

# 압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정 (Ⅱ)

—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 장치공학연구실 연구원



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

## 4. 실험 및 고찰

본 실험에서는 앞의 설계 이론에 의하여 설계, 제작된 실험 가속도계를 실제로 보정 실험을 행하여 그 특성을 파악하고 실제 설계값과의 비교, 고찰을 하였다.

보정은 비교 보정 방법과 중력식 보정방법을 이용하였으며 이들 두 보정 방법에 의한 실험 결과를 비교하여 압전형 가속도계의 보정 방법에 대한 고찰을 하였다.

그리고 그림 8은 가속도계에서 예 증폭기

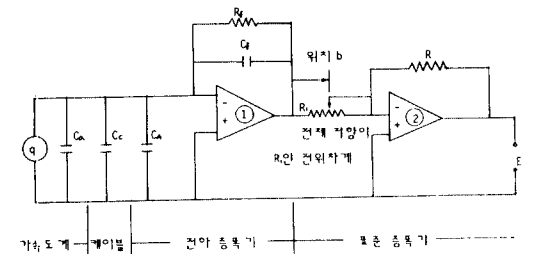


그림 8 압전형 가속도 계와 전하 증폭기를 갖는 측정 회로

(preamplifier)까지의 보정 장치의 회로도를 나타낸 것이다.

### 4.1 보정 (11,15)

본 연구에서 설계, 제작한 가속도계는 실제 보정실험을 수행하여 선형성, 감도, 부착 공진 주파수 그리고 전달 함수의 특성을 파악할 수 있다.

본 실험에서는 B & K회사의 표준 가속도계 (Type 8305)를 이용한 비교 보정 방법 (comparison calibration method)과 실험실에서 직접 제작한 중력식 보정계 (gravimetric calibration system)를 이용한 보정 방법을 각각 사용하여 이들 두가지 보정 방법을 통하여 실험 가속도계의 성능을 파악하고 이들 보정 실험의 결과 들을 설계값과 비교하였다.

#### (1) 기교 보정 방법

그림 9와 같은 전체 보정 실험 장치에서 표준 가속도계 (B & K 8305)와 실험 가속도계를 스투드 (stud)를 이용하여 같은 강체로 서로 결합시켜 주파수를 증가시켜 가면서 가진기를 이

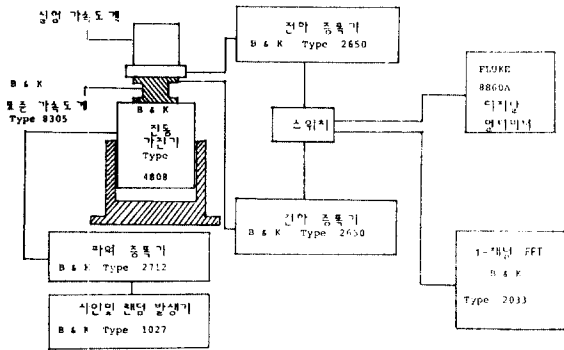


그림 9 비교 보정계

$$S_s = \frac{E_s}{a} \quad (27)$$

식 (26), (27)에서 실험 가속도계의 감도는

$$S_T = S_s \frac{E}{E_s} \quad (28)$$

이다. 따라서 식 (28)에서 표준 가속도계의 감도를  $S_s$ 를 알고 있으면 실험 가속도계의 감도  $S_T$ 를 알 수 있다.

본 실험에서 보정에 사용한 가진기는 실험 가속도계의 부착 공진 주파수까지 가진되지 못하기 때문에 7kHz까지만 보정을 하였다.

표준 가속도계의 전하 감도는 예 증폭기를 거치기 전의 케이블선까지를 포함한 보정의 결과 이므로 위의 식 (28)을 이용하여 구한 실험 가속도계의 전하 감도는 케이블선을 포함한 감도가 된다.

실험 가속도계의 전압 감도를 구하기 위하여 실험 가속도계의 전기 용량(capacitance)  $C_a$ 를 LCR미터로 측정하고 전하 감도의 측정시에 사용한 케이블선의 전기 용량  $C_c$ 와 합하여

용하여 가진을 시켰을 때 이미 정확하게 보정이 되어 있는 표준 가속도계의 주파수에 따른 감소를 알고 있으면 실험 가속도계의 감도를 비교 보정 실험을 통하여 구할 수 있다.

실험 가속도계의 감도를  $S_T$ 라고 하면

$$S_T = \frac{E_T}{a} \quad (26)$$

표준 가속도계의 감도를  $S_s$ 라고 하면,

표 3 비교 보정 방법에 의한 보정 결과(T-2)

AO 0038(B&K) 케이블선의 용량 : 110pF

전하 감도(평균) : 12.97PC/g(오차 2.1%)

케이블선을 포함한 가속도계의 용량 : 671 pF

전압 감도(평균) : 19.19mV/g(오차 1.5%)

실험주파수 (Hz)	표준가속도계 $E_s$ (mV)	T-2 $E_T$ (mV)	전하감도 $S_T$ (PC/g)	전압감도 $S_V$ (mB/g)
10	100	1079	12.9	19.2
20	200	2166	13.0	19.4
30	200	2162	13.0	19.4
50	300	3232	12.9	19.2
70	300	3226	12.0	19.2
100	300	3215	12.9	19.2
200	300	3195	12.8	19.1
300	500	5302	12.8	19.1
500	500	5288	12.7	18.9
700	500	5268	12.7	18.9
1 k	500	5260	12.7	18.9
2 k	500	5289	12.8	19.1
3 k	500	5292	12.8	19.1
5 k	500	5417	13.4	20.0
7 k	500	5669	14.2	21.2

$$\begin{aligned}
 Sv &= \frac{e}{a/g} \\
 &= \frac{q/(Ca+Cc)}{a/g} \\
 &= \frac{S_T}{Ca+Cc} \quad (29)
 \end{aligned}$$

과 같은 식에서 앞에서 구한 전하 감도를 가지고 구할 수 있다<sup>(1)</sup>.

표 3은 식 (28)의  $E_T$ ,  $E_S$  그리고 실험 가속도계 T-2의 전하감도와 식 (29)에서 구한 전압 감도 및  $Ca$ ,  $Cc$ 의 값을 나타내었다.

그리고 그림 10과 그림 11은 각 실험 가속도계의 주파수에 따른 전달 함수의 특성을 도시

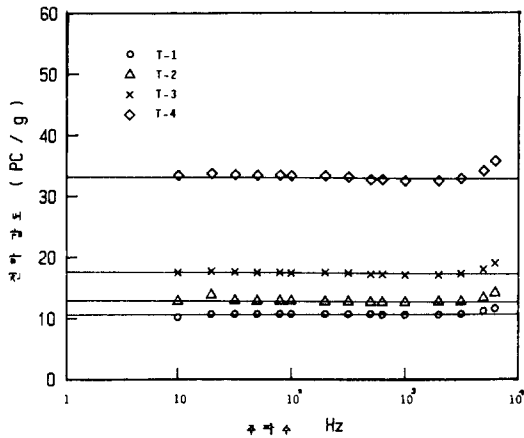


그림 10 실험 가속도계들의 전달 함수 특성

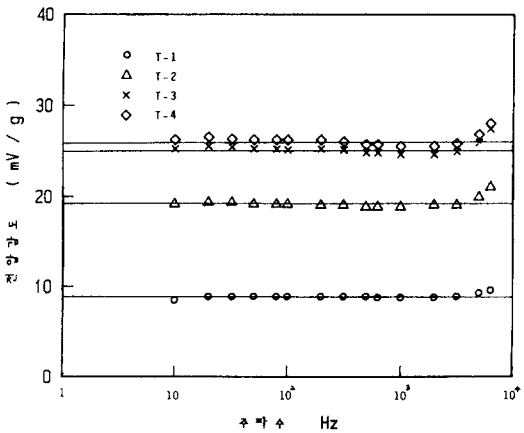


그림 11 실험 가속도계들의 전달 함수 특성

한 것이다.

실험 가속도계의 선형성은 기준 주파수 100 Hz에 대하여 가진 레벨을 0.1g에서 2g까지 0.1g씩 증가시켜 가면서 가진 레벨에 따른 실험 가속도계 출력 전압의 선형성을 실험하였다.

그림 12는 각 실험 가속도계의 선형성을 도

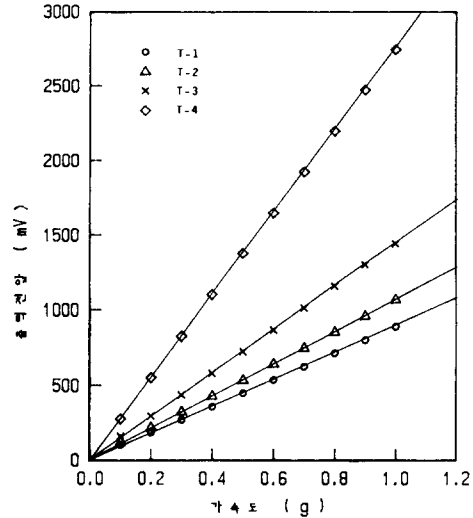


그림 12 100Hz기준 주파수에서의 실험 가속도계 선형 특성

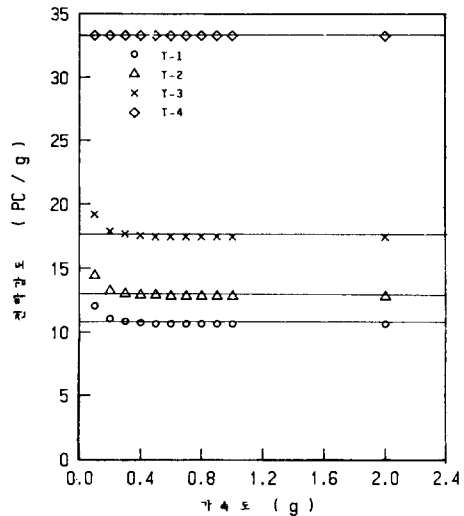


그림 13 100Hz기준 주파수에서 감도 대 가속도 관계

시한 것이고 그림 13은 100Hz의 기준 주파수에 대하여 가진 레벨에 따른 전달 함수 특성을 도시한 것이다.

(2) 중력식 보정 방법

그림 14는 중력식 보정 실험계의 전체 실험 구성도를 나타낸 것이며 이러한 중력식 보정 방법은 뉴우톤의 제2운동 법칙인

$$F = ma$$

$$= mg\left(\frac{a}{g}\right) \quad (30)$$

을 이용한 것으로 실험 질량(실험 가속도계 + 추)m의 자중에 의한 힘은

$$F_{mg} = mg = \frac{E_{mg}}{S_f} \quad (31)$$

이며 여기서  $E_{mg}$ 는 실험 질량을 하중 센서에 정적인 상태로 두었다가 재빨리 제거해 버리면 그림 15(a)와 같은 시간대 출력 전압 곡선에서 구할 수 있다. 다음에 실험 질량을 임의의 높이에서 하중 센서위로 떨어뜨렸을 때의 충격력은

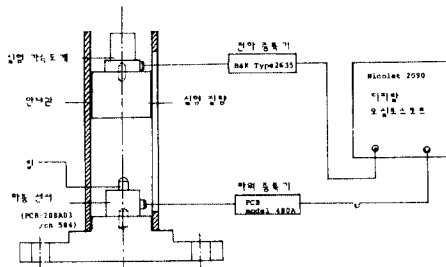
$$F = \frac{E_f}{S_f} \quad (32)$$

이다. 따라서 식 (30), (31), (32)에서

$$\frac{E_f}{S_f} = mg\left(\frac{a}{g}\right) = \frac{E_{mg}}{S_f}\left(\frac{a}{g}\right)$$

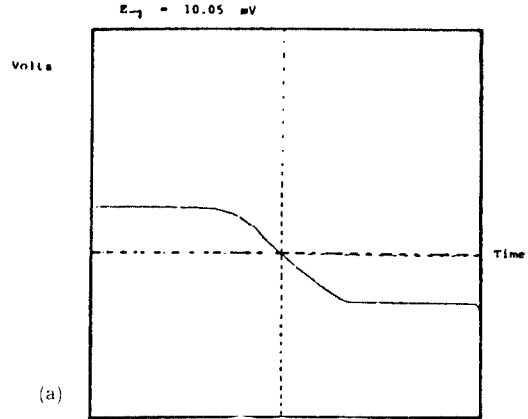
따라서

$$\frac{a}{g} = \frac{E_f}{E_{mg}} \quad (33)$$

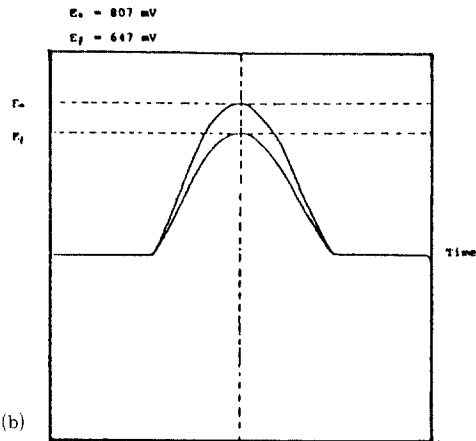


팁 : 플라스틱

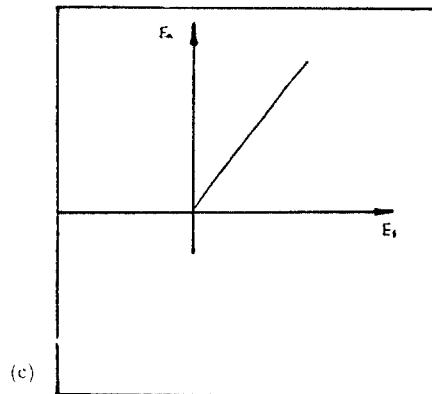
그림 14 중력식 보정계



(a)



(b)



(c)

- (a) 실험 질량+실험 가속도계를 갑자기 들어올릴 때 얻은 출력 전압
- (b) 충격시 얻은 출력 전압
- (c) 선형성(가속도 대 힘)

그림 15 실험 가속도계 T-4에 대한 중력식 보정 결과

또한 중력당 가속도에 대한 출력 전압을 가속도계의 감도로 했을 때

$$S_a = \frac{E_a}{(a/g)} \quad (34)$$

이며 따라서 가속도계의 감도는 식 (33)과 (34)로부터

$$S_a = E_{mg} \frac{E_a}{E_f} \quad (35)$$

이다.

위의 식 (35)식에서 볼 수 있듯이 하중 센서의 감도를 몰라도 실험 속도계의 감도를 구할 수 있으며 식 (28)과 (35)를 비교해 볼 때 중력식 보정 방법은 비교 보정 방법과 유사한 보정 방법이며 중력식 보정 방법으로도 비교 보

정 방법으로 구한 결과만큼 정확한 보정 결과를 얻을 수 있다.

그림 14의 중력식 보정 실험 장치에서와 같이 식 (35)에서 구한 전압 감도는 실험 가속도계와 연결되는 케이블선 뿐만 아니라 예 증폭기까지 포함한 전압 감도이므로 비교 보정 실험 결과의 케이블선을 포함한 실험 가속도계의 전하 감도와 비교하기 위하여 예 증폭기의 영향을 뺀 전하 감도를

$$S = S_a \frac{S_{setting}}{G} \quad (36)$$

여기서

- S : 케이블선을 포함한 실험 가속도계의 전하 감도
- S<sub>a</sub> : 케이블선과 예 증폭기를 포함한 실험 가속도계의 전압 감도
- S<sub>setting</sub> : 예 증폭기에 설정된 전하 감도
- G : 예 증폭기에 설정된 게인(gain)

에서 구하여 표 4에 나타내었다.

중력식 보정 결과인 그림 15(a)에서 E<sub>mg</sub> 전압을 알 수 있고 (c)에서의 기울기가 바로 (b)에서

표 4 중력식 보정 방법에 의한 보정 결과

실험 가속도계	전하 감도 (PC/g) S(평균)	오차(%) (출력값-평균) /평균×100
T-1	9.36	5.9
T-2	11.91	2.4
T-3	16.59	4.5
T-4	32.20	2.8

팁종류	가속도계	전하 감도(PC/g)									
		실험 횟수									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
고 부	T-1	9.91	9.81	9.91	9.91	9.81	9.81	9.91	9.71	9.81	9.81
	T-2	12.0	12.0	12.0	11.8	12.0	12.0	12.0	12.0	11.8	12.0
	T-3	16.7	16.7	16.7	16.7	16.4	16.5	16.7	16.4	16.4	16.5
	T-4	33.3	32.8	33.0	33.2	33.2	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1
플라스틱	T-1	9.41	9.12	9.12	9.02	9.02	8.82	9.12	8.32	9.02	9.12
	T-2	11.6	11.6	11.6	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
	T-3	16.2	16.2	16.4	16.0	16.2	16.2	16.1	16.1	16.1	16.1
	T-4	31.6	31.7	31.5	31.5	31.6	31.9	31.9	31.5	31.8	31.9
강 철	T-1	9.32	9.22	9.32	9.02	9.32	9.12	8.72	9.41	9.61	9.32
	T-2	12.2	12.1	12.2	12.1	12.0	12.2	11.9	12.1	12.0	12.2
	T-3	16.7	17.0	17.3	16.9	16.7	17.0	17.2	17.3	17.3	17.1
	T-4	32.0	31.4	31.4	32.9	31.8	31.4	31.2	31.5	31.5	31.6

의  $E_a/E_f$ 이므로 식 (35)를 이용한 중력식 보정 실험에 의하여 쉽게 가속도계의 성능을 파악할 수 있다. 본 실험에서는 팁(tip)의 종류를 강철, 플라스틱 그리고 고무를 각각 사용하여 강철은 수 kHz에서의 실험 가속도계 특성을 그리고 고무는 수 Hz에서의 가속도계 특성을 실험하기 위하여 사용하였으며 높이를 달리 하여 각 팁에 대하여 10번씩 실험하여 가속도계의 선형성을 실험하였다. 표 4는 이들 실험 결과들을 나타낸 것이다.

#### 4.2 실험 결과의 고찰

##### (1) 비교 보정 방법에 대한 고찰

본 연구의 설계 이론에 의하여 설계, 제작된 실험 가속도계의 전하 감도를 살펴보면 T-1의 보정 결과에서 실제 이론에 의한 설계값은 13.9PC/g이었는데 보정의 결과는 10.67PC/g로 약 3PC/g 정도가 낮으며 T-1과 같은 설계 감도를 갖는 T-2의 보정 결과는 12.97PC/g으로 약 1PC/g 정도가 낮게 나타났다. 이는 원하는 감도의 압전형 가속도계를 설계하려고 할 때 식 (23)에서의 관성 질량의 무게뿐만 아니라 압전 소자의 두께도 고려하여 설계하여야 한다는 것을 의미한다. 즉 압전 소자의 두께 방향의 변형량이 실제로 압전소자의 두께에 따라서 달라지므로 본 실험에서 단일 압축식 압전형 가속도계를 설계하기 위하여서는 압전 소자의 두께를 1mm보다 2mm로 하는 것이 실제 설계값에 가까운 가속도계를 설계할 수가 있다.

압전소자의 두께는 2mm로 같고 관성 질량의 두께가 5mm, 7mm로 각각 다른 실험 가속도계 T-2와 T-3의 보정 결과를 보면 관성 질량의 무게에 따라서 원하는 감도의 가속도계를 설계할 수 있음을 알 수가 있다. 그리고 이중 압축식 압전형 가속도계의 보정 결과를 보면 전하 감도가 33.35PC/g으로 나타나 실제 설계값 27.8PC/g보다 약 6PC/g정도 높게 나타났으며 이러한 원인은 압전 소자 사이의 얇은 금속판(brass)과 납땀한 납의 무게가 더하여져 관성 질량의 무게가 무거워짐으로서 전하 감도가 실

제 설계값보다 높아진 것으로 보인다.

실험 가속도계의 주파수에 따른 전달 함수의 특성을 보면 압전소자의 두께가 가장 작은 T-1의 경우가 고주파에서의 특성이 아주 좋으며 이중 압축식의 T-4가 감도가 높은 반면 고주파에서의 특성이 좋지않다. 실험한 비교 보정의 결과에서 대체로 7kHz이상의 높은 주파수에서 응답 특성이 좋지않은 원인을 살펴보면, (가) 가진기의 최대 가진 주파수가 10kHz미만이다. (나) 표준 가속도계와 실험 가속도계를 스티드를 이용하여 서로 결합시킬 때 실제로 완전한 강제로 결합시키기 어렵기 때문에 높은 주파수의 진동에서 이러한 결합의 영향이 나타난다<sup>(10)</sup>.

(다) 높은 주파수에서는 케이블선의 진동으로 인한 잡음이 보정에 영향을 끼친다.

등이다. 실제로 위와 같은 원인으로 인하여 비교 보정 방법으로 압전형가속도계를 보정할 때에는 7kHz이상에서의 보정은 일반적으로 하지 않고 레이저 간섭계(laser interferometer)를 이용한 절대 보정 방법을 사용하여야 한다<sup>(11)</sup>.

실험 가속도계의 선형성에 대한 실험 결과를 보면 단일 압축식의 경우에는 모두 0.2g이하의 낮은 가진 레벨에서 특성이 좋지 않다. 이러한 원인을 살펴보면

- (가) 전체 보정 실험 장치가 주위 전원으로부터 야기되는 60Hz주파수 잡음의 영향을 많이 받아 가속도계 출력 신호에 영향을 미친다. 본 실험에서 1g는 100mV에 해당하며 60Hz의 영향을 보면 T-1 : 4.96mV, T-2 : 5.64mV, T-3 : 7.01mV, T-4 : 2.32mV이다.  
(나) 기타실험 장치 자체 잡음의 전체합을 보면 T-1 : 0.13mV, T-2 : 0.16, T-3 : 0.16mV, T-4 : 0.13mV이다.

따라서 낮은 가진 레벨에서는 60Hz주위 전원의 노이즈가 크게 작용하므로 하우징과 베이스의 설계에 있어서 압전 소자를 주위로부터 완전히 절연(isolation)시킬 수 있도록 설계하여야 한다. 그러나 높은 감도를 갖는 이중 압축식의 경우를 보면 주위 노이즈의 영향을 무

시할 수가 있어 0.1g이하의 낮은 가진 레벨에서도 선형성이 아주 뛰어나다.

(2) 중력식 보정 방법에 대한 고찰

중력식 보정방법에 의하여 구한 표 4의 실험 가속도계 각각의 전하 감도를 보면 9.36PC/g, 11.91PC/g, 16.59PC/g, 32.2PC/g으로 실험 가속도계 모두가 비교 보정 방법에 의하여 구한 전하 강도보다 약 0.5에서 1.0picocoulomb정도 낮게 나타나며 팁의 종류에 따라서 감도의 차이가 조금씩 나타나며 이러한 원인들은 대부분 실험 적인 오차가 많이 작용한 것으로 생각된다. 이러한 실험적인 오차의 원인을 살펴보면

- (가)  $E_{mg}$  전압을 측정할 때 실험 질량을 들어 올리는 속도에 따라서 측정값이 조금씩 변한다. 이러한 변화량들은 감도에 큰 영향을 끼친다.
- (나)  $E_a/E_f$  전압을 측정할 때 강철 팁을 사용하는 경우에는 측정된  $E_a$ 대  $E_f$  전압이 정확하게 서로 선형이 되도록 낙하 높이를 조절하기가 힘들다.
- (다) 실험 질량이 낙하하는 동안에 안내관의 벽면에 부딪혀 힘 변환기에 정확한 충격을 주지 못한다.

그러나 이러한 중력식 보정에 의한 실험 결과는 비교 보정에 의한 정확성만큼 거의 같은 보정 결과를 얻을 수 있으며 그림 15(a)에서 볼 수 있듯이 낙하 높이를 달리하면서 가속도계의 선형성을 실험한 결과에서 T-1의 경우에는 127g, T-2는 68g, T-3는 101g, T-4는 112g까지의 가진 레벨에서도 실험 가속계는 선형 특성이 뛰어난을 알 수가 있다.

그리고 T-2의 실험에서 관성 질량의 두께가 커지게되면 충격에 의한 가속도계의 출력 신호 특성은 좋지 않으며 따라서 관성 질량의 두께가 너무 커지지 않도록 원하는 감도의 가속도계를 설계하고자 할 때 직경과 두께의 적절한 상호 보완이 이루어져야 한다.

표 5는 비교 보정 방법과 중력식 보정 방법의 보정 결과를 설계값에 비추어 서로 비교한

표 5 전하 감도(PC/g)에 대한 보정 결과들의 비교

	T-1	T-2	T-3	T-4
설계값	13.90	13.90	19.50	27.80
비교보정방법 (오차%)	10.67 (4.4)	12.97 (2.1)	17.53 (2.5)	33.55 (2.5)
중력식보정방법 (오차%)	9.36 (5.9)	11.91 (2.4)	16.59 (4.5)	32.2 (2.8)

것이다. 표에서 알 수 있듯이 이 두가지 보정 방법에 의한 보정 결과에서 각 실험 가속도계는 상용 가속도계에서 허용하고 있는 허용 오차인 5%이내의 오차를 갖는 뛰어난 성능 특성을 보여주고 있다.

그리고 표 5에서 중력식 보정 방법은 T-1, 2, 3, 4모두가 비교 보정방법에 의한 결과와 비교하여 거의 1PC/g만큼 차이가 나며 이러한 보정의 결과를 확인하기 위하여 T-1, 2, 3, 4와 각각 똑같은 설계 조건에서 T-5, 6, 7, 8의 또 다른 가속도계를 제작하여 거듭 실험한 결과에서 T-5의 경우에는 제작 과정에서 압전 소자와 관성 질량 그리고 베이스들 간의 결합시에 너무 강한 면압을 가한 영향으로 압전 소자가 압전 효과를 잃어버려 성능 실험을 하지 못하였으나 다른 가속도계들의 전하 감도를 살펴보면 표 6에서 T-6의 경우는 12.66PC/g으로 T-2의 비교 보정 방법에 의한 표 5의 12.97PC/g의 결과와 비교해서 0.31PC/g의 차이가 나며 T-7의 경우는 17.04PC/g으로 T-3와 비교하면 0.49PC/g의 차이로 아주 유사함을 알 수가 있다. T-8를 보면 27.57PC/g으로 설계값에 거의 가까운 감도특성을 보여 주었다.

그리고 표 6에서 T-9, 11, 15와 T-2, 6, 12, 13, 16 그리고 T-3, 7, 10, 14, 20를 각각 비교해보면 같은 설계 감도를 갖더라도 압전 소자의 두께가 두꺼운 것이 얇은것 보다 감도가 설계치에 가까운 것을 알 수가 있다.

그리고 T-25의 경우는 제작시에 지그를 사용하지 않은 이유로 접촉층의 두께가 두꺼워져

표 6 중력식 보정 방법에 의한 실험 가속도계의 보정 결과

가속도계	적층	$Dp$ (mm)	$Ds$ (mm)	$t_p$ (mm)	$t_s$ (mm)	$S$ (PC/g)	$Sd$ (PC/g)
T-1	단일	10	10	1	5	9.36	13.9
T-2	단일	10	10	2	5	11.95	13.9
T-3	단일	10	10	2	7	16.59	19.5
T-4	이중	10	10	1	5	32.20	27.8
T-5	단일	10	10	1	5	—	13.9
T-6	단일	10	10	2	5	12.66	13.9
* T-7	단일	10	10	2	7	17.04	19.5
T-8	이중	10	10	1	5	27.57	27.8
* T-9	단일	10	10	1	3	6.95	8.4
T-10	단일	10	10	1	7	14.10	19.5
* T-11	단일	10	10	1.5	3	7.43	8.4
T-12	단일	10	10	1.5	5	11.92	13.9
* T-13	단일	10	10	1.5	5	10.46	13.9
T-14	단일	10	10	1.5	7	14.84	19.5
T-15	단일	10	10	2	3	7.53	8.4
* T-16	단일	10	10	2	5	12.29	13.9
T-17	이중	10	10	1.5	5	—	27.8
T-18	이중	10	10	2	5	—	27.8
T-19	이중	10	10	1.5	7	—	39.0
* T-20	단일	10	10	1.5	7	14.53	19.5
T-21	단일	15	15	2	3	—	—
T-22	단일	15	15	2	3	—	—
T-23	단일	15	15	3	3	—	—
T-24	단일	15	15	1	3	—	—
* T-25	단일	10	10	1.5	5	7.77	12.4

\* : 극성 반전

Sd : 설계값(전하 감도)

서 감도가 설계치보다 훨씬 떨어진 것으로 생각된다.

(3) 설계, 제작 결과에 대한 고찰

본 연구에서는 표 7에서의 T-25를 Vern-

iron사의 PZT-5A 압전 세라믹을 가지고 설계, 제작하여 한국표준 연구소에서 예비 성능 실험을 하였으나 접착층의 두께 문제로 인하여 전하 감도가 설계값보다 약 6PC/g만큼 낮게



표 7 실험 가속도계의 결함 분석

가속도계	압전 소자	베이스	접착제	진공 오븐	비 고
T-1, 2, 3, 4 6, 8, 10, 12 14, 15	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	시바 가이지사 에폭시	사 용	정 상
T-5	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	시바 가이지사 에폭시	사 용	극성 파손
T-7, 9, 11, 13, 16	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	시바 가이지사 에폭시	사 용	정상 (극성 반전)
T-17, 18	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	시바 가이지사 에폭시	사 용	도선 결함
T-19	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	비슨사 5분에폭시	사용 않음	관성 질량 탈락
T-20	대원웨이트사 M-type	스테인리스강	비슨사 5분에폭시	사용 않음	극성 반전
T-21, 22, 23, 24	대원웨이트사 R-type	듀랄루민	비슨사 5분에폭시	사용 않음	베이스변형 및 스터드구멍파손
T-25	VERITRON사 PZT-5A	스테인리스강	비슨사 5분에폭시	사용 않음	극성 반전

측정되었다.

이러한 접착층의 두께에 의한 성능 저하를 방지하기 위하여 압전 소자와 관성 질량 그리고 베이스간의 결합시에 지그를 이용하여 임의의 면압을 가하였으며 표 6에서의 T-19와 20를 제작하여 성능 특성 실험을 하였다. 여기서 T-19는 중력식 보정 실험도중에 몇 번의 낙하 충격에 의하여 실험 도중에 관성 질량이 탈락해 버리는 결함을 보여주었다. 이러한 현상은 구성 요소들간의 결합에 사용한 BISON사의 5분 에폭시가 빨리 굳고 단단한 접착 효과를 나타 내지만 충격에 약함을 보여 주었으며 그리고 에폭시 접착제의 레진과 경화제를 서로 섞게 되면 기포가 많이 일게되며 이러한 상태의 접착제를 사용하게 되면 충격 실험에서 접착면에 존재하는 기포의 영향이 나타나는 것을 생각된다.

위와같은 제작상의 조건들이 가속도계의 성

능에 미치는 영향들을 고려하여 본 연구에서는 가속도계의 구성 요소들간의 결합면에 유연성을 주고 또 기포의 영향을 없애며 접착층의 두께를 최대한 얇게하기 위하여 CIBA-GEIGY제품의 에폭시를 진공 오븐에서 완전히 기포를 제거한 양호한 에폭시로 만든 후에 구성 요소들 간의 결합에 이용한 결과 성능 특성 실험에서 뛰어난 접착효과와 감도특성을 보여주었다.

또한 가속도계의 구성 요소의 설계 중에서 베이스의 설계 문제와 관련한 예비 실험을 위하여 베이스의 재질을 듀랄루민으로 한 T-21, 22, 23, 24의 4가지 가속도계를 제작하여 실험한 결과 가속도계의 무게는 아주 줄어 들지만 베이스의 변형이 쉽게 발생하고 탭(tap)으로 되어 있는 스테드의 구멍이 쉽게 망가져버려 가속도계를 진동하는 계에 부착시키는데 문제가 발생하는 결함을 보여주었다. 이러한 베이스 변형에 의한 결함을 방지하기 위하여 본 연

표 8 성능 변수에 따른 실험 가속도계의 분류

형태	적층	설계치수				PZT 재료	에폭시 처리		베이스 재질	극성	Acc. #	S(PC/g)	Sd(PC/g)
		Dp	Ds	tp	ts		에폭시	진공오븐					
1	S	10	10	1	3	M	C	yes	S.S.	-	T-9	6.95	8.4
2	S	10	10	1	5	M	C	yes	S.S.	+	T-1	9.36	13.9
										+	T-5	-	
3	S	10	10	1	7	M	C	yes	S.S.	+	T-10	14.10	19.5
4	S	10	10	1.5	3	M	C	yes	S.S.	-	T-11	7.43	8.4
5	S	10	10	1.5	5	M	C	yes	S.S.	+	T-12	11.92	13.9
										-	T-13	10.46	
6	S	10	10	1.5	7	M	C	yes	S.S.	+	T-14	14.84	19.5
7	S	10	10	2	3	M	C	yes	S.S.	+	T-15	7.53	8.4
8	S	10	10	2	5	M	C	yes	S.S.	+	T-2	11.95	13.9
										+	T-6	12.66	
										-	T-16	12.29	
9	S	10	10	2	7	M	C	yes	S.S.	+	T-3	16.59	19.5
										-	T-7	17.04	
10	D	10	10	1	5	M	C	yes	S.S.	+	T-4	32.20	27.8
										-	T-8	27.57	
11	D	10	10	1.5	5	M	C	yes	S.S.	+	T-17	-	27.8
12	D	10	10	2	5	M	C	yes	S.S.	+	T-18	-	27.8
13	S	10	10	1.5	5	M	B	no	S.S.	-	T-20	14.53	19.5
14	D	10	10	1.5	7	M	B	no	S.S.	+	T-19	-	39.0
15	S	15	15	1	3	R	B	no	Du.	+	T-24	-	-
16	S	15	15	2	3	R	B	no	Du.	+	T-21	-	
										+	T-22	-	
17	S	15	15	3	3	R	B	no	Du.	+	T-23	-	-
18	S	10	10	1.5	5	PZT-5A	B	no	S.S.	-	T-25	7.77	12.4

S : 단일, D : 이중, M,R : 대원 웨라이트사, C : 시바 가이지 사

B : 비슨 사, S.S. : 스테인리스강, Du : 듀랄루민

구에서는 베이스의 재질을 무게는 무거우나 강성이 큰 스테인리스 강(stainless steel)을 사용하였다.

그리고 표 6의 T-7, 9, 11, 13, 16, 20, 25는 극성 반전(reversed polarity)의 결합을 보여 주는데 이러한 극성 반전의 결합은 제작상의 실수로 인한 결합으로 가속도계 자체의 결합 문제로서는 별로 중요하지 않는 결합이다.

T-5는 압전 세라믹이 압전성을 잃어버린 결합을 보여 주는데 이러한 원인은 가속도계의 구성 요소들간의 결합시에 너무 강한 면압을 가하므로서 일어난 가속도계의 결합이다. 압전 소자에 너무 강한 면압을 가하게 되면 압전 효과의 감소가 일어난다<sup>(14)</sup>.

표 8은 표 6의 전체 가속도계를 가속도계의 성능을 좌우하는 변수에 따라서 type-1에서 type-18까지 18가지형의 가속도계로 분류하여 도시한 것이다.

## 5. 맺 음 말

본 연구를 통하여 원하는 감도와 부착 공진 주파수가 주어질 때 실제로 이러한 성능을 갖는 압축식 압전형의 가속도계를 이론적으로 설계하여 제작할 수 있었으며 보정 실험을 통하여 실험 가속도계는 실제 설계값에 가까운 성능을 나타내었다. 설계, 제작된 실험 가속도계의 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 식 (23)에서와 같이 가속도계의 감도는 압전 소자의 압전 상수가 일정할 때 관성 질량에 따라서만 지배되는 것이 아니라 압전 소자의 크기에 따라서도 달라진다.
- (2) 높은 감도의 가속도계를 설계하기 위해서는 단일 압축식의 설계보다는 이중 압축식의 설계를 행하는 것이 바람직하며 감도가 큰 가속도계 일수록 0.1g 이하의 낮은 가진 레벨에서의 특성도 아주 좋다.
- (3) 높은 주파수에서의 특성이 좋은 가속도계를 설계하기 위하여서는 단일 압축식으로 설계

하는 것이 좋으며 압전 소자의 두께는 얇은 것이 좋다.

(4) 압전 소자와 관성 질량의 접촉시에 전도성 접착제를 사용하지 않아도 기포를 제거한 양호한 에폭시계통의 접착제를 사용하여 접착층의 두께를 최대한 얇게하면 설계값에 가까운 감도를 가진 가속도계를 제작할 수가 있다.

## 후 기

본 연구의 수행에 도움을 주신 한국 에너지 연구소 장치 공학 연구실과 비파괴 연구실, 한국 표준 연구소 음향 연구실 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifier Handbook, Bruel & Kjaer, October, 1986.
- (2) 이재갑, 1988, '스트레인 게이지를 이용한 가속도계의 설계, 제작 및 보정에 관한 연구', 한국 과학 기술원.
- (3) 박창엽, 1987, 압전 세라믹스, 김영 출판사.
- (4) "Electronic Components and Piezo Ceramics by Venitron. 45 years of innovation", Venitron Piezoelectric Division
- (5) "Modern Piezoelectric Ceramics", Venitron
- (6) Meitzler A.H., 1978, "IEEE Standard on Piezoelectricity", ANSI/IEEE Std 176.
- (7) Mason W.P, 1981, "Piezoelectricity, its History and Application", J. Acoust. Soc. Am. 70(6), Dec.
- (8) Berlincourt D., 1981, "Piezoelectric Ceramics; Characteristics and Applications", J. Acoust. Soc. Am. 70(6), Dec.
- (9) Bever M.B., 1986, Encyclopedia of Materials Science and Engineering, Pergamon Press, MIT Press, Vol. 5, pp. 3524~3528.
- (10) Lovell, M.C. Avery, A.J. and Vernon, M.W., 1976, Physical Properties of Materials, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 153~184.
- (11) Harris, C.M. and Crede, C.E., 1961, Shock

- and Vibration Handbook, McGraw Hill book company.
- (12) Walter, P. L., 1988 "Erroneous Modal-Analysis Data due to Accelerometer Base Strain", Experimental Techniques, March, pp. 18~19.
- (13) Licht, T.R., Andersen, H. and Jensen, H.B., 1987, "Recent Developments in Accelerometer Design Trends in Accelerometer Calibration", Bruel & Kjaer, Technical Review, No. 2.
- (14) "Piezoelectric Transducer Failure Modes and Effects", Endevco corporation, TP 235, may, 1966.
- (15) Anspach, R.B., "Comparison Shock Motion Calibration", Endevco corporation, TP 240.
- (16) Strathopoulos, G., 1962, "Effects of Mounting on Accelerometer Response" Electronic Industries, May.
- (17) 구경희, 1989, '압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정', 한국과학기술원 기계공학과.



국제 학술대회 참가 안내

**COMODIA'90**

**—International Symposium on Diagnostics and Modelling of  
Combustion in Internal Combustion Engines—**

- 주 관 : The Japan Society of Mechanical Engineers  
The Society of Automotive Engineers of Japan  
The Marine Engineering Society in Japan
- 분 야 : Diagnostics and Modeling of Fluid Mechanics and Combustion-Related Processes in Internal Combustion Engines
- 일 시 : 1990년 9월 3일~5일 (3일간)
- 장 소 : Kyoto Park Hotel, Kyoto, Japan
- 일 정 : 1989년 11월 30일 : 500단어 내외 영문초록 제출  
1990년 1월 10일 : 채택여부 통보  
1990년 3월 1일 : 논문제출 마감  
1990년 6월 30일 : 심포지움 예비 등록
- 연락처 : Prof. Makoto Ikegami  
Department of Mechanical Engineering  
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan  
TEL : (075)753-5248, FAX : (075)771-7286, Telex : 5423115 ENG KU J