

“혈액검사, 집에서 한 방울이면 정확도는 병원 수준” GIST, 차세대 바이오센서로 병원급 혈액검사 구현 병원 임상장비 대비 혈액지표 정확도 95% 달성

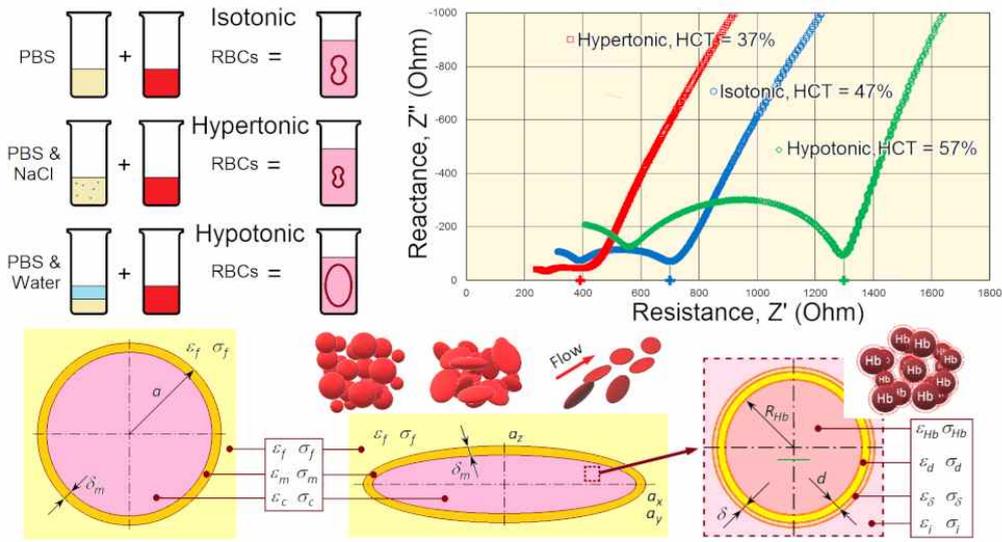
- 기계로봇공학과 양성 교수팀, 소량의 혈액만으로 고정밀 혈액검사 가능한 기술 개발... 혈액 속 건강 신호와 질병 지표를 빠르고 정확하게 분석할 수 있는 전기화학 기반 플랫폼
- 고가의 임상 장비 없이도 손쉽게 고감도 검사 가능해 심혈관 질환 조기진단 및 개인 맞춤 건강관리 적용 기대... 국제학술지 《Analytical Chemistry》 표지논문 게재



▲ (왼쪽부터) 기계로봇공학과 석박사통합과정 이예성 학생, 즈바노브 알렉산더 연구교수, 양성 교수
병원에서 사용하는 대형 장비에 의존하던 혈액검사와 달리, 소량의 혈액만으로도 빠르고 정밀하게 주요 혈액 지표를 확인할 수 있는 차세대 바이오센서 기술이 개발됐다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계로봇공학과 양성 교수 연구팀이 미세유체 전기화학 임피던스 센서(MEIS)*를 활용해 적혈구의 형태와 전기적 특성을 동시에 정밀 분석하고, 이를 바탕으로 기존 임상 혈액검사 수준의 주요 지표를 산출하는 기술을 구현했다고 밝혔다.

* 미세유체 전기화학 임피던스 센서(MEIS, Microfluidic Electrochemical Impedance Sensor): 미세유체 채널에 전극을 배치하여 소량의 혈액이나 세포 현탁액이 흐를 때 발생하는 전기화학적 임피던스(전기 저항과 유전 특성)를 측정하는 장치다. 비파괴적이고 실시간 분석이 가능하며, 다중 주파수 측정을 통해 적혈구 형태 변화, 세포막-세포질의 전기적 특성 등 다양한 생체 정보를 정밀하게 파악할 수 있어, 혈액검사와 세포 분석, 질병 조기 진단 등 차세대 바이오센서 기술로 주목받고 있다.



▲ **Graphical Abstract.** 혈액 내 수분 환경에 따른 적혈구 형상 변화, 삼투 조건별 나이퀴스트 플롯 (Nyquist plot, 전기적 반응을 그래프로 표현한 것), 적혈구 내외부 이론 모델.

이 기술은 기존 센서보다 한층 정확한 분석이 가능하다. **혈액이 흐르는 동안 삼투 조건*의 변화를 전기적으로 감지하고 반영함으로써 안정적이고 신뢰도 높은 결과를 제공한다.**

* **삼투 조건(Tonicity):** 세포와 외부 용액 사이의 농도 차이가 세포에 미치는 영향을 의미하며, 저장성(hypotonic) 용액에서는 적혈구가 팽창하고, 고장성(hypertonic) 용액에서는 수축하며, 등장성(isotonic) 용액에서는 정상 상태를 유지한다. 즉, 세포 내외 수분 균형과 적혈구 형태를 결정하는 핵심 인자다.

혈액검사는 환자의 적혈구 수, 혈색소 농도, 혈장 점도 등 다양한 지표를 통해 빈혈, 감염, 심혈관 질환 등을 조기에 발견하는 데 필수적인 검사다. 그러나 기존 장비는 많은 혈액 샘플과 고가의 임상 장비, 숙련된 인력이 필요해 분석 시간이 길고, 환자 곁에서 즉시 검사하기에는 한계가 있었다.

이런 한계를 극복하기 위해 소량의 혈액을 빠르고 정확하게 분석할 수 있는 미세 유체 기반 기술이 주목받고 있으며, 전기 신호 변화를 활용한 분석법(임피던스 분석)도 세포를 손상시키지 않고 실시간으로 측정할 수 있다는 점에서 관심을 모아 왔다.

연구팀은 앞서 전기화학적 신호 분석법(EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy)과 실제 혈류 환경을 모사한 미세유체 채널을 결합해 혈액의 전기적 특성을 측정하고, 적혈구 배열과 헤모글로빈 주변의 수분 구조(수화 구조*)를 정량적으로 해석하는 연구를 발표한 바 있다. 이를 통해 실제 혈액에서도 혈액학적 지표를 도출할 수 있음을 입증했다.

그러나 기존 연구들은 적혈구가 삼투 조건에 따라 팽창하거나 수축하는 변화를 충분히 반영하지 못해, 정밀한 지표 측정에는 한계가 있었다.

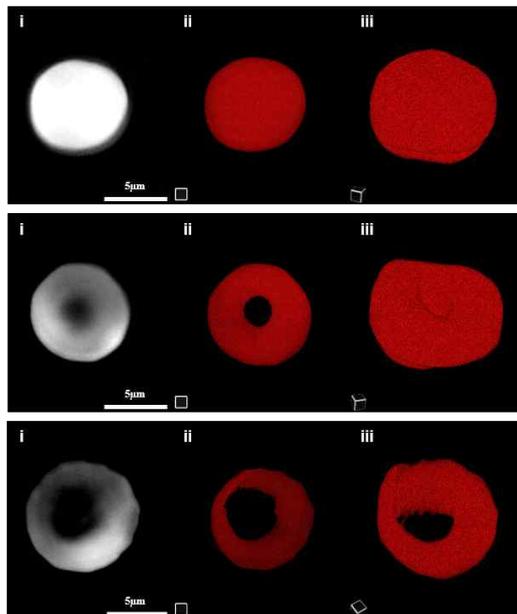
* **헤모글로빈 수화 구조(Hemoglobin Hydration Shell):** 헤모글로빈 분자 주변에 형성된 물 분자층을 의미하며, 이 수화층은 헤모글로빈의 안정성과 구조 유지, 산소 결합과 방출 등 기능 수행에 중요한 역할을 한다. 즉, 헤모글로빈이 정상적으로 작동하고 혈액 내 산소 운반 능력을 유지하는 데 핵심적인 요소다.

이에 연구팀은 적혈구가 서로 다른 삼투 환경 - 예를 들어 물을 많이 흡수해 부풀거나, 반대로 수분을 잃어 쪼그라드는 상황 - 에서 어떻게 모양과 부피가 변하는지를 광학 현미경과 홀로토포그래피 현미경*으로 관찰했다. 이어 전극이 부착된 미세 유체 채널을 통해 혈액 샘플의 전기적 반응을 다양한 주파수에서 측정해, 세포 안팎의 변화를 보다 정밀하게 포착했다.

이를 바탕으로 혈장, 적혈구 세포막, 세포질의 유전 특성을 계산하고, 삼투압 변화에 따른 적혈구의 수축·팽창과 헤모글로빈 주변의 수분 상태까지 반영한 새로운 분석 모델을 제시했다.

* **홀로토포그래피 현미경(Holotomography Microscope):** 레이저 빛이 시료를 통과할 때 발생하는 위상 변화를 측정해 세포나 조직의 3차원 구조를 비침습적으로 재구성하는 첨단 현미경 기술로, 라벨링 없이도 적혈구, 세포막, 세포질 등 세포 내부 구조와 형태 변화를 실시간으로 관찰할 수 있어 세포 연구, 혈액 분석, 질병 진단 및 약물 반응 평가 등 다양한 분야에서 활용된다.

* **등장액(Isotonic solution):** 세포 내부와 외부의 삼투압이 같아 세포 크기 변화가 없는 용액 / **고장액(Hypertonic solution):** 세포 외부의 삼투압이 세포 내부보다 높아 세포에서 물이 빠져 나가 수축하는 용액 / **저장액(Hypotonic solution):** 세포 외부의 삼투압이 세포 내부보다 낮아 세포로 물이 들어가 팽창하는 용액



▲ 삼투 조건에 따른 혈구 형상 변화를 홀로토포그래피 현미경으로 관찰. (위쪽부터) 저장성(Hypotonic), 등장성(Isotonic), 고장성(Hypertonic) 혈액 내의 적혈구 사진.

그 결과 연구팀은 임상 혈액검사에서 사용하는 6가지 주요 지표 - 적혈구 수(RBC), 헤모글로빈 농도(Hb), 헤마토크릿(HCT)*, 평균 적혈구 헤모글로빈(MCV), 평균 적혈구 헤모글로빈(MCH), 평균 적혈구 헤모글로빈 농도(MCHC) - 를 산출하는 데 성공했으며, 기존 임상 장비 분석값과 95% 이상 일치하는 높은 정확도를 보였다.

또한 **혈장과 적혈구 내부 유체의 점도까지 평가해 환자의 건강 상태를 더욱 정밀하게 반영할 수 있음**을 입증했다. 특히 기존 쿨터 계수기(Coulter Counter)* 방식이 단일 주파수에서 세포 용적만 추정했던 것과 달리, 이번 연구는 **여러 주파수에서 전기 신호 변화를 종합 분석해 결합해 혈액 성분의 유전적 특성을 종합적으로 해석할 수 있는 새로운 분석법을 제시했다.**

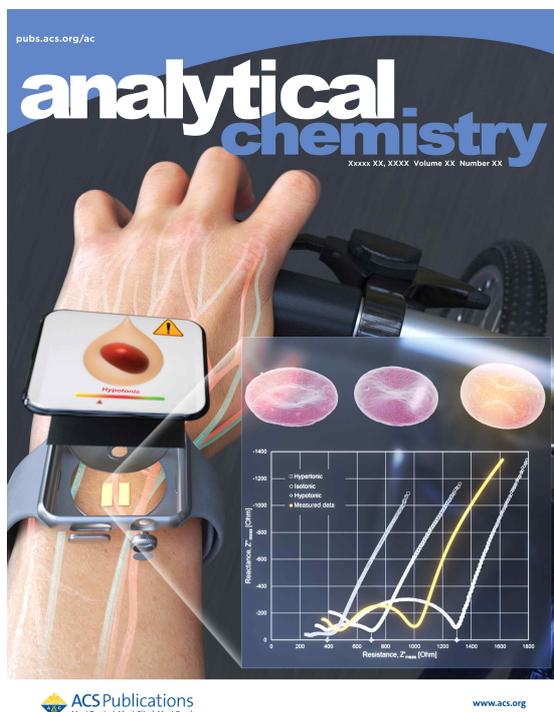
* **헤마토크릿(HCT, Hematocrit):** 혈액에서 적혈구가 차지하는 비율을 의미하며, 일반적으로 전체 혈액 부피의 퍼센트(%)로 표시된다. 이 수치는 빈혈, 탈수 등 다양한 질환의 진단과 혈액 상태 평가에 중요한 지표로 활용된다.

* **쿨터 계수기(Coulter Counter):** 세포나 입자가 전해질 용액 속 작은 구멍을 통과할 때 발생하는 전기 저항 변화를 측정해 세포 수와 부피를 계산하는 장치로, 세포 내부 구조나 전기적 특성 같은 상세 정보는 제공하지 못한다.

양성 교수는 “이번 연구는 **혈액 속 수분 변화까지 반영해 혈액학적 지표를 분석할 수 있는 기술을 구현했다는 점에서 의미가 크다**”며, “**혈액 성분의 형태학적 변화와 전기적 특성을 동시에 정량화할 수 있어, 앞으로 실시간 혈액검사와 차세대 현장 진단 기기 개발로 이어질 중요한 출발점이 될 것**”이라고 밝혔다.

이번 연구는 GIST 기계로봇공학과 양성 교수의 지도 아래, 즈바노브 알렉산더 (Zhbanov Alexander) 연구교수와 이예성 석박사통합과정생이 공동 제1저자로 수행했으며, 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 미국화학회(ACS)가 발간하는 국제학술지 《어널리티컬 케미스트리 (Analytical Chemistry)》에 2025년 8월 26일 온라인으로 게재됐으며, 표지 논문 (front cover)으로 선정됐다.



▲ 국제학술지 Analytical Chemistry 선정 표지 그림(게재 예정).

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Analytical Chemistry (IF: 6.7, 2024년 기준)
- 논문명 : Microfluidic Electrochemical Impedance Sensor for Hematological Tests of Blood under Different Osmotic Conditions
- 저자 정보 : 즈바노브 알렉산더(공동 제1저자, 기계로봇공학과), 이에성(공동 제1저자, 기계로봇공학과), 손민국 교수, 김병준 박사, 양성 교수(교신저자, 기계로봇공학과)