

잔류응력 완화에 미치는 상변태의 수치적 모델링

장 경 복* · 손 금 렬* · 강 성 수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술 연구소

N.M. for the Effect of P.T. on Residual Stress Relaxation

G.B. Jang, K.Y. Son and S.S.Kang

* Dept. of Mechanical and Precision Engineering, Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

** Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

Most of ferrous b.c.c weld materials may experience martensitic transformation during rapid cooling after welding. It is well known that volume expansion due to the phase transformation could influence on the relaxation of welding residual stress. To apply this effect practically, it is a prerequisite to establish a numerical model which is able to estimate the effect of phase transformation on residual stress relaxation quantitatively. For this purpose, the analysis is carried out in two regions, i.e., heating and cooling, because the variation of material properties following a phase transformation in cooling is different in comparison with the case in heating, even at the same temperature. The variation of material properties following phase transformation is considered by the adjustment of specific heat and thermal expansion coefficient, and the distribution of residual stress in analysis is compared with that of experiment by previous study.

Consequently, in this study, simplified numerical procedures considering phase transformation, which based on a commercial finite element package was established through comparing with the experimental data of residual stress distribution by other researcher. To consider the phase transformation effect on residual stress relaxation, the transition of mechanical and thermal property such as thermal expansion coefficient and specific heat capacity was found by try and error method in this analysis.

(Received July 8, 1999)

Key Words : Martensite transformation, Transformation expansion, Welding residual stress, Residual stress relaxation, Material properties, Specific heat, Thermal expansion coefficient

1. 서 론

아크 용접등의 용융 용접은 열을 접합부에 집중하여 국부적으로 용융·응고 되어짐으로 인해 국부적인 열팽창·수축과 이에 의한 소성변형 등으로 인해 용접 잔류응력과 변형이 필연적으로 발생한다. 이러한 용접 변형과 잔류응력은 구조물의 강도적 신뢰성을 떨어뜨

리기 때문에^{1,2)} 용접이 등장한 이래 이를 저감하려는 노력이 계속되고 있으며, 현재에 이르러서는 건전한 구조물과 제품을 설계하고 제작·보수 관리하는데 반드시 고려하지 않으면 안되는 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 용접 잔류응력을 저감하려는 노력으로는 용접전의 예열처리와 용접후의 응력제거 열처리가 가장 널리 적용되고 있으며, 실험적인 검증과 유한요소법 등을 이용한 예측법으로 그 효과가 정량화되어 있어

작업 현장에서의 관리지침으로 잘 적용되고 있다. 그러나, 이러한 예열처리와 후열처리는 용접공정 외의 추가 공정이므로 비용 및 시간의 증가를 가져온다.

이에 반해, 대부분의 용접재가 용접 후 빠른 속도로 냉각되는 과정에서 겪게되는 상변태(마르텐사이트 변태)는 용접공정 중에 발생함으로 이를 이용하여 용접 잔류응력을 완화하려는 실험적 연구가 수행되었으며, 그 결과 상변태가 용접 잔류응력을 완화시키는데 기여한다는 사실이 증명되었다^{3,4)}. 그러나, 기존의 연구는 실험적인 연구에 치우쳐 있으며 수치적 모델에 관한 연구⁵⁾는 너무 많은 야금학적인 인자를 고려하려 함으로 인해 복잡한 형태가 되어 현장에 적용성이 떨어지는 상황이다. 즉, 용접 잔류응력 완화에 미치는 상변태의 영향을 정량적으로 평가하여 현장에 적용할 수 있는 실용적인 수치적 모델링의 정립은 이루어지지 않고 있다.

실질적으로 상변태 현상을 해석적으로 명확하게 구현하기 위해서는 상변태 구간에서의 온도에 대한 재료 물성치의 변화를 정확하게 알아야만 가능하다. 그러나, 이러한 물성치 변화를 실험적으로 획득하기란 상당한 시간과 비용을 요구하는 어려운 문제이다.

이에 본 연구에서는 기존의 실험적 연구(잔류응력의 측정)로 획득되어진 결과⁴⁾를 이용하여 상변태시의 재료의 열적·기계적 물성치 변화를 해석적인 방법으로 역추적함으로써 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 연구⁴⁾에서 참조하였으며, 재료 및 형상은 다음과 같다. 재료는 용접 고장력 강 중 QT(Quenched and Tempered steel)의 일종인 HT80으로서 화학 성분 및 상온에서의 기계적·열적 특성이 Table 1, 2와 같다.

Table. 1 Chemical composition of HT80.

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 at room temperature.

Mechanical properties				Thermal properties		
E[kg/mm ²]	Y.S[kg/mm ²]	T.S[kg/mm ²]	α [1/°C]	Cp[cal/°C · g]	ρ [kg/cm ³]	K[cal/cm · °C]
21000	80.3	85.3	1.2×10^{-5}	0.13	7.8	0.17

용접 시편은 폭 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. 수치적 모델

3.1 해석영역 및 경계조건

해석 모델은, 각 단면에서 동일한 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위길이를 지니는 수직한 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였고 일반화된 평면 변형률 (Generalized plain strain) 가정을 이용하였으며, 해석에 사용된 요소는 4절점 사각형 요소 (4-node quadrilateral element)이다. Fig.1은 해석의 대상인 용접 시편의 크기와 용접선상에 수직한 단면의 해석 모델을 나타내며, Fig.2는 해석모델의 요소 형상과 기계적 및 열적 경계조건을 나타낸다. 입열 모델로는 용융부 부근의 금열에 의한 순간적인 온도상승으로 그 영역에서의 수치적인 해의 수렴성이 어려워지는 문제를 피하고, 또한 2차원 평면에서 3차원 해석

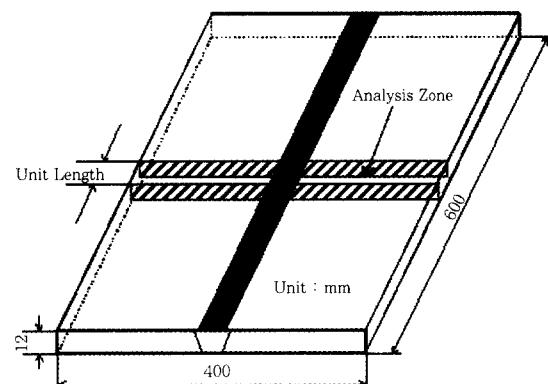


Fig. 1 Dimension of weld specimen and analysis zone

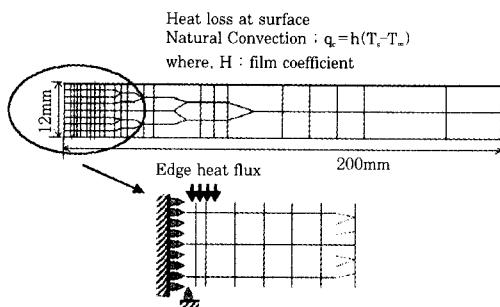


Fig. 2 Mesh generation and boundary condition

과 같이 이동하는 열원의 효과를 나타내기 위해, 용접 잔류응력 예측에 유용하게 사용되는, 램프(ramp) 열입력 모델^{6,7)}을 사용하였으며 램프비는 100%로 하였다.

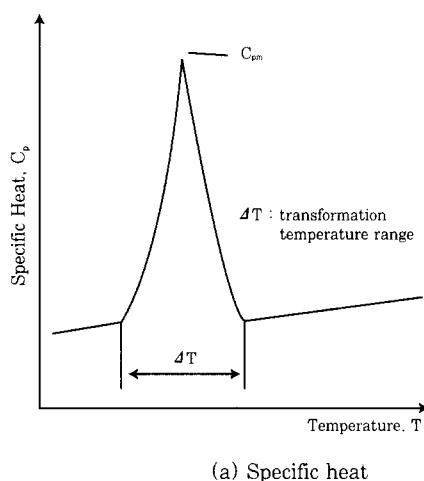
3.2 상변태의 수치적 모사

용접부 중 입열된 후 급냉되는 부분은 상변태를 겪게 되는데, 이러한 상변태 시에는 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, 용접입열과 냉각으로 인해 온도가 변화하면 상변화가 발생하고 이는 잠열의 방출과 흡수를 가져와 다시 온도장이 변화한다. 그리고, 열팽창과 수축에 의해 열응력이 발생하며, 이렇게 발생한 열응력은 역학적인 일에 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, 재료 내부 조직의 3종류의 장이 연관되어 있는 물리현

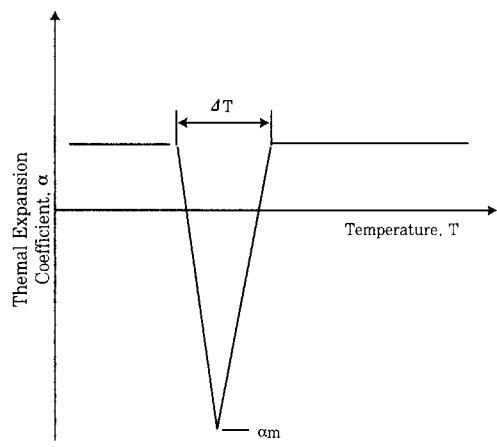
상이기 때문에 이를 수치적으로 모델링하는 것은 상당히 어려운 문제이나 용접에서의 역학적 현상을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 반드시 필요하다고 여겨진다.

이렇듯 복잡한 상변태 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서는 기존에 온도와 응력·변형률의 관계를 해석하는 열-기계적 커플링 해석^{8~11)}의 바탕 위에 온도와 조직간의 상관 관계는 재료의 물성치 중 비열의 변화에 크게 의존하며, 응력·변형률과 조직과의 상관 관계는 재료의 열팽창 계수의 변화에 크게 의존하는 것으로 간주하여 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 응력완화의 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 것이다.

Fig.4에는 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 응력 상태와 온도장을 구하였다. 여기서, 재료의 물성치는 온도의 함수로서 고려하였다. HT80의 Ac3 변태점은, 탄소 함량 0.12%이므로 상태도에서 살펴보면 865°C 정도이나, 실질적으로 이 온도에 도달하여도 변태가 바로 일어나는 것이 아니라 잠복기가 존재하기 때문에 이를 고려하기 위해 50°C 정도가 높은 915°C로 오스테나이트화 온도를 설정하였다. Fig.5는 HT80의 Fe-C계 상태도에서의 오스테나이트화 온도의 결정과정을 나타낸다. 냉각 과정에서는, 우선 입열과정에서 구해진 응력 및 온도 분포를 초기조건으로 지니도록



(a) Specific heat



(b) Thermal expansion coefficient

Fig. 3 Variation of material properties within a transformation temperature range.

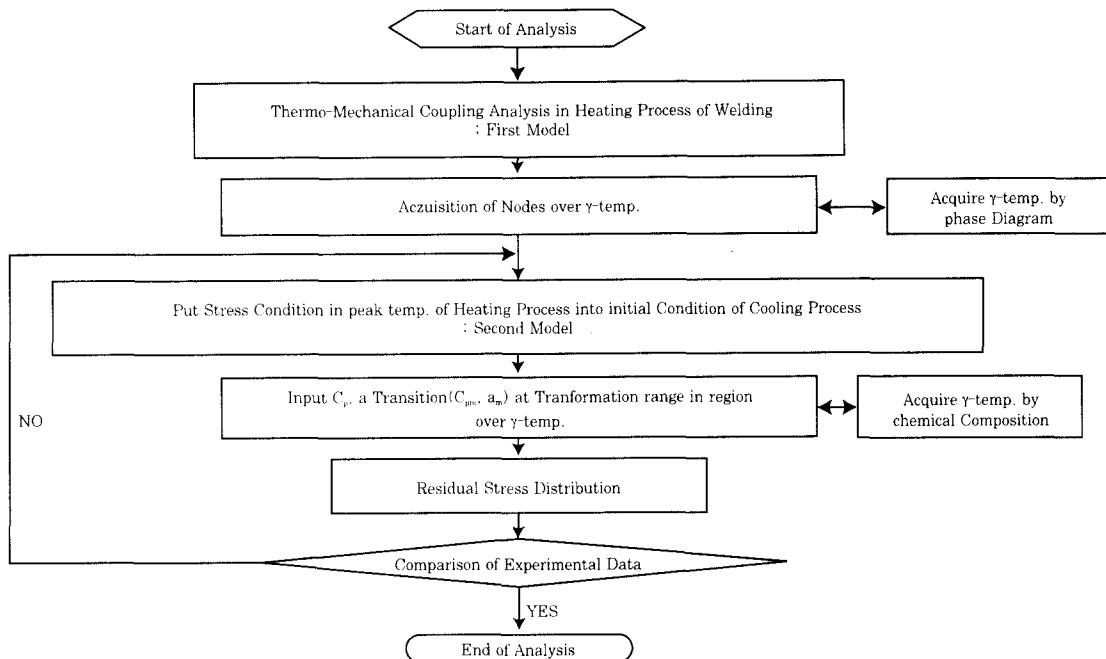


Fig. 4 Flow chart of numerical modeling.

하고 입열과정에서 구하여진 오스테나이트화 온도 이상 영역은 재료의 물성치 중 비열과 열팽창 계수가 Fig.3과 같은 형태를 지니도록 하고 나머지 부분은 기존의 물성치를 지니는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 여기서, Fig.3의 변태 시작 온도는 Andrew의식을 이용하여 구하였으며, 변태 종료 온도는 200°C로 하였다. 이러한 과정을 해석으로 얻어진 잔류응력의 결과가 실험치와 일치할 때까지 반복하여 상변태시의 물성치 변화, 즉 Fig.3의 C_{pm} 과 a_m 을 구하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

Fig.6은 기존의 사토 연구 결과로서 용접선 방향의 잔류응력과 상온에서의 항복응력의 비를 나타내는데,

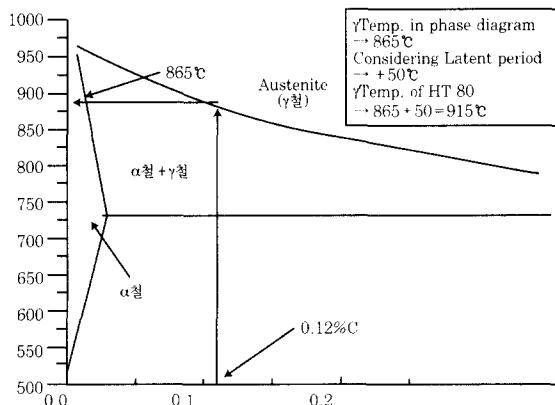


Fig. 5 A phase transformation temperature(Ac3) of HT80.

여기서 실선은 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 해석의 결과와는 용접부의 응력 분포에 있어서 상당한 차이를 보이고 있다. Fig.7은 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 역할을 한다.

Fig.4에서와 같은 알고리즘이 냉각 중의 상변태 현상을 제대로 모사하는지를 알아보기 위해, Fig.7에서

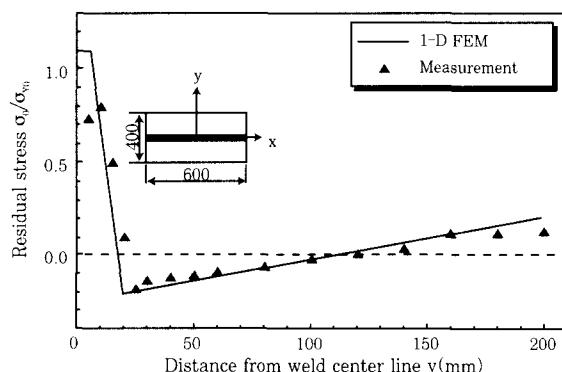


Fig. 6 Analytical and experimental results by Satoh⁴⁾.

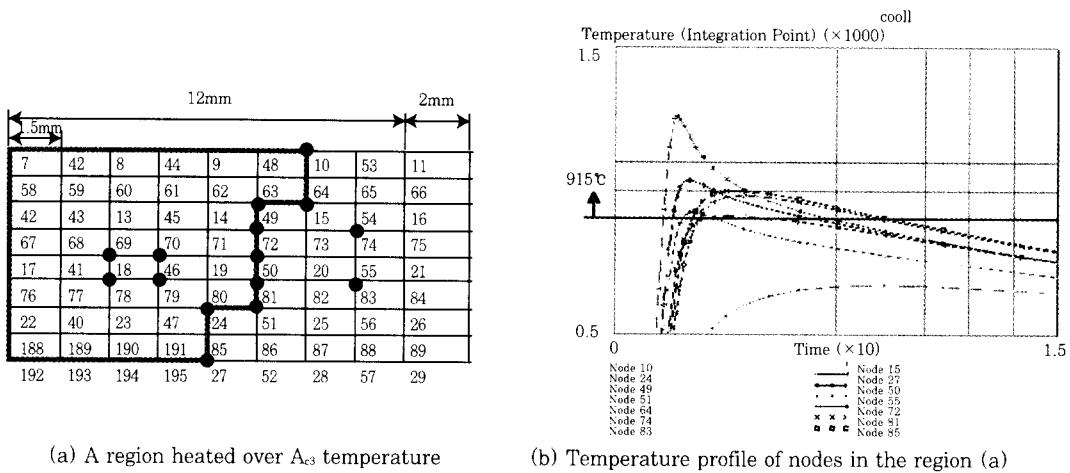


Fig. 7 A region heated over A_{c3} temperature and temperature profile of nodes in the region (a).

나타난 영역 내의 임의의 절점에서의 용접의 입열과 냉각과정 동안의 열응력과 온도 이력을 상변태를 모사하지 않는 일반적인 열-기계적 커플링 해석으로 구하여진 결과와 비교하였는데 Fig.8은 열응력의 변화를, Fig.9는 온도 이력의 변화를 각각 나타낸다.

Fig.8를 살펴보면 상변태를 모사하는 모델의 경우, 즉 (b)에서는 상변태를 구현하지 않은 (a)의 경우와는 달리 냉각 중에 변태 온도 영역에서 변태 팽창으로 인해 응력의 완화가 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. Fig.9의 경우에는 (b)의 경우 변태 온도 영역에서 잠열로 인해 (a)와 달리 온도 변화률이 줄어든 부분을 관찰할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서 제시된 수치적 모델이 용접 후 냉각중의 상변태 과정을 제대로 모사하고 있다고 판단된다.

Fig.10은 본 연구에서 수행한 유한요소 해석 결과로서 용접선 방향의 응력을 나타내는데, 실선은 상변태 과정을 고려하지 않고 해석을 수행한 결과이며, 점선

은 상변태 현상을 Fig.4의 알고리즘으로 고려하여 해석한 결과를 나타내는 것으로 실제 측정에 의한 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

기존의 연구에서 나타난 실험 결과를 이용하고, 상변태시의 재료의 물성치 변화는 크게 비열과 열팽창 계수에 의존한다는 사실에 근거하여 해석적인 방법으로 변태 온도 영역에서의 열적·기계적 물성치 변화를 역추적함으로써 용접 잔류응력의 완화에 기여하는 상변태 현상을 정량적으로 평가할 수 있는 수치적 모델을 정립하였다. 여기서, 용접 공정의 해석을 크게 가열과정과 냉각과정으로 구분하여 수행함으로써 상변태로 인한 가열과정과 냉각과정에서의 물성치 변화가 달라지는 것을 구현할 수 있었다. 이렇게 정립되어진 수치적 모델의 타당성이 용접용 고장력강 HT 80의 단순

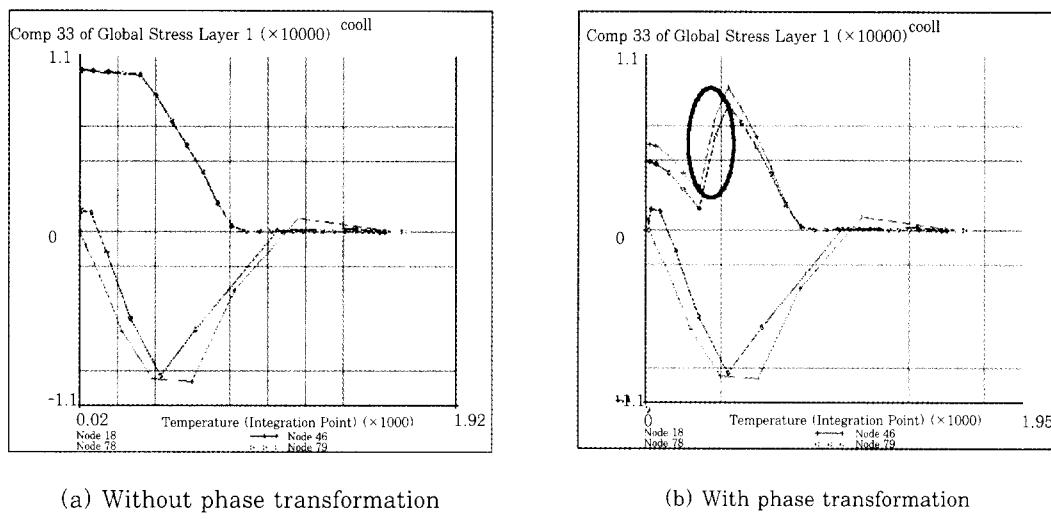


Fig. 8 Change of thermal stress during heating and cooling of welding.

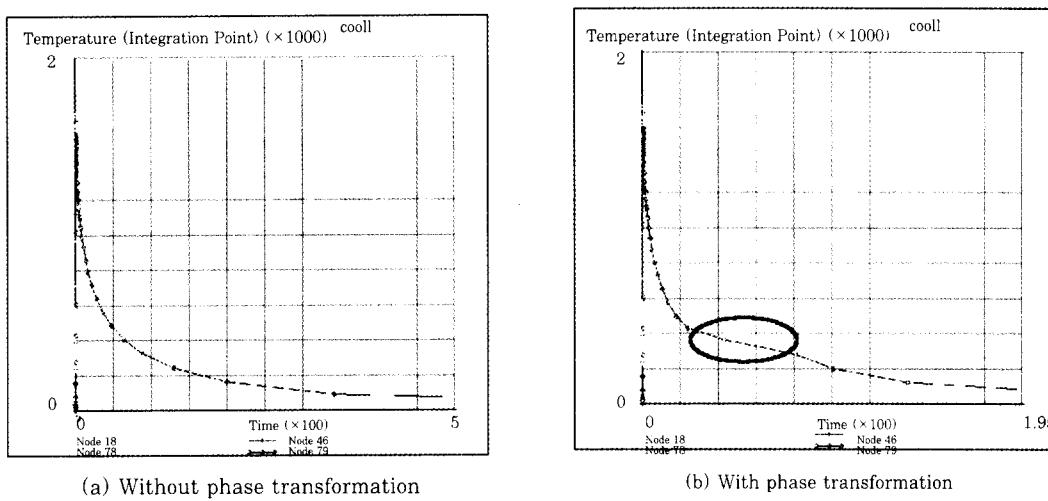


Fig. 9 Temperature profile during heating and cooling

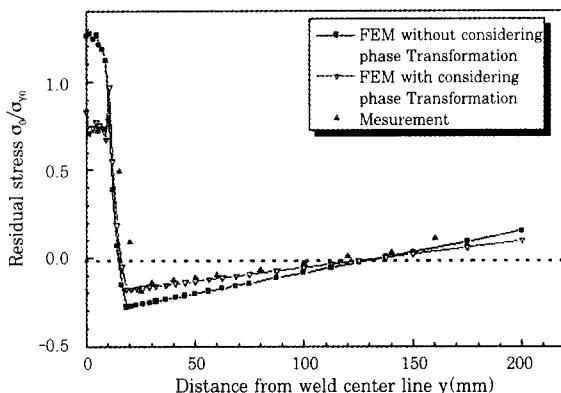


Fig. 10 Result of analysis in the present study

맞대기 용접의 경우에 대해 검증되었으나, 앞으로 다른 계수 형태 및 구조물, 그리고 다른 재질의 경우에 대해 서도 그 타당성을 검증할 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

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. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Welding conditions on Residual Stresses Distributions in Welded Structures Materials, JWS, Vol.45(1976), pp.150-156.
4. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Transformation Expansion on Welded Residual Stresses Distributions, JWS, Vol.45(1976), pp.560-566.
5. 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.
6. 심용래, 이성근 : 용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발, 대한용접학회지, 제11권, 3호 (1993), pp.110-123.
7. Y. SHIM, Z. FENG : Determination of Residual Stress in Thick-section Weldments, Welding Journal, Sep.(1992), pp.305-312.
8. 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.
9. 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.
10. B. Andersson, and L. Karlsson : Thermal Stresses in Large Butt-Welded Plates, Journal of Thermal Stresses, Vol.4(1981), pp.491-500.
11. 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.

Residual Stresses Distributions and Welding Deformations, JWS, Vol.45, No.7(1976), pp.560-566