

Synthesized analysis and its verification of the piezoresistive pressure sensor

이 승 환* · 이 곤 재** · 한 승 오†
(SeungHwan Yi · Gon-Jae Lee · Seungoh Han)

Abstract - Piezoresistive pressure sensor have become the successfully-commercialized MEMS product and the related technologies have been well developed over the past decades. Regarding the design methodology, however, the coupled-physics FEM analyses of the transducer itself and the signal-processing circuitry design based on the conventional EDA are separated and both of the analyses were sequentially processed for the full design of the pressure sensor. For the fast and effective R&D, new design methodology is proposed in this paper where the FEM results are linked to the EDA environment and therefore most of the design works can be done in the EDA environments, which means the time-consuming FEM analyses can be minimized. In order to verify the proposed approach, a typical piezoresistive pressure sensor having the silicon diaphragm and piezoresistors was modeled and analyzed based on the proposed methodology. The verification results showed that the simulated results were matched well with the measured data within the 7% difference while the simulation time was reduced less than 5% compared to the conventional methodology. Through the proposed approach, various types of the piezoresistive pressure sensors can be developed in more effective way.

Key Words : Piezoresistive pressure sensor, MEMS, FEM, EDA, Design

1. 서 론

1960년대 초소형 가공기술을 이용한 최초의 소자가 발표 [1]된 초소형 압력센서는 상업화에 성공한 초기 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 제품의 하나로써 그 동안 비약적인 기술발전에도 힘입어 종래의 산업 및 자동차용은 물론 의료, 군사, 환경 등의 다양한 응용분야를 개척해 왔다[2, 3]. 압저항형 압력센서는 압력 차이에 의한 다이어프램(diaphragm)의 기계적 변위를 압저항 효과에 의한 저항변화를 통해 측정하여 인가되는 압력을 검출하는데, 이를 위해서는 저항변화로부터 전압신호로의 변환, 잡음 제거를 위한 필터링, 미약한 전압신호의 증폭, 그리고 온도보상 등과 같은 신호처리 회로가 다이어프램 구조와 함께 개발되어야 한다. 하지만 현재 이루어지고 있는 압저항형 압력센서의 개발은 응용분야에 따른 다양한 동작 압력범위들에서 적절한 저항변화가 얻어지도록 복합장 유한요소법(FEM: Finite Element Method) 해석[4]을 통해 다이어프램과 압저항을 설계하는 단계와 반도체 설계분야에서 이미 널리 사용되고 있는 EDA(Electronic Design Automation) 환경에서의 신호처리 회로 설계단계로 나뉘어 서로 독립적이고 순차적으로 이

루어지고 있다. 이러한 두 영역의 분리는 다이어프램/압저항과 신호처리 회로 사이에서 충분한 정보교류가 불가능하게 하기 때문에 개발시간의 단축이나 완성도 측면에서 효과적인 압저항형 압력센서의 개발을 저해하는 원인이 된다.

이에 본 논문에서는 종래의 설계법과는 달리 압력센서와 신호처리 회로의 설계와 해석이 EDA 환경에서 함께 이루어지는 통합설계법을 새로이 제안하였다. 제안된 설계법에서는 압저항 관련해석을 EDA 환경에서 진행함으로써 장시간이 소요되는 유한요소 해석을 다이어프램만을 대상으로 최소화하고 그 결과를 압저항과 신호처리 회로의 설계과정에 참조되도록 함으로써 짧은 시간내에 효과적인 설계가 가능하도록 하였다. 제안된 설계법을 검증하기 위해 일반적인 구조의 압저항형 압력센서를 설계하고 제작하여 그 측정결과를 해석결과와 비교하였다.

2. 압력센서에서의 통합해석 기법

2.1 통합해석의 개념

제안된 새로운 설계방법은 Fig. 1과 같은 원리로서 기존의 복합장 FEM 해석에서 다이어프램의 기계적 응답과 압저항의 전기적 응답을 모두 해석하던 것과는 달리, FEM 해석에서는 인가되는 압력에 따른 다이어프램에서의 응력분포만을 구하고 이를 상미분방정식(ODE: Ordinary Differential Equation)에 기반한 EDA 설계환경으로 전달하여 압저항의 전기적 응답 즉, 인가압력에 따른 저항변화로부터 신호처리 회로 동작에 대한 해석까지 진행하게 된다.

* 정 회 원 : 충주대학 기계공학과 조교수
** 비 회 원 : (주)KEC 선임연구원
† 교신저자, 정회원 : 호서대학 융합기술연구소 전임강사 · 공박
E-mail : sohan@hoseo.edu
접수일자 : 2008년 10월 13일
최종완료 : 2009년 2월 2일

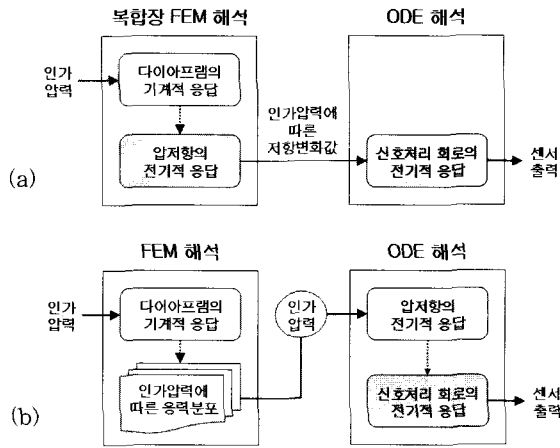


그림 1 통합설계법의 개념도: (a) 종래의 압저항형 압력센서 설계법, (b) 제안된 통합설계법
 Fig. 1 Concept of the synthesized analysis: (a) Conventional method, (b) Proposed method

종래의 설계법에서는 압력센서의 입력(인가압력)으로부터 출력까지의 센서 응답을 구하기 위해 복합장 FEM 해석부터 ODE 해석까지 순차적으로 진행해야 한다. 때문에 두 가지 서로 다른 설계환경을 거쳐야만 한다는 번거로움과 압저항 설계나 배치 최적화와 같은 중간 단계에서의 설계변경을 위해 설계가 완료된 다이아프램의 해석에서부터 다시 시작해야만 한다는 단점이 있다. 반면 제안된 통합설계법은 다이아프램의 기계적 응답 즉, 인가압력에 따른 응력분포를 구하기 위해 1회의 FEM 해석을 진행한 이후로는 ODE 해석 환경에서 압력인가부터 센서출력까지를 모두 진행할 수 있다. 특히 전술한 압저항 설계와 관련하여 설계가 완료된 다이아프램에서의 응력분포 결과를 반복적으로 재사용할 수 있어 보다 효율적인 설계가 가능하게 된다.

2.2 압저항형 압력센서 모델

전술한 통합설계 환경을 이용하여 설계하고자 하는 압저항형 압력센서는 Fig. 2와 같이 일반적인 실리콘 다이아프램 구조를 갖는다. 실리콘 기판에 대한 이방성 습식식각을 통해 사각형 다이아프램을 형성하고 후술할 설계과정을 통해 결정되는, 외부압력에 의한 다이아프램 변형시 최대 응력이 얻어지는 위치에 압저항들을 배치한다. 이후 열 산화막과 실리콘 질화막을 순차적으로 형성하여 실리콘 다이아프램에 대한 전기적으로 절연층을 구현한 후, 금속배선을 통해 압저항과 주변에 배치된 신호처리 회로를 전기적으로 연결한다[5].

사각형 다이아프램에 외부로부터 압력 p 가 인가되는 경우 식 (1)과 같이 최대변위 w 를 갖는 변형이 발생[6]하는데, 여기서 E 는 Young's modulus, ν 는 Poisson ratio, t 는 다이아프램 두께, 그리고 r 은 다이아프램의 크기이다.

$$p = \frac{Et^4}{(1-\nu^2)(r/2)^4} \left[4.2 \frac{w}{t} + 1.58 \frac{w^3}{t^3} \right] \quad (1)$$

이와 같은 변형은 다이아프램에 응력 σ 를 유발하며 이는

등축정계(cubic system) 물질로 압저항을 제작한다고 가정할 경우 식 (2)의 압저항 효과에 따라 저항을 변화시킨다. 이러한 저항변화는 식 (3)의 Ohm 법칙에 의해 전압 E 와 전류 I 의 관계를 변화시키며 이는 일반적으로 휘트스톤-브릿지 회로에 의해 전압신호로 변환되어 센서출력으로 얻어진다[7].

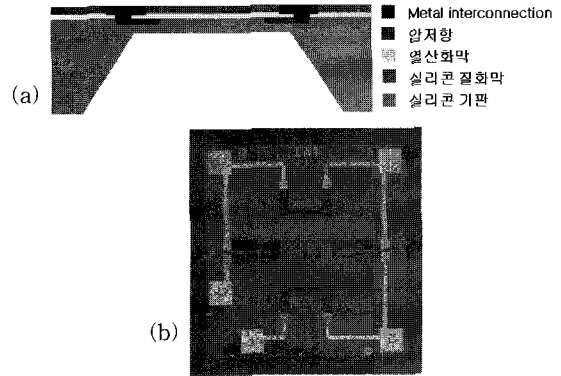


그림 2 압저항형 압력센서의 구조: (a) 압저항형 압력센서 단면도, (b) 제작된 압저항형 압력센서
 Fig. 2 Piezoresistive pressure sensor: (a) Cross-sectional view, (b) Photograph of the fabricated sensor

$$\begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{22} \\ d_{33} \\ d_{13} \\ d_{23} \\ d_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \rho_0 \begin{bmatrix} 1+d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 1+d_{22} & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 1+d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때, π 는 압저항 계수이며 ρ_0 는 응력이 없는 상태에서의 초기 비저항이고 식 (2)와 (3)의 첨자들은 결정축 방향을 나타낸다.

2.3 통합해석법의 검증

압저항에서의 저항변화는 저항영역에서의 응력분포와 관계되므로 정확한 저항변화량을 얻기 위해서는 FEM 해석을 통한 다이아프램에서의 응력분포가 필요하다. 본 논문에서는 상용 프로그램인 CoventorWareTM를 이용하여 50kPa의 외부 압력에 의한 다이아프램 변형과 그에 따른 응력분포를 해석하였다. 압력센서의 모델링에서는 Table 1에 정리된 물성값 및 해석조건들을 사용하였으며 이를 통해 Fig. 3(a)의 변위와 Fig. 3(b)의 응력분포를 얻었다.

다이아프램 두께를 변화시키면서 FEM 해석을 수행할 때 얻어지는 최대변위를 식 (1)로부터 계산되는 최대변위와 비교하면 Fig. 4와 같다. 다이아프램의 두께가 15um 이상인 경우에는 계산된 결과와 FEM 결과가 잘 일치하지만 10um의 두께인 경우에는 계산결과와 해석결과가 17.5%의 차이를 보인다. 이는 식 (1)의 수학적 모델이 넓은 범위의 변위에 대해 적용 가능한 모델이기는 하지만 이방성 식각에 따른 경사벽 등과 같이 수학적 모델의 유도조건과는 차이가 있기 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

표 1 해석에 사용된 물성값 및 해석조건

Table 1 Material properties and conditions

항목		값
Si	Young's modulus	112.4 GPa
	Poisson ratio	0.28
압저항 계수	π_{11}	6.6×10^{-5} /MPa
	π_{12}	-1.1×10^{-5} /MPa
	π_{44}	138.1×10^{-5} /MPa
열 산화막 두께		0.1 μ m
실리콘 질화막 두께		0.15 μ m
다이아프램 기준 크기		1000 μ m
Si 다이아프램 기준 두께		15 μ m
초기 저항		4 k Ω

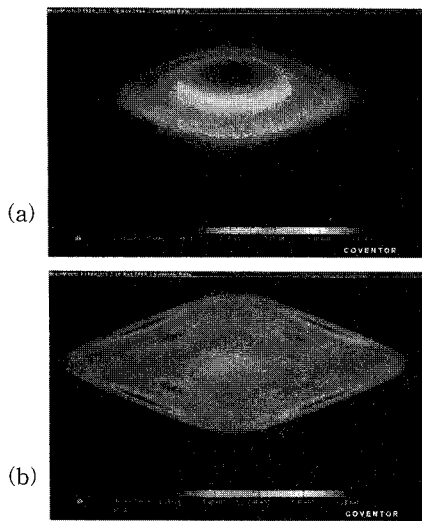


그림 3 다이아프램에서의 변위 및 응력 분포: (a) 다이아프램의 변위, (b) 다이아프램에서의 응력분포
 Fig. 3 Stress and displacement distributions on the diaphragm: (a) Displacement, (b) Stress

전술한 유한요소 해석을 통해 얻어진 변위와 응력분포 결과는 Fig. 5와 같은 EDA 환경에서의 통합모델을 통해 신호처리 회로와 연동된다. 즉, 외부에서 인가되는 압력이 "Pressure" 요소를 통해 정의되면 FEM 해석으로부터 얻어진 결과들 가운데 인가되는 압력에 대응되는 변위와 응력분포가 읽혀진다. 압저항 요소들(H1, H2, D1r, D2r, Lr, Ll, D1l, D2l)은 각각 크기와 위치 그리고 전기적 특성에 대한 변수값들을 통해 정의되며, 압저항 요소들의 위치에서의 응력값들로부터 압저항 효과에 의한 저항값 변화가 결정된다. 압저항들로 이루어진 휘트스톤-브릿지 회로를 통해 저항변화는 전압신호로 변환되며 이를 Op-Amp를 이용한 차동증폭기로 증폭함으로써 기본 신호처리 동작을 고려한 회로해석까지 완료된다. 이는 FEM 해석을 통해 얻어지는 다이아프램에서의 응력분포 결과에 각 위치를 정의하는 좌표값이 포함되어 있기 때문에 회로해석 모델에서 압저항 효과에 따른 저항변화를 계산할 때 압저항 위치에서의 응력을 1:1로 대응시켜 계산할 수 있다는 원리에 기반한다.

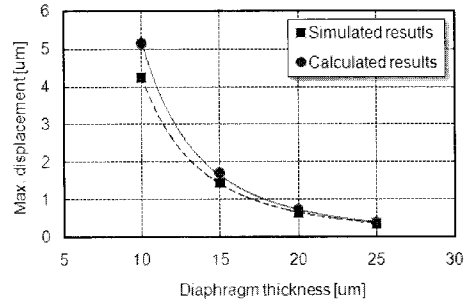


그림 4 다이아프램 두께에 따른 최대변위
 Fig. 4 Max. displacement as a function of the diaphragm thickness

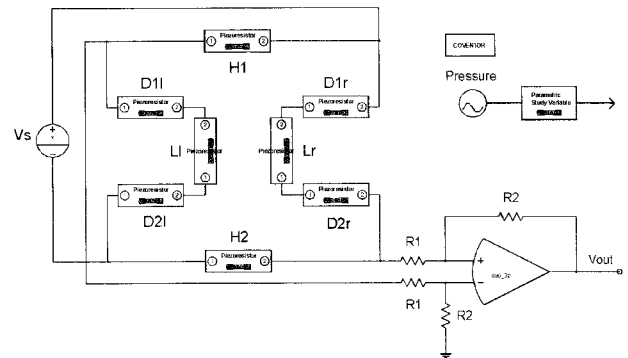


그림 5 압저항형 압력센서에 대한 통합모델
 Fig. 5 Synthesized model of the pressure sensor

Fig. 5와 같이 구성되는 통합모델은 Fig. 6의 압저항 위치 최적화와 같은 압력센서의 설계과정에서 유용하게 사용된다. Fig. 6은 다이아프램의 가장자리로부터 압저항을 얼마나 이격시키는가에 따른 출력전압 변화로써 이는 다이아프램과 압저항의 형상 및 치수와 관련된다. 전술한 압력센서에 대한 Fig. 6의 해석결과에 의하면 가장자리로부터 20um 이격(x 방향시켜 중앙(y 방향)에 배치할 때 가장 우수한 출력특성이 얻어짐을 확인할 수 있다.

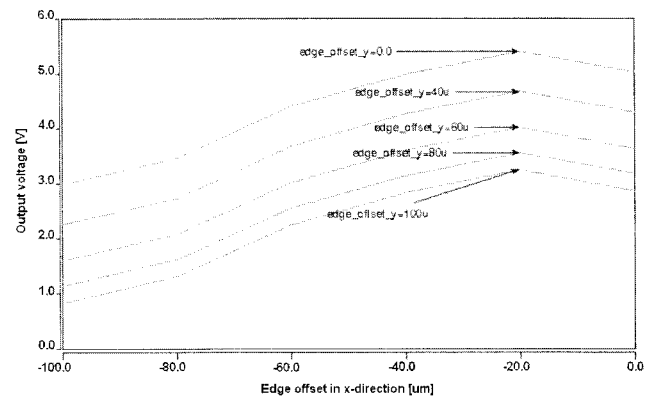


그림 6 통합모델을 이용한 압저항 위치에 따른 출력전압 변화 해석
 Fig. 6 Output voltage as a function of the piezoresistor location

이를 위해서는 다이어그램에서의 응력분포를 얻기 위한 1회의 FEM 해석과 압저항의 위치변화에 따른 30회(x방향 6회 × y방향 5회)의 통합모델 해석이 필요하였다. 1회의 FEM 해석에서는 약 45분이 소요되었으며 30회의 통합모델 해석은 ODE 해석이었기 때문에 약 5분이 소요되었다. 이를 종래의 복합장 FEM 해석으로 진행할 경우에는 45분/회×30회=1350분이라는 대단히 긴 시간이 필요하다. 즉, 제시된 통합설계 방식을 적용함으로써 압저항 배치 최적화를 종래의 방법에 비해 1/20 이상 짧은 시간 내에 수행할 수 있다.

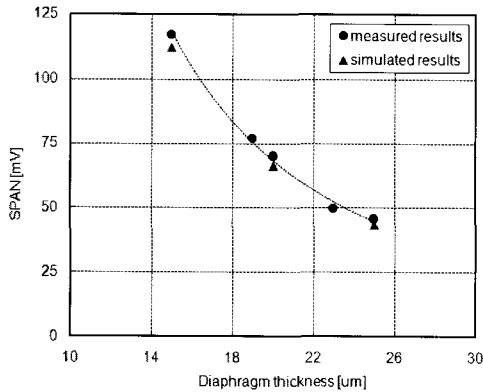


그림 7 측정결과와의 비교를 통한 통합모델의 검증
 Fig. 7 Verification of the synthesized model by comparing the results to the measured

Fig. 5의 모델을 통해 얻어지는, 신호처리 회로의 동작까지를 포함한 전체 압저항형 압력센서의 출력신호는 Fig. 7과 같다. 결과에서 보는 바와 같이 다이어그램의 두께가 감소함에 따라 출력신호는 증가하며 제작된 압력센서에 대한 측정결과는 통합해석을 통해 얻어진 출력전압은 측정결과와 7% 이내의 오차범위에서 잘 일치하고 있다. 재료의 물성값이나 공정편차 등을 고려할 때, Fig. 7의 비교 결과로부터 제안된 통합해석 접근법이 압저항형 압력센서를 정확하게 조사하고 있다고 결론지을 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 압저항형 압력센서의 설계 및 해석에 있어 FEM 해석을 이용한 다이어그램 분석과 ODE 기법에 기반하여 압저항과 신호처리 회로 설계를 통합하는 방안을 제시하였다. 이는 FEM 해석이 공간상의 좌표정보를 포함하고 있다는 사실에 기초하여 EDA 환경에서 모델링되는 압저항에 대해 그 공간적 위치를 정의하는 설계변수를 사용함으로써 구현 가능하다. 제시된 통합모델을 사용하여 실리콘 다이어그램을 갖는 일반적인 형태의 압저항형 압력센서를 해석하고 그 결과를 측정결과와 비교하였다. 압저항 배치 최적화를 위한 설계단계에서 제안된 통합설계법을 통해 종래의 복합장 FEM 해석법에 비해 1/20 이상으로 설계시간 단축이 가능하였으며, 제작된 압력센서에 대해 측정된 결과와 해석결과의 비교를 통해 7% 이내의 범위에서 결과들이 일치함을 확인하였다. 이처럼 제안된 통합모델은 매우 긴 해석시간이 필요한 종래의 복합장 FEM 해석법에 비해 짧은

시간 내에 높은 정확도로 설계가 가능하도록 하기 때문에 최근 대두되는 다양한 응용분야들에서 필요로 하는 다중 압력센서들을 효과적으로 개발할 수 있도록 기여할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호: 20070125)

참 고 문 헌

- [1] A. C. M. Gieles, "Subminiature silicon pressure transducer," IEEE International Solid-State Circuits Conf., pp. 108-109, 1969.
- [2] M. Z. Shaikh, S. F. Kodad, and B. C. Jinaga, "Performance analysis of piezoresistive MEMS for pressure measurement," J. Theor. Appl. Info. Tech., pp. 227-231, 2008.
- [3] L. Lin and W. Yun, "MEMS pressure sensors for aerospace applications," Proc. IEEE, pp. 429-436, 1998.
- [4] L. Lin, H.-C. Chu, and Y.-W. Lu, "A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors," Journal of MEMS, Vol. 8, No. 4, pp. 514-522, 1999.
- [5] 이근재, 오동환, 이종홍, 김성진, "감도특성 향상을 위한 국부적 표면식각 다이어그램 구조 연구," 센서학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 154-160, 2004.
- [6] M. Gad-el-Hak, *The MEMS handbook: MEMS applications*, 2nd Ed., CRC Press, 2004.
- [7] Y. Kanda, "A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon," IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. ED-29, No. 1, pp. 64-70, 1982.

저 자 소 개



이 승 환 (李 承 煥)

1988년 고려대학교 전기공학과 학사, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 센서 및 MEMS 분야 박사. 1993년~1998년 만도기계 중앙연구소 주임연구원, 2002년~2004년 GE Sensing Korea 책임연구원, 2004년~현재 충주대학교 기계공학과 조교수. 관심분야: MEMS, 마이크로스피커 및 마이크로폰, 가스센서, 기능성 박막재료 연구 등.



이 곤 재 (李 坤 宰)

1998년 배재대학교 무기재료공학과 졸업,
2000년 한양대학교 대학원 세라믹공학과
졸업(석사). 2000년~현재 (주)KEC 선임
연구원. 관심분야: MEMS, 실리콘 센서,
반도체 공정.



한 승 오 (韓 承 畝)

1973년 6월 14일생. 1996년 고려대학교
전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 마이
크로머시닝 협동과정 졸업(석사), 2006년
동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007
년~현재 호서대학교 융합기술연구소 전
임강사. 관심분야: MEMS 및 나노소자의
해석 및 모델링, 지능형 센서 등.