

발 간 등 록 번 호

11-1721000-000019-10

국가연구개발
우수성과 100

비밀번호의 비어, 국문기호의 비어

추적조사

*추적 대상연도: 2010~2011

우수성과 100선의
발자취를 따라서



목 차



I 국가연구개발 우수성과 100선 추적조사 개요	05
1 우수성과 100선 추적조사란?	06
2 우수성과 100선 추적조사 우수사례 선별과정	06
3 우수성과 100선 추적조사 우수사례 홍보·확산	07
4 우수성과 100선 추적조사 우수사례 10선 목록	08
II 국가연구개발 우수성과 100선 추적조사 우수사례 10선	11
[내 삶을 바꾸는 과학기술]	
1 3D 프린터로 인간장기 생산의 꿈에 다가서다!	12
2 프로바이오틱스 먹고 자라는 안전한 수산 먹거리	16
3 퇴행성관절염, 나이 들면 어쩔 수 없이 수술해야 한다고? No!!	20
4 집콕시대, 스마트폰으로 즐기는 모바일라이프의 비결은?	24
[우리 산업을 바꾸는 과학기술]	
5 혼자서 심해 탐사하는 토종 수중로봇 '이심이' 개발 이야기	27
6 심해 극한 미생물로 친환경 수소연료를 대량 생산 한다구요?	30
7 세계 최고 수준 200년 가는 슈퍼 콘크리트	34
[나라의 기초체력이 되는 과학기술]	
8 K-연구용 원자로, 하나로 이야기	38
9 암세포만 표적 진단·치료하는 항암치료가 가능해진다구요?	42
10 전기공학·물리학·생물학 경계 넘은 막단백질 연구자	46

국가연구개발
우수성과 100
추적조사

우수성과 100선의
발자취를 따라서



I

국가연구개발
우수성과 100선
추적조사 개요

1 우수성과 100선 추적조사란?

» 추진 목적

- * 우수성과 100선 선정 이후 10년 이상 경과된 과제('10~'11년)가 현재 어떻게 활용·확산*되고 있는지 심층 조사 분석하고 우수사례를 홍보
 - * 후속 연구개발 추진, 기술이전 및 상용화, 연구중단 등
 - 과학이 국민 삶에 미친 영향력을 공감하고, 과학으로 인해 펼쳐질 긍정적 미래를 기대할 수 있도록 국민체감 우수사례 전파

» 조사대상

- * 10년 전 우수성과 100선으로 선정된 과제('10~'11년) 200건*
 - * 200건 중 '보안' 연구(7건)는 조사대상에서 제외하여 193건 조사

2 우수성과 100선 추적조사 우수사례 선별 과정

- * 우수성과 100선 추적조사 대상 연구자 기초 조사* ('21.3~4월)
 - * 조사대상 연구자 현황 파악, 우수성과 2회 이상 수상자, 기술로·사업화·등록특허 상위 과제 등 조사
- * 조사대상 연구자에게 성과활용현황조사서 요청 ('21.4.6.~5.7)
 - ※ 조사대상 193명의 연구자에게 회신을 요청하여 112명 회신
- * 연구자 제출자료 및 기초조사 내용을 바탕으로 5개 기술분과위원회*에서 35건 중 심층조사 대상 추천 ('21.6.7~6.10)
 - * 5개 분과별(기계·소재, 생명·해양, 에너지·환경, 정보·전자, 기초·인프라) 산·학·연 전문가가 참여하여 연구발전과 성과확산 내용 심의
- * 기술분과위원회 추천 의견을 기반으로 총괄위원회*에서 심층조사 대상 20건 결정 ('21.6.18)
 - * 기술별 전문가, 홍보 및 사업화 전문가 참여하여 국민공감도 및 과학사회 파급도 등을 고려한 심의
- * 심층조사 대상 20건에 대해 과학 전문기자 인터뷰 실시 ('21.8.1~9.30)
- * 2차 총괄위원회에서 국민홍보 우수사례 10건 선정 ('21.10.14) 및 홍보('21.11월~)

〈2021년 우수성과 100선 심층 추적조사 우수사례 발굴절차〉



3 우수성과 100선 추적조사 우수사례 홍보·확산

- 1 우수성과 100선 추적조사 사례집 e-book 발간
 - ※ 교보문구, 알라딘, YES24에 무상으로 제공
- 2 우수사례를 카드뉴스로 제작하여 과학기술정보통신부 SNS 홍보, 유관부처 연계 온라인 홍보
- 3 NTIS R&D 플러스에 우수사례 인터뷰 내용 탑재
 - ※ 우수사례 10건 인터뷰 및 사례집 자료, 20건 심층 인터뷰 자료 요약
- 4 과학 전문 크리에이터 연계 성과확산 스토리 제작 및 유튜브 상영
- 5 성과확산 시사점 도출을 통한 정책 반영에 활용 등

4 우수성과 100선 추적조사 우수사례 10선 목록

연번	분과	우수성과 수상당시 부처	우수성과 수상당시 소속기관	현재 소속기관	성과명	선정 연도	연구자	페이지
내 삶을 바꾸는 과학기술								
1	기계 소재	교육과학기술부	포항공과대학교	포항공과대학교	생체 조직 재현을 위한 3차원 초정밀 바이오 인공지지체 기술	2010	조동우	12
2	생명 해양	농림수산식품부	국립수산과학원	국립수산과학원	친환경 유기수산양식을 위한 생균제 개발	2011	김영옥	16
3	생명 해양	농림수산식품부	광주과학기술원	광주과학기술원	퇴행성 관절염의 근본 발병원인 규명	2011	전장수	20
4	정보 전자	지식경제부	한국전자통신연구원	한국전자통신연구원	4세대 이동통신(LTE-Advanced) 시스템 개발	2011	김영진	24
우리 산업을 바꾸는 과학기술								
5	기계 소재	국토해양부	한국해양연구원	선박해양플랜트연구소 (한국해양과학기술원 부설)	해저를 정밀 탐사하는 자율 무인잠수정 개발	2010	이판목	27
6	생명 해양	국토해양부	한국해양연구원	한국해양과학기술원	해양 초고온 고세균이용 바이오수소 생산기술개발	2011	강성균	30
7	에너지 환경	지식경제부	한국건설기술연구원	한국건설기술연구원	SUPER BRIDGE 200 (저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술)	2011	김병석	34
나라의 기초체력이 되는 과학기술								
8	에너지 환경	교육과학기술부	한국원자력연구원	한국원자력연구원	연구용 원자로 최초 수출	2010	오수열	38
9	순수기초 인프라	교육과학기술부	고려대학교	고려대학교	새로운 발광센서 물질 개발	2010	김종승	42
10	순수기초 인프라	교육과학기술부	한국과학기술원	서울대학교	단소포체 이미징을 통한 신경세포 통신 분자제어 메커니즘 규명	2011	윤태영	46

※ 국민체감 분야-기술분과-우수성과 수상 연도-대표연구자 성함 가,나,다 순 정렬

국가연구개발
우수성과 100
추적조사

우수성과 100선의
발자취를 따라서



II

국가연구개발
우수성과 100선
추적조사 우수사례 10선

01

3D 프린터로 인간장기 생산의 꿈에 다가서다!

생체 조직 재현을 위한 3차원 초정밀 바이오 인공지지체 기술

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 포항공과대학교	 조동우 포항공대 교수	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 조동우 • (공동 연구자) 심진형, 윤원수, 장진아
우수성과 선정정보	• 생체 조직 재현을 위한 3차원 초정밀 바이오 인공지지체 기술(2010년)	
성과소개	• 3D 프린팅을 의학분야에 적용한 인공지지체 기술(2010년 우수성과)을 발전시킨 바이오잉크* 연구로 환자에게 이식가능 한 인공조직 개발 추진 (* 살아있는 세포를 잉크처럼 활용하여 인간조직 프린팅) ※ 병원과 협력하여 인공 골조직 적용한 다수 수술 성공, 복잡한 장기에 대해서는 임상추진 중	
활용처	• 인공지지체, 각막, 간패치 등 인간조직 분야에 활용, 장기칩 구축으로 동물실험 대체가능, 향후 지속적 연구로 장기이식 분야로 연구발전 기대	
성과확산 경로	<input checked="" type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input checked="" type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	• 바이오3D 프린팅 원천기술 연구 시작('00 초반)-국가지정연구실(NRL) 선정('05)-바이오 인공지지체 연구('05)-3D 프린팅 인공지지체 개발성공('10)-티앤알바이오랩 설립('13)-3차원 세포프린팅 연구 발표('14)-인공체장 실용화기술 및 동물 대체 실험 연구('17)-인공각막 제작('19)-인공 혈관 및 근육 소재 연구('20~)	
기술수준	• 세계 최고 수준의 인공 지지체 제작 정밀도, 바이오잉크 등 인공장기 분야 원천기술 선점 • 3D 바이오 프린팅 및 바이오 잉크 관련 특허 출원·등록 수도 세계 3위 수준 ※ 본 기술을 기반으로 창업된 티앤알바이오랩은 세계 3대 3D 바이오프린팅 기업 중 하나	
파급효과	• 과학·기술적 세계 최고 수준 학술지에 연구결과 발표*, 의료/기계 분야를 넘나드는 네트워크 구축과 이종연구 분야 간 상호작용 촉진, 숙련된 연구인력 배출 (* 10년간 185개의 SCIE 논문 게재) • 경제적 본 기술을 바탕으로 설립된 티앤알바이오랩은 '18년 코스닥 상장으로 급격히 성장하였으며, 해당 기술이전으로 관련 제품 매출의 3%를 배당, 그 외 에드바이옴믹스 창업에 기여 • 사회·문화적 부작용 없이 환자에게 필요한 조직을 빠르게 이식하므로 환자 삶의 질 향상	
성공/장애요인	• 성공 기계공학 분야에서 생명공학 분야로 저변을 넓힌 연구, 이종 연구자 간의 협력, 자율적 연구환경과 연구자의 기업가 정신 • 장애 해외 대비 활발하지 않은 산업기반, 이종 연구자 간 연구 초기 협력 어려움	

희망 사라지는 장기이식 대기 환자¹

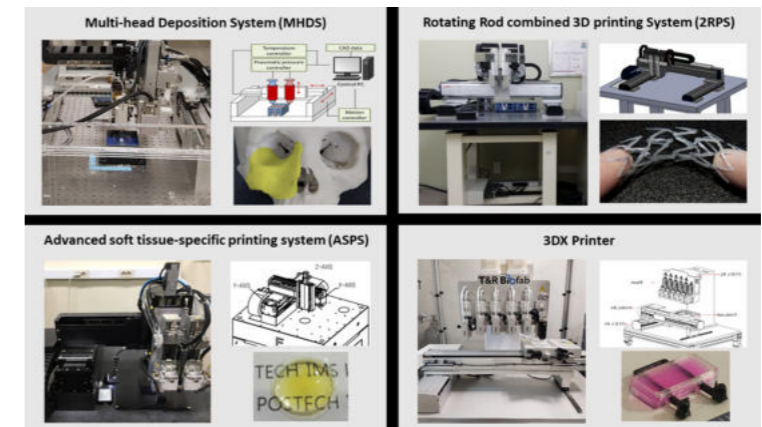
2020년 장기기증 희망 등록자는 6만7160명으로 전년도 9만350명보다 약 25.7% 감소한 것으로 나타났다. 10년 동안 장기기증 희망 등록자가 7만명 이하로 떨어진 것은 이번이 처음이다. 뇌사자의 장기기증도 2016년 573명에서 지난해 478명으로 줄었다. 반면 장기이식을 받기 위해 기다리는 환자는 오히려 증가하고 있다. 2020년 장기이식 대기자는 3만5852명으로 2019년 3만 2990명보다 약 8.7% 증가했다. 장기이식을 기다리다가 사망하는 환자의 수도 꾸준히 증가해 지난 2016년 1,318명에서 2017년 1,597명, 2018년 1,891명, 2019년 2,136명, 2020년 2,194명으로 매년 늘고 있다. 장기이식 대기환자의 6분의 1만 수술을 받고 있다. 장기이식 수술을 받기 위해 대기하는 시간은 지난해 기준 평균 1850일로 조사됐다. 장기이식 상황이 악화하고 있는 가운데 세계 각국의 과학자들은 인공장기에서 희망을 찾고 있다.

한국에도 인공장기 연구와 관련된 과학자 그룹이 존재한다. 대표적인 리더 과학자는 포항공대 기계공학과 조동우 교수이다. 조 교수는 2005년 입체(3D) 프린팅 기술로 복잡한 인체조직을 찍어내겠다는 아이디어를 가지고 연구를 시작한다. 한국연구재단의 국가지정연구실(NRL)로 선정돼 5년간 지원을 받았는데, 당시 목표는 3D 프린팅 기술로 인체에 최적화된 가장 좋은 인공지지체(스캐폴드)를 만들자는 것이었다. 스캐폴드란 조직이나 세포가 성장할 수 있는 공간을 제공해 치유를 유도하는 구조체를 말한다.

3D 프린팅에 조직공학과 재생의학 접목

1990년대 말 레이저를 활용한 세포의 2D 바이오 프린팅 개념이 등장했다. 기계공학에서는 2000년대 초반 3D 프린팅 기술이 화두였고 이를 직접 개발하기 시작해 2003~2004년 3D 프린터로 원하는 제품을 만들 수 있는 가공 기술을 구축하는 수준에 이르렀다. 하지만 3D 프린팅의 기술적 활용처는 뚜렷한 방향이 없었다. 3D 프린팅 기술의 장점은 연골세포 같은 아무리 복잡한 형상도 쉽게 생산할 수 있다는 점이다. 이론상으로는 컴퓨터로 스케치할 수만 있으면 어떤 제품이든 프린트해낼 수 있다. 하지만 nm(나노미터·1nm는 10억 분의 1m) 수준의 정밀 가공이나 고속 대량 생산은 원천적으로 불가능했다.

조 교수팀은 3D 프린팅 기술의 장단점을 모두 활용할 수 있는 분야를 찾다가 바이오메디컬 분야로 눈을 돌렸다. 환자의 암 조직을 떼어낸 부위에 새로운 조직을 이식할 경우 사람마다 크기, 모양, 조건 등이 다르다. 대량 생산할 필요가 없는 셈이다. 게다가 3D 프린팅을 이용하면 인체 조직의 복잡한 구조를 쉽게 설계할 수 있다는 장점이 있었다.



3D프린팅을 이용한 다양한 생체조직공학 기술.
* 출처: 연구자 제공

1 최원국 (2021.10.13). 코로나사태 후 장기기증 등록자 25% 줄었다. <조선일보>.

**세계적으로
신생 분야
생체조직공학
선도**

바이오메디컬은 세계적으로도 신생 분야였다. 20년 이상 조직공학 연구가 진행되고 있었지만, 인체에 이식할 수준의 뚜렷한 결과가 없었다. 가장 큰 걸림돌은 스캐폴드를 제작하는 방식이다. 세포가 자랄 공간을 확보하기 위해 구멍이 뚫린 다공성 구조의 스캐폴드가 실험실 수준에서는 계속 개발됐지만, 세포의 종류에 따라 스캐폴드의 구조가 달라져야 하는데 이를 일일이 설계하고 실험하는 방식으로는 시간이 걸리고 효율이 떨어진다는 게 조직공학 연구의 가장 큰 문제점이었다. 조 교수는 조직공학 연구자들로부터 이 같은 문제점을 전해 듣고 3D 프린팅 기술을 해결책으로 떠올렸다. 기계공학을 전공했기 때문에 바이오메디컬 연구를 하기 위해서는 생물학 공부를 다시 해야 했다. 고등학교 생물 교과서부터 붙잡고 생물학 분야를 다시 훑었다. 그리고 3D 프린팅 기술을 이용해 스캐폴드 문제를 해결하겠다는 목표를 세우고 연구제안서를 작성했고, 이 연구제안서로 한국연구재단의 국가지정연구실에 선정됐다.

당시 3D 프린팅을 접목한 바이오메디컬 연구는 세계적으로도 연구자가 거의 없을 만큼 새로운 분야였다. 세계 어느 곳에서도 시도된 적이 없는 독창적인 기술이다. 그만큼 기술 개발에 먼저 성공한다면 한국이 선점할 가능성이 큰 분야였다. 국가지정연구실 마지막 해인 2010년에 이 같은 목표를 이뤘고, 덕분에 이해 국가연구개발 우수성과 100선에 선정됐다.

**세포로 만든
3D 프린팅용
바이오 잉크**

3D 프린팅 기술로 인공장기를 개발하려면 여전히 큰 문제가 남아 있었다. 인체 기관은 한 종류가 아니라 여러 종류의 세포로 이뤄져 있다. 가령 피부를 배양하려면 피부세포뿐 아니라 혈관, 근육 등 세포 주변 조직까지 모두 배양해야 이식할 수 있는 수준의 피부를 만들 수 있다. 스캐폴드뿐 아니라 만들고 싶은 생체 재료도 3D 프린팅으로 찍어내야 했다.

연골세포를 3D 프린팅으로 찍어낼 때 연골 조직에서 가장 많은 성분을 하이드로젤 형태로 만들고 여기에 연골세포를 넣는 식이었다. 3D 프린팅에 사용할 수 있는 재료에 한계가 있었기 때문에 무조건 하이드로젤 형태를 갖춰야 했다. 그런데 이렇게 하면 가격이 비싸졌다. 하이드로젤 몇 방울에 100만 원 수준이어서 기술이 상용화된다고 해도 경제성이 없었다. 뼈 조직에 가장 많은 콜라겐을 이용해보려고 했지만, 콜라겐의 특성상 3차원 형상을 유지하는 데 한계가 있었다.

연구진은 세포 자체를 3D 프린터의 바이오 잉크로 써보기로 했다. 실제 조직과 같은 성분으로 이뤄진 탈세포화 한 조직을 3D 프린터의 잉크로 사용하는 3D 세포 프린팅용 바이오 잉크를 개발하기로 했다. 탈세포화 된 조직으로 바이오 잉크를 만들고 여기에 재생하고자 하는 조직에 맞는 중간엽 줄기세포를 넣어 3D 세포 프린팅 기술로 인공 조직을 만들었다. 콜라겐을 이용해 제작한 인공 조직보다 세포 분화가 더 활발하게 이뤄졌다. 당시 박사 과정생이었던 장진아 포스텍 창의융합공학과 교수는 3D 세포 프린팅 바이오 잉크를 개발할 때 탈세포화 조직을 써보자는 아이디어를 처음 냈다.

3D 세포 프린팅용 바이오 잉크를 개발한 성과는 2014년 국제학술지 '네이처 커뮤니케이션스'에 실렸다. 지금까지 이 논문이 인용된 횟수만 1000회가 넘는다. 무엇보다 '세포 프린팅'이라는 개념을 처음 낸 연구자가 있었지만, 그는 개념만 제안했을 뿐 실제 기술로 발전시키지 못했다. 이를 우리가 한 것이어서 더욱 의미가 컸다. 당시 논문에서는 3D 프린터로 분사할 수 있는 바이오 잉크와 유사한 형태의 생체 적합성 고분자를 이용해 지방, 연골, 심근 등 3개 조직을 만들 수 있음을 보였다.

**미국, 중국에서
라이벌 그룹
생기며 경쟁 치열**

조 교수는 2013년 3D 바이오 프린팅 핵심 기술을 이용해 바이오벤처인 티앤알바이오랩을 설립했고, 이후 티앤알바이오랩을 통해 세계 최초로 바이오 잉크를 상용화했다. 티앤알바이오랩은 제자인 윤원수, 심진형 두 사람이 공동 설립했고, 윤원수 한국산업기술대 교수가 대표를 맡고 있다. 티앤알바이오랩의 기술력은 지금까지도 세계 최고 수준으로 평가받고 있다. 존슨앤드존슨과 같은 글로벌 바이오 제약사와 공동 연구개발도 진행하고 있다.

**글로벌
재생의료 시장
전망 '맑음'**

3D 바이오 프린팅 업계에서는 티앤알바이오랩을 세계 3대 기업 중 하나로 꼽는다. 3D 바이오 프린팅 및 바이오 잉크 관련 특허 출원 및 등록 수도 세계 3위 수준이다.

재생의학 연구에서 라이벌 그룹으로 불릴 만한 곳은 미국 웨이크 포레스트대의 제임스 유 교수 연구실이다. 제임스 유 교수는 '조직공학의 대부'라고 불릴 만큼 이 분야의 선구자로 꼽힌다. 중국 칭화대도 줄기세포 연구를 재생의학에 접목해 건물 한 개 동을 전부 할애할 만큼 공격적으로 이 분야를 확장하고 있다. 하지만 연구 결과나 데이터 분석에서는 여전히 포스텍이 앞서 있다. 최근 10년간 발표한 논문만 200편가량으로 1년에 평균 20편의 논문을 발표하며 앞선 연구 역량을 유지하고 있다.



티앤알바이오랩 상장
* 출처: 연구자 제공

3D 바이오 프린팅을 활용한 글로벌 재생의료 시장 전망은 매우 밝다. 2018년 250억 달러(약 28조9300억 원)에서 연평균 19.8%씩 성장해 2024년에는 768억 달러(약 88조8700억 원)에 이를 것으로 전망된다².

현재 3D 바이오 프린팅을 활용한 글로벌 재생의료 시장은 크게 두 갈래로 발전하고 있다. 하나는 치료 목적의 인공 조직·기관 생산이다. 이 분야에서는 미국 웨이크포레스트대가 가장 앞서 있다. 방광 반쪽을 이 방식으로 만들어 임상까지 진입했다. 대학이 큰 병원을 끼고 있다는 점이 치료 목적의 임상 연구에 도움이 된 것 같다. 인공 조직이나 기관 생산에서 최종 목표는 3D 프린팅 기술로 인간에게 이식할 수 있는 인공 조직이나 기관을 바로 인체해내는 것이다. 하지만 현재 기술에서 이 정도 수준까지 구현하는 것은 꿈에 가깝다. 다만 이 기술을 개발하는 과정에서 부수적인 연구성과들이 나오는 장점이 있다. 최근 전남대 의대와는 간에 붙이면 질병 완화 효과가 있는 '간 패치'를 개발하기도 했다.

또 다른 하나는 '장기칩'으로 불리는 '오간-온-어-칩' 분야다. 인간의 질병을 치료하기 위해 신약을 개발하는 과정에서 동물실험을 할 수밖에 없다. 살아있는 동물을 대상으로 진행한 실험에서 얻은 데이터가 인간에게도 비슷하게 적용될 수 있을 것으로 기대하기 때문이다. 신약 종류에 따라 토끼, 원숭이를 포함한 영장류 등 다양한 동물이 실험 대상이 된다.



하지만 유럽이 화장품 개발시 동물실험을 전면 금지하는 등 최근 세계적으로 동물실험에 대한 제약이 커지고 있다. 장기칩은 인간의 특정 장기의 세포를 배양해 해당 장기의 생리학적 특성을 최대한 흉내 낼 수 있게 만들었다. 장기칩을 이용하면 동물실험을 최소화하거나 아예 대체할 수 있다.

2 한국바이오협회 (2021). 글로벌 첨단바이오의약품 산업 동향

02

프로바이오틱스 먹고 자라는 안전한 수산 먹거리

친환경 유기수산양식 위한 생균제 개발

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
	 김영옥 과장	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 김영옥 • (공동 연구자) 남보혜, 김동균, 공희정, 안철민, 김태완, 하상우
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 친환경 유기수산양식 위한 생균제 개발(2011) • 해양미생물을 이용한 펄(pearl) 안료 및 피부 개선 화장품 소재 개발(2014) • 양식 생산성 향상을 위한 친환경 미생물제제 개발 및 산업화(2017) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 병원성 세균에 대한 저항력을 가진 토종 미생물을 발굴한 이후, 항생제 걱정 없이 수산 양식용 어류에게 투여할 수 있는 무항생제 첨가제 제품을 개발하여 양식생산성 제고 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 항생제를 대체할 수 있는 안전하면서도 어류 면역력을 증진시키는 첨가제 개발 • 사료 첨가제 뿐 아니라 천연 향균 소재, 화장품 소재, 식품 소재, 의약품 등으로 확장하여 활용 가능 	
성과확산 경로	<ul style="list-style-type: none"> ☑ 기업 기술이전 ☐ 연구자 창업 ☑ 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) ☑ 연구결과와 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산 	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 수산유용 유전자 연구(90년 후반~)-항생제 기능 토종 미생물 '바실러스' 균주 확보('10)-양식용 생균제 개발, 우수성과 100선 수상('11)-프로바이오틱스 균주 관련 기술이전('11)-해양 미생물 활용 화장품 소재개발, 우수성과 100선('14)-아쿠아프로비온 신제품 출시('16)-양식생산 미생물 제제개발 우수성과 100선('17)-화장품 원료 효능검증 등 연구('18) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 미생물 제제, 효소 등 사료첨가제 기술은 세계 7위권으로 평가 되고 있음 • 연구자는 기초원천 기술(미생물 100여종 이상 분리)을 산업체에 이전시킬 수 있을 정도로 기술 발전을 이룸 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 국내 해양 미생물에 대한 정보 축적으로 향후 국가 수준 마이크로바이옴 정보 구축에 영향력, 친환경 사료첨가제에 대한 국내 기술력 증진 • 경제적 해당 연구를 기반으로 한 제품화성공(아쿠아 프로비온)으로 매출 발생 및 수입대체 효과, 해외 수출 진행, 나고야의정서 등 생물종 주권과 관련된 국제 협약 대응 가능 • 사회·문화적 항생제에 대한 우려가 커진 시점에서 안전한 먹거리 창출 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 국내 유용 미생물을 찾기 위한 헌신적 노력, 산-학-연 간 효율적 업무배분 및 밀접한 협력을 기반으로 한 제품개발, 정부의 실용화 지원 사업으로 인한 지속적 예산확보 • 장애 미생물 배양 기초연구, 미생물 정보 지식재산화 등 기반 구축 필요, 산업체 발굴 어려움 	

양식 늘며 항생제 내성 출현, 친환경 첨가제 필요성 높아져

프로바이오틱스로 사료 첨가제를 만든다

인류가 급속도로 늘어나면서 지구의 생산력에도 한계가 오고 있다. 대표적인 분야가 수산 분야다. 수산 자원의 남획으로 지속가능한 어업 문제가 대두되면서 이를 대체하기 위해 양식 수산의 비중이 전 세계적으로 커지고 있다. 문제는 수산자원을 좁은 공간에 많이 키우는 '밀식 사육'은 질병에서 자유롭기 어렵다는 점이다. 이를 예방하기 위해 항생제를 과다 이용하기 시작했다. 여기서 항생제 내성균이 출현하고 인체 내에 항생제가 축적되는 문제가 시작 되었다. 이를 막는 것이 항생제를 대체할 수 있는 사료 첨가제다. 자연에 있는 성분을 활용해 항생제 내성에서도 자유롭고 웰빙 수요에도 대응할 수 있는 무공해 기능성 첨가제 필요성이 점차 부상했다. 하지만 2000년대 초반 국내 수산 업계에서는 축산용 사료 첨가제를 사용하고 있었기에 수산업에 적합한 첨가제를 개발해달라는 산업계의 요구가 점점 커져갔다. 육상생물과 수산생물의 장내미생물 구성이 완전히 다른 것도 수산생물에 적합한 기능성 첨가제 개발의 필요성으로 지적됐다. 또한 궁극적으로 축산이든 수산이든 기능성 첨가제 원재료는 수입하는 경우가 많아 국산 원료와 제품개발이 절실한 상황이었다.

김영옥 국립수산과학원 양식산업연구부 생명공학과장은 국내 양식 환경에 적합하고 우수한 항균력을 가지는 해양 균주(프로바이오틱스) 개발에 성공했다. 김 과장 연구팀이 개발한 바실러스 균주는 양식에 문제가 되는 나쁜 세균인 어병 세균을 효과적으로 죽일 수 있는 항균물질 효능이 우수하다. 프로테아제(프로테이스), 리파아제(라이페이스), 셀룰라아제(셀룰레이스)와 같은 유용한 효소도 분비한다. 어류 병원균 조절뿐 아니라 사료 소화 흡수를 도와 사료 첨가제로도 적절한 균주다. 국내 대표 양식 어종인 넙치를 대상으로 균주를 검증했다. 주요 어병 세균을 넙치에 인위적으로 감염시킨 후 프로바이오틱스 첨가 사료를 먹인 넙치와 그렇지 않은 넙치를 비교했다. 그 결과 프로바이오틱스 첨가 사료를 공급한 넙치의 폐사 개체수가 확연히 줄었다. 생균제를 섞었을 때는 생존율이 30%를 넘어서는 것으로 나타났다. 시중에 유통되는 축산용 프로바이오틱스보다 감염 예방에 효과가 좋았다.



친환경 생균제 *출처: 연구자 제공

전국 돌다 새우 양식장에서 찾은 토종 균주... 창의력과 노력의 결실

김 과장은 유용물질을 생산하는 토종 미생물을 손에 넣겠다는 목표로 전국을 떠도는 연구를 시작했다. 2014년 생명 자원 보유국의 주권을 인정하는 나고야의정서가 발효되면서 국가 간 생명 자원 경쟁은 더욱 가속화되고 있어 연구자들의 노력이 중요한 시점이었다. 김 과장은 "원하는 해양 미생물을 찾기 위해 갯벌 등 다양한 수산환경을 헤매고 배를 타고 사료 채집을 나가기도 했다"고 말했다. 지금의 균은 새우 양식장에서 발견했다. 2009년 충남 태안에서 대량 폐사가 일어나 일대 새우 양식장이 큰 어려움을 겪었다. 그런데 한 곳은 폐사가 일어나지 않아 소위 '대박'이 났다는 소식이 들려왔다. 보통 폐사가 발생하면 일대 전체가 문제가 되는데 그러지 않은 것이다. 김 과장팀은 이유를 확인하고 싶어 새우 양식장을 찾았다. 처음엔 문전박대를 당했다. 양식장 주변 위생관리나 점검 조사를 위해 나온 사람들로 오해한 것이다. 끈질기게 설득해 사료를 얻는데 성공했고 균을 확보할 수 있게 됐다. 후보 물질 스크리닝 작업에만 1~2년이 걸린 끝에 얻은 결과다. 김 과장은 "지도교수님이 늘 '미생물은 창의력을 발휘해 노력하는 사람을 배반하지 않는다'고 얘기하셨다"며 "그 말을 되새기는 계기였다"고 말했다.

산업화 위해 수많은 기업 만나다

좋은 균을 확보해도 어떻게 활용할 것인지는 또 다른 문제다. 김 과장은 균을 산업적으로 활용할 방법을 찾기 시작했다. 기업 및 전문가 그룹 간 역할 분담에 핵심을 뒀다. 연구팀이 어디까지 기술 개발을 진행할 것인지, 기업은 어느 단계부터 참여할 것인지를 분담했다. 확보한 균을 제대로 분석할 수 있는 훌륭한 전문가 그룹을 찾아 연구 분석을 맡겼다. 몰랐던 새로운 기능을 찾을 수도 있다는 기대였다.

국립수산과학원의 주도로 소재 확보와 활성 물질 탐색이 순조롭게 이뤄졌다. 활성 물질 구조분석과 품질관리기술 개발은 대학과 연구소의 전문인력이 공동으로 최신 분석 장비를 활용해 진행했다. 대량생산공정과 현장적용실험 등은 산업화 경험이 풍부한 기업체에서 맡았다. 김 과장은 “산·학·연이 인프라를 만들고 긴밀히 협력했다”며 “이런 방식으로 협업을 진행한 덕분에 기초연구에서 끝나지 않고 산업체로 기술 이전도 할 수 있었다”고 말했다.

사업화 의지가 있는 기업체를 만나는 것과 산업화를 위한 추가연구비 확보는 연구와는 또 다른 별개의 어려움이였다. 김 과장은 “국립수산과학원은 국가 연구기관인 만큼 어민에게 도움을 주는 일을 해야 한다”며 “그래서 제품 개발이 꼭 필요했다”고 말했다. 하지만 최종 완성품을 개발하는 일은 회사의 몫인 만큼 회사를 잘 선정하고 산업화를 위한 연구비도 확보해야 하는 게 문제였다.

김 과장은 백방으로 기업체를 찾아다녔다. 관심을 보이는 기업은 많았지만, 중소기업은 연구비 투자에 어려움이 많았다. 당시만 해도 연구 시스템은 각자 연구비를 투자해 공동연구 형태로 진행할 수밖에 없는 여건이어서 중소기업과의 공동연구가 현실적으로 쉽지 않았다.

하지만 결국 해양수산부에서 주관하고 해양수산과학기술진흥원이 관리하는 실용화지원사업을 통해 ‘아쿠아프로비온’이라는 수산물 미생물 첨가제 제품화 사업에 성공했다. 김 과장은 “2년 과제를 통해 현장에서 효능을 검증하고 제품까지 나올 수 있었다”며 “정부의 지원사업으로 얻은 연구결과를 통해 산업화 장벽을 낮춘 게 제품화에 결정적 도움이 됐다”고 말했다.



아쿠아 프로비온 제품 사진과 팜플렛(왼쪽부터) * 출처: 연구자 제공

기능성 첨가제, 수산 분야 고급화 전략과 수출 길 열 것

항생제를 첨가제로 대체하는 문제는 축산업계에서도 일찍이 일어난 일이다. 국내에서는 2011년 7월부터 이미 배합사료 내 항생제 첨가가 금지됐다. 이에 세계 프로바이오틱스 시장은 점차 커지고 있다. 프루스트 앤 설리반에 따르면 세계 동물 사료용 프로바이오틱스 시장은 2016년 11억 9,650만 달러에서 연평균 성장률 6.5%로 성장하여 2022년에는 17억 4,650만 달러에 이를 것으로 예상된다³. 또한 글로벌 유산균 기업인 크리스찬 한센의 ‘바이오플러스2B’가 유럽연합(EU)에서 최초로 항생제 대체제로 인증받아 사료 첨가제로 활용되는 등 동물 사료용 프로바이오틱스 연구가 주목받고 있었다.

국내 미생물 제제, 효소 등 사료 첨가제 기술 수준은 일본, 미국, 유럽 등에 이어 세계 7위권으로 평가된다. 하지만 기술이 대부분 축산용에 집중돼 있는 상황이다. 하지만 이제 믿고 먹을 수 있는 수산물 수요가 늘면서 친환경 생균제 등 관련 시장은 더욱 성장할 것이며 이에 따라 기존 양식 방법을 고수할 수 없게 되었다. 친환경 양식은 수산물 소비 촉진, 수산물 고급화, 어가 소득 증대, 양식산업 관련 시장 규모 증가에도 기여할 것이라 예상된다.

3 연구개발특구진흥재단 (2019). 동물 사료용 프로바이오틱스 시장.

다양성 큰 수산 미생물 발견과 배양 연구 주력해야

김 과장은 “향후 수산 분야도 고급화 전략으로 가야 할 것으로 생각한다며 이를 위해 항생제를 대체할 첨가제 시장이 신뢰를 줘야 한다”고 하였다. 특히, 항생제 대체제를 개발하면 체내 항생제 잔류 문제 등의 위험을 줄여 국민의 건강에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 김 과장은 “경제적으로는 수입 수산용 사료 첨가제 국산화를 통해 수입품 대체효과를 낼 수 있다”며 “현재 사료 첨가제의 해외 판로를 개척해 동남아시아와 남미권 국가들에 수출도 진행 중”이라고 말했다.

김 과장은 여전히 수산용 기능성 사료 첨가제 연구를 진행 중이지만, 최근 항균제를 넘어 기생충 구제물질과 항곰팡이 물질에 관심을 두고 있다. 어류 기생충인 스키테카충은 스키테카병의 주요 원인 기생충으로 치어기 양식생물의 대량폐사를 유발한다. 2018년 양식장 대량 폐사原因的 44.5%가 이 병이었다. 김 과장은 “동물약품 시장도 항생제를 규제하다 보니 치료용 개념에서 백신 같은 예방제 개념으로 점차 변화하고 있다”며 “면역력을 향상해 병이 나타나지 않게 하는 것”이라고 말했다.

김 과장은 수산 미생물 발굴에 주력할 필요가 있다고 강조했다. 김 과장은 “육상 기원 생물의 한계를 극복하고 다양한 수산 환경에서 새로운 미생물 자원을 발굴하거나 확보하며 수산 미생물의 가치를 재발견함으로써 산업용 소재 발굴과 응용기술 개발로 이어질 것”이라며 “이를 위해 고부가가치 바이오산업 성장에 필요한 과제 개발이 필요하다”고 말했다. 비만, 당뇨, 면역력 등과 관련이 있는 장내미생물의 역할이 밝혀질수록 해양 미생물 연구도 더욱 활발히 진행되리라 기대다.

다행히 최근 수산 분야에서 미생물 연구 기반이 다져지고 있다. 국가 마이크로바이옴 이니셔티브와 관련해 다부처 마이크로바이옴 사업이 준비되고 있고 여기에 7개 부처가 함께 참여한다. 해양수산분야도 과학적 정보제공과 연구 프로젝트 참여를 계획하고 있다. 김 과장은 “경험적으로 보면 해양생물은 다양성이 더 높은 경우가 많다”며 “갯벌을 예로 들면 밀물과 썰물이 끊임없이 드나들고 태양이 내리쬐릴 때 온도도 다르고 같은 곳에서 시간대별로만 비교해도 다양성이 크다”고 설명했다.

미생물 확보 뿐 아니라 배양 연구도 더욱 필요하다는 지적이다. 매년 수많은 신종 미생물이 보고되고 있지만, 발견되는 미생물의 99%가 인공적으로 조성한 환경에서 배양이 불가능하다. 김 과장은 “배양기술 연구가 일부 이뤄지면서 노하우를 하나씩 쌓고 있지만 이 분야의 연구가 필요하다”며 “해양은 육상보다 환경이 더 다양한 만큼 해양 미생물 배양기술 연구개발이 반드시 필요하다”고 말했다.

수산 미생물 연구로 국가연구개발 우수성과 100선 세 차례 선정… 후속 연구 밀거름

김 과장은 2011년 해양 균주(프로바이오틱스) 이용 첨가제로 우수성과를 수상했을 뿐 아니라 총 3회 우수성과 100선에 이름을 올렸다. 수산분야에서는 최초 우수성과 100선 선정자 였다. 2014년에는 바닷물에서 분리한 미생물에서 피부 미백에 효능이 있는 천연 펄(Pearl) 안료를 개발해 우수성과 100선에 선정됐다. 2017년에는 친환경 사료 첨가제를 개발하고 산업체에 이전해 대량생산한 공로로 우수성과 100선에 또 한 번 선정됐다.

국가연구개발 우수성과 100선에 선정된 것이 후속 과제 진행의 큰 밑거름이 됐다고 김 과장은 회고했다. 양식장 퇴적물, 갯벌, 어패류 장 등 다양한 수산 환경에서 100종 이상의 유용한 미생물을 분리하고 유용 대사산물 분석, 효과 검증 등을 통해 미국 특허 1건, 국내의 특허 11건의 원천기술을 얻었다. 공동연구, 기업체 설명회 등을 거쳐 산업화 연구 인프라를 구축하고 기술 12건을 산업체에 이전했다. 제품개발 2건으로도 이어졌다.

김 과장은 “국가 연구개발(R&D) 제도는 지금도 훌륭하다”고 말한다. 다만 앞으로 바이오 경제 시대로의 진입을 앞둔 만큼 원천기술, 원천정보 등 지적재산권 보호의 중요성이 커지고 있는 점에 주목할 것을 강조했다. 그는 “미생물 정보의 경우 원천기술이나 지적재산으로 바로 연결되는 경우가 많다”며 “향후 그런 재산을 포함한 지식기반 경쟁력을 갖출 수 있는 좋은 사업을 발굴하고 다음을 준비하는 과제를 국가 차원에서 발굴할 필요가 있다”고 말했다.

03

퇴행성관절염, 나이를면 어쩔 수 없이 수술해야 한다고? No!!

퇴행성관절염 근본 발병원인 규명

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 광주과학기술원	 전장수 교수	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 전장수 • (공동 연구자) 김진홍, 전지민, 이규석, 신민희, 원윤경, 곽지선, 이진설, 류제황, 전철홍
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 퇴행성관절염 근본 발병원인 규명(2011) • 퇴행성관절염의 발병원인 규명(2015) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 연골 퇴행이 노화에 의해 닳아 없어지는 자연스러운 현상이라는 고정관념에 도전하여 근본 원인을 밝혀내고, 통증완화에만 국한된 치료제가 아닌 조기예방 차원의 치료법 연구 ※ 히프투알파 유전자, 아연이온, 콜레스테롤 등 관절염에 영향을 미치는 요인 밝혀냄 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 혈액이나 소변에서 골관절염을 초기에 찾아낼 수 있는 바이오마커 등으로 연구 확장 가능 ※ 퇴행성관절염은 전 세계 인구의 약 10~15%, 국내 성인 인구의 31%가 증상을 갖고 있는 대표적인 퇴행성질환이며, 조기진단을 통해 환자 삶의 질 개선에 기여 가능 • 질병초기 병 진행을 억제하는 후보물질을 발견하고 이를 응용한 치료제 개발 기대 	
성과확산 경로	<input type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 연골발생 유전자 규명연구(~'00)-연골조직 퇴행 조절기전 연구시작('00~)-연골퇴행유전자(히프투알파(HIF-2α)) 발현 기전규명('10), 우수성과 100선 수상('11)-아연이온에 의한 퇴행성관절염 원인규명('14)-우수성과100선 수상('15)-콜레스테롤에 의한 관절염 원인 규명('19) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 골관절염 연구 수준은 세계 최고 수준으로 평가 받고 있으며 연구자는 불모지나 다름없던 국내 골관절염 기초연구 분야 선구자 역할 • 연골퇴행 조절 후보인자들을 세계 최초로 연달아 확인하며 Cell, Nature 등에 논문 게재 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 기초연구가 부족했던 퇴행성관절염 분야 연구를 개척해 국제사회에서 한국 연구의 위상을 높임, 국내 퇴행성관절염 기초연구 분야 네트워크 구축, 기초-임상 연구 간 중개연구 필요성을 인지시킴 • 사회·문화적 연구가 사업화 될 시, 퇴행성 관절염 조기진단과 치료가 가능하게 되어 환자 삶의 질 증진에 기여 가능 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 연구분야에 대한 연구자의 지속적인 열정, 자율적 연구환경, 지속적인 연구비 지원과 이로 인한 우수한 박사급 인력과의 연구진행 • 장애 골관절염 기초연구 분야는 국내에서 소수 연구자들이 연구를 하고 있어 연구 생태계가 활발하지 않은 상황, 연구초기 다수의 단기과제를 수행으로 인한 연구행정 업무 어려움 	

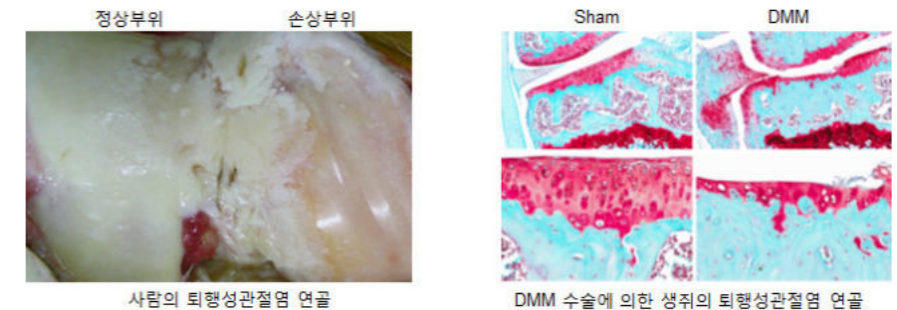
고령화 사회 가장 무서운 질병 '퇴행성관절염' 연구 길 열다

퇴행성관절염은 관절을 보호하고 있는 연골이 망가지거나 퇴행하며 관절을 이루는 뼈와 인대에 손상이 생겨 염증과 통증이 발생하는 병이다. 골관절염을 비롯한 퇴행성관절염은 사회 노령화가 가파라질수록 점점 많은 인구가 겪는 병이 되고 있다. 현재 70대 이상 여성 50%, 남성 20%가 퇴행성관절염으로 치료받아야 하는 환자로 추산된다. 여기에 최근 수명이 늘어나면서 퇴행성관절염은 더욱 많이 걸릴 수밖에 없는 질환이 되고 있다.

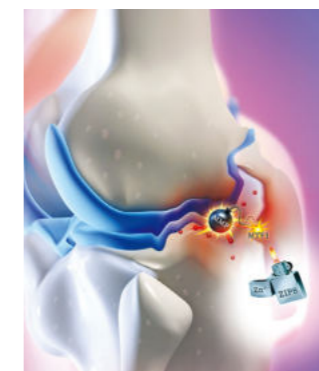
이처럼 많은 영향을 주는 질환임에도 퇴행성관절염에 관한 기초연구는 많지 않았다. 최악의 경우 연골을 갈아 끼우는 대체 수술을 통해 아픔을 해소할 수 있다 보니 빚어진 결과다. 매년 수술만 10% 이상 증가하는 추세다. 그러다 보니 예방이나 진단에 관한 연구가 부족했다. 세계적으로도 퇴행성관절염이 노화에 따라 연골이 단순히 닳아 없어지는 질병이라는 고정관념이 있었다. 근본적인 병의 원인을 밝혀내지 못해 예방과 치료법이 없었다. 특히 국내에서는 임상적으로는 잘 발전된 반면 달리 기초의학과 중개연구의 기반은 취약했다. 이유는 간단하다. 죽지 않으니 예방과 치료가 필요없다는 것이다. 하지만 퇴행성관절염을 겪는 환자의 삶의 질은 엄청나게 떨어진다는 걸 고려하면 수술에 의존하지 않고 예방과 치료법을 찾아내는 것 또한 필요했다.

전장수 광주과학기술원(GIST) 생명과학부 교수는 국내에서는 거의 볼모지나 다름없던 퇴행성관절염 분야에서 분자생물학적 연구를 통해 새로운 지평을 연 것으로 꼽힌다. 퇴행성관절염이 단순히 노화로 이뤄지는 것이 아니라 유전자에 의해 조절되고, 아연과 콜레스테롤이 퇴행성관절염을 일으킨다는 사실도 새로 밝혀냈다.

퇴행성 관절염의 원인 하나하나 밝혀내다



* 출처: 연구자 제공



연골 내에서 아연이온의 인위적인 조절을 통한 퇴행성관절염의 치료제 개발이 가능해진다. 고령화에 따른 발병증가에도 불구하고 근본적인 치료방법이 없던 퇴행성관절염의 예방 및 치료 방법 개발에 새로운 실마리를 제공할 것으로 기대된다.
* 출처: 연구팀 제공

전 교수팀은 연골퇴행 조절 후보인자인 히프투알파(HIF-2α) 유전자가 연골조직을 파괴하는 다양한 인자들의 발현과 활성을 조절하여 퇴행성관절염을 유발한다는 사실을 세계 최초로 밝혔다. 퇴행성관절염의 발병과정에서 핵심적인 역할을 하는 전사인자를 밝히고자 관절연골을 구성하는 연골 연골세포에서 발현된 유전자 조각에 대한 정보를 담고 있는 표현서열태그(EST) 데이터베이스를 분석해 얻어낸 결과다. 관련 연구는 2010년 국제학술지 '네이처 메디신'에 게재하였다. 2011년에는 이 연구로 우수성과 100선에도 선정됐다.

연구팀은 퇴행연골 조직에서 발현이 늘어나는 히프투알파가 MMP와 ADAMTS와 같은 연골조직을 파괴하는 효소의 발현을 증가시키는 것을 확인했다. 연골조직의 염증을 유발하는 물질을 생산하는 효소들인 iNOS, COX-2의 발현도

“퇴행성 관절염 연구 운 좋았지만... 정확한 원리 찾는 건 다른 문제”

한국서 새로운 기초연구 도전이 결실 맺었다

퇴행성관절염 분야 국내 네트워크 만들어져... 국제 위상도 상승

증가시켰다. 유전자조작 생쥐와 퇴행성관절염에 대한 질병동물모델을 이용해 히프투알파 유전자 발현을 늘리면 퇴행성관절염이 촉진되고 반대로 히프투알파 유전자의 발현을 억제하면 퇴행성관절염의 발병을 막을 수 있음도 밝혀냈다.

여기에 그치지 않고 연구팀은 정상 연골세포와 달리 퇴행성관절염 연골세포에서 아연이온 농도가 비정상적으로 높아지는 것을 확인했다. 이들 아연이온이 연골퇴행을 유발하는 단백질들을 활성화시켜 퇴행성관절염이 결정적으로 유발됨을 밝혀 국제학술지 '셀'에 2014년 게재했다. 이후 관절연골 콜레스테롤이 퇴행성관절염을 일으키는 원인임을 세계 최초로 증명한 연구는 2019년 국제학술지 '네이처'에 발표됐다.

전 교수는 자신의 연구성과에 대해 운이 좋았다고 겸손해했다. 아연 이온과 관련한 연구에서 연구팀은 세포에서 아연이온수송체를 받아들이고 내보내는 관련 인자가 24개인데 이 중 하나인 ZIP8을 꼭 잡아내는 성과를 얻었다. 전 교수는 “24개 중 유일하게 하나만 수치가 올라가 있는 것을 발견한 것”이라며 “여러 개가 증가하면 정말 실험하기 힘들었을 것”이라고 말했다. 콜레스테롤 타겟을 발견한 것도 CYP7b와 수산화염소만 증가하는 현상이 발견되며 얻은 성과다.

전 교수는 “거기서 엮어나가는 건 또 다른 문제”라며 “인체는 효율적이기 때문에 갑자기 어느 물질이 많이 발현했다고 하면 쓸데없이 일어나는 건 없지만 정확한 동작 원리를 찾는 건 쉽지 않다”고 말했다.

전 교수는 미국 매사추세츠대 박사과정을 졸업하고 하버드대 박사후연구원을 거쳐서 1993년 경북대 교수로 부임했다. 당시 연골분화 연구를 제안받은 게 첫 연구의 시발점이었다. 전 교수는 “미국에서 했던 걸 다시 하면 따라가는 것밖에 안되겠다 싶었다”며 “연골분화 분야는 학위과정 때 신호전달을 한 만큼 맞아떨어진다고 생각했다”고 말했다. 전 교수는 2000년 GIST로 옮겨 세포의 탈분화, 체내 연구로 보폭을 넓히며 골관절염 분야에 뛰어들었다.

퇴행성관절염 연구는 2000년대 초반 해도 어떻게 논문을 낼 수 있느냐는 소리까지 들던 분야다. 연구가 어렵기도 하고 사람들이 잘 도전하지도 않아서다. 전 교수팀은 이러한 환경에서도 장기간에 걸친 연구를 통해 퇴행성관절염 관련 연구를 최고 권위 학술지로 꼽히는 네이처, 사이언스, 셀을 모은 이른바 'NSC' 논문에 잇따라 발표한 것이다. 전 교수는 “2015년 관절염 학회에서 기초연설까지 할 수 있었다”며 “퇴행성관절염 연구가 NSC 논문에 나간 것도 처음이었다”고 말했다. 전 교수는 “과학적으로 이런 분야를 해도 주요 학술지에 나가는 걸 증명하고 중개연구가 중요하다는 것도 증명했다”며 “질병이 단순히 노화 때문이 아닌 것을 입증하고 싶었다”고 하였다.

전 교수의 연구에 힘입어 한국은 골관절염 분야 국제학회에서 내년 회장을 맡기로 하는 등 위상이 높아지고 있다. 전 교수는 “미국 관절염학회에 가면 첫 질문이 어느 그룹 출신이냐고 물어본다. 한국에서 처음 시작했다고 하면 잘 안믿는다”며 “기초와 중개연구에서 연구를 통해 분야를 어느 정도 띄웠다”고 말했다. 그는 “여전히 국내에서는 골관절염 기초연구에 뛰어들 연구팀이 많지 않다”면서도 “그래도 어느 정도 나아진 상황”이라고 말했다.

국내 퇴행성관절염의 기초의과학 연구의 네트워크 구축과 연구활성화도 이뤄졌다. 국내 골관절염의 연구기반이 취약하던 2000년대 초반부터 국내 대학병원을 중심으로 하는 임상적외 기초연구자들을 모은 '연골연구회'와 '대한연골 및 골관절염학회' 창립도 전 교수의 손으로 이뤄졌다. 전 교수는 “지금도 퇴행성관절염 연구 네트워크 구축과 연구 활성화가 어느 정도 이뤄졌다”고 하였다.

사회적으로도 퇴행성관절염이 치료될 수 있는 질환이라는 기대를 갖게 만드는 역할을 했다. 전 교수는 “연구가 보도될 때마다 많은 연락이 온다”며 “아연 관련한 연구가 나왔을 때는 아연 이온에 대한 관심이 높아지는 등 파급력이 크다”고 말했다.

원인 규명 넘어 조기진단과 치료까지 연구할 것

전 교수는 원인 규명을 넘어 이제는 퇴행성관절염의 가능성을 조기에 진단하는 인자를 찾는 연구를 수행하고 있다. 전 교수는 “골관절염은 임상적으로 보면 사람들이 완전히 관절이 망가졌을 때 알게 된다”며 “그러나 건강검진 하게 되면 RF팩터로 찾을 수 있는 류머티스와 달리 진단을 못한다”고 말했다. 고가의 자기장공명영상(MRI) 촬영으로 확인은 가능하지만 아프지도 않은 다리에 고가의 검진을 받는 사례가 많지는 않다.

관절염 초기에 피나 소변에서 찾아낼 수 있는 인자를 찾아낼 수 있다면 조기진단을 통해 골관절염을 예방할 수 있게 된다. 전 교수는 “치료제를 개발하는 것은 추후 할 일이라고 생각한다”며 “초기에 진행을 억제하는 목표를 찾아야 하고 그걸 대상으로 하는 치료제는 가능하지 않을까 한다”고 말했다. 그는 “완전히 망가진 걸 즐기세포로 치료하는 건 가능할 것 같고 관련해서 연구가 많이 되고 있다”며 “조기진단과 치료는 오래지 않아 가능하지 않을까 본다”고 말했다.

04

집콕시대, 스마트폰으로 즐기는 모바일라이프의 비결은?

4세대 이동통신(LTE-Advanced) 시스템 개발

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
	 김영진 책임연구원	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 김영진 • (공동 연구자) 김대식, 김대호, 김경숙, 김남일, 박애순, 신연승, 신재욱, 안재영, 이상호, 정광열
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 세계 최초 3.9세대 이동통신 시스템 기술 개발(2008년) • 4세대 이동통신(LTE-Advanced) 시스템 개발(2011) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 달리는 차 안에서 휴대전화로 3D 영화와 고화질 TV를 보는 4세대 이동통신 기술의 세계 최초 상용화('09)에 기여하였고, 이후 5G, 6G 등으로 연구성과가 지속적으로 발전 ※ 4세대 이동통신 단말, 기지국, 코어망 기술 확보, 3GPP 표준화 작업 참여 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 더 빠른 이동통신 기술을 접목한 국민 모바일 라이프 전반에 활용 • 게임, 영상, 음악 등 모바일 콘텐츠 시장 활성화 ※ Full-HD/UHD(Ultra High Definition)급 동영상, 의료영상 서비스, 3D 입체영상 서비스, 고품질의 IP 기반 영상전화 서비스, 모바일 방송서비스, 개인방송 서비스 등 	
성과확산 경로	<ul style="list-style-type: none"> ☑ 기업 기술이전 ☐ 연구자 창업 ☑ 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) ☑ 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산 	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 이동통신 서비스 플랫폼 연구('06~)-LTE기술개발('05~'07), 3GPP LTE 이동통신 시스템 세계 첫 개발('08), 우수성과 100선('08)-3G evolution 단말기 연구('08)-LTE-A개발('08~'10), 우수성과 100선('11)-4G 이동통신 시스템 개발('06~'10)-B4G 이동통신 핵심기술('11~'16)-5G 이동통신 핵심기술('14~'18)-6G 관련연구 * 3GPP 원천기술 연구를 기반으로 4세대, 5세대, 6세대 이동통신 기술 진화 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 세계 최초 LTE Advanced 기술 개발 이후 5G 최초 상용화, 6G 연구 착수 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 4G 및 5G 관련 원천 기술을 개발/확산 하므로 우리나라 이동통신 기술 선진화에 밑거름이 되었으며, 이동통신 분야 국제표준 설정 등에도 영향력을 미칠 수 있게 됨 • 경제적 이동통신사업자 및 중소기업등과 공동연구를 수행하고 기술이전하므로 산업생태계 전반 활성화에 기여, 다양한 산업 융합을 통한 새로운 비즈니스 모델 창출 * LTE-Advanced 시스템 개발로 '15~'21년 국가 전체 생산 유발 효과는 560조원, 국내 고용창출 효과는 70만명 • 사회·문화적 4세대 인터넷 도입으로 인한 국민생활 편의 증진 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 이동통신에 대한 정부지원 의지, 사회적/기술적 흐름을 고려한 기술개발 목표 설정, 관련 기업과의 밀접한 연대 • 장애 정부과제를 수주하지 못할 경우, 예산 미확보로 인한 인력 손실로 연구 지속에 어려움 	

영상·음악·게임 등 콘텐츠 수요 높아진 이동통신 서비스

2019년 4월 한국은 세계 최초로 5세대(5G) 이동통신 서비스를 상용화했다. 정보통신기술(ICT) 강국으로서의 자존심을 세우고 다가오는 자율주행, 인공지능, 빅데이터 등 첨단 혁신을 가져올 수 있는 인프라 기술을 가장 먼저 확보했다는 의미가 있다. 5G 이동통신을 최초로 상용화한 데는 4세대(4G) 이동통신 시스템 개발 등 선행 연구가 뒷받침했기 때문이다. 무선전송, 무선접속, 이동성 관리, 이동통신 세션 관리, 무선자원관리 프로토콜, 데이터 링크제어, 패킷데이터 압축 및 해제 기술 등 이동통신 시스템 전반을 아우르는 기술을 개발한 경험이 있기 때문에 가능한 것이라는 의미다.

2000년대 후반 이동통신 서비스가 본격화하면서 3G 이동통신 서비스가 나오고 애플 아이폰 등 스마트폰이 등장했다. 3G 이동통신 서비스도 혁신적이었지만 당시 가장 큰 서비스의 걸림돌은 전송 속도였다. 단위시간당 이동통신 기술로 전송할 수 있는 데이터량이 턱없이 부족했던 것이다. 3G 서비스로는 영상이나 고음질 음악 등을 데이터로 보내기에는 한계가 있다.

데이터 전송 속도를 높이기 위해 국제전기통신연합 전파통신 부문(ITU-R)은 3G의 한계를 극복하는 4세대(4G) 이동통신 규격 요구사항을 만들었다. 3G로는 서비스가 되지 않는 영상이나 게임, 고음질 음악 등 콘텐츠 수요가 많았기 때문이다.

4세대 이동통신 개발 주도... 정보통신 강국 위상 높여

김영진 한국전자통신연구원(ETRI) 연구전문위원(현재) 연구진은 2000년대 중반부터 4G 이동통신 연구개발을 진행했다. ITU-R이 4G 이동통신 요구사항 기준을 만들고 관련 표준화 단계인 3GPP가 2008년부터 표준화를 시작해 2010년에 표준화 기술 규격을 완성했다.

김 연구원 연구진은 “당시 4G 이동통신 기술 규격 표준화가 여러 갈래로 나뉘었는데 선행 연구를 한 덕분에 3GPP의 기술 규격이 최종적으로 채택될 것으로 분석 예측하고 3GPP 표준화를 진행하는 일정에 맞춰 2008~2010년 표준화 작업을 진행했다”며 “어느 방향의 표준화가 더 유력한지 전망을 하면서 연구개발에 착수한 게 맞아떨어지게 된 것”이라고 말했다.

김 연구원은 LTE 규격으로 표준화 방향을 정한 것이 현재까지 한국이 이동통신 기술에서 경쟁력을 지니고 5G 최초 상용화를 할 수 있게 된 밑바탕이라고 자부한다. 표준화 관련 단계인 3GPP, 3GPP2, IEEE802 등이 경합하던 상황에서 3GPP 표준화가 가장 유력할 것이라는 사실을 가장 먼저 확인한 것이다.

김 연구원 연구진이 개발한 기술은 3G 이동통신의 데이터 전송속도에 비해 40배 이상 빠른 4G 이동통신 규격인 LTE-Advanced 기반 이동통신 단말과 기지국, 코어망 기술이다. LTE-Advanced 규격을 기반으로 하는 세계 최고 수준의 통합시스템 개발과 세계 최초 실내, 실외 연동시험에도 성공했다. 연구진이 시연한 당시 세계 우수 기관들의 기술 수준은 모뎀 성능 위주의 기술과 실내 고정 환경에서의 시연에 그쳤다.

LTE-Advanced 기반 기술을 연구하면서 3GPP에 참여해 200여건의 승인과 표준특허 24건을 확보해 국제 표준화 작업에 기여하는 동시에 ETRI의 위상을 높였다. ETRI가 이동통신 분야 기술을 선도하는 연구기관이라는 인식을 전세계 이동통신 연구자들에게 심어준 계기가 되기도 했다.

김 연구원은 “4G 이동통신 기술 기반 각종 융합서비스를 바탕으로 한 새로운 비즈니스 창출과 음악, 영상, 게임 등 모바일 라이프 향상에 기여했다”며 “세계 최고 기관들과 어깨를 나란히 하며 지속적으로 5G 이동통신 기술을 연구개발하게 됐는데 4G 연구가 이같은 이동통신 기술의 선진화에 밑거름이 됐다”고 밝혔다.



2011년 2월 8일 LTE-Advanced 기술 개발 주역들이 청와대 오찬에 초청받아 연구개발 공로를 인정받았다. *출처: ETRI 제공.

5G 넘어
6G 연구
이어진다

5G 시대 통신
전문 연구기관의
나아갈 길

이동통신
연구인력 갈수록
줄어든다

김 연구원은 2011년 '4세대 이동통신(LTE-Advanced) 시스템 개발'로 국가연구개발 우수성과 100선 과제로 선정됐다. ETRI 기술연구소가 분석한 데이터에 따르면 LTE-Advanced 시스템 개발로 2015~2021년 국가 전체 생산 유발 효과는 560조원, 국내 고용창출 효과는 70만명으로 분석됐다.



김 연구원 연구진의 장기간 연구개발은 5G를 넘어 6G 연구로도 이어지고 있다. 4G가 데이터 전송 속도가 핵심 이슈였다면 5G는 전송속도뿐만 아니라 이른바 '레이턴시(Latency)' 해결이 핵심이다. 레이턴시는 통신 지연을 의미한다. 얼마나 빨리 응답성 있게 데이터를 거의 실시간에 가깝게 전송할 수 있느냐가 중요하다는 의미다.

5G에서 레이턴시가 중요한 이유는 사물인터넷(IoT)과 자율주행, 인공지능(AI)이 활성화되는 시대에 요구받는 기술이 굉장히 많은 양의 단말과 센서가 서로 실시간으로 데이터를 주고받을 수 있어야 하기 때문이다.

6G에서 요구되는 사항은 인공지능(AI)이다. 데이터를 전송할 때부터 AI 개념이 적용되는 규격이 요구된다. AI를 적용시켜 무선 신호가 오고갈 때 데이터를 축적하고 전파 특성을 파악하는 인공지능 알고리즘을 개발하는 게 핵심이다. 인공지능은 데이터를 축적해서 최적의 전파 송수신 환경을 스스로 계산해 내고 음영지역에서도 어떻게 전파를 전송하고 받을 것인지, 전파 간섭 현상을 어떻게 회피하고 충돌을 방지할 것인지에 대한 알고리즘을 개발해야 한다.

김 연구원은 "4G 시스템 개발할 때도 무선 자원 효율을 극대화하는 다중전송 기술이 핵심이었다"며 "이를 COMP(Coordinate Multi-Point)라고 부르는데 지극히 협력 간섭을 없애고 전송 속도와 성능 향상을 위해 대역폭을 넓히는 기술 연구"라고 설명했다. 그는 또 "이 같은 기술들이 5G에서 더 발전하고 6G에서는 인공지능이 적용되는 것"이라며 "기술을 개발하는 데 만만치 않은 연구과제들이며 실패하더라도 연구개발을 지속해야 한다"고 강조했다.

6G에서는 또 테라헤르츠 대역에서 통신이 이뤄질 것으로 예상된다. 구현하는 데 쉽지 않지만 미래기술로 불리는 홀로그램이나 원격 수술 같은 서비스가 이뤄지려면 6G 통신 시스템이 필요할 것으로 분석된다.



4G 시스템을 개발할 때와는 달리 현재 통신 관련 대기업들은 전문 연구기관인 ETRI와 공동연구를 하지 않는 경향이 있다. 기업의 연구개발 역량이 충분히 축적된 데다 대학 등 다른 기관과의 협력 창구도 열려있기 때문이다. 연구개발 비용을 지원하는 정부도 반드시 연구기관이 수행해야 할 필요성은 없다고 볼 수 있다. 김 연구원은 "현재 ETRI가 처한 문제"라며 "약 3000여명의 ETRI 연구인력이 유지될 만큼 연구비가 지원되지 않아 외부 수탁 연구개발 과제를 해야 하는 경우가 생긴다"고 말했다. 그는 "핵심 원천 기술은 ETRI가, 응용 기술은 기업이 주도하는 방향성에는 변함이 없어야 한다"고 말했다.

김 연구원은 정부가 이동통신에 대한 연구를 계속해야 한다는 공감대는 있지만 문제는 예산이 줄어들고 있다고 지적했다. 예산이 감소하면 인건비 확보가 어렵고 연구인력이 유출될 수밖에 없다. 김 연구원은 "이같은 구조적인 문제로 연구인력이 이동통신 분야에서 다른 분야로 전환하고 있고 다시 이동통신 분야로 돌아오지 않고 있다"며 "이럴 경우 10여년 이상 쌓여 있던 노하우가 축적되거나 연계되지 않고 빠른 시간 내에 연구 역량은 물론 축적한 노하우도 사라질 것"이라고 말했다.

05

우주보다 먼 심해 탐사하는 토종 수중로봇 '이심이' 개발 이야기

차세대 심해용 무인 잠수정 개발

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소	 이판목 책임연구원	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 이판목 • (공동 연구자) 김방현, 박진영, 백혁, 심형원, 유승열, 전봉환, 정우영
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 심해 해양과학 탐사를 위한 무인잠수정 "해미래-해누리" 개발(2006) • 차세대 심해용 무인 잠수정 개발(2010) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 원격조종 수중로봇(Remotely Operated Vehicle) 연구에 이어, 척박한 해저 환경을 극복하고 해저를 탐사할 수 있는 자율무인잠수정(AUV:Automatic Under Vehicle) 개발 ※ 6000m급 심해 무인잠수정 '해미래'와 수심 2000m 급 자율무인잠수정 '이심이' 개발 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 심해 학술조사 및 군용 목적 운용, 인명구조, 해양 미세플라스틱, 방사능 농도, 녹조/적조 예보 등으로 연구성과 활용처 확장 가능 	
성과확산 경로	<input checked="" type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 차세대 심해용 무인잠수정 개발 착수('01~)-해저 6000m급 원격조종 무인잠수정 해미래 개발('06), 우수성과 100선 선정('06)-자율 무인 잠수정 이심이 개발('09), 우수성과 100선('10)-한화시스템 기술이전('11)-6개 다리를 이용해 해저에서 움직이는 로봇 '크랩스터'개발('14)-한국항공우주연구원 무인 이동체 및 해양 복합연구단 무인 수상선, 수중자율이동체 복합체계 개발 중('21~) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • '21년 기준 세계 최고에 준하는 해양환경 데이터, 항법 기술, 센서기술 등 자율주행 탐사로봇 기술 보유함 ※ 무인자율 잠수정(AUV)은 수중 속 센서동작, 무인자율주행 항법정보 획득 등의 어려움이 있는 고난이도의 연구이며 미국 등 군사강국 위주로 개발을 진행하고 있음 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 자율무인잠수정은 과학선진국 위주로 보유한 기술이며 국내 기술 위상 상승, 학계 협업으로 인력 양성에 도움 • 경제적 기업기술이전으로 기술료 수입을 획득 • 사회·문화적 해양사고 구조, 해양 미세플라스틱, 방사능 농도 예보 등에 활용하여 국민체감이 가능하며 자율무인 탐사로봇에 대한 사회적 관심도 상승 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 꾸준한 연구개발 통한 전문성 축적, 대학을 비롯한 항공우주연구원, 기계연구원 등 다양한 전문 연구기관과의 밀접한 협력, (주)한화 등 수요 반영한 기술개발 • 장애 국내 시장이 충분치 않은 관계로 데이터/장비 등 구하기 어려운 실정이며, 전문인력과 연구비 또한 충분하지 않은 상태 	

**심해 해저를
알아서 달리는
자율주행
탐사로봇의 시대**

미국 연구팀이 수심 4000m의 심해 해저를 달리는 자율주행 탐사로봇 '벤딕II'를 개발했다고 국제학술지 '사이언스 로보틱스'에 지난 11월 4일 발표했다. 이 로봇은 한번 바다에 들어가면 1년 간 혼자 힘으로 심해를 누빈다. 바다 수온과 산소 농도, 해저 퇴적물을 장기간 모니터링할 수 있어 이전까지 정량화한 적이 없는 심해 탄소 순환에 대한 이해를 높일 것이라 기대가 나온다.

한달 앞서 10월에는 캐나다 해저채굴기업 '메탈스컴퍼니'가 태평양 심해저에서 로버를 활용해 배터리 원료로 쓰이는 '망간단괴' 채굴에 나서겠다고 발표했다. 청소기 머리처럼 생긴 해저 로봇이 해저에 박혀있는 망간단괴를 빨아들인다. 메탈스컴퍼니는 현재 태평양 해저지역 약 15만 제곱킬로미터에 대한 사업권을 확보한 상태이며 이 지역에는 전기차 약 2억 8000만대에 쓰일 망간단괴가 존재하는 것으로 분석된다.

이처럼 해저 탐사로봇의 수요가 늘고 있다. 자원채굴이나 학술적 조사 등 민간이나 학계에서의 역할 외에도 군수 목적이나 재난구조의 영역에서도 활용되고 있다. 수심 200m 이상의 깊은 바다 밑은 빛이 들지 않고 산소가 거의 없고 온도가 낮으며 압력이 매우 높다. 이런 심해 환경을 건디는 해저 탐사로봇을 개발하는 일은 과학자들에게 큰 도전 과제였다. 1980년대부터 관련 연구들이 시작됐는데, 최근 관련 기술력이 꽃을 피우고 있다.

한국에서도 해저 로봇 개발에 일찍이 뛰어든 연구팀이 존재한다. 이판목 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원팀은 2000년대부터 해저 탐사로봇을 개발해왔다. 그 결과 6000m급 심해 무인잠수정 '해미래'를 개발했고, 수심 2000m 급에서 6개 다리를 이용해 해저에서 움직이는 로봇 '크랩스터'를 만들어냈다. 크랩스터 기술은 군 수요를 노리는 한화시스템에 기술이전 되는 성과도 냈다. 이판목 책임연구원은 "해저 탐사로봇 기술력에 있어 현재 98%를 확보한 상태"라며 "2%만 더 쌓으면 된다"고 강조했다.

**해저 탐사로봇의
원천기술
확보했다**

해저 탐사로봇의 난제는 통신이다. 예를 들어 육상에서 쓰는 드론은 전파 통신을 통해 영상도 받아보고 조종도 한다. 수중에서는 전파통신이 불가능하다. 공기 중에서는 전파가 초당 30만km를 이동하지만 물 속에서는 1.5km 밖에 도달하지 못한다. 통신이 안되니 항법 기술이 중요해진다. 하지만 위성위치확인시스템(GPS)을 이용하는 항법 기술도 수중에선 무용 지물이다. 수중 30cm만 들어가도 GPS를 활용할 수 없다.

연구팀은 센서를 활용한 항법시스템을 만들었다. 어뢰에 쓰는 항법시스템을 활용해 해저 탐사로봇이 어뢰처럼 물 속에서 움직이게 했다는 설명이다. 다만 이 같은 항법시스템을 개발하며 많은 난관을 겪었다. 우선 해저 탐사로봇에 들어갈 만큼의 작은 크기의 센서가 높은 정밀도를 갖기 힘들었다. 또 정밀도를 높인 센서들은 전력 소비량이 높았다. 해외에서 파는 성능이 좋은 센서들은 2~3억원에 육박한다. 그마저도 업체에서는 잘 팔려고 하지 않는다. 해저 탐사로봇 기술의 핵심이 결국 항법시스템이기 때문이다. 센서를 팔아도 센서를 통해 얻을 수 있는 원시 데이터(Raw Data)들을 업체 측에서 주지 않는다는 게 이 책임연구원의 설명이다.

그는 "작은 크기의 저전력 센서를 여러개 달아 '센서퓨전 기술'을 적용하는 방법을 사용했다"고 설명했다. 센서퓨전 기술은 각 센서들이 획득한 여러 종류의 데이터를 통합해 각 센서에서 발생할 수 있는 오류를 보정하는 기술이다. 개발한 항법시스템은 '해미래'나 '크랩스터' 개발의 근간 기술이 됐다. 연구팀은 2001년 6년 과제로 1단계, 2단계 활용연구를 4년 진행해 총 10년 과제를 진행했다. 연구팀은 해저 탐사로봇 핵심기술을 확보했다는 공로로 2010년 국가연구개발 우수성과 100선을 수상했다.

이후 연구를 이어가 자율 무인잠수정 '이심'도 개발했다. 이심이는 한국 전래동화에 나오는 물고기 이름에서 따온 것으로 수심 2000m에서도 자율 주행하며 무선으로 원격제어가 가능하다. 해당 기술은 한화시스템에 이전됐다.

현재 연구팀은 한국항공우주연구원과 무인 이동체와 해양 복합연구단에서는 무인 수상선과 수중자율이동체 복합체계 개발에 참여하고 있다. 이 책임연구원은 "국내에서 앞서서 관련 기술 수준을 끌어올렸다는 자부심 있다"며 "핵심기술이나 원천기술을 서울대와 KAIST, 충남대 등과 함께 협력하며 함께 개발하며 관련 인력 양성에도 기여했다"고 말했다.

**2027년 해저
탐사로봇 시장
3배 커진다...
수요 열리며
연구도 진전**



무인자율잠수정 이심이 100과 이심이 6000. 한화시스템의 자율무인잠수정HW200(상단왼쪽부터 시계방향)
* 출처: 연구자 제공

해저 탐사로봇의 기술력이 높아지며 관련 시장이 커지고 있다. 시장 조사기관 '베러파이드 마켓리서치'에 따르면 관련 세계 시장은 지난해 약 5조원으로 추산된다. 2027년에는 약 15조 6000억원으로 3배 이상 커질 것으로 예상된다. 연구팀은 국가의 지원이 없었다면 해저 탐사로봇 관련 핵심기술을 확보할 수 없었을 것이라 설명했다.



일본해양연구개발기구(JAMSTEC)이 개발한 바닷속을 탐사하는 무인자율잠수정.
*출처: 네이처

이 책임연구원은 "한국은 연구개발(R&D) 투자가 잘되는 국가"라며 "기업이 투자하기도 힘든 분야라 정부가 아니었다면 연구가 힘들었을 것"이라고 말했다.

그러면서 "선진국 수준의 지원에 진입했다고 자타가 공인하는 단계에 왔다"며 "중장기 투자도 중요하지만 5~10년 투자 했는데 당장 결과가 안 나오면 그런 연구팀은 도태되어야 한다고 생각한다"고 강조했다.

현재 국내 해저 탐사로봇 관련 연구는 잠시 휴식기에 있다. 이 책임연구원은 "한번 과제를 받으면 동일한 과제로는 또 국가 지원을 받을 수 없다"고 말했다. 기업들이 조금씩 관심을 두는 상황이지만 구체적 진전이 없는 상황이다. 그렇다고 이 책임연구원은 추가 국가 지원을 바라진 않는다. 이 책임연구원은 "정부에서 추가 지원을 하기 쉽지 않다"며 "상용화하고 기술을 안정화시키고 최적화시키는 것은 기업에서 할 일이 될 것"이라고 덧붙였다.

해저 탐사로봇 기술을 이전받은 한화시스템이 이 같은 움직임을 보여주고 있다. 이 책임연구원은 "한화시스템에 기술이전을 한 지 약 10년이 지났다"며 "경제성을 따져 성능을 딱 맞추면 자연적으로 가격도 떨어지고 크기도 작아지는 최적화 연구를 진행 중"이라고 말했다. 또 최근 해저 탐사로봇에 대한 수요가 늘어남에 따라 타 기업들도 적극적으로 관심을 보이고 투자할 것이라 기대가 나온다. 이 책임연구원은 "이에 따라 곧 연구환경이 나아질 것으로 예상된다"고 기대했다.

**미세플라스틱
농도 예보 활용**

이 책임연구원은 해저 탐사로봇 개발로 현재까지 발생한 경제적 효과는 그다지 크지 않다고 본다. 그러나 한편으로는 경제적 가치가 곧 높아질 것으로 기대하고 있다. 자율자동차처럼 어느 순간 기술의 완성도가 높아지면 수요가 급격히 늘 것이라 예상된다. 레저나 군사 목적 뿐 아니라 환경 문제 해결에도 도움이 될 것으로 보고 있다. 이 책임연구원은 "요즘 미세플라스틱 문제가 심각한데 AUV가 수중 미세플라스틱 농도를 측정해 관련 예보를 하는데 활용될 수 있다"며 "동일한 방법으로 방사능이나 녹조, 적조 등을 예보할 수도 있을 것"이라고 내다봤다.



이 책임연구원은 "연구에 있어 극복 불가능한 것은 없다고 본다"고 강조했다. 이 책임연구원은 "의지만 있으면 모두 가능하다고 생각한다"며 가령 미세플라스틱을 조사하는 것에 국민적 공감대가 형성되면 어떤 형태든 구현이 가능하다. 국민적 공감대라는 의지와 정책 방향이라는 선택만 있다면 가능하다"고 말했다.

다만 연구 성패를 따지는 풍토를 지적했다. 이 책임연구원은 "연구라는 게 실패할 수도 있고 개발했다더라도 전혀 헛다리를 짚은 것도 있을 수 있다"며 "최근에 보면 그 정도가 심한 것 같다. 최선을 다했다면 비리가 아니라면 실패를 용납하는 문화가 있었으면 한다"고 조언했다.

06

심해 극한 미생물로 친환경 수소연료를 대량 생산 한다구요?

해양 초고온 고세균이용 바이오수소 생산

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
	 강성균 본부장	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 강성균 • (공동 연구자) 정해창, 이성혁, 이선민, 이현숙, 강성균, 이성목, 이종민, 유영돈, 김수현, 최강순
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 해양 초고온 고세균이용 바이오수소 생산(2011) • 산업 부생가스이용 바이오수소 생산 기술 개발(2015) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 부생가스를 수소로 전환하는 고세균 '서모코커스 온누리누스 NA1'을 이용한 바이오 수소 생산 플랜트 실증 성공 및 실용화 기반 마련 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 일산화탄소 등 제철소나 화력발전소에서 나오는 처리가 필요한 부생가스를 유용한 수소로 전환하는 그린수소 플랜트로 활용 가능 	
성과확산 경로	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산 	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 이정현박사팀이 남태평양에서 해양 고세균 서모코커스 온누리누스 NA1 발견('02)-NA1의 수소 생산 능력 확인('10)-생산성 증진된 균주 개발('15)-당진제철소 부생가스 이용 파일럿 플랜트 구축해 실증('17)-한국서부발전 해양 바이오 수소 실증플랜트 구축('19) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 극한 환경에서 서식하는 미생물이 수소를 생산하는 대사작용을 규명하여 네이처 등에 발표 • 30t 규모 미생물 배양 가능. 연간 수소 330t 생산 실증 플랜트 ※ ('19년 건설된 실증 플랜트는 2,200대 수소 전기차 운행가능한 규모) 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 심해 열수구 미생물을 이용해 세계최고 수준 바이오수소 생산성 확보, 다양한 학제 분야 간 교류와 연구 활성화에 기여 • 경제적 가격경쟁력을 확보할 수 있는 플랜트 설계 등으로 수소 경제 선점에 기여, 원천기술 일부를 기업이전해 연구소기업 설립 지원 • 사회·문화적 폐기물에서 발생한 CO2가스를 이용해 환경보호와 경제성 동시 확보, 수소 가스를 확보할 수 있는 다양한 경로를 확대하므로 국민의 에너지 생활에 기여 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 기초연구를 산업화까지 발전시키기까지 다양한 기초연구자·공학자 등과 연구협력 진행, 미생물 기초연구 분 아니라 플랜트 연구에도 적극적으로 참여한 연구자의 의지, 연구발전 단계별 정부의 지속적인 연구비 지원 • 장애 심해탐사 연구를 위한 조사선 인프라 미비 등 어려움 존재, 실증화를 위해 다양한 기업과 협력하는 것이 필요한데 이 과정 중 기업체 경영사정에 따라 일정 변경 등 가능 	

심해 속 극한 환경서 발견한 고세균, 수소 만들어내다

바다는 다양한 극한 환경이 존재해 거기에 적응하기 위해 극한 능력을 갖춘 미생물로 가득하다. 80도가 넘는 고온에서도 살아남는 미생물, 유독한 황을 먹고 소화하는 미생물, 강한 산성에서도 생존하는 미생물 등이 그것이다. 지구 전체에는 약 1조 종의 미생물이 사는 것으로 추정되는데, 인간은 아직 그 가운데 0.06%에 불과한 600만 종만 파악하고 있다. 바다에 사는 미생물은 최대 10억 종인데, 접근이 어렵기에 더욱 밝혀지지 않은 것이 많은 신비의 영역이다.

한국해양과학기술원의 해양조사선 '온누리호' 연구팀이 2002년 남태평양 파푸아뉴기니 서쪽 바닷속 1650m 지점에서 발견한 '서모코커스 온누리누스 NA1'도 그중 하나다. 뜨거운 물이 나오는 해저지형인 심해 열수구에서 발견한 이 고세균은 80도 이상의 높은 온도에 살며 염분 농도가 높고 산성인 흑독한 환경에서도 강인한 생존력을 발휘한다. 고세균 NA1은 한국이 분리, 배양해 학명을 붙인 최초의 해양 극한미생물이다.

강성균 해양과기원 해양자원연구본부장은 고세균 NA1의 유전체를 연구하던 중 수소 관련한 유전자가 유독 많은 것을 발견하였다. 개미산이나 일산화탄소같은 탄소를 이용해 수소를 만들어내는 특이한 생명현상이 확인됐다. 이 고세균은 현재 산업체에서 나오는 부생가스를 수소로 바꾸는 플랜트에 활용되고 있다.

우수성과 100선에 선정된 연구들, 수소 생산 연구로 이어지다

강 본부장의 연구는 2011년 국가연구개발 우수성과 100선에 선정됐고, 2015년에도 또 선정됐다. 2011년에는 NA1이 수소를 생산하는 독특한 대사작용을 확인해 2010년 국제학술지 '네이처'에 발표한 성과가 인정됐다. 2015년에는 NA1이 일산화탄소와 개미산을 먹고 수소를 생성하면서, 동시에 포도당, 구연산 등 유기탄소화합물을 생성해 지속적인 증식이 가능하다는 사실을 세계 최초로 규명했고, 이를 토대로 바이오수소 생산기술을 개발한 성과가 인정받았다.

처음부터 수소 생산을 연구한 것이 아니었지만 NA1이 수소를 만들어내는 현상을 확인하면서 미생물을 이용해 수소를 만드는 바이오수소로 자연스럽게 연구 주제가 확장됐다. 당시 바이오수소는 전 세계적으로 실용화가 안 된 상태였다. 미생물을 이용해 수소를 만들 때 가장 큰 걸림돌은 생산효율이었다. 미생물의 에너지가 워낙 작아 수소의 생산효율도 낮았기 때문이다. 그런데 NA1은 일산화탄소를 수소를 전환하는 효율이 매우 높았다. 이런 발견이 바이오수소 생산으로 이어진 셈이다.

산업체와의 협업, 30t 규모 미생물 배양 플랜트로 결실

2015년 국가연구개발 우수성과 100선에 선정될 당시만 해도 바이오수소 연구는 실험실 수준이었다. 2014년 NA1의 생성 원리를 최초로 규명해 미국 '국립과학원회보(PNAS)' 발표하면서 이론적인 토대는 마련한 상태였고, 산업 부생 가스를 받아 실험한 결과 바이오수소를 생산할 가능성을 확인한 수준이었다. 강 본부장은 "산업체와 협력하면서 수소 생산기술을 파일럿 규모로 적용할 수 있었다"며 "여기서 더 발전해 산업체 현장에 대형 실증 플랜트를 짓고 수소를 생산하는 실증 실험까지 이어졌다"고 말했다.

바이오수소 생산 실험은 크게 두 가지로 진행했다. 하나는 파일럿 규모로 제철소에서 나오는 부생가스를 직접 받아 이를 수소로 전환하는 실험을 진행한 것이다. 한 달가량 연속실험을 진행한 결과 안정적으로 수소를 생산할 수 있음을 확인했다. 당시 미생물을 이용해서, 그것도 고세균으로 파일럿 규모로 수소 생산 실험을 진행한 사례 자체가 없었다. 강 본부장은 "이런 결과를 토대로 충남 태안 한국서부발전에서 바이오수소를 생산하는 실증 플랜트를 준공하는 결과로 이어졌다"고 말했다.

기초연구에서 시작했지만 바이오수소 생산이라는 산업화까지 이어지면서 연구 인프라도 많이 필요했다. 고세균을 배양하기 위해 특수시설도 갖춰야 했고, 나중에는 대형 실증 플랜트도 지어야 했다. 실험실에서 기술을 개발하는 단계까지는 난관이 생겨도 스스로 헤쳐나갈 수 있었지만, 산업체 적용 단계에 들어가자 직접 해결할 수 없는 문제들이 발생했다. 강 본부장은 "부생가스를 많이 얻는 것부터 어려웠는데 다행히 많은 분의 도움으로 제철소, 한국서부발전 등과 협업할 수 있었다"고 회고했다.

강 본부장은 “미생물을 이용해서 수소를 만드는 바이오수소 생산 기술에서는 생산성 측면에서 우리 기술이 세계 최고 수준”이라고 강조했다. 바이오수소 생산은 원료가 어떤 물질인지에 따라 생산성이 달라진다. 강 본부장의 기술은 부생가스를 이용해서 바이오수소를 생산하는 게 특징이다. 미생물이 독성이 있는 일산화탄소에 적응하고 수소를 생산하게 만들기 때문에 더욱 유용하다. 강 본부장은 “실증 수준에서 미생물 배양 규모는 30t에 이른다”고 말했다.



바이오 수소 생산을 위한 장치들. 피드 탱크, 1배양기, 마이크로버블러, PSA수소정제장치, 수소저장장치(왼쪽부터)
* 출처: 연구자 제공

드물던 유전체 기초연구로 연구 난관 돌파

강 본부장은 서울대 미생물학과를 졸업했다. 박사후 연구원 시절에는 다른 분야도 연구했지만, 당시 유전체학과 같은 오믹스 연구가 학계를 주도하면서 이를 이용해 새로운 것을 발견해내는 분위기가 강했다. 강 본부장은 “그중에서도 극한 환경에서 서식하는 미생물은 ‘생명체의 마지막 프론티어’로 불리며 우주의 탄생과 기원을 설명할 실마리를 가진 존재로 여겨졌다”고 말했다.

강 본부장은 한국해양연구원(현 한국해양과학기술원)에 입사한 뒤 운 좋게도 심해 열수구에 서식하는 고세균의 유전체를 2004년부터 본격적으로 연구할 수 있게 됐다. 그 과정에서 수소를 생산하는 독특한 생명현상도 찾아낼 수 있었다. NA1은 일반적으로 미생물의 대사 과정에 대한 고정관념을 깨는 고세균이었다. 처음에는 NA1이 이런 독특한 대사작용을 할 것이라고 예상하지 못했다. 이 분야를 연구하던 과학자들도 발견하지 못했다. 이런 기능을 처음 발견할 수 있었던 것은 유전체 연구를 적용했기 때문이다. 강 본부장은 “개미산이나 일산화탄소를 이용해 수소를 만들어낸다는 상식을 파괴하는 대사작용을 발견한 게 브레이크 포인트였다”며 “이후 연구의 동력을 얻었다”고 말했다. 강 본부장은 “덕분에 2010년 ‘네이처’에 논문을 발표할 수 있었지만, 한편으로는 전 세계 학계의 관심과 공격을 동시에 받았다”고 회고했다.

NA1의 유전자 조작을 통해 수소 생산에 적합한 돌연변이를 만들어낸 것도 연구의 중요한 터닝 포인트로 꼽힌다. 수소를 생산하는 NA1은 2002년에 심해 열수구에서 찾은 야생 고세균은 아니다. 강 본부장은 유전자 조작을 통해 수소 생산성을 100배가량 높은 NA1의 돌연변이를 만들어냈다. 그는 “이 정도 생산성이 담보돼야 실증 플랜트에 적용할 수 있다”고 말했다



제철소 일산화탄소 포함 부생가스를 활용한 바이오 수소 생산과 이를 활용한 전기 생산 개념도.
* 출처: 연구자 제공

다른 분야 전문가들·학계와의 협업이 성과의 원동력

고세균 연구 같은 기초연구 역량 ‘퍼스트 무버’ 핵심 요인

기계공학, 화학공학 등 바이오수소 생산에 필요한 다른 분야 전문가들과의 협업도 바이오수소 생산에 이르는 핵심 요인이 됐다. 특히 우수한 연구진이 바이오수소 생산 성공을 이끌었다. 해양과학기술원 외에도 공동연구를 하는 다른 분야 전문가들, 해외 인적 네트워크 등이 많은 역할을 했다. 강 본부장은 “미생물학 전문가였던 만큼 부생가스를 이용해 수소를 만드는 공정 설계는 쉽지 않았다”며 “한국에너지기술연구원, 고등기술연구원 등 국내 우수한 공학자들의 도움과 지원이 없었더라면 바이오수소 생산은 불가능했을 것”이라고 말했다.

미생물을 이용해 바이오수소를 생산하는 연구는 당시 신생 분야였던 만큼 학계에서 인정받기 위해 이론을 정립하는 일도 중요했다. 이론 정립에는 해외 과학자들과의 공동 연구가 많은 도움이 됐다. 강 본부장은 “극한 미생물 연구 경험이 많은 미국, 독일 등 해외 과학자들과 협업을 통해 국제적인 네트워크를 구축하는 동시에 새로운 이론 정립에도 성과를 낼 수 있었다”고 말했다.

심해 열수구에 서식하는 고세균과 같은 극한 미생물의 생명현상을 이해하는 분야는 10년 전과 비교해 양적으로 크게 늘지 않았다고 한다. 그만큼 어려운 분야이기도 하다. 강 본부장은 “폭발적인 발전이 있었다기보다는 꾸준히 관심을 얻으면서 차츰 발전해왔다”며 “특히 고세균을 산업에 활용하면서 우수 균주 개발, 실증 기술 개발, 플랜트 대형화 등이 이뤄졌다”고 말했다. 이어 “10년 전만 해도 바이오수소에 대한 관심이 크지 않았는데, 지금은 수소 경제라는 용어가 자주 사용될 만큼 수소에 대한 관심이 커졌다”고 말했다.

하지만 이런 상황에도 불구하고 국내에서 이 분야를 발전시키기는 쉽지 않다는 게 강 본부장의 판단이다. 심해 열수구라는 극한 환경 탐사가 선행돼야 하는 만큼 해양이나 우주 등에 적극적으로 투자하는 미국, 일본, 프랑스, 독일, 영국, 러시아, 중국이 적극적이다. 강 본부장은 “심해 탐사를 위해서는 조사선 등 인프라가 필요하다”며 “한국도 과학기술 강국으로 꼽히지만, 응용산업 중심의 과학기술 위주로 발전해 미생물학과 같은 기초연구 분야는 발전이 더딘 편이다”고 짚었다.

강 본부장은 “최근 ‘퍼스트 무버’가 돼야 한다는 의견이 많은데, 기초 역량이 결국 퍼스트 무버가 되기 위한 핵심 요인임을 알 수 있다”며 “고세균인 NA1의 유전체를 분석하고, 유전체 관점에서 생명현상의 대사 기작을 알아내는 기초연구가 뒷받침되지 않았다면 바이오수소 생산까지 이어지지 못했을 것”이라고 말했다.

이어 “고세균을 활용하는 기술이 더 발전하면 국민의 삶에도 도움이 될 것”이라며 “고세균에서 나오는 극한 소재들이 실생활에 사용되는 사례가 생길 수 있고 바이오수소를 수소차 연료로 쓰는 날이 올 수도 있다”고 강조했다.

연구 단계별로 정부의 효과적 지원 뒷받침돼... ‘경제성 해결할 것’

강 본부장은 연구에 있어서 정부의 도움도 컸다고 회고했다. 강 본부장은 “해양수산부의 전폭적인 지원이 있었고 과학기술정보통신부도 국가연구개발 우수성과 100선 선정 등을 통해 연구 내용을 적극적으로 알렸다”며 “그러면서 산업체의 관심도 얻을 수 있었고 상용화까지 이어졌다”고 말했다. 이어 “정부 지원 덕분에 여기까지 오게 된 것이라고 생각해 항상 감사하는 마음을 갖고 있다”고 했다. 연구 단계별로 효과적인 지원이 뒷받침됐다는 설명이다. 강 본부장은 “고세균 발견은 기초연구였지만, 바이오수소 생산기술을 개발할 때는 실용화 기술개발 과제가 됐다”며 “여기에 맞춰서 산업체나 실제 기술 수요자들과 매칭되도록 지원도 받았다”고 말했다.

바이오수소 생산이라는 산업화 과정에 돌입한 만큼 이제는 경제성을 해결하는 게 가장 큰 과제다. 강 본부장은 “산업체가 고세균 생산과 시장 판매를 주도하고 있지만, 우리 연구팀도 계속 지원하고 있다”며 “운영 단가를 낮추는 등 기술적으로 경제성을 확보할 방법을 연구하고 있다”고 말했다.

07

세계 최고 수준 200년 가는 슈퍼 콘크리트

Prestressed Concrete 교량의 건설비용 절감

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
	 김병석 원장	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 김병석 • (공동 연구자) 고경택, 김성욱, 김영진, 박성용, 이창홍, 정문경, 조창빈
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • Prestressed Concrete 교량의 건설비용 절감(2006) • SUPER BRIDGE 200(저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술)(2011) • 세계 최고 수준의 '200년 가는 슈퍼콘크리트' 기술 개발 및 상용화(2020) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 200년 가는 장수명·저비용·고품질 슈퍼콘크리트 제작 기술 확보, 이 기술을 기반으로 세계 최고 수준 사장교 건설기술 확보 ※ 일반 콘크리트 대비 강도 5배, 수명 4배, 제조비용(국외 대비) 50% 이상 절감 및 공사비 10% 절감형 구조물 등 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 사장교·건축구조 등 대형 구조물뿐만 아니라 스마트 첨단산업분야 전반에 활용 ※ 춘천대교 건설에 성공하고 현재 건설중인 고덕대교 등 최신 사장교를 국내 기술로 건설 	
성과확산 경로	<ul style="list-style-type: none"> ☑ 기업 기술이전 ☐ 연구자 창업 ☑ 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) ☑ 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산 	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • Pressed Concrete 철근콘크리트교량 설계법 개발('05), 우수성과100선('06)-저비용 장수명 사장교 기술개발('10), 우수성과 100선('11)-압축강도 80~180MPa급 맞춤형 슈퍼콘크리트 재료 및 구조물 기술 개발 연구('13~'19)-Hawkeye UHPC Bridge('15), Ka Thae Myaung Bridge('15)-춘천대교('17)-200년 가는 교량기술개발('19), 우수성과 100선('20)-세계 최장 슈퍼콘크리트 사장교 '고덕대교' 건설중('22 완공) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 건설 신재료 분야 First mover 역할, '21년 기준 세계 최장 슈퍼콘크리트 사장교 고덕대교 건설중 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 슈퍼콘크리트 기술의 글로벌 스탠다드화에 기여, 국내 건설기술로 국위선양 • 경제적 재료 최적화 및 국산화를 통하여 세계 최저 비용으로 고성능콘크리트 기술 시공, 관련 건설기업과 협업을 통한 산업 활성화 • 사회·문화적 사회 곳곳 안전문제 등 부각되는 상황에서 교량기술에 한정적이지만 글로벌 수준의 성과를 냄. 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 탄탄한 기초연구, 건설 예산 등을 고려한 연구자의 비즈니스 마인드, 월드 베스트 전략의 지속적인 유지 • 장애 지속적 기술발전 위한 추가투자 필요, First mover로써 새로운 시도를 할 때 고민 	

프랑스 기술로 건설한 선유교에서 자극을 받다

2002년 한 프랑스 수교 100주년 기념으로 한강에 초고성능 콘크리트 보도교인 선유교를 순수 프랑스 기술로 건설했다. 이때 사용한 재료는 프랑스 시멘트 회사 'Lafarge', 혼화재 회사 'Bouyugues', 국책연구소인 LCPC(Laboratoire Central des Ponts et Chaussees) 등이 공동으로 개발한 초고성능 콘크리트(Ductal)로, 완제품을 프랑스에서 직접 가져왔다. 공사 후 사용하다 남은 초고성능 콘크리트 제품을 모두 수거해 본국으로 가져갈 정도로 철저히 기술 보안을 유지했다. 김병석 한국건설기술연구원 원장(당시 책임연구원)은 “이후 프랑스에서는 국제학회나 컨퍼런스 등 기회가 있을 때마다 선유교를 자국이 개발한 초고성능 콘크리트 건설한 것이라고 자랑했는데 그럴 때마다 한국의 연구자로서 자존심이 크게 상했다”고 말했다.

이후 전 세계적으로 초고성능 콘크리트가 주목을 받기 시작했다. 독일의 카셀대학, 일본의 태평양시멘트, 대성건설, 카지마건설 등에서도 연구가 시작돼 간간히 소규모 교량에 시범 적용됐다. 독일에서는 카셀대학을 중심으로 2005년부터 2012년까지 연구 지원 기관인 'DFG(Deutsche Forschungs Gemeinschaft)'의 종합적인 연구계획에 따라 170억원을 투자해 초고성능 콘크리트(UHPC, Ultra High Performance Concrete) 재료의 성능 개선, 이를 이용한 구조물의 설계와 결합방법 등에 대한 연구를 진행했다. 미국에서는 프랑스 등에서 개발한 초고성능 콘크리트를 이용해 2000년대 초반부터 교량을 건설하는 등 주로 초고성능 콘크리트의 활용 기술에 큰 관심을 가졌으며, 이후 자체적으로 재료도 개발하기 시작했다. 유럽, 일본, 미국 등에서 초고성능 콘크리트를 미래 건설 산업을 이끌 신성장 동력으로 간주하고 국가적인 차원에서 연구개발을 본격적으로 시도하는 단계였다.

김병석 원장은 “당시 국내 건설 기술자에게는 초고성능 콘크리트가 기존 콘크리트와 너무 달라서 먼 미래의 건설 재료로 여겨졌고 개발 자체도 문제지만, 국내 개발이 되더라도 너무 고가라 시장 경쟁력 측면에서 문제가 있는 기술로 인식됐다”고 설명했다.

세계 최고 200년 수명, 세계 최저 비용 장대교량 기술 개발



[슈퍼콘크리트의 춘천대교 현장 적용]

[세계최초 UHPC 도로 사장교(춘천대교)]

* 출처: 연구자 제공

김병석 원장은 2000년대 재료국산화와 시장경쟁력 확보를 목표로 내걸고 사장교용 초고성능 콘크리트 개발에 착수했다. 그 결과 압축강도 200메가파스칼·MPa(기존 고강도 콘크리트의 5배)를 유지하면서 인장강도를 18MPa까지 향상(당시 세계 최고 수준은 미국 미시간대의 14 MPa)시킨 세계 최고 수준의 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)를 개발하고, 구성재료의 효율화와 국산화를 통해 재료 단가를 50% 이상 절감시키는 데 성공했다.연구 시작 당시 콘크리트 사장교의 최대 지간장은 530m (노르웨이, 스칸순교)이고, 이는 콘크리트 사장교로는 한계 지간장으로 인식되고 있었다. 콘크리트 사장교의 시장을 확장하려면 530m를 뛰어넘어 800m급까지도 경제성을 확보할 필요가 있다고 판단하였다. 이를 위해 첨단재료 및 이의 구조 부재 활용 기술, 사장교 건설 기술을 융복합화함으로써 국내외에서 수요가 많은 200~800m 구간의 사장교를 대체할 수 있는 저비용·장수명 사장교 기술을 개발했다. 사장교의 공사비를 20% 절감시키고, 수명을 2배 이상 확대하여 200년까지 보장하는 기술이다.

**경쟁력 확보와
실용화가 관건**

김병석 원장은 “기술 검증을 위해 테스트베드로 UHPC를 활용하는 세계 최초의 보도 사장교(Super Bridge I)를 건설연 내에 건설했다”며 “이 교량은 세계 최초의 UHPC 사장교로서 비록 규모는 작지만 장대 교량 건설에 필요한 핵심기술이 집약되어 있는데 이를 통해 기술 적용 타당성을 인정받았고 2010년에는 세계 최초로 UHPC 도로 사장교(조발대교)를 실제 설계입찰에 적용하는 성과를 올리는 결정적인 계기가 됐다”고 밝혔다.

원천기술을 확보한 연구진은 가격 경쟁력을 확보하고 실용화해야 연구개발의 성과가 비로소 열매를 맺을 수 있을 것으로 봤다. 그러나 UHPC를 만드는 데 필요한 재료가 워낙 비쌌다. 180메가파스칼의 압축강도를 내는 재료는 1세제곱미터당 450만원으로 대부분 재료가 다 수입이었다. 일반 콘크리트는 8만원에 그친다. 압축강도를 높이면 인장이 약해지는데 이를 잡아주기 위해 철근을 넣는다. 보통 지푸라기처럼 생긴 강섬유를 사용하는데 이 강섬유를 덴마크의 베카르트는 회사가 독점했고 가격은 비싸 엄두가 나지 않았다.

선유교 건설에 참여했던 국내 업체들에게는 초고성능 콘크리트의 수축량이 지나치게 커서 품질관리가 어렵다는 인식이 팽배했다. 콘크리트는 수축하는 특성을 갖고 있는데 슈퍼콘크리트는 일반 콘크리트보다 수축량이 1.5배 이상이다. 결국 철근을 넣어야 되었는데 이에 따른 균열 문제를 해결해야만 했다.

철근을 쓰지 않는 방식으로 수십 차례 테스트를 진행한 결과 압축강도와 인장강도의 균형이 잡힌 UHPC를 개발하는 데 성공했다. 김병석 원장은 “나노 재료 등을 국산화하고 180메가파스칼의 압축강도가 나오는 UHPC를 1세제곱미터당 100만원 정도로 가격경쟁력을 갖춘 UHPC를 개발했다”고 말했다. 연구성과를 인정받은 연구진은 2011년 ‘슈퍼브리지200(저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술)’로 국가연구개발 우수성과 100선에 선정된다.

**연구성과에
만족하지 않고
후속연구에 몰입**

김 원장 연구진은 2012년 ‘SUPER BRIDGE 200(저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술)’ 연구사업 종료 이후 후속 연구사업으로 ‘압축강도 80~180MPa급 맞춤형 슈퍼콘크리트 재료 및 구조물 기술 개발’ 연구(68개월, 314억 원, 2013.2월~2019.12월) 국가R&D사업을 수행했다. 연구 수행 중에 국내외 여러 현장적용, 기술 실용화 등 많은 성과를 도출해 다시 ‘2020년 국가연구개발 우수성과 100선’에 선정됐다.

슈퍼브리지 200 연구과제에서는 사장교에 적용하기 위한 200MPa급 초고성능 콘크리트가 개발 대상이었으나, 일반교량 및 건축물 등 일반 구조물에서는 이보다 더 낮은 성능의 콘크리트가 오히려 더 경쟁력이 있었다. 이에 후속연구에서는 구조물의 종류에 따라 요구되는 성능에 최적화한 콘크리트 재료(슈퍼 콘크리트)를 개발하고 설계기준, 설계 및 시공 기술을 개발하여 적용 범위를 확장하는 데 목표를 뒀다. 후속연구를 통해 일반 콘크리트 대비 강도 2~5배, 수명 2~4배, 제조비용(국외 대비) 50% 이상 절감 및 공사비 10% 절감형 구조물 등 세계 최고 수준의 장수명·저비용·고품질 슈퍼콘크리트 재료·구조물 기술을 개발했고 이 기술을 적용해 실제 교량과 건축물을 국내는 물론 해외(미국, 미얀마, 베트남)에도 현장 적용해 여러 건의 수출성과를 냈다.



미국 아이오와주 180MPa급 슈퍼콘크리트 ‘Hawkeye’ 교량 건설 기념 사진(2015.11. 완공).
* 출처: 한국건설기술연구원 제공.

**정부의 원천기술
분야 R&D
“중복 투자를
허하라”**

김 원장은 “세계 최고 수준의 인장강도(19MPa)를 유지하면서 재료의 국산화·최적화를 통해 제조가격을 60~80% 정도 떨어뜨려서 대내외 가격경쟁력을 확보했고 5,000개 이상의 다양한 시편·부재 실험과 신뢰성 해석 등을 통해 국내는 물론 해외에서도 적용 가능한 세계적 수준의 슈퍼콘크리트 설계·시공 기준을 개발했다”며 “슈퍼콘크리트의 장점을 극대화한 최적 구조시스템의 개발로 공사비를 기존 경쟁기술 대비 10% 이상 절감해 시장경쟁력을 확보했다”고 말했다.

압축강도 180MPa급 슈퍼콘크리트 도로 사장교인 「춘천대교」(2017년) 및 120MPa급 슈퍼콘크리트 비정형 셸 구조물인 울릉도 「힐링스테이 코스모스 리조트」(2017년)를 세계 최초로 건설하고 이를 인정받아 미국 FHWA(연방도로청) 주관 ‘제1회 국제 UHPC 혁신상(2019.06.)’에서 ‘인프라’와 ‘빌딩’ 부문에서 각각 단독 수상했다. 540m로 완공시 세계에서 가장 긴 콘크리트 사장교인 「고덕대교」에 슈퍼콘크리트 기술을 적용해 현재 건설중이다(2022년 완공 예정).

김 원장은 이 분야에서 세계 선도에 서기 시작했고 시장 수요가 충분히 존재하나, R&D를 통해 지속적으로 추가 개발을 하지 않으면 비교 우위를 확보하기 어려운 환경이라고 지적했다. R&D 영역에서 중복 연구는 지양해야 하지만 일부 경쟁력 있는 기술에 대해서는 5년, 10년이 아니라, 20년, 30년 또는 그 이상 지속적으로 투자해 나가야 퍼스트 무버로서의 세계 최고의 기술경쟁력, 국가 경쟁력을 갖출 수 있다는 것이다.

김 원장은 “2003년부터 시작해 2019년까지 이어진 슈퍼콘크리트 기술 개발 연구의 사례를 보면, 세계적으로 퍼스트 무버로 선도하려면 오랜 기간 동안 연속적인 연구개발이 수반되어야 가능하다고 판단된다”고 말했다. 그는 또 “최근 중국은 이 분야에 대한 시장과 기술개발의 중요성을 인식하고 2019년부터 대형국가R&D를 추진해오고 있다”고 경고했다.

김 원장에 따르면 토목이나 건축 시설물과 관련한 큰 규모의 장기적인 기술개발은 민간 건설회사에서 투자해서 할 수 없는 영역이다. 건설회사는 당장의 가격 입찰과 영업으로 수수하기 바쁜 구조를 가지고 있다. 기술 개발을 책임지는 본부장들의 임기는 길어야 3~4년 정도이고, 5년 이상 10년 이상 소요되는 기술 개발을 할 이유와 명분이 없다.

김 원장은 “세계적인 경쟁력이 있는 기술에 대해서는 정부차원에서 지속적으로 기술개발 지원을 해야 한다”며 “중복투자를 못하게 하는데 일부 부문과 일부 예산은 오히려 중복투자에 써야 한다”고 말했다. 또 “5년 정도 하면 국내에서 알아주고, 10년 하면 세계에서 어느 정도 알아주고, 15년 정도 하니 세계 최고 수준에 일부 올라 설 수 있었고 트랙 레코드를 만들어 나갈 수 있었다”며 “그런데 지금 슈퍼 콘크리트를 더 하자고 하면 아마도 ‘그만큼 했으면 됐지’ 라고 할 것”이라고 말했다.

08

K-연구용 원자로, 하나로 이야기

연구용 원자로 최초 수출

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 한국원자력연구원	 오수열 책임연구원	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 오수열 • (공동 연구자) 김영기, 류정수, 박수기, 박종학, 박철, 서철교, 이병철, 이준식, 조영갑, 채희택
우수성과 선정정보	• 연구용 원자로 최초 수출(2010)	
성과소개	• 연구용 원자로 하나로 개발(30MW급) 개발 이후 오르단 원자로 수주('09) 및 완공('16)	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 하나로로는 반도체, 미세먼지, 암치료 등 다양한 영역에서 국민생활 편의 증진에 기여 • 해외 연구용 원자로 건설 시장 수주/상용 원전 수주 	
성과확산 경로	<input type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 오르단 연구로 건설사업 수주('09)-네덜란드 PALLAS 연구로 개념설계('09)-델프트공대 연구용원자로사업 수주('14)-오르단 연구로 준공('16)-연구로 관련 개도국 기술건설팅('20)-하나로 운영 101주기 기념('21) 	
기술수준	• 국제원자력기구(IAEA)가 '19년 하나로를 국제연구용원자로거점센터(ICERR)로 지정할만큼 세계 최고 기술수준을 인정받고 있음	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 우리나라가 연구로 공급국 지위를 확실하게 획득하며 국가의 과학기술적 위상을 제고함, 기술성에서 우위를 점함으로써 후속 수출 가능성을 높임 • 경제적 연구로 전체 시설의 수출이 아니더라도, 판형 핵연료의 경우 호주, 일본 등 국제적 수요에 대해 공급 방안을 협의 진행 중임 • 사회·문화적 핵 비확산과 관련하여, 미국이 주도하고 있는 전 세계 연구로 핵연료의 저농축 핵연료 전환 프로그램에 기여하고 있음 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 수요 고려한 R&D 기획과 기술경쟁 우위, 기술 파트너와 긴밀한 연계 • 장애 소속기관 방침 변화, 협력 산업체의 경영악화, 후속 시장 발굴 위한 자금 지원 부재 등 	

전기를 생산하지 않는 과학실험 장치로서 원자로

연구용 원자로는 원자력발전소와 달리 전기를 생산하지 않는다. 원자력 발전과는 달리 중성자 등을 생산하여 기초과학에 사용하는 일종의 최첨단 연구장비 중 하나이다. 연구용 원자로는 상용 원자력발전소의 원자로에 비해 열출력이 약 100분의 1 수준이다. 원자력발전소가 고온·고압 조건인 약 340도, 150기압에서 운전하는 것과 달리 연구용 원자로의 상온(45도) 대기압(1기압) 환경에서 가동하기 때문에 상대적으로 안전한 것으로 알려져 있다. 또한, 상시 방사능 감시체계, 내진설계 등 작업자의 안전을 위한 다양한 장치도 설치되어 있다. 연구용 원자로의 원자력 기술 전문가를 키우는 교육용 목적으로 활용되기도 한다. 각국은 과학연구와 동위원소 생산, 전문가 양성을 위해 과학자 양성을 위해 연구용 원자로 도입에 나서고 있다.

한국도 1950년대부터 미국에서 연구용 원자로를 들여와 운영한데 이어 1995년부터 대전 유성 한국원자력연구원에서 자체 기술로 건설한 연구용 원자로 '하나로'를 운영하고 있다. 2009년에는 원자력 기술을 개발한지 반세기만에 오르단에 연구용 원자로 수출 계약까지 성사시키기도 하였으며, 2019년에는 국제원자력기구(IAEA) 지정 국제연구용원자로거점센터(ICERR)로 지정되는 등, 한국 과학기술의 우수성을 알리는 성과를 내기도 했다.

알고보면 우리 생활과 가까운 팔방미인 연구용 원자로

연구용 원자로에서 생산되는 입자는 광학현미경의 빛 대신 사용하면 현미경처럼 미세한 세계를 관찰하는 데 사용된다. 대표적인 것이 중성자이다. 중성자의 파장은 나노미터 전후이기 때문에 수백나노미터의 파장을 가진 가시광선보다 훨씬 작은 원자와 분자의 세계를 관찰할 수 있다. 또한 광학현미경은 대상의 표면만 관찰할 수 있는 데 비해 중성자는 물질을 잘 투과하므로 병원에서 엑스레이를 사용해 우리 몸 안을 촬영하듯이 내부 구조를 측정하는 데 사용된다. 암 진단과 항암 치료에 사용되는 의료용 동위원소를 생산하는 목적으로도 쓰인다. 하나로로는 매년 총 10가지의 방사성동위원소를 생산해 국내외에 공급하고 있다. 의료용 동위원소는 갑상샘암 진단과 치료에 쓰이는 요오드-131 캡슐제와 용액제, 난치병 진단에 사용되는 테크네슘-99m도 연구용 원자로에서 생산하는 의료용 동위원소다. 특히, 소아암 치료제 mIBG는 국내 수요의 100%를 담당하고 있다고 한다.

하나로에서 생산되는 중성자를 이용한 비파괴 검사는 다양한 물질의 내부 정보나 결함을 확인할 수 있는데 이 원리를 이용해서 수소연료 전지, 문화재, 항공기 부품 등의 성능시험에 쓰일 수 있다. 그 외 반도체 제작 시, 일반적 화학공정보다 인(P)을 균일하게 분포시키는 기술 등 그 산업적 쓰임새가 다양하다. 눈에 보이지도 않는 중성자, 동위원소라는 작은 입자가 우리 생활을 지원하고 있는 것이다.

핵연료 자체 개발, 냉중성자 생산 성공.. 기술적으로는 세계최고 수준 인정

하나로를 통해 국내 연구용 원자로 기술은 날이 발전하고 있다. 2004년에는 하나로의 핵연료를 국산 기술로 제작해 공급하는 기술을 확보했다. 그전까지는 하나로에 사용되는 핵연료를 캐나다에서 전량 수입해왔다. 2005년부터 하나로에는 원자력연이 자체 생산한 핵연료를 장전했고, 이후 지금은 100% 원자력연이 만든 핵연료를 쓰고 있다. 이렇게 연구용 원자로 운영자가 핵연료까지 자체적으로 생산하는 경우는 원자력연이 세계에서 유일하다.

2010년에는 냉중성자 연구시설을 준공해 가동에 들어갔다. 하나로에서 생산되는 열중성자를 영하 250도의 액체수소로 된 감속재에 통과시켜 차가운 냉중성자로 만들면 파장이 매우 짧아 nm(나노미터·1nm는 10억 분의 1m) 영역의 물질 구조를 연구할 수 있다. 냉중성자를 이용하면 살아있는 세포를 파괴하지 않고도 관찰할 수 있어 생명과학계에서 기대가 컸다.

한국의 연구용 원자로 기술은 세계 최고로 평가받는다. 국제원자력기구(IAEA)는 원자력연의 하나로를 2019년 국제연구용원자로거점센터(ICERR)로 지정했다. 아시아에서는 처음이며, 세계적으로도 국제원자력기구(IAEA)의 ICERR로 지정된 곳은 하나로를 포함해 벨기에, 프랑스, 루마니아 등 네 곳에 불과하다.

ICERR은 연구용 원자로를 이용해 국제원자력기구(IAEA) 회원국에 제공할 각종 연구개발(R&D)을 수행하고 그 결과를 공유하고 있다. 하나로 2021년 6월 100주기 가동을 무사히 마치고 101주기 가동에 들어갔지만, 101주기 가동 열흘 만에 원자로가 자동 정지돼 약 두 달 뒤인 8월 재가동이 승인됐다.



〈연구용 원자로 하나로〉
* 출처: 원자력연 홈페이지

한국의 연구용 원자로 기초기술에 대한 노력은 무려 50년이 넘는 세월 동안 축적 되었다. 전쟁이 끝나고 얼마되지 않은 시점인 1959년 미국 제너럴아토믹(GA)사로부터 열출력 100kW(킬로와트)급 소형 연구용 원자로인 트리가 마크(TRIGA Mark)-II를 도입해 원자력 기술을 개발하기 시작했다. 트리가 마크-II는 서울 공릉동에 터를 잡고 건설을 시작해 1962년 본격 가동에 들어갔다. 트리가 마크-II는 한국 최초의 연구용 원자로다. 트리가 마크-II는 1995년 가동을 멈출 때까지 33년간 상용 원자로 개발과 기초과학 연구, 동위원소 생산 등에 활용되며 국내 원자력 기초기술 발전에 기여했다.

1972년에는 열출력 2MW인 트리가 마크-III의 운영을 시작하고 2005년에 해체 할 때까지 연구용 원자로 운영 경험을 축적하였다. 마크-III에 이어 1995년부터 가동을 시작한 연구용 원자로 하나는 우라늄의 핵분열 연쇄반응에서 생성된 중성자를 이용해서 다양한 연구개발을 수행하는 30MW급 연구용 원자로다. 하나로를 자체 기술로 설계하고 건설할 수 있었던 것도 트리가 마크-II와 트리가 마크-III의 운용 경험이 밑바탕이 됐다. 요르단에 연구용 원자로를 수출할 수 있었던 것도 하나로 등 연구용 원자로를 운영하며 축적한 기술과 경험이 빛을 발했다고 볼 수 있다.

오랜 시간 연구용원자로는 과학강국의 전유물이었지만, 2000년대 하나로의 기술을 인정받은 만큼 연구용원자로 수출도 새로운 시장이 될 수 있을 것이라는 판단이 섰다. 하지만, 연구용원자로 시장에서 성공하기 위해서는 기술력 뿐 아니라 다양한 국가 차원 전략이 필요하다. 2009년 요르단 연구용 원자로 수주는 기술력 뿐 아니라 과학외교의 성공 사례라고 할 수 있다.



〈요르단 연구 및 교육용 원자로 내부와 외부 모습〉
* 출처: 연구자 제공

**50년 원자력
기술 축적의
산실, 연구용
원자로**

**연구용 원자로를
수출하는
과학강국이 되다!**

한국원자력연구원은 2009년 대우건설과 컨소시엄을 이뤄 요르단원자력위원회(JAEC)가 발주한 5MW급 연구 및 교육용 원자로(JRTR) 건설사업에 입찰서를 제출했고 그 해 12월 국제 경쟁입찰에서 최우선협상대상자로 선정됐다. 당시 한국은 연구용 원자로를 수출한 경험이 전혀 없었다. 아르헨티나, 중국, 러시아 등 3개국이 원자력연 컨소시엄과 치열한 경합을 벌였고, 그중에서도 아르헨티나가 가장 강력한 경쟁자였다. 아르헨티나 국영기업인 인밤(INVAP)은 연구용 원자로를 전문으로 설계하고 건설하는 업체로 그간 국제시장에서 연구용 원자로 수출을 독점하다시피 해왔다. 해외 원자력 시장 진출을 위해서는 과거 수출 경험이 있느냐 없느냐가 중요한 기준으로 작용했다. 그런 점에서 아르헨티나의 인밤이 절대적으로 유리했다. 하지만 인밤이 참여한 팔라스 사업 입찰이 석연치 않은 이유로 중단되고 인밤이 건설한 호주 연구용 원자로 '오팔(OPAL)'에서 결함이 발견되면서 한국에 희망이 생겼다.

다른 입찰 참여국인 러시아와 중국도 국가가 나서서 전폭적으로 지원하는 상황에서 한국은 결국 하나로 기술의 우수성을 적극적으로 알리는 전략을 취하는 게 유리하다는 판단이 섰다. 또 인밤은 원자로를 건설하고 나면 그것으로 끝이었지만, 한국은 소위 애프터서비스(AS)를 내세웠다. 여기에 정부가 입찰에서 주도적인 역할을 하고 연구소와 기업이 협력하면서 결과는 긍정적인 방향으로 돌아갔다. 정부가 나서서 연구용 원자로를 개발하지만, 혜택은 기업에 넘겨주고 기업은 일자리를 창출할 수 있었다.

특히 요르단 정부는 한국이 하나로를 통해 축적한 연구용 원자로 운영 경험을 전수해주고 인력 교육도 지원해준다는 점을 크게 환영했다. 실제로 계약이 이뤄진 뒤 요르단의 학생 10여 명이 과학기술연합대학원대(UST)에서 원자력 전문 교육을 받고 석사학위를 취득했다. 또 20여 명은 연구용 원자로 운전원이 될 수 있도록 훈련시켰다. 이들이 현재 요르단 원자력 2세대의 주축을 이루고 있다. 요르단 연구용 원자로는 2010년 8월 사업에 착수해 2016년 12월 성공적으로 준공했다. 특히 요드131 같은 방사성동위원소 의약품을 생산하면서 요르단의 의료 서비스가 개선됐고 국민에게 돌아가는 혜택이 커졌다. 이웃 국가에서 요르단으로 의료 관광도 오고 있다.

**K-연구용 원자로,
세계적인 위상을
떨치기까지...**

요르단에 처음으로 연구용 원자로 수출을 성사시킨 뒤에도 남아프리카공화국, 태국, 사우디아라비아, 케냐 등 5년 안에 연구용 원자로 건설이 예상되는 국가의 동향을 파악했고, 일부 국가들과는 실질적인 협력을 유지하고 있다. 터키, 베트남, 우즈베키스탄, 아랍에미리트(UAE) 등도 중장기적으로 연구용 원자로가 필요할 것으로 보고 있다. 2014년 원자력연은 컨소시엄을 구성해 네덜란드 델프트공대가 발주한 '델프트공대 연구용 원자로 출력증강 및 냉중성자 설비 구축사업(OYSTER 프로젝트)'을 수주하면서 소기의 성과도 달성했다. 델프트공대는 운영 중인 연구용 원자로의 열출력을 2MW급에서 3MW급으로 증강하기 위해 시설개조와 냉중성자 연구설비 구축을 요청했다. 2021년에는 원자력연이 방글라데시 원자력위원회가 발주한 연구용 원자로 'BRTT'의 계측제어 계통(원자로 운전감시·제어 설비) 개조사업을 수주하는 데도 성공했다. 방글라데시는 1986년부터 가동해온 BRTT의 계측제어계통을 디지털 기술로 개발해 교체해달라고 요청했고, 원자력연은 설계, 제작, 설치, 시운전에서 교육 훈련까지 턴키 방식(일괄수주계약)으로 제공하기로 했다.

국제원자력기구(IAEA)에 따르면 2021년 기준 전 세계에서 운영 중인 연구용 원자로 220기다. 11기가 건설 중이며, 14기는 신규로 들어설 예정이다. 이미 퇴역했거나(446기), 영구 종료(58기), 해체 중(65기) 등 그간 전 세계에서 건설됐거나 건설 중 또는 건설 예정인 연구용 원자로를 모두 합하면 842기에 이르기엔 앞으로의 시장이 밝다. 또 원자력 프로그램을 시작하려는 개발도상국이나 저개발 국가들은 상용 원전의 전 단계로 연구용 원자로 프로그램을 추진하는 경우가 일반적인 만큼 이들 국가에서 연구용 원자로 수요도 계속될 것이다. 2009년 요르단 연구용 원자로 수출을 기점으로 발휘된 과학외교능력과 그간에 축적된 기술력이 있다면 우리나라 연구용 원자로가 세계로 더 뻗어나갈 수 있을 것으로 기대한다!

09

암세포만 표적 진단·치료하는 항암치료가 가능해진다구요?

새로운 발광센서 물질 개발

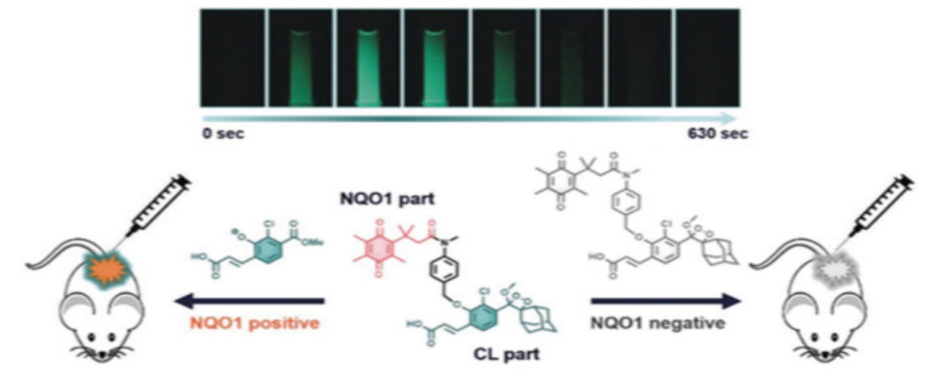
소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 고려대학교	 김종승 교수	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 김종승 • (주요 공동 연구자) 김현정, 이민희, 정효성, 이연옥, 이재홍, 배창완, 박준원, 이수민
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 새로운 발광센서 물질 개발(2010) • 표적 암치료용 약물전달시스템 개발(2015) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 화학 센서를 개발했던 기술을 바탕으로 암세포의 특이적 특성을 활용해 실시간으로 진단하면서 동시에 암세포를 표적 삼아 사멸시키는 치료를 하는 '테라노스틱' 발판 마련 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 암을 실시간으로 진단하면서 동시에 암세포를 표적 삼아 사멸시키는 치료를 하는 분야 	
성과확산 경로	<input type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input checked="" type="checkbox"/> 연구자 창업 <input type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 발광센서 물질 연구(~10년 중반), 우수성과100선 수상('10)-저분자 유기화합물 이용 약물전달시스템 원천기술확보('13)-세계에서 가장 영향력 높은 연구자 선정('14)-우수성과100선 수상('15)-차세대 분자테라노시스 연구('18~) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 세계 최초로 '저분자를 이용한 표적 지향형 항암제'에 대한 패러다임을 제시함으로써 전 세계 약물전달시스템 분야의 연구자들에게 선구자 역할 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 피인용 기준 세계 1% 수준의 우수과학자로 과학적 영향력이 높음, 국제학술지 연구논문 다수 • 경제적 전 세계 제약사에서 관련 연구가 활발하며, 약물전달시스템 활용한 신약개발로 인한 경제적 파급효과 기대 • 사회·문화적 암을 진단함과 동시에 치료함으로써 부작용과 후유증을 크게 완화하는 치료 전망, 알츠하이머성 치매 등 난치성 만성질환에도 후유증 적은 치료가 가능해질 것으로 예상 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 유기합성을 전공해 화학센서를 개발해왔던 연구자가 바이오의약 분야에 뛰어들어 끊임없이 노력, 국내외 다른 분야 연구자들과 협업 등 ※ 리더연구자지원사업(창의연구) 등 지속적인 정부 연구비 지원, 공동연구 등 • 장애 아직까지는 부족한 국내 연구 인력 pool로 인해 다양한 해외 그룹과 협업 필요 	

과거 발광 센서 연구 성과 바탕으로 바이오의약 분야 도전

현재 쓰이는 항암제는 암세포만 공격하는 것이 아니라 건강한 세포까지 공격해 부작용을 일으킨다. 30년 넘게 화학자로 살아왔던 김종승 교수(고려대 화학과)는 항암제가 기존 암세포뿐 아니라 건강한 세포까지 공격해 독성을 일으키는 탓에 환자들이 심각한 부작용에 시달린다는 사실을 알고 나서 바이오의약분야에 뛰어들게 되었다. 부작용이 적고 조기에 진단과 치료를 할 수 있는 항암제를 개발하겠다는 목표도 세웠다

그는 본디 유기합성을 전공해 화학 센서들을 개발해왔다. 2010년 우수성과로 선정돼 수상한 연구만 봐도 '새로운 발광센서 물질을 개발한 성과'다. 당시 그의 연구팀은 신규 유기분자전기소자로 화학 발광 센서를 개발해 유기발광다이오드(OLED) 물질이 차세대 광전유기소자로 사용될 수 있다는 가능성을 보였다. 그랬던 그가 2015년에는 '암세포에만 선택적으로 작용하는 새로운 표적 약물 전달 체계를 개발한 성과'로 국가연구개발 우수성과 100선에 두 번째로 선정됐다. 그의 연구팀은 지금도 이 기술을 바탕으로 항암 표적 약물 개발에 매진하고 있다.

김 교수는 그는 "우수성과로 선정된 두 연구 성과가 전혀 다른 분야인 듯이 보이지만 사실은 이전까지 해왔던 성과들을 바탕으로 새로운 바이오생화학 분야의 성과를 만들어낸 것"이라며 "지금까지 연구해왔던 유기합성 원천기술을 바이오의약 응용 분야에 접목한다면 건강한 세포는 피하고 암세포에만 작용하는 표적 약물을 개발할 수 있겠다고 생각했다"고 말했다.



김종승 교수팀이 개발한 암 진단 화학발광 바이오마커. 과발현된 유전자(NQO1)를 선별한다
 * 출처: 앙케반테 케미

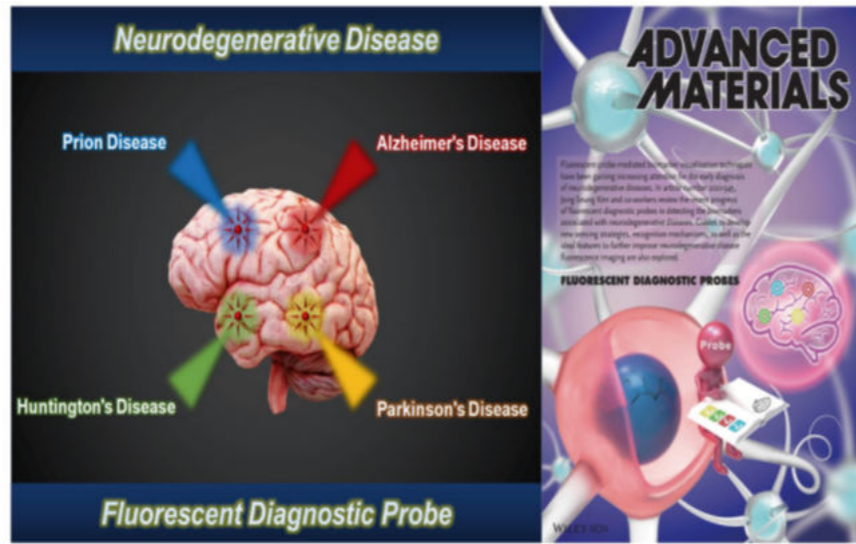
저분자 유기화합물로 암 진단 동시에 치료까지

2010년대 초중반 당시 국내외 연구자들은 나노 바이오 기술을 활용해 표적 약물을 개발하는 연구를 조금씩 시도하기 시작했다. 수 많은 바이오, 의약화학 연구자들은 국내외를 막론하고 고령화로 인해 암 발생률이 증가하면서 치료방법과 암 전이를 막는 방법에 대해 관심을 가졌다. 1세대 항암제로 불리는 화학 항암제의 부작용이 극심해 차세대 항암제들을 차례대로 발표했지만 부작용 문제는 여전히 해결하지 못했다.

김 교수는 "우리 연구팀이 가진 원천기술을 접목하면 기존 항암제를 암세포에만 선택적으로 작용하게 해 부작용을 줄이는 방법을 찾을 수 있겠다고 봤다"고 말했다. 김 교수는 지금까지 해왔던 화학 센서 기술을 바탕으로 정상 세포와 암세포가 존재하는 세포 환경의 특징을 이용해 약물의 표적을 정하고 치료와 진단을 동시에 하는 '테라노스틱'의 발판을 마련했다. 그 때 당시, '저분자 유기화합물'을 이용한 표적 약물을 개발하는 연구팀은 전무했다.

'테라노스틱' 연구에 있어 김 교수팀은 세계적인 선두그룹이 되었다. 김 교수의 연구는 2013년 8월 '미국화학회지(JACS)'에 표지논문으로 실리며 체내에서 약물을 암세포까지 정확하게 전달하는 효과를 극대화해 환자에게 고통을 주지 않는 환자 친화적 치료법의 토대가 될 것으로 평가받았다. 이외에도 '어드밴스드

머티리얼스', '앙케반테 케미', '케미컬 리뷰' 같은 화학분야 국제학술지에 소개됐다. 이를 바탕으로 다른 국내외 연구자들도 관심 갖고 비슷한 연구를 시작하게 됐고 지금은 협업 연구를 활발하게 진행하고 있다.



〈김 교수팀이 개발한 유기 저분자 기반 약물전달시스템은 항암치료 외에도 알츠하이머성 치매, 파킨슨병 등 다양한 난치성 질환을 치료하는 데에도 활용될 전망이다〉 * 출처 : 연구자 제공

연구 초반에는 암세포가 있는 미세환경에서 일부 효소와 단백질, 세포막 수용체 등이 과발현돼 있다는 사실에 주목해 이런 특성을 진단하는 화학 센서를 주로 연구했다. 이런 원천기술에 광 치료법을 적용해, 특정 파장대의 빛에만 반응해 발생하는 활성산소종(Reactive oxygen species, ROS)으로 암세포를 사멸시키는 약물도 개발하고 있다. 암 치료뿐 아니라 암이 재발하는 원인을 밝혀내는 암 줄기세포 연구, 또 다른 난치성 질병인 알츠하이머성 치매, 노화 세포에 대한 연구도 활발하게 하고 있다. 현재 국내외 수많은 연구자들이 나노기술로 약물전달시스템을 연구 개발하고 있는데, 김 교수팀은 나노기술과 유기저분자를 접목해 각 기술의 단점을 장점으로 극복할 수 있는 기술융합연구도 진행 중이다.

김 교수가 연구자로서 늘 안정적인 생활만 했던 것은 아니었다. 특히나 그는 30년 이상 유기화학 분야에만 전념하며 연구를 진행해 왔기 때문에 바이오의약 분야에 뛰어들어 초반에는 여러 난관에 봉착했다. 김 교수는 “머릿속에 생물학 이론들이 쉽게 그려지지 않았고, 다양한 환경에서 생물체가 굉장히 긴밀하면서도 복잡하다는 것을 새삼 실감했었다”며 “다학제간 연구가 얼마나 중요한지, 각 학문과의 소통이 얼마나 중요한지 깨닫게 하는 시간이었다”고 회상했다. 김 교수 본인이 전공하지 않은 생물학을 이해해야만 신약 개발이 가능했기 때문이다. 그는 생물학을 단순 이해하는 수준에만 그치지 않았다. 생명과학 각 분야의 최고 연사를 초청해 관련 세미나를 매달 최소 1회씩 진행하고, 연구실 자체적으로도 매주 생물학 관련 연구논문 토론회를 해왔다. 그 결과 현재 연구팀 내의 모든 연구원과 학위과정생들이 생물학 전공자 못지않게 다양한 생물학적 지식을 갖게 됐고, 그 하나의 목표를 가진 열정과 열망이 원동력이 되어 연구성과를 내고 있다. 그는 “연구 초반에는 생물학과 의약학 연구자들과 소통이 어려워 서로 다른 방향으로 연구가 이어진 적도 있었지만 끊임없는 토론을 통해 각 분야를 서로 이해하고 받아들이면서 함께 달려왔다”고 말했다. 지금도 김 교수와 동료 연구자들은 서로 많은 도움을 주고 받으며 연구 성과를 내고 있다.

국제공동연구도 연구의 질을 높이게 한 비결이었다. 국내 연구실에서만 좁은 시야로 보면 연구의 질이 다소

**우수성과 비결은
다른 분야
연구자와의 협업**

편향적이거나 주관적일 수 있어 해외 우수 연구그룹과의 교류가 필요하다고 생각했다. 김 교수는 “한계를 극복하기 위해 미국과 중국, 영국, 이스라엘 등 해외 최고위 연구자 그룹과 활발하게 공동 연구를 해왔다”며 “그 결과 이 분야에서 세계가 객관적으로 인정하는 성과를 냈다”고 말했다

**정부 지원으로
우수 인재 모아...
독보적인 기술
확보**

김 교수는 훌륭한 연구를 하기 위해 필요한 3요소로 '연구인력'과 '연구비', '연구공간'을 꼽았다. 이 중에 하나라도 문제가 생기면 연구를 지속할 수 없거나 연구의 질이 떨어지기 때문이다.

김 교수팀에서도 이런 한계에 대해 고민하던 시절이 있었다. 다행히 2009년 발광센서재료연구단을 시작으로 현재 차세대분자테라노시스연구단인 리더연구자지원사업을 수행하며 신규 약물 전달 시스템을 지속적으로 개발하고 발전시킬 수 있었다. 그가 연구비를 지속적으로 지원받는 덕분에 실력 있는 연구원과 대학원생을 모집할 수 있었고 학교 본부에서도 공간을 지원받아 연구의 폭을 넓혀가기 시작했다. 김 교수는 “혁신적인 연구 성과를 내기 위해서는 이처럼 우수 연구자들을 위한 연구 제반이 마련돼야 한다”며 “연구공간을 확보하고 최신기자재를 도입하는 등 정부에서 연구지원과 투자유치가 연구자를 위한 시각에서 적극적으로 이뤄진다면 국가지원을 통한 우수한 연구 성과들이 쏟아져 나올 것”이라고 하였다.

여러 가지 연구의 어려움을 극복하고 캄캄한 문이 하나씩 열리면서 연구 성과가 밝은 햇살처럼 들어오기 시작했다. 그의 원천기술과 아이디어는 현재까지도 국제 저명한 학술지에 매년 최소 20편 이상의 연구논문으로 소개되고 있으며, 이러한 연구를 통해 2014년부터 화학 분야에서 '세계에서 가장 영향력 있는 연구자 (1% Highly Cited Researchers, 클래리베이트 분석)'에 7년 연속 선정됐다. 연구논문 인용 횟수도 4만1000회에 이르러 H-지수(H-index) 104를 기록하고 있다. 특히 김 교수의 연구 성과가 우수성으로 선정된 당시에는, 저분자를 이용한 표적 지향형 항암제가 전무했기 때문에 국내를 비롯한 전 세계의 약물전달시스템 분야의 연구자들에게 새로운 패러다임을 제시하는 선구자의 역할을 했다고 한다. 그는 “우수성으로 선정된 당시만 해도 이런 연구를 하는 연구자가 다른 곳은 전혀 없었기 때문에 이렇게 지금까지 전 세계 연구자들이 깊이 있게 연구할 만큼 발전할 것으로 상상하지 못했다”고 소감을 전했다.

**부작용 크게 줄인
표적 약물로
저비용, 고효율
실현**

약물전달시스템 분야는 전 세계의 수많은 연구팀들이 다양한 약물과 재료를 활용해 질병 표적 진단과 치료까지 가능한 방법을 활발히 연구하고 있다. 인류가 고령화하면서 의료 소비가 급증하고 의료기술이 점차 약물 치료 중심으로 발달하면서 전 세계 약물전달시스템 시장도 해마다 빠르게 성장하고 있다. 향후 약물전달시스템 기술은 만성질환을 치료하는 데까지 발달할 것으로 보인다. 현재는 비슷한 기술을 존슨앤드존슨, 노바티스, 로슈 등에서도 연구개발하고 있다.

김 교수 역시 연구 성과를 내는 데에만 그치지 않고 상업화하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 현재 많은 숙제를 풀었고, 제약산업을 통해 신규 항암제를 상용화하는 사업도 추진 중이다. 국제 표적 약물 시장에서 기술적 우위를 선점해 기술 가치와 약물 개발의 경쟁력을 확보하는 것이 김 교수의 목표이다. 성과가 실현된다면 국내 항암제 내수화가 가능해지고 국가 의료시스템과 환자 모두에게 재정적 부담을 줄일 수 있다. 또한 국내외의 수많은 암 환자와 난치성 질환자들에게 부작용과 후유증을 크게 완화시킬 수 있다.

그는 “연구의 가설을 세우고 하나씩 찾아가 하는 인내와 도전 정신이 있다면, 또 다양한 시각에서 개방된 연구적 마음가짐을 가지고 목표를 향해서 꾸준히 달려나갈 수 있는 열정이 있다면, 극복 불가능한 과제는 없다”고 말했다. 그의 좌우명인 ‘시련은 있어도 실패는 없다’처럼 어려움을 극복하고 매일 새로운 도전을 한다면 극복할 수 있다는 생각이다. 그는 “그러면 언젠가는 연구자들이 한마음으로 소원하는 한국인 노벨상 수상자가 등장할 것”이라고 소망했다.

10

전기공학·물리학·생물학 경계 넘은 막단백질 연구자

단소포체 이미지를 통한 신경세포 통신 분자제어 메커니즘 규명

소속기관	우수성과 수상 연구자	주요 공동연구진
 서울대학교	 윤태영 교수	<ul style="list-style-type: none"> • (인터뷰 참여 연구자) 윤태영 • (주요 공동 연구자) 권대혁 신연균 이태선 이한기 이흥원
우수성과 선정정보	<ul style="list-style-type: none"> • 단소포체 이미지를 통한 신경세포 통신 분자제어 메커니즘 규명(2011) • 인간 막 단백질 접힘의 직접관찰을 통한 접힘 경로 규명(2020) 	
성과소개	<ul style="list-style-type: none"> • 반도체처럼 분자층 얇게 쌓는 기술로 막단백질 구조 규명 • 자기 집게 기술을 고도화해 막단백질 구조 관찰 기술 첫 개발 	
활용처	<ul style="list-style-type: none"> • 여러 질환 및 유전병과 막단백질의 접힘의 뚜렷한 상관관계를 밝히므로 질환의 근본적 원인 확인 가능 (유전병 치료제 및 진단기술에 활용) 	
성과확산 경로	<input type="checkbox"/> 기업 기술이전 <input checked="" type="checkbox"/> 연구자 창업 <input checked="" type="checkbox"/> 연구인력의 이동으로 인한 기술·지식의 전파·확산(후학양성 등) <input checked="" type="checkbox"/> 연구결과의 피인용으로 인한 기술·지식의 전파·확산	
연구 및 성과확산 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 전기공학박사학위('00년 초반)-생체막 단백질의 신경전달물질 분출 조절기능 연구발표('10), 우수성과100선('11)-프로티나 설립('15)-막단백질의 4차원 구조 관찰 기술 첫 개발('19)-우수성과 100선 수상('20) 	
기술수준	<ul style="list-style-type: none"> • 세계적으로 활발한 막단백질 연구 분야에서 독보적인 기술 • 자기 집게 기술 이용한 막단백질 연구로써는 세계적 독보적인 전문성 	
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 과학·기술적 막 단백질 접힘에 대한 법칙 규명, 단백질간 상호작용을 정량적으로 분석하는 도구 제공 전망 • 경제적 PPI 진단 시장 개척 및 새로운 개념의 분자진단시장 개척, 환자 개인 맞춤형진단 기술로 발전시키기 위해 벤처기업 '프로티나' 설립 • 사회·문화적 막단백질 연구로 추후 암이나 당뇨병 등 비정상 단백질 표적 신약 물질 개발 이 가능하며 이에 따른 국민 삶의 질 증진 	
성공/장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 성공 액정 디스플레이를 전공했던 공학자가 바이오 분야에 도전한 열정과 기업과 정진 • 장애 실험 데이터 획득 성공 확률이 아직 낮음 	

디스플레이 공학자, 막단백질 연구자로 거듭나다

“원래 액정디스플레이에 대해 연구했던 공학박사다. 하지만 좀 더 기초과학적인 원천기술을 개발하고 싶다는 생각에 바이오머티리얼 분야에 도전하게 됐다. 그리고 생체 물질 중에서 액정디스플레이와 가장 닮은 막단백질 연구자가 됐다.”

윤태영 교수(서울대 생명과학부 교수)에게 막단백질을 연구하게 된 계기를 묻자 이처럼 대답했다. 윤 교수는 이력이 특별하다. 생명과학부 교수지만 2000년대 초반 서울대에서 전기공학으로 박사학위를 받았다. 당시 액정디스플레이, 광시야각 기술에 대해 연구했다. 윤 교수는 “연구하면서 알게 된 것이지만 바이오머티리얼이 굉장히 액정과 비슷한 특성을 많이 갖고 있다”며 “액정이 온도에 의해 상이 바뀌는 것처럼 막단백질은 농도 기준으로 상태가 많이 달라진다”고 설명했다.

윤 교수는 미국 존스홉킨스대 하택집 교수 연구실에서 박사후연구원을 하면서 생물물리학 연구를 시작했다. 하 교수는 단분자신호를 측정하는 연구 분야에서 세계 최고다. 윤 교수는 “나만의 영역을 개척해보자는 생각에서 생체막, 막단백질에 대해 연구하기 시작했다”며 “또한 새로운 연구를 해보고 싶어서 자기 집게 기술을 익혔는데 이를 활용해 막단백질의 구조를 자세히 밝힐 수 있는 독보적인 기술도 갖게 됐다”고 말했다. 그만의 도전정신이 세계적으로 독보적인 막단백질 관찰 기술과 전문성을 갖게 한 비결인 셈이다.

그는 국가연구개발 우수성과 100선에 두 차례 선정되었다. 첫 번째 연구성과를 냈던 2011년 당시에는 한국과학기술원(KAIST) 소속이었다. 당시에는 전기공학과도 생명공학부도 아닌, 물리학과에 있었다. 윤 교수팀은 생화학과 생물물리 분야, 구체적으로 설명하면 ‘단백질과 분자들의 신호를 내는 연구’를 진행하고 있었다.

반도체처럼 분자층 얇게 쌓아 막단백질 비밀 풀어

약 20년 전만 해도 학계에서는 단일 분자가 내는 신호만 잡아서 연구하는 기법이 발달했었다. 하지만 윤 교수팀은 신경세포에서 정보전달이 일어나는 현상에 대해 주목했다. 포스텍과 성균관대, 고등과학원과 공동연구로 생체막 단백질인 ‘시냅토타그민1’(synaptotagmin1)이 신경세포에서 신경전달물질의 분출을 조절하는 기능을 한다는 사실을 밝혀내 연구 결과를 2010년 5월 국제학술지 ‘사이언스’에 실었다.

그가 이런 연구 성과를 낼 수 있었던 비결은 신경세포를 두르고 있는 생체막에 집중했기 때문이다. 생체막은 신경세포 같은 세포뿐 아니라 미토콘드리아, 골지체, 소포체 등 세포 소기관을 두르고 있다. 인지질분자로 이뤄져 있으며, 세포 안팎의 물질을 수송하거나 신호를 전달하는 역할을 하는 단백질이 박혀있다. 사람 몸에 있는 단백질 10만 여 가지 중 30%가 여기에 존재한다. 또한 암이나 당뇨병, 비만 등 각종 질환과 관련돼 있어 신약 개발 표적 단백질의 70%에 해당하기도 한다.

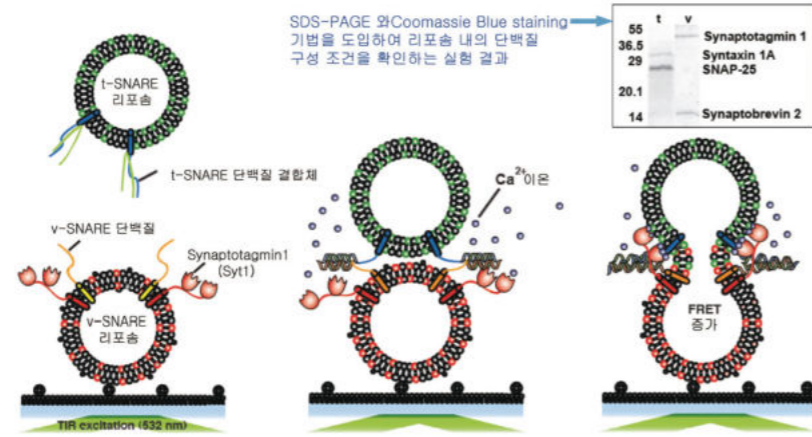
신경세포에 있는 소포체 안에는 신경전달물질이 들어있다. 이것이 신경세포에서 나가 다른 신경세포로 들어가면서 신경세포 간 통신이 일어난다. 중추신경계에서는 이런 현상이 1000분의 1초 안에 발생한다. 신경세포막에 있는 단백질 중 스네어(snare)와 시냅토타그민1은 이 신경전달물질 분출을 조절하는 것으로 알려져 있다.

스네어 단백질의 경우에는 많이 연구가 돼 약물 개발 실용 단계에 이르렀다. 스네어 단백질의 중간을 끊으면 전체 신경계가 제어되기 때문이다. 뱀독 등에서 추출한 보톡스로 스네어 단백질의 중간을 끊어 주름살을 없애는 방법으로 쓰인다.

하지만 시냅토타그민1이 어떤 역할을 하는지에 대해서는 이전까지 알려진 바가 없었다. 칼슘이온과 관련있다는 것만 밝혀져 있었다. 대개 칼슘이온이 많이 유입되면 신경전달물질이 많이 분출돼야 하는데, 시냅토타그민1의 경우에는 그 반대로 작용해 10여 년간 학계에서 미스터리로 남아 있었다.

윤 교수팀은 ‘단소포체 형광 기법’이라는 기술을 개발해 시냅토타그민1이 어떤 작용을 하는지 구체적으로 관찰할 수 있었다. 이 기법은 반도체를 만들 때처럼 기판(웨이퍼) 위에 분자층을 쌓아 지름 50나노미터(1나노미터는 10억분의 1미터)의 소포체(풍선)를 만들고, 여기에 단백질을 넣어 그 기능을 측정하는 방식이다. 연구팀은 이 기법으로 1만개 이상의 단소포체 데이터를 5분 안에 분석해냈다.

그 결과 신경세포가 세포막에 풍선 모양의 고리를 만들어 이 안에 신경전달물질을 담고 있다가, 칼슘이온이 들어오면 옆의 신경세포와 붙어 세포막이 합쳐지면서 풍선 안에 있던 신경전달물질을 옆 신경세포로 전달한다는 사실을 알아냈다. 또한 칼슘이온 농도가 적절한 수준일 때는 신경전달물질이 많이 분출되지만 일정 수준을 넘어가면 오히려 감소한다는 사실을 알아냈다. 여기서 시냅토타그민1은 신경세포 통신의 강약을 제어하는 스위치 역할을 하고 있었다.

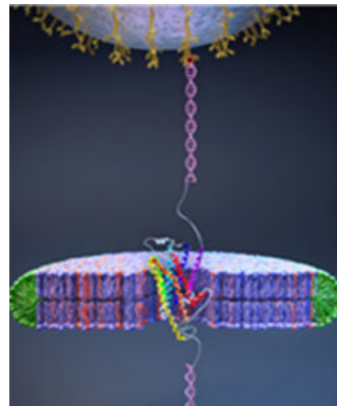


〈시냅토타그민-1 단백질이 생체막 결합 동역학에 미치는 역할을 확인하는 단세포 FRET 실험 모식도〉
* 출처: 연구자 제공

윤 교수팀이 2020년 국가연구개발 우수성과 100선에 선정된 두 번째 연구 성과는 프랑스 과학자들이 만든 '자기 집게(magnetic tweezer)' 기술을 고도화해 막단백질의 구조를 풀어낸 것이다. 자기 집게는 자석을 움직여 자력을 조절하는 방식으로 집게처럼 물질을 잡았다 놓았다 할 수 있는 기술이다. 막단백질은 현재 개발 중인 신약 대부분이 표적으로 삼고 있을 만큼 중요하지만, 어떻게 접혀 있는지 3차원 구조를 밝혀내기는 쉽지 않다. 막단백질은 세포 안에서 만들어진다. 다른 단백질과 마찬가지로 DNA에 담긴 유전정보에 따라 아미노산들이 순서대로 합쳐지면서 만들어진다. 이후 고유한 모양이 나오도록 잘 접혀야 한다. 단백질은 독특한 모양을 가지면서 고유의 기능을 얻게 된다.

문제는 어떤 형태로 접히는지 알기 힘들다는 것이다. 이것을 알아내는 방법을 최초로 알아낸 것이 윤 교수팀이다. 기존에 이미 나와 있던 자기 집게 기술을 응용해서다. 광학현미경에 샘플인 막단백질을 놓는다. 막단백질의 양 끝에는 DNA가 붙어 있는데, 자기 집게를 가까이 대면 접혀 있던 단백질을 펼 수 있다. 이 기술은 이미 2015년에 국제학술지 '네이처 케미컬 바이올로지'에 발표했다. 연구팀은 이후 자력을 약하게 해 다시 원래대로 접히게 하는 실험에도 성공했다. 자기 집게를 이용해 단백질을 접었다가 펼쳤다가 하면서 어떻게 접혀 있는 것인지 관찰할 수 있다.

윤 교수팀은 인간 혀의 미뢰에서 후각과 미각을 감지하는 막단백질인 GPCR(G protein-coupled receptor)을 연구했다. 자기 집게로 잡아당겨 폼다가 다시 놓아 접히게 하면서 구조를 관찰했다. 길이가 50nm 이하인 작은 단백질의 입체 구조를 명확하게 밝혀낸 비결이다. 이 연구 성과는 2019년 국제학술지 '사이언스'에 실렸다. 자기 집게 기술



〈자기집게를 이용한 막단백질 접힘 연구 모식도〉
* 출처: 연구자 제공

**자기 집게
기술 고도화해
막단백질 구조
관찰 기술 첫
개발**

**과거 연구를 10년
동안 꾸준히
지속... 또 다른
성과 얻어**

이용한 막단백질 연구로써는 윤 교수팀이 세계적으로 독보적인 전문성을 가졌다는 점을 다시 한번 알린 것이다.

윤 교수는 2010년에 냈던 소포체가 합쳐지는 연구를 지금까지 계속 발전시켰다. 그 결과 연구를 과거 소포체가 합쳐지는 걸 보는 수준에서 단백질 간 상호작용을 연구하는 수준까지 끌어올렸다. 예를 들면 암세포가 생길 경우 체내에서 스스로 암세포를 없애야 하는데 막단백질이 과활성화하는 탓에 이 기능을 제대로 못해 암이 됐을 경우다. 이때 과활성화한 막단백질을 찾아 활성정도를 낮춰주면 암세포 분열을 막고 치료할 수 있다. 물론 해결해야 할 문제도 남아 있다. 윤 교수는 “단백질 간 상호작용을 측정하려면 잘 훈련된 연구자들이 하루 5개씩 수작업을 해야 한다”며 “작업도 오래 걸리고 서로 간에 정량적인 비교가 힘들다”고 말했다.

그는 “우리는 빠른 속도로 누구나 정량적으로 측정해 비교할 수 있는 기술을 개발했다”며 “언제 어디서 누가 하든 정량적인 값이 나오게 할 수 있다면 단백질 간 상호작용에 대한 빅데이터를 구축할 수 있게 된다”고 설명했다. 윤 교수팀은 이 빅데이터를 구축해 단백질 간 상호작용이 어떻게 일어날지 예측할 수 있는 모델을 만들 계획이다. 연구팀의 연구 성과를 환자의 개인맞춤형 진단 기술까지 발전시키기 위해 벤처기업 ‘프로티나’를 만들었다. 공동 연구도 꾸준히 하고 있다. 윤 교수팀이 개발한 단백질 간 상호작용을 정량적으로 분석하는 도구가 세계적으로 가장 뛰어난 덕분에 다국적 기업 두 곳(아직 이름을 밝힐 수 없다)과 공동연구를 하고 있다. 실제 산업화까지 이어지고 있다는 뜻이다. 최근에는 상당히 좋은 기술 가치를 인정받고 벤처캐피탈의 투자를 받았다. 총 가치가 980억 정도 된다. 윤 교수는 “지금까지 급속 냉동 조직을 사용했는데, 앞으로는 병원에서 쓰이는 표준 프로토콜인 고정화된 조직을 사용하도록 기술을 개선할 계획”이라며 “고정화된 조직에서도 관찰이 가능해지면 훨씬 광범위하게 기술을 적용할 수 있을 전망”이라고 말했다.

**세계적으로 늘
뜨거운 막단백질
연구 분야에서
독보적인 기술**

막단백질 연구 자체는 매우 큰 분야다. 막단백질이 잘못 만들어지거나 아예 안 만들어지면 제 기능을 못해 유전질환이 생길 수 있다. 예를 들면 염소가 세포막을 지나가게 하는 막단백질이 기능을 못하는 낭포성 섬유증 같은 것이다. 이 병에 걸리면 가래가 많이 생겨서 폐섬유화가 진행될 위험이 있다. 미국 제약사 베르텍스가 세포 안에 들어가 이 막단백질을 만드는 약을 만들어 엄청난 매출을 올렸다. 이 때문에 생물학계, 제약업계에서는 막단백질에 대한 연구가 뜨겁다. 연구자들은 대개 저온전자현미경을 이용해 막단백질을 연구한다. 윤 교수팀처럼 자기 집게를 이용해 단백질의 최종 구조, 즉 어떻게 접혀 있는지 형태를 알아내는 연구는 세계에서 유일하다. 자기 집게 기술 자체도 보통은 DNA를 늘이거나 줄이는 연구에 많이 쓰이는데, 이것을 단백질 끝에 붙여서 단백질 구조를 연구하는 데 활용한 것도 연구팀이 유일하다.

결국 최종적인 목표도 막단백질이 어떻게 접혔는지 알아내, 잘못 만들어진 단백질을 교정하는 약물물질을 찾는 것이다. 현재 극복해야 할 숙제도 있다. 아직 실험 데이터를 얻는 성공 확률이 매우 낮다는 점이다. 윤 교수는 “현재 학생들이 수작업으로 일일이 해야 해 매우 힘들어 한다”며 “지금까지는 ‘하면 된다’ 정신으로 해왔지만 점점 더 힘들어지고 있어서, 높은 확률로 성공적인 데이터를 얻는 방법을 찾고 있다”고 말했다

**코로나백신 같은
혁신 만들려면
기초연구 지원
필요**

윤 교수는 지금까지 창의적연구진흥사업의 지원을 받아서 안정적으로 연구를 해왔다. 올해는 리더연구사업에 선정돼 6월부터 2030년 3월까지 장기적으로 연구를 할 수 있게 됐다. 윤 교수는 “우수하고 성실한 연구자가 남들이 보기도 의미있는 정확한 방향으로 연구를 하고 있다면 국가적으로 지원을 해줘야 한다”고 말했다. 그러면서 헝가리 과학자 카탈린 카리코가 40년간 mRNA 연구에 매달린 덕에 이번에 화이자와 모더나에서 코로나19 백신을 신속하게 개발할 수 있었던 것을 사례로 들었다. 그는 “과학기술, 특히 기초과학은 어떤 분야의 어떤 연구가 언제 필요할지 미리 예측하기가 어렵다”며 “각 분야에서 의미있는 연구를 하고 있는 연구자라면 확실한 지원을 해야 한다”고 강조했다.



우수성과 100선의 발자취를 따라서

인쇄 | 2021년 11월

발행 | 2021년 11월

기획 및 발행 | 과학기술정보통신부 성과평가정책과 이은영 과장, 성인제 사무관

한국과학기술기획평가원 성과확산센터 김홍영 센터장, 김남희 책임전문관리원, 김소라 선임전문관리원

제작 및 인쇄 | 주식회사 동진문화사 (02-2269-4783)

ISBN | 979-11-87680-27-7 05500

사례집에 수록된 내용 중 문의사항이 있으시면 아래로 연락해 주시기 바라며,

PDF파일은 KISTEP과 NTIS 홈페이지를 통해 다운로드가 가능합니다.

또한, e-book으로도 제작되어 교보문고, 알라딘, YES24 등에서 무상으로 제공되고 있습니다.

(30121) 세종특별자치시 가름로 194 (어진동) 과학기술정보통신부 성과평가정책국 성과평가정책과

성인제 사무관 : 044) 202-6922 <http://www.msit.go.kr>

(27740) 충청북도 음성군 맹동면 원중로 1339 한국과학기술기획평가원 평가분석본부 성과확산센터

김소라 선임전문관리원: 043-750-2531 <http://www.kistep.re.kr>

주의

1. 이 사례집은 과학기술정보통신부와 한국과학기술기획평가원에서 시행한 국가연구개발성과평가사업 및 과학기술혁신정책지원사업 보고서입니다.
2. 이 사례집 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부와 한국과학기술기획평가원에서 시행한 국가연구개발성과평가사업 및 과학기술혁신정책지원사업의 결과임을 밝혀야 합니다.

국가연구개발
우수성과 100

추적조사

*추적 대상연도: 2010~2011

우수성과 100선의
발자취를 따라서



과학기술정보통신부
Ministry of Science and ICT



한국과학기술기획평가원
Korea Institute of S&T Evaluation and Planning

ISBN 979-11-87680-27-7 05500