압력용기용 Mn-Ni-Mo계 A302-C강의 용접특성

윤병현†,장웅성*,권영각**(RIST)

A study on the welding characteristics of Mn-Ni-Mo type A302-C steel plate for pressure vessel

Yoon Byoung Hyun, Chang Woong-Seong and Kweon Young Gak

Key Words: Pressure vessel(압력용기), welding(용접), A302-C steel(A302-C강)

Abstract : In order to develop ASTM A302 grade C type steel plate with excellent weldability, several steels with different chemistry have been manufactured and evaluated their mechanical properties and weldability. Trial A302-C steels have revealed tensile strength in the range of 61-67kg/㎟ and elongation in the range of 27~32%, depending on chemical compositions within the ASTM specification range. In case of impact toughness, trial steels showed in the range of 58-70J at 0℃. From the weldability test, the minimum preheat temperature was found to be about 150℃, and automatic welding condition satisfied the requirements of both ASTM specification and users.

1. 서론

국내 발전설비의 신증설에 따라 Mn-Mo-Ni 계 압력용기용 중고온용강의 소요량이 증대되고 있으나 현재까지는 전량수입에 의존하고 있는 실정이다. Separator tank 등 주로 후물재에 대한 요구가 많은 강종으로 제조시 열처리 특성 및 용접기술의 개발이 필수적으로 요구되므로 모재의 품질확보 단계에서 고객사 가공조건을 고려한 용접성 향상 방안이 동시에 강구되어야 할 강종이다.

A302 Grade C 강은 60 kg㎟ 급 강재로서 50 kg/㎟ 급 강재인 A516 규격의 강보다 두께 측면에서 장점이 있는 강재이다. A302 C 강은 두께 50㎜ 까지는 열처리 없이 압연상태에서 사용되나 두께 50㎜ 이상인 경우에는 노말라이징 열처리를 하여 인성을 확보해야 하는 강종이다. 또한 시공사들은 저 탄소당량의 강재를 요구하는 경우도 많기 때문에 이에 대응할 수 있는 방안이 필요하다.

보일러 설비의 열효율을 높이기 위해 사용온도가 점점 높아지고 있는 실정으로서 보일러의 설계시 두께를 무한정 두껍게 할 수 없기 때문에 고강도의 강재에 대한 수요가 증대될 전망이다. 이러한 관점에서 본 연구는 A302 C 강의 안정적 품질확보 및 최적 용접조건을 도출하기 위한 합금설계 및 용접성에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과를 이에 정리하였다.

2. 이론적 고찰

A302강의 ASTM 규격은 Table 1 에 나타낸 바와 같이 4종류로 구분되어 있는 60kg/㎟ 급 강이다. Grade A와 B강은 5대 원소이외에 Mo를 첨가하는 강이고 Grade C 와 D 강은 Mo 와 Ni을 첨가하여 고온강도 및 인성을 증가시킨 강이다. ASTM 규격상에는 충격인성에 관한 규정은 없다. 두께 50㎜ 이하까지는 as-rolled 상태에서 제조되며 두께가 50㎜를 넘어갈 경우 노말라이징 처리를 하여 기계적 특성을 확보할 수 있도록 하고 있다.

Table 1. Specifications of A302 steel(ASTM, JIS)

	두께, t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Y.S. (kg/㎟)	T.S. (kg/㎟)	JIS 규격
Grade A	≤25	≤0.20	0.15-0.30	0.95-1.30	0.035 이하	0.040 이하	0.45-0.60		≥32	53-67	SBV1A
	25<t≤50	≤0.23									
	>50	≤0.25									
Grade B	≤25	≤0.20	0.15-0.30	1.15-1.50	0.035 이하	0.040 이하	0.45-0.60		≥35	56-70	SBV1B
	25<t≤50	≤0.23									
	>50	≤0.25									
Grade C	≤25	≤0.20	0.15-0.40	1.15-1.50	0.035 이하	0.040 이하	0.45-0.60	0.40-0.70	≥35	56-70	SBV2
	25<t≤50	≤0.23									
	>50	≤0.25									
Grade D	≤25	≤0.20	0.15-0.40	1.15-1.50	0.035 이하	0.040 이하	0.45-0.60	0.70-1.00	≥35	56-70	SBV3
	25<t≤50	≤0.23									
	>50	≤0.25									

다양한 중고온 압력용기용강이 보일러, 석유화학, 합성화학 및 석유정제 분야에서 활용되고 있다. 중고온 압력용기용강의 각종 용도에 따른 온도와 적용강종을 나타낸 것이 Fig.1이다.

보일러의 경우 연강의 사용한계는 내산화성과 고온강도 측면에서 최고 450℃이며, 보다 고온에서는 Mo를 첨가할 필요가 있다. A302강은 중고온 압력용기용강중 JIS 규격의 SBV(Mn-Mo강, Mn-Mo-Ni강), SQV(Mn-Mo강, Mn-Mo-Ni강)에 해당하며 연강과 Cr-Mo계강 사이의 영역에서 활용이 가능한 강이다.

3. 실험방법

3.1 A302강의 제조

ASTM A302 C grade 강은 인장강도가 56-70 kg/㎟ 범위인 강으로서 노말라이징 열처리를 기본으로 하는 강이다. 이 강은 원자력압력용기 또는 보일러용 강으로 사용되는 강으로서 ASTM 규격에는 저온인성에 대한 규격은 없다.

한편, 압력용기 제조업체들은 탄소함량을 낮추어 용접성을 향상시켜줄 것을 요구하고 있기 때문에 이에 상응하는 차원에서 Ceq(탄소당량)를 낮추는 것을 고려하여 합금설계를 하였다.

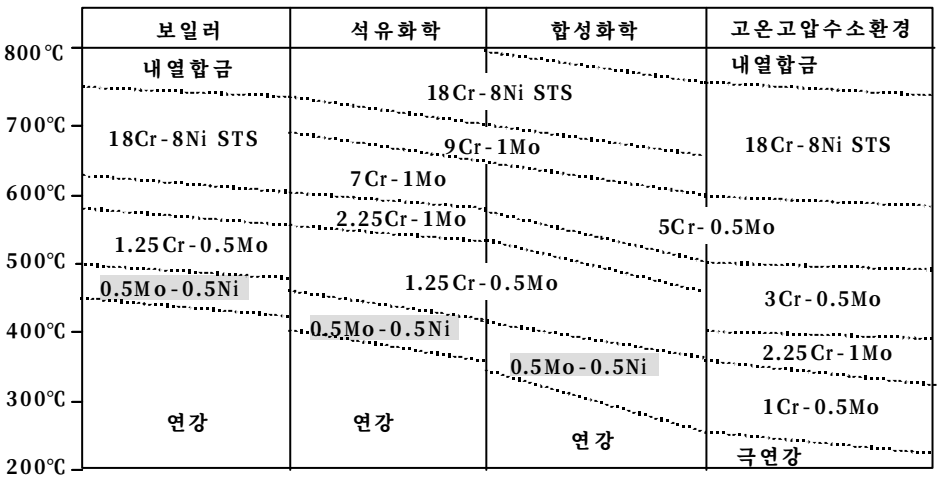

Fig. 1 A applicable temperature of pressure vessel steels.

한편, 현장 시험생산재의 가공성 평가의 일환으로 모재강도를 평가하였는데 각각 L 방향과 C 방향의 t/4 와 t/2 위치에서 시편을 채취하여 ASME Section II, Part A, SA370 에 정한 바에 의한 시험편 형상으로 가공한 후 상온에서 인장시험을 실시하였다.

한편, 수요가들은 용접후열처리 후에도 ASTM 규격에 상당하는 강도를 유지할 것을 요구하는 경우가 많으므로 후열처리 조건을 시뮬레이션 하는 방식으로 열처리를 실시한 후 기계적 특성을 평가하였다.

3.2 용접성 평가

현장시험생산재의 용접부 강도, 충격인성, 저온균열감수성 시험, 최고경도시험을 실시하였다. 먼저 용접부 강도는 각각 압연 방향과 압연 직각 방향의 t/4 와 t/2 위치에서 시편을 채취하여 ASME Section II, Part A, SA370 에 정한 바에 의한 시험편 형상으로 가공한 후 상온에서 인장시험을 실시하였다. 용접부 충격인성시험은 용접부의 t/4 와 t/2 위치에서 시편을 채취하여 각각 L 방향과 C 방향으로 V 노치를 가공한 후 상온, 0℃, -20℃에서 충격인성을 평가하였다. 용접부 최고경도는 예열온도를 상온, 50℃, 100℃, 150℃로 각각 달리하여 용접을 실시한 후 10kg 하중, 0.5㎜ 간격으로 경도를 측정하여 최고경도를 평가하였다. 한편, 저온균열감수성 시험은 예열조건을 설정하기 위해서 예열온도를 상온, 50℃, 100℃, 150℃로 각각 달리하여 용접을 실시한 후 경사 Y-groove 구속시험을 통하여 최소 예열온도를 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 모재 특성

4.1.1. 모재강도

Table 2 는 현장에서 제강, 연주, 후판공정을 거쳐 생산된 A302강의 화학조성을 나타낸 것이다. 용접성을 고려하여 탄소가 0.14%인 A강과 0.17%인 B강 등 두가지 종류의 강을 생산하였다.

Table 3은 제조된 강의 기계적 특성을 나타낸 것으로 탄소가 0.14%인 A강은 노말라이징(N,900℃+70min)처리후 약 61kg/㎟ 정도의 강도를 보이고 용접후열처리를 고려한 응력완화처리(SR2, 650℃+5Hr)처리후에는 약 54.7kg/㎟ 정도의 강도를 나타내었다. 탄소가 0.17%인 B강은 노말라이징(N, 900℃+70min)처리후 약 66.9kg/㎟ 정도의 강도를 나타내고 용접후열처리를 고려한 응력완화처리(SR2, 650℃+5Hr)처리 후에는 약 58kg/㎟ 정도의 강도를 나타내었다.

Table 2. Chemical compositions of manufactured A304-C steel.(wt.%)

구분		C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni
규 격		≤0.23	0.15 ~0.40	1.15 ~1.50	≤ 0.035	≤ 0.035	0.45 ~0.60	0.40 ~0.70
설계	A	0.12 ~0.16	0.20 ~0.30	1.20 ~1.40	≤ 0.020	≤ 0.005	0.45 ~0.55	0.45 ~0.55
	B	0.15 ~0.19	0.20 ~0.30	1.30 ~1.50	≤ 0.012	≤ 0.005	0.45 ~0.55	0.45 ~0.55
결과	A	0.140	0.259	1.27	0.016	0.005	0.48	0.48
	B	0.170	0.267	1.40	0.008	0.003	0.50	0.48

Table 3. Mechanical properties of A302-C steel.

구 분	열처리 조건	인장강도(Kg/㎟)			경 도
		YS	TS	E1.(%)	Hv
규 격	N	≥ 35.2	56.3 ~ 70.3	≥ 20	-
A (50t)	As-rolled	39.2	61.8	26	201
	N	36.1	61.0	32	194
	N+SR1	38.6	53.9	33	172
	N+SR2	40.0	54.7	32	171
B (50t)	As-rolled	42.3	66.9	25	209
	N	43.2	66.9	27	204
	N+SR1	45.3	60.4	31	186
	N+SR2	43.4	58.0	31	180

4.1.2. 충격특성

현장 생산된 강의 저온인성을 평가하기 위하여 충격실험을 실시하였다. Fig 2는 그 결과를 나타낸 것으로 에 나타내었다. 전술한 바와 같이 ASTM 규격에는 저온인성에 대한 규정은 없으나 시공 및 운전조건에 따라서는 저온인성 확보가 필요하다. 그림에서 알 수 있듯이 0.14% C 첨가 A강의 노말라이징 처리 후 -20°C에서 약 28J정도의 충격흡수에너지값을 나타내며 SR2 처리 후에는 약 160J까지 충격흡수에너지값이 증가하였다. 0.17% C 첨가 B강은 노말라이징처리 후 -20°C에서 약 54J정도의 충격흡수에너지값을 나타내며 SR2 처리 후에는 약 300J까지 충격흡수에너지값이 증가하였다.

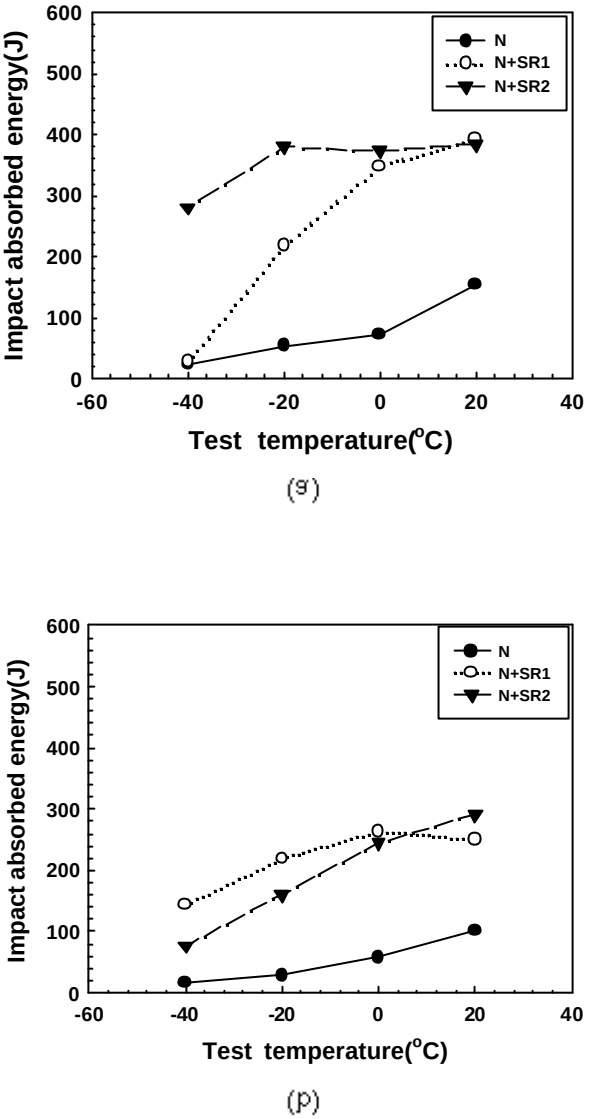

Fig. 2 Variation of impact absorbed energy of A302-C steel with test temperature and heat treatment.
(a) 0.14% C steel (b) 0.17%C steel

4.1.3. 고온강도

Fig.3은 노말라이징+응력완화열처리를 거친 시편의 고온강도를 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 온도가 증가할수록 인장강도가 낮아지는데 A강(0.14C)의 경우 400°C에서 약 50 kg/㎟ 정도의 강도를 나타내지만 500°C에서는 약 40 kg/㎟ 정도로 연화된다. B강(0.17C)의 경우 400°C에서 약 55 kg/㎟ 정도의 강도를 나타내다

500℃에서는 약 45 kg/㎟ 정도의 인장강도값을 갖는다.

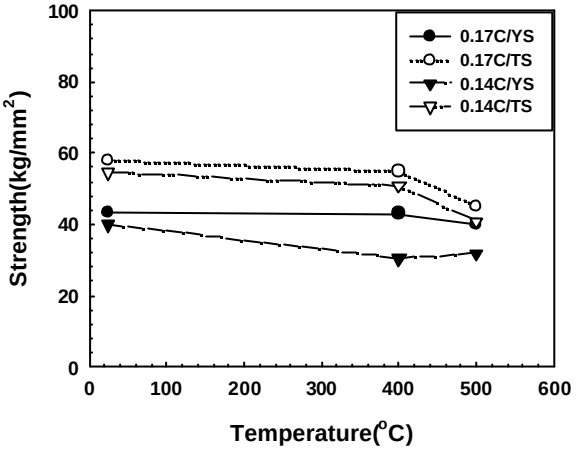

Fig. 3 High temperature strength of A302-C steel.

4.2 용접 특성

0.17C를 함유한 A302-C강을 이용하여 자동용접(SAW) 실시후 용접성 평가를 실시하였다. 용접조건은 Table 4와 같이 입열량 42kJ/cm로 서브머지드 아크 자동용접을 적용하였다. 이때 강종의 두께는 50㎜이었다.

Table 4. Submerged arc welding condition of A302-C steel.

	용접 방법	입열량 (kJ/cm)	예열 (℃)	후열 처리	층간온도 (℃)
50t	SAW	42	150	620℃ x2hr	200

Table 5는 용접부의 인장시험결과를 나타낸 것으로 시편채취 위치 및 방향에 따라 큰 차이는 보이지 않고 있다. 후열처리(620℃+ 2시간)후에는 항복강도의 변화는 없으나 인장강도는 약 4-5kg/㎟ 정도 감소한 것을 알 수 있다.

Table 5. Tensile strength of A302-C steel weldment.

두께	시편 위치	Y.S	T.S	El(%)	파단 위치	비 고
50t	L, t/4	46.5	66.7	15.5	모재	-
	L, t/2	45.4	66.9	18.5	모재	-
	C, t/4	45.6	66.5	14.5	모재	-
	C, t/2	44.9	66.6	19.0	모재	-
	L, t/4	44.2	59.0	17.0	모재	620℃+ 2시간
	L, t/2	46.5	62.3	19.5	모재	〃
	C, t/4	46.2	62.1	16.5	모재	〃
	C, t/2	45.4	61.5	19.0	모재	〃

Table 6은 용접부의 충격시험결과를 나타낸 것으로 시편채취 위치 및 방향에 따라 큰 차이는 보이지 않으나 C 방향에서 다소 값이 낮아지며 충격시험위치에 따라서는 큰 차이를 보이지 않고 있가. 고 있다. 인장시험결과와 마찬가지로 후열처리(620℃+ 2시간)후에 충격흡수에너지값이 상승하는 경향이 있다.

Table 6. Impact aborbed energy of A302-C steel weldment.

두께	노치 방향	후열처리	시험위치	충격흡수에너지 (0℃, J)
50t	L	-	WM	59
			FL	195
			FL+1	190
			FL+3	191
		620℃+ 2시간	WM	63
			FL	231
			FL+1	222
			FL+3	200
	C	-	WM	81
			FL	162
			FL+1	166
			FL+3	145
		620℃+ 2시간	WM	51
			FL	182
			FL+1	215
			FL+3	207

5. 결 론

A302-C 강의 안정적 품질확보를 위한 열처리 조건 최적화 및 최적 용접조건을 확립하고자 합금성분계를 설계하고 열처리를 실시한 후 인장시험, 충격시험 및 미세조직 분석을 실시하였으며, 용접성 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. ASTM 규격상의 기계적 특성을 만족하는 합금성분계를 설계하기 위해 각종 합금 원소의 영향을 검토하여 2종류의 합금계를 기본으로 하는 합금강을 설계 및 제조하였다.

나. 현장 생산재의 인장시험결과 약 61-67kg/㎟ 정도의 인장강도를 나타내었다. 모재의 충격시험결과 노말라이징후에는 -20℃에서 28-54J 정도를 노말라이징+응력완화열처리후에는 160-380J 정도의 충격흡수에너지값을 나타내었다.

다. 고온강도 실험결과 400℃에서 약 50-55 kg/㎟ 정도의 인장강도를 나타내다 500℃에서는 약 40-45 kg/㎟ 정도의 인장강도값을 나타내었다.

라.현장 생산강의 실제 용접성평가 결과 A302-C강의 용접시 저온균열방지를 위한 최소예열온도는 150℃이며 용접성 평가에서 기계적 특성에 대한 ASTM 규격 및 수요가 요구조건을 모두 만족하였다.

참고문헌

1. M.F. Ashby and K.E. Easterling, Acta Metall., vol 30 (1982), 1969

2. R. Habu et al, 철과강, vol. 60 (1974), 1470

3. G.R. Speich and W. Warlimont, J. Iron Steel Inst., vol. 206 (1968), 385

4. F. Pickerling, ***Physical Metallurgy and the Design of Steels***

5. F. Pickerling, ***Towards Improved Ductility and Toughness***, 1971, 9