[UCI]I804:24011-200000232658

2006 년 2월
석사학위 논문

*9Cr-1Mo*강에 대한 *Laser* 및 *SMAW* 용접부의 열 및 역학적 거동에 관한 기초적 연구

The Fundamental Study of the Heat and Mechanical Behaviors between the Laser & SMAW Welds of 9Cr-1Mo Steel.

조선대학교대학원
선 박 해 양 공 학 과
김 인 식

*9Cr-1Mo*강에 대한 *Laser* 및 *SMAW* 용접부의 열 및 역학적 거동에 관한 기초적 연구

The Fundamental Study of the Heat and Mechanical Behaviors between the Laser & SMAW Welds of 9Cr-1Mo Steel.

2006년 2월

조선대학교대학원

선박해양공학과

김 인 식

*9Cr-1Mo*강에 대한 *Laser* 및 *SMAW* 용접부의 열 및 역학적 거동에 관한 기초적 연구

지도 교수 방한서

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함.

2005 년 11월

조선대학교대학원

선 박 해 양 공 학 과

김 인 식

목 차

List of Figures ····· Ⅲ
List of Tables ····· Ⅳ
Abstract ····· Ⅴ

제 1 장 서론 ····· 1
1. 1 연구 배경 및 목적 ····· 1
1. 2 연구 및 실험 ····· 1

제 2 장 해석 이론 ····· 3
2. 1 열전도 이론의 유한요소 정식화 ····· 3
2. 2 열분포 해석용 프로그램 ····· 6
2. 3 열탄소성 이론의 유한요소 정식화 ····· 7
2. 4 용접잔류응력 해석용 프로그램 ····· 9
2. 5 해석 모델 및 용접조건 ····· 10
2. 5. 1 시험편의 제작 및 입열량 ····· 13

제 3 장 용접부 열분포 수치해석 ····· 17
3. 1 각각의 용접법에 의한 용접열분포 해석 ····· 17
3. 2 용접부 열이력 곡선 ····· 22

제 4 장 용접 접합부 잔류응력분포 수치해석 ····· 23
4. 1 각 용접법에 따른 용접잔류응력분포 해석 ····· 23

제 5 장 기계적 강도 시험 ····· 26

5. 1 시험편의 선정 ····· 26
5. 2 시험편의 제작 ····· 27
5. 3 경도시험 ····· 27
5. 4 충격시험 ····· 29
5. 5 굽힘 및 상온 인장시험 ····· 30
5. 6 고온 인장 시험 ····· 36

제 6 장 결론 ····· 41

참고문헌 ····· 43

List of Figures

Fig. 1 Flow-Chart of analysis on thermal distribution ····· 6
Fig. 2 Flow-Chart of analysis on welding residual stress ····· 9
Fig. 3 Schematic mesh division for F.E analysis ····· 12
Fig. 4 Boundary Condition for thermal elasto-plastic analysis ····· 13
Fig. 5 Specimen Size of SMAW 60° ····· 14
Fig. 6 Specimen Size of SMAW 30° ····· 15
Fig. 7 Specimen Size of Laser ····· 16
Fig. 8 Heat Distribution of SMAW 60° ····· 19
Fig. 9 Heat Distribution of SMAW 30° ····· 20
Fig. 10 Heat Distribution of CO_2 Laser ····· 21
Fig. 11 Temperature History of 9Cr-1Mo Steel Weldments ····· 23
Fig. 12 Residual Stress of 9Cr-1Mo Steel Weldments ····· 25
Fig. 13 Micro Vickers Hardness Tester ····· 28
Fig. 14 Hardness of 9Cr-1Mo Steel Weldments ····· 29
Fig. 15 Charpy Test Machine and Specimen of Impact Test ····· 30
Fig. 16 Specimen of Bending and Tensile Test ····· 32
Fig. 17 Machines of Bending and Tensile Test ····· 32
Fig. 18 Results of Bending Test ····· 33
Fig. 19 Tensile Test Results of 9Cr-1Mo Steel Weldment ····· 35
Fig. 20 Specimen of High Temperature Tensile Test ····· 37
Fig. 21 Machine of High Temperature Tensile Test ····· 38
Fig. 22 High Temperature Tensil Test Results of 9Cr-1Mo Steel weldment ····· 39

List of Tables

Table. 1 Chemical composition and Mechanical property of welding rod … 2
Table. 2 Laser and SMAW welding condition …… 10
Table. 3 Physical property of 9Cr-1Mo steel …… 11
Table. 4 Welding Condition of SMAW 60° …… 14
Table. 5 Welding Condition of SMAW 30° …… 15
Table. 6 Chemical composition and Mechanical property of base metal … 26
Table. 7 Results of Impact Test …… 30
Table 8. Results of Tensile Test …… 36
Table 9. High Temperature Tensil Test Results …… 40

ABSTRACT

The Comparison of the Heat Distribution Characteristic and Mechanical Behavior betweenthe Laser & SMAW Welds of 9Cr-1Mo Steel.

Kim In Sik
Advisor : Prof. Bang Han Sur, Ph.D
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering
Graduate School of Chosun University

The pressure vessel and pipe laying used for atomic power plant and petro-chemical plant is subjected to harsh environments such as high temperature, high pressure, hydrogenates environment etc. Low alloy Cr-Mo steel known to be considerably superior for heat, pressure and corrosion resistance is used for the manufacturing above structures. However, welding process generates deterioration of material and welding residual stresses caused by thermal cycles of heating and cooling, which reduce the stability of the weldment. These effects are quite different according to the welding methods (i.e. according to the various heat sources) [1]. Latest technical advance has made welding for thick plates capable by high output of laser welding equipment. Laser welding gives a minimum thermal shock to adjacent quality of the material, accurate welding, minimum welding contraction and transformation and has an advantage obtaining high quality of welding with minimum heating of the material quality when compared with arc welding process. In spite of the merits of laser welding when compared to arc

welding, laser welding is mainly used in joining of thin steel parts of electronics industry. Laser welding is getting widely used in joining thick plate and special kinds of steel due to its high power. While the arc welding is still applied for 9Cr-1Mo steel which is the essential materials of atomic power generation equipment, the laser welding is not yet applied despite of its high quality. So it has been applied in a special case demanding high welding quality, such as atomic power plant.

Therefore, in this present study, in order to confirm the possibility of applying the laser welding to heat and pressure resistance steel, low alloy 9Cr-1Mo steel was fabricated by SMAW and CO2 laser welding, and the characteristic of welding heat distribution and residual stress in weldments of each welding process have been investigated and analyzed using the two dimensional heat conduction and elasto-plastic simulation. The strength of welded joints has been evaluated through the mechanical tests(hardness, low thermal toughness, bending and tensile). The Charpy test was carried out to understand the effect on the fracture toughness of weldments. The results of examination and test of the mechanical properties showed the validity of this research.

Accordingly, in this research, the mechanical properties of weldments by arc and laser welding were investigated using FEM to confirm the applicability of laser welding to 9Cr-1Mo steel.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

산업의 발달과 더불어 원자력, 항공기, 석유공업의 기계 또는 장치의 주요부분이 고온에서 사용되고 있으며, 이러한 환경에서 사용되어지고 있는 재료가 고온에서 내구력을 갖는다는 것은 기계성능에 큰 영향을 미친다.

이러한 성능적 요구사항으로 인해 9Cr-Mo강의 수요가 점점 증가하는 추세이나, 그에 따른 용접방법 및 그 용접부에 대한 열거동과 응력, 변형거동의 예측 및 해석 기반기술 확보를 위한 연구개발은 매우 미흡한 실정이다. 따라서 용접부의 강도나 인성이 용접방법에 따라 어떻게 변화하는가에 대해 파악하는 것이 필요하고 특히, 원자력설비 구조안전기술중 가장 핵심인 고온 환경에서의 용접부의 역학적 특성을 규명함으로써 개선된 Cr-Mo 강에 대한 용접성 및 신뢰성을 확립해 나아가야 한다.

본 연구에서는 9Cr-1Mo강에 대한 기존의 용접법인 SMAW와 새로운 용접방법인 Laser 용접에 대해 수치해석을 수행하여 용접시 발생하는 열분포 및 용접잔류응력 특성을 파악하고 역학적 특성을 규명함으로써 새로운 용접법인 Laser용접법의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

1. 2 연구 및 실험

9Cr-1Mo강의 레이저 용접적용에 대한 이론적 연구는 그다지 활발하지 못하고 연구성과도 미비한 것이 사실이다. 본 연구에서는 2차원 비정상열전도와 열· 탄소

성 이론에 의한 수치해석을 통하여 SMAW 및 레이저 용접부를 대상으로 열 및 역학적 거동에 관한 기초적 연구를 수행하고자 하였으며, 다양한 강도 시험법을 통해 금속재료의 역학적 성질을 비교하고자 하였다.

수치해석과 동일한 용접조건을 기준으로 하여 9Cr-1Mo강의 용접성 분석 관련 용접법에 따른 용접시편 제작하여 용접부의 기계적 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 시행하였다.

- 9Cr-1Mo강의 용접성 분석 관련 용접법에 따른 용접시편 제작.

▷ SMAW 맞대기 용접 (300×500×16T)

- 사용 용접봉 : S-9016.B3 3.2mm, 4.0mm

Table. 1 Chemical composition and Mechanical property of welding rod

Product	Chemical Coposition (wt%)						
CM-90	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
	0.085	0.379	0.080	0.097	0.336	9.376	0.911
	Mechanical Properties						
	Yield Stress (MPa)			Tensile Stress (MPa)			
	500			670			

- 9Cr-1Mo강 용접부의 저온파괴인성(Charpy) 시험
- 9Cr-1Mo강 용접부의 굽힘 및 상온 인장 시험
- 9Cr-1Mo강 용접부의 고온 열화 특성 분석을 위한 고온인장 및 피로파괴실험

- 9Cr-1Mo강의 용접성 분석 관련 용접법에 따른 용접시편 제작.

2장 해석 이론

본 연구에서는 레이저 및 SMAW 접합부의 열전도 및 용접잔류응력 분포를 열전도 및 용접잔류응력 분포를 유한요소식으로 정식화한 수치해석 mfhrmfoa을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 해석에 사용한 수치해석 프로그램은 모두 자연좌표계를 이용한 Isoparametric 개념을 도입하여 정식화 하였다. 또한, 용접의 경우 시간에 따라 온도가 변화하므로 본 연구에 사용한 9Cr-1Mo강의 물리정수인 비열, 밀도 및 열전도도등이 변화하게 되므로 이를 고려한 열분포 해석용 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서는 열원은 준 정상상태로 구별되는 접합부 중앙단면에 대하여 순간열원으로 고려하였으며, 본 장에서는 이들 해석에 사용한 프로그램의 해석이론에 대하여 간단히 언급하고자 한다.

2. 1 열전도 이론의 유한요소 정식화

물체의 표면에 대한 열적 경계조건은 물체 내에 온도차가 존재하면 열은 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동한다는 푸리에 법칙(Fourie's law)이며 式으로 나타내면 (2·1)과 같다.

$$q = -\lambda_x \frac{dT}{dx} \qquad (2\cdot1)$$

여기서, q : 열유속(heat flux), 물체내의 단위면적을 단위 시간에 이동한 열량

$\frac{dT}{dx}$: 열이흐르는 방향의 온도구배

T : 온도

χ : 열이 흐르는 방향 좌표

λ_x : 열전도율(thermal conductivity, ㎉/m·hr℃)

해석에 사용한 열전도 프로그램에 대한 유한요소 정식화 과정에서는, 재료가 등방성(Isotropic)일 때, 위의 (2·1)식을 기초로 하여 미소 단위 체적에 유입되는 열량, 유출되는 열량을 x, y, z축에 구하여 다음의 (2·2)식과 같이 3차원 직교 좌표계의 비정상 열전도 방정식을 구할 수 있다.

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z})+Q \qquad (2\cdot2)$$

여기서, T : 온도 (℃)

ρ : 밀도 (㎈/g℃)

c : 비열 (g/㎠)

Q : 단위 시간당 입열량 (㎈/sec)

상기 (2·2)식에서 재료를 등방성 재질로 가정하면 열전도율은 $\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z=\lambda$로 가정할 수 있으며, 따라서 (2·2)식은 아래의 식으로 변환될 수 있다.

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2})+\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2})+\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2})+Q \qquad (2\cdot3)$$

본 연구에서는 2차원 열전도 해석을 고려하였으며, 따라서 위의 (2·3)식을 2차원 비정상 열전도 방정식으로 바꾸면 (2·4)식과 같이 쓸수 있고

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2})+\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2})+Q \qquad (2\cdot4)$$

위의 (2·4)식에 Galerkin법을 적용하면,

$$\int_v [N]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \qquad (2\cdot5)$$

여기서, 위의 식(2·5)을 Green Gauss 정리를 이용하여 부분적분한 후 프리어 법칙 $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$을 대입하여 정리하면 비정상 열전도 방정식을 다음과 같이 유한요소식으로 정식화할 수 있다.

$$[k]\{\Phi\} + [c]\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right\} = \{f\} \qquad (2\cdot6)$$

여기서,

$\{k\}$: 열전도 Matrix,

$$-\int_v \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV$$

$\{c\}$: 열용량 Matrix,

$$\int_v \rho c [N]^T [N] dV$$

$\{f\}$: 열유속 Vector,

$$\int_s \alpha_c T_c [N]^T dS + \int_v \dot{Q} [N]^T dV$$

$\{\Phi\}$:절점온도

본 연구에서는 (2·6)식에 입각하여 구성된 2차원 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 해석하였다.

2. 2 열분포 해석용 프로그램

본 논문에서 9Cr-1Mo 강 재질의 물리적 성질을 고려하여 수치 해석시 사용한 열분포 해석용 프로그램 Flow-Chart를 Fig. 1에 나타내었다.

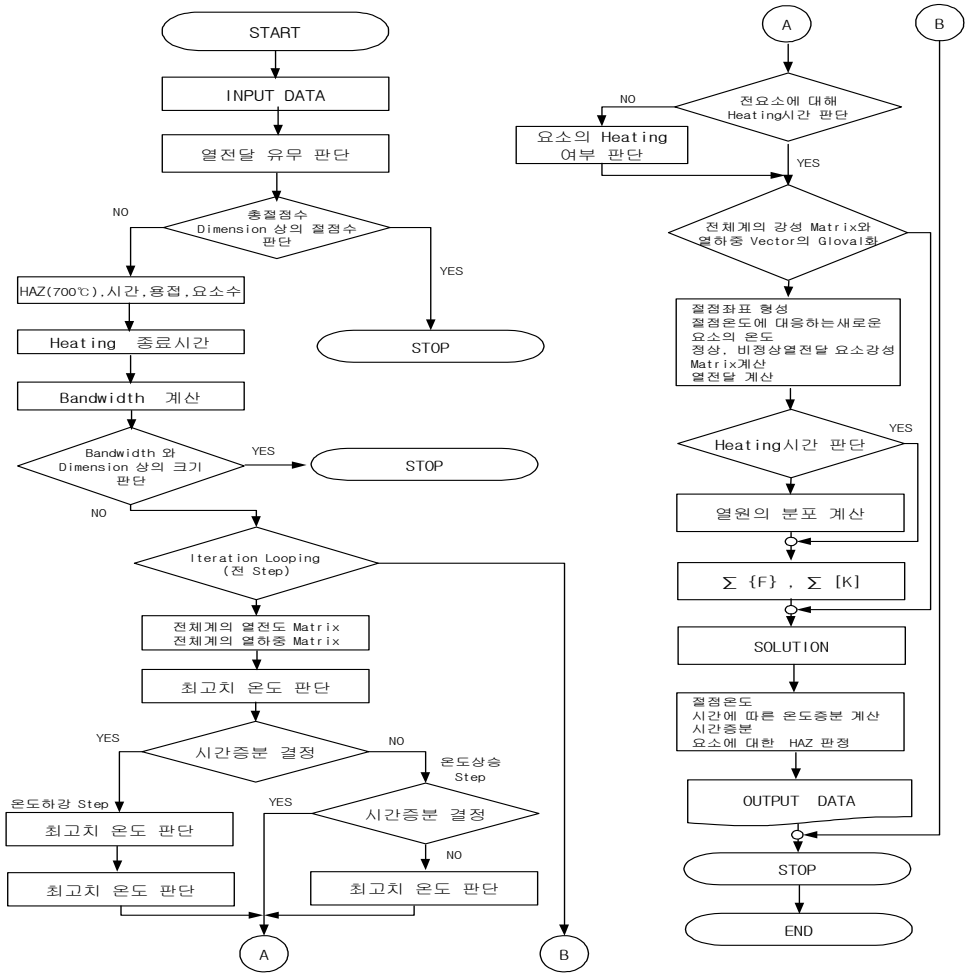


Fig. 1 Flow-Chart of analysis on thermal distribution

2. 3 열탄소성 이론의 유한요소 정식화

구조체가 주어진 물체력 및 경계조건을 만족함과 함께 평형상태를 유지하고 있다면 그것에 대한 평형방정식과 역학적 경계조건이 성립하며 이러한 상태에서 구조체에 미소한 가상변위 $\delta u, \delta v, \delta w$가 발생한다고 고려하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있으며,

$$
\begin{aligned}
&-\int_v \Big[\Big(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+\overline{X}\Big)\delta u+\Big(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}+\overline{Y}\Big)\delta v \\
&+\Big(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}+\overline{Z}\Big)\delta u\Big] dV+\int_{S_\sigma}[(T_x-\overline{T_x})\delta u \\
&+(T_y-\overline{T_y})\delta v+(T_z-\overline{T_z})\delta w] \qquad (2\cdot7)
\end{aligned}
$$

위의 식에 경계조건을 도입하고 그린정리에 의한 부분적분을 수행하여 가상일의 원리(Principal of virtual work)를 정식화하였다.

일반적으로 유한요소법에서는 열탄소성해석을 위한 기초방정식으로서 평형방정식을 가상일의 원리로 치환한 식을 사용하며, 따라서 유한요소법에서 사용하는 기초방정식은 가상일의 원리, 변형-변위 관계식, 응력-변형 관계식으로 정의할 수 있다.

용접잔류응력 및 변형율 해석용 열탄소성 프로그램에서는 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 항복강도, 탄성계수 등의 재료정수의 온도 의존성을 고려하였고, 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow)이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정도를

높였다.

전 변형율(Total strain)증분 $\{d\varepsilon\}$은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형율의 합으로써 구성되었다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^{e}\} + \{d\varepsilon^{p}\} + \{d\varepsilon^{t}\} \tag{2·8}$$

또한, 선형등방경화 법칙을 고려한 폰-미세스(Von-Mises) 항복조건을 항복함수로 사용하였다.

2. 4 용접잔류응력 해석용 프로그램

본 논문에서 용접체에 발생하는 역학적 메카니즘을 정도높게 해석하기 위하여 사용한 용접잔류응력 해석용 프로그램 Flow-Chart를 Fig. 2에 나타내었다.

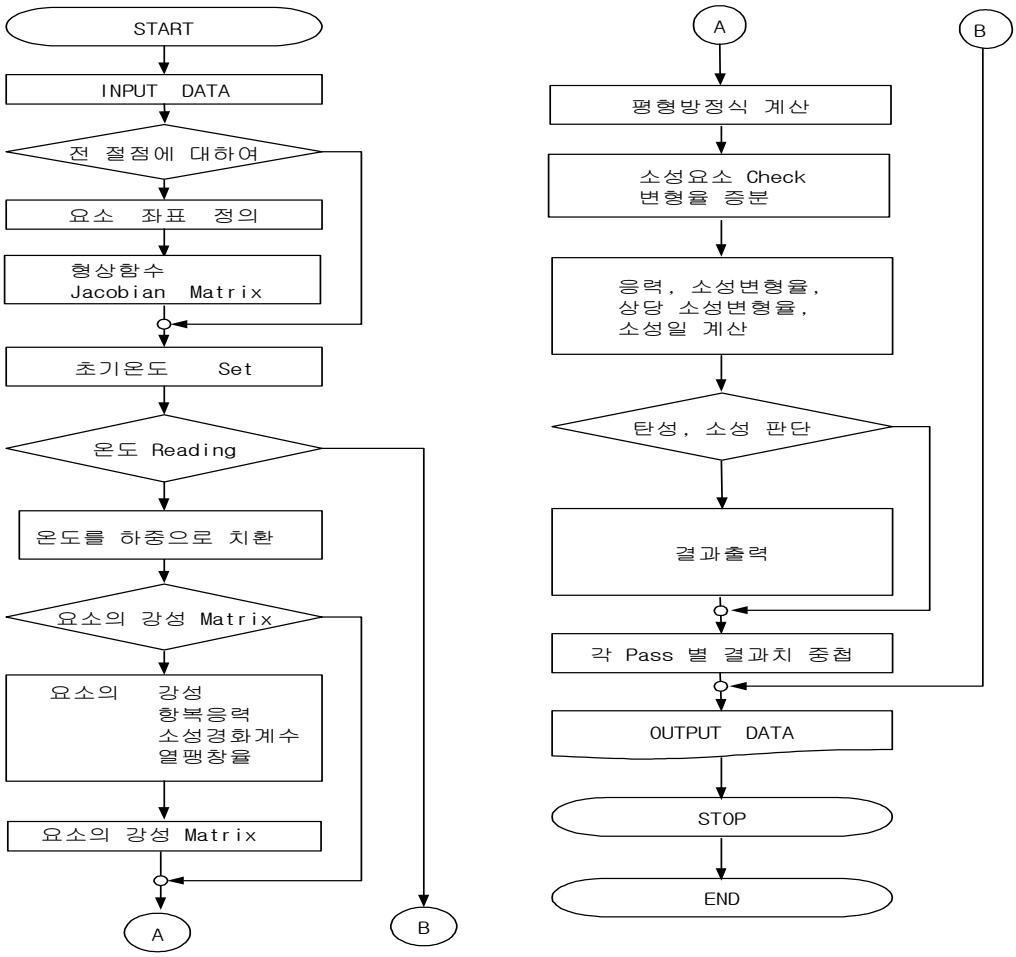


Fig. 2 Flow-Chart of analysis on welding residual stress

2. 5 해석 모델 및 용접조건

본 연구에서는 4절점 Isoparametric 요소를 이용하여 2차원 비정상 열전도 해석을 실시하였다. 수치 해석시 사용된 용접조건은 실제 시험편 제작시 사용되었던 용접조건으로 Table.1에 나타내었다. 레이저 용접의 경우 12㎾급 CO_2 레이저 용접기를 이용하여 1Pass 완전 용입으로 용접하였고 SMAW 용접의 경우 개선각 60°, gap 3㎜를 주어 S-9016.B3 3.2㎜, 4.0㎜ 용접봉을 사용하여 총 10pass로 용접하였으며, 전면 용접 후 후면 용접시 back gauging을 실시하여 후면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 마지막 pass를 실시하여 시험판을 제작하였다.

또한 9Cr-1Mo강에 대해 고려한 온도의존성에 대한 물리정수를 Table.2에 나타내었다.

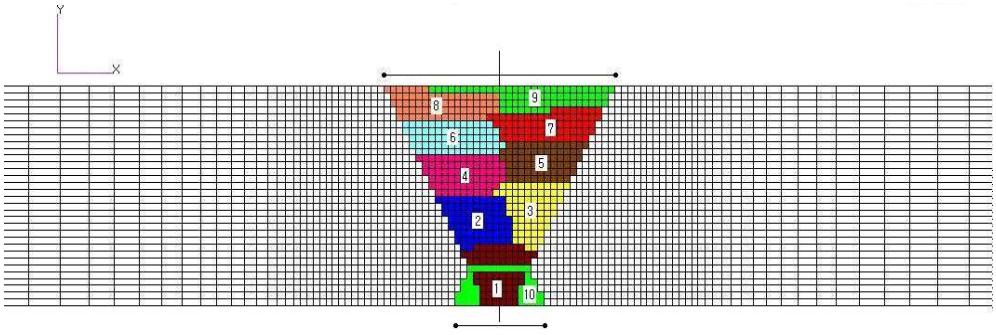
Table. 2 Laser & SMAW welding condition

Type	Power	Speed	Shield gas
CO_2 Laser	12 ㎾	1 m/min	He 15ℓ/min
SMAW	Groove	Current	Volt
	60°	170 A	25 V
	HJ	Speed	Pass
	17 KJ/cm	15 CPM	10

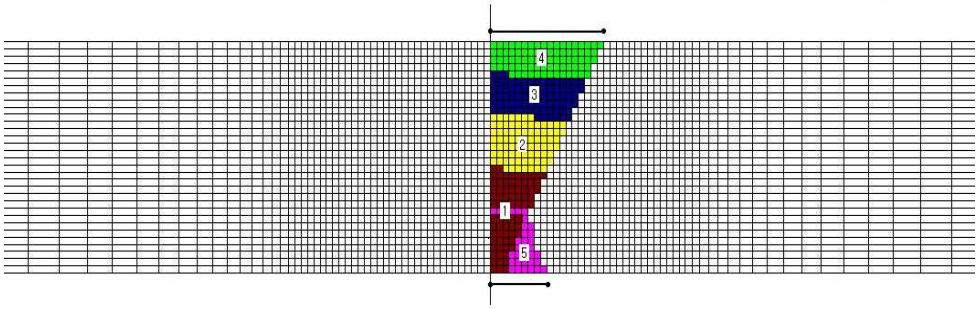
Table. 3 Physical property of 9Cr-1Mo steel

Temp (℃)	Density (g/㎤)	Specific heat (J/KgK)	Thermal expansion (10^{-6}/K)	Thermal conductivity (W/mK)
RT	7.78	402	11.15	26.0
100		427	11.30	26.4
200		461	11.60	26.8
400		528	12.10	27.6
600		595	12.65	26.8
700		624	12.85	26.8

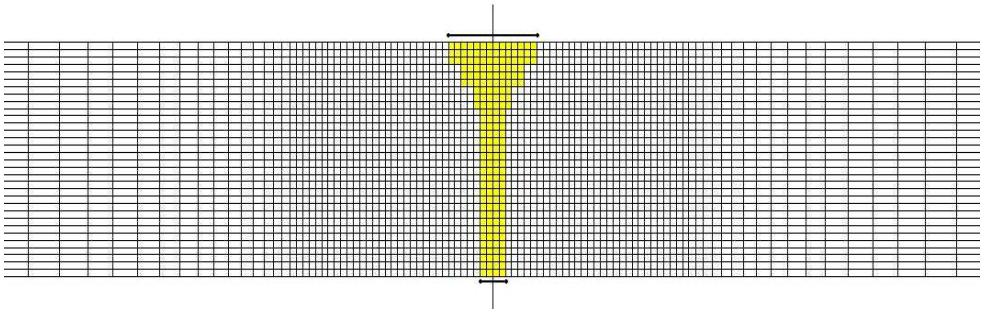
해석에 사용된 모델은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 SMAW (300㎜×16㎜, 총요소수:2944개, 총절점수:3069)와 Laser 용접부에 대하여 열전도 해석을 수행하였고 재료 내부로의 열전도 및 대기중으로의 열전달을 열 경계조건으로 사용하였으며 초기온도는 20℃인 것으로 가정하였고, 열탄소성 해석을 위해 Fig. 4의 경계조건을 사용하였다.



(a) SMAW 60°



(b) SMAW 30°



(c) CO_2 Laser

Fig. 3 Schematic mesh division for F.E analysis

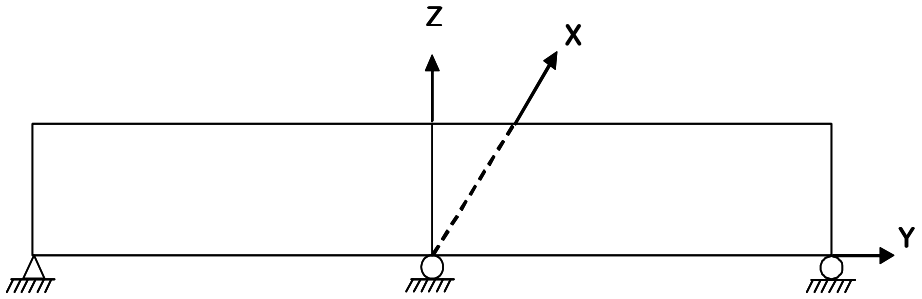


Fig. 4 Boundary Condition for thermal elasto-plastic analysis

용접부에 대한 입열량을 계산하기 위해 SMAW 식 (2·9)을 CO_2 Laser 식 (2·10)를 사용하였다.

$$Q = \eta \frac{V \cdot I}{W_s} \tag{2·9}$$

여기서, Q: 용접입열(KJ/㎝) η_A: 아크용접효율

V: 용접전압(V) I : 용접전류(A)

$$Q = \eta_L \frac{P}{W_s} \tag{2·10}$$

여기서, η_L: 레이저 용접효율 P: 레이저 출력(㎾)

W_s: 용접속도(cm/sec)

2. 5. 1 시험편의 제작 및 입열량

다음 그림 Fig. 5에 SMAW 60° 에 대한 시험편 제작도와 수치해석시 입열량 입

력을 위한 단면형상을 보기위해 폴리싱한 후 전해 에칭한 시험편 단면사진을 다음과 같이 나타내었고, Table. 4에서는 SMAW 60°에 대한 용접조건 및 각 패스별 입열량을 나타내었다.

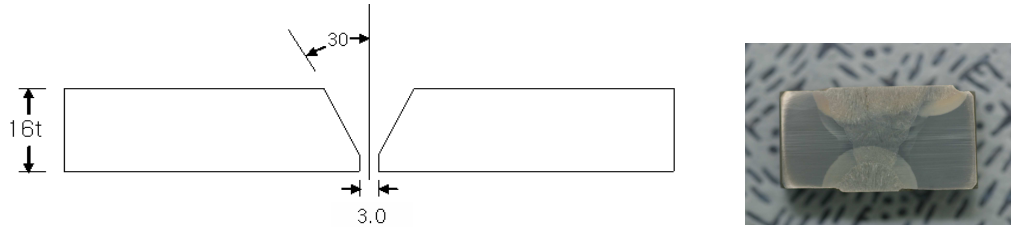


Fig. 5 Specimen Size of SMAW 60°

Table. 4 Welding Condition of SMAW 60°

Pass	Current(A)	Volt(V)	Speed(CPM)	H.I(KJ/cm)
1	170	25	14	16.6
2	170	25	15	17
3	170	25	15	17
4	170	25	16	17.3
5	170	25	15	17
6	170	25	15	17
7	170	25	15	17
8	170	25	17	17.8
9	170	25	17	17.8
Back Gauging 실시				
10	170	25	15	17

다음 그림 Fig. 6에 SMAW 30°에 대한 시험편 제작도와 단면사진을 다음과 같이 나타내었고, Table. 5에서는 SMAW 30°에 대한 용접조건 및 각 패스별 입열량을 나타내었다.

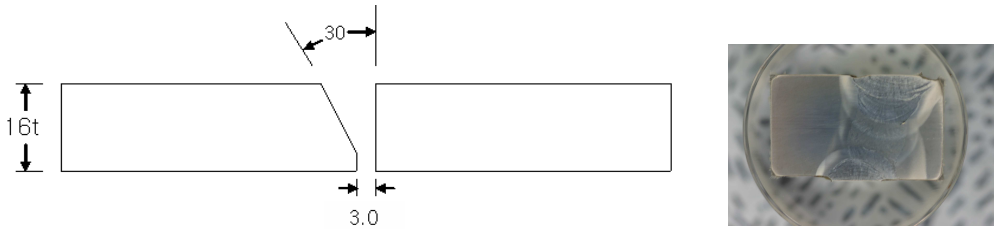


Fig. 6 Specimen Size of SMAW 30°

Table. 5 Welding Condition of SMAW 30°

Pass	Current(A)	Volt(V)	Speed(CPM)	H.I(KJ/cm)
1	170	25	14	16.6
2	170	25	15	17
3	170	25	15	17
4	170	25	17	17.8
Back Gauging 실시				
5	170	25	15	17

다음 Fig. 7에서는 레이저 용접부의 단면사진을 나타낸 그림으로 레이저 용접시 0 mm Gap 상태에서 용접을 실시하였다. 또한 레이저 용접시 사용한 용접효율은 35%를 사용하여 입열량을 계산하였다.

Fig. 7 Specimen Size of Laser

개발프로그램의 결과와 실험결과 비교분석을 위한 각 용접법(SMAW 60° 개선, SMAW 30° 개선 및 CO_2 레이저)을 이용한 맞대기 용접부에 대한 용접 열분포 및 용접잔류응력 해석 실시하였다.

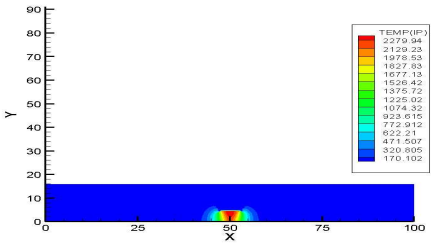
제 3 장 용접부 열분포 수치해석

3. 1 각각의 용접법에 의한 용접열분포 해석

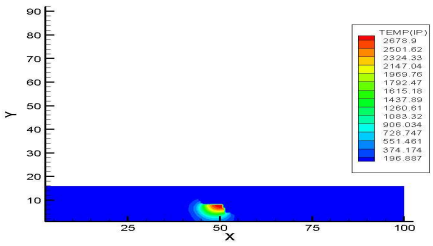
Fig. 8과 Fig. 9는 SMAW 용접부에 대한 각 Pass별 용접 시작 2초 후 최고 온도 분포를 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 용접열이 열원을 중심으로 균일하게 전도됨을 보이고 용착 금속부와 열영향부(Heat Affect Zone)가 넓게 분포됨을 알 수 있다. 이때 용착 금속부의 온도는 1700℃를 기준으로 하였으며, 열영향부의 기준은 역학적 강성 회복 온도인 750℃를 기준하였다.

Fig. 10는 CO_2 Laser 용접부에 대한 온도분포 역시 용접시작 2초 후 최고온도 분포 상태에서, 열원을 중심으로 사방으로 퍼져나가는 경향을 보이는 SMAW와는 달리 용접열원을 중심으로 시험편 폭 방향으로 선 열원 형태의 분포로 열전달되는 현상을 볼 수 있다.

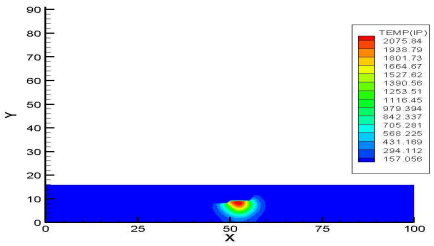
또한, SMAW 용접부에 비해 열영향부의 영역이 더 적게 생성됨을 알 수 있으며 보다 좁고 균일한 열영향부로 인해 CO_2 Laser 용접의 경우가 SMAW 보다 잔류응력의 영역대가 보다 작게 나타났다. Fig. 11에서 나타낸 각 용접부의 열이력 곡선의 특징을 보면 CO_2 Laser 용접의 경우가 SMAW 보다 냉각구배가 크게 나타남을 알 수 있다.



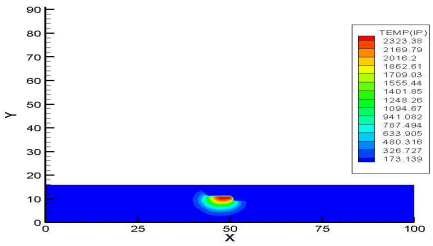
(a) 1 Pass



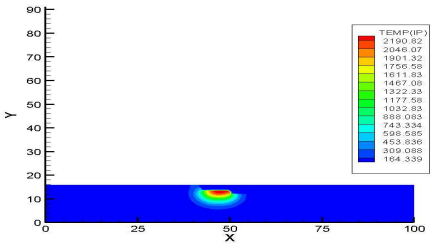
(b) 2 pass



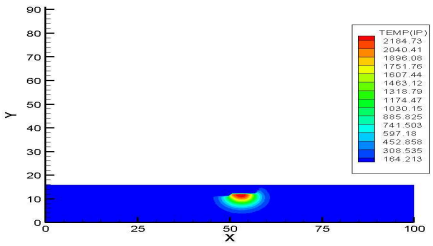
(c) 3 Pass



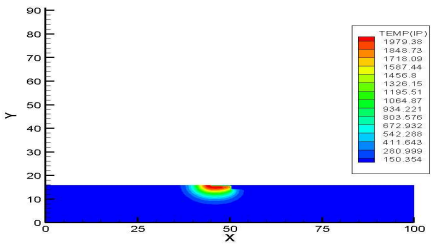
(d) 4 Pass



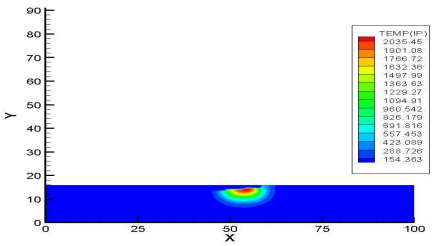
(e) 5 Pass



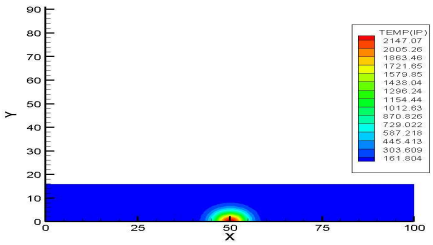
(f) 6 Pass



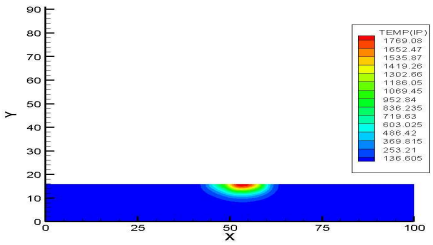
(g) 7 Pass



(h) 8 Pass

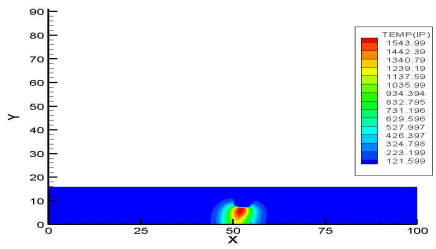


(i) 9 Pass

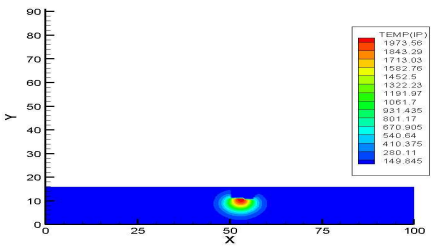


(j) 10 Pass

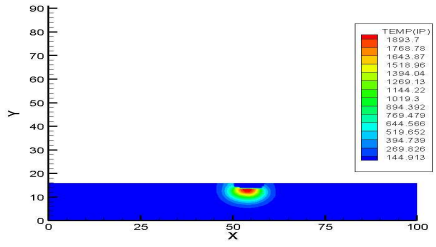
Fig. 8 Heat Distribution of SMAW 60°



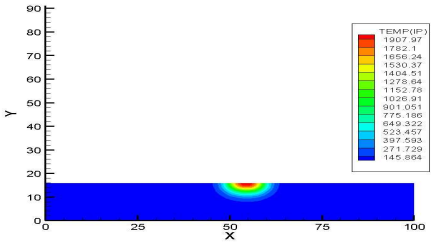
(a) 1 Pass



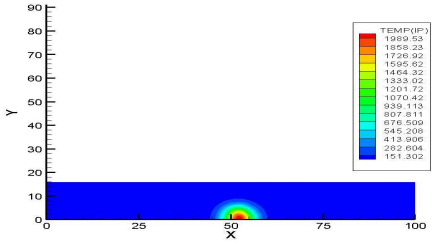
(b) 2 Pass



(c) 3 Pass



(d) 4 Pass



(e) 5 Pass

Fig. 9 Heat Distribution of SMAW 30°

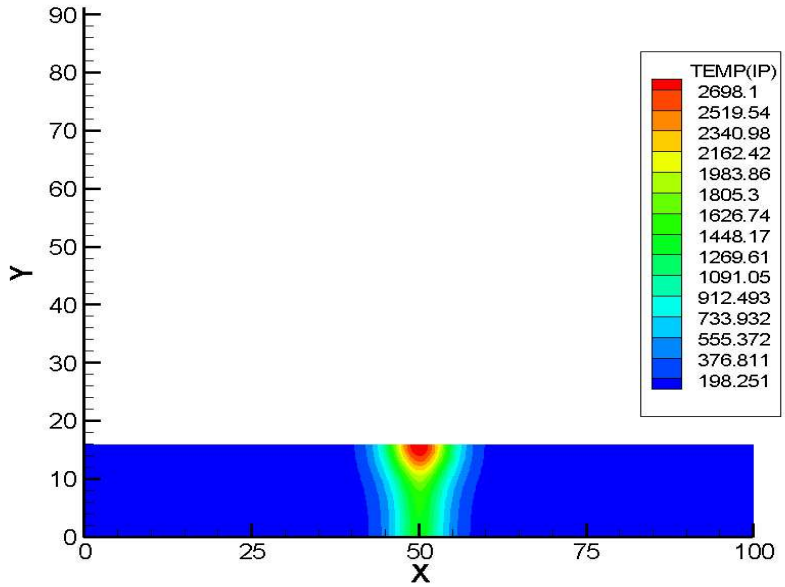
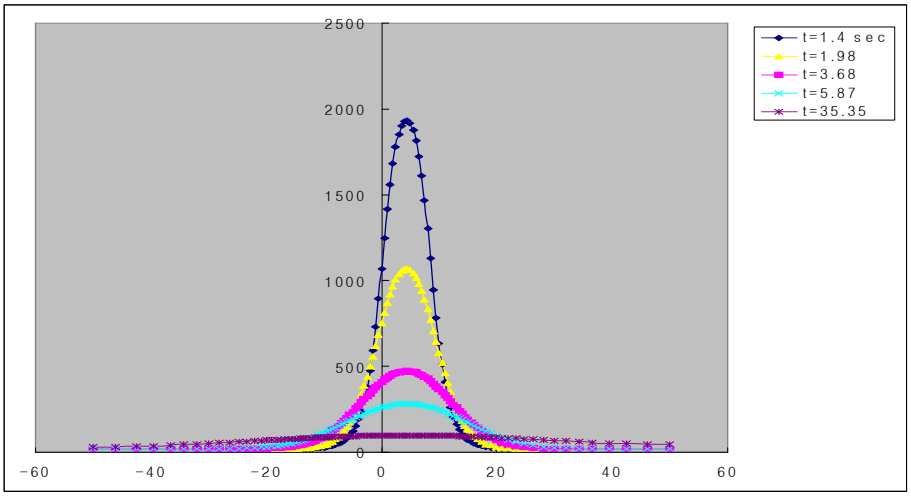
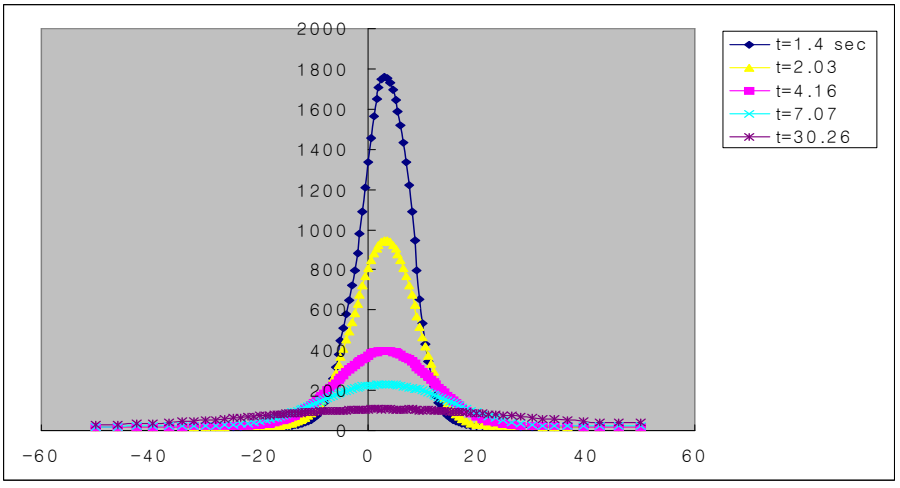


Fig. 10 Heat Distribution of CO_2 Laser

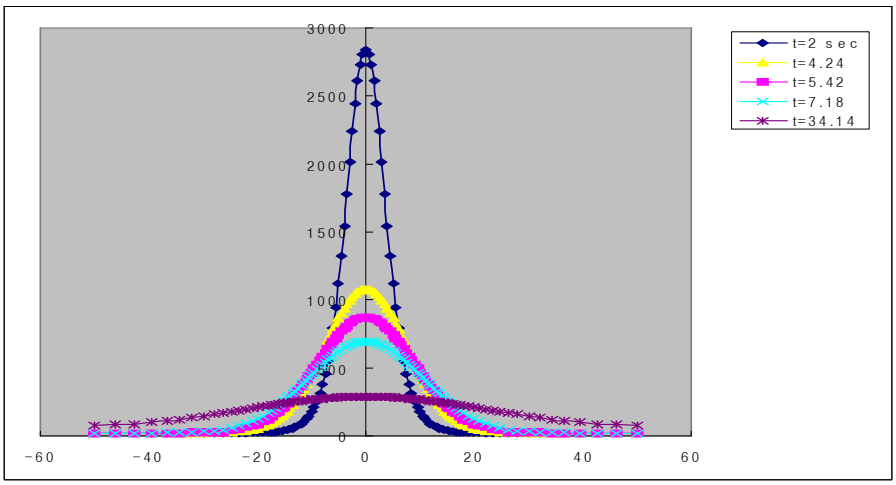
3. 2 용접부 열이력 곡선



(a) SMAW 30°



(b) SMAW 60°



(c) CO_2 Laser

Fig. 11 Temperature History of 9Cr-1Mo Steel Weldments

Fig. 11에서 용접부 상부면 0.5mm 아래 부분에서의 열이력 곡선을 보이고 있다.

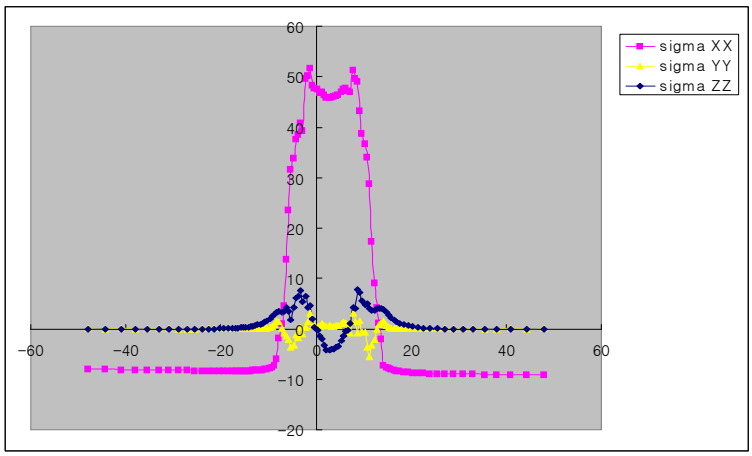
SMAW의 경우 각각 4pass, 9pass시를 최고값을 보이고 있고, 레이저 용접부는 레이저 특성상 1pass 완전 용입시의 열이력을 보이고 있다. 보는 바와 같이 레이저 용접부의 형상은 깊고 폭이 좁은 관계로 용접 중심부에서 모재에 이르는 온도구배가 크고 따라서 냉각속도가 크므로 SMAW 용접부와의 경도 비교시 경도분포에서의 폭이 좁은 경향을 파악할 수 있다.

제 4 장 용접 접합부 용접잔류응력 분포 해석

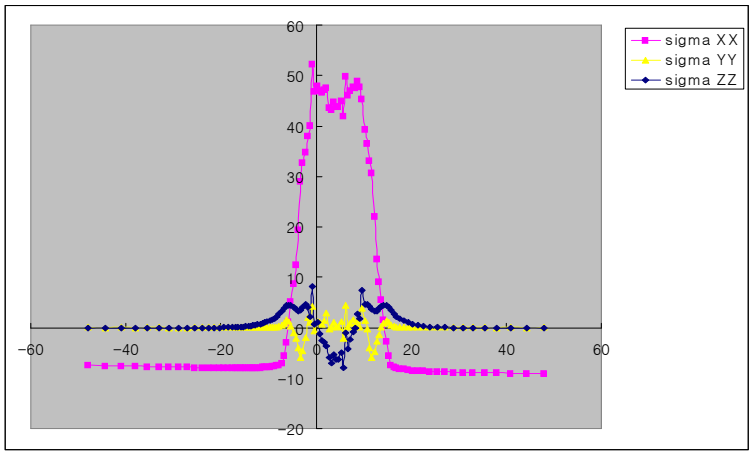
4. 1 각 용접법에 따른 용접잔류응력분포 해석

Fig. 12 은 각 용접법에 의한 열탄소성 해석 후 표면으로부터 0.5㎜ 지점에 대한 용접잔류응력 분포를 나타낸 그림이다. 이 때 용접잔류응력 분포 특성을 보면 용접선 길이방향 성분인 σ_x는 시편의 두께 방향에 걸쳐 용접부에서 큰 인장값을 보이고 폭 방향 성분 σ_y는 압축응력 상태를 보이며 두께방향 응력 성분 σ_z는 그 크기가 아주 작게 분포하였다.

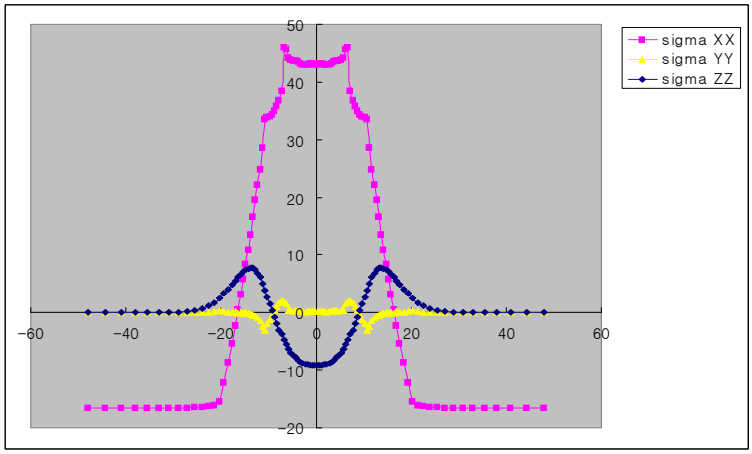
또한, CO_2 레이저 용접의 경우가 SMAW 공정에 비해 균일한 열영향부로 인해 잔류응력의 형성 영역이 균일하게 형성되었다.



(a) SMAW 60°



(b) SMAW 30°



(c) CO_2 Laser

Fig. 12 Residual Stress of 9Cr-1Mo Steel Weldments

제 5 장 기계적 강도 시험

5.1 시험편의 선정

본 실험에 사용된 시편은 Cr-Mo계의 합금요소로 되어있는 강으로서, 사용 환경상 내열, 내압, 내부식성이 양호하며, 적당한 성분의 용가재를 사용하면 용접성은 나쁘지 않으나, 용접부가 용접열로 인해 열화하는 결점을 가지고 있다. 재료의 화학적 특성과 기계적 특성은 다음 Table. 6 에 나타내었다.

Table. 6 Chemical composition and Mechanical property of base metal

Materials	Chemical Coposition (wt%)						
9Cr-1Mo Steel	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
	0.085	0.379	0.019	0.0008	0.336	0.080	0.097
	Cr	Mo	Al	Nb	V	N	
	9.376	0.911	0.032	0.080	0.189	0.042	
	Mechanical Properties						
	Yield Stress (MPa)			Tensile Stress (MPa)			
	568			712			

5. 2 시험편의 제작

수치해석 시험편과 동일하게 제작하여 SMAW 및 Laser 접합을 하였다. 레이저 용접의 경우 12㎾급 CO_2 레이저 용접기를 이용하여 1Pass 완전 용입으로 용접하였고 SMAW 용접의 경우 개선각 60°, gap 3㎜를 주어 S-9016.B3 3.2㎜, 4.0㎜ 용접봉을 사용하여 총 10pass로 용접하였으며, 전면 용접 후 후면 용접시 back gauging 을 실시하여 후면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 마지막 pass를 실시하여 시험판을 제작하였다.

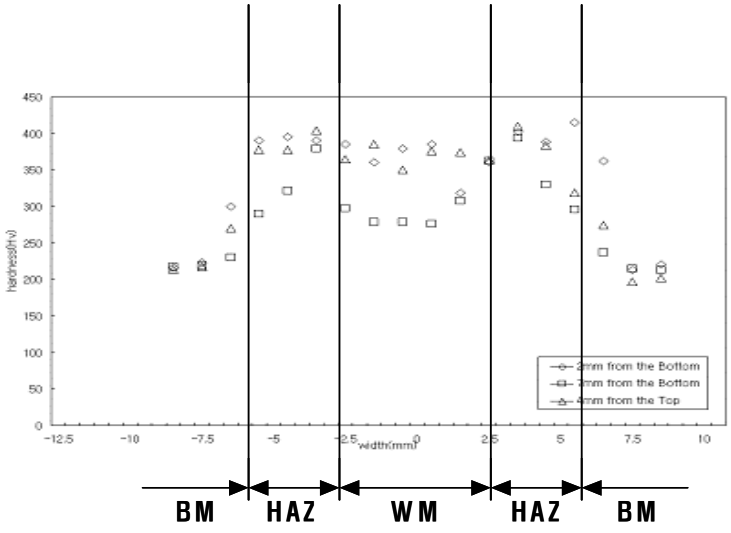
5. 3 경도 시험

다음 Fig. 13에서 본 실험실이 보유한 **Micro Vickers Hardness Tester**를 사용하여 하중 500g으로 0.5mm단위 길이로 측정을 실시한 결과이다. 일반적으로 경도는 재료의 변형에 대한 저항을 나타내며, 금속의 경우 소성변형에 대한 저항의 척도로서 간편하게 금속의 강도를 예측할 수 있는 강력한 도구로도 사용되므로 각 용접법에 따른 용접부의 경도를 측정하여 Fig. 14에 도시하였다.

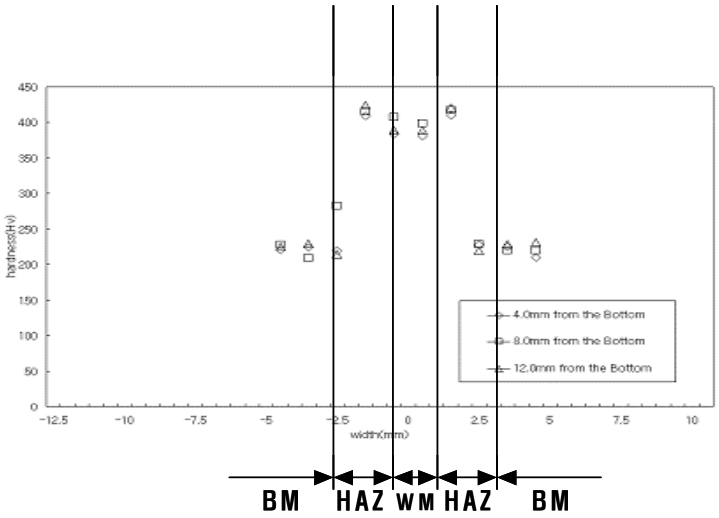
또한 여기서 나타내는 경도값은 물리 정수가 아닌 공업 정수로써 용접부에서 경도값에 대한 비교시 그 값의 높고 낮음 보다는 분포경향을 보는 것이 보다 바람직하다고 사료된다.

여기서 CO_2 레이저 용접부에서 최고 경도값이 SMAW 용접부에 비해 다소 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않은 반면에 고집적 선형열원의 특성을 지니고 있으므로 좁고 균일한 용착금속량과 열영향부로 인해 최고 경도값의 분포 영역대가 좁게 형성되고 있음을 확인하였다.

Fig. 13 Micro Vickers Hardness Tester



(a) SMAW 60°



(b) CO_2 Laser

Fig. 14 Hardness of 9Cr-1Mo Steel Weldments

5. 4 충격(Charpy) 시험

각 용접법에 따른 저온에서의 용접부의 인성 및 연성을 파악하기 위하여 표준 샤르피(Charpy) 시험편을 제작하여 본 실험실이 보유하고 있는 **(30kgf-m)** 급 Charpy 충격시험기를 이용하여 0℃와 -20℃에서 각각 시험을 실시하였으며 그 결과를 Table. 7 에 나타내었다.

그 결과를 보면 0℃에서의 충격흡수에너지는 SMAW 60°, SMAW 30°, CO2 레이저 에서 각각 19.8J, 15.6J, 15.6J을 나타냈으며, -20℃에서도 각 시편 모두 거의 비슷한 값을 나타내었다. 또한 각 용접법에 대하여 실온과 0℃의 값이 모두 오차 범위 안에 있었다.

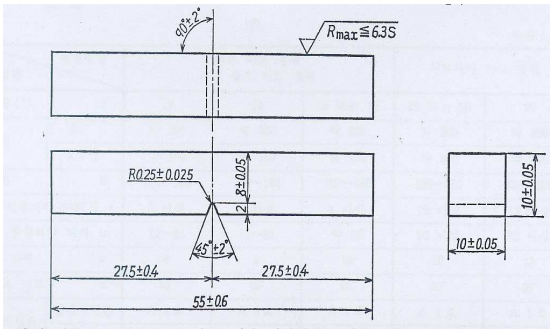


Fig. 15 Charpy Test Machine and Specimen of Impact Test (KS B 0821)

Table 7. Results of Impact Test

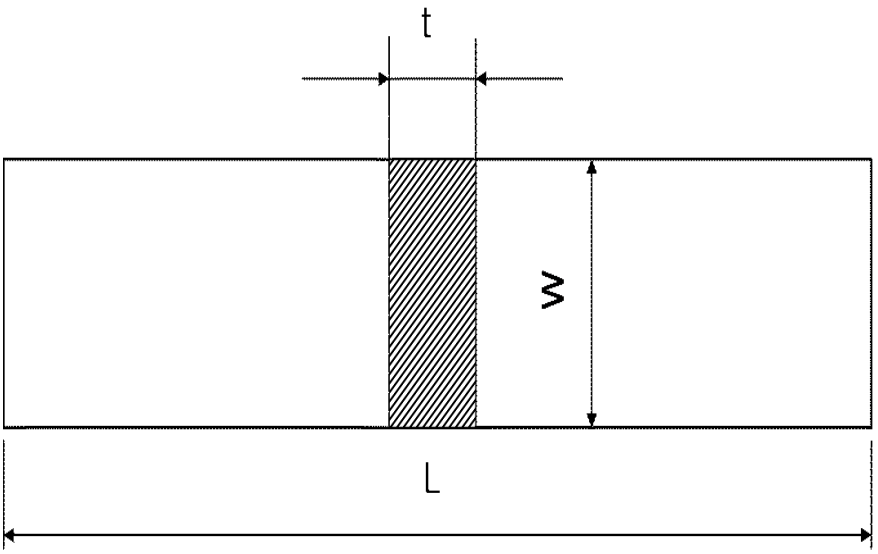
Result / Number	SMAW 60°		SMAW 30°		CO_2 Laser	
	0℃	-20℃	0℃	-20℃	0℃	-20℃
1	19.8 J	11.6 J	15.6 J	11.6 J	15.6 J	10 J
2		12.6 J		25.7 J		16.2 J

5. 5 굽힘 및 상온 인장 시험

각각의 용접 프로세스에 의해 제작된 시편 모두에서 굽힘 시험과 인장시험을 실시하였다. 굽힘시험 결과를 보면 개선각에 상관없이 SMAW 용접부는 완전한 파단과 터짐현상이 일어났으며, CO2 레이저 경우 파단은 일어나지 않았으나 용접부에서 약간의 균열 현상을 볼 수 있었다. 인장시험에서는 모두 용접부 모재에서 시편

이 파단 되어지고 Max load 및 Rupture load의 값은 용접법에 상관없이 유사하며 오히려 레이저 용접의 경우 Rupture load 가 약간 높은 결과를 얻을 수 있었다.

다음 Fig. 16과 같이 굽힘 시험편은 **KS B 0803** 규정 및 인장시험편은 **ASTM A370** 규정에 의거하여 시험편을 제작하였다.

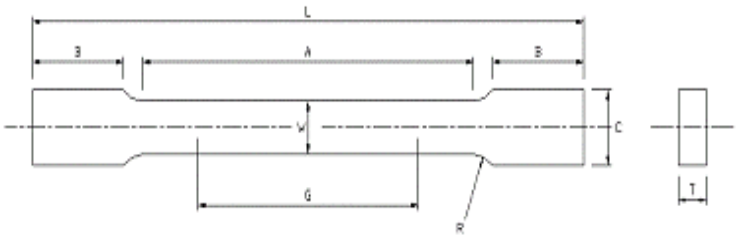


Thickness(t) : Original thickness

Width(W) : ≤35mm

Length(L) : ≤250mm

(a) Specimen of Bending Test



(b) Specimen of Tensile Test

G-Gage length	: 25.0±0.08mm
W - Width	: 6.25±0.05mm
T - Thickness	: 6mm
R - Radius of fillet,min	: 6mm
L - Over-all length, min	: 100mm
A - Length of reduced section, min	: 32mm
B - Length of grip section, min	: 32mm
C - Width of grip section, approximate	: 10mm

Fig. 16 Specimen of Bending and Tensile Test

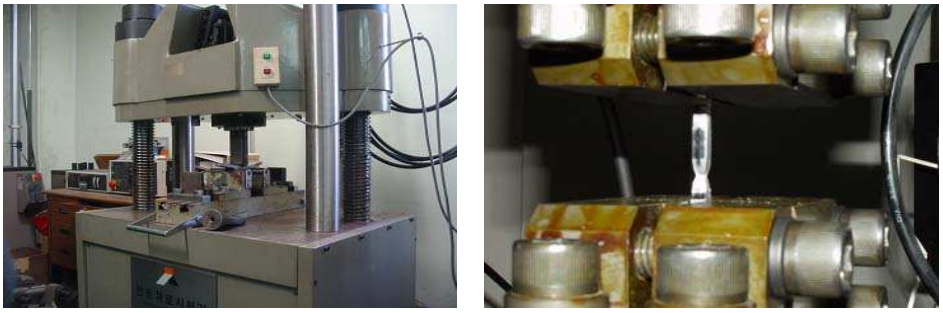
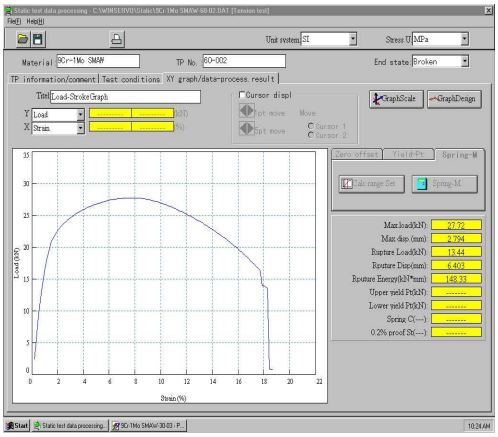
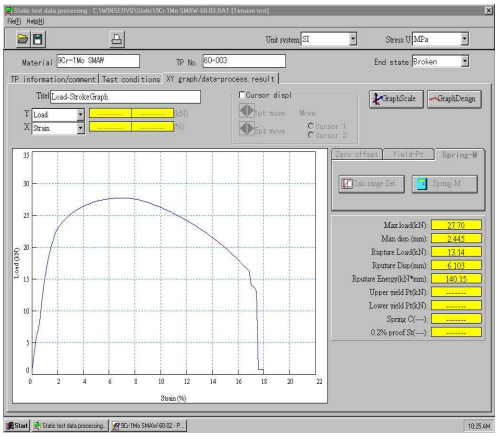


Fig. 17 Machines of Bending and Tensile Test

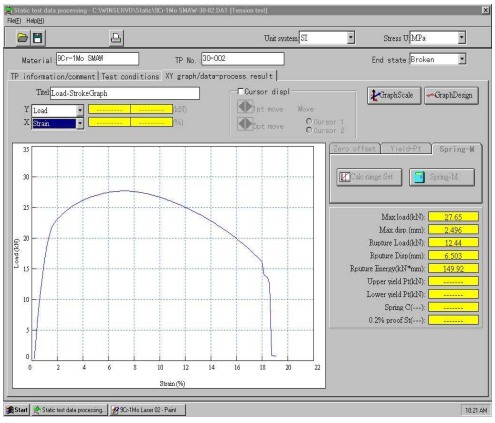
Fig. 18 Results of Bending Test

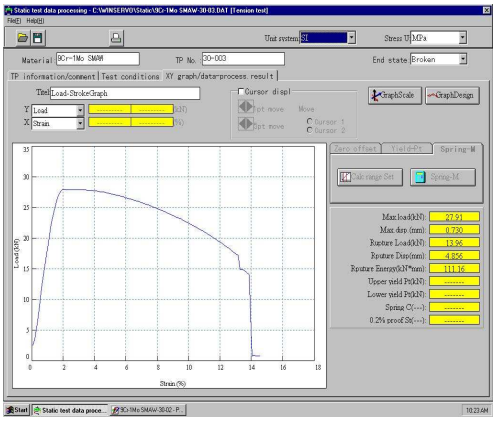
본 실험의 결과로 레이저 용접부의 특성상 열영향부(HAZ)의 폭이 적으므로 인해 상대적으로 폭이 넓은 SMAW 용접부에서 터짐현상이 발생됐다고 사료된다.



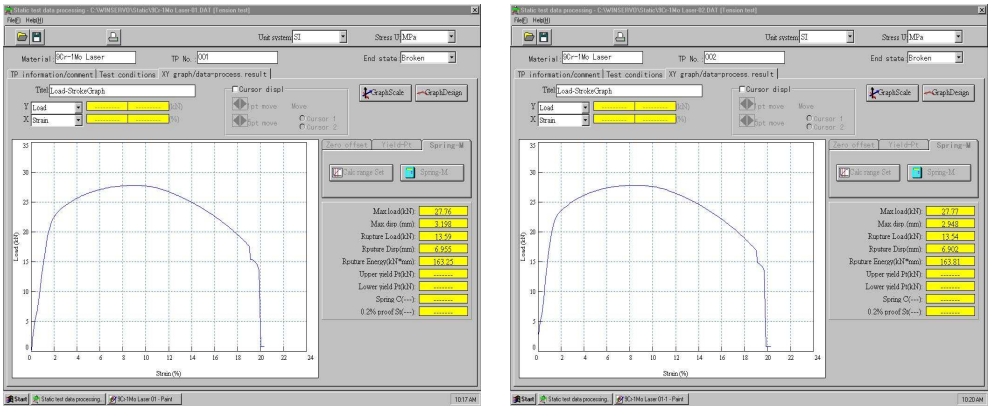


(a) SMAW 60°





(b) SMAW 30°



(c) CO_2 Laser

Fig. 19 Tensile Test Results of 9Cr-1Mo Steel Weldment

본 연구에서 사용한 장비는 유압식 시마즈사의 최대재하하중 20ton급으로 변형속도는 1mm/min으로 수행하였다. 인장시험에서는 용접방법에 따라 약간의 차이는 있다. 용접시편의 경우 모재에 비해 인장강도가 증가하였다. 이는 용접부 내부에 발생한 잔류응력으로 인해 응력분배에 기인하거나, 용접시 생성된 잔류 δ-페라이트에 기인하는 것으로 사료된다.

시편 모두 용접부 모재에서 파단 되어지고 Max load 및 Rupture load의 값은 용접법에 상관없이 유사하며 오히려 레이저 용접의 경우 Rupture load 가 약간 높은 결과를 얻을 수 있었다.

이는 레이저 용접의 선형 열원 특징으로 인한 좁고 균일한 용접부의 생성으로 인한 것으로 사료된다.

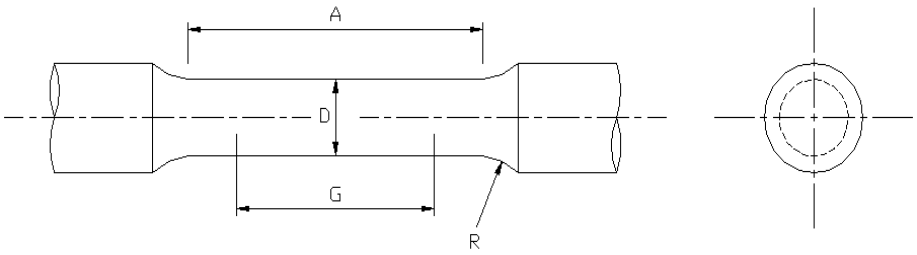
Table 8. Results of Tensile Test

Load / Number	SMAW 60°		SMAW 30°		CO_2 Laser	
	Max Load(KN)	Rupture Load(KN)	Max Load(KN)	Rupture Load(KN)	Max Load(KN)	Rupture Load(KN)
1	27.72	13.44	27.65	12.44	27.76	13.39
2	27.70	13.14	27.91	13.96	27.77	13.54
Average	27.71	13.29	27.78	13.20	27.77	13.47

5. 6 고온인장시험

9Cr-1Mo강 용접부의 고온열화 특성 분석을 위해 CO_2 레이저 용접부, SMAW 60°, SMAW 30° 용접부의 고온인장 시험을 실시하였으며, 원전의 가동조건인 고온 환경을 고려하여 각 용접법에 따라 700℃에서 인장시험을 하였다.

고온 인장시험 및 피로시험 시편 제작 다음 Fig. 20에 보는 바와 같이 : ASTM A370 (Small-size specimen proportional to standard) 규정에 준하여 제작하였다.



G - Gage length : 25.0±0.10mm

D - Diameter : 6.25±0.12mm

R - Radius of fillet , min : 5mm

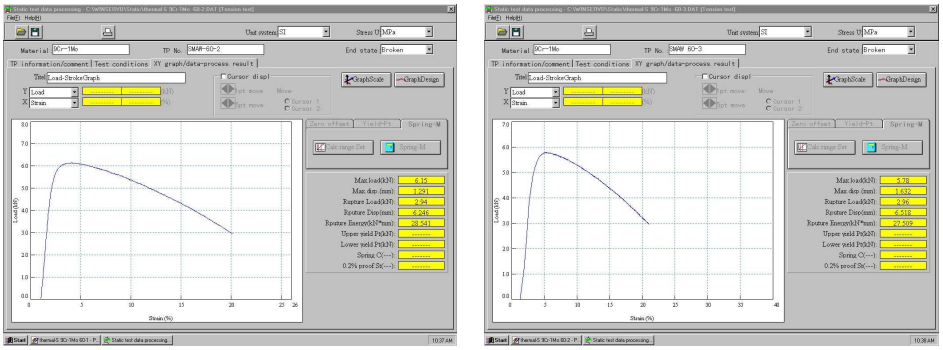
A - Length of reduced section, min : 32mm

Fig. 20 Specimen of High Temperature Tensile Test

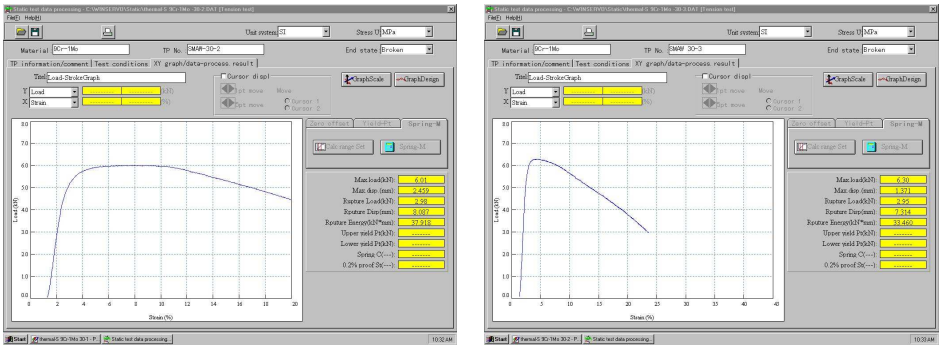
본 연구에서 사용한 장비는 유압식 시마즈사의 최대재하하중 20ton급 UTM에 전기로를 설치한 후 온도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 700℃ 온도에서 1시간동안 전기로를 사용해서 가열하고, 시험편 평형부의 온도를 균일화시키기 위하여 시험온도에서 20분간 유지한 후, 1mm/min 변형속도로 시험을 시행하였다. 700℃ 온도에서 각각의 용접법에 따라 2개의 시편에 대해 인장시험을 수행하여 평균을 구하였다.

Fig. 21 Machine of High Temperature Tensile Test

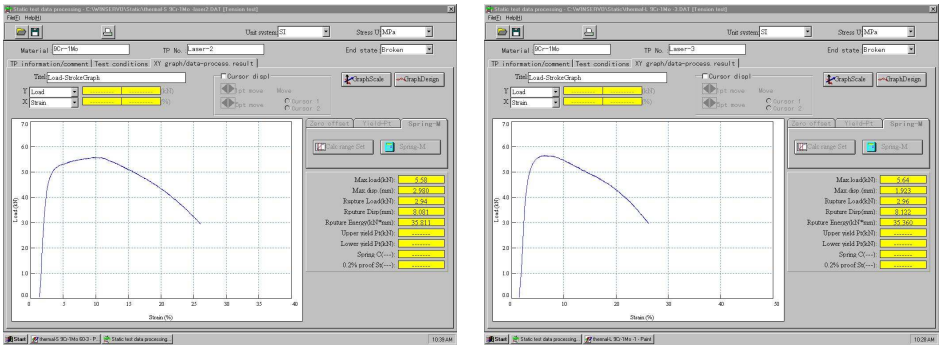
다음 Fig. 22에 시험 후 측정값을 다음과 같이 나타내었다.



(a) SMAW 60°



(b) SMAW 30°



(c) CO_2 Laser

Fig. 22 High Temperature Tensil Test Results of 9Cr-1Mo Steel Weldment

9Cr-1Mo강 용접부의 고온열화 특성 분석을 위해 CO_2 레이저 용접부, SMAW 60°, SMAW 30°용접부의 고온인장 시험을 실시하였으며, 원전의 가동조건인 고온환경을 고려하여 각 용접법에 따라 700℃에서 인장시험을 하였다. 결과를 살펴보면, 각 용접법 모두 Rupture load는 700℃에서 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

Table 9. High Temperature Tensil Test Results

Load / Temp		SMAW 60°		SMAW 30°		CO_2 Laser	
		Max Load(KN)	Rupture Load(KN)	Max Load(KN)	Rupture Load(KN)	Max Load(KN)	Rupture Load(KN)
700 ℃	1	6.15	2.94	6.01	2.98	6.05	2.94
	2	5.78	2.96	6.30	2.95	5.91	2.96
Average		5.97	2.95	6.16	2.97	5.98	2.95

4. 결　　론

이상에서 보인 9Cr-1Mo강에 대한 SMAW 및 CO_2 Laser 용접부의 열 및 역학적 거동의 특성을 고찰해 본 결과는 다음과 같다.

1) SMAW의 경우 용접열원을 중심으로 사방으로 퍼져나가는 온도분포 경향을 보이고 CO_2 Laser 용접의 경우 시험편 폭 방향으로 선 열원 형태의 분포로 열전달되는 경향을 볼 수 있었다.

2) CO_2 Laser 용접부의 경우 SMAW 용접부에 비해 냉각 구배가 크고 열영향부의 영역이 보다 적고 균일하게 생성됨을 알 수 있었다.

3) 각 용접법에 대한 용접잔류응력 해석 결과 CO_2 레이저 용접의 경우 SMAW보다 다소 적게 나타나나 거의 차이가 없으며, SMAW 용접법에 비해 분포영역대가 훨씬 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 CO_2 레이저 용접의 특성에 따른 좁은 용착부 및 열영향부의 형성에 기인된 것으로 사료된다.

4) 상온인장 시험에서는 SMAW, CO_2 레이저 용접 시험편 모두 모재부에서 파단 되었으며, 굽힘 시험 결과 SMAW시험편에서는 표면 균열이 관찰되었으나, CO_2 레이저 용접 시험편에서는 균열이 관찰되지 않았다.

5) 9Cr-1Mo강 용접부의 고온열화 특성 분석을 위해 CO_2 레이저 용접부, SMAW 60°, SMAW 30°용접부의 고온인장 시험을 실시하였으며, 원전의 가동조건인 고온환경을 고려하여 각 용접법에 따라 700℃에서 인장시험을 하였다. 결과를 살펴보

면, 각 용접법 모두 Rupture load는 700℃에서 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

6) 경도 분포 특성에 있어서는 SMAW와 CO_2 레이저 용접부에서의 최고 경도값이 거의 차이가 없이 나타났으나, 경도분포면에서 레이저의 특성상 레이저 용접부의 분포 폭이 좁게 나타남을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 방한서, “유한요소법에 의한 박판용접의 2차원 비정상열전도해석”, 대한조선학회지, Vol. 27, No. 4, pp.44~50, 1990.

2. 방한서, 김유철 (1991). “유한요소법에 의한 후판용접시의 3차원 비정상열전도해석”, 대한용접학회지, 제9권 제2호, 37-43

3. 방한서, 외 1인 : 2.25Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접이음부의 재열균열에 관한 수치해석 연구, 한국해양공학회지, Vol. 14, No. 1 pp. 88~94, 2000

4. 최기용 외 1인 2.25Cr-1Mo 강판의 용접성 및 용접부 성능

5. 장웅성, 윤병현, 권영각, 이길제 : 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 후판의 고강도화와 용접성 향상, 대한용접학회지, Vol. 20, No. 2(2002)32-41

6. C. Carmignani, R. Mares and G. Toselli (1999). "Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 179, No 3, pp 197-214

7. Qianchu Liu (1997). "Modelling the effect of welding residual stresses on fracture toughness of a welded joint", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 72, No 2, pp 103-109

8. E.Letofsky and H. Cerjak : Metallography of 9Cr steel power plant weld micro- structures, Science and Technology of welding and Joining, Vol.9, No.1(2004) 31-36

9. Commentary on Highly Restrained Welded Connections, AISC, pp.61-73, 1973

10. K. J. Bathe : Finite element procedures in engineering analysis. Prentice-Hallbnc, 1986

11. G. Dhatt : The fine element method displayed. John and Sons Inc, 1982
12. Yukio UEDA and Min Gang YUAN : "A Prediction Method of Welding Residual Stress Using Sourse of Residual stress(Report HI)". Trans. JWRI Vol. 22, No.l, 1993. pp.l57~168.
13. Daws C J, Laser welding: A practical guide, Chap. 2, Abington Publishing, England, pp.28~29.