



Convergence Research Review

# 융합연구리뷰

의학의 혁신을 가져오다

**디지털 헬스케어**

—

물부족, 기술로 해결한다

**해수담수화**

## 목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2015 September vol.1 no.6

---

- 03 편집자주
  - 04 의학의 혁신을 가져오다  
디지털 헬스케어
  - 28 국가 R&D 사업 분석\_디지털 헬스케어
  - 36 **물부족, 기술로 해결한다**  
해수담수화
  - 56 국가 R&D 사업 분석\_해수담수화
- 

### 표지 이야기

의료분야에 디지털 기기 및 시스템 활용을 상징적으로 표현한 그림

## 융합연구정책센터 KIST

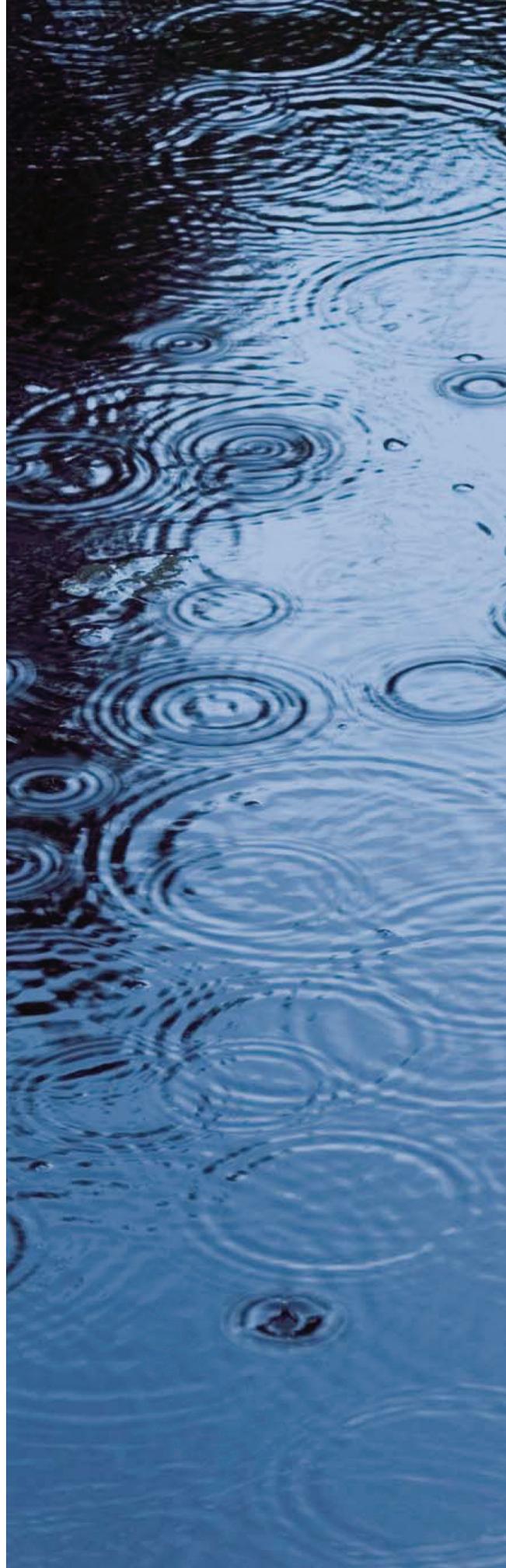
Convergence Research Policy Center

발행일 2015년 9월 7일

발행인 하성도

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터  
136-791 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5  
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

편집 (주)디자인플럼 tel. 051-202-9201



| 편집자주 |

## 의학의 혁신을 가져오다 디지털 헬스케어

20세기 말 우리는 컴퓨터와 인터넷을 통해 시작된 디지털 혁명을 맞이하였다. 그리고 21세기인 현재에도 지속적인 정보통신기술의 발달로 인해 그 혁명은 진행 중이다. 그 혁명의 소용돌이 속에 의료 분야도 안전하지 않았으며, 최근 의료분야에서의 디지털 기술을 바탕으로 한 혁명의 결과물들이 하나, 둘씩 나타나기 시작하였다. 다양한 데이터를 축적한 컴퓨터는 인공지능 기술을 더해 의료 진단 업무를 수행하기 시작하였으며, 인터넷과 스마트폰이라는 접근성이 높은 매개체들이 일상화 됨으로 인해 수집할 수 있는 의료 관련 데이터를 양이 비약적으로 증가함으로써 기존의 의료 연구분야의 패러다임 변화를 가져오고 있다. 더 나아가 기존에는 개념조차 존재하지 않았던 디지털 표현형이라는 새로운 개념의 인자가 의료 분야에 등장하며, 이를 활용한 질병 진단 가능성이 모색 중이다.

이에 이번 호의 1부에서는 정보통신기술과 의료기술의 융합을 통해 탄생되고 최근 급격하게 관심이 증대되고 있는 디지털 헬스케어에 대해 다뤄보고자 한다. 본 리뷰를 통해 디지털 헬스케어의 최신 동향과 연구 방향, 산업적 가능성 등을 예상하고, 향후 새로운 디지털 헬스케어 기술 개발 및 선도적 활용이 이루어지기를 기대해 본다.

## 물부족, 기술로 해결한다 해수담수화

2015년 6월 대한민국은 심각한 가뭄의 위기에 처했다. 소양강댐의 수위가 152.24m로 1978년 이후 역대 최저 수위에 도달하였으며, 여름 장마 기간을 포함한 강우량이 예년의 절반 수준에 불과하여 가뭄이 장기화 될 것이라는 우려 또한 커지고 있다. 이는 비단 우리나라만의 문제가 아니다. 중국 동부 곡창지대도 53년 만에 최악의 가뭄에 시달렸으며, 중앙 아프리카와 남 아프리카, 인도도 평년보다 12% 적은 강수량을 기록하였고, 동남아시아와 중남미에서도 강수량이 평년보다 감소하였다. 많은 전문가들은 지구 온난화로 인한 기후변화로 인해 가뭄과 물부족이 더 심해질 것으로 예상하고 있다. 이에 인류는 지구상 97% 이상의 물을 가지고 있으나 식용수로 활용하기 어려웠던 바닷물에 관심을 두고 이를 담수화 하는 기술 개발을 끊임없이 추진하여 왔다. 그리고 최근 기술 발전을 기반으로 서남아시아 지역을 중심으로 담수화 플랜트들이 세워져, 연구를 넘어 산업적으로 구현하는 수준까지 발달하였다.

이에 이번 호의 2부에서는 물부족 문제를 해결하기 위해 가능성을 타진하고 있는 해수담수화 기술에 대해 다뤄보고자 한다. 본 리뷰를 통해 기계, 재료, 화학, 물리 등의 다양한 분야 융합을 통해 이루어지고 있는 해수담수화 기술의 최신 동향 및 연구 내용, 방향 등을 파악하여, 향후 해수담수화 분야를 선도해 나갈 수 있는 차세대 기술 개발이 활발히 이루어지기를 기대해 본다.



# 디지털 기술은 어떻게 의학 연구를 혁신하는가

▣ 성균관대학교 휴먼CT융합학과 최윤섭 교수(shryu@kist.re.kr)



89%  
17A/2  
BPM NORM.



디지털 기술의 발전은 의료를 혁신하고 있다. 디지털 기술과 의학의 융합에 따라 의료분야는 현재 전 세계적 변혁의 시기를 지나고 있다. 이에 글로벌 IT기업들은 앞다투어 의료분야에 뛰어들고 있으며, SF영화에서나 보던 혁신적인 기술들이 의료현장에서 구현되고 활용되기 시작했다.

디지털 헬스케어 분야는 미국에서 초고속 성장 산업으로 떠올랐다. 특히 2014년은 디지털 헬스케어 분야에서 기록적인 한 해였다. 미국의 해당 스타트업 분야의 투자규모는 41억 달러로, 2011-2013년의 투자 규모의 합을 넘어섰다.(2015년 상반기까지 전년도의 추세는 여전히 이어지고 있다)[1, 2].

구글, 애플, IBM 같은 거대 IT기업들도 각종 서비스, 플랫폼, 디바이스 등을 앞다투어 내놓으며 헬스케어 분야로의 진출을 알렸다. 이렇게 시작된 헬스케어 분야의 변화들은 우리 삶을 바꿔 놓은 스마트폰 사례처럼, 우리 삶에 또 한 번 근본적인 변화를 불러일으킬 것으로 예상된다.

하지만 의료 분야에서 디지털 기술은 새로운 사업 기회만 만들어내는 것은 아니다. 디지털 기술은 기존의 임상 의학 연구를 근본적으로 바꾸어 나가고 있다. 질병 연구, 신약 개발, 임상 시험 등 전통적인 의학 연구 분야도 변혁의 바람을 맞고 있다.

특히 스마트폰, 인공 지능, 소셜 미디어, 웨어러블 디바이스의 발전은 의학 연구의 새로운 기회를 낳고 있다. 이러한 기술을 기반으로 선도적인 제약회사, 병원, 임상연구자들은 지금까지와는 전혀 다른 방식으로 임상연구의 새 장을 열어가고 있다.

디지털 기술로 지금까지 얻을 수 없었던 새로운 종류의 데이터를 얻게 됐으며, 그 양은 차원이 다르게 방대해지고 있다. 지금까지 임상 시험에 참여하지 못했던 환자들이 연구에 기여하게 되며, 그 방식과 역할은 지금까지와 매우 달라진다. 또한 이런 의학 연구에서의 변화는 해결해야 할 또 다른 이슈와 숙제를 남겨주기도 한다.

이에 이번 글에서는 디지털 기술이 신약 개발, 임상 시험 등의 의학 연구를 어떻게 혁신하고 있는지 알아보도록 하겠다.



## 의료, 인공지능의 대표적인 활용분야

인공지능에 대한 관심은 전 세계적으로 뜨겁다. 인공 지능의 구현이 더 이상 SF 속의 이야기가 아니게 된 지금, 인공지능이 앞으로 인류의 미래에 어떤 영향을 미칠지에 대한 관심이 뜨겁다. 세계적인 석학 스티븐 호킹과 ‘지구상에서 미래에 가장 먼저 도달한 남자’ 앨론 머스크 등은 인공지능의 발전이 인류의 미래를 위협할 것이라는 예측을 내어놓기도 했다[3, 4]. 또한 인공지능 때문에 미래에 사라질 직업이 무엇인지에 대한 논의도 활발하다.

영화 속 터미네이터 같은 ‘강한 인공지능(strong artificial intelligence)’이 도래하기까지는 아직 적지 않은 시간이 걸릴 것으로 보인다. 하지만 ‘약한 인공지능(weak artificial intelligence)’은 이미 여러 산업에 영향을 미치고 있다.

현재 실제 비즈니스와 연구에 적용되고 있는 인공지능의 대명사는 IBM의 왓슨(Watson)이다. 2011년 미국의 유명 퀴즈쇼 제퍼디에서 인간 챔피언 두 명을 무참히 짓밟고 우승하면서(그 중 한 명은 전설의 74연승을 기록했던, 제퍼디의 슈퍼스타 켄 제닝스였다) 전 세계의 시선을 한 번에 받았다.

이후 왓슨은 재무, 여행, 요리 등의 여러 분야에 진출했다. 그 중 가장 대표적인 활용 분야는 의료 분야이다. 왓슨은 현재 여러 병원 및 연구 기관과의 활발한 협력을 통해 암 환자 진단, 유전체 분석, 신약 후보 물질 탐색, 임상 시험 진행 등을 돕고 있다[5, 6].

제퍼디 우승 직후인 2012년 3월부터 왓슨은 뉴욕의 대형

암병원인 메모리얼 슬론 케터링 암센터(MSKCC)와의 공동 연구를 통해 폐암 환자의 진단을 시도하였고, 2013년 10월부터는 세계 최대의 암센터인 MD앤더슨 암센터에서 백혈병 환자의 진단을 시작했다. 2014년 10월에는 클리블랜드 클리닉에서 암 맞춤 치료의 구현을 위해 유전 정보를 분석하는 연구를 시작하기도 했다. IBM은 2015년 4월 왓슨의 헬스케어 관련 사업 부문을 ‘왓슨 헬스(Watson Health)’라는 독립적인 조직으로 신설함으로써 이 분야 비즈니스의 진출을 본격화하기도 했다[7].

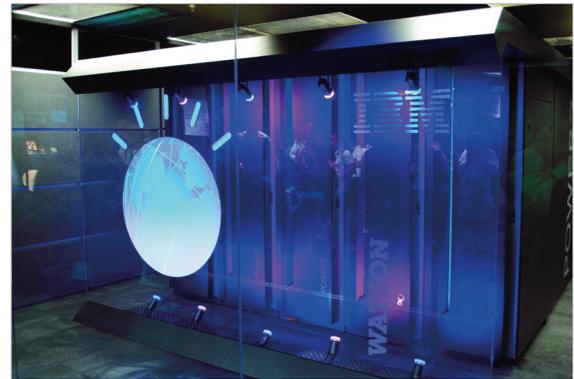


그림1. 의료에 활용되는 인공지능 컴퓨터 IBM 왓슨

## IBM 왓슨, 신약 임상 시험을 돕는다

왓슨의 의료 분야 적용에서의 특이점은 신약 임상 연구를 도와준다는 것이다. 2014년 9월, 혁신적인 의료 서비스와 새로운 기술에 개방적이기로 유명한 병원인 메이요 클리닉은 임상 시험에 왓슨을 도입하겠다고 발표했다[8]. 기존의 치료법에 효과가 없는 환자들이 등록할 수 있는 가장 적합한 임상 시험을 왓슨이 찾아주겠다는 것이다.

모든 신약은 일정한 절차의 임상 시험을 거침으로써 그



약효와 안전성, 부작용 여부, 적정 투여 용량 등을 증명한 후에 FDA 혹은 식품의약품안전처와 같은 허가 기관으로부터 승인을 받게 된다. 신약 후보 물질이 선정되면 일반적으로 동물에게 투여하여 안전성을 검증하는 전임상 시험을 거친다. 이후 임상 1상~3상까지 실제 사람에게 투여하는 연구를 거치게 된다.

이 임상 시험은 약을 개발하는 제약회사와 질병으로 고통 받는 환자들에게 모두 중요한 프로세스이다. 임상 시험은 기존의 치료법에 차도가 없는 환자들이 임상 연구에 참여하여(약효와 안전성이 완전히 검증되지는 않았지만), 새로운 치료법을 남들보다 먼저 접할 수 있는 소중한 기회가 된다.

제약사의 입장에서 신약을 성공적으로 개발하는 것은 때론 회사의 명운이 달린 문제이기도 하다. 신약 개발에는 오랜 시간과 막대한 투자가 필요하기 때문이다. 일반적으로 신약 개발의 전체 과정은 10년 이상의 시간이 걸린다. 일반적으로 10,000여 개의 후보 물질 중에 최종적으로 승인을 받고 시장에 판매되는 약은 하나에 불과하다고도 한다[9].

하지만 주어진 특정 환자에게 여러 임상 시험 중에 어떤 것이 가장 적합한지를 판별하는 것은 임상 시험에 있어 가장 어려운 부분 중의 하나이다. 임상 시험은 병기, 기존의 치료법, 유전형 등 매우 까다로운 조건을 충족시키는 환자만 참여 가능하기 때문이다. 이에 환자가 등록할 수 있는 임상 연구는 무엇이 있으며, 각 임상 시험의 요건 및 프로토콜은 어떠한지 일일이 찾아볼 수 밖에 없다.

이러한 임상 시험 요건은 보통 매우 긴 텍스트로 설명된

문서로 이루어진다. 현재 환자가 등록 가능한 요건이 되는지를 파악하기 위해서는 그 문서를 일일이 읽어보는 수 밖에 없다. 메이요 클리닉 한 병원만 하더라도 8,000개 이상의 임상 시험이 진행 중이며, 전 세계적으로 17만 건 이상의 임상 시험이 진행되고 있는 것을 고려한다면, 이 중에 최적의 임상 시험을 찾는 것은 거의 불가능에 가깝다[8]. 더구나 바쁜 의사들과 간호사들이 이런 문서를 일일이 검토하는 것도 현실적으로 어려운 일이다.

적합한 환자들과 적합한 임상 시험을 서로 매칭하기가 어렵다는 점은 여러 문제를 야기한다. 제약사의 입장에서 참여 환자의 부족이 임상 시험을 계획대로 완료하지 못하는 가장 큰 요인 중의 하나이다. 또한, 임상 시험에 등록했다면 의학적인 효용을 보았을 환자들이 결국 그러한 신약이 개발되고 있는지조차 알지 못하는 경우도 발생한다.

메이요 클리닉에서는 왓슨이 이러한 상황을 해결해줄 것으로 기대하고 있다. 왓슨의 가장 기본적인 기능 중의 하나는 자연어 처리, 즉 인간의 언어를 읽고 분석할 수 있다는 것이다. ClinicalTrial.gov와 같은 임상 연구 데이터베이스를 모두 읽고 기억한 후, 특정 환자에게 가장 적합한 임상 시험을 매칭해줄 수 있다는 것이다.

메이요 클리닉에서는 인공지능 활용이 임상 시험에 참여하는 환자의 비율을 현재 5%에서 10%까지 증가시킬 것으로 기대하고 있다. 미국 전체의 임상 시험 참여 환자 외 비율이 3%에 불과한 것을 고려하면 이 수치는 매우 높다[8]. 임상 시험에 더 많은 환자들이 등록하게 되면, 임상 시험의 진행은 더욱 개선될 수 있다. 이는 환자, 임상 연구자, 제약사 모두에게 좋은 일이다.



## 환자들의 페이스북, 임상 연구의 새로운 통로

흔히 ‘환자들의 페이스북’ 이라고도 불리는 환자들의 소셜 미디어, PatientsLikeMe도 제약 회사의 신약 임상 연구에 참여 환자 모집을 위해 활용되기도 한다. PatientsLikeMe는 루게릭병(ALS, Amyotrophic lateral sclerosis)에 걸린 형제를 위해서 2004년에 세 명의 MIT 의 엔지니어들이 ALS 환자 온라인 커뮤니티를 만들면서 시작되었다. 현재 PatientsLikeMe는 2,500개 이상의 질병에 대하여, 전세계 35만 명 이상의 환자들이 가입한 거대한 소셜 네트워크로 발전했다.

전세계 누구나 무료로 가입할 수 있는 이 개방형 서비스는 철저히 익명으로 운영된다. 회원 가입 시에 아이디 역할을 하는 이메일을 제외하면 어떤 개인정보도 넣을 필요가 없다. 대신, 자신이 앓고 있는 질병과 복용하고 있는 약 등에 대한 정보를 입력하게 된다.

마치 페이스북에 가입했을 때처럼, 환자들은 PatientsLikeMe에 가입함으로써 자신과 같은 질병, 병기 등을 기준으로 친구를 맺을 수 있으며, 그들과 교류할 수 있다. 특히 페이스북 담벼락에 일기나 자신이 좋아하는 책, 영화, 스포츠 팀을 기록하는 것처럼, PatientsLikeMe에서 환자들은 자신의 의료 일지를 작성하고 친구들에게 공개할 수 있다. 자신의 질병 증상, 진행, 복용한 약, 치료 결과 등을 공유하는 것이다.

모든 회원들이 원천적으로 익명으로 가입하고, 자발적으로 자신의 데이터를 공개하는 것이기 때문에 미국 의료

정보 보호 교정인 HIPPA(Health Insurance Portability and Accountability Act)에 저촉되지 않는다 [10].

PatientsLikeMe는 특이한 수익 모델을 가지고 있다. 바로 거대한 규모의 환자들이 모여 있다는 점, 그리고 그 환자들이 자발적으로 올리는 방대한 규모의 데이터를 이용한다. 환자들이 자발적으로 쓰는 자신들의 의료 일지, 특히 약의 효능과 부작용에 대한 데이터는 제약 회사에 귀중한 정보가 된다. 이 익명의 의료 빅데이터를 제약회사와 보험사에 판매하는 것이 이 회사의 수익 모델 중 하나이다.

다른 수익 모델은 바로 환자와 임상 시험을 연결하는 플랫폼이 되는 것이다. 세계적으로 35만명 이상의 환자가 하나의 커뮤니티에 모여 있다는 것은 제약사의 입장에서 임상 시험 참여자와 접촉할 수 있는 중요한 플랫폼이 된다. 제약 회사들은 PatientsLikeMe 플랫폼에 진행 중인 임상 시험을 공개하고, 환자들은 이 플랫폼에서 자신이 등록할 수 있는 임상 시험이 있는지를 찾게 된다[10].

현재 PatientsLikeMe에는 총 19만 건 이상의 임상 시험이 등록되어 있으며, 환자들은 여기에서 자신의 질병과 상태에 맞는 임상 시험을 찾거나 추천 받을 수 있다. 이와 같이, 환자들의 온라인 커뮤니티가 제약사들로 하여금 임상 시험을 더욱 가속화시킬 수 있는 기반이 되고 있다.

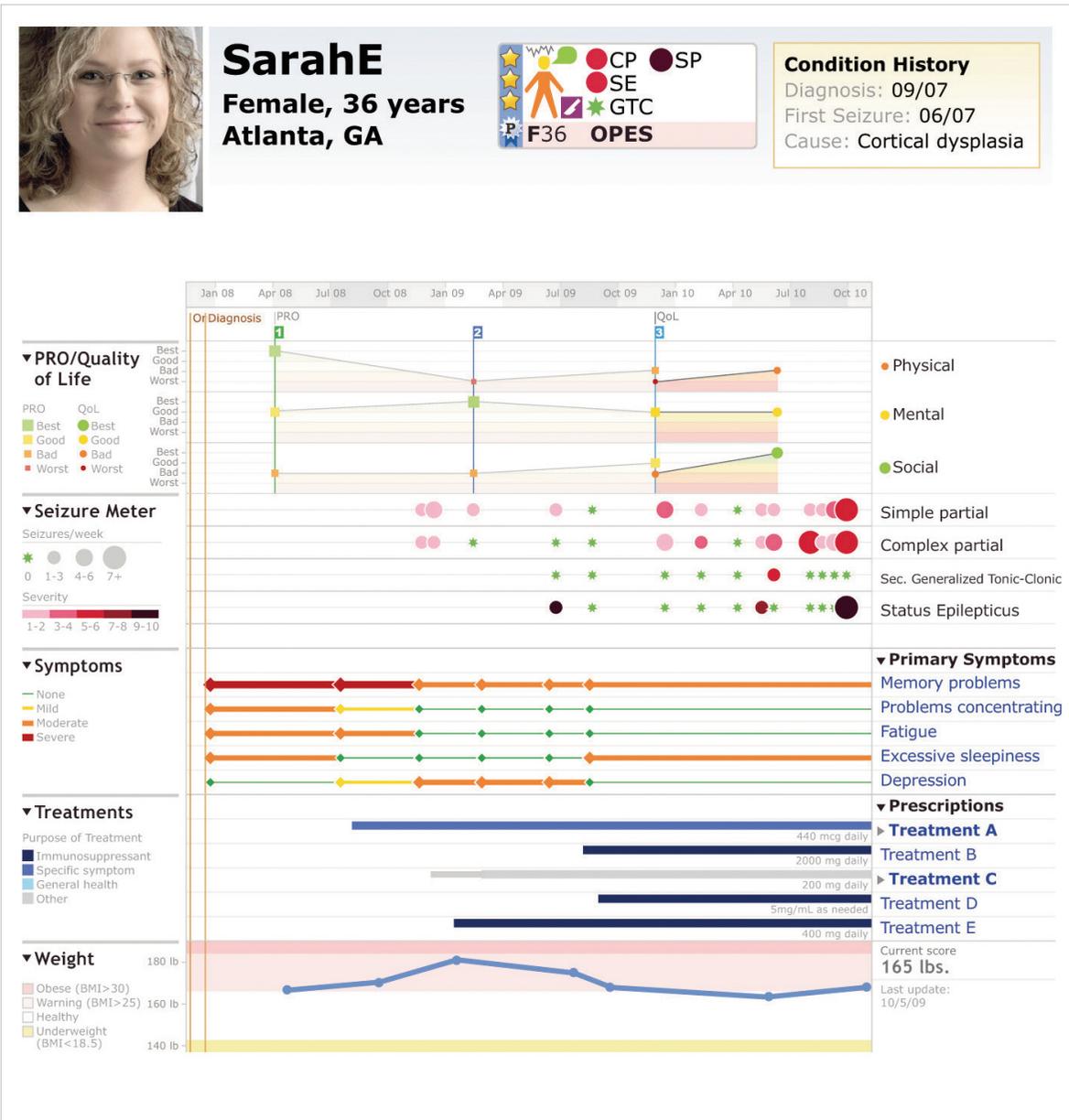


그림2. PatientsLikeMe의 환자 프로필. PatientsLikeMe에서는 환자들이 자신의 증상 변화와 약 복용 등에 대한 기록을 남길 수 있다[10]



## 임상 시험을 원격으로 한다?

앞서 살펴본 것처럼 임상 시험에 적합한 환자를 찾고 연구에 등록하게 하는 것은 제약사의 입장에서 신약 개발을 위해 필요 불가결한 프로세스이다. 임상 시험에 등록된 환자들은 정기적으로 병원을 직접 방문하여 임상 연구자들과 면담을 하고, 필요한 검사를 거치며, 일정 기간 동안 복용할 약을 받아가게 된다.

하지만 모바일 기술이 발달한 오늘날에 환자가 병원을 내원하는 번거로운 과정을 생략하고, 이 모든 과정을 원격으로 진행할 수는 없을까? 이미 미국은 국내와 달리 원격 의료가 허용되어 있어 총 여섯 번의 진료 중 한 번은 원격으로 이루어질 정도로 모바일 기술을 이용한 의료 행위가 활발하다. 이에 임상 시험에 참가하고 있는 환자 역시 원격으로 관리를 받을 수도 있다.

원격 임상 시험을 최초로 시도한 곳은 세계 최대의 제약사 화이자(Pfizer)이다. 2011년 6월 화이자 FDA로부터 가정용 전자 기기를 이용한 원격 신약 임상 시험 수행을 최초로 승인을 받았다. 이 연구의 대상이 되는 약은 과민성 방광 치료제 데트롤(Detrol)이었다[11]. 이 임상 연구에서 환자들은 병원에 방문할 필요가 없었다. 환자의 모집부터 온라인으로 이루어졌다. 약도 우편을 통해서 환자의 집으로 배송됐다. 환자들은 스마트폰 일지를 통해서 복용을 기록했다. 정기적으로 온라인으로 검사를 받으며, 혈액 검사가 필요할 경우 집 근처의 병원을 방문하면 됐다.

사실 화이자의 연구의 목적은 원격 임상 시험의 결과와

기존의 임상 시험의 동등성을 증명하는 것이었다. 데트롤은 이미 2007년에 4개월간 600명의 환자를 대상으로 위약 대비 효과가 입증된 약이었다. 이 약에 대한 원격 임상 시험이 전통적인 방식과 동등한 결과를 나타낸다면, 향후 원격 임상 시험을 더 확대하겠다는 복안이었다.

제약사가 원격으로 임상 시험을 진행하려고 하는 가장 큰 이유는 역시 비용 문제다. 신약을 개발하기 위해서는 총 10억달러에 달하는 막대한 비용이 필요하다. 그 비용 중 대부분은 임상 시험 과정에서 소요된다. 때로는 임상 시험 참여자를 모집하기 위해 10개가 넘는 병원의 연구자들이 동원된다. 즉, 환자를 더 빨리 리크루팅 하거나, 쉽게 관리할 수 있으면 그만큼 비용을 절감할 수 있는 것이다.

디지털 헬스케어 컨설팅 회사, 헬스 이노베이션 파트너스의 CEO 파울로 마차도는 모바일 기술을 활용하면 임상 시험에 소요되는 시간과 비용을 절반 가까이 줄일 수 있을 것이라고 예측하기도 했다[12].

하지만 2011년 이러한 화이자의 원격 임상 시험에 대한 첫번째 시도는 실패로 막을 내리게 된다. 임상 참가자를 충분히 확보하지 못했기 때문이다. 페이스북이나 크레이그 리스트 같은 소셜 미디어 채널을 통해서 사람들을 임상 시험 등록 웹사이트까지 끌어들이는 것에는 성공했으나, 그 중 실제로 임상 시험에 참여하기로 결정한 사람의 비율은 높지 않았던 것이다[12]. 당시 화이자의 관계자는 그 이유로 아직까지는 환자들이 온라인을 통해서 자신의 의료 정보를 보낼 정도로 원격 인프라를 신뢰하지 않는다는 점을 들었다.



## 맞춤 의료 시대의 원격 임상 시험

화이자의 실패 이후, 이번에는 또 다른 다국적 제약사 사노피(Sanofi S.A)가 원격 임상 시험을 시도하고 있다. 2015년 2월 사노피는 유럽에서 VERKKO 라고 이름 붙여진 임상 시험의 진행을 지원한다고 발표하였다 [13].

특정 약의 효과를 원격으로 검증하고자 했던 화이자의 사례와는 달리, 이번 사노피의 임상 시험은 무선 혈당 측정계를 검증하기 위한 것이다. 멘도(Mendor)라는 무선 혈당 측정계는 기존의 혈당 수치와 측정 스케줄을 바탕으로 환자들의 혈당 관리를 도와준다. 이 기기는 자체적으로 통신 기능을 가지고 있어서 클라우드에 혈당 데이터를 직접 업로드한다. 임상 연구자들은 이 데이터를 원격으로 얻게 된다.

이번 임상 역시 전적으로 원격 형태로 진행 된다. eClinicalHealth라는 회사의 플랫폼을 이용하여 환자의 모집부터, 데이터 수집, 동의서 확인 등의 모든 과정을 온라인으로 진행하게 된다. 연구자들은 원격 임상이라는 상대적으로 편리한 임상 연구 디자인을 활용하여 환자를 더 빨리 모집하고, 임상 시험 과정에서의 이탈을 막을 뿐만 아니라, 더 빨리 임상 시험 결과를 내놓을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

사실 원격 임상은 제약사에게 앞으로 더욱 중요해질 전망이다. 단순히 신약 개발을 위한 비용을 절감하고 시간을 단축시키는 정도가 아니라, 맞춤 신약 개발을 위해서 필수적인 인프라가 될 수 있기 때문이다[14].

하나의 질병을 가진 모든 환자를 위해서 약이 개발되던 과거와는 달리, 맞춤 의료 혹은 정밀 의료가 구현되고 있는 오늘날에는 특정한 유전적 표지자(genetic marker)를 가진 일부 환자를 대상으로 한 맞춤 신약이 개발되고 있다. 예를 들어, 최초의 표적 항암제 글리벡(Gleevec)은 Abl-Bcr 합성 유전자를 가지고 있는 만성 골수성 백혈병 환자를 대상으로 효능을 보이며, 얼비투스(Erbitux)와 같은 EGFR(Epidermal Growth Factor Receptor) 저해제는 KRAS 유전자에 특정 변이가 없는 환자에만 효능을 보인다.

맞춤 신약이 발전할수록 더 특수한 유전적 표지자, 더 소수의 환자들만이 가진 유전형을 표적으로 하는 신약이 개발될 것이다. 이러한 경우 우리가 알고 있는 전통적인 임상 시험 방식은 적합하지 않을 수 있다. 해당 유전형을 가지는 환자의 수가 충분하지 않다면, 환자를 모으기가 물리적으로 여의치 않을 수 있기 때문이다.

전 세계적으로 여러 국가를 통틀어야만 통계적으로 유의미한 결론을 내릴 수 있을 정도의 환자를 모을 수 있다면, 결국 지역적 제약에 상관 없이 환자들의 데이터를 모을 수 있는 원격 임상 시험의 구현은 불가피할 것이다.



## 리서치키트: 전세계 아이폰 유저를 임상 연구로

환자들로부터 원격으로 임상 연구에 필요한 데이터를 모바일 플랫폼을 통해 얻으려는 더욱 파격적인 시도도 있다. 바로 애플이 내어 놓은 리서치키트(ResearchKit) 플랫폼이다. 애플은 2015년 3월 애플 위치의 구체적인 스펙과 판매 일정을 공개하면서, 기대하지도 않았던 깜짝 발표를 했다. 바로 아이폰 기반의 의료 연구 플랫폼인 리서치키트를 소개했던 것이다. 전 세계 많은 연구자들은 애플 위치보다 오히려 이 리서치키트의 중요성을 더 높게 평가하며, 이 혁신적인 플랫폼의 잠재력에 기대를 걸었다.

리서치 키트는 아이폰에 내장되어 있는 많은 센서를 기반으로, 전 세계 아이폰 유저들이 자신의 데이터를 임상 연구자들에게 자발적으로 기부할 수 있다. 스마트폰은 단순한 전화기가 아니라, 고도의 연산 능력을 가진 모바일 컴퓨터일 뿐만 아니라, 터치 스크린, 마이크, 카메라, 가속도계, GPS, 자이로센서 등의 다양한 센서까지 내장하고 있다. 별도의 추가적인 디바이스 없이도, 이 스마트폰 내장 센서들을 이용하면 걸음 걸이, 운동 능력, 기억력, 목소리 떨림, 근육의 강도 등 각종 의학 연구에 활용될 수 있는 데이터를 객관적이고, 정량적이며, 정확하게 측정할 수 있다.

애플은 리서치키트 발표 당시 유방암, 당뇨병, 파킨슨병, 심장질환, 천식 등 총 5가지 질병에 대한 앱을 출시했다. 예를 들어 파킨슨 병에 관한 데이터 측정을 위

해서는 스마트폰 마이크에 ‘아~’ 하는 목소리를 녹음하고, 스마트폰 화면에 두 개의 손가락을 번갈아가며 20초 동안 최대한 빠르게 터치만 하면 된다. 신경 퇴행성 질환인 파킨슨병에 걸리면 근육의 떨림이나 경직이 발생하게 되며, 움직임이 느려지고, 단추 잠그기나 글씨 쓰기와 같은 세밀한 작업에 어려움을 겪게 되는데, 이러한 증상이 터치 스크린과 마이크 등 스마트폰 센서에 반영될 수 있는 것이다.

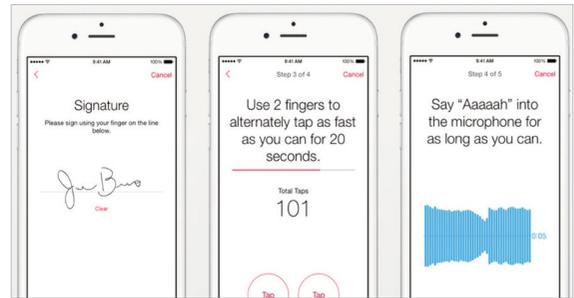


그림 3. 애플 리서치키트, 아이폰의 터치 스크린과 마이크 등의 센서를 통해서 개인 사용자의 의료데이터를 수집한다. (출처: 애플)

앞서 언급한 바 있는, 임상 연구 참여자의 확보가 어렵다는 문제 역시 리서치키트로 해결 가능하다고 애플은 밝혔다. 스마트폰의 센서를 통하여 데이터를 수집한다면 임상 연구 참여에 대한 시간적, 물리적 제약이 사라질 뿐만 아니라, 엄청난 연구 참여자 그룹을 확보할 수 있다. 전 세계 아이폰 유저 전체를 잠재적 임상 연구자 풀로 활용할 수 있으며, 직접 병원에 내원할 필요가 없이 언제 어디서든지 자신의 데이터를 측정 및 전송할 수 있다. 또한, 데이터의 측정 및



전송에 수십초 정도의 아주 짧은 시간만 할애하면 된다.

리서치키트는 발표되자마자 폭발적인 반응을 불러일으켰다. 스탠퍼드 연구자들이 출시한 심혈관계 질환 앱, 마이하트(myHeart)는 발표 하루 만에 11,000명의 참가자가 등록했다. 스탠퍼드의 해당 연구 책임자 앨런 영은 “기존의 방식으로 이 정도의 참가자를 모집하기 위해서는 미국 전역의 50개 병원에서 1년간 모집을 진행해야만 한다”고 언급했다[15].

또한 파킨슨병 관련 앱인 엠파워(mPower)는 하루 만에 5,589명의 참여자 동의를 이끌어 내었다. 연구를 진행하는 세이그(Sage)재단에 따르면 기존에 6,000만달러를 들여 5년 동안 모은 환자의 수는 단 800명 정도 밖에 되지 않았다고 한다[15]. 애플의 부사장 제프 윌리엄스에 따르면 리서치키트가 출시 된지 몇 개월 만에 75,000명 이상의 환자들이 연구 참여를 결정했다고 한다[16].

리서치키트는 학계와 의료계에서 점차 확대되고 있다. UCSF(University of California, San Francisco)에서는 2015년 6월 성소수자의 건강 및 수명에 대해 연구하는 PRIDE 연구를 수행하기 위해 리서치키트 플랫폼을 활용하겠다고 발표했다[17]. 또한 필자가 2015년 5월 개인적으로 방문했던 샌디에고의 스크립스 중개과학연구소 등 여러 연구기관들도 추가적인 리서치키트 앱의 출시를 계획하고 있었다.

제약사들도 리서치키트를 활용하기 시작했다. 특히, 다국적 제약사 글락소스미스클라인(GSK)과 퍼듀 파마(Purdue Pharma)는 임상 시험에 리서치키트를 활용할 계획이 있다고 직접적으로 언급한 바 있다. 특히 글락소스미스클라인의 경우, 임상 시험에 리서치키트를 활용하기 위한 준비를 현재 진행 중이며, 이를 환자들의 연구 참여도 증대와 데이터 수집에 활용할 계획을 밝혔다[16].

사실 아이폰을 활용하여 임상 연구 데이터를 측정하는 것에는 여러 한계가 있을 수 있다. 사용자들의 의도적으로 정확하지 않은 데이터를 보낼 수도 있고, 스마트폰 내장 센서의 정확성에도 한계가 있을 수 있다. 또한 여러 버전의 아이폰이 조금씩 상이한 성능의 센서가 내장되어 있다는 점도 지적된다. 또한, 아이폰을 쓰는 사용자로만 연구 대상이 국한되며, 안드로이드 폰을 사용하거나, 스마트폰을 보유하지 못한 사람들은 연구에서 배제될 수 밖에 없다는 한계점도 있다.

하지만, 임상 연구 참여자들의 대상을 기존의 방식과는 비교할 수 없이 폭넓게 만든다는 점, 많은 사람들의 참여를 유도함으로써 방대한 데이터를 용이하게 얻을 수 있다는 점, 그리고 이렇게 얻은 막대한 데이터 포인트는 결국 센서의 성능이나 노이즈, 오류를 통계적으로 줄여줄 수 있을 것으로도 기대해볼 수 있다.



## 환자들의 소셜 네트워크, 루게릭병 연구를 반박하다

온라인 플랫폼을 기반으로 진행되는 의학 연구를 설명하기 위해서는, 앞서 언급한 바 있는 ‘환자들의 페이스북’ PatientsLikeMe의 사례를 빼놓을 수 없다. 소셜 네트워크 형식의 공개 온라인 플랫폼에서 환자들은 자신의 질병 데이터를 익명으로 자유롭게 공유할 수 있다.

PatientsLikeMe에 가입한 환자들은 자신이 업로드 한 데이터를 바탕으로 비슷한 질병을 경험하고 있는 다른 환자와 커뮤니케이션 할 수 있을 뿐만 아니라, 환자들 스스로가 임상 연구를 주도하기도 한다. 특히 기존 방식의 느린 임상 시험 결과를 기다릴 여유가 없거나, 희귀 질환에 걸렸거나, 물리적으로 임상 연구에 참여하기 어려운 사람들의 경우에 이러한 온라인 플랫폼은 강한 영향력을 발휘하기도 한다.

소셜 네트워크를 통해 환자들이 스스로 진행한 일종의 임상 연구는 기존의 연구 결과를 뒤집기도 한다. 대표적인 사례로 PatientsLikeMe 루게릭병 환자들이 자발적으로 진행한 탄산리튬 임상 연구를 들 수 있다. 2007년 PNAS에는 소규모 임상 연구 결과, 탄산리튬(Lithium carbonate)이 루게릭 병의 진행을 늦출 수 있다는 것이 보고 되었다 [18].

이 연구 결과를 본 PatientsLikeMe의 많은 루게릭병 환자들은 직접 이 탄산리튬을 스스로 복용해보기로 결정한 것이다. 앞서 언급했듯이, 루게릭병에 걸린 자신의 형제를 위해 MIT 엔지니어들이 시작한 PatientsLikeMe에는 많은 루게릭병 환자들이 가입되어 있다. 10만명 중 1-2명에게서 발병되는 희귀한 질병임에도 불구하고,

PatientsLikeMe에는 현재 7,500 명 이상의 루게릭병 환자들이 가입되어 있다.

PatientsLikeMe는 환자들의 이러한 요구에 맞춰, 탄산리튬을 복용하는 루게릭병 환자들이 자신의 경험을 기록할 수 있는 실시간 연구 툴도 제공했다. 환자들은 이를 통해 약효, 부작용, 혈중 리튬 농도 등을 기록할 수 있었다. 이렇게 온라인을 통한 환자들의 자발적인 연구는 많은 한계점을 가지고 있으며, 기존의 임상 연구를 대체하기는 어렵다는 것은 분명하다. 하지만 이를 통해 환자들이 실제 현실 속에서 가지고 있는 약물의 효과나 경험들을 공유할 수 있는 훌륭한 플랫폼이 된다.

루게릭병 환자들이 스스로 진행한 이 연구의 결과는 놀라웠다. 12개월간 탄산리튬을 복용한 환자들의 데이터를 분석한 결과, 이 치료법이 루게릭병의 진행을 늦추는데 효과가 없다는 결론을 내린 것이다. 기존의 전통적 임상 연구 결과를 반박하는 이 새로운 형식의 연구 결과는 2011년 네이처 바이오테크놀러지에 실렸다 [19].

특히, 두 임상 시험에 참여한 환자들의 숫자에 큰 차이가 있었다. PNAS에 보고된 소규모 연구에는 총 44명의 참여 환자 중에 실험군으로 분류되어 탄산리튬을 복용한 환자는 16명에 불과했다. 루게릭병이 희귀한 질환이라는 것을 감안한다면 놀랄만한 점은 아니다.

하지만 PatientsLikeMe에서 진행한 연구의 경우, 당시 4천명 이상의 루게릭병 환자들 중 348명이 탄산리튬을 복용하였고, 그 중 일정 기준을 충족하는 149명의 환자 데이터가 최종적으로 분석 대상이었다. 온라인 플랫폼을 활용한 결과 기존 연구의 약 9배에 달하는 환자를 분석하여, 통계적으로 보다 의미 있는 결론을 내릴 수 있었던 것이다.



## 신약의 부작용 발견에도 활용되는 소셜 네트워크

뿐만 아니라, PatientsLikeMe는 신약의 부작용을 연구하기 위해서도 사용될 수 있다. 임상 1-3상을 거치며 철저하게 안전성이 검증된 약의 경우에도 출시 후에 임상 시험에 참여했던 사람들의 수보다 더 큰 규모의 환자들에게 이용될 경우, 미처 발견하지 못했던 부작용이 나타나는 경우가 있다. 임상 시험 시에 만 명에게 투여 되었을 때에는 나타나지 않던 극히 낮은 빈도의 치명적인 부작용이 시판 후 수십, 수백만 명의 환자에게 처방될 경우에는 나타날 수 있기 때문이다. 1994년 허가 받은 다국적 제약사 머크(Merck)의 블록버스터 관절염 치료제 바이옥스(Vioxx)가 심장질환 위험 증가 등의 부작용 발견으로 2004년 11월 퇴출된 것이 대표적인 사례이다. 퇴출 직전까지 바이옥스는 매달 250만명이 처방 받는 약이었다.

특히, 2007년 미국 의회는 제약사들이 약을 허가 시판한 이후에도 안전성에 대한 검증을 지속해야 한다는 법안을 통과시킴으로써, 제약사들의 입장에서는 부담이 더 커진 상황이다. 제약사들이 시판 후 시장에서의 환자들의 목소리를 듣기 위한 통로로는 PatientsLikeMe와 같은 대규모 온라인 환자 커뮤니티 만한 것이 없을 것이다. 현재 PatientsLikeMe에는 환자들이 자발적으로 자신들의 경험을 공유한 결과, 1,000여 개의 약에 대해서 110,000 개 이상의 부작용에 관한 보고들이 축적되어 있다[20].

PatientsLikeMe가 시판약의 부작용 조사 목적으로 사용된 사례로 항 우울제 렉사프로(Lexapro)의 사례를 들 수 있다. 선택적으로 세로토닌(Serotonin)의 재흡수를 저해하는 이 약은 715명의 환자군을 대상으로 한 임상 시험에서 성욕 감퇴 등의 성기능 관련 부작용은 3%의 환자에서만 보고 되었다. 하지만 시판 후 이 약을 복용한 PatientsLikeMe의 환자들 중 24%가 성기능 관련 부작용을 경험했다고 보고한 것이다[10]. 이후 추가적인 연구에 따르면 렉사프로의 성기능 관련 부작용은 기존 임상 연구 결과보다 PatientsLikeMe 환자들의 보고와 더욱 일치하는 것으로 나타났다. 119명의 우울증 환자를 대상으로 성기능 관련 부작용을 연구한 경우, 41%에 달하는 환자들에서 문제가 나타난 것이다[21]. 이 연구에 따르면 제약사의 기존 렉사프로의 임상 시험에서는 부작용에 대해 환자들에게 ‘열린 질문’을 던졌기 때문에, 제약회사가 성기능 관련한 부작용을 제대로 포착할 수 없었다고 지적하고 있다.

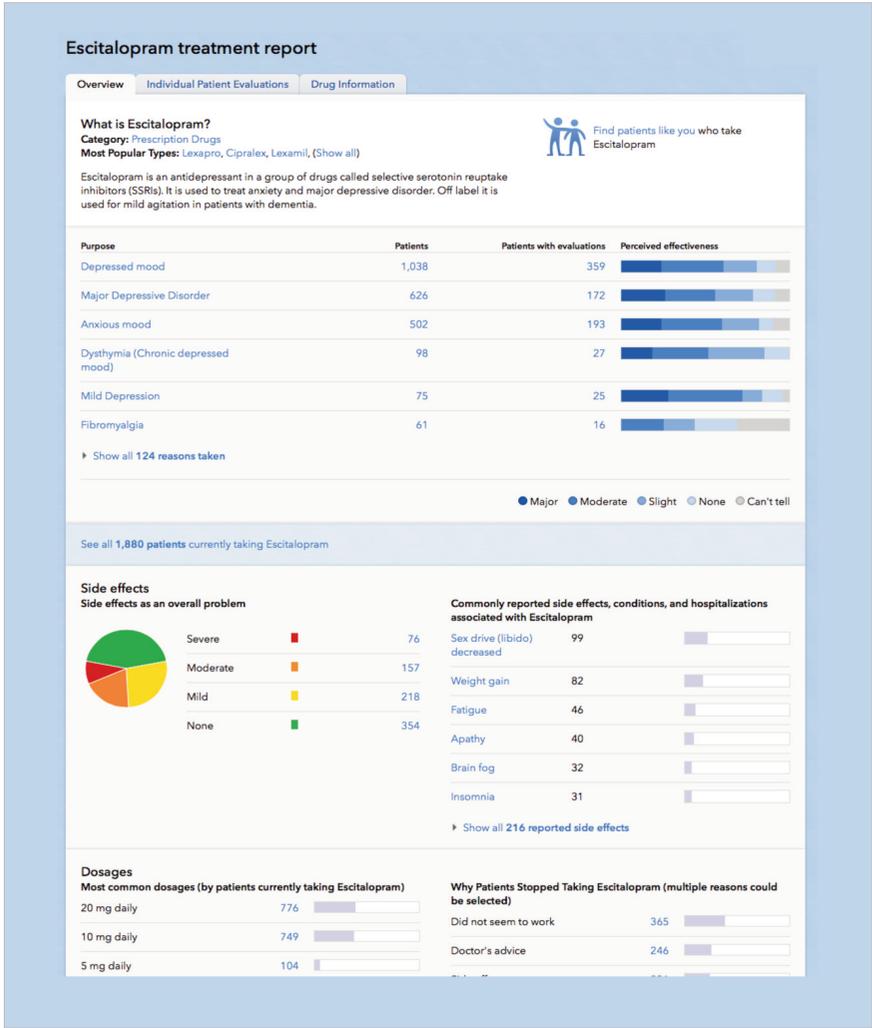


그림4. PatientsLikeMe의 처방보고서 예시. 환자가 자발적으로 기록한 데이터는 신약의 새로운 부작용의 발견에 사용되기도 한다. (출처: PatientsLikeMe)

이러한 사례는 PatientsLikeMe 등의 개방형 온라인 플랫폼이 신약 시판 후에 실제로 환자들이 복용한 경험을 토대로 기존 임상 시험에서 발견하지 못했던 부작용을 발견하기 위해 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

최근 들어서는 FDA마저도 이러한 목적으로 PatientsLikeMe와 협력을 모색하고 있다. 2015년 6월 FDA는 시판 중인 약의 부작용에 대한 환자들의 목소리를 듣기 위한 통로로 PatientsLikeMe를 활용하는 것을 검토 중이라고 밝혔다[20].



## 약에 부착하는 ‘먹는 센서’

사물인터넷(Internet of Things) 기술이 발달하면서 각종 센서들이 범람하고 있다. 그 중에 가장 흥미로운 것 중의 하나는 바로 ‘소화 가능한 센서(in-gestible sensor)’, 즉 먹는 센서이다. 실리콘밸리의 프로테우스 디지털 헬스(Proteus Digital Health)는 환자의 복용 모니터링을 목적으로 이 센서를 개발했다.

환자가 약을 처방받은 대로 복용하지 않는 것은 실제로 막대한 사회적 비용과 불필요한 입원 및 사망을 초래하기도 하는 원인이 된다. 뉴 잉글랜드 헬스케어 연구소의 조사에 따르면, 환자가 처방에 따라 약을 복용하지 않는 것 때문에 연간 2,900억 달러의 의료 비용이 낭비되며, 350만 건 이상의 입원과 125,000건의 사망을 초래한다고 한다[22].

프로테우스의 이 센서를 활용하게 되면 환자가 약을 실제로 복용할 때에만 기록이 남기 때문에 효과적으로 환자의 모니터링이 가능하다. 약에 부착하는 모래알 크기의 작은 센서는 위산과 반응하여 미세한 전류를 발생시키게 된다. 발생한 전기적 신호는 복부에 착용한 전용 패치에 감지되어 스마트폰에 기록이 남게 된다. 무기질로 이루어진 이 센서는 전자를 내어놓은 다음 자연스럽게 소화되어 없어진다.

이 ‘먹는 센서’는 정확하게 작동할 뿐만 아니라, 안전성도 이미 검증되었다. 이미 2012년 FDA의 승인을 받았으며, 2010년에 유럽의 CE 마크를 획득했다. 또한 2014년 발표된 논문을 보면 412명 환자를 대상으로 20,993번의 복용을 거친 결과 99.1%의 정확성과 0%의 위양성(false positive)을 보였다[23]. 즉, 약을 복용한 경우 99% 이상 이 약을 복용하였다는 기록이 남게 되며, 약을 먹지 않았는데도 기록이 잘못 남게 되는 경우는 0% 라는 것이다. 이 과정 중에 부작용이 일어난 경우는 한 건도 없었다.



그림5. 스마트폰과 연계된 먹는 센서. 소화 가능한 센서는 약에 부착하여 환자가 언제 약을 복용하였는지를 모니터링 할 수 있게 해준다. (출처: 프로테우스 디지털 헬스)



이 기술은 특히 제약사들이 신약 임상 시험 과정에서 유용하게 활용될 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 오랜 시간과 막대한 투자가 필요한 신약 임상 시험은 제약사의 명운이 걸려 있다고 해도 과언이 아니다. 임상 시험을 거치면서 신약 후보 물질이 특정 질병에 효과가 있는지, 부작용은 없는지, 적당 투여 용량은 무엇인지 등을 검증하게 된다.

하지만 임상 시험 과정에서 제약사들의 고민이 있다. 바로 임상 시험에 참여 하는 수백, 수천 명의 환자들을 모니터링 하는 것이다. 임상 시험 결과 신약 후보의 유효성, 안전성, 용법, 용량 등을 결정하기 때문에, 참여하는 환자들이 스스로 주어진 프로토콜(용법과 용량 등)을 잘 준수하는 것이 매우 중요하다.

특히, 경구제의 경우 환자들은 보통 한 달 분의 임상 시험 약을 수령하여 각자 집으로 돌아간 후 일상 생활을 하면서 약을 복용하게 된다. 문제는 제약사로서는 이 환자들이 정말 주어진 용법과 용량대로 정확하게 복용하는지 알 수 있는 방법이 없다는 것이다. 따라서 임상 시험 연구자들은 환자들이 스스로 보고하는 것을 그대로 믿는 것 외에는 별다른 방법이 없었다.

약의 유효성과 안전성을 정밀하게 판단해야 하는 제약사로서는 이 부분에 문제가 있는 것이다. 만약 환자가 실제로는 약을 프로토콜 대로 잘 복용하지 않고

(의도적이든, 의도하지 않았든) 정확하지 않은 정보를 제공하는 경우 제약사가 내린 결론에 오류가 있을 수 있기 때문이다. 실제로 임상 3상에서 실패하는 약 중의 45%가 환자들이 프로토콜을 준수하지 않았기 때문이라는 보고가 있다[24].

기준에 제약회사는 환자가 지시대로 정해진 빈도와 정해진 용량의 약을 복용했는지에 대해서, 환자의 말을 믿는 것 말고는 다른 방법이 없다. 관계자에 따르면, 이러한 상황에서 일부 환자들은 수령한 신약 후보물질을 복용했다고 거짓말을 하고, 실제로는 뒷거래를 통해 다른 환자에게 판매하는 등의 경우도 가끔 발생한다고 한다.

## ‘먹는 센서’로 임상 시험 환자 모니터링

소화 가능한 센서(ingestible sensor)를 이용하면 제약회사가 직면한 이러한 문제도 해결 가능하다. 프로테우스 디지털 헬스(Proteus Digital Health)는 거대 IT 기업인 오라클과 함께 이 ‘먹는 센서’를 신약 임상 시험에 활용할 수 있는 시스템을 구축했다[25]. 사실 오라클은 기준에 임상 시험 관리 솔루션을 제공해 왔다. 클라우드 컴퓨팅 인프라를 기반으로 한 오라클의 임상 시험 관리 솔루션 헬스 사이언스 인폼(Health Science InForm)은 지금까지 5,000 여 이상의 임상 시험에 활용되어 왔다.



프로테우스 디지털 헬스의 먹는 센서는 오라클의 임상 시험 관리 솔루션에 통합되었다. 즉, 임상 시험에 사용되는 약에 ‘먹는 센서’를 부착하여 환자들에게 배분하고, 환자가 자택에서 이 약을 복용할 경우 이 기록이 오라클의 임상 시험 관련, 전자 데이터 수집(Electronic Data Capture) 시스템으로 자동 전송 된다.

이로써 이제 제약사들은 임상 시험에 참여하는 환자들이 집에서 실제로 약을 언제, 얼마나 복용했는지를 실시간으로 모니터링 할 수 있게 되었다. 이는 제약 회사의 신약 임상 시험 프로세스에 근본적인 변화를 불러 일으킬 것으로 예상된다.

특히, 이 기술을 통해 제약사들은 단순히 환자들이 임상 시험 요건을 잘 준수하는지를 모니터링 할 수 있을 뿐만 아니라, 후보 물질의 유효성과 안전성에 대해 더 정확하고 신뢰할만한 데이터를 얻을 수 있다. 이는 결국 임상 시험의 속도와 성공률을 높이는 결과를 가져올 것으로 예상된다.

더 나아가, 임상 연구자들이 환자들로부터 자료를 수집하고, 취합하는 번거로운 과정과 그에 수반되는 비용도 줄일 수 있다. 기존에는 환자들이 직접 설문지를 작성하고, 임상 시험 연구자들은 남은 약의 개수를 확인하는 등의 과정을 거쳐, 이 정보를 시스템에 수작업으로 입력해야 했다. 하지만 프로테우스-오라클의 시스템을 활용하면 이러한 과정을 모두 자동으로 수행할 수 있게 된다.

프로테우스디지털 헬스의 이 ‘먹는 센서’도 웨어러블 센서의 일종으로 볼 수 있겠지만, 단순히 신체에 부착하거나 착용하는 기기들과는 다른 상당히 특이한 포지셔닝을 구축하고 있다. 다국적 제약사 노바티스(Novartis)가 이 기술을 라이선싱 한 지 이제 몇 년의 세월이 흘렀지만, 아직까지 이 센서를 부착하고 허가 승인을 받거나, 시판되고 있는 약은 없다.

이 센서를 언제쯤 시판 되는 약에서 볼 수 있을까? 임상 시험에 당장 이 센서가 활용 될 지의 여부는 역시나 비용대비 효과(cost-effectiveness)가 고려되어야 할 것이다. 이 ‘먹는 센서’를 사용하는 비용은 아직까지 알려지지 않았으나, 구성되는 재료나 크기로 볼 때 원가는 매우 낮을 것이라고 생각한다.

반면 제약회사의 입장에서는 신약 개발에 실패하거나, 잘못된 임상 시험으로 선부른 시장 출시 후에 시장에서 신약을 철수시켜야 한다면 그 비용이 너무도 크다. 이러한 이유로, 이 센서에 대한 매력은 상대적으로 클 것으로 생각한다. 향후 임상 시험에서 이 센서를 활용하는 경우가 늘어난다는 것을 예상한다면, 그 약들이 승인을 받거나, 시중에서 판매될 경우에도 여전히 그 센서를 부착한 상태일 가능성이 높을 것이다.



## 핏빗은 환자의 회복 속도를 알고 있다

'신체에 착용하는 기기'인 웨어러블 디바이스는 흔히 새로운 컴퓨터의 형식으로 많은 주목을 받고 있다. 현재 거의 상상할 수 있는 모든 부위에 착용하는 형태의 웨어러블 디바이스가 이미 출시되었다고 해도 과언은 아니다. 안경, 손목 밴드, 목걸이, 반지, 복대, 의복, 신발 밑창, 안대 등 갖가지 종류의 기기들이 여러 종류의 기능을 선보이고 있다.

이러한 여러 형식의 웨어러블 기기 중 가장 대중화된 것은 손목 밴드 형식의 피트니스 트래커일 것이다. 이런 피트니스 트래커들은 주로 가속도계 등의 센서를 이용하여 보행 수, 이동 거리 등 사용자의 활동량을 측정한다. 시중에는 핏빗(Fitbit), 미밴드(MI-BAND), 조본업(Jawbone up), 미스핏(Misfit), 베이스스(Basis), 애플 워치 등 다양한 브랜드의 디바이스들이 사용자의 손목에 부착되어 활동량을 측정한다.

그 중에 핏빗은 피트니스 트래커 중 대표적인 기기 중 하나이다. 핏빗은 지금까지 활동량 측정계 시장의 세계 점유율 1위를 놓치지 않고 있는 기기로, 2013년 피트니스 트래커 판매량 중 58%를 차지하였으며, 2014년 1분기에도 판매량의 절반을 차지했다[26]. 2015년 1분기에는 시장 경쟁 격화로 점유율이 34.2%로 하락하였지만, 여전히 1위 자리를 내어놓지 않고 있다[27].

2015년 6월, 피빗은 웨어러블 기기 제조사로서는 최초로 미국 증시에 상장되면서 주목을 받기도 했다. 핏빗은 이 기업 공개에서 총 7억달러 이상의 자금을 끌어들이면서, 소비자 가전 산업 역사상 가장 큰 IPO라는 기록을 세우기도 했다[28].

사용자의 활동량을 측정하는 이러한 피트니스 트래커는 보통 의료용 기기로 분류되고 있지는 않지만, 의료 분야에서도 활용도는 실로 적지 않다. 환자의 활동량을 정확하고 객관적으로 측정하는 것은 때로 중요한 지표가 되지만, 기존의 방식으로는 측정이 용이하지 않았다. 하지만 핏빗과 같은 간단한 웨어러블 디바이스로 이러한 문제를 이제 해결할 수 있게 되었다.

새로운 기술에 개방적인 것으로 유명한 미국의 메이요 클리닉은 2013년 심장 수술을 받은 고령 환자들의 회복 정도를 핏빗을 이용한 활동량의 측정으로 파악할 수 있다는 연구 결과를 발표했다[29]. 핏빗 원(Fitbit One)이라는 클립 형태의 웨어러블 기기를 수술 후 환자들의 발목에 부착하여 활동량을 측정한 것이다.



그림6. 헬스케어에 활용되는 다양한 종류의 디바이스 (출처: 핏빗)

그 결과 더 많은 걸음을 걸은 환자들이 상대적으로 적은 걸음을 걸은 환자들보다 수술 후 회복 속도가 빨랐으며, 병원에서 입원 치료를 받아야 하는 기간이 더 짧았다. 예를 들어, 중환자실에서 나온 지 이틀째 되는 날, 추후 일찍 퇴원하게 된 사람들은 평균 675 걸음을 걸었던 반면, 추가적인 치료가 필요했던 사람들은 108 걸음 정도를 걸었다. 두 그룹 사이의 활동량 차이는 세 번째, 네 번째 날에도 유의미하게 격차가 벌어졌다.

이 연구에 따르면 간단한 방식과 여타 의료기기에 비해 저렴한 일반 웨어러블 디바이스를 이용해서 효과

적으로 환자들의 예후를 예측하고, 입원 기간을 결정하는데 도움을 줄 수 있다. 특히, 환자들의 활동량은 기존에 정량적으로 측정이 어려웠기 때문에 간호사의 노트 정도에만 기록됐다. 의사들이 의료적 의사결정을 내리는 과정에는 거의 포함되지 않았다.

하지만 이 연구에서처럼 웨어러블 디바이스를 이용하면 무선으로, 객관적이며 정량적인 데이터를 지속적으로 쉽게 측정할 수 있다. 이에 따라 의료진은 예상보다 회복이 더딘 환자들을 파악할 수도 있고, 환자들의 입원 기간을 미리 예측함으로써 병원의 공간과 리소스를 효율적으로 활용하는데 도움이 될 수도 있을 것이다.



## 피트니스 트래커를 이용한 신약 효능 검증

피트니스 트래커의 대명사 핏빗은 신약의 효능을 입증하는데 쓰이기도 한다. 다국적 제약사 바이오젠 아이텍(Biogen Idec)은 2014년 12월 핏빗을 자가면역질환의 일종인 다발성 경화증(multiple sclerosis) 환자의 모니터링과 신약 개발에 활용하겠다고 발표했다[30].

다발성 경화증은 뇌와 척수에 영향을 미치는 질환으로 감각 증상과 함께 운동 장애를 동반하는 질병이다. 감각 증상은 무감각, 얼얼한 느낌, 화끈거림 등의 이상 감각으로 나타나며, 운동 장애는 근력 저하에서부터, 반신 마비, 사지 마비까지 나타날 수 있다. 한국을 비롯한 아시아에서는 척수 침투에 의한 하지 마비가 가장 흔하다고 한다.

이처럼 다발성 경화증 환자들은 운동 능력에 이상이 생기기 때문에, 환자의 움직임에 대한 데이터를 측정하는 것은 환자의 질병 진행 단계를 파악하고, 더 효과가 좋은 약을 만드는 것에 도움을 줄 수 있다. 바이오젠 아이텍은 핏빗을 다발성 경화증 환자에게 나눠주고, 자사의 약을 복용하고 있는 환자들의 활동량 변화를 모니터링 하기로 했다.

기존에는 다발성 경화증 환자들의 움직임의 변화를 상시 모니터링 할 수 있는 방법이 없었다. 바이오젠 아이텍의 최고의료경영자(CMO)인 알 샌드록이 언급한 것처럼, 일년에 환자를 4번 진료한다고 하더라도 총 2시간 밖에 되지 않는다. 즉, 두 시간을 제외한 모든 순간의 데이터는 놓치게 되는 것이다.

하지만 핏빗과 같은 피트니스 트래커를 이용하면 활동량을

측정할 수 있다. 예를 들어, 다발성 경화증 환자들에게 핏빗을 나눠주고, 약을 복용한 그룹과 복용하지 않은 그룹의 활동량의 차이에 변화가 있는지를 검증할 수 있는 것이다.

이렇게 얻은 데이터는 바이오젠 아이텍과 같은 제약사들이 값비싼 약에 대해 보험을 적용 받기 위해서 활용할 수 있다. 값비싼 약에 대해 의료 보험 지원을 받는 것은 제약사로서 환자에게 약을 판매하기 위해 중요한 부분이다.

그런데 최근 미국 의료 보험사나 약국 이윤 매니저(pharmacy benefit manager)는 약값이 상승하면, 보험을 적용하는 약의 종류를 줄이는 것으로 대응하고 있다. 미국인 9,000만명 이상의 약제 급여를 관리하는 익스프레스 스크립트(Express Scripts)는 2014년 약효에 비해서 약값이 지나치게 비싼 44개의 처방약과 의료 기기에 대해서 보험금 지급을 중단하기로 결정했다 [31]. 제약사 베이어(Bayer)의 다발성 경화증 약인 베타세론(Betaseron)도 그 중의 하나였다.

즉, 보험 적용을 계속 받기 위해서는 비싼 약가를 매길 수 있을 만큼 그 약의 효과가 충분히 좋다는 것을 증명할 수 있어야 한다. 다발성 경화증의 경우에는 핏빗과 같은 피트니스 트래커를 통해 약을 복용한 환자의 개선 정도를 파악할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

재미있게도 환자들의 이러한 데이터를 수집하는 플랫폼으로, 앞서 여러 번 언급한 '환자들의 페이스북', PatientsLikeMe가 활용된다[32]. 해당 연구에 동의한 환자들은 핏빗으로 측정한 데이터를 PatientsLikeMe 플랫폼에 저장하고, 이렇게 모은 데이터는 다시 바이오젠 아이텍으로 보내진다.



## 직토, 다발성 경화증 재발의 조기 발견도 가능할까?

더 나아가 피트니스 트래커를 이용하여 다발성 경화증의 재발을 조기에 발견할 수 있을 가능성도 제기되고 있다. 비영리 연구 단체인 '다발성 경화증 조기 치료 프로젝트'의 회장 로버트 맥버니는 웨어러블 디바이스가 환자의 보행 자세나 순발력에 대해서 미세한 차이까지 측정할 수 있다면 다발성 경화증 환자에게 매우 유용할 것으로 내다보았다[32].

특히, 이 질병은 돌발적으로 재발하는 것이 특징이기 때문에 병이 재발하기 전에 나타날 수 있는 행동의 미묘한 변화를 조기에 감지할 수만 있다면 큰 가치가 있다. 이러한 변화는 환자나 주변 사람들이 스스로 알아차리기에는 너무 미묘할 수도 있지만, 웨어러블 디바이스를 이용함으로써 정확하게 감지해낼 가능성이 있다. 이것이 가능하다면 질병의 재발에 앞서 선제적인 조치를 취할 수도 있을 것이다.

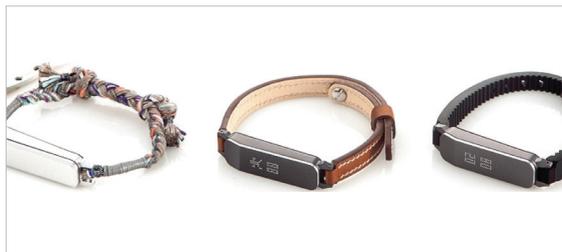


그림7. 국내 스타트업의 웨어러블 디바이스 직토는 사용자의 걸음걸이 자세를 인지한다 (출처: 직토)

그렇다면 손목에 착용하는 웨어러블 기기로 사용자의 보행 자세의 미묘한 차이까지 정확하게 인식할 수 있을까? 국내의 초기 스타트업 기업인 직토(Zikto)의 피트니스 트래커는 보행 자세 인지를 대표적인 기능으로 내세우고 있다. 2014년 11월 국내 기업으로는 드물게 킥스타터에서 크라우드 펀딩을 시작하지 24시간만에 5만불을 모금하며 화제가 되었던 직토는 2015년 7월 첫 번째 제품인 직토 워크(Zikto Walk)를 출시하며 전세계 배송을 시작했다.

직토에 따르면, 직토 워크는 발에 전해지는 충격량, 보행 주기, 보폭, 팔의 3차원 궤도, 8가지로 분류한 보행 자세, 신체 부위별(어깨, 허리, 골반) 비대칭 지수 등의 다양한 데이터를 측정한다[33].

보행에 대하여 다양한 측면의 데이터를 측정하는 것은 다발성 경화증 등 움직임이나 활동량의 변화를 수반하는 질병의 모니터링에 활용될 가능성이 있다. 앞서 소개한 메이요 클리닉의 심장 질환 수술 환자들도 단순히 걸음 수에 기반하여 활동량을 평가하는 것이 아니라, 좀 더 세분화된 기준을 통해 환자를 평가할 수 있을 것이다.

직토는 이러한 기능을 활용하여 현재 아산병원과 척추 측만증 환자의 수술 전후 경과를 측정하는 임상 시험을 진행 중이며, 유의미한 결과를 얻는 것에 성공한 것으로 알려져 있다.



## 디지털 표현형: 디지털로 확장되는 인간의 표현형

‘이기적 유전자’로 유명한 생물 철학자 리처드 도킨스는 확장된 표현형(extended phenotype)이라는 도발적인 개념을 주창한 바 있다. 생물의 유전적인 요인과 이 요인들의 외부적인 발현을 지칭할 때 유전형(genotype)과 표현형(phenotype)이라는 용어를 사용한다. 어떤 특징에 대한 유전적인 형질을 DNA 속에 가지고 있는 것과 이것이 발현되어 겉으로 나타나게 된 것을 구분한 것이다.

인간의 키, 피부/눈 색깔, 곱슬머리 등은 모두 표현형이라고 볼 수 있다. 더 나아가서는 질병에 걸리는 것도 표현형의 일종이다. 도킨스는 이러한 표현형을 생물 개체의 신체적 특징에 국한되는 것이 아니라, 생물의 행동이나 부산물까지 그 범위를 확대해야 한다고 주장한 것이다. 예를 들어 수달이 나뭇가지를 엮어서 댐을 만들거나, 거미가 집을 짓는 행동들마저 표현형의 일종이라는 것이다.

오늘날 디지털 시대에는 인간의 표현형이 또 한 번 더 확장되고 있다고 할 수 있다. 바로 스마트폰과 소셜 네트워크 등에 디지털화 되어 표현되는 행동양식이 바로 그것이다. 우리는 페이스북과 트위터에 글을 쓰고, 인스타그램에 사진을 올린다. 메시지로 대화를 나누고, 새로운 장소에서 GPS로 자신의 위치를 검색하여 체크인을 하는가 하면, 친구들의 글에 ‘좋아요’를 누른다. 디지털 영역에 우리가 의식적, 무의식적으로 남

기는 이러한 발자취는 모두 우리의 행동양식 및 신체적, 정신적 상태를 반영한다.

이것이 바로 ‘디지털 표현형(digital phenotype)’이다. 2015년 네이처 바이오테크놀러지는 이 디지털 표현형이라는 개념에 대해 소개하면서, 그 자체로도 의미가 있을 뿐만 아니라 기존의 다른 의학적인 정보들과 합해졌을 때 응용도가 더욱 높아질 것이라고 주장했다[34].

특히, 질병을 진단하거나 검출해내기 위해서 기존의 생물학적인 지표(biometric profile)를 더욱 확장시키는 수단이 될 수 있다. 페이스북, 트위터 같은 소셜 미디어와 스마트폰 등으로 측정된 데이터는 질병과 환자에 대해 보다 통합적인 이해를 가능하게 한다는 것이다[34].

더 나아가 질병의 조기 발견에도 도움을 줄 수 있다. 전통적인 생물학적 지표의 변화로 증상을 파악하기 전에, 디지털 표현형을 통해서 증상이 더 빨리 나타날 수 있기 때문이다. 예를 들어, 불면증에 걸린 환자는 트위터나 페이스북에 남긴 글의 내용이나, 작성시간에 변화가 있게 된다. ‘불면증’, ‘잠이 오지 않는다’ 등의 내용을 남기거나, 새벽 3-4시에 글을 쓰는 빈도가 올라간다는 등의 양상을 통해 불면증 환자를 모니터링할 수 있는 것이다.



그림 8. 디지털 표현형의 예 트위터 등 소셜 미디어에 남기는 글에는 사용자의 불면증 증상이 반영된다[34].

실제로 연구자들과 제약사는 디지털 표현형을 이용한 연구를 진행하고 있다. 보스턴 소아병원과 다국적 제약사 머크(Merck)는 소셜 미디어 데이터를 바탕으로 불면증 환자의 행동 양상을 연구하고 있다[35]. 미국인 중 58%는 적어도 일주일에 며칠 정도는 불면증으로 고생하고 있으며, 30%의 미국인은 만성적인 수면 장애를 앓고 있다. 하지만 불면증 진단은 많은 부분 환자가 본인의 자가 평가를 바탕으로 하는 경우가 많다.

이 연구의 책임자 존 브라운스테인 박사에 따르면 트위터 데이터(트윗의 내용 및 빈도 등), 페이스북 데이터('좋아요' 누르기, 로그인/로그아웃 시간, 사이트에 머문 시간 등)를 이해하는 것이 환자의 불면증 증상을 파악하고 진단을 내리는데 도움이 될 것으로 기대하고 있다.



## 스마트폰은 우울증을 알고 있다

그런가 하면 스마트폰에 나타나는 디지털 표현형을 활용하여 우울증을 진단하기 위한 노력이 있다. 2015년 7월 노스웨스턴 대학에서는 스마트폰의 사용 패턴을 분석함으로써 사용자가 우울증 증상을 가지고 있는지 86.5%의 정확도로 파악할 수 있다는 연구 결과를 발표했다[36].

일반적으로 우울증에 걸린 환자들은 다른 사람들과 접촉하거나 대화하는 빈도가 적어지고, 집 밖으로 나가지 않거나, 불규칙적인 생활을 하게 된다. 이러한 우울증의 증상은 디지털 표현형의 일부로 스마트폰의 사용 패턴에 고스란히 반영되게 된다. 이런 패턴의 변화는 친구나 가족들보다 스마트폰이 오히려 더 정확하게 알아차릴 수도 있다.

연구진은 환자의 스마트폰을 통해서 환자가 머무는 장소가 얼마나 다양한지, 집에 얼마나 오랫동안 머무는지, 생활이 얼마나 규칙적인지, 전화를 사용하는 빈도와 시간 등의 다양한 지표들 측정하였다. 특히 환자가 위치한 장소를 파악하기 위해서 매 5분마다 위치를 GPS로 추적하기도 하였다. 그 결과 우울증의 정도와 특정한 스마트폰 사용 패턴에 강한 상관관계가 발견되었다. 특히, 생활의 규칙성, 방문하는 장소의 다양성이 우울증과 상관관계가 매우 높았으며, 전화의 사용 시간, 전화의 사용 빈도 역시 유의미한 상관관계를 보였다 [36].

예를 들어, 하루 중일 1-2 곳의 장소에서만 시간을 보내는 사람일수록 우울증의 확률이 높았으며, 생활패턴이 일정하지 않은 사람, 즉 집에서 나가고 들어오는 시간이 일정하지 않은 사람일수록 우울증에 걸릴 가능성이 높았다.

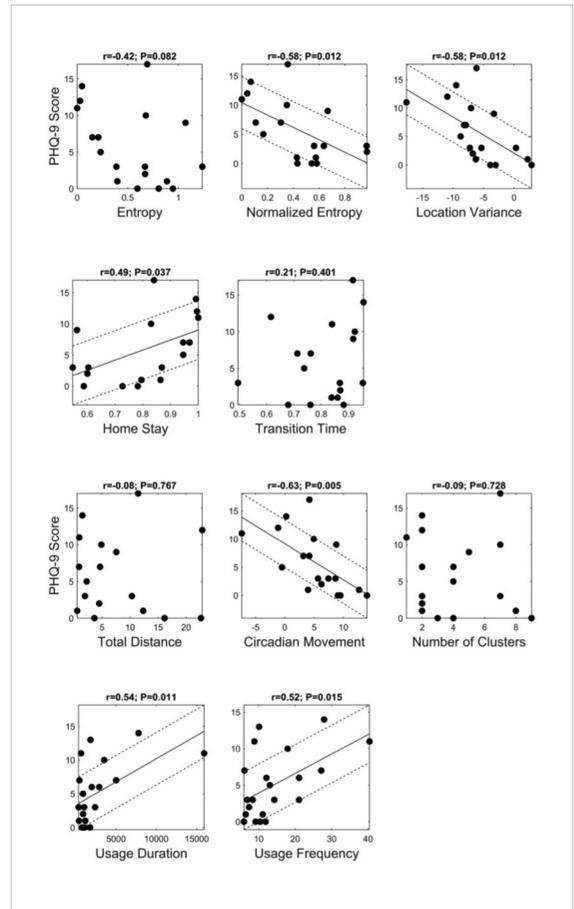


그림9. 스마트폰 위치와 사용 패턴 등과 우울증과의 상관관계. 사용자의 우울증 증상은 스마트폰에 전화 빈도의 감소, 생활의 규칙성 감소 등 여러 형태로 반영된다[36].



이렇게 스마트폰에 반영되는 디지털 표현형을 통해서, 우울증 환자의 상태를 모니터링하려는 기업도 있다. 대표적으로 실리콘밸리의 Ginger.io와 같은 스타트업이다. 이 회사는 MIT 미디어랩에서 스핀오프 한 기업으로 최근 발표된 노스웨스턴 연구에서 측정한 항목보다 스마트폰에 대해서 더 다양하면서도 세부적인 부분들을 정량적으로 측정한다[37].

Ginger.io의 방식은 이미 여러 병원이나 보험사를 통해서 우울증 뿐만 아니라, 양극성 장애, 심장 질환, 당뇨병 등의 다양한 질환과 관련해서 연구를 진행하고 있다. 대표적으로 카롤라이나와 버지니아 주에 13개의 병원을 가지고 있는 노반트 헬스(Novant Health)의 연구를 들 수 있다[37].

이 병원들에서는 당뇨병 환자와 산후 우울증 등의 연구를 위해서 이 스마트폰 앱을 활용하고 있다[38]. 특히, 사용자들이 스스로 느끼는 우울증의 정도와 Ginger.io가 파악한 우울증에 상관 관계가 있는지를 검증하고 있다. 향후 대규모의 연구로 추가적인 검증이 필요하다는 것이 지금까지의 결론이지만, 적어도 상당한 상관관계가 있는 것으로 파악하고 있다.

이렇게 스마트폰에 반영되는 디지털 표현형을 이용하는 것은 여러 장점이 있다. 특히, 스마트폰은 대부분의

환자들이 일상적으로 사용하는 기기이기 때문에 환자의 모니터링을 위해 별도의 기기를 새롭게 사용하거나 추가적인 검사를 하지 않아도 된다. 즉, 이러한 수동적 모니터링(passive monitoring) 방식은 사용자에게 별도의 동기 부여가 필요 없다. 반면, 사용자의 통화 상태, 시간, 빈도 등을 자동으로 분석하는 것으로 인한 개인 프라이버시 문제가 발생할 수도 있다는 한계가 존재한다.

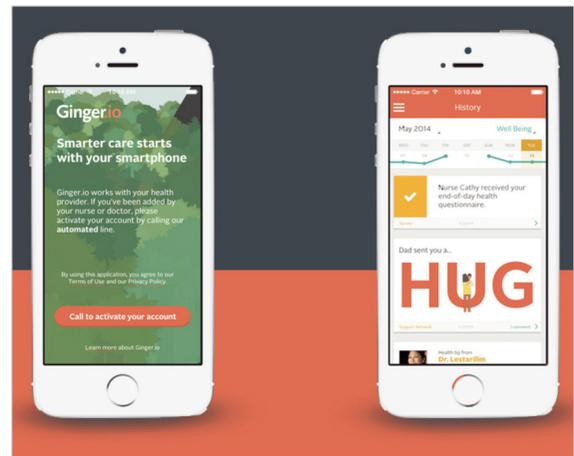


그림10. Ginger.io의 디지털 표현형 기반 질병진단 소프트웨어, 스마트폰에 남겨지는 디지털 표현형을 통해 우울증 등의 질병 진단을 돕는다. (출처: Ginger.io)

## 디지털 기술이 혁신하는 미래의 의학 연구

지금까지 디지털 기술의 발전이 어떻게 의학 연구를 혁신하고 있는지 다양한 사례를 들어 살펴 보았다. 인공지능의 발전과 환자들의 소셜 네트워크는 임상 연구자들이 가지는 임상 시험 환자 리크루팅 등의 문제를 새로운 각도에서 해결해나가고 있다.

또한 모바일 기술을 활용한 원격 임상 시험은 임상 시험에 필요한 비용과 시간을 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 정밀 의료 시대의 환자 맞춤형 신약의 개발을 위해서 새로운 대안적 플랫폼을 제시하고 있다.

웨어러블 기기는 기존에는 측정하지 못했던 환자들의 새로운 데이터를 얻을 수 있게 하며, 이는 환자의 입원 관리나 신약의 효능 검증에 활용될 수 있고 향후 질병의 재발을 조기에 발견하는데 도움을 줄 수도 있다.

뿐만 아니라, 디지털 기술을 통해서 환자들이 임상 연구에 자발적이고 더욱 적극적으로 참여할 수 있는 통로가 늘어나고 있다. 전세계 환자들은 이제 스마트폰의 센서를 이용해서 자신의 데이터를 임상 연구자들에게 손쉽게 전송할 수 있을 뿐만 아니라, 소셜 미디어 플랫폼에서 익명화된 자신의 의료 데이터를 스스로 제공할 수 있다. 이렇게 모인 의료 빅데이터는 기존의 신약 임상 시험에서 발견하지 못했던 새로운 부작용을 발견하고, 희귀 질환에 대한 기존의 연구 결과를 뒤집기도 했다.

이렇게 스마트폰, 웨어러블 디바이스, 소셜 네트워크, 클라우드 소싱 등의 디지털 기술은 오늘날의 의학을 변모시키고 있다. 아직까지는 적용 초기 단계에 있거나,

의학적으로 더 세부적인 검증이 필요한 부분도 있지만, 그러한 큰 변화가 이미 시작되었으며 앞으로 확대될 것이라는 점은 부인할 수 없을 것 같다.

첨연하자면, 아직까지 국내에서는 임상 연구 및 신약 개발 등에 이러한 디지털 기술의 적용이 미비한 것은 사실이다. 신약 임상 시험에 인공지능이나, 웨어러블 디바이스, 혹은 소셜 네트워크를 이용하는 국내 사례는 필자가 알기로 아직까지 손에 꼽을 정도다. 웨어러블 디바이스를 이용한 수술 후 회복, 비만 관련 연구 등은 진행 중이나, 대부분 디바이스 제조사의 필요에 의해 주도되는 면이 많다.

디지털 기술의 발전은 기존의 임상 연구를 새로운 차원으로 진일보시킬 가능성이 있다. 임상 연구자들은 이러한 기술의 발전 및 응용 가능성에 대해서 주목해야 할 필요가 있다. 뿐만 아니라, 식품의약품안전처 등 국내 규제 기관 역시 임상 연구에 인공지능 및 소셜 네트워크 등의 새로운 기술이 적용되어 개발된 신약 등을 어떻게 심사할 것인지, 또한 FDA가 발 빠르게 대응하듯 국민의 건강권을 위해서 새로운 기술을 어떻게 활용할 수 있을지에 대해서도 고민이 필요하다.

바야흐로 디지털 헬스케어의 시대다. 이러한 새로운 기술의 적용이 혁신적인 의학 연구 결과들과, 더 나아가 환자들의 삶의 질 개선으로 이어지기를 바래본다.



# YOON SUP CHOI

최운섭 (yoosup.choi@gmail.com)



## 학 력

- POSTECH 시스템생명공학부 박사
- POSTECH 컴퓨터공학과/생명과학과 학사

## 경 력

- 現)최운섭 디지털 헬스케어 연구소 소장
- 現)성균관대학교 휴먼 ICT 융합학과 교수
- 前)KT 융합기술원 팀장
- 前)서울대학교 의과대학 암연구소 연구조교수

## 참고문헌

---

1. Teresa Wang, Rock Health Blog, Jan 2015, "Digital Health Funding Tops \$4.1B: 2014 Year in Review"
2. Malay Gandhi, Rock Health Blog, July 2015, "With \$2.1B in digital health funding, first half of 2015 is keeping pace with 2014"
3. Victor Luckerson, Time, Dec 2014, "5 Very Smart People Who Think Artificial Intelligence Could Bring the Apocalypse"
4. Greg Kumparak, TechCrunch, Oct 2014, "Elon Musk Compares Building Artificial Intelligence To Summoning The Demon"
5. 최윤섭, 최윤섭의 헬스케어 이노베이션 블로그, Oct 2014, "MD앤더슨과 MSK 암센터, IBM Watson의 진료 정확도를 공개하다"
6. Matthew Herper, Forbes, May 2015, "IBM's Watson Enters Market For Analyzing Cancer Genetics"
7. Steve Lohr, New York Times, April 2015 "IBM Creates Watson Health to Analyze Medical Data"
8. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Sep 2014, "IBM's Watson to help Mayo Clinic tackle clinical trials"
9. Alliance Research Center Blog, "About Clinical Trials", <http://www.researchalliance.com/about-clinical-trials.html>
10. John Gallaughier, 2012 Book Archive, "Social Media, Peer Production, and Web 2.0", chapter 7, "Getting the Most Out of Information Systems(v.1.3.)"
11. Jennifer Corbett Dooren, The Wall Street Journal, June 2011, "A Clinical Drug Trial Via Phone, Computer"
12. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Nov 2012, "The year for mobile-enabled clinical trials: 2013 or 2030?"
13. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Feb 2015, "Sanofi backs fully remote clinical trial for diabetes management"
14. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Jun 2015, "Mobile data collection's role in precision medicine and the clinical trial of the future"
15. Michelle Cortez, Bloomberg Business, Mar 2015, "Thousands Have Already Signed Up for Apple's ResearchKit"
16. Mikey Campbell, Jul 2015, "Big pharma exploring Apple ResearchKit integration in for-profit efforts"
17. Admit Pai, MobiHealthNews Jun 2015, "UCSF to launch LGBT health study using Apple's ResearchKit", MobiHealthNews
18. Fornai et al., Proc Natl Acad Sci USA, Feb 2008, "Lithium delays progression of amyotrophic lateral sclerosis",
19. Paul Wicks et al., Nature Biotechnology, 2011, "Accelerated clinical discovery using self-reported patient data collected online and a patient-matching algorithm"

- 
20. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Jun 2015, "FDA taps PatientsLikeMe to test the waters of social media adverse event reporting"
  21. Landén et. al., J Clin Psychiatry, 2005, "Incidence of sexual side effects in refractory depression during treatment with citalopram or paroxetine"
  22. New England Healthcare Institute, 2009, "Thinking Outside the Pillbox"
  23. Hooman Hafezi et. al., IEEE Trans Biomed Eng, 2014, "An Ingestible Sensor for Measuring Medication Adherence"
  24. Varun Saxena, FierceMedicalDevices, Jan 2015, "JP Morgan: Oracle to use Proteus' 'digital pills' in its clinical trial management platform"
  25. 최윤섭, 최윤섭의 헬스케어 이노베이션 블로그, Feb 2015, "'먹는 센서' 를 약에 부착하여, 신약 개발 임상 시험에 활용"
  26. Admit Pai, MobiHealthNews, Feb 2014, "Prediction: 17M wristworn activity trackers to ship in 2014"
  27. IDC, Business Wire, Jun 2015, "Wearable Market Remained Strong in the First Quarter Despite the Pending Debut of the Apple Watch"
  28. Brian Dolan, MobiHealthNews, Jun 2015, "Fitbit raises \$732M in the biggest ever consumer electronics IPO"
  29. David J. Cook et. al., Annals of Thoracic Surgery, 2013, "Functional Recovery in the Elderly After Major Surgery: Assessment of Mobility Recovery Using Wireless Technology"
  30. 최윤섭, 최윤섭의 헬스케어 이노베이션 블로그, Jan 2015, "'피트니스 트레커를 이용한 환자 모니터링: Fitbit의 다발성 경화증 치료 활용"
  31. Heather Kathryn Ross, HealthlineNews, Nov 2013, "Express Scripts Drops Coverage of Some High-Cost Drugs"
  32. Caroline Chen, Bloomberg Business, Dec 2014, "Express Scripts Drops Coverage of Some High-Cost Drugs"
  33. Zikto 서울대학병원 가정의학과 세미나 발표자료, July 2015
  34. Sachin H Jain et al, Nature Biotechnology, 2015, "The digital phenotype"
  35. PR Newswire, Feb 2014, "Boston Children's Hospital and Merck to Study Social Media Behavior to Characterize Insomnia"
  36. Sohrab Saeb, JMIR, 2015, "Mobile Phone Sensor Correlates of Depressive Symptom Severity in Daily-Life Behavior: An Exploratory Study"
  37. Joseph Walker, The Wall Street Journal, 2015, "Can a Smartphone Tell if You're Depressed?"
  38. Jonah Comstock, MobiHealthNews, Nov 2014, "Ginger.io is working with UCSF, Duke, Partners on diverse pilots"
-

## 국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 디지털 헬스케어와 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

### 과제 선별 기준

〈과제 선별 기준〉 연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 선별한 후 연구내용을 바탕으로 분석 대상 선정 (헬스케어) or (웨어러블) or ((디지털) and (신약)) or ((디지털) and (임상))

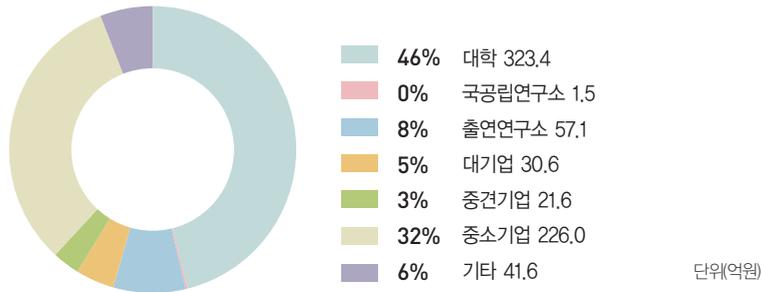
분석 결과 최근 3년간 총 260건의 과제에 739억원의 연구비가 투자됨

- 디지털 헬스케어에 대한 관심 및 활용성 증대로 지속적으로 관련 연구는 증가 중임
- 하지만 사회전반의 헬스케어의 관심 및 시장 형성 정도에 비해 국가 R&D 투자 비율은 낮은 수준임(전체 국가 R&D 투자의 0.15%에 불과)
- 또한 과제당 연구비 규모도 2.6~3.0억원 수준으로 소규모 연구가 주를 이루고 있음
- 이는 R&D 분야 분석을 바탕으로 도출한 한국보건산업진흥원에서 분석한 'ICT헬스케어 융합 R&D와 산업융합 (M&A) 특성분석'의 결과와도 유사한 경향성을 보이고 있음



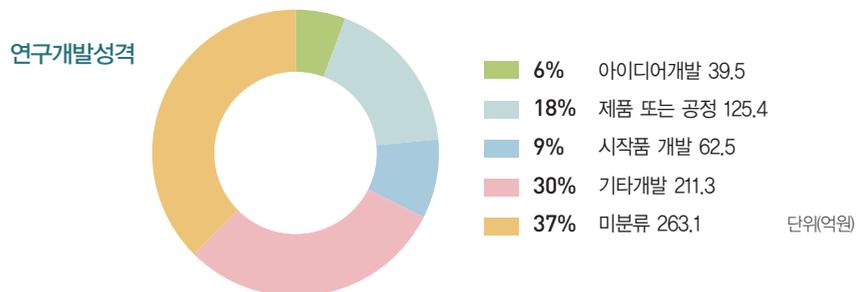
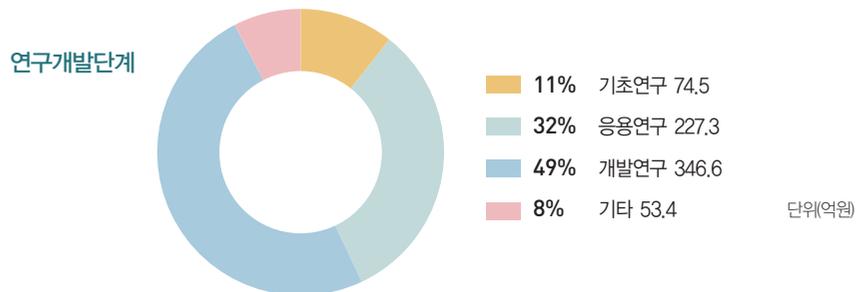
연구수행주체 대학(46%)과 중소기업(32%)을 중심으로 연구가 이루어지고 있음

- 대학의 경우 145건(323억원)의 연구를 수행하고 있으며, 중소기업은 61건(226억원)의 연구를 수행 중임
  - 이는 디지털 헬스케어 분야의 연구가 등장한지 얼마 안된 분야이면서도, 실질적으로 산업적 활용성이 높기에 학계와 산업계 모두에서 활발히 연구가 이루어지고 있음을 의미함
- 그에 반해 출연연구소의 경우에는 다른 분야의 연구에 비해 연구 수행율이 낮게 나타남

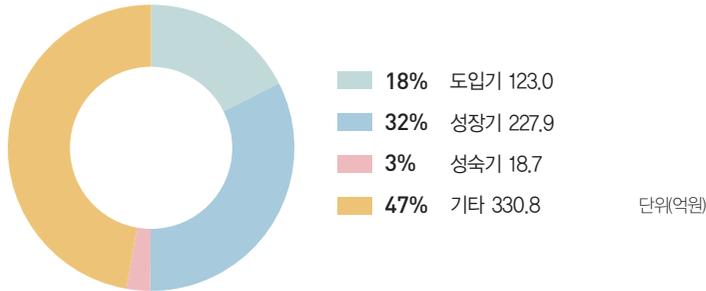


### 연구수준 개발연구단계(49%)가 주를 이룸

- 디지털 헬스케어의 대다수 원리는 이미 다른 분야에서 활용되고 있거나 오래전에 제시된 개념이기에 이를 구현할 수 있는 응용(32%)-개발연구단계(49%) 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 디지털 헬스케어는 본문에 나와 있듯이 무형의 개발부터 유형의 개발까지 그 범위가 넓기 때문에 연구개발 성격은 기타 개발(30%)이나 미분류(37%)로 분류되는 것들이 많음
- 기술수명주기적 측면에서는 아직 연구개발의 역사가 오래되지 않았기 때문에 기술수명주기를 판단하기 어렵다는 기타(47%)가 다수를 차지하고 있으나,
  - 일부 분야에서는 이미 도입기(18%)를 넘어 성장기(32%) 연구가 많이 이루어지고 있는 부분은 디지털 헬스케어 분야의 기술개발 속도가 그 어떠한 연구분야보다 빠르게 이루어지고 있음을 의미함



### 기술수명주기

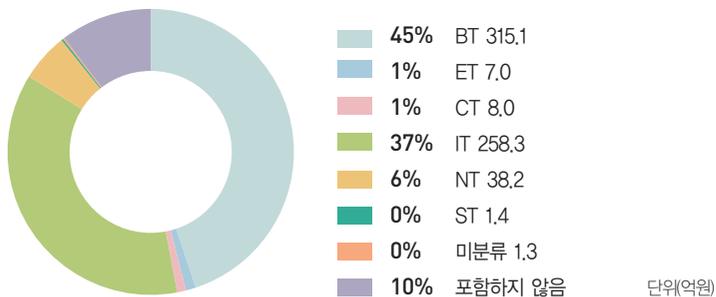


**연구분야** 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 보건의료-정보/통신 중심의 IT-BT, 정보-지식-지능화 사회 구현 및 건강한 생명사회 지향 분야에서 비슷한 비율로 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남

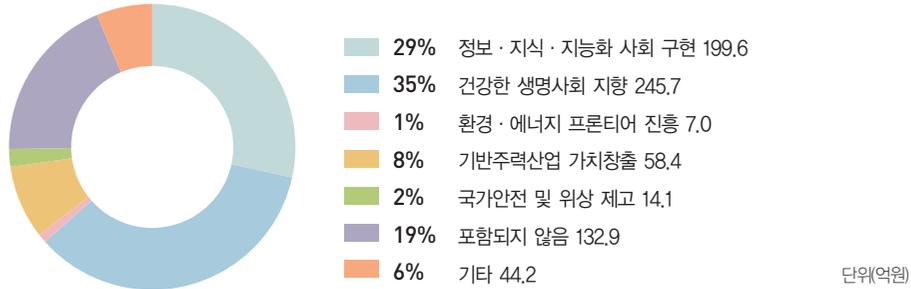
### 연구분야 [국가과학기술표준분류]



### 연구분야 [6T]



## 연구분야 [NTRM]



### • 보건의료분야와 정보/통신 분야를 중심으로 연구가 이루어짐

- 정보/통신 분야와 보건의료 분야는 각각 전체 연구의 29%와 40%를 차지하며 비슷한 수준으로 디지털 헬스케어 연구를 이끌어가고 있음
- 그 외에도 디지털 헬스케어 구현을 위한 생명과학, 물리학, 기계, 화학 등의 분야에서 연구가 이루어지고 있으며, 디지털 헬스케어의 활용을 위한 경제/경영, 인지/감성과학, 생활 분야에서의 연구도 이루어지고 있음
- 이는 디지털 헬스케어가 단순히 정보/통신, 보건의료 분야에 한정된 것이 아닌 연구계 전반에 걸쳐 파급 효과를 가진 주제임을 반증함

### • 6T 기준에서도 IT와 BT가 각각 전체 연구의 37%와 45%를 차지하며, 비슷한 규모의 연구를 진행하고 있는 것으로 나타남

### • NTRM 분석 결과도 역시 건강한 생명사회 지향(35%)과 정보-지식-지능화 사회 구현(29%)이 비슷한 비율로 나타남

- 이는 디지털 헬스케어 분야가 어느 한 분야가 아닌 두 분야 모두에 걸쳐있는 성격의 것이기 때문이며, 인상적이게도 전체 분석에서 의료 분야의 비율이 좀 더 높게 나타난 것은 디지털 헬스케어 기술이 디지털 IT 기술을 활용하고 있지만 의료 분야에서의 적용을 목적으로 하고 있고, 의료 분야의 지식과 기술이 좀 더 많이 적용되어야 하는 분야임을 간접적으로 시사하고 있음

# 인류가 당면한 물부족 문제를 해결하는 기술: 해수담수화

▣ 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 이석현 책임연구원(seocklee@kist.re.kr)



# 1. 서론

기후변화가 세계적인 이슈가 되고 있다[1]. 재생이 불가능(non-renewable)한 화석연료의 지나친 남용과 온실가스(green house gas)의 대기권 축적의 결과 지구역 사상 유래 없는, 인류의 활동이 주요 원인이 된 기후변화가 초래된 것으로 인류사회는 받아들이고 있다.

기후변화의 영향으로 지역에 따라서는 홍수와 가뭄이 심각한 문제를 일으키고 있다. 기후변화 이슈는 감쇄(mitigation)와 적응(adaptation)으로 크게 구별할 수 있는데, 감쇄는 기후변화의 심각화를 막아보려는 노력과 이미 현실화된 기후변화시대에 어떻게 적절히 대응할 것인가 하는 것이다. 적응이슈 가운데 핵심적인 것이 물부족의 심각화이다[2].

현재 지구상의 물부족 상태는 어느 정도인가? 지구상의 거의 모든 대륙에 걸쳐서 40% 이상의 인구가 물부족을 겪고 있다. 2025년까지 18억명이 절대적인 물부족 상태에 놓이게 될 것이며, 지구상의 인구 가운데 2/3에 해당하는 사람들이 물 때문에 스트레스를 겪게 될 것으로 알려져 있다[3].

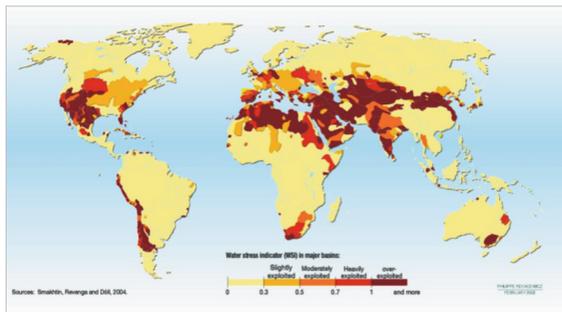


그림1. 물부족 지역 분포도 (출처: Water Scarcity Index from 'Vital Water Graphics', UNEP/GRID-ARENDAL, 2008)

물부족은 물에 대한 수요와 공급의 불균형으로부터 기인한다. 사람이 살지 않는 오지라면 수요가 없으므로 물

부족이랄 것이 없지만, 전 대륙에 걸쳐서 인류가 분포하고 있는 현대에는 지구 전역에 걸쳐 인구의 증가, 산업화, 도시화에 따라 물수요가 증가 추세이고, 공급이 이를 따라주지 못하는 것이 근본적인 물부족의 원인이라 할 수 있다.

물은 지구 전체적으로 순환하고 있다. 이 거대한 순환의 출발점을 정할 수는 없지만, 지구상의 대부분의 물이 모여있는 바다에서 그 시작을 설명해보자. 우선 태양에너지로 데워진 물은 수증기화되어 대기중으로 상승하고, 대기중의 수증기는 지구규모의 대기순환을 따라서 이동하게 되며, 다시 응축되어 눈이나 비의 형태로 지상으로 떨어지게 된다. 지상에 떨어진 물은 지표면을 타고 낮은 곳으로 모여 흐르는 강이 되거나, 땅속으로 스며들어 지하수가 된다. 그리고 결국에는 다시 바다로 흘러 든다.

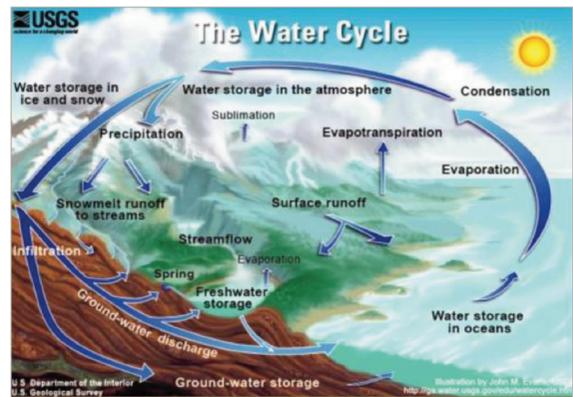


그림2. 물의 순환 구조 (출처: US Geological Survey)

위도나 고도가 높은 지역에 떨어진 눈은 상당히 오랜 기간 지상에 머물게 되며, 지역에 따라서는 계절이 겨울에서 봄으로 바뀌는 시기에 녹아서 낮은 지대로 흐르게 된다.

이러한 계절적인 용설의 흐름은 중요한 지표수자원의 원천이 된다. 급속한 기후변동은 빙하가 형성되는 것보다 빠른 속도로 그것을 녹아서 흘러내리게 하고 있다. 그리고 이런 식으로 많은 지역에서 빙하가 줄어들게 되면, 이는 심각한 물부족으로 이어질 것으로 보고 있다[4, 5].



그림3. 급격히 줄어들고 있는 빙하 (출처: Al Gore, Inconvenient Truth, 2008) [4]

지구상 대부분의 물은 바다에 있으며, 이는 염분을 포함한 염수(salt water)이다. 그 양은 전체 지구상 물의 약 97%이며, 나머지 3%정도가 염분이 없는 담수(fresh water)이다. 하지만, 이 담수의 대부분(약 2%)은 빙하의 형태로 존재하며, 지하수의 형태로도 많은 양이 존재한다. 용이한 수자원인 지표수로 존재하는 담수는 0.1%도 되지 않는다. 우리나라는 강이나 호소수와 같은 비교적 이용이 용이한 지표수(surface water)가 주로 상수원이 되는 나라이다. 미국은 상수원의 약 50%정도를 지하수에 의존하고 있다. 지표수나 지하수는 인간활동에 의해서 오염이 되기도 하며, 물의 자정능력을 초과할 경우 유입된 오염물질은 용수로서 가치를 상실하게 할 뿐만 아니라, 수생태계(aquatic ecosystem)를 파괴하게 된다. 경우에 따라서는 자연적인 이유로 비소와 같은 중금속이 다량으로 유입되어 지하수의 이용을 어렵게 하기도 한다. 방글라데시아는 반복되는 홍수피해로 고통을 겪고 있는 동시에, 지하수가 비소로 오염되어 심각한 건강상의 문제를 일으키는 지역이기도 하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 적절한 기술이 보급되어야만 한다. 특히 저개발국은 경제적인 이유로 물부족을 겪고 있는데, 가용한 수자원은 있지만, 적절한 질적 변환을 하지 않으면 안되기에 경제적인 기술이 요구된다. 이러한 기술은 적정기술(appropriate technology)로 불리며, 이에 대

한 세계적인 관심이 증가하고 있다.

중국에서는 만성적인 물부족 지역인 북쪽에 남쪽의 물을 공급하는 이른바 남수북조사업이라는 대규모 수로 건설 사업을 통해 지역간의 물공급의 불균형을 해소하려고 하고 있다.



중선	투자액(위안)	동선
920억	1432	420억
1432	1467	800
350-420	수량(m <sup>3</sup> /초)	

그림4. 중국 동북지역의 물부족 문제를 해소하기 위한 남수북조사업 (출처: 중앙일보 2014.12.29, [http://article.joins.com/ews/article/article.asp?total\\_id=16801708](http://article.joins.com/ews/article/article.asp?total_id=16801708))

지구규모로 가뭄이 심각해지고 있는 한편으로 물에 대한 수요의 지속적인 증가는 담수화 세계시장을 계속해서 성장하게 하고 있다. 건조한 중동지역은 세계적으로 중요한 담수화 시장으로 대규모 담수시설이 건설되고 있다. 쿠웨이트는 수도에서 남쪽으로 해안을 따라 100km 떨어진 Az-Zour에 Az-Zour North IWPP (Independent Water and Power Project) phase 1이라 명명된 프로젝트를 진행 중이다[6]. 공사가 완료되는 2016년 이후 하루 약 500만톤의 담수를 생산하게 될 것이다. 이것은 쿠웨이트가 현재 보유하고 있는 물공급 가용량의 20%를 증대시키는 것이라고 한다.



그림5. 쿠웨이트 대규모 담수발전프로젝트(Az-Zour North Independent Water and Power Project)

(출처: <http://www.water-technology.net/projects/az-zour-north-independent-water-and-power-project/az-zour-north-independent-water-and-power-project3.html>, [http://library.gdfrsuez.com/uid\\_a26e7ccc-c337-4deb-96f9-6b3dd48516ad/html/en/page70.html](http://library.gdfrsuez.com/uid_a26e7ccc-c337-4deb-96f9-6b3dd48516ad/html/en/page70.html))

미국의 서쪽을 흐르는 콜로라도강은 인근의 도시들에게 중요한 물공급원이다. 이 지역은 해마다 심각해져 가는 물부족을 해결하기 위해서 적극적인 공급량 증대책이 검토되어 왔다. 해수담수화는 그 가운데 중요한 대안이 되고 있다. 샌디에고 카운티는 Carlsbad에 대규모 해수담수화플랜트를 2015년 말 완공 예정이며, 하루 5천4백만갤런의 담수를 생산공급하게 될 것이다. 이것은 이 지역의 물공급량을 10% 증가시킬 것이다[7].

물문제는 양적인 부족도 문제가 되지만, 질적인 면도 중요하다. 산업화와 인구의 도시집중은 광범위한 수질오염 확대를 유발하고 있다.

다양한 분야의 기술적인 성과가 집약되어 발전되어온 것이 환경공학분야이다. 양적·질적측면에서 물 문제를

해결해온 담수화, 정수처리, 하폐수처리, 초순수처리 등 각종 수처리기술은 다학제적인 기술의 융합에 기반하고 있다. 도시 하수의 핵심처리기술인 활성오니법(activated sludge process)은 자연의 자정작용(自淨作用) 가운데 생물학적 작용을 중심으로 물리학적 단위기술들이 결합되어 개발된 것이다. 이외에도 정보의 축적과 기술의 발달로 오염된 물의 질적인 전환(qualitative transformation)을 위해서 다양한 생물학적, 화학적, 물리학적 단위공정들이 개발·도입되고 있다.

생물학적인 처리기술은 활성오니(activated sludge)로 표현되는 미생물의 군집이 호기적인 환경에서 유기성 오염물질을 무기물질로 안정화하는 것이 대표적인 방법이다. 호기적인 환경에서 BOD(biochemical oxygen demand)로 표현되는 유기성 오염물질을 이산화탄소와 물로 분해하며, 이 과정에 미생물들은 에너지를 얻고 성장한다. 자연계에서 일어나는 생화학적인 반응을 제한된 공간에 집적화하여 고농도의 오염물질을 단시간에 안정화시키는 방법이라 하겠다. 이 과정에 다량의 산소공급이 필요하며, 일반적으로 하수처리에 소요되는 에너지의 대부분이 산소를 공급해주는 송풍기(blower)의 구동에 투입된다. 최근에는 이러한 에너지 소비를 줄이는 동시에 신재생에너지로서 바이오 가스를 생산할 수 있는 혐기적인 공정(anaerobic process)이 활발히 연구되고 있다.

화학적인 처리방법은 응집반응에 의한 오염물질의 제거, 흡착반응에 의한 제거, 산화반응에 의한 제거 등이 대표적인 것들이다. 과거에 주로 이용된 방법은 인을 제거하기 위한 응집제의 투입이었다. 최근에는 미량오염물질에 의한 수질오염이 중요한 이슈로 부상하면서, 스위스 등 선진국에서는 분해가 어려운 미량의 오염물질을 분해·제거할 수 있는 고도산화방법을 하수처리에 도입하는 움직임이 활발하다.

물리적인 방법은 침강분리(gravitational separation), 사이클론, 여과(filtraion) 등이 대표적인 방법이다.

최근에는 막(membrane)을 이용한 공정의 진화가 1980년대 이후 활발히 이루어지고 있다.

한편, 단위 공정 내에서도 기술의 융합이 이루어지고 있다. MBR(membrane bio-reactor)이 그 대표적인 사례라고 할 수 있다. 물리적 분리공정인 막과 생물공정을 융합한 기술로 혁신적인 처리수질의 향상을 이루었다고 평가된다. 최근에는 에너지 소비를 줄이기 위해 혐기성 MBR(anaerobic MBR), FO-MBR(Forward Osmosis-MBR)등이 활발히 연구되고 있다.

생체모방막(mimetic membrane)은 매우 혁신적이며 흥미로운 융합기술의 개발 예이다. 아직 개발 초기단계로 극복할 과제가 많지만, 나노스케일에서 생물체의 구조를 결합하여 물리적인 분리소재를 개발하려고 한다는 것은 수처리기술의 융합적 성격을 극적으로 보여주고 있다고 하겠다. 향후 수처리기술의 발전방향은 이러한 나노기술과 같은 첨단기술이 계속해서 각 단위기술은 물론 시스템 개발에 융합되며 진행될 것이다[8].

## 2. 담수화기술의 진화 : 증발방식에서 역삼투방식으로

지구규모의 물순환은 염분을 포함한 해양으로부터 수증기의 증발과 대기중으로 상승, 그리고 응결된 물분자가 눈이나 비로 지상에 다시 돌아오는 과정으로 되어 있다. 이 과정에서 염분을 다량 포함한 바닷물이 담수로 지상에 돌아오게 되고, 이 변환은 근본적으로 태양에너지에 의해서 이루어진다. 이러한 변환과정을 기술적으로 대용량화하게 되면 염수에 열에너지를 가하여 제한된 공간에서 대량의 수증기를 만들어 염분과 물을 분리하고, 분리된 수증기를 다시 순수한 물로 응결시켜 모을 수 있다. 이러한 방식으로 개발된 전통적인 해수담수화기술을 증발방식이라 부른다. 대표적인 것으로 MSF(multi stage flash)증발법이 있다. 증발된 물은

다단으로 응결되어 담수로 회수되는데, 이 과정에 감압을 하게 되면 담수화된 물의 회수를 극대화 할 수 있다. 이러한 방식은 많은 양의 열에너지를 요구하게 되므로, 에너지소비를 최소화하는 기술이 요구되어 왔다. 해수로부터 1 m<sup>3</sup> (1,000 리터 또는 1 톤에 해당)의 담수를 생산하는데 요구되는 에너지는 증발방식의 경우 MSF가 10-16 kWh/m<sup>3</sup>인데 비해 역삼투(reverse osmosis) 방식은 3-4 kWh/m<sup>3</sup>정도로 적다. 증발방식은 이러한 문제를 해결하기 위해서 발전시설과 결합한 열병합 발전소(cogeneration plant) 형태로 에너지 효율을 높이는 것이 바람직하다.

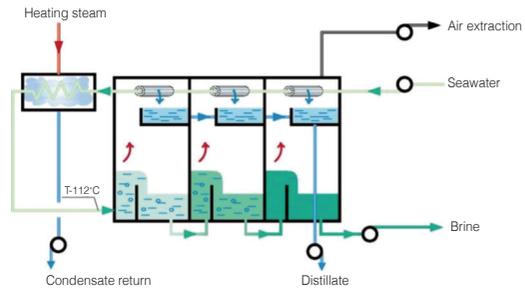


그림6. 증발방식 담수화기술의 개념도: MSF 증발 방법

에너지 사용량과 크기를 줄일 수 있다는 장점 때문에 최근의 담수화 시설의 확대는 역삼투방식이 중심이 되었다[9]. 해수담수화 시장은 이미 증발방식에서 역삼투방식으로 큰 전환이 이루어진 상태이다.

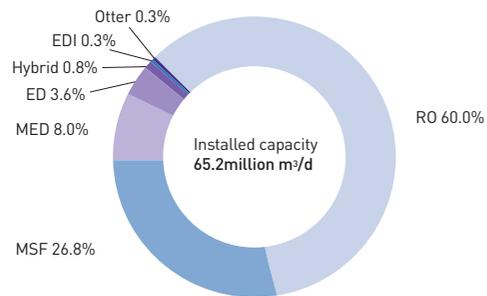


그림7. 누적 생산용량 기준 담수화 기술 세계 담수화 시장규모 (2010년 기준)

RO: Reverse osmosis; MSF: Multi-stage flash distillation; MED: Multi-effect distillation; ED: Electrodialysis; EDI: electrodeionisation; Other: includes freeze, nanofiltration, thermal and all other processes (자료출처: Desalination.com, 2012).

**표1.** 큰 상업용 담수화 과정의 에너지 소비와 물 생산 비용(평균)  
Energy consumption and water cost (average values) of large scale commercial desalination processes [10]

Process	Thermal energy, kWh/m <sup>3</sup>	Electrical Energy, kWh/m <sup>3</sup>	Total Energy, kWh/m <sup>3</sup>	Investment cost, \$/m <sup>3</sup> /d	Total water cost US\$/m <sup>3</sup>
MSF	7.5-12	2.5-4	10-16	1200-2500	(0.8-1.5) <sub>a</sub>
MED	4-7	1.5-2	5.5-9	900-2000	0.7-1.2
SWRO	-	[3-4] <sub>b</sub>	3-4	900-2500	0.5-1.2

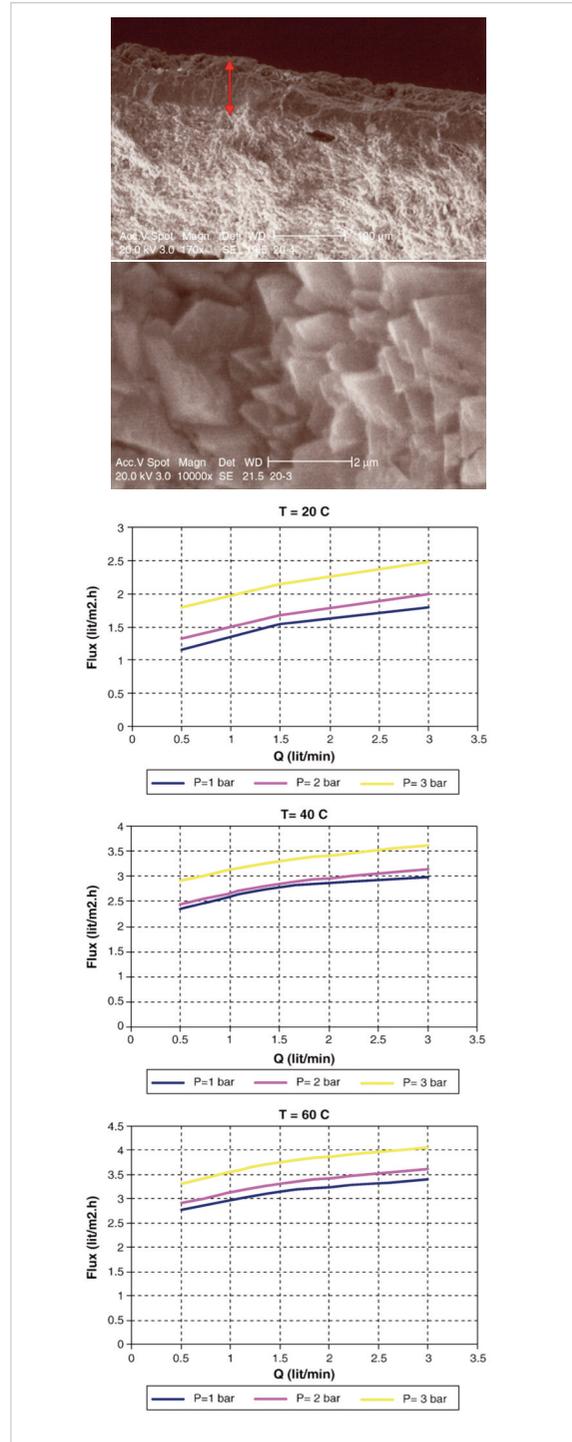
\* a: 보조금을 포함, b: 에너지회수를 포함

### 3. 나노소재를 이용한 역삼투막 개발

역삼투막은 수십 마이크로미터 정도로 매우 얇으며 염분을 통과시키지 않고 담수만을 통과시킬 수 있는 선택층(selective layer)을 핵심 구조로 가지고 있다. 이 선택층의 성능을 향상시키기 위해서 나노스케일의 소재와 제조기술을 도입한 새로운 역삼투막에 대한 연구가 활발하다. Zeolite-coated ceramic membrane, nanoparticle imbedded membrane, CNT membrane, mLBL membrane, biomimetic membrane, self-assembled block copolymer membrane 등은 기존의 역삼투막 보다 해수담수화에서 향상된 물의 투과성능을 기대할 수 있을 것으로 보고 활발하게 연구되고 있다.

#### 1) Zeolite-coated ceramic membrane

제올라이트(Zeolite)를 나노 스케일로 코팅한 무기막(ceramic membrane)은 유기고분자를 기반으로 한 막에 비해서 부가된 압력에 대한 물의 투과성능이 우수하다. 또, 무기막은 내열성, 내화학성이 우수하며 기계적 강도도 높아서 다양하고 가혹한 환경에서도 적용이 가능하다는 점에서 활용가능성이 기대되는 소재이다. 현 단계에서는 수열(hydrothermal) 방식으로 제조한 실험실 규모의 막이 그 가능성을 보고된 상태로 상용화를 위해서는 보다 균일한 초박막 코팅을 가능하게 하는 새로운 기술개발이 필요하다.



**그림8.** HS(Hydroxysodalite) zeolite coated ceramic membrane 단면 전자현미경사진 [11]

## 2) Inorganic nanoparticle imbedded membrane

고분자소재의 막에 무기성 나노입자를 결합한 형태의 inorganic-organic TFC(thin film composite)막은 이미 상업화가 실현된 새로운 소재이다. 종래의 유기고분자 RO막은 기계적인 강도를 제공하는 지지층(support layer)과 염분을 제거하는 역할을 하는 선택성 박층(selective thin layer)으로 구성되어 있으며, 그 전체 두께는 150 마이크로 정도 얇기 때문에 TFC막으로 불린다.

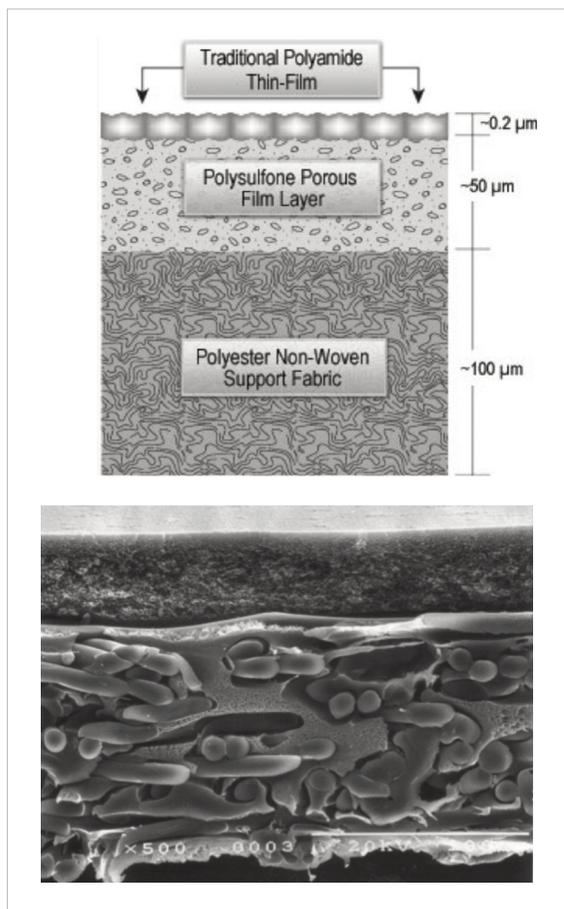


그림9. Polyamide selective thin film layer를 가지는 일반적인 고분자 역삼투막의 구조[12]

한편, inorganic-organic thin film nanocomposite (TFN)막은 무기성 나노입자(inorganic nanoparticle)를 선택층에 넣어 기계적 강도, 화학적 안정성 등을 향상시키며, 향상된 물투과도(water flux)를 얻는 장점을 기대할 수 있다. 제올라이트 나노입자를 도입한 TFN막은 기존의 폴리아라이드 선택층(polyamide selective layer)의 염분제거 성능을 유지하면서도 물의 투과도는 크게 향상되었다. 기존의 막과 동일한 크기를 유지하며 향상된 성능을 얻을 수 있고, 기존의 모듈과 관(vessel)의 형태를 그대로 활용할 수 있기 때문에 빠른 상용화가 가능하였다고 할 수 있다[13].

무기성 나노입자 중에는 은나노입자(silver nanoparticle)나 타이타니아(이산화 티타늄) 나노입자(titanium nanoparticle)의 도입이 시도되고 있다. 은나노입자는 나노물질 가운데 상업적으로 가장 많이 이용되고 있는 물질 중 하나로, 항균성이 뛰어나기 때문에 공정의 운전 중에 막 표면에 형성되는 바이오 필름(bio-film)을 억제할 수 있는 장점이 있다. 역삼투막은 물론 수처리용 막은 대부분 가압식으로 물을 투과시키며, 불순물을 제거한다. 원수(source water)에 포함된 불순물 가운데에는 유기 및 무기물질은 물론 미생물도 포함되어 있는 것이 일반적이다. 이들 불순물들은 물이 막을 통과하는 운전과정에 막의 표면에 자연스럽게 쌓이게 된다. 물리적인 이동으로 쌓이는 것은 물론이고 활성을 가진 미생물들은 막의 표면에 바이오 필름의 형태로 부착하여 살아가면서 그 두께는 두꺼워진다. 이렇게 되면 물이 투과하는데 저항이 커지게 되고, 투과도가 떨어지며 염분의 제거율도 낮아지게 된다. 이러한 현상을 생물부착(bio-fouling)이라고 하는데, 전세계적으로 대부분의 역삼투 담수시설에서 발생하는 문제로 중요한 해결과제이다. 다양한 연구자들과 산업체에서는 이러한 현상을 방지 또는 억제하는 성능을 가진 항생물 부착막(anti bio-fouling membrane)에 대한 연구가 진행되고 있다.

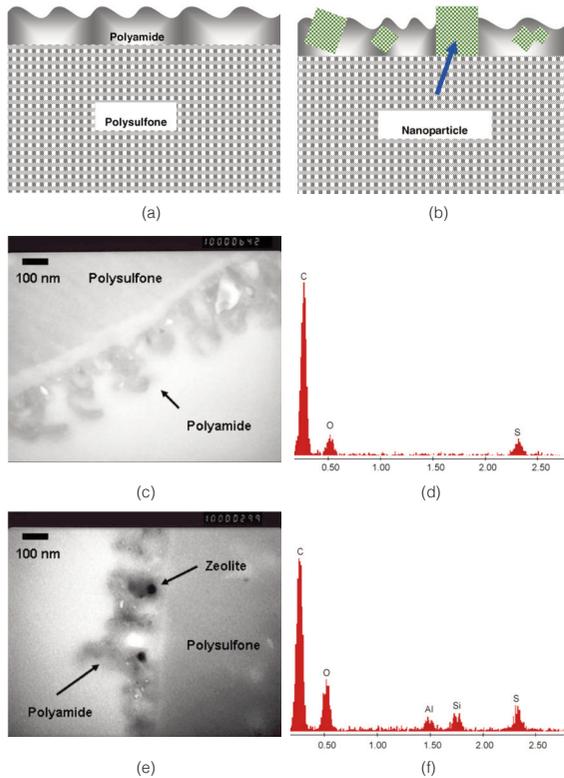


그림10. Zeolite nano-particle imbedded TFN composite membrane: (a) pure polyamide TFC membrane (b)nanocomposite membrane 단면 모식도 (c),(e) 전자현미경(TEM) 사진 (d),(f) EDX 분석, 선택층에 zeolite nano-particle이 포함되어 있음[13].

### 3) Carbon Nano-Tube (CNT) membrane

CNT 막은 마찰이 없는 소수성의 구멍을 가지기 때문에, 기존의 막에 비해서 향상된 물투과도를 얻을 수 있다. 또한, 기존의 고분자 유기물질로 합성된 막(polymeric membrane)은 주로 중합반응에 의해 만들어지기 때문에 그 구조의 불규칙성과 구멍이 일정하지 않게 분포하는 근본적인 한계를 가지고 있다. 반면, CNT 막은 고도의 균일한 구조를 가지게 되어 매우 일정한 구멍크기를 가지는 구조를 제공할 수 있다. 즉, CNT가 수직으로 일정한 규칙성을 가지면서 배열된 형태로 물 흐름의 통로

역할을 하게 된다[14]. 또, 다른 방식의 적용은 CNT가 가지는 특성을 활용하기 위해 종이 형태로 제작하여 이용하는 것이다. CNT를 이용한 막 개발이 극복해야 할 과제는 우선 복잡한 제조방법과 경제성, 그리고 구멍 크기의 균일성을 기술적으로 확보하는 것이다. 불균일한 구멍은 염제거율을 높이는데 한계를 가지기 때문이다 [15].

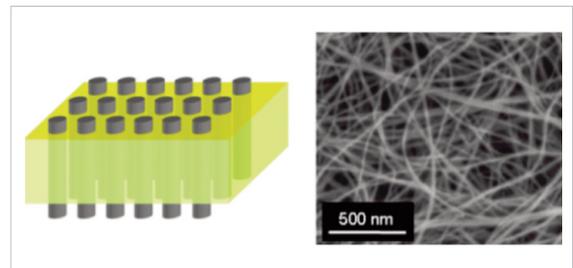
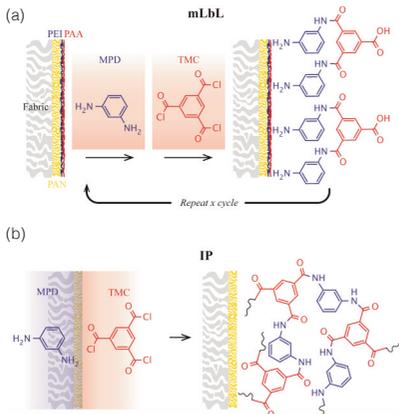


그림11. CNT를 이용한 막의 제조법 (좌) isoporous CNT membrane, (우) CNT Bucky-papers [14]

### 4) Molecular Layer-by-Layer (mLBL) membrane

mLBL막 역시 구조를 균일하게 조절할 수 있는 형태로 제작한 막이다. 전통적인 polyamide TFC막은 m-phenylenediamine(MPD)과 trimesoyl chloride (TMC)의 계면중합반응(interfacial polymerization reaction)에 의해서 cross-linked aromatic polyamide(PA) network으로 이루어진 얇은 센터층을 형성하게 된다. 이러한 방식은 불균일한 내부구조와 융선골(ridge-and-valley) 표면을 생성하게 되는 것에 비해, mLBL 방식으로 제조한 막은 고도로 균일한 구조로 폴리아마이드 선택층을 형성할 수 있게 한다. 기존의 방식보다 필름의 두께와 구조를 조절하며 선택층을 형성할 수 있으며, 균일한 표면구조를 가지므로 불순물질의 표면부착에 의한 오염도 방지할 수 있을 것으로 기대되고 있다[16]. 이러한 구조는 정삼투막(forward osmosis



membrane)으로의 응용도 기대되고 있다[17].

그림12. (a) Molecular layer-by-layer(mLBL)방법과 (b)전통적인 계면중합(IP, interfacial polymerization)방법에 의한 polyamide thin film composite membrane의 제조 모식도.

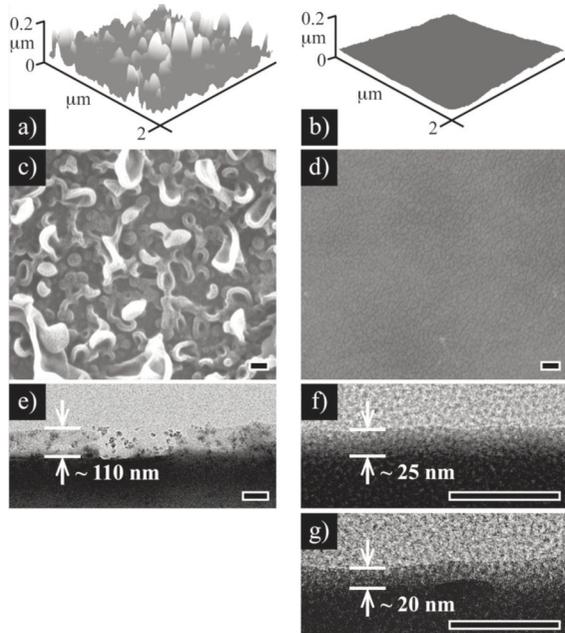


그림13. AFM height image (a)계면중합(IP)법, (b)mLBL법, SEM image (c) IP-PA표면, (d)mLBL-PA표면, (e) IP-PA 단면, (f),(g) mLBL 단면 [16]

## 5) Biomimetic membrane

생체모방기술(Biomimetics)은 생물학적으로 생성된 물질의 기능, 구조, 형성과정을 연구하여 그것을 모사하여 인공적으로 유사한 물질을 합성하는 것을 의미한다. 역삼투 방식에 적용하고자 개발되고 있는 생체모방막(biomimetic membrane)은 아쿠아포린(aquaporins, AQPs)을 이용하는 것이다. 아쿠아포린은 유체의 이송이 중요한 각종 세포와 조직에서 물분자의 이동통로 역할을 하는 일단의 막단백질들이다. 아쿠아포린은 작은 소수성의 단백질로 삼투압차이에 따라서 물분자를 이동시키는 역할을 한다. 이 아쿠아포린을 지지체와 적절하게 결합한 형태로 막으로 제조할 수 있다면, 기존의 유기고분자를 이용한 TFC막보다 크게 향상된 물투과도를 얻을 수 있다는 것이 확인되고, 활발한 연구가 진행되고 있다[18].

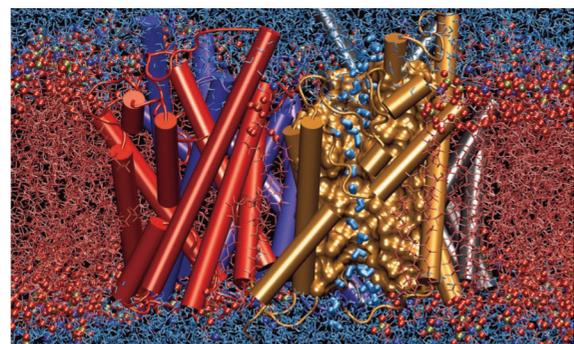
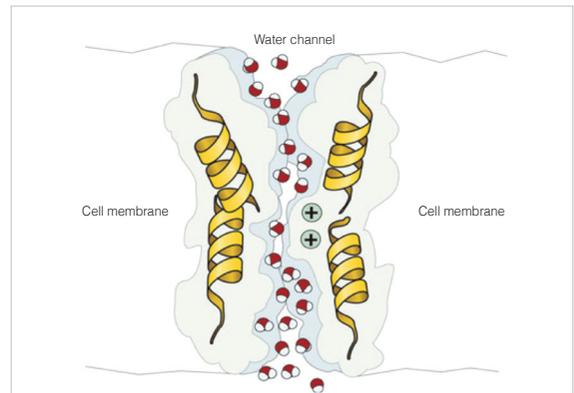


그림14. 세포막에서 물 통로 역할을 하고 있는 아쿠아포린 단백질 3차원구조 모식도, 물 통로의 크기는 길이가 4nm 이고 직경은 가장 좁은 곳에서 0.3nm [19]

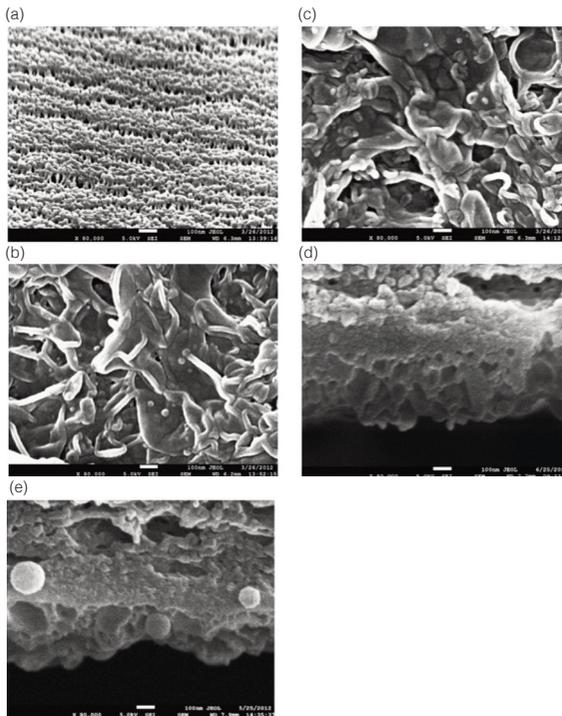
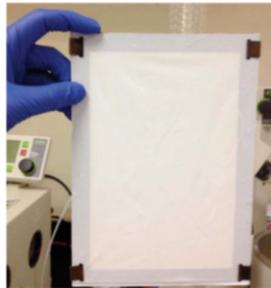
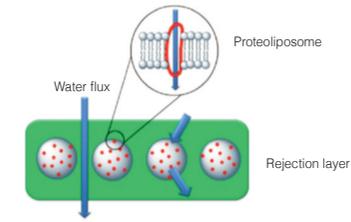


그림15. Aquaporin-Z를 interfacial polymerization방법으로 막 구조에 포함시킨 아쿠아포린 기반 생체모방 막(ABM)

한편, 합성된 단백질로서 아쿠아포린을 이용하기에는 실온에서의 안정성에 문제가 있을 수 있다는 지적이 있다. 이를 극복하기 위해서 화학적으로 합성된 유사한

구조를 이용하는 연구도 제안되어 있다. 즉, 아쿠아포린의 구조와 기능을 모사하여 인공적으로 합성한 물질을 막에 활용하려는 것이다. Sandia National Lab에서는 세라믹 생체모방막을 개발하였으며, 같은 실험조건에서 향상된 물투과도를 얻었다. 기존의 고분자 막이 구멍을 통하여 직접적으로 물을 이동시키는 것이 아니라 확산(diffusion)에 의한 물질이송에 의해 물을 투과시키고 있는 것과 달리 이러한 막들은 나노크기의 구멍을 가지며 이것이 물 통로역할을 하는 구조를 가지고 있다[20].

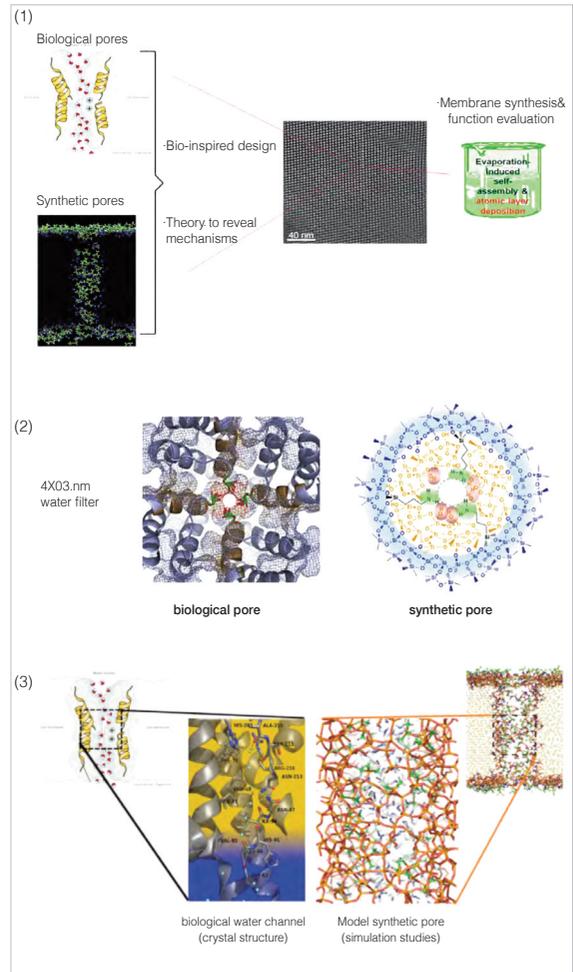


그림16. 생체모방을 통한 막의 합성 (1) 수직단면 (2) 수평단면 (3) 물투과 구조 [21]

## 6) Self-assembled block copolymer membrane

블록 공중합체(Block copolymer)는 자가조립(self-assembly)에 의해서 고도로 규칙성을 가진 구조를 형성할 수 있는 고분자 단위체이다. 자가조립조건을 변화시키기에 따라서 다양한 구조를 얻을 수 있으며, 수처리에 적용할 수 있는 원통형의 구멍 구조를 가지는 막을 제조할 수 있다[22].

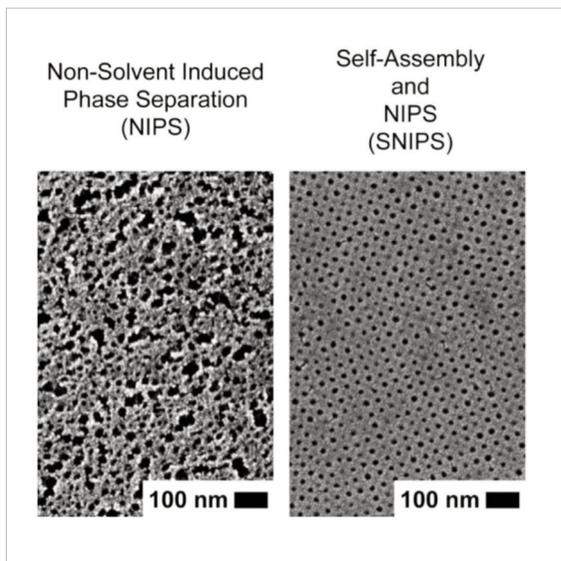


그림17. 블록 공중합체  
자료출처: <http://www3.nd.edu/~waterlab/research1.html>

## 4. 역삼투 방식을 대체 보완할 차세대 담수화 기술

새로운 소재를 도입한 역삼투막의 연구개발이 활발히 진행되고 있는 한편으로, 에너지소비를 감소시키고 성능을 향상시키므로써 역삼투 공정을 대체하거나 보완할 수 있는 차세대 담수화 공정들이 연구개발 되고 있다. 이들 기술 중 대표적인 것이 정삼투(forward osmosis) 방식과 막증류(membrane distillation)방식이다.

## 1) 정삼투 방식

증발방식에 비하여 에너지 소비를 줄일 수 있었던 역삼투 방식 보다 더 에너지 소비를 더 줄일 수 있는 방법으로 정삼투 방식이 연구되고 있다[23, 24]. 역삼투 방식은 농도차에 의해서 발생하는 삼투압의 역방향으로 그보다 더 높은 압력을 가하여 해수와 같은 고농도 염수(salty water)로부터 반투막(semipermeable membrane)을 통하여 담수 혹은 탈염수(de-salted water)를 얻는 것이다. 이에 비하여 정삼투 방식은 자연적인 삼투현상을 이용하는 기술이다. 즉, 부가적인 압력을 가할 필요 없이 고농도를 조성한 방향으로 삼투막을 통해 물을 이동시킨 후에 고농도 환경을 조성한 물질-유도물질(draw agent) 또는 유도용질(draw solute, DS)로 부름-을 투과된 물과 분리하는 기술이다. 운전압력이 매우 낮아 에너지가 적게 들며, 막 표면의 오염도 상대적으로 심하게 발생하지 않는 장점이 있다. 이 기술은 오래 전에 원리가 제안되어 있었으나, 2005년 이후 연구가 급격히 증가하기 시작하였다. 그것은 정삼투에 특화된 막이 상용화되면서부터이다. HTI사가 CTA(celulose triacetate)제 정삼투 전용 막을 개발하여 보급하였다. 초기 상용화된 형태는 휴대용 팩 형태로 군용이나 캠핑용으로 오염된 물을 정화하는 것이었다.



그림18. HTI사의 팩 형태 휴대용 정삼투 정수장치, 오염된 물을 한쪽에 채우면 정삼투막을 통과하여 시럽이 들어있는 반대쪽으로 순수한 물만 이동하여 결과적으로는 안전한 음료를 얻게 된다.

역삼투막과 같이 정삼투막도 대용량 시설에 적용하기 위해서 막의 투과도 향상이 요구되며, 높은 투과도를 얻을 수 있는 TFC형태의 폴리아미드의 개발이 최근 수년간 활발하게 진행되었다. 고압을 가하지 않기 때문에 역삼투막에 비해서 상대적으로 요구 강도가 낮게 되고, 이 때문에 막의 두께를 더 얇게 하면서 투과도를 더 높이는 방향으로 개발이 진행되었다.

한편, 정삼투공정의 기술적인 핵심과제는 막의 개발보다는 적당한 유도용질을 개발하는 것이라고 할 수 있다. 2000년대 중반 이산화탄소와 암모니아를 용해시켜 얻는 용액(ammonium carbonate와 ammonium carbamate의 혼합액)을 이용하여 정삼투 공정을 구동할 수 있고, 막을 투과한 물이 유도용질로부터 분리하는 것은 섭씨 60도 정도의 낮은열을 가함으로써 간단하게 가능하다고 하는 연구발표가 정삼투의 실용가능성에 대해 큰 관심을 끄는 계기가 되었다[25]. 하지만, 이러한 유도용질은 완벽한 분리가 어렵기 때문에 대용량의 담수화시설로 적용하여 음용수를 생산하기에는 한계가 있다. 현재는 해수담수화에 단독으로 적용하는 것 보다는 역삼투와 결합된 형태 또는 특화된 수요(niche market)를 대상으로 적용 사례를 확대하고 있는 추세이다.

정삼투 방식의 핵심기술은 막보다는 유도용질이기에 다양한 유도용질의 개발을 위한 연구도 진행되었다. 나노키의 자성입자를 고농도로 분산시킨 것을 DS로 하여 높은 물 투과를 얻은 연구결과가 보고되었으나, 이 또한 완벽한 분리에 한계가 있으며 나노입자의 특성상 안정적인 분산상태를 유지하는 것도 문제가 된다. 용존성의 유도용질은 일정량이 막의 반대쪽으로 이동하는 RSF(reverse salt flux) 현상 또한 해결해야 할 과제이다. 물 투과도가 상승하면 이 RSF도 증가하는 것이 일반적이어서, 이동한 유도용질의 영향을 해소하는 것도 연구과제이다. 다양하고 새로운 유도용질

연구개발과 그 적용방식이 이렇듯 활발히 연구 되고 있다. 2012년에는 최초의 상용 정삼투 해수담수화 플랜트가 영국의 Modern Water사에 의해서 오만에 설치되기도 하였다.

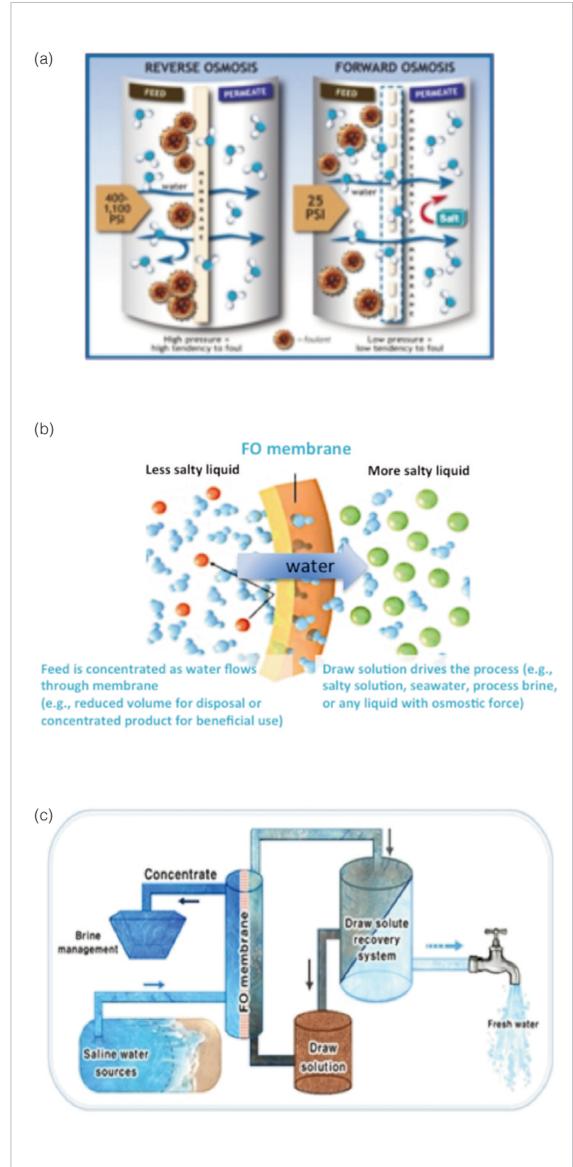


그림19. (a) 역삼투 방식과 정삼투 방식의 개념 비교. (b) 유도용질을 활용한 정삼투 방식 구동 원리. (c) 정삼투 공정개념도.

역삼투 방식은 고압을 외부로부터 가해주어야 하는 반면, 정삼투 방식은 고농도의 유도용질에 의해서 유도되는 삼투압에 의해 정삼투막을 통해서 물이 투과된다. 투과된 물은 유도용질과 분리되어 담수가 된다.

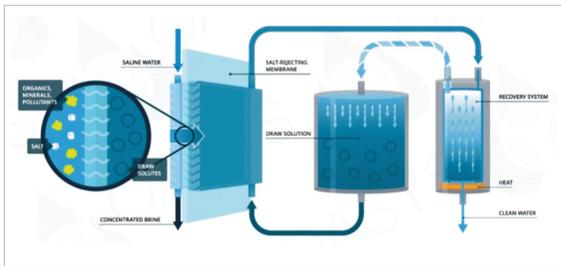


그림20. 미국 Oasys사의 정삼투시스템 개요도  
자료출처: <http://oasyswater.com/solutions/technology/>

미국의 Oasys사의 정삼투 시스템은 정삼투막과 유도용질 용액 회수 시스템을 제공한다고 설명하고 있다. 기술의 적할·용분야로 세일가스플랜트와 같은 석유가스 산업에서 발생하는 탁도(turbidity)와 염도(salinity)가 매우 높은 공정수, 광산폐수, 발전소 폐수, 역삼투 농축수 등의 처리를 제안하고 있다. 모두 염도(salinity)가 높아 역삼투로는 처리가 곤란하며, 폐수 무방류(zero liquid discharge, ZLD)가 요구되거나, 처리수를 순환해서 재이용해야 하는 경우들이다.

Porifera사도 정삼투막과 모듈 시스템을 제공하며, 생산품의 농축(FO 단독 공정)과 폐수의 처리(정삼투+역삼투 hybrid 공정)에 적용을 제안하고 있다. 폐열을 이용할 수 있을 경우에는 막증류와 결합한 형태의 시스템을 제안한다. 또한, 역삼투 방식 해수담수화 공정에서 농축배출수로 발생하는 브라인(brine)을 유도용질로 활용하고 MBR (membrane bio-reactor)의 막 역할을 정삼투막에 담당하는 방식으로 결합된 융합시스템도 제안하고 있다. 이러한 다양한 정삼투 공정의 적용방법은 산업계는 물론 학계에서도 활발하게 연구되고 있다.

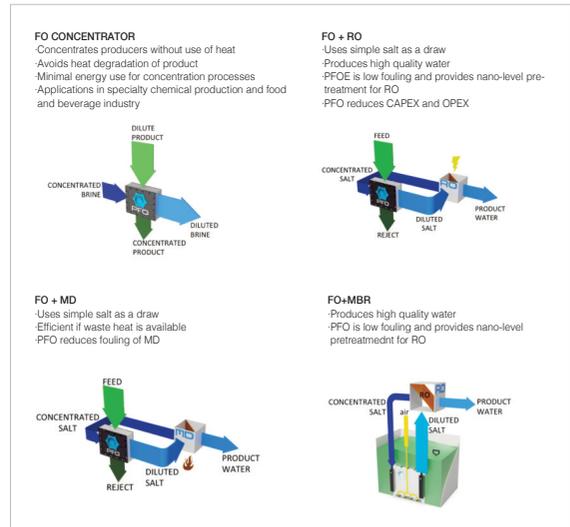


그림18. Porifera사의 정삼투의 응용 및 복합공정(hybrid process)  
(자료출처: <http://porifera.com/>)

## 2) 막증류 방식

역삼투 공정을 대체할 수 있는 또 다른 담수화기술로서 막증발법 혹은 막증류법이라고 불리기도하는 막증류 공정도 활발하게 연구 개발되고 있다[26, 27]. 막증류 기술은 열에너지에 의한 증기압의 변화로 물분자를 증기화한 후에 냉각시켜 순수한 물을 얻는 증발법과 막 분리 기술이 결합된 것이라고 할 수 있다. 기술이 처음 소개된 것은 1963년 Bodel의 특허와 4년후에 발표된 논문[28]에 의해서다. 기술적인 가능성은 제안되었지만 역삼투에 비해 생산성이 낮다는 평가로 큰 주목을 받지 못하였다. 연구가 활기를 띠게 된 것은 역시 막 소재의 개발이 가속되면서부터이다. 마이크론 보다 작은 크기의 구멍을 가지는 정밀여과급 물에 젖지 않는 소수성막(hydrophobic membrane)을 사이에 두고 양쪽에 온도차를 가지는 물을 접촉하여 두면, 증기압차가 생겨 온도가 높은 쪽으로부터 발생한 수증기 분자가 소수성의 막 구멍을 통과하여 온도가 낮은 쪽으로 이동하게 된다. 이동된 수증기는 냉각되어 물분자로 다시 돌아가게 되

고, 높은 온도 쪽에 증기화될 수 없는 불순물은 그대로 남아 결과적으로는 증류된 담수를 얻게 되는 것이다. 100 마이크론 두께의 막을 통해 증기를 이동시켜 담수를 얻는 기술이기 때문에 거대한 보일러에 열을 가해 발생한 수증기를 냉각시켜서 응축된 담수를 얻는 전통적인 증발방식에 비해 효율이 좋고, 낮은 온도에서도 증기압의 차이만 막의 양쪽에 주어지면 되므로 상대적으로 낮은 온도에서 운전이 가능하다. 따라서, 수심도 내외의 폐열을 이용할 수 있다는 장점이 있고, 태양열이나 지열을 이용할 수도 있다.

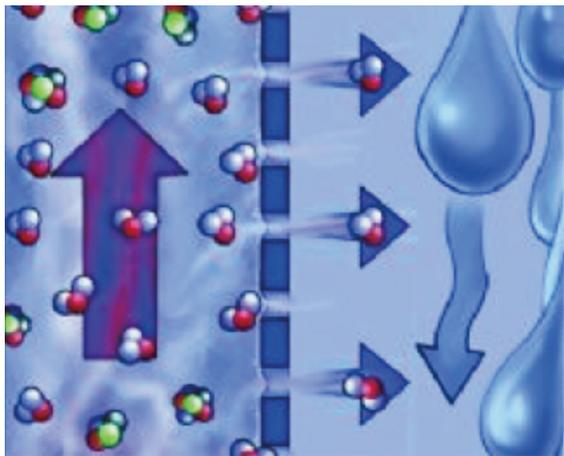


그림22. 막증류 방식 개념도

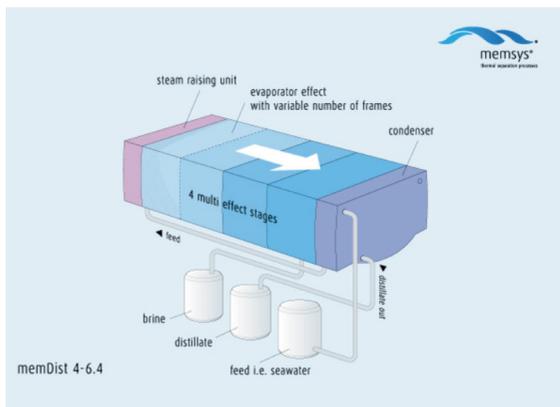


그림23. MEMSYS사의 다단식 막증류 공정

최근에는 역삼투 공정에서 발생하는 농축된 배출수를 막증류에 의해서 담수화하여 전체 시스템의 담수화 회수율을 높인 역삼투-막증류 융합 시스템에 대한 연구가 중요한 관심을 끌고 있다. 역삼투 방식 해수담수화의 경우 50%이상의 회수율을 얻기가 기술경제적으로 곤란하기 때문에, 회수율을 높이고 농축배출수를 줄일 수 있는 막증류 방식의 활용가능성이 높기 때문이다. 막증류는 일반적으로 섭씨 수십 도의 적용온도 조건에서도 증발할 수 없는 염분을 100% 분리할 수 있고, 회수율을 높일 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 증발식 담수시설에서도 배출수가 발생하고 열을 이용할 수 있다는 장점을 살려 막증류와의 융합 공정 실용화 연구도 진행되고 있다[29].

이러한 많은 장점을 지닌 방법이지만 아직 기술적 난제들이 많다. 원리적으로는 증발을 이용하는 것이므로 100%까지 회수율을 높일 수 있으나, 이 과정에 과포화 상태에 도달한 염분이 석출되게 된다. 이것이 막증류막의 표면에 쌓이게 되면, 막 오염이 진행되어 물투과도가 급격히 저하되게 된다. 또, 표면이 친수성으로 바뀌게 되어 물 투과 증기압(liquid entry pressure)이 낮아져, 순수한 수증기만이 투과되는 것이 아니라 염분이 포함된 물이 직접 통과하게 되는 구멍의 젖음 현상(wetting)이 발생하게 되어 담수화된 물을 얻을 수 없게 된다. 따라서, 이러한 현상을 방지하기 위한 적절한 전처리(pre-treatment)기술이 개발되어야 한다. 또, 막증류 기술은 열에너지를 투입하여야 하기 때문에 가능한 회수율을 높이고 에너지 효율을 높이는 것도 매우 중요한 연구과제이다.

### 3) 태양에너지 응용

자연적인 해수담수화는 태양에 의한 바닷물의 증발과 순환에 의해 이루어진다. 이 태양에너지를 직접 또는 간접적으로 이용하여 장치화 하면, 신재생에너지 담수화시스템을 구축할 수 있다. 물론, 지역에 따라서는 풍력이나 지열을 이용할 수도 있으며, 이를 통해 담수화에 소요되는 에너지를 줄여 환경친화적인 담수시설 구축이 가능하다[30]. 여기서는 태양에너지를 이용한 담수화기술의 예를 살펴본다.

#### 태양종류 (Solar Distillation)

태양열을 직접 또는 간접적으로 이용하여 해수를 담수화할 수 있다. 앞에도 기술한 바와 같이 지구로 유입하는 태양에너지가 지구규모의 거대한 물순환의 핵심적인 구동력이 되고 있으므로, 이것을 소규모로 장치화하여 담수를 생산하는 것은 기술적으로 가능한 일이다. 단, 태양열은 당연히 하루 중 낮에만 얻을 수 있으며, 흐리거나 비가 오는 등 기상에 따라 모을 수 있는 양이 줄어드는 단점이 있다. 하지만 다른 에너지원이 없거나, 에너지공급망 밖에 있는(off-power grid) 원격지나 저개발지역에는 유용한 기술이 될 수 있다. 통칭하여 수동 태양 증류법(passive solar distillation)이라고 분류되며, 저개발지역의 적정기술로서 관심을 모으고 있다. 소형으로는 watercone과 같은 간단하고 다양한 기술이 창의적으로 제안되고 있다.

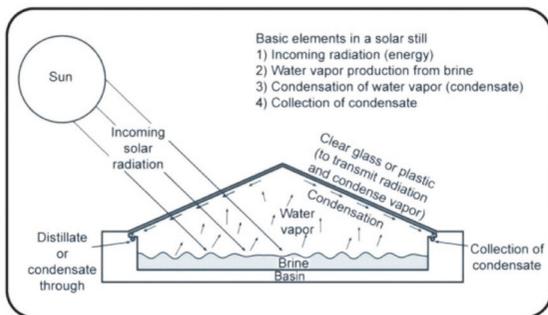


그림25. 태양열을 직접 이용한 전형적인 담수화방법 (passive solar distillation)

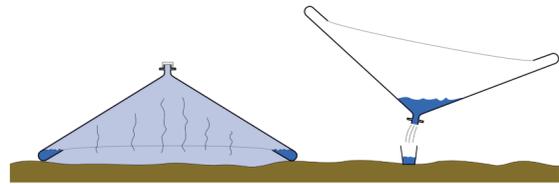


그림26. 적정기술로 활용할 수 있는 태양열이용 담수법 예 (출처: source: Watercone.com)

#### 태양에너지 기반 막 공정.

태양에너지를 막공정과 결합한 형태로 담수화를 하는 방식들도 제안되고 있다. 역삼투와 결합한 형태로 오래 전에 제안된 것은 태양전지(photovoltaic reverse osmosis, PV-RO)이다. 태양전지에 의해 전기를 생산하여 역삼투의 구동에 이용하는 것이다. 이 기술은 재생가능한 에너지로서 태양에너지를 활용하며, 안정적인 구동을 위해 태양전지판, 배터리, 인버터, 레어기 등을 완비한 시스템으로 설치·운영된다. 재생에너지를 활용하는 장점이 있으나 시설투자와 운전효율의 향상을 통한 경제성 향상이 중요한 해결과제로 남아있다.

태양열 막증류(Solar powered membrane distillation, SP-MD)도 연구개발이 진행 중인 태양에너지를 이용한 담수화기술이다. 태양열을 집열하여 직접 막증류에 공급하거나 축열하여 공급하는 방식으로 막증류에 요구되는 열에너지를 공급하는 기술이다.

## 5. 결론

1972년에 출판된 로마클럽의 보고서는 인류가 같은 삶의 방식을 고집할 경우 인류의 문명은 100년을 넘기지 못할 것이라고 경고한 바 있다[31]. 이 보고서는 지구상의 물에 대해서도 그 오염이 심각해 지고 이용할 수 있는 물의 양도 제한을 받을 것이라는 어두운 전망을 제시하였다. 2004년에는 30년이 지난 상황에서 그 예측이 대부분 맞아가고 있다는 보고서가 같은 연구그룹에 의해서 발표되었다. 반면에 줄리안 사이먼(Julian Simon)의 'Resourceful earth'로 상징되는 지구의 미래에 대한 낙관론을 주장하는 사람들도 적지 않은 수를 차지하고 있는 것이 현실이다[32]. 하지만 인류의 역사 이래 낙관론이 지지를 얻을 수 있었던 것은 기술의 발달이 있었기 때문이다. 비판론을 선호하는 입장이라고 하더라도 상황을 개선하기 위해서는 기술적인 해결방안을 찾아 대응하는 노력을 계속해야 할 것이다. 문제해결을 위한 기술의 발달과 실질적인 활용은 예측 가능한 다양한 측면을 주의 깊게 살피면서 세심한 대응을 해나가는 가운데 이루어져왔다고 할 수 있다. 해수담수화의 기술발달도 이러한 맥락에서 단순히 혁신적인 성능의 향상에만 주의를 기울이지 않고, 당면한 인류의 문제인 에너지와 환경문제에 적절하게 대응하는 방식으로 진행되어야 할 것이다[33]. 즉, 에너지소비를 최소화하는 동시에 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 혁신적인 소재와 융합기술에 기반한 공정을 개발하여야 하며, 또한 환경에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 궁극적으로는 지구규모의 물부족을 해소

시킬 수 있는 지속 가능한 기술로 개발 보급되어야 할 것이다.

우리나라는 연간 평균 강우량이 약 1,300mm로 세계평균으로 보면 적은 편은 아니라고 할 수 있으나, 1인당 수자원량으로 환산할 경우에는 수자원이 제한적인 물스트레스 국가에 해당한다. 또한, 연간 강수량은 7-8월의 호우기에 집중되어 있으며, 지역적으로도 편차가 심하다. 제철소 등이 입지한 지역에서는 물수요와 공급이 균형을 이루지 못해 물의 재이용과 해수담수화가 현실적인 대안이 되고 있다. 포항시는 하수처리장에서 처리한 물을 포항제철에 공급하는 대규모시설을 2014년에 가동하기 시작하였으며, 광양제철소에서는 용수공급을 위하여 3만 톤급의 해수담수화시설이 설치되었다.

과거 증발법을 중심으로 국내기업이 세계 담수화기술 시장에서 중심적인 역할을 해왔으며, 최근에는 역삼투방식으로도 중동을 중심으로 한 해수담수화 시장에 적극적으로 참여하고 있다. 해수담수화는 물재이용과 함께 세계적으로 수요가 증가하는 성장시장이라고 할 수 있다. 핵심소재인 역삼투막과 관, 고압펌프, 사전처리 UF/MF막이 국산화되고 테스트베드도 건설되는 등 적극적인 연구개발이 최근 활발히 진행되고 있다.

중동, 미국, 중국, 남미, 서유럽, 북아프리카 등을 중심으로 한 세계적으로 해수담수화시장은 확대되고 있는 추세이다. 치열한 기술개발 경쟁이 이루어지는 가운데 차세대 해수담수화에 대한 연구개발도 활기를 띠고 있으며, 국내에서도 사업단과 연구단 규모의 국가연구개발 프로그램도 진행되고 있다. 경쟁력이 있는 소재의 개발은 물론, 이들 소재를 시스템화하는 기술도 중요하다. 수처리시장은 새로운 시설의 건설이 요구되는 신규시장과 기존의 시설을 개량하는 기존 시장 모두에 새로운 기술이 필요하다. 국내에서도 유사한 일이 진행되고 있지만, 인프라가 완비된 선진국에는 플랜트(operation and management) 최적화를 위한 기술력의 선진화 중요성도 커지고 있다. 어떤 경우이던, 앞선 기술력과 창의성이 과거보다 더욱 요구되는 시대로 전환되는 시점에 있다.

융합학문인 환경공학분야의 특성이 그대로 집약되어 있는 담수화 혹은 수처리는 다양한 전문분야의 학제적인 기술융합이 특히 요구되는 분야이다. 주의할 것은 소재의 우수성이 확인되거나 검증된다고 하더라도, 공공이나 민간시설에 실제 적용하기 위해서는 대용량화와 경제성이 확보되어야 한다. 핸드폰과 같이 소형이고 기술주기가 짧으며, 개인단위의 취향이 관계하는 상품이 아니라, 수명이 상대적으로 길고 안정적인 서비스를 공공과 민간에 공급하는 시설 관련 분야이기 때문에 확대 적용에 앞서 기술에 대한 안정성 검증을 요구하는 경우가 대부분이기 때문이다. 이러한 조건을 충족시키는 동

시에 경쟁력을 갖춘 기술력을 확보하기 위해서는 첨단기술의 개발과 동시에 실증을 거치는 연구개발전략을 취하여야 한다. 또한, 국내산업 전반의 과제로 부각된 추격형 기술개발 패러다임의 탈피, 첨단요소기술의 학제간 융합을 통한 독자적이고 차별적인 연구개발 노력이 담수화기술을 포함한 수처리 분야에도 절실히 요구되기에, 전략적인 융합기술개발이 중요하다 하겠다.



# LEE, SEOCKHEON

이석헌(李錫憲)



## 학 력

- 1989 서울대학교 토목공학과 공학사
- 1991 서울대학교 토목공학과 공학석사
- 1997 The Univ of Tokyo Urban Eng Ph.D.
- 1991 서울대학교 토목공학과 공학석사

## 경 력

- 現)한국과학기술연구원(KIST) 물자원순환연구 단장
- 現)한국물환경학회 부회장
- 現)KDS(Korean Desalination Society) Vice President
- 前)Univ of Central Florida Visiting Scholar
- 前)Univ of North Visiting Scholar

## 참고문헌

---

- 1) IPCC, Climate change 2007, Cambridge Press, 2007
- 2) WWAP (World Water Assessment Programme), the United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk, Paris, UNESCO, 2012
- 3) UNEP/GRID-ARENDAAL, VITAL WATER GRAPHICS, An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters, 2nd Edition, 2008
- 4) Al Gore, An Inconvenient truth, 2008
- 5) Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J. P. Palutikof, Eds., Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008
- 6) LIS STEDMAN, 'Drought and demand drive the global desalination market', Water 21, IWA, June, 2015
- 7) David Talbot, Desalination out of Desperation, MIT technical technology review, Dec 16, 2014
- 8) 오동익, "미래지향형 하수처리기술의 동향과 향후 전망", Special Issues, GGCP(Global Green Growth Policy, 국가환경정보센터, 2011, 51호, 1-31
- 9) Ibrahim S. Al-Mutaz, A comparative study of RO and MSF desalination plants, Desalination, 1996, 106, 99-106
- 10) Noredine Ghaffour, Thomas M. Missimer, Gary L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability, Desalination, 2013, 309, 197-207
- 11) Mansoor Kazemimoghadam, New nanopore zeolite membranes for water treatment, Desalination, 2010, 251, 176-180
- 12) Robert Burk, New Technology spotlight, CaribDA News, 2012, Volume 2, Issue 4,
- 13) Byeng-Heon Jeong, et al., Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis membranes, Journal of Membrane Science, 2007, 294, 1-7
- 14) Kallista Sears et.al., Recent Developments in Carbon Nanotube Membranes for Water Purification and Gas Separation, Materials, 2010, 3(1), 127-149
- 15) Rasel Das, Md. Eaqub Ali, Sharifah Bee Abd Hamid, Seeram Ramakrishna, Zaira Zaman Chowdhury Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination, Desalination, 2014, 336, 97-109
- 16) Joung-Eun Gu, et al., Molecular Layer-by-Layer Assembled Thin-Film Composite Membranes for Water Desalination, Adv. Mater. 2013, 25, 4778-4782
- 17) Soon-Bum Kwona, JongSukLee, SoonJinKwond, Seong-TaekYun, SeockheonLee, Jung-HyunLee, Molecular layer-by-layer assembled forward osmosis membranes, Journal of Membrane Science, 2015, 488, 111-120

- 
- 18) C.Y. Tang, Y. Zhao, R. Wang, C. Hélix-Nielsen, A.G. Fane, Desalination by biomimetic aquaporin membranes: Review of status and prospects, *Desalination* 2012,
  - 19) Emad Tajkhorshid and Klaus Schulten, Water Permeation Through Aquaporins, *Science*, 2004, 305, 1905
  - 20) Randall T. Cygan, et al., A Molecular Basis for Advanced Materials in Water Treatment, *MRS BULLETIN*, 2008, 33
  - 21) Sandia National Laboratories, Biomimetic membrane for water purification, *R&D* 100, 2011
  - 22) William A. Phillip, Brandon O' Neill, Marc Rodwogin, Marc A. Hillmyer, and E. L. Cussler, Self-Assembled Block Copolymer Thin Films as Water Filtration Membranes, *Applied Materials and Interfaces*, 2010, 2, 3, 847-853
  - 23) Tzahi Y. Cath, Amy E. Childress, Menachem Elimelech, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *Journal of Membrane Science*, 2006, 281(1-2), 70
  - 24) Devin L. Shaffer, Jay R. Werber, Humberto Jaramillo, Shihong Lin, Menachem Elimelech, Forward osmosis: Where are we now?, *Desalination*, 2015, 356, 271-284
  - 25) Jeffrey R. McCutcheon, Robert L. McGinnis, Menachem Elimelech, A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process, *Desalination* 174 (2005) 1-11)
  - 26) M.S. El-Bourawi, Z. Ding, R. Ma, M. Khayet, Review: A framework for better understanding membrane distillation separation process, *Journal of Membrane Science*, 2006, 285, 4-29
  - 27) Abdullah Alkhudhiri, Naif Darwish, Nidal Hilal, Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination*, 2012, 287, 2-18
  - 28) M.E. Findley, Vaporization through porous membrane, *Ind. & Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1967, 6, 226
  - 29) Samer Adham, Altaf Hussain, Joel Minier Matar, Raul Dores, Arnold Janson, Application of Membrane Distillation for desalting brines from thermal desalination plants, *Desalination*, 2013, 314, 101-108
  - 30) Ali Al-Karaghoul n, Lawrence L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24, 343-356
  - 31) Donella H. Meadows et al, *The limits to growth*, 1972
  - 32) Simon, J. and Herman Kahn, (Eds.). *The Resourceful Earth: A Response to the Global 2000 Report*. New York: Basil Blackwell., 1984
  - 33) Elimelech and Phillip, The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, *Science*, 2011, 333, 712
-

## 국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 해수담수화와 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

### | 과제 선별 기준 |

〈과제 선별 기준〉 연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 선별한 후 연구내용을 바탕으로 분석 대상 선정 (해수) and (담수화)

분석 결과 최근 3년간 총 97건의 과제에 611억원의 연구비가 투자됨

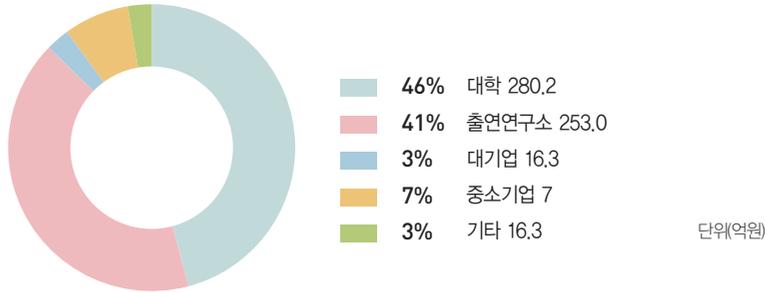
- 해수담수화 연구의 경우 규모가 큰 연구 위주로 이루어져 과제 건수는 큰 변화가 없으나, 연구비는 지속적으로 증가 중임
- 해수담수화를 제외한 수처리 관련 연구는 최근 3년간 109건의 과제에 264억원의 연구비가 투자되어, 해수담수화가 수처리 분야에서 70%가 넘는 높은 비중을 차지하는 연구임을 확인할 수 있음
- 또한 국토부의 플랜트기술고도화사업과 해양에너지 및 자원이용기술개발 사업을 중심으로 292억원 가량의 큰 규모 투자가 이루어지고 있음



**연구수행주체** 대학과 출연연구소, 국공립연구소를 중심으로 연구가 이루어지고 있음.

- 대학은 과제당 평균 연구비가 5.9억원인 과제 47건을, 출연연구소는 과제당 평균 연구비가 9.7억원인 과제 26개를 수행 중임

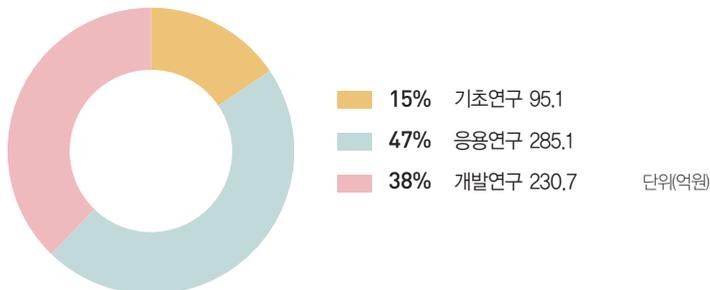
- 산업적 파급효과가 큰 연구임에도 불구하고, 대기업과 중소기업의 연구 비율은 3%와 7%에 그쳤으며, 과제당 평균 연구비도 3.3억원과 2.6억원으로 작게 나타남
- 이는 기업들의 경우 해수담수화 관련 연구의 상당수를 국가 R&D를 통해서가 아닌 자체적인 민간 R&D를 통해 연구를 진행하고 있기 때문인 것으로 판단됨



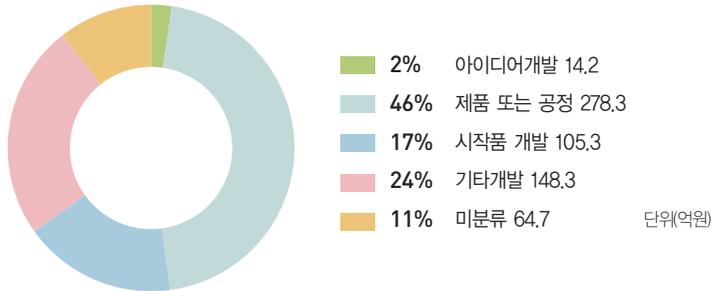
**연구수준** 응용연구단계(47%)와 도입기(42%) 제품 공정 연구(46%)가 주를 이룸

- 해수담수화 연구의 경우 원리와 구동 방식은 본문에서 살펴본 대로 RO 방식이 대세를 이루고 있기 때문에 연구 또한 이를 바탕으로 한 응용연구가 47%, 개발연구가 38%로 주를 이룸
- 하지만 본문에서 언급한대로 FO 방식이라든지 MD 방식과 같은 새로운 구동방식에 대한 연구와 같은 기초-응용 수준의 연구도 많이 이루어지고 있음
- 같은 이유로 연구개발성격 또한 제품 또는 공정 개발(46%)과 시작품 개발(17%)이 주를 이루고 있음
- 기술수명주기적 측면에서는 해수담수화의 공정별 특성이 반영되어 성숙기와 성장기에 접어든 연구가 각각 30%와 19%의 비율을 보이고 있으나 전반적으로는 아직 산업적으로 시작 단계이고 향후 개선의 여지가 큰 만큼 도입기 연구(42%)가 대다수를 차지하고 있음

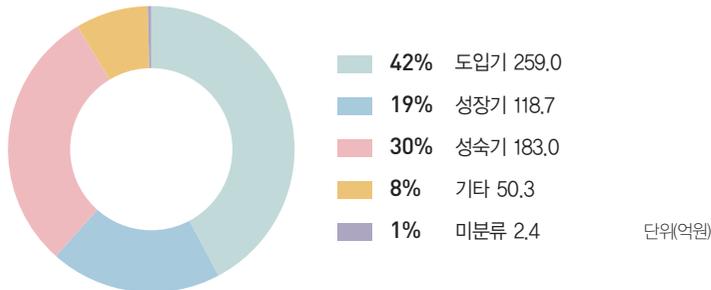
**연구개발단계**



### 연구개발성격

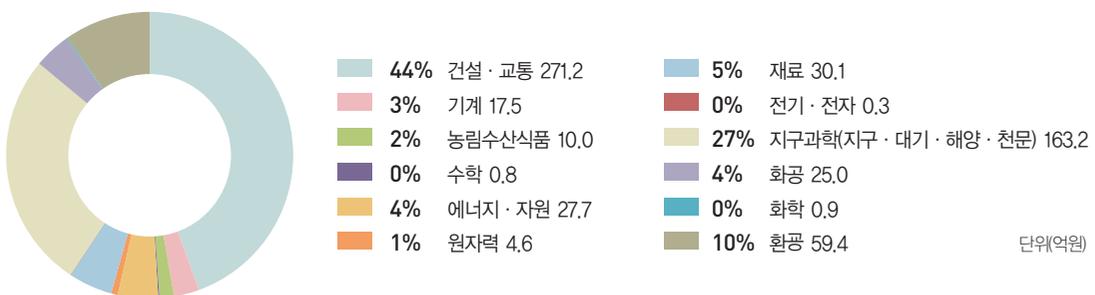


### 기술수명주기

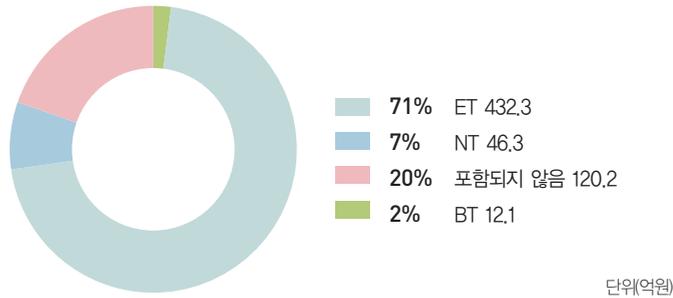


**연구분야** 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 건설/교통 중심의 환경/에너지 연구가 대다수인 것으로 나타남

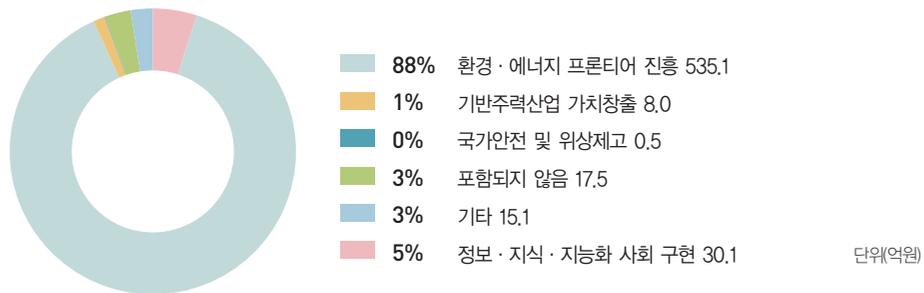
### 연구분야 [국가과학기술표준분류]



### 연구분야 [6T]



### 연구분야 [NTRM]



- 건설/교통 분야를 중심으로 해수담수화 시설 개선 및 설치/구동 연구 등이 주를 이룸
- 해수담수화의 특성상 물을 만드는 기술이기에 ET로 대다수 분류가 됨
  - 해수담수화 구현 과정의 기술에 초점을 맞추어 NT로 분류되거나 활용적인 측면에서 BT로 분류된 연구들이 소수 존재함
- NTRM 분석 결과도 역시 환경/에너지 프론티어 진흥이 88%로 가장 높게 나타났으며, 그 이유는 해수담수화 기술 목적 자체가 바로 바닷물을 통해 활용할 수 있는 물을 만드는 기술이기 때문임



DIGITAL HEALTHCARE  
-  
DESALINATION