

마이크로 가속도계의
신호 검출 회로 설계 및 성능시험

성운탁 이장규 강태삼 송진우 성상경

*서울대 전기공학부 자동제어특화연구센터, (주)마이크로인피니티 **호서대 정보제어공학과

Detection Circuit Design and Performance Test of
Gimbal-Structured Micro-Accelerometer

W.T. Sung J.G. Lee T. Kang J.W. Song S.K. Sung

*ACRC, SoEE, Seoul National University, MicroInfinity co., Ltd., **SoEE, Hoseo University

Abstract - 본 논문에서는 MEMS 기술에 의해 제작된 마이크로 가속도계를 위한 신호 검출 및 처리회로를 설계 제작하였으며, 레이트 테이블을 이용한 실험을 통해 제작된 센서 및 신호처리회로의 성능을 시험하였다. 본 논문에서 제시한 가속도계는 입력 가속도에 따라 용량이 변하는 방식으로, 두개의 김블 구조를 가지므로 타측 입력 가속도의 영향을 적게 받는 장점이 있다. 또한 감지전극의 효과적 배치를 통해 감도가 커지도록 설계되었다. 신호검출 및 처리는 여기 신호를 이용한 차분 검출방식을 이용하였다. 이 방식은 구성이 복잡한 단점이 있으나, 잡음 신호와 검출 신호를 주파수 영역에서 분리시킬 수 있으며, 기생용량의 영향을 감소시키고 전기적 감도를 증가시키는 장점이 있다. 실험을 통해 제시한 신호검출 및 처리방식을 이용할 경우 가속도계의 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

부 가속도가 인가되었을 때 발생하는 질량체의 변위에 의한 정전용량을 검출하는 것이다. 그림1에서 보는 바와 같이 스프링1에 의해 외부 김블이 앵커에 고정되어 있고 스프링2에 의해 질량체가 외부 김블과 연결이 되어 있다.

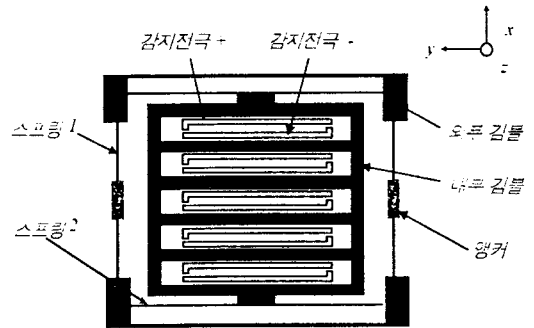


그림 1. 마이크로 가속도계의 구조

x축으로의 가속도 입력이 들어왔을 경우, 관성 질량체는 스프링2에 의해 x축 방향으로 변위가 생긴다. 이때 질량체와 감지전극 간의 간극이 변하게 되어 이에 따른 용량(capacitance)의 변화가 생기게 된다. 이 용량 변화를 검출하면 인가된 가속도의 크기를 측정할 수가 있게 된다. 가속도 입력이 y축으로 인가되었을 경우는, 스프링 1에 의해 외부 김블 및 이와 연결된 질량체가 y축 방향으로 움직이게 되지만 질량체와 감지전극 간의 변위는 없게 된다. 즉 타측 입력에 대해서는 영향을 받지 않도록 설계되었다.

감지전극은 감도를 높이기 위해 두 개로 구성된 전극 쌍이 질량체 사이에 효과적으로 배치되어 있다. 위의 그림에서 감지전극을 둘러싸고 있는 질량체가 x방향으로 움직일 경우 질량체와 감지전극+ 사이의 간격은 증가하고 감지전극- 사이의 간격은 감소하게 된다. 이를 차분으로 검출할 경우 감도를 증가시키는 효과와 함께, 적은 변위에 대해 비교적 큰 검출신호를 얻을 수 있으므로 마이크로 가속도계와 같은 미소 변위를 검출하는 MEMS 구조물에 효과적이다.

이러한 차분에 의한 미소변위 검출은 전기적인 용량 변화 측정을 통해서 이루어지므로 입력력의 선형성을 보장할 수 있는 장점이 있다. 즉 변위-용량변화는 원래 비선형의 관계식이 성립하는데 미소 변위에 대해서는 선형적인 응답을 얻을 수 있으므로 미소 변위를 검출할 수 있는 이러한 차분방식이 유리하다.

1. 서 론

마이크로 가속도계는 MEMS(Micro Electromechanical System)기술을 이용하여 제작하는 관성 센서로서 소형화, 경량화, 저전력 사용, 저가의 생산 등의 장점을 지니고 있다. 또한 기존의 일반적인 기계식 가속도계의 경우 제작 공정이 복잡하여 대량생산이 불가능한 반면, 마이크로 머시닝 기법으로 미소 구조물을 제작하는 MEMS 기술을 사용하면 이를 보완할 수 있으므로 현재 서울대를 비롯하여 많은 기관에서 활발히 연구가 진행되고 있다. [2,3] 특히 MEMS 기술로 제작되는 센서는 소형의 구조물을 대량 생산할 수 있는 것 외에 신호 검출 회로와 같은 주변의 회로를 하나의 칩 안에 집적화시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 마이크로 가속도계는 90년대 이후로 연구가 활발하며 검출 원리에 따라 크게 펜듈러스 타입의 변위 검출형[4-6]과 공진형[1,7-8]으로 나눌 수 있다.

본 논문에서 실험한 마이크로 가속도계는 수평의 가속도 입력에 대한 변위를 검출하는 방식으로, 두 개의 김블 구조로 되어 있어 타측에 의한 영향을 받지 않도록 설계되었다. 이러한 구조는 동일한 성능지수를 갖는 2축의 가속도계를 하나의 구조물에 제작할 수 있게 하는 잇점도 있다. 본 논문에서는 이에 앞서 1축 가속도를 측정할 수 있는 회로를 설계, 제작하였다.

가속도의 크기를 측정하기 위해서는 질량체와 감지전극간의 용량의 변화를 검출하게 되는데, 여기서는 외부 잡음에 의한 영향을 감소시키고 전기적 감도를 증가시킬 수 있는 캐리어를 이용한 방식을 사용하였다. 이러한 방식은 신호 검출부에 추가적인 회로 구성을 필요로 하므로 회로가 복잡해지는 단점이 있지만 캐리어를 이용하지 않을 경우에 비해 그 효과는 매우 크다.

2. 본 론

2.1 마이크로 가속도계의 구조 및 동작 원리

마이크로 가속도계의 동작 원리는 고정된 질량체에 의

2.2 신호 검출 회로 설계

가속도 입력에 의한 변위를 전기적 출력 신호로 얻기 위해 앞서 언급한 용량 검출 방식으로 신호 검출 회로를 설계하였다. 제작된 회로는 정현파 발진회로, 전하적분

회로, 증폭회로, 복조회로, 필터회로 등 아날로그 신호 처리 회로로 구성되었다. 마이크로 가속도계와 신호검출 회로를 하나의 PCB기판 위에 집적화시켜 제작과 측정이 용이하도록 설계하였다.

2.2.1 신호 검출 원리

설계된 신호 검출 회로는 외부 가속도에 따른 질량체와 감지 전극간의 변위에 의한 용량의 변화량을 검출하기 위한 회로이다.

외부 가속도 F 가 가속도계에 가해졌을 때 질량체의 변위 방정식은 다음과 같은 2차 미분방정식을 따른다.

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F$$

여기서 M 은 관성질량체의 질량, C 는 공기 저항에 의한 댐핑 계수, K 는 감를 지지하는 스프링의 상수이다. 위 2차 미분방정식의 해는 F 가 시스템의 대역폭 내의 낮은 주파수의 입력이라고 가정하고, x 의 과도응답을 고려하지 않는 정상상태 응답(steady-state response)으로 가정했을 때 근사적으로 $x = F/K$ 와 같은 선형식으로 나타낼 수 있다.

변위 x 에 의해 감지전극과 질량체 사이의 용량의 변화가 생기게 되는데 이때의 용량의 변화는 변위량에 대해 수식적으로는 선형적인 관계가 성립하지 않으나 본 실험에서 측정하고자하는 가속도 범위 내에서는 변위량이 미소하므로 선형적인 관계를 유지하게 된다. 간극의 변위에 대한 용량의 변화를 수식으로 나타내면 미소 변위에 대해 다음과 같은 근사적인 선형관계가 성립된다.

$$\Delta C = \epsilon_0 N \frac{l}{g} \Delta x$$

여기에서 ϵ_0 는 공기의 유전율, N 은 감지전극의 수, l 은 전극의 길이, g 는 전극과 질량체 사이의 초기 간극, Δx 는 간극의 변위를 나타낸다.

질량체와 감지전극 간의 간극의 변위에 의해 생긴 이러한 용량의 변화는 질량체에 연결된 전극에 변위에 비례하는 출력 신호를 내는데 이 신호를 감지하면 외부 가속도 입력을 유추할 수 있게 된다.

그림2에서와 같이 감지전극 양단에 반전된 정현파의 캐리어 신호를 가한다. 이때 외부 가속도에 의한 질량체의 움직임에 따라 감지전극과 질량체 양단의 용량에 변화에 따른 전기적인 출력 신호가 발생하게 된다. 이때의 출력 신호는 그림에서와 같이 용량의 변화량에 선형적인 수식 관계가 성립하게 된다. 결과적으로 질량체에 연결된 감지전극의 신호는 가속도-변위-용량변화-검출전위변화로 이어지는 관계에 따라 출력되므로 이 신호를 적절히 처리하면 외부 입력 가속도에 선형적인 출력값을 구할 수 있다.

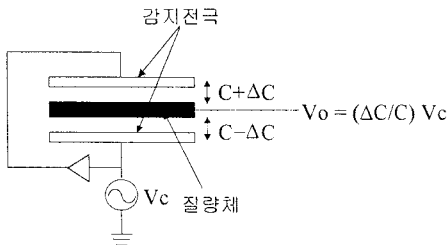


그림 2. 변위 신호의 검출 원리

이때 질량체 전극에서 출력되는 값은 단순한 용량의 변화량이 아닌 기준 용량에 대한 용량의 변화량의 비로 나타내게 되므로 적은 용량 변화에 대해 비교적 큰 값을

얻을 수 있는 잇점이 있다.

한편, 여기에서 감지전극에 가해지는 캐리어 신호가 정현파 신호이므로 출력단에서의 신호는 그림에서 보는 바와 같이 입력 가속도 신호가 캐리어 신호에 곱해진, 즉 변조된 형태이므로 원래의 가속도신호를 얻기 위해서는 복조 과정을 거쳐야 한다.

2.2.2 신호 검출 회로 구성

그림3에서는 전체 신호 검출 회로의 개략적인 개념도를 나타내었다. 감지전극 양단에 반전된 캐리어 신호를 가하고, 질량체에 연결된 전극으로부터 출력 신호를 얻는다. 이 신호는 charge amp를 이용한 전하 적분 방식을 통해 전압 출력으로 얻을 수 있다. 이러한 전하 적분 방식의 검출회로는 매우 큰 이득 증폭율을 얻을 수 있음과 동시에 신호 대 잡음비가 좋아 작은 변위 신호를 검출하는데 유리하다.

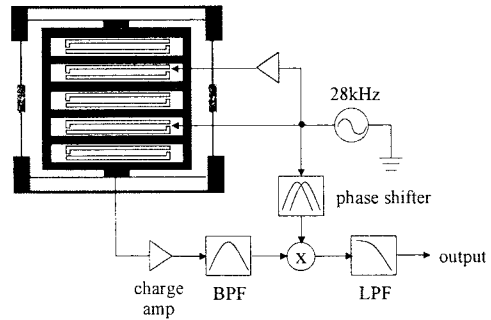


그림 3. 신호 검출 회로 개념도

출력된 신호는 캐리어 주파수에 외부 가속도 신호가 변조된 형태이므로 원래의 가속도 신호를 얻기 위해서는 복조과정을 거쳐야 한다. 전하 적분 회로와 증폭단을 거친 pick-off 신호는 먼저 저주파 전원 노이즈 및 고주파 잡음을 제거하기 위해 캐리어 주파수를 중심 주파수로 하는 대역 통과 필터를 거치게 된다. 그 다음, 복조 기준 신호인 캐리어 신호를 위상 조정을 거쳐 곱셈기를 통과하게 되면 입력된 가속도의 주파수 신호와 두 배의 캐리어 주파수 신호로 분리가 된다. 이 신호를 저역 통과 필터를 통과시키면 최종 가속도 신호를 얻게 된다.

그림4는 이러한 방식을 이용하여 제작된 신호 검출 회로를 나타내었다.

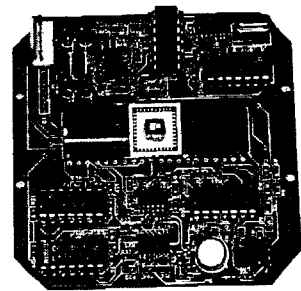


그림 4. 제작된 신호 검출 회로

2.2.3 성능 실험 결과

마이크로 가속도계와 제작한 신호 검출 회로에 대한 성능 평가를 위해 가속도 인가 실험을 하였다.

레이트 테이블 위에 가속도계를 장착한 다음, 검출측

방향과 중력방향을 일치시켜 -90° 에서 90° 까지 10° 간격으로 회전을 가하여 $-1G$ 에서 $1G$ 사이의 가속도를 단계별로 인가하였다. 동일한 실험을 수 차례 반복 실시하여 그 결과를 종합하였다. 실험 결과는 그림5에 나타난 바와 같다.

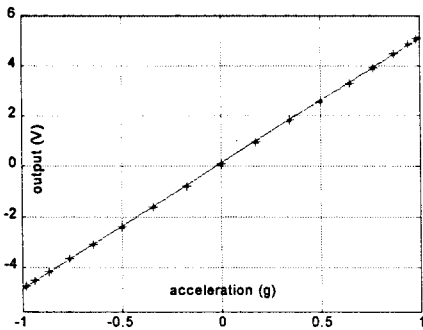


그림 5. 가속도 인가실험 결과

실험 결과에서 보듯이 $\pm 1G$ 범위 내에서 선형적인 출력 특성을 가지며 $4.97 V/g$ 의 감도를 나타내었다. 측정된 잡음의 표준편차는 $5.5 mV$ 이므로 분해능은 $1.1mG$ 임을 알 수 있다. 실험한 결과를 종합하여 표1에 나타내었다.

표 1. 성능 실험 결과

Performances	
Sensitivity	4.97 V/G
Resolution	1.1 mG
Non-linearity	0.36 %

3. 결 론

본 논문에서는 마이크로 가속도계를 위한 신호 검출 회로를 설계, 제작하였으며 이를 이용한 가속도 인가실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

마이크로 가속도계는 MEMS 기술을 이용하여 제작된 기기로서 소형화, 저가의 대량생산이 가능한 장점을 가지고 있어 앞으로의 많은 수요가 예상되는 센서이다. 동작 범위와 분해능, 대역폭 등의 한계로 인해 고수준의 센서로서는 제약을 받고 있지만 현재 활발히 연구되고 있는 MEMS 기술과 신호 처리 기술의 향상으로 중급의 항법센서 및 민수용으로 다양하게 응용될 수 있는 센서로서의 개발 가능성을 가지고 있다.

본 연구에서 수행한 캐리어를 이용한 신호 검출의 경우 감도가 크게 향상되고 잡음이 효과적으로 제거가 됨을 확인할 수 있었다. 실험을 통해서 본 결과, $4.97 V/G$ 의 감도와 $1.1mG$ 의 분해능을 가지는 성능을 나타내었다. 또한 $\pm 1G$ 의 범위내에서 선형적으로 동작함을 확인할 수 있으므로 낮은 동작범위에서 좋은 성능을 갖는 센서로 활용이 될 수 있다.

기타 사양에 대한 추가적인 성능 검증과 회로 개선을 통해 높은 수준의 센서로서 개발할 수 있는 가능성을 보이고 있으며 회로소자의 소형화 및 집적화를 통해 더욱 경량화된 저전력 소비의 센서를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소와 서울대학교 자동제어특화 연구센터의 지원과 주식회사 마이크로인피니티의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Trey A. Rossig, et al., "Surface-Micromachined Resonant Accelerometer," International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers 97), pp.869-862
- [2] J. G. Lee, Research on the micro gyroscope and accelerometer for inertial navigation system, Seoul Natoinal University, 2000.
- [3] Jin Woo Song, Jang Gyu Lee, Taesam Kang, Sangkyung Sung, "Design and performance test of an in-plane gimbaled silicon gyroscope," ibid, pp 339-345, 2000
- [4] B. Wenk, M. Fehrenbach and W. Riethmuller, "Thick poly silicon surface micromachined capacitive accelerometer with force feedback operation," SPIE Vol. 2642, pp.84-94
- [5] K. H. Chau, S. R. Lewis and R. T. Howe, "An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications, International Conference on S.S sensors and actuators," pp. 593-596, Stockholm, June 25-29, 1995
- [6] Karl J. Ma, Navid Yazdi and Khalil Najafi, "A Bulk Capacitive Micro Accelerometer With Built-in Overrange and Force Feedback Electrodes," Center for integrated sensors and circuits, Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI, 48109-2122
- [7] B. L. Norling, "Superflex: a synergitic combination of vibrating beam and quartz flexure accelerometer, Journal of the Institute of Navigation, Vol.34, No.4, 1988, pp. 337-353
- [8] Sangkyung Sung, Jang Gyu Lee, Taesam Kang, "Development of a Tunable Resonant Accelerometer with Self-sustained Oscillation Loop," IEEE National Conference on Aerospace and Electronics, vol. 1, no. 2, October 2000, pp. 354-361