

# 3D-ESPI System을 이용한 응력집중부의 변형률 측정기법 연구

김경수\* · 심천식\* · 전종욱\* · 김덕호\*  
\* 인하대학교 선박공학과

## The Research of the Strain Measurement Method on the Stress Concentration Area using 3D-ESPI System

Kyung-Su Kim\*, Chun-Sik Shim\*, Jong-Wuk Jun\* and Duck-Ho Kim\*  
\* Dept. of Naval Architecture Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**KEY WORDS:** 3D-ESPI System 3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템, Tensile test 인장시험, Semi-circular edge notch 끝단반원노치, Notch root strain 노치선단 변형률

**ABSTRACT:** In this paper, the tensile test of three kinds of the specimens was performed. Type I specimen is without notch and type II, III specimens have a radius of semi-circular edge crack of 2.5mm, 4.0mm. The tensile load(20kN and 30kN) was applied to the specimen by Universal Testing Machine. 3D-ESPI system and strain gauge measured simultaneously the strain in the center of the specimen and near the edge crack. The test results were compared with each other. Moreover, the stress concentration factor based on geometric information was calculated to confirm the accuracy of the strain measured by 3D-ESPI system. The calculated strain was compared with the measured one by 3D-ESPI system. As a result, it was confirmed that 3D-ESPI system measured the right strain near the semi-circular edge crack of the specimens.

### 1. 서 론

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)는 홀로그래피 기록 물질 대신 CCD 카메라를 이용한 영상 홀로그래피이다. 기록된 정보는 홀로그래프를 형성한 후 재생빔을 사용하여 재생되는 것이 아니고, CCD 카메라의 시그널이 정보처리 회로를 거쳐 모니터에 나타나게 된다. ESPI 는 홀로그래피 간섭법과 마찬가지로 2개 이상의 간섭무늬를 비교하여 모델 변형을 측정 후, 변형률 분포를 나타낸다. CCD 카메라에서 출력된 기준빔(reference beam)과 물체빔(measuring beam)의 간섭무늬는 비디오 시그널로 신호처리회로에 입력되고 이미지 처리를 거친다. 비디오 신호 처리과정에서는 비디오 신호를 더하거나 빼서 비교하고, high pass filtering 으로 DC 성분을 거른 후 정류시켜 모니터로 출력된다.

최근에 사용되어지고 있는 ESPI 기술은 1970년대 초반에 Butters, Leendertz 그리고 Macovski 등에 의해서 개발되어졌다. 그 이후 ESPI System은 외부하중을 받고 있는 구조부재 표면에 발생하는 변형과 변형률 측정 그리고 복합재료에 발생하는 결함 조사 등 정적변형과 진동변형에 관련된 다양한 분야에 적용되어지고 있다.(Peter M, Klaus D. H, Rajpal S. S, 1996)

### 2. 3D-ESPI System 특징

일반적인 구조실험에서 많은 연구원들은 스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정방법을 이용하고 있다. 스트레인 게이지를

이용한 변형률 측정방법은 변형률 정보를 얻고자 하는 위치에 게이지를 부착하여 하중이 작용하는 동안 변형률을 얻게된다. 그러나 균열 끝단, 기하학적 불연속을 갖는 용접라인 등과 같은 게이지 부착이 어려운 부위의 critical point에서 변형률 측정이 많은 문제점을 노출했다. 또한 적은 영역 많은 위치에서 변형률 측정이 요구되어지는 경우에도 게이지 부착에 관련된 문제점은 현장에서 계속적으로 지적되어왔다.

이에 비해 3D-ESPI System을 이용한 변형률 측정방법은 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 물체변형에 대해 측정감도가 좋고 비파괴 비접촉의 측정이 가능하고 삼차원 정보 추출이 가능해서 주어진 간섭무늬로부터 critical point를 포함한 전영역에서 변형을 측정할 수 있으며 장치의 이동, 설치 및 조작이 간편한 여러 장점을 가지고 있다. 그리고 사용레이저의 파장이 측정 기준이 되므로 영점조정이 필요없고, 정보가 전자적으로 처리되기 때문에 기록 및 컴퓨터 인터페이스가 쉬우며 측정물체의 위치와 처리위치와의 분리가 가능한 특징을 가지고 있다.

스트레인 게이지에 비하여 3D-ESPI System 의 많은 장점들에도 불구하고 일반적인 햇빛, 열대류 등이 측정결과에 노이즈로서 작용하기 때문에 3D-ESPI System을 이용한 측정이 민감한 주위 환경조건이 현장에서 사용하기 어려운 단점이다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 일반 구조용으로 사용되고 있는 고장력강이며, 이 재료의 기계적 성질은 Table 1 에 보이는 바와 같다. 시험편은 ASTM E466-96 (American Society for Testing and Materials, 1996)에 따라 시험영역 폭(w)이 45 mm 이고 두께(t)가 15 mm 인 사각단면을 갖는다. 시험편에 만들어진 노치는 Table 2 에 나타난 바와 같고 이들 4가지 형태의 시험편을 Type I, II, III, IV 로 구분하였다. 시험편에 방전가공을 이용하여 반원형태를 갖는 노치를 만들었다.

Table 1 Mechanical properties of specimens

E [MPa]	$\nu$	$S_u$ [MPa]	$S_m$ [MPa]
210,000	0.3	1,620	2,447

Table 2 Geometries of Type I, II, III, IV specimens

Type	Test Section		
	Width	Thickness	Radius of Notch
I	45	15	0.0
II	45	15	2.5
III	45	15	4.0
IV	45	15	5.0

### 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 변형률 측정은 스트레인게이지와 3D-ESPI System을 이용한 2가지 방법으로 모두 계측하였다. 스트레인게이지는 0.1 scan/sec 속도로 데이터 수집장치에 저장하였다. 동시에 3D-ESPI System을 이용하여 목표하중까지 몇 개의 단계로 나누어 변형률을 계측하였다. Type I, II, III, IV 시험편에 대하여 인장하중 20kN 과 30kN에서 발생하는 각각의 변형률을 측정하였다.(Dowling N. E., 1993; Kobayashi A. S., 1987)

## 4. 시험결과분석

### 4.1 Type I 인장시험결과

Type I 에 대한 인장시험을 수행하였다. 작용한 하중은 20 kN 과 30 kN 이며, 시편의 기계적 물성치를 고려할 때 탄성범위내에 해당한다. 시편의 시험영역은 두께 15 mm 와 폭 45 mm 를 갖으며 단면적은 225 mm<sup>2</sup> 이다.

따라서 2가지 하중에 대하여 중앙단면에서 계산되어진 변형률은 Table 3과 같다. 하중 20 kN 과 30 kN 이 작용할 때 시편 앞면 시험영역에서 3D-ESPI System을 이용하여 측정되어진 분포는 Fig. 1과 같다.

시험영역 A-A' 단면에서 주변형률,  $\epsilon_1$  profile 은 Fig. 2와 같다. 이상적인 시편이라면 균일 변형률 분포를 보여야 하지만 strain profile에서 부분적으로 보여지는 큰 변형률은 시편에 있는 스크래치와 같은 결함에 의해서 발생하였다. 시험전에 충분한 연마를 하였지만 결함을 완전히 제거하지 못하였음을 확인하였다. 이들 결함에서 변형률이 집중되어지는 정도에 따라 피로시험에서 균열시작점으로서의 발전 가능성이 예측되어진다.

Table 3 Smooth Specimen Tensile Strain Data of Type I

Type I Specimen	
Load	Strain
20 kN	$1.411 \times 10^{-4}$
30 kN	$2.116 \times 10^{-4}$

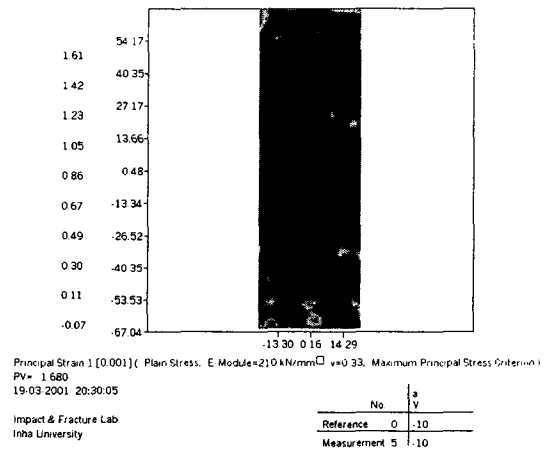


Fig. 1 Strain Distribution of Type I under 20kN

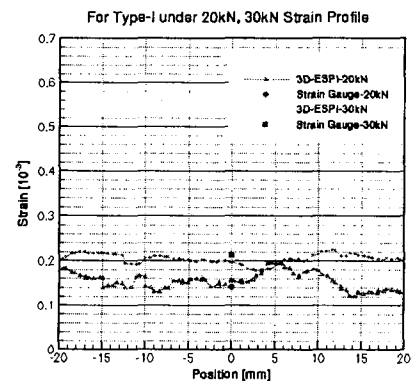


Fig. 2 Strain Profile of Type I under 20kN, 30kN

### 4.2 Type II, III, IV 인장시험결과

Type II, III, IV 시험편에 대한 인장시험을 수행하였다. 작용한 하중은 20 kN 과 30 kN 이며, 시편의 기계적 물성치를 고려할 때 탄성범위내에 해당한다. 시편의 노치를 제외한 시험영역은 두께 15 mm 와 폭 45 mm 를 갖으며 노치반경은 각각

2.5 mm, 4.0 mm, 5.0 mm 이다. 스트레인 게이지를 이용하여 노치 끝단 부근에서 측정되어진 변형률은 Table 4와 같다. Type II, III, IV 시편에 하중 20 kN 과 30 kN 이 작용할 때 시편 앞면 시험영역에서 3D-ESPI System을 이용하여 측정되어진 분포는 Fig. 3, 5, 7과 같다. 시험영역 A-A' 단면에서 주 변형률  $\epsilon_1$  profile 은 Fig. 4, 6, 8과 같다.

Table 4 Smooth Specimen Tensile Strain Data of Type II, III, IV using Strain Gauge

Type	Load	Strain		
		Left	Center	Right
II	20 kN	$1.760 \times 10^{-4}$	$1.467 \times 10^{-4}$	$1.760 \times 10^{-4}$
	30 kN	$2.347 \times 10^{-4}$	$2.054 \times 10^{-4}$	$2.200 \times 10^{-4}$
III	20 kN	$1.174 \times 10^{-4}$	$1.027 \times 10^{-4}$	$1.174 \times 10^{-4}$
	30 kN	$2.933 \times 10^{-4}$	$2.787 \times 10^{-4}$	$2.347 \times 10^{-4}$
IV	20 kN	$2.054 \times 10^{-4}$	$1.467 \times 10^{-4}$	$2.054 \times 10^{-4}$
	30 kN	$2.933 \times 10^{-4}$	$1.907 \times 10^{-4}$	$3.080 \times 10^{-4}$

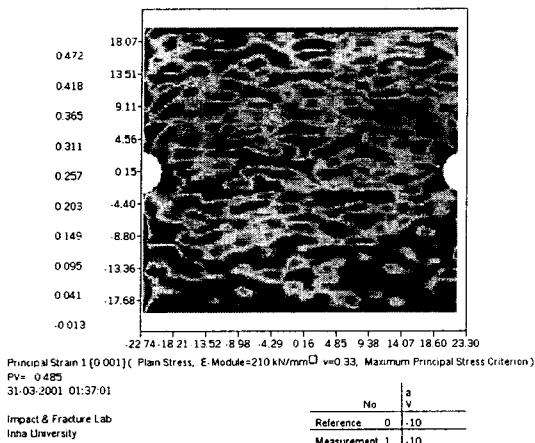


Fig. 3 Strain Distribution of Type II under 20kN

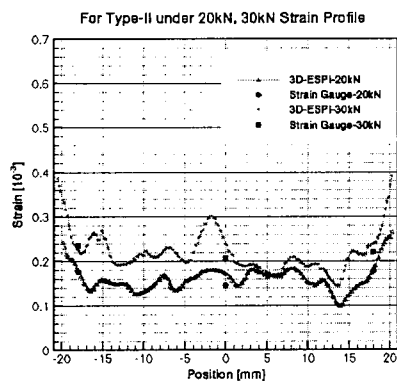


Fig. 4 Strain Profile of Type II under 20kN, 30kN

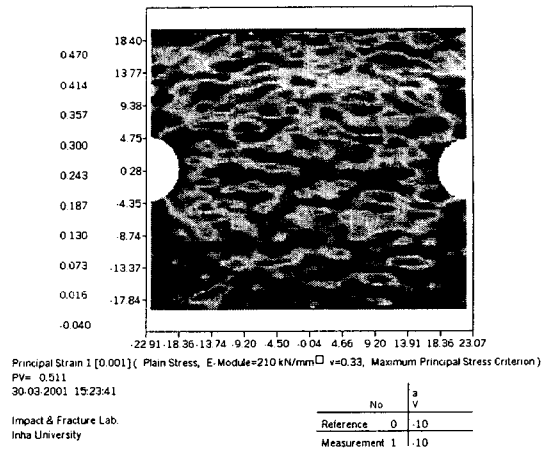


Fig. 5 Strain Distribution of Type III under 20kN

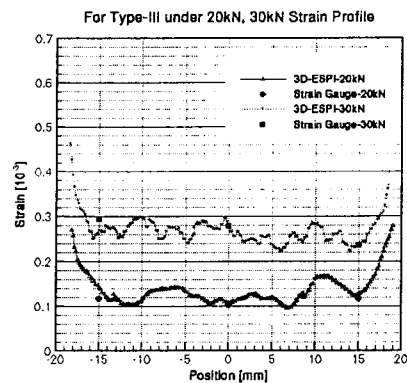


Fig. 6 Strain Profile of Type III under 20kN, 30kN

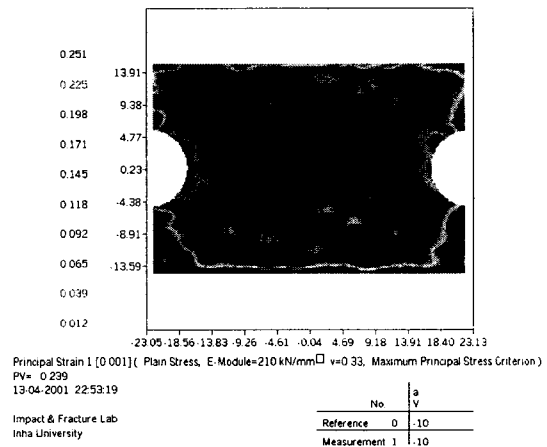


Fig. 7 Strain Distribution of Type IV under 20kN

#### 4.3 응력집중계수와 비교

시험에 사용되어진 시험편 Type II, III, IV 에 대한 응력집중계수를 문헌을 통하여 구하였다.(Julie A. B., Jess J. C., James L. H., 1990; Peter M, Klaus D. H, Rajpal S. S, 1996)

응력집중계수에 의해 계산한 노치선단 변형률과 3D-ESPI System 에 의해서 측정되어진 노치선단 변형률을 Table 5에 비교하였다. 그 결과 20kN, 30kN 하중에 대하여 각각 측정된 변형률이 계산한 변형률의 80% 내외의 만족도를 나타내었다. 이는 최대 변형률이 노치 안쪽에 발생한다는 사실을 고려할 때 측정되어진 노치선단 변형률이 높은 정밀도를 갖음을 확인할 수 있었다.

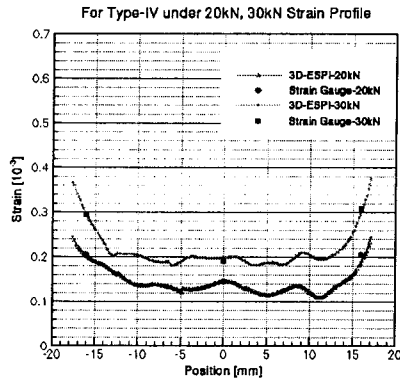


Fig. 8 Strain Profile of Type IV under 20kN, 30kN

Table 5 Comparison with Strain Values using S.C.F.

Type	S.C.F.	Load [kN]	Notch Root Strain		Acceptance [%]
			Calculated	3D-ESPI	
II	2.35	20	$3.315 \times 10^{-4}$	$2.655 \times 10^{-4}$	80
		30	$4.972 \times 10^{-4}$	$3.909 \times 10^{-4}$	78
III	2.43	20	$3.428 \times 10^{-4}$	$2.803 \times 10^{-4}$	81
		30	$5.142 \times 10^{-4}$	$4.260 \times 10^{-4}$	82
IV	2.18	20	$3.076 \times 10^{-4}$	$2.461 \times 10^{-4}$	80
		30	$4.613 \times 10^{-4}$	$3.690 \times 10^{-4}$	80

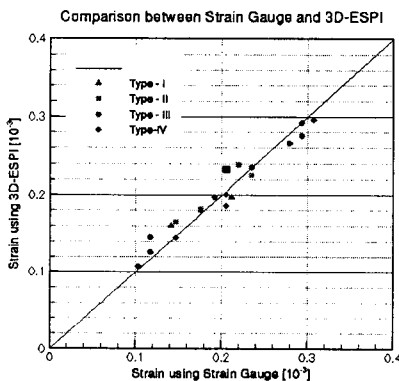


Fig. 7 Comparison between Strain Gauge and 3D-ESPI System

## 5. 비교 및 고찰

Type I, II, III, IV 시편에 대하여 스트레인 게이지에 의해서 측정되어진 변형률과 3D-ESPI System 에 의해서 측정되어

진 변형률을 Fig. 7에 비교하였다.

스트레인 게이지에 의해서 측정되어진 변형률과 3D-ESPI System 에 의해서 측정되어진 변형률 사이의 차이는 다음과 같은 원인에 의한 것이라 판단되어진다.

- 1) 비록 같은 시편에서 2가지 방법에 의해 측정되어진 변형률이지만 시편 앞면과 뒷면의 불균질한 조직상태 그리고 가공연마 상태 등이 다르다. 즉 스크레치와 같은 초기 결함이 측정되어진 변형률에 영향을 주어 오차가 발생하였다.
- 2) 시험장치가 유압서보 장치인 관계로 3D-ESPI System에 의하여 측정되어진 변형률에 의도하지 않은 오차가 포함되어있다. 즉 스트레인 게이지의 경우 변형률이 데이터 수집장치에 의해 계속적으로 기록되어진다. 즉 노이즈가 들어오더라도 실험자가 선택하여 혹은 구간 평균값으로 변형률을 취할 수 있다. 그러나 3D-ESPI System 은 어느 순간의 변형률을 기준으로 하기 때문에 의도하지 않은 큰 오차가 발생하기도 한다.

## 6. 결론

본 연구는 3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용한 비접촉 변형률 측정방법이 구조시험분야에 적용 가능여부를 알아보기 위하여 고장력강을 모재로 한 시험편에 대하여 인장시험을 수행하였다. 이들 시험에서 측정되어진 변형률은 스트레인 게이지를 이용하여 측정되어진 변형률과 비교하였다. 인장시험으로부터 측정된 변형률 비교로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템을 구조시험분야에 설치하고 시험하는데 상당한 주의와 경험이 요구되어진다. 그러나 안정된 조건에서 수행되어지는 시험에서는 스트레인 게이지를 이용하여 얻기 어려운 균열끝단영역과 일반 넓은 영역에서 높은 정밀도를 갖는 변형률 측정이 가능하다. 따라서 다양한 구조시험분야에 3차원 전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용하여 많은 경험이 축적되어진다면 측정이 어려웠던 영역에서 높은 정밀도를 갖는 시험결과를 얻을 수 있다고 판단되어진다.

## 참고문헌

- Julie A. B., Jess J. C., James L. H., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990
- Dowling N. E., "Mechanical Behavior of Materials", Prentice Hall, 1993
- American Society for Testing and Materials, ASTM Designation E466-96, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 1996
- Kobayashi A. S., "Handbook on Experimental Mechanics", Prentice Hall, 1987
- Peterson R. E., "Stress Concentration Factor", John Wiley and Sons, 1974
- Peter M, Klaus D. H, Rajpal S. S, "Selected Paper on Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice", SPIE Optical Engineering Press, 1996