pISSN 2733-4554
eISSN 2733-4562

J. Dairy Sci. Biotechnol. 2026;44(3):107-123
https://doi.org/10.22424/jdsb.2026.44.3.107

Review

반려동물에서의 고병원성 조류인플루엔자 A(H5N1) 감염: 낙농·식품 안전과 연계한 One Health 관점

서건호[1†] · 천정환[2†] · 송광영[3*]

[1]건국대학교 수의과대학 및 원헬스연구소
[2]강원대학교 농업생명과학대학 식품생명공학과
[3]대구한의대학교 반려동물보건학과 및 반려동물산업학과

Highly Pathogenic Avian Influenza A (H5N1) Infection in Companion Animals: A One Health-Based Review Integrating Dairy and Food Safety

Kun-Ho Seo[1†], Jung-Whan Chon[2†], Kwang-Young Song[3*]

[1]College of Veterinary Medicine and Center for One Health, Konkuk University, Seoul, Korea
[2]Department of Food Science and Biotechnology, Kangwon National University, Chunchon, Korea
[3]Department of Companion Animal Health and Department of Pet Industry, Daegu Haany University, Gyeongsan, Korea

Received: April 7, 2026
Revised: July 2, 2026
Accepted: July 7, 2026

†These authors contributed equally to this study.

*Corresponding author :
Kwang-Young Song
Department of Companion Animal Health and Department of Pet Industry, Daegu Haany University, Gyeongsan, Korea
Tel : +82-53-819-1605
Fax : +82-53-819-1273
E-mail : drkysong@gmail.com

Copyright © 2026 Korean Society of Dairy Science and Biotechnology.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Kun-Ho Seo
https://orcid.org/0000-0001-5720-0538
Jung-Whan Chon
https://orcid.org/0000-0003-0758-6115
Kwang-Young Song
https://orcid.org/0000-0002-5619-8381

Abstract

Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) has recently expanded beyond avian hosts to infect a wide range of mammalian species, raising concerns about its implications for animal health, food safety, and public health. Among companion animals, cats are highly susceptible to H5N1 infection and frequently develop severe respiratory and neurological diseases; dogs appear to be less susceptible, but they may still contribute to viral exposure and environmental transmission. Recent outbreaks in dairy cattle have further highlighted novel exposure pathways, including contaminated raw milk, raw meat-based diets, and dairy farm environments, emphasizing the need to reassess the H5N1 risk from a One Health perspective. This review summarizes the current epidemiology, transmission routes, host susceptibility, clinical manifestations, and pathological characteristics of H5N1 infection in companion animals. It also discusses recent evidence regarding mammalian adaptation, dairy-associated transmission, and food safety concerns, together with the potential role of companion animals as sentinel hosts for early detection of viral circulation. Based on current evidence, effective prevention and control of H5N1 require an integrated One Health approach linking wildlife, livestock, companion animals, humans, and the environment. Strengthening national surveillance systems that include companion animals, improving biosafety in dairy production, avoiding the consumption of unpasteurized milk and raw meat-based diets, and promoting interdisciplinary collaboration are essential to reduce the risk of zoonotic transmission and enhance preparedness for future emerging infectious diseases.

Keywords

highly pathogenic avian influenza A (H5N1), companion animals, One Health, zoonotic risk, food and dairy safety

서 론

고병원성 조류인플루엔자(highly pathogenic avian influenza, HPAI) A(H5N1)는 전통적으로 가금류와 야생조류 집단에서 높은 치사율과 대규모 경제적 피해를 유발하는 중대한 가축전염병으로

인식되어 왔으며, 동시에 제한적이지만 치명적인 인체 감염 사례가 반복적으로 보고된 대표적인 인수공통감염병으로 평가되어 왔다[1-4]. 특히 조류 산업에 미치는 막대한 경제적 영향과 더불어, 인체 감염 시 높은 치명률로 인해 H5N1은 장기간 국제 보건·방역 체계에서 최우선 관리 대상 병원체로 다루어져 왔다.

그러나 2020년 이후 goose/Guangdong 계통에 속하는 clade 2.3.4.4b H5N1 바이러스가 유럽, 북미, 아시아, 남미 전역으로 급속히 확산되면서, 기존의 조류 중심 역학 양상을 넘어서는 새로운 감염 양상이 뚜렷하게 관찰되고 있다[2,3,5-8]. 여우, 밍크, 수달, 사자 등 다양한 야생 및 사육 포유류에서의 감염 사례가 지속적으로 보고되고 있으며, 일부 사례에서는 집단 감염이나 포유류 간 전파 가능성까지 제기되고 있다. 이러한 변화는 H5N1이 단순히 조류에 국한된 병원체가 아니라, 포유류 숙주로의 종간 장벽을 반복적으로 극복할 수 있는 진화적 잠재력을 보유하고 있음을 시사한다[2,3,5-9]. 그 결과, H5N1을 '조류에 국한된 감염병'으로 이해해 온 기존의 인식과 관리 전략은 근본적인 재검토가 요구되는 상황에 이르렀다.

이러한 맥락에서 반려동물은 H5N1의 새로운 역학적 연결 고리로 주목받고 있다. 반려동물은 인간과 동일한 생활 공간을 공유하면서도, 야생동물, 가축, 그리고 환경과 직간접적으로 접촉할 수 있는 독특한 생태적 위치에 존재한다. 즉, 반려동물은 야생 생태계와 가정 환경, 그리고 인간 사회를 연결하는 매개체 역할을 수행할 수 있는 잠재적 위치에 놓여 있다. 최근 고양이, 개, 페럿 등 반려동물에서 보고된 H5N1 자연 감염 사례들은 이러한 생태적 특성이 실제 감염 위험으로 현실화될 수 있음을 보여준다[10-12].

이들 사례는 단순한 개별 수의학적 사건에 그치지 않고, 인간 보건, 식품 안전, 환경 보건이 상호 얽혀 작동하는 One Health 관점에서 접근해야 할 새로운 공중보건적 위험 요소로 부각되고 있다. 특히 일부 반려동물에서는 급성 호흡기 증상과 신경계 침범을 동반한 중증 또는 치명적인 임상 경과가 보고되어, 반려동물이 단순한 우발적 숙주가 아니라 바이러스 감염에 대해 높은 감수성을 보일 수 있는 숙주임을 시사한다. 이는 반려동물이 H5N1의 감염·전파 사슬에서 차지하는 역할과 잠재적 위험성을 체계적으로 평가할 필요성을 제기한다.

한국의 상황 또한 이러한 국제적 흐름과 무관하지 않다. 반려동물 양육 가구의 지속적인 증가와 더불어, 생식 사료(raw meat-based diets) 및 비살균 유제품 급여와 같은 새로운 사육·급여 문화가 확산되면서, 반려동물의 H5N1 노출 경로는 과거보다 더욱 다양해지고 있다[13-16]. 특히 낙농 환경에서의 H5N1 발생 가능성과 원유 안전성 문제는 반려동물, 식품, 그리고 인간 건강이 상호 연결된 복합적 위험 구조를 형성할 수 있음을 시사한다. 이러한 맥락에서 반려동물에서의 H5N1 문제는 단순히 수의학적 영역에 국한되지 않고, 국내 낙농·식품 안전 체계와 공중보건 관리 전반과 직결된 사안으로 인식될 필요가 있다.

이에 본 종설은 기존에 산발적으로 보고된 반려동물 H5N1 관련 사례 연구, 역학 조사, 실험 연구, 그리고 국제 보건·방역 정책 문헌을 체계적으로 정리·통합함으로써, 반려동물에서의 H5N1 감염을 중심으로 한 역학적 특성, 병원성, 전파 양상 및 예방·관리 전략을 종합적으로 고찰하고자 한다. 나아가 본 고찰을 통해 낙농·식품 안전과 연계된 One Health 기반 대응 전략의 학술적 근거를 제시하고, 향후 반려동물 감염을 포함한 통합적 조류인플루엔자 대응 체계 구축을 위한 연구 및 정책적 방향성을 제안하고자 한다.

반려동물에서의 H5N1(Highly Pathogenic Avian Influenza A) 역학

1. 세계적 발생 동향

2021년 이후 goose/Guangdong 계통에 속하는 clade 2.3.4.4b H5N1 바이러스는 유럽, 북미, 아시아, 남미 등 전 세계 거의 모든 대륙으로 확산되었으며, 과거 특정 지역과 계절에 국한되었던

조류인플루엔자 발생 양상과는 뚜렷이 구별되는 전 지구적 유행(panzootic) 양상을 보이고 있다[1-3,5-8]. 이러한 확산은 주로 철새를 포함한 야생조류의 장거리 이동 경로를 따라 반복적으로 재점화되며, 각 지역의 가금류 집단으로 지속적으로 유입되어 대규모 발생을 초래하고 있다. 특히 최근의 H5N1 유행은 단일 유행 파동으로 소멸되지 않고, 여러 계절과 연도에 걸쳐 연속적으로 유지·확산된다는 점에서 기존 조류인플루엔자 역학과 근본적으로 다른 특성을 보인다.

이러한 전 지구적 확산의 가장 중요한 특징 중 하나는, 바이러스의 숙주 범위가 조류에 국한되지 않고 다양한 포유류 숙주로 점진적으로 확대되고 있다는 점이다. 실제로 여우, 밍크, 수달, 사자, 해양포유류 등 야생 포유류뿐 아니라, 사육 환경에 놓인 밍크 농장이나 동물원 개체군에서도 H5N1 감염 사례가 지속적으로 보고되고 있다[2,3,8]. 일부 포유류 집단에서는 동일 지역·동일 시기에 다수의 개체가 감염되는 집단 발생 양상이 관찰되었으며, 제한적이지만 포유류 간 전파 가능성이 제기된 사례도 보고되었다. 이러한 관찰 결과는 H5N1의 포유류 감염이 단순한 우연적 종간 전파(spillover)에 그치지 않고, 특정 환경에서는 포유류 숙주 내 적응과 확산이 가능함을 시사한다.

반려동물에서의 H5N1 감염 사례는 이러한 포유류 감염 증가 흐름 속에서 점차 확인되고 있다. 특히 고양이는 현재까지 보고된 반려동물 중 가장 빈번하게 감염이 확인된 숙주로, 유럽과 북미를 중심으로 자연 감염 사례와 집단 폐사가 반복적으로 보고되었다[17-19]. 이러한 사례들은 주로 야생조류 또는 가금류와의 직접 접촉이나 섭취 이후 발생하였으며, 일부 지역에서는 단기간 내 다수의 고양이가 급성 호흡기 및 신경계 증상을 보이거나 폐사하는 양상이 관찰되었다. 이는 고양이가 생태적·행동학적 특성상 감염된 조류에 노출될 가능성이 높고, H5N1에 대한 생물학적 감수성 또한 높은 숙주임을 시사한다.

개의 경우 공식적으로 보고된 임상 감염 사례는 고양이에 비해 상대적으로 적다. 그러나 혈청학적 조사에서 항체 양성 개체가 확인되고, 무증상 또는 경미한 임상 증상을 보인 감염 사례들이 보고되면서, 실제 바이러스 노출 빈도는 기존의 임상 보고 자료보다 과소평가되고 있을 가능성이 제기되고 있다[17,20,21]. 이는 개가 감염 후 비교적 경미한 경과를 보이거나 진단되지 않은 채 회복될 가능성을 시사하며, 반려동물 감시 체계의 한계를 드러내는 지점으로 평가된다.

페럿은 반려동물로서의 자연 감염 사례는 제한적이지만, 자연 감염 보고와 더불어 다수의 실험적 연구에서 H5N1에 대해 매우 높은 감수성을 보이는 것으로 확인되었다[22, 23]. 페럿은 인플루엔자 A 바이러스의 병원성, 숙주 적응, 전파 양상을 평가하는 대표적인 포유류 모델로 활용되어 왔으며, 이러한 특성은 반려동물로서의 잠재적 위험성뿐 아니라, 포유류 숙주에서의 전파 가능성과 공중보건적 의미를 평가하는 데 중요한 근거를 제공한다.

종합하면, clade 2.3.4.4b H5N1의 세계적 확산은 조류 집단을 넘어 포유류, 특히 인간과 밀접한 생활 환경을 공유하는 반려동물까지 포함하는 새로운 역학적 국면으로 진입하고 있다. 이러한 변화는 반려동물을 단순한 우발적 감염 숙주가 아니라, 야생동물-가축-인간을 연결하는 중요한 역학적 접점(interface host)으로 재인식해야 할 필요성을 제기하며, 이후 전파 위험 평가와 One Health 기반 대응 전략 수립의 핵심 배경으로 작용한다.

2. 감염원 및 주요 위험 요인

최근 H5N1의 역학은 기존의 감염된 조류와의 직접 접촉을 넘어, 낙농 환경과 식품을 통한 새로운 노출 경로까지 포함하는 방향으로 확대되고 있다. 특히 H5N1에 감염된 젖소 농장에서 비살균 원유(unpasteurized milk), 오염된 분변 및 축사 환경을 통해 고양이와 개의 감염 사례가 보고되면서, 낙농 환경이 반려동물 감염의 새로운 위험요인으로 주목받고 있다[13,15,24-27]. 이러한 사례는 H5N1이 조류-가금류-낙농동물-반려동물로 이어지는 다단계 전파 경로를 형성할 수 있음을 시사하며, 동물 건강, 식품 안전 및 공중보건이 긴밀하게 연결되어 있음을 보여준다.

또한 생식사료(raw meat-based diets)와 비살균 원유 또는 비살균 유제품의 급여 역시 중요한

식이 노출 경로로 인식되고 있다. 열처리를 거치지 않은 원료에서는 바이러스가 불활화되지 않을 수 있으며, 실제로 raw pet food 또는 비살균 우유를 섭취한 이후 H5N1 감염이 확인된 고양이 사례가 보고되었다[14,28-30]. 더욱이 H5N1 바이러스는 냉장 및 냉동 조건에서도 일정 기간 생존할 수 있는 것으로 알려져 있어, 이러한 급여 방식은 가정 내 반려동물 감염의 새로운 진입점(entry point)이 될 수 있다.

따라서 반려동물에서의 H5N1 감염 위험은 야생조류와의 접촉뿐 아니라 낙농 환경, 식품 및 사료 관리, 그리고 보호자의 급여 방식이 복합적으로 작용한 결과로 이해되어야 한다. 이러한 점은 반려동물 H5N1 관리가 수의학적 접근에 국한되지 않고 낙농·식품 안전을 포함한 'One Health 기반의 통합적 관리 전략'을 필요로 함을 시사한다.

3. 감시 체계와 역학적 공백

현재 전 세계적으로 운영되고 있는 H5N1 감시 체계는 역사적으로 가금류 산업 보호와 야생조류를 통한 바이러스 유입 차단을 주요 목표로 설계되어 왔다. 이에 따라 감시는 주로 가금류 농장, 도축장, 가금 유통망, 그리고 철새 및 야생조류 집단을 중심으로 이루어지고 있으며, 반려동물은 국가 차원의 정규 감시 대상에서 제외되어 있는 경우가 대부분이다[5,6]. 이러한 구조는 조류인플루엔자가 주로 조류에 국한된 감염병으로 인식되던 시기의 역학적 이해를 반영한 결과로 볼 수 있다.

그 결과, 반려동물에서의 H5N1 감염은 대부분 중증 임상 증상을 보이거나 폐사한 개체를 대상으로 한 사후 진단(post-mortem diagnosis)을 통해 제한적으로 확인되고 있다. 무증상 또는 경증 감염 개체에 대한 체계적인 선별 검사, 혈청학적 조사, 또는 장기적 추적 관찰은 거의 이루어지지 않고 있으며, 이는 반려동물 감염의 실제 발생 규모와 감염 양상을 파악하는 데 근본적인 제약으로 작용한다[17,20]. 특히 개와 같이 임상 증상이 경미하거나 비특이적인 경우, 감염 자체가 인지되지 않은 채 지나갈 가능성이 높아 실제 노출 빈도는 현재 보고된 수치보다 상당히 높을 가능성이 있다.

이러한 감시 공백은 반려동물이 환경 내 H5N1 바이러스 순환에 기여할 수 있는 잠재적 역할을 과소평가하게 만드는 요인으로 작용한다. 반려동물은 야생조류, 가축, 낙농 환경, 그리고 인간 생활 공간을 동시에 연결하는 독특한 위치에 존재하며, 바이러스가 서로 다른 생태계 구획을 이동하는 과정에서 중요한 연결 고리(interface host)로 작용할 수 있다. 그럼에도 불구하고 현행 감시 체계는 반려동물을 조류-가금류-환경-인간을 잇는 역학적 흐름 속에서 독립적인 관찰 대상으로 충분히 반영하지 못하고 있다[10-12].

특히 반려동물은 인간과 가장 밀접한 접촉 환경을 공유하는 동물 집단으로, 감염 발생 시 가정 내 노출, 보호자 접촉, 생활 환경 오염 등을 통해 공중보건적 파급 효과가 상대적으로 클 수 있다. 그럼에도 불구하고 반려동물 감염은 현재의 공중보건 및 수의 방역 체계에서 명확한 보고·대응 경로가 정립되어 있지 않아, 실제 위험이 체계적으로 평가되지 못한 채 사각지대에 놓여 있는 실정이다[10-12].

따라서 반려동물을 포함한 통합 감시 전략의 구축은 역학적 측면에서 강하게 요구된다. 반려동물을 One Health 기반 조기 경보(sentinel) 종으로 활용할 경우, 야생조류 또는 가축에서 시작된 H5N1의 환경 내 유입과 확산을 보다 조기에 탐지할 수 있으며, 낙농 환경 및 식품 유통 단계에서의 잠재적 오염 위험, 나아가 인간 노출 가능성을 선제적으로 평가하는 데 기여할 수 있다. 이러한 접근은 반려동물을 단순한 감염 종착점이 아닌, 조류인플루엔자 위험을 조기에 감지하고 대응 전략을 조정할 수 있는 능동적 감시 자원으로 재정의하는 것을 의미한다.

궁극적으로 반려동물을 포함한 감시 체계의 확장은 조류인플루엔자 대응을 가금류 중심의 방역 모델에서 벗어나, 환경·식품·인간 건강을 아우르는 One Health 기반 통합 감시 모델로 전환하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

반려동물에서의 병원성 및 숙주 반응

1. 종별 감수성과 임상 양상

반려동물에서의 H5N1 감염은 숙주 종에 따라 감수성, 임상 증상의 양상, 질병의 진행 속도 및 예후에서 뚜렷한 차이를 보인다. 현재까지 보고된 자연 감염 사례와 실험 연구 결과를 종합하면, 이러한 차이는 단순한 우연적 변이가 아니라 숙주의 생물학적 특성, 행동 양식, 그리고 바이러스-숙주 상호작용에 의해 결정되는 것으로 이해된다. 이러한 차이를 이해하는 것은 감염 위험 평가와 One Health 기반 감시 전략을 수립하는 데 중요하다. 주요 반려동물 종의 특성은 Table 1에 요약하였다.

고양이는 현재까지 보고된 반려동물 중 H5N1에 대해 가장 높은 감수성을 보이는 숙주로 평가된다. 자연 감염 사례에서 고양이는 급성 호흡기 증상(호흡곤란, 기침, 비강 분비물), 고열, 심한 무기력과 식욕부진을 초기 증상으로 나타내는 경우가 많으며, 상당수 사례에서 신경계 증상(운동실조, 발작, 경련)과 위장관 증상(구토, 설사)이 동반된 전신성 질환으로 빠르게 진행하는 양상이 보고되었다[8,17,19,31]. 이러한 임상 양상은 H5N1 감염이 고양이에서 상부 또는 하부 호흡기에 국한된 국소 감염에 머무르지 않고, 혈행성 확산을 통해 다장기로 침범할 가능성이 높음을 시사한다.

특히 일부 고양이 사례에서는 잠복기가 매우 짧고, 임상 증상 발현 이후 수일 이내에 급격한 악화가 관찰되었으며, 치료 개입에도 불구하고 높은 치사율이 보고되었다[18,19]. 이러한 급격한 임상 경과는 고양이가 반려동물 중에서도 H5N1에 가장 취약한 숙주임을 반복적으로 확인시켜 주며, 고양이 감염 사례 자체가 환경 내 H5N1 존재를 시사하는 중요한 공중보건적 경고 신호로 기능할 수 있음을 의미한다.

숙주 상태에 따른 병원성 차이 또한 중요한 특징으로 지적된다. 면역저하 상태 또는 기저질환을 가진 고양이에서는 질병의 중증도가 더욱 증가하는 경향이 보고되었다. 당뇨, 만성 감염성 질환, 종양, 면역억제 치료 이력이 있는 개체에서 전신 장기 침범과 치명적인 임상 경과가 확인되었으며, 이는 숙주 요인이 바이러스 감염 이후 병원성 발현을 조절하는 핵심 인자로 작용함을 보여준다[18,31]. 이러한 양상은 사람에서 H5N1 감염 시 기저질환, 고령, 면역 상태가 중증도와 예후를 좌우하는 것과 유사한 특징을 보이며, 반려동물 감염이 인간 감염의 병리학적 이해에도 간접적인 시사점을 제공함을 시사한다.

반면 개는 고양이에 비해 상대적으로 낮은 감수성을 보이는 것으로 보고되고 있다. 자연 감염 사례에서 개는 경미한 호흡기 증상, 일시적인 무기력 또는 식욕 저하 외에 뚜렷한 임상 증상을 보이지 않거나, 무증상으로 경과하는 경우가 다수 보고되었다[17,20,21]. 일부 사례에서는 단기간의 발열이나 비특이적 증상만 관찰된 후 자연 회복이 이루어지기도 하였다. 이러한 임상 경과는 개가 H5N1 감염에 대해 상대적으로 높은 저항성을 가질 가능성을 시사한다.

그러나 혈청학적 조사에서 항체 양성 개체가 확인된 사례들이 보고되면서, 개가 임상적으로 감염이 드러나지 않더라도 바이러스에 노출되고 일시적으로 감염될 수 있음이 점차 명확해지고 있다[20,21]. 이는 개에서의 H5N1 감염이 임상 진단에 기반한 보고만으로는 실제 노출 규모를 정확히 반영하지 못할 수 있음을 의미하며, 현재까지 보고된 개 감염 사례 수가 실제 위험을 과소평가하고

Table 1. Comparison of H5N1 infection among companion animal species

Species	Susceptibility	Major clinical signs	Severity	Epidemiological significance
Cat	High	Respiratory, neurological, gastrointestinal	High mortality	Most frequently reported natural infections
Dog	Low–moderate	Usually mild or asymptomatic; occasional respiratory signs	Generally mild	Potentially under-recognized exposure
Ferret	Very high (experimental)	Respiratory and neurological disease	Severe	Widely used experimental model for mammalian transmission

H5N1, highly pathogenic avian influenza A.

있을 가능성을 제기한다. 또한 이러한 무증상 또는 경증 감염은 감시 체계의 사각지대를 형성하여, 환경 내 바이러스 순환을 간접적으로 유지하는 역할을 할 가능성도 배제할 수 없다.

페럿은 반려동물로서의 자연 감염 사례는 제한적이지만, 인플루엔자 A 바이러스 전반에 대해 매우 높은 감수성을 가지는 대표적인 포유류 모델로 잘 알려져 있다. 자연 감염 사례와 더불어 다수의 실험적 감염 연구에서 페럿은 호흡기 증상, 발열, 체중 감소와 함께 신경계 증상을 나타내며, 바이러스의 병원성과 조직 친화성, 그리고 전파 가능성을 평가하는 데 중요한 정보를 제공해 왔다[22,23]. 특히 페럿 모델은 포유류 숙주에서 인플루엔자 바이러스의 적응과 전파 특성을 이해하는 데 핵심적인 역할을 수행해 왔으며, 이러한 연구 결과는 반려동물 감염의 공중보건적 의미를 해석하는 데 중요한 근거로 활용된다.

종합하면, 반려동물에서의 H5N1 감염은 종별로 뚜렷이 구분되는 감수성과 임상 양상을 보이며, 고양이는 중증·치명적 감염의 고위험 숙주, 개는 무증상 또는 경증 감염이 가능한 잠재적 노출 숙주, 페럿은 병원성 및 전파 연구의 핵심 모델로 각각 위치 지을 수 있다. 이러한 종별 특성에 대한 이해는 반려동물 감염의 위험 평가뿐 아니라, 이후 전파 가능성 분석과 One Health 기반 감시·대응 전략 수립의 중요한 기초 자료로 작용한다.

2. 조직 친화성과 전신 감염 양상

H5N1 바이러스는 HA(hemagglutinin) 단백질에 존재하는 다염기성 절단 부위(polybasic cleavage site)를 특징으로 하며, 이로 인해 숙주 체내에서 다양한 조직으로 확산될 수 있는 높은 병원성을 보인다. 이러한 분자적 특징은 숙주 세포 내에서 ubiquitously 발현되는 furin 유사 단백분해효소에 의해 HA가 효율적으로 활성화될 수 있도록 하여, 바이러스가 상부 및 하부 호흡기에 국한되지 않고 전신 장기로 확산될 수 있는 병원성 기반을 제공한다. 이는 저병원성 조류인플루엔자 바이러스와 구별되는 H5N1의 핵심적인 병원성 결정 요인으로 알려져 있다.

실제로 반려동물에서 보고된 자연 감염 사례 및 부검 연구에서, 바이러스 RNA 또는 항원은 폐 조직뿐 아니라 뇌, 간, 비장, 심장, 췌장, 신장, 위장관 등 다양한 장기에서 검출되었다[18,19,22]. 이러한 광범위한 조직 분포는 H5N1 감염이 단순한 호흡기 감염을 넘어 전신성 감염(systemic infection)으로 진행할 수 있음을 명확히 보여준다. 특히 혈관 내피 세포, 면역세포, 그리고 신경조직에서의 바이러스 검출은 혈행성 전파 또는 신경계 경로를 통한 확산 가능성을 시사한다.

중추신경계 침범은 반려동물, 특히 고양이와 페럿에서 중증 임상 경과와 밀접하게 연관된 소견으로 반복적으로 보고되고 있다. 뇌 조직에서의 바이러스 항원 검출과 함께 뇌염(encephalitis), 수막염(meningitis), 신경세포 괴사 및 염증성 침윤 소견이 확인되었으며, 이는 임상적으로 관찰되는 발작, 운동실조, 의식 저하, 행동 변화와 같은 신경계 증상을 병리학적으로 설명해 준다[18,31]. 이러한 신경계 침범 양상은 H5N1 감염이 반려동물에서 단순한 호흡기 질환을 넘어, 치명적인 전신성 신경계 질환으로 발전할 수 있음을 시사한다.

전신 감염 양상은 반려동물에서의 질병 중증도 및 치명성과도 직접적으로 연관된다. 다장기 침범이 확인된 사례에서는 임상 증상이 급격히 악화되며, 호흡기 증상과 신경계 증상이 동시에 또는 순차적으로 진행하는 양상이 관찰되었다. 이러한 경우 집중적인 치료 개입에도 불구하고 예후가 불량한 경우가 다수 보고되었으며, 짧은 경과 후 폐사로 이어지는 사례도 적지 않다[18,19]. 이는 H5N1의 조직 친화성과 전신 확산 능력이 반려동물 감염에서의 높은 치명률을 설명하는 중요한 요인임을 시사한다.

종합하면, H5N1 바이러스의 조직 친화성과 전신 감염 양상은 반려동물에서 관찰되는 중증 임상 경과의 핵심 병태생리적 기전으로 이해될 수 있다. 이러한 특성은 반려동물 H5N1 감염을 단순한 호흡기 질환으로 과소평가해서는 안 되는 이유를 제공하며, 조기 진단과 신속한 대응, 그리고 공중보건적 위험 평가에서 전신 감염 가능성을 반드시 고려해야 함을 시사한다.

3. 병원성 발현에 영향을 미치는 숙주 요인

반려동물에서의 H5N1 감염 결과는 바이러스 자체의 병원성뿐 아니라, 숙주의 생물학적·생리적 특성에 의해 크게 좌우된다. 현재까지 보고된 사례들을 종합하면, 연령, 면역 상태, 영양 상태, 그리고 동반 질환의 존재 여부가 감염 후 임상 경과와 예후를 결정하는 중요한 요인으로 작용하는 것으로 나타난다. 특히 어린 개체나 고령 개체, 그리고 만성 질환을 가진 반려동물에서 중증 또는 치명적인 경과가 상대적으로 빈번하게 보고되고 있으며, 이러한 양상은 사람에서의 H5N1 중증 감염과 유사한 특징을 보인다[19,31].

연령은 숙주 감수성과 병원성 발현에 중요한 영향을 미치는 요인이다. 어린 반려동물의 경우 면역 체계가 완전히 성숙하지 않아 초기 바이러스 증식을 효과적으로 억제하지 못할 가능성이 있으며, 고령 개체에서는 면역 노화(immunosenescence)로 인해 항바이러스 면역 반응이 저하될 수 있다. 이러한 면역학적 취약성은 바이러스의 체내 확산과 다장기 침범을 용이하게 하여, 임상 경과를 악화시키는 요인으로 작용할 수 있다.

면역 상태 또한 H5N1 감염의 병원성 발현에 핵심적인 역할을 한다. 면역억제 치료를 받고 있거나, 종양, 만성 감염성 질환, 내분비 질환 등을 가진 반려동물에서는 바이러스 증식 억제가 지연되고, 그 결과 전신 감염으로 진행할 가능성이 증가하는 것으로 보고되고 있다[18,31]. 특히 면역 기능이 저하된 개체에서는 비교적 낮은 바이러스 노출에도 불구하고 중증 임상 경과가 나타날 수 있어, 숙주 면역 상태가 병원성 발현의 임계점을 결정하는 중요한 요소임을 시사한다.

숙주 면역 반응의 질적 특성 또한 병원성 발현에 영향을 미칠 수 있다. H5N1 감염에서 과도한 염증 반응 또는 면역 조절 실패는 조직 손상과 임상 악화를 초래하는 주요 기전으로 제시되어 왔다. 사람에서 보고된 H5N1 감염 사례에서는 사이토카인 폭풍(cytokine storm)과 같은 과잉 염증 반응이 중증 폐 손상과 다장기 부전으로 이어질 수 있음이 잘 알려져 있으며, 반려동물에서도 유사한 면역 병리 기전이 작용할 가능성이 제기되고 있다[19,31]. 이러한 면역 반응의 불균형은 바이러스 자체의 직접적인 세포 손상 효과와 결합되어 질병의 중증도를 더욱 증폭시킬 수 있다.

영양 상태와 전신 건강 역시 간과할 수 없는 요인이다. 영양 결핍 상태에 있는 반려동물은 면역 반응이 저하될 가능성이 높으며, 반대로 비만이나 대사성 질환을 가진 개체에서는 만성 저등급 염증 상태가 존재하여 감염 시 비정상적인 면역 반응을 유발할 수 있다. 이러한 숙주 상태는 바이러스 감염 이후 회복 능력에도 영향을 미쳐, 동일한 바이러스 노출에도 개체 간 임상 경과의 차이를 유발하는 원인이 될 수 있다.

이와 같이 반려동물에서의 H5N1 감염은 단순한 우발적 노출 사건이 아니라, 바이러스의 병원성과 숙주 요인이 복합적으로 상호작용하여 임상 경과가 결정되는 체계적인 질환으로 이해되어야 한다. 숙주 요인에 따른 병원성 발현의 차이는 감염 위험 평가와 임상 관리 전략 수립에 중요한 시사점을 제공하며, 나아가 반려동물 감염이 환경 내 바이러스 순환과 전파 위험에 미칠 수 있는 영향을 해석하는 데에도 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있다.

궁극적으로 이러한 숙주 요인에 대한 이해는 반려동물 H5N1 감염을 개별 사례 수준이 아닌, 인수공통감염병 생태계 내 하나의 구성 요소로 평가하는 데 필수적이며, 이후 전파 위험 분석과 One Health 기반 공중보건 대응 전략을 정교화하는 데 중요한 과학적 근거를 제공한다.

전파 양상과 인수공통감염 가능성

1. 반려동물로의 전파 경로

반려동물에서의 H5N1 감염은 현재까지 축적된 역학적·실험적 근거를 종합할 때, 주로 감염된 조류와의 직접 접촉 또는 섭취, 그리고 바이러스로 오염된 환경에의 노출을 통해 발생하는 것으로

이해되고 있다[2,17,19]. 이러한 전파 경로는 반려동물이 처한 생태적·행동학적 특성과 밀접하게 연관되어 있으며, 특히 육식성 또는 잡식성 행동을 보이는 반려동물에서 감염 위험이 상대적으로 높게 평가된다.

감염된 야생조류의 사체, 내장, 조직을 섭취하는 행위는 반려동물에서 H5N1 감염을 유발하는 가장 효율적인 경로로 지목되고 있다. 이는 바이러스가 조류 조직 내에서 높은 역가로 존재할 수 있기 때문이며, 소화관을 통한 노출이 전신 감염으로 빠르게 이어질 가능성을 높인다. 이러한 전파 경로는 고양이에서 높은 감수성과 중증 임상 경과가 반복적으로 관찰되는 주요 원인으로 지목되고 있으며, 다수의 자연 감염 사례에서 조류 섭취 이력이 공통적으로 확인되었다[19,31].

고양이는 야생조류를 사냥하거나 사체를 섭취하는 행동 특성과 더불어, 가정 외부 환경과의 접촉 빈도가 상대적으로 높아 H5N1 노출 가능성이 크다. 도시 환경에서는 비둘기, 물새 등과의 접촉 가능성이 존재하며, 공원·하천·주거지 주변 환경에서의 간접 노출도 배제할 수 없다. 농촌 환경에서는 가금류 사육지와의 근접성, 농가 주변 환경에 노출될 가능성이 추가적인 위험 요인으로 작용한다. 이러한 점에서 고양이는 도시 및 농촌 환경 모두에서 H5N1 감염의 고위험 반려동물로 분류된다.

반면 개의 경우 조류 사체 섭취 빈도는 고양이에 비해 상대적으로 낮은 것으로 평가되나, 오염된 환경과의 접촉이나 식이를 통한 간접 노출 가능성은 여전히 존재한다. 특히 농촌 지역이나 낙농·축산 환경 인근에서 사육되는 개는 분변, 토양, 오염된 사료 또는 물을 통한 노출 위험이 증가할 수 있다[17,20,21]. 이러한 간접 노출 경로는 임상적으로 뚜렷한 증상을 보이지 않는 감염 사례를 설명하는 데 중요한 요소로 고려된다.

최근 보고된 사례들에서는 기존의 조류 접촉 중심 전파 경로 외에, 낙농 환경과 연계된 새로운 전파 가능성이 제기되고 있다. 2016년 미국 뉴욕시(New York City) 동물보호소에서 발생한 저병원성 조류인플루엔자 A(H7N2) 집단감염에서는 감염된 고양이를 진료하던 수의사가 감염되어, 고양이에서 사람으로의 전파(cat-to-human transmission)가 확인된 첫 사례로 보고되었다[23]. 이러한 사례는 반려동물이 새로운 인플루엔자 바이러스의 감시와 인수공통감염 위험 평가에서 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. H5N1에 감염된 젖소 농장에서 비살균 원유, 오염된 우유 부산물, 분변 및 축사 주변 환경을 통해 고양이와 개가 감염된 사례들이 보고되었으며, 이는 낙농 산업과 반려동물, 그리고 인간 건강 간의 연결 고리를 명확히 보여주는 사례로 평가된다[13-15,24-26,32]. 이러한 전파 양상은 H5N1이 조류-가금류-낙농 동물-반려동물로 이어지는 다단계 전파 사슬을 형성할 수 있음을 시사하며, 기존의 '조류 중심 전파 모델'을 실질적으로 확장하는 근거를 제공한다.

또한 생식 사료(raw meat-based diets) 및 비살균 유제품 급여는 반려동물의 식이 노출 경로로서 점차 중요한 위험 요인으로 인식되고 있다. 실제로 raw pet food 또는 비살균 우유 섭취 이후 H5N1 감염이 확인된 고양이 사례들이 보고되었으며, 바이러스가 냉장 또는 냉동 조건에서도 일정 기간 생존할 수 있음이 실험적으로 지적되고 있다[14,28-30]. 이는 가정 내 급여 환경이 반려동물 H5N1 감염의 새로운 진입점으로 작용할 수 있음을 시사하며, 식품 안전과 반려동물 건강 관리가 분리된 문제가 아님을 명확히 보여준다.

2. 반려동물 간 및 포유류 간 전파 가능성

현재까지 자연 조건에서 반려동물 간 지속적인 H5N1 전파가 명확히 입증된 사례는 제한적이다. 보고된 반려동물 감염 사례의 대부분은 단일 개체 또는 소규모 집단에서 발생하였으며, 명확한 반려동물 간 연쇄 전파 양상은 관찰되지 않았다[17-19]. 그러나 이러한 관찰 결과는 반려동물 간 전파 가능성이 존재하지 않음을 의미하기보다는, 현행 감시 체계와 조사 범위의 한계를 반영하는 것으로 해석할 필요가 있다.

실제로 밍크, 여우 등 사육 포유류 집단에서는 밀집 사육 환경을 중심으로 포유류 간 전파가 보고된 바 있으며, 일부 사례에서는 제한적인 집단 내 확산 양상이 관찰되었다[2,3,8,23]. 이러한 사례들

은 특정 조건, 즉 고밀도 사육, 반복적 노출, 환경 오염이 결합될 경우 H5N1이 포유류 간 전파를 일으킬 수 있음을 보여준다. 이는 반려동물에서도 보호소, 다두 사육 환경, 또는 밀접 접촉 조건하에서 유사한 상황이 발생할 가능성을 완전히 배제할 수 없음을 시사한다.

실험적 연구에서는 포유류 간 비말 또는 밀접 접촉을 통한 전파가 조건부로 가능함이 확인되었다[23,33,34]. 특히 페럿 모델을 이용한 연구에서는 고병원성 인플루엔자 바이러스가 특정 유전적 변이를 획득할 경우, 호흡기 분비물을 통한 제한적 전파가 가능함이 보고되었다. 다만 이러한 전파는 현재 자연 환경에서 일반화할 수 있는 수준은 아니며, 바이러스의 포유류 적응 정도, 숙주 종 특성, 환경 조건에 크게 의존하는 것으로 평가된다.

3. 포유류 적응과 인수공통감염 위험

최근 포유류에서 분리된 H5N1 바이러스에서는 중합효소 복합체 유전자, 특히 PB2 유전자에서 포유류 적응과 연관된 변이가 반복적으로 보고되고 있다[3,7,33-35]. 이러한 변이는 포유류 세포 내에서의 바이러스 복제 효율을 증가시키고, 체온 차이 및 숙주 세포 환경에 대한 적응성을 높일 수 있는 요인으로 작용한다. 이러한 유전적 변화는 바이러스의 병원성뿐 아니라 전파 특성 변화와도 직결될 수 있어, 공중보건적 관점에서 중요한 감시 대상이 된다.

반려동물은 인간과 가장 밀접한 접촉 환경을 공유하는 포유류 숙주로서, 바이러스 적응 과정에서 중요한 접점이 될 수 있다. 현재까지 반려동물에서 인간으로의 H5N1 직접 전파 사례는 명확히 확인되지 않았으나, 반려동물이 바이러스를 가정 환경으로 유입시키거나 일시적으로 배출함으로써 보호자 또는 동거인의 간접적 노출 위험을 증가시킬 가능성은 충분히 존재한다[11,12,36]. 특히 반려동물의 체액, 분변, 오염된 피모를 통한 환경 오염은 가정 내 노출 경로로 작용할 수 있다.

과거 고양이에서 인간으로의 인플루엔자 전파 사례(H7N2)는 이러한 위험이 이론적 가능성에 그치지 않음을 보여주는 중요한 전례로 자주 인용된다[36]. 비록 H5N1과 동일한 상황은 아니지만, 반려동물이 인플루엔자 바이러스의 인수공통감염 사슬에서 역할을 할 수 있음을 시사하는 사례로 평가된다. 따라서 반려동물에서의 H5N1 감염은 개별적인 수의학적 사건으로만 인식되기보다는, 인수공통감염 위험 평가와 공중보건 감시 체계 내에서 지속적으로 관찰되어야 할 대상으로 인식될 필요가 있다.

종합하면, 반려동물에서의 H5N1 전파는 현재까지 주로 조류 및 오염된 환경에 기인하나, 낙농·식품 환경과의 연계, 포유류 적응 가능성, 그리고 인간과의 밀접한 접촉이라는 특성은 향후 인수공통감염 위험을 평가함에 있어 간과할 수 없는 요소로 평가된다. 이러한 점에서 반려동물은 H5N1 생태계 내에서 단순한 종착점이 아니라, 조기 경보와 위험 평가를 위한 중요한 관찰 창으로 기능할 수 있다.

One Health 기반 예방 및 관리 전략

1. 가정 및 보호자 수준의 예방

반려동물에서의 H5N1 감염 예방에 있어 가장 중요한 1차 방어선은 보호자와 가정 환경에서의 관리이다. 반려동물은 인간과 동일한 생활 공간을 공유하며, 가정은 조류, 환경, 식품을 통해 유입된 병원체가 인간과 반려동물 모두에게 노출될 수 있는 핵심 접점으로 작용한다. 따라서 가정 내 관리 수준은 반려동물 감염 발생 여부뿐 아니라, 잠재적인 인수공통감염 위험을 좌우하는 중요한 요인으로 평가된다.

조류인플루엔자 발생 시기에는 특히 고양이의 야외 활동을 제한하고, 야생조류 및 가금류와의 직접적·간접적 접촉을 최소화하는 것이 핵심적인 예방 조치로 권장된다[5,6]. 고양이는 사냥 행동과 자유로운 외부 활동으로 인해 감염된 조류의 사체나 배설물에 노출될 가능성이 높으며, 이러한 행동

학적 특성은 감염 위험을 구조적으로 증가시킨다. 따라서 보호자는 일시적인 불편을 감수하더라도 유행 시기 동안 실내 사육을 강화하고, 외부 출입 후 반려동물의 상태를 면밀히 관찰할 필요가 있다.

가정 내 위생 관리 역시 중요한 예방 요소이다. 외출 후 반려동물의 발과 피모에 대한 세척, 분변 및 구토물 처리 시 보호자의 개인위생 강화는 환경 내 바이러스 잔존 가능성을 줄이는 데 필수적이다[11,12]. 반려동물이 감염된 조류와 직접 접촉하지 않았더라도, 오염된 토양, 물, 사료, 또는 보호자의 신발과 의복을 통해 바이러스가 가정 내로 유입될 수 있다는 점을 고려할 때, 이러한 기본적인 위생 조치는 감염 확산을 차단하는 데 중요한 역할을 한다.

특히 반려동물에게 생식 사료(raw meat-based diets) 또는 비살균 원유·유제품을 급여하는 행위는 H5N1뿐 아니라 다양한 인수공통병원체에 대한 노출 위험을 증가시키는 요인으로 반복적으로 지적되어 왔다[14,28-30]. 최근 보고된 사례들은 이러한 급여 행태가 가정 내에서 반려동물 감염의 직접적인 진입점으로 작용할 수 있음을 시사한다. 보호자 대상 위험 소통에서는 '자연식'이나 '면역 증진'과 같은 개념이 반드시 과학적 안전성과 동일시될 수 없음을 명확히 전달할 필요가 있다. 이는 단순한 정보 제공을 넘어, 보호자의 급여 행태와 인식 변화를 유도하는 핵심 예방 전략으로 평가되며, 근거 기반의 소통이 이루어질 때 실질적인 감염 예방 효과를 기대할 수 있다[28,30].

2. 수의 임상 현장에서의 대응

수의사는 반려동물 H5N1 감염의 조기 인지와 확산 차단에 있어 핵심적인 역할을 수행하는 전문 인력이다. 조류인플루엔자 유행 시기에는 급성 호흡기 증상, 신경계 증상, 또는 원인 불명의 급사 사례에서 H5N1을 감별진단 목록에 포함시키는 것이 권장된다[17-19]. 특히 고양이에서 호흡기 증상과 함께 신경계 증상이 동반된 급성 질환이 관찰될 경우, 조류인플루엔자 감염 가능성을 적극적으로 고려하는 임상적 판단이 요구된다.

임상 현장에서는 의심 환축에 대한 신속한 격리, 개인보호구 착용, 시료 채취 및 검사 과정에서의 생물안전 수칙 준수가 필수적이다. 이러한 조치는 수의사와 진료 보조 인력의 직업적 노출 위험을 줄이는 동시에, 병원 내 교차 감염 가능성을 최소화하는 데 기여한다. 또한 검사 결과와 역학적 정보는 보건 당국 및 방역 기관과 신속하게 공유되어야 하며, 이는 개별 반려동물 관리 차원을 넘어 지역사회 수준의 위험 평가와 대응 전략 수립에 중요한 자료로 활용된다[10,11,37].

수의 임상 현장은 반려동물 감염을 조기에 탐지할 수 있는 최전선이자, One Health 기반 감시 체계의 핵심 구성 요소로 기능한다. 임상 수의사가 의심 사례를 신속히 인지하고 보고할 수 있을 때, 반려동물 감염은 단순한 개별 사건이 아닌 조기 경보(sentinel) 신호로 작용할 수 있다. 이러한 체계적인 임상 대응은 반려동물 보호를 넘어, 보호자와 동거 가족, 나아가 지역사회 구성원의 인수공통감염 위험을 동시에 감소시키는 효과를 가진다.

궁극적으로 가정과 수의 임상 현장에서의 예방·대응 전략은 분리된 개별 조치가 아니라, One Health 관점에서 상호 보완적으로 작동해야 한다. 보호자의 일상적 관리와 수의사의 전문적 판단이 유기적으로 연결될 때, 반려동물에서의 H5N1 감염은 조기에 차단되고, 낙농·식품·인간 보건으로 확산될 수 있는 잠재적 위험을 효과적으로 완화할 수 있을 것이다.

3. 낙농·식품 안전과의 연계 관리

최근 보고된 H5N1의 낙농 환경 침투 사례는 반려동물 예방 전략에 식품 안전 관점을 체계적으로 통합해야 할 필요성을 명확히 보여준다. 젖소에서의 H5N1 감염과 원유를 통한 바이러스 노출 가능성은, 조류인플루엔자가 기존의 가금류 중심 전파 양상을 넘어 낙농 환경으로 확장되고 있음을 시사한다. 이러한 변화는 낙농 산업이 더 이상 조류인플루엔자 위험에서 간접적인 위치에 머무르지 않음을 의미하며, 반려동물과 인간 건강을 동시에 고려한 관리 전략 수립의 필요성을 부각시킨다.

비살균 원유는 반려동물과 인간 모두에게 잠재적인 감염원이 될 수 있다. 특히 원유를 직접 섭취하거나 이를 원료로 한 급여 행태는 바이러스에 대한 노출 빈도와 강도를 증가시켜 감염 위험을 증폭시킬 수 있다[13,15,25,26,38]. 반려동물에게 비살균 원유 또는 이를 기반으로 한 사료를 급여하는 경우, 보호자와 가정 환경 역시 간접적인 노출 위험에 놓일 수 있다는 점에서 공중보건적 의미를 갖는다. 미국의 젖소 집단감염 사례에서는 감염 개체의 원유에서 매우 높은 농도의 감염성 H5N1 바이러스가 검출되었으며, 이는 젖소의 유선조직에서 바이러스가 활발하게 증식할 수 있음을 시사한다. 원유 내 바이러스 농도는 최대 약 '10^6 TCID50/mL' 수준까지 보고되었으며, 이러한 높은 바이러스 역가는 생원유의 취급 및 섭취가 반려동물과 사람 모두에게 잠재적인 감염 위험이 될 수 있음을 보여준다. 반면, 실험 연구에서는 원유를 63°C에서 가열할 경우 감염성 바이러스가 2분 이내에 검출 한계 이하로 감소하였으며, 72°C에서도 대부분의 감염성 바이러스가 신속히 불활화되는 것으로 확인되었다. 다만 quantitative reverse transcription polymerase chain reaction(RT-qPCR)에서는 바이러스 RNA가 열처리 후에도 일부 검출될 수 있으나, 이는 감염성이 유지됨을 의미하지는 않는다. 또한 미국 FDA(Food and Drug Administration)의 조사에서도 시판 저온살균 유제품에서는 바이러스 RNA가 일부 검출된 반면, 감염성 바이러스는 분리되지 않아 현재의 상업적 저온살균 공정은 H5N1의 식품 매개 전파 위험을 크게 감소시키는 것으로 평가되고 있다. 따라서 낙농 분야에서는 감염 원유의 생산 단계에서부터 유통 차단과 철저한 저온살균 관리가 이루어져야 하며, 반려동물에게 비살균 원유 또는 원유를 원료로 한 생식 식이를 급여하지 않도록 하는 예방 조치가 중요하다. 따라서 낙농 현장에서의 원유 위생 관리 강화, 비살균 원유의 생산·유통 통제, 그리고 적절한 열처리 공정의 준수는 단순한 식품 위생 조치를 넘어, 인수공통감염병 예방을 위한 핵심 관리 요소로 평가된다.

아울러 반려동물 사료 산업은 이러한 One Health 관리 체계에서 중요한 연결 고리를 형성한다. 사료 원료 단계에서의 조류인플루엔자 감시 강화, 원료 취급 및 가공 과정에서의 열처리 또는 기타 바이러스 불활화 공정의 적용, 그리고 문제 발생 시 신속한 제품 추적 및 회수 체계의 구축은 반려동물 감염 예방에 있어 필수적인 관리 지점으로 인식되고 있다[14,28,29]. 특히 생식 사료(raw meat-based diets)의 확산은 반려동물의 병원체 노출 위험을 증가시킬 수 있어, 사료 안전 관리의 중요성을 더욱 부각시킨다.

이러한 관리 전략들은 식품 안전과 반려동물 건강이 서로 독립된 영역이 아니라, 동일한 위험 사슬 상에 존재함을 명확히 보여준다. 즉, 낙농 및 사료 산업에서의 관리 실패는 반려동물 감염으로 이어질 수 있으며, 이는 다시 가정 환경과 인간 건강에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 낙농·식품 안전 관리 체계에 반려동물 건강을 포함시키는 통합적 접근은 One Health 개념을 실질적으로 구현하는 핵심 전략으로 평가될 수 있다.

4. 정책 및 감시 체계 통합

One Health 관점에서 반려동물을 국가 차원의 H5N1 감시 체계에 포함시키는 것은 향후 대응 전략의 핵심 과제로 제시된다. 현재 대부분의 국가에서 H5N1 감시는 가금류와 야생조류를 중심으로 설계·운영되고 있으며, 반려동물은 제도적 감시 범위에서 제외되어 있는 경우가 많다[5,6]. 이러한 구조는 전통적인 조류인플루엔자 역학 양상에는 부합하였으나, 최근 포유류 숙주로의 감염 확산과 반려동물 감염 사례 증가라는 변화된 상황을 충분히 반영하지 못하고 있다.

반려동물은 인간과 가장 밀접한 생활 공간을 공유하는 포유류 숙주로서, 감염 발생 시 공중보건적 파급 효과가 상대적으로 클 수 있다. 특히 가정 내 환경에서 반려동물 감염은 보호자 및 동거 가족의 간접 노출 위험을 증가시킬 수 있으며, 이러한 특성은 반려동물을 단순한 '말단 숙주'가 아닌 공중보건 위험 평가의 중요한 구성 요소로 인식해야 할 필요성을 제기한다. 그럼에도 불구하고 현재의 감시 체계에서는 반려동물 감염이 주로 사후적·사건 기반(event-based)으로만 인지되고 있어, 조기 개입과 선제적 대응이 어려운 구조적 한계를 가진다.

수의·의료·환경 부문 간 정보 공유와 공동 대응 체계 구축은 이러한 한계를 극복하기 위한 핵심 전략으로 평가된다. 반려동물 감염 정보가 수의 영역에 국한되지 않고, 인간 보건 및 환경 감시 데이터와 연계될 때, 조기 위험 인지와 확산 차단이 가능해진다. 이는 One Health 접근의 핵심 원칙인 부문 간 협력과 통합적 의사결정에 부합하며, 실제 정책 실행 단계에서 구체적인 효과를 기대할 수 있는 방향이다[10-12].

특히 반려동물을 조기 경보(sentinel) 종으로 활용하는 감시 전략은 환경 내 H5N1 유입과 순환을 조기에 탐지할 수 있는 실질적인 수단으로 주목받고 있다. 반려동물은 야생조류, 낙농·축산 환경, 식품 유통, 가정 환경을 연결하는 위치에 존재하기 때문에, 감염 발생 시 환경 변화의 신호를 비교적 빠르게 반영할 가능성이 있다. 이러한 특성은 낙농 환경, 식품 유통 단계, 그리고 인간 노출 위험을 사전에 평가하는 데 있어 중요한 장점으로 작용한다[12,39].

종합하면, 반려동물 H5N1 예방과 관리는 가정 내 위생 관리, 수의 임상 대응, 낙농·식품 안전 관리, 그리고 정책·감시 체계가 유기적으로 연결된 One Health 기반 통합 전략을 통해서만 효과적으로 수행될 수 있다. 반려동물을 감시 체계의 사각지대에 두는 기존 접근에서 벗어나, 제도적·정책적 수준에서 반려동물을 포함하는 방향으로 전환하는 것이 향후 H5N1 대응의 지속가능성을 확보하는 핵심 과제로 평가된다.

미래 전망과 연구 과제

1. 반려동물 H5N1(highly pathogenic avian influenza A) 연구의 현재 한계

현재까지 반려동물에서의 H5N1 감염에 관한 지식은 주로 산발적인 사례 보고(case report)와 제한적인 역학 조사에 기반하고 있다. 이러한 연구들은 반려동물 감염의 존재와 임상적 중요성을 제시하는 데에는 중요한 기여를 하였으나, 감염의 실제 규모와 역학적 특성을 정량적으로 평가하기에는 근본적인 한계를 가진다[40]. 특히 체계적인 감시 체계가 부재한 상황에서 무증상 감염률, 감염 후 바이러스 배출 기간, 체액 및 분변을 통한 배출 양상, 그리고 가정 및 주변 환경 내 오염 정도 등에 대한 정량적 자료는 충분히 축적되지 못하고 있다[17,20,21].

이러한 정보 공백은 반려동물이 H5N1 전파 사슬에서 차지하는 실제 역할을 과소평가하게 만들며, 감염 위험을 사후적으로만 인지하는 구조를 고착화할 우려가 있다. 즉, 현재의 지식 체계는 중증 또는 폐사 사례를 중심으로 한 '사건 기반(event-based)' 인식에 머무르고 있어, 감염의 초기 단계나 저병원성 노출 양상을 포착하기 어렵다. 이는 반려동물 감염을 조기 경보 신호로 활용할 수 있는 가능성을 제한하는 요인으로 작용한다.

또한 대부분의 기존 연구는 조류 또는 산업 동물을 중심으로 설계되어 있어, 반려동물 특유의 생활 환경, 행동 양식, 식이 노출 경로, 그리고 인간과의 밀접한 접촉 양상을 충분히 반영하지 못하고 있다[5,6]. 이러한 연구 설계상의 한계는 반려동물 맞춤형 예방 전략과 위험 평가 모델을 구축하는 데 필요한 과학적 근거를 제한하는 요인으로 작용하며, 향후 연구 설계의 방향 전환 필요성을 시사한다.

2. 포유류 적응과 진화적 위험 평가

H5N1 바이러스의 반복적인 포유류 감염은 바이러스의 적응과 진화를 촉진할 수 있는 생물학적 환경을 제공한다. 특히 최근 포유류에서 분리된 H5N1 바이러스에서 중합효소 복합체 유전자, 특히 PB2와 PA 유전자에서 포유류 적응과 연관된 변이가 반복적으로 보고되고 있다[3,7,33-35]. 이러한 변이는 포유류 세포 내에서의 바이러스 복제 효율을 증가시키고, 숙주 체온 및 세포 환경에 대한 적응성을 높이는 것으로 알려져 있다.

이러한 유전적 변화는 바이러스의 병원성뿐 아니라 전파 특성 변화로 이어질 가능성이 있어, 공중보건적 관점에서 중요한 진화적 위험 요소로 평가된다. 반려동물은 인간과의 근접성이 매우 높은 포

유류 숙주로서, 이러한 적응 변이가 공중보건적 위험으로 전이될 가능성을 평가하는 데 있어 중요한 관찰 대상이 된다. 특히 반려동물에서 발생한 감염이 반복될 경우, 바이러스가 포유류 환경에 노출되는 빈도가 증가함에 따라 진화적 선택 압력이 강화될 가능성을 배제할 수 없다.

따라서 향후 연구에서는 반려동물 유래 H5N1 바이러스에 대한 지속적인 유전체 분석과 함께, 세포 및 동물 모델을 이용한 기능적 평가를 병행함으로써, 포유류 적응 변이가 실제 병원성 및 전파력에 미치는 영향을 정밀하게 규명할 필요가 있다[1,36]. 이는 반려동물 감염을 단순한 부수적 현상이 아닌, 바이러스 진화 감시의 중요한 창으로 활용하기 위한 필수적인 연구 방향이다.

3. One Health 기반 감시 전략의 발전

향후 H5N1 대응 전략에서는 반려동물을 포함한 통합 감시 체계 구축이 핵심 과제로 제시된다. 반려동물을 One Health 기반 조기 경보(sentinel) 종으로 활용할 경우, 환경 내 H5N1 유입과 순환을 조기에 탐지할 수 있을 뿐만 아니라, 낙농 환경과 식품 유통 단계, 그리고 인간 노출 위험을 선제적으로 평가할 수 있는 장점이 있다[10-12].

이러한 감시 체계는 수의·의료·식품·환경 분야 간 데이터 공유를 전제로 하며, 지역 단위에서의 실시간 정보 연계가 필수적이다. 특히 낙농 지역과 도시 지역을 연결하는 반려동물 이동 패턴, 보호자의 행동 양식, 사료 및 식품 유통 경로를 함께 고려한 감시 모델 개발이 요구된다[13,15,25,26,39]. 이는 기존의 단일 종 또는 단일 환경 중심 감시 체계를 넘어서는 통합적 접근으로 평가되며, 향후 H5N1뿐 아니라 신종 인수공통감염병 대응에도 적용 가능한 전략적 틀을 제공한다.

4. 낙농·식품과 연계된 미래 대응 방향

낙농 산업과 반려동물에서의 H5N1 감염 문제는 향후 더욱 긴밀하게 연계될 가능성이 높다. 최근 보고된 젖소 감염 사례와 원유를 매개로 한 바이러스 노출 가능성은, 조류인플루엔자가 기존의 가금류 중심 생태계를 넘어 낙농 환경으로 확장되고 있음을 보여주는 중요한 신호이다. 이에 따라 원유의 안전 관리, 비살균 유제품의 생산·유통 통제, 그리고 낙농 현장에서의 생물안전(biosecurity) 강화는 반려동물과 인간 건강을 동시에 보호하기 위한 핵심 전략으로 재정의될 필요가 있다[15,25,26,38]. 이러한 조치들은 단기적인 방역 대응에 그치는 것이 아니라, 중장기적 공중보건 전략의 일부로 제도화되어야 할 것이다.

특히 비살균 원유 및 유제품은 반려동물과 인간 모두에게 잠재적 감염원이 될 수 있으므로, 낙농 현장에서는 감염 동물의 조기 발견, 원유 취급 과정에서의 위생 관리 강화, 그리고 비상 상황에서의 유통 차단 체계가 보다 체계적으로 구축되어야 한다. 이는 식품 안전 관리 체계가 단순히 소비자 보호에 국한되지 않고, 반려동물과 가정 환경까지 포함하는 확장된 One Health 관리 영역으로 발전해야 함을 의미한다.

아울러 반려동물 사료 산업에서도 H5N1을 포함한 인수공통병원체 위험을 고려한 예방적 관리 전략이 요구된다. 원료 단계에서의 병원체 감시 강화, 열처리 또는 기타 바이러스 불활화 공정의 표준화, 그리고 문제 발생 시 신속한 제품 추적 및 회수 체계의 고도화는 반려동물 건강 보호뿐 아니라 공중보건 위험을 감소시키는 데 기여할 수 있다. 이러한 접근은 식품 안전과 반려동물 건강을 분리된 영역으로 관리해 온 기존 관행에서 벗어나, 하나의 연속선상에서 통합적으로 관리하는 One Health 접근의 구체적 실행 사례로 평가될 수 있다.

또한 반려동물 보호자를 대상으로 한 과학적 위험 소통과 교육은 향후 대응 전략에서 중요한 축을 형성한다. H5N1과 관련된 위험 정보를 전달함에 있어, 과도한 공포를 유발하거나 반려동물 양육 자체에 대한 불안을 증폭시키는 방식은 바람직하지 않다. 대신 생식 사료 급여, 비살균 유제품 사용, 야생조류와의 접촉과 같은 실제 위험 행동을 중심으로, 근거 기반의 명확한 메시지를 제공하는 것이 필요하다[11,12,30]. 이러한 위험 소통은 보호자의 행동 변화를 유도함과 동시에, 불필요한 사회적

혼란을 최소화하는 데 기여할 수 있다.

종합하면, 반려동물에서의 H5N1 감염은 향후 바이러스의 진화 방향, 전파 위험, 그리고 공중보건 대응 전략을 평가하는 데 있어 중요한 관찰 창을 제공한다. 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 낙농·식품 안전 관리, 반려동물 건강 보호, 그리고 인간 공중보건을 아우르는 One Health 기반의 통합 연구와 감시 체계 구축이 필수적이다. 이러한 통합적 접근이 정착될 때, H5N1과 같은 고위험 인수공통감염병에 대한 선제적 대응 역량을 한층 강화할 수 있을 것이다.

결 론

반려동물에서의 H5N1는 더 이상 개별 동물의 건강 문제에 국한되지 않고, 낙농·식품 안전 및 인간 공중보건과 밀접하게 연계된 One Health 이슈로 부상하고 있다. 최근 반려동물 감염 사례와 비살균 원유, 생식사료 및 낙농 환경과 같은 새로운 노출 경로의 확인은 H5N1 관리가 기존의 조류 중심 방역체계를 넘어 One Health 기반의 통합적 접근으로 확대되어야 함을 시사한다.

본 종설에서 고찰한 바와 같이 반려동물은 인간과 동일한 생활 공간을 공유하면서 야생동물, 가축, 환경 및 식품 체계와 연결되는 독특한 생태적 위치에 존재한다. 이러한 특성으로 인해 반려동물은 단순한 감염 숙주를 넘어 바이러스의 환경 내 유입과 순환을 조기에 반영할 수 있는 지표 숙주(sentinel host)로서 중요한 의미를 가진다. 따라서 반려동물을 포함한 감시체계는 H5N1의 포유류 적응과 인수공통감염 위험을 조기에 평가하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

따라서 반려동물을 포함한 통합적 One Health 접근은 H5N1 대응의 필수 전략이다. 이를 위해서는 반려동물을 국가 HPAI 감시체계에 포함하여 야생조류·가금류·낙농동물·사람을 연계하는 One Health 기반 통합 감시체계(surveillance)를 구축할 필요가 있다. 또한 비살균 원유와 생식사료 등 새로운 감염 위험요인에 대한 관리지침을 마련하고 보호자 교육을 강화하며, 수의·의료·식품·방역 분야 간 정보 공유와 분자역학적 감시를 확대하여 포유류 적응과 인수공통감염 위험을 조기에 평가할 수 있는 협력체계를 구축해야 한다.

궁극적으로 이러한 One Health 기반의 통합적 관리 전략은 반려동물 H5N1 감염의 예방과 관리뿐 아니라 향후 출현할 신종 인수공통감염병에 대한 국가 차원의 대응 역량을 강화하는 기반이 될 것이다. 본 종설이 반려동물을 포함한 통합 감시와 예방관리 체계 구축을 위한 학술적 근거를 제공하고, 동물·식품·인간 건강을 아우르는 협력적 One Health 전략의 발전에 기여하기를 기대한다.

Conflict of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

감사의 글

이 논문은 2026년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2026-25493892). 본 연구는 또한 중소기업기술정보진흥원(TIPA, Korea)이 지원하는 산학연 콜라보 R&D 사업(과제번호: RS-2026-25527666)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Koopmans M, Uyeki TM. Evolution and spread of avian influenza viruses with zoonotic potential. Nat Rev Microbiol. 2024;22:85-97.

2. Elsmo EJ, Wünschmann A, Beckmen KB, Broughton-Neiswanger LE, Buckles EL, Ellis J, et al. Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus clade 2.3.4.4b infections in wild terrestrial mammals, United States, 2022. Emerg Infect Dis. 2023;29:2451-2460.
3. Fusaro A, Zecchin B, Giussani E, Palumbo E, Agüero-García M, Bachofen C, et al. High pathogenic avian influenza A(H5) viruses of clade 2.3.4.4b in Europe: Why trends of virus evolution are more difficult to predict. Virus Evol. 2024;10:veae027.
4. World Organisation for Animal Health (WOAH). High pathogenicity avian influenza (HPAI) in cattle [Internet]. 2025 [cited 2026 Jun 29]. Available from: https://www.woah.org/en/disease/high-pathogenicity-avian-influenza-hpai-in-cattle/
5. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). A(H5) bird flu: current situation [Internet]. 2026 [cited 2026 July 15]. Available from: https://www.cdc.gov/bird-flu/situation-summary/?utm_source=chatgpt.com
6. World Organisation for Animal Health (WOAH). Avian influenza [Internet]. 2024 [cited 2026 July 20]. Available from: https://www.woah.org/en/disease/avian-influenza/
7. Long JS, Mistry B, Haslam SM, Barclay WS. Host and viral determinants of influenza A virus species specificity. Nat Rev Microbiol. 2019;17:67-81.
8. Pardo-Roa C, Nelson MI, Ariyama N, Aguayo C, Almonacid LI, Gonzalez-Reiche AS, et al. Cross-species and mammal-to-mammal transmission of clade 2.3.4.4b highly pathogenic avian influenza A/H5N1 with PB2 adaptations. Nat Commun. 2025;16:2232.
9. Ma W, Richt JA. Swine and avian influenza viruses: interspecies transmission. Curr Top Microbiol Immunol. 2013;370:199-228.
10. Kibenge FSB. A One Health approach to mitigate the impact of influenza A virus (IAV) reverse zoonosis is by vaccinating humans and susceptible farmed and pet animals. Am J Vet Res. 2023;84.
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), United Nations Environment Programme (UNEP), World Health Organization (WHO), World Organisation for Animal Health (WOAH). One Health joint plan of action (2022-2026): working together for the health of humans, animals, plants and the environment. Rome: FAO; 2022.
12. Gibbs EPJ. The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future. Vet Rec. 2014;174:85-91.
13. Shanta RN, Akther M, Prodhan MA, Akter SH, Annanale H, Sarker S, et al. Adaptation and outbreak of highly pathogenic avian influenza in dairy cattle: an emerging threat to humans, pets, and peridomestic animals. Pathogens. 2025;14:846.
14. Bonilla-Aldana DK, Calle-Hernández DM, Ulloque-Badaracco JR, Alarcón-Braga EA, Hernández-Bustamante EA, Cabrera-Guzmán JC, et al. Highly pathogenic avian influenza A(H5N1) in animals: a systematic review and meta-analysis. New Microbes New Infect. 2024;60-61:101439.
15. U.S. Food and Drug Administration (FDA). Investigation of avian influenza A (H5N1) virus in dairy cattle [Internet]. 2024 [cited 2026 July 25]. Available from: https://www.fda.gov/food/alerts-advisories-safety-information/investigation-avian-influenza-h5n1-virus-dairy-cattle?utm_source=chatgpt.com

16. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Talking to patients about unpasteurized (raw) milk and highly pathogenic avian influenza [Internet]. 2024 [cited 2026 July 27]. Available from: https://www.cdc.gov/bird-flu/hcp/unpasteurized-raw-milk/index.html?utm_source=chatgpt.com
17. Moreno A, Bonfante F, Bortolami A, Cassaniti I, Caruana A, Cottini V, et al. Asymptomatic infection with clade 2.3.4.4b highly pathogenic avian influenza A(H5N1) in carnivore pets, Italy, April 2023. Euro Surveill. 2023;28:2300441.
18. Maddock KJ. A raw deal: the intersection of the immunocompromised cat, influenza, and a lapse of infection prevention and control measures. ASM Case Rep. 2026; 2:e00180-25.
19. Reperant LA, Kuiken T. Avian influenza virus pathogenicity in mammals. Rev Sci Tech. 2012;31:113-124.
20. Songserm T, Amonsin A, Jam-on R, Sae-Heng N, Pariyothorn N, Payungporn S, et al. Fatal avian influenza A H5N1 in a dog. Emerg Infect Dis. 2006;12:1744-1747.
21. Giese M, Harder TC, Teifke JP, Klopfleisch R, Breithaupt A, Mettenleiter TC, et al. Experimental infection and natural contact exposure of dogs with avian influenza virus (H5N1). Emerg Infect Dis. 2008;14:308-310.
22. Golke A, Jańczak D, Szaluś-Jordanow O, Dzieciątkowski T, Mickiewicz M, Frymus T. Natural infection with highly pathogenic avian influenza A/H5N1 virus in pet ferrets. Viruses. 2024;16:931.
23. Belser JA, Maines TR, Tumpey TM, Katz JM. Ferret models of influenza virus pathogenesis and transmission. J Virol. 2013;87:4271-4278.
24. Caserta LC, Frye EA, Butt SL, Laverack M, Nooruzzaman M, Covaleda LM, et al. Spillover of highly pathogenic avian influenza H5N1 virus to dairy cattle. Nature. 2024;634:669-676.
25. Mostafa A, Abdelwhab EM, Mettenleiter TC, Pleschka S. Zoonotic potential of influenza A viruses. Viruses. 2018;10:497.
26. U.S. Department of Agriculture (USDA). USDA actions to protect livestock health from highly pathogenic H5N1 avian influenza [Internet]. 2024 [cited 2026 July 30]. Available from: https://www.aphis.usda.gov/news/agency-announcements/usda-actions-protect-livestock-health-highly-pathogenic-h5n1-avian?utm_source=chatgpt.com
27. Kamel M, Aleya S, Almagharbeh WT, Aleya L, Abdel-Daim MM. The emergence of highly pathogenic avian influenza H5N1 in dairy cattle: implications for public health, animal health, and pandemic preparedness. Eur J Clin Microbiol Infect Dis. 2025;44:1817-1833.
28. Freeman LM, Chandler ML, Hamper BA, Weeth LP. Current knowledge about the risks and benefits of raw meat-based diets for dogs and cats. J Am Vet Med Assoc. 2013;243:1549-1558.
29. Nüesch-Inderbinen MT, Treier A, Zurfluh K, Stephan R. Raw meat-based diets for companion animals: microbial hazards and public health risks. Vet Microbiol. 2019;232:197-205.
30. Kuiken T, Taubenberger JK. Pathology of human influenza A(H5N1) infection.

Lancet. 2008;371:1237-1245.
31. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Current situation: bird flu in dairy cows [Internet]. 2025 [cited 2026 Jun 29]. Available from: https://www.cdc.gov/bird-flu/situation-summary/mammals.html
32. Steel J, Lowen AC. Influenza A virus reassortment. In: Compans RW, Oldstone MBA, editors. Influenza pathogenesis and control. Current topics in microbiology and immunology. Vol. I. Cham: Springer; 2014. p. 377-401.
33. Subbarao K, Katz J. Avian influenza viruses infecting humans. Cell Mol Life Sci. 2000;57:1770-1784.
34. Gabriel G, Fodor E. Molecular determinants of pathogenicity in influenza A viruses. Curr Opin Virol. 2014;8:38-45.
35. Koopmans M. Spillover and pandemic risk. Lancet. 2021;398:1385-1387.
36. World Organisation for Animal Health (WOAH). Guidelines for veterinary public health and zoonoses. Paris: WOAH; 2021.
37. European Food Safety Authority. Avian influenza and food safety considerations. EFSA J. 2023;21:e07812.
38. World Health Organization (WHO). Global influenza strategy 2019–2030. Geneva: WHO; 2019.
39. USDA conditionally approves H5N1 poultry vaccine. Nat Biotechnol. 2025;43:461.
40. Chen Y, Zhong G, Wang G, Deng G, Li Y, Shi J, et al. Dogs are highly susceptible to H5N1 avian influenza virus. Virology. 2010;405:15-19.