

우리나라 구제역 방역대책의 동태적 분석: 2010년 11월 구제역 감염을 중심으로*

A Dynamic Analysis of Control Measures Against Foot-and-Mouth Disease Epidemic in Korea, November 2010

전재호**

Juhn, Jaeho

Abstract

The purpose of this paper is to find out some clues about effectiveness and implementing timing of the control measures against Foot-and-Mouth Disease (FMD) in Korea. To do that, the case of FMD, which broke out during November 2010 in Korea, is examined and constructed as a system dynamics simulation model.

The implications of simulation result are as follows. First of all, it is most effective measure to prevent the movement of vehicle from infected farmhouse to other noninfected farmhouses, which are located far away, in the early stage of FMD diffusion. Secondly, earlier vaccination can be adopted as a reliable means to control the epidemic when FMD spreads widely. Finally, reducing the time to vaccinate the whole noninfected livestock is a little help to restrain the additional infections of FMD.

Keywords: 구제역, 우제류, 방역대책, 전염병

(Foot-and-Mouth Disease, FMD, Cloven-Hoofed Animal, Control Measures, Epidemic Disease)

* 이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

** 한국교통대학교 행정정보학과 교수(단독저자, jhjuhn@ut.ac.kr)

I. 서론

구제역은 소, 돼지 등과 같이 발굽이 둘로 갈라진 우제류(偶蹄類) 동물들에서 발생하는 급성 바이러스성 전염병이다. 구제역에 감염된 성우나 성돈이 폐사하는 비율은 높지 않지만, 치료약이 존재하지 않으므로 바이러스 보균 상태로 대부분의 감염축이 생존하게 된다. 이러한 바이러스 보균성과 고전염성으로 인해 구제역 감염국의 축산물 해외수출이 금지되게 되고, 결과적으로 구제역 감염국가는 치명적인 경제적 손실을 피할 수 없게 된다(Rich, 2008). 따라서, 축산물 수출을 희망하는 구제역 감염국가는 감염축(감염 의심축 포함)을 살 처분하고, 일정기간동안 구제역이 발생하지 않았음을 인증받음으로써 수출가능 국가로의 지위회복에 국가적인 노력을 투입할 수 밖에 없는 특성을 가지고 있다.

세계적으로 구제역의 최근 발생동향을 보면 <표 1>과 같다. <표 1>에 나타난 바와 같이 2010년부터 2011년 6월말까지의 제한된 기간에만 전세계적으로 41개 국가에서 구제역이 발생하였다. 이와 같이 빈번한 발생과 그 경제적 피해로 인해 구제역 관련 연구도 상당히 많이 이루어진 바 있다. 그러나, 대부분의 연구는 수의학 혹은 역학적 관점에서 이루어졌으며(김기연외, 2013; 김봉환·최상호, 2001; Alexandersen et al., 2003; Fan et al., 2013; Naranjo & Cosivi, 2013; Gao, 2012) 구제역 방역대책의 실시 시점 및 효과성 등에 대한 면밀한 검토 연구는 극소수에 불과하다(양기근, 2013; Rich, 2008).

<표 1> 2010년부터 2011년 6월까지 전세계 구제역 발생 현황

발생 대륙	발생국
아시아 (19개국)	한국, 북한, 아프가니스탄, 캄보디아, 중국, 대만, 홍콩, 인도, 카자흐스탄, 미얀마, 팔레스타인, 카타르, 사우디아라비아, 몽골, 스리랑카, 태국, 예멘, 베트남, 말레이시아
아프리카 (18개국)	베냉, 보츠와나, 브르키나파소, 코트디부아르, 이집트, 에디오피아, 가나, 나라이, 모잠비크, 나미비아, 니제르, 소말리아, 남아프리카공화국, 수단, 우간다. 짐바브웨, 잠비아, 리비아
유럽 (3개국)	러시아, 터키, 불가리아
중남미 (1개국)	에콰도르

자료 : OIE Homepage

우리나라는 2010년 이전까지 대규모 구제역 확산을 경험하지는 않았었다. 그러나, 2010년 이후 3회에 걸쳐 구제역 감염이 발생하였으며, 특히 2010년 11월 28일에 경북 안동에서 발생한 구제역은 단기간에 전국으로 확산되었다. 이로 인해 국내에서는 처음으로 전국

적인 우제류 백신접종을 통해 5개월여에 걸친 구제역 방역 작업을 종결지을 수 있었다. 이 기간동안 국내 우제류 가축의 26% 정도가 살처분 되는등 직접적인 방역비용으로만 약 3조 1,759억 원이 투입되는 엄청난 피해가 발생하였다(김정호 외, 2011).

구제역 방역대책은 기본적으로 사전대책과 사후대책으로 구분된다. 사전대책으로는 공항과 항만 등에서 외국으로부터 구제역이 국내로 유입되는 것을 차단하는 검역, 치밀한 방역 매뉴얼과 방역 시스템 구축, 축산 정보시스템 구축을 통한 예찰 및 관리 등을 나열할 수 있다. 반면, 구제역 감염이후에 실시되는 사후 대책으로는 발생초기에 신속한 진단과 그에 따른 이동제한조치, 축산 농가단위 차단 방역, 주요 도로 및 지역 차단 방역, 살처분 그리고 백신접종 등이 있다. 이러한 사전·사후 대책은 전세계 주요국에서 공통적으로 활용되고 있으며, 추가적인 대책으로는 축산농가의 축산환경 개선등 간접적이고 중장기적인 정책이 고려될 수 있다(김선경 외, 2011).

이러한 구제역 방역대책을 직접적으로 분석한 연구로는 양기근(2013)과 Rich(2008)가 있다. 양기근(2013)은 AHP기법을 활용하여 구제역 방역대책 전반에 대해 상대적 중요도와 우선순위를 도출하였다. 전문가들의 의견과 기존 연구내용을 종합해서 전체적인 방역대책들의 상대적 중요도를 정리하였다는 측면에서 의미가 있으나, 개별 대책들의 현실적인 효과에 대해서는 파악이 어렵다는 한계를 갖는다고 하겠다. Rich(2008)는 육지로 연결된 남미 4개국(아르헨티나, 우루과이, 파라과이, 브라질)중 특정 지역에서 구제역이 발생한 경우 각국의 방역대책에 대해 시스템다이내믹스 기법을 적용해 분석을 수행하였다. 육지로 연결된 4개국간에는 구제역이 쉽게 전파되는 반면 4개국의 대응제도는 상이한 상황에 착안하여 Durand & Mahul(2000)의 확장된 SIR(Susceptible-Infectious-Removed) 모델을 보다 세분화한 모델을 작성하고 사후대책 중심으로 분석을 수행하였다. Rich(2008)는 구제역 감염 단계의 세분화와 다수 국가를 모형에 반영함으로써 보다 일반화된 모형을 제시하였다는 측면이 연구의 기여점이라고 할 수 있다. 그러나, 우리나라는 바다와 비무장지대로 타국과 분리되어 있고, Rich의 상세모델에서 필요로 하는 세분화된 자료가 축적되어 있지 못하다는 현실적 한계로 인해 동 모델을 직접 적용하기에는 무리가 있다.

본 연구의 목적은 Rich(2008)의 연구와 마찬가지로 구제역이 발생한 이후 시행되는 사후적 대책의 현실적 효과성을 살펴보는 것이다. 연구 대상 범위에는 2010년 11월에 안동에서 발생하여 전국으로 확산된 구제역 확산과정과 사후적 방역활동 전반이 포함된다. 연구목적 달성을 위해 일차적으로 2010년 11월에 발생한 우리나라 구제역 확산 과정을 면밀히 검토하고, 이를 토대로 우리나라에서 발생한 구제역의 확산과정을 적절히 설명할 수 있는 인과지도와 시스템다이내믹스 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 다음으로는 구축된 모형의 기본 시뮬레이션 결과가 2010년 11월 구제역의 확산과정을 적절히 재현하는지 여부를 확인하여

모델의 적정성을 검증하였으며, 주요 사후적 방역대책의 실시 시기 및 실행소요시간을 변경하면서 효과성을 검토하였다. 즉, 구제역 확진 이후 실행가능한 사후적 방역대책중에서 이동제한조치의 효과적 실행, 백신접종 소요시간 단축, 백신접종 조기 실시 등의 현실적인 효과를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 사후대책중 가장 많은 인력과 시간이 투입된 살처분은 추가 분석에서 배제하였는데, 이는 2010년 하반기 구제역 확산당시 군·관·민이 총동원되어 최대한 살처분 시간을 최소화하였기 때문에 추가적으로 살처분 소요시간을 축소할 수 없다는 전문가들의 의견을 고려한 것이다.

이후의 내용은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서는 시뮬레이션 모델 작성에 필요한 구제역의 개괄적인 사항과 2010년 11월의 감염사례를 검토하고, 이를 토대로 III 장에서 인과지도 분석, 시뮬레이션 모델링 및 기본 시뮬레이션을 수행하였다. IV 장에서는 주요 방역대책에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 정리하였고, 마지막으로 V 장에서는 시뮬레이션 결과에 따른 시사점과 본 연구의 한계점 등을 논의하였다.

II. 구제역 개관과 2010하반기 감염 사례

1. 구제역 개관

구제역(口蹄疫; Foot-and-mouth disease; FMD)은 소, 돼지, 양, 염소, 사슴 등 발굽이 둘로 갈라진 우제류(偶蹄類; Cloven-hoofed animals) 가축에서 발생하는 급성 바이러스성 전염병이다(중앙재난안전대책본부, 2011; Naranjo & Cosivi, 2013). 구제역은 전염성이 매우 높아 세계동물보건기구(World Organization for Animal Health; OIE)¹⁾에서도 가장 중요하게 취급되고 있다(진영화, 2006). 우리나라에서도 가축전염병예방법에서 제1종 가축 전염병으로 명시함으로써 구제역을 가장 핵심적인 가축 전염병중 하나로 관리하고 있다.²⁾

-
- 1) 세계동물보건기구는 전 지구적 차원에서 발생하는 동물 질병을 관리·예방·치료하기 위한 연구 및 정책 개발, 국제협력과 감시를 목적으로 설립된 국제기구이다. 1924년 가축 유행병 국제기구(Office international des épizooties; OIE)라는 명칭으로 설립되었다가, 2003년 국제보건기구(WHO)와 대칭되도록 세계동물보건기구(World Organization for Animal Health)로 명칭을 변경하였지만 OIE라는 약칭은 그대로 사용하고 있다. 회원국은 130여가지 가축 전염병의 자국내 발생 현황을 보고할 의무가 있고, 국제적인 축산물 교역은 OIE가 정하는 위생기준에 근거해 이루어지고 있다(온라인 브리태니커 백과사전 요약).
 - 2) 가축 및 가금의 전염병 발생을 예방하여 질병의 만연 방지와 축산 진흥을 시도할 것을 목적으로 정부에서는 가축전염예방법을 제정하였다(공포일 2002.12.26.). 가축전염병에는 제1종 가축전염병과 제2종 가축전염병이 있다. 제1종에는 우역(牛疫), 우폐역(牛肺疫), 구제역, 가성우역(假性牛疫), 불루팅병, 리프트게곡열, 림프스킨병, 양우(羊痘), 수포성구내염(水疱性口內炎), 아프리카마역(馬疫), 아프리카돼지콜

구제역 바이러스는 전파속도가 매우 빠르며, 직간접 접촉은 물론 공기 및 기타 경로 등 다양한 형태로 전파가 이루어진다. 즉, ① 감염동물의 수포액, 침, 호흡공기, 분변, 정액 등을 직접 접촉하여 전파되거나, ② 감염지역내 사람(목부, 수의사, 인공수정사 등), 차량(사료차, 출하차, 집유차 등), 의복, 사료, 기구, 물 등에 바이러스가 묻어 간접적인 접촉 형태로 전파된다. 또, ③ 공기(바람)에 의한 전파의 경우 육지에서는 60km, 바다에서는 250km 까지 전파가 가능하며, 이외에 ④ 구제역 바이러스에 오염된 식육 및 식육부산물 등이나 야생동물 등을 통해서도 전파된다(Alexandersen et al., 2003). 구제역 바이러스의 잠복기는 일반적으로는 2~8일 정도이지만, 최대 잠복기는 14일 정도로 비교적 장기간이 경과된 이후에 증상이 나타나는 경우도 있다(농림수산식품부, 2012).

구제역에 감염된 동물은 수포가 나타나는 것이 특징적이며 구강, 비강, 유두, 발굽 등에 작은 궤양을 형성하고, 폐사율이 높은 것은 아니지만 심한 발육불량과 산유량 급감 등의 사육농가에 직접적인 피해를 초래한다. 이에 더하여 OIE의 기준³⁾에 따라 축산물 국제교역이 통제를 받게 되므로 막대한 경제적 피해를 초래하게 된다(Pendell et al., 2007).

2. 구제역 발생 공식인증 상태와 회복

OIE 회원국은 구제역이 발생하면 이 사실을 OIE에 통보하도록 의무화 되어있고, 통보 즉시 구제역 청정국으로써의 지위를 상실하게 된다(OIE, 2013). 대부분의 국가에서는 구제역 청정국 지위를 상실한 국가로부터 축산물의 수입을 금지하므로 이에 따른 경제적 손실이 청정국 지위 회복시까지 일정 기간동안 발생한다. 동시에 구제역 청정국 지위를 이미 상실한 타국가들의 축산물 수입 요구를 일정부분 받아들여야 함으로써 축산물 국제교역시장에서 수출불가와 수입요구에 따른 이중고를 감수해야 한다(우병준 · 이명기, 2011;

레라, 돼지콜레라, 돼지수포성 뉴켄슬병, 고병원성 가금인플루엔자 등이 있다. 제2종에는 탄저, 기증저, 브루셀라병, 결핵병, 요네병, 소해면상뇌증, 소유행열, 돼지일본뇌염, 스크레피비저(鼻疽), 말전염동맥병, 구역, 말전염성 자궁염, 동부말뇌염, 서부말뇌염, 베네주엘라말뇌염, 가금티프스, 가금콜레라, 닭아이코플라스마병, 조병원성 가금인플루엔자, 광견병, 부저병(腐蛆病)이었다. 그밖에 이에 준하는 질병으로는 농림부령이 정하는 가축의 전염성 질병이 있다(강영희, 2008).

- 3) 1994년 5월, OIE 세계총회에서 구제역 청정 회원국을 공식 인정하는 절차를 개발하도록 ‘구제역 및 기타 가축전염병 위원회(추후 동물 질병 과학위원회로 개명)’에 요청하였다. 동 위원회에서 개발한 이 공식인증 절차는 이후 OIE에서 관장하는 기타 주요 동물질병의 상태 인증 절차로 확대 적용되었다. 회원국의 동물질병 상태에 대한 공식인증은 국제교역에서 절대적인 역할을 수행하고 있는데, 이는 1995년부터 발효된 WTO 위생측정 Framework내에서 OIE의 동물질병 상태인증 결과가 WTO의 국제교역 허가에 중요한 자료로 사용되도록 협정이 이루어졌기 때문이다. 1998년에는 이 협정에 근거해서 동물질병과 페스트 청정지역을 인정하는 OIE의 권한을 WTO와 OIE가 다시 한번 확인한 바 있다(OIE, 2013).

Pendell et al., 2007).

이와 같이, 국제 교역의 변화에 직접적인 변수로 작용하는 ‘OIE의 구제역 발생 공식 인증 상태(이후에서는 구제역 인증 상태로 표기)’는 OIE의 표준관리절차(Standard Operating Procedure)에 따라 이루어진다. 구제역이 발생한 국가에서 구제역 방역을 통해 ‘구제역 인증 상태’ 변화를 도모하기 위해 선택할 수 있는 대표적인 정책대안은 살처분(Stamping-out)과 예방접종(Vaccination)으로 요약될 수 있다(김선경 외, 2011). 물론, 현실에서는 사전적인 방역조치로써의 수출입 검역, 사후적인 이동금지조치, 차단방역, 살처분, 예방접종 등 다양한 방역수단이 사용된다(농림수산식품부, 2012). 그러나, 구제역 발생국가에서 구제역 종식 이후 청정국 지위 회복 등 ‘구제역 인증 상태’의 변화 소요기간과 절차는 전술한 살처분과 예방접종을 사용한 방식에 따라 상당부분 좌우되게 된다.

〈표 2〉 구제역 방역 정책별 청정국 지위 회복 방식과 신청가능 시점

청정국 지위회복 방식	방역 정책	OIE에 지위회복 신청가능 시점
구제역 감염국 ↓ 백신 미접종 구제역 청정국	살처분 정책만 사용	마지막 감염 발생이후 3개월 경과
	살처분 + 긴급 백신접종후 접종가축 모두 살처분	백신접종 가축 전체 살처분후 3개월 경과
	살처분 + 긴급 일부지역 백신 접종후 접종 가축 살처분	마지막 질병 발생일 또는 백신접종완료후 6개월 경과
	살처분 정책 미실시	① 1년간 구제역 미발생, ②1년간 바이러스 감염증거 없음, ③1년간 예방접종 미실시, ④백신접종 중단 후 백신접종 가축의 유입 없음 등 4가지 조건이 모두 충족되는 시점
구제역 감염국 ↓ 백신 접종 구제역 청정국	전체 지역 백신접종 (살처분 병행여부는 무관)	① 2년간 구제역 미발생, ②1년간 바이러스 감염증거 없음, ③우제류 가축 80% 이상 정기 백신접종 등의 조건이 모두 충족되는 시점
백신 접종 구제역 청정국		백신접종 구제역 청정국 지위 획득 이후 ① 1년간 구제역 미발생, ②1년간 바이러스 감염증거 없음, ③ 1년간 예방접종 미실시, ④백신접종 중단후 백신접종 가축의 유입 없음 등 4가지 조건이 모두 충족되는 시점
백신 미접종 구제역 청정국		

* 신청시점에서 실제 지위회복까지는 4~9개월 정도의 기간이 추가로 소요됨

자료: (우병준·이명기, 2011) 요약 정리

‘구제역 인증 상태’는 ① 백신접종 미 실시 구제역 청정국(Country free without vaccination), ② 백신접종 실시 구제역 청정국(Country free with vaccination), ③ 백신접종 미 실시 구제역 청정국 지위 정지(Suspension of the status free without vaccination), ④ 백신접종 실시 구제역 청정국 지위 정지(Suspension of the status free with vaccination) 등으로 구분된다. ①과 ②는 일단 구제역 감염이 종식되었음을 OIE가 인증한 상태이고, ③과 ④는 각각 ①과 ②상태에서 구제역이 발생하여 현재 감염이 발생하고 있음을 의미한다(OIE Homepage).

구제역 발생국가는 구제역 감염발생에 따르는 국제 교역상의 불이익을 최대한 빠른 시일내에 극복하기 위해 ‘구제역 인증 상태’의 변화를 시도한다. 구제역 감염국이 구제역 방역과정중에 고려할 수 있는 목표 대안은 ① 백신 미접종 구제역 청정국으로의 직접 진입 또는 ② 백신접종 구제역 청정국으로의 진입 후 추후 백신 미접종 구제역 청정국으로의 재진입이다. 이 두가지 목표 대안은 구제역 방역 정책 수립에 결정적인 영향을 미치게 된다. 구제역 방역 과정에서 사용한 방역수단에 따라 선택할 수 있는 목표 대안이 제한을 받기 때문이다. 목표대안별 사용가능한 방역정책 대안과 지위변화 신청가능 시점 그리고 지위변화 결정에 실제로 소요되는 기간 등은 <표 2>에 나타난 바와 같다.

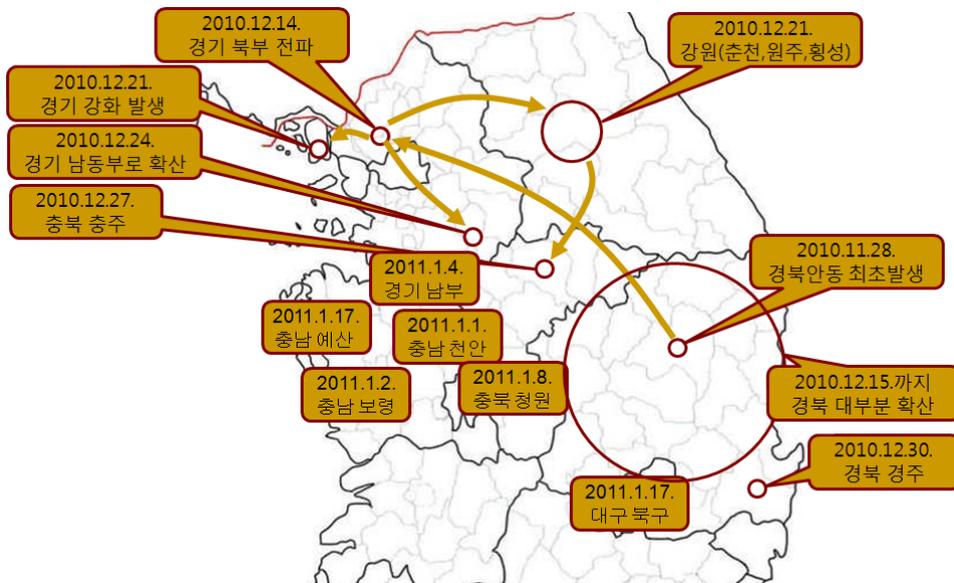
3. 국내 구제역 발생 개관

기록상 우리나라에서 최초로 구제역이 발생한 시점은 1911년으로 알려져 있다. 이후 매년 소규모로 발생하다가 1934년 발생을 마지막으로 상당기간 발생 사실이 없는 것으로 기록되어 있다(김정호 외, 2011). 이와 같이 소규모 발생과 종식으로 잠잠하던 구제역이 2000년 3월 경기도 파주, 2002년 경기도 안성, 2010년 1월 경기도 포천, 2010년 4월 경기도 강화 등 2000년 이후 비교적 빈번히 발생하고 발생규모도 점차 증가세를 보이고 있다. 이와 같이 2000년대 이후 발생한 4회의 구제역도 살처분 정책만으로 일정기간내에 방역이 성공하고 짧은 기간 경과 후 ‘백신 미접종 구제역 청정국’으로 재진입한 바 있다. 그러나, 2010년 11월 경북 안동에서 최초 발생한 구제역의 경우 약 5개월의 기간동안 전국으로 확산되었고, 이전과 달리 살처분은 물론 전국 백신접종 정책을 시행하여 겨우 진정된 대규모 구제역 감염 사례로 기록되고 있다. 본 연구에서 이 사례를 대상으로 하는 것도 전국적인 최대 규모의 구제역 감염이라는 점에 기인하고 있다.

2010년 11월 28일 발생한 구제역(이후부터는 ‘2010하반기 구제역’으로 표기)이 2011년 1월 17일까지 일부기간에 대해 전파된 상황은 [그림 1]에 나타난 바와 같다. 구제역 중앙안전 대책본부 백서(2011)에 나타난 바에 따르면, 이와 같이 단기간에 전국으로 확산된 원인은 크게 세가지로 정리되고 있다. 첫째, 구제역 바이러스는 추운 날씨에 더욱 왕성한 활

동력을 보인다는 점, 둘째로는 전염병에 취약한 우리나라의 축산구조, 그리고 세 번째 요인으로는 백신접종 결정이 지나치게 신중했다는 점을 지적하고 있다.

두 번째 요인으로 지적된 ‘취약한 축산구조’에는 세부적으로 ① 구제역 발병시 살처분에만 의존했던 방역정책과 ② 고밀도 집약식 사육환경이 거론되고 있다. 또, 세 번째 요인에 대해서는 위의 두 번째 요인에서 지적된 ‘기존 살처분 위주 방역정책’의 연장선상에서 살처분 정책 중심으로 구제역 확산에 대응하다가 전국적인 확산이 이루어진 이후에야 백신접종을 실시함으로써 백신접종의 시기가 지나치게 지연되었다는 지적을 하고 있다. 여기서, 발병시점이 초겨울이므로 기온에 의한 구제역 바이러스의 활성화에는 적절한 대응책을 찾기 어려울 수 있으나, ‘전염병에 취약한 축산구조’는 장기적으로 개선해야 할 과제이고, ‘백신 도입 및 접종지연’은 단기적으로 정책 수정을 고려해야 할 부분이라고 하겠다.

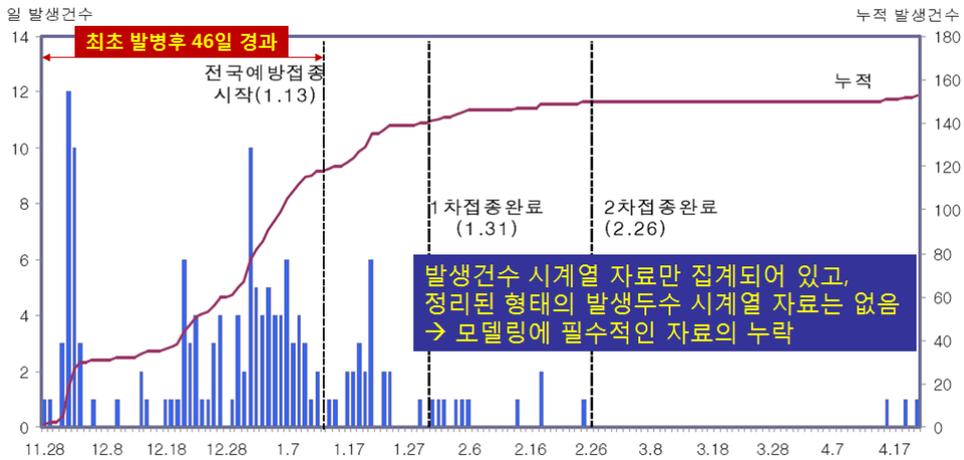


[그림 1] 2010하반기 일반기간(2010. 11. 28. ~ 2011. 1. 17.) 구제역 전파도

자료: 구제역 중앙 재난안전대책본부, 2011 요약 정리

백신 접종 시기가 지나치게 늦었다는 지적은 [그림 1]과 더불어 [그림 2]를 함께 고찰하면 보다 명확히 알 수 있다. [그림 2]에는 ‘2010하반기 구제역’ 전체 확산 기간(2010년 11월 28일 ~ 2011년 4월 17일)에 대해 일자별 구제역 발생 건수와 누적 발생건수가 나타나 있다(김정호 외, 2011). 여기서, [그림 2]에 나타나 있는 ‘발생건수’는 ‘감염된 개체수’가 아니라 개체수와 무관하게 감염이 발생한 농장수를 나타낸다. 또한, 우제류 가축은 소, 돼지,

염소, 사슴 등 다양하지만 이러한 축종별 구분도 이루어지지 않은 상태로 단순히 감염발생 건수만을 나타내고 있다. 즉, [그림 2]의 자료에서는 일자별로 구분된 축종별 감염 개체수는 물론이고 감염된 우제류 전체 개체수도 파악할 수 없다. 구제역이 급속하게 전파되는 상황에서 현장 담당자가 축종별로 구체적인 감염 개체수를 파악하기 어려울 뿐만 아니라, 특정 농장에 감염증상을 보이는 소수의 개체가 발견되면 해당농장의 모든 가축을 살처분하기에 급급했던 상황의 결과로 보여진다. 이와 같은 자료 기록의 부정확성 또한 우리의 구제역 방역대응 체계상에서 개선이 이루어져야 할 부분이라고 판단된다.



[그림 2] 2010하반기 구제역 발생건수 (2010. 11. 28. ~ 2011. 4. 17.)
 자료: 김정호 외, 2011.

<표 3> 2010 하반기 구제역에 따른 매몰처리 농장수와 가축수

축종	매몰처리 농장수	매몰처리 가축수
소	3,750	150,864
돼지	2,103	3,318,298
염소	232	7,557
사슴	156	3,243
계	6,241	3,479,962

* 자료: 김정호 외, 2011.

[그림 1]에 나타나있는 바와 같이 전국적인 확산이 이루어진 것으로 볼 수 있는 2011년

1월 17일보다 4일 앞선 시점(최초 발병후 46일 경과 시점)에서야 전국적인 예방접종이 시작되고 있음을 [그림 2]를 통해 알 수 있다. 또, [그림 2]의 누적 발생건수 곡선에서 최초 백신 접종이후 어느 정도 감염 발생건수가 진정되고 이후 1차 접종 완료시점부터는 거의 신규감염이 사라지고 있음을 알 수 있다. 2011년 6월 2일자를 기준으로 이상과 같은 전국적인 감염확산 및 방역과정을 거쳐 매몰처리가 이루어진 농장수는 6,241개소이고, 매몰된 우제류 가축수는 3,479,962마리로 추계되고 있다(김정호 외, 2011). 이는 우리나라 우제류 가축 전체의 약 26%에 해당된다. 축종별 매몰 가축 개체수는 <표 3>에 나타난 바와 같다.

III. 시스템 다이나믹스 모델링과 시뮬레이션

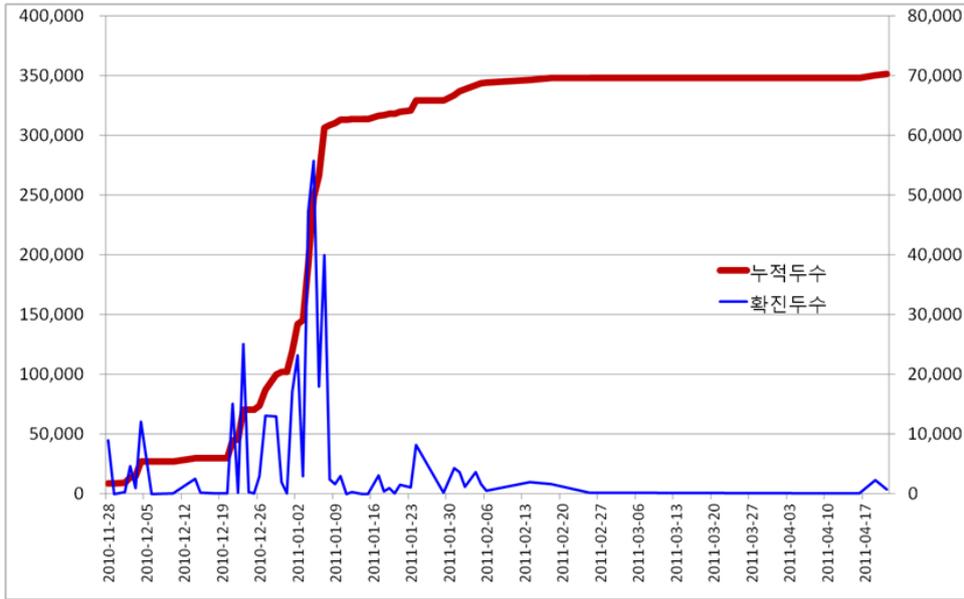
1. 모형 작성상의 가정

본 연구는 ‘2010 하반기 구제역’이라는 구체적인 전염병 확산 사례를 대상으로 하고 있다. 따라서, 일차적으로 동 사례의 확산 행태를 재현할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하고, 다음 단계에서는 구제역 방역 정책들의 실시 시기별 효과성을 검증하는 과정을 거친다. 그러나, 전염병 확산과정 시뮬레이션 모형화에 필수적인 축종별, 감염개체수 자료가 존재하지 않는다는 점은 전술한 바와 같다. 이외에도, 몇가지 현실자료의 부재로 인해 다음과 같은 세가지 가정을 전제로 하여 모형을 작성하였다.

- (가정 1) 우제류 가축들을 축종별로 구분하지 않고 단일 집단으로 모형에 반영한다.
- (가정 2) 구제역은 감염축(또는 감염지역)을 중심으로 가까운 지역부터 원형으로 확산이 진행된다.
- (가정 3) 구제역 감염가능성을 근거리 감염가능성과 원거리 감염가능성으로 이원화하여 고려한다.

(가정 1)은 ‘2010 하반기 구제역’ 관련 백서 및 자료에서 축종별 감염 개체수 자료를 찾을 수 없는 한계점에 기인하고 있다. 이와 관련하여, 백서 등에 정리된 자료에서는 ‘감염 개체수’가 아닌 ‘감염 건수’가 나타나 있음은 전술한 바 있다. 다만, 김정호 외(2011)에 포함된 ‘구제역 상황 일지’에 일자별 발생건수가 정리되어 있다. 그러나 동 자료에서도 축종 구분이 명확히 기재되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우가 혼재되어 있는 관계로 불가피하게 축종 구분 없이 우제류 전체를 단일집단으로 가정하고, ‘구제역 상황 일지’를 종합하여

[그림 3]과 같이 ‘전체 우제류 감염 개체수’시계열 자료를 작성하였다.



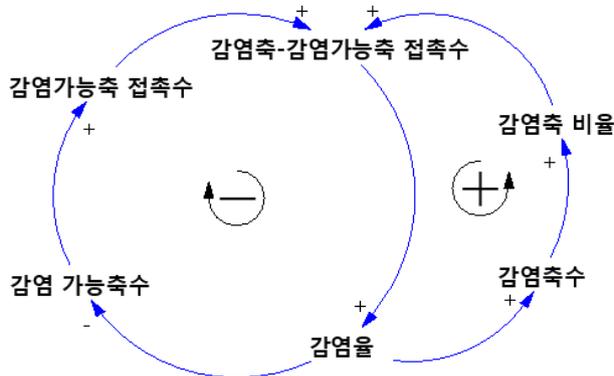
[그림 3] 2010 하반기 구제역 감염 우제류 개체수
 자료 : (김정호 외, 2011)에서 정리

(가정 2)는 기본적으로 전염병 확산 행태를 반영한 것이다. 동시에, 현재 시점에서 우리나라 우제류 사육농장 자료(농장별 위치, 면적, 사육두수 등)가 체계적으로 관리되고 있지 못하다는 현실적 한계로 인해 불가피하게 설정한 가정이기도 하다. 물론, 이러한 우제류 사육농장 자료가 활용가능하다면 보다 세분화된 모형수립을 고려할 수는 있겠지만 이는 ‘위치정보를 함께 사용하는 시뮬레이션 모델수립’이라는 새로운 연구과제로써 상당한 추가 연구를 필요로 할 것으로 사료된다. (가정 3)은 본 연구 모델링에서 핵심적인 부분에 해당한다. 즉, (가정 2)에서 구제역이 감염축(감염지점)을 중심으로 원형의 형태를 띠면서 점진적으로 확산된다고 보았기 때문에 감염지역과 멀리 떨어진 지역에서 감염이 발생하는 현상은 일어나지 않아야 한다. 그러나, [그림 1]에서 볼 수 있는 바와 같이 2010년 11월 28일 경북 안동에서 최초로 발생한 구제역이 인근 지역으로 확산됨과 동시에 2010년 12월 14일에는 발생지역으로부터 직선거리로 200Km이상 떨어져 있는 경기도 북부지역으로 전파되었다. 김정호 외(2011)와 중앙재난안전대책본부(2011)은 이러한 현상을 전국적인 사료공급차의 이동에 따른 결과일 가능성이 높다고 진단하고 있다. 그러나, 구제역은 그 이외에도 공기, 일반 차량, 사람, 야생동물 등 여러 가지 전파 매개체를 통해 확산되므로 정확한 감염

전과 원인을 특정하기는 어렵다. 하지만, 분명한 것은 원거리 감염의 가능성이 존재한다는 사실이다. 정리해보면 (가정 2)는 특정 지역에 감염축이 발생하면 그로부터 인근 지역으로 원형으로 확산이 이루어진다는 근거리 감염방식에 대한 가정이고, (가정 3)은 구제역이 감염축과 일정거리내에서만 감염이 발생하는 것이 아니라, 다양한 매개체에 의해 원거리 감염도 발생한다는 사실을 반영한 가정이다. 여기서 주의할 점은 ‘원거리 감염’에 의해 감염이 발생한 감염축도 감염 직후부터는 다시 인근의 비감염축들을 대상으로 근거리 감염을 발생시킨다는 사실이다. 따라서, 모델내에서는 근거리 감염이든 원거리 감염이든 일단 감염이 이루어진 감염축은 근거리 감염이라는 동일한 감염 전파역할을 수행한다는 사실을 반영하였다. 다만, 근거리 감염 가능성이 원거리 가능 가능성보다 높게 설정된다는 차이점이 존재하게 된다.

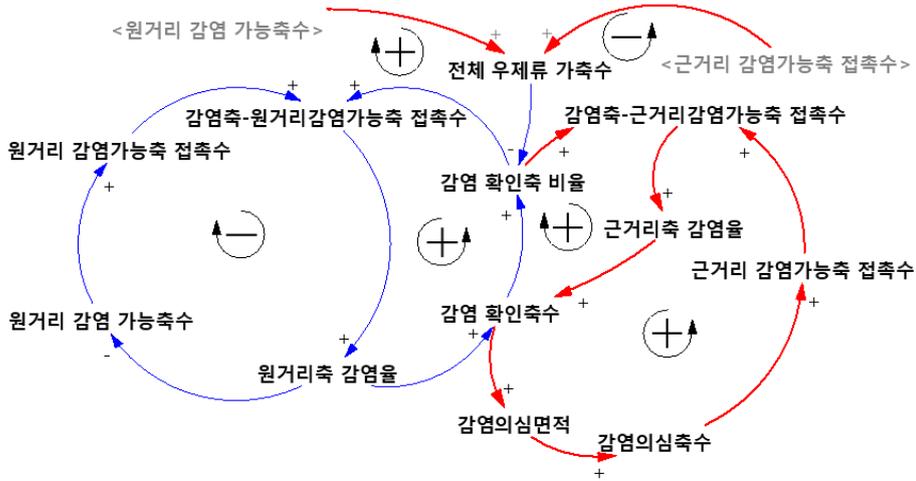
이상의 세가지 가정 설정을 통해 2010하반기 구제역 감염 사례에 대한 세부적인 자료의 부재에도 불구하고, 추상화·통합화된 모델을 작성하였다. 그러나, 이는 현재까지 축산정책 당국에서는 우제류 농장의 위치 및 사육정보의 정확한 파악과 일목요연한 관리를 수행하지 않았고, 구제역 방역 당시 축종별·일자별 감염확진 개체수를 명확히 기록으로 남기지 않음에 따른 불가피한 선택일 뿐이다. 세부적인 자료가 가용하다면 해당 자료들을 최대한 반영할 수 있는 모델로 확장·개선해야 할 것이다.

2. 인과지도



[그림 4] 구제역 감염 확산 기본 인과지도

구제역은 기본적으로 일반적인 전염병의 전형적인 특성을 모두 가지고 있다. 즉, 구제역에 감수성을 갖는 비감염축 집단과 가까운 거리내에서 신규감염이 발생하면 II장 1절에서 기술한 바와 같이 다양한 경로를 통해 감염이 전파된다. 이에 따라, 감염축 집단의 규모는 증가하면서 비감염축과의 접촉가능성이 높아져 감염을 더욱 빠르게 유발한다(양의 피드백 루프). 반면, 감염이 상당부분 확산됨에 따라 비감염축 집단의 규모는 감소하게 되고, 이는 추가적인 감염확산을 억제시키는 요인으로 작용한다(음의 피드백 루프). 즉, 감염초기에는 양의 피드백 루프가 시스템을 지배함으로써 감염집단의 규모를 증가시키다가, 일정 시점 이후에는 음의 피드백 루프가 시스템을 지배하게 됨으로써 전형적인 S형 성장곡선을 형성하게 된다(김동환, 2004; 김도훈 외, 1999; Sterman, 2000). 이러한 기본적인 전염병 인과지도는 [그림 4]에 나타난 바와 같고, 본 연구의 모형은 이 기본 인과지도에 구제역이 갖는 특성들을 반영하는 방식으로 작성되었다.

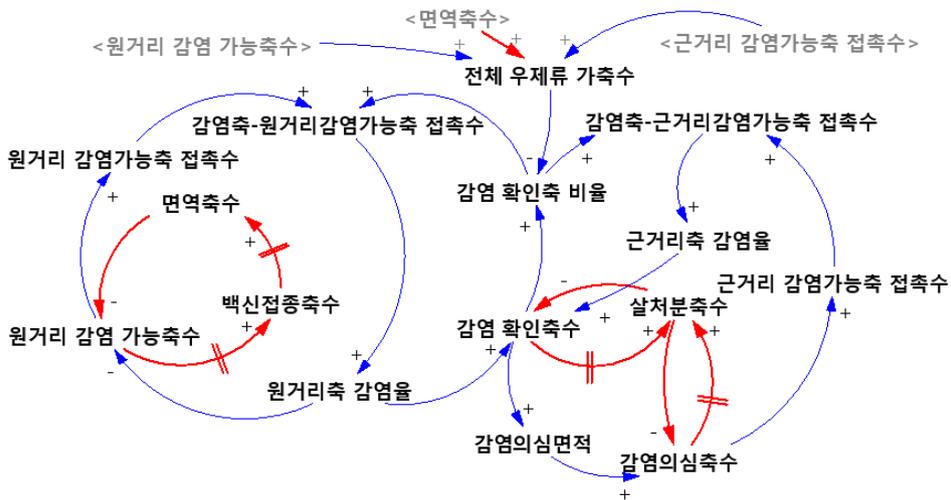


[그림 5] 원형 확산 및 근거리/원거리 감염 고려 인과지도

[그림 4]의 기본 인과지도에 감염이 원형으로 확산되어 감염 가능성이 높은 근거리 면적이 증가하는 측면과, 원거리 감염도 동시에 고려하도록 수정된 인과지도가 [그림 5]에 나타나 있다. 즉, 감염확인축수가 증가할수록, 감염가능성이 높은 감염가능면적이 증가하게 되고, 이는 다시 감염의 속도를 증가시키는 양의 피드백 루프로 기능하게 된다. 또, 감염확인축이 증가하면 근거리 감염가능성보다는 낮은 비율이지만 사료 공급차량등에 의한 원거리 감염의 가능성도 증가하게 된다. 원거리 감염에 의해서도 일단 감염이 일어나면 이는 다시 모델상에서는 근거리 감염축과 동일하게 ‘감염확인축’ 집단으로 산입되게 되고, 해당

감염축(또는 감염지역)은 인근 지역에 대해 근거리 감염을 발생시키는 기능을 하게 된다.

다음으로는 구제역 방역의 핵심 정책인 살처분과 백신접종을 추가하여 [그림 6]과 같이 최종 인과지도를 작성하였다. 구제역은 전염성이 강하고 감염이후에는 치료제가 존재하지 않으며, 구제역 방역에 성공한 이후 청정국 지위를 회복하는 시점까지 국제교역상 막대한 피해를 가져오게 되므로, 감염축 및 감염의심축은 살처분(감염원의 영구 격리)이 불가피하다. 동시에, 비감염축에 대한 감염을 원천봉쇄하기 위한 수단으로써 비감염축에 대해 백신접종을 실시하게 되는데, 본 연구의 사례인 2010하반기 구제역 확산에서도 두가지 정책이 시차를 두고 실시되었으므로 이를 반영하였다. [그림 6]의 최종 인과지도에서 감염확인축 및 감염의심축이 살처분축으로 전이되는 과정에 시간지연이 표시된 이유는 인력과 장비의 부족으로 인해 현장에서 실제로 나타난 현상을 반영한 것이다. 또, 백신접종은 감염이 의심되지 않을 만큼 충분히 원거리에 있는 비감염축을 대상으로 이루어지고, 백신접종 실시(백신 확보와 백신접종 인력의 한계로 시간지연 발생) 및 백신접종후 면역화까지도 각각 시간지연이 발생하는 현실을 반영하였다.

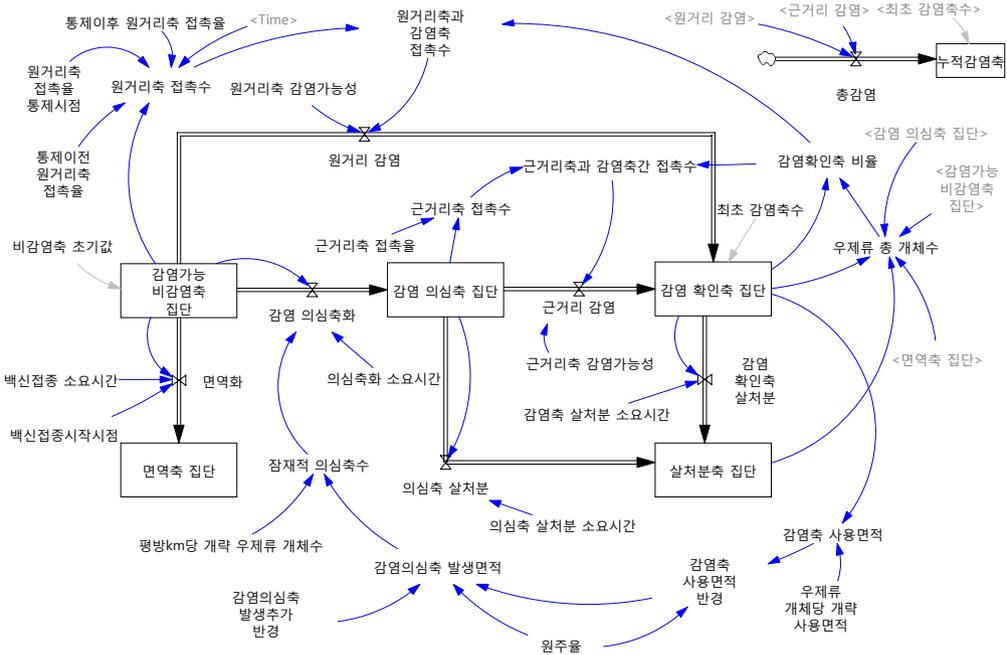


[그림 6] 살처분과 백신접종을 추가한 최종 인과지도

3. Stock-Flow Diagram

최종 인과지도를 토대로 작성한 Stock-Flow Diagram은 [그림 7]과 같다. 우제류 총 개체수등은 2010하반기 구제역 백서(김정호외, 2011; 중앙재난안전대책본부, 2011)의 자료를 활용하였으며, 동 백서의 자료와 기타 전문가 인터뷰 (EBS, 2011) 등을 참조하여 기본적인 수

식을 기본적으로 설정한 후 [그림 3]의 구제역 누적확진두수 자료와 Vensim의 Optimization 기능을 활용하여 파라미터값들을 미세 조정하였다. 본 연구에서 작성한 모델이 현실을 상당부분 단순화·추상화·통합화 하였고, 동시에 세부적인 현실 데이터가 거의 존재하지 않는 상황이어서 불가피하게 이러한 방법을 적용하였다. 세부적인 수식은 부록으로 첨부하였다.

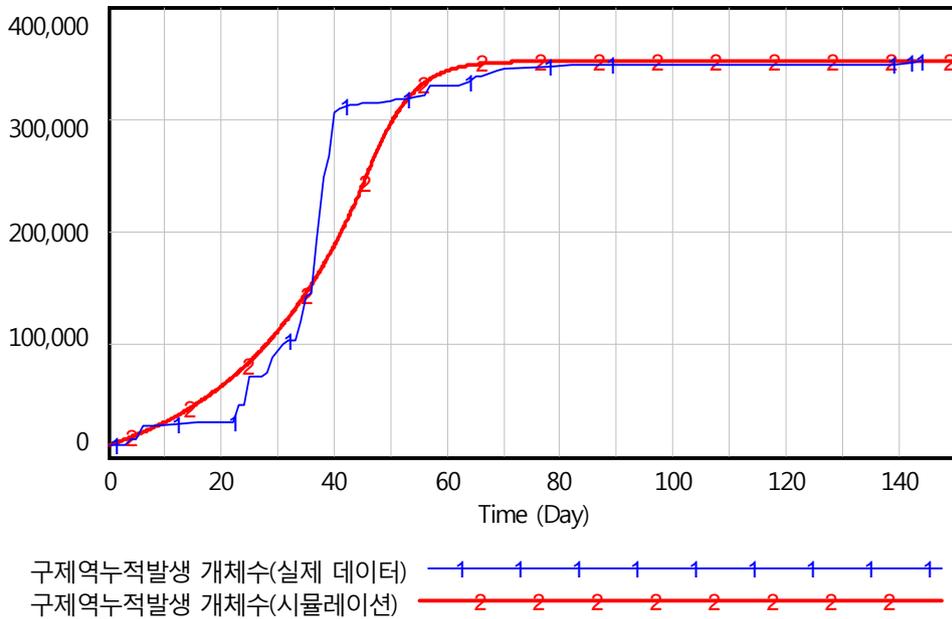


[그림 7] 구제역 감염 확산 Stock-Flow Diagram

4. 기본 시뮬레이션

[그림 3]에서 제시한 바 있는 ‘2010 하반기 구제역 감염 누적개체수’ 자료와 본 시뮬레이션 기본 모델의 결과를 비교한 그래프가 [그림 8]에 나타나 있다. 그래프에서 Time축의 수치는 구제역 최초 발생시점인 2010년 11월 28일을 0으로 하여 이로부터 경과된 일자를 표시하고 있다. [그림 8]에서 실제 데이터와 시뮬레이션 결과가 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 기본적으로 우리나라 우제류(주로 돼지와 소) 사육농가의 대규모 집적사육 특성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 대규모 집적사육이 이루어지는 하나의 농장에 감염축이 한 마리라도 발생하면, 이는 전체 가축이 감염되는 것으로 간주되기 때문에 급격한 감염확산

이 실제 데이터에 반영되어 있다. 그러나 시뮬레이션 모델에서는 농장 위치 및 농장별 사육두수 자료의 부재로 인해 기본적으로 우리나라 전체 우제류 가축들이 고르게 산재된 것을 묵시적으로 가정하고 있다. 또한, 현실에서 구제역 확진은 농장주의 신고와 방역당국의 확인에 의해 일정한 시차를 두고 감염축수 자료가 수집되게 되므로 확진시점은 실제 감염시점보다는 시간지연이 개입되어 있을 가능성이 크다. 따라서, 사육농가가 밀집되어 있는 특정 감염지역별로 (실제 감염시점보다 약간 늦게) 대규모로 감염이 확인되는 현실상황이 실제데이터에 반영되어 있을 가능성이 있을 것으로 추정된다. [그림 8]의 두 곡선을 비교해보면 실제 데이터는 시뮬레이션 곡선보다 초반 증가추세는 약간 늦게 나타나고, 일정시점 이후에는 급격한 증가를 보이는 차이를 보이고 있는데, 일정부분은 전술한 원인에 기인했을 것으로 추정된다.



[그림 8] 실제 구제역 감염 누적 개체 발생수와 시뮬레이션 결과 비교

IV. 방역대책 시뮬레이션 결과

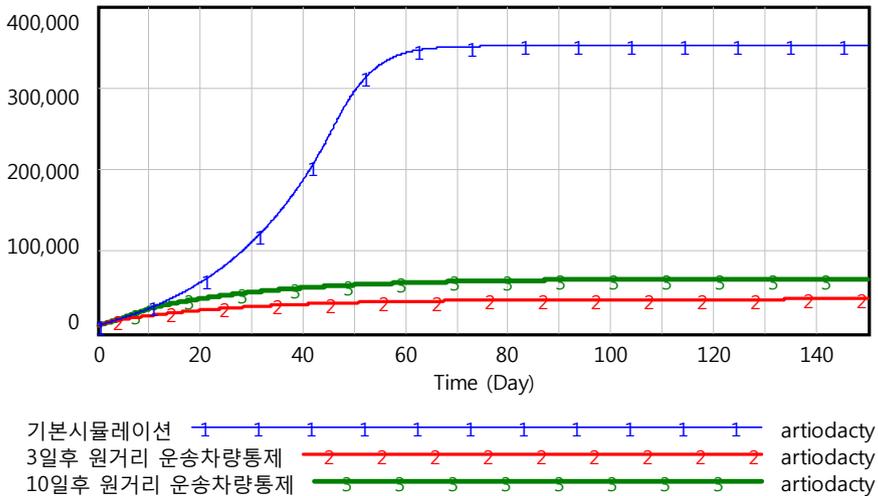
구제역 발생 이후에 일반적으로 활용되는 대책은 이동제한, 농장 및 주요도로 소독, 살처분 그리고 백신접종 등이 있다. 이동제한 조치는 초기의 경우 발생농장 인근을 중심으로

이루어지다가, 일정 지역 이상으로 감염이 확산되면 전국 주요 도로로 확대된다. 그러나, 본 연구에서는 근거리 이동제한은 큰 의미를 부여하지 않았다. 근거리의 경우 II장에서 논의한 바와 같이 사람뿐만 아니라 공기, 야생동물 등 다양한 매개체에 의해 전파가 이루어지기 때문에 사람에 대한 이동제한 조치가 큰 의미를 갖지 못하기 때문이다. 따라서 본 장에서는 감염발생 축산농장에서 원거리에 위치하는 축산농장으로 감염을 전이시키는 ‘원거리 이동제한 조치’, 그리고 감염확산 이후에 가장 효과적인 대책으로 활용되는 ‘백신 접종’에 대해 주로 시뮬레이션을 수행하였다. 이에 더하여 살처분 소요시간을 단축하는 것도 일정부분 효과가 있을 것으로 판단되지만 이 시간 단축은 현실적으로 불가능하다는 판단에 따라 본장에서 고려하지 않았다. 2010하반기 구제역 방역 현장에서는 가용한 인력을 총 동원해서 살처분에 임한 바 있다(김정호 외, 2011; 중앙재난안전대책본부, 2011). 따라서, 추후 감염 발생시에도 당시보다 더 빠른 속도로 살처분을 실행하기는 난망하다고 판단되기 때문이다.

1. 축산차량 원거리 이동제한 조치

구제역 긴급행동지침에는 구제역 의심축이 발생하면 일차적으로 해당농장에 대해서만 이동제한 조치를 실시하고, 구제역으로 확진되면 인접지역에 이동통제 및 소독초소를 설치하는 것으로 규정되어 있다(농림수산식품부, 2012). 그러나, ‘2010 하반기 구제역 감염 사례’에서도 나타났었던 바와 같이, 신속하고도 정확한 초동 대처가 부족하였다(김정호 외, 2011). 따라서, 본 연구에서는 구제역 확진이후 신속한 이동제한조치의 효과성을 일차적으로 시뮬레이션하였다.

이동제한 조치는 ‘의심축 발생시 해당 농장에 대해서만 실시하는 이동제한’과 ‘확진축 발생시 인접지역에 이동통제 및 소독초소’ 설치를 망라하는 것으로 본질적으로 일정한 거리 이상 이격되어 있는 우제류 가축들에 대한 ‘원거리 감염’을 방지하는 노력으로 해석된다. 이러한 이동통제가 효과적으로 이루어진다면 감염축과 ‘원거리에서 사육되고 있는 우제류 가축들’과의 접촉률이 감소한다고 보는 것이 타당할 것이다. 이러한 접촉률 감소를 시뮬레이션 모델에 반영하기 위해서 ‘통제이전 원거리축 접촉율(1일 3.6마리)’에서 통제이후 원거리축 접촉율(1일 2마리)로 감소하도록 설정하였다. 또, 이러한 이동제한 조치가 실질적인 감염과 동시에 이루어지는 것은 현실적으로 불가능하므로, 감염 3일후에 실시되는 경우와 감염 10일후에 실시되는 경우를 각각 시뮬레이션 하였다. ‘통제이후 원거리축 접촉율’을 0이 아닌 2로 설정한 것은 우리나라의 현재 축산환경에서 완벽한 통제가 사실상 불가능하다는 점을 고려한 것이다. 시뮬레이션 결과는 [그림 9]에 나타난 바와 같다.



[그림 9] 이동제한조치에 의한 원거리 감염 억제 효과

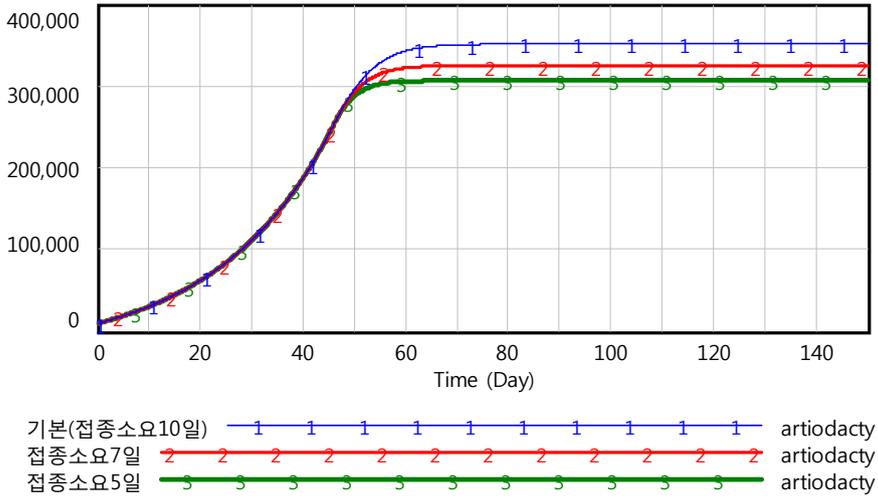
[그림 9]의 그래프에서 1번으로 표시된 ‘기본시뮬레이션’ 곡선은 [그림 8]에 나타난 바와 동일한 기본 설정상태의 누적감염축수를 나타낸다. 즉, ‘2010 하반기 구제역’ 감염 상황을 그대로 묘사한 곡선이므로, 발생 초기에는 살처분만으로 대응하다가, 발생후 46일이 경과된 시점에서 전국적인 백신접종과 살처분을 병행한 상황을 상정하고 있다. 반면, 이동제한조치를 반영한 2번과 3번 곡선은 순수하게 이동제한조치의 효과만을 살피기 위해, 살처분은 기존과 동일한 방식으로 진행하지만, 백신접종은 시행하지 않는 상황으로 설정되어 있다. 이러한 설정하에서 이동제한조치 실시시기에 따라 누적감염수의 차이는 있지만 제대로 된 이동제한조치는 구제역 방역에 결정적인 역할을 수행하는 대책임을 [그림 9]는 보여주고 있다.

실제로 본 연구에서 대상으로 하고 있는 ‘2010 하반기 구제역’ 발생 이전에도 여러번 국내에 구제역이 발생한 바 있지만 살처분과 이동제한 및 소독조치만으로 전국적 확산이전에 방역에 성공하였었다. 특징적인 점은 이전에 발생한 구제역 감염은 겨울이 아닌 계절에 발생하였다는 것이다. 구제역 바이러스는 낮은 기온에서 더욱 활성화되는 반면 구제역 방역에 사용되는 소독액은 영하의 기온에서는 결빙으로 인해 그 효과가 급격히 낮아진다는 점에 주목해야 한다. 즉, 구제역 감염 발생시 주요 도로에 설치하는 소독초소 운영은 혹한기의 경우 그 효과가 매우 제한적이라는 것이다. 또, 최근으로 올수록 우제류 축산농가의 사육환경이 대규모 집적화 방식으로 변경되었으며, 이는 필연적으로 차량에 의한 벌크사료 공급과 분뇨처리 등의 방식의 확산으로 이어졌다. 특히, 사료값을 절감하려는 축산농가의

요구는 전국적인 공급망을 갖춘 대규모 벌크사료 공급업체의 출현을 초래하였으며, 이는 구제역 감염발생시 전국적인 확산에 결정적 매개체 역할을 수행할 수 있다. 사후적 분석이기는 하지만 이상에서 논의한 영하의 기온과 전국적인 사료공급차량이 ‘2010 하반기 구제역’ 사례에서 방역당국의 이동제한조치를 약화시킨 주범으로 지목되고 있다(EBS, 2011). 실제로 ‘2010 하반기 구제역’ 감염 발생이후 상당한 기간 동안 주요 도로의 소독초소 근무자가 사료공급차량에 대해 특별한 주의를 기울이지 않은 상태에서 영하의 기온으로 큰 효과를 기대할 수 없는 일상적인 차량소독만을 실시했던 것으로 나타나고 있다. 구제역 감염발생 초기에 원거리 축산농장을 정기적으로 운행하는 사료 및 분뇨차량 자체의 운행을 효과적으로 통제할 수 있다면 [그림 9]에 나타난 바와 같이 백신을 접종하지 않고도 살처분 대책만으로 전국적인 대규모 구제역 확산을 회피할 수 있었을 것으로 판단된다.

2. 백신접종 소요시간 단축

다음으로는 구제역 방역에서 매우 효과적인 대책이지만, ‘(백신 미접종) 구제역 청정국’으로의 재진입에 소요되는 시간이 길게 소요된다는 점, 그래서 그 기간 동안 수출 제한에 따르는 경제적 손실 발생을 미리 염려하여 시행 시기를 늦추었던 ‘백신접종’의 효과에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 우리나라에서는 ‘2010하반기 구제역’ 이전에 발생했던 모든 구제역 감염 사례에서 살처분과 이동통제(소독초소 운영)만으로 구제역 방역에 성공해 왔음은 전술한 바 있다. 이러한 경험에 더하여 백신접종 없이 구제역 방역에 성공하면 이후 ‘백신 미접종 구제역 청정국’ 지위회복이 백신접종시보다 최소한 1년 이상 적게 소요된다는 사실(<표 2> 참조) 때문에 정책당국에서 백신접종을 주저한다고 판단된다. 그러나, 구제역이 감염가축수에서나 감염지역 측면에서 일정한 수준 이상으로 확산되면 살처분과 이동통제만으로는 방역에 한계가 있다는 점도 전문가들의 공통적인 지적이다.(EBS, 2011) 2010 하반기 구제역의 경우에도 전국적으로 확산이 이루어진 이후에 백신접종을 통해 비로소 감염확산 속도를 낮출 수 있었음이 [그림 2]이 잘 나타나 있고, 이는 대규모 구제역 확산시 가장 효과적인 대책이 백신접종을 방증하는 것이다.

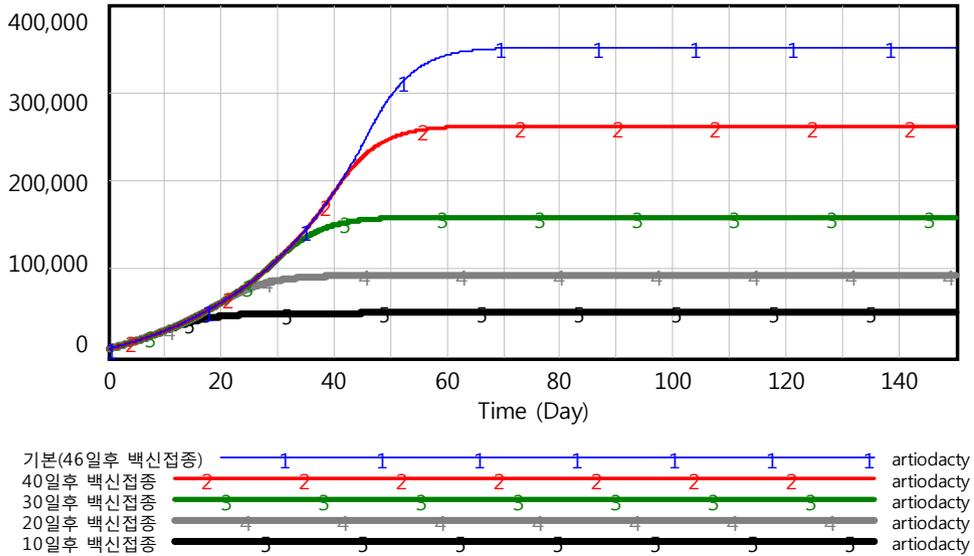


[그림 10] 백신접종 소요시간 단축에 의한 감염 억제 효과

본 연구에서는 방역당국에서 백신접종을 시점을 늦출 수 밖에 없는 현실을 감안하여, 비교적 백신접종 시점이 늦었다 하더라도 최대한 접종에 소요되는 시간을 단축하였을 때의 효과를 일차적으로 시뮬레이션 하였다. 물론, 이를 위해서는 전국적인 긴급 백신수급 및 백신접종 체계 구축과 접종인력의 확보가 선행되어야 하겠다. [그림 10]은 전국적인 백신접종 시작 시점을 2010 하반기 구제역 사례와 동일하게 최초 발생후 46일 경과시점으로 설정한 상태에서 (1) 전국 접종완료에 10일 소요(기본 시뮬레이션), (2) 전국 접종완료에 7일 소요, (3) 전국 접종완료에 5일 소요로 설정을 각각 변경하면서 시뮬레이션한 결과이다. [그림 10]에 나타난 바와 같이 접종 소요시간의 단축이 일정정도의 효과는 보여주지만, 근본적인 해결책이 될 수 없다고 판단된다.

3. 조기 백신 접종

정책당국에서 구제역 감염 확산 상태를 파악하는 과정에는 필연적으로 시간지연이 개입된다. 즉, 해당 시점의 실제 확산상태보다 과소하게 파악하게 되는 것이 일반적이다. 이에 따라, 살처분만으로 구제역 방역이 가능할 것이라는 기대와 백신접종에 의해 자명하게 초래되는 경제적 피해(축산물 수출제한에 의한 피해)은 백신접종 시기를 지연시키게 한다. 이러한 접종시점 지연에 따르는 피해를 살펴보기 위해 2010하반기 구제역 사례에서 백신접종 시점을 앞당겼을 경우에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과가 [그림 11]에 나타나 있다.



[그림 11] 구제역 조기 예방접종의 효과 비교

[그림 11]에는 구제역 발생 10일, 20일, 30일, 40일 이후 그리고 지난 2010하반기 구제역 감염에서 실제로 접종을 시작한 시점인 46일 이후를 각각 시뮬레이션 한 결과들이 비교되었다. 이 비교 시뮬레이션 결과에서 조기 백신접종이 구제역 방역에 결정적인 역할을 수행함을 한번더 확인 할 수 있다. 더불어, 접종시점이 늦어질수록 접종 시작시점부터 구제역 감염속도 완화까지 소요시간이 늘어나는 현상도 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 구제역 감염이 확산될수록 확진은 되지 않았지만 실질적인 감염축이 더 많이 발생하는 현실과 일치하는 결과라고 할 수 있다.

V. 결론

본 연구는 ‘2010 하반기 구제역’ 감염 사례를 중심으로 시뮬레이션 모형을 구축하고 이를 토대로 주요한 사후적 방역대책들이 실효성 있게 실행되었을 경우의 효과를 시뮬레이션 함으로써 아래와 같은 시사점을 도출하였다.

첫째, 원거리에 이격된 우제류 축산농가간을 이동하는 사료 및 분뇨 운반차량 등을 적절히 통제한다면 전국적인 대규모 구제역 확산을 효과적으로 제어할 수 있다는 사실이다. ‘2010 하반기 구제역 백신’들에서는 초기 확진 지연을 대규모 확산의 가장 큰 원인으로 지

목하고 있으나, 감염 발생후 일정 시점이 경과했다 하더라도 축산차량의 원거리 이동통제를 수행한다면 구제역 추가 감염을 효과적으로 억제할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 실효성 있는 원거리 축산차량 통제가 살처분과 병행되면 백신접종 없이도 구제역 감염 종식을 조기에 달성할 수 있는 가장 효과적인 대책이라는 점이 시뮬레이션 결과에서 드러나고 있다.

두 번째는 백신접종에 소요되는 기간을 축소하는 것은 구제역 추가감염 완화에 약간의 도움은 되지만 결정적인 역할을 수행하지는 못한다는 사실이다. ‘2010 하반기 구제역’ 감염 사례에서 백신접종 결정이 이루어진 이후에도 국내에 보유중인 백신의 분량이 제한적이었고, 부족한 백신은 전량 수입에 의존하는 구조이어서 백신접종에 추가적인 시간지연이 발생한 바 있다. 이에 따라, 방역당국에서는 백신의 국내생산은 물론 백신접종 인력 및 체계 정비를 고려하고 있다. 그러나 본 연구 결과로부터 백신 수급 및 접종 시간단축은 제한적인 효과를 갖는 보조적인 대책임을 알 수 있었다.

마지막으로 구제역이 상당히 확산된 경우라면 백신접종 시작시점을 가능하면 앞당기는 것이 구제역 확산 억제에 결정적인 역할을 수행한다는 사실을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 방역당국에서 파악하는 구제역 확진축수와 확진 위치 정보는 실제 감염과는 10 여일 이상 시차를 두고 파악된다는 사실을 감안해서 백신접종 시작 시점을 앞당길 필요가 있겠다.

본 연구에서는 전염병 확산 기본 모델에서 출발하여 구제역이 갖는 고유한 특성과 ‘2010 구제역 확산’ 사례자료를 결합하여 최종 시뮬레이션을 작성하였다. 그러나, 모델 작성에 필요한 세부 통계 자료는 대부분 존재하지 않는 관계로 상당부분 통합화되고 추상화된 모델이라는 근본적인 한계를 가지고 있다. 단기적으로는 축산 및 수의전문가 면담 등의 방법으로 부족한 자료를 수집하여 모델을 보완할 필요성이 있으며, 중장기적으로는 축종별·지역별 우제류 가축 세부 사육정보를 반영한 모델로의 수정보완이 필요하다. 특히, 본 연구의 대상인 ‘2010 구제역 감염’을 계기로 추진되고 있는 전국축산정보시스템 자료를 적절히 활용할 수 있도록, 위치정보를 포함한 시스템다이나믹스 시뮬레이션 기법에 대한 연구가 장기적인 관점에서 필요하다고 하겠다.

【참고문헌】

- 강영희. (2008). 『생명과학대사전』. 아카데미서적.
- 김기연 · 김태형 · 손원근 · 고한중 · 정경임 · 김치호 · 김현태. (2013). “구제역 바이러스의 공기중 전파 관련 위험성 평가 및 대기 확산 모델 적용”. 『농업생명과학연구』 제47권 제2호: 53-63.
- 김도훈 · 문태훈 · 김동환. (1999). 『시스템다이내믹스』. 대영문화사.
- 김동환. (2004). 『시스템사고: 시스템으로 생각하기』. 선학사.
- 김봉환 · 최상호. (2001). “구제역의 역학적 특성, 발생현황 및 관리대책”. 『농촌의학, 지역보건』 제26권 제1호: 185-198.
- 김선경 · 김지은 · 백도명. (2011). “2010-2011년도에 발생한 구제역 살처분 원인에 대한 문화 분석”. 『한국환경보건학회지』 제37권 제2호: 165-169.
- 김정호 · 허덕 · 정민국 · 우병준 · 김창호 · 정종기 · 연가연. (2011). 『2010~2011 구제역 백서』. 한국농촌경제연구원.
- 농림수산식품부. (2012). 『구제역 긴급행동지침(SOP)』.
- 양기근. (2013). “구제역 재난관리 정책의 우선순위 분석: AHP 기법을 이용한 우선순위 측정을 중심으로”. 『한국정책학회 춘계학술발표 논문집』. 364-386.
- 온라인 브리태니커 백과사전. <http://www.britannica.co.kr/>
- 우병준 · 이명기. (2011). 『구제역 청정국 지위 유지 여부의 영향 분석』. 한국농촌경제연구원.
- 중앙재난안전대책본부. (2011). 『구제역 중앙재난안전대책본부 운영 백서』. 행정안전부.
- 진영화. (2006). “구제역! 소의 병변을 알아봅시다.”. 『월간 낙농 · 육우』 제26권 제5호: 163-165.
- EBS. (2011). 『하나뿐인 지구 - 가축대재앙, 구제역 바이러스의 습격』.
- Alexandersen, S., Z. Zhang, A.I. Donaldson and A.J.M. Garland. (2003). “The pathogenesis and diagnosis of foot-and-mouth disease”, *Journal of Comparative Pathology*, Vol. 129, No. 1, pp. 1-36.
- Durand, B., O. Mahul., (2000). “An Extended state-transition model for foot-and-mouth disease epidemics in France”, *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 47, pp. 121-139.
- Fan, X, J. Jiang, Y. Liu, X. Huang, P. Wang, L. Liu, J. Wang, W. Chen, W. Wu, B. Xu. (2013). “Detection of human enterovirus 71 and Coxsackievirus A16 in an outbreak of hand, foot, and mouth disease in Henan Province, China in 2009”, *Virus genes*, Vol.

46, No.1, pp. 1-9.

Gao, Zong-Liang, Yuan-Xing Gu, Jian-Hua Zhou, Yao-Zhong Ding, Jie Zhang, Hao-Tai Chen, Li-Na Ma, Yong-Sheng Liu.(2012), “Characteristics of Nucleotide and Codon Usage Bias of 2A Sequence of Foot and Mouth Disease Virus”, *Journal of Animal and Veterinary Advances*, Vol. 11, No. 19, pp. 3627-3634.

Naranjo, J. and O. Cosivi. (2013). “Elimination of foot-and-mouth disease in South America: lessons and challenges”, *Philosophical transactions the royal society biological sciences*, Vol. 368, No. 1623, pp.1-12.

OIE Homepage. <http://www.oie.int>

OIE. (2013). “Standard Operating Procedures for official recognition of disease or risk status of bovine spongiform encephalopathy and for the endorsement of official control programmes of Member Countries”, World Organization for Animal Health. pp.1-10.

Pendell, D.L., J. Leatherman, T.C. Schroeder and G.S. Alward. (2007). “The economic impacts of a foot-and-mouth disease outbreak: a regional analysis”, Selected Paper prepared for presentation at the Western Agricultural Economics Association Annual Meeting, Portland. (Available at: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/10252/1/sp07pe01.pdf>. visited 15. Nov. 2013).

Rich, K. M.(2008), “An interregional system dynamics model of animal disease control: applications to foot-and-mouth disease in the Southern Cone of South America”, *System Dynamics Review*, Vol. 24, No. 1, 67-96.

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics - Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin McGraw-Hil.

▶ 접수일 : 2013. 11. 29. / 게재확정일 : 2013. 12. 24.

【부록: 모델 수식】

감염 의심축 집단= INTEG (감염 의심축화-근거리 감염-의심축 살처분, 0)
감염 의심축화=MIN(감염가능 비감염축 집단, 잠재적 의심축수)/의심축화 소요시간
감염 확인축 살처분=감염 확인축 집단/감염축 살처분 소요시간
감염 확인축 집단= INTEG (근거리 감염+원거리 감염-감염 확인축 살처분, 최초 감염축수)
감염가능 비감염축 집단= INTEG (-감염 의심축화-면역화-원거리 감염, 비감염축 초기값)
감염축 사용면적=감염 확인축 집단*우제류 개체당 개략 사용면적
감염축 사용면적 반경=SQRT(감염축 사용면적/원주율)
감염축 살처분 소요시간=7
감염의심축 발생면적=원주율*(감염축 사용면적 반경+감염의심축 발생추가 반경)*(감염축 사용면적 반경+감염의심축 발생추가 반경) - 원주율*감염축 사용면적 반경*감염축 사용면적 반경
감염의심축 발생추가 반경=0.8
감염확인축 비율=감염 확인축 집단/우제류 총 개체수
근거리 감염=근거리축과 감염축간 접촉수*근거리축 감염가능성
근거리축 감염가능성=0.85
근거리축 접촉수=감염 의심축 집단*근거리축 접촉율
근거리축 접촉율=10
근거리축과 감염축간 접촉수=근거리축 접촉수*감염확인축 비율
누적감염축= INTEG (총감염, 최초 감염축수)
면역축 집단= INTEG (면역화, 0)
면역화=(감염가능 비감염축 집단/백신접종 소요시간) * STEP(1, 백신접종시작시점)
백신접종 소요시간=10
백신접종시작시점=46
비감염축 초기값=1.3233e+007
살처분축 집단= INTEG (감염 확인축 살처분+의심축 살처분, 0)
우제류 개체당 개략 사용면적=0.00753571
우제류 총 개체수=감염가능 비감염축 집단+감염 의심축 집단+감염 확인축 집단+면역축 집단-살처분축 집단
원거리 감염=원거리축과 감염축 접촉수*원거리축 감염가능성

원거리축 감염가능성=0.0515

원거리축 접촉수=감염가능 비감염축 집단*(IF THEN ELSE(Time>=원거리축 접촉율 통제시
점, 통제이후 원거리축 접촉율, 통제이전 원거리축 접촉율))

원거리축 접촉율 통제시점=5

원거리축과 감염축 접촉수=원거리축 접촉수*감염확인축 비율

원주율=3.14159

잠재적 의심축수=감염의심축 발생면적*평방km당 개략 우제류 개체수

의심축 살처분=감염 의심축 집단/의심축 살처분 소요시간

의심축 살처분 소요시간=10

의심축화 소요시간=18

통제이전 원거리축 접촉율=3.6

통제이후 원거리축 접촉율=2

총감염=근거리 감염+원거리 감염

평방km당 개략 우제류 개체수=50

최초 감염축수=9000