

Fatigue Indicator Sensor 의 형상에 따른 균열진전 특성의 비교 연구

김재현^{†*}, 김슬기*, 조영근*, 여승훈*, 김경수*, 김성찬**, 이장현*

인하대학교 조선해양공학과*
인하공업전문대학 선박해양시스템과**

A Comparative Study on the Crack Propagation Characteristics According
to the Pre-Notch Shapes of Fatigue Indicator Sensor

Jae Hyun Kim^{†*}, Seul Ki Kim*, Young Gun Cho*, Seung Hoon Yeo*, Kyung Su Kim*,
Sung Chan Kim** and Jang Hyun Lee*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Korea*
Department of Ship and Ocean System, Inha Technical College, Korea**

Abstract

It is difficult to predict the accurate fatigue life of the ship structure because of load uncertainty and load redistribution at the ship structure members. As one of studies for accurate evaluation and prediction of fatigue life, it is a promising way to detect the crack previously by attaching the Fatigue Indicator Sensor (FIS) at the crack prediction region. In order to predict the fatigue life of the ship structure by using FIS, it is required to know previously the crack propagation characteristics according to pre-notch shapes. In this study, we obtained the stress distribution phase, stress concentration factors and stress intensity factor of various pre-notch shapes through FEA. Additionally, we conducted the fatigue test and obtained the characteristics of crack propagation according to the pre-notch shapes through comparison between the fatigue test and the FEA. Consequently, we classified the pre-notch shape into 3 categories: Long, Medium, and Short life type. On the basis of the numerical and experimental results, the FIS can be developed.

※ Keywords: Fatigue indicator sensor(FIS, 균열예지센서), Fatigue life(피로수명), Stress concentration factor(응력집중계수), Stress intensity factor(응력확대계수), Characteristics of crack propagation(균열진전특성)

접수일: 2009년 12월 18일, 승인일: 2010년 5월 19일

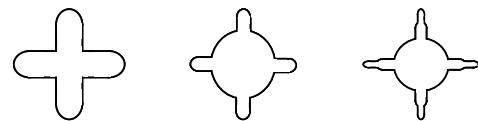
†교신저자: jhkim09@Inha.edu, 032-860-8756

1. 서 언

선박이나 각종 기계 구조물은 기하학적인 불연속 부를 포함하고 있으므로 응력집중 효과로 인해 균열이 발생할 가능성이 존재한다. 만약 FPSO (Floating Production Storage and Offloading), FSRU(Floating Storage and Regasification Unit), LNGC(Liquefied Natural Gas-Carrier) 등에서 균열이 발생하여 화물창 등에 파손이 일어나는 경우에는 원유 또는 천연 가스의 유출에 의한 환경오염과 많은 인명피해 및 막대한 사회적 경비를 초래하게 된다. 따라서 사전에 피로균열을 예지할 수 있는 시스템이 필요하며 이러한 예지 기술은 선박뿐만 아니라 사회 기반 시설의 안정성 확보에 기여할 수 있다. 그러나 현재까지는 정기적인 육안 계측, 자분 탐사법 등 비파괴 검사방법을 이용하여 균열의 생성 여부만 파악하고 있기 때문에 균열의 생성 과정 및 응력 수준 등을 파악하여 설계에 반영하기 어려운 실정이다. 따라서 피로 균열의 정확한 평가 및 예측을 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. Kim et al(2008)은 대형구조물 실험, 수치해석을 통하여 선체 용접부 균열진전 및 피로수명 예측에 관하여 연구를 수행하였으며, Kim et al(2002)은 선체 피로균열 전파거동 추정을 위한 응력강도계수 간이 추정법을 제안하였다. 이러한 피로 균열 예측과 이를 정량화를 위한 연구 방안으로 균열을 장기적으로 모니터링 할 수 있는 장치인 FIS를 이용하는 방법이 개발 중이다. FIS는 구조물의 불연속 부보다 더 큰 응력집중을 가지게 하는 인위적인 예 균열을 만들어 균열을 유도하여 구조물의 균열을 예지하는 시스템이다. 현재까지 FIS와 유사한 것으로 Fujimoto et. al(1996)가 개발한 sacrificial specimen과 Smith(1975)가 개발한 Fatigue damage indicator, Hyeong-Yeon Lee 등 (2000)의 Multidirectional fatigue damage indicator 등이 있다. 그러나 모두 한 가지 형상의 예 균열만을 가지며 실제로 사용될 부위의 작용응력 및 수명에 대한 고려를 하지 못하였으며 다양한 형태의 예 균열을 제시하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 실제 사용될 부위의 수명을 고려한 적절한 응력집중계수를 갖는 예 균열

형상을 도출하였고, 부착 환경에 맞는 FIS를 개발하기 위한 기초연구를 수행했다. 우선적으로 부착 환경에 맞는 FIS를 개발하기 위해서 다양한 예 균열 형상에 따른 균열진전 특성을 알아보기 위한 실험 및 유한요소해석(FEA: Finite Element Analysis)을 수행하였다. 실험 및 FEA에 적용될 하중의 타당성을 마련하기 위해 선박에 작용하는 변동 하중의 특성을 파악하여 등가응력을 구했고 이를 실험 및 유한요소해석에 동일하게 적용했다. 또한 실험을 통해 예 균열 형상에 따른 a-N curve를 도출하여 FEA 및 수치 계산으로 구한 값과 비교하여 실험의 타당성을 입증했다. 최종적으로 얻어진 균열 전파 특성으로부터 예 균열 형상을 Long life, Medium life, Short life로 구분하여, 실제 부착환경을 고려한 Long life FIS, Medium life FIS, Short life FIS 제작의 기초를 마련했다.



(a) Type 1 (b) Type 2 (c) Type 3
Fig. 1 Pre-notch shapes

2. 예 균열 형상 결정

FIS의 핵심 개념은 피로균열이 주로 발생하는 선체 구조물 내의 불연속 부에서의 응력집중 계수(Stress Concentration Factor, SCF)보다 큰 응력집중계수를 갖게 함으로써 구조물보다 빠른 파손을 유도 하는 것이다. 실제 선박 내 불연속 부에 대한 응력집중계수에 관한 자료(DNV, 2003)를 보면 특별한 경우를 제외하고는 대략 3이내로 보고되고 있으므로 응력집중계수가 3인 원형태를 응용하여 3가지 형태의 예 균열 형상(Fig. 1)을 고안했다. 그리고 FEA으로 각 예 균열의 치수 변화에 대한 응력 집중 계수 와 응력 분포양상에 대한 변수를 연구하였고 FIS에 사용할 예 균열 형상을 결정했다.

2.1 유한요소해석 모델

응력 집중 계수 'K_t'의 계산은 범용유한요소해석

프로그램인 ANSYS WORKBENCH를 사용했다. 예 균열의 형상이 상하좌우 대칭이므로 Fig. 2와 같이 1/4을 2차원 8-node isotropic solid element를 이용하여 분할하였다. 균열 선단 근방은 특이성을 고려하여 요소크기를 0.1mm로 정하였다. 적용된 응력집중계수는 식(1)과 같으며(DNV, 2003), σ_{max} 는 예 균열 주위에서 발생한 최대응력이고, σ_{nom} 은 공칭응력이다.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (\text{for tension or bending}) \quad (1)$$

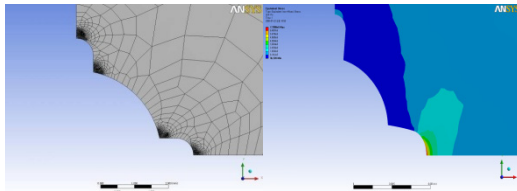


Fig. 2 Finite element model and the residual stress distribution

Table 1 SCF obtained by FEA

Type 1		Type 2		Type 3	
Pre-crack length (mm)	SCF	Pre-crack length (mm)	SCF	Pre-crack length (mm)	SCF
3.0	4.5	6.0	5.0	9.0	7.8
4.0	5.2	7.0	6.7	11.0	8.8
5.0	5.8	8.0	7.3	13.0	9.3
6.0	6.3	9.0	7.8	15.0	10.2
7.0	6.8	10.0	8.2	17.0	11.2

2.2 응력집중계수와 응력분포양상

예 균열의 길이를 변화시키면서 유한요소해석을 수행한 결과는 Table 1과 같다. 해석 결과 예 균열의 길이가 길수록 SCF 값이 커짐을 알 수 있고, 3가지 예 균열 중 Type 3의 SCF 값이 가장 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 3가지 예 균열에 대한 응력분포양상의 한 예를 보여준다. SCF가 클수록 공칭응력에 이를 때까지의 거리가

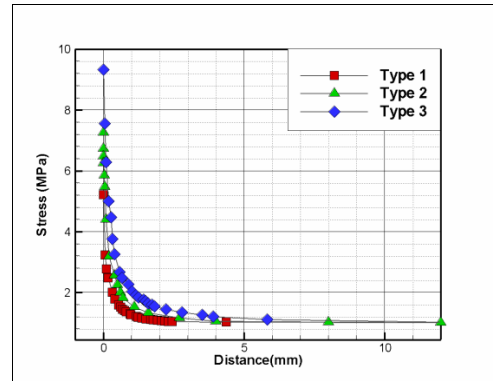


Fig. 3 Stress distribution phase

길어지므로 SCF가 큰 예 균열 형상일수록 공칭응력 이상의 응력을 받는 부위의 면적이 커진다. 따라서 SCF가 큰 예 균열 형상일수록 SCF가 작은 예 균열보다 먼저 균열이 발생하게 될 것이라 예상된다.

3. 균열진전특성 실험

피로균열 수명예지를 위한 FIS를 개발하기 위해 앞서 반드시 예 균열 형상에 따른 균열진전특성을 알아보아야 한다. 따라서 응력집중계수 5.2, 7.3, 9.3을 가지는 Type 1~3의 예 균열 형상을 선택하여 균열진전특성 실험에 사용될 시편을 제작했다. 시편의 재질은 SS400강을 사용했다.

3.1 시편형상과 재질특성

예 균열 형상을 포함한 시편의 두께는 1.6mm, 형상은 Fig. 4와 같으며 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of SS400

Yield stress (MPa)	235
Ultimate tensile stress(MPa)	510
Young's modulus (MPa)	206,000
Poisson's ratio	0.3
Paris crack growth rate constant, C	1.9144E-011
Paris exponent, m	3.0

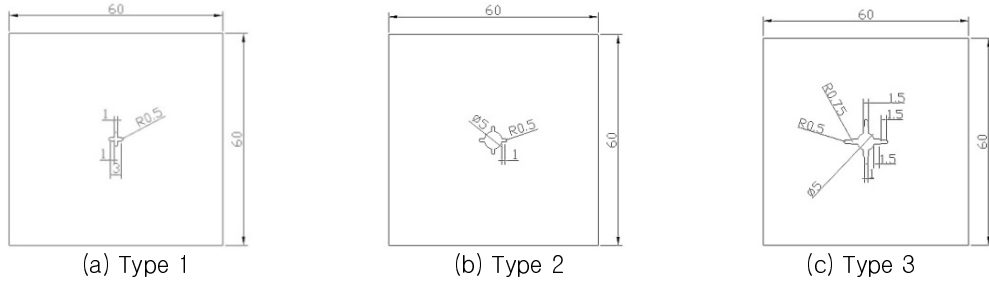


Fig. 4 Geometry of specimen according to the crack propagation feature (unit: mm)

3.2 실험 진행

FIS가 부착될 선박은 운항 중 다양한 형태와 크기의 변동하중을 받게 되는데 변동 하중에서 Miner's rule을 기본으로 한 등가응력 평가는 피로수명 예측에 유용함이 보고되고 있다(DNV, 2003). 따라서 본 연구의 실험 하중의 타당성을 입증하기 위하여 Miner's rule과 Weibull distribution function을 이용하여 실제 선박에 작용하는 하중과 같은 손상을 가지고 오는 등가응력을 구하여 실험 하중으로 정했다.

3.2.1 등가 응력

Miner 법칙에 의한 변동하중 하의 파손조건은 S-N 곡선 $N_i = C \cdot \Delta\sigma_i^{-m}$ 의 관계로부터 식 (2)와 같이 나타내어지고 변동하중의 응력 값은 다양하게 변화하므로 연속확률분포함수를 도입하면 식 (3)과 같다.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta\sigma_i}{A} \right)^m \cdot n_i = \frac{1}{A^m} \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_i^m \cdot n_i = 1 \quad (2)$$

$$\frac{1}{A^m} \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_i^m \cdot n_i = \frac{1}{A^m} \int_0^\infty \Delta\sigma^m \cdot f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (3)$$

n_i : 응력 블록에서의 사이클 수

N_i : 일정 응력 범위 하에서의 파단에 이르는 cycle 수

k : 응력 블록 수

A, m : S-N fatigue parameters

따라서 A는 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$A = \left[\int_0^\infty \Delta\sigma^m \cdot f(\sigma) d\sigma \right]^{1/m} \quad (4)$$

또한 일정진폭하중에 대한 손상량과 변동하중에 의한 손상량이 같다고 하면 등가응력을 사용하여, 식 (4)는 식(5)와 같이 표현된다.

$$\Delta\sigma_{eq} \cdot \left[\int_0^\infty f(\sigma) d\sigma \right]^{1/m} = A \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)에 의해 등가응력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[\frac{\int_0^\infty \Delta\sigma^m f(\sigma) d\sigma}{\int_0^\infty f(\sigma) d\sigma} \right]^{1/m} \quad (6)$$

이 식에서 $f(\sigma)$ 는 일정시간 동안 각 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 가 발현하는 빈도를 형상계수 h와 척도계수 q로 구성된 2-parameter Weibull distribution 함수로 가정하고 이를 확률밀도함수로 정의하면 식 (7)로 표현된다. 그리고 m은 S-N선도의 기울기를 의미한다. 2-parameter Weibull distribution 함수와 S-N선도는 DNV CN30.7(DNV, 2003)을 참고 했다. 그리고 S-N 선도는 FIS의 부착 부위가 선체 내 주요 불연속부인 용접부 근처이고 부착환경을 고려하지 않기 위하여 DNV lb curve 식을 이용했다.

$$f(\Delta\sigma) = \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{h-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h \right\}, \quad (7)$$

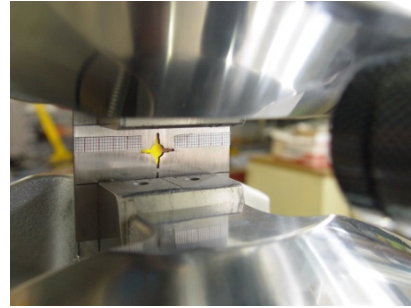
$$q = \Delta\sigma_{\max} / (\ln n_0)^{1/h}$$

$$\log N = 12.76 - 3 \log \Delta\sigma, \quad m = 3 \quad (8)$$

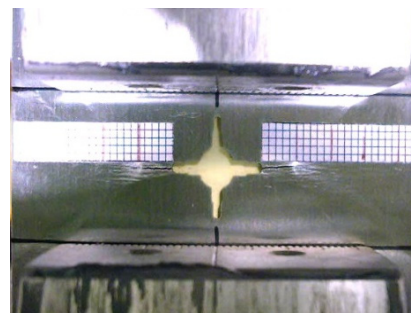
Table 3 Weibull Shape-parameter h , Weibull scale factor q and equivalence stress

		Bottom Longitudinal	DECK Longitudinal	Side Shell & T.BHD
Weibull Shape Parameter h		0.78	0.85	0.90
$\Delta\sigma_{max}$ (MPa) Design life cycles $n_0 : 10^8$ cycles		593.1	512.1	465.9
Weibull Scale factor q		14.15	16.62	18.29
$\Delta\sigma_{eq}$ (MPa)	Equivalence notch stress Range (MPa)	414.8	364.8	335.9
	Equivalence nominal stress Range (MPa)	138	122	112

예상 설계수명 동안 발생하는 변동 응력의 사이클 수 n_0 는 선박의 수명 20 년 동안 만나는 파의 수를 10^8 개로 가정하였고, 형상계수 h 는 DNV CN30.7(DNV, 2003)을 참고하여 주요 균열 발생 부위별로 계산했다. 그리고 식 (6), (7)을 이용하여 척도계수 q 와 증가응력을 구했고 이 과정에서 적분 상한 값은 이론적으로 $\sigma = \infty$ 이지만 실제의 응력진폭에는 이러한 값이 존재하지 않으므로 최대응력 σ_{max} 로 하여 계산했다. DNV lb curve 는 notch stress range 기반의 선도이므로 FIS 가 공칭응력 위치에 붙여질 것을 고려하여 얻어진 notch stress range 응력범위 값에서 응력집중계수 $K_t=3$ 을 나누어 공칭응력범위를 구했다. 계산된 형상계수 h 와 척도계수 q , 증가응력은 Table 3 과 같다.



(a) Test set



(b) During the test set

Fig. 5 Experimental configuration of crack propagation

Table 4 Type of FIS according to the crack propagation feature

Specimen type	Load ratio	Max.stress (MPa)	Min.stress (MPa)	Hz
Type 1	0	200	0	10
		170	0	
		140	0	
Type 2	0	200	0	10
		170	0	
		140	0	
Type 3	0	200	0	10
		170	0	
		140	0	

3.2.2 실험 순서

실험은 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 수행하였다. Fig. 5 는 균열진전특성실험의 세팅 및 실험 중 균열발생 사진이다. 실험은 Table 4

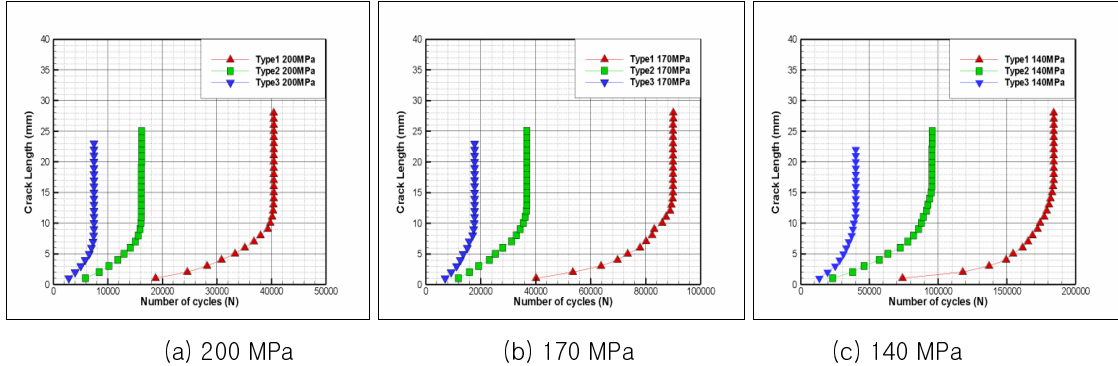


Fig. 6 Crack propagation features of each type under constant amplitude loading

와 같이 3가지 예 균열 시편에 대하여 10Hz로 정현파 반복 하중 형태로 수행하였고, 하중비 R 은 0 으로 하였다. 작용 응력은 실제 선박에 작용하는 하중보다 높은 하중을 가하기 위하여 앞서 얻어진 최대 등가응력 이상의 응력인 200MPa, 170MPa, 140MPa에 해당하는 하중으로 실험을 수행하였다. 또한 정확한 균열 길이 측정을 위하여 고 배율로 관찰이 가능한 카메라를 설치하여 균열 길이를 확인하였다.

3.3 실험 결과

3가지 하중 조건에서 실험하여 얻은 균열길이와 하중 반복수의 관계는 Fig. 6과 같다. 시편 대부분의 피로수명은 초기 균열을 발생시키는데 사용되고 균열이 발생 후에는 균열성장속도가 증가했다. 뿐만 아니라 작용응력이 증가함에 따라서도 균열성장속도가 증가했다.

균열길이는 예 균열 끝 단에서 발생한 균열의 길이를 말한다. 일정 하중에 대한 3가지 예 균열 시편의 일정 균열발생시 수명 비교를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6으로부터 세 가지 예 균열 시편 중 응력집중계수가 높은 Type 3이 작용 하중에 제일 민감함을 알 수 있으며, Type 1이 제일 둔감함을 알 수 있다.

4. 균열 진전특성의 수치해석

실험 결과의 타당성을 입증하기 위해 MSC. Fatigue를 이용한 수치해석을 수행하였고, 피로

수명을 계산하는 과정에서 얻어진 SIF(Stress Intensity Factor)와 이론적으로 수계산을 통하여 구한SIF를 비교하였다. 그리고 MSC. Fatigue에서 얻어진 a-N curve와 수 계산으로 얻어진 a-N curve를 실험결과의 a-N curve와 비교하였다. 또한 실험 결과를 이론 식에 적용하여 이론적으로 검증하였다.

4.1 응력 확대 계수

유한요소모델은 Fig. 7과 같고 예 균열 근방은 특이성을 고려하여 요소 크기를 0.1mm로 하여 mesh를 구성하였다.

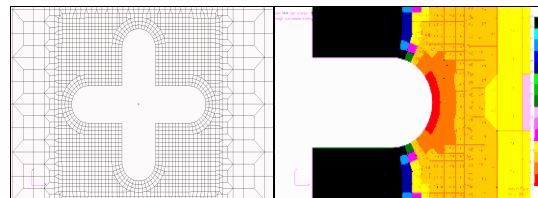


Fig. 7 Finite element analysis for SIF

FEA로 얻어진 SIF값과 수 계산으로 얻어진 SIF 값을 Fig. 8에 나타내었다. 예 균열 종류에 다른 SIF 크기의 비교를 위해 예 균열 끝 단에서 발생한 균열 길이 기준으로 SIF 값을 비교하였다. Type 3 시편의 SIF값이 가장 크고 Type 1 시편의 SIF 값이 가장 작음을 알 수 있다. 따라서 Type 3의 예 균열이 Type 1의 예 균열보다 작용 하중에 민감하게 반응하여 균열이 빨리 발생할 것임을 알 수 있다.

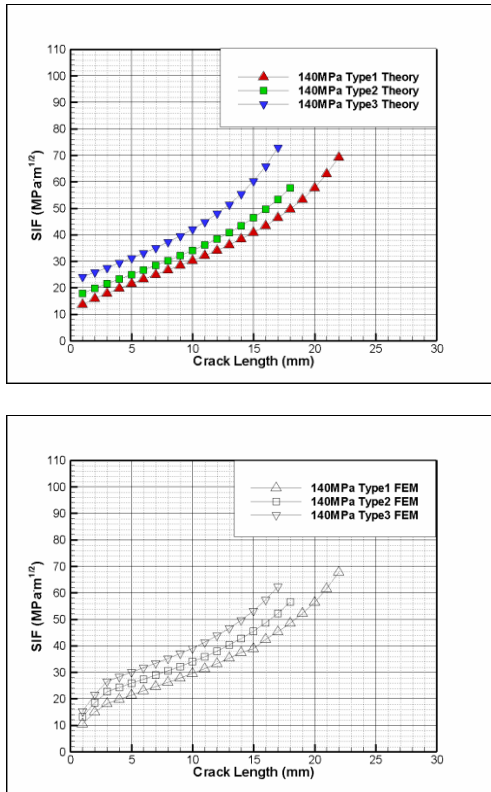


Fig. 8 Comparison of SIF obtained by theoretical method and FEA

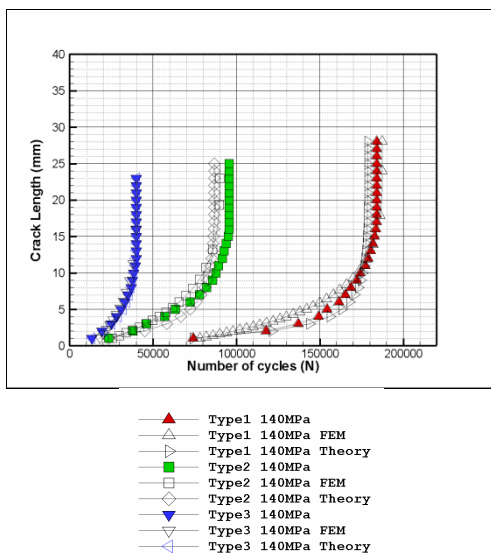


Fig. 9 Comparison of a-N curves

4.2 a - N curve

피로 균열 전파에서 가장 기본이 되는 것은 식 (11)과 같은 Paris's law이다. c, m은 재료 상수이다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (11)$$

Paris's law를 변수 분리하고 적분하면 식 (12)와 같은 식이 되고 이 식에 앞에서 구한 SIF를 대입하여 수치적으로 a-N curve를 구하였다. 수 계산을 통한 SIF는 실험에서 정의한 초기 균열 발생 이후의 진전 수명을 계산하는데 사용하였으며 MSC.Fatigue a-N curve 결과와 비교하였다.

$$N_f = \int_{a_0}^{a_i} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (12)$$

$$= \frac{2}{(m-2)C[f(g) \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}]^m} \left(\frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} \right)$$

여기서, a₀는 첫 번째 균열크기이며 a_i는 다음 균열크기이고 N_f는 그 때의 반복 횟수이다. 실험 결과의 타당성을 입증하기 위해 Fig. 9와 같이 수 모 든 결과를 비교하였다. 전체적으로 실험 결과와 이론적으로 얻은 결과, FEA 결과가 잘 맞음을 알 수 있다.

5. 결론

(1) 예 균열 형상에 따른 SCF값과 응력 분포양상을 FE 해석으로 구한 결과, Type 3 예 균열의 SCF가 가장 컸고 Type 1의 예 균열이 가장 작았다. 그리고 SCF값이 클수록 공칭응력 이상의 응력을 받는 부위의 면적이 커지므로 SCF가 작은 예 균열 형상보다 균열이 먼저 발생할 것이다.

(2) 균열진전실험 결과 SCF값이 큰 예 균열 형상을 가지는 시편 순서대로 균열이 먼저 발생하며, 균열진전속도가 빠른 것을 알 수 있다.

(3) FEA 및 수치 계산에서 구한 SIF 값을 예 균열 형상에 따라 비교해 보았을 때, Type 3 시편이 가장 큰 SIF값을 가지며 Type 1 시편이 가장 작은 SIF값을 가지는 것으로 보아, Type 2 시편의 예 균

열 형상의 균열이 빨리 발생함을 알 수 있고 하중에 보다 더 민감한 것을 알 수 있다.

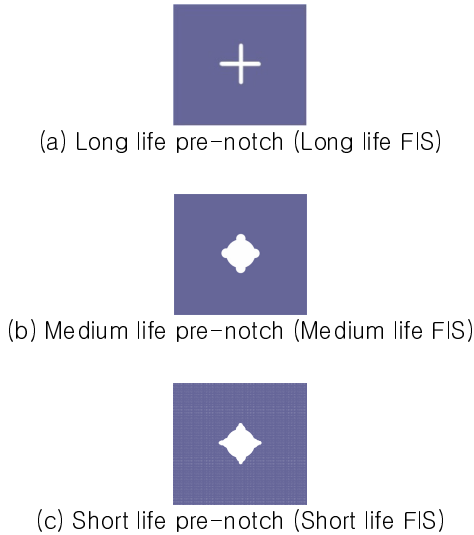


Fig. 10 Long, Medium and Short life FIS

위와 같이 얻은 결론으로 예 균열 형상을 Fig. 10 과 같이 Type 1, Type 2, Type 3을 long life, medium life, short life로 구분하였으며, 최종적으로 3가지로 정해진 예 균열 형상을 원하는 목적에 맞게 long life FIS, medium life FIS, short life FIS로 정하여 피로 수명의 장단기에 따라 활용할 수 있는 각각의 형상을 제시하였다.

후 기

이 논문은 한국연구재단의 연구비 지원을 받아 수행된 연구로, 위 기관의 후원에 감사 드립니다. (No.R01-2007-000-20340-0).

참 고 문 헌

- Kim, K.S., Hisashi Ito, Seo, Y.S., Jang, B.S., Kim, B.I., and Kwon, Y.B., 2008, "A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(I)," Journal of the Society of Naval Architects of

Korea, Vol. 45, pp.669-678.

- Kim, C.W., Kim, D.S., and Nho, I.S., 2002, "Fatigue Life Assessment of Ship Structures based on Crack Propagation Analysis - Simplified Prediction Method of Stress Intensity Factors-," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No.1, pp. 90-99.
- Fujimoto, Y., Shintaku, E., and Kim, S.C., 1996, "Structural Monitoring for Fatigue Crack Detection and Prediction," The International Society of Offshore and Polar Engineers, Vol. 4, pp. 227-235.
- Det Norske Veritas(DNV), 2003, Fatigue Assessment of Ship Structures, Classification Notes, 30.7, pp. 8-19 & 92-104.
- Lee, H.Y., Kim, J.B., 2000, Multidirectional Fatigue Damage Indicator, United States Patent, US 6443018 B1.
- Smith, H.W., 1975, Fatigue Damage Indicator, United States Patent, 3979949.



<김 재 현>



<김 슬 기>



<조 영 근>



<여 승 훈>



<김 경 수>



<김 성 찬>



<이 장 현>