

# 유한요소법을 이용한 피로하중을 받는 균열선단의 소성영역크기에 대한 연구

김경수\* · 심천식\* · 이재욱\* · 조형민\*  
\*인하대학교 선박공학과

## A Study on Plastic Zone at the Crack Tip under Cyclic Loading by FEM

KYUNG-SU KIM\*, CHUN-SIK SHIM\*, WOOK-JAE LEE\* AND HYUNG-MIN CHO\*  
\* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

**KEY WORDS:** Plastic zone size 소성영역크기, Fatigue crack growth 피로균열성장, Elasto-plastic analysis 탄소성해석, ESPI System 전자스펙타클래퍼된 간섭시스템, Finite element method 유한요소법

**ABSTRACT:** In this paper, the effect of the crack growth length on the plastic zone size at the crack tip and the crack growth lives of the DENT specimen under constant amplitude cyclic loading were studied. The plastic zone size was calculated by nonlinear static method in commercial finite element analysis program, MSC/NASTRAN and the crack growth lives were also calculated by using compliance function considering geometric shape in MSC/FATIGUE. The calculated plastic zone size increased proportional to the crack length. And comparison of calculated plastic zone size and crack growth lives with the experimental results shows a good agreement.

### 1. 서 론

선박이나 해양구조물을 포함한 대부분의 구조물과 구조부재들은 사용되거나 운행되는 동안 피로하중의 영향을 받고 있다. 이런 구조물들은 기능이나 외관상의 이유로 기하학적 불연속점을 갖고 있으며 이 부분에서 응력집중이 발생하여 피로강도를 저하시키게 된다. 구조물 전체 중에서 국부응력이 발생하는 노치, 홈 그리고 용접연결부 등과 같은 곳은 가장 먼저 피로균열이 발생하는 부분으로 보강제 설치만으로 피로파괴를 막을 수 없다. 구조물에 발생한 피로균열은 큰 응력집중 효과와 균열 진전에 따른 응력확대 효과를 동시에 발생시킨다.

항복에서 파괴까지의 시간이 짧은 취성이 큰 재료를 제외한 공학적으로 사용되는 대부분의 재료들의 경우 응력집중 효과에 의해 발생한 소성영역 내에서의 응력은 항복응력에 도달하게 되고 영구변형으로 인해 에너지가 소모되면서 응력 증가보다 변형률 증가가 더 커지는 현상을 보인다. 균열선단에서의 소성영역 크기는 피로성장거동에 영향을 미치는 여러 가지 인자들 가운데 중요한 인자이다. 피로반복하중이 작용하는 시편

에 과대하중 혹은 다른 환경적인 원인에 의해서 균열선단에 큰 소성영역이 발생한다면 균열단함 현상이 발생하게 되고 이는 균열성장수명의 지연으로 연결된다. 피로반복하중을 받고 있는 시편에 대하여 유한요소법을 이용한 균열선단 소성영역 크기 계산이 가능하다면 변동하중 하에서 균열성장 거동을 해석을 하는데 도움이 될 것이다.

본 연구논문에서는 일정진폭반복하중을 받고있는 DENT(Double Edge Notched Tension) 시편에 대하여 균열길이 성장에 따른 균열선단에서 소성영역 크기를 상용 유한요소법 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 계산하였다. 이들 계산되어진 결과는 ESPI 시스템을 이용하여 균열성장시험으로부터 얻은 결과와 비교하여 정확도를 검증하였다. 또한, MSC/FATIGUE를 이용하여 균열길이 성장에 따라 피로균열성장수명을 계산하여 피로균열성장시험 결과와 비교하였다. 최대 오차 10% 이내에서 일치하고 있음을 확인하였다.

### 2. 해석시편

#### 2.1 화학적 특징

본 연구에 사용되는 DENT 시편은 SM490b로 제조되었으며 주요혼합물 성분비는 Table 1과 같다.

제1저자 김경수 연락처: 인하대학교 선박공학과

032-860-7341 ksukim@inha.ac.kr

Table 1 Chemical Components ratio(SM490b)

Material	Composition (weight %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM490b	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035

## 2.2 물리적 특징

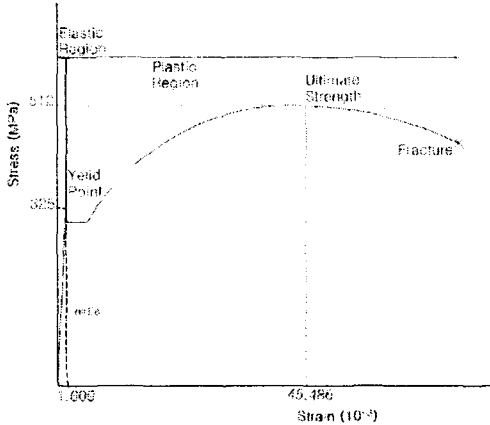


Fig. 1 Stress-Strain Curve(SM490b)

Fig. 1의 응력-변형률 선도는 탄성계수  $E=202\text{GPa}$ 와 포아송 비  $\nu=0.3$ 의 물리적 특징을 갖는 SM490b에 대해 7번의 단순인장시험으로부터 항복응력  $\sigma_y=325\text{MPa}$ , 극한강도  $\sigma_u=512\text{MPa}$ 를 얻었고 통계적인 방법을 이용하여 위의 선도를 산정하였다.

## 2.3 DENT 시편의 제원

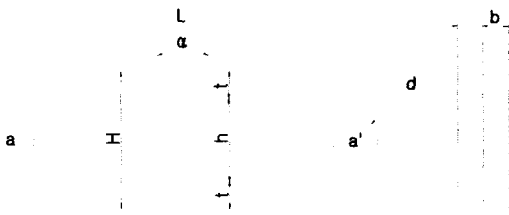


Fig. 2 Geometry of DENT Specimen

본 연구에 사용된 DENT 시편은 Fig. 2와 같은 형상을 갖고 길이  $L=300\text{mm}$ , 폭  $H=75\text{mm}$ , 두께  $b=14\text{mm}$ 의 평활시편에 유효폭  $h=45\text{mm}$ , 노치길이  $t=15\text{mm}$ , 노치각  $\alpha=60^\circ$ 인 노치를 시편 중앙양쪽에 가공하였다.

유효폭과 두께의 비가 10:1 이상일 경우 평면응력 상태로 가정할 수 있다. 그러나 위에 사용되어진 모델은 3.21:1의 비율을 갖기 때문에 두께의 영향을 고려한 3D Solid를 이용하여 모델링하였다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 해석방법

유한요소법에 의해 계산된 결과는 모델링을 구성하는 Mesh의 형태와 크기, 그리고 비율에 따라 많은 차이를 나타내며 계산과정이 수치해석에 의한 통계적 처리로 오차범위를 갖기 때문에 그 범위를 줄이기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

1) 균열선단 부근에서 육면체 요소의 가로, 세로, 높이 비율이 서로 1:2 미만인 되도록 하였다.

2) 요소들의 크기는 점진적으로 증가 또는 감소하도록 하였다.

3) 약 6,800개의 요소들로 구성되어진 해석모델을 이용한 계산결과를 기준으로 요소 수를 0.3배 증가 및 감소시킨 계산결과와 비교하여 그 차이가 5% 미만인 수렴결과를 최종결과로 사용하였다.

만약 육면체 요소의 가로 세로 비율이 1:2를 넘는 직사각형화가 되면 각 노드에 대한 하중적용오차가 발생하게 되고, 한 요소에서 이웃한 요소로의 하중적용에 영향을 주게된다. 즉 급격한 요소 크기변화는 완전한 하중 전달에 장애를 준다.

유한요소법에서 촘촘한 mesh가 항상 정확한 결과를 계산하지 못한다. 오히려 계산결과가 발산하여 오차범위가 더 커질 수도 있을 뿐만 아니라 계산과정이 지나치게 오래 수행되는 단점이 발생한다. 반면에 지나치게 성글게 mesh를 만들면 계산과정은 단축되지만 필요한 지점에서의 계산결과를 얻지 못할 수 있다. 이 때문에 적합한 mesh를 결정하는 것이 중요하다.

### 3.2 소성영역 크기 계산

MSC/NASTRAN의 nonlinear static solution을 이용하여 일 정진폭하중을 받고 있는 DENT 시편의 균열선단에 발생하는 소성영역 크기에 대한 계산을 수행하였다. 소성영역을 계산하기 위한 인자로 hardening slope 와 응력-변형률 선도가 있다. Hardening slope는 연성이 큰 금속인 알루미늄과 구리와 같이 뚜렷한 항복점이 나타나지 않는 경우에 사용되어야 하고 Fig. 1과 같이 명확한 항복점을 갖는 경우 응력-변형률 선도를 사용하여 항복이후 실제와 비슷한 변형률 거동을 계산할 수 있다. 계산에 사용된 균열길이는 ESPI system을 이용하여 균열성장시험에서 측정되어진 결과이다. 즉, 유한요소법으로 계산되어진 소성영역크기와 균열성장시험으로부터 측정되어진 결과를 비교하기 위하여 균열선단에 노드를 생성시킴으로써 동일한 균열길이를 갖는 조건에서 계산이 수행되도록 하였다. 또한 가로 세로 비율이 1:1.3 이하이고 주변 요소와의 체적비가 1.8 이하인 육면체 요소를 사용하여 삼입된 노드로 인해 요소의 크기변화가 급진적으로 변하는 것을 막아 보다 정확한 계산결과를 유도하였다.

### 3.3 균열성장수명 계산

MSC/FATIGUE를 이용하여 Fig. 3에 보인 최대하중 75kN, 최소하중 15kN 그리고 진동수 3Hz인 일정진폭변동하중이 작용하는 DENT 시편에 대한 균열성장수명을 계산하였다.

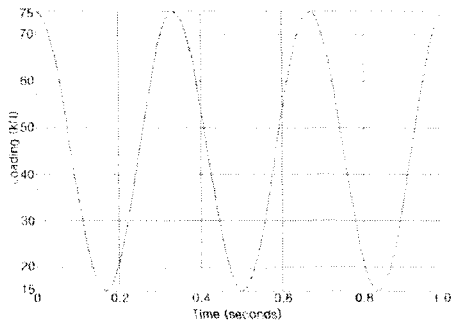
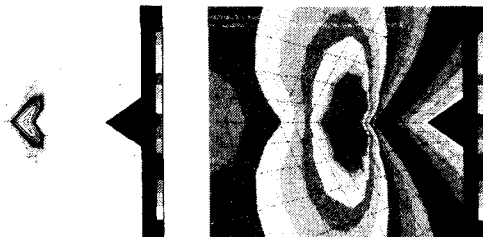


Fig. 3 Constant amplitude alternative loading history

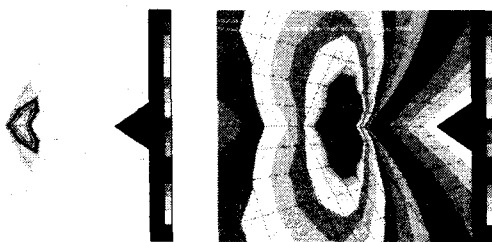
#### 4. 해석결과

##### 4.1 소성영역 크기 계산결과

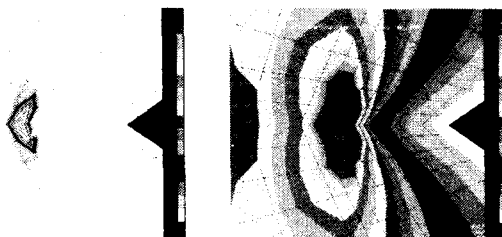
Fig. 4는 이를 MSC/NASTRAN을 이용하여 균열성장길이에 따라 계산되어진 균열선단 변형률분포결과로 왼쪽의 그림들은 Plastic Strain 탄소성해석법으로 계산한 결과이며 오른쪽의 그림들은 Tresca Criteria Strain 탄소성해석법에 의해 계산되어진 결과들이다. 또한 Table 2는 ESPI system을 이용하여 측정된 결과와 유한요소법으로 계산한 결과를 비교하고 있다. 10% 오차범위 내에서 일치하고 있다.



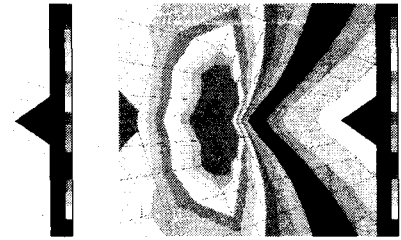
(a) At crack length,  $a=3.060\text{mm}$



(b) At crack length,  $a=3.690\text{mm}$



(c) At crack length,  $a=4.080\text{mm}$



(d) At crack length,  $a=4.520\text{mm}$

Fig. 4 Change of the plastic zone shape according to the crack length

Table 2 Comparison of the plastic zone size at the crack tip

Cycles	Plastic Zone Size (mm)	
	ESPI System	FEM Analysis
281,476	1.00854	0.9693
299,601	1.15783	1.0411
308,741	1.16589	1.0770
317,740	1.34387	1.2206

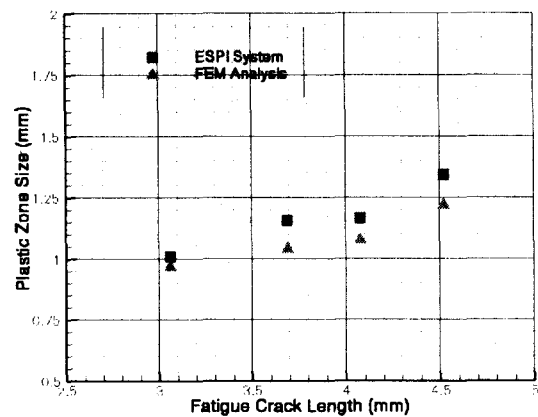


Fig. 5 Change of the plastic zone size according to the fatigue crack length

Fig. 5에 보여지는 것과 같이 균열선단에서의 소성영역 크기가 균열길이 성장에 비례하는 것을 확인할 수 있었다.

##### 4.2 균열성장수명 계산결과

Table 3 Comparison of the fatigue crack growth lives

Crack Increment (mm)	Crack Length (mm)		Crack Growth Life (cycles)	
	Initial	Final	Experiment	FEM Analysis
0.630	3.060	3.690	18,125	17,477
0.390	3.690	4.080	9,140	10,194
0.440	4.080	4.520	8,999	10,079

## 후 기

본 연구는 황해권수송시스템 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 송재영, 신찬호 (1998). "선체구조물의 피로강도 해석기법", 한국 선급연구소
- Hiroshi Tada, Paul C. Paris, George R. Irwin (2000). "The Stress Analysis of Cracks Handbook Third Edition", ASME International Three Park Ave., New York, New York 10016.
- G.C. Sih, E. Sommer, W. Dahl(editors) (1983). "Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures", Martinus Nijhoff Publishers.
- Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock (1990). "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis" Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 07632
- Walter D. Pilkey (1997). "Peterson's Stress Concentration Factors", John Wiley & Sons, Inc.
- T.L. Anderson (1995) "Fracture Mechanics 2nd Edition". CRC Press.
- Ashok Saxena (1998). "Nonlinear Fracture Mechanics for Engineer", CRC press,

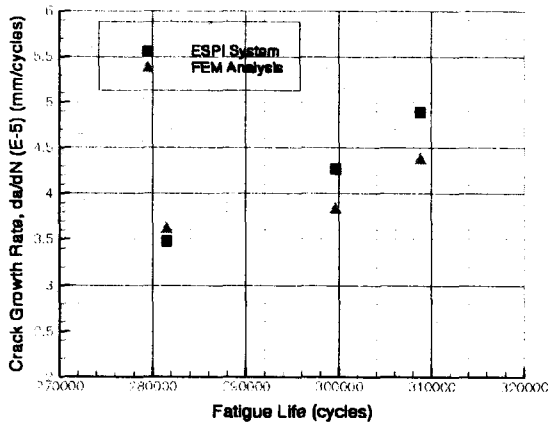


Fig. 6 Comparison of the crack growth rate

Table 3에서 보여지는 것과 같이 균열성장시험과 동일조건 하에서 MSC/FATIGUE를 이용하여 계산되어진 균열성장수명 결과는 오차범위 4~10% 이내에서 피로시험결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 6 은 균열성장률에 대한 계산결과와 실험결과와의 비교이다. 비교적 같은 경향을 보이고 있다.

## 5. 결 론

- 1) 유한요소법에 의해 계산되어진 균열성장길이에 따른 균열선단 소성영역크기는 ESPI system에 의한 측정결과와 4~10% 정도의 오차를 나타내고 있다. 따라서 탄소성유한요소법에 의한 결과를 실제 구조물의 균열성장거동 해석에 적용할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 탄소성유한요소해석으로부터 얻은 결과를 기초로 균열성장수명을 계산하였다. 실험에 의한 결과와 4~10% 오차범위에서 일치하고 있다. 이러한 유한요소해석방법을 이용하면 균열성장거동을 고려한 실제 구조물의 피로설계에 많은 도움이 될 것으로 기대되어진다.