논 문
59P-1-10

전기용량성 섬유 압력센서를 이용한 호흡측정 시스템

Respiration Measurement System using Textile Capacitive Pressure Sensor

민 세 동* · 윤 용 현** · 이 충 근* · 신 항 식** · 조 하 경** · 황 선 철*** · 이 명 호†
(Se-Dong Min · Young-Hyun Yun · Chung-Keun Lee · Hang-Sik Shin · Ha-Kyung Cho · Seon-Cheol Hwang · Myoung-Ho Lee)

Abstract - In this paper, we proposed a wearable respiration measurement system with textile capacitive pressure sensor. Belt typed textile capacitive pressure sensor approach of respiration measurement, from which respiration signatures and rates can be derived in real-time for long-term monitoring, are presented. Belt typed textile capacitive pressure sensor has been developed for this measurement system. the distance change of two plates by the pressure of motion has been used for the respiration measurement in chest area. Respiration rates measured with the textile capacitive pressure sensor was compared with standard techniques on 8 human subjects. Accurate measurement of respiration rate with developed sensor system is shown. The data from the method comparison study is used to confirm theoretical estimates of change in capacitance by the distance change. The current version of respiratory rate detection system using textile capacitive pressure sensor can successfully measure respiration rate. It showed upper limit agreement of $3.7997*10^{-7}$ RPM, and lower limit of agreement of $-3.8428*10^{-7}$ RPM in Bland-Altman plot. From all subject, high correlation were shown($p<0.0001$). The proposed measurement method could be used to monitor unconscious persons, avoiding the need to apply electrodes to the directly skin or other sensors in the correct position and to wire the subject to the monitor. Monitoring respiration using textile capacitive pressure sensor offers a promising possibility of convenient measurement of respiration rates. Especially, this technology offers a potentially inexpensive implementation that could extend applications to consumer home-healthcare and mobile-healthcare products. Further advances in the sensor design, system design and signal processing can increase the range and quality of the rate-finding, broadening the potential application areas of this technology.

Key Words : Wearable, Respiration Measurement, Textile Capacitive Pressure Sensor

1. 서 론

최근 고령화 사회의 도래와 건강관리에 대한 관심의 증가로 언제 어디서나 지속적으로 건강 모니터링이 가능한 u-Health 디바이스 및 서비스에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 건강과 관련된 생체신호를 편안하게 모니터링하고, 일상환경과 비슷한 환경에서 건강관리를 받을 수 있는 환경을 추구하는 경향이 증가하고 있으며, 지속적인 생체 신호 모니터링에 대한 관심 또한 증가하고 있다[2, 3]. 이는 사회적으로도 효과적이며 경제적인 건강정책중의 하나로 볼 수 있다. 전도성섬유를 주재료로 하는 스마트 의류는 유연성이 있고, 인간 친화적이며, 효율적인 인터페이스가 될 수 있어 지속적인 생체 신호 측정과 사용자 중심의 모니터링 기기로의 개발이 가능하다. 때문에 스마트 의류의 개발은 중요한 u-Health 어플리케이션의 하나로 자리 잡고 있다[4]. 이러한 수요 동향 및 기술의 개발에 따라 생체 신호 측정을 위한 스마트 의류는 심전도 측정 의류, 근전도 측정 의류, 호흡 측정의류, 체온 측정 의류 등 다양하게 연구, 개발되어지고 있다[5]. 센서 기반 스마트 의류는 비침습적이며, 무자각적, 무구속적이라는 측면에서 생체 신호 측정 시스템으로써의 장점을 가진다.

본 논문에서는 전도성 섬유 기반의 호흡 모니터링 시스템을 개발하여 인체의 4대 활력징후 중의 하나인 호흡[2]의 간편한 측정 방법을 제안한다.

호흡 모니터링은 인체의 생리적 상태를 파악하는 중요한 지표 이다. 호흡은 응급상황이나 진료 시에 측정되어 진단에 활용되어지고 있다. 예를 들면, 환자의 호흡유무 판단, 비정상적인 호흡률(Respiration Rate, RR)과 호흡 패턴 분석을 통한 심장의 이상 진단, 호흡량의 비정상적인 증가 관찰을 통한 인체 조직의 산소 결핍과 같은 주요 질환의 진단에 있어 호흡의 측정 및 분석은 매우 중요하다[6]. 뿐만 아니라 호흡률의 변화를 관찰하며 교감신경과 부교감 신경의 활동을 예측할 수 있다[7].

흡기와 호기 시에 발생하는 인체의 가슴과 복부의 변이를 전도성 물질을 이용하여 호흡을 측정하는 방법은 다양하게 연구되어져 왔다[8-12]. [8]에서는 전도성 고무를 이용하여 신생아의 생체신호를 계속 체크하면서 갑작스런 신체의 이상이 발생했을 때, 경보를 울리는 기능을 하는 의복을 개발하였으며, [9], [10], [11]에서는 스테인레스 스틸 실을 이용

* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정
** 비 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정
*** 비 회 원 : 인덕대학 방송영상미디어과 교수 · 공박
† 교신저자, 시니어회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 정교수 · 공박
E-mail : mhiee@yonsei.ac.kr
접수일자 : 2009년 11월 17일
최종완료 : 2009년 12월 11일

하여 impedance pneumography 방식으로 생체신호 측정 시스템을 구현하였다. [12]에서도 스테인레스 스틸 실을 이용하여 inductive plethysmography 방식의 생체신호 측정 시스템을 개발하였다.

국내의 한 연구에서는 의복이 복부 둘레의 변화를 감지하는 센서 기능을 하도록 환자의 하의 허리띠 부위에 고무줄 형태로 성형한 전도성 고무띠를 삽입하여 호흡시 측정되는 복부신호로부터 호흡 모니터링의 가능성을 보인 바 있다[17]. 또한 적외선 광섬유를 이용한 호흡측정 시스템을 구성한 뒤 호흡 운동에 의해 발생한 이산화탄소의 유무에 따른 적외선의 변화를 측정한 연구가 진행된 바 있다[18].

본 연구에서는 호흡에 의한 복부의 변위에서 발생되는 압력을 전도성 섬유 기반의 전기용량성 섬유 압력센서(Textile Capacitive Pressure Sensor, TCPS)를 사용하여 측정 하였으며, 측정된 커패시턴스 값에 따라 흡기와 호기를 추정하였다. 추정된 결과는 Nasal Thermocouples로 측정된 레퍼런스 호흡신호와 비교 분석하였다.

2. 호흡측정 시스템 설계

2.1 호흡측정을 위한 전기용량성 섬유 압력 센서 이론

본 연구에서는 커패시터의 원리를 전도성 섬유를 이용하여 벨트형태의 섬유 커패시터를 제작하였으며 그 원리는 다음과 같다.

커패시터는 식1과 같이 거리의 변화에 따라 그 값이 달라진다. 이러한 원리를 이용하여 호흡 활동 시에 발생하는 인체표면의 움직임(그림1)이 개발된 TCPS에 힘으로 작용하여 두 극판(전도성섬유)의 거리변화를 야기 시킨다.

$$c = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times \frac{A}{d} \qquad (1)$$

결과적으로, d값의 변화는 커패시터의 값을 변화 시키고 이를 통하여 흡기와 호기를 판별할 수 있게 된다.

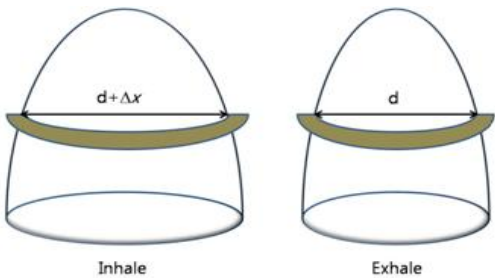


그림 1 흡기와 호기 시의 인체표면의 변화
Fig. 1 Body surface displacement due to respiration

2.2 전기용량성 섬유 압력센서 설계

전기용량성 섬유 센서는 그림2에서 보이는 것과 같이 전도성 섬유 2개 층과 비전도성 섬유3개 층으로 이루 어 졌으며, 전도성 섬유2개 층이 커패시터(Capacitor)의 양극판의 역할을 한다. 전도성 섬유는 W-290-PCN (Ni+Cu+Ni, 아진 일렉트론, 부산, 대한민국)을 사용하였으며, 제작된 TCPS의 특성을 보기 위하여 Push-Pull 게이지(FB-20K, IMADA, 일본)를 이용하여 장력변화에 대한 커패시턴스의 변화를 0 Kgf부터 3 Kgf까지 0.2 Kgf 씩 증가시켜가며 측정하고 3회 실험하여 평균값을 도출하였다. 개발된 TCPS는 0.6 Kgf이상의 압력에 대하여 근사적인 선형 특성을 가지는 것으로 확인 되었다 (그림 3).

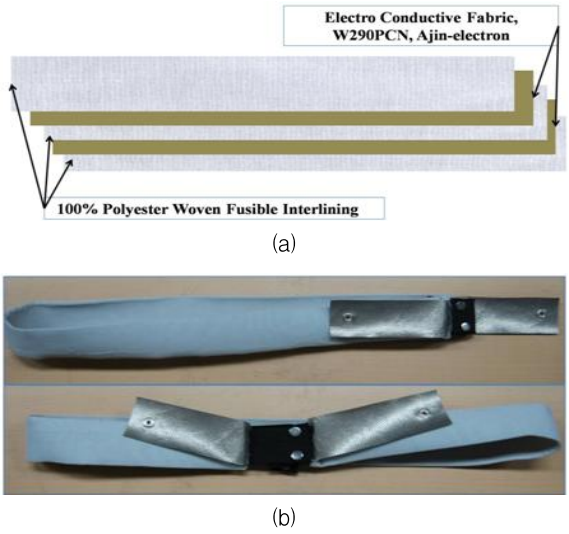


그림 2 전도성 섬유를 이용한 전기용량성 섬유 압력센서
(a) 전기용량성 섬유 압력센서의 구성
(b) 제작된 전기용량성 섬유 압력센서
Fig. 2 Textile Capacitive Pressure Sensor (TCPS) using electro conductive textile.
(a) The Construction of TCPS
(b) Fabricated TCPS

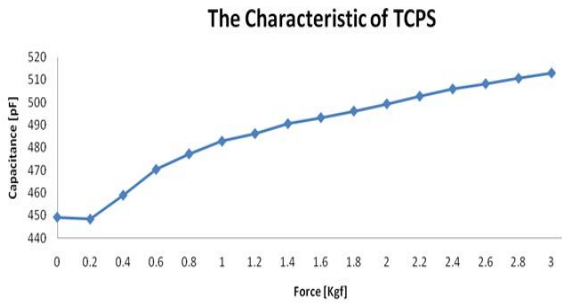


그림 3 힘에 따른 TCPS의 커패시턴스 변화
Fig. 3 The Characteristic of TCPS by Force

2.3 측정회로 설계

제작된 전기용량성 섬유 압력 센서의 커패시터 변화를 측정하기 위하여 그림4와 같이 Auto-balancing Bridge[19], High Impendence Precision Rectifier[20], 그리고 Butterwoth 2차 LPF를 사용하여 측정회로를 설계하였다.

설계된 회로의 검증을 위하여 커패시터 값을 0.1 nF에서 1nF까지 변화 시키며 회로의 출력을 관찰하였으면 결과는 그림5와 같이 커패시턴스 값이 증가 할수록 측정회로의 amplitude(V)도 증가함을 보였다.

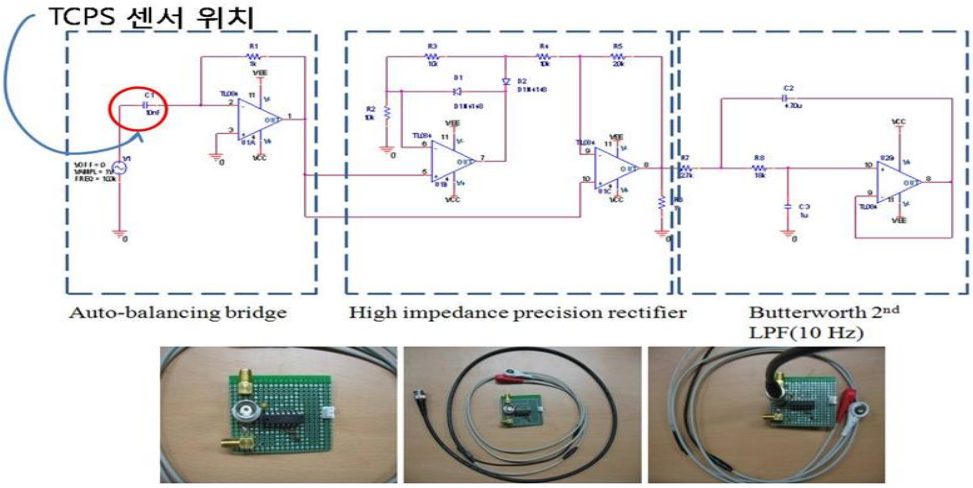


그림 4 TCPS 측정회로도 및 개발된 측정회로
Fig. 4 TCPS Measurement Circuit Front End

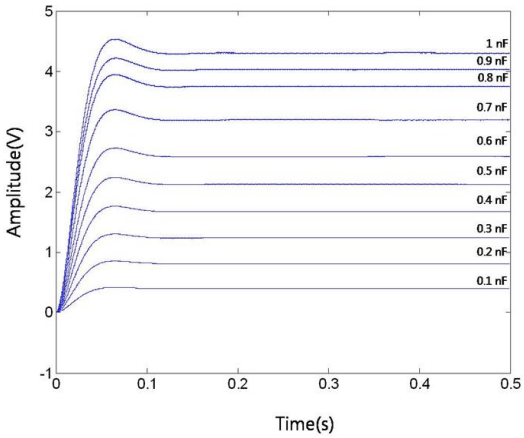


그림 5 측정회로 시뮬레이션 결과
Fig. 5 The Measurement Circuit Simulation by Increasing Capacitance

2.4 측정시스템 구성

제작된 TCPS와 측정회로를 이용하여 그림6과 같이 개발된 TCPS 모듈, 측정회로 모듈, 데이터 획득 모듈 그리고 신호 처리 및 분석 모듈로 구성되어있다. 전기용량성 섬유 압력 센서의 출력은 MP150 (Biopac, U.S.A)과 Labtop 컴퓨터를 사용하여 획득 되었고(샘플링 주파수 100 Hz), 데이터는 AcqKnowledge 3.8.1(Biopac, U.S.A) 소프트웨어를 사용하여 실시간으로 모니터링, 저장 되었다. 저장된 신호를 처리하고 호흡신호를 검출하기 위해서 Matlab 7.3 (The MathWorks,

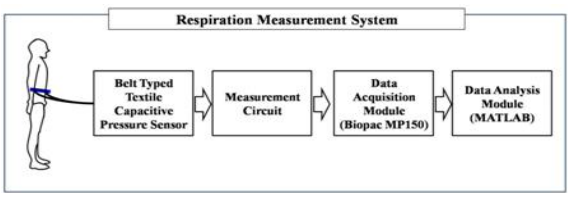


그림 6 호흡측정 시스템 구성
Fig. 6 Wearable Respiration Measurement System

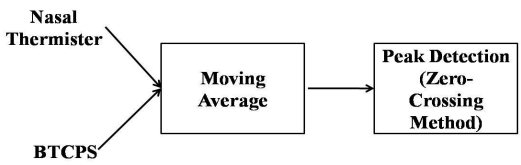


그림 7 호흡측정 시스템 구성
Fig. 7 Wearable Respiration Measurement System

Inc., Natick, MA, USA)이 사용되었다.

TCPS 시스템에서 획득된 신호는 호흡대역의 주파수(0.1~0.5 Hz)이외의 고주파 잡음을 포함하고 있기 때문에 그림 7과 같이 이동평균 필터(Moving average filtering)를 사용하여 고주파 노이즈를 제거하였으며, 흡기에서 호기로 전환되는 변곡점(피크)은 필터링 된 신호에 영점교차기법[13]을 적용하여 검출 하였다. 이 변곡점은 한주기의 호흡을 의미하며, 각 호흡주기의 간격으로부터 호흡률을 유도 하였다. TCPS 시스템의 정확성은 유도된 호흡률을 Nasal Thermocouple로부터 측정된 호흡율과의 비교를 Bland-Altman Plot을 이용하여 검증 되었다.

3. 호흡측정 실험 및 결과

3.1 호흡측정 실험

개발된 TCPS 호흡측정 시스템의 성능검증을 위하여 24세에서 36세의 신체 건강한 8명의 남성 피험자를 대상으로 180초 동안 앉은 자세에서 개발된 센서를 가슴 아래 부분에 착용시켜 호흡을 측정하였으며 그 결과를 비교 분석하였다. 각 피험자의 키, 몸무게 가슴둘레, 흡기시의 가슴둘레, 호기시의 가슴둘레를 측정하였으며 이는 표1과 같다. 개발된 센서의 성능 비교를 위하여 호흡 측정의 표준 방식인 Nasal Thermocouple 센서(TSD202A, Biopac, USA)를 피험자 코 밑에 부착하여 호흡을 동시에 측정하였다.

3.2 호흡측정 결과

Nasal Thermo Couple 센서 와 TCPS로 얻어진 피험자8의 호흡측정 원 신호(그림8 (a))와 획득한 신호에서의 잡음제

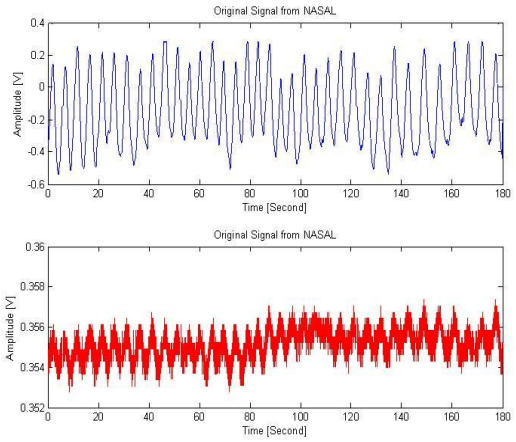
거를 위하여 이동평균 필터링을 한 후의 신호(그림8 (b)) 그리고 180초 동안의 호흡횟수 및 Respirtion Rate(RR)을 분석하기 위한 Peak detection 결과(그림8 (c))과 그림8에 나타나져있다.

그림9는 TCPS 시스템에서 측정된 호흡률과 Nasal Thermocouple에서 측정된 호흡을 비교한 것으로 점선이 Nasal Thermocouple로 분석된 호흡률이며, 실선이 TCPS로부터 분석된 호흡률이다. 두 센서에서 유도된 호흡률의 pearson 상관계수는 r=0.9553 (p<0.0001)이었고, Nasal thermistor 의 호흡률 평균은 5.002±0.89 RPM(Respiration per Minute), TCPS의 호흡률 평균은 5.001±0.5 RPM이였다.

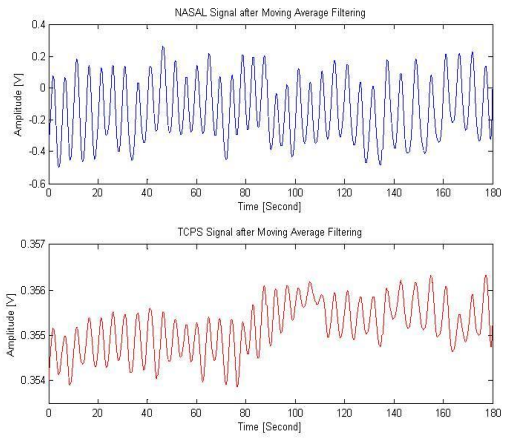
표 1 피험자 측정 Data

Table 1 Measured and Collected Subjects Data

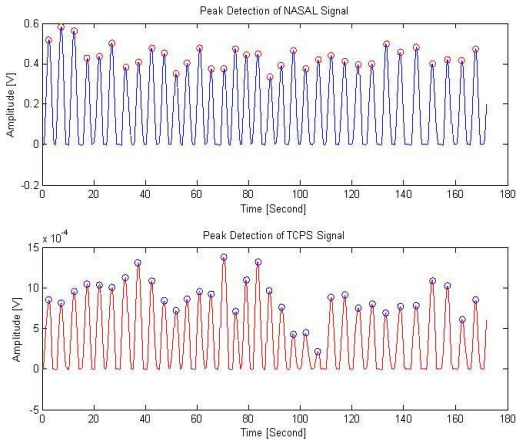
피험자	나이	성별	키 [cm]	몸무게 [kg]	가슴둘레 [cm]	흡기 시 가슴둘레 [cm]	호기 시 가슴둘레 [cm]
1	26	M	174	73.5	93	86	80
2	36	M	173	66.5	82	83	78
3	29	M	178	74	84	88	81
4	26	M	178	62.5	78	79	77
5	24	M	167	65.5	80	82	79
6	30	M	172	80.5	90	93	88
7	33	M	177	75	82	90	80
8	26	M	177	77	86	89	83



(a)



(b)



(c)

그림 8 피험자8의 측정 데이터 및 신호처리 결과.
(a) NASAL(위) 및 TCPS(아래)로 측정된 신호
(b) Moving Average Filtering 결과
(c) Peak 검출 결과

Fig. 8 Measured signals from subject8
(a) Original signals from NASAL(Top) and TCPS(Bottom)
(b) Signals from Moving average filtering
(c) Result from peak detection

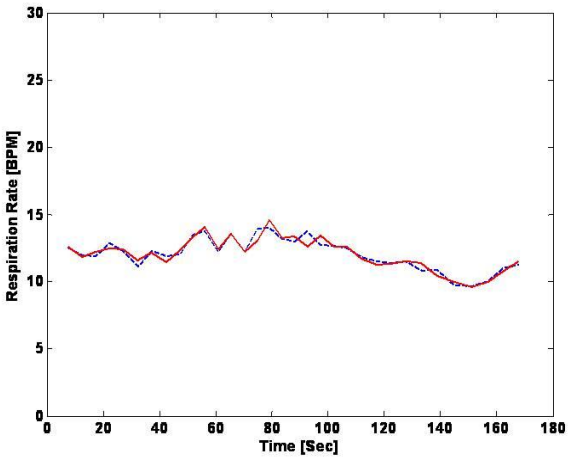


그림 9 피험자8의 RR 비교 (점선:Nasal thermistor, 실선:TCPS)

Fig. 9 RR Comparison of subject 8 (a dotted line : Nasal thermistor, a solid line : TCPS)

표2는 모든 피험자의 호흡수와 RR의 평균값, 그리고 통계적 분석을 보여주며, 통계적인 유의성을 판단하기 위하여 모든 피험자의 결과를 Bland-Altman Plot[14-16]을 이용하여 비교분석하였다(그림.10). 전체 피험자의 호흡수의 비교는 모든 피험자에 대하여 같은 결과를 보여주었으며, Bland-Altman Plot을 이용한 두 방법의 오차 허용한계는 상한이 3.7997*10-7 RPM, 하한이 -3.8428*10-7 RPM 이였다. 모든 피험자의 결과에서 보여 지듯이, 개발된 TCPS로 호흡의 변위를 측정하여 호흡을 검출하는 방법은 기존의 호흡 측정방법으로 측정된 호흡과 매우 높은 유의성 (p<0.0001)을 가짐을 알 수 있다.

표 2 모든 피험자의 호흡률 비교 및 분석

Table 2 Respiration rate comparison and analysis of all subjects

	호흡수		Nasal Thermistor		TCPS			
Subject	Nasal Thermistor	TCPS	RR [RPM]	Standard Deviation	RR [RPM]	Standard Deviation	Mean Differnce	Standard Deviation
1	27.00	27.00	6.503	0.89	6.515	0.84	-0.01	0.42
2	24.00	24.00	7.025	0.64	7.022	0.66	0.00	0.23
3	49.00	49.00	3.584	0.28	3.586	0.32	-0.002	0.13
4	34.00	34.00	5.013	0.47	5.015	0.47	0.00	0.17
5	25.00	25.00	6.868	0.83	6.868	0.81	0.00	0.11
6	47.00	47.00	3.799	0.45	3.798	0.46	0.00	0.14
7	23.00	23.00	7.490	0.79	7.494	0.76	-0.004	0.13
8	34.00	34.00	5.002	0.50	5.001	0.50	0.00	0.15

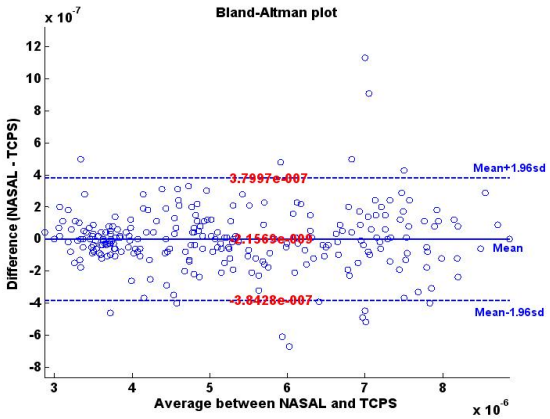


그림 10 Bland-Altman 차트를 이용한 전제피험자의 RR 통계분석

Fig. 10 Statistical analysis using Bland-Altman Plot of all subjects

4. 결 론

본 연구에서는 호흡측정을 위해 전도성 섬유를 이용한 전기용량성 압력센서를 벨트 형식으로 개발하여 호흡을 측정하였다. Bland-Altman Plot의 결과에서 두 방법의 오차 허용한계는 상한이 3.7997*10-7 RPM, 하한이 -3.8428*10-7 RPM으로 제안된 벨트타입의 wearable 호흡신호 측정 시스템은 기존의 호흡 측정 장치를 대체 할 수 있을 정도의 작은 오차를 보였다. 또한 제안된 시스템은 저비용 및 장시간 호흡 모니터링 장치로 활용이 가능하며, 기존의 호흡 측정센서들과 달리 피부에 전극 부착 및 착용으로 인한 불편함을 덜 수 있는 효율적인 호흡측정 장치로 사용 가능함을 보여주었다.

향후, wearable 센서를 이용하여 인체의 호흡 현상을 유비쿼터스 환경에서 정확하고 재현성 있게 측정하기 위해서는 전도성 섬유의 특성 및 전도성 섬유 사이에 들어가는 비전도성 섬유의 유전율 등을 고려하여 그에 따른 결과에 대한 비교 및 분석을 통하여 전기용량성 섬유 압력센서의 활용 범위를 확대할 수 있는 연구가 필요한 것으로 판단되며, 전기용량서 섬유 센서를 이용한 다른 생체신호들의 측정에 관한 연구도 진행되어야 할 것으로 판단되어진다.

참 고 문 헌

[1] SUNGMEE PARK , SUNDARESAN JAYARAMAN. Enhancing the quality of life through wearable technology Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 2003

[2] Joanna Briggs Institute, "Vital Sign", Volume 3, Issue 3, 1999

[3] S. H. Nam, T. G. Yim, C. Y. Ryu, S. C. Shin, J. H. Kang, S. Kim, "The Preliminary Study of Unobtrusive respiratory monitoring for e-health", Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference Shanghai, China, September 1-4, 2005

[4] Thomas Martin, Emil Jovanov, Dejan Raskovic. Issues in Wearable Computing for Medical Monitoring Applications : A Case Study of a Wearable ECG Monitoring Device. Fourth International Symposium on Wearable Computer. 2000.

[5] M. Pacelli, G. Loriga., N. Taccini and R. Paradiso. Sensing Fabrics for Monitoring Physiological and Biomechanical Variables : E-textilesolutions. Proceedings of the 3rd IEEE-EMBS, MIT, Boston, USA, Sept.4-6, 2006.

[6] H. Saito, M. Nishimura, E. Shibuya, H. Makita, I. Tsujino, K. Miyamoto, and Y. Kawakami, "Tissue hypoxia in sleep apnea syndrome assessed by uric acid and adenosine," Chest, vol. 122, no. 5, pp. 1686-1694, 2002.

[7] P. Fathizadeh, W. C. Shoemaker, C. C. J. Wo, and J. Colombo, "Autonomic activity in trauma patients based on variability of heart rate and respiratory rate," Critical Care Medicine, vol.32, no.6, pp.1420-1421, 2004.

[8] C. Linti, H. Horter, P. Osterreicher, and H. Planck, "Sensory baby vest for the monitoring of infants," in Proceedings of the International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2006), 2006, pp. 135-137.

[9] R. Paradiso, G. Loriga, and N. Taccini, "A wearable health care system based on knitted integrated sensors," IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 9, pp. 337-344, Sept., 2005.

[10] D. DeRossi, G. Loriga, F. Lorussi, R. Paradiso, N. Taccini, M. Tesconi, and A. Tognetti, "Wearable systems for personalized health care," Textile Asia - The Asian Textile & Apparel Monthly, 2005.

[11] G. Loriga, N. Taccini, D. De Rossi, and R. Paradiso, "Textile Sensing Interfaces for Cardiopulmonary Signs Monitoring," in Proceedings of the 27th Annual International Conference IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS 2005), Shanghai, China, 2005, pp. 7349-7352.

[12] N. Noury, A. Dittmar, C. Corroy, R. Baghai, J. L. Weber, D. Blanc, F. Klefstat, A. Blinovska, S. Vaysse, and B. Comet, "VTAMN - A Smart Clothe for Ambulatory Remote Monitoring of Physiological Parameters and Activity," in Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2004), 2004, pp. 3266-3269.

[13] Valentin T. Jordanov, Member, IEEE, Dave L. Hall, Mat. Kastner, "Digital Peak Detector with Noise Threshold" IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2002

[14] J. M. Bland and D. G. Altman, "Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement," Lancet, vol. 1, no. 8476, pp. 307-310, 1986.

[15] J. M. Bland and D. G. Altman, "Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading," Lancet, vol. 346, no. 8982, 1085-1087, 1995.

[16] J. M. Bland and D. G. Altman, "Measuring agreement in method comparison studies," Statistical Methods in Medical Research, vol. 8, pp. 135-160, 1999.

[17] 李仁光, 金盛植, 張鐘贊, 金君珍, 金敬娥, 李泰洙, 車殷宗, "복부에서 측정하는 일회 호흡용적의 정확도 평가", 전기학회논문지 제57권 제7호, pp.1298-1303, 2008년 7월

[18] 유욱재, 조동현, 장경원, 오정은, 이봉수, 탁계래. Chalcogenide 광섬유를 이용한 호흡측정 센서 개발을 위한 기초 연구. 한국 센서 학회지. Vol. 16, No.5, pp.331~336, 2007

[19] Honda, M., "Impedances measurement handbook", Edition Hewlett Packard 2003.

[20] Coughlin, R. F., and Driscoll, F. F., Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits, New Delhi, Prentice Hall of India, 1996.

저 자 소 개

민 세 동(閔 世 東)

고려대학교 응용전자공학과 졸업(2001). 연세대학교 생체공학협동과정 석사(2004). 동대학원 전기전자공학과 박사과정

관심분야 : Biomedical signal processing, Ubiquitous healthcare service & technology

윤 용 현(尹 容 玹)

서울산업대학교 전자공학과 졸업(1998). 연세대학교 대학원 의공학 석사(2002). 동 대학원 전기전자공학 박사과정.

관심분야 : Medical instrumentation, Medical ultrasound, Biomedical signal processing

이 충 근(李 忠 根)

연세대학교 의용전자공학과 졸업(2002). 동 대학원 전기전자공학 석사(2004). 동 대학원 박사과정

관심분야 : Biomedical signal processing, Neural interface, e-Health System

신 항 식(申 伉 植)

연세대학교 기계전자공학부 졸업(2003). 동 대학원 석사(2005). 동 대학원 박사과정

관심분야 : Biomedical Modelling and signal processing, e-Health system

조 하 경(趙 昰 熲)

가톨릭대학교 소비자주거학과 졸업(2001). 연세대학교 의류환경학과 석사(2007). 동 대학원 박사과정

관심분야 : e-ealth system, smart clothing

황 선 철(李 明 鎬)

연세대학교 전기공학과 졸업(1986). 동 대학원 석사(1988). 동 대학원 박사(1999). LG전자 미디어통신연구소(1991-1998). 인덕대학 방송영상미디어과 교수(1999년~현재)

관심분야 : 동영상 압축(H.264, MPEG), 동영상 워터마킹, 영상통화(H.323, SIP), 영상통화 보안 (H.235)

이 명 호(李 明 鎬)

연세대학교 전기공학과 졸업(1972). 동 대학원 석사(1975). 동 대학원 박사(1978). University of Wisconsin -Madison, 객원교수(1984-1985). 연세대학교 전기전자공학과 정교수(1980년~현재).

관심분야 : Medical Electronics & Information, e-Health System, Biomedical Signal Processing.