

함정용 배전반 용접부의 용접후처리 방법에 의한 피로강도 증대 효과에 관한 연구

김명현* · 강민수* · 강성원*

*부산대학교 조선해양공학과

A Study on Improvement of Fatigue Strength of Electrical Panel Weldments in Naval Vessels by Post Weld Treatment

Myung-Hyun Kim*, Min-Su Kang* and Sung-Won Kang*

*Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Corresponding author ; kimm@pusan.ac.kr

(Received January 28, 2008 ; Revised March 10, 2008 ; Accepted July 14, 2008)

Abstract

Structural reliability of electrical panels installed in naval vessels is of critical importance from structural performance viewpoint. The panels may be exposed to vibration and fatigue loadings from internal and external sources and wave loading which cause fatigue cracking. In this study, common methods such as burr grinding and post weld heat treatment (PWHT), for the fatigue strength improvement of weldments are investigated. Burr grinding is carried out using a electric grinder in order to remove surface defects and improve the weld bead profile. And also PWHT is carried out for the purpose of removing residual. The effectiveness of the two post treatment methods is evaluated in terms of fatigue strength improvement of welded structures.

Key Words : Fatigue, Electrical Panel, PWHT, Burr grinding

1. 서 론

함정은 전투 상황에 대비하기 위해 건조되는 특수 선박이므로 상선과는 다른 개념에 따라 설계된다¹⁾. 함정은 일반 상선과는 달리 전투라는 특수 임무를 갖고 있다. 또한, 적의 공격에 대비하기 위해 설계 및 건조에 있어 선체구조 및 주요 탑재 장비의 안전성 확보는 절실히 필요하며 함정의 생산성 관점에서 가장 중요한 사항 중의 하나이다. 함정용 탑재 장비는 선체 구조에 탑재되어 지속적인 파랑 및 기관 기진력으로부터 전달되는 진동 및 피로하중에 노출되어 작동하여야 할 뿐만 아니라, 전투 상황에서 발생할 수 있는 심한 진동과 충격에 대해서도 기능을 보전할 수 있는 고도의 방진·내

충격 성능이 요구된다. 특히 함정용 전장반 구조와 탑재장비는 진동·충격에 의한 피로 강도 저하 및 노후화에 따른 파손이 발생할 가능성을 항상 가지고 있다. 따라서 중추적인 기능수행의 역할을 담당하고 있는 함정용 전기·전자 장비 구성 부재의 피로강도 및 신뢰성 향상을 위한 시험평가 및 해석기법에 대한 지속적인 기술개발이 요구된다²⁾.

용접구조물의 피로수명을 향상시키기 위해 일반적으로 사용되는 방법으로 그라인딩(grinding), 샷 피닝(shot peening), 햄머 피닝(hammer peening) 등의 표면처리 방법이 있다. 또한 잔류응력을 제거하여 피로강도를 개선하는 방법으로는 피닝(peening), 오버로딩(overloading), 스팟 히팅(spot heating) 방법 등이 있다.

본 연구에서는 참고 문헌의 최적화된 bracket형상을 바탕으로 용접후열처리(Post Welding Heat Treatment, PWHT)방법을 적용한 시험편과 피로수명 향상 기대할 수 있는 burr grinding을 적용한 시험편에 대하여 피로시험을 실시하고 이 결과를 바탕으로 합정용 탑재장비 전장반의 내진 및 내피로 강도 향상기법을 개발하는데 그 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 주요파단 부위 모습

Table 1에 나타나 있는 합정용 탑재장비의 내진 성능기준인 MIL-STD-167-1A³⁾를 적용하여 실시한 진동시험 중 Photo 1에서와 같이 일부 브라켓의 용접부에서 응력 집중으로 파단 되었다.

3. 용접부 형상 변화를 통한 개선

전장반의 구성 유닛을 1m×1m의 단순화된 frame으로 모델링하고 기존에 사용되고 있는 bracket의 형상을 변화시켜가며 Fig. 1과 같이 프레임의 각 부분에 삽입하여 해석을 수행하였다.

Table 1 MIL-STD-167-1A Vibratory displacement of environmental vibration

Test type	Objective	Test method
Exploratory vibration test	To determine the presence of response prominences	· 4~33Hz : single amplitude 0.01 in · maintained at each frequency for about 15 seconds
Variable frequency test	Frequency durability examination	· 4~50Hz : maintained for 5 minutes · 4~15Hz : 0.030±0.006 in · 16~25Hz : 0.020±0.004 in · 26~33Hz : 0.010±0.002 in
Endurance test	durability test from resonance frequency	· Response prominences from exploratory or variable frequency testing · Total period of at least 2 hours · The amplitudes of vibration shall be in accordance with variable frequency test

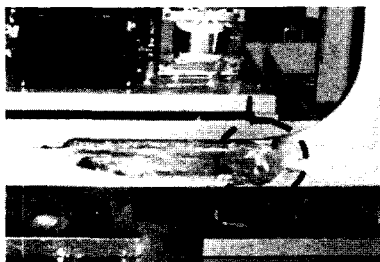


Photo 1 Fatigue cracking at bracket

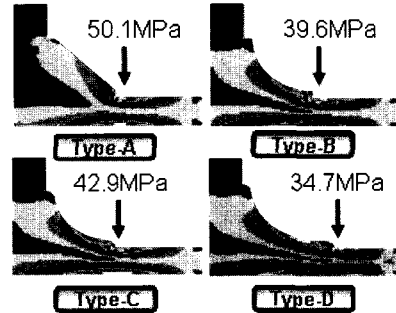
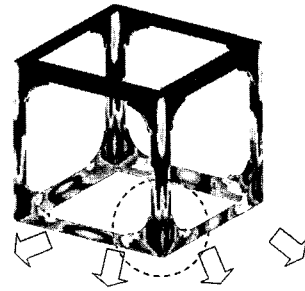


Fig. 1 FEA result for idealized frame

프레임의 상부 앵글을 모두 구속(dx, dy, dz, θ_x , θ_y , θ_z = fixed)하고 하부 앵글에 6000N의 하중을 주어 해석을 수행하였다. Type A는 bracket의 상부가 직선으로 뺀 형상이며, Type B는 bracket의 상부를 곡선으로 처리하였으며, Type C는 Type B에서 끝단 처리를 곡선으로 하였다. 마지막으로 Type D는 Type C에서 bracket의 하단부위를 일정거리 연장하였다. 이는 응력집중부의 응력이 bracket의 형상에 민감하게 반응하여 변화함을 보여 준다²⁾.

4. 시험 절차

4.1 시험편 형상

본 연구에 사용된 시험편은 Fig. 1의 case study를 통한 최적화된 형상이며, 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. bracket은 용접부 다리길이가 5mm가 유지 되도록 필릿 용접하여 시험편을 제작하였으며, 시험편의 두께는 4.5mm이다.

4.2 용접후열처리

피로강도를 증가시키고 잔류응력을 제거하기 위해 열처리를 하였으며 Table 2에 ASME와 BS5500에서 규정하고 있는 PWHT의 조건을 나타내었다⁴⁾.

본 연구에서는 Table 2의 규정을 참고하여 650℃까지의 가열시간은 3시간, 650℃에서 1시간동안 유지하여

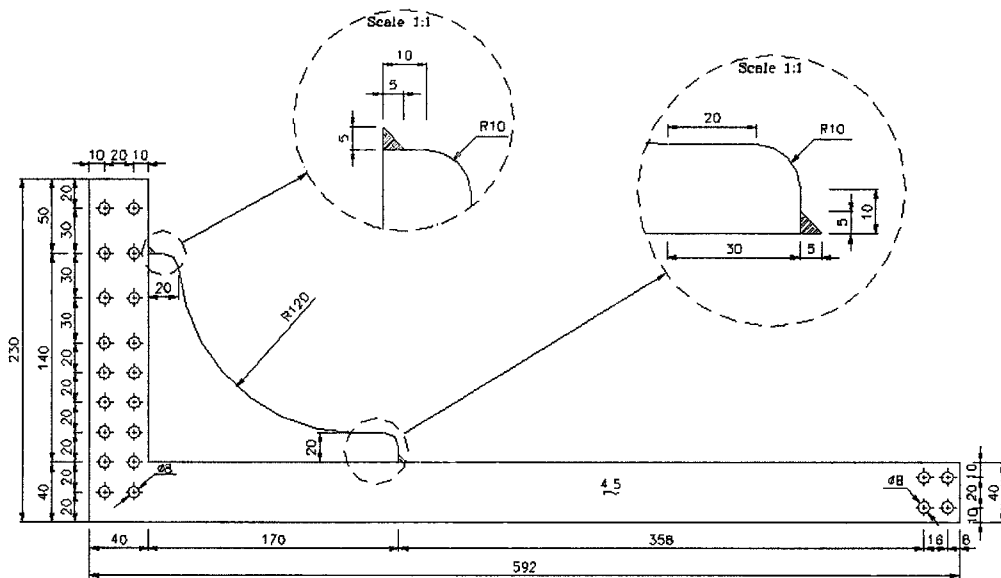


Fig. 2 Dimension of test specimen

Table 2 PWHT condition

Hold hour	ASME : 15~30minute
	BS 5500 : 60minute
Heating temperature	ASME : 595~675℃
	BS 5500:600±20℃

를 향상시키기 위해서는 기본적으로 용접토우부의 결함을 제거하고, 용접 윤곽을 매끄럽게 하여 응력 집중을 감소시켜야 한다. 용접 토우부에 있어서 균열이 발생·전파에 의해 파손이 일어나는 경우, 특정 범주의 용접부에 있어서 용접 투두우부 그라인딩을 통해 약 3~4 배의 피로수명 향상을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 이는 용접부의 형상 및 하중 모드 등에 따라 현저히 달라진다⁵⁾.

특히 본 연구에서는 용접부 피로 강도를 향상시키는 방법으로 용접 형상 개선 방법 중 grinding 방법을 채택하였으며, 용접부에 있어서 grinding 가공된 모습을 Photo 3에 나타내었다. 또한, Table 3과 Fig. 3에서는 IIW recommendation에서 규정한 burr grinding 방법과 허용치수를 각각 나타내었다.



Photo 2 Furnace for PWHT of test specimens

열처리를 실시하였으며 Photo 2의 가열장치(furnace)를 이용하여 시험편을 열처리하였다.



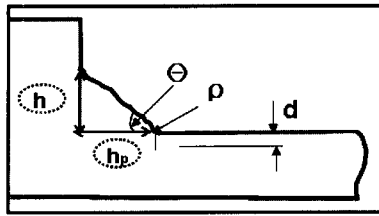
Photo 3 Ground specimen

4.3 Burr grinding

용접부가 모재에 비해 취약한 원인은 용접 후 발생하는 금속조직의 변화, 용접결합, 용접토우부의 형상 및 잔류응력 등을 들 수 있다. 용접 연결 부위의 피로강도

Table 3 Condition of improvement method

Thickness of Plate	Diameter of Tip	Speed	Air pressure	Travel speed
10~50mm	10~25mm	15000~40000 rpm	5~7 bar	15~20 mm/sec



Burr grinding	
•	t = 10~15mm : Minimum Depth (d)=0.5mm
•	t > 15mm : Minimum Depth (d)=1.0mm
•	Maximum Depth (d)=2.0mm or 5%t (t: plate thickness)

Fig. 3 Specification of depth for burr grinding (IIW recommendation)

4.4 용접부 형상 측정

동일한 부재에 있어서도 용접부의 피로강도는 용접부 형상에 따라 크게 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 피로 시험을 수행하기에 앞서, 사용된 시험편의 용접 토우부 형상을 측정하기 위하여 용접 토우부 표면에 Photo 4와 같이 치과용 실리콘 고무를 이용하여 형상을 본뜨고 비드 길이방향으로 1mm 단위로 3등분하여 절단한 형상을 비디오 현미경으로 계측하였다.

직경이 6mm인 tip을 사용하여 grinding하였으며, 깊이는 1mm로 하였다. 용접부 형상 측정 결과를 Table 4에 나타내었으며, IIW 규정에 부합함을 확인하였다.

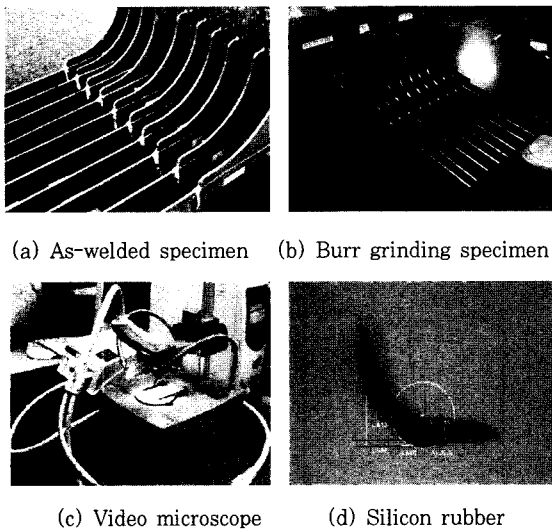


Photo 4 Measurement of weld profile using silicon rubber

Table 4 Average of dimension of ground area

	h(mm)	hp(mm)	θ	ρ	d(mm)
Burr grinding	2.62	6.48	29.77	3.37	1.19
PWHT	4.32	4.69	-	-	0

5. 유한요소 해석

5.1 해석모델 및 방법

피로 시험에 앞서 각 시험편에 대해 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 shell 4 node의 요소로 응력 해석을 수행하였다. Fig. 4와 같이 burr grinding을 하지 않은 시험편 및 grinding을 실시한 시험편에 대하여 각각 유한요소해석을 수행하여 토우부 끝단에서부터의 응력값을 Fig. 5와 같이 나타내었다.

5.2 Hot spot stress

용접구조물에 있어서 균열은 주로 불연속부나 용접부에서 발생한다. 따라서 이러한 응력 집중부 (hot spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법 (extrapolation)을 이용하여 구한 응력을 핫스팟 응력 (Hot spot stress, HSS)이라고 정의하며, 이를 바탕으로 피로수명을 산정할 수 있다. 이 방법은 현재 선체 구조의 피로강도를 구하는데 있어 통상적으로 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 여러 가지 핫스팟 응력의 산출 방법 중 선급에서 주로 사용되는 방법을 이용하여 부재두께의 0.5t 및 1.5t (t=두께)에서 외삽한 값을 통해 핫스팟 응력을 구하였다⁶⁾.

Fig. 5와 같이 결과는 burr grinding 된 시험편의 핫스팟 응력이 26 MPa로 나타나 As-welded된 시험편의 핫스팟 응력 40 MPa에 비교하여 약 35% 정도의 응력이 완화된 것으로 나타났다.

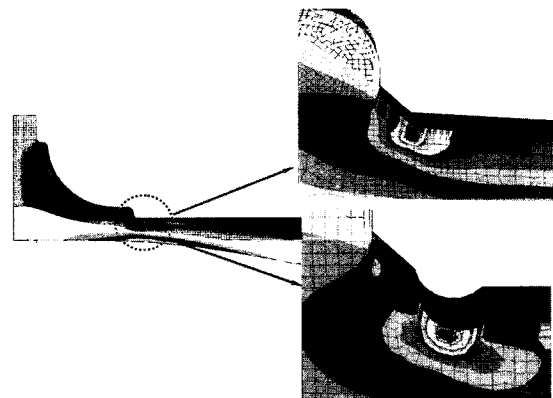


Fig. 4 Stress distribution obtained from FEA

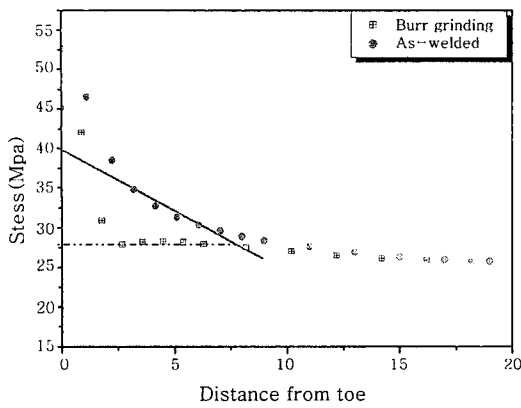


Fig. 5 FEA result along distances from the weld toe

6. 피로 시험 및 결과

6.1 Laser 변위센서를 이용한 측정

본 연구에서 피로시험은 외팔보 형식의 굽힘 시험기를 사용하였으며, 이때 피로시험을 위한 변위제어를 정확히 하기 위하여 레이저 변위 센서를 이용하여 시간에 따른 변위를 측정하였다. Photo 5에 피로시험 시 사용된 레이저 변위센서를 나타내었으며, 이를 이용하여 일정시간 동안 측정된 변위를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 시험 중 변위는 일정하게 반복되고 있음을 알 수 있었다.

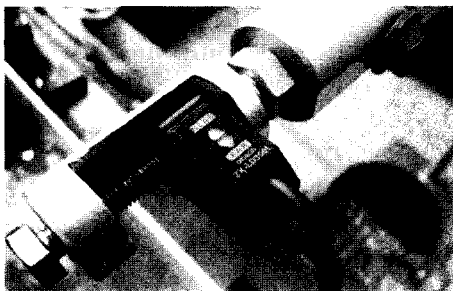


Photo 5 Laser displacement sensor

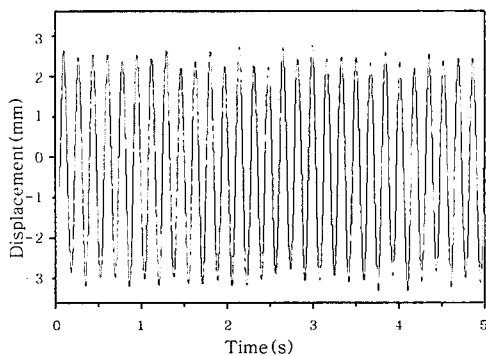


Fig. 6 Measurement of displacement

6.2 피로시험 및 결과

피로시험은 정현파를 이용한 변위제어를 이용하여 시험하였으며, 응력비=-1 및 주파수=30Hz의 조건으로 피로 실험을 수행하였다. 또한 실제 시험에 사용된 시험기는 외팔보 시험기로 최대진폭 ±25.4mm, 최고 주파수 33Hz에서 시험이 가능하며, 그 실제 시험모습을 Photo 6에 나타내었다.

이렇게 수행된 피로시험 결과를 Fig. 7과 같이 As-welded 시험편의 피로시험 결과와 비교하여 응력범위 (ΔS), 파단수명 (N_f)사이의 관계를 S-N선도로 나타내었다.

결과는 Fig. 7과 같이 그라인딩 효과 및 용접후열처리 효과로 인해 As-welded 시험편보다 Burr grinding 시험편 및 PWHT 시험편이 피로강도 및 피로수명 향상을 나타내었다. 정량적인 피로강도 및 피로수명 향상 효과를 구하기 위해 다음과 같이 식 (1)과 식 (2), (3)으로 나타내었다.

$$\text{As-welded} : \log N_f = 18.22 - 5.33 \log \Delta S \quad (1)$$

$$\text{Burr grinding} : \log N_f = 19.18 - 5.68 \log \Delta S \quad (2)$$

$$\text{PWHT} : \log N_f = 20.54 - 6.2 \log \Delta S \quad (3)$$

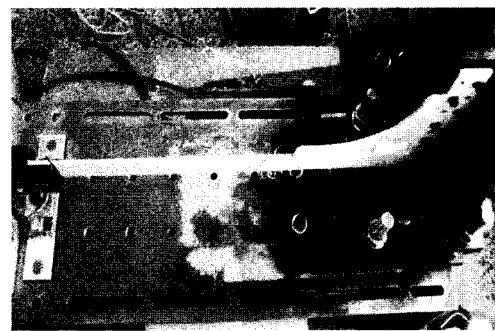


Photo 6 Cantilever type fatigue test machine

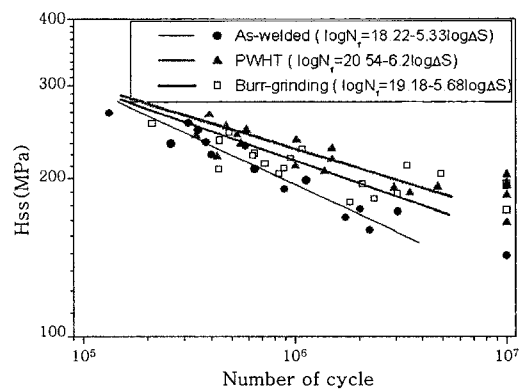


Fig. 7 Improvements of fatigue strength due to burr grinding and PWHT

Table 5 Improvements of fatigue life

	As-welded	burr grinding	PWHT
Fatigue life at 200MPa	1.0	1.14times	1.23times
Fatigue life at 2×10^6 cycle	1.0	2.04times	3.23times

식 (1)과 식 (2), (3)에 의하면 As-welded 시험편에 비해 PWHT 시험편의 경우 2×10^6 cycle 기준으로 3.23배의 피로수명 향상을 보였으며, 기준응력 200 MPa 기준 1.23배의 피로수명 향상을 보였다. 또한, burr grinding 시험편의 경우 2×10^6 cycle 기준 2.04배의 피로수명 향상을 보였으며, 기준응력 200 MPa에서의 피로수명은 1.14배이었다. As-welded 시험편을 기준으로 burr grinding 및 PWHT 시험편의 피로수명 향상 정도를 Table 5에 나타내었다.

7. 결 론

본 연구에서는 선박용 전장 패널에 있어 응력이 집중되는 기하학적 불연속부 및 용접부에 있어서 최적 bracket 형상을 바탕으로 용접후처리한 피로시험편에 대한 피로시험 및 해석을 수행하여 피로강도 및 피로수명을 평가해 보았다.

기존 As-welded 시험편의 피로시험 결과와 용접후처리를 통한 피로강도 및 피로수명 향상을 꾀한 시험편을 피로선도에 적용하였을 때 As-welded 시험편에 비하여 용접후처리 된 시험편의 피로수명 및 피로강도가 상당부분 향상된 결과를 보이는 것을 알 수 있었다.

향후 본 피로시험의 결과와 미 해군의 탑재장비 내진 성능 기준인 MIL-STD-167-1A, 내충격 성능기준 MIL-S-901D 및 진동절연 성능기준 MIL-STD-740-2를 비교 분석하여 선박용 전장반 보강재의 내진·내충격 성능 고도화에 활용할 수 있는 구조최적설계의 개선안을 마련하는데 보다 지속적이고 다양한 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. S. Seo, K. H. Son, M. K. Park, A Study on the Optimum Structural Design of Naval Vessels, Journal of the Society Naval Architects of Korea, **39-1**, (2002) 100-112 (in Korean)
2. M. H. Kim, J. Y. Choi, S. W. Kang, J. Y. Chung, Optimum Design for Frame Bracket of Electrical Panels for Improved Fatigue Strength, Journal of the Society Naval Architects of Korea, **43-2**, (2006) 206-212 (in Korean)
3. MIL-STD-167-1A : Mechanical vibration of shipboard equipment, Department of Defense, USA, 2005
4. 대한용접학회 : 용접·접합 편람(I), 403-409(in Korean)
5. Haagensen P. J., Maddox S. J., Specifications for weld toe improvement by burr grinding, tig dressing and hammer peening for transverse welds, IIW Commission XIII-Working Group 2, Collaborative Test Program on Improvement Techniques, 1995
6. S. W. Kang, M. H. Kim, S. H. Kim, W. I. Ha, An Experimental Study of Fatigue Strength of Welded Structures Using Structural Stress and Hot Spot Stress, Journal of the Society Naval Architects of Korea, **42-2**, (2005) 129-135 (in Korean)