

3D-ESPI 시스템을 이용하여 결정된 응력집중계수가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구

김경수* · 심천식*
* 인하대학교 선박공학과

A Study on the Effect of Stress Concentration Factor Determined by 3D-ESPI System on the Fatigue Life

KYUNG-SU KIM*, CHUN-SIK SHIM*

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

KEY WORDS: 3D-ESPI System 3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템, Fatigue Life 피로수명, Stress Concentration Factor 응력집중계수, Semi-circular Edge Notch 끝단반원노치, Strain Distribution 변형률 분포

ABSTRACT: Fatigue life estimation by the theoretical stress concentration factors are, in general, considerably different from test results. And in calculating stress concentration factor, it is very difficult to consider actual geometry and material property which are the notch shapes, imperfections or defects of materials such as porosities inclusions and casting defects, etc. Therefore, the paper deals with the experimental method to find out the more exact stress concentration factors by measuring the strain distributions on each specimen by 3D-ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) System. Then the fatigue lives are compared between theoretical calculations using stress concentration factors determined by 3D-ESPI system and fatigue test results.

1. 서 론

선박 및 해양구조물과 같은 대형 용접구조물에서는 용접부의 미세균열을 피하기 어려울 뿐만 아니라 그 기하학적 형상의 복잡성 때문에 국부적인 응력집중이 발생하게 된다. 또한 구조물에 작용하는 복잡한 외력에 의해 해석하고자 하는 구조부재는 다축 하중 상태에 있게 되고 이로 인하여 정확한 응력집중위치와 응력집중계수를 산정하는 것이 어려워 피로수명 예측에 대한 심한 편차가 발생하고 있다.

일반적으로 선박의 피로수명계산에 사용되어지는 응력-수명 방법에서는 응력집중계수와 피로노치계수가 피로수명계산 결과에 큰 영향을 미치며 이 값들은 경험식으로부터 결정된 이론적 계수값들이 사용되어진다. 구조물의 기하학적 형상이 단순한 경우 이들 계수값을 결정하기 위하여 단지 기하학적 형상과 하중형태에 의존하는 경험식들을 이용할 수 있지만 기하학적 형상이 복잡한 구조물의 경우에는 이 경험식들을 이용하여 계산된 응력집중계수와 피로노치계수로부터는 신뢰할 만한 피로수명을 얻을 수 없다.

지금까지 응력집중계수와 피로노치계수값을 결정하는 실험적 방법으로는 통상 변형률 게이지를 이용하였다. 그러나 변형률 게이지는 부착의 불편함과 게이지 사이즈에 의한 측정 한

계성 등과 관련된 어려움이 있다. 또한 변형률 게이지는 측정하는 한점에 대한 변형률값을 제공하기 때문에 복잡한 형상을 갖는 구조물의 응력집중부에 대한 측정과 피로시험시 균열시작부의 측정에는 측정 위치 선정의 어려움이 있다.

그러나 3D-ESPI System 을 이용한 변형률 측정방법은 한점이 아닌 측정영역 전체에 대한 변형률값을 제공하기 때문에 복잡한 구조물의 응력집중부 및 균열 시작점의 위치를 쉽게 찾을 수 있을 뿐만 아니라 그 주변 영역의 정보도 제공 받을 수 있으며 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 물체변형에 대한 측정감도가 좋고 비파괴, 비접촉 변형률 측정이 가능하며 3차원 정보 추출이 가능한 장점이 있다. 또한 이와 같이 측정된 변형률 분포는 시편의 기하학적 형상은 물론 노치가공상태 등이 종합적으로 고려되어진 응력집중계수 결정을 가능하게 한다.

본 연구에서는 노치를 포함하는 시편의 응력집중계수를 인장하중 하에서 3D-ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) System에 의해서 측정되어진 변형률 분포로부터 결정하였다. 이와 같이 결정된 응력집중계수는 동종의 시편인 경우에도 노치가공상태, 재료의 불균질성 등이 고려되어지기 때문에 서로 다른 값을 갖을 수 있으며 동종의 시편일지라도 피로시험을 통해 얻어진 피로수명들이 상이할 수 있다. 따라서 이들 응력집중계수와 응력-수명 방법을 이용하여 피로수명을 계산하고 이들 계산되어진 피로수명결과들을 피로시험으로부터 얻은 각 시편의 피로수명결과들과 비교하였다.

제1저자 김경수 연락처: 인천시 남구 용현동 253 인하대학교
032-860-7341 ksukim@inha.ac.kr

2. 3D-ESPI System

지금까지 일반적인 구조시험에서 변형률 측정을 위하여 변형률 게이지를 이용하였다. 그러나 균열 끝단, 기하학적 불연속을 갖는 용접라인 등과 같은 변형률 게이지 부착이 어려운 입계점에서 측정할 변형률값은 실제 변형률값과 상당한 차이를 보였다.

이에 비해 3D-ESPI System 을 이용한 변형률 측정방법은 균열선단, 노치부 등을 포함하는 관심영역 전체의 변형률을 측정할 수 있으며 장치의 이동, 설치 및 조작이 간편한 여러 장점들을 가지고 있다. 사용레이저의 파장이 측정 기준이 되므로 영점조정이 필요없고, 정보가 전자적으로 처리되기 때문에 기록 및 컴퓨터 인터페이스가 쉬운 특징들을 가지고 있다. 또한 본 시스템의 측정감도는 $0.03 \mu\text{m}$ 이고 측정영역은 최대 $300 \times 400 \text{mm}^2$ 이다.(Wykes, 1982)

Fig. 1에서 보여지는 것과 같이 3D-ESPI System 은 CCD 카메라와 레이저 다이오드를 이용한 변형률 측정장비로서 CCD 카메라 내부에는 2개의 레이저 다이오드가 있다. 이 레이저 다이오드는 각각 2개의 레이저 빔으로 나누어져 x, y, z 방향의 변형률을 측정한다. 본 시스템은 변형이 발생하기 전의 스페클 패턴 이미지(Step 1)와 변형이 발생한 후의 스페클 패턴 이미지(Step 2)를 비교하여 레이저 1과 레이저 2 사이 초기 위상차

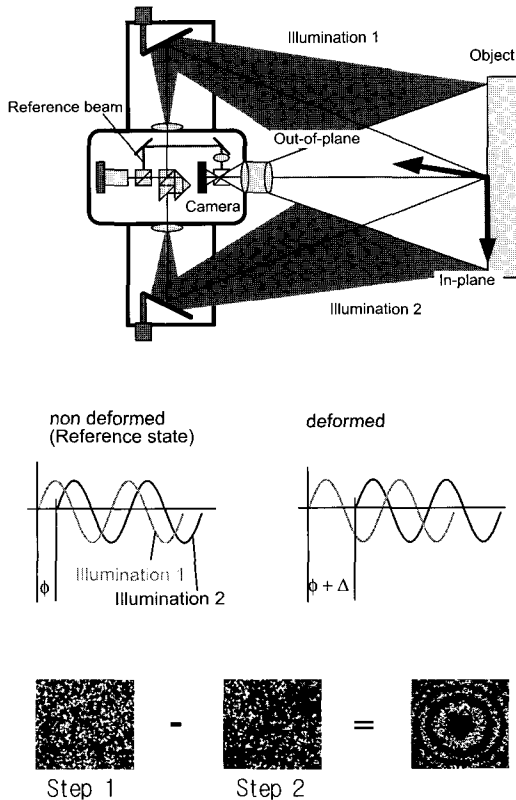


Fig. 1 Principle of 3D-ESPI System, wave profile and Speckle Pattern Images

ϕ 에 추가적으로 발생한 위상차 Δ 를 결정하고 이 값을 변형률 계산식 (1)에 대입하여 하중에 의해 시편에 발생한 변형률을 계산하게 된다.(Winther, 1988)

$$d = \frac{N \cdot \lambda}{2 \cos(a/2)} \quad (1)$$

Where d : 측정방향으로의 변형률

N : 측정위치에서 fringe order

λ : 사용되어지는 파장

a : 측정방향과 레이저 광원 사이의 각

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 일반 구조용강(SAE1045)이며, 이 재료의 특성은 Table 1 에 보이는 바와 같다. 시편은 ASTM E466-96 에 따라 설계되었고 시험영역 폭(w)이 45 mm 이고, 두께(t)가 15 mm 인 사각단면을 갖는다. 방전가공을 이용하여 시편에 반원형태를 갖는 노치를 시편 중앙 양쪽면에 만들었다. 시편에 만들어진 노치에 관한 기하학적 정보는 Table 2 에 나타난 바와 같고 이들 2가지 형태의 시편을 Type I, II로 구분하였다.[Fig. 2]

Table 1 Mechanical properties of specimens

| E (MPa) | ν | S_y (MPa) | S_u (MPa) |
|---------|-------|-------------|-------------|
| 202,000 | 0.3 | 382 | 621 |

Table 2 Geometries of Type I, II specimens

| Type | Test Section | | |
|------|--------------|----------------|----------------------|
| | Width (mm) | Thickness (mm) | Radius of Notch (mm) |
| I | 45 | 15 | 2.5 |
| II | 45 | 15 | 4.0 |

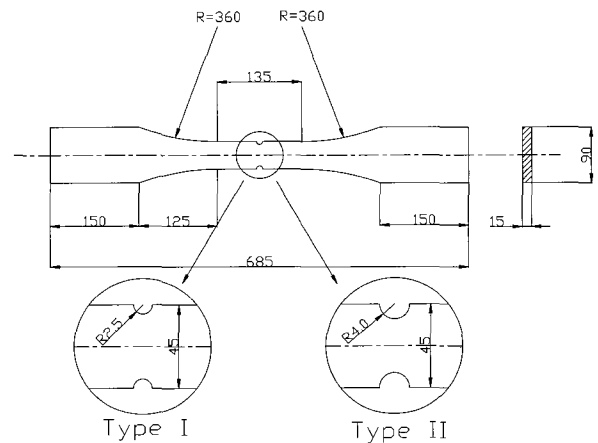


Fig. 2 Configuration of Type I, II Specimen with semi-circular edge notch (unit: mm)

3.2 인장시험

인장시험은 상온의 대기 중에서 500kN 최대하중을 갖는 유압서어보식 만능시험기에 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고, 준정적시험에 요구되어지는 0.3%/min 이하의 변형률속도를 갖는 하중제어를 이용하여 수행하였다. 작용하중은 시험편의 길이방향으로만 작용하도록 하였다.

시험편에 발생하는 변형을 측정은 스트레인게이지와 3D-ESPI System을 이용한 2가지 방법으로 모두 측정하였다. 스트레인게이지는 0.1 scan/sec 속도로 데이터 수집장치에 저장하였다. 동시에 3D-ESPI System을 이용하여 목표하중까지 몇 개의 단계로 나누어 변형률을 측정하였다. Type I, II 시험편에 대하여 인장하중 20kN, 30kN 그리고 150kN 에서 발생하는 각각의 변형률을 측정하였다.

3.3 피로시험

피로시험은 Type I, II 시험편에 대하여 인장시험에서 사용한 동일 시스템으로 하중제어를 이용하여 수행하였다. 시험편에는 3Hz 의 주파수와 90kN 의 평균하중 그리고 75kN 의 하중 크기를 갖는 일정진폭반복하중을 작용하였다. 피로시험 중에 균열끝단 주위에 축적되어지는 피로손상에 따라 발생하는 변형률 분포 변화를 3D-ESPI System을 이용하여 측정하였다.

4. 시험결과

4.1 Type I, II 인장시험결과

Type I, II 시험편에 대한 인장시험을 수행하였다. 20 kN, 30 kN, 150 kN 의 인장하중을 작용하였다. 시험편의 노치를 제외한 시험영역은 두께 15 mm 와 폭 45 mm 를 갖으며 노치반경은 각각 2.5 mm, 4.0 mm 이다. 변형을 게이지를 이용하여 노치 끝단 부근에서 측정되어진 변형률은 Table 3 과 같다. Type I, II 시험편에 하중 150kN 이 작용할 때 시험편 앞면 시험영역에서 3D-ESPI System 을 이용하여 측정되어진 변형률 분포는 Fig. 3, Fig. 5 와 같다.

Fig. 4, Fig. 6에 보여지는 실선은 3D-ESPI System 에 의해서 측정되어진 변형률 분포로부터 얻어진 노치의 중심을 통과하는 시험영역 중앙 단면에서 주변형률 ϵ_1 profile 이다. 또한 Fig. 4, Fig. 6에 보여지는 점들은 시험편의 중앙 단면의 왼쪽, 가운데, 오른쪽에 위치하고 있는 변형률 게이지에서 측정되어진 변형률 값들이다. 보여지는 바와 같이 3D-ESPI System 은 관심 영역전체에 대한 변형률 분포를 제공하기 때문에 변형률 게이지에 의해서는 얻기 어려운 영역에서의 변형률 분포 측정을 가능하게 하였다. 스트레인 게이지와 3D-ESPI System에 의해 측정되어진 변형률이 서로 잘 일치함을 보여주고 있다.

인장시험에서 3D-ESPI System을 이용하여 측정되어진 변형률 분포로부터 각 시험편의 노치전단변형률과 공칭변형률을 이용하여 응력집중계수를 계산한다. Table 5에서 보여지는 것과 같이 노치반경이 같은 Type I 혹은 Type II 의 동일한 시험편들 사이에서 방전가공에 의해 만들어진 노치의 기하학적 형상 차이에 의해서 서로 다른 응력집중계수값을 보이고 있다.[Table 4](김경

수 등, 2001; Peterson, 1974)

Table 3 Smooth specimen tensile strain data of Type I, II using strain gauge

| Type | Load | Strain | | |
|------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | Left | Center | Right |
| I | 20 kN | 1.760×10^{-4} | 1.467×10^{-4} | 1.760×10^{-4} |
| | 30 kN | 2.347×10^{-4} | 2.054×10^{-4} | 2.200×10^{-4} |
| | 150 kN | 1.172×10^{-3} | 1.013×10^{-3} | 1.187×10^{-3} |
| II | 20 kN | 1.174×10^{-4} | 1.027×10^{-4} | 1.174×10^{-4} |
| | 30 kN | 2.933×10^{-4} | 2.787×10^{-4} | 2.347×10^{-4} |
| | 150 kN | 1.245×10^{-3} | 1.041×10^{-3} | 1.384×10^{-3} |

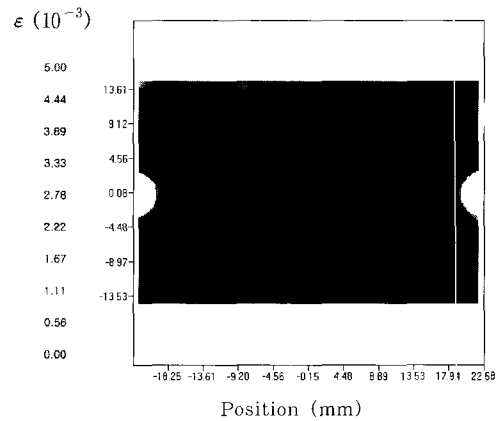


Fig. 3 Strain Distribution of Type I under 150kN

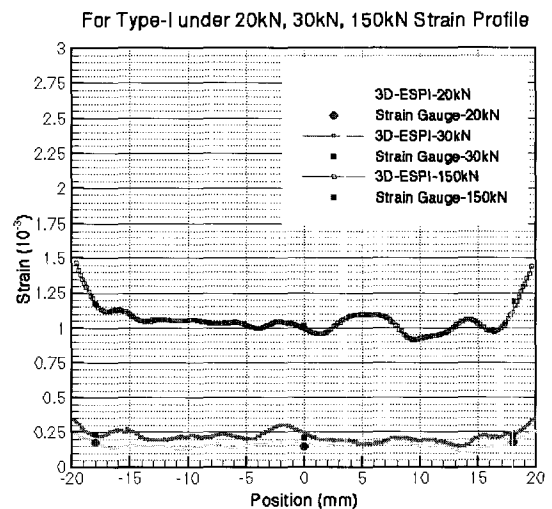


Fig. 4 Strain profile of Type I under 20kN, 30kN, 150kN

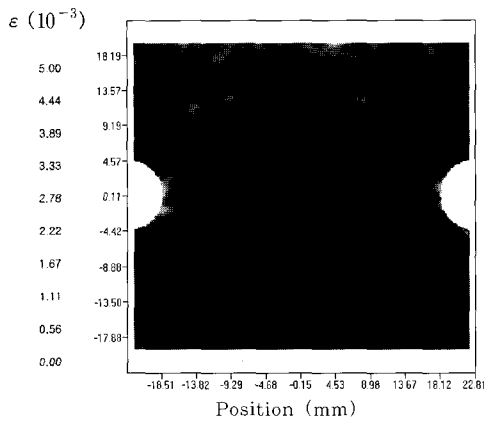


Fig. 5 Strain distribution of Type II under 150kN

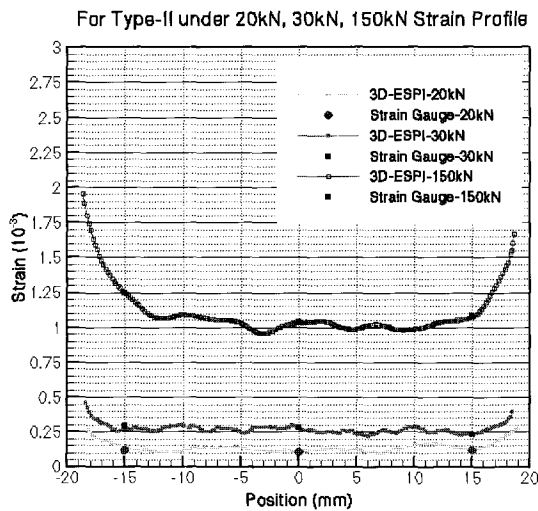


Fig. 6 Strain profile of Type II under 20kN, 30kN, 150kN

4.2 피로수명 계산결과

각 시편의 인장시험에서 3D-ESPI System을 이용하여 측정 되어진 변형률 분포로부터 결정된 응력집중계수와 응력-수명 방법을 이용하여 일정진폭반복하중을 받고 있는 Type I, II 각 시편에 대한 피로수명을 다음과 같이 계산하였다.[Table 4]

먼저 3D-ESPI System 에 의해서 결정된 응력집중계수와 재료상수, 노치선단 반경에 의해서 결정된 notch sensitivity factor 를 이용하여 피로노치계수를 계산한다. 이렇게 계산되어진 피로노치계수는 노치가 없는 시편의 피로강도가 노치에 의해서 실제적으로 감소한 강도의 비를 의미한다. 장기 피로수명을 계산하는데 있어 표면처리, 사이즈 영향 등과 관련된 감소계수를 이용하여 피로한계를 계산한다. 노치가 있는 부재에 대한 수정된 S-N 곡선을 계산하는 Juvinal approach(Juvinal, 1967)와 앞서 계산되어진 피로노치계수, 피로한계를 이용하여 피로수명 계산에 기초가 되는 S-N 곡선을 결정한다. 마지막으로 수정되어진 Goodman 식을 사용하여 작용하중의 평균응력이 고려된 등가완전교번응력을 계산한 후, 이 응력에 해당하는

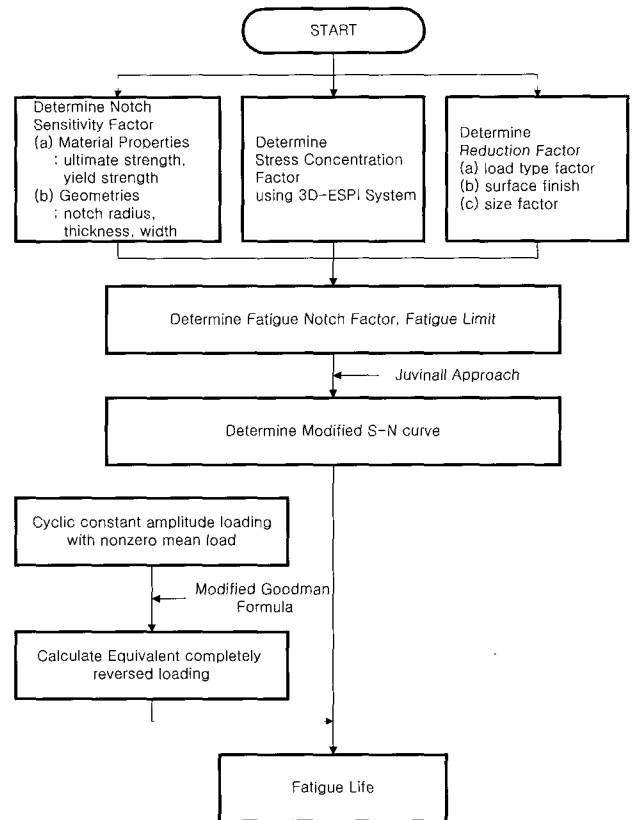


Fig. 7 Stepwise procedure for fatigue life calculation

피로수명을 계산한다. Fig. 7 는 계산과정을 나타내는 흐름도이다. 시편의 기하학적 형상, 재료 물성치, 작용하중에 따른 피로수명 계산과정은 수치해석 소프트웨어 Mathematica 를 이용하여 프로그래밍 하였다.(Dowling, 1993; Julie, 1993; 김선진, 2000)

4.3 피로시험결과

Type I, II 시편에 평균하중, 90kN, 하중크기, 75kN, 주파수, 3Hz 의 일정진폭반복하중을 작용하여 피로시험을 수행하였다. 이들 피로시험으로부터 얻은 각 시편의 피로수명 결과들과 계산되어진 피로수명 결과들을 비교하였다. 3D-ESPI System을 이용하여 측정된 변형률 분포로부터 결정되어진 응력집중계수를 사용하여 계산된 피로수명 결과가 피로시험으로부터 얻은 실제 피로수명 결과와 오차 10% 이내에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.[Table 4, Fig. 8]

또한 동종의 시편일지라도 서로 다른 응력집중계수가 측정 되었으며, 피로시험을 통해서도 피로수명이 응력집중계수의 크기에 반비례하여 변화함을 알 수 있었다. 즉 응력집중계수가 높은 시편(F-25-3)이 응력집중계수가 가장 낮은 시편(F-25-1)보다 현저히 피로수명이 단축됨을 알 수 있었다.

반복하중이 작용하는 반원형태의 양쪽 노치를 갖는 시편의 피로시험에서 피로손상 축적에 따른 변형률 분포 변화를 측정하였다. 측정 시점은 계산되어진 피로수명 결과를 기준으로 결정하였다. Fig. 9(a), 10(a)에서 보여지는 것과 같이 항복은 노

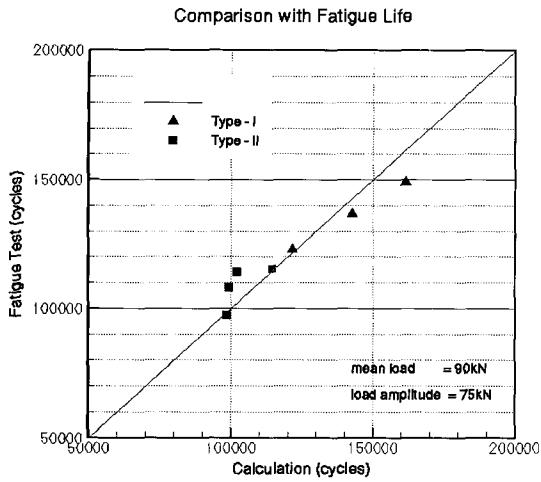


Fig. 8 Comparison with fatigue lives under mean load, 90kN and load amplitude, 75kN

Table 4 Comparison of fatigue life under cyclic constant amplitude loading

| Type | Model | S.C.F | | Fatigue Life (cycles) | | Ratio(%) N_{fe}/N_{ft} |
|------|--------|---------------|---------------------|-----------------------|-----|-----------------------------|
| | | Using 3D-ESPI | Calculated N_{fe} | Test N_{ft} | | |
| I | F-25-1 | 1.560 | 161,539 | 148,975 | 108 | |
| | F-25-2 | 1.675 | 142,799 | 136,633 | 104 | |
| | F-25-3 | 1.866 | 121,538 | 122,854 | 99 | |
| II | F-40-1 | 1.785 | 98,758 | 97,134 | 102 | |
| | F-40-2 | 1.737 | 102,359 | 114,033 | 90 | |
| | F-40-3 | 1.773 | 99,621 | 107,960 | 92 | |

Where N_{fe} is calculated fatigue life using 3D-ESPI System. N_{ft} is a fatigue test result.

치 주변 작은 영역에서 발생함을 관찰할 수 있었다. 반복하중이 계속적으로 작용함에 따라 피로손상이 축적되어져 소성영역이 확장되어지는 형태를 3D-ESPI System을 이용하여 관찰할 수 있었다.[Fig. 9, 10]

5. 결 론

본 연구는 3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용한 비접촉 변형률 측정방법을 이용하여 일반 구조용강을 모재로 한 시험편에 대하여 인장시험을 수행하였고 인장시험에서 측정되어진 변형률 분포로부터 응력집중계수를 결정한 후 피로수명을 계산하였다. 또한 피로시험으로부터 얻은 피로수명결과와 계산결과를 비교하였다.

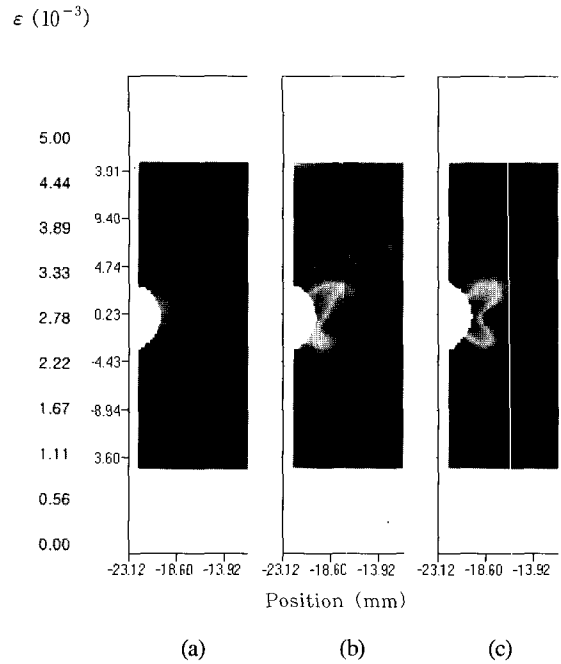


Fig. 9 Change of strain distribution of Type I specimen according to accumulated damage: (a) at 98,872 cycles, (b) at 104,472 cycles, (c) crack initiation at 109,247 cycles

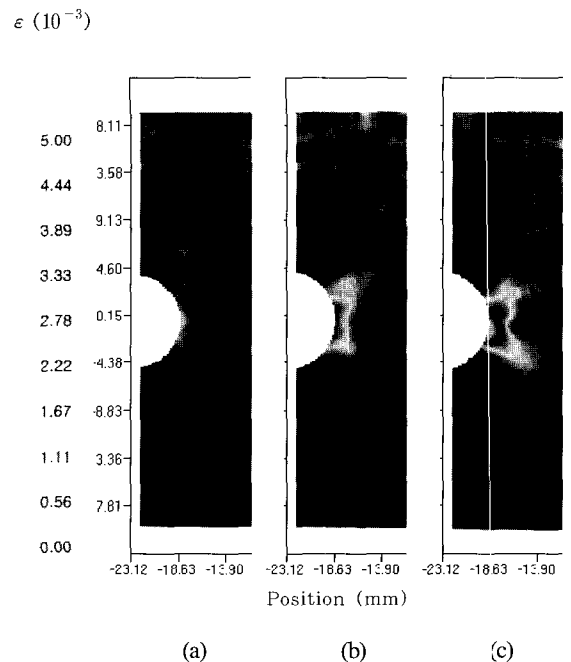


Fig. 10 Change of strain distribution of Type II specimen according to accumulated damage: (a) at 77,787 cycles, (b) at 90,852 cycles, (c) crack initiation at 97,467 cycles

이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 3D-ESPI System을 사용하여 노치를 포함하는 관심영역 전체의 변형률 분포측정 및 응력집중계수를 결정할 수 있었다.
- (2) 동종의 시편일지라도 노치 가공상태, 재료의 불균질성 등에 의해 서로 다른 응력집중계수가 측정되었으며 피로수명 또한 응력집중계수에 반비례하여 변화함을 알 수 있었다.
- (3) 따라서 3D-ESPI System을 이용하여 변형률 분포를 측정 비교함으로써 시편의 균질성을 검증할 수 있으며 피로실험의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 김경수, 심천식, 전종욱, 김덕호 (2001). "3D-ESPI System을 이용한 응력집중부의 변형률 측정기법 연구", 한국해양공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp 150-153.
- 김선진, 안석환 (2000). "강재의 피로균열전파율에 미치는 시험편 크기의 영향", 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp 99-105.

- ASTM (1996). "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, No. E466-96.
- Dowling N. E. (1993). "Mechanical Behavior of Materials", Prentice Hall.
- Julie A. B., Jess J. C., James L. H. (1990). "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall.
- Juvinal R. C. (1967). "Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength", McGraw-Hill, New York.
- Peterson R. E. (1974). "Stress Concentration Factor", John Wiley and Sons.
- Winther, S. (1988). "3D Strain Measurements using ESPI", Optics and Laser in Engineering, Vol 8, pp 45-57.
- Wykes, C. (1982). "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) in the Measurement of Static and Dynamic Surface Displacement", Optical Engineering, Vol 21, No 3, pp 400-409.

2001년 11월 24일 원고 접수

2002년 1월 4일 최종 수정본 채택