

NIGT BRIEF

영국 ARIA - 'Forecasting Tipping Points' 추진 현황 및 시사점

전은진 / 하수진 / 조민선 / 오지현





전은진 / 제도혁신센터
조민선 / 제도혁신센터

하수진 / 제도혁신센터
오지현 / 제도혁신센터

하이라이트

- 영국은 ‘첨단연구혁신국(Advanced Research and Invention Agency; ARIA)’은 최근 기후변화 적응 R&D에 해당하는 ‘임계점 예측(Forecasting Tipping Points)’ 프로그램의 세부 내용을 공개(‘24.9)
- 다소의 논란에도 불구하고 그린란드 빙하의 융해와 아한대 환류가 야기하는 변화의 조기 감지 및 예보 시스템 개발로 연구개발 목적을 특정
 - 아한대 환류와 AMOC과의 연계에 대해서는 아직 학계 · 연구계에서 확신이 없는 상태임에도 불구하고, 장기 · 대규모 피해를 사전에 방지하거나 혹은 미증유의 피해에 대응할 수 있는 시간 확보를 위해 과감한 시도를 결정
- 다양한 학제간 협력을 통해 과감한 시도를 함으로서 광학, 전자공학, AI, 우주기술 등 연관 분야의 혁신을 견인하는 부수적 효과를 함께 도모하고, 젊은 혁신가 등을 포괄하고 다양한 연구기관/타국과의 교류를 강화함으로써 장기적인 차세대 연구자 육성 기능도 함께 수행
- 우리나라에서도 기후변화 적응 R&D를 혁신도전형 R&D 사업 형태로 추진할 경우보다 최대한 다양한 분야와의 긍정적인 연쇄효과를 창출할 수 있는 방향으로 기획할 필요
- 국제협력 측면에서 볼 때 우리나라에서도 유사한 맥락으로 북극권-중위도 간 상호작용에 관한 연구를 진행하고 있으며 영국 ARIA 프로그램에서도 신진 연구자 역량 강화를 위한 국제교류 추진을 언급하고 있으므로, 동 연구 영역을 중심으로 호혜적 협력 관계 구축을 검토할 여지가 있음

키워드

- ARIA, 북극권, 빙상, 혁신도전형 R&D, 기후변화 적응

분석 개요

영국 첨단연구혁신국(Advanced Research and Invention Agency) 출범 배경

- 영국은 2010년 이후 과학기술 분야에서의 경쟁력 쇠퇴 및 위상 저하 문제를 돌파하기 위하여, DARPA 모델을 벤치마킹한 ‘첨단연구혁신국(Advanced Research and Invention Agency; ARIA) 설립¹⁾을 선언(‘21)
 - 과학혁신기술부 산하 기관이나 독립성을 가진 연구관리 전문기관으로, 영국의 대표적인 연구관리 전문기관인 영국연구혁신기구(UKRI)과 차별되는 역할을 부여
 - * 미국 DARPA 모델을 벤치마킹하여 설립된 기관 성격상 High Risk-High Reward형 과학연구 지원에 집중하고

¹⁾ <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-launch-new-research-agency-to-support-high-risk-high-reward-science>

있으며, 근거법(ARIA Act 2022) 상으로 도전적 연구개발 · 활용 및 실패에 관한 관용을 명시²⁾

- 새로운 발견 · 기술로 이어지는 전환적 발상들을 빠르게 식별하여 지원할 수 있도록 세계 최고 수준의 전도유명한 과학자들을 PD(Programme Director)로 임명하여 최대한의 자율성을 부여
- * 연구 주제에 대한 심도깊은 탐색 및 자금 공모 기획, 피드백에 대한 직접 요청, 프로젝트 공모 및 선정, 명확한 평가 기준에 따른 외부 전문가들의 검토 등을 추진할 권한을 보유
- 운영 방향성 및 근거법 제정 등 장기간의 설립 준비 단계를 거쳐 2023년 공식적으로 출범하였으며, ARIA-PD간 협력을 통한 미래비전 도출 단계를 거쳐 현재까지 4개의 프로그램 영역을 구성한 상태³⁾
 - (합성 식물(Synthetic Plants)) 합성생물학과 식물학의 전문성을 집대성하여 미래 변화에도 영향 없는 농업 시스템 확립 및 신세대 주요 작물로의 새로운 경로 모색(예산 지원 규모 : 총 6,240만 파운드)
 - (임계점 예측(Forecasting Tipping Points)) 글로벌 회복력 확보 및 선제적 기후적응에 필요한 정보를 확보하기 위해 임계점(tipping points)에 초점을 맞춘 조기 경보 시스템 창설(예산 지원 규모 : 총 8,100만 파운드)
 - (인간에 근접한 로봇의 기능(Robot Dexterity)) 고령화 시대에 대비하여 로봇 기능을 변형하고 인간 생산성의 수준을 상승(예산 지원 규모 : 총 5,700만 파운드)
 - (안전조치된 AI(Safeguarded AI) 위협이 최소화된 상태에서 첨단 AI 시스템의 경제 · 사회적 혜택을 최대한 향유할 수 있도록 AI 안전성 강화(예산 지원 규모 : 총 5,900만 파운드)
- 최근 기후변화 적응 R&D로 분류가능한 '임계점 예측' 프로그램에서 신규 프로젝트 공모⁴⁾에 착수하면서 구체적인 연구내용이 공표('24.9)된 바, 본 연구에서는 해당 프로그램을 분석하여 정책적인 시사점을 제시하고자 함
 - '임계점 예측'은 그린란드 빙상 및 아한대 환류(Subpolar gyre)*에서 발생하는 변화들이 지구 기후 시스템의 평형을 결정적으로 이동시킬 변곡점이 될 가능성에 주목하여, 이에 대한 조기 감지 및 대응 방안 모색을 목적으로 추진
 - 상기 프로그램의 추진 의미를 영국의 대표적인 북극권 연구 프로그램과 연계하여 정책적 함의를 도출하고, 이에 대한 우리나라의 기후변화 적응 R&D에 대한 시사점을 제시

기후변화 적응 이슈 관련 북극권 연구와 관련된 영국의 선행 연구프로그램 : NERC - CANARI

- (추진배경 및 목적) 점차 극심해지고 있는 영국 내 홍수 · 폭풍 · 폭염 등의 이상기후 피해를 야기하는 가장 큰 원인 중의 하나가 북극권의 온난화 가속화 및 해빙 손실인 것으로 추정됨에 따라, 관련 기전을 해석 · 이해하기 위한 연구 필요성 부각
- 현재의 기후모델은 지구 온난화 속도보다 3배 빠르게 진행되고 있는 북극권 해빙 후퇴 및 온난화 수준을 과소 평가하고 있음을 인식하여, 일련의 기전에 대한 지향성 및 영국에 대한 영향을 빠르게 파악 · 경보할 수 있는 기반을 조성하기 위해 '북극-북대서양 지역에서의 기후변화 및 영국으로의 영향 (CANARI)*' 출범('22)⁵⁾
 - * 원어명 : Climate change in the Arctic- North Atlantic Region and Impacts on the UK
- (자금) 영국연구혁신기구(UKRI)를 구성하는 연구회 중 하나인 '자연환경연구회(NERC)'의 '다센터 연구 (Multi-centre research)*'을 통해 약 5년간 1,200만 파운드를 지원('22~'27)⁶⁾

²⁾ Advanced Research and Invention Agency Act 2022. Retrieved from : <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2022/4/contents/enacted>(최종접속일자 : 24-11-06).

³⁾ <https://www.aria.org.uk/#>

⁴⁾ <https://www.aria.org.uk/forecasting-tipping-points/>

⁵⁾ <https://canari.ac.uk/about/what-is-canari/>

⁶⁾ <https://www.ukri.org/news/47m-to-address-critical-environmental-challenges-facing-the-uk/>

- * NERC의 국가역량(National Capacity) 기금으로 2022년에는 동 연구주제를 포함한 6개의 핵심 환경 이슈(Critical Environmental Issues)를 선정하여 관련 센터들을 지원
- (추진체계) 국립 대기과학센터의 주도 하에 영국남극관측소, 영국지질관측소, 극지관측 및 모델링 센터, 국립지구관측센터, 국립해양학센터, 영국생태·수문학센터 등 6개 기관이 협력하여 연구를 진행
 - 영국기상청(Met Office)의 해들리 센터가 프로젝트 파트너로서 참여
- (연구영역) 기후모델링, 이상기상 및 영국에의 영향, 북대서양 대기 및 해수 순환, 북극권의 가속화된 변화 등 4개 연구영역으로 구분⁷⁾
 - (기후 모델링) 전지구적 기후 시뮬레이션에서 고해상도의 지역 대기·해양 시뮬레이션 개발
 - * 북극-북대서양 조류 활성 해빙(海氷) 모델을 통한 기후 시뮬레이션, 1.5km 해상도의 대륙붕 지역 바다(shelf sea) 해양순환 등 시뮬레이션 등
 - (이상기후 및 영국에의 영향) 시뮬레이션으로부터 획득한 통찰을 결합하여 각 이상기후*별 미래 변화를 정량화
 - * 내륙지역의 홍수, 강풍, 폭염, 가뭄, 대륙붕지역 바다에서의 변화
 - (북대서양 대기·해수 순환) 북대서양 대기·해양 순환상의 변화 평가 및 대규모 대기 순환과 영국 상공에서의 기상현상과의 상호작용 분석
 - (북극권의 가속화된 변화) 북극권 내 해빙-해양 상태 및 순환과 북극권의 대류권-성층권 상호작용 등을 종합적으로 평가하여 북극의 온난화가 야기하는 중위도 기상 시스템에의 영향 전망

ARIA - Forecasting Tipping Points 프로그램의 주요 내용 분석

- (추진배경) 그린란드 빙하의 융해와 아한대 환류가 야기하는 변화에 대한 조기 감지 및 예보 시스템 개발 추진
 - 일시적인 이상기후로 인한 피해는 증가하고 있지만, 기후의 임계점 돌파 이후 발생할 수 있는 장기적이면서 과멸적일 수 있는 변화에 비하면 미미한 수준이라는 점이 현재 간과되고 있는 상태
 - 인류가 선행하지 못한 현상이기에 지금 예측되고 있는 규모도 과소 평가되어 있을 가능성이 높은 바, 사전에 해당 현상을 일으키는 임계점에 대한 이해를 심화하여 불확실성을 최소화하고 대응 시간을 확보할 필요성이 지적됨
 - 북극권 관련 이슈 중에서도 그린란드 빙상 융해 및 아한대 환류 약화*를 주요 임계점으로서 지목하고, 임계점을 구성하는 내부 변수들을 감지하여 변화에 대해 미리 대응할 수 있는 연구개발을 추진
 - * 아한대 환류는 전세계 열에너지/염류를 이동시키는 심층 해수 순환⁸⁾인 '대서양 자오선 역전 순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation; AMOC)'의 강도에 영향을 미칠 것으로 전망되고 있어, 가장 위험한 기후 임계점 중 하나로 추정되고 있음
- (도전과제의 구체화) 향후 조기경보시스템 형성 과정에서 봉착하게 될 도전요소들을 관측 및 모델링 등 2개 측면에서 발굴하고 이를 토대로 주요 연구 영역을 도출⁹⁾
 - 극한 온도 및 압력 환경에서 동작할 수 있는 기기가 부족할 뿐만 아니라 위성의 기능 범위를 벗어나는 해상도를 가지는 데이터가 부족한 점이 임계점 관측 분야의 만성적인 문제로 거론

⁷⁾ <https://canari.ac.uk/overview/science/>

⁸⁾ 단비뉴스, 대서양 자오선 역전 순환(AMOC). 2023.07.28.자 게재.

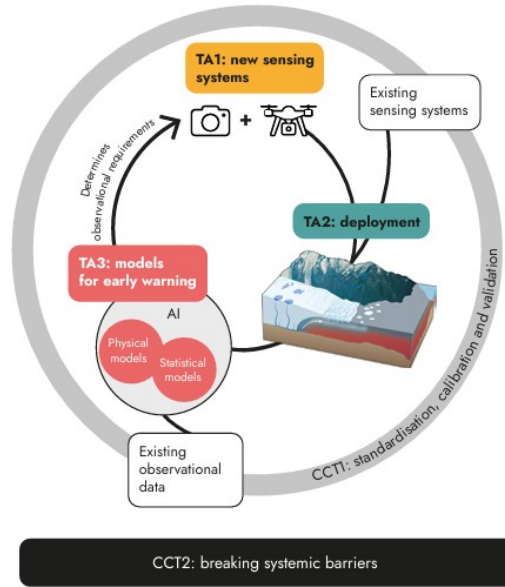
⁹⁾ ARIA. 2024. Towards an early warning system for climate tipping points.

[임계점 예측 프로그램 기획과정에서 발굴된 도전요소]

관측에서의 도전요소(Observation Challenges)	모델링에서의 도전요소(Modelling Challenges)
<ul style="list-style-type: none"> - 기후 관련 기록들의 단기적인 속성 - 시계열성에서의 단절 존재 - 다양한 관측 수단에서의 공간/시간적 해상도 제한 - 기후시스템 피드백 내에서의 핵심 과정 포착의 빈약성 - 관측 부문에서 여전히 잔존하고 있는 기기적/방법론적 불확실성 	<ul style="list-style-type: none"> - 임계점, 그에 연계된 피드백, 연쇄적 상호작용과 같은 고영향-발생가능성이 낮은 현상 모델링은 초기단계에 불과 - 기후시스템의 임계점 도래 시점, 결과, 타임스케일 예측에 대한 낮은 신뢰성 및 기후모델의 높은 계산 비용 - 서로 다른 공간/시간적 스케일에서 획득되는 모델링과 관측으로 인한 유의미한 검증에 한계 <p>※ 역으로 모델링 결과에서 유의미한 측정변수/측정위치 특정도 어려움</p>

※ 출처 : ARIA(2024)의 내용 정리

- (연구영역 구성) 3개의 기술 영역(Technical Area(TA))와 2개의 횡단주제(Crosscutting Theme)이 도출되었으며, 각 영역간 연계를 유지하는 구조로 구축
 - (TA 1) 기후 임계 시스템의 건전성 혹은 직접적인 기후 인자 추론과 직결되는 해양 및 빙권의 관측을 위한 센싱 시스템 개발
 - ※ 우선순위가 높은 작용 IoT 등을 활용하여 저비용, 지속가능한 센싱 시스템 개발
 - (TA 2) 조기 경보 시스템을 위한 모니터링 기술의 빠른 활용
 - ※ 소규모/큐브/나노 위성, 드론, 고고도 플랫폼(HAPs), 부표, 글라이더, 바다 드론, 잠수정 등 다양한 첨단기술 활용을 고려
 - (TA 3) 기후모델의 높은 계산 비용과, 기후모델 내 누락된 작용 및 피드백 문제를 해결하기 위해 임계점 관측이 가능한 변수 식별 및 통계적 분포 등 연구
 - (Crosscutting 1) 대규모 표준화, 보정 및 검증을 통한 불확실성 감소 및 상호 운용성 극대화
 - (Crosscutting 2) 구성원 모두에게 미치는 기후변화 영향을 고려하여 다양한 배경/커리어를 가진 인력들이 장기 기후 모니터링/기록 분야에 유입될 수 있도록 기후과학에서의 시스템적 장애요소 제거
 - ① 국제 규모에서의 연구기관간 교류 활동을 통해 현행 기후 연구에서 가장 부족한 수학자, 컴퓨터 과학자 및 기술자들의 숙련도 부족을 보완
 - ② 지구과학/우주과학 분야에서의 신진 혁신가들을 위한 공모전 개최 등 기후과학에서의 평등·다양성·포용성 향상 조치 시행
 - ③ 미디어 및 커뮤니케이션 전문가들과의 협업 등을 통한 기후 옹호 및 리스크 커뮤니케이션 강화



※ 출처 : ARIA(2024)

[임계점 예측 프로그램의 연구영역 구조도]

- (기타) 연구 프로그램 추진과 관련된 낙수효과로 AI, 전자공학, 광학, 우주기술 등 인접 분야의 혁신을 견인할 수 있을 것으로 기대

ARIA – Forecasting Tipping Points에 대한 대내외적 평가¹⁰⁾

- 동 프로그램의 PD인 젤마 베일(Gemma Bale) 및 새러 본딕(Sarah Bohndiek)은 비침습적 의료기기 개발에 주력하는 생체의학물리학(Biomedical Physics) 연구자¹¹⁾이지만, 연구계의 예상과 달리 의학과 무관한 기후변화 대응 조기 경보 시스템 구축 프로그램을 출범
 - PD는 기후변화 관련 분야 이외의 연구자들도 동 연구분야에 관심을 갖고 참여 및 협력할 수 있는 계기가 될 수 있음을 강조
- 그린란드 빙하의 융해와 관련된 현상에 대한 연구는 영국 뿐만 아니라 세계 각지에서 연구가 수행되고 있으나, ARIA는 이러한 연구를 가속화시킬 수 있는 계기가 될 수 있다는 점에서 주목을 받고 있음
 - 모델간 격차와 제한적 증거로 인해 어떤 변수를 중점적으로 모니터링해야 하는지조차도 식별하기 어려웠던 상황임을 지적
- 다만, 일각에서는 ARIA가 북극권 관련 연구 분야 중 그린란드 빙하와 아한대 환류 시스템을 임계점으로 특정하여 연구를 지원하는 점에 대해 다소 우려를 표명
 - 대부분의 연구자들이 아한대 환류 시스템에 더 큰 영향을 미치는 요인은 바람인 것으로 보고 있으며, 동 환류 시스템과 AMOC과의 연계는 아직 규명되지 않았음을 위험요소로 지적

¹⁰⁾ <https://www.technologyreview.com/2024/09/04/1103555/the-uk-is-building-an-alarm-system-for-climate-tipping-points/>

¹¹⁾ <https://www.aria.org.uk/our-team/>

- 다소 급진적인 개입으로 평가되고 있으나, 동 프로그램이 성공하여 예측 신뢰도가 향상되면 기후변화 대응 조치에 대한 국민들의 인식변화 및 예산 투입에 대한 구체적인 근거 확보 등의 긍정적 효과를 창출 가능할 것으로 평가
 - (예시) 가속화되는 온난화에 대해 아무런 대응을 하지 않을 경우의 피해와 지구공학 기법(태양복사관리 등) 적용 후 발생가능한 위험성간의 이익형량 근거

시사점

- 영국은 북극권 기후변화가 북반구 중위도 지역의 이상기후 현상에 미치는 영향에 주목하여, 근본적인 대응책 마련을 위해 기초연구를 강화하는 추세
 - 북극권 연구에 관한 집단연구 지원사업인 NERC의 CANARI 프로그램(5년간 1,200만 파운드 투입) 출범에 이어, ARIA*를 통해 혁신도전형 R&D 형태로 추가적인 연구개발 프로그램을 출범
 - * 세계 최고 수준의 전도유망한 과학자들을 활용하여 새로운 발견·기술로 이어지는 전환적 발상들을 빠르게 식별·지원할 목적으로 설립된 기관인 특성상, 해당 기관의 투자/지원 동향에 대해서 예의주시할 필요성이 있음
- 아한대 환류와 AMOC과의 연계에 대해서는 아직 학계·연구계에서 확신이 없는 상태임에도 불구하고, ARIA는 장기·대규모 피해를 사전에 방지하거나 혹은 미증유의 피해에 대응할 수 있는 시간 확보를 위해 과감한 시도를 결정
 - 대신 다양한 학제간 협력을 통해 과감한 시도를 통해 광학, 전자공학, AI, 우주기술 등 연관분야의 혁신을 견인하는 부수적 효과를 함께 도모하는 동시에, 젊은 혁신가 등을 포괄하고 다양한 연구기관/타국과의 교류를 강화함으로써 장기적인 차세대 연구자 육성 기능도 함께 수행하는 것으로 해석됨
- 우리나라에서도 기후변화 적응 R&D를 혁신도전형 R&D 사업 형태로 추진할 경우 보다 최대한 다양한 분야와의 긍정적인 연쇄효과를 창출할 수 있는 방향으로 기획할 필요
- 국제협력 측면에서 볼 때 우리나라에서도 유사한 맥락으로 북극권-중위도 간 상호작용에 관한 연구를 진행하고 있으며 영국 ARIA 프로그램에서도 신진 연구자 역량 강화를 위한 국제교류 추진을 언급하고 있으므로, 동 연구영역을 중심으로 호혜적 협력 관계 구축을 검토할 여지가 있음
 - 아시아에서 배출된 미세먼지와 AMOC 둔화와의 관련성에 대한 심화 연구 등의 연관 주제에 대해서도 고려 가능

참고문헌

- 1) UKRI. 2021. UK to launch new research agency to support high risk, high reward science. Retrieved from : <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-launch-new-research-agency-to-support-high-risk-high-reward-science>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 2) HM Government. 2022. Advanced Research and Invention Agency Act 2022. Retrieved from : <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2022/4/contents/enacted>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 3) ARIA 공식 홈페이지 - 메인 페이지. Retrieved from : <https://www.aria.org.uk/#>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 4) ARIA 공식 홈페이지 - 'Forecasting Tipping Points' 웹페이지. Retrieved from : <https://www.aria.org.uk/forecasting-tipping-points>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 5) CANARI 공식 홈페이지 - "What is CANARI?". Retrieved from : <https://canari.ac.uk/about/what-is-canari>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 6) UKRI. 2022. £47m to address critical environmental challenges facing the UK. Retrieved from : <https://www.ukri.org/news/47m-to-address-critical-environmental-challenges-facing-the-uk>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 7) CANARI 홈페이지 - CANARI Overview. Retrieved from : <https://canari.ac.uk/overview/science>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 8) 단비뉴스. 2023. 대서양 자오선 역전 순환(AMOC). 2023.07.28. 게재. Retrieved from : <https://www.danbi-news.com/news/articleView.html?idxno=23992>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 9) ARIA. 2024. Towards an early warning system for climate tipping points(최종접속일자 : 24-11-06).
- 10) MIT Technology Review. 2024. The UK is building an alarm system for climate tipping points. Retrieved from : <https://www.technologyreview.com/2024/09/04/1103555/the-uk-is-building-an-alarm-system-for-climate-tipping-points>(최종접속일자 : 24-11-06).
- 11) ARIA - Our Team 웹페이지. Retrieved from : <https://www.aria.org.uk/our-team>(최종접속일자 : 24-11-06).

본 발간물은 한국연구재단 수탁과제인 "(N2400002) 기후변화 적응 중점기술 현황 및 성과조사, 기술발굴, R&D발굴" 과제의 연구결과를 정리한 것입니다

NIGT BRIEF

본 NIGT BRIEF의 내용은 필자의 개인적 견해이며,
연구소의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.



07328 서울특별시 영등포구 여의나루로 60 여의도포스트타워 14층
TEL 02)3393-3900 FAX 02)3393-3919~20 www.nigt.re.kr