

800 MPa급 무예열 용접재료의 폭파변형성능에 관한 연구

박태원*[†] · 송영범* · 김진영* · 박철규** · 김희진***

*국방과학연구소

**고려용접봉

***한국생산기술연구원

Investigation on Explosion Bulge Test Results of 800 MPa Grade
Pre-heat Free Welding ConsumablesTaewon Park*[†], Youngbeum Song*, Jinyoung Kim*, Chulgyu Park** and Heejin Kim***

*Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

**KISWEL, Changwon 641-120, Korea

***Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 330-825, Korea

[†]Corresponding author : parktw9@lycos.co.kr

(Received November 11, 2009 ; Revised November 24, 2009 ; Accepted December 14, 2009)

Abstract

The Cu-bearing PFS-700 steel which has yield strength over 700 MPa was developed to replace the existing submarine structural material, HY-100. The PFS-700 steel has a combination of good mechanical properties and superior weldability. Because of that, it can be welded without pre-heating. The application of PFS-700 steel to submarine or battle ship will give a great reduction of cost by omitting pre-heating or lowering pre-heat temperature. To develop pre-heating free welding consumables that match and take advantage of PFS-700 steel, new welding consumables have been designed for the GMAW, SAW processes and explosion bulge test(EBT) was conducted to see the reliability of welded structure. All welds were made without pre-heating, and the inter-pass temperature was below 50°C for SAW50 and 150°C for GMAW and SAW150. All EBT specimens show over 14% thickness reduction without through-thickness crack or crack propagation to the hole-down area. Tensile properties for all welding conditions show higher(GMAW) or similar values(SAW50, SAW150) to the base metal. Charpy impact values for the weld metal also show 163.5J(GMAW), 95.4J(SAW50) and 69.0J(SAW150), which meet the goal(higher than 50J) of this project.

Key Words : Pre-heat free steel, PFS-700, Welding consumables, Crack start test, Explosion bulge test

1. 서 론

HY-80 및 HY-100강은 고강도와 고인성을 가지며, 내응력 부식성 및 피로특성이 우수하기 때문에 선박이나 잠수함용 재료로 사용되어 왔다¹⁾. 그러나 이들 강재는 구조물 제조시 용접부에서 저온 균열이나 인성 저하가 발생하기 때문에 높은 예열온도와 용접 패스간 온도 조절이 필요하고 용접 입열량이 엄격하게 규제되는 등

실제 용접시 허용되는 조건이 까다롭기 때문에 용접부의 품질 향상 및 생산성 측면에서 재료의 개선 및 신합금 개발이 요구되어 왔다. 1980년대 이후 HY강과 동일한 기계적 성질을 가지며, 용접성 향상을 목적으로 저탄소 Cu석출경화강인 저합금 고장력강(HSLA, High Strength Low Alloy)에 대한 관심이 고조되면서 HY-100강을 대체하기 위해 HSLA-80강이 미 해군 규격 MIL-S-24645에 등록되었으며, 1990년에는 이 규격에 HSLA-100강이 첨가되어 MIL-S-24645A로

등록되었다²⁾.

이 규격에 의하면 Cu 함유 HSLA 강은 탄소함량이 0.06wt%이하로 제한되어 인성과 용접성을 향상시키며, 탄소 감소에 의한 강도 감소는 Cu 석출물 생성에 의한 강도 증가로 보상되도록 설계되었다. 또 Cu 함유 HSLA강은 HY강보다 높은 입열량을 적용해도 저온균열이 발생하지 않아 생산성이 향상되는 것으로 보고되고 있다³⁻⁴⁾.

HY강을 대체하여 HSLA강을 사용하여 잠수함 및 항공모함 등을 제작할 경우 비용절감 효과가 상당하기 때문에 미국에서는 이들 재료를 사용하여 선체에 적용 중에 있다. 또한 예열이 필요 없는 HSLA 강의 이점을 최대한 활용하기 위해서는 예열이 필요 없는 용접재료가 필요하기 때문에 새로운 용접재료 개발에 대한 연구가 1990년부터 현재까지 진행 중이다.

국내에서는 국방과학연구소에서 용접예열이 필요 없는 항복강도 560MPa 및 700MPa급의 고강도강을 개발하여 각각 PFS-560 과 PFS-700 으로 명명하였으며, 국방규격 KDS 9515-3001 로 등록되었다. 여기서 PFS는 무예열강 즉, Pre-heat Free Steel 의 약자이다. 이 강재는 현재 KDX-III 에 적용되었으며, 군수용으로 용도가 더욱 확장될 전망이다⁵⁾.

그러나 용접예열이 필요 없는 PFS-560 및 PFS-700 강의 이점을 충분히 활용하기 위해서는 무예열의 용접재료가 적용되어야 하지만, 현재는 기존 HY-80 및 HY-100강용 용접재료를 사용함으로써 용접전 예열을 125~150℃ 정도로 하고 있다.

그리하여 용접예열이 필요 없는 PFS-560 및 PFS-700 강에 적합한 용접재료를 개발하여 무예열의 장점을 활용하여 경제적인 방법으로 용접을 하고자 하며, 군사규격에서는 새로운 강재와 용접재를 사용하면서 용

접조건이 변경될 경우에는 기본적인 특성 외에 용접부에 대한 성능시험으로 폭파변형시험을 수행하도록 하고 있다. 본 연구에서는 개발된 용접재료와 용접공정으로 제작된 시험편에 대해 용접부 평가의 일환으로 폭파변형시험을 수행하여 용접부 건전성을 평가하고 향후 개발될 수상함, 잠수함 등의 무기체계에 대한 사용적합성을 평가하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

본 시험에 사용된 PFS-700 강재는 포스코(주)에서 100톤 전로를 사용하여 제작되었으며 화학조성은 Table 1과 같다. 900℃에서 오스테나이트처리, 650℃에서 시효처리를 수행한 압연판재에 대하여 폭파변형시험편을 제작하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 GMAW 및 SAW 용 용접재료의 성분은 각각 Table 2 및 Table 3과 같으며 용착금속의 성분분석 결과를 함께 나타내었다.

GMAW 및 SAW 용 용접재료를 사용하여 25mm 판재를 Fig. 1에 나타낸 접합부 형상으로 그루브를 가공 및 용접하여 25T×510W×510L(mm) 크기의 폭파 변형 시험편을 제작하며, Fig. 2는 용접후 비드 형상을 보여준다. Fig. 3은 용접후 제작된 폭파변형시험편을 보여주며, Fig. 1 및 Fig. 2에서 나타낸 형상으로 용접비드(Fig. 3a)를 제작한 후 돌출된 비드를 그라인딩하여 없앤 후 용접비드와 수직으로 취성의 경화 육성 비드를 생성시키고 비드 중앙에 슬롯(Slot)을 주어 이

Table 1 Chemical composition of PFS-700 steel(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Fe
PFS-700	0.048	0.209	0.5	0.008	0.002	0.025	1.29	3.5	0.59	0.48	0.037	0.003	Bal.

Table 2 Chemical composition of consumable and weld metal in GMAW(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Fe
Consumables	0.053	0.51	1.48	0.002	0.002	0.006		3.42		0.57	0.076	Bal.
weld Metal	0.057	0.37	1.19	0.002	0.003	0.002	0.43	3.31	0.07	0.58	0.029	Bal.

Table 3 Chemical composition of consumable and weld metal in SAW(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	Cu	Ni	V	Mo	Ti	Fe
Consumables	0.05	0.19	2.03	0.002	0.002	0.006		2.8	0.032	0.74	0.013	Bal.
weld Metal	0.057	0.23	2.02	0.01	0.001	0.007	0.07	2.76	0.02	0.72	0.02	Bal.

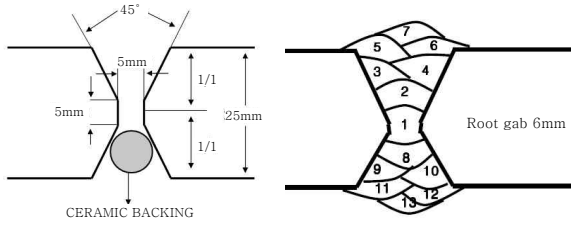


Fig. 1 Joint appearance of EBT specimen

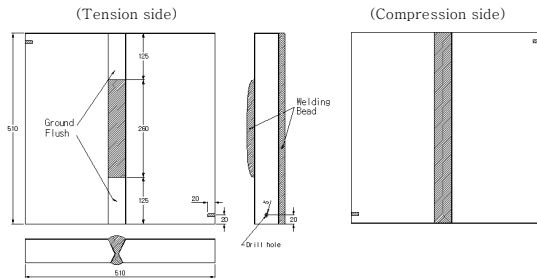


Fig. 2 Schematics for bead of EBT specimen

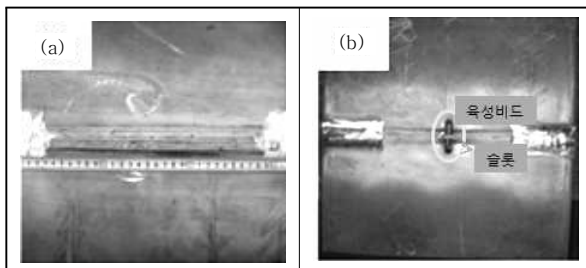


Fig. 3 EBT(a) and CST(b) specimens after welding

곳에서 균열이 전파되도록 유도하는 균열전파시험편 (Fig. 3b)이다.

GMAW 및 SAW에 대해 폭파변형시험용 시험편과 균열발생시험편을 각각 2조씩 제작하였으며, 모두 예열 없이 용접한 후 층간온도는 150°C 이하로 제어하였다. 또한 SAW에 대해서는 층간온도를 50°C로 제어하여 층간 용접 간에도 무예열과 동일한 온도를 유지한 효과를 조사하고자 하였다. SAW 공정으로 50°C 및 150°C 이하의 층간온도 시험편을 각각 SAW50 및 SAW150으로 표기하였다. Table 4에는 각 용접공정에 대한 용접조건을 나타내었다.

Table 4 Welding condition with welding process

Welding process	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Shielding gas	Inter-pass temperature (°C)
GMAW	260	22	45	Ar+20%CO ₂	≤150°C
SAW50	700	32	40	-	≤50°C
SAW150	700	32	40	-	≤150°C

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 CST(균열발생시험)

CST(Crack Start Test, 균열발생시험)시험에 대한 첫 번째 폭파시험 시 합격기준은 육성 용접bead에 균열이 반드시 형성되어야 하지만 판재두께를 관통하는 균열 및 치구영역까지 확장된 균열이 존재하지 않아야 하며, 시험판재로 부터 어떠한 조각도 떨어져 나오지 않아야 한다^{5,6)}.

Fig. 4에 GMAW, SAW50 및 SAW150 시험편의 첫 번째 폭파후 시험편형을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 주 용접 bead 위에 위치한 육성용접 bead에서 균열이 발생되었고, 이 균열은 주 용접 bead 표면까지 확장되었으나, 시험편으로부터 어떠한 조각도 떨어져 나오지 않았고, 판재두께를 관통하지 않았으므로 CST 시험편의 첫 번째 폭파시험결과는 관련규정을 만족하였다.

균열생성시험편에 대한 두 번째 폭파시험은 첫 번째 시험에서 육성 용접비드에 균열이 발생하지 않았을 경우에 반복 실시하나, 재료의 균열전파 저항성을 관찰하기 위해 두 번째 폭파를 실시하였으나(Fig. 5) 발생한 균열이 치구영역까지 진전되지 않고, 시험편으로부터 어떠한 조각도 떨어져 나오지 않는 것으로 관찰되었다.

CST 시험에 대한 폭파시험시의 폭파 조건 즉 시험온도, 폭약량, 이격거리 등의 결과를 Table 5에 나타내었다. 시험온도는 -18°C 전후이며, 폭약량은 약 4.5kg으로 고정하고 이격거리를 조정하면서 두께 변형량을 조절하였다.

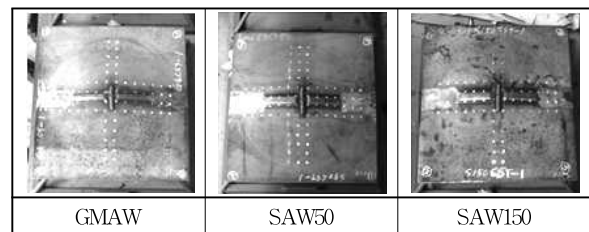


Fig. 4 Specimen appearance after 1st CST



Fig. 5 Specimen appearance after 2nd CST

Table 5 Condition of crack starter test

Welding process	Shot No.	Test condition		
		Test Temp.	Explosive weight	Stand-off distance
GMAW	1	-17.5°C	4.5kg	500mm
	2	-21.7°C	4.5kg	460mm
SAW50	1	-19.5°C	4.5kg	500mm
	2	-20.5°C	4.5kg	460mm
SAW150	1	-18.2°C	4.5kg	500mm
	2	-17.8°C	4.5kg	460mm

3.2 EBT(폭파변형시험)

균열발생시험(CST) 완료 후 폭파시험절차에 따라 폭파변형시험(Explosion Bulge Test, EBT)을 수행하였다. 폭파변형시험은 GMAW, SAW50 및 SAW150 시편에 대하여 -18±1.5°C에서 수행하고, 폭파 후 시편의 변형양상 및 두께감소율을 측정하여 절차서에 규정된 EBT 항목의 합격기준(Table 6) 충족여부를 판단하였다. 두께감소율 충족여부를 판단하기 위하여 최대 변형이 발생하는 시편 중심 모재부에서의 두께측정 결과를 시험 전 두께와 비교하여 두께 감소율을 계산하였고, 시편의 부위별 변형정도를 파악하기 위하여 약 30mm의 bead 폭을 갖는 주 용접 bead선의 중심선으로부터 약 20mm정도 떨어진 위치에서 25mm 간격으로 시편의 중심부를 기준으로 좌/우측 각각 6개소(측정부위 전체길이는 약 325mm) 총 24부위에서의 두께 변화를 측정하였으며 측정할 부위를 표시한 시험편을 Fig. 6에 나타내었다.

폭파변형시험(EBT) 후 시편형상에 대한 합격기준에

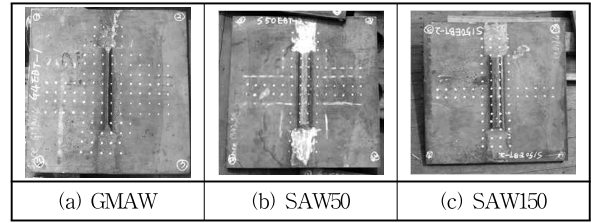


Fig. 6 EBT specimens prepared for thickness measurement for EBT specimens

의하면 시험판재가 재료규격에서 규정한 두께감소율 이하의 변형에서는, 치구영역까지 균열이 확장되기 전 까지 계속해서 폭파시험 수행이 가능하며, 매 폭파시험 시 시험판재로부터 어떤 조각도 떨어져 나오지 않을 것을 요구한다. 판재두께를 관통하는 균열에 대해서는 첫 번째 및 두 번째 폭파시험까지는 판재두께를 관통하는 균열이 발생되지 않아야 하지만, 이후 세 번째 이상의 폭파시험 시에는 판재 두께를 관통하는 균열이 발생하여도 무방하지만 균열이 치구영역까지 도달하기 전에 두께 변형률 기준을 만족하여야 합격기준에 해당한다.

Fig. 7 에는 GMAW, SAW50 및 SAW150 시험편에 대해 4폭 시험 후의 시편형상을 전면, 후면, 측면과 침투시험(Penetration Test)후의 전면에 대해 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 4폭의 폭파시험 후에도 시편의 전, 후면으로부터 아무런 조각도 떨어져 나오지 않았으며 두께를 관통하는 균열도 발생하지 않았고, 치구영역으로까지 확장된 균열도 발견되지 않았음을 확인할 수 있다. 시편의 변형양상은 측면형상으로 알 수 있는 바와 같이 폭파시험의 폭압에 의하여 시편의 중심부로부터 bulge가 되었으며, 폭파시험 횟수가 증가할수록 bulge된 정도는 증가하며 그 결과

Table 6 Explosion test acceptance criteria⁶⁾

Acceptance criteria	Crack starter test		Explosion bulge test		
	First shot	Second shot	First shot	Second shot	Additional shots
Crack starter bead shall crack	×	1/	N/A	N/A	N/A
No piece shall be thrown out of material being tested	×	×	×	×	×
No through thickness cracks shall be present	×	N/R	×	×	N/R
No crack shall extend into the hole0down area	×	×	×	×	×
Percent reduction in thickness	2/	2/	2/	2/	3/

Conditions required for each shot are marked with an "X", N/R = not required
 1/ : In the event the crack-starter bead does not crack on the first shot, the first shot shall be repeated
 2/ : The percent reduction in thickness shall be recorded for information only
 3/ : The required percent reduction in thickness shall be as specified in the applicable material specification. Shots shall be discontinued when the metal fails to meet the above conditions, or when the reduction in thickness requirement are met.

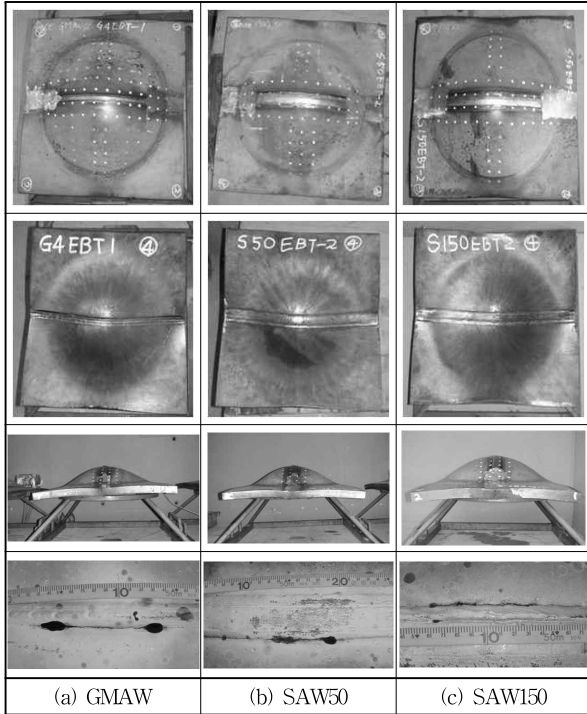
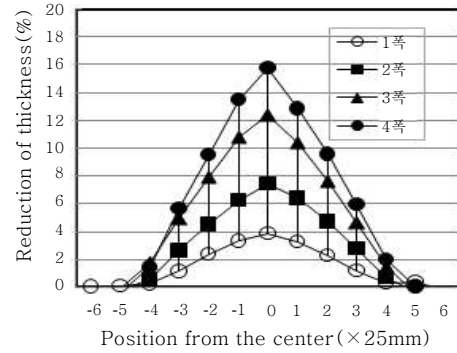


Fig. 7 Specimen appearance after 4th EBT

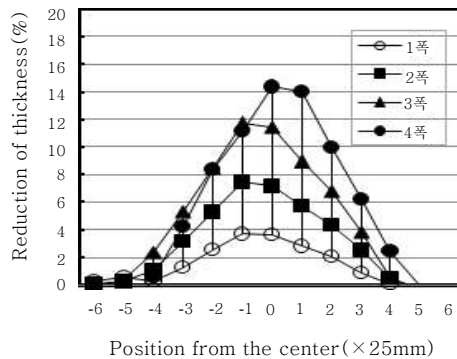
를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8은 GMAW, SAW50 및 SAW150 공정에 대한 폭파시험 회수 및 시험편 위치에 따른 두께 변형률이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 3 공정 모두 폭파시험 횟수가 증가할수록 두께 변형률이 증가함을 알 수 있다. 폭파회수가 증가함에 따라 시험편의 두께가 얇아지며, 이는 다음의 폭파시 큰 두께변형을 초래하기 때문에 폭약이 폭발하여 시험편에 미치는 압력을 감소시켜 이전의 두께변형율과 비슷한 값을 갖도록 하기 위해서는 폭약량이나 폭약과 시험편 간의 거리(이격거리)를 조정하여야 한다. 본 시험에서는 매 폭파시험시 동일한 종류 및 동일한 형상의 폭약을 사용하여 이격거리를 조정하여 폭압이 시험편에 미치는 두께 변형률을 조정하였다. 초기 폭파시 이격거리는 500mm로 설정하여 두께 변형률이 약 3~4% 전후가 되도록 유도하였고, 두 번째 폭파시에는 폭압으로 변형(Bulge)된 깊이를 측정하여 이 값과 이격거리를 합산하여 이격거리가 500mm가 되도록 하였다. 세 번째 폭파시에도 역시 동일한 방법으로 측정하여 이격거리를 510mm로 조정하였다.

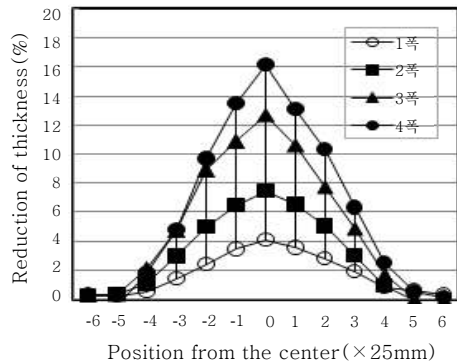
PFS-700강에 대한 용접부의 폭파시험시 두께 변형률 14%이상을 규격⁵⁾에서 요구하기 때문에 세 번째 폭파후 14%를 과도하게 넘지 않도록 최종적으로 이격거리를 조정한다. 본 시험에서는 네 번째 폭파시험시 이격거리를 580mm로 설정하였으며 네 번째 시험시 두께 변형이 과도하지 않도록 유도하며 규격상의 두께 변



(a) GMAW



(b) SAW50



(c) SAW150

Fig. 8 Change of reduction of area with number of explosion

형률 14%이상을 획득하고자 하였다.

Fig. 8에서 나타낸 각 용접공정별 시험편 위치에 따른 두께 변형률에서 변형이 가장 많이 일어난 중심부에 대한 최대 두께 변형률을 Fig. 9에 나타내었다. 첫 번째 폭파에서 약 4%정도, 두 번째 폭파에서 약 8%, 세 번째 폭파에서 약 12% 정도의 두께 변형률을 보이며, 네 번째 폭파에서는 GMAW, SAW50 및 SAW150 각각 15.7%, 14.42% 및 16.24%를 나타내어 시험 조건은 적절하게 설정된 것으로 나타났으며, PFS-700강의 규격에서 요구하는 두께 변형률 14%이상을 나타내었다.

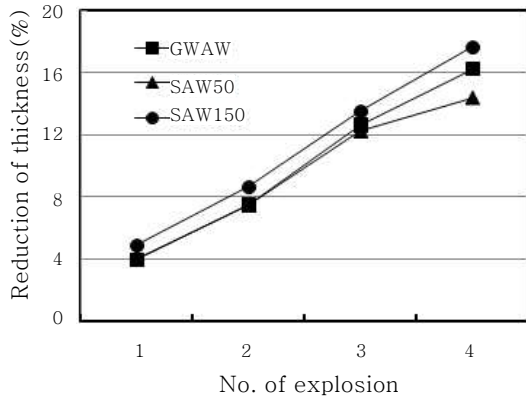


Fig. 9 Maximum reduction of thickness with explosion in welding processes

3.3 기계적 특성시험

EBT 시험 규격에 의하면 EBT 시험편은 25T×510W×510L(mm) 크기이나 기계적 특성용 시험편은 용접선을 확장하여 25T×510W×1,300L (mm) 크기의 시험편을 제작하여 25T×510W×510L(mm) 크기를 절단하여 EBT 시험용으로 사용하고 나머지는 기계적 특성 평가를 하도록 규정하고 있다⁶⁾. 본 시험에서도 약 1,300mmL 크기의 시험편을 제작하여 510mmL 은 EBT 용으로 사용하고 나머지 약 800mmL 을 기계적 특성 평가용으로 사용하여 시험한 결과를 Table 7에 나타내었다.

모재에 대한 인장시험 결과 L 방향과 T 방향의 특성이 비슷한 값을 나타내며 항복강도, 인장강도, 연신율 및 단면감소율이 각각 810MPa, 841MPa, 24.0% 및 68% 정도이며, -51℃에서의 충격인성값은 199.4J(L 방향), 237.5(T방향) 으로 나타났다.

GMAW, SAW50 및 SAW150 시험편의 용접비드와 평행한 용접금속에서 채취한 시편(A 로 표기)의 경우 인장강도가 각각 984.9 MPa, 882.5 MPa 및 867.5 MPa 이며 모두 모재의 강도보다 높게 나타났다. 인장시편을 용접비드 방향과 수직으로 채취한 시편(B 로 표기)에서는 인장강도가 GMAW 및 SAW50 의 경우 각각 834.9 MPa 및 821.5 MPa 이며 연신율은 16.4% 및 20.4% 이었다. 이들 시편은 모두 시편의 평행부 끝단에서 파단 되었으며, 이는 모두 모재 부분에서 파단된 것으로 판단되며 모재와 비슷한 인장값을 보여준다. 연신율 역시 평행부의 대부분이 용접금속이 접하고 있으므로 용접부와 비슷한 값을 나타낸다. 충격 인성은 GMAW의 경우 강도가 높음에도 불구하고 용접 금속에서 노치 가공한 것과 용접금속과 HAZ의 경계부에서 노치를 가공한 시편 모두 양호한 값을 나타내었다.

Table 7 Mechanical properties with welding processes

Welding process	Tensile properties				CVN(J) (-51℃)		
		Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)	R.A. (%)	C	D
Base metal	L	813.0	841.3	24.3	67.3	199.4	
	T	811.5	841.1	24.1	68.2	237.5	
GMAW	A	902.0	984.9	15.8	66.0	163.5	128.8
	B	805.2	830.7	16.4	70.4		
SAW50	A	849.0	882.5	21.0	67.9	95.4	184.2
	B	795.4	834.9	20.4	70.8		
SAW150	A	833.0	867.5	19.9	67.5	69.0	210.0

A : Weld metal B : Specimen perpendicular to weld bead
 C : Weld metal(Bead center)
 D : Border of weld metal and HAZ

고, SAW50 및 SAW150의 시편에서도 95.4J, 184.5J 및 69.0J, 210.0J 로서 본 연구에서 목표로 설정한 50J(-50℃)을 상회하는 값을 나타내었다.

4. 결 론

국내에서 개발된 용접전 예열이 필요 없는 인장강도 800 MPa 급(항복강도 700 MPa 급)의 고강도 강재인 PFS-700강에 적합한 무예열 용접재료 개발의 일환으로 폭파변형시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 무예열 GMAW 및 SAW 공정용 무예열 용접재료를 사용하여 CST 시험한 결과 육성비드에서 균열이 발생하였고, 이 균열은 판재를 관통하거나 치구영역까지 전파되지 않았다.
- 2) EBT 시편에서도 두께 변형률 14%이상 되도록 폭파시험을 수행하였으나 조각의 떨어짐이나, 판재를 관통하거나 치구영역까지 확장되는 균열이 발견되지 않았다.
- 3) GMAW, SAW50 및 SAW150 공정 시편에서 4 폭의 폭파로 두께 변형률이 15.7%, 14.42% 및 16.14%로 나타났으며 규격을 만족하였다.
- 5) GMAW, SAW50 및 SAW150 용접금속에서의 인장강도는 각각 984.9 MPa, 882.5 MPa 및 867.5 MPa 로서 모두 모재의 강도보다 높은 값을 나타내었다.
- 6) GMAW, SAW50 및 SAW150 용접금속에서의 충격인성도 용접금속에서 노치 가공한 것과 용접금속과 HAZ의 경계부에서 노치를 가공한 시편 모두 목표로 설정한 50 J(-50℃)보다 높은 값을 나타내었다

후 기

본 연구는 민군겸용기술센터의 지원 사업으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. E.J. Czyryca : Proceedings of 1st Conf. on Metallurgy, Welding and Qualification of Microalloyed(HSLA) Steel Weldment, AWS, (1990), 553-572
2. Mil-S-24645(SH) 10, Janu, (1990)
3. E.J. Czyryca : Advances in High Strength Steel Technology for Naval Hull Construction, Key Engineering Materials, Vol. 84-85, (1983), 491-520
4. A.D. Wilson : High Strength, Weldable Precipitation Aged Steels, Journal of Metals, March (1987), 36~38
5. 국방규격 KDS 9515-3001-1, Nov. (2004)
6. MIL-STD-2149A