

Contents

- 01 편집자 주
- 04 도시 물 관리 시스템 국내외 적용사례 및 시사점
- 36 폐열 에너지를 전기로 변환하는 열전발전기술



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2018 August vol.4 no.8

발행일 2018년 08월 07일

발행인 김주선

편집인 최수영 · 권민지

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹 주식회사 Tel. 1800-3673



| 도시 물 관리 시스템 국내외 적용사례 및 시사점

최근 4차 산업혁명의 핵심기술인 빅데이터 기반 ICT 기술을 접목하여 실시간으로 정보를 수집하고 처리하는 통합 물 관리 시스템을 개발하여 운영 중에 있다. 또한 지난 20여 년 간 국토부와 환경부 등에서 분담해 온 물 관리 업무가 2018년 5월 ‘물 관리 일원화 3법’이 통과되면서 일부 업무를 제외한 나머지 업무가 환경부로 통합되었다. 이렇듯 물 관리 통합에 대한 기술적, 정책적 관심이 뜨겁다.

이에, 본 호 1부에서는 도시 물 관리의 개념과 국내 및 해외 활용 사례를 살펴보고자 한다. 또한, 물 관리 시스템 관련 기술 및 정책 동향을 살펴보고 이를 기반으로 우리나라 시스템의 한계 및 시사점을 도출하고자 한다. 도시 물 관리는 기능적으로 물 공급, 물 환경, 물 재해 문제로 구분된다. 국내외 물 공급 측면에서는 ICT 기술 기반의 지능화된 물 관리 기술인 Smart Water Grid에 대한 다양한 시도들이 이루어져 왔다. 또 물 환경 측면에서는 수질 측정 및 관리 시스템 개발, 물 재해 측면에서는 홍수 및 가뭄 관련 정보를 분석하고 대응하는데 필요한 시스템 개발이 이루어지고 있다. 각 분류별로 다양한 활용 사례가 존재하지만 기후 변화, 도시개발, 인구이동 등의 이슈에 따른 체계적인 물 관리 시스템 구축을 위해서는 분야별 전문기관에 의한 지속적인 정보의 생산과 연계가 이루어져야 한다.

본 호를 통해 도시 물 관리의 분류 별 기술 동향을 살펴보고 향후에 우리나라가 물 관리 일원화와 기술개발을 이뤄내어 수자원의 효율적인 배분과 관리체계를 구축하기를 기대해 본다.

| 폐열 에너지를 전기로 변환하는 열전발전기술

기후변화로 인해 전 세계적으로 폭우와 폭염과 같은 이상기후가 나타나고 있다. 이에 대응하기 위해 세계 각국에서는 온실가스 배출 감축을 위한 정책적인 노력을 기울이고 있다. 주요 에너지원인 화석연료는 매장량에 한계가 있으며 온난화에 큰 영향을 미치고 있어 대체 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 대체 에너지로 주목받았던 태양광과 풍력 등의 재생에너지원의 경우 환경적 영향으로 인한 불안정한 공급과 신뢰성에 대한 이슈가 있어 최근에는 버려지는 에너지를 재활용해 전력을 생산하는 열전발전기술이 대안으로 주목받고 있다. 열전발전기술은 열원이 존재하는 경우 24시간 발전이 가능하며 구동부가 불필요해 구조가 간단하고 유지보수가 편리하다.

이에 본 호 2부에서는 열전발전기술과 열전발전 시장 및 기술 동향에 대해 알아보하고자 한다. 열전발전기술의 근간인 열전효과는 온도 차이로 전류가 유도되는 제백효과와 전기에너지가 열에너지로 변환되는 펠티어효과로 분류된다. 열전발전기술의 핵심 부품은 열전소자로 우주항공 분야, 자동차, 산업 현장 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 기술개발은 열전소자의 특성을 가능하는 지표인 무차원 성능지수 값을 높이기 위한 연구들이 열전소자 특성의 주요 인자인 열전재료별로 이루어지고 있다. 하지만 대부분의 열전소재는 독성 원소들을 활용하고 있어 상용화를 위한 기술 확보에 적극적인 지원이 필요하다.

본 호로 열전발전기술의 이해와 대체 에너지로서의 가능성을 재고할 수 있기를 기대해 본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2018 August vol.4 no.8

<http://cipc.kist.re.kr>

01

도시 물 관리 시스템 국내외 적용사례 및 시사점

한국수자원공사(K-water) 국가가뭄정보분석센터
이호선 책임위원 (hilhs2016@kwater.or.kr)

01' 도시 물 관리 개념과 최근 이슈

1.1 들어가며

최근 물 관리 일원화 법안이 국회에서 입법화 되었다. 이에 따라 그동안 국토교통부, 환경부 등으로 이원화되어 많은 문제점을 가지고 있던 우리나라 물 관리에 새로운 전환기가 마련되었다. 이제 시작 단계이고 해결 되어야 할 많은 문제점이 남아 있지만 우리나라가 물 관리에 있어 많은 발전 발판을 마련한 것임에는 틀림없을 것이다.

그간 추진되어온 도시 물 관리 관련 분야 사업이나 시스템들은 그 성격상 통합되거나 상호 융합되어 추진되어야 함에도 불구하고 관리의 영역적인 문제와 정책적인 문제로 중복되거나 이원화된 사업으로 추진된 경우가 대부분이다. 특히, 시스템의 경우 실적 위주로 증구난방 구축되거나 제대로 유지관리되지 않는 사례가 많았다. 또한 실사용자인 지자체(도시) 담당자의 요구사항을 반영하지 못함으로써 제대로 활용되는 시스템이 얼마 되지 않는 것이 현실이다.

이 글에서는 도시 물 관리의 개념을 살펴보고 그간 국내·외 적용된 시스템 사례를 분석하여 최근 대두되고 있는 융합적인 측면에서 물 관리 일원화에 필요한 문제들을 도출해보고 향후 개선 방향에 대해서 검토하고자 한다.

1.2 도시 물 관리 개념

도시는 사전적으로 '촌락과 더불어 인간의 2대 거주형태이며, 사회적·경제적·정치적 활동의 중심이 되는 장소'¹⁾로 정의되어 있다. 인위적인 공간으로서 주로 물을 이용하기 쉬운 하천 인근에 형성되어 왔기 때문

1) 두산백과(<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1083091&cid=40942&categoryId=33136>)

에, 도시 물 관리는 기능적으로 도시 내 물을 공급하는 문제와, 위생적 측면에서 활용한 물을 처리하는 문제 그리고 하천 범람 등으로 발생하는 수재해 문제로 크게 세가지 영역으로 구분할 수 있다. 각 영역이 서로 밀접한 상관성을 가지고 있기 때문에 통합적으로 고려되고 관리되어야 하지만 시간적인 문제와 예산적인 문제 등으로 과거에는 주로 물공급과 수재해가 강조되었다. 그런데 최근에는 안정적인 생활수준과 맞물려 환경적인 문제와 함께 통합적인 측면에서 에너지 절감 등의 운영 효율성이 강조되고 있다.

도시 물 관리는 기능적으로 이수(물의공급, 재이용), 치수(홍수 등 방재), 환경(수질, 수생태 등)으로 구분할 수 있다. 먼저 이수기능을 살펴보면 거주하고 활동에 필요한 물을 공급하는 기능으로 물 관리에 있어서 가장 우선시 할 수밖에 없는 기능이다. 안정적인 수량 확보를 위한 댐, 저수지, 하천, 지하수, 취수시설 등의 인프라, 깨끗한 물을 생산할 수 있는 정수처리시설, 원활한 물공급을 위한 급·배수 시설 그리고 공급된 물을 재활용하여 에너지 등을 절감할 수 있는 재이용시설과 이를 관리할 수 있는 시스템 등이 관련되어 있다.

두 번째는 치수기능으로서 주로 하천범람과 관련되어 발생하는 홍수관리라고 할 수 있다. 홍수조절을 목적으로 건설한 댐, 보, 하천 제방, 유수지, 하수도, 빗물저류지, 펌프장과 이를 관리하기 위한 시스템 등이 관련되어 있다. 또 홍수관리를 위해 강우를 예측하기 위한 기상 분야와 집중호우로 발생하는 국지적인 피해를 방지하기 위한 시스템, 예·경보를 위한 분석 및 예측시스템 등의 개발이 이루어지고 있다.

마지막으로 환경적인 기능으로서 하수도 및 하수처리시설과 도시 내 하천 복원사업, 자연형 하천 그리고 도시 내 물 순환을 고려하는 LID(Low Impacted Development)시설 등이 관련되어 있다. 또한 도시는 공간적으로 주로 하천유역에 위치하므로 한 개 유역에 여러 개의 도시가 자리 잡을 수 있는 구조를 가지고 있다. 하나의 하천을 여러 개의 도시가 공유하는 경우 도시 물 관리는 인문, 사회적인 측면도 고려해야 되기 때문에 매우 복잡한 형태를 가지게 된다.

이렇듯 도시 물 관리는 기능적으로, 공간적으로 고려해야 될 매우 다양한 요소를 가지고 있다. 어느 한 분야에 치우친 관리보다는 통합과 융합적인 접근방식에 의한 관리가 필요한 분야라고 할 수 있다.

표 1

도시 물 관리 관련 연관기술

기능적 분류	연관기술
이수측면	• 수리/수문 조사/해석기술, 수자원계획기술, 수자원 통합관리기술, 수리구조물설계기술, 하천설계기술, 생태 수리/수문기술, 상/하수도 시스템 설계/시공/관리기술, 정수장 효율향상/고도처리기술, 관망 최적 관리기술, 양질의 상수원수 확보/유지관리기술
치수측면	• 위험감지/모니터링 장비, 재난정보관리체계, 재난취약요소 진단 정보관리기, 비상재난통신망 구축기술, 예경보 발령/전달체계, 재난상황대응 의사결정시스템, 재난지리정보기술
환경측면	• 수질오염 방지기술, 하/폐수 고도처리/핵심요소기술, 친환경 방류수 처리/관리기술, 훼손된 자연생태계 복원격 모니터링 기술, 원기술, 생태환경 이용/관리기술, 환경재해 예측/저감기술
융합측면	• 데이터베이스, 실시간 시스템, 정보시스템, 고정밀 센서기술, 측정분석 장비기술, 수공시스템기술

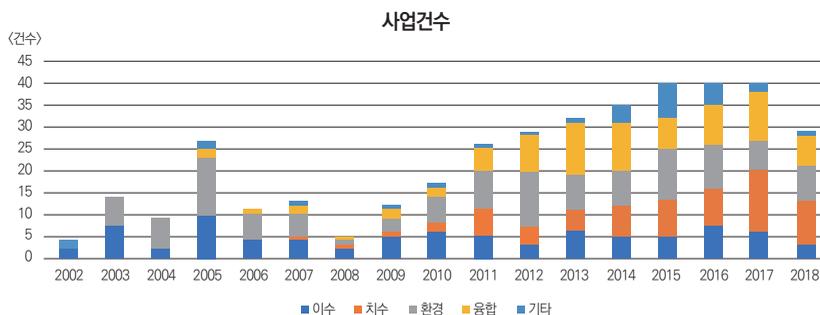
출처: KISTEP, 2018²⁾

1.3 최근 물 관리 시스템 관련 기술 및 정책 동향

2002년도부터 국내에서 진행된 기술개발 동향을 파악하기 위해 도시 물 관리와 관련되어 추진된 연구 사업을 도시 물 관리 기능별로 이수, 치수, 환경으로 구분하고 투자된 연구내용과 연구비를 조사³⁾하였다. <그림 1>은 2002년부터 투자된 연구사업 건수와 개발 금액을 나타낸 것이고 <그림 2>는 기능별로 총 투자금액을 나타낸 것이다.

그림 1

연도별 연구사업 추진건수



2) 국가과학기술표준분류체계(2018) 내용을 기능적으로 재분류하고 이수, 치수, 환경 측면에 공통적으로 적용되는 기술을 융합측면으로 고려함
 3) 국가과학기술지식정보서비스, NTIS에서 검색 후 재정리

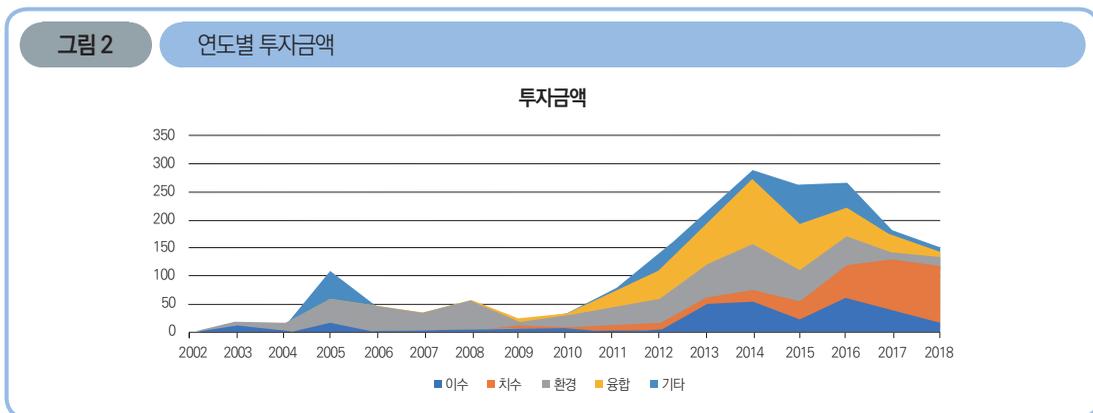


표 2 기간별 주요 키워드

기간	주요키워드	추진건수	투자금액(억원)
2002-2008	우수(빗물)활용, 친환경, 하천복원	83	294.4
2009-2010	물 순환, 유비쿼터스, 녹색성장, 생태복원	29	60.23
2011-2014	지능형, 스마트, 최적관리, 도시생태, LID	122	751.72
2015-2017	IT, 융합, 빅데이터	120	702.34

출처: KISTEP/K2Base, 2014

조사된 자료에 따르면 2002년부터 400여 건에 달하는 연구개발 사업이 추진되어 왔으며, 그중 도시 물 관리와 관련된 환경 분야는 연도별로 지속적인 투자가 이루어져왔다. 2002년부터 2008년 까지는 친환경, 하천복원, 생태 등의 키워드를 가진 사업들로 높아진 국내 소득수준과 더불어 주변 환경에 대한 관심이 높아지면서 주로 이수와 환경에 대한 기술개발이 추진되었다. 2009년과 2010년에는 물 순환과 유비쿼터스, 녹색성장, 생태복원 등의 키워드가 대두되어 융합사업이 시작된 시기라고 할 수 있다. 2010년부터는 신 성장 동력 기술전략에 스마트 상수도 분야 및 관련기술을 포함하여 스마트워터 그리드 원천기술 확보와 기술상용화, 해외 진출을 위한 실증 공간 확보를 목표로 연구개발 사업이 진행되었다(정승수, 2014).

이러한 연구개발 사업으로 세계 물 시장의 확대와 국내 기업의 해외 진출 및 수주 실적이 증가함에 따라 관련 기술의 활용과 협력 가능성이 증대하였다. 국내 물 관련 기업의 경우 해외 진출 경험 및 전문 인력이 부족하고, 외국물 전문기업에 비해 자본 및 전문성이 상대적으로 취약하지만 상수도 설계 및 시공 분야는 선진국과 경쟁 가능한 수준이라 할 수 있다. 또한 이로 인해 선진국 대비 기술 수준이 낮은 지능형 물 생산 및 공급 시스템을 추진했다고 할 수 있다.

이후 선진국과 동일한 통합 물 관리 정책을 추진하고 있으며 국정목표에 부합하는 창조산업의 육성, 물관련 재난관리체계 강화, 환경과 조화되는 국토개발, 기후변화 적응을 위한 스마트 분산형 물 관리 기술 개발을 추진하였다. 구체적으로 보면 기술 기초기반 구축을 위한 건전한 도시 물 순환-저영향 개발 기술, 스마트 워터그리드 개발 및 통합 수자원 관리 기술 등의 기초연구가 분산되어 국내에서 진행되었다.⁴⁾

- 에코스마트 상수도 시스템 개발 사업단, '11~'16(6년), 849억 원
- 차세대 지능형 상수관망 기술개발 사업단, '11.8~'16.4(5년), 250억 원
- SMART WATER GRID 연구단, '12.7~'16.7(4년), 317억 원

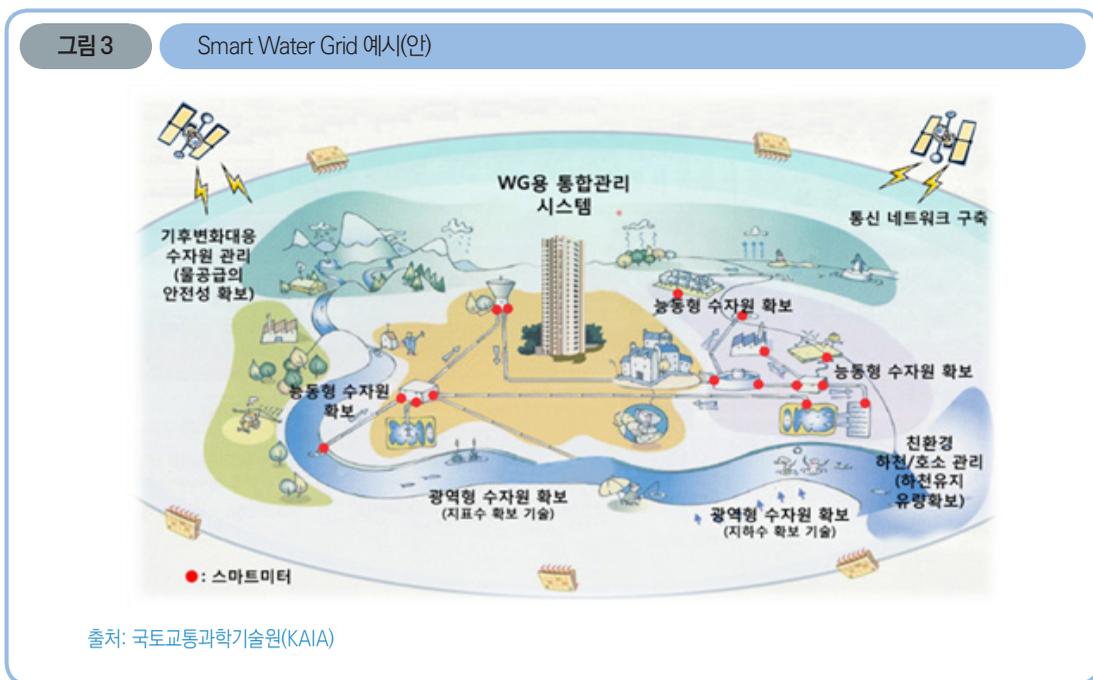
표 3 우리나라의 스마트 물 관리 관련 연구개발 과제 예시

부처명	사업명	과제명
환경부	차세대지능형상수관망기술개발	스마트 미터 및 센서 네트워크 기반 상수관망 운영관리 최적화
한국건설기술연구원	한국건설기술연구원	지능형 물 공급시설 건설기술 개발
환경부	차세대 에코 이노베이션 사업	토탈솔루션 형태의 지능형 상수도 통합관리 시스템 설계/시공/운영 - 협동과제 10건
환경부	차세대 에코 이노베이션사업	소규모 상수시설 통합관리용 저전력 관역 센서망 및 복합센서 모듈기술 개발
국토해양부	건설기술혁신사업	자립형 센서기반 지능형 환경관리 시스템
환경부	수처리선진화	급수설비의 안정성 확보 기술개발
환경부	국제공동연구사업	태국수질관리용 수질계측기(BOD, COD) 운영기술 개발
지식경제부	추가연구개발특구육성	광학식 DO, pH, 탁도 센서가 적용된 수질모니터링시스템 개발
		수질계측센서의 성능분석 및 센서 융합기술에 관한 연구
건설교통부	NGIS 지원연구사업	지자체 지하시설물 DB 성과의 활용 확대 방안 연구 (상수도 관망 및 누수관리를 중심으로)
건설교통부	건설기술기반구축사업	국토 및 도시의 효율적 관리를 위한 광역공간정보 처리기술 연구
국토해양부	건설기술혁신사업	Smart Water 그리드 맞춤형 ICT기반 물 정보 관리 기술 개발
중소기업청	마을상수도 원격제어 통합관리 시스템 개발	마을상수도 통합관리시스템의 개발
중소기업청	원격 상수도 제어감시시스템	원격 상수도 제어 감시 시스템 개발
환경부	물 환경 정책시스템구축	물 환경 관리, 수질오염 예·경보시스템 외 3개 시스템 구축

출처: KISTEP/K2Base, 2014

4) 국토교통부(2014), “해외건설 기술경쟁력 강화 연구개발사업”

〈표 3〉은 그간 추진된 스마트 물 관리 관련 연구 과제를 예시한 것이다. 도시 단위에서 적용할 수 있는 기술로서 주로 이수와 관련되어 있다.



〈그림 3〉은 유역 및 도시내 물을 공급하기 위한 Smart Water Grid를 예시로 나타낸 것으로 ICT 기술을 활용하여 다양한 정보를 계측하고 복잡한 요소를 반영하여 통합 운영하는 컨셉이 반영되어 있다. 최근에는 가뭄 등의 영향으로 치수 분야 투자가 많이 늘어난 것을 확인할 수 있는데 융합이 이슈가 된 이후에는 빅데이터라는 키워드가 등장하고 있으며 통합을 위한 표준화와 더불어 플랫폼(시스템)을 구축하려는 시도, 스마트워터 시티 등 도시 물 관리에 특화된 사업 등이 정부 주도로 추진되고 있다.

또한, 부처별로 이원화되어 도시 물 관리 관련 정책 수립 및 추진 시에 많은 어려움이 있어왔지만(〈표 4〉) 물 관리 일원화 원칙에 따라 지난 6월 환경부로 이관됨에 따라 새로운 전환점을 맞이하게 되었다(〈표 5〉).

표 4 부처별 물·에너지·식량 관련 주요법률과 법정계획현황

법률		관련계획	주요내용
환경부	환경정책기본법	-국가환경종합계획(20년)	-국토계획과 환경계획의 연계성 강화
	수질 및 수생태계 보전에 관한 법률	-수질 및 수생태계 보전 계획(10년)	-수질 및 수생태계 보호
	4대강수계특별법	-오염 총량 관리 기본 계획	-4대 강 유역 통합 관리 및 주민 지원
	하수도법	-국가 하수도 종합 계획(10년) -유역 하수도정비기본계획(20년)	-수질 및 하수도 관리
국토부	하천법	-수자원 장기 종합 계획(20년) -유역 종합 치수 계획(10년) -하천 기본 계획(10년)	-이수 치수 하천관리 수질 오염의 측정(환경부)
	지하수법	-지하수 관리 기본 계획(10년)	-지하수의 이용 및 관리
	댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률	-댐 건설 장기 계획(10년)	-이수 치수, 댐 건설 및 주민 지원
행자부	소하천정비법	-소하천 정비 종합 계획(10년)	-소하천 관리
산업부	에너지기본법	-국가에너지기본계획(20년)	-에너지정책 기본방향 수립
농림부	농어촌정비법	-농어촌 용수 이용 합리화 계획	-농어촌 용수의 효율적인 개발 이용 및 보전

출처:윤인숙, 2017

표 5 제·개정 법령 주요 내용⁵⁾

정부조직법 (*18.6.8 시행)	물 관리기본법 (*19.6.13 시행)	물기술산업법 (*18.12.13 시행)
<ul style="list-style-type: none"> “수자원 보전·이용·개발” 기능을 환경부로 이관 수자원정책국(3개과), 홍수 통제소 4개소, K-water 이관 	<ul style="list-style-type: none"> 물 관리 원칙 국가·유역 물 관리위원회 국가·유역 물 관리계획 물 분쟁의 조정 등 	<ul style="list-style-type: none"> 물산업 기본계획 수립·추진 물산업 실증화시설 및 집적단지 조성·운영 중소 물기업 지원대책 추진

5) 하천법 등 하천관리 기능(하천계획과, 지방국토관리청)은 국토부에 존치하나, 하천법 중 수자원 관리 기능(하천유지유량, 하천수 사용허가 등)은 이관

02¹ 국내외 적용 사례

도시 물 관리 시스템의 적용 사례는 앞에서 살펴보았듯이 많은 분야가 관련되어 있으므로 이를 효율적으로 살펴보기 위해서는 우선 도시 물 관리 시스템의 구성요소를 구분하고 검토 범위를 한정할 필요가 있다. 이 글에서는 검토를 위한 범위를 직접적으로 도시 물 관리를 위해 개발된 분석 및 운영 시스템과 일반인 또는 전문가 간, 의사결정자 간의 상호 정보교환을 목적으로 개발·운영되는 포털시스템으로 한정하였다. 기 설치된 물리적인 인프라(댐, 상수도, 하수도, 수처리시설, 펌프 등)의 하드웨어적인 측면은 검토 대상에서 제외하였다.

2.1 도시 물공급 관련

도시 물공급(이수) 측면에서는 주로 도시 내 필요한 생활용수나 공업용수를 공급하기 위한 시스템이 관련되어 있다. 우리나라는 용수 공급을 위한 정수처리시설을 보유한 17개 시도단위 지자체와 K-water가 자체적으로 정수처리와 급배수, 누수 및 수질관리 등을 위한 수운영 시스템을 개발하여 운영하고 있는 실정이다. 그래서 도시별로 수준이 다르고 구축된 시스템 형태가 다양하여 상호연계 및 정보교환에 상당히 어려운 구조를 가지고 있다. 이뿐만 아니라 국가적으로 깨끗한 물을 안정적으로 수요자에게 생산·공급하기 위해 개발되는 새로운 기술들도 표준화되지 않은 시스템들로 인해 그 적용과 활용이 매우 어렵다.

최근 가뭄이 지속되고 동일 유역의 상하류 도시 간 물 분쟁이 빈번히 발생하면서, 대체 수원의 개발과 빗물활용, 물의 재활용, 물의 지능화와 수요관리 등 도시 단위의 물 관리를 근본적으로 개선하기 위한 시스템적 접근이 이루어지고 있다. Smart Water Grid가 대표적인 사례이며 이 글에서는 국내 이수 관련 물 관리 시스템과 최근 활발히 진행되고 있는 Smart Water Grid 국내외 추진사례 위주로 검토해 보았다.

2.1.1 PFS(Precipitation Forecasting System, K-water)

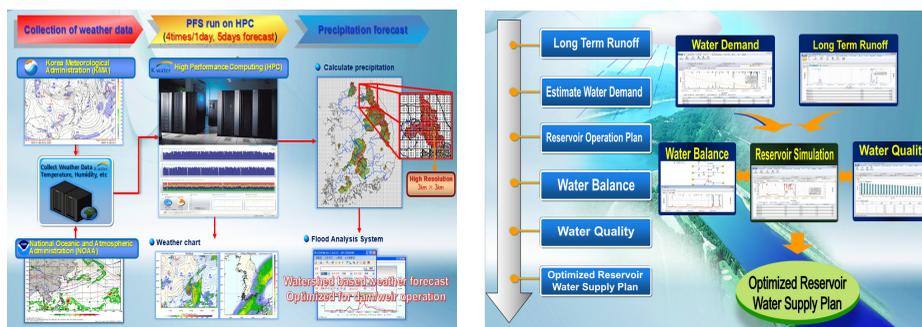
PFS란 강우 예측 시스템으로 이수를 위한 용수 공급 수립 시와 홍수 및 가뭄을 예측할 때 활용될 목적으로 개발·운영되고 있다. 61개 댐과 보유역 정량적 강우 예측(3×3km 단위)을 위해 1일 4회 슈퍼컴기반 정량 강우분석이 이루어지고 있다.

2.1.2 RWSS(Reservoir Water Supply System, K-water)

RWSS는 저수지 용수 공급 의사결정 시스템으로 K-water 내부에서 운영하고 있으며, 운영계획을 수립하거나 용수 공급을 시행할 때 활용될 수 있도록 프로그램이 구성되어 있다. 주요 기능은 댐-보 최적 연계 운영, 댐-보 물수지 분석, 하천 1,2차원 수질분석, 빈도분석프로그램 등이 있다.

그림 4

PFS(좌) 및 RWSS(우) 개요도



출처: K-water

2.1.3 물수지분석 시스템(한강홍수통제소)

한강 홍수통제소에서는 유역의 용수 공급과 수자원 시설 운영 등의 계획 수립 시와 수량-수질 연계 및 지표수-지하수 연계 계획 시 활용할 수 있도록 물의 유입량과 유출량 분석기능이 포함된 물수지분석 시스템을 개발하여 운영 중에 있다.

2.1.4 아리수통합정보센터(서울특별시)

서울특별시는 서울시 상수도사업본부에, 취수에서 수도꼭지까지 아리수의 수량, 수질, 수압 등 각종 정보를 실시간으로 감시·통합 관리할 목적으로 생산관리시스템, 공급관리시스템, 원격관리시스템, 영상감시시스템, 수질감시시스템을 설치하여 운영 중에 있다. 또 독자 개발한 생산·공급관리 솔루션을 활용해 수도물 생산 및 배·급수 계통을 최적의 상태로 운영·관리하고 14개 사업소(정수센터 6개, 수도사업소 8개)에서 개별 관리하던 모든 상수도 정보를 아리수 통합정보 센터에서 통합 관리하는 컨셉이다.

2.1.5 Smart Water Grid

최근 대두되고 있는 스마트(지능화)와 관련해서 도시 물 관리 측면에서, 스마트 시티는 지속 가능한 도시 실현을 위한 필수 방안으로 주목받고 있다. 이 중에서 도시 물 관리의 당면 과제를 해결하기 위한 첨단 ICT를 기반으로 한 스마트 도시 물 관리 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 스마트 도시 물 관리 기술 중 스마트 워터그리드 기술은 다중수원의 활용과 물 위기 사전대응, 물 공급의 지능화와 효율화에 의하여 도시에서의 물공급 문제를 해결할 수 있는 기술로 주목받고 있다(이상호, 2016). 해외에서는 2009년부터 미국을 중심으로 확산되고 있는데 실증사례로는 지능형 검침인프라(AMI: Advanced Metering Infrastructure)를 활용한 것이 다수를 차지하고 있으나, 그 외에도 다양한 시도가 진행되고 있다.

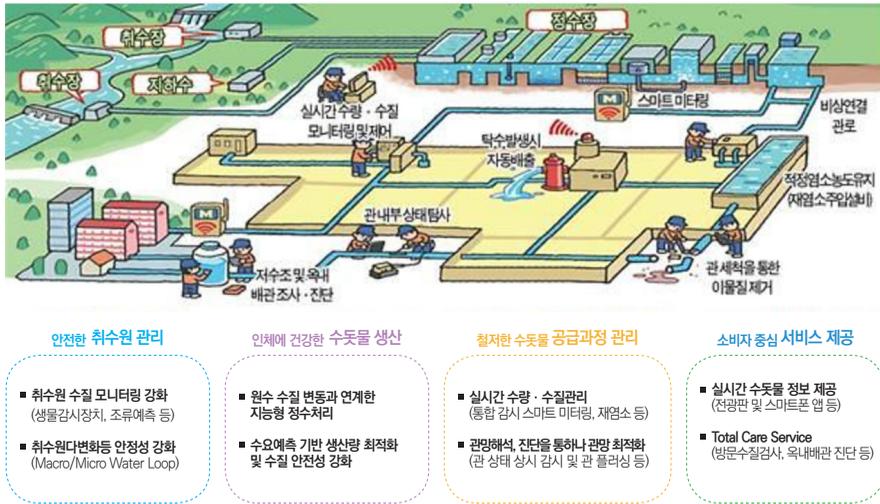
1) 국내

인천 영종도와 대청도에 실증시설을 설치하고 기술 적용을 위한 연구개발을 진행 중이므로 물공급에 대한 실시간 정보 확보를 통한 도시 물 관리 효율을 크게 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 우리나라의 경우 치수와 환경 등 도시 내 다른 물 관리 기능은 고려하지 않아 도시 내 물 관리 전과정을 지능화하는 당초 기술 출현 배경에는 미치지 못하고 있다.

K-water에서는 2017년 파주에 건강한 수도물 공급 시범사업인 '스마트워터시티' 사업을 진행하였다. 스마트워터시티는 취수원에서 수도꼭지까지의 공급 과정에 대해 ICT(Information and Communications Technology) 기술을 접목해 수량과 수질을 과학적으로 관리하는 도시를 말한다. 직접 음용률이 1%에서 19%로 끊여 마시는 경우를 포함하면, 수도물 음용률이 36%에서 60%로 크게 상승하여 ICT를 접목한 이수분야 성공사례로 평가받고 있다. 이러한 스마트워터시티를 세종시와 부산시에도 추진할 예정이다.

그림 5

스마트워터시티 건강한 물 공급개념



출처: K-water

2) 미국

미국의 스마트 물 서비스는 지능형 검침인프라, AMI, 스마트 물 서비스를 이용한 물 관리시설의 에너지 사용 최적화, 수자원 및 수질관리를 위한 센서 네트워크, 국가 단위의 효율적 수자원 관리 시스템 등 크게 4 가지 방향으로 진행되고 있다.

이 가운데 AMI 적용으로 연간 1조 3,000억원의 물 절약과 연간 200만MWh의 전력 절감, 연간 1400만 톤의 온실가스 배출 저감 효과를 얻었다고 밝혔다. 스마트 물 서비스는 현재 IBM이 주도하고 있으나 Siemens나 Suez등 기존 물 관련 기업의 관심도 높아지고 있다. IBM은 “Smarter Planet” 계획의 하나로 스마트 물 서비스를 추진하고 있으며 스마트 물 서비스 기술의 3대 특성을 기능화(Instrumented), 연결성(Interconnected), 지능화(Intelligent)로 제시하고 있다.

미국에서의 스마트 물 서비스는 크게 4가지 방향으로 진행되고 있는데 첫 번째, 지능형 검침인프라(AMI:Advanced Metering Infrastructure)를 중심으로 한 상수도 관리 시스템 구축, 두 번째, 스마트 전력

그리드를 이용한 물 관리시설의 에너지 사용 최적화, 세 번째, 수자원 및 수질관리를 위한 센서 네트워크 구축, 마지막으로, 국가 단위의 효율적 수자원 관리시스템 구축이다.

3) 호주

호주는 2004년부터 2007년까지 극심한 물 부족 문제를 겪으면서 이를 해결하기 위한 스마트 물 서비스의 한 가지 형태인 Water Grid 개념을 최초로 도입하였다. Water Grid는 물이 남는 지역과 물이 부족한 지역을 연결하기 위한 시스템으로, 이를 통해 다양한 종류의 수자원을 다수의 시설에서 확보할 수 있다.

호주의 Brisbane 지역은 2004년과 2007년 사이에 극심한 가뭄을 겪었다. 이로 인하여 수자원 관리체계의 재편이 요구되었다. 이에 따라 장기적인 수자원을 위하여 SEQ Water Grid가 계획되어 2008년부터 운영되고 있다. SEQ Water Grid는 물이 남는 지역과 부족한 지역을 연결하는 535km의 상수관망을 기본 구성요소로 댐 12개, 정수장 10개, 재이용수 고도처리시설 3개, 해수담수화시설 1개, 저수지 28개, 펌프장 22개, 관로 총 535 km 등 광역 수자원의 통합 관리를 추진하고 있다. SEQ Water Grid의 목적은 가뭄 대응과 지역의 장기적인 수자원 확보, 지역단위 시설 통합에 의한 위험 분산, 다양한 수원에 대한 효율적인 활용 등으로 Seqwater, WaterSecure, LinkWater, SEQ Water Grid Manager 등 여러 기관이 역할을 분담하여 진행하였으나 최근에는 경제적인 이유로 제대로 운영되지 못한 것으로 알려져 있다.

4) 유럽

유럽은 미국에 비해서 AMI 도입이 다소 늦게 시작되었으나 최근에는 도입 속도가 빨라지는 추세이다. 영국의 경우 에너지나 물 관리 분야 모두 AMI의 도입이 늦은 편이었으나, 2020년까지 각 가정에 스마트 미터를 도입하는 것을 목표로 하는 계획을 발표하였다. 이에 따라 프랑스와 스페인, 네덜란드 등에 총 1,100만 개의 스마트 미터가 도입될 것으로 전망된다. 네덜란드의 경우 스마트 미터에 대한 표준을 제정(NTA8027: water; NTA8130: electricity)하였으며, 독일의 Erding시에서는 GE사와 함께 에너지 및 물에 대한 AMI 구축을 시작하였다. 또한 유럽의 민간 기업에서도 스마트 물 서비스에 대한 관심이 높아져 IBM은 유럽에서도 스마트 물 서비스와 관련된 사업을 추진 중에 있으며 Veolia와 Suez 등의 기업에서도 스마트 물 서비스에 대한 높은 관심을 나타내고 있다. 독일의 Siemens사는 최근 스마트 물 서비스에 대한 로드맵을 제시한 바 있다.

Malta는 이탈리아 남쪽 지중해에 위치한 섬 국가로서 주요 수원을 지하수와 해수담수화에 의존하고 있다. 현재 물이 부족한 편이며, 향후 지구온난화 등의 영향으로 물 부족이 더욱 심화될 것으로 예상된다. 따라서 Malta에서는 물과 에너지 효율을 제고하기 위하여 스마트 그리드를 국가 차원에서 적용하고 있다. Malta는 IBM과 함께 물과 전력분야에 2009년부터 향후 5년간 국가 단위의 AMI와 스마트그리드 구축을 위한 7000만 유로 규모의 사업을 시작하였다. IBM은 물과 전력관리를 위한 새로운 시스템을 도입하고 있으며, 특히 물 관리 분야에서는 원격관리가 가능한 수도계량계를 도입하고 사용자가 인터넷을 통해서 사용량을 점검할 수 있는 시스템을 구축하였다.

5) 싱가포르

싱가포르는 대부분의 수자원을 인접국인 말레이시아로부터 수입하고 있었으나, 변화하는 국제정세에 따라 안정적인 수자원을 확보하고 수자원 자립기반 구축을 위하여 Smart Water Grid를 추진하고 있다. 이에 따라 선진화된 멤브레인(Membrane) 기술을 이용한 하·폐수 재이용을 통해 식수 및 공업용수를 공급하여 성공적인 수자원 자립 기반을 확립하였다. 그 결과 하루 2억 900만 리터가 생산(전체 물수요의 15% 담당)되는 NEWater 처리수를 산업용수, 조경수 등으로 100% 재이용하고 있다.

6) 이스라엘

이스라엘은 예루살렘지역 1,200km 상수관망 중 2008년 기준으로 누수율 약 10.5%에서 물 관리 기반시설 감시 시스템 및 소프트웨어 전문업체인 TaKaDu사를 중심으로 스마트물 서비스 사업 추진을 통해 누수율을 4% 이하로 절감하였다. 또한, 기존 센서의 데이터와 기상자료, 음향자료, GIS자료 등을 활용하여 스마트 물 서비스를 구현하는 기술과 향후 발생할 문제를 사전에 예측하여 예방할 수 있는 기술을 개발하였고, IBM과 Thames Water 등의 회사와 협력하여 해외 사업에도 진출 중이다.

2.2 도시 물재해 관련

도시 물재해(치수)와 관련된 시스템은 홍수와 가뭄에 밀접한 관련이 있다. 주로 지자체별로 소규모 상하수도에 CCTV를 설치하고 중요한 시설을 모니터링하는 방식으로 운영중이다. 국가적으로 보면 대규모 홍수와

관련된 재해를 겪으면서 체계적으로 정보를 수집하고 분석한 후 대응하는 필요성에 따라 홍수재해 시스템이 개발·운영되어 왔다. 가뭄은 최근에 이례적인 가뭄 상황을 겪으면서 시스템 개발이 이루어졌다.

이수와 달리 홍수와 가뭄은 매일 발생하는 것이 아니다. 그러므로 방대한 정보를 분석하여 합리적으로 대응하기 위한 업무를 지자체 단위에서 운영하기에는 현실적으로 어려운 구조이다. 따라서 국가차원에서 전문 기관에 의뢰하여 시스템을 개발·운영하고 있으나, 지자체에서는 거의 활용되지 못하는 실정이다.

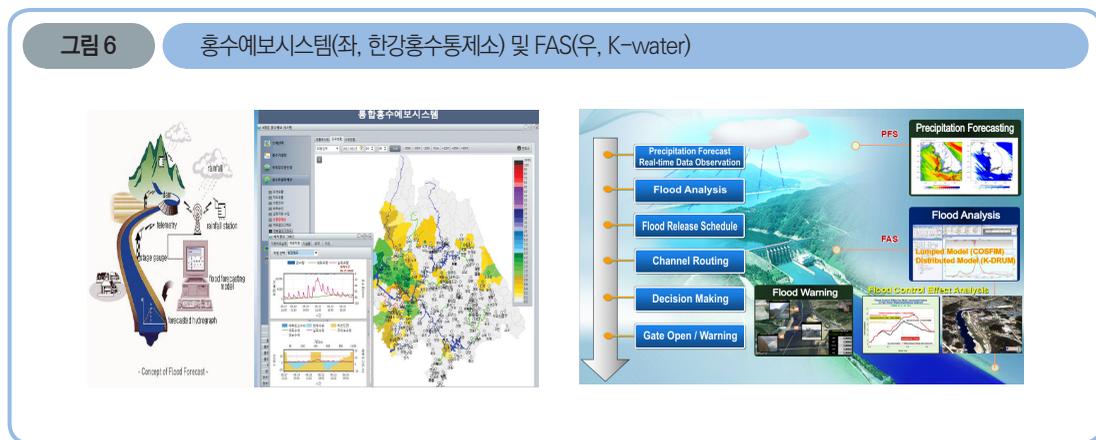
2.2.1 국내

1) 통합홍수예보시스템(한강홍수통제소)

한강홍수통제소에서는 실시간으로 관측되는 강수량, 수위, 댐 방류량 등 수문자료를 활용하여 홍수예보 발령을 검토하는 분석 시스템을 구축하여 운영 중에 있다. 홍수예보시스템을 이용하여 강우량, 댐 방류량 등을 고려한 하천 수위 분석 및 홍수예보 발령 여부 검토, Fax, SMS, CBS, 앱 등을 통한 중앙재난안전대책본부, 지자체, 관계기관 및 언론기관 홍수예보 발령 사항 동시 전달 체계까지 갖추고 있다.

2) FAS(Flood Analysis System, K-water)

K-water에서 개발 운영하는 홍수분석시스템으로서 예상 강우량과 실시간 수문 상황 등을 고려한 저수지 모의운영을 통해 홍수조절 계획을 검토한 후 상·하류 영향분석(댐 수위 상승 및 방류에 따른 하류 홍수예측 등)을 최적 방류 의사결정 시 활용하고 있다.



3) 재난관리시스템(국립재난안전연구원)

정부는 2002년 태풍 루사, 2003년 대구지하철 참사, 태풍 매미 등을 계기로 쌍방향 커뮤니케이션이 가능한 국가재난관리 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 중앙정부와, 시·도 및 시·군·구 지자체를 연계하여 재난 예방·대비·대응·복구의 단계별 재난관리를 통합적으로 수행할 수 있도록 설계되었다.

국가재난관리정보시스템(National Disaster Management System; NDMS)은 재난관리에 필요한 기능과 역할에 따라 재난감지, 수집·분석, 상황전파, 대응·복구 4가지로 구분되어 있다. 이를 4개의 서브시스템과 2개의 운영센터를 통해 관리한다. <표 6>은 재난관리정보시스템의 재난관리 역할 및 시스템 구성을 예시한 것이다.

표 6

재난관리정보시스템의 재난관리 역할 및 시스템 구성

기능	시스템	주요내용
재난 감지	재난정보 공동활용시스템	44개 재난관리 책임기관의 225종 재난정보를 실시간 연계·공동 활용하여 전라지도 기반의 통합화면에 표출
	재난영상(CCTV) 정보 통합연계시스템	다양한 재난영상정보를 통합 운영 관리함으로써 신속한 의사결정 및 현장대응 가능하게 하며, 영상정보와 현장 상황정보를 연계하여 실시간 제공하는 전자상황판서비스
수집·분석	재난정보 관리DB센터	재난관리시스템 등 각종 재난관련 정보시스템을 활용한 업무 수행 과정에서 생성 축적되는 각종 재난정보가 자동으로 가공·분석되어 정책수립 의사결정지원 자료 제공
상황 전파	상황전파시스템	재난상황을 중앙, 지방자치단체 및 유관기관까지 실시간으로 전파하여 대응할 수 있도록 지원하는 정보시스템으로 중앙, 시·도, 시·군·구, 유관기관에 설치되어 운영
	국가재난정보센터	지방자치단체, 유관기관 등에 분산되어 있던 각종 정보(기상, 화재, 산불, 풍수해 등 재난정보 및 재난안전행동요령 등)를 국민에게 제공하는 재난정보 포털사이트
대응·복구	재난관리시스템	재난관리 프로세스 4단계(예방→대비→대응→복구)를 정보화한 것으로 재난정보를 신속하게 수집전파하고 재난상황별 표준행동절차에 따라 대응·지원하는 시스템 (중앙정부, 시·도, 시·군·구)

출처: 국립재난안전연구원보고서, 2014

국가재난관리정보시스템은 재난과 관련된 많은 사항을 다루고 있다. 그러나 도시 물 관리 측면에서 보면 이수 계획과 환경적인 측면을 고려했음에도 불구하고 시스템 접근과 활용이 매우 제한적이다.

4) 국가가뭄정보분석 시스템

2014년부터 최근까지 우리나라는 가뭄으로 인한 심각한 물 부족을 겪었다. 이로 인해 2015년 국가정책 조정회의를 통해 K-water내 가뭄정보분석센터를 설립하고 2016년 3월부터 가뭄 예·경보를 시행하였다. 2017년 9월에는 국가가뭄정보분석시스템을 구축하였다.

시스템은 여러 기관에 흩어져 있는 가뭄 관련 정보를 모으는 부분과 가뭄 현황 및 전망 분석 부분, 대국민 정보공유 부분(<http://drought.kwater.or.kr>)으로 구축되어 있다. 대국민 가뭄정보 포털의 경우 총 7개의 대메뉴와 37개의 세부 메뉴로 구성되어 있다. 세부내용은 일반 국민이 가뭄에 대한 이해와 정보를 쉽게 얻을 수 있는 뉴스 및 활동, 가뭄 교육 및 상식, 가뭄 대응 등의 메뉴와 의사결정자와 공무원, 전문가 등이 활용할 수 있는 고급 정보로서 가뭄 기초 자료, 가뭄 감시 및 전망 메뉴를 제공하고 있다.

현황 및 전망을 위해 방대한 자료를 수집하고 이를 분석할 수 있는 전문가와 내부적으로 활용되는 분석 시스템을 운영하여 신뢰성 있는 정보 생산을 계속하고 있다.



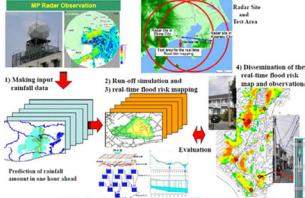
주목할 점은 도시 단위에서 활용가능한 우리동네 가뭄정보와, GIS기반 읍면동 단위 정보 획득이 가능하다는 점이다. 또한, 도시 물 관리자를 위해 빅보드 방식의 의사결정 지원툴을 별도로 제공하고 가뭄정책 수립 및 대응 시 활용할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 지자체 담당자가 기초정보, 수원 현황, 가뭄 현황들을 직접 피드백할 수 있는 양방향 소통방식으로 구성되어 있다.

2.2.2 국외

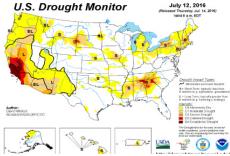
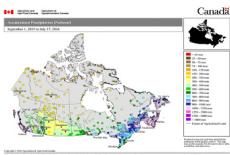
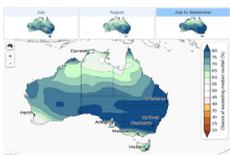
홍수와 관련된 국외 시스템은 <표 7>과 같다. 시스템은 예·경보를 위한 정보제공과 의사결정자를 위한 기능들로 개발·운영되고 있다.

표 7

국외 홍수관리시스템 현황

구분	주요내용
 <p data-bbox="276 895 353 925">〈AHPS〉</p>	<p data-bbox="495 721 954 751">Advanced Hydrologic Prediction Services(AHPS)</p> <ul data-bbox="495 753 1232 876" style="list-style-type: none"> - 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)이 운영 중인 시스템으로 통합적인 하천 홍수 예경보 등 하천 관리자에게 정확한 의사 결정정보의 제공에 목적으로 개발되었다. 도시 단위에서 활용할 수 있도록 구성되었으며 20여개의 세부기능을 제공하고 있어 의사결정자가 활용하기 편리하게 구성되어 있다.
 <p data-bbox="263 1173 368 1203">〈ESPADA〉</p>	<p data-bbox="495 1032 742 1062">홍수예경보시스템(ESPADA)</p> <ul data-bbox="495 1064 1232 1124" style="list-style-type: none"> - 프랑스 ESPADA는 중앙 시스템으로 전산화된 강우-유출모형(rainfall-runoff model)에 의해 30분 주기로 도시지역의 홍수 예보를 수행한다.
 <p data-bbox="247 1451 384 1481">〈침수위험지도〉</p>	<p data-bbox="495 1310 666 1340">내수침수예측시스템</p> <ul data-bbox="495 1342 1232 1403" style="list-style-type: none"> - 일본 국립지구과학방재연구소(NIED)에서 실시간 내수침수예측시스템을 개발하여 실시간으로 Web GIS와 연계한 침수위험지도를 작성하여 침수방지 업무에 활용하고 있다.
 <p data-bbox="276 1729 353 1759">〈FRICS〉</p>	<p data-bbox="495 1572 1109 1602">Foundation of River & Basin Integrated Communications (FRICS)</p> <ul data-bbox="495 1604 1232 1695" style="list-style-type: none"> - 일본 하천정보센터는 개인용 휴대폰을 이용한 하천정보 제공 시스템을 개발하고 강우 자료, 원격송신을 통한 하천의 수위, 댐 저수량 등과 관련된 정보에 대한 해석 및 대책 등을 수립하고 있다.

가뭄과 관련된 국외 가뭄관리 시스템은 <표 8>과 같다. 국가 단위에서 이루어지는 시스템으로 미국의 경우 주단위로 별도의 분석·대응시스템을 구축하여 운영하고 있다.

표 8	국외 가뭄관리시스템 현황
구분	주요내용
 <p><Drought Monitor></p>	<p>국립가뭄경감센터(National Drought Mitigation Center, NDMC)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 미국 전역의 가뭄 감시를 위한 각종 지수를 활용하여 가뭄도(Drought Monitor, DM)를 제공 - 가뭄의 진행속도가 느림에 따라 가뭄계획을 세워 피해 경감에 활용
 <p><Drought Outlook></p>	<p>U.S. Drought Portal(USDP)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 미국내 모든 기관에서 생산되는 가뭄정보를 종합적으로 분석하여 제공(상황판처럼 활용가능)
 <p><EDO></p>	<p>European Drought Observatory(EDO)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 가뭄에 대한 상황을 자세한 설명과 보고서로 제공하며, SPI, 토양수분에 기초한 복합 가뭄지수를 통한 가뭄 모니터링 정보 제공
 <p><Drought Watch></p>	<p>Canada Drought Watch</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 및 과거의 강수량과 온도 단계 등을 보여주는 지도정보를 제공 - 인터랙티브 맵을 이용하여 캐나다 전역의 가뭄수준 및 가뭄데이터 제공
 <p><호주 기상청></p>	<p>호주 기상청</p> <ul style="list-style-type: none"> - 강수량과 온도에 대한 전망정보, 호주 전역의 토양수분과 관련된 정보 제공 - 과거 14개월간의 누적강수량 분석을 통한 강수량 부족량 표시

2.3 도시 물환경 관련

도시 물 환경 관리에서 전통적으로는 하천 환경을 우선시한다. 이에 따라 하천환경개선과 공공위생을 위한 하수도와 하수처리시설을 중심으로 사업이 진행되어 왔다. 특히 근래에는 삶의 질이 개선되면서 하천 복원을 비롯한 친수와 생태 기능이 우선시되었다. 또한, 도시 내 물 순환 측면을 강화하여 환경개선과 수질개선, 홍수방지, 지하수위 확보를 도모할 수 있는 LID(Low Impacted Development) 관련 사업들이 최근 활발히 진행되고 있다.

2.3.1 국내

1) 수질TMS(Tele-Monitoring System)

수질TMS는 수질원격감시체계로서 공공하수처리시설, 폐수종말처리시설, 폐수배출 사업장의 최종 방류구에 수질 자동측정 기기를 설치하여 오염물질의 실시간 배출 상황을 관제센터에서 감시할 수 있도록 하는 시스템이다. 실시간으로 오염원의 배출 감시 및 감독을 통해 수질오염사고를 예방하고, 사업장 스스로 계절별, 시간대별 수질 현황을 분석하고 관리할 수 있도록 하여 자체적으로 공정을 개선할 수 있도록 유도하고 있다. 또한 배출 오염도의 정확한 파악이 가능함에 따라 합리적인 배출 부과금의 산정 및 수질 관리가 가능하다.

2) 국가수질자동측정망

국가수질자동측정망 시스템은 4대강 주요 하천과 호소에 수질자동측정소를 설치하여 실시간으로 수질을 측정하고 인터넷망을 통해 정보를 수질자동측정망 시스템에 전달하여 측정소 원격제어, 초기 경보체계 운영, 수질측정데이터 저장 및 관리, 웹 서비스 등의 서비스를 제공하는 사업이다.

한강 등 4대강 수계를 상시 측정해 수질오염사고 시 신속한 대처 및 상수원의 수질보호가 이루어질 수 있도록 하며, 실시간 수질데이터 기반 구축을 통해 과학적인 하천 수질관리 및 오염총량관리제 등 정책 기초자료로 활용할 목적으로 구축하였다.



3) SURIAN(SUpercom based River Analysis Network)

SURIAN은 K-water 수질관리 담당자 의사결정 지원을 위한 수질예보 목적으로 개발되어 구축된 시스템이다. 시스템은 주간, 월간 조류발생 현황 및 전망과 16개 보, 3개 하천, 12개 댐 지점 수질예보 시 활용되고 있다.

4) 수질오염원 조사자료 입력 및 관리시스템

2008년에 개발된 시스템으로 수질오염원을 조사하고 입력하는데 활용하기 위해 구축되었다. 생활계, 축산계, 산업계, 양식계, 매립계, 환경기초시설, 기타 수질 오염원 자료를 등록하고 관리할 수 있도록 되어 있고, 연도별 통계자료를 제공하여 입력 시 참고할 수 있도록 되어 있다.

2.3.2 국외

1) REON(River and Estuary Observatory Network), 미국

REON 프로젝트는 Beacon 연구소와 IBM Smarter Planet이 2008년부터 공동으로 추진 중인 환경 실시간 모니터링 플랫폼으로, 507km의 허드슨 강 전체에 100m 간격으로 센서 및 초음파 해류계(ADCP)를 설치하여 강의 상태(온도, 수압, 염분, 탁도, DO 등)와 풍향, 풍속, 기압 등의 실시간 정보를 통합플랫폼으로 전송하고 수집하여 허드슨 강의 수중 환경 정보를 제공하고 있다.

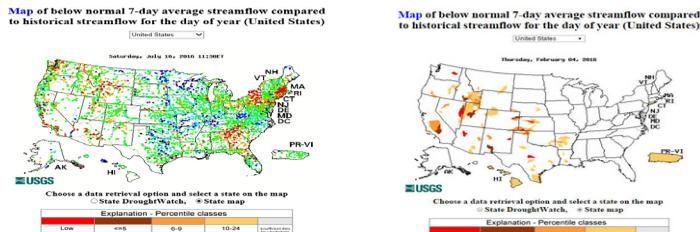
2) NWIS(National Water Information System), 미국

NWIS는 미 지질조사국(USGS)에서 운영 중인 물 관련 자료의 저장 및 검색을 위한 통합시스템이다. 이 시스템은 분산형 데이터베이스 구조를 기반으로 측정지점, 시계열 관측 자료, 침투 유량, 지하수, 수질, 수자원 이용 등의 다양한 데이터를 실시간으로 수집·관리한다. 그러면 이 실시간 데이터를 웹페이지에서 텍스트와 그래픽 파일 형식으로 바꿔서 제공해준다. 이러한 방법으로 총 177만 1,032개의 관측 지점을 설치하여 다양한 센서들을 통해 물 관련 정보들을 수집한다.

NWIS는 수자원 이용정보, 수질정보, 지하수정보, 데이터 처리의 네 가지 시스템으로 구성된다. 수자원 이용정보 시스템은 호수, 저수지, 하천, 수리시설물의 유량, 강우, 수질 등의 물 관련 데이터들을 제공한다. 수질정보 시스템은 하천, 호수, 지하수의 수질 관련 자료를, 지하수정보 시스템은 지하수의 위치, 수위, 수질에 대한 데이터를 제공한다. 데이터처리 시스템은 측정장비들을 통해 수집된 지표수 정보들을 미 지질 조사국으로 전송하는 역할을 수행하고 있다.

그림 9

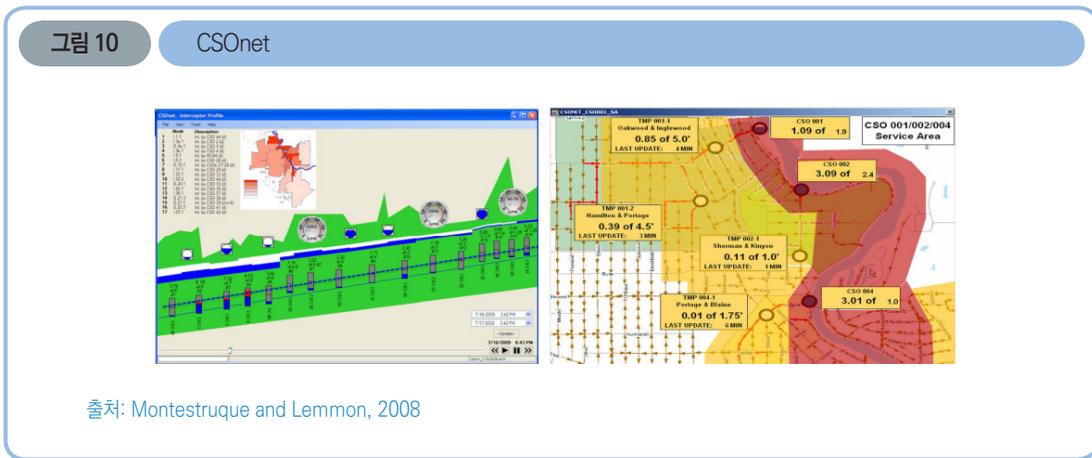
NWIS의 실시간 유량 자료



출처: NWIS, <http://waterwatch.usgs.gov>

3) CSOnet, 미국

CSOnet은 강우 시 합류관에서 오수가 처리되지 않은 채 하천으로 방류되는 합류관의 월류(CSO: Combined-sewer Overflow)를 관리제어 및 감시하는 시스템으로, WSAN(Wireless Sensor Actuator Network)를 기반으로 하드웨어(Hardware), 미들웨어(Middleware), 제어요소(Control component)로 구성된다. CSOnet은 무선망(RF)을 기반으로 센서와 구동 장치를 통해 실시간 오수 관리를 수행해 강우 시 오수처리시설로 흐르는 유량을 제어하여 월류량을 감소시킨다.



4) 하천관리시스템, 미국

미국은 하천 환경관리 시스템을 구축하여 운영중으로 하천의 오염물질 누출 사고와 같은 긴급 상황에 대한 실시간 오염물질 이송, 확산을 모의할 수 있도록 구현되어 있다. 또한 조기 경보를 위하여 GIS기반의 실시간 수질예측시스템인 RiverSpill을 활용하고 있다.

5) 오염사고 위기경보 및 방지 시스템, 유럽

유럽은 Danube강을 대상으로 오염사고 위기경보 및 방지시스템(The Danube Accident Emergency Warning and Prevention System, DAEWPS)을 개발하여 국가 경계를 넘는 홍수와 오염물질 누출 사고에 대한 예측과 정보를 교환하기 위한 시스템으로 활용하고 있다.

2.4 정보제공 시스템

국내에서 제공되는 정보 제공만을 목적으로 도시 물 관리에 활용 가능한 시스템은 <표 9>와 같다. 각 정보 제공 시스템은 다양한 분야에 걸쳐 구축되어 운영되고 있지만 국내의 경우 대부분 대국민을 위한 단순 정보 제공 위주로 구축되어 있어 연구자나 전문가가 정보를 얻기에는 매우 불편하다. 시스템별로 표준화 연계가 되어 있지 않아 분석 자료 활용에도 어려움이 있다.

표 9 정보제공을 위해 구축된 국내 시스템 사례

시스템 명	개요 및 현황	운영
물환경정보시스템 (http://water.nier.go.kr)	- 물환경에 대한 기본적인 지식과 수질정보를 제공 - 수질(일반, 총량, 방사성), 수리, 수문, 생물측정망 정보, 조류경보제 자료	국립환경과학원
실시간 수질정보시스템 (http://www.koreawqi.go.kr)	- 자동측정소에서 측정된 자료를 대국민 공개 - (미확정자료) 1차 선별·검증 후 제공 - (확정자료) 2차 전문가 검증 후 자료 제공	환경부
수질총량정보시스템 (https://tmdlms.neir.go.kr)	- 오염총량관리제 관련 정보제공과 지역개발부하량 산정기능(간이), 지리정보 조회 서비스 등으로 대국민 이해도 제고	
수질오염방재정보시스템 (http://www.waterkorea.or.kr)	- 수질오염사고에 대응하기 위한 관리시스템 - 사고접수, 사고조회, GPS 정보 등의 수질오염사고 관리용 정보 - 오염사고 대응하기 위한 단순 분석정보제공	한국환경공단
국가상수도정보시스템 (https://www.waternow.go.kr)	- 산재된 상수도 분야 주요 정보를 수집하여 통합관리 - 수도물 법정 수질자료, 상수도 통계 및 시설정보 등 상수도 관련 정보 제공 - 관련 법령, 기술정보, 뉴스 등 제공	한국환경공단
국가하수도정보시스템 (https://www.hasudoinfo.or.kr)	-산재된 하수도 분야 주요 정보를 수집하여 통합관리 -통계자료(연도별), 운영현황(수질, 연계처리수, 재이용수, 에너지 자립화, 찌꺼기 처분현황) 제공 -기술자료, 하수도관련지침, 뉴스 등 제공	한국환경공단
국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS) (http://www.wamis.go.kr)	-국가 물 관련 정보 제공 -수문·기상, 유역현황, 하천, 댐, 지하수, 이수, 수도, 환경생태, 자연재해, 지형 공간	
물 관리정보유통 시스템 (WINS) (http://www.wins.go.kr)	-물 관리 공동활용 대상 정보의 온라인 유통 -수문·기상, 유역현황, 하천, 댐, 지하수, 이수, 수도, 환경생태, 자연재해, 지형 공간	한강홍수통제소
하천관리지리 정보시스템(RIMGIS) (www.river.go.kr)	-하천관련 행정업무, 하천대장, 하천정비 기본계획 자료관리 -하천기본계획 전산화 결과물(하천시설물 공간·속성정보, 하천대장, 시설물 도면정보)	
통합물정보 포털 (MyWater) (http://water.or.kr)	- 국내 · 외 산재된 물관련 자료를 수집 · 가공하여 9개 대 메뉴, 356개 상위콘텐츠, 1,323개 세부콘텐츠로 구성 - (맞춤물정보) 일반 국민부터 전문가까지 다양한 콘텐츠 - (이슈물정보) 현재 사회적으로 이슈가 되고 있는 최신 물 정보 - (참여물정보) 사용자간 물정보를 공유할 수 있는 콘텐츠	K-water

이 중 수자원관리 종합정보 시스템(Water Resources Management Information System, WAMIS)은 물 관리 전반에 산재되어 있는 물 정보를 과학적이고 체계적으로 정리하여 자료의 생성, 가공, 제공 등 일련의 과정을 표준화하고, 통신망을 통하여 관련된 정보를 공동으로 활용할 수 있는 종합정보시스템을 구축하기 위한 사업으로 시행되었다. 그러나 물 관리 전반에 걸친 정보 제공이라는 당초 목적과 달리 치수부분에 치우쳐 있으며 마찬가지로 일반인이 정보를 제공받는데 불편하게 구성된 한계를 보인다.

한편 K-water에서 개발하여 운영 중인 통합 물 정보 포털은 통합 관점에서 이수, 치수, 환경과 관련된 물 정보를 체계적으로 제공하고 있어 도시 물 관리 시 많은 도움이 될 것으로 보인다.

03' 국내 도시 물 관리 시스템의 한계 및 시사점

국내 도시 물 관리 시스템을 살펴보면 중앙부처의 물 관리 기능의 분산에 따라 다양한 물 관련 법률과 계획이 혼재되어 있다. 특히, 하천관리와 용수 공급에 있어서는 다원화된 물 관리로 인해 행정적, 경제적 비효율이 발생해 왔다고 볼 수 있다. 도시 물 관리 시스템 또한 이러한 물 관리 현실에 따라 기능별로, 추진 주체별로 매우 다양하게 혼재되어 개발·운영되어 왔다.

우선, 물공급 측면에서 보면 도시공급자에 따라 광역상수도과 지방상수도로 이원화되어 있다. 자체수원이 없는 도시의 경우 수원을 관리하는 주체와 활용하는 주체가 상이하다. 따라서 지자체에서는 누수방지, 수질향상, 안전한 물공급을 목적으로 주로 도시 단위에서 물공급 상황을 모니터링하고 누수, 수질사고 등에 즉각적으로 대응할 수 있는 시스템을 개발하여 운영하고 있다. 근래 기후변화에 따라 수자원의 계절적 편차가

심해지고 있고 도시개발, 인구이동 등으로 인해 도시 물공급 여건이 급변하고 있다. 기존에 활용하던 수원의 안정적 활용과 용수 공급체계를 유지하는 것이 점점 어려워질 전망으로 도시 간 물의 이동, 대체 수원 활용 등의 대비가 필요하다. 하지만 올바른 계획수립과 협업을 위한 정보수집과 연계가 어려운 우리나라의 구조적인 문제가 도시 단위에서 물공급 위협에 제대로 대처하기 힘든 요인이라고 볼 수 있다.

물 재해 측면에서 보면 우리나라는 시기적인 영향과 홍수와 가뭄이 반복되기 때문에 올바른 계획 수립과 체계적인 모니터링, 대응을 위해서는 전문지식을 가진 인력과 이를 뒷받침할 분석 관리 시스템이 반드시 필요하다. 하지만 소규모 도시 단위에서 전문 인력과 시스템을 확보하여 상시적으로 운영하기에는 물리적 한계가 있다. 국가차원의 재해별 전문기관에 의한 시스템 개발 및 운영은 이러한 물리적 한계를 극복할 수 있는 좋은 대안이다. 실제로 국내에서도 전문기관을 통한 모니터링, 분석, 대응 시스템을 구축하여 전문 인력을 두어 운영하고 있는 추세이다. 하지만 실적 위주로 급하게 구축되고 유지관리가 제대로 이루어지지 않아 정책과의 연계가 약하고, 사용자의 요구에 부합하지 못하는 시스템이 많은 실정이다. 또 지자체에서 실제 활용되는 사례가 거의 없는 것으로 파악되고 있다. 따라서 도시 물 관리에 활용 할 수 있는 수준의 시스템 개선이 무엇보다도 시급하다.

셋째 물 환경 측면이다. 국내에서는 수질, 수생태를 모니터링하고 수량을 감안한 대응 분석을 수행할 수 있는 시스템이 K-water 수리안 이외 사례는 찾아보기 힘들다. 이것조차 내부용이라서 도시 물 관리자가 활용할 수 있도록 공개되어 있지 않다. 때문에 실질적으로 도시 물 환경 관리를 위해 활용할 수 있는 시스템은 정보제공 포털 이외에는 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 그간 도시 물 관리에서 소외되어 있던 물 환경 분야의 지속적인 관심과 투자가 필요하다고 본다.

한편 기존 우리나라 물 관리 체계에서는 계측과 모니터링 시 기능별로, 전문기관과 지자체 간에 필연적으로 중복되는 요소를 가질 수밖에 없는 구조⁶⁾를 가지고 있기 때문에 그간 중복투자에 대한 끊임없는 지적이 있어왔다.

6) 시스템은 계측→모니터링→분석→예측→대안수립(의사결정)의 구성요소를 가지기 때문에 시스템 구축 및 운영을 위해서는 반드시 계측과 모니터링 부분이 필요함

최근 대두된 Smart Water Grid와 Smart Water City 사업은 이러한 중복 요소를 배제하고 ICT 기술을 융합하여 도시 물 관리를 근본적으로 개선할 수 있다. 또 효율적인 지능화 운영을 통해 에너지 저감과 물 안보까지 확보할 수 있는 좋은 대안이라고 볼 수 있다. 하지만 기술개발 발주처가 이원화된 시기에 추진되면서 우리나라의 경우 이수적인 측면이 지나치게 강조되고 있어 일부 신도시에만 Smart Water Grid와 Smart Water City 사업이 적용되는 것은 아쉬운 점이라고 할 수 있다.

마지막으로 최근 정수처리를 위한 단위공정부터 복잡한 이·치수 의사결정까지 빅데이터를 활용한 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 도시 물 관리에 적용하기 위해서는 아직 데이터 표준화와 연계되지 못하고 있고 전문 인력의 확보 또한 부족해 실질적인 효과를 보기까지는 많은 시간이 요구된다. 하지만 물 관리 일원화에 따라 기존에 추진된 사업과 함께 전반적으로 재검토되어 보다 합리적인 방향으로 개선하여 적용할 필요가 있다.

04 | 결론

이 글에서는 도시 물 관리를 기능적으로 구분하고 지금까지 진행된 기술동향과 정책을 살펴본 후 국내에 적용된 시스템 사례를 살펴보았다. 도시 물 관리는 기능적으로 이수, 치수, 환경적인 측면으로 구분할 수 있는데 2010년 이전까지는 기능적으로 이원화된 상태로 물 순환, 하천복원, 최적화 등이 주목을 받아오다가 최근 사회적으로 유행하고 있는 IT, 융합, 빅데이터 경향에 맞춰 융합과 통합을 위한 기술개발이 활발히 이루어지고 있는 상황이다.

국내 도시 물 관리 시스템은 그 다양성만 보자면 부문별로 많은 시스템이 개발·운영되어 왔으며 이 글에서 언급하지 못한 지자체(도시)단위의 시스템까지 합하면 상당 수의 도시 물 관리 시스템이 있는 것으로 나타났다.

하지만 시스템 수와 정보 제공량이 많음에도 불구하고 정책과의 연계가 약하고, 사용자의 요구에 부합하지 못하여 일부 대도시에서 운영하는 시스템과 전문기관에서 제공하는 시스템을 제외하고는 도시 단위에서 물 관리를 위해 활용할 수 있는 시스템은 국내에 거의 없는 것으로 나타났다.

체계적인 도시 물 관리 시스템 구축 및 운영을 위해서는 분야별로 전문기관을 통한 신뢰성 있는 정보를 생산하여 도시 담당자가 활용할 수 있도록 하고, 도시 단위에서는 전문기관에서 합리적인 결과를 도출할 수 있도록 정보연계를 진행하는 것이 무엇보다도 필요한 시기라고 본다.

최근 대두된 Smart Water Grid와 Smart Water City 사업은 ICT 기술을 융합하여 도시 물 관리를 근본적으로 개선하고 효율적인 지능화 운영을 통해 에너지 저감과 물 안보를 확보 할 수 있는 좋은 대안이라고 볼 수 있다. 이 글에서 언급한 시스템들이 물 관리 일원화에 따라 체계적으로 검토되어 도시 물 관리 시 지속적으로 활용될 수 있는 시스템으로 개선되길 기대한다.

Ho sun Lee

저자
이 호 선

학력

인천대학교 환경수리 박사
인천대학교 환경수리 석사
인천대학교 토목공학과 학사

경력

現) K-water 국가가뭄정보분석센터 책임위원
前) Smart Water Grid 연구단 사무국장
前) 한국환경공단 연구원
前) 인천지역환경기술개발센터 연구원

참고문헌

1. 광주광역시(2016), 물 순환 도시를 위한 도시계획 수립, 기후변화대응 광주습지생물다양성 세미나, 광주광역시
2. 국토교통부(2014), “해외건설 기술경쟁력 강화 연구개발사업”
3. 김민석외(2017), 내외수 연계 홍수위험 및 침수예측 선진화 기술 개발, 2017 대한토목학회 정기학술대회 전문연구세션
4. 문영일(2014), 도림천 홍수예측시스템 구축에 관한 연구, 서울특별시
5. 박현주(2014), 빗물과 미래의 도시 물 관리, 코네틱 리포트, 환경부
6. 안중호외(2011), 물 재이용을 통한 도시하천 물 순환개선 정책방향, 한국환경정책평가연구원
7. 윤인숙(2017) 기후변화 대응을 위한 지속 가능한 물 관리 정책 및 법제연구- 물·에너지·식량 상호연관성(Nexus)에 기반한 통합관리를 중심으로, 한국법제연구원
8. 여국현(2016), 기후변화에 대비한 홍수방어기술 동향, 한국환경산업기술원
9. 이상은외(2016), 도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 정책지원 시스템 구현(I), 국토연구원
10. 이호선외(2014), Smart Water Grid 연구단 소개와 기술확산을 위한 추진전략, 물과 미래
11. 이호선외(2014) 수자원관리의 새로운 패러다임, 스마트워터그리드, 정보와 통신
12. 전승수(2014), 스마트 시대의 물 산업 생태계 조망과 시사점, ISSUE PAPER, 한국과학기술기획평가원
13. 정원식(2016), 물 관리 정책 산출과정과 갈등 조정에 관한 연구: 국토교통부와 환경부의 수자원관리법을 중심으로, 2016 동계 (사)한국도시행정학회 학술대회 발표논문집
14. 정재동(2014), 해외 주요국의 재난관리 ICT 동향과 시사점, ISSUE PAPER 11월, 한국과학기술기획평가원
15. 정진홍(2010), 도시 물 순환 통합관리 네트워크 구축기술, 한국토목학회논문집, 58권 12호
16. 한강홍수통제소(2015), 국민생활중심 홍수예보마스터플랜 수립 요약보고서, 국토교통부

17. 한국과학기술기획평가원(2018), 국가과학기술표준분류체계(2018)
18. 한상기(2015), 스마트시티 도시별 추진현황, KISA Power Review
19. 홍성진(2014), 실시간 재난상황 의사결정 지원기술 개발, 국립재난안전연구원
20. L. Montestruque and M.D. Lemmon(2008), CSOnet: a metropolitan scale wireless sensor-actuator network, International Workshop on Mobile Device and Urban Sensing (MODUS), 2008
21. F. Mizuki, K. Mikawa, H. Kurisu(2012), Intelligent Water System for Smart Cities, Hitachi Review Vol. 61, No. 3 147
22. Navigant Research(2014), Smart Cities
23. Sharon L Nunes(2012), Smart Systems for Planetary Water Management, IBM.
24. The President's Council of Advisors on Science and Technology(2016), Technology and the Future of Cities, US White House Report
25. UN Population Division(2014), World Urbanization Report Revision Highlights
26. 국가가뭄정보포털 <http://drought.kwater.or.kr>(최종접속:2018.07.11)
27. 국가상수도정보시스템 <https://www.waternow.go.kr>(최종접속:2018.07.11)
28. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) <http://www.wamis.go.kr>(최종접속:2018.07.11)
29. 국가하수도정보시스템 <https://www.hasudoinfo.or.kr>(최종접속:2018.07.11)
30. 물 관리정보유통시스템(WINS) <http://www.wins.go.kr/>(최종접속:2018.07.11)
31. 물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr>(최종접속:2018.07.11)
32. 미국 캘리포니아 수자원국 데이터교환센터 홈페이지, <https://cdec.water.ca.gov/> (최종접속:2018.06.11.)
33. 미국 통합가뭄정보시스템 홈페이지, <https://www.drought.gov/drought/> (최종접속: 2018.06.11.)
34. 미국 USGS 홈페이지, NWIS, <http://waterwatch.usgs.gov>(최종접속:2018.06.11.)
35. 수질정보시스템. <http://www.koreawqi.go.kr>(최종접속:2018.07.11)

36. 수질오염방재정보시스템 <http://www.waterkorea.or.kr>(최종접속:2018.07.11)
37. 수질총량정보시스템 <https://tmdlms.neir.go.kr>(최종접속:2018.07.11)
38. 통합물정보포털(MyWater) <http://water.or.kr>(최종접속:2018.07.11)
39. 하천관리지리정보시스템(RIMGIS) www.river.go.kr (최종접속:2018.07.11)
40. The City Science research group 홈페이지, <http://cities.media.mit.edu/about/cities>(최종접속:2018.06.11.)

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2018 August vol.4 no.8

<http://cpc.kist.re.kr>

02

폐열 에너지를 전기로 변환하는 열전발전기술

포항공과대학교(POSTECH)

창의IT융합공학과 김기현 연구조교수 (khkim85@postech.ac.kr)

창의IT융합공학과 박태훈 석박사통합과정 재학

01 | 서론

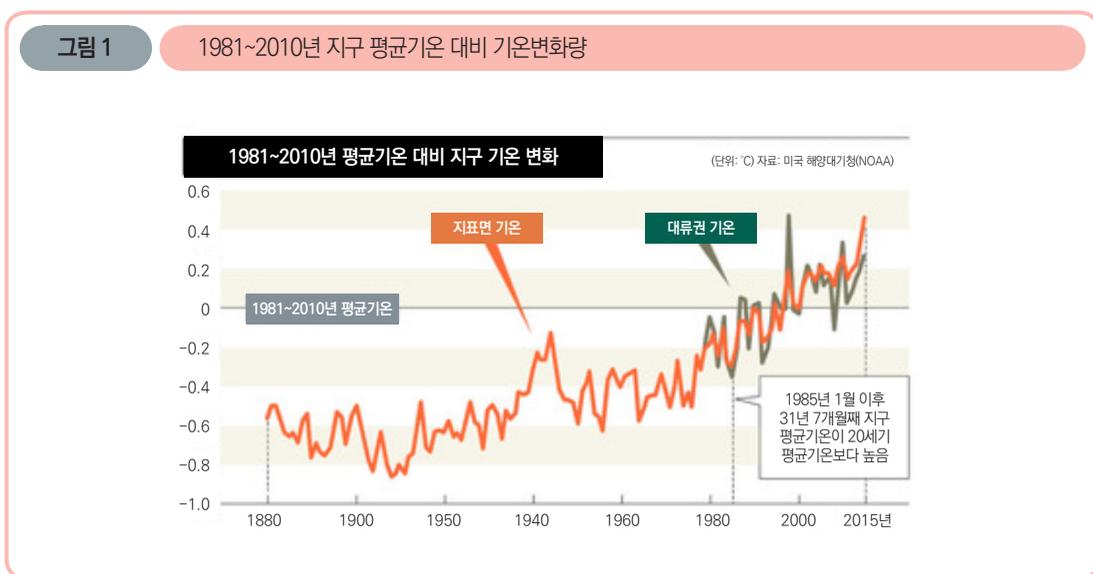
1.1 배경 및 필요성

과학기술의 발달은 우리의 생활을 더욱 편리하고 풍요롭게 만들어 주었으나, 과학기술이 발달함에 따라 지구 온난화와 화석에너지 고갈과 같은 문제들도 발생하고 있다. 매년 전 세계에서 폭염, 폭우, 한파 등과 같은 이상기후가 빈번히 발생함에 따라 지구 온난화에 의한 기후변화 문제는 우리의 삶과 떼려야 뗄 수 없는 관계가 되었다. 미국 해양대기청 집계 기준에 의하면 1985년 1월 이후 지구 평균기온은 단 한 번도 20세기 평균 아래로 떨어진 적이 없으며 산업혁명 이전에 비해 섭씨 1도 가량 올라간 상태이다. 지구 평균기온의 상승폭은 매년 증가하고 있는 추세이다. 세계 기후 과학자의 98%가 지구 온난화의 주요 원인이 화석연료 발전에 의해 배출된 온실가스라는 사실에 동의하였으며 기후변화에 적절히 대응하지 못할 경우 그 피해가 매년 전 세계 GDP의 20%에 이를 것으로 전망하였다. 국제 사회는 기후변화가 인류 삶에 미치는 영향의 심각성을 인식하고 1992년 유엔기후변화협약과 1997년 교토의정서 등을 통해 기후변화 대응을 위한 노력을 지속해왔다.

최근에는 유엔을 중심으로 전 세계 국가가 공동의 책임하에 온실가스를 줄이는 파리협정을 채택하여 기후변화체계에 대비하고 있다. 파리협정은 2020년 만료되는 교토의정서의 뒤를 잇는 국제 환경협정으로써 전 세계 195개 국가가 세계 온실가스 감축을 위해 2015년 12월 12일 프랑스 파리에서 맺은 국제협약을 말한다. 파리협약에서는 기존의 선진국 위주의 온실가스배출 감축의무를 모든 국가로 확대 적용하고 이를 이행하도록 규정하고 있다. 이에 따라 전 세계는 2030년까지의 온실가스 감축 계획을 유엔에 제출하고 이를 달성하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. <표 1>에 각국의 온실가스 감축 목표와 이를 이행하기 위한 국가적 차원의 정책들을 정리하였다.

2014년 기준으로 우리나라는 전 세계 에너지의 2% (세계 9위)에 해당하는 에너지를 소비하고 있으며 이산화탄소 배출량은 5억 7천만 톤(세계 7위)으로 중국, 미국, 인도, 러시아, 일본, 독일 다음으로 많으며 1인

당 온실가스 배출량은 11.3톤으로 OECD 18위를 기록하고 있다(양의석 et al., 2016). 이에 따라 우리나라는 국제사회에서 온실가스 감축에 대한 책임을 피할 수 없으며 온실가스 감축 문제는 무역 의존도가 높은 우리나라의 새로운 무역 장벽으로 작용할 수 있어 온실가스 감축을 위한 적극적인 노력이 필요하다. 우리나라는 2030년까지 'BAU'(Business As Usual)¹⁾ 대비 37%의 온실가스를 감축하겠다는 목표를 수립 후 유엔에 제출하였고 정부는 감축 목표 이행을 위한 로드맵을 새롭게 만들고 있다.



세계 에너지 수요는 급격하게 증가하고 있지만 인류가 사용할 수 있는 에너지 자원의 대부분을 차지하는 화석연료는 매장량에 한계를 가지고 있다. 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 화석에너지인 석유의 수요는 2035년까지 13.8%로 급격히 증가할 것으로 전망되고 있지만 2016년 말 기준 지구상의 석유 매장량은 전 세계가 51년 정도만 쓸 수 있는 1조 7천억 배럴에 불과하다. 특히, 우리나라는 에너지 자원이 부족하여 해외 의존도가 95%가 넘는 자원 부족국가이기 때문에 안정적인 에너지 확보가 중요하다. 가장 경제성 있는 대체 에너지원으로 원자력발전이 주목받아 왔지만 후쿠시마 원전 사고 등으로 안정성에 의문이 제기되면서 원자력발전 중단 및 축소 움직임이 일고 있다.

1) 현재 수준으로 배출 할 때 전망치

세계적으로 기후변화와 화석에너지 고갈 문제를 해결하기 위해 청정 재생 에너지 및 에너지 효율 향상 기술 개발을 위한 투자가 확대되고 있다. 하지만 태양광과 풍력 등의 재생에너지원은 외부환경에 의한 영향(시간대:낮/밤, 날씨:맑음/흐림 등)으로 전력생산이 가변적이고 불규칙적이다. 이에 따라 최근 버려지는 열 에너지로부터 전기에너지를 생산하는 열전발전기술이 기존 대체에너지 및 재생에너지의 문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 열전발전기술은 날씨나 일조량에 영향을 받지 않아 안정적인 열원을 확보한다면 24시간 규칙적인 발전이 가능하며 구동부가 존재하지 않아 반영구적으로 사용할 수 있어 소규모 분산형 발전에 적합하다. 본 리뷰에서는 열전발전 기술을 소개하고 그 동안 연구되었던 열전발전기술의 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다.

표 1 주요 국가별 온실가스 감축 목표 및 방안

국가	CO ₂ 배출량	주요내용	감축 목표 (2030)
 중국	세계 1위	<ul style="list-style-type: none"> 온실가스 배출통제 방안(16~20) 에너지 효율 개선 대기환경 규제 강화 청정수송시스템 보급: 신에너지 자동차 및 에너지 절약 핵심사업(16) 재생에너지 사용 확대: 태양광발전 신규건설 계획 발표(16) 	60~65% (2005년 대비)
 일본	세계 5위	<ul style="list-style-type: none"> 지구온난화 대책 계획(16) 에너지 효율 개선 청정수송시스템 보급 재생에너지 사용 확대: 일본 최대규모 풍력발전 조건부 승인 	26% (2013년 대비)
 EU	독일: 세계 6위 프랑스: 세계 19위 영국: 세계 15위	<ul style="list-style-type: none"> 2030 기후·에너지 정책 프레임 워크(14~) 기후·안보 관련 EU-UNEP 이니셔티브 및 공동 프로젝트(16~) 에너지효율개선: EU 에너지효율 등급표시제도 개선(16) 청정수송시스템 보급 재생에너지 사용 확대: EU 에너지정책 법률안 개선(16) 	40% (1990년 대비)

출처: 양의석 et al., 2016

02' 열전발전기술 소개

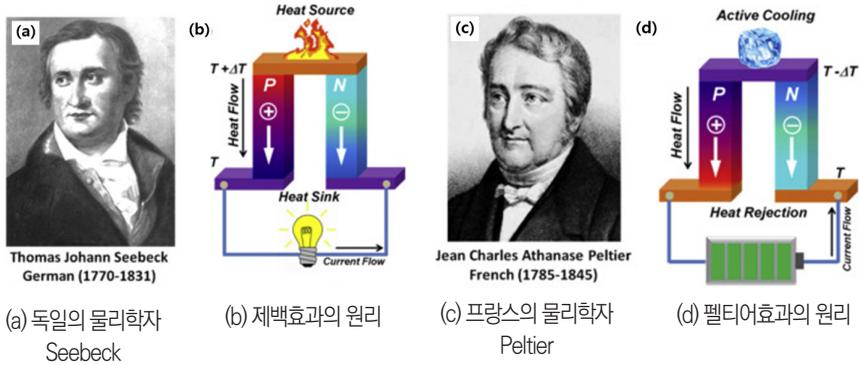
2.1 열전효과

열전발전기술의 근간이 되는 현상은 열전효과이며 이는 크게 제백효과(Seebeck Effect)와 펠티어효과(Peltier Effect) 두 가지로 분류된다. 제백효과는 반도체 재료의 양단에 존재하는 온도차에 의해 소재 내부의 전자(Electron) 또는 정공(Hole)이 발생하고 이동함으로써 기전력이 발생하는 현상이며 열전발전에 이용되는 기본 원리이다. 이 현상은 1821년 독일의 물리학자 Thomas Seebeck에 의해 발견되었으며 1950년대 들어서 반도체 재료의 발견과 함께 빠르게 발전해왔다. Seebeck은 서로 다른 두 금속인 비스무스(Bismuth)와 구리(Copper)를 서로 연결하고 그 안에 나침반을 배치한 후 비스무스의 한쪽 끝을 가열하는 실험을 진행하였다. 이 장치에서 가열된 비스무스에 의해 나침반의 방향이 변하는 것을 관찰함으로써 온도차이에 의해 전류가 유도되는 제백효과를 처음으로 규명하였다.

일반적으로 열전효과를 활용하는 열전소자는 <그림 2> (b)와 같이 P형 반도체 소재와 N형 반도체 소재를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결함으로써 제작된다. 열전소자에서 제백효과에 의한 전기에너지 생성원리를 자세히 살펴보면 다음과 같다. 열전소자의 한쪽 전극 접합부에 고온의 열을 가해주고 다른 한쪽의 전극 접합부를 저온으로 유지시켜 온도차를 형성하게 되면 N형 재료에서는 고온 전극 접합부 영역에서 전자가 생성되어 확산에 의해 저온 전극 접합부 영역으로 이동하고 P형 재료에서도 고온 전극 접합부에서 정공이 생성된 후 저온 전극 접합부 영역으로 이동하게 된다. 전자와 정공의 이동에 의해 P형 재료와 N형 재료에서 고온부 전극과 저온부 전극 사이에 기전력이 발생하고 이로 인해 전류가 흐르게 된다. 열전소자에서 열과 전기의 흐름은 고온부 전극→열전재료→저온부 전극을 통해 이루어지므로 열전소자에서 전극/열전재료 접합 부분은 전기전도도가 높고 열전도도가 높을수록 성능이 좋아진다.

그림 2

열전 효과



출처: Zhang, & Zhao, 2015

제백효과와 반대로 전기에너지가 열에너지로 직접 변환되는 현상인 펠티어효과는 우리 생활에서 냉각을 위한 용도로 많이 활용된다. 펠티어효과는 제백효과가 발견되고 약 20년이 흐른 1843년 프랑스의 물리학자 Peltier에 의해 발견되었으며 제백효과보다 먼저 상용화된 기술이다. Peltier는 서로 다른 두 금속선의 양 끝을 접합시키고 전류를 흘려주면 한쪽 접합부는 발열이 일어나 뜨거워지고 다른 한쪽 접합부는 흡열이 일어나며 전류의 방향에 따라서 발열과 흡열이 반대로 일어나는 현상을 규명하였다. 본 리뷰에서는 냉각을 위한 펠티어 효과에 대해서는 상세히 다루지 않을 예정이다.

2.2 열전소자의 성능지수

열전발전기술에서 가장 핵심이 되는 부품은 열전소자이며 열전소자는 열전발전시스템의 전체 비용 중 50~80%의 큰 비중을 차지하기 때문에 열전소자의 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다(LeBlanc et al., 2014). 열전소자 특성은 열전재료, 모듈설계, 접촉저항 등 다양한 인자에 영향을 받지만 이 중에서도 가장 크게 영향을 받는 인자는 열전재료이다. 열전소자의 특성을 향상시키기 위해서는 열전재료의 특성을 정량적으로 평가하고 이를 개선하는 것이 매우 중요하다. 열전재료의 특성을 정량적으로 논하기 위해서는 가장 기초적인 물리량인 무차원 성능지수 ZT(figure of merit)와 Seebeck 계수의 정의에 대해서 알아야한다. Seebeck 계수(α)는 열전재료에 가해지는 단위 온도차에서 유도되는 전압을 의미하며 다음과 같이 표현된다.

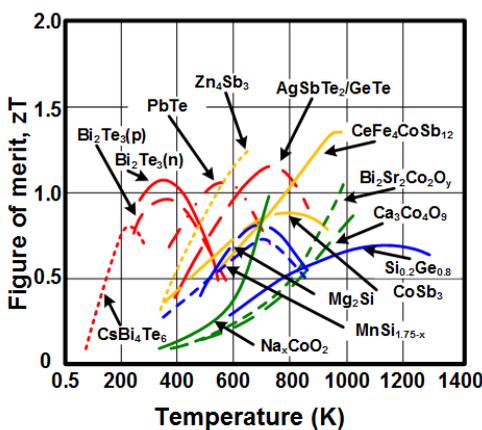
$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

일반적으로 금속 물질은 ~수 $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 아주 작은 값을 가지며, 반도체 물질은 ~수백 $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 값을 가진다(장문규 et al., 2012). 이 Seebeck 계수 값이 커지면 열전재료의 양단에 같은 온도차를 가하더라도 상대적으로 더 큰 기전력이 발생한다. 한편, 열전소자의 특성을 가늠하는 지표로 무차원 성능지수 ZT 가 사용되며 다음과 같이 기술된다.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{k}$$

그림 3

온도에 따른 열전재료의 ZT 특성



출처: The Kanatzidis Research Group, n.d.

여기서 T 는 열전재료 양단에 가해지는 고온부와 저온부의 산술 평균 온도이며, σ 는 물질의 전기전도도, k 는 물질의 열전도도이다. ZT 가 큰 값을 가질수록 열전소자는 우수한 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며 높은 ZT 를 위해서는 Seebeck 계수, 전기전도도, 고온부와 저온부의 산술 평균 온도가 크며 열전도도는 낮아져야 한다. 그러나 대부분의 재료에서 열전도도와 전기전도도는 상호의존적 관계를 나타내기 때문에 일반

적으로 열전도도가 낮은 물질은 작은 전기전도도를 가진다. 이러한 상호의존적 관계를 극복하고 ZT 값을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. <그림 3>의 온도에 따른 열전재료의 ZT 특성 변화를 살펴보면 온도가 높아짐에 따라 ZT가 증가하다가 최대치를 보이고 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 열전재료로 가장 널리 사용되는 Bi₂Te₃의 경우 400K 근처에서 가장 높은 ZT를 가지며 PbTe는 600K 근처, SiGe는 1200K 근처에서 가장 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 열전재료는 재료별로 고유의 온도의존성을 가지며 이로 인해 최대 ZT 값이 나타나는 온도가 각기 다르게 나타나기 때문에 이용대상의 열원 온도에 따라 적절한 열전재료를 선택하여 사용해야 한다.

2.3 열전소자의 적용 사례

세계적으로 가장 많이 활용되는 에너지원인 화석연료 중 34%만이 실제 활용 가능한 에너지로 변환되고 나머지 66%는 열에너지의 형태로 버려지고 있다. 자동차의 경우를 살펴봐도 지난 100여년 동안 기술 개발을 통해 엔진효율을 향상시켜 왔지만 가솔린 엔진은 전체 에너지 중 38%, 디젤엔진은 43%의 에너지만을 활용하고 나머지는 열에너지 형태로 버려지고 있다. 열전발전기술은 우리 생활주변에서 버려지는 열에너지로부터 전기에너지를 생산해내면서도 오염물질을 배출하지 않고 긴 수명, 소형화, 경량화의 장점을 가지고 있어 다양한 분야에 적용되고 있다. 열전소자를 발전용으로 처음 활용한 분야는 우주항공 분야이며 미국 NASA가 방사성동위원소를 이용한 열전발전기를 개발하여 무인 탐사선 Voyager 1 & 2에 적용하였고 40년이 넘는 현재까지도 우주에서 안정적으로 전력을 생산하고 있다. 우주항공 이외에도 다양한 열원이 발생하는 자동차, 산업 현장, 생활가전 분야 등에 열전발전기술을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

그림 4

열전발전기술이 적용된 BMW 사의 자동차



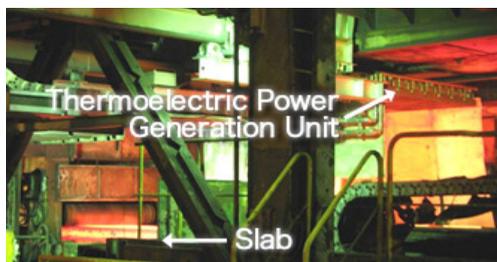
출처: Caradvice, 2011

BMW, GM, 포드, 크라이슬러 등의 자동차 업체들은 머플러에 열전발전기술을 적용하여 폐열을 전기 에너지로 바꾼 후 엔진 보조전력으로 사용하거나 차량의 냉난방 시트에 활용하는 기술을 개발하고 있다. BMW는 2005년 12월 머플러 폐열로부터 전기 에너지를 생산하여 엔진 효율을 15% 증가시키는 1차 터보스터머(Turbosteamer) 시제품을 개발하였고 2008년 BMW 5 시리즈에 터보스터머를 적용하여 대중에 공개하였다. 폭스바겐도 2008년 10월 베를린에서 열전발전기를 장착하여 5%의 연료절감 효과를 보이는 자동차 시제품을 공개하였다.

이외에도 미국과 일본 등의 선진국에서는 산업현장의 용광로, 소각로, 가열로 등의 각종 열화학공정에서 발생하는 폐열을 회수하기 위해 열전발전기술을 활용하고 있다. 미국 Alphabet Energy사는 캐나다의 가스시추 회사인 ENCANAs의 가스 굴착 및 정제 공정에서 발생하는 폐열을 회수하기 위해 열전발전시스템을 적용하였고 Marlow Industry사는 산업이나 가정에서 사용되는 유체/기체 파이프에서 발생하는 열에너지 회수를 위한 EverGen Power Strap 열전모듈을 개발하여 판매하고 있다. 일본의 경우 Komastu/KELK사가 2013년 열전발전 시스템을 개발하여 JFE Steel사의 연속주조공정에 적용하여 10kw급 전력을 생산한 적이 있다. 이 외에도 Showa Denko/PLANTEC사와 ACTREE사는 소각로에서 발생하는 폐열로부터 전기를 생산하는 열전발전시스템을 개발 중이며 Atsumitec사와 Komastu사는 오토바이 또는 자동차 배기열 회수를 위한 시스템을 개발 중이다. 캐나다의 CANMET Energy사는 2009년에 LNG 연소열을 이용하는 1kw급 초소형 열병합발전시스템을 개발하였다. 우리나라의 경우는 포항산업과학연구원의 강덕홍 박사팀이 2015년 5kW급 열전발전시스템을 개발하고 이를 포스코 열연공장의 가열로에 적용하여 285℃ 폐열에서 5kW의 전력을 안정적으로 생산하는데 성공하였다.

그림 5

Komastu/KELK의 10 kW 열전발전시스템(좌)과 포항산업과학연구원의 5 kW 열전발전 시스템(우) 실증 모습



생활가전 분야는 지금까지 열전발전기술이 가장 성공적으로 응용되고 있는 분야이다. 독일의 프라운호퍼(Fraunhofer) 연구소는 열전발전기술로 동작하는 Sentine라고 불리는 창문 위치 센서를 개발하였고 Micropelt사와 ABB사는 열전발전에 의해 자가 충전이 가능한 무인 센서를 공동 개발하고 실증을 완료하였다. Keiback & Peter사는 EnOcean사와 협력하여 건물의 라디에이터에 적용되는 열전발전 구동 히팅밸브 등 다양한 제품을 출시하였다.

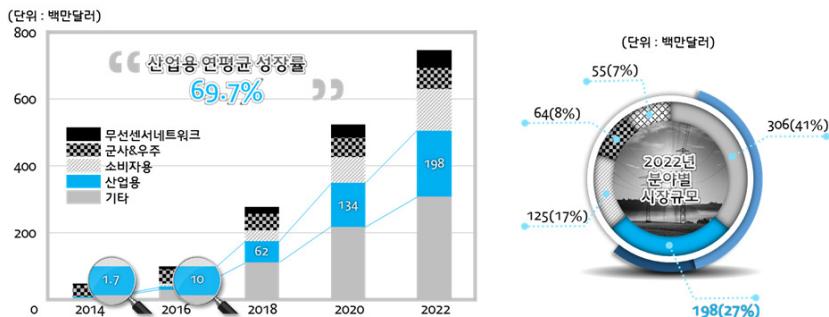
03 | 열전발전 시장 및 기술 동향

3.1 국내외 시장동향

열전소자 시장은 크게 발전분야 시장과 냉각분야 시장으로 구분될 수 있으며 현재 열전기술의 주요시장은 냉각분야이다. 하지만 열전재료의 효율향상과 함께 발전용 열전소자의 활용분야가 자동차, 산업, 생활가전 등으로 확대됨에 따라 발전시장이 빠르게 성장하고 있다. 시장조사기관 IDTechEx의 2010년 보고서에 따르면 열전소자의 세계 시장은 연평균 성장률 37.1%로 가파르게 성장하여 2018년 2억 7,400만 달러, 2022년 7억 4,600만 달러로 매우 큰 시장을 형성할 것으로 예측되고 있다(표 2와 그림 6). 용도별 시장을 살펴보았을 때 무선센서네트워크(WSN)용 열전소자가 전체 시장에서 가장 큰 비중을 차지하며 전체 시장의 연평균 성장률 보다 약 3.7배 큰 139.2%의 연평균 성장률로 시장규모가 확대되어 2022년 3억 600만 달러의 시장규모를 형성할 것으로 예측되고 있다. 2022년 시장에서 무선센서네트워크 다음으로 큰 시장을 형성할 것으로 기대되는 분야는 기타 산업용 열전소자 시장이다. 기타 산업용 시장은 2018년 6200만 달러에서 2020년 1억 3400만 달러, 2022년 1억 9800만 달러로 연평균 69.7% 성장할 전망이다. 산업용 열전소자는 산업 쓰레기의 주역이었던 폐열들을 보물 같은 에너지원으로 변환하여 활용할 수 있기 때문에 산업계에서 큰 관심을 가지고 있으며 특히, 많은 폐열원을 배출하는 제철소와 석유화학 공장들은 열전소자를 적용하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

그림 6

연도별 열전소자 시장 그래프



출처: IDTechEx, 2012

제철소를 예로 들 경우, 철강공정에 사용되는 전체 에너지 중 48.7%만이 실제로 공정에 활용되고 있으며 7.8%는 폐열로 온수를 생산하여 지역난방용으로 재활용한다. 나머지 43.5%에 해당하는 에너지가 재사용되지 못하고 열에너지 형태로 버려지고 있는 실정이기 때문에 이를 재활용할 수 있는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 파리협약 이후 온실가스 감축 및 에너지 효율화에 대한 중요성이 강조됨에 따라 산업용 열전소자 시장은 더 빠르게 성장할 것으로 예상된다. 이 외에도 헬스케어 열전소자 시장은 연평균 78.6%로 성장하여 2022년 3,300만 달러, 기타 비소비자용 열전소자 시장은 연평균 44.6%로 성장하여 2022년 2,000만 달러 규모의 시장을 형성할 것으로 전망된다. 기타 소비자용 열전소자 시장은 2018년 3,400만 달러에서 2020년 7,800만 달러, 2022년 1억 2,500만 달러로 연평균 139.7%의 가장 높은 성장을 기록하고 군사·우주용 열전소자 시장은 2018년 4,900만 달러에서 2020년 5,800만 달러, 2022년 6,400만 달러로 연평균 7.9%로 가장 낮은 성장을 기록할 것으로 예측된다.

국내에서는 열전소자가 적용된 냉정수기 및 와인냉장고의 판매가 이루어지고 있기 때문에 냉각분야 국내 시장은 형성되어 있지만 발전분야는 아직 본격적인 산업화가 이루어지지 않아 구체적인 시장이 형성되지 않은 상태이다. 열전발전용 소자는 활용분야가 다양하며 산업적 파급효과가 크기 때문에 수 년 내에 본격적인 산업화가 이루어지고 시장이 형성될 것으로 전망된다.

표 2

연도별 열전소자 시장 전망

(단위: 백만달러)

구분	2017	2018	2019	2020	2021	2022	CAGR
무선센서네트워크(WSN)	66	108	156	213	259	306	139.2%
군사·우주	45	49	53	58	61	64	7.9%
기타 산업용	35	62	100	134	167	198	69.7%
헬스케어	7	10	15	22	28	33	78.6%
기타 소비자용	19	34	56	78	99	125	139.7%
기타 비소비자용	9	11	13.5	16	18	20	44.6%
합계	181	274	393.5	521	632	746	37.1%

출처: IDTechEx, 2012

3.2 국내외 특허동향

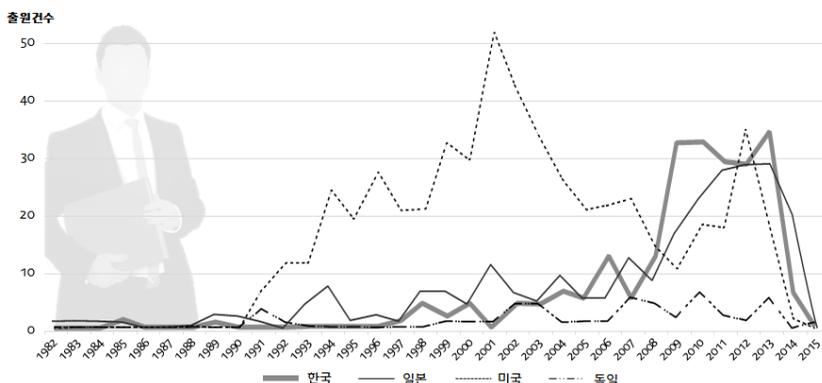
본 장에서는 열전발전기술의 각 국가별 경쟁력을 분석하기 위해 1982년부터 현재까지 미국, 일본, 독일 및 한국의 특허 동향을 간략히 살펴보고자 하겠다. 특허 검색을 위해 사용한 검색식은 외국의 경우는 “thermoelectric or device or module or element or system”을 한국의 경우는 “열전 or 소자 or 모듈 or 시스템”을 사용하였다. 열전소자 및 시스템 기술과 관련된 특허는 2015년까지 총 1,067건이었으며 일본이 전체의 49.5%인 528건을 차지하고 있으며 그 다음으로 미국(24.8%)과 한국(21.6%)이 많은 특허를 보유하고 있다. 즉 열전소자 및 시스템 관련 기술개발을 일본, 미국 및 한국이 주도해왔다는 것을 의미한다. 연도별 특허동향을 살펴보면, 열전발전기술 관련 특허가 1982년부터 출원되기 시작하였으며 1990년부터 2002년까지 일본을 중심으로 특허출원이 급격히 증가하였다가 2008년 이후에는 미국과 한국의 특허출원 수가 증가하여 일본과 비슷한 수치를 보였다. 특허출원 추세를 보았을 때 일본은 꾸준히 열전발전기술과 관련된 특허를 출원해 왔으며 미국과 한국은 2008년 이후 열전발전기술에 관심을 가지고 활발한 연구를 진행해 온 것으로 파악된다. 총 1,146건이 출원된 열전소자 특허의 요소 기술별 현황을 살펴보면 열전모듈 제작 관련 특허가 699건으로 61%의 가장 높은 비중을 보이고 있으며 합금계 열전소재(BiTe계 및 PbTe계), 열전모듈 제

조 관련 특허가 그 뒤를 잇고 있다. 비금속 열전소재 관련 특허는 2012년 이후로 5건만 출원된 상태로 특허 출원은 거의 이루어지지 않는 상태이다.

일본의 경우 주요 출원인은 Hitachi사와 Komatsu/KELK사이며 1991년부터 현재까지 104건과 116건의 특허를 출원한 상태이다. Hitachi사와 Komatsu/KELK사는 모듈 제작 및 합금계 열전소재에 중점을 두고 지속적으로 특허를 출원해 왔다. 미국은 Marlow Industry사, Alphabet Energy사, GMZ Energy사가 주요 출원인이며 Marlow Industry사는 1975년 특허를 출원하기 시작하여 현재까지 미국 내에서 가장 많은 44건의 특허를 출원한 상태이다. Alphabet Energy사와 GMZ Energy사는 2010년 이후 특허를 활발히 출원하였으며 Alphabet Energy사는 Berkely의 M. L. Scullin 과 P.Yang에 의해 2009년에 설립된 벤처기업으로 비금속 소재 기반의 열전소재 및 시스템을 주로 개발하고 있다. 독일의 주요 출원인은 프라운호퍼 연구소와 Micropelt사이며 각각 19건과 16건의 특허를 출원한 상태이다. 한국의 경우 한국전기연구원, 삼성전자, 한국기계연구원에서 주로 특허를 출원해왔으며 이 중 한국전기연구원이 30건으로 가장 많은 특허를 보유하고 있다. 삼성전자의 경우 2009년 이후 많은 열전소재 관련 특허를 출원하였다. 전 세계적으로 합금계 열전소재 및 열전모듈 관련 특허 출원이 많았으며 시스템 및 비금속 열전소재 관련 특허의 출원 건수는 상대적으로 적었다. 이로부터 합금계 열전소재 및 열전모듈 연구는 활발히 진행되어 기술발달이 많이 이루어진 상태로 판단된다.

그림 7

국가 연도별 특허출원 동향

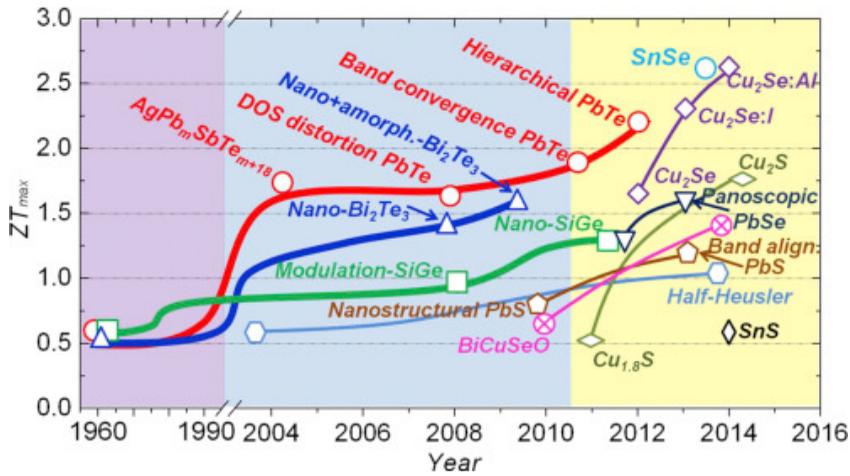


3.3 국내외 기술동향

3.3.1. 열전재료 개발 동향

그림 8

열전재료의 연도별 ZT 변화 추이



출처: Zhang, & Zhao, 2015

〈그림 8〉은 열전재료의 연도별 ZT값 향상 추이를 보여주고 있으며 열전재료의 ZT 변화는 크게 3개의 세대로 구분할 수 있다 (1세대: 1960~1990년대(보라색), 2세대: 2000~2010년 중반(파란색), 3세대: 2010 중반~현재(노란색)). 1세대에는 벌크 Bi₂Te₃, PbTe, SiGe가 열전재료로서 활발히 연구되었으며 1990년대 말에 ZT 값은 1에 가까운 값을 가지게 되었다. 2세대는 Massachusetts Institute of Technology(MIT) 대학의 Hicks와 Dresselhaus (1993)가 열전소재를 양자점 및 저차원 나노구조로 제조함으로써 열전재료의 성능을 향상시킬 수 있다는 점을 이론적으로 제시함으로써 도래하게 되었다. 2세대는 열전재료에 나노구조가 적용된 시대를 의미하며 ZT값이 1.7까지 증가하게 되었다. 현재까지도 나노기술과 관련된 열전재료 개발에 관한 많은 연구가 주를 이루고 있다. 3세대에는 기존의 열전재료에 특정재료를 첨가하여 내부구조를 나노구조로 형성하거나 새로운 재료를 개발함으로써 ZT가 2 이상의 값을 가지게 되었다.

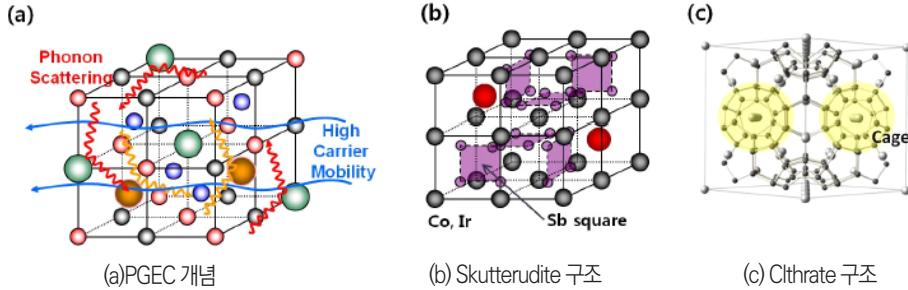
최근의 열전재료는 ZT를 향상시키기 위해서 다음에 설명하는 3가지 방법을 기반으로 연구가 진행되고 있다(김성웅, 2013). 첫 번째는 저차원성(Low dimensionality) 구조를 활용하여 전기전도도와 Seebeck 계수를 동시에 높임으로써 ZT를 향상시키는 것이다. Seebeck 계수는 에너지에 따른 전자의 상태밀도에 의해 크게 영향을 받으며 에너지에 대한 전자의 상태밀도의 기울기가 증가할수록 높은 Seebeck 계수를 보인다. 3차원 구조인 벌크형태에 비해 2차원 구조인 평면, 그리고 1차원 구조인 나노선이 상대적으로 더 큰 전자의 상태밀도 기울기를 가져 높은 Seebeck 계수를 구현할 수 있다. 실제로 다층 양자우물(Multiple-quantum-well, MQW), 2DEG(2 dimensional electron gas), 초격자(superlattice) 구조를 구현하여 실험적으로 Seebeck 계수를 10배까지 향상시킨 연구결과들이 보고되었다. 하지만 다층 양자우물, 2DEG, 초격자 구조들은 대면적의 열전소자를 제작하는데 활용하기 어려워 이를 벌크 재료에서 구현하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

두 번째는 1994년에 제시된 Phonon Glass and Electron Crystal (PGEC) 구조를 구현하는 것이다. PGEC 구조는 열전도도 특성 측면에서는 유리와 같이 불규칙한 구조를 가지고 전기적 특성 측면에서는 규칙적인 구조를 가져 낮은 열전도도와 높은 전기전도도를 동시에 구현하여 높은 ZT를 가진다. 이 구조를 가지는 대표적인 열전재료는 Skutterudite(CoSb_3 , IrSb_3)와 Clathrate ($\text{Sr}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$)이다. Skutterudite 구조의 화합물은 단위격자의 빈 공간에 희토류이온이 채워져 있으며 이들 이온의 열진동으로 인해 강한 포논산란이 발생해 매우 낮은 열전도도를 보이는 것이 특징이며 중고온 영역에서 높은 ZT를 보인다. Clathrate 화합물은 갇힌 결정구조를 가지고 있어 약하게 결합된 게스트 원자(Ba, Sr)는 물질 내부에서 자유롭게 움직일 수 있다. 따라서 자유로운 게스트 원자들에 의해 포논산란이 크게 일어나고 이로 인해 열전도도가 낮아져 ZT가 증가하게 된다.

마지막은 열전재료의 내부를 나노구조체화시켜 기존 벌크 형태의 물질보다 현저히 낮은 열전도도를 구현하면서도 나노구조체의 크기 또는 결합을 제어하여 전기전도도가 높게 유지되는 재료를 개발하는 것이다. 이 방법에서는 나노입자, 나노선, 나노플레이트 등의 형태로 물질을 제작하고 내부의 도펀트, 결합, 계면 상태 등을 나노단위로 정밀하게 제어하여 열전도도를 획기적으로 낮추는 것이 핵심이다. 2008년 Nature 저널에 보고된 직경이 작고 표면 거칠기가 높은 실리콘 나노선 구조가 이 방법의 대표적인 사례라고 할 수 있다. 실리콘 물질은 풍부한 지구상 매장량과 반도체 공정기술로 인해 경제성이 우수하지만 높은 열전도도로 인해 열전재료로서 주목받지 못했다.

그림 9

PGEC 개념과 대표 물질



출처: 김성용, 2016

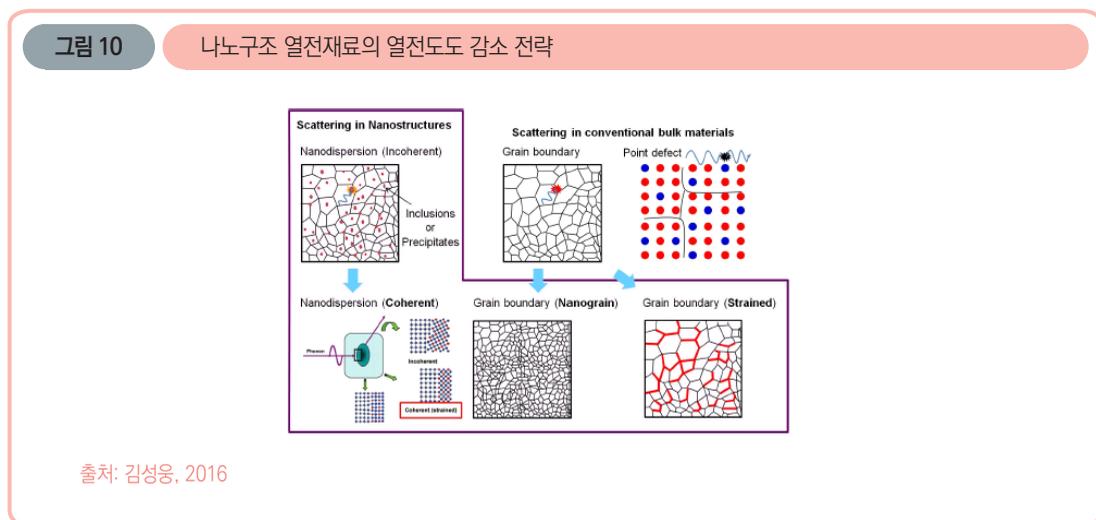
하지만 Nature 저널을 통해 실리콘을 나노구조체화 시킬 경우 열전도도가 급격히 낮아져 열전성능이 향상된다는 연구 결과가 발표된 이후로 실리콘 열전소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 포논 평균 이동거리(phonon mean free path)보다 나노선의 직경이 작아야 열전도도의 감소가 발생하며 최근 연구 결과들에 의하면 나노선 표면 거칠기 또는 결합에 의해 발생하는 포논산란만으로도 낮은 열전도도를 얻을 수 있다고 보고되고 있다. 또한 열전소재 내부에 밀도가 높은 결정입계(grain boundary) 또는 석출물(precipitates)을 생성시켜 열전도도를 감소시킬 수 있다는 결과가 보고되었다.

3.3.2. 열전재료별 개발 현황

1) Bi-Te계 열전재료

Bi-Te계 물질 중 Bi_2Te_3 은 1954년 General Electric의 엔지니어 Goldsmid(1964)에 의해 최초로 냉각용 열전소자에 적용된 이후 현재까지 가장 널리 활용되고 있는 열전소재이며 400K 근처의 저온 영역에서 높은 ZT 값을 보인다. Bi_2Te_3 는 c축 방향을 따라 -Te(1)-Bi-Te(2)-Bi-Te(1)-Te(1)-Bi-Te(2)-Bi-Te(1)-의 순서가 반복되어 적층되어 있는 층상 화합물로 이루어져 있다. 여기서 (1)과 (2)는 음이온의 2가지 화학적 상태를 나타낸다. Bi와 Te 원자는 작은 이온 기여에 의한 공유결합으로 결합되어 있지만 Te(1)-Te(1) 결합면은 원자 결합이 약한 Van der Waals 결합으로 이루어져 있다(Takashiri et al., 2016). Te-Te 사이의 약한 결합으로 인해 Bi_2Te_3 는 기계적 강도가 매우 약하고 소성가공이 매우 어려우며 열전 소자 또는 모듈 제조를 위해 절단 시 재료의 손실이 크다는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위하여 Bi_2Te_3 는 열간소결법과 HIP(Hot isostatic press)법으로

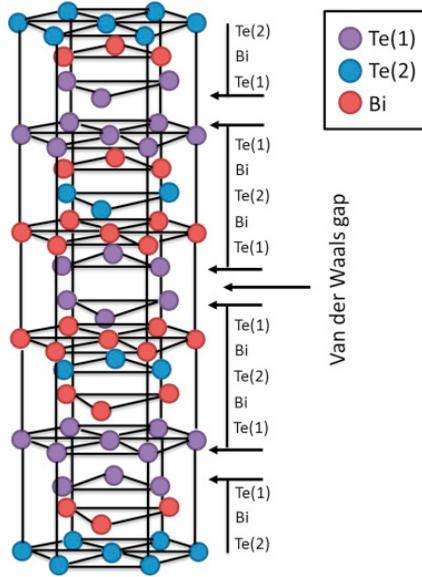
제조하는 경우가 많다. 2000년대 이전까지 Bi_2Te_3 열전재료의 ZT값은 1의 벽을 넘지 못하고 있었으나 다양한 물질(Sb, Sn, Ag, Ga 등)의 도핑 및 치환과 나노구조의 도입을 통해 성능이 개선되어 왔다. 이러한 방법에서의 성능향상이 한계에 도달하자 초격자화와 같은 나노구조 제어에 의한 성능향상이 시도되어 왔다.



2008년 미국 Boston University의 Z. F. Ren 연구팀과 MIT의 G. Chen 연구팀은 ball milling으로 BiSbTe 나노분말을 만든 후 열간소결법(hot press)을 이용해 p-type BiSbTe 의 열전재료를 제작함으로써 최대 1.4의 ZT를 달성하였다(Poudel et al., 2008). 나노파우더를 사용하여 열전재료를 합성함으로써 재료 내부에 2~10 nm 크기의 미세한 결정입계(grain boundary)들이 형성되게 되었고 이 결정입계에 의해 강력한 포논산란이 야기되어 열전도도가 획기적으로 감소하고 ZT는 향상되었다. 나노 결정입계에 의한 열전도도 감소 결과가 보고된 이후로 결정입계 미세화 또는 Te-Te 결합면에 금속 물질을 추가하여 열전특성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되었다. 이화여자대학교 김성진 교수 연구팀은 Bi_2Te_3 열전재료에 Cu 이온을 첨가하여 ZT가 1.15인 n-type의 열전재료를 개발하였다. Te-Te 결합면 사이에 Cu 이온이 추가되면 p-type 이었던 Bi_2Te_3 가 n-type의 $\text{Cu}_{0.07}\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 로 바뀌고 전기적 결합이 강화되어 전기전도도는 향상되면서 열전도도는 낮아져 ZT가 향상되게 된다(Han et al., 2011). 중국 Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering의 G. Xu 연구팀은 p-type BiSbTe 열전재료에 ZnAlO 나노파우더를 첨가하여 열전재료를 합성해 ZT를 최대 1.33까지 향상시켰다. BiSbTe 내부에 생성된 ZnAlO 는 포논산란을 강화시키고 이로 인해 열전도도가 감소함으로써 ZT가 향상된 결과를 보였다(Zhang et al., 2011).

그림 11

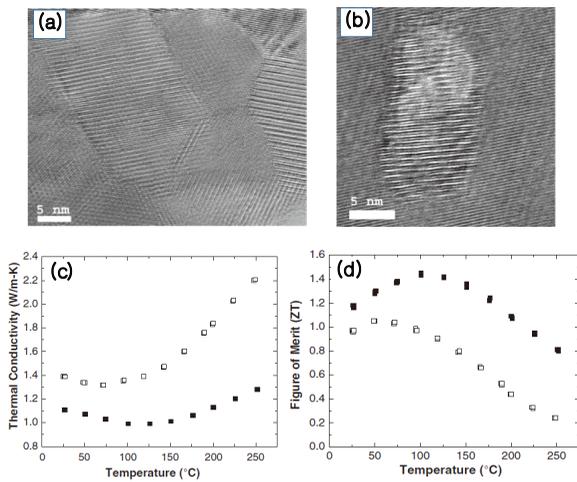
Bi_2Te_3 의 결정구조



출처: Takashiri et al., 2016

그림 12

BiSbTe 의 나노 결정입계 TEM 사진과 열전특성



출처: Poudel et al., 2008

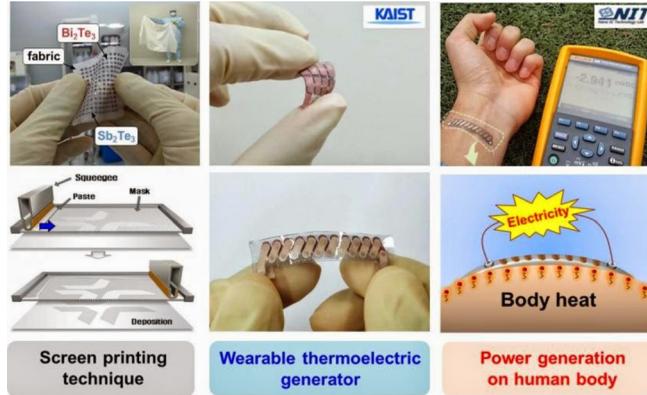
호주 University of Queensland의 J. Zou와 미국 Northwestern University의 G. J. Snyder와 M. G. Kanatzidis는 microwave-assisted surfactant-free solvothermal 방법을 이용하여 ZT가 1.23인 n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 나노플레이트(Nanoplate)를 합성하는데 성공하였다. 나노플레이트는 넓은 포논 주파수 대역에서 강력한 포논산란이 일어나 열전도도가 감소하고 동시에 band gap이 증가하여 양극성 효과를 억제함으로써 파워 팩터(power factor: $\alpha^2\sigma$)가 증가하여 ZT값이 상승한다고 보고되었다(Hong et al., 2016). 중국 Tsinghua J.-F. Li 연구팀은 스파크 플라즈마(spark plasma) 소결법을 이용해 textured structure를 가지는 n-type $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$ 를 합성하여 전기전도도와 파워 팩터를 증가시켰다. 하지만 textured structure는 열전도도를 함께 증가시켜 ZT 향상이 나타나지 않았으며 이를 해결하기 위해 연구팀은 나노 결함 클러스 또는 distorted region을 강제로 생성하여 열전도도를 감소시킴으로써 1.1의 ZT값을 얻었다(Pan & Li, 2016).



2015년 삼성종합기술원 김상일 박사, 강원대학교 이규형 교수, 기초과학연구원(IBS) 이영희 단장, 성균관대학교 김성웅 교수 연구팀은 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 분말과 액상 Te를 이용한 액상 소결(liquid-phase compaction) 중 압력을 가하는 방식으로 결정입계의 변형을 유발하여 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 ZT를 1.86까지 향상시킨 결과를 발표하였다. <그림 13>에서 알 수 있듯이 액상 소결 중 압력이 가해지게 되면 결정입계로부터 액상 Te가 배출되며 낮은 에너지를 가지는 dislocation arrays가 형성되고 이로 인해 포논산란이 유발된다. 포논산란으로 인해 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 열전도도는 감소하고 ZT는 향상된다(Kim et al., 2015).

그림 14

카이스트가 개발한 웨어러블 열전소자



출처: 아이뉴스24, 2014. 4. 7

최근에는 Bi_2Te_3 를 저렴한 가격으로 대량생산하기 위한 제조법 또는 웨어러블 장치에 적용하기 위한 열전소자 개발연구도 진행되고 있다. 2015년 카이스트 조병진 교수 연구팀은 저비용 공정인 스크린 프린팅 공정 기법을 이용하여 가벼우면서도 쉽게 구부릴 수 있는 열전소자를 개발하였다. 이 열전소자는 유리섬유 기판에 Bi_2Te_3 와 Sb_2Te_3 를 증착하여 제작되었으며 17°C 온도 차이에서 40 mW 의 전력을 생산하는데 성공하였다(Kim et al., 2015). 이 기술은 웨어러블(착용 가능한) 발전장치로서 유네스코의 ‘세상을 바꿀 10대 기술’ 중 그랑프리(대상)로 선정되었다.

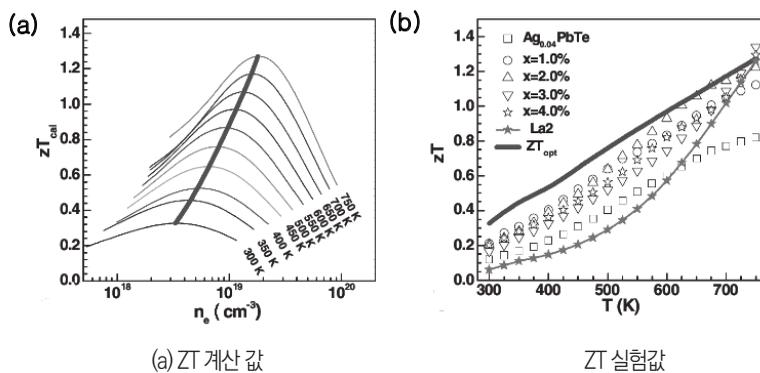
앞선 연구결과들로부터 Bi_2Te_3 열전재료의 ZT 향상은 대부분 열전도도의 감소에 의해 이루어지는 것을 알 수 있다. 열전성능이 우수한 나노구조화 Bi_2Te_3 소재는 낮은 생산성, Te 재료의 희소성, 성능의 불균일성 등으로 인하여 산업화되고 있지 못하다.

2) Pb-Te계 열전재료

PbTe는 강한 양자 구속 효과와 낮은 열전도도의 강점을 가지고 있는 물질로써 600K 근처에서 가장 높은 ZT값을 가지며 850K이하의 중온 영역에서 많이 사용되는 열전재료이다. 2011년 이후로 California Institute of Technology(Caltech)의 J. Snyder 연구팀은 벌크 형태의 PbTe에 Ag_2Te 물질을 도입한 후 La,

Ag, Na를 도펀트로 활용하여 ZT를 향상시키는 연구를 진행해왔다. 평형 상변이 다이어그램을 통해 PbTe 열전재료 내부에 50~200 nm 크기의 Ag₂Te 침전물을 생성하였으며 침전물의 농도가 높아질수록 열전도도가 감소한다는 사실을 밝혀냈다. 열전재료는 화학적인 도핑을 통한 캐리어 농도 조절을 통해 열전성능을 최적화할 수 있기 때문에 La 도핑을 통해 PbTe의 캐리어 농도를 변화시키면서 열전도도 및 ZT의 변화를 관찰하였다. La 도핑은 PbTe의 전기적 특성과 내부의 Ag₂Te의 마이크로 구조를 독립적으로 조절할 수 있게 한다. 결과적으로 La-doped (PbTe)_{0.945}(Ag₂Te)_{0.055} 샘플이 775K에서 가장 높은 1.6의 ZT를 보였다. 또한 열전성능을 향상시키기 위해 PbTe/Ag₂Te 샘플에 La 대신 Ag를 도핑하고 결과를 살펴보았다. Ag는 PbTe matrix 내에서 온도에 의존하는 용해도를 보이기 때문에 온도에 따라 ZT가 최대가 되는 전자 농도가 변하게 된다. 따라서 Ag-doped PbTe/Ag₂Te 시편은 300~600K 온도영역에서 La-doped 시편보다 50% 높은 ZT를 보였다(그림 15). PbTe/Ag₂Te 샘플에 Na를 도핑하게 되면 원자가 전자대 구조가 복잡해져 Na-doped PbTe보다 300~750K 범위에서 30% 높은 ZT를 보인다는 사실 또한 밝혀냈다(pei et al., 2016).

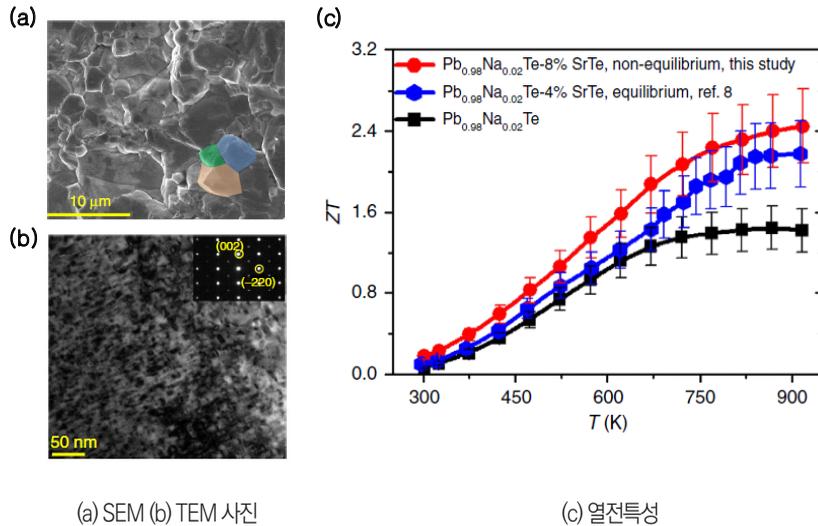
그림 15 Ag doped PbTe/Ag₂Te의 전자 농도별



출처: Pei et al., 2011

그림 16

$Pb_{0.98}Na_{0.02}Te-8\%SrTe$



출처: Tan et al., 2016

ZT를 향상시키기 위해서는 나노구조를 통해 포논산란을 증가시켜 열전도도를 감소시키고 density-of-state engineering을 통해 전기적 특성을 증가시키는 방법이 있다. 미국 Northwestern University의 M. G. Kanatzidis 연구팀은 Na_2Te 로 도핑된 $PbTe$ matrix에 $SrTe$ 나노입자를 형성시킴으로써 800K에서 ZT 값이 1.7인 열전재료를 개발했다(Biswas et al., 2011). ZT의 향상은 $PbTe$ matrix 내의 $SrTe$ 가 band gap을 확장시켜 파우 팩터를 크게 증가시킴으로써 나타난 것이다. 연구팀은 이어 $SrTe$ 가 함유된 $PbTe$ 를 작은 파우더로 만들고 이를 스파크 플라즈마 합성을 이용해 내부에 나노구조를 제작하여 장파장 포논을 추가적으로 산란시킴으로써 ZT값을 915K에서 2.2까지 증가시켰다(Biswas et al., 2012). 나아가 100K/s 이상의 급속냉각 기법을 적용하여 $SrTe$ 의 함량을 5 mol%까지 증가시킴으로써 ZT를 2.5까지 개선하였다(Tan et al., 2016). 연세대학교의 이우영 교수 연구팀은 증기 수송(Vapor transport) 방식으로 직경이 76~436 nm 인 $PbTe$ 나노선을 합성하고 합성된 나노선의 Seebeck 계수와 열전도도를 분석하였다. 분석결과에 의하면 $PbTe$ 나노선 열전소자는 벌크 $PbTe$ 보다 우수한 $-130 \mu V \cdot K^{-1}$ 의 Seebeck 계수와 $1.2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 의 열전도도 수치를 보였다. 이러한 결과는 나노선 직경에 의해 발생하는 포논 경계 산란(boundary scattering)에 의

해 나타난다(Lee et al., 2011). PbTe는 다양한 연구결과들을 통해 ZT가 최대 2.5까지 상승하였지만 납(Pb)이라는 인체에 유해한 독성 물질이 활용되기 때문에 상용화에 많은 어려움을 겪고 있다.

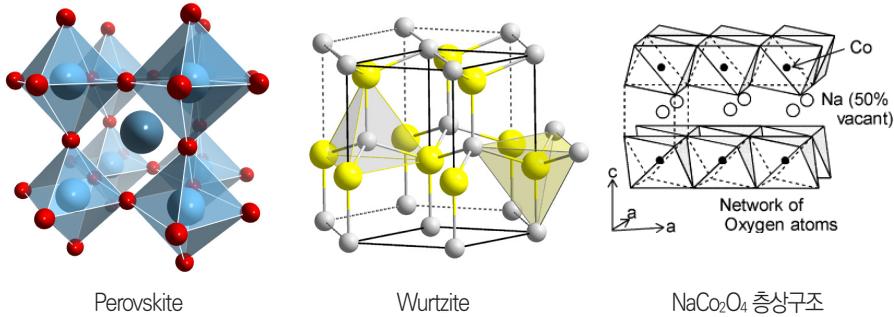
3) 산화물계 열전재료

산화물은 Bi₂Te₃나 PbTe와 달리 내열성이 우수하고 인체에 무해하여 친환경 열전소재로 주목 받고 있으며 산화에 의한 열화가 없어 비교적 고온에서 공기 중 사용이 가능하다. 하지만 산화물계 열전재료는 일반적인 합금계 열전재료보다 이동도(mobility)와 유효질량이 작아 열전성능이 낮다는 문제점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 Wurtzite 구조, Perovskite 구조, 앞선 구조에 Rock salt 구조가 결합된 층상구조를 가지는 산화물 재료에 크기나 최외각 전자가 다른 불순물을 주입하거나, 입자의 미세구조를 조절하거나, 특성이 다른 박막을 겹겹이 쌓아서 만들어지는 초격자 구조 또는 2DEG 구조를 활용하는 연구가 진행되고 있다(정봉용 et al., 2017).

n형 열전재료인 CaMnO₃ 물질은 높은 Seebeck 계수를 가짐에도 불구하고 낮은 전기전도도로 인해 열전성능이 낮은 문제점을 가지고 있다. 일본 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)의 R. Funahashi는 CaMnO₃ 물질에서 Ca의 일부를 Tb, Tb, Nd 등의 불순물로 대체하여 전기전도도를 향상시킴으로써 ZT를 향상시키는 연구를 진행하였다. 다양한 물질들 중에서 Ca의 일부분을 Tb로 대체한 열전재료인 Ca_{0.9}Tb_{0.1}MnO₃가 1000K에서 0.16의 ZT를 보여 가장 우수한 열전성능을 보였다(Flahaut et al., 2006). 중국 Shandong University의 Mei는 Sr_{0.95}La_{0.05}TiO_{3-δ}와 10 mol% TiO₂ 파우더 용액을 섞은 후 고온(1,300 °C, 1,350 °C, 1,400 °C)에서 소결하여 열전소재를 제작하고 Seebeck 계수, 열전도도, 전기전도도를 평가하였다. 평가 결과, 1,350 °C에서 TiO₂를 첨가해 제작된 시편은 Sr_{0.95}La_{0.05}TiO_{3-δ}와 유사한 Seebeck 계수를 보이고 TiO₂ 결정입계의 생성으로 열전도도와 전기전도도는 모두 낮아졌다. 결과적으로 1350 °C에서 TiO₂를 첨가해 제작된 Sr_{0.95}La_{0.05}TiO_{3-δ} 물질은 가장 높은 ZT값이 0.2로 나타났고 이는 기존의 Sr_{0.95}La_{0.05}TiO_{3-δ}보다 약간 높은 값이다(Lie et al., 2010). 영국 Manchester University의 R. Freer와 L. A. Kinloch는 La-SrTiO₃에 1% 미만의 graphene을 첨가한 열전재료를 합성하여 순수 La-SrTiO₃ 대비 280% 향상된 ZT를 달성하였다(300K에서 0.42, 677K에서 0.36)(Lin et al., 2015).

그림 17

다양한 산화물 열전재료



출처: <https://chemicalstructure.net>, n.d., Terasaki, I., 2003

ZnO계 또는 CoO₂계 물질은 대표적인 층상구조의 산화물 열전재료이다. 절연체인 순수한 ZnO의 경우 전 기전도도를 향상시키기 위해 다양한 양이온을 첨가하는 연구가 진행되었다. 일본 Nagoya University의 K. Koumoto 연구팀은 reactive templated grain growth 방법을 이용하여 1073K에서 0.33의 ZT값을 보이는 n-type yttrium-substituted (ZnO)₅In₂O₃를 합성하였고(Isobe et al., 2002) Kyushu University의 M. Ohtaki 연구팀(2009)은 ZnO에 Al과 Ga 이온을 동시에 도핑하여 열전도도를 낮춤으로써 1247K에서 0.65의 ZT값을 가지는 Zn_{0.96}Al_{0.02}Ga_{0.02}O 물질 개발에 성공하였다. NaCo₂O₄, Ca₃Co₄O₉, [Sr₂(Bi, Pb)₂O₄]_xCoO₂ 물질은 CoO₂가 전자전도도의 역할을 하는 CoO₂계 층상산화물이며 주로 일본에서 발견되어 보고되었다. 1997년 International Superconductivity Technology Center의 I. Terasaki 연구팀에 의해 NaCo₂O₄는 가장 먼저 열전성능이 보고되었으며 그 이후 일본에서 NaCo₂O₄의 단결정화 및 저차원 나노구조화를 통해 1이 넘는 ZT값들이 보고되고 있다. 한국세라믹 기술원의 최순목 박사 연구팀은 spark plasma sintering 공정을 통해 1173K에서 0.22의 ZT값을 보이는 Ca₃Co₄O₉ 물질과 SmCoO₃에 Fe와 Sr 이온을 도핑하여 파워 팩터가 향상된 Sm_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO₃ 물질을 개발하는데 성공하였다(Lim et al., 2015).

4) Skutterudite계 열전재료

Skutterudite는 두 개의 void를 포함하는 32개의 원자들로 이루어진 결정구조에서 void들에 이종원자를 채워 넣어 만들어지는 물질이며 void에 채워진 원자들은 다른 원자들과 독립적으로 진동할 수 있다. 이러

한 특성으로 인해 3차원 포논산란이 발생하기에 적합하며 이를 열진동(rattling) 효과라 한다. 열진동 효과는 강한 포논산란을 유발하여 열전도도를 낮추게 된다. AB_4C_{12} 화합물이 Skutterudite의 예이며 이때 $A=La, Ce, Eu, Yb$ 이며 $B=Fe, Ru, Os$ 이며 $C=P, As, Sb$ 등으로 이루어지며 A 가 앞서 언급한 void들에 채워지는 rattler 원자들이다. 미국을 중심으로 rattler 원자에 의한 전자산란은 최소화시키고 격자산란은 극대화시킴으로써 Skutterudite를 PGEC로 만들어 열전효율을 향상시키는 연구가 활발히 연구되고 있다.

미국 J. Yang, W. Zhang 및 L. Chen 연구팀은 $CoSb_3$ 에 Ba, La, Yb를 채워 넣어 850K에서 ZT가 1.7인 n형 Skutterudite 물질을 합성하는데 성공하였다. 이 Skutterudite 물질은 Ba, La, Yb를 최적분율(filling fraction)로 만들어 열전도도를 glass limit까지 낮추고 파워 팩터를 증가시켜 우수한 ZT를 달성하였다(Shi et al., 2011). 중국 Wuhan University of technology의 X. Tang 연구팀은 melt-anneal-quench-spark plasma sintering 방법을 이용하여 10~80 nm 크기의 나노구조 InSb가 내부에 형성된 n-type $In_{0.2}Ce_{0.15}Co_4Sb_{12}$ 물질을 합성하여 포논산란을 강화시킴으로써 800K에서 1.43의 ZT값을 얻었다(Li et al., 2009). 미국 Clemson University의 T. M. Tritt 연구팀은 직경이 작고 무거운 Yb이온을 $CoSb_3$ 의 void들에 부분적으로 채워 열전도도를 낮추고 동시에 전기전도도를 유지하는 Skutterudite 물질을 개발하였으며 이 물질은 600K에서 1에 가까운 ZT를 보였다(Nolas et al., 2000). 국내에서는 한국교통대학교, 한국세라믹기술원, LG화학 등에서 Skutterudite 물질에 대한 연구가 진행 중이며 n형 소재의 경우 1.2 이상의 ZT, p형 소재의 경우 0.8 이상의 ZT값들이 보고되었다. 일본의 Furukawa 기계 금속(株)에서는 670K에서 1.1과 1.3의 ZT 값을 보이는 p형 및 n형 Skutterudite 소재를 개발하고 이를 활용하여 열전소자를 제작 후 실증하였다.

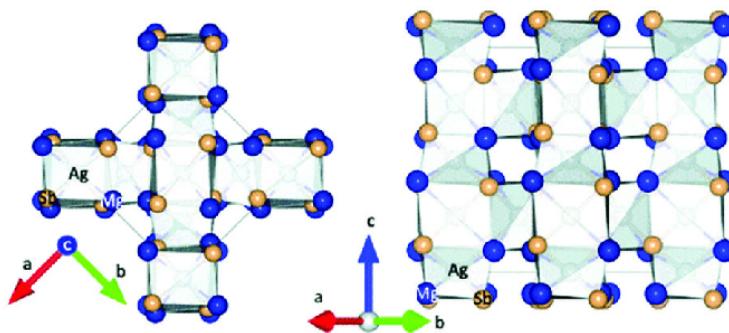
5) Half-Heusler계 열전재료

Half-Heusler 물질은 가전자농도(valence electron concentration)가 특정한 수치가 되었을 때 반도체 특성을 나타내며 결정격자 중에 다수의 void를 가지는 독특한 결정구조를 가지며 이로 인해 열전도도가 낮은 값을 보여 열전재료로 활용되고 있다. 기본적인 Half-Heusler 물질은 XYZ의 화학식으로 나타내며 X는 Zr, Ti, Hf이며 Y는 Ni, Co이며 Z는 Sn, Sb으로 구성된다. n형 재료의 대표적인 물질은 (Zr, Ti, Hf)NiSn이며 Mn을 첨가하여 열전도도를 낮춰 열전성능 ZT를 최대 1이상의 값을 가지도록 향상시켰다. p형 재료의 대표적인 물질은 (Zr, Ti, Hf)CoSb이며 ZT는 최대 0.8의 성능을 보이는 것으로 보고되고 있다. 또한 기존 Half-Heusler 제조법인 열간소결법에서 미소균열이 발생하여 열전성능이 열화된다는 현상이 밝혀진 이후

이를 해결하기 위한 OFZ(Optical Floating Zone Melting) 제조법이 보고되어 전기적 출력을 향상시켜왔다. 앞서 언급한 물질 외에 MgAgSb도 각광받고 있는 Half-Heusler 물질 중 하나이다. MgAgSb는 합성온도에 따라 세 가지 결정구조를 가지는데 이 중 300-560K에서 형성되는 정방상 구조(α 상)의 MgAgSb는 일반적으로 Mg-Sb의 절반정도가 Ag로 채워져 있어 $\sim 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 정도의 낮은 열전도도를 보이기 때문에 열전재료로 많이 활용된다. 미국 Houston University의 Z. Ren 연구팀은 ball milling 후 열간소결법을 활용하여 20 nm 보다 작은 결정입계와 point defect을 가지는 $\text{MgAg}_{0.965}\text{Ni}_{0.005}\text{Ag}_{0.99}$ 를 합성하는데 성공하였으며 이 물질은 $\sim 0.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 의 아주 낮은 열전도도로 인해 475K에서 1.4의 우수한 ZT값을 보였다(Zhao et al., 2014). 또한 추가적인 연구를 통해 MgAg_{0.97}Sb_{0.99} 물질에 Na를 도핑하여 Mg_{0.925}Na_{0.075}Ag_{0.97}Sb_{0.99}를 만들어 523K에서 1.26의 ZT값을 얻었다(Shuai et al., 2015). MIT의 G. Chen 연구팀은 p-type MgAg_{0.965}Ni_{0.005}Ag_{0.99} 열전재료를 이용해 단일 레그의 열전모듈을 만들어 225K 온도 차이에서 8.5%의 변환효율을 얻었다(Kraemer et al., 2015). Half-Heusler계 열전재료는 Skutterudite와 비교하여 재료가격이 고가이지만 파워 팩터가 2배 이상 높아 활발히 연구되고 있으며 미국의 GMZ Energy와 독일의 프라운호퍼는 단순한 소자뿐만 아니라 양산이 가능한 모듈제조법에 대한 연구를 진행하고 있다.

그림 18

α -MgAgSb의 결정구조



출처: Liu et al., 2018

6) 실리콘계 열전재료

Bi_2Te_3 열전재료는 ZT가 1에 근접하는 값을 가지기 때문에 현재까지 열전재료로 널리 사용되고 있는 물질이다. 하지만 Bi_2Te_3 의 구성 원소 중 하나인 Te는 지구상 매장량이 5 ppb 에 불과한 희소 물질이며 열간 소결법을 활용하여 재료를 제작 후 가공을 통해 모듈화를 진행해야하기 때문에 대량생산이 어렵다. 반면 실리콘(Si) 물질은 지구상의 매장량(277,100 ppm)이 가장 많고 저렴한 물질로써 반도체 산업에서 핵심소재로 수 십년간 활용되어 왔다. 실리콘의 발달된 반도체 공정기술을 활용하여 열전소자를 제작할 경우 대량생산이 가능하고 재료 가격이 낮아 경제성이 높은 장점을 가지지만 실리콘 물질의 한계로 인해 열전소재로 활용되지 못했다. 실리콘 물질은 우수한 열전달 특성을 가지고 있어 상온에서 열전도도가 $\sim 150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 에 달해 ZT가 0.01 밖에 되지 않는다. 즉, 실리콘을 열전재료로 활용하기 위해서는 전기전도도의 변화 없이 열전도도를 1/100 가량 감소시켜야 한다는 것을 알 수 있다. 최근 나노선 또는 초격자 구조를 도입함으로써 실리콘의 열전도도가 급격히 감소된다는 결과가 보고됨에 따라 실리콘 나노구조를 활용한 열전소재 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

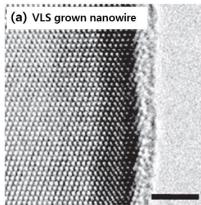
Stanford University의 K. E. Goodson 연구팀은 SOI 웨이퍼의 실리콘 층의 두께를 줄였을 경우 열전도도의 감소시킬 수 있다는 사실을 밝혀냈다. 상온(300K)에서 실리콘의 두께를 100 nm 이하로 줄일 경우 열전도도는 벌크 실리콘의 1/3 수준인 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 로 감소하였다(Asheghi et al., 1997). 또한 Si과 SiGe의 이종접합을 활용할 경우에도 열전도도가 감소하여 열전소재로 활용이 가능하다는 결과들이 보고되었다. SiGe은 500~1000K 범위에서 활용 가능한 열전소재로 1970년대 중반부터 인공위성 전원장치에 이용되어 왔을 정도로 신뢰성이 높다. SiGe는 용해재의 분말을 hot press 방법으로 소결하여 제조되며 소결체는 단결정보다 전기전도도와 Seebeck 계수가 10%정도 낮으나 열전도도는 20~30% 낮기 때문에 ZT가 20~30% 높다. 열전능력이 최적화되는 Ge 비율은 30~70%이며 이 범위에서 열전도도는 최소화되지만 Ge 재료가 고가이기 때문에 실용적인 측면에서 20~30%의 조성이 활용되어왔다. UC Berkeley의 A. Majumdera와 P. Yang 공동 연구팀은 Si/SiGe의 이종접합 나노선을 합성하고 열전도도 변화를 관찰하였다. 나노선의 직경이 감소할수록 열전도도도 점차 감소하며 직경이 58 nm일 때 $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 의 열전도도를 보였다. 이는 22nm 직경을 가지는 단일 Si 나노선의 열전도도인 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 보다 작은 값이다. 이렇게 이종접합구조의 나노선에서 열전도도가 감소되는 원인은 질량이 낮은 Si 나노선에서 질량이 큰 SiGe 나노선으로 포논이 전파되기 어렵기 때문이다(Li et al., 2003). MIT의 M. S. Dresselhaus와 G. Chen 연구팀과 Boston college의 Z.

Ren 연구팀은 Si/SiGe 합금에서 나노구조화가 포논에 미치는 영향에 대해서 연구하였으며 900K에서 나노구조화된 n형 및 p형 SiGe 벌크 합금이 각각 1.3과 0.95의 ZT값을 보인다는 것을 발표하였다(Wang et al., 2008, Joshi et al., 2008).

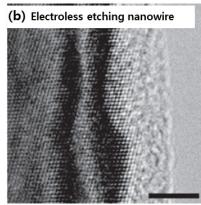
2008년 UC Berkeley대학의 A. Majumdera와 P. Yang 연구팀은 VLS(vapor-liquid-solid) 방식으로 합성하여 표면이 매끄러운 실리콘 나노선과 electroless etching(EE) 방식으로 제작되어 표면이 거친 실리콘 나노선의 열전특성을 Nature지에 발표하였다. 그림 19(b)의 제작된 나노선들의 열전도도 특성을 살펴보면 두 가지 나노선 모두 직경이 감소함에 따라 열전도도가 감소하는 경향을 보인다. 300K에서 EE 방식으로 제작된 나노선(직경: 50 nm)은 VLS 방식으로 제작된 나노선(직경: 56 nm)보다 열전도도가 거의 1/8배 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 거친 표면이 열전도도를 낮추기 위한 포논산란을 더 강하게 일으킨다는 사실을 알 수 있다. EE 방식으로 제작된 50 nm 직경의 나노선은 300K에서 $3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ 의 파워 팩터와 0.5의 ZT를 보였다(Hochbaum et al., 2008). 같은 해에 Caltech의 J. R. Heath 연구팀도 Nature지를 통해 VLS방식으로 합성한 10 nm와 20 nm 직경을 가지는 실리콘 나노선의 열전도도는 200K에서 벌크 실리콘 보다 각각 200배와 75배 낮아지고 ZT는 최대 1에 가까운 값을 가진다는 결과를 발표하였다(Boukai et al., 2008).

그림 19

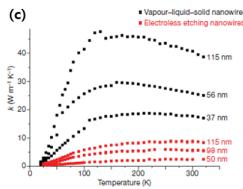
제작된 나노선의 TEM 사진



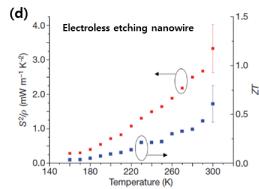
(a) VLS 실리콘 나노선



(b) EE 실리콘 나노선



(c) 제작된 나노선의 열전도도

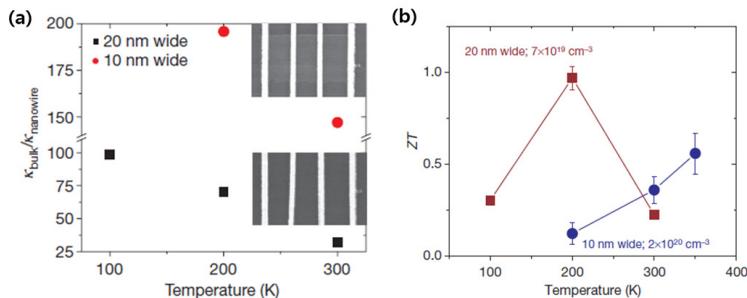


(d) EE 실리콘 나노선의 Seebeck 계수와 ZT

출처: Hochbaum et al., 2008

그림 20

직경 10 nm와 20nm 인 실리콘 나노선의 열전도도와 ZT



출처: Boukai et al., 2008

최근에는 P. Yang 그룹에 의해 포논산란을 강화시키기 위한 2차원 실리콘 구조인 holey 실리콘 박막 구조가 발표되었다. SOI 기판에 반복적인 hole을 형성함으로써 holey 실리콘 박막 구조를 제작하였고 열전도도 특성을 분석하였다. Holey 실리콘 박막 구조에 35%의 porosity와 55 nm의 간격을 가지는 hole들이 형성되었을 때 $1.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 의 열전도도를 보였으며 이 값은 amorphous SiO_2 와 근접한 값이다(Tang et al., 2010).

국내의 경우 한림대학교의 장문규 교수 연구팀에 의해 실리콘 나노선의 Seebeck 계수, 열전도도, 파워 팩터 분석연구가 수행되었고 한국전자통신연구원에서는 실리콘 나노구조 박막을 이용한 열전소재 개발 연구를 진행 중에 있다. 포항공과대학교 백창기, 김기현 교수 연구팀은 대량생산이 가능한 실리콘 반도체 공정을 활용하여 200K 온도차에서 평균 0.2V의 전압을 생성하는 실리콘 나노선 열전소자를 개발하는데 성공하였으며 현재는 포항산업과학연구원의 강덕홍 박사 연구팀과 함께 실리콘 기반 열전발전 상용화시스템을 열병합발전소에 실증하는 연구를 진행 중에 있다.

04' 결론

현재 전세계적으로 대두되고 있는 화석연료의 고갈과 기후변화 문제에 대응하기 위한 기술 중 하나로 열전발전기술이 주목받고 있다. 열전발전기술은 버려지는 열에너지를 전기에너지로 변환할 수 있으며 열원이 존재하는 곳에서 24시간 발전이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 구동부가 필요하지 않아 구조가 간단하고 유지보수가 간편하다. 현재 열전발전기술 적용을 위해 활발히 연구되고 있는 분야는 자동차 배기열 및 공장 폐열 기반 발전분야이지만 열원이 발생하는 모든 곳에서 적용이 가능하여 태양열, 지열 등의 자연 에너지뿐만 아니라 선박 폐열, 소각로 폐열, 발전소 폐열, 군사, 가정용 보일러 등 다양한 분야에 적용이 가능하다. 열전발전 기술은 반도체 소재 기술의 발전과 함께 꾸준히 발전해왔지만 열전 변환효율이 충분하지 않아 기술 적용분야 확장이 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위해 전 세계적으로 다양한 고효율 열전재료(Bi-Te계, Pb-Te계, 산화물계, Skutterudite계, Half-Heusler계, 실리콘계) 개발을 위한 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 연구는 열전소재의 성능지수를 향상시키는데 집중되어 왔으며 나노기술의 접목으로 ZT값이 2가 넘는 열전재료에 대한 연구결과들이 보고되어 왔다. 하지만 대부분의 열전소재는 희소원소 또는 중금속과 같은 독성원소들을 활용하고 있으며 모듈 제작 시 발생하는 문제들이 산적해 있어 상용화에 많은 제약이 따른다. 특히 국내의 경우 열전소재와 관련된 원천 기술은 미흡한 상태이며 열전발전기술은 에너지 효율 향상 및 기후변화 대응을 위한 신에너지 기술임에도 불구하고 아직 신재생에너지로 분류되어 있지 않아 실증연구에 많은 제약이 따른다. 미래 성장 가능성이 높은 열전발전 시장을 선도하기 위해서는 열전발전 원천기술 확보를 위한 정부의 적극적인 지원이 필요하며 특히 정부 주도의 산·학·연 협력으로 모듈화 요소기술 개발에 대한 다각적인 연구가 매우 필요한 시점이다. 고효율 열전발전 기술의 상용화가 가시화될 경우 열전발전기술의 활용 범위는 더욱 넓어져 신에너지 시장을 창출할 수 있으며 기후변화 및 에너지 효율 향상에도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

Ki Hyun Kim

저자
김기현

학력

포항공과대학교 전자전기공학 박사
한양대학교 전자정보시스템공학 학사

경력

現) 포항공과대학교 창의IT융합공학과 연구조교수
前) 포항공과대학교 미래IT융합연구원 선임연구원

Tae Hoon Park

저자
박태훈

학력

포항공과대학교 기계공학과 학사

경력

現) 포항공과대학교 창의IT융합공학과
석박사통합과정 재학

참고문헌

1. 김성웅. (2013). 나노구조 기반 고효율 열전 에너지 변환 기술, 물리학과 첨단기술, 12-14
2. 심재동. (2010). 에너지변환용 열전발전 재료의 개발 동향. 한국과학기술정보연구원.
3. 아이뉴스24. (2014.04.07). 체온으로 웨어러블기기에 전기 공급하다. Retrieved from http://m.inews24.com/v/814330#_enliple
4. 양익석, 석주현, & 김아름. (2016). 온실가스 감축을 위한 세계 주요국의 2016년 에너지정책 변화. 세계 에너지현안 인사이트 제16-3호.
5. 이은도. (2010). 열전소자의 기술개발 현황.
6. 장문규. (n.d.). 실리콘 나노선 열전소자 기술
7. 장문규. (2012). 실리콘 열전소자 기술. 전자통신동향분석 제27권 제1호.
8. 장문규, 전명심, 노태문, & 김종대. (2008). 고효율 열전소자 기술. 전자통신동향분석 제23권 제6호.
9. 장문규, & 이진호. (2013). 실리콘 열전소자 기술의 연구 동향. 전자통신동향분석 제28권 제5호.
10. 전황수, & 문승언. (2015). 열전소자 적용 동향. 전자통신동향분석 제30권 제1호.
11. 전황수, & 장문규. (2014). 열전소자 시장 및 개발동향. 전자통신동향분석 제29권 제6호.
12. 정봉용, 양미성, 이순일, 임영수 & 김주형. (2017). 전기에너지 수확, 열전발전 그리고 에너지세라믹 기술 동향. KEIT PD · Issue Report, 17-7, 114-115
13. 한국에너지기술평가원. (2011). 온실가스감축기술전략로드맵2011.
14. 한국에너지기술평가원. (2014). 에너지 혁신 미래형 고효율 에너지 변환·저장.
15. 한국전자통신연구원. (2012). 10-2014-0076961, 서울: 특허청
16. Asheghi, M., Leung, Y. K., Wong, S. S., & Goodson, K. E. (1997). Phonon-boundary scattering in thin silicon layers. Applied Physics Letters, 71(13), 1798-1800.
17. Bai, S. Q., Pei, Y. Z., Chen, L. D., Zhang, W. Q., Zhao, X. Y., & Yang, J. (2009). Enhanced thermoelectric performance of dual-element-filled skutterudites $Ba_{x}Ce_{y}Co_{4}Sb_{12}$. Acta Materialia, 57(11), 3135-3139.

18. Biswas, K., He, J., Blum, I. D., Wu, C. I., Hogan, T. P., Seidman, D. N., ... & Kanatzidis, M. G. (2012). High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. *Nature*, 489(7416), 414.
19. Biswas, K., He, J., Zhang, Q., Wang, G., Uher, C., Draid, V. P., & Kanatzidis, M. G. (2011). Strained endotaxial nanostructures with high thermoelectric figure of merit. *Nature chemistry*, 3(2), 160.
20. Boukai, A. I., Bunimovich, Y., Tahir-Kheli, J., Yu, J. K., Goddard, W. A., & Heath, J. R. (2008). Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials. *Nature*, 451, 168-171.
21. Caradvice. (2011.09.01.). BMW working on Turbosteamer and thermoelectric generator technology. Retrieved from <https://www.caradvice.com.au/135748/bmw-working-on-turbosteamer-and-thermoelectric-generator-technology/>, %20https://f30.bimmerpost.com/forums/showthread.php?t=579012
22. Choi, W., Jun, D., Kim, S., Shin, M., & Jang, M. (2015). Thermoelectric characteristics of Pt-silicide/silicon multi-layer structured p-type silicon. *Energy*, 82, 180-183.
23. Flahaut, D., Mihara, T., Funahashi, R., Nabeshima, N., Lee, K., Ohta, H., & Koumoto, K. (2006). Thermoelectrical properties of A-site substituted Ca_{1-x}RexMnO₃ system. *Journal of Applied Physics*, 100(8), 084911.
24. Goldsmid, H. J., *Thermoelectric refrigeration*, Plenum Press.
25. Han, M. K., Ahn, K., Kim, H., Rhyee, J. S., & Kim, S. J. (2011). Formation of Cu nanoparticles in layered Bi₂Te₃ and their effect on ZT enhancement. *Journal of Materials Chemistry*, 21 (30), 11365-11370.
26. Hicks, L. D., & Dresselhaus, M. S. (1993). Use of quantum-well superlattices to obtain a high figure of merit from nonconventional thermoelectric materials. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 326.
27. Heremans, J. P., Jovovic, V., Toberer, E. S., Saramat, A., Kurosaki, K., Charoenphakdee, A., & Snyder, G. J. (2008). Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states. *Science*, 321(5888), 554-557.

28. Hong, M., Chasapis, T. C., Chen, Z. G., Yang, L., Kanatzidis, M. G., Snyder, G. J., & Zou, J. (2016). n-Type $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ Nanoplates with Enhanced Thermoelectric Efficiency Driven by Wide-Frequency Phonon Scatterings and Synergistic Carrier Scatterings. *ACS nano*, 10(4), 4719–4727.
29. Hochbaum, A. I., Chen, R., Delgado, R. D., Liang, W., Garnett, E. C., Najarian, M., ... & Yang, P. (2008). Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires. *Nature*, 451(7175), 163.
30. Hyun, Y., Park, Y., Choi, W., Kim, J., Zyung, T., & Jang, M. (2012). Evaluation of Seebeck coefficients in n- and p-type silicon nanowires fabricated by complementary metal-oxide-semiconductor technology. *Nanotechnology*, 23(40), 405707.
31. Isobe, S., Tani, T., Masuda, Y., Seo, W. S., & Koumoto, K. (2002). Thermoelectric performance of yttrium-substituted $(\text{ZnO})_5\text{In}_2\text{O}_3$ improved through ceramic texturing. *Japanese journal of applied physics*, 41(2R), 731.
32. Joshi, G., Lee, H., Lan, Y., Wang, X., Zhu, G., Wang, D., ... & Chen, G. (2008). Enhanced thermoelectric figure-of-merit in nanostructured p-type silicon germanium bulk alloys. *Nano letters*, 8(12), 4670–4674.
33. Kim, S. I., Lee, K. H., Mun, H. A., Kim, H. S., Hwang, S. W., Roh, J. W., ... & Snyder, G. J. (2015). Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics. *Science*, 348(6230), 109–114.
34. Kim, S. J., We, J. H., & Cho, B. J. (2014). A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy & Environmental Science*, 7(6), 1959–1965.
35. Kraemer, D., Sui, J., McEnaney, K., Zhao, H., Jie, Q., Ren, Z. F., & Chen, G. (2015). High thermoelectric conversion efficiency of MgAgSb-based material with hot-pressed contacts. *Energy & Environmental Science*, 8(4), 1299–1308.
36. LeBlanc, S., Yee, S. K., Scullin, M. L., Dames, C., & Goodson, K. E. (2014). Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 313–327.

37. Lee, S. H., Shim, W., Jang, S. Y., Roh, J. W., Kim, P., Park, J., & Lee, W. (2011). Thermoelectric properties of individual single-crystalline PbTe nanowires grown by a vapor transport method. *Nanotechnology*, 22(29), 295707.
38. Li, D., Wu, Y., Fan, R., Yang, P., & Majumdar, A. (2003). Thermal conductivity of Si/SiGe superlattice nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(15), 3186-3188.
39. Li, H., Tang, X., Zhang, Q., & Uher, C. (2009). High performance $\text{In}_x\text{Ce}_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ thermoelectric materials with in situ forming nanostructured InSb phase. *Applied Physics Letters*, 94(10), 102114.
40. Lin, Y., Norman, C., Srivastava, D., Azough, F., Wang, L., Robbins, M., ... & Kinloch, I. A. (2015). Thermoelectric power generation from lanthanum strontium titanium oxide at room temperature through the addition of graphene. *ACS applied materials & interfaces*, 7(29), 15898-15908.
41. Lim, C. H., Seo, W. S., Lee, S., Lim, Y. S., Kim, J. Y., Park, H. H., ... & Park, K. (2015). Anisotropy of the thermoelectric figure of merit (ZT) in textured $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ ceramics prepared by using a spark plasma sintering process. *Journal of the Korean Physical Society*, 66(5), 794-799.
42. Liu, J., Wang, H. C., Su, W. B., Wang, C. L., Zhang, J. L., & Mei, L. M. (2010). Synthesis and thermoelectric properties of $\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_{3-\delta}-\text{TiO}_2$ solid solutions. *Solid State Sciences*, 12(1), 134-137.
43. Nolas, G. S., Kaeser, M., Littleton IV, R. T., & Tritt, T. M. (2000). High figure of merit in partially filled ytterbium skutterudite materials. *Applied Physics Letters*, 77(12), 1855-1857.
44. Oh, J. H., Jang, M. G., Kim, H., Moon, S. E., & Shin, M. (2015). Suppression of phonon transport in multiple Si/PtSi heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 117(24), 245102.
45. Ohtaki, M., Araki, K., & Yamamoto, K. (2009). High thermoelectric performance of dually doped ZnO ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 38(7), 1234-1238.

46. Pei, Y., May, A. F., & Snyder, G. J. (2011). Self-Tuning the Carrier Concentration of PbTe/Ag₂Te Composites with Excess Ag for High Thermoelectric Performance. *Advanced Energy Materials*, 1, 291–296.
47. Poudel, B., Hao, Q., Ma, Y., Lan, Y., Minnich, A., Yu, B., ... & Chen, X. (2008). High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. *Science*, 320(5876), 634–638.
48. Shuai, J., Kim, H. S., Lan, Y., Chen, S., Liu, Y., Zhao, H., ... & Ren, Z. (2015). Study on thermoelectric performance by Na doping in nanostructured Mg_{1-x}Na_xAg_{0.97}Sb_{0.99}. *Nano Energy*, 11, 640–646.
49. Shi, X., Yang, J., Salvador, J. R., Chi, M., Cho, J. Y., Wang, H., ... & Chen, L. (2011). Multiple-filled skutterudites: high thermoelectric figure of merit through separately optimizing electrical and thermal transports. *Journal of the American Chemical Society*, 133(20), 7837–7846.
50. Tan, G., Shi, F., Hao, S., Zhao, L. D., Chi, H., Zhang, X., ... & Kanatzidis, M. G. (2016). Non-equilibrium processing leads to record high thermoelectric figure of merit in PbTe–SrTe. *Nature communications*, 7, 12167.
51. Tang, J., Wang, H. T., Lee, D. H., Fardy, M., Huo, Z., Russell, T. P., & Yang, P. (2010). Holey silicon as an efficient thermoelectric material. *Nano letters*, 10(10), 4279–4283.
52. Zhang, T., Zhang, Q., Jiang, J., Xiong, Z., Chen, J., Zhang, Y., ... & Xu, G. (2011). Enhanced thermoelectric performance in p-type BiSbTe bulk alloy with nanoinclusion of ZnAlO. *Applied Physics Letters*, 98(2), 022104.
53. Wang, X. W., Lee, H., Lan, Y. C., Zhu, G. H., Joshi, G., Wang, D. Z., ... & Song, S. (2008). Enhanced thermoelectric figure of merit in nanostructured n-type silicon germanium bulk alloy. *Applied Physics Letters*, 93(19), 193121.
54. Zhao, H., Sui, J., Tang, Z., Lan, Y., Jie, Q., Kraemer, D., ... & Ren, Z. (2014). High thermoelectric performance of MgAgSb-based materials. *Nano Energy*, 7, 97–103.





융합연구리뷰

Convergence Research Review

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02. 958. 4984