*2004년도 춘계 학술발표대회 발표논문, 2004년 5월, 제주*

# 용접공정 유한요소 해석의 병렬 처리 적용

# Application for parallel computation for finite element analysis of welding processes

**임세영*, 김주완**, 최강혁*****
* KAIST 기계공학과 교수
** KAIST 기계공학과 연수연구원
*** KAIST 기계공학과 박사과정

**ABSTRACT** A parallel multi-frontal solver is developed for finite element analysis of an arc-welding process, which entails phase evolution, heat transfer,and deformations of structure. We verify the code via comparison to a commercial code,SYSWELD. Attention is focused on the implementation of the parallel solver using MPI library, on the speedup by parallel computation, and on the effectiveness of the solver in welding application

## 1. 서 론

산업 현장의 구조물에 대해서 상변태를 고려하여 변형 및 응력 해석을 수행할 시 상당히 긴 해석 시간을 요구한다. 이러한 과다한 해석 시간에 대한 대응방법으로 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

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 Leblond[1,2]가 제안한 변태 소성 구성 방정식에 대해서 곱분해에 근거한 효율적인 초탄성 수식화를 적용하여 변태소성의 경우에 적용될 수 있는 정합접선계수를 유도하고 이용함으로서 기존의 SYSWELD에 비해서 효과적인 수렴성을 보여준는 해석 코드를 개발하였으며, 이 해석 코드에 대해서 병렬 처리 코드로 확장하고자 한다. 먼저, Leblond[1,2]이 제안한 변태소성을 고려한 소성 유동에 대한 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} = (-)\frac{3\Delta\varepsilon^{th}_{1\to 2}}{\sigma^{y}_{1}\left(\bar{\varepsilon}^{eff}_{1}\right)} h\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma^{y}}\right)\mathbf{s}(\ln z)\dot{z} + \frac{3(1-z)}{2\sigma^{y}_{1}\left(\varepsilon^{eff}_{1}\right)}\frac{g(z)}{E}\mathbf{s}\,\dot{\bar{\sigma}} + \frac{3(\alpha_1-\alpha_2)}{\sigma^{y}_{1}\left(\varepsilon^{eff}_{1}\right)} z(\ln z)\mathbf{s}\,\dot{\theta} \quad (1)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{eff}_{1} = (-)\frac{2\Delta\varepsilon^{th}_{1\to 2}}{1-z} h\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma^{y}}\right)(\ln z)\dot{z} + \frac{g(z)}{E}\dot{\bar{\sigma}} + \frac{2(\alpha_1-\alpha_2)z\ln z}{1-z}\dot{\theta} \quad (2)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{eff}_{2} = (-)\frac{\dot{z}}{z}\bar{\varepsilon}^{eff}_{2} + \omega\frac{\dot{z}}{z}\bar{\varepsilon}^{eff}_{1} \quad (3)$$

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 Miehe[4]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. Kim[5] 가 제안한 영역 기반 멀티 프론탈(domain-wise multi-frontal) 방법을 도입하여 이 해법을 이용한 해석시 기존의 멀티 프론탈 해법과의 해속 속도 비교를 통해서 대형 용접 구조물의 해석을 위한 적용에 대한 적합성을 판단하고자 한다.

## 3. 수치 예제

개발된 해석 코드의 검증을 유한 간단한 맞대기-용접 공정에 대해서 2280개의 8절점 육면체 요소를 사용하여 해석한 Von-Mises 응력 결과(용접 시작 후 600초 경과)를 Fig.1 과 Fig2.를 통하여 비교하였다. 두 결과가 매우 잘 일치함을 보여주고 있으며, 이를 통하여 본 해석 코드의 정확성을 검증 하였다.

병렬 처리는 Linux 기반의 16개의1.7GHz 프로세서와 각 노드당 512 Mbyte memory를 가지고 있는 PC-클러스터 시스템을 이용하여 수행하였다. 사용된 요소의 개수는 각각 $4\times20\times20$ (두께 방향 요소수 × 길이 방향 요소수 × 폭), $4\times40\times40$ and $4\times80\times80$이며 균일한 모양을 가진 요소로 해석 격자를 구성하였으며, 테스트에서 사용한 프로세서 수는 1, 2, 4, 8, 16개이다. Fig. 3은 Metis-4.0을 이용하여 16개의 프로 세서를 사용하였을 때의 분할된 해석 영역을 보여주고 있다. 병렬 처리에 의한 속도 향상(The speedup by parallel computation)은 다음과 같이 정의된다.

$$Speedup = \frac{computation\ \ time\ \ by\ \ multi-processors}{computation\ \ by\ \ single\ \ processor}$$

Fig. 4는 각각의 해석 모델에 대한 속도 향상을 보여준다. 해석 모델의 크기가 작은 경우는 네트웍을 통한 데이터의 교환 시간이 차지 하는 비중이 순수 계산 시간에 비해 커서 해석 속도 향상이 떨어지지만, 모델의 사이즈가 커질 수록 매우 좋은 해석 수행 속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

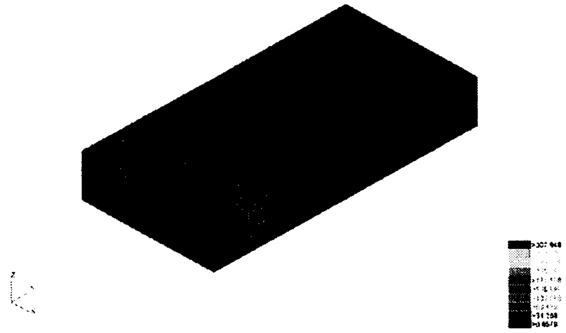


Fig. 1. The distribution of von-Mises stress of the present result at time=600(seconds).

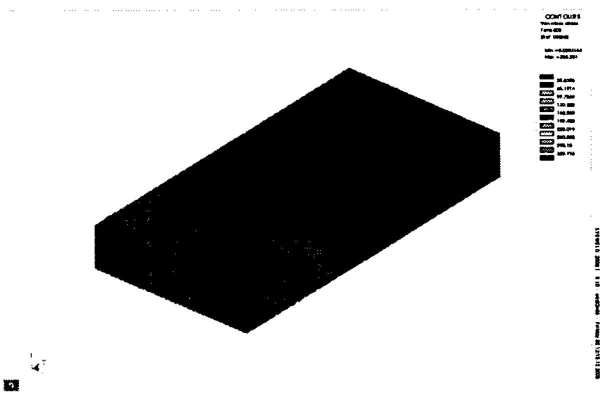


Fig. 2. The distribution of von-Mises of SYSWELD at time=600(seconds).

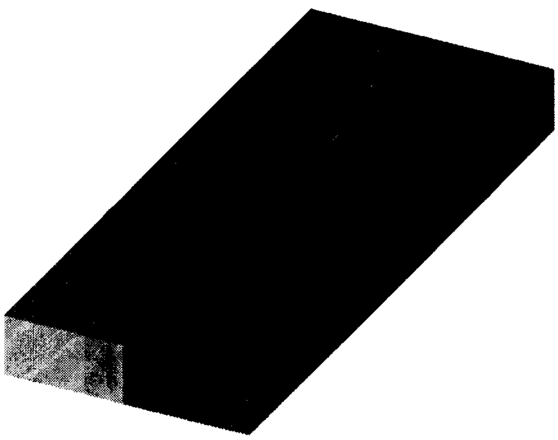
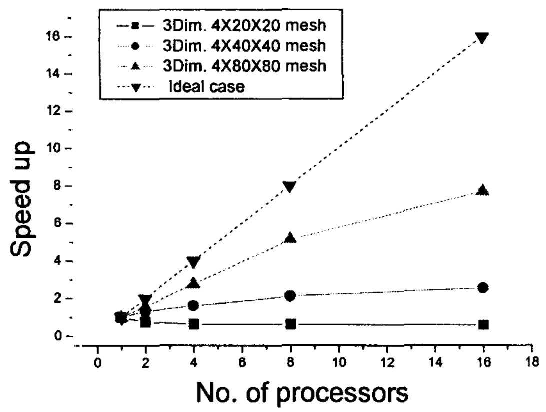


Fig. 3 The decomposed domain by Metis-4.0 for 16 processors.




## 4. 결 론

본 연구에서는 변태소성을 고려한 용접공정 해석에 대한 병렬 처리 해석의 유용성에 대해서 조사하였다. 영역 기반 프론탈 해법의 사용시 약 20000개 이상의 3차원 육면체 요소를 사용하는 거대 용접 구조물 해석에 적용할 경우 비교적 높은 효율의 계산 속도 향상을 기대할 수 있다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

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. Springers-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.