

용량형 압력센서용 디지털 보상 인터페이스 회로설계

李允熙*, 澤田辛司**, 徐熙敦*, 崔世崑*

Design of Compensated Digital Interface Circuits for
Capacitive Pressure Sensor

Youn-Hee Lee*, Kouji Sawada**, Hee-Don Seo*, Se-Gon Choi*

요 약

출력신호를 검출하기 위한 집적화한 용량형 압력센서를 구현하기 위해서는 센서의 특성에 나쁜 영향을 미치는 기생용량, 온도/열 드리프트 및 누설전류 등의 요소가 개선 되어야 한다.

본 논문에서는 2개의 용량-주파수 변환기와 4비트 디지털 보상회로로 구성된 새로운 이상적인 인터페이스 회로를 설계 하였다. 이 회로는 센싱 센서 주파수를 기준 센서 주파수로 나누어 줌으로써 드리프트 및 누설전류의 영향이 제거될 수 있도록 설계 되었고, 신호 전송시 잡음의 영향이 적은 디지털 신호를 처리 하도록 되어있다. 그러므로 이 회로는 디지털 비트수를 늘려 줌으로 출력신호의 분해능을 향상 시킬수 있다. 또 이 회로중 디지털 부분은 FPGA 칩으로 제작되어 그 작동이 확인 되었다.

Abstract

In order to implement the integrated capacitive pressure sensors, which contains integrated interface circuits to detect the electrical output signal, several main factors that have a bad effect on the characteristics of sensors must be improved, such as parasitic capacitance effects, temperature/thermal drift, and the leakage current of a readout circuitry.

This paper describes the novel design of the dedicated CMOS readout circuitry that is consists of two capacitance to frequency converters and 4 bit digital logic compensating circuits. Dividing the oscillation frequency of a sensing sensor by that of reference sensor, this circuit is designed to eliminate the thermal/temperature drift and the effect of the leakage currents, and to access a digital signals to obtain a high signal-to-noise(S/N)ratio.

Therefore, the resolution of this circuit can be increased by increasing the number of the digital bits. Digital compensated circuits of this circuits, except for the C-F converters, are fabricated on a FPGA chip, and fundamental performance of the circuits are evaluated.

1. 서론

* 영남대학교 전자공학과

(Department of Electronic Engineering
Yeung-Nam University)

** 도요하시대학 전기전자공학계.

(Department of Electrical and Electronic
Engineering Toyohashi University)

<접수일자 : 1996년 8월 16일>

* 본 연구는 1994년도(ISRC-94-5078) 교육부 학술
연구 조성비에 의하여 수행 되었음.

역학적 응력을 전기신호로 변환하는 압력센서는 자동차, 항공, 산업용 로봇등 압력측정이 요구되는 공업 분야 뿐 아니라, 생체내 국부적 압력변동이나 생체 각부의 역학적 기능의 정확한 계측을 필요로 하는 의료 및 의료공학에 널리 이용될 수 있기 때문에 고감도, 고정도 및 디지털 출력의 압력센서가 요구 되어진다.

반도체 미세가공 기술을 응용한 마이크로머시닝(micromachining)에 의해 제작되는 실리콘 다이아프램 압력센서는 소형, 경량 및 고신뢰성의 특성을 갖고 있기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^[1,2,3]. 특히 압력변화에 따른 피에조 저항 변화를 이용한 피에조 저항형 압력센서가 제품화가 용이하다는 장점이 있어 현재까지 널리 보급되어 왔다. 그러나 감도가 낮고, 패키징시 측면응력과 온도영향이 크기 때문에 고 정도화 시키기 위해 제품 하나 하나에 조정이 필요하다. 이에 반하여 다이아프램 변형에 따른 용량압의 변화를 이용한 용량형 압력센서는 감도가 크고 안정성이 뛰어나는 뿐만 아니라 소비전력이 적다. 그러나 이 용량형 압력센서는 출력감도가 비선형적이며 출력 임피던스가 높고 기생용량의 영향을 받기 쉽기 때문에 용량의 변화를 저 임피던스의 전기신호로 출력하는 인터페이스 회로의 개발이 필요하다.

용량을 검출하는 회로에는 용량을 전압으로 변환하는 방식^[4,5]과 펄스폭으로 변환하는 방식^[6,7] 등이 있지만, 용량을 주파수로 변환하는 방식^[8,9,10,11]은 출력이 주파수이기 때문에 잡음의 영향이 적으면서 디지털 처리가 용이하므로 많이 이용되고 있다. 그러나 실제 인터페이스 회로에 사용할 경우, 기생용량의 영향과 온도특성 및 누설전류 등의 영향이 나타나게 된다. 이들 중 기생용량의 영향은 센서 제작과정에서 어느정도 개선할 수 있지만 온도에 의한 드리프트와 누설전류의 문제가 예상된다. 이를 개선하는 방법으로 인터페이스 회로의 전원전압을 조절해서 온도 드리프트를 보상하는 회로^[9,12]와 2개의 정전류원을 이용하여 충·방전 전류를 충분히 크게하여 누설전류의 영향을 줄이는 회로^[13]가 있다. 그러나 용량-주파수 변환기 회로 자체가 온도 의존성 및 전원전원 의존성이 있기 때문에 완전히 이 문제들이 해결될 수가 없다.

본 연구에서는 센서의 센싱 용량 가까이 동일 크기의 기준 용량을 제작하고, 이들의 출력 주파수를 서로 나누므로 이론적으로 온도 드리프트 및 누설전류의 영향을 완전히 배제하는 새로운 회로를 제안한다. 이 회로의 출력은 디지털 값이므로 마이크로 프로세서의 버스(bus)에 직접 접속할 수 있는 장점이 있고 디지털 비트 수를 늘림으로써 분해능을 증가시킬 수 있는 특징이 있다.

II. 보상원리 및 회로설계

그림 1은 슈미트 트리거(Schmitt trigger)를 이용하여 용량을 주파수로 변환하는 용량-주파수 변환기(capacitance-frequency converter; 이하 C-F 변환기)이다.

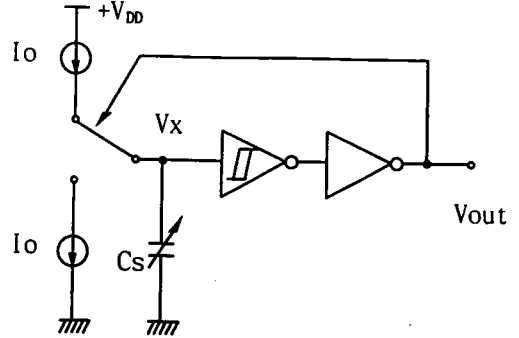


그림 1. 용량-주파수 변환기의 구조.

Fig. 1. Schematic diagram of C-F converter.

이 회로는 정전류원에 의해 센서용량의 충전 및 방전으로 발진하게 된다. 그 발진 주파수는 식 (1)과 같이 정전류원의 전류값(I_0)에 비례하고, 센서용량(C_s)과 슈미트 트리거의 히스테리시스 폭(V_h)에 반비례한다.

$$f_s = \frac{I_0}{2C_s V_h} = I_0(1 - P/P_{\max})/2C_s \cdot V_h \quad (1)$$

단, C_s 는 압력이 인가되지 않은 상태일때 센서의 기본 용량이다.

이 식에서 알 수 있듯이 인가압력을 변화시키면 용량이 변하기 때문에 발진 주파수가 변화하게 되고 최대압력(P_{\max})에서 영 까지 떨어지게 된다. 또 센서 제작시 그림 2와 같이 센싱용량 가까이 압력 변화에 영향을 받지 않는 기준용량을 함께 설계하여 그림 1과 동일한 C-F 변환기에 접속하면, 인가압력 변화에도 용량이 변화하지 않으므로 식(2)와 같은 일정한 기준 발진주파수를 얻을 수 있다.

$$f_{ref} = \frac{I_0}{2C_{ref} V_h} \quad (2)$$

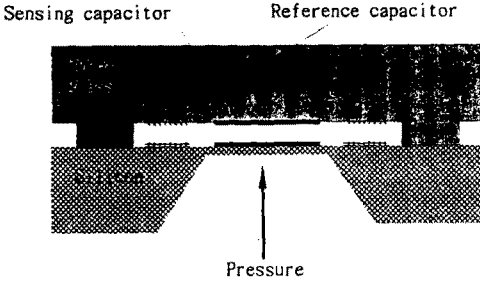


그림 2. 용량형 센서 단면도.

Fig. 2. Cross section of the capacitive sensor.

실제 센서를 사용할 경우 이들 회로에서 전원전압이나 온도가 변화하게 되면 정전류원의 전류값 및 슈미트 트리거의 히스테리시스 폭이 변화하여 발진 주파수가 변동하게 된다.

여기서 센싱용량 센서 C-F 변환기의 발진 주파수를 기준 주파수로 나누게 되면 식 (3)과 같이 출력은 두 용량 크기의 비로만 나타나게 되어 슈미트 트리거의 히스테리시스 폭이나 정전류원의 전류값에 무관하게 된다.

$$\frac{f_s}{f_{ref}} = \frac{C_{ref}}{C_s} \quad (3)$$

즉, 전압 변동이나 온도 변화에 따른 드리프트나 누설전류의 영향을 제거할 수 있다.

센싱용량과 기준용량 각각에 접속된 C-F 변환기의 발진 주파수를 카운터를 이용하여 계수한다. 여기서 기준 용량측의 출력이 N회 계수되는 시간 T는 식(4)와 같다.

$$T = \frac{N}{f_{ref}} \quad (4)$$

이 시간(T)동안 센싱 용량 측의 주파수 f_s 를 계수한다면 카운터 값 M는 식 (5)와 같이 된다.

$$M = f_s \cdot T = N \frac{f_s}{f_{ref}} = N \frac{C_{ref}}{C_s} \quad (5)$$

이 값을 저장해서 디지털 값으로 출력한다. 카운터의 비트수를 증가 시키면 회로자체 분해능이 증가하게 된다.

그림 3은 식 (3)과 같은 주파수 나눗셈을 실현할 수 있도록 설계한 회로이다.

이 회로는 센서의 센싱 용량 및 기준 용량을 주파수로 변환하는 2개의 C-F 변환기, 센싱 용량을 분주하는 분주기, 기준 용량을 계수하는 16비트 카운터, 연산결과를 기억 시키는 16비트 레지스터 및 각 블록에 리세트 신호를 보내주기 위한 타이밍 제어기로 구성되어 있다.

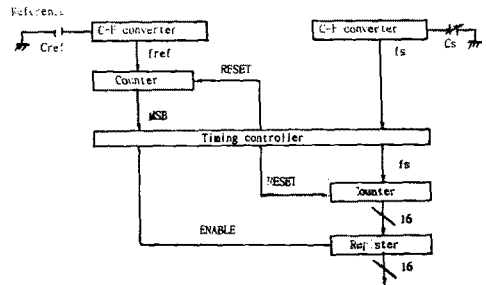


그림 3. 인터페이스 회로의 블록도.

Fig. 3. Block diagram of the interface circuit.

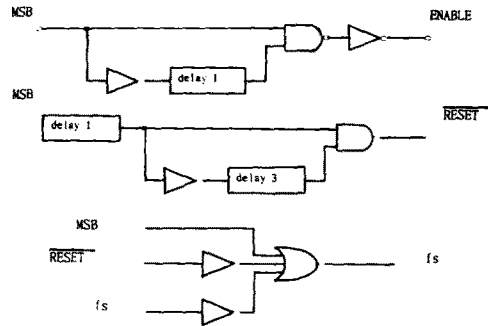


그림 4. 타이밍 제어회로.

Fig. 4. Timing control circuit.

그림 4는 센싱 용량 쪽의 C-F 변환기의 출력이 변동이기 때문에 이것에 의한 불안정 상태가 일어나지 않도록 제어하는 회로로서 주파수 분배기의 최종 출력단의 하강에지와 상승에지에서 리세트(RESET) 신호와 인에이블(ENABLE) 신호를 각각 발생 시키게한다. 인에이블 신호는 기준 용량(C)의 주파수 변환회로에서 발생된 주파수를 계수한 카운터의 값을 레지스터에 저장 시키고, 리세트 신호는 카운터와 주파수 분주기를

초기화 시킨다.

그림 5는 계수한 결과를 2진 코드화 하여 출력하는 카운터와 주파수 분배기로서 카운터 펄스가 몇 개 인가에 따라 1개 혹은 복수개의 펄스를 출력하는 카운터이다. 이 회로의 클리어(CLR) 단자에 타이밍 제어회로의 리셋 신호를 연결하여 주파수 분배기와 카운터를 동시에 동기화 시키도록 되어있다.

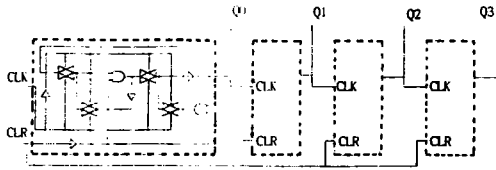


그림 5. 4 비트 카운터와 주파수 분배기.
Fig. 5. 4 bit counter and frequency divider.

또, 그림 6은 D-플립플롭을 사용하여 설계된 4 bit 레지스터로 클럭 단자에 타이밍 제어회로의 인에이블 신호를 연결하여 계수한 결과를 저장하도록 설계되어 있다. CLK(clock pulse)는 모든 플립플롭을 인에이블 시켜서 4개의 입력정보가 4 bit 레지스터에 전송될 수 있도록 한다.

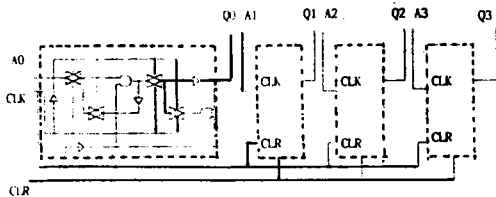


그림 6. 4 비트 레지스터.
Fig. 6. 4 bit register.

III. 실험결과 및 고찰

그림 3의 회로는 CMOS IC 칩으로 제작하여 용량형 압력센서와 하이브리드 형으로 집적화하기 위한 것이므로 기존 용량센서의 출력값을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

그림 7은 인터페이스 회로의 작동을 확인하기 위해 그림 3의 회로중 4 비트 회로에 대하여 시뮬레이션 한 결과이다.

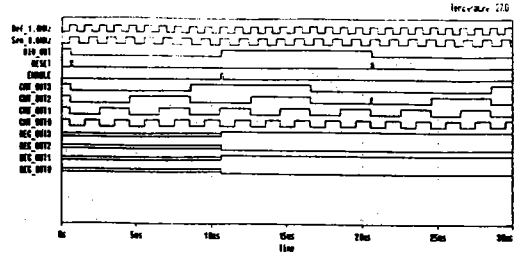


그림 7. 인터페이스 회로 시뮬레이션 결과.
Fig. 7. Simulation result of the interface circuit..

실제 센싱용량 주파수 (f_s)는 센서의 크기(특히, 다이아램 크기와 전극간 간격)에 따라 수 kHz내지 수십 kHz 정도이지만 기준용량 주파수 (f_{ref})는 1 MHz로 고정하고 센싱용량 주파수를 0.8 MHz로 설정하였다.

이 결과에서 알수 있듯이 센싱 용량(C_s)을 주파수로 변환하는 C-F 변환기의 출력이 주파수 분배기의 클럭으로 사용되어 주파수 분배기의 최종 출력단(DIV-OUT)에서 센싱 주파수가 1/16 배 만큼 분배된다. 또 이 신호가 타이밍 제어 회로의 입력 신호로 작용하여 상승에지에서 인에이블 신호(ENABLE), 하강에지에서 리셋 신호(RESET)를 생성 시킨다.

이 리셋 신호는 그림에서 알수 있듯이 기준용량에 의해 발생한 주파수를 계수하는 카운터를 초기화 시킨다. 또 타이밍 제어기의 인에이블 신호 상승에지에서 기준센서 주파수를 계수한 결과가 레지스터에 저장되고 있다. 예로 그림에서 두번째 인에이블 신호에서 카운터 출력(CNT_OUT 0~3)서 주파수 "1 0 1 0" 이 그대로 레지스터 출력(REG_OUT 0-3)에 나타나고 있음을 알수 있다.

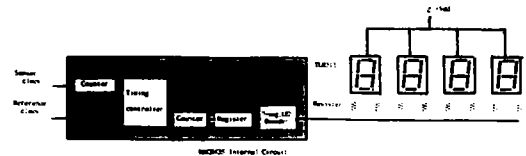


그림 8. FPGA칩 측정 시스템의 개략도
Fig. 8. Schematic diagram of FPGA chip measurement system.

인터페이스 회로가 IC칩 으로 제작 되었을때의 동

작상태를 확인하기 위하여 그림 3의 인터페이스 회로에서 C-F 변환기를 제외한 디지털 신호처리 부분과 LED 디코더를 FPGA 소자로 제작 하였다.

그림 8은 7-세그먼트 LED를 이용한 FPGA 칩 측정 시스템이다.

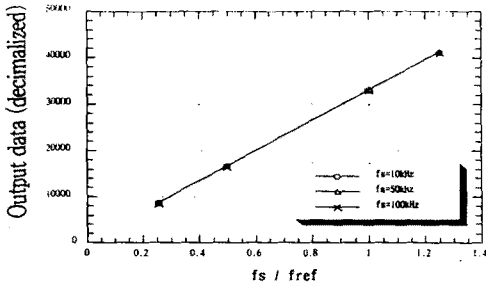


그림 9. 센싱 주파수와 기준 주파수 비의 출력특성.
 Fig. 9. The output characteristics of sensing frequency dividing ratio by reference frequency..

표 1. 7 세그먼트 LED 출력 데이터.

Table 1. 7-Segment LED output data.

Output data (Hex)	fref (kHz)					
	10	20	40	60	80	100
10	8000					
20	4000	8000				
40	2000	4000	8000	C000		
60	1559	2AAB	5556	8000	AAAB	D558
80	1000	2000	4000	6000	8000	A000
100	0CCD	199A	3334	4CCD	6667	8000
120	0AAB	155E	2AAB	4000	5556	6AAB
140	0925	1249	2493	36DC	4925	5B7E
160	0800	1000	2000	3000	4000	5000
180	071B	0E39	1C72	2AAB	38E4	471D
200	0667	0CCD	199A	2667	3333	4000

표 1은 입력에 센싱센서 주파수 f_s 와 기준센서 주파수 f_{ref} 대신, 주파수 신디사이즈(synthesize)를 이용하여 주파수를 변화 시키면서 인가 하였을때 주파수 나눗셈을 행한 결과 값 즉, 7-segment LED 표시 값이다. 그림 9는 그 측정 결과를 이용하여 센싱 주파수 f_s 와 기준 주파수 f_{ref} 의 비에 대한 출력특성을 10진화하여 나타낸 것이다. 결과에 의하면 발진 주파수 f_s

와 f_{ref} 의 절대값은 온도,전원전압 등에 따라 변할지라도 그 비인 f_s / f_{ref} 는 변화하지 않고' 일정하기 때문에 출력은 온도 및 전원전압에 따른 드리프트를 보상 받게 된다.

IV. 결론

용량형 압력센서의 출력특성에 문제가 되는 기생용량의 영향, 온도 드리프트 및 누설전류의 영향을 줄이기 위하여 센서내에 센싱 용량과 동일 크기의 기준 용량을 설계하고, 이들 용량의 발진 주파수를 나누어 주는 새로운 인터페이스 회로를 제안 하였다. 이 회로는 용량비를 디지털 회로를 이용하여 계수하기 때문에 근본적으로 온도 드리프트나 누설전류의 영향을 제거할 수 있고 비트수를 늘려 주므로 출력신호의 분해능을 향상시킬 수 있는 특징이 있다. 시뮬레이션을 통하여 동작 특성을 확인했을 뿐 아니라 설계된 회로에 대하여 FPGA 소자로 구현하여 하이브리드 집적화나 모노리식 집적화에 응용될 수 있음을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. K. clark and K. D. wise, "Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin Diaphragm Pressure Sensor", IEEE Trans. Electron Devices ED-26, No, 12, pp. 1887-1905, 1979.
- [2] W. H. Ko, M. Bao and Y. Hong, "A High-Sensitivity Integrated Circuit Capacitive Pressure Transducer", IEEE Trans. Electron Device, ED-29, pp. 48-56, 1982.
- [3] Y. Ishikura, S. Kimura and T. Fukiura, "A Thin Film Capacitive Pressure Sensor," Tech. Digest 11th Sensor Symp. Japan, pp. 149-152, 1992.
- [4] W. H. Ko. et al, "Capacitive pressure transducers with integrated circuits", Sensors and Actuators 4, pp. 403-411, 1983.
- [5] Y. E. Park and K. D. Wise, "An MOS Switched-capacitor readout amplifier for capacitive pressure sensor", IEEE proc. Custom IC Conf, Rochester, pp. 380-384, 1983.

- [6] M. J. S. Smith, M. A. Prisbe, L. Bowman and J. D. Meindl "A micropower IC for a biomedical pressure sensor", Conf. Solid-State sensor and Actuator, PA, pp. 42-45, 1985.
- [7] Craig S. Sander, "A Monolithic Capacitive Pressure Sensor with Pulse-Period Output", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-27, May 1980.
- [8] A. Hanneborg, T. E. Hansen, P. A. Ohlckers, E. Carlson, B. Dahl and O. Holwech, "An Integrated Capacitive pressure Sensor with frequency modulated output", Sensors and Actuators, pp. 345-351, 1986.
- [9] T. Kudoh, S. Shoji and M. Esashi, "An Integrated Miniature Capacitive Pressure Sensor", Sensor and Actuator, A.29, pp. 185-193, 1991.
- [10] A. Kjensmo, A. Hanneborg, J. Gakkestad and H. Vonder lippe, "A CMOS Front-end Circuit for a Capacitive Pressure Sensor", Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 102-107, 1990.
- [11] H. Terabe, S. Sakurai, O. Tabata, S. Sugiyama and M. Esashi, "An Integrated Capacitive Pressure Sensor with Voltage Output", Tech. Digest of the 11th sensor symp. pp.135-138, 1992.
- [12] H. D. Seo, G. B. Lim and M. Esashi, "Hybrid-Type Capacitive Pressure Sensor", Sensors and Materials, 4, 5, pp. 277-289, 1993.
- [13] Y. Matsumoto, S. Shoji and M. Esashi, "Fabrication of C-F Converter CMOS IC for capaitive sensor", IEICE(Japan), Vol. 73-C-II, No. 3, pp. 194-202, 1990.

著 者 紹 介

李允熙

「센서학회지 제2권 제1호」 논문 93-2-1, p19 참조
 현재 영남대학교 대학원 전자공학과 박사과정

澤田辛司

1993년 3월 : 도요하시대학 전기전자공학계 졸업,
 1995년 3월 : 동 대학원 석사과정 졸업, 1995년 4월-현재 : 케논(주) LSI 사업부 아나로그 IC 설계실, 주관심 분야 : 센서 인터페이스 회로, 회로 및 시스템.

徐熙敦

「센서학회지 제2권 제1호」 논문 93-2-1, p19
 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수

崔世崑

「센서학회지 제2권 제1호」 논문 93-2-1, p19 참조
 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수