

저탄소 2.25Cr-1Mo강판의 용접성 및 용접부 성능

Weldability and joint performance of low carbon 2.25Cr-1Mo steel plates

최 기 용* 장 응 성*

* 포항산업과학연구원 설비·용접팀

1. 서 언

1980년대 들어 선진국에서는 중고온용 강재의 고품질화 및 다양화에 전력을 기울여 왔으며 현재 9%Cr강을 포함한 여러 가지 종류의 A387 grade 강재들을 양산 공급하고 있다. 또한 이들 강재는 TMCP, DQ 등 신 가공기술의 적용이 시도되고 있다. 이외에도 한층 강도 수준을 높이고 사용성능을 개선시킨 A542 grade 강재는 최근 개발을 완료하고 규격화를 도모하고 있다. 이에 비해 Cr-Mo 첨가 중고온용강의 국내생산은 1991년도에 A387-11-C11강을 상업적으로 생산한 실적만 있을 뿐이었다. 1993년 이후 주문실적이 미미하여 Cr-Mo 첨가 중고온용강의 생산실적은 없었다. 그러나 최근 들어 국내 고객사의 신규 요구는 크게 증가하고 있는 실정이다. 따라서 기 강재의 제조범위 확대는 필연적이며 현재 전량 수입에 의존하고 있는 기타 중고온용강의 제조기술 확립 및 양산체제 구축 또한 시급한 실정이다.

본 연구실에서는 1998년부터 POSCO 현장에서 생산을 시작한 A387 강종 중 A387-22강재에 대한 성분설계 및 현장열처리 조건설정, 모재특성 및 용접성 등에 대해 다양한 평가를 실시하였다. 본 연구는 이 결과 중 A387-22 강재의 용접성과 관련된 결과를 논한다. A387-22강 모재의 규격 및 용접이음부의 기계적 성질은 저탄소화에 의해 어떠한 영향을 받는지에 관해 중점적으로 연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 A387-22 강재의 최적 합금설계의 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 A387-22 강은 Table.1에 나타낸 바와 같이 약 2.25%의 크롬과 1.0% 몰리브덴을 포함하는 조성을 가진 2.25Cr-1Mo강이다. 모재 A의 탄소함량은 0.064%의 저탄소를 함유한다. 탄소함량의 변화에 따른 강판의 인장강도와 최고경도를 비교하기 위해 0.138%의 고탄소를 함유한 B를 사용하였다.

Table.1 Chemical composition of an ASTM A387-22 steel used.(wt%)

Steel	C	Si	Mn	P
Spec.	0.05-0.17	≤0.50	0.30-0.60	≤0.035
A	0.064	0.155	0.398	0.007
B	0.138	0.142	0.460	0.014
Steel	S	Cr	Mo	Fe
Spec.	≤0.035	2.00-2.50	0.90-1.10	bal.
A	0.003	2.25	0.894	bal.
B	0.004	2.27	0.970	bal.

Table.2는 A387-22 강의 용접공정별 용접조건을 나타낸 것이다. 사용된 plate의 두께는 16mm이며 FCAW와 SMAW를 실시하였다. 용접이음부 성능시험은 용접상태와 PWHT 적용 후로 구분하여 실시하였으며 PWHT는 720℃에서 2시간 유지한 후 노냉하였다.

Table.2 Welding conditions applied to A387-22 steel plate(16mm)

Process	Consumables (mm)	Current (A)	Voltage (V)
FCAW (1G)	E80C-G	230~270	26~30
SMAW (1G)	E8018.B2	110~130	23~25
Process	Speed (cm/min)	Preheating (°C)	Heat Input (KJ/cm)
FCAW (1G)	17.4~45.2	142	Max. 21
SMAW (1G)	6.9~11.1	150	Max. 27

인장시험은 PWHT 실시 유무에 따라 ASTM A370에 준하여 2set 실시하였다. 충격시험은 용접금속과 FL, FL+1, FL+3 및 FL+5 등에서 3set 실시하였다. A387-22강의 용접경화성의 평가는 용접열영향부의 최고경도시험으로 JIS Z 3101의

규정에 준하여 측정하였다. 이때 사용한 용접봉은 AWS E9018-B3 규격에 해당하는 용접봉을 사용하였다. 용접부 저온균열감소성은 JIS Z 3158에 규정되어 있는 경사Y형 용접균열시험으로 평가하였다. 경사Y형 용접균열시험시 사용한 용접봉은 최고경도시험과 같은 용접봉을 적용하였다. 이때 단면 및 표면 균열조사는 용접후 24시간 방치한 다음 다섯 단면에 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저, 2.25Cr-1Mo강 모재의 탄소함량 변화는 인장성질에 어떠한 영향을 미치는지 관찰할 필요가 있다. Fig.1은 tempering 온도변화와 인장강도의 관계를 나타낸 것이다. Normalizing 상태에서

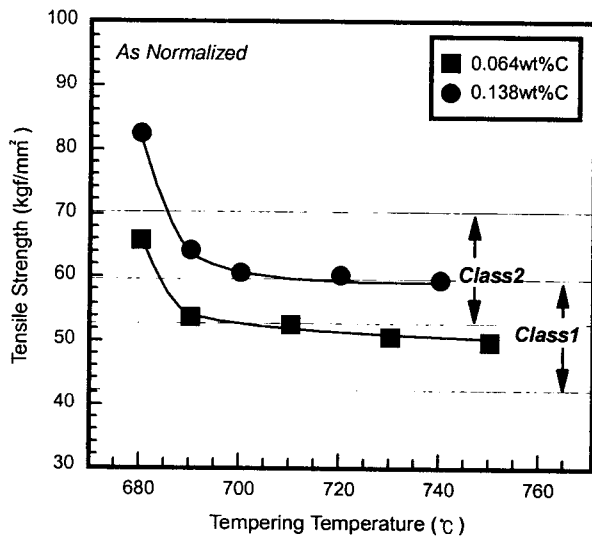


Fig. 1 Comparison of tensile strength for A387-22 steels with different carbon weight percent.

tempering을 실시하면 탄소함량에 관계없이 인장강도는 급격히 감소한다. tempering 온도가 증가하면서 인장강도는 완만한 감소를 보인다. 저탄소 2.25Cr-1Mo강재는 고탄소 2.25Cr-1Mo강재에 비해 전반적으로 인장강도가 낮다. 이것은 탄소함량의 감소는 곧 인장강도 감소의 수반을 의미하는 것이다. 규격을 살펴보면 0.138% 탄소를 함유한 2.25Cr-1Mo강은 A387-22의 Class 2 규격을 안정적으로 보장된다. 그러나 0.064% 탄소를 함유한 2.25Cr-1Mo강은 tempering 온도가 증가함에 따라 A387-22의 Class2 규격에서 미달된다. 즉, 저탄소 2.25Cr-1Mo강은 Class1 규격을 만족

하지만 Class2 규격을 안정적으로 만족하기 위해서는 DQ, TMCP 등 신가공기술의 적용이 필요함을 알 수 있다.

Fig.2는 저탄소 2.25Cr-1Mo강판을 FCAW 및 SMAW로 용접한 맞대기용접부의 단면조직을 촬영한 것이다. 맞대기의 한쪽 joint는 열영향부의 안정적인 충격에너지 확보를 위해 수직으로 가공하였다. SMAW 시험편에 비해 대전류인 FCAW 시험편의 열영향부 폭은 상대적으로 넓다. 이것으로부터 두 용접이음부의 기계적 성질은 다른 양상을 나타낼 것으로 예측된다.

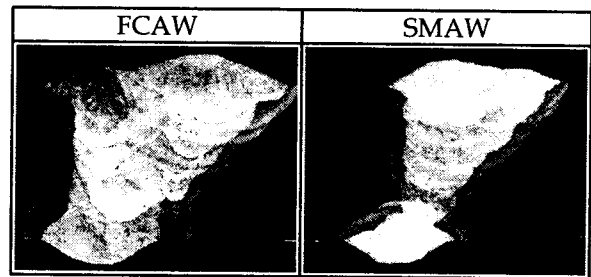


Fig. 2 Macrographs of welded low carbon A387-22 with FCAW and SMAW.

Fig. 3은 저탄소 2.25Cr-1Mo강판의 용접공정별 PWHT 전후의 용접이음부 인장시험 결과이다. 인장시험 결과 파단은 예외 없이 모재측에서 발생하였다. FCAW 및 SMAW 모두 용접상태는

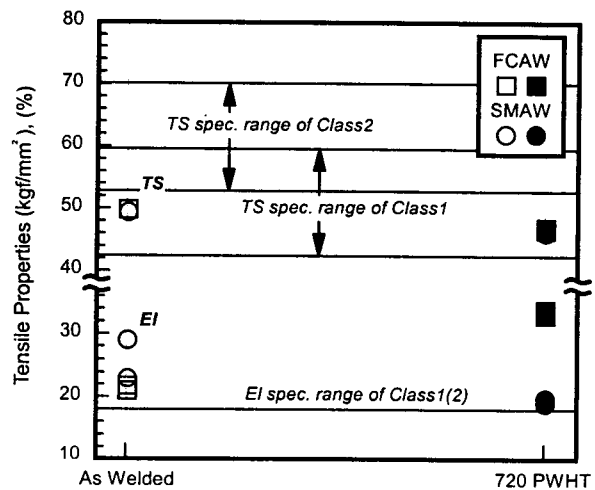


Fig. 3 Effect of PWHT on tensile properties of welded joints for low carbon A387-22 steel.

A387-22의 Class1 규격을 만족한다. PWHT 후에는 용접상태에 비해 약 7% 연화됨을 보인다. 그러나 이 또한 Class1급 모재의 규격 내에 포함될

정도로 인장강도는 우수함을 보여준다. PWHT 전후 조금 다른 양상을 보이지만 연신을 또한 A387-22-CI1 및 CI2의 규격 내에 포함되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 공정별 PWHT 전후로 구분하여 -20℃에서 용접이음부의 충격인성의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 용접상태에서 FCAW 용접이음부는

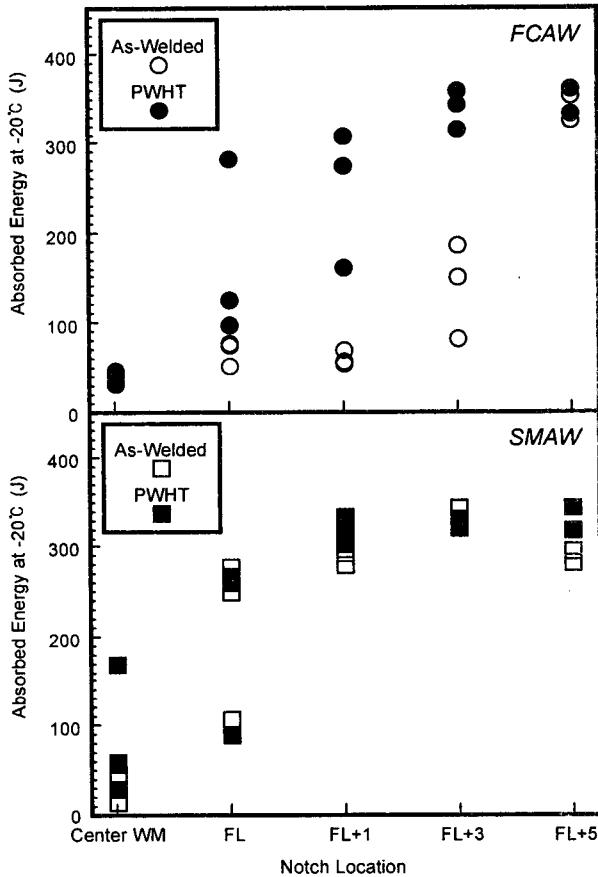


Fig. 4 Effect of PWHT on impact absorbed energy from different notch locations.

FL+ 3mm까지 충격에너지가 아주 낮다. 그러나 PWHT 후에 열영향부는 100J 이상의 수준으로 인성이 회복됨을 보여준다. SMAW의 경우 용접 상태에서 용접이음부는 FL+1mm까지 100J 이상의 높은 수준의 인성이 이미 확보되어 있다. 따라서 PWHT 전후의 충격에너지의 회복은 크지 않다. 이와 같이 용접상태에서 FCAW 용접열영향부의 충격에너지가 아주 낮은 것은 Fig. 2에서 보았듯이 큰 대전류로 인해 열영향부의 폭이 상대적으로 넓어지고 그만큼 마르텐사이트나 베이 나이트 등의 경화상의 분율과 폭이 넓어지기 때문인 것으로 판단된다. 용접방법에 상관없이 용

접조건의 차이에 의해 열영향부의 폭이 넓을수록 용접이음부의 기계적 성질이 불량해짐은 자명한 일이다. 따라서 우수한 용접이음부의 기계적 성질을 확보하기 위해서는 용접조건에 따라 후열처리 온도와 유지시간이 달라져야 할 것이다.

Fig. 5는 용접경화성 평가의 일환으로서 예열온도의 증가에 따라 최고경도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 예측식은 Yurioka의 최고경도 예측식에 의해 계산한 것이다. 실측 및 예측에 의한

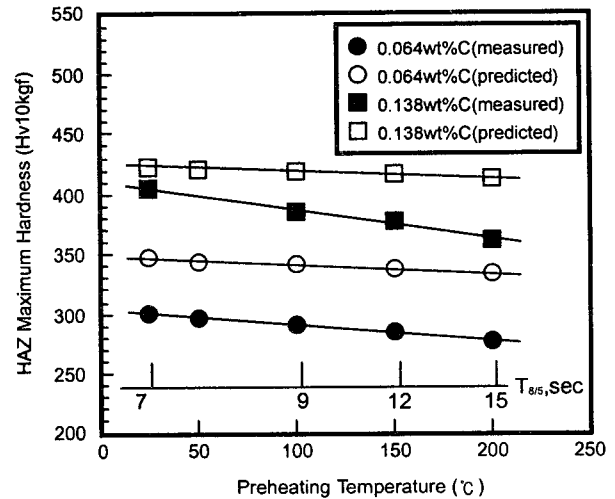


Fig. 5 Change of heat affected zone hardness with increasing preheating temperature for A387-22 with different carbon percent.

최고경도는 예열온도 증가에 따라 모두 감소하는 경향이다. 이것은 예열온도 증가에 따라 냉각시간이 길어지고 이로 인해 경화상의 생성이 억제되기 때문인 것으로 사료된다. 예열온도 변화에 따라 조금씩 차이가 나지만 0.064% 저탄소 A387-22강은 0.138% 고탄소 A387-22강에 비해 최대 100Hv 정도 낮은 경도를 보유하고 있음을 알 수 있다. 경도가 높은 고탄소 A387-22강은 경도가 낮은 저탄소 A387-22강에 비해 마르텐사이트 및 베이 나이트 등과 같은 경화상의 생성이 용이해져 경도가 높아지고 결국 용접이음부 성능은 열악해질 것으로 생각된다. 여기서 실측 및 예측에 의한 최고경도는 차이가 있음을 알 수 있다. 그 이유는 현재로서 명확하지 않지만 본 실험에서 적용한 실용접시 냉각시간 추정의 정확성문제 때문일 수 있다. 또한 이 예측식은 Cr-Mo 첨가 저합금강의 최고경도 예측에 한계가 있음을 의미할 수 있으나 결론을 내리기는 힘들다.

마지막으로 용접부의 저온균열감수성평가는 경사Y형 구속균열시험으로 실시하였다. Fig. 6은 경사Y형 구속균열시험의 결과로서 저탄소 및 고탄소 A387-22강의 예열온도변화에 따른 단면 및 표면균열율을 나타낸다. 고탄소 A387-22강은 예열온도가 100℃ 이하에서 단면 및 표면균열율이 100%로 용접비드가 2등분될 정도로 저온균열감수성이 높다. 그리고 예열온도가 150℃가 되어서

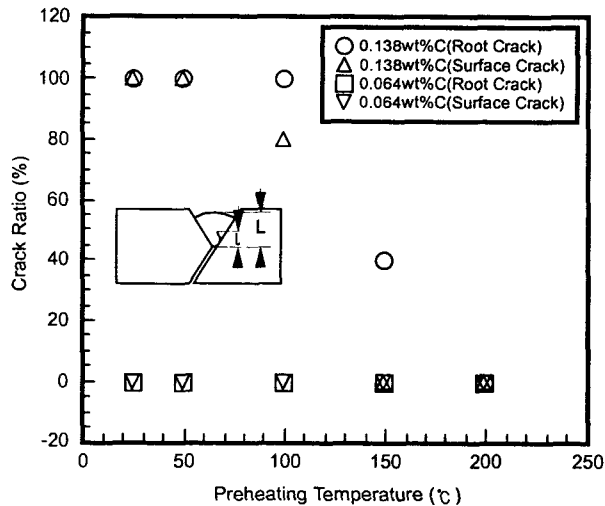


Fig. 6 Comparison of Oblique Y-slit restraint cracking test results for A387-22 steel with different carbon percent.

야 비로소 고탄소 A387-22강의 단면균열율은 40% 수준으로 낮아지고 200℃ 예열에 의해 저온균열은 완전히 방지될 수 있다. 0.064% 저탄소 A387-22강은 예열을 실시하지 않은 상온에서조차 단면 및 표면균열이 발생하지 않는 우수한 저온균열감수성을 보유하고 있다. 고탄소 A387-22강재에서 발생한 용접 저온균열은 주로 수소에 의한 지연균열(delayed crack)이다. 지연균열은 용접후 수분으로부터 수 일 후에 결정입내 및 입계에서 발생하여 전파한다. 이러한 저온균열의 발생을 촉진하는 인자로서는 경화조직, 확산성수소 및 구속조건 등 세 가지가 지적되고 있다. 열영향부의 경화조직은 강재의 화학성분과 열cycle로 결정된다. 본 연구에서 고탄소 A387-22강의 저온균열발생은 0.138%의 고탄소 함유가 주된 원인으로 판단된다. 이 경우 마르텐사이트 등의 경화조직의 생성되어 저온균열이 발생이 용이한 것은 자명하다. 합금원소의 첨가량이 많은 A387-22강재는 용접시 저온균열 발생방지를 위

한 대책 수립이 중요한 과제였다. 따라서 A387-22강재의 저탄소화는 저온균열 발생을 방지하기 위한 근본적인 대책이라고 할 수 있다.

4. 결론

중고온용 2.25Cr-1Mo강판 용접부의 기계적 성질에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

4.1 우수한 기계적 성질보유

저탄소화한 2.25Cr-1Mo강 용접부 성능은 ASTM A387-22강의 Class1 규격을 만족할 뿐만 아니라 저온균열감수성이 고탄소에 비해 아주 낮았다.

4.2 A387-22강재의 최적 합금설계방향 제시

A387-22강의 합금설계는 저탄소 2.25Cr-1Mo강에서 출발해야 함을 알 수 있었다. 즉, 저탄소 A387-22강재로 TMCP, DQ 등 신 가공기술의 적용해야만 용접이음부는 우수한 저온균열감수성과 Class2 규격의 기계적 성질을 공유할 가능성을 확인하였다.

A387-22강재의 Class2 규격을 안정적으로 만족시키고 용접이음부의 우수한 기계적 성질을 동시에 보유하는 것을 목적으로 본 연구실에서는 저탄소 A387-22강재의 합금을 설계하였고 TMCP, DQ 등 신 가공기술의 적용을 시도하였으며 현재 완료단계에 있다.

5. 참고 문헌

1. N Yurioka, M Okumura, T Kasuya and HJU Cotton, "Prediction of HAZ hardness of transformable steels", METAL CONSTRUCTION, 1987, pp. 217R~223R
2. Robert F. Allen etc., ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 2000, 2000, pp. 217~221
3. Y. Ootoguro, Hydrogen attack limit of 2.25Cr-1Mo steel, WRC Bulletin 305, 1985
4. J.E. Indacochea, Cr-Mo STEEL WELDING METALLURGY, Key Engineering Materials Vols. 69 & 70(1992), pp. 47~93
5. API Pub. 941, 3rd Ed., 1983
6. 日本溶接協會, 高强度Cr-Mo鋼技術基準, 1993
7. 石黒徹, 高温高压水添壓力容器用鋼材の動向, 鐵と鋼, Vol. 73(1987), 34
8. 日本鐵鋼協會, 新しい時代を創造する高性能厚板, 西山記念講座, No.159, 160(1996), 145