



융합연구리뷰

Convergence Research Review

재생 및 재활용 에너지 기반 자력 발전 빌딩 기술

남유진(부산대학교 건축공학과 교수)

배상무(부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원)

국가연구개발사업 성과평가 분석과 융합연구에의 적용

이지욱(산업통상자원 R&D 전략기획단 수석전문위원)



CONTENTS

- 01 개편기념사
- 03 재생 및 재활용 에너지 기반 자력 발전 빌딩 기술
- 23 국가연구개발사업 성과평가 분석과 융합연구에의 적용

융합연구리뷰

Convergence Research Review

2024 May Vol.10 No.05

발행일 2024년 5월 29일

발행인 임혜원

발행처 한국과학기술연구원 미래융합전략센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4987 | <https://kist.re.kr/fcsc>

펴낸곳 공간기획 Tel. 044-863-0978

개편기념사

경계를 넘어 해결책을 탐구하는 세상 속에서, 융합연구에 대한 통찰과 이해를 넓히겠습니다.

미래융합전략센터는 융합연구리뷰를 발간함으로써, 융합을 통해 사회 변혁을 주도할 수 있는 기술을 매월 2개씩 선정하여 융합기술에 대한 연구 동향과 산업 현황, 정책 동향 등을 다루어왔습니다. 이를 통해 우리는 연구자, 산업 종사자, 정책 입안자, 그리고 일반인들에게 융합연구에 대한 관심을 고취하였습니다.

2024년 5월, 이제 융합연구리뷰는 새롭게 시작합니다. 융합기술에서 한 발 더 나아가, 융합정책까지 다루며 더욱 폭넓은 시각으로 융합연구에 대한 이해를 높이고자 합니다.

새로운 시작은 단순히 주제를 수록하는 것을 넘어, 융합기술과 융합정책의 영향력을 보다 널리 알릴 것입니다. 연구와 산업 현장에서 현실적인 문제를 해결하는데 기여할 수 있는 새로운 아이디어와 통찰을 제공하는 데 그 의의가 있습니다.

이번 기술리뷰는 재생 및 재활용 에너지 기반 자력 발전 빌딩 기술로 시작합니다. ZEB(Zero Energy Building, 제로에너지빌딩)는 건물의 에너지 소비를 제로로 만들기 위해 단열 성능을 극대화하고, 신재생 에너지를 적극 활용하는 건물을 의미합니다. ZEB 시장 규모는 높은 성장 잠재력을 가진 한편, 건축물 규제나 단열 및 신재생 에너지 기술 등 복합적 문제를 안고 있어 분야 간 긴밀한 협력이 필요합니다.

본 호를 통해 처음 선보이는 정책리뷰는 국가연구개발사업 성과평가 분석과 융합연구에의 적용을 다룹니다. 국가연구개발사업이 어떻게 성과를 평가하고 평가결과를 어떻게 환류하는지 소개하고, 한국과 일본의 성과평가 체계를 비교하여 국가연구개발사업 성과평가 체계의 개선점을 제안합니다. 마지막으로 국가연구개발사업 성과평가를 융합연구에 적용하기 위하여, 융합에 특화된 평가의 방향성을 제시합니다.

새로 돌아온 융합연구리뷰로 융합연구의 더 높은 가치를 발견할 수 있도록 노력하겠습니다. 융합연구리뷰를 읽어주시는 모든 여러분께 융합연구의 중요성을 깨닫고, 혁신적인 발전을 이루어 나갈 수 있기를 기대합니다.



융합연구리뷰
Convergence Research Review

2024 May Vol. 10

No. 05



1. 융합기술

재생 및 재활용 에너지 기반 자력 발전 빌딩 기술

남 유 진
부산대학교 건축공학과 교수

배 상 무
부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원

1. 재생 및 재활용 에너지 기반 자력 발전 빌딩 기술

남 유 진 (부산대학교 건축공학과 교수)

배 상 무 (부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원)

I. 제로에너지빌딩과 신재생에너지기술 현황

기후변화와 온실가스 저감에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 최근 UN사무총장 안토니우 구테흐는 Global Warming의 시대를 지나 Global Boiling의 시대가 왔다는 표현을 할 정도로 지구온난화가 심각하며 탄소저감을 위한 전 세계의 노력을 강조하였다. IEA 보고서에 따르면, 탄소중립을 위한 가장 현실적이고 이상적인 접근 방법 중 하나로 신재생에너지 이용과 에너지효율 향상을 거론하였다. 건물 부문에서도 제로에너지건축물(ZEB, Zero Energy Building) 보급 활성화와 함께 신재생에너지 설비와 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다.

ZEB은 건축물의 에너지 소비를 제로(0) 또는 제로에 가까운 수준으로 만들기 위해 단열, 기밀 등의 패시브 하우스 기술과 고효율 설비 등의 액티브 기술로 에너지 요구량을 최소화하고 신재생에너지 기술로 에너지를 생산하는 건축물을 말한다. IMARC Services 보고서에 따르면, 전 세계 Zero Energy Building 시장 규모는 2022년 278억 달러에 달할 것으로 산정하였고, 2023년부터 2028년까지 21.8%의 연평균 성장률(CAGR)이 예상되어 시장 규모는 2028년까지 1,039억 달러로 성장할 것으로 예측하였다.

이러한 배경에는 주요 선진국에서 ZEB 보급 활성화를 위한 정책이나 규제를 만들고 있으며, 특히, 적용 건물의 용적률이나 고도 제한의 완화, 세금 감면과 같은 인센티브를 부여하는 정책을 통해 보급을 장려하고 있다. 국내에서는 ZEB 구현을 위해, 주로 태양광(PV)과 지열 등의 단일 시스템이 주로 이용되고 있으나, 제로에너지 건축물인증 기준의 상향에 대응하기 위해서는 새로운 대안이나 기술이 필요하다. 또한, 건축물의 입지 조건이나 형태, 용도 등에 따라 단일 시스템만으로 건축물의 에너지 자립을 달성하기는 어려운 한계가 있어 두 가지 이상의 에너지원을 결합한 신재생 융복합 기술이 주목받고 있다.

그림 1. 제로에너지건축물 의무화 로드맵



* 출처: 한국에너지공단

본 원고에서는 현재 건물에서 보급률이 가장 높고 다양한 용도에서 응용 가능성이 높은 태양광, 태양열, 지열 등의 융복합 시스템 연구에 대해 소개하고자 한다.

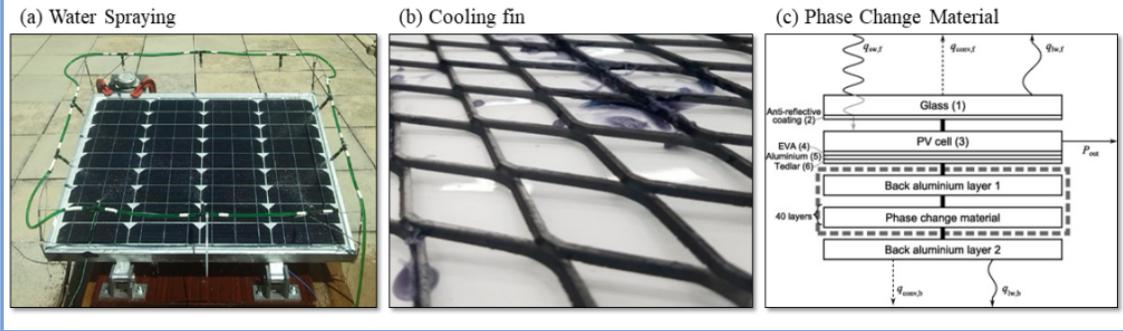
II. 신재생에너지 융복합 연구 동향

1. 태양광열(Photovoltaic-thermal, PVT) 기술 동향

태양전지의 진보된 기술개발로 인해 발전효율이 크게 향상되고 있지만, 상용화된 고효율 제품의 경우 발전효율은 약 20% 수준이다. 하지만, 태양전지의 발전효율은 온도에 의해 제한되며 온도가 1°C 상승할 때마다 발전효율이 약 0.5% 감소하며 이것은 태양광 시스템의 해결 과제 중 하나다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 태양전지의 냉각을 위한 Water Spraying, Cooling fin, Phase Change Material 등의 기술이 제안되고 있다.

Water Spraying은 태양광 패널의 양면(전·후)에 물을 분사하여 태양전지를 냉각·세척하는 방법이다. 이러한 방법을 통해 태양광 패널의 온도를 약 30°C 낮추고 태양전지의 발전효율을 15% 개선하였다. 그러나, 물을 직접 분사하는 방식은 태양광 패널 후면에 있는 Junction Box에 결함·화재 등의 문제를 발생시킬 수 있다. Cooling fin은 후면에 철망을 부착하여 태양광 패널이 가진 열을 전도와 대류의 방식으로 배출한다. 철망은 구조적 접착제를 통해 부착하므로 비교적 간단한 방식이고 다른 냉각기술보다 경제적이다. 철망의 냉각 효과는 재료의 열특성에 의해 차이를 나타냈으며, 알루미늄으로 구성된 철망은 태양광 패널의 온도를 약 6.5°C 낮출 수 있었다. Phase Change Material(PCM)은 낮 동안 태양광 패널에 유입된 열에너지를 흡수하여 태양광 패널의 급격한 온도 상승을 억제하고, 태양전지 온도를 낮게 유지하여 발전효율을 개선하는 방법이다. 연간 태양전지의 전기생산을 약 6% 개선할 수 있었다.

그림 2. 태양광 패널 냉각기술

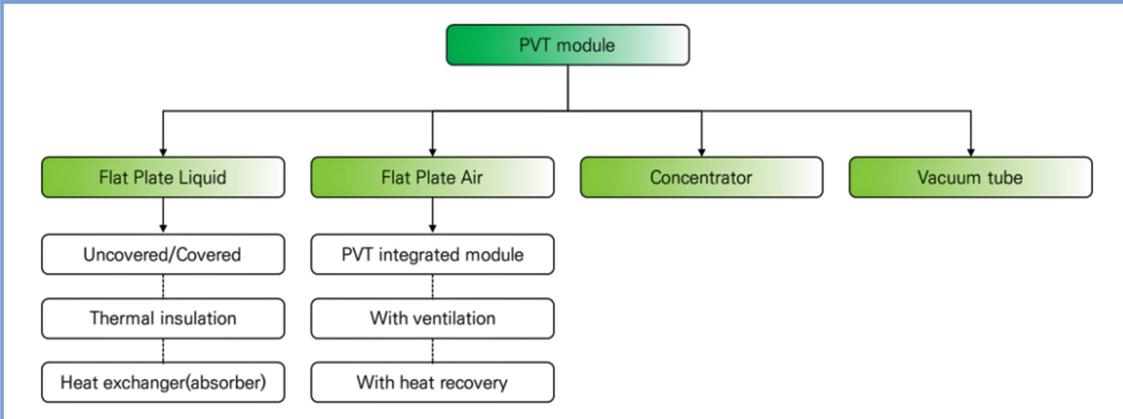


* 출처: (a) Nizetic, S. et al. (2016), (b) Kim, J. et al. (2019), (c) Smith, C. et al. (2014)

한편, 태양광열 기술은 전기생산과 동시에 버려지는 폐열을 활용할 수 있는 능력으로 인해 기존의 냉각기술보다 더욱 경제적으로 이용될 수 있다. 또한, 태양광열 기술은 순환매체를 통해 태양전지의 온도를 감소시킬 수 있으므로 효과적으로 발전효율을 개선할 수 있다. 태양광열의 온도는 열에너지의 활용성을 결정하기 때문에 이를 효과적으로 사용하기 위한 연구가 제시되고 있으며, 태양광열이 수집한 온도 범위에 따라 (1) 난방, (2) 급탕, (3) 히트펌프 열원, (4) 시스템 전력 공급 등으로 사용할 수 있다. 이러한 사용방법 중에서 태양광열 기반의 히트펌프 융복합 기술은 태양광열과 히트펌프의 효율의 향상으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 대부분 태양광열 기반의 히트펌프 융복합 기술은 (1) 태양광열-공기열원 히트펌프, (2) 태양광열-지열원 히트펌프로 활용되고 있다.

태양광열 기술개발을 위해 전 세계적으로 전문업체의 수는 꾸준히 증가하고 있으며, 이러한 기술개발의 진보에 따라 태양광열의 기술분류는 확장되고 있다. 태양광열의 기술분류는 건축물 적용, 히트펌프(공기열원, 지열원)와 연계성, 태양전지, 태양열 집열기 형태, 순환매체의 종류에 따라 구분할 수 있다.

그림 3. PVT module classification



* 출처: Corry et al. (2017), 재가공

국외에서는 독일, 프랑스, 네덜란드, 영국 등의 유럽을 중심으로 태양광열 전문업체가 분포되어 있으며, 무창형 평판형 액체식(Uncovered Flat Plate Water)이 가장 많은 보급 비중을 차지하고 있다. 평판형 액체식의 태양광열 기술은 건축물에 단독으로 사용할 수 있고, 히트펌프(공기열원, 지열원)와 같이 비교적 저온이 필요한 건축물의 난방 공조 시스템에 적용할 수 있으므로 활발히 이용되고 있다.

네덜란드 기업청(Netherlands Enterprise Agance)의 지원으로 발간한 PVT Benchmark에서는 유럽에 위치한 25개의 무창형 평판형 액체식 태양광열 모듈 전문업체를 대상으로 가격을 조사하였다. 태양광열 모듈의 정규가격은 55만원에서 90만원 수준으로 확인되었으며 평균 정규가격은 72만원으로 계산되었다. 태양광열 모듈의 가격은 2005년 대비 절반 수준까지 감소하였으나, 태양전지의 가격하락에 따라 정규가격은 더욱 감소할 전망이다. 국내에서는 대기업을 중심으로 태양광 사업을 추진하고 있지만 태양광열 모듈 제작 관련 인프라 부족으로 국외시장보다 정규가격이 비교적 높게 책정될 것으로 예측된다.

2. 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템 기술 동향

공기열원을 활용한 냉난방 및 급탕 시스템은 설비의 단순화, 설치의 편의성 및 경제성 등으로 전 세계적으로 널리 이용되고 있다. 그러나, 한랭지에서의 낮은 에너지 효율, 제상운전으로 인한 성능 저하 등의 약점이 있다. 이러한 기존 공기열원 히트펌프 시스템의 단점을 보완할 수 있는 기술로 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템이 주목을 받고 있다. 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템은 대형 장비(굴착기계, 천공기계 등)와 넓은 건축부지를 필요로 하지 않기 때문에 협소한 도로와 도시 지역에도 적용할 수 있다. 나아가, 초기투자비용이 비교적 저렴하고 제한된 공간에서도 설치공사를 수행할 수 있으므로 건축주(발주자)의 비용적 부담을 완화할 수 있다. 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템에 관해 많은 엔지니어와 연구자들은 실제 건물적용을 활성화하기 위해 이론적 분석과 기술개발에 노력하고 있다.

건물일체형 태양광열(Building Integrated Photovoltaic-thermal)과 공기열원 히트펌프를 결합한 시스템을 활용하여 태양열과 공기열을 활용한 히트펌프 시스템의 에너지 효율성을 분석하고 있으며, 한랭지에서 공기열원 히트펌프의 성능계수를 개선하기 위해 태양광열 모듈을 열원으로 활용하는 방안을 제시하고 있다. 대부분 관련 연구에서는 수학적 모델, 에너지 시뮬레이션 그리고 실험실 규모(Lab-scale)의 실험을 통해 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능을 평가하고 있다. 이러한 해석적 접근방식은 건물의 부분부하, 시스템의 에너지 사용과 생산 그리고 환경조건을 정확하게 고려하는데 한계점이 있으며, 실제 건물에 설치된 시스템과 비교할 때 상당한 차이를 나타낼 수 있다.

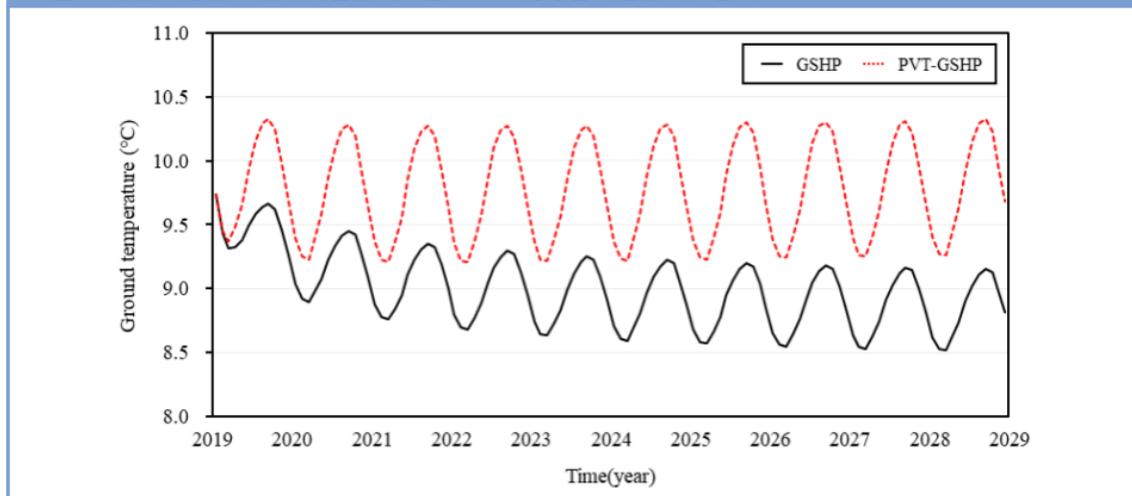
표 1. 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템 선행연구

Authors	System configuration	Analytical approach
Kamel and Fung ⁷⁾	BIPVT + ASHP	Energy simulation
Hailu et al. ⁸⁾	BIPVT + ASHP	Energy simulation
Wang et al. ⁹⁾	PVT + ASHP	Lab-scale experiment
Cao et al. ¹⁰⁾	PVT + ASHP	Energy simulation
Emmi et al. ¹¹⁾	PVT + ASHP	Energy simulation
Dumoulin et al. ¹²⁾	BIPVT + ASHP	Energy simulation
Hasan et al. ¹³⁾	BIPVT + ASHP	Mathematical model
Li and Huang ¹⁴⁾	PVT + ASHP	Energy simulation

3. 태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템 기술 동향

지열 히트펌프 시스템은 안정된 지중온도를 활용하여 건물의 냉난방 및 급탕에 대응할 수 있는 고효율 기술로 공기열원 히트펌프 시스템에 비해 상대적으로 높은 성적계수를 확보할 수 있어 북미 및 북유럽을 중심으로 보급이 활발히 이루어져 왔다. 태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템은 태양광, 태양열, 지열원 히트펌프를 통해 건축물의 냉방, 난방, 급탕, 전력수요를 담당할 수 있다. 또한, 서로의 통합된 운전전략을 통해 태양광열과 지열원 히트펌프가 가진 기술적·성능적 한계점을 극복하고 시너지 효과를 발생시킬 수 있다. 특히, 태양열을 통한 지중축열을 통해 장기 운전에도 지중온도를 안정적으로 유지할 수 있다.

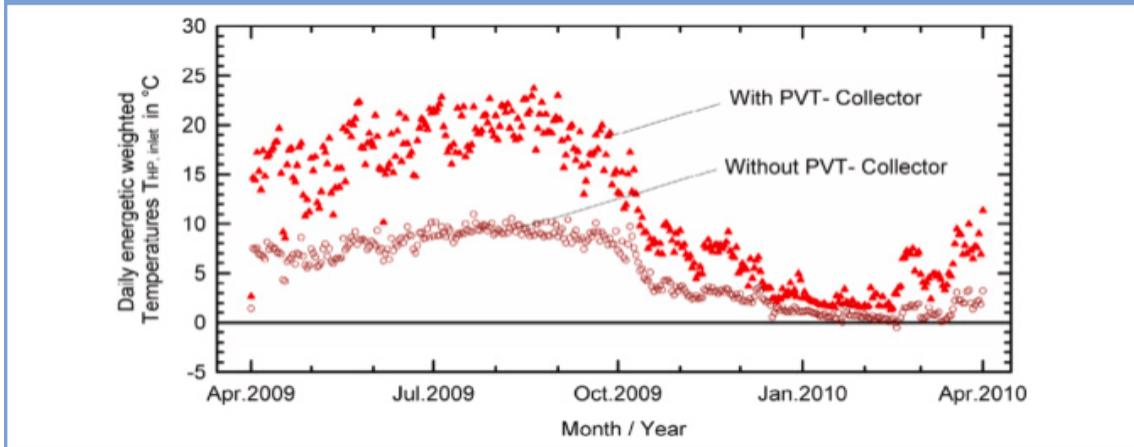
그림 4. 연간 지중온도 변화(지열원 히트펌프 vs 태양광열-지열원 히트펌프)



* 출처: Kim, H. et al. (2020)

태양광열-지열원 히트펌프는 안정적인 지중온도의 유지는 물론 태양열을 히트펌프의 열원으로 사용할 수 있다. 태양광열의 활용은 겨울철 지중온도보다 높은 온도의 열을 히트펌프에 공급함으로써 압축기의 소비동력을 절감할 수 있다. 태양열의 활용은 지열원 히트펌프의 성능개선과 함께 시추공(Borehole)의 개수를 절감할 수 있다. 이는, 설치면적이 제한된 지열원 히트펌프에 효과적이며 경제적 설계가 가능하다.

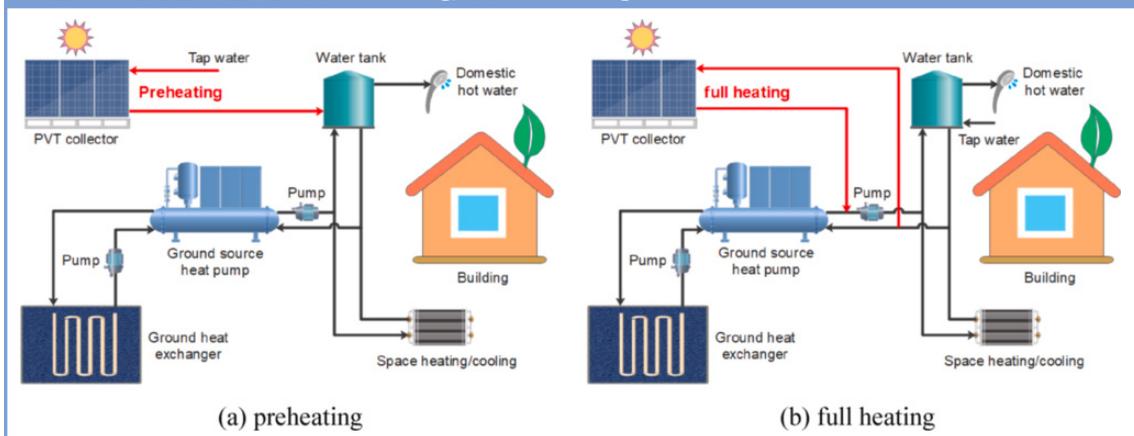
그림 5. 히트펌프 증발기의 입구온도 비교



* 출처: Bertman, E. et al. (2011)

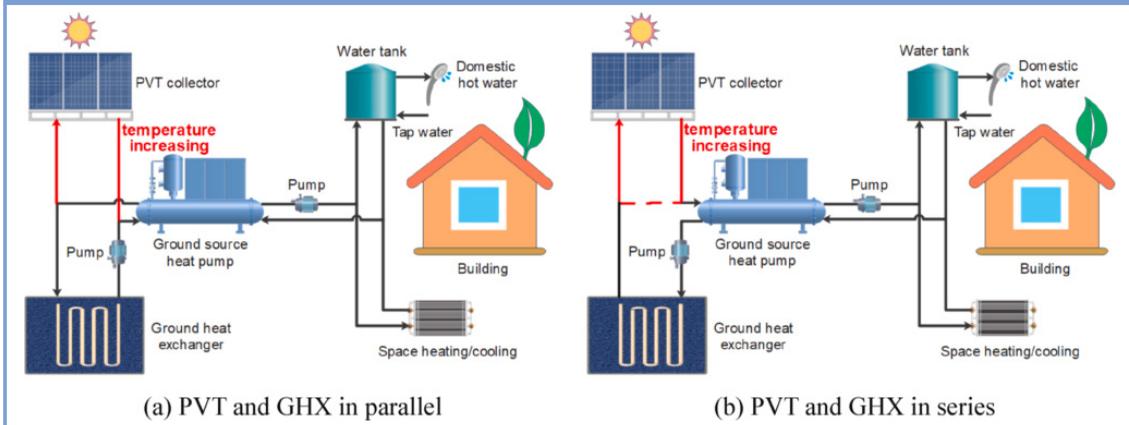
태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템은 기능과 구조에 따라 네 가지 범주로 분류된다: (1) 태양광열 직접활용, (2) 태양광열 병렬·직렬연결, (3) 다열원 시스템, (4) 지중축열 + 에너지저장. 이러한 시스템의 범주 외에도 열저장장치, 전력저장장치, 가스열원 설비기기(연료전지, 가스엔진 히트펌프) 등을 추가하여 건물의 부하조건에 적합하도록 시스템의 기능과 구조를 수정할 수 있다.

그림 6. 태양광열 직접활용: (a) Preheating, (b) Full heating



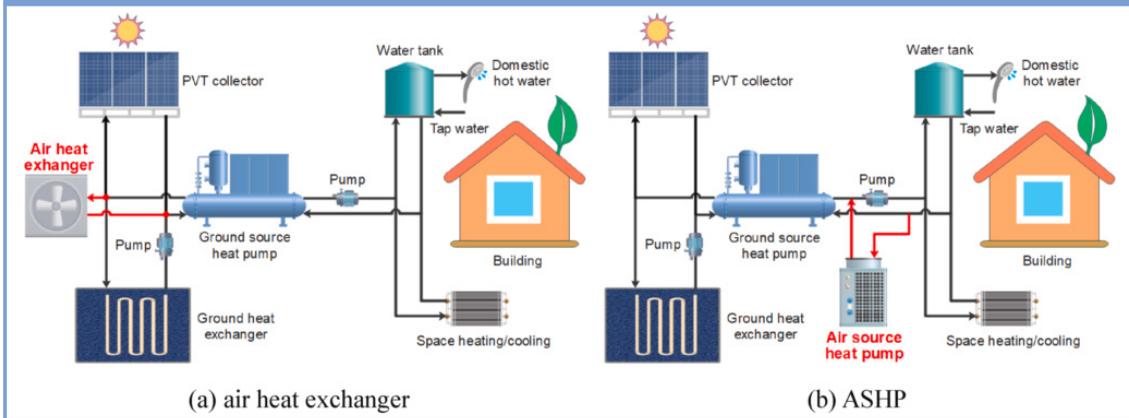
* 출처: Tian You et al. (2021)

그림 7. 태양광열 연결: (a) 병렬, (b) 직렬



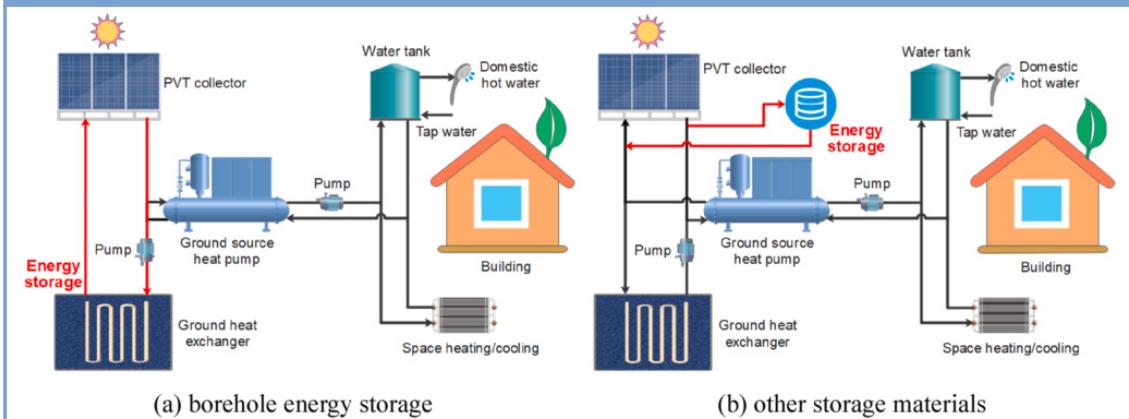
* 출처: Tian You et al. (2021)

그림 8. 다열원 활용: (a) 열원활용방식, (b) 직접공조방식



* 출처: Tian You et al. (2021)

그림 9. 지중축열 + 에너지 저장: (a) 지중축열, (b) 에너지 저장



* 출처: Tian You et al. (2021)

태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템의 기술개발은 지속적으로 수행되고 있으나 현재까지도 기존 보일러와 에어컨디셔너를 이용한 냉난방 공조 시스템이 대부분 건물에 이용되고 있다. 더불어, 정부에서 신재생에너지 시스템에 의한 발전 비중을 높이기 위해 2012년 '신재생에너지 공급의무화제도 관리 및 운영지침(Renewable Portfolio Standard, RPS)'을 공표하고 '신재생에너지 보급지원사업'을 통해 신재생에너지 원별 설치비용을 지원하고 있다. 나아가, 정부는 탄소중립·기후적응·녹색성장을 목적으로 '국가 탄소중립·녹색성장 기본계획'을 발표하며 2027년까지 약 90조원의 예산을 투입할 예정이다.

표 2. 탄소중립·녹색성장 재정투자 계획

구분	'23 예산	'24-'27 예산	합계
부문별 중장기 감축 대책	79,480	466,283	545,763
기후변화 적응대책	29,856	164,213	194,068
녹색산업 성장	10,459	54,453	64,912
정의로운 전환	2,366	19,837	22,203
지역 탄소중립·녹색성장	4,602	30,319	34,922
인력양성 및 인식제고	5,999	26,881	32,881
국제협력	693	3,751	4,444
합계	133,455	795,738	899,193

* 출처: 관계부처 합동 (2023)

탄소중립과 녹색성장 기본계획에서 건축부문 제로에너지건축물과 그린리모델링 구현을 위해 신재생에너지 시스템의 도입을 적극적으로 장려하고 있음에도 불구하고 실제 건축물에 적용이 지연되고 있다. 이는, 실제 건물에 실제 건물에 태양광열-지열원 융복합 시스템을 구현한 실증사례는 국내외를 포함하여 매우 미비하고 융복합 시스템의 성능과 경제성 등에 대해 참고 및 근거자료로 활용할 수 있는 종합적인 실증 데이터가 매우 부족하기 때문이다.

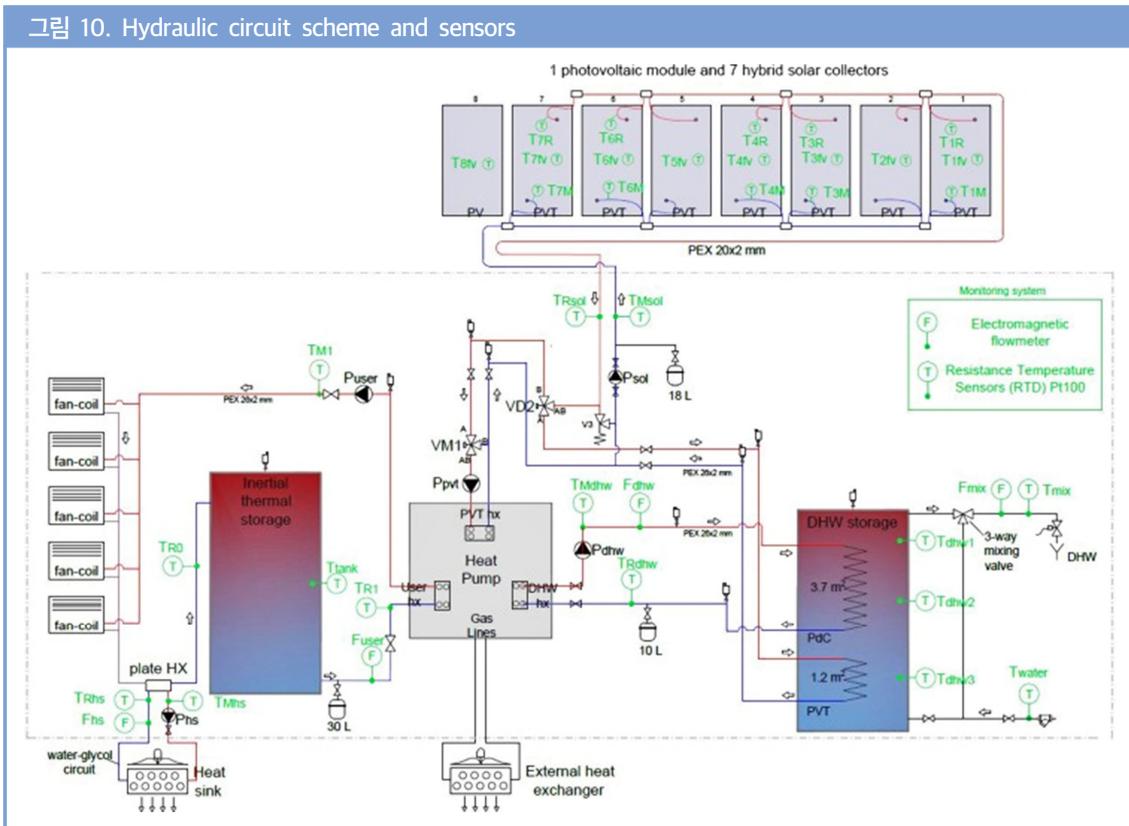
대부분의 선행연구에서는 상당한 시간, 비용, 인력이 필요하므로 실험실 규모와 에너지 시뮬레이션을 통해 성능을 추정하고 있다. 이러한 접근방법은 태양광열-지열원 융복합 시스템의 에너지 성능 및 경제적 이점에 대해 불확실성이 높으므로 발주자, 설계자, 엔지니어, 연구자 등의 관련 종사자들이 시스템 설치와 운영에 대해 적극적으로 추진하기 어려운 실정이다. 따라서, 태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템의 보급 활성화와 더불어 관련 종사자들에게 신뢰성 높은 실증사례 및 데이터를 제공하기 위해서는 시제품 또는 실용화 연구단계에서 수행된 실증실험이 필수적이다.

III. 신재생에너지 융복합 적용사례

1. 태양광열-공기열-지열 융복합 사례

Fabrizio Leonforte et al.은 하이브리드 태양광열 보조 히트펌프 시스템을 제시하고 현장 연구 결과를 논의하기 위해 설계 및 성능 모니터링을 진행하였다. PVT-SAHP 프로토타입은 밀라노 지역(위도 45.48°, 경도 9.26°)의 RSE Spa(Ricerca sul Sistema Energetico Spa) 본사에 위치한 테스트 시설에 설치되었다. 축열조 설정온도 43도, 실내 설정온도 22도, DHW 회수량 일일 600L의 난방 운전 시에는 3.85의 HP COP를 나타냈으며, 축열조 설정온도 43도, 실내 설정온도 24도, DHW 회수량 일일 200L의 냉방 운전 시에는 3.25의 HP COP를 나타냈다. PVT의 축열조 열 공급 비율은 각각 35.3%, 83.1%로 나타났다.

그림 10. Hydraulic circuit scheme and sensors



* 출처: Leonforte, F. et al. (2022)

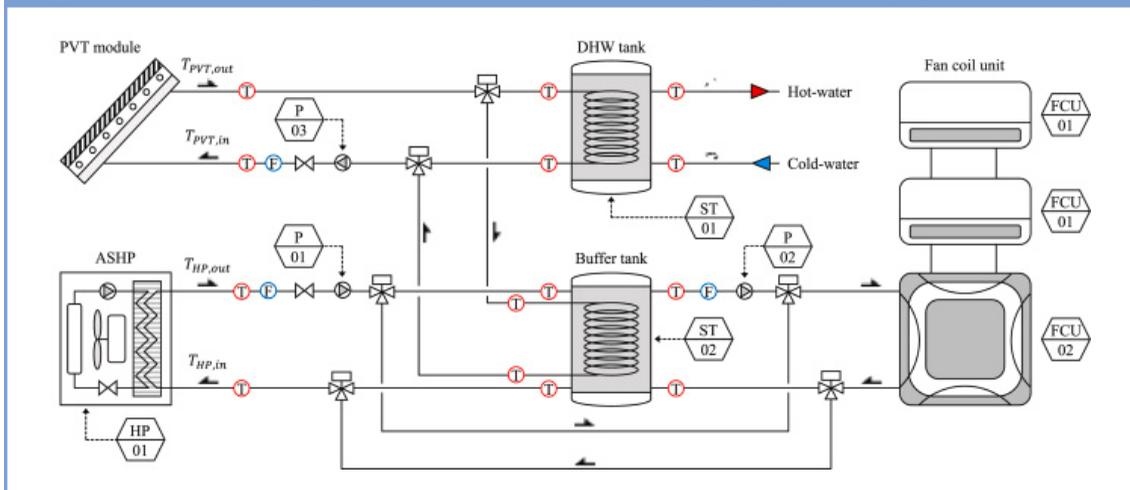
그림 11. View of the test facility installation



* 출처: Leonforte, F. et al. (2022)

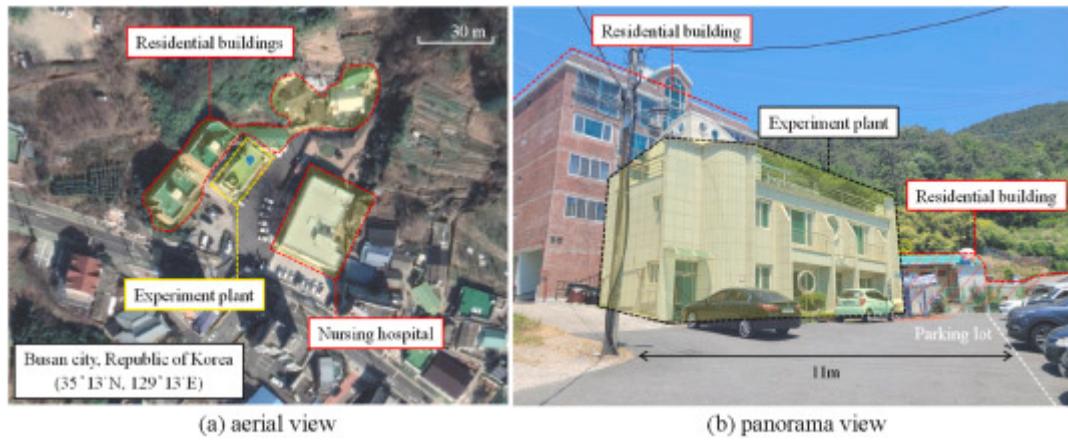
Bae et al.은 하이브리드 태양광열 - 공기열원 히트펌프 시스템을 제시하고 PVT-ASHP 시스템의 성능을 평가하기 위해 소규모 건물을 기반으로 실제 적용에 대한 실험적 분석을 진행하였다. PVT-ASHP 시스템은 대한민국 부산광역시(35°13'N, 129°13'E)에 위치한다. 분석 결과 PVT-ASHP 시스템은 기존 ASHP 시스템에 비해 최대 52%의 성능 향상을 이루어냈으며, 소비전력은 냉난방 기간 동안 각각 18%, 27%를 상쇄하였다. PVT-ASHP 시스템은 PVT-GSHP 시스템에 비해 초기투자비용을 44% 절감하였다.

그림 12. Schematic of the photovoltaic-thermal air source heat pump (PVT-ASHP) system



* 출처: Sangmu Bae et al. (2023)

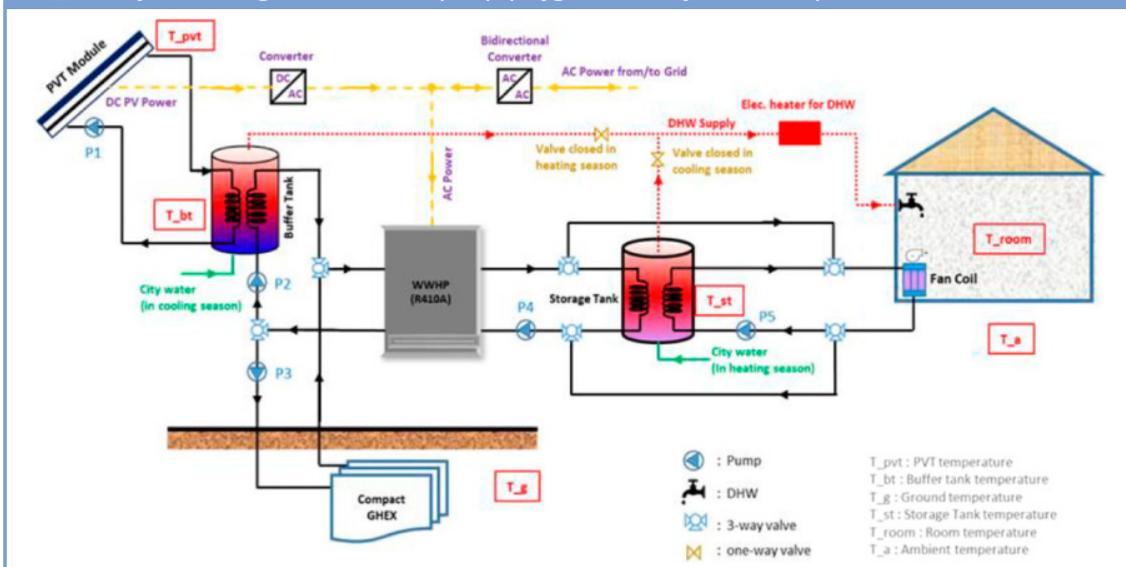
그림 13. Surrounding view of the real-scale experimental plant



* 출처: Sangmu Bae et al. (2023)

한국에너지기술연구원, 부산대, 캐나다 Canmet Energy 등은 하이브리드 태양광열 - 모듈형 지열원 히트펌프 시스템을 제시하고 PVT-GSHP 시스템의 성능을 평가하기 위해 소규모 건물을 기반으로 실제 적용에 대한 실험적 분석을 진행하였다. PVT-GSHP 시스템은 대한민국 청주에 위치한다. 분석결과 ISO 13256 기반의 WWHP 실험실 성능 데이터는 COP_c 9.9를 나타냈고, 현장 실증 데이터는 COP_c 10.3을 나타내어 4.3% 상대오차를 나타내며, 동일한 소스 온도에 대한 COP_c 영향도 분석 결과, GHX를 활용하였을 때 WWHP 소스 온도가 20.9°C에서 16.9°C로 4.0°C 감소했으며, 이는 COP_c를 8.5에서 9.8로 13% 증가시켰다.

그림 14. Hybrid solar-geothermal heat pump polygeneration system concept



* 출처: Yujin Kim et al. (2021)

그림 15. Photovoltaic-thermal (PVT) and ground heat exchanger (GHX) installation for the polygeneration



* 출처: Yujin Kim et al. (2021)

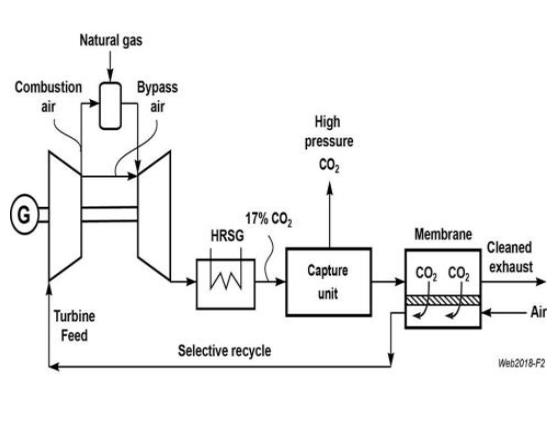
2. 그 외 재생에너지 융복합 사례

그림 16. 호주 왕립아동병원



* 출처: Cummins Industries

그림 17. Membrane Solution



* 출처: MTR Industrial Separations

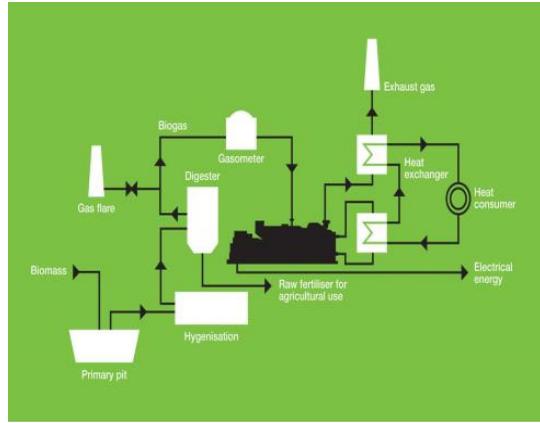
호주 왕립아동병원(The Royal Children's Hospital)은 천연가스 발전기를 이용하여 전기, 난방 및 냉각 시스템을 제공하고 디젤 발전기를 대기 전력을 제공한다. 삼중 발전 시스템은 흡수식 냉각기를 이용하여 기저부하 전력, 난방 및 냉방을 공급한다. 정전이 발생할 경우 디젤 발전기는 가스 발전기와 함께 작동하여 전력의 연속성을 나타낸다. 별도의 전기 시스템을 보유하는 것이 아니라 발전기 통합을 통해 열병합 발전으로 CO₂ 배출 감소를 이뤄냈다.

그림 18. Columbus Water Works



* 출처: Cummins Industries

그림 19. Biogas CHP



* 출처: Clarke Energy

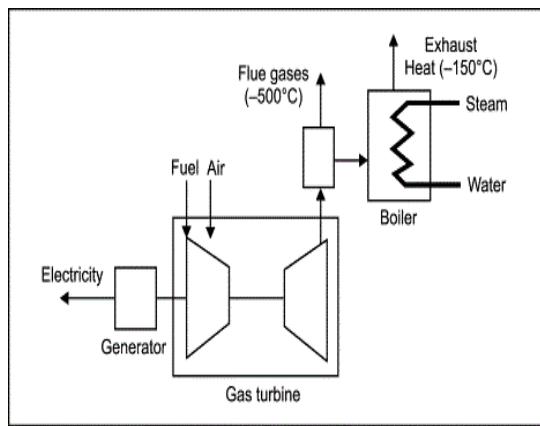
미국 콜럼버스 워터 워크스(Columbus Water Works)는 폐수 처리의 부산물로 생성된 바이오가스가 열병합 발전을 운영하기 위한 원료원으로 사용된다. 이중 연료 희박 연소 가스 발전기를 설치하여 필요에 따라 바이오가스나 천연가스를 사용하여 전기를 생산해낸다. 발전기 세트, 개폐 장치 및 폐열 회수 시스템을 설치하였다. 모니터링 및 개폐 장치, 발전기 세트는 이중연료로 작동이 가능하여 폐수 처리장에서 생산되는 가스의 에너지화에 대한 이상적인 예시를 보여준다. 테스트를 통해 난방 및 전력 시스템의 전력 공급 안전성 향상, 발전소의 압력 감소, 보완 전력 공급 가능에 더해 탄소 배출량 감소에도 긍정적인 역할을 해냈다.

그림 20. Hongqiao Business District



* 출처: Cummins Industries

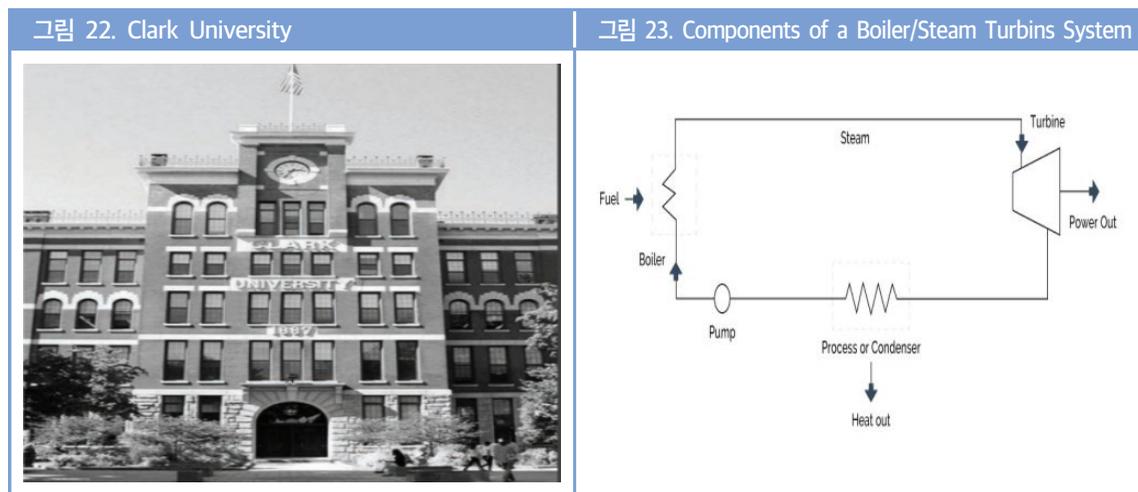
그림 21. Gas turbine cogeneration systems



* 출처: Heat Storage Systems for Buildings

중국 상하이 훙차오 비즈니스 지구(Hongqiao Business District)는 천연가스를 사용하여 전기를 생산하고 열을 회수하여 지역의 냉난방 및 전력 수요를 충족하고 있다. 수냉식 스크류 냉각기 및 가스 보일러와 함께 모듈식 에너지 솔루션을 결합한 흡수식 냉각기를 사용한다. 통합된 냉난방 및 전력 모델을 사용하여 지역의 전체 냉난방 부하와 전기 부하를 줄인다. 운영 테스트 결과 열병합 발전 시스템을 통해 전력 공급 시스템의 안전성 향상, 발전소 부담 감소, 피크 감소를 통한 보완 전력 공급력 향상에 긍정적인 역할을 한 것으로 나타났다.

- 미국, 메사추세츠 주 클라크 대학교



* 출처: Cummins Industries

* 출처: Understanding CHP

미국 메사추세츠 주 클라크 대학교(Clark University)는 열병합 발전을 설치하여 엔진 배기가스가 증기 보일러를 통과하여 열을 생산함과 동시에 뜨거운 물의 형태로 열회수도 가능하도록 하였다. 효율이 높은 가스 발전기를 사용하여 대학의 연간 전기 및 열 에너지 요구사항을 충족하는 동시에 초과 생산된 전력을 에너지 회사에 되팔아 상당한 비용 절감효과도 나타났다. 열병합 발전기 및 발전기 성능을 원격으로 모니터링할 수 있도록 하여 인건비와 유지 관리 비용을 줄이고 있다.

IV. 마무리

신재생에너지 융복합 시스템은 단일 시스템의 단점을 극복하고 건축물의 에너지 자립을 실현할 수 있는 중요한 기술이다. 특히, 전 세계적인 탄소중립 이슈가 주목받고 있는 가운데 제로에너지건축물인증, 녹색건축인증 등의 보급 활성화와 함께 향후 기술개발이 요구되는 분야이다. 자칫 두 가지 이상의 기술의 시너지 효과가 아닌 단순한 중복 투자나 과대 설계로 끝난다면 융복합의 의미는 퇴색될 것이다. 시스템의 도입에 앞서 융복합의 효과를 기술적으로 경제적으로 검증한 후, 건축물의 조건과 상황에 맞게 적절한 설계가 되어 적용되어야 올바른 보급이 이루어질 것이다.

그동안 정부는 신재생에너지 시스템에 의한 발전 비중을 높이기 위해 신재생에너지 보급지원사업 등을 통해 신재생에너지 보급 활성화를 추진하고 있으며 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획을 통해 2027년까지 약 90조 원의 예산 투입 계획도 발표하였다. 이러한 신재생에너지 시스템의 적극적 도입 장려 정책에도 불구하고 신재생 융복합 기술의 적용은 미흡한 것은 실증사례가 많지 않아 융복합 시스템의 종합 성능 및 경제성 등에 대해 참고할 만한 근거자료가 부족하고 신뢰성 있는 실증 데이터가 매우 부족하기 때문이다. 신뢰성 높은 근거자료(Track record)가 부족한 상황에서는 기술 도입을 적극적으로 추진하기 어려울 것이다. 따라서, 태양광열-공기열원-지열원 히트펌프 융복합 시스템의 보급 활성화를 위해서는 다양한 건물 유형에서 실증 연구가 수행되어야 하며 융복합 시스템에 대응하기 위한 제품 개발 및 상품화의 노력도 동시에 필요할 것이다.

저자소개 남유진 (Nam Yujin)

• 학력

도쿄대학 건축환경설비 박사
 도쿄대학 건축환경설비 석사
 부산대학교 건축공학 학사

• 경력

現) 부산대학교 교수
 前) 서던캘리포니아대학 방문연구원
 前) 청주대학교 조교수
 前) 도쿄대학 생산기술연구소 특별연구원

저자소개 배상무 (Bae Sangmu)

• 학력

부산대학교 건축공학 박사
 부산대학교 건축공학 석사
 경남대학교 건축공학 학사

• 경력

現) 부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원
 前) 노스캐롤라이나 주립대학 방문연구원
 前) 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 국토교통부, 2022, 녹색건축물 조성 지원법 제17조
- 2) 국토교통부, 2022, 녹색건축물 조성 지원법 제27조
- 3) 관계부처 합동, 2023, 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획
- 4) 산업통상자원부, 2021, 신·재생에너지 공급의무화 제도 및 연료 혼합의무화 제도 관리·운영 지침
- 5) 한국에너지공단, 2021, 2021년 신재생에너지 보급지원사업
- 6) 한국에너지공단, 제로에너지건축물 홈페이지, <https://zeb.energy.or.kr/>

〈국외문헌〉

- 1) Abu-Rumman et al., 2020, Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system, *Geothermics*, 85, 101809.
- 2) Bae et al., 2019, Economic solution of the tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump for zero energy building (ZEB) realization, *Energies*, 12, 3304.
- 3) Bertman, E. et al., 2011, Heat pump systems with borehole heat exchanger and unglazed PVT collector, 30th ISES Solar World Congress, International Solar Energy Society.
- 4) Cao et al., 2016, Research on PV/T air source heat pump integrated heating system in severe cold region, *Procedia Engineering*, 146, 410-414.
- 5) Corry et al., 2017, An overview of PVT modules on the European market and the barriers and opportunities for the Dutch Market., *PVT inSHaPe benchmark 2017*.
- 6) Dumoulin et al., 2021, Operation and grid interaction modeling of a house with a building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) system coupled to an air-source heat pump, *Science and Technology for the Built Environment*, 27, 1311-1329.
- 7) Emmi et al., 2017, A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collector: A case study of a multi-source energy system, *Energy Conversion and Management*, 151, 386-399.
- 8) Hailu et al., 2015, Performance evaluation of an air source heat pump coupled with a building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system under cold climatic conditions, *Energy Procedia*, 78, 1913-1918.

참고문헌

- 9) Hasan et al., 2021, A comparative evaluation on the case for the implementation of building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) air based systems on a typical mid-rise commercial building in Canadian cities, *Journal of Building Engineering*, 44, 103325.
- 10) Kamel S. and Fung, A. S., 2014, Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate, Canada, *Energy and Buildings*, 82, 758-770.
- 11) Kim, H. et al., 2020, Study on the performance of multiple sources and multiple uses heat pump system in three different cities, *Energies*, 13, 5211.
- 12) Kim, J. et al., 2019, Experimental and numerical study on the cooling performance of fins and metal mesh attached on a photovoltaic module, *Energies*, 13, 85.
- 13) Lazzarin and Noro, 2020, Photovoltaic/Thermal (PV/T)/ground dual source heat pump: Optimum energy and economic sizing based on performance analysis, *Energy and Buildings*, 211, 109800.
- 14) Leonforte. F. et al., 2022, Design and performance monitoring of a novel photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump system for residential applications, *Applied Thermal Engineering*, Volume 210, 118304.
- 15) Li and Huang, 2022, Simulation analysis on operation performance of a hybrid heat pump system integrating photovoltaic/thermal and air source, *Applied Thermal Engineering*, 200, 117693.
- 16) Nizetic, S. et al., 2016, Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response, *Energy Conversion and Management*, 108, 287-296.
- 17) Sangmu Bae, Hobyung Chae, Yujin Nam, 2023, Experimental analysis of an integrated system using photovoltaic/thermal and air source heat pump for real applications, *Renewable Energy*, Volume 217, 119128.
- 18) Smith, C. et al., 2014, Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling, *Applied Energy*, 126, 21-28.
- 19) Tian You, Wei Wu, Hongxing Yang, Jiankun Liu, Xianting Li, 2021, Hybrid photovoltaic/thermal and ground source heat pump: Review and perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 151, 111569.
- 20) Wang et al., 2015, Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system, *Energy and Buildings*, 108, 175-184.

참고문헌

- 21) Wang et al., 2021, Modeling and operation optimization of an integrated ground source heat pump and solar PVT system based on heat current method, Solar Energy, 218, 492-502.
- 22) Yujin Kim et al., 2021, Hybrid Solar Geothermal Heat Pump System Model Demonstration Study, Front. Energy Res., Vol. 9.

〈기타자료〉

- 1) Clarke Energy, <https://www.clarke-energy.com/applications/biogas/>
- 2) Cummins Industries, <https://www.cummins.com/news/2021/08/09/cogeneration-examples-across-industries>
- 3) Heat Storage Systems for Buildings, 2021, Pages 91-113, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823572-0.00004-7>
- 4) MTR Industrial Separations, <https://www.mtrinc.com/natural-gas-fired-power-plants/>
- 5) Understanding CHP, <https://understandingchp.com/chp-applications-guide/4-5-steam-turbines-and-rankine-bottoming-cycle/>



융합연구리뷰
Convergence Research Review

2024 May Vol. 10

No. 05



2. 융합정책

국가연구개발사업 성과평가 분석과 융합연구에의 적용

이 지 욱

산업통상자원 R&D 전략기획단 수석전문위원

2. 국가연구개발사업 성과평가 분석과 융합연구에의 적용

이 지 옥 (산업통상자원 R&D 전략기획단 수석전문위원)

I. 들어가며

국가연구개발사업은 연구개발을 위하여 국가의 정부출연금을 가장 직접적으로 지원하는 정책이다. 여기서 정부출연금은 ‘국가가 해야 할 사업이지만 여건상 정부가 직접 수행하기 어렵거나 민간이 이를 대행하는 것이 더 효과적이라고 판단될 경우, 국가가 재정상 원조할 목적으로 법령에 근거하여 민간에게 반대급부 없이 금전적으로 행해지는 출연’을 말한다. 이는 한 국가의 체제 및 잠재적 시장 실패를 보완하기 위하여 국가가 가장 적극적으로 개입하는 정책으로 産·學·研·官의 협력을 통해 수행되는 국가의 주요 사업이다. 이와 같은 국가연구개발사업의 성과평가 체계는 각 부처가 담당하는 자체평가와 과학기술정보통신부가 담당하는 상위 평가로 이루어져 있다.

우리나라는 1999년부터 국가연구개발사업의 분석 및 조사 등 평가제도를 도입한 이후 국가연구개발사업의 효과적인 성과평가 시스템 구축 및 예산 환류를 위해 지속적인 법률제정 및 제도개선을 추진해 오고 있다. 특히 2005년도 「국가연구개발사업의 성과평가 및 성과관리에 관한 법률」 제정을 통해 국가연구개발사업의 성과평가에 대한 체계적인 추진방안이 수립되었다. 또한 2005년부터 2021년까지 “국가연구개발 성과평가 기본계획” 수립을 통해 지속적으로 제도개선을 하고 있으며 [표 1]과 같이 2006년 제1차부터 2021년 제4차까지 5년 주기로 수립되어 왔다. “국가연구개발 성과평가 기본계획”은 관계 전문가로 구성된 추진위원회 및 전문가 자문회의 등을 통하여 국가연구개발 기관평가 및 사업평가의 실시, 과제평가 제도 운영, 평가기반의 관리 등에 관한 세부 계획을 마련하고 있다.

표 1. 제1차부터 제4차까지의 국가연구개발 성과평가 기본계획의 주요 내용

구분	주요 사항
제1차 국가연구개발 성과평가 기본계획 (2006년~2010년)	○ 현행 성과 중심 평가제도의 근간 마련
제2차 국가연구개발 성과평가 기본계획 (2011년~2015년)	○ 평가제도 고도화 추진 - 중심평가를 질적 성과, 고유임무 달성도 및 성과목표 등으로 제시(국가연구개발 성과평가 개선 종합대책('23.10)) - 과제평가에서 책임성 강조, 연구자 평가 부담 완화 및 전문가 정성평가 확대 등을 제시(국가연구개발 과제평가 표준지침 제정('15.03))
제3차 국가연구개발 성과평가 기본계획 (2016년~2020년)	○ 평가관점을 관리자에서 연구자 중심으로 전환 ○ 우수 국가연구개발성과 창출 견인을 위한 평가체계 선진화 - 평가의 질적 우수성 추구 및 과제평가에서 연구자의 평가 부담 완화 - 연구기관의 효과적인 연구환경 조성을 위하여 기관평가 시 기관운영평가와 연구 사업평가 분리('19)
제4차 국가연구개발 성과평가 기본계획 (2021년~2025년)	○ 연구현장의 성과창출 역량 제고를 위한 자율과 책임 위주의 평가 - 평가 책임성 및 자율성 제고 - 정책-투자-평가 관계의 환류 강화 - 효과 중심에 따른 성과평가 고도화 - 성과평가의 인프라 확충

* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

본 장에서는 국가연구개발사업이 어떻게 성과를 평가하고 그 평가결과를 어떻게 환류하는지에 대해서 개괄적으로 기술한다. 또한 연구개발사업의 착수-수행-종료-활용 단계별 평가에 관해서도 기술할 것이다. 그리고 일본 국가연구개발산업의 성과평가에 관해서도 소개하고자 한다. 앞서 기술한 한국과 일본의 성과평가 체계에 관한 내용을 바탕으로 국가연구개발사업의 성과평가 체계의 개선점에 관하여 몇 가지 언급할 것이다. 마지막으로 융합연구에 대한 한국과 일본의 사례를 소개하고 국가연구개발사업에서의 융합연구에 대한 동향과 융합연구에 대한 성과평가에 대한 방향성을 기술하고자 한다.

II. 국가연구개발사업 성과평가

1. 국가연구개발사업 성과평가 종류

국가연구개발사업 평가는 총 4단계에 걸쳐서 이루어지며 부처별로 자체평가를 실시하고 자체평가 결과를 과학기술정보통신부(혁신본부)가 적절성 위주로 점검하는 상위점검(적절성 점검)과 혁신본부에서 직접 수행하는 특정평가로 구분할 수 있다[표 2].

표 2. 국가연구개발사업 단계별 평가내용 및 일정

구분	내용(주체)	일정
착수 단계	전략계획서 수립(부처) 적절성 점검(혁신본부)	분석 및 수립: 4월~6월 적절성 점검: 7월~12월
수행 단계	중간평가(자체평가)(부처) 적절성 점검(혁신본부)	실시계획 수립: Y-1년 11월~12월 자체평가: 1월~3월 적절성 점검: 4월~5월
	특정평가(혁신본부)	특정시기없음 연 2~3회 수행
종료 단계	성과관리·활용 계획(부처) 적절성 점검(혁신본부)	분석 및 수립: 5월~8월 적절성 점검: 9월~10월
활용 단계	효과성 분석(부처) 적절성 점검(혁신본부)	분석 및 수립: 5월~6월 적절성점검: 7월~8월

* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

1.1. 전략계획서 점검

전략계획서란 부처가 소관하는 국가연구개발사업의 사업목표, 추진방안, 성과목표 및 지표, 평가시기 등 사업 전반에 대한 기획을 국회 확정 예산규모에 맞춰 수립한 계획서로 일종의 연구개발사업 설계도라고 할 수 있다.

※ (법적근거) 중앙행정기관의 장은 제1항에 따라 수립된 사업 전략계획의 과학기술정보통신부 장관에게 제출하여야 하며, 과학기술정보통신부 장관은 이를 점검하여야 한다. (연구성과평가법 제6조 제3항)

1.1.1. 개요

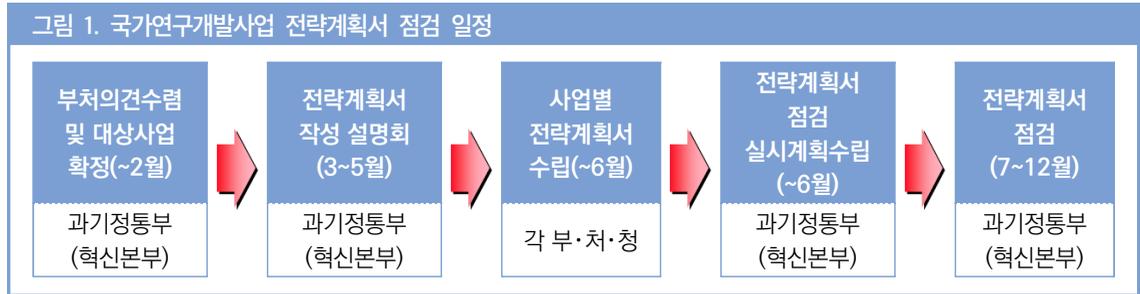
국가연구개발사업의 기획과 추진 간의 일관성을 높이고 성과평가 시 기준으로 활용하는 사업의 전략계획서의 적절성을 점검한다.

1.1.2. 전략계획서 점검 대상 사업

신규사업은 원칙적으로 점검 대상에 포함되며 기존 계속사업 중 올해 이후 단계에 대한 성과목표 및 지표가 부재한 사업, 평가결과 및 대외환경변화로 인해 계획 변경이 불가피한 사업, 대규모 예산이 증가하거나 감액된 사업, 사업 기간의 연장 등 사유로 추가 계획 수립이 필요한 사업 등 전략계획서 수정이 필요한 사업에 대해서도 점검 대상이 된다.

1.1.3. 전략계획서 점검 절차

기획보고서, 예비타당성조사 보고서, 사업내용 변경 사유서, 확정예산 설명자료, 성과목표 및 실적 관련 자료 등 근거자료를 바탕으로 부처는 전략계획서를 작성하여 근거자료와 함께 성과평가정보시스템(PEIS)에 등록을 당해연도의 6월 말까지 해야 한다. 점검주체는 과기부 주관으로 사업별 전략계획서의 적절성을 점검하고 전문성 확보를 위해 점검위원단을 구성하여 점검을 시행하며 점검위원단은 기술 분야별 전문가 및 전략계획서 기점검 참여자 등으로 구성된 외부 전문가로 구성된다.



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

1.1.4. 전략계획서 점검 항목

2024년도부터 전략계획서의 점검항목은 실제 중간평가의 주요 평가 기준으로 활용되는 성과 목표 및 지표를 중심으로 효율화하여 7개 항목에서 3개 항목으로 간소화되었다[표 3].

표 3. 전략계획서 점검기준 변경

항목	점검 기준('22년)	점검 기준('23년)
사업 개요	① 사업기획 및 연차별 추진내용의 반영 충실성 ② 위험요인 및 극복방안, 수혜자 제시 여부	성과 목표 ① (단계별) 성과목표의 타당성
성과 목표	③ 전략목표와 단계별 성과목표의 연계성 ④ 성과목표의 타당성 및 구체성	성과 지표 ② 성과목표와 지표 간 연계성
성과 지표	⑤ 성과목표와 성과지표 설정 연계성 ⑥ 목표치 및 측정 방법의 타당성	성과 지표 ③ 성과지표 측정산식 및 방법의 타당성
평가 계획	⑦ 사업 기간·단계 고려한 평가시기 설정 여부	

구체적으로 설명한다면 ①성과목표의 타당성은 단계별 사업 추진내용과 성과목표 간 연계성·구체성 등을 중심으로 검토하며 ②성과목표의 성과지표 간 연계성은 개별 성과지표 달성이 성과 목표 달성에 기여하는지 등을 중점적으로 검토한다. 그리고 ③성과지표 측정산식 및 방법의 타당성에 대해서는 성과지표 달성 여부 판단을 위한 산식과 방법이 구체적이고 타당성이 높은지에 대해서 검토한다.

1.1.5. 전략계획서 점검 결과의 활용

점검이 완료된 최종 전략계획서는 중간평가, 사업 종료 이후 성과관리·활용 계획, 효과성 분석 등을 수행할 때의 성과평가와 성과관리의 기준으로 활용되기 때문에 전략계획서의 수립이 잘못되면 사업의 성과평가에도 매우 민감하게 영향을 줄 수 있으므로 전략계획서의 수립은 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

1.2. 중간평가(자체평가)

부처가 추진하는 소관 국가연구개발사업의 효율적 관리와 성과 제고를 위해 사업추진 과정 및 관리체계, 목표달성

및 성과의 우수성, 환류계획 등을 평가하는 것을 중간평가라고 한다. 또한 현재 진행 중인 사업에 대한 평가이기 때문에 평가결과는 사업의 효율성 개선, 예산 배분·조정의 직접적인 기준이 된다.

※ (법적근거) 과학기술정보통신부 장관은 제1항에 따라 실시한 자체평가가 제6조 제1항의 사업 전략계획과 제2항의 자체평가 실시계획에 따라 실시되었는지 여부 및 결과의 적절성을 점검할 수 있다. (연구성과평가법 제7조 제4항)

1.2.1. 개요

사업수행부처가 소관 연구개발사업을 자율적으로 평가(자체평가)하고, 해당 결과를 과학기술정보통신부가 상위점검(적절성 점검)을 실시한다.

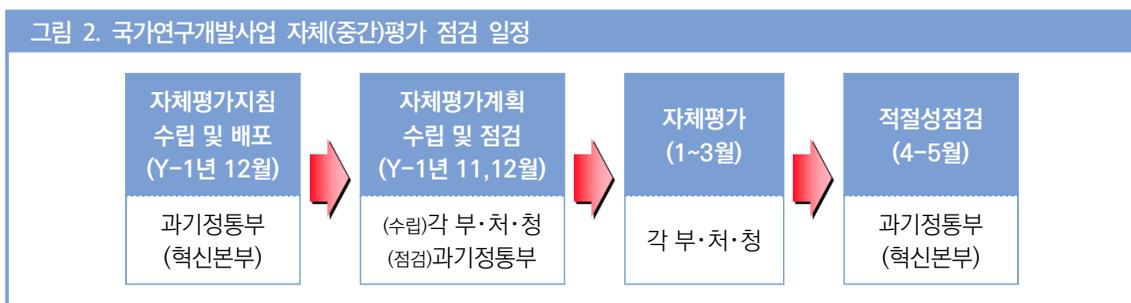
1.2.2. 중간평가 대상사업

전략계획서 수립·점검이 완료된 국가연구개발사업 중 전략계획서 내 기재한 평가계획 시기가 도래한 사업이 중간평가 대상사업이며, 평가 실익이 낮은 사업, 당해연도 종료, 정책적 목적에 따른 평가유예 사업 등은 대상사업에서 제외할 수도 있다. 사업별 평가대상 연도, 기간, 단계는 전략계획서 내 수립한 평가계획 내용을 기준으로 설정하며 평가는 세부사업에 대한 평가를 원칙으로 하며, 최근 3년간 연평균 예산이 30억 원 이하인 소액사업도 평가대상에 포함된다.

1.2.3. 중간평가 점검 절차

소관부처는 소관사업에 대해 자체평가(중간평가) 계획을 수립하여 제출하고(Y-1년 11월) 과기정통부는 이를 점검한다(Y-1년 12월). 주요 내용은 자체평가 계획상에서 자체평가위원회 구성, 운영, 절차, 일정, 평가위원교육 계획, 평가등급 배분 비율 등에 대하여 평가지침에 따라 적절하게 계획되어 있는지에 대한 점검을 실시한다. 그 다음으로 자체평가계획 점검이 완료되면 부처는 자체평가위원회 구성 후 자체평가를 실시하고, 결과와 관련자료를 성과평가정보시스템(PEIS)을 통해 과기정통부에 당해연도 3월 말까지 제출한다. 과기정통부는 부처로부터 받은 결과 등 자체평가 관련자료를 중심으로 자체평가 과정과 결과의 적절성이 있는지에 대한 점검을 실시한다. 다만, 상대평가 기준(하위 20% 이하 미흡 판정) 미준수 시에는 자체평가 점수 기준으로 하위 20% 이하 사업을 '부적절'로 부여한다.

그림 2. 국가연구개발사업 자체(중간)평가 점검 일정



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

1.2.4. 중간평가 평가 부문 및 지표 구성

부처는 자체평가계획에 근거하여 사업 특성에 따라 평가부문에 대하여 항목별 설정된 배점에 따라 정성평가를 실시하며, 평가 부문 및 지표는 사업 유형에 따라 일반사업과 시설장비 사업으로 나누어서 다르게 구성된다. 일반사업은 7개 평가지표, 시설장비사업은 3개 평가지표로 구성되며 각 100점 만점으로 배점된다[표 4].

표 4. 일반사업 및 시설장비사업의 자체평가 지표 및 배점

사업유형	평가부문	평가지표	배 점
일반 사업	추진과정	①투입, ②과제관리, ③위험관리, ④수혜자, ⑤환류 지표당 10점, 2개에서 4개까지 설정	20~40
	성과	⑥계획된 성과목표별 성과(실적) (우수성(질적 우수성), 핵심성(목표달성도), 전략계획 적절성·대표성과 설정 여부)	50~70
	환류계획	⑦성과분석과 환류계획의 구체성	10
시설장비 사업	사업관리	①사업의 계획적 추진 과정(50) ②사업추진의 모니터링 및 사업 개선(20)	70
	목표달성도	③계획된 성과목표 달성도 (전략계획서상 설정된 성과목표는 달성 여부 점검)	30

* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

등급점수 및 등급부여 기준을 고려하여 3등급으로 점수와 등급을 부여하고 등급은 자체평가계획에 제시한 평가등급 배분 비율을 준수해야 하며, 2024년 자체평가부터는 자체평가 지침에 부처별 성과평가·관리 담당자의 구체적 책임을 명시하고 자체평가위원회 역할 및 책임을 명확히 하여 책임성을 강화했다. 등급부여는 상대평가를 기준으로 하며, 우수등급은 상위 25% 이하, 미흡 등급은 하위 20% 이하로 설정해야 한다(우수: 25% 이하, 보통: 55% 내외, 미흡: 20% 이상).

1.2.5. 중간평가 적정성 점검(상위평가)

과기부(혁신본부)는 부처 단위로 자체평가의 적정성을 점검하고, 점검기준 미충족 시에는 부처 단위로 재평가 통보(1차 점검) 및 부적절 부여(2차 점검)를 한다. 1차 점검은 부처 단위로 상위 점검 순서에 따라 평가하며, 점검기준 미달 시 다음 단계에 대한 평가 없이 자체평가 재평가를 통보한다. 그리고 2차 점검은 원칙적으로 부처 단위로 평가하되, 상대평가 기준 미충족(미흡 20% 미만 등) 시에는 혁신본부가 직접 자체평가 점수 기준 하위 사업(20% 이상)에 대해서 사업 단위 부적절 판정을 부여한다.

1.2.6. 중간평가 결과활용

중간평가 결과에 따라 부처가 자율적으로 성과 부진 사업을 자체 구조조정하고, 우수 사업의 확대를 도모하기 위해, 자체평가 결과 '미흡'과 적정성 점검 '부적절' 사업은 예산삭감을 원칙으로 하고, 적정성 점검 '적절' 중 '우수'인 사업은 예산 증액 요소로 활용된다. 그리고 평가 과정 및 결과에서 제기된 사업 개선 의견에 대한 이행계획을 수립하고 사업 추진계획 및 전략계획서 등에 반영함으로써 사업개선에 도움을 줄 수 있다.

1.3. 특정평가

과학기술 정책 이슈 및 사업 간 연계·조정 등이 필요한 사업을 과기정통부가 직접 선정하고 심층평가를 실시하는 것을 특정평가라고 한다.

※ (법적근거) 과학기술정보통신부 장관은 다음 각호의 기준에 따라 정한 연구개발사업에 대하여 특정평가를 실시하여야 한다. (연구성과평가법 제8조 제1항)

1.3.1. 특정평가 개요

국가연구개발사업의 효과성 제고를 위해 심층평가가 필요한 사업 등을 과기정통부가 선정하여 전략적으로 특화된 맞춤형 평가를 실시하는데, 과학기술 정책 이슈 대응, 성과 제고가 필요한 사업, 성과목표·임무 달성을 위한 컨설팅이 필요한 사업, 사업 간 연계·조정 등이 필요한 사업들을 대상으로 한다.

1.3.2. 특정평가 트랙

특정평가는 평가 목적에 따라 5개 세부 평가 트랙으로 구분되며 크게 맞춤형 평가 트랙과 사업 조정형 평가 트랙으로 나뉜다. 또한 맞춤형 평가 트랙은 과정중심 평가, 사업개성 등을 주요 목적으로 하는 국가전략기술 트랙, 혁신·도전형 트랙, 이슈사업 심층분석 트랙으로 구성되며, 사업 조정형 평가 트랙은 환경변화에 따른 사업계획 변경 및 구조조정 등의 목적으로 하는 사업계획변경 트랙, 사업 재검토 트랙으로 구분된다[표 5].

표 5. 특정평가 평가트랙 구성

트랙	구분	목적	대상	평가 방법
맞춤형 평가	국가전략기술	최종 임무달성 지원	국가전략기술 프로젝트	단계별 마일스톤 기준 달성도 점검 등
	혁신·도전형	세계 최고의 연구성과 창출 지원	혁신·도전형 R&D 사업*	사업관리 체계 등 과정중심 평가
	이슈사업 심층분석	사업별 이슈 해결 및 성과 제고	이슈발생 사업(군)·분야	이슈해결 중심의 사업 개선사항 도출
사업 조정형 평가	사업계획변경	급격한 환경 변화의 반영과 예산활용의 효과성 제고	사업계획 변경 필요성이 제기된 예타사업	예비타당성 조사방식에 준하는 평가
	사업 재검토	사업의 일몰·조정 의견 제시	성과부진 및 낭비적 요소가 있는 사업	사업 지속여부 등 사업 타당성에 대한 평가

* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

* 과기부 장관과 중앙행정기관의 장이 혁신성·도전성 등을 고려하여 협의해서 지정한 연구개발사업

1.3.3. 특정평가 절차 및 평가방법

과기정통부(혁신본부)는 특정평가 대상사업을 수시로 선정하며 대상 사업(군)별 평가전략을 수립하여 평가하고 조치계획의 적정성 점검을 실시한다. 그리고 평가 트랙 및 평가 대상에 따라 평가 방향 및 방법을 차별화하여 평가하는데, 국가전략기술과 같은 사업은 마일스톤 달성도, 임무달성 가능성, 기술 포트폴리오 적절성 등을 평가하며 사업 재검토 트랙은 사업지속 여부, 구조조정 필요성 등을 중심으로 사업 타당성을 평가한다.

1.4. 성과관리·활용 계획

사업을 담당했던 소관부처는 종료된 사업을 대상으로 추진 결과에 대한 종합 분석을 실시하고 사업추진 성과의 관리 및 활용계획을 수립해야 하며 과기정통부는 적정하게 수립되었는지 상위점검을 실시하는 것을 성과관리·활용 계획이라고 한다.

※ (법적근거) 중앙행정기관의 장은 제1항에 따른 관리·활용계획과 제2항에 따른 효과성 분석 결과를 과학기술정보통신부장관에게 제출하여야 하며, 과학기술정보통신부장관은 이를 점검할 수 있다. (연구성과평가법 제19조 제3항)

1.4.1. 성과관리·활용 계획 개요

연구개발사업 수행 결과를 종합하고, 체계적 성과확산 활동을 추진하기 위해 성과관리·활용계획 수립 후 자체·상위점검을 추진한다.

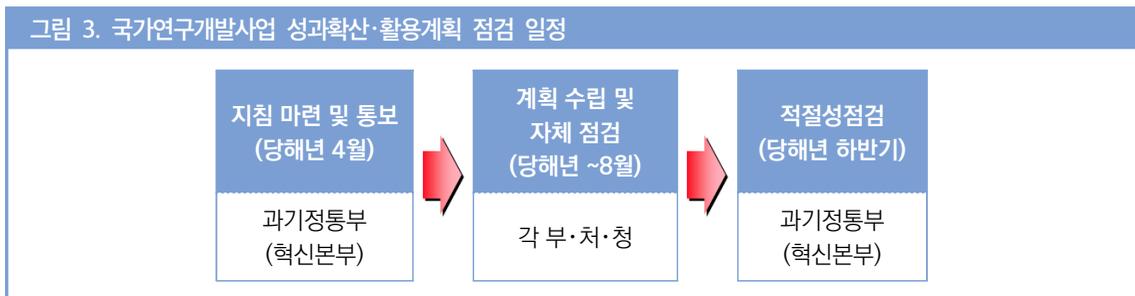
1.4.2. 성과관리·활용 계획 점검대상 사업

전년도 종료 국가연구개발사업이 기본적으로 대상사업이 되며, 출연연 지원금, 인건비, 운영비, 기획평가관리비 등 필요성이 현저히 낮은 사업은 제외한다. 그리고 과기정보통신부는 규모, 부처의 우선순위 등을 고려하여 선정할 부처별 중점 사업(20% 내외)에 대한 자체점검 결과를 상위 점검한다.

1.4.3. 성과관리·활용 계획 점검절차

과기정통부는 성과관리·활용계획 지침 및 통보는 해당연도 4월까지 해야 하며, 소관 부처는 계획을 수립하고 자체점검을 해당연도 8월까지 실시하고 결과를 과기정통부에 제출해야 한다. 부처로부터 받은 성과관리·활용계획 결과에 대해서는 과기정통부가 당해연도 하반기 중으로 상위점검을 실시한다. 점검항목은 사업의 성과 창출·확산 체계, 활용·확산 활동, 효과성 분석 계획 등으로 구성된다. 부처는 자체점검 시 체크리스트에 따라 성과관리·활용 계획이 적절하게 수립되어 있는지 확인하고, 보고서를 수정·보완하며, 상위점검(적절성점검) 대상 사업은 각 점검지표 및 점검 기준별로 컨설팅 관점에서 종합적으로 조망하고 점검하여 우수·보통 등급을 부여한다.

그림 3. 국가연구개발사업 성과확산·활용계획 점검 일정



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

1.5. 효과성 분석

사업을 담당했던 소관부처는 사업 종료 후 일정 기간에 성과관리·활용결과와 과학적·기술적·경제적·사회적 파급효과 등 효과성을 종합적으로 분석하며 과기정통부는 적절하게 분석되었는지 상위점검을 실시하는 것을 효과성 분석이라고 한다.

※ (법적근거) 중앙행정기관의 장은 제1항에 따른 관리·활용계획과 제2항에 따른 효과성 분석 결과를 과학기술정보통신부장관에게 제출하여야 하며, 과학기술정보통신부장관은 이를 점검할 수 있다. (연구성과평가법 제19조 제3항)

1.5.1. 효과성 분석 개요

성과관리·활용계획 수행에 대한 효과성을 분석하여 성과관리 역량 제고와 성과관리 우수 사례의 확산을 추진한다.

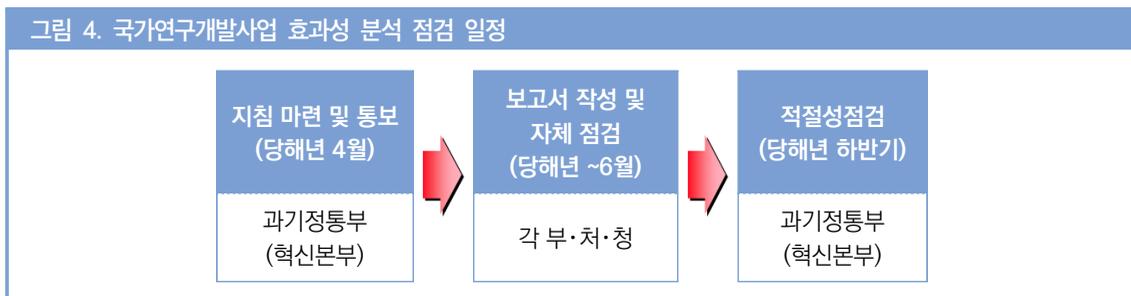
1.5.2. 효과성 분석 점검대상 사업

사업 종료 후 5년 이내 성과관리·활용계획 상 효과성 분석 예정 시기 도래 사업에 기본적으로 점검대상 사업이며, 제도 변화로 종료 시 성과관리·활용계획을 미수립한 사업은 사업 종료 후 5년 차에 실시한다. 그리고 과기정통통신부는 규모, 부처의 우선순위 등을 고려하여 선정한 부처별 중점 사업(20% 내외)에 대한 자체점검 결과를 상위 점검한다.

1.5.3. 효과성 분석 점검절차

과기정통부는 효과성 분석 지침 및 통보는 해당연도 4월까지 해야 하며, 소관 부처는 계획을 수립하고 자체점검을 해당연도 6월까지 실시하고 결과를 과기정통부에 제출해야 한다. 부처로부터 받은 효과성 분석 결과 중 일부사업에 대해서는 과기정통부가 당해연도 하반기 중으로 상위점검을 실시한다. 점검항목은 사업의 성과 창출·확산 체계, 활용·확산 활동, 효과성 분석 결과 등으로 구성된다. 부처는 자체점검 시 체크리스트에 따라 효과성 분석이 적절하게 수행되었는지 확인하고 보고서를 수정·보완하며, 상위점검(적절성점검) 대상 사업은 각 점검지표 및 점검 기준별로 컨설팅 관점에서 종합적으로 조망하고 점검하여 우수·보통 등급을 부여한다.

그림 4. 국가연구개발사업 효과성 분석 점검 일정



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

III. 일본의 국가연구개발사업의 성과평가

1. 일본의 국가연구개발사업 성과평가(경제산업성)

국가연구개발사업 성과평가는 제1기 과학기술 기본계획(1996년)에 연구개발기관 및 연구개발과정에 대한 평가를 근본적으로 수정하여 적절한 평가과정의 정비와 엄정한 평가 실현을 위해 연구개발평가의 도입과 정착화를 추진하였다. 최근 2022년에는 연구개발사업평가에 대하여 기술관점의 평가에서 가치평가로의 평가로의 전환, 평가체계의 중복해소·연계강화의 필요성 강조, 평가에 따른 예산환류의 필요성을 강조하는 기조로 바뀌었다. 평가의 종류는 프로그램 평가, 프로젝트 평가, 개별사업의 평가, 추적조사·추적평가 등이 있다. 단, 본 장에서는 개별사업의 평가를 뺀 나머지 평가에 관해서 기술한다.

1.1. 프로그램 평가

프로그램 평가는 평가항목·평가기준에 따라서 요소기술의 발굴·육성, 연구개발·실증, 사회구현 달성을 위한 노력에 대한 타당성 확인 및 프로그램 소속 프로젝트에 대한 상대평가를 실시한다. 이를 통하여 프로그램을 구성하는 프로젝트의 신설 또는 중지 등의 평가결과에 따라 보다 실효성이 높은 프로그램이 될 수 있도록 반영이 된다.

1.1.1. 프로그램 평가의 항목

여기서 말하는 프로그램이란 목표하는 미래상(비전 및 목표)을 실현하기위한 연구개발의 범위를 말하는데 프로그램 평가는 정부가 정한 정책·시책 등의 기획하여 수립하는 것뿐만 아니라 효과적이고 효율적인 추진에 활용하기 위해 실시한다. 평가 항목은 ①(정책·시책과의 부합성)정부가 정한 정책·시책이 목표로 하는 미래상과 명확하게 연관이 있는가?, ②(본프로그램의 의의)외부환경(국내외 기술동향 및 시장동향, 제도환경, 정책동향 등)의 상황이나 변화를 바탕으로 사회과제 해결에 공헌할 수 있는가?, ③(프로젝트와의 연계)프로그램을 구성하는 프로젝트와의 연계가 적절하게 설계되어 있고, 상호 소통하는 구조로 정비되어 있는가?를 중심으로 평가한다.

1.2. 프로젝트 평가

연구개발의 특성에 따른 예산, 인재 등의 자원배분의 반영, 연구개발의 질적 향상을 위한 개선을 위해 프로젝트/연구자금제도사업의 사전평가, 중간평가, 종료시 평가를 「표준적 평가항목·평가기준¹⁾」에 따라 실시한다.

1.2.1. 사전평가

사전평가는 상위사업과의 관련에 기반하여 실시의 필요성, 목적·계획·실시체계·운영관리·비용대효과 등의

1) 일본 경제산업성 기술환경국 연구개발과(https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/b00/METI_Evaluation_Criteria.pdf)

타당성, 연구관리의 구성 타당성을 파악하고 예산 등의 자원배분의 의사결정을 하기 위해 실시한다. 실시시기는 연구자금제도사업(국가연구개발사업)의 초년도 예산요구 전에 실시하는 것이 원칙이다.

1.2.2. 중간평가

중간평가는 정세의 변화, 진행 현황 등을 파악하여 본 사업에 대한 중단·중지를 포함한 계획변경 타당성 여부를 확인, 예산 등의 자원배분에 대한 의사결정을 위해 실시한다. 실시시기는 실시기간이 5년 이상 혹은 실시기간이 정해지지 않은 프로젝트(계속프로젝트) 및 연구자금제도사업에 있어서는 3년에 한 번씩 평가한다.

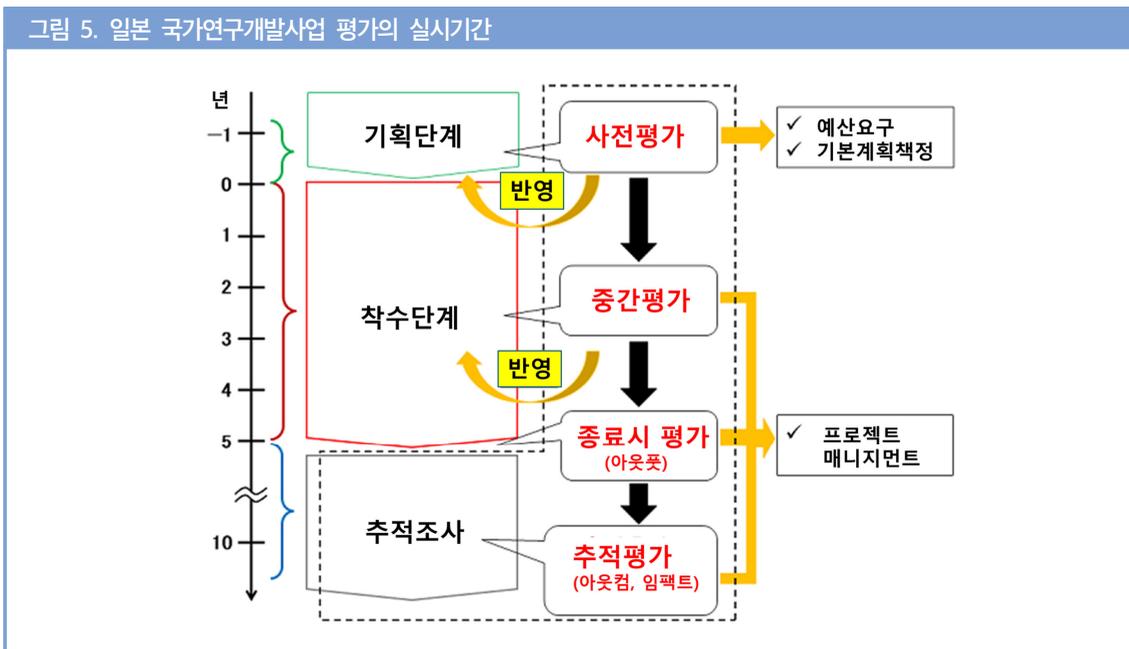
1.2.3. 종료시 평가

종료시 평가는 목표 달성현황 및 성과, 목표설정 및 공정표의 타당성 등을 파악하고 후속 사업 기획에 활용하기 위해, 그리고 더 나아가 최종적인 목표인 사회 구현을 위한 추진 방향에 대한 제안을 얻기 위해 종료시 평가를 실시한다. 원칙적으로 프로젝트/연구자금제도사업(국가연구개발사업)이 종료시에 실시한다.

1.3. 추적조사·추적평가

종료된 연구개발사업을 대상으로 종료 후 수년도에 따른 연구개발활동 및 연구개발성과가 산업, 사회에 미치는 파급효과 등에 대해서 필요에 따라 조사하는 것이 추적조사이며, 추적평가는 종료된 연구개발사업의 사회실장(사회구현)의 달성현황과 그 성공·실패요인 등을 파악하고 검증하여 그 결과를 연구개발사업의 기획에 반영하고 평가제도 개선에 활용하기 위해, 해당 목적에 부합하는 사업을 선발하여 평가한다.

그림 5. 일본 국가연구개발사업 평가의 실시시간



* 출처: NEDO

IV. 국가연구개발사업의 성과평가 제도의 개선안 - 산업부 R&D를 중심으로

1. 정책환경의 변화

우리나라의 현행 국가연구개발사업의 현행 평가제도는 연구의 질 제고, 사업 및 정책의 효과성, 책임성 제고를 위한 다양한 평가유형 범위를 제공하고 있다. 즉, 「연구개발성과평가법」(05)을 통해 부처 자체평가, 혁신본부 상위평가 체계로 변환하면서 부처의 책임부여를 강화하였으며 성과 중심으로 평가하고 연구성과를 효율적으로 관리·활용함으로써 연구개발투자의 효과성 및 책임성을 향상시키는 것을 목적으로 규정함으로써 연구개발사업의 평가는 종합적 사업개선에 대한 사항을 포괄하는 성격을 띠게 되었다. 그러나 최근에는 관리적 평가체계에서 벗어나 도전적 평가 체제로의 전환에 대한 목소리가 높아지고 있다. 특히, 저성장의 고착화를 타파하기 위하여 신시장과 일자리를 창출할 수 있는 도전적·혁신적 기술이 창출되는 First-Mover형 R&D 시스템으로의 전환, 기존 공급자 중심의 평가에서, 전문성을 가진 연구공동체 중심의 자기규제, 융합과 협력의 개방형 혁신 평가 시스템으로의 전환의 요구가 높다. 또한 양적 투입의 한계로 인하여 정부 R&D 시스템의 고효율화, 질적 성과에 대한 요구 또한 증대되고 있다.

2. 국가연구개발사업 성과평가 현황 및 주요 이슈

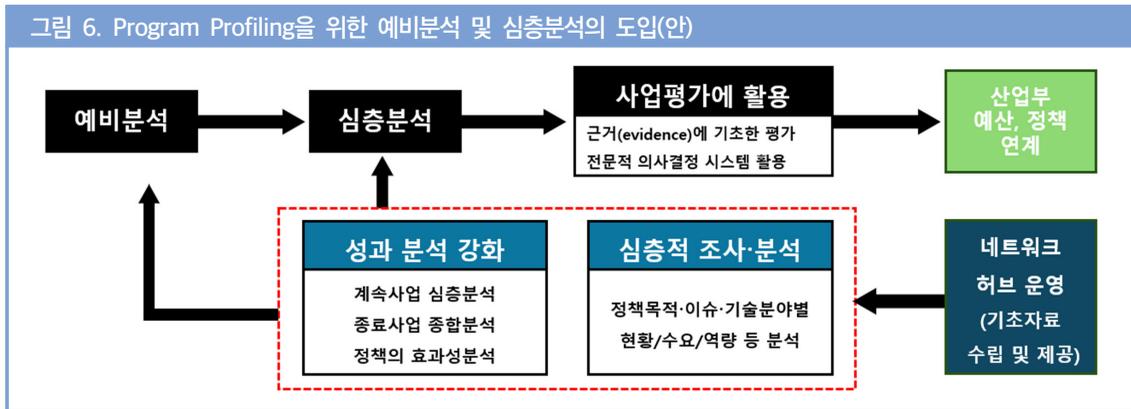
자체평가 지침준수 및 평가등급 도출 중심의 일률적인 평가로 부처의 능동적 성과관리 및 사업개선 노력에 한계가 존재한다. 특히 공정성을 지나치게 강조하여 사업수행 주체 및 평가위원의 전문성 활용에 한계가 있으며 짧은 평가기관 및 평가지원 인력·비용 한계 등이 이슈화되고 있으며 자체평가 개편을 통해 스스로 주도하고 책임지는 진정한 자율평가 실현과 적극적인 사업개선에 대한 노력이 필요하다. 사업부처 내 이해관계자 간 사업평가 개념 이해도 간극, 불충분한 정보분석 및 평가 역량 한계로 높은 행정비용에도 불구하고 평가 실효성에 대한 의구심이 많이 나오고 있으며 이와 같은 비효율적인 성과평가에 대한 개선의 노력이 필요한 시점이다.

3. 국가연구개발사업 개선 방향

산업부 내 R&D 자체평가를 법에 근거한 행정절차가 아닌 R&D 사업의 종합적인 개선을 위한 정책적 도구로서 적극 활용하기 위해서는 다음과 같은 개선이 요구된다. 첫째, 전문성·신뢰성 기반의 자율평가를 위하여 산업부 내 자체 심층분석 제도를 도입하고, 프로파일링 기반 심층분석 체계를 구축한다. 둘째, 과정 중심의 사업 개선 평가를 통하여 시장 중심의 우수성과 창출 및 경제·산업적 파급효과 확대에 기여하는 평가체계를 구축한다. 마지막으로 사업의 성과평가 정보의 체계적 관리·활용, 평가 참여 주체의 역량강화 등 평가체계의 신뢰성 강화를 위한 발전적 평가기반을 고도화해야 한다.

3.1. 근거기반 분석·평가 강화

평가의 객관성 및 전문성 제고를 위한 근거기반 평가체계 구축을 위해 기초자료의 수집·분석을 고도화하고 예비분석 및 심층분석을 도입하여 Program Profiling 기반의 R&D 사업평가체계를 마련한다. 여기서 말하는 Program Profiling이란 관련 연구개발사업 관련 정보수집을 통해 특성 및 이슈를 분석하는 방법론을 의미한다. 또한 시스템 및 전문가 네트워크를 통하여 수집·가공하여 도출된 정보를 예비·심층 분석에 활용할 수 있도록 체계적으로 제공하기 위해 NTIS 및 산업부 기존 시스템을 활용·고도화하여 투입 자원(예산, 인력 등), 산출 자원(특허, 논문 등), 사업체계, 대외여건 등을 정보화하고 정책목적, 이슈, 기술분야 등에 따른 전문가 네트워크를 구축하고 시스템을 통해 수집된 자료와 연계하여 상시 정보 분석 체계를 운영해야 한다(그림 6).



* 출처: 산업통상자원 R&D 전략기획단 내부보고서, 저자 재가공

3.2. 시장 중심 성과지표 최적화

시장 중심 성과의 창출을 견인하기 위하여 산업부 R&D사업의 특성에 맞는 성과지표를 개발하는 것이 시급하다. 특히 기술성과 정책성, 경제성 측면에서 사업의 기획단계에서 종료단계까지 일관성 있는 분야별(유형별) 성과지표 발굴은 물론 성과지표의 체계화와 성과지표의 풀(Pool)을 확장하기 위한 노력이 필요하다. 그리고 시장 중심 우수성과의 기준 확립 등 산업기술 R&D 관점에서 질 중심 성과지표 설정을 지속적으로 확대해야 하고 사업화 목적 사업의 경우 목적 달성 및 결과의 현장 적용 여부, Scale-up 관련 지표, 투자 유치 등 사업화 관련 지표 개발 및 설정도 지속적으로 확대해야 한다. 또한 특허의 단순 양적 건수·등급과 매출액 등 일률적 성과지표에서 사업의 특성을 반영하는 적절한 대표적 시장 성과, 몇 개의 특정 지표로 설명이 어려운 사업은 사업 특성에 적절한 정성지표 및 복합지표를 개발하기 위한 전문가 위원회 등의 상시적인 운용이 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 평가기반 고도화를 위한 평가위원 책임평가제도 도입

책임평가위원 지정 및 임기제 운용으로 일정기간 동안 지속적으로 국가연구개발사업 성과평가에 참여함으로써 평가위원의 전문성과 책임성을 높이기 위한 노력이 필요하다. 또한 평가위원 위촉시 전문성을 우선적으로

고려하고 평가위원을 위한 성과평가 교육은 물론 평가를 받는 피평가기관에 대한 성과보고서 작성 교육에 대해서 연중 수시로 체계화된 교육과정을 교육 전문기관에 위탁하여 교육훈련 실시를 통한 효율적이고 명확한 평가기반 고도화가 필요하다.

V. 국가연구개발사업 성과평가의 융합연구 적용과 성과평가 방향

1. 융합연구에 대한 성과평가 방향성

1.1. 융합연구의 정의

2020년대 들어서 더욱더 심각해지고 있는 글로벌 문제·국가적 위기(기후변화, 탄소중립, 신종 감염병, 생물다양성 소실, 자연재해, 저출생 및 초고령사회 등)는 과학기술의 단일 분야로는 해결하기 어려운 복합적인 특성이 있다. 이러한 복합적인 문제들을 다각도로 조명하고 상호 연결된 요소들을 이해함으로써 새로운 해결 방안을 모색하기 위해 최근 연구개발 분야에서 융합연구에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 정부는 2023년 12월“제4차 융합연구개발 활성화 기본계획”을 수립함으로써 글로벌 문제와 국가적 위기를 해결의 해법을 제시하기 위해 융합연구의 활성화를 위한 계획을 제시하였다.

【제4차 융합연구개발 활성화 기본계획 상 “융합연구의 정의”】

- 기존 과학기술만으로는 해결할 수 없는 복합문제*에 해법을 제시하고, 미래기술개발에 도전하는 범(汎)학제형 협력연구로 정의
 - * 해결이 어려운 문제(Wicked Problems), 사회적 도전과제(Societal Challenges)
- 융합연구를 다학제 연구, 학제 간 연구, 초학제 연구, 변혁적 연구로 4대 유형으로 세분화
 - 다학제 연구: 다른 학문 분야가 하나의 문제에 대해 병렬적으로 연구
 - 학제 간 연구: 공통 목표를 달성하기 위해 주제 경계를 넘나드는 방식으로 관련되지 않은 여러 학문 분야를 포함(예: 신경과학(생물학, 물리학, 공학))
 - 초학제 연구: 인문사회 및 비학계의 적극적 참여를 통해 새로운 지식 창출, 공통 목표 달성(예: 기후변화(농업, 기후과학, 수문학, 생물다양성, 역사, 사회), 모빌리티(공학, 보건의로, 사회심리학, 법학))
 - 변혁적 연구: 과학, 공학 또는 교육에서 중요한 기존 개념에 대한 이해를 근본적으로 전환, 새로운 패러다임·분야 창조(예: 인간 게놈지도, 탄소섬유, 레이저, 딥러닝, 유전자 편집)

1.2. 융합연구의 국내외 사례

제4차 융합연구개발 활성화 기본계획에서 제시된 미래개척 융합분야는 3개 부문, 12개 분야로 도출하였다. 3개 부문은 ①자유롭고 상생하는 인류, ②한계와 제약이 없는 스마트 사회, ③지속 가능한 지구로 그룹을 나누었으며 부문별로 4개의 미래개척 융합분야로 구성되었으며, [표 6]은 12개 분야 및 개념에 대해서 설명한다. 또한 일본의 문부과학성 산하 독립행정법인 과학기술진흥기구(JSPS)의 연구개발전략센터(CRDS)에서는 미래 주목받을 수 있는 12대 뿔분야의 융합영역 및 횡단 테마를 선정 발표하였는데 자세한 내용은 [표 7]에 나타내었다.

표 6. 미래 시나리오로부터 도출한 분야 및 개념

	미래개척 융합분야	개 념
I. 자유롭고 상생하는 인류	① 건강수명 증진 플랫폼	인간의 신체기능을 확장하거나 인공지능에 인간적 요소를 도입하여, 인간의 진화와 신체적 건강을 이루는 제반 기술 분야
	② 디지털 정신건강 통합 솔루션	정신의학적 장애·질병을 예방, 치료하기 위하여 근거 기반의 치료적 중재를 제공하는 소프트웨어 및 기기 개발을 위한 기술 분야
	③ 복합적 인류생존 요소 확보	인류의 생존을 위한 의식주 기본권 보장과 인류 지속가능성 확보를 위한 복합적 기술 분야
	④ 인구 소멸·변화 대응	인구구조 변화 문제의 해결을 위해 사회구성원 간 건강한 관계 구축과 개인과 삶의 질 향상을 돕는 기술 분야
II. 한계와 제약이 없는 스마트 사회	⑤ 미래사회 주체와 공존	물리 데이터가 상시 연동되어 미래사회주체(인간-기계-디지털휴먼)가 언제 어디서든 연결 및 공존하는 사회를 구현하는 기술 분야
	⑥ 시·공간의 확장과 연결	가상공간을 확장 구축하여 현실을 대체하거나 시뮬레이션 기술로 사회이슈를 탐지·해결하는 등 사회의 효율적 운영 관련 기술 분야
	⑦ 사회 안전망의 자율 진화	다양한 미래 불확실성 및 위험인자로부터 국민을 보호하고, 최소한의 사회 시스템 운영을 보장하는 보안·안정 관련 기술 분야
	⑧ 미래형 모빌리티 시스템	이동의 편리성과 환경 영향 최소화를 모두 달성하기 위한 장기적 관점의 미래형 모빌리티 및 시스템 관련 기술 분야
III. 지속가능한 지구	⑨ 기후변화 대응	자연생태계에 나타나는 장기적인 변화를 파악하기 위해 기후변화의 원인과 현상을 조사·분석하여 기후변화를 감시·예측 및 대응하는 기술 분야
	⑩ 청정에너지 융합	화석연료 에너지난 해결과 탄소중립을 달성하기 위해 기존 신에너지와 재생에너지 기술을 융합하여 최대 효과의 청정에너지를 창출하는 기술 분야
	⑪ 지구환경 회복 및 치유	지구 환경을 정화·복원하기 위해 토양·수질 환경·산림 분야의 오염 원인 및 유해 물질을 제거·관리하는 기술
	⑫ 극한 미지영역 개척 (우주/심해/지하)	지구 내 생활 공간 부족 및 자원 고갈 문제를 해결하고자 우주·심해·극지 등 미지의 극한 공간을 개척하는 데 필요한 기술을 개발

* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

표 7. 일본 CRDS가 주목하는 12대 뿔분야 융합영역·횡단테마

융합영역·횡단 테마	융합을 일으키기 위해 넘어야 하는 전문 분야(협업이 필요한 분야)	사회구현을 위해 함께 행동해야 하는 조직
① 복잡사회에 대한 인간의 의사결정 정보과학기술	시스템·정보과학, 사회학, 행동경제학, 정치학, 심리학	
② 데이터 수집·활용을 통한 사회 문제해결을 위한 연구개발 1. 에너지 네트워크와 IoT 2. 데이터 통합 생명·의학에 의한 개인 예방의료 실현	1. 시스템·정보과학, 재료공학, 건축학, 전기공학, 수학, 경제학, 사회학, 심리학, 의학, 환경학 2. 생명과학, 의과학, 시스템·정보과학, 의료경제학, 병원·의료관리학	
③ 사이버피지컬시스템(디지털트윈)을 이용한 차세대 설계·제조기술	시스템·정보과학, 기계공학, 물리공학, 재료공학, 화학공학, 금속공학, 유체역학, 전기공학, 계측과학	
④ 로보틱스	로봇·제어공학, 기계공학, 시스템·정보과학, 계측과학, 재료공학, 심리학	기업가·기업·사업자, 법률가, 금융기관, 의료기관,
⑤ 데이터 구동형 연구개발	시스템·정보과학, 생명과학, 재료공학 등	농가·농업법인,
⑥ 생명현상을 조사하는 혁신 계측기술	계측·분석과학, 시스템·정보과학, 생명과학	행정기관, NPO·NGO,
⑦ 바이오생산 시스템	생명과학, 시스템·정보과학, 농학, 식물학, 약학, 재료과학	학교·교육자, 디자이너·아티스트,
⑧ 물·에너지·식품 문제의 통합적 해결을 위한 접근 방식	환경학, 에너지공학, 공학, 농학, 생태학, 사회과학, 법학, 경제학, 시스템·정보과학	시민 등
⑨ 물질·자원환경 시스템	화학, 공학, 농학, 환경학, 생태학, 재료과학	
⑩ 분리공학	화학공학, 금속공학, 생물공학, 기계공학, 유체역학, 에너지공학	
⑪ 바이오재료공학~생체와 재료의 상호작용을 제어하는 연구분야	생명과학, 의과학·임상의학, 재료과학, 기계공학	
⑫ 연구시스템·Lab 혁신, R&D 인프라·리소스 플랫폼	시스템·정보과학, 로봇공학, 경영학	

* 출처: Beyond Disciplines(2018)

1.3. 우리나라 융합연구 동향(NTIS 통계를 중심으로)

우리나라 국가연구개발 중 융합연구의 동향을 살펴보기 위해 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)의 융합연구관련 정부투자연구비와 융합연구 과제 수 등 최근 5개년(2018년~2022년) 동향을 살펴보았다. 여기서 통계적인 데이터를 얻기 위한 융합연구의 정의는 연구개발과제 당 선택된 3개의 분류 중 2개 이상의 다른 대분류로 분류된 경우를 융합연구로 정의한다.

1.3.1. 융합연구에 대한 정부투자연구비와 과제 수

융합연구와 전체연구에 대한 정부투자연구비와 융합연구비 비율을 보면 2018년부터 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 정부 총연구개발비가 5개년간 연평균 성장률(compound annual growth rate; CAGR)이 약 7.7%인 것에 비해 융합연구개발비는 5개년간 연평균 성장률이 약 14%로 융합연구에 대한 폭발적인 성장세를 알 수 있다. 또한 전체연구개발비에서 차지하는 융합연구에 대한 포션이 2018년부터 점점 늘어나는 경향(9.18%(18년)→12.22%(22년))으로 보아 향후 융합연구가 더욱더 늘어날 것으로 예상된다[표 8a]. 또한,

융합연구 과제수 역시 전년대비 증감율은 전체적으로 증가하는 것으로 보이며, 5년간 연평균 증가율(CAGR)은 약 7%이다[표 8b].

표 8. 융합연구에 대한 정부투자연구비 및 과제 수

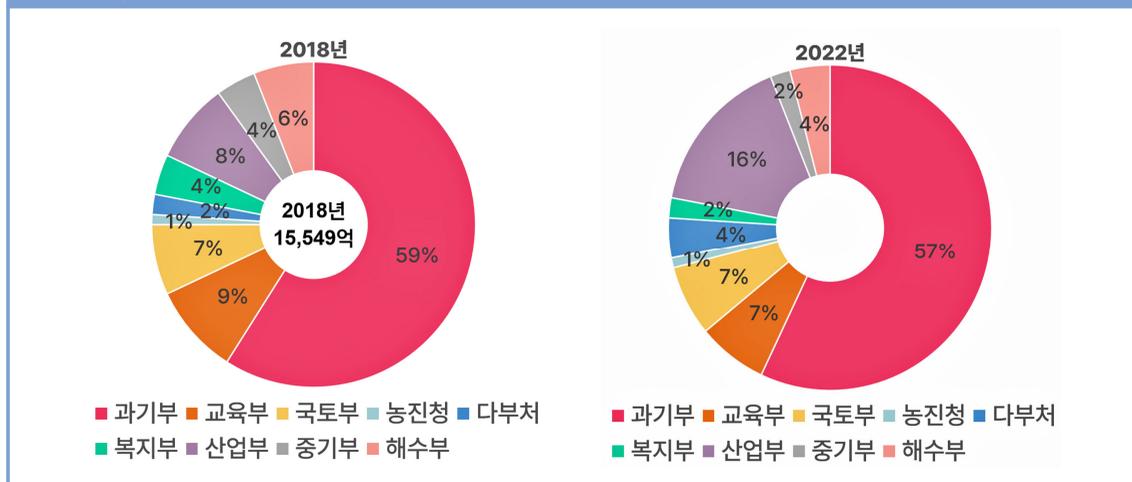
연도	(a) 국가 R&D 연구비(억원)		(b) 국가 R&D 과제수(건)	
	정부투자연구비 (융합연구/전체연구)	융합연구비 비율	과제수 (융합과제)	전년대비 증감률
2018	18,155/197,766	9.18%	8,043	0%
2019	20,073/205,803	9.75%	9,475	17.8%
2020	23,493/238,803	9.84%	9,782	3.24%
2021	29,796/265,791	11.21%	10,925	11.68%
2022	35,057/286,782	12.22%	11,265	3.11%

* 출처: NTIS(국가과학기술지식정보서비스) 통계 재가공

1.3.2. 부처별 융합연구에 대한 정부투자연구비

2018년과 2022년의 융합연구에 대한 부처별 정부투자연구비의 비율을 보면 과기부가 융합연구의 50% 이상을 차지하고 있다(그림 7). 그리고 교육부, 국교부, 산업부, 해수부를 중심으로 융합연구 정부투자연구비가 많이 투입되고 있음을 할 수 있다. 2018년과 비교하여 2022년에는 산업부와 다부처 사업에 대한 융합연구 정부투자비가 많이 증가한 것도 알 수 있다. (산업부: 8%(18년)→16%(22년)), 다부처: 2%(18년)→4%(22년)). 주목할 만한 점은 융합연구의 70% 이상이 과기부와 산업부를 중심으로 이루어지고 있다는 점이다.

그림 7. 융합연구에 대한 부처별 정부투자연구 구성비



* 출처: NTIS(국가과학기술지식정보서비스) 통계 재가공

1.3.3. 분야별 융합연구 현황

연구분야별 융합연구 과제수의 현황(5개년: 2018년~2022년)을 보면 보건의료, 생명과학 등 바이오 분야가 압도적으로 높은 비율을 차지하고 있다. 또한, 기계/재료, 전기/전자, 정보/통신 등 차세대 미래첨단 전략산업과 밀접하게 관련이 높은 분야에서 융합연구가 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다[그림 8].



* 출처: NTIS(국가과학기술지식정보서비스) 통계 재가공

1.4. 융합에 특화된 평가체계 확립

다양한 분야의 연구가 활발히 진행되고 있는 현대 사회에서 여러 연구 분야의 융합을 통해 새로운 연구 분야가 개척되는 경우가 빈번하게 일어나고 있다. 하지만 기존 연구 분야의 틀을 기반으로 구축된 평가 기준과 평가 체계는 새로운 융합연구분야(신흥·학제분야)의 연구 과제를 기존 연구 분야 내의 연구 과제에 비해 과도하게 낮게 평가할 가능성이 있다. 융합 연구 중에는 새로운 분야라는 특성상, 연구 성과의 가치 판단 기준이 명확하지 않거나, 산업계 등의 요구가 아직 명확하게 드러나지 않은 예도 있으므로 평가에 있어서는 새로운 연구 분야의 싹을 꺾지 않도록 신중하게 평가해야 한다.

1.5. 융합연구 성과평가의 지향점

기존 연구 분야의 틀에서 벗어나 융합 연구의 특성을 반영한 평가 방식이 필요하다. 따라서 융합연구의 독창성, 학제성, 사회적 영향력, 산업계 수요 대응도, 연구 커뮤니티 형성 기여도 등 평가기준 및 평가지표를 다양화해야 한다. 그리고 다양한 분야의 전문가로 구성된 평가위원회를 구성하는 등 융합연구 전문가의 참여가 확대되어야 한다. 또한 융합 연구의 특성상 단기간에 성과를 기대하기 어려울 수 있으므로 장기적인 측면에서의 평가가 이루어져야 한다.

1.6. 융합연구 성과평가의 중요성

융합연구 성과평가는 단순히 연구성과를 판단하는 것이 아니라, 새로운 연구 분야의 발전을 촉진하고 사회적 가치를 창출하는 데 중요한 역할을 한다. 따라서 융합연구의 특성을 반영한 평가 방식을 마련하고, 새로운 융합연구의 성과평가에 대한 다양한 지향점의 반영 등을 통해 융합연구가 촉진될 수 있도록 성과평가 측면에서의 대응책 마련도 서둘러야 할 것이다.

저자소개 이지옥 (Jee-Wook Lee)

• 학력

오사카대학교 재료공학 박사
오사카대학교 재료공학 석사
국민대학교 금속재료공학부 학사

• 경력

現) 산업통상자원 R&D 전략기획단 수석전문위원
前) 국민대학교 전임연구교수
前) 경희대학교 의과대학 수석연구원
前) 오사카대학교 특임연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 과학기술정보통신부, 2023, 2024년도 국가연구개발사업 성과평가 실시계획안
- 2) 과학기술정보통신부, 2023, 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획(안)
- 3) 한국과학기술기획평가원, 2024, 2023년 성과평가 정책수립·운영 및 성과평가 실시 최종보고서
- 4) 홍형득, 2018, 국가연구개발사업 평가체계 비교분석에 관한 연구, 한국공공관리학회, 한국공공관리학보 제32권 제2호: 159-182

〈국외문헌〉

- 1) 経済産業省, 2022, 経済産業省研究開発評価指針 令和4年10月
- 2) 経済産業省産業技術環境局, 2022, 経済産業省研究開発評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準 令和4年12月
- 3) Beyond Disciplines, 2018, JST/CRDSが注目する12の異分野融合領域・横断テーマCRDS-FY2018-RR-02

〈기타자료〉

- 1) NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構): <https://www.nedo.go.jp/>
- 2) NTIS(국가과학기술지식정보서비스): <https://www.ntis.go.kr/ThMain.do>



융합연구리뷰

Convergence Research Review



이 보고서는 2024년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 작성되었음.

(2023M3C1A604340012)



융합연구리뷰

Convergence Research Review