

잔류응력 완화에 미치는 상변태의 수치적 모델링

Numerical Modeling of Phase Transformation Effect on Stress Release

장경복*, 손금렬*, 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술 연구소

1. 서론

아크 용접등의 용융 용접은 열을 접합부에 집중하여 국부적으로 용융·응고 되어짐으로 인해 국부적인 열팽창·수축과 이에 의한 소성변형등으로 인해 용접 잔류응력과 변형이 필연적으로 발생하는데, 이러한 용접변형과 잔류응력은 구조물의 강도적 신뢰성을 떨어뜨리기 때문에 용접이 등장한 이래 이를 저감하려는 노력이 계속되고 있어, 현재에 이르러서는 건전한 구조물과 제품을 설계하고 제작·보수관리하는데 반드시 고려하지 않으면 안되는 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 용접 잔류응력을 저감하려는 노력 가운데 하나로서 대부분의 용접재가 용접 후 냉각시에 겪게되는 상변태를 이용하려는 실험적 연구가 수행되었으며, 그 결과 상변태가 용접 잔류응력을 완화시키는데 기여한다는 사실이 증명되었다.

그러나, 기존의 연구는 실험적인 연구에 치우쳐 있어 상변태시의 현상을 명확하게 규명하고 있지는 못한 실정이다. 즉, 용접 잔류응력 완화에 미치는 상변태의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 수치적 모델링의 정립은 이루어지지 않고 있다. 이러한 정량적 평가가 이루어지기 위해서는 상변태 현상을 모사할 수 있는 수치적 모델의 정립을 바탕으로 유한요소법 등의 이론적 예측법의 활용이 반드시 필요하다. 이에 본 연구에서는 기존의 실험적 연구에서 나타나 있는 데이터를 이용하여 상변태시의 재료의 열적·기계적 물성치 변화를 구하여 용접 잔류응력의 완화에 기여하는 상변태 현상을 정량적으로 평가할 수 있는 수치적 모델을 정립하고자 한다.

2. 실험 재료 및 형상

실험 데이터는 기존의 佐藤의 연구에서 참조하였으며, 재료 및 형상은 다음과 같다. 재료는 용접 고장력강 중 조질강(Quenched and Tempered steel)의 일종인 HT80으로 화학 성분 및 상온에서의 기계적·열적 특성이 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of material used

Chemical composition(wt%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	B
0.12	0.28	0.90	0.008	0.007	0.02	0.67	0.15	0.34	0.0009

Table 2 Mechanical and thermal properties of material used

Mechanical properties				Thermal properties		
E[kg/mm ²]	Y.S[kg/mm ²]	T.S[kg/mm ²]	α [1/°C]	C_p [cal/°C·g]	ρ [kg/cm ³]	K[cal/cm·°C]
21000	200	200	1.2×10^{-5}	0.13	7.8	0.17

용접 시편은 판폭 200mm, 길이 600mm, 두께 12mm의 두 판재를 맞대기 용접한 것으로 개선각이 60° 인 V 개선 단층 용접의 경우이다. 용접법은 GMAW이며 용접 조건은 450A, 25V, 용접 속도는 25cm/min 이다.

3.유한요소 모델

해석 모델은, 각 단면으로 동일한 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위길이 를 지나는 수직한 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였으며 일반화된 평면 변형률 (Generalized plain strain) 가정을 이용하였다. 해석의 정확성을 높이기 위해 8절점 사각형 요소(8-node quadrilateral element)를 사용하였다. Fig.1은 해석의 대상인 용접 시편의 크기와 용접선상에 수직한 단면의 해석 모델을 나타내며, Fig.2는 해석모델의 요소 형상과 경계 조건을 나타낸다. 입열 모델로는 용융부 부근의 급열에 의한 순간적인 온도상승으로 그 영역에서의 수치적인 해의 수렴성이 어려워지는 문제를 피하고, 또한 2차원 평면에서 3차원 해석과 같이 이동하는 열원의 효과를 나타내기 위해, 용접 잔류응력 예측에 유용하게 사용되는, 램프(ramp) 열입력 모델을 사용하였으며 램프비는 100%로하였다.

용접부 중 입열된 후 급냉되는 부분은 상변태를 겪게 되는데, 이러한 상변태시에는 변태 초소성(Transformation superplasticity), 즉 마르텐사이트 변태와 변태 팽창(Transformation expansion)에 의한 응력의 완화가 발생한다. 이를 온도와 응력·변형률, 그리고 조직과의 상관 관계에서 살펴보면, 용접 입열과 냉각으로 인해 온도가 변화하면 상변화가 발생하고 이는 잠열의 방출과 흡수를 가져와 다시 온도장이 변화한다. 그리고, 열팽창과 수축에 의해 열 응력이 발생하며, 이렇게 발생한 열응력은 역학적 일 에 의한 발열로서 다시 온도장에 영향을 미친다. 또한, 변태에 따르는 체적변화는 변태 변형률과 응력의 원인이 되고, 역으로 응력과 변형률이 부하되면 변태가 유기된다. 이처럼, 상변태 현상은 온도장, 응력·변형률, 재료의 조직의 3종류의 장이 연관되어 있는 물리현상이기 때문에 이를 수치적으로 모델링하는 것은 상당히 어려운 문제이나 용접에서의 역학적 현상을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 반드시 필요하다고 여겨진다. 이렇듯 복잡한 상변태 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서는 기존에 온도와 응력·변형률의 관계를 해석하는 열-기계적 커플링 해석의 바탕위에 온도와 조직간의 상관 관계는 재료의 물성치 중 비열의 변화에 크게 의존하며, 응력·변형률과 조직과의 상관 관계는 재료의 열팽창 계수의 변화에 크게 의존하는 것으로 생각하여 모델링하였다. Fig. 3은 상변태 온도 영역에서의 비열과 열팽창 계수의 온도에 따른 변화를 나타내는데 반복적인 해석의 수행으로 실험치의 잔류응력과 가장 잘 일치할 때의 C_{pm} 과 α_m 을 구함으로써 본 연구에서 사용된 재료의 용접 후 냉각 과정에서의 상변태에 의한 응력 완화의 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 것이다.

Fig.4 에는 수치적 모델의 전반적인 알고리즘을 나타내었다. 해석을 크게 두 영역으로 나누어 수행하였다. 즉, 입열 과정은 최고 온도에 도달하기까지를 열-기계적 커플링 해석으로 수행하여 오스테나이트화 온도 이상으로 된 영역을 구하고, 최고 온도에서의 응력상태와 온도장을 구하였다. 여기서, 재료의 물성치는 온도의 함수로서 고려하였다. HT80의 오스테나이트화 온도는, 탄소 함량 0.12%이므로 상태도 에서 살펴보면 865℃ 정도이나, 실질적으로 이 온도에 도달하여도 변태가 바로 일어나는 것이 아니라 잠복기가 존재하기 때문에 이를 고려하기 위해 50℃ 정도가 높은 915℃로 설정하였다. 냉각 과정에서는, 우선 입열과정에서 구해진 응력 및 온도 분포를 초기조건으로 지니도록 하고 오스테나이트화 온도 이상 영역은 재료의 물성치 중 비열과 열팽창 계수가 Fig.3과 같은 형태를 지니도록하고 나머지 부분은 기존의 물성치를 지니는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 여기서, Fig.3의 변태 시작 온도는 Andrew의 식을 이용하여 구하였으며, 변태 종료 온도는 200℃로 하였다.

이러한 과정을 해석으로 얻어진 잔류응력의 결과가 실험치와 일치할 때 까지 반복하여 상변태시의 물성치 변화, 즉 Fig.3의 C_{pm} 과 α_m 을 구하였다.

4. 해석 결과

Fig.5는 기존의 사토 연구 결과를 나타내는데, 여기서 실선을 냉각 과정에서의 상변태 현상을 고려하지 않고 단순히 용접선에 수직한 단면으로의 1차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하여 얻어진 결과이며 점들은 실제 측정에 의한 잔류응력의 분포를 나타내는데, 실제 재료에서는 상변태에 의한 응력의 완화가 발생하기 때문에 그림에서와 같이 용접부에서 상당한 인장응력의 감소가 발생하여, 이를 고려하지 못한 단순한 해석의 결과와는 용접부의 응력 분포에 있어서 상당한 차이를 보이고 있다. Fig.6은 입열과정의 해석에서 재료의 오스테나이트화 온도 915°C를 넘어서는 절점의 온도 사이클과 그 영역을 나타낸 것으로, 이 영역에서 냉각시에 상변태가 발생하여 변태응력에 의해 용접부의 응력을 완화 시켜주는 것이다. Fig.7은 본 연구에서 수행한 유한요소 해석 결과를 나타내는데, 실선은 상변태 과정을 고려하지 않고 해석을 수행한 결과이며, 점선은 상변태 현상을 Fig.4의 알고리즘으로 고려하여 해석한 결과를 나타내는 것으로 실제 측정에 의한 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

기존의 연구에서 나타난 실험치를 이용하고, 용접 공정의 해석을 가열과정과 냉각과정으로 구분하여 수행함으로써 용접 후 냉각시에 발생하는 상변태로 인한 잔류응력의 완화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 상변태를 고려하는 용접 공정의 수치적 모델을 정립하였으며, 이를 통해 상변태 구간에서의 재료의 물성치 변화를 알아낼 수 있었다.

5. 참고문헌

- 1) Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, 1980.
- 2) Koichi Masubuchi, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures", AWS, Dec., 1991, pp. 41-47.
- 3) T. Muraki, J.J. Bryan, and K. Masubuchi, "Analysis of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding", Journal of Eng. Materials and Tech. ASME, (1975), pp.81-91.
- 4) E. Friedman, "Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method", Journal of Press. Vesel Tech. ASME, Series J, 97(3), (1975), pp.206-213.
- 5) B. Andersson, and L. Karlsson, "Thermal Stresses in Large Butt-Welded Plates", Journal of Thermal Stresses, Vol.4, (1981), pp.491-500.
- 6) 심용래, 이성근, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발", 대한용접학회지, 제 11권, 3호, 1993, pp.110-123.
- 7) Y. SHIM, Z. FENG, "Determination of Residual Stress in Thick-section Weldments", Welding Journal, 1992, 9, pp.305-312.
- 8) J. A. Free, Peter Goff, R. F. D., "Predicting Residual Stress in Multipass Weldments with the Finite Element Method", Computer&Structures, 32(2), 1989, pp.365-378.
- 9) B.A.B. Andersson, "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformation", Transaction of ASME, Vol. 100, Oct., (1978), pp.356-362.

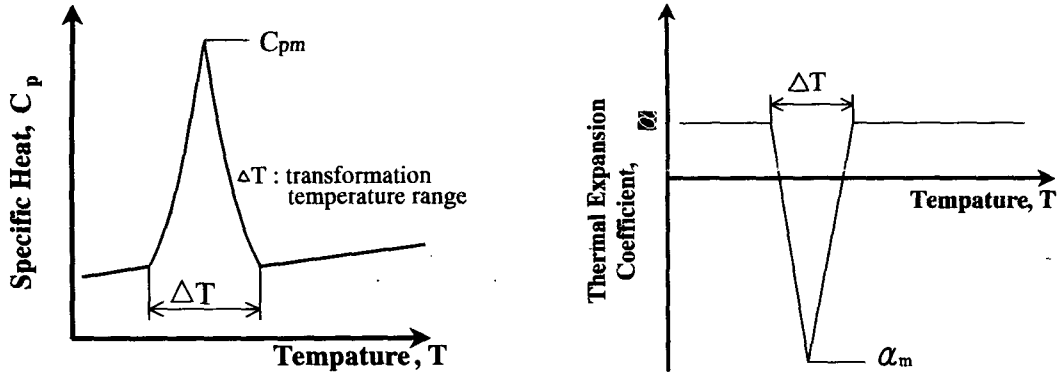


Fig.3 Transition of material properties in transformation temperature range.

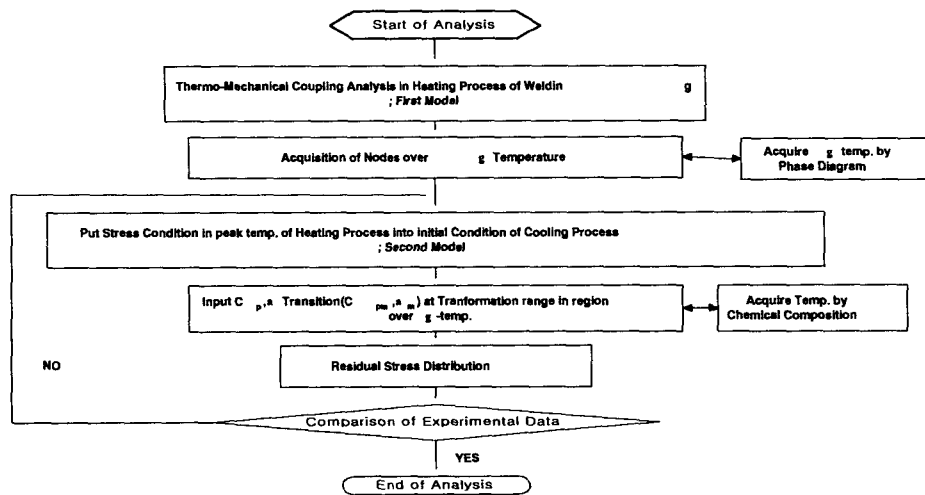


Fig.4 Flow chart of numerical modeling.

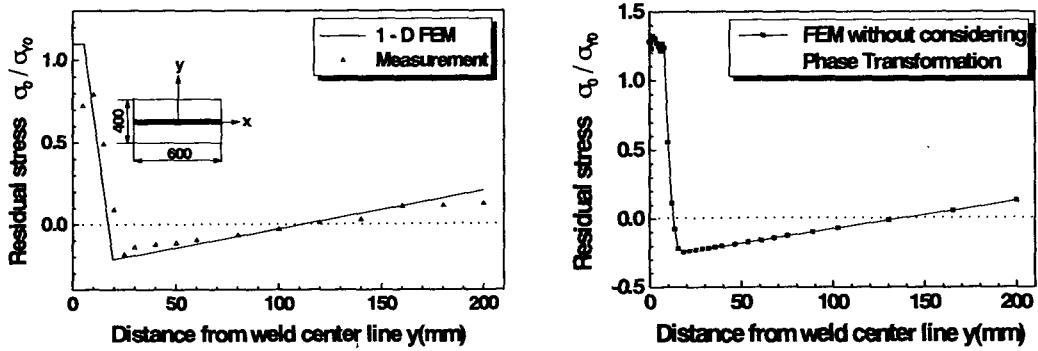


Fig.6 Residual stress distribution in groove weld of high strength steel HT 80.

Fig.7 Residual stress in finite element analysis.