pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 40, No. 5, pp. 389~395 (2025)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2025.40.5.389

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

기후변화 시나리오에 따른 주요 식중독균의 발생 예측 분석

이희수 · 손지영 · 주고운 · 김수정 · 김태수 · 한샘 · 최민지 · 홍준배*
한국소비자원 소비자안전센터

Analysis of Food Poisoning Occurrence Prediction for Major Pathogens Based on Climate Change Scenarios

Hee-Soo Lee, Ji Yeong Son, Goeun Ju, Su Jung Kim, Tae Soo Kim, Saem Han, Minji Choi, Joonbae Hong*
Korea Consumer Agency, Consumer Safety Center, Eumseong, Korea

(Received August 18, 2025/Revised Septmeber 29, 2025/Accepted October 01, 2025)

ABSTRACT - This study aimed to predict future food poisoning occurrences under climate change scenarios, provide foundational data to enhance public awareness, and inform relevant policies. We analyzed the correlations between climate variables (average temperature, precipitation, and relative humidity) from the Korea Meteorological Administration and food poisoning statistics (cases involving five pathogens) from the Ministry of Food and Drug Safety, spanning 2003 to 2022. A log-normal regression model was used to assess the impact of climatic factors on the incidence of food poisoning. Future occurrences were projected using shared socioeconomic pathway (SSP) scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5) for the period of 2023-2100. The analysis revealed that a 1°C rise in average temperature was associated with a 6% increase in pathogenic *Escherichia coli* cases, a 4% increase in *Salmonella* cases, and a 3% increase in *Campylobacter jejuni* cases, while norovirus cases decreased by 3%. Under SSP5-8.5, by 2092, the incidence of pathogenic *E. coli* is projected to be more than double compared to the current levels, and *Salmonella* cases are also expected to increase. Norovirus cases were predicted to decline across all scenarios, most notably under SSP5-8.5. These findings suggest that rising temperatures due to climate change may significantly increase the risk of bacterial food poisoning. Therefore, proactive climate mitigation and strengthened food hygiene management are essential for safeguarding public health.

Key words: Climate change, Food poisoning, Prediction, Shared socioeconomic pathways, Log-normal regression

기후변화는 특정 지역에서 장기간에 걸쳐 나타나는 기후의 평균적 변화를 의미하며, 온실가스 농도 증가로 인한 지구온난화가 대표적인 현상이다. 이러한 기후변화는 폭염, 폭우 등 이상기후 현상의 빈도를 증가시키고 생태계 전반에 걸쳐 다양한 위험을 초래하고 있다[1]. 특히, 기온 상승은 식품 매개 병원체의 증식에 유리한 환경을 제공하여 식중독 발생 위험을 높이는 주요 요인으로 작용한다[2,3]. 실제로 국내 연평균기온은 지난 109년간(1912-2020) 10년당 0.2°C씩 꾸준히 상승해왔으며, 21세기 후반기에는 온실가스 배출 시나리오에 따라 현재 대비 최대 6.3°C까지 상승할 것으로 전망된다[4]. 이러한 전 지구적 기온 상승은 살모넬라증 및 캄필로박터증과 같은 세균성 위장염의 발생률 증가와 뚜렷한 연관성을 보인다[5,6].

식중독은 유해 미생물 또는 유독 물질에 오염된 식품 섭취로 발생하는 질환으로, 국민 건강을 위협하고 막대한 사회·경제적 손실을 유발한다[7]. 국내 식중독 발생으로 인한 연간 사회·경제적 손실비용은 약 1조 8,532억 원에 달하는 것으로 추정되며, 이는 식품 안전 관리의 중요성을 시사한다[8]. 식중독 원인 미생물의 활동은 기온, 습도, 강수량 등 기후 요인과 밀접한 관련이 있으며, 선행 연구에 따르면 평균기온이 1°C 상승할 때 식중독 발생 건수는 5.3% 증가하는 것으로 보고되었다[9]. 또한, 기온뿐만 아니라 강수량 및 습도 변화 역시 식중독균의 전파 및 바이러스 생존에 영향을 미치는 중요한 환경 요인으로 알려져 있다[10,11].

*Correspondence to: Joonbae Hong, Korea Consumer Agency, Eumseong 27738, Korea
Tel: +82-43-880-5830, Fax: +82-43-880-4502
E-mail: jbhong@kca.go.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution,and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근 식품의약품안전처는 빅데이터를 활용한 식중독 예측 지도 서비스를 제공하는 등 식중독 예방을 위한 노력을 기울이고 있으나, 미래 기후변화가 식중독 발생에 미칠 장기적인 영향을 구체적으로 예측하고 대비하는 연구는 아직 부족한 실정이다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 미래 사회경제변화를 고려한 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 시나리오를 통해 2100년까지의 기후변화를 예측하고 있으며, 이 시나리오에 따르면 2100년 연간 CO_2 배출량은 약 25-120 $GtCO_2$로, 현재 대비 약 5배까지 증가할 수 있는 것으로 전망된다[12,13]. Miraglia 등[3]의 연구에 따르면 기후변화는 마이코톡신, 해양 독소, 농약 잔류물, 중금속 축적 등 다양한 식품 안전 문제를 유발할 수 있으며, 특히 홍수·폭염과 같은 극한 기상 현상으로 인해 식품 내 병원성 박테리아의 발생 빈도가 증가할 수 있음을 보고하였다. 이러한 변화는 식중독을 포함한 식품 매개 질환의 발생 위험을 높일 잠재력이 있으며, 따라서 이를 과학적으로 예측하고 선제적인 대응 전략을 마련하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 과거 20년간의 국내 기상 자료와 식중독 발생 통계자료를 바탕으로 기후 요인이 최근 5년간(2018-2022) 식중독 발병률이 높은 5종의 원인균[병원성 대장균(Pathogenic *Escherichia coli*), 살모넬라(*Salmonella* spp.), 캄필로박터 제주니(*Campylobacter jejuni*), 클로스트리디움 퍼프린젠스(*Clostridium perfringens*), 노로바이러스(Norovirus)] 발생에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였다. 나아가, IPCC의 SSP 기후변화 시나리오를 적용하여 2100년까지의 미래 식중독 발생 건수를 예측함으로써, 기후변화 시대의 식품 안전 정책 수립과 국민 인식 개선을 위한 과학적 기초자료를 제공하고자 하였다.

Materials and Methods

데이터 수집 및 변수 설정

본 연구에서는 2003년 1월부터 2022년 12월까지 총 20년간의 국내 기후 및 식중독 발생 데이터를 활용하였다. 기후 자료는 기상청 기후정보포털에서 제공하는 전국 단위의 월별 평균기온(°C), 강수량(mm), 상대습도(%) 데이터를 수집하였다. 식중독 통계자료는 식품의약품안전처(Ministry of Food and Drug Safety, cheongju, Korea)의 식품안전나라에서 제공하는 데이터를 활용하였으며, 최근 5년간(2018-2022) 발생 빈도가 높은 5종의 식중독 원인균(Pathogenic *E. coli*, *Salmonella* spp., *C. jejuni*, *C. perfringens*, Norovirus)에 대한 월별 발생 건수를 분석 대상으로 하였다.

탐색적 데이터 분석(Exploratory Data Analysis) 결과, 식중독 환자 수는 발생 시설의 규모에 따라 편차가 크고 특정 시기에 이상치를 보여 통계분석의 종속변수로는 부적합하다고 판단하여 제외하였다. 독립변수인 기후 요인 중 평균기온, 최고기온, 최저기온은 다중공선성(multicollinearity)이 높게 나타나 평균기온을 대표 변수로 선정하였고, 강수량과 상대습도를 분석에 포함하였다. 최종적으로 종속변수는 5종 원인균별 식중독 발생 건수, 독립변수는 평균기온, 강수량, 상대습도로 설정하였다. 또한, 식중독 원인균의 잠복기(incubation period)를 고려하여 식중독 발생 건수와 기후 요인 간에 1개월의 시차(lag)를 적용하여 분석을 수행하였다.

미래 기후변화 시나리오

미래 식중독 발생 예측을 위해 IPCC 제6차 평가보고서에서 사용된 SSP 시나리오를 적용하였다[14]. SSP 시나리오는 2100년까지의 사회경제적 변화와 온실가스 배출 수준에 따라 5가지 경로로 구분된다. 본 연구에서는 이 중 3가지 주요 시나리오를 활용하였다. 1) SSP1-2.6: 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용을 최소화하고 지속가능한 발전을 추구하는 저탄소 시나리오, 2) SSP2-4.5: 현재 수준의 기후변화 완화 노력이 지속되는 중도 시나리오, 3) SSP5-8.5: 산업기술 발전에 의존하여 화석연료 사용이 높고 무분별한 개발이 확대되는 고탄소 시나리오. 각 시나리오에 따른 2023년부터 2100년까지의 월별 평균기온, 강수량, 상대습도 예측 자료는 기상청으로부터 제공받아 분석에 사용하였다.

통계분석 모델

식중독 발생 건수 데이터는 0을 포함한 양의 정수 값을 가지며, 분산이 평균보다 큰 과대산포(over-dispersion) 특성을 보였다. 이러한 데이터 특성을 고려하여 포아송 회귀모형(poisson regression model), 음이항 회귀모형(negative binomial regression model), 로그-정규 회귀모형(log-normal regression model)을 비교 검토하였다. 모델 비교를 위해 베이즈 정보기준(Bayesian Information Criterion, BIC)을 사용하였으며, 모든 원인균에서 BIC 값이 가장 낮은 로그-정규 회귀모형을 최종 분석 모델로 선정하였다. 로그-정규 회귀모형은 종속변수에 로그 변환을 적용하여 데이터의 과대산포를 완화하고 정규분포를 가정하여 분석하는 방법이다.

또한, 식중독 발생 건수 데이터는 월별로 기록된 시계열 자료로 시간의존적 특성을 가질 수 있다. 이에 자기상관함수(Auto-Correlation Function, ACF) 분석을 수행한 결과, 12개월 주기의 뚜렷한 계절성이 확인되었다(Fig. 1). 이러한 계절성을 모델에 반영하기 위해 1개월 전(lag-1) 및 12개월 전(lag-12)의 식중독 발생 건수를 독립변수로 추가하였다

$$\log(Yt)=\beta_0+\beta_1(Temp_t\text{-}1)+\beta_2(Prec_t\text{-}1)+\beta_3(Hum_t\text{-}1)+\beta_4(Y_t\text{-}1)+\beta_5(Y_t\text{-}12)+\varepsilon$$

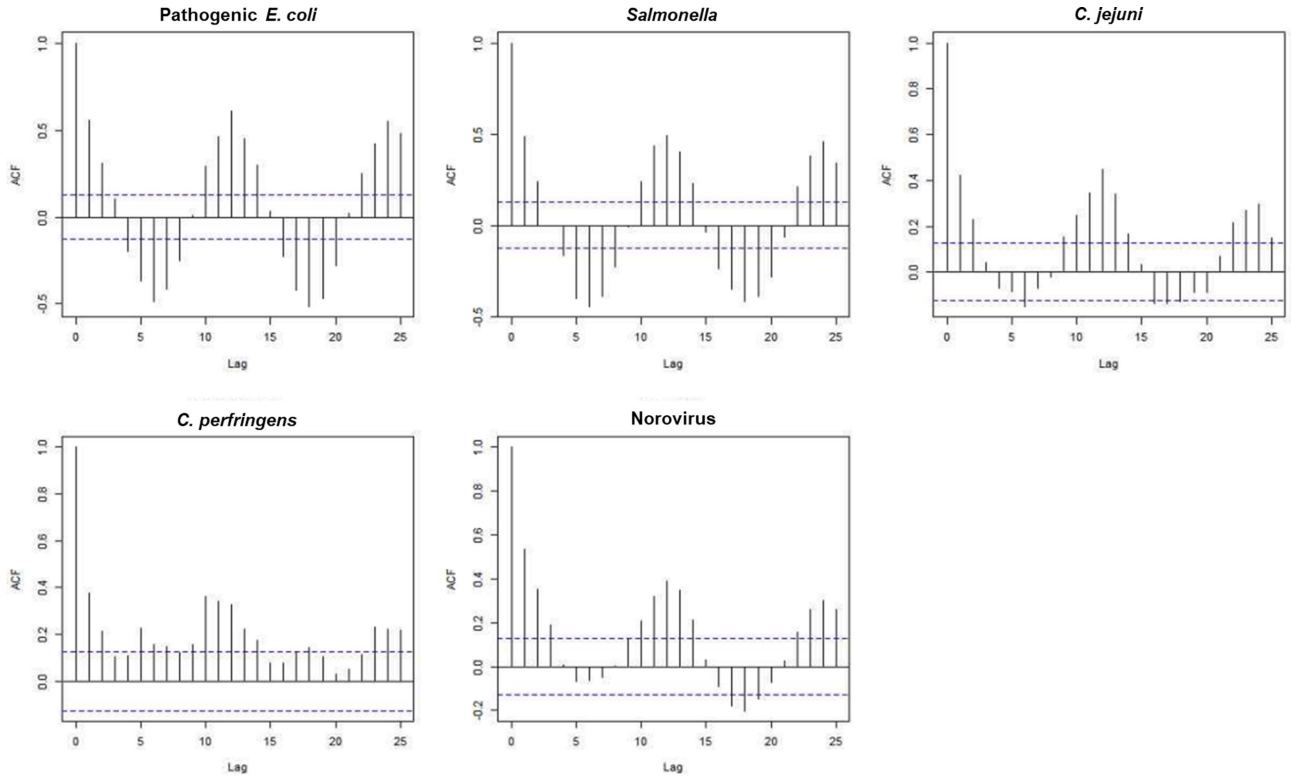

Fig. 1. The auto-correlation function (ACF) plot for the log-transformed numbaer of cases by food poisoing causel. ACF measures the correlation between a time series value and its past values. Lag: The time separation between the observations, Dashed lines: 95% confidence interval.

여기서 Yt는 t 시점의 식중독 발생 건수, Temp는 평균기온, Prec는 강수량, Hum은 상대습도를 의미하며, ε는 오차항이다. 모든 통계분석은 통계 패키지 R (version 4.3.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 사용하여 수행하였으며, 통계적 유의수준은 P<0.05로 설정하였다.

Results and Discussion

기후 요인이 식중독 발생에 미치는 영향 분석

과거 20년간(2003-2022)의 기후 자료와 식중독 발생 건수 간의 관계를 로그-정규 회귀모형으로 분석한 결과는 Table 1과 같다.

Pathogenic *E. coli*의 경우, 평균기온이 1°C 상승할 때 발생 건수가 6% 증가하는 것으로 나타났다(exp (β)=1.06). 이는 기온 상승이 Pathogenic *E. coli*의 증식 속도를 높여 식중독 위험을 증가시킨다는 기존 연구들과 일치하는 결과로, 메타분석 연구에서도 평균기온 1°C 증가 시 Pathogenic *E. coli* 발생률이 8% 증가(95% CI: 5-11%)한다는 것이 확인된 바 있다[13].

또한 강수량이 10 mm 증가할 때 발생 건수가 1% 증가하였는데, 이는 강우로 인한 농경지 오염 및 교차오염 가능성을 시사한다[15]. 반면, 상대습도가 1% 상승할 때는 발생 건수가 4% 감소하는 경향을 보였는데, 이는 강수량과 온도가 일부 세균의 생존에 불리하게 작용할 수 있다는 보고와 관련이 있을 수 있다[16].

Salmonella spp.는 평균기온이 1°C 상승할 때 발생 건수가 약 4% 증가하는 것으로 분석되었다(exp (β)=1.04). 이러한 경향은 Akil 등[17]의 연구와 유사하며, 해당 연구에서는 기온이 1 F 상승할 때 *Salmonella* 발생이 4건으로 나타났고, 특히 여름철(6-8월) 고온기에서 그 영향이 두드러진 다고 보고하였다. 또한, Fleury 등[18]은 캐나다의 시계열 분석에서 기온 상승이 살모넬라증 발생과 유의한 양의 상관관계를 보이며, 여름철과 초가을에 가장 뚜렷한 증가 추세를 나타낸다고 밝혔다. 이는 기온 상승이 살모넬라증 발생 위험을 높인다는 점에서 본 연구의 결과와 맥을 같이 한다. 본 연구에서 강수량은 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않았으나(P=0.059), 일부 연구에서는 폭우가 살모넬라 오염을 확산시킬 수 있다고 보고하여[19] 지역적 특성에 따른 차이가 있을 수 있다.

*C. jejuni*는 평균기온 1°C 상승 시 발생 건수가 3% 증가하였다(exp (β)=1.03). 이는 캠필로박터증 발생 간의 연관성을 분석한 연구 결과와 유사하다[20]. 특히, 강수량이 10 mm 증가할 때 발생 건수가 1% 감소하는 것으로 분석되었는데, 이는 강수량 증가가 *Campylobacter* spp. 의 주요 오염원인 가금류 사육 환경이나 토양 환경의 미생물

Table 1. Log-normal regression analysis of the effect of climate factors on the number of food poisoning cases

Pathogen	Variable	Coefficient (β)	SE	*P*-value	exp (β)
Pathogenic *E. coli*	Avg. temp. (t-1)	0.057	0.009	<0.001***	1.06
	Precipitation (t-1)	0.001	0.001	0.038*	1.00
	Rel. humidity (t-1)	-0.036	0.008	<0.001***	0.96
Salmonella	Avg. temp. (t-1)	0.036	0.009	<0.001***	1.04
	Precipitation (t-1)	0.001	0.001	0.059	1.00
	Rel. humidity (t-1)	-0.024	0.008	0.004**	0.98
C. jejuni	Avg. temp. (t-1)	0.028	0.007	<0.001***	1.03
	Precipitation (t-1)	-0.001	<0.001	0.007**	1.00
	Rel. humidity (t-1)	-0.012	0.007	0.100	0.99
C. perfringens	Avg. temp. (t-1)	-0.003	0.006	0.651	1.00
	Precipitation (t-1)	0.001	<0.001	0.286	1.00
	Rel. humidity (t-1)	-0.012	0.007	0.097	0.99
Norovirus	Avg. temp. (t-1)	-0.027	0.009	0.002**	0.97
	Precipitation (t-1)	-0.001	0.001	0.317	1.00
	Rel. humidity (t-1)	0.015	0.009	0.123	1.01

SE: Standard error. Statistical significance: $P<0.05$, *$P<0.01$, **$P<0.001$. (t-1): Average temperature, precipitation, relative humidity values used in the log-normal regression are lagged by one month (i.e., data from the month preceding the food poisoning cases).

군집에 복합적인 영향을 미치기 때문으로 추정된다. 이외에 다른 유럽 국가 연구[21,22]에서도 유사한 경향이 보고되었다.

Norovirus는 평균기온이 1°C 상승할 때 발생 건수가 약 3% 감소하는 것으로 나타나(exp (β) = 0.97), 저온 환경에서 활성이 높아지는 Norovirus의 특성이 반영된 결과로 해석된다. Rohayem 등[23]의 연구에서는 Norovirus가 뚜렷한 겨울철 계절성을 보이며, 특히 기온이 낮고 상대습도가 낮을 때 전파력이 증가한다고 보고하였다. 또한, Lopman 등[24]은 Norovirus가 온대지역에서 겨울철에 집중적으로 유행하며, 기온 및 습도의 변화가 유행 시기와 규모에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 관찰된 기온과 발생 간의 음의 상관관계를 뒷받침한다.

*C. perfringens*는 분석에 사용된 모든 기후 요인이 발생 건수에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 *C. perfringens* 식중독 발생 건수 자체가 다른 균에 비해 적고, 0건인 월이 많아 기후 요인과의 통계적 연관성을 설명하기에 한계가 있었던 것으로 판단된다.

기후변화 시나리오에 따른 미래 식중독 발생 예측

SSP 시나리오에 따른 미래 기후 예측 자료를 로그-정규 회귀모형에 적용하여 2100년까지의 식중독 발생 건수를 예측하였다. Fig. 2는 시나리오별 Pathogenic *E. coli*의 미래 발생 건수 예측 결과를 12개월 이동평균으로 시각화한 것이다. 모든 시나리오에서 미래로 갈수록 발생 건수가 증가하는 추세를 보였으며, 특히 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서 가장 가파른 증가세를 나타냈다.

Table 2는 주요 원인균에 대해 현재(최근 5년 월별 중앙값)와 미래 특정 시점(2092년)의 연간 총 발생 건수 예측치를 비교한 것이다.

Table 2. Comparison of predicted annual food poisoning cases by pathogen and SSP scenario

Pathogen	Current[1)]	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
	(Cases/year)	2092	2092	2092
Pathogenic *E. coli*	26	36	36	67
Salmonella	24	21	21	33
C. jejuni	15	9	8	19
C. perfringens	10	7	6	7
Norovirus	46	32	29	19

[1)] Median of monthly cases from the last 5 years (2018-2022), summed for the year.

Fig. 2. Predicted number of pathogenic *E. coli* food poisoning cases based on SSP scenario (12-month moving average).

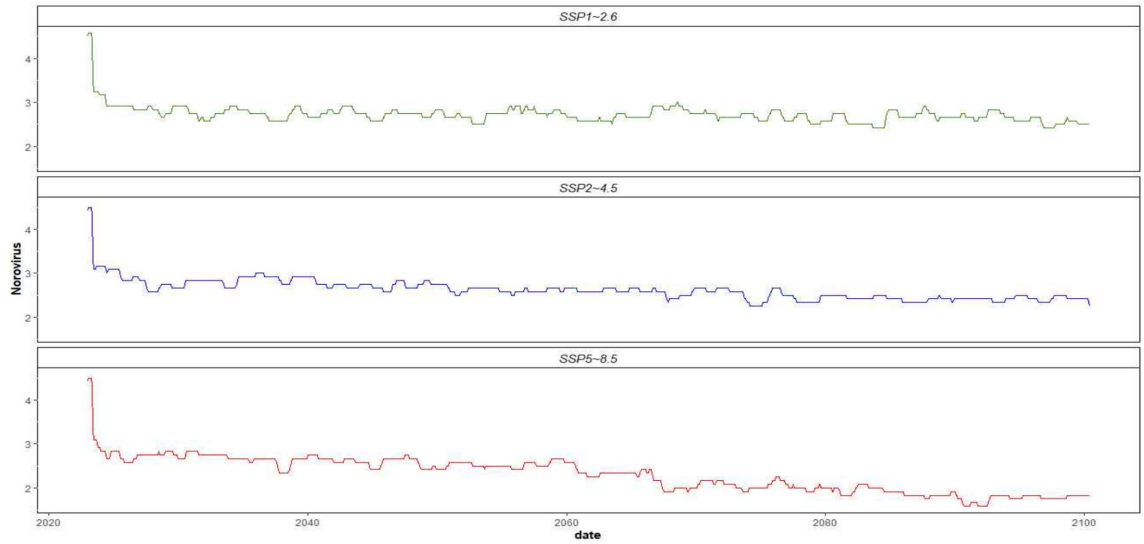

Fig. 3. Predicted number of Norovirus food poisoning cases based on SSP scenario (12-month moving average).

Pathogenic *E. coli*는 SSP5-8.5 시나리오에서 2092년 연간 발생 건수가 67건으로 예측되어 현재(26건) 대비 약 2.5배 이상 증가할 것으로 나타났다(Fig 2). 이는 기온 상승이 Pathogenic *E. coli* 식중독 위험을 크게 증폭시킬 것임을 강력하게 시사하며, 기후변화가 식품 안전에 미치는 심각한 위협을 보여준다[25].

Samonella spp. 역시 SSP5-8.5 시나리오에서 2092년 발생 건수가 33건으로 예측되어 현재(24건)보다 약 38% 증가할 것으로 나타났다. 이것은 기온 상승이 살모넬라 감염 발생을 증가시킨다는 메타분석 연구결과[26]와 일치한다. SSP1-2.6과 SSP2-4.5 시나리오에서는 현재와 유사하거나 소폭 증가하는 수준으로 예측되어, 탄소 배출 감축 노력이 *Samonella* 식중독 증가를 억제하는 데 효과가 있을 수 있음을 보여준다.

반면, Norovirus는 모든 시나리오에서 발생 건수가 감소하는 뚜렷한 경향을 보였다. 특히 SSP5-8.5 시나리오에서 2092년 발생 건수는 19건으로 예측되어 현재(46건) 대비 58% 이상 크게 감소할 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 지구온난화로 인해 겨울철 기온이 상승하면서 Norovirus의 생존 및 전파에 불리한 환경이 조성되기 때문으로 해석된다. 하지만 일부 연구에서는 기후변화로 인한 폭우나 홍수가 수인성 전파 경로를 통해 Norovirus 발생을 증가시킬 가능성도 제기하고 있어 종합적인 위험 평가가 필요하다.

종합적으로, 본 연구 결과는 기후변화, 특히 기온 상승

이 Pathogenic *E. coli*와 *Samonella* spp.와 같은 주요 세균성 식중독의 발생 위험을 미래에 크게 증가시킬 가능성이 있음을 과학적으로 예측하였다. 반면, 겨울철에 유행하는 Norovirus 식중독은 오히려 감소할 수 있음을 보여주었다. 이러한 예측 결과는 미래의 식품 안전 관리 정책이 기후변화를 핵심 변수로 고려해야 하며, 원인균별 특성에 맞춘 차별화된 예방 및 관리 전략이 필요함을 시사한다. 특히, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 식중독 발생 건수가 급증하는 예측 결과는 탄소중립과 같은 기후변화 완화 노력이 국민 보건 및 식품 안전 확보에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

Acknowledgement

성균관대학교 응용통계연구소 김상태, 서용원 연구원의 도움을 받아 통계를 수행하였으며, 이에 감사드립니다

국문요약

본 연구는 기후변화 시나리오에 따른 미래 식중독 발생을 예측하여 국민 인식 개선 및 관련 정책 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다. 2003년부터 2022년까지의 기상청 기후자료(평균기온, 강수량, 상대습도)와 식품의약품안전처의 식중독 통계(5종 병원균 발생 건수)를 수집하였다. 기후 요인이 식중독 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 로그-정규 회귀모형을 사용하였으며, 이를 바탕으로 2023년부터 2100년까지의 공통사회 경제경로(SSP) 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)에 따른 미래 식중독 발생을 예측하였다. 분석 결과, 평균기온이 1°C 상승할 경우 Pathogenic *E. coli*, *Samonella* spp., *C. jejuni* 발생 건수는 각각 6%, 4%, 3% 증가하였으나, Norovirus는 3% 감소하였다. SSP5-8.5 시나리오에 따르면, 2092년 Pathogenic *E. coli* 발생 건수는 현재보다 2배 이상 증가하고 살모넬라 발생 건수도 증가할 것으로 예측되었다. 반면, Norovirus 발생 건수는 모든 시나리오에서 감소하였으며, 특히 SSP5-8.5에서 가장 큰 감소 폭을 보였다. 이러한 결과는 기후변화로 인한 기온 상승이 세균성 식중독의 위험을 크게 증가시킬 수 있음을 시사한다. 따라서 공중 보건을 위해 기후변화 완화 노력과 식품 위생 관리 강화가 필수적이다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Hee-Soo Lee https://orcid.org/0000-0001-6737-1867
Ji Yeong Son https://orcid.org/0009-0007-2463-6133
Goeun Ju https://orcid.org/0009-0008-7288-0365
Su Jung Kim https://orcid.org/0009-0001-2182-0249
Tae Soo Kim https://orcid.org/0009-0000-7003-5135
Saem Han https://orcid.org/0009-0005-1488-3988
Minji Choi https://orcid.org/0009-0004-9122-7637
Joonbae Hong https://orcid.org/0000-0002-0981-7637

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA.
2. U.S. Global Change Research Program (USGCRP), 2016. The impacts of climate change on human health in the United States: a scientific assessment, USGCRP, Washington, DC, USA.
3. Miraglia, M., Marvin, H.J.P., Kleter, G.A., Battilani, P., Brera, C., Coni, E., Cubadda, F., Croci, L., De Santis, B., Dekkers, S., Filippi, L., Huis in ‘t Veld, J., Noordam, M.Y., Pisante, M., Piva, G., Prandini, A., Toti, L., van den Born, G.J., Vespermann, A., Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe. *Food Chem. Toxicol.*, **47,** 1009-1021 (2009).
4. Korea Meteorological Administration (KMA), 2023. Understanding climate change science for carbon neutrality, KMA, Seoul, Korea, pp.103.
5. Akil, L., Ahmad, H.A., Reddy, R.S., Effects of climate change on *Salmonella* infections. *Foodborne Pathog. Dis.*, **11,** 974-980 (2014).
6. Lake, I.R., Gillespie, I.A., Bentham, Nichols, G.L., Lane, C., Adak, G.K., Threlfall, E.J., A re-evaluation of the impact of temperature and climate change on foodborne illness. *Epidemiol. Infect.*, **137,** 1538-1547 (2009).
7. Scallan, E., Hoekstra, R.M., Angulo, F.J., Tauxe, R.V., Widdowson, M.A., Roy, S.L., Jones, J.L., Griffin, P.M., Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens. *Emerg. Infect. Dis.*, **17,** 7-15 (2011).
8. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, August 18). Annual loss cost due to food poisoning estimated at 1.8 trillion won. Retrieved from https://www.nifds.go.kr/brd/m_21/view.do?seq=13180
9. Shin, H.S., Yoon, S.M., Jeong, K.H., Lee, S.H., Climate change, food-borne disease prediction, and future impact. *Health Soc. Welf. Rev.*, **29**, 143-162 (2009).
10. Trtanj, J.M., Jantarasami, L., Brunkard, J., Collier, T., Jacobs, J., Lipp, E., Shiloh, S., Sith, D., Ziska, L., 2016. Chapter 6: climate change and human health. In: the impacts of climate change on human health in the United States: a scientific assessment, USGCRP, Washington, DC, USA, pp. 159-196.
11. de Souza, S.J.P., de Camargo Guaraldo, A., Honório, N.A., Câmara, D.C.P., Sukow, N.M., Machado, S.T., Duarte Dos

Santos, C.N., da Costa-Ribeiro, M.C.V., Spatial and temporal distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* oviposition on the coast of Paraná, Brazil, a recent area of dengue virus transmission. *Trop. Med. Infect. Dis.*, **7**, 246 (2022).

12. Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Samir, K.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Glob. Environ. Chang.*, **42,** 153-168 (2017).
13. Philipsborn, R., Ahmed, S.M., Brosi, B.J., Levy, K., Climatic drivers of diarrheagenic *Escherichia coli* incidence: a systematic review and meta-analysis. *J. Infect. Dis*, **214,** 6-15 (2016).
14. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA.
15. Lal, A., Baker, M.G., French, N.P., Dufour, M., Hales, S., The epidemiology of human salmonellosis in New Zealand, 1997-2008. *Epidemiol. Infect*., **140**, 1685-1694 (2012).
16. Sterk, A., Schijven, J., de Nijs, T., de Roda Husman, A.M., Direct and indirect effects of climate change on the risk of infection by water-transmitted pathogens. *Environ. Sci. Technol*., **47**, 12648-12660 (2013).
17. Akil, L., Ahmad, H.A., Reddy, R.S., Effects of climate change on *Salmonella* infections. *Foodborne Pathog. Dis*., **11**, 974-980 (2014).
18. Fleury, M., Charron, D.F., Holt, J.D., Allen, O.B., Maarouf, A.R., A time series analysis of the relationship of ambient temperature and salmonellosis in Canada. *Int. J. Biometeorol.*, **50,** 385-391 (2006).
19. Cann, K.F., Thomas, D.R., Salmon, R.L., Wyn-Jones, A.P., Kay, D., Extreme water-related weather events and waterborne disease. *Epidemiol. Infect.*, **141,** 671-686 (2013).
20. Louis, V.R., Gillespie, I.A., O'Brien, S.J., Russek-Cohen, E., Pearson, A.D., Colwell, R.R., Temperature-driven Campylobacter seasonality in England and Wales. *Appl. Environ. Microbiol*., **71**, 85-92, (2005).
21. Nylen, G., Dunstan, F., Palmer, S.R., Andersson, Y., Bager, F., Cowden, J., Feierl, G., Galloway, Y., Kapperud, G., Megraud. F., Molbak, K., Petersen, L.R., Ruutu, P., The seasonal distribution of campylobacter infection in nine European countries and New Zealand, *Epidemiol. Infect.,* **128,** 383-390 (2002).
22. Djennad, A., Lo Iacono, G., Sarran, C., Lane, C., Elson, R., Höser, C., Lake, I.R., Colón-González, F.J., Kovats, S., Semenza, J.C., Bailey, T.C., Kessel, A., Fleming, L.E., Nichols, G.L., Seasonality and the effects of weather on *Campylobacter* infections. BMC *Infect. Dis.* **19,** 255 (2019).
23. Rohayem, J., Norovirus seasonality and the potential impact of climate change. *Clin. Microbiol. Infect.*, **15**, 524-527 (2009).
24. Lopman, B., Zambon, M., Brown, D., The evolution of norovirus, the "gastric flu". *PLoS Med.*, **5**, e42 (2008).
25. Semenza, J.C., Suk, J.E., Estevez, V., Ebi, K.L., Lindgren, E., Mapping climate change vulnerabilities to infectious diseases in Europe. *Environ. Health Perspect.*, **120**, 385-392 (2012).
26. Damtew, Y.T., Tong, M., Varghese, B.M., Anikeeva, O., Hansen, A., Dear, K., Driscoll, T., Zhang, Y., Capon, T., Bi, P., The impact of temperature on non-typhoidal *Salmonella* and *Campylobacter* infections: an updated systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. eBioMedicine, **109**, 105393 (2024).