

용접해석코드 GFC의 소개 및 적용 사례

최강혁·임세영

Introduction and Applications of Welding Analysis Code GFC

K. H. Choi and S. Y. Im

이전의 기술강좌에서 언급한 바와 같이, 용접은 열적/야금학적/기계적 현상이 모두 연결되어 있는 매우 복잡한 물리 현상이다. 산업현장에서 시행되고 있는 수치해석을 여러 공정과 시험들에 적용하고자 하는 필요성은 계속해서 증가하고 있고 이에 부응하기 위해 다양한 상용 수치해석 프로그램이 개발되고 있다. 그러나 용접해석의 경우 ESI사에서 상변태와 변태소성까지 고려한 용접전용 프로그램인 SYSWELD를 발표하였지만, 아직까지 그 필요성을 충분히 만족시키지 못하고 있다. 본 기고에서는 KAIST 기계공학과 Multi-physics Systems 실험실에서 자체적으로 개발한 용접해석 코드인 GFC(General Finite element Code)를 소개하고, 대형 구조물의 용접해석과 관련한 GFC의 응용 사례에 대하여 설명하고자 한다.

GFC는 포트란(Fortran) 언어를 이용해 작성된 유한요소코드로서, 용접과 같은 multi-physics 현상을 해석하기 위한 목적으로 개발되었다. SYSWELD와 마찬가지로 정확한 용접해석에 필요한 상변태 과정과 변태소성과정을 수식화하여 적용하였으며, 일반적으로 많이 사용되고 있는 hypo-elastic 이 아닌 hyper-elastic 수식화를 적용하여 비선형 해석 과정에서 수렴속도의 향상을 가져왔다.

GFC에서 사용한 상진화 방정식은 Leblond와 Devaux¹⁾가 제시한 것으로 다음과 같이 나타낸다.

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

여기서 \dot{p}_i 는 각 상들의 부피비율, θ 는 온도, A_{ij} 는 I상에서 j상으로 상이 변화하는 값을 나타내고 있다¹⁾. 식 (1)을 유한차분화한 결과를 이용해 매 순간마다 온도에 따른 값을 계산하여 상이 변화하는 것을 고려하게 된다. 이렇게 계산된 상비율들은 다음과 같이 열전달 지배방정식에 고려되어 열적 해석을 수행하게 된다.

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

위의 식에서 기계적 현상이 분리된 이유는 소성소산(plastic dissipation)이 열적 재료상수들에 미치는 영향이 무시해도 좋을 만큼 미미한 것으로 알려져 있기 때문이다²⁾. 한편, 식 (1)에서 계산한 상비율들은 이후 기계적 해석에서 온도와 더불어 재료상수들을 결정짓는 요인이 되고 실제 계산 시에는 혼합법칙(mixture rule)을 적용해 상비율들을 고려한 재료상수들을 계산하고 해를 구하게 된다.

이와 같은 상의 변화는 기존의 소성변형 이외에 변태소성(transformation plasticity)을 유발하게 되는데, 여기서 변태소성이란 해당 재료에 작용하는 응력이 항복응력에 도달하지 않더라도 국부적인 소성거동을 보이는 것을 의미한다^{3,4)}. 이 변태소성의 고려여부는 실제 해석결과의 정확도에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 변태소성의 수식화 과정에서 여러 상들은 오스테나이트로 구분되는 약상(weak phase)과 그 외의 상들을 포함하는 강상(harder phase)으로 나누어진다. 이 강상과 약상들의 비선형 혼합법칙을 통해 해당 상태의 거시적인 항복응력이 결정되고 재료에 작용하는 응력이 이 항복응력에 도달할 경우에 기존의 소성법칙을 따라 거동하지만, 그렇지 않을 경우에는 변태소성을 고려한 소성법칙이 적용된다. GFC는 hyper-elastic 가정 하에서 변태소성을 수식화하여 적용하고 있다⁶⁾.

SYSWELD와 GFC에서 상변태 과정과 변태소성을 고려한 것은 동일하다. 그러나 SYSWELD의 경우 hypo-elastic 수식화를 적용한 반면, GFC에서는 hyper-elastic 수식화를 적용하였다는 차이점이 있다. 특히, GFC에서는 정합접선계수(consistent tangent moduli)를 도입하여 해의 수렴속도를 향상시켰다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 1과 2는 평판에 용접이 가해지는 문제의 해석

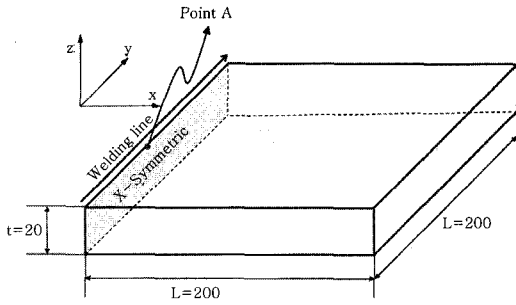


Fig. 1 평판용접 모델의 형태

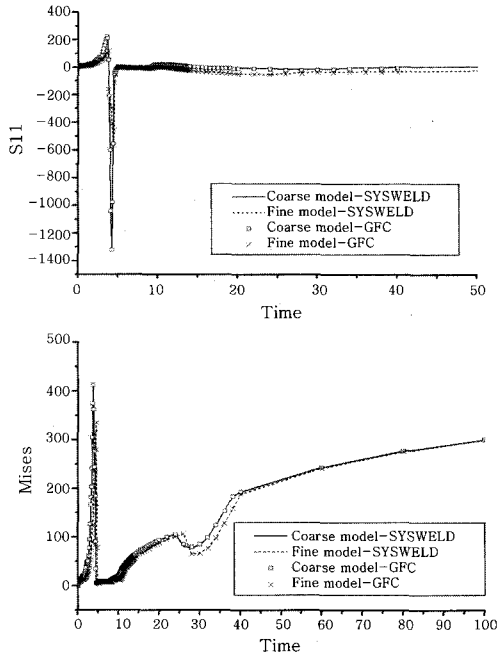


Fig. 2 A 위치에서 시간에 따른 응력의 변화

결과를 SYSWELD와 비교한 것으로 시간에 따른 응력의 변화추이가 SYSWELD의 결과와 매우 정확하게 일치한다.

용접해석은 특성상 자유도가 매우 큰 경우가 많고 잔류응력의 계산을 위해서는 용접비드가 지나간 후에도 온도가 충분히 냉각하는 순간까지 해석을 해야 하기 때문에 일반 기계적 해석보다 훨씬 많은 계산량이 요구된다. 산업현장에서 실제로 사용되고 있는 multi-path의 경우 이와 같은 현상은 더욱 극심해 진다. 또한, 용접현상 자체의 특성 때문에 용접부위에서 매우 조밀한 요소망을 사용할 필요가 있고, 이는 결국 전체 유한요소 모델의 자유도를 크게 증가시키게 된다. 자유도의 증가는 단순히 계산시간의 증가를 가져올 뿐 아니라 해를 구하기 위해 요구되는 메모리의 크기 역시 증가시키기 때문에 일정 정도 이상의 자유도를 가지는 문제는 풀지 못하게 될 수도 있다. 이와 같은 이유 때문에 용접의 수치해석에서는 solver의 성능이 현실적으로 중요한 요인으

로 작용한다. GFC는 큰 자유도를 가지는 문제에서 탁월한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있는 multi-frontal solver를 채택해 사용함으로써 일반 PC에서도 상당히 큰 자유도를 가지는 문제를 풀 수 있도록 설계되어 있다.

Fig. 3과 4는 파이프 용접과 자동차 부품에 GFC를 적용 사례를 보여준다. Fig. 3은 평판을 나선형으로 소성 변형시키고 용접하는 대규격 용접 파이프의 제조 공정을 GFC를 이용하여 해석한 사례로서, 이 문제는 70,800개의 요소로 구성된 모델로써 293,085개의 자유도를 가지고 있다⁷⁾. Fig. 4는 자동차의 하단부에 사용되는 CTBA (Coupled Torsion Beam Axle)을 해석한 것으로 141,513개의 요소와 327,075개의 자유도를 가지고 있고 7개의 multi-path를 따라 용접이 수행된다.

Fig. 3의 파이프 제조 공정의 경우, 얇은 평판을 원형으로 굽히는 과정에서 매우 큰 변형 및 응력이 발생하게 되는데 일반적인 솔리드 요소를 사용하여 이와 같은 공정을 해석하는 것은 매우 비효율적이다. 따라서 기계적 하중과 열적 하중이 동시에 작용하는 경우에 효과적으로 자유도를 줄이고 계산시간을 단축할 수 있도록 새로운 솔리드-셸 요소를 개발하여 적용하였다. 개

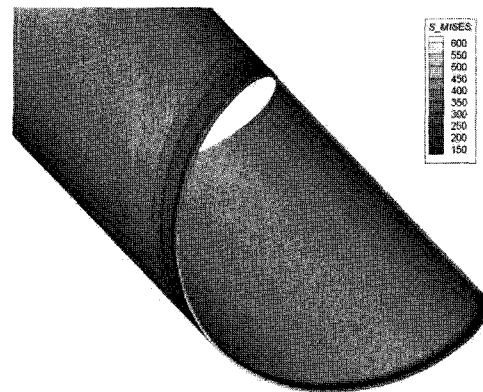


Fig. 3 스파이럴 파이프의 잔류응력 분포

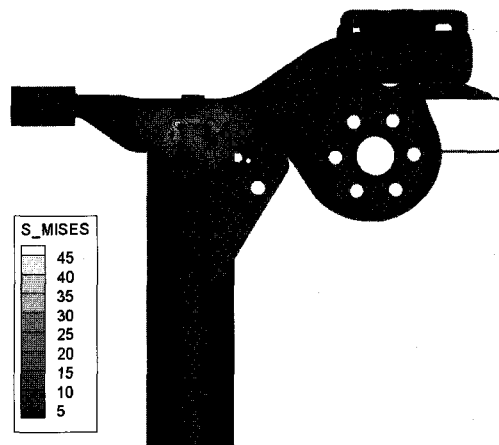


Fig. 4 CTBA 모델의 잔류응력 분포

발한 솔리드-셸 요소는 Lie⁷⁾ 등이 제시한 변형율의 테일러 시리즈 전개방법에 기반하여 보다 일반적인 전단 변형율의 표현방법을 사용하고 있으며, 수정된 변형율을 고려한 변형구배를 새로이 정의하여 hyper-elastic 수식화에 사용하고 있다. Fig. 5는 얇은 평판에 굽힘 모멘트와 용접 열원이 동시에 주어지는 모델을 보여주고 있으며, Fig. 6은 동일한 요소망 하에서 솔리드와 솔리드-셸 요소를 사용함에 따른 결과가 극심한 차이를 가져오는 것을 보이고 있다. 즉, 솔리드 요소는 잠김(locking) 현상을 인해 웬만큼 메쉬를 세분화하기 전에는 타당한 해를 주지 못한다.

지금까지 설명한 바와 같이, 개발된 해석코드 GFC는 복잡한 용접현상을 포함하여 다양한 수치해석이 가능한 코드이다. 현재 자체적으로 개발한 다절점 요소를 추가하여 보다 효율적인 요소망을 사용할 수 있도록 개발 중이다. 또한 개발된 용접해석방법 및 솔리드-셸 요소를 ABAQUS와 같은 General Purpose FE Package

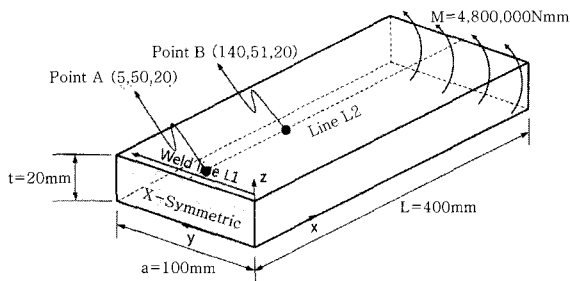


Fig. 5 굽힘모멘트와 용접열원이 모두 가해지는 평판

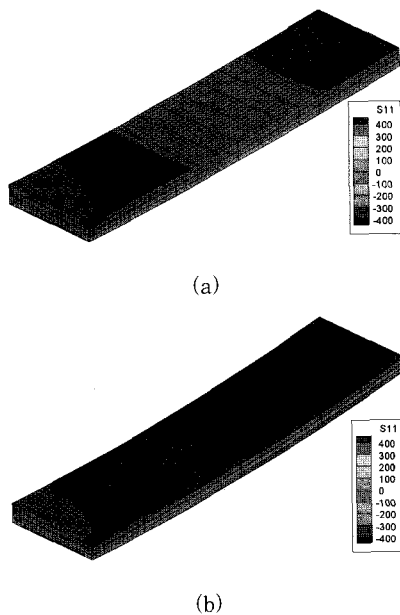


Fig. 6 잔류응력분포 : (a)솔리드 요소의 경우, (b)솔리드-셸 요소의 경우

Code에 UMAT(User Materials)와 UEL(User Elements)의 기능을 이용하여 이식하고 있다. 이 연구가 성공적으로 완수되면 조선, 자동차, 제강 및 중공업 분야에서 보다 용이하게 용접공정을 해석할 수 있으며, 산업계의 생산성과 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

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. Ronda J., Oliver G.J., "Consistent thermo-mechano-metallurgical model of welded steel with unified approach to derivation of phase evolution laws and transformation-induced plasticity," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **189** (2000) 361-417
3. 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
4. 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
5. Oddy A.S., Goldak J.A., McDill J.M.J. "Numerical analysis of transformation plasticity in 3D finite element analysis of welds," *European J. of Mechanics, A/Solids*, **9(3)** 1990 253-263
6. Kim J., Im S., Kim H.-G., "Numerical implementation of a thermo-elastic-plastic constitutive equation in consideration of transformation plasticity in welding," *Int. J. Plasticity*, **21** (2005) 1383-1408
7. Choi K., Kim W., Kim K., Im S., Kim C.-M., Lee J.-B., "Large-scale finite element analysis of arc-welding processes," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39** (2006) 2869-2875



- 최강혁(崔剛赫)
- 1976년생
- KAIST 기계공학과 박사과정
- 구조해석 / 용접해석
- e-mail : khchoi76@kaist.ac.kr



- 임세영(林世榮)
- 1953년생
- KAIST 기계공학과 교수
- 구조해석 / 나노역학
- e-mail : sim@kaist.ac.kr