

용접에서 발생하는 변태소성을 고려한 용접공정의 유한요소 해석

Finite element analysis of welding process in consideration of transformation plasticity in welding

임 세 영*

* 한국과학기술원 기계공학과, sim@mail.kaist.ac.kr

ABSTRACT Finite element analysis of welding processes, which entail phase evolution, heat transfer and deformation, is considered in this paper. Attention focuses on numerical implementation of the thermo-elastic-plastic constitutive equation proposed by Leblond et al in consideration of the transformation plasticity. Based upon the multiplicative decomposition of deformation gradient, hyperelastic formulation is employed for efficient numerical integration, and the algorithmic consistent moduli for elastic-plastic deformations including transformation plasticity are obtained in the closed form. The convergence behavior of the present implementation is demonstrated via a couple of numerical example

1. 서 론

용접공정은 열전달과 변형 및 상변태까지 포함되어 있는 매우 복잡한 현상이다. 특히 생산 공정에서 중요하게 여기는 잔류응력을 정확히 계산하기 위해서는 변태소성을 고려해야 한다. Leblond(1989)는 상변태과정의 소성거동에 대한 구성방정식을 제안하였고 이는 용접해석용 상용코드인 'SYSWELD'에서 채용하고 있다.

본 연구에서는 상변태 과정을 고려한 체계적인 구성방정식의 유한요소 수식화를 목적으로 하며 이 과정에서 곱분해에 근거한 효율적인 초탄성 수식화를 적용하여 변태소성의 경우에 적용될 수 있는 정합접선계수를 계산하게 된다.

2. 유한요소 수식화

Leblond(1989a,b)[1,2]이 제안한 변태소성을 고려한 유동규칙은 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = (-) \frac{3\Delta\varepsilon_{1\rightarrow 2}}{\sigma_y(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{eff})} h\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right) \mathbf{s}(\ln z) z \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{3(1-z)}{2\sigma_y(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{eff})} \frac{g(z)}{E} \mathbf{s} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sigma_y(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{eff})} z(\ln z) \mathbf{s} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{eff} = (-) \frac{2\Delta\varepsilon_{1\rightarrow 2}}{1-z} h\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right) (\ln z) z \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{g(z)}{E} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{2(\alpha_1 - \alpha_2)z \ln z}{1-z} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2^{eff} = (-) \frac{z \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2^{eff}}{z} + \omega \frac{z \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{eff}}{z} \quad (3)$$

위의 식들을 거시적인 소성조건으로 다시 표현하면 변태소성에 해당하는 유동규칙이 항복조건이 제외된 고전적 소성의 경우와 같은 형태를 가지게 된다.

곱분해(multiplicative decomposition)와 초탄성 수식화에 근거한 유한요소 수식화는 변형률의 합분해(additive decomposition)를 기반으로 하는 hypoelasticity의 경우와 비교하여 두가지의 장점을 가지는 것으로 알려져 있다(Simo and Hughes, 1998)[3]. 저장에너지 함수와 항복조건이 주어지면 해당하는 유동규칙은 최대소실원리(the principle of maximum dissipation)로부터 유일하게 결정된다. 또한, 재료객관성(material objective)을 만족시키는 과정에서 회전중화(rotation neutralization)가 불필요하다.

반경회귀매핑을 이용하여 응력과 변형률을 갱신하고 Simo and Miehe(1992)[4]의 과정에 기초하여 변태소성의 적분과정을 유도하고 정합접선계수를 계산한다.

3. 수치 예제

먼저 3차원 8절점 요소 1개가 단축인장에 의해 변태 소성이 발생하는 경우를 계산해 보았다(Fig. 1). Fig. 2 는 변태소성의 경우 본 연구결과와 상용코드에 비해 우수함을 보이고 있다.

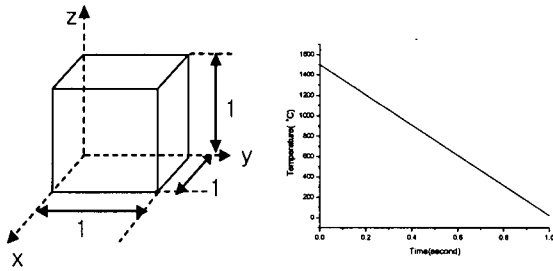


Fig. 1 Test model and temperature history

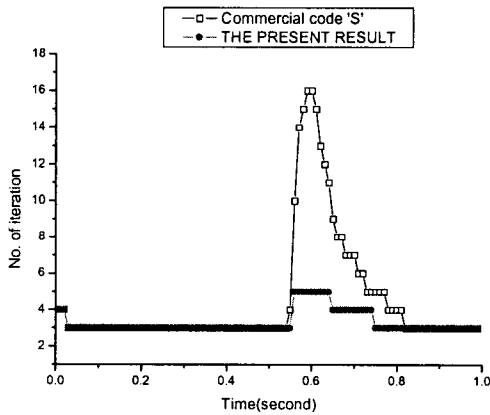


Fig. 2 The number of iterations for each time step

두 번째 수치예제는 Fig. 3과 같은 형태의 맞대기용접을 해석한 것으로 Fig. 4에 나타낸 point 'A'에서의 응력해석결과를 상용코드와 비교하여(Fig5, 6, 7) 본 연구결과가 매우 잘 일치함을 보이고 있다. 또한 Table 1에 나타난 평균계산횟수에서 본연구의 우수한 수렴성을 확인할 수 있다.

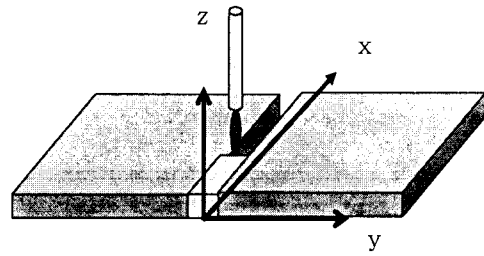


Fig. 3 Test butt-welding model

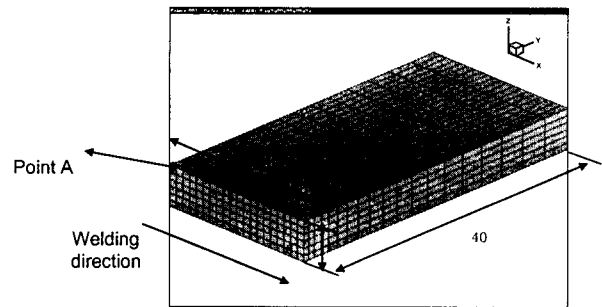


Fig. 4 The FE model of the butt-wwing process

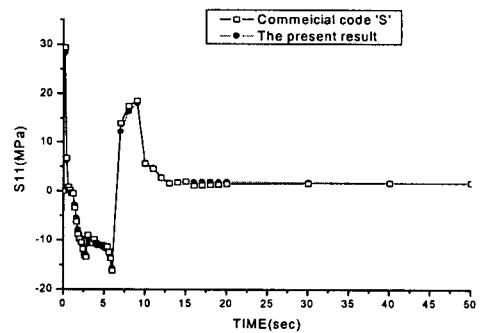


Fig. 5 The stress 11 component of point 'A'

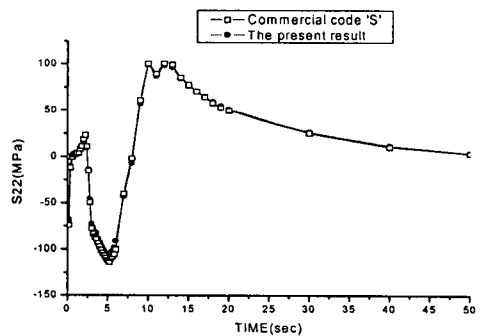


Fig. 6 The stress 22 component of point 'A'

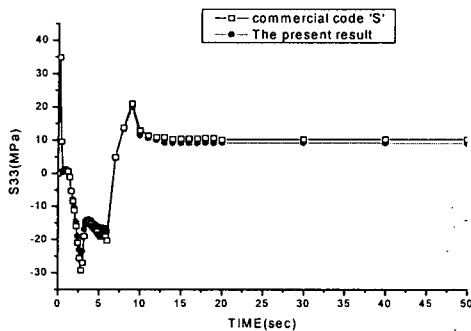


Fig. 7 The stress 33 component of point 'A'

Table 1 The average of each time step for the butt-welding process analysis

	The average iteration of each time step
The present result	3.8
commercial code 'S'	8.2

4. 결 론

본 연구에서는 용접시 발생하는 변태소성을 고려한 효율적이고 조직적인 열적-탄소성 구성방정식의 수식화를 제안하였다. 곱분해에 근거한 초탄성 수식화를 개발하였고 이를 이용하여 최대소성소실원리로부터 유일한 유동규칙을 얻을 수 있었다. 수렴속도를 향상시키기 위해 변태소성을 고려한 정합접선계수를 계산하였다. 마지막으로 수치예제들을 통해 수식화의 정확도 및 효율성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국책연구개발사업 중 공학용 해석소프트웨어 기술개발사업의 일환으로 수행되었음에 감사드립니다.

참고문헌

1. Leblond, J.B., 1989. "Mathematical modeling of transformation plasticity in steels I : case of ideal-plastic phases", Int. J.

Plasticity, 5, 511-572.

2. Leblond, J.B., 1989. "Mathematical modeling of transformation plasticity in steels II : coupling with strain hardening phenomena", Int. J. Plasticity, 5, 573-591.

3. Simo, J. C., Hughes, T. J. R., 1998, Computational inelasticity. Springer-Verlag, New York.

4. Simo, J. C., Miehe, J. C., 1992, "Associative coupled thermoplasticity at finite strains : Formulation, numerical analysis and implementation", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 98, 41-194.