스톡 하중을 받는 용접 구조물의 피로 수명 평가에 대한 실험 연구

유창혁^{1,†} · 김경수¹ · 서용석² · 심용래³ · 하영수¹ · 유원호¹ · 최현준¹
인하대학교 조선해양공학과¹
삼성중공업(주)²
미국선급협회³

An Experimental Study on Fatigue Life Evaluation of Welded Joints under Storm Loading

Chang-Hyuk Yoo^{1,†} · Kyung-Su Kim¹ · Yong-Suk Suh² · Yong-Lae Shim³ · Yeong-Su Ha¹ · Won-Hyo You¹ · Hyun-Jun Choi¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Samsung Heavy Industries Co. Ltd.²
ABS, Houston, USA³

Abstract

In this paper, fatigue tests are conducted for the specimens with longitudinal and transverse attachment under variable amplitude axial loading based on storm model. Considered loadings include repeated single storm, 6 or 8 storms randomly, and storms including calm sea condition while the mean stress and the maximum stress of loadings are changed. The effect of three variables are investigated; root mean square(RMS) value of stress amplitude, mean stress shift and maximum stress, which can characterize storm loading on fatigue life. In addition, experiments including calm sea loading are also carried out to investigate the effect of calm sea state. Test results are evaluated and compared with DNV-CN2005 and Matsuoka's method for the estimation of crack initiation and propagation life. To verify the validity of the criteria, the measured crack initiation lives are compared with the specific crack length 15mm, which are calculated with beach marks.

Keywords : Storm loading(스톡 하중), Welded joint(용접 이음부), Crack initiation life(균열개시수명), Fatigue life evaluation(피로수명평가)

1. 서론

최근 선박이 북해와 같은 극한 환경에서 운항 할 수 있도록 설계 기준이 강화되고 있으며 또한 FPSO(Floating Production Storage & Offloading)와 같은 대형 해양 구조물의 경우, 피항 시 입는 경제적 손실이 막대하기 때문에 가능한 한 지정된 장소에서 운용 기간 동안 지속적으로 원유를 생산해야 한다. 따라서, 폭풍 상태와 잔잔한 파의 하중 이력을 모두 고려한 극한 환경 하에서의 피로 수명이 선박 및 해양 구조물의 피로 설계에 반영되어야 한다. 그러나 기존의 피로 수명 평가 법은 Miner (1945)가 제안한 선형 누적 손상 법칙의 가정에 기반 하기 때문에 비교적 온건한 해상 조건에 대하여 그 결과가 실제 수명과는 잘 일치하지만 스톡과 같은 높은 변동 하중이 작용하는 경우에 실제 피로 수명과 차이가 있으며 이에 대한 새로운 평가법이 요구되어진다.

이와 관련하여 Tomita, et al.(1992,1995)은 선박의 피로 강도

평가에 영향을 주는 스톡 모델에 대한 연구를 수행 하였고, Tomita, et al.(2004)과 Osawa, et al.(2006)은 스톡 모델을 기반으로 한 스톡 하중과 Wave scatter diagram으로부터 스톡 모델을 생성하는 방법을 제시하였다. Matsuoka, et al.(2000)은 구조물의 기하학적 형상 또는 용접부에 의한 구조적 불연속점에 발생하는 구조적 응력 집중과 잔류 응력을 고려한 등가 응력을 산출하여 Miner's rule을 기반으로 변동 하중 하에서의 피로 수명 계산 방법을 제안하였고 DNV (2008)은 구조물의 피로 설계에 관한 총체적인 기준을 포함하고 있다. 또한, Kim, et al.(2003, 2008, 2011)은 과대 하중이 구조물의 피로 균열 수명에 미치는 영향, 선체 용접부의 균열 진전 및 피로 수명 예측에 관한 연구 및 변동 하중 하에서 잔류 응력을 고려한 용접부의 잔존 피로 수명 예측에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 실제 해상 상태가 고려된 하중 이력을 가지고 선박 및 해양 구조물에서 피로 손상이 가장 빈번히 보고되는 구조 부재를 대상으로 피로 실험을 수행하였다. 5% Strain drop 방

법에 의한 초기 수명과 파단 수명을 보기 위해 피로 실험을 수행한 후, 시험편 형상에 의한 용접부의 응력 집중 효과와 평균 응력 효과를 고려할 수 있는 기존의 DNV rule에 의한 방법과 용접에 의한 잔류 응력의 영향을 고려할 수 있는 Matsuoka, et al.(2000)의 피로 수명 계산 방법들의 유효성을 검증하고 실제 해상 상태를 고려한 스톱 하중 하에서의 피로 특성을 분석하였다.

2. 피로 실험

2.1 시험편 형상 및 재료 물성치

시험편은 선박 및 해양 구조물의 부재로 널리 사용되는 강재인 연강(Mild steel)과 고장력강(High tensile steel)을 대상으로 실험을 수행하였다. 연강은 Longitudinal attachment 용접 시편, 고장력강은 Transverse attachment 용접 시편으로 가공하였다. 각 시험편의 형상 및 재료의 물성치는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 높은 압축 응력에 대비하여 FEA를 통해 좌굴 발생 가능성을 평가하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1 Test specimens

Table 1 Mechanical properties of the type (a) and (b) specimens

Type	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
(a) Mild Steel	315	459
(b) High Tensile Steel	440	550

Table 2 Critical loads of the type (a) and (b) specimens

Type	Applied Load (kN)	Buckling Stress from FEA (kN)
(a) Mild Steel	200	2586
(b) High Tensile Steel	200	847

2.2 스톱 하중의 생성

Tomita, et al.(2004)과 Osawa, et al.(2006)은 Wave scatter diagram으로부터 스톱 하중과 스톱 모델을 생성하는 방법을 제시하였다.

스톱 모델은 Fig. 2에 보이는 것과 같이 Calm sea 상태와 Storm sea 상태를 포함한다.

Fig. 2 Storm model

본 연구에서 사용된 스톱 모델은 IACS 34 wave scatter diagram에 의거하여 생성하였다. 스톱 모델의 작성을 위한 가정은 다음과 같다.

- 해상 상태는 Calm sea와 스톱 상태로 분류 됨.
- 스톱 모델은 이등변 삼각형 형태를 가짐.
- 스톱 상태에서 H_s (유의 파고)는 점차적으로 높아지거나 낮아짐.
- 단기간(Short-term period)을 2시간으로 정의함.
- 스톱 하중 기간을 3.5일로 정의함.
- $H_s \geq 2 \times H_{s,mean}$ (유의 파고의 평균값) 일 때, H_s 는 스톱 상태로 간주함.
- $H_s \leq 2 \times H_{s,mean}$ 일 때, H_s 는 무작위로 Calm sea 상태에서 발생함.
- 최대 유의 파고를 포함하는 스톱 하중은 설계 수명 동안 1회 발생함.

위와 같은 가정을 통해 스톱 상태에서 선택된 H_s 는 Fig. 3에 나타난 하나의 스톱에서 하중 단계 크기의 수를 순차적으로 결정한다. 유의 파고의 평균, 가장 작은 스톱 크기, 하중 단계 수는 다음의 식으로 정의된다.

$$H_{s,mean} = 3.41m$$

$$M_{in,storm} = 2 \times H_{s,mean}$$

$$N_s \text{ (Number of short term } \in \text{ a storm)} \\ = 3.5days \times 24hours/2hours = 42$$

7.5m의 H_s 는 가장 작은 스톰 'B'로 구해지며, 16.5m의 H_s 는 가장 큰 스톰 'J'로 간주된다.

Fig. 3 Storm model generation

다음으로 하중 이력은 스톰 모델로부터 생성이 된다. 스톰 모델을 기반으로 스톰 하중의 생성을 위한 가정은 다음과 같다.

- 단주기의 파고 "x"의 발현 확률 분포는 식 (1)과 같이 Rayleigh 분포로 표현.
- 파 주기는 해양파의 평균 유의 파고 주기와 동일.
- 응력은 해양파의 파고에 비례.
- 단순 응력의 증가는 스톰 하중의 반, 단순 감소는 스톰 하중의 나머지 반으로 작성.
- $2\beta = H_{s,mean}$

$$P(x;\beta) = \frac{x}{\beta^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\beta^2}\right) \quad (1)$$

한 스톰 내, 모든 유의파고에서의 하중은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 응력의 단순 증가와 감소의 가정을 기반으로 재배열되고 계산된다. 피로 한도 이하의 하중은 실험 시간을 줄이기 위해 제거되었다. 모든 스톰 생성 과정에서 하중 계산과 재배열은 반복적으로 수행되었다.

Fig. 4 Storm load generation

2.3 Calm sea 하중의 생성

Tomita, et al.(1992, 1995)은 스톰 상태에는 포함되어 있지 않은($2 \times H_{s,mean}$ 보다 작은) 작은 유의파를 일정하지 않게 Calm sea 상태에 포함시켰지만 그 생성법은 명확히 언급되지 않았다. 따라서, 다음의 가정을 통해 Calm sea 하중을 생성하였다.

- Calm sea 상태 하중 기간을 3.5일로 정의함.
(North pacific route에서 20년간 Wave의 수는 1080이며, 이의 Wave period는 6.3초).
- Calm sea와 스톰 상태를 포함하는 유의파의 전체 발생 빈도는 Wave scatter data와 일치함.
- 유의파로부터 각 Wave의 생성은 스톰 하중 생성과 같음.
- Calm sea 상태의 각 Wave의 순서는 임의로 배열되며 각 Wave의 수는 빈도 분포에 따름.

2.4 하중조건

피로 실험은 상온의 대기 중에서 최대 500kN 하중 용량을 가진 MTS사의 유압서보식 만능 시험기를 이용하며, 피로 실험 속도는 하중 이력에 따라 9 ~ 31Hz로 수행하였다. 복잡한 변동하중을 적용하기 위하여 MPT(Multi purposes test ware)를 사용하여 응력 범위 및 평균 응력이 복잡하게 변화하는 변동 하중을 구현하였다.

Fig. 5 Loading condition

2.2절과 2.3절의 방법으로 작성된 스톰 하중의 영향을 평가하기 위하여 총 4개의 Pattern으로 나누어 실험을 수행하였으며 하나의 스톰 하중의 형상은 Fig. 5와 같으며 각 패턴의 하중 이력은 Table 3, Table 4와 같다. *표시는 세 블록마다 스톰 하중의 평균 응력이 바뀌는 것을 의미한다. Pattern 1에서는 시험편의 S-N 선도의 도출하고, 기존 피로 수명 계산법과의 비교, 분석을 위해 일정 진폭 하중의 피로 실험을 수행하였다. Pattern 2에서는 스톰 하중의 응력 범위를 변화시키면서 피로 실험을 수행하였고, Pattern 3에서는 일정한 스톰 하중 블록에 평균 응력을 변화시켰

으며 마지막으로 Pattern 4에서는 실제 해상 상태를 고려한 불규칙한 응력 범위와 순서 및 평균 응력을 변화시키면서 피로 실험을 수행하였다. 표기의 편의상 Pattern #, case *를 P#C*로 표기하였다.

Table 3 Experimental loading condition of each specimen type (a)

Loading Pattern	Case	Stress (MPa)		
		Max. Amp.	Min. Amp.	Mean Stress
1	1	75		85
	2	60		70
	3	50		60
2	1	140	10	70
	2	220	30	70
	3	180	30	70
	4	220	10	70
	5	180	30	0
3	1	220	30	35
	2	220	30	0
	3	220	30	-35
	4*	220	30	70/-70
	5*	220	30	35/-35
	6*	220	30	70/0
4	1	Random 1		70
	2*	Random 1		70/-70
	3*	Random 1		35/-35
	4*	Random 1		70/0
	5	Random 1		0
	6	Random 2		70

Table 4 Experimental loading condition of each specimen type (b)

Loading Pattern	Case	Stress (MPa)		
		Max. Amp.	Min. Amp.	Mean Stress
1	1	110		120
	2	90		100
	3	60		70
2	1	220	30	0
	2	300	30	0
3	1	220	30	70
	2	160	30	140
	3*	220	30	35/-35
	4*	160	30	140/0
4	1	Random 1		90
	2*	Random 1		90/-90
	5	Random 1		0
	6	Random 2		90
	7	Random 1		0
	7A*	Random 1		70/-70
	7B*	Random 3		70/-70
	8*	Random 1		70/-70
	9A	Random 1		70
	9B	Random 3		70

추가적으로 Calm sea 상태를 고려하기 위해 Fig. 6과 같이 P4C7A와 P4C9A의 하중 이력에 Calm sea 하중 이력을 추가하여 P4C7B와 P4C9B에 대한 실험을 수행하였다.

- P4C7A : 평균 응력이 변하는 랜덤한 순서의 스톰 하중
- P4C7B : P4C7A하중에 Calm sea 하중추가
- P4C9A : 일정한 평균 응력 하에서 랜덤한 순서의 스톰 하중
- P4C9B : P4C9A하중에 Calm sea 하중추가

Fig. 6 Loading pattern in P4C7B of specimen type (b)

3. 피로 수명 평가 방법

3.1 5% Strain Range Drop

초기 수명은 모재와 용접 부가물의 용접 토우부 끝단으로부터의 거리가 0.5t인 위치에 부착된 변형률 게이지로 측정된 변형률이 5% 감소 할 때의 사이클 수로 정의하였다. 이 방법에 의한 초기 균열은 시험편의 깊이 방향으로 약 1 ~ 2mm, 길이 방향으로 약 10 ~ 20mm 정도 진전하며 이것은 육안으로 확인이 가능하다.

일정 진폭 하중의 경우, 5% strain drop이 뚜렷한 형상을 나타내어 비교적 정확하게 초기 수명을 정의할 수 있지만, 변동 하중의 경우, 하중 이력이 변화하므로 변형률의 감소를 판단하기가 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 5% strain range drop 방법을 사용하였다. 5% strain range drop 방법은 스톰 하중의 지정된 위치에서의 변형률의 변화를 측정하여 첫 하중 블록에서의 strain range를 기준으로 5%의 감소가 발생된 사이클 수를 초기 수명으로 정의하는 방법이다.

(a) specimen type (a)

(b) specimen type (b)

Fig. 7 Attachment of strain gage for measuring hotspot stress

3.2 DNV Method

DNV (2008)는 피로 강도 계산 방법에 대해 명시하고 있다. 이 방법은 외부에 작용하는 공칭 응력에 대한 응력 집중 계수, 용접 방법과 형상에 따른 용접 계수, 평균 응력의 영향을 고려하기 위한 감소 계수(Reduction factor)를 고려하여 노치 응력을 산정한 후, 제한한 DNV S-N선도에 적용하여 수명을 계산하는 방법이다.

$$\Delta\sigma_{nominal} \times K_w \times K_g \times f_m = \Delta\sigma_{notch} \quad (2)$$

$\Delta\sigma_{nominal}$: Nominal stress range

K_w : Welding coefficient ($K_w = 1.5$)

K_g : Geometric coefficient ($K_g = 1.33$)

f_m : Reduction factor due to mean stress effects

= 1.0 (for tension over the whole stress cycles)

= 0.8 (for mean stress equal to zero)

= 0.6 (for compression over the whole stress cycle)

$\Delta\sigma_{notch}$: Notch stress range

$$\log N_c = \log a - m \log \Delta\sigma \quad (3)$$

N_c : Predicted number of cycles to failure for stress range $\Delta\sigma$

$\log a$: Intercept of log N-axis by S-N curves
($\log a = 12.164$)

m : Negative inverse slope of S-N curves ($m=3$)

$\Delta\sigma$: Stress range

계산된 등가 하중에 대한 수명을 선형 피로 손상 법칙인 Miner's rule에 적용하여 피로 손상도를 산정해 초기 수명을 계산하였다.

3.3 Matsuoka's Method

Matsuoka 방법은 잔류 응력을 고려할 수 있는 피로 수명 계산 방법으로 공칭 응력을 응력 집중과 잔류 응력을 고려한 등가 응력으로 산정하여 DNV 방법과 동일하게 Miner's rule에 적용하여 피로 수명을 계산하는 방법이다.

$$S_{eq} = \Delta S^m \times \Delta S_{max}^{1-m} \quad (4)$$

$$\Delta S = K_s \times (S_{n,max} - S_{n,min}) \leq 2S_y \quad (5)$$

$$S_{max}^{1-m} = (K_s \times S_{n,max}) + S_r \text{ or } S_y \quad (6)$$

$$\log S_{eq} = \alpha + \beta \log N_c \quad (7)$$

$$\log N_c = -\frac{\alpha}{\beta} + \frac{1}{\beta} \log S_{eq} \quad (8)$$

$$N_c^{est} = \frac{2}{\left[\frac{1}{N_c^{Ten}} + \frac{1}{N_c^{Comp}} \right]} \quad (9)$$

S_{eq} : Equivalent stress range
 ΔS : Nominal stress range
 K_s : Structural stress concentration factor
 S_y : Yield stress
 $S_{n,max}$: Maximum nominal stress
 $S_{n,min}$: Minimum nominal stress
 S_r : Residual stress
 α, β, m : Optimized parameter
 $(\alpha=3.434, \beta=-0.2051, m=0.6448)$
 N_c : Predicted number of cycles to failure

Table 5는 잔류응력과 피로수명의 관계를 알아보기 위하여 시험편 (b)의 Pattern 4, case 9A, B의 하중 이력에 대해 Matsuoka가 제안한 방법으로 수명 계산을 한 것이며, 초기 잔류 응력을 시험편의 항복 강도 대비 100%부터 10%까지 바꾸며 초기 잔류 응력이 피로 수명에 미치는 영향을 나타내고 있다. 계산 결과를 통해 Matsuoka의 방법은 항복 강도를 잔류 응력으로 가정하고 계산하여도 크게 문제가 되지 않음을 알 수 있었다. DNV 방법과 마찬가지로 등가 응력에 따라 계산된 수명을 Miner's rule에 적용하여 피로 손상도를 구해 초기 수명을 계산하였다.

Table 5 Relationship between residual stress and calculated life

	P4C9A						
Initial Residual Stress Ratio	100 %	75 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Number of Storm Blocks	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.6	14.5

	P4C9B						
Initial Residual Stress Ratio	100 %	75 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Number of Storm Blocks	8.8	8.8	8.8	8.8	8.9	8.9	14.2

3.4 Beach mark를 이용한 방법

본 연구에서는 스톰 하중내의 과대 하중으로 인해 발생한 파면의 선명한 윤곽선인 비치 마크(Beach mark)를 사용하여 파단 후 초기 수명의 유효성을 검증하였다. 비치 마크는 과대 하중에 의해 균열 지연이 발생하여 Fig. 8과 같이 파단면에 형성된다. 육안으로 확인이 가능한 첫 비치 마크의 표면 균열 길이가 13 ~ 18mm로 편차를 보였다. 따라서, 본 연구에서는 기준이 되는 Beach mark를 이용하여 표면 균열 길이 15mm에서 피로 수명을

계산하여 변형률 5% strain range drop 방법의 유효성을 검증 하였다.

Fig. 8 Fracture surface for beach mark

4. 피로 실험 결과 분석

5% strain range drop 방법으로 구한 초기 수명, 파단 수명에서 Two-standard-deviation을 감한 수명을 나타내는 DNV 방법, 표면으로부터 깊이방향으로 약 1mm까지 피로 균열이 진전하였을 때의 피로 수명을 계산한 Matsuoka 방법, 마지막으로 파단면에 형성된 비치 마크를 이용하여 계산한 피로 수명을 각각 비교하였다. Transverse attachment 용접 시편인 시험편 (b)의 경우 파단면에 형성된 비치 마크의 형상이 불분명하여 결과에서 제외하였다.

4.1 일정 진폭에 대한 검토

일정 진폭 피로 실험의 결과가 기존의 피로 수명 평가 방법인 DNV 방법, Matsuoka 방법과 유사함을 Fig. 9에서 볼 수 있다. Fig. 9에서 N_i 는 초기 수명, N_f 는 파단 수명을 나타낸다.

Fig. 9 Comparison of experiment results and curves(DNV, Matsuoka)

4.2 초기 수명(N_i)에 대한 검토

Pattern 2는 변동 하중인 스톱 하중이 일정하게 작용된 실험으로 하중의 크기에 따라 비교적 합리적인 결과를 보여준다. 하지만 변동 하중의 특성에 따른 5% strain range drop 방법의 부정확성을 고려하여 비치 마크를 이용해 계산된 피로 수명을 함께 비교하였다(Fig. 10 참조).

먼저 시험편 (a)의 실험에서 비교적 하중이 작은 Case 1, Case 3, Case 5의 5% strain range drop 수명인 초기 수명과, 비치 마크를 이용하여 계산된 피로 수명의 경우 초기 수명이 비치 마크를 이용하여 계산된 피로 수명보다 작아 결과에 대한 신뢰도가 확보된다. 하지만 상대적으로 대 변형이 발생하는 높은 하중의 Case 2, Case 4의 경우, 초기 수명이 비치 마크를 이용하여 계산된 피로 수명보다 크므로 5% strain range drop 방법으로 초기 수명을 정의하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다. 이는 대 변형이 유발하는 불안정한 변형을 형상으로 인한 측정상의 오차, 혹은 변형을 게이지가 부착된 1축 선상 외에서 균열이 발생하여 균열 발생 초기의 변형을 변화를 정확히 감지하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 상대적으로 정확하게 수명을 정의하는 비치 마크 방법을 이용한 피로수명과 DNV 및 Matsuoka 방법에 의한 수명을 비교하였다.

결과를 통해, DNV 방법과 Matsuoka 방법 모두 실험 결과로 얻어진 수명에 비해 보수적인 결과를 보이고 있다. 일정 진폭 하

Fig. 10 Pattern 2 - Constant storm loading

중에서 오차가 적었던 점을 감안한다면 스톱 하중과 같은 과대하중을 포함하는 변동 하중의 경우 초기 수명을 보수적으로 예측한다고 판단할 수 있다. 한편, Matsuoka 방법은 DNV 방법에 비하여 시험편 (a)에서는 비교적 정확한 수명을 예측하고 있음을 알 수 있지만, 시험편 (b)의 경우는 DNV 방법이 Matsuoka 방법에 비해 비교적 정확한 수명을 예측한다고 판단할 수 있다.

4.3 평균 응력 영향 분석

평균 응력의 영향을 검증하기 위한 Pattern 3의 경우, 대부분의 경우에 있어 일관성 있는 결과를 보여주고 있다(Fig. 11 참조). 시험편 (a)에서 평균 응력이 35MPa, 0MPa, -35MPa로 감소하는 Case 1, Case 2, Case 3의 경우, 비치 마크를 이용한 수명 측정 결과가 일관되게 증가하였고 DNV 방법도 보수적이지만 비교적 결과를 잘 예측하고 있다. Matsuoka 방법은 계산상에서 평균 응력의 영향을 고려하지만 압축으로 변할 경우, 잔류 응력의 이완이 적어져 결과적으로 같은 값을 나타내고, 오직 실험에서 측정된 응력 집중 계수에 의해 수명이 변화하였다.

Fig. 11 Pattern 3 - Constant storm loading considering mean stress effect

평균 응력을 세 개의 스톱 하중 블록마다 70 ~ -70MPa, 35 ~ -35MPa, 70 ~ 0MPa로 변화시켜 평균 응력 변화의 효과를 검증하는 Case 4, Case 5, Case 6의 경우, 실험 결과와 DNV 방

법에서는 평균 응력의 효과가 지배적이지 않은 것을 알 수 있다. 한편, Matsuoka 방법은 실험 결과보다 과대한 결과를 보여준다.

시험편 (b)에서도 평균응력이 높아지고 하중 크기가 작아진 Case 1과 Case 2의 경우, P3C1이 P3C2보다 수명이 적다. 따라서, 평균 응력 보다 하중 크기가 더 지배적인 영향을 보임을 알 수 있고, DNV와 Matsuoka 방법 모두 보수적인 평가를 하고 있음을 알 수 있다.

4.4 실제 해상 상태를 고려한 피로 실험

실제 해상 상태와 비슷한 변동 하중의 영향을 검증하는 Pattern 4의 경우, 하중 범위 및 평균 응력에 따라 일관성 있는 결과를 보여준다(Fig. 12 참조).

Fig. 12 Pattern 4 - Real storm loading

시험편 (a)에서는 동일한 불규칙 응력 범위 하에서 평균 응력의 크기가 70MPa, 70 ~ -70MPa, 35 ~ -35MPa, 70 ~ 0MPa로 변화하는 Case 1, Case 2, Case 3, Case 4의 경우, 피로 수명에 약간의 차이는 있지만 그 영향이 앞의 경우와 비슷하게 미미한 것으로 나타났다. 반면, 평균 응력이 70MPa, 0MPa인 Case 1, Case 5의 경우, 수명이 증가하는 결과를 보여준다. 불규칙 응력 범위의 Case 1과, 같은 응력 범위를 작은 응력 범위부터 재정렬한 Case 6의 결과를 보면, 수명에 큰 차이를 보이지 않음

로 적은 실험 수만으로 판단한다면 하중 순서의 영향이 미미한 것을 알 수 있다.

시험편 (b)에서도 시험편 (a)와 비슷한 경향이 나타났고, Load case 뒤에 A와 B가 붙은 것은 Calm sea의 영향을 알아보는 실험을 수행한 경우이다. 이의 결과는 다음의 4.5절에 나타내었다.

4.5 Calm Sea 상태를 고려한 랜덤 피로 실험

이전의 스톱 하중에 대한 연구는 파고가 낮은 Calm sea에 의한 하중의 영향은 없다는 가정 하에서 이루어졌다. 그러나 이러한 가정의 타당성은 분명하게 입증되지 않았기 때문에 본 연구에서는 시험편 (b)로 수행한 실험을 통해 Calm sea에 대한 영향을 알아보았다.

실험 결과를 Fig. 13, Fig. 14와 같이 스톱 하중의 개수로 나타내었다. 실험 결과를 토대로 Calm sea의 영향을 분석해본 결과, 평균 응력이 변하지 않는 경우(P4C9A, B)에 적용된 스톱 하중의 개수가 비슷한 것으로 보아, Calm sea 하중에 대한 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 하지만 평균 응력이 변화와 동시에 Calm sea 하중이 적용된 경우(P4C7B)에 적용된 스톱 하중의 개수가 Calm sea 하중이 적용되지 않는 경우(P4C7A)보다 작은 것으로 보아 Calm sea 하중의 영향이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 13 Comparison of N_f under variable and constant mean stress

Fig. 14 Comparison of N_f under variable and constant mean stress

5. 피로 수명 평가 방법의 비교

기존의 피로 수명 평가 방법으로 잘 알려진 DNV 방법과 Matsuoka 방법을 종합적으로 비교해 보면, 두 방법 모두 대체적으로 피로 수명을 잘 예측 하지만 다소 과소 평가하는 경향이 나타난다. 또한, Matsuoka 방법에서는 평균 응력의 영향을 고려하지만 시험편 (a)의 경우, 평균응력이 세 블록씩 변할 때 잔류 응력의 값이 변함에 따라 실험 결과보다 과대한 예측을 함을 알 수 있다(Fig. 15, 16 참조).

Fig. 15 Comparison of beach mark method and DNV method for N_i

Fig. 16 Comparison of beach mark method and Matsuoka's method for N_i

6. 결 론

본 연구는 최종적으로 스톱 하중과 같은 불규칙 하중이 용접 방법이 다른 두 시험편에 작용될 경우, 각 용접부에 대한 피로 수명을 정확히 예측할 수 있는 피로 수명 계산법의 평가 및 분석에 목적이 있다. 또한, 불규칙 해상 상태를 고려한 하중 모델을 적용

하여 기존의 피로 설계 방법을 검증하였다.

피로 실험 결과 분석시 스톱 하중이 적용된 피로 실험을 수행한 결과와 기존에 잘 알려진 DNV 방법 및 Matsuoka 방법을 비교하였고, 일정 진폭 하중의 실험 결과에 기반한 계산법과 불규칙 하중이 적용된 경우의 실험 결과를 비교, 평가하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 시험편에 일정 진폭 하중을 적용한 경우, 실험 결과와 DNV 방법, Matsuoka 방법이 비교적 잘 일치하였다.
- 평균 응력의 변화에 따른 피로 수명 및 계산 수명은 평균 응력의 영향을 잘 보여주고 있다. 하지만 평균 응력 변화는 피로 수명에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.
- 잔류 응력을 고려할 수 있는 Matsuoka 방법은 재료의 항복 강도로 초기 잔류 응력을 가정하고 계산하여도 피로수명에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 스톱 하중 하에서 DNV 방법과 Matsuoka 방법에 의한 수명 예측은 대부분 보수적으로 계산되어 설계 시 신뢰성이 확보된다. 다만 Longitudinal attachment 시험편으로 실험한 것 중, 일정한 스톱 하중으로 평균 응력을 바꾸어 가며 실험한 경우 Matsuoka 방법은 70%가 넘는 과대 수명을 예측하였다.
- 평균 응력이 압축으로 전환될 경우 전체 피로 수명은 증가하나, 균열 진전 수명 증가율은 초기 수명 증가율보다 상대적으로 적다. 또한, 평균 응력의 변화에 따른 영향은 미미한 것으로 분석된다.
- 평균 응력이 변하지 않는 경우, Calm sea 하중에 대한 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 하지만 평균 응력이 변함과 동시에 Calm sea 하중이 적용된 경우, Calm sea 하중의 영향이 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 (주)삼성중공업과 미국선급협회의 연구비 지원을 받아 실험을 수행하였으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- DNV-Det Norske Veritas. 2008. *Fatigue Assessment of Ship Structures, Classification Notes*, No.30.7.
- Kim, K.S. et al., 2003. A Study on the Effect of Overloading on Fatigue Life. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.45-53.
- Kim, K.S. et al., 2008. A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure (1). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.669-678.

- Kim, K.S. et al., 2008. A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(II). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.679-687.
- Kim, S.H. et al., 2011. Fatigue Crack Propagation Life Assessment of T-joint Fillet Weldment Considering Residual Stress under Random Loading. *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 29(2), pp.46-55.
- Miner, M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12, pp.A159-A164.
- Matsuoka, K. Takahashi, I. Uematsu, S. & Ushijima, M., 2000. Effect of Loading History on Fatigue Life of Welded Joint. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 188, pp.617-624.
- Osawa, N. Hashimoto, K. Sawamura, J. & Rokutanda, A., 2006. Construction of the Storm Model with Consideration to the Sea Area and the Season. *2nd Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies Conference*, Jeju Island, Republic of Korea, 17-20 October 2006.
- Tomita, Y. Kawabe, H. & Fukuoka, T., 1992. Statistical Characteristic of Long-term Wave-induced Load for Fatigue Strength Analysis for Ships. *5th International Symposium on the Practical Design of Ships and Mobile Units*, Newcastle upon Tyne, U.K., 17-22 May 1992.

- Tomita, Y. Matoba, M. & Kawabe, H., 1995. Fatigue Crack Growth Behavior under Random Loading Model Simulating Real Encountered Wave Condition. *Marine Structures*, 8(4), pp.407-422.
- Tomita, Y. et al., 2004. Study on Fatigue Design Loads for Ships Based on Crack Growth Analysis. *Journal of ASTM International*, 1(9), pp.420-434.

유창혁

김경수

서용석

심용래

하영수

유원호

최현준