

## 맞대기 용접 시편의 백플레이트에 따른 피로강도 평가

도현덕\*, 강성원\*, 한주호\*, 김성민\*, 김명현†\*

부산대학교 공과대학 조선해양공학과\*

### Fatigue Assessment in accordance with Back Plate of Butt Welded Specimens

Hyun-Duk Do\*, Sung-Won Kang\*, Ju-Ho Han\*, Seong-Min Kim\* and Myung-Hyun Kim†\*

Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.\*

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the fatigue strength in accordance with back plate of butt welded specimens. Fatigue life of butt welded specimens was presented for determining the effect of back plates in terms of fatigue strength. As a results, fatigue strength of butt welded specimens with steel back plate show a decrease as compared against the butt welded specimens with ceramic back plate. Compared with the fatigue strength with respect to the existence of steel back plate, the specimens without back plate were much higher than the specimens with back plate.

※Keywords: Fatigue strength(피로 강도), Back plate(백플레이트), CMT(시엠티 용접)

#### 1. 서론

용접은 금속 구조물의 접합 방법 중 작업이 용이하고 신뢰성 있는 접합법으로써 매우 유용한 수단이지만 설계가 어렵고 건전성의 평가가 어렵다는 단점이 있다(Goo et al. 2004). 용접부의 건전성 평가는 유한요소해석 및 실험적 방법을 통하여 이루어지고 있다. 특히 용접부의 건전성 평가 중

피로수명 평가는 구조물 접합의 대부분이 용접으로 이루어진 선박의 설계 건전성과 잔존수명을 예측하기 위한 중요한 평가수단이라고 할 수 있다. 용접 구조물에서 용접이음부의 피로수명은 용접 시 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 용접결함, 잔류응력, 응력집중에 의해 용접 모재에 비해 저하될 수 밖에 없으나, 잔류응력과 용접결함은 작업 공정 중 제어할 수 있는 요소이지만, 용접구조물에 외력이 반복적으로 작용해 형상불연속부 및 용접도우부에 발생하는 응력집중은 용접 구조물의 피로수명에 상당한 영향을 끼친다. 한편 선박의

접수일: 2008년 12월 3일, 승인일: 2009년 1월 9일

†교신저자: kimm@pusan.ac.kr, 051-510-2486

외판과 같은 후판 용접시 완전 용입을 위해 가우징을 하게 되는데 가우징의 경우 작업능률이 저하될 뿐 아니라 용접사의 건강에도 악영향을 끼치고, 선박과 같이 대형화 되고, 구조물 내에 보강재가 많은 구조물의 경우 가우징이 어렵다는 단점이 있다(Nam et al. 2005). 이러한 이유 때문에 가우징을 대신해 용접시 깊은 용입을 가능하게 하고 용락을 방지하는 백플레이트를 채용한 맞대기 용접을 하는 경우가 많아지고 있다. 그러나 백플레이트를 채용할 경우 백플레이트를 채용하지 않았을 경우보다 높은 응력집중이 발생하여 피로수명이 저하되는 경향을 보인다(Han et al. 2005).

이에 본 연구에서는 steel back plate 용접 시편, ceramic back plate 용접 시편, 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접 시편의 피로강도를 서로 비교 평가해 보았다.

**2. 실험 방법 및 결과**

**2.1 피로 실험 시편 제작**

본 연구에 사용한 모재는 용접구조용 SM490A 강재이며 기계적 특성 및 화학 성분 조성은 Table 1 및 Table 2 와 같다.

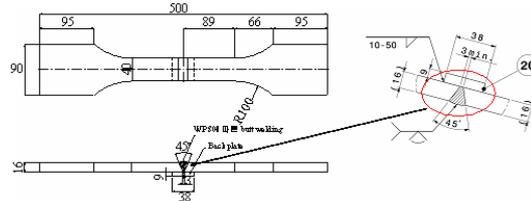
본 연구에서 맞대기 용접 이음부에 대한 피로실험을 수행하기 위하여 Fig. 1 에 보인 바와 같이 맞대기 용접 시편을 설계하였다. 시편은 SM490A 판재를 길이 500mm, 폭 40mm, 두께 16mm, root face 3mm, groove angle 45° 로 시편을 설계하였다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 는 설계 도면을 바탕으로 제작된 시편의 사진이고, Fig. 2 는 steel back plate 용접 시편이다. Fig. 3 은 ceramic back plate 용접 시편이고, Fig. 4 는 백플레이트를 채용하지 않은 CMT(cold metal transfer) 프로세스로 초층 용접한 시편이다.

**Table 1** Mechanical properties of SM490A

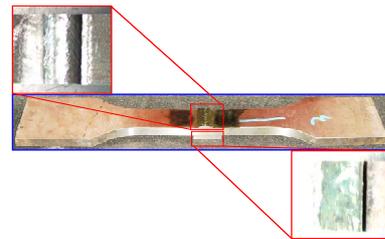
Y.P.[MPa]	T.S. [MPa]	Elong. [%]
315	490	19

**Table 2** Chemical compositions of SM490A (Unit: %)

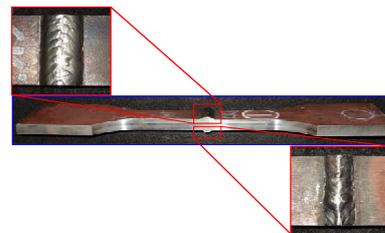
C	Si	Mn	P	S
0.2.	0.55	1.60	0.035	0.035



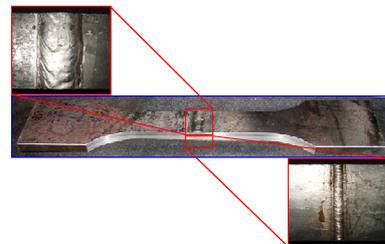
**Fig. 1** Design of butt welded specimen



**Fig. 2** Butt welded specimen with steel back plate



**Fig. 3** Butt welded specimen with ceramic back plate



**Fig. 4** Butt welded specimen without back plate

본 연구에서 백플레이트를 채용한 시편은 GMAW 용접법으로 ER70S-G 1.4mm 사용하여 아래보기 자세로 용접을 실시해 제작하였고, 백플레이트를 채용하지 않은 시편의 경우 초층 용접 시 ER70S-G 1.2mm 사용한 것 외에는 다른 시편과 동일한 방법으로 제작되었다. 시편 종류별 용접 조건은 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 과 같다.

Joint Preparation					Bead Sequence					
Pass No.	W/D Process	Filler Metal		W/D Position	Current	Welding Parameter			Interpass Temp.	
		AWS Class	Size (mm)		Type DC/AC	Ampere [A]	Volt [V]	Speed [CPM]	Heat Input [KJ/Cm]	
1	GMAW	ER70S-G	1.4	Flat	DC	280	24	20	20.1	10°
2	GMAW	*	1.4	*	DC	330	23	23	22.4	68°
3	GMAW	*	1.4	*	DC	330	23	26	19.8	108°
4	GMAW	*	1.4	*	DC	330	23	20	25.7	158°

Fig. 5 Welding condition of butt welded specimen with steel back plate

Joint Preparation					Bead Sequence					
Pass No.	W/D Process	Filler Metal		W/D Position	Current	Welding Parameter			Interpass Temp.	
		AWS Class	Size (mm)		Type DC/AC	Ampere [A]	Volt [V]	Speed [CPM]	Heat Input [KJ/Cm]	
1	GMAW	ER70S-G	1.4	1F	DC	230	21	15	19.3	17°
2	GMAW	*	1.4	1F	DC	330	26	22.7	22.6	79°
3	GMAW	*	1.4	1F	DC	330	26	25.4	20.2	138°
4	GMAW	*	1.4	1F	DC	330	26	20.4	25.2	170°

Fig. 6 Welding condition of butt welded specimen with ceramic back plate

Joint Preparation					Bead Sequence					
Pass No.	W/D Process	Filler Metal		W/D Position	Current	Welding Parameter			Interpass Temp.	
		AWS Class	Size (mm)		Type DC/AC	Ampere [A]	Volt [V]	Speed [CPM]	Heat Input [KJ/Cm]	
1	CMT	A5.18 ER70S-G	1.2	1G	DC	124	11.8	7.5	11.2	-
2	GMAW	*	1.4	*	DC	280	25.5	27.1	15.6	19°C
3	GMAW	*	1.4	*	DC	315	28	22.5	22.1	124°C
4	GMAW	*	1.4	*	DC	340	30.5	22.5	25	196°C

Fig. 7 Welding condition of butt welded specimen without back plate

맞대기 용접 시편의 백플레이트에 따른 피로강도 평가

2.2 정하중 시험

피로실험에 앞서, 각 시편의 용접토우부의 핫스팟 응력을 측정하고 용접 시편에 작용하는 공칭응력을 측정하기 위해 정하중 시험을 실시하였다. 정하중 시험의 경우 용접 시편에 작용하는 응력이 적합하게 부하되는지 여부를 확인하기 위해 백플레이트 유무에 따라 Fig. 8, Fig. 9 와 같이 적절한 위치에 단축 5mm 스트레인 게이지를 시편의 앞면 및 뒷면에 각각 부착하였고, 하중을 단계적으로 증가시키면서 측정된 응력값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 계속하였다. Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 는 각 시편 종류별 정하중 실험 데이터를 토대로 외삽하여 핫스팟 응력을 구한 뒤 응력집중계수를 계산하였다. 그 결과 steel back plate 용접 시편이 가장 높은 응력집중계수를 보였고, 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접시편이 가장 작은 응력집중계수를 보였다.

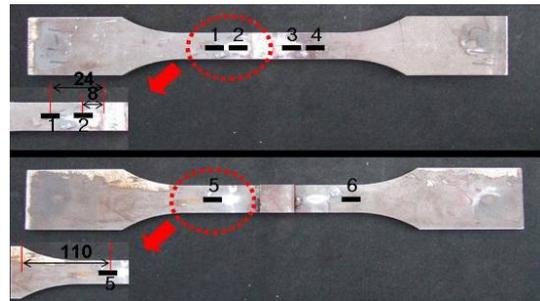


Fig. 8 Strain gauge locations of butt welded specimen with back plate

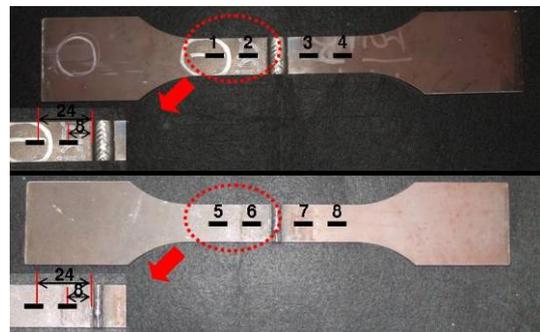


Fig. 9 Strain gauge locations of butt welded specimen without back plate

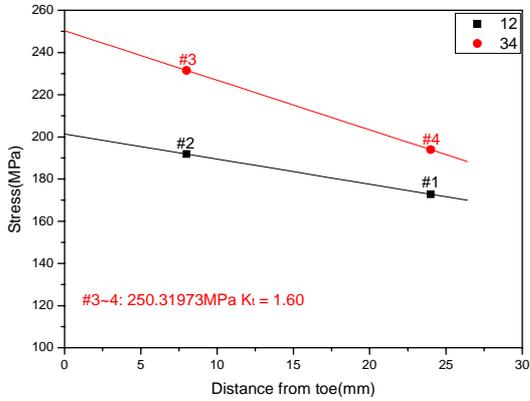


Fig. 10 Hot spot stress of butt welded specimen with steel back plate

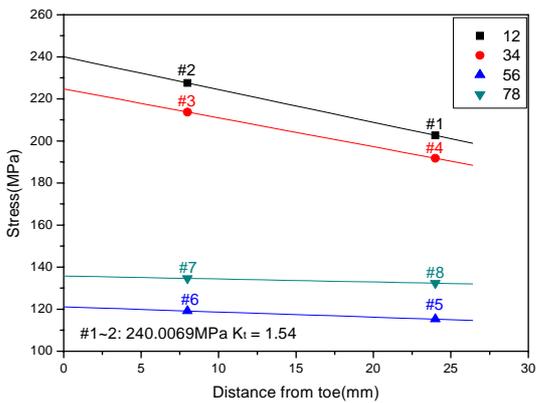


Fig. 11 Hot spot stress of butt welded specimen with ceramic back plate

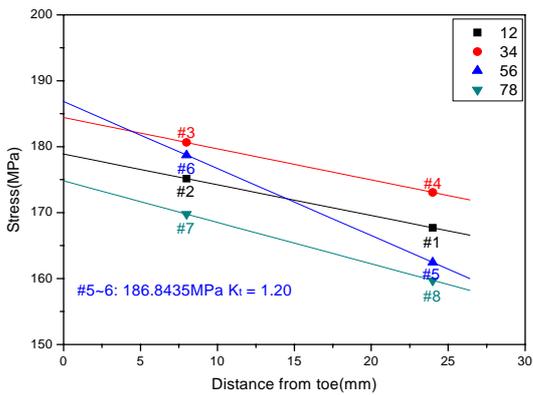


Fig. 12 Hot spot stress of butt welded specimen without back plate

### 2.3 응력집중계수(Stress Concentration Factor)

본 연구에서는 Fig. 13 과 같이 치과용 실리 콘을 사용하여 용접도우부의 곡률반경( $\rho$ )과 프랭크각( $\theta$ )을 측정하여 각 시편 종류별 크랙이 시작된 부분의 비드 형상에 따른 응력집중계수를 식 (1)에서 계산하여 Table 3 에 나타내었다(Lee et al. 1998).

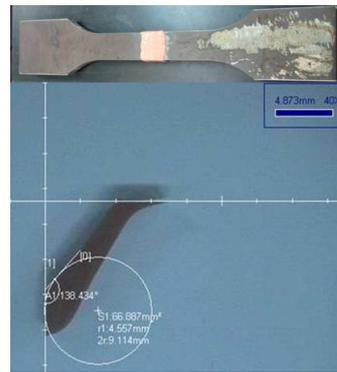
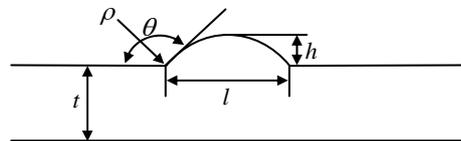


Fig. 13 Measurement method of weld toe contour



$$K_t = 1 + f(\theta)(\alpha_1 - 1) \quad (1)$$

여기서

$$\alpha_1 = 1 + c \left[ \left( \frac{1}{2.8\Delta_1 - 2} \right) \cdot \frac{h}{\rho} \right]^\beta$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp[-0.90\sqrt{\Delta_2}(\pi - \theta)]}{1 - \exp(-0.45\pi\sqrt{\Delta_2})}$$

$$\beta = 0.65 - 0.1 \exp\left(\frac{-0.63l}{t}\right)$$

$$c = 1 - 0.48 \exp\left(\frac{-0.74l}{t}\right)$$

$$\Delta_1 = (2h + t)/t$$

$$\Delta_2 = \frac{\Delta_1}{2}$$

**Table 3**  $\rho$ ,  $\theta$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $K_t$  of the crack initiation side

Specimen	Mean				
	$\rho$	$\theta$	$h$	$l$	$K_t$
Steel backplate	0.34	145.45	3.26	20.56	2.13
Ceramic backplate	0.65	144.90	3.56	22.90	1.77
CMT	0.91	156.43	2.06	20.35	1.45

## 2.4 피로실험

본 연구에 사용된 피로 시험기는 최대용량 50ton 의 축인장/압축 유압 서보 피로 시험기 (Instron Model 8803)를 사용하였다. 피로 시험기의 주요 제원 및 사진은 Table 4 및 Fig. 14 에 각각 나타내었다. 피로 실험을 실시하기 전, 각각의 용접 시편에 대한 공칭응력을 계산하기 위하여 해당 용접부의 실제 단면적을 측정하였고, 하중 제어 방식으로 피로 실험을 수행하였다. 피로 하중의 파형은 정현파이며, 응력비는 완전 편진 상태가 되도록 최대 하중과 최저 하중을 설정하였다. 하중 반복 속도는 각 시편 별 응력 대를 고려하여 4~10 Hz 범위에서 실험을 수행하였고, 피로 한도는  $2 \times 10^6$  cycles 로 고려하여 실험을 수행하였다. 피로실험 조건은 Table 5 에 정리하여 나타내었다.

**Table 4** Fatigue test machine performance

Maximum load capacity	$\pm 50$ ton
Maximum displacement	$\pm 120$ mm
Frequency range	0.001~50Hz
Control mode	Disp. / Elong. / Load

**Table 5** Fatigue test condition

Load pattern	Sine wave
Frequency	4~10Hz
Stress ratio	0.1

**Fig. 14** Fatigue test machine(Instron Model 8803)

## 2.5 피로실험 결과

피로실험은 세 가지 시험편 총 59 개의 시편에 대해 실험을 수행하였는데 steel back plate 용접 시편의 경우 총 21 개의 시편, ceramic back plate 용접 시편의 경우 총 20 개의 시편, 백플레이트를 채용하지 않은 맞대기 용접 시편의 경우 총 18 개의 시편에 대해 피로실험을 수행하였다. 피로실험을 수행한 결과 백플레이트를 채용한 시험편의 경우 모든 시험편이 토우파괴가 일어났고, 백플레이트를 채용하지 않은 시험편의 경우 백플레이트를 채용한 경우와 달리 파괴양상이 불규칙하게 일어났고 그 결과를 Fig. 15 에 나타내었다.

Fig. 16 은 각 시편의 종류별 S-N 비교 선도를 나타내었다. 각 시편의 종류별 S-N 선도를 비교해 본 결과 응력집중계수가 작게 나타난 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접 시편이 가장 좋은 피로강도를 보였고, 응력집중계수가 가장 높게 나타난 steel back plate 용접 시험편의 경우 가장 피로강도가 낮은 것으로 나타났다. Ceramic back plate 용접시험편의 경우 steel back plate 용접 시편보다는 나은 피로강도를 보였으나 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접 시험편보다는 낮은 피로강도를 보였다. 세 종류의 시험편 모두 IIW(International Institute of Welding)에서 제시하는 피로선도를 만족하였다(IIW 2004).

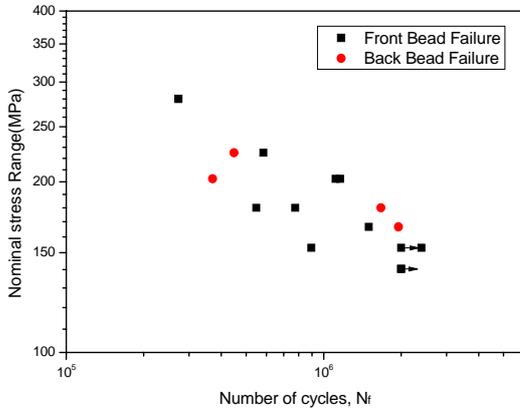


Fig. 15 Diverse aspects of fatigue fracture of butt welded specimen without back plate

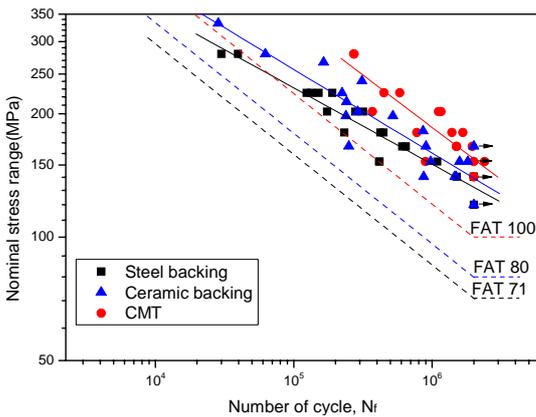


Fig. 16 S-N curve of butt welded specimens

### 3. 결론

본 연구에서는 SM490A 용접구조용 강재의 맞대기 용접 시편에 대하여 백플레이트를 채용한 steel back plate 용접 시편, ceramic back plate 용접 시편과 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접 시편의 피로강도를 비교 평가해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 백플레이트를 채용할 경우 steel back plate 용접 시편보다는 ceramic back plate 용접 시편이 더 좋은 피로강도를 가진다. 이는 steel back

plate 용접 시편의 경우 백플레이트에 의한 응력집중이 ceramic back plate 용접 시편보다 더 크게 발생하여 피로강도가 저하되는 것으로 판단된다.

2) 백플레이트를 채용하지 않은 CMT 초층 용접 시편이 백플레이트를 채용한 용접 시편보다 피로강도가 좋게 나타났다. 이는 백플레이트에 의한 응력집중이 발생하지 않아 피로강도가 향상된 것으로 판단된다.

3) 본 연구 결과를 종합해 볼 때 맞대기 용접 시 백플레이트를 채용할 경우 steel back plate 보다는 ceramic back plate 를 채용하는 것이 구조물의 피로강도 측면에서 봤을 때 더 좋을 것으로 판단되며, 백플레이트를 채용하지 않을 경우 백플레이트를 채용할 경우보다 더 좋은 피로강도를 갖을 것으로 판단된다. 따라서 우수한 기대수명과 피로강도가 요구되는 금속 구조물의 경우 백플레이트를 채용하지 않는 것이 더 좋을 것으로 판단된다.

### 후 기

본 논문은 산자부 중기거점 및 첨단 조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었습니다. 위 기관의 후원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Goo, B.C., Choi, B.I. and Kim, J.H., 2004, "Finite Element Analysis of the Stress Concentrations for Butt Welded Joints," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 22, No. 5, pp. 59-64.
- Han, J.H., Kang, S.W., Pyun, J.H., Kim, S.M. and Kim, M.H., 2008, "Fatigue Assessment of Butt Welded Specimens with Backplates," Proceedings of the 2008 Spring Annual Meeting of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, pp. 1975-1979.
- International Institute of Welding, 2004, "Recommendation for Fatigue Design of

Welded Joints and Components,” IIW documents XIII-1965-03/XV-1127-03

- Lee, H.W., Shin, Y.T., Park, J.U. and Suk, H.G., 1998, “ A Study on Metallurgical Properties and Fatigue Strength depending on Bead Height in SAW Butt Joints,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No. 3, pp. 62-70.
- Nam, S.K., Jang, T.W., Yun, D.R., Han, J.S. and Sun, H.S., 2005, “ Effect of Ni content on mechanical properties of deposited weld metal by FCAW,” Abstracts of the 2005 Spring Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, Vol. 44, pp. 118-120.



< 도 현 덕 > < 강 성 원 > < 한 주 호 >



< 김 성 민 > < 김 명 현 >