

도축장 출하차량 이동의 사회연결망 특성 분석

박혁* · 배선학** · 박선일*¹

*강원대학교 수의과대학 및 동물의학종합연구소, **강원대학교 사범대학 지리교육과

Properties of a Social Network Topology of Livestock Movements to Slaughterhouse in Korea

Hyuk Park*, Sunhak Bae** and Son-Il Pak*¹

*College of Veterinary Medicine and Institute of Veterinary Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea
**Department of Geography Education, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

(Received: June 27, 2016 / Accepted: October 13, 2016)

Abstract : Epidemiological studies have shown the association between transportation of live animals and the potential transmission of infectious disease between premises. This finding was also observed in the 2014-2015 foot-and-mouth disease (FMD) outbreak in Korea. Furthermore, slaughterhouses played a key role in the global spread of the FMD virus during the epidemic. In this context, in-depth knowledge of the structure of direct and indirect contact between slaughterhouses is paramount for understanding the dynamics of FMD transmission. But the social network structure of vehicle movements to slaughterhouses in Korea remains unclear. Hence, the aim of this study was to configure a social network topology of vehicle movements between slaughterhouses for a better understanding of how they are potentially connected, and to explore whether FMD outbreaks can be explained by the network properties constructed in the study. We created five monthly directed networks based on the frequency and chronology of on- and off-slaughterhouse vehicle movements. For the monthly network, a node represented a slaughterhouse, and an edge (or link) denoted vehicle movement between two slaughterhouses. Movement data were retrieved from the national Korean Animal Health Integrated System (KAHIS) database, which tracks the routes of individual vehicle movements using a global positioning system (GPS). Electronic registration of livestock movements has been a mandatory requirement since 2013 to ensure traceability of such movements. For each of the five studied networks, the network structures were characterized by small-world properties, with a short mean distance, a high clustering coefficient, and a short diameter. In addition, a strongly connected component was observed in each of the created networks, and this giant component included 94.4% to 100% of all network nodes. The characteristic hub-and-spoke type of structure was not identified. Such a structural vulnerability in the network suggests that once an infectious disease (such as FMD) is introduced in a random slaughterhouse within the cohesive component, it can spread to every other slaughterhouse in the component. From an epidemiological perspective, for disease management, empirically derived small-world networks could inform decision-makers on the higher potential for a large FMD epidemic within the livestock industry, and could provide insights into the rapid-transmission dynamics of the disease across long distances, despite a standstill of animal movements during the epidemic, given a single incursion of infection in any slaughterhouse in the country.

Key words : social network, small-world, livestock movement, slaughterhouse.

서 론

축산농가에서 가축전염병 발생은 경제적 손실과 직결된다. 통계청의 농림수산물주요통계에 의하면 2014년 기준으로 우리나라의 농림업 총생산액은 47조 3천억원이며 이 중 축산업은 18조 7천억원으로 농림업 총 생산액의 39.5%를 차지하고 있다. 축종별로 볼 때 돼지와 소는 약 10조 8천억원으로 57.5%를 점유하고 있어 가축전염병이 발생하는 경우 막대한 손실이 초래되는데(17) 우리나라의 경우 2010년 11

월 경상북도 안동 지역에서 시작된 구제역이 전국적으로 확산되어 직접적인 손실액만 약 2조 7천억원으로 추계되었다.

가축전염병이 국내 및 심지어 국가 간 확산되는 경로는 가축의 이동, 사람의 이동, 차량과의 접촉 등 매우 다양하며(4,8), 이러한 요인들 중 생축(live animal)의 이동은 구제역을 비롯한 다양한 전염성 가축전염병의 국지적 혹은 전국단위의 확산과 밀접한 관련이 있다. 특히 도축장은 농장에서 출하되는 가축을 수송하는 차량이 집합하는 장소라는 점에서 다양한 가축 질병을 매개할 가능성이 매우 높은 고위험 축산시설이기 때문에 도축장에 대한 차단방역은 가축전염병 확산 방지에 매우 중요하다. 만일 생축이동 시점에서 감염되어 있거나 잠복감염 상태에 있다면 이들 가축이 서로 모이

¹Corresponding author.
E-mail : paksi@kangwon.ac.kr

는 축산시설에서 직접 혹은 간접적인 접촉을 통하여 감염이 순환되고, 이러한 축산시설을 방문하는 차량이 오염되어 차량의 이동에 기인하여 비발생 지역으로 감염이 확산될 가능성이 증가한다(9). 실제로 2014-2015년 국내에서 발생한 구제역에 대한 역학조사결과(26) 잠복 감염된 돼지가 출하되거나 오염된 가축 운반차량에 의하여 바이러스가 전파된 사례가 확인되었으며, 특히 돼지 발생 농장 180건 중 88.3% (159건)는 발생 전 30일 이내에 도축장으로 출하된 사례가 있는 것으로 조사되었다. 또한 농장관리인이 임상증상을 인지하지 못한 상태에서 바이러스를 배출하는 시기에 돼지를 출하하는 경우가 많았으며, 돼지 발생농장 중 60.6%(109개소)에서 신고 1주일 이내에 도축장으로 출하하거나 신고 당일 출하 건수도 11.7%(21건)로 나타났다. 이와 같이 가축이동에 기인하여 질병이 확산된 유사한 사례는 많은 해외 연구에서도 보고된바 있다(2,10,14,16,19,20,25,29).

농림축산식품부에서는 구제역과 같은 전염성이 높은 가축 전염병이 신속하게 전국적으로 확산된 주요 원인으로 가축 분뇨, 사료 및 출하차량의 이동과 관련이 높다는 역학조사 결과에 근거하여 가축전염병예방법 제17조에 따라 일정 규모 이상의 축산시설을 출입하는 차량에 대해서는 차량무선 인식장치(GPS) 설치를 의무화하는 축산차량등록제를 시행하여 가축의 이동상황을 추적하고 있다. 본 제도는 2012년 8월 GPS 장치를 보급한 후 2013년 1월부터 준수사항 위반 정도에 따라 벌금이나 과태료 등을 부과하고 있다. 2015년 12월 기준으로 약 46,000여대의 GPS 부착 차량으로부터 수집된 출입차량의 정보는 국가동물방역통합시스템(KAHIS, Korean Animal Health Integrated System)에 저장되어 질병 예방과 가축전염병 역학조사 업무에 활용되고 있다.

최근 들어 전염병의 확산경로를 예측하거나 질병 발생 후 예방 전략을 최적화하는 목적으로 네트워크(사회연결망) 분석을 시도한 연구가 증가하고 있다. 네트워크분석은 노드가 상호 어떠한 연결 관계를 갖고 있는지를 분석하는 기법으로 수의학 분야에서는 영국, 프랑스, 덴마크, 이탈리아, 스페인, 아르헨티나, 벨기에 등의 국가에서 축산시설(노드, node) 간 가축이동(링크, link) 정보에 근거한 네트워크분석을 통하여 가축이동 패턴 분석, 유행규모 예측, 질병확산 경로 추정, 질병 전파에 기여한 핵심(허브) 농장 확인, 전염성 질병에 대한 구조적 취약성 파악 등 다양한 용도로 사용되고 있다(1,3, 5,7,18,23,24,27-29,31). 영국의 경우 양계 사육농가에 대한 네트워크 분석에서 많은 농장들이 다수의 도계장을 이용함으로써 이들 간 상호 밀접한 연결 관계를 맺고 있어 조류인플루엔자가 발생하는 경우 광범위한 지역으로 확산될 가능성이 증가할 것으로 보고된바 있다(9). 이와는 대조적으로 우리나라의 경우 많은 농가들이 해당 소재지의 행정구역 벗어나 타 지역의 도축장을 이용하는 빈도가 매우 높을 것이라는 추정은 많지만 실제로 도축장이 상호 어떠한 네트워크로 연결되어 있는지에 대한 실증적 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국가차원의 강력한 방역조치에도 불구하고 한번 발생한 구제역이 전국적으로 신속하게 확산되는 이유에 대한 구체적인 해답을 얻고자 2013년 축산차량등록제 실시 이후 국내 우제류 도축장으로 이동한 축산차량의 이동정보를 사회연결망(social network) 기법을 이용하여 분

석한 결과를 보고하고자 한다.

재료 및 방법

자료

농림축산검역본부로부터 2014-2015년 구제역 발생 이전 시점인 2014년 9-11월 기간과 구제역 발생 이후 2015년 1-2월까지 총 5개월 기간 동안 우제류 도축장 간 축산차량의 이동상황에 대한 정보를 공식적인 절차를 통하여 제공받았다. 2014년 12월 자료는 2014-2015년 구제역이 2014.12.3일 처음으로 확진되어 이동제한 등의 사유로 질병 발생 이전과 발생 이후의 차량이동 패턴이 혼합되어 있다는 점을 고려하여 분석에서 제외하였다. 농림축산검역본부에서 제공받은 원시자료 중 2015년 7월 기준으로 운영 중에 있고, 한국 축산물처리협회에서 보유하고 있는 도축장 이름과 주소가 일치하는 총 75개 우제류 도축장 자료만을 노드(node)로 추출한 후 차량이동을 링크(link)로 연계한 행렬(matrix) 파일을 방향성 네트워크(directed network)로 생성하여 분석하였다.

네트워크분석 및 시각화

네트워크의 일반적인 특성은 연결정도(degree), 평균연결정도(average degree), 직경(diameter), 포괄성(inclusiveness), 고립노드(isolated node) 개수, 약한 컴포넌트(weak component) 개수, 강한 컴포넌트(strong component) 개수로 파악하였다. 또한 네트워크의 중심성(centrality)은 연결 중심성(degree), 근접 중심성(closeness), 매개 중심성(betweenness), 아이겐벡터 중심성(eigenvector, Bonacich power centrality)으로 평가하였으며, 네트워크의 응집성(cohesion)은 밀도(density), 평균거리(mean distance), 군집계수(clustering coefficient)로 평가하였다. 차량이동에 대한 네트워크가 복잡계(complex system) 특성인 멱함수 분포(power-law distribution)를 따르는지의 여부는 Kolmogorov-Smirnov 통계량에 근거한 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 수행하였다(6,27). 사회연결망 분석은 Netminer (version 4.2.1, Cyram, Seoul, Korea) 소프트웨어를 사용하였으며, 분석결과의 시각화는 각 노드 쌍이 이상적인 거리를 갖도록 최적화하여 최단경로거리에 비례하는 만큼 이격되도록 배치하는 spring algorithm의 stress majorization 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 분석모수의 정의는 다음과 같다(7,10,20,33).

연결정도(연결도)

네트워크의 노드 간 연결된 정도를 나타내는 지표로 노드에 연결된 링크의 개수로 측정된다. 링크의 방향성으로 볼 때 내향 연결정도(in-degree)는 특정 노드로 향하는 링크의 개수이고, 내향 연결정도(out-degree)는 특정 노드에서 다른 노드로 향하는 링크의 개수로 측정한다.

평균 연결정도

네트워크의 총 링크 수를 총 노드 수로 나눈 값으로 임의의 1개 노드가 가질 수 있는 평균 링크 수를 의미한다.

밀도

네트워크에서 노드 간 전체적인 연결수준을 나타내는 지

표로 네트워크의 모든 가능한 총 링크 중 존재하는 링크의 비율로 정의된다. 네트워크 내에 노드 간 연결이 많을수록 밀도가 높고, 밀도가 높은 네트워크일수록 응집력(cohesion)이 높다고 말한다. 즉 밀도가 낮은 그룹에 비하여 밀도가 높은 그룹일수록 노드의 연결 관계가 많기 때문에 이를테면 네트워크 내에서 질병을 전파시킬 가능성이 높다는 것을 시사한다.

평균거리

거리(distance)는 네트워크 내에서의 노드들 간의 상대적 차이를 측정하는 지표로, 두 노드 간 다수의 경로(path)가 있을 때 가장 짧은 경로를 최단경로(geodesic)라 하며, 최단경로의 길이는 최단경로거리(geodesic distance)가 된다. 따라서 평균거리(average distance, average shortest path length)는 네트워크에서 임의의 두 노드가 갖는 평균적인 최단 거리를 의미한다.

직경

네트워크에서 임의의 두 노드 간 최단경로길이 중 가장 긴 거리 혹은 가장 긴 최단 거리를 갖는 두 노드 사이의 거리를 나타낸다. 일반적으로 직경이 큰 그룹에 속한 노드와 비교할 때 직경이 작은 그룹에 속한 노드는 소수의 중간 노드를 거쳐 다른 노드와 연결되어 있어 노드 간에 질병을 전파할 가능성이 높다.

포괄성

전체 노드 중 연결된 노드의 비율로 연결선이 없는 고립된 노드가 없을 경우 1이 된다.

군집계수

네트워크의 노드들이 평균적으로 군집되어 있는 정도를 나타내는 지표로 모든 노드가 네트워크 내 다른 노드와 직접적으로 연결된 경우 최댓값 1이고, 노드 간 직접적인 연결이 없는 경우 최솟값 0이 된다. 군집성은 전체 네트워크 중 서브그룹의 존재와 관련이 있으며, 강한 서브그룹이 있는 경우 일부 노드를 제거할 경우 네트워크는 급속하게 단절(fragmentation)될 수 있다. 군집 정도가 높다는 것은 이를테면 전체 네트워크에서 단절된 특정 서브그룹 내에서 질병전파가 매우 빠르고, 해당 서브그룹 내에서 질병이 종식될 가능성이 높아 전체 집단으로는 서서히 전파될 수 있음을 의미한다. 이러한 특성은 질병을 억제한다는 측면에서는 유리하지만 질병 관련 정보를 전달한다는 측면에서는 불리할 수 있다.

고립노드

연결정도가 0인 노드를 나타낸다.

컴포넌트

네트워크 내 최소 1개의 경로로 서로 연결되는 서브그룹(집합)으로, 강한 컴포넌트는 컴포넌트의 노드 간 링크의 방향성에 따라 모든 노드들이 상호 도달할 수 있는 노드들의 집합이고, 약한 컴포넌트는 방향을 고려하지 않고 도달할 수 있는(단순히 연결된) 노드들의 집합을 의미한다.

중심성

네트워크 혹은 그룹 내에서 특정한 노드의 구조적 중요성

을 계량화하는 방법이다.

연결 중심성

노드 간 직접적으로 연결된 정도 즉 인접한 연결 관계에 근거하여 국지적 수준에서 네트워크의 중심성을 분석하는 방법으로 특정 노드와 직접적으로 연결된 정도가 많은 노드일수록 연결중심성이 높다고 말하며, 특정 노드와 직접적으로 연결된 링크의 수로 계산된다. 연결중심성이 높다는 것은 전체 네트워크 수준에서 지배적 위치에 있어 다른 노드에 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 이를테면 차량이동(링크)이 많은 도축장일수록 질병에 노출될 기회가 증가하며, 만일 이러한 연결중심성이 높은 도축장이 오염될 경우 다른 노드로 감염을 전파할 가능성이 높아지게 된다.

근접 중심성

연결중심성이 노드 간 직접적으로 연결된 인접 관계에 근거하여 분석한다. 반면에 근접중심성은 네트워크 내의 간접적으로 연결된 관계를 모두 고려하며 전체 네트워크 수준에서 중심성을 측정한다. 즉 노드 간의 최단경로거리에 근거하여 중심성을 분석하는 방법으로 특정 노드와 네트워크의 다른 모든 노드들 간 최단경로거리의 역수로 계산된다. 근접중심성이 높다는 것은 그룹 내에서 특정 노드의 잠재적 영향력을 반영하는 지표로 질병전파와 관련하여 전파단계의 개수가 문제가 되는 경우 중요한 의미를 갖는다. 즉 근접중심성이 높다는 것은 매개 역할을 하는 다른 노드들에 의존하지 않고 신속하게 다른 노드에 도달할 수 있으며, 이를테면 특정한 도축장이 오염되어 있다고 가정할 때 이러한 오염된 도축장이 전체 집단으로 감염을 얼마나 신속하게 전파시키는지를 판단하는 지표가 되며, 연결중심성은 감염된 도축장과 이웃하는 도축장으로 감염을 전파시키는 잠재적 능력이라는 점에서 두 지표의 차이점이 있다.

매개 중심성

매개중심성은 직접 연결되어 있지 않은 노드들 간의 관계를 매개하는 정도를 전체 네트워크 수준에서 평가하는 지표다. 노드 간 상호의존성(pair-dependency)에 근거하여 네트워크의 중심성을 분석하며, 한 노드가 다른 모든 노드 간의 최단경로(geodesic path, shortest path)에 나타나는 횟수를 기준으로 계산된다. 즉 특정 노드가 다른 노드 쌍 간의 경로에 더 많이 나타날수록 매개중심성이 높다고 말하며, 이 지표는 네트워크에서 노드의 영향력(브로커 역할)을 의미한다. 이를테면 질병전파를 차단하기 위해서는 매개중심성이 높은 도축장에 방역조치를 집중하는 것이 효과적이라는 것을 의미한다. 또한 매개중심성이 높은 노드는 집단의 안전성 측면에서 중요한 의미를 갖는데 이를테면 매개중심성이 높은 노드를 제거하는 경우 전체 네트워크는 작은 서브그룹으로 분할된다.

결 과

본 연구의 대상 기간인 5개월 간 75개 우체류 도축장으로 차량이 이동한 횟수는 총 5,657,125건으로 월간 평균 1,131,425건으로 나타났다(Fig 1). 연구대상 기간 5개월에 대

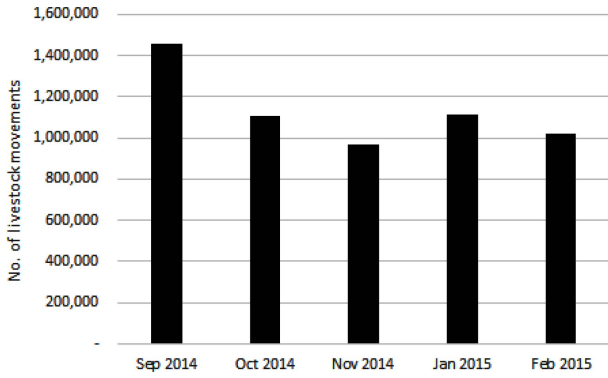


Fig 1. Plot of the number of monthly livestock movements to abattoir in Korea during the five-month period January 2014-February 2015.

하여 구축한 월간 네트워크의 특성은 Table 1에 제시하였다. 네트워크에서 총 링크 수의 범위는 2,139~2,324개로 도축장 1개당 평균 29.5~33.1개의 도축장과 연결 관계를 맺고 있었으며, 네트워크의 밀도는 0.421~0.488의 범위를 보여 도축장 간 연결 관계가 매우 높았다. 임의의 두 도축장 간 평균거리의 범위는 1.52~1.64로 나타나 모든 도축장들은 대략 1단계의 중재노드(intermediary node)를 거치면 서로 연결되며, 네트워크에서 가장 멀리 떨어진 두 도축장의 경우 3~4 단계를 거치면 서로 연결되는 응집성이 매우 강한 네트워크를 보였는데 이러한 특성은 높은 군집계수(0.639~0.0.777)로도 확인되었다(Fig 2). 모든 네트워크에서 고립노드는 없었다.

연결 중심성 분석에서 중앙값(median)은 네트워크에 따라 in-degree와 out-degree 모두 0.4~0.5의 범위를 보여 도축장 간의 직접적인 연결 관계가 매우 높았으며, 근접 중심성도는 0.6~0.7을 보여 도축장 간 거리가 매우 짧은 반면에 매개 중심성은 0.004로 분석되어 도축장을 상호 매개하는 역할을 하는 노드는 드문 것으로 나타났다(Table 2).

축산차량 이동에 대한 월간 네트워크가 멱함수 분포를 따르는지를 파악하기 위하여 제곱지수(α)를 추정하여 적합도 검정을 수행한 결과 연결 중심성의 in-degree는 모두 충족되

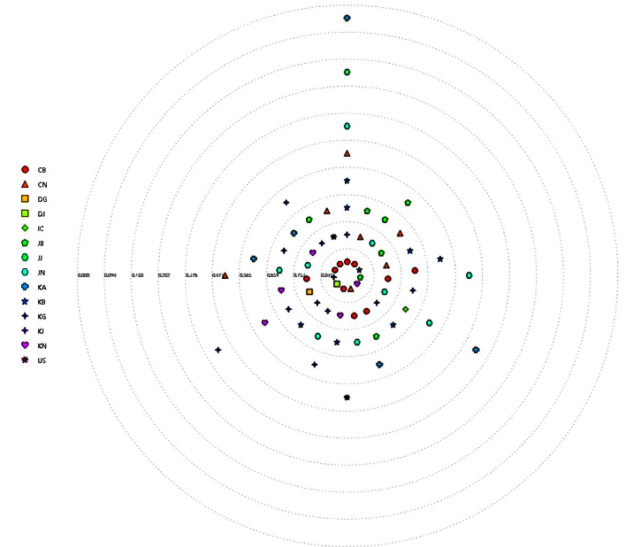


Fig 2. An example concentric map of livestock movements to abattoir in the September 2014 network. KA = Kangwon, KY = gyonggi, KB = Kyoungbuk, CN = Chungnam, JB = Jeonbuk, JN = Jeonnam, CB = Chungbuk, KN = Kyoungnam, KJ = Kwangju, IC = Incheon, US = Ulsan, DG = Daegu, DJ = Daejeon, JJ = Jeju.

었으나 out-degree의 경우 2개 네트워크는 충족하지 못하였다(Table 3, Fig 3). 컴포넌트 분석에서 월간 네트워크별로 1-5개의 컴포넌트가 확인되었으며, 모든 네트워크에서 1개의 컴포넌트가 노드의 대부분(94.4-100%)을 차지하였다(Table 4).

고 찰

본 연구에서는 도축장을 왕래하는 개별 축산차량이 상호 역동적인 접촉 네트워크를 통하여 구조적으로 연결되어 있어 있을 것이라는 가정에 근거하여 그간 국내에서 발생한 구제역이 전국적으로 확산된 원인을 파악하고자 축산차량이 도축장으로 이동한 정보를 분석하였다. 본 연구에서 구축한 월

Table 1. Properties for the monthly networks of Korean livestock movement to abattoir during the period September 2014 to February 2015

Properties	Network				
	September 2014	October 2014	November 2014	January 2015	February 2015
Number of nodes	69	70	70	72	71
Number of links	2,324	2,293	2,202	2,221	2,139
Average degree	33.1	32.0	30.7	30.2	29.5
Density	0.488	0.465	0.446	0.426	0.421
Number of weak components	1	2	2	1	4
Number of strong components	2	3	3	2	5
Inclusiveness	1.0	0.986	0.986	0.639	0.958
Mean distance (SD)	1.52 (0.52)	1.53 (0.53)	1.55 (0.53)	1.64 (0.61)	1.56 (0.55)
Clustering coefficient	0.777	0.773	0.770	0.639	0.762
Diameter	3	4	3	4	3
Number of isolated nodes	0	0	0	0	0

Mean distance, average shortest path length, SD, standard deviation

Table 2. The results of the calculated centrality parameters for each monthly network

Parameter	Network									
	September 2014		October 2014		November 2014		January 2015		February 2015	
	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
Degree centrality										
Minimum	0.000	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000
Mean	0.487	0.488	0.465	0.465	0.446	0.446	0.426	0.426	0.421	0.421
Median	0.500	0.485	0.478	0.471	0.457	0.456	0.429	0.429	0.443	0.443
Mode	0.529	0.456	0.464	0.652	0.507	0.391	0.535	0.521	0.514	0.443
Maximum	0.882	0.868	0.884	0.869	0.826	0.811	0.817	0.803	0.786	0.771
Closeness centrality										
Minimum	0.000	0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.369	0.000	0.000
Mean	0.661	0.660	0.636	0.636	0.629	0.628	0.618	0.616	0.589	0.589
Median	0.667	0.654	0.644	0.638	0.638	0.632	0.617	0.616	0.617	0.610
Mode	0.680	0.641	0.644	0.699	0.721	0.597	0.669	0.644	0.641	0.669
Maximum	0.895	0.880	0.893	0.879	0.848	0.834	0.845	0.822	0.812	0.798
Betweenness centrality										
Minimum	0.001		0.000		0.000		0.000		0.000	
Mean	0.004		0.005		0.005		0.006		0.005	
Median	0.004		0.004		0.004		0.004		0.004	
Mode	NA		NA		NA		0.000		0.000	
Maximum	0.008		0.012		0.013		0.036		0.013	

NA, not available

Table 3. Power-law fitting for exponent (α) for the calculated centrality parameters

Parameter	Network				
	September 2014	October 2014	November 2014	January 2015	February 2015
Degree centrality					
In-degree	9.83 (0.63)	7.65 (0.33)	11.36 (0.20)	7.02 (0.09)	8.58 (0.17)
Out-degree	10.04 (0.67)	7.45 (0.45)	4.65 (0.00)	6.51 (0.00)	8.51 (0.28)
Betweenness centrality	3.69 (0.04)	4.14 (0.06)	3.82 (0.11)	3.03 (0.54)	4.13 (0.17)

The frequency distribution of the centrality parameter (k) was fitted for power-law, $p(k) = Ck^{-\alpha}$, where C is constant, and α is exponent. Parenthesis denotes for p-value for goodness-of-fit by Komorogrov-Smirnov test. For all networks, the frequency distributions of the closeness centrality were not characterized by power-law distributions

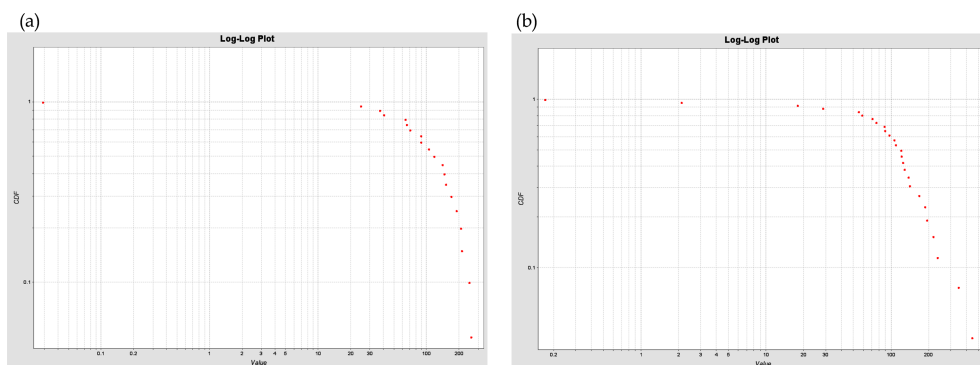


Fig 3. The cumulative distribution of the degree values for (a) October 2014 and (b) January 2015 network (log-log scale).

간 네트워크의 특성을 요약하면 도축장(노드) 간 평균거리는 1.52~1.64의 범위로 매우 짧고, 군집계수는 0.64~0.78의 범

위로 매우 높은 반면에 직경은 3~4로 매우 짧았는데 이러한 네트워크의 특성(topology)을 좁은 세상(small-world)이라고

Table 4. Results of cohesion analysis for each monthly network

Component	Network														
	September 2014			October 2014			November 2014			January 2015			February 2015		
	Size	%	Density	Size	%	Density	Size	%	Density	Size	%	Density	Size	%	Density
Weak component (WC)															
WC1	68	95.8	0.469	69	98.6	0.488	69	98.6	0.469	72	100	0.434	68	95.8	0.469
WC2	1	1.4	ud	1	1.4	ud	1	1.4	ud				1	1.4	ud
WC3	1	1.4	ud										1	1.4	ud
WC4	1	1.4	ud										1	1.4	ud
Strong component (SC)															
SC1	67	95.8	0.475	68	97.1	0.492	68	97.1	0.473	71	98.6	0.438	67	94.4	0.475
SC2	1	1.4	ud	1	1.4	ud	1	1.4	ud	1	1.4	ud	1	1.4	ud
SC3	1	1.4	ud	1	1.4	ud	1	1.4	ud				1	1.4	ud
SC4	1	1.4	ud										1	1.4	ud
SC5	1	1.4	ud										1	1.4	ud

ud, undefined

한다(11,12,32). 이러한 소견은 가축이동과 관련한 다양한 네트워크 연구에서도 유사한 결과가 보고된바 있다(3,5,10,23). Regular 혹은 random 네트워크의 반대 개념인 좁은 세상 네트워크는 해당 네트워크 내에서 다른 노드와 연결하는데 짧은 거리를 갖는 상호 연결된 노드가 군집되어 있어 네트워크 내에서 대부분의 노드가 다른 노드와 이웃해 있지는 않지만 몇 단계의 연결을 거치면 모든 다른 노드에 도달할 수 있게 된다. 그 이유는 노드 간 최단경로길이는 네트워크의 크기가 증가함에 따라 대수적으로(logarithmically) 증가하기 때문이다(13). 좁은 세상은 무작위로 선택된 두 사람은 다섯 명을 거치면 6단계 만에 서로 연결되는 소위 6단계분리법칙(six degrees of separation)에 따라 좁은 세상 네트워크를 강조한 것으로(21) 이러한 네트워크에서 차량이동 특성과 패턴을 이해한다면 질병전파 경로를 예측하는데 유용하게 사용할 수 있다. 즉 본 연구에서와 같이 도축장 간 차량이동이 좁은 세상 네트워크를 보이는 경우 regular 혹은 random 네트워크에 비하여 질병이 보다 용이하게 확산되고, 설령 국지적으로 질병이 발생하였을지라도 전국적으로 질병이 쉽게 확산될 가능성이 매우 높다. 또한 좁은 세상 네트워크에서는 국지적으로 높은 수준의 군집 현상을 보이기 때문에 유행 초기에 확산을 예측하는 것이 쉽지 않다(13). 한편 군집계수가 높다는 것은 해당 응집그룹으로 질병이 유입되는 경우 그룹 내에서 전파가 빠르게 진행되며, 전파가 그룹 내에서만 이루어지는 경우 전체 네트워크 수준에서는 전파가 서서히 진행될 수 있음을 의미한다(33). 사회네트워크 분석 대상이 되는 네트워크는 복잡계는 흔히 멱함수 분포(power-law distribution)와 프리 네트워크(scale-free)의 특성을 보이는데(10,30) 본 연구에서 구축한 도축장 간 축산차량 이동 네트워크는 일부를 제외한 대부분 멱함수 분포에 부합하는 것으로 나타났다.

단일 컴포넌트가 네트워크 내 노드의 대부분을 차지하는 경우 giant 컴포넌트를 갖는 네트워크라고 한다(7). 본 연구의 컴포넌트 분석에서 확인된 중요한 특성의 하나는 월간 네트워크별로 약간의 차이는 있지만 1개의 강한 컴포넌트가 전

체 도축장의 94.4-100%를 차지하고 있어 우리나라의 도축장은 전형적인 giant 컴포넌트를 갖고 있다는 점이다. 이러한 소견은 독일에서 돼지 이동(4), 이탈리아에서 소의 이동(23), 프랑스에서 소의 이동(27)에 대한 네트워크 연구에서도 보고된바 있다. 또한 소수의 노드가 많은 이웃 노드와 연결되어 있는 허브(hub and spoke)의 특성(27)은 관찰되지 않았다. 컴포넌트 내의 모든 도축장이 상호 연결되어 하나의 거대한 응집 그룹(cohesive group)을 형성한다는 것은 만일 이 그룹으로 질병이 유입된다면 응집 그룹 내 연결 관계에 있는 모든 도축장으로 감염이 신속히 전파될 위험이 증가한다는 것을 시사한다(10,15,16,20). 이러한 구조적인 특성은 과거 구제역 발생사례에서 정부가 발령했던 이동제한 조치와 같은 강력한 방역조치에도 불구하고 어떠한 이유로 전국적인 확산을 차단하지 못하였는지를 설명하는 중요한 단서가 된다. 본 연구는 축산차량의 도축장 이동네트워크인 관계로 농장 간 가축이동 네트워크의 특성에 관한 해외 연구사례와 직접적인 비교가 어렵지만 우리나라의 경우 네트워크의 직경은 독일(4)에 비하여 2배, 프랑스(27) 보다는 4.8배 짧고, 평균 최단경로길이가 역시 독일의 2.3배, 프랑스의 3.3배 짧은 반면에 평균 연결정도는 독일의 8.7배, 프랑스의 9.9배 많은 수준이다. 한편 덴마크에서 소의 이동 네트워크(22)와 비교할 때 평균 최단경로길이는 2.8배 짧고, 군집계수는 2.6배 높은 수준이다. 선진국과 비교할 때 우리나라의 도축장 네트워크는 도축장 위치한 소재지의 행정구역과 무관하게 타 지역의 도축장과 직접적인 연결 관계가 매우 높고, 도축장 간 거리가 매우 짧다는 것이 중요한 차이점이다. 이러한 측면에서 볼 때 구제역과 같은 전염성이 높은 가축질병이 발생할 경우 국지적이고 일시적인 방역조치는 분명한 한계가 있기 때문에 도축장과 같은 고위험 축산시설을 왕래하는 차량이동을 신속하고 철저히 통제하는 것이 질병 확산을 예방하는데 가장 중요한 요인이 될 것으로 판단된다. 본 연구결과에 근거할 때 구제역 확산을 최소화하기 위해서는 축산농가의 경우 차단방역, 출하차량에 대한 소독관리, 도축장을 비롯한 고

위험 축산시설에서의 오염원 제거와 같은 기본적인 질병관리 원칙을 철저히 준수하고, 방역당국에서는 도축장 간 차량이동 고리를 단절시킬 수 있는 정책수립과 정부에서 추진할 계획으로 있는 권역화 차단방역정책을 조속히 이행하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 고려하지 않았지만 개별 도축장의 도축규모와 같은 속성 정보, 도축장으로 연결된 도로망의 입지특성, 농장과 도축장 간의 차량이동 빈도 등을 고려한 행정구역별 네트워크 분석을 통하여 과거 구제역 발생 사례에서 규명하지 못한 질병 확산경로를 추정하는 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

결 론

본 연구는 2014-2015년 구제역 발생 이전 3개월과 발생 이후 2개월 동안 국내 75개 우제류 도축장을 왕래한 축산차량의 이동패턴에 대한 특성을 파악하고자 도축장을 노드, 차량이동을 링크로 연계한 방향성 네트워크 파일을 구축하여 분석하였다. 그 결과 도축장 간 평균거리는 짧고, 군집계수가 높고, 네트워크의 직경이 짧은 좁은 세상(small-world) 네트워크를 형성하고 있었다. 또한 단일 컴포넌트가 전체 도축장의 대부분을 차지하는 giant 컴포넌트를 갖는 응집성이 강한 네트워크를 보이고 있어 특정 도축장이 오염될 경우 질병이 전국적으로 급속히 확산될 가능성이 매우 높은 구조적인 문제점을 갖고 있는 것으로 분석되었다. 또한 일부 도축장이 다수의 도축장과 연결된 허브(hub)의 특성은 나타나지 않았는데 이는 오염된 일부 도축장에 대하여 일시적인 이동제한 조치를 취한다고 하더라도 질병확산을 근본적으로 차단하기 어렵다는 것을 의미한다. 따라서 출하차량 이동에 의한 구제역 전파를 차단하기 위해서는 도축장 간 차량이동의 연결고리를 단절시킬 수 있는 방역당국의 근본적인 정책수립이 시급히 요구되며, 현 시점에서는 개별 축산농가 단위에서 차단방역을 강화하는 것이 최선이다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 2016년 가축질병대응기술개발사업(Animal Disease Management Technology Development)의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: C1012840-01-01, 구제역 및 AI 가상방역훈련 프로그램 개발).

참고문헌

- Aznar MN, Stevenson MA, Zarich L, León EA. Analysis of cattle movements in Argentina, 2005. *Prev Vet Med* 2011; 98: 119-127.
- Barlow ND, Kean JM, Caldwell NP, Ryan TJ. Modelling the regional dynamics and management of bovine tuberculosis in New Zealand cattle herds. *Prev Vet Med* 1998; 36: 25-38.
- Bigras-Poulin M, Thompson RA, Chriel M, Mortensen S, Greiner M. Network analysis of Danish cattle industry trade patterns as an evaluation of risk potential for disease spread. *Prev Vet Med* 2006; 76: 11-39.
- Büttner K, Krieter J, Traulsen A, Traulsen I. Static network analysis of a pork supply chain in Northern Germany-Characterisation of the potential spread of infectious diseases via animal movements. *Prev Vet Med* 2013; 110: 418-428.
- Christley RM, French NP. Small-world topology of UK racing: the potential for rapid spread of infectious agents. *Equine Vet J* 2003; 35: 586-589.
- Clauset A, Shalizi CR, Newman MEJ. Power-law distributions in empirical data. *SIAM Rev* 2009; 51: 661-703.
- Danon L, Ford AP, House T, Jewell CP, Keeling MJ, Roberts GO, Ross JV, Vernon MC. Networks and the epidemiology of infectious disease. *Interdiscip Perspect Infect Dis* 2011; 2011: 284909.
- Daszak P, Cunningham AA, Hyatt AD. Emerging infectious diseases of wildlife--threats to biodiversity and human health. *Science* 2000; 287: 443-449.
- Dent JE, Kao RR, Kiss IZ, Hyder K, Arnold M. Contact structures in the poultry industry in Great Britain: exploring transmission routes for a potential avian influenza virus epidemic. *BMC Vet Res* 2008; 4: 27.
- Dubé C, Ribble C, Kelton D, McNab B. A review of network analysis terminology and its application to foot-and-mouth disease modelling and policy development. *Transbound Emerg Dis* 2009; 56: 73-85.
- Eubank S, Guclu H, Kumar VS, Marathe MV, Srinivasan A, Toroczkai Z, Wang N. Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature* 2004; 429: 180-184.
- Grange ZL, VAN Andel M, French NP, Gartrell BD. Network analysis of translocated Takahe populations to identify disease surveillance targets. *Conserv Biol* 2014; 28: 518-528.
- Jeger MJ, Pautasso M, Holdenrieder O, Shaw MW. Modelling disease spread and control in networks: implications for plant sciences. *New Phytol* 2007; 174: 279-297.
- Kao RR. The role of mathematical modelling in the control of the 2001 FMD epidemic in the UK. *Trends Microbiol* 2002; 10: 279-286.
- Kao RR. Evolution of pathogens towards low R0 in heterogeneous populations. *J Theor Biol* 2006; 242: 634-642.
- Kiss IZ, Green DM, Kao RR. The network of sheep movements within Great Britain: Network properties and their implications for infectious disease spread. *J R Soc Interface* 2006; 3: 669-677.
- Knight-Jones TJ, Rushton J. The economic impacts of foot and mouth disease - what are they, how big are they and where do they occur? *Prev Vet Med* 2013; 112: 161-173.
- Lentz HH, Korschake M, Teske K, Kasper M, Rother B, Carmanns R, Petersen B, Conraths FJ, Selhorst T. Trade communities and their spatial patterns in the German pork production network. *Prev Vet Med* 2011; 98: 176-181.
- León EA, Stevenson MA, Duffy SJ, Ledesma M, Morris RS. A description of cattle movements in two departments of Buenos Aires province, Argentina. *Prev Vet Med* 2006; 76: 109-120.
- Martínez-López B, Perez AM, Sánchez-Vizcaino JM. Social network analysis. Review of general concepts and use in preventive veterinary medicine. *Transbound Emerg Dis* 2009; 56: 109-120.
- Milgram S. The small-world problem. *Psychol Today* 1967; 1: 61-67.
- Mweu MM, Fournié G, Halasa T, Toft N, Nielsen SS. Temporal characterisation of the network of Danish cattle movements and its implication for disease control: 2000-2009. *Prev Vet Med* 2013; 110: 379-387.
- Natale F, Giovannini A, Savini L, Palma D, Possenti L, Fiore G, Calistri P. Network analysis of Italian cattle trade patterns

- and evaluation of risks for potential disease spread. *Prev Vet Med* 2009; 92: 341-350.
24. Nöremark M, Håkansson N, Lewerin SS, Lindberg A, Jonsson A. Network analysis of cattle and pig movements in Sweden: measures relevant for disease control and risk based surveillance. *Prev Vet Med* 2011; 99: 78-90.
 25. Perez AM, Ward MP, Carpenter TE. Control of a foot-and-mouth disease epidemic in Argentina. *Prev Vet Med* 2004; 65: 217-226.
 26. Quarantine Inspection Agency. An epidemiological investigation report on 2014-2015 foot-and-mouth disease in Korea. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2016.
 27. Rautureau S, Dufour B, Durand B. Vulnerability of animal trade networks to the spread of infectious diseases: a methodological approach applied to evaluation and emergency control strategies in cattle, France, 2005. *Transbound Emerg Dis* 2011; 58: 110-120.
 28. Ribbens S, Dewulf J, Koenen F, Mintiens K, de Kruif A, Maes D. Type and frequency of contacts between Belgian pig herds. *Prev Vet Med* 2009; 88: 57-66.
 29. Robinson SE, Christley RM. Exploring the role of auction markets in cattle movements within Great Britain. *Prev Vet Med* 2007; 81: 21-37.
 30. Strogatz SH. Exploring complex networks. *Nature* 2001; 410: 268-276.
 31. Vernon MC. Demographics of cattle movements in the United Kingdom. *BMC Vet Res* 2011; 7: 31.
 32. Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of small-world networks. *Nature* 1998; 393: 440-442.
 33. Wey T, Blumstein DT, Shen W, Jordn F. Social network analysis of animal behaviour: a promising tool for the study of sociality. *Anim Behav* 2008; 75: 333-344.