

## 압전 특성을 이용한 구조물 부재의 응력측정

Stress Measurement of Structural Member Using Piezoelectric Property

임 은 상\*  
Im, Eun Sang

김 태 훈\*\*  
Kim, Tea Hoon

### Abstract

A stress measurement method of structural member using piezoelectric property and electrostatic voltmeter is presented. The electric potentials of the surface of the piezoelectric element, which are proportional to the strain  $\epsilon$  on the structural member, are measured by an electrostatic voltmeter during load cycling. The stress  $\sigma$  is calculated by this strain  $\epsilon$ . Moreover, a stress distribution measurement tape which can be used for the stress distribution measurement along a specified line on the surface of structural member is developed, and the surface potential was measured by an electric static voltmeter of non-contact type. The applicability of the stress distribution measurement tape is examined through experiments using a notched specimen under cyclic loading. The measured distributions of x, y and xy are compared with those calculated by FEM analysis.

### 요 지

본 연구에서는 압전 특성과 표면전위계를 이용한 응력측정 방법을 제안하였다. 다시 말하면 이 응력측정방법은 압전소자에서 발생한 전위를 표면전위계로 측정하게 하는 방법으로서, 이 표면전위는 구조물 부재의 변형률에 비례한다는 특성을 이용하여, 구조물 부재의 각 위치에서의 발생하는 응력을 변형률로부터 계산할 수 있게 된다. 또한, 구조물 부재의 응력분포를 보다 간편하게 구하기 위해서 비접촉 측정법을 이용한 응력분포 측정 Tape를 제작하였다. 특히, 이 Tape는 균열이나 홈과 같이 이상응력 발생 가능한 위치에서의  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ 의 응력을 측정 뿐만 아니라 국부 응력해석에 활용되었고 그 적용성을 검토하기 위해서 홈이 있는 실험편에 대해서 반복하중 시험결과와 FEM 해석의 결과와 비교 분석하였다.

**Keywords :** Stress measurement method, Piezoelectric property, Electrostatic voltmeter, PVDF

**핵심 용어 :** 응력측정방법, 응력분포측정 Tape, 압전 특성, 표면전위계, PVDF필름

\* 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소

\*\* 정희원, 대우건설 기술연구소

E-mail : ESIM89@hanmail.net 042-860-0593

•본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서론

구조물의 응력측정에는 변형률 게이지가 많이 사용되고 있지만, 다수의 위치에서 응력을 측정할 경우 특히 균열의 주변이라든지 부재의 접합부분에서의 응력을 측정할 경우에는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 다수의 변형률 게이지를 접착해야 할 필요가 있기 때문에 많은 접착작업과 배선작업이 필요하게 된다. 현재 몇 개의 게이지를 직렬로 배열한 응력 집중형 게이지가 있지만 시판되어지고 있는 대부분의 응력 집중형 게이지는 변형률 측정용이며, 또한 균열등의 주변에 정확히 근접하여 접착하기에는 부적합하다고 할 수 있다. Fujimoto Y. et al(2003) and Liu G. et al(2002)은 필름형의 고분자 압전재료인 PVDF(polyvinylidene fluoride)를 이용함으로써 균열의 선단이나 용접부근의 응력측정 뿐만 아니라 곡선부분의 응력도 가능하다는 것을 보였고, 본 논문에서는 비접촉식 측정법을 개선한 측정법을 활용함으로써 의사가 환자를 청진기로 치료하는 것처럼 배선이 필요하지 않는 응력측정방법을 제안하였다.

그리고 구조물의 선형적인 응력분포를 측정할 수 있으면, 국부 응력분포를 파악하는데 편리할 뿐만 아니라 전체 구조해석에서 검사하기 곤란한 조립정도, 용접변형, 잔류응력 등의 영향을 고려한 국부 응력상태를 검토하는 것이 가능하게 되고, 측정된 응력분포를 경계조건으로 이용하면 국부구조의 Sub-model해석을 실행할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 응력분포측정 Tape를 제작하여 Fig. 2에서 보는 것처럼 부재의 접

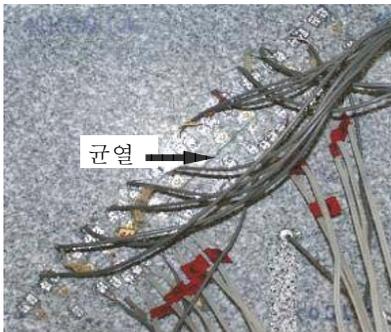


Fig. 1 기존의 측정방법에 의한 균열주변의 응력 측정

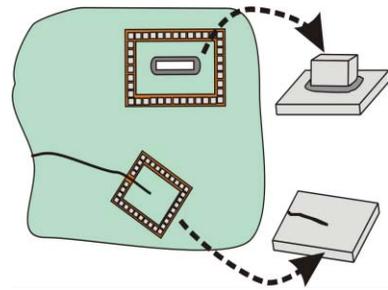


Fig. 2 응력분포측정 Tape의 적용 예

합부근이나 균열선단의 주변에 응력분포측정 Tape를 접착하여 대상 부위의 경계부에 따르는 연속적인 응력분포를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 본 연구에서는 흠이 있는 실험편에 대해서 반복하중 시험을 실시하여 이 응력분포측정 Tape의 적용성을 검토하였고, 이 방법으로 측정된 응력분포를 경계조건으로 하여 실시한 Sub-model 해석과 Global mesh 해석의 결과를 비교하여 Sub-model 해석을 이용한 국부구조해석의 가능성을 보였다.

# 2. PVDF의 특성

본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 CH<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub> 구조를 갖는 β-type의 PVDF를 이용하였으며, 이는 일반적인 압전재료와 마찬가지로 변형과 발생전압 사이에 비례적인 관계를 가지고 있는 극히 얇은 (40μm) 고분자 압전재료로서 유연성과 면내이방성을 보이고 있다. 다시 말하면, PVDF의 이방성의 주축이 x축과 일치하도록 접착한 후, 부재에 변형이 생기면 PVDF에 분극이 일어나서 표면에 전위V가 발생한다.(Ikeda

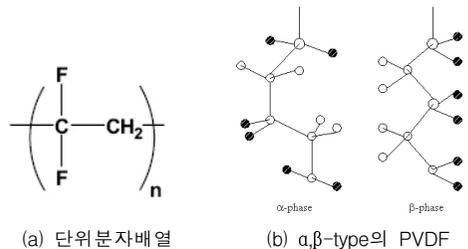


Fig. 3 단위분자배열 및 α,β-type의 PVDF

T.:1990) 이 변위V와 부재의 변형 사이의 관계는 식 (1)과 같이 성립한다.(Egashira K& Shinya N.:1993, Katsumi K. et al:1999)

$$V = b_1 \varepsilon_x + b_2 \varepsilon_y \quad (1)$$

여기서,  $b_1$ ,  $b_2$ 는 PVDF의 압전특성과 접촉조건에 의해서 결정되는 정수이다.

또한 Fig. 4에서 보는 것과 같이 PVDF의 부재표면에 이방성의 방향을 변화시켜 0도, 45도, 90도의 3장의 PVDF에 대한 관계식을 정리하면 식(2)와 같이 정리되며 표면전위와 응력의 관계식으로 전환을 하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

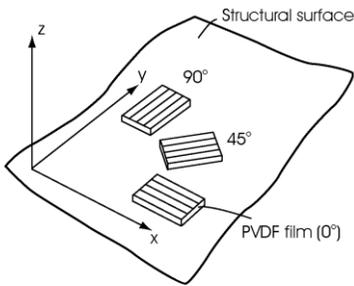


Fig. 4 PVDF 필름의 접착 예 (3방향)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{b_1^2 - b_2^2} \begin{bmatrix} b_1 & -b_2 & 0 \\ -b_2 & b_1 & 0 \\ -(b_1 + b_2) & -(b_1 + b_2) & 2(b_1 + b_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_{45} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{a_1^2 - a_2^2} \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & 0 \\ -a_2 & a_1 & 0 \\ -(a_1 + a_2)/2 & -(a_1 + a_2)/2 & (a_1 + a_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_{45} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$a_1 = (b_1 - \nu b_2)/E, a_2 = (b_2 - \nu b_1)/E$$

여기서,  $\nu$ 는 구조부재의 포아송 비이고,  $E$ 는 영계수이다. 식(3)의 정수  $a_1$ ,  $a_2$ 는 Fig. 5에서처럼 평면 실험편에 이방성의 방향을 다르게 한 PVDF를 2장 이상 접착하고 재하응력과 표면전위의 관계를 측정하는 것이 가능하게 된다. 그러나 여기서 주의하여야 할 점은 PVDF의 접착성에 대한 사항으로서 본 시험에서는 Cyanoacrylate CC-33A를 사용하여 PVDF를 접착하여 결과를 얻었으며, 정확한 정수  $a_1$ ,  $a_2$ 을 얻기 위해서는 PVDF의 압전상수, 부재의 영계수와 포아송 비 뿐만 아니라 접착상태 역시 신중히 고려하여 부재의 특성을 고려한 접착제를 선택해야 할 것이다. (Liu et al, 2002)

### 3. 압전형 전극

기존의 비접촉 측정법(Fujimoto Y. et al; 2003, Liu G. et al; 2002)은 Fig. 6에서 보는 것처럼 PVDF의 표면과 probe의 거리에 따라서 측정하는 면적이 달라지기 때문에 측정중에 일정한 거리를 유지하지 않으면 정확한 면적에서의 표면전위를 구할 수가 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 필자 등은 Fig. 7에서처럼 측정면적을 정확히 구할 수 있는 압전형태의 전극을 개발하였다. 그리고 이 압전형전극은 전극의 선단에 2×2mm의 도전고무가 접착되어 있기 때문에 미세한 면적의 전위뿐만 아니라 어느 정도의 곡면에 대해서도 측정이 가능하다고 할 수 있다. 압전형전극을 이용해 측정된 결과와 비접촉 측정방식에 의한 측정결과를 Fig. 8에서 비교해서 보였는데 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

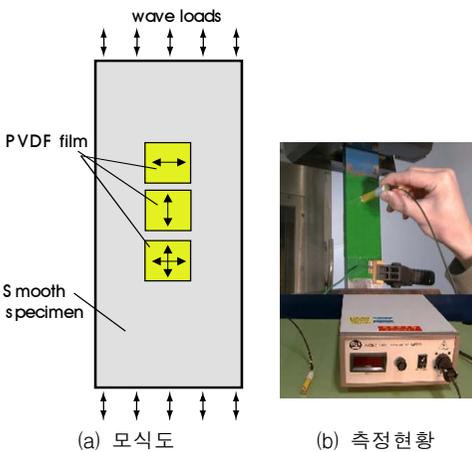
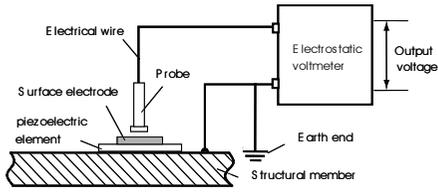
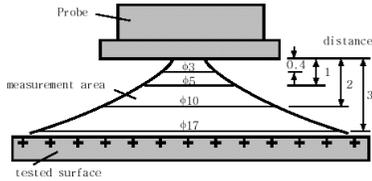


Fig. 5 정수  $a_1$ ,  $a_2$  또는  $b_1$ ,  $b_2$ 를 구하기 위한 평면실험편의 실험 모식도 및 사진



(a) 응력측정 모식도



(b) 비접촉 거리에 대한 측정영역

Fig. 6 비접촉 응력측정법의 상세도

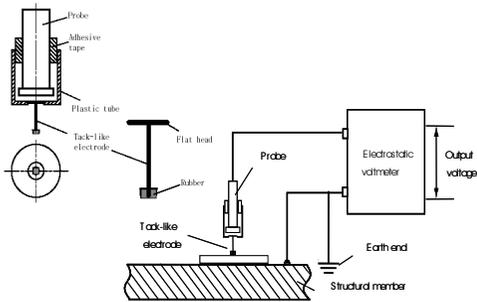


Fig. 7 압전형전극을 이용한 응력측정법의 상세도

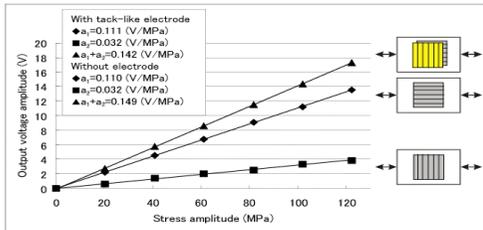


Fig. 8 압전형전극을 이용한 응력측정법과 비접촉 응력 측정법의 측정결과 비교

또한, 압전형전극 측정방법의 정도를 알아보기 위하여 Fig. 9에서처럼 실험을 수행하였다. 즉 홈이 파인 실험편의 홈 선단에 한편은 하중방향(X방향)으로 실험편의 반대편에는 하중과 직각방향(Y방향)으로 PVDF를 접착시킨 후에 하중을 재하하고 압전형전극을 이용

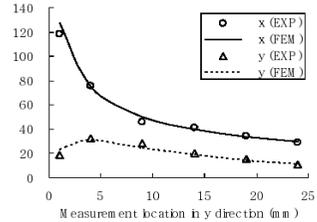
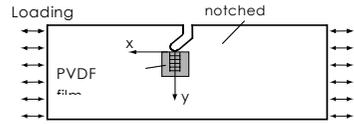


Fig. 9 압전형전극을 이용한 응력측정의 결과

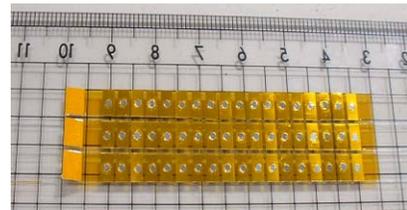
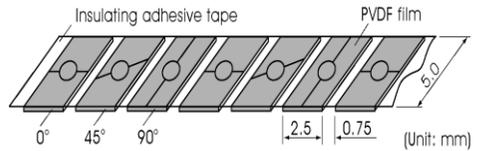


Fig. 10 응력분포 측정 Tape

하여 그 응력을 측정하였다. 그리고 그 결과를 FEM 해석 결과와 함께 역시 Fig. 9에 나타냈다. 이 그림에서 잘 알 수 있듯이 압전형전극 측정방법의 응력분포와 FEM해석의 응력분포 결과가 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 응력분포 측정 Tape

응력분포측정 Tape는 PVDF를 직선상에 다수 배치하고 이것을 절연재료의 Tape에 접착시킨 것으로 Fig. 10와 같이 폭 5mm, 길이 2.5mm의 장방형의 PVDF를 0.75mm 간격으로 17장을 배치하여 전장이 60mm이다. 또한 이 전장은 필요에 따라서 증감이 가능하며 PVDF의 방향을 알아보기 쉽게 하기 위해서 각 PVDF의 중앙부분에 이방성의 주축방향으로 직선을 표시하였다. 표면전위의 측정은 PVDF의 중앙부분

의 절연재 Tape에 구멍을 내고 이 구멍으로부터 압전형 전극을 이용하여 전위를 측정한다. 그리고 응력은 응력분포측정 Tape의 전접한 임의의 3장의 PVDF의 표면전위를 측정하고, 식(3)으로부터 각 위치의  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ 의 응력을 구할 수 있다.

## 5. 응력분포측정 실험

흠(넓이 10mm)이 파인 SS400 실험편의 흠 주위의 응력분포를 구하기 위해서 Fig. 11에서 보인 것처럼 3장의 응력분포측정 Tape를 접착하였다. 그리고 1Hz, 정현파, 20kN진폭의 하중 조건으로 반복재하 실험을 실시하였다. 실험중에 압전형 전극을 이용하여 절연재 Tape에 뚫어놓은 구멍을 통해서 각 PVDF의 표면전위를 측정하고 다음 이 전위를 식(3)에 대입하여 Tape 1, Tape 2 및 Tape 3의 응력분포를 구하고 그 결과를 Fig. 12에 나타냈다.

또한, 이 Fig. 12에는 응력분포측정 Tape로 측정 한 결과와 FEM해석의 결과를 비교하기 위해서 같은 재하조건에서의 FEM해석에 의한 응력분포를 같이 나타냈다. 이 그림으로부터는 실험에서 구한 응력분포가 FEM해석에서 계산한 응력분포와 대체적으로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 다만, Tape2의 중간부분 즉

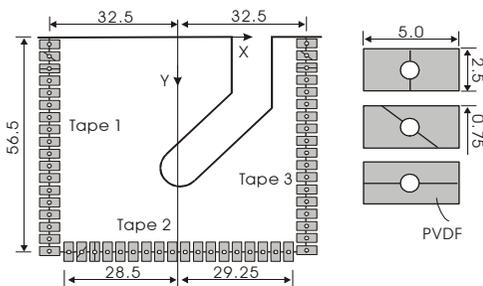


Fig. 11 응력분포측정 Tape를 이용한 응력측정 실험

흠의 선단부분의 하중방향의 응력  $\sigma_x$ 가 해석결과와 조금 다른 결과를 보이고 있는데, 이는 실제실험에서는 실험편의 흠이 한쪽에 있기 때문에 해석에서처럼 실험

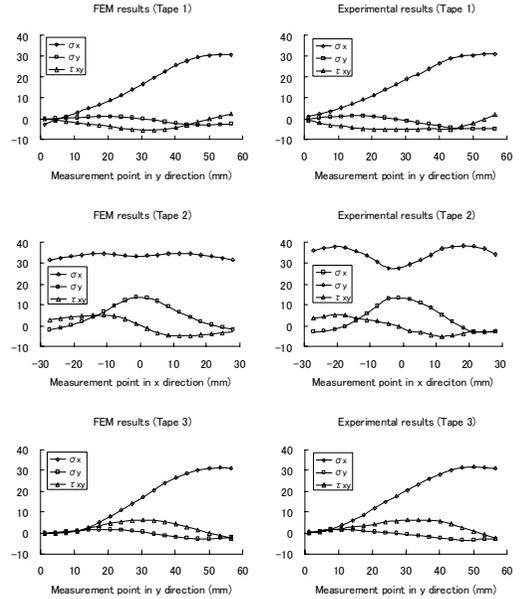
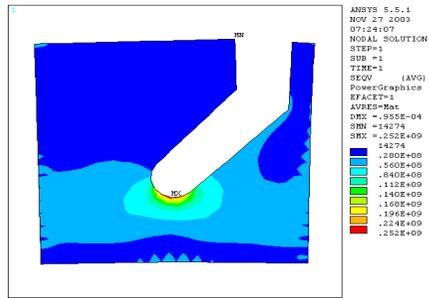
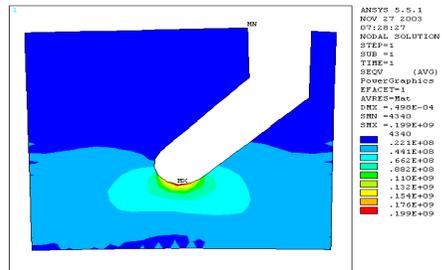


Fig. 12 실내실험과 FEM해석의 응력측정 결과



(a) Sub-model 해석



(b) Global model 해석

Fig. 13 FEM해석의 응력Contour 결과

편 전체적으로 균등한 하중이 가해지지 않았기 때문으로 생각된다.

Fig. 13은 응력분포측정 Tape에서 측정된 응력을 경계조건으로 하여 계산 Sub-model 해석과 Global mesh 해석의 응력 Contour를 보인 그림이다. 여기서 Sub-model 해석은 Fig. 11에서와 같이 홈 주위에서 측정된 응력분포를 유한요소해석의 경계조건으로 하고 응력분포 측정 Tape의 내부만을 계산한 결과이고 Global mesh 해석은 실험조건을 재현한 즉 전체 실험편에 대한 해석을 수행한 것으로서 그 결과를 비교해보면 Sub-model 해석과 Global mesh 해석의 결과가 앞에서 설명한 오차를 감안하면 상당히 일치한다는 것을 알 수 있다. 결국, Sub-model 해석을 이용하여 관심부분만 해석하는 국부구조해석이 가능하게 됨으로서 보다 간편한 해석을 수행할 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 구조부재에 접촉하여 응력을 간편히 구할 수 있는 측정방법을 제안하고, 임의의 선상의 응력분포를 측정할 수 있는 응력분포측정 Tape를 제작하여 실험과 FEM 해석을 통해서 그 적용성을 검토하였다. 그 결과 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 압전재료, 표면전위계를 이용하여 보다 간편하게 응력을 측정하는 것이 가능하다. 단, 정확한 정수  $a_1$ ,  $a_2$ 을 얻기 위해서는 PVDF의 압전상수, 부재의 영계수와 포아송비 뿐만 아니라 접촉상태를 신중히 고려하여야 한다.

- 2) 표면전위계의 Probe에 부착할 수 있는 압전형전극을 개발함으로써 비접촉식 응력측정방식의 단점인 측정시의 일정한 거리유지조건을 극복할 수 있다.
- 3) 응력분포측정 Tape로 측정된 응력분포를 이용하여 국부응력해석을 실시해서 응력집중부분의 응력상태를 파악할 수 있다.

## 참고문헌

1. Fujimoto Y, Shintaku E, Pirket G, Liu G., "Piezoelectric sensor for stress intensity factor measurement of two dimensional cracks." Eng Fract Mech. Vol.70, 2003, pp. 1203-1218.
2. Liu G, Fujimoto Y, Shintaku E, Wakabayashi S, Masaguchi T, Komatsubara N., "Application of PVDF film to stress measurement of structural member." Journal of the Society of Naval Architects of Japan. Vol. 192, 2002, pp. 591-599.
3. Egashira K & Shinya N., "Local strain sensing using piezoelectric polymer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, 1993, pp. 558-560.
4. Katsumi K, Biwa S, Matsumoto E, Shibata T., "Measurement of static strain distribution using piezoelectric polymer film (Principle and application to a holed plate)." Solid Mechanics and Material Engineering, Series A, JSME International Journal. Vol. 42, NO. 1, 1999, pp. 11-16.
5. Ikeda T. "Fundamentals of piezoelectricity." NY: Oxford Univ. Press, 1990.

(접수일자 : 2006년 5월 16일)