PMMA가 코팅된 주름 구조를 갖는 다공성규소 격판을 이용한 광섬유 압력센서

이기원+ · 조소연

Fiber-Optic Pressure Sensor Using a Rugate-Structured Porous Silicon Diaphragm Coated with PMMA

Ki-Won Lee⁺ and So-Yeon Cho

Abstract

In this research, fiber-optic pressure sensors were fabricated with rugate-structured porous silicon (RPS) diaphragms coated with PMMA (Polymethyl-Methacrylate). The reflectance spectrum of the PMMA/RPS diaphragm was almost the same as that of uncoated RPS diaphragm. However the mechanical strength of the PMMA/RPS diaphragm increased more than that of the uncoated diaphragm. As a result, the fiber-optic sensor fabricated with PMMA/RPS diaphragm could successfully detect more high pressure difference without diaphragm damage than the highest detectable pressure difference of the sensor with normal RPS diaphragm. The response data of the fiber-optic sensor recorded as a function of pressure difference were fitted by theoretical curves. During this process, elastic moduli of the used PMMA/RPS diaphragms were obtained numerically. The dynamic response properties of the fiber-optic sensor were also investigated under continuous variation of the pressure difference conditions.

Keywords : Porous silicon, Pressure sensor, PMMA, Pressure difference, Fiber-optic sensor, Diaphragm

1. 서론

불화수소산(HF) 용액 속에서 단결정 규소 기판의 양극산화(anodization)에 의해 제작되는 다공성규소(Porous Silicon, PS)는 강한 발광 특성과 고다공성 구조 때문에 활발히 연구되고 있다. 특히 이 재료를 기체, 액체, 바이오 물질 등을 검출하기 위한 센서의 감지 부로서 이용하기 위해 다양한 시도들이 진행되어 왔다. 기체로는 NO₂, 에탄올[1-3] 등, 액체로는 에탄올, 암모니아수[4] 등, 바이오 물질로는 DNA, IgG[5-8] 등이 감지대상 물질로서 연구된 바 있다.

이러한 연구와 더불어 PS를 압력감응물질로서 활용하기 위한 연구도 시도되었다. Gangopadhyay와 Pramanik 연구그룹은 얇은

규소 기판 위에 PS가 형성된 구조, 즉 PS/Si 격판(diaphragm)을 제작하고, 압력에 따른 PS 층의 전기적 저항변화로부터 압력감응을 얻었다[9, 10]. Sujatha도 유사한 PS/Si 구조를 제작하였다[11]. 그리고 인가된 압력에 따른 격판의 변형을 piezoresistor로 측정함으로써 압력 감응을 얻은바 있다. 이러한 연구들은 PS를 압력감응물질로서 활용하기 위해 시도된 선도적인 연구들로서 평가될 수 있다. 그러나 두 경우 모두 PS의 부서지기 쉬운 특성 때문에 PS 물질만으로 압력감응을 얻지 못하고 그 지지체인 Si이 격판을 구성하는 요소로서 동시에 사용되었다. 따라서 센서로부터 출력되는 압력감응의 민감도는 사용된 Si 막 때문에 낮아질 수 있다. 뿐만 아니라 압력 감응신호를 얻기 위해 PS/Si 격판 위에 금속전극 또는 piezoresistor의 부착이 필요하다. 이러한 이차물질도 압력감응의 효율을 낮추는 요인이 될 수 있다.

최근에는 기존 연구의 이러한 단점을 극복하기 위해 주름 구조를 갖는 다공성규소(Rugate-structured Porous Silicon, RPS) 격판을 이용한 광섬유 압력센서(fiber-optic pressure sensor)가 보고된바 있다[12]. 이 센서는 자립형 PS 격판만을 압력감응재료로서 활용하기 때문에, 감응 전과 후의 신호의 변화율이 종전 연구의 약 3% 보다 매우 높은 40% 이상을 보였다. 게다가 이 센서는 RPS 격판의 반사 스펙트럼에서 관찰되는 날카로운 멈춤대역(stopband)

공주대학교 물리학과(Department of Physics, Kongju National University)

56 Gongjudaehak-ro, Gongju, Chungnam 314-701, Korea

⁺Corresponding author: ga992205@kongju.ac.kr

(Received : May. 6, 2013, Accepted : May. 23, 2013)

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.

을 이용하여 광학적인 방법으로 감응신호를 얻기 때문에 격판이 이차적인 물질과 접촉하지 않는 장점이 있다. 한편 이 센서의 단점으로는 RPS 격판의 부서지기 쉬운 특성 때문에 측정 압력차의 영역이 20 kPa 미만으로 매우 좁다는 것이다. 그러므로 이 센서의 효용성을 높이기 위해서는 측정영역의 확대를 위한 연구가 반드시 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 RPS 격판을 이용한 광섬유 압력센서의 측정범위를 넓이기 위한 수단으로서, RPS 격판 위에 PMMA(Polymethyl-Methacrylate)를 코팅하여 역학적 강도가 강화된 PMMA/RPS 격판을 제작하였다. 그리고 이 격판의 광학적 특성과 이 격판을 장착한 광섬유 센서의 압력감응 특성을 조사하였다. 그리고 실험적으로 측정된 압력감응을 이론적 모델을 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 이 과정에서 PMMA/RPS 격판들의 탄성계수 값들을 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료의 제작

주름 구조를 갖는 PS는 비저항이 0.02 Ω·cm인 (100)방향 단결정 구조기판(Nilaco, Si-500440)을 에탄올이 희석된 15% HF 용액 속에서 사인파형 전류밀도로 양극산화하여 제작되었다. 사인파형은 S. Ilyas 그룹의 방법과 동일하게 step function을 이용하여 근사적으로 형성되었다[13]. Step function은 프로그램 가능한 전원공급기(Agilent, E3634A)와 LabVIEW 8.5(National Instruments)를 이용하여 제작되었다. 한 주기의 사인파형은 총 35개의 스텝으로 만들어졌고, 최소와 최대 전류밀도 값은 각각 15.0과 50.0 mA/cm²이었다. 파형의 한 주기 값은 7.0 s로 고정되었으며, 주름 구조를 형성하기 위한 파형의 주기는 100주기로 고정하였다.

제작된 주름 구조를 갖는 PS는 Si 기판 위에 여전히 부착되어 있다. 그러므로 RPS 격판을 제작하기 위해서는 Si 기판으로부터 주름 구조를 갖는 PS 층만을 완전히 분리해야만 한다. 그런데 이미 만들어진 RPS 격판 위에 PMMA를 코팅하는 것은 부서지기 쉬운 격판의 특성 때문에 지극히 어렵다. 그래서 본 연구에서는 PS 층의 하단은 기판과 분리되었으나 가장자리는 여전히 기판과 붙어있는 semi-RPS를 중간단계로서 제작하고, 이 시료 위에 PMMA를 코팅하였다. 그리고 그 후에 격판의 가장자리를 기판으로부터 완전히 분리시킴으로써 PMMA/RPS 격판을 제작하였다. Semi-RPS는 제작 직후의 주름 구조를 갖는 PS를 3.3% HF 용액 속에서 13.0 mA/cm²의 일정한 전류밀도로 50.0 s 동안 이차 양극산화함으로써 제작되었다.

PMMA 분말의 물질량(molar mass)은 25,000 g/mol 이었고,

용매로는 99.5%의 톨루엔이 사용되었다. PMMA 용액의 농도는 PMMA 분말의 질량과 톨루엔 부피의 비율을 서로 달리하여 33.3, 50.0, 100.0 g/L로 조절하였다. 제작된 PMMA 용액은 스핀코터(JDtech, JSP4A)를 이용하여 위에서 설명한 semi-RPS 위에 코팅되었다. PMMA 용액은 1000 rpm에서 semi-RPS 위로 주입되었으며, 주입 후 1500 rpm에서 60.0 s 동안 유지되었다. 코팅이 끝난 후 시료는 100℃로 유지되는 오븐에서 10분간 열처리되었다. 마지막으로 semi-RPS의 측면이 기판으로부터 분리됨으로써, PMMA/RPS 격판이 얻어졌다. 제작된 PMMA/RPS 격판의 표면과 단면 모습은 주사전자현미경(Hitachi, S-4800)으로 관찰되었다.

2.2 실험장치의 구성

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 광섬유 센서시스템의 개략도이다. 그림과 같이 PMMA/RPS 격판은 원통형 관 모양으로 생긴 sensor tip위에 놓여졌다. 그 격판의 상단은 대기압 P_1 에 노출되었고, 하단은 진공펌프(KNF, N816.3KT.18)와 leak valve에 의해 조절되는 압력 P_2 에 노출되었다. 그러므로 PMMA/RPS 격판의 양단에는 $P_1 - P_2 = \Delta P$ 의 압력차가 인가된다. 원통형 관 내부에는 $d=600\mu\text{m}$ 코어 직경을 갖는 광섬유나선(bare optical fiber)(Thorlab, BFL-600)이 삽입되었다. 이 광섬유의 끝은 sensor tip의 끝으로부터 $h=1.0 \times 10^{-3}\text{m}$ 아래에 고정되었다. 그리고 다른 한 끝은 connector를 이용하여 분기광섬유(bifurcated optical fiber)(Ocean optics, QBIF600-UV/VIS)와 연결되었다. 분기광섬유의 양끝에는 각각 광원인 텅스텐-할로겐 램프(Ocean optics, LS-1)와 분광기(Ocean optics, USB2000+)가 그림처럼 연결되었다. 그러므로 광원에서 방출된 빛은 분기광섬유와 광섬유나선을 진행하여 PMMA/RPS 격판의 하단을 조사한다.

Fig. 1. Schematic diagram of a fiber-optic sensor with a PMMA/RPS diaphragm.

그리고 그 격판으로부터 반사된 빛의 일부는 역순으로 광섬유나선과 분기광섬유를 경유하여 분광기로 전달된다. 이를 통해 시료에서 반사되는 반사 스펙트럼이 측정된다.

PMMA/RPS 격판에 걸리는 ΔP 의 참값은 Fig. 1에서와 같이 참조용 압력센서(Vernia, GPS-BTA)를 센서 팁에 연결하여 실시간으로 측정되었다.

3. 이론

평평한 PMMA/RPS 격판에서 일정한 거리만큼 떨어진 광섬유로부터 빛이 조사되고 있을 때, 조사된 빛의 상당량은 격판에서 반사된 후 다시 광섬유로 재입사된다. 그런데 Fig. 1과 같이 PMMA/RPS 격판의 양단에 압력차가 걸리면, 격판은 압력이 낮은 쪽으로 굽어진다. 그러면 격판으로부터 반사되어 광섬유로 재입사하는 빛의 강도는 격판이 평평할 때 보다 감소한다. 이와 같이 광섬유로 재입사하는 빛의 강도를 측정하고 분석하면 격판의 양단에 걸린 압력차의 크기에 대한 정보를 구할 수 있다.

압력차에 의해 변형되는 PMMA/RPS 격판을 이상적인 포물반사면으로 간주하면, 격판이 평평할 때와 비교하여 굽어진 격판에서 반사되어 광섬유로 재입사하는 빛의 강도변화율은 다음의 식으로 주어진다[12].

$$\Delta I/I_0 = (2f(h+f') - 0.5\sqrt{K})^2 d^{-4} - 1 \quad (1)$$

(1)식에서 I_0 는 격판이 평평할 때 측정된 빛의 강도이고, K 는 다음과 같다.

$$K = 16f^2(h+f')^2 + 4d^2(r^2 + 4ff') \quad (2)$$

(1)식과 (2)식에서 d 는 빛을 조사하고 다시 받아들이는 광섬유나선 core의 반지름, r 은 PMMA/RPS 격판의 반지름, h 는 PMMA/RPS 격판으로부터 광섬유나선 끝단까지의 거리이다. 그리고 f 와 f' 은 압력차 ΔP 가 인가되기 전과 후의 포물면의 초점으로서 다음과 같이 각각 주어진다[12].

$$f = r\sqrt{Y}(2\sqrt{\Delta P})^{-1} \quad (3)$$

$$f' = r(-\Delta P + Y)(2\sqrt{\Delta PY})^{-1} \quad (4)$$

(3)식과 (4)식에서 Y 는 Pa의 단위를 갖는 격판의 탄성계수이다.

4. 실험 결과

Fig. 2는 농도 50.0 g/L의 PMMA 용액으로 코팅된 PMMA/RPS 격판의 모습을 주사전자현미경으로 관찰한 이미지이다. 시료의 가장자리 부분을 관찰하였기 때문에 코팅된 PMMA 층뿐만 아니라 그 아래에 있는 RPS 층의 표면과 내부 모습도 동시에 얻어졌다. RPS 층의 내부는 수많은 미세공들이 무수히 형성되어 있음을 관찰할 수 있다. 이 미세공들의 크기는 양극산화 과정에서 설정된 사인파형 전류밀도 값에 의존하기 때문에, 깊이 방향으로 주기적인 크기 기울기를 갖는 층이 형성된다(Fig. 2에서는 명확히 구분되어 나타나지 않음). RPS 층의 표면은 사인파형 양극산화 전류밀도의 시작 값인 15.0 mA/cm²로 양극산화되었기 때문에 미세공의 크기가 아주 작게 관찰된다. 이 RPS 층 위에는 코팅된 PMMA 층이 관찰된다. 이 층이 상당히 매끄럽게 관찰되는 것으로 보아, 코팅이 균질하게 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라 Fig. 2는 본 연구에서 목적으로 하는 PMMA/RPS 격판의 구조가 성공적으로 균질하게 제작되었음을 나타낸다.

Fig. 2. Scanning electron microscope image of a PMMA/RPS diaphragm.

RPS 격판의 전형적인 광학적 특성이 PMMA/RPS 격판에서도 동일하게 유지되어야 한다. 만일 PMMA/RPS 격판의 반사 스펙트럼에서 날카로운 멈춤대역이 더 이상 관찰되지 않거나 크게 감소되어 버린다면 압력감응을 얻기 위한 신호로서 멈춤대역을 더 이상 활용할 수 없기 때문이다. Fig. 3은 이를 확인하기 위해 RPS와 50.0 g/L의 농도를 갖는 PMMA 용액으로 코팅된 PMMA/RPS 격판의 반사 스펙트럼들을 각각 측정하고 비교한 것이다. 그림과 같이 두 시료의 반사 스펙트럼은 거의 동일하였다. 즉 PMMA/RPS 격판에서도 RPS 격판에서와 같이 날카로운 멈춤대역이 그대로 관찰되며 최대봉우리는 498 nm에서 여전히 유지되었다. 이 결과는 PMMA 코팅이 RPS 격판의 광학적 특성에 큰 영향을 주지 않으며, PMMA/RPS 격판도 광섬유 압력센서의 압력감응재료로서 효과적으로

Fig. 3. A comparison between reflectivity spectra of the RPS and the PMMA/RPS diaphragms.

이용될 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 50.0 g/L 농도의 PMMA로 코팅된 PMMA/RPS를 Fig. 1의 센서 팁 위에 올려놓고 다양한 압력차에서 반사 스펙트럼의 변화를 비교한 것이다. 여기서 압력차가 인가되지 않은 0.0 kPa에서 측정된 스펙트럼을 Fig. 3의 PMMA/RPS의 스펙트럼과 비교해 볼 때, 동일한 조건의 PMMA/RPS일지라도 스펙트럼의 모양과 최대 봉우리 파장이 서로 다르다. 그 이유는 큰 크기의 RPS 격판에 구조적 비균질성이 존재하여 위치에 따라 서로 다른 광학적 특성이 초래되기 때문이다. 그러므로 큰 크기의 RPS 격판이 작게 잘려진 후 센서 시스템 위에 장착된 격판들은 서로 다른 반사 스펙트럼을 보일 수 있다. 그렇더라도 중요한 것은 PMMA층의 유무에 따라 동일한 위치에서 측정된 반사스펙트럼은 Fig. 3에서와 같이 거의 동일하다는 것이다. 요약하면 Fig. 3과 4에서 관찰되는 반사스펙트럼의 모양과 최대 봉우리 파장의 차이는 압력차에 의한 것이 아니라 PMMA/RPS 층 자체의 반사스펙트럼이 서로 다르기 때문임을 밝힌다.

Fig. 4. A comparison between reflectivity spectra measured from a fiber-optic pressure sensor with a PMMA/RPS diaphragm at various pressure differences.

Fig. 4에 따르면, 격판의 양단에 걸리는 ΔP 의 값이 증가할수록 멈춤대역의 최대 봉우리 파장은 변하지 않고, 그 강도는 꾸준히 감소됨을 확인할 수 있다. 그리고 RPS 격판의 경우 약 20.0 kPa이 초과되는 압력차에서 부서져 버렸던 현상[12]과 비교하여, PMMA/RPS 격판은 50.0 kPa의 압력차가 인가되더라도 여전히 유지됨으로써 반사 스펙트럼이 측정될 수 있었다. 본 실험의 경우 Fig. 1의 시스템이 아직 최적화 되지 못해 50.0 kPa보다 큰 압력차는 시료에 인가할 수 없었다. 이것을 감안한다면 본 연구에서 제작한 PMMA/RPS 격판은 50.0 kPa 이상의 압력차에서도 여전히 형태를 유지할 수 있음을 짐작할 수 있다. 보다 넓은 압력범위에서의 실험은 실험시스템의 성능을 더욱 향상시킨 후에 향후 연구에서 수행할 예정이다.

우리는 압력감응의 안정성과 민감도 측면에서 우수한 특성을 보이는 PMMA의 최적농도를 조사하기 위해, 서로 다른 농도의 PMMA로 코팅된 PMMA/RPS 격판들을 제작하였다. 그리고 그 격판들에 대해 압력차의 함수로서 멈춤대역의 최대 봉우리 강도의 변화, 즉 압력감응의 변화를 조사하였다. 그 결과는 Fig. 5에 점으로 제시되었다. 그림에서 마름모형 점들은 PMMA가 코팅되기 전 RPS 격판의 압력감응이다. 앞에서 기술한 바와 같이 격판의 부서지기 쉬운 특성 때문에 0–20 kPa범위에서만 측정될 수 있었다.

Fig. 5. Response curves to the pressure as measured from the RPS and the PMMA/RPS diaphragms coated with PMMA solutions of different concentrations.

한편 그림에서 사각형, 동그라미, 삼각형 점들은 각각 100.0, 50.0, 그리고 33.3 g/L의 PMMA가 코팅된 PMMA/RPS 격판들의 압력감응 데이터이다. 그림과 같이 PMMA 용액의 농도에 따라 시료들의 압력감응의 정도는 서로 달랐다. RPS 격판의 압력감응을 기준으로, 100.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS 격판은 감응의 민감도가 가장 높게 나타났다. 그러나 그림에서와 같이 감응의 변화가 매우 불균일하여 안정성 측면에서 낮은 특성을 보였다. 이에 비해 50.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS는 민감도는 제일 낮으나 경향 있는 연속적인 변화를 보여 안정성이 우수하였다. 그리고

33.3 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS는 코팅전 RPS 격판과 거의 유사한 변화를 보였다.

PMMA 용액의 농도가 클수록 점성도 높아지기 때문에 PMMA층의 코팅 두께는 두꺼워진다. 그러므로 높은 농도의 용액으로 제작된 PMMA/RPS 격판은 탄성력이 증가되어 감응 민감도는 낮아져야 한다. 이러한 관점에서 보면 50.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS 격판의 민감도가 33.3 g/L의 농도로 제작된 격판보다 낮은 이유가 설명된다. 그러나 50.0 g/L과 비교하여 더 높은 농도인 100.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS 격판에서 민감도가 더 높게 나온 것은 특이한 결과이다. 이 현상은 PMMA의 농도가 지나치게 높으면 시료의 유연성이 지극히 낮아져 인가된 압력차에 의해 격판이 휘어지기 보다는 깨어져 버리기 때문으로 관찰되었다. 그러므로 작은 압력차에서도 PMMA/RPS 층은 전체적으로 균열이 발생되었고 압력차가 증가할수록 PMMA 층이 길게 늘어나 버렸다. 이로 인해 100.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS는 압력차가 다시 0으로 회복되더라도 압력감응은 다른 시료들과는 달리 초기상태로 회복되지 않았다. 이러한 특성 때문에 100.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS는 압력감응 물질로서 활용하는 것이 적합하지 않다. 한편 33.3 g/L의 경우 간혹 50.0 kPa 전·후의 압력차에서 격판이 파괴되는 현상이 나타났다. 그 이유는 코팅된 막의 두께가 너무 얇기 때문이다. 이에 비해 50.0 g/L의 농도로 제작된 PMMA/RPS는 50.0 kPa에서도 항상 안정된 압력감응을 보였다. 그러므로 50.0 g/L 농도의 PMMA로 코팅된 PMMA/RPS 격판은 본 연구에서 사용된 3개의 시료들 중 넓은 압력감응범위, 감응의 안정성, 민감도를 고려할 때 압력감응 물질로서 가장 적합함을 알 수 있었다.

PMMA/RPS 격판의 압력감응의 민감도를 결정하는 대표적인 척도는 격판의 탄성계수이다. 즉 탄성계수 값이 클수록 인가되는 외부 힘에 대한 저항성이 커 압력감응의 민감도는 낮아진다. 본 연구에서는 이 값들을 구하기 위해 식 (1)을 이용하여 Fig. 5에서 보여졌던 실험으로 얻은 데이터 점들을 최적화 하였고, 그 결과를 Fig. 5에 실선으로 나타내었다. 그 결과 PMMA가 코팅되지 않은 RPS 격판의 탄성계수는 1.82 MPa이 얻어졌다. 이에 비해 100.0, 50.0, 그리고 33.3 g/L의 PMMA 농도로 코팅된 PMMA/RPS 격판들은 0.08, 3.55, 그리고 2.18 MPa이 각각 얻어졌다.

본 연구에서는 압력차가 연속적으로 변하는 동안 PMMA/RPS 격판을 이용한 광섬유 센서의 동적 압력감응 특성도 조사하였다. Fig. 6(a)는 인위적으로 변화시킨 PMMA/RPS 격판의 양단에 걸린 압력차 ΔP 를 참조 압력센서로 측정된 결과이다. 경과시간이 0~420 s까지 ΔP 는 0.0 kPa로 유지되었고, 420 s에서 40.3 kPa로 상승되었다. 그리고 1020 s에서 0.0 kPa로 다시 회복된 후 1,500 s까지 그대로 유지되었다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)와 동일한 압력변화 하에서 50.0 g/L의 농도로 코팅된 PMMA/RPS 격판으로부터 측정된 압력감응이다. 그림과 같이 ΔP 가 0.0 kPa일 때 격판의 압력감응도 없다가, 40.3 kPa로 증가되었을 때 -44.6%의 압력감응을 보

였다. 그리고 다시 0.0 kPa로 ΔP 가 회복되었을 때 압력감응도 초기상태로 완전히 회복되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 제작한 PMMA/RPS 격판을 활용한 광섬유 압력센서가 연속적인 압력차 변화에 대해서도 효과적인 압력 감응을 보임을 나타낸다. 그러나 Fig. 6(b)는 단지 압력감응을 나타낼 뿐이며, 이것이 압력차로서 보정되지 않았기 때문에 Fig. 6(a)와는 직접적인 비교를 할 수 없다. 그래서 Fig. 6(b)의 곡선을 Fig. 5에서 50.0 g/L로 코팅된 PMMA/RPS 격판으로부터 얻은 최적화된 함수를 이용하여 보정하였으며, 그 결과를 Fig. 6(c)에 굵은 실선으로 나타냈다. 또한 Fig. 6(c)에는 비교를 위해 Fig. 6(a)의 압력 곡선을 얇은 실선으로 함께 나타냈다. 그림과 같이 광섬유 센서로부터 측정된 압력 곡선은 참조 압력센서로 측정된 곡선과 전반적으로 동일한 경향의 응답을 보였다. 다만 가장 높은 압력차에서 참조 값 40.3 kPa보다 5.7 kPa이 큰 46.0 kPa이 광섬유 압력센서로부터 얻어졌다. 이 오차는 본 연구에서 제작한 센서시스템, PMMA 코팅법 등이 아직 최적화되지 않았기 때문에 나타난 것으로 보인다. 특히 Fig. 5에서 에러바로 표시한 바와 같이 시료내 위치간의 비균질성에 의해 초래되는 압력감응의 불확도와 시뮬레이션에서 사용된 포물반사면 모델의 부정확성 등이 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 이러한 요인을 고려하고 개선한다면 Fig. 6(c)에서의 오차는 충분히 감소될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 6. (a) Reference curve measured by a commercial pressure sensor for ΔP adjusted by hands, (b) the dynamic response curve to the pressure measured using a fiber-optic sensor with a PMMA/RPS diaphragm, and (C) a comparison of the reference curve (thin line) and calibrated response curve (thick line).

5. 결론

RPS 격판이 이용된 광섬유 압력센서의 큰 단점중의 하나인 감응 범위의 협소문제를 해결하기 위해, PMMA/RPS 격판을 이용한 센서를 제작하고 그것의 압력 감응 특성을 조사하였다. 그 결과 RPS 격판이 20 kPa 정도의 압력차까지 측정 가능했던 반면에 PMMA/RPS 격판은 50 kPa 이상의 압력차도 측정할 수 있었다. 50.0 g/L의 농도를 갖는 PMMA 용액을 이용하여 제작된 PMMA/RPS 격판은 최적의 감응 민감도와 안정성을 보였다. 제작된 센서는 고정된 압력뿐만 아니라 동적 압력변화에 대해서도 성공적으로 감응하였다. 다만 압력차가 높아질수록 측정 압력값의 오차가 커지는데, 이를 최소화하기 위해서는 센서시스템과 시료 제작의 최적화, 보다 정확한 이론적 모델의 수립이 필요함을 도출하였다. 이러한 후속연구를 거친다면 PMMA/RPS 격판을 활용한 광섬유 압력센서의 실용화 가능성이 커질 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0023953)

REFERENCES

- [1] L. Pancheri, C.J. Oton, Z. Gaburro, G. Soncini, and L. Pavesi, "Very sensitive porous silicon NO₂ sensor", *Sens. Actuator B-Chem.*, Vol. 89, pp. 237-239, 2003.
- [2] C. Baratto, G. Faglia, E. Comini, G. Sberveglieri, A. Taroni, V. La Ferrara, L. Quercia, and G. Di Francia, "A novel porous silicon sensor for detection of sub-ppm NO₂ concentrations", *Sens. Actuator B-Chem.*, Vol. 77, pp. 62-66, 2001.
- [3] S.-H. Park, D. W. Seo, Y.-Y. Kim, and K.-W. Lee, "Organic vapor detection using a color-difference image technique for distributed Bragg reflector structured porous silicon", *Sens. Actuator B-Chem.*, Vol. 147, pp. 775-779, 2010.
- [4] M. A. Parashchenko, N. V. Vandsheva, V. V. Kirienko, N. S. Filippov, and S. I. Romanov, "Electrical microchannel silicon sensor for solvent detection", *XII International conference and seminar EDM'2011*, pp. 150-151, Erlagol, Russia, 2011.
- [5] H. Ouyang, C. C. Striemer, and P. M. Fauchet, "Quantitative analysis of the sensitivity of porous silicon optical biosensors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, pp. 163108-1-163108-3, 2006.
- [6] S. Chan, Y. Li, L. J. Rothberg, B. L. Miller, and P. M. Fauchet, "Nanoscale silicon microcavities for biosensing", *Mater. Sci. Eng. C*, Vol. 15, pp. 277-282, 2001.
- [7] K. S. Dancil, D. P. Greiner, and M. J. Sailor, "A porous silicon optical biosensor: Detection of reversible binding of IgG to a protein A-Modified surface", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 121, pp. 7925-7930, 1999.
- [8] A. Jane, R. Dronov, A. Hodges, and N. H. Voelcker, "Porous silicon biosensors on the advance", *Trends Biotechnol.*, Vol. 27, pp. 230-239, 2009.
- [9] U. Gangopadhyay, C. Pramanik, H. Saha, Kyunghae Kim, and J. Yi, "Porous silicon as pressure sensing material", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 47, pp. S450-S453, 2005.
- [10] C. Pramanik and H. Saha, "Piezoresistive pressure sensing by porous silicon membrane", *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, pp. 301-309, 2006.
- [11] L. Sujatha and E. Bhattacharya, "Composite Si/PS membrane pressure sensors with micro and macro-porous silicon", *Sādhanā*, Vol. 34, pp. 643-650, 2009.
- [12] S.-Y. Cho, K.-W. Lee, J.-W. Kim, D.-H. Kim, "Rugate-structured free-standing porous silicon-based fiber-optic sensor for the simultaneous detection of pressure and organic gases", *Sens. Actuator B-Chem.*, Vol. 183, pp. 428-433, 2013.
- [13] S. Ilyas, T. T. Böcking, K. Kilian, P. J. Reece, J. Gooding, K. Gaus, and M. Gal, "Porous silicon based narrow line-width rugate filters", *Opt. Mater.*, Vol. 29, pp. 619-622, 2007.