

TMCP형 해양구조용강의 용접특성

Weldability of TMCP type Steel for Offshore Structures

김충명*, 한재광, 안영호
포항종합제철(주), 경상북도 포항시

1. 서론

근래 들어 육상자원의 고갈이 가속화됨에 따라 해양자원의 경제성이 높아져 이를 개발하기 위한 해양구조물의 건조가 증가하고 있다. 또한 대부분의 새로운 해양구조물들은 기존의 해양구조물보다 대형이며, 사용환경이 훨씬 가혹하기 때문에 사용강재 및 구조물 제작에 대한 엄격한 품질이 요구되고 있다. 이에 따라 해양구조물용 강재에는 고장력화, 고인성화가 크게 요구되고 있으며, 이같은 특성뿐만 아니라 우수한 용접부 품질까지 확보할 수 있는 강재로서 TMCP강이 개발되어 그 사용량이 점차 증가하고 있다. 본 연구에서는 POSCO에서 생산한 TMCP형 해양구조용강인 API-2W Gr.50의 수요가의 사용에 대비하여 제반 용접부 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 시험재 및 실험방법

시험재는 POSCO에서 TMCP제조법을 적용하여 생산한 30mm 두께의 해양구조용강 API-2W Gr.50으로서 모재의 화학조성은 Table 1에, 기계적성질은 Table 2에 나타내었다. 강재의 용접경화성은 최고경도시험 및 용접이음부 경도분포 측정을 통하여 관찰하였고, 저온균열감수성과 lamellar tear특성은 y-groove시험과 Cranfield시험을 통하여 평가하였다. 냉각속도의 변화에 따른 미세조직의 변화와 각각의 충격인성은 용접 열cycle재현시험을 통하여 관찰하였다. 실용접이음부의 제특성은 1.77kJ/mm입열량의 수동용접부와 4.5kJ/mm입열량의 SAW용접부에 대하여 인장특성, 충격인성, 굴곡특성, critical CTOD값, 경도분포 등을 조사하였다. 용접부 충격인성은 notch 위치를 fusion line으로부터 모재쪽으로 이동하며 용접시 최고가열온도의 차이에 따른 미세조직의 변화와 grain size의 변화에 따른 충격인성의 변화를 관찰하였다. 해양구조물에 요구되는 중요한 특성으로서 -10°C 시험온도에서의 용접이음부 CTOD값을 측정하였다. Notch 위치는 역시 충격시험에서와 같이 fusion line, fusion line + 1mm 및 fusion line + 3mm로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.1은 4.5kJ/mm입열량의 SAW용접이음부에 대하여 열영향부의 연화 또는 경화정도를 파악하기 위하여 연속경도시험을 실시한 결과이다. 일반적으로 TMCP강을 용접하는 경우에는 합금원소 첨가량이 낮기 때문에 용접열cycle에 의하여 용접열영향부에 연화현상이 나타나게 된다. Fig.1에서 face측의 경도분포는 weld metal과 HAZ 및 모재부위가 거의 일정한 값을 보여주고 있어 HAZ 연화현상이 거의 나타나지 않고 있으며, back측의 경우에는 fusion line이 약간 높은 경도를 나타내고, HAZ 중앙은 모재에 비하여 약간 낮은 분포를 보이고 있으나 그 정도는 매우 작다고 할 수 있다. 따라서 일반적으로 TMCP강에서는 입열량이 높을수록 용접열영향부 연화현상은 커지게 되지만, 본 시험재에 있어서는 Fig.1에서 보는 바와 같이 4.5kJ/mm의 입열량에서도 열영향부 연화현상이 나타나지 않고 있음을 알 수 있으며, 따라서 열영향부 연화에 따른 용접이음부의 강도저하는 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다. 이

것은 Table 3에 나타난 용접이음부 인장시험에서 확인할 수 있다. Table 3의 용접이음부에 대한 인장시험결과에서 SMAW용접부와 SAW용접부 모두 모재에 비하여 인장강도 및 항복강도의 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 또한 인장시험편의 파단부위도 모재에서 발생하여 강도측면에서는 본 시험에 적용된 용접조건이 적정함을 알 수 있다.

Fig.2는 용접이음부의 파괴인성을 평가하기 위하여 실시한 COD시험 결과를 나타낸 것이다. 시험은 통상적으로 COD값이 요구되는 기준온도인 -10°C 에서 실시하였으며, notch위치는 용접시 최고가열온도의 변화에 따라 인성이 변화하는 것을 감안하여 열영향부에서 3부위를 선정하여 시험하였다. 본 시험재에 대한 COD시험결과는 Fig.2에서 보는바와 같이 용접방법 및 용접입열량의 차이와 관계없이 모두 1.0mm 이상의 우수한 critical CTOD값을 나타내고 있었으며, 시험에 사용된 COD gauge의 측정한계를 초과할 때까지 pop-in이 발생하지 않는 우수한 파괴저항성을 나타내고 있다. 또한 notch 위치별로도 인성이 가장 취약하게 나타나는 fusion line에서도 이같은 우수한 특성을 나타내주고 있다. 해양구조용 강재의 용접부에 대한 critical CTOD값의 요구치는 적용되는 구조물의 종류, 사용환경 등에 따라서 통상적으로 시험온도 -10°C 에서의 시험결과를 기준으로 결정되는데, 이때 요구되는 값은 PWHT의 유무, 판재의 두께, 용접부의 위치 등에 따라 결정된다. 각종 해양구조물에 있어서 지금까지 요구되어온 critical CTOD값의 수준은 최저 0.2~0.35mm 이상이었다. 본 시험재에 대한 critical CTOD값은 적용된 용접방법 및 입열량, 전 notch위치에서 1.0mm 보다도 높게 나타나고 있어 지금까지 적용된 CTOD요구치를 기준으로 할 때 어느 구조물에도 적용이 가능한 매우 우수한 파괴저항특성을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 다음의 충격시험에서 관찰된 바와 같이 본 시험재의 용접부 인성이 매우 우수함을 증명해 주는 것으로 생각되며, 본 시험에서 적용한 SMAW와 SAW의 용접입열량 조건에서는 충분한 파괴인성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig.3은 본 시험재에 대하여 입열량 1.77kJ/mm의 SMAW용접이음부에 대한 notch 위치별 충격인성을 조사한 것이다. Fig.3의 충격시험 결과를 보면, weld metal의 충격인성이 가장 낮게 나타나고 있으나 모재에서 요구되고 있는 충격인성 요구치 ($41\text{Joule} < \sqrt{E_{40}}$)는 충분히 만족시키고 있는 수준이며, fusion line의 경우는 weld metal에 비하여 훨씬 우수한 값을 보이고 있다. 또한 fusion line에서 모재 쪽으로 갈수록 충격인성이 개선되고 있는 것을 볼 수 있는데, fusion line+1mm와 fusion line+3mm의 충격인성은 거의 비슷한 수준으로 나타나고 있다. 열영향부에 있어서의 충격인성에 대한 절대값을 고려해 보면, 가장 취약한 부위인 fusion line의 충격인성이 모재의 충격인성 요구치의 기준이 되는 -40°C 에서 약 179Joule 정도로 나타나 매우 양호한 값을 나타내고 있는데, 이것은 열영향부의 미시조직이 bainite로 변태 되었기는 하지만 결정립의 크기가 그다지 크게 성장하지 않고 비교적 미세하게 이루어져 있기 때문으로 생각된다. 한편 fusion line+1mm보다는 낮은 값을 나타내고 있는 것은 fusion line의 notch가 인성이 낮은 weld metal을 함께 포함하기 때문인 것으로 판단된다. 이에 비하여 fusion line+1mm는 -40°C 에서의 충격인성이 약 226Joule 정도로 나타나 매우 우수한 인성은 보여주고 있는데, 이것은 fusion line보다도 bainite자체의 크기도 작고, weld metal을 포함하는 비율이 적기 때문에 fusion line에 비하여 훨씬 우수한 값을 나타내고 있는 것으로 생각된다. 이러한 결과로 볼 때 본 시험재의 저온 충격인성이 매우 우수한 것을 알 수 있으며, 따라서 본 시험재에 대하여

입열량 1.7kJ/mm의 수동용접을 실시하는 경우 용접부 충격인성을 충분하게 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig.4는 입열량 4.5kJ/mm의 SAW 용접이음부에 대한 용접부 충격시험 결과를 보면 역시 weld metal의 충격인성이 가장 낮은 분포를 보이고 있으며, 열영향부에 있어서 fusion line 및 모재쪽으로 갈수록 충격인성은 높은 분포를 보여주고 있다. 여기에서 비록 weld metal의 충격인성이 가장 낮게 나타나고 있는 있으나, -40°C에서의 충격인성이 약 176Joule 정도로 나타나고 있어 매우 우수한 충격인성을 가지고 있음을 알 수 있다. 열영향부의 충격인성은 이러한 weld metal보다도 더 양호하게 나타나고 있는데, 용접 열 cycle에 의하여 열영향부의 미시조직이 조대하게 성장하였음에도 이처럼 충격인성은 우수한 것은 비록 열영향부의 prior austenite grain 자체는 조대하게 성장하였어도 prior austenite grain의 내부는 주로 충격인성이 우수한 것으로 알려진 acicular ferrite로 이루어져 있기 때문인 것으로 생각된다. 또한 본 시험에서는 weld metal의 충격인성도 매우 우수하게 나타나고 있어, 통상적으로 인성이 낮은 weld metal이 열영향부의 충격시험편에 포함되기 때문에 나타나는 열영향부의 충격인성이 저하하는 현상도 볼 수 없는 점도 하나의 원인으로 생각된다. 이같은 SAW 용접부의 충격시험 결과로부터 본 시험재에 대하여 입열량 약 4.5kJ/mm의 SAW를 적용하여도 용접부 충격인성은 충분하게 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 1 Chemical compositions of API-2W Gr.50.

Material	C	Si	Mn	P	S	Totl.Al	Ti	N	Ceq [*]	Pcm ^{**}
Standard	≤0.18	0.15 ~ 0.40	0.90 ~ 1.36	≤0.04	≤0.02	0.02 ~ 0.05	-	≤0.012	≤0.43	-
Used	0.105	0.26	1.28	0.015	0.004	0.036	0.01	0.005	0.318	0.178

* Ceq(%) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 [IIW]

** Pcm(%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

Table 2 Mechanical properties of API-2W Gr.50.

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Absorbed Energy vE ₄₀ , (Joule)	Hardness (Hv,10kg)
Standard	482 ~ 620	345 ≤	20 ≤	41 ≤	-
Used	511	404	24	237	153.2

Table 3 Tensile properties of welded joint of API-2W Gr.50.

Welding Conditions			Tensile Properties		
Welding Process	Groove Shape	Heat Input (kJ/mm)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Fractured Position
SMAW	X	1.7	519	407	Base Metal
SAW	X	4.5	503	383	Base Metal

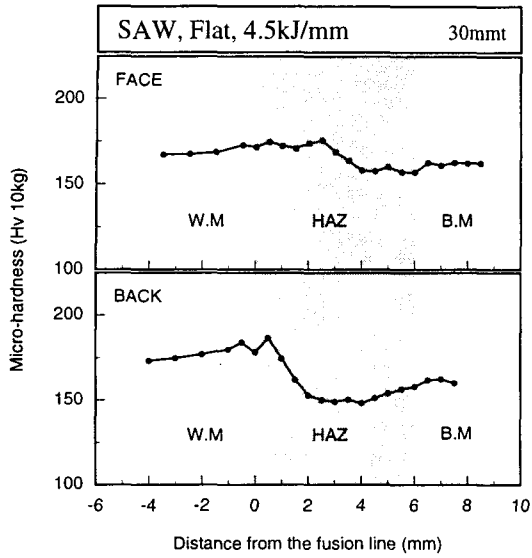


Fig.1 Hardness distribution of SAW welded joint

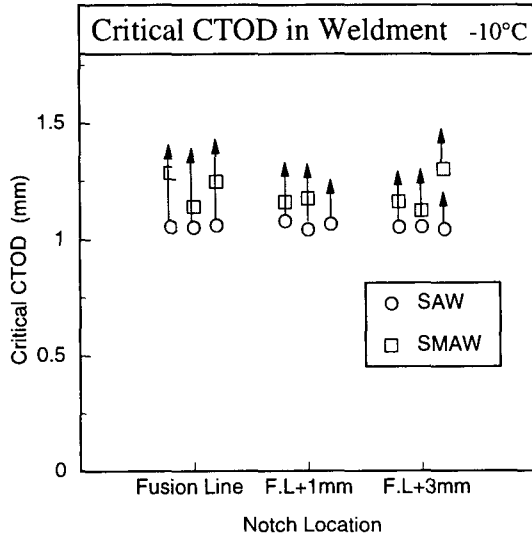


Fig.2 Critical CTOD values of welded joint.

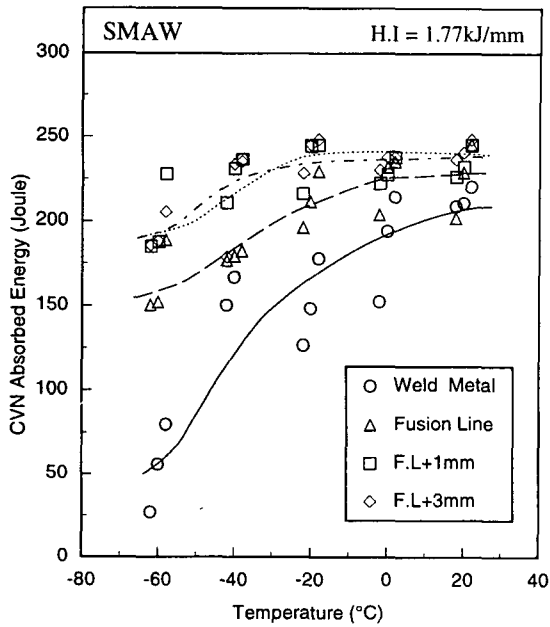


Fig.3 Charpy V-notch impact toughness of SMAW weldment.

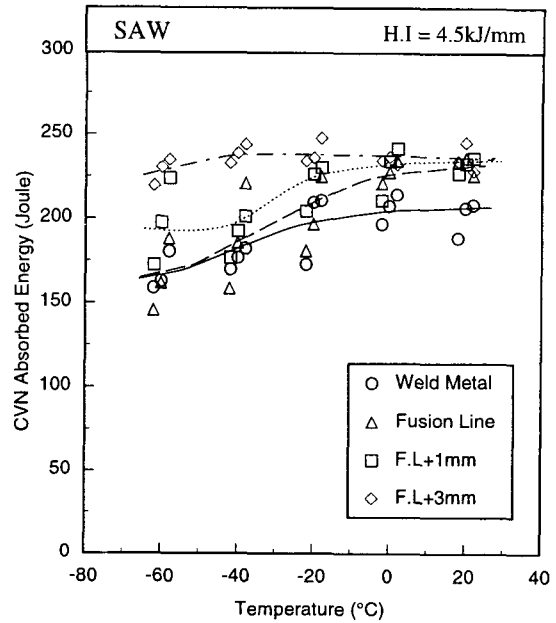


Fig.4 Charpy V-notch impact toughness of SAW weldment.