

2014년 국내 발생 HPAI(고병원성 조류인플루엔자)의 시·공간 군집 분석

문운경¹ · 조성범² · 배선희^{3*}

Spatio-Temporal Clustering Analysis of HPAI Outbreaks in South Korea, 2014

Oun-Kyong MOON¹ · Seong-Beom CHO² · Sun-Hak BAE^{3*}

요 약

본 연구는 질병역학의 관점에서 2014년 발생한 HPAI(H5N8)의 시간적 분포와 공간적 분포 그리고 시·공간을 동시에 고려한 분포를 지리정보시스템과 연계하여 분석함으로써 2014년 발생한 HPAI의 전파 및 확산 특징을 알아보고자 한다. 분석 결과 2014년 HPAI는 시간적으로는 모두 3번의 파동을 형성하였으며, 공간적으로는 경기도·충청북도·충청남도가 인접하는 지역, 전라북도의 곰소만 일대, 전라남도의 영암과 나주 등 영산강과 인접한 지역에서 높은 밀도를 보였다. 시·공간적으로도 공간 밀도가 높은 충청북도 음성지역, 전라북도 부안·고창지역, 나주지역에서 군집이 형성되었다. 다만, 충청북도 음성·진천, 충청남도 천안, 경기도 안성·이천 지역과 전라남도 영암 지역에서는 공간적인 밀도는 높음에도 불구하고 시간적인 범위가 넓음으로써 시·공간 군집이 형성되지 못하였다. 이는 이들 지역의 방역에 문제가 있음을 의미한다. 반면에 곰소만과 인접하고 있는 전라북도 부안·고창·장수 지역은 시·공간 군집이 형성됨으로써, 상대적으로 효과적인 방역이 수행되었다고 볼 수 있다.

주요어 : 고병원성 조류인플루엔자, 질병역학, 지리정보시스템, 시·공간 분석

ABSTRACT

Outbreaks of highly pathogenic avian influenza (HPAI) subtype H5N8 have occurred in Korea, January 2014 and it continued more than a year until 2015. And more than 5 million heads of poultry had been damaged in 196 farms until May 2014. So, we studied

2015년 6월 23일 접수 Received on June 23, 2015 / 2015년 8월 19일 수정 Revised on August 19, 2015 / 2015년 9월 9일
심사완료 Accepted on September 9, 2015

1 농림축산검역본부 Animal and Plant Quarantine Agency

2 서울대학교 수의과대학 College of Veterinary Medicine and Research Institute for Veterinary Science, Seoul National University

3 강원대학교 지리교육과 Department of Geography Education, Kangwon National University

* Corresponding Author E-Mail : gis119@kangwon.ac.kr

the spatial, temporal and spatio-temporal patterns of the HPAI epidemics for understanding the propagation and diffusion characteristics of the 2014 HPAI. The results are expressed using GIS. Throughout the study period three epidemic waves occurred over the time. And outbreaks made three clusters in space. First spatial cluster is adjacent areas of province of Chungcheongbuk-do, Chungcheongnam-do and Gyeonggi-do. Second is Jeonlabuk-do Gomso Bay area. And the last is Naju and Yeongam in Jeollanam-do. Also, most of spatio-temporal clusters were formed in spatially high clustered areas. Especially, in Gomso Bay area space density and spatio-temporal density were concurrent. It means that the effective prevention activity for HPAI was carried out. But there are some exceptional areas such as Chungcheongbuk-do, Chungcheongnam-do, Gyeonggi-do adjacent area. In these areas the outbreak density was high in space but the spatio-temporal cluster was not formed. It means that the HPAI virus was continuing inflow over a long period.

KEYWORDS : HPAI(Highly Pathogenic Avian Influenza), Epidemiology, GIS, Spatio-Temporal Analysis

서론

HPAI(Highly Pathogenic Avian Influenza, 고병원성 조류인플루엔자)는 조류인플루엔자 바이러스 감염에 의해 닭, 오리 등 사육가금과 야생조류에 발생하는 급성 바이러스성 전염병이다. 한반도와 인접한 중국과 동남아시아 등지에는 이미 토착화 한 상태로 인체 감염 사례 및 사망사례도 꾸준히 보고되면서 전 세계적으로 주목 받고 있는 중요한 인수공통전염병이다.

한국은 2003년 충북 음성에서 처음으로 HPAI가 발생된 이후 총 5차례 발생하였으며, 이로 인한 가금농가의 피해보상, 방역 및 매몰 비용 등 가금 및 관련 산업에 끼친 직·간접적 피해는 천문학적이었다. 특히 2014년에 발생하여 2015년까지 지속된 H5N8형 HPAI의 경우 기존에 발생하였던 H5N1형과는 또 다른 전파 및 확산 특성을 보이고 있어 발생 예방, 예찰에서 혼란을 초래하였다. 이에 새로운 HPAI인 H5N8형에 대한 발생, 전파, 확산 요인 분석에 대한 차별화된 역학적 접근의 필요성이 대두되었다. 또한 막대한 경제적 보상비용을 초래하고 윤리적인 관점 등에서 비판을 받고 있는 살처

분 방식의 효과와 필요성 등에 대한 연구 필요성이 제기되고 있다.

2015년 현재 2014년에 국내에서 발생하였던 H5N8형 HPAI 바이러스가 중국과 일본 등 한국의 주변국뿐만 아니라 유럽과 북미 지역에 까지 발생함으로써 세계적으로 확산 추세에 있으며(Verhagen *et al.*, 2015), 2015년 신규로 발생한 국가들은 한국의 HPAI 진행상황을 주시하고 있다. 2014년부터 2015년 4월 현재까지 국내에서 지속적으로 발생하고 있는 H5N8형 HPAI의 경우 야생조류 및 가금류에서 전 세계적으로 동시 다발적으로 발생하는 것으로 미뤄 한국, 중국 등 동남아시아에서 감염된 철새들이 철새 이동 경로가 교차하는 지점에서 서로 교차 오염되어 퍼져나간 것으로 추정된다.

HPAI와 구제역 등 국가적으로 피해가 큰 질병은 해당 질병이 종료되었을 때 종합적인 역학조사가 수행된다. 이러한 역학조사 보고서에는 질병의 발생-전파-확산의 과정이 포함된다. 질병의 발생-전파-확산은 모두 공간상에서 진행된다. 따라서 질병의 확산에 대한 정확한 분석과 예측을 위해서는 공간분석 도구인 GIS를 활용한 공간분석이 효과적이다. 그러나 지금까지 수행된 HPAI와 관련된 역학조사와 관련 연

구들은 대부분 공간에 대한 고려와 분석이 부족한 상황에서 수행된 것이 현실이다. 기존에 작성된 역학보고서에서는 일반적으로 해당 질병이 질병 발생 기간 동안에 어느 지역에 얼마만큼의 빈도로 발생하였고, 어느 날짜에 집중적으로 발생하였는가를 공간과 시간으로 각각 분리하여 총량적으로 제시하였다. 공간과 시간은 연계한 분석의 경우도 시·군 단위에서의 발병 시점과 전파 경로를 시·군명으로 제시하는 수준에 머물러 있다.

전염성이 높은 질병은 방역 상황에 따라 시·공간상에서 군집을 이루기 때문에, 질병 발생 사례에 대한 시·공간 군집 분석은 질병의 발병 가능성이 높은 지역과 시기를 추정하는데 있어서 매우 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다. 그리고 이러한 시·공간 군집에 대한 분석 결과는 발병과 확산의 요인 파악에 관한 정보를 제공해 주며, 이는 결과적으로 질병 관리와 방역에 기여한다(Carpenter, 2001). 따라서 주요 질병에 관한 역학조사에서는 시간과 공간을 동시에 고려한 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 2014년 발생한 H5N8형 HPAI의 전파 특성을 GIS 기반의 공간분석 방법인 시·공간 분석 방법으로 분석함으로써 HPAI의 시·공간적인 군집 특성을 살펴보고자 한다. 그리고 그 결과를 토대로 HPAI가 시·공간 상에서 어떠한 확산 특성을 보였는가를 분석하고, 동시에 현재 논란이 되고 있는 발생 농가의 주변 농가에 대해 일괄적으로 수행되는 예방적 살처분의 효과를 함께 분석해 보고자 한다.

HPAI와 같은 전염성 질병의 역학관련 연구는 국내·외에서 활발하게 진행되고 있다. 국내·외에서 수행된 동물 질병 역학과 관련된 연구는 크게 질병 발생 후에 그 전파과정과 결과를 분석한 연구와 질병 발생 중 또는 이전에 진행상황을 예측하기 위한 전파확산 시뮬레이션 모델 개발에 관한 연구로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 HPAI와 구제역 등에 관한 역학조사보고서가 대표적인 사례이며, 후자의 경우는 동물 질병 전파·확산 모델의 국내 적용 연구가 대표적인 사례이다. 그러나 시뮬레이션 모

델은 고려해야 할 요인과 경우의 수가 너무 많기 때문에 현재로서는 범용적인 동물 질병 예측에 직접적으로 활용되지 못하고 있다. 그러나 동물 질병과 관련된 빅데이터의 분석이 가능해지는 시점에서는 그 활용도가 점차 높아질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 질병 발생 이후에 수행되는 역학 분석과 관련된 연구들 중 GIS 기반의 시·공간 분석 연구를 중심으로 사례 조사를 하였다.

국내에서는 동물 질병에 관한 시·공간 분석이 아직은 초기 단계이며, HPAI를 대상으로 수행된 연구는 없다. 다만, 2010년과 2011년에 발생한 구제역을 대상으로 한 시·공간 분석이 수행된 사례를 시작으로 시·공간 분석에 관한 관심이 점차 증가하고 있다(Park and Bae, 2012; Bae *et al.* 2013). 국외 연구를 살펴보면 Minh *et al.*(2009)은 2003년에서 2007년까지 4년간에 걸쳐 베트남 북부의 홍강(Red river) 삼각주와 남부의 메콩강 삼각주 지역에서 발생한 HPAI(H5N1)의 시·공간 군집 분석을 수행하였다. 그 결과 HPAI가 시간적으로, 공간적으로 그리고 시·공간적으로 군집을 이루고 있음을 확인하였고, 근거리 전파와 원거리 전파의 복합적인 원인에 의하여 확산되었음을 밝혔다. 특히 2003~04년과 2004~05년에 발생한 HPAI의 경우 베트남의 대표적인 축재인 Tet(구정월 맞이) 축제와 관련성이 높음을 확인하였다. 또한 시·공간 분석을 통하여 방역 활동이 근거리 전파 차단에 있어서는 성과를 거두었지만, 장거리 전파 차단에는 실패하였음을 확인하였다. 또한 단거리 전파 차단의 경우에 이동 통제와 함께 신속한 예방적 살처분 조치의 필요성을 주장하였다. Ekong *et al.*(2012)은 2006년에서 2008년 사이에 나이지리아에서 발생한 HPAI (H5N1)에 대하여 시간적·공간적으로 확산되어 가는 과정을 살펴보고, 시·공간 군집 추출을 통하여 HPAI의 확산 요인을 찾기 위해 시·공간 군집 분석을 수행하였다. 시·공간 분석 결과 지방정부 차원의 방역 강화와 HPAI의 신속한 발견이 중요함을 확인하였다. 그 외 Ahmed *et al.*(2011)도 방

글라데시에서 발생한 HPAI(H5N1)에 대해서 시·공간 분석을 수행하였다. 구제역에 대한 시·공간 분석도 수행되었는데 Alkhamis *et al.*(2009)은 2006~2007년에 이스라엘과 팔레스타인 일대에서 발생한 구제역의 시·공간 군집 분석을 통하여 이 지역에서 유목 농가들 사이에서 수년에 걸쳐 구제역이 확산되는 과정을 분석하였다. 동물 질병은 아니지만 병원의 응급실 방문 환자의 시·공간 정보를 이용하여 특정 질병의 발병을 초기에 예측하는 방법에 대한 연구(Kulldorff *et al.*, 2005) 등도 시·공간이 동시에 반영된 분석 사례이다.

전염성이 높은 가축 질병과 관련된 분야에서 시·공간을 동시에 고려한 분석 방법은 이미 주요 선진국에서 1990년대 중반 이후 본격화되기 시작하였지만, 국내의 동물 질병 역학분석 분야에서는 시·공간을 동시에 고려한 연구가 아직 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 2014~15년 국내에서 발생한 HPAI의 시·공간 군집 특성을 분석함으로써 시·공간을 동시에 고려한 상황에서의 국내 HPAI의 전파 특징을 알아보고자 한다.

다만 본 연구는 HPAI의 전파에 영향을 주는 요인 분석이라기 보다는 HPAI가 시·공간적으로 어떠한 확산 경향을 보이는가라는 HPAI의 확산 현상을 분석한 연구이다. 따라서 HPAI의 전파와 확산에 관련된 다양한 요인과 HPAI의 확산 특징 등에 대해서는 분석하지 않았다.

연구범위 및 방법

1. 연구범위 및 연구자료

2000년대 들어서 우리나라에서는 모두 5번의 크고 작은 HPAI가 발생하여 농가에 직·간

접적으로 큰 피해를 주었다. 1차 HPAI는 2003~04년 겨울에 102일 동안 발생하였고, 2차 HPAI는 2년 뒤인 2006~07년 겨울에 105일 동안 발생하였다. 3차 HPAI는 타 HPAI와는 다르게 2008년 봄철에 발생하여 42일 동안 지속되었으며, 4차 HPAI는 2010년과 2011년 겨울에 139일 동안 발생하였다. 그리고 본 연구의 분석 대상이 되는 5차 HPAI는 2014년 1월에 발생하여 2015년까지 계속되었으며, 2014년 이전에 발생한 HPAI 바이러스는 H5N1형이었지만 2014년의 경우는 H5N8형으로 지금까지 발생한 HPAI 중에서 그 피해규모가 가장 크다(표 1).

2014년 1월 17일 최초 HPAI 신고가 접수된 이후 2015년까지 HPAI는 그 빈도수는 줄었지만 지속적으로 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 2014년 1월 17일부터 2014년 6월말까지 신고된 HPAI 발생 농장을 대상으로 그 분석 범위를 한정하였다. 2014년 6월 26일까지 HPAI 발생 농가는 모두 196곳이며, 501만 수의 닭, 오리, 메추리, 타조, 거위, 기러기, 칠면조 등이 피해를 입었다.

HPAI 발생 농가에 관한 정보로는 주소 형식으로 제공되는 위치정보와 신고일자에 해당하는 시간정보, 축종, 사육두수 등이 있다(그림 1). 이들 정보 중 주소정보는 지오코딩(geocoding)의 방법을 이용하여 좌표로 변환한 후, GIS 공간정보 형식인 점(point) 객체로 전환하였다(그림 2).

2. 분석 방법

분석 방법에 있어서는 공간분석과 시간에 따른 빈도 분석 그리고 시·공간을 동시에 고려한 분석을 함께 수행하였다. 공간분석 방법인

TABLE 1. HPAI outbreaks in South Korea

preiod	2003.12~04.3	2006.11~07.3	2008.4~08.5	2010.12~11.5	2014.1~14.5
days	102	105	42	139	120
infected farms	19	13	98	91	196
(damage livestock)	(396,000)	(571,000)	(1,615,000)	(2,621,000)	(5,012,000)

(Animal and Plant Quarantine Agency of Korea, 2014)

연번	신고일(접수일)	주소	축종	사육두수
1	2014-01-16	전북 고창 신림면 무림	종오리	21,340
2	2014-01-17	전북 부안 줄포면 신리	육용오리	6,500
3	2014-01-18	전북 부안 줄포면 신리	육용오리	9,200
4	2014-01-19	전북 고창 하리면 사반	육용오리	11,200
5	2014-01-20	전남 해남 송지면 마봉	종오리	12,500
6	2014-01-21	충남 부여 홍산면 북촌	중계	22,000
7	2014-01-22	전남 나주 세지면 오봉	종오리	10,800
8	2014-01-23	전북 부안 계화면 양산	육용오리	18,100
9	2014-01-24	충남 천안 서북구 직산	종오리	9,500
10	2014-01-25	충북 진천 이월면 삼용	종오리	5,900
11	2014-01-26	경기 화성 서신면 전곡	중계	16,000
12	2014-01-27	전남 영암 덕진면 장선	종오리	10,100
13	2014-01-28	경남 밀양 조동면 덕산	토종닭	9,500
14	2014-01-29	충북 진천 덕산면 인산	육용오리	9,000
15	2014-01-30	충북 음성 대소면 삼정	종오리	9,940
16	2014-01-31	경기 화성 온석동 488-	중계	27,000
17	2014-02-01	전남 영암 도포면 덕화	산란계	27,000
18	2014-02-02	전남 영암 영암읍 송평	종오리	12,000
19	2014-02-03	전북 정읍 삼산동 524	중계	14,362
20	2014-02-04	충남 청양 은곡면 위라	산란계	31,000
21	2014-02-05	전북 김제 용지면 반교	종오리	7,400
22	2014-02-06	충북 음성 맹동면 봉현	육용오리	6,100
23	2014-02-07	충남 논산 연무읍 마전	중계	38,380
24	2014-02-08	경기 평택 팽성읍 대사	종오리	18,600
25	2014-02-09	충남 천안 동남구 병천	산란계	115,279
26	2014-02-10	전남 영광 묘량면 영양	종오리	19,702
27	2014-02-11	경기 안성 일죽면 화봉	산란계	25,000

FIGURE 1. HPAI outbreak farms list

밀도분석과 분포분석은 HPAI 발생 지역을 시각적으로 표현해 주기는 하지만 시간이 변함에 따라 HPAI가 어떻게 확산되어 갔는가를 표현해 주지는 못한다. 또한 시간에 따른 빈도 분석은 시간이 지남에 따라 질병의 발생 빈도가 어떠한 변화를 보이는 가를 보여줄 수 있지만, 이러한 빈도 변화가 특정 공간에 집중하여 나타나는 지 또는 전 지역에 걸쳐 나타나는 지에 대한 답을 주지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 공간분석과 시간 분석의 한계를 극복하기 위해 HPAI가 발생한 농장의 위치정보와 함께 날짜정보를 조사하고 이를 시계열적으로 배열함으로써 시간이 지남에 따라 HPAI의 확산에 시·공간적인 군집(Spatio-Temporal clustering)이 발생하였는가를 살펴보았다.

질병의 전파는 공간 및 시간과 밀접한 관련성이 있다. 그리고 이러한 시·공간에서의 전파 과정에서 특이점이나 규칙성을 발견하고 그 원인을 조사하는 것은 역학 조사에 있어서 중요

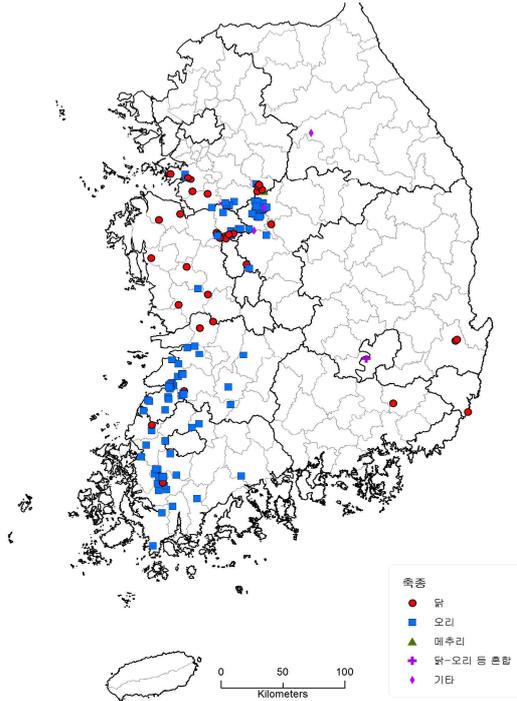


FIGURE 2. HPAI outbreak farms geocoding

한 부분이다. HPAI와 같이 전염성이 강한 질병의 확산을 보다 정확하게 이해하기 위해서는 공간과 시간을 동시에 고려한 분석 방법이 필요하다. 즉, 일정한 기간 동안 일정한 공간적 범위에서 얼마만큼의 HPAI가 발병하였는가를 분석함으로써, 시·공간을 동시에 고려한 상황에서 HPAI가 집중적으로 발병한 지역과 그렇지 않은 지역을 구분하고 그 원인과 결과에 대한 분석을 병행할 필요가 있다(Pak and Bae, 2012).

HPAI의 시·공간 분석을 위한 연구 방법에 있어서는 분석 모델의 경우 일반적으로 고려되는 요인이 많을수록 결정모델(deterministic model)보다는 확률모델(stochastic model)이 적절하다. 그리고 지리정보 자료를 활용한 모델은 그렇지 않은 모델에 비하여 질병 발생상황을 더 잘 표현한다(Carpenter, 2011). 대부분의 질병이 그러하듯이 전염력이 강한 HPAI의 경우 철새, 차량, 야생동물, 농장주, 가축, 사료와

분노, 온도 등 전파와 확산에 영향을 주는 요인이 무수히 많으므로 확률모델이 적합하다. 따라서 본 연구에서도 확률모델을 적용하여 분석하고 그 결과는 GIS를 이용하여 시각화하였다. 시·공간 군집 분석은 검색통계(scan statistics) 방법의 하나인 시·공간 순열모델(space-time permutation model)이 적용된 SatScan v9.1을 이용하였으며, 지도화와 공간분석을 위한 소프트웨어는 ArcGIS v10을 사용하였다.

시·공간검색통계의 원리는 사건이 발생한 각 지점들을 중심으로 하는 가상의 원통(cylinder)을 순차적으로 그린다. 이때 원통의 지름은 공간거리를 나타내고 원통의 높이는 시간거리를 나타낸다. 원통의 지름과 높이는 점차 확대되고 이동하면서 시·공간 군집이 발생한 지역과 시기를 찾게 된다. 일반적으로 각 지점에서의 원통의 지름과 높이는 총 사례 수의 50%까지 확장시켜 분석한다(kulldorff and Nagarwalla, 1995). 이러한 과정에서 기대치에 대한 관측치의 비율(observed-to-expected ratio)을 계산하여 사건 발생에 있어서 군집 유무를 추정한다. 그리고 Monte Carlo Simulation 방법을 이용하여 각 클러스터에 대한 관측치와 기대치

에 대한 통계적인 유의수준($P < 0.1$)을 검증하는 과정을 거친다(Alkhamis *et al.*, 2009). 이는 시·공간과 관련된 현상을 단순히 주세도로 제작하거나 시간별로 배열하여 추세로 보여주는 방법과 비교할 때 통계적인 설득력을 제공해줄 수 있다는 장점이 있다(Gang, 2008). 이러한 시·공간검색통계 방식은 GIS 기반의 공간통계분석 방법에 시간이라는 요소를 추가하여 군집을 찾고 그 결과를 통계적으로 검증하는 방법이다.

HPAI 발생 특징 분석

1. 시간에 따른 HPAI의 발생 빈도 변화

2014년 발생한 HPAI는 겨울철에 국내로 남하한 월동조류가 추수이후 낙곡이 많고 서식조건이 좋은 서남해안지역인 전남과 전북지역의 호수를 중심으로 월동하는 과정에서 가금 농가로 전염된 것으로 추정된다. 즉, 겨울철새의 무리에 포함되어 있던 H5N8형 HPAI 바이러스가 순환 감염되면서 서남해안지역에 서식하는 철새와 가금농가에서 HPAI가 높은 발생 빈도를 보였다. H5N8형 HPAI의 감염 시기를 주간별

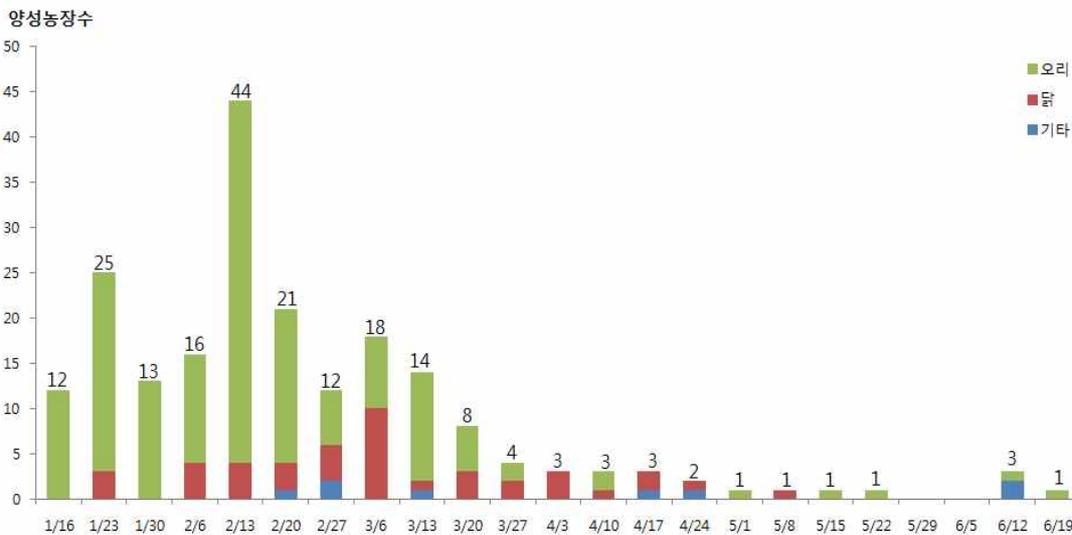


FIGURE 3. HPAI epidemic incidence over time

로 분석한 결과, 1월 16일 이후부터 감염농가 수가 지속적으로 증가하다가 2월 13일 주간에서 최고점에 도달한 후 점진적으로 감소 추세로 전환되었다. 5월 이후에는 주 1회 정도의 낮은 발생빈도를 보였지만, 1년 내내 지속적으로 발병하는 특징을 보인다는 점에서 기존에 국내에서 발병한 HPAI와는 차이를 보이고 있다(그림 3).

2. HPAI 발생의 공간적 분포

질병의 발생은 공간상에 나타나는 현상이기 때문에 일반적으로 공간에 기반 한 표현과 분석 방법을 통하여 해석된다. HPAI 역시 공간상에 나타나는 현상이기 때문에 공간적 분포 특성에 대한 분석이 필요하다. 한국과 같이 방목이 아닌 상대적으로 좁은 공간에서 가축 사육이 이루어지는 경우, 대부분의 경우 그 질병이 발병한 위치 정보를 점 유형으로 추출할 수 있다. 그리고 이러한 점 객체들의 개수가 많거나 소축적 지도에서 서로 중첩되어 표현될 때 객체에 대한 공간분포 특징을 시각화하는 가장 일반적인 방법 중 하나가 밀도분석이다. 본 연구에서는 점 객체에 대한 시각화 방법으로 커널밀도(Kernel Density) 분석을 활용하였다. 밀도분석은 반경을 얼마로 설정하느냐에 따라 밀도 값에 차이가 나지만, 반경 값 설정을 위한 통계적 기준 등은 제시되지 않기 때문에 사용자가 임의로 반경 값을 설정해 주어야 한다. 본 연구에서는 HPAI의 발생 농가의 밀도 분석을 위한 반경을 HPAI 발생 시 방역 범위에 해당하는 3km로 설정하여 분석하였다. 즉, 발생지점으로부터 3km 범위에 해당하는 지역까지 단계적으로 값이 부여되고 3km를 벗어난 지역에서는 값이 부여되지 않는다. 단, 가금류 축산농가의 밀도 분석을 위한 반경은 2km 설정하였다.

우리나라의 전체 가금류 사육 밀도를 살펴보면 충청남도과 충청북도 북부 지역이 가장 높으며, 전라남·북도에서도 상대적으로 높은 밀도를 보인다. HPAI 발생 농가에 대한 밀도 분석 결과 HPAI의 공간적 분포는 3곳에서 군집

경향을 보인다. 먼저 충청북도 음성과 진천, 충청남도 천안, 경기도 안성을 중심으로 가장 높은 밀도를 보인다. 3개 광역자치단체가 서로 인접하고 있는 이 지역의 특징은 축산 농가가 밀집하여 있고, 상대적으로 도로망이 발달하였다. 다음으로는 전라북도 부안, 정읍, 고창 일대에서 높은 밀도를 보였다. 이 지역은 곰소만을 중심으로 동립저수지 등이 분포하고 있는 우리나라의 주요 철새 도래지 중 한 곳이다. 마지막으로 전라남도 영암과 나주 일대에서도 높은 밀도를 보였다. 이 지역은 영산강과 인접하여 있으면서 금지제와 성산제 등 다수의 농업용 저수지가 분포하는 곳으로 역시 철새의 주요 도래지 중 한 곳이다(그림 4, 그림 5).

이러한 결과를 토대로 2014년 HPAI의 공간 분포 특징을 살펴보면, 발생 밀도가 높은 지역은 인접한 곳에 주요 겨울 철새 도래지가 되는 만과 저수지가 분포한다. 이는 HPAI의 초기 바이러스 유입에 철새가 중요한 요소로 작용하였음을 추론하게 하는 부분이다. 다만, 충청북도와 충청남도 그리고 경기도 경계지역이 환경부와 농림축산식품부에서 조사하여 제시한 주요 철새 도래지가 아닌 점을 고려할 때, 이들 지역에서는 주로 차량 등 인간의 활동에 의해 바이러스가 유입되었을 가능성이 높다.

3. 시·공간 군집 분석

본 연구에서는 시·공간검색통계 분석을 위해 공간의 최대 군집 크기를 사례(HPAI 발생) 수의 50%로 하고, 시간의 최대 군집 크기는 5일로 설정하여 수행하였다. 세계동물보건기구(OIE)에서는 규정하는 HPAI의 잠복기는 일반적으로 수 시간에서 3일 정도이다. 그러나 발병 환경에 따라서는 최대잠복기를 21일까지도 규정하고 있다. 따라서 군집분석을 위한 적절한 시간범위를 설정하기 위해 본 연구에서는 시간의 범위를 2일부터 10일까지 변화시키면서 시·공간 군집분석을 수행하였다. 그 결과 5일 이후부터 10일까지 유사한 군집 경향을 보이고 있으므로 본 연구에서는 5일을 시간적 범위의

최대값으로 설정하여 시·공간 군집 분석을 수행하였다.

시·공간 분석 결과 시·공간 군집은 모두 4건이 확인되었다. 이들 중 3건은 유의수준($P < 0.1$) 범위 내에 해당하는 값을 보여 통계적으로 유의미한 수준에서의 시·공간 군집이 형성되었음을 확인할 수 있었고, 1건은 유의수준을 크게 벗어난 값을 보였다. 이렇게 생성된 시·공간 군집들을 시간 순으로 살펴보면, 먼저 2014년 1월 20일부터 2014년 1월 24일까지 5일간 전라북도 부안군과 고창군 일대의 반경 24.7km에서 발생한 17건이 기대치 보다 7.31배 높은 수치를 보였다. 두 번째는 2014년 2월 17일부터 2014년 2월 19일까지 3일간 충청북도 음성군 일대의 반경 2.2km에서 발생한 28건으로 이는 기대치 보다 6.31배 높은 수치를 보였다. 세 번째는 2014년 2월 28일부터 2014년 3월 2일까지 3일간 반경 57.1km에서 발생한 3건으로 기대치 보다 14.7배 높은 수치를

보였다. 그러나 세 번째 발병의 경우 통계 검정에서는 유의수준을 크게 벗어난다. 네 번째는 2014년 3월 13일에서 2014년 3월 16일까지 4일간 전라남도 나주시 일대의 반경 21.3km에서 발생한 9건으로 기대치 보다 9.8배 높은 수치를 보였다.

일반적으로 전염성 질병의 시·공간 분석에서는 발생 초기에 시·공간 군집의 범위가 작게 형성되는 특징을 보이다가 시간이 지남에 따라 그 크기가 커지는 경향을 보인다. 그러나 2014년에 발생한 HPAI의 경우는 시·공간 군집의 크기가 불규칙하다. 이러한 현상은 기존 발생 지역과 인접하지 않은 새로운 지역에 바이러스가 유입되어 주변 지역을 오염시키는 현상이 반복적으로 발생할 때 나타날 가능성이 높다. 실제로 HPAI 발생 빈도를 하루 단위로 조사한 후 시·공간 발생 시점을 표시한 결과 2014년 HPAI에서는 시간적으로 모두 세 번의 파동이 존재하는데 각 파동에서 시·공간 군집

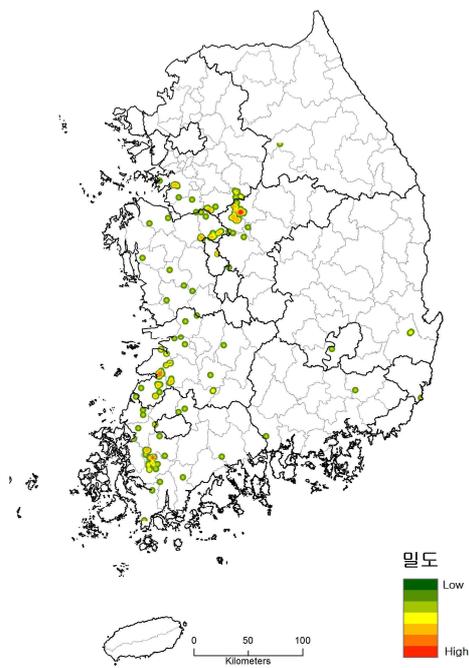


FIGURE 4. HPAI infected farms density

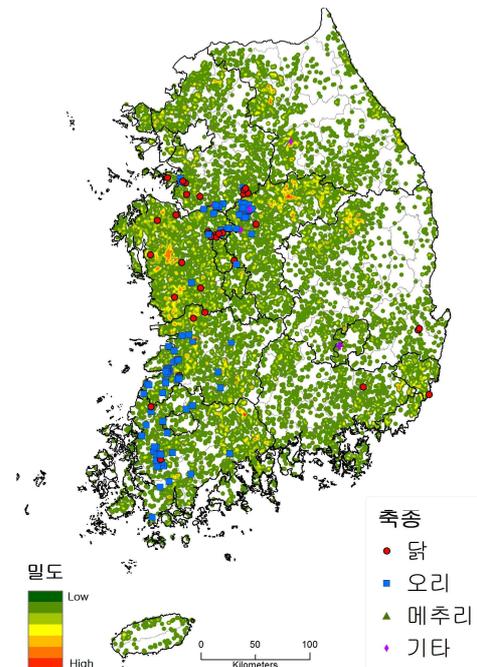


FIGURE 5. HPAI infected farms location and poultry farms density

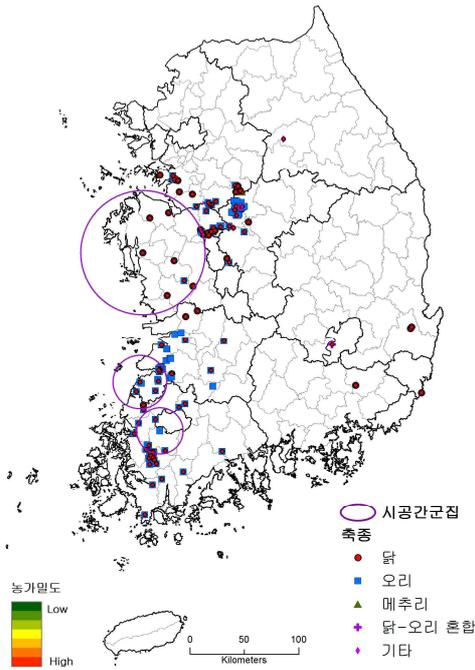


FIGURE 6. HPAI infected farms spatio-temporal cluster: include stamping out farms

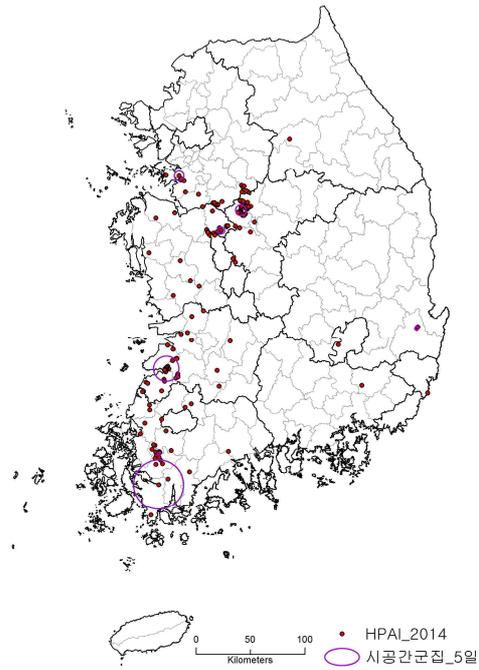


FIGURE 7. HPAI infected farms spatio-temporal cluster: exclude stamping out farms

TABLE 2. HPAI infected farms spatio-temporal cluster: include stamping out farms

Cluster number	Radius (km)	Time frame	Period	No. of outbreaks	Observed-to-expected ratio	P-value
1	24.7	2014/1/20-2014/1/24	5	17	7.31	0.000
2	2.2	2014/2/17-2014/2/19	3	28	6.31	0.000
3	57.1	2014/2/28-2014/3/02	3	3	14.7	0.998
4	21.3	2014/3/13-2014/3/16	4	9	9.8	0.000

TABLE 3. HPAI infected farms spatio-temporal cluster: exclude stamping out farms

Cluster number	Radius (km)	Time frame	Period	No. of outbreaks	Observed-to-expected ratio	P-value
1	11.7	2014/1/17-2014/1/20	4	7	14.57	0.000
2	4.9	2014/2/01-2014/2/02	2	2	34.00	0.925
3	4.4	2014/2/06-2014/2/09	4	3	25.50	0.094
4	23.0	2014/2/11-2014/2/14	4	4	6.80	0.997
5	1.3	2014/2/20-2014/2/20	1	2	25.50	0.986
6	1.7	2014/3/07-2014/3/07	1	2	25.50	0.986
7	3.0	2014/3/17-2014/3/21	5	3	12.75	0.949

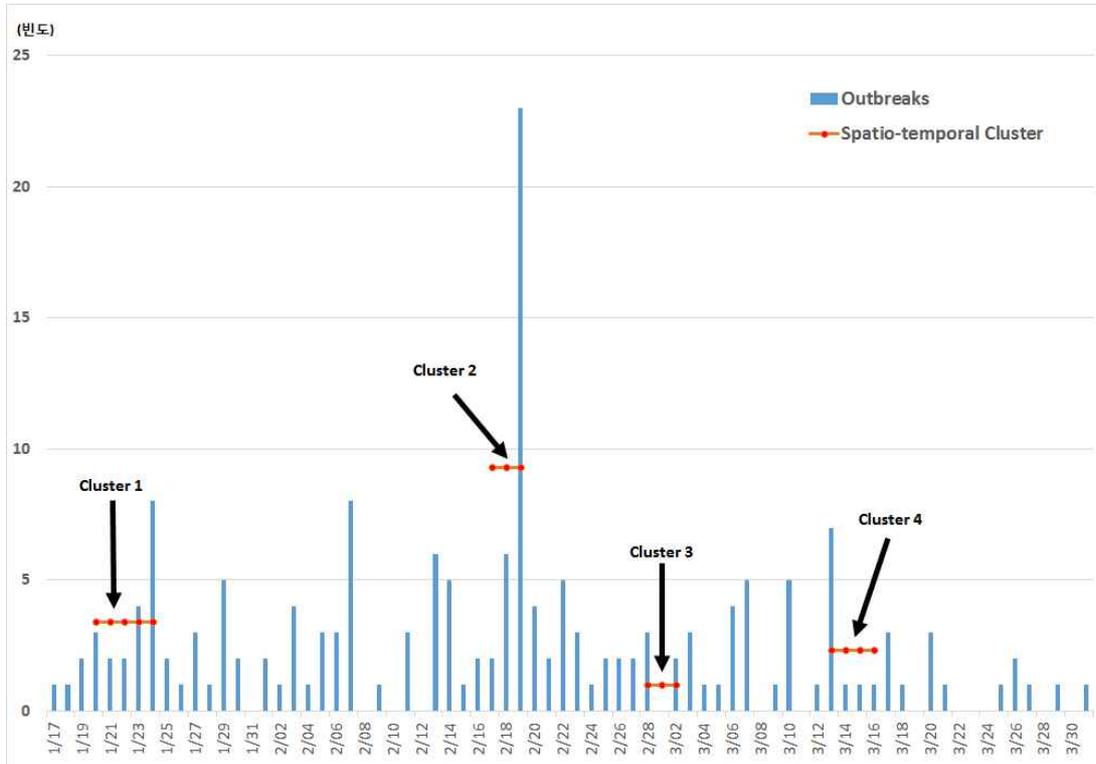


FIGURE 8. Daily number of HPAI infected farms and spatio-temporal clusters

이 형성됨을 확인할 수 있었다. 즉, 시·공간 군집에서도 유의수준을 벗어나는 3번 군집(2014년 2월 28일 ~ 2014년 3월 2일)을 제외하면 모두 세 번의 군집이 시간에 따른 발생빈도 파동의 정점을 전후로 형성되었다(그림 6).

이러한 결과로 볼 때 특정 지역에 바이러스가 유입될 경우 해당 농가에서 질병을 인지하고 신고하는 시점에는 이미 해당 농가의 인접 지역으로 바이러스가 전파되어 확산이 진행되고 있을 가능성이 높다. 그리고 질병의 인지가 늦으면 늦을수록 인접 농가로의 감염 가능성은 높아지고 이와 병행하여 확산 범위 또한 넓어진다.

4. 예방적 살처분 농가를 제외한 시·공간 군집 분석

전염성이 강한 동물 질병은 초기 대응이 중

요하다. 현재 가장 일반적으로 수행되고 있는 초기 대응 방법은 HPAI가 특정 농가에서 발생하였을 때 해당 농가로부터 일정한 반경 내에 위치한 농가의 가금류 전체에 대한 살처분 시행이다. 그러나 이와 같은 일괄 살처분 방법에 대하여 해당 농민과 동물보호단체 등이 지속적으로 문제를 제기하고 있는 상황이다. 따라서 현행 방역 제도의 개선 또는 농민 및 이해 관계자들의 반발을 최소화하기 위해서는 현재 인접 농가에 대해 수행하는 예방적 일괄 살처분 방법의 효과를 객관적으로 검증하여야 할 필요성이 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 살처분 농가가 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대하여 각각 HPAI 시·공간 군집 분석을 수행한 후 비교함으로써, 현재의 일괄 살처분 방법이 인접 농가로의 확산 방역에 효과를 보이는가를 분석하였다.

예방적 살처분은 HPAI의 인접 확산을 막기 위해 최초 신고 농가를 중심으로 일정 반경이 내에 위치하는 주변 농가들에 대하여 일괄적으로 수행된다. 그리고 이 과정에서 예방적 살처분이 수행되는 인접 농가들에 대한 HPAI 검사를 수행함으로써 HPAI의 인접 확산 정도를 함께 분석하고 있으며, HPAI 검사 결과에서 양성 반응을 보인 농가 정보도 HPAI 발생 농가 목록에 포함되어 있다. 따라서 최초 신고 농가와 인접한 농가들에 대하여 수행되는 예방적 살처분이 인접 전파 차단에 효과적이거나에 대한 분석을 위하여 본 연구에서는 예방적 살처분이 수행된 농가를 제외한 시공간 분석을 수행하였다. 만약, 예방적 살처분이 효과가 없다면 예방적 살처분이 수행된 농가를 제외한 분석에서도 시공간 군집이 형성되어야 한다.

분석 결과 예방적 살처분 농가를 제외한 시·공간 군집 분석에서도 전체 HPAI 발생 농가를 대상으로 한 분석과 유사한 결과가 나왔다. 즉, 시간적 범위가 5일을 넘어서면 군집이 안정화 되는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 시간적 범위로 볼 때는 전체 HPAI 발생 농가를 대상으로 한 분석에서와 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 시·공간 군집이 형성되는 지역에 있어서는 전체 농가를 대상으로 하였을 때와 유사한 경향을 보이지만, 군집의 반경은 매우 작게 나타났다(그림 7, 8, 표 2, 3). 또한 대부분의 군집에서 통계적인 유의수준($P < 0.1$)을 충족시키지 못하였다. 즉, 군집은 형성되었지만 통계적으로는 신뢰도가 낮음을 의미한다. 이러한 결과는 현재 수행중인 예방적 살처분의 방법과 범위가 HPAI의 방역에 일정 부분 기여하고 있음을 의미한다.

결론

시·공간검색통계 방식은 전통적인 GIS 기반의 공간분석 방법에 시간이라는 요소를 추가하여 군집이 형성된 지역을 찾고 그 결과를 통계적으로 검증하는 방법이다. 그리고 그 결과는 지도를 통하여 시각화됨으로써 의사결정에 도

움을 주게 된다. 즉, GIS 기반의 공간통계 방식에 시간이라는 요소를 추가적으로 고려한 방법이다.

2014년에 발생한 HPAI는 인접 전파에 의한 것과 원거리 전파에 의한 것으로 구분할 수 있다. 철새와 차량 등에 의하여 원거리에서 HPAI가 유입되면 인접 전파를 통하여 주변지역으로 확산된다. 그리고 인접 전파의 경우 초기 대응에 실패하면 주변으로 확산되면서 시·공간 군집을 형성하게 된다. 2014년 발생한 HPAI의 시·공간 군집분석 결과에 의하면 발생 농가 주변 지역을 대상으로 수행되는 예방적 살처분 방법이 HPAI의 인접 전파 차단에 효과적이었다. 그리고 2014년 HPAI 발생 농가 전체를 대상으로 시간적 범위를 점차적으로 증가시키면서 시·공간 군집 분석을 수행한 결과 전체적인 경향에서는 시간적 범위 5일 이후에는 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 2014년에 발생한 HPAI의 경우 최초 신고 후 5일까지는 인접지역으로의 바이러스 확산이 진행되지만, 5일 이후에는 예방적 살처분 등 방역활동으로 인하여 바이러스의 확산이 차단되었다고 볼 수 있다. 그러나 지역에 따라서는 현재의 차단 방역 체계나 농가의 방역 활동 등에 개선이 필요한 것으로 나타났다. 특히, 주요 철새 도래지역이 아닌 경기도·충청북도·충청남도 등이 서로 인접하고 있는 지역에서는 HPAI의 발생빈도가 매우 높지만, 시·공간 군집은 형성되지 않고 있다. 이는 이들 지역의 방역 체계에 문제가 있음을 의미한다. 즉, 이 지역은 장기간에 걸쳐 지속적으로 바이러스가 유입되었으며, 이렇게 유입되는 바이러스는 효과적으로 차단되지 못하고 이 일대의 농가들을 장기간에 걸쳐 지속적으로 오염시키고 있음을 의미한다. 이러한 현상은 2010-11년 HPAI에서도 유사하게 나타났다. 따라서 이들 지역은 방역이 취약한 원인을 추가적으로 조사하여 보완책을 수립할 필요가 있다.

그러나 본 연구에서는 현실적으로 시·공간 군집에 영향을 줄 수 있는 도로망, 토지이용, 철새도래지와 거리 등 다양한 요인에 대한

분석이 함께 수행되지 못하였다는 한계가 있다. 또한 시·공간 군집이 발생한 지역과 그렇지 않은 지역에 대한 객관적이고 체계적인 분석 작업이 병행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2014년 농림축산식품부 가축질병 대응기술개발사업의 “살처분·이동통제 범위 등에 대한 오리, 닭 등 품목별 현 국가 예찰 및 방역시스템의 평가와 개선방안 연구(과제번호: 314005-2)”에 의해 수행되었음. 

REFERENCES

- Ahmed, S.S., A.K. Ersbøll, P.K. Biswas, J.P. Christensen and N. Toft. 2011. Spatio-temporal magnitude and direction of highly pathogenic avian influenza (H5N1) outbreaks in Bangladesh. *PLoS One* 6(9):e24324.
- Alexandersen, S., Z. Zhang, A.I. Donaldson and A.J. Garland. 2003. The pathogenesis and diagnosis of foot-and-mouth disease. *Journal of Comparative Pathology* 129:1-36.
- Alkhamis, M.A., A.M. Perez, H. Yadin and N.J. Knowles. 2009. Temporospatial clustering of foot-and-mouth disease outbreaks in Israel and Palestine, 2006-2007. *Transboundary and Emerging Diseases* 56:99-107.
- Bae S.H., Y.K. Sin, B.H. Kim and S.I. Pak. 2013. Temporospatial clustering analysis of foot-and-mouth disease transmission in South Korea, 2010~2011. *Journal of Veterinary Science* 53(1):49-54 (배선학, 신연경, 김병환, 박선일. 2013. 시공간 클러스터링 분석을 이용한 2010~2011 국내 발생 구제역 전파양상. *대한수의학회지* 53(1): 49-54).
- Carpenter, T.E. 2001. Methods to investigate spatial and temporal clustering in veterinary epidemiology. *Preventive Veterinary Medicine* 48:303-320.
- Carpenter, T.E., 2011. Stochastic, spatially-explicit epidemic models. *Revue Scientifique et Technique* 30:417-424.
- Ekong, P.S., E. Ducheyne, T.E. Carpenter, O.A. Owolodun, A.T. Oladokun, L.H. Lombin and D. Berkvens. 2012. Spatio-temporal epidemiology of highly pathogenic avian influenza(H5N1) outbreaks in Nigeria, 2006-2008. *Preventive Veterinary Medicine* 103(2): 170-177.
- Gang, H.J. 2008. Hot spot analysis. *The Korea Spatial Planning Review* 324:116-121 (강호제. 2008. 핫스팟 분석기법(Hot Spot Analysis): 공간분석의 기초, 최근린군집분석과 국지모란지수의 이해와 활용. *국토연구* 324:116-121).
- Kulldorff M. and N. Nagarwalla. 1995. Spatial disease clusters: detection and inference. *Statistics in Medicine* 14: 799-810.
- Kulldorff M., R. Heffernan, J. Hartman, R. Assunção and F. Mostashari. 2005. A space-time permutation scan statistic for disease outbreak detection. *PLoS Medicine* 2(3):216-224.
- Minh, P.Q., R.S. Morris, B. Schauer, M. Stevenson, J. Benschop, H.V. Nam and R. Jackson. 2009. Spatio-temporal epidemiology of highly pathogenic avian influenza outbreaks in the two deltas of

- Vietnam during 2003-2007. *Preventive Veterinary Medicine* 89(1):16-24.
- Park, S.I. and S.H. Bae. 2012. A space-time cluster of foot-and-mouth disease outbreaks in south Korea, 2010~2011. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* 14(4):464-472 (박선일, 배선학. 2012. 구제역의 시·공간 군집 분석 -2010~2011 한국에서 발생한 구제역을 사례로-. *한국지리학회지* 14(4):464-472).
- Verhagen, J.H., S. Herfst and R.A. Fouchier. 2015. Infectious disease, how a virus travels the world. *Science* 347(6222):616-617.
- <http://www.qia.go.kr> (Animal and Plant Quarantine Agency, 농림축산검역본부).
- <http://www.satscan.org> (SatScan). 