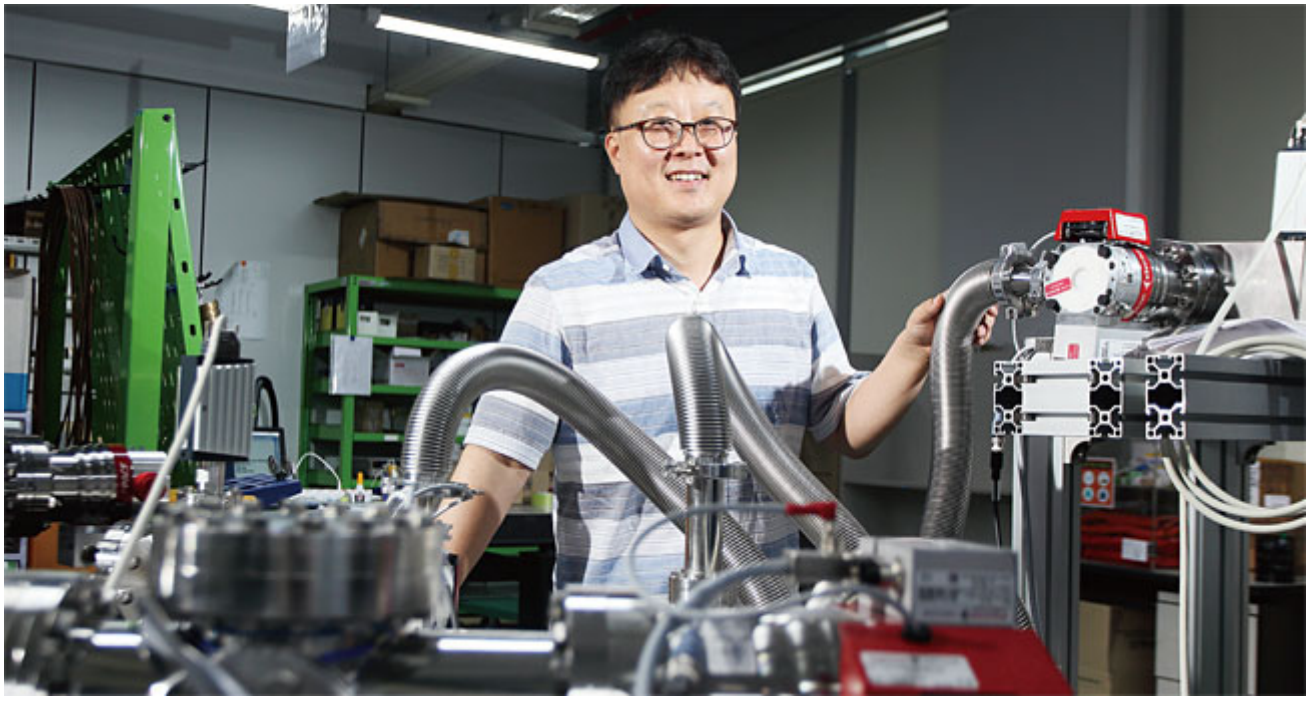
주간조선 [2573호] 2019.09.02

[과학 연구의 최전선] 정모세 울산과학기술원 교수

울산= 최준석 선임기자 jschoi@chosun.com



▲photo 양수열 영상미디어 기자

지난 7월 31일 정모세 교수 연구실을 찾아서 울산과학기술원(UNIST) 물리학과 건물 4층을 두리번거리고 있었다. 정 교수는 '빔 물리 이론'을 새롭게 만들어 주목받는 가속기물리학자. '고강도 빔-가속기 연구실'이라고 쓰여 있는 실험실(Lab)이 보이자 정 교수 연구실이 인근에 있을 거라는 생각이 들었다. 빔은 입자가속기 내부에서 빛의 속도로 움직이는 입자 다발이다.

입자물리학자와 핵물리학자를 취재하면서 입자가속기에 관해 수없이 들어왔다. 스위스 제네바 소재 CERN(유럽핵입자물리연구소)의 LHC, 미국 시카고 외곽에 있는 페르미국립가속기연구소의 테바트론, 미국 뉴욕주 롱아일랜드 소재 브룩헤이븐국립연구소(BNL)의 상대론적중이온충돌기(RHIC) 등등. 그런데 그간 취재한 사람들은 입자가속기가 아니라 입자가속기에 설치된 입자검출기를 갖고 연구하는 학자들이었다. 반면 정모세 교수는 입자가속기 자체를 연구한다. 차세대에 사용될 성능이 뛰어난 입자가속기를 어떻게 하면 만들 수 있느냐를 고민한다.

입자가속기와 입자검출기는 다르다. LHC의 경우 27㎞ 지하 터널에 진공파이프가 설치돼 있다. 이 진공파이프 안에 전하를 띤 입자 다발, 즉 빔을 만들어 집어넣고, 빔을 빛에 가까운 속도로 빠르게 이동시킨다. 진공파이프의 몇 개 지점에서 마주 오는 빔들이 충돌하도록 정교하게 설계되어 있다. 이 빔의 충돌 지점에 설치돼 있는 게 입자검출기다. LHC의 대표적인 입자검출기는 아틀라스, CMS, 앨리스다. 아틀라스와 CMS는 입자물리학 실험에, 앨리스는 고에너지 핵물리학 실험에 쓰인다.

가속기물리학자는 한국에 10여명뿐

입자가속기 자체를 연구하는 사람을 만난 건 정모세 교수가 처음이다. LHC는 지상 최대의 고에너지 물리 실험시설이지만, 현재의 충돌에너지로는 한계에 부딪혀 차세대 시설을 지어야 한다고 한다. 힉스입자를 발견했으나, 기대하던 다른 입자는 찾지 못했다. 차세대 입자가속기는 유럽과 중국, 일본이 추진하고 있다. 가령 유럽과 중국의 차세대 입자가속기는 지하에 뚫을 터널 길이만 100㎞다. LHC보다 4배 가까이 길다. LHC 건설에도 수조원이 들어갔는데 이보다 몇 배나 큰 시설을 지으려면 돈이 얼마나 많이 들어갈 것인가? 비용을 줄이기 위한 혁신적인 아이디어가 필요한 이유다.

정 교수에 따르면, 한국 대학에 가속기물리학 연구자는 10명 내외다.

정모세 교수는 차-차세대 입자가속기로 플라스마 가속기와 뮤온 가속기를 연구한다. 그는 CERN의 차세대 플라스마 가속기 개발을 위한 '어웨이크(Awake)' 실험에 참여하고 있고, 전자빔 입사(入射) 최적화와 빔 라인 설계 부분의 연구를 하고 있다. 2013년에 시작한 어웨이크 실험은 양성자 빔을 플라스마에 쏘아 전자의 속도를 올리는 데, 즉 가속하는 데 성공했다. 정 교수는 "이 모델이 구현되면 수십㎞가 아니라 1㎞ 이내 크기의 가속기로 충분하다"라고 말했다. 이 연구 결과는 지난해 9월 학술지 네이처에 실린 바 있다.

가속기물리학의 세 가지 최전선

서울대 원자핵공학과(1990학번)를 졸업한 그는 미국 프린스턴대학에 유학 갔다가 플라스마 및 가속기물리학 연구를 시작했다. 학위를 받은 뒤 시카고 인근의 페르미국립가속기연구소에서 박사후연구원으로 일할 때는 뮤온 가속기를 연구했다. 정모세 교수는 가속기물리학에는 세 개의 최전선이 있다고 했다. 플라스마 가속기와 뮤온 가속기 개발은 그 최전선 중에서 첫 번째 분야에 속한다. 즉 고에너지 가속기 개발 분야다. 다른 두 최전선은 고강도 가속기 개발, 빔의 품질 향상이다.

정 교수에 따르면 가속기 원리는 이렇다. 전기를 띤 하전입자, 즉 양성자나 전자를 만들어 가속기 안에 집어넣는다. 그런 뒤 자기장을 위에서 아래로 걸어준다. 그러면 로렌츠 힘이라는 것에 의해 입자가 뱅글뱅글 돌게 되어 있다. 입자의 진행 방향을 바꾸거나 입자를 일정한 공간에 가두는 건 자기장이다.

전기장은 입자를 가속시키기 위해 사용한다. 자석과 자석 사이의 가속관에 고전압의 고주파를 걸어주는데, 그러면 강력한 전기장이 생긴다. 자기장에 의해 회전하던 입자는 전기장으로부터 에너지를 받아 가속된다. 정 교수는 "입자의 가속은 전기장, 입자의 방향 전환과 일정 영역 안에 가두는 건 자기장이 하며 이 두 가지가 가속기의 핵심 기술"이라고 말했다.

LHC와 같은 현재의 입자충돌기는 입자의 충돌에너지를 올리는 데 기술적인 장벽이 있다. 때문에 전자석이나 고주파 기술에 제약을 받지 않는 혁신적인 새로운 가속기 기술이 필요한데, 그 후보로 플라스마 가속기와 뮤온 가속기가 연구되고 있다.

빔 덩어리에 들어갈 입자 개수를 늘려라!

정모세 교수의 랩 이름은 '고강도 빔-가속기 연구실'. 가속기물리학의 두 번째 프런티어가 '고강도

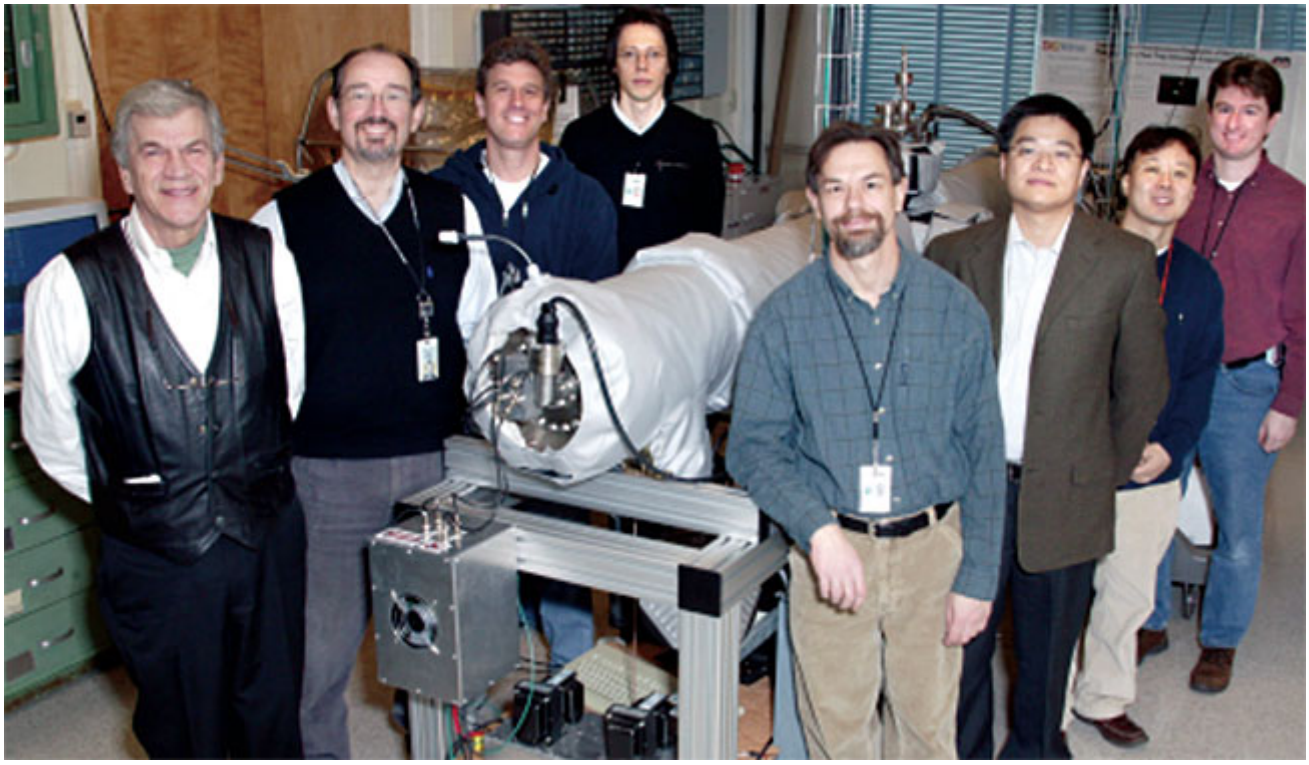
(High Intensity)' 분야이다. 랩 이름이 바로 고강도 분야에서 왔음을 알 수 있다. 이 분야에 정 교수가 힘을 더 쏟고 있는 게 아닌가 싶었다. 입자가속기는 입자 다발, 그것도 같은 전하를 가진 입자들인 빔을 빠른 속도로 움직이게 한다. 빔은 전자 아니면 양성자인데 LHC가 주로 만드는 빔은 양성자 빔이다. 전하를 띤 입자를 사용하는 이유는 그래야 자석으로 입자를 통제할 수 있기 때문이다. LHC에 빔을 처음에 집어넣을 때 한 개의 빔 속에 들어 있는 양성자 수는 1.2×1011(12억)개나 된다.

가속기물리학자는 입자들을 더 많이 뭉친 빔을 만들어 가속기 내로 집어넣으려 한다. 충돌시켰을 때 나타나는 효과를 더 많이 볼 수 있다. 2차 입자가 늘어나기 때문이다. 문제는 같은 전하를 가진 입자끼리는 밀쳐내기 때문에 빔 안에 우겨넣을 수 있는 입자의 수가 제한된다는 점이다.

이 반발력이 '공간전하효과(space-charge effect)'이다. 공간전하효과를 더 정밀하게 이해하면 빔에 들어가는 입자 수를 더 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그의 굵직한 연구도 공간전하효과에서 나왔다. 미국 프린스턴대학에서 '공간전하효과'라는 가속기 분야 실험으로 2008년 박사학위를 받았다. 이 실험 결과는 물리학계 최고의 학술지인 PRL(Physical Review Letters)에 실렸다. 그로부터 8년이 지난 2016년에는 '공간전하효과'를 이론 측면에서 연구한 성과가 PRL에 실렸다. 한 분야에서 이론과 실험 양쪽 연구에서 인정을 받았다. 정 교수는 지금까지 PRL에 제1저자로 쓴 논문이 3편, 공동저자로 쓴 논문이 5편이라고 했다.

정 교수가 2001년 플라스마 물리학을 공부하러 유학 간 프린스턴대학은 당시 핵융합 연구에서 가장 앞서 있었다. 세계적인 프린스턴 플라스마물리연구소(PPPL)가 그곳에 있다. 차세대 에너지원인 핵융합 연구를 하러 간 그는 그런데 그곳에서 가속기물리학자로 변신했다. "지도교수인 론 데이비슨(Ronald Davidson) 교수와 면담을 하고 가속기물리학을 공부하기로 결정했다. 론은 당시 '이온트랩'이라는 길이 2m 크기 실험 장치를 만들면서 그걸로 실험을 할 박사과정 학생을 찾고 있었다. 핵융합장치는 크기가 클 뿐 아니라 여러 사람이 관여해 연구가 복잡하다. '공간전하효과' 연구는 이에 비해 단순하다. 플라스마는 음·양 두 전하를 다 다루지만, 빔은 둘 중 한 가지만 다룬다. 그래서 이온트랩 연구를 택했다." 정 교수는 PPPL 소장(1991~1996)을 역임한 은사가 쓴 교과서를 아직도 갖고 있었다.



▲ 정모세 교수(오른쪽 두 번째)와 프린스턴대학 이온트랩 장치. photo 정모세

데이비슨 교수와 이온트랩과의 인연

그는 공간전하효과가 가속기에서 어떻게 나타나는지를 보기 위해 이온트랩 장치를 활용했다. 빔 다발은 전자기장을 이용해 가둔다. 입자가속기에서 일어나는 공간전하효과를 이온트랩에서 보자는 것이다. 가속기에서 실험하려면 돈이 많이 드니, 작은 실험 장치인 이온트랩을 만들어 가속기에서 일어나는 일을 확인하자는 취지다.

"가속기의 전자석에 특정 자장 세기를 걸어준다고 하자. 하지만 실제로는 원하는 크기로 정확히 나오지 않는다. 자장 크기 1을 목표로 할 경우 1.001일 수도 9.999 크기일 수도 있다. 그런 오차가 쌓이면 공간전하효과와 합쳐져서 어떤 일이 일어나는지를 보았다. 빔 뭉치가 느끼는 자석에 의한 집속(focusing) 세기를 내 맘대로 조절할 수가 있다. 내 맘대로 약간의 오차를 줬다. 오차의 크기에 따라 빔이 어떤 영향을 받는지를 확인했다. 시뮬레이션상으로는 있었지만, 실제 실험으로 이론 예측이 맞는지 여부를 비교한 적이 없었다. 나는 실험을 통해 시뮬레이션과 얼추 맞는다는 걸 확인했다. 그걸 가속기물리학 커뮤니티가 인정해서 PRL에 2009년 논문이 실렸다."

그는 2008년 박사학위를 받고 페르미국립가속기연구소 박사후연구원 및 펠로로 뮤온 가속기를 연구하다가, 2014년 울산과학기술원 교수로 한국에 돌아왔다. 당시 신임 교수로 실험시설도, 같이 연구할 학생도 없었다. 그래서 정 교수는 이론, 즉 '공간전하효과' 이론을 연구했고, 기존의 가속기물리 이론(KV이론)을 확장한 연구 성과를 2016년에 내놓았다. 새로운 빔 물리 이론이라는 평가를 받았다.

"카푸친스키와 블라디미르스키라는 두 러시아 물리학자가 1959년 'KV이론'을 내놓은 바 있다. 공간전하효과를 감안한 가속기 설계 혹은 실험의 표준이론으로 불리는 이론이다. 러시아 물리학자가 가속기물리학 분야에 많다. 소련이 무너진 뒤 러시아 물리학자가 미국으로 많이 옮겨왔고, 내가 박사후연구원으로 일한 페르미연구소에도 많았다. 당시 내 상관도 러시아 출신이다. 나의 2016년 이론은 이 KV이론을 확장시킨 것이다."

KV모델을 내놓은 러시아 가속기물리학자들은 입자가 가속기 내부를 날아갈 때 일어나는 상하운동과 좌우운동이 서로 독립적이라고 생각했다. 서로 다른 운동에 영향을 주지 않는다고 봤다. 따라서 빔의 상하운동과 좌우운동을 각기 통제하는 전자석을 진공파이프 주변에 배치했다. 이런 전자석을 '4중극자(quadrupole)'라고 한다. 그러나 최근 들어서는 조금 더 강한 빔을 만들어야 하고, 빔의 형상을 자유자재로 조절하려고 한다. 그래서 일반적인 '4중극자'가 아니라 '휘어지며 돌아가는 4중극자(skew quadrupole)'를 사용한다. 4중극자를 진공파이프를 따라 나선 모양으로 회전하며 감싸는 모양으로 설치해 빔을 더 강하게 통제하려고 한다. 그런데 이렇게 되면 입자 다발의 상하운동과 좌우운동이 독립적이 아니게 된다. 서로 영향을 받는다. 기존의 KV모델로는 안 되는 것이다.

정 교수는 "KV모델이 2차원 모델이라면, 나의 확장모델은 4차원 모델이다"라고 말했다. 공간전하효과와 커플링효과 두 개를 동시에 설명하는 이론이다. 이 두 개를 이해하기는 쉽지 않았으나, 정 교수는 수학을 가지고 두 개를 결합시킬 수 있었다고 한다.

'공간전하효과' 연구로 세계적인 주목

그의 이론은 세계적인 주목을 받았고 실제로 독일 GSI연구소는 그로부터 자문을 받았다. GSI는 고에너지핵물리학 실험을 하는 곳으로 다름슈타트에 있다. 이들은 빔 형상을 좀 더 자유자재로 통제하거나 빔의 집속력을 높이기 위해 솔레노이드 전자석과 '휘어져가는 전자석'을 배치하는 실험을 해왔다. GSI가 정 교수에게 연락을 해온 건 그가 UNIST에 부임한 2014년. '공간전하효과' 이론 논문을 내놓기 2년 전이었으나 학계는 그가 이론 모형을 이미 갖고 있다는 걸 알고 있었다. 정 교수는 GSI의 실험 결과를 보고 해석해줬다.

'공간전하효과' 연구를 적용한 정 교수의 다른 연구는 '빔 진단장치' 개발이다. 입자 다발이 빠른 속도로 운동하는 진공파이프 주변에 해무리, 달무리처럼 큰 궤적을 그리는 높은 에너지 입자가 나타나고 이것이 진공파이프를 때린다. 그런데 진공파이프에 충격을 주는 이런 '빔 헤일로(beam halo)' 현상은 최소화해야 한다. 빔 헤일로 현상이 발생하면 빨리 알아내고 없애는 게 중요하다. 정 교수의 실험실에는 제작 중인 빔 진단장비가 있었다. 스테인리스처럼 보이는 깨끗한 파이프를 이리저리 연결한 장치였다.

정 교수가 말하는 가속기물리학 연구의 3번째 최전선은 '빔의 질(quality) 향상' 분야다. 빔 다발의 길이와 형상 등을 사용자 필요대로 만드는 게 이 분야의 연구 방향이다. 정 교수는 이와 관련해서 몇 개의 연구 과제를 하고 있다. 포항 방사광가속기에서의 실험천체물리를 위한 '전자 빔 이온트랩'과 대전에 짓고 있는 중이온 가속기를 위한 '전자 빔 이온 소스'가 그중 하나다.

트랩 장치의 응용 연구는 CERN에서 수행 중인 반물질의 중력 낙하 실험도 있다. 서울대 김선기 교수가 한국 측 대표로 참가하는 실험이다. 반물질로 된 사과도 뉴턴의 사과처럼 떨어뜨리면 지상으로 낙하하는지를 확인하는 게 목표다. 물론 이론가는 반물질 사과도 물질 사과처럼 중력을 받아 땅에 떨어질 것이라고 생각한다. 하지만 누구도 실제로 그런지는 본 적이 없다. CERN은 이를 눈으로 보려고 하고, 그러기 위해서는 수소의 반물질인 반수소를 만들어야 한다. 반수소는 반양성자 주위를 양전자가 돌고 있는 물질이다. 정 교수는 "한국에서 반양성자를 뽑아내어 가두고 길들이는 이온트랩을 만들고 있다. 김선기 교수가 만드는 걸 돕고 있다. 연말까지 장치를 CERN으로 보낼 예정이다"라고 말했다.

한국에는 대형 입자가속기가 4개 있다. 포항가속기연구소에 있는 두 대의 전자 가속기(하나는 원

형 가속기, 다른 하나는 선형 가속기로 길이는 1.1㎞)와 경주의 양성자 가속기, 그리고 2021년을 목표로 대전에 짓고 있는 중이온 가속기 등이다. UNIST 인근인 포항과 경주에 가속기가 3대나 있어 정 교수는 이들 기관과의 협력이 활발하다고 했다.

"가속기물리학은 기초과학을 지원하는 것도 주요하지만, 응용과학 분야도 많이 만들어낼 수 있다. 입자물리를 하기 위해 가속기를 만들었으나, 전자를 빠른 속도로 회전시키니 엑스선이 나온 것이 대표적인 예다. 품질이 좋은 엑스선은 고체나 반도체, 물질의 성질을 분석하는 데 탁월하다. 단백질과 같은 분자 내부 구조를 분석하는 데도 유용하다. 가속기 응용에서 가장 성공적인 분야라고 할 수 있다. 그래서 만든 게 포항방사광가속기다. 물질구조분석, 물성연구자, 재료과학자와 생명과학자 등이 주로 사용한다. 응용과학이 가속기물리학에서 주연 자리를 점점 차지하고 있는 상황이다. 핵폐기물 처리 시설도 큰 응용영역이다."

점점 커지는 가속기물리학의 존재감

정 교수의 방에 들어서면 출입문 안쪽 왼쪽 벽에 '입자가속기의 간단한 역사'라고 쓴 영어 자료가 붙어 있다. 입자가속기 100여년의 역사를 압축적으로 이해할 수 있는 자료다. 정 교수에 따르면 1897년 음극선으로 J.J. 톰슨이 전자를 발견하고, 1911년 어니스트 러더퍼드가 알파입자(헬륨원자 핵)를 금박에 쏘는 실험을 통해 원자핵이 있다는 걸 알아내면서 가속기 역사가 시작됐다. 가속기의 대표적인 두 모델인 사이클로트론과 싱크로트론이 등장한 게 1930년 이후다. 첫 번째 사이클로트론 모델을 개발한 미국 물리학자 어니스트 로런스가 만든 입자가속기 크기는 10㎝(4인치)에 불과했다. 그게 지금은 27㎞가 됐고, 수십 년 후에는 100㎞로 커진다. 가속기물리학의 존재감이 기초 및 응용과학연구에서 중요해지고 있다는 방증이다.

그럴수록 가속기물리학자가 일반인 눈에도 더 잘 보일 듯하다. '고강도 빔-가속기' 연구실을 처음 봤을 때는 낯설었지만, 취재를 마치고 나올 때는 그 어리둥절함이 사라졌다. 열차 출발 시간이 15분 밖에 남지 않았다는 게 당혹스러울 뿐이었다.

Copyright ⓒ 조선뉴스프레스 - 주간조선. 무단전재 및 재배포 금지