

남성 비만 환자를 위한 무계당 저작활동 웨어러블 모니터링 시스템 개발

신화윤¹, 주하영¹, 김수홍¹, 강지윤¹, 박시우¹, 오봉석², 김한준^{1*}
국립금오공과대학교¹, (주) Y. T. M.²

tlsghkdb4605@kumoh.ac.kr, 20221140@kumoh.ac.kr, 20180214@kumoh.ac.kr,
misokgy@kumoh.ac.kr, 20200464@kumoh.ac.kr, o0429@hanmail.net, hanjoonk@kumoh.ac.kr

A Weight-Normalized Chewing Activity Wearable Monitoring System for Obese Male Patients

Hwayun Shin¹, Ha Yeong Ju¹, Suhong Kim¹, Jiyun Kang¹, Siwoo Park¹, Bong-Seok Oh²,
Han-Joon Kim^{1*}
Kumoh National Institute of Technology¹, Y. T. M.²

요 약

본 연구는 남성 비만 환자에서 저작 횟수 감소가 높은 체질량 지수(BMI)와 관련이 있다는 점에 주목하여, 무계당 권장 저작 횟수(Weight-based Proper Chewing Count, WPC)를 산출하는 새로운 모니터링 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 저항성 장력 센서 기반의 이어클립형 저작 활동 웨어러블 장치로부터 저작 횟수를, 로드셀 기반 식사 패드로부터 실시간 음식 섭취 무게를 측정하며, 두 정보를 블루투스 저전력 통신을 통해 스마트폰으로 전송한다. 스마트폰 애플리케이션은 수집된 데이터를 기반으로 WPC를 계산하고, 섭취 패턴을 ‘부족’, ‘적정’, ‘과다’의 세 단계로 피드백한다. 혈당 측정 실험 결과, WPC 조건에서 인슐린이 선제적으로 분비되어 식후 혈당 상승이 완만하게 나타났으며, 이를 통해 제안 시스템을 비만 관리 및 혈당 조절에 활용할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

비만은 전 세계적으로 심각한 공중보건 문제로, 그 발생에는 개인의 식습관이 밀접하게 관련되어 있다. 특히 남성의 경우, 적은 저작 횟수와 빠른 식사 속도는 높은 체질량 지수 및 식후 인슐린 분비 지연에 따른 혈당 스파이크와 강한 상관관계를 보이는 것으로 보고되었다[1, 2]. 반면, 여성에서는 비만군과 정상군 간의 식사 속도 및 저작 횟수 차이가 통계적으로 유의하지 않아 본 연구의 분석 대상에서 제외하였다. 음식을 급하게 섭취하는 식습관은 단순히 섭취량 증가로 인한 비만뿐만 아니라, 대사 불균형을 초래하여 대사증후군 및 당뇨병 위험을 높이는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 식습관을 정량적으로 모니터링하고 개선하는 것이 중요하다. 기존 연구에서는 근전도(EMG) 또는 저작음 분석을 통해 식습관을 평가하였으나, 주변 근육의 간섭 신호나 외부 소음 등으로 인해 정확한 저작 횟수 분석이 어려웠다. 또한, 대부분의 기존 시스템은 식사 속도만을 고려하고 실제 섭취량 정보를 반영하지 않아, 개인별 정확한 저작 패턴을 분석하는 데 한계가 있었다[4, 5].

이에 본 연구에서는 턱의 움직임 기반 저항성 장력 센서를 이용한 저작 활동 측정과 로드셀 기반 섭취 무게 측정을 동시에 수행하는 식습관 모니터링 시스템을 제안한다. 또한, 섭취량에 비례한 적정 저작 횟수를 나타내는 새로운 지표인 무계당 권장 저작 횟수(Weight-based Proper Chewing Count, WPC)를 도입하고, 이를 실제 혈당 변화와 비교함으로써 제안 시스템의 유효성과 임상적 가능성을 검증하였다.

2.1. 무계당 저작횟수 모니터링 시스템

본 연구에서 개발한 이어클립형 저작 활동 웨어러블 장치는 저항성 장력 센서를 이용하여 턱의 움직임을 실시간으로 감출한다. 장치는 한쪽 귀에 안정적으로 고정되는 이어클립 구조를 적용하여 센서의 위치 변동을 최소화하고, 균일한 저항값 변화를 확보하였다. 또한, 헬멧 턱받침과 유사한 구조물을 추가하여 턱이 하강할 때 발생하는 장력이 센서에 직접 전달되도록 설계함으로써 신호 감도와 안정성을 향상시켰다. 이를 통해 사용자는 장착의 불편함 없이 높은 측정 신뢰도와 착용 편의성을 동시에 얻을 수 있다. 음식의 무게 측정을 위한 식사 패드는 책 형태의 이동형 센서 구조로 설계되었으며, 표면 소재로 방수성이 우수한 폴리우레탄 레터를 적용하여 휴대성과 위생성을 모두 만족하였다. 각 측정 장치에서 수집된 데이터는 저전력 블루투스(BLE) 통신을 통해 스마트폰 애플리케이션으로 전송된다. 애플리케이션은 수집된 저작 횟수와 음식 섭취 무게 데이터를 기반으로

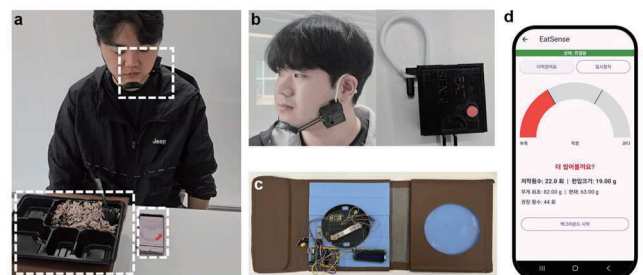


Fig. 1 개발 시스템 개요 (a) 실험 셋업, (b) 이어클립형 저작활동 웨어러블 장치, (c) 섭취 무게 측정용 식사 패드, (d) 정보 피드백용 어플리케이션

II. 본론

WPC 를 계산하고, 결과를 게이지, 텍스트, 알람 형태로 사용자에게 제공하여 식사 중 저작 운동의 적정성을 직관적으로 피드백한다. 정확한 측정을 위해 사용 전에는 저작 활동 모니터링 장치와 식사 패드의 초기화 및 영점 조정이 필요하며, 두 장치는 스마트폰 애플리케이션과 자동으로 연결되어 동기화된다. 전체 시스템의 구성은 Fig. 1 에 나타내었다.

2.2. 저작활동 감지 및 무게당 저작횟수 연산 알고리즘

제안된 알고리즘은 초기 설정, 신호 처리, 이벤트 판정, 피드백의 네 단계로 구성된다. 장치 착용 후 착용자의 얼굴 크기나 센서 장력 등으로 인해 발생할 수 있는 초기 저항 편차를 보정하기 위해 초기 설정 단계에서 사용자별 기준선을 자동으로 설정한다. 사전 측정 결과, 저항 변화(ΔR)는 작은 저작운동 시 약 0.4 ~ 1.5 kΩ, 큰 저작 시 0.8 ~ 2.0 kΩ의 범위로 나타나 일부 중첩이 확인되었다. 저작운동을 감지하기 위해 단일 임계값을 적용할 경우 작은 저작은 자세나 호흡에 따른 노이즈로 오검출되거나, 큰 저작은 한 번의 동작이 두 번으로 중복 검출될 위험이 존재한다. 이를 해결하기 위해 세션별 자동 기준값과 최댓값 기반 분류를 결합한 동적 임계값을 적용하였으며, 이를 통해 개인차 및 환경 변화에 따른 영향을 보정하고 실제 저작 이벤트를 안정적으로 검출하면서 강도와 속도 변화에도 일관된 인식을 유지하였다. 센서 출력은 빠른 저작 운동과 느린 저작운동을 구별하기 위한 두 개의 지수 이동평균의 차(ΔT)를 계산하여 신호 변화를 추적한다. 빠른 저작운동을 위한 이동평균필터($gain=0.8$)는 순간 변화를 즉시 반영하고, 느린 저작운동을 위한 이동평균필터($gain=0.2$)는 전체 추세를 천천히 반영하므로 ΔT 는 사실상 고역 통과 필터(high-pass filter)처럼 작동한다. 알고리즘은 ΔT 의 진폭과 지속 시간을 종합적으로 분석하여 ΔT 가 크고 지속시간이 짧으면, 빠른 저작, ΔT 가 작고 지속시간이 길면, 느린 저작으로 구분하고, 이를 통해 지속적인 턱의 움직임을 검출한다. 단일 저작 확정 구간은 ΔT 가 80~180 ms로 설정하고, 이후 180~500 ms 구간은 재검출 억제 구간으로 정의하여 중복 카운팅을 방지하였다. 180 ms는 빠른 저작의 잔류 진동을 제거하기 위한 최소 시간, 500 ms는 느린 저작의 다음 동작을 인식하기 위한 최대 시간으로, 이 구간은 개인별 저작 속도 차이를 보정하여 한 번의 저작을 정확히 1 회로 인식하도록 하는 동적 안정 구간이다. 저작 횟수 데이터는 BLE를 통해 애플리케이션으로 전송되며, 식사 전 약 100 ms 구간에서의 무게 데이터를 기준으로 표준편차가 2.0 g 이하로 안정화되면 식사 시작을 감지한다. 이후 이전 무게 대비 변화량을 한 입 섭취량으로 정의하고, 이를 기반으로 (한 입 섭취량) \times 2.3으로 계산한 WPC [6]와 장력 센서로 측정된 실제 저작 횟수를 비교하여 저작 속도를 판단한다. 실제 저작 횟수가 WPC의 0.8~1.2 배 범위에 있을 경우 '적정', 이를 초과하면 '과다', 미만이면 '부족'으로 판정하여 사용자에게 피드백을 제공한다.

III. 실험 조건 및 결과

개발 시스템의 유효성을 보이기 위해 20 대 남성 비만 참가자를 대상으로 흑미 100 g 섭취 후 불충분 저작과 적정 저작 조건에서 혈당을 비교하였다. 실험은 11 시간의 공복시간 이후에 진행하였으며, 혈당은 공복 및 식사 시작 후 15, 30, 60, 120, 150 분에 측정하였다. 일반 저작속도(2.3 배)는 정상인의 평균 저작 빈도(2.3 회/g)를, 빠른 저작속도(1.2 배)는 약 20% 빠른 식사 속도를 반영한 것으로, 기존 논문의 저작 빈도 차이와 저작 횟수 실험을 근거로 설정하였다[6]. Fig. 2에서 빠른 저작의 경우 식후 1 시간 후에 144~149 mg/dL 까지 혈당이 급격히 상승 후 빠르게 감소하는 혈당스파이크가 나타난 반면, 적정 저작은 상대적으로 낮은 혈당 최고치(132~141 mg/dL)와 완만한

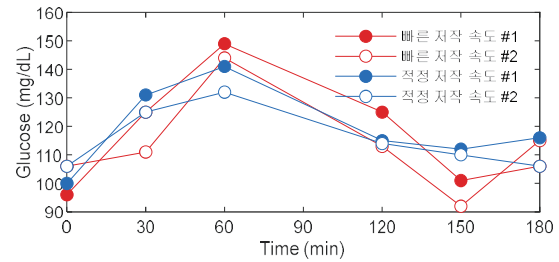


Fig. 2 저작속도에 따른 혈당측정 결과

혈당 감소를 보였다. 이는 충분한 저작이 음식 분해와 포도당 흡수를 점진적으로 유도하여 혈당 급등을 억제하고, 식후 혈당 안정성을 향상시킨 결과로 해석된다.

IV. 결론

본 연구는 저작 횟수와 섭취량을 동시 측정을 통해 WPC를 실시간 산출·피드백하는 저작 활동 모니터링 시스템을 제시하였다. 이 시스템은 한입 크기와 저작 패턴을 정량 통합해 과식 억제와 식사 속도 조절을 유도하고, 식후 혈당 변동성 완화를 돕는 행동 피드백을 제공함으로써 비만·당뇨 환자의 혈당관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역 혁신 사업과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00214390, RS-2024-00415347).

참 고 문 헌

- [1] S. Park and W.-S. Shin, "Differences in eating behaviors and masticatory performances by gender and obesity status," *Physiol. Behav.*, vol. 138, pp. 69-74, 2015.
- [2] A. Sato *et al.*, "Morning mastication enhances postprandial glucose metabolism in healthy young subjects," *Tohoku J. Exp. Med.*, vol. 249, no. 3, pp. 193-201, 2019.
- [3] L. Barrea *et al.*, "Forever young at the table: Metabolic effects of eating speed in obesity," *J. Transl. Med.*, vol. 19, no. 1, p. 530, 2021.
- [4] R. Zhang and O. Amft, "Monitoring chewing and eating in free-living using smart eyeglasses," *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 21, no. 3, pp. 597-605, 2017.
- [5] S. Päßler and W.-J. Fischer, "Food intake monitoring: Automated chew event detection in chewing sounds," *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 18, no. 1, pp. 278-289, 2014.
- [6] J. Li *et al.*, "Improvement in chewing activity reduces energy intake and modulates plasma gut hormone concentrations in obese and lean young men," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 94, no. 3, pp. 709-716, 2011.