

전산용접역학의 최근 동향

최강혁·임세영

Recent Trends of Computational Welding Mechanics

K. H. Choi and S. Im

1. 서 론

용접공정은 조선과 자동차, 중공업 등과 같은 산업현장에서 필수적으로 사용되고 있으며 자동화된 공정을 통해 생산량과 속도, 정확성을 향상시키는 것의 중요성 역시 계속해서 부각되고 있다. 두 물체를 접합시킨다는 용접의 기본목적은 달성하는 과정에서 고온의 열과 그로 인한 재료의 변화는 필연적으로 용접부에서 잔류변형 및 잔류응력을 야기하게 되는데, 이는 대부분의 경우 바람직하지 못한 현상을 가져온다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 우선 용접현상의 거동을 이해하고 발생할 변형과 잔류응력을 예측할 수 있어야 한다. 과거에는 반복되는 시험과 측정을 통해 시행착오를 거쳐야 했으나, 최근 컴퓨터의 발달에 힘입어 전산역학을 이용해 전산모사하는 경우가 점차 늘어나고 있다. 그러나 타 공정의 전산모사와 비교해 볼 때 용접공정은 상대적으로 보편화되지 못하고 있다. 이는 용접 현상이 근본적으로 열적/기계적/야금학적 거동이 복합적으로 연계되어 있는 매우 복잡한 현상이기 때문이다. 이와 같은 어려움에도 불구하고 용접의 전산모사 필요성이 계속 요구되고 있기에 많은 연구자들이 다양한 방면에서 용접거동에 대한 연구를 진행하고 있다. 이로써 이런 연구가 소위 전산용접역학 (Computational Welding Mechanics) 이라는 전산역학의 한 분야로 등장하였다. 본 기고에서는 전산용접역학의 핵심적인 사항을 간략히 소개하고자 하며, 보다 자세한 내용은 참고문헌 (1)을 참조하기 바란다.

용접비드에서 열을 가하여 온도가 변화함에 따라 재료의 기본적인 물성치들이 변하는 것은 물론 철강의 경우 페라이트에서 오스테나이트를 거쳐 마텐사이트 등과 같은 상변태가 일어날 수도 있고, 또한 이와 같은 상변태 역시 물성치의 변화를 야기한다(Fig. 1). 엄밀하게

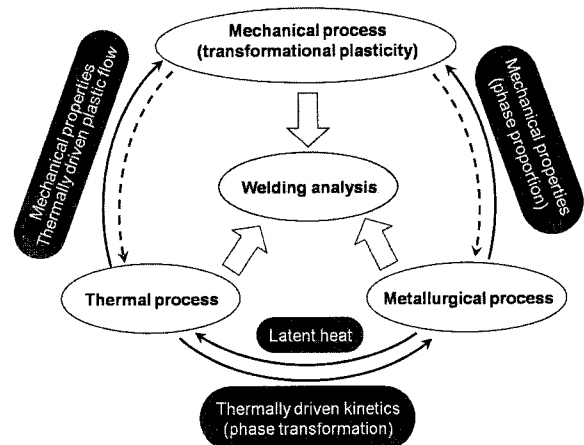


Fig. 1 Couplings in thermo mechanical analysis of welding

말한다면 세가지 현상을 동시에 고려하여 지배방정식을 풀어야 하지만, 변형과 응력 같은 기계적 변화는 열적/야금학적 거동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다²⁾. 또한 열적/기계적 방정식을 동시에 푸는 것은 매우 큰 비대칭 방정식들을 다루어야 하는 어려움을 가지고 있다. 따라서 용접의 전산모사 과정에서 열적 해석을 수행한 후 계산된 온도장을 고려해 기계해석을 하는 방법이 많이 사용되고 있다. 이 과정에서 미시구조의 변화를 고려한 야금학적 해석을 포함하는 것을 열적/야금학적/기계적 (thermo-metallurgical-mechanical, TMM) 해석이라 한다.

용접현상을 전산모사하는 것은 전술한 바와 같은 이론적으로 복잡한 이유도 있으나 그 외에도 현실적인 어려움이 있기 때문이다. 일반적으로 용접에 의한 잔류응력은 국부적인 현상인 경우가 많은데 이를 제대로 해석하기 위해서는 용접부 주위에 매우 조밀한 요소망을 구성할 필요가 있다. 또한 고온에서 발생하는 열변형 및 소성변형은 복잡한 비선형 거동을 보이기 때문에 수렴

성을 보장하기 위해 시간 간격 역시 충분히 작게 할 필요가 있다. 따라서 유한요소모델의 전체 자유도는 매우 커지게 되고 상당히 큰 계산시간을 유발한다. 뿐만 아니라, 단순한 기계적 해석의 경우 변형과 응력 등만을 저장하면 문제가 없으나 용접의 경우 이 외에도 상비율, 상비율변화율 등 추가적으로 저장해야 하는 변수들이 많은데 이 역시 계산시간의 증가를 유발한다. 얇은 판재를 다루는 경우 쉘 요소를 이용해 자유도를 줄이고 계산의 효율을 높이는 경우가 많지만 용접의 경우 얇은 두께방향으로도 응력과 변형을 정확히 고려해야 하기 때문에 쉘 요소를 사용하는데 어려움이 있다는 점도 용접해석을 어렵게 만드는 요인 중 하나이다.

유한요소법에서 변위를 표현하는데 사용되는 형상함수는 일반적으로 온도장의 형상함수보다 한 차수 높다. 이는 기계적 해석에서 사용되는 열변형률이 온도장으로부터 바로 계산되기 때문이며, 이로 인하여 열변형률을 계산할 때 온도의 평균값이 사용되어야 한다.

열원을 모델링하는 방법으로는 크게 용접부위의 온도를 직접 조정하거나 적절한 양의 열유속을 분포시켜 적용하는 방법이 있다. 후자의 경우 열유속의 분포 형태에 대한 연구도 진행되어 타원형 모델이나 가우시안 모델 등이 발표되었다. 용접시 발생하는 상변태에서 중요한 잠열을 고려하기 위해서 상변태 단계에서 비열을 증가시키는 방법이 사용되었으나, 이 방법은 비열의 급격한 변화로 인해 수치적으로 안정하지 못한 단점을 가지고 있었다. 엔탈피를 이용한 방법을 도입해 이 문제를 해결하였고 Leblond³⁾는 CCT 선도에 기반하여 다음과 같은 상진화(phase evolution) 방정식을 도입하여 상변태 과정을 묘사하였다.

온도변화에 따른 재료의 상이 여러가지로 변화함에 따라 재료의 열적/기계적 성질도 변화하며, 전산모사과정에서는 각각의 상들이 존재하는 비율과 그것의 물성치를 혼합법칙(mixture rule)을 통해 고려하게 된다. 또한 이런 상의 변화는 기존의 소성변형 외에 변태소성(transformation plasticity)을 유발할 수도 있는데 이는 재료에 걸리는 응력상태가 크지 않을 경우에도 국부적인 소성상태에 도달할 수 있음을 의미한다^{4,5)}. 실제로 Oddy⁶⁾ 등은 변태소성의 고려여부에 따라 해석결과가 달라질 수 있음을 보였다. 따라서 보다 정확한 용접해석을 위해서는 열적/기계적 거동 외에도 상변태 과정과 변태소성을 모두 고려해야 한다고 할 수 있다. 현재까지 이와 같은 Leblond의 모델을 적용한 프로그램은 용접전문 프로그램인 SYSWELD가 유일한 것으로

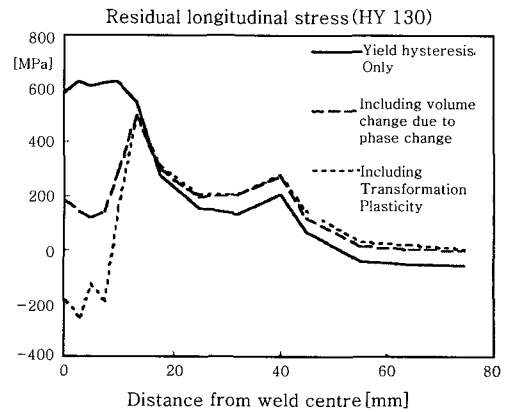


Fig. 2 Influences of phase change and transformation plasticity in residual stresses

알려져 있다.

이와 같이 용접현상을 정확히 묘사하는 것이 상당히 어렵기 때문에 복잡한 야금학적 거동을 생략하고 해석하는 경우도 있다. ABAQUS나 ANSYS와 같은 전산모사를 전문으로 하는 상용 프로그램들의 경우 열적/기계적 해석을 하는 것은 가능하기에 이를 이용해 해석하면 상당히 간단히 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 경우 해의 경향을 파악하는 데에는 도움이 되지 않지만, Fig. 2에 보인 바와 같이 용접부 근처에서 잔류응력은 상당한 차이를 보일 수도 있음이 알려져 있다⁷⁾.

References

1. Lindgren L.-E., 2006, "Numerical modeling of welding," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195, 6710-6737
2. Ronda J., Oliver G.J. 2000, "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, 361-417
3. Leblond J.B., Devaux, J. 1984, "A kinetic model for anisothermal metallurgical transformation in steels including effect of austenite grain size", *Acta Metall.*, 32(1), 137-146
4. Leblond J.B., Mottet G., Devaux J.C. 1986a, "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), 395-409
5. Leblond J.B., Mottet G., Devaux J.C. 1986b, "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), 411-432
6. Oddy A.S., Goldak J.A., McDill J.M.J., 1990, "Numerical analysis of transformation plasticity in

3D finite element analysis of welds." *European J. of Mechanics, A/Solids*, **9(3)**, 253-263

7. Oddy et al. 1989, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Trends in Welding Research*



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



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