

아크 용접 공정의 3차원 병렬처리 유한 요소 해석

Three dimensional finite element analysis of arc-welding processer via parallel computing

임 세영, 김 주완, 김 현규, 조 영삼

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 updated Lagrangian formulation. We examine the efficiency of parallel computation for the finite element analysis of a welded structure using 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. 이 프로그램은 Leblond가 제안한 변태 소성 구성 방정식의 복잡성으로 인해 외연적 적분법(explicit integration)을 사용한다. 이러한 외연적 적분법의 사용은 해석의 수렴성을 보장하지 못하는 문제점을 발생시킨다. 본 연구에서는 SYSWELD에서 사용한 Leblond 변태 소성 구성 방정식에 대해서 수렴성을 보장하는 하나의 내연적 적분 방법(implicit integration method)을 제시하고 검증하였다. 실제 산업 현장의 구조물에 대해서 상변태를 고려하여 변형 및 응력 해석을 수행할 시 상당히 긴 해석 시간을 요구하므로 병렬 처리를 통하여 해석하는 기법이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 멀티 프론탈 해법(parallel multi-frontal solver)를 이용한 병렬 처리를 통해서 용접 구조물을 해석시의 속도 향상에 대하여 논하였다.

2. 본론

SYSWELD에서 사용하는 변태 소성, 즉 항복응력에 도달하기 않아도 발생하는 소성에 대한 구성방정식은 1986년 Leblond[1]가 제안한 모델 사용한다. 이 모델은 강재(steel)의 야금학적 상(phase)을 크게 2개로 나누어 고려한다. 먼저 상대적으로 작은 항복응력을 가지는 오스테나이트(Austenite)를 상1 그리고 다른 상들(Martensite, pearlite 등)을 상2로 구분한다. 이 때 발생하는 소성 변형률은 [1]에서 나타나 있다. 본 연구에서는 updated Lagrangian 수식화를 이용하여 유한 요소 수식화를 하고, 응력-변형률 관계식(stress-strain relation)은 Simo[2]가 제안한 hyperelastoplastic 응력-변형률 관계식을 이용하여 Leblond의 변태 소성을 고려하였다. 응력 변화를 및 기타 상태 변수들에 대해서 Euler backward 방법으로 적분하여서 해석의 수렴성이 보장되도록 하였다. 자세한 응력을 개선(update stress)방법은 Simo [2]를 이용하였다. 제시한 적분방법에 대응하는 변태 소성 접선 계수(Consistent Tangent Modulus)는 구하였다.

본 연구에서는 제시한 적분법의 검증을 위하여 2차원 평면 변형률 상태를(plane strain state)가정한 맞대기(butt) 용접 구조물의 모델에 대하여 유한 요소 해석을 수행하였으며 그 결과를 SYSWELD를 이용한 해석 결과와 비교하였다. 재료의 물성치는 [3]에서 주어진 A508 c1.3 steel의 데이터를 이용하였고 하중 및 경계 조건은 단위 부피당 열입력은 50KW를 Gaussian 분포로 주었으며, 아크 효율은 0.8, 표면에서의 대류 경계 조건을 주었다.

Fig. 1은 용접후 잔류 Von-Mises 응력 분포를 나타낸다. (a)는 본 연구의 방법을 이용한 것이고 (b)는 SYSWELD를 이용한 결과이다. 두 결과는 매우 유사한 분포를 보여 주고 있으며 이를 통하여 본 연구에서 사용한 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

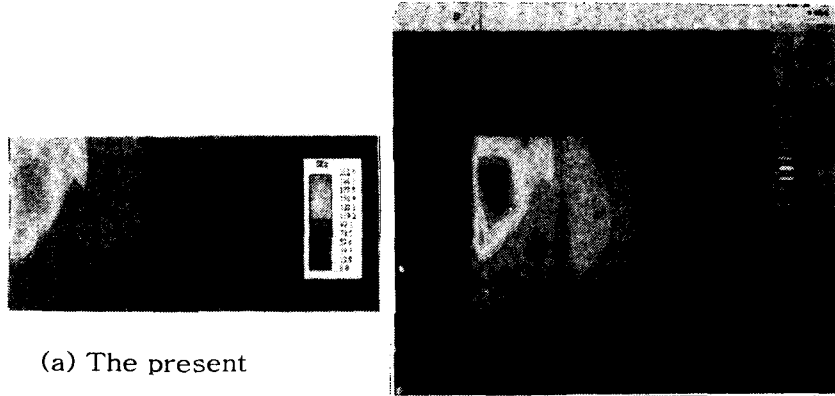


Fig. 1 Von-Mises stress distribution of the test example.

실제 산업 현장의 용접 구조물에 대해서 상변태를 고려해서 실시간 용접 해석을 수행하는 것은 너무나 많은 계산 시간을 요구하기 때문에 해석 수행 속도의 향상을 위해서 병렬 처리 해법을 도입할 필요가 있다.

본 연구에서는 병렬 처리 해석을 위해서 Iron[4]에 의해서 제한된 프론탈 해법에 기반한 멀티 프론탈 해법을 이용하였다. 프론탈 해법의 병렬화는 1986년 Duff[5]에 의해서 연구가 시작되었다. 프론탈 해법은 각각의 프로세서가 자신이 담당하는 해석 영역의 요소들의 강성행렬을 순차적으로 결합 시킴과 동시에 정적 응축(static condensation) 과정을 수행하여서 주어진 연립 방정식의 해를 구하는 방법이다. 이러한 특징은 가장 자연스럽게 병렬화를 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 멀티 프론탈 해법은 주어진 해석 영역을 이용하여 병렬 처리를 수행할 프로세서의 수만큼 영역 분할법을 이용하여 나누고 각각의 프로세서에서 동시에 프론탈 해법을 수행하는 방법이다. 본 연구에서 멀티 프론탈 해법을 MPI를 이용하여 병렬화 하였으며 본 연구실의 리눅스 클러스터(Linux cluster)[16X 펜티엄4 1.7GHz, 16X512 Mbyte memory]를 이용하였으며 해석을 수행하였다.

속도 향상 검증을 위해서 3차원 맞대기 용접 모델의 절반을 모델링하고 대칭 경계조건을 부여하여 해석하였다 주어진 용접 조건 및 경계조건은 앞의 2차원 문제에서와 같다. Fig. 2는 해석에 사용된 하나의 유한 요소 해석 모델이다. 3차원 선형 육면체 요소를 이용하여 해석을 수행하였으며 크게 3가지 해석 모델, 4X20X20, 4X40X40, 4X80X80로 모델하고 각각의 경우에 대해서 프로세서는 1, 4, 16개를 사용하여 해석을 수행하였다. 사용된 요소는 Fig. 4는 사용한 요소와 프로세서의 수에 대한 해석 수행 시간 향상(Speed Up)을 결과를 나타낸다. 요소의 개수가 작을 때는 네트워크를 통한 데이터 교환에 따른 속도 감소로 인해서 계산 속도 향상을 얻을 수 없지만 요소 수가 증가할수록 높은 효율의 계산 속도 증가를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

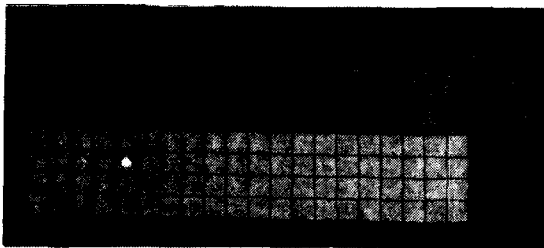


Fig. 2 해석에 사용된 유한 요소 모델

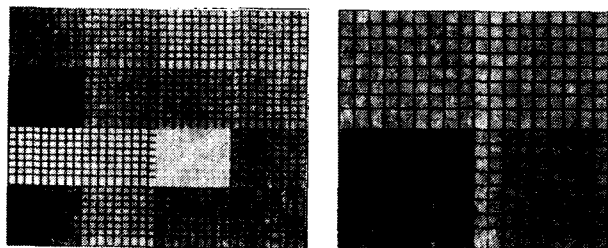


Fig. 3 4, 16 processor 해석에 사용된 영역 구분

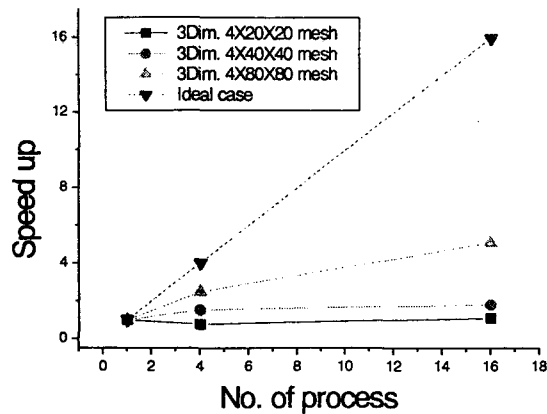


Fig. 4 병렬 처리를 통한 계산시 속도 향상

3. 결 론

본 연구에서는 SYSWELD를 이용하여 용접 구조물 잔류 응력 해석할 때 발생하는 수렴성 문제를 해결할 수 있는 하나의 변태 소성 구성방정식 적분법을 제시하였고 이 방법에 대응하는 탄소성 접선 계수를 구하였다. 실제 산업 현장 문제의 적용시 문제가 되는 해석 수행 시간을 줄이기 위하여 멀티 프론탈 해법을 이용한 병렬 처리 용접 구조물 해석 수행하였으며 해석 모델의 크기가 증가할 때 사용된 프로세서의 개수에 증가에 따른 계산 속도의 향상을 얻을 수 있음을 보였다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행되었음에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Leblond, J. B., Mottet G. and Devaux J. C. : A Theoretical and Numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations Part-II , Study of classical plasticity for ideal-plastic phases, J. Mech. Phys. Solids, 34-4(1986), pp411-432
2. Simo,J.C. : A Framework for Finite Strain Elastoplasticity Based on Maximum Plastic Dissipation and the Multiplicative Decomposition Part I, Continuum Formulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 66(1988), pp199-219
3. J.B. Leblond and J. Devaux : A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size ,Acta metall.,32(1984), pp137-146
4. B. Irons : A frontal solution of program for finite element analysis, Int. J. Num. Meth. Engrg. 2(1970), pp5-32
5. I.S. Duff : Parallel implementation of multifrontal schemes, Paralle Comput.,3(1986), pp 193-204