한국소성가공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집 pp. 334~336

상변태를 고려한 탄소성 유한요소 해석

이명규[1#] · 김성준[1] · 정우창[2]

Elasto-Plastic Finite Element Analysis in Consideration of Phase Transformations

M.G. Lee, S.J. Kim, W.C. Jeong

Abstract

An elastic-plasticity model during the austenitic decomposition was derived and implemented to incorporate the two important deformation behaviors observed during the phase transformations: the volumetric strain and transformation induced plasticity due to the temperature change and phase transformation. To obtain transformed phase volume fractions during cooling, the fourth order Runge-Kutta method was used to solve the Kirkaldy's phase kinetics model which is function of temperature, austenitic grain size and chemical composition. The volumetric strain was calculated by considering the densities of constituent phases, while the transformation induced plasticity was based on the micro-plasticity due to the volume mismatch between soft austenitic phase and other harder phases. The constitutive equations were implemented into the implicit finite element software and a simple boundary value problem was chosen as a model problem to validate the effect of transformation plasticity on the deformation behavior of steel under cooling from high temperature. It was preliminary concluded that the transformation plasticity plays a critical role in relaxing the developed stress during forming and thus reducing the magnitude of springback.

Key Words : Hot Press Forming (핫 프레스 포밍), Phase Transformation (상변태), Elastic-Plasticity (탄소성)

1. 서 론

최근 들어 일반강의 우수한 고온 성형성과 담금질에 의한 고강도 상변태 특성을 이용한 핫 프레스 포밍 (또는 프레스 퀜칭, 핫 포밍) 기술 (hot press forming)이 그 응용 범위를 빠른 속도로 넓혀 가고 있다 [1]. 핫 프레스 포밍은 기존의 고온 성형법 (warm Forming)과는 달리 모재를 900°C 이상으로 가열, 고온 성형과 동시에 담금질(quenching)을 유도하는 연속 공정으로 성형 전 모재의 강도를 성형 후 약 2~3배 이상 증가 시킬 수 있다. 핫 프레스 포밍에서 중요한 공정 변수 중의 하나가 금형에 의한 냉각 공정으로 원하는 강도를 얻기 위해서는 적절한 상변태를 유도하여야만 한다. 이를 위해서는 재료의 상변태 특성을 정확하게 이해하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 기존의 탄소성 구성식(constitutive equation)이 고려하지 않는 냉각에 의한 부피변형 및 상변태에 의한 소성변형을 고려하였다. 특히, 상변태 소성은 연한상(soft phase)인 오스테나이트와 냉각 중에 변태되는 강한 상들과의 부피불일치(volume mismatch)에 따라 발생한다는 Greenwood-Johnson 모델에 기초하였으며, 이를 탄소성 유한요소 해석에 적용하기 위하여 수식화하였다.

본 연구에서는 쉘(shell)요소를 적용한 유한요소 해석을 이용해 간단한 경계조건을 갖는 3점굽힘 시뮬레이션을 통해 상변태 소성이 핫 프레스 포밍된 판재에 미칠 수 있는 영향에 대해서 고찰하고자 한다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
2. 대구가톨릭대 기계자동차공학부
교신저자: 재료연구소, E-mail:mang92@kims.re.kr

2. 상변태를 고려한 구성방정식

본 연구에서는 고온에서의 완전 오스테나이트 상이 냉각에 의해 다른 상으로 변태할 때 발생하는 소성변형율 속도를 고려하였다. 최근 Leblond 등에 의해 제안된 2상에서의 상변태소성변형율을 np상으로 확장하는 연구가 진행되었으며 [2,3] 상변태에 의한 변형율 속도 ($\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{p,tr}}$)와 냉각 및 외부에서 가해지는 응력에 의한 변형률 속도 ($\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{p,c}}$)는 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{p,tr}} = -\frac{3}{\bar{\sigma}_1}\left(\sum_{i=2}^{np}\frac{X_i}{X}\varepsilon_i^{V,tr} - \varepsilon_1^{V,tr}\right)h\cdot\ln X\cdot\boldsymbol{\Sigma}\cdot\dot{X} \tag{1}$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{p,c}} = \frac{3(1-X)}{2\bar{\sigma}_1}\frac{g(X)}{E}\cdot\boldsymbol{\Sigma}\cdot\dot{\bar{\sigma}} + \frac{3(1-X)}{\bar{\sigma}_1}\left(\sum_{i=2}^{np}\frac{(\alpha_1-\alpha_i)X_i\ln X_i}{1-X_i}\right)\cdot\boldsymbol{\Sigma}\cdot\dot{T} \tag{2}$$

식(1)에서 X 는 변태된 총 부피분율, $\boldsymbol{\Sigma}$ 는 deviatoric응력, $\varepsilon_i^{V,tr}$ 및 X_i 는 i번째 상의 부피변형율 및 부피분율을, $\bar{\sigma}_1$ 는 오스테나이트의 유동응력을 나타낸다. 식(2)에서 α_i 는 i번째 상의 열팽창 계수를, T는 온도를, E는 탄성계수를 각각 나타낸다. 위 식들에서 h 및 g는 보정상수들이다[2]. 만약 외부에서 가해지는 응력이 충분히 커서 전체 상들을 소성변형 시킬 수 있다면 소성변형율 속도는 일반적인 탄소성문제와 같이 normality 규칙을 고려하여 해석할 수 있다.

상변태가 진행됨에 따라 각 변태 구간에서는 새로운 상들이 변태되게 되는데 본 연구에서 사용한 모델은 Kirkaldy [4]가 제한한 모델을 사용하였으며 다음과 같은 일반적인 식으로 나타내어진다.

$$\dot{\bar{X}}_i = \frac{2^{\frac{G-1}{2}}\cdot\Delta T^n\cdot\bar{X}_i^{\frac{2(1-\bar{X}_i)}{3}}\cdot(1-\bar{X}_i)^{\frac{2\bar{X}_i}{3}}\cdot D_i}{B_i} \tag{3}$$

위의 식에서 G는 ASTM 그레인사이즈 수, ΔT 는 undercooling 온도, n은 상에 따라 2에서 3의 값을 갖는 지수, $\bar{X}_i$ 는 i번째 상의 변태된 부피분율을 나타내며 D 와 B는 각각 상수들로 상에 따라서 화학조성, 활성화 에너지 등의 함수로 표현될 수 있다. 각 상들에 대한 구체적인 모델은 참고문헌 [5]에 잘 나타나 있다. 식 (3)는 상미분 방정식으로 ABAQUS를 이용한 유한요소 해석 시 매 time step에서 4차 Runge-Kutta 법을 이용하여 해를 구하였다. 상변태를 고려한 구성식을 평면응력 가정하에 user subroutine인 UMAT으로 구현하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 상변태를 고려한 유한요소 해석을 이용하여 상변태 소성이 재료의 탄소성 거동에 어떠한 영향을 미치는지 간단한 3점 굽힘 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 사용된 물성은 Table 1에 나타난 화학조성으로부터 실험 및 문헌 등으로부터 구하였다. Fig.1에서 실제 공정을 간략화 한 모델을 나타내었다. 먼저 실제 핫프레스 포밍에서의 가열 및 고온성형 공정을 모사하기 위해서 800°C 에서 일정한 변위로 굽힘을 가한 후 상온까지 냉각을 하며 마지막으로 판재와 접촉면 사이의 접촉을 제거함으로써 스프링백이 발생한다. 본 연구에서의 목적인 상변태에 의한 소성변형이 스프링백에 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위해서 상변태 소성을 임의로 무시하고 냉각에 의한 부피변형율만 고려한 경우와 고온성형시의 물성만을 고려한 일반적인 탄소성구성식을 이용한 경우를 비교하였다.

Table 1 Chemical compositions used in the simulations (unit: wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.2~0.25	≤0.25	≤1.3	≤0.025	≤0.002

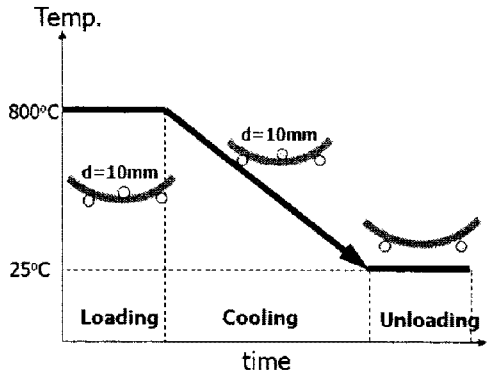

Fig. 1 Schematic illustration of the three point bending simulation

Fig. 2는 세가지 다른 구성식을 이용한 경우에 대하여 스프링백 후 판재의 형상을 보여준다. 그림에서 보듯이 냉각시 발생하는 상변태에 의한 추가적인 소성변형을 고려하였을 경우 스프링백이 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며, 만약 냉각 및 상변태에 의해 발생하는 부피변형율만 고려한다면 상당한 양은 아니지만 스프링백이 관찰

됨을 알 수 있다. 주목할 결과는 단순히 성형이 이루어질 때의 고온의 물성만을 고려한 유한요소 해석의 경우 상당한 양의 스프링백이 발생하며 이는 실제 핫프레스포밍 공정에서 관찰되는 무시할만한 스프링백이 단순히 고온에서의 응력-변형율 관계에서 낮은 유동응력 때문만이 아님을 보여준다.

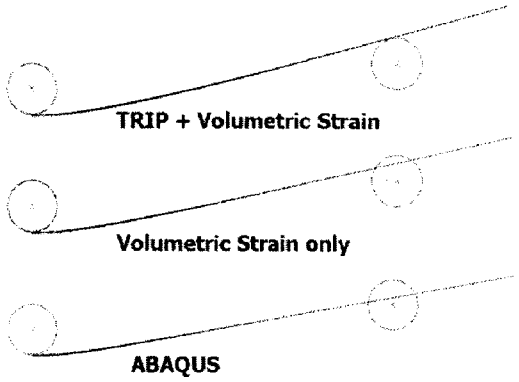

Fig. 2 Deformed sheet specimens after springback for three different constitutive equations.

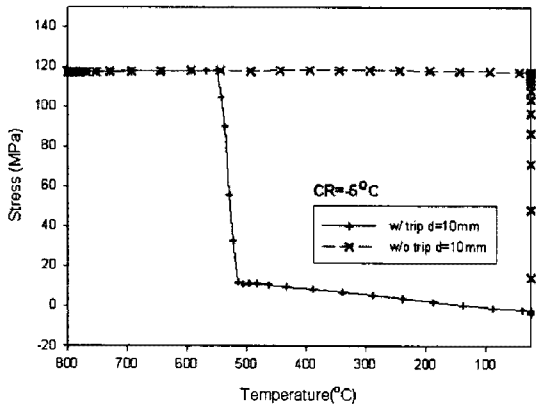

Fig. 3 Stress history during cooling for two different cases.

Fig.3에 판재의 중심대칭지점에서 Longitudinal 응력을 냉각온도에 따라 나타내었다. 그림에서 보이듯 냉각시의 상변태에 의한 소성변형을 고려할 경우 상변태가 발생하는 시점에서 응력이 급격히 떨어짐을 알 수 있으며 이는 상변태 소성변형율이 응력을 완화시키는 역할을 한다는 것을 보여준다. 이와 반대로 단순히 부피변형만을 고려한 경우에는 냉각중에 응력의 변화가 거의 없어 스프링백 직전의 잔류응력이 상당한 값을 유지하여 상변태 소성을 고려한 경우보다 큰 값의 스프링백을 나타내게 된다.

요약하면 본 연구에서는 간단한 경계조건을 가지는 유한요소 해석을 통하여 상변태 소성변형율과 냉각 중 부피변화에 의한 변형율이 실제 핫프레스포밍 공정에서 잔류응력을 완화시켜 스프링백을 현저히 줄이는 역할을 함을 알 수 있었다.

4. 결 론

(1) 철강재료의 냉각시 발생하는 상변태에 의한 소성변형과 부피변화를 고려하기 위한 구성식이 개발되어 이를 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하였다.

(2) 핫프레스포밍에서 일어나는 현상을 설명할 수 있는 간단한 3점굽힘해석을 제안하였으며, 이로부터 서로 다른 3가지의 구성식이 핫프레스포밍 시에 발생하는 스프링백에 미치는 영향을 고찰하였다. 이로부터 상변태소성변형 및 부피변형율이 핫프레스포밍시 응력의 완화에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 단순히 고온에서의 낮은 응력-변형율 관계가 스프링백을 감소시키지는 않는 것을 검증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 '차세대소재성형기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다

참 고 문 헌

[1]방원준, 남정열, 김성주, 김형섭, "Press Hardening 공정을 이용한 자동차 경량부품개발에 관한 연구", 대한금속재료학회, 제7회 철강기술심포지엄 논문집, (2000), PP.339~353

[2] J.B. Leblond, G. Mottet, J. Devaux, "A theortical and numerical approach to the plastic behavior of steels during phase transformations", J. Mech. Phys. Solids, Vol.34, (1986), PP.395-409.

[3] M.G. Lee, S.J. Kim, H.N. Han, W.C. Jeong "Implicit finite element formulations for multi-phase transformation in high carbon steel", Int. J. Plasticity, in press.

[4] J.S. Kirkaldy, "Prediction of alloy hardenability from thermodynamic and kinetic data", Metall. Mater. Trans. B. Vol.4, (1973), P.2327.

[5] P. Akerstrom, M Oldenburg, " Austenite decomposition during press hardening of a boron steel", J Mater Proc Tech. Vol.174, (2006), PP.399-406.