

용접공정의 유한요소해석

최강혁[†] · 김주완* · 임세영**

Finite element analysis of welding processes

Kanghyouk Choi, Juwan Kim and Seyoung Im

Key Words : Welding(용접), FEM(유한요소법), Solid-shell(솔리드 셸)

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 examples. Several locking phenomena removed by Solid-shell element.

1. 서론

용접공정은 열진달과 변형 및 상변태까지 포함되어 있는 매우 복잡한 현상이다. 특히 생산 공정에서 중요하게 여기는 잔류응력을 정확히 계산하기 위해서는 변태소성을 고려해야 한다. 본 연구에서는 상변태 과정을 고려한 체계적인 구성 방정식의 유한요소 수식화를 목적으로 하며 이 과정에서 곱분해에 근거한 효율적인 초탄성 수식화를 적용하여 변태소성의 경우에 적용될 수 있는 정합접선계수를 계산하게 된다. 또한, 용접하중과 기계적하중이 동시에 적용되는 경우 보다 효과적인 해석을 위해 Solid-shell 요소를 적용한다.

2. 유한요소 수식화

2.1 용접현상의 유한요소 수식화

Leblond(1989a,b)[2,3]이 제안한 변태소성을 고려한 유동규칙은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}^p = (-) \frac{3\Delta\epsilon_{1\rightarrow 2}}{\sigma_1^p(\bar{\epsilon}_1^{eff})} h\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma^p}\right) \mathbf{s}(\ln z) \dot{z} + \frac{3(1-z)}{2\sigma_1^p(\bar{\epsilon}_1^{eff})} \frac{g(z)}{E} \mathbf{s} \dot{\bar{\sigma}} + \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sigma_1^p(\bar{\epsilon}_1^{eff})} z(\ln z) \mathbf{s} \dot{\theta} \quad (1)$$

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

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

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 합분

[†] KAIST 기계공학과
E-mail : khchoi76@hanmir.com
TEL : (042)869-3068 FAX : (042)869-3095

* 현대자동차 차량개발해석팀

** KAIST 기계공학과

해(additive decomposition)를 기반으로 하는 hypoelasticity 의 경우와 비교하여 두가지의 장점을 가지는 것으로 알려져 있다(Simo and Hughes, 1998)[6]. 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.

다음으로 반경회귀매핑을 이용하여 응력과 변형률을 갱신하고 Simo and Miehe(1992)[5]의 과정에 기초하여 변태소성의 적분과정을 유도하고 정합접선계수를 계산한다.

2.2 Solid-shell 요소의 적용

Solid-shell 의 형상은 일반적인 shell 과 마찬가지로 Eq.(4,5)과 같이 표현된다[7]

$$X(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{2} [(1 + \zeta) X_u(\xi, \eta) + (1 - \zeta) X_l(\xi, \eta)] \quad (4)$$

$$x(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{2} [(1 + \zeta) x_u(\xi, \eta) + (1 - \zeta) x_l(\xi, \eta)] \quad (5)$$

여기서 X_u, X_l 는 각각 요소의 윗면과 아랫면의 좌표를 의미하며 평면상의 형상함수로 표현된다. Eq.(4,5)에서 알 수 있듯이 solid-shell 요소는 요소의 두께방향으로는 항상 선형으로 근사하지만 평면상(in-plane)에서는 선형 혹은 그 이상의 고차식으로 근사가 가능하다.

또한 본 연구에서는 진단잠김현상과 두께잠김현상을 제거하기 위해 ANS 방법[1]과 EAS 방법[4]을 적용하였다.

3. 수치예제

3.1 맞대기용접해석 예제

본 예제는 Fig.1 과 같은 형태의 맞대기용접을 해석한 것으로 Fig.2 에 나타난 point 'A'에서의 응력해석결과를 상용코드와 비교하여(Figs 3, 4, 5) 본 연구결과가 매우 잘 일치함을 보이고 있다.

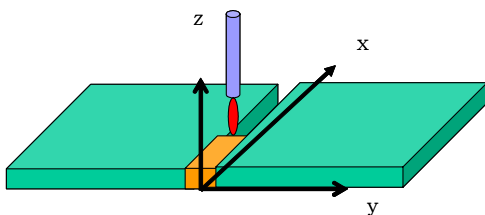


Fig. 1 Butt-welding model

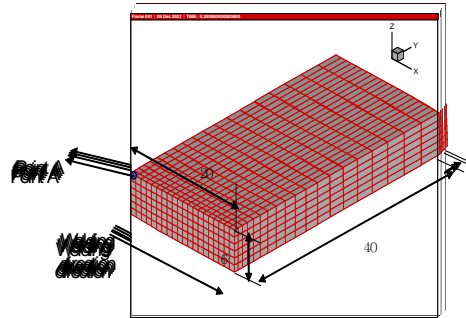


Fig. 2 FE model of butt-welding process

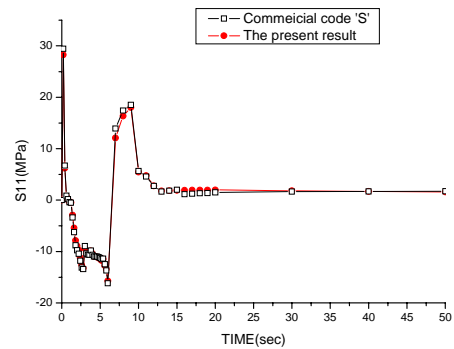


Fig. 3 The stress11 of point 'A'

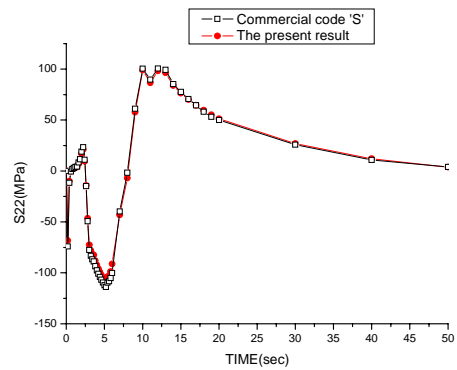


Fig. 4 The stress22 of point 'A'

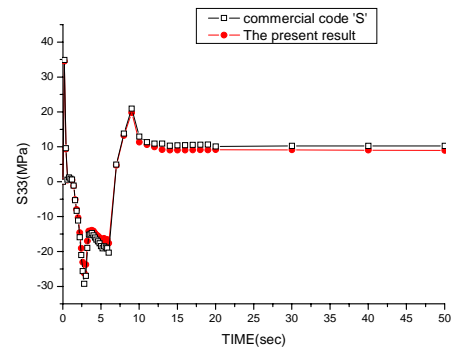


Fig. 5 The stress33 of point 'A'

3.2 외팔보 빔의 용접/굽힘 예제

다음과 같은 얇은 평판모델에 대해 기계적 하중과 열적 하중을 동시에 가하는 예제를 시험해 보았다. 사용한 요소는 107 개이며 전체 크기는 100*10*1 이며 변태소성을 고려한 탄소성 해석을 수행하였다. Fig. 6 는 본 예제의 요소망과 경계조건을 나타낸 것이다.

열원은 0~5 초까지 이동하며 가해지고 이후로는 대류조건에 의해 냉각되게 된다. Solid 요소를 사용한 경우와 solid-shell 요소를 사용한 경우를 비교해 보면 온도분포는 거의 차이를 보이지 않는다. 그러나 Fig. 7 에서와 같이 잠김현상에 의해 solid 요소의 경우 변형이 제대로 발생하지 못하는 반면 solid-shell 요소의 경우 잠김현상이 제거되어 변형이 잘 일어나고 이에 따라 결국 응력분포도 큰 차이를 보이고 있다.

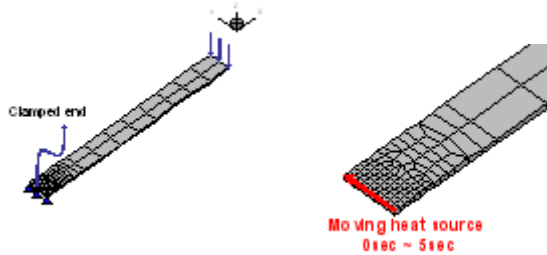


Fig. 6 FE model of welding/bending beam

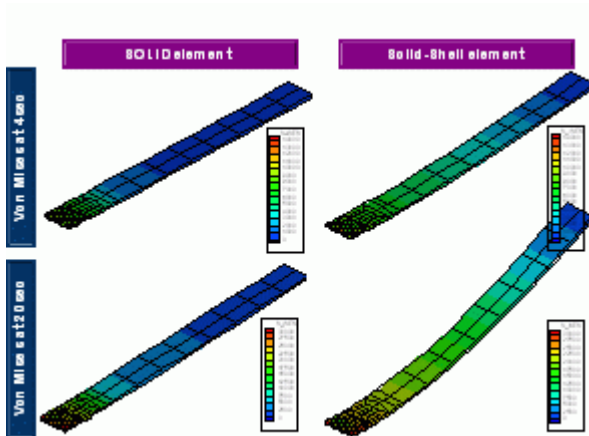


Fig. 7 Von-mises stress plot of solid & solid-shell element with deformed geometry

4. 결론

본 연구에서는 용접시 발생하는 변태소성을 고려한 효율적이고 조직적인 열적-탄소성 구성방정

식의 수식화를 제안하였다. 곱분해에 근거한 초탄성 수식화를 개발하였고 이를 이용하여 최대소성 소실원리로부터 유일한 유동규칙을 얻을 수 있었다. 수렴속도를 향상시키기 위해 변태소성을 고려한 정합접선계수를 계산하였다.

또한 Solid-shell 요소를 적용하여 보다 기계적인 하중까지 효율적으로 고려할 수 있게 하고 수치예제들을 통해 수식화의 정확도 및 효율성을 검증하였다.

후 기

본연구는 현대자동차 위탁과제 중 프레임 용접 변형 및 잔류응력 해석과제의 일환으로 수행되었음에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dvorkin, E.N., Bathe, K.J., 1989, "Continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis", *Engrg. Comput.* 1,77-88
- (2) Leblond, J.B., 1989a, "Mathematical modeling of transformation plasticity in steels I : case of ideal-plastic phases", *Int. J. Plasticity*, 5, 511-572.
- (3) Leblond, J.B., 1989b, "Mathematical modeling of transformation plasticity in steels II : coupling with strain hardening phenomena", *Int. J. Plasticity*, 5, 573-591.
- (4) Simo, J.C., Rifai, M.S., 1990, "A class of mixed assumed strain methods and the methods of incompatible modes", *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, 29, 1595-1638
- (5) 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.
- (6) Simo, J.C., Hughes, T. J. R., 1998, Computational inelasticity. *Springers-Verlag*, New York.
- (7) Sze, K.Y., Yao, L.Q., 2000, "A hybrid stress ANS solid-shell element and its generalization for smart structure modeling. Part I-solid-shell element formulation", *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, 48, 545-564