

## 研究論文

# 304 스테인리스강 용접부 잔류응력에 미치는 예열 효과의 유한요소 해석

장 경 복\* · 김 하 균\*\* · 강 성 수\*\*\*

**Finite Element Analysis of Effect of Preheating on the Residual Stress in 304 Stainless Steel Weldment**

G. B. Jang\*, H. K. Kim\* and S. S. Kang\*\*

**Key Words :** Residual Stress(잔류응력), F.E.M(유한요소법), Thermal Cycle(열이력), Preheat Process(예열공정), Welding Equilibrium Temperature(용접 평형온도)

### Abstract

This study aimed at the experimental and finite element analytic investigation of the effect of preheating on the residual stress of weldment. In this study, an autogenous arc welding was used on type 304 stainless steel and MARC as F. E. M. common code was utilized in analysis. The analyses include transient and moving heat source and thermal properties as function of temperature. During welding, the thermal cycles of four locations in the weldment were recorded to investigate of the behavior of thermal stress and residual stress.

The experimental and analytic results had good coincidence and show that there are two factors influencing the formation of welding residual stress in preheat process. One is the elevation of welding equilibrium temperature and the other is the increase of amount of heat input. The former decrease welding residual stress and the latter increase welding residual stress. Therefore, the cumulative effects result in the welding residual stress not being improved significantly with preheating in 304 stainless steel.

\* 1998년 3월 16일 접수

\* 학생회원, 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 부산대학교 기계기술연구소

## 1. 서 론

용접시에 잔류응력은 반드시 발생하며, 이 잔류응력은 보재의 항복강도를 넘을 수가 있다. 이러한 높은 잔류응력은 재료의 기계적 성질 및 부식성능에 영향을 미친다. 그러므로, 이러한 잔류응력을 감소시키기 위하여 다양한 열적, 기계적 처리가 용접부에 행하여지고 있으며 그 예로 예열 및 후열처리, 피닝(peening) 등이 있다.<sup>1)</sup> 이 중 예열처리는 용접전에 보재의 온도를 주위 온도 이상으로 가열하는 처리로서 용접금속과 열영향부의 냉각속도를 떨어뜨려 용접금속 및 보재에서의 균열발생을 억제하는 역할을 한다.<sup>2)</sup> 즉, 예열처리의 목적은 용접 잔류응력 및 변형의 완화, 용접부 성능의 개선등이며 용접 잔류응력 및 변형은 예열을 통해 용접부의 급냉을 방지함으로써 감소하며 그 감소 정도는 예열온도에 의해 큰 영향을 받는다. 용접부 성능의 개선효과로는 HAZ 경화부의 연화, 용착금속의 연성 향상 등이 있다.

예열처리는 많은 규격, 기준 등에 의하여 엄격히 정해지며, 재료의 종류, 두께, 용접상태, 사용조건 등에 따라 실시되고 있으나 규격에서 요구하지 않는 경우에도 크기, 형상, 사용조건, 부하등을 고려하여 필요하면 행하는 경우도 있다.

본 논문에서는 304 스테인리스강을 이용하여 용접에 의해 발생하는 잔류응력에 미치는 이러한 예열처리의 효과를 유한요소 해석을 이용하여 예측하고 그 결과를 실험에 의한 측정값과 비교하였다. 만약, 해석에 의한 결과와 실험에 의한 측정치의 오차가 적다면 용접시 예열공정의 필요성 여부를 실용성을 행하지 않고 결정할 수 있고, 예열공정이 필요하다면 예열온도, 용접 조건 등을 예측할 수 있어 상당한 비용절감을 가져오리라 판단된다. 이러한 해석은 유한요소 상용코드인 MARC를 이용하여 3차원 해석을 수행하였으며, 용접조건을 각각 다른 3가지의 경우에 대하여 해석을 하였고, 잔류응력 온도분포를 주관심 대상으로 계산하였다.

## 2. 유한요소 해석

본 연구에서는 3차원 유한요소 모델을 이용하여 맞대기용접의 일반적인 용접공정과 예열공정을 해

석하였다. 유한요소 계산은 상용 프로그램인 MARC를 이용하였으며, 정확한 해석을 위하여 온도에 의존하는 열물성치를 사용하였고 잠열의 효과와 복사와 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 그리고, 실 용접공정에 보다 근접한 결과를 얻기 위해 3차원 과도, 이동하는 열원에 대한 열전달해석과 열응력해석을 동시에 수행하는 커플링해석(coupled thermo-mechanical analysis)을 수행하였다.

### 2.1 해석영역 및 해석에 필요한 조건

요소분할(mesh generation)은 국부적인 입열에 의해 온도구배가 심한 용접부의 주변에는 보다 미세하게 요소분할을 하였으며 용착금속부와 열영향부에서는 해석의 정확도를 위해 Fine Mesh로 하였다<sup>3)</sup>. Fig. 1은 이러한 요소의 형상을 나타내며 요소분할은 일반적으로 3차원 해석시 사용되는 8 절점 블록 요소(8 node hexagonal brick element)를 이용하여 구성하였다.

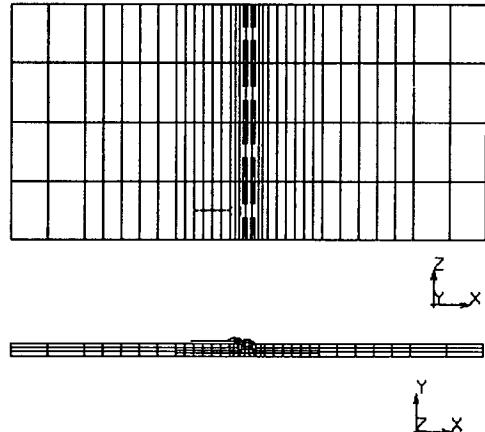


Fig. 1 Mesh generation

온도분포 해석시 필요한 경계조건으로 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 298K로 하였고, 용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력을 겪게 되므로 이를 고려하기 위해 재료의 열적 성질인 열대류계수와 열전도계수, 그리고 비열을 Fig. 2와 같이 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 열손실은 주로 대류와 복사에 의해 지배되는 것으로 간주하였으며, 열전달해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent

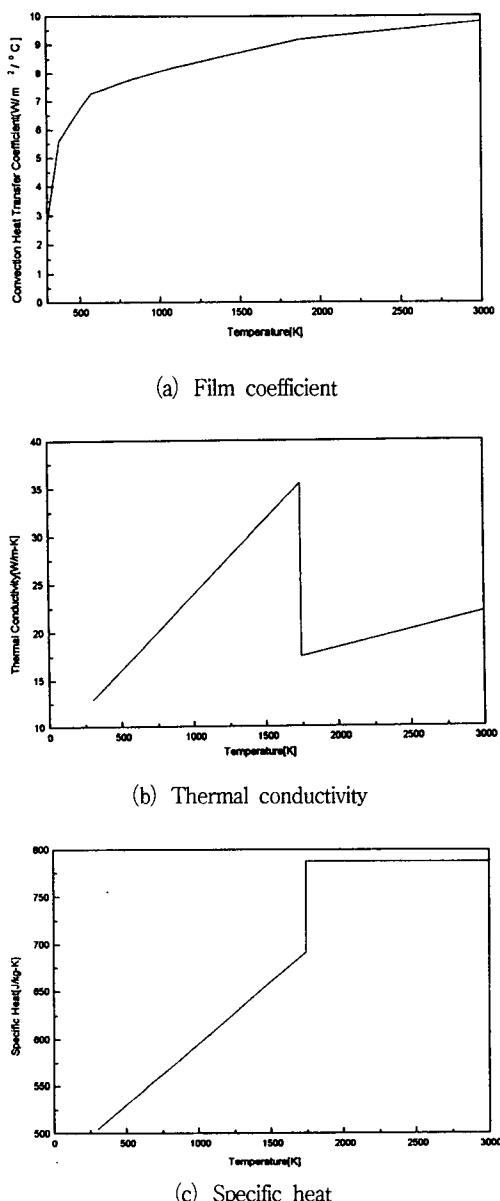


Fig. 2 Thermal properties of the material used

heat)에 대한 효과도 고려 하였다. 열전달 해석시 재료는 등방성이며, 재료의 항복거동은 폰미세스(Von-Mises)의 항복조건을 적용하였다.

커플링해석은 우선 열전달해석을 통하여 획득된 온도분포를 응력해석으로 넘겨줌으로서 입열에 따른 열응력, 열변형의 해석이 이루어지도록 하

는 것이다.<sup>4)</sup> 이러한 커플링해석의 개념도를 Fig. 3에 나타내었다. 커플링해석에 사용되는 변수는 모두 온도에 의존하며 지배방정식은 다음과 같다.<sup>5)</sup>

$$M\ddot{u} + D(T)\dot{u} + K(T)u = f \quad (1)$$

$$C(T)T + K(T)T = Q + Q^1 \quad (2)$$

여기서,  $M$  : mass matrix,  $C(T)$  : specific heat matrices,  $K(T)$  : thermal conductivity matrices,  $D(T)$  : temperature-dependant displacement matrices,  $T$  : nodal temperature vector,  $u$  : displacement vector,  $f$  : plastic work,  $Q^1$  : the amount of heat generated due to plastic work

## 2.2 해석순서

본 연구에서는 3차원 과도, 이동하는 열원을 형성하기 위해 맞대기용접부에서 열원의 점진적인 이동을 고려하기 위해 필러재료요소 (filler material elements)를 z-방향으로 4개의 그룹으로 형성하여 하나의 그룹의 요소에 20초간의 입열을 가하면서 열원을 이동시킴으로써 실용접에 보다 근접한 결과를 얻고자 하였으며 총 용접 시간은 80초로 하였다. 그리고, 해석시간은 가열과정과 냉각과정을 거쳐 정상상태에 이르러 상온에 도달하게 되는 시간까지를 전체 해석시간으로 하여 1000초로 하였다.

예열공정은 용접열원에 앞서 예열열원이 먼저 입열된 다음 z-방향으로 4개의 그룹 요소에 순차적으로 용접열원을 입력하여 유한요소해석을 실시하였다.

## 3. 실험재료 및 실험방법

해석과 실험에 사용된 재료는 304 스테인리스강으로 재료의 성분과 기계적성질을 Table 1에 나타내었다. 사용된 시편의 치수는 260(폭) × 130(길이) × 7(두께) mm로 용접전에 850°C에서 2시간 동안 어닐링 처리된 것을 사용하였다. 예열공정은 디지털 전기저항 가열 블록(digital electric resistance heating blocks)를 이용하여 일정한 온도 영역이 유지되도록 하였다. 용접공정은 GTAW를 이용하였고 용접조건은 Table 2와 같다. 용접열원

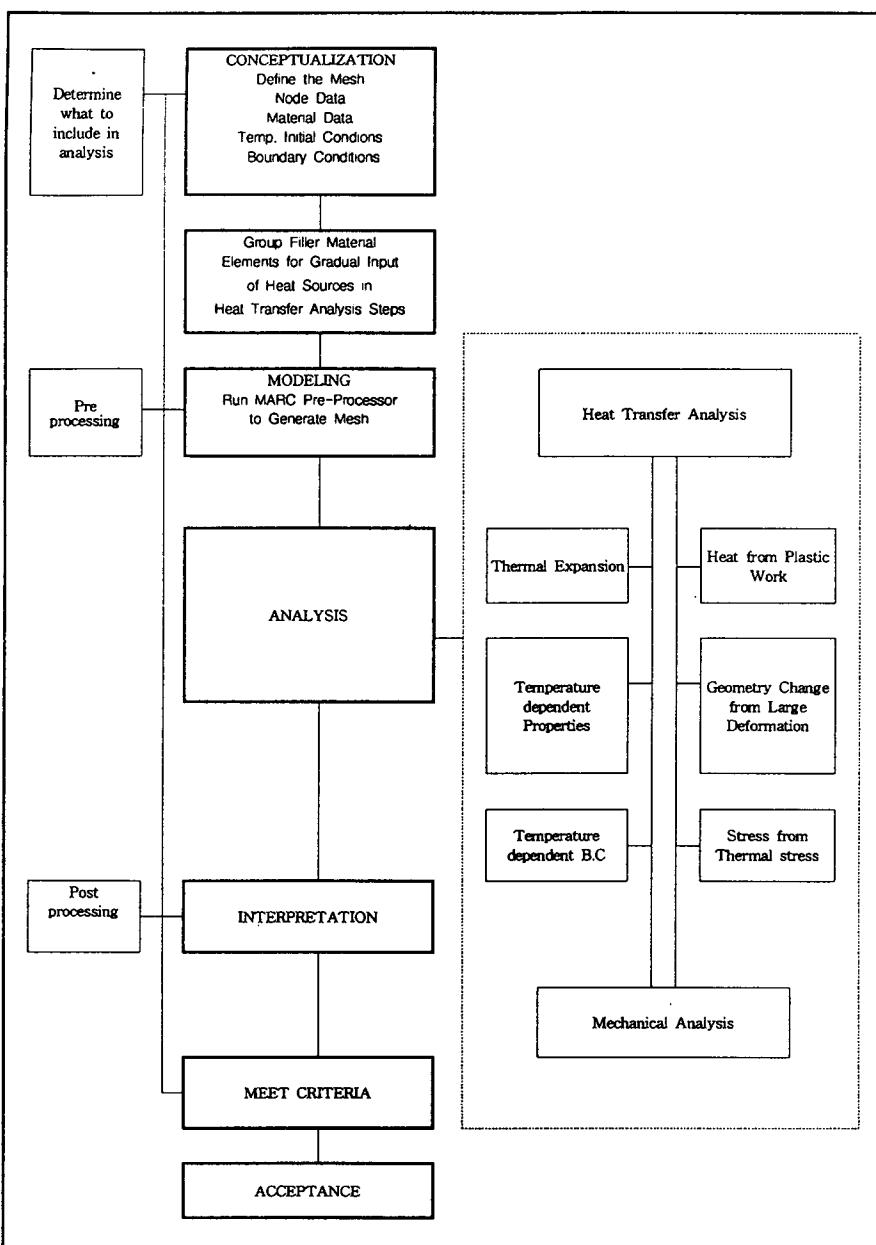


Fig. 3 Computation scheme of coupled thermo-mechanical analysis

의 세기는 단위길이당의 입열량으로 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$H = \eta EI / v (KJ/cm) \quad (3)$$

여기서,  $\eta$ 는 아크 효율이며  $E$ 는 전압(Volts),  $I$ 는 전류(Ampères),  $v$ 는 용접 속도(cm/sec)이다.

잔류응력에 미치는 예열효과를 고찰하기 위해 일반용접(conventional welding-CW)과 예열(preheat-PH)을 수반하는 용접이 각각 적용되었

**Table 1.** Chemical composition and mechanical properties of the material used

화학성분 (wt%)							기계적 성질			
C	Si	P	S	Ni	Cr	Mn	항복강도 (Mpa)	인장강도 (Mpa)	탄성계수 (Mpa)	프와 송비
0.069	0.447	0.025	0.015	8.24	18.58	1.505	260	689	193	0.28

**Table 2.** Welding conditions used

용접조건	전류(A)	전압(V)	용접속도(cm/min)	입열량(kJ/cm)	예열온도(°C)
A	130	10.5	8	10	-
B	170	11	8	14	-
C	200	12.0	8	18	-
D	130	10.5	8	10	200
E	170	11.0	8	14	200
F	200	12.0	8	18	200
G	130	10.5	8	10	100
H	130	10.5	8	10	200
I	130	10.5	8	10	300

다. 그리고, 실험 시편은 구속이 없는 상태에서 용접되었다.

용접동안의 열사이클을 측정하기 위해 4개의 셔커플(thermocouple)을 용융라인으로부터 각각 1, 10, 22, 그리고 40 mm지점에 부착하였다. 셔커풀은 용접아크의 복사열에 의한 에러를 피하기 위해 표면 아래 5 mm지점에 시편의 뒷면으로부터 구멍을 뚫어 설치하였다.

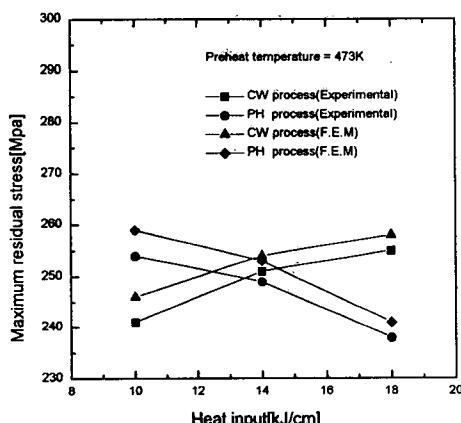
잔류응력을 측정하기 위해 용접후 3개의 스트레인 게이지 로젯(strain-gage rosette)을 용융라인으로부터 5.5 mm에 설치하였으며, 잔류응력은 ASTM E837의 홀드릴링 스트레인 게이지(hole-drilling strain-gage) 방법을 이용하였다.

#### 4. 해석결과와 실험결과의 비교 및 고찰

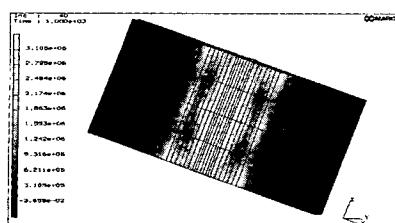
##### 4. 1 잔류응력 평가

실험에 의해 측정한 CW시편과 200°C로 예열된 PH시편의 입열에 따른 최대 잔류응력치와 해석에 의한 잔류응력치를 Fig. 4에 나타내었다. 그리고, Fig. 5에는 CW시편의 입열이 각각 10, 14, 18 (kJ/

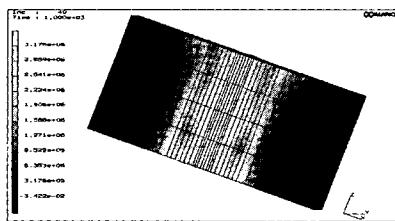
cm) 일 때 용접후 완전히 냉각된 후에 잔류하는 응력의 분포를 해석한 결과로 나타내었다. 실험결과와 해석결과 모두 CW과정에서는 용접 입열이 증가할수록 최대 잔류응력이 증가하며, PH과정에서는 용접입열의 증가에 따라 최대 잔류응력이 감소



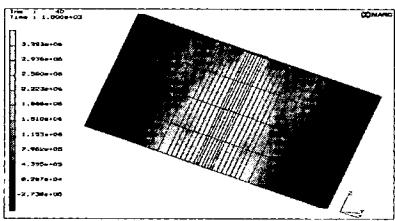
**Fig. 4** Comparison of the experimental and FEA data on effect of heat input on the residual stress



(a) heat input 10k



(b) heat input 14k



(c) heat input 18k

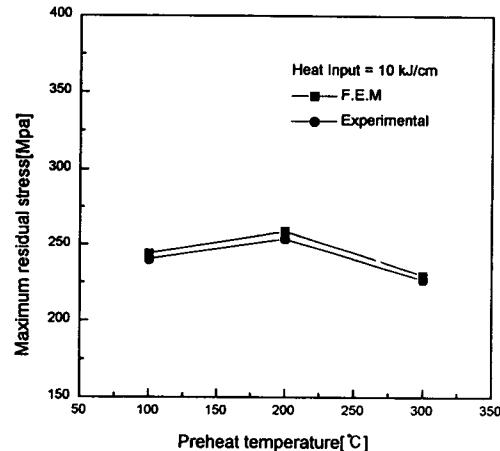
**Fig. 5** Distribution of residual stress in CW specimen with heat input

하고 있음을 보여주고 있다. 그리고, 용접입열이 낮을 경우 PH시편의 잔류응력이 CW시편의 값보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 일반적으로 예열을 하게 되면 용접후 냉각시에 도달하게 되는 평형온도의 상승으로 냉각속도가 감소하여 잔류응력을 감소시키나 입열량은 증가하므로 잔류응력의 증가를 가져오는, 즉 어느 경우의 효과가 크게 나타나느냐에 따라 최종적인 잔류응력의 증가 또는 감소를 가져오게 되는데 예열을 한 경우의 저입열에서는 입열량의 증가에 따른 잔류응력의 증가가 더 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

해석결과와 실험치는 잘 일치하고 있으나, 해석결과의 값이 전체적으로 실험치 보다 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는, 실 용접에

서는 각 조건의 용접마다 비드의 폭이라든가 용입깊이 등이 각각 다르게 나타나는데 비해 해석시에는 이를 정확하게 고려하기가 곤란하며 또한 입열이 되는 영역도 실용접과 해석시가 정확히 일치하기가 곤란하기 때문에 해석시의 경우가 실용접보다 전체적인 입열이 다소 높게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 예열공정에 있어서 최대 잔류응력에 미치는 예열온도의 영향을 나타내었다. 실험치와 해석치의 전체적인 경향이 비슷하며 오차도 그리 크지 않음을 알 수 있다. 최대 잔류응력의 값은 예열온도에 따라 227Mpa에서 255Mpa 정도로 분포하는데 Fig. 2에서 알 수 있듯이 CW시편에서의 최대 잔류응력은 241Mpa 정도이다. 그러므로, 실험과 해석에 의한 결과 304 스테인리스강의 용접은 예열처리를 통해 잔류응력이 효과적으로 감소되지는 않음을 알 수 있다.



**Fig. 6** Comparison of the experimental and FEA data on effect of temperature on the residual stress in the preheat process

#### 4.2 열사이클 분석

잔류응력과 열응력의 거동을 고찰하기 위해 용접 열사이클을 측정 및 해석하였다. Fig. 7에는 CW시편에서 용접열원이 z-방향의 마지막 요소에 입열 되는 순간인 해석시간이 75sec일 때의 전체적인 온도분포를 나타내었는데 동적인 열원이 잘 나타나고 있다. CW시편에서 저입열인 용접조건 A와 고입열인 용접조건 C의 열사이클의 측정치와 해석

치를 각각 Fig. 8와 9에 나타내었다. 입열량이 10KJ에서 18KJ로 증가함에 따라 용융라인에서 1mm떨어진 지점에서의 피크온도가 대략 100K 정도 증가하였으며 용융라인에서 멀어질수록 그 증가 정도가 적어짐을 알 수 있다. 그 이유는 304 스테인리스강은 낮은 열전도도를 지니기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 10과 11에는 PH 시편에서의 저입열 조건 D와 고입열 조건 F의 열사이클의 측정치와 해석치를 나타내었다. 실험치와 해석치는 각 시간에 대한 온도값이 다소의 차이를 나타내나 전체적인 온도 사이클의 형태는 일치하고 있다.

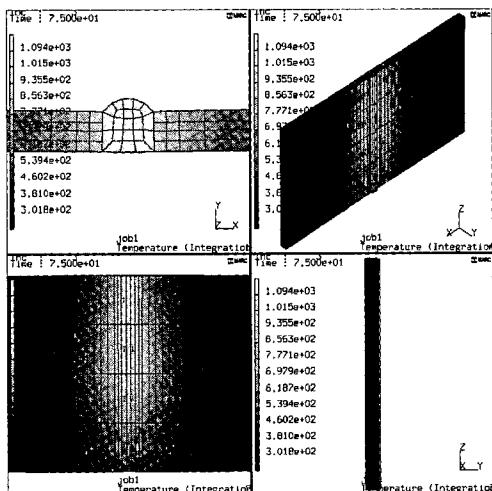
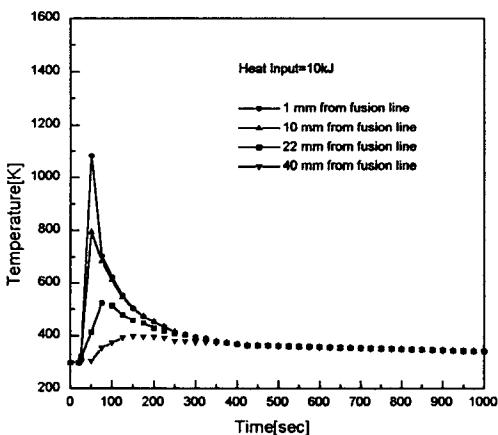


Fig. 7 Temperature distribution of CW specimen



(a) Welding condition A

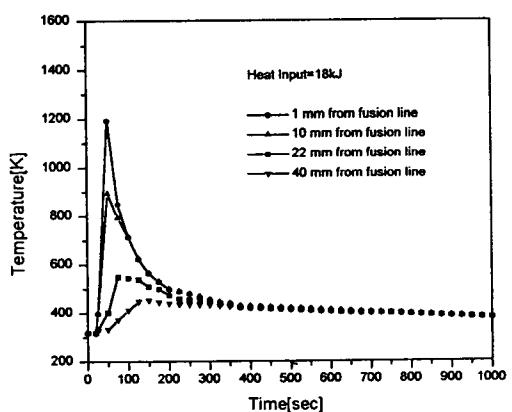
Fig. 10에서 나타나듯이 PH시편에서 저입열 D인 경우의 평형온도(용접부의 다양한 위치의 온도의 차이가 냉각과정에서 제로가 되는 온도)는 523K, 그때의 시간은 350sec이고 고입열 F인 경우의 평형온도는 553K, 시간은 400sec으로 평형온도가 증가하였음을 알 수 있다. 이렇듯 평형온도가 증가하면 용접 잔류응력은 감소하는 것으로 알려져있다.<sup>4), 5)</sup> 그 이유는 입열량이 클수록 냉각속도가 떨어지기 때문이다.

이러한 열사이클 및 잔류응력의 해석에 기초하여 예열과정 동안 잔류응력에 미치는 인자는 크게 2가지가 있음을 알 수 있다. 첫째, 평형온도의 상승으로 이는 용접 잔류응력을 감소시킨다. 둘째는 입열량의 상승으로 이것은 용접 잔류응력을 증가시키는 요인이다. 즉, 예열공정으로 인해 용접후 평형온도는 상승하나 입열량도 증가하기 때문에 용접 잔류응력은 크게 감소하지는 않음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

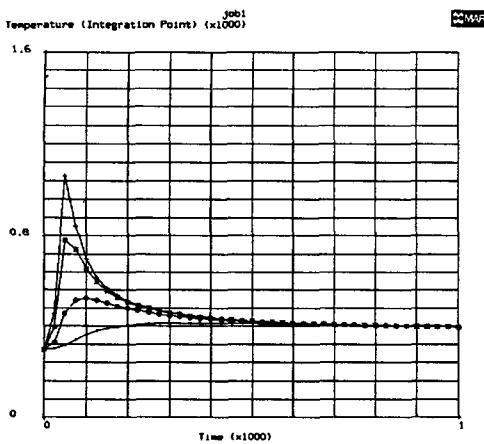
용접공정 중 예열공정이 잔류응력에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 검증하기 위해 304스테인리스강을 이용하여 실험을 통하여 용접 열사이클 및 잔류응력을 측정하고 3차원 유한요소해석으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 1. 잔류응력의 해석 및 측정에 의한 결과 CW시

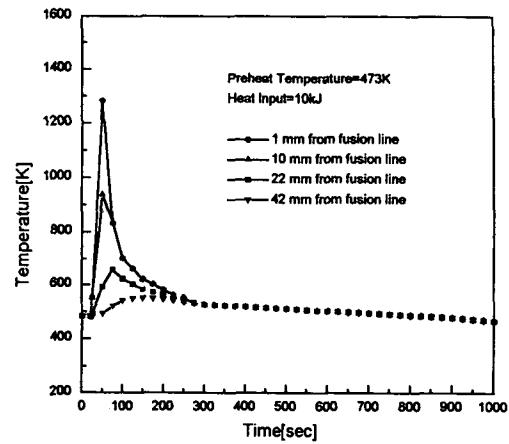


(b) Welding condition C

Fig. 8 Thermal cycles at various locations of conventional welding process by experiment

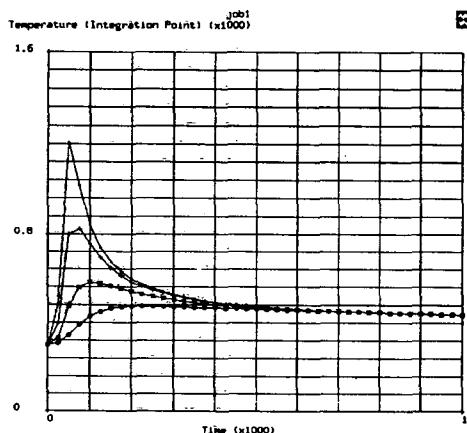


(a) Welding condition A

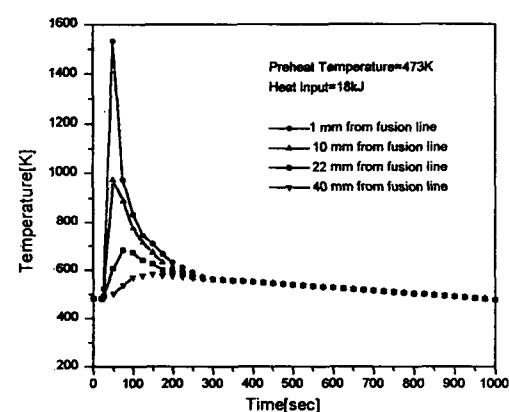


(b) Welding condition C

Fig. 9 Thermal cycles at various locations of conventional welding process by F. E. A



(a) Welding condition D



(b) Welding condition F

Fig. 10 Thermal cycles at various locations of preheat process by experiment

편에서는 용접입열이 증가할수록 최대 잔류응력이 증가하였고, PH시편에서는 감소하였으며, 용접입열이 낮을 경우에는 PH시편의 잔류응력이 CW시편의 값보다 크게 나타났다.

2. 용접 열사이클 분석결과 입열량이 증가함에 따라 피크온도가 증가하였으나 304스테인리스강의 낮은 열전도도로 인해 용융라인으로부터 멀어질수록 그 증가 정도가 감소하였다. 그리고, PH시편에서는 입열량이 증가할수록 용접후의 평형온도가 증가하였다.

3. 이러한 잔류응력 및 열사이클의 분석으로 예열공정에서 잔류응력에 영향을 미치는 인자로는 평형온도의 상승과 입열량의 증가라는 두 가지 주된 요인이 있으며, 전자는 용접 잔류응력의 감소에 긍정적인 효과를 지니나 후자는 부정적인 영향을 미치기 때문에 304 스테인리스강에서 예열공정은 용접 잔류응력을 크게 감소 시키지는 않음을 실험과 해석을 통하여 검증하였다.

4. 이상과 같이 용접 예열공정을 유한요소법을 이용하여 해석함으로써 최종적인 잔류응력의 분포

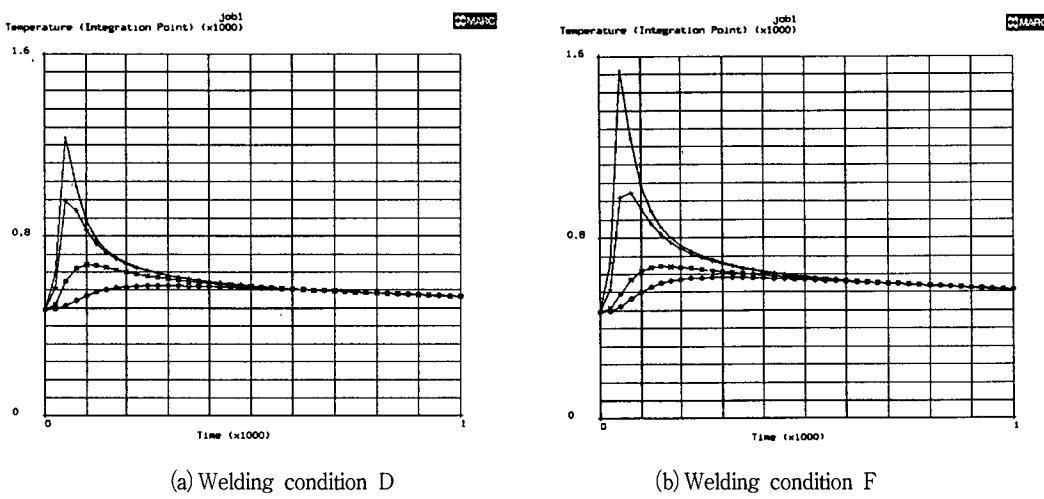


Fig. 11 Thermal cycles at various locations of preheat process by F. E. A

와 열 사이클을 예측할 수 있어 예열공정의 필요성 여부와 최적의 예열공정을 실용접을 수행하지 않고도 알 수 있어 예열공정으로 낭비되는 비용을 절감할 수 있으리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures", AWS, Dec., (1991), pp. 41-47
2. Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, (1980)
3. P. Tekriwal, J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three Dimensional Transient Heat Transfer in GMA welding", AWS, July, (1988) pp. 150s-156s
4. 양영수, 이세환, "필렛 용접부의 각변형량 예측에 관한 연구", 대한용접학회지, 제15권, 4호, (1997), pp. 289-295
5. Analysis Research Corporation, MARC User Manual