

용접 잔류응력 완화에 미치는 변태 온도의 영향에 관한 수치적 모델링

Numerical Modeling of the Transformation Temperature Effect on Welding Residual Stress Release

장경복*, 손금렬*, 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술 연구소

1. 서론

용접부의 잔류응력의 경감은 요점설계와 시공상의 중요한 문제로 정적 강도와 피로강도의 저하를 막음과 동시에 응력 부식 피해등을 감소 시킨다. 이러한 잔류응력의 경감에 대부분의 용접재가 용접 후 냉각시 겪게되는 상변태에 의한 열응력의 완화가 이용될 수 있다는 것이 실험적으로 증명되었으며 이에 대한 수치적 모델의 정립도 이루어졌다. 전보에서는 용접용 고장력강에 대해 기존의 실험적 연구에 의한 데이터와 수치적 모델을 이용하여 상변태시의 고장력강의 열적·기계적 물성치 변화를 해석적인 방법으로 구하였다. 그러나, 용접용 재료에는 고장력강이외에도 다양한 재료들이 존재하는데 이를 상변태가 일어나는 온도를 기준으로 분류하면 크게 4가지로 나눌수 있다. 우선, 상변태를 겪지 않는 무변태 재료, 둘째 상변태를 겪기는 하나 그 영역이 고온이라 상변태가 끝난 후 상온까지의 냉각 동안 그 효과가 소멸되어 열응력의 완화에 크게 기여하지 못하는 고온 변태 재료, 셋째 중온 영역에서 상변태를 겪음으로 열응력의 완화에 기여하는 고장력강, 넷째 상변태가 상대적으로 저온에서 발생하여 상온 영역에서 끝남으로 인해 열응력의 완화에 상당히 큰 영향을 미치는 즉 저온 변태하는 재료이다. 그러므로, 상변태에 의한 잔류응력의 완화 정도는 용접 재료에 따라 크게 달라진다는 것을 즉 변태온도의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 이러한 다양한 변태 온도를 지니는 용접 재료에서의 상변태에 의한 잔류응력의 완화정도가 정량적으로 평가되어 지기 위해서는 정립되어진 수치 모델을 이용하여 상변태 영역에서의 각 재료의 물성치에 대한 데이터 베이스의 구축이 반드시 필요하고, 이를 통하여 상변태시의 재료의 온도 사이클에 대한 역학적 거동을 정확히 알아낼 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 변태 온도가 용접 잔류응력의 완화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 4가지의 재료 즉 무변태 재료인 304스테인리스강, 고온변태 재료인 연강, 중온 변태 재료인 고장력강, 저온 변태 재료인 9%Ni강에 대하여 기존의 실험적 연구의 결과와 전보에서 정립되어진 상변태를 고려하는 수치적 모델을 이용하여 각 재료에 대한 상변태 영역에서의 물성치의 변화값을 획득하였으며, 각 재료의 상변태시의 역학적 거동을 비교 및 분석하였다. 또한, 이를 통해 고장력강에 대해 정립되어진 전보의 수치적 모델의 타당성을 다른 변태온도를 지니는 재료에 대한 적용으로 검토하였다.

2. 실험 재료 및 형상

실험 데이터는 기존의 70년대 후반의 사토의 연구와 90년대의 무라타, 카토등의 연구에서 참조하였으며, 재료 및 형상은 다음과 같다. Table 1은 사용되어진 재료의 화학 성분을 Table2는 상온에서의 열적·기계적 성질을 나타낸다. 용접 시편은 판폭(W) 200mm, 길이(L) 600mm, 두께(h) 12mm의 두 판재를 맞대기 용접한 것으로 개선탄이 60° 인 V 개

선 단층 용접의 경우이다. 용접법은 GMAW이며 입열 조건에 관계하는 파라미터는 Table 3 과 같다.

Table 1 Chemical composition of materials used

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	B
HT80	0.12	0.28	0.90	0.008	0.007	0.02	0.67	0.15	0.34	0.0009
9%Ni	0.09	0.226	0.58	0.006	0.006	8.72				
Mild Steel	0.25	0.34	0.58	0.03	0.02	0.01	0.01		0.002	
STS304	0.06	0.53	1.3	0.03	0.01	8.8	18.6			

Table 2 Mechanical and thermal properties of materials used in room temperature

Materials	Specific Heat, C (J/kg°C)	Thermal Conductivity, K (w/m°C)	Thermal Expansion Coefficient, $(10^{-5}/^{\circ}\text{C})$	Density, ρ (kg/cm ³)	Yield Strength, σ_y (MPa)	Young's Modulus, E (MPa)	Temperature above which yield strength becomes zero, $\theta_M(^{\circ}\text{C})$
HT80	546	0.15	1.2	7.8	80	21000	830
9%Ni	504	0.15	1.3	7.9	64	20500	930
Mild Steel	546	0.5	1.2	7.8	31	21000	830
STS304	504	0.125	1.75	7.9	28	20400	950

Table 3 Parameter of Heat input in welding conditions

Materials	Average Temperature, $T_{av} = Q/2c\rho Wh [^{\circ}\text{C}]$	Heat Input, $Q/h [J/cm^2]$
HT80	31	1509
9%Ni	31	1410
Mild Steel	37	1800
STS304	34	1300

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 이용하였고, 해석에 사용되어진 요소는 4절점 사각형 요소 (4-node quadrilateral element)이다. 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 급냉되는 부분은 변태 초소성(Transformation superplasticity), 즉 마르텐사이트 변태와 변태 팽창(Transformation expansion)에 의한 응력의 완화가 발생하는데, 이는 온도 장, 응력·변형률, 재료의 조직의 3종류의 장이 연관되어 있는 물리현상이다. 이렇듯 복잡한 상변태 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서 제시되어진 수치적 모델은 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 가정하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 4는 수치적 모델링을 위해 필요한 데이터로서 각 재료의 탄소당량과 이를 이용하여 Fe-C 상태도에서 구한 잠복기를 고려한 오스테나이트화 온도, 그리고 용접 후 냉각시의 변태 온도 영역을 나타낸다. 여기서 연강의 변태온도가 가장 높고 그 다음이 HT80이고 9%Ni강의 변태온도가 가장 낮음을 알 수 있다. 그리고, STS304는 상온에서도 오스테나이트로 존재하기 때문에 변태를 하지 않는 재료이다. Fig.1은 기존의 실험적 연구를 바탕으로 스테인리스강, 연강, 고장력강, 9%Ni강의 용접 후 냉각 중에 나타나는 열응력 곡선을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 정립되어진 해석 모델로서 용접부에서 실질적으로 상기와 같은 열응력 곡선을 얻어서 상변태시의 재료의 역학적 거동을 파악하여 변태온도가 열응력의 완화 정도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

Fig.2는 연강, 9%Ni강, 그리고 STS304의 해석 모델에서 상변태를 고려하는 해석을 수행한 결과 용접부내의 임의의 절점에서의 온도 사이클에 대한 용접선 방향으로의 응력의 변화를 획득한 것이다. 스테인리스강의 경우 냉각시 변태를 하지 않기 때문에 응력의 완화가 나타나지 않으며 연강의 경우는 고온 변태를 하기 때문에 응력의 완화는 나타나나 그 후 상온까지 냉각되는 과정에서 다시 응력의 상승이 크게 나타나고 있어 변태에 의한 응력의 완화 효과가 적으며 9%Ni강의 경우는 저온 변태를 하기 때문에 즉 변태가 완료되는 시점이 상온이기 때문에 변태에 의한 응력의 완화 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

변태온도가 용접 잔류응력의 완화에 미치는 영향을 파악하기 위해 용접 후 냉각시 변태하지 않는 STS304, 고온 변태하는 연강, 중온 변태하는 고장력강, 저온 변태하는 9%Ni강을 대상으로 기존의 실험적 결과를 바탕으로 해석을 수행한 결과 변태과정에서의 역학적 현상을 파악할 수 있었으며 변태에 의한 응력의 완화 효과는 저온변태하여 상온에서 변태가 끝나는 9%Ni강에서 가장 큼을 알 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) Kunihiro Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Welding conditions on Residual Stresses Distributions in Welded Structures Materials, JWS, Vol.45, (1976), pp.150-156.
- 4) Kunihiro Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Transformation Expansion on Welded Residual Stresses Distributions and Welding Deformations, JWS, Vol.45, No.7, (1976).
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) B. Andersson, and L. Karlsson, "Thermal Stresses in Large Butt-Welded Plates", Journal of Thermal Stresses, Vol.4, (1981), pp.491-500.
- 8) 심용래, 이성근, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발", 대한용접학회지, 제 11권, 3호, 1993, pp.110-123.

Table 4 Data for considering phase transformation

Materials	Equivalent Carbon, C_{eq}	Austenizing Temperature	Transformation range during cooling ($M_s \sim M_f$, °C)
HT80	0.5	810°C	450~250
9%Ni	0.414	830°C	380~160
Mild Steel	0.363	850°C	780~540
STS304	..	.	No

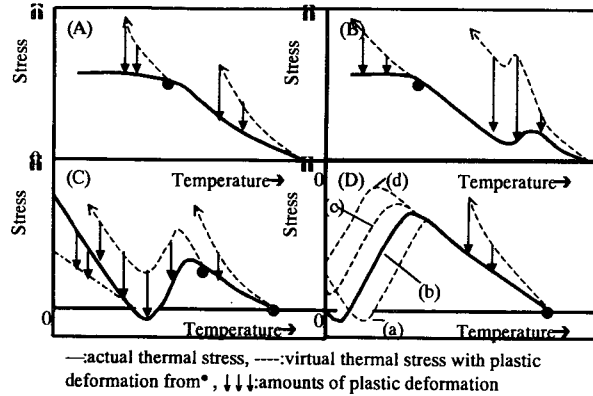
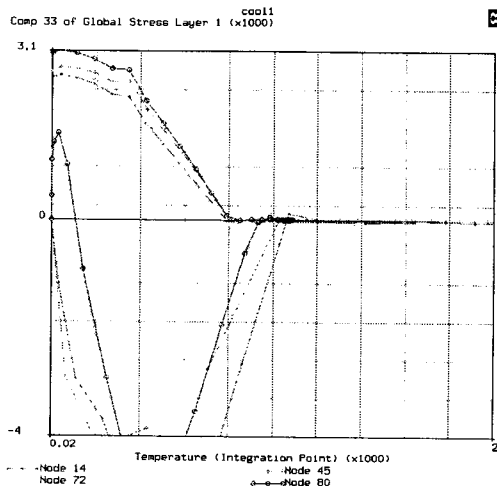
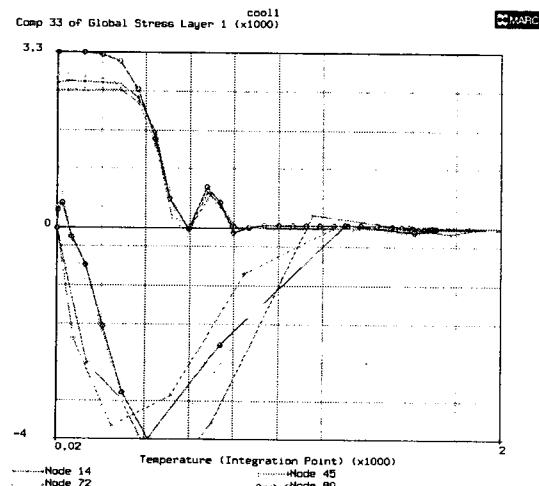


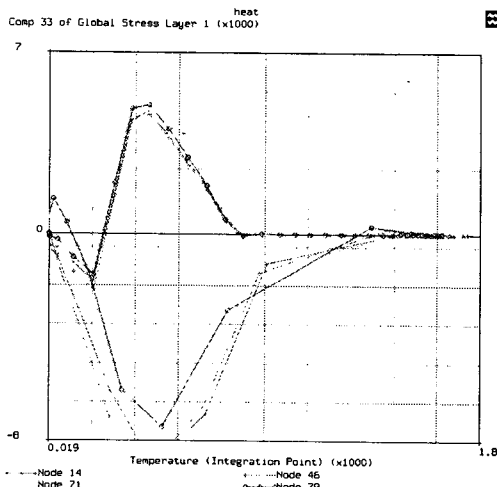
Fig.1 Four typical thermal stress curves during cooling by transformation difference



(a) STS304



(b) Mild Steel



(c) 9%Ni Steel

Fig.2 Change of Thermal Stress during heating and cooling.