

전산용접역학의 최근 동향

임 세 영*, 한 유 성*, 이 계 형*, 한 명 수**, 최 강 혁***

*KAIST 기계공학과

**대우조선해양(주) 선박기술연구소

***POSCO CEM기술개발추진반 고속주조기술개발팀

Recent Development in Computational Welding Mechanics

Seyoung Im · Yousung Han · Kyeheyoung Lee · Myoung-Soo Han · Kanghyouk Choi

Abstracts

Welding is one of the most important joining processes and the effect of welding residual stresses in the structure has a great deal of influence on its quality. In this paper, recent development in computational welding mechanics, particularly calculation of welding residual stresses, is introduced. The hypoelastic formulation of finite element analysis for thermoelastic-plastic deformation is applied to welding processes to find residual deformations and stresses. Leblond's phase evolution equation coupled with the energy equation is employed to calculate the phase volume fraction; this plays an important role as a kinetics parameter affecting phase fraction effects in the mechanical constitutive equation of welded materials. Furthermore, transformation plasticity is taken into account for an accurate evaluation of stress. The influence of the phase transformation and the transformation plasticity on residual stress is investigated by means of numerical analyses using metallurgical parameters in Leblond's phase evolution equation that are adjusted with respect to various cooling rates in a CCT-diagram. Coding implementation is conducted by way of the ABAQUS user subroutines, UMAT.

Key Words : finite element analysis, welding, transformation plasticity, phase transformation

1. 서 론

용접공정은 산업현장에서 필수적으로 사용되고 있으며 자동화된 공정을 통해 생산량과 속도, 정확성을 향상시키는 것의 중요성 역시 계속해서 부각되고 있다. 용접 공정시 발생하는 고온의 열과 그로 인한 재료의 변화는 필연적으로 용접부에서 잔류변형 및 잔류응력을 야기하게 되는데, 이는 구조물의 변형 및 피로강도에 영향을 준다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 우선 용접 현상의 거동을 이해하고 발생할 변형과 잔류응력을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 용접은 열적/기계적/야금학적 거동이 복합적으로 연계되어 있기 때문에 그 해석이 매우 복잡하다. 이와 같은 어려움에도 불구하고 용접

의 전산모사 필요성이 계속 요구되고 있기에 많은 연구자들이 다양한 방면에서 용접거동에 대한 연구를 진행하고 있다.

용접구조물의 잔류응력을 정확하게 예측하기 위해서는 상변태(phase transformation)와 변태소성(transformation plasticity)을 고려한 전산모사 해석이 필수적이다. 현재까지 개발된 유한요소해석 프로그램 중에서 상변태와 변태소성을 고려한 용접해석 프로그램은 ESI사에서 개발한 SYSWELD가 유일한 것으로 알려져 있다. ABAQUS나 ANSYS 와 같은 상용프로그램의 경우, 열적/기계적 연계해석을 통한 간단한 용접해석 기능을 제공하고 있으나 재료의 물성치에 직접적으로 영향을 주는 야금학적 해석은 고려하지 않기 때문에 실제 용접해

석 결과와 상당한 차이를 보일 수 있다. KAIST 기계공학과 Multi-Physics System Lab.에서는 ABAQUS를 이용하여 상변태와 변태소성을 고려한 용접해석이 가능하도록 용접잔류응력 해석 프로그램을 자체적으로 개발하였고 이를 ABAQUS 유저서브루틴, UMAT (User Materials)에 이식하였다. 본 기고에서는 용접해석을 위한 ABAQUS 유저서브루틴 이식과정을 간략히 소개하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 야금학적/열적/기계적 해석

용접공정에서 재료의 상변태 과정과 변태소성은 구조물의 강도에 큰 영향을 주기 때문에 전산모사를 위해서 이를 구성방정식에 반영해야 한다. 또한 비선형 해석과정에서의 수렴속도 향상과 계산시간 단축을 위해서는 아탄성 수식화(hypoelastic formulation)가 필요하다.

재료의 상분율 계산을 위해 사용한 상진화 방정식은 Leblond 와 Devaux[1]가 제시한 것으로 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{p}_i = - \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij}(\theta, \dot{\theta}) \quad (1)$$

여기서 \dot{p}_i 는 각 상들의 부피비율, θ 는 온도, A_{ij} 는 i상에서 j상으로 상이 변화하는 값을 나타내고 있다[1]. 이렇게 계산된 상분율은 다음과 같이 열전달 지배방정식에 반영되어 온도장 해석을 수행하게 된다.

$$\sum_i p_i \rho_i c_i \frac{d\theta}{dt} + \sum_i \dot{p}_i \rho_i H_i = \nabla \cdot (\sum_i p_i \lambda_i \nabla \theta) \quad (2)$$

한편, 식 (1)에서 계산한 상분율은 이후 기계장 해석시 재료상수들을 결정하는데 사용된다.

상변태 현상은 기존의 소성변형 이외에 변태소성을 유발하게 되는데 이는 해당 재료에 작용하는 응력이 항복응력에 도달하지 않더라도 국부적인 소성거동을 보이는 것을 의미한다(Leblond[2,3]). 변태소성의 수식화 과정에서 강의 여러 상들은 오스테나이트로 분류되는 약상(weak phase)과 그 외의 상들을 포함하는 강상

(harder phase)으로 나누어진다. 비선형 혼합법칙을 이용하여 거시적인 항복응력이 결정되고 재료에 작용하는 응력이 항복곡면에 도달하는 경우에는 기존의 소성법칙을 따르고 그렇지 않을 경우에는, 변태소성을 고려한 소성법칙이 적용된다.

2.2 CCT-선도 교정(calibration)

용접공정에서 상변태는 온도장 및 기계장 해석에 영향을 미치기 때문에 야금학적 해석을 정확하게 수행하는 것이 무엇보다도 중요하다. 식 (1)의 상진화 방정식을 이용하여 각 상의 분율을 계산하기 위해서는 재료의 야금학적 물성치 정보를 입력해야 한다. 이를 위해서 Leblond와 Devaux[1]는 야금학 변수 k_{ij} , l_{ij} 을 도입하여 식 (1)의 A_{ij} 를 다음과 같이 정의하였다.

$$A_{ij}(\theta, \dot{\theta}) = k_{ij}(\theta, \dot{\theta})p_i - l_{ij}(\theta, \dot{\theta})p_j \quad (3)$$

$$k_{ij} = \frac{P_{eq}(\theta)}{\tau}, \quad l_{ij} = \frac{1 - P_{eq}(\theta)}{\tau} \quad (4)$$

여기서 k_{ij} , l_{ij} 은 재료의 상변태를 나타내는 야금학적 변수로서 CCT 선도로부터 추출해야 하는 값이다. k_{ij} , l_{ij} 은 식 (4)와 같이 $P_{eq}(\theta)$ 와 τ 로 다시 표현된다. $P_{eq}(\theta)$ 는 일정온도 조건에서 상평형 상태에 도달했을때의 재료의 상분율을 의미하고, τ 는 상변태의 특성시간을 의미하는 변수이다. $P_{eq}(\theta)$ 와 τ 에 대한 자세한 설명은 Leblond와 Devaux[1]에 명시되어 있다. $P_{eq}(\theta)$ 를 상변태가 일어나는 전체 온도 범위에 대한 현재 까지의 온도 변화라고 가정하면, 다음의 수식이 성립한다:

$$P_{eq}(\theta) = \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_f} \quad (5)$$

여기서 θ_s, θ_f 는 각각 상변태의 시작온도와 최종 온도를 의미한다. 또한, τ 를 재료가 상평형에 도달하기 까지 걸린 시간으로 가정하면, 다음의 수식이 성립한다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq} - P}{\tau} \quad (6)$$

식 (6)을 테일러급수 전개하여 얻은 상분율 값을

CCT 선도에서의 상분율값과 비교하여 두 값이 일치하도록 τ 의 값을 결정한다.

3. 수치 예제

3.1 CCT 선도 교정

본 절에서는 수치예제를 통해서 2.2장에서 논의한 야금학 변수 교정(calibration) 방법의 타당성을 검증한다. 이를 위해서 교정된(calibrated) 야금학 변수를 이용한 수치해석 결과와 CCT-선도에서의 상분율 값을 비교하였다. Fig. 1은 EH36 강의 CCT-선도이다. Fig. 1의 CCT-선도로부터 11개의 다른 냉각속도에 대한 야금학적 변수 $P_{eq}(\theta)$, τ 를 구하고, 이를 이용하여 수치적 계산으로 최종상태에서 각 상의 분율을 계산하였다. Table 1,2,3은 수치해석을 통해서 얻은 상분율 값을 CCT-선도를 통해 구한 상분율 값과 비교한 것이다. 두 결과가 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 2.2절에서 언급한 CCT-선도 교정 방식의 타당성을 입증한다.

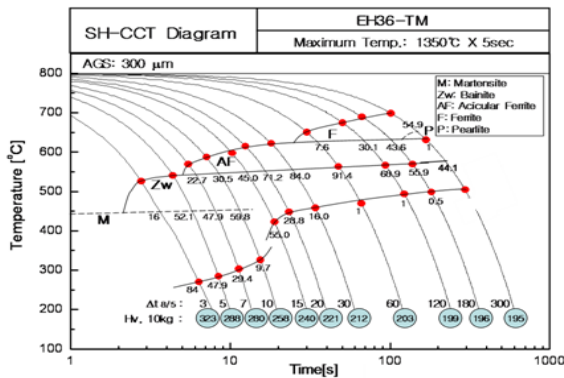


Fig. 1 CCT-diagram for EH36 steel

Table. 1 The Ferrite-Pearlite portions of EH36-TM steel which are obtained from the numerical simulation and the CCT-diagram

냉각속도 [°C/sec]	페라이트-펄라이트	
	해석결과	CCT 선도
-0.98	0.990	0.990
-1.74	0.993	0.995

-2.58	0.994	0.990
-5.08	0.999	0.990
-10.71	0.841	0.840
-16.72	0.708	0.712
-20.46	0.450	0.450
-29.35	0.302	0.305
-41.67	0.227	0.227
-65.29	0.000	0.000
-84.39	0.000	0.000

Table. 2 The Bainite volume fractions of EH36-TM steel which are obtained from the numerical simulation and the CCT-diagram

냉각속도 [°C/sec]	베이나이트	
	해석결과	CCT 선도
-0.98	0.010	0.000
-1.74	0.003	0.005
-2.58	0.003	0.010
-5.08	0.001	0.010
-10.71	0.159	0.160
-16.72	0.292	0.288
-20.46	0.549	0.550
-29.35	0.594	0.598
-41.67	0.480	0.479
-65.29	0.519	0.521
-84.39	0.159	0.160

Table. 3 The Martensite volume fractions of EH36-TM steel which are obtained from the numerical simulation and the CCT-diagram

냉각속도 [°C/sec]	마르텐사이트	
	해석결과	CCT 선도
-0.98	0.000	0.000
-1.74	0.000	0.000
-2.58	0.000	0.000
-5.08	0.000	0.000
-10.71	0.000	0.000
-16.72	0.000	0.000
-20.46	0.000	0.000
-29.35	0.104	0.097
-41.67	0.293	0.294
-65.29	0.481	0.479
-84.39	0.840	0.840

3.2 박판 맞대기 용접

Fig. 2는 상변태와 변태소성이 용접잔류응력에 미치는 영향을 확인하기 위한 박판 맞대기 용접 예제이다. 이를 위해서 상변태와 변태소성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어서 수치 해석을 수행하였다. 모델은 총 9400개의 요소로 이루어져 있고, y축을 따라서 용접이 수행된다.

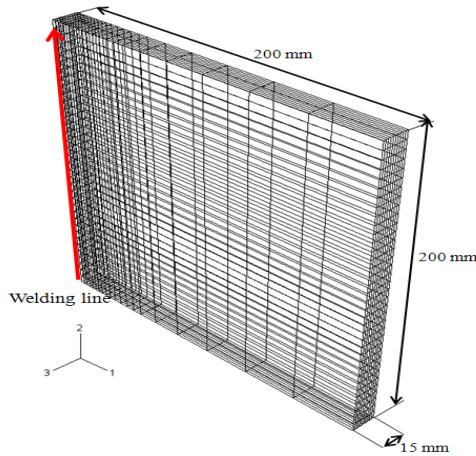


Fig. 2 Butt welding model of a thin plate

Fig. 3과 Fig. 4는 최종 상태에서 용접선 방향(y축방향)과 용접선에 수직인 방향(x축방향)으로의 Von-Mises 응력 분포다.

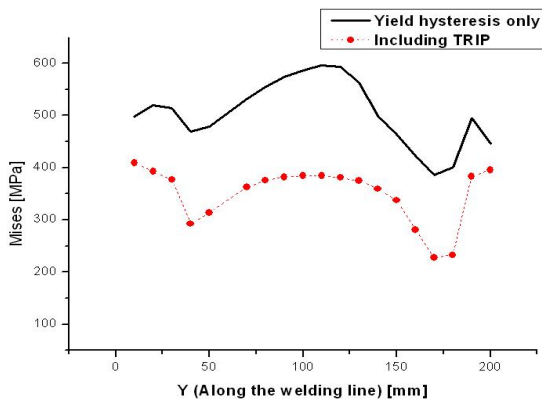


Fig. 3 The Von-Mises stress distribution along the welding line, with considering the phase transformation and transformation plasticity or not.

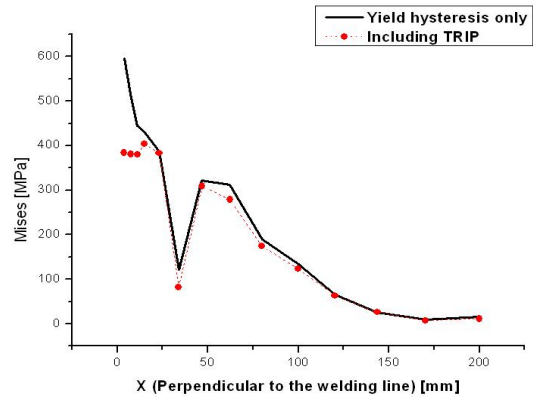


Fig. 4 The Von-Mises stress distribution perpendicular to the welding line, with considering the phase transformation and transformation plasticity or not.

Fig. 3에서 상변태 및 변태소성 고려 유,무에 따라서 Von-Mises 응력분포가 평균적으로 46% 차이가 난다. Fig. 4에서는 용접선으로부터 약 20mm가 떨어진 지점까지 응력분포 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 영역은 온도변화에 의하여 재료의 상변태가 발생하는 영역과 일치한다. 즉, 상변태와 변태소성이 용접해석시 잔류응력에 큰 영향을 미치는 요소임을 의미한다.

4. 맺음 말

본 기고에서는 상변태와 변태소성을 고려한 열탄소성 용접해석을 소개하였다. 해석을 위해서 합분해를 근간으로 하는 아탄성 수식화를 이용하였고, 변태소성을 고려한 접선계수(tangent moduli)를 유도하였다. 재료의 야금학적 현상을 해석에 반영하기 위해서 다양한 냉각속도에서의 CCT-선도 교정을 시행하고 이를 코드에 반영하여 상변태와 변태소성이 용접 구조물의 잔류응력에 미치는 영향을 규명하였다.

후 기

본 연구는 대우조선해양의 지원을 받아 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

1. Leblond J.B., Devaux, J., "A kinetic model for

anisothermal metallurgical transformation in steels including effect of austenite grain size,” *Acta Metall.*, 32(1) (1984) 137-146

2. Leblond J.B., Mottet G., Devaux J.C. “A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations –I. Derivation of general relations,” *J. Mech. Phys. Solids*, 34(4) (1986) 395-409

3. Leblond J.B., Mottet G., Devaux J.C. “A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations–II. Study of classical plasticity for ideal-plastic phases,” *J. Mech. Phys. Solids*, 34(4) 1986 411-432