creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

工學碩士學位論文

압전 필름을 이용한 교량 탄성 받침의 동적 하중 모니터링

2012年 2月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

金 秀 敏

工學碩士學位論文

압전 필름을 이용한 교량 탄성 받침의 동적 하중 모니터링

指導敎授 : 愼 晟 佑

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2012年 2月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

金 秀 敏

金秀敏의 工學碩士 學位論文을

認准함

2012 年 2 月

主 審 工學博士 張 聖 祿 (인)

委 員 工學博士 權 五 憲 (인)

委 員 工學博士 愼 晟 佑 (인)

목 차

제 1 장 연구개요 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1

1.2 연구동향 ····· 7

제 2 장 PVDF 필름을 이용한 변형률 측정 ····· 14

2.1 압전이론과 재료에 대한 연구 ····· 14

2.2 변형률 응답과 PVDF 필름의 상관관계 도출 ····· 19

2.3 하중 주파수에 따른 PVDF 필름 응답 ····· 35

제 3 장 탄성 교량 받침의 정/동적 하중 재하 실험 및 응답 특성 분석 40

3.1 정적 하중의 측정 ····· 40

3.2 동적 하중의 측정 ····· 45

3.3 PVDF 필름을 이용한 동적 하중에 대한 변형률 측정 ····· 52

제 4장 하중 추정을 위한 매개변수 추출 및 알고리즘 개발 ····· 56

제 5 장 하중 모니터링 시스템 구성 및 모니터링 성능 검증 ····· 60

5.1 모니터링 시스템 구성 ····· 60

5.2 모니터링 성능 검증 ····· 62

제 6 장 결론 ····· 66

참고문헌 ····· 68

Dynamic load Monitoring of Bridge Elastomeric bearing Using PVDF Film

Sumin Kim

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

In this study, the applicability of PVDF films of dynamic load monitoring in a Bridge Elastomeric bearing 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 ESG (ESG) and a PVDF film. Strain-voltage relationship obtained from the experiment was compared with the analytic relationship. In addition, the Bridge Elastomeric bearing for the Static/Dynamic load test of load-strain relationship found by

doing. Through Strain-voltage relationship and Load-strain relationship to Load-voltage relationship is derived. Good agreement between the analytic and experimental relationships was observed. It was found that a tailored PVDF film can monitoring the dynamic load of a Bridge Elastomeric bearing .

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

제1장 연구개요

1.1 연구의 배경 및 목적

교량 받침은 교량 상부의 하중을 교각과 지반으로 전달하고, 교량 상판의 온도에 의한 변형을 흡수할 뿐 만 아니라, 지진 시에는 교량의 면진/내진 역할을 수행하는 매우 중요한 교량 부재이다 [1].

Fig. 1-1 Example of Damaged Bridge Bearing

만약 이러한 교량 받침에 Fig. 1-1과 같이 문제가 발생할 시에는 교량의 기능성에 미치는 영향이 매우 크며, 경우에 따라서는 교량의 안전성에도 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 교량 받침의 상태를 수시로 확인 또는 모니터링 하여, 이상 상황 발생 시에 적절한 보수 및 보강을 실시하는 일련의 과정이 공용기간동안의 교량의 기능성과 안전성 확보 측면에서

매우 중요하다. 그러나 현재 운영되고 있는 교량의 받침에 대한 건전성 평가는 대부분 육안 점검과 간단한 테스트를 주기적으로 실시하는 것에만 의존하고 있으며 [2], 이러한 점검 방법은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 즉, 점검일 현재를 기준으로 교량 받침에 외관상 문제점이 있다고 판단될 경우에만 정밀진단을 실시하여 보수/보강 여부를 결정하게 되는 현행의 점검 방법에서는 외관에 대한 점검자의 주관적 판단이 개입할 가능성이 크며, 따라서 점검자의 경험과 기량의 차이에 의하여 받침의 건전성에 대해 다른 판정이 나올 수 있게 된다. 또 다른 문제점은, 현행 교량 받침의 점검은 주기적/단속적으로 실시하여, 이전 점검일 이후의 교량 받침의 상태에 대한 정보는 없고 점검일 현재와 이전 점검일의 자료만을 확보하고 있기 때문에, 점검일 현재를 기준으로 교량 받침에 문제점이 있다고 판단된 경우, 이러한 문제점의 원인이 무엇인지를 파악하기가 어려우며, 따라서 보수/보강을 실시한다고 하더라도 추후에 동일한 문제점이 재발될 여지가 있다는 것이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는, 첫째 교량 받침의 성능 평가 기준과 평가 방법을 확립하여야 하며, 둘째 교량 받침의 상태를 연속적으로 측정하고 이를 Database로 구축하여 교량 받침의 상태 평가와 보수/보강에 지속적으로 활용하는 것이다. 그러나 이러한 해결 방법을 실제적으로 적용하기 위해서는 선결되어야 할 조건이 있다. 즉, 교량 받침의 성능 평가 기준 및 평가 방법의 확립과 교량 받침의 상태에 대한 Database

를 구축하기 위해서는 공용중인 교량 받침의 성능과 상태를 평가할 수 있는 하중 이력이나 변형/변위 이력 등과 같은 물리적인 정보가 필요하며, 따라서 이러한 물리적인 정보를 연속적으로 획득하고 저장할 수 있는 모니터링 시스템의 개발이 앞서 언급한 교량 받침의 건전성 및 상태 평가에 있어서 무엇보다 선결되어야 할 핵심 요소 기술이다.

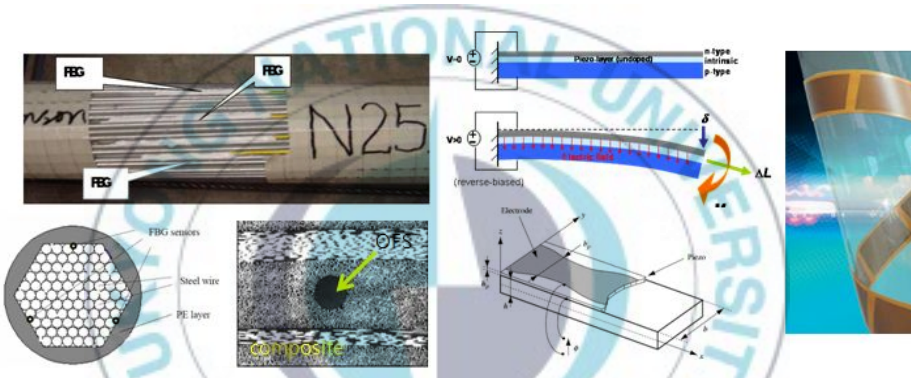


Fig. 1-2 Smart tendon embedded FBG sensor (Left);

Smart beam attached Piezoelectric sensor(Right)

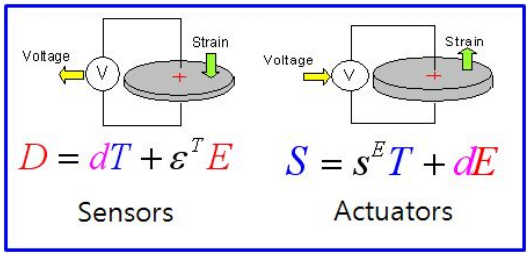


Fig. 1-3 Sensor function of Piezoelectric material (Left);

Actuator Function (Right)

한편, 최근에 구조물의 효율적인 유지 관리를 위해서 압전 센서나 FBG 센서와 같은 스마트 센서를 이용한 모니터링 시스템 개발에 관한 연구가 매우 활발하다 [3]. 스마트 센서가 기존의 Off-the-shelf 센서에 비해서 가지는 장점은, 구조물에 직접 부착하거나 매립하기가 매우 용이하기 때문에 Fig. 1-2 와 같이 구조 부재에 센서가 내장된 형태로 시공이 가능하다는 것에 있으며, 또한 가격이 매우 저렴하여 효율적인 모니터링 시스템의 구축이 가능하다는 것이다. 많은 연구자들이 스마트 센서의 이러한 장점을 이용하여 다양한 형태의 구조물에 대한 효율적인 모니터링 시스템 개발에 이를 적용하고자 하는 연구를 수행하고 있으며 [4, 5], 그중에서도 압전 센서를 이용한 모니터링 시스템 개발에 관한 연구가 최근에 매우 활발하게 이루어지고 있다. PZT, PVDF와 같은 압전 재료는 전기적 에너지를 역학적 에너지로 변환하고, 역으로 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 특성이 있으며 [6], 따라서 Fig. 1-3과 같이 압전 재료는 센서로서 사용할 수 있을 뿐만 아니라 동시에 액추에이터로서 사용이 가능한 기능성 재료이다. 따라서 압전 재료를 이용하면, 수동형 모니터링 시스템뿐만 아니라 능동형 모니터링 시스템에도 적용이 가능하며 [7, 8], 이에 따라 모니터링 목적에 맞는 최적의 센싱 기법을 적용하기에 용이한 장점이 있다. 또한, 압전 재료는 크기와 형상을 목적에 맞게 임의로 가공하기가 용이하며, 따라서 구조 부재의 형태를 변화하지 않고 부착 또는 매립이 가능한

장점도 있다.

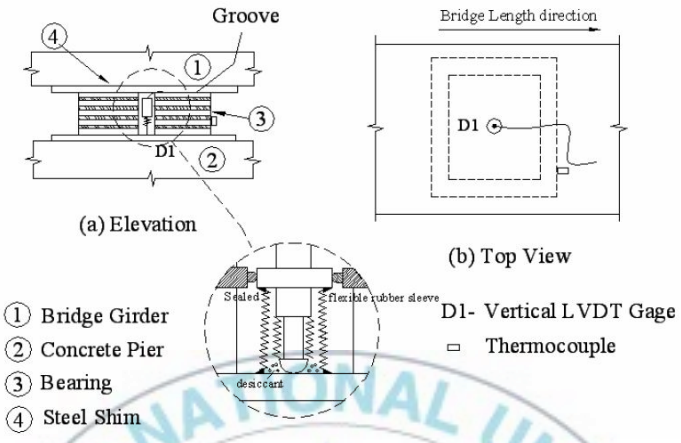


Fig. 1-4 LVDT sensor embedded Bridge bearing of load measurement system[9]

본 연구에서는 교량 받침의 효율적인 건전성 평가를 위한 핵심 요소 기술인 교량 받침의 하중 모니터링 시스템의 개발에 주요한 목표가 있다. 앞서 언급한 바와 같이 교량 받침은 상부 구조의 수직 하중을 하부 구조로 전달하고, 상부 구조의 온도에 의한 수평 변형을 흡수하는 구조 부재이며, 따라서 교량 받침에 작용하는 하중과 변형은 교량 받침의 성능 및 상태 평가를 위한 주요 모니터링 항목이다. 이에 따라 교량 받침에 작용하는 하중을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 계측 시스템의 개발 필요성에 의하여 최근에 국외에서 초기 단계의 연구가 수행되었으나, Fig. 1-4에 나타낸 바와 같이 하중 측정을 위한 센서의 설치를 위하여 교량 받침의 구조를 변경하는 방식으로 시스템이 개발되었다 [9]. 그러나 교량 받침의 구조를 변경

하는 계측 시스템의 경우, 구조 변경에 따른 교량 받침의 성능에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하며, 이는 결국 교량 받침 설계 및 제작 과정에서 추가적인 노력을 필요로 하는 등의 비효율성을 야기하게 된다. 따라서 본 연구에서는 교량 받침의 구조적인 형태의 변경이 없이 교량 받침에 작용하는 하중에 의한 계측할 수 있는 형태로 연구를 수행하였으며, 압전 센서에서 측정된 전기적 응답으로부터 교량 받침에 작용하는 하중을 추정할 수 있는 **하중 추정 역산 알고리즘을 개발**하고, 이를 교량 받침에 적용하여 **하중 추정 성능을 평가**하고자 한다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

1.2 연구 동향

공용중인 교량 받침에 작용하는 하중을 연속적으로 계측하기 위한 하중 모니터링 시스템의 개발에 관한 연구는 주로 국외에서 수행되었으며, 국내에서는 한국표준과학연구원에서 국외의 기술을 답습하여 시도한 연구는 있으나 체계적인 개발에 관한 연구는 수행된 바가 없는 것으로 확인되었다. 하중을 모니터링 할 수 있는 센서 내장형 교량 받침 (일명"Smart Bearing")에 관한 연구는 최근에 들어서야 국외에서 본격적인 연구가 시작되어 아직까지 상용화된 시스템의 개발은 되지 않은 상태이다. 교량 받침에 작용하는 여러 가지 하중을 측정하기 위한 Smart Bearing에 관한 개념적 연구는 유한 요소를 이용한 수치 해석적 연구로부터 시작되었으며, Subramaniam [10], Nims et al [11] 에 의하여 탄성 받침을 가진 교량에서 교량 상판의 차량 운행에 의한 교행 하중이 교량 받침에 충분히 측정 가능한 변형을 유발하며, 따라서 교량 받침에 측정 장치를 부착할 경우에 차량 하중을 추정할 수 있음을 수치 해석적 연구로 증명하였다. 또한 교량 받침의 변형률이나 변위 응답을 측정하여 이로부터 하중을 추정하고자 할 때, 하중 추정의 정확성은 변형률이나 변위의 하중에 대한 민감도 보다는, 변형률/변위 응답으로부터 역산하여 하중을 추정하는 역산알고리즘의 정확성에 매우 의존적임을 보였다. 이러한 수치 해석적 연구를 토대로 교량 받침

에 작용하는 하중을 실제로 모니터링 할 수 있는 센싱 시스템 개발에 관한 연구가 이후 순차적으로 수행되었다. 센싱 시스템 개발에 관한 최초의 연구는 주로 Fiber Optic Sensor (FOS)를 이용하는 방향으로 진행되었으며 1990년대 중반부터 후반까지 미국의 Blue Road Research Company와 Oregon DOT가 공동으로 수행하였다. 이들은 연구를 통하여 Fig. 1-5과 같은 FOS 내장형 로드 셀에 대한 개념 설계를 시작으로 하여 [12], Fig. 1-6와 같이 Fiber Optic Sensor가 내장된 Smart Bearing Prototype 시스템을 최종적으로 개발하고 [13], 이 시스템을 이용한 하중 추정 성능을 실험을 통하여 검증 하였다 [14]. 그러나 이들이 개발한 시스템은 FOS를 내장하기 위하여 탄성 받침의 내부에 Duct를 설치해야 하는 등 교량 받침의 구조를 변경해야 문제점뿐만 아니라, FOS의 가격과 설치에 소요되는 비용이 교량 받침 자체의 가격의 수배에 달할 정도로 고비용이 필요로 하여 실용화에 한계가 있는 것으로 지적되었다.

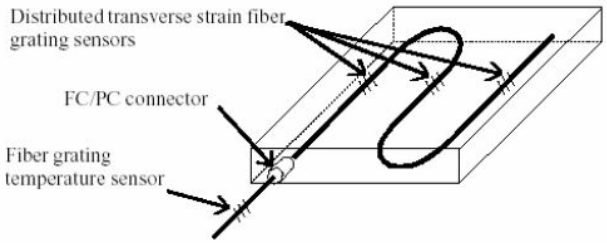


Fig. 1-5 FBG sensor embedded conceptual of diagram [12]

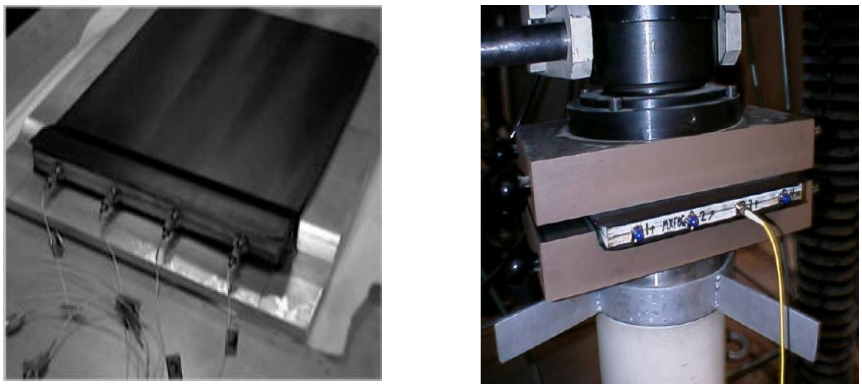


Fig. 1-6 FBG sensor embedded Smart Bearing Prototype(left) and experiment(right)

한편, 과적 차량을 단속하기 위한 차량 축하중 측정 시스템의 개발을 위해서 Ghosh et al. [15]은 저렴한 ESG를 부착한 Smart Bearing 을 Fig. 1-7과 같이 개발하였다. Ghosh et al.은 이 시스템을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정하였으며, 측정된 변형률로부터 과적 차량을 식별하기 위한 알고리즘은, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 다양한 차량에 대한 변형률 응답을 수치적으로 구하고, 측정 응답을 수치 응답과 패턴인식 기법을 이용하여 비교함으로써 과적 차량을 식별하고자 하였다. 그러나 비록 Ghosh et al.의 시스템은 과적 차량의 식별에 효과적임이 실험적으로 증명되었으나, 과적 차량의 식별 과정에서 교량 받침에 작용하는 하중을 직접적으로 추정하지 않기 때문에, 교량 받침의 하중을 모니터링하기에는 적합하지 않다.

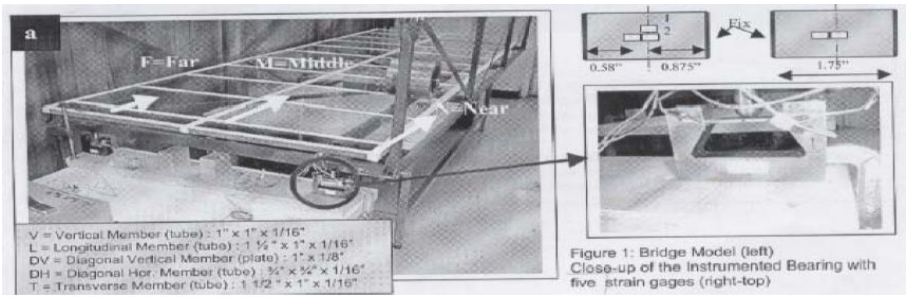


Fig. 1-8 Smart Bearing embedded ESG for overloaded vehicle

Smart Bearing에 관한 가장 최근의 연구는 NY DOT의 지원에 받아 CUNY (City University of New York)의 Agrawal et al.에 의하여 수행되었다 [9]. Agrawal et al.의 연구에서는 두 가지의 서로 다른 종류의 교량 받침 하중 측정 시스템을 개발하고, 두 시스템의 교량 받침 하중 모니터링 적용 과정에서 소요되는 비용을 체계적으로 비교 분석하였다. 두 가지 서로 다른 시스템중 첫 번째는 Blue Road Research Company의 FOS 기반 시스템을 개량한 시스템이며 (Fig. 1-9), 두 번째 시스템은 앞 장의 Fig. 1-4에 제시된 LVDT를 이용한 시스템이다. Agrawal et al.의 연구 결과 LVDT를 이용한 시스템은 센서, Data Logger, 설치비용까지 합해서 10개의 교량 받침이 설치된 5경간 연속 교량에 대하여 대략 50000 USD의 비용이 소요되는 반면에, 동일한 교량에 대하여 FOS 시스템은 대략 200,000 USD 이상이 소요가 되어 FOS 시스템은 경제적 실용성에 문제가 있음을 재차 확인하였다. 그러나 Agrawal et al.이 개발한 LVDT 시스템은 하중

추정 유효성에 관한 실험을 추후 연구로 남겨 두고, 이후에 LVDT 시스템의 하중 추정 성능에 대한 검증에 대한 보고가 없어서 하중 추정 시스템으로서의 신뢰성이 미확보된 상태일 뿐만 아니라, LVDT를 교량 받침 내부에 설치하기 위하여 교량 받침의 구조를 변경한 상태여서, 교량 받침으로서의 구조적 성능에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

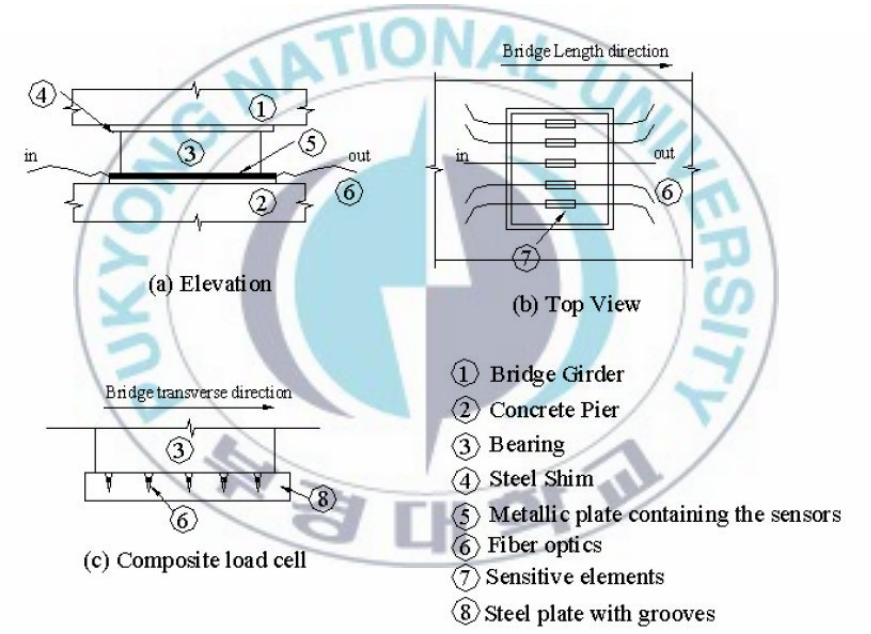


Fig. 1-9 Elastomeric bearing embedded FBG sensor feasible with Load monitoring [12]

교량 받침에 작용하는 하중을 직접적으로 모니터링 할 수 있는 센서 내장형 교량 받침 (Smart Bearing)에 관한 국내외 연구 개발 현황 조사 결

과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- Smart Bearing에 관한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있으나, 실용적으로 사용할 수 있는 시스템의 개발은 아직 이루어지지 않았다.

- 현재까지 개발되고, 하중 추정 성능 평가가 진행된 시스템은 대부분 FOS를 이용한 시스템이지만, FOS 시스템의 구축에 소요되는 비용이 매우 고가이고, FOS를 교량 받침 내부에 매립하기 위한 추가 공정이 필요하여 교량 받침의 제작이 매우 까다로워 실용화하기가 매우 어렵다.

- 상대적으로 저렴한 센서 (LVDT)를 이용할 경우, 시스템의 구축비용은 상대적으로 저렴할 수 있으나, 교량 받침의 구조를 변경하여야 할 뿐만 아니라 변경된 교량 받침의 구조적 성능에 대한 신뢰성이 아직 확보되지 않은 상태이다.

- 본 연구에서 개발하고자 하는 압전 센서 기반의 교량 받침 하중 모니터링 시스템은, 압전 재료의 특성상 교량 받침의 구조 변경 없이 센서의 내장이 가능하며, 또한 압전센서의 가격이 매우 저렴하여 저비용으로도 모니터링 시스템의 구축이 가능하기 때문에 개발에 성공할 경우 FOS나 LVDT 등을 이용하는 기존의 시스템에 비하여 실용화/상용화의 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

- 압전센서 기반의 교량 받침 하중 모니터링 시스템 개발에 있어서 선행 연구에서 나타난 결과를 바탕으로 하여 고려해야 할 부분은, 압전 센

서의 전기-역학 연성 특성에 대한 충분한 이해를 바탕으로 한 하중 추정 역산 알고리즘의 개발과 교량 받침의 변형 응답을 안정적으로 측정할 수 있는 압전 센서 부착 위치의 선정을 통한 센서 내장형 교량 받침을 개발해야 한다는 것이다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

제 2 장 PVDF 필름을 이용한 변형률 측정

2.1 압전 이론 및 재료에 대한 연구

가. 압전이론

1880년에 Jacques Curie와 Pierre Curie에 의해서 발견된 압전현상 (piezoelectric phenomenon)이란, 어떠한 재료에 응력장(stress field)을 형성할 때 전기장(electrical field)이 동시에 생성되는 현상 (직접 압전 효과)과 역으로 전기장을 형성할 때 변형률장(strain field)이 생성되는 현상 (역압전 효과)을 일컫는다. 또한, 이러한 압전 현상을 나타내는 물질을 압전재료 (또는 압전체)라 한다. 이러한 압전 현상을 수학적으로 표현하는 전기-기계 연성 구성 방정식 (Electro-Mechanical Coupled Constitutive Equation)은 다음과 같은 텐서형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= S^{E}_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{kij}E_k \\ D_i &= d_{ikl}\sigma_{kl} + e^{\sigma}_{ik}E_k \end{aligned} \qquad (1)$$

여기에서, ε_{ij} 와 σ_{kl} 는 각각 압전체의 변형률과 응력 텐서이며, E_k 와 D_i

는 각각 전기장 벡터와 전기변위 벡터를 나타낸다. 또한, S_{ijkl}^{E}은 전기장이 0 일 때의 단위 응력에 대한 압전체의 변형률 크기를 나타내는 역학적 컴플라이언스 (mechanical compliance)이며, d_{kij}와 d_{ikl}은 압전계수로써 각각 단위전기장에 대한 변형률 응답과 단위 응력에 대한 전하(charge) 응답을 나타낸다. 마지막으로 e_{ik}^{σ}는 응력장이 0일 때의 압전체의 절연유전율 (dielectric permittivity)을 나타낸다. 식(1)에서 알 수 있듯이, 압전현상을 나타내는 압전체에서는, 역학적 변형이 전기적 신호로 변환이 가능하게 되어 센서로써 사용할 수 있으며, 반대로 전기적 신호의 입력을 통하여 역학적 변형을 발생할 수 있으므로 작동기 (액추에이터)로써 사용할 수도 있다는 것을 알 수 있다 [16]. 한편, 압전체의 구성방정식은 공학 분야에서는 편의상 행렬형태로 주로 표현하며, 이때 Fig. 2-1로 주어진 좌표계와 Voigt의 Table.기법을 이용하여 텐서지수를 다음과 같이 변환하여 표현한다. [17].

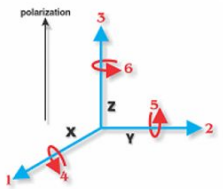


Fig. 2-1 Dimensions for Piezoelectric Constitutive Equation

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{Bmatrix} \qquad \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

식(2)를 이용하여, 식(1)을 행렬방정식으로 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_{1} \\ E_{2} \\ E_{3} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{Bmatrix} D_{1} \\ D_{1} \\ D_{1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_{1} \\ E_{2} \\ E_{3} \end{Bmatrix}$$

일반적으로 압전재료는 횡등방 (transverse isotropy) 성질을 가지고 있

으며, 또한 전기장과 전기변위의 벡터적 특성 때문에 식 (3)의 행렬 값들 중 일부는 0의 값을 갖는다. 이러한 특성을 바탕으로 일반적인 압전재료의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & e_{22} & 0 \\ 0 & 0 & e_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

나. 압전재료

압전현상을 나타내는 압전재료 (압전체)는 크게 세라믹 계열과 고분자 계열로 나눌 수 있으며, 대표적인 세라믹계열의 압전 재료는 PZT로 널리 알려진 Lead zirconate titanate 이 있으며 (Fig. 2-2), 대표적인 고분자

계열의 압전재료는 PVDF로 알려진 Polyvinylindene Fluor 가 있다 (Fig. 2-3).

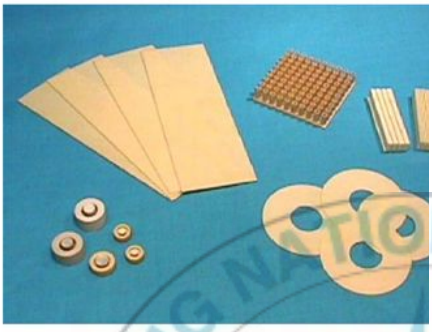


Fig. 2-2 Example of PZT

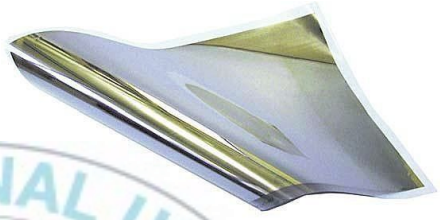


Fig. 2-3 Example of PVDF

세라믹계 압전체와 고분자계 압전체의 가장 큰 차이점은 전기역학 결합 계수에서 나타나며, 전기역학 결합 계수는 다음과 같은 식으로 표현된다. [18].

$$k = \sqrt{\frac{mechanical\ energy\ stored}{electrical\ energy\ stored}} \tag{5}$$

식 (5)는 전기 에너지가 압전 재료에 공급될 때 역학적 에너지의 발생량을 나타내는 지표로써 변환 효율이 어느 정도인지를 알 수 있는 값이며, 압전계수와 컴플라이언스, 절연유전율의 함수이다.

일반적으로 세라믹계의 전기역학 결합 계수는 고분자계 압전재료보다 10-20배 이상의 높은 값을 나타내며, 이는 세라믹계의 압전재료가 매우 높은 변환효율성을 가지고 있다는 것을 의미한다. 세라믹계의 높은 변환효율성은 압전체를 이용하여 구조물에 변형을 유발하고자 하는 경우에 (즉 액추에이터) 유용성이 높은 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 초음파 가진이나 진동 제어에 응용되는 연구가 많이 이루어졌다. 그러나 세라믹계의 압전재료는 인성 (toughness)이 작아서, 매우 취성적이며, 이에 따라 큰 변형을 측정하고자 하는 경우나 압전재료를 휘어야 할 경우에는 적용이 어려운 단점이 있다. 반면에 고분자계 압전재료는 변환효율성은 낮으나 우수한 연성 능력이 있어서, 큰 변형을 측정하고자 할 경우나 곡면 등에 부착하기가 매우 용이한 장점이 있어서 주로 센서로써 많이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 변형률 측정의 목적에 적합한 PVDF를 교량 받침 내장용 센서로 선정하였다.

2.2 변형률 응답과 PVDF 필름의 상관관계 도출

가. 변형률 입력에 대한 PVDF 필름의 전압 응답 모델링

압전물질의 전기-역학 연성 구성방정식은 텐서 표기법을 이용할 경우 다음과 같은 식으로 표현 된다[19].

$$\epsilon_{ij} = S^E_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{kij}E_k \tag{1-1}$$

$$D_i = d_{ikl}\sigma_{kl} + e^{\sigma}_{ik}E_k \tag{1-2}$$

여기에서, ϵ_{ij}와σ_{kl}는 각각 역학적 변형률과 응력 텐서이며, E_k와 D_i는 각각 전기장 벡터와 전기변위 벡터를 나타낸다. 또한, S^E_{ijkl}은 전기장이 0 일 때의 단위 응력에 대한 압전체의 변형률 크기를 나타내는 역학적 컴플라이언스이며, d_{kij}와 d_{ikl}은 압전계수로써 각각 단위전기장에 대한 변형률 응답과 단위 응력에 대한 전하 응답을 나타낸다. 마지막으로 e^{σ}_{ik}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.

$$D_i = d_{ikl}K^E_{klij}\epsilon_{ij} \tag{2-1}$$

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

$$\{D\} = [d][K^E]\{\epsilon\} \tag{2-2}$$

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

$$q = \int_A \{D\}^T \{dA\} = \int_A \left([d] \left[K^E \right] \{\epsilon\} \right)^T \{dA\} \tag{3}$$

한편, 폭(b)과 길이(l)에 비하여 두께를 매우 얇게 하여 Fig. 2-3과 같은 필름 형태로 가공한 PVDF (전기 분극 방향은 3축 방향)에 1축 방향으로 지배적인 변형률장 가 형성될 경우, 변형률과 총전하량의 관계는 다음과 같이 유도 된다.

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

만약, 1 축 변형률장 $\epsilon_{11(x)}$가 Fig. 2-4 으로 주어진 PVDF 필름의 길이에 걸쳐서 균일한 값인 $\epsilon_{11(x)} = \epsilon$을 가진다고 가정하면 (즉, $\epsilon_{11(x)}$의 값이 위치 x에 대하여 변화가 크지 않은 경우), 식 (4)는 다음과 같이 근사적인 평균 변형률 ϵ의 선형함수로 표현할 수 있다.

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

여기에서 $A = d_{31}K_{31}^{E}bl$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 선형비례하며, 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 구성 면에서 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 변

형률 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_f이고, 피드백 커패시턴스가 C_f인 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.

$$i = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \tag{6}$$

전하증폭기가 이상적으로 거동한다고 가정하면, 최종 출력 전압(V_{out})에 대한 전하증폭기의 회로방정식은 식(6)을 이용하면 다음과 같이 표현된다 [20].

$$\dot{V_{out}} + \frac{V_{out}}{R_f C_f} = -\frac{\dot{q}}{C_f} \tag{7}$$

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

$$V_{out}(w) = -C_1\left[\frac{jwR_fC_f}{1+jwR_fC_f}\right]\frac{q}{C_f} = C_1H(w)\frac{q(w)}{C_f} \tag{8}$$

여기에서, C_1은 무차원 계수로써 전하증폭기의 output gain 조절 등에 대한 보정을 위한 값이며, $H(w)$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.

$$V_{out}(w) = C_1H(w)\frac{q(w)}{C_f} = C_1H(w)\frac{A}{C_f}\epsilon(w) = H_1(w)\epsilon(w) \tag{9}$$

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

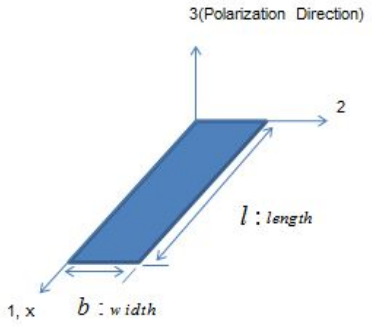


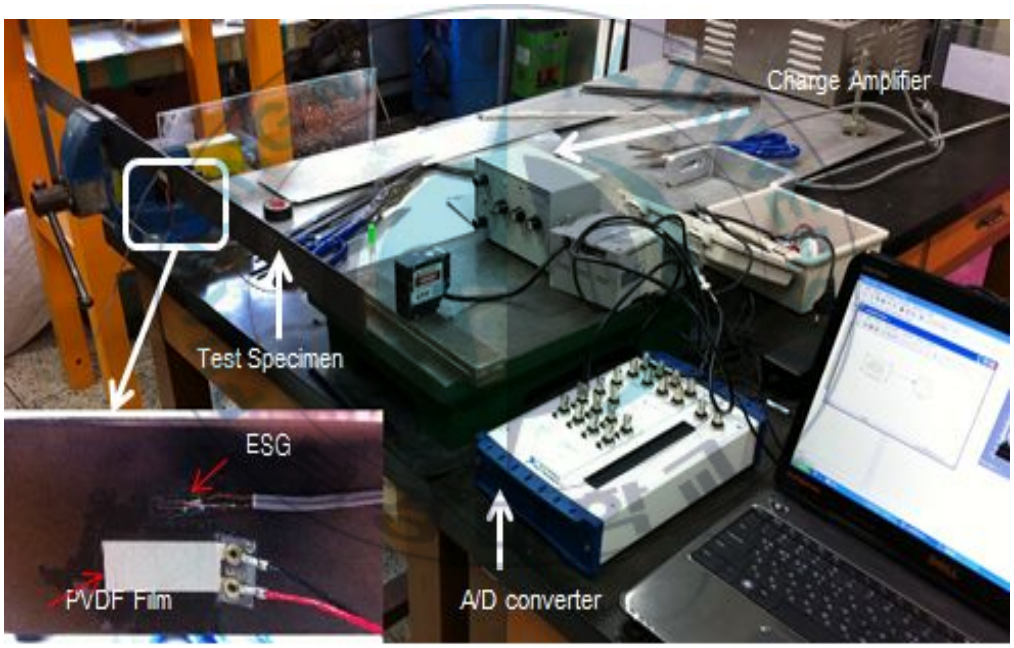
Fig. 2-4 Dimensions of PVDF Film

나. PVDF 필름을 이용한 변형률 측정 실험

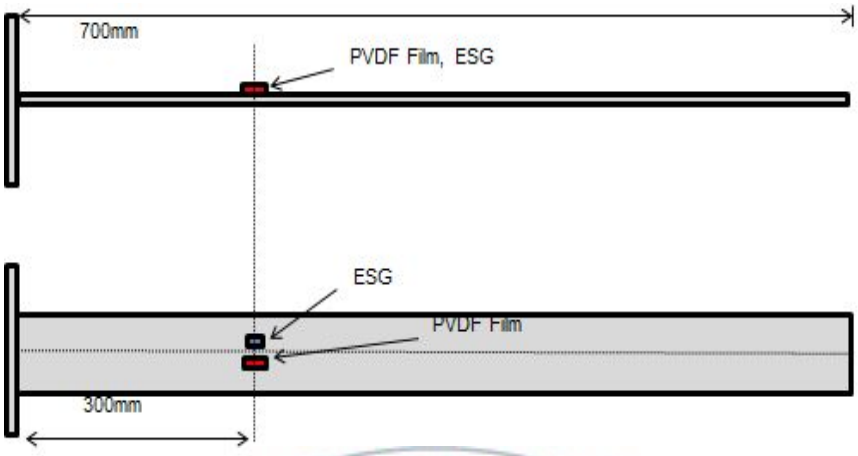
(1). 실험 구성

진동에 의한 구조물의 변형률을 PVDF 필름을 이용하여 측정하기 위해서, Fig. 2-5와 같이 길이 700mm, 폭 40mm, 두께 2mm 인 캔틸레버 보 실험체를 제작하여, 자유 진동 실험을 수행하였다. 두께가 52 ㎛ 인 Sheet 형태의 PVDF를 길이 30 mm, 폭 10mm 크기의 필름 형태로 가공하여, 고정단 지지 점에서 거리 300mm 인 위치에 에폭시를 이용하여 부착하였다. 사용된 PVDF 필름의 물성치와 크기를 Table. 2-1에 정리하였다 [21]. 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. 2-5에 나타낸 바와 같이, 전하증폭기의 출력 신호는 16 bit A/D 변환기를 이용하여 Digital 신호로 변환하여 Laptop 컴퓨터에 저장되도록 하였다.



(a) Measurement Setup



(b) Configuration of Test Specimen

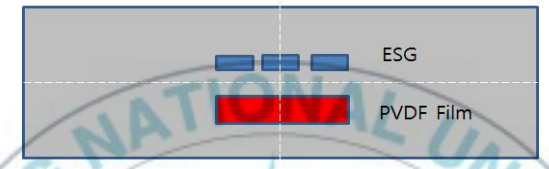
Fig. 2-5. Measurement Setup and Configuration of Test Specimen

Table. 2-1. Parameter Values of PVDF Film

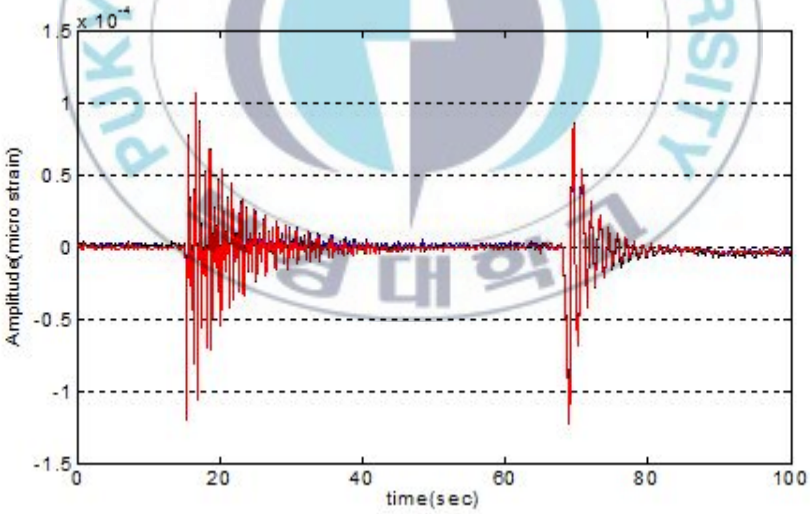
Length	Width	Thickness	d_{31} (Coulomb/Newton)	e_{33} (Farad/Meter)	K_{11}^{E} (Young's Modulus)
30 mm	10mm	52 ㎛	23×10^{-12}	106×10^{-12}	2 GPa

한편, Fig. 2-5의 실험 셋업에서 확인 할 수 있듯이 PVDF 필름과 ESG사이에는 다소 크기의 차이가 존재한다. 따라서 PVDF 필름의 크기에 맞게끔 ESG를 3곳의 위치에 부착하여 측정 변형률의 값을 비교하여 Fig. 2-6

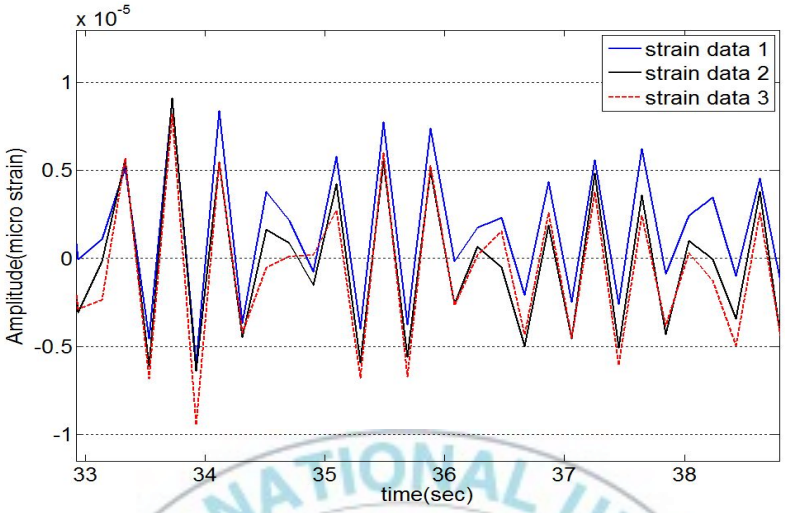
에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 세 위치에서의 측정값이 모두 매우 근소한 차이만을 보이며 대부분 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 Fig. 2-5에서의 실험 셋업의 ESG부착 위치와 개수는 올바르다고 판단되어 진다.



(a) Configuration ESG and PVDF Film



(b) Strain Response of ESG



(c) Strain Response of ESG (enlarged)

Fig. 2-6. Strain Response of ESG

(2). 전압-변형률 관계의 검증

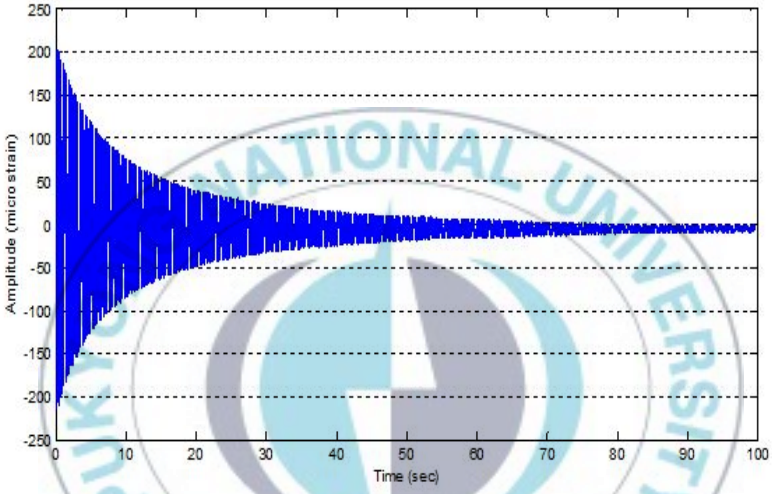
캔틸레버 보 실험체에 대하여 자유진동 실험을 수행하였다. 샘플링 주파수는 25Hz 이고, 100 초 동안 응답을 측정하였다. Fig. 2-7에 실험을 통해 측정된 PVDF Film에서의 전압 이력과 ESG에서의 변형률 이력 그리고 각각에 대한 주파수 응답을 나타내었다. ESG에 의해 측정된 변형률 응답의 주파수는 3.71 Hz이고, PVDF 필름의 전압 응답의 주파수도 3.71 Hz 로 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형을 측정 가능하다는 것을 입증한다. ESG에 의해서 측정된 변형률과 PVDF 필름에서 측정된 전압의 상관관계를 분석하기 위하여, 매 측

정 시점마다의 PVDF 필름 전압 응답 값과 ESG의 변형률 값을 추출하여 선형 회귀 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2-8에 나타내었다. ESG에서 측정된 변형률 값과 PVDF 필름에서 측정된 전압이 선형적인 관계를 나타내는 것을 Fig.에서 확인할 수 있으며, 선형회귀분석을 통해서 구한 전압-변형률 관계는 다음과 같다.

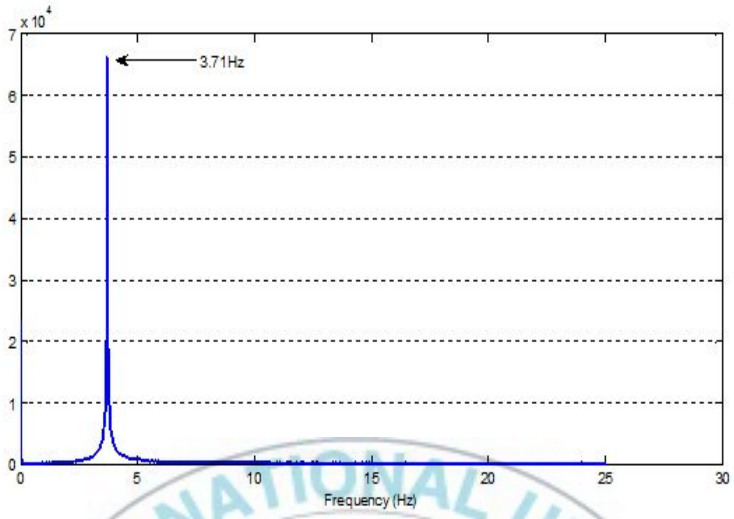
$$V_{out} = H_{1,\exp}\epsilon = (0.0236)\epsilon \tag{10}$$

여기에서 변형률의 단위는 micro strain 이다. 실험을 통해서 구한 PVDF 필름의 변형률 응답 계수($H_{1,\exp}$)는 0.0236이며, 이 값을 식(9)의 이론적인 값과 비교하였다. Fig. 2-9는 본 실험에 사용된 PVDF의 물성치와 전하증폭기의 특성치 및 Output gain 값을 이용하여 구한 주파수별 변형률 응답 계수 이다. 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. 2-10에는 이론적인 변형률 계수 값과 실험을 통해 구한 값을 적용한 PVDF의 변형률 응답 결과를 나타내었다. PVDF를 이용하여 측정한 구조물의 동적 변형률이 실제 변형률과 매우 동

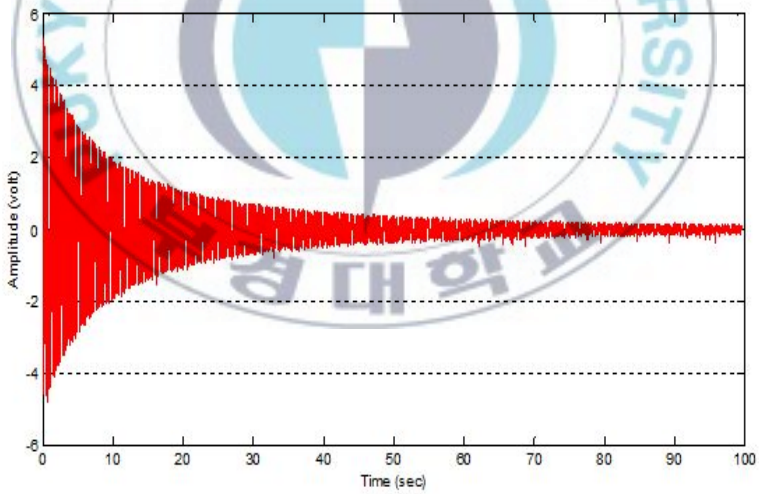
일한 양상을 나타내며, 상대적으로 잘 일치하는 것을 그림에서 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 구조물의 동적 변형률 측정에 있어서 PVDF 필름을 적절히 적용할 경우에 기존의 ESG 만큼의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다는 것을 입증한다.



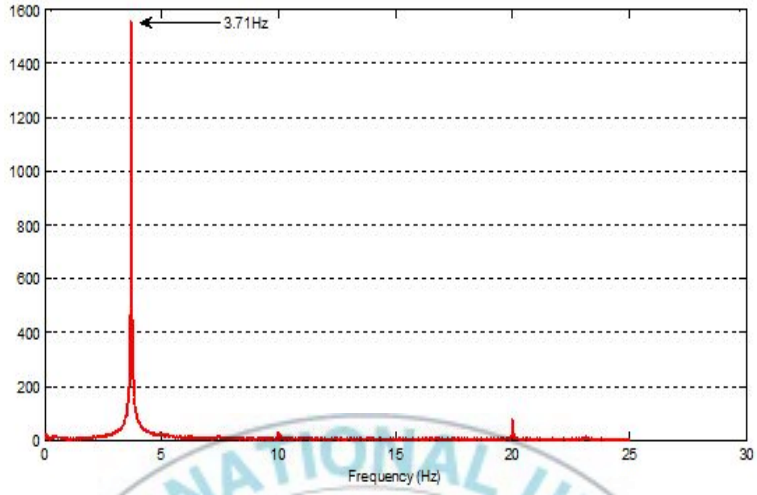
(a) Strain Response of ESG (unit : micro strain)



(b) Frequency Spectrum (ESG)



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



(d) Frequency Spectrum (PVDF Film)

Fig. 2-7. Responses of ESG and PVDF Film

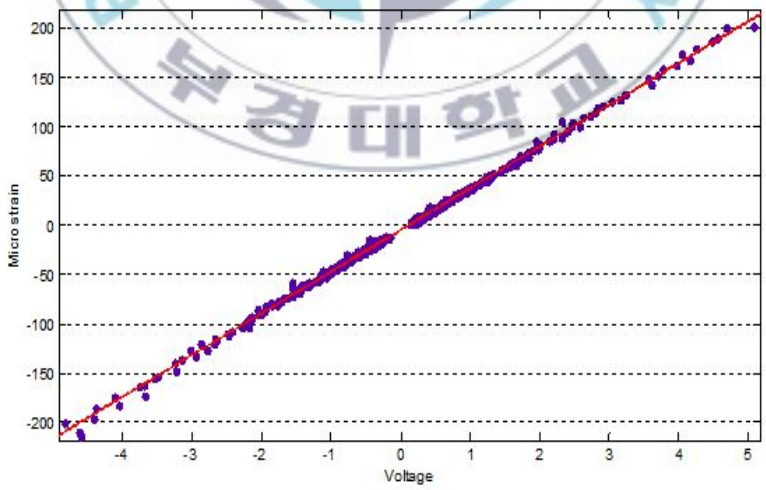


Fig. 2-8. Experimental Relationship between Strain and Voltage

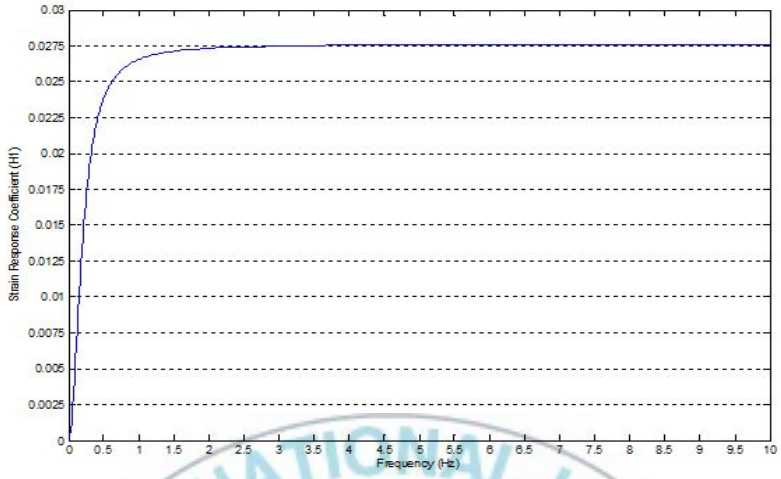


Fig. 2-9. Strain Response Coefficients (Feedback Resistance : 10 Mega Ohm)

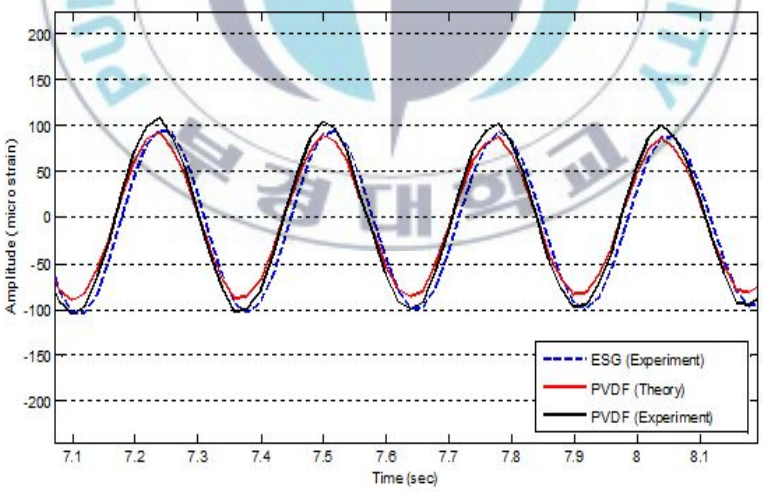


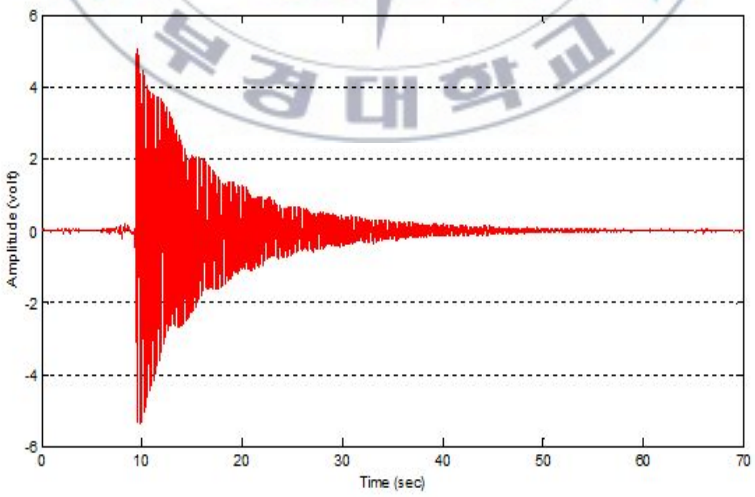
Fig. 2-10. Calibrated Strain Responses of PVDF Film

2.2 하중 주파수에 따른 PVDF 필름 응답

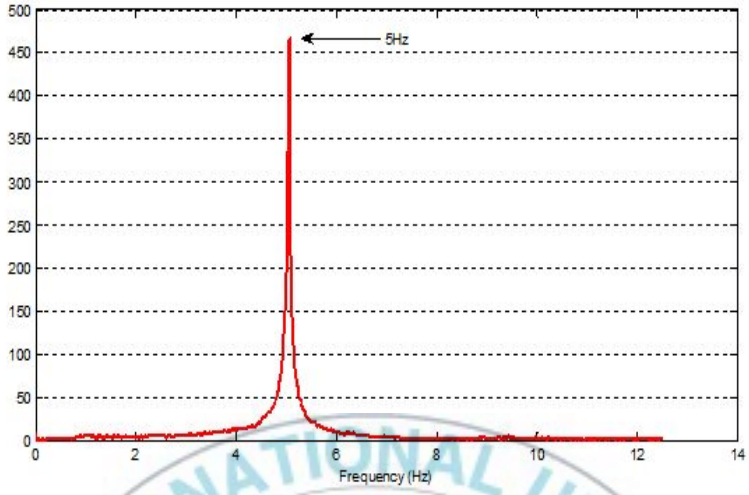
변형률 응답 계수의 값은 주파수에 따라 다른 값을 가진다는 것을 Fig. 2-9에서 알 수 있다. 이를 검증하기 위해서, 600mm와 800mm 길이의 캔틸레버 보 실험체에 대해서 각각 자유 진동 실험을 수행하였다. 자유 진동 실험을 통하여 측정된 PVDF 필름의 전압 응답 결과를 Fig. 2-11에 나타내었다. 600mm의 캔틸레버 보에서의 자유 진동 주파수는 5 Hz 이며, 800mm 는 2.91 Hz 로서, 각 주파수에 해당하는 변형률 응답 계수를 Fig. 2-9에서 구하면, 각각 0.0276와 0.0274의 값을 가진다. 변형률 응답 계수를 적용한 PVDF 필름의 변형률 응답과 ESG로 측정한 변형률 응답 결과를 Fig. 2-12에 나타내었다. PVDF 필름의 변형률 응답이 ESG로 측정한 변형률 응답에 매우 근사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 2-9의 주파수별 변형률 응답 계수에서 알 수 있듯이, 동적 변형률 성분의 주파수가 2 Hz 이상 일 경우에는 변형률 응답 계수 값이 주파수에 따라 변화가 거의 없이 일정한 값을 가지지만, 2 Hz 이하일 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 나타낸다. 주파수별 변형률 응답 계수는 전하증폭

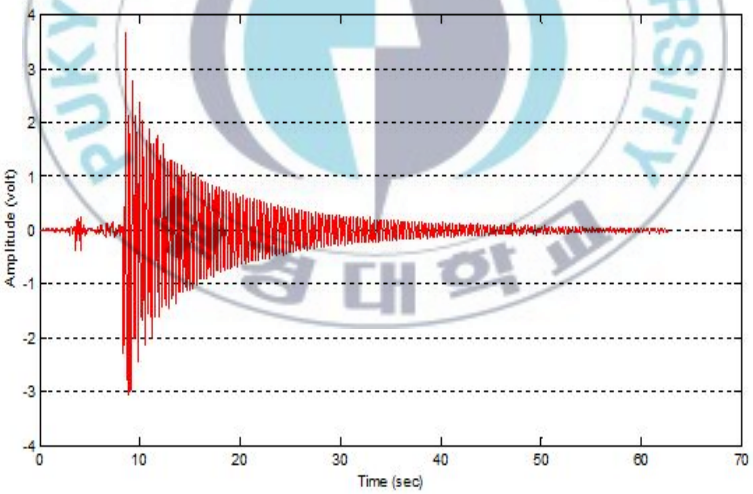
기의 피드백저항과 피드백 커패시턴스 값에 따라 변화가 되며, 따라서 피드백 저항과 피드백 커패시턴스를 변화시킴으로써 저주파수 대역에서도 왜곡 없이 변형률을 측정 가능하다는 것을 의미한다. Fig. 2-13에는 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항만을 100 Mega Ohm으로 변화시켰을 때의 주파수별 변형률 응답 계수를 나타낸다. Fig.에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항을 100 Mega Ohm으로 바꾸면 0.5 Hz의 저주파수 성분도 왜곡 없이 측정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형률을 왜곡없이 측정하기 위해서는, 동적 변형률 성분의 주파수 대역에 맞도록 식(8)의 전하증폭기의 주파수 응답 함수를 조절하여야 한다.



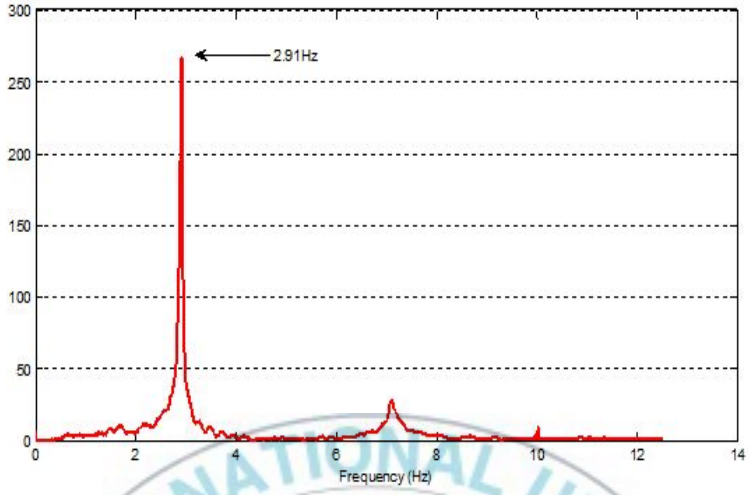
(a) Time History (Specimen Length : 800mm)



(b) Frequency Spectrum (Specimen Length : 800mm)

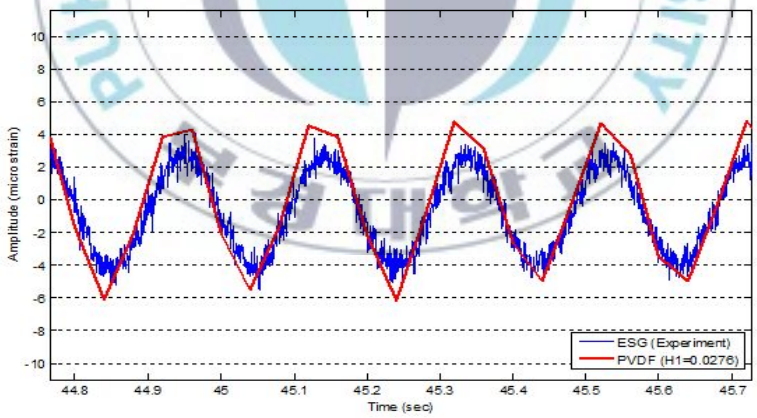


(c) Time History (Specimen Length : 600mm)

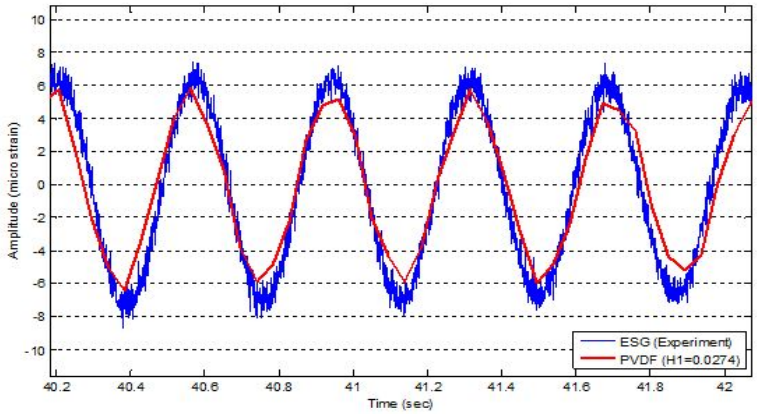


(d) Frequency Spectrum (Specimen Length : 600mm)

Fig. 2-11. Responses of PVDF Film



(a) Calibrated Strain Response (Specimen Length: 800mm)



(b) Calibrated Strain Response (Specimen Length: 600mm)

Fig. 2-12. Calibrated Strain Responses of PVDF Film

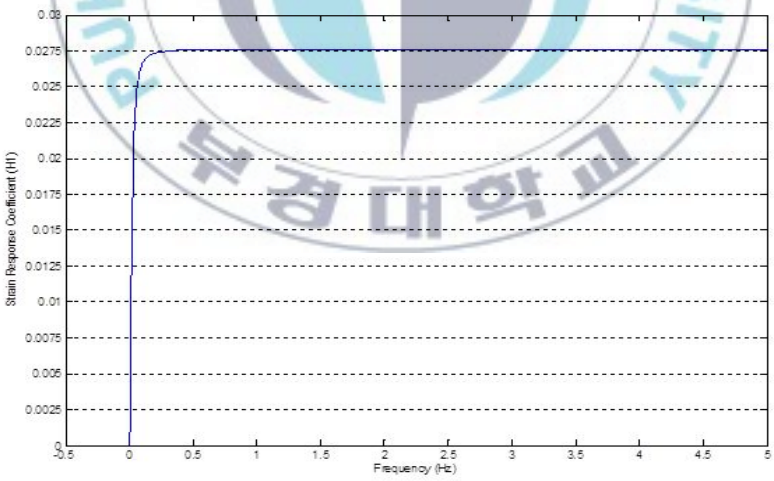


Fig. 2-13. Strain Response Coefficients (Feedback Resistance : 100 Mega Ohm)

제 3 장 탄성 교량 받침의 정/동적 하중 재하 실험 및 응답 특성 분석

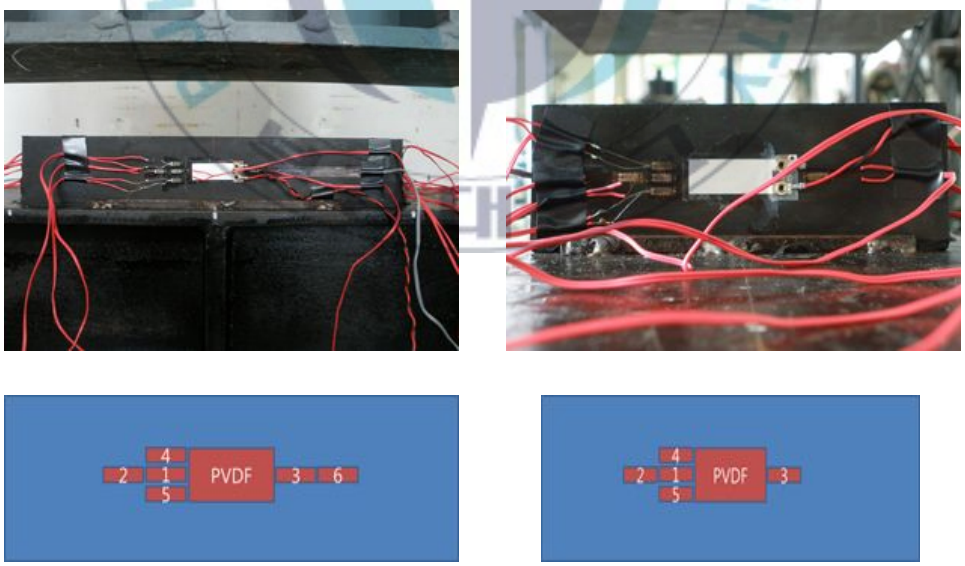
3.1 정적 하중의 측정

탄성 교량 받침의 경우 실제 현장의 환경은 통상적으로 교량에 일정 수준의 하중이 걸려 있다. 이는 교량 상부 구조물에 의해 탄성 교량 받침에 가해지는 정적 하중으로 판단 할 수 있으며, 따라서, 탄성 교량 받침에 정적 하중이 가해지는 경우에 대한 PVDF 필름의 응답을 살펴볼 필요성이 있다. 하지만 압전 재료의 경우 외력의 변형에 의해 생기는 전압을 충전하지 못하고 곧 방출하는 특성을 지니고 있기 때문에, 정적인 외부 자극에 의한 응답을 살펴보는 것이 불가능하다고 알려져 있다. 이에 대한 검증을 위하여 교량받침에 PVDF 필름을 부착한 후 정적 하중 재하 실험을 수행하였다. 실험을 위해 탄성 교량 받침의 전, 후, 좌, 우면에 ESG와 PVDF 필름을 Fig. 3-1 과 같이 부착하였다. 정적 하중 재하 실험을 위한 셋팅은 Fig. 3-2과 같으며, 탄성 교량 받침과 PVDF 필름의 제원은 Table. 3-1와 같다.

Table. 3-1 Parameter Values for Rubber Bearings and PVDF Film

Bridge Elastomeric Bearing						
Materials	Length	Width	Height	Material properties		
				Poisson's Ratio	Young's modulus	Density
Steel	134mm	284mm	7mm	0.29	216 GPa	7900 kg/m³
Rubber	150mm	300mm	8mm	0.49	100 MPa	2100 kg/m³

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



Front and Back side (300mm) Side (150mm)

Fig. 4-1 . Configuration of ESG and PVDF Film

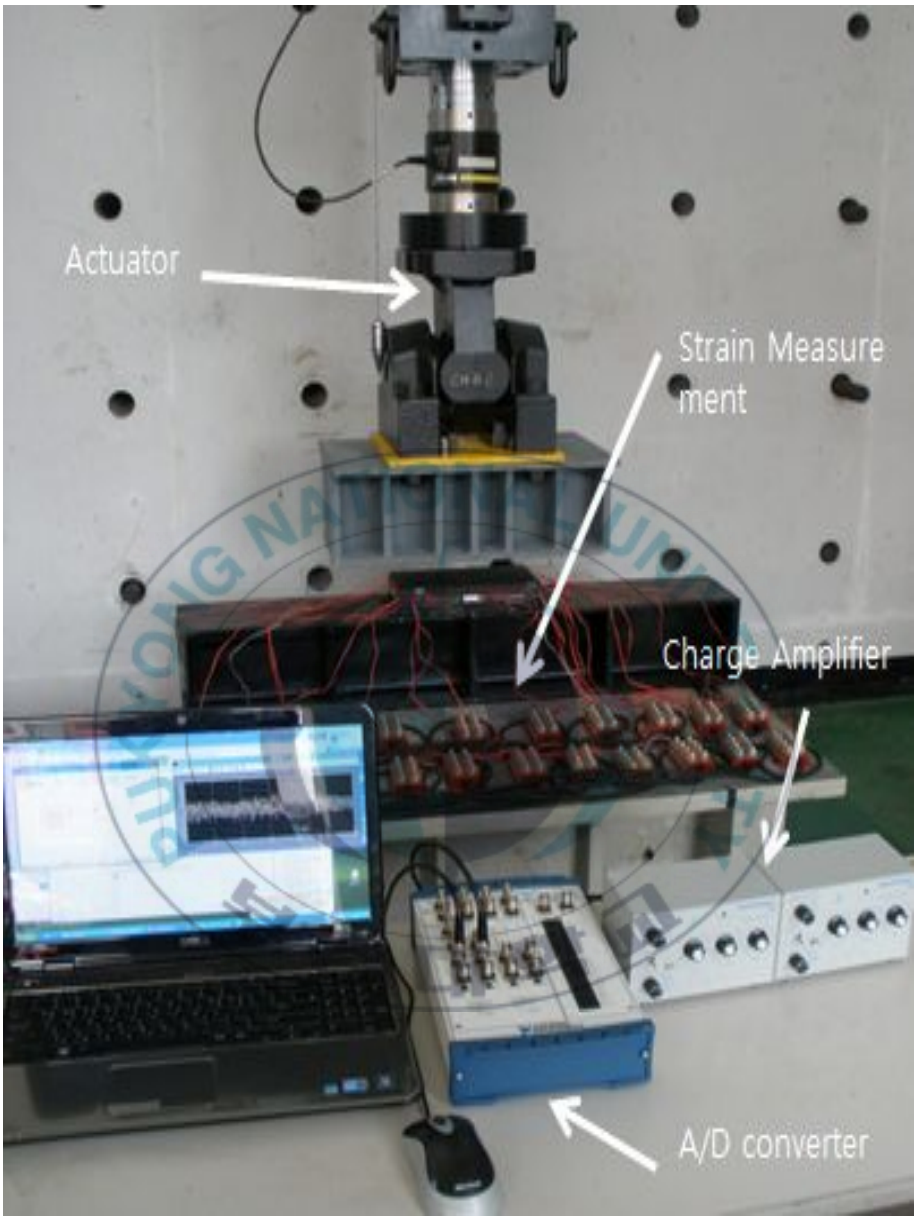


Fig. 3-2 Test setup

실험은 Load control 방식으로 수행 하였으며, 분당 100kN의 하중으로

Fig. 3-3과 같은 형태로 재하 하였다. 정적 하중 실험에 대한 변형률 측정 결과를 Fig. 3-4에 나타내었다. 입력 하중의 형태와 유사하게 변형률의 응답을 보여주고 있으며 최대 300micro strain의 값을 보이고 있다. Fig. 3-5에서는 PVDF 필름의 전압 응답 결과를 나타내었다. 결과를 살펴보면 하중이 재하 되는 시점에서는 약간의 충격파 탓에 응답이 측정되는 듯 하나 하중이 재하되는 전체 구간에서 전체적으로 전압 응답은 변하지 않는 결과를 보인다. 정적 하중 재하 실험의 결과 분석의 결과, 알려진 사실과 같이 PVDF 필름은 정적 하중을 추정하는 데는 무리가 있다고 할 수 있으며, PDVF 필름을 이용한 하중 모니터링의 방법은 동적 하중에 초점을 맞추어야 한다는 사실을 알 수 있다.

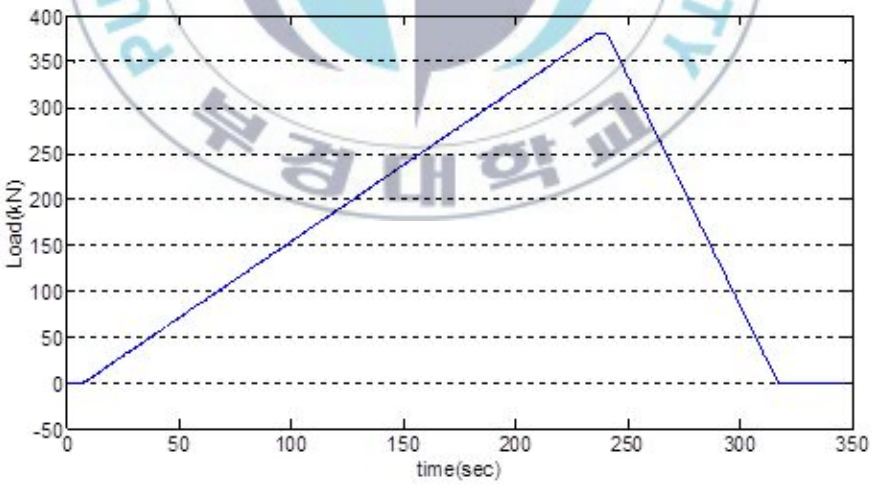


Fig. 3-3 Static Load (380kN) : Time(sec)-Load(kN)

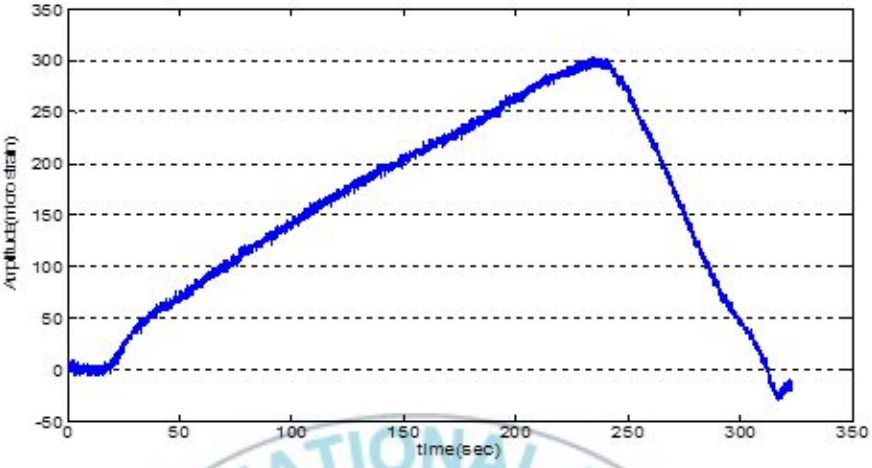


Fig. 3-4 Static Load (380kN) : Time(sec)-strain(micro strain)

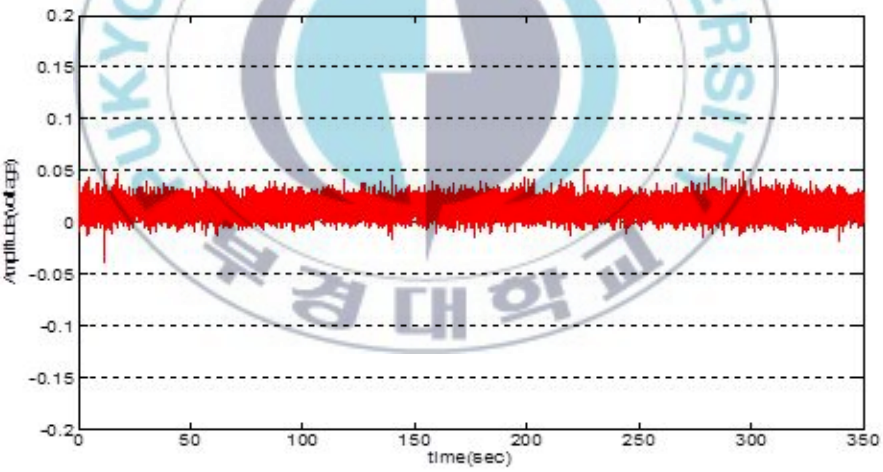


Fig. 3-5 Static Load (380kN) : Time(sec)-voltage(volt)

3.2 동적 하중의 측정

교량과 같은 구조물의 경우, 교량 상판의 차량 교행 등에 의한 외부의 동적인 하중에 의하여, 교량 받침에서는 동적 하중이 재하 된다. 교량 받침에 작용하는 동적 하중에 대한 PVDF 필름의 전기 응답을 알아보기 위해서, 동적 하중에 대한 실험을 수행하였다. 측정을 위해 Table. 3-2와 같이 교량에 이미 부가되어 있는 정적 하중(Pre Load)와 교량 상판의 동적 하중(Cyclic Load), 그리고 하중이 가해지는 주파수(Frequency)로 나누어 입력 하중의 케이스에 따라 하중 재하 실험을 교량 탄성받침 대하여 수행하였다. 동적 하중의 입력은 Fig 3-6에서와 같이 정적 하중을 나타내는 Pre load를 가한 후 동적 하중에 해당하는 Cyclic load를 주파수에 따라 가한 후에 다시 하중을 빼는 형태이다. 먼저, Pre load:100kN, Cyclic load:25kN, Frequency:1Hz에서 동적하중에 해당되는 Cyclic load를 25kN과 50kN으로 나누어 응답을 측정한 실험 결과를 살펴보면 Fig. 3-7에서 나타나는 것과 같이 동적 하중의 증가에 따라 변형률 응답 또한 약 100micro strain에서 200micro strain으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3-8에서의 전압 응답에 대한 결과 역시 동적 하중의 증가에 따라 약 1volt에서 2volt로 전압 응답의 증가를 확인 할 수 있다. 다음으로 Pre load:200kN, Cyclic load:25kN, Frequency:1Hz 의 하중 케이스에서 주파수 대역을 1Hz와 2Hz

로 나누어 실험을 수행한 결과를 Fig. 3-9과 10에 나타내었다. Fig. 3-9에서 하중의 주파수를 높였음에도 동적 하중에 대한 변형률의 값은 약 90micro strain으로 일정한 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, Fig. 3-1의 전압 응답 특성의 결과를 살펴보았을 때, 1Hz에서 0.9volt의 응답을 보였지만, 하중 주파수를 2Hz로 증가시켰을 경우 약 1.7volt의 전압 응답을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 PVDF 필름의 경우 주파수 의존적인 성향을 띄고 있다는 것을 확인 할 수 있는 결과이며, 수행 되는 연구 과정에 있어서 변형률 추정과 하중 추정에 대하여 주파수 의존적인 성향에 대한 보완이 필요하다는 것을 알 수 있는 결과이다. 또한, 실험의 수행 결과에서 알 수 있듯이 변형률의 경우 정적 하중에 해당 하는 Pre load의 구간에서 모두 입력 하중과 매우 유사한 응답을 보이지만 전압 응답의 경우에서는 전압의 응답을 확인 할 수가 없다. 이는 앞선 정적 하중 응답 분석에 대한 결과와 일치하는 것으로, PVDF 필름의 정적 하중에 대한 응답 분석이 불가능하다는 것을 다시 한 번 확인 할 수가 있다.

Table.3-2 Dynamic load data

Preload level (kN)	Cyclic load level (kN)	Load control (frequency)		
100	25	0.5	1	2
	50	0.5	1	2
200	25	0.5	1	2
	50	0.5	1	2

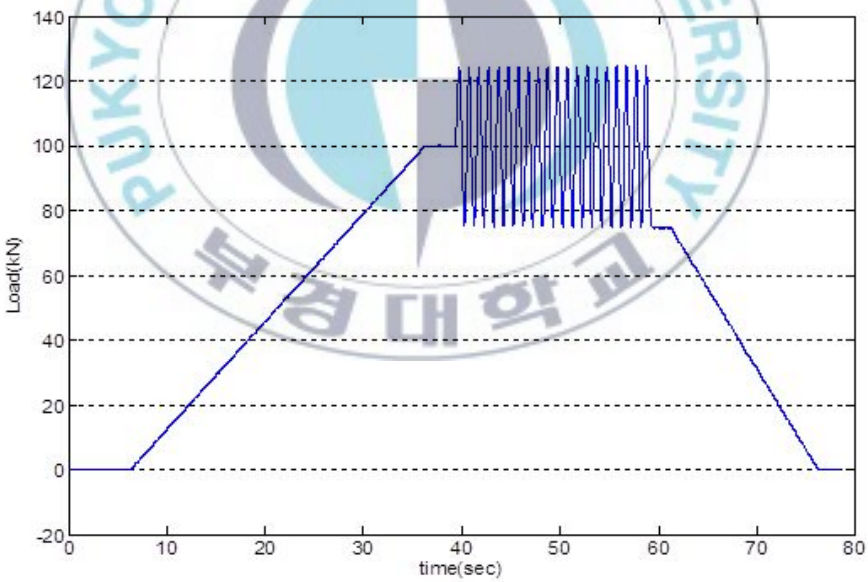
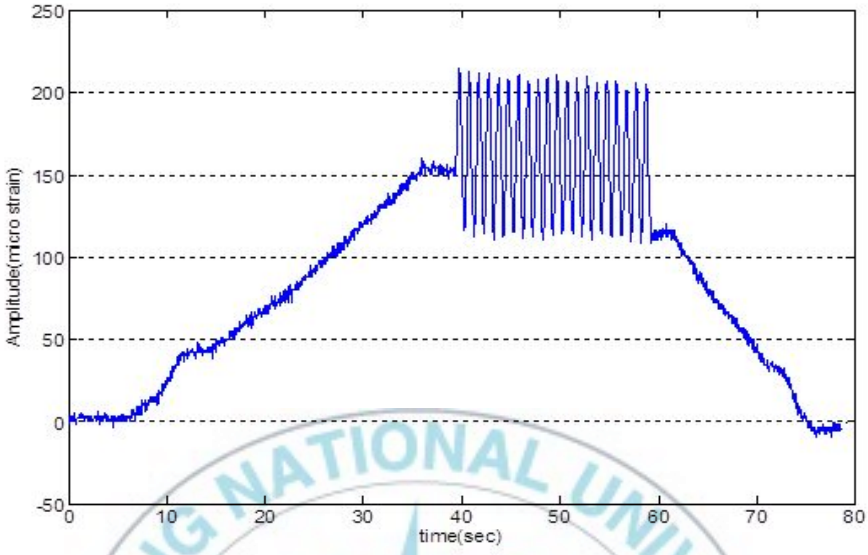
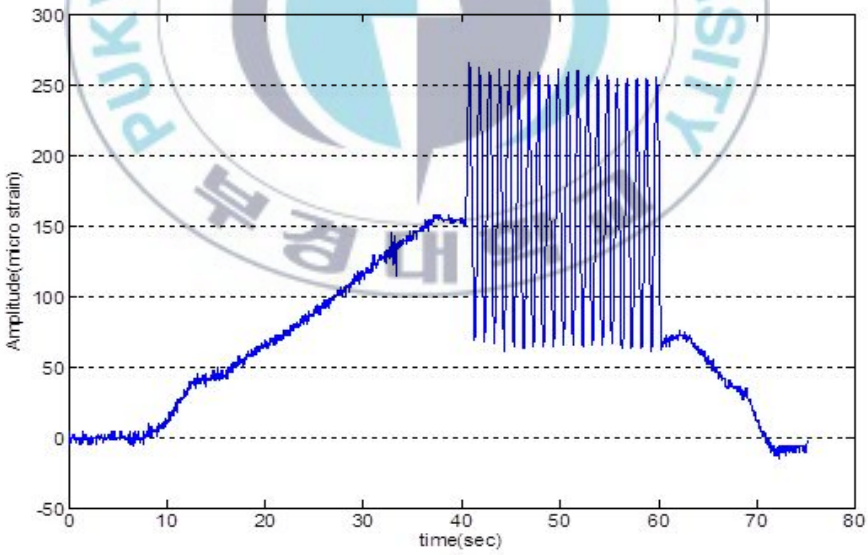


Fig.3-6 Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : Time-Load

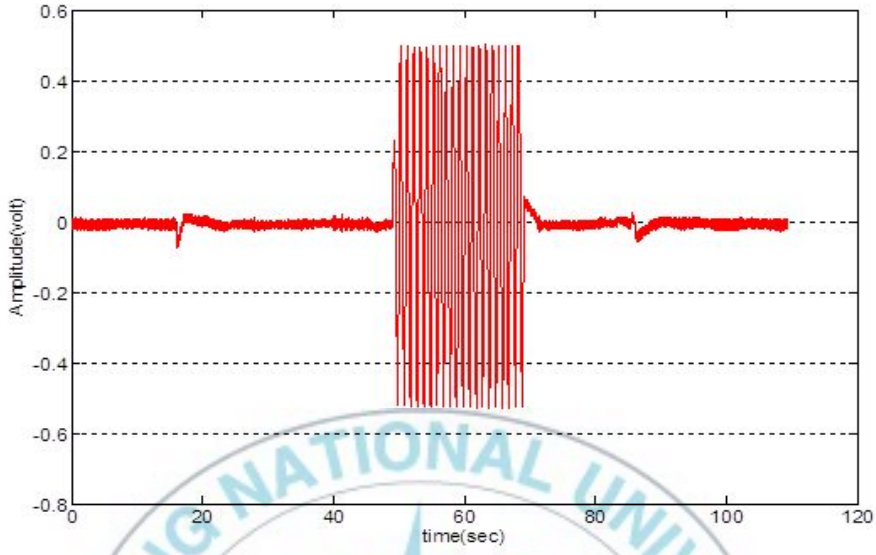


(a) Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz

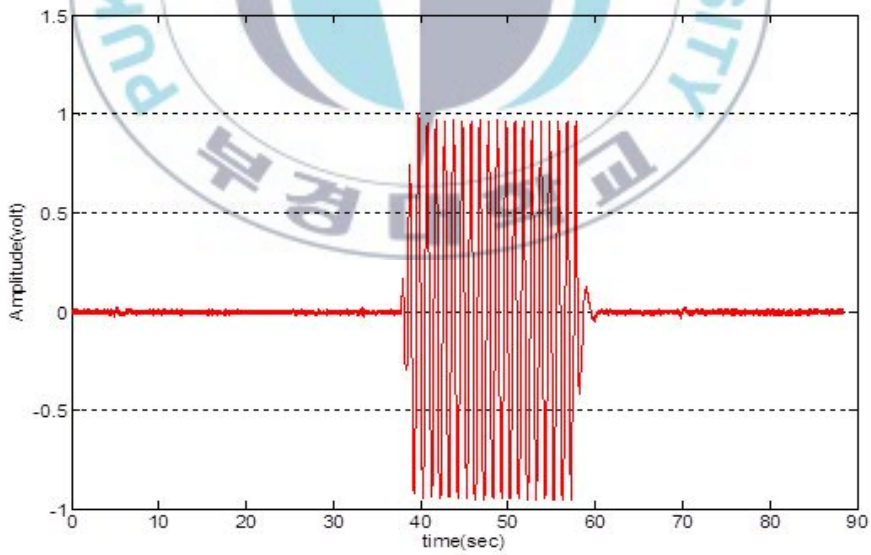


(b) Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz

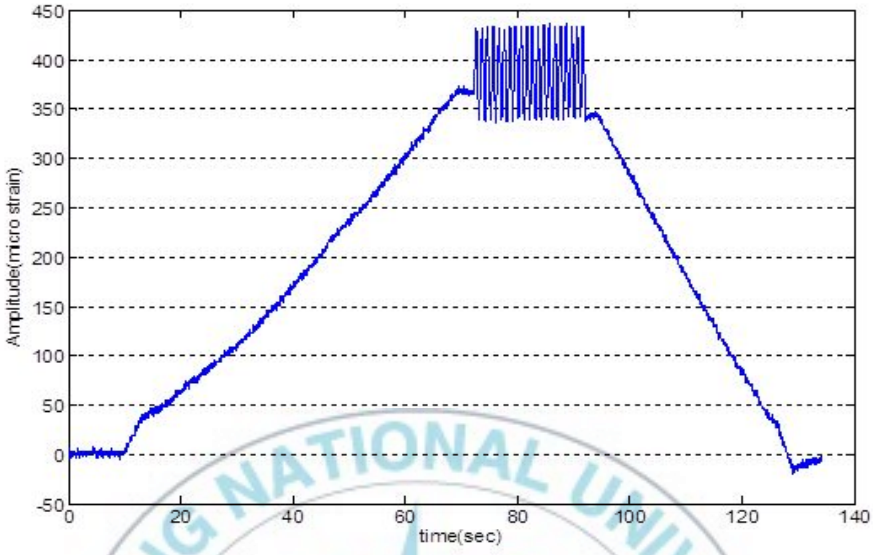
Fig.3-7 (a) and (b): Strain Response of Dynamic load



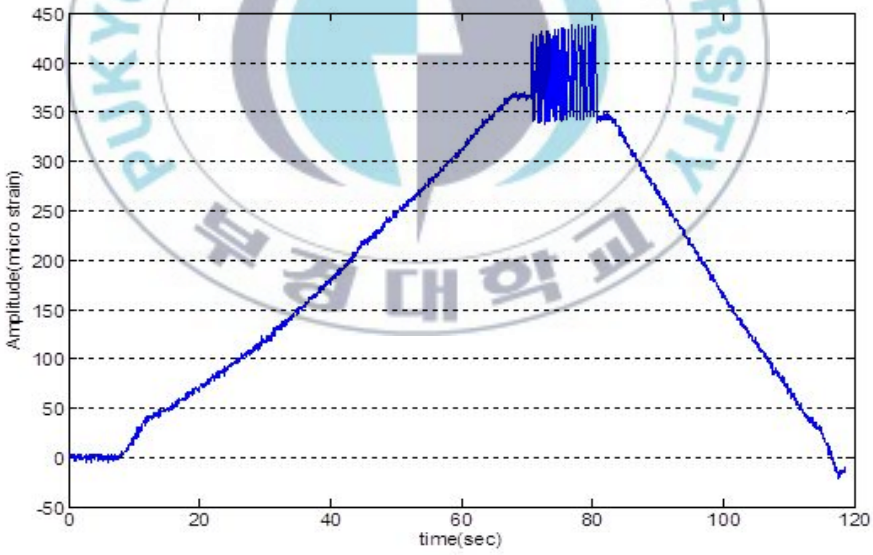
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz



Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1Hz
Fig.3-8 Voltage Response of Dynamic load

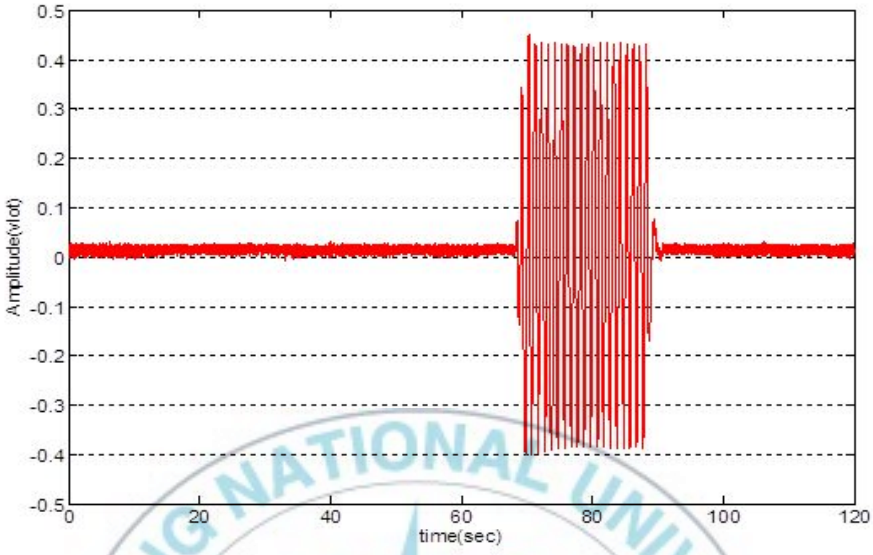


Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz

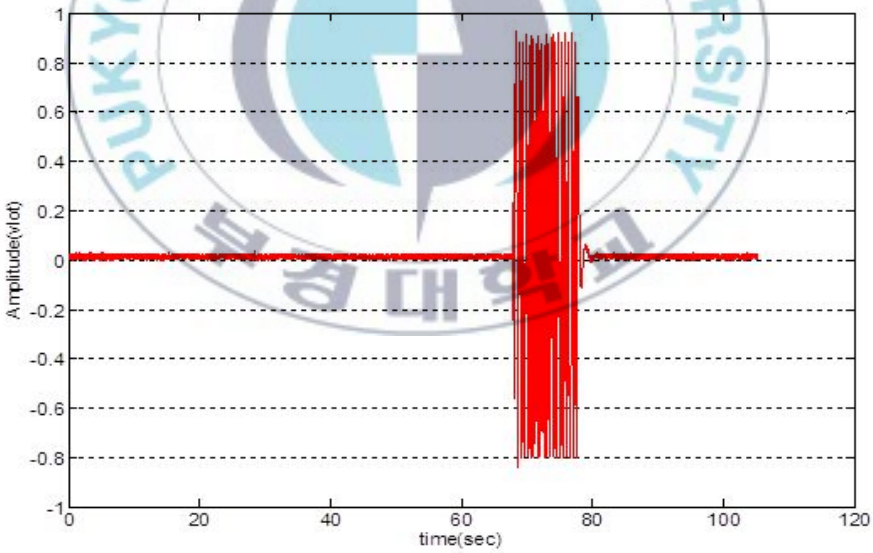


Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz

Fig.3-9 Strain Response of Frequency



Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz



Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz

Fig.3-10 Voltage Response of Frequency

3.3 PVDF 필름을 이용한 동적 하중에 대한 변형률 측정

본 연구는 PVDF 필름을 이용하여 교량 받침에 가해지는 동적 하중의 측정을 통하여 교량 받침의 변형과 하중의 모니터링에 목적을 두었다. 변형률의 측정의 경우 기존 ESG 센서를 통한 측정 역시 가능하지만, ESG센서의 경우 환경에 의한 부식에 대한 문제점을 가지고 있다. 하지만, PVDF 필름의 경우 폴리머계의 재료이기 때문에 부식에 강한 특성을 지니고 있으며, 재료가 가지는 고 인성으로 인해 어느 형태에나 부착이 용이하고, 또한 측정 방식에 있어 ESG 센서를 통한 측정 보다 경제적으로 저렴한 장점을 지니고 있다. 따라서 PVDF 필름을 통한 변형률의 측정이 기존의 ESG 센서를 통한 측정에 비해 어느 정도의 신뢰성을 지니고 있는지에 대하여 살펴보기 위해, Fig. 3-1과 같이 ESG 센서와 PVDF 필름 센서를 부착하여 실험을 수행하였다. 앞선 동적 하중에 대한 실험 수행에서 PVDF 필름은 주파수 의존적인 성향을 지니고 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 Fig. 3-11 과 같이 PVDF 필름의 변형률 응답 계수와 실험적으로 구한 전압의 증폭계수(0.5Hz: 측정전압의 13배, 1Hz: 측정전압의 3배, 2Hz: 측정전압의 1.5배)를 통하여, PVDF 필름의 Gauge Factor를 산정 하였다. Table 3-2의 입력 하중에 대한 실험 수행 결과 중 Pre load:100kN, Cyclic load:25kN의 케이스에 대하여 각 주파수 마다 Gage Factor를 적용한 PVDF 필름의

변형률 추정 값과 ESG를 통한 변형률 측정값과 비교한 결과를 Fig. 3-12에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 0.5Hz, 1Hz, 2Hz 대역에서의 변환 전압 값들이 모두 ESG를 통한 변형률 측정값과 매우 근사하게 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 PVDF 필름을 이용한 변형률 측정의 가능성을 잘 나타내고 있는 결과이다. 하지만, Gauge Factor의 산정과정에서 알 수 있듯이, 1Hz나 2Hz의 대역에 비하여 0.5Hz의 저 주파수 대역에서는 보정이 필요한 것을 보여주고 있다. 한편, 고 주파수대역으로 갈수록 전압의 증폭계수가 필요하지 않다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 PVDF 필름이 저 주파수에 비해 고 주파수 대역의 측정에 용이하다는 것을 보여주는 결과이다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

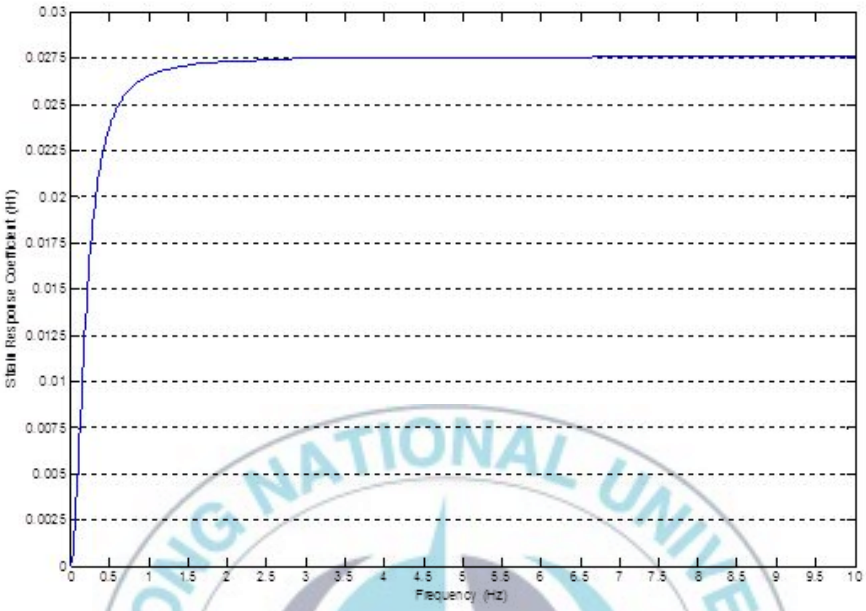
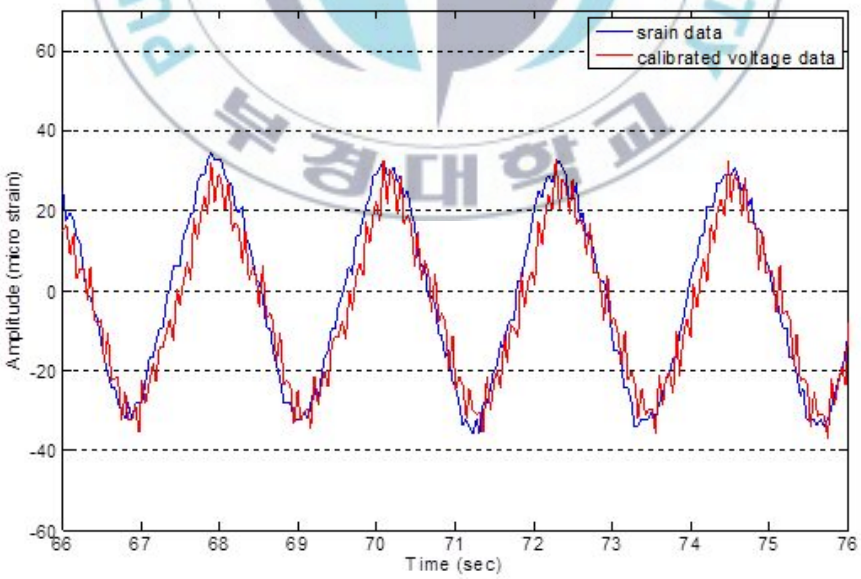
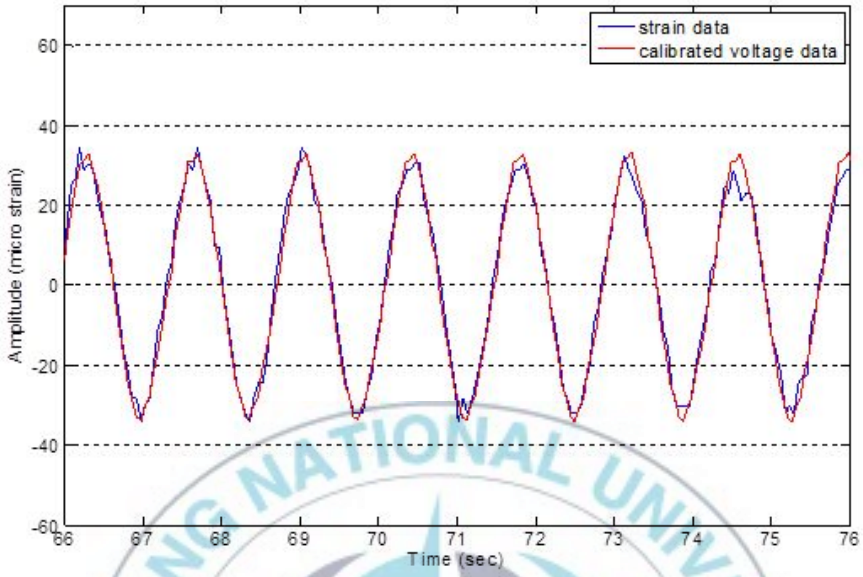


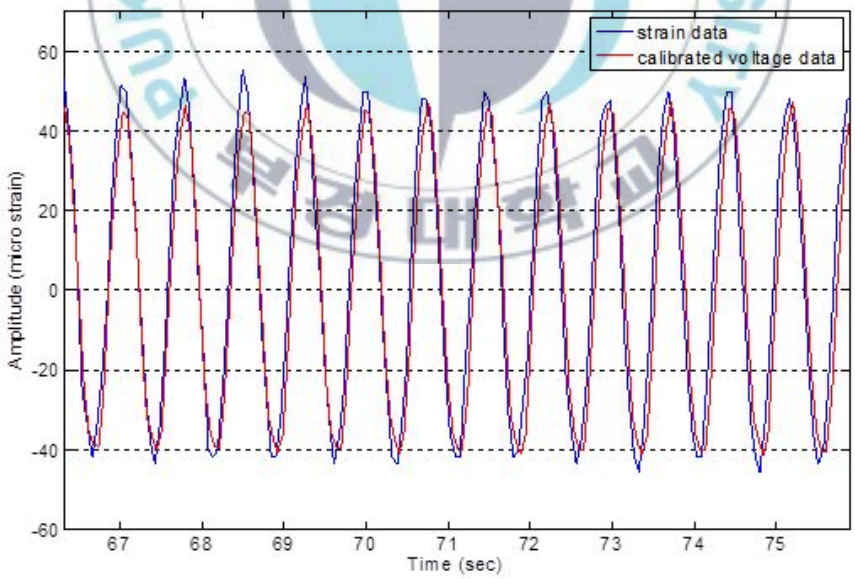
Fig. 3-11. Strain Response Coefficients



(a)Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz



(b)Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz



(c)Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz :

Fig.3-12 . Calibrated Strain Responses of PVDF Film

제 4 장 하중 추정을 위한 매개변수 추출 및 알고리즘 개발

하중 추정에 있어서 기본적인 방식은 측정된 전압을 이용하여 변형률을 계산하고 계산된 변형률을 사용하여 하중을 역산하는 방식이다. 이는 정확한 하중의 추정보다는 PVDF 필름을 이용한 하중의 추정에 대한 가능성을 알아보기 위한 것이다. 먼저, 하중 추정을 위해 변형률과 하중간의 관계를 파악할 필요성을 지닌다. 하중 추정에 이용되는 관계식을 구하기 위하여 Fig. 3-1에서의 ESG에서 모든 변형률을 평균으로 사용하여 식의 도출을 수행하였다.

우선적으로 Table. 3-2의 동적 하중 입력을 통해 측정된 ESG에서의 변형률 평균값 과 이미 알고 있는 입력 하중의 값을 선형 회귀 분석을 통하여 관계식 도출하였다. 분석의 결과를 Fig. 4-1에 나타내었다. 실험에서 구성된 하중의 경우 입력하중의 주파수 성분은 0.5Hz, 1Hz, 2Hz로 이루어져 있다. 따라서 (PVDF 필름 변형률 응답 계수)의 경우 세 주파수 대역의 평균값을 사용하였다. 이를 이용하여 식(10)~(12)와 같이 하중과 전압간의 관계식을 유도하였다.

$$L_{(load)} = \alpha_{(l-\epsilon)} + \beta = (0.6804)\epsilon + 4.147 \qquad (10)$$

여기서 $\alpha_{(l-\epsilon)}$과 β는 하중과 변형률 사이의 상관계수이다. 변형률과 전압의 관계는 식 (11)와 같다

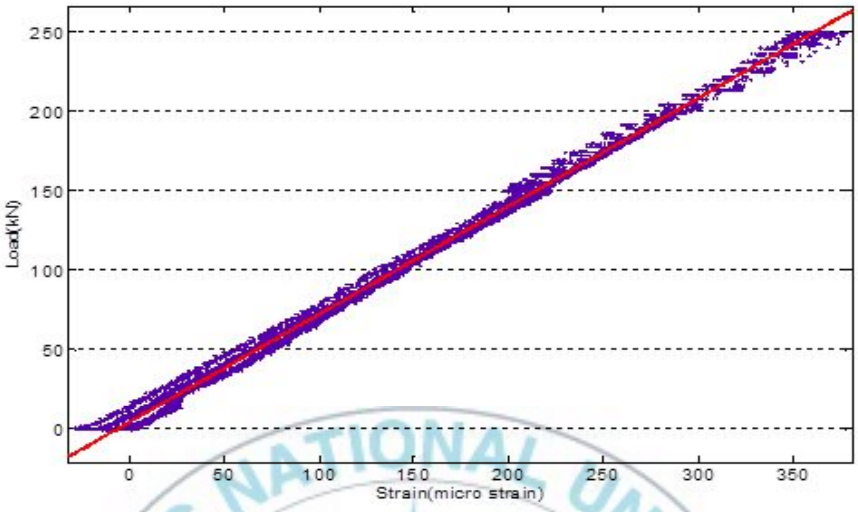
$$V_{out} = H_{1,\exp}\epsilon = (0.0275)\epsilon \tag{11-1}$$

$$\epsilon = (36.36)V_{out} \tag{11-2}$$

식(11-2) 을 식(10) 대입하여 하중과 전압간의 관계식을 유도해내었다.

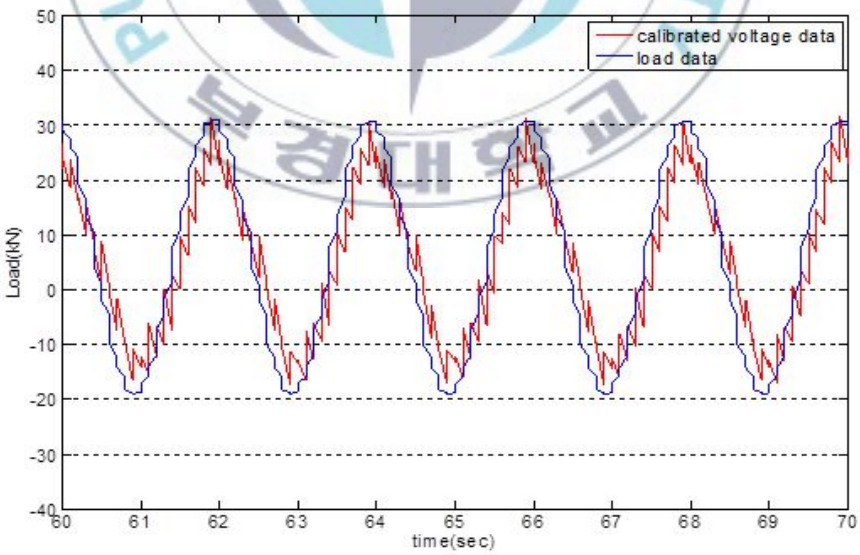
$$L = q_{s-v}H_{1,\exp}V_{out} = (0.6804)(36.36)V_{out} + 4.147 \tag{12}$$

식(12)의 하중-전압 관계식을 이용하여 동적 하중 케이스에 대한 하중 추정 결과를 Fig. 4-2에 나타내었다. Fig. 4-2는 Pre load100kN, Cyclic load 25kN 의 각 주파수에 따른 하중 추정 결과 이다. 결과 그림에서 알 수 있듯이 식 (12)를 이용하여 산출된 PVDF필름을 통해 측정된 전압을 통한 하중 추정의 결과가 입력 하중과 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 2Hz에서는 전압 측정 장비의 측정 한계 탓에 매끄러운 그래프를 보여주지 못하고 있지만 하중 추정 식에 의한 값의 결과가 타당하다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 PVDF 필름을 사용한 교량 탄성 받침의 하중 모니터링에 있어서 (12)식을 사용할 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 교량 탄성 받침에 가하여 지는 교량 상부에 대한 하중의 역산의 가능성을 보여줄 수 있는 결과이다.

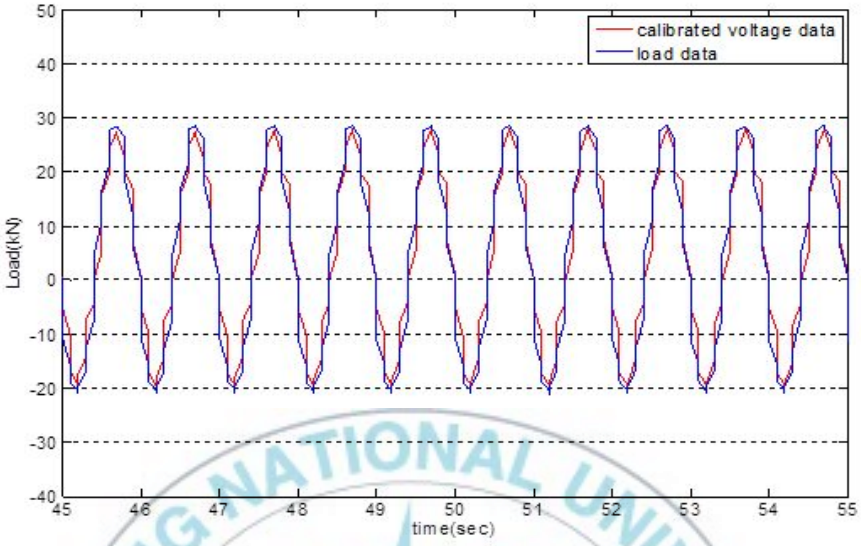


$$y_{(load)} = (0.6804)x_{(strain)} + 4.417$$

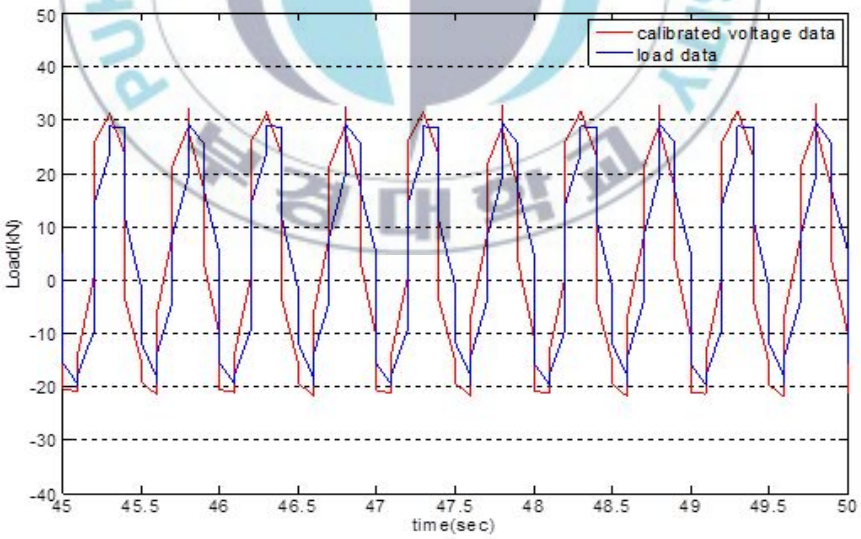
Fig. 4-1 Experimental Relationship between Load and Strain



(a) Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5Hz



(b) Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1Hz



(c) Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2Hz

Fig. 4-2 Calibrated Load Responses of PVDF Film

제 5 장 하중 모니터링 시스템 구성 및 모니터링 성능 검증

5.1 모니터링 시스템 구성

하중 모니터링을 위한 시스템 구성을 Fig. 5-1과 같이 나타내었다. 먼저 하중 추정을 필요로 하는 구간, 혹은 구조물에 PVDF 필름을 부착한다. 그리고 구간, 혹은 구조물에 재하 되는 하중을 측정 하게 되는데 이에 필요한 계측 장비로써 A/D converter와 Charge Amplifier를 사용하게 된다. 계측 장비를 통해 측정된 전압 데이터를 하중 추정 알고리즘에 대입하여 수행된 계산 값으로써 하중 추정을 완료 하게 된다.

Fig° 5-1 Load Estimation system

5.2 모니터링 성능 검증

Fig. 5-2와 같이 하중 재하 장비를 통하여 Random 하중 재하 실험을 수행하였으며, 입력된 하중의 형태와 크기는 Fig.5-3와 같다. 먼저 Random 하중에 의한 변형률 측정의 결과를 Fig. 5-4에 나타내었으며 단순 동적 하중에서는 저주파수 대역에서도 ESG의 측정값과 근사한 값을 측정할 수 있었던 것에 비하여 0.5Hz 구간에서는 PVDF 필름을 통한 측정값과 ESG 센서를 통한 측정값 간의 결과 차이가 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 하중 추정에 대한 성능 검증을 위하여 하중 추정을 수행하여 Fig. 5-5에 그 결과를 나타내었다. 앞선 변형률 측정 결과와 유사하게 PVDF 필름의 하중 추정값과 입력 하중 값 사이에 오차가 발생하고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 저주파수 구간에서 그 오차가 더욱 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 2Hz와 1HZ구간에서는 비교적 입력하중과 근사한 측정값을 나타내고 있는 것 또한 확인 할 수 있다. 결과를 통해 확인 가능한 사실은 PVDF 필름의 경우 저주파수 대역보다 고주파수 대역에서의 측정이 용이하며 값의 민감도 또한 좋다고 볼 수 있다. 더불어 한 가지 배제 할 수 없는 조건은 직접 부착을 하게 되는 경우에 있어 그 재질에 따른 오차가 생길 수 있다는 점이다. 본 연구에서와 같이 비선형 재료인 고무를 쓰게 될 경우에 있어서 생기는 측정값의 비선형성에서 생기는 값의 불일치 또한 배

제할 수 없는 조건이다. 재료의 성질이 균일한 Coupon test의 경우 저주파수 대역의 결과를 알아보기가 힘들어 확인을 할 수 없었지만, 모든 주파수에서 ESG센서와 매우 유사한 응답을 보인 것이 그 예이다. 비선형성 재료의 경우 Random 하중 입력에 따른 변형률 측정 및 하중 추정의 경우 서로 각기 다른 주파수 대역에 대하여 불가피하게 Gauge Factor의 증폭 계수를 평균값을 쓸 수밖에 없게 된다. 이에 따른 오차 역시 변형률 측정 및 하중 추정에 있어 문제점이 될 수 있다. 따라서 PVDF 필름을 통한 하중 추정에는 무리가 없다고 할 수 있으나, 그 부착 대상에 대한 고찰이 필요하며, 가능한 선형적인 대상의 선택이 필요하다고 할 수 있다. 또한 비선형적 재료라 할지라도 Gauge Factor에서 증폭계수를 산정하는 과정을 좀 더 연구하게 된다면, PVDF 필름을 이용한 동적 변형률/하중 추정의 가능성을 뚜렷하게 보여줄 수 있는 실험 결과라고 할 수 있다.

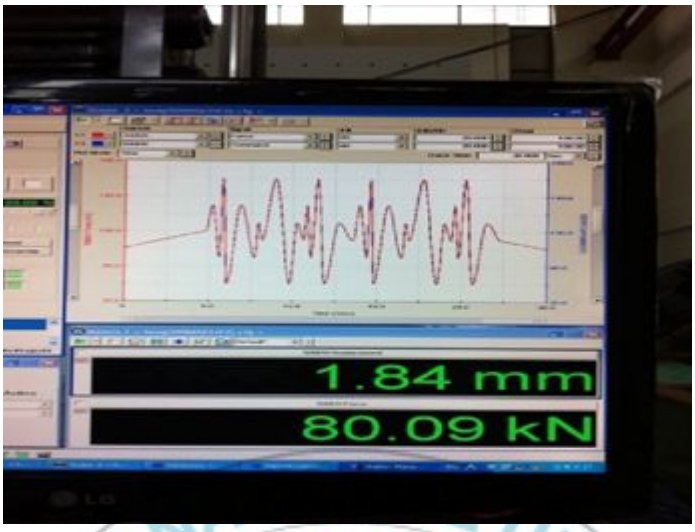


Fig. 5-2 Random load test

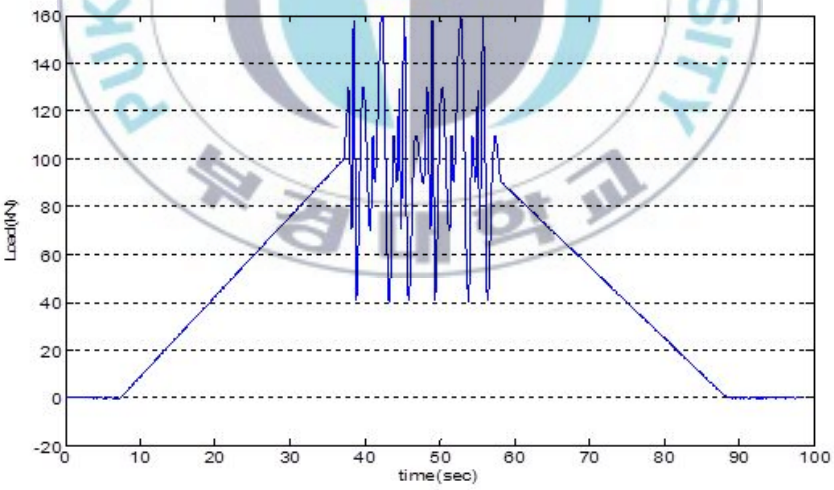


Fig. 5-3 Random load : time(sec)-load(kN)

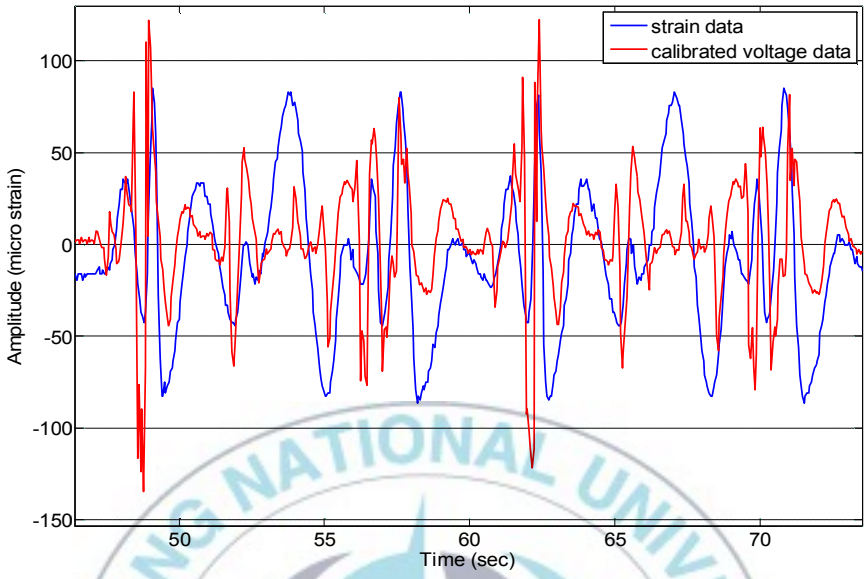


Fig. 5-4 Calibrated Strain Responses of PVDF Film

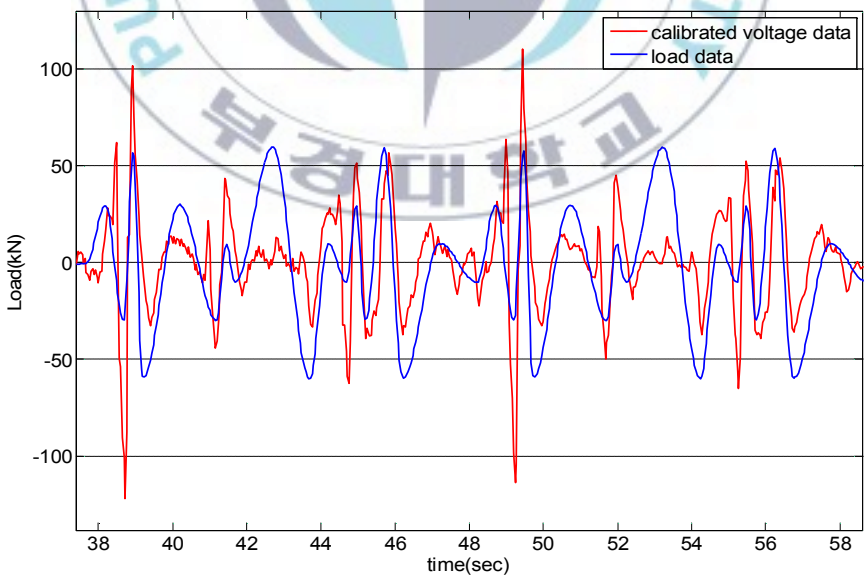


Fig. 5-5 Calibrated Load Responses of PVDF Film

제 6 장 결 론

본 연구에서는 탄성 교량 받침의 동적 하중 모니터링에 필름 형태로 가공된 PVDF의 적용 성을 알아보았다. 변형률 입력에 대한 PVDF 필름의 전압 응답을 이론적으로 유도하였으며, 캔틸레버 보에 대한 자유 진동 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 추정한 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, 결론을 토대로 PVDF 필름이 부착된 교량 탄성 받침에 정/동적 하중을 재하 하여 응답 특성을 알아보았다. 결과로부터 하중 추정을 위한 관계식을 도출해 내었고, 도출된 관계식을 통하여 임의의 하중에 대한 하중 추정을 통해 하중 모니터링에 대한 검증을 수행하였었다. 이로부터 교량 탄성 받침의 동적 하중에 대한 PVDF 필름을 이용한 하중 모니터링의 가능성을 확인 할 수 있었지만, PVDF 필

름의 주파수 의존적인 성향에 의한 문제점 또한 파악할 수 있었다. 추후 연구를 통하여 PVDF 필름이 가진 저주파수 측정에 관한 문제점을 해결한다면 PVDF 필름을 통한 교량 탄성 받침의 동적 하중 모니터링이 가능하다는 것을 알 수 있으며, 이것으로부터 PVDF 필름이 가질 수 있는 구조물 모니터링에 대한 연구 활용도를 높여줄 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

참고문헌

1. Helmut Eggert and Wolfgang Kauschke, Structural Bearings, Ernst & Sohn Verlag, Germany, 2002

2. 한국시설안전기술공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 : 교량편, 국토해양부, 2009

3. Keith Worden, Bill Bullough, and Jonathan Haywood, Smart Technologies, World Scientific Publishing, UK, 2003

4. Farhad Ansari ed., Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Springer, USA, 2005

5. Steven D. Glaser, Hui Li, Ming L. Wang, Jinping Ou and Jerome Lynch, “Sensor technology innovation for the advancement of structural health monitoring: a strategic program of US-China research for the next decade,” Smart Structures and Systems, Vol. 3(2), pp.221-244, 2007

6. Yang, J., An Introduction to the Theory of Piezoelectricity, Springer, USA, 2005

7. R. Lahtinen, T. Muukkonen, J. Koskinen, S. Hannula, and O. Heczko, "A piezopaint-based sensor for monitoring structure dynamics," Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. 2571-2576, 2007

8. S.W. Shin, A. R. Qureshi, J.Y. Lee, and C.B. Yun, "Piezoelectric sensor-based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete," Smart Materials and Structures, Vol. 17 (5), 055002, 2008

9. A.K. Agrawal, K. Subramaniam, and Y. Pan, Development of Smart Bridge Bearing System - A Feasibility Study, Final Report on Project # C-02-02, NYDOT, USA, 2005

10. Subramaniam, K.V., "Feasibility of Using Instrumented Elastomeric Bearings for Bridge Monitoring and Condition Assessment," M.S. Thesis, University of Toledo, 1995

11. Nims, D.K., Subramaniam, K., Parvin, A. and Aktan, A.E., "The Potential for the Use of Elastomeric Bearings in an Intelligent Bridge System," Transportation Research Board 75th Annual Meeting, Washinton D.C., USA, 1996

12. Caussignac, J.M., Barbachi, M. and Chabert, A., "Bridge Bearings Equipped with Optical Fiber Sensor for Monitoring Vertical Load Through the Support," Proceedings of SPIE, Vol. 2719, pp. 220-228, 1996

13. Schulz, W.L., Udd, E., Seim, J.M. and McGill, G.E., "Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges, Structures, and

Highways," Proceedings of SPIE, Vol. 3325, pp. 212-216, 1998

14. Udd, E., Schulz, W.L., Seim, J.M., Corona-Bittick, K., Dorr, J., Slattery, K. T., Laylor, H.M., and McGill, G.E., "Fiber optic smart bearing load structure," Proceedings of SPIE, Vol. 3587, pp. 40-48, 1999

15. Ghosh, A.K., Maji, A., and Dasgupta, D., "Smart Inspection Unit for NAFTA Trucking Problem," Technical Report to the New Mexico State Highway and Transportation Department, USA, 2003

16. Arnau, A., Piezoelectric Transducers and Applications, Springer, USA, 2003

17. Yang, J., The Mechanics of Piezoelectric Structures, World Scientific Publishing, Singapore, 2006

18. Yang, J., Analysis of Piezoelectric Devices, World Scientific Publishing, Singapore, 2006

19. Arnau, A. (2008), Piezoelectric Transducers and Applications - 2nd Edition,Springer,UK.

20. Paul, R.C. (2001), Fundamentals of Electric Circuit Analysis, John Wiley & Sons, NY, USA

21. Specifications of Piezoelectric Film Sheet, Measurement Specialties Inc., USA (http://www.meas-spec.com)

감사의 글

2년의 배움에 모르는 것이 참 많아졌습니다. 배움에 의미를 두지 않았던 시절에 모르는 것이 무언지도 몰랐었기 때문 이였습니다. 그런 저에게 지식의 소중함과 배움의 기쁨을 알게 해주신 신성우 교수님께 가장 먼저, 가장 큰 감사의 인사를 올립니다. 너무나도 부족했던 저에게 기대를 해주시고, 부응하지 못함에 눈물을 흘리던 작은 저에게 항상 따뜻함으로 어깨를 다잡아 주심에 감사드립니다. 때론 엄한 모습으로 나태한 저를 다잡아 주셨음에 다시 한 번 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 많은 지도를 해주시고 안전공학도로써의 마음가짐과 자세를 가지게 해주셨던 장성록 교수님, 언제나 인자하신 모습으로 자상한 충고를 아끼지 않아주셨던 권오헌 교수님, 제가 모자라 많은 가르침에 보답 드리지 못했지만 존경하는 마음만은 늘 간직하고 바라보았던 이의주 교수님, 오창보 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 안전공학과에 와서 자부심을 느낄 수 있게 해주셨던, 목연수 교수님, 박외철 교수님, 이동훈 교수님, 최재욱 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 교수님으로써 때론 선배님으로써 많은 신경과 도움, 응원과 격려를 해주신 이종빈 박사님, 강지웅 박사님, 고경찬 박사님께도 마음 다해 감사의 인사를 드립니다.

처음 실험실이 만들어지고 많은 일들을 겪으며 웃고 울고 시간을 보냈던

우리 동생들, 사소한 것부터 뭐든 챙겨주고 도와주던 가람이. 야식 같이 먹고 함께 살쪄준 재근이. 끝자락에 만났지만 많이 친해진 지용이, 귀여운 늦둥이 현수, 끝까지 함께 하지 못해 아쉬웠던 유성이, 2년의 시간 모두 함께여서 즐거웠다고 말할 수 있는 지금을 있게 해줘 너무 고맙다는 말과 공부 열심히 하란 말 함께 전합니다. 그리고 항상 누나같이 잘 챙겨주시던 손쌤, 늘 살갑게 대해주던 애교 많은 철준이와, 답답한 때 마다 커피 한잔에 기분 풀어주던 금미, 시도 때도 없이 귀찮게 질문하는 제게 항상 최고의 답변으로 도와주시던, 진호형님, 주원형님, 실험에 과한 많은 지식과 가르침을 주셨던 동수형님, 포영형님 , 엔지니어로써의 자세를 직접 보여주시고 가슴에 새기게 해주었던 임진석 박사님과 김용규 연구원님, 어수룩한 제게 많은 사랑과 가르침을 주셨던 대학원의 선배님들과 지인들에게도 고맙다는 인사 전합니다.

마지막으로 힘들 때 곁에서 항상 응원해주고 지켜주었던 나의 가족과 같은 성용이와 대현이, 나의 대학 생활의 절반을 차지하고, 지금 이 자리에 후회 없이 있게 해준 창형이와 못난 자식 덕에 고생만 하시는 부모님에게 너무나도 고맙다는 말로 마칩니다.

2012년 1월 실험실에서 김수민