

용접 공정에 따른 2.25Cr-1Mo강 용접이음부의 특성 변화에 관한 연구

방한서* · 오종인** · 방희선* · 김형**

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**조선대학교 선박해양공학과 대학원

A Study on the Characteristic Change of 2.25Cr-1Mo Steel Welds for Various Welding Processes

HAN-SUR BANG*, CHONG-IN OH**, HEE-SUN BANG* AND HYUNG KIM**

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju, Korea

KEY WORDS: 2.25Cr-1Mo Steel 2.25크롬 1몰리브덴 강, Arc Welding 아크용접, Laser Welding 레이저용접, Welding Residual Stress 용접잔류응력, Brittle Fracture 취성파괴, Charpy Test 샤르피 시험

ABSTRACT: In spite of the merits of laser welding being able to obtain the high welding quality such as smaller width of melting and heat affected zone, smaller welding deformation and fine grains of weldment 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 2.25Cr-1Mo steel which is the essential material of atomic power generation equipment, the laser welding is not yet applied despite its high quality. So it has a trial to a special case demanding high welding quality such as atomic power plant. 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 2.25Cr-1Mo steel. 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.

1. 서 론

원자력 발전소 및 석유화학 플랜트에 사용되는 압력용기용 강은 고온, 고압 및 수소 환경 등 가혹한 사용 환경에서 사용되어지므로 내열, 내압 및 내부식성이 현저하게 우수한 것으로 알려져 있는 저합금강 2.25Cr-1Mo강이 사용되고 있다. 그러나 압력용기 제작시 용접공정은 급열, 급냉의 다양한 열 사이클로 인하여 용착금속의 물성치 저하뿐만 아니라 용접열 영향부(heat affected zone)의 취화, 용접결합 등에 대한 최근 기술 발달에 따른 레이저 용접장비의 고출력화로 후판 용접이 가능해짐에 따라 레이저 용접의 산업적용이 확대되어지고 있는 추세이다. 레이저 용접은 다른 고밀도 고에너지 용접법인 전자빔 용접과는 달리 대기중 작업이 가능하며, 정밀한 용접과 최소의 용접수축과 변형, 인접재질에도 매우 적은 열충격을 준다. 더불어 일반 아크용접에 비해 매우 작은 열영향부위를 만들며, 단일 pass의 용접으로 좁고 깊은 용접부위를 구현할 수 있고 재질열화를 최소화 할 수 있는 등의 높은 용접 품질을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. (Carmignani, R. Mares 등, 1999)

한편 본 연구의 대상인 원자력 발전설비용 증고온 고압배관재료인 2.25Cr-1Mo 강은 그 특성상 견전하며 안정성과 내구성이 우수한 용접부가 요구되어지며 기존의 경우 용접을 위해 SAW, SMAW, GTAW, FCAW 등의 아크용접이 적용되어져 왔다. 따라서 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강에 대한 고품질의 레이저 용접공정의 적용가능성 검토를 하기 위해, 기존의 아크(SMAW-11Pass 및 FCAW-4Pass)용접부 및 CO₂레이저 용접부(1Pass)의 역학적 특성(용접 열영향, 잔류응력, 인성, 인장강도 등)을 수치해석적인 방법(방한서 등, 1991)과 실험적인 방법을 통하여 파악하고자 하였다. 이를 위하여 우선적으로, 각종 용접법 (SMAW, FCAW 및 CO₂레이저)에 따른 2.25Cr-1Mo강에 대한 맞대기 용접부의 잔류응력분포 특성을 비교하고자 평면변형 열탄소성 이론에 입각한 유한요소 해석을 통하여 분석하고 아울러 각종 성능시험(경도, 저온인성 파괴, 굽힘 및 상온 인장)을 수행하여 (이제명 등, 2003)이들 용접이음부의 강도특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험 및 유한요소해석 방법

2.1 실험 조건 및 방법

실험에 사용한 재료는 2.25Cr-1Mo강이며 Table 1,2에 재질

제1저자 방한서 연락처 : 광주광역시 동구 서석동 375
062-230-7134 hsbang@mail.chosun.ac.kr

의 화학조성과 물성치를 나타내었다. 또한, 각 용접법에 대한 시험편의 형상은 Fig. 1에 도시한바와 같이 두께 12mm, 길이 450mm, 폭 300mm로 선정하였고 용접프로세스에 따른 열원의 특성을 고려하여, SMAW는 11pass, FCAW는 4pass의 V형 그루브 형상의 개선(60°)을 가진 다층용접의 맞대기용접을 수행하고, CO₂레이저 용접의 경우는 개선이 없는 단층 완전 용입 맞대기용접을 각각 수행하였으며, 이들 용접시험편의 이음부 형상 및 용접적층상태(입열 위치와 순서)는 Fig.2에 도시하였다. SMAW 용접시 사용된 용접봉은 고강도 2.25Cr-1Mo강 용 S9016-B3(3.2mm, 4.0mm)이며, FCAW 용접시는 FCW Supercored 2CM 1.2mm/Ar+20%CO₂ 용접봉을 사용하였고 사용된 각 용접법에 대한 용접조건은 Table 3,4,5에 각각 나타내었다.

Table 1 Chemical Composition of Used Material(%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb
0.1298	0.1500	0.4700	0.0080	0.0040	2.21	0.17	0.020	0.99	0.008	0.001

Table 2 Mechanical Properties of Used Material

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)
476	582	30	59

Table 3 Welding Condition of SMAW Test Specimen

Pass	Current (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Inter-pass temperature(°C) 175±10 AWS A5.5 E9016-B3 (163~191 °C)
1	100	22	9.7	
2	125	23	20.0	
3	160	25	34.8	
4	160	25	32.9	
5	160	25	38.7	
6	160	25	32.9	
7	160	25	28.2	
8	160	25	38.7	
9	160	25	27.6	
10	160	25	30.8	
Back Gauging				
11	160	25	23.8	

Table 4 Welding Condition of FCAW Test Specimen

Pass	Current (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Inter-pass temperature (°C) 200±15
1	140	28	15.6	
2	250	27	27.3	
3	250	27	20.3	
Grinding				
4	250	27	25.4	

Table 5 Welding Condition of CO₂ laser Test Specimen

Type of laser	Pulse-F CO ₂ Laser (TRUMPF, 50,000Hz)
Output power	12kW
Travel speed	1m/min
Shield gas	He(15 ℓ / min)

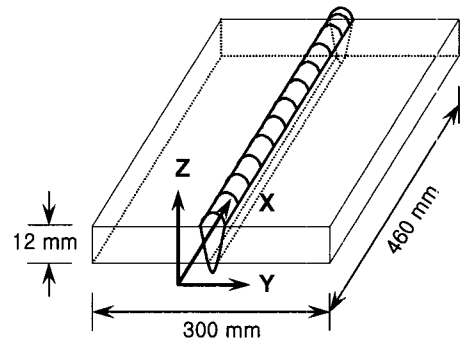


Fig. 1 Configuration of Welded Specimen and Coordinate

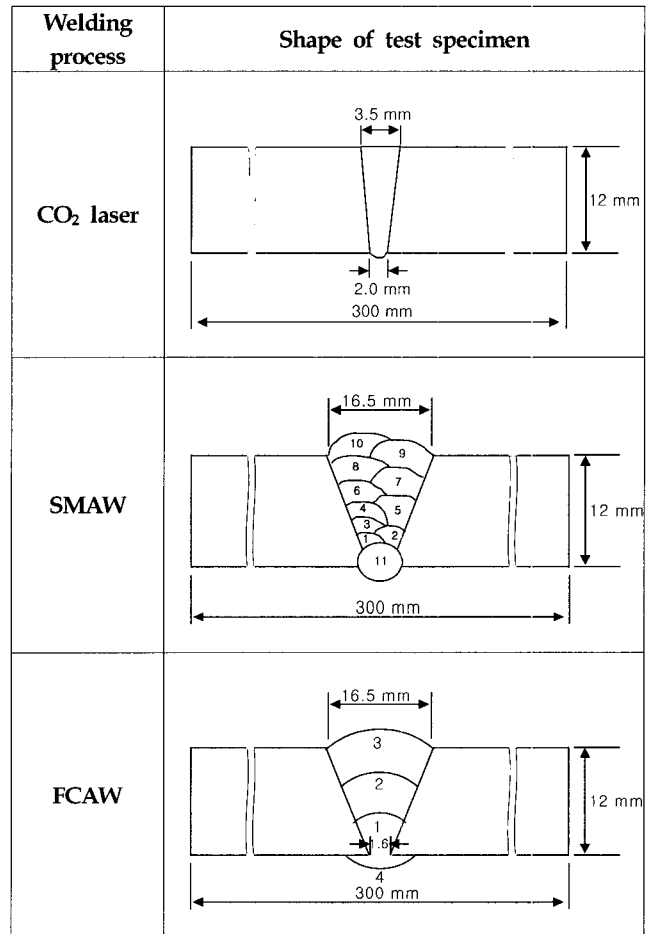
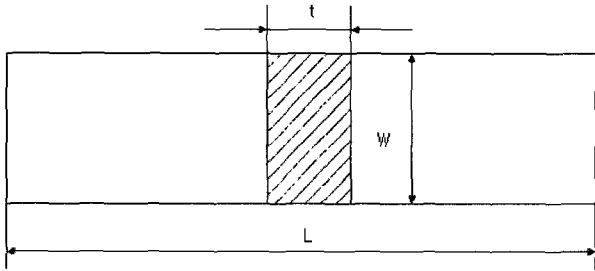


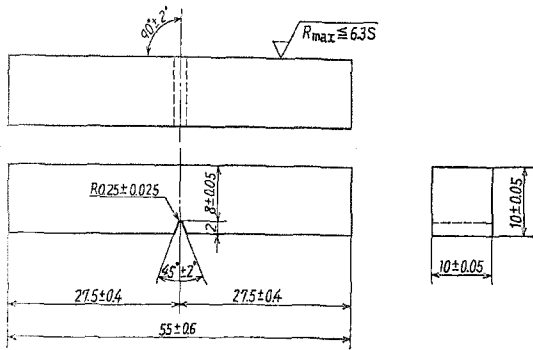
Fig. 2 Welding Configuration and Sequence

Fig. 3은 각종 성능시험(굽힘, 저온인성파괴 및 상온 인장)을 위해 KS 및 ASTM 규격을 고려하여 제작된 시편을 나타내었다. (H. Kuwamura, 2003)

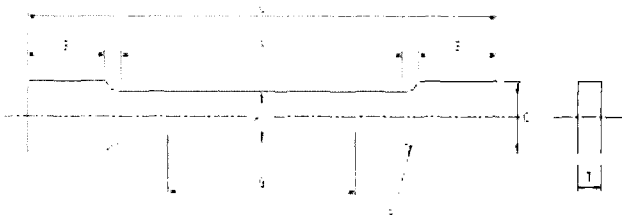


Thickness (t) : Original thickness
 Width (W) : ≤ 35 mm
 Length (L) : ≤ 250 mm

(a) Specimen of Bending Test



(b) Specimen of Impact Test(KSB0821)



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

(c) Specimen of Tensile Test(ASTM A370)

Fig. 3 Schematic Specimen for Experiments

2.2 유한요소 해석이론 및 조건

온도의 시간 및 공간적 분포는 2차원 비정상 열전도 방정식을 만족하고 경계조건으로는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중으로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈라킨법을 이용하여 유한요소 정식화하였다.(방한서, 1992) 또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (1)에 보인 것처럼 전변형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에 의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^t \quad (1)$$

열원에 따른 용접이음부의 역학적 거동을 규명하기 위해 Fig. 1,2에 나타낸 바와 같이 3가지 용접법에 대한 모델을 선정하고, 4절점 아이소파라메트릭 요소를 도입하여 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 용접법에 관계없이 총 절점수 1365개, 총 요소수 1248개로 분할하여 해석을 실시하였다. 해석의 실 용접현상의 재현을 위해 역학적 경계조건은 실제 용접현상을 반영하여 Fig. 5와 같이 적용하였으며, 탄성 및 소성의 전 영역에서 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 재료의 기계적 물성치(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수 등) 및 각종 재료정수의 온도 의존성을 고려하였다. 또한, 소성역에서는 선형 등방경화법칙을 고려한 Von-Mises 항복조건을 항복함수로 사용하였으며, 변형·응력의 관계식을 소성 이론에 따라 증분식으로 나타내어 용접잔류응력을 해석하였다. 여기서 용융부에서의 유체역학적 거동과 금속재료의 상변태 및 레이저 용접에 의한 기홀 내부의 기화와 열방사는 고려하지 않았으며, 재료는 등방성이고 초기온도는 20℃인 것으로 가정하였으며, 재료의 역학적 강성 회복온도는 750℃로 가정하였다. (Qianchu Liu, 1997)

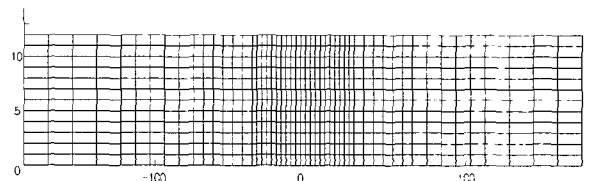


Fig. 4 Finite-Element Mesh for Numerical Analysis

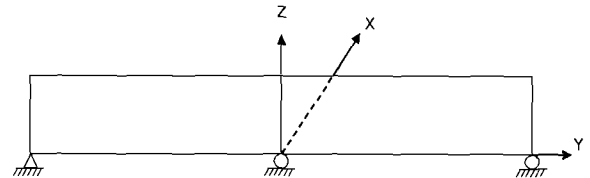


Fig. 5 Boundary Condition for Stress Analysis

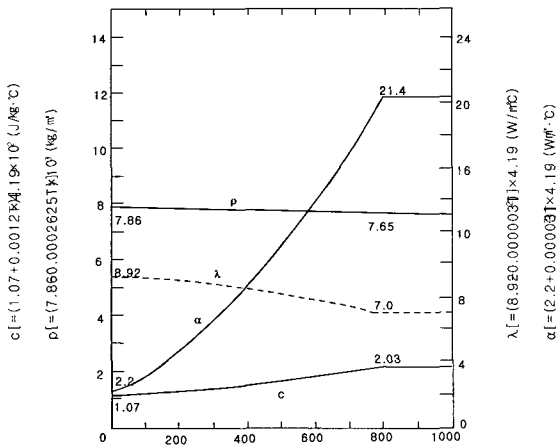
본 해석을 위해 열원에 따른 입열량은 각 용접법에 대한 실제 용접조건인 Table 3,4,5를 고려하여 아크용접인 SMAW와 FCAW는 식(2), CO₂레이저용접은 K. W. Carlson에 의해 제안된 식(3)를 이용하여 계산하였다.

$$Q_{net} = \eta_{arc} \frac{EI}{v} \quad (2)$$

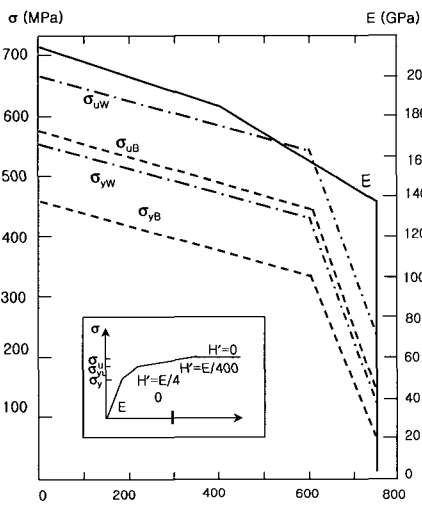
Q_{net} : 유효 입열량(J/cm), η_{arc} : 아크 입열효율, E : 아크전압 (V),
 I : 아크전류(A), v : 용접속도(cm/sec)

$$Q_{net} = \eta_L \frac{P}{v} \quad (3)$$

η_L : 레이저 입열효율, P : 레이저 파워(kW), v : 용접속도(cm/sec)



(a) Thermal coefficient



(b) Physical properties

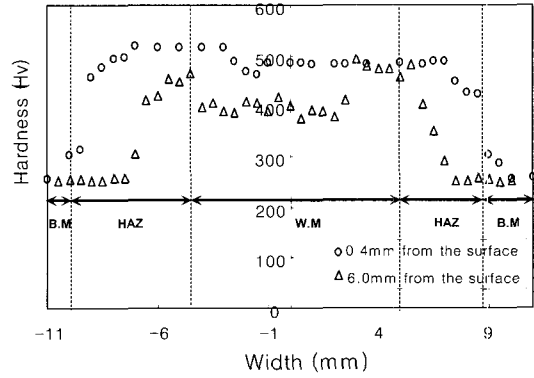
Fig. 6 Temperature Dependency of Material Properties of 2.25Cr-1Mo Steel

3. 실험, 해석 결과 및 고찰

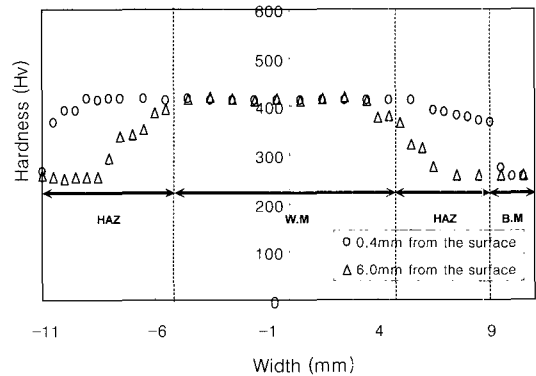
3.1 용접법에 따른 각 용접이음부의 기계적 강도

3.1.1 용접이음부의 경도시험

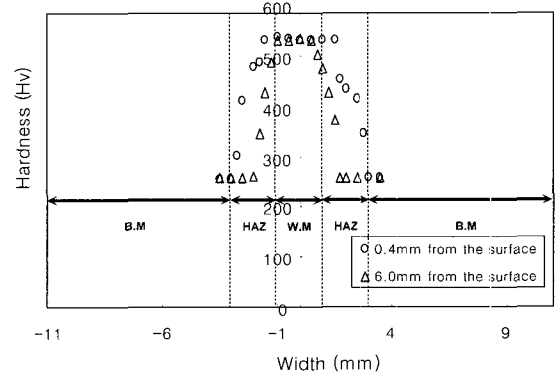
2.25Cr-1Mo강에 대한 SMAW, FCAW 및 CO₂ 레이저 용접부의 경도값을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 그 분포 특성을 고찰하여 보면 CO₂ 레이저 용접부에서의 최고 경도값이 SMAW 및 FCAW 용접부에 비해 다소 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않은 반면에 좁고 균일한 용착금속량과 열영향부로 인해 최고 경도값의 분포 영역대가 좁게 형성되고 있음을 확인하였다.



(a) SMAW Weldment



(b) FCAW Weldment

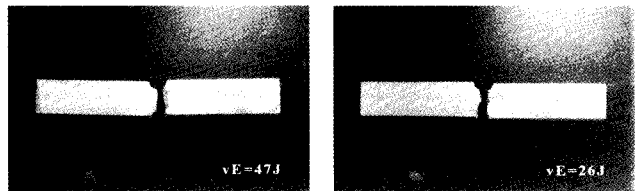


(c) CO₂ Laser Weldment

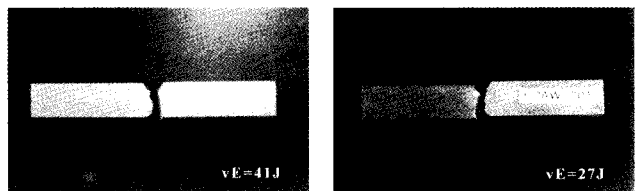
Fig. 7 Hardness Distribution in Each Weld's

3.1.2 용접이음부의 저온인성 파괴시험

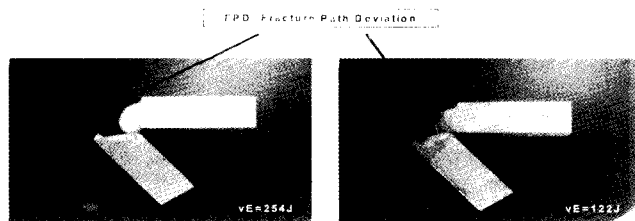
각 용접법에 따른 용접부에 생성된 역학적 특성의 차가 외부 충격으로부터 보여주는 물리적 현상을 파악하기 위하여 샤르피 충격시험을 수행하였다. 시험편은 용접부가 시험편의 중심에 위치하도록 하고 용착금속부에 노치를 주어서 표준 샤르피 시험편으로 제작하였으며, 0℃와 -20℃에서 시험을 수행하여 Fig.8에 나타내었다. 그 결과를 고찰해보면 0℃에서의 충격흡수에너지는 SMAW와 FCAW에서 각각 47J과 41J을 나타낸 반면 CO₂ 레이저 용접시험편에서는 254J을 나타냈으며, -20℃에서는 각 시험편 모두 약 40~50%의 충격흡수에너지 저하를 나타내었다. 또한, CO₂ 레이저 용접에 의한 용접이음부 충격흡수에너지 크기는 온도에 관계없이 SMAW와 FCAW에 의한 용접이음부 충격흡수에너지 크기의 5배 이상의 수준이며 SMAW와 FCAW에 의한 용접이음부의 충격흡수에너지 크기를 비교해 보면, 0℃에서는 FCAW에 의한 용접이음부 충격흡수에너지 크기가 SMAW에 의한 용접이음부의 충격흡수에너지에 비해 적은데 반하여, -20℃에서는 충격흡수에너지의 차가 거의 없으나 보다 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이때 SMAW와 FCAW 시험편보다 CO₂ 레이저 용접 시험편에서의 충격흡수에너지가 크게 나타난 이유는 SMAW와 FCAW 시험편에서는 파괴경로가 용착금속부로 이어지는데 반해 CO₂ 레이저 용접시험편에서는 파괴경로가 용착금속부에서 모재로 그 경로가 변화하는 현상(FPD : Fracture Path Deviation)이 나타났기 때문이며, 이는 레이저 용접부에서의 용착금속부와 열영향부의 폭이 좁은데 기인하는 레이저 용접의 특성으로 사료된다.



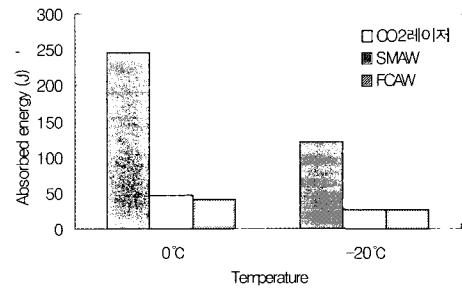
(a-1) SMAW Weldment 0℃ (a-2) SMAW Weldment-20℃



(b-1) FCAW Weldment 0℃ (b-2) FCAW Weldment-20℃



(c-1) CO₂ Laser Weldment 0℃ (c-2) CO₂ Laser Weldment-20℃

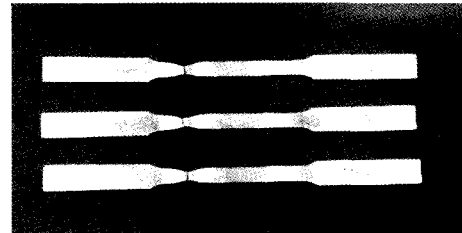


(d) Graphical representation of Charpy test results

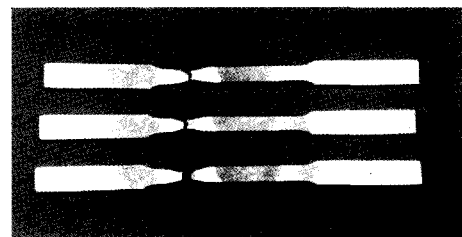
Fig. 8 Results of Charpy Test according to the Welding method

3.1.3 용접이음부의 굽힘 및 상온인장 시험

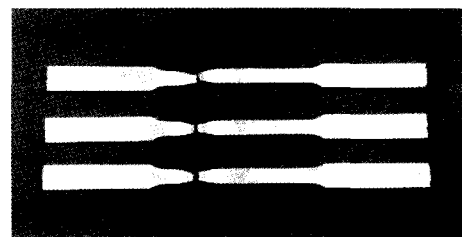
SMAW와 FCAW 및 CO₂레이저 용접법에 대하여 KS 및 ASTM 규격집을 참조하여 상온인장 시험편 및 굽힘 시험편을 제작한 후 50톤급 U.T.M 시험기를 사용하여 인장 및 굽힘 시험을 수행함으로써 각 용접법에 대한 용접이음부의 용접강도 및 용접성을 측정하고자 하였다. 그 결과를 살펴보면 Fig. 9와 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 제작된 시험편모두에서 인장 시험에서는 모두 용접부 모재에서 시험편이 파단 되어지고 굽힘 시험에 의한 표면균열은 관찰되어지지 않는 결과를 얻을 수 있었다.



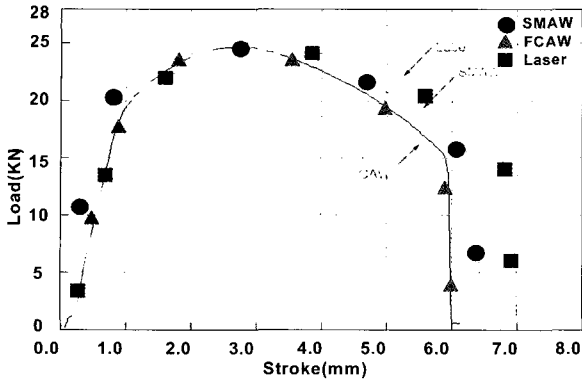
(a) SMAW



(b) FCAW

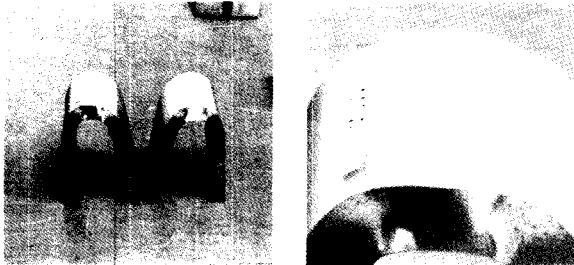


(c) CO₂ Laser



(d) Graphical representation of Tensile test results

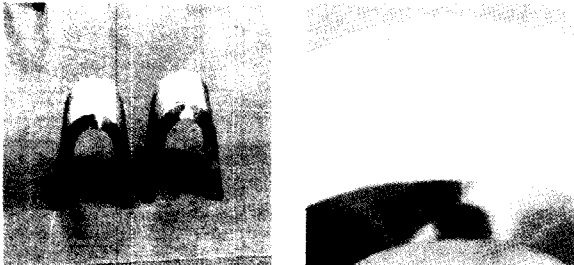
Fig. 9 Results of Tensile Test in each welds



(a) SMAW



(b) FCAW



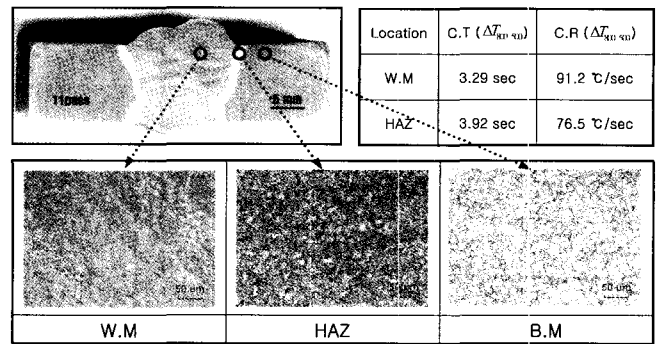
(c) CO₂ Laser

Fig. 10 Results of Bending Test in each welds

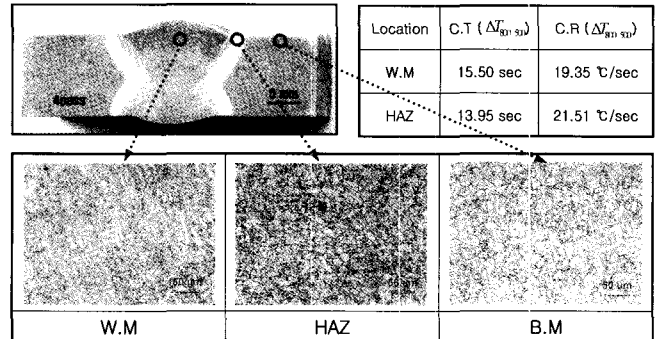
3.1.4 용접이음부의 미세조직

Fig. 11은 각 용접법에 따른 용융부, HAZ 및 모재부에 대

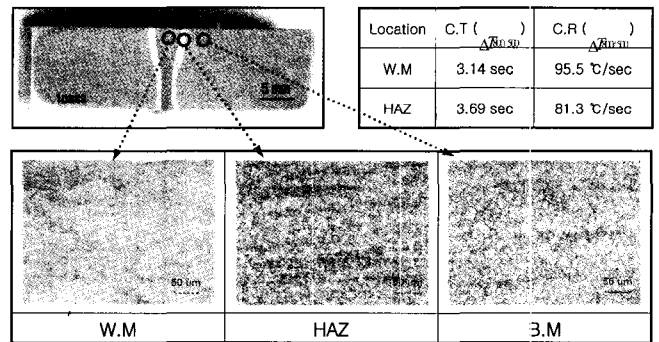
하여 미세조직을 관찰한 사진이다. 용접법에 따른 용융부에서의 조직분포를 살펴보면 아크용접인 SMAW와 FCAW는 조직이 분리되어 비평형 마르텐사이트 구조인데 반하여 CO₂ 레이저 용접은 서로 혼합된 형태로의 평형 마르텐사이트 구조를 보임으로써 용융부에서의 조직간의 결합성이 CO₂ 레이저 용접에서 더 우수하고 HAZ부를 지배하는 금속조직에서 보면 마르텐사이트 조직과 펄라이트 조직 구성비가 CO₂ 레이저 용접이 아크용접에 비해 넓은 분포 특성을 가지며 이러한 특성은 HAZ부에서의 경도에 영향을 미칠 것이다. 또한, 마르텐사이트 조직과 펄라이트 조직의 결합 형태에서 오는 금속조직의 치밀성에 의해 CO₂ 레이저 용접이 아크용접에 비해 충격 흡수성이 우수 할 것으로 사료된다.



(a) SMAW



(b) FCAW



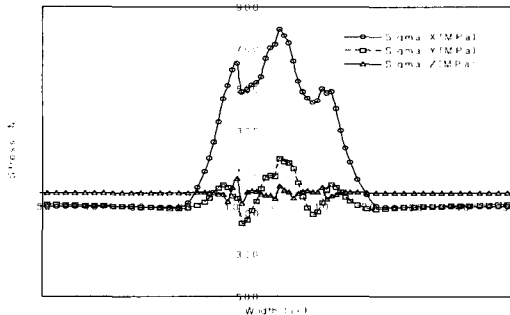
(c) CO₂ laser welding

Fig. 11 Microstructures in Weldments

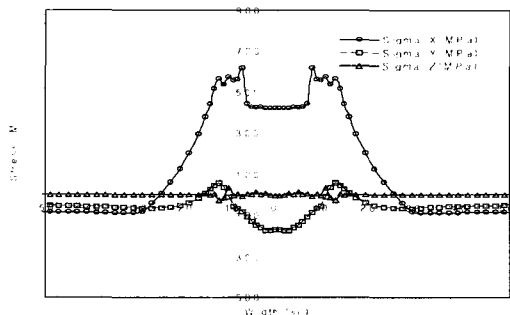
3.2 용접법에 따른 각 용접이음부의 열탄소성 해석

각 용접법에 대한 열탄소성 해석후 시험편의 상표면으로부터 0.5(mm) 떨어진 Z=11.5(mm) 지점을 응력 주목점으로 하여 Fig. 12의 (a)는 11pass를 실시한 SMAW 용접부, (b)는 4pass를 실시한 FCAW 용접부, (c)는 CO₂ 레이저 용접 완전 용입 1pass를 실시한 용접부의 용접잔류응력 분포 상태를 도시한 그림이다.

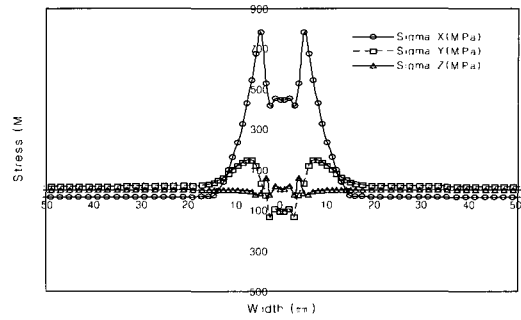
결과에 의하면 SMAW 경우 다층용접의 특성인 용착금속의 비대칭적 적층으로 인해 좌우의 잔류응력 분포가 비대칭적으로 나타났으며, SMAW와 FCAW의 용접선 길이 방향 잔류응력 성분인 σ_x 는 용착금속부와 열영향부에서 인장성분이 발생되었고 모재부 끝단으로 갈수록 압축성분으로 되는 경향을 보이고 있다. 한편, σ_y 의 경우 동일하게 인장성분에서 압축성분으로 변화하고 있으며 그 크기가 σ_x 보다 작은 이유는 폭방향의 구속도가 용접선 길이 방향의 구속도보다 작은데 기인한 것으로 사료된다. 잔류응력을 기준으로 할 때 FCAW용접부의 잔류응력 크기가 나머지 두 용접법에 비해 작게 나타남을 알 수가 있다. 이는 열원에 따른 입열량의 크기에 기인한 것으로 사료된다. CO₂ 레이저 용접의 경우는 잔류응력의 최고영역대가 타 용접법과 거의 동일하게 나타나나 그 분포 영역대가 SMAW 및 FCAW에 비해 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 CO₂ 레이저 용접의 특성인 좁은 열영향부에 기인된 것으로 사료되어진다. 또한, 폭방향 잔류응력인 σ_y 의 분포 양상이 타 용접법과 반대인 압축에서 인장으로 나타나는 차이점을 볼 수 있었다.



(a) SMAW Weldment



(b) FCAW Weldment



(c) CO₂ Laser Weldment

Fig. 12 Welding Residual Stress Distribution in each welds (Z=11.5mm)

5. 결 론

본 연구를 통하여 중고온용 내열강인 2.25Cr-1Mo강의 용접에 있어서 수치해석과 실험을 통한 역학적 특성(용접잔류응력, 저온인성, 굽힘, 인장강도, 경도측정 및 미세조직 등) 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) CO₂ 레이저 용접부의 최고 경도값이 SMAW, FCAW에 비해 다소 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않고 좁고 균일한 용착부와 열영향부에 의해 최고 경도값의 분포 영역대가 좁게 형성되었다.
- (2) 상온인장 시험에서는 SMAW, FCAW 및 CO₂ 레이저 용접 시험편 모두 모재부에서 파단 되었으며, 굽힘 시험 결과 각 용접 시험편 모두 표면 균열은 관찰되지 않았다.
- (3) 샤르피 충격 시험에 따른 용접이음부 충격흡수에너지의 크기는 CO₂ 레이저 용접이 SMAW, FCAW에 비해 5배 이상의 수준이며, 이는 CO₂ 레이저 용접부의 금속특성의 차에 기인하는 것으로 사료된다.
- (4) 각 용접법에 따른 용착부의 미세 조직을 살펴본 결과 CO₂ 레이저 용접은 평형 마르텐사이트 조직 구조를 SMAW, FCAW 용착부는 비형평 마르텐사이트 구조를 보임으로써 용융부에서의 조직간의 결합성이 CO₂ 레이저 용접에서 더 우수함을 알 수 있었다.
- (5) 각 용접법에 대한 용접잔류응력 해석 결과 CO₂ 레이저 용접의 경우 SMAW, FCAW보다 다소 높게 나타나 거의 차이가 없으며, 나머지 두 용접법에 비해 분포영역대가 훨씬 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 CO₂ 레이저 용접의 특성에 따른 좁은 용착부 및 열영향부의 형성에 기인된 것으로 사료된다.

이상과 같이 각 용접법에 대한 역학적 특성(잔류응력 분포 특성과 상온인장, 굽힘, 저온인성, 경도측정 및 미세조직 등)을 고찰해 본 결과 신뢰성 측면 및 시공 측면에서 CO₂레이저 용접이 아크용접인 SMAW와 FCAW보다 더 장점을 가질 수 있음을 확인할 수 있었으며, 2.25Cr-1Mo강과 같이 안전성과

내구성을 증시하는 구조물 제작에 유리함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 원자력연구개발 중장기사업의 위탁 과제 (계정번호: 53733-02)의 일환으로 수행되어졌으며, 한국원자력연구소의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 방한서, 김유철 (1991). "유한요소법에 의한 후판용접시의 3차원 비정상열전도해석", 대한용접학회지, 제9권, 제2호, pp 37-43.
- 방한서 (1992). "후판 용접부의 역학적 특성 -유한요소법에 의한 3차원 열탄소성 해석", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp 250-258.
- 이제명, 백점기, 윤동렬(2003). "용접구조물의 구속효과와 균열발생특성간 상관관계", 한국해양공학회지, 제17권,

제2호, pp 14-20

- Carmignani, C., Mares, R. and Toselli, G. (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.
- Kuwamura, H. (2003). "Classification of Material and Welding in Fracture Consideration of Seismic steel Frames", Engineering Structures, Vol 25, No 5, pp 547-563.
- 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

2004년 11월 19일 원고 접수

2005년 2월 2일 최종 수정본 채택