

경제-역학 모형을 이용한 조류인플루엔자 백신의 최적 비축 실물옵션 연구*

정진영** · 박호정*** · 장희선****

논문 초록 | 외래질병의 확산은 관련 산업뿐만 아니라 국가 전체에 큰 영향을 미치기 때문에 전염병의 확산을 사전에 예방하기 위한 적정 백신규모에 관한 경제학적 연구가 필요하다. 하지만 전통적인 경제학 모형은 질병 확산의 불확실성을 충분히 반영할 수 없는 한계가 있어 질병역학과 경제학을 결합한 통합모형을 활용하여 분석할 필요가 있다. 이에 본 연구는 국내에서는 최초로 경제-역학모형을 실물옵션과 연계하여 고병원성 조류인플루엔자(HPAI)의 최적 백신 비축량을 도출하였다. 또한, 기존의 역학모형에서는 제시하지 못했던 백신투여의 임계감염비율도 산출하였다. 본 연구결과에 따르면 2014년 HPAI 발생 사례를 기반으로 할 때 3,237만 수의 백신을 보유해야 하는 것으로 도출되었다.

핵심 주제어: 경제-역학모형, 실물옵션, 백신 비축

경제학문헌목록 주제분류: B4, C6, I0, Q0

투고 일자: 2019. 2. 1. 심사 및 수정 일자: 2019. 3. 15. 게재 확정 일자: 2019. 3. 22.

* 이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017S1A5A2A01025923).

** 제1저자, 에너지경제연구원 위촉연구원, e-mail: tootooi@keei.re.kr

*** 제2저자, 고려대학교 식품자원경제학과 교수, e-mail: hjeongpark@korea.ac.kr

**** 교신저자, 에너지경제연구원 부연구위원, e-mail: heesun.jang@keei.re.kr

I. 서 론

전 세계적으로 조류 인플루엔자(Avian Influenza), 신종플루, SARS, MERS와 같은 외래 질병¹⁾은 관련 산업 및 국가 전체에 큰 피해를 발생시키고 있다. 따라서 전염병에 대비한 백신의 적정 규모 비축에 관한 경제학적인 연구는 필수적이다. 현재 국내에서 가축에 발생하는 외래질병은 백신접종이 아닌 살처분(stamping out)을 활용하여 방역하고 있다. 백신을 주 방역수단으로 활용할 경우 백신으로 인한 병원균의 변이 가능성과, 국제 무역상에서 청정국의 지위 상실로 인한 경제적 불이익²⁾ 등이 발생할 수 있기 때문이다. 하지만 살처분을 주 방역수단으로 활용하게 되면 살아있는 개체를 폐사시킴에 따라 농가에 경제적인 피해가 발생하고(우병준 외, 2008), 매장된 사체에서 발생하는 침출수로 인한 2차 오염으로 환경오염 등의 피해가 발생할 수 있다(Munro, 2001; 한국농어촌공사, 2011). 또한 살처분에 참여하는 공무원 및 수의사의 약 75%가 외상 후 스트레스 장애(Post Traumatic Stress Disorder, PTSD)를 겪고, 참여인원 전체의 23%는 우울증까지 겪는 등의 피해가 발생하는 것으로 보고된다(국가인권위원회, 2017). 반면 백신접종을 통해 외래질병을 방역하면, 외래질병에 감염될 가능성이 낮아지기 때문에 살처분 개체 수와 비용이 감소하게 된다. 이에 따라 국내에서도 살처분으로 인해 발생하는 비용을 절감하기 위한 백신투여의 필요성이 제기되고 있다.³⁾

국내에서 고병원성 조류인플루엔자(Highly Pathogenic Avian Influenza, HPAI)는 2014년 이후 매년 2회 이상 꾸준히 발생하고 있다. 또한, HPAI의 감염으로 인해 살처분되는 가금류의 수 역시 가파르게 증가하고 있다.⁴⁾ 이에 따라 살처분 증가에

1) 본 논문에서의 외래질병은 전염성이 높은 pandemic disease를 의미한다.

2) OIE(World Organisation for Animal Health, 국제수역사무국)가 동물관련 전염병으로부터 안전하다고 인정한 국가를 의미한다. 전염병이 한 번 발생하게 되면, 질병이 완치 될 때까지 청정국의 지위를 상실하며 관련된 가축의 수출이 전면 금지된다. 일반적으로 백신을 투여하여 방역하는 경우, 접종된 개체의 항체검사를 실시하기 때문에 살처분을 활용하여 방역한 경우보다 청정국의 지위 상실 기간이 더 길다.

3) 최근 국내에서 개최된 'HPAI 백신정책 포럼'에서는 HPAI 백신과 인체 감염은 큰 상관관계가 존재하지 않기 때문에 매년 증가하고 있는 살처분 비용과 개체 수를 줄이기 위해 국내에도 HPAI 백신을 도입해야 한다는 주장이 제기되었다.

4) 2003년 102일 동안 약 528만 마리가 살처분 된 것에 비해 2016년에는 41일 만에 약 2,700만 마리가 살처분 되었다

따른 방역 비용 및 보상금도 증가하고 있는 상황이다(농림수산식품부, 2008, 2011, 2016; 한국농촌경제연구원, 2015). 하지만 한국은 AI 청정국의 지위상실로 인한 국제 무역상의 불이익, 백신 투여 시 발생할 수 있는 인체감염의 우려 및 HPAI의 토착화 가능성 등으로 인해 HPAI의 방역수단으로써 백신을 아직까지 적극적으로 활용하지 않고 있다. 하지만 우리나라와는 달리 멕시코, 중국 등은 HPAI의 방역수단으로써 백신을 주 방역수단으로 활용하고 있으며, 특히 중국은 2004년부터 2012년까지 HPAI 백신 사용으로 사용이전보다 약 84억 달러를 절감한 것으로 나타났다(Sun et al., 2017).

미국도 우리나라처럼 HPAI로 인해 많은 피해를 입은 사례가 있다. 2014년 12월부터 2015년 6월까지 발생한 HPAI로 칠면조 약 750만 마리 산란계 약 4,210만 마리 등이 살처분된 것으로 나타났다(임송수, 2017). 이에 대한 후속대처로 미국동식물검역소(Animal and Plant Health Inspection Service, APHIS)에서는 HPAI 백신을 방역의 보조적 수단으로 사용할 것을 검토하였고, 현재 백신뱅크(vaccine bank)에는 매년 약 1억 수분에 해당하는 HPAI 백신을 보유하고 있는 상황이다.

외래질병의 발생과 백신에 관한 경제학의 선행연구를 보면, 우선 Meltzer et al. (1999)은 미래에 발생 가능한 인플루엔자의 경제적 피해를 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 예측하고 사망률과 입원 및 외래진료 데이터를 활용하여 백신투여의 경제적 효과를 분석하였다. 또한, 한국농촌경제연구원(2002)은 구제역 백신접종에 관한 경제성분석을 실시하였는데, 백신접종의 편익은 구제역 추가발병 위험의 감소, 백신접종의비용은 백신접종비용 및 청정국 지위 회복이 더 느려짐에 따라 발생하는 추가적인 수출의 감소분으로 설정하였다. 분석결과 구제역 추가 발생이 1개 지역, 추가발생확률이 50%이상인 경우 백신접종의 경제성이 발생하는 것으로 나타났다. Jeuland et al. (2009)은 사하라 이남 지역의 콜레라 예방 접종에 대한 경제성을 사회적 비용 편익 분석(cost-benefit analysis)을 활용하여 수행하였다. 최근 Mauskopf et al. (2018)은 비용-효과 분석(cost-effectiveness analysis), 제약식 하에서의 최적화(constrained optimization), 재정 건강 모델링(fiscal health modeling) 등의 모형을 활용하여 전염병 예방을 위한 새로운 백신투여 프로그램의 경제적 가치를 분석하였다.

이러한 연구들의 경우 전염병 확산의 불확실성을 모형에 반영하지 못한다는 한계가 존재하기 때문에, 경제학에 역학(epidemiology) 모형을 결합하여 백신접종의 효

과를 분석한 논문들도 다수 존재한다. Laxminarayan and Brown (2001)은 항생제 효과를 재생 불가능한 자원으로 간주하고 2가지 항생제를 최적으로 사용하는 문제를 SIS 모형⁵⁾을 활용하여 분석하였다. Biswas et al. (2014)는 SEIR 모형⁶⁾ (Susceptible - Exposed - Infectious - Recovered)을 활용하여 전염병에 대한 최적 예방 접종 계획을 산출하였다. Gao et al. (2007)은 전염병의 조기종식을 위해 펄스 백신접종 (pulse vaccination)⁷⁾과 지연된 SEIRS모형 (delayed Susceptible - Exposed - Infectious - Recovered - Susceptible)을 활용하여 전염병의 종식 조건을 분석하였다. 또한 He and Nie (2015)는 사람들의 질병에 대한 치료 반응이 미디어에 의존한다는 점을 활용하여 미디어 충격 (media impact)을 고려한 합리적인 전염병 예방 전략을 SIR모형을 활용하여 도출하였다. 마지막으로 Park (2016)은 전염병 확산의 확률적 (stochastic)인 요소와 경제-역학 모형을 활용하여 신종플루 (H1N1)의 최적 백신 비축량을 분석하였다. 특히, 전염병 확산의 불확실성을 반영하기 위해 실물옵션 방법을 이용하였으며 Impulsive vaccination⁸⁾의 개념을 적용하여 최적 백신 비축량을 도출하였다.

본 연구에서 적용하는 실물옵션은 모형의 풀이가 다소 어렵고, 특히 닫힌 해 (closed solution)가 존재하지 않는 경우 해를 구하기 위해 복잡한 수학이 필요하다는 단점이 존재한다. 하지만 실물옵션 방법을 적용함으로써 사업의 미래에 대한 불확실성과 초기 투자비용의 기회비용을 매몰비용의 관점에서 적극적으로 고려할 수

-
- 5) SIS 모형 (Susceptible - Infectious - Susceptible) : 수학적인 역학 모형 중 하나이며 감기와 천연두와 같이 완치가 불가능한 질병에 대해 사용되는 모형이다. 모형 내에서 전체 개체는 질병에 감염된 집단과 감염되지 않는 집단으로만 나뉘며 한 개체는 두 집단 사이를 자유롭게 이동할 수 있다고 가정한다.
 - 6) SEIR 모형 (Susceptible - Exposed - Infectious - Recovered) : SIS 모형과 같이 수학적인 역학 모형 중 하나이며 완치가 가능한 질병에 사용되는 모형이다. SEIR 모형에서 전체 개체는 질병에 감염되지 않는 집단, 감염에 노출된 집단, 감염된 집단, 감염으로부터 회복된 집단으로 총 4가지 집단으로 나뉜다. SIS모형과는 달리 한 개체는 두 집단 사이를 자유롭게 이동할 수 없으며 Susceptible에서 Recovered쪽으로는 방향으로만 이동할 수 있다고 가정한 모형이다.
 - 7) 펄스 백신접종 : 백신접종의 한 방법이며 병원균의 확산이 저지될 때까지 위험이 노출된 그룹에 반복적으로 백신을 접종하는 방법을 의미한다. 주로 홍역과 소아마비의 발병 시 많이 사용된다.
 - 8) Impulsive vaccination : 집중적 백신접종이라 불리며 백신을 투여함에 있어 전체 집단 중 일부집단에게만 매우 짧은 시간에 집중적으로 백신을 즉각적으로 투여하는 행위를 일컫는다.

있고, 분석에 활용된 파라미터들이 최적 해에 어떻게 영향을 미치는지 민감도분석을 통해 알 수 있다는 장점이 존재한다. 특히, Schwartz (2004)는 백신 R&D 프로젝트의 가치를 실물옵션을 활용하여 연구하였으며, Favato et al. (2013)은 실물옵션을 활용하여 새로운 백신 프로그램의 가치를 평가하였다. 또한 실물옵션은 질병 확산(diffusion process)의 불확실성을 확률과정을 통해 반영할 수 있다는 장점이 있다.

다만, 본 연구에 실물옵션을 적용함에 있어 향후 실제로 HPAI가 발생했을 때, 정부가 HPAI 발생 인근지역의 이동통제 및 방역을 즉각적으로 광범위하게 실시한다는 점을 본 논문의 모형에 반영하지 못했다는 점에서는 한계가 존재한다. 그러나 이러한 광범위한 살처분과 폐사체의 매몰로 인한 침출수의 발생은 인근 지역의 수질 및 토양을 오염시키고 농작물 생산에도 피해를 준다. 적정량의 HPAI 백신 비축은 이에 대한 대응책이 될 수 있다. 본 연구는 경제학적인 관점에서 백신 비축의 적정량을 제시함으로써 전염병 확산의 예방을 위한 가이드라인을 제시한다는 데 그 의미가 있다.

본 논문은 Park (2016)을 기반으로 경제-역학 모형과 실물옵션방법론을 활용하여 HPAI 백신의 최적 비축량을 도출하였다. 다만, Park (2016)이 신종플루의 최적 백신 비축량을 산출한데 비해 본 논문은 2014년 국내에서 발생한 HPAI 사례를 대상으로 HPAI 백신의 최적 비축량을 제시하였다는 점에서 차이가 존재한다. 또한 본 연구는 백신의 최적 비축량을 도출하는데 있어 살처분으로 인해 발생하는 직접적인 피해 이외에도 폐사된 사체에서 발생하는 침출수로 인한 2차 오염의 피해까지 고려하였다. 또한, Park (2016)에서는 최적해를 도출하기 위해 콤머의 미분방정식(Kummer's Differential Equation)을 활용하였지만, 본 연구에서는 콤머의 미분방정식을 일반화한 수정된 콤머의 미분방정식(Modified Kummer's Differential Equation)의 알고리즘을 활용하여 해를 도출했다는 점에서 차이가 존재한다.

앞서 논한 바와 같이, HPAI를 살처분이 아닌 백신을 활용하여 방역하면 살처분에 따른 농가의 직접적인 피해비용과 정부의 방역비용 뿐만 아니라 침출수로 인한 환경오염 피해비용 등을 절감할 수 있다. 이에 본 연구는 백신투여로 절감한 살처분의 복합적인 피해비용을 백신의 편익으로 간주하여 분석을 진행하였다. 또한, HPAI의 확산이 로지스틱 함수의 형태를 갖는다는 가정을 활용하여 국내 문헌에서는 최초로 백신의 최적 투여 시점을 제시하였다. 또한, 확률과정을 고려하지 않은

역학적인 관점에서의 집단면역임계수준(Herd Immunity Threshold, HIT)⁹⁾과 경제-역학 모형을 통해 도출된 집단면역임계수준의 차이를 비교하도록 한다. 본 연구는 향후 우리나라가 HPAI 백신을 보조적인 방역수단으로 적극적으로 활용할 때, 적절한 백신의 보유량의 근거자료로 활용 될 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 이론적 모형을 소개한다. 제Ⅲ장에서는 2014년 국내에서 발생한 HPAI 데이터를 활용하여 실증분석을 수행한다. 마지막으로 제Ⅳ장의 결론에서는 연구 결과를 요약하고 시사점을 제시한다.

Ⅱ. 모 형

1. 질병확산모형

HPAI는 바이러스의 아형이 다양하고 변이가 쉽게 이루어질 수 있기 때문에 감염으로부터 치료가 되더라도 언제든지 재감염이 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 HPAI의 최적 비축량을 산출하기 위해서는 재감염을 고려한 SIS모형을 활용해야한다. SIS모형은 전체집단을 감염집단과 비감염집단으로 나누고 한 개체가 두 집단 사이를 자유롭게 이동할 수 있다고 가정한다. 재감염이 가능한 HPAI의 특성을 고려할 때 감염집단과 비감염집단의 증분은 다음과 같다.

$$dI = \beta ISdt - \gamma Idt - mIdt + \sigma_I dw_I \quad (1)$$

$$dS = -\beta ISdt + \gamma Idt + \sigma_S dw_S \quad (2)$$

식 (1)은 감염집단의 증분을, 식 (2)는 비감염집단의 증분을 나타낸다. I 는 감염집단, S 는 비감염집단, dI 는 감염집단의 증분, dS 는 비감염집단의 증분을 각각

9) 집단면역임계수준 : 집단면역을 발생시키는 최소한의 개체비율을 의미하며, 고전적인 역학모델에서는 일반적으로 $1 - 1/R_0$ 로 도출된다. 또한, 집단면역(Herd Immunity)은 한 집단내의 일정 구성원들이 전염병에 면역이 충분하게 되어있어 전염병이 자연적으로 확산되지 않는 상태를 의미한다. 또한, 집단면역임계수준을 도출할 때의 R_0 는 기초재생산지수(Basic Reproduction Number)라 칭하는데, 역학적인 관점에서 초기 감염군에 의해 발생하는 평균 2차 감염주의 수를 의미한다.

의미한다. I 와 S 는 각각 시간에 대한 함수로서, $I=I(t)$ 이고, $S=S(t)$ 이다. β 는 전염속도, γ 는 회복속도, m 은 폐사율, σ_I 와 σ_S 는 각각 감염 및 비감염 개체 수에 대한 불확실성을 나타낸다. dw_I 와 dw_S 는 두 증분 과정이 위너과정(Wiener process)을 따르는 것을 의미하며, $E(dw_i)=0$ 이고 $V(dw_i)=dt$ 이다. 따라서 식 (1)은 감염집단(I)이 매 기간 비감염집단(S)에서 β 만큼 감염되어 개체 수가 증가하는 한편 γ 만큼 회복되고 m 만큼 폐사하여 개체 수가 변화하는 것을 의미한다. 식 (2)는 S 의 증분으로 I 와 반대로 해석할 수 있다. 두 연립방정식의 풀이를 간단히 하기 위해 전체 집단(N)을 1로 정규화할 수 있다(Goldman et al., 1996). 즉, $N(t)=1$ 이면 $S(t)+I(t)=1$ 이다. 따라서 $S(t)$ 와 $I(t)$ 는 0과 1사이의 값이고 전체 개체에서 각 개체의 비율로 해석할 수 있다. 정규화된 식을 식 (1)에 대입하면 아래와 같다.

$$dI = (\alpha - \beta I)dt + \sigma dw \quad (\text{where } \alpha = \beta - \gamma - m) \quad (3)$$

α 는 질병의 자연 증가율로서 비감염집단에서 감염집단으로 이동하는 비율을 의미한다(박호정, 2018). 만약 불확실성이 없다는 하에서 $K=\alpha/\beta$ 라고 하면, 식 (3)은 아래와 같다.

$$dI = \alpha I \left(1 - \frac{I}{K}\right) dt \quad (4)$$

식 (4)는 잘 알려진 형태의 로지스틱 함수로서, 이는 감염개체의 증분이 로지스틱 함수의 형태로 바뀔 수 있다는 것을 의미한다. 로지스틱 변환을 하면 추정해야 할 모수가 기존의 두 개(β, γ)에서 한 개(α)로 줄어드는 장점이 있다. 이에 본 연구에서도 로지스틱 함수를 적용하여 분석을 하도록 한다. 식 (4)에서 K 는 환경용량(carrying capacity)을 의미하며, 환경적인 요소(식량, 물, 서식지 등)를 고려하였을 때, 한 종이 유지 가능한 최대 인구크기를 의미한다(Hui, 2006).

확률과정이 반영된 백신의 옵션가치를 $V(I)$ 라고 하면, 할인율을 고려한 옵션가치는 아래와 같다.

$$\rho V = \frac{1}{dt} E(dV) \quad (5)$$

식 (5)의 $E(dV)$ 를 구하기 위해서는 먼저 dV 를 구해야하며, dV 는 Bellman의 동적계획법과 Ito의 정리를 활용하여 계산할 수 있다. 식 (4)의 dI 를 대입하여 정리하면 식 (6)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} dV = & V'[(\alpha - \beta I)Idt + \sigma dw] \\ & + \frac{1}{2} V''[(\alpha - \beta I)^2 I^2 (dt)^2 + 2\sigma(\alpha - \beta I)Idtdw + \sigma^2(dw)^2] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 확률변수는 오직 dw 만 해당하기 때문에 양변에 평균을 취해 $E(dV)$ 를 계산하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} E(dV) = & V'[(\alpha - \beta I)IEdt + \sigma E(dw)] \\ & + \frac{1}{2} V''[(\alpha - \beta I)^2 I^2 E(dt)^2 + 2\sigma(\alpha - \beta I)I\sigma dt E(dw) + \sigma^2 E(dw)^2] \end{aligned} \quad (7)$$

w 는 위너과정으로서 $(dt)^2 = 0$, $E(dw) = 0$, $E[(dw)^2] = dt$ 이므로 이를 식 (7)에 대입하면 $E(dV)$ 는 식 (8)과 같다.

$$E(dV) = [(\alpha - \beta I)I] V' dt + \frac{\sigma^2}{2} V'' dt \quad (8)$$

식 (8)의 $E(dV)$ 를 식 (5)에 대입하면 식 (9)를 얻게 된다.

$$\rho V = (\alpha - \beta I)IV' + \frac{1}{2}\sigma^2 I^2 V'' \quad (9)$$

백신접종의 옵션가치를 의미하는 V 는 I 의 함수이기 때문에 I 가 0으로 수렴하면 옵션가치 역시 0으로 수렴해야 한다. 따라서 식 (9)는 $\lim_{I \rightarrow 0+} V(I) = 0$ ($\because 0 <$

$I < 1$)이라는 가정을 내포하고 있다. 식 (9)과 같은 비선형 미분방정식은 복잡하기 때문에 일반적으로 변수변환을 적용해 해를 구하며, 일반적으로 식 (9)와 같은 미분방정식의 해는 $V(I) = Y(I)I^a$ 의 형태를 갖는 것으로 알려져 있다. 또한 V 를 I 에 대해 미분한 1계 및 2계 도함수를 구하면 각각 $V' = Y'I^a + aYI^{a-1}$ 과 $V'' = Y''I^a + 2aY'I^{a-1} + a(a-1)YI^{a-2}$ 와 같다. 이러한 2개의 도함수를 식 (9)에 대입하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho YI^a &= \alpha Y'I^{a+1} + a\alpha YI^a - \beta Y'I^{a+2} - a\beta YI^{a+1} \\ &+ \frac{1}{2}\sigma^2 Y''I^{a+2} + a\sigma^2 Y'I^{a+1} + \frac{1}{2}a(a-1)\sigma^2 YI^a \\ &\left(\frac{1}{2}a(a-1)\sigma^2 + a\alpha - \rho \right) YI^a \\ &+ \left(\alpha Y' - \beta Y'I - a\beta Y + \frac{1}{2}\sigma^2 Y''I + a\sigma^2 Y' \right) I^{a+1} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Y 와 I 는 0이 아니기 때문에 항등식의 정리를 적용하면 식 (10)에서 $\frac{1}{2}a(a-1)\sigma^2 + a\alpha - \rho = 0$ 과 $\alpha Y' - \beta Y'I - a\beta Y + \frac{1}{2}\sigma^2 Y''I + a\sigma^2 Y' = 0$ 이 동시에 성립해야 한다. 첫 번째 식은 a 에 관한 2차 방정식이므로 근의 공식을 활용하여 구할 수 있으며, a 는 두 근중 양근에 해당되는 $\left(\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} \right) / \sigma^2$ 만 해당하는 것을 알 수 있다. 만약 a 가 음수라면 I 가 감소함에 따라 V 는 증가하게 되는데, 이는 앞에서 가정한 $\lim_{I \rightarrow 0+} V(I) = 0$ 이 성립하지 않기 때문이다.

두 번째 식은 미분방정식이므로 해를 구하기 위해 변수변환을 한 번 더 활용해서 해를 구해야 한다. $x = \frac{\beta I}{\sigma^2}$ 라고 가정하면 $Y(I) = Y\left(\frac{x\sigma^2}{\beta}\right) = y(x)$ 라고 변환 할 수 있고, 합성함수의 미분법을 활용해 Y 를 x 에 관한 1계, 2계 도함수를 구하면 각각 $\frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{\sigma^2}{\beta} Y' = y'$, $\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \left(\frac{\sigma^2}{\beta}\right) Y'' = y''$ 임을 알 수 있다. 이를 식 (10)의 두 번째 식에 대입하면 아래와 같다.

$$xy'' + (b - 2x)y' - 2ay = 0, \quad \left(b = 2a - \frac{2\alpha}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

식 (11)은 잘 알려진 Kummer의 미분방정식¹⁰⁾과 유사한 형태임을 알 수 있다. 하지만 식 (11)에서 y' 계수 중 x 의 계수가 -1이 아니기 때문에 더 일반적인 형태인 수정된 Kummer의 미분방정식 (Modified Kummer's Differential Equation)에 해당된다고 볼 수 있다. 이러한 미분방정식의 일반적인 형태는 $t \frac{d^2}{dt^2} u(t) + (c - bt) \frac{d}{dt} u(t) - abu(t) = 0, t > 0$ 이고, 해는 식 (12)와 같다 (Morita, 2016).

$$u(t) = Au_1(t) + Bu_2(t) \quad (12)$$

여기에서

$$\begin{aligned} u_1(t) &= {}_1F_1(a; c; bt) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k}{k!(c)_k} (bt)^k, (a)_n = \prod_{k=0}^{n-1} (a+k), (a)_0 = 1 \\ &= 1 + \frac{a}{c}(bt) + \frac{a(a+1)}{2!c(c+1)}(bt)^2 + \frac{a(a+1)(a+2)}{3!c(c+1)(c+2)}(bt)^3 + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

$$u_2(t) = t^{1-c} {}_1F_1(a-c+1; 2-c; bt) \quad (14)$$

식 (12)부터 식 (14)를 활용하여 식 (11)의 해를 계산하면 아래와 같다.

$$Y(I) = AI_1 + BI_2 \quad (15)$$

여기에서

$$\begin{aligned} I_1 &= {}_1F_1\left(1; b; \frac{\beta}{\sigma^2}x\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1)_k}{k!(b)_k} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right)^k, \text{ where } (1)_k = \left(\prod_{k=0}^{n-1} (1+k)\right), (1)_0 = 1 \\ &= 1 + \frac{1}{b} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right) + \frac{1(2)}{2!b(b+1)} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right)^2 + \frac{1(2)(3)}{3!b(b+1)(b+2)} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right)^3 + \dots \\ &= 1 + \frac{1}{b} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right) + \frac{1}{b(b+1)} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right)^2 + \frac{1}{b(b+1)(b+2)} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2}I\right)^3 + \dots \end{aligned}$$

10) Kummer의 미분방정식의 일반형은 $xy'' + (b-x)y' - ay = 0$ 와 같다.

$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(b)_k} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2} I \right)^k, (\text{where } (b)_k = \prod_{k=0}^{n-1} (b+k), (b)_0 = 1) \quad (16)$$

$$I_2 = \left(\frac{2\beta}{\sigma^2} I \right)^{1-b} \cdot {}_1F_1 \left(2-b; 2-b; \frac{2\beta}{\sigma^2} x \right) \quad (17)$$

식 (15)에서의 $Y(I)$ 는 $V(I)$ 를 포함하고 있기 때문에 식 (9)와 같이 $\lim_{I \rightarrow 0} V(I) = 0$ 의 가정이 성립해야 한다. 그러나 식 (11)에서 y' 의 x 의 계수는 2이기 때문에 식 (17)의 I_2 는 I 가 0으로 수렴하더라도 전체 값은 발산하게 되어 $\lim_{I \rightarrow 0} I_2 \neq 0$ 의 가정을 충족하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (15)에서 I_2 의 계수인 B 를 0으로 가정하여 I_2 와 관련된 항을 소거해야 한다. 결국 다음과 같이 식 (11)의 해는 I_1 에 의해서만 표현된다.

$$Y(I) = AI_1, (\text{where } I_1 = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(b)_k} \left(\frac{2\beta}{\sigma^2} I \right)^k, \\ (b)_k = \prod_{k=0}^{n-1} (b+k), (b)_0 = 1) \quad (18)$$

따라서, 옵션가치인 $V(I)$ 는 아래와 같다.

$$V(I) = AI_1 I^a \quad (19)$$

2. 목적함수

본 연구에서 목적함수는 백신투여에 따른 살처분의 복합적인 비용 감소에 초점을 맞추도록 한다. HPAI의 방역대책으로 살처분을 시행하게 되면, 직접적으로 발생하는 비용뿐만 아니라 침출수로 인한 환경오염 등 외부비용이 발생한다. 한편 백신을 활용하여 고병원성 조류인플루엔자를 방역하면, 백신 접종 이전에 비해 HPAI의 감염률이 현저하게 줄어들어 이러한 복합적인 비용을 회피할 수 있다. 이는 곧 백신 투여의 편익을 의미한다. 즉, HPAI 백신 투여의 편익은 백신을 투여하지 않았다면 폐사되었을 개체가 백신 투여로 인해 폐사되지 않았을 때 발생한다. 백신의 편익

신의 효능과 연결된다. 즉, C_B 는 〈Figure 1〉에서 I 전체에 발생하고, C_A 는 I_s 에
만 발생한다. 따라서 HPAI 백신을 통해 발생하는 편익 B 는 식 (20)과 식 (21)의
차이로서 다음과 같다.

$$B = C_B - C_A = (1 - \theta)(p + c_1 + z)IN \quad (22)$$

백신투여 비용(C_v)은 비감염개체(S)에 백신을 투여할 때 발생하는 비용으로
 $c_2 v^2 SN$ 으로 나타낼 수 있다. 여기에서 c_2 는 백신투여비용이고 v 는 백신투여비율,
 SN 은 HPAI에 감염되지 않은 개체 수를 의미한다. C_v 는 선행연구를 참조하여 투
여비율 v 에 대한 2차식으로 볼록하게 정의하였다(Barrett et al., 2003; Biswas et
al., 2014; Park, 2016). 또한, 일반적으로 백신의 편익(B)은 백신의 투여비율(v)
에 비례하여 증가하기 때문에 이를 고려한 백신투여로 인해 발생하는 단기적인 총
편익(Π)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi &= vB - C_v = C_B - C_A - C_v \\ &= v(1 - \theta)(p + c_1 + z)IN - c_2 v^2 SN \\ &= v(1 - \theta)(p + c_1 + z)IN - c_2 v^2 (1 - I)N \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)에서 독립변수는 v 로서, Π 를 극대화하는 최적 백신투여비율(v^*)을 구
하면 식 (24)와 같다.

$$v^* = \frac{(1 - \theta)(p + c_1 + z)I}{2c_2(1 - I)} \quad (24)$$

식 (24)를 식 (23)에 대입하여 정리하면 식 (25)와 같다.

$$\Pi^*(I) = \left[\frac{(1 - \theta)(p + c_1 + z)I}{2c_2(1 - I)} \right] \left[(1 - \theta)(p + c_1 + z)IN - \frac{(1 - \theta)(p + c_1 + z)(1 - I)I}{2} \right] \quad (25)$$

다음으로 식 (19)의 옵션상수 A 와 식 (25)의 임계감염비율 I^* 을 구하도록 한다. 실물옵션의 등가조건 (value - matching condition)과 한계조건 (smooth-pasting condition)을 활용하여 정리하면 아래와 같다.

$$AI_1 I^a = \Pi^*(I) \quad (26)$$

$$A(I_1)'I^a + aAI_1 I^a = \Pi^{*'}(I) \quad (27)$$

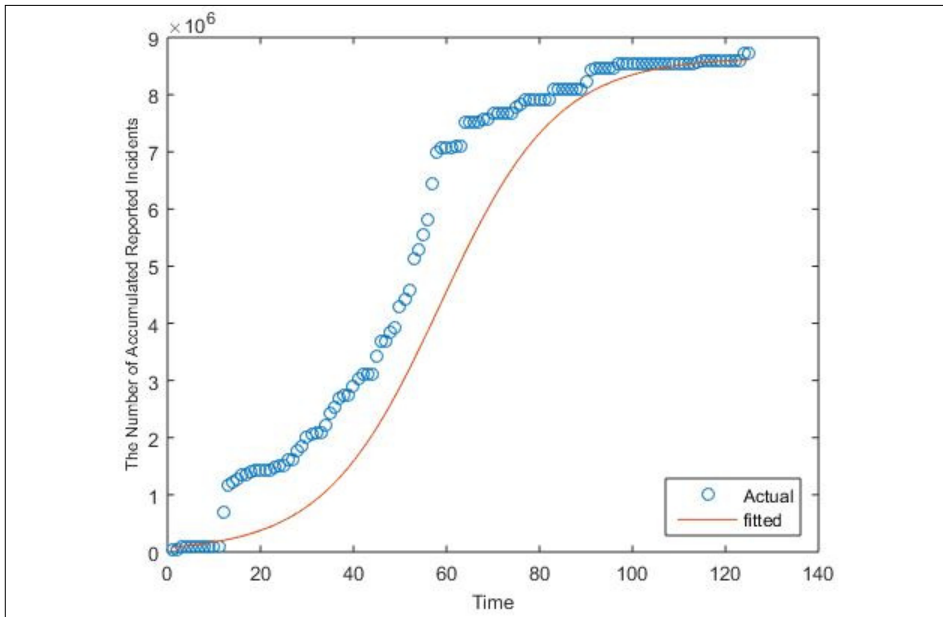
식 (26)은 백신의 옵션가치와 백신의 단기편익을 일치시키는 등가조건으로서, $I = I^*$ 에서 제약식과 목적식이 서로 일치함을 나타낸다. 식 (27)은 식 (26)을 I 에 대해 미분한 것으로, 백신의 한계옵션가치와 한계단기편익을 $I = I^*$ 에서 일치시키는 한계조건을 의미한다. 따라서 등가조건과 한계조건을 활용하면 옵션가치와 백신의 단기편익이 $I = I^*$ 에서 접하게 된다. 백신의 옵션가치가 단기편익보다 크다면 백신을 투여하지 않는 것이 바람직하며, 백신의 단기편익이 백신의 옵션가치보다 크다면 백신을 빠르게 투여해야할 것이다. 식 (26)의 좌변과 우변의 차이 ($AI_1 I^a - \Pi^*(I)$)는 기다림의 가치 (waiting value)로서, 기다림의 가치가 0이 되는 시점이 최적 투자시점이 된다.

Ⅲ. 실증분석

본 연구에서는 농림축산식품부에서 발표한 2014년 1월 16일부터 5월 31일까지의 산란계 및 육계 살처분 데이터를 활용하여 실증분석을 수행하였다. <Figure 2>는 식 (4)의 로지스틱 함수를 추정한 결과이다. 회귀분석을 통하여 로지스틱 함수를 추정한 결과 2014년 국내에서 발생한 HPAI의 자연증가율(α)은 0.0799로, 전염속도(β)는 1.5437로 분석되었다. 또한, 불확실성(σ)은 선행연구를 따라회귀분석 잔차(residual)의 표준편차를 활용하여 6.7565e-04를 적용하였다. 이에 따라 다른 변수를 고려하지 않았을 때의 HPAI의 기초 재생산지수(R_0)는 1.0549로 계산되었다. 이는 HPAI에 감염된 닭 한 개체가 감염시키는 개체 수가 약 1.0549마리인 것을 의미한다. 또한, 기초 재생산지수(R_0)를 활용하여 계산한 집단면역임계수준(H_0)은 0.0520으로 도출되었다. 이는 역학적인 관점에서 산란계 및 육계 집단이

고병원성 조류인플루엔자에 집단면역을 갖추기 위해서는 전체 산란계 및 육계 개체수의 5.2%가 질병에 면역이 되어야 한다는 것을 의미한다.

〈Figure 2〉 Estimation result of the logistic function



백신투여에 따른 편익극대화와 질병확산의 불확실성을 고려한 모형에 〈Table 1〉의 파라미터를 적용하여 고병원성 조류인플루엔자의 최적 백신 비축량을 추정하였다. 할인율(ρ)의 경우 한국은행에서 발표한 2014년 국고채 5년 수익률 0.0284를 일간 단위로 적용하였고 폐사율(m)과 백신투여 이후 살처분 비율(θ)은 Swayne et al. (1999)을 참조하여 각각 0.92와 0.19를 적용하였다. 농가의 기회비용에 해당되는 p 는 통계청에서 발표하는 육계 및 산란계의 최근 3년 평균 수당 수익성에 산란계와 육계의 살처분 비율을 고려하여 1,675원을 적용하였다. 또한 살처분 비용은 OIE의 자료를 참고하여 126원을 적용하였으며, 백신투여비용(c_2)은 Swayne (2008)을 참고하여 190원을 적용하였다. 또한 2차오염 피해비용(z)는 직접적인 데이터가 존재하지 않아 선행연구를 바탕으로 직접 계산하였으며, 자세한 산출방식은 부록에서 설명하도록 한다.

〈Table 1〉 Summary of the parameters

Variable	Explanation	value	Variable	Explanation	value
ρ	Discount rate	7.78E-05	σ	Volatility rate	6.7565e-04
m	Mortality rate	0.92	θ	Mortality rate after HPAI vaccination	0.19
α	Drift rate	0.0799	p	Foregone profit per the unit of poultry	1,675
β	Transmission rate	1.54369	c_1	Stamping-out cost per the unit of poultry	126
γ	Recovery rate	0.5369	c_2	Vaccination cost per the unit of poultry	190
R_0	Basic reproduction index	1.0549	z	Environmental cost per the unit of poultry	2,196
H_0	Herd immunity threshold	0.0520	N	Total number of chicken and broiler	166,444,165

분석결과 고병원성 조류인플루엔자 백신 비축 모형의 옵션상수(A)는 3.5723e-30으로, HPAI 백신 투여의 임계감염비율(I^*)은 2.29%로 나타났다. 식 (24)에 따라 임계투여비율(v^*)은 19.94%로, 경제-역학모형 하에서의 집단임계면역수준(H_0^*)은 19.48%로 계산되었다. 이는 기존의 역학모형에서 도출된 H_0 와 비교할 때 약 4배정도 높게 나타나는데, 경제-역학모형에서는 백신투여의 총 편익에 불확실성을 추가로 고려하기 때문에 기존의 역학모형보다 더 많은 개체가 HPAI에 면역을 되어야 한다는 것으로 해석된다. 이는 Park (2016)에서 불확실성을 고려할 때 그렇지 않은 경우에 비해 신종인플루엔자의 집단면역임계수준이 약 11% 높아진 것과 일치한다.

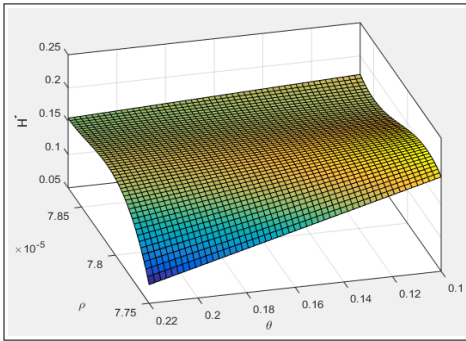
요약하면, 본 연구의 경제-역학모형에 따르면 전체 산란계 및 육계 개체 수의 2.29%가 HPAI에 감염되었을 때 비 감염 개체의 약 20%에 해당하는 백신을 투여해야 하는 것으로 분석된다. 이는 2014년 발생한 HPAI 사례를 기반으로 할 때 산란계 및 육계 개체 수의 약 20%에 해당하는 3,237만 개의 백신을 보유해야 함을 의미한다.

〈Figure 3〉은 백신투여 이후 살처분 비율(θ)과 할인율(ρ)이 경제-역학 모형의 집단임계면역수준(H_0^*)에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행한 민감도분석 결과이

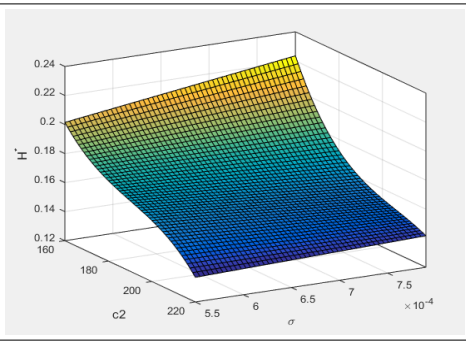
다. 〈Figure 3〉에서 보이는바와 같이, θ 와 H_0^* 는 음의 관계(-)인 한편 ρ 와 H_0^* 는 양(+)의 관계인 것으로 나타났다. 식 (21)과 (22)에서 θ 는 백신투여로 인한 HPAI 감염의 감소율을 의미하므로 θ 의 감소는 HPAI 백신의 수익성 악화를 의미한다. 반면 θ 의 상승은 백신투여의 편익이 증가하는 것을 의미하며, H_0^* 는 하락하게 된다.

〈Figure 4〉는 H_0^* 에 대한 살처분비용(c_2)과 불확실성(σ)의 민감도분석 결과이다. c_2 의 증가는 H_0^* 을 감소시키며, σ 의 증가는 H_0^* 를 증가시키는 것으로 나타났다. 특히 c_2 의 증가는 다음 2가지의 경로를 통해 H_0^* 를 감소시킨다. 먼저, 식 (24)에서 알 수 있듯이 c_2 와 v^* 는 반비례 관계이므로 c_2 의 증가는 v^* 를 감소시킨다. 또한, c_2 의 증가는 θ 의 감소와 마찬가지로 백신투여의 편익이 감소함을 의미하기 때문에 추가적인 경제성을 확보하기 위해 I^* 가 상승하고 S^* 는 감소하게 된다($S^* = 1 - I^*$). 여기에서 $H_0^* = v^* S^*$ 이므로 c_2 의 증가는 H_0^* 를 감소시킨다. 또한 σ 가 커질수록 사업의 불확실성이 높아지기 때문에 더 높은 H_0^* 에서 사업의 경제성이 확보되는 것으로 분석된다.

〈Figure 3〉 Sensitivity analysis of θ and ρ on H_0^*



〈Figure 4〉 Sensitivity analysis of c_2 and σ on H_0^*



IV. 결 론

2014년 이후 우리나라에서 고병원성 조류인플루엔자는 매년 2회 정도 꾸준히 발생하고 있다. 이는 과거 2~3년에 1회 발생하던 것에 비해 발생 빈도가 잦아지는

한편, 질병의 지속기간이 길어지고 살처분에 소요되는 비용 역시 증가하고 있다. 이러한 상황에서 HPAI의 역학조사분석은 잘 이루어지고 있다고 판단되나, HPAI 주 방역방법인 살처분으로 인해 발생하는 사회적 비용 및 HPAI 조기종식을 위한 백신에 관한 연구들은 활발하게 이루어지고 있지 않은 실정이다. 본 연구는 HPAI 방역방법에 살처분을 보조할 수 있도록 백신접종을 도입할 경우에 대해 백신의 최적 비축량을 산출하였다. 최적 비축량을 산출하는데 있어 HPAI의 감염 성질을 고려하였고, 경제-역학모형과 실물옵션기법을 활용하였다.

2014년에 국내에서 발생한 HPAI를 대상으로 실증분석을 수행한 결과, 백신접종이 경제성을 얻기 위해서는 국내 전체의 산란계 및 육계 개체 수의 2.29%가 감염되었을 때 최소 비감염개체의 19.94% 이상을 접종해야하는 것으로 분석되었다. 이는 2014년 2분기의 산란계 및 육계가 약 1억6614만 마리임을 고려할 때 약 3,237만 개의 백신을 비축해야함을 의미한다.

본 연구는 다음과 같은 한계가 있다. 우선 조류인플루엔자 감염데이터의 부재로 인해 살처분 현황 데이터를 사용하였다. 우리나라는 조류인플루엔자가 발병하면 감염농가의 가금류를 살처분하고, 인근 3km까지 떨어진 농가에도 예방적 살처분을 진행하고 있는 상황으로 조류인플루엔자의 감염개체 수 데이터는 존재하지 않아 살처분 현황 데이터를 모형에 적용하였다. 또한, 본 논문에서 사용한 백신접종인 Impulsive vaccination의 특성상 목적함수에서 백신으로 인해 발생할 수 있는 장기적인 편익 및 비용을 고려할 수 없었다. 우리나라가 백신을 사용하지 않는 주요한 이유는 빠른 AI 청정국 지위 회복이다. 만약 우리나라가 AI를 백신을 보조적 방역 수단으로 사용한다면, 가금류의 몸속에서 백신이 발견되지 않을 때까지 AI 청정국 지위 회복이 더 늦어지게 된다. 이는 해외 수출의 감소로 이어져 편익 감소가 발생할 수 있다. 그러나 이는 백신접종으로 인해 순간적으로 발생하는 편익의 감소는 아니기 때문에 모형에서는 고려하지 않았다. 마지막으로 본 연구에는 수치해석을 활용하여 도출한 최적해의 유일성에 대한 한계가 존재한다. 본 논문의 모형을 활용하여 도출된 해는 주어진 제약하에서 백신 투여의 편익을 극대화시키는 최적해이다. 하지만 복잡한 고차 연립방정식을 풀기 위해 수치해석을 활용함에 따라 최적해가 초기 값에 민감하게 반응 할 수 있다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 향후 우리나라가 고병원성 조류인플루엔자에 대응하기 위해 백신을 도입하는 경우 적정 비축량에 대한 값을 제시할 수 있다는

점에서 중요한 의미를 갖는다. 그리고, 본 연구는 경제학적 관점에서 다른 전염병 백신의 적정 비축량과 같은 후속 연구를 진행하는데 도움을 줄 것으로 판단된다. 또한, 후속 관련연구로 SIS에 행위자기반모형¹¹⁾을 연계하여 질병의 네트워크 확산을 분석하는 방향을 고려해 볼 수 있을 것이다.

아직까지 우리나라는 HPAI뿐만 아니라 다른 전염성 질병의 기초재생산지수에 대한 연구와 데이터 구축이 상당히 부족한 것이 사실이다. 이러한 상황에서 본 연구가 제시하는 백신의 최적 비축량은 전염병에 초기에 대응하여 사회적 비용을 감소시킨다는 점에서 의의가 있다. 다만, 해마다 반복되는 가축전염병의 피해를 궁극적으로 최소화하기 위해서는 우선 관련 데이터를 체계화함으로써 사회적 네트워크에 따른 전염도 측정, 전염병 초기 대응 방식 수립 등에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다. 또한 향후 더 정밀한 연구를 위해서는 다양한 분야의 전문가간의 공동연구가 수행되어야 할 것이다.

■ 참 고 문 헌

1. 국가인권위원회, 『가축매몰(살처분) 참여자 트라우마 현황 실태조사』, 2017.
(Translated in English) National Human Rights Commission of Korea, *A Survey on the Condition of Traumas of Participants in Buried Livestock (Stamping-out)*, 2017.
2. 농림수산식품부, 『(2008년) 고병원성 조류인플루엔자 역학조사분석보고서』, 2008.
(Translated in English) Animal and Plant Quarantine Agency, *(2008) Highly Pathogenic Avian Influenza Epidemiological Analysis Report*, 2008.
3. _____, 『(2010·2011년) 고병원성 조류인플루엔자 역학조사분석보고서』, 2011.
(Translated in English) Animal and Plant Quarantine Agency, *(2010·2011) Highly Pathogenic Avian Influenza Epidemiological Analysis Report*, 2011
4. _____, 『(2014·2016년) 고병원성 조류인플루엔자 역학조사분석보고서』, 2016.
(Translated in English) Animal and Plant Quarantine Agency, *(2014·2016) Highly*

11) 행위자기반모형은 상호작용하는 자율적인 경제주체들로 이루어진 시스템을 컴퓨터 환경에서 구현한 모형을 의미한다. 양정승(2018) 참조.

- Pathogenic Avian Influenza Epidemiological Survey Analysis Report*, 2016.
5. 박호정, 『실물옵션과 투자분석: 불확실성과 경제성 평가』, 리얼포털, 2018.
(Translated in English) Park, Hojeong, *Real Option and Investment Analysis: Uncertainty and Economic Evaluation*, Real Portal, 2018.
6. 양정승, “기업의 교육훈련 투자 동학: 행위자 기반 모형 접근,” 『경제학연구』, 제66권 제4호, 2018, pp. 51-91.
(Translated in English) Jung-Seung Yang, “Dynamics of Firm Investment on Training: An Agent-Based Model Approach,” *The Korean Economic Review*, Vol. 66, No. 4, 2018, pp. 51-91
7. 우병준 · 이형우 · 황윤재 · 김진년, “고병원성 조류인플루엔자 발생의 경제적 피해 제측,” 한국농촌경제연구원, 농정연구속보, 2008.
(Translated in English) Woo, Byungjoon, Hyungwoo Lee, Yunjae Hwang and Jinnyeon Kim, “The Estimation of Economic Damage from the Occurrence of Highly Pathogenic Avian Influenza,” *Korea Rural Economic Institute, Agri-Policy Focus*, 2008.
8. 임송수, “조류 독감(Avian Influenza)의 최근 국제 동향-미국과 EU 사례,” 『세계농업』, 제197호, 2017, pp. 99-122.
(Translated in English) Lim, Song-Soo, “A Recent International Trend of Avian Influenza-The Case of the United States and EU,” *World Agriculture*, No. 197, pp. 99-122.
9. 한국농어촌공사, 『긴급 살처분 매몰지 침출수에 의한 오염지하수 확산방지 연구』, 2011.
(Translated in English) Korea Rural Community Corporation, *A Study on the Prevention of Groundwater Contamination by the Leachate Released from Livestock Mortality Burials*, 2011.
10. 한국농촌경제연구원, 『2002 구제역 발생 실태와 파급영향』, 2002.
(Translated in English) Korea Rural Economic Institute, *The Occurrence and Impact of Foot-and-Mouth Disease in 2002*, 2002.
11. _____, 『2014/15년 AI 발생 · 확산 원인 및 재발 방지 방안 연구(2014/15 AI 백서)』, 2015.
(Translated in English) Korea Rural Economic Institute, *A Study on the Prevention of the Causes of AI's Occurrence and Diffusion in 2014/15(2014/15 AI white Paper)*, 2015.
12. Barrett, S. and M. Hoel, “Optimal Disease Eradication,” Working paper, Health Economics Research Program, University of Oslo, 2003.
13. Biswas, M. H. A., L. T. Paiva, and MdR de Pinho, “A SEIR Model for Control of Infectious Diseases with Constraints,” *Mathematical Biosciences and Engineering*, Vol. 11, Issue 4, 2014, pp. 761-784.
14. Favato, G., G. Baio, A. Capone, A. Marcellusi and F. S. Mennini, “A Novel Method to Value Real Options in Health Care: The Case of a Multicohort Human Papillomavirus Vaccination Strategy,” *Clinical Therapeutics*, Vol. 35, Issue 7, 2013, pp. 904-914.
15. Gao, S., L. Chen, and Z. Teng, “Impulsive Vaccination of an SEIRS Model with Time Delay and Varying Total Population Size,” *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 69, Issue 2, 2007, pp. 731-745.

16. Goldman, S. M. and J. Lightwood, "Cost Optimization in The SIS Model of Infectious Disease with Treatment," Working paper, Department of Economics, University of California Berkeley, 1996.
17. He, Z. and L. Nie, "The Effect of Pulse Vaccination and Treatment on SIR Epidemic Model with Media Impact," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, pp.235-267.
18. Hernandez-Sancho, F., M. M. Senante, and R. Sala-Garrido, "Environmental Benefits of Wastewater Treatment: An Economic Valuation," *Risk Management of Water Supply and Sanitation Systems*, 2009, pp.251-260.
19. Hui, C., "Carrying Capacity, Population Equilibrium, and Environment's Maximal Load," *Ecological Modelling*, Vol. 192, Issue 1-2, 2006, pp.317-320.
20. Jeuland, M., M. Lucas, J. Clemens, and D. Whittington, "A Cost-Benefit Analysis of Cholera Vaccination Programs in Beira, Mozambique," *The World Bank Economic Review*, Vol. 23, Issue 2, 2009, pp.235-267.
21. Laxminarayan, R. and G. M. Brown, "Economics of Antibiotic Resistance: A Theory of Optimal Use," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 42, Issue 2, 2001, pp.183-206.
22. Mauskopf, J., B. Stanaert, M. P. Connolly, A. J. Culyer, L. P. Garrison, R. Hutubessy, M. Jit, R. Pitman, P. Revill, and J. L. Severens, "Economic Analysis of Vaccination Programs: an ISPOR Good Practices for Outcomes Research Task Force Rreport," *Value in Health*, Vol. 21, Issue 10, 2018, pp.1133-1149.
23. Meltzer, M. I., N. J. Cox, and K. Fukuda, "The Economic Impact of Pandemic Influenza in the United States: Priorities for Intervention," *Emerging Infectious Diseases*, Vol. 5, No. 5, 1999, pp.659-671.
24. Morita, T. and K. Sato, "Solution of Differential Equations with Polynomial Coefficients with the Aid of an Analytic Continuation of Laplace Transform," *Mathematics*, Vol. 4, Issue. 19, 2016, pp.1-18.
25. Munro, R. "Decomposition of Farm Animal Corpses in Mass Burial Sites," *Veterinary Laboratories Agency Report*, United Kingdom, 2001, pp.1-9.
26. Park, H., "A Real Option Analysis for Stochastic Disease Control and Vaccine Stockpile Policy: An Application to H1N1 in Korea," *Economic Modelling*, Vol. 53, 2016, pp.187-194.
27. Pratt, D. L., "Environmental Impact of Livestock Mortalities Burial," Master's thesis, University of Saskatchewan, 2009.
28. Sun, Z., J. Wang, and Z. Huang, "Assessment of China's H5N1 Routine Vaccination Strategy," *Scientific Reports*, Vol. 7, 2017, pp.1-10.
29. Swayne, E. D. and D. R. Kapczynski, *Avian Influenza*, Blackwell Publishers, 2008.
30. Swayne, E. D., J. R. Beck, M. Garcia, and H. D. Stone, "Influence of Virus Strain and Antigen Mass on Efficacy of H5 Avian Influenza Inactivated Vaccines," *Avian Pathology*, Vol. 28, Issue 3, 1999, pp.245-255.
31. Schwartz, E. S., "Patents and R&D as Real Options," *Economic Notes*, Vol. 33, Issue 1, 2004, pp.23-54.

A. 부 록

본 부록에서는 III장에서 사용한 2차오염 피해비용(z)의 계산방법에 대해 자세히 서술하도록 한다. 폐사된 닭의 사체를 토양에 매장하는 경우, 닭에서 발생하는 침출수 및 가스로 인해 대기오염, 토양오염, 수질오염 등이 발생 할 수 있다. 하지만, 이와 관련된 연구는 활발하게 진행되고 있지 않고 있다. Jackie et al. (2004) 이 논의한 바와 같이 개별 생산자가 규제화된 절차를 알지 못하거나 승인절차를 무시 할 수도 있기 때문에 살처분에 따른 2차오염 피해비용을 정확하게 도출하는 것은 힘든 것으로 알려져 있다. 이에 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 살처분으로 인해 발생한 침출수가 오직 수질오염만을 일으킨다는 가정 하에서 분석을 진행하였다. 또한, 국내에서 이와 관련된 데이터는 찾기 어렵기 때문에, 외국의 선행연구를 참고하여 살처분으로인한 2차오염 피해비용의 값을 구하고자 한다.

구체적으로, 닭 1수를 매장하였을 때의 발생하는 2차오염 피해비용은 아래의 식으로 정의할 수 있다.

〈Table A1〉 Secondary pollution damage cost of stamping-out

(Secondary pollution damage cost per the unit of poultry) = (Amount of leachate from the unit of chicken buried) × (Environmental benefit from an elimination of contamination) × (Amount of contamination per a liter of leachate)
--

매장된 가금류 사체에서 시간의 경과에 따라 발생하는 침출수의 양은 Munro (2001)의 소, 양, 돼지의 사체에서 발생하는 침출수의 평균값을 적용하였다. 소의 사체의 경우 600kg을 기준으로 1주일간 발생하는 침출수의 양이 80L로 분석 되었으며, 양은 7L, 돼지는 6L의 침출수를 각각 발생시키는 것으로 나타났다. 이를 활용하여 폐사된 닭의 무게를 1kg으로 가정하였을 때 닭 1마리를 매장하는 경우 약 0.08L의 침출수가 발생하는 것으로 나타났다.

〈Table A2〉 Amount of leachate from buried livestock for one week

	Weight (kg)	Leachate (L)	The amount of leachate per kilogram(L)
Cattle	600	80	0.13
Sheep	100	7	0.07
Pig	200	6	0.03
Average	-	31	0.08

Source: Munro (2001).

Sancho et al. (2009)는 환경적 편익을 고려한 폐수 처리의 경제적 평가를 제시하였다. Sancho et al. (2009)는 잠재가격(Shadow price)을 고려하여 질소(Nitrogen, N), 인(Phosphorus, P), 부유물질(Suspended Solid, SS), 생화학적 산소 요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적 산소 요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)을 각각 제거하였을 때 발생하는 환경적 가치를 계산하였다.

〈Table A3〉 Environmental benefit from an elimination of contamination

Contaminants	Amount of eliminated contaminants (ton/year)	Total environmental benefit of eliminated contaminants (€ /year)	Environmental benefit of eliminated contaminants per kilogram (€ /kg)
N	4,288	98,133,996	22.89
P	918	50,034,733	54.51
SS	60,445	448,098	0.01
BOD	59,635	2,690,421	0.05
COD	113,510	13,364,429	0.12

Source: Sancho et al. (2009).

〈Table A3〉은 Sancho et al. (2009)의 논문을 정리한 것이다. 제거된 오염물질의 양은 화학적 산소 요구량이 1년 동안 약 11만 톤이 제거되어 가장 많았으며, 그 뒤로 부유물질, 생물학적 산소 요구량, 질소, 인 순으로 나타났다. 하지만 제거된 오염물질의 총 환경적 가치는 질소가 가장 높고 이어서 인, 화학적 산소 요구량, 생물학적 산소 요구량, 부유물질 순으로 나타났다. 이러한 5가지의 오염물질 중에서 질소와 인의 제거로 발생하는 환경적 가치가 전체 오염물질 제거로 인한 환경적 가

치의 약 90%를 차지하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 Sancho et al. (2009)에 따라 침출수에서 발생하는 오염물질 중에서 질소와 인을 제거하였을 때 발생하는 kg당 오염제거의 환경적 가치를 고려하여 침출수의 2차오염 피해비용을 산출하고자 한다.

Pratt (2009)는 가금류의 폐사체 매장지에 파이프를 설치하여 2주부터 약 2년까지 침출수의 성분이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 침출수 성분 중 질소와 인의 변화를 요약하면 <Table A4>와 같다. 암모니아태 질소(Ammonium Nitrogen)의 경우 시간이 흐름에 따라 방출되는 양이 급격하게 증가하는 모습을 보이지만, 질소(Nitrogen)와 인(Phosphorus)은 시간에 흐름에 따라 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 측정치의 평균값을 적용하여 침출수 단위 리터당 발생하는 환경적 가치를 계산하였다. 폐사된 가금류 한 마리의 사체에서 발생하는 질소 및 인은 각각 8,753mg/L과 1,934mg/L로 나타났다.

<Table A2>, <Table A3> 그리고 <Table A4>를 활용하여 계산한 가금류 한 마리를 살처분 하였을 때 발생하는 2차오염 피해비용은 2,196원이다.

<Table A4> Variation of the components of leachate over time

Unit: mg/L

Date	Ammonium as Nitrogen	Nitrogen	Phosphorus
2005. 08. 17	4,500	19,500	1,830
2005. 09. 21	4,542	16,500	2,090
2005. 10. 20	9,860	17,800	1,870
2005. 11. 23	11,200	20,200	1,970
2006. 5. 25	8,370	18,100	2,000
2006. 10. 26	12,700	17,700	1,890
2007. 9. 11	10,100	17,300	1,890
Average	8,753	18,157	1,934
Total	26,910		1,934

Source: Pratt (2009).

A Real Options Study on Avian Influenza Vaccine Stockpile Using a Stochastic Process*

Jinyoung Jeong** · Hojeong Park*** · Heesun Jang****

Abstract

As the spread of pandemic disease could have a profound impact on the related industry and the national economy, it is necessary to conduct the study on the optimal vaccine stockpile from an economic perspective for preventing epidemics in the world. However, since the traditional model in economics could not sufficiently consider the uncertainty of disease spread, it is required to make an integrated model combining epidemiology and economics. This study is the first in Korea that calculates optimal vaccine stockpile of highly pathogenic avian influenza (HPAI), using an economic-epidemiological model with a real option approach. In addition, it derives the critical infectious rate of vaccination, which is 32.37 million vaccines that should be stockpiled, and this value could not be estimated in the conventional epidemiological model.

Key Words: economic epidemiology model, real option, vaccine stockpile

JEL Classification: B4, C6, I0, Q0

Received: Feb. 1, 2019. Revised: March 15, 2019. Accepted: March 22, 2019.

* This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2017S1A5A2A01025923).

** First Author, Research Assistant, Korea Energy Economics Institute, 405-11, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44543, Korea, Phone: +82-52-714-2091, e-mail: tootooi@keei.re.kr

*** Second Author, Professor, Department of Food and Resource Economics, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea, Phone: +82-2-3290-3039, e-mail: hjeongpark@korea.ac.kr

**** Corresponding Author, Associate Research Fellow, Korea Energy Economics Institute, 405-11, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44543, Korea, Phone: +82-52-714-2280, e-mail: heesun.jang@keei.re.kr