# 시스템다이나믹스를 이용한 철새의 AI 전파 모델

## Modeling the Dynamics of Wildbird's Avian Influenza Using the System Dynamics

박영욱, 원동규*, 최성배**
KISTI, KISTI*, KISTI**

Park Young-wook, Won Dong-gyu*,
Choi Sung-Bae**
KISTI, KISTI*, KISTI**

요약

조류인플루엔자는 닭이나 오리와 같은 가금류 또는 야생조류에서 생기는 바이러스의 하나로, 농장에 큰 피해를 줄 뿐 아니라 인체에 치명적 영향을 줄 수 있다. 특히 조류인플루엔자의 주요 발생원이 철새로 추정되는 상황에서 이에 대한 예찰활동은 중요하다. 철새가 텃새에게 조류인플루엔자를 전염시키면 이로 인해 국내 가금류에게 2차 전염을 유발할 확률이 높기 때문이다. 따라서 본 연구는 겨울철 국내에 유입되는 철새의 AI 전파 현상을 시스템다이나믹스를 이용하여 모델링함으로써 예찰활동에 대한 시사점을 도출하였다.

Abstract

Avian Influenza is an infectious desease of birds. The infection can cause a wide spectrum of symptoms in birds, ranging from mild illness to a rapidly fatal diseases which might bring a tremendous economic loss to poultry farms[1]. It can also give fatal diseases to human. Therefore it is important to surveil wildbirds that are primary transportation of avian influenza. This report showed a relationship between avian influenza and a habitat of wildbirds using system dynamics, and concluded with suggestion for surveilance.

## Ⅰ. 서론

조류인플루엔자(Avian Influenza, AI)는 2003년 말부터 아시아 지역을 시작으로 전 세계적으로 급속하게 퍼진 전염병으로서 사회적 재난으로 인식될 정도로 파급효과가 크다. 우리나라에서도 2003년 발생한 이래 연평균 9~10회 발생하였고, 2008년에는 33건이 발생하였다. AI는 가금류 농장에 심각한 경제적 피해를 줄 뿐 아니라, 사람도 감염될 수 있는 위험이 있다. 1997년에 홍콩에서 인체감염을 일으켜 감염자 18명 중 6명이 사망하였고, 2006년 7월에는 전 세계적으로 229명이 감염되어 그 중 131명이 사망한 사례가 있다[2].

AI는 사람 간에 감염은 되지 않고, 주로 닭이나 오리 등의 가금류와 밀접하게 접촉할 경우에 발병하는 것으로 나타난다. AI는 바이러스에 감염된 조류의 콧물, 호흡기 분비물, 분변에 접촉한 조류들이 다시 감염되는 형태로 전파되며 비병원성, 저병원성 및 고병원성으로 구분된다. 이 중 고병원성 AI(HPAI)는 닭이나 칠면조에서 급성으로 경과하면서 100%에 가까운 높은 폐사율을 나타내기 때문에 국제수역사무국에서 관리대상 질병으로 분류하고 있으며, 우리나라에서도 제1종 법정 전염병으로 지정하여 관리하고 있다[3].

AI가 주는 피해를 최소화하기 위해서는 발생 시 신속한 검역활동을 수행하는 것이 중요한데, 다행히 우리나라는 체계적으로 역학조사를 실시하고, 효율적인 방역계획을 수립함으로써 세계에서 모범 국가로 평가받고 있다. 따라서 향후에는 AI의 발생을 예방하는 보다 적극적인 예찰활동을 수행할 필요가 있다.

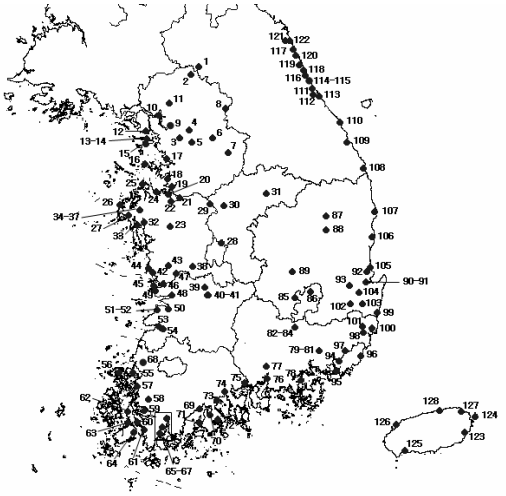
아직까지는 AI가 사육하는 닭이나 오리에게서 자연발생한 사례가 없다. 단지 세계적으로 겨울철새들이 AI 전파에 중요한 역할을 하는 것으로 추정하고 있다[4].

겨울철새는 AI의 자연 병원소로서 감염이 되어도 증상이 약하거나 없는 경우가 많지만, 철새들의 저병원성 바이러스가 닭이나 오리와 같은 가금류에 옮겨졌을 때에는 고병원성을 보일 수 있다. 그러므로 AI 발병률이 높은 겨울철새를 집중 관찰한다면 AI에 대한 피해를 방지하거나 그 규모를 줄일 수 있다. 그러한 관점에서 본 논문에서는 겨울철새의 AI 전파를 시스템다이나믹스를 이용하여 모델링하였다. 이를 위해 먼저 겨울철새의 서식지를 분석하였다. 그것은 AI의 예찰 활동이 철새의 서식지 중심으로 이루어지기 때문이다.

겨울철새의 종류 및 개체수가 다르므로 서식지별로 AI 발생 확률은 다르다. 만약 AI 발생 확률이 높은 지역을 알아낼 수 있다면 예찰 활동이 더욱 효과적일 것이다. 이를 위해 철새와 가금류 사이의 매개체로 텃새를 주목하였다. 따라서 모델링 시 주요한 가정 중의 하나는, AI의 전파 경로가 겨울철새에서 텃새, 텃새에서 가금류로 연결된다는 것이다.

## Ⅱ. 겨울철새의 서식지 분석

겨울철새의 서식지는 국립환경과학원에서 매년 조사하는 '겨울철 조류 동시 센서스' 자료[5]를 참조하였다. 2007년 자료에 따르면, 한 해 동안 약 160만 마리의 겨울철새가 한반도에 도래하는데, 이 중 상당수는 호수와 평야 지대보다는 금강, 한강, 낙동강 등 주로 강에 분포하는 걸로 나타났다. 총 128개 조사 지역 중 금강이 전체 개체수의 58%를 차지하였다.



▶▶ 그림 1. 한반도 겨울철새 도래지역

〈그림 1〉은 겨울철새의 서식지를 표현한 것이다. 그림의 번호는 〈표 1〉의 것과 일치한다. 〈표 1〉은 서식지별 조류 현황을 정리한 것이다.

표 1. 서식지별 겨울철새 현황

| 번호 | 서식지 | 환경 | 예찰대상 철새 수 | 예찰대상 텃새 수 | 전체 조류 수 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 철원평야 A,B | 평야 | 3,464 | 547 | 5,176 |
| 2 | 연천 | 평야 | 12,440 | 979 | 13,535 |
| 3 | 성산대교-팔당댐 | 강 | 8,989 | 561 | 10,455 |
| 4 | 중랑천 | 강 | 6,436 | 71 | 6,748 |
| 5 | 탄천 | 강 | 2,828 | 210 | 3,238 |
| 6 | 팔당호(경안천포함) | 호수 | 1,330 | 62 | 1,559 |
| 7 | 남한강(양평, 여주) | 강 | 729 | 31 | 778 |
| (중략) | | | | | |
| 125 | 서귀-안덕 해안 | 해안 | 366 | 609 | 2,062 |
| 126 | 제주시-대정 해안 | 해안 | 2,961 | 379 | 7,759 |
| 127 | 하도리 | 만 | 2,925 | 254 | 3,252 |
| 128 | 함덕-하도 해안 | 해안 | 946 | 134 | 1,682 |

〈표 1〉에서 예찰대상 철새란, AI 감염 시 폐사 여부, 인간의 생활지 인근 서식 여부, 군집성 등을 고려하여 선정된 겨울철새로 청둥오리, 쇠오리, 넓적부리 등 31종이 있다[6]. '예찰대상 철새'를 고려한 이유는 AI에 대한 병원성이 철새마다 다르기 때문이다. 마찬가지로 '예찰대상 텃새'를 별도로 구분하였다. 예찰대상 텃새는, 서식지가 인간의 생활지역, 가금류 농장, 철새 서식지 부근인 정주성 조류 중 우선조사 조류종으로 해오라기, 참새, 원앙, 어치 등 13종이 있다[7]. 〈표 1〉에서 전체 개체수가 예찰대상 철새와 예찰대상 텃새의 합보다 큰 이유는 예찰대상에 포함되지 않는 겨울철새와 텃새가 존재하기 때문이다.

시스템다이나믹스에 서식지별 조류 분포의 특성을 반영하기 위해 〈표 1〉의 수치를 전국 비율로 변환하였다. 예를 들면, 한반도의 전체 조류 수가 약 160만 마리이므로, 철원평야에 서식하는 조류 비율은 0.32%이다. 이와 같은 방식으로 전체 128개의 철새 서식지를 〈표 2〉에 정리하였다.

표 2. 서식지별 겨울철새 비율(%)

| 번호 | 서식지 | 예찰대상 철새 | 예찰대상 텃새 | 전체 조류 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 철원평야 A,B | 0.23 | 1.94 | 0.32 |
| 2 | 연천 | 0.84 | 3.47 | 0.85 |
| 3 | 성산대교-팔당댐 | 0.61 | 1.99 | 0.65 |
| 4 | 중랑천 | 0.43 | 0.25 | 0.42 |
| 5 | 탄천 | 0.19 | 0.74 | 0.20 |
| 6 | 팔당호(경안천포함) | 0.09 | 0.22 | 0.10 |
| 7 | 남한강(양평, 여주) | 0.05 | 0.11 | 0.05 |
| (중략) | | | | |
| 125 | 서귀-안덕 해안 | 0.02 | 2.16 | 0.13 |
| 126 | 제주시-대정 해안 | 0.20 | 1.34 | 0.49 |
| 127 | 하도리 | 0.20 | 0.90 | 0.20 |
| 128 | 함덕-하도 해안 | 0.06 | 0.48 | 0.11 |

## Ⅲ. 겨울철새의 AI 전파 모델

### 1. 모델링

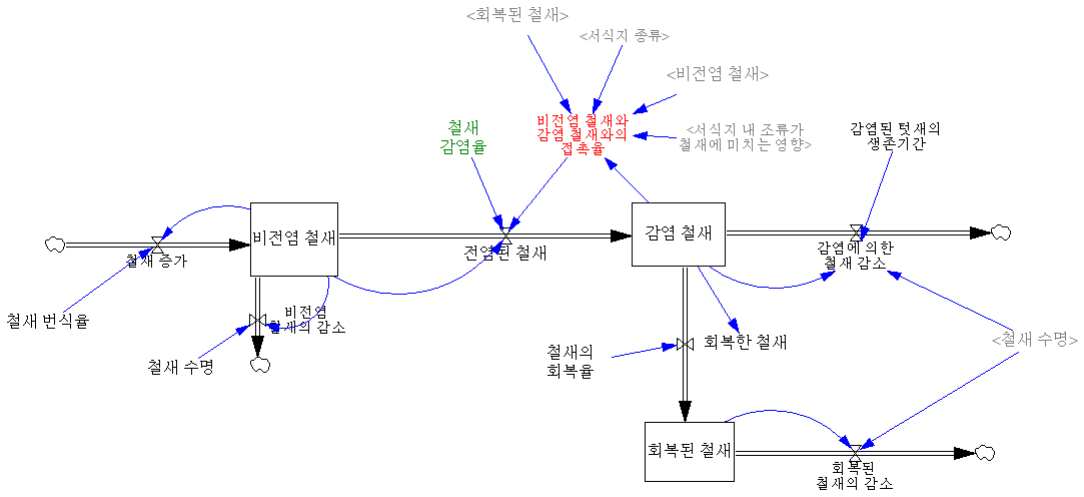
겨울철새의 AI 전파를 모델링하기 위하여 '시스템다이나믹스(SD)'라는 시뮬레이션 방법을 적용하였다. SD는 1950년 대에 미국 MIT의 포레스터 교수가 발명한 것으로, 구성원 간에 미치는 영향 결과를 예측하기 위한 것이다[8]. AI의 전파 특성이 복잡하고, 비선형적이며 동적인 양상을 보이므로 SD가 이런 AI 특성을 모델링하기에 적합하다.

모델에 사용한 철새와 텃새는 모두 예찰대상 철새와 예찰대상 텃새를 가리키며, 전형적인 전염병의 전파 형태인 S(Susceptible)-I(Infectious)-R(Recovery) 방식을 적용하였다. AI 전파 모델의 전체 구조에서 예찰대상 철새와 예찰대상 텃새를 구분하였으며, 여기에 사용된 주요 변수는 〈표 3〉에 정리하였다. '비전염 철새(S)'는 아직 AI에 감염되지 않은 철새이며, '감염된 철새(I)'는 AI에 감염된 철새를 말하며, '회복된 철새(R)'는 AI 감염에서 회복한 철새를 의미한다.

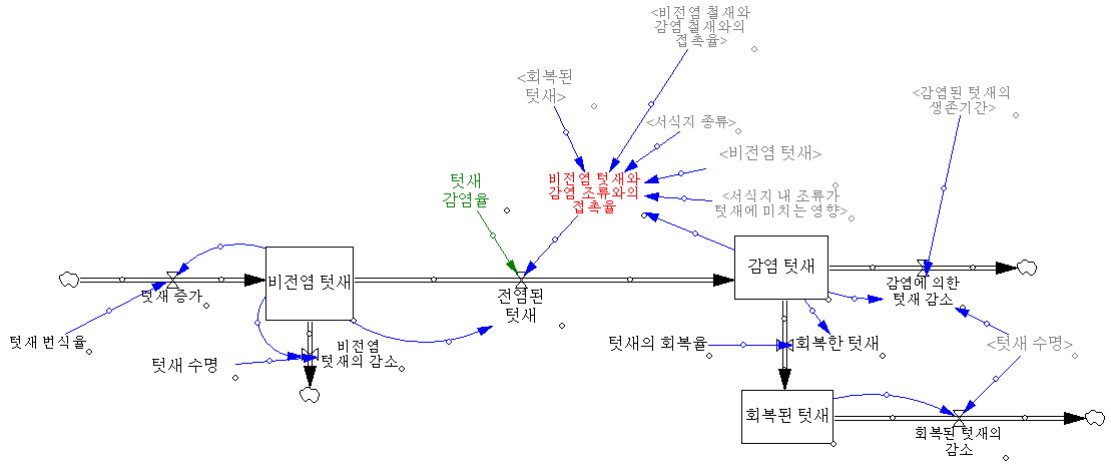
표 3. 주요 변수

| 변수명 | 관계식 |
|---|---|
| 비전염 철새 | INTEG (철새 증가-비전염 철새의 감소-전염된 철새, 12640)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 감염 철새 | INTEG (전염된 철새-감염에 의한 철새 감소-회복한 철새, 1)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 회복된 철새 | INTEG (회복한 철새-회복된 철새의 감소, 0)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 철새 증가 | 비전염 철새*철새 번식율 |
| 철새 번식율 | 0.005 ※ 하루 동안의 번식율 |
| 철새 수명 | 3650 day ※기러기의 기대수명 10년 |
| 비전염 철새의 감소 | 비전염 철새 / 철새 수명<br>※ 하루 동안 감소하는 철새 수 |
| 전염된 철새 | 20*비전염 철새와 감염 조류와의 접촉율*철새 감염율*비전염 철새<br>※ 숫자는 보상 상수 |
| 철새 감염율 | 0.015 |
| 비전염 철새와 감염 철새와의 접촉율 | 감염 철새/(비전염 철새+감염 철새+회복된 철새)*서식지 종류<br>+서식지주변 조류가 철새에 미치는 영향 |
| 서식지 종류 | 1 ※평야, 강, 만, 호수, 저수지, 해안 |
| 서식지 내 조류가 철새에 미치는 영향 | 0.0014 ※ 입력값 |
| 회복한 철새 | 감염 철새*철새의 회복율 |
| 철새의 회복율 | 0.1 |
| 감염에 의한 철새 감소 | 감염 철새/감염된 철새의 생존기간+감염 철새/철새 수명 |
| 감염된 철새의 생존기간 | 8 |
| 회복된 철새의 감소 | 회복된 철새/철새 수명 |
| 비전염 텃새 | INTEG (텃새 증가-비전염 텃새의 감소-전염된 텃새, 979)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 감염 텃새 | INTEG (전염된 텃새-감염에 의한 텃새 감소-회복한 텃새, 0)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 회복된 텃새 | INTEG (회복한 텃새-회복된 텃새의 감소, 0)<br>※ 괄호 안의 숫자는 최초 개체 수 |
| 텃새 증가 | 비전염 텃새*텃새 번식율 |
| 텃새 번식율 | 0.002 ※ 하루 동안의 번식율 |
| 텃새 수명 | 2920 day ※ 까치의 기대수명 8년 |
| 비전염 텃새의 감소 | 비전염 텃새 / 텃새 수명<br>※ 하루 동안 감소하는 텃새 수 |
| 전염된 텃새 | 10*비전염 텃새와 감염 조류와의 접촉율*텃새 감염율*비전염 텃새<br>※ 숫자는 보상 상수 |
| 텃새 감염율 | 0.010 |
| 비전염 텃새와 감염 텃새와의 | 감염 텃새/(비전염 텃새+감염 텃새+회복된 텃새)*서식지 종류 |

| | |
|---|---|
| 접촉율 | +서식지주변 조류가 텃새에 미치는 영향 |
| 서식지 내 조류가 텃새에 미치는 영향 | 0.0019 ※ 입력값 |
| 회복한 텃새 | 감염 텃새*텃새의 회복율 |
| 텃새의 회복율 | 0.1 |
| 감염에 의한 텃새 감소 | 감염 텃새/감염된 텃새의 생존기간+감염 텃새/텃새 수명 |
| 감염된 텃새의 생존기간 | 8 |
| 회복된 텃새의 감소 | 회복된 텃새/텃새 수명 |




▶▶ 그림 2. 철새의 AI 전파 모델



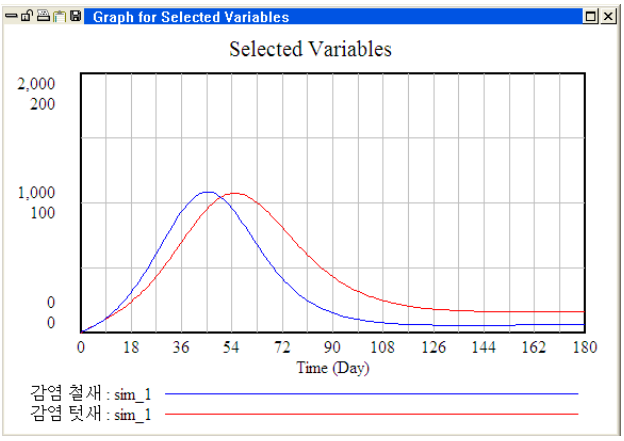

▶▶ 그림 3. 텃새의 AI 전파 모델

조류의 번식률과 수명은, 철새의 경우 기러기를, 텃새는 까치의 것을 적용하였다. 서식지마다 철새(텃새)의 개체 수, 전체 조류 수가 다른 특성을 반영하기 위해 비전염 철새(텃새)의 초기값과 서식지 내 조류가 철새(텃새)에 미치는 영향을 입력값으로 두었다.

## 2. 시뮬레이션 결과

〈그림 2〉와 〈그림 3〉과 같이 모델링한 후 전체 128개 서식지별 철새의 AI 전파 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 철새 무리에 AI에 감염된 한 마리가 존재할 때 일정 시간 경과 후 감염된 철새 수가 최고치를 기록했다가 서서히 줄어드는 양상을 보인다. 이에 따른 영향으로 감염된 텃새 수도 비슷한 현상을 나타내는데, 단지 정점을 찍기까지의 기간과 그때의 개체 수가 다를 뿐이다.

〈그림 4〉는 낙동강 하류 지역 철새에 대한 AI 시뮬레이션 결과다. AI 최초 발생 후 철새는 45일 경과 후 최대 1,083마리가 감염되고, 55일이 지나면 107마리의 텃새가 감염되는 것으로 나타났다.




▶▶ 그림 4. 시뮬레이션 결과(낙동강 하류)

AI에 감염된 철새가 서식지가 동일한 텃새를 감염시킨다면 그 비율만큼 인근 농장에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 〈표 4〉는 감염된 텃새 수가 많은 순서대로 상위 20개 지역을 나열한 것이다. 낙동강 하류 지역이 107마리로 제일 많이 나타났으며, 그 뒤를 낙동강 하구(48마리), 구미의 해평(42마리)이다.

〈표 4〉에서 낙동강 하류와 하구, 구미 해평, 한강 하구, 주남저수지, 임진강, 강화도 등 7개 지역은 2009년도 AI 예찰 대상 철새 서식지이다[9]. 시뮬레이션 결과를 상위 50위(128개 서식지의 40%)까지 확대하면 AI 예찰 대상 철새 서식지가 19개(41개의 46%) 존재하므로 본 모델링이 타당한 것으로 판단된다.

표 4. AI 감염 철새 및 텃새 개체 수

| 순위 | 지역 | 철새 | | 텃새 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 감염 (마리) | 경과 (일) | 감염 (마리) | 경과 (일) |
| 1 | 낙동강하류 | 1083 | 45 | 107 | 55 |
| 2 | 낙동강하구 | 2979 | 44 | 48 | 54 |
| 3 | 구미 해평(도흥리-일선교) | 450 | 56 | 42 | 66 |
| 4 | 연천 | 1047 | 53 | 40 | 67 |
| 5 | 충주호 | 201 | 58 | 40 | 68 |
| 6 | 대호지 | 1203 | 53 | 36 | 63 |
| 7 | 한강 하구,김포 홍도평야 | 5117 | 41 | 27 | 51 |
| 8 | 남양호 | 2717 | 47 | 25 | 57 |
| 9 | 주남저수지 | 521 | 59 | 25 | 69 |
| 10 | 산남저수지 | 39 | 59 | 25 | 69 |
| 11 | 대부도 | 296 | 62 | 23 | 72 |
| 12 | 서귀-안덕 해안 | 27 | 56 | 23 | 66 |
| 13 | 성산대교-팔당댐 | 724 | 59 | 22 | 69 |
| 14 | 부남호 | 957 | 58 | 22 | 68 |
| 15 | 철원평야 | 274 | 64 | 21 | 74 |
| 16 | 임진강 | 1963 | 51 | 20 | 61 |
| 17 | 강화도 | 483 | 62 | 19 | 72 |
| 18 | 군내간척지 | 86 | 65 | 19 | 76 |
| 19 | 해창만간척지 | 33 | 59 | 17 | 69 |
| 20 | 석문간척지 | 1058 | 58 | 16 | 68 |

# Ⅳ. 결론

조류인플루엔자(AI)는 발생 시 일어날 수 있는 문제로 인해 전 세계적으로 집중 관리할 전염병이다. 지금까지 AI는 가금류 내에서 자체로 발생하기 보다는 철새에서 발병하여 인근 농장에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 철새에 대한 예찰 활동이 AI 발생으로 인한 피해를 최소화할 수 있는 것으로 판단된다. 그런 점에

서 본 논문에서 구현한 철새의 AI 전파 모델링은 의미가 있다.

시뮬레이션에서 AI에 감염된 한 마리의 철새가 존재하면 감염 개체 수는 시간에 따라 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 주변 텃새에도 비슷한 영향을 주는 것으로 보였다. 감염된 텃새 수에 따른 서식지 위험도를 분석한 결과를 올해 초 농림수산식품부에서 지정한 AI 예찰 대상 철새 서식지와 비교했을 때, 상관관계를 보였다. 따라서 완전하지는 않지만, 모델링에 대한 타당성이 입증된 것으로 판단된다.

위험도 상위 지역은 예찰 활동 시 특히 유념해야 한다. 낙동강, 구미 해평, 연천, 충주호 등이 여기에 포함된다. 전국 128개 철새 서식지 중 위험도 상위 지역 중심으로 AI 예찰 활동을 하는 것이 보다 효과적일 것으로 예측된다.

모델링은 정교해질수록 그 결과도 현실을 100%에 가깝게 묘사한다. 본 철새의 AI 모델링이 더욱 정교해지기 위해서는 변수의 재정립, 입력값에 대한 조정이 필요하다. 향후에는 본 모델에서 적용하지 않은 서식지 주변 환경(논, 밭, 가금류 농장 등)이나 조류의 밀도 정보를 고려하고, 아울러 겨울철새의 서식지 분석을 매년 수행하는 조류 동시 센서스 조사와 연계한다면 철새의 AI 전파 모델이 더욱 정교해질 것으로 예상한다.

## ■ 참 고 문 헌 ■


[1] http://www.who.int/topics/avian_influenza/en/

[2] 원종석 "도시형조류인플루엔자(AI)의 서울시 대응체계 확립방안, 서울시정개발연구원 2008 보고서

[3] 국립수의과학검역원 “08. 고병원성 조류인플루엔자 역학보고서”, 2008.9

[4] 이상진, "Epidemiology of 2008 HPAI outbreaks in Korea and migratory birds" KISTI 특강자료, 2009.2

[5] 국립환경과학원 “2007년도 겨울철 조류 동시 센서스”, 2007

[6] 국립수의과학검역원 “07. 고병원성 조류인플루엔자 역학보고서”, 2007.6

[7] 유병호 외, “야생동물 전염성 질병연구”, 국립환경과학원, 2007

[8] Andrei 외, "From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling:Reasons, Techniques, Tools", 22th Conference of System Dynamics, 2004.7

[9] 2009년도 AI 예찰 세부계획, 농림수산식품부, 2009.1