

피에조 필름을 이용한 축중감지기 개발

양희선* · 박연규** · 강대임** · 김엄기***

Development of a Weight in Motion sensor using Piezo Film

Hui-Sun Yang, Yon-Kyu Park, Dae-Im Kang, Am-Kee Kim

Key Words: Weight in motion sensor(축중감지기), Polyvinylidene fluoride(PVDF 필름), Uniformity(균일도)

Abstract

This paper describes a weight in motion(WIM) sensor to measure the weight of a vehicle in motion. The main sensing element of the WIM sensor is the PVDF(Polyvinylidene fluoride) film that shows rapid response to an external excitation. Due to the property of rapid response, it is possible to measure the weight of a vehicle in motion with high speed. In the development of the WIM sensor, the dominant target value was the uniformity of the sensor. To increase the uniformity, We employed shrinkable tube made of rubber to enhance the uniformity, and performed the rolling of the brass tube repeatedly. The uniformity of the sensor was examined experimentally. It was comparable to that of a WIM sensor of the MSI which was the benchmark of this development. This paper also describes the mechanical modeling of the sensor and the suitable charge amplifier for the sensor.

기호설명

- t : 시간
- R_f : 피드백 저항
- C_f : 피드백 커패시턴스
- τ : 시간상수
- f_c : 차단주파수

1. 서 론

산업의 발달과 함께 화물차량의 운행이 증가하는 추세에 있으며, 특히 과적차량은 노면의 파손 및 수명단축, 교량 붕괴사고의 원인이 되고 있다.

우리나라의 교통개발연구원이 조사한 바에 의하면 과적차량에 의해 파손되는 도로의 유지보수비는 연간 약 7,500억원이 소요된다.[1] 기존의 과적차량 단속시스템에 사용되는 스트레인 게이지식 축중감지기는 경제성이 떨어지고, 설치면적을 넓게 차지하여 설치가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 10 km/h 이상에서는 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하여 압전재료를 이용한 축중감지기 개발이 진행되고 있다. 축중감지기는 과적차량을 단속하는 자동계중시스템에 적용하는 센서이다.

미국이나 독일 등 선진국에서 사용되는 축중감지기는 피에조 폴리머 원재료를 가공하여 제작되었다. 가늘고 긴 형태의 감지기로써 설치가 용이하며, 피에조 재료의 특성상 동적 물리량 측정에 적합하다.

자동계중시스템의 핵심부품인 PVDF(Polyvinylidene fluoride)를 이용한 축중감지기는 현재 외국

* 공주대학교 기계공학과 대학원

** 한국표준과학연구원 역학표준부 힘그룹

*** 공주대학교 기계공학과

에서 전량 수입되므로 국산화가 필요하다. 국내 기술로 피에조 재료인 PVDF를 이용한 축중감지기의 개발은 자동계중시스템에 사용되어 과적차량을 단속하므로써 도로의 파손 및 교량 붕괴사고를 사전에 예방할 수 있어 연간 수천억원의 도로보수비를 절약할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고, 무역수지 개선 효과를 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 국가 ITS 사업에 적용이 가능하리라 본다.

그러나, 외국 선진국의 제품에서 사용한 폴리머 원재료의 직접가공은 본 연구의 범위에서 벗어나며, 특허가 걸린 문제이기 때문에 우리 연구팀에서는 쉽게 구매가 가능한 PVDF 필름을 사용하여 센서 개발을 시도하고자 하였다.

PVDF 필름과 황동튜브를 이용하여 축중감지기를 제작하고, 각 위치에 따른 출력 전압의 균일도를 측정하였다. 주파수 분석장비를 이용하여 전하 증폭 회로를 통한 전하 증폭비를 결정하고, 차단주파수 및 시간상수를 설정하여 출력 전압을 측정하였다.

2. 센서의 감지부 설계 및 제작

현재 선진국에서 제작되어 상용되고 있는 축중감지기를 분석해보고자 한다. Fig. 2-1에서 피에조 폴리머 원재료를 사용하여 제작된 미국의 MSI 사와 독일의 PAT 사의 축중감지기 단면을 보여주고 있다.

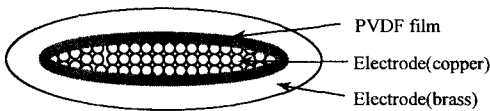


Fig. 2-1 WIM sensor made of co-polymer

Fig. 2-1에서 보는 바와 같이 가운데에는 구리선 다발이 존재하며, 그 주위를 피에조 재료가 둘러싸고 있다. 피에조 재료는 다시 황동튜브에 둘러싸여있는 구조이다. 피에조 분극방향은 가운데 구리선에서 밖으로 향하는 방향으로 되어있다. 그 단면의 폭과 높이는 각각 1.8 mm와 6.7 mm이며, 길이는 1.8 m이다. 구리선의 직경은 0.06 mm이며, 이는 센서의 +극 역할을 한다. 황

동튜브의 두께는 0.5 mm로서, 이는 센서의 -극 역할을 한다. 이러한 구조는 외부 변형이 적용되면 전기적 출력을 얻게 되는데, 그것은 센서 두께 방향의 압축력에 효과적으로 반응을 한다. 센서 길이 방향의 굽힘력에는 반응을 하지 않는다.[2]

이러한 원리를 참고하여, 우리 연구팀에서는 구리판 위·아래에 PVDF 필름을 부착한 형태의 축중감지기를 고안하였다. PVDF 필름은 다양한 형태와 크기로 구매가 가능한 재료이다. PVDF 필름을 이용하여 Fig. 2-1에 나타난 축중감지기를 대체할 수 있는 모델을 고안하였다. PVDF 필름 사이의 구리판은 MSI 센서의 구리선을 대체하며, PVDF 필름은 피에조 원재료를 대신한다. 작동원리 측면에서 볼 때, 전술한 외국의 제품과 우리 연구팀에서 제작한 축중감지기는 서로 같다고 말할 수 있다.

본 연구에서 최종 선정된 PVDF 필름은 양면에 전극처리가 되어있고, 그 위는 비닐로 포장되었다. 접착제가 붙어있는 띠 형태로써 어느곳에나 부착이 용이하도록 되어있다. 단면의 크기는 4.8 mm × 0.4 mm이고, 길이는 1480 mm이다. 필름 1장의 커패시턴스는 12.1 nF이다. 필름에 이미 전극처리가 되어있기 때문에, 처음 고안했던 구리판은 더 이상 필요가 없었다. 그러나, 센서 외부의 황동튜브는 센서 형태 유지 및 보호 측면에서 계속 필요하였다.

설계된 황동튜브는 단면의 크기가 7.7 mm × 2.6 mm이고, 두께와 길이가 각각 0.5 mm, 1500 mm이다. 황동튜브는 압출과정을 거쳐 제작되었다. 황동튜브 내부의 균일도를 알아보기 위해 15 cm 간격으로 절단한 후 단면형상을 측정하였다. 10개의 단면치수는 균일도가 상대표준편차 2.5 %로 양호함을 보였다. 황동튜브는 센서가 도로에 설치되었을 때 주행 차량의 중량에 대해 PVDF 필름을 보호하는 역할을 하게 된다.

구리판에 PVDF 필름을 부착하고, 그것을 황동튜브에 삽입한 후 2단 로울러를 통해 압연을 함으로서 감지기를 제작하게 되었다. 감도 확인 결과, 위치에 따른 출력이 균일하지 않았다. 황동튜브와 PVDF 필름이 접촉하는 부분에 고무와 같은 탄성체가 삽입된다면 균일한 출력신호를 얻을 수 있을 것으로 판단하고, 구리판 대신 고무로 된 수축튜브를 이용하는 방법을 고안하였다. 구리판

처럼 황동튜브 내부에서 PVDF 필름의 정렬을 도와주는 역할과 함께 센서의 균일도 향상을 위하여 고무 재질의 수축튜브를 이용하고자 하였다.



Fig. 2-2 Cross-section of WIM sensor using shrinkable tube

두장의 PVDF 필름 사이에 아무것도 없는 형태로서, 필름을 서로 겹치고, 지름 4 mm의 수축튜브에 삽입한 후 가열하여 수축하였다. Fig. 2-2에서 수축튜브가 사용된 축중 감지기 단면을 보여주고 있다. 황동튜브에 삽입시 마찰력이 작용하여 밀어주는 힘 만으로는 삽입이 불가능하였다. 수축튜브 외부에 약간의 윤활제를 바르고, 황동튜브 반대편에서 와이어를 이용하여 필름을 당겨주는 방법으로 제작하였다. 로울러를 통해 압연을 해주게 되면, 압하율이 커지더라도 수축튜브의 탄력이 작용하므로 PVDF 필름에도 손상이 없으며, 균일한 압연이 될 수 있다는 장점이 있다. 압연이 균일하게 되면 센서의 출력신호는 높은 균일도를 갖게된다. 압연 작업시 압하율 8%로 여러번에 걸쳐 제작하였다. 여기서 압하율을 K라고 하면 다음과 같이 표현된다.[3]

$$K = \frac{H_i - H_o}{H_i} \quad (2-1)$$

H_i 와 H_o 는 각각 압연 전·후 두께를 의미한다.

Fig. 2-3은 완성된 축중감지기의 외형을 보여주고 있다. 그림에서 검은색 띠 형태로 된 것은 수축튜브로 포장된 PVDF 필름이다.

3. 축중감지기 단면 해석

수축튜브를 이용하여 제작한 축중감지기 단면을 스프링 등가 시스템으로 모델링하여 역학적 해석을 하였다. 외부 힘에 대해 PVDF 필름의 변형 거동을 예측하므로써 감지기의 감도와 관련된 변수들을 찾고자 한다. Fig. 3-1에서처럼 축중감지기 단면을 단순보와 스프링으로 나타낼 수 있다.

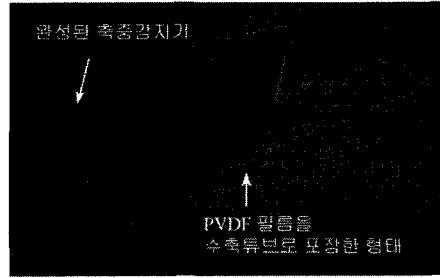


Fig. 2-3 The picture of WIM sensor

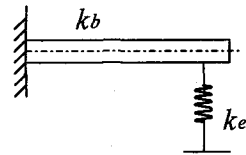


Fig. 3-1 Equivalent system of cross-section

Fig. 3-1에서 단순보에 해당되는 k_b 는 황동튜브의 굽힘에 의한 스프링상수이고, k_e 는 수축튜브와 PVDF 필름의 등가 스프링상수를 나타낸다. 이것으로부터 k_b 와 k_e 는 병렬관계의 스프링 시스템으로 나타낼 수 있다. Fig. 3-2에서 전체적인 스프링 등가시스템을 보여주고 있다.

Fig. 3-2에서 k_b 는 황동튜브의 순수굽힘에 의한 스프링상수로서, 손으로 계산하기 힘든 타원형의 단면형상이므로 유한요소 프로그램을 이용하여 계산하였다. k_c 는 황동튜브의 압축에 의한 스프링상수이다. 0.5 mm 두께의 황동튜브는 중심선을 따라 위·아래에 $2k_c$ 의 스프링상수가 직렬 연결 형태로 등가시킬 수 있다. k_r , k_v 그리고 k_f 는 각각 수축튜브와 필름을 덮고 있는 비닐, 그리고 PVDF 필름의 스프링상수를 나타낸다. 각각의 스프링 상수값은 단위길이에 대해 계산된 값으로서 Table 3-1에서 보여주고 있다.

Table 3-1 Spring coefficient of each component (kN/m)

k_b	k_c	k_r	k_v	k_f
294	500000	34	497	3440

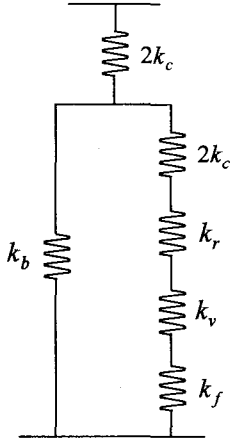


Fig. 3-2 Equivalent spring system

스프링 4개의 직렬연결에서는 가장 작은 값을 갖는 수축튜브의 스프링 상수 k_r 에 비슷한 등가 스프링 상수를 얻을 수 있다. 그리고, 병렬 연결에서 외부하중이 작용할 때, PVDF 필름의 변형 거동은 황동튜브의 스프링상수 k_b 에 의해 지배됨을 알 수 있다. 황동튜브의 굽힘에 의한 스프링상수 값이 작아질수록 외부하중에 대해 PVDF 필름에 미치는 변형이 커질것이고, 따라서 감지기의 출력 전압이 높을 것으로 예측할 수 있다.

4. 증폭회로의 설계

피에조 필름을 이용하여 제작한 센서에서 출력은 전하와 전압 신호의 형태로서 취득하게 된다. 센서로부터의 높은 임피던스 출력을 신호취득에 유리하도록 낮은 임피던스 신호로 전환해주는 증폭기는 크게 전하방식과 전압방식으로 나뉜다. 전하증폭방식은 입력된 전하량에 비례하여 전압으로서 신호를 취득하며, 센서의 감도는 사용되는 케이블 길이에 영향을 받지 않으므로 본 연구에서도 전하증폭기를 사용하였다.

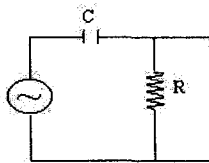


Fig. 4-1 Equivalent circuit of piezo-film

Fig. 4-1은 피에조 필름의 등가 회로를 보여주고 있다. C는 필름의 커패시턴스로서 약 25 nF이다. R은 신호의 증폭 및 주파수 측정능력과 관련된 로드저항을 의미한다. 여기에서 출력전압 및 시간상수, 그리고 차단주파수는 아래식과 같이 표현된다.

$$V_o = \frac{Q}{C} \quad (4-1)$$

$$\tau = R \cdot C \quad (4-2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4-3)$$

Fig. 4-2에 LM741 OP-Amp를 이용하여 전하 증폭 회로를 구성하였다. R_f 와 C_f 는 각각 피드백 저항과 커패시턴스를 의미한다.[4]

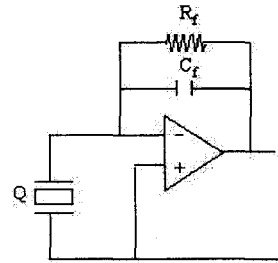


Fig. 4-2 Charge amplifier

C와 Q는 각각 피에조 필름의 커패시턴스 및 입력 전하량을 의미한다. PVDF 필름 2장의 커패시턴스는 약 25 nF이다. Fig. 4-2에서 출력전압, 시간상수 및 차단주파수는 아래 식과 같이 표현된다.

$$V_o = \frac{Q}{C_f} \quad (4-4)$$

$$\tau = R_f \cdot C_f \quad (4-5)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (4-6)$$

피에조 필름 등가회로에서의 출력전압에 대한 전하 증폭 회로에서의 출력전압 간의 비로서 감도를 정의한다면 아래 식과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$G_c = \frac{V_{out}/charge}{V_{out}/equi} = \frac{Q/C_f}{Q/C} = \frac{C}{C_f} \quad (4-7)$$

OP-Amp를 통한 피드백 커패시턴스 C_f 는 9 nF으로 정하여 이득을 2.78로 하였다. 그리고, 피드백 저항 R_f 는 2 M Ω 으로 하여 차단주파수를 8.84 Hz로 설정하였다. 이때의 시간상수 τ_f 는 1.8×10^{-2} sec 이다.

5. 축중감지기의 특성 평가

수축튜브를 이용하여 제작된 축중감지기의 출력신호 균일도를 검증하고, 출력특성을 파악하기 위하여 충격시험을 행하였다. 감지기를 고정시키기 위해 지그를 사용하였고, 충격해머로부터 축중감지기에 충격력을 가해주었다. 사용된 충격해머는 힘센서가 내장되어 있다. 주파수 분석기를 통해 충격력에 대한 감지기 출력값의 비가 dB의 크기로 나타나게 된다. 실험에 대한 신호 취득 과정을 Fig. 5-1에서 보여주고 있다. 각 위치에 대한 감도는 네번의 반복실험을 통한 평균값을 이용하였다.

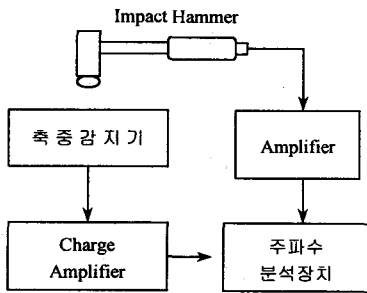


Fig. 5-1 Experimental set-up

측정된 출력값을 표본이 되는 축중감지기의 출력과 상대 비교를 해 볼 필요가 있다. 미국의 MSI 사 축중감지기와 상대 비교하였다.

Table 5-1은 우리 연구팀(KRISS)에서 직접 제작한 축중감지기와 미국의 MSI 사로부터 수입된 축중감지기의 위치에 따른 출력값을 나타낸다. 출력값은 전하 증폭 회로를 통해 얻어진 결과이다.

실험 결과, 본 연구팀에서 제작한 축중감지기는 표본 MSI 사 축중감지기의 균일도보다 나은 결과를 얻었다. PVDF 필름과 황동튜브 사이에

고무로 된 수축튜브가 자리함으로써, 상대표준편차 8.11 %의 높은 균일도를 보이고 있다.

Table 5-1 Sensitivity of the WIM sensor

위치	출력전압(mV/N)	
	KRISS	MSI
1	4.36	23.97
2	3.64	21.11
3	4.45	21.88
4	4.13	21.37
5	4.56	20.94
6	3.59	24.36
7	4.39	21.69
8	4.20	18.23
9	3.93	19.06
10	4.33	20.61
평균	4.16	21.32
상대표준 편차(%)	8.11	8.85

6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 차량 운행중 하중의 정확한 측정을 위하여 피에조 필름을 이용한 축중감지기를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 피에조 필름 2장을 포갠 후, 수축튜브 포장하고, 이를 다시 타원형 단면의 황동튜브에 삽입하여 압연작업을 행하였다.

본 센서의 경우 길이가 긴 띠 형태를 가지며, 따라서 길이 방향에 따른 균일도가 매우 중요한 특성을 가진다. 균일도 향상을 위해 수축튜브를 사용하였으며, 측정결과 비교대상인 미국의 MSI 사의 제품과 비등한 균일도를 얻을 수 있었다.

앞으로의 연구과제로는 우선 황동튜브의 압하울을 제어하는 방법의 고안을 들 수 있다. 균일한 압연작업이 수행되어야만 높은 균일도를 달성할 수 있다.

또한, 피에조 필름을 이용한 하중감지센서의 단점인 온도변화에 따른 출력의 드리프트 현상을 줄이기 위하여 온도 보상 방법을 연구하고, 현장 적용시 적합여부를 평가하여야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부 공업기반기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- [1] 노관섭, "국내 포장의 유지보수 현황 및 개선 방안," pp. 57~61
- [2] 손병기, "센서의 압전변환기능," pp. 28~30
- [3] 염영하, "신편 기계공작법," pp. 142~154
- [4] Mark Serridge, Torben R., "Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook," pp. 38~53