

용접부 형상을 고려한 피로특성 평가

An assessment of fatigue properties with respect to weld profiles

서정관*, 정장영**, 강성원**, 백점기**, 이제명**

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원

** 부산대학교 조선해양공학과

1. 서 론

선박, 해양구조물, 자동차, 항공기, 교량 등과 같은 강구조물들은 주어진 설계수명동안 정적인 하중 뿐만 아니라 충격, 피로, 비틀림 등과 같은 다양한 환경조건하에서도 견딜 수 있도록 설계·제작되어야 한다.

특히, 강구조물의 특성상 각종 연결부의 제작을 위해 사용되는 용접과 관련하여 용접부 피로 문제와 피로강도향상을 위한 방법론에 대한 연구가 많이 수행되고 있다^{[1]-[4]}. 실제 용접 구조물에 반복 피로하중이 작용하는 경우의 피로수명에는 용접 비드의 형상, 작용하중의 방향 및 크기, 용접 잔류응력, 언더컷 등이 큰 영향을 미친다. 이러한 요인들을 제거하거나 완화시키기 위한 방법으로서, 잔류응력완화법, Dressing 법, 용접부 형상변화법 등이 대표적이며, 일부는 실제의 용접부를 대상으로 적용한 결과, 피로강도의 향상 효과를 가져올 수 있음이 확인되었다^[2].

그러나, 시공에 의한 피로강도 개선법으로 크게 분류할 수 있는 이러한 방법들은 대부분 용접 완료 후에 재가공하는 방법이기 때문에, 용접공수 및 생산성의 저하를 초래할 수 밖에 없다.

따라서, 본 연구에서는 피로수명에 큰 영향을 미치는 요소인 용접 비드형상의 변화에 따른 필릿 용접 판구조물의 정적 및 피로강도를 정량적으로 분석하여, 강구조물 제작과정에서 적절한 비드형상을 적용할 수 있는 지침을 마련하고자 한다.

2. 피로특성평가

2.1 시험편 및 비드형상의 분류

Fig.1 은 시험편 형상을 나타내고 있으며 이 시험편을 이용하여 정적 강도시험, 피로강도시험을 수행하였다.

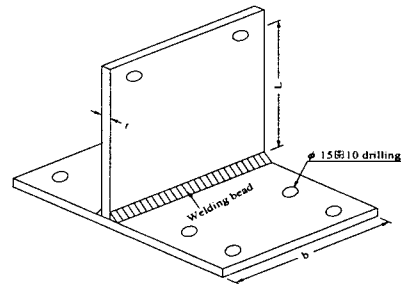


Fig. 1 A schematic of the test specimen

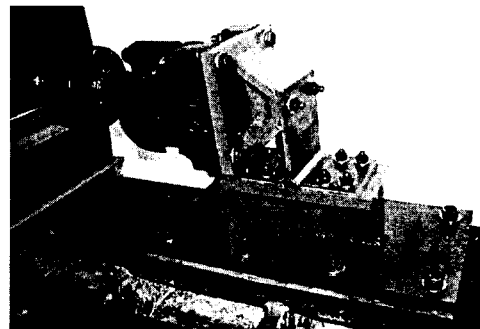


Photo. 1 Test apparatus

시험편의 필릿용접부 비드형상을, 오목형, 볼록형, 표준형으로 분류하였으며, 이들 분류는 용접부의 다리길이(*leg length*)에 대한 목두께(*throat thickness*)의 크기를 기준으로 판정하였다. 즉,

$$c = \frac{\sqrt{2}l}{2} = 0.707l \quad (1)$$

여기서, *c*=목두께(mm), *l*=다리길이(mm)이다.

구체적으로는, (1)식에서 주어진 다리길이에 대한 목두께의 값이 5% 이상의 크기이면 볼록(*convex*)형, ±5% 이내이면 표준(*triangular*)형, 5% 이하이면 오목(*concave*)형으로 정의하였다. 이들 세가지 비드형상을 인위적으로 만들기 위해 사용한 용접조건을 Table 1에 정리한다.

Table 1 Welding conditions applied in test specimen

Bead profile	Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Weaving
Convex	SF-71	180~190	19	18	×
Triangular	SF-71	180~190	24	18	×
Concave	SF-71	180~190	26	21	○

2.2 정적강도시험

실험은 Photo. 1에 보이는 것처럼, MTS servo-controlled hydraulic testing machine을 이용하여 수행하였으며, Fig.2 에 보이듯이 정적하중을 가하는 경우는 비드형상에 관계없이 하중-변형량관계가 거의 동일함을 확인할 수 있었다.

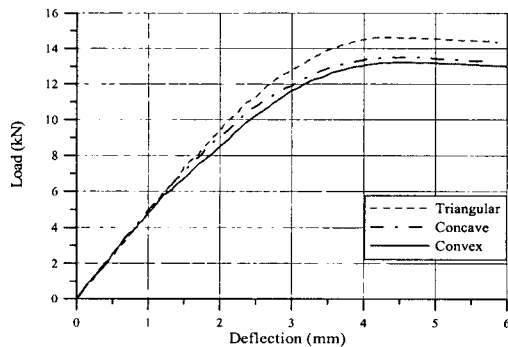


Fig. 2 Load-deflection curves with respect to bead profile

2.3 피로강도특성

정적시험에서와 동일한 시험장비를 이용하여, 6~11Hz의 속도로 정현파 반복하중을 가하여 피로강도를 평가하였다. 용접비드 형상만 변화시킨 동일형상의 시험편을 대상으로, 응력비 $R=0$ (용접부는 반복 인장응력)의 편진하중을 가하였다.

피로수명은 표면균열이 폭방향으로 진전하여 시험편이 완전히 파단한 하중 반복수로 정의하였다. 이 경우 대략 균열 진전깊이는 판두께의 40% 정도로 되었다. Table 2에 10개의 시험편을 이용하여 수행한 시험결과를 정리한다.

Fig. 3에서는, 비드형상에 따른 피로강도특성을 S-N선도를 이용하여 정리하고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 비드형상이 블록에서 오목형으로 됨에 따라 피로수명은 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Welding conditions applied in test specimen

Specimen No.	Leg length (mm)	Throat thickness (mm)	Toe radius(ρ) (mm)	Bead profile
CV-static	7.12	6.10	—	convex
CV-1	6.32	5.66	0.29	convex
CV-2	7.99	6.22	0.32	convex
CV-3	6.27	5.52	0.26	convex
CV-4	6.73	5.90	0.29	convex
TR-static	6.93	4.90	—	triangular
TR-1	7.26	4.93	0.55	triangular
TR-2	6.28	4.51	0.60	triangular
TR-3	6.62	4.65	0.51	triangular
CC-static	6.61	4.28	—	concave
CC-1	7.53	4.30	1.15	concave
CC-2	6.70	4.19	1.19	concave
CC-3	6.48	4.18	1.11	concave

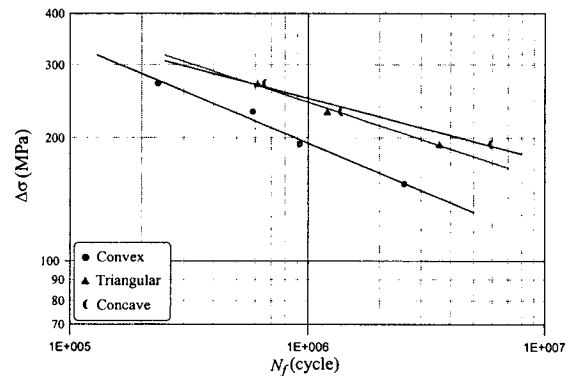


Fig. 3 S-N curves for the test specimen under various bead profiles

피로시험결과를 바탕으로 회귀분석을 통해 얻어진 S-N 관계식은 다음과 같다.

Convex : $\log(N_f) = 35.750 - 4.167 \log(\Delta\sigma)$

Triangular : $\log(N_f) = 43.037 - 4.319 \log(\Delta\sigma)$

Concave : $\log(N_f) = 50.846 - 6.711 \log(\Delta\sigma)$ (2)

이상의 관계는 용접부의 형상이나 재질특성에 따라 다소 차이를 가질 수 있으나, (2)식과 같은 관계를 바탕으로 용접부 형상선택과 피로강도 향상용 가이드라인 제시를 위한 정량적 기준을 얻을 수 있으리라 사료된다.

2.4 피로균열진전특성

피로시험의 균열 파괴면의 양상을 보면, 전술한 바와 같이 편진 인장응력을 가하였기 때문에, Photo 2와 같이 용접 토우부에서 균열이 시작되어 판의 두께 방향으로 진전하였다.

Fig. 4와 5는 균열진전특징 및 균열발생과 S-N관계를 도시하고 있다. 반복수의 증가에 따라 표면 균열의 길이는 증가하게 되고 마침내 파괴에 이르게 된다. 초기 균열은 육안으로 확인할 수 있는 길이(약 5mm 정도)를 기준으로 하였다.

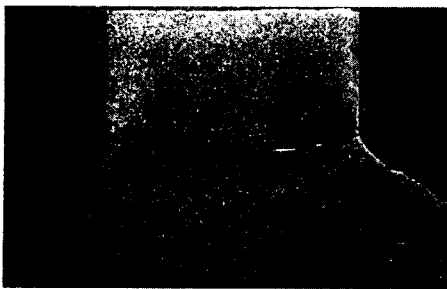


Photo 2 A photograph of crack propagation

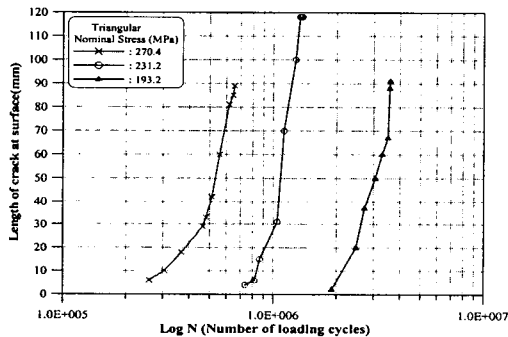


Fig. 4 Cycle to failure versus toe radius($\Delta \sigma = 270.4\text{MPa}$)

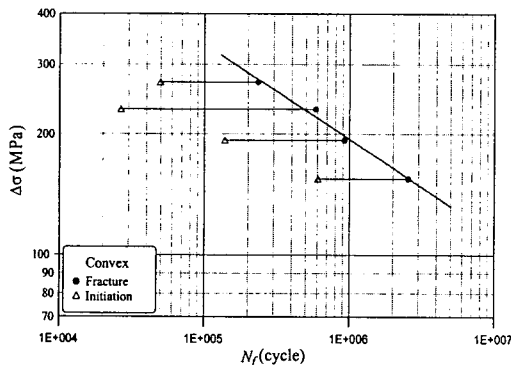


Fig. 5 Crack initiation and fatigue fracture (Convex bead type)

Fig. 5에는 토우반경과 피로수명의 관계를 보이고 있다. 곡률반경(ρ)이 작을수록 즉, 비드형상이 볼록형이 될 수록 피로수명은 단축되고, 곡률반경이 클수록 피로수명은 증가함을 알 수 있다.

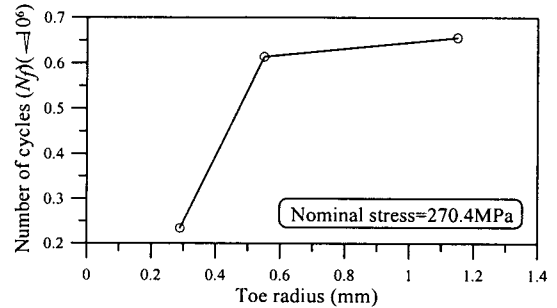


Fig. 5 Cycle to failure versus toe radius($\Delta \sigma = 270.4\text{MPa}$)

3. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 필릿용접 강구조물이 정하중을 받는 경우는, 비드형상에 무관하게 강도는 거의 일정하지만, 반복하중하의 피로수명은 현저한 차이가 있음을 확인하였다.
- 2) 용접부 비드형상 뿐만 아니라, 용접 토우부의 균일성 및 토우 반경 또한 피로강도 수명에 큰 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 향후연구과제로서, 균열진전거동에 대한 정량적인 연구, 각종 수치해석을 통한 설계지원 간이식제안 등을 들 수 있으며, 이들 연구결과들을 이용하여 피로강도 향상을 위한 설계 지침을 마련할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. F.R. Mashiri, X.L. Zhao, P. Grundy : Effects of weld profile and undercut on fatigue crack propagation life of thin-walled cruciform joint, Thin-Walled Structures, 39, 2001, 261-285.
2. M. Matoba & K. Inoue : Fatigue strength of hull in use of high tensile steel, 일본조선학회논문집, 156, 1984, 450-457.
3. 엄동석, 강성원, 이태훈, 이혜우, 조수형 : SM 490A 강으로 제작된 T형 편면용접이음재의 굽힘피로강도에 관한 연구, 대한용접학회지, 16-5, 1998, 478-485.
4. K. Iida : Brief summary of Japanese documents concerned with the improvement of fatigue strength of welded joints, IIW-XIII-867-77.