



이산화염소(ClO₂) 처리가 계분의 악취 억제에 미치는 영향

박지우^{1*} · 김경진^{1*} · 마분 다메리아 타비타² · 윤두학³ · 공창수³ · 이상무³ · 김은중^{3†}

¹경북대학교 축산BT학과 대학원생, ²경북대학교 축산BT학과 박사후연구원, ³경북대학교 축산BT학과 교수

Effect of Chlorine Dioxide (ClO₂) on the Malodor Suppression of Chicken Feces

Ji Woo Park^{1*}, Gyeongjin Kim^{1*}, Tabita Dameria Marbut², Duhak Yoon³, Changsu Kong³, Sang Moo Lee³ and Eun Joong Kim^{3†}

¹Graduate Student, Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

²Post-Doctoral Researcher, Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

³Professor, Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

ABSTRACT This study evaluated the efficacy of chlorine dioxide (ClO₂) as an oxidant to reduce malodor emission from chicken feces. Two experiments were performed with the following four treatments in parallel: 1) fresh chicken feces with only distilled water added as a control, 2) a commercial germicide as a positive control, and 3) 2,000 or 4) 3,000 ppm of ClO₂ supplementation. Aluminum gas bags containing chicken feces sealed with a silicone plug were used in both experiments, and each treatment was tested in triplicate. In Experiment 1, 10 mL of each additive was added on the first day of incubation, and malodor emissions were then assessed after 10 days of incubation. In Experiment 2, 1 mL of each additive was added daily during a 14-day incubation period. At the end of the incubation, gas production, malodor-causing substances (H₂S and NH₃ gases), dry matter, pH, volatile fatty acids (VFAs), and microbial enumeration were analyzed. Supplementing ClO₂ at 2,000 and 3,000 ppm significantly reduced the pH and the ammonia-N, total VFA, H₂S, and ammonia gas concentrations in chicken feces compared with the control feces (*P*<0.05). Additionally, microbial analysis indicated that the number of coliform bacteria was decrease after ClO₂ treatment (*P*<0.05). In conclusion, ClO₂ at 2,000 and 3,000 ppm was effective at reducing malodor emission from chicken feces. However, further studies are warranted to examine the effects of ClO₂ at various concentrations and the effects on malodor emission from a poultry farm.

(Key words: chlorine dioxide, chicken feces, malodor suppression)

서 론

최근 양계 농가는 사육환경의 규제 강화정책으로 인하여 사육환경을 개선하고 동물복지를 지향하는 사육방법으로 변환하고 있고, 특히 악취는 동물의 사육 및 환경규제에 관련된 직접적인 요소 중 하나이다(Kim et al., 2013). 계분의 악취는 누적되거나 퇴비로 만들어 사용할 때 더 많이 발생하며(Jang et al., 2004), 계사에서 발생하는 악취는 다른 산업시설이나 생활시설에서 배출되는 악취에 비해 농도, 강도, 지속성 모두 상대적으로 높은 것으로 보고된 바 있어(Hartung and Phillips, 1994) 악취 저감은 닭의 사육에서 사

육환경의 개선을 위해서도 필요하다. 계사 내에서는 황화수소(H₂S), 암모니아(NH₃), 아산화질소, 아민, volatile fatty acid (VFA), 황화합물 등이 발생되며 이 중 NH₃와 H₂S가 주요 악취 유발 물질이다(Hartung and Phillips, 1994). 또한, 산란계사와 육계사 내 악취물질의 농도에서도 상이함이 보고된 바 있다(Jang et al., 2010). 이러한 악취의 발생 원인은 계사 내 미생물이 분해하는 유기물 영양소를 분해하는 과정에서 악취 유발 물질들을 생성하기 때문이며, 분사 내에는 이런 물질들이 서로 혼합되어 있어 악취를 유발한다(Ranadheera et al., 2017).

악취를 저감하는 방법에는 제어 시점을 기준으로 동물의 소화과정의 용이성을 위해 사료 내 생균제를 투여하거나,

* These authors have contributed equally to this work.

† To whom correspondence should be addressed : ejkim2011@knu.ac.kr

분 내 악취 유발 물질의 원인이 되는 단백질 함량 또는 품질을 조절하는 등 악취가 생성되기 전에 악취 생성량 자체를 감소시키는 근원적 제어방법과 자연배기 또는 강제배기법(환기를 통한 악취 저감법), 미생물 이용법(악취 유발 물질에 미생물 처리를 하여 악취를 저감하는 방법), 악취 물질 흡착 및 흡수법(악취의 주성분을 흡착 및 흡수하여 냄새를 저감하는 방법), 효소 이용법(악취 유발 물질에 효소를 이용하여 악취를 저감하는 방법), 및 산화법(살균제를 이용하여 미생물을 살균해 악취를 저감하는 방법) 등의 생성 후 감소 방법으로 나눌 수 있다(Bjerg et al., 2002; Ahmed et al., 2015; Kim et al., 2021; Zhu et al., 2021). 그러나 동물에 생균제를 직접 투여하는 방법은 첨가제 내의 성분이 가축의 생리변화에 잠재적인 위험성을 야기할 수 있고 사료 내 단백질량의 조절은 닭의 초기성장에 큰 영향을 미칠 수 있다(Lee et al., 2009).

위에 제시한 악취 저감방법 중 산화법은 염소, 이산화염소, 과산화수소와 같은 산화제를 이용해 악취 유발 물질을 산화시키고 미생물의 살균 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Roller et al., 1980; Kim et al., 2014). 특히 이산화염소(ClO₂)는 살균제로 이용되는 염소화합물로, 염소보다 물에 대한 용해도가 높고 NH₃나 질소화합물과 반응하여 chloramine이나 발암물질인 trihalomethane을 형성하지 않으며 산화능력이 높아 살균력이 높다(Youm et al., 2004; Svecovicus et al., 2005). 이산화염소의 작용기전은 비특이적인 산화 손상으로 인해 병원균의 세포 외막의 투과성이 손실된 후, 세포막 사이의 이온 농도 기울기가 불균형을 이루게 되면서 살균효과를 나타내며 이때 살균력은 pH의 영향을 받지 않는 것이 특징이다(Berg et al., 1986). 그러나 물에 이산화염소 처리 시 시간손상이나 용혈성 빈혈을 야기하는 chlorite와 chlorate가 형성되기 때문에 음용수에 처리하는 양이 제한되어 있으며 이산화염소 처리 시 물에는 aldehydes, esters 등이 생성되는 단점이 있다(Gan et al., 2020). 이산화염소는 액체상태로 처리하여 병원균 살균이나 악취 저감을 위해 수영장(Kim et al., 2017)이나 구강(Shinada et al., 2010)에도 사용되며 식품에서는 가스형태의 이산화염소 처리를 통해 *Salmonella*, *Escherichia coli* (*E. coli*), *Listeria* 등과 같은 병원균을 제거하여 보존성을 높이는 것으로 보고되었다(Mahmoud et al., 2007). 한편, 이산화염소를 계육이나 육계 사료에 직접 처리하여 장내 미생물의 변화 또는 계분의 악취를 평가한 보고는 있으나(Ellis et al., 2006; Ahmed et al., 2015) 계분에 이산화염소 처리 시 악취 저감 효과에 관한 연구는 매우 드문

것으로 조사되었다.

본 연구는 산화제인 이산화염소를 계분에 처리 시 병원균 및 악취를 저감할 것이라는 가설을 바탕으로, 육계 계분에 이산화염소를 수준별로 첨가하여 일정 기간 배양하는 동안 계분의 악취 발생에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

1. 계분 시료의 준비

계분은 경상북도 상주시 소재의 육계농장에서 계사 내부를 순회하며 가능한 한 새롭게 배설된 것을 수거하였다. 실험에 필요한 계분의 시료량을 충분히 확보하기 위하여 당일 하루 약 3시간 동안 순회하며 계분 약 500 g을 채취하였다. 수거한 시료(1일 1회)는 플라스틱으로 제작된 시료 봉투 및 아이스박스에 담아 실험실로 즉시 옮긴 후 대표성을 나타낼 수 있도록 잘 혼합하여 실험의 시료로 사용하였다.

2. 실험설계

첨가량의 수준과 효과 및 실험에 적용할 총 수분량의 설정에 참고하기 위하여 본 실험 이전에 1회의 예비실험을 시행한 후 본 실험을 설계하였다(data not included). 첨가제인 이산화염소는 I사의 상용제품(ClO₂ 8%)을 선정하였고 제품에 기술된 사용법과 예비실험의 결과를 참고하여 첨가 수준을 설정하였다. 제조사의 사용법에 의하면 축사의 악취제거 목적으로 1,000 ppm~2,000 ppm 사용을 권장하였는데, 본 연구에서도 이를 적용하였으며 첨가 수준에 따른 변화를 조사하기 위하여 보다 높은 농도를 처리구로 추가하여 실험을 수행하였다. Positive control(PC)은 일부 양계 농가에서 사용하는 N사 제품(potassium monopersulfate triple salt 제제)을 선정하였다. Potassium monopersulfate 제제는 산화제로서 농가 소독제로 많이 이용되며, 유기물 분해를 촉진하여 암모니아, volatile solid, VFA 감소 효과가 보고된 바 있다(Wang et al., 2020). 본 제품의 성상은 분말 형태이고 사용 시 물에 녹여 사용하는 제품으로서 제조사에서 제공한 사용법에 따라서 준비하였으며, positive control로서의 역할이 분명하게 나타날 수 있도록, 축산 농가에서 유기물이 많은 소독 대상에 권장하는 희석배수보다 20배 더 진하게 희석하여 실험에 사용하였다. 해당 농도의 용액을 첨가하는 과정이나 실험 종료 시 시료를 취급하는 과정에서 연구자에 위해를 나타내는 요인은 없었다.

1) 실험 1. 이산화염소의 단일 첨가에 따른 악취 저감 효과

실험구는 계분에 증류수만을 첨가한 대조구, 농가에서 사용하는 소독제를 첨가한 PC, 이산화염소를 수준별로 첨가한 T2000(ClO₂ 2,000 ppm), T3000(ClO₂ 3,000 ppm)으로 구성하였다. 실험구당 4반복으로 16개(4종류×4반복)의 실리콘 마개로 밀봉 가능한 가스백(8.5 cm × 13.5 cm, 120 mL)을 이용하여 실험을 진행하였다. Aluminum재질의 가스백에 계분 10 g(as-fed basis)과 첨가제를 배양 기간(10일) 동안의 양(10 mL)을 1회에 모두 첨가하였다(Table 1). 실리콘 마개를 이용해 밀봉 후 가스백 내 잔여공기로 인한 악취 유발 가스의 회색 가능성을 배제하기 위해 주사기를 이용하여 가스백 내의 잔여 공기를 제거하였고, 외부를 손으로 주물러 내용물을 혼합한 후 30℃ 배양기(BOD incubator, WIR-150, Daihan, Korea)에서 10일간 배양하였다.

2) 실험 2. 이산화염소의 반복적 첨가에 따른 악취 저감 효과

실험 2의 실험구 및 반복수는 실험 1과 동일하나 14일 동안 각각의 가스백에 첨가제를 1 mL씩 매일 투여하여 배양을 진행하였다(Table 1). 실험1과 동일하게 실리콘 마개를 이용하여 밀봉 후 주사기를 사용하여 잔여 공기를 제거하였고, 첨가제를 투입할 때마다 외부를 주물러 내용물을 섞은 후 30℃ 배양기(BOD incubator, WIR-150, Daihan, Korea)에 넣어 14일 동안 배양하였다. 실험 1과 실험 2의 기간 차이는 실험 종료 후 미생물의 수를 측정하는 즉, 도말 작업 진행의 어려움 때문에 기간 차이를 설정하여 실험을 진행하였고, 실험의 내용은 Table 1에 나타내었다.

3. 분석항목 및 방법

1) 건물(dry matter, DM) 함량, pH

건물 함량(#934.01)은 배양 종료 후 가스백의 내용물을 수거하여 AOAC(2019)의 방법으로 측정하되 일부 변형하

여, 시료 당 1 g씩 무게를 측정한 후 drying oven(Daihan, Korea)에서 105℃로 16시간 이상 건조하여 3반복으로 분석하였다. 내용물의 pH는 계분과 증류수를 1:4의 비율로 혼합한 후 pH meter(Thermo Sci, Korea)를 이용하여 측정하였다.

2) 악취 유발 성분 측정

실험 1의 총 가스 발생량은 실험개시부터 실험종료(10일)일까지 발생한 가스를 50 mL 주사기를 이용하여 총량을 측정한 후 별도의 가스백에 포집하였다. 가스 성분의 측정 전에 가스 시료와 공기를 1:100, 1:50, 1:10, 0으로 희석하여 측정장비의 범위를 설정하였다. 포집한 가스 내 NH₃와 H₂S의 농도는 가스백에서 1 mL의 가스를 포집하여 가스 시료와 공기를 1:50으로 희석한 후, 전기화학식 센서가 장착된 GasAlertMicro-5(BW Technologies, USA)에 시료 가스를 주입하여 측정하였다. GasAlertMicro-5(BW Technologies, USA)의 NH₃가스와 H₂S가스의 탐지범위는 각각 0~100 ppm, 0~500 ppm까지 측정이 가능하며 분해능은 1 ppm이었다. 각 시료당 3회 측정하여 측정값 중 가장 높은 값을 취하였고 가스 미발생 시료의 경우 “0” 값을 취하였으며, 2 mL 이하로 포집된 시료의 경우 측정값 중 가장 높은 값을 취하였다.

실험 2에서 가스 총량은 일일 발생한 가스를 50 mL 주사기를 이용하여 측정하였으며, 가스 성분의 분석을 위하여 별도의 가스백에 포집하여 실온 보관하였다. 실험 5일, 10일, 14일차에, 각 기간 동안 포집한 가스를, 처리구별로 대표성을 나타낼수 있도록, 혼합하여 실험 1과 동일한 방법으로 측정하였다. 농도를 측정한 후 계분의 건물함량을 기준으로 발생한 NH₃가스와 H₂S가스(mL/g DM)의 생성량을 계산하였다.

배양 종료 후 시료 내 암모니아태질소(ammonia-N)의 함량은 Chaney and Marbach(1962)의 방법으로 분석하였다. 배양액은 원심분리기(Labogene, 1730MR, Korea)로 10분 동안 9,425 × g으로 원심분리하였다. 상등액 20 μL를 15 mL 유리 실험관에 옮겨 담아 phenol color reagent 1 mL와 alkali-hypochlorite reagent 1 mL를 혼합해 30분간 상온에서

Table 1. Information related to the present study

Items	Experiment 1 ¹	Experiment 2 ²
Incubation day	10	14
Total solution added to feces (mL)	10	13

¹ Experiments 1=single dose of diluted chlorine dioxide at the beginning of the experiment followed by 10 days incubation.

² Experiments 2=daily dose of 1 mL diluted chlorine dioxide for 14 days of incubation.

정치한 후 일회용 큐벳(Ratiolab cuvette, Germany)에 옮겨 분광광도계(Optizen pop, Korea)를 이용해 630 nm 파장으로 측정하였다.

Volatile fatty acid는 Erwin et al.(1961)의 방법으로 분석하였다. Ammonia-N과 동일하게 원심분리한 시료 1 mL를 주사기에 옮겨 0.45 µm syringe filter(Rephile, RjN1345NH, China)를 이용하여 여과한 후 BR-Wax fame(BR87503, Germany) 컬럼이 장착된 가스크로마토그래피(Bruker Inc, 450-GC, Germany)로 분석하였다. 표준용액은 volatile fatty acid standard solution(Sigma-Aldrich, 46975-U, USA)을 사용하였다. Injector와 detector(FID, Flame Ionization Detector)의 온도는 250°C, oven 온도는 100°C로 설정하였으며, 질소, 수소, 고순도 에어의 유속은 각각 29 mL/min, 30 mL/min, 300 mL/min으로 설정하여 분석하였다.

3) 미생물 수 분석

미생물 수의 계측은 평판계측법(plate count method)을 이용하였다. 배양이 종료된 시료 내 미생물 수의 분석은 총 균수, 대장균군, 젖산균, 효모, 그리고 곰팡이를 plate counting agar(PCA, BD Difco™, France), MacConkey agar(MCA, BD Difco™, France), lactobacilli De Man, Rogosa and Sharpe agar(MRS, BD Difco™, France), potato dextrose agar(PDA, BD Difco™, France) plate에 시료당 2승수 2반복으로 도말 후 30°C로 3일간 배양하여 분석하였다. 승수와 반복 수는 예비실험의 결과를 근거로 선정하였다.

4. 통계분석

이산화염소 첨가에 따른 효과는 일원 분산분석법(one-way analysis of variance)을 실시하여 유의적 차이를 분석하였으며, IBM SPSS(version 23, IBM, USA) 프로그램을 이용하였다. 유의성이 나타나는 결과에 대하여 던컨의 다중 검정법(Duncan's multiple range test)으로 평균 간 유의성을 검정하였다. 모든 통계검정은 유의수준 95%로 수행하였다.

결 과

1. 계분 시료의 이화학적, 생물학적 성분

첨가제 처리 전 계분 시료의 건물 함량은 21.85%이며 pH는 5.70, ammonia-N은 56.71 mg/100 mL로 검출되었다. 또한, VFA 중 acetate, propionate, butyrate의 비율은 각각 84.39%, 7.76%, 5.00%로 나타났으며, valerate는 검출되지 않았다(Table 2). 계분 시료 내 미생물 수에 있어서 총 균수는 10.71 log CFU/mL, 젖산균 9.34 log CFU/mL, 효모 7.34 log CFU/mL, 대장균군 5.69 log CFU/mL로 나타났다(Table 3).

2. 실험 1: 이산화염소의 단일 첨가에 따른 악취 저감 효과

실험 1의 건물 함량 및 pH, ammonia-N, VFA의 조성에 관한 결과를 Table 4에 나타내었다. 건물 함량은 PC에서 가장 높게 나타났으며 pH는 PC, T2000, T3000에서 각각 3.07, 5.86, 6.06으로 대조구(pH 7.60)보다 낮게 나타났다($P < 0.05$).

Table 2. Chemical composition of the chicken feces used for this study

Composition	Amount
Dry matter (%)	21.85±0.605
pH	5.70±0.034
Ammonia-N (mg /100 mL)	56.71±15.228
Total VFA ¹ (mM)	35.96±1.456
Acetate (% of total VFA)	84.39±0.815
Propionate (% of total VFA)	7.76±0.462
Butyrate (% of total VFA)	5.00±0.363
Valerate (% of total VFA)	ND ²
A:P ratio ³	10.92±0.756

¹ Total VFA=total volatile fatty acids.

² ND=not detected.

³ A:P ratio=acetate:propionate ratio.

Table 3. Microbial analysis of the chicken feces used for this experiment

Items	Amount (log CFU/mL)
Total microorganism	10.71±1.012
Lactic acid bacteria	9.34±0.296
Yeast	7.34±0.035
Fungi	ND ¹
Coliform	5.69±0.688

¹ND=not detected.**Table 4.** Effect of chlorine dioxide on chemical composition of chicken feces after 10 days incubation (Experiment 1)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	P-value
Dry matter (%)	6.89 ^a	19.58 ^c	11.42 ^b	11.65 ^b	0.288	<0.01
pH	7.60 ^c	3.07 ^a	5.86 ^b	6.06 ^b	0.143	<0.01
Ammonia-N (mg/100 mL)	138.31 ^b	18.22 ^a	25.02 ^a	20.66 ^a	2.576	<0.01
Total VFA ⁶ (mM)	520.9 ^b	10.32 ^a	11.07 ^a	7.11 ^a	3.124	<0.01
Acetate (mM)	369.9 ^b	3.39 ^a	8.00 ^a	5.59 ^a	4.726	<0.01
Propionate (mM)	110.6 ^b	0.20 ^a	0.91 ^a	1.04 ^a	2.055	<0.01
Iso-butyrate (mM)	2.92 ^b	0.06 ^a	ND	0.05 ^a	0.083	<0.01
Butyrate (mM)	34.34 ^b	0.32 ^a	2.09 ^a	0.37 ^a	3.858	<0.01
Iso-valerate (mM)	2.50 ^b	ND	0.08 ^a	0.07 ^a	0.038	<0.01
Valerate (mM)	0.73 ^a	6.37 ^b	ND	ND	1.403	<0.01
AP ratio ⁸	3.35 ^a	17.22 ^b	16.32 ^b	7.13 ^a	2.618	<0.01

¹ CON=distilled water.² PC=commercial germicide.³ T2000=ClO₂ (2,000 ppm) solution.⁴ T3000=ClO₂ (3,000 ppm) solution.⁵ SEM=standard error of the mean.⁶ Total VFA=total volatile fatty acids.⁷ ND=not detected.⁸ A:P ratio=acetate:propionate ratio.^{a-c} Different superscripts within row are significantly different ($P<0.05$).

Ammonia-N은 대조구(138.31 mg/100 mL)와 비교하여 PC는 87%, T3000은 85%, T2000은 82% 감소하였다($P<0.05$). Total VFA는 대조구와 비교하여 PC, T2000, T3000에서 각각 87%, 82%, 85%가 감소하였다($P<0.05$). Butyrate와 valerate는 각각 대조구(34.34 mM)와 PC(6.37 mM)에서 가장 높게 나타났으며 이산화염소 처리구에서는 butyrate 함량이 유의적으로 낮거나 valerate는 검출되지 않았다($P<0.05$). 총 가스발생량 및 NH₃, H₂S 가스의 결과는 Table 5와 같다. 배양시간동안 총 가스발생량은 대조구에서 283.1 mL/g DM으로 T2000(26.97 mL/g DM), T3000(14.73 mL/g DM), PC(8.00 mL/g DM)보다 높게 발생되었다($P<0.05$). 특히 그 중

이산화염소 처리구에서 NH₃ 가스와 H₂S 가스를 측정하였을 때 검출이 되지 않거나(PC, T3000) 대조구보다 유의적으로 감소하였다(T2000; $P<0.05$). 미생물의 영향에 관한 결과는 Table 6과 같다. 실험 1에서는 대조구와 비교하여 이산화염소 처리에 따른 미생물 수의 변화는 유의적 차이가 없었으며 PC처리구에서만 젖산균, 대장균군이 유의적으로 감소하였다($P<0.05$).

3. 실험 2: 이산화염소의 반복적 첨가에 따른 약취 저감 효과
실험 2의 건물 함량과 pH, ammonia-N, VFA의 조성에 관

Table 5. Effect of chlorine dioxide on gas production and composition of chicken feces after 10 days incubation (Experiment 1)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	P-value
Total gas (mL/g DM)	283.1 ^c	8.00 ^a	26.97 ^b	14.73 ^{ab}	5.185	<0.01
NH ₃ (ppm)	17.75 ^b	ND ⁶	1.75 ^a	ND	1.923	<0.01
NH ₃ (μL/g DM)	506.1 ^b	ND	7.20 ^a	ND	0.053	<0.01
H ₂ S (ppm)	50.50 ^b	ND	4.50 ^a	ND	5.026	<0.01
H ₂ S (μL/g DM)	1,439 ^b	ND	18.55 ^a	ND	0.143	<0.01

¹ CON=distilled water.² PC=commercial germicide.³ T2000=ClO₂ (2,000 ppm) solution.⁴ T3000=ClO₂ (3,000 ppm) solution.⁵ SEM=standard error of the mean.⁶ ND=not detected.^{a-c} Different superscripts within row are significantly different ($P<0.05$).**Table 6.** Effect of chlorine dioxide on microbial enumeration (log CFU/mL) of chicken feces after 10 days incubation (Experiment 1)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	P-value
Total microorganism	10.41	10.00	10.23	10.37	0.189	0.450
Lactic acid bacteria	9.80 ^b	4.80 ^a	9.68 ^b	9.54 ^b	0.969	0.008
Yeast	5.53	4.87	5.90	6.41	0.846	0.763
Fungi	1.63	ND ⁶	ND	ND	0.524	0.116
Coliform	3.15 ^{bc}	0.46 ^a	1.05 ^{ab}	4.08 ^c	0.791	0.022

¹ CON=distilled water.² PC=commercial germicide.³ T2000=ClO₂ (2,000 ppm) solution.⁴ T3000=ClO₂ (3,000 ppm) solution.⁵ SEM=standard error of the mean.⁶ ND=not detected.^{a-c} Different superscripts within row are significantly different ($P<0.05$).

한 결과는 Table 7과 같다. 건물 함량은 실험 1과 같이 PC에서 가장 높게 나타났다($P<0.05$). 배양물의 pH는 PC 2.69, T2000 5.23, T3000 5.29로 대조구 7.29보다 낮게 나타났다($P<0.05$). Ammonia-N의 농도는 대조구(124.20 mg/100 mL)와 비교하여 PC, T2000, T3000에서 83%가 감소하였다($P<0.05$). Total VFA는 대조구보다 PC, T2000, T3000에서 각각 82%, 85%, 88%가 감소하였으며($P<0.05$), acetate, propionate, iso-butyrate, butyrate, iso-valerate 또한 대조구에서 다른 처리구들보다 높게 검출되었다($P<0.05$). 총 가스발생량 및 NH₃ 가스, H₂S 가스의 결과는 Table 8에 나타내었다. 배양 동안 총 가스발생량은 대조구에서 353.2 mL/g DM으로 PC(21.57 mL/g DM), T2000(9.84 mL/g DM), T3000(8.15 mL/g DM)보다 높게 발생하였다($P<0.05$). NH₃ 가스와 H₂S 가스의 농도 및 발생량을 측정하였을 때 대조구에서는 각각 24.75 ppm, 874.3 μL/g DM(NH₃)과 61.00 ppm, 2,156

μL/g DM (H₂S)으로 검출되었으나 PC와 이산화염소 처리구에서는 NH₃ 가스와 H₂S 가스는 검출되지 않았다($P<0.05$). 이산화염소 첨가 시 미생물 수 변화에 대한 결과는 Table 9에 나타내었다. 총 균수는 처리구간 유의적으로 차이가 없었으며 젖산균의 경우 대조구(8.67 log CFU/mL)와 T2000(8.62 log CFU/mL), T3000(8.34 log CFU/mL)간에 유의적인 차이는 없었고, PC에서 가장 낮게(3.19 log CFU/mL) 나타났다($P<0.05$). 효모와 곰팡이 또한 PC에서 가장 낮게 나타난 반면 대조구와 T2000, T3000에서는 유의적인 차이는 없었다. 대장균군 수는 T3000(0.41 log CFU/mL) 처리구가 대조구보다 낮게 검출되었다($P<0.05$).

고 찰

본 연구는 산화제로 이용되는 이산화염소를 계분에 처리

Table 7. Effect of chlorine dioxide on the chemical composition of chicken feces after 14 days incubation (Experiment 2)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	<i>P</i> -value
Dry matter (%)	5.75 ^a	19.28 ^c	8.89 ^b	9.08 ^b	0.100	<0.01
pH	7.29 ^d	2.69 ^a	5.23 ^b	5.29 ^c	0.013	<0.01
Ammonia-N (mg/100 mL)	124.2 ^b	20.62 ^a	21.32 ^a	20.58 ^a	1.928	<0.01
Total VFA ⁶ (mM)	616.1 ^b	22.22 ^a	18.56 ^a	15.48 ^a	1.625	<0.01
Acetate (mM)	467.2 ^b	9.00 ^a	17.15 ^a	14.65 ^a	1.467	<0.01
Propionate (mM)	101.1 ^b	0.33 ^a	0.94 ^a	0.68 ^a	0.865	<0.01
Iso-butyrate (mM)	3.23 ^b	0.10 ^a	ND	ND	0.052	<0.01
Butyrate (mM)	41.63 ^b	0.19 ^a	0.16 ^a	0.14 ^a	0.489	<0.01
Valerate (mM)	0.59 ^a	12.60 ^b	0.30 ^a	0.06 ^a	0.431	<0.01
Iso-valerate (mM)	2.31 ^b	ND	ND	ND	0.077	<0.01
A:P ratio ⁷	4.65 ^a	27.07 ^c	18.38 ^b	22.96 ^{bc}	0.700	<0.01

¹ CON=distilled water.² PC=commercial germicide.³ T2000=ClO₂ (2,000 ppm) solution.⁴ T3000=ClO₂ (3,000 ppm) solution.⁵ SEM=standard error of the mean.⁶ Total VFA=total volatile fatty acids.⁷ AP ratio=acetate:propionate ratio.^{a-c} Different superscripts within row are significantly different (*P*<0.05).**Table 8.** Effect of chlorine dioxide on the gas production and composition of chicken feces after 14 days incubation (Experiment 2)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	<i>P</i> -value
Total gas (mL/g DM)	353.2 ^b	21.57 ^a	9.84 ^a	8.15 ^a	4.056	<0.01
NH ₃ (ppm)	24.75 ^b	ND ⁶	ND	ND	0.668	<0.01
NH ₃ (μL/g DM)	874.3 ^b	ND	ND	ND	0.028	<0.01
H ₂ S (ppm)	61.00 ^b	ND	ND	ND	1.744	<0.01
H ₂ S (μL/g DM)	2,156 ^b	ND	ND	ND	0.074	<0.01

¹ CON=distilled water.² PC=commercial germicide.³ T2000=ClO₂ (2,000 ppm) solution.⁴ T3000=ClO₂ (3,000 ppm) solution.⁵ SEM=standard error of the mean.⁶ ND=not detected.^{a-c} Different superscripts within row are significantly different (*P*<0.05).**Table 9.** Effect of chlorine dioxide on microbial counts (log CFU/mL) of chicken feces after 14 days incubation (Experiment 2)

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	<i>P</i> -value
Total microorganism	9.83	8.18	9.13	9.90	0.727	0.353
Lactic acid bacteria	8.67 ^b	3.19 ^a	8.62 ^b	8.34 ^b	0.602	<0.01
Yeast	7.06 ^b	0.59 ^a	7.18 ^b	6.41 ^b	0.329	<0.01

Table 9. Continued

Items	CON ¹	PC ²	T2000 ³	T3000 ⁴	SEM ⁵	P-value
Fungi	2.61 ^{bc}	ND ⁶	3.83 ^c	2.30 ^b	0.447	0.001
Coliform	3.64 ^b	ND	2.51 ^b	0.41 ^a	0.553	0.002

¹ CON=distilled water.

² PC=commercial germicide.

³ T2000= ClO_2 (2,000 ppm) solution.

⁴ T3000= ClO_2 (3,000 ppm) solution.

⁵ SEM=standard error of the mean.

⁶ ND=not detected.

^{a-c} Different superscripts within row are significantly different ($P<0.05$).

하여 배양 시 계분에서 발생하는 악취 저감 정도를 평가하기 위해 수행되었다. 계분을 대상으로 악취 저감의 목적으로 사용된 이산화염소에 대한 연구는 보고된 바가 충분하지 않아서 양돈장 악취 저감, 구취 제거 및 식품 보존을 목적으로 사용된 이산화염소에 대한 연구도 함께 인용하였다.

건물 함량은 실험 1과 실험 2에서 모두 실험구간에 유의적인 차이가 나타났다($P<0.05$). 이러한 결과는 첨가제를 투여하는데 사용한 증류수와 첨가제 내 무기물 함량에 기인한 것으로 판단된다. 특히 PC로 사용한 potassium monopersulfate triple salt 제제는 분말 제품으로서 건물 함량 측정 시 검출되어, 실험구 간 건물 함량의 차이에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. 결과적으로 실험 1과 2 모두 PC 처리구에서 건물 함량이 가장 높게 측정되었다. 또한, 첨가제없이 증류수만을 투여한 CON 실험구에선 건물 함량이 매우 낮게 측정되었는데, 배양 중 유기물의 분해가 진행되어 건물 함량이 소실되는 효과가 발생하였을 것으로 추정된다.

한편, 첨가제를 추가하는 과정에서 계분 시료와 비교하여 첨가제의 양(실험 1에서 10 mL, 실험 2에서 14 mL)이 너무 많았던 것으로 판단된다. 목적한 양을 첨가하는 과정에서 희석배수만 생각하였을 뿐 계분의 양을 고려하지 않아 현장에 적용하기 위하여 확대하여 해석하기에는 어려움이 있고 이러한 요인 역시 건물 함량의 변화를 초래하는 원인이 되었을 것으로 사료된다. 추후 실험 또는 현장 적용실험을 위해선 목적하는 첨가제의 수준에 적절한 용매의 양을 첨가하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

이산화염소 처리 후 pH는 실험 1과 2에서 대조구보다 이산화염소 처리구에서 낮게 나타났다($P<0.05$). Kim et al. (2021)의 연구에서는 악취성 가스를 제거하는 방법인 약액 세정법의 공정에서 이산화염소 수용액과 증류수에 각각 H_2S 를 처리했을 때 pH는 이산화염소 수용액(pH 3.46)이 증

류수(pH 3.89)보다 낮게 나타났으며 NH_3 와 H_2S 를 함께 처리했을 때에도 H_2S 만을 처리한 실험구와 비교하여 pH가 전체적으로 높아졌지만, 증류수(pH 8.93)보다 이산화염소 수용액(pH 7.29)에서 pH가 낮게 나타났다. 이러한 원인으로는 이산화염소가 H_2S 를 흡수하였기 때문으로 보고하였는데, 본 연구에서도 계분에 이산화염소를 처리하여 배양하는 과정에서 발생하는 H_2S 가스의 흡수량이, 증류수를 주입한 대조구보다 많을 것으로 추정하고, 흡수된 H_2S 로 인해 이산화염소 처리구의 pH가 증류수를 주입한 대조구의 pH보다 낮게 나타난 것으로 사료된다(Table 4, 7). 또한, NH_3 가스화는 pH에 따라서도 영향을 받는데 NH_3 는 수용액상태에서 NH_3 와 암모늄(NH_4^+) 형태로 존재해 있다가 pH가 높아질수록 NH_3 형태로 방출되는 정도가 높아진다(Dashtestani et al., 2021). 본 실험에서 pH는 대조구 pH가 7~8, 이산화염소 처리구 pH가 5~6, PC의 pH가 2~3으로 증류수만을 주입한 대조구에서 가장 높게 나타났다. 따라서 다른 처리구와 비교하여 대조구의 NH_3 가스의 유의적 차이는 처리구간 pH 차이에 일부 영향이 있었던 것으로 사료된다.

계분 내 유기물의 분해과정에서 발생하는 VFA는 양계농가의 악취 원인으로 알려져 있으며(Lacey et al., 2004), acetate와 propionate가 가장 높은 비율을 차지한다(Yin et al., 2021). Bell(1970)의 연구 또한 계분 내 VFA와 악취 간에는 강한 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 배양 후 PC를 제외한 대조구와 이산화염소 처리구에서 acetate와 propionate가 전체 VFA의 80% 이상을 차지하였으며 acetate와 propionate의 농도가 대조구에서 다른 처리구들보다 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). VFA는 탄소수가 많아질수록 악취정도가 높아지는데(Nagata, 2003) 본 연구에서 탄소수가 4개인 butyrate부터 5개인 iso-valerate까지 이산화염소 처리구에서는 최대 2.17 mM,

최소 0.20 mM 이 검출된 반면 대조구에서는 실험 1과 2에서 각각 40.49 mM과 47.76 mM이 검출되었다. 따라서 대조구에서 acetate와 propionate뿐만 아니라 butyrate에서 valerate까지 높게 검출되어 악취가 심할 것으로 예상되는 반면(Kim et al., 2021) 이산화염소 처리구에서는 대조구보다 VFA함량이 낮게 검출되어 이산화염소가 VFA 감소를 통한 악취저감에 효과적인 것으로 판단된다.

이산화염소는 악취 물질을 생성하는 미생물의 수를 감소시키거나(Wu et al., 2019) 황(S) 친화력으로 인해 H₂S나 methyl mercaptan와 같은 volatile sulfur compound(VSC)를 산화하는 것으로 알려져 있다(Gan et al., 2020). 본 연구에서는 이산화염소 처리에 따라 총 미생물 수 및 관련 미생물의 수가 감소할 것으로 예상하였으나(Wu et al., 2019) 실험 1에서는 대조구와 비교하여 총균수, 젖산균, 효모, 곰팡이, 대장균군 수에 유의적인 차이는 없었고, 실험 2에서는 대조구와 비교하여 T3000에서 대장균군이 유의적으로 감소하였다($P < 0.05$). Shinada et al.(2010)의 연구는 본 실험의 결과와 같이 미생물의 총 균수는 이산화염소 처리에 의해 감소되지 않았으나, 악취 물질을 생성하는 미생물의 수가 감소됨과 동시에 VSC가 감소한 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 총 균수는 감소하지 않았으나 대장균군 수가 감소한 본 연구의 결과(실험 2) 및 H₂S가 감소한 결과(실험 1, 실험 2)와 일치하였다. 또한, Ahmed et al.(2015)의 연구에서는 이산화염소를 육계 사료에 첨가하였을 때 계분 내 *Escherichia coli*와 *Salmonella*의 수만 감소하였을 뿐 젖산균, *Bacillus*, 효모, 곰팡이의 수는 변화가 없었다. 이산화염소의 작용기전으로는 세포막에 작용해 병원균 세포 외막의 투과성 손실로 인한 이온농도 불균형, 단백질 합성 일부 억제 및 대사활동에 관여하는 탈수소효소의 활성을 억제하는 것으로 알려져 있다(Roller et al., 1980; Kim et al., 2014). 본 연구에서는 젖산균과 같이 세포벽이 두꺼운 gram-positive bacteria의 수는 감소하지 않았으면서 gram-negative bacteria인 대장균군의 수가 실험 2에서 감소하였는데 이러한 결과는 Ahmed et al.(2015)의 연구에서 서술한 바와 같이 세포벽에 작용하는 이산화염소가 gram-positive bacteria의 세포벽을 손상시키지 못한 결과로 사료된다. 이산화염소는 fungi의 제거에도 효과가 있는 것으로 나타났으나 일부 fungi에서는 수 감소 및 비활성화 효과는 미미한 것으로 나타났다(Wen et al., 2017). 실험 1의 결과(Table 6)에서는 처리구간 유의적인 차이는 없었으나, 이산화염소 처리구에서 fungi가 검출되지 않은 점을 본 실험의 결과로 해석하는데 한계가 있다. 그러나

Vandekinderen et al.(2009)의 연구에서도 이산화염소 효과는 세포벽 차이에 의해 gram-positive bacteria보다는 gram-negative bacteria에서 더 높은 것으로 보고하였다. Fungi는 핵막이 핵을 감싸고 있어 세포가 비활성화 되기 어렵다는 점과 일반적으로 세포벽의 주요성분이 포자가 비활성화 되는 것을 방지하는 chitin으로 이루어져 있어 이산화염소 효과가 gram-negative bacteria보다는 떨어지는 것으로 보고되었다(Wen et al., 2017). 한편, 염소가스, 브롬, 클로라민, 과산화수소 등도 gram-negative bacteria에 효과가 있는 것으로 알려져 있으나(Svecevicus et al., 2005; Virto et al., 2005), 인체에 유해하거나 소독부산물로 인한 발암물질 생성 등의 부작용으로 사용에 제한적이라고 보고된 바 있다(Virto et al., 2005). 반면 이산화염소는 상기한 부작용이 적고 햇빛에 의해 분해되는 친환경적인 산화제(Kim et al., 2021)여서 가축에 적용하는 것이 훨씬 용이할 것으로 판단된다.

총 가스발생량은 대조구에서 가장 많았으며 이산화염소 처리구에서는 대조구와 비교하여 90% 이상 감소하였다. 특히 계사 내에서 강한 악취를 유발하는 NH₃와 H₂S의 농도 또한 90% 이상 감소하거나 검출되지 않았으며($P < 0.05$), PC의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. Song et al.(2011)과 Song et al.(2012)의 연구에서도 제조된 원액의 10배를 희석한 이산화염소를 양돈장 및 퇴비장에 살포했을 때 NH₃가스 발생량이 감소하면서 이산화염소가 악취 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다. 실험 2의 경우 T3000에서 대장균군이 대조구보다 유의적으로 감소한 반면 실험 1에서는 대장균군이 대조구보다 감소하지 않았으나 두 실험 모두 H₂S, NH₃, ammonia-N 및 VFA와 같은 악취 유발 물질들이 감소하였다($P < 0.05$). Roller et al.(1980)의 연구는 이산화염소 사용 시 미생물의 사멸이 일어나지 않더라도 미생물의 기능을 비활성화할 수 있는 것으로 보고하였다. 따라서 대장균군의 수가 감소하고 악취 유발 물질들이 감소했던 실험 2뿐만 아니라 실험 1에서도, 미생물의 수에 대한 사멸 효과는 확인되지 않았으나, 이산화염소의 작용으로 미생물의 기능이 비활성화되면서 악취 유발 물질들의 생성이 감소하거나 산화되어 최종적으로 배양 후 대조구보다 낮게 생성된 것으로 추정된다.

실험 1과 실험 2의 결과를 종합하여보면, 이산화염소를 계분에 처리 시 미생물의 사멸 또는 비활성화를 통한 악취 저감 효과가 있는 것으로 사료된다. 본 연구는 양계 농가에서 채취한 계분 시료를 이용하여, 실험실 내에서 조건을 갖추어 도출한 결과이므로 양계 현장에의 적용, 첨가 수준에 관한 다양성 검증 등 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 산화제인 이산화염소 처리가 계분의 악취 저감에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 실험 1과 2 모두 대조구(증류수 첨가), PC(potassium monopersulfate triple salt, 상업용 살균제 첨가), T2000(2,000 ppm ClO₂ 첨가), T3000(3,000 ppm ClO₂ 첨가)로 총 4개의 처리구로 구성되었다. 실험 1과 2 모두 계분을 함유한 가스백을 밀봉하여 수행되었으며 첨가수준은 동일하나 실험 1에서는 배양 10일 동안의 첨가량을 실험 시작 시 한 번에 투여하여 10일 동안 배양하였고, 실험 2에서는 배양 동안 매일 1 mL씩 투여하여 총 14일 동안 배양하였다. 배양 기간 중 가스를 포집하여 총 가스발생량과 악취를 유발하는 NH₃와 H₂S 가스를 측정하였다. 배양 종료 후에는 가스백을 개봉하여 DM, pH, ammonia-N, VFA, 계분 내 미생물(총 미생물 수, 유산균, 효모, 곰팡이, 대장균군)을 분석하였다. 계분 내 미생물 수는 실험 1에서는 대조구와 비교하여 유의적인 차이를 보이지 않았으나, 실험 2의 T3000 처리구에서 대장균군의 수가 대조구보다 낮게 검출되었으며($P<0.05$) 그 외 미생물 수는 대조구와 유의적인 차이가 없었다. 그러나 실험 1과 2에서 이산화염소 처리구가 대조구보다 pH, ammonia-N, VFA, 총 가스발생량, NH₃와 H₂S 가스의 농도 및 발생량이 유의적으로 낮게 나타났다($P<0.05$). 이러한 결과는 이산화염소 처리 시 대장균군의 수는 감소하지 않았으나 대장균군의 비활성화(실험 1) 또는 대장균군의 감소(실험 2)를 통한 악취 물질 생성 감소 및 산화로 인해 악취가 저감된 것으로 판단된다. 추가적으로, 실험 1과 실험 2의 결과를 종합하였을 때 ammonia-N, VFA, 총 가스발생량, NH₃와 H₂S 가스는 T2000에서 대조구보다 낮게 검출되었으며 T3000과는 유의적인 차이를 보이지 않은 점으로 판단하건대 T2000의 첨가수준도 악취저감에 효과적이라고 사료된다. 또한, 첨가제를 한 번에 투여한 실험 1과 매일 투여한 실험 2는 배양 기간이 다르므로 직접 비교할 수는 없으나 투여방법에 따른 차이는 없는 것으로 추정된다.

(색인어 : 이산화염소, 계분, 악취 저감)

ORCID

Ji Woo Park <https://orcid.org/0000-0001-9198-3791>
 Gyeongjin Kim <https://orcid.org/0000-0003-2202-126x>
 Tabita D. Marbun <https://orcid.org/0000-0002-3360-9715>

Duhak Yoon <https://orcid.org/0000-0002-3983-9757>
 Changsu Komg <https://orcid.org/0000-0002-3876-6488>
 Sang Moo Lee <https://orcid.org/0000-0003-2510-2591>
 Eun Joong Kim <https://orcid.org/0000-0002-5962-6994>

REFERENCES

- Ahmed ST, Kim G, Islam MM, Mun HS, Bostami ABMR, Yang CJ 2015 Effects of dietary chlorine dioxide on growth performance, intestinal and excreta microbiology, and odorous gas emissions from broiler excreta. *J Appl Poult Res* 24(4):502-510.
- Association of Official Analytical Chemists 2019 Official Method of Analysis. 21th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C., USA.
- Bell RG 1970 Fatty acid content as a measure of the odour potential of stored liquid poultry manure. *Poult Sci* 49(4):1126-1129.
- Berg JD, Roberts PV, Matin A 1986 Effect of chlorine dioxide on selected membrane functions of *Escherichia coli*. *J Appl Microbiol* 60(3):213-220.
- Bjerg B, Svidt K, Zhang G, Morsing S, Johnsen JO 2002 Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Comput Electron Agric* 34(1):223-235.
- Chaney AL, Marbach EP 1962 Modified Reagents for determination of urea and ammonia. *Clin Chem* 8(2):130-132.
- Dashtestani F, Nusheh M, Siriwongrungson V, Hongrapipat J, Materic V, Pang S 2021 Effect of H₂S and NH₃ in biomass gasification producer gas on CO₂ capture performance of an innovative CaO and Fe₂O₃ based sorbent. *Fuel* 295:120586.
- Ellis M, Cooksey K, Dawson P, Han I, Vergano P 2006 Quality of fresh chicken breasts using a combination of modified atmosphere packaging and chlorine dioxide sachets. *J Food Prot* 69(8):1991-1996.
- Erwin E, Marco GJ, Emery E 1961 Volatile fatty acid analyses of blood and rumen fluid by gas chromatography. *J Dairy Sci* 44:1768-1771.
- Gan W, Ge Y, Zhong Y, Yang X 2020 The reactions of chlorine dioxide with inorganic and organic compounds in water treatment: kinetics and mechanisms. *Environ Sci Water Res Technol* 6(9):2287-2312.

- Hartung J, Phillips VR 1994 Control of gaseous emissions from livestock buildings and manure stores. *J Agric Eng Res* 57(3):173-189.
- IBM Corp Released 2015 IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0. IBM Corp, Armonk, NY.
- Jang YK, Jung BJ, Kim J, Song KB, Kim HJ, Yoo YH 2010 Assessment of odor characterization and odor unit from livestock facilities by animals. *J Environ Impact Assess* 19(1):29-38.
- Jang YK, Song KP, Kim HJ, Yoo YH 2004 An investigation on the odor characteristics of livestock facilities. *J Environ Impact Assess* 13(1):33-40.
- Kim D, Ates N, Kaplan Bekaroglu SS, Selbes M, Karanfil T 2017 Impact of combining chlorine dioxide and chlorine on DBP formation in simulated indoor swimming pools. *Res J Environ Sci* 58:155-162.
- Kim DH, Lee IB, Choi DY, Song JI, Jeon JH, Ha DM 2013 A survey on current state of odor emission and control from livestock operations. *J Anim Environ Sci* 19(2):123-132.
- Kim G, Park CS, Marbun TD, Yun JT, Choi S, Kim EJ 2021 Effect of commonly used effective microorganisms on chemical properties of aerated swine liquid manure from a swine farm. *Ann Anim Resour Sci* 32(4):112-122.
- Kim JS, Park JW, Kim DJ, Kim YK, Lee JY 2014 Direct effect of chlorine dioxide, zinc chloride and chlorhexidine solution on the gaseous volatile sulfur compounds. *Acta Odontol Scand* 72(8):645-650.
- Kim WS, Dong JI, Lee SM, Jo YM 2021 Gaseous odor absorption using aqueous chlorine dioxide. *J Korean Soc Atmos Environ* 37(4):600-611.
- Lacey RE, Mukhtar S, Carey JB, Ullman JL 2004 A review of literature concerning odors, ammonia, and dust from broiler production facilities: 1. Odor concentrations and emissions. *J Appl Poult Res* 13(3):500-508.
- Lee H, Kang B, Na J, Ryu K 2009 Effects of dietary energy, protein on growth and blood composition in cross-bred with Korean native chicks. *Korean J Poult Sci* 35(4):399-405.
- Mahmoud BSM, Bhagat AR, Linton RH 2007 Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* on strawberries by chlorine dioxide gas. *Food Microbiol* 24(7):736-744.
- Nagata Y 2003 Measurement of odor threshold by triangle odor bag method. *Odor Measurement Review* 118:118-127.
- Ranadheera CS, McConchie R, Phan-Thien K, Bell T 2017 Strategies for eliminating chicken manure odour in horticultural applications. *World's Poult Sci J* 73(2):365-378.
- Roller SD, Olivieri VP, Kawata K 1980 Mode of bacterial inactivation by chlorine dioxide. *Water Res* 14(6):635-641.
- Shinada K, Ueno M, Konishi C, Takehara S, Yokoyama S, Zaitu T, Ohnuki M, Wright FAC, Kawaguchi Y 2010 Effects of a mouthwash with chlorine dioxide on oral malodor and salivary bacteria: a randomized placebo-controlled 7-day trial. *Trials* 11(1):14.
- Song J, Jeon J, Lee J, Park K, Cho S, Hwang Y, Kim D 2012 Conducted to verify the effect of chlorine dioxide (ClO₂) on odor reduction at a compost facility. *J Anim Environ Sci* 18(suppl):1-6.
- Song J, Jeon J, Park K, Yoo YH, Kim D 2011 Conducted to verify the effect of chlorine dioxide (ClO₂) on odor reduction at a commercial swine facility. *J Anim Environ Sci* 17(suppl):43-50.
- Svecevicus G, Syvokiene J, Stasiūnaite P, Mickeniene L 2005 Acute and chronic toxicity of chlorine dioxide (ClO₂) and chlorite (ClO₂⁻) to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Environ Sci Pollut Res* 12(5):302-305.
- Vandekinderen I, Devlieghere F, Van Camp J, Kerkaert B, Cucu T, Ragaert P, De Bruyne J, De Meulenaer B 2009 Effects of food composition on the inactivation of foodborne microorganisms by chlorine dioxide. *Int J Food Microbiol* 131(2-3):138-144.
- Virto R, Mañas P, Alvarez I, Condon S, Raso J 2005 Membrane damage and microbial inactivation by chlorine in the absence and presence of a chlorine-demanding substrate. *Appl Environ Microbiol* 71(9):5022-5028.
- Wang J, Cui H, Xie G, Liu B, Cao G, Xing D 2020 Co-treatment of potassium ferrate and peroxymonosulfate enhances the decomposition of the cotton straw and cow manure mixture. *Sci Total Environ* 724:138321.
- Wen G, Xu X, Huang T, Zhu H, Ma J 2017 Inactivation of three genera of dominant fungal spores in groundwater using chlorine dioxide: effectiveness, influencing factors, and mechanisms. *Water Res* 125:132-140.
- Wu W, Gao H, Chen H, Fang X, Han Q, Zhong Q 2019 Combined effects of aqueous chlorine dioxide and

- ultrasonic treatments on shelf-life and nutritional quality of bok choy (*Brassica chinensis*). LWT-Food Sci Technol 101:757-763.
- Yin D, Mahboubi A, Wainaina S, Qiao W, Taherzadeh MJ 2021 The effect of mono- and multiple fermentation parameters on volatile fatty acids (VFAs) production from chicken manure via anaerobic digestion. Bioresour Technol 330:124992.
- Youm HJ, Ko JK, Kim MR, Song KB 2004 Inhibitory effect of aqueous chlorine dioxide on survival of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in pure cell culture. Korean J Food Sci Technol 36(3):514-517.
- Zhu P, Shen Y, Pan X, Dong B, Zhou J, Zhang W, Li X 2021 Reducing odor emissions from feces aerobic composting: additives. RSC Adv 11(26):15977-15988.

Received Dec. 9, 2022, Revised Dec. 23, 2022, Accepted Dec. 23, 2022