

남극 조류의 이동경로 추적을 통한 고병원성
조류인플루엔자 역학 연구

기획보고서



목 차

I. 서 론	1
1. 기획연구의 필요성	1
1.1 연구개발 배경 및 필요성	1
1.2 기존사업 차별성	11
1.3 기존사업 연계방안	13
2. 기획연구의 목표 및 주요내용	14
2.1 기획대상의 정의	14
2.2 기획연구 목표	15
2.3 기획연구 주요내용(범위)	16
2.4 기획연구 추진체계	18
II. 환경 및 역량분석	19
1. 국내 · 외 동향 및 역량	19
1.1 연구동향 및 역량	19
1.2 정책동향 및 역량	21
1.3 산업동향	28
1.4 기술 및 인프라 동향	29
2. 특허 · 논문 동향 및 역량	31
2.1 특허동향 및 역량	31
2.2 연구 · 논문 동향 및 역량	31
3. 기획기술 시사점	37
III. 연구개발과제 및 추진계획	38
1. 비전 및 목표	38

2. 개발목표 및 사양도출	38
3. 핵심개발과제	40
3.1 핵심개발내용	40
3.2 사업 주요내용	42
4. 사업추진체계 및 방식	54
5. 사업추진 로드맵 및 소요예산	55
6. 성과목표 및 지표	56
7. 기대효과 및 활용방안	60
7.1 기대효과	60
7.2 활용방안	61
8. 사업개념도	63
 IV. 사업 타당성 분석	 64
1. 정책적 타당성	64
2. 과학·기술적 타당성	64
3. 경제적 타당성	65
4. 사회·문화적 타당성	68
 첨부1. 참고문헌	 69



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 조류의 이동경로 추적을 통한 고병원성 조류인플루엔자 역학 연구” 과제의
기획보고서로 제출합니다.

2025. 04. 08



연구책임자 : 김 종 우

핵심참여연구원 : 김 지 희

김 정 훈

김 상 희

일반참여연구원 : 이 숙 영

김 유 민

이 형 석

신 명 섭

강 다 혜

최 혜 주

최 장 원

I. 서론

1. 기획 연구의 필요성

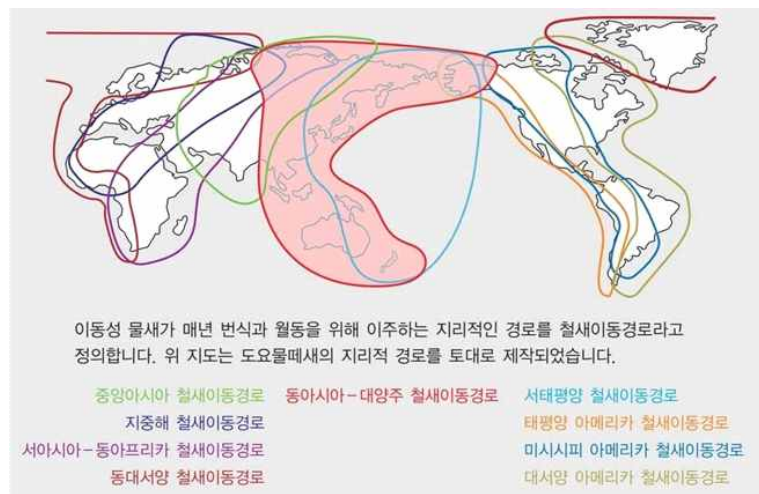
1.1 연구개발 배경 및 필요성

가. 연구 배경

- 남극에 서식하는 조류들은 다양한 기후대와 생태계를 이동하고 있기 때문에, 잠재적으로 병원체의 매개체 역할을 할 수 있으며, 남극 조류의 이동경로를 추적하는 것은 조류인플루엔자 바이러스(Avian Influenza virus, AIV)의 확산 경로를 이해하는데 중요 함
- 전세계적으로 전파되고 있는 H5N1형의 고병원성 조류인플루엔자(High Pathogenic Avian Influenza, HPAI)는 23/24년에 최초로 (아)남극권에서 발생하였으며, 24/25년에는 세종기 지 인근 및 바톤반도에서도 발생하여 다양한 남극 조류들의 폐사되었음
- 포유류 및 인체 감염 가능성 증가에 따라 남극 동물과 직간접적으로 접촉 할 수 있는 현장조사 연구원의 안전 확보와 남극 과학 프로그램의 수행 차질에 따른 대응 방안 필요
- 또한, 중간 벽을 뛰어넘어 해양 포유류 및 인간 감염 사례가 증가함으로써 AIV의 새로운 판데믹(Next Pandemic) 가능성이 제기되고 있음
- 남극 조류의 이동경로와 HPAI의 상관관계는 현재까지 명확하게 규명되지 않았으며, 이들의 관계는 조류 인플루엔자의 글로벌 확산 메커니즘을 심도있게 이해할 수 있음

□ 전염병의 길이 되는 철새의 비행 경로

- 전 세계적으로 철새들이 번식지, 기착지, 겨울 서식지를 연결하는 9개의 주요 비행경로는 지리적, 생태학적 특성에 따라 구분됨. 광범위한 이동 경로는 서로 다른 생태계와 지역을 연결하면서 병원체가 넓은 지역으로 확산되는 통로의 역할을 할 수 있음(그림 I-1)



[그림 I-1] 철새의 전세계 이동경로

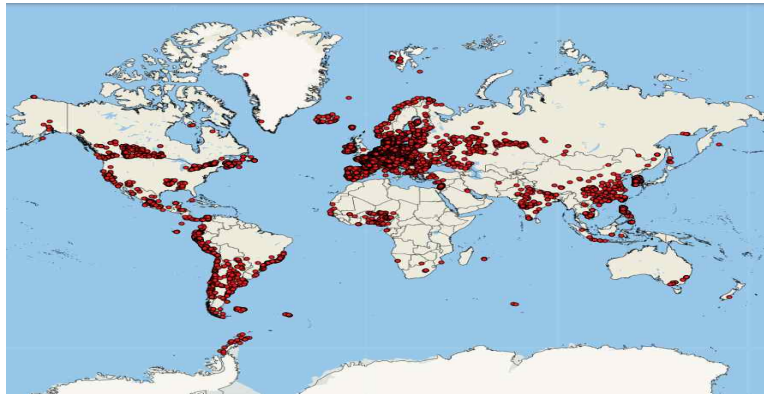
- 남극에서의 철새 이동 및 취식활동에 대한 정보는 미흡

□ 남극으로 향하는 고병원성 조류 인플루엔자 바이러스

○ 2020년 10월 유럽에서 2.3.4.4b* 계통의 H5N1 HPAIV의 등장 이후 철새 이동 경로에 따라 바이러스가 전세계적으로 전파 됨(그림 I-2)

- 2021년 이후 H5N1 HPAIV가 북반구의 여러 지역에 걸쳐 광범위하게 확산되었으며, 2023년에는 알래스카에서 HPAIV에 감염된 북극곰이 폐사하는 사례가 발생, 이후에도 철새 이동 경로를 통해 대륙 간 전파가 지속되고 있음

*인플루엔자 바이러스의 유전자 계통에 따른 분류

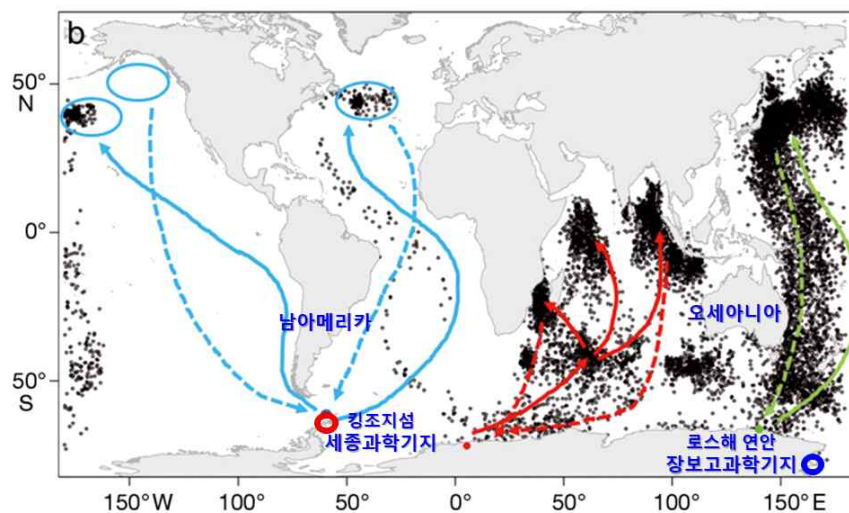


[그림 I-2] HPAI의 전세계 발생(2020.09~2025.03)

○ 2022년 이후 남미 지역에서 야생 조류와 해양 포유류에서 H5N1 HPAI 대규모 발병이 보고 됨. 남미 해안선과 남극 반도는 지리적으로 가깝게 위치해 있기 때문에 조류 이동에 의한 HPAI 바이러스(HPAIV)의 이동 가능성이 매우 높음

○ 남미, 아프리카 및 오세아니아를 거쳐 이동하는 야생조류에 의한 남극으로 바이러스 유입 가능성이 매우 높으며, 야생조류의 생태적 특징은 국소적인 바이러스 전파 가능성을 높일 수 있음(그림 I-3)

- (아)남극권의 주변 지역을 이동하는 조류는 바이러스 전파의 새로운 매개체가 될 수 있으며, 감염된 사체의 포식 및 주변 오염된 환경에서의 활동에 의한 전파 가능성 증가

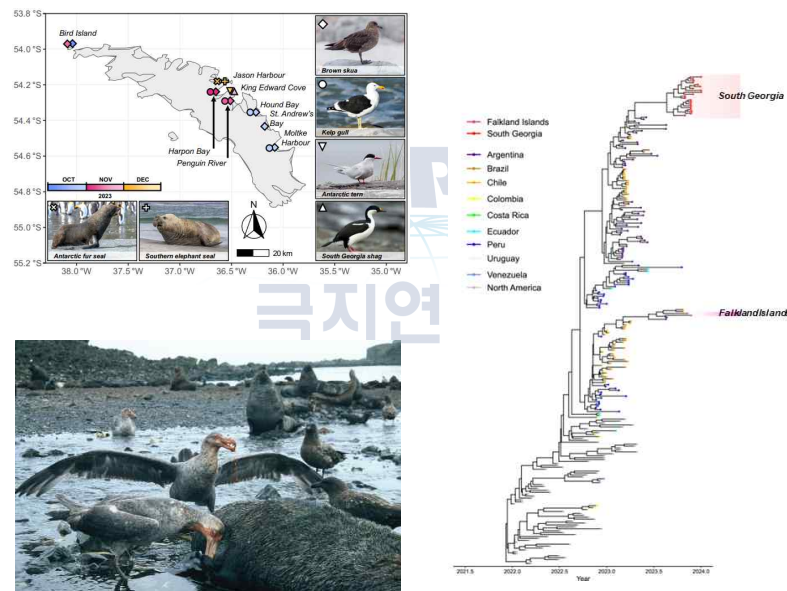


[그림 I-3] 남극도독갈매기의 이동경로

- 세종기지가 위치한 킹조지섬 인근은 조류의 이동으로 인한 HPAI 전파 위험이 높은 상황으로, 세종과학기지에서 번식하는 일부 조류는 계절이동시 HPAI가 발생한 남미 해안을 경유할 뿐 아니라 발병지역인 남극반도 일대에서 먹이사냥을 하는 것으로 확인됨
- 남미 지역에서 야생 조류와 해양 포유류를 포함한 여러 종에서 H5N1 HPAI의 대규모 발생이 보고되었고, 남미 해안선과 남극 대륙은 지리적으로 가까워 이 지역의 조류가 남극으로 이동할 가능성이 높아짐
- 2024년 로스해에서 번식하는 남극도독갈매기의 이동경로에 위치하는 호주의 가금류 농장에서 고병원성 H5N1/H7N3/H7N8/H7N9 바이러스와 뉴질랜드 가금 농장에서 고병원성 H7N6 바이러스 검출

□ 남극에서 확산되는 조류 인플루엔자, 해양 포유류도 위험 직면

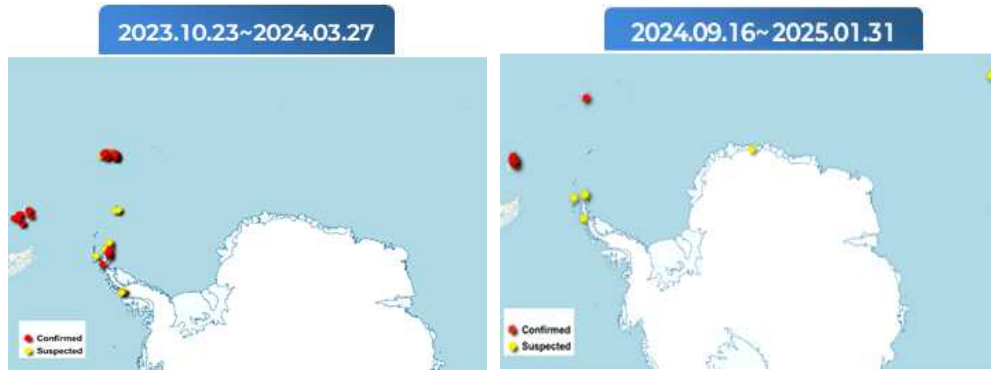
- 2023년 10월 최초로 (아)남극권의 사우스조지아섬과 포클랜드제도 등에 서식하는 다양한 조류와 포유류에서 H5N1 HPAI가 발생, 남미에서 이동해 온 철새에 의해 HPAIV 유입 확인 (그림 I-4)



[그림 I-4] 최초로 (아)남극에서 발생한 고병원성 조류인플루엔자(Banyard et al, 2024)

- 2024년 2월 중순, 남극 반도에서는 최초로 호프베이에 위치한 에스페란자 기지인근에서 발견된 스쿠아와 남방큰재갈매기에서 HPAIV 감염 사례 확인되었으며, 이후 남극 반도 곳곳에서 HPAI 감염 확진 및 감염 의심 사례 발생 빈도 증가(그림 I-5)
- 한편, 2014년에는 남극 펭귄에서 저병원성의 H11N2 조류 인플루엔자의 감염이 처음 보고된 이후로 2022년까지 지속적으로 발견되고 있으며, 일부 다른 아형의 저병원성 인플루엔자 바이러스도 남극에서 확인
- 2021년 미국 메인주에서 하버물범을 시작으로 캐나다 퀘벡에서 하버물범과 회색물범, 플로리다에서 큰돌고래의 HPAI감염에 의한 폐사 사례 보고, 이후 남미에서도 해안가를 중심으로

바닷새 및 해양포유류에서 HPAIV 감염이 확산되고 집단 폐사가 보고되고 있음



[그림 I-5] 23/24 시즌과 24/25 시즌 남극 및 아남극과 주변 섬들에서의 고병원성 조류 인플루엔자 확산 현황

- 2022년 10월부터 2023년 12월까지 남미에서 야생조류 597,832마리, 해양포유류 50,785마리가 폐사(그림 I-6)

※ 페루: 조류 557,140마리, 해양포유류 10,458마리 폐사, 칠레: 조류 29,432마리, 해양포유류 20,179마리 폐사



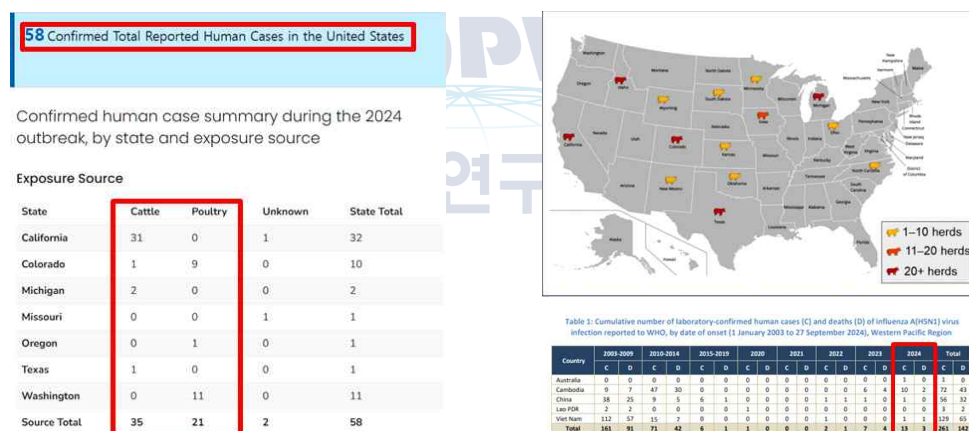
[그림 I-6] 남미에서 발생한 HPAI 발생 사례(Uhart, Marcela M., et al. 2024)

- WOAH의 AI 포유류 감염 사례를 보면, H5형의 바이러스에 대해서는 남미 국가에서 많이 보고가 되었으며, H5N1형 바이러스에 대해서 미국, 캐나다, 영국, 독일, 필란드에서 보고가 많음

□ 철새에서 인간까지 진화하는 감염 위험

○ 조류에서 포유류로 HPAI의 꾸준한 중간 전파 사례가 보고되고 있음

- 미네소타의 한 농장에서 2024년 2월에 가금류가 HPAI A(H5N1)에 감염되었고 3월에 이런 염소들과 소들에게서 동일한 바이러스 검출되었음
- 사망한 철새들이 같은 농장 부지에서 발견된 점을 고려할 때, 이는 철새의 이동이 바이러스 확산에 중요한 역할을 했을 가능성을 시사함
- 2024년 10월 기준, 미국의 14개 주에 걸쳐 299개의 낙농우 농장에서 H5N1 발병 사례가 보고되었으며, 이는 농장 주변의 야생동물 뿐만 아니라 농장에서 감염 동물과 밀접하게 생활하는 농장 인부들까지 위협이 되고 있음(그림 I-7)
- 2025년 1월, 미국에서 고령의 기저질환 환자가 조류에 노출된 뒤 H5N1 조류독감에 감염되어 사망하였으며, 앞서 캐나다에서는 10대의 소녀가 변이된 H5N1에 감염된 사례가 보고되기도 하였음
- 2024년 9월까지 서태평양지역에서 인간 감염 사례가 261건이 보고되었으며, 미국에서는 같은 해에 66명이 H5N1에 감염되었던 것으로 보고 되었음, 이들은 대부분이 동물(가축) 상시 접촉자인 것으로 확인 됨(그림 I-7)



[그림 I-7] H5N1 HPAIV의 사람 및 포유류 감염 사례 보고(WHO, 2024)

□ 국경 없는 바이러스, 국경 없는 대응을 위한 남극 거버넌스의 공동 노력

○ CCAMLR, ATCM, COMNAP, SCAR 등의 국제기구 및 과학위원회에서 고병원성 조류 인플루엔자(HPAI)의 남극권 유입 감시와 확산 방지 대책 강구

- 2024년 46차 ATCM에서 관련 국제기구¹⁾가 공조하여 당사국들과 각기구의 회원국들에게 생물안전 지침과 질병전파 방지를 위한 협력 촉구
- CCAMLR 생태계보존관리작업반(WG-EMM)은 2024년 각 회원국의 남극프로그램 통해 HPAI 감염사례를 ATCM, SCAR, COMNAP에 보고하는 절차를 논의하고, 회원국들은 CEMP-site에서 확진 및 의심되는 사례 정보를 사무국에 제공하기로 합의

1) 남극연구과학위원회(SCAR), 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR), 남극프로그램관리자사회(COMNAP), 국제남극관광운영자협회(IAATO)

나. 연구 필요성

- 2023/24년 (아)남극권 최초로 고병원성 조류인플루엔자 유입 후, 남극과 남극 주변국의 연쇄적인 HPAI 발생에 대응하는 예방적인 모니터링 시급
- 2023년 남미 해안에서 해양포유류에게 전파된 이후 아남극권과 남극권으로의 유입 및 야생 동물 폐사 확인(그림 I-8)



[그림 I-8] '23/24 남극반도 Beak Island에서 HPAI 발생에 의한 남극도독갈매기의 집단폐사

- 2023년 10월 아남극권의 사우스조지아에서 HPAI 최초 발생 이후 갈색도독갈매기를 비롯한 남방큰재갈매기, 남극물개 등 다양한 동물종에서 감염 폐사를 확인하였으며, '25년에도 HPAI 확진 및 의심사례가 지속적으로 보고(표 I-1)

※ '23/24 총 72건(HPAI 확진 37건, 의심 35건), '24/25 총 45건(HPAI 확진 30건, 의심 41건)

<표 I-1> '25년 1월 남극 HPAI 발생(의심) 보고현황(SCAR, 2025)

날짜	위치	동물종	결과
2025-01-01	St. Andrews Bay	Giant petrels, Skua, Sheathbill, Elephant seal	Suspected
2025-01-02	Grass Island	Antarctic fur seal	Suspected
2025-01-03	Prince Olav Harbour	Antarctic fur seal	Suspected
2025-01-03	Prion Island	Antarctic fur seal pups	Suspected
2025-01-04	Hope Bay	Brown skua, Adelie penguin, Kelp gull	Suspected
2025-01-05	Possession Bay	Antarctic fur seal	Suspected
2025-01-05	Bird Island	Wandering albatross	Suspected
2025-01-06	Jason Harbour	Antarctic fur seals, Pintail duck	Suspected
2025-01-08	Barff Peninsula	Antarctic fur seal	Suspected
2025-01-09	Maiviken	Antarctic fur seal, Elephant seal	Suspected

2025-01-10	Carlini Station	Adelie penguins, South Polar Skuas, Gentoo penguin	Suspected
2025-01-10	Petrel Station	Brown skua, Antarctic shag, Crabeater seal	Suspected
2025-01-10	Primavera Station	South Polar Skua	Suspected
2025-01-10	Marambio station	Kelp Gull, Brown skua	Suspected
2025-01-20	Cape Calmette	Skua	Suspected
2025-01-23	Tay Head	Adelie Penguin, Kelp Gull, Skua, Crabeater seal	Confirmed
2025-01-24	Heroína Island	Adelie penguin	Confirmed
2025-01-25	D'Urville Monument	Adelie penguin, Gentoo penguin, Kelp Gull	Confirmed
2025-01-25	Beak Island	Skua	Confirmed
2025-01-27	Devit Island	Adelie penguin	Confirmed
2025-01-29	Brown Bluff	Adelie penguin, Gentoo penguin, Kelp Gull	Confirmed

- 미국 농식품부에서 관리하는 세계동물질병 정보시스템(Global Animal Disease Information System)의 정보를 기반으로 분류한 결과, 남극에서 처음 보도된 2023년 10월부터 최근 2025년 1월말까지 전세계에서 HPAI는 4,366건이 보고되었으며, 같은 기간 남극에서는 164건이 보고
- 2024년 12월 18일과 21일 각각 세종과학기지 인근에서 남극도독갈매기 사체 1구씩을 발견하였으며, 분변 스왑을 이용한 신속진단 키트 및 rRT-PCR을 이용하여 H5형의 조류 인플루엔자 감염을 확인(그림 I-9)



[그림 I-9] '24년 12월 세종과학기지 인근에서 발견된 HPAI 감염의심 남극도독갈매기 사체

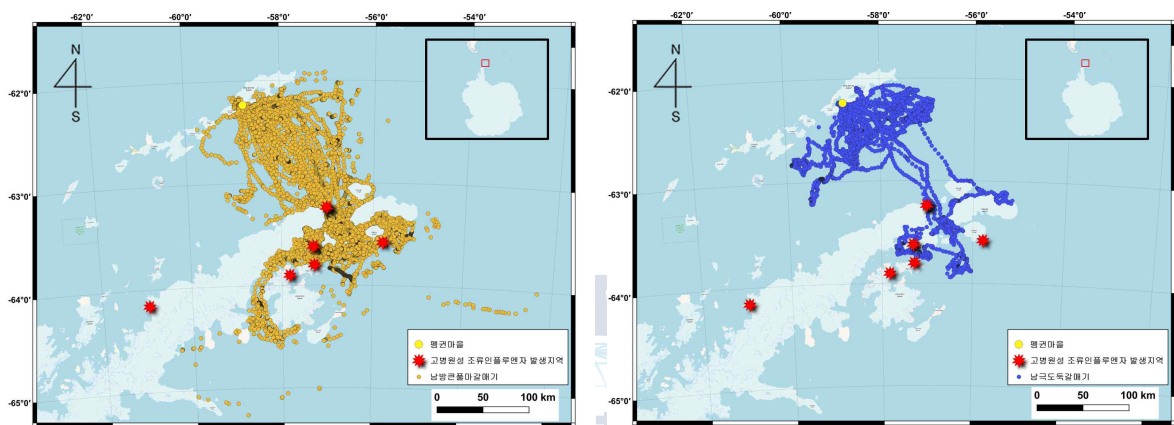
- 우리나라가 관리하는 남극 내 특별보호구역들(ASPAs)에는 대규모의 펭귄 서식지가 있으며, 이는 CCAMLR 장기모니터링 수행지역(CEMP-sites) 및 중요 조류 서식지역(IBAs)에 해당함. 해당 펭귄 및 기타 조류 집단서식지의 보호, 관리 의무에 따른 대응 방안 마련 시급
- 비교적 외부 질병에 노출이 적은 남극 동물들은 새로운 감염병의 노출 시 높은 치사율을 보일 가능성이 있으며, HPAI로 인한 특정 종 개체수의 급격한 감소는 남극 고유의 생태계

균형을 무너트릴 수 있음

- HPAI는 일정한 주기를 가지고 지속적으로 발생해왔으며, 남극으로 한번 유입된 이상 남극 고유의 지리적·기후적 특성²⁾에 따라 환경 및 자연숙주³⁾내에 잠복 후 재발생 가능성이 있어 바이러스 유입 및 재유행에 대한 장기적인 모니터링이 필요

○ 남극내에서도 조류의 이동 경로와 기존 HPAI 발생지역 중첩에 의한 남극 내 지속적인 HPAI 확산 가능성

- 본 연구팀의 선행연구 결과 세종과학기지에서 번식하는 일부 조류는 계절 이동시 HPAI 발생한 남미 해안을 경유할 뿐 아니라 HPAI 발병지역인 남극반도 일대에서 먹이사냥을 하는 것으로 확인됨(그림 I-10)
- 이는 지금까지의 단발적인 HPAI 발생 사례로 그치지 않고 대규모의 집단감염 가능성을 시사하며, 집단내의 반복적인 발생으로 인한 포유류 및 인간감염 가능성까지도 시사



[그림 I-10] 2023/24년 HPAI 발생지역과 강조지점 펭귄마을에서 번식하는 조류의 취식이동 경로

- 장보고기지 인근에서는 현장에서 채집한 조류 및 포유류의 분변시료를 이용하여 조류인플루엔자 바이러스 보유 여부를 NGS방법을 이용하여 선행연구를 수행하였으나, 현재까지 조류인플루엔자 바이러스는 검출되지 않음.

○ 남극 내 HPAI 발생 시 인간활동 제약 및 포유동물과 인간으로의 감염 위험성의 지속적인 모니터링 필요

- 우리나라를 포함한 남극 프로그램 운영국에서 마련한 HPAI 발생 대응 지침 및 단계별 대응 방안⁴⁾에 의해 남극에서 대규모의 HPAI 발생시 인간활동 제한 및 중단 가능성 존재
- 남극조약협약당사국 회의(ATCM)이나 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)에서는 전파 방지를 위한 대책 등이 주요 안건으로 상정, 회원국들에게 지침서 배포를 통해 선제적 대응을 권고
- 전세계의 HPAI 확산과 인간 감염 가능성에 따라 세계보건기구(WHO)에서는 독감 바이러스 next pandemic을 경고함
- COVID-19 유행에서도 경험했듯이 새로운 바이러스의 유행시 모든 인간활동에서 제약을

2) 남극은 바다로 둘러싸여 고립된 대륙이며, 평균기온이 0도를 넘지 않는 극한의 기후를 가지고 있음

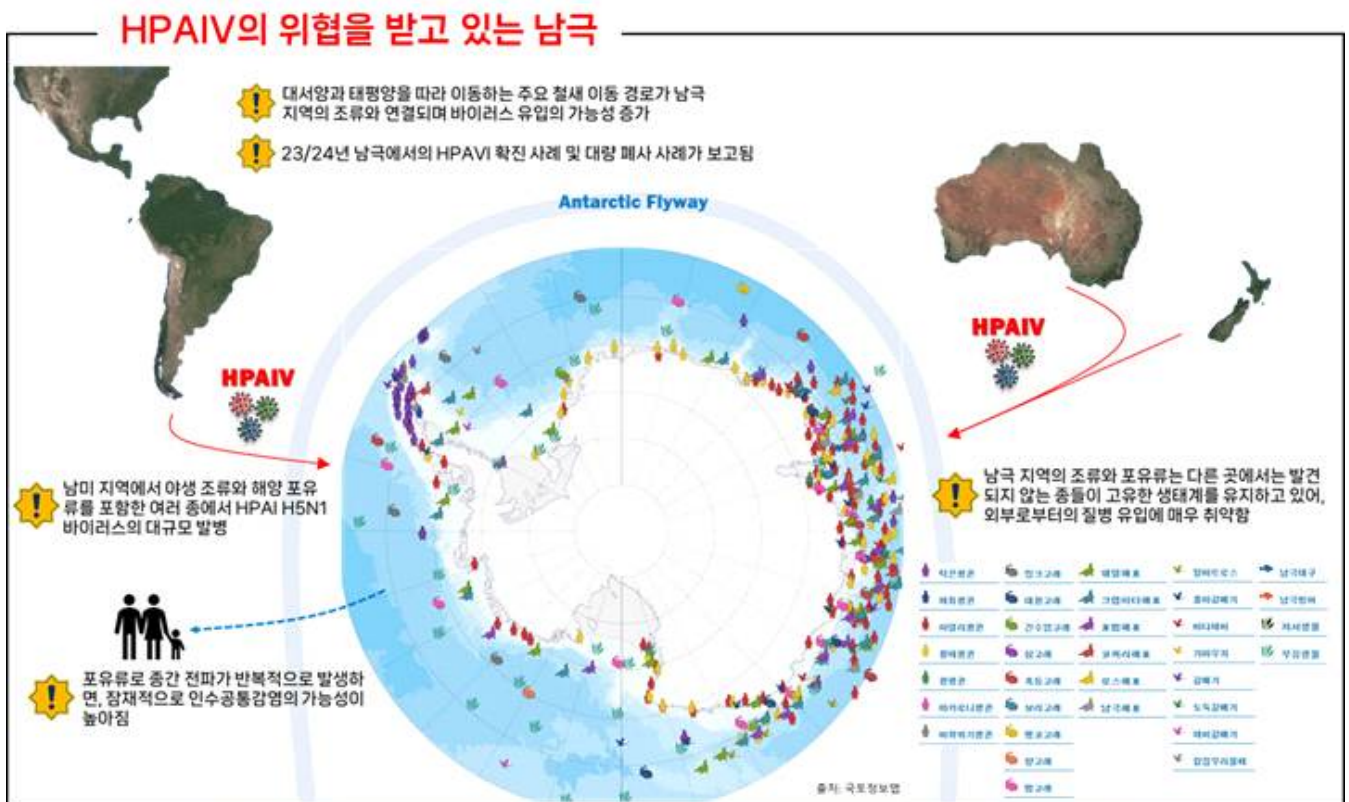
3) 병원체가 장기간 머무르며 증식할 수 있는 숙주로서 무증상 감염상태로 다른 개체에 전파가능성이 높음

받게 됨에 따라 남극에서도 HPAI의 중장기적 모니터링을 통해 활동을 효율적으로 관리할 필요성 있음

- 최근 HPAI의 해양 포유류 감염사례들이 증가함에 따라 잠재적인 매개체인 남극 조류들에 의한 남방코끼리물범(킹조지섬) 및 웨델물범(로스해 연안) 번식집단의 전파 가능성이 높음
- HPAI 감염 동물과 밀접하게 접촉하는 사람들에게 전파되어 감염되는 사례가 증가하는 만큼 남극에서도 감염 동물과 접촉할 수 있는 과학기지 거점 현장조사 연구원들의 안전 확보를 위한 대응조치 필요

○ 과학적 근거를 기반한 구체적인 HPAI 현장대응 체계가 필요 (그림 I-11)

- 기존 국내외 조류인플루엔자(AI) 감염 대응체계 대부분의 경우 축산업 연관된 가금류에서의 질병 발생 및 확대 방지, 예방과 관련한 내용들로 실제 남극과 같은 특수한 환경 내에서 적용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단 됨
- 현재는 과학적 연구가 부족한 상황이기때문에, 호주의 Communicable Diseases Network Australia는 가능한 사체를 건드리지 말고 피할 것을 권장하고 있는 상황



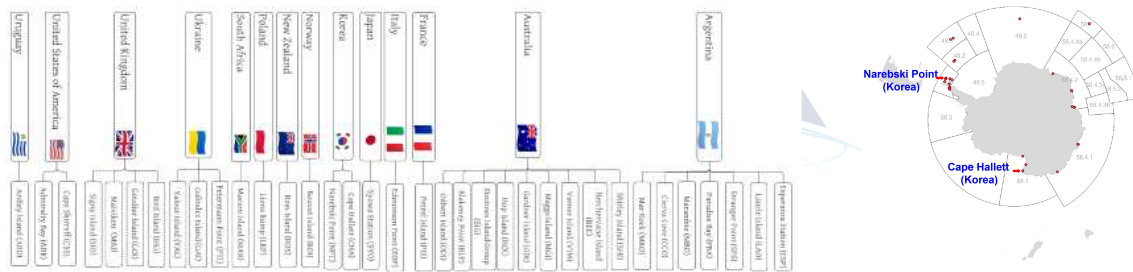
남극 지역의 고병원성 조류 인플루엔자의 감시 및 연구가 필요함

[그림 I-11] 남극의 고병원성 조류 인플루엔자의 유입 및 전파 경로 감시와 바이러스의 특성 연구의 필요성

○ CCAMLR, ATCM, COMNAP 등의 국제기구에서 고병원성 조류 인플루엔자(HPAI)의 남극권 유입 감시와 확산 방지 대책 구축을 촉구

- 남극 관련 국제기구에서 고병원성 조류 인플루엔자 (HPAI) 유입 감시 및 대응 조치가 주요 안건으로 부상
- CCAMLR 주관 국제공동모니터링 프로그램(CEMP)은 어업활동과 환경변화가 생태계에 미치는 영향을 평가, 이를 기반으로 과학적 보존 및 관리전략을 수립하기 위해 수행
- CCAMLR 주관 국제공동모니터링 프로그램의 수행 차질에 따른 대응방안 마련 필요

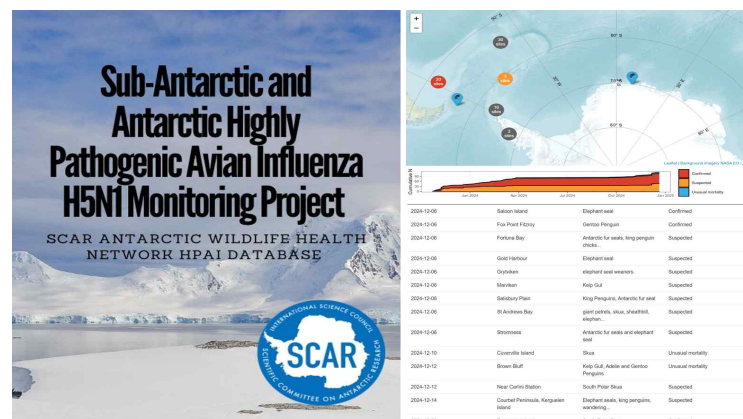
- 2023/24년에 남극반도에 위치한 일부 모니터링지역(CEMP-site)에서 HPAI 발생하여 현장문제와 예방조치로 인해 고병원성 조류인플루엔자(HPAI) 관리와 관련된 접근 규제가 일부 회원국의 데이터 수집에 영향 미쳤으며, 이에 따라 제출된 데이터 세트 축소
- 2023/24년 아르헨티나는 고병원성 조류인플루엔자(HPAI) 관리를 위한 예방 조치로 연구 지역(스트레인저 포인트 및 에스페란자/호프 만)에서 샘플링을 수행하지 못하는 등 심각한 차질을 겪었으며, 로리 섬에서는 의심되는 인플루엔자와 월동인력을 위한 보호장비 부족으로 현장조사 취소
- 연례 모니터링을 수행하는 회원국(14개국)의 담당 지역(CEMP-site)에서 HPAI 발생 모니터링 및 국제기구 보고 합의(2024년 CCAMLR WG-EMM) (그림 I-12)



[그림 I-12] CCAMLR 생태계모니터링 프로그램(CEMP) 참여국 및 모니터링 지역

○ 아남극 및 남극 고병원성 조류인플루엔자 H5N1 모니터링 프로젝트 참여 (그림 I-13)

- SCAR 회원국이 각국 기지기반 모니터링 프로그램으로 참여하는 남극 야생동물 건강 네트워크 HPAI 데이터베이스(Antarctic Wildlife Health Network: AWHN)에 실시간 인플루엔자 전파 현황 및 제반 데이터 제공



[그림 I-13] SCAR 주관 아남극 및 남극 고병원성 조류인플루엔자 H5N1 모니터링 프로젝트

1.2 기존사업 차별성

<표 I -2> 기존사업과의 차별성

구분	국내외 선행연구 이름 및 내용	차별성
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적	Detection and Spread of High Pathogenicity Avian Influenza Virus H5N1 in the Antarctic Region (Banyard et al. 2024) 기존) 2023/24년 하계기간에 아남극권의 사우스조지아섬과 포클랜드제도에서 발생한 HPAI의 첫 감염사례 유입경로 등의 분석	차별성) 남극권에 위치한 킹조지섬에서의 HPAI 모니터링 예정. 취식이동 경로와 이주경로 확인을 통해 다양한 조류 종의 HPAI 잠재적 전파 경로 확인 예정
	남극특별보호구역 모니터링 및 남극기지 환경관리에 관한 연구 (환경부) 기존) ASPA 171 구역 내 동물상 모니터링과 번식조류 개체군 파악 및 펭귄 취식지 이동과 월슨바다제비의 연 주기적인 이동 경로 확인	차별성) 조류 이동경로 분석을 위해 보다 확장된 조류 종을 대상으로 진행하며, 혈 청검사를 통한 병원체의 유입 등을 함께 모니터링 할 예정
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극특별보호구역 모니터링 및 남극기지 환경관리에 관한 연구 (환경부) 기존) '23/24년 한시적으로 신속 진단 키트 활용한 남극 조류 대상 HPAI감염 여부 확인	차별성) 유전자 기반 고병원성 판별 및 유전자 분석을 통한 유입경로 추적 등의 HPAI 초점을 맞춘 보다 깊이 있는 연구
	Host Dependence of Influenza A Virus Spatio-temporal Dynamics (Emory University) 기존) 인플루엔자바이러스의 중간 전파에 대한 심층적인 이해를 위해 다양한 숙주에서 관찰되는 조류 인플루엔자 바이러스의 시공간적인 역학 연구	차별성) 기존 연구의 연구방법과 분석방법은 유사하나 본 연구에서는 대상 지역 이 남극으로 국한되며, 전세계적인 조류 이동을 기반으로 한 시공간적 역학연구를 수행
	Viruses Associated with Antarctic wWldlife: From Serology Based Detection to Identification of Genomes Using High Throughput Sequencing (Smeele et al, 2018) 기존) 기존의 남극 특정 종들을 대상으로 한 바이러스 감염 및 검출에 대한 단편적인 결과들을 통합적으로 리뷰	차별성) 남극 야생 조류 및 해양 포유류 대상 HPAI에 대한 다년간의 연구는 없었으며, HPAI의 유입부터 변이, 유출까지의 과정까지 확인하고자 함
	Sustained RNA Virome Diversity in Antarctic Penguins and Their Ticks (Michelle Wille et al. 2020) 기존) 펭귄에 바이러스 다양성을 평가하기 위해 세 종의 펭귄과 진드기에서의 RNA 바이롬을 수행	차별성) 남극 펭귄 이외에도 대상종을 다양한 남극 동물 종으로 확대시켜 결과의 다양성과 전체적인 남극 동물상에서 바이러스 군집을 확인해보고자 함
	Scavengers as Prospective Sentinels of Viral Diversity: the Snowy Sheathbill Virome as a Potential Tool for Monitoring Virus Circulation, Lessons from Two Antarctic Expeditions (Zamor a et al. 2023) 기존) 남극 동물종에서 특정 바이러스들을 검출 및 분석을 통한 숙주의 역할들을 추정 제시	차별성) 남극 동물 종의 이동경로와 바이러스 검출 결과 및 시공간적 전파 경로 분석 등의 통합적 분석을 통한 HPAI 매개 동물 유추
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	Spillover of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 Virus to Dairy Cattle (Caserta et al, 2024) 기존) HPAI가 가금류에서 소로 중간 전파된 사례의 보고	차별성) 남극에서 남극 동물 종을 대상으로 HPAI 감염에 대해 모니터링을 통해 사례 보고 뿐만 아니라 수용체 분석 및 마커 분석을 통한 지금까지 전무한 남극 동물 대상 감염 위험성 평가를 수행
	High-pathogenicity Avian Influenza In Wildlife: a Changing Disease Dynamic That is Expanding In Wild Birds and Having an Increasing Impact on a Growing Number of	차별성) 남극에 서식하는 고유의 종들을 대상으로 전혀 알지 못하는 HPAI 감염 기작 및 영향에 대한 평가, 위험종의 유 무 등을 분석할 예정

	Mammals (Puryear et al, 2024) 기존) HPAI 감염에서 신경계, 호흡기 감염에 대해 상세하게 설명하고 일부 감염 개체에서 포유류 적응 돌연변이를 확인	
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	감염성 질병예방을 위한 질병-생태 통합 평가시스템 구축 종합연구 (한국환경연구원) 기존) 조류인플루엔자 사례를 중심으로 감염병 유입-확산-대응 정책을 수립하기 위한 연구	차별성) 남극에서 HPAI 발생으로 인한 전반적인 남극 생태계의 영향은 평가되지 않았기 때문에 남극 해양 생태계 특화된 가이드 라인 수립
	해외유입 가능 주요 감염병의 진단 및 관리·대응체계 구축 연구 (질병관리본부 2018) 기존) 해외 유입 신종 감염병 중 16개 질병을 선정하여 대상질병의 진단 현황 제시 및 발병시 질병 특성에 대한 적용 지침과 대응 체계 제시	차별성) 해외 유입 조류들로 인한 조류 인플루엔자와 관련된 간접적인 감염병 전파 가능성에 대한 연구 및 대응 체계 마련 시도 가능
	동물인플루엔자 인체감염증 예방관리 실용화연구 (질병관리본부 2014) 기존) 관련 동물들과 밀접한 관계를 가진 인원들에 대한 고위험군으로 지정 및 예방관리 조치 철저한 수행	차별성) 남극 지역의 고위험군 연구자 대상의 예방조치 및 시설 설치 검토



<표 I -3> 연구개발의 목표수준

상세내역	과거 연구성과 ⇨	현재 수준 ⇨	목표 수준
기술수준	세종과학기지에 서식하는 펭귄의 번식기 행동권 파악	펭귄의 겨울철 이동경로 파악 및 HPAI 매개후보종 2종의 번식기 행동권 일부 파악	GLS 및 위성추적기를 활용하여 HPAI 매개후보종 4종 이상 이동경로 파악
	조류 인플루엔자 바이러스 항원보유 여부 확인	조류 인플루엔자 바이러스 항원 및 유전자 검사	조류 인플루엔자 바이러스 항원 및 유전자 검사를 포함한 신속한 고병원성 여부 파악
	남극 동물에서 바이러스에 대한 병원성 평가 전무	남극 동물 유래 바이러스의 유전자 분석을 통한 병원성 및 특성을 유추	남극 동물의 생체시스템을 모사한 시스템을 활용한 HPAI의 병원성 재현
운용방식	GPS 추적장치를 활용한 번식기 젠투펭귄 및 턱끈펭귄 취식지 분석	- GLS를 활용한 펭귄의 겨울철 이동경로 파악 - 위성추적장치를 활용한 남방큰돌고래 및 남극도둑갈매기 번식기 이동경로 사전조사	GLS 및 위성추적기를 상호보완적으로 활용하여 남방큰돌고래, 남극도둑갈매기, 갈색도둑갈매기, 갈집부리물떼새의 비번식기 행동권 파악
	신속진단 키트를 이용한 항원보유 여부 확인	신속진단 키트/조류 인플루엔자 바이러스 유전자 검사(qPCR)	신속진단 키트/qPCR 및 PCR을 방법을 이용한 AIV의 신속한 고병원성 여부 파악
	평가 운용방식 전무	유전학적 유사성을 근거로 한 병원성 및 생물학적 특성의 유추	남극 동물 모사하는 오가노이드 시스템으로 남극동물에서 나타나는 병원성을 재현 가능
장점	펭귄의 번식기 행동권 정밀 파악 가능	- GLS 이용 시 저비용으로 겨울철 이동경로 파악 가능 - 위성추적기 이용 시 추적장치의 회수없이 번식기 행동권 파악	- 효율적인 비번식기 이동경로 파악 가능 - 향상된 장비를 활용하여 연가 이동경로 분석 가능 - 행동권 및 이동경로를 정밀 파악 가능
	현장적용이 용이함	2시간내의 빠른 시간 소요	고병원성 여부까지 정밀 진단 가능
	-	바이러스의 병원성 유추가 용이	남극 동물을 모사할 수 있으며, 보다 정확한 병원성 특성분석이 가능
단점	자료 수집을 위해 추적장치의 회수 필요 및 비번식기 취식지 분석 불가	- 자료수집을 위해 GLS 회수 필요 - GLS 로거의 정밀도 낮음 - 추적기의 낮은 성능으로 약 두 달간만 확보할 수 있었음	GLS 자료수집 방법에 비해 소모 비용이 큼
	조류 인플루엔자 이외의 파라믹소계열의 바이러스 항원 검출 가능	고병원성 여부 확인 불가	주변국의 협조가 우선시
	-	유전학적으로 유사하지만 전혀 다른 생물학적 특성(병원성)을 나타낼 수 있으며, 유전자에 따라 결과가 달라질 수 있음	남극 동물 오가노이드를 제작하기 위한 시료확보가 어려우며, 오가노이드 제작하기 위한 시간과 비용이 큼

1.3 기존사업 연계방안

<표 I -4> 기존사업과의 연계방안

기존사업(기술·정책 등)	주요특징	연계방안
남극특별보호구역 및 기지 관리 모니터링	ASPA 171 동물상 모니터링 및 번식조류 개체군 파악	(연구 확장) 기존의 한시적인 HPAI 감염 의심사례 모니터링을 위한 1차 진단에서 고병원성 판별 및 전파 경로까지 연구 확장 (건강성 평가) 남극특별보호구역 내 야생동물의 번식 생태 등과 HPAI의 모니터링을 연계한 야생동물의 건강성 평가
	남극 동물에서 특정 바이러스 유전자 검출 확인	- 특정 바이러스 유전자 검출 방법들을 향후 프로토콜화 하여 진단 매뉴얼로 제작 가능 - 남극 동물종에 감염되어 있는 바이롬의 연구까지 연구 확장
A call to innovate Antarctic avian influenza surveillance. Trends in Ecol. & Evol.(Wille et al, 2024)	환경 샘플링과 신속한 현장·전방 감지 및 시퀀싱 기능으로 구성된 '스마트 감시'	시료 수집 시 환경 샘플링을 통한 안전하고 비용 절감하는 방식으로 샘플 수집 고려

2. 기획연구의 목표 및 주요 내용

2.1 기획대상 정의

□ 고병원성 조류 인플루엔자 바이러스(Highly Pathogenic Avia Influenza, HPAI)

○ 인플루엔자 A 바이러스 (Influenza A virus, IAV) 개요

- 인플루엔자 A 바이러스(Influenza A virus, IAV)는 인간뿐만 아니라 소과 동물을 제외한 다양한 포유류와 조류를 숙주로 삼는 넓은 감수성을 지닌 인수공통전염병 병원체임 (그림 I-14)

- IAV는 공중보건 및 가축 방역 분야에서 중대한 영향을 미치는 병원체로, 전염병 발생과 확산의 주요 원인 중 하나로 간주됨

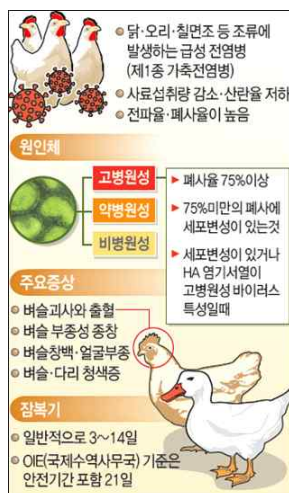
- IAV는 10-18개의 바이러스 단백질을 암호화하는 유전체 구조와 오류율이 높은 복제 기전으로 인해, 유전자 재조합(reassortment)을 유발하고, 이는 높은 유전적 다양성과 적응력을 야기하며 (항원 대변이: antigenic shift, 항원 소변이: antigenic drift) 종 간 전염 및 새로운 변종의 출현을 촉진하여 팬데믹 위험성을 증가시키는 요인이 됨

○ 고병원성 조류 인플루엔자(Avian Influenza) 개요

- 야생의 오리기러기(Anseriformes)와 물떼새(Charadriiformes)는 저병원성 조류 인플루엔자 바이러스(Low Pathogenic Avian Influenza Virus; LPAIV)의 자연 숙주로 알려져 있음

- H5 및 H7 아형 LPAIV는 가금류(Gallinaceous poultry)에서 적응하는 과정에서 HA 단백질의 절단 부위에 염기성 아미노산이 삽입되면서 고병원성 조류 인플루엔자 바이러스(Highly Pathogenic Avian Influenza Virus; HPAIV)로 진화함

- HPAIV는 닭과 같은 Galliformes에서 최대 100%의 사망률을 유발하지만, Anseriformes에서는 다양한 수준의 사망률을 보임



[그림 I-14]. 조류 인플루엔자 바이러스의 특징

2.2 기획연구 목표

○ HPAI 전파 경로 추적 및 예측

- HPAI는 국경을 넘는 전염병으로, 전 세계적인 보건 위협이 될 수 있으므로 남극과 같은 원격 지역에서의 감염 사례는 전 세계적인 확산 가능성을 시사
- HPAI의 전파경로를 추적하고 전파 예측을 통해 초기 대응을 위한 자료를 확보하는 것은 국제 보건 위기를 사전에 예방하고 관리하는 데 중요함

○ 남극 야생동물의 바이러스 유전체 확보

- 남극 야생동물에서 바이러스의 장기적인 모니터링 및 보유 바이러스 다양성을 확인함으로써 남극 야생동물의 건강성 평가에 활용할 수 있는 데이터 확보 가능
- 남극 고유의 환경에 의한 바이러스 유입, 변이, 유출의 과정을 모니터링하여 향후 세계적인 전염병 확산 방지에 중요한 데이터로 활용

○ 종간 전파 가능성과 포유류 감염 가능성 평가

- 남극 내 동물중 HPAI에 취약한 동물종을 파악하고, 남극에서 HPAI 유입과 유행에 따른 생태계에 미칠 영향등을 예측할 수 있음
- 남극 내 야생동물과 직접적으로 접촉할 수 있는 과학기지 거점 현장조사 연구자들의 안전 확보를 위한 중요한 데이터로 활용

○ 대응 체계 참여

- 남극에서의 연구 활동은 다양한 국가들과의 협력을 필요로 하기 때문에 한국이 이러한 국제 연구 활동에 적극적으로 참여함으로써 국제 과학 커뮤니티 내에서의 입지를 강화하고, 글로벌 공중보건 문제 해결에 기여할 수 있음

- 2025년 3월 25일 Antarctic Wildlife Health Network Special HPAI Meeting에서 각국의 HPAI 모니터링 결과 공유 및 협력 필요성 제시
- 우리나라에서는 23/24년, 24/25년 HPAI 모니터링 결과 공유(그림 I-15)

Antarctic Wildlife Health Network Special HPAI Meeting

Presentations and Speakers

21:00 Welcome

21:10 - 21:50 Sub-Antarctic Region

- 21:10 Falklands Wildlife Health - Amandine Gamble
- 21:20 HPAI dynamics in South Georgia - Augustin Clessin
- 21:30 ECOPATHS - Thierry Boulintier
- 21:40 HPAI Planning and Surveillance on Marion Island - Laura Roberts
- 21:50 Seabird research at the sub-Antarctic Prince Edward Islands - Laura Roberts

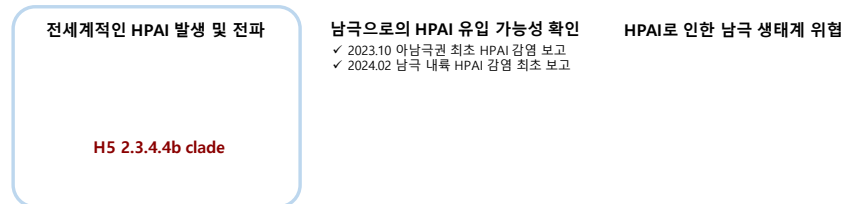
21:50 - 22:55 Antarctica

- 21:50 ANTPATH - Meagan Dewar
- 22:00 Brazilian Antarctic Program (PROANTAR)/ Surveillance of Pathogens, Their Impacts on Global Health, and Research on the Biotechnological Potential of the Antarctic Microbiota for Health - Maria Ogrzewalska
- 22:10 Chilean Antarctic Expedition INACH-UCHILE - Victor Neira
- 22:20 Millennium Institute BASE - Juliana Vianna
- 22:30 Surveillance of HPAI in Antarctica - Suk Young Lee**
- 22:40 UTAS 24-25 Antarctic Season - Jane Younger
- 22:45 CSIC-UNESPA Antarctic Expedition - Antonio Alcamí



[그림 I-15]. SCAR AWHN special HPAI meeting

- 한국이 선도적으로 남극보호구역 내에서의 한국 관할 지역에 대해서 효과적으로 관리할 수 있음
 - HPAI 대응에 대한 제도적 공백이 존재하며, 과학적 기반으로 구체적인 대안 제시 필요
 - 국내 HPAI 대응 체계를 남극에 적용하기 어렵기 때문에 남극에 최적화된 체계 마련 필요
- 남극에서 HPAI 감염 확산될 경우의 국제적 가이드라인 제공
 - 오가노이드나 간이 키트와 같은 기술적으로 빠른 대처법을 특히 전략으로 활용하고 국제 거버넌스에서 한국의 역할을 제안 (그림 I-16)



(아)남극권 HPAI 유입 감시 및 대응이 국제 주요 안전으로 상정
남극지역 내 HPAI의 전파 경로 파악 및 진단 방법 미흡

보호/관리/대응 방안 마련 필요
다학제적인 정보 수집과 연구 필요

[그림 I-16] 연구개발 대상 현황 및 필요성 모식도

2.3 기획연구 주요내용(범위)

○ (HPAI 전파 추적) 잠재적인 바이러스 매개조류의 이동경로 추적

- 남극 회귀조류의 HPAI 발생지역 경유 이력 및 바이러스 유래 추적
 - 남극을 번식지로 매년 이동하는 철새를 남극을 기준으로 보았을 때 회귀조류로 표현
- 취식이동 관련 번식조류의 남극 내 HPAI 발생지역 방문 및 병원체 이동 경로 파악
 - 바이오로깅 기술: 동물의 몸에 추적장치나 카메라 등의 장비를 부착하여 동물의 행동과 생리를 파악하는 연구 방법
 - 위성 추적 장치(Global Positioning System, GPS): 장치의 위치를 위성으로 송신하여 정밀한 위치를 추적하는 장비로, 중대형 조류의 정밀 위치추적을 위해 이용하는 장비
 - 지오로케이터(Geolocator, GLS): 초소형의 위치추적장치로 일출-일몰 시간과 태양 남중 시간을 빛센서로 감지해서 위경도를 추정하는 바이오로거. 수십-수백km 오차가 발생하기에 정밀 위치 추적은 불가하며, 주로 먼 거리를 이동하는 소형조류를 대상으로 이용하는 추적 장비
- 조류 집단번식지에서 중간 접촉을 통한 HPAI 전파경로 추적

○ (극지동물의 바이러스 다양성) 조류/해양포유류 보유 바이러스 파악

- 잠재적 HPAI 매개 조류의 보유 바이러스 유전체 분석
- 펭귄 집단이 보유하고 있는 바이러스 유전체 분석
- 해양포유류 집단에서의 HPAI 감염 현황 조사

○ (HPAI 위험성 평가) 남극동물 대상 HPAI 감염 위험성 평가

- HPAIV 양성 시료를 활용한 HPAIV 특성 분석

- 8개의 RNA 분절(segment)로 이루어진 단일 가닥 음성(-) RNA 바이러스 생성 과정: 공동 감염 이후 RNA 분절 혼합으로 새로운 바이러스 생성
- 바이러스의 전장 유전체 확보: 바이러스의 cDNA 합성과 PCR 진행
- 종과 전파 가능성을 높이는 유전자 마커 분석을 통해 데이터셋 구축
- 데이터셋과의 비교 분석을 통한 인플루엔자 바이러스 항원성 예측 분석: 신규성과 항원성을 고려해서 바이러스 대표주 선정

- 감염성 클론 제작 및 병원성 평가

- 평가 지표: 유전자 분석, 숙주 수용체 결합능 측정, 사람 호흡기 세포에서의 증식성 측정, Fusion pH 측정, 항원성 평가, 항바이러스 감수성 측정에 따라 평가

- 바이러스 연구용 오가노이드 기술 활용

- 오가노이드: 실험동물 또는 인체에서 유래한 세포의 자가조직화 능력을 이용하여 3차원 증식을 유도하고 이를 생체모델시스템으로서 활용하는 생명공학 기술
- 이를 통해 질환 모델링, 바이러스 변이 메커니즘 연구, 신약-백신 개발 플랫폼 구축 등 다양한 분야에서 응용할 수 있음

- HPAI 수용체 분포 조사를 통한 감염민감성 평가 및 취약동물 종 확인

- AI유전자 마커분석 및 수용체 결합연구를 통한 포유류 감염 가능성 예측

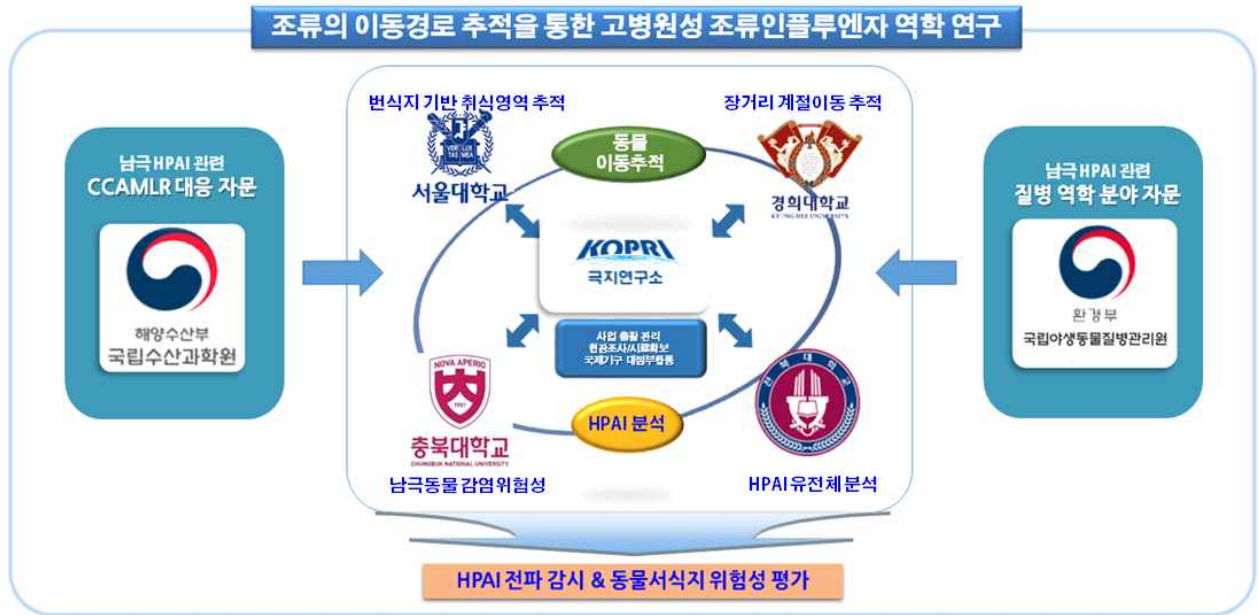
○ (HPAI 대응체계 참여) 남극지방 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

- 남극조약 체계의 거버넌스 구조는 남극 지역의 평화적 이용, 환경 보호, 과학적 연구 촉진이라는 목표를 달성하기 위해 설계된 다층적이고 상호 연결된 기구들로 구성됨

- 조약 체계의 원활한 운영과 국제적 협력을 보장하는 외부 협력 기구로 구성되는 통합적 거버넌스 체계가 형성되어 왔으며, 해양생태계 합리적 사용과 보존을 위해 남극 조약에 기반하여 남극해양 생물자원보존협약 또는 남극환경보호 의정서가 채택되었듯, 새로운 거버넌스가 형성될 수 있음

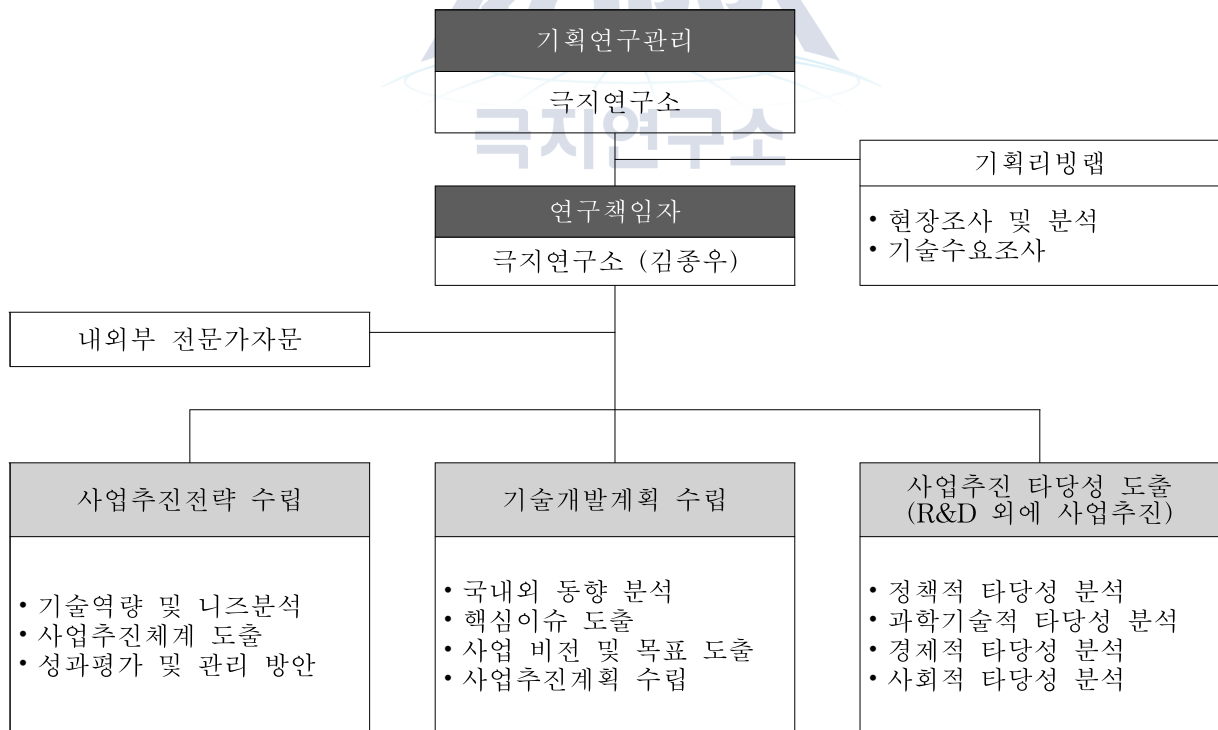
- 감염 가능 병원체 대상 진단 프로토콜 제작 및 관련 국제 대응 체계 참여

2.4 기획연구 추진체계



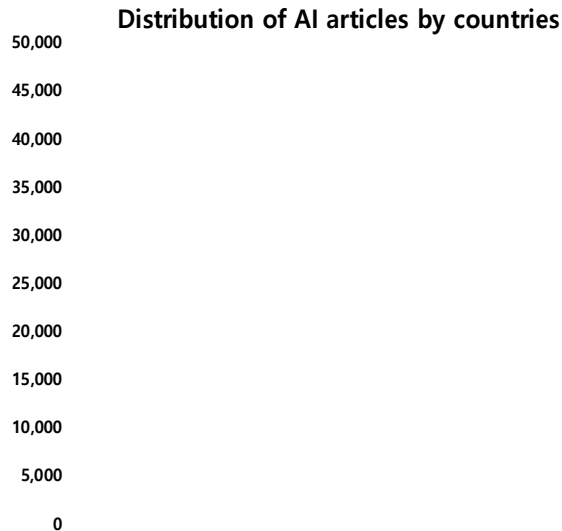
[그림 I-17] 역학 연구 추진 연구 협의체 구성도

<표 I-5> 기존연구 추진체계



○ 조류인플루엔자 연구는 선진국들을 중심으로 수행되고 있는 상황

- 조류인플루엔자에 관한 연구는 주로 미국과 유럽권 국가에서 주로 이루어졌으며, 동아시아 권에서도 한국이 다른 나라(중국, 일본)에 비해 게재된 논문 수가 상대적으로 적은 편(그림 II-3).



[그림 II-3] 나라별 조류인플루엔자 논문 수(1900-2024)

- 국내외 학술 검색 서비스(Web of Science, Kiss, Riss)를 통해 확인된 국내 논문은 국외 연구와 마찬가지로 의학, 보건 및 분자생물학 분야에 주로 치우쳐져 있는 상황임.

○ 남극권 조류인플루엔자 연구는 미비한 편

- 조류인플루엔자와 남극을 모두 포함하는 논문('Avian Influenza' or 'Avian flu' or 'Bird flu' or Influenza A' or 'HPAI' and 'antarctica' or 'south polar' or 'antarctic')은 총 51편의 논문만이 확인 되었으며, 전체 조류인플루엔자 논문에서 0.05%라는 적은 비중을 차지함 (그림 II-4).

Articles of Avian Influenza

**Antarctica
0.05%**

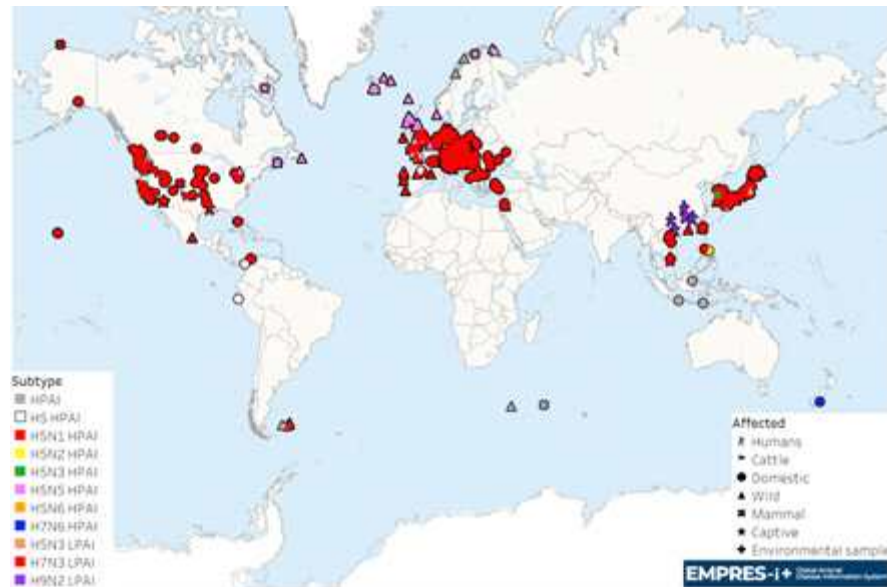
Veterinary
Environmental Sciences
Ecology
Biodiversity conservation
Multidisciplinary Sciences

[그림 II-4] 조류인플루엔자 논문 중 남극 관련 논문의 비중

1.2 정책동향 및 역량

□ HPAI 해외 발생현황

- 아시아, 유럽 및 아프리카 대륙에서도 HPAI가 거의 매년 발생하고 있고, 가금산업과 야생조류의 피해가 확대되고 있는 추세



[그림 II-5] 2022년 AI바이러스의 확산 현황

- 1997년 H5N1 고병원성 AI에 의한 홍콩 조류독감이 세계 최초로 발생한 이후, 2003년도부터 전세계적으로 급속히 확산되는 중 (그림 II-5)
 - 대륙별, 국가별로 HPAI 바이러스가 광범위하게 발생하고 있으며, 지속적인 바이러스 유전자 변이와 병원성 변화로 범지구적 피해가 확대되고 있을 뿐만 아니라 HPAI 발생에 있어서 글로벌 동조화 현상이 뚜렷해짐
 - 유럽에서는 '21/22년 동안 H5N1 HPAI 바이러스에 의한 역대 최고의 대규모 HPAI 발생
 - 중국을 비롯한 아시아 지역에서는 H5Nx라고 명명된 H5N1, H5N2, H5N6, H5N8 등의 AI 바이러스 유전자 아형(subtype)에 의하여 AI 바이러스의 생태계에 다양한 변화를 경험 중
 - 미국의 경우, '10년대 초까지 H5Nx에 의한 HPAI 발생이 없었으나, '14~'15년에 당시 세계적으로 확산된 H5N8 바이러스에 의하여 대규모 HPAI 발생 피해 및 2022년 역대 최대 규모 HPAI 발생
- 1996년 중국 광둥에서 H5N1 변이주가 처음 확인된 이후, 대륙 간 전파에서 H5Nx으로 표현되는 변이형 확산으로 시대별 4번의 큰 파동이 보고됨
 - ①'05~'06: 아시아, 유럽 및 아프리카 확산, ②'09~'10: 아시아 및 유럽 확산, ③'14~'15: 아프리카, 아시아 및 유럽 전역 확산, ④'16~'17: 아프리카, 아시아 및 유럽 전역 확산

□ HPAI 국내 발생현황

- 국내의 경우 '03년 H5N1로 인한 HPAI 발생이후 최근까지 10차례의 HPAI 발생(그림 II-6)



[그림 II-6] 국내 HPAI 발생 현황

차수	년도	특징
1	2003/04년	■ 오리에 의한 전파 확인
2	2006/07년	■ 중국-동남아발 전파 발생
3	2008년	■ 재래시장과 중간상인으로 인한 전파
4	2010/11년	■ 철새와 야생조류로 발생하는 것에 대한 근거자료 구축
5	2014/16년	■ 최장기간 발생
6	2016/17년	■ 야생 조류와 철새에 의해 대규모 피해 발생
7	2017년	■ 경미한 피해로 종식
8	2017/18년	■ 철새로 부터 광범위한 독립적 감염
9	2020/21년	■ 야생조류 위험성 재확인
10	2021/22년	■ 유럽, 미국, 일본도 역대 최대 HPAI 피해 발생 등 광범위한 야생조류 감염으로 전세계적 확산 추세

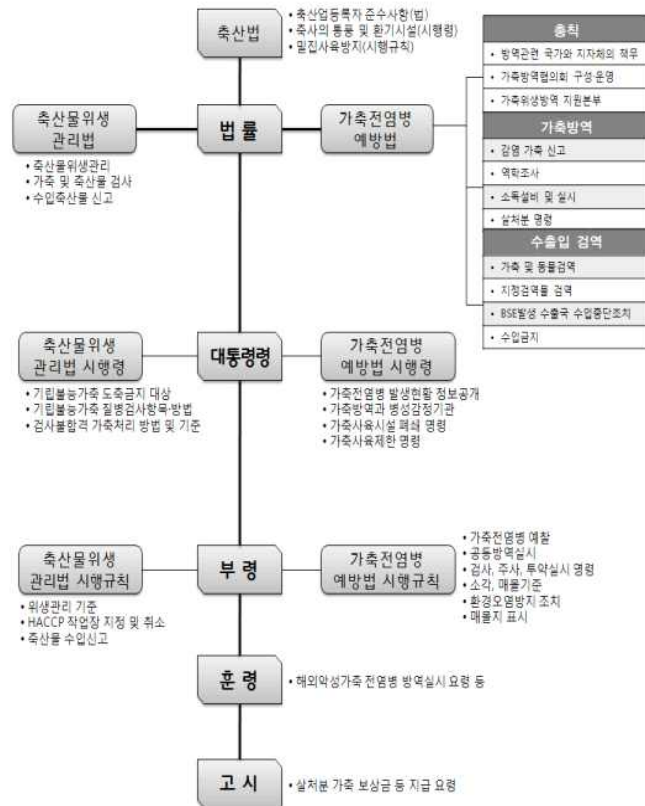
- 2016~2017년 야생조류에서 발견된 HPAI 항원은 65건, 가금 농장 발생은 377건으로 집계되며, 사람,차량 등을 통한 2차전파(수평전파)가 이루어진 것으로 밝혀짐
- 2020~2021년도 야생조류 발견은 229건으로 증가하였으나 가금 농장 발생은 108건으로 감소하였으며, 이는 방역강화를 통한 농장간 수평전파 확산 감소로 판단

HPAI 방역 변화 요인

1. 2017년까지 500m 예방적 살처분 거리를 3km로 확대
2. 가금 농장 진단 검사 주기를 월 1회에서 격주 1회로 실시
3. 가금류 개체 외 농장시설 및 토양 등 환경에 대한 추가 검사 실시
4. 철새 도래지 주변 야생조류 사체 및 분변 검사하는 지인망식 방역
5. 유럽, 일본 등에서 3~7일 소요되는 HPAI 진단 결과를 3~4시간 만에 진단할 수 있는 기술 도입
6. 현장 담당자를 위한 매뉴얼 조성

- 특별방역대책 기간 설정: 정부는 매년 겨울철 HPAI 발생 위험이 높아지는 시기에 특별방역대책 기간을 설정하여 방역 관리를 강화함
- 위기경보 단계 조정: HPAI 발생 상황에 따라 위기경보 단계를 상향 조정하여 대응 체계를 강화
- 부처 간 협력 강화: 질병관리청과 농림축산식품부 등 관련 부처 간 협력을 통해 HPAI 대응 역량 강화
- 초동대응 능력 향상: 지자체와 관련 기관은 HPAI 발생 시 신속한 초동대응을 위해 가상 방역 현장훈련(CPX)을 실시하여 대응 역량을 강화

- 인체감염 예방 교육: HPAI 발생 시 인체감염 예방을 위해 지자체 대응 요원을 대상으로 선제적 교육을 실시하여 대응 역량을 강화
- 방역 조직 및 체계 개선: HPAI 방역 정책의 개선 방향으로 농장 차단 방역 기준 마련, 가금산물 유통 체계 개선, 소독제 관리 및 연구개발(R&D) 강화, 철새 대응 체계 정비, 예찰 체계 정비 등 예방 체계를 강화
- 조류 인플루엔자 긴급행동지침(SOP): 농식품부(검역본부)와 환경부(국립생물자원관)가 협력하여 철새 도래 현황과 예찰 및 검사 결과를 관계자에게 제공함
- 우리나라의 AI 사체 처리 대응은, 농림축산식품부의 AI SOP (2024년 9월 개정)의 「별표 11 살처분 및 사체 처리요령」에 따라 이루어지고 있으며, 대부분의 경우, AI 발생 상황에서 전파 방지를 위한 살처분과 관계된 행정적 조치 및 시행과 처리 방법 등으로 구성되어 있음(그림 II-7)
- 기본적으로 매몰법에 집중하고 있으며, 그 외에 랜더링, 열처리 및 소각시설의 활용 등을 설명하고 있으며, 야생조류에 대한 지침은 국립생물자원관의 생물분류 현장전문가 지침에서 기술되어 있는 사체의 밀봉처리, 개인 위생 및 활동 후 개인 위생 및 행동, 물품의 세척 등에 대하여 기술됨



[그림 II-7] 가축 질병 방역 및 검역 관련법 구성 및 내용(Korea Rural Economic Institute, 2016)

- 국내외에서 조류 인플루엔자 감염에 의한 생물의 폐사 및 그에 대한 처리는 가금류 대상으로 가이드라인을 마련함
- 대부분의 경우 축산업 연관된 가금류에서의 질병 발생 및 확대 방지, 예방과 관련한 내용들로 실제 남극과 같은 특수한 환경 내에서 적용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단됨
- 접촉자 등을 7일간 관련 업무에서 배제하거나 하는 일부 지침들의 경우, 남극의 연구 환경에 따라 조절할 필요가 있을 것으로 보임

□ 남극지역 HPAI 발생관련 정책 동향

○ 국제 사회에서 (아)남극권 내 고병원성 조류 인플루엔자 (HPAI) 유입 감시 및 대응 조치가 주요 안건으로 상정됨

- 국외의 경우 국내와 같이 주로 축산업 관계 기관 및 호주 및 미국 등 축산업의 영향이 있는 국가들 위주로 관련 가이드라인들이 작성 후, 활용되고 있으며 야생동물 및 필드의 야생동물 사체 관리에 대한 구체적인 규정은 확보하기 어려운 실정
- 2024년 제46차 남극조약협약당사국 회의(ATCM)에서 조류 인플루엔자의 남극지역 확산 방지 및 유입 시 대책 등이 논의됨
- 세계동물보건기구(WOAH)는 회원국들에게 야생동물의 HPAI 발생에 신속하고 철저한 대응을 권장하고, 동물 보건 감시, 보고, 대비 및 대응 시스템에 야생동물 보건 통합 강조

- 세계동물보건기구(WOAH, OIE)에서 권장하는 국가별 HPAI 예찰 프로그램의 필수 구성요소는 ① 검사 시료를 통한 위험성 자료 수집, ② 수집 정보의 가공, 관리 및 질병 발생 조기보고 시스템 운영, ③ HPAI 바이러스 검출 또는 질병 발생에 따른 역학 및 실험실적 조사, ④ 조사 결과의 총체적 분석과 위험성에 대한 대국민 소통을 포함함

○ 남극 거버넌스 내 HPAI 관련 국제기구 동향 분석

- 2023년 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)에서는 선박과 조우하는 조류 및 포유류를 통한 HPAI의 전파방지를 위해 회원국들에게 관련지침서 배포 등을 통해 선제적 대응 권고
- 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)와 고병원성 조류인플루엔자(HPAI)

- 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)는 남극 주변 해양 생물자원의 보존과 지속가능한 이용을 목적으로 1982년에 설립된 국제기구로, 남극해 생물다양성을 보호하고, 과도한 어업 활동으로 인한 자원고갈 및 생태계 파괴를 방지를 목적을 위해 회원국 간 협력 활동으로 국제적 보존 노력을 조율함.
- CCAMLR 협약수역에서 고병원성 조류인플루엔자 출현을 공식화하고 관련 정보를 제공하고 있으며, 회원국, 세계동물보건기구(WOAH), 남극연구과학위원회(SCAR)의 남극 야생동물 보건네트워크, ACAP(Agreement on the Conservation of Albatrosses and Petrels) 등과 협력하여 대응 방안을 조율하고 있음.

- CCAMLR 해역 내 HPAI 관한 지침(SC CIRC 23/106)

- 2023년 12월 사무국은 “CCAMLR 해역 내 선박의 고병원성 조류인플루엔자(HPAI)에 관한 바닷새 및 해양포유류 처리 및 폐기에 관한 지침”을 발표,
- 고병원성 조류인플루엔자의 감염경로, 치사율, 인수감염 가능성에 대한 정보를 제공, 선박의 예방 조치 및 지침을 작성하여 권고함. 본 지침은 ①살아있는 동물/죽은 동물 발견 시 보호장비(PPE)를 착용 후 즉시 바다로 돌려보내기/폐기, ②동물 접촉 후 위생관리 철저(비누, 소독제 사용 등), ③바닷새 또는 해양포유류 혼획 완화 절차 지키기, ④바닷새 또는 해양포유류의 이상행동 발견시 당국보고 등의 사항을 포함하고 있음

- CCAMLR 생태계 모니터링 및 관리 작업반(WG-EMM) 활동 내 HPAI 관련 논의

- 48.3해역 Bird Island에서 3종의 조류, 1종의 해양포유류(wandering albatross(Diomedea exulans), brown skua(Stercorarius antarcticus), gentoo penguin(Pygoscelis papua), Antarctic fur seal(Arctocephalus gazella))에서 HPAI(H5N1)의 발생이 확인, 보고되었으며 급격한 사망률 증가, 바이러스 확산이 관찰됨.

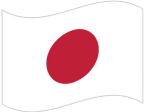
- 먹이경쟁, 어업으로 인한 우발적 사망 등으로 2007년 이후 급격히 감소 중인 South Shetland Island (SSI)의 Antarctic fur seals 개체군이 HPAI(H5N1) 감염에 의해서도 위협받고 있음을 확인하여 상황에 대한 모니터링의 중요성이 강조됨.
- 작업반에서는 각 회원국의 남극프로그램을 통해 HPAI 감염사례를 남극조약협약당사국회의(ATCM), 남극연구과학위원회(SCAR), 남극프로그램관리자이사회(COMNAP)에 보고하는 절차를 논의, CEMP 사이트에서 확인되거나 의심되는 사례에 대한 정보를 데이터 해석과 데이터 수집 단계의 이해를 위해 사무국에 제공하기로 합의함.
- 향후 몇 년간 협약수역 내 HPAI 감염이 지속될 가능성을 대비하여 작업반은 CEMP 사이트에서의 HPAI 정보를 수집하는 양식개발을 사무국에 요청
- 작업반은 이미 공개된 「CCAMLR 해역 내 HPAI 관한 지침」을 남극조약협약당사국회의(ATCM)의 권고사항에 맞추어 수정하여 회원국에 배포를 권고
- 추가된 사항: 보호장비를 구체화(일회용 라텍스장갑, N95 마스크사용, 보안경 등)/ 분변 등의 세척을 위해서는 저압력의 물줄기를 사용하여 에어로졸에 의한 감염을 방지하는 방법, 세척시 바이오사이드(소독제)의 사용을 권장하고 있으며/ 알려진 HPAI 임상 증상(무기력, 발작, 설사 등)을 구체적으로 추가하여 감염의 감지할 수 있도록 하였으며, 감염 징후를 기록하기 위한 사진 또는 녹화의 중요성을 강조/ 마지막으로 HPAI 관련 정보 링크를 추가하여 다양한 출처의 정보를 확인할 수 있도록 함.



○ 해외 국가 동향 분석

<표 II-1> 국가별 조류 인플루엔자 및 인수공통감염병 관리 현황

국가	조류 인플루엔자 담당 부처	조류 인플루엔자 정책	인수공통감염병 담당 부처	인수공통감염병 정책
 한국	- 농림축산식품부(MAFRA)와 검역본부(QIA). - 환경부 산하 국립야생동물질병관리원. - 중앙방역대책본부와 지방자치단체가 협력.	- 전국 단위 감시 시스템: 주요 철새 도래지와 가금류 농가 대상 정기 검사. - 이동 제한 및 소독: 감염 지역 주변 10km 이동 금지와 매일 소독. - 살처분 기준 강화: 감염 우려 지역 가금류를 선제적으로 살처분. - 철새 관리 강화: 겨울철 철새 도래지 집중 방역. - 주변국가와 철새 이동경로 공유 및 공동 대응. - 야생조류 조류인플루엔자 표준행동지침(AI SOP) 배포: 긴급 조치 사항, 조사 등 요령 포함	- 질병관리청(KDCA): 인간 건강과 관련된 감염병 관리. - 농림축산검역본부(QIA): 동물 감염병 및 축산 방역. - 농림축산식품부(MAFRA): 가축 방역 및 동물복지.	- 인수공통감염병 협의체 운영: 부처 간 협력을 강화하여 조기 대응. - OneHealth접근법: 인간, 동물, 환경 건강을 통합 관리. - 국가 방역체계 강화: 고위험 병원체에 대한 감시 및 검사 체계 구축. - 철새 및 야생동물 감시: 주요 전파 매개체로 알려진 동물 집중 모니터링.
 미국	- 미국 농무부(USDA) 산하 동물식물검역국(APHIS): 바이오안전성 강화, 감염 조기 탐지, 감염된 가금류의 신속한 제거 등 다양한 전략을 통해 질병 확산을 방지, 미국에서 발생한 조류독감 발생에 대한 정보 제공 - 질병통제예방센터(CDC)도 인간 감염 가능성 조사에 관여. - USGSNationalWildlifeHealthCenter: 야생조류의 조류 인플루엔자 감시에 대한 추가 정보 제공.	- 조기 탐지 및 보고: 국가 동물보건 네트워크를 통해 조기 감시 체계 운영. - 살처분 및 방역: 감염된 가금류는 즉각 살처분하며, 이동 제한 조치를 시행. - 백신 개발: 비상 상황에 대비한 조류 인플루엔자 백신 개발 및 비축. - 국제 협력: 세계동물보건기구(WOAH) 및 FAO와 협력해 글로벌 확산 방지.	- 질병통제예방센터(CDC): 인간 감염병 대응. - 농무부(USDA): 동물 감염병 예방 및 관리. - 국립야생동물보건센터(NWHC): 야생동물 관련 질병 관리.	- One Health Initiative: 인간, 동물, 환경 간 상호 연관성을 고려한 정책. - ZoonosesEducation: 지역사회 및 농장 소유주 대상 교육 프로그램 운영. - 질병 감시 네트워크: 국경 및 농장 중심으로 질병 조기 경보 시스템 구축. - 연구 투자: 병원체와 동물 간 전파 메커니즘 연구.
 EU	- 유럽식품안전청(EFSA)와 유럽질병예방통제센터(ECDC)가 주요 역할 수행. - 회원국별 농업부 및 환경부가 조율.	- EU 통합 감시 시스템: 조류 인플루엔자 발생 현황 데이터베이스 운영. - 지역 격리: 감염 지역 주변 이동 제한 및 통제 구역 설정. - 비상 대응 계획: EU 차원의 표준화된 비상 대응 프로토콜 마련. - 지속적 연구: 바이러스 변종 및 백신 효과성에 대한 지속적 연구 투자.	- 유럽질병예방통제센터(ECDC): 인간 감염병 모니터링 및 예방. - 유럽식품안전청(EFSA): 동물 감염병 및 식품 매개 병원체 연구.	- One Health Framework: EU 차원의 통합 보건 접근법 도입. - EUZoonosesMonitoringDirective: 회원국 간 통일된 감시 및 보고 체계 운영. - 야생동물 및 가축 관리 강화: 주요 감염원 모니터링 및 차단. - 위생 기준 강화: 식품 및 농업 관련 위생 기준을 정비하여 인수공통감염병 예방.

 영국	환경식품농림부(DEFRA)가 주도하며, 스코틀랜드, 웨일스, 북아일랜드는 각각의 보건 당국이 관여.	1) National Control Plan: 국가 통제 계획을 통해 조기 감지 및 대응 강화. 2) 농장 생물안전성 강화: 바이러스 전파 방지를 위한 농장 관리 지침 제공. 3) 공공 커뮤니케이션: 위험 수준에 따른 대중 정보 제공 및 캠페인.	1) 영국 보건안전청(UKHS): 인간 건강 관련 감염병 관리. 2) 환경식품농림부(DEFRA): 동물 감염병 및 농업 방역 정책.	- Zoonoses National Control Programme: 국가 차원의 통제 프로그램 운영. - OneHealthApproach: 학계, 산업계, 정부 간 협력 강화. - 질병 발생 보고 시스템: 농가 및 의료기관에서의 실시간 보고 체계 구축. - 항생제 내성 관리: 동물에서의 항생제 사용 규제.
 일본	- 농림수산성(MAFF). - 환경성(MOE) - 필요 시 내각부, 후생노동성(MHLW)도 인간 감염 방지에 관여.	1) 농가 감시 체계: 농가의 정기 검사 및 의심 사례 즉각 보고 의무화. 2) 긴급 대응 매뉴얼: 감염 발생 시 살처분, 방역, 이동 제한 등의 프로세스 상세화. 3) 백신 사용 제한: 일반적인 예방 접종보다는 감시 및 방역에 집중.	1) 후생노동성(MHLW): 인간 감염병 관리 및 연구. 2) 농림수산성(MAFF): 동물 방역 및 농업 정책.	- 조기 정보 체계 강화: 주요 동물 및 인간 병원체 실시간 감시. - OneHealth실현: 인간과 동물 간 감염 질병 대응을 통합 관리. - 국제 협력: WHO 및 OIE와 협력해 정보 공유. - 교육 및 캠페인: 감염병 예방을 위한 대중 교육 강화.
 캐나다	- 캐나다 식품검사청(CFIA). - 보건부(Health Canada)와 협력해 인간 건강 문제도 감독.	1) HPAI 대응 계획: 감염 발생 시 긴급 살처분, 이동 제한, 역학 조사 진행. 2) 생물안전성 교육: 가금류 농가 및 운송업자 대상 교육 제공. 3) 철새 감시: 철새 이동 경로에 따른 감염 위험 예측.	1) 보건부(Health Canada): 인간 감염병 대응. 2) 캐나다 식품검사청(CFIA): 동물 감염병 관리. 3) 공중보건청(PHAC): One Health 관련 연구와 정책 조정.	- Multi-Sectoral Approach: 인간, 동물, 환경 간 교차 분야 협력 체계 구축. - 질병 감시 네트워크: 캐나다 전역에서 병원체 발생 모니터링. - 백신 및 치료제 개발: 주요 병원체에 대한 백신 연구. - 교육 및 대중 캠페인: 인수공통감염병 위험에 대한 인식 제고.
 호주	- 농업, 수산 및 산림부 (Department of Agriculture, Fisheries and Forestry) - 보건 및 고령화부 (Department of Health and Aged Care) - WildlifeHealthAustralia - Outbreak.gov.au	1) 철새 및 야생 조류 감시: 국경 내 바이러스 유입 차단. 2) 응급 대처 계획: 국가 조류 인플루엔자 비상 대응 지침(National AI Response Plan) 운영. 3) 국경 검역 강화: 해외에서 유입되는 농산물 및 가축 검사.	1) 보건부(Department of Health): 인간 건강과 관련된 감염병 관리. 2) 농업수자원환경부(DAWE): 동물 감염병 및 생태계 관리.	- National Zoonoses Framework: 연방 및 주정부 간 협력 체계 구축. - 야생동물 관리 강화: 고위험 동물군의 감시 체계 확립. - 질병 진단 역량 강화: 빠른 대응을 위한 실험실 및 진단 시스템 정비. - OneHealthProgram: 인간-동물-환경 건강의 상호 작용에 기반한 통합 정책.

1.3 산업동향

□ 국내외 관련 산업 및 시장 현황

○ 국내외 시장 규모

- 글로벌 시장: 미국, 유럽 등 주요 가금류 생산국에서도 HPAI 발생 시 가금류 살처분과 수출 제한 등으로 인해 산업 전반에 큰 영향을 받으며, 대표적인 예로 2022년 7월 미국 농무부(USDA)는 미국 36개 주에서 4,009만 마리의 새가 HPAI에 감염되었다고 보고됨
- HPAI 진단 기술을 포함한 가금류 진단 시장은 2024년 약 9억 7,820만 달러에서 2032년까지 23억 340만 달러로 성장할 것으로 예상되며, 연평균 성장률(CAGR)은 11.3%로 전망됨
- 국내 시장: 한국은 가금류 산업의 규모와 HPAI 발생 위험성을 고려할 때, 감시 기술에 대한 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상됨(2008년 당시 국내 HPAI 발생 시 방역비용과 생산단계 피해액이 총 3,288억 원에 달했음)

○ 국내외 HPAI 관련 주요 업체 및 기관 현황

- 국내 업체 및 기관

- 씨젠(Seegene): 분자진단 전문 기업으로, 다양한 감염병 진단 키트를 개발 및 공급하고 있음
- 바이오니아(Bioneer): 유전자 분석 및 분자진단 분야에서 활동하며, 조류인플루엔자 진단 키트를 제공하고 있음
- 농림축산검역본부: 가축 감염병 및 농가의 HPAI 감시와 방역을 총괄하며, 전국적인 모니터링 시스템을 운영
- 국립야생동물질병관리원: 야생조류를 통한 국내 HPAI 전파 감시를 강화하기 위해 일본 야마시나조류연구소와 공동으로 현장조사를 진행하는 등 국제 협력을 추진

- 국외 주요 관련 업체 및 기관 현황

- IDEXX: 동물 진단 분야의 글로벌 리더로, 조류인플루엔자 진단 솔루션을 제공함
- Zoetis: 동물 건강 분야의 선도 기업으로, 가금류 질병 진단 및 예방 제품을 개발하고 있음
- 세계동물보건기구(OIE): HPAI 발생 국가의 보고를 받고, 국제적인 방역 지침을 제공
- 미국 농무부(USDA): HPAI 발생 시 방역 조치와 산업 지원을 담당

○ 예측 및 전망

- 인공지능(AI)과 사물인터넷(IoT)을 활용한 조기 경보 시스템 개발이 활발히 진행되고 있으며 이와 같이 여러분야의 융합된 기술이 개발될 전망이다

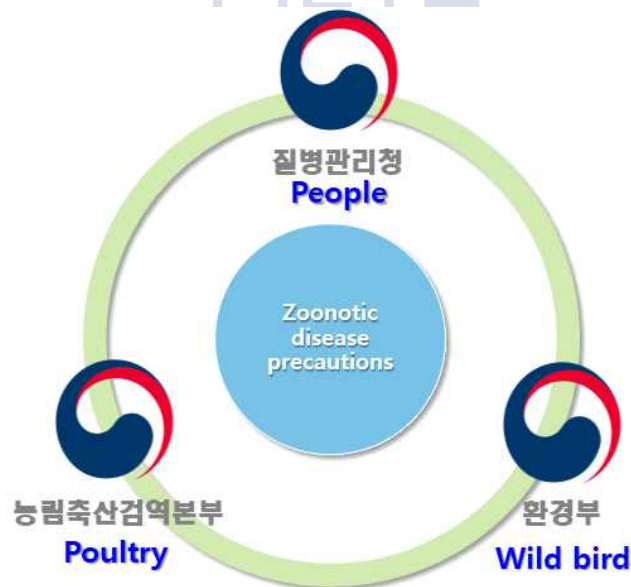
1.4 기술 및 인프라 동향

○ 남극지역 내 고병원성 조류 인플루엔자(HPAI)의 전파 경로 및 진단 방법 미흡

- 남극 내 극한환경 및 기상조건으로 인해 조류의 장거리 이동추적 연구가 제한적으로 이루어짐
- 2023/24년 남극에 전파된 HPAI의 매개종과 전파경로가 확인되지 않았으며, 특히 남극 현장에서 유전자 기반 정밀 진단 시스템이 부재하기에 간이 조사만 수행되었기에 제한적인 실험 및 분석만 수행됨
- 초기 감염단계에서 낮은 바이러스 농도를 감지할 수 있는 진단기술 활용성이 낮으며, HPAI 연구에서 세포주 및 동물 모델 시스템이 제한적인 상황

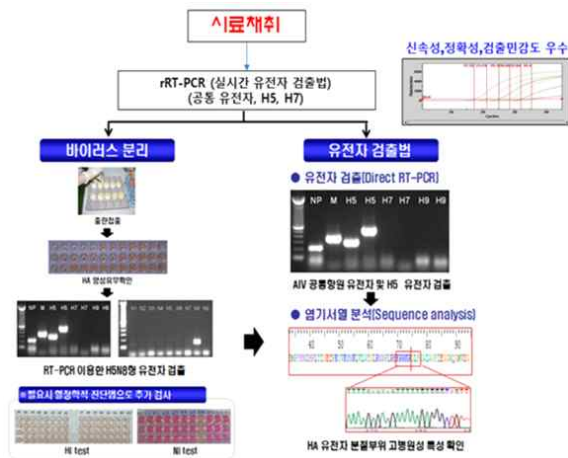
○ 국내

- 원헬스 관점에서 다부처간에 서로 협력하여 HPAI에 대한 조기 감시 체계를 구축하고 있음(그림 II-8)
- Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 및 International Association of Antarctica Tour Operators (IAATO)와 같은 기구와의 협력을 통해 과학적 데이터를 교환
- 한국 연구팀은 남극 현장에서 직접 샘플을 수집하고, 이를 분석하여 HPAI의 전파 경로를 추적함
- 한국은 분자 생물학적 방법을 포함한 다양한 진단 기술을 활용하여 남극지역에서 HPAI의 감염 여부를 조사하고 있으며 유전자 염기서열 분석과 같은 고급 기술을 이용하여 바이러스의 유형과 변종을 식별하고 있음



[그림 II-8] 국내 인수공통감염 조기 감시 체계

- 각 부처별로 HPAIV 진단 및 정보를 공유하고 방역 대책을 수립함(그림 II-9)



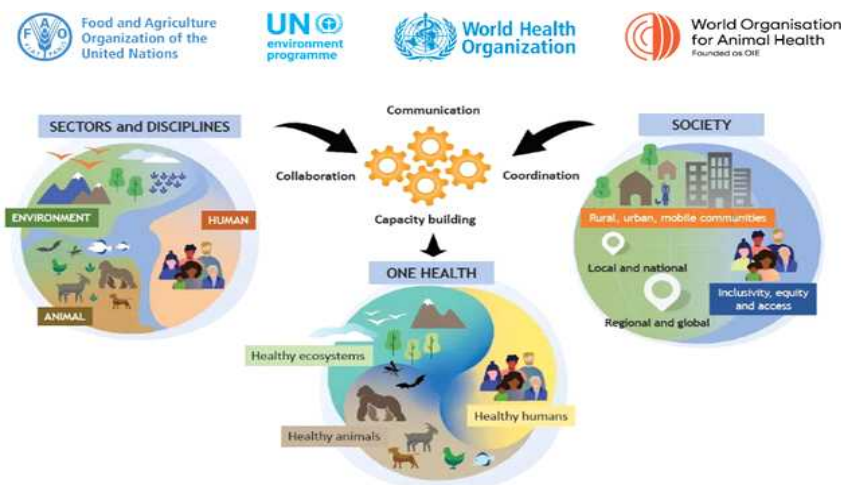
농림축산검역본부의 체계

환경부의 체계

[그림 II-9] 부처별 조류 인플루엔자 바이러스 진단 및 보고 체계

○ 국외

- 전 세계적으로도 원헬스 관점에 입각하여 다부처간의 협력 체계를 구축하고 있음(그림 II-10)
- 여러 국제기구와 연구소가 협력하여 남극의 HPAI 감시 및 연구를 수행
 - Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 및 International Association of Antarctica Tour Operators (IAATO)와 같은 기구들이 중심이 되어 활동
- 남극에서의 직접적인 필드 조사를 통해 HPAI의 존재 및 확산을 모니터링하고 있음
 - 이러한 조사는 바이러스의 전파 경로를 추적하고, 관련 종에 대한 정보를 수집하는 데 중요함
- 현장에서 채취한 샘플을 분석하기 위해 대량 고급 유전자 분석 기술을 사용하고 있음
 - 이러한 분석은 바이러스의 유전적 특성을 파악하고, 전파 메커니즘을 이해하는 데 도움을 줌
- 남극과 같은 실험적으로 제한된 현장에서 극한 환경에서 사용 가능한 새로운 진단 기술과 연구 방법을 개발하는 데 주력하고 있음
- 남극에서의 생물안전과 HPAI 확산 방지를 위해 국제적인 지침과 프로토콜을 개발하고 있음



[그림 II-10] 고병원성 조류 인플루엔자 대응을 위한 국제적 협력 체계

2. 특허 · 논문 동향 및 역량

2.1 특허동향 및 역량

<표 II- 2> 특허 현황

순번	국가 /출원인	발명의 명칭	기술 요약	년도	비고
1	United States	• Avian influenza viruses, vaccines, compositions, formulations, and methods	• 일반적으로 인플루엔자 백신, 보다 구체적으로는 조류 인플루엔자 백신 및 감수성 조류 종을 예방 접종하는 데 유용한 제형	2007	US9072701B2 ⁴⁾
2	United States	• Machine Learning in Early Diagnosis	• 기계 학습 기술을 활용하여 HPAI의 초기 진단과 감지	2024	US20240153616A1 ⁵⁾
3	대한민국	• 조류인플루엔자 바이러스 탐지용 단일클론항체 및 이의 용도	• 조류인플루엔자 바이러스 탐지용 단일클론항체, 단일클론항체를 이용한 AIV 신속 정밀 감별할 수 있는 현장 진단 키트 개발	2022	1020220187211
4	대한민국	• 폐상피세포 및 대식세포를 포함하는 폐포 오가노이드 제조 방법 및 이의 용도	• 폐 독성평가 및 약물개발을 위한 인간 전문화능 줄기세포 유래 대식세포를 함유한 폐포 오가노이드 생산	2020	10-2183101

2.2 연구·논문 동향 및 역량

○ 국내외 조류 인플루엔자 연구 현황 및 경향

- 국내에서는 주로 여러 대학과 국립야생동물질병관리원, 농림축산검역본부에서 연구가 진행 중이며, 주로 국내 가금류나 야생조류에서 발생하는 HPAIV에 대한 연구가 많음

- 주로 유전자 분석을 시행했고 국내 야생 조류의 바이러스 전파 가능성과 감염 예방 효과에 대한 내용을 제시
- 특히 HPAI 감염에 취약한 지역(임창민 et al., 2024), 가축의 밀도(유대성 et al.; 2022민경덕 et al., 2023)와 같은 환경적 요인과 유전자형 특성상 취약한 종을 밝힘(차라미 et al., 2023)
- 유전자 분석을 통해 철새 이동 경로에서 전파가 일어나고(백윤기 et al., 2022; 강용명 et al., 2023; 서예람 et al., 2024), 국내 동물에서 분리된 HPAIV H5N1과 H5N6이 한중일에서 유행했던 것을 확인(정창기., 2024; 조 앤드류 영 et al., 2024)

<표 II-3> 국내 조류 인플루엔자 선행연구

저자	소속	발표 년도	AIV subtype	연구 주요 내용
서예람 등	서울대학교 수의과대학	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2022~23년 국내 야생 조류에서 발생한 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b의 주요 전파 경로와 바이러스의 유전자 분석을 통한 진화적 기원을 분석.
김지윤 등	건국대학교 수의과대학	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2021~22년 국내 겨울철 야생 조류에서 분리된 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b의 유전자 분석을 통해 야생조류가 바이러스의 전파와 지속적으로 유지되는 데에 중요한 역할을 한다는 것을 규명.
시영재 등	국립야생동물 질병관리원	2024	H5N8 (HPAIV)	• 2021~22년 국내 겨울철 야생 조류에서 분리된 HPAIV H5N8의 유전자 분석을 통해 바이러스의 유전적 진화를 연구. HPAIV H5N8에서 주요 두 가지 genotypes(G1, G2)을 발견하고 각 genotype에서 특징적인 유전적 재조합과 시간에 따른 확산 양상을 규명.
조 앤드류 영	건국대학교	2024	H5N1	• 국내 야생 조류 (Eurasian wigeon)에서 분리된 HPAIV H5N1 2.3.4.4b의 유전자 분석을 통해 일본에서 한국으로

4)<https://patents.google.com/patent/US9072701B2/en>

5)https://slate.greyb.com/patent/US20240153616A1?utm_source=insight_gate&utm_medium=top_ten_articles&utm_campaign=insightgate&utm_id=insightgate

	수의과대학		(HPAIV)	전파되었을 가능성을 제시.
서예람 등	건국대학교 수의과대학	2024	H5N1 (HPAIV)	2022년에 국내 야생 조류인 흑두루미(<i>Grus monacha</i>)에서 분리된 HPAIV H5N1 2.3.4.4b의 유전자 분석 결과 한국과 일본 간 철새 이동 경로에서 바이러스가 전파가 일어남을 제시. 또한 병리학적 분석을 통해 HPAIV에 감염된 흑두루미에서 전신 감염 관찰.
Andrew Yong Cho 등	서울대학교 수의과대학, 국립야생동물 질병관리원	2024	H5N6 (HPAIV)	2023년 국내에서 큰고니(whooper swan)과 흑기러기(bean geese) 사체에서 처음으로 HPAIV H5N6가 분리된 사례를 연구. 유전자 분석을 통해 HPAIV H5N1 2.3.4.4b와 HPAIV 사이에서 유전자 재조합을 통해 새로운 reassortant H5N6 HPAIV 형성을 밝힘.
임창민 등	고려대학교	2024	HPAIV	국내 비무장지대(DMZ) 및 한반도 인근에서 발생한 HPAIV의 발병 패턴을 머신 러닝 알고리즘을 이용하여 모델링하고 분석. HPAIV는 특히 농업 지역에서 전파 위험도 높으며 DMZ도 위험도 지역으로 분석됨.
허경범 등	서울대학교 수의과대학, 농림축산검역 본부	2024	H5N6 및 H5N1 (HPAIV)	2023년 국내 육계 오리 농장에서 발생한 HPAIV H5N6 및 H5N1 clade 2.3.4.4b 동시에 발생한 사례를 연구. 유전체 분석을 통해 두 바이러스의 유전적 특성과 계통발생학적 관계를 분석
정창기 등	전북대학교 수의과대학	2024	H5N6 (HPAIV)	2023년 국내 청둥오리에서 분리된 HPAIV H5N6를 연구. 유전자 분석을 통해 internal gene이 한국과 일본에서 유행했던 HPAIV H5N1과 중국에서 유행했던 HPAIV H5N6, LPAIV로부터 유래했다는 것을 밝힘.
이선학 등	건국대학교 수의과대학	2024	H5N8 (HPAIV)	2020년 국내에서 매(<i>Falco peregrinus</i>)의 공격을 받은 흰죽지(<i>Aythya ferina</i>)에서 HPAIV H5N8를 분리 및 유전자 분석. 병리학적 검사 결과와 항원검사 결과 전신 감염이 일어났음을 확인. 또한 여러 장기의 상피세포에서 바이러스의 강한 항원 양성 반응을 보아 물새로부터 포식자에게 HPAIV가 전염될 가능성을 시사.
차라미 등	농림축산검역 본부	2023	H5N1 (HPAIV)	2021~22년 국내에서 분리된 HPAIV H5N1의 유전적 특성과 병원성을 분석. 야생 철새를 통해 유입된 여러 유전자형이 확인되었으며, 특정 유전자형이 가금류와 야생 조류에서 질병 발생의 주요 원인으로 작용됨 밝힘. 닭에서는 높은 치사율과 전염성이 확인되었고, 오리는 무증상 전파자로 바이러스 확산에 기여할 가능성이 밝혀짐.
민경덕 등	충북대학교 수의과대학	2023	HPAIV	2010~2021년 국내에서 발생한 HPAIV 발병 초기 단계의 환경적 요인을 분석한 결과, 낮은 온도와 높은 가축 수의 밀도가 닭 농장의 주요 위험 요인으로, 보호구역 비율이 오리 농장의 위험 요인으로 나타남. 포식자에서 종 다양성은 HPAIV 위험을 줄이는 보호 효과가 있음을 확인
강용명 등	농림축산검역 본부	2023	H5N1 (HPAIV)	2022년 국내에서 발견된 새로운 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b 유전자형과 전파 경로를 분석. 바이러스는 유라시아와 북미에서 유래한 서로 다른 유전자형(G10-like 및 North Dakota-like)을 포함하고 있음을 확인. 봄과 가을철 철새 이동 경로를 통해 한국으로 유입된 것으로 추정
사공민근 등	농림축산검역 본부	2022	H5N1 (HPAIV)	2021년 국내에서 발견된 새로운 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b 유전자형 특성을 분석. 이 바이러스는 H5N8 및 유라시아 저병원성 조류 인플루엔자(LPAI) 바이러스 간의 재조합을 통해 생성된 것으로 분석됨. 유전자 염기 서열 분석에서 한국 H5N1 바이러스는 유럽에서 보고된 H5N1 및 H5N8 바이러스와 밀접한 관련이 있지만, 내부 유전자 구성에서 차이를 보였음.
백윤기 등	농림축산검역 본부	2022	H5N8 (HPAIV)	2020-21년 국내 야생조류에서 발생한 HPAIV H5N8의 유전자 특성과 진화 양상을 분석. 두 개(G1, G2)의 주요 유전자형이 확인됨. G1는 다양한 LPAIV와의 재조합을 통해 5개의 하위 유전자형(G1-1 ~ G1-5)으로 발전하였고 G2는 유럽에서 발견된 H5N8 바이러스와 유사성을 보이며, 철새를 통해 한국으로 유입된 것으로 분석됨. 특히, 야생 조류 서식지는 바이러스의 재조합과 전파의 중심지로 확인됨.
유대성 등	고려대학교	2022	H5N6 (HPAIV)	2016~17년 국내에서 발생한 HPAIV H5N6감염을 예방하기 위한 농장에서의 생물보안 조치의 효과를 분석. 농장 방문자 및 작업자에 대한 위생 관리가 감염 예방에 핵심적임을 시사
유대성 등	고려대학교	2022	H5N1, H5N8, H5N6 (HPAIV)	2003~17년에 국내에서 발생한 HPAIV H5N1, H5N8, H5N6 감염 사례를 분석하고 이를 바탕으로 공간적 특성을 통해 향후 발생 위험을 예측. 주요 위험 요인으로는 가금류 농장 밀도, 철새 서식지와 거리, 그리고 살아있는 조류 시장(LBM)까지의 최소 거리가 포함됨. HPAIV 발생 위험 지역을 예측하는 데 공간적 특성이 중요한 역할을 한다는 것을 강조.

- 국외 조류 인플루엔자 연구에서는 야생 조류에서의 HPAIV 연구가 주를 이루고 있으나, 최근에는 인간 전염사례의 증가로 포유류전파 가능성 및 위험성 평가에 대한 연구도 일부 진행되고 있음
- 야생 철새의 이동이 바이러스 확산의 주요 경로(Sarah N Bevins, 2022; Xiaoqing Zhang et al., 2024; Zyne Baybay et al., 2024; Hendra Wibawa et al., 2024)임을 밝히고 있음
- 다양하고 독특한 유전자형을 포함한 바이러스와 그 안의 포유류 적응 마커를 발견했고 (Celia Abolnik et al., 2023; Deeksha S. Tare et al., 2024) 포유류 간 바이러스 전파와 인간의 감염 가능성을 제시함(Mostafa, Ahmed et al., 2024)

<표 II-4>. 국외 조류 인플루엔자 선행연구

저자	소속	발표 년도	AIV subtyp e	연구내용
Yoshihiro Takadate et al	NIAH:Division of Zoonosis Research	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2022~23년 일본 가금에서 분리된 HPAIV H5N1 및 H5N2의 유전적 다양성과 계통발생학적 특성을 연구. 야생 철새를 통한 전파 HPAIV의 전파와 다양한 유전자 재조합이 일어났음을 밝힘.
Mostafa, Ahmed, et al	Department of Disease Intervention and Prevention, Texas Biomedical Research Institute	2024	H5N1 (HPAIV)	• HPAIV H5N1이 미국 낙농 가축에서 발견된 사례를 연구. 유전자 분석을 통해 이 바이러스가 가금류, 포류, 특히 유제품을 생산하는 소 사이에서 전파되었음을 확인. 최초로 포유류 간 전파와 인간 감염 가능성을 제기.
Xu, Yuting, et al	School of Life Sciences, East China Normal University	2024	H5N6 (HPAIV)	• 2023년 중국에서 발견된 HPAIV H5N6의 유전적 재조합과 진화 양상을 연구. HPAIV H5N6는 야생 조류, 가금류, 인간에서 유래한 바이러스의 유전자 재조합을 통해 형성되었으며 강력한 병원성과 확산 가능성을 평가.
Xiaoqing Zhang et al	Wuhan Institute of Virology	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2022년 중국에서 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b의 발생과 이 바이러스의 유전자 재조합 양상을 분석. HPAIV H5N1과 LPAIV 간의 재조합으로 새로운 유전자형이 발생했음을 밝히고 야생 철새의 이동이 바이러스 전파의 주요 경로임을 확인.
Zyne Baybay et al	BioAssets Corporation	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2022년 필리핀에서 발생한 HPAIV H5N1의 유전적 특성을 분석. 이 바이러스가 Goose/Guangdong lineage clade 2.3.4.4b에 속했고 야생 철새가 바이러스의 주요 전파 원인으로 추정됨을 밝힘.
Jourdan M. Ringenberg et al	U.S. Department of Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Service,	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2021~23 미국에서 HPAIV H5N1가 발생한 시기에 Atypical 야생 조류에서 바이러스의 유병률과 전염 동역학을 분석. 포식성 조류에서 높은 감염률이 관찰되었으며 바이러스가 감염된 조직 섭취를 통해 전파된다는 점을 확인
Hendra Wibawa et al	Disease Investigation Center Wates	2024	H5N1 (HPAIV)	• 2022년 인도네시아에서 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b가 오리 농장에 발생한 사례를 분석. 유전자 분석 결과 이 바이러스는 일본, 중국, 한국에서 분리된 H5N1 바이러스와 높은 유사성을 보임. 또한 철새 이동 경로가 바이러스의 전파에 중요한 역할을 했을 가능성을 제시.
Junki Mine et al	National Institute of Animal Health, National Agriculture and Food Research Organization	2024	H5N1, H5N8 (HPAIV)	• 2021~22년 일본에서 발생한 HPAIV H5N1 및 H5N8의 유전적 특성과 전파 양상을 분석. 바이러스가 시베리아 철새의 이동과 유전자 재조합에 의해 발생했음을 밝힘. 또한 세 가지 다른 유전자형이 다른 시점과 지역에서 확산되었음을 확인.
Deeksha S. Tare et al	ICMR-National Institute of Virology	2024	H5N1 (HPAIV)	• 인도에서 2006년 이후 보고된 HPAIV H5N1에 대한 시공간적 유전자 기원을 분석. 인도에서 발생한 HPAIV H5N1는 인도네시아, 한국, 방글라데시, 부탄, 중국 등으로부터 유입되었으며 8개의 유전자 재조합형이 발견됨. 특히, 2021년 인간 감염 사례에서 분리된 바이러스는 독특한 재조합 유전자형과 포유류 적응마커를 가지고 있음.

Yanxia Sun et al	School of Population Medicine and Public Health	2023	HPAIV	2018~22년 전세계적으로 발생한 HPAIV의 역학적 패턴과 인체 감염, 유전자 변화를 분석. 주로 H5N1, H5N6, H5N8 subtype이 주로 유행했으며, 아시아에서 유럽, 북미로의 바이러스 확산이 관찰됨.
Yoshihiro Takadate et al	National Institute of Animal Health, National Agriculture and Food Research Organization	2023	H5N1, H5N8	2021~22년 일본 가금에서 분리된 HPAIV H5N8, H5N1의 감염성과 전파성을 비교분석한 연구. H5N8(Akita 7C)는 H5N1(Kagoshima6T 및 Iwate7T)에 비해 감염성과 전염성이 높았으나 H5N1 바이러스는 더 빠르게 복제되고, 특히 Iwate7T 균주는 더 높은 치사율을 보임
Celia Abolnik et al	Department of Production Animal Studies, University of Pretoria	2023	H5N1 (HPAIV)	2021~22년 남아프리카에서 발생한 HPAIV H5N1의 유전자 분석과 전파 경로를 연구. 서아프리카에서 야생 철새를 통해 바이러스가 유입되었으며, 가금류와 해양 조류에서 다양한 유전자형이 발견됨.
Anne Günther	Friedrich-Loeffler-Institute, Greifswald - Insel Riems, Germany	2022	H5 (HPAIV)	아이슬란드가 유럽과 북미 사이의 HPAIV H5N1 확산에 중요한 중간 경로로 작용했음을 계통발생학적 분석을 통해 연구. 아이슬란드가 대서양을 가로지르는 철새 이동 경로에서 바이러스 확산의 연결점 역할을 한다는 점을 강조.
Federica Gobbo	National Reference Laboratory for Avian Influenza and Newcastle Disease, Istituto Zooprofilattico Sperimentale delle Venezie	2022	H5N1 (HPAIV)	2021~22년 이탈리아 가금 농가 지역에서 발생한 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b의 무증상 감염 사례를 분석. 폐사한 닭의 장기에서 바이러스가 검출됨. 무증상 감염 특성 때문에 감염 초기에 조기 발견이 어려워, 폐사한 닭을 중심으로 한 샘플링이 효과적인 감염 감시 방법으로 제안
Sarah N Bevins	US Department of Agriculture National Wildlife Research Center, Fort Collins, Colorado, USA	2022	H5N1 (HPAIV)	2021년 북미에서 발견된 HPAIV H5N1의 대륙 간 이동과 북미 내 전파를 분석한 연구. Eurasia 기원의 H5N1 바이러스가 대서양을 통해 북미로 유입되었으며, 주로 철새 이동 경로를 통해 전파된 것으로 확인됨. 야생 조류 감시의 중요성을 강조

○ 국내·외 야생동물 질병 위험성 평가 연구 현황

- 전 세계적으로 조류에서 포유류로 HPAI가 발생한 사례와 분리된 바이러스의 특성 분석이나 기원 추적이 주를 이루고 있음

- 포유류 세포와의 결합과 관련된 아미노산의 변이가 발견되었고(Andreina de Carvalho Araujo et al., 2024) 포유류에 적응하기 쉬운 바이러스 돌연변이가 발견되면서 포유류로의 전파 가능성 제안되었음(Mariana Leguia et al., 2023; Marcela M. Uhart et al., 2024; Ivan Sobolev et al., 2024)
- 전세계 조류에서 발견된 바이러스(HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b)와 유전적으로 비슷한 HPAIV H5N1에 사람에게까지 감염 사례가 관찰되었음
- 현재 극지방 데이터는 부족한 상태로, 체계적인 생태 연구가 필요(Jonathon D. Gass, Jr.)

<표 II-5> 국내외 야생동물 질병 위험성 평가 선행연구

저자	소속	발표 년도	AIV subtyp e	연구내용
Marcela M. Uhart et al ¹⁾	Karen C. Drayer Wildlife Health Center, University of California	2024	H5N1 (HPAIV)	2023년 아르헨티나에서 HPAIV H5N1 감염으로 인해 남방코끼리물범(Mirounga leonina)에서 발생한 대규모의 폐사 사례를 연구. 유전자 분석 결과 이 바이러스는 페루, 칠레, 브라질, 우루과이의 해양 포유류 바이러스와 동일한 클레이드에 속하며, 포유류 적응 돌연변이가 발견됨. 포유류 간 전파 및 포유류에서 조류로의 전파 가능성을 제기.
김일환 등 ²⁾	농림축산검역본부	2024	H5N1 (HPAIV)	2023년 국내 고양이에서 분리된 HPAIV H5N1의 병원성과 포유류 간 전파 가능성을 분석. 쥐와 페렛 모델에서 높은 병원성과 전신 감염을 보였으며, 접촉 전파 가능성을 확인.
Bud Jung et al ³⁾	고려대학교 약학대학	2024	H1N1, H3N2	2015~2019년 동안 국내의 야생 멧돼지에서 인플루엔자 A 바이러스 감염 여부를 조사. ELISA 검사 결과 3.5%, HI 테스트에서 2.1% 양성률을 보임. 유전자 검출된 주요 subtype으로는 팬데믹 2009 H1N1, 사람에서의 계절성 H3N2, 돼지 유래의 H1N1 등으로 인간과 돼지 인플루엔자 바이러스 간 교차 감염의 가능성이 관찰됨.
Andreina de Carvalho Araujo et al ⁴⁾	Department of Veterinary Medicine, FZEA- USP	2024	H5N1 (HPAIV)	2023년 브라질에서 HPAIV H5N1 2.3.4.4.b에 의한 남아메리카 바다사자 대규모 폐사에 대한 연구. 유전자 분석결과 바이러스는 북미에서 남미로 철새를 통해 유입된 것으로 보이며 포유류 세포의 affinity와 관련있는 아미노산의 변이가 발견됨.
Ivan Sobolev et al ⁵⁾	Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine	2024	H5N1 (HPAIV)	2023년 러시아에서 북방물개(Callorhinus ursinus)와 스텔러바다사자(Eumetopias jubatus)에서 발생한 HPAIV H5N1 감염을 분석. 일본과 러시아 극동 지역에서 유행하던 바이러스와 유전적으로 유사했음. HPAIV H5N1의 변이는 포유류에 적응성을 증가시켰으며, 조류와 해양 포유류 간의 접촉할 수 있는 기회가 감염 확산에 기여했음을 시사
Hinh Ly ⁶⁾	Phalacrocorax capensis	2024	H5N1 (HPAIV)	2024년 미국에서 발생한 HPAIV H5N1의 가축 감염 사례를 분석. 미국의 여러 주의 낙농 가축(소) 및 염소에서 감염 사례가 보고됨. 이 바이러스는 전 세계 조류에서 발견된 HPAIV H5N1 clade 2.3.4.4b와 유전적으로 유사함. 초기에 감염된 지역에서 수출된 가축을 통해 전파된 것으로 추정됨. 사람에게까지 감염 사례가 관찰되었음.
Mariana Leguia et al ⁹⁾	EpiCenter for Emerging Infectious Disease Intelligence, Peru	2023	H5N1 (HPAIV)	2022년 페루에서 HPAIV H5N1에 감염된 해양 동물의 사례를 연구. 해양 포유류(남미 바다사자, 돌고래)와 해양 조류(펠리컨, 구아노, 가마우지 등)에서 감염이 확인됨. 유전자 분석결과 Eurasia와 America 계통의 유전자 재조합체로 확인되며 포유류 적응성과 관련된 돌연변이(D701N 등)이 관찰됨.
Alexander Postel ¹¹⁾	Institute of Virology, Germany	2022	H5N8 (HPAIV)	2021년 독일 북해 연안에서 발견된 점박이물범에서 HPAIV H5N8 clade 2.3.4.4b 감염 사례를 분석한 연구. 이 바이러스는 조류 또는 오염된 환경으로부터 유입된 것으로 추정. 또한 물범이 조류와 포유류간의 중간 전파에 잠재적 매개체로 작용할 수 있음을 시사
Jonathon D. Gass, Jr. ¹²⁾	Department of Infectious Disease and Global Health	2022		북극 지역 야생 동물에서 인플루엔자 A 바이러스(IAV)의 역학과 생태를 체계적으로 검토. 북극 지역의 다양한 야생 동물(바다새, 물새, 물범, 육상 포유류 등)과 환경에서 IAV가 검출됨. 알래스카를 중심으로 한 데이터가 많으며, 러시아, 캐나다, 북대서양 지역 데이터는 상대적으로 부족. 북극 지역 IAV 생태에 대한 체계적인 연구의 필요성을 강조.

○ 남극 생물 이동 연구 현황은 주로 번식기, 비번식기의 먹이활동에 초점을 맞춤

- 턱끈펭귄과 젠투펭귄의 경우 번식기동안 취식 이동 및 행동에 대한 연구가 주로 이루어짐

- 젠투펭귄은 주간보다 야간에 얕은 깊이에서 잠수하며 이는 크릴의 이동 패턴에 따라 달라지는 것으로 나타남 (Lee et al. 2015)
- 같은 서식지에서 번식하는 두 종에 대해 공간 및 먹이 이용 패턴을 분석해 종간과 종내 경쟁 강도를 비교한 결과, 같은 종 안에서 공간 이용을 분리시킴으로써 종내 먹이경쟁을 조정하였으며, 다른 종 간 비슷한 공간 이용을 보였으나 서로 다른 먹이를 이용한 것으로 보임 (Lee et al. 2021)
- 다른 연구 (Kokubun et al. 2010)에서는 턱끈펭귄과 젠투펭귄이 먹이 서식지를 수평 및 수직적으로 분리하여 먹이 경쟁을 완화하였으며, 턱끈펭귄이 더 먼 심해로 이동하여 먹이활동을 하는 것으로 나타남

- 비번식기에도 먹이활동 시 이동 거리와 먹이활동지 분포 등에 대한 연구 중점으로 이루어짐

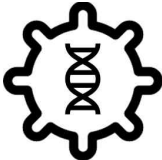
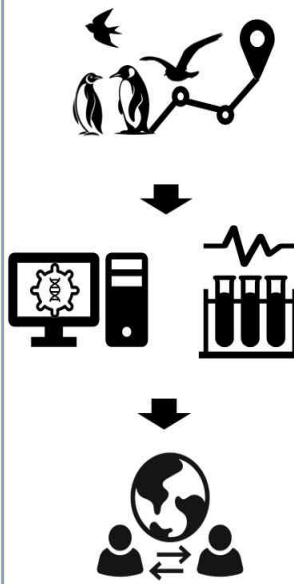
- 포클랜드 제도에서 비번식기의 젠투펭귄은 먹이활동을 위해 해안으로부터 최대 480km 떨어진 지역까지 이동하였으며, 먹이활동 기간도 6-25일까지 다양하였으며, 같은 집단에 속한 개체들 간에도 개체차가 큰 것으로 나타남 (Baylis et al. 2020)
- 사우스셰틀랜드 제도의 두 번식지(Cape Shirreff, Admiralty만)에서 턱끈펭귄의 겨울 이동 패턴을 조사한 결과, 번식지 근처 얕은 지역에서 먹이를 탐색할 때도 있지만 최대 1,300km 떨어진 사우스 샌드위치 섬까지 이동하는 등 지역적인 먹이 환경의 변화에 따라 다른 전략을 보임 (Trivelpeice et al. 2017)
- 도둑갈매기류의 경우, 종과 집단에 따라 서로 다른 이동 경로와 패턴을 보임. 특히, 킹조지섬의 남극도둑갈매기의 경우 이주 중 남미 해안을 경유하는 것이 확인됨

○ 남극 생물을 통한 조류 인플루엔자 전파 가능성 존재

- 2010-2013년동안 코끼리, 킹조지, 리빙스턴(livingston)섬에서 펭귄 3종(턱끈, 젠투, 아델리)과 갈색도둑갈매기, 남방큰풀마갈매기, 알락풀마갈매기를 대상으로 H6N8 조류인플루엔자 바이러스 확인한 결과, 턱끈펭귄과 갈색도둑갈매기에서 바이러스 검출됨 (Seixas et al. 2022)

- 남아메리카(아르헨티나, 칠레)의 바이러스와 유전적으로 밀접한 관련이 있는 것으로 나타나며, 이는 남극과 남아메리카를 오가는 조류로부터 전파된 것으로 추정
- 도둑갈매기류는 다른 조류의 알과 새끼를 먹는 습성으로 바이러스의 전파와 유지에 중요한 역할을 가능성이 있으며, 펭귄들의 집단 번식으로 인한 분변 등에 노출이 종 내 전파 가능성 있음

3. 기획기술 시사점

비 전	고병원성 조류인플루엔자의 남극 유입에 대한 사전/사후 대응		
목 표	남극과학기지 기반 고병원성 조류인플루엔자의 유입 및 전파경로 감시와 남극의 동물과 집단서식지의 위험성 평가		
전 략 방 향	 HPAI 전파 추적 +  극지동물의 바이러스 다양성 파악 +  HPAI 위험성 평가 +  HPAI 대응체계 참여		
AS-IS		TO-BE	
펭귄의 번식기 행동권 파악			남극 조류의 연주기성 이동 파악
펭귄마을의 펭귄 2종의 번식기 주요 서식지 파악			킹조지섬 서식 조류의 번식기 및 비번식기 이동모형 제작
바이러스 스크리닝			바이러스 병원성 판별
한시적 AIV 신속진단 키트를 활용한 감염여부 확인			1차 진단을 포함한 고병원성 판별 및 전파유래 파악
HPAIV 감염율에 따른 위험 중 유추			남극 동물 중 대상 위험성 평가
문헌상의 HPAIV 감염율에 따른 남극 동물 종의 위험성 유추			생물학적 분석을 통한 HPAIV의 남극 동물 중 위험성 평가
HPAI 발생 알림 확인			대응 협력 모델 구상
HPAI 의심/확진 현황 공유 플랫폼을 통한 확인 가능			현장 조사 매뉴얼 적용 및 국제적 협력 대응

III. 연구개발과제 및 추진계획

1. 비전 및 목표

☐ 연구 비전 및 목표

- 연구 비전: 고병원성 조류인플루엔자의 남극 유입에 대한 사전/사후 대응
- 연구 목표: 남극과학기지 기반 고병원성 조류인플루엔자의 유입 및 전파경로 감시와 남극의 동물과 집단서식지의 위험성 평가(SCAR의 “남극해의 HPAI에 대한 생물학적 위험 평가”에 의거)
 - (HPAI 전파 추적) 잠재적인 바이러스 매개조류의 이동경로 추적
 - (극지동물의 바이러스 다양성) 조류/해양포유류 보유 바이러스 파악
 - (HPAI 위험성 평가) 남극동물 대상 HPAI 감염 위험성 평가
 - (HPAI 대응체계 참여) 우리나라 기지주변에서의 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

2. 개발목표 및 사양도출

구분	내용
최종목표	남극과학기지 기반 고병원성 조류인플루엔자의 유입 및 전파경로 감시와 남극의 동물과 집단서식지의 위험성 평가
최종목표 설정근거	○ 「제5차 과학기술 기본계획 3-4-2」: 감염병, 방사능 누출사고, 범지구적 기후재난에 대한 징후 감지·관측·예측·영향 분석 기술 고도화 ○ 「12대 국가전략기술」 첨단바이오: 신·변종 및 미해결 감염병 발생시 관련 백신·치료제를 신속하게 개발·제조할 수 있는 전달물질 및 후보물질 발굴 등의 기반 기술 ○ 「제4차 남극연구활동진흥기본계획 2-2」: 남극 생태계 변화의 지속적 관측·분석과 국제의무 이행 등을 통한 남극 환경보호 기여도 제고 ○ 「환경보호에 관한 남극조약의정서 제2부속서」 제4조 비토착 중·기생충 및 질병의 반입: (7항) 각 당사국은 남극조약지역에 본래 현존하지 아니하는 미생물(바이러스 등)의 유입을 방지하기 위한 예방조치를 취해야 함 ○ 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제 4조 국가 및 지방자치단체의 책무: (2항 16) 해외 신종감염병 발생 동향의 지속적 파악, 위험성 평가 및 관리대상 해외 신종감염병의 지정
세부목표	☐ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 남극 번식지 회귀조류의 HPAI 발생지역 경유이력 및 바이러스 유래 추적 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체 수 모니터링 ▪ 매개후보종의 포획, 개체 표지 및 추적 ▪ 매개후보종의 이동 및 공간이용 모형에 따른 위험성 평가 ▪ 공간정보 기반 매개후보종별 HPAI 전파 위협에 대한 관리 및 대응방안 도출

- 변식조류의 남극 내 HPAI 발생지역 방문 및 병원체 이동 경로 파악
 - 종별, 지역별 매개후보종의 극지-극지 외부 연결성 및 HPAI 노출 위험 분석
 - 추적 개체별 HPAI 항체 보유 여부 및 감염 여부와 이동경로 및 생존율 관계 분석
- 조류 집단번식지에서 중간 접촉을 통한 HPAI 전파 경로 추적
 - 남극 생태계 내 먹이그물에 따른 HPAI 전파 위험성 평가

□ 극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석

- 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 남극 서식 조류 및 포유류의 분변 및 혈액 시료 채취
 - 남극 서식 야생동물 사체 발견 시 고정상태의 조직 시료 확보
- 남극 야생동물 바이러스 유전체 및 진화 분석
 - 남극 야생동물에서 HPAI 감염 현황 조사 및 유전체 분석을 통한 유입 경로 파악
 - 남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 분석을 통한 남극에서 진화 패턴 분석
- 남극 야생동물의 바이러스 항체보유조사
 - 대표 바이러스에 대한 항체보유조사를 통한 바이러스 감염 시기 및 지역 추적

□ 남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가

- 남극 HPAIV의 감염기작 및 병원성 평가
 - 확보 가능 시, HPAI 감염 개체의 조직으로부터 병원성 평가
- HPAI 수용체 분포 조사 및 취약 동물종 확인
 - HPAI 수용체 분포 조사를 통한 감염 민감성 평가 및 취약 동물 종 확인
 - 남극 동물 모사 오가노이드(3차원 체외 세포배양 시스템)를 이용한 HPAI 감염 패턴 비교
- 포유류 감염 가능성 예측
 - 유전자 마커분석 및 수용체 결합연구를 통한 포유류 감염 가능성 예측

□ 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

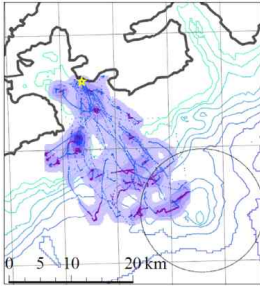
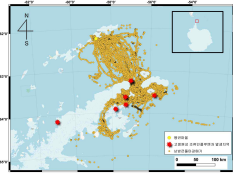
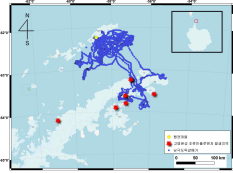
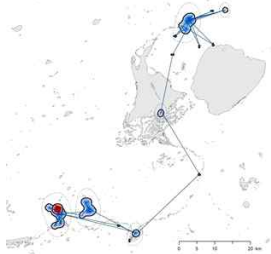
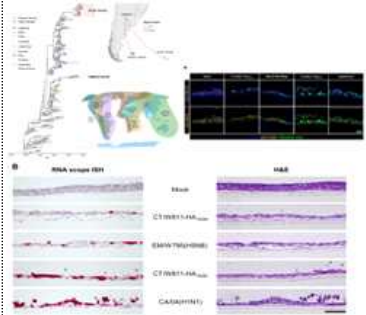
- 남극 동물 유래 병원체 진단 프로토콜 및 현장 대응 매뉴얼 제작
 - 국내외 제도 현황 검토 및 보완점 제시
- HPAI 신속정밀 진단 시스템 현장 적용
 - HPAI 의심/확진 사례 당시의 현장 조사
- 남극 HPAI의 국제적 대응 및 국제 협력 체계 참여
 - 대응 협력 모델 구상
 - 국제적 문건 작성 및 제출

3. 핵심개발과제

3.1 핵심개발내용

<표 III-1> R&D 수행으로 예상되는 개선수준

핵심 항목	현재 수준(모습)	R&D 수행시 개선수준(모습)		향후 수준(모습)
		'26년 수준	목표수준	
	~ '25	'26	'26~'31(종료년도)	'32~(종료이후)
남극 조류의 이동경로 파악	• 펭귄마을 번식 권 2종의 번식기 행동권 분석 • 남극도독갈매기 및 남방큰돌매기 번식기 행동권 사전 조사	• 남극 서식조류 위치추적 장비 구축 • 위치추적자료 기반 이동경로 예측 모델 개발 시작	• 남극조류 4종의 번식기 행동권 및 서식지 간 연결성 파악 • 남극조류 4종의 비번식기 이동경로 파악 • 남극조류 4종의 이동경로 기반 HPAI 전파 모델 제작	• 남극 번식 조류 10종의 번식기 행동권 파악 • 남극 서식 조류 및 해양포유류의 연간 서식지 이용 파악 • 남극조류의 HPAI 전파 모델 (매개후 보종별 시나리오 모델 형성)
극지동물 보유 바이러스 조사	• '23/24년 한시적 신속 진단 키트를 활용한 AIV 감염여부 확인 • 주요 바이러스에 대한 보유 여부 확인	• 현장에서 고병원성 여부 확인 가능 • 일부 남극 동물 종에 대한 바이러스 유전체 분석 선행 연구	• 주변국과 공조를 통한 신속한 진단 네트워크 마련 • 다양한 남극 동물 종에 대한 보유 바이러스 유전체 분석 및 전파/감염 경로, 진화패턴 분석	• 남극 내 질병진단 가능한 시스템 구축 • 남극 야생동물 유래 바이러스 유전자 데이터베이스 구축
HPAI 위험성 평가	• 각 나라별 보고 문헌에 따른 HPAIV 감염을 확인 및 위험종 유추	• 병원성 평가를 위한 플랫폼 구축 • HPAIV 수용체 분포조사를 위한 남극 동물 시료 준비 • HPAIV 유전자 마커분석을 위한 목록화	• 오가노이드 및 재조합 바이러스를 이용한 남극 HPAIV 감염기작 및 병원성 평가 • HPAIV에 대한 남극 취약 동물 종 목록화 • 남극 HPAIV의 포유류 감염 가능성 확인	• 남극 동물 생체모사 시스템(오가노이드) 구축 및 영구적인 자원화 • 넥스트 판데믹 또는 남극 위협 질병에 대한 즉각적인 위험성 평가 가능 • 포유류 감염 가능성 바이러스 출현에 대한 즉각적 대응
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응 체계 참여	• SCAR에서 HPAI 의심/확진 현황 공유 사이트가 있느냐 세부적인 대응책이나 가이드라인이 미비함	• 남극 관리 국가 국내외 제도 및 비교 • 기존 국제적 거버넌스에서의 보완점 제시 • HPAI 의심/확진 사례 당시의 현장조사 정리	• 대응 협력 모델 구상 • 현장 조사 매뉴얼 제작 • ATCM(CEP) 문건 작성 및 채택	• 남극권 HPAI 협력 네트워크 참여 • 현장조사 매뉴얼 개선 • 효율적인 HPAI 대응체계 참여

상세 내역	과거 연구성과 ⇨	현재 수준 ⇨	향후 모습
기술수준	- 세종과학기지에 서식하는 펭귄의 번식기 행동권 파악 - 신속 진단 키트를 활용한 AIV 감염여부 확인	- 펭귄의 겨울철 이동경로 파악 및 HPAI 매개 후보종 2종의 번식기 이동경로 사전조사 - 신속 진단 키트를 활용한 AIV 감염여부 확인 - 주요 바이러스 보유 여부 및 유전자 분석	- GLS 및 위성추적기를 활용한 HPAI 매개 후보종 4종 이상 번식기 행동권 및 비번식기 이동경로 파악 - HPAI의 전파경로 및 남극 동물에서 위험성 파악 - 남극 동물 생체 모사 시스템(오가노이드)을 통한 다양한 병원체의 평가 시스템 구축
그림	 	  	 
적용대상	남극도독갈매기 외	남극도독갈매기, 남방큰돌가갈매기 외	4종 이상의 조류 및 포유류
파급효과	- 번식기 펭귄 주요취식지 파악 - 남극 야생동물 대상 신속진단 키트 활용 가능성 확인	- 남극조류 2종의 번식기 서식지 연결성 파악 - 남극조류에서 AIV 및 대표 바이러스 보유 확인	- 남극조류의 이동에 따른 서식지간 연결성 파악 - 남극조류가 매개하는 질병 전파경로 예측모델 제작 - 남극 동물 생체 모사 시스템(오가노이드) 구축 및 영구적인 자원화 - 넥스트 판데믹 또는 남극 위협 질병에 대한 즉각적인 위험성 평가 가능

3.2 사업 주요내용

가. 1차년도(2026년)

해당연도 연구개발 목표	남극권 고병원성 조류인플루엔자 역학 관련 바이러스 현황 분석		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	현장연구 매뉴얼 제작 및 연구 장비 구축	300,000	서울대학교 경희대학교 극지연구소
	매개후보종 이동경로 및 철새의 질병 매개 기작 선행연구 분석	50,000	서울대학교 극지연구소
	조류 집단번식지 내 중간 접촉조사 시스템 구축	150,000	극지연구소
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)	100,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생조류 바이러스 감염 및 유전체 분석	150,000	극지연구소
	남극 야생동물 바이러스 항체보유 조사를 위한 시 스템 구축	70,000	극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제 작을 위한 시스템 구축	320,000	한국과학기술원 전북대학교
	HPAI 수용체 분포 조사를 위한 남극 동물 시료 준비	150,000	극지연구소
	HPAI바이러스 유전자 마커 분석을 위한 시스템 구축	150,000	극지연구소
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국내외 제도 검토 및 비교	30,000	성신여자대학교
	국제적 거버넌스에서의 보완점 제시	20,000	성신여자대학교
	HPAI 의심/확진 사례 당시의 현장 조사 정리	10,000	극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술
☐ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ○ 남극에서 번식하는 HPAI 매개 가능 장거리 이동 철새의 이동경로 연구 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 조사 ▪ 매개후보종에 대한 선행연구 분석 - 남극반도 및 남세틀랜드 제도의 조류 이동 선행 연구 분석 - 문헌기반 대상종별 매개 위험성 및 연구 우선순위 평가 - 남극 번식 HPAI 매개 가능 조류의 이동경로 및 자연사 선행연구 분석 - 장거리 이동 철새의 HPAI 매개 및 전파 사례 선행연구 분석 ▪ 매개후보종 현장연구 매뉴얼 제작 - 연구지역 및 대상종 선정 - 매개후보종 포획, 보정, 시료 수집 및 추적장비 부착 매뉴얼 제작 - 매개후보종 추적 장비 선정 및 예비 시험 ○ 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사 ▪ 연구지역 내 중간 상호작용 선행연구 분석 - 남극 내 중간 포식-피식 관계 리뷰 - 분변 DNA를 이용한 먹이원 분석 매뉴얼 제작

- 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가
 - 남극 동물 유래 바이러스 분석을 위한 준비
 - 남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)
 - HPAI 모니터링 및 감염 시료를 이용한 HPAIV 유전자 분석
 - 누적된 남극 유래 HPAIV 유전자 데이터 확보 및 신규 감염 HPAIV 유전체 확보
 - HPAIV 유전자 정보를 활용한 전파 경로 유추
 - 남극 동물 시료를 활용한 바이러스 유전체 분석 및 감염 확인을 위한 시스템 구축
 - 남극 야생 조류 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 남극 야생동물의 바이러스 항체보유 조사를 위한 시스템 구축
 - 병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작을 위한 시스템 구축
 - 역유전학을 이용한 남극 유래 HPAIV의 infectious clone system 구축
 - 남극 동물의 생체 시스템 모사를 위한 오가노이드 시스템 구축
 - 오가노이드 제작을 위한 남극 동물 유사종 조직 확보 및 세포배양 시스템 구축
 - 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사
 - 남극 동물 사체로부터 조직 시료 확보 및 바이러스 유전자 마커 목록화
- 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여
 - 국제 협력 네트워크 참여 및 대응
 - SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유
 - 국내외 제도 검토 및 비교 (~2025년 현황)
 - 해양 야생동물(조류, 포유류) 활동 모니터링
 - 관리 대상 동물종 정리, 관리 주체 설정 및 대응 체계 세분화
 - 야생동물 질병 대처
 - 대응 단계(유입 차단, 예찰/예방, 진단/확산방지, 사후관리)별 검토
 - 국제적 거버넌스에서의 보완점 제시
 - SCAR, WOA, 남극조약체계, 조류인플루엔자 글로벌 전문가 그룹 등 국제적 거버넌스 내 참여국과 해당 국가들의 협력 방식 검토
 - 문헌 연구와 사례 연구를 통한 보완점 제시
 - 남극 HPAI를 다루는 국제 협의 기구 구상안 제시
 - HPAI 의심/확진 사례 당시의 현장 조사 정리
 - 대응 및 신고 체계의 보완점 정리: 남극 연구 지역 및 방문지역에 대한 가이드 분석

나. 2차년도(2027년)

해당연도 연구개발 목표	HPAI 매개후보종의 행동과 바이러스 분석 및 대응체계 협력기반 구성		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	남극 번식 매개후보종의 행동권 파악	250,000	서울대학교 극지연구소
	장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악	100,000	경희대학교 극지연구소
	HPAI 매개후보종 먹이원 분석	50,000	극지연구소
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)	200,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생포유류 바이러스 감염 및 유전체 분석	150,000	극지연구소
	남극 야생동물의 바이러스 항체보유 조사	150,000	극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작	200,000	한국과학기술원 전북대학교
	다양한 남극 동물에서 HPAI 수용체 분포 조사	50,000	극지연구소
	HPAI 바이러스 유전자 마커 분석 및 수용체 결합 가능성 연구	100,000	극지연구소
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국가별 동향 분석	50,000	성신여자대학교
	대응 협력 모델 구상	50,000	성신여자대학교 극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술
□ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 모니터링 ▪ 매개후보종의 생존률 및 회귀율 분석 ▪ 매개후보종의 번식기 행동권 파악 - 칼집부리물떼새, 남극도둑갈매기, 갈색도둑갈매기, 남방큰재갈매기, 남방큰풀마갈매기, 월슨바다제비, 검은배바다제비, 남극제비갈매기 등 극지에서 번식하는 철새의 선행 추적을 통한 집중 연구 대상종 선정 - 추적 매개후보종별 번식기 행동권 및 공간이용 양상 파악 - 추적 매개후보종간 공간 중첩도 및 상호작용 분석 ○ 남극에서 번식하는 HPAI 매개 가능 장거리 이동 철새의 이동경로 연구 ▪ 장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악 - 종별, 생활사 특징 및 몸 크기별 추적장치와 부착법 비교 - GPS 추적 및 light sensor 이용 지오로케이터 (GLS) 기기 부착을 통한 선행 추적 수행 ▪ 장거리 이동 매개 후보종 체액 시료 확보 - 장거리 이동 매개후보종의 이동 전 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보 ○ 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사 ▪ 분변 DNA를 이용한 매개후보종 먹이원 분석

- 남극 번식 조류의 분변 NGS를 통한 먹이원 분석
- 남극 생태계 내 먹이그물 파악

□ 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가

- 남극 동물 유래 바이러스 분석
 - 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 지속적인 HPAI 모니터링 및 감염 시료 확보
 - 다양한 남극 서식 동물의 분변, 혈액, 조직 등의 시료 확보
 - 남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 남극 동물 시료를 활용한 바이러스 감염 조사 및 바이러스 유전체 분석
 - 남극 야생동물의 혈액 및 혈청을 이용한 바이러스 항체보유 조사
- 병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작
 - 남극 유래 HPAIV의 infectious clone system 제작
 - 대표종의 남극 유래 HPAIV 유전자를 이용한 infectious clone 제작
 - 남극 동물의 생체 시스템 모사를 위한 오가노이드 제작
 - 뇌, 폐, 기관, 장 등 바이러스 감염에 민감한 주요 조직에 대한 오가노이드 제작
- 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사
 - 남극 동물 조직의 (반)영구적인 자원화
 - 남극 동물 사체로부터 확보한 각 주요 조직의 파라핀 블록 제작 및 보관
 - 각 조직별 HPAIV에 대한 수용체 분포 조사

□ 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

- 국제 협력 네트워크 참여 및 대응
 - SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유
- 국가별 동향 분석 (2026년 현황)
 - 대응 체계, 국제 협력 등 변동 사항 파악
 - 추후 협력 모델 구상안에 반영
- 대응 협력 모델 구상
 - 협력 조직도 구상
 - 협력 조직도 내 행위자 혹은 관련 연구기관과 MOU 체결
 - 단계별 협력 제안 구상
 - 예찰/예방: 질병 모니터링 체계 참여 및 질병 조사
 - 질병 위험도(평상시, 위기시), 기술 성숙도 등을 고려하여 관리 주체 설정 및 대응 체계 세분화
 - 유입 차단: 연구자 간 소통 체계 및 평가 체계 방식 구상

다. 3차년도(2028년)

해당연도 연구개발 목표	HPAI 매개후보종의 행동과 바이러스 분석 및 대응 모델 참여		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	남극 번식 매개후보종의 행동권 파악	200,000	서울대학교 극지연구소
	장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악	100,000	경희대학교 극지연구소
	HPAI 매개후보종 먹이원 분석	50,000	극지연구소
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)	200,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석	150,000	극지연구소
	남극 야생동물의 바이러스 항체보유 조사	150,000	극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	병원성 평가를 위한 바이러스 제작 및 배양 플랫폼을 이용한 감염 패턴 확인	200,000	한국과학기술원 전북대학교 극지연구소
	다양한 남극 동물대상 HPAI 수용체 분포 조사	50,000	극지연구소
	HPAI 바이러스 유전자 마커 분석 및 수용체 결합 가능성 연구	100,000	극지연구소
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국가별 동향 분석	50,000	성신여자대학교
	대응 협력 모델 구상	30,000	극지연구소
	ATCM(CEP) 문건 작성	20,000	성신여자대학교 극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술
☐ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 모니터링 ▪ 매개후보종의 생존률 및 회귀율 분석 ▪ 매개후보종의 번식기 행동권 파악 - 바이오로거 부착을 통한 종별 번식기 행동생태 추적 - 추적 매개후보종별 번식기 행동권 및 공간이용 양상 파악 - 추적 매개후보종간 공간 중첩도 및 상호작용 분석 ○ 남극에서 번식하는 HPAI 매개 가능 장거리 이동 철새의 이동경로 연구 ▪ 장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악 - 집중 연구 대상종의 이동경로 파악 - 보완 연구 대상종 시험 추적 수행 - ASPA 171.외부 인접 번식지 개체 추적 ▪ 장거리 이동경로 추적 방법 비교 분석 - 종별 추적 개체의 회귀율 분석 - 추적장치 종류와 방법에 따른 회귀율 분석 ▪ 장거리 이동 매개 후보종 체액 시료 확보 (연례조사) - 장거리 이동 매개후보종의 이동 전 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보 - 이동 후 회귀한 개체의 이동 후 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보

○ 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사

- 분변 DNA를 이용한 매개후보종 먹이원 분석
 - 남극 번식 조류의 분변 NGS를 통한 먹이원 분석
 - 연구지역에 따른 남극 생태계 먹이그물 파악

□ 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가

○ 남극 동물 유래 바이러스 분석

- 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 지속적인 HPAI 모니터링 및 감염 시료 확보
 - 다양한 남극 서식 동물의 분변, 혈액, 조직 등의 시료 확보
- 남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 남극 동물 시료를 활용한 바이러스 감염 조사 및 바이러스 유전체 분석
 - 남극 야생동물의 혈액 및 혈청을 이용한 바이러스 항체보유 조사

○ 병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작

- 남극 유래 HPAIV의 infectious clone system 제작
 - 대표종의 남극 유래 HPAIV 유전자를 이용한 infectious clone 제작
 - 세포배양 또는 종란접종을 통한 바이러스 증식 확인(Biosafety Level 3 실험실 사용)
- 남극 동물의 생체 시스템 모사를 위한 오가노이드 제작
 - 뇌, 폐, 기관, 장 등 바이러스 감염에 민감한 주요 조직에 대한 오가노이드 제작

○ 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사

- 남극 동물 조직의 영구적인 자원화
 - 남극 동물 사체로부터 확보한 각 주요 조직의 파라핀 블록 제작 및 보관
 - 각 조직별 HPAIV에 대한 수용체 분포 조사

□ 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

○ 국제 협력 네트워크 참여 및 대응

- SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
- ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유

○ 국가별 동향 분석 (2027년 현황)

- 대응 체계, 국제 협력 등 변동 사항 파악
- 추후 협력 모델 구상안에 반영

○ 대응 협력 모델 구상

- 단계별 협력 제안 구상
 - 진단/확산 방지: 동물 위치 정보 데이터와 토지피복지도에 중첩시켜 질병 전파 현황 예측
 - 사후 관리: 유전 정보의 공유 체계 구체화, 종내-종간 관리 고려
 - 시료 확보 등 관리 방안 마련: 시료 관리를 위한 공동의 코드 체계
 - 연구 데이터 공유 방안 구상: 병원체 자원 전문 은행과 분양 관리 등

○ ATCM(CEP) 문건 작성

- 배경 문서(Background Paper): 남극 HPAI 발생 상황과 대응 현황
- ATCM 회의에 '남극 HPAI 대응'을 사전 안건 혹은 보충 안건으로 제안

라. 4차년도(2029년)

해당연도 연구개발 목표	HPAI 매개후보종 질병 감염 매개 모형 개발 및 국제 대응 네트워크 참여		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	매개후보종의 이동 및 공간이용에 따른 위험성 평가	250,000	서울대학교 극지연구소
	장거리 이동 후보종의 질병 매개 모형 개발	100,000	경희대학교 극지연구소
	HPAI 매개후보종 먹이원 분석	150,000	극지연구소
남극 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)	100,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생동물 유래 바이러스의 유전체 및 진화분석	150,000	극지연구소
	남극 야생동물의 항체보유 조사 및 유래 파악	70,000	경희대학교 극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	병원성 평가를 위한 바이러스 제작 및 배양 플랫폼을 이용한 감염 패턴 확인	320,000	한국과학기술원 전북대학교 극지연구소
	다양한 남극 동물대상 HPAI 수용체 분포 조사	150,000	극지연구소
	HPAI 바이러스 유전자 마커 분석 및 수용체 결합능 분석을 통한 포유류 감염 가능성 분석	150,000	극지연구소
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국가별 동향 분석	30,000	성신여자대학교
	대응 협력 모델 구상	20,000	성신여자대학교
	ATCM(CEP) 문건 작성	10,000	극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술
☐ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 모니터링 ▪ 매개후보종의 생존률 및 회귀율 분석 ▪ 매개후보종의 연간 행동권 및 이동 파악 - 바이오로거 부착을 통한 종별 번식기 행동생태 추적 - 추적 매개후보종별 연간 분포, 이동경로 및 이동전략 파악 ▪ 매개후보종의 이동 및 공간이용 모형 개발 - 개발된 이동 및 공간이용 모형의 검증 평가 - 상황별 시나리오 개발 및 상황에 따른 전파위험 수준 평가 시뮬레이션 수행 ○ 남극에서 번식하는 HPAI 매개 가능 장거리 이동 철새의 이동경로 연구 ▪ 장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악 - 장거리 이동 매개 후보종의 월동지 및 중간기착지 파악 - 장거리 이동 매개 후보종의 비번식기 서식지 이용 분석 ▪ 장거리 이동 매개 모형 개발 - 추적 자료 기반 개체이동모형 개발 - 지역간 개체군 연결성 분석 ▪ 장거리 이동 매개 후보종 체액 시료 확보 (연례조사) - 장거리 이동 매개후보종의 이동 전 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보 - 이동 후 회귀한 개체의 이동 후 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보

- 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사
 - 분변 DNA를 이용한 매개후보종 먹이원 분석
 - 남극 번식 조류의 분변 NGS를 통한 먹이원 분석
 - 연구지역에 따른 남극 생태계 먹이그물 파악
 - 조직 안정성 동위원소를 이용한 매개후보종 먹이원 분석
 - 남극 번식 조류의 조직 안정성 동위원소 분석을 통한 먹이원 분석
- 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가
 - 남극 동물 유래 바이러스 분석
 - 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 지속적인 HPAI 모니터링 및 감염 시료 확보
 - 다양한 남극 서식 동물의 분변, 혈액, 조직 등의 시료 확보
 - 남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 남극 동물 시료를 활용한 바이러스 감염 조사 및 바이러스 유전체 분석
 - 누적된 바이러스 유전자의 변이 및 진화 패턴 분석
 - 남극 야생동물의 혈액 및 혈청을 이용한 바이러스 항체보유 조사 및 조류 이동과의 통합 분석
 - 병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작
 - HPAIV의 infectious clone system을 이용한 병원성 평가
 - 재조합 HPAIV의 농축 및 정량
 - 다양한 동물(마우스, 닭, 페렛 등)을 대상으로 한 재조합 HPAIV의 병원성 평가
 - 남극 동물 모사 오가노이드를 이용한 감염 패턴 확인
 - 제작된 오가노이드를 이용한 재조합 HPAIV의 감염 패턴 확인
 - 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사
 - 남극 동물 조직의 영구적인 자원화
 - 각 종별, 조직별 HPAIV에 대한 수용체 분포 조사 및 민감성 평가
 - HPAIV 유전자 마커 분석
 - 다양한 유전자 마커 부위 분석을 통한 포유류 감염 가능성 및 병원성 유추
- 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여
 - 국제 협력 네트워크 참여 및 대응
 - SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유
 - 국가별 동향 분석 (2028년 현황)
 - 대응 체계, 국제 협력 등 변동 사항 파악
 - 추후 협력 모델 구상안에 반영
 - 현장 조사 매뉴얼 제작
 - 대응 협력 모델의 단계별 협력 제안안 구축을 위한 전문가 네트워크 구축
 - 대응 협력 모델의 조직도 내의 참여자들의 의견 수렴 및 간소화
 - ATCM(CEP) 문건 작성
 - 정보 문서(Information Paper): ATCM 회의 안건으로 채택될 경우 남극 HPAI 대응 관련 해서 당사국의 역할과 기대효과 등을 제시한 문서 작성(현장 조사 매뉴얼 내용 포함)

마. 5차년도(2030년)

해당연도 연구개발 목표	HPAI 변이 여부와 중간 확산 패턴 분석 및 현장 조사 매뉴얼 시범운영		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	매개후보종의 이동 및 공간이용에 따른 위험성 평가	200,000	서울대학교 극지연구소
	장거리 이동 후보종의 질병 매개 모형 개발	100,000	경희대학교 극지연구소
	HPAI 매개후보종 먹이원 분석	50,000	극지연구소
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보(분변, 혈액, 조직 등)	200,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생동물 유래 바이러스의 유전체 및 진화분석	150,000	극지연구소
	남극 야생동물의 항체보유 조사를 통한 바이러스 감염 빈도 및 유래 파악	150,000	경희대학교 극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	병원성 평가를 위한 제작된 HPAI의 동물모델 감염 실험 및 감염 패턴 확인	200,000	전북대학교 극지연구소
	다양한 남극 동물대상 HPAI 수용체 분포 조사를 통한 취약 동물 중 확인	50,000	극지연구소
	HPAI 바이러스의 포유류 감염 가능성 분석	100,000	극지연구소
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국가별 동향 분석	50,000	성신여자대학교
	현장 조사 매뉴얼 적용 방안 구상	30,000	극지연구소
	ATCM(CEP) 문건 작성	20,000	성신여자대학교 극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술	
☐ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 모니터링 ▪ 매개후보종의 생존률 및 회귀율 분석 ▪ 매개후보종의 연간 행동권 및 이동 파악 - 바이오로거 부착을 통한 중별 번식기 행동생태 추적 - 추적 매개후보종별 연간 분포, 이동경로 및 이동전략 파악 ▪ 매개후보종의 이동 및 공간이용 모형에 따른 위험성 평가 - 상황별 시나리오 개발 및 상황에 따른 전파위험 수준 평가 시뮬레이션 수행 - 시나리오에 따른 공간정보 기반 매개후보종별 HPAI 전파 위험 평가 ○ 남극에서 번식하는 HPAI 매개 가능 장거리 이동 철새의 이동경로 연구 ▪ 장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악 - 장거리 이동 매개 후보종의 월동지 및 중간기착지 파악 - 장거리 이동 매개 후보종의 비번식기 서식지 이용 분석 ▪ 장거리 이동 매개 모형 개발 - 추적 자료 기반 개체이동모형 개발 - 중별, 지역별 월동지, 중간기착지 등 비번식기 동안의 서식지와 번식지간의 연결성 분석 - 월동지 및 비번식지 등 주요 극지 외부 서식지의 HPAI 노출 가능성 분석 ▪ 장거리 이동 매개 후보종 체액 시료 확보 (연례조사) - 장거리 이동 매개후보종의 이동 전 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보 - 이동 후 회귀한 개체의 이동 후 감염 여부 확인을 위한 체액 시료 확보	

○ 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사

- 분변 DNA를 이용한 매개후보종 먹이원 분석
 - 남극 번식 조류의 분변 NGS를 통한 먹이원 분석
 - 연구지역에 따른 남극 생태계 먹이그물 파악
- 조직 안정성 동위원소를 이용한 매개후보종 먹이원 분석
 - 남극 번식 조류의 조직 안정성 동위원소 분석을 통한 먹이원 분석

□ 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가

○ 남극 동물 유래 바이러스 분석

- 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 지속적인 HPAI 모니터링 및 감염 시료 확보
 - 다양한 남극 서식 동물의 분변, 혈액, 조직 등의 시료 확보
- 남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 바이러스 감염 빈도 분석을 통한 감염율 분석
 - 바이러스 유전자의 변이 및 진화 패턴 분석
 - 바이러스의 시공간적 전파 패턴 분석을 통한 역학 연구
 - 남극 야생동물의 바이러스 항체보유 조사 및 감염 유래 추적

○ 재조합 바이러스 및 오가노이드를 이용한 병원성 평가

- HPAIV의 infectious clone system을 이용한 병원성 평가
 - 다양한 동물(마우스, 닭, 페렛 등)을 대상으로 한 재조합 HPAIV의 병원성 평가
- 남극 동물 모사 오가노이드를 이용한 감염 패턴 확인
 - 제작된 오가노이드를 이용한 재조합 HPAIV의 감염 패턴 확인
 - 각 동물별, 조직별 재조합 HPAIV의 감염 패턴 비교

○ 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사

- HPAIV의 수용체 분포 조사를 통한 취약 동물 종 확인
 - 각 종별, 조직별 HPAIV에 대한 수용체 분포 조사 및 민감성 평가
 - HPAIV에 대한 취약종 목록화
- HPAIV 유전자 마커 분석
 - 유전자 마커 분석과 동물실험을 통한 병원성 및 포유류 감염 가능성 비교 분석

□ 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

○ 국제 협력 네트워크 참여 및 대응

- SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
- ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유

○ 국가별 동향 분석 (2029년 현황)

- 대응 체계, 국제 협력 등 변동 사항 파악
- 추후 협력 모델 구상안에 반영

○ 현장 조사 매뉴얼 적용 방안 수정 및 보안

- ATCM 및 관련 국제회의 논의 내용을 반영하여 현장 조사 매뉴얼 수정 보완
 - 구축된 매뉴얼 이용 확산 방안 구축

○ ATCM(CEP) 문건 작성

- 작업 문서(Working Paper): ATCM회의에서 나온 내용을 바탕으로 연구 문서 및 결의안 작성
- 환경보호위원회(CEP)의 자문 요청

바. 6차년도(2031년)

해당연도 연구개발 목표	HPAI 바이러스 정보 데이터베이스 구축과 중간 감염 통합적 분석 및 프로토콜 제안		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용 및 범위	연구비(천원)	연구개발기관
잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파	매개후보종의 이동 및 공간이용에 따른 위험성 평가	200,000	서울대학교 극지연구소
	장거리 이동 후보종의 질병 매개 모형 개발	100,000	경희대학교 극지연구소
	피식-포식 기반 HPAI 전파경로 추적	50,000	극지연구소
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	남극 서식 야생동물 시료 확보 및 각 시료의 목록/정보화	200,000	서울대학교 극지연구소
	남극 야생동물 보유 바이러스 진화 및 감염 패턴의 통합적 분석 및 남극 유래 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	150,000	극지연구소
	남극 야생동물의 항체보유 조사를 통한 바이러스 감염 빈도 및 유래 파악	150,000	경희대학교 극지연구소
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	남극 HPAI 바이러스 감염기작 및 병원성 평가	200,000	한국과학기술 원 전북대학교 극지연구소
	HPAI 수용체 분포 조사 및 취약 동물 종 확인	50,000	극지연구소
	HPAI 바이러스의 포유류 감염 가능성 통합적 분석	100,000	극지연구소 전북대학교
남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여	국가별 동향 분석	50,000	성신여자대학 교
	ATCM(CEP) 문건 채택	30,000	극지연구소
	법령 개정 방안 연구	20,000	성신여자대학 교 극지연구소

연구개발내용 및 범위 상세기술
□ 잠재적인 HPAI 매개 조류의 이동경로 분석을 통한 바이러스 전파 추적 ○ 고병원성 조류인플루엔자 매개후보종의 번식기 행동권 파악 ▪ 매개후보종의 분포 및 개체수 모니터링 ▪ 매개후보종의 생존률 및 회귀율 분석 ▪ 매개후보종의 연간 행동권 및 이동 파악 - 바이오로거 부착을 통한 중별 번식기 행동생태 추적 - 추적 매개후보종별 연간 분포, 이동경로 및 이동전략 파악 ▪ 매개후보종의 이동 및 공간이용 모형에 따른 위험성 평가 - HPAI 유입경로, 위험지역 및 위험시기 예측 - 각 매개후보종의 HPAI 전파 기여도 추정 ▪ 공간정보 기반 매개후보종별 HPAI 전파 위협에 대한 관리 및 대응방안 도출 ○ 매개후보종의 장거리 이동에 의한 HPAI 전파가능성 분석 ▪ 각 중별, 지역별 매개후보종의 극지-극지 외부 연결성 및 HPAI 노출 위험 분석 - 개체이동모형 및 연결성 분석, 노출 가능성의 종합적 평가 및 지표 산출 ▪ 추적 개체별 HPAI 항체 보유 여부 및 감염여부와 이동경로 및 생존률의 관계 분석

- 추적 개체의 감염 여부에 따른 이동경로, 노출가능성, 생존률 분석

○ 조류 집단번식지 내 중간 접촉 조사

- 남극 생태계 내 먹이그물에 따른 HPAI 전파 위험성 평가
 - 번식지 내 중간 HPAI 예상 전파 경로 모형 제작
 - 번식 조류의 이동과 중간 상호작용에 따른 번식지역간 예상 전파 경로 추정

□ 남극 동물의 바이러스 다양성 분석 및 HPAI 감염 위험성 평가

○ 남극 동물 유래 바이러스 다양성 분석

- 남극 서식 야생동물 시료 확보
 - 다양한 남극 야생동물 시료 확보 및 각 시료의 목록, 정보화
- 남극 야생동물 바이러스 감염 및 유전체 분석
 - 남극 야생동물 유래 바이러스 진화 및 전파 패턴, 다양성 분석
 - 남극 유래 바이러스 유전자 데이터베이스 구축

○ 남극 HPAIV 감염기작 및 병원성 평가

- 다양한 동물에서 HPAIV 감염기작 및 병원성 평가
- 남극 동물 모사 오가노이드를 이용한 남극 동물에서 HPAIV 감염 패턴 평가

○ 남극 동물에서 HPAIV 수용체 분포 조사

- 남극 야생동물 종에 따른 감염 민감성 평가
- 남극 유래 HPAIV의 중간 감염 가능성 예측

□ 남극에서 HPAI 발생에 대한 대응체계 참여

○ 국제 협력 네트워크 참여 및 대응

- SCAR 워킹그룹인 AWHN 참여
 - ASPA 171지역의 선제적 모니터링 결과 공유 및 발표
- ROSS SEA HPAI 모니터링 그룹 참여
 - ROSS SEA HPAI 모니터링 상황 및 결과의 즉각적 공유

○ 국가별 동향 분석 (2030년 현황)

- 대응 체계, 국제 협력 등 변동 사항 파악
- 추후 협력 모델 구상안에 반영

○ ATCM(CEP) HPAI 아젠다 대응

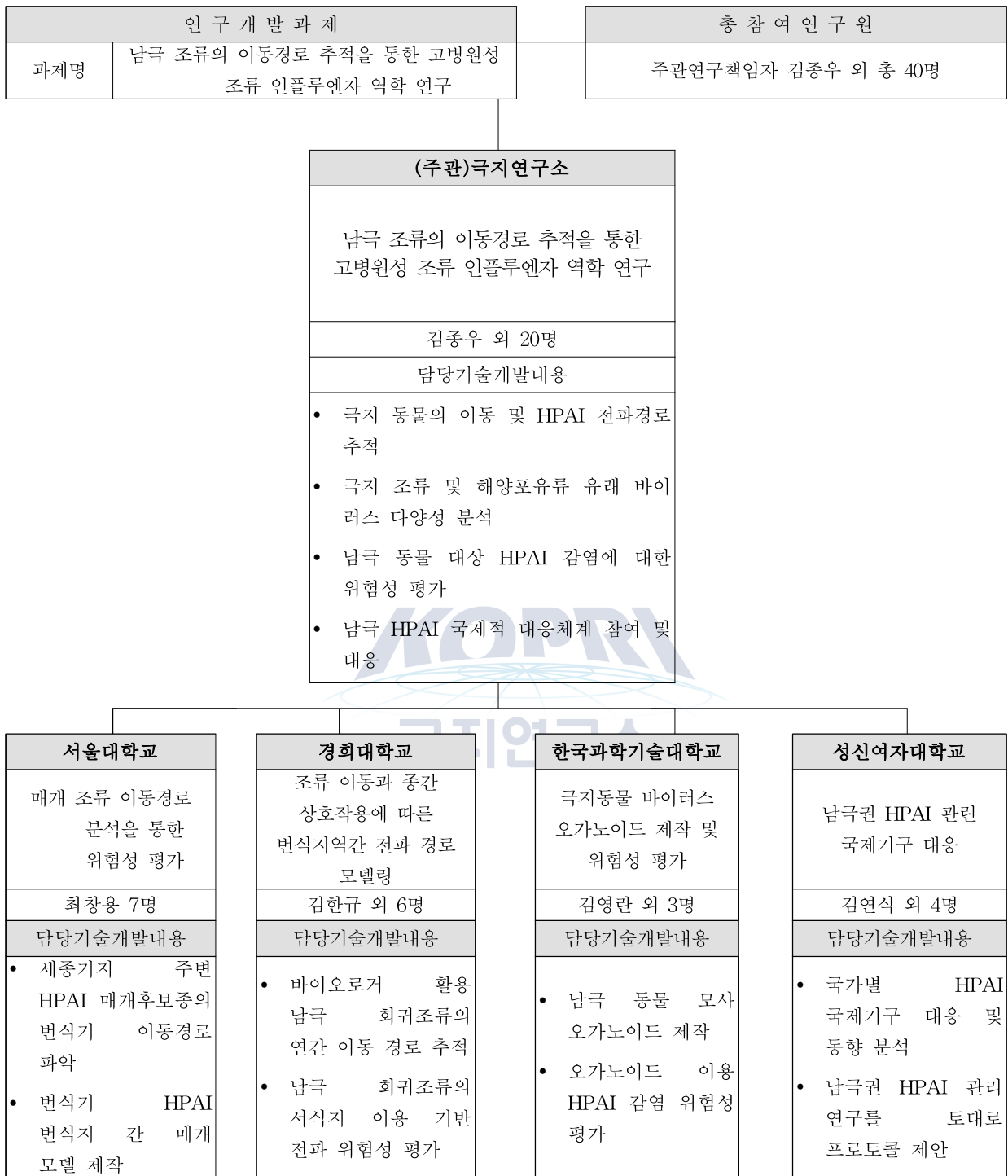
- CEP Handbook 및 CCAMLR, SCAR 등 HPAI 관련 대응 아젠다 제시

○ 법령 개정 방안 고려

- 남극권 HPAI 관리를 위한 국내법적 체계 개정안 고려
 - 국내 유입 방지를 위한 엄격한 검역, 관계자 대상 및 권한에 대한 기존의 국내법 개정안 검토

4. 사업추진체계 및 방식

[그림 III-1] 사업시행체계



- 수산과학원(CCAMLR 대응), 서울대학교/경희대학교(조류이동 추적), 한국과학기술대학교/전북대학교(HPAI 위험성 평가 분석), 성신여자대학교(국제기구 대응) 등 관련 전문기관이 참여하는 연구협의체 구성

5. 사업추진 로드맵 및 소요예산

<표 III-2> 사업추진 로드맵

구 분		'26	'27	'28	'29	'30	'31	합 계
요구금액(백만원)		1,500	1,300	1,300	1,500	1,300	1,300	8,200
남극 조류의 이동경로 추적을 통한 고병원성 조류인플루엔자 (HPAI) 연구	HPAI 전파 추적	장거리 이동 매개 후보종의 이동경로 파악			장거리 이동 조류의 질병 매개 모형 개발			2,400
		250	200	200	250	200	200	
		바이오로거 활용 남극 번식지 조류의 행동권 분석			매개후보종의 이동 및 공간이용 모형에 따른 위험성 평가			
		100	100	100	100	100	100	
		HPAI 매개 후보 종 먹이원 분석					피식-포식기 반 HPAI 전파경로 추적	
		150	50	50	150	50	50	
	극지동물 보유 바이러스 조사	남극 서식 야생동물 분변 및 혈액 시료 채취						2,640
		100	200	200	100	200	200	
		남극 야생동물 바이러스 유전체 분석			남극 야생동물 바이러스 유전체 및 진화 분석			
		150	150	150	150	150	150	
		남극 야생동물의 바이러스 항체보유조사						
		70	150	150	70	150	150	
	HPAI 위험성 평가	병원성 평가를 위한 바이러스 및 배양 플랫폼 제작			남극 HPAIV의 감염기작 및 병원성 평가			2,640
		320	200	200	320	200	200	
		HPAI 수용체 분포 조사			HPAI 수용체 분포 조사 및 취약 동물종 확인			
		150	50	50	150	50	50	
		HPAI바이러스의 유전자 마커 및 수용체 분석			포유류 감염 가능성 예측			
		150	100	100	150	100	100	
	HPAI 대응 체계 참여	남극 동물 유래 병원체 목록화			남극 동물 유래 병원체 진단 프로토콜 및 현장 대응 매뉴얼 제작			520
		30	50	50	30	50	50	
		HPAI 신속 정밀 진단 시스템 구상			HPAI 신속정밀 진단 시스템 현장 적용			
		20	30	30	20	30	30	
		기존 남극 내 HPAI 대응체계 분석 및 참여			남극 HPAI의 국제적 대응 및 국제 협력 체계 참여			
		10	20	20	10	20	20	

6. 성과목표 및 지표

성과목표	연구 연차	성과지표	목표치	설정근거	평가 기준
잠재적인 HPAI 매개조류의 이동경로 분석	최종	매개후보종 위치추적 선행연구 분석	1건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	분석 건수
		매개후보종 보유 바이러스 분석을 위한 시료 수집	3건	매개후보종 바이러스 유전체 분석	조직 시료 수집 종 수
		매개후보종의 이주경로 파악	9건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
		매개후보종 번식기 행동권 파악	9건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 5건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
잠재적인 HPAI 매개조류의 이동경로 분석	1년차	매개후보종 위치추적 선행연구 분석	1건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	분석 건수
		매개후보종 보유 바이러스 분석을 위한 시료 수집	3건	매개후보종 바이러스 유전체 분석	조직 시료 수집 종 수
	2년차	매개후보종의 이주경로 파악	1건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
		매개후보종 번식기 행동권 파악	1건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
	3년차	SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
		매개후보종의 이주경로 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
		매개후보종 번식기 행동권 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	4년차	매개후보종의 이주경로 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
		매개후보종 번식기 행동권 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
		매개후보종의 이주경로 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
	5년차	매개후보종 번식기 행동권 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 2건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	6년차	매개후보종의 이주경로 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 이주경로 지도 제시 건수
		매개후보종 번식기 행동권 파악	2건	HPAI 매개 후보종 이동경로 분석	종별 행동권 지도 제시 건수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	최종	HAPTV 포함 남극 유래 바이러스의 전장 유전자 확보	3건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	전장 유전자 확보된 바이러스 수
		남극 동물 종에 대한 바이러스 유전체 분석	5건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	분석 야생동물 종 수
		바이러스 진화 및 전파경로 분석	4건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
		항체보유 조사	3건	남극 동물 바이러스 감염 분석	조사 바이러스 종 수
		바이러스 감염을 분석	4건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 7건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수

극지 야생동물 유래 바이러스 다양성 분석	1년차	남극 HPAIV 전장 유전자 확보	1건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 데이터베이스 제작	전장 유전자 확보된 바이러스 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	2년차	남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 분석	1건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	분석 야생동물 종 수
		남극 유래 바이러스 바이러스 전장 유전자 확보	1건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 데이터베이스 제작	전장 유전자 확보된 바이러스 수
	3년차	SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
		남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 분석	2건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	분석 야생동물 종 수
	4년차	바이러스 진화 및 전과정로 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40 이상 2건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	5년차	남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 분석	2건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전자 데이터베이스 구축	분석 야생동물 종 수
		남극 유래 바이러스 바이러스 전장 유전자 확보	1건	남극 야생동물 보유 바이러스 유전체 데이터베이스 제작	전장 유전자 확보된 바이러스 수
	6년차	남극 야생동물 항체 보유 조사 및 감염 경로 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	조사 바이러스 종 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	7년차	바이러스 진화 및 전과정로 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
		남극 야생동물 항체 보유 조사	1건	남극 동물 바이러스 감염 분석	조사 바이러스 종 수
	8년차	SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
		바이러스 감염율 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
	9년차	남극 야생동물 항체 보유 조사 및 감염 경로 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	조사 바이러스 종 수
		바이러스 감염율 분석	2건	남극 동물 바이러스 감염 분석	분석 바이러스 종 수
	10년차	SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
		기지 내 HPAI 연구 시설 구축	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	구축 건수
남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	최종	재조합 바이러스 제작 및 병원성 평가	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	제작된 재조합 바이러스 수
		남극 동물 모사 오가노이드 제작 및 감염성 평가	4건	남극 HPAIV 감염기작 분석	제작된 오가노이드 수
		동물 조직 내 HPAI 수용체 분석	건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	수용체 분석된 동물 종 수
		HPAIV의 유전자 마커 분석	1건	남극 HPAIV의 병원성 예측	예측된 바이러스의 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 5건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수

남극 야생동물 대상 HPAI 감염에 대한 위험성 평가	1년차	HPAI 감염기작 연구 시설 구축	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	구축 건수
		Infectious clone system 구축	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	vector 확보 건수
		오가노이드 제작을 위한 동물 조직 수집	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	동물 조직 수집 건수
		남극 동물 조직 시료 확보 및 조직 슬라이드제작	2건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	확보된 조직의 동물 종 수
		바이러스 유전자 마커 목록	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	유전자 마커 목록 표
	2년차	HPAIV infectious clone system 제작	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	clone 제작 건수
		오가노이드 제작을 위한 동물 조직 수집	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	동물 조직 수집 건수
		제작된 오가노이드 수	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	제작된 오가노이드 장기 수
		남극 동물 조직 시료 확보 및 조직 슬라이드제작	2건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	확보된 조직의 동물 종 수
		수용체 분포조사	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	분석된 조직의 동물 종 수
	3년차	제조합 HPAIV 제작	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	증식된 바이러스 수
		오가노이드 제작을 위한 동물 조직 수집	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	동물 조직 수집 건수
		제작된 오가노이드 수	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	제작된 오가노이드 장기 수
		오가노이드 이용 바이러스 감염 실험	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 바이러스 건 수
		남극 동물 조직 시료 확보	2건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	확보된 조직의 동물 종 수
		수용체 분포조사	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	분석된 조직의 동물 종 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	4년차	HPAI의 동물실험	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 동물 종 수
		제작된 오가노이드를 이용한 HPAIV의 감염패턴 확인	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 오가노이드 수
		오가노이드 제작을 위한 동물 조직 수집	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	동물 조직 수집 건수
		제작된 오가노이드 수	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	제작된 오가노이드 장기 수
		남극 동물 조직 시료 확보 및 수용체 분포조사	2건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	확보된 조직의 동물 종 수
		바이러스의 마커 분석을 통한 병원성 유추	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	예측된 바이러스의 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	5년차	HPAI의 동물실험	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 동물 종 수
		제작된 오가노이드를 이용한 HPAIV의 감염패턴 확인	2건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 오가노이드 수
		남극 동물 조직에서 HPAIV수용체 분포조사	2건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	조사된 조직의 동물 종 수
		HPAV에 대한 남극 취약 종 목록화	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	취약종 목록표
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 2건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수
	6년차	남극 동물 조직에서 HPAIV수용체 분포조사	1건	남극 야생동물 조직 HPAI 수용체 분석	조사된 조직의 동물 종 수
		제작된 오가노이드를 이용한 HPAIV의 감염패턴 확인	1건	남극 HPAIV 감염기작 분석	실험된 오가노이드 수
		SCI(E)급 논문 게재	mrnIF 40이상 1건	표준화된 순위 보정영향력 지수 (mrnIF) 기준	게재 및 게재승인 편수

남극에서 HPAI 발생 에 대한 대응체계 참여	최종	MOU 체결	2건		체결 건수
		국내외 워크숍 개최	4건		개최 건수
		국제문건(ATCM(CEP)) 제출 및 활용	5건		제출 건수
		현장 조사 매뉴얼 발간	1건		발간 건수
		정책/법령 제언	2건		제언 건수
		KCI/CSOPUS급 논문	6건		게재 및 게재승인 편수
남극에서 HPAI 발생 에 대한 대응체계 참여	1년차	KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수
	2년차	MOU 체결	2건	국내외 연구기관	체결 건수
		KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수
	3년차	국내외 워크숍 개최	2건	MOU 체결 기관과 연구 현황 공유, 전문가 자문	개최 건수
		국제문건(ATCM(CEP)) 제출	2건	배경 문서	제출 건수
		KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수
	4년차	국제문건(ATCM(CEP)) 제출	1건	정보 문서	제출 건수
		KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수
		국제문건(ATCM(CEP)) 제출	1건	작업 문서	제출 건수
	5년차	KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수
		현장 조사 매뉴얼 발간	1건	현장 조사 매뉴얼 작성 및 적용	발간 건수
	6년차	국내외 워크숍 개최	2건	MOU 체결 기관과 연구 현황 공유, 전문가 자문	개최 건수
		국제문건(ATCM(CEP)) 활용	1건	CEP Handbok에 활용	활용 건수
		정책/법령 제언	2건	HPAI 관리 제도의 확산	제언 건수
		KCI/CSOPUS급 논문	1건		게재 및 게재승인 편수

7. 기대효과 및 활용방안

7.1 기대효과

☐ 과학·기술적 기대효과

- 철새 이동 경로와 남극에서 HPAI 모니터링 결과를 결합한 전 지구적인 질병의 전파 모델 생성 가능
 - 철새 이동 경로를 분석하고, 남극에서 HPAI 확산 양상 파악 및 바이러스 변이 과정을 추적함으로써 숙주의 이동에 의한 질병의 발생에 대한 전파 모델 구현
 - 기타 다양한 바이러스 전파 요인들의 고려를 통한 남극 최적의 질병 대응체계 구축에 기여할 수 있음
- 새로운 기술 적용을 통한 남극 연구 수준 향상 및 남극 고유 자원의 반영구적 자원화
 - 남극 동물 조직 모사 시스템(오가노이드⁶⁾) 구축을 통해 감염병 연구 시 남극 동물 대상 윤리적 부담을 경감하고, 최신 기술 도입으로 연구 수준 향상
 - 남극 동물 또는 유사 동물 조직 수집을 통해 활용 가능한 남극 고유 자원을 장기적으로 보존할 수 있는 반영구적 자원으로 전환 가능
- HPAI 바이러스 유전체 확보·분석 및 공유를 통한 전염병 확산 방지 데이터로 활용 기대
 - 남극에서 HPAI 유전체를 확보하고, 장기 모니터링을 통한 남극 HPAIV의 진화 양상을 파악함으로써 향후 유행할 수 있는 바이러스의 특성 예측 가능
 - 고립된 환경의 외부 간섭 최소화된 환경에서 바이러스 변이 추적함으로써 바이러스 변이·진화 연구에 새로운 통찰력 제시 가능
 - 남극 병원체의 신규 확보를 통한 전세계 전염병 지도의 구체화 및 데이터 공유를 통한 질병 기원 파악을 위한 공백을 보완(감염병 최대 데이터베이스인 GISAID⁷⁾의 데이터 공유)

☐ 경제·산업적 기대효과

- 방역망을 통한 경제적 피해 감소에 기여
 - 남극권 HPAI 발생 시 집중적인 방역관리체계를 통해 다양한 전파 경로를 통한 주변국 및 우리나라의 전파가능성 사전에 차단 가능
 - 남극권 HPAI 전파 경로를 조기에 파악하여 우리나라의 가금류 및 무역 산업의 직·간접적 피해 예방
- 신기술 개발 및 산업적 활용 가능
 - 다양한 실험동물 대체 오가노이드 시스템의 개발을 통한 감염성 연구 및 백신/치료제 개발

6) 오가노이드 기술은 줄기세포로부터 유래한 일종의 3차원 미니 장기로서 해당 동물의 장기 구조 및 기능을 재현을 통해 전통적인 세포배양이나 동물실험의 한계성을 보완하는 첨단 기술

7) GISAID(글로벌 인플루엔자 데이터 공유 이니셔티브): 독일에 기반을 둔 비영리 기관, 인플루엔자 바이러스 유전자 정보 공유를 시작으로 코로나19 등 신종 바이러스에 대한 데이터베이스 구축

비용 절감

- 남극 동물 생체 모사 시스템은 타 남극 연구 국가들에서 활용도가 높을 것으로 예측되어, 이에 따른 특허 등 산업적 활용 가능성 제시

□ 사회·문화적 기대효과

○ 대중 인식 제고 및 허위정보 방지

- 남극권 바이러스 확산은 대중에게 막연한 불안감을 줄 수 있기에, 정확한 연구 결과를 공유하여 감염병에 대한 경각심을 높이고 환경 보전 의식을 강화

○ 남극 생물 보호 및 국제 공동연구 촉진

- 국제협력을 통해 신속한 대응체계 지원 및 관련 분야에 대한 국가 간 공동 연구 모색
- 다양한 국제 기구(WHO, WOAHP, CCAMLR, ATCM, COMNAP, SCAR 등)의 HPAI 대응 전략 수립에 기여
- 남극에서 HPAI 발생 시 빠른 진단 방법 제안 및 신속한 대응 방안 마련을 통해 극지연구 선도국으로서의 지위를 획득할 수 있을 것으로 기대

○ 글로벌 감염병 대비 전략 강화 (One Health 증진)

- 해양수산부는 국가연구개발사업인 해양수산생명공학기술개발 사업을 꾸준히 진행하고 있는 만큼 위 연구과제를 통해 해양수산부의 전문성을 활용하여 차별적이고 선도하는 사업을 진행 가능
- 원헬스(One-Health) 개념 기반 남극동물-사람 간 HPAI 확산 방지 및 남극 생태계와 환경 보호 강화 기여

7.2 활용방안

○ 조류의 이동경로와 HPAI 발생지역 간의 연관성 규명을 통해 바이러스 확산 예측 및 대응

- HPAI 확산 경로 예측 모델 형성을 통해 선제적 대응 조치 수행에 기여
 - 남극 지역에서의 HPAI 감시 데이터를 바탕으로 조류 이주의 패턴, 바이러스 유입 경로, 확산 가능성을 예측하는 모델을 개발할 수 있으며, 이는 바이러스의 글로벌 확산 방지 및 초기 대응 체계를 강화하는 데 활용될 수 있음
- HPAI의 잠재적 피해자 및 전파자로서 남극 조류의 분포와 이동에 대한 정보 확보
 - 남극 생태계의 지표종, 핵심종, 깃대종들에 대한 이해 증진
 - 다양한 시공간적 규모의 분포, 이동 양상을 파악하고, 기후변화에 의한 향후 변화와 적응 예측에 활용
 - 남극에서의 HPAI 발병 동향을 분석하고 이해함으로써 주요종의 HPAI 민감도와 전파에서의 역할 파악
- 지리적 연결성, 개체군 연결성을 파악하여 피해 발생 예측 및 대응방안 모색에 활용

- HPAI의 집단 내 유입경로와 방향, 주요 대상종에 대한 정보 확보
- HPAI 유입의 위협수준과 모니터링 대상 지역/대상종의 우선순위 선정
- 연결성이 확인된 지역에서 AI 발생 시 남극특별보호구역 및 대상 집단에 대한 모니터링 노력 확대

- 기존 발병사례, 문헌연구 등의 수집을 통한 실질적 대응 지침 개선

- 국내외 주요 HPAI 현황과 모니터링 지침, 대응 방향 등을 참고하여 현장 상황에 맞는 국내대응 지침의 지속적 개정/보완
- 상시모니터링, 오염현장에 대한 출입, 사체 수거 및 처리 방안, 사후 모니터링등의 구체적이고 단계적인 대응 방안 확보

○ 과학적 이해 증진 및 학술적 기여

- 극지 바이러스 연구 확대 및 생물다양성 보전

- 고립된 극지방에서 극지방의 바이러스 생존, 전파, 변이에 대한 이해를 높임으로써 바이러스의 유전학적·생물학적 특성을 새롭게 규명할 수 있으며, 이는 전 세계 바이러스 연구의 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 판단됨
- 남극 생태계에 서식하는 펭귄, 남극 칼집부리물떼새 등 고유종에 대한 바이러스 위험 평가를 통해 보호 우선순위를 정하고, 종 보존 및 복원 전략을 수립할 수 있음
- HPAI의 영향을 받는 종 및 서식지를 관리함으로써 남극의 생태계 균형 유지와 지속 가능성을 지원할 수 있음

- 기후 변화 연구와의 연계

- 기후 변화가 바이러스 전파 및 조류 이동에 미치는 영향을 남극 데이터로 분석함으로써, 기후 변화와 감염병 확산 및 조류 이동공간 변화 간의 연관성을 규명하는 데 기여할 수 있음

○ 공중 보건 강화

- 국내 AI발생 특별방역대책 초기 평가자료 및 다부처의 기초자료로 활용

- 남극-한반도 간 연결성 분석을 통한 조류인플루엔자 국내 유입 가능성을 파악하고, 국내 특별방역대책 초기 평가지표인 '해외 고병원성 AI 발생 동향', '철새에 의한 국내 유입 위험'의 평가 지표로 활용 가능
- 다부처에 남극 병원체 유전정보 공개 및 공유를 통한 국내 검역·감시 시스템 자료⁸⁾로 활용 가능

- 인간 감염 가능성 평가 및 예방

- 원헬스적 관점에서 남극에서 발견되는 HPAI에 대한 인체 감염 가능성 평가를 통해 인간으로 전파될 가능성을 사전에 평가하고, 이에 따른 예방책을 수립할 수 있음

- 극지동물 유래 HPAI의 유전정보를 활용한 바이러스 신속 진단·대응 체계 보완수립에 기여

- HPAI에 적절한 백신 및 치료제 개발을 위한 유전정보 제공을 통해 남극 생태계보전 및 연구자의 안전한 현장 연구 수행에 기여

○ 남극 HPAI 관련 공동연구, 네트워크 참여 등의 국제협력을 통해 국제 기구의 대응 체계에 참여

- 남극에서 HPAI 발생 시 빠른 진단 방법 제안 및 신속한 대응 방안 마련을 통해 극지연구 선도국으로서의 지위를 획득할 수 있을 것으로 기대

8) 농림축산검역본부에서는 국가가축방역통합시스템(KAHIS), 환경부에서는 야생동물질병관리시스템(WADIS)을 운영, 질병 발생의 사전 예방 및 질병 발생 시 확산 방지를 위한 최신 정보통신(ICT)기술을 활용하여 동물질병 및 가축방역 정보 통합관리

8. 사업개념도



IV. 사업 타당성 분석

1. 정책적 타당성

- 고병원성 조류 인플루엔자의 남극 유입에 따른 생태계 변화가 예상됨에 따라 남극 해양 생태계에 특화된 대응 가이드라인이 필요
 - 남극으로 HPAI 및 고병원성 병원체 유입은 주로 해양성 조류에 의해 발생되고 있으며, 유입된 바이러스는 해양포유류 및 남극 활동 종사자들에 위협이 되고 있음
 - 남극에서 고병원성 조류 인플루엔자의 발생은 남극 고유종의 집단 폐사, 남극 활동 및 해양 활동의 중지와 같은 재앙적 결과를 초래할 수 있음
 - 미국의 NOAA Fisheries에서도 적극적으로 대응 가이드라인 구축의 필요성을 주장하고 있으며, 해양포유류 네트워크 파트너 및 정부 기관과 협력하여 계속해서 사건을 조사하고 바이러스의 진행 상황을 모니터링하고 있는 상황
 - 고병원성 조류 인플루엔자의 남극 유입은 남극의 해양 동물뿐만 아니라, 인접한 주변 환경에서 활동하는 모든 동물에 영향을 미칠 수 있는 중대한 이슈이기에 해수부의 영향력으로 남극 해양생태계에 맞춤형 가이드라인을 마련할 수 있는 기회라고 생각됨
- 해수부의 「극지활동 진흥기본계획」, 남극조약의 「환경보호의정서」 등에 따라 남극 생태계의 변화 모니터링과 남극 환경보고 및 바이러스 유입 방지에 기여할 수 있음
 - 현재 남극에서 HPAI의 발생은 남극 야생동물내에서 재난같은 상황이지만, HPAI에 대한 연구는 전무함. 따라서 본 연구는 남극의 정책적 방향에 따라 남극 생태계의 변화와 남극 환경보고, 남극조약지역에 미생물(바이러스 등) 유입 방지 역할에 기여

2. 과학·기술적 타당성

- 급격한 환경변화에 따른 조류의 이동패턴 변경이 전 지구적인 HPAI 전파 역학에 미치는 영향 규명
- 바이러스 전파 경로 및 생태 이해
 - 남극은 이주성 조류의 중요한 서식지로, 조류 인플루엔자의 전파 경로를 추적함으로써 전세계 확산을 예측하는 데 중요한 데이터를 제공할 수 있음
 - 극한 환경에서 바이러스 변이양상을 분석함으로써 감염병의 기초 과학 연구를 확장할 수 있음
- 남극 동물 대상 바이러스 감염에 대한 위험성 평가
 - 남극에 서식하는 고유 종 중에서 바이러스 감염에 취약한 종을 목록화하고 이를 기반으로 연구를 확장하여 바이러스와 숙주간의 상호작용을 이해하는데 도움이 될 수 있음
 - 원헬스적 관점에서 남극에서 검출되는 바이러스의 인체 감염 위험성 평가를 진행하여, 남극 연구진의 안전성을 강화하고 연구의 지속성을 확보할 수 있음

○ 남극 신규 연구분야에 대한 선도적 지위 확보 가능성

- 남극의 불리한 지리적 접근성에도 불구하고 남극 기지기반으로 구축된 K-방역의 일부 표준화된 진단시스템으로 주변국에서도 협조요청 쇄도
- HPAI의 남극 발생에 따른 국제적 관심이 높은 상황에서 K-방역과 같은 표준화된 우리나라 기술력은 남극에 적용함으로써 남극 연구의 신규 분야에 대한 선도적 지위 확보 가능성 존재

3. 경제적 타당성

- 조류 이동 추적 장비, 고병원성 병원체이기 때문에 BL3 시설의 사용 등에 따른 예산 편성이 필요
- HPAI로 인한 피해 예상액을 고려했을 때, 본 연구사업은 사회 전체 관점에서 높은 비용 대비 편익을 창출, 재정적·정책적으로 모두 추진 타당성이 높은 것으로 판단
 - 6개년 간(2025년~2031년) 사업 시행으로 인해 발생하는 편익과 비용을 분석하기 위한 비용-편익 분석(Cost-Benefit Analysis, CBA), 편익과 비용의 가치 차이를 반영하기 위해 할인율을 적용한 순현재가치(Net Present Value, NPV) 분석, 그리고 분석 결과의 신뢰성을 제고하고자 민감도 분석(Sensitivity Analysis)를 시행하여 본 연구 사업의 비용과 편익을 정량적으로 분석
- 비용 항목은 연구 장비 및 기술 도입비, 인건비, 현장조사비, 데이터 인프라 구축비, 운영비 및 기타 협력 활동 비용을 포함 (표 III-3)

<표 IV-1> 비용 분석 (총 82억 원)

항목	연간 비용 (억 원)	6개년 총비용 (억 원)
위성추적기 및 센서 도입비	2.5	15
AI 분석 시스템 구축비	1.67	10
연구 인력 및 조사 인건비	3	18
현장조사비(남극 및 경유지)	2	12
데이터 인프라 구축비	1.17	7
운영 및 관리비	1.5	9
국제협력 및 교육, 자문비	1.67	10
총합계	11.51	82

- 위성추적기 및 센서 도입
 - GPS 기반 위성 추적 장비 및 센서 도입을 통한 남극 조류의 위치 경로의 실시간 파악
- AI 분석 시스템 구축
 - 조류 이동 정보와 기후 데이터를 통합 분석하여 위험지역 조기 경보할 수 있는 알고리즘 개발 및

클라우드 연계형 학습 모델 구축

- 연구인력 및 조사 인건비

- 생태학, 수의학, 바이러스학, 데이터과학, 법·정책학 등 융복합적 연구를 위한 전문가 인건비

- 현장조사비

- 남극 및 중간 기착지에서의 표본 채취, 조류 조사 등 활동 비용

- 데이터 인프라 구축비

- 현장 수집 데이터의 저장 및 공유 플랫폼 구축 포함

- 운영 및 관리비

- 국제협력 및 교육 자문비

- 국제공동연구 파트너십 구축, 학술교류, 연구자 역량 강화 교육 비용

○ 편익 항목은 ① 조기경보 체계 구축에 따른 HPAI 방역비용 절감, ② 양계산업의 감염 피해 예방으로 인한 산업 보호 편익, ③ 백신 관련 기초연구 데이터 및 특허 편익, ④ 오가노이드 기반 첨단 생명공학 기술의 발전과 국내 산업 확산 효과로 구성 (표Ⅲ-4)

<표 IV-2> 편익 분석 (총 6,600억 원)

항목	연간 편익 (억 원)	6개년 총편익 (억 원)
방역비용 절감 효과	500	3,000
양계산업 피해 예방	300	1,800
백신 관련 기초연구 데이터 및 특허	200	1,200
오가노이드 등 첨단 기술 파급효과	100	600
총합계	1,100	6,600

- 방역비용 절감 및 방역망을 통한 경제적 피해 감소 기여

- 조기경보체계 확보를 통한 조류인플루엔자 국내 유입 선제적 차단을 통해 국내서 발생하는 대 규모 살처분, 격리, 소독, 방역인력 동원 등 직간접적 비용 절감
- 과거 국내 HPAI 발생 시 투입된 방역 비용 자료 기반, 연간 500억, 총 3,000억 편익 예상

- 양계 산업 피해 예방

- HPAI 발생 시 양계 농가의 생산성 손실, 유통만 교란, 소비 위축 등 간접 피해 방지
- HPAI 1회 발생 시 손실 규모 평균값 기반, 연간 300억, 총 1800억 편익 예상

- 백신 관련 기초연구를 통한 인간 및 공중 보건 강화

- 인체감염 사전 대응 가능 및 사전진단을 통해 조기 경보 체계, 백신 개발을 통해 의료적 비용과 사회적 손실 감소 (연간 200억, 총 1,200억 편익 예상)

- 오가노이드 등 첨단 신기술 개발 및 산업적 활용 가능

- 확보되는 병원체 정보 및 생물학적 데이터로 오가노이드 기술 활용한 백신 및 치료제 개발의 기반을 확보, 국내 바이오 기업의 R&D 경쟁력 제고, 글로벌 연구 협력 확대 등으로 확장
- 산업연관표 기준 첨단 생명공학 기술의 경제적 파급계수에 따라 총 600억의 산업 효과 예상

- 비용 편익 분석 (CBA)를 통해 편익비용비율(Benefit-Cost Ratio, BCR)과 순현재가치(NPV)를 산출하여 경제성 여부를 평가
 - 본 사업의 총 편익 6,600억과 총비용 82억을 기반으로 총편익을 총비용을 나눈 비용편익비율(BCR)은 67.1로 경제성이 있는 것으로 평가 됨
 - 각 연도별 편익과 비용을 사회적 할인율 (3%)를 적용하여 현재 가치로 환산한 뒤 계산한 순현재가치(NPV)는 값이 양(+)로 나오므로 장래편익에서 장래비용을 차감해도 편익이 큰 것으로 나타남
 - 민감도 분석을 통해 주요 변수들의 불확실성과 변화 가능성을 반영, 평가 결과가 안정적인 지 검토를 시행
 - 방역비 절감 효과와 오가노이드 및 첨단 기술 편익을 민감 요소로 설정, 이들의 변화에 따른 비용편익비(BCR)에 미치는 영향 분석을 진행하여 방역비 절감의 효과가 줄어들거나, 바이오 기술의 변화의 편익이 줄어드는 경우에도 비용편익비는 1을 훨씬 상회하는 값(57.9, 61.9)이 나오며, 보수적 시나리오를 적용하더라도 경제적 타당성에 큰 영향이 없음이 나타남
- 할인율 시나리오 분석을 통해, 미래의 편익 가치에 따른 경제성 평가 검토 3%, 5%, 7%의 사회적 할인율을 적용하여 순현재가치(NPV)의 변화를 살펴 본 결과, 순현재가치는 양의 값(+)을 나타내며 단기적 수익에 그치는 것이 아닌 확실한 장기적 경제성 또한 나타냄
- 남극 조류의 이동경로 추적을 통한 고병원성 조류인플루엔자(HPAI) 역학 연구의 경제성을 분석한 결과, 방역, 산업, 공중보건, 생명공학 등 다양한 분야에서 6,600억 원에 달하는 사회적 편익에 비해 총 비용은 82억이라는 결과가 나옴
 - 비용편익비, 순현재가치 산출에서도 양의 값(+)이 나타났으며, 민감도 분석, 할인율 분석에서도 불확실한 변화 가능성과 미래의 편익에서도 확실한 경제성을 담보함
 - 남극권 HPAI 연구는 단순한 극지 생태조사와 단순한 감염병 대응차원을 넘은, 방역체계 선진화, 산업 기술 발전, 공중보건 강화 등 사회 전 분야에 걸쳐 실질적 편익을 창출하는 고효율 연구 정책사업

4. 사회 · 문화적 타당성

- 남극의 HPAI 발생지에서 출발하는 조류의 이동경로 예측을 통해 전파 위험지에 위치한 가금류 농장에서 효과적 대응
- 선제적 HPAI 대응 조치를 통한 관리비용 절감과 남극 관광산업 활성화
- 지구 생태계 보존의 글로벌 책임
 - 남극은 전 세계 생태계 건강을 상징하는 지역으로, 이를 보존하는 연구는 전 인류의 공동 책임이라는 사회적 가치를 담고 있음
 - 남극 생태계를 연구하고 보호하는 활동은 환경 보호에 대한 국제적 의무 이행의 사례로 제시될 수 있음

○ 국제 협력과 평화 증진

- 남극은 과학 연구를 위한 국제적 협력의 상징적 장소로, 공동연구는 국가 간 신뢰를 구축하고 협력을 증대시키는 데 이바지함
- 전 세계가 직면한 감염병 문제해결을 위해 남극 연구 자료를 제공함으로써 국제적 위상을 높일 수 있음

○ 과학 대중화와 인식 제고

- 남극에서의 연구는 대중에게 과학적 호기심을 불러일으키고, 환경 보호 및 감염병 대응의 중요성에 대한 인식을 높이는 데 이바지할 수 있음
- 극지방 생물과 환경에 대한 연구는 교육 및 문화적 콘텐츠로 활용 가능하며, 이는 과학 문화 확산과 사회적 관심을 높이는 데 유용할 것임



첨부1. 참고문헌

<연구 문헌>

- Abolnik, Celia, et al. "The molecular epidemiology of clade 2.3. 4.4 B H5N1 high pathogenicity avian influenza in Southern Africa, 2021 - 2022." *Viruses* 15.6 (2023): 1383.
- Agüero, Montserrat, et al. "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus infection in farmed minks, Spain, October 2022." *Eurosurveillance* 28.3 (2023): 2300001.
- Baek, Yoon-Gi, et al. "Evolution, transmission, and pathogenicity of high pathogenicity avian influenza virus A (H5N8) clade 2.3. 4.4, South Korea, 2014 - 2016." *Frontiers in Veterinary Science* 9 (2022): 906944.
- Banyard, A. C., Bennison, A., Byrne, A. M., Reid, S. M., Lynton-Jenkins, J. G., Mollett, B., ... & James, J. (2024). Detection and spread of high pathogenicity avian influenza virus H5N1 in the Antarctic Region. *Nature Communications*, 15(1), 7433.
- Baybay, Zyne, et al. "Molecular Characterization of a Clade 2.3. 4.4 b H5N1 High Pathogenicity Avian Influenza Virus from a 2022 Outbreak in Layer Chickens in the Philippines." *Pathogens* 13.10 (2024): 844.
- Baylis, A. M., Tierney, M., Orben, R. A., Gonzalez de la Pena, D., & Brickle, P. (2021). Non breeding movements of Gentoo Penguins at the Falkland Islands. *Ibis*, 163(2), 507-518.
- Bennett-Laso, B., Berazay, B., Muñoz, G., Ariyama, N., Enciso, N., Braun, C., ... & Neira, V. (2024). Confirmation of highly pathogenic avian influenza H5N1 in skuas, Antarctica 2024. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1423404.
- Bevins, Sarah N., et al. "Intercontinental movement of highly pathogenic avian influenza A (H5N1) clade 2.3. 4.4 virus to the United States, 2021." *Emerging infectious diseases* 28.5 (2022): 1006.
- Caserta, L. C., Frye, E. A., Butt, S. L., Laverack, M., Nooruzzaman, M., Covalada, L. M., ... & Diel, D. G. (2024). Spillover of highly pathogenic avian influenza H5N1 virus to dairy cattle. *Nature*, 634(8034), 669-676.
- Cha, Ra Mi, et al. "Genetic characterization and pathogenesis of H5N1 high pathogenicity avian influenza virus isolated in South Korea during 2021 - 2022." *Viruses* 15.6 (2023): 1403.
- Cho, Andrew Yong, et al. "Index case of H5N1 clade 2.3. 4.4 b highly pathogenic avian influenza virus in wild birds, South Korea, November 2023." *Frontiers in Veterinary Science* 11 (2024): 1366082.
- Cho, Andrew Yong, et al. "Novel Avian Influenza A (H5N6) Virus in Wild Birds, South Korea, 2023." *Emerging Infectious Diseases* 30.6 (2024): 1285.
- de Carvalho Araujo, Andreina, et al. "Mortality in sea lions is associated with the introduction of the H5N1 clade 2.3. 4.4 b virus in Brazil October 2023: whole genome sequencing and phylogenetic analysis." *BMC Veterinary Research* 20.1 (2024): 285.
- de Seixas, M. M. M., de Araújo, J., Krauss, S., Fabrizio, T., Walker, D., Ometto, T., ... & Durigon, E. L. (2022). H6N8 avian influenza virus in Antarctic seabirds demonstrates connectivity between South America and Antarctica. *Transboundary and emerging diseases*, 69(6), e3436-e3446.

- Elsmo, Elizabeth J., et al. "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus clade 2.3. 4.4 b infections in wild terrestrial mammals, United States, 2022." *Emerging infectious diseases* 29.12 (2023): 2451.
- Gass Jr, Jonathon D., et al. "Epidemiology and ecology of Influenza A viruses among wildlife in the Arctic." *Viruses* 14.7 (2022): 1531.
- Gobbo, Federica, et al. "Silent infection of highly pathogenic avian influenza virus (H5N1) clade 2.3. 4.4 b in a commercial chicken broiler flock in Italy." *Viruses* 14.8 (2022): 1600.
- Guinat, Claire, et al. "Disentangling the role of poultry farms and wild birds in the spread of highly pathogenic avian influenza virus in Europe." *Virus Evolution* 8.2 (2022): veac073.
- Günther, Anne, et al. "Iceland as stepping stone for spread of highly pathogenic avian influenza virus between Europe and North America." *Emerging infectious diseases* 28.12 (2022): 2383.
- Heo, Gyeong-Beom, et al. "Concurrent Infection with Clade 2.3. 4.4 b Highly Pathogenic Avian Influenza H5N6 and H5N1 Viruses, South Korea, 2023." *Emerging Infectious Diseases* 30.6 (2024): 1223.
- Hurt, C. B., Sebastian, J., Hicks, C. B., & Eron, J. J. (2014). Resistance to HIV integrase strand transfer inhibitors among clinical specimens in the United States, 2009 - 2012. *Clinical infectious diseases*, 58(3), 423-431.
- Im, Changmin, et al. "Mapping African Swine Fever and Highly Pathogenic Avian Influenza Outbreaks along the Demilitarized Zone in the Korean Peninsula." *Transboundary and Emerging Diseases* 2024.1 (2024): 8824971.
- Jeong, Chang-Gi, et al. "Emergence of HPAI H5N6 Clade 2.3. 4.4 b in Wild Birds: A Case Study From South Korea, 2023." (2024).
- Jung, Bud, et al. "Large-Scale Serological Survey of Influenza A Virus in South Korean Wild Boar (*Sus scrofa*)." *EcoHealth* (2024): 1-9.
- Kang, Yong-Myung, et al. "Introduction of multiple novel high pathogenicity avian influenza (H5N1) virus of clade 2.3. 4.4 b into South Korea in 2022." *Transboundary and Emerging Diseases* 2023.1 (2023): 8339427.
- Kim, Il-Hwan, et al. "Pathogenicity of Highly Pathogenic Avian Influenza A (H5N1) Viruses Isolated from Cats in Mice and Ferrets, South Korea, 2023." *Emerging Infectious Diseases* 30.10 (2024): 2033.
- Kim, Ji-Yun, et al. "Genomic epidemiology of highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus in wild birds in South Korea during 2021 - 2022: Changes in viral epidemic patterns." *Virus Evolution* 10.1 (2024): veae014.
- Kokubun, N., Takahashi, A., Mori, Y., Watanabe, S., & Shin, H. C. (2010). Comparison of diving behavior and foraging habitat use between chinstrap and gentoo penguins breeding in the South Shetland Islands, Antarctica. *Marine Biology*, 157, 811-825.
- Korea Rural Economic Institute. (2016). A study on the causes of foot-and-mouth disease outbreaks in 2014-2015 and improvement measures for the quarantine system. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.

- Lee, Sun-Hak, et al. "Caught Right on the Spot: Isolation and Characterization of Clade 2.3. 4.4 b H5N8 High Pathogenicity Avian Influenza Virus from a Common Pochard (*Aythya ferina*) Being Attacked by a Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*)." *Avian Diseases* 68.1 (2024): 72-79.
- Lee, W. Y., Jung, J. W., Han, Y. D., Chung, H., & Kim, J. H. (2015). A new sex determination method using morphological traits in adult chinstrap and gentoo penguins on King George Island, Antarctica. *Animal Cells and Systems*, 19(2), 156-159.
- Lee, W. Y., Park, S., Kim, K. W., Kim, J. H., Gal, J. K., & Chung, H. (2021). Inter-specific and intra-specific competition of two sympatrically breeding seabirds, chinstrap and gentoo penguins, at two neighboring colonies. *Animals*, 11(2), 482.
- Leguia, Mariana, et al. "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) in marine mammals and seabirds in Peru." *Nature Communications* 14.1 (2023): 5489.
- Ly, Hinh. "Highly pathogenic avian influenza H5N1 virus infections of dairy cattle and livestock handlers in the United States of America." *Virulence* 15.1 (2024): 2343931.
- Min, Kyung-Duk, and Dae-sung Yoo. "Ecological drivers for poultry farms predisposed to highly pathogenic avian influenza virus infection during the initial phase of the six outbreaks between 2010 - 2021: a nationwide study in South Korea." *Frontiers in Veterinary Science* 10 (2023): 1278852.
- Mine, Junki, et al. "Genetics of H5N1 and H5N8 High-Pathogenicity Avian Influenza Viruses Isolated in Japan in Winter 2021 - 2022." *Viruses* 16.3 (2024): 358.
- Mostafa, Ahmed, et al. "Avian influenza A (H5N1) virus in dairy cattle: origin, evolution, and cross-species transmission." *mBio* (2024): e02542-24.
- Ogrzewalska, M., Couto Motta, F., Resende, P. C., Fumian, T., Fonseca da Mendonça, A. C., Appolinario Reis, L., ... & Mendonca Siqueira, M. (2022). Influenza A (H11N2) virus detection in fecal samples from Adélie (*Pygoscelis adeliae*) and Chinstrap (*Pygoscelis antarcticus*) Penguins, Penguin Island, Antarctica. *Microbiology spectrum*, 10(5), e01427-22.
- Paungpin, Weena, et al. "Evidence of Influenza A Virus Infection in *Cynomolgus* Macaques, Thailand." *Veterinary Sciences* 9.3 (2022): 132.
- Postel, Alexander, et al. "Infections with highly pathogenic avian influenza A virus (HPAIV) H5N8 in harbor seals at the German North Sea coast, 2021." *Emerging microbes & infections* 11.1 (2022): 725-729.
- Puryear, W. B., & Runstadler, J. A. (2024). High-pathogenicity avian influenza in wildlife: a changing disease dynamic that is expanding in wild birds and having an increasing impact on a growing number of mammals. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 1(aop), 1-9.
- Ringenberg, Jourdan M., et al. "Prevalence of Avian Influenza Virus in Atypical Wild Birds Host Groups during an Outbreak of Highly Pathogenic Strain EA/AM H5N1." *Transboundary and Emerging Diseases* 2024.1 (2024): 4009552.
- Sagong, Mingeun, et al. "Emergence of clade 2.3. 4.4 b novel reassortant H5N1 high pathogenicity avian influenza virus in South Korea during late 2021." *Transboundary and emerging diseases* 69.5 (2022): e3255-e3260.

- Seo, Ye-Ram, et al. "Evolution and spread of highly pathogenic avian influenza A (H5N1) clade 2.3. 4.4 b virus in wild birds, South Korea, 2022 - 2023." *Emerging Infectious Diseases* 30.2 (2024): 299.
- Seo, Ye-Ram, et al. "Genetic and pathological analysis of hooded cranes (*Grus monacha*) naturally infected with clade 2.3. 4.4 b highly pathogenic avian influenza H5N1 virus in South Korea in the winter of 2022." *Frontiers in Veterinary Science* 11 (2024): 1499440.
- Si, Young Jae, et al. "Evolutional dynamics of highly pathogenic avian influenza H5N8 genotypes in wintering bird habitats: Insights from South Korea's 2020 - 2021 season." *One Health* 18 (2024): 100719.
- Smeele, Z. E., Burns, J. M., Van Doorsaler, K., Fontenele, R. S., Waits, K., Stainton, D., ... & Varsani, A. (2018). Diverse papillomaviruses identified in Weddell seals. *Journal of General Virology*, 99(4), 549-557.
- Sobolev, Ivan, et al. "Highly Pathogenic Avian Influenza A (H5N1) Virus Clade 2.3. 4.4 b Infections in Seals, Russia, 2023." *Emerging Infectious Diseases* 30.10 (2024): 2160.
- Sun, Yanxia, et al. "High activity levels of avian influenza upwards 2018 - 2022: A global epidemiological overview of fowl and human infections." *One Health* 16 (2023): 100511.
- Takadate, Yoshihiro, et al. "Different infectivity and transmissibility of H5N8 and H5N1 high pathogenicity avian influenza viruses isolated from chickens in Japan in the 2021/2022 season." *Viruses* 15.2 (2023): 265.
- Takadate, Yoshihiro, et al. "Genetic diversity of H5N1 and H5N2 high pathogenicity avian influenza viruses isolated from poultry in Japan during the winter of 2022 - 2023." *Virus Research* 347 (2024): 199425.
- Tammiranta, Niina, et al. "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus infections in wild carnivores connected to mass mortalities of pheasants in Finland." *Infection, Genetics and Evolution* 111 (2023): 105423.
- Tare, Deeksha S., et al. "Phylogeography and gene pool analysis of highly pathogenic avian influenza H5N1 viruses reported in India from 2006 to 2021." *Archives of Virology* 169.5 (2024): 111.
- Trivelpiece, W. Z., Buckelew, S., Reiss, C., & Trivelpiece, S. G. (2007). The winter distribution of chinstrap penguins from two breeding sites in the South Shetland Islands of Antarctica. *Polar Biology*, 30, 1231-1237.
- Uhart, M. M., Vanstreels, R. E., Nelson, M. I., Olivera, V., Campagna, J., Zavattieri, V., ... & Rimondi, A. (2024). Epidemiological data of an influenza A/H5N1 outbreak in elephant seals in Argentina indicates mammal-to-mammal transmission. *Nature Communications*, 15(1), 9516.
- Uhart, Marcela M., et al. "Epidemiological data of an influenza A/H5N1 outbreak in elephant seals in Argentina indicates mammal-to-mammal transmission." *Nature Communications* 15.1 (2024): 9516.
- Wibawa, Hendra, et al. "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus clade 2.3. 4.4 b in domestic ducks, Indonesia, 2022." *Emerging Infectious Diseases* 30.3 (2024): 586.
- Wille, M., Dewar, M. L., Claes, F., Thielen, P., & Karlsson, E. A. (2024). A call to innovate Antarctic avian influenza surveillance. *Trends in Ecology & Evolution*.

- Wille, M., Dewar, M. L., Claes, F., Thielen, P., & Karlsson, E. A. (2024). A call to innovate Antarctic avian influenza surveillance. *Trends in Ecology & Evolution*.
- Xu, Yuting, et al. "The Novel 2.3. 4.4 b H5N6 Highly Pathogenic Avian Influenza Viruses Isolated From Wild Birds in 2023 Posing a Potential Risk to Human Health." *Transboundary and Emerging Diseases* 2024.1 (2024): 4900097.
- Yoo, Dae-Sung, et al. "Preventive effect of on-farm biosecurity practices against highly pathogenic avian influenza (HPAI) H5N6 infection on commercial layer farms in the Republic of Korea during the 2016-17 epidemic: A case-control study." *Preventive Veterinary Medicine* 199 (2022): 105556.
- Yoo, Dae-sung, et al. "Risk prediction of three different subtypes of highly pathogenic avian influenza outbreaks in poultry farms: based on spatial characteristics of infected premises in South Korea." *Frontiers in Veterinary Science* 9 (2022): 897763.
- Zamora, G., Aguilar Pierlé, S., Loncopan, J., Araos, L., Verdugo, F., Rojas-Fuentes, C., ... & Barriga, G. P. (2023). Scavengers as prospective sentinels of viral diversity: The snowy sheathbill virome as a potential tool for monitoring virus circulation, lessons from two antarctic expeditions. *Microbiology spectrum*, 11(3), e03302-22.
- Zhang, Xiaoqing, et al. "Highly Pathogenic Avian Influenza A Virus in Wild Migratory Birds, Qinghai Lake, China, 2022." *Emerging Infectious Diseases* 30.10 (2024): 2135.

<정부 문헌>

- 이진수, 김영모, & 인하대학교병원. (2019). 해외유입 가능 주요 감염병의 진단 및 관리·대응체계 구축 연구 (정책연구용역사업 최종결과보고서). 질병관리본부.
- 질병관리본부. (2014). 동물인플루엔자인체감염증예방관리실용화연구

<국제기구 문헌>

- World Organisation for Animal Health. (2023, December). Vaccination of wild birds as a complementary tool for the management of HPAI outbreaks: Considerations and challenges. [PDF document]. Retrieved from <https://www.woah.org/app/uploads/2024/01/vaccination-wild-birds-hpai-outbreak-dec2023.pdf>
- World Organisation for Animal Health. (2024, February). Practical guide for authorised field responders to HPAI outbreaks in marine mammals: With a focus on biosecurity, sample collection for virus detection and carcass disposal. <https://www.woah.org/app/uploads/2024/02/woah-practicalguide-forauthorisedfieldresponders-hpaimarinemammals-feb24.pdf>

<웹사이트>

- <https://patents.google.com/patent/US9072701B2/en>
- https://slate.greyb.com/patent/US20240153616A1?utm_source=Insight_gate&utm_medium=top_ten_articles&utm_campaign=insightgate&utm_id=insightgate