

병렬 처리를 이용한 용접 공정 유한 요소 해석

Finite element analysis of welding process by parallel computation

임 세영*, 김 주완*, 최 강혁*, 임 재혁*

* 한국과학기술원 기계공학과

ABSTRACT An implicit finite element implementation for Leblond's transformation plasticity constitutive equations, which are widely used in welded steel structure is proposed in the framework of parallel computing. The implementation is based upon the multiplicative decomposition of deformation gradient and hyper elastic formulation. We examine the efficiency of parallel computation for the finite element analysis of a welded structure using domain-wise multi-frontal solver.

1. 서 론

용접 구조물의 잔류응력 해석을 위하여 가장 많이 사용되는 상용 해석 코드인 SYSWELD는 다른 해석 코드는 달리 상변태에서 발생하는 변태 소성을 고려하여 잔류 응력을 해석 한다. 본 연구에서는 Leblond가 제안한 변태 소성 구성 방정식에 대해서 곱분해에 근거한 효율적인 초탄성 수식화를 적용하여 변태소성의 경우에 적용될 수 있는 정합접선계수를 유도하여 이용함으로써 기존의 SYSWELD에 비해서 효과적인 수렴성을 보여준다. 또한 실제 산업 현장의 구조물에 대해서 상변태를 고려하여 변형 및 응력 해석을 수행 할 시 상당히 긴 해석 시간을 요구하므로 병렬 처리를 통하여 해석하는 기법이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 기존의 멀티 프론탈 해법(parallel multi-frontal solver)을 수정 보완한 영역기반 프로탈 해법을 이용한 병렬 처리를 통해서 용접 구조물을 해석시의 속도 향상에 대하여 논하고자 한다.

2. 본 론

Leblond^{1,2)}이 제안한 변태소성을 고려한 유동규칙은 다음과 같다.

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

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

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

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 크게 두가지의 장점을 가진다[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)을 필요로 하지 않는 장점이 있다.

이러한 장점을 이용하고자 본 연구에서는 반경회귀맵핑을 이용하여 응력과 변형률을 갱신하고 Simo and Miehe⁴⁾의 과정에 기초하여 변태소성의 적분과정을 유도하고 정합접선계수를 계산하여 유한 요소 수식화를 구현하였다.

병렬처리를 이용한 용접 해석 문제를 위한 계산에서는 J.H. Kim and S.J. Kim⁵⁾가 제안한 영역 기반 멀티 프론탈(domain-wise multi-frontal) 방법을 도입하여 이 해법을 이용한 해석시 기존의 멀티 프론탈 해법과의 해석 속도 비교를 통해서 대형 용접 구조물의 해석을 위한 적용에 대한 적합성을 판단하고자 한다.

력해석결과를 상용코드와 비교하여(Fig5, 6, 7) 본 연구 결과가 매우 잘 일치함을 보이고 있다. 또한 Table 1에 나타난 평균계산횟수에서 본연구의 우수한 수렴성을 확인할 수 있다.

3. 수치 예제

본 연구의 해석의 검증과 수렴성의 비교를 위해 다음과 같은 테스트를 통해 기존의 상용코드의 SYSWELD와 비교하고자 한다. 먼저 3차원 8절점 요소 1개가 단축인장에 의해 변태소성이 발생하는 경우를 계산해 보았다(Fig. 1). Fig. 2는 변태소성의 경우 본 연구 결과의 수렴성이 상용코드에 비해 우수함을 보이고 있다.

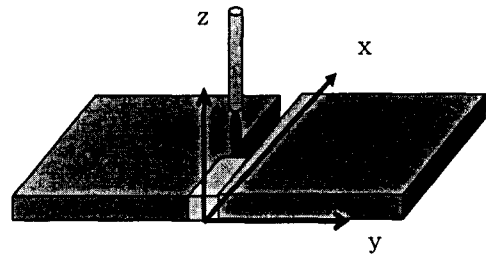


Fig. 3 Test butt-welding model

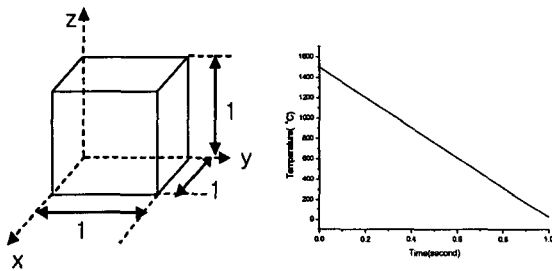


Fig. 1 Test model and temperature history

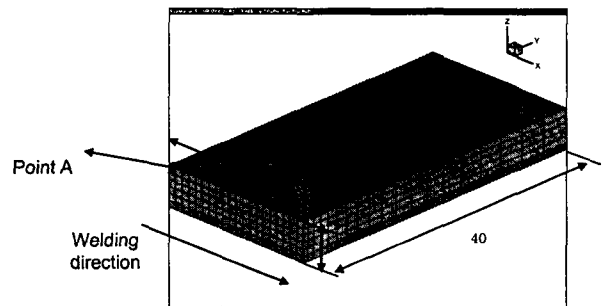


Fig. 4 The FE model of the butt-welding process

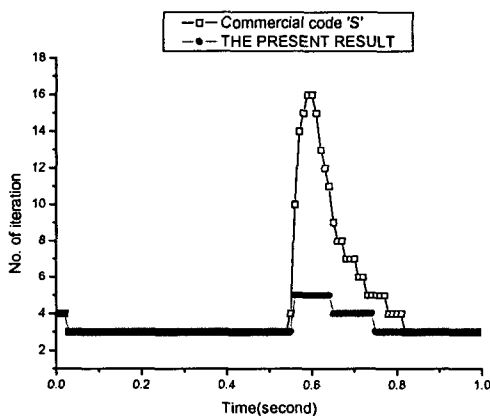


Fig. 2 The number of iterations for each time step

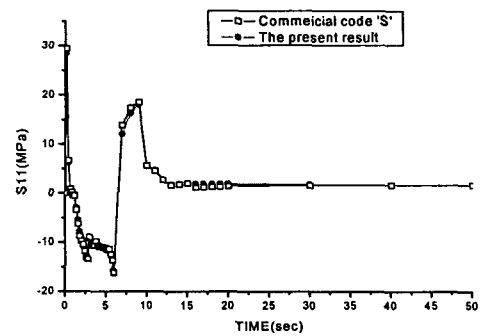
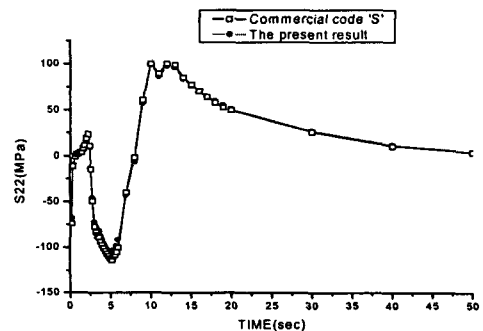


Fig. 5 The stress S11 component of point 'A'



두 번째 수치예제는 Fig. 3과 같은 형태의 맞대기용접을 해석한 것으로 Fig. 4에 나타난 point 'A'에서의 응

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

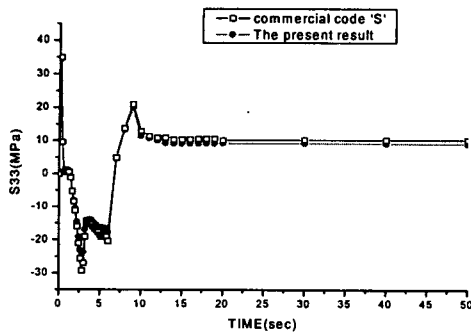


Fig. 7 The stress 33 component of point 'A'

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

Table 2는 기존의 프론탈 해법과 영역 기반 멀티 프론탈 해법을 이용하였을 시의 계산 속도를 비교한 것이다. 영역 기반 멀티 프론탈 해법의 경우 4배 이상의 속도 향상을 보여주고 있다. 병렬 처리를 이용한 속도 향상에 대한 결과는 아직 코드의 검증 과정이 끝나지 않아 결과를 얻을 수 없었음을 밝힌다.

Table 2 The computation time for domain-wise multi-frontal solver and frontal solver by single processor

	The computation time(sec)
Domain-wise multi-frontal solver	1120.4
Frontal solver	4812.5

4. 결 론

본 연구에서는 용접시 발생하는 변태소성을 고

려한 효율적이고 조직적인 열적-탄소성 구성방정식의 수식화를 제안하였다. 곱분해에 근거한 초탄성 수식화를 개발하였고 이를 이용하여 최대 소성소실원리로부터 유일한 유동규칙을 얻을 수 있었다. 수렴속도를 향상시키기 위해 변태소성을 고려한 정합접선계수를 계산하였다. 수치예제들을 통해 수식화의 정확도 및 효율성을 검증하였다. 기존의 프론탈 해법에 비해 영역 기반 프론탈 해법의 사용시 병렬 처리를 사용하지 않는 경우에도 매우 높은 효과를 보여줌으로서 병렬 처리에도 매우 높은 효과를 기대한다.

후 기

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

참고문헌

1. Leblond, J.B. : Mathematical modeling of transformation plasticity in steels I : case of ideal-plastic phases, *Int. J. Plasticity*, 5,(1989), 511-572.
2. Leblond, J.B. : Mathematical modeling of transformation plasticity in steels II : coupling with strain hardening phenomena, *Int. J. Plasticity*, 5, (1989), 573-591.
3. Simo, J. C., Hughes, T. J. R. : *Computational inelasticity*. Springer-Verlag, New York (1989)
4. Simo, J. C., Miehe, J. C : Associative coupled thermoplasticity at finite strains : Formulation, numerical analysis and implementation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 98, (1992), 41-194.
5. J.H. Kim and S.J. Kim : A multi-frontal solver combined with graph partitioners, *AIAA Journal*, 38, 8, (1999), 964-970.