

ESPI System 을 이용하여 측정 한 국부 변형 률 이 저 사이클 피로 수명 에 미치는 영향 에 관한 연구

김경수^{†*}, 김기성*, 권정민*, 박성모*, 김범일*

인하대학교 선박해양공학과*

Effect of Local Strain on Low Cycle Fatigue using ESPI System

Kyung-Su Kim^{†*}, Ki-Sung Kim*, Jung-Min Kwon*, Seong-Mo Park* and Beom-Il Kim*

Dept. of Naval Architecture Engineering, Inha University*

Abstract

Low cycle fatigue cracks are mainly detected at discontinuous welded locations with high stresses under repeated cyclic static loads due to cargo loading and unloading. Theoretical and analytical methods have been used for evaluation of local stress and strain which have an effect on a prediction of fatigue life, but those have difficulties of considering stress concentration at notched location and complicated material behavior of welded joint or heat affected zone. Electronic speckle pattern interferometry(ESPI) system is nondestructive and non-contact measurement system which can get the relatively accurate full field strain at critical positions such as welded zone and structural discontinuous location. In this study, local strain was measured on welded cruciform joint by ESPI system and then low cycle fatigue test was performed. Effect of local strain on low cycle fatigue life was examined by measured values using ESPI system. Moreover, experimental fatigue life was compared with established S-N curves using theoretical local strain and stress calculated by Neuber's rule.

※Keywords: ESPI system(전자스펙클패턴간섭시스템), Low cycle fatigue(LCF:저사이클 피로), Welded cruciform joint(용접된 십자형 조인트), Strain concentration factor(변형률 집중계수), Neuber's rule(Neuber 법칙)

접수일: 2005년 10월 21일, 승인일: 2005년 12월 28일

†주저자, E-mail: ksukim@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7341

1. 서론

선체구조는 기하학적인 불연속부(notch)의 존재가 불가피한 상황이 자주 발생하며, 대형 용접구조물인 선체의 경우 용접부(welded joint), 특히 용접 토우부(weld toe)와 같은 형상 변화부, 이음부 등에서 응력집중으로 인해 응력조건이 상당히 위험한 수준까지 이르게 되어 피로파괴의 가능성이 높아진다. 운항중의 선박에서 다수의 저사이클 피로 손상사례가 보고 된 후 각 선급 및 선주들의 저사이클 피로 강도에 대한 관심이 커지고 있다. 현재 피로 수명 평가 과정에 사용하는 S-N 선도는 고사이클 피로 영역에 해당하는 것이어서 화물의 적, 하역시 높은 응력이 발생하는 부위에서는 S-N 선도를 이용하여 피로손상을 예측할 수 없으므로 저사이클 피로에 대한 평가가 필요하다(Heo et al. 2004) 또한 저사이클의 피로 하중을 받게 되면 불연속부에서의 응력-변형률이 비선형적으로 거동하게 되므로 응력 집중부의 국부적인 상태를 고려한 적절한 피로 내구성 평가방법을 강구하여야 한다.

저사이클 피로 현상에 대해 조상명과 Horikawa(1991)는 박용재료에 대한 반복경화특성이 노치의 응력 및 변형을 진폭에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, JSME(1982)에서는 기계용 강재에 대한 저사이클 피로 편람을 만들었으나 국내의 조선 분야에서는 이에 대한 연구가 미비한 실정이며, 특히 용접부에서의 저사이클 피로 현상을 규명하기 위한 데이터가 매우 부족한 실정이다.

이러한 용접이음부의 응력집중을 추정하기 위해 강성원 등(1996)은 십자형 필렛 용접부의 응력 집중계수를 정량적으로 평가하였고, 조규남 등(1991)은 유한요소법을 이용하여 튜블러 조인트의 응력집중계수를 통해 피로강도 평가를 하는 등 많은 연구자들에 의해 응력 집중부의 실험적, 수치해석적 연구가 수행되어 왔다.

노치부의 저사이클 피로균열 발생수명 예측을 위해서 전통적으로 국부 변형률법이 사용되어 왔다. 국부응력 및 변형률을 예측하는 방법으로 Neuber's rule 과 Glinka's 등가 변형을 에너지 밀

도법(Equivalent Strain Density rule, ESED)이 가장 보편적이며, 간단하게 노치부의 변형률을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 방법은 응력과 변형률 성분이 단축일 때만 적용될 뿐만 아니라, 작용하중이 단축이더라도 구속효과로 인해 다축 상태의 응력과 변형률을 유발하게 되므로 실제 선체에는 적용하기 힘들다는 약점을 가지고 있다(임재용 등 2004).

ESPI system 은 비접촉 방식으로 스트레인 게이지와 달리 일정 영역을 비교적 정확히 측정할 수 있다는 장점이 있다. ESPI system 을 이용하여 김경수 등(2003)은 노치 선단에서 발생하는 과대하중으로 인한 소성영역의 크기를 측정하여 균열 지연효과에 대해 설명하였고, Toubal et al.(2005)은 복합재료의 홀 주위의 변형을 측정하여 응력 집중과 변형을 집중을 구하여 Lekhnitskii 의 방법과 비교하는 등 ESPI system 이 국부적인 재료거동을 평가하는데 효과적임을 실험적으로 검증하였다.

본 연구에서는 선박용 강재의 용접부에 대해 국부 변형률이 저사이클 피로에 미치는 영향을 규명하기 위해 용접된 십자형 조인트의 용접부 끝단에서의 변형률을 ESPI system 으로 측정하여 피로 수명과 관계의 밝히고자 한다. 재료의 영향을 고려하기 위해 선박용 강재 A grade 와 AH36 을 모재로 한 십자형 용접시편에 대해 변형을 제어 하에서 저사이클 피로 시험을 수행하였으며, 피로 시험 중 ESPI system 으로 측정된 국부 변형률을 pseudo elastic stress 개념을 사용하여 기존 응력 기반으로 제안된 British standard 와 DNV 의 S-N curve 와 비교하였다.

2. 이론

2.1 Neuber's rule

고사이클 피로 영역에서 노치 선단의 응력 분포를 알 수 있는 방법 중 하나는 응력집중계수이다. 응력 집중 계수를 통해 공칭 응력 상태를 노치 응력으로 표현할 수 있다. 그러나 이러한 접근 방법은 노치선단에서 항복을 일으키기 전, 재료가 손수하게 탄성거동을 일으킬 때까지 유효하고 높은

응력을 받는 저사이클 피로 영역에서는 허용되지 않는다.

Neuber 는 탄소성 극부 응력에 대한 간단하고 효과적인 근사방법을 제안하였다. Neuber 는 특정 노치의 기하학적 형상을 분석하여 다음 관계를 유도하였다

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\epsilon \tag{1}$$

$$K_\sigma = \frac{\sigma}{S}, K_\epsilon = \frac{\epsilon}{e} \tag{2}$$

여기서 S 와 e 는 공칭응력과 변형률이고, σ 와 ϵ 는 노치 응력과 변형률이다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \tag{3}$$

노치선단의 탄소성 재료 거동은 Ramberg-Osgood 의 관계식으로 표현할 수 있다. K' 는 반복적 강도계수이고, n' 는 반복적 변형을 경화지수이다.

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 노치응력은 식(2)와 식(3)을 조합하여 구할 수 있다. 공칭 응력과 변형률 상태인 O(s,e)점에서 C($K_t\sigma, K_t\epsilon$)점으로 이동하고 Neuber 곡선을 따라 실제 노치에서 작용

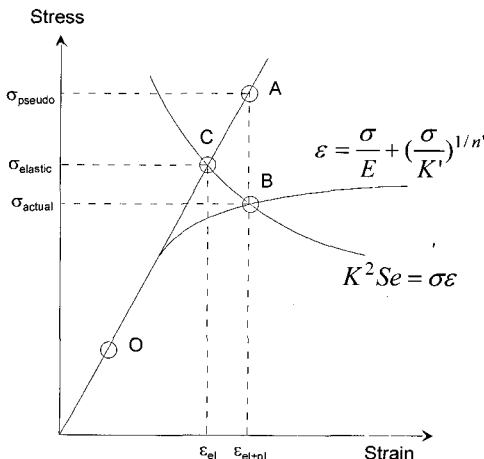


Fig. 1 Actual, equivalent elastic, pseudo stress

응력과 변형률인 B(σ, ϵ)점을 구할 수 있다. 따라서, 이들 식을 조합하여 다음의 관계를 얻을 수 있다(Heo et al. 2004).

$$\left[\frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'}\right]\sigma = \frac{(K_t S)^2}{E} \tag{4}$$

2.1 ESPI system

ESPI system 은 레이저의 간섭현상으로 생긴 위상차를 이용하여 시편 표면에 발생한 변위를 비접촉 방식으로 영역을 측정하는 장비이다. ESPI system 의 반사경에서 나온 레이저는 시편 표면에 반사된다. 반사된 레이저는 CCD 카메라에 의해서 측정되고, 이 때 이미지(fringe image)는 컴퓨터 내부에 저장된다.

이러한 과정은 시편에 하중이 작용하여 변형이 발생하기 전후에 2 번 이루어진다. 이들 2 개의 이미지를 비교하여 얻은 결과(subtraction correlation fringe image)를 이용하여 노치 선단 표면에서 발생한 변형률을 계산하게 된다(김경수 등 2003).

3. 사용재료 및 시험방법

3.1 시험 재료

선박용 강재 A grade 와 AH36 을 모재로 하여 Fig. 2 와 같은 기하학적 형상 갖는 시편을 사용하였고, 시편의 개수는 각각 5 개이다. 사용된 재료 A grade 와 AH36 그리고 weld metal 의 기계적 성질은 Table 1 과 2 에 보인 바와 같다.

3.2 시험 방법

본 연구에서는 상온의 대기 중에서 500kN 최대 하중과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구

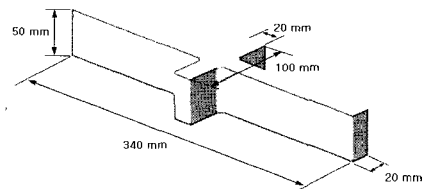


Fig. 2 Geometry of welded cruciform joint specimen (unit : mm)

Table 1 Monotonic test results for engineering steels (INHA Univ.2003)

Material	K' Cyclic Strength Coefficient	n' Cyclic Strength Coefficient
Base material (A-Grade)	582	0.111
Base Metal (AH36)	699.5	0.108

Table 2 Fatigue properties of the material (INHA Univ.2003)

Type	Young's Modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
Weld	208,161	547.604	603.229
Base Metal (A Grade)	200,033	264.281	440.793
Base Metal (AH36)	207,420	384.495	512.655

성하고 있는 유압서어보식 만능시험기를 이용하여 저사이클 피로 시험을 수행하고, 저사이클 시험 중 변형률 분포 측정이 가능한 ESPI system 을 이용하여 용접부의 변형률 측정을 수행하였다.

반복 응력-변형률 곡선을 통해 Neuber's rule 을 적용하기 위하여 응력-변형률이 안정화 되었다고 판단되는 100cycle 정도 하중이 가해진 후, Fig.3 과 같이 ESPI system 장비인 Microstar(Q-100)를 이용하여 십자형 조인트의 용접부 끝단에서 변형률을 측정한 후 다시 피로시험을 실시하였다.

주파수 0.05Hz, 응력비 -1, 0.4%~0.8%의 변형률에 대해 extensometer 를 이용하여 일정 진폭의 변형률 제어 피로 시험을 하였다.

Failure 를 결정하기 위해 하중 감소 기준을 사용하였다.

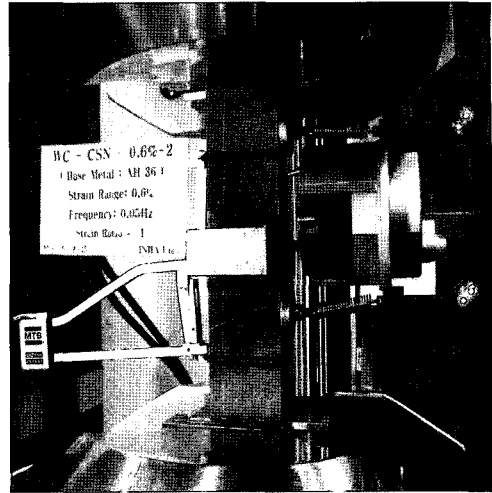


Fig. 3 Setting picture of cruciform with microstar

즉 일정 진폭의 변형률이 시편에 작용하는 동안 하중이 최대 응력의 약 50% 이하로 떨어지는 순간을 failure 로 정의하고 그 때의 cycle 을 피로 수명이라 정의 한다. 이 모든 과정은 ASTM E606-92(1998)를 따르고 있다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 용접부의 변형률 측정

변형률 제어 시험을 하는 동안 ESPI system 을 이용하여 재료 내부 거동을 볼 수 있으며, 변형으로 인해 표면에 발생하는 스파클 패턴들의 위상차를 이용하여 변형률을 구하게 된다.

Fig. 4 와 같이 저사이클 피로 실험 중에 응력이 안정화된 후 ESPI system 을 이용하여 십자형 조인트의 용접도우부의 변형률을 측정하였다.

각각의 가해진 공칭 변형률에 따른 용접부 주위의 변형률 분포를 측정할 수 있었으며 공작상의 문제나 제작과정에서 발생할 수 있는 각각 시편의 특성도 파악할 수 있었다.

용접부 끝단에서의 변형률은 Fig. 4 에 보인 결과들을 바탕으로 ESPI system 을 이용하여 구하였다.

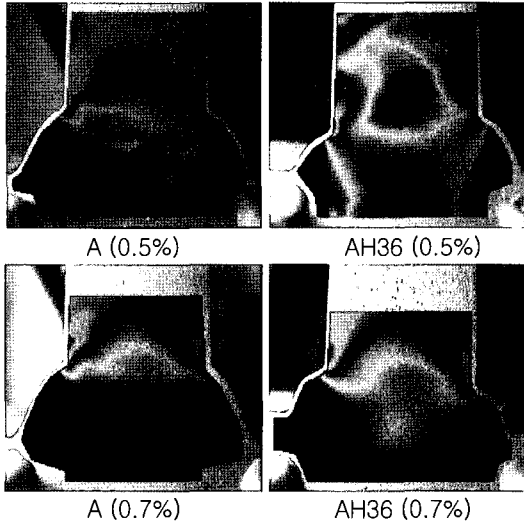


Fig. 4 Strain distribution on cruciform joint

4. 2 국부 변형률에 대한 비교

ESPI system 을 이용하여 cruciform 단면에서 최대 변형률이 발생하는 용접 토우부 양단을 직선으로 연결하여 Fig. 5 에 나타내었다.

A grade 와 AH36 을 모재로 하는 cruciform 에 대하여 변형을 측정과 피로시험을 수행한 결과 각각의 가해진 변형을 크기에 관계없이 용접 토우부에서 최대 변형률이 발생하였고, 단면 전체에 걸친 내부 재료 거동은 각각 약간의 차이를 보였으나 변형률은 모재와 관계 없이 비슷한 경향을 보였다.

용접부의 잔류응력과 용접 열에 의한 재료의 상 변화 등 복잡한 영향과 제작상의 문제들로 인해 각각 시편의 특성을 고려하여 피로 수명을 예측하는 것은 어려운 문제이다. 그러나 이러한 복잡한 조건들이 모두 고려된, ESPI system 으로 측정된 용접 토우부의 최대 변형률이 피로 균열과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

Fig. 5 에 나타난 최대 변형률이 측정된 부분에서 대부분의 피로균열이 발생하였다는 것이 이를 입증한다. 이것을 통하여 국부 변형률이 저사이클 피로 수명에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다.

노치부의 변형을 집중계수의 영향을 평가하기

위해 측정된 십자형 조인트 용접토우부의 변형률을 식(2)와 (4)를 이용하여 계산하면, 변형률 집중계수와 응력 집중계수는 Fig. 6 과 같이 나타난다.

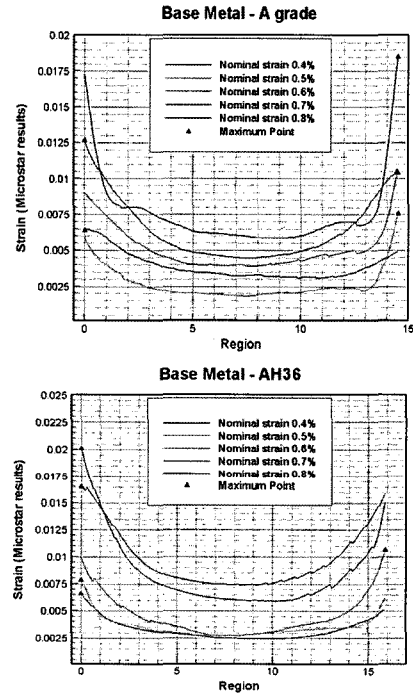


Fig. 5 Comparison of strain distribution according to applied strain for a grade and AH36

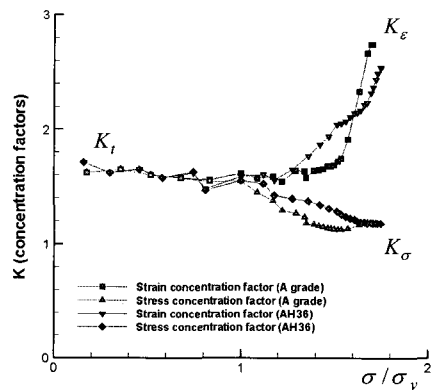


Fig. 6 Comparison of concentration factor K between a grade and AH36 at weld toe

A grade 와 AH36 의 측정 값을 바탕으로 계산한 결과 용접부에서 항복이 발생한 후 변형률 집중계수는 증가하는 반면, 응력 집중 계수는 감소한다. 탄성영역 내에서 이론적 응력 집중계수 K_t 는 A grade, AH36 모두 약 1.6 정도로 나타났다

4. 3 피로수명에 대한 비교

변형률-수명 곡선이 저사이클 피로 평가에 널리 쓰이고 있으나 몇몇 설계 코드들의 주요 설계 변수들은 노치 변형률 대신 pseudo elastic stress 개념을 사용하고 있다. Pseudo elastic stress 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{Pseudo} = E \epsilon_{notch} \tag{5}$$

Pseudo elastic stress 개념을 사용하는 코드들 중 일반적으로 많이 사용하는 BS5500 중 본 실험과 같은 형상의 용접된 플렛 조인트에 사용하는 F curve 를 저사이클 영역까지 단순 확장시켜 실험 결과를 비교하여 Fig. 7 에 나타내었다. BS5500 F curve 는 nominal stress 를 기반으로 하고 있고, DNV curve 는 Notch Stress 를 기반으로 하고 있다(BSI et al.1997)

십자형 용접 시편의 저사이클 피로 시험 결과 모재의 영향은 없는 것으로 판단되며, BS5500 F curve 와 거의 같은 경향을 보이고 있다.

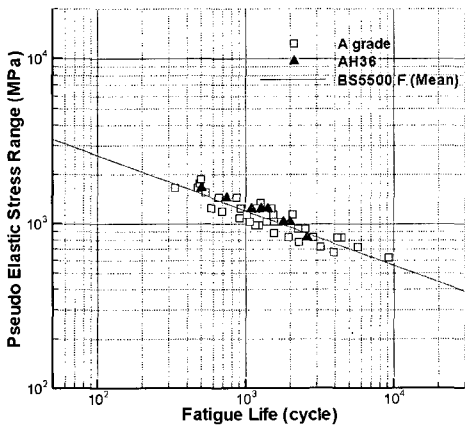


Fig. 7 Fatigue test results by pseudo stress

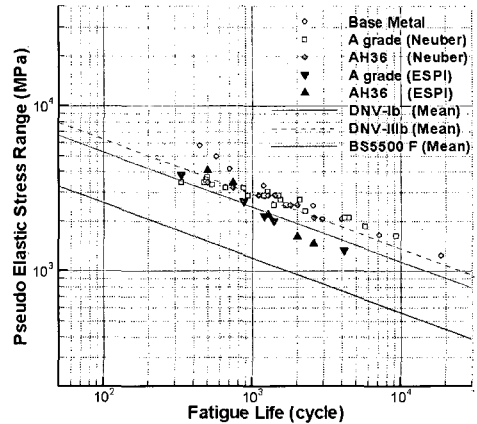


Fig. 8 Comparison between ESPI results and Neuber's rule

Neuber's rule 을 이용하여 계산한 노치 변형률과 ESPI system 을 이용하여 측정한 최대 국부 변형률을 pseudo stress 형태로 변환하여 노치 응력과 피로 수명을 함께 Fig. 8 에 나타내었다.

Neuber's rule 을 사용하는 과정에서 응력집중계수는 2.2 를 산정하였으며 재료 상수는 모재와 용접재의 반복 응력-변형률 곡선으로부터 구하였다(Heo et al. 2004).

용접된 조인트에 사용하는 DNV-Ib curve(Veritas 2003)를 저사이클 영역으로 확장시켜 비교한 결과, Neuber's rule 을 사용하여 이론적으로 구한 값보다 ESPI system 으로 측정된 결과와 잘 일치하였다. 용접부와 같은 부위는 유한요소해석이 복잡하고 절차가 까다롭다는 단점이 있는 반면, ESPI system 을 사용하면 원하는 부위의 국부 변형률을 측정하여 피로수명을 비교적 정확히 예측할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결론

- 1) ESPI system 을 이용하여 십자형조인트의 단면에 발생하는 변형률을 측정하고, 피로수명과 비교하였다.
- 2) 용접된 시편의 저사이클 피로 시험 결과 모재에 관계 없이 비슷한 수명을 보였다.

- 3) ESPI system 을 사용하여 측정된 최대 변형률 이 발생한 부분에서 대부분의 피로 균열이 발생하였다.
- 4) 노치선단의 작용 응력이 항복을 넘어서면 변형률 집중계수는 증가하나 응력 집중계수는 감소한다.
- 5) ESPI system 으로 측정된 결과와 DNV 에서 제안한 S-N curve 를 비교하였을 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다.
- 6) 비접촉식 측정장비인 ESPI system 을 이용하여 불연속부나 용접부 등의 변형률을 측정하면 공작상의 문제나 제작과정에서 발생할 수 있는 시편 특성을 고려하여 피로수명을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

후 기

이 논문은 2005 년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원 및 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구로(R05-2004-000-10615-0), 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 강성원, 하우일, 신종석, 제정신, 1996, “ 필렛용접 이음부의 응력집중계수에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 33 권, 제 3 호, pp. 1-7.
- 김경수, 신병천, 심천식, 박진영, 조형민, 2003, “ 과대하중이 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 45-53.
- 임재용, 홍성구, 이순복, 2004, “ 국부 변형률 근사를 이용한 원통형 노치시편의 피로균열 발생수명의 예측,” 대한기계학회 논문집 A 권, 제 28 권, 제 6 호, pp. 791-798.
- 조규남, 장영식, 하우일, 장창두, 강성준, 남동호, 1991, “ 해양 구조물 튜블러 조인트의 피로 해석에 대한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 28 권, 제 2 호, pp. 285-293.

- 조상영, Horikawa. K, 1991, “ 박용재료의 반복경화 및 피로특성에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 28 권, 제 1 호, pp. 108-116.
- ASTM E606-92, 1998, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, In: Annual book of ASTM standards, Philadelphia, ASTM, pp. 557-571.
- British Standard Institute, 1997, “ Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, BS5500,” Annex C
- Heo, J.H., Kang, J.K., Kim, Y.I., Yoo, I.S., Kim, K.S., Urm, H.S., 2004, “ A Study on the Design Guidance for Low Cycle Fatigue in the Ship Structure,” PRADS, pp. 782-789.
- JSME(Japan society of mechanical Engineers), 1982, The Fatigue Strength of Low Cycle, In: Design Manual IV about Ultimate Strength of Metallic Material, Tokyo.
- Toubal, L., Karama, M. and Lorrain, B., 2005, “ Stress Concentration in a Circular Hole in Composite Plate,” Composite Structures 68, pp. 31- 36.
- Veritas, N., 2003, Fatigue Assessment of Ship Structures, Classification Notes, No. 30.7



< 김 경 수 >



< 김 기 성 >



< 권 정 민 >



< 박 성 모 >



< 김 범 일 >