

PVDF 필름을 이용한 구조물의 동적 변형률 측정

김수민 · 신성우[†] · 이재용^{*} · 김남식^{**}

부경대학교 안전공학과 · ^{*}부경대학교 건축공학과 · ^{**}부산대학교 토목공학과
(2011. 9. 20. 접수 / 2011. 12. 12. 채택)

Measurements of Dynamic Strain of Structures Using PVDF Films

Sumin Kim · Sung Woo Shin[†] · Jae-Yong Lee^{*} · Nam-Sik Kim^{**}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}Department of Architectural Engineering, Pukyong National University

^{**}Department of Civil Engineering, Pusan National University

(Received September 20, 2011 / Accepted December 12, 2011)

Abstract : In this study, the applicability of PVDF films for measurements of dynamic strain in a structure was investigated. A relationship between the strain and the voltage response of a PVDF film was analytically derived. Free vibration test on a steel cantilever beam was performed and vibration response of the beam was measured both by a conventional foil strain gauge and a PVDF film. Strain-voltage relationship obtained from the experiment was compared with the analytic relationship. Good agreement between the analytic and experimental relationships was observed. It was found that a tailored PVDF film can measure the dynamic strain of a structure as accurate as a conventional foil strain gauge.

Key Words : dynamic strain, PVDF film, piezoelectric effect, smart sensing, SHM

1. 서론

교량 등과 같은 사회기반시설물의 효율적인 유지 관리를 위하여, 구조물의 안전성을 상시적으로 감시하고 이상 상황 발생 시에 능동적으로 대처할 수 있는 구조 건전성 모니터링 (Structural Health Monitoring : SHM) 시스템에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다¹⁾. 초기에 개발된 SHM 시스템은 구조물의 정/동적 응답을 변위 센서나 가속도 센서 등과 같은 제품화된 센서를 구조물에 설치하여 측정하고, 측정된 데이터를 유선으로 전송하는 시스템으로 구성되었다²⁾. 그러나, 구조물의 안전성에 대한 정확한 평가나 국부적으로 발생하는 손상을 효과적으로 탐지하기 위해서는, 센서의 설치 간격을 좁혀 가급적 많은 위치에서 구조물의 응답을 측정하여야 하나, 이 경우 고가의 센서가 대량으로 필요하여 장대교량이나 초고층빌딩과 같이 측정 대상 구조물이 대형일 경우 SHM 시스템 구축을 위한 경제적 부담이 가중된다. 이에 따라, 제품화된 센서를 사용하는 대신

에, 구조물 표면에 부착하거나 또는 시공 과정에서 구조물 내부에 영구 매립하여 구조물의 거동을 수명 기간 동안 지속적으로 모니터링할 수 있는 스마트 센싱 기술이 SHM 시스템의 실용성 향상을 위한 기술로써 높은 관심을 받고 있다³⁾. 구조 부재에 부착하거나 또는 매립하여 장기적인 모니터링이 가능한 스마트 센싱 시스템을 구현하기 위해서는, 센서가 (1) 환경 작용에 의한 부식 등에 대한 저항성이 우수하여야 하며, (2) 가격이 저렴하여야 하고, 또한 (3) 기존의 제품화된 센서만큼의 측정 민감도가 확보되어야 한다.

한편, 구조물의 변형은 SHM에 있어서 변위/가속도와 함께 중요한 측정 항목의 하나이다. 구조물의 변형을 측정하기 위한 대표적인 센서로는 전기 저항식 스트레인 게이지 (ESG)가 있다. ESG는 가격이 매우 저렴하고, 구조물의 표면에 부착하여 사용하기가 매우 용이한 장점이 있는 반면, 전기 잡음의 영향이 커서 신호/잡음비가 낮아 경우에 따라 측정 값이 왜곡될 수 있는 문제점이 있다. 뿐만 아니라, 구조물에 설치된 ESG는 장기간 외기에 노출될 경우 부식될 가능성이 높아 SHM과 같은 장기 모니터링에 적

[†] To whom correspondence should be addressed.
shinsw@pknu.ac.kr

용하기가 쉽지 않은 문제점이 있다. 이에 따라, 구조물 변형의 장기 모니터링을 위한 다양한 스마트 센서 시스템이 제안되었으며, 일례로 광섬유 브래그 격자 센서 등과 같은 광섬유 센서(Optical Fiber Sensor : OFS) 시스템이 있다⁴⁾. OFS의 장점은 구조물에 부착 또는 매립이 용이하며, 전기적인 잡음의 영향을 받지 않기 때문에 ESG에 비하여 신호/잡음비가 매우 높아 측정 민감도가 높고, 광섬유를 이용하여 만들기 때문에 부식에 대한 우려가 없어서 장기 모니터링에 적합하다는 것이다. 그러나, OFS의 이러한 장점에도 불구하고, OFS 시스템을 구현하기 위한 광원 발생 장치 등과 같은 Interrogator의 가격이 매우 고가여서 SHM에 실용적으로 이용하기에는 아직까지 한계가 있는 실정이다.

압전물질은 응력 등과 같은 역학적 작용이 가해질 때 전기 신호를 발생시키는 센서로서의 기능과, 역으로 전기적 작용이 가해질 때 역학적인 변형이 발생하는 액츄에이터로서의 기능을 동시에 가진 물질을 일컬으며, 압전물질의 이러한 특성을 응용하여 다양한 종류의 센서 제품과 초음파 진동자와 같은 액츄에이터 제품이 개발되었다⁵⁾. 대표적인 압전 물질에는 세라믹 계열의 PZT(Piezo Lead-Zirconate-Titanate)와 고분자 폴리머 계열의 PVDF (Polyvinylidene Fluoride)가 있다. 특히, PVDF의 경우 PZT에 비하여 가격이 저렴하고, 연성이 우수하여 필름 형태 등으로 가공할 경우 곡면 표면 등에 부착이 용이하며, 유기질의 고분자로 이루어져 부식 저항성이 매우 높은 장점이 있어서 구조물의 장기 SHM에 적합한 것으로 보고된 바 있다⁶⁾.

본 연구에서는 구조물의 동적 변형률 모니터링에 필름 형태로 가공된 PVDF의 적용성을 알아 보고자 한다. 특히, PVDF 필름의 변형률 측정 가능성을 살펴 본 앞선 연구와는 달리⁷⁾, 본 연구에서는 PVDF 필름의 변형률-전압 관계를 이론적으로 유도하고, 유도된 응답 전압과 구조물 변형률의 정량적 관계를 실제 실험을 통하여 구한 응답 전압과 변형률의 관계와 비교함으로써 PVDF 필름의 변형률 측정 정확성을 평가하여 PVDF 필름의 변형률 센서로서의 적용성을 검증하고자 한다.

2. 변형률 입력에 대한 PVDF 필름의 전압 응답 모델링

압전물질의 전기-역학 연성 구성방정식은 텐서 표기법을 이용할 경우 다음과 같은 식으로 표현된다⁵⁾.

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{kij} E_k \quad (1-1)$$

$$D_i = d_{ikl} \sigma_{kl} + e_{ik}^{\sigma} E_k \quad (1-2)$$

여기에서, ε_{ij} 와 σ_{kl} 는 각각 역학적 변형률과 응력 텐서이며, E_k 와 D_i 는 각각 전기장 벡터와 전기변위 벡터를 나타낸다. 또한, S_{ijkl}^E 은 전기장이 0일 때의 단위 응력에 대한 압전체의 변형률 크기를 나타내는 역학적 컴플라이언스이며, d_{kij} 와 d_{ikj} 은 압전계수로서 각각 단위 전기장에 대한 변형률 응답과 단위 응력에 대한 전하 응답을 나타낸다. 마지막으로 e_{ik}^{σ} 는 응력장이 0일 때의 압전체의 절연유전율이다. 만약 외부 전기장이 없을 경우 ($E_k=0$), 식 (1-2)는 식 (1-1)을 이용하여 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$D_i = d_{ikl} K_{klj}^E \varepsilon_{ij} \quad (2-1)$$

여기에서 K_{klj}^E 은 전기장이 0일 때의 단위 변형률에 대한 압전체에서의 응력의 크기를 나타내는 역학적 강성텐서이다. 변형률텐서의 대칭성을 이용하면, 식 (2-1)은 다음과 같이 행렬형태로 표현이 가능하다.

$$\{D\} = [d][K^E]\{\varepsilon\} \quad (2-2)$$

압전체에 응력 또는 변형률이 가해졌을 때, 압전체의 표면에 발생하는 충전하량(q)은 전기변위벡터를 압전체의 표면 면적에 대하여 적분하여 구할 수 있다.

$$q = \int_A \{D\}^T \{dA\} = \int_A ([d][K^E]\{\varepsilon\})^T \{dA\} \quad (3)$$

한편, 폭(b)과 길이(l)에 비하여 두께를 매우 얇게 하여 Fig. 1과 같은 필름 형태로 가공한 PVDF (전기 분극 방향은 3축 방향)에 1축 방향으로 지배적인 변형률장 $\varepsilon_{11}(x)$ 가 형성될 경우, 변형률과 충전하량의 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$q = d_{31} K_{11}^E b \int_0^l \varepsilon_{11}(x) dx \quad (4)$$

만약, 1 축 변형률장 $\varepsilon_{11}(x)$ 가 Fig. 1로 주어진 PV-

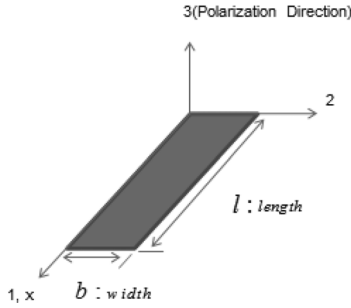


Fig. 1. Dimensions of PVDF Film.

DF 필름의 길이에 걸쳐서 균일한 값인 $\epsilon_{11}(x) = \epsilon$ 을 가진다고 가정하면 (즉, $\epsilon_{11}(x)$ 의 값이 위치 x 에 대하여 변화가 크지 않은 경우), 식 (4)는 다음과 같이 근사적인 평균 변형률 ϵ 의 선형함수로 표현할 수 있다.

$$q \cong (d_{31}K_{11}^E bl)\epsilon = A\epsilon \quad (5)$$

여기에서 $A = d_{31}K_{11}^E bl$ 는 변형률의 크기와 관계없이 결정되는 PVDF 필름의 특성치이며, PVDF 제조사로부터 주어지는 PVDF의 물성과 필름 형태로 가공하였을 때의 크기를 이용하여 구할 수 있다. 식 (5)로부터 알 수 있듯이, PVDF 필름에 발생하는 전하량은 외부 전기장이 없을 경우에 변형률과 선형 비례하며, 따라서 PVDF 필름에서 발생된 전하량을 측정하면, 역으로 PVDF 필름이 부착된 위치에서의 구조물의 변형률을 직접적으로 구할 수 있다는 것을 입증한다. 또한, 식 (5)는 PVDF 필름을 변형률 측정에 사용하고자 할 때, 측정시스템의 구성면에서 매우 중요한 의미를 가진다. ESG를 이용한 변형률 측정은, 변형에 의하여 도선의 전기 저항이 달라지는 원리를 이용하며, 따라서 변형률의 측정을 위해서 도선에 전류를 공급하여, 달라진 전기 저항을 측정하여야 한다. 즉, 변형률 측정 과정에서 도선에 전류를 공급하는 외부 장치가 필요한 능동형 측정시스템을 구성하여야 한다. 그러나, 식 (5)에서 알 수 있듯이, PVDF는 외부 전기장의 공급 없이도, PVDF에서 발생하는 전하를 측정하면 변형률을 구할 수 있으므로, 능동형 방식인 ESG에 비하여 보다 경제적으로 측정시스템을 구성할 수 있게 된다.

한편, PVDF를 이용하여 변형률을 계측하기 위해서는, 식 (5)와 같이 변형률 입력에 의해 생성된 PVDF 표면 전하량을 측정하여야 한다. 그러나, 오실로스코프 등과 같은 측정 장치의 입력 임피던스는

PVDF의 출력 임피던스에 비하여 일반적으로 매우 작은 값을 가지므로, 이 경우 PVDF에서 발생한 표면 전하량을 직접 측정하기가 매우 어렵다. 따라서, 이러한 입/출력 임피던스 차이를 보완하는 출력 조절 장치가 측정 과정에서 필요하다. 본 연구에서는 PVDF 필름에서 생성된 전하의 출력 조절을 위하여 피드백 저항이 R_f 이고, 피드백 커패시턴스가 C_f 인 Op-Amp를 이용한 전하증폭기(charge amplifier)를 출력 조절 장치로 이용하였다. 전하 증폭기를 고려한 변형률 응답 모델은 다음과 같은 전하(q)-전류(i) 관계를 이용하여 유도할 수 있다.

$$i = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \quad (6)$$

전하증폭기가 이상적으로 거동한다고 가정하면, 최종 출력 전압(V_{out})에 대한 전하증폭기의 회로방정식은 식 (6)을 이용하면 다음과 같이 표현된다⁸⁾.

$$\dot{V}_{out} + \frac{V_{out}}{R_f C_f} = -\frac{\dot{q}}{C_f} \quad (7)$$

조화(Harmonic) 입력일 경우, 식 (7)의 주파수 영역 해는 다음과 같다.

$$V_{out}(\omega) = -C_1 \left(\frac{j\omega R_f C_f}{1 + j\omega R_f C_f} \right) \frac{q}{C_f} = C_1 H(\omega) \frac{q(\omega)}{C_f} \quad (8)$$

여기에서, C_1 은 무차원 계수로써 전하증폭기의 output gain 조절 등에 대한 보정을 위한 값이며, $H(\omega)$ 는 전하증폭기의 전달함수로써 피드백 저항(R_f)과 피드백 커패시턴스(C_f)에 의해서 결정되는 값이다. 식 (5)를 식 (8)에 대입하면 변형률과 출력 전압에 대한 다음과 같은 관계를 최종적으로 유도할 수 있다.

$$V_{out}(\omega) = C_1 H(\omega) \frac{q(\omega)}{C_f} = C_1 H(\omega) \frac{A}{C_f} \epsilon(\omega) = H_1(\omega) \epsilon(\omega) \quad (9)$$

여기에서, $H_1(\omega)$ 는 PVDF 필름의 변형률 응답 계수로 정의할 수 있으며, 가진 주파수와 PVDF 필름의 물성치, 전하증폭기의 특성치(피드백 저항, 피드백 커패시턴스)와 Output gain을 알고 있을 경우에 결정되는 값이다.

Table 1. PVDF 필름의 제원

Length	Width	Thickness	d_{31} (Coulomb/Newton)	ϵ_{33} (Farad/Meter)	K_{11}^E (Young's Modulus)
30 mm	10mm	52 μm	23×10^{-12}	106×10^{-12}	2 GPa

3. PVDF 필름을 이용한 변형을 측정 실험

3.1. 실험 구성

진동에 의한 구조물의 변형을 PVDF 필름을 이용하여 측정하기 위해서, Fig. 2와 같이 길이 700 mm, 폭 40 mm, 두께 2 mm인 캔틸레버 보 실험체를 제작하여, 자유 진동 실험을 수행하였다. 두께가 52 μm 인 Sheet 형태의 PVDF를 길이 30 mm, 폭 10 mm 크기의 필름 형태로 가공하여, 고정단 지지점에서 거리 300 mm인 위치에 에폭시를 이용하여 부착하였다. 사용된 PVDF 필름의 물성치와 크기를 Table 1에 정리하였다⁹⁾. 한편, 이론적으로 유도된 전압-변형률 관계의 분석 및 검증을 위해, PVDF 필름이 부착된 위치와 동일한 위치에 ESG를 부착하였다. PVDF 필름의 출력 신호의 조절을 위한 출력조절기는, 10 Mega Ohm의 피드백 저항과 500 Nano Farad의 피드백 커패시턴스를 가진 전하증폭기(charge amplifier)를 사용하였으며, 전하증폭기의 Output power gain을 30 dB로 추가 설정하였다. 마지막으로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 전하증폭기의 출력 신호는 16 bit A/D 변환기를 이용하여 Digital 신호로 변환하여 Laptop 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

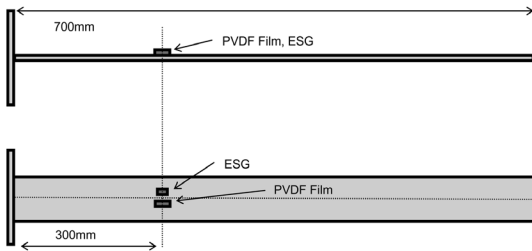


Fig. 2. Configuration of Test Specimen.

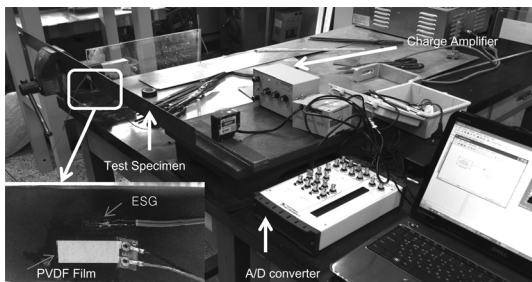
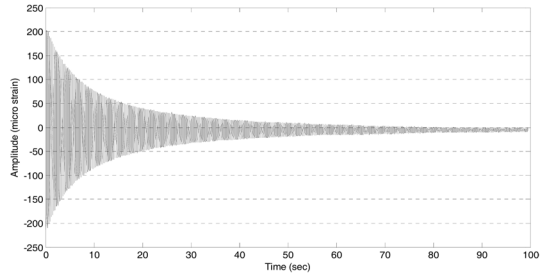


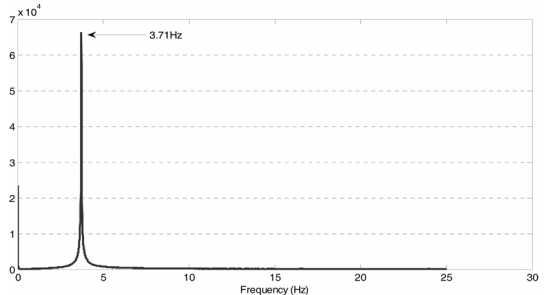
Fig. 3. Measurement Setup.

3.2. 전압-변형률 관계의 검증

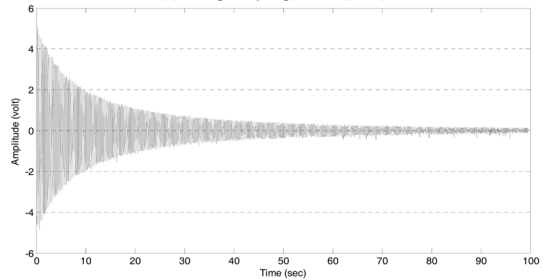
캔틸레버 보 실험체에 대하여 자유진동 실험을 수행하였다. 샘플링 주파수는 25 Hz이고, 100초 동안 응답을 측정하였다. Fig. 4에 실험을 통해 측정된



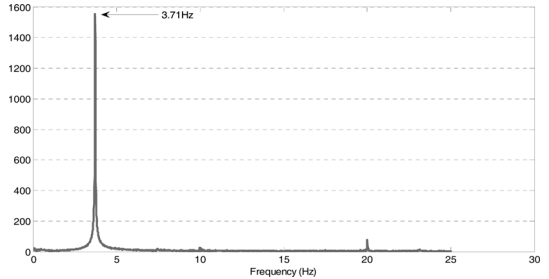
(a) Strain Response of ESG(unit : micro strain)



(b) Frequency Spectrum(ESG)



(c) Voltage Response of PVDF Film(unit : volt)



(d) Frequency Spectrum(PVDF Film)

Fig. 4. Responses of ESG and PVDF Film.

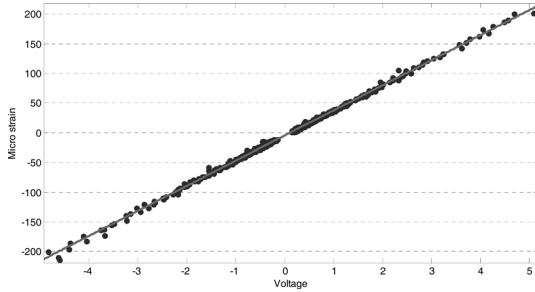


Fig. 5. Experimental Relationship between Strain and Voltage.

PVDF Film에서의 전압 이력과 ESG에서의 변형률 이력 그리고 각각에 대한 주파수 응답을 나타내었다. ESG에 의해 측정된 변형률 응답의 주파수는 3.71 Hz이고, PVDF 필름의 전압 응답의 주파수도 3.71 Hz로 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형을 측정 가능하다는 것을 입증한다. ESG에 의해서 측정된 변형률과 PVDF 필름에서 측정된 전압의 상관 관계를 분석하기 위하여, 매 측정 시점마다의 PVDF 필름 전압 응답 값과 ESG의 변형률 값을 추출하여 선형 회귀 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. ESG에서 측정된 변형률 값과 PVDF 필름에서 측정된 전압이 선형적인 관계를 나타내는 것을 그림에서 확인할 수 있으며, 선형회귀분석을 통해서 구한 전압-변형률 관계는 다음과 같다.

$$V_{out} = H_{1,exp} \varepsilon = (0.0236)\varepsilon \quad (10)$$

여기에서 변형률의 단위는 micro strain이다. 실험을 통해서 구한 PVDF 필름의 변형률 응답 계수($H_{1,exp}$)는 0.0236이며, 이 값을 식 (9)의 이론적인 값과 비교하였다. Fig. 6은 본 실험에 사용된 PVDF의 물성치와 전하증폭기의 특성치 및 Output gain 값을 이용하여 구한 주파수별 변형률 응답 계수이다. 가진 주파수 3.71 Hz에서의 이론적인 변형률 응답 계수 값은 0.0275로써, 선형회귀분석으로 구한 값 0.0236과 비교할 때 약간의 오차가 있으나, 이론적인 해를 구하는 과정에서 전하증폭기의 거동을 이상화함으로써 발생하는 모델링 오차를 고려할 때, 실제 값에 매우 근사한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 7에는 이론적인 변형률 계수 값과 실험을 통해 구한 값을 적용한 PVDF의 변형률 응답 결과를 나타내었다. PVDF를 이용하여 측정된 구조물의 동적 변형률이 실제 변형률과 매우 동일한 양상을 나타내며, 상대적으로 잘 일치하는 것을 그림에서 확인할 수

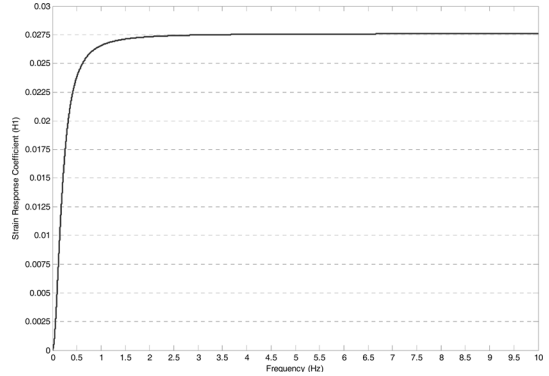


Fig. 6. Strain Response Coefficients (Feedback Resistance : 10 Mega Ohm).

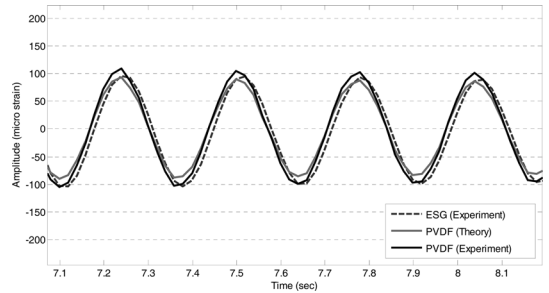


Fig. 7. Calibrated Strain Responses of PVDF Film.

있다. 이러한 결과는 구조물의 동적 변형률 측정에 있어서 PVDF 필름을 적절히 적용할 경우에 기존의 ESG 만큼의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다는 것을 입증한다.

3.3. 주파수별 변형률 응답

변형률 응답 계수의 값은 주파수에 따라 다른 값을 가진다는 것을 Fig. 6에서 알 수 있다. 이를 검증하기 위해서, 600 mm와 800 mm 길이의 캔틸레버 보 실험체에 대해서 각각 자유 진동 실험을 수행하였다. 자유 진동 실험을 통하여 측정된 PVDF 필름의 전압 응답 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 600 mm의 캔틸레버 보에서의 자유 진동 주파수는 5 Hz이며, 800 mm는 2.91 Hz로써, 각 주파수에 해당하는 변형률 응답 계수를 Fig. 6에서 구하면, 각각 0.0276과 0.0274의 값을 가진다. 변형률 응답 계수를 적용한 PVDF 필름의 변형률 응답과 ESG로 측정된 변형률 응답 결과를 Fig. 9에 나타내었다. PVDF 필름의 변형률 응답이 ESG로 측정된 변형률 응답에 매우 근사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 6의 주파수별 변형률 응답 계수에서 알 수 있듯이, 동적 변형률 성분의 주파수가 2 Hz 이상

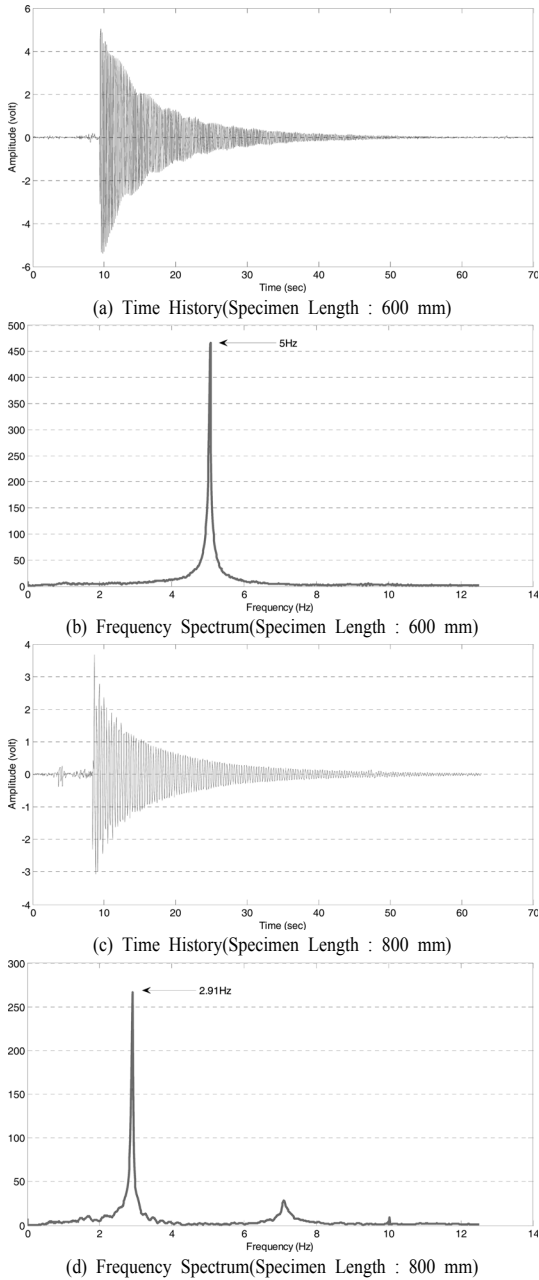


Fig. 8. Responses of PVDF Film,

일 경우에는 변형률 응답 계수 값이 주파수에 따라 변화가 거의 없이 일정한 값을 가지지만, 2 Hz 이하 일 경우에는 주파수에 따라 변형률 응답 계수 값이 변화하는 것을 알 수 있다. 특히, 1 Hz 이하의 주파수 대역에서는 값의 변화가 매우 급격하며, 이는 동적 변형률 계측 시에 1 Hz 이하의 저주파수 대역 성분은 실제 변형률을 크게 왜곡할 수 있다는 것을 나

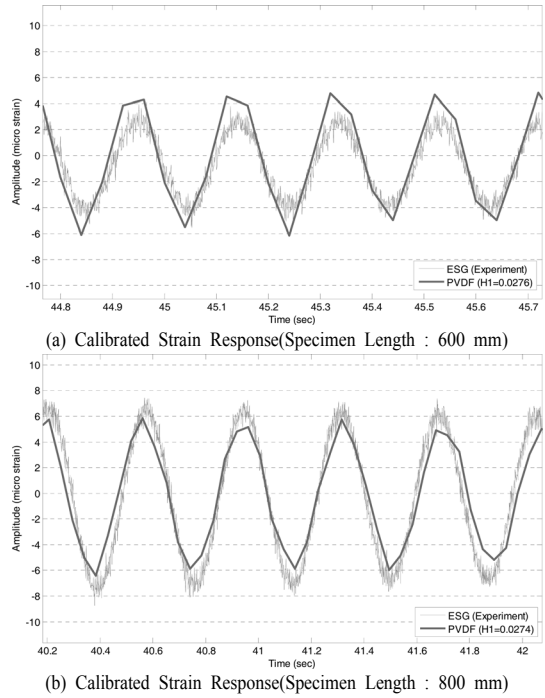


Fig. 9. Calibrated Strain Responses of PVDF Film,

타낸다. 주파수별 변형률 응답 계수는 전하증폭기의 피드백 저항과 피드백 커패시턴스 값에 따라 변화가 되며, 따라서 피드백 저항과 피드백 커패시턴스를 변화시킴으로써 저주파수 대역에서도 왜곡없이 변형률을 측정 가능하다는 것을 의미한다. Fig. 10에는 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항만을 100 Mega Ohm으로 변화시켰을 때의 주파수별 변형률 응답 계수를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항을 100 Mega Ohm으로 바꾸면 0.5 Hz의 저

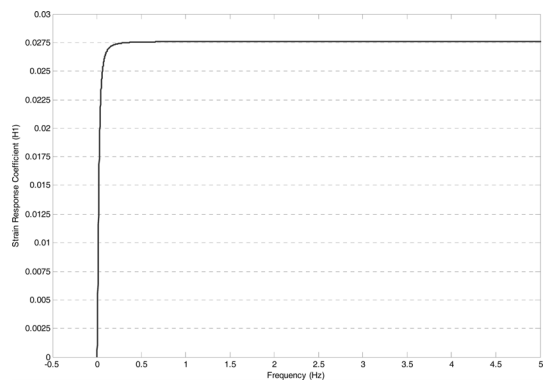


Fig. 10. Strain Response Coefficients (Feedback Resistance : 100 Mega Ohm),

주파수 성분도 왜곡없이 측정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형률을 왜곡없이 측정하기 위해서는, 동적 변형률 성분의 주파수 대역에 맞도록 식 (8)의 전하증폭기의 주파수 응답 함수를 조절하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물의 동적 변형 모니터링에 필름 형태로 가공된 PVDF의 적용성을 알아 보았다. 변형률 입력에 대한 PVDF 필름의 전압 응답을 이론적으로 유도하였으며, 캔틸레버 보에 대한 자유진동 실험을 수행하여 구조물의 동적 변형을 PVDF 필름과 ESG로 측정하였다. 실험 결과 이론적으로 구한 변형률 응답 계수와 실험을 통해 구한 변형률 응답 계수가 상대적으로 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었으며, 또한 변형률 응답 계수가 적용된 PVDF 필름의 변형률 응답이 실제 변형률 응답과 동일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 변형률 응답의 주파수가 다른 경우에도 변형률 응답 계수로부터 추정된 PVDF 필름의 변형률 응답이 실제 변형률과 상대적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터 PVDF 필름이 구조물의 동적 변형률 측정에 있어서 신뢰성 있게 적용할 수 있다는 결론을 얻었으며, 장기 모니터링에 있어서 기존의 ESG를 대체하여 사용 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 국토해양부/한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(과제명 : IT기반 스마트 교량 내진 장치 개발, 과제번호 : P1101)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Chang, P. C., Flatau, A. and Liu, S. C., "Health Monitoring of Civil Infrastructure", Structural Health Monitoring, Vol. 2(3), pp. 257~2671, 2003.
- 2) Balageas, D., Fritzen, C. P. and Guemes, A., Structural Health Monitoring, ISTE, London, UK., 2005.
- 3) Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M.E. and Kurata, N., "Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 11(4), pp. 349~368, 2004.
- 4) Lee, B., "Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors", Optical Fiber Technology, Vol. 9(2), pp. 57~79, 2003.
- 5) Arnau, A., Piezoelectric Transducers and Applications-2nd Edition, Springer, UK, 2008.
- 6) Gu, H., Zhao, Y. and Wang, M. L., "A Wireless Smart PVDF Sensor for Structural Health Monitoring", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 12, pp. 329~343, 2005.
- 7) Zhang, H., Galea, S. C., Chiu, W.K. and Lam, Y. C., "An Investigation of Thin PVDF Films as Fluctuating-Strain-Measuring and Damage-Monitoring Devices", Smart Materials and Structures, Vol. 2(4), pp. 208~216, 1993.
- 8) Paul, R. C., Fundamentals of Electric Circuit Analysis, John Wiley & Sons, NY, USA, 2001.
- 9) Specifications of Piezoelectric Film Sheet, Measurement Specialties Inc., USA(<http://www.meas-spec.com>)