구제역 가축 매몰지 침출수 독성영향평가

Ecotoxicity Assessment of Leachate from Disposal Site for Foot-and-Mouth Disease Carcasses

김 동 우¹⁾ · 유 승 호²⁾ · 장 순 웅¹⁾ · 이 정 아[†]

Dongwoo Kim · Seungho Yu · Soonwoong Chang · Junga Lee

Received: January 2nd, 2014; Revised: February 5th, 2014; Accepted: June 24th, 2014

ABSTRACT : In this study, chemical analysis and ecotoxicity tests of leachate from disposal site for foot-and-mouth disease carcasses (FMD leachate) were conducted to collect fundamental data that will be used to develop environmental risk assessment tools for FMD leachate. For chemical analysis, concentration of Cl^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Korea standard method indicators for detection of leachate released from animal carcasses burial site into groundwater and NRN (Ninhydrin-Reactive Nitrogens), a newly suggested screening test indicator to detect groundwater contamination by FMD leachate, were assessed. For ecotoxicity tests, luminescent bacteria (*V. fischeri*), micro-algae (*P. subcapitata*) and water flea (*D. magna*) were selected as test species. Correlation analysis between the concentration of Cl^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, NRN and the toxicity to *V. fischeri* was performed to identify the better indicators to monitor FMD leachate contamination. From regression analysis, the concentration of the indicators in FMD leachate contaminated sample that induced halfmaximal toxic effect to *V. fischeri* was evaluated. Results obtained from this study can be applied to assess the risk by FMD leachate and to establish the guideline to manage risk in relation to FMD leachate.

Keywords : Foot-and-mouth disease, Leachate, NRN, *Pseudokirchneriella subcapitata*, Toxic unit, *Vibrio fischeri*

요 지 : 구제역 가축 매몰지 침출수(이하 구제역침출수)의 생태계 위해성 평가 기법을 개발하기 위한 기초자료를 도출하고자 구제역 가축 매몰지의 유공관 또는 관측정에서 채취한 시료에 대하여 이화학적 분석과 생태독성시험을 수행하였다. 이화학적 분석은 환경부 기준 구제역침출수 유출판별지표 항목 중 염소이온(Cl^-)과 암모니아성질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$)농도, 그리고 한국원자력연구원에서 제안한 구제역침출수 유출판별지표인 NRN(Ninhydrin-Reactive Nitrogen)농도를 분석하였고, 생태독성시험은 발광박테리아(*V. fischeri*), 담수미세조류(*P. subcapitata*), 그리고 물벼룩(*D. magna*)을 생물종으로 이용하여 수행하였다. 이화학적 분석 결과와 *V. fischeri*에 대한 독성영향과의 상관관계를 분석하여 상관도가 높은 구제역침출수 유출판별지표 인자를 도출하였고 회귀분석식을 이용하여 반수독성을 유발하는 지표항목의 농도를 산출하였으며 생태독성영향과 구제역침출수의 수계유출관리법과의 연계성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 구제역 가축 매몰지에 의한 생태계 위해성을 평가하고 향후 관리 기준을 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 예측한다.

주요어 : 구제역, 침출수, NRN, 담수미세조류, 독성값, 해양 발광박테리아

1. 서 론

구제역이란 소, 돼지, 양, 염소 등 발굽이 두 개로 갈라진 동물(우제류)에서 발생하는 제1종 바이러스성 가축전염병으로 구제역에 감염된 가축은 가축전염 예방법에 따라 모두 도살, 매립, 소각 등의 방법으로 처리하도록 되어 있으며, 우리나라는 대부분 매몰법을 선택하고 있다(Kang et al., 2012; 환경부, 2011a). 2010년 안동에서 발생한 구제역은 초기방역의 실패와 빠른 감염속도로 인해 전국적으로 확산되어 약 4,800개의 매몰지가 긴급하게 조성 되었으며(Kim et al., 2010; Lee, 2011; 농림수산식품부, 2010) 시간, 인력, 장소 및 장비

등의 부족으로 인해 논 내부 또는 하천 주위 등 주로 축산 농가 주변이 매몰지로 선택되었다(Kim & Kim, 2013; Lee, 2011).

가축 사체의 70 %는 수분을 함유한 부패성 유기물질로 구성되어 있기 때문에 사체가 부패하는 과정에서 다량의 침출수가 발생하게 된다(Kang et al., 2012; Kim et al., 2010). 구제역 가축 매몰지 침출수(이하 구제역침출수)에는 병원성 미생물 존재의 가능성이 있고, 높은 농도의 암모니아성질소를 포함한 다양한 유기오염물질을 포함하고 있으며, 살처분 시 사용된 소독제 및 항생제, 성장촉진제 등의 다양한 오염원을 내포하고 있다(Lee, 2011). 구제역침출수의 유출 시 상

1) Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

2) Korea Atomic Energy Research Institute

† Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University (Corresponding Author : leejunga@kyonggi.ac.kr)

수원 및 지하수 오염이 예상되고 이로 인해 농작물에 영향을 줄 수 있으며 구제역침출수에 포함된 유해물질이 수계에 유입되면 수계에 서식하는 생물에게 영향을 미치게 되어 심각한 경우 생태계 변화나 파괴 또는 인체에도 해로운 영향을 유발할 수 있다(Kim et al., 2010; Lee, 2011). 따라서 구제역침출수 또한 생태 및 인체에 유해한 영향을 야기하는 잠재적 환경오염원이 될 수 있다.

구제역침출수로 인한 지하수 오염문제가 제기된 초기에 환경부에서는 염소이온(Cl^-), 암모니아성질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 질산성질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 농도 및 대장균 수를 기준으로 유출 여부를 판별하였으나 이와 같은 판별법은 축산분뇨나 퇴비 또는 비료에 의한 오염과 구분이 어렵다는 문제점이 제기되어 현재 염소이온(Cl^-), 암모니아성질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 전기전도도를 주요 지표인자로 선정하여 개별적 또는 통합적 농도 기준을 정하여 구제역침출수의 유출 여부를 단계별로 판단하고 있다(환경부, 2012). 최근 한국원자력연구소는 동물 사체의 단백질 분해 산물인 아미노산과 ninhydrin과의 반응으로 가축 사체 유래물질을 측정하는 기법을 적용하여 구제역침출수로 인한 지하수 오염을 판단하는 NRN(Ninhydrin-Reaction Nitrogen) test를 개발하였다(Yu & Ahn, 2011; Friedman & Sigel, 1966).

구제역침출수에 대한 국·내외 연구 동향을 살펴보면 주로 침출수의 거동과 약이나 침출수 성분의 이화학적 특성 또는 이화학적 분석을 통한 오염분석 등의 연구가 수행되고 있다(Alberto & Lorenzo, 2006; Kae et al., 2006; Kang et al., 2012; Lee, 2011; Lee & Oh, 2011; Pratt, 2009; Ritter & Chirside, 1995). 그러나 이화화적인 성분분석 방법만으로는 독성물질에 대한 수계의 직접적, 또는 잠재적인 독성영향을 파악하기에는 제한점이 있다. 수계 생물종을 이용한 독성시험(Bioassay)은 수생태계에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 유해물질에 대한 독성을 평가할 뿐만 아니라 환경에 끼칠 피해를 예측하고, 처리기준을 설정하는데 중요한 역할을 할 수 있어 이화학적 성분분석과 더불어 상호보완적으로 이용되는 방법이다(Baderna et al., 2011; Butt et al., 2008; Shin et al., 2010).

이에 본 연구에서는 잠재적 오염원인 구제역침출수의 생태위해성평가 기법개발을 위한 기초자료를 도출하기 위해 총 6지점(구제역 가축 매몰지 유공관 2곳, 관측정 4곳)의 시료를 채취하여 이화학적 분석과 생물종을 이용한 독성시험을 수행하였다. 이화학적 분석은 환경부 기준 구제역침출수 판별지표항목 중 암모니아성질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 염소이온(Cl^-) 농도와 한국원자력연구소에서 제안한 구제역침출수 오염지표인 NRN 농도를 측정하였다. 생태독성영향평가는 발광박테리아(*Vibrio fischeri*, *V. fischeri*)를 이용한 생태독성시험을

수행하여 각각의 반수영향농도(EC_{50})와 독성값(Toxic Unit, TU)을 산출하였고, 미세녹조류(*Pseudokirchneriella subcapitata*, *P. subcapitata*)와 물벼룩(*Daphnia magna*, *D. magna*)을 이용한 독성시험을 수행하여 중별 영향 및 민감도를 비교하였다. 또한 구제역침출수의 누출 시 수계유입에 의한 영향을 예측하기 위하여 6지점의 침출수를 각각 일정 배율로 희석한 인공시료(구제역 가축매몰지 침출수 오염시료, 24개)에 대해 개별적으로 이화학적 분석과 *V. fischeri*를 이용한 독성시험을 수행한 후 이화학적 분석 결과와 독성영향과의 상관분석을 통하여 상관도가 높은 유출판별 지표인자를 도출하였고 회귀분석식을 이용하여 반수독성을 유발하는 지표항목의 농도를 산출하였으며 독성영향과 수계유출관리법과의 연계성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시료채취 및 전처리

경기도 A시와 B시의 구제역 가축 매몰지 유공관 1곳과 관측정 2곳씩, 총 6지점의 침출수를 채취하여(Table 1) 원심분리(3,000 rpm, 4 °C, 15분, 415G, GYROZEN, Korea)와 여과(0.45 µm, WKP4525-1, Smartpor, USA)의 전처리 과정 후(Kang et al., 2012) 이화학적 분석과 생태독성시험을 수행하였다.

2.2 이화학적 분석

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (ES 04355.1)와 Cl^- 농도(ES 04356.3) 분석은 수질공정시험법에 의거하여 수행하였다(환경부, 2011b). NRN 시험은 시료가 ninhydrin solution과 반응 후 발생 정도를 측정하는 분석법으로 간략한 실험방법은 다음과 같다. Ninhydrin 용액은 ninhydrin(151173, SIGMA, USA), hydrindantin hydrate(088-03701, Wako, Japan), dimethyl sulfoxide(154938, SIGMA, USA), sodium acetate(SIGMA, S8750, USA)를 혼합하여 제조하였다. 1 mL의 침출수 시료에 0.5 mL의 ninhydrin 용액을 넣어 80 °C 항온수조(WB-11, DAIHAN Scientific, Korea)

Table 1. Sampling sites and type

Sample	Type	Site
Site 1	Extraction well	A
Site 2	Monitoring well	
Site 3	Monitoring well	
Site 4	Extraction well	B
Site 5	Monitoring well	
Site 6	Monitoring well	

에서 10분 동안 발색시킨 후 상온에서 15분간 냉각시켰다. 10 mL의 50 % ethanol을 넣고 흡광도를 측정한다(570 nm, EL808, Biotek, Korea) 표준용액(DL-leucine, 50 µg-N/mL)에 대한 검량선을 이용하여 NRN 값을 구하였다(Yu & Ahn, 2011; Friedman & Sigel, 1966).

2.3 생태독성시험

2.3.1 *V. fischeri* 시험

*V. fischeri*에 대한 독성영향은 Modern water Microtox[®] Analyzer를 이용하여 분석하였다(Model 500, Microtox[®], USA). 독성시험은 구제 역가측 매물지 침출수에 총량의 1/10(v/v)에 해당하는 OAS(Osmotic Adjusting Solution)를 넣은 후 농도별로(0.2 %, 1.0 %, 5.00 %, 25.0 %, 50 %, 100 %) 희석된 시료에 대하여 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 측정용 cuvette에 100 µL의 *V. fischeri*를 넣고 초기 발광도를 측정한 뒤 900 µL의 시료를 넣어 노출경과 5분, 15분, 30분 뒤 발광도를 측정하여 각 시료에 대한 EC₅₀을 구한 뒤 Eq. (1)을 이용하여 TU값을 산출하였다(AZUR Environmental, 1998).

$$TU = \frac{100}{EC_{50}} \quad (1)$$

2.3.2 *P. subcapitata* 시험

*P. subcapitata*에 대한 독성 영향은 OECD 화학물질 시험가이드라인에 따라 수행하였다(OECD, 2011). 독성시험은 침출수 함유율 0.008 %, 0.04 %, 0.2 %, 1.0 %, 5.0 %(v/v)의 시료에 대하여 광도 5,500 Lux, 광주기 16:8(명:암), 온도 24±1 °C의 조건에서 세포 밀도 3~5×10⁴ cells/mL로 4일간 배양하여 지수생장기에 도달한 조류를 이용하여 수행하였으며 실험과정은 다음과 같다. 100 mL 삼각플라스크에 조류 15 mL와 시료 15 mL를 합쳐 총량 30 mL가 되게 한 후 위의 배양 조건에서 72시간 동안 배양 후 조류의 세포 밀도를 측정하여 조류의 비 성장속도(average specific growth rate; µ)와 성장저해율(percent inhibition in average specific growth rate; % Ir)을 Eq. (2), (3)에 의해 산출하였다(Kim et al., 2007; OECD, 2011). 조류의 세포 상태와 밀도는 혈구계수관(Superior, Haemacytometer, Germany)을 이용하여 Inverted microscope (CKX41, OLYMPUS, Japan)으로 측정하였다.

$$\text{Specific growth rate } (\mu) = \frac{\ln N_n - \ln N_0}{t_n - t_0} (\text{day}^{-1}) \quad (2)$$

Where *N* is the algal numbers, *t* is time(day)

$$\text{Inhibition rate } \% (\% Ir) = \frac{\mu_{\text{control}} - \mu_{\text{inhibited}}}{\mu_{\text{control}}} \times 100 \quad (3)$$

Where *μ* is specific growth rate

2.3.3 *D. magna* 시험

*D. magna*에 대한 독성영향은 US-EPA와 환경부(2011b)에서 제시하는 급성독성평가시험법에 따라 수행하였다(ES 04751.1, US-EPA, 1992). 시험생물종인 *D. magna*는 국립환경과학원에서 분양을 받았으며 시료의 농도는 최대 구제역 가축 매물지 침출수 함유율 20 %로, 농도별 반복처치군은 4개로 수행하였다. 시험조건은 온도 21±1 °C, 광조건 명:암=16:8(800 Lux), 습도는 50 %로 유지하였다. 시험은 50 mL의 비커에 농도별로 준비된 시료에 생후 24시간 미만의 어린 개체(neonate) 5마리를 넣어 수행하였다. 시료에 노출시킨 뒤 24시간과 48시간 경과 후 *D. magna*의 유영저해를 판단하고 Trimmed Spearman-Kärber Method를 이용하여 EC₅₀을 도출한 후 Eq. (1)을 이용하여 TU를 산출하였다.

2.4 통계처리

대조군과 실험군의 유의성 검정은 students t-test로 비교하였고 상관관계 분석은 MINITAB 통계프로그램을 이용하였으며 모든 통계값에서 유의 수준은 0.05 이하(p < 0.05)로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이화학적 분석

지점별 Cl⁻ 농도는 site 4 > site 1 > site 5 > site 6 > site 3 > site 2 순으로, NH₄⁺-N 농도는 site 1 > site 4 > site 3 > site 5 > site 2 > site 6 순으로, 그리고 NRN 농도는 site 1 > site 4 > site 2 > site 5 > site 3 > site 6 순으로 높게 측정되었다(Table 2). 내부 침출수(유공관 시료, site 1, 4)는 모든 분석항목에서 외부 침출수(관측정 시료, site 2, 3, 5,

Table 2. Concentrations of Cl⁻, NH₄⁺-N, NRN in FMD leachate from 6 burial sites

Sample	Cl ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NRN (mg/L)
Site 1	1,540.0 ± 141.4	13,800.0 ± 565.7	2,585.3 ± 157.6
Site 2	256.0 ± 11.3	715.4 ± 9.6	389.9 ± 23.5
Site 3	276.0 ± 5.7	1,100.0 ± 141.4	282.9 ± 60.2
Site 4	1,660.0 ± 197.9	9,300.0 ± 141.4	2,346.5 ± 138.2
Site 5	736.0 ± 22.6	952.0 ± 11.3	333.5 ± 68.1
Site 6	420.0 ± 28.3	500.0 ± 141.4	122.8 ± 9.5

6)에 비해 상당히 높은 농도로 측정되었으며 모든 지점의 침출수 모두 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 가장 높게 측정되었다(Table 2). Pratt의 가축 사체침출수의 이화학적 성상분석 연구에 의하면 가금류 매몰지 침출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 4,500~12,700 mg/L, Cl^- 농도는 2,360~3,480 mg/L로 분석되었고, 돼지 매몰지 침출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 2,400~16,300 mg/L, Cl^- 농도는 2,140~2,855 mg/L로 분석되었으며, 소 매몰지 침출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 4,708~19,200 mg/L, Cl^- 농도는 2,180~3,810 mg/L로 분석되었다(Pratt & Fonstad, 2006). 본 연구의 결과 내부 침출수인 site 1과 site 4의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 9,300~13,800 mg/L이고 Cl^- 농도가 1,540~1,660 mg/L로 기존의 연구에서 조사되었던 가축 사체 침출수에 대한 이화학적 성상과 비교하였을 때 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 검출농도 범위가 유사하였으며 Cl^- 농도는 조금 낮은 것으로 분석되었다(Alberto & Lorenzo, 2006; Pratt & Fonstad, 2006).

3.2 *V. fischeri* 시험

*V. fischeri*를 이용한 독성시험 결과, 각 지점의 EC_{50} (15분)을 기준으로 TU값이 site 4 > site 1 > site 5 > site 2 > site 3 > site 6 순으로, EC_{50} (5분, 30분)을 기준으로 TU값이 site 4 > site 1 > site 2 > site 5 > site 3 > site 6 순으로 높은 것으로 나타났다(Table 3). A시의 경우 내부 침출수(유공관 시료, site 1)가 외부 침출수(관측정 시료, site 2, 3)에 비해 *V. fischeri* 대한 독성이 약 1.9~3.6배 높은 것으로 측

정되었고 B시의 경우 내부 침출수(유공관 시료, site 4)가 외부 침출수(관측정 시료, site 5, 6)에 비해 *V. fischeri* 대한 독성이 약 3.0~11.4배 높은 것으로 측정되었다. 독성영향은 지점별로 많은 차이를 보이고 있으나 내부침출수가 외부 침출수에 비해 독성이 높고 구제역침출수 유출 판별에 적용되는 지표물질의 농도가 높은 지점일수록 *V. fischeri*에 대한 독성이 높은 것으로 나타났다(Table 2, 3).

3.3 *P. subcapitata* 시험

P. subcapitata 독성시험은 6지점 중 이화학적 분석값과 *V. fischeri*에 대한 독성영향이 중간 정도이며 이화학적 분석 농도 순위와 독성도 순위가 상이한 site 2와 site 5에서 채취한 침출수에 대하여 수행하였다. *P. subcapitata* 독성시험 결과 2지점의 침출수 모두 함유율 25 % 이상에서 조류가 사멸하였으며(data not shown), 5 %의 침출수가 함유된 시료는 site 1의 경우 대조군에 비해 34.83 %, site 5의 경우 대조군에 비해 68.31 %의 성장 저해를 나타냈다(Fig. 1). 그러나 1 % 이하의 침출수에 노출된 조류는 두 곳 모두 대조군에 비해 조류의 생장이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 질소는 미세조류의 중요한 구성성분으로 다양한 형태의 무기질소(NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- 등)의 흡수를 통해 세포생장이 증대되는 특성이 있다(Tam & wong, 1996; Hu et al., 2000; Park et al., 2009). NH_4Cl 을 이용하여 *P. subcapitata*에 대한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 영향을 수행한 결과 침출수 5 %가 함유된 시료

Fig. 1. Toxic effect to *P. subcapitata* of FMD leachate

Table 3. Half maximal effective concentration (EC_{50}) and Toxic Unit (TU) of each site to *V. fischeri* at 5, 15 and 30 min

Sample	5 min			15 min			30 min		
	EC_{50} (%)	95 % C.I	TU	EC_{50} (%)	95 % C.I	TU	EC_{50} (%)	95 % C.I	TU
1	0.687	0.358 - 1.320	145.48	0.625	0.330 - 1.184	159.97	0.577	0.292 - 1.141	173.25
2	0.853	0.363 - 2.005	117.23	1.173	0.681 - 2.022	85.25	0.979	0.503 - 1.907	102.11
3	2.480	0.708 - 8.689	40.32	2.245	0.552 - 9.140	44.54	2.206	0.437 - 11.150	45.33
4	0.376	0.270 - 0.523	266.17	0.368	0.121 - 1.117	271.81	0.337	0.146 - 0.774	297.09
5	0.924	0.539 - 1.584	108.23	1.107	0.568 - 2.159	90.33	1.226	0.689 - 2.181	81.57
6	4.951	4.376 - 5.600	20.20	4.192	3.045 - 5.769	23.86	3.575	2.513 - 5.085	27.97

에 포함된 범위의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 노출은 세포독성영향을 야기하였으나 침출수 1 %가 함유된 시료에 포함된 범위의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 노출에 의한 세포생장은 관찰되지 않았다(data not shown). 따라서 침출수에 포함된 다른 영양물질에 의해 세포 생장이 증대된 것으로 예측되며 이와 같은 현상은 구제역침출수가 수계에 누출 시 부영양화 등을 유발할 수 있으므로 향후 원인 규명을 위한 연구가 연계되어야 할 것으로 사료된다.

3.4 *D. magna* 시험

D. magna 독성시험은 *P. subcapitata* 독성시험을 수행한 site 2와 site 5에서 채취한 침출수 시료에 대하여 수행하였다. *D. magna* 독성시험 결과 site 2와 site 5에 대한 *D. magna* EC_{50} (24시간)은 각각 1.56 %와 1.48 %이고 EC_{50} (48시간)은 각각 0.78 %와 0.57 %로 측정되었다(Table 4). 두 지점의 침출수에 대한 *V. fischeri*의 EC_{50} (15분)이 각각 1.17 %와 1.11 %로 구제역 가축 매몰지 침출수에 대한 *D. magna*(24시간)의 독성민감도는 *V. fischeri*(15분)와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 *P. subcapitata* 세포의 성장을 촉진시키는 시료가 *D. magna*와 *V. fischeri*에 독성영향을 유발하므로 이와 같은 결과는 구제역침출수는 시험생물종 마다 독성영향이 상이할 수 있음을 시사한다.

Table 4. Half maximal effective concentration (EC_{50}) to *D. magna* and Toxic Unit (TU) of FMD leachate from site 2 and site 5

Sample	Exposure duration	EC_{50} (%)	95 % Confidence Interval	TU
Site 2	24 hr	1.56	1.37 - 1.70	64.10
	48 hr	0.78	0.56 - 0.89	128.21
Site 5	24 hr	1.48	1.30 - 1.62	67.57
	48 hr	0.57	0.47 - 0.70	175.44

3.5 상관관계 분석

구제역침출수의 누출 시 수계유입에 의한 영향을 예측하기 위하여 6지점의 침출수를 각각 일정 배율로 희석한 인공 시료(구제역 가축 매몰지 침출수 오염시료, 24개)에 대해 개별적으로 이화학적 분석과 독성시험을 수행한 후 유출판별 지표와 *V. fischeri*의 독성영향(15분)과의 상관관계 및 유출판별기준과의 연계성을 분석하였다.

Site 1~6의 침출수 함유율 5 % 시료의 *V. fischeri*에 대한 발광저해율이 대조군에 비해 각각 84.59 %, 80.84 %, 59.56 %, 94.73 %, 52.50 %로 모두 독성영향이 관찰되었다. Cl^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 그리고 NRN과 독성영향과의 상관도는 각각 0.78, 0.90, 0.92로 세 가지 항목 모두 농도와 독성과의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 특히 NRN과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 독성영향과의 상관관계가 높았으며 *V. fischeri*에 반수영향을 유발하는 침출수 시료 내의 NRN과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 회귀분석식을 이용하여 각각 14.09 mg/L와 33.98 mg/L로 산출되었다(Fig. 2).

환경부 가이드라인에 의하면 모니터링 결과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 10 mg/L 이상이면서 Cl^- 농도가 100 mg/L 이상인 경우 침출수의 유출 가능성이 높은 단계(1단계)로 판단하고 있다(환경부, 2012). 본 실험의 결과, site 1에서 채취한 침출수가 5 % 함유된 시료의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 Cl^- 농도는 각각 2,415.0 mg/L와 77.0 mg/L이고 site 4에서 채취한 침출수가 5 % 함유된 시료의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 Cl^- 농도는 각각 440.0 mg/L와 86.0 mg/L(Table 5)로 환경부 가이드라인 적용 시 내부 침출수가 5 % 함유된, 특히 독성영향이 약 80% 이상인 시료임에도 구제역침출수 유출 가능성이 높은 단계로 판단되지 않았다. 이와 반면 한국원자력 연구원 판별법을 적용한 결과 시료가 0.2 % 함유되었을 경우(site 6 제외) NRN 농도가 1 mg/L 이상으로 독성영향이 30 % 이하인 구제역침출수 오염시료에 대해 유출판별이 가능한 것으로 나타났다(Table 5).

구제역침출수는 매몰 가축의 종과 수에 따라 발생량에

Fig. 2. Relationship between toxic effect to *V. fischeri* and (a) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ or (b) NRN

Table 5. Concentrations of Cl^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and NRN in diluted FMD leachate from 6 burial sites

Conc.	Site 1			Site 2			Site 3		
%	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN
0.2	4.1	28.5	12.88	0.0	2.8	1.09	0.4	2.5	1.88
1.0	16.3	131.0	48.10	1.0	11.1	5.19	2.6	11.0	3.84
5.0	77.0	845.0	246.73	17.3	42.2	26.85	12.0	60.0	12.75
Conc.	Site 4			Site 5			Site 6		
%	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN	Cl^-	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	NRN
0.2	3.3	20.0	10.88	2.5	3.3	2.41	0.4	1.6	0.66
1.0	16.0	91.0	45.48	13.5	14.3	5.49	4.3	7.3	3.27
5.0	86.0	440.0	238.55	48.5	57.9	19.89	22.0	30.0	14.42

(unit : mg/L)

차이가 있으며 매몰지 안정화 정도 및 매몰지점으로부터의 거리 등에 따라 이화학적 성상이 달라질 수 있다(Park, 2011). 따라서 여러 가지 매몰환경요인과 특성에 따라 침출수의 성상이 다양하여 유출 시 수계에 미치는 독성영향 또한 상이할 것으로 예측된다. 구제역침출수에 대한 이화학적 성상과 독성영향과의 상관성 분석은 독성영향에 가장 크게 기여하는 분석 항목을 도출할 수 있으며, 독성 유발에 기여하는 지표항목에 대한 농도 예측은 향후 침출수 유출의 판별 기준으로 적용할 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 독성평가의 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 수 생태계의 잠재적 오염원인 구제역침출수에 대한 위해성 평가 기법 개발의 기초자료로 활용하고자 구제역침출수의 유출관리법과 수계 유출 시 중요한 생태독성과의 연계성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 세 가지 생물 종(*V. fischeri*, *P. subcapitata*, *D. magna*)을 이용한 독성시험 결과 시험 종별로 영향이 상이하나 구제역침출수 시료가 5 % 이상 함유된 시료에서 모두 독성영향이 발현되었으며 독성민감도는 *D. magna*(24 시간)와 *V. fischeri*(15분)가 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 구제역침출수에 대한 이화학적 성상과 독성영향과의 상관 분석 결과, NRN과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 *V. fischeri* 독성영향과 상관도가 높게 나타났으며 이와 같은 결과는 NRN과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 구제역침출수의 유출을 판별할 뿐 아니라, 그에 대한 독성 정도를 예측하는데 적용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 환경부 가축매몰지역 환경조사지침에 근거한 유출 기

준 적용결과, 구제역 가축 매몰지 유공관 침출수가 5 % 오염된 시료에 대하여 침출수 유출 가능성이 높은 단계로 판별되지 않았으나 한국원자력연구원에서 제시한 유출 판별기준 적용결과, 0.2 % 함유된 시료에도 구제역침출수 오염을 판별하였다. 이와 같은 결과는 NRN test가 구제역침출수 유출 판별에 민감한 시험법으로 판단된다.

- (4) 본 연구의 구제역침출수에 대한 생태독성영향과 유출 판별기준과의 연계성 평가 결과는 향후 구제역침출수에 대한 위해성 평가는 물론 그로 인한 환경오염을 효과적으로 예방하고 관리하는데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.
- (5) 구제역침출수가 수 생태계에 미치는 영향을 정확히 평가, 예측하고 더 나아가 관리기준을 설정하기 위해서는 가축 매몰지의 특성(규모, 매몰경과시간, 가축의 종류 등)이 고려된 구제역침출수에 대해 다양한 생물종을 이용한 독성영향평가는 물론 원인물질탐색(TIE, Toxicity Identification Evaluation) 및 독성저감평가(TRE, Toxicity Reduction Evaluation)에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원 (과제번호: GT-11-B-01-015-0) 받아 수행한 연구입니다.

References

1. 농림수산식품부 (2010), 가축전염병예방법, pp. 1~19.
2. 환경부 (2011a), 구제역 관련 가축매몰지 조성관리지침, pp. 1~5.

3. 환경부 (2011b), 수질오염공정시험기준, pp. 317~421, 1015~1023.
4. 환경부 (2012), 가축매몰지역 환경조사지침, pp. 1~99.
5. Alberto, P. and Lorenzo, G. (2006), Acute toxicity test of leachate from traditional and sustainable landfills using luminescent bacteria, *Waste Management*, Vol. 26, No. 10, pp. 1148~1155.
6. AZUR Environmental. (1998), The microtox acute basic, DIN, ISO and wet test procedure, Carlsbad, Calif, USA, pp. 1~23.
7. Baderna, D., Maggioni, S., Boriani, E., Gemman, S., Molteni, M., Lombardo, A., Colombo, A., Bordonali, S., Rotella, G., Lodi, M. and Benfenati, E. (2011), A combined approach to investigate the toxicity of an industrial landfill's leachate: Chemical analyses, risk assessment and *in vitro* assays, *Environmental Research*, Vol. 111, No. 4, pp. 603~613.
8. Butt, T. E., Lockley, E. and Oduyemi, K. O. K. (2008), Risk assessment of landfill disposal sites - state of the art, *Waste Management*, Vol. 28, No. 6, pp. 952~96.
9. Friedman, M. and Sigel, C. W. (1966), A kinetic study of the ninhydrin reaction. *Biochemistry*, Vol. 5, No. 2, pp. 478~484.
10. Hu, Q., Westerhoff, P. and Vermaas, W. (2000), Removal of nitrate from groundwater by cyanobacteria: quantitative assessment of factors influencing nitrate uptake, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 1, pp. 133~139.
11. Kae, O., Kashiwada, S., Tatarazako, N. and Ono, Y. (2006), Toxicity testing of leachate from waste landfills using Medaka (*Oryzias Latipes*) for monitoring environmental safety, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 117, No. 1~3, pp. 73~84.
12. Kang, M. A., Kim, M. S., Choi, B. W. and Sohn, H. Y. (2012), Organic matter analysis and physicochemical properties of leachate from a foot-and-mouth disease landfill site, *Korean Journal of microbiology and Biotechnology*, Vol. 40, No. 2, pp. 128~134 (in Korean).
13. Kim, K. H., Kim, K. R., Kim, H. S., Lee, G. T. and Lee, K. H. (2010), Assessment of soil and groundwater contamination at two animal carcass disposal sites, *Korean Society of solid Science and Fertilizer*, Vol. 43, No. 3, pp. 384~389 (in Korean).
14. Kim, K. T., Lee, B. C., Kim, D. W. and Kim, S. D. (2007), Ecological risk assessment (ERA) of abandoned mine drainage (AMD) in Korea Based on *Vibrio fischeri*, *Selenastrum capricornutum* and *Daphnia magna*, *Korean society of Environmental Engineers*, Vol. 29, No. 2, pp. 163~168 (in Korean).
15. Kim, M. H. and Kim, G. H. (2013), Analysis of environmental impacts using LCA for the carcass burial, *Korean society on Water Environment*, Vol. 29, No. 2, pp. 239~246 (in Korean).
16. Lee, K. K. (2011), Foot-and-mouth disease and that burial leachate and groundwater contamination, *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 6~17 (in Korean).
17. Lee, S. H. and Oh, M. H. (2011), Case study abroad for livestock burial and follow-up management method for domestic Foot-and-Mouth Disease, *Korean Geosynthetics Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 24~29 (in Korean).
18. OECD (2011), Guidelines for the testing of chemicals. test No. 201: Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test. pp. 1~25.
19. Park, J. W. (2011), Livestock burial leachate characteristics and treatment method. *Geoenvironmental Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 45~56 (in Korean).
20. Park, K. Y., Kim, B. R. and Lee, K. (2009) Growth of microalgae in diluted process water of the animal wastewater treatment plant, *Water Science and Technology* Vol. 59, No. 11, pp. 2111~2116.
21. Pratt, D. L. and Fonstad, T. A. (2006), livestock mortalities burial leachate chemistry-the first nine months, *ASABE, MBSK* 06-303 pp. 1~16.
22. Pratt, D. L. (2009), Environmental impact of livestock mortalities burial, Master's Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, pp. 46~78.
23. Ritter, W. F. and Chirnside, A. E. M. (1995), Impact of dead bird disposal pits on groundwater quality on the delmarva peninsula, *Bioresource Technology*, Vol. 53, No. 2, pp. 105~111.
24. Shin, J. J., Yim, E. C. and Kim, S. J. (2010), Toxicity evaluation of leachate of sanitary landfill located in G city, *Korean society of Urban Environmental*, Vol. 10, No. 3, pp. 305~310 (in Korean).
25. Tam, N. F. T. and Wong, Y. S. (1996), Effect of ammonia concentrations on growth of *chlorella vulgaris* and nitrogen removal from media, *Bioresource Technology*, Vol. 57, No. 11, pp. 45~50.
26. US-EPA. (1996), Ecological effects test guidelines, *Aquatic Invertebrate Acute Toxicity Test*, *Freshwater Daphnids*, 8 p.
27. Yu, S. H. and Ahn, Y. D. (2011), Ninhydrin method for the detection of leachate from animal carcass burial sites, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, pp. 209~212.