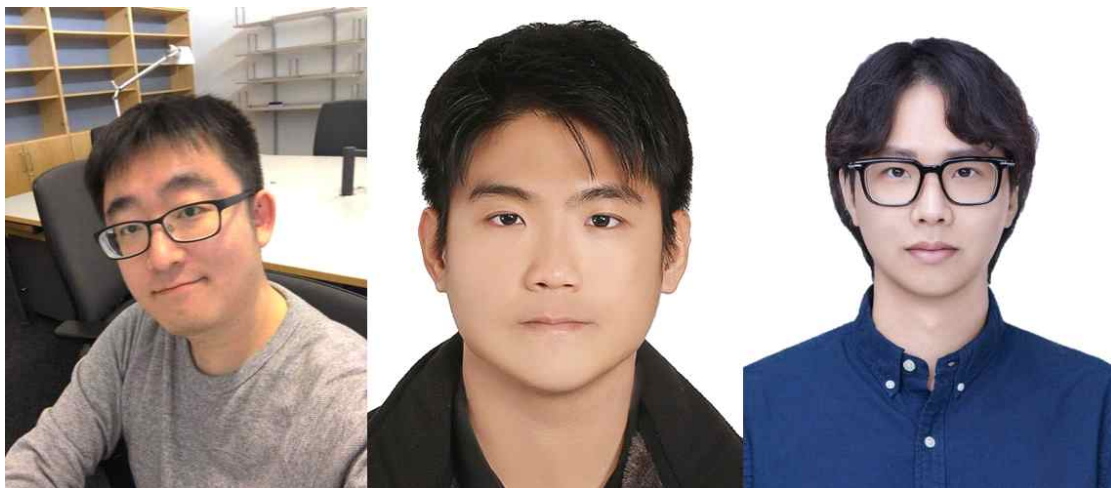


“손끝을 데우지 않아도 뜨거운 철판처럼 느낀다”

GIST, 가상 물체의 온도·질감 함께 구현하는 촉각 기술 개발

- AI학과 박건혁 교수팀, 손가락 중간 마디의 온도 자극으로 손끝에 냉감·열감 유도... 표면의 거칠기와 온도 함께 전달하는 촉각 장치 개발
- 가상현실(VR)에서 얼음·가열된 철판 등 다양한 표면의 촉감 구현 가능성 확인
- 국제학술지《IEEE Transactions on Haptics》19권 제3호 게재 및 표지논문 선정



▲ (왼쪽부터) GIST AI학과 박건혁 교수, 김동현 석박사통합과정생, 임충만 석박사통합과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 **AI학과 박건혁 교수 연구팀이 손끝에 직접 온도 자극을 가하지 않고도 가상 물체의 차갑거나 뜨거운 느낌과 표면의 거칠기를 함께 전달하는 촉각 기술을 개발했다고 밝혔다.**

연구팀은 손가락의 한 부위에 가한 온도 자극이 다른 부위에서도 느껴지는 ‘온도 전이 현상(thermal referral)’을 활용했다. 이를 통해 가상현실(VR)에서 얼음이나 뜨거운 철판처럼 온도와 질감이 서로 다른 가상 표면을 손끝으로 만지는 듯한 촉각 경험을 구현했다.

가상현실에서 물체를 실제로 만지는 듯한 느낌을 구현하려면 **표면의 거칠기뿐 아니라 온도도 함께 전달해야 한다.** 같은 매끄러운 표면이라도 차가운 얼음과 따뜻한 물체를 만질 때 느끼는 감각은 다르기 때문이다.

기존 촉각 장치는 주로 진동이나 물리적인 마찰을 이용해 표면의 질감을 구현해 왔다. 여기에 온도까지 표현하려면 피부에 닿는 부분을 직접 데우거나 식혀야 한다. 그러나 질감을 구현하는 장치에 온도 조절 기능까지 결합하려면 장치의 구조와 제어가 복잡해지는 한계가 있었다.

기존 연구에서는 피부의 한 부위에 온도 자극을 가하고 주변의 다른 부위에 진동

을 주면, 온도 자극이 가해지지 않은 부위에서도 차갑거나 뜨거운 감각이 느껴지는 **‘온도 전이 현상’**이 나타난다고 보고됐다. 그러나 이러한 현상이 손가락으로 물체의 표면을 문지르며 질감을 느끼는 상황에서도 나타나는지는 충분히 밝혀지지 않았다.

연구팀은 **‘온도 전이 현상’**이 손가락으로 표면을 문지르며 질감을 느끼는 상황에서도 나타나는지 확인하기 위해, 손가락의 서로 다른 부위에 온도와 질감 자극을 나눠 전달하는 방식을 고안했다.

이를 위해 검지의 중간 마디에는 차갑거나 따뜻한 온도 자극을 가하고, 손끝에는 서로 다른 질감의 재질이 부착된 작은 원판을 교체·회전시켜 표면을 문지르는 듯한 **촉감을 전달**하는 실험용 장치를 제작했다. 이를 통해 손끝에 직접 온도 자극을 가하지 않고도 질감의 종류와 관계없이 차갑거나 따뜻한 감각이 전달되는지 확인하고자 했다.

연구팀은 참가자 12명을 대상으로 **온도 전이 현상**이 나타나는지 확인하는 실험을 진행했다. 참가자들이 손을 움직이지 않는 상태에서 **24~40℃ 범위의 다섯 가지 온도 자극과 서로 다른 촉각 자극을 느끼도록 한 뒤**, 온도감을 어느 부위에서 느끼는지 조사했다

그 결과, **검지 중간 마디에 40℃의 온도 자극을 가했을 때 손끝에서도 열감을 느끼는 현상이 나타날 확률은 86%로 추정됐다.**

온도 자극은 표면의 거칠기를 느끼는 정도에도 영향을 미쳤다. 중간 정도로 거친 섬유 소재를 손끝에 전달하면서 검지 중간 마디에 온도 자극을 가한 결과, **참가자들은 24℃일 때보다 36℃ 또는 40℃일 때 같은 표면을 더 거칠게 느끼는 것으로 나타났다.**

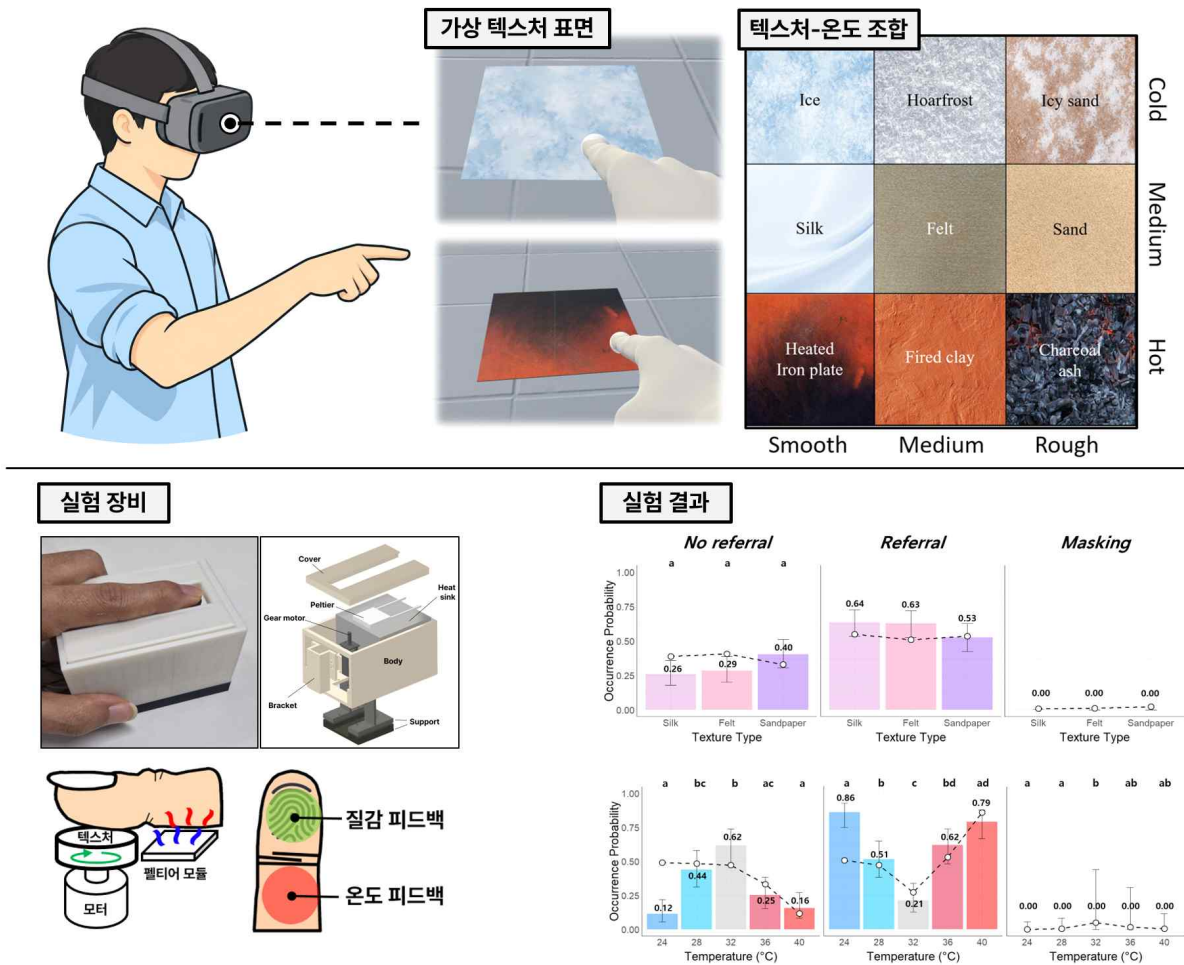
이어 연구팀은 손가락을 움직이며 표면을 문지를 때도 **온도 전이 현상**이 나타나는지 **확인**하기 위해, 앞선 실험에 참여하지 않은 12명을 대상으로 가상현실에서 가상 표면을 직접 탐색하는 실험을 진행했다.

그 결과, **24℃의 차가운 온도 자극**에서는 온도 전이 현상이 나타날 확률이 손을 움직이지 않았을 때 51%에서 손가락을 움직이며 표면을 탐색했을 때 **86%로 높아졌다.** 반면 **40℃의 뜨거운 온도 자극**에서는 손을 움직이지 않았을 때 86%, 움직였을 때 79%로 나타나, **손의 움직임에 따른 발생 확률의 증가가 확인되지 않았다.**

가상현실에서의 활용 가능성도 평가했다. 참가자들이 얼음, 가열된 철판, 모래 등 온도와 질감이 서로 다른 9종의 가상 표면을 손끝으로 탐색하도록 한 뒤, ▲실제로

만지는 듯한 느낌(현실감) ▲ 흥미도 ▲ 몰입도를 평가했다.

그 결과, 참가자들의 평가 점수는 100점 만점에 ▲ 현실감 평균 약 72~78점 ▲ 흥미도는 68~73점 ▲ 몰입도 69~76점으로 나타났다. 이는 손끝에 전달하는 질감과 손가락 중간 마디에 가하는 온도 자극을 결합해 다양한 표면의 촉감을 표현할 수 있음을 보여준다.



▲ 가상현실(VR)에서 온도와 질감을 함께 전달하는 촉각 기술의 작동 원리 및 실험 결과. 사용자가 촉각 장치를 쥐고 가상 표면을 탐색하면, 검지 중간 마디에는 온도 자극을, 손끝에는 표면의 질감을 전달한다. 실험 결과, 손끝에서도 냉감이나 열감이 느껴지는 '온도 전이 현상'은 표면의 거칠기보다 온도 조건에 더 큰 영향을 받았으며, 특히 차갑거나 뜨거운 조건에서 발생 가능성이 높게 나타났다.

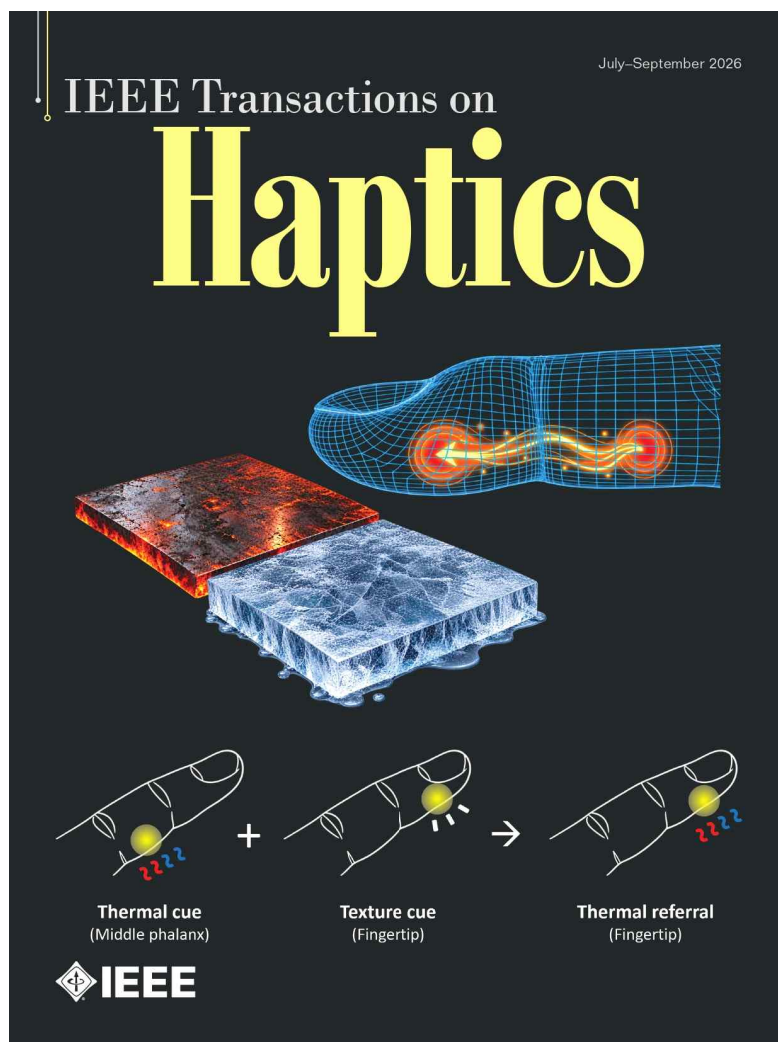
다만 이번 연구는 실험용 장치를 이용한 초기 검증 단계로, 온도 변화에 필요한 시간과 장치의 크기, 매끄러운 표면의 촉감 표현 등은 추가 개선이 필요하다.

박건혁 교수는 "이번 연구는 상온의 표면 질감 구현에 주로 초점을 맞춰온 기존 연구에서 나아가 질감과 온도를 함께 전달할 수 있음을 확인했다는 데 의의가 있다"며 "향후 다양한 온도와 질감을 지닌 가상 물체를 실제처럼 느끼고 상호작용할 수 있는 VR-촉각 인터페이스 기술로 발전시켜 나가겠다"고 말했다.

GIST AI학과 박건혁 교수가 지도하고 김동현 석박사통합과정생이 제1저자, 임충만

석박사통합과정생이 제2저자로 참여한 이번 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 정보통신기획평가원(IITP)이 지원하는 ▲ 디지털분야글로벌연구지원사업의 지원을 받아 수행됐다.

연구 결과는 국제학술지 《IEEE Transactions on Haptics》 제19권 제3호(7~9월)에 게재됐으며, 디지털 표지논문으로 선정됐다.



▲ GIST AI학과 박건혁 교수팀의 가상 물체 온도·질감 구현 연구가 국제학술지 'IEEE Transactions on Haptics' 제19권 제3호 디지털 표지논문으로 선정됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 받고 있다고 밝혔다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : IEEE Transactions on Haptics (IF: 3.1 , 2026년 기준)
- 논문명 : ThermalTexture: Temperature-Integrated Surface Rendering Using Thermal Referral Induced by Texture Slip-Feedback

- 저자 정보 : 김동현(제1저자, GIST AI학과 석박사통합과정생), 임충만(제2저자, GIST AI학과 석박사통합과정생), 박건혁(교신저자, GIST AI학과 부교수)