficient of lubricant	4.18×10^2 [W/m ² K]
Heat transfer coefficient of the environment	4.18×10^{-3} [W/m ² K]
Density of Workpiece	2.77×10^{-3} [kg/m]
Density*Heat capacity of workpiece	3.7735×10^3 [J/m ³ K]
Density*Heat capacity of die and punch	3.7735×10^3 [J/m ³ K]
Radiation coef.*Boltzman constant	8.5×10^{-12} [W/m ² K ⁴]

표3. 유한요소해석 조건

Preform size	Diameter : 0.036m, Height : 0.032 m
Initial solid fraction(Initial Temperature)	$f_s = 0.25$ (T = 913k)
Die and punch temperatures(T _m)	773K, 823K, 873K