

자동형 양압유지기의 자동적정 알고리즘 개발

박종욱¹ · 에르덴바야르¹ · 김윤지¹ · 이경중^{1*} · 이상학²

¹연세대학교 보건과학대학 의공학부, ²주맥아이씨에스 연구소

Development of Auto-titrating Algorithm for Auto-titrating Positive Airway Pressure

Jong-Uk Park¹, Erdenebayar Urtnasan¹, Yoon-Ji Kim¹, Kyoung-Joung Lee^{1*} and Sang-hag Lee²

¹Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

²R&D department, MEKICS, Paju, Republic of Korea

(Manuscript received 7 June 2019 ; revised 29 July 2019 ; accepted 14 August 2019)

Abstract: This study proposes an auto-titrating algorithm for auto-titrating positive airway pressure (APAP). The process of the proposed algorithm is as follows. First, sleep apnea-hypopnea and snoring events were detected using nasal pressure. Second, APAP base pressure and SDB events were used for automatic titration of optimal pressure. And, auto-titrating algorithm is built into M3 (MEK-ICS CO. Ltd., Republic of Korea) for evaluation. The detection results of SDB showed mean sensitivity (*Sen.*) and positive predictive value (*PPV*) of 85.7% and 87.8%, respectively. The mean pressure and apnea-hypopnea index (AHI) of auto-titrating algorithm showed 13.0 ± 5.2 cmH₂O and 3.0 ± 2.4 events/h, respectively. And, paired *t*-test was conducted to verify whether the performance of our algorithm has no significant difference with AutoSet S9 ($p > 0.05$). These results represent better or comparable outcomes compared to those of previous APAP devices.

Key words: Auto-titrating, Auto-titrating positive airway pressure (APAP), Sleep-disordered breathing, Sleep apnea-hypopnea, Snoring

1. 서 론

수면호흡장애(sleep-disordered breathing, SDB)는 수면 중 상기도의 부분적 또는 완전한 폐쇄로 무호흡 혹은 저호흡의 환기 장애를 일으키고, 이로 인해 혈중 산소포화도가 감소, 수면분절로 인한 수면의 질 저하, 심할 경우 고혈압, 부정맥, 뇌졸중과 같은 심뇌혈관질환을 동반하기도 한다[1].

이러한 수면호흡장애를 치료하기 위해 양압지속유지기(continuous positive airway pressure, CPAP)가 사용되

며, 수면 중 환자에게 지속적으로 압력을 공급하여 상기도가 폐쇄되는 것을 막는다[2]. CPAP은 수면 중 환자의 기도폐쇄를 억제할 수 있는 압력을 지속적으로 공급하며, 이러한 압력을 최적압력(optimal pressure)이라고 한다. 환자의 적정압력은 수면다원검사(polysomnography, PSG) 중 훈련된 수면기사가 수동적정(manual titration)을 통해 CPAP의 고정 최적압력(fixed optimal pressure)을 결정한다[3]. 그러나 수동적정 방법은 특화된 수면센터에서 수행되어야 하며, 시설이나 인력, 장비 등의 비용이 필요하고, 환자에게 시간적, 공간적, 경제적 부담이 발생된다[3]. 또한 기도폐쇄가 일어나지 않는 구간에 적용되는 적정압력은 오히려 환자의 불편함을 초래할 수 있다는 단점이 있다[3].

이러한 CPAP의 단점을 보완하기 위해 자동적정 기능이 포함된 자동형 양압유지기(auto-titrating positive airway pressure, APAP)가 개발되었다. APAP은 환자의 상태에 따라 고정된 압력이 아닌 실시간으로 치료 압력을 변화시켜 상기

Corresponding Author : Kyoung-Joung Lee
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University,
Wonju, Kangwon-do 26493, Korea
Tel: +82-33-760-2808
E-mail: lkj5809@yonsei.ac.kr

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국가혁신클러스터사업(P0006697_웨어러블 기기를 활용한 심폐모니터링 시스템 개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

도가 폐쇄되는 것을 막는 장비로, CPAP에 비해 낮은 압력으로 효율적인 치료가 가능하여 환자의 수용(acceptance)와 순응도(compliance) 개선에 도움이 된다[4].

그러나 국내 APAP 시장은 전량 수입에 의존하고 있으며, 국내에서는 APAP의 핵심 기술인 자동 적정 알고리즘에 대한 기술 개발이 이루어지지 않고 있다. 기존의 대표적인 해외 APAP 장비에서는 환자의 수면 중 수면호흡장애 이벤트를 자동으로 검출하여 실시간으로 자동 적정을 실시하며, 정확한 자동 적정을 위해서는 정확한 수면호흡장애 검출 알고리즘이 필수적이다[5].

따라서 본 연구에서는 자동 적정을 위한 고성능의 수면호흡장애 검출 알고리즘과 APAP의 기준 압력을 이용한 자동 적정 알고리즘을 제시하였으며, 기존 APAP 장비와 성능을 비교평가 하여 유용성을 확인하였다.

II. 연구 방법

1. 분석대상 및 신호획득

본 연구에서는 자동적정 알고리즘 개발 및 평가를 위해 두 트랙으로 데이터를 획득하였다.

첫번째는 자동적정 알고리즘을 개발하기 위해 데이터를 획득하였으며, 삼성서울병원(Samsung Medical Center, Seoul, Republic of Korea)에서 27명의 수면호흡장애 환자(F/M: 3/24 people, Age: 47.1±12.4 year, AHI: 46.4±24.7 events/h)를 대상으로 split-night PSG를 수행하였다(IRB Number: CPAP2014/3.0). Split-night PSG는 수면다원검사기(Embla N7000 PSG Amplifier, Embla System LLC, USA)를 이용하여 수면호흡장애 환자의 데이터를 획득하는 동시에, AutoSet S9(ResMed, USA)를 이용하여 수동적정을 실시하였다. 이때 비강압력 신호는 비강 캐놀라에 삽입된 압력센서로부터 16 bits/sample, 200 Hz/second로 획득되었으며, 임상전문가가 RemLogic PSG Software(Embla System LLC, USA)에서 미국수면학회(American Academy of Sleep Medicine, AASM)의 판독기준에 따라 수면호흡장애 이벤트를 분석하고 양압 지속유지기의 적정압력을 결정하였다[6].

두번째 실험은 본 연구에서 개발한 자동적정 알고리즘을 평가하기 위해 수행되었으며, 국산형 양압지속유지기인 M3(MEK-ICS CO., Ltd, Republic of Korea)에 자동적정 알고리즘을 탑재한 후 10명의 수면호흡장애 환자(F/M: 0/20 people, Age: 28.2±4.4 year, AHI: 30.2±18.7 events/h)를 대상으로 AutoSet S9과 비교평가 하였다(IRB Number: 1041849-201708-BM-089-04). 평가방법은 M3와 AutoSet S9을 착용한 상태로 각각 하루밤 동안 수면을 취하여 APAP 치료를 실시하였으며, M3와 AutoSet S9 치료시 Portable PSG(EmblettaX10, Embla System LLC, USA)를 함께 착용하여 무호흡-저호흡

지수(apnea-hypopnea index, AHI)와 양압지속유지기의 평균압력을 계산하였다.

2. 수면호흡장애 검출 알고리즘

자동적정을 위해서는 환자의 수면 중 수면호흡장애 이벤트를 모니터링하는 것이 중요하며, 본 연구에서는 무호흡, 저호흡, 코골이 이벤트와 양압유지기의 기준압력을 고려하여 자동적정 지표로 활용하였다.

(1) 수면 무호흡-저호흡 검출 알고리즘

수면 무호흡-저호흡 검출 과정은 크게 전처리부, 호흡진폭 계산부, 무호흡-저호흡 검출부로 구성된다. 전처리부에서는 51차 메디안 필터를 이용해 배경 잡음 및 코골이 관련 신호를 제거하였다. 호흡진폭을 계산하기 위해 호흡의 최고점과 최저점을 검출하였으며, 오검출을 방지하기 위해 최고점과 최저점간의 시간간격이 최소 0.3초 이상인 경우에만 검출하도록 하였다. 또한 진폭이 0.0085 mbar 이상인 경우에만 호흡으로 간주하였으며, 최고점과 최저점의 차이를 호흡진폭으로 정의하였다. 무호흡-저호흡 검출부에서는 AASM의 판독 기준에 근거하여 그림 1과 같이 알고리즘을 설계하였으며, Rule1~5를 기반으로 무호흡과 저호흡 이벤트로 판단하였다.

(2) 코골이 검출 알고리즘

코골이 검출 과정은 크게 전처리부, 특징추출부, 코골이 검출부로 구성된다. 전처리부에서는 10 Hz 고역통과 필터를 사용하여 호흡노력 등 저주파 신호를 제거하였고, 코골이 특징을 추출하기 위해서 0.5초 동안의 short-time energy를 수식 (1)과 같이 계산하였다. 이때 e 는 short-time energy를 계산한 결과이며, x 는 필터링된 신호, h 는 해밍 윈도우(hamming window), N 은 데이터 길이를 나타낸다. 그림 2는 비강압력 신호로부터 short-time energy를 계산하는 일련의 과정을 보여준다.

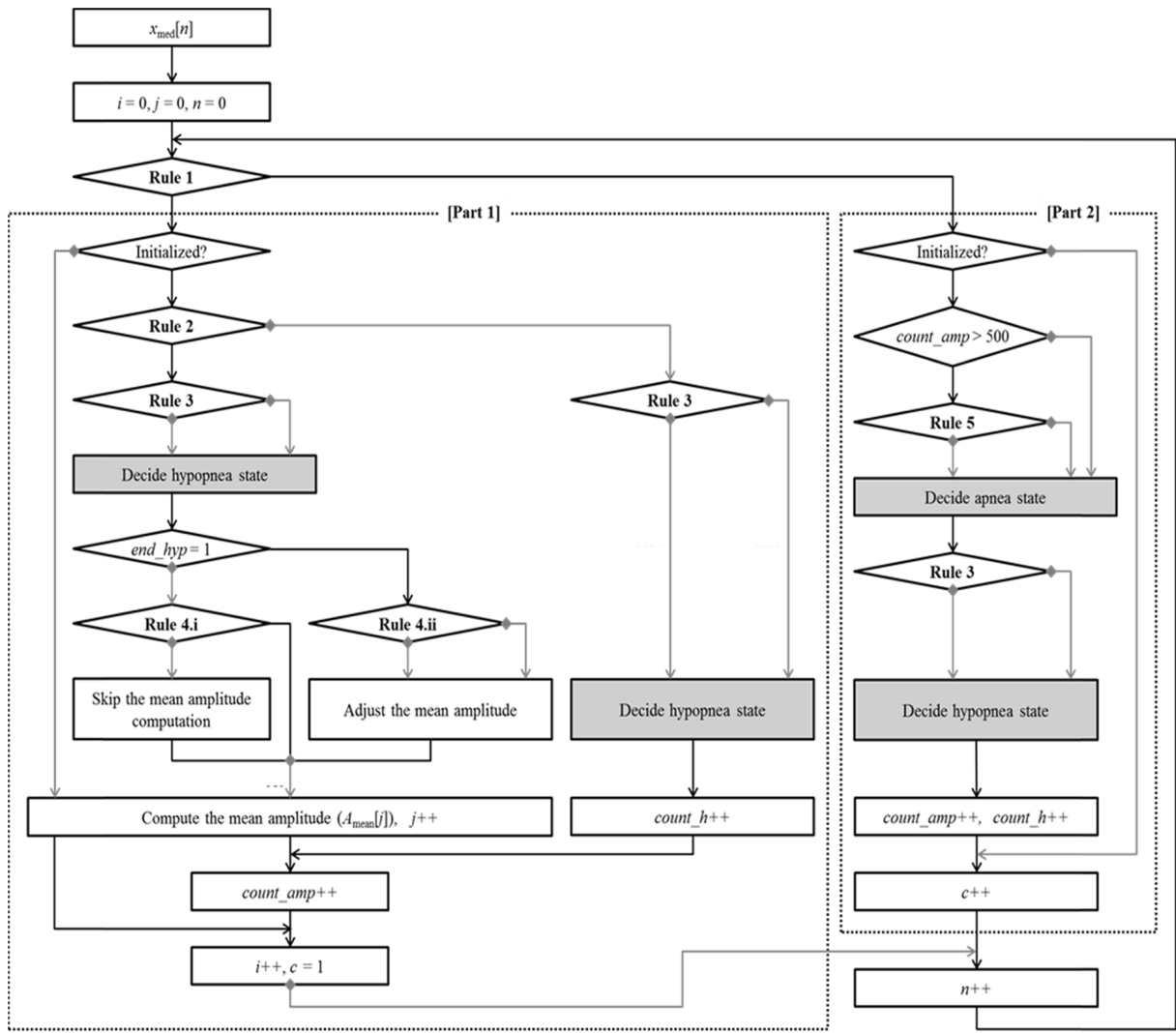
$$e(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x^2(m) * h(n-m) \quad (1)$$

코골이는 에너지의 크기가 10dB 이상인 상태로 1초 이상 지속될 경우 코골이 이벤트로 판단하였다.

(3) 자동적정 알고리즘

앞 절에서 언급한 수면호흡장애 검출 알고리즘으로부터 검출된 수면호흡장애 이벤트와 기준압력에 따른 변화 압력을 표 1에 제시하였다.

수면호흡장애 이벤트의 중증에 따라 무호흡-저호흡-코골이 순으로 압력 변화를 달리 하였으며, 양압유지기의 높은



134

- Rule 1) IF $x_{med}[n]$ is trough point
- Rule 2) IF $A[i] > A_{mean}[j] \cdot thres_hypop$
- Rule 3) IF $count_h > thres_duration$
- Rule 4.i) IF $end_hyp = 1 \ \& \ A[i] < A_{mean}[j]$
- Rule 4.ii) IF $A[i] > A_{mean}[j] \cdot thres_over_amp$
- Rule 5) IF $x_{med}[n] - value_temp < A_{mean}[j] \cdot 0.1$
& $count_a \geq thres_duration$

그림 1. 수면 무호흡-저호흡 검출 알고리즘
Fig. 1. Algorithm of sleep apnea-hypopnea detection

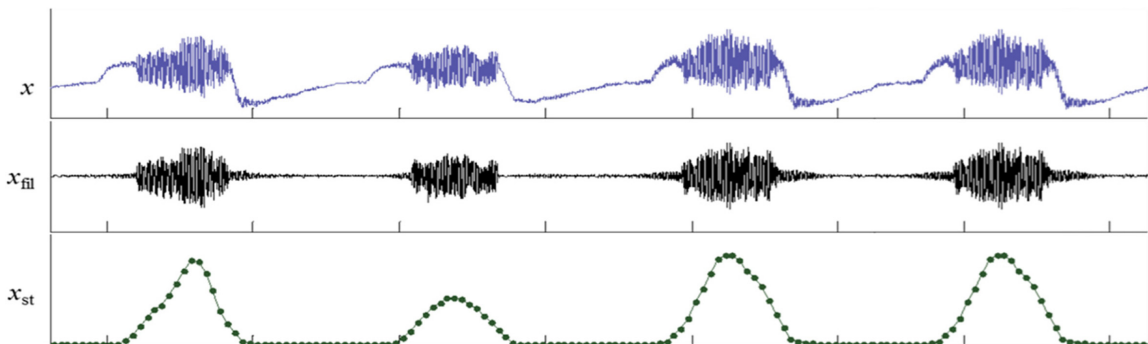


그림 2. 비강압력 신호를 이용한 코골이 특징추출 과정
Fig. 2. Feature extraction of snoring using nasal pressure

표 1. 수면호흡장애 이벤트 및 기준압력에 따른 압력변화

Table 1. The pressure changes with sleep-disordered breathing and base pressure

Base pressure (cmH ₂ O)	SDB Events	Pressure ↑ (cmH ₂ O/event)	Normal breathing time (min)	Pressure ↓ (cmH ₂ O/min)
4~8	apnea	1.0	≥ 4	0.1
	hypopnea	0.5		
	snoring	0.2		
8~10	apnea	0.7	≥ 4	0.2
	hypopnea	0.3		
	snoring	0.2		
10~12	apnea	0.5	≥ 2	0.2
	hypopnea	0.2		
	snoring	0.1		
12~14	apnea	0.4	≥ 2	0.5
	hypopnea	0.1		
	snoring	0.1		
14~20	apnea	0.2	≥ 2	1.0
	hypopnea	0.0		
	snoring	0.0		

표 2. 수면호흡장애 검출 알고리즘 성능평가 결과

Table 2. The performance results of sleep-disordered breathing

Split-night data (N=27)	Sleep apnea-hypopnea	snoring
Sen. (%)	86.4	85.4
PPV. (%)	84.5	92.0
M3 data (N=10)	sleep apnea-hypopnea	snoring
Sen. (%)	82.0	88.4
PPV. (%)	85.8	87.0

Sen.: sensitivity, PPV.: positive predictive value

압력에서는 환자의 수면의 질을 방해할 수 있으므로 기준압력이 높아질 수록 압력변화를 작게 하였다.

III. 연구 결과

표 2는 자동적정을 위한 수면호흡장애 이벤트의 검출 결과이다. 수면 무호흡-저호흡 검출 알고리즘의 민감도와 양성예측도는 각각 86.4%, 84.5%(split-night data), 82.0%, 85.8%(M3 data), 코골이 검출 알고리즘은 85.4%, 92.0%(split-night data), 88.4%, 87.0%(M3 data)의 성능을 보였다.

그림 3은 본 연구에서 제시한 자동적정 알고리즘을 M3에 탑재하여 수면호흡장애 환자에게 적용한 예시이다. 적정 압

력은 4~20 cmH₂O까지 변화할 수 있으며, 수면 중 수면호흡장애 이벤트에 따라 적정 압력이 증가되고, 정상 호흡 시 감소되어 환자 상태에 따라 최적의 적정 압력을 적응적으로 조절하는 것을 보여준다. 표 3은 본 연구에서 제시한 자동적정 알고리즘(M3)과 AutoSet S9의 성능을 비교한 것이다. 10명의 수면호흡장애 환자를 대상으로 각각 하루밤동안 M3와 AutoSet S9를 착용했을 때 자동형 양압유지기의 평균압력과 환자의 AHI를 계산하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용했을 때 평균압력은 13.0±5.2 cmH₂O, AHI는 3.0±2 events/h. AutoSet S9는 각각 11.7±4.3 cmH₂O, 4.7±3.4 events/h였으며, 모든 평가지표에 대해서 M3와 AutoSet S9간의 paired t-test를 수행하여 통계적으로 유의한 차이가 없음을 확인하였다($p>0.05$).

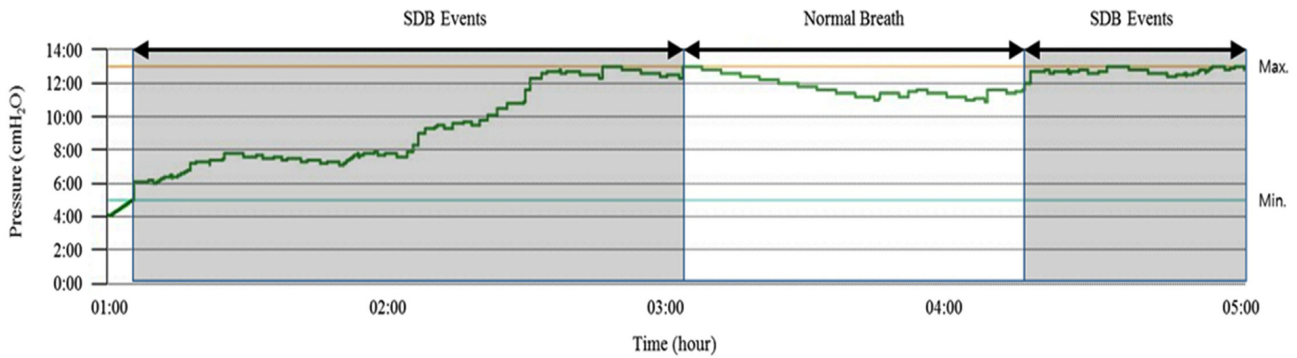


그림 3. 수면호흡장애 이벤트와 기준압력에 따른 자동적정 알고리즘 적용 예시

Fig. 3. The example of auto-titrating algorithm with sleep-disordered breathing event and base pressure

표 3. 자동적정 알고리즘 성능평가 결과

Table 3. The performance results of auto-titrating algorithm

Performnace index	M3 (N=10)	AutoSet S9 (N=10)	p-value
Average pressure	13.0±5.2	11.7±4.3	0.12*
AHI	3.0±2.4	4.7±3.4	0.08*

AHI: apnea-hypopnea index, *no significant difference ($p>0.05$)

IV. 고찰 및 결론

136

본 연구에서는 자동형 양압유지기에 적용하기 위한 자동적정 알고리즘을 제안하였다. 자동적정을 위해 수면 무호흡-저호흡, 코골이를 검출하였고 양압유지기의 기준압력과 수면호흡장애 이벤트를 고려하여 실시간으로 자동적정이 가능하도록 하였다.

알고리즘 개발 및 평가를 위해 split-night PSG와 APAP 실험을 진행하였으며, 수면호흡장애 검출 알고리즘은 평균적으로 민감도 85.7%와 양성예측도 87.8%의 성능을 보였다. 또한 수면호흡장애 및 기준압력을 기반으로 자동적정을 수행하였을 때 평균압력이 13.0±5.2 cmH₂O, AHI가 3.0±2.4 events/h로 세계수준의 장비인 AutoSet S9과 비교하였을 때 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

Stammnitz A 등은 CPAP과 APAP 장비를 비교평가하였고, CPAP 사용시 AHI가 0.7±1.2 events/h, APAP 장비 중 ResMed(USA)는 3.0±2.9 events/h, Devilbiss(USA)는 2.3±2.5 events/h, Vituoso(USA)는 12.0±13.6 events/h였다[7].

따라서 본 연구에서 제시한 자동적정 알고리즘은 기존 장비에 비해 유사하거나 우수한 성능을 보였으며, 자동형 양압유지기에 적용하여 효율적으로 수면호흡장애 환자의 치료에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 자동형 양압유지기의 사용 목적은 낮은 압력으로 환자의 수면방해를 최소화하면서 치료효과를 보는 것이다.

따라서 추후에는 각성지수(arousal index), 총수면시간(total sleep time) 등 환자의 수면의 질과 관련된 지표를 추가할 것이며, 더욱 많은 환자를 대상에게 적용하여 객관적인 알고리즘 평가를 수행할 것이다.

References

- [1] Collop N. The effect of obstructive sleep apnea on chronic medical disorders. *Cleve. Clin. J. Med.* 2007;74(1):72-8.
- [2] Prasad B, et al. Continuous positive airway pressure device-based automated detection of obstructive sleep apnea compared to standard laboratory polysomnography. *Sleep Breath.* 2010;14(2):101-7.
- [3] Sawyer AM, et al. LA systematic review of CPAP adherence across age groups: clinical and empiric insights for developing CPAP adherence interventions. *SLEEP.* 2011;15(6):343-56.
- [4] Nigro CA, et al. Accuracy of a novel auto-CPAP device to evaluate the residual apnea-hypopnea index in patients with obstructive sleep apnea. *Sleep Breath.* 2015;19(2): 569-78.
- [5] Hirose M, et al. Bench study of auto-CPAP devices using a collapsible upper airway model with upstream resistance. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2008;162(1):48-4.
- [6] Berry RB, et al. The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications. American Academy of Sleep Medicine, 2007.
- [7] Stammnitz A, et al. Automatic CPAP titration with different self-setting devices in patients with obstructive sleep apnoea. *Eur. Respir. J.* 2004;24(2):2073-8.