

# GIST, 이온빔 최적화 설계 기술 개발... 고체 상태 유지하며 '태양 수준' 고온 구현

- 물리·광과학과 방우석 교수팀, 시료 내부 온도 편차 획기적으로 줄이는 역설계 방법론 제시... 태양 표면보다 뜨거운 '따뜻한 고밀도 물질(WDM)' 정밀 구현 가능성 확인
- 이온빔 가열 효율 99.1%, 비균일도 0.55% 달성하며 고에너지밀도 물리 연구 기반 마련
- 핵융합·행성 내부 연구 및 암 치료 등 응용 기대... 국제학술지 《ICHMT》 게재



▲ (왼쪽부터) 물리·광과학과 방우석 교수, 이성민 석박통합과정생, 조수지 석박통합과정생  
광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 물리·광과학과 방우석 교수 연구팀이  
고체와 같은 높은 밀도를 유지한 채 물질을 최적의 방식으로 가열할 수 있는 이온빔\*  
에너지 분포 역설계 방법을 제시했다고 밝혔다.

고에너지 이온빔은 전하를 띤 이온을 빠르게 가속해 만든 입자선으로, 물질 내부에  
직접 에너지를 전달할 수 있다. 이를 이용하면 나노초(ns) 이하의 매우 짧은 시간  
안에 고체와 같은 높은 밀도를 유지한 채, 고체의 녹는점을 훨씬 넘어서는 고온 상  
태(수만 켈빈(K) 수준)를 구현할 수 있다.

이렇게 생성되는 극한 상태가 바로 **따뜻한 고밀도 물질(Warm Dense Matter, WDM)\***로, 고체와 플라즈마의 중간 영역에 해당하는 물질 상태다. 이는 **행성 내부 환경이나 핵융합 연료 상태를 이해하는 데 중요한 연구 대상**이다.

\* **이온빔(ion beam)**: 전하를 띤 이온을 한 방향으로 가속해 만든 입자선이다. 물질 내부로 침투해 에너지를 전달할 수 있어 가열, 재료 가공, 암 치료, 핵융합 연구 등에 활용된다.

\* **따뜻한 고밀도 물질(warm dense matter)**: 고체처럼 높은 밀도를 유지하면서도 높은 온도를 갖는 물질로, 고체와 플라즈마의 중간 영역에 해당하는 극한 상태이다. 이는 거대 행성 내부나 레이저 핵융합 연료와 같은 극한 환경을 이해하는 데 중요한 연구 대상이다.

그러나 기존 이온빔 가열 방식은 **이온 에너지에 따라 물질 내부에서 멈추는 깊이가 달라지는 특성** 때문에 시료를 균일하게 가열하기 어려웠다.

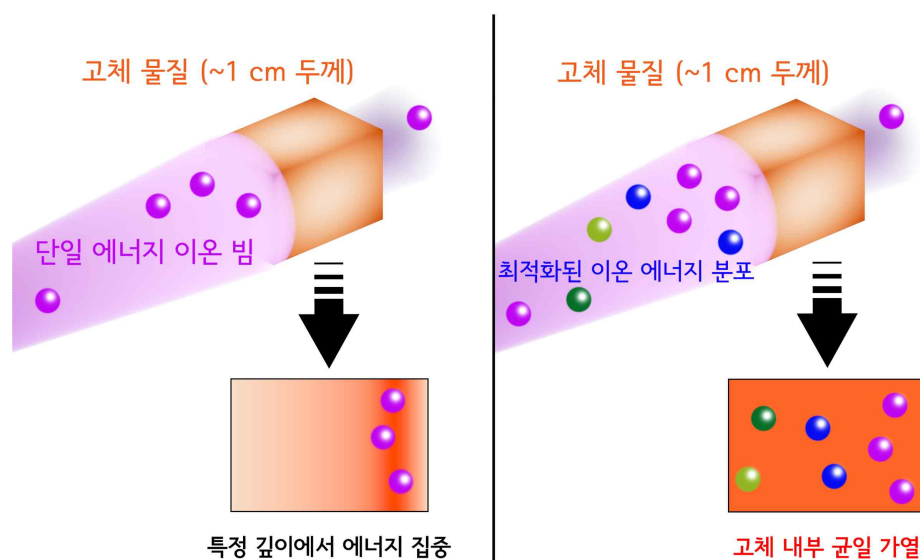
특히 브래그 피크(Bragg peak)\* 현상으로 인해 **에너지가 특정 깊이에 집중되면서**

시료 내부의 온도 분포가 불균일해지는 문제가 발생한다.

반대로 이온 에너지를 매우 높이면 가열의 균일성은 개선될 수 있지만, 많은 이온이 시료를 통과해 빠져나가면서 에너지 전달 효율이 낮아지는 한계가 있다.

따라서 가열의 균일성과 에너지 효율을 동시에 만족하는 이온 에너지 분포를 설계하는 것이 핵심 과제였다.

\* **브래그 피크(Bragg peak):** 입자가 물질 속을 지나가며 잃는 에너지가 특정 깊이에서 가장 크게 나타나는 현상이다. 이온빔은 이 피크가 좁고 뚜렷하게 나타나므로, 이온이 가진 에너지의 상당 부분이 브래그 피크 부근의 좁은 영역에 전달된다.



▲ **이온빔을 사용한 고체 가열 과정의 가상도.** 이온의 색은 이온이 가진 에너지를 나타내는 것으로 이온빔이 고체 물질 내부를 통과하면서 에너지를 잃으며 감속하면서 에너지를 전달한다. 단일 에너지 이온빔은 물질 내부의 특정 깊이까지 집중적으로 가열하지만, 최적화된 에너지 분포를 가진 이온빔은 물질 전체를 균일하게 가열할 수 있다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 원하는 가열 조건을 먼저 설정한 뒤, 그 조건을 만족하는 이온 에너지 분포를 역으로 계산하는 '역설계(inverse design) 방법'을 제시했다.

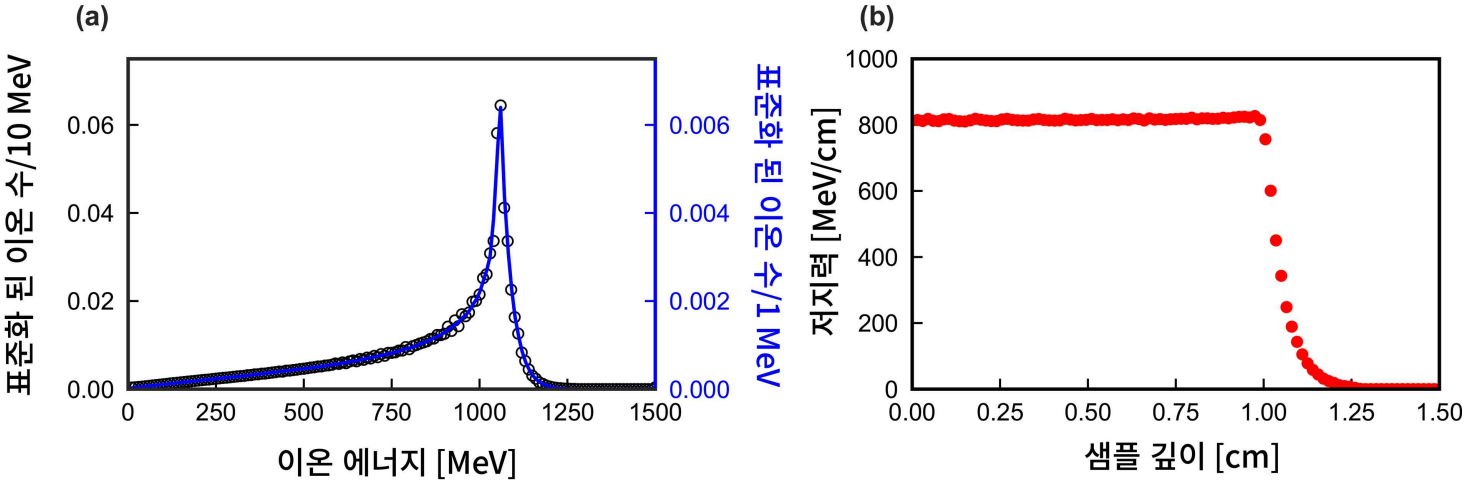
이를 위해 먼저 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)\*을 활용해 서로 다른 에너지를 가진 탄소 이온이 1 cm 두께의 고체 밀도 알루미늄 시료를 통과할 때 깊이에 따라 에너지가 어떻게 전달·흡수되는지를 계산했다.

이후 계산 결과를 바탕으로 시료 전체에 균일한 열 분포를 형성하는 이온 에너지 조합을 도출했으며, 이때 목표 분포와의 오차를 최소화하기 위해 비음수 최소제곱법(NNLS)\*을 적용해 최적의 에너지 분포를 설계했다.

\* **몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation):** 무작위 추출을 반복해 복잡한 물리 현상을 계산하는 방법이다. 이 연구에서는 이온이 물질 내부를 지나며 깊이에 따라 얼마나 많은 에너지를 전달

하는지 계산하는 데 사용되었다.

\* **비음수 최소제곱법(non-negative least squares)**: 계산 결과가 음수가 되지 않도록 제한하면서 목표값과 가장 잘 맞는 해를 찾는 수학적 최적화 방법이다.



▲ 두께 1 cm의 고체 알루미늄 시료를 균일하게 가열하기 위해 탄소 이온 에너지 분포를 최적화한 결과도. 최적의 에너지 분포를 나타내는 (a)는 95%의 높은 효율과 균일 가열을 구현하기 위한 설계 값으로, 약 1 GeV를 중심으로 입자들이 좁게 모인 '준단색'의 모습을 보이고 있다.

(b)는 (a)의 조건으로 가속된 탄소 이온이 1cm 두께 알루미늄 내부를 통과하며 에너지를 일정하게 전달하는 모습이다. 시료 전체에 열이 고르게 퍼지는 '초균일 가열' 성능을 나타내고 있다.

연구팀은 이렇게 개발한 계산 방법을 탄소 이온빔에 적용해, 1 cm 두께의 고체 밀도 알루미늄 시료를 균일하게 가열할 수 있는 조건을 도출했다.

그 결과, 에너지 전달 효율을 극대화하는 조건에서 약 10억 전자볼트(1 GeV) 부근에 에너지가 가장 많이 분포하는 초지수형(super-exponential)\* 에너지 분포가 도출됐다.

컴퓨터 시뮬레이션으로 검증한 결과, 해당 분포의 이온빔은 에너지 전달 효율 99.1%, 가열 비균일도\* 0.55%를 기록해, 가열의 균일성과 효율을 동시에 극대화할 수 있음을 확인했다.

\* **초지수형(super-exponential)**: 일반적인 지수함수보다 더 빠르게 증가하며, 매우 가파른 성장세를 보이는 형태를 말한다.

\* **가열 비균일도**: 물질 깊이 별 전달된 에너지양 분포의 표준편차와 평균의 비, 0%에 가까울수록 분포의 균일성이 높다.

또한 연구팀은 에너지가 특정 값 주변에 비교적 좁게 분포하는 준단색(quasi-monoenergetic)\* 이온빔 조건도 검토해, 균일 가열 가능성을 확인했다.

중심 에너지가 약 10억 전자볼트(1 GeV)인 준단색 이온빔은 에너지 전달 효율 약

95%, 가열 비균일도 0.42%를 달성했다. 이는 비교적 단순한 에너지 분포에서도 높은 균일 가열이 가능함을 보여준다.

\* **준단색(quasi-monoenergetic):** 하나의 에너지를 중심으로 좁은 에너지 폭을 갖는 분포를 말한다. 완전히 단일한 에너지는 아니지만, 특정 에너지 부근에 대부분의 이온이 모여있다.

연구팀은 가열 효율을 94%에서 99%까지 변화시키며 분석한 결과, **효율이 높아질수록 이온의 에너지가 더 좁은 범위에 모이고, 이상적인 조건에서는 에너지가 특정 값 주변에 크게 집중된 분포에 가까워진다는 사실을 확인했다.**

또한 이 방법을 이용해 이온 투입량에 따른 알루미늄 시료의 온도 변화를 계산한 결과, **일정 수준 이상의 이온을 투입하면 태양 표면보다 높은 약 1만 켈빈(K) 이상의 고온 상태를 구현할 수 있음**을 보였다.

이때 이온이 물질 내부로 들어가 에너지를 전달하고, 전자와 이온 사이의 열이 평형을 이루는 과정까지 포함한 전체 가열 시간은 약 0.1 나노초(ns) 이내로 매우 짧은 것으로 분석됐다.

연구팀이 제시한 역설계 방법은 원하는 가열 조건을 먼저 설정한 뒤, 그에 맞는 이온빔 조건을 계산으로 직접 설계할 수 있는 기술이다. 이를 통해 반복적인 시행착오 없이 목표 열 분포를 구현할 수 있어 실용성과 파급력이 클 것으로 기대된다.

이 방법은 물질 내부를 초고온·고밀도 상태로 만들면서 원하는 깊이와 균일도를 정밀하게 제어해야 하는 고에너지밀도 물리 및 극한 상태 물질 연구에 유용한 기반을 제공한다.

또한 입자선 치료와 레이저 핵융합 연료 가열처럼 특정 깊이에 에너지를 전달하면서 손실을 최소화해야 하는 응용 분야에도 활용될 수 있다.

방우석 교수는 "이번 연구는 원하는 가열 분포를 먼저 정하고, 이를 구현하는 최적의 이온 에너지 분포를 계산적으로 설계할 수 있음을 보여준 것"이라며 "균일성과 효율을 동시에 만족하는 이온빔 조건을 제시함으로써 고체 밀도를 유지한 극한 상태 물질의 정밀 가열이 필요한 다양한 연구와 응용 분야에서 폭넓게 기여할 수 있을 것으로 기대된다"고 말했다.

GIST 물리·광과학과 방우석 교수가 지도하고, 이성민·조수지 석박통합과정생이 공동 제1저자로 참여한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 세계 학술지 평가 지표인 JCR(저널 인용 보고서) 기준 역학 분야 상위

6.1% 국제학술지 《International Communications in Heat and Mass Transfer》에  
2026년 4월 19일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려  
한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행  
할 수 있다고 밝혔다.

## 논문 정보

### ○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : International Communications in Heat and Mass Transfer (IF=6.4,  
역학 분야 상위 6.1%, JCR 2024)
- 논문명 : Optimized ion spectra for ultra-uniform and high-efficiency heat  
transfer into dense matter
- 저자 정보 : 이성민(공동제1저자, GIST), 조수지(공동제1저자, GIST),  
송치완(공저자, GIST), 노유환(공저자, GIST), 김형일(공저자, GIST),  
노용훈(공저자, GIST), 심준(공저자, GIST), 방우석(교신저자, GIST)