행위자 기반 공간 모델을 이용한 구제역 확산 시뮬레이션

Foot-and-mouth disease spread simulation using agent-based spatial model

Ariuntsetseg, E¹⁾ · 염재홍²⁾
Ariuntsetseg Enkhbaatar · Yom, Jae-Hong

Abstract

Epidemiological models on disease spread attempt to simulate disease transmission and associated control processes and such models contribute to greater understanding of disease spatial diffusion through of individual's contacts. The objective of this study is to develop an agent-based modeling(ABM) approach that integrates geographic information systems(GIS) to simulate the spread of FMD in spatial environment. This model considered three elements: population, time and space, and assumed that the disease would be transmitted between farms via vehicle along the roads. The model is implemented using FMD outbreak data in Andong city of South Korea in 2010 as a case study. In the model, FMD is described with the mathematical model of transmission probability, the distance of the two individuals, latent period, and other parameters. The results show that the GIS-agent based model designed for this study can be easily customized to study the spread dynamics of FMD by adjusting the disease parameters. In addition, the proposed model is used to measure the effectiveness of different control strategies to intervene the FMD spread.

Keywords : Agent-based model, GIS, Epidemiological model, Foot-and-mouth disease

초 록

역학 모델은 질병 확산에 대한 시뮬레이션 및 관련 방역대책을 수립하는데 유용하며, 개체들의 접촉을 통해 전파되는 질병의 공간 확산에 대한 자세한 이해를 가능하게 한다. 이 연구에서는 공간에서 개체 간의 상호작용에 의한 결과로 구제역 전염병의 확산을 시뮬레이션하기 위해 GIS와 통합된 행위자 기반 공간 모델을 제안하고자 한다. 설계된 모델은 모집단, 시간, 공간이라는 세 요소를 고려하여 축산장 간의 간접접촉을 묘사하였다. 모집단의 역학 관계는 2010년 경상북도 안동시에서 발생한 구제역 사례를 기준으로 하였으며, 도로를 주행하는 차량에 의한 간접 접촉으로 전염병이 전파하는 것으로 설계하였다. 확산 모델은 구제역 전파 확률, 질병에 대한 여러 상태, 질병의 확산 시간, 감염률, 잠복기 및 기타 매개변수 간의 관계를 수식으로 표현하였다. 모델을 이용하여 구제역 발생 상황을 예측하면서 다양한 시나리오를 적용해서 모의실험하였다. 구제역 발생 상황에서 방역 전략을 선정하기 위해 제시된 방법을 이용하여 방역조치를 다양하게 실험하는 것은 구제역 확산을 통제하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

핵심어 : 행위자 기반 모델, GIS, 역학 모델, 구제역

1. 서 론

1.1 연구 배경

공간 역학(spatial epidemiology) 컴퓨터 모델은 여러 가축전염병의 전파에 대한 대처 및 원인 규명을 하는 데 중요한 도구로 사용되고 있다. 구제역은 다른 가축전염병에 비해

1) Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, Korea (E-mail: ariuka@sju.ac.kr)

2) Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, Korea (E-mail: jhyom@sejong.ac.kr)

서 빠르게 전파되기 때문에 가장 심각한 질병으로 간주하며 (Keeling, 2005) 공간 역학적 컴퓨터 모델을 구제역의 확산에 적용하여 더 정확하고 구체적인 이해를 함으로써 피해를 감소시킬 수 있는 연구가 시급하다[Kostova, 2004; Kung, 2009].

일반적으로 역학 모델링(epidemiological modeling)는 접근 방법에 따라 수학적 모델(mathematical model), 셀룰러 오토마타 기반 모델(cellular automaton based model:CA)과 행위자 기반 모델(agent-based model:ABM)로 구분할 수 있다(Kung, 2009). 수학적 모델은 오래전부터 사용되어 온 모델로서 1927년에 W. O. Kermack 과 A.G. McKendrick 이 한정한 전염병 확산에 대해서 수학적으로 묘사한 모델을 처음으로 발표하였으며(Hagenaars, 2011) 이를 발전시켜 모집단의 모든 개체에 대한 질병의 상태(disease state)를 기준으로 SIR (susceptible - infectious - recovered/removed), SEIR (susceptible - exposed - infectious - recovered), 그리고 SER (susceptible-exposed-recovered) 등 세부적인 모델로 표현한다. 그러나 이러한 수학적 모델은 전파의 공간적인 요인과 개체 간의 상호 작용을 고려하지 않은 모델로서 실제 확산 현상과 차이가 크므로 정확도 향상에 대한 필요성이 요구되었다(Kung, 2009).

셀룰러 오토마타 모델은 수학적 모델에 비해서 공간적인 요인을 고려한 발전된 모델이지만(Ko, 2011) 공간상에 개체(individual)들의 이동과 접촉에 대한 요인을 모델링 할 수 없다. 특히 구제역과 같이 전염성이 높은 질병이 있어서는 이동과 접촉이 질병 확산에 중요한 요소이므로 적용할 수 없으며, 이동과 접촉을 고려한 보다 발전된 모델이 필요한데, 행위자 기반 모델로서 이러한 요인을 고려할 수 있다.

행위자 기반 모델은 시스템 내 행위자(가족, 농가, 이동차량 등)의 미시적인 메커니즘에 초점을 맞추어 행위자 간 상호 작용을 모델링하여 전체시스템의 거시적인 행동 패턴을 분석하는 시뮬레이션 모델이다. 행위자 기반 모델은 크게 행위자(agent), 그리고 활동하고 상호작용하는 환경(environment), 행위자가 행동하는 규칙(rule) 등의 세 가지 요소로 구성된다. 행위자 기반 모델링은 이들 요소를 설정하고, 시간에 따라 질병 확산과 같은 현상이 어떻게 발전되는지를 분석하고 예측하는 것이다(Chae, 2007).

1.2 관련 연구 동향

구제역을 통제하기 위한 방역 조치에서부터 방역 전략, 그리고 한 나라의 동물 질병 방역정책을 결정하는 단계까지 역학적 시뮬레이션 모델이 널리 이용되고 있다. 특히 유럽, 미국, 호주에서 구제역에 대한 모델링 방법들이 개발되고 있다

(Bates, 2003; Diggle, 2006; Morris, 2001). 호주(AusSpread), 뉴질랜드(InterSpread Plus), 캐나다 · 미국(North American Animal Disease Spread Model, NAADSM), 미국(DADS)에서 개발된 모델들을 대상으로 실제 또는 가상의 자료를 이용하여 구제역 전파 확산에 대한 역학적 시뮬레이션 모델 연구가 많이 수행되고 있다(Dubé, 2007; Tildesley, 2008). 위의 모델들은 다 지리정보를 이용하는 확률적 모델이지만 실제 공간에서의 발생 양상과 개체 간의 상호작용을 표현하지 않는 한계가 있다.

근래에 행위자 기반 모델은 전염병 확산에 많이 적용되고 있다. Connie Carpenter는 인플루엔자의 발생 상황을 시뮬레이션하기 위해 계절에 따라 인구의 이동과 인플루엔자의 관계를 연구한 multi-agent based model을 제시하였으며(Carpender, 2004), Hongzhong Deng 등은 질병 전파 과정에 대한 multi-agent based simulation을 제안하였다(Deng, 2004). Jianhua Gong 등은 행위자 기반 모델을 사용하여 SARS의 시공간적 확산 행동(behavior)을 모델링 하였으며(Gong, 2003), Liliana Perez 등도 홍역 발생의 사례 연구 결과에 의해 도시 환경에 전염병의 확산을 시뮬레이션하기 위해 행위자 기반 모델을 사용하였다(Perez, 2009). 이 중에서 Jianhua Gong과 Liliana Perez의 개발된 모델들은 실제 지리적 데이터를 사용하지 않는 공간적 모델이며, 개체 간 접촉을 통한 질병의 공간적 확산 양상 과정을 고려하지 않는 한계가 있다.

국내에서 행위자 기반 모델을 전염병 확산에 적용한 연구 사례는 상대적으로 많지 않으며, 조류 인플루엔자에 적용한 사례는 있으나(Yeon, 2011; Lee, 2011; Kim, 2010), 구제역의 질병 확산 모델에 행위자 기반 모델을 적용한 연구는 없는 것으로 조사되었다. 구제역에 대한 피해의 규모와 빠른 전파속도를 고려하면, 구제역 확산에 대해서 공간적인 요인을 고려한 행위자 기반 모델에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

1.3 연구 목적 및 범위

최근 2010년 말에 발생한 구제역이 과거와 다르게 이른 시간에 전국적으로 확산하고, 경제적으로 피해가 컸고 사회문제로 대두하고 있다. 이 연구에서는 최초 구제역 발생 중심으로 확산 특성을 고려해서 전파에 영향을 미친 공간적 요소를 고려하며, 행위자 기반 모델링 기술을 적용한 구제역 확산 시뮬레이션을 위한 공간 역학적 모델을 설계하고 구현하는 데 주요 목적이 있다.

모델을 설계 및 구현하기 위해 구제역 감염의 생물학적 과정(경과 양상)을 묘사하기 위해 먼저 수리학 SIR 모델을 확장시킨 다음 개체 간의 상호작용, 행동을 제시하였으며, 그들의

위치 그리고 행동 및 상호작용하는 환경을 GIS 데이터를 이용하여 모델링하였다. 모델의 구현을 위해 NetLogo 프로그래밍 언어를 사용하여 모델의 그래픽 인터페이스를 제작하였다. 마지막으로 모델의 활용성을 제시하기 위해 모델에 다양한 시나리오를 적용해서 모의실험 수행하고 도출된 결과를 예측하면서 모델의 활용도를 분석하였다. 이 모델에서는 축군 내에서의 동물 개체 간 접촉과 전파양상을 고려하지 않았다.

모델을 구현하기 위해 2010년 말 한국에서 발생한 구제역 사례 데이터를 사용하였으며, 현재 한국에서 시행하고 있는 구제역에 대한 방역체계의 구제역 방제대책을 적용하였다.

2. GIS와 통합 행위자 기반 모델 설계

이 모델에서는 농장 간 구제역 전파 양상 혹은 간접접촉 감염을 고려하였으며, 한국의 기존 구제역 발생 분석 결과(QIA, 2011)에서 도로망을 통한 차량과 농장의 공간적 위치는 농장 간 구제역 전파에 큰 영향을 미친 것으로 발표되어 이 점을 감안하여 모델을 설계하였다.

본 모델은 개체들을 묘사한 행위자, 행위자들이 상호작용하는 환경, 그리고 행위자들의 상호작용, 질병 경과 양상, 행위자의 행동 등을 운영한 규칙으로 구성된다(Fig. 1).

Fig. 1. Agent-based model generic architecture

차량과 농장이 행위자가 되며, 일반적으로 stationary와 mobile이란 두 종류의 행위자로 하며, 차량은 mobile 행위자, 농장이 stationary 행위자가 된다. 모델에서 실제 공간 데이터를 이용해 모델 환경을 생성시켰다. 공간 데이터를 사용하는 것은 현실적인 환경을 설정함으로써, 한편으로는 공간적으로 질병 전파에 영향을 미치는 공간적 요소(위치, 밀도)들을 고려할 수 있고, 다른 한편으로는 행위자의 활동(activity)을 제한할 수 있다.

GIS와 통합된 행위자 기반 모델을 구제역에 적용하기 위해서 먼저 전염병 구제역의 질병 상태와 변수들을 정의하기 위해 일반감염모델을 설계하였다. 즉, 이 부분은 구제역 확산의 생물학적인 과정을 모델링 한다. 그다음에 지역에서 농장 간에 구제역을 전파된 감염 행동(behaviors)과 행위자의 일상 활동을 운영한 규칙(rule)에 대한 행위자 기반 모델을 설계하였다. 마지막으로 설계 및 구현된 모델을 이용하여 구제역 전파에 대한 시뮬레이션을 가상 시나리오로 전개하여 방역 활동에 유용한 정보를 분석하였다.

2.1 수리학 SIR 모델을 확장된 감염모델 설계

전염병의 진행 과정 또는 경과하는 양상은 병리학적인 특성에 따라 SIR, SEIR, SIRS 등, 다양한 모델로 나타낼 수 있지만, 이 실험에서 우제류 동물 구제역 특성을 고려하였으며 확장시킨 감염 모델이 Fig. 2와 같이 구성된다. Fig. 2에서 타원형은 감염 상태를 나타내며 사각형 모양은 방역조치를 의미한다.

Fig. 2. Different states of the epidemic model(Kostova-Vassilevska, 2004)

본 모델에서 구제역 경과 양상은 하루 단위로 전개되고 농장 간 전파를 실험하는 형식으로 구성되었다. 감수성 우제류 동물 가진 농장이 구제역 바이러스에 감염되면 이 농장 개체의 상태는 감수성(susceptible)에서 잠재 감염(latently infected) 상태로 전환된다. 이 상태에서는 아직 다른 개체를 감염시키지 않는다. 잠복기가 지난 다음 바이러스를 배출하게 되면 이때를 감염기(infectious)라고 하는데, 아직 인지할 수 있는 임상증상이 나타나기 전의 시기인 무증상 감염기(subclinically infectious)와 증상을 나타내며 감염성을 가지는 증상 감염기 (clinically infectious)로 구분된다. 살처분된 후에는 제거된 상태 (removed)가 되며, 모델에서 더 이상 고려하지 않는다. 일단 감염성을 가진 개체는 살처분 될 때까지 지속적으로 감염성이 있는 것으로 간주한다. 또한 예방접종을 고려하였으며, 예방접종 후의 개체의 상태가 면역(immune)

상태로 전환된다. 한 농장에서 한 마리라도 감염되면, 이 농장은 감염된 농장으로 간주하며, 무증상 감염기로 넘어가면 감염성 농장으로 간주 된다.

Fig. 2에서 표현된 잠복기(latent period, L_P), 무증상 감염 기간(subclinical period, S_P)이 다음 수식과 같다.

$$L_P = t_i + X_{LP} \quad (1)$$

$$S_P = L_P + X_{SP} \quad (2)$$

여기에서 (t_i)는 감수성 개체가 구제역 바이러스로 감염된 첫날이며, (X_{LP})는 감수성 상태에서 무증상 감염기 상태까지 흐르는 시간, (X_{SP})는 무증상 감염기 상태에서 증상 감염기 상태까지 흐르는 시간을 각각 의미한다.

구제역 양상의 병리학적 과정을 운용하는 규칙에 대한 업무 흐름도는 Fig. 3과 같다. 모델에서 생성된 농장들은 모두 다 감수성 상태가 된다. 먼저 바이러스 원인체를 가진 차량이 도로 따라 이동하면서 어떤 농장과 접촉하게 되며, 감염 접촉 거리를 다음 수식으로 결정된다.

$$A_c = \pi r^2 \quad (3)$$

이 면적은 원인체에서의 감염 반경(infection radius)을 근거하여 설정하였으며, 본 모델에서 감염 반경을 10m 거리를

기준으로 하였다. 정해진 거리 이내에서 접촉하였을 때, 감수성 농장이 질병 바이러스에 감염되고 잠재 감염 상태로 전환한다. 감염된 개체의 경과 양상은 Fig. 3과 같은 순서대로 진행된다.

Fig. 3. Flow diagram representing different infection phases

2.2 GIS 통합 행위자 기반 감염 모델 설계

질병 바이러스에 감염된 개체의 질병이 전파되는 양상을 생물학적 모델이 확립된 후에는 지리적 공간에서 개체들의 접촉과 상호작용에 의한 전파에 대해서 설계를 해야 한다. 그 과정은 Fig. 4와 같다.

이 모델에서는 사료차량만 고려하였으며, 지리공간에서 도로 따라 이동하는 것으로 제안시켰으며 하루 12시간 이동하는 것으로 가정하였다.

Fig. 4. Process of the epidemic spread agent-based model and individuals interaction an environment

Fig. 5. GIS datasets of Andong city

공간에서 개체 간의 접촉이 일어나는 환경을 표현하기 위해 GIS 데이터를 활용하였으며, 전염병의 확산에 미칠 수 있는 공간적 요소로는 농장의 밀집도를 계산하여 이를 확산의 속도와 연관시켜 모델링 하였다. 가축의 사육밀도가 구제역 확산에 영향을 줄 수 있는 주요한 원인 중 하나로 지목되기 때문에, 본 연구에서는 농장의 밀집도를 고려하였다(Kostova, 2004; QIA, 2011). Fig. 5에서와 같이 네 개의 레이어를 사용하였다.

첫 번째 레이어(A)는 해당 지역의 행정구역 경계이며, 폴리곤의 밖으로 나갈 수 없도록 행동을 제한하였다. 두 번째 레이어(B)는 해당 지역에 있는 우제류 동물을 기르는 농장들의 밀도 정보이며, 밀도분석 방법으로는 ArcGIS에서 제공하는 Silverman(1986)의 커널밀도(Kernel Density) 알고리즘을 사용하여 계산하였으며, 구제역 전파 확률을 계산하는데 적용하였다. 세 번째 레이어(C)는 농장 개체로서, 위치정보가 있는 좌표 포인트로 활용하였다. 마지막 레이어(D)는 도로망이며, 한 위치에서 다른 위치로 이동하는 차량의 행동 경로를 결정하는 데 사용하였다.

모델에서 개체 간의 질병 전파요인을 접근 거리와 밀도라는 두 개의 요인을 고려하여 설계하였다. 전파 거리를 3km로 설정하였으며, 감염 확률은 농장의 밀도에 따라 정의되었다. 감염 확률을 기초 감염 재생산율(reproductive ratio, R)로 정의해 주었으며, 기초감염 재생산율은 집단 내 전염병 감염 개체에서 다른 개체로 전파되는 수를 의미한다. 계산의 절차(compute procedure)를 단순화시키기 위해 농장 밀도를 저밀도(low density), 중밀도(middle density) 그리고 고밀도(high density)로 구분하였으며, 각 농장의 밀도에 따른 감염확률을

결정하는 데 사용하였다. 감염률과 농장 간에 밀집도가 직접적 관계가 있다고 가정하고, 밀집되어 있는 지역 내에 존재하는 농장 중에서 감수성이 있으면 질병 감염 확률이 높은 것으로 설계하였다.

3. 모델 구현

3.1 역학 자료

본 연구에서 2010년 말에 한국에서 발생한 구제역 사례 자료를 사용하였다. QIA에서 보고된 자료들을 사용하여 모델에 필요한 변수들을 정의하였으며, 기존의 따르는 모델에 사용한 변수들은 Table 1과 같다(QIA, 2011).

Table 1. Foot-and-disease parameters

Parameter		Value
Transmission distance		3000m
Infectious rate	High	0.06
	Medium	0.03
	Low	0.005
Latent period (S→L)		4.8
Subclinically period (L→SI)		2.6

3.2 공간 데이터

공간 데이터로는 2010년 말 구제역이 처음 신고된 안동시를 선정하였으며, 그 지역에 대한 공간 데이터를 사용하여 본 모델을 구현하였다.

모델에 필요한 도로망 데이터는 OpenStreetMap(OSM)에서 다운로드 받아서 사용하였다(www.openstreetmap.org, 2011). 축산농장에 대한 자료는 biz-gis.com 웹에서 축산농장 자료를 취득해서 사용하여 작업을 수행하였다. 좌표 체계를 WGS84에 맞추었으며, 축산농장에 대한 밀도 지도를 추출하였다.

3.3 구현 및 실험

Multi-agent 프로그래밍 언어인 NetLogo (Wilensky, 1999)를 사용하여 구제역 확산 시뮬레이션 모델을 구현하였다. NetLogo는 GIS 확장 모듈이 있어 GIS 데이터 쉽게 질병 전파 모델에 활용할 수 있다. 구현된 모델의 그래픽 인터페이스는 Fig. 6과 같다. 가운데 큰 창은 시뮬레이션 진행 과정을 실시간으로 보여주며, 이를 통해 구제역 발생 상황을 파악할 수 있다. 왼쪽 버튼은 다양한 시나리오 평가하기 위해 임의로 변수들을 변경할 수 있도록 만들었다. 오른쪽 버튼은 구제역 방역조치와 관련된 변수들이며, 시나리오 목적에 따라 수정할 수 있다. 오른쪽 아래 모니터링 부분에서 시뮬레이션 결과에 대한 값들을 실시간으로 볼 수 있게 만들었다.

모델의 행위자 그룹은 농장과 사료차량으로 구분하였으며, 농가 수는 3228개로 설정될 수 있게 구성돼 있다. 사료 차량을 10개로 설정되어 있으며, 필요한 조건에 따라 변화시킬 수 있다(Fig. 6).

앞서 설명한 생물학적 모델요인과 공간적 전파 요인을 고려하여 농장에 대한 위치 정보와 밀도 정보 등을 고려하여 NetLogo를 이용하여 행위자 기반 모델을 구현하였다. 시뮬레이션 정보는 농장정보, 도로에 대한 위치 정보, 외부와의 간접 접촉, 감염된 축군에서의 경과 양상, 인근 전파 여부, 방역조치

전략 등을 고려하도록 구성되어 있다.

모델을 실행하기 위해 우선 공간 데이터를 불러오고 모델의 합성 집단(synthetic population)을 구성한 다음 구제역 전파의 매개체로 여러 차량을 선택한 후 모의실험을 전개하였다.

방역조치 영향에 대해 시뮬레이션 하기 위해서는 기본 방역조치 변수들을 설정하여야 한다. 구제역 발생 시 방역조치는 발생농장을 확인 후 24시간 이내에 발생농장에서 사육되는 우제류 동물들을 다 살처분 하는 것으로 설계하였으며 인근 지역에 위치한 농장에서 사육되는 동물 등에 대해서는 이동이 제한되는 것을 기본으로 설정하였다. 방역조치가 시작되는 시점은 감염된 농장이 다른 농장들에 바이러스 전파시키기 시작하는 시점으로 결정하였다. 예방적 살처분, 이동제한 또는 예방접종 후의 질병의 감염력이 감소하도록 설정하였으며, 방역조치에 대한 관리 및 효과에 대해서 시나리오를 수행할 수 있도록 설계하였다. 발생농장 중심으로 살처분된 방역대의 반경, 이동제한 방역대의 반경, 방역조치 적용 시간 등을 변경하면서 여러 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 설계되어 방역에 대한 평가를 할 수 있을 것으로 기대된다(Fig. 6).

구제역 발생 상황을 예측하고 다양한 방역조치를 비교하기 위해 설계된 모델을 이용하여 두 개의 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 시나리오는 방역 활동의 시작 일을 2일씩 지연시키면서 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 발생 상황에 따라 농림수산식품부에서 구제역 살처분 범위는 발생농장 중심으로 500m-3km(QIA, 2011) 이내로 지정하고 있으며, 본 실험에서는 살처분 범위를 500m 이내의 농장을 대상으로 하였다. 두 번째 시나리오는 방역활동 시기를 증상

Fig. 6. Graphic user interface developed for model implementation

인지 시작하는 첫째 날로 고정시켰으나, 방역활동 중에서 살 처분 범위를 밀집도에 따라 변경시키면서 시뮬레이션을 진행 하였다. 이때 질병 전파모델은 시나리오 1에서 사용하였던 모델과 다르며 밀집도를 고려한 전파 모델을 사용하였다. 또한, 살처분 대상 범위를 밀집도와 관계없이 500m, 고밀도 지역만 500m, 그리고 고밀도와 중밀도 지역의 500m로 정하였다. 시나리오 2의 결과를 분석하여 밀집도에 따른 살처분 범위를 변경하여 살처분을 최소로 하며 효과적인 방역을 할 수 있는지 여부를 확인하고자 두 번째 시나리오를 실행하였다.

4. 분석 결과

이 모델은 확률적 모델로서 시뮬레이션의 결과가 임의성 성격을 가지므로, 각 시나리오에 대해서 5번 실행하였으며, 각 경우의 결과를 기록 후 그 평균치를 최종 결과로 간주하였다.

4.1 모델 결과에 대한 민감도 분석

모델 내의 변수 및 의사 결정 규칙의 영향을 평가하기 위해 모델이 변수 값 변경에 민감한지를 검토하는데 사용되는 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. 민감도 분석은 입력 변수의 값을 변경하였을 때 결과 값들이 어떻게 변화하는지를 판단할 때 사용된다. 민감도 분석은 일변량(univariate)과 다변량(multivariate)이란 두 개의 종류가 있다(Iman, 1988; Crosetto, 2000).

본 연구에서는 일변량 방법을 사용하여 민감도 분석을 수

행하였다. 농장 밀도에 따른 감염률을 Table 1의 값을 기준으로 변경시켜 네 개의 시나리오(A, B, C, D)를 수행하였다. 각각의 경우에 따른 농장 밀도에 대한 감염률을 결정하였다. Table 2에서 농장의 고/중/초 밀도에 따라 감염률 변수의 변경을 정의하였다. 각 시나리오를 21일 시간적 간격으로 수행하였으며, 3228개의 감수성을 가진 농장들과 한 개의 질병 원인체를 갖는 것으로 설정한 후 실험을 수행하였다.

Table 2. Values used to evaluate sensitivity changes in rate of infection based on population density

Scenario	Population density	Rate of Infection (%)
A	High	6
	Medium	3
	Low	0.5
B	High	0.5
	Medium	3
	Low	6
C	High	6
	Medium	0.5
	Low	3
D	High	3
	Medium	2
	Low	0.5

감염률의 변경에 대한 모델 결과물의 민감도 평가는 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 A, B, C, D에 대한 4개의 시나리오를 보여주며, 21일 동안의 구제역이 경과하는 각각 상태를 하루 단위로

Fig. 7. Simulation outcomes for scenarios A, B, C, and D.

표시하였다.

시나리오 A에서는 높은 밀도에서 높은 감염률(6%)을 그리고 낮은 밀도에서는 낮은 감염률(0.5%)로 정하였으며, 시나리오 B에서는 그 반대로 정하였다. 이 값으로 확산 모델을 적용한 결과가 절정(peak) 감염 농가 수는 67개가 있었으며, 시나리오 B의 절정 감염 농가 수는 26개였지만 절정 일은 일치하게 나타났다. 같은 방식으로 A와 C, A와 D 시나리오를 분석하였으며. 위의 결과들은 농장 밀도가 농장 밀도에 따른 감염률 변수에 민감한 것으로 나타내었다.

4.2 방역조치

시나리오 1을 적용한 농장 간 구역적 전파 확산 양상 과정을 Fig. 8로 묘사하였다. Fig. 8의 (a), (b)와 (c)는 각각 시뮬레이션 시작 날의 상태, 10일 경과 후의 상태 그리고 발생 종료 22일 경과 후의 상태를 일부 지역의 공간적으로 확산하는 분포를 보여 주고 있다.

첫 발생 농장에서 바이러스 혈증을 한 즉시 방역활동을 시행한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서의 실선 그래프는 감수성 가진 한 농장이 구역적 감염된 시점부터 발생 종료 시점까지 1일 단위로 각 여러 감염 상태에 있는 농장수의 변화를 나타내고 있다.

그래프에서와 같이 구역적 발생 3일 후 잠복상태선(파란색)이 증가한 것으로 보아 질병 전파 시작된 것을 알 수 있으며, 9일 감염선(붉은선)이 증가한 것은 잠복기를 지나 감염상태로 활성화되기 때문이다. 초록색의 살처분 상태는 10일부터 급하게 증가하며 그 후로 계속 완만한 증가추세이다. 감수성을 나타내는 보라색선은 일직선으로 보이나 이는 실제에는 그 변동이 있는 것이나 농가 수가 다른 상태의 개체 수에 비해 월등히 많아서 직선으로 보이는 것이다. 모의실험에서는 최초

Scenario 1

Fig. 9. Graphical representation of the disease spread progression with comparison of the proportion of individual health state through time

발생농장의 위치를 고밀집된 지역이 아닌 것으로 선정하였기 때문에 이번 구역적 전파가 기하급수적으로 증가하지 않았다(Fig. 8(a)). 11일째부터 감염된 동물들에 증상이 나타내게 되고 인지하게 되기 때문에 예방적 기본 방역조치 활동이 적용되며 16일째부터 구역적 전파가 감소하게 되며 22일째 전파가 종료되고 24일 때 모든 상황이 종료되는 것을 볼 수 있다. 구역적 발생에 대응한 방역 활동에 관해 발생사항을 분석하기 위해 크게 두 가지 상황을 고려하였으며, 시뮬레이션한 결과 다음과 같다.

Fig. 10에서는 방역활동을 2일씩 지연시켰을 때의 상황을 보여주고 있다. Fig. 10(a)에서는 첫 발생농장에서 바이러스 혈증을 한 즉시, Fig. 10(b)는 2일 후, Fig. 10(c)는 5일 후의 상황이다. 이때 각각의 경우의 살처분된 농장 수 309개, 415개, 512개로 계산되었다. 살처분 신속하게 한 것이 전제 피해가 감소함을 알 수 있다.

시나리오 2에서 살처분 범위를 농장 밀집도에 따라 변화를

Fig. 8. Simulation result of foot-and-mouth disease spread on different days

Fig. 10. Scenario 1: Graphic representation of model to changes in controls start day

Fig. 11. Scenario 2: Influence of slaughter range changes based on the farms density

주었을 때 구제역 발생 상황에 어떤 차이가 있는지를 예측하였다. 이를 위해 살처분 범위를 첫 번째, 밀집도와 관계없이 구

제역 발생 농가 중심으로 그 인근 500m, 두 번째 고밀도와 중밀도 지역에서만 500m, 세 번째 고밀도 지역에서만 500m 단위로 살처분하는 것으로 모의실험을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과가 Fig. 11과 같이 나타났다.

첫 번째 상황 경우, 바이러스 감염된 농장 수 18개와 그에 따라 살처분된 농장 수 276개, 발생 기간이 평균 17.1일로 나타났다. 두 번째 살처분 활동 경우 감염된 농가 수는 첫 번째 상황과 동일하게 18일로 나타내었으나 살처분된 농장 수 245개, 발생 기간이 17.3일로 나타났다. 세 번째 경우, 고밀도에서만 살처분 하였을 때 발생 농장 수 19개, 살처분된 농장 수 172개로, 발생 기간이 17.6일로 나타났으며 앞 두 상황보다 발생 기간이 좀 증가하였으나 살처분된 농가 수가 감소한 것을 볼 수 있었다.

두 시나리오 결과 분석에 의하면 구제역 유행의 규모는 발생 초기에 검출되는 농가 수에 따라 다르지만, 발생 규모를 최소화하려면 최대한 빨리 감염을 인지하여 질병의 전파 확산을 방지하는 것이 가장 중요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 구제역 확산을 방지하기 위한 방역조치로는 광범위한 예방적 살처분 보다는 고위험 농가 즉, 고밀집 지역 내에 있는 농가를 우선 선정하여 즉시 살처분하는 것은 효율성이 높은 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 GIS를 이용하여 구제역 공간 확산 시뮬레이션하는 공간 명시적 행위자 기반 모델을 설계 및 구현하는 데 목적을 두고 연구를 수행하였다.

연구의 주요 내용이 다음과 같다. 우선 선행연구에 대한 검토를 통해 한국에서 발생한 구제역 상황과 대응상 문제점과 미시적 기준의 역학모델이 갖고 있는 한계점을 지적하였다. 이어 통해 GIS 공간자료를 이용하여 차량을 통해 전파된 구제역 모의실험을 할 수 있는 행위자 기반 모델의 필요성을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 NetLogo 소프트웨어를 이용해 차량을 통한 구제역 확산을 시뮬레이션하는 GIS 통합 행위자 기반 모델을 제안하였다.

본 모델의 특징은 축군 내의 동물 간의 질병 전파 양상 상황 보다는 농장 간의 전파양상을 고려하였으며, 모델을 통해 농장의 위치, 농장 밀집도, 도로망 등 공간적 요소들을 고려해서 질병 전파에 미치는 영향을 판단하였다.

또한 구현된 모델의 입력 변수가 결과에 영향을 미치는지를 분석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 농장 밀도에 따른 감염률의 변경에 대해 네 개의 시나리오를 적

용하여 수행하였다. 분석 결과는 농장 밀도에 따라 감염률 변수에 민감한 것으로 나타내었다.

모델을 이용해 서로 다른 시나리오를 적용해서 모의실험 수행한 시뮬레이션 결과가 실제 구제역 전염의 확산과 거의 일치함을 알 수 있었고, 어떤 상황에서 발생 가능한 사건의 결과를 예측할 수 있어 효과적인 방역 활동을 제시한 것으로 판단된다.

구제역 발생 상황을 예측하고 다양한 방역조치를 비교하기 위해 방역 활동의 두 가지 상황을 적용해 시뮬레이션을 수행하였다. 최초 발생농장의 인지 시기가 발생의 규모를 감소시키는데 가장 결정적인 역할을 하고 효과적인 것을 확인하였다. 한편 고밀집 지역 내에 있는 농가를 우선 선정하여 즉시 살처분하는 것은 발생 규모는 큰 차이가 없었으나 살처분의 효율성을 높을 것으로 사료된다.

이 모델은 모델 검증의 한계가 있다. 2010년~2011년 사이에 한국에서 발생한 구제역에 대한 정확한 역학 정보 및 구제역 발생농장의 위치정보와 발병 시간 자료 확보가 어려운 실정이다. 모델 검증과 함께 모델 개선에 대한 추가 작업이 필요하며, 향후 연구로 본 모델을 확장하여 정확한 데이터를 이용하여 모델의 검증 및 정확도 평가가 이루어져야 한다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2012-0001663)과 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 것입니다.

References

- Bates, T.W., Thurmond, M.C., and Carpenter, T.E. (2003), Description of an epidemic simulation model for use in evaluating strategies to control an outbreak of foot-and-mouth disease, *Am J Vet Res*, Vol. 64, pp. 195-204.
- Carpenter, C.V. (2004), Agent-based modeling of seasonal population movement and the spread of the 1918-1919 flu, *American Journal of Human Biology*, Vol. 16, pp. 197-198.
- Chae, S.B., Jo, H.H., and Moon, H.T. (2007), Understanding and Application of Agent-Based Model, *Physics and High Technology*, Vol. 16, pp. 10-14.
- Crosetto, M., Tarantola, S., and Saltelli, A. (2000), Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 81, pp. 71-79.
- Gong, J.H., Sun, Z.L., and Li, X.W. (2003), Simulation and analysis of control of severe acute respiratory syndrome, *Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, pp. 260-265.
- Deng, H.Z., Chi, Y. and Tang, Y.J. (2004) Multi agent-based simulation of disease infection. *Computer simulation*, Vol. 21, pp.167-175.
- Diggle, P.J. (2006), Spatio-temporal point processes, partial likelihood, foot and mouth disease, *Statistical Methods in Medical Research*, Vol. 15, pp. 325-336.
- Dion, E., Van Schalkwyk, L., and Lambin, E.F. (2011), The landscape epidemiology of foot-and-mouth disease in South Africa: A spatially-explicit multi-agent simulation, *JEcolModel*. Vol. 222, pp. 2059-2072.
- Dubé, C., Stevenson, M.A., Garner, M.G., Sanson, R.L., Corso, B.A., Harvey N., Griffin, J., Wilesmith, J.W., and Estrada, C. (2007), A comparison of predictions made by three simulation models of foot-and-mouth disease, *N Z Vet J*, Vol. 55, pp. 280-288.
- Hagenaars, T.J., A. Dekker, de Jong, M.C., and Eble, P.L. (2011), Estimation of foot and mouth disease transmission parameters, using outbreak data and transmission experiments, *RevSciTech*, Vol. 30, pp. 467-477.
- Iman, R.L. and Helten, J.C. (1988), An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models, *Risk Analysis*, Vol. 8, pp. 71-90.
- Keeling, M.J. (2005), Models of foot-and-mouth disease, *ProcBiolSci*, Vol. 272, pp. 1195-1202.
- Kim, T., Hwang, W., Zhang, A., Surajit, S., and Murali, R. (2010), Multi-Agent Modeling of the South Korean Avian Influenza Epidemic, *BMC Infectious Diseases*, 10:236.
- Ko, Y. (2011), A Study of Cellular Automata, Master's thesis, Chonnam National University, Korea, 48p.
- Kostova, K., (2004), On The Use Of Models To Assess Foot-And-Mouth Disease Transmission And Control. Lawrence Livermore National Laboratory.
- Wang, J., Xiong, J., Yang, K., Peng, S., and Xu, Q. (2009),

- Use of GIS Agent-based modeling to simulate the Spread of Influenza, in *Proceedings of Geoinformatics*, pp. 1-6.
- Lee, S.W. (2011) Time-series analysis of epidemic model and consideration on follow-up model, Master's thesis, Korea University, Seoul, Korea, 86p,
- Morris, R.S., Wilesmith, J.W., Stern, M.W., Sanson, R.L., and Stevenson, M.A. (2001), Predictive spatial modelling of alternative control strategies for the foot-and-mouth disease epidemic in Great Britain, *Vet Rec*, Vol. 149, pp. 137-144.
- NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (Accessed Feb. 15, 2013).
- Perez, L. and Dragicevic, S. (2009), An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*, Vol. 8, p. 50.
- QIA(Animal, Plant and Fisheries Quarantine and Inspection Agency). (2011) Epidemiological report of the 2010-2011 foot-and-mouth disease epidemic, QIA, pp. 209-274.
- Silverman, B.W. (1986), Density estimation for statistics and data analysis, Vol. 26 of Monographs on Statistics and Applied Probability, Chapman and Hall, London.
- Statistics Korea, <http://kostat.go.kr/> (Accessed Jan. 15, 2013).
- Tildesley, M.J. and Keeling, M.J. (2008), Modelling foot-and-mouth disease: A comparison between the UK and Denmark, *Prev Vet Med*, Vol. 85, pp. 107-124.
- Wilensky, U. (1999) NetLogo 5.0.2. User Manual, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (Accessed Feb. 15, 2013).
- Yeon, N. (2011), A Study on Scenario Screening for Stochastic Disease Spreading Models using Simulation, Master's thesis., KAIST, Seoul, Korea, 56p.

(Received 2013. 04. 18, Revised 2013. 05. 30, Accepted 2013. 06. 14)