

전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용한 피로하중을 받는 균열선단에서 탄소성 영역 측정에 관한 연구

김경수* · 심천식*

*인하대학교 선박공학과

A Study on the Measurement of Elastic-Plastic Zone at the Crack Tip under Cyclic Loading using ESPI System

KYUNG-SU KIM* AND CHUN-SIK SHIM*

*Dept. of Naval Architecture Engineering, Inha University, Incheon, Korea

KEY WORDS: ESPI System 전자스펙클패턴 간섭시스템, Elastic-Plastic Zone 탄소성 영역, Fatigue Crack Growth Length 피로 균열성장 길이, Plastic Zone Size 소성영역크기

ABSTRACT: The magnitude of the plastic zone around the crack tip of DENT(Double Edge Notched Tension) specimen and the crack growth length under cyclic loading were measured by ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) system. The measured magnitude of plastic zone was compared with the equations proposed by Irwin and calculated by a nonlinear static method of MSC/NASTRAN. The measured crack growth length by ESPI system was also compared with the obtained data by the image analysis system. From the study, it is confirmed that the plastic zone and crack growth length can be measured accurately with the high-tech equipment.

1. 서 론

실제 재료의 경우 이론적인 균열선단에서의 무한 응력은 균열선단에 발생하는 항복, 균열가치 그리고 균열성장 등 때문에 발생하지 않는다. 이 때 균열선단에 발생하는 소성영역에서 응력은 재료의 항복으로 인하여 탄성적으로 계산되어지는 값보다 작은 값을 가지고 변형률은 큰 값을 갖는다. 이는 하중에 대한 재료의 저항이 낮음을 의미한다. 이러한 이유들 때문에 균열선단에서의 소성영역은 피로균열성장률 뿐만 아니라 균열성장수명에까지 중요한 영향을 미친다.

선박 및 해양구조물과 같은 대형구조물의 경우 전체 피로수명에서 균열성장수명은 약 70% 이상의 비중을 차지하고 있기 때문에 균열성장에 관한 연구는 매우 중요하다. 지금까지 균열 성장에 관련하여 균열선단에서의 소성영역 크기 측정과 균열 성장길이 측정을 위하여 변형률 게이지 등을 이용한 여러 가지 시도가 있었지만 만족스러운 결과를 얻고 있지 못하였다. 소성영역 크기와 관련된 이론식의 경우 Irwin이 제안한 식이 널리 사용되고 있으나 평면응력과 평면변형률에 관한 2가지 식으로 제한되어져 있다.

평면응력, 변형률 상태가 아닌 일반적인 시편의 균열성장 거동을 해석하기 위해서는 두께의 영향이 고려되어진 균열선단에서의 소성영역 크기와 균열성장길이를 측정할 수 있는 실험

방법이 요구되어왔다. 최근에 시편에 발생한 균열을 비파괴적인 방법으로 측정할 수 있는 음향방출법에 관한 연구가 수행되어지고 있다(남기우, 2001; 남기우 등, 1997). 그러나 이 방법은 균열선단에 발생한 소성영역 형태 혹은 소성영역 크기를 직접 측정하는 데는 어려움이 있다.

본 연구에서는 비접촉, 비파괴적으로 일정영역에 대한 변형률 분포 측정이 가능한 ESPI system을 이용하여 일정진폭하중이 작용하는 DENT 시편 균열선단 주위의 변형률 분포를 측정 한 후, 이들 측정되어진 변형률 분포 결과로부터 균열선단에 발생한 소성영역 크기를 결정하였다. 또한 ESPI system을 이용하여 반복하중이 작용하는 시편에 피로손상이 축적되어짐에 따라 증가하는 피로균열길이 측정을 수행하였다. 결정되어진 소성영역의 크기는 Irwin이 제안한 그리고 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN에 의해 계산되어진 소성영역 크기와 비교하였고 측정되어진 균열성장길이는 화상분석 시스템을 이용하여 측정되어진 결과와 비교하였다.

2. 3D-ESPI System

ESPI system은 레이저의 간섭현상으로 생긴 위상차를 이용하여 시편 표면에 발생한 변위로부터 변형률을 측정하는 장비로서 스트레인 게이지와 같이 한점에 대한 값이 아닌 일정영역에 대한 변형률 값을 측정할 수 있다. ESPI system의 반사경에서 나온 레이저는 시편 표면에서 반사되어진다. 반사되어진 레이저는 CCD 카메라에 의해서 측정되어지고 이 때 이미지 (fringe image)는 컴퓨터 내부에 저장되어진다. 이러한 과정은

제1저자 김경수 연락처: 인천광역시 남구 용현동 253

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

시편에 하중이 작용하여 변형이 발생하기 전후에 2번 이루어진다. 이들 2개의 이미지를 비교하여 얻은 결과(subtraction correlation fringe image)를 이용하여 시편 표면에 발생한 변형률을 계산하게 된다(김경수와 심천식, 2002).

Fig. 1은 어느 한 방향으로의 평면 변형을 측정하기 위해 단 순화시킨 개념도이다. Fig. 1(a)에서 보여지는 것과 같이 같은 평면상에 위치하는 2개의 레이저 빔은 시편의 표면에서 θ_1 과 θ_2 의 각을 이루면서 반사되고 이들은 CCD 카메라에 의해서 측정되어진다. 카메라 센서에 의해 측정된 광도(intensity)는 다음과 같다.

$$I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi) \quad (1)$$

여기서 I_1 과 I_2 는 각 레이저 빔에서 산란(scatter)되어진 빛의 광도이고 $\Delta\psi$ 는 2개의 레이저 빔 사이의 위상차(phase difference)이다.

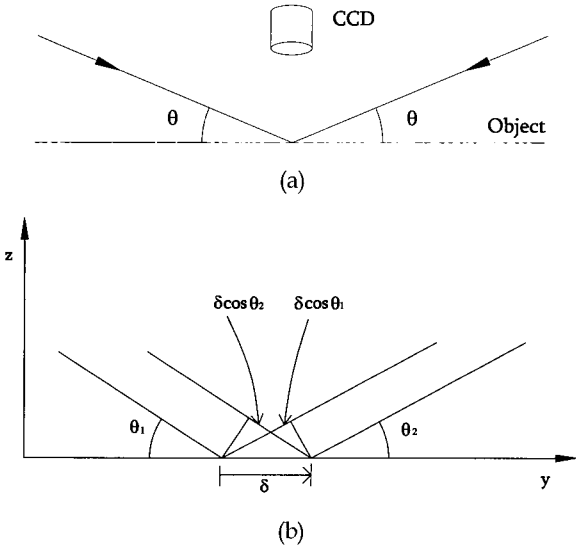


Fig. 1 Illumination configuration for in-plane electronic speckle pattern interferometry analysis

산란되어진 빛의 고유 특성 때문에 $\Delta\psi$ 는 일정하지 않다. 하중이 작용하여 시편 표면에 작은 변위가 발생한 후에 I_1 과 I_2 광도는 거의 일정하게 유지된다. 그러나 위상차는 $\Delta\psi + \Delta\psi'$ 로 변한다. 여기서 2개의 이미지를 비교하여 얻은 광도와 $\Delta\psi'$ 를 이용하여 측정위치에서 fringe order, N 를 결정한다. 만일 y 방향으로 변위가 발생하였고 레이저 빔이 yz 면에 있다면 Fig. 1(b)에서 위상차(optical pathlength difference)가 $\delta(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$ 와 같으며, 변위는 식 (2)와 같다.

$$\delta = \frac{N\lambda}{\cos\theta_1 + \cos\theta_2} \quad (2)$$

2개의 이미지 사이에 변형률 증분량은 $\Delta\varepsilon = d\delta/dy$

이고 fringe separation 은 $\delta y = dy/dN$ 라 하자. 이 때 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 라 하면 식 (2)는 아래와 같이 된다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\lambda}{2\Delta y \cos\theta} \quad (3)$$

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 일반 구조용강(SM490B)이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2에 보이는 바와 같다. 시편은 ASTM E338-91에 따라 설계되었고 시험영역 폭(w)이 45mm 이고, 두께(t)가 14mm 인 사각단면을 갖는다. 방전가공을 이용하여 V 형태를 갖는 노치를 시편 중앙 양쪽면에 만들었다. 시편에 만들어진 노치에 관한 기하학적 형태는 Fig. 2에 보여지고 있다.

Table 1 Chemical composition of SM490B

Material	Composition (weight %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035

Table 2 Mechanical properties of SM490B

Yield stress (MPa)	325
Ultimate tensile stress (MPa)	490
Young's modulus (MPa)	202,000
Poisson's ratio	0.3

Double Edge Notched Tension (DENT) Specimen

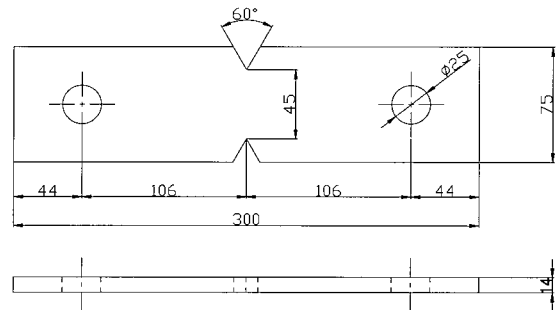


Fig. 2 Geometry of the DENT specimen (unit: mm)

3.2 실험방법

500kN 최대하중과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고 있는 유압서보식 만능시험기, 시험영역에서의 변형

를 분포 측정이 가능한 3D-ESPI system 그리고 균열길이 0.001mm 까지 측정 가능한 화상분석 시스템을 이용하여 균열 성장시험을 수행하였다.

주파수 3Hz, 하중비 R 이 0.2, 평균하중 45kN 하중크기 30kN를 갖는 사인파 형태의 일정진폭하중을 균열성장시험에 사용하였다. 이들 시험중에 균열길이 성장에 따라 ESPI system 을 이용하여 균열선단에 발생한 소성영역 크기를 측정하였다.

일정진폭하중하의 피로균열성장시험은 거시적으로 응력상태를 일정하게 유지하고 있지만, 균열이 전파함에 따라 균열선단의 파괴조건, ΔK 가 증가하게 되고 피로균열성장률도 증가하게 된다. 이 때 피로균열성장률에는 많은 변동성을 포함하게 되는데 이는 재료의 불균질성에 의한 균열선단에서의 균열성장에 대한 성장저항이 불규칙하게 변하기 때문이다(김선진, 1999; 김선진과 안석환, 2000).

ASTM의 균열성장시험에 관한 규정에 따르면 균열전파속도가 $1 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 이상으로 증가할 경우 균열성장속도는 미소구조변화, 균열가지와 같은 균열선단 형상변화 등 많은 인자에 의해 상당히 민감하게 반응하여 변동량이 증가한다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 노치선단 응력확대계수 $\Delta K = 24 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에 기준하여 일정진폭하중의 크기를 결정하고 균열전파속도가 $1 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 범위내에서 변화하도록 하였다 (ASTM, 1999).

4. 실험결과

4.1 균열선단 소성영역크기

일정진폭하중이 작용하는 균열성장시험중에 ESPI system을 이용하여 하중크기에 따라 균열선단에 발생한 소성영역의 크기를 측정하여 Irwin이 제안한 식으로부터 계산된 소성영역 크기와 비교하였다.

피로반복하중이 증가함에 따라 균열선단 주변 변형률 분포 변화는 Fig. 3에 보여지는 것과 같이 ESPI system 에 의해서 측정되어졌다. 이들 측정되어진 변형률 분포 결과들로부터 균열선단에서 소성영역 크기를 결정하였고 그 결과가 Table 3에 보여지고 있다. 소성영역 크기는 균열길이가 성장함에 따라 증가되어짐을 보여준다.

평면응력상태의 경우 소성영역 내의 항복으로 인하여 응력은 탄성응력장 식에 의해서 계산되어지는 값보다 작은 값을 갖게되고 하중에 대한 재료적 저항은 낮아지며 큰 변형이 발생하게 된다.

Table 3 The plastic zone size at the crack tip in measured by ESPI system

Cycles	Plastic Zone Size (mm)
281,476	1.00854
299,601	1.14783
308,741	1.16589
317,740	1.24387

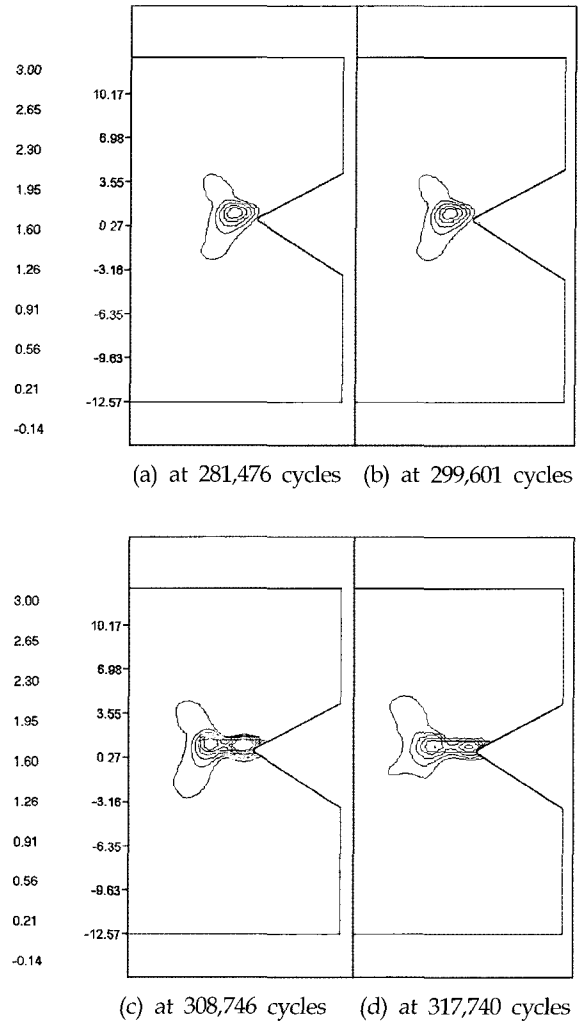


Fig. 3 Change of plastic zone shape measured by ESPI system according to cyclic loading

반면 평면변형률상태의 경우에는 응력 σ_z 가 값을 가짐에 따라 항복을 일으키는데 큰 응력을 필요로 하고 결과적으로 평면응력 상태의 소성영역보다 작은 소성영역을 갖게된다. Irwin 은 다음과 같이 평면응력과 평면변형률상태에 대한 소성영역의 크기를 정의하였다(Anderson, 1995).

$$2 r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (\text{for plane stress}) \quad (4)$$

$$2 r_p = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (\text{for plane strain}) \quad (5)$$

이들 소성영역에 대한 식은 작용하중과 균열길이 등에 영향을 받는 최대응력확대계수에 의해 결정되는 간단한 가정에 기초를 두고 있기 때문에 두개의 영향을 포함한 여러 가지 복잡한 실제 조건을 고려하지 못하고 있다(Dowling, 1993). 따라서 실제조건을 고려하여 ESPI system으로 측정된 소성영역의 크기는 평면응력상태와 평면변형률상태의 값 사이에 위치하여야 한다.

Table 4 Calculation of the plastic zone size from Irwin's estimate according to the crack growth length measured by ESPI system

Cycles	Crack growth Length	Plastic Zone Size (mm) from Irwin's equation	
		Plane Stress	Plane Strain
281,476	3.060	1.26525	0.42175
299,601	3.690	1.33583	0.44528
308,741	4.080	1.38210	0.46070
317,740	4.520	1.43695	0.47898

균열성장길이에 대하여 소성영역 크기변화를 보여주고 있는 Fig. 4는 ESPI system을 이용하여 측정된 결과와 Irwin의 식을 이용한 계산결과를 비교하고 있다. 보여지는 것과 같이 ESPI system 으로 측정된 소성영역 크기는 Irwin의 두값 사이에 위치하며 균열길이에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다.

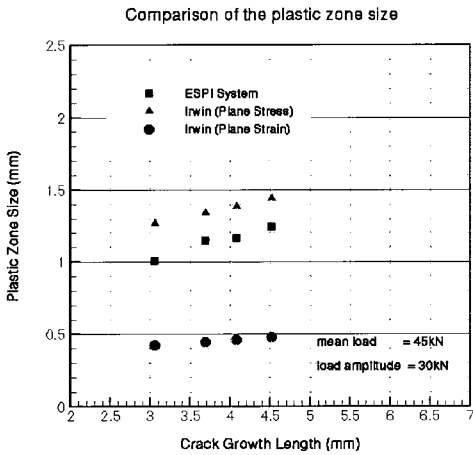


Fig. 4 Comparison of the plastic zone sizes on the basis of the crack growth length measured by ESPI system

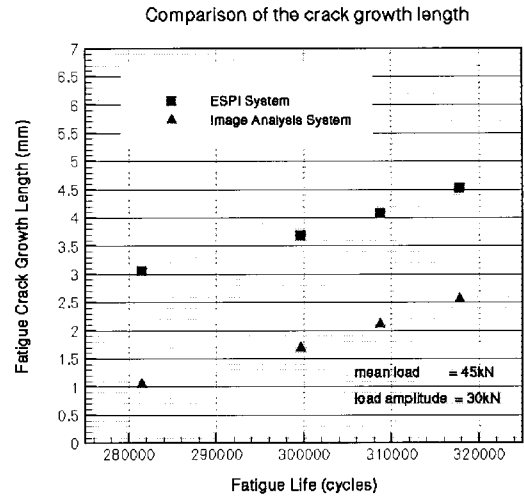
4.2 균열성장길이

화상분석시스템과 ESPI system을 이용하여 일정진폭반복하중이 작용하는 균열선단에서 피로손상이 축적되어짐에 따라 성장하는 균열성장길이를 측정하였다. Table 5와 Fig. 5에 보여지는 것과 같이 ESPI system을 이용하여 측정된 균열성장길이를 화상분석시스템을 이용하여 측정된 결과와 비교하였다.

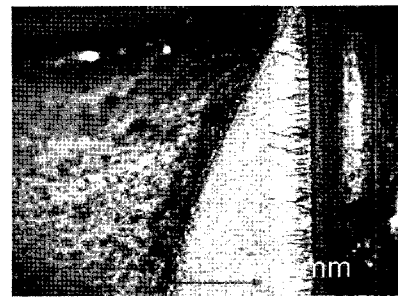
Table 5 Comparison of the crack growth length

	Crack Growth Length	
	ESPI System	Image System
a_{281476} (mm)	3.06	1.036
a_{299601} (mm)	3.69	1.680
a_{308741} (mm)	4.08	2.092
a_{317740} (mm)	4.52	2.549

where a_n (mm) is the crack growth length at n cycles loading



(a) Crack growth length curve



(b) Fracture surface for fatigue in test specimen

Fig. 5 Crack growth length curve determined by ESPI system and image analysis system

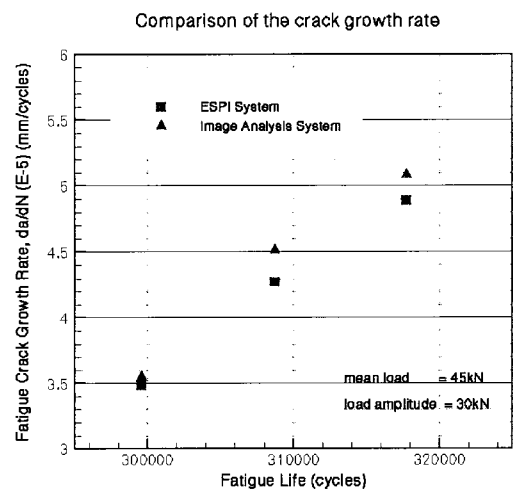


Fig. 6 Comparison of crack growth rate measured by ESPI system and image analysis system

시험결과에서 보여지듯이 ESPI system에 의한 결과와 화상 분석시스템에 의한 결과 사이에 2mm 차이가 균일하게 유지되

어진다. Fig. 5 (b)는 파단면에 발생한 균열성장 사진이다. 두께가 큰 시편의 경우 표면에서 측정되어지는 균열길이와 중심단면에서의 균열길이와의 차이가 발생할 수 있음을 보여주고 있다. ESPI system으로 측정되어진 균열길이는 두께의 영향이 고려되어진 중심단면에서의 균열길이이다. Fig. 6은 ESPI system과 화상분석시스템을 이용하여 측정한 균열성장률이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

5. 유한요소해석을 이용한 계산결과

5.1 소성영역 크기 계산 및 비교

MSC/NASTRAN의 nonlinear static solution을 이용하여 일정피로하중을 받고 있는 DENT 시편의 균열선단에 발생하는 소성영역 크기에 대한 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 균열길이는 ESPI system을 이용하여 균열성장시험에서 측정되어진 결과이다. 유한요소법으로 계산되어진 소성영역크기와 균열성장시험으로부터 측정되어진 결과를 비교하기 위하여 균열선단에 노드를 생성시킴으로서 동일한 균열길이를 갖는 조건에서 계산을 수행하였다.

Fig. 7은 MSC/NASTRAN을 이용하여 균열성장길이에 따라 Tresca criteria strain 탄소성해석법에 의해 계산되어진 균열선단 변형률 분포 결과이다.

또한 Table 6과 Fig. 8에서 ESPI system을 이용하여 측정한 결과와 유한요소법으로 계산한 결과를 비교하였다. 10% 오차 범위 내에서 일치하고 있다.

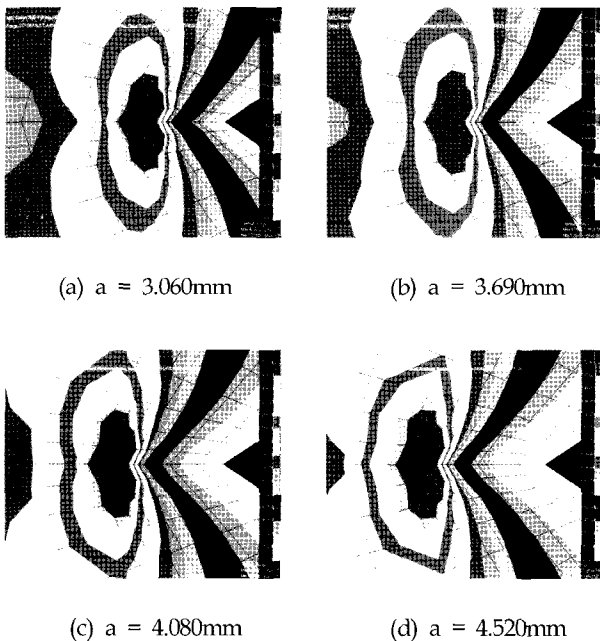


Fig. 7 Change of the plastic zone shape according to the crack growth length

Table 6 Comparison of the plastic zone size at the crack tip

Cycles	Crack Growth Length	Plastic Zone Size (mm)	
		ESPI System	FEM Analysis
281,476	3.060	1.00854	0.9693
299,601	3.690	1.14783	1.0411
308,741	4.080	1.16589	1.0770
317,740	4.520	1.24387	1.2206

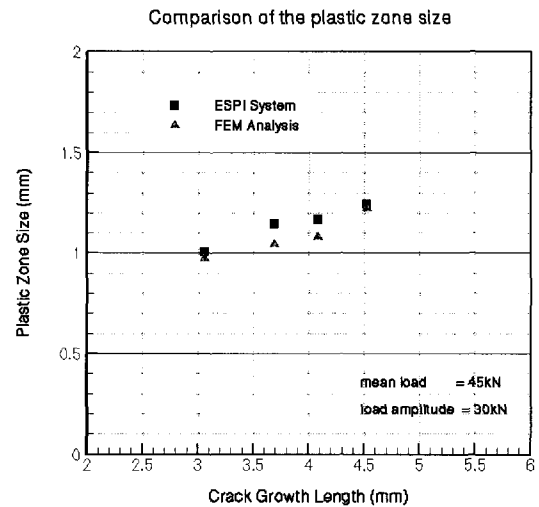


Fig. 8 Comparison of the plastic zone size according to the fatigue crack growth length

6. 결 론

- 1) ESPI system을 이용하여 측정한 변형률 분포로부터 소성영역 형태와 크기를 결정할 수 있었다. 이들 결과는 Irwin의 이론식에 의한 평면변형률과 평면응력상태의 소성영역 크기 사이에 위치하고 있음을 확인하였다.
- 2) 탄소성 유한요소해석에 의해 계산되어진 균열성장길이에 따른 균열선단 소성영역 크기는 ESPI system에 의한 측정결과와 4~10% 정도의 오차를 나타내고 있다. 이들 결과비교로부터 ESPI system에 의한 측정결과인 소성영역 크기의 신뢰도를 확보할 수 있었다.
- 3) ESPI system을 이용하여 피로반복하중이 작용하는 시편에서 피로균열성장길이 측정을 수행하였다. 일반적으로 화상분석시스템은 시편표면에 발생한 피로균열성장길이를 측정할 수 있는 반면 ESPI system은 시편중심단면에서의 균열길이까지 측정이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 ESPI system을 이용하여 균열선단에서의 소성영역크기와 균열성장길이 측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 피로시험시 초기균열발생 시기와 균열성장속도를 알 수 있어 균열성장수명을 비교적 정확하게 예측할 수 있으며 균열의 성장과 지연에 대한 기초연구에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 김경수, 심천식 (2002). "3D-ESPI 시스템을 이용하여 결정된 응력집중계수가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제1호, pp 46-51.
- 김선진 (1999). "피로균열전파저항의 변동성에 의한 균열전파율의 해석", 대한기계학회논문집, 제23권, 제7호, pp 1139-1146.
- 김선진, 안석환 (2000). "강재의 피로균열전파율에 미치는 시험편 크기의 영향", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 99-105.
- 남기우 (2001). "알루미늄 5083의 피로균열 진전에 따른 수명에 측 및 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 94-98.
- 남기우, 김선진, 이진찬, 오정환, 오세규, 이주석 (1997). "표면 균열재의 피로균열관통거동에 따른 어코스티시티션", 한국해양공학회지, 제11권, 제3호, pp 29-38.
- Anderson T.L. (1995). Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications, CRC Press.
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, No. E647-99
- Dowling N.E. (1993). Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall.

2002년 6월 24일 원고 접수

2002년 8월 7일 최종 수정본 채택