

800MPa급 무예열 용접 판재의 수중 폭파변형시험

박태원^{*†} · 송영범^{*} · 김진영^{*} · 양성호^{*} · 박철규^{**} · 서준석^{***} · 김희진^{***}

^{*}국방과학연구소

^{**}고려용접봉

^{***}한국생산기술연구원

Explosion Bulge Test Underwater of 800MPa Grade Pre-heat Free Welding Plate

Tae-won Park^{*†}, Young-beum Song^{*}, Jin-young Kim^{*}, Sung-ho Yang^{*}, Chul-gyu Park^{**},
Jun-suck Seo^{***} and Hee-jin 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 June 30, 2010 ; Revised July 23, 2010 ; Accepted October 17, 2010)

Abstract

The pre-heat free consumables for GMAW, SAW and FCAW processes that match with the Cu-bearing PFS-700 steel which has yield strength over 700MPa were developed and evaluated to see the suitability in military such as submarine and battle ship. Explosion Bulge Test underwater was developed and applied to see the reliability of welded structure. All welding was conducted without pre-heat before welding, the interpass temperature was below 150°C for all welding conditions. Tensile strength for the weld metal in GMAW, SAW and FCAW process is 887MPa, 875MPa and 813MPa, respectively, these values are similar to the base metal of PFS-700 steel of 838MPa. EBT results in GMAW, SAW and FCAW show 14.0%, 14.02% and 15.9% reduction of thickness without generation of crack, respectively and stand-off distance was set up properly to have over 14.0% reduction of thickness. Through EBT results, the developed new consumables are applicable to the weapon systems such as submarine and battle ship.

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

1. 서 론

폭파변형시험(Explosion Bulge Test)은 철계 및 비철계 소재, 용접재료, 용접공정 등의 적용 적합성을 평가하는 시험이다. 이 시험은 폭약을 사용한 고속, 고압의 하중을 이용하여 재료의 변형 특성을 조사한다¹⁾.

구조물의 용접부 특성을 분석/조사하기 위해 흔히 인장시험, 충격시험, 경도시험 등을 이용하고 있다. 이러한 시험에서는 1축 하중(Uniaxial Loading)에 의한 결과를 얻을 수 있으나, 구조물의 용접부는 다축 하중(Multiaxial Loading)을 받기 때문에 1축 하중에 의

한 시험결과로 용접부 성능을 정확히 평가하기 곤란하다. 그리고 분석하고자 하는 구조물의 용접부에 비해 시편크기가 작아 Full Joint에 대한 특성 평가로 적절하지 않은 경우가 많다. Bulge Test는 실험장비 및 절차가 단순하나 균일하게 변형되는 영역이 작아 복합 하중하에서 소재의 유동 및 파괴를 평가하는데 유용하다. 잠수함 및 수상함 재료로서 강도 급에 따라 HY-80, HY-100, HY-130강 등이 사용되어 왔으며, 최근 용접성이 향상된 HSLA-80, HSLA-100, HSLA-130강 등이 소개되고 있다. 이 들 강재의 규격은 MIL-S-16216(HY-80, HY-100강)²⁾, MIL-S-24371(HY-130)³⁾, MIL-S-24645(HSLA-80, HSLA-100)⁴⁾ 등

이며, HY-80, HY-100, HY-130강은 국산화되어 DS-80, DS-100, DS-130 강으로 명명되었다. 특히, 무예열 강재로 개발된 HSLA-80, HSLA-100강과 동등한 용접특성을 나타내는 PFS-560과 PFS-700강이 개발되어 규격화되었다⁵⁾.

잠수함 및 수상함의 운용은 주로 해양 및 심해로서 압력을 많이 받으며, 기뢰, 폭뢰, 어뢰 등의 공격에 견딜 수 있도록 고강도 강판이 사용되어야 하며, 용접부에 대한 평가가 필수적이다. 상기에 언급한 강재들은 외부의 하중에 대해 충분한 소성능을 가져야 하고 안정성이 확보되어야 하며, 규격에 이를 규정하고 있다. HY강이나 HSLA강의 용접부에 대해서 폭파변형시험에 의해 소재변형, 균열발생, 파괴양상에 대한 기준을 제시하고 있으며 HY-80강, HSLA-80강 및 PFS-560강은 두께변형률이 16%, HY-100강, HSLA-100강 및 PFS-700강은 14%, HY-130강은 7.5%이상으로 규정되어 있다.

폭파변형시험은 미국에서는 공기중에서 저온(-18.5℃)에서 시험하도록 규정하고 있고¹⁾, 독일에서는 수중에서 시험하도록 규정하고 있다⁶⁾. 수중에서의 폭파시험은 폭약의 방수가 필요하고 폭파후 치구 및 시험편의 회수에 신경을 기울여야 하며, 시험 과정이 공기중에 비해 복잡하다. 그러나 공기중에 비해 실제 상황하에서의 선체 구조물의 충격파에 의한 손상여부를 판단하는데 유용하다.

국방과학연구소에서는 공기중⁷⁾ 및 수중⁸⁾ 폭파시험방법을 개발하여 소개하였으며, 수상함에 적용되는 PFS-700강의 용접재료 및 용접공정을 인증하기 위한 공기중 폭파시험을 수행하였다. 현재 건조중인 잠수함과 관련된 인증시험은 독일 하테베에서 수행하고 있다. 국내에서 이미 잠수함 및 수상함용 고강도 판재를 개발하였으며, 이들 강재에 적합한 용접재료도 개발되고 있다.

이제는 잠수함 및 수상함 등을 비롯하여 모든 해양

무기체계에 있어 외부 압력에 대한 파괴저항성을 증대시키기 위해서는 안정성이 확보된 고강도의 국산 판재와 용접재료가 사용되어야 할 것이며, 폭파변형시험을 비롯한 각종 인증시험이 국내에서 이루어져 외국의 기술 및 인증에서 탈피하여야 할 것이다.

본 고에서는 국내에서 개발된 800MPa(항복강도 700MPa) 급의 무예열 PFS-700강에 적합한 GMAW, SAW 및 FCAW 용 무예열 용접재료를 적용하여 용접한 판재에 대해 수중에서 폭파변형시험한 결과를 소개하였다.

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 시효처리한 압연판재를 사용하여 폭파변형시험편을 제작하였다. 이 판재의 인장강도 및 항복강도는 각각 838MPa 및 810MPa 이고, 연신율과 -84℃ 충격인성은 23.8% 와 250J 로서 고강도이면서 고연성, 고인성을 가진 재료이다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 GMAW, SAW 및 FCAW 용 용접재료의 성분은 각각 Table 2, Table 3 및 Table 4와 같다. 이들 용접재료를 사용하여 25mm 판재에 Double V 그루브를 가공 및 용접하여 지름 800mm 크기의 수중 폭파변형시험편을 Fig. 1(a)와 같이 제작한다. 공기중 폭파시험시에는 용접후 비드를 그대로 두고 폭파시험을 수행하나 수중 폭파시험에서는 상부와 하부

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 metal in GMAW(wt.%)

	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Fe
Consumables	0.016	0.45	1.40	3.42	0.99	0.06	Bal.

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

	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Fe
Consumables	0.05	0.19	2.03	2.80	0.74	0.013	Bal.
Weld metal	0.057	0.23	2.03	2.76	0.72	0.02	Bal.

Table 4 Chemical composition of consumable in FCAW(wt.%)

	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Fe
Consumables	0.027	0.26	1.6	3.02	0.47	0.05	Bal.

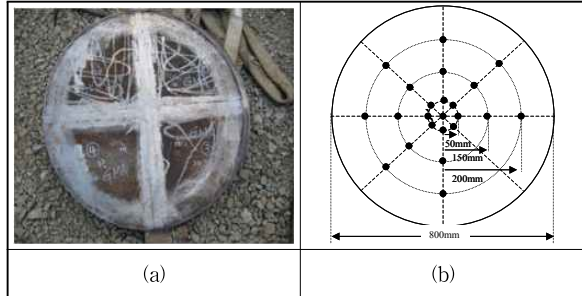


Fig. 1 Appearance of EBT specimen

의 비드를 그라인딩하여 완전히 제거한다. 그라인딩후 시험편에 (b)와 같이 100, 300, 400mm 동심원을 그려 0부터 24번까지의 점을 표식하고 매 폭파후 이점에서 두께 변화를 측정한다. 자세한 실험방법 및 절차에 대해서는 저자 등⁸⁾이 이미 상세히 보고한 바가 있다.

GMAW, SAW 및 FCAW에 대해 폭파시험용 시험편을 각 1조 제작하였으며, 모두 예열없이 용접한 후 층간온도는 150℃이하로 제어하였다. Table 5는 각 용접공정에 대한 용접조건을 보여준다. GMAW의 경우 보호가스는 Ar+20%CO₂, FCAW는 100%CO₂를 사용하였다.

Fig. 2는 폭약 제작 절차를 보여준다. 폭약용 폭약은 (a)와 같은 분말 형태의 Comp. C4를 사용하였고 중량 약 1.0kg 이 되도록, 밀도를 고려하여, (b)와 같이 알루미늄 몰드를 준비하여 분말 폭약을 비닐에 넣어 반죽을 하면서 몰드를 사용하여 성형하여 구형으로 만든다(c). 성형된 구형의 폭약에 기폭 화약인 RP 87(d)를 (e)와 같이 삽입하여 절연체 및 비닐을 사용하여 완전히 방수하여 수중용 폭약을 제작한다. (f)는 최종 제작된 폭약으로 Comp. C4 에 기폭제인 RP 87을 삽입하여 비닐 및 테이프로 방수한 상태이다.

Table 5 Welding condition with welding process

Welding process	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Pre-heat (°C)	Interpass temperature(°C)
GMAW	260	22	45	RT	≤150°C
SAW	700	32	40	RT	≤150°C
FCAW	220	29	35	RT	≤150°C

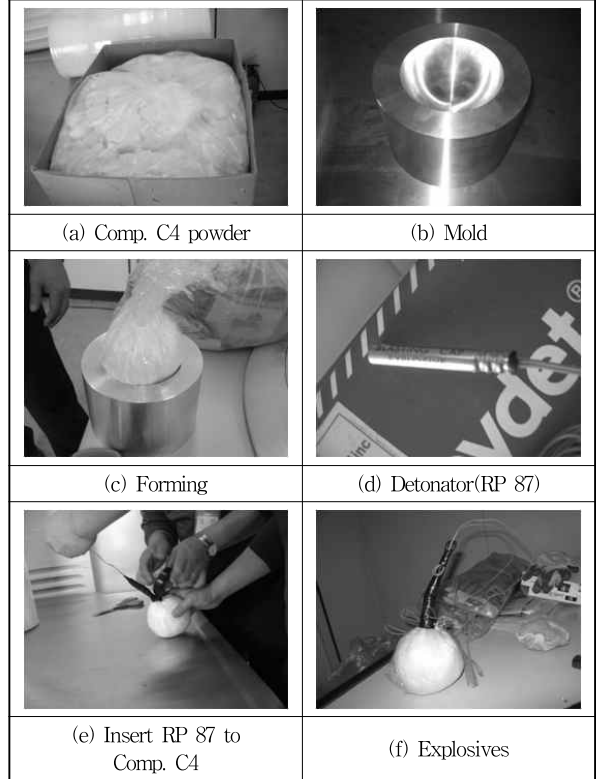


Fig. 2 Procedure to make explosives for EBT in underwater

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접재료 평가

Table 2, 3, 4 에 나타난 각 용접재료를 전용착시험 평가한 결과를 Table 6에 나타내었다. 모재인 PFS-700강의 인장강도, 838MPa,에 비해 FCAW에서 약간 낮은 값을 보이나, 본 연구에서 목표한 인장강도 800MPa 이상을 나타낸다. 용접재료의 확산성 수소량도 GMAW, SAW 및 FCAW 에서 각각 1.1, 0.89

Table 6 Evaluation of GMAW, SAW and FCAW Consumables

Welding process	TS (MPa)	CVN Energy at -51°C (J)	Diffusible Hydrogen(ml/100g)
GMAW	867	96	1.1
SAW	875	90	0.89
FCAW	812	63	2.9

및 2.9ml/100g 으로서 낮은 값을 보여준다. 확산성 수소량은 ISO 3690(수은법)에 따라 측정하였다. 고강도 강용 용접재료를 사용하여 용접한 대부분의 용접부가 수소에 의한 취화로 파괴가 일어나는 점을 감안할 때 고강도강용 용접재료일수록 확산성 수소량을 낮게 제어할 필요가 있다.

3.2 폭파시험결과

Fig. 3은 수중 폭파시험 전 과정을 보여준다. 두께 25mm, 지름 800mm 되는 시험편을 고정하기 위한 치구가 필요하며 (a)는 상부치구와 하부 치구가 결합된 형상을 보여주며, (b)는 이 치구 위에 시험편을 정착한

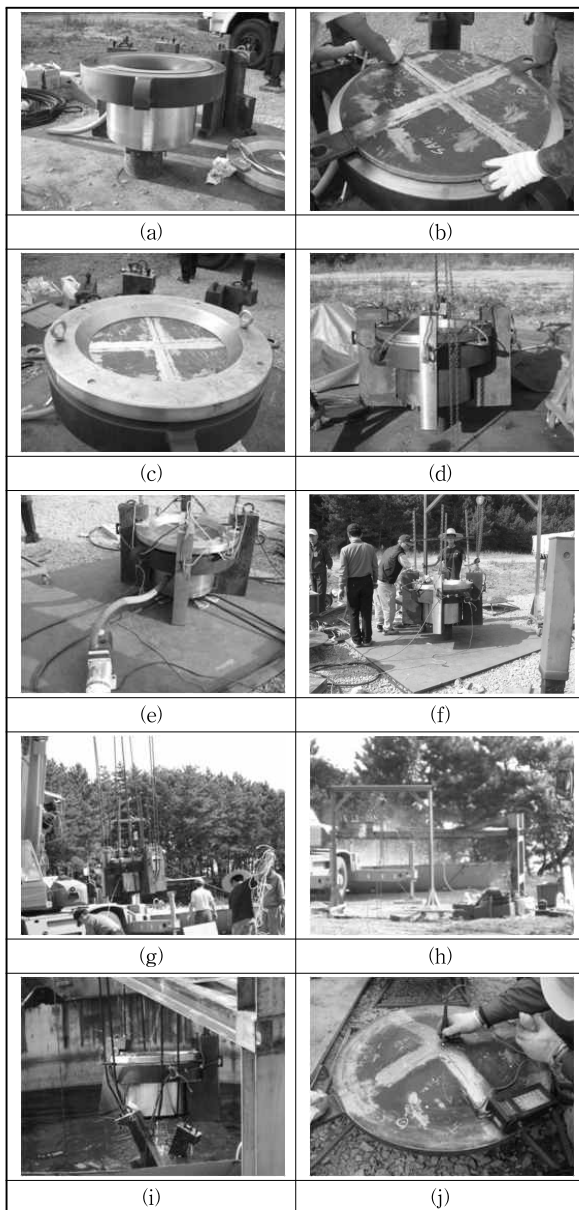


Fig. 3 Procedure of explosion Bulge test under-water

상태이다. 시험편을 고정하기 위해 시험편 위에 치구를 놓고(c) 측면 치구로 고정시키며 폭약을 시험편의 상부에 일정한 간격을 두고 설치한다(d). 상부치구(a)와 시험편 간의 공간을 진공으로 유지하기 위해 배기한다(e). (f)는 시험편을 치구에 완전히 정착하여 설치가 완료된 상태이며, 이 치구의 하부에 연결된 와이어를 크레인에 연결시켜 수조로 이동한다(g). (h)는 수조에서 폭파시의 모양을 보여준다. 수중에서 폭파가 일어나 폭음과 불기둥은 보이지 않고 물기둥이 올라온다. (i)는 수중에서 폭파 후 시험편과 치구를 회수하는 모습이며 시험전 치구에 고정된 시험편이 해체되어 흩어진 모습을 보이며, 와이어로 연결되어 회수된다. 시험전 와이어로 시험편과 치구가 분실되지 않도록 각별한 주의가 필요하며, 완벽히 와이어로 치구와 시험편을 연결시켜야 한다. 회수된 시험편에 대해 정해진 위치에서 두께 측정을 한다(j).

Fig. 4는 GMAW, SAW 및 FCAW 공정으로 제작한 시험편에 대해 1폭 시험한 후의 형상으로써 전체 시험편과 중앙 용접부분이다. SAW 공정에 대해 1폭 시험시 폭약은 1kg, 폭약과 시험편 간의 이격거리를 100mm로 시험한 결과, 최대 두께변형률이 8.76%로서 예상한 3~6%보다 과다하여 GMAW와 FCAW에 대해서는 이격거리를 150mm로 조정하였으며, 두께변형률이 각각 7.2%와 6.77%로 나타났다. 추후 PFS-700강재와 본 시험에서 적용한 용접재료의 조합시에는 폭약량을 줄이거나 이격거리를 늘려야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 GMAW, SAW 및 FCAW 공정으로 제작한 시험편에 대해 2폭 시험한 후의 시험편 형상이다. 상부는 전체 시험편, 중부는 중앙 용접부분, 하부는 측면에서 관찰한 형상이다. 전체 세 공정에 대해 폭약은 1kg, 이격거리는 200mm로 하였다. 이때는 1폭시 bulge된 깊이를 고려하여 시험편과 폭약 간의 거리를 조정한다. 즉 폭파변형시험시 폭약이 설치되어 있는 반

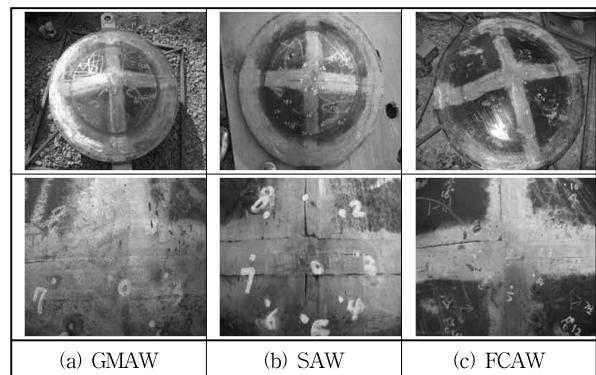


Fig. 4 Specimen appearance after 1st shot

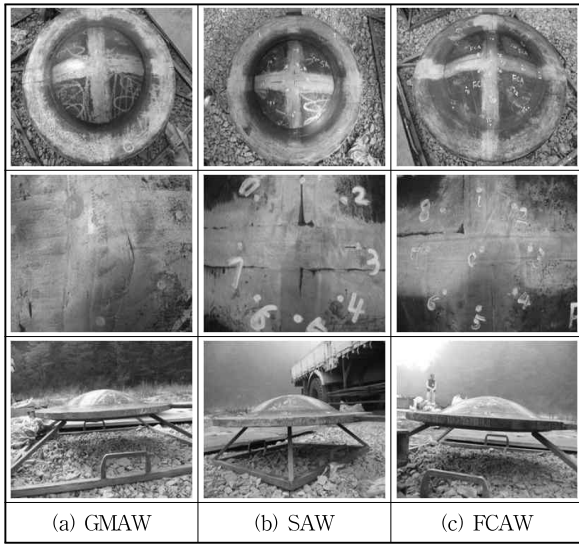


Fig. 5 Specimen appearance after 2nd shot

대 방향으로 시편이 휘어지므로 폭약을 일정 높이에 설치하면 폭파 회수가 증가함에 따라 화약과 시편 간의 거리가 증가하기 때문에 같은 중량의 폭약을 사용하더라도 일정한 두께 변형을 얻기가 어렵다. 따라서 일정한 이격거리를 설정하기 위해서는 폭파하기 전 시편을 치구에 설치한 상태에서 bulge된 깊이를 고려하여 폭약을 설치할 높이를 결정한다. 2폭 시의 변형량은 GMAW, SAW 및 FCAW 각각 11.16%, 12.0%, 11.55%로 나타났으며 1폭 시 보다 각각 4.8%, 2.4% 및 4.78% 정도 증가하였다. 2폭 시의 이격거리 200mm는 적절히 선정된 것으로 사료되며, 3폭시 14.0%에 도달하기 위해서는 각각 2.84%, 2.0%, 2.45% 이상 변형되면 되므로 3폭시의 이격거리는 200mm로 설정하였다.

Fig. 6은 GMAW, SAW 및 FCAW 공정으로 제작한 시편에 대해 3폭 시험후의 형상이다. 상부는 전체 시편, 하부는 측면의 형상이다. 3폭 시 GMAW와 SAW 공정에 대해서 이격거리 200mm로 하여 시험한

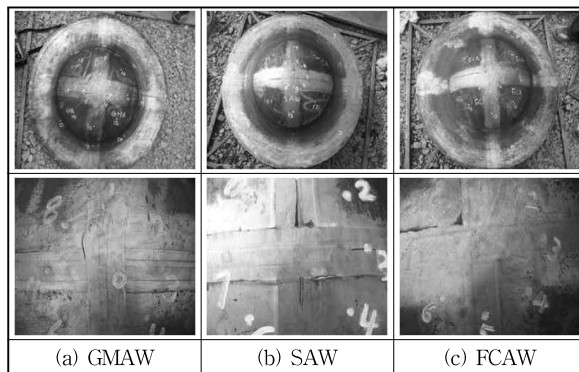


Fig. 6 Specimen Appearance after 3rd shot

결과 최대 두께변형율이 각각 14.0%, 14.02%로 나타났으며, PFS-700강의 경우 두께변형율이 14% 이상이면 규격을 만족하나, 14.0%에 근접하여 FCAW에 대해서는 이격거리를 150mm로 한 결과 15.9%를 나타내어 규격 이상을 나타내었다. Fig. 6에서 보듯이 전용접공정에서 비드에서 약간의 균열 발생이 관찰되거나 관통되거나, 치구영역까지 전파되는 균열 없이 두께변형율 14%이상을 나타내어 규격(KDS 9515-3001-1)을 만족하였다.

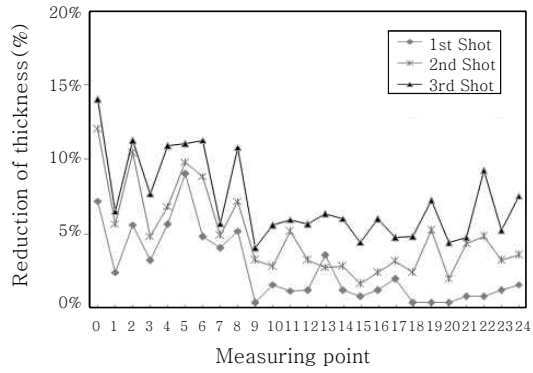
Table 7은 Fig. 4, 5, 6에서 시험한 폭파 조건을 정리한 결과이다. 본 시험에서는 폭약종류와 폭약중량은 일정하게 하고 시편편과 폭약 간의 거리를 조정함으로써 폭약이 폭파시 시편편에 미치는 압력의 정도를 조정하여 원하는 두께변형율을 획득하였다.

Fig. 7은 시편편에 Fig. 1(b)와 같이 100, 300, 400mm 동심원을 그려, 0부터 24번까지 표식한 점에서 매 폭파후 두께 변화를 측정된 결과이다. Fig.에서 measuring point “0”는 시편편의 정 중앙 용접부이고, point “1~8”은 100mm의 동심원, point “9~16”은 300mm 동심원, point “17~24”는 400mm의 동심원 상에 있는 두께 변형율이다. Fig. 6에서 언급한 바와 같이 point “0”에서 최대 두께변형율이 GMAW, SAW 및 FCAW 에 대해 각각 14.0%, 14.02% 및 15.9%이며, 중심에서 멀어질수록, 즉, 동심원 100mm, 300mm, 400mm로 갈수록 두께변형율이 감소한다.

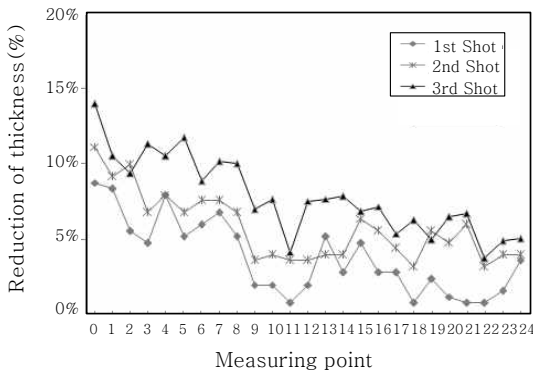
Fig. 7에서 나타난 GMAW, SAW 및 FCAW 공정에서 최대 두께변형율을 나타낸 measuring point “0”에서의 폭파 회수에 따른 두께변형율을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 폭파시험 횟수가 증가할 수록 두께변형율이 가한다. 폭파회수가 증가함

Table 7 Condition of explosion

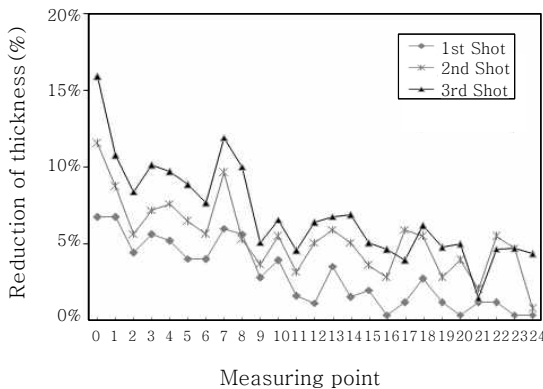
Welding process	Shot No.	Test condition		
		Explosive	Explosive weight	Stand-off distance
GMAW	1st	Comp. C4	1.0kg	150mm
	2nd	Comp. C4	1.0kg	200mm
	3rd	Comp. C4	1.0kg	200mm
SAW	1st	Comp. C4	1.0kg	100mm
	2nd	Comp. C4	1.0kg	200mm
	3rd	Comp. C4	1.0kg	200mm
FCAW	1st	Comp. C4	1.0kg	150mm
	2nd	Comp. C4	1.0kg	200mm
	3rd	Comp. C4	1.0kg	150mm



(a) GMAW



(b) SAW



(c) FCAW

Fig. 7 Reduction of thickness with measuring point in GMAW, SAW and FCAW

에 따라 시험편의 두께가 얇아지며, 동일한 이격거리에서 시험할 경우 다음의 폭발시 큰 두께변형을 초래하기 때문에 시험편에 미치는 압력을 감소시켜 이전의 두께변형율과 비슷한 값을 갖도록 하기 위해서는 폭발량이나 이격거리를 조정하여야 한다. 본 시험에서는 매 폭발시험시 동일한 중량의 폭발을 사용하였으며, Fig. 4, 5, 6에서 언급한 바와 같이 이격거리를 조정하여 폭발이 시험편에 미치는 압력을 변화시켜 두께변형율을 조정하였다.

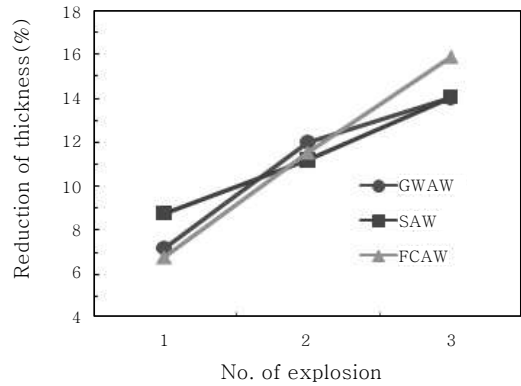


Fig. 8 Maximum reduction of thickness in welding processes

4. 결 론

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

- 1) GMAW, SAW 및 FCAW 용접금속에서의 인장강도는 각각 887MPa, 875MPa 및 813MPa로서 모두 모재의 강도와 비슷한 값을 나타내었다.
- 2) GMAW, SAW 및 FCAW 공정 시험에서 3폭의 폭발로 최대 두께변형율이 각각 14.0%, 14.02% 및 15.9%로 나타났으며 규격을 만족하였다.
- 3) 최대 두께변형율 14%이상 되도록 폭발시험을 수행하여 매 폭발시험마다 이격거리가 적절히 선정되었다.
- 4) 무예열 강재인 PFS-700강에 GMAW, SAW, FCAW 공정용 무예열 용접재료를 사용하여 수중 폭발 변형시험시 균열이 발생하지 않아 무예열 용접재료로서 사용이 적합한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술센터의 지원사업으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. MIL-STD-2149(SH): "Standard procedures for explosion testing ferrous and non-ferrous metallic materials and weldments" supersending NAVSEA 0900-LP005-5000, Navy-SH, Nov. (1983)
2. MIL-S-16216 : "Steel plate, structural high yield Strength", HY-80/100
3. MIL-S-24371 : "Steel plate, structural high yield Strength", HY-130, (1989)

4. Mil-S-24645(SH), "Steel plate, sheet, or coil, age-hardening alloy", structural, high yield strength (HSLA-80 AND HSLA-100) Jan. (1990)
5. 국방규격 : KDS 9515-3001-1, Nov. (2004) (in Korean)
6. NATO STANAG 4137(Classified): Standarg Underwater Explosion Test for Operational SurfaceShip and Crafts
7. Taewon Park, Honggyu Kim, Sung Suk Hong, Inok Shim, : Outline of Ezplosion Bulge Test in Air of Welding Structure, Journal of kwjs, 27-6 (2009), 579-584 (in Korean)
8. Taewon Park, Youngbeum Song, Honggyu Kim, Sung Suk Hong, Inok Shim : Outline of Ezplosion Bulge Test Underwater of Welding Structure, Journal of kwjs, 28-1 (2010), 6-9. (in Korean)
9. Taewon Park, Youngbeum Song, Jinyoung Kim, Chulgyu Park, Heejin Kim : Investigation on Explosion Bulge Test Results of 800MPa Grade Pre-Heat Free Welding Consumables, Journal of kwjs, 27-6 (2009), 658-664.(in Korean)