

# GIST, 겹친 중성자 신호에 새 해법...

## '검출되지 않은 경우'로 발생량 측정

- 물리·광과학과 방우석 교수팀 짧은 시간에 많은 중성자가 발생해 신호가 겹치는 레이저 핵융합 실험에서도 개별 신호를 구분하지 않고 중성자 발생량을 측정하는 새로운 방법 제시
- 제한된 실험 횟수에서도 측정 오차를 줄일 수 있는 검출 조건 제시
- 핵융합 분야 세계적 권위의 국제학술지《Nuclear Fusion》게재



▲ (왼쪽부터) 물리·광과학과 방우석 교수, 노유환 석박사통합과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 물리·광과학과 방우석 교수 연구팀이 레이저 핵융합 실험에서 중성자를 하나씩 세지 않고도 전체 중성자 발생량을 측정할 수 있는 새로운 분석 방법을 제시했다고 밝혔다.

연구팀은 중성자가 하나도 검출되지 않은 경우의 비율을 이용해 전체 중성자 발생량을 역으로 계산하는 방법을 제안했다. 개별 중성자의 신호가 서로 겹쳐 구분하기 어려운 상황에서도 발생량을 측정할 수 있어, 레이저 핵융합처럼 짧은 시간에 많은 중성자가 발생하는 실험의 측정·검출 조건을 설계하는 데 활용될 것으로 기대된다.

핵융합은 가벼운 원자핵들이 서로 결합해 더 무거운 원자핵을 만드는 반응으로, 이 과정에서 전기적으로 중성을 띠는 입자 '중성자'가 방출되기도 한다. 레이저 핵융합은 고출력 레이저를 이용해 이러한 핵융합 반응을 일으키는 방식이다.

레이저 핵융합 실험에서는 중성자가 발생한 뒤 검출기에 도달하기까지 걸리는 시간인 '비행시간(Time-of-Flight, TOF)'을 측정해 중성자의 에너지와 발생량을 분석한다.

중성자가 적게 발생할 때는 검출기에 나타나는 신호를 하나씩 구분해 발생량을 추정할 수 있다. 그러나 레이저 핵융합처럼 짧은 시간에 많은 중성자가 한꺼번에 발생하면 여러 신호가 겹쳐 하나의 신호처럼 나타나는 '신호 중첩(pulse pile-up)' 현상이 발생한다. 이 경우 신호를 단순히 세는 방식으로는 실제보다 적은 양의 중성

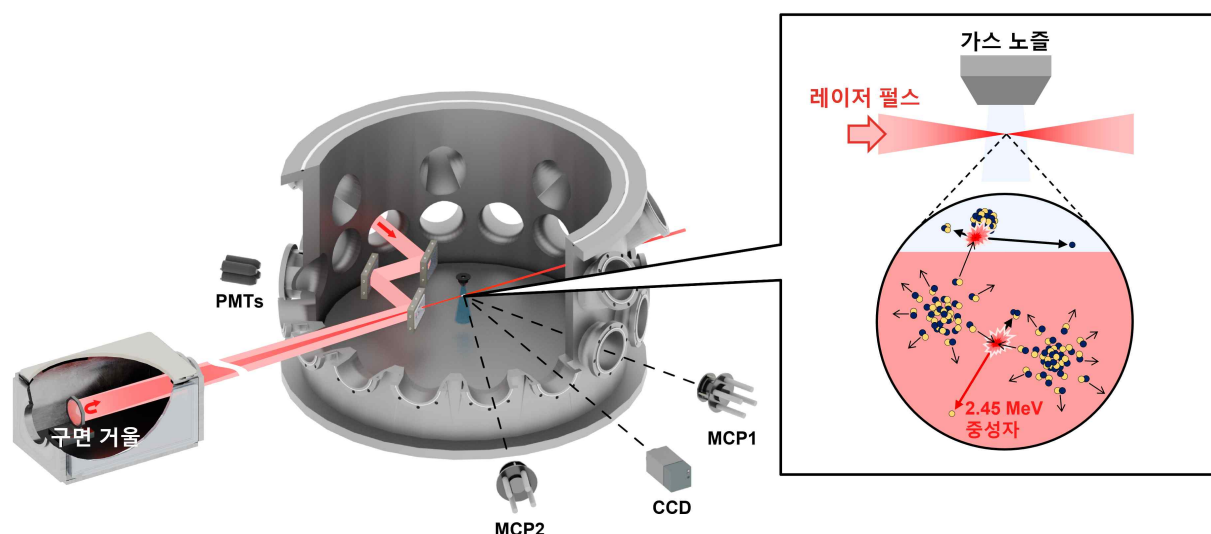
자가 발생한 것으로 측정될 수 있다.

신호 중첩을 줄이기 위해 검출기를 중성자 발생원에서 멀리 떨어뜨릴 수도 있지만, 거리가 멀어질수록 중성자가 검출기에 도달할 확률도 낮아져 충분한 측정 데이터를 얻기 위해 더 많은 실험을 반복해야 한다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 중성자 발생량이 많아질수록 '중성자가 하나도 검출되지 않은 경우'의 비율이 낮아진다는 점에 주목했다. 즉, 개별 중성자의 신호를 일일이 구분하는 대신 중성자가 검출되지 않은 경우의 비율을 이용해 전체 중성자 발생량을 측정할 수 있다는 것이다.

연구팀은 이 방법이 실제 레이저 핵융합 실험에 적용해 성능을 확인했다.

연구팀은 수소의 한 종류인 중수소로 이루어진 분자들이 작은 덩어리 형태로 뭉쳐 있는 '중수소 클러스터'에 100 TW(테라와트)급 고출력 레이저를 쏘아 핵융합 반응을 일으키고, 이때 발생한 약 2.45 MeV(메가전자볼트)\*의 중성자를 검출했다.



▲ 레이저-클러스터 핵융합 실험 구성도. 중수소 클러스터에 고출력 레이저를 조사해 핵융합 반응을 일으키고, 이 과정에서 발생한 약 2.45 MeV의 중성자를 검출기로 측정하는 실험을 나타낸다.

레이저 세기를 조절해 이온 온도를 달리하면서 실험을 반복하고, 각 온도에서 중성자가 하나도 검출되지 않은 경우의 비율을 이용해 중성자 발생량을 계산했다.

그 결과, 이온 온도가 높아질수록 발생량이 증가했으며, 레이저를 한 번 쏠 때 약 100개에서 10만 개 수준의 중성자가 발생하는 것으로 측정됐다.

연구팀은 계산 결과를 검증하기 위해 여러 차례 측정한 중성자 신호를 누적한 뒤, 중성자 1개가 만드는 평균 신호를 기준으로 발생량을 계산하는 별도의 분석 방법과 비교했다. 그 결과, 두 방법으로 계산한 중성자 발생량이 서로 부합하는 것을 확

인했다.

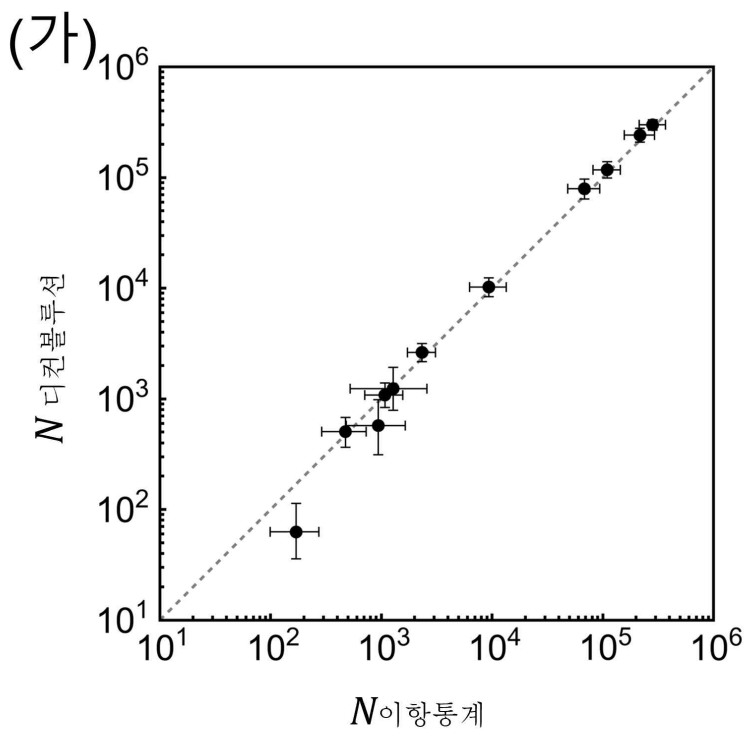
\* **MeV(메가전자볼트)**: 입자의 에너지를 나타내는 단위로, 1 MeV는 100만 전자볼트(eV)에 해당한다.

연구팀은 더 나아가 **제한된 실험 횟수 안에서 중성자 발생량을 보다 정확하게 측정하기 위한 조건도 제시했다.**

중성자 발생원과 검출기 사이의 거리 등에 따라 한 번의 실험에서 중성자가 검출될 확률이 달라지기 때문이다.

연구팀이 **실험 횟수와 '0회 검출' 비율에 따른 통계적 오차를 분석한 결과**, 측정 횟수가 많아질수록 **'0회 검출' 비율이 약 20%에 가까울 때 오차가 가장 작아지는 것**을 확인했다.

이를 바탕으로 **예상되는 중성자 발생량에 맞춰 검출기의 거리 등을 조절하면, 정해진 실험 횟수 안에서 측정 오차를 줄일 수 있다는 기준을 제시했다.**



▲ **두 분석법으로 구한 핵융합 중성자 발생량 비교.** 연구팀이 제안한 '0회 검출' 비율을 이용한 이항통계 분석법과 같은 실험 데이터의 누적 신호를 이용하는 디컨볼루션 분석법으로 각각 중성자 발생량을 계산해 비교한 결과, 두 방법의 측정값이 서로 부합하는 것을 확인했다.

방우석 교수는 “**레이저 핵융합 실험에서는 여러 중성자가 거의 동시에 검출되면서 신호가 겹쳐 개별 중성자를 구분하기 어렵다**”며 “이번 연구는 겹친 신호를 어떻게 분리할 것인가에 집중하는 기존의 접근에서 벗어나, 오히려 **'중성자가 하나도 검출되지 않은 경우'에 주목해 전체 중성자 발생량을 측정하는 새로운 분석 방법**을 제

시했다는 데 의미가 있다”고 말했다.

GIST 물리·광과학과 방우석 교수가 지도하고, 노유환 석박사통합과정생이 제1저자로 참여한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제원자력기구(IAEA)가 발행하는 핵융합 분야 세계적 권위의 국제학술지 《핵융합(Nuclear Fusion)》에 2026년 9월 28일 온라인으로 게재됐다.

## 논문 정보

### 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nuclear Fusion

(IF=4.1, 유체 및 플라즈마 물리 분야 상위 8.1%, JCR 2025)

- 논문명 : Measurement of fusion neutron yields in laser-cluster fusion experiments using binomial statistics
- 저자 정보 : 노유환(제1저자, GIST 물리·광과학과 석박사통합과정생), 김형일(공저자, GIST 물리·광과학과 석박사통합과정생), 이성민(공저자, GIST 물리·광과학과 석박사통합과정생), 노용훈(공저자, GIST 물리·광과학과 박사과정생), 송치완(공저자, GIST 물리·광과학과 박사후연구원), 송재현(공저자, 중이온가속기연구소 박사후연구원), 원준호(공저자, IBS 희귀 핵 연구단 선임연구원), 심준(공저자, GIST 물리·광과학과 석박사통합과정생), 성재희(공저자, IBS 상대론적 레이저과학 연구단 수석연구원), 방우석(교신저자, GIST 물리·광과학과 교수)