

에어컨 냉매압 측정용 정전용량형 압력센서 소자의 전기적 특성 연구

최가현¹ · 정우영¹ · 최정운² · 김시동² · 민준원^{1,+}

A Study on Electrical Characteristics of a Capacitive Pressure Sensor Element to Measure the Pressure of Refrigerant of Air-Conditioner

Ga-Hyun Choi¹, Woo-Young Chung¹, Jung-Woon Choi², Si-Dong Kim², and Joon-Won Min^{1,+}

Abstract

The purpose of this study is to optimize the design of a capacitive pressure sensor element using the simulation of electrical characteristics. The simulation of the ceramic sensor diaphragm (Al_2O_3) was performed by permitting pressure to change the curvature of the diaphragm. The pressure capacitance (C_p) was increased from 19.63 pF to 15.26 pF by applying pressure because the distance between the electrodes has been changed from 30 μm to 15 μm . When the thickness of the diaphragm was changed to 0.46~0.52 mm, a larger capacitance change showed in accordance with the reduced thickness, which means an increase of sensitivity. However, considering the viewpoint of the signal linearity, it was selected for the optimum thickness of the diaphragm to 0.50 mm. The designed sensor element based on simulated results was tested to measure the output characteristics. Comparing of simulated and measured results, there was a margin of error of approximately 2%.

Keywords: Pressure sensor, Capacitive type, Air-conditioner for automobile, Pressure of refrigerant

1. 서 론

차량용 압력센서는 파워트레인제어, 주행안전제어, 보디 제어 등 엔진 주변 중심으로 구동계 등에 확장 적용되고 있는 추세이며, 향후 연비 향상, 배기가스 클린화, 안정성 향상 목적으로 적용 수량 및 활용도가 급격히 증가되고 있는 핵심 전장 부품이다[1].

차량용 압력센서는 적용 압력 범위에 따라 저압용, 중압용, 고압용으로 구분될 수 있으며, 저압 및 중압용으로 세라믹 압력센서와 실리콘형 압력센서가 적용되고 있고, 최근 저가화 및 대량 양산기술 진보에 따라 중압용 압력센서의 차량 적용 사례가 급

격히 증가되고 있다.

차량에서 중압용 압력센서로 가장 널리 사용되고 있는 에어컨 냉매압 측정용 압력센서는 냉방장치 압축기와 증발기 사이의 배관에 장착되어, 고압/저온의 냉매압력을 측정, 엔진 ECU(Electronic Control Unit)의 압축기 제어를 위한 압력정보를 제공하는 역할을 수행하고 과부하를 방지하는 핵심 전장 부품이며, 현재 전량 수입되어 완성차에 적용되고 있다.

이러한 에어컨 냉매압 측정용 압력센서는 일반적으로 압력센서에 적용되는 감지원리인 압저항(piezo-resistive) 방식, 정전용량(capacitive) 방식, 압전효과(piezo-electric effect) 방식 중에서 세라믹 다이어프램(diaphragm)을 수압부로 사용하며, 인가압력에 의한 다이어프램의 미소 변형을 정전용량 식으로 변환시키는 정전용량형 방식이 적용되고 있다. 정전용량형 방식은 기관과 다이어프램 사이에서 발생하는 크리프 현상이 적고, 안정성이 우수하며, 높은 게이지율 및 낮은 온도 영향 특성 등의 장점을 가진다[2-5].

따라서 본 연구에서는 에어컨 냉매압 측정용 압력 센서의 국산화 방안의 일환으로 정전용량형 세라믹 소자를 보다 경제적으로 개발하기 위하여 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 기반으로 한 상용 수치해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 전기적 특성 해석을 수행하였다.

¹자동차부품연구원 친환경소재기술연구센터(Green Materials R&D Center, Korea Automotive Technology Institute)
303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

² 오토산업 기술연구소 (Auto Industrial Co., LTD.)
6, Venture-ro 100beon-gil, Yeonsu-gu, Incheon, 406-840, Korea

⁺Corresponding author: jwmin@katech.re.kr

(Received : Mar. 23, 2015, Accepted : Jun. 3, 2015)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

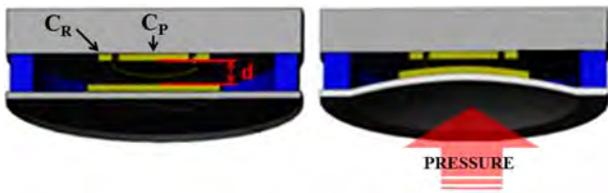


Fig. 1. Diagram of capacitive pressure sensor device.

2. 연구 방법

2.1 정전용량형 방식의 압력센서 동작원리

Fig. 1과 같이 정전용량형 방식의 압력센서는 평행판 커패시터(capacitor)를 이용하며, 커패시터의 한쪽 판 (plate)이 동력 컬렉터(force collector, 주로 다이어프램 형상)로써 작동한다.

정전용량형 압력센서 소자 중 다이어프램에는 C_p (pressure capacitance) 전극이 형성되고, 상대물인 세라믹 기판 (substrate)에는 가운데부분에 C_p (pressure capacitance), 주변 전극이 C_R (reference capacitance)이 형성된다[6,7].

압력센서의 동작은 압력에 의해 d (전극 사이 간격)가 변화됨에 따라 결과적으로 C (정전용량)가 변화하는 원리를 이용한다. 즉, 외부 압력에 의해 다이어프램의 변형이 발생하면 기판과의 거리(d)가 변화하게 되고 d 에 따라 변화하는 C 값을 검출하여 회로단의 신호처리를 통하여 최종 전압 출력값으로 나타내게 되고, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \epsilon A/d \tag{1}$$

(C : 정전용량, ϵ : 유전율, A : plate 면적, d : plate 간격)

$$C_1 \propto A/d \text{ (압력 미 인가 시)} \tag{2}$$

$$C_2 \propto A/(d-\Delta d) \text{ (압력 인가 시)} \tag{3}$$

따라서 압력에 의한 Capacitance 변화는 $\Delta C=C_1-C_2$ 로 나타낼 수 있다.

2.2 압력센서 소자의 전기적 특성 해석

2.2.1 해석 개요

본 연구에 적용된 정전용량형 방식의 압력센서 소자에 0~32 bar 범위의 압력을 인가하였을 때 capacitance 측정과 세라믹 다이어프램 두께를 변경하였을 때 capacitance 값의 비교를 통하여 최적의 세라믹 다이어프램 두께를 선정하고자 전계해석을 수행하였다.

설계는 Solidworks 2014로 진행하였으며, 전계해석은 COMSOL 4.3b의 AC/DC Module, CAD Import Module을 사용하였다.

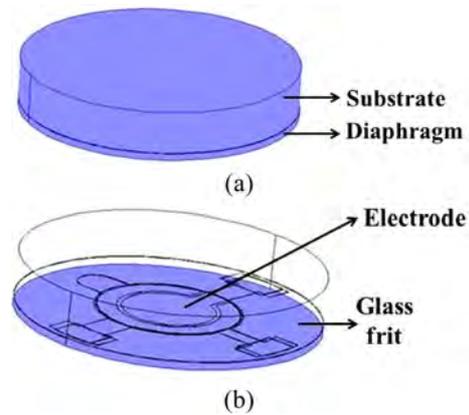


Fig. 2. The 3-dimension geometry of (a) a pressure sensor element and (b) a transparentized substrate.

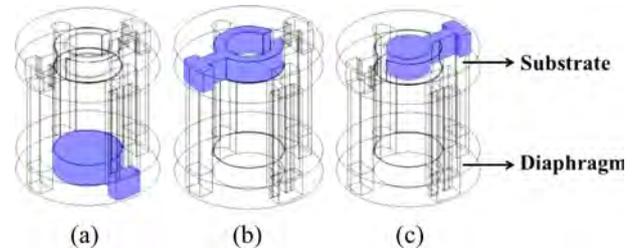


Fig. 3. The 3-dimension geometry of the expanded electrode : (a) C_p (b) C_R (c) C_p .

Table 1. The elastic material properties

Material property (unit)	Substrate, Diaphragm (Al_2O_3)	Glass frit	Electrode (Gold)	Air
Relative permittivity	5.7	3.6	1	1
Young's modulus (GPa)	303	177.27	77.2	-
Poisson's ratio	0.21	0.17	0.42	-
Density (g/cm^3)	3.72	1.80	19.32	-

2.2.2 해석모델 및 적용 정보

Fig. 2는 해석에 반영된 압력센서 소자의 3D 모델이다. Fig. 2 (b)는 Fig. 2 (a)의 기판을 투명하게 하여 기판과 다이어프램 사이의 전극과 glass frit을 나타낸 것으로, 그림에서와 같이 전극은 기판과 다이어프램의 중심부에 위치하게 되고 전극을 제외한 부분에 glass frit이 적용된다.

Fig. 3은 전극 부분을 확대하여 나타낸 모식도이다. Fig. 3 (a)는 다이어프램에 형성된 C_p 전극, Fig. 3 (b)와 (c)는 각각 기판에 형성된 C_R 전극과 C_p 전극을 나타낸다.

전기적 특성 해석을 위한 세라믹 다이어프램의 두께는 기본 0.50 mm로 설정하였고, 0.46~0.52 mm 범위의 두께 변화를 해석에 반영하였다. 압력센서 소자의 소재는 세라믹 기판과 다이

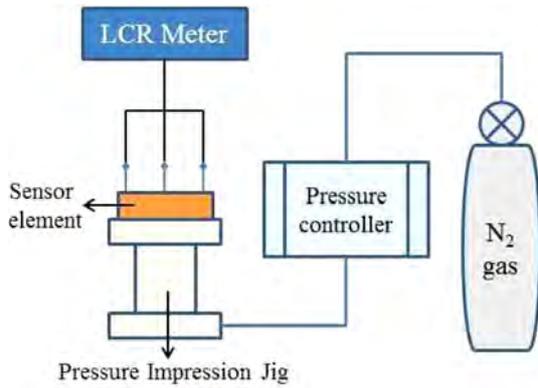


Fig. 4. The geometry of capacitance measurement equipment.

어프램 (Al₂O₃), Glass frit, 전극 (Gold), 이의 부분은 Air로 나누어지며, 전계해석에 적용된 소재의 물성 값은 상대유전율, 탄성계수, 프와송비, 밀도 등으로 Table 1과 같다.

전계 해석과 구조 해석을 구현하기 위하여 각각 Gauss's law 와 Hook's law를 적용하였으며, 각각의 공식은 (4), (5)와 같다.

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \dots\dots \text{Gauss's law} \tag{4}$$

$$-\nabla \cdot \sigma = F_v \dots\dots \text{Hook's law} \tag{5}$$

여기서 E는 전계, ρ는 전하량, ε는 유전율, F_v는 외력, σ는 변형율을 의미한다. 이 후, 구조해석 결과를 전계 해석에 반영하기 위하여 AC/DC module 내에서 Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)가 활용되었다.

2.3 압력센서 소자의 전기적 특성 측정

압력센서 소자에 대한 전기적 특성 평가는 해석 결과에 대한 신뢰성을 평가하고자 수행하였다.

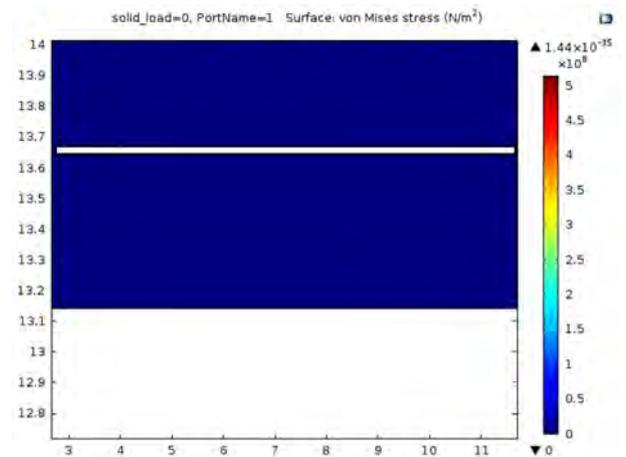
Fig. 4는 센서 소자의 전기적 특성을 측정할 시험 장치의 모식도이다. 시험 장치는 압력이 인가되는 부분에 O-ring을 위치시켜 압력센서 소자의 다이어프램과 측정 지그 가압부 간의 기밀을 유지하고, SUS 지그에 고정된 소자를 실린더가 하측에서 상측으로 이동 후 고정하게 되어 측정 지그에 연결된 N₂ 가스와 pressure controller에 연결하여 목적한 압력을 형성하고 측정하는 방식으로 구성하였다.

시험 조건은 압력은 0~32 bar범위이며, LCR Meter (E4980A, Agilent, USA)를 이용하여 C_B, C_R 값의 측정을 진행하였다.

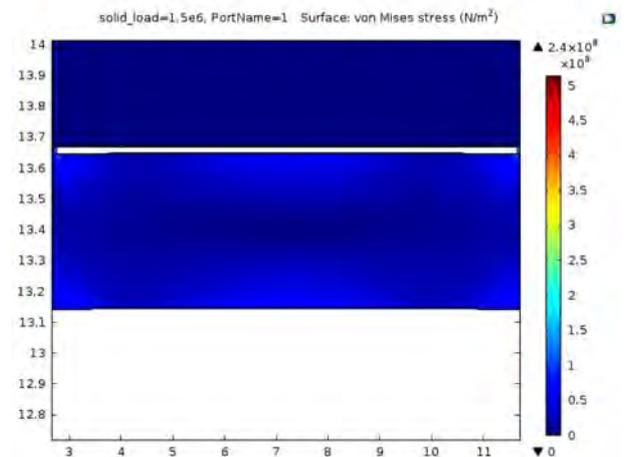
3. 결과 및 고찰

3.1 압력센서 소자의 전기적 특성 해석

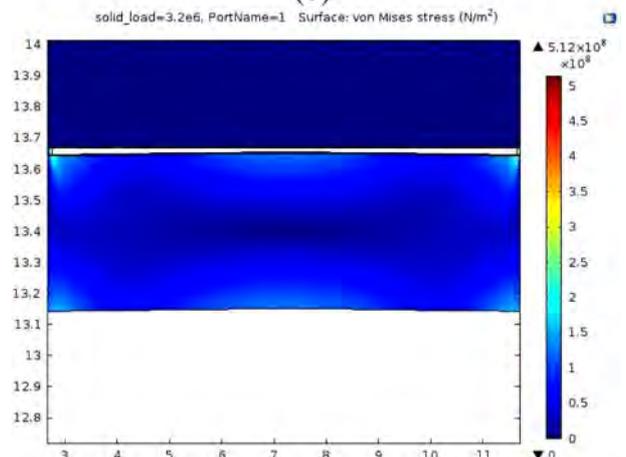
3.1.1 압력에 따른 Capacitance 해석



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. The transform of diaphragm and stress distribution according to pressure change : (a) 0 bar (b) 15 bar (c) 32 bar.

Fig. 5는 압력센서 소자 모델에 0~32 bar의 압력을 가하였을 때 다이어프램의 변형과 응력분포를 나타낸 것이다. 그림과 같이 압력이 가해짐에 따라 세라믹 다이어프램이 변형되어 d 값이 30 μm에서 15 μm까지 변형됨을 알 수 있었다. 또한 물체의

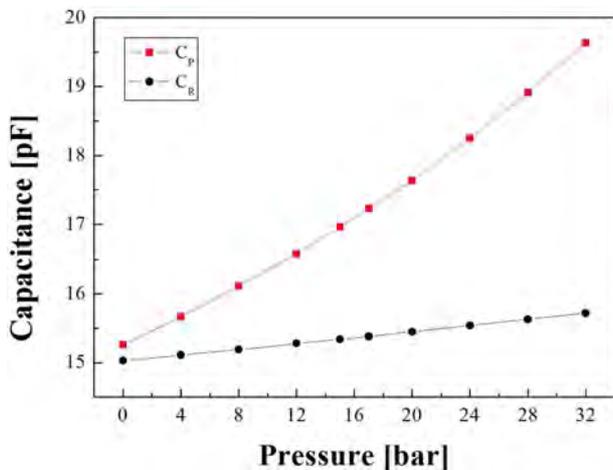


Fig. 6. Simulated results of capacitance according to pressure change.

파괴를 예측하는 기준으로 잘 알려진 등가응력(von Mises stress) 값은 0 bar에서 1.44×10^{-35} N/m²이었으나, 32 bar 조건에서 다이어프램 양쪽 끝 부분은 최대 5.12×10^8 N/m²의 값을 나타내었다.

Fig. 6은 압력에 따른 capacitance 해석 결과이다. 해석 결과, 초기 C_p 값은 15.26 pF이었고, 중간압 17 bar에서는 17.23 pF, 측정범위 최고압 32 bar에서는 19.63 pF를 나타내었다. 이 때, C_R 값은 15.03 pF에서 15.72 pF로 미소변화가 관찰되었다.

해석 결과, C_p 전극의 capacitance 값은 외부 압력에 민감하게 반응하며, 압력센서 소자에 인가되는 압력이 0 bar에서 32 bar로 증가할수록 전극 사이의 간격이 30 μ m에서 15 μ m로 감소하여 Sensor의 capacitance가 4.37 pF 만큼 증가되는 것을 알 수 있었다.

3.1.2 Diaphragm 두께에 따른 Capacitance 해석

Fig. 7은 압력센서 소자의 다이어프램 두께를 0.46~ 0.52 mm 범위에서 변경하여 진행한 capacitance 해석 결과이다. 센서에서 capacitance 값은 소량 변하기 때문에 회로에서는 C_R/C_p 로 계산된 변화량을 측정하고 신호처리를 통하여 출력신호로 나타나게 되므로, 해석 결과를 압력에 따른 C_R/C_p 의 변화로 나타내었다. 그림과 같이 세라믹 다이어프램의 두께가 감소할수록 센서에 인가되는 압력 대비 capacitance 변화폭이 커지므로 다이어프램 두께 감소에 따라 민감도가 증가함을 알 수 있었다.

그러나 센서 성능에 있어서는 선형성(linearity)이 신호 검출 회로의 신뢰성을 나타내는 매우 중요한 요인이므로, 다이어프램 두께 조건인 0.46~0.52 mm 범위에서 압력에 따른 capacitance 값의 단순 상관 분석을 진행하였으며, 단순 상관 분석의 공식은 다음과 같다.

$$y = A + Bx \tag{6}$$

단순 상관 분석에서 선형성을 평가하는 주요 인자는 상관계

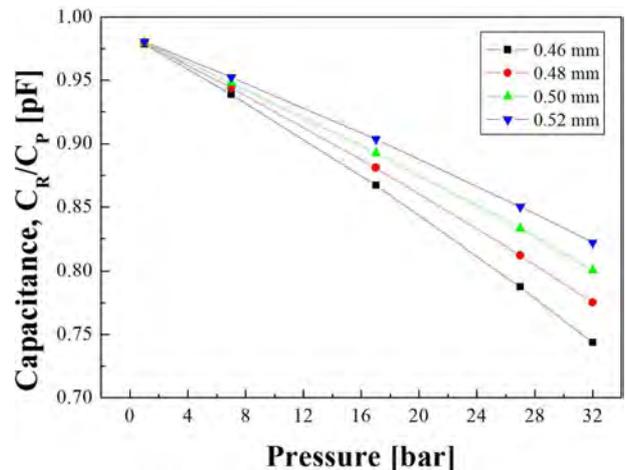


Fig. 7. Simulated results of capacitance(C_R/C_P) according to diaphragm thickness change.

Table 2. The result of simple linear regression

Diaphragm Thickness [μ m]	A	B	R ²
0.46	0.99028	-0.00757	0.99814
0.48	0.98884	-0.00658	0.99872
0.50	0.98772	-0.00577	0.99910
0.52	0.98750	-0.00511	0.99906

수의 제곱(R²) 값으로 값이 1에 가까울수록 선형성을 나타내게 된다[8-10].

Table 2는 해석한 결과에 대한 단순 상관 분석 결과이며, 다이어프램 두께가 0.50 mm 일 때, R² 값이 0.99910로 가장 1에 가까운 수치를 나타내었다.

따라서 신호에 대한 선형성 관점을 고려하면 0.50 mm의 다이어프램 두께가 압력센서 소자에 적합할 것으로 사료된다.

3.2 압력센서 소자의 특성 평가 결과

해석을 통하여 선정한 0.50 mm의 다이어프램 두께 조건을 반영하여 제작한 압력센서 소자에 대하여 0~32 bar 압력에 대한 실제 capacitance 측정을 진행하였다.

Fig. 8은 인가 압력에 따른 압력센서 소자의 실제 capacitance 측정 결과이다. C_p 값이 초기 1 bar에서는 11.22 pF, 중간압인 16.7 bar에서는 12.55 pF, 측정범위 최고압인 32.3 bar에서는 14.36 pF로 측정되었다. 이는 압력 인가량이 증가함에 따라 C_p 값 역시 증가함을 나타낸다. C_R 값은 reference로 사용되는 값이므로 이상적인 경우는 변화율이 없지만, 실제 측정 시 1 bar에서는 10.81 pF, 32.2 bar에서는 11.71 pF로 측정되어 압력 증가에 따라 미소 변화가 발생되었고, 이를 통하여 해석 결과 역시 실제와

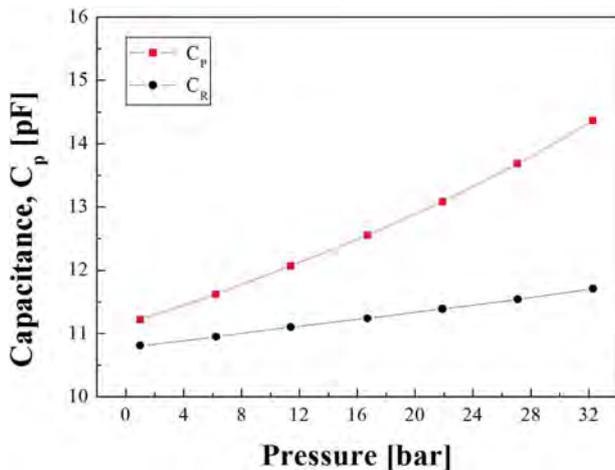


Fig. 8. Measured results of capacitance according to pressure change.

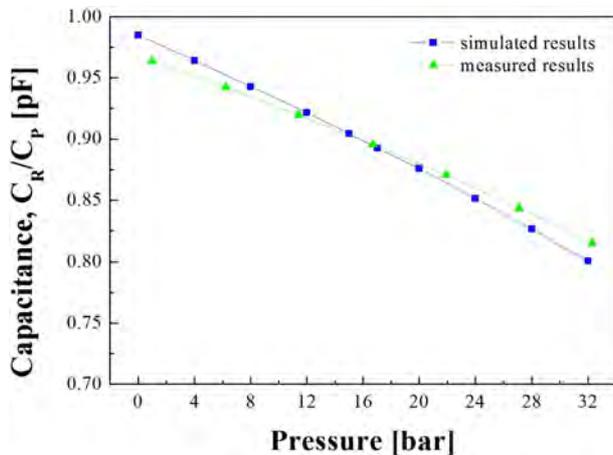


Fig. 9. Verification of simulation by comparing the results to the measured and simulated.

유사하게 미소 변화를 나타내었다는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 전기적 특성 해석과 실제 측정 결과를 비교한 결과이다. 해석으로 얻은 압력센서 소자의 C_R/C_p 값은 0 bar에서 0.98, 32 bar에서는 0.80의 값을 나타내었고, 실제 측정한 소자의 C_R/C_p 값은 1 bar에서 0.96, 32.3 bar에서 0.81의 값을 나타내었다.

따라서 해석과 실제 측정한 C_R/C_p 값은 약 2% 정도의 오차 범위를 가지고 있으나, 이는 재료의 물성 값과 압력 등의 공정 편차에 대한 오차로 사료된다. 따라서 해석을 통한 결과가 신뢰성을 가지며, 이를 활용하여 개선된 세라믹 소자 또한 신뢰성을 가질 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 에어컨 냉매압 측정용 32 bar 급 정전용량형

압력센서 소자의 최적 설계를 목적으로 압력과 두께에 따른 전기적 특성 해석 및 실부품 평가를 수행하여 다음의 결론을 도출하였다.

1. 압력센서 소자는 0~32 bar 범위에서 인가 압력이 증가할수록 전극 사이 간격이 감소되어, capacitance 값의 증가를 나타내었다.

2. 세라믹 다이어프램 두께 조건인 0.46~0.52 mm 범위에서 변화폭이 가장 큰 0.46 mm가 민감도가 가장 우수하였으나, 선형성 관점을 고려하여 0.50 mm를 최적 다이어프램 두께로 선정하였다.

3. 해석을 통하여 선정된 다이어프램 두께를 설계에 반영하여 압력에 따른 출력 특성을 비교한 결과, 해석 결과와 측정 결과는 약 2%의 오차범위를 가지고 있으므로 해석 결과 및 이를 통해 개선된 세라믹 소자 모두 신뢰성을 가질 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 지식경제기술혁신사업(과제 번호: 10043590, 과제명: 자동차부품 국산화를 위한 에어컨 냉매압 측정용 32bar급 정전용량형 압력센서 제조 및 신뢰성 확보 기술 개발)의 지원을 받아 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] S. H. Cho, D. S. Lee, J. W. Choi, S.W. Choi, S. H. Park, J. R. Lee, and K. Y. Lee, "A design of signal processing analog front-end IC for automotive piezo-resistive type pressure sensor", *J. of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 8, pp.1722-1732, 2014
- [2] K. K. Baik, "Microsensor", *Proc. of Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea*, pp. 107-114, 2003
- [3] W. H. Ko, and Q. Wang, "Touch mode capacitive pressure sensor for industrial applications", *Proc. Of IEEE on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 284-289, 1997
- [4] W. H. Ko, and Q. Wang., "Modeling of touch mode capacitive sensor and diaphragms", *Proc. Of Solid-State Sensor and Actuators*, pp. 230-241, 1999
- [5] M. Z. Shaikh, Dr. S. F. Kodad, and Dr. B. C. Jinaga., "Modeling and simulation of MEMS characteristics: A numerical integration approach", *J. of Theoretical and Applied Information Technology*, pp. 415-418, 2008
- [6] W. S. Choi, "Automotive pressure sensor technology applying the ceramic materials", *Intensify Report of Ceramics Bank*, pp. 1-16, 2013
- [7] W. J. Fleming, "New automotive sensors-A review", *J. of IEEE Sensors*, Vol. 8, No. 11, 2008
- [8] S. I. Pak, and T. H. Oh, "Correlation and simple linear regression", *J. Vet. Clin.*, Vol. 27, No. 4, pp. 427-434,

2010

- [9] Y. S. Bae, J. H. Seo, E. S. Jung, and M. Y. Sung, "Design of the readout IC for IR image sensor with a novel input stage to improve linearity", *Proc. Of the KIEEME Annual Summer Conf.*, pp. 1912-1913, 2010
- [10] J. T. Kim, and H. M. Choi, "Estimation of the number of change-points with local linear fit", *J. of Data & Information Science Society*, Vol. 13, No. 2, pp. 251-260, 2002