

압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정(I)

—개발 연구 사례를 중심으로—

이 종 원

한국과학기술원 기계공학과 교수



● 1948년생
● 랜덤 데이터 해석 및 처리, 회전체 역학등을 강의하고 있으며, 회전기계, 정밀기계 등의 진동해석 및 제어가 관심분야이다.

구 경 회

한국에너지연구소 장기공학연구실 연구원



● 1964년생
● 진동 및 제어공학을 전공하고 있으며, 압전 세라믹을 이용한 센서 설계, 랜덤 신호처리 및 해석, 구조물의 모우드 해석 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

오늘날 널리 연구되고 있고 공학자들에게 많은 관심을 끌고있는 압전 세라믹(ceramic)을 이용하여 자연계에서 일어나는 각종 진동현상을 측정하고 해석하기 위한 센서(sensor)의 설계, 제작은 이미 선진국에서도 보편화된 지 오래이다. 특히 압전형 가속도계(piezo type accelerometer)는 진동의 절대 측정에 가장 유용한 센서로 널리 알려져 있으며 이러한 압전형 가속도계의 특징을 보면⁽¹⁾

- (1) 아주 넓은 사용 주파수 범위
- (2) 넓은 동적범위(dynamic range)에 걸친 뛰어난 선형성(linearity)
- (3) 측정된 가속도 신호를 전기적으로 적분하여 속도와 변위에 대한 자료 제공 용이
- (4) 높은 정확성
- (5) 자발전(self-generating)이므로 외부 전원 공급이 불필요
- (6) 긴 수명과 뛰어난 내구성

(7) 작은 크기와 가벼운 무게 등이다.

현재 기계 구조물 진동 측정에 이용되고 있는 스트레인 게이지형(strain gage-type)의 가속도계는 감도가 좋고 저주파 진동 측정에는 편리한 반면 충격이나 높은 주파수 진동 측정에는 적합하지 않으며 내부 구조가 다소 복잡하다⁽²⁾.

반면에 압전형 가속도계는 압전 소자와 관성 질량의 조합 설계로서 저주파 진동 측정에 적합한 고감도의 가속도계와, 감도는 떨어지나 아주 높은 주파수 범위의 진동까지 측정이 가능한 가속도계를 손쉽게 설계, 제작할 수 있다.

본 글에서는 선진국에 비해 낙후된 국내의 센서 설계, 제작 기술을 고양시키고자 최근 한국과학기술원에서 시도된 압전형 가속도계의 개발 연구 사례를 중심으로 설계 및 제작시 고려 사항과 보정 문제를 소개하고자 한다.

본 연구에서는 이미 상용되어 시판되고 있는 여러가지 압전 재료 중에서 표 1에서의 PZT-5A와 유사한 재료의 물성을 갖는 국내 제품

표 1 압전 재료의 물성

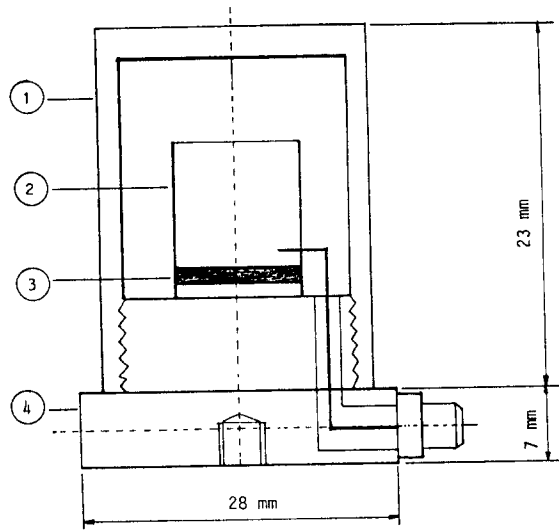
재료명		M-type	PZT-5A
유전상수	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1800	1700
	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1700	1730
손실계수	$\tan\delta$ (%)	2.0	0.02
	k_p	0.61	-0.60
결합계수	k_{31}	0.36	-0.344
	k_{33}	0.74	0.705
	k_t	0.48	0.486
	k_{15}	0.72	0.685
	$d_{31}(\times 10^{-12}\text{m/V})$	-185	-171
압전변형상수	$d_{33}(\times 10^{-12}\text{m/V})$	420	374
	$d_{15}(\times 10^{-12}\text{m/V})$	630	584
	$g_{31}(\times 10^{-3}\text{V/N})$	-10.3	-11.4
압전응력상수	$g_{33}(\times 10^{-3}\text{V/N})$	23.3	24.8
	$g_{15}(\times 10^{-3}\text{V/N})$	36.9	38.2
	$s_{11}^E(\times 10^{-12}\text{m/N})$	15.2	16.4
탄성계수	$s_{33}^E(\times 10^{-12}\text{m/N})$	17.7	18.8
	$Y_{11}^E(\times 10^{10}\text{N/m})$	6.5	6.1
영계수	$Y_{33}^E(\times 10^{10}\text{N/m})$	5.6	5.3
	$T_c(^{\circ}\text{C})$	320	365
큐리온도	$D(\times 10\text{kg/m}^3)$	7.7	7.75

인 M-type과 같은 압전 재료를 선택하였으며 이를 이용하여 여러형의 가속도계 중에서 압축식 압전형 가속도계를 설계, 제작하였다.

압축식 압전형 가속도계의 제작에서 특히 중요한 것은 가속도계 구성 요소들의 조립 문제이며 가속도계가 작으면 작을수록 제작이 어려워지게 되므로 본 연구에서는 그림 1, 2와 같은 크기의 가속도계를 제작하여 실제 보정 실험을 통하여 특성을 파악하고 설계값과 비교하여 실제 적용을 위한 지침으로 삼고자 한다.

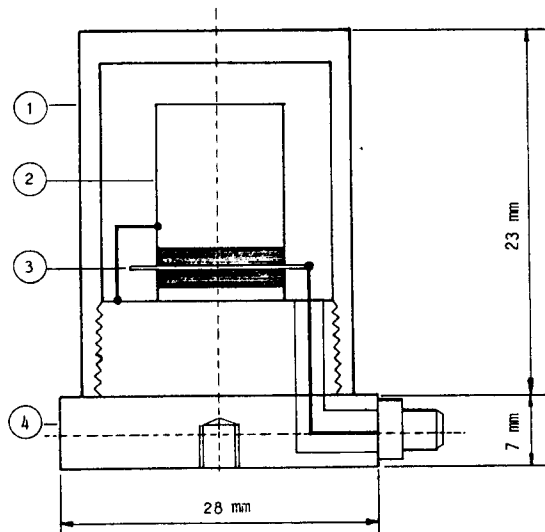
2. 센서용 압전 재료⁽³⁻⁹⁾

일반적으로 고체 물질의 결정은 대칭성에 따라서 32정족(class)으로 분류되며 이중 20정족



- ① 하우징 ② 관성 질량
- ③ 압전 소자 ④ 베이스

그림 1 단일 압축식 압전형 가속도계 (구성 요소)



- ① 아크릴 ② 황동
- ③ 황동 ④ 스테인리스 강

그림 2 이중 압축식 압전형 가속도계 (구성 요소들의 재질)

에 속하는 결정은 압전성(piezoelectricity)을 나타낸다.

강유전체(dielectric material)로서는 1920년에 발견된 로셀염(Rocelle salt)계통의 것과 1935년에 발견된 인산화수소가리계통의 두 종류가 있었으나 물에 약한 관계로 공업재료로서는 만족할 만한 것이 못되었다. 이후 1947년에 제 3의 강유전체인 티탄산바륨($BaTiO_3$)에서 압전성이 발견되어 단성분계로서는 압전 세라믹의 대표로 알려져 있었으나 온도의 영향에 아주 민감한 이유로 재료의 안정성에 문제가 많았다. 그 이후 이성분계로 PZT라고 불리는 압전 세라믹이 발견되어 가속도계 뿐만 아니라 압력계, 하중계 등 다른 많은 센서용으로 현재 널리 사용되고 있다.

이 PZT 세라믹은 티탄산납($PbTiO_3$)과 지르코산납($PbZrO_3$)을 일정한 비율로 섞은 것으로 사용 용도에 따라 불순물을 첨가시켜 여러 가지 재료 물성을 갖는 압전 세라믹으로 사용되고 있다. 이러한 압전 세라믹은 그 자체만으로는 사용할 수가 없고 원하는 방향으로 전극을 입힌 후 강한 직류 전계를 가하여 극성(polarization)을 갖게 하여야 한다.

또한 센서용 압전 재료로서 수정(crystal)과 같은 자연산 결정체는 온도의 영향을 거의 받지 않기 때문에 가속도계나 하중계 등에 많이 쓰이고 있으나 원하는 방향으로 극성을 갖도록 하기 위하여 결정체를 가공하는데 경비가 많이 들며 사용 주파수 범위가 좁아 고주파에서는 특성이 좋지 않다.

2.1 압전 효과

그림 3(a)와 같이 같은 한쌍의 양전하(q^+)와 음전하(q^-)가 어떤 일정한 거리(r)를 두고 분리되어 있는 것을 쌍극자(dipole)라고 한다. 이러한 쌍극자들은 쌍극자 모멘트에 의하여 서로 구속되어 있다.

전계(electric field)는 물질내에서 전기적 극성(polarization)을 일으키며 이러한 극성 효과가 큰 물질들을 유전체(dielectric material)

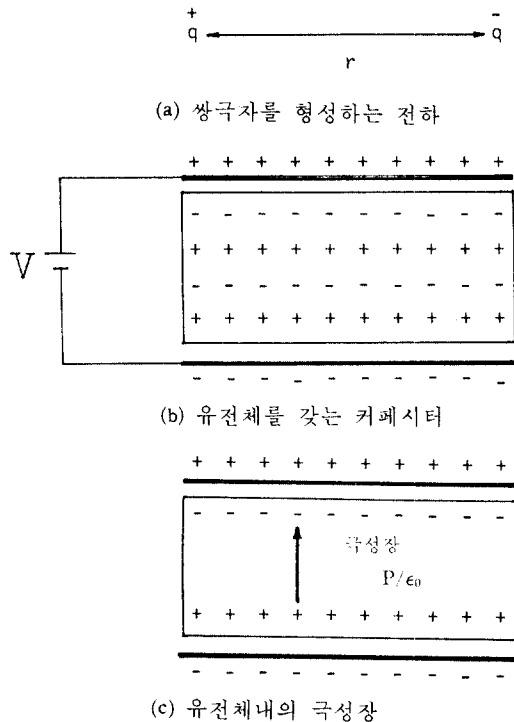


그림 3 유전 물질

라고 부른다. 이러한 유전체는 반드시 압전성을 갖는다. 그림 3(b)에서 유전체의 내부는 서로 상쇄되어 없어지고, (c)에서 볼 수 있듯이 유전체 표면에 구속 전하(bound charge)가 생기게 되며 이 유전체의 양 표면에 전극판을 붙이게 되면 전극판의 자유 전하(free charge)와 유전체 표면의 구속 전하가 전극판 표면에 생기게 된다. 여기서 구속 전하 밀도를 극성이라고 한다.

이러한 관계를 식으로 표현해 보면^(4,6,10),

두 전극판 사이가 진공일 때,

$$Q = \epsilon_0 \xi$$

두 전극판 사이에 유전체가 있을 때,

$$D = Q + Q_b = \epsilon_r Q$$

따라서

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon_0 \xi + Q_b$$

여기서 구속 전하 밀도 Q_b 는

$$Q_b = P = dT \quad (1)$$

따라서

$$D = \epsilon_0 \xi + dT \quad (2)$$

$$S = sT + d \quad (3)$$

여기서

D : 전기적 변위

Q : 자유 전하 밀도

Q_b : 구속 전하 밀도

ϵ_0 : 차원 인자

ϵ_r : 유전 상수

ξ : 전계

P : 극성

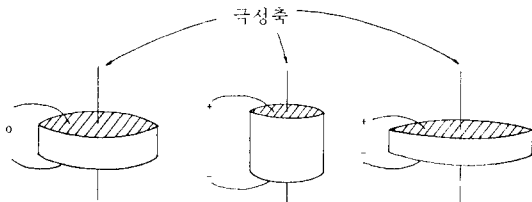
T : 응력

S : 변형률

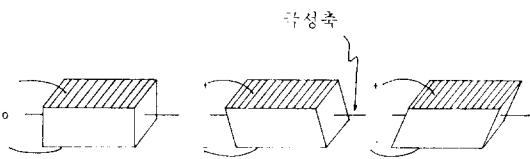
d : 압전 상수

s : 탄성 역강성

압전 효과란 위와 같은 유전체에 기계적 응력을 가하게 되면 재료의 변형이 일어나서 식 (1)에서와 같이 원래의 극성의 방향이 약간 변하며 이때 구속 전하 밀도의 변화, 즉 극성의 변화 정도가 압전 효과로 나타난다. 이와 반대로 강한 전계를 가하게 되면 식 (2), (3)에서와 같이 전기적 변위가 변하면서 재료의 변형이 일어나는 것을 말한다. 압전소자는 그림 4 (a)



(a) 두께 방향의 인장 및 압축



(b) 두께 방향의 전단

그림 4 압전 재료의 기본적인 변형

와 같이 압전 소자의 극성축(poling axis) 방향과 평행하게 전극판을 붙이게 되면 극성축 방향으로 압축, 인장 변형의 압전 효과를 나타내고 극성축과 수직하게 전극판을 붙이게 되면 그림 4(b)와 같이 전단 변형의 압전 효과를 나타내므로⁽⁴⁾ 극성축에 따라서 전극판의 배열을 달리하면 여러형의 압전형 가속도계를 설계할 수가 있다.

3. 압전형 가속도계의 설계, 제작

본 연구에서 수행한 압축식 압전형의 가속도계는 그림 1, 2와 같이 관성 질량(seismic mass), 압전 소자(piezoelectric element), 베이스(base), 그리고 하우징(housing)으로 구성되어 있으며 이들 각각의 설계는 서로 연관되어 있기 때문에 설계시에 전체적으로 여러가지 조건들을 고려하여야 한다.

3.1 압전형 가속도계의 동작 원리

진동하는 계(system)에 측정하고자 하는 방향으로 가속도계를 부착하게 되면 가속도계 내의 관성 질량이 압전 소자에 관성력(inertia force)을 전달하게 되어 압전 소자에 기계적 변형을 야기시킨다. 이때 압전 소자의 양단에 입혀진 얇은 전극판 위에 2.1절에서 설명한 것과 같은 압전 효과로 인하여 압전 소자의 변형량에 비례한 전하 밀도가 생기며 이때 생긴 전하량은 압전 소자의 뛰어난 선형성으로 인하여 베이스로부터 전달된 가속도에 비례하게 된다(식 18). 따라서 진동의 절대 측정 방식이다. 압전형 가속도계를 기계적 진동계로 보면 압전 소자가 관성 질량과 베이스 질량 사이의 스프링 역할을 하게 되어 그림 5와 같은 가속도계 몸체에 대한 관성 질량의 상대적 운동을 측정하는 원리로 되어 있다.

(1) 가속도계 동작의 이론적 해석⁽¹⁾

그림 5에서 볼 수 있듯이 압전형 가속도계는 감쇠가 거의 없는 질량-스프링계로 되어 있다. 운동 방정식을 보면

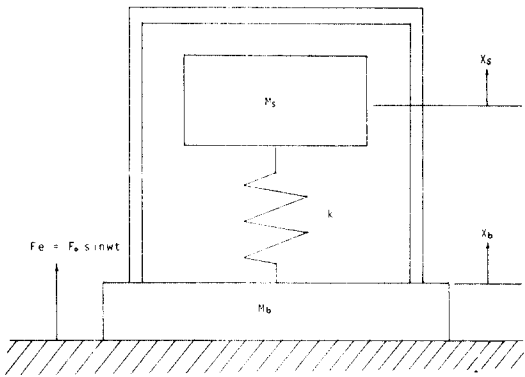


그림 5 가속도계의 모델링

$$m_b \ddot{x}_b + k(x_b - x_s) = F_e \quad (4)$$

$$m_s \ddot{x}_s - k(x_b - x_s) = 0 \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 결합하면

$$(\ddot{x}_b - \ddot{x}_s) + k\left(\frac{1}{m_b} + \frac{1}{m_s}\right)(x_b - x_s) = \frac{F_e}{m_b} \quad (6)$$

여기서

$$r = x_b - x_s$$

$$F_e = 0$$

일 때 가속도계의 공진 주파수는

$$\omega_n^2 = k\left(\frac{1}{m_b} + \frac{1}{m_s}\right) \quad (7)$$

이다.

실제로 가속도계의 베이스가 진동하는 물체에 단단히 고정되어 물체와 같은 강체로서 움직일 때 베이스의 질량 m_b 가 관성질량 m_s 에 비하여 충분히 커지게 되어(즉 $m_b \gg m_s$) 식 (7)에서 $1/m_b$ 는 무시할 수 있다. 따라서

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m_s} \quad (8)$$

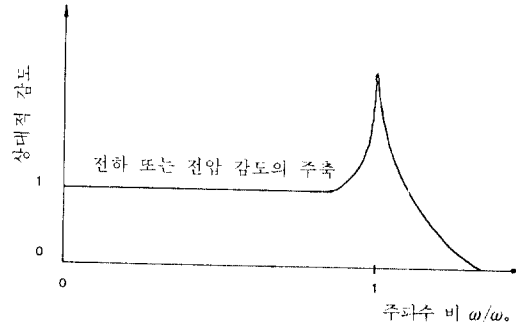
가 되어 가속도계의 공진 주파수가 낮아지게 된다. 이때 ω_n 를 부착 공진 주파수(mounted resonance frequency)라고 한다.

다음에 강제 진동을 살펴보면

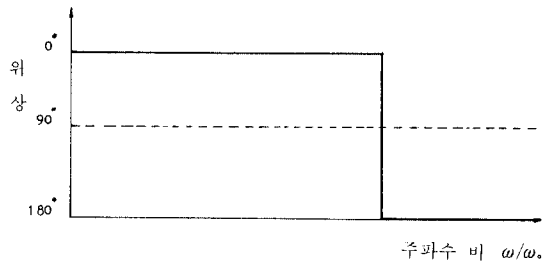
$$\ddot{r} + \omega_n^2 r = \frac{F_e}{m_b} \quad (9)$$

정현파의 가진 함수를 생각하면

$$F_e = F_0 \sin \omega t \quad (10)$$



(a) 가속도계의 상대적 감도와 주파수비 관계



(b) 위상과 주파수비 관계

그림 6 이상적인 가속도계에 대한 전달 함수 특성 곡선

이때 응답을 $r = R \sin \omega t$ 라고 두고 식 (9)를 풀면

$$R = \frac{F_0}{[m_b(\omega_n^2 - \omega^2)]} \quad (11)$$

$\omega_n \gg \omega$ 인 영역에서의 변위를 R_0 라고 하면

$$R_0 = \frac{F_0}{m_b \omega_n^2} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)에서 가속도계의 상대적 감도를 A 라고 하면

$$A = \frac{R}{R_0} \quad (13)$$

이다.

그림 6은 식 (13)과 같은 감도가 거의 없는 이상적인 가속도계의 특성 곡선을 도시한 것이다.

(2) 압전형 가속도계의 형태(type)

압전형 가속도계의 종류에는 압전 소자의 압축 또는 전단을 이용한 여러 가지 형태가 있

다.

- (가) 압전 소자의 변형에 따라
 - (a) 압축식 (compression-type)
 - (b) 델타 전단식 (delta shear-type)
 - (c) 평면 전단식 (plane shear-type)
 - (d) 굽힘식 (bender-type)⁽¹¹⁾
- (나) 측정 방향에 따라서
 - (a) 단축 (uniaxial)
 - (b) 삼축 (triaxial)
 - (c) 다축 (omnidirectional)⁽¹¹⁾

압축 방식과 전단 방식은 각각 장단점이 있다⁽¹¹⁾. 압축 방식은 베이스의 변형에 따라서 압전 소자가 직접 영향을 받기 때문에 온도 변화에 따른 베이스의 변형에 영향을 많이 받으나 설계, 제작이 간단하여 아주 작은 크기의 가속도계까지 만들 수 있다. 반면에 전단 방식은 온도의 영향은 적으나 설계, 제작이 복잡하여 작은 크기로 만들기에는 어려움이 많다.

3.2 설계의 기본 방향

압축식 압전형 가속도계의 감도와 부착 공진 주파수를 결정하는 것은 구성 요소들 중에서 압전 소자의 크기와 관성 질량의 무게이다. 본 연구에서는 원하는 감도와 부착 공진 주파수를 설계의 입력 변수로 하여 압전 소자의 크기와 관성 질량을 설계할 수 있도록 하였다.

그러나 실제로 이들 두 설계 변수는 서로 상반 관계에 있기 때문에 적절한 조합 설계가 필요하다.

(1) 설계의 요구 조건

일반적으로 이상적인 압축식 압전형 가속도계는 다음 조건을 만족해야 한다⁽¹¹⁾.

- (가) 관성 질량과 베이스는 무한대의 강성을 갖는다.
 - (나) 스프링 역할을 하는 압전 소자의 질량은 무시된다.
 - (다) 압전 소자의 두께 방향으로 힘이 작용할 때 반경 방향으로의 변형이 자유스럽다.
- 실제로 (가)의 조건에서 베이스의 재질은 가볍고 강성이 큰 것으로 해야 하지만^(12,13) 일반적

으로 무게가 무거운 재질은 강성이 크기 때문에 (가)의 조건을 완전히 만족시키기는 어렵다. (다)의 조건에서 압전 소자는 관성 질량과 베이스에 강한 접착제로 붙어 있기 때문에 두께 방향으로 압축 또는 인장력이 작용하면 자연스러운 반경 방향으로의 변형이 관성 질량과 베이스의 강성으로 인하여 제한되므로 두께 방향으로의 실질적인 변형은 줄어들어 가속도계의 감도는 이론값보다 약간 낮아지게 된다.

3.3 가속도계의 구성요소 설계

각 구성 요소들의 설계는 서로 연관되어 있으며 압전 소자의 크기에 따라서 관성 질량의 모양이 변하고 베이스와 하우징의 크기가 달라진다.

원판(disk) 형태의 압전 소자는 직경과 두께에 따라서 압전 효과가 달라진다. 본 연구에서는 압전 소자의 직경과 압전 소자에 관성력을 전달하는 관성 질량의 직경이 같게 설계하였으며 베이스와 하우징의 바깥 직경도 압전 소자의 직경을 고려하여 그림 1,2와 같이 모두 일정하게 설계되도록 하였다.

베이스의 옆부분에는 측정선의 연결부(connector: micro-dot)를 체결할 수 있도록 하고 밑 바닥에는 (10-32NF) 탭(tap), 구멍 깊이 (0.5 in)의 부착 탭구멍(mounting tapped hole)을 내어 스테드(stud)를 이용하여 측정하고자 하는 물체에 부착시킬 수 있도록 설계하였다.

3.4 가속도계의 설계

본 연구에서는 원하는 감도와 부착 공진 주파수가 주어질 때 이러한 성능을 가질 수 있는 가속도계를 이론적으로 설계할 수 있도록 하였으며 감도와 부착 공진 주파수를 설계의 입력 변수로 하여 관성질량과 압전 소자가 설계될 수 있도록 하였다. 그러나 압전 소자의 재료 물성 자체는 설계하지 못하고 표 1의 M-type 과 같은 재료 물성을 갖는 압전 소자를 이용하여 압전 소자의 크기만 설계되도록 하였다.

표 2 실험 가속도계의 설계

실험가속도계	T-1	T-2	T-3	T-4
적층 형태	단일	단일	단일	이중
PZT의 두께 t_p (mm)	1	2	2	1 each
관성 질량의 두께 t_s (mm)	5	5	7	5
PZT의 직경 D_p (mm)	10	10	10	10
관성 질량의 직경 D_s (mm)	10	10	10	10
관성질량의 재료	황동	황동	황동	황동
베이스의 재 질	스테인 리스강	스테인 리스강	스테인 리스강	스테인 리스강
하우징의 재료	아크릴	아크릴	아크릴	아크릴
압전 재료	M-type (Dae Won Ferrite Corp.)			
내부 도선	Wrapping wire (OK Machine and Tool Corp. USA)			
가속도계 전체 질량(gram)	55.75	56.88	57.15	57.90

높은 감도를 갖는 가속도계를 설계하기 위하여 압전 소자를 극성 방향과 평행하게 여러 개 사용한 다중 압축식의 설계를 하였으며 본 연구에서는 압전 소자를 한개 사용한 단일 압축식(실험 가속도계 : T-1, T-2, T-3)과 두개를 사용한 이중 압축식(실험 가속도계 : T-4)을 각각 설계, 제작하여 실제 보정 실험을 통하여 이들의 성능 특성을 파악하고 실제 설계값과 비교하였다.

표 2는 이들 각 실험 가속도계의 설계치를 나타낸 것이다.

(1) 설계를 위한 입력 및 출력 변수의 선택⁽¹¹⁾

가속도계를 설계할 때 가속도계 자체의 공진 주파수보다도 부착 공진 주파수가 가속도계를 실제 적용함에 있어서 더 유용하며 따라서 식

(8)로부터 가속도계의 부착 공진 주파수는

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_p}{m_s} \right)^{1/2} \text{ Hz} \quad (14)$$

이다. 여기서 k_p 는 전체 압전 소자의 총 강성이며 두께가 같은 압전 소자를 극성 방향과 평행하게 n 개 사용했을 때

$$k_p = \frac{E_{33}\pi D_p^2}{4n t_p} \text{ newtons/meter} \quad (15)$$

이며 여기서

n : 압전 소자 개수

E_{33} : 압전 재료의 영계수

D_p : 압전 소자의 직경

t_p : 압전 소자의 두께

이다.

부착 공진 주파수보다 매우 낮은 주파수 영역에서 관성 질량으로부터 관성력을 받아 압전 소자에 발생하는 총 전하량 q 는

$$q = nd_{33}F \text{ coulombs} \quad (16)$$

여기서 d_{33} 는 압전 상수 (piezoelectric strain constant)이며 F 는 베이스로부터 전달된 가속도로 인하여 압전 소자에 가해진 관성력으로

$$F = m_s \ddot{x} \text{ newtons} \quad (17)$$

이다.

식 (16)과 (17)에서

$$q = nd_{33}m_s \ddot{x} \text{ coulombs} \quad (18)$$

이며 평행하게 결합되어 있는 전체 압전 소자의 전기 용량 (capacitance) C_e 는

$$C_e = \frac{n\epsilon\pi D_p^2}{4t_p} \text{ farads} \quad (19)$$

이며 여기서 ϵ 는 유전 상수이다.

f_m 보다 매우 낮은 주파수 영역에서 발생하는 개방 회로 전압 e 는

$$e = \frac{q}{C_e} = \frac{4d_{33}m_s \ddot{x}}{C_e} \text{ volts} \quad (20)$$

이다. 따라서 식 (19)와 (20)에서

$$e = \frac{nd_{33} m_s \ddot{x}}{(n\epsilon\pi D_p^2/4t_p)} = \frac{4d_{33} m_s t_p \ddot{x}}{\epsilon \pi D_p^2} \\ = \frac{4g_{33} m_s t_p \ddot{x}}{\pi D_p^2} \text{ volts} \quad (21)$$

여기서 $g_{33} = d_{33}/\epsilon$ 이다.

또한 가속도계에 발생하는 전기적 에너지는

$$E = \frac{q^2}{2C_e} = \frac{2n(d_{33} m_s \ddot{x})^2 t_p}{\epsilon \pi D_p^2} \text{ joules} \quad (22)$$

이제까지의 식들에서 설계를 위한 입력 변수를 원하는 감도와 부착 공진 주파수로 했을 때 이들 두 설계 변수들의 상호 보완설계는 가속도계의 전체 무게를 고려하여 설계하여야 한다.

먼저 원하는 감도가 주어질 때 식 (18)과 (21)에서 중력당 가속도의 전하 감도는

$$S_q = \frac{q}{\ddot{x}/g} = nd_{33}m_s g \quad (23)$$

중력당 전압 감도는

$$S_v = \frac{e}{\ddot{x}/g} = \frac{4g_{33} m_s g t_p}{\pi D_p^2} \quad (24)$$

이며 여기서 전하 감도를 첫번째 설계의 입력 변수로 하여 관성질량의 무게를 설계할 수 있다. 이때 관성 질량의 비중을 알게 되면 관성 질량의 크기를 설계할 수 있다. 본 연구에서는 관성 질량의 직경과 압전 소자의 직경이 같도록 설계하였으며, 먼저 압전 소자의 직경이 설계되면 관성 질량의 크기가 설계되도록 하였다. 다음에 부착 공진 주파수를 두번째 설계 변수로 하면 식 (14)와 (15)로부터

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{E_{33} \pi D_p^2}{4n m_s t_p} \right)^{1/2} \text{ Hz} \quad (25)$$

이 된다. 여기서 관성 질량의 무게는 식 (23)으로부터 정해지므로 압전 소자의 직경과 두께의 적절한 상호 보완 설계를 해야 한다. 본 연구에서는 가속도계의 제작 문제와 관련하여 압전 소자의 직경을 10mm로 설계하고 감도와 부착 공진 주파수에 따라서 압전 소자의 두께와 관성 질량의 두께를 설계하도록 하였다.

이상에서 원하는 감도와 부착 공진 주파수가 주어지면 압전 소자의 크기와 관성 질량의 무게를 설계할 수 있다. 그러나 식 (23)과 (25)에서 볼 수 있듯이 이들 두 입력 변수들은 압전상수 d_{33} 와 영계수 $E_{33}(=1/s_{33})$ 에 따라서 달라지므로 가속도계에 적합한 압전 소자의 재료 물성 자체도 설계되어야 한다. 그리고 이 식에서 보면 압전 소자의 갯수를 많이 하고 관성 질량을

크게 하면 감도는 높아지지만 부착 공진 주파수가 낮아져 사용 주파수 범위가 줄어들게 됨을 알 수 있다. 따라서 가속도계의 전체 무게와 크기를 고려하여 적절한 조합 설계를 하여야 한다.

3.5 가속도계의 제작

가속도계의 성능을 높이고 높은 충격에서도 견딜 수 있도록 구성요소들을 결합하는데는 무엇보다도 접착제의 선정과 접착 기술이 중요하다.

순간 접착제와 같이 대체로 빨리 굳는 접착제일수록 접착 상태가 단단하게 굳는 경향이

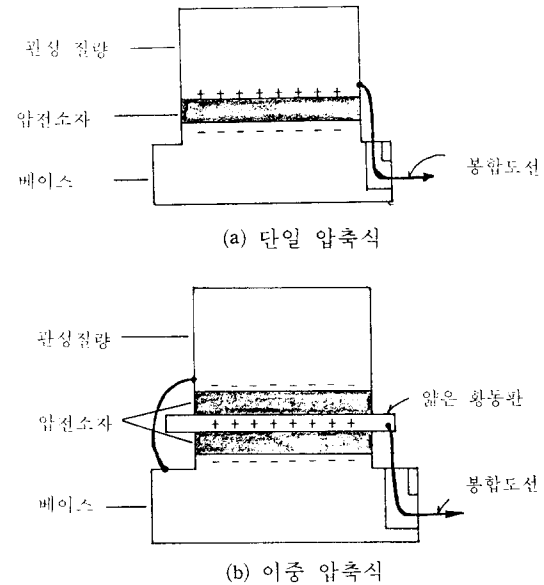


그림 7 실험 가속도계의 배선

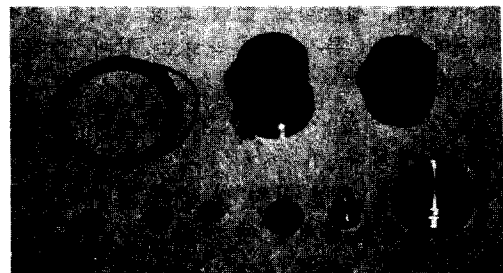


그림 8 실험 가속도계의 구성 요소

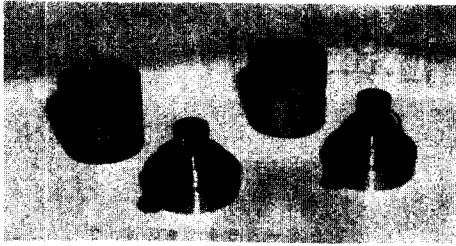


그림 9 실험 가속도계의 내부 모습

있으나 충격에는 약하다. 본 연구에서는 접착 상태에 어느 정도 유연성을 주기 위하여 CIBA-GEIGY제품의 에폭시(epoxy)를 사용하였다. 그리고 접착층의 두께를 최대한 얇게 하기 위하여 진공 오븐을 이용하여 양호한 에폭시를 만들어 구성 요소들의 접착에 사용하였다. 이러한 양호한 에폭시는 레진(resin)(S/N : GY-509)과 경화제(S/N : HY956)를 4 : 1 비율로 골고루 섞은 다음 진공 오븐에서 약 10~15분간 기포를 제거하여 만들며 이렇게 기포를 제거한 에폭시를 이용하여 각 구성 요소

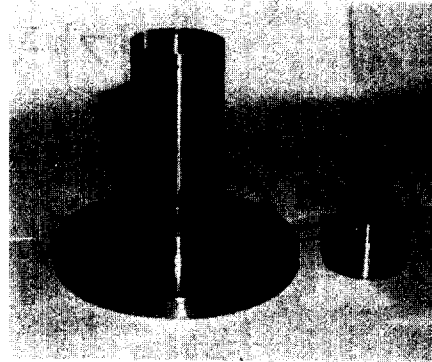


그림 10 중력식 보정계

들을 접합한 다음 상온에서 8시간 이상 경화시켰다. 결합시는 압전 소자의 극성 방향은 베이스가 접지(ground) 선이 되도록 그림 7과 같이 배열하였다.

그림 8은 본 연구에서 설계된 가속도계의 구성 요소들의 실물을 보여주는 것이며 그림 9와 그림 10은 완성된 가속도계의 내부 모습과 중력식 보정계의 실물을 보여준 것이다.

■ 국제 학술대회 참가 안내 ■

제 9 회 국제열전달 학술대회 —Ninth International Heat Transfer Conference—

주 관 : 국제열전달 학술회의(IHTC)

분 야 : 전도, 강제, 자연 및 혼합열전달, 복사, 복합열 및 물질전달, 연소, 용해 및 응고, 비등 및 응축, 이상유동, 계면현상, 분체 및 다공성 매질, 측정기술, 전달성질, 열교환기, 열전달증진, 프로세스 기기, 태양열, 원자로 시스템, 전자시스템, 생물공학, 회전기계, 열에너지 저장, 모델링 및 수치기법 등의 열전달의 기초 및 응용분야

일 시 : 1990년 8월 19일~24일(6일간)

장 소 : 이스라엘 예루살렘

일 정 : 1989년 6월 1일 예비초록 제출마감

1989년 7월 1일 초록 채택 통보

1989년 10월 1일 심사용 논문 제출마감

1989년 12월 15일 논문채택에 즈음한 심사자의 논평 통보

1990년 2월 1일 최종초록 제출마감

※ 기타 자세한 내용은 서울대학교 공과대학 기계공학과 강신형 교수(열 및 유체역학부문위원장)에게 문의 바람(전화번호 (02)886-0101(交)3471)