

함정용 배전반의 피로강도 향상을 위한 프레임 브래킷의 최적설계

김명현^{†*}, 최재영*, 강성원*, 정지영^{**}

부산대학교 조선해양공학과*
(주)KTE 기술연구소^{**}

Optimum Design for Frame Bracket of Electrical Panels for Improved Fatigue Strength

Myung-Hyun Kim^{†*}, Jae-Young Choi*, Sung-Won Kang* and Ji-Young Chung^{**}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University*
KTE Co., R&D^{**}

Abstract

Structural reliability of electrical panels installed in naval vessels is of critical importance from structural performance viewpoint. The electrical panels may be exposed to vibration and fatigue loadings from internal and external sources as well as wave loadings which result into a crack and fracture due to the decrease of fatigue strength. It is also well known that welded joints including brackets within steel structures such as vessels and bridges are vulnerable against such repeated loadings. This study introduces a preliminary result of the optimized shape of frame bracket consisting of electrical panels in naval vessels against fatigue loading and their fatigue life at brackets of electrical panels by means of hot spot stress and structural stress methods.

※Keywords: Optimum design of structures(구조 최적 설계) Fatigue test(피로시험), Panel bracket(패널 브래킷), Structural stress(구조응력), Distributing board(배전반), Welded structure(용접구조물)

1. 서론

함정용 전가전자장비 관련 배전반은 육상용 장비와는 달리 선체 구조에 탑재되어 충격에 노출될 경우뿐만 아니라 지속적인 진동 및 피로하중에 노

출 되어도 작동하여야 하는 특징을 가지고 있으며, 특히 해군함정 장비의 진동 및 충격 요구조건(Military Standard)을 만족하도록 요구되고 있다. 선박의 운항에 있어 파랑 및 기관 기진력으로부터 전달되는 지속적인 반복하중에 의해 배전반을 구성하고 있는 일부 부재들의 피로 강도 저하 및 노후화에 따른 파손이 발생할 가능성을 항상 가지고

접수일: 2005년 9월 16일, 승인일: 2006년 1월 17일

† 주저자, E-mail: kimm@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2486

있으므로 선박의 기능수행에 있어서 중추적인 역할을 담당하고 있는 함정 탑재용 전가전자 장비 구성 부재의 피로강도 및 신뢰성 향상을 위한 시험평가 및 해석기법에 대한 지속적인 기술개발이 요구된다.

선박용 배전반은 탑재된 판 구조물을 통해 전달되는 진동 및 피로하중에 노출되어 부재의 노후화 및 강도 저하는 물론 선박 기능의 저하요인으로 작용할 수 있으므로 배전반 부재의 열화요인 및 피로수명 등을 파악하여 부재의 건전성을 확보하는 방안이 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 선박용 전장 패널에 있어 응력이 집중되는 기하학적 불연속부 및 용접부에 있어서 최적 브래킷 형상 도출을 위한 피로수명 특성을 파악하기 위해 함정용 탑재장비 중 배전반을 구성하고 있는 박판용접부의 기하학적인 형상 변화를 통해 최적화된 형상을 찾아내고, 이를 바탕으로 피로강도 시험 및 평가를 실시하여 함정용 배전반의 내진내충격 성능 향상을 위한 내진내충격 성능 고도화에 활용할 수 있는 해석설계 기술을 확보하고자 한다.

2. 주요파단 부위 및 모습

함정용 탑재장비의 내진성능 요구조건을 만족하기 위해 함정용 배전반을 구성하는 판, 보강재, 부가물의 최적화를 통한 방진설계 기술개발을 위한 시험의 일환으로 MIL-STD-167-1을 적용하여 선박용 배전반 패널에 대하여 실시한 시험 중 일부 브래킷 부위에서 파단된 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 균열 및 손상이 주로 발생하는 부위는 배전반의 프레임을 지탱하는 브래킷의 용접부임을 알 수 있다.

3. 용접부 형상 변화를 통한 개선

3.1 프레임에서 브래킷의 기하학적 형상변화

다양한 치수와 형상의 브래킷 및 구조 보강재를 포함한 실제시험을 모두 수행하기는 용이하지 않으므로 상용 유한요소 해석 프로그램으로 모델링

하여 균열 및 손상의 주요 발생 부위인 브래킷의 기하학적 형상을 변화시킴으로써 응력집중을 완화시키고 이에 따른 피로강도의 향상을 목표로 하였다. 이를 위해 배전반의 구성유닛을 1m×1m의 단순화된 프레임으로 모델링하고 기존에 사용되고 있는 브래킷의 형상을 Junkichi et al.(1991) 논문에서 제시하고 있는 응력집중 완화 모델을 참고하여 변화시켰다. 한편, 변화된 각각의 브래킷을 Fig. 2와 같이 프레임의 각 부에 삽입하여 유한요소해석을 수행하여 손상 발생 예상 부위인 응력집중부의 응력을 비교해보았다. 이때 유한요소해석은 상용유한요소 프로그램인 MSC Patran/Nastran을 사용하였으며, 요소 타입은 shell 4 node를 사용하여 두께와 같은 크기로 요소를 나누었다.

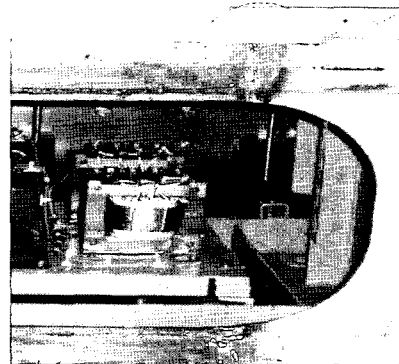


Fig. 1 Photo of crack in brackets

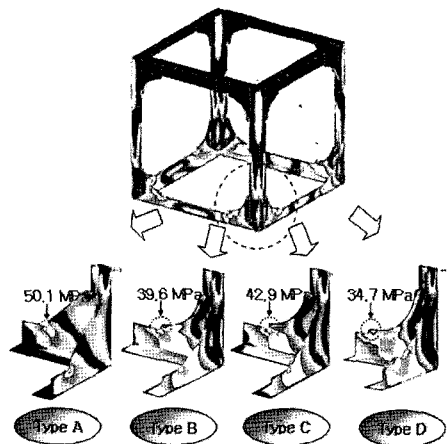


Fig. 2 FEA result for an idealized frame

Fig. 2에 나타난 바와 같이 Type A는 브래킷의 상부가 직선으로 뺀 형상이며 브래킷 끝단 응력 집중부의 응력이 50.1MPa로 발생하였다. 두 번째는 브래킷의 상부가 곡선으로 처리된 Type B이며 응력집중부에서 계산된 응력은 39.6MPa이다. Type B에서 끝단 처리가 곡선으로 된 Type C에서는 42.9MPa의 응력이 발생하였으며, 마지막으로 Type C에서 브래킷의 하단부위를 일정거리 연장한 Type D의 경우는 34.7MPa의 응력이 집중됨을 알 수 있다. 이는 응력집중부의 응력이 브래킷의 형상에 민감하게 반응하여 변화함을 보여 준다.

3.2 브래킷의 기하학적 형상의 세부 변화

프레임을 포함한 유한요소 해석결과를 바탕으로 하여 기존의 브래킷의 형상을 기준으로 최적화된 브래킷의 기하학적 형상을 찾아내기 위한 세부 모델링 및 해석을 수행하였다. 이때 해석에 사용된 브래킷의 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 모델 치수는 $H=240\text{mm}$, $L=340\text{mm}$, $B=75\text{mm}$ 로 일정하며 변경되는 치수는 Table 1에 표시하였다.

이를 기초로 시험편 오른쪽 끝단에 하중을 작용시키고, 경계조건으로 왼쪽 끝단의 변위를 모두 구속하여, 프레임 해석과 같은 조건으로 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 사례별 연구를 수행하였다.

모든 형상의 브래킷 중 응력집중부에 가장 큰 응력이 발생하는 case1의 No.1 모델을 기준으로 하여 브래킷의 형상이 변함에 따른 응력 집중부의

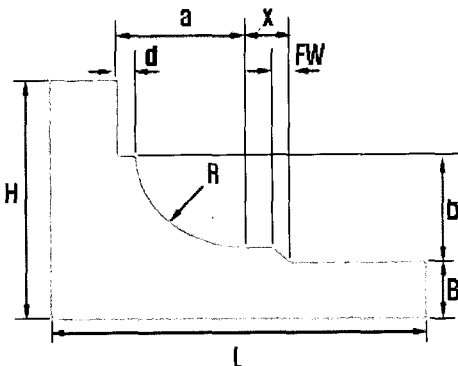


Fig. 3 Dimension of FEA model

Table 1 Matrix of model size (Unit: mm)

No.	x	a=b	d	FW	R	
case 1	1	0	140	20	0	
	2	0	140	10	0	
	3	0	140	20	5	
	4	0	140	10	5	
	5	0	140	20	20	
case 2	6	0	140	20	0	100
	7	0	140	20	0	110
	8	0	140	20	0	120
	9	0	140	20	0	130
	10	0	140	20	0	140
	11	0	140	20	0	150
	12	0	140	20	0	160
case 3	13	30	140	20	5	140
	14	40	140	20	0	140
	15	50	140	20	0	140
	16	60	140	20	0	140
	17	70	140	20	0	140

응력 감소의 정도를 계산하여 비교하였다.

Case 1에서는 필릿 용접의 다리길이 (FW)와 d의 길이를 변화시켜가며 응력집중부에서의 응력의 크기를 살펴보았다. 기하학적 형상만으로 비교하였을 때 필릿 용접부가 들어간 형상이 응력의 집중을 완화시키는 결과를 도출하였다.

Case 2에서는 브래킷 상단의 곡률반경 R을 변화시켜가면서 응력집중부에서의 응력의 크기를 살펴보았다. 결과는 R의 크기가 작을수록, 응력집중이 완화되는 것으로 나타났다. 그러나 R이 일정값 이하가 되면 브래킷의 곡률 부위가 브래킷이 d의 높이 이하가 되어 형상의 문제가 생기고, 이는 브래킷이 프레임 angle을 지지하여 굽힘 강성을 증가시키는 역할을 충분히 수행할 수 없다고 판단된다.

Case 3에서는 브래킷의 하단지지부로부터 X의 길이를 변화시키면서 길이 변화에 따른 응력집중부에서의 응력의 크기를 살펴보았다. 결과는 X의 길이를 길게 할수록 브래킷 끝단 응력집중부의 응력이 점점 완화되는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 4에 나타난 바와 같이 X의 길이를 일정이상 길게 하는 것은 오히려 브래킷의 끝단이 아닌 Fig. 4 (b)에 보인 바와 같은 위치에서 브래킷 끝단에서 보다 높은 값의 최대 응력이 발생하는 것으로 나타나 응력집중을 완화시키는데 효과가 없는 것으로 판단된다. 이는 앞서 Fig. 1에서 보인 바와 같

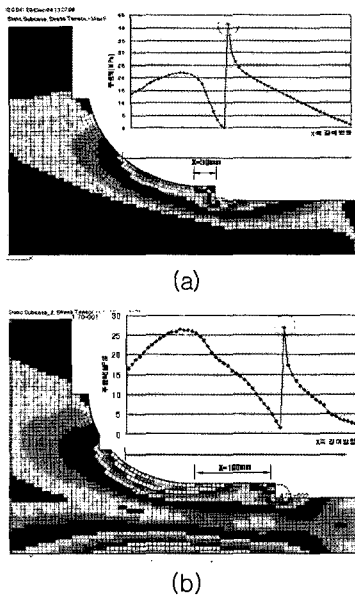


Fig. 4 FEA result at X=50mm(a) and 100mm (b)

이 브래킷에 있어서 X의 길이를 일정 이상 연장한 경우 파단 위치는 브래킷 끝단에서가 아니고 곡률 부분이 끝나는 부위에서 파손이 발생하는 실험결과와도 일치하는 것으로 나타났다.

이상의 Case 1, 2, 3에서 고찰한 결과를 모두 포함시켜 최적화된 브래킷과 기존의 브래킷의 형상과 응력집중부에서의 응력의 크기를 비교하였을 때 기존의 브래킷에서는 52.9MPa, 최적화된 브래킷에서는 41.8MPa의 결과가 나왔으며, 이로부터 약 21%의 응력완화 효과가 기대된다.

이때 최적화 형상 보다 낮은 응력값이 도출된 No. 14, 15, 16, 17의 모델의 경우는 Fig. 4의 (b)의 경우에 가까우며, Fig. 1의 진동시험의 결과와 같은 손상이 우려되어 최적화 형상에서 제외하였다.

이상의 사례연구에서 얻은 결과를 바탕으로 응력 집중부의 응력값을 Hot Spot Stress 법으로 계산하여 Table 2에 정리하여 나타내었다. 이때 Hot Spot Stress는 각 선급에서 사용하고 있는 방법을 이용하였으며, 용접 비드 형상을 고려한 모델링을 통해 유한요소계산 결과를 바탕으로 브래킷의 끝단으로부터 일정거리(판 두께의 0.5 및 1.5배) 떨어진 위치에서의 응력값을 외삽하여 구하였다(강성원 등 2005).

Table 2 Hot spot stress for various model cases (Unit: mm)

No.	1	2	3	4	5	6
σ_{hss}	61.5	60.0	52.9	48.1	46.2	53.3
No.	7	8	9	10	11	12
σ_{hss}	55.4	56.5	57.2	57.8	58.3	58.7
No.	13	14	15	16	17	
σ_{hss}	41.8	44.1	41.3	38.6	36.0	

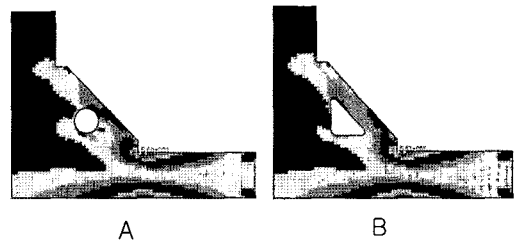


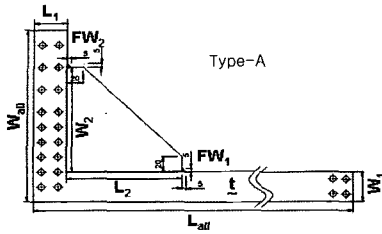
Fig. 5 FEA of with hole model

동일한 크기의 함정에서 중량이 작은 쪽이 속도나 기동성, 안전성, 유지비용 등의 면에서 우수하기 때문에 함정 구조 설계의 1차 목적은 중량을 최소화하는데 있다(서승일 등 2002). 이를 감안하여 Fig. 5의 A와 같이 브래킷에 구멍을 뚫은 모델에 대한 사례연구를 수행해 보았다. 무게경감을 목적으로 하는 구멍의 크기의 반경 r=10, 20, 30으로 변화를 주고 해석을 수행했을 때 응력 변화의 폭은 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 브래킷에 구멍이 적용된 모델에 대해서는 본 연구에서 제시하고 있는 최적화 형상 중 곡률반경 R이 포함된 경우 구멍의 적용이 용이하지 않은 점을 감안하여 최적화에서 제외하였다.

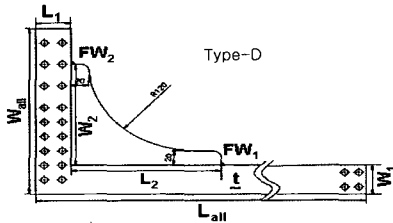
4. 시험절차

4.1 시험편형상

본 연구에 사용된 시험편은 Fig. 6과 같이 제작하였다. 시험편은 기존에 사용되고 있는 브래킷의 형상을 가진 type A와 유한요소해석을 이용한 일련의 case study를 통해 구해진 최적화된 형상을 갖춘 type D의 시험편을 채택하였다. Table 3에 시험편의 상세 치수를 나타내었다.



(a) Test specimen - Type A



(b) Test specimen - Type D

Fig. 6 Dimension of test specimen

Table 3 Matrix of specimen size (Unit: mm)

	L_{all}	L_1	L_2	W_{all}	W_1	W_2	FW_1	FW_2	t
A	592	40	140	230	40	140	5	5	4.5
D	592	40	170	230	40	140	5	5	4.5

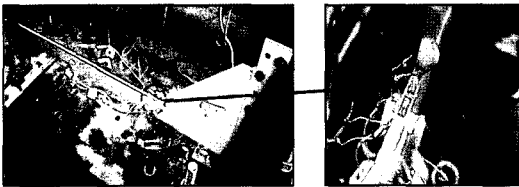


Fig. 7 Typical strain gauge placement

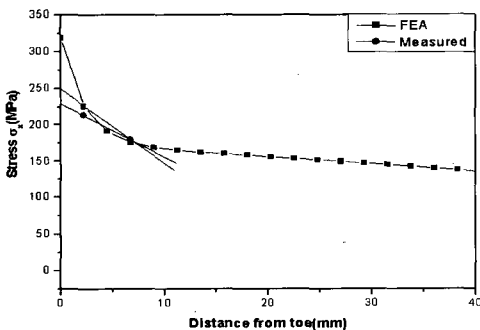


Fig. 8 FEA result along distances from the weld toe

4.2 정하중 시험

시험에 앞서 각 시험편의 브래킷 끝단 부분의 용접 토우부로부터 0.5t 및 1.5t (t: 시험편 두께)에 걸쳐서 1축 2mm 스트레인 게이지를 Fig. 7에 나타난 바와 같이 부착하였다. 먼저 부착된 스트레인 게이지로부터 응력집중부인 용접 토우부로부터의 응력분포를 측정하였다.

4.2 유한요소해석

각 시험편에 대해 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 shell 4 node의 요소로 응력 해석을 수행하였다. Type-A 및 type-D 시험편에 대하여 유한요소해석을 수행하여 대표적으로 Type-A 시험편의 용접 토우부 끝단에서부터의 응력 변화 값을 실제 측정치와 비교하여 Fig. 8과 같이 나타내었다.

4.3 Laser 변위센서를 이용한 측정

본 연구에서 피로시험은 외팔보 형식의 굽힘 시험기를 사용하였으며, 이때 피로시험을 위한 변위 제어를 정확히 하기 위하여 레이저 변위 센서를 이용하여 시간에 대한 변위를 측정하였다. Fig. 9에서는 레이저 변위센서를 이용하여 일정시간 동안 측정된 변위를 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 변위가 일정하게 반복되고 있음을 확인하였다.

5. 피로시험 및 결과

피로시험은 정현파를 이용한 변위제어로 실시하였으며, 응력비=-1 및 주파수=28Hz 등의 조건으로 피로시험을 수행하였다. 또한 실제 시험에 사용된 시험기는 외팔보 시험기로 최대진폭 ±1 inch, 최

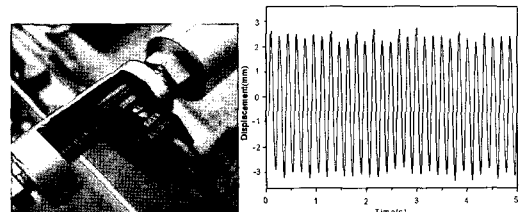


Fig. 9 Measurement of displacement using laser sensor

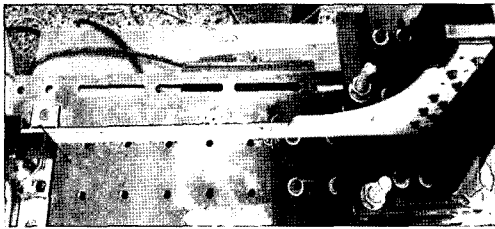


Fig. 10 Fatigue test machine

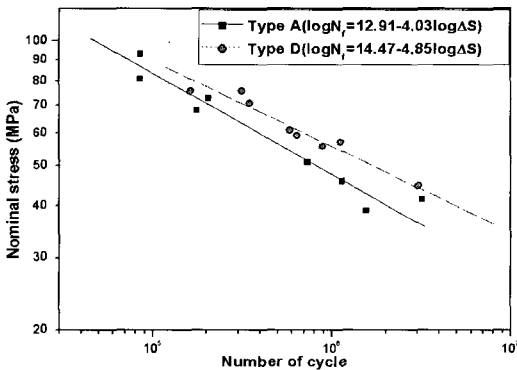


Fig. 11 Comparison of fatigue test results of type-A and type-D

고 주파수 33Hz에서 시험이 가능하며, 실제 피로 시험모습을 Fig. 10에 나타내었다.

피로시험 결과를 바탕으로 Type-A와 type-D 시험편에 대하여 응력범위 (ΔS), 파단수명 (N_f)사이의 관계를 S-N선도로 나타내었다.

Fig. 11과 같이 피로선도로 작성한 결과 2×10^6 사이클 기준으로 type-D 시험편의 피로강도는 48.3MPa로 나타났으며, 이는 type-A 시험편의 피로강도 40.2MPa에 비하여 약 20% 향상되었음을 알 수 있었다.

6. 결론

항정용 배전반의 내진내충격 성능 향상을 위해 배전반을 구성하는 보강재의 구조적 최적 형상을 도출하고 또한 주요 손상부인 용접부에서의 거동 파악 및 피로파괴 가능성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 브래킷 및 용접부의 기하학적 형상 변화만으로도 응력집중 완화에 효과가 있다는 결과를 도출하였으며 브래킷 및 용접부의 형상변화를 통해

기존대비 약 21% 응력집중이 완화된 최적화된 브래킷의 형상을 도출하였다.

- (2) 응력집중 완화 효과를 얻기 위하여 기하학적 형상의 변화를 가함에 있어 브래킷의 선단부의 길이를 일정길이 이상 늘이는 것은 부재의 과도한 사용을 유발하며 브래킷으로써의 역할을 높이는 것은 아니라는 결론을 도출하였다.
- (3) 항정용 배전반 용접부에 대하여 일련의 변위제어 피로시험 결과를 바탕으로 2×10^6 사이클을 기준으로 약 20% 피로강도 향상 효과를 달성하였다.
- (4) 선박용 전장 패널에 있어 응력이 집중되는 기하학적 불연속부 및 용접부에 있어서 최적 브래킷 형상 도출을 위한 피로수명 특성을 파악하기 위해 필요한 피로강도 시험 및 평가를 완료하고, 피로시험의 결과와 미 해군의 탑재장비 내진 성능 기준 및 내충격 성능기준을 만족할 수 있는 선박용 배전반 보강재의 내진내충격 성능 고도화에 활용할 수 있는 구조최적설계의 개선안을 마련하는데 보다 지속적이고 다양한 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 연구는 산업기술재단 지역혁신인력양성사업 및 한국과학재단 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 강성원, 김명현, 김석훈, 하우일, 2005, “구조응력 및 핫스팟응력을 이용한 용접구조물 피로수명에 평가에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 2호, pp. 138-144.
- 서승일, 손건호, 박명규, 2002, “항정의 최적 구조설계에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 1호, pp. 100-112.
- Junkichi Y., Susumu M., Yasumitsu T., Masaaki M. and Tetsuro K., 1991, “Definition of Hot Spot Stress in Welded Plate Type Structure for Fatigue Assessment (1st Report),” Commission VIII of the

International Institute of Welding, IIW-VIII-1414-91,
pp. 1-13.



< 김 명 현 >



< 최 재 영 >



< 강 성 원 >



< 정 지 영 >