미생물 위해평가의 산업적 활용

Microbiological Risk Assessment for Industry

김현정*, 김승민, 옥경식, 구민선

Hyun Jung Kim*, Seung Min Kim, Gyeongsik Ok, Minseon Koo

한국식품연구원

Korea Food Research Institute

서론

지금까지 식품업계, 정부 및 학계에서 광범위한 분야에 걸쳐 많은 노력을 했음에도 불구하고 식중독 부담은 여전히 존재한다. 특히 단체급식과 외식의 증가와 더불어 식중독 사고의 위험이 증가하고 있다. 2011년-2014년 (9월까지) 사이 학교 및 기업체 집단급식에 의한 식중독 환자는 연간 3천-4천 명이며 전체 식중독 환자수의 35.5-64.35 (평균 53.5%)로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 다음으로는 음식점(평균 22.1%)이 차지하고 있다 (그림 1). 단체급식소 위생관리 향상에 대한 정부의 정책적 노력으로 위생의 많은 부분이 개선되고 있으나 식중독 사고로 인한 환자수는 줄어들고 있지 않으며 특히 2014년에는 다수의 학교에서 발생한 식중독 사고로 인해 환자수가 크게 증가된 바 있어 보다 집중적인 안전관리가 필요한 시점이다.

국내외에서 식품안전관리는 단순히 기준규격의 준수여부를 확인하는 것으로 대별되는 사후 조치형 안전관리를 벗어나 식품에서 정량적으로 오염수준을 예측하고, 식품

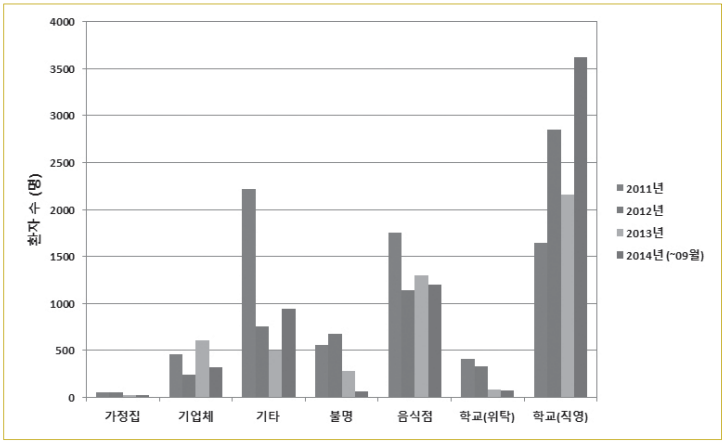

그림 1. 2011-2014년 시설별 식중독 환자수 발생 자료

* Correspondence to: Hyun Jung Kim
Korea Food Research Institute 516, Baekhyun-dong, Bundang-ku, Songnam-si, Kyunggi-do 463-746, Korea
Tel: +82-31-780-9271 Fax: +82-31-709-9876 E-mail: hjkim@kfri.re.kr

체인 (food chain)에서 위해인자의 운명을 예측하며, 인간의 건강과 연관된 위해를 추정하는 사전 예방적 안전관리 시스템을 도입하는 추세이다. 이와 관련하여 식품안전 분야에서 위해평가의 중요성이 크게 인식되고 있다. 위해평가는 식품 등에 존재하는 위해요인이 인체에 노출되었을 때 발생할 수 있는 유해 영향과 발생확률을 과학적으로 예측하는 일련의 과정으로 국내의 경우 2005년도 식품위생법에 위해평가 관련규정이 신설되면서 식품안전의 측면에서 위해평가가 강조되어 왔다. 정부 주도의 식품안전관리는 물론이고 산업적 식품안전관리까지 널리 이용되는 추세이다.

최근의 식품안전사고는 식품산업과 유통망의 발달로 글로벌화, 대형화되는 특징이 있고, 이를 예방하기 위해서는 식품안전정보 공유기술과 식품안전관리 시스템을 개발하고, 식품오염 방지 및 예방 기술의 개발이 시급하다. 식품안전관리 시스템과 관련하여 최근 가장 큰 이슈라고 할 수 있는 미국 식품안전현대화법 (Food Safety Modernization Act)은 식품공급을 과학적인 방법론으로 접근하고, 위해수준에 기반하여 예방 관리하고자 식품 공급망 전반에 걸쳐 감독하고 식품안전 시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있다. 이와 관련하여 특히 식품 공급망에서 발생되는 방대한 양의 데이터 관리 중요성이 대두되고 있다. 식품체인에서 발생되는 여러 데이터와 정량적 위해평가기술을 접목함으로써 보다 효율적인 식중독 안전관리가 가능할 것으로 생각되며, 본고에서는 정량적 위해평가의 산업적 활용에 대해서 살펴보고자 한다.

식중독 위험요인

여러 식품안전 위해요인 중 단체급식 식중독은 주로 생물학적 원인에 의해 발생된다. 식중독 유발 세균과 바이러스가 주요 원인이며 이들은 식품 체인 중 여러 단계에서 진입하며 종류가 매우 다양할 뿐 아니라 환경 적응력도 뛰어나서 생존, 증식 및 독소를 분비하여 인체에 위해를 초래한다. 증식이 가능하다는 점은 식중독균의 독특한 특성으로 화학물질과는 다른 부분이다. 따라서 미생물 분야의 식품 안전의 경우 새로운 도전과 이에 대한 전략 및 방법을 고려할 필요가 있는데 이를 위하여 식품안전시스템을 미생물학적 관점에서 분석하고 현재의 자료를 바탕으로 발생 가능한 시나리오를 도출함으로써 식품안전의 미래를 예측할 필요가 있다.

냉장, 편이, 건강지향적인 식품을 추구하는 소비자의 기호변화를 새로운 식품안전 문제와 연관 지어 생각할 필요가 있는데, 식품 선택 시 냉장식품을 선호함에 따라 내냉성 미생물 및 병원균이 재출현하게 되고 이국적 식품, 지역 식품을 선호하며 무가공 또는 저가공 식품(낮은 열처리 포함)이 증가함에 따라 새로운 위해인자의 도입이 수반된다. 아울러 기존의 식품이 연중 조달 가능하게 되며 이와 관련된 위험도 증가할 것으로 예측된다. 신선, 전처리 농·식품은 더 이상 가열처리를 하지 않아 미생물 관점에서 소비자 위해가 증가하므로 이에 대한 적절한 제어 기술을 적용해야 한다. 전통적으로 육류 및 육제품은 식중독 고위험 식품군으로 알려져 있으며 육류 및 육제품의 위험순위에 대한 오스트리아의 자료에 의하면 심각성을 기준으로 했을 때는 (덜 익힌) 햄버거 섭취에 의한 장출혈성 대장균 식중독 위험이 가장 높게 조사되었고, 덜 익힌 육류에 의한 장출혈성대장균과, *Toxoplasma gondii*, 교차오염에 의한 *Salmonella* 오염이 심각한 것으로 조사되었다. 그러나 발생 확률, 소비단계에서 저감화 가능여부 등을 감안한 위험순위는 덜 익힌 육류에 의한 *Toxoplasma gondii*에 의한 위험성과 10% 이상의 교차오염에 의한 *Salmonella* 식중독 위험이 높게 나타났다. 한편 가공육의 경우에는 Deli-meat/*Listeria monocytogenes*, Kebab/*Salmonella*, 신뢰할 수 없는 과정으로 제조된 살라미/장출혈성대장균의 위험 순위가 높았다.

아울러 최근 EFSA (European Food Safety Authority)에서는 비가열섭취가 가능한 신선채소를 새로운 식중독균의 매개체로 제시하고 이에 대해 주의를 당부한 바 있다. 전 세계적으로 위험순위가 가장 높은 비동물성식품/식중독균의 조합은 엽채류/병원성 대장균이

었으며 엽채류 및 토마토/*Salmonella*의 위험도 높았다. 딸기 및 라스베리/norovirus의 경우 유럽에서 위험순위가 높았고 그 외의 국가에서는 멜론·열대과일/*Salmonella* spp 오염의 위험순위가 높은 것으로 분석되었다. 국가별로 선호하는 식품군과 섭취방법에 차이가 있으므로 단체급식 식중독 안전관리를 위한 우선순위 설정을 위하여, 주요 식품 및 식중독균에 대한 체계적인 위험순위 분석이 수행될 필요가 있다.

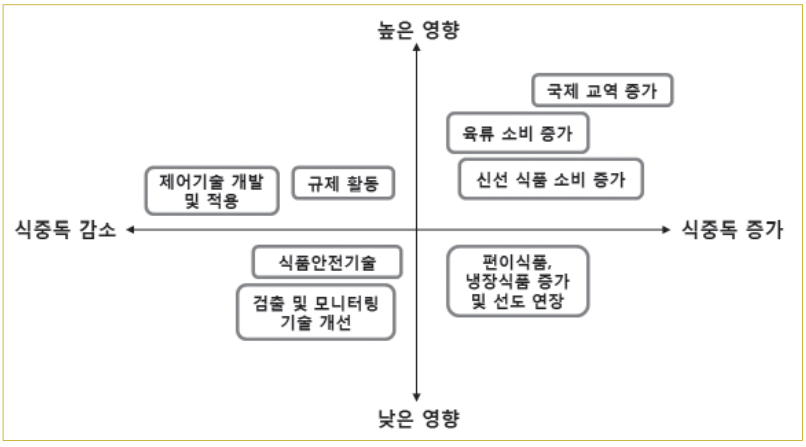

그림 2. 전 세계 식중독 발생에 미치는 영향을 도식화한 식중독 영향인자.

식품산업과 관련된 또 다른 특성으로는 당, 염도가 낮은 제품 섭취에 대한 소비자의 선호도를 들 수 있다. 당 또는 염은 수분활성도를 낮추어 미생물 생육을 억제하는데, 최근 소비자들은 당, 염도가 낮은 제품을 선호함에 따라 이들 제품에 대한 미생물 안전성을 고려해야 한다. 지방성분은 소화 중 위를 통과할 때 미생물을 감싸 미생물 생존율을 높이는 작용을 한다. 저지방 제품의 경우 소화 중 미생물 생존율을 낮추고 수용계에서 용질을 희석하므로 수분활성도를 증가시켜 미생물 관점에서 식품안전위험을 변화시킬 수 있다.

위험요인의 영향 분석

식품안전과 관련된 몇 가지 주요 위험요인이 식중독 발생에 미치는 영향을 도식화하여 다음 그림 2에 나타내었다. 식중독 발생에 영향을 줄 수 있는 인자들 중 제어 기술의 개발과 적용, 정부의 규제활동, 식품안전기술의 개발 그리고 검출 및 모니터링 기술 개선은 식중독 발생을 감소시키는 결과를 나타낸다. 이 중 투자 주도로 이루어지는 제어 기술 개발 적용과 규제활동은 관련 영향이 높은 편이고 식품안전기술, 검출 및 모니터링 기술 개선은 상대적으로 영향이 낮은 것으로 분석되었다. 한편, 국제교역 증가는 식중독 증가에 높은 영향을 주는 것으로 조사되었는데 이와 함께 육류와 신선식품 소비 증가도 아울러 식중독 증가에 영향을 주는 인자였다. 한편 편이식품이나 냉장식품의 증가와 선도연장은 식중독을 증가시키는 인자이나 영향은 낮은 것으로 조사되었다.

미생물 위해평가의 특징

위해평가는 유해물질이 인간에 노출됨으로써 발생하는 알려지거나 잠재적 가능성이 있는 부작용(adverse health effects)에 대한 과학적 평가로, 위험성확인 (hazard identification), 위험성 결정 (hazard characterization), 노출평가 (exposure assessment), 위해도 결정 (risk characterization)의 단계를 거쳐 진행된다 (그림 3). 당초 위해평가는 국제식품규격위원회(Codex)에서 WTO 체제하에서 객관적이고 과학적인 식품안전관리의 방법으로 위해분석 (Risk analysis)를 제시한 것으로부터 식품안전관리를 위한 방안으로 도입되었다. 이후 위해평가 결과는 국가적 안전관리 규제를 위한 정책 결정단계에서 그 역할이 점차 확대되고 있으며 최근에는 산업적 식품안전성 확보를 위한 관리방안으로 활용되기 시작했다.

미생물 위해평가는 식품에 존재하는 미생물의 위해요소를 확인하고, 위해미생물이 식품에 노출되고 이를 섭취할 가능성과 섭취로 인해 위해 영향이 일어날 가능성을 정

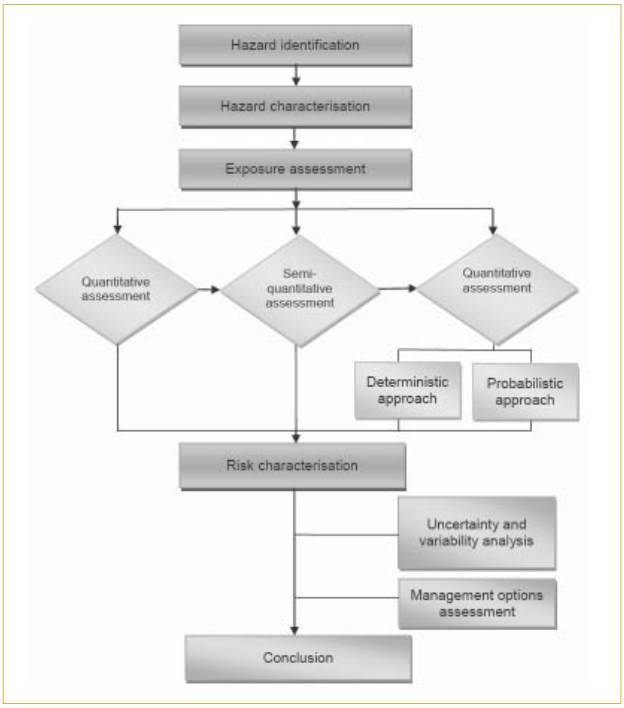

그림 3. 위해평가의 4단계. I)Hazard identification, II) Hazard characterization, iii) Exposure assessment and iv) Risk characterization.

량적으로 평가하는 과학적인 과정이다. 기본적으로 정량 모델과 정량 데이터에 기반을 두고 있다. 모델의 구조, 가설, 방법과 사용하는 도구와 함께 미생물 위해평가 결과의 질은 적절한 데이터 사용에 있다. 이들 데이터는 생물학적 데이터, 식품 데이터 뿐 아니라 가공 공정이나 가정에서 식품의 조리, 섭취빈도 및 섭취량과 같은 소비자에 대한 데이터도 포함한다.

미생물은 외부적 환경요인에 따라 계속적으로 성장하거나 사멸할 수 있으므로 식품 내에 존재하는 미생물의 실질적인 양을 예측하기 위해서는 다양한 조건에서 미생물의 성장, 사멸을 예측할 수 있어야 한다. 이 때 예측모델(predictive model)을 통해 미생물 성장 및 사멸을 예측할 수 있는 자료는 미생물 노출평가 시 반드시 고려되어져야 할 자료이다. 식품 섭취 시 노출되는 미생물의 실질적인 양을 평가하기 위해서는 식품의 원료수송, 가공, 포장, 운반 등 물리적, 화학적 변화에 따라 미생물의 변화를 고려하여 실질적인 미생물의 양을 산출해야 한다. 예측미생물학은 다양한 환경 상태에서 미생물의 성장, 사멸 등을 예측할 수 있는 모델을 연구하는 학문으로 수학적 매개변수를 이용하여 결과를 정량적으로 표현할 수 있다. 위해평가 결과를 바탕으로 한 식품 안전관리 또는 위험관리 기술은 식중독 부담을 감소시키는데 중요한 영향을 준다.

미생물 위해평가에서는 다음과 같은 미생물의 특징을 고려해야 한다. 즉, 미생물 종 (species)은 물론 같은 종의 다른 strain도 독특한 증식·사멸 특징을 나타낸다. 또한 환경스트레스가 일부 미생물의 병원성에 영향을 주며 미생물 생성 독소는 균체가 사멸한 후에도 잔존하는데 일부 장독소는 열에 안정하며 잘 분해되지 않아 여러 질병을 유발한다. 미생물 위해평가에서는 숙주의 면역능과 민감성도 고려해야 한다.

재 오염 또는 교차 오염에 의한 2차 전염은 병원성 미생물에 의한 감염을 증폭시키게 되며 특히 일부 미생물은 물체의 표면에 수일에서 수개월 동안 생존이 가능하므로 이와 같은 2차 전염 가능성을 증가시킨다. 일부 병원성 미생물의 경우 인간이 무 증세 만성 보균자로 작용하여 다른 사람을 감염시키거나 식품·물을 오염시킬 수 있다. 병원성미생물의 경우 대체로 환경 매트릭스 내에 불균일하게 분포되어 있고 증식할 경우 군집을 이루는 분포를 나타내며 병원성 미생물은 서로 달라붙거나 유기·무기 입자에 부착 또는 내부에 포집되어 있어 전통적인 의미의 농도 측정이 어려운 점도 있다.

미생물 위해평가 모델

위험성 확인 모델로는 데이터베이스와 정성적 논리, 구조화된 모델을 이용하여 정책결정을 위한 모델을 개발할 수 있다. 또한 Risk ranger와 같이 상대적 위해를 알아보기 위한 리스크 순위화 모델도 이 범주에 속한다. 주로 우선순위 설정을 위해서 이용하며 선정된 식품-위해인자는 보다 심도있는 위해평가를 수행하게 된다.

노출평가를 위한 모델로는 국내에 잘 알려져 있는 증식

예측모델을 들 수 있다. 온도, 시간과 같은 변수를 지정했을 때 특정 균주가 몇 시간 후 얼마나 증식될 수 있는지를 예측할 수 있기 때문에 가장 직관적인 결과를 보여주게 되며 이 때문에 국내에서 가장 많이 연구되고 있는 분야이기도 하다. 증식을 위한 모델로는 시간을 변수로 하는 1차 모델과 여기에서 도출된 lag time, maximum growth rate 등을 온도 등을 변수로 변환된 2차 모델이 있다. 주요 환경 영향인자로는 온도, 산도, 수분활성도, 보존제 (약한산이나 유사한 첨가제), redox와 대기 등이 있다. 증식 모델만큼이나 정량적 미생물 위해평가에서 중요한 모델이 사멸 모델이며 역시 1,2차 모델 개발이 가능하다. 식품의 가공 또는 조리 과정에서는 여러 조작이 이루어지는데 각 단계마다 온도변화가 있으며 식품에서의 열전달도 다르게 일어나 식품 중 존재하는 미생물에 미치는 영향도 크게 달라진다. 이와 같이 식품생산을 위한 가공 공정이나 일련의 조리 과정 중 미생물의 거동을 예측하기 위해서는 증식예측모델과 확률위해평가 모델을 결합함으로써 보다 현실적인 데이터를 얻을 수 있다.

그 외에도 노출평가를 위해서는 재 오염 모델 (Models of recontamination)과 혼합/분배 모델 (Models for mixing and partitioning)도 적용된다. 재 오염 모델은 주로 교차오염에 대한 이슈를 다루게 되는데 이는 대표적인 인수공통병원균에 의한 식중독사고가 ready-to-eat 식품 섭취를 통해서 일어나는 것을 설명할 수 있으며 주로 소비단계에서 이루어지는 다룸 (food handling)에 의한 식중독 원인과 제어 방안을 설명할 수 있다

위험성 결정 모델은 dose-response model을 들 수 있다. 가장 기본적인 모델은 single-hit 모델이며 섭취된 용량 중 미생물의 r이 모두 같다는 전제하에 출발한다. 미생물이 균일하게 분포되어 있으며 식품섭취량 중 존재하는 식중독균이 용량은 Poisson 분포를 따르는 평균용량과 관련되어 있는 것으로 가정하는 exponential model 이 있다. 또한 식중독균이 감염력이 동일하지 않고 변이성이 있다는 가정 하에 beta-poisson model이 개발되었다. 만약 숙주의 변이성이 포함된다면 Weibull-Gamma model이 적용된다.

노출평가

미생물위해평가에서 노출평가는 미생물 위해에 노출되는 경로, 빈도, 지속기간 및 노출정도를 평가하는 것을 목적으로 한다. 미생물은 하나 이상의 오염원으로부터 유래되며 여러 노출경로를 통해 전파되고 2차 전염되기도 한다. 이와 같은 노출경로는 서로 연관되어 있으며 주어진 미생물 위해인자에 적합한 노출경로는 상황마다 다르며 미생물의 특징과 잠재적 숙주에 따라 다르다. 노출 경로 외에도 오염원, 미생물 증식 · 사멸, 개인의 섭취량 차이 등의 인자를 이 단계에서 고려해야 한다.

노출평가를 위한 시나리오 개발은 위해평가의 목적과 범위를 반영해야 하는데 몇 가지 고려할 점을 제시하면 다음과 같다. 초반에 노출평가에 이용될 입력값, 변수, 흐름, 여러 인자들의 관계를 포함하는 다이어그램 (개념모델)을 작성한다. 노출평가는 오염원에 존재하는 미생물로부터 시작되나 때로는 노출시점의 미생물 농도부터 시작하기도 하는데 이 경우 관련 데이터가 제공되어야 하며 노출로 인한 건강영향에 대한 정보만을 제공하게 된다. 노출평가의 시작점이 정해졌으면 경로, 이동 모델 또는 예측모델을 이용하여 인체에 노출되는 시점까지 미생물 수준 변화를 반영한다. 노출평가 마지막 단계에서는 어떤 경로로 타겟 미생물에 노출되는지를 결정해야 한다. 잘 알려진 노출 경로로는 흡입 (코와 입을 통해 폐로 전달), 섭취 (경구), 직접 접촉이 있으며 식품안전에서는 주로 식이를 통한 경구 섭취를 고려하고 있다. 섭취를 통한 노출은 서빙 단계의 미생물 수를 결정하기 위해서 오염원-공정 단계에서 미생물 수의 변화를 고려해야 한다.

예를 들어 다진 쇠고기 섭취를 통한 *E. coli* O157:H7의 질병위험을 추정하기 위해서는 노출평가 시 농장 생산, 도축, 저장 · 준비 단계에서 원인 인자를 포함해야 한다. 이와 같이 복잡한 farm-to-table 노출평가에서는 계절, 생존 동물의 비율, 이송, 도체 (오염제거, 냉각, 절단), 분쇄,

저장, 조리, 섭취와 같은 인자들이 서빙 당 분쇄 쇠고기의 노출 추정에 미치는 영향을 검토해야 한다. 또한 계절별 도축 대상 중 감염체의 비율과 도체 오염 제거과정, 저장 시간·온도, 조리 등 요인의 조합을 시나리오에 반영할 수 있다.

미생물 위해평가의 활용

미생물 위해평가결과는 특정 사건으로부터 위험을 감소시키거나, 규정, 정책, 기준 등이 적절한지 확인하는데 이용되거나, 규제할 필요성 결정 또는 어떻게 규정하는지를 결정할 때, 마지막으로 예측 또는 위험순위설정, 스크리닝, 타당성 평가 등의 연구 목적으로 활용된다. 산업계에서 미생물 안전성 확보를 위해서도 이와 같은 범주에서 위해평가를 활용할 수 있을 것이다. 특히 식중독균의 증식예측모델은 산업계에서 여러 방면으로 응용되고 있으나 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉 미생물 증식속도, 생육 제한, 특정 식품성분 또는 공정조건과 관련된 불활성화 속도를 분석하여 새로운 제품, 공정, 기존제품의 변화, 저장조건 및 유통기한 설정 등 제품 혁신에 활용될 수 있으며 공장 라인 설계, HACCP에서 CCP 설정, 공정변수의 변화가 미생물 안전 및 제품품질에 미치는 영향 등의 정보를 제공하여 공장운영과 관련된 결정을 지원하는 작업지원에도 이용된다. 또한 시판제품에 문제가 있는 경우 소비자 안전 또는 제품 품질에 미치는 영향을 평가하는 사건발생 지원에도 이용될 수 있다.

식품산업에서의 안전관리를 위해서 아직은 HACCP의 현장 적용에만 더 관심이 많으나 예측모델을 포함한 미생물 위해평가 기술을 이용함으로써 특정 단위공정이나 저장 또는 유통 등 여러 발생 가능한 조건 및 상황에서의 미생물 생육을 예측하고 위험 산출이 가능할 것으로 사료된다. 정성적인 안전관리기술이라고 할 수 있는 HACCP보다 적극적인 미생물 안전관리가 가능하며 정량적 미생물 위해평가기술을 식품산업에 적용할 경우 단위 가공공정 또는 저장이나 유통 등 특정 조건 중 중점제어단계와 정량적 제어수준 도출이 가능하며 이에 근거하여 제어 기술 개발도 가능하다. Codex에서는 정부와 산업에서 미생물 위해평가의 활용을 위해 다음과 같이 주요 목적, 위해평가의 범위 사용되는 데이터, 노력과 결과물에 대해서 제시한 바 있다 (표 1).

유니레버에서는 자체적으로 Internal/External 미생물 전문가 시스템 및 소프트웨어를 개발하여 제품의 품질과 안전관리에 활용하고 있다 (그림 4). 이 때 예측모델은 pH, 수분활성도, 산, 염, 보존제등 제품내부인자와, chilling, modified atmosphere와 같은 제품외부 인자 및 열처리, 압력처리, 이온화 에너지처리 등 공정에 따른 미생물의 증식과 불활성정도를 평가하는데 활용된다. 이와 관련된 연구결과들이 다수 공개되어 있으나 많은 경우

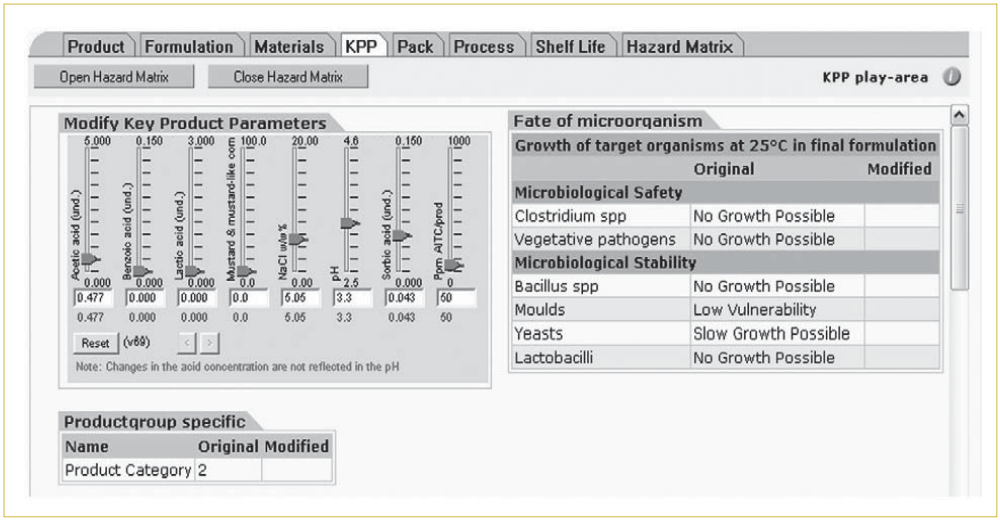

그림 4. 제품개발자와 같은 모델링 비전문가용 예측 시스템 예시

표 1. 정부와 산업체에서 미생물 위해평가의 활용

	정 부	산업체
목적	■ 소비자 건강과 안전보호. 세계 교역 이슈에 대한 공통 개념 ■ ALOP과 FSO에 대한 위해 관리자 결정의 근간 ■ 시장에서 현재 식품안전관행의 재평가 수단	■ 제품을 출시하기 전 MRA와 유사한 툴을 이용하여 신제품에서 위해 인자 제거에 활용 ■ 제품과 공정 평가 시 투명성과 감사(audit)에 활용 ■ 생산제품의 식품안전성 재평가의 근간으로 활용
범위	■ 국가적, 일부 지역 또는 전 세계적 소비자 인구 대상 ■ 서로 다른 생산자에 의한 유사 식품들에 대한 병원균 경로 ■ 위해 순위, 식품 중 잠재적 위해에 대한 상대 비교, 특정 식품/카테고리에 대한 위해 인자 ■ 때로는 식품망 (1차 생산품에서 소비자까지) 전 단계를 포함	■ 신제품을 목적으로 한 시장의 소비자 인구집단 ■ 특정 회사에서 생산된 특정 제품 중 병원균 경로 ■ 대체로 원료에서부터 소비단계까지의 위해 수준을 모두 포함
Input	■ 위해 인자의 용량-반응 효과에 대한 데이터/지식. 독성 및 역학 자료 ■ 생산, 가공, 제조 이후의 소비자 다룸에 대한 데이터/지식	■ 위해 인자의 dose-response에 대한 상세한 데이터나 지식 이용하지 않음. ■ 특정 제품-병원균에 대한 일반적인 역학이나 병원성에 대한 정보는 이용 ■ 원료에 대한 데이터 또는 지식을 이용, 공정 효과나 제조공정 중 또는 그 이후의 다룸 또는 재 오염에 대한 효과 고려
Out-put	■ 추정된 위해에 대한 절대 또는 상대값 ■ 예를 들어 특정 병원균을 포함하는 특정 식품 섭취를 통한 질병 발생율 또는 서로 다른 식품에 대한 상대적인 위해 수준	■ 일반적으로 노출평가를 종말점으로 함 ■ 식품안전수준이 높은 기존 또는 타사 제품의 수준과 자사 제품 중 존재하는 특정 병원균의 노출수준 비교

모델은 실험조건에서 만들어져 있으므로 실제 현장에 적용하기 위해서는 모델의 검증 특히 실제 식품에서의 검증이 필수적으로 이루어져야 한다. 예시와 같은 업체는 이와 같은 제한점을 극복하기 위하여 자사의 목적에 맞도록 예측모델을 개발, 검증하고 있다. 제품개발자와 같이 모델링 전문가가 아닌 직원도 쉽게 사용할 수 있도록 사내 전산망에서 쉽게 접근할 수 있으며 제품 중 포함되는 산, 염, pH 등의 정보를 선택하면 최종제품에서 목적미생물의 증식 가능성 여부를 보여준다.

대부분의 업체는 사업장별 업체맞춤형 예측모델시스템을 갖출 여력이 없으므로 이 경우 일반예측모델시스템을 활용할 수 있다. 현재 이용되고 있는 일반 미생물증식예측시스템은 사용하기 편리하나 동일한 조건을 입력하여도 각 소프트웨어가 사용하는 1차, 2차 모델에 따라 제공하는 증식정보는 차이가 있어 일반적으로 업체에서 제품생산단계에 바로 적용하기에는 무리가 있다. 제공하는 미생물의 종류가 주로 위해미생물로 제한되며 대부분 배지에서의 증식정도라는 점도 산업현장에서 바로 활용하기 어려운 이유가 된다. 이와는 달리 Combase와 같은 데이터베이스는 실제 식품에서의 오염도 정보를 바탕으로 하므로 제품안전과 관련하여 급하게 사안을 결정해야 하는 경우 도움이 될 수 있다.

확률노출평가모델의 산업적 활용 예를 살펴보면 유니레버는 증식예측모델 외에도 확률노출평가도 활용하고 있는데, 병원성미생물에 대한 소비자의 노출을 보다 정확하게 평가하기 위하여 *Bacillus cereus*와 관련하여 저장성이

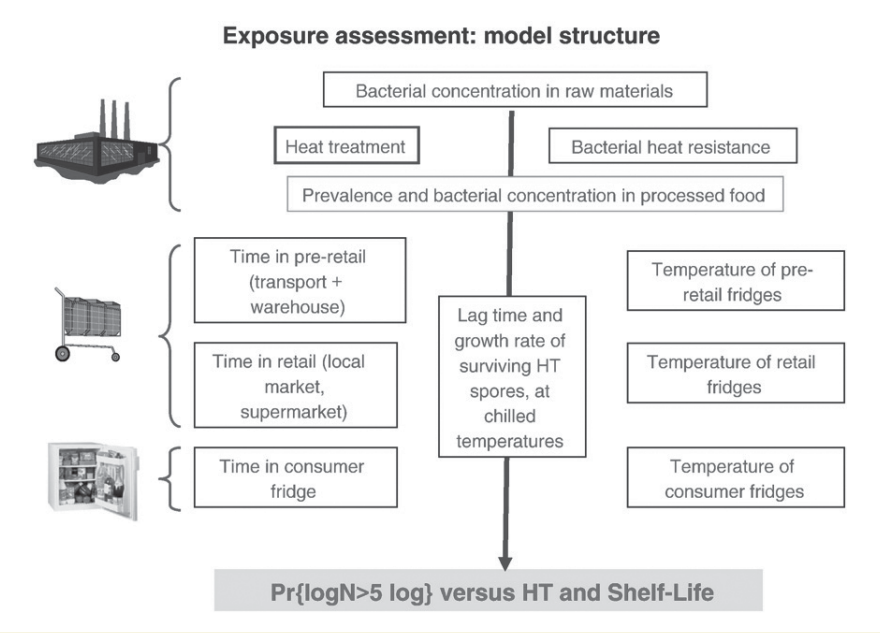

그림 5. 실제 마켓 조건하에서 섭취 시 식품 중 Bacillus cereus의 노출 수준 평가를 위한 평가모델 구조. (HT: heat treated or heat treatment)

증진된 냉장가공식품의 안전을 평가하기 위한 확률노출평가 모델을 개발하였다 (그림 5). 기본적인 예측미생물 모델과 원재료의 오염도, 열처리, 냉장유통체인, 소비 특성 분석 등 여러 가지 인자를 고려하여 노출평가모델을 개발하였다. 개발된 노출평가모델을 이용함으로써 소비시점에서 단위중량당 10^5 cfu이상 미생물이 존재할 확률을 분석할 수 있고, 공정, 제품 구성성분, 냉장 조건 등에 대한 여러 시나리오를 도출하고 그 결과를 비교하여 안전한 제품 생산에 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 90℃와 95℃ 온도조건에서 5 – 15분간 열처리 했을 때 40일 이후 단위중량당 10^5 cfu이상일 확률을 산출함으로써 적절한 가열조건을 선정하는데 활용될 수 있다. 확률노출평가모델의 개발은 비교적 단순한 인자 (온도, 수분활성도, pH 등)를 활용한 미생물증식예측모델 개발과 비교했을 때 보다 훨씬 긴 시간, 많은 자원과 집중적인 컴퓨터 모델작업, 복잡한 모델링 기법이 필요하므로 개발에 어려움이 있다. 그러나 단순히 냉장온도 설정 정보 등을 제공하는데 그치고 있는 단일 미생물증식예측모델에 비해서 훨씬 현실적인 시나리오를 구동하고 유용한 정보를 확보할 수 있도록 도와준다.

국내의 경우 미생물 위해평가를 주로 국민 보건을 위한 안전관리 기준 설정에 활용하고 있으나 김 등이 보고한 단체급식소에서 조리된 식품 섭취를 통한 항생제 내성균의 노출평가 모델과 같이 작업장의 운영 조건을 반영함으로써 실제로 식품이 입고, 보관, 전처리, 조리, 배식 등 일련의 과정을 거치면서 어떤 단계에서 목적하는 식중독균의 증식 수준을 파악할 수 있고, 이를 통해서 주요 안전관리 공정을 도출할 수 있다.

또 다른 예로서 유제품 산업에서 위험에 기반한 미생물학적 식품안전관리에 정량적 위해평가기술을 접목한 예를 살펴보면 정량적 위해평가 기술이 식품생산단계에서 효율적인 제어 전략을 도출하고 새로운 위험기반 안전관리 옵션을 도출하는 데 어떻게 활용되는지 알 수 있다.

저온살균 우유를 이용한 연질 치즈 생산에 대한 전체 제조 공정과 잠재적 오염원을 고려하고 여러 가정을 바탕으로 위해평가 모델을 개발하고 이를 통해서 섭취 단계에서 리스테리아 식중독 위험을 추정할 수 있다. 즉, 저온살균에서부터 섭취까지 우유, 신선한 치즈 또는 가공 환경 중에서 리스테리아 증식을 시간, 장소, 제품 lot별로 시뮬레이션 가능하며 위생관리나 샘플링 계획과 같은 안전관리 옵션 개발에 활용할 수 있다. 시나리오 분석을 통해서 리스테리아 식중독에 기여하는 주된 변수를 도출하고 이를 예방하기 위한 단계와 수준을 예측할 수 있다. 그림 6은 저온살균 우유를 이용한 연질치즈 제조 공정 중 2차 오염에 의한 각 제조공정별 오염도에 대한 개념을 제시한 것으로 교차오염에 의한 재 오염을 위해평가 모델 개발에 활용

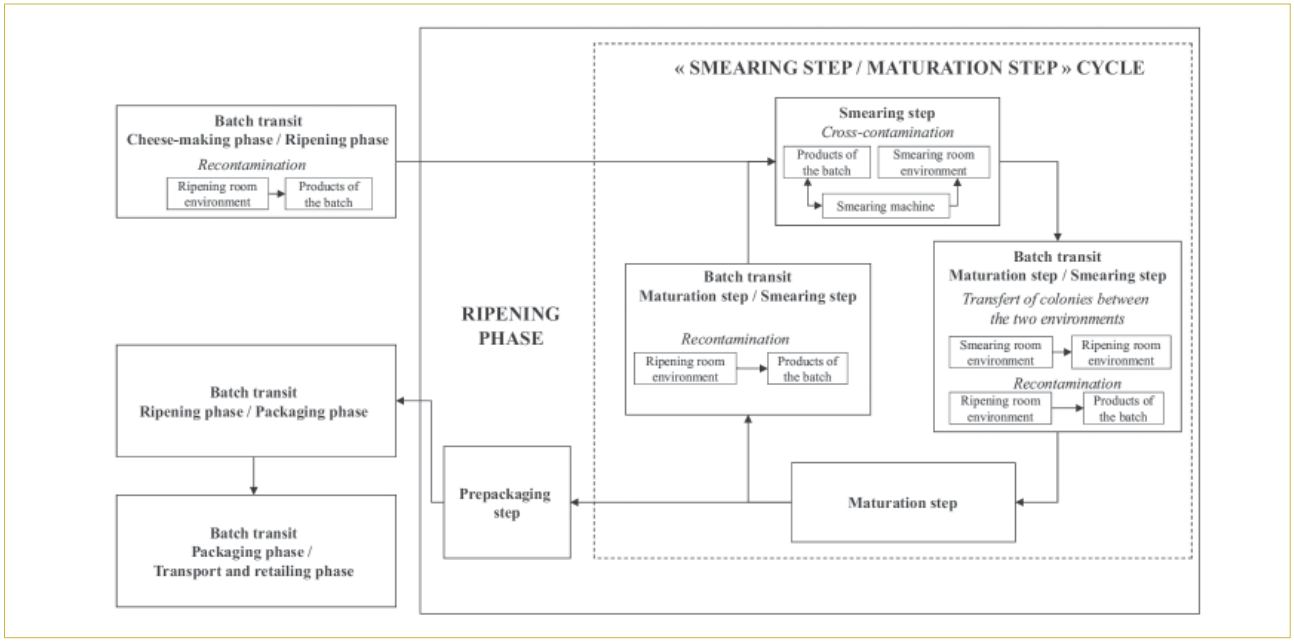

그림 6. 연질치즈 제조공정 중 2차 오염에 의한 각 단계별 오염도

하였음을 잘 나타내고 있다.

안전관리

식품산업과 공중보건으로 대별되는 산업과 관리당국의 안전관리 영역을 그림으로 나타내었다 (그림 7). 산업체의 안전관리 영역에 정상 운영 (normal operations)과 사고 (incidents)가 포함되어 있음을 알 수 있는데, 내외부 고객의 요구사항을 만족시키는 경우 관련 절차가 정상이라고 말할 수 있고 이 때 정상적인 공정에 대한 지표를 주기적으로 모니터링하는 것이 도움이 된다.

주요 표지자가 정상수준에서 벗어나는 경우 알려진 위험인자가 존재하며 허용한계치를 초과할 때 생산단계에서 사고가 발생하게 된다. 특히 상당수의 공정 표지자가 기준에서 벗어나게 되면 완제품의 품질에 영향을 주게 된다. 사고단계에서 제품 판매의 윗 단계 (상향)으로 정보를 제공해야 하며 수정절차가 진행되어야 한다. 예를 들면 공정관리 시스템이나 이력추적 시스템, 공정 표지자 등을 검토한다든가 종사원 훈련을 강화하는 등의 절차가 이루어져야 한다.

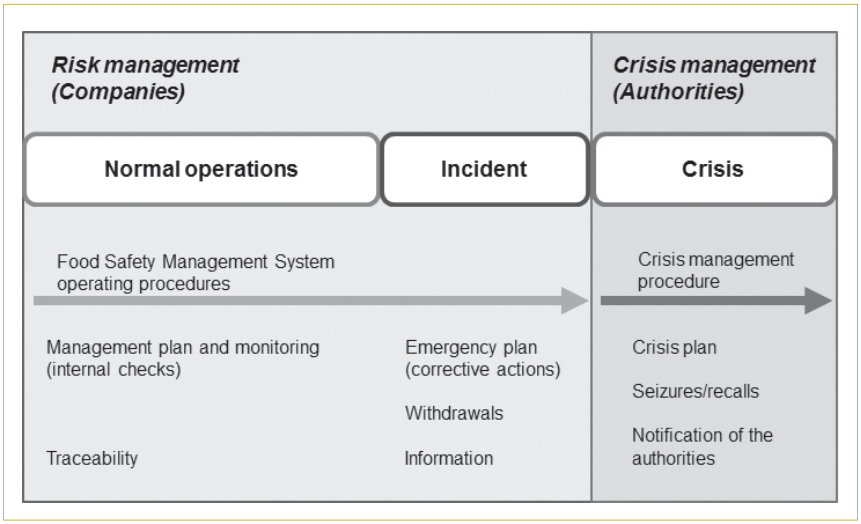

그림 7. 기업과 관리당국의 안전관리 영역

한편 관리당국의 안전관리는 위기상태를 막기 위한 안전관리영역에 위치하게 되는데 이 경우 즉각적인 조치가 취해져야 한다. 생산단계와는 달리 특정 시장의 폐쇄, 고객 감소 및 불만 증가, 아래 단계 (하향)로 조치가 취해지는 경우가 많다. 위기단계에서는 산업체와 관리당국의 협조가 필요하다. 이와 같이 정부(관리 당국)와 산업체의 안전관리를 위한 영역과 의사결정 방향은 서로 다르지만 공통적으로 과학적인 의사결정을 하고 주요 위험단계를 도출하는데 정량적 위해평가 기술이 활용될 수 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이 미생물 위해평가는 식품의 생산-소비단계 중 존재하는 문제점을 정량적 수치로 나타내어 식품 안전성을 객관적으로 판단할 수 있으며 안전성 확보를 위한 해결책을 제시할 수 있는 강력한 식품안전관리 기술이다. 기존의 정책결정을 위한 과학적 근거 제공의 역할 뿐 아니라 식품 중 병원성 미생물 발생율 또는 미생물학적 기준의 형태로 제시되는 식품안전성 목표 설정에도 활용될 수 있으며 공공분야 못지않게 산업적 활용도가 높으므로 식품과학 및 산업 분야에서 널리 이용될 수 있다. 특히 건 당 발생 환자수가 많아 식품안전관리를 위해 중요한 위치를 차지하는 단체급식 집단 식중독 안전관리에 위해평가 기술을 활용하면 보다 사전 예방적이며 정량적인 안전관리가 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국식품연구원의 연구비 지원(E0142014297)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Aziza F.T., Daudin J.J., Maffre A. and Sanna M. Risk-based approach for microbiological food safety management in the dairy industry: The case of *Listeria monocytogenes* in soft cheese made from pasteurized milk. *Risk Anal.*, 34: 56-75 (2014)

2. Codex (Codex Alimentarius Commission) (1999) Principles and Guidelines for the Conduct of Microbial Risk Assessment, CAC/GL-30. http://www.who.int/foodsafety/publications/micro/cac1999/en/ and www.codexalimentarius.net/download/standards/357/CXG_030e.pdf (accessed Feb. 26, 2015).

3. FAO/WHO. Principles and guidelines for incorporating microbiological risk assessment in the development of food safety standards, guidelines and related texts. Report of a Joint FAO/WHO consultation. Kiel, Germany (2002)

4. Havelaar A.H., Brul S., de Jong A., de Jonge R., Zwietering M.H. and ter Kuile B.H. Future challenges to microbial food safety, *Int. J. Food Microbiol.*, 139:s79-s94 (2009)

5. Kim H.J. and Koo M.S. Estimation of dietary exposure to antimicrobial resistant *Staphylococcus aureus* from pork-based food dishes. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.*, 32:91-97 (2012)

6. Membre J.M. and Lambert R.J.W. Application of predictive modelling techniques in industry : From food design up to risk assessment. *Int. J. Food Microbiol.*, 128:10-15 (2008)

7. U.S. Department of Agriculture/Food Safety and Inspection Service (USDA/FSIS) and U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Microbial Risk Assessment Guideline: Pathogenic Organisms with Focus on Food and Water. (2012)

8. Da silva Felício M.T., Hald T., Liebana E., Allende A., Hugas M., Nguyen-The C., Skoien Johannessen G., Niskanen T., Uyttendaele M. and McLauchlin J. Risk ranking of pathogens in ready-to-eat unprocessed foods of non-animal origin (FoNAO) in the EU: Initial evaluation using outbreak data (2007-2011). *Int. J. Food Microbiol.*, 195:9-19 (2015)