

다중 호흡 신호 및 딥러닝 기반 비침습 운동 유발 지방 대사 평가 알고리즘

이준영¹⁾, 이병주^{1), 2)}, 노효웅¹⁾, 한영기³⁾, 이대식^{1)*}

1) 한국전자통신연구원, 2) KAIST, 3) 경북대학교

dalee@etri.re.kr

A Study on the Deep Learning-Based Noninvasive Algorithm for Evaluating Exercise-Induced Fat Metabolism Using Multimodal Respiratory Signals

Lee Junyeong¹⁾, Lee Byeongju^{1), 2)}, Noh Hyowoong¹⁾, Hahn Young Ki³⁾, Lee Dae-Sik^{1),*}

Electronics and Telecommunications Research Institute, Chosun Univ., Korea

Advanced Institute of Science and Technology, Kyungpook National Univ.

요 약

본 논문은 딥러닝과 호흡신호 내 다중 휘발성 유기 화합물(VOC) 기반 운동 유발 지방대사 비침습·실시간 추정 알고리즘을 제안한다. 호흡신호에서 측정된 다차원 시계열 호기신호를 분석하기 위해 1D-CNN 알고리즘을 개발했다. 개발한 알고리즘을 활용하여 호기신호로부터 혈중 BOHB를 정량 예측했다. 30건의 임상 데이터로부터 추정된 BOHB와 혈중 BOHB 비교를 통해 테스트데이터로부터 $R=0.86$ 수준의 높은 상관관계를 달성했으며, 이를 통해 제안한 알고리즘의 개인 맞춤 운동 최적화·대사 모니터링 활용성을 제시한다.

I. 서 론

비만과 대사질환은 전 세계적으로 증가세이며, 임상 및 생활 현장에서 운동 중 지방대사 상태를 지속적이고 비침습적으로 파악하려는 요구가 커지고 있다. 기존의 대사평가(예: 혈액 채취, 마스크 기반 가스 분석)는 침습성·장비 부피·비용 문제로 일상 적용이 어렵다[1].

지방 산화가 증가하면 간에서 생성되는 케톤체(특히 β -하이드록시부티르산, BOHB)가 상승하고, 호기에서는 아세톤 등 VOC가 증가한다[2,3]. 이들 지표는 서로 연동되어 운동 강도와 대사 전환(지방 연소) 정보를 제공한다. 다만, 구강/상부 기도 공기에는 외부 혼입·타액·비강 영향이 남아 대사 신호가 희석될 수 있는 반면, 폐포 호기(end-tidal)는 심부 폐포에서 교환된 대사 부산물을 더 직접적으로 반영한다[3].

본 연구는 다차원 호흡 신호를 분석할 수 있는 1차원 합성곱신경망(1D-CNN) 기반 비침습 대사 분석 알고리즘을 제안한다. 핵심 아이디어는 다중 호흡신호(VOC 패턴)를 융합해 혈중 BOHB를 실시간 근사하고, 폐포 호기의 유효성을 실험적으로 검증함으로써 운동 유발 지방대사 평가의 정확도와 실용성을 높이는 것이다.

II. 본론

비만과 대사질환의 증가로, 일상 환경에서 운동 중 지방대사 상태를 비침습적으로 모니터링하려는 수요가 커지고 있다. 기존 혈액 채혈이나 메타볼릭 카트 기반 측정은 정확하지만 침습적이고 장비 부피·비용·착용 부담 때문에 개인 맞춤형 관리에 제약이 있다. 이에 본 연구에서는 호기(VOC) 신호를 활용한 정량 및 저비용 진단이 가능한 시스템 구현을 목표로 하고, 이를 위한 1-D CNN 알고리즘 기반 실시간 대사 모니터링 시스템을 구현한다.

우선 호기 분석에 의한 지방대사 모니터링 가능성에 대한 학술적 근거로는 지방 대사 시 발생하는 케톤체 부산물 중 하나인 acetone을 들 수 있다. 지방 산화가 항진되면 간에서 케톤체(특히 β -하이드록시부티르산; BOHB) 생성이 증가하고, 호기에서는 아세톤 등 VOC 농도가 상승한다. BOHB(혈중)와 아세톤(호기)은 운동 유발 지방 연소(exercise-induced fat metabolism)의 대리지표로 상호 연동되며, 이 관계를 이용하면 호기 분석만으로도 혈중 대사 상태를 추정할 수 있다.

호기 신호는 지난 분당서울대병원과의 협업을 통한 연구개발 및 임상시험에서 개발된 호기 측정 시스템을 통해 확보한 센서 데이터를 활용한다. 해당 신호는 30명의 임상 대상자로부터 채집된 150개 이상 시료로부터 측정된 다차원 시계열 데이터 그룹이다. 해당 신호 측정에 활용된 호기 측정 시스템의 주요 특징으로는 측정 신호에서 발생할 수 있는 노이즈 성분을 최소화하여 측정 결과 정확도를 높이기 위해 채취 시료를 구강 호흡과 폐포호흡으로 구분하는 기술이 적용되었다. 또한 해당 하드웨어는 VOC 센서 어레이로 호기 내 아세톤을 포함한 다성분 패턴을 수집한다. 구강·폐포 호기를 밸브/흐름 제어로 분리하고, 실시간

신호 전처리(정규화·기저선 보정·드리프트 보정)를 수행한다. 이렇게 얻은 다중 호흡 신호는 이후 딥러닝 모델의 입력으로 사용된다.

센서 시계열 패턴을 분석하기 위해 딥러닝 알고리즘이 설계 및 시스템에 적용되었다. 해당 알고리즘은 측정된 신호로부터 혈중 BOHB 를 추정하기 위한 추정 알고리즘으로 설계되었다. 개발된 1-D CNN 추정 알고리즘은 다차원 시계열 데이터를 입력받아 연산 후 혈중 BOHB 농도를 연속 값으로 회귀 예측한다. 모델은 슬라이딩 윈도우 기반 입력을 사용하고, 과적합 방지를 위해 정규화·조기 종료 등 규제를 적용했다. 목표는 저지연 실시간 추정으로, 추후 온디바이스 경량화까지 염두에 두었다.

개발된 알고리즘의 신뢰도를 평가하기 위해 임상 데이터 분석을 수행했다. 임상 데이터는 각 피검자 별 운동 수행 시간에 따른 5 개의 호기 시료를 측정된 다차원 시계열 데이터 그룹들로 구성되어 총 150 개의 데이터가 준비되었고, 이 중 측정 과정에서의 하드웨어 오류 등으로 인해 변형이 발생한 일부 데이터는 분석에서 제외되었다. 전체 데이터 중 80%를 training data 로, 20%를 test 데이터로 설정하고, 학습 및 데이터 추정을 수행하였다. 최종 학습된 1-D CNN 추정모델을 통한 테스트 데이터 분석 결과 혈액 분석을 통해 확보된 BOHB 수치와의 상관관계는 $R=0.86$ 으로 매우 높은 수치가 확인되었다.

III. 결론

제안한 호기 측정 시스템 및 분석 알고리즘의 호기 분석 결과는 다중 호흡신호로 혈중 BOHB 를 높은 상관관계로 추정하여 (학습데이터 $R=0.96$, 시험데이터 $R=0.86$), 높은 복잡성을 가지는 호기 데이터 분석을 위한 제안한 1-D CNN 알고리즘의 바이오마커 검출 알고리즘으로의 우수성을 검증한다. 실험결과는 또한 비침습 인체대사 모니터링을 위한 도구로써 폐포 호기 데이터의 우수성을 실증했다. 이는 운동 유발 지방 연소의 실시간 모니터링과 개인 맞춤형 운동 코칭, 그리고 대사 건강 추적으로의 적용 가능성을 뒷받침한다. 한편, 표본 규모 확대, 외부/다기관 검증, 장기간 추적이 향후 과제이며, CO_2 (호기말)·호흡량 등 추가 생리 신호 통합과 모델 경량화는 실제 착용형·가정용 구현을 가속할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT, 한국)의 재원으로 학연협력플랫폼구축시범사업 (Scale-up Collaboration by KNU&ETRI Program)의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00304776)

참 고 문 헌

[1] K. E., Jones, et al., "Breath Acetone Correlates With Capillary β -hydroxybutyrate in Type 1 Diabetes", *J. of Diabetes Sci. Tech.*, 19322968251334640 (2025)

[2] K. Königstein, et al., "Breath acetone change during aerobic exercise is moderated by cardiorespiratory fitness" *J. of breath research*, 15(1), 016006 (2020)

[3] F. Bovey, et al. "Breath acetone as a marker of energy balance: an exploratory study in healthy humans." *Nutrition & diabetes*, 8(1), 50 (2018)

[4] W. Miekisch, et al. "Impact of sampling procedures on the results of breath analysis." *J. of breath research*, 2(2), 026007 (2008)

[5] A. Di Gilio, et al. "Breath analysis: Comparison among methodological approaches for breath sampling." *Molecules*, 25(24), 5823 (2020)