

TMCP형 YP390강의 용접특성

Welding Characteristics of TMCP type YP390 Steel

김충명*, 한재광, 이길제
포항종합제철(주), 경상북도 포항

1. 서론

1973년의 oil shock 이후 원유수송 선박의 경제성에 대한 관심이 고조되어 선체구조용 강재로 고장력강을 사용하는 경향이 증가하였다. 이에 따라 기존의 항복강도 315MPa급 강재에 비하여 강도수준이 높은 YP355MPa급 강재가 널리 사용되기 시작하였다. 이같은 고장력강의 사용이 증가하게 된 것은 VLCC, Container선 등과 같은 대형선박의 사용이 크게 증가한 이후부터이며, YP355강 뿐만아니라 그 이상의 고장력강에 대한 필요성까지 대두되었다. 한편 강재의 제조시 TMCP제조법을 적용함으로써 탄소당량을 크게 낮출수 있어 대형선박의 건조시 용접작업 효율을 크게 향상시킬 수 있는 대입열용접의 적용이 가능하게 되었다. 이같은 추세에 대응하기 위하여 POSCO에서도 TMCP type의 선박용 고장력 강재 YP390강을 개발하기에 이르렀으며, 본 연구에서는 POSCO에서 시험 생산한 YP390강의 용접특성을 검토한 것이다.

2. 실험방법

시험재는 POSCO에서 시험생산한 두께 25mm의 AH390급 및 EH390급 강재로서 모재의 화학조성 및 기계적성질은 각각 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 강재의 규격은 YP390강에 대한 규정이 확정된 NV규격을 적용하여 NVA390S 및 NVE390S를 적용하였다. A390S 및 E390S강의 제조시 공정의 단순화를 위하여 두 강재의 화학조성은 동일하게 설계하였으며, 제어압연 및 가속냉각조건을 변화시켜 AH급과 EH급 강의 충격인성 수준을 만족시켰다. 용접부 경화성과 저온균열감수성은 각각 최고경도시험과 y-groove시험을 통하여 조사하였으며, 용접후 냉각속도의 변화에 따른 미시조직의 변화 및 그에 따른 충격인성의 변화는 용접열cycle 재현시험 및 SH-CCT diagram을 통하여 조사하였다. 용접이음부 특성은 약 5kJ/mm 입열량의 SAW용접부, 약 15kJ/mm의 FAB용접부 및 약 23kJ/mm의 SEGARC용접부에 대하여 강도, 경도분포, 굴곡특성 및 충격인성 등을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.1은 A390S 강 및 E390S강의 용접경화성을 평가하기 위하여 실시한 용접열영향부 최고경도시험 결과로서 예열온도의 변화에 따른 열영향부 최고경도를 관찰한 것이다. 두 강재에 대한 최고경도시험 결과는 예열온도의 크기에 관계없이 경도차이가 크게 나타나지 않고 거의 비슷한 수준을 나타내고 있다. 이러한 결과는 두강재가 동일한 화학조성으로 설계되었기 때문으로서, 동일한 용접열cycle을 받음에 따라 재결정 생성과정에서 동일한 미시조직을 가지게 되었기 때문으로 생각된다. 예열없이 상온에서 용접한 경우의 용접열영향부 최고경도값은 두 강재에서 약 Hv255~Hv260 정도로 나타났으며, 예열온도의 상승과 함께 점차 감소하는 경향을 보였다. 용접부 경화성시험은 용접열cycle에 의하여 발생하는 용접열영향부의 저온변태조직, 즉 수소취화에 가장 민감한 martensite의 생성에 의하여 underbead cracking이 발생하는 것을 방지하기 위해서 실시한다. 용접열영향부에 있어서 특히 underbead cracking의 발생이 우려되는 임계 경도값은 시험결과에

따라 약간 다르게 나타나고 있으나, 일본강선공작법정도표준(JSQS)에서는 Vicker's경도 값으로 Hv400이하가 되어야 한다는 기준을 제시하고 있다. 이에 따라 선급재에 대하여 통상적으로 Hv400 이하가 되는 용접조건을 구하게 되는데, 본 시험재의 경우 예열을 실시하지 않은 상온용접에서도 이보다 크게 낮은 수준으로 나타나고 있다. 즉 1.77kJ/mm의 표준 수동용접조건에서의 본 시험재의 최고경도값은 매우 안전한 범위에 있는 것으로 보이며, 따라서 용접경화성이 비교적 낮은 것으로 판단된다.

강재를 용접할 때 모재가 용접 arc열에 의하여 급가열된 후 냉각되는 과정에서 용접입열량의 크기에 따라 용접 열영향부의 냉각속도가 변화하게 되며, 이로 인하여 용접 열영향부의 미시조직에 차이가 나타나게 된다. Fig.2는 본 시험재의 용접후 냉각속도 변화에 따른 미시조직 변태특성을 관찰한 SH-CCT diagram이다. 시험 결과 가장 빠른 냉각조건인 $\Delta t_{800-500}=3\text{sec}$ 조건에서는 494~498°C 정도에서 martensite 변태가 개시되고 있음을 볼 수 있으며, 이때의 경도값은 Hv360~Hv362정도로 나타났다. 한편 $\Delta t_{800-500}=7\text{sec}$ 조건에서는 martensite와 함께 bainite가 석출하기 시작하였으며, 소량의 acicular ferrite가 함께 나타나기 시작하는 것을 관찰할 수 있었다. $\Delta t_{800-500}=15\text{sec}$ 조건에서는 특히 acicular ferrite 조직이 많이 생성되는 것이 관찰되었으며, 이러한 경향은 $\Delta t_{800-500}=30\text{sec}$, 60sec 조건에까지 이어지고 있었다. Grain boundary ferrite 변태는 $\Delta t_{800-500}=60\text{sec}$ 조건에서부터 관찰되었으며, $\Delta t_{800-500}=120\text{sec}$ 조건부터는 미량의 pearlite 조직이 관찰되기 시작하였으며, $\Delta t_{800-500}=180\text{sec}$ 조건부터는 pearlite가 본격적으로 석출하고 있다. 한편 $\Delta t_{800-500}=6, 17, 32, 65, 140, 180, 240\text{sec}$ 의 용접열cycle 재현재에 대한 충격시험결과는 $\Delta t_{800-500}=17\text{sec}$ 조건에서 가장 양호한 충격치를 나타내고 있었으며, 이것은 Fig.2에서 관찰할 수 있었던 바와 같이 충격인성이 가장 우수한 것으로 나타나고 있는 acicular ferrite조직이 주로 생성되는 냉각조건 영역이기 때문으로 생각된다. 이에 따라 본 시험재의 용접부 충격인성을 확보하기 위해서는 용접 열영향부 변태조직이 주로 acicular ferrite가 석출되는 $\Delta t_{800-500}=15\text{sec}\sim 65\text{sec}$ 범위로 용접조건을 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Table 3은 본 시험재에 대하여 실시한 용접조건별로 용접이음부 강도를 조사한 결과이다. 시험결과는 적용된 모든 용접방법 및 용접입열량 조건에서 모두 강도요구치를 만족하고 있음을 알 수 있었다. Fig.3은 A390S강에 대하여 15kJ/mm 입열량의 SAW 용접부에 대한 충격인성을 조사한 결과이다. A390S강의 용접부 충격인성 요구치는 그림에 나타낸 바와 같이 전 용접부에 대하여 20°C에서 39Joule 이상이 되어야 하는 것이다. Fig.3에서 용착금속의 충격인성은 규정된 인성요구치를 충분히 만족하는 수준으로 나타났다. 용접이음부에 있어서 가장 취약지점인 fusion line의 충격인성은 규격의 기준온도 20°C에서 시험한 경우 132~169Joule을 나타냄으로써 인성요구치 39Joule을 크게 상회하고 있다. 또한 fusion line+1mm, fusion line+3mm와 같이 용접부로부터 모재쪽으로 갈수록 열영향부의 충격인성은 규격의 요구치를 만족하는 것은 물론 fusion line에 비하여 크게 상승하고 있다. 가장 취약한 지점인 fusion line에서도 이같이 우수한 충격인성이 나타난 것은 이 부분에서의 변태조직으로서 acicular ferrite가 생성되었기 때문인 것으로 생각된다. 한편 Fig.4는 E390S강에 대한 SAW 용접부 충격인성을 조사한 결과이다. Fusion line의 충격인성은 규정온도 -20°C에서 평균 121Joule 정도를 나타내고 있어 규격의 요구치 39Joule에 비하여 매우 우수하게 나타났다. 그러나, 용착금속의 충격인성은 규격의 요구치를 겨우 만족시키는 수준으로서 용접재료에 대해서는 보다 우수한 충격인성을 확보할 수 있는 재료를 선정해야할 필요성이 제기되었다.

Table 1 Chemical compositions of materials used.

Material	C	Si	Mn	P	S	Sol-Al	Nb	V	Ti	Ceq*	Pcm**
Standard	≤0.18	0.1~0.5	NVA390S 0.7~1.6 NVE390S 0.9~1.6	≤0.40	≤0.40	≤0.08	≤0.05	≤0.10	-	-	-
Materials Used	0.104	0.330	1.510	0.017	0.006	0.043	0.018	-	0.010	0.356	0.192

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

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

Table 2 Mechanical properties of materials used.

Materials	Rolling Direction	Y. S. (N/mm ²)	T. S. (N/mm ²)	El.(%)	CVN Energy (Joule)
Standard		390 ≤	530 ~ 650	17 ≤	39 ≤ vE (A0°C, E-20°C)
NVA390S	Longi.	442.0	541.9	21	vE ₀ =212.9
	Trans.	457.7	550.8	21	vE ₀ =165.7
NVE390S	Longi.	464.5	560.6	21	vE ₀ =273.9
	Trans.	468.4	566.4	20	vE ₀ =156.3

Table 3 Tension test results of welded joint.

Materials	Welding Methods	Strength (N/mm ²)	
		T. S.	Y. S.
A390S	SEGARC	T. S.	537.6
		Y. S.	398.6
	SAW	T. S.	579.3
		Y. S.	460.0
FAB	T. S.	547.0	
	Y. S.	409.2	
E390S	SAW	T. S.	586.9
		Y. S.	463.8
	FAB	T. S.	546.7
		Y. S.	403.7

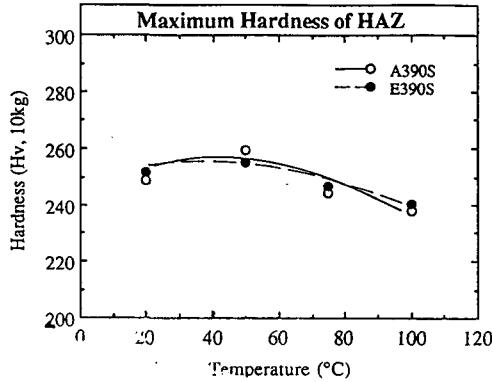


Fig.1 Maximum hardness of HAZ.

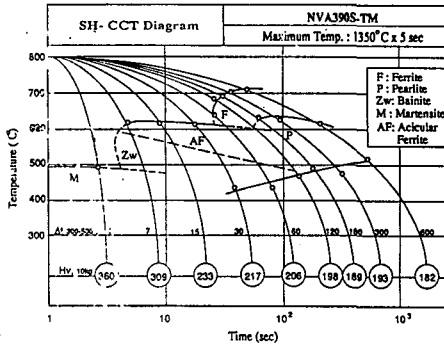


Fig.2 SH-CCT diagram.

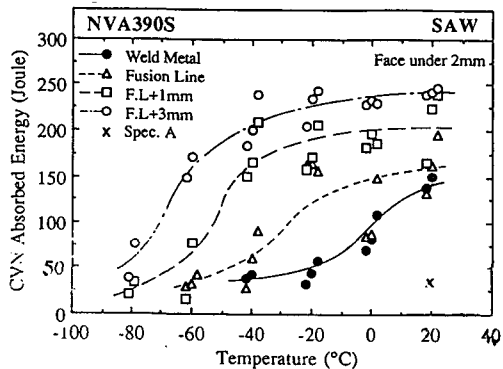


Fig.3 Impact toughness of A390S weldment.

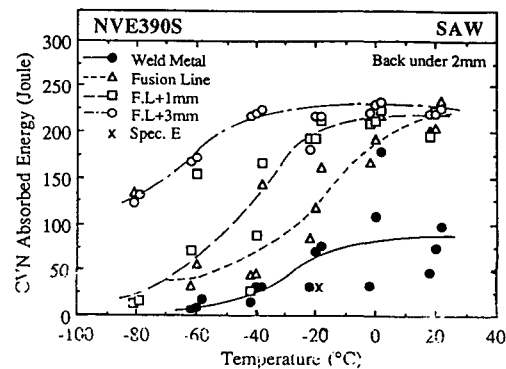


Fig.4 Impact toughness of E390S weldment.