

대한물리치료과학회지

Journal of Korean Physical Therapy Science
2023. 09. Vol. 30, No 3, pp. 49-58

휴대형 폐기능 검사기 'The Spirokit'의 제작 및 ATS 24/26파형을 통한 성능검증

김병수¹ · 송준영¹ · 이명모²

¹대전대학교 물리치료학과 대학원 · ²대전대학교 물리치료학과

Production of Spirometer 'The Spirokit' and Performance Verification through ATS 24/26 Waveform

¹Byeong-Soo Kim, MS, PT. · ¹Jun-Young Song, PT, MS. · ²Myung-Mo Lee, PT, Ph.D

¹Department of Physical Therapy, Graduate School, Daejeon University, Republic of Korea.

²Department of Physical Therapy, Daejeon University, Republic of Korea.

Abstract

Background: This study aims to examine the usefulness of the portable spirometer "The Spirokit" as a clinical diagnostic device through technology introduction, precision test, and correction.

Design: Technical note

Methods: "The Spirokit" was developed using a propeller-type flow rate and flow rate measurement method using infrared and light detection sensors. The level of agreement between the Pulmonary Waveform Generator and the measured values was checked to determine the precision of "The Spirokit", and the correction equation was included using the Pulmonary Waveform Generator software to correct the error range. The analysis was requested using the ATS 24/26 waveform recognized by the Ministry of Food and Drug Safety and the American Thoracic Society for the values of Forced Voluntary Capacity (FVC), Forced Expiratory Volume in 1second (FEV1), and Peak Expiratory Flow (PEF), which are used as major indicators for pulmonary function tests. All tests were repeated five times to derive an average value, and FVC and FEV1 presented accuracy and PEF pre-

sented accuracy as the result values.

Results: FVC and FEV1 of 'The Spirokit' developed in this study showed accuracy within $\pm 3\%$ of the error level in the ATS 24 waveform. The PEF value of 'The Spirokit' showed accuracy within the error level $\pm 12\%$ of the ATS 26 waveform.

Conclusion: Through the results of this study, the precision of 'The Spirokit' as a clinical diagnosis device was identified, and it was confirmed that it can be used as a portable pulmonary function test that can replace a spirometer.

Key words: pulmonary, spirometer, smart, COPD, asthma.

교신저자

이명모

대전광역시 대학로 62대학로 대전대학교 물리치료학과 (34520)

T: 042-280-2290, E: mmlee@dju.kr

I. 서론

2020년 세계보건기구(World health organization, WHO)는 세계적으로 만성폐쇄성폐질환(Chronic obstructive pulmonary disease, COPD)으로 인한 사망률은 전체 사망률 중 3위라 보고하였으며, 이는 지속적으로 증가할 것이라 예측하였다(Adeloye 등, 2021). 소아 천식환자 또한 증가하고 있는 추세로 이는 천연물질로 인한 알러지보다는 대기오염 노출에 기인한 것으로 발표되었다(Grant 등, 2022). COPD나 천식과 같은 호흡기질환은 악화와 호전을 반복하는 질환으로 조기진단이 중요하다(Kaplan 등, 2021). 증상초기에 치료가 되지 않을 경우 지속적인 악화로 이어질 가능성이 높으며 환자의 예후에도 악영향을 미친다. 더욱이 COPD와 천식은 환자의 예후상태에 따라 환자뿐만 아니라 가족의 삶의 질에도 많은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Kocks 등, 2021).

폐기능검사는 COPD와 천식을 진단할 수 있는 전통적인 검사방법으로 임상에서 널리 활용되고 있다. 비침습적인 방법이며, 호흡 시 공기의 유량(volume)과 유속(velocity)을 측정하여 말초기도나 허파파리의 탄성회복력을 감별진단 할 수 있기에 다른 검사에 비해 비교적 안전하고 정확한 검사가 가능하다(Saputra 등, 2021). 그러나 폐기능검사기의 경우 휴대가 불가능한 거치형 검사기 형태로, 전문적으로 교육을 받은 보건의료인의 지도하에 검사가 진행되고 있다. 검사절차와 방법에 대한 전문적인 이해가 필요하며, 환자에게 정확한 검사 참여를 유도해야 한다. 이에 따라 정밀한 검사기기를 활용하여 적절한 검사절차와 방법을 충분히 환자에게 학습시킨 후 검사를 진행할 수 있는 의료기관에서 전문적으로 시행되어져 오고 있다(Feng 등, 2021).

최근 폐기능검사기의 경량화와 소형화가 이루어지고 있으며, 스마트 기기의 어플리케이션이나 영상을 이용하여 검사방법을 지도할 수 있게 개발되고 있다(Ge 등, 2021). 일반인도 쉽게 폐기능을 측정할 수 있다는 장점에도 불구하고 대부분 해외에서 집중적으로 개발 및 소개되고 있지만(Coughlin 등, 2021), 기기의 정밀도나 보급은 아직 미비한 수준이다.

이에 본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 어플리케이션 기반 휴대형 폐기능검사기 ‘The Spirokit’의 임상적 유용성을 확인하기 위해 기기의 개발기술을 소개하고 정밀도 규명결과를 공유함에 그 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 휴대용 폐기능검사기 ‘The Spirokit’의 제작방법

폐기능검사기는 미세유량 및 유속을 계산해야 하는 장치이며, 미세 유량과 유속을 계산하기 위한 방법으로 주로 4가지의 방법이 사용되고 있다. 첫 번째는 와이어 센서를 활용한 방법이다(Ardekani 등, 2012). 와이어 센서 방법의 경우 바람을 불었을 때, 미세한 온도의 차이가 발생하게 되는데, 이 미세한 온도의 차이를 와이어 센서를 통해 유량을 계산하는 방법이다. 와이어 센서를 활용한 방법의 단점은 센서의 비용이 비싸고, 온도에 민감하여 기기를 매일 Calibration을 할 필요가 있다는 점이다(Nozu 등, 1991)(Figure 1-A). 두 번째는 차압센서를 활용한 방법이다(Carta 등, 2007). 공기를 불어넣는 관에 공기유량을 불어넣었을 때, 공기가 들어가는 입구쪽과 나가는 출구쪽의 압력차를 계산해 유량과 유속을 규명하는 방법이다. 이 방법은 미세유량 및 유속을 계산하기에 정밀한 방법이나, 공기를 불어넣는 관의 길이가 길어짐(Rodriguez 등, 2021)으로 인해 휴대형태의 검사장치로는 부적합하다는 단점이 있다(Figure 1-B). 세 번째는 초음파센서를 활용한 방법이다(Walters 등, 2006). 초음파센서의 경우,

음파를 교대로 발사하여 공기의 흐름을 감지해 유량 값을 계산하는 방법으로 매우 정밀한 방법이나, 차압센서와 마찬가지로 공기를 붙여넣는 관의 길이가 길어지며, 초음파에 의한 공명현상을 보정해야함으로 고도의 보정기술이 필요한 단점이 있다(Plaut & Webster, 1980)(Figure 1-C). 네 번째 방법은 프로펠러 터빈을 활용한 회전속도 인식방법으로, 공기의 흐름으로 인해 생기는 프로펠러의 회전수를 적외선(Infrared ray, IR), 광검출(Photodetector, PD)센서를 활용하여 검출하는 방법이다(Sokol 등, 2016). 이 방법은 생산에 많은 비용이 소요되지 않으며, 공기가 흐르는 관을 길게 설계할 필요가 없어 휴대성이 좋다. 하지만, 유량과 유속에 따른 관성에 의해 프로펠러가 영향을 받으므로 보정산식을 넣을 필요가 존재하다(Malmberg 등, 1993)(Figure 1-D).

본 연구에서 제작한 휴대형 폐기능검사기 'The Spirokit'은 휴대성이 용이한 프로펠러 터빈 방법을 채택하였다. 본 연구에서 제작한 프로펠러 터빈의 경우 Front, Middle, Lear Fan으로 구성되어 있으며, Front, Lear Fan은 40도의 나선 형태로 구성하여 호기 시 Middle Fan이 정방향으로 회전하도록 만들고, 흡기 시 역방향으로 회전하도록 구성하였다. 프로펠러 터빈의 총 규격은 길이 6.14cm, 높이 3.32cm, 반지름 1.67cm이며, 'The Spirokit' 기기에 호환되는 전용 필터가 바로 프로펠러 터빈에 장착되도록 설계되었다(Figure 2). 유속과 유량을 계산하는 IR, PD 센서는 프로펠러가 회전하는 방향, 회전수, 회전속도를 계측하도록 설계되어 원형 회로기판에 장착하였다. 센서는 IR 센서에 비해 PD 센서가 아래쪽 30도 방향을 향하도록 기판에 배치하였으며, 이는 IR 센서가 PD 센서로 신호를 보내 회전 중인 프로펠러를 정밀하게 인지할 수 있게 하기 위함이다(Figure 3). 본 기기는 휴대성을 높이기 위하여 인식된 센서 데이터는 모두 메인보드의 마이크로컨트롤러유닛의 블루투스 스택에 의해 애플리케이션으로 전송될 수 있도록 설계하였다. 프로펠러 방식은 앞서 설명과 같이 관성에 대한 보정산식이 필요하므로, ATS24/26 과형을 발사해주는 검사장치에 'The Spirokit' 프로펠러 터빈에 연결한 다음 계측된 'The Spirokit'의 프로펠러 터빈의 1초간 회전속도(Rotator per second, RPS)을 계산하였다. 도출된 RPS 값을 FVC, FEV1, PEF을 ATS 24/26과형에서 제시하는 유량, 유속 값으로 맞추고자 도출되는 오차값을 일정하게 삭감하여 스마트폰 어플리케이션에서 L 값과 L/s 값으로 변환하도록 설계하였다(Figure 4). 기존 폐기능검사기의 문제점인 교차감염을 방지하고자 자외선 A과형(Ultraviolet-A,UV-A) 중 일광소독이 가능한 405nm[18] 발광다이오드(Light emitting diode, LED)를 기기 원형회로기판 하단에 설치하였다. 전원장치와 더불어 배터리 충전을 위해 포고핀 방법을 활용해 충전 및 소독기능이 동작하도록 설계하였다. 제작된 'The Spirokit'의 총 최종 규격은 길이 16.0cm, 가로 3.3cm, 폭 5.0cm이며 기기의 무게는 100g이다(Figure 5).

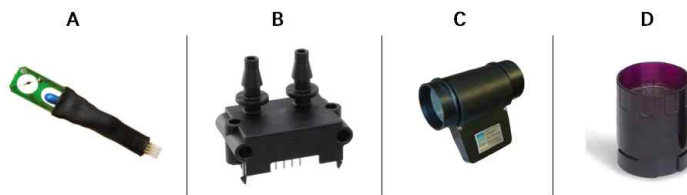


Figure 1. Flow sensor used in pulmonary function test equipment

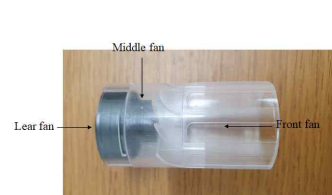


Figure 2. Flow calculation turbine of 'The Spirokit'

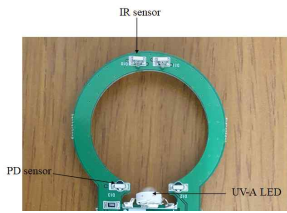


Figure 3. Flow calculation sensor and sterilize LED of “The Spirokit”



Figure 4. Software of ATS 24/26 waveform generator



Figure 5. Main components of “The Spirokit”

2. ‘The Spirokit’의 정밀도 규명과 보정을 위한 ATS 24/26 파형 분석방법

본 연구에서 개발한 ‘The Spirokit’의 정밀도 규명과 보정을 위하여 대한민국 식약처의 진단 폐활량계 성능평가 지침과 ATS에서 인정한 24/26 파형을 활용하였다(Graham 등, 2019; Lee 등, 2015). 본 연구에서 활용된 ATS 24/26 파형 발생장치는 Pulmonary Waveform Generator(PWG-33BT, Piston medical Ltd, Hungary)를 활용하였다(Figure 6). 검사전 PWG 33BT에 ‘The Spirokit’을 공기 토출구에 맞추어 결합한 후에, PWG 33BT에서 사용하는 Windows용 소프트웨어인 Waveform stimulator를 활용하였다[20]. 검사변수는 폐기능검사에서 가장 주된 변수인 노력성 폐활량(Forced voluntary capacity, FVC), 1초간 노력성 호기량(Forced expiratory volume 1 second, FEV1), 최대호기유량(Peak expiratory flow, PEF)로 하였다(Saputra 등, 2021). 검사 방법은 식약처와 ATS에서 규정한 표준 검사방법에 준해 FVC, FEV1은 ATS 24 파형, PEF는 ATS 26파형을 활용해 검사하였다. 검사는 총 5회 반복하여 검사하였으며, 검사결과값을 5회 평균하여 결과값을 제시하였다(Lee 등, 2015). 검사 후 검사결과는 Microsoft excel(Version 2018, Microsoft, USA)를 통해 입력하였다. 검사 결과 데이터 평균값과 파형에 따른 기준 값을 대입해 검사 오차율을 검증하였다. 모든 검사는 식약처에서 인정하는 위탁 의료기기시험분석기관인 스탠다드뱅크에 의뢰 후 의료기기 및 전기안전시험본부 분석시험연구관의 감독하에 진행하였으며, 검사결과에 따른 오차율을 검증받은 후 식약처 인증 공인시험성적서를 발급받았다.



Figure 6. ATS 24/26 waveform test of “The Spirokit”

III. 결 과

식약처 및 ATS에서 규정한 표준 ATS 24/26 파형에 따른 유량, 유속 값은 아래 Table 1,2,3에서 제시한 Standard value와 같다. 검사 기준은 FVC와 FEV1의 경우 정확성 요소에서 오차수준 $\pm 3\%$ 이내이며, PEF는 정확성 요소에서 오차수준 $\pm 12\%$ 이내이다. 식약처와 ATS에서 규정한 표준 ATS24파형에 의한 'The Spirokit'의 5회 반복 검사 결과 값과 기준 값에 의한 FVC 정확성은 Table 1과 같다. 본 실험결과에서 'The Spirokit'의 FVC 정확성은 식약처와 ATS인정기준인 $\pm 3\%$ 에 부합하였다.

Table 1. FVC Accuracy waveform test results of "The Spirokit"

Waveform	Standard value	1	2	3	4	5	Average	Accuracy(%)
1	6.000	6.161	6.166	6.148	6.152	6.149	6.155	+2.59
2	4.999	5.120	5.107	5.085	5.107	5.106	5.105	+2.12
3	3.489	3.519	3.519	3.484	3.494	3.486	3.500	+0.33
4	1.498	1.501	1.495	1.479	1.500	1.488	1.493	-0.36
5	5.132	5.003	5.017	5.032	5.041	5.012	5.021	-2.16
6	4.011	3.926	3.908	0.910	3.913	3.929	3.917	-2.34
7	3.169	3.191	3.201	3.189	3.194	3.196	3.194	+0.80
8	1.993	1.948	1.949	1.949	1.940	1.963	1.950	-2.17
9	4.854	4.819	4.805	4.784	4.822	4.806	4.807	-0.96
10	3.843	3.812	3.801	3.793	3.794	3.801	3.800	-1.11
11	2.735	2.714	2.750	2.772	2.761	2.743	2.748	+0.48
12	2.002	2.042	2.003	2.000	2.030	2.003	2.016	+0.68
13	4.896	5.009	4.995	4.986	4.990	4.976	4.991	+1.94
14	3.786	3.720	3.697	3.700	3.695	3.696	3.702	-2.23
15	5.937	5.947	5.905	5.930	5.890	5.887	5.912	-0.42
16	5.458	5.555	5.551	5.583	5.573	5.575	5.567	+2.00
17	5.833	5.902	5.897	5.971	5.941	5.937	5.930	+1.66
18	4.343	4.377	4.392	4.384	4.378	4.398	4.386	+0.99
19	3.935	3.860	3.832	3.841	3.826	3.826	3.837	-2.49
20	2.881	2.847	2.847	2.848	2.861	2.849	2.850	-1.06
21	4.477	4.607	4.606	4.605	4.600	4.611	4.606	+2.88
22	3.857	3.889	3.884	3.883	3.902	3.915	3.895	+0.97
23	3.419	3.444	3.440	3.440	3.439	3.435	3.440	+0.60
24	1.237	1.278	1.260	1.261	1.245	1.247	1.258	+1.71

식약처와 ATS에서 규정한 표준 ATS24파형에 의한 ‘The Spirokit’의 5회 반복 검사결과 값과 기준 값에 의한 FEV1 정확성은 Table 2과 같다. 본 실험결과에서 ‘The Spirokit’의 FEV1 정확성은 식약처와 ATS인정기준인 $\pm 3\%$ 에 부합하였다.

Table 2. FEV1 Accuracy waveform test results of “The Spirokit”

Waveform	Standard value	1	2	3	4	5	Average	Accuracy(%)
1	4.262	4.348	4.310	4.321	4.323	4.321	4.325	+1.47
2	4.574	4.659	4.647	4.640	4.647	4.646	4.648	+1.61
3	1.188	1.216	1.187	1.217	1.216	1.216	1.210	+1.89
4	1.371	1.389	1.405	1.389	1.388	1.393	1.393	+1.59
5	3.868	3.898	3.893	3.926	3.887	3.890	3.899	+0.80
6	3.027	2.941	2.937	2.939	2.939	2.933	2.938	-2.95
7	2.519	2.537	2.538	2.535	2.536	2.537	2.537	+0.70
8	1.615	1.644	1.644	1.645	1.644	1.649	1.645	+1.87
9	3.772	3.805	3.795	3.744	3.791	3.793	3.786	+0.36
10	3.031	3.027	3.032	3.034	3.034	3.033	3.032	+0.03
11	1.811	1.836	1.841	1.841	1.829	1.836	1.837	+1.41
12	1.621	1.645	1.642	1.643	1.652	1.641	1.645	+1.46
13	3.834	3.742	3.738	3.740	3.742	3.738	3.740	-2.45
14	3.053	2.944	2.972	2.973	2.972	2.972	2.967	-2.83
15	5.304	5.139	5.208	5.254	5.205	5.199	5.201	-1.94
16	3.896	3.926	3.929	3.939	3.970	3.920	3.937	+1.05
17	2.597	2.588	2.616	2.616	2.617	2.617	2.611	+0.53
18	3.155	3.180	3.184	3.187	3.188	3.178	3.183	+0.90
19	2.512	2.518	2.518	2.502	2.500	2.642	2.536	+0.96
20	2.563	2.540	2.538	2.541	2.556	2.539	2.543	-0.79
21	3.549	3.509	3.511	3.510	3.515	3.515	3.512	-1.04
22	2.813	2.857	2.854	2.831	2.848	2.860	2.850	+1.32
23	1.360	1.376	1.375	1.375	1.376	1.376	1.376	+1.15
24	0.922	0.962	0.942	0.941	0.942	0.942	0.946	+2.58

식약처와 ATS에서 규정한 표준 ATS26파형에 의한 'The Spirokit'의 5회 반복 검사결과 값과 기준 값에 의한 PEF 반복성은 Table 3과 같다. 본실험결과에서 'The Spirokit'의 PEF 정확성은 식약처와 ATS 인정기준인 $\pm 12\%$ 에 부합하였다.

표 3. PEF Accuracy waveform test results of "The Spirokit"

Waveform	Standard value	1	2	3	4	5	Average	Accuracy(%)
1	7.445	7.341	7.406	7.373	7.341	7.341	7.360	-1.14
2	10.860	10.661	10.729	10.661	10.729	10.729	10.702	-1.46
3	4.794	4.713	4.726	4.726	4.726	4.726	4.723	-1.47
4	4.401	4.453	4.475	4.464	4.442	4.475	4.462	+1.38
5	3.630	3.734	3.734	3.750	3.569	3.569	3.671	+1.13
6	3.088	3.159	3.140	3.154	3.135	3.154	3.148	+1.96
7	2.509	2.483	2.471	2.480	2.477	2.471	2.476	-1.30
8	2.328	2.335	2.344	2.335	2.332	2.330	2.335	+0.31
9	5.259	5.171	5.171	5.187	5.171	5.171	5.174	-1.61
10	4.733	4.881	4.895	4.868	4.881	4.868	4.879	+3.08
11	6.870	6.749	6.722	6.749	6.722	6.695	6.727	-2.08
12	10.684	10.729	10.729	10.729	10.729	10.593	10.702	+0.17
13	4.804	4.951	4.965	4.937	4.937	4.937	4.945	+2.94
14	3.821	3.927	3.927	3.927	3.927	3.918	3.925	+2.73
15	7.956	7.895	7.858	7.895	7.895	7.895	7.888	-0.86
16	5.251	5.150	5.150	5.134	5.166	5.134	5.147	-1.98
17	5.842	5.752	5.772	5.772	5.752	5.772	5.764	-1.34
18	8.593	8.496	8.540	8.540	8.540	8.540	8.531	-0.72
19	6.953	6.804	6.860	6.832	6.832	6.804	6.826	-1.82
20	7.430	7.340	7.373	7.341	7.341	7.373	7.354	-1.03
21	3.973	3.892	3.892	3.901	3.884	3.884	3.891	-2.07
22	3.377	3.314	3.308	3.314	3.308	3.301	3.309	-2.01
23	8.132	8.047	8.047	8.047	8.047	8.125	8.063	-0.85
24	4.155	4.141	4.141	4.131	4.131	4.141	4.137	-0.43
25	14.194	14.184	14.184	14.184	14.184	14.184	14.184	-0.07
26	11,595	11,386	11,386	11,386	11,464	11,386	11,402	-1.67

IV. 논 의

본 연구는 휴대형폐기능 검사기 ‘The Spirokit’ 개발에 대한 기술문서로써, ATS 24/26 파형을 활용한 정밀성 검증을 통해 진단폐활량계로써 성능을 검증한 연구이다. 대한민국의 경우 국제규격과 지침을 기반으로 진단폐활량계 성능기준을 제시하고 있다. 이는 임상 환경에서 진단 및 처방을 내리기 위한 의료기기로서 기기가 나타내는 지표가 타당한지를 판가름할 수 있는 기준이기도 하다(식품의약품안전처, 2012).

기존 임상환경에서 사용하는 폐기능검사기의 경우 ATS/ERS에서 제시하는 성능 요구 기준을 통과하였음을 나타내고 있다(Graham BL 등, 2019). 그러나, 이에 대한 구체적인 성능평가 과정, 검사결과 등에 대해서는 공개되어 있지 않다. 게다가, 몇몇 연구에서 임상에서 사용중인 폐기능검사기를 대상으로 ATS파형 성능평가 검사를 실시하였을 때, 일부 기기에서 오차범위를 벗어나 정확도 기준에서 벗어나는 결과들이 나타난 것으로 보고되었다(Lefebvre, Q. 등, 2014; Schermer 등, 2012; Hegewald, M. J. 등, 2016).

‘The Spirokit’의 경우 정밀도 검증결과 ‘The Spirokit’의 FVC, FEV1 지표에 대한 정확성 $\pm 3\%$, PEF 정확성은 $\pm 12\%$ 으로, 미국흉부학회와 식품의약품안전처에서 제시한 기준을 충족한 것으로 나타났다. 이에 본 연구가 국내에서 진단폐활량계 성능평가 과정 및 결과에 대하여 기술한 사례로써 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

본 연구의 경우 ATS 기준의 파형을 활용하여 정확도를 검증하였지만, 인체 호기, 흡기 유량과 유속의 경우 인체마다 다르며, 때에 따라 다르기 때문에 ATS 24/26개 파형으로만 임상적 모든 호기 유량과 흡기의 신뢰성을 규명하였다 단정 짓기 어렵다. 따라서 향후 연구에서는 실제 임상환경에서 인체를 대상으로 한 임상적인 신뢰도를 규명할 필요성이 있다. 또한 본 연구에서 파형 발생장치로 사용한 PWG-33BT 외에 다른 파형발생기를 활용하였을 경우의 정확도와 정밀도 역시 규명할 필요성이 있다.

본 연구의 결과를 토대로 후속 연구를 통해 본 폐기능검사기에 대한 신뢰성을 높일 필요가 있으며, 향후 기존 거치형 정밀 폐기능검사기 간 신뢰도 타당도 검증을 통해 임상에서도 기존 폐기능검사기를 대체하여 사용가능한 장비로써 활용할 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구에서 개발한 ‘The Spirokit’은 식약처와 ATS에서 표준으로 제시한 ATS 24/26 파형에서 FVC와 FEV1, PEF 모두 식약처 진단폐활량계 성능평가 가이드라인 지침과 ATS 표준검사방법에 부합하여 정밀 측정기기임을 확인 하였다. 검사결과를 토대로 ‘The Spirokit’은 식약처의 진단 폐활량계 수출허가신청과 더불어 GMP인증, 식약처 2등급 진단폐활량계 품목허가신청을 완료하였다. 본 연구를 토대로 휴대성과 정밀도를 규명하였으므로 기존 폐기능검사기를 대체하여 널리 임상에서 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 식품의약품안전청. 진단폐활량계의 허가 및 기술문서 작성을 위한 가이드라인. 식품의약품안전처;2012
- 이인광, 박미정, 김경옥 등. 진단폐활량계 성능검증을 위한 장치의 정확도 평가. 대한전기학회:학술대회논문집. 2015;1429-30.
- 이인광, 박미정, 이상봉 등. 호흡기류 계측모듈의 교정과 성능 비교를 위한 실용적인 표준기류 생성 시스템. 의공학회지. 2015;36(4):115-22.
- Adeloye D, Agarwal D, Barnes PJ, et al. Research priorities to address the global burden of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) in the next decade. *Journal of global health.* 2021;11:15003.
- Ardekani MA, Nafisi VR, Farhani F. Extrapolation of Calibration Curve of Hot-wire Spirometer Using a Novel Neural Network Based Approach. *Journal of medical signals and sensors.* 2012;2(4):185-91.
- Carta R, Turgis D, Hermans B, et al, editors. A Differential Pressure Approach to Spirometry. 2007 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference; 2007 27-30 Nov. 2007.
- Coughlin S, Parrott H, Wells C, et al, Sonnappa S, Fleming L. Acceptability of Home Spirometry in Children with Asthma: The NuvoAir Platform. TP67 TP067 SYMPTOMS, QUALITY OF LIFE, AND CAREGIVER ENGAGEMENT IN PULMONARY, CRITICAL CARE, AND SLEEP: American Thoracic Society; 2021. p. A3188-A.
- Feng Y, Wang Y, Zeng C, et al. Artificial Intelligence and Machine Learning in Chronic Airway Diseases: Focus on Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *International journal of medical sciences.* 2021;18(13):2871-89.
- Ge Y, Ming J, Feary J, et al. P77 Outcomes in pandemic asthma diagnostics with home spirometry. *Thorax.* 2021;76(Suppl 2):A109.
- Graham BL, Steenbruggen I, Miller MR, et al. Standardization of Spirometry 2019 Update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine.* 2019;200(8):e70-e88.
- Grant T, Croce E, Matsui EC. Asthma and the social determinants of health. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology.* 2022;128(1):5-11.
- Hegewald MJ, Gallo HM, Wilson EL. Accuracy and quality of spirometry in primary care offices. 2016;13(12):2119-24.
- Kaplan A, Cao H, Fitz Gerald JM, et al. Artificial Intelligence/Machine Learning in Respiratory Medicine and Potential Role in Asthma and COPD Diagnosis. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice.* 2021;9(6):2255-61.
- Kocks JWH, Andringa HJH, van Heijst E, et al. Aeroallergen sensitization for detecting asthma in primary care: A diagnostic test accuracy study. *Clinical & Experimental Allergy.* 2021;51(8):1080-4.
- Lefebvre Q, Vandergoten T, Derom E, et al. Testing spirometers: are the standard curves of the American Thoracic Society sufficient? 2014;59(12):1895-904.
- Malmberg LP, Hedman J, Sovijärvi ARA. Accuracy and repeatability of a pocket turbine spirometer: comparison with a rolling seal flow-volume spirometer. *Clinical Physiology.* 1993;13(1):89-98.

- Nozu Y, Ming-Ho Y, Tatsum M, et al. Utility of the Hot-Wire Spirometer. *The Annals of physiological anthropology*. 1991;10(2):77-82.22.
- Peak MJ, Peak JG. Convex Curvatures of alkaline elution profiles of DNA from human cells irradiated with 405nm : evidence for induction of slowly developing Alkali-Labile sites. *Photochemistry and Photobiology*. 1989;50(3):379-83.
- Plaut DI, Webster JG. Ultrasonic Measurement of Respiratory Flow. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1980;BME-27(10):549-58.
- Rodríguez-Olivares NA, Nava-Balanzar L, Barriga-Rodríguez L. Differential Pressure Spirometry for Mechanical Ventilation Using Dichotomic Search. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021;70:1-10.
- Saputra AJ, Widyastuti K, Sutanto YS. New GOLD COPD Guideline 2019: How We Deal with It? (Inhaled Corticosteroid Use and Blood Eosinophil Count). *Respiratory Science*. 2021;1(2):79-87.
- Schermer TR, Verweij EH, Cretier R, et al. Accuracy and precision of desktop spirometers in general practices. 2012;83(4):344-52.
- Sokol YI, Tomashevsky RS, Kolisnyk KV, editors. Turbine spirometers metrological support. 2016 International Conference on Electronics and Information Technology (EIT); 2016 23-27 May 2016.
- Walters JAE, Wood-Baker R, Walls J, et al. Stability of the EasyOne ultrasonic spirometer for use in general practice. *Respirology*. 2006;11(3):306-10.
-