

## 용접 잔류응력 완화에 미치는 변태 온도의 영향에 관한 수치적 모델링

장 경 복\* . 강 성 수\*\*  
(2000년 3월 6일 접수)

### Numerical Modeling of the Transformation Temperature Effect on the Relaxation of Welding Residual Stress

Gyoung-Bok, Jang and Sung-Soo, Kang

**Key Words:** Martensite Transformation(마르텐사이트 변태), Transformation Expansion(변태팽창),  
Welding Residual Stress(용접 잔류응력), Residual Stress Relaxation(잔류응력 완화),  
Specific Heat(비열), Thermal Expansion Coefficient(열팽창 계수)

#### Abstract

Most of ferrous b.c.c weld materials have 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 necessary 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. 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. In addition to, since the transformation temperature changes by the kind and control of alloying elements, the steel with many kinds of transformation temperature were selected and the effect of transformation on stress releasement was investigated by the numerical procedures considering phase transformation.

#### 1. 서 론

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : janggb@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2304 FAX : (051)512-9835

아크 용접 등의 용융 용접은 열을 집합부에 집중하여 국부적으로 용융·응고 되어짐으로 인해 국부적인 열팽창·수축과 이에 의한 소성변형

등으로 인해 용접 잔류응력과 변형이 필연적으로 발생한다. 이러한 용접변형과 잔류응력은 구조물의 취성과파괴, 피로강도, 좌굴강도 등에 악영향을 미쳐 강도적 신뢰성을 떨어뜨리기 때문에<sup>(1,2)</sup> 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.<sup>(3,4)</sup> 그러나, 기존의 연구는 실험적인 연구에 치우쳐 있으며 수치적 모델에 관한 연구<sup>(5,8)</sup>는 너무 많은 야금학적인 인자를 고려하려 함으로 인해 복잡한 형태가 되어 현장에의 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 결과<sup>(4)</sup>를 이용하여 상변태시의 재료의 열적·기계적 물성치 변화를 해석적인 방법으로 역추적함으로써 용접 잔류응력의 완화에 기여하는 상변태 현상을 정량적으로 평가할 수 있는 수치적 모델을 정립하고, 이를 다양한 용접 재료에 적용하여 그 타당성을 검증하고자 하였다. 즉, 용접 재료를 상변태가 일어나는 온도를 기준으로 분류하면 크게 4가지로 나눌

수 있는데, 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 변태온도를 지니는 용접 재료에서의 상변태에 의한 잔류응력의 완화정도가 정량적으로 평가되어지기 위해서는 정립되어진 수치 모델을 이용하여 상변태 영역에서의 각 재료의 물성치에 대한 데이터베이스의 구축이 반드시 필요하고, 이를 통하여 상변태시의 재료의 온도 사이클에 대한 역학적 거동을 정확히 알아낼 필요가 있다.

그러므로, 본 연구에서는 변태 온도가 용접 잔류응력의 완화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 4가지의 재료 즉 무변태 재료인 304 스테인리스강, 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.

## 2. 실험재료 및 형상

실험 데이터는 기존의 70년대 후반의 사토의 연구<sup>(4)</sup>와 90년대의 무라타, 카토 등의 연구<sup>(11)</sup>에서 참조하였으며, 재료 및 형상은 다음과 같다. Table 1은 사용되어진 재료의 화학 성분을 Table 2는 상온에서의 열적·기계적 성질을 나타낸다. 용접 시편은 판폭(W) 200mm, 길이(L) 600mm, 두께(h) 12mm의 두 판재를 맞대기 용접한 것으로 개섵각이 60° 인 V 개섵 단층 용접의 경우이다. 용접법은 GMAW이며 입열 조건에 관계하는 파라미터는 Table 3과 같다.

**Table 1** Chemical composition of materials used

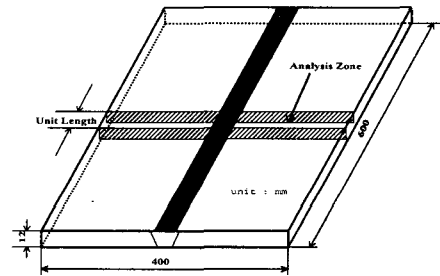
Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	B
HT80	0.12	0.28	0.90	0.008	0.007	0.02	0.67	0.15	0.34	0.0009
9%Ni	0.09	0.226	0.58	0.006	0.006	8.72				
Mild Steel	0.25	0.34	0.58	0.03	0.02	0.01	0.01		0.002	
STS304	0.06	0.53	1.3	0.03	0.01	8.8	18.6			

**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, $\alpha$ ( $10^{-3}/^\circ\text{C}$ )	Density, $\rho$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)	Young's Modulus, E (MPa)	Temperature above which yield strength becomes zero, $\theta_M$ (°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 <sup>2</sup> ]
HT80	31	1509
9%Ni	31	1410
Mild Steel	37	1800
STS304	34	1300

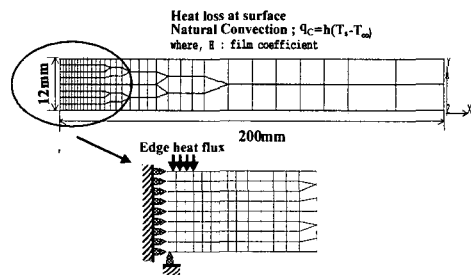


**Fig. 1** Dimension of weld specimen and analysis zone

### 3. 유한요소 모델

#### 3.1 해석영역 및 경계조건

해석 모델은, 각 단면으로 동일한 온도 변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위 길이를 지니는 수직한 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였으며 일반화된 평면 변형률(Generalized plain strain) 가정을 이용하였고, 해석에 사용되었던 요소는 4절점 사각형 요소(4-node quadrilateral element)이다. Fig. 1은 해석 대상인 용접 시편의 크기와 해석 영역을 나타내며, Fig. 2는 해석 모델의 요소 형상과 기계적 열적 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 모델<sup>(9,10)</sup>을 사용하였으며 램프비는 100%로 하였다.



**Fig. 2** Mesh generation and boundary condition

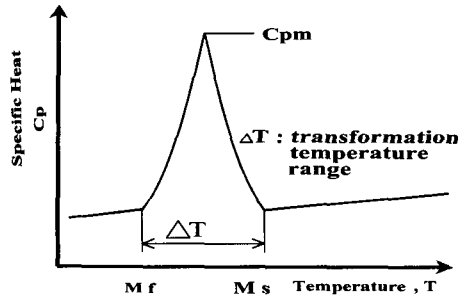
#### 3.2 상변태의 수치적 모델링

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. 이와 같은 상변태

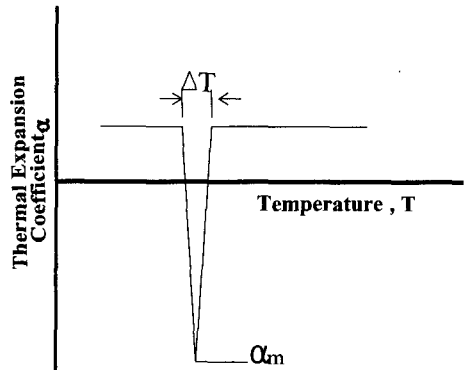
현상은 온도장, 응력·변형률, 재료 내부 조직의 3종류의 장이 연관되어 있는 물리현상이기 때문에 이를 수치적으로 모델링하는 것은 상당히 어려운 문제이나 용접에서의 역학적 현상을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 반드시 필요하다고 여겨진다. 이렇듯 복잡한 상변태 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서는 기존에 온도와 응력·변형률의 관계를 해석하는 열-기계적 커플링해석<sup>(12-19)</sup>의 바탕 위에 온도와 조직간의 상관 관계는 재료의 물성치 중 비열의 변화에 크게 의존하며, 응력·변형률과 조직과의 상관 관계는 재료의 열팽창 계수의 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  $\alpha_m$ 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 응력상태와 온도장을 구하였다. 여기서, 재료의 물성치는 온도의 함수로서 고려하였다. 여기서, 각 재료의 오스테나이트화 온도는 탄소 당량을 기준으로 Fe-C 상태도를 이용하여 구하였다. 냉각 과정에서는, 우선 입열과정에서 구해진 응력 및 온도 분포를 초기조건으로 지니도록 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 및 종료 온도는 Andrew의 식을 이용하여 구하였다. 이러한 과정을 해석으로 얻어진 잔류응력의 결과가 실험치와 일치할 때까지 반복하여 상변태시의 물성치 변화, 즉 Fig. 3의  $C_{pm}$ 과  $\alpha_m$ 을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 4는 상변태의 수치적 모델링을 위해 필요



(a) Specific heat



(b) Thermal expansion coefficient

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

Table 4 Data for considering phase transformation

Materials	Equivalent Carbon, $C_{eq}$	Austen-izing Temperature	Transformation range during cooling ( $M_s \sim M_f$ : $^{\circ}C$ )
HT80	0.5	815 $^{\circ}C$	450~250
9%Ni	0.414	830 $^{\circ}C$	380~160
Mild Steel	0.363	850 $^{\circ}C$	780~540
STS304	.	.	No

한 데이터로서 각 재료의 탄소당량과 이를 이용하여 Fe-C 상태도에서 구한 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. 5는 입열 과정의 해석에서 각 재료의 오스테나이트화 온도를 넘어서는 절점

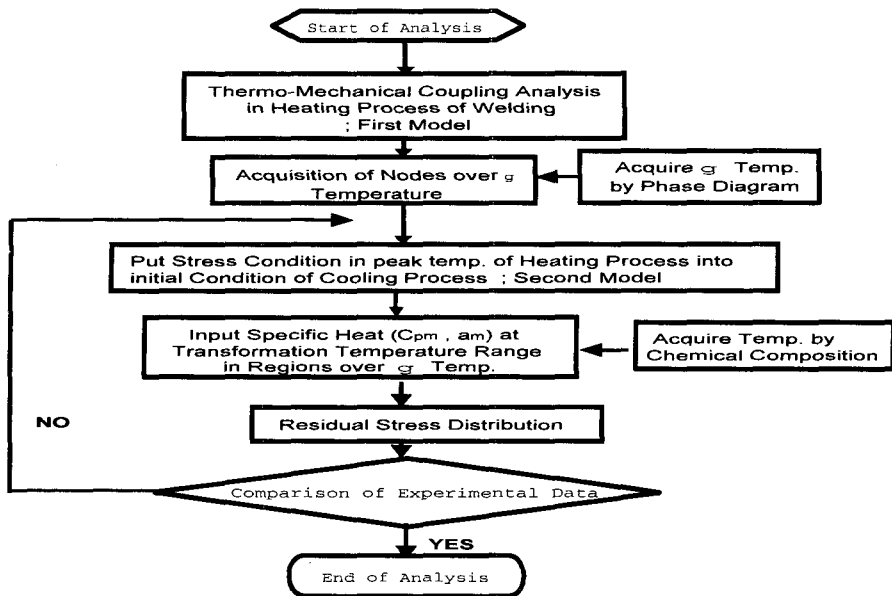


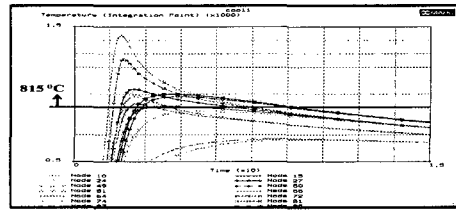
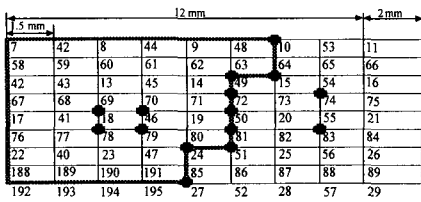
Fig. 4 Flow chart of numerical modeling

의 온도 사이클과 그 영역을 나타낸 것으로, 이 영역에서 냉각시에 상변태가 발생하여 변태응력에 의해 용접부의 응력을 완화시켜주는 역할을 한다. Fig. 4에서와 같은 알고리즘이 냉각 중의 상변태 현상을 제대로 모사하는 지를 알아보기 위해, 각 재료의 해석 모델에서 상변태를 고려하는 해석을 수행한 결과 Fig. 5에서 나타난 영역 내의 임의의 절점에서의 온도 사이클에 대한 용접선 방향으로의 응력의 변화를 획득하여 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로, 용접시에 잔류하는 최종 응력은 변태 팽창에 의한 완화를 제외하면 냉각 중의 열수축이 어느 정도 소성변형으로 소비되는나에 의해 결정된다.

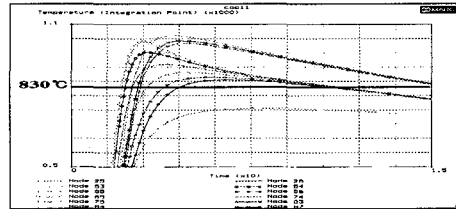
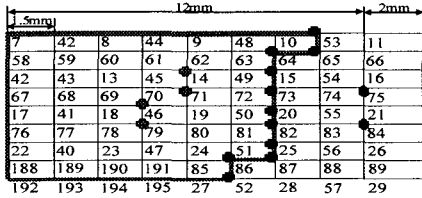
즉, Fig. 6(a) 처럼 냉각시 변태를 하지 않는 스테인리스강의 경우는 고온역에서의 열수축의 일부분이 탄성 변형으로 바뀌어 높은 응력을 나타내어 수축하여 저온역에서 열수축의 대부분이 소성변형으로 소비되어지는 데도 불구하고 높은 응력이 형성된다. Fig. 6(b) 처럼 고온에서 변태하는 연강의 경우 변태역에서 변태 응력에 의해 제로 가까이 응력이 이완되나, 변태 종료 후의 온도 저하량이 크기 때문에 열수축에 의해 다시 열응력의 상승이 크게 나타나고 있어 변태에 의한 응력의 완화 효과가 적다. Fig. 6(c)와 같이 중간 온도역에서 변태하는 고장력강의 경우는 중간 온도

역의 변태 개시 온도까지는 스테인리스강과 유사한 응력 상승을 보이나 그 이후에는 변태에 의한 응력 완화가 나타나고, 그 후 상온까지 약간의 열응력 상승이 있으나 최종적으로 무변태하는 스테인리스강에 비해 상당한 응력의 완화가 나타나고 있다. Fig. 6(d) 처럼 저온역에서 변태하는 9%Ni강의 경우는 변태가 완료되는 시점이 상온이기 때문에 변태에 의한 응력의 완화가 그대로 유지되어 그 효과가 현저함을 알 수 있다. 그리고, 변태가 일어나는 영역의 임의의 절점에 대한 온도 사이클을 확인한 결과 냉각 중 변태를 하는 연강, 고장력강, 9%Ni강에서는 각 변태 온도 영역에서 잠열로 인해 변태를 하지 않는 스테인리스강과는 달리 온도 변화율이 줄어드는 부분을 확인할 수 있었다. 그러므로, 본 연구에서 제시된 수치적 모델이 용접 후 냉각 과정의 상변태에 의한 잔류응력의 완화 과정을 제대로 모사하고 있다고 판단된다.

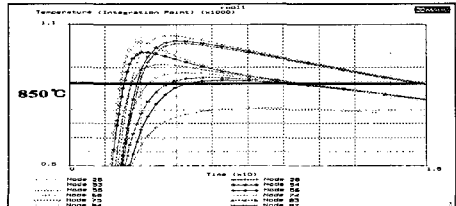
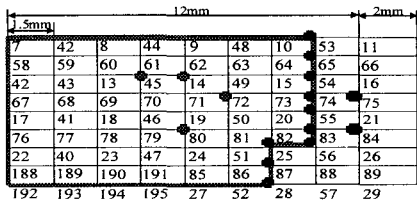
Fig. 7은 본 연구에서 수행한 유한요소 해석 결과로서 용접선 방향의 응력을 나타내는데, 변태가 일어나는 재료에 대해서는 상변태를 Fig. 4의 알고리즘으로 고려한 해석의 수행 결과와 고려하지 않은 해석 결과를 나타내는 것으로 상변태를 고려한 해석 결과가 실제 측정에 의한 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) HT80



(b) 9%Ni Steel



(c) Mild Steel

Fig. 5 A region heated over Ac3 temperature and temperature profile of nodes in the region for each specimen

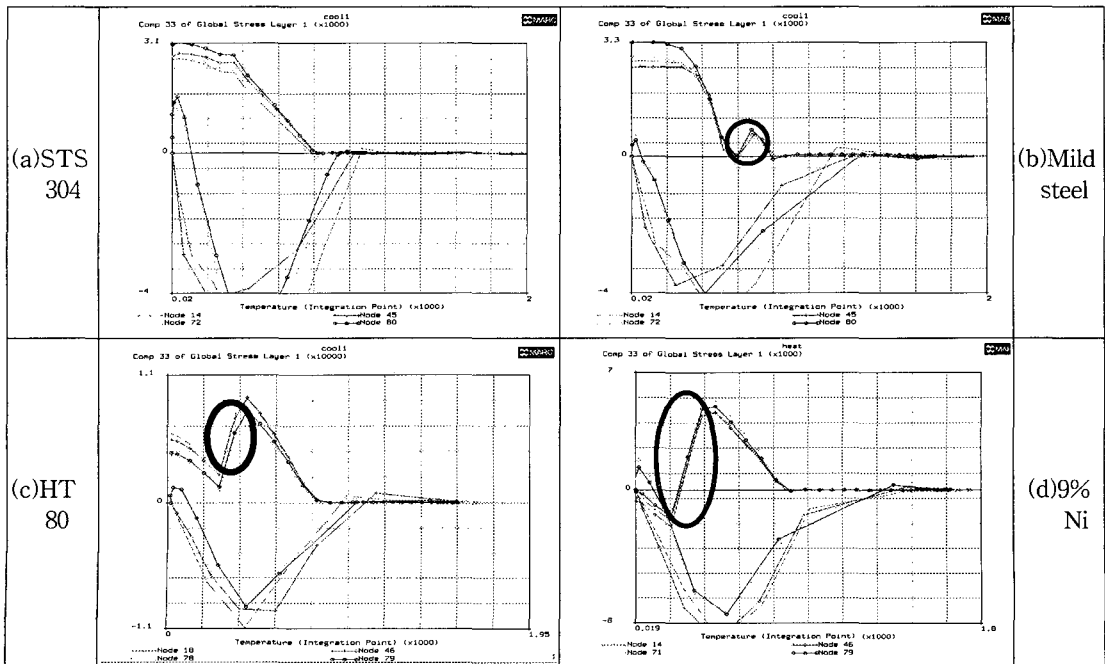
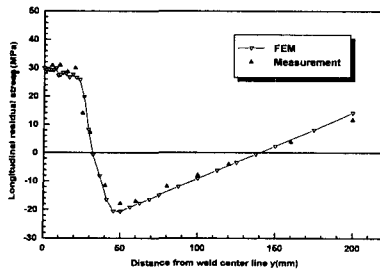
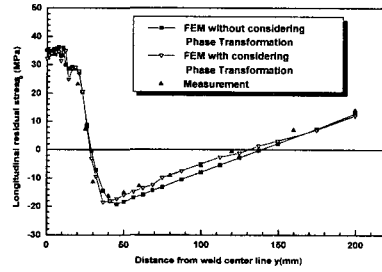


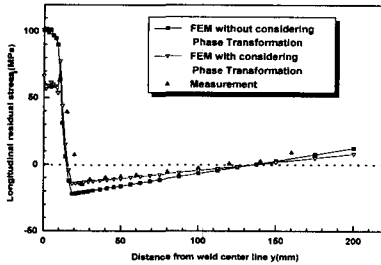
Fig. 6 Change of thermal stress during heating and cooling of welding



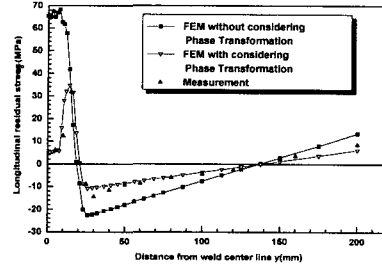
(a) STS 304



(b) Mild steel



(c) HT80



(d) 9%Ni

Fig. 7 Result of analysis in the present study

### 5. 결론

(1) 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.

(2) 이렇게 정립되어진 수치적 모델을 이용하여, 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 저온 변태하여 상온에서 변태가 끝나는 9%Ni강에서 가장 큼

을 알 수 있었다.

(3) 본 연구에서 제시된 수치적 모델의 타당성이 단순 맞대기 용접의 경우에 대해 검증되었으나, 앞으로 다른 계수 형태 및 구조물에 대해서도 그 타당성을 검증할 필요가 있다고 사료된다.

### 참고문헌

- (1) Koichi Masubuchi, 1980, "Analysis of Welded Structures," Pergamon Press.
- (2) Koichi Masubuchi, 1991, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures," AWS, Dec., pp. 41~47.
- (3) Kunihiko Satoh, Toshio, 1976, "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses Distributions in Welded Structures Materials," *JWS*, 45, No. 2, pp. 150~156.
- (4) Kunihiko Satoh, Toshio, 1976, "Effect of Transformation Expansion on Welded Residual Stresses Distributions and Welding Deformation," *JWS*, 45, No. 7, pp. 560~566.
- (5) Josefson, B.L, 1983, "Stress Redistribution

- During Annealing of a Multi-Pass Butt-Welded Pipe," *Journal of pressureVessel, Technology*, 105 pp. 165~170.
- (6) Karlsson, L., 1986, "Thermal Stresses in Welding," Thermal Stresses, Ed. R. B Hetnarski, Vol. 1, pp. 300~389, North-Holland, Amsterdam.
- (7) Goldak, J., 1990, "Modeling Thermal Stresses and Distortions in Welds," *Recent Trends in Welding Science and Technology*, pp. 71~82. ASM Internal, Material Parks, Ohio.
- (8) Andersson, B. A. B., 1978, "Thermal Stresses in a Submerged-arc Welded Joint Considering Phase Transformations," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100(No. 4), pp. 356~362.
- (9) SHIM, Y. L. and FENG, Z. 1992, "Determination of Residual Stress in Thick-Section Weldments," *Welding Journal*, Vol. 71(No. 9), pp. 305~312.
- (10) 심용래, 이성근, 1993, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발," 대한용접학회지, 제11권, 제3호, pp. 110~123.
- (11) Murata. H. and Kato. N, 1990, "Proportion of Transformation Superplasticity and Expansion on Stress Release," *JWS*. Vol. 8, No. 2 pp. 249~254.
- (12) Free. J. A. and Potter Goff. R.F.D., 1989, "Predicting Residual Stress in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method," *Computer and Structures*, Vol. 32(No. 2), pp. 365~372.
- (13) Shim, Y., Feng, Z., Lee, S., Kim, D., Jaeger, J. and Tsai, C.L., 1991, "Modeling of Welding Residual Stresses," *Processings of the Winter Annual Meeting of the ASME*, Atlanta, Georgia, pp. 29~41.
- (14) Leung, C.K. and Pick, R.J., 1990, "Finite Element Analysis of Multipass Welds," *WRC Bulletin* 356, pp. 11~33.
- (15) Ueda, Y., Takahashi, E., Fukuda, K., and Nakacho. K., 1974, "Transient and Residual Stresses in Multi-Pass Welds," *Transactions of JWRI*, Vol. 3(No. 1), pp. 59~67.
- (16) The Ohio State University, 1992, "Experimental Verification of Finite Element Modeling Procedures for Thick Plates," Technical Report Submitted to U.S. Army Corps of Engineers Department of Welding Engineering.
- (17) Hibbit. H. D. and Marcal. P. V., 1973, "A Numerical Thermo-Mechanical Model for the welding," *Computer and Structures*, Vol. 3(No. 11), pp. 1145~1147.
- (18) Friedman. E., 1975, "Thermo-Mechanical Analysis of the Welding Process Using Finite Element Method," *Journal Press. Vessel Tech. ASME*, series J, Vol. 97(No. 3), pp. 206~243.
- (19) Michaleris., P., and DeBiccari., A. 1997, "Prediction of Welding Distortion," *Welding Journal Vol.* 76(No. 4), pp. 172~179.