

수산생물 중 유해물질의 인체 노출 및 위해평가 시스템 개발

이재원¹ , 이승우¹ , 최민규² , 이현주^{1*}

¹캠아이넷(주) ICT융합연구소, ²해양수산부 국립수산물과학원

Development of Human Exposure and Risk Assessment System for Chemicals in Fish and Fishery Products

Jaewon Lee¹, Seungwoo Lee¹, Minkyu Choi², and Hunjoo Lee^{1*}

¹ICT Convergence Research Center, CHEM.I.Net, Co., Ltd., ²South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science

ABSTRACT

Background: Fish and fishery products (FFPs) unintentionally contaminated with various environmental pollutants are major exposure pathways for humans. To protect human health from the consumption of contaminated FFPs, it is essential to develop a systematic tool for evaluating exposure and risks.

Objectives: To regularly, accurately, and quickly evaluate adverse health outcomes due to FFPs contamination, we developed an automated dietary exposure and risk assessment system called HERA (the Human Exposure and Risk Assessment system for chemicals in FFPs). The aim of this study was to develop an overall architecture design and demonstrate the major features of the HERA system.

Methods: For the HERA system, the architecture framework consisted of multi-layer stacks from infrastructure to fish exposure and risk assessment layers. To compile different contamination levels and types of seafood consumption datasets, the data models were designed for the classification codes of FFP items, contaminants, and health-based guidance values (HBGVs). A systematic data pipeline for summarizing exposure factors was constructed through down-scaling and preprocessing the 24-hour dietary recalls raw dataset from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNAHES).

Results: According to the designed data models for the classification codes, we standardized 167 seafood items and 2,741 contaminants. Subsequently, we implemented two major functional workflows: 1) preparation and 2) main process. The HERA system was developed to enable risk assessors to accumulate the concentration databases sustainably and estimate exposure levels for several populations linked to seafood consumption data in KNAHES in a user-friendly manner and in a local PC environment.

Conclusions: The HERA system will support policy-makers in making risk management decisions based on a nation-wide risk assessment for FFPs.

Key words: Dietary exposure, environmental contaminants, fish and fishery products, local system, risk assessment

Received August 24, 2021

Revised September 14, 2021

Accepted September 23, 2021

Highlights:

- An automated exposure assessment system of chemicals in fish and fishery products was developed.
- A systematic data-pipeline mechanism was applied for summarizing exposure factors.
- The system can support the risk management decision based on a nation-wide risk assessment.

*Corresponding author:

ICT Convergence Research Center, CHEM.I.Net, Co., Ltd., 43, Mokdongjungang-ro, Yangcheon-gu, Seoul 07964, Republic of Korea

Tel: +82-2-2647-4930

Fax: +82-2-2647-4932

E-mail: adstar@cheminet.kr

I. 서 론

수산생물은 단백질을 비롯한 인간의 건강 유지를 위해 필수적인 주요 영양성분의 급원일 뿐만 아니라, 어업인의 어가소득 등 경제적 가치를 창출하는 매우 중요한 천연 생명자원이다. 그러나, 산업화에 따른 환경오염으로 중금속 등과 같은 유해물질

은 수질을 오염시키고, 먹이사슬을 통하여 수산생물에 노출되어, 최종적으로 그것을 섭취하는 인간에 영향을 줄 수 있는 잠재적 위해인자로서 국민들의 우려를 낳고 있다.¹⁾

수산생물 중 유해물질에 대한 식품섭취 즉 식이를 통한 노출을 정량화하는 식이노출평가와 인체노출안전기준(Health based guidance value, HBGV)를 적용하여 위해도를 결정하는

위해성평가 연구는 다양한 대상 유해물질과 수산생물 조합으로 광범위하게 수행되고 있다.²⁻⁷⁾

일반적으로 식이노출평가 모델⁸⁾은 식품 중 유해물질의 농도 자료(이하, 농도 데이터셋)와 식품을 국민들이 얼마나 섭취하는 지에 관한 섭취량 자료(이하, 섭취량 데이터셋)을 이용하여 구성하는 데, 농도·섭취량 데이터셋은 각각 국가 단위의 유해물질 모니터링 및 섭취조사 프로그램을 기반으로 생산된 자료를 정제·가공하여 활용한다.^{9,10)} 민족마다 식습관이 상이하므로 노출평가 대상 식품의 품목선정 및 섭취조사 자료에 대하여 해당 국가의 식생활패턴이 고려된 대표성 있는 자료를 사용하는 것을 원칙으로 하고 있다.¹¹⁾

대부분의 국가에서 농도 및 섭취량 데이터셋은 서로 다른 정부 부처 혹은 민간 연구기관에서 서로 다른 코드 체계로 생산되어 데이터셋간 호환성 문제가 있으며, 데이터셋이 대량으로 생산되다 보니, 이를 처리할 수 있는 유효한 컴퓨팅 수단이 필요한 실정이다.¹²⁾ 따라서, 각국의 정부기관은 자동화된 식이노출평가 처리를 위한 컴퓨터 프로그램(이하, 식이노출평가 시스템)을 개발하여 활용하고 있다.¹³⁾

동작방식 및 기술구조의 관점에서, 식이노출평가 시스템은 크게 1) 개인용 로컬 PC에서 단독으로 동작하는 응용프로그램(이하, 로컬시스템)¹⁴⁾과 2) 분산 컴퓨팅 및 관계형데이터베이스 환경에서 웹을 기반으로 동작하는 시스템(이하, 웹 시스템)¹⁵⁾으

로 구분되어 개발되고 있다.¹⁶⁾

식이노출평가 시스템에 대한 로컬시스템 개발 사례는 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)의 확률적 인체 노출 및 용량 시뮬레이션 식이 모델(Stochastic Human Exposure and Dose Simulation, SHEDS-dietary model),¹⁷⁾ 유럽 EFSA의 잔류농약 섭취모델(Pesticide Residue Intake Model, PRIMo)¹⁸⁾ 및 호주 뉴질랜드 식품기준청(Food Standards Australia New Zealand, FSANZ)의 영양 성분 데이터의 식이 모델링(DIetary Modelling Of Nutritional Data, DIAMOND)가 있다.¹⁹⁾ 한편, 웹시스템은 미국 식품의약품안전국(U.S. Food and Drug Administration, US FDA)의 웹 기반 위해평가 도구(Web based risk assessment tool, iRISK),²⁰⁾ 유럽연합 네덜란드 국립보건환경연구소(Netherlands National Institute for Public Health and the Environment, RIVM)의 몬테카를로 기반 위해성평가(Monte Carlo Risk Assessment, MCRA)²¹⁾ 및 FSANZ의 DIAMOND의 새로운 버전인 Harvest가 있으며,¹³⁾ 대한민국의 경우도 식품의약품안전처의 식품위해평가통합시스템(Monitoring Information Management System/Monitoring database and Assessment Program, MIMS/MAP)²²⁾이 있다.

본 연구는 수산생물 중 유해물질의 오염도 자료를 효과적으로 입력하고, 수산생물의 국가 섭취량자료와 연계하여 식이노

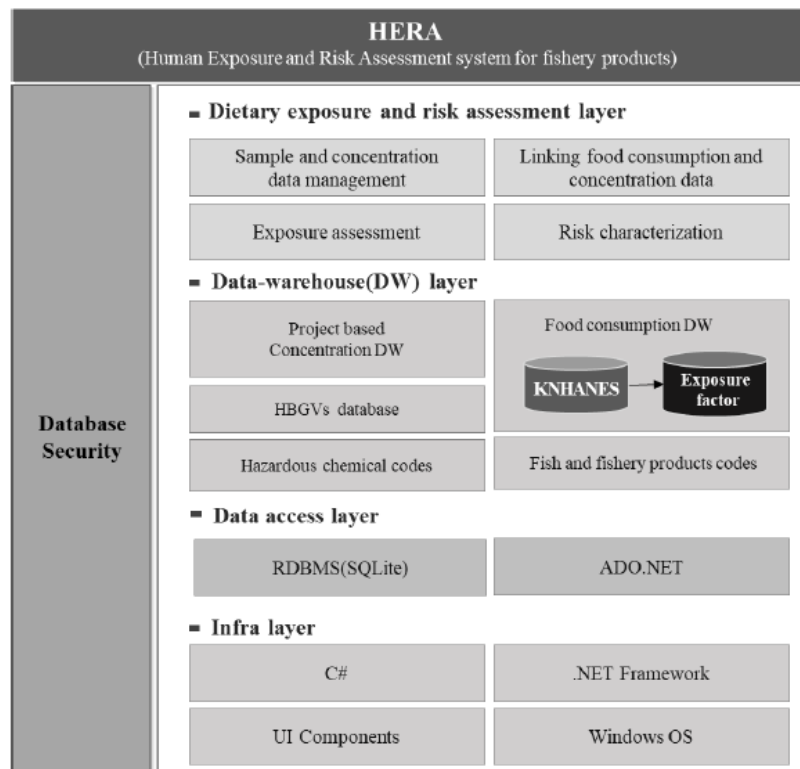


Fig. 1. The multi-layered system architecture for the implemented system

출평가 및 위해도결정 프로세스를 지원하는 로컬시스템 일명, 수산생물의 인체 노출 및 위해평가 시스템(Human exposure and risk assessment system of chemicals in fish and fishery products, HERA)의 전체 아키텍처 설계 및 주요 기능을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. HERA의 시스템 아키텍처 설계

HERA의 시스템 아키텍처는 수산생물에 노출되는 유해물질의 고유특성, 수산생물 노출매체의 분류체계, 식이노출평가 알고리즘 및 로컬시스템의 구동방식 등을 고려하여 총 4단계의 층(Layer)으로 설계를 하였다(Fig. 1).

최하위 층인 인프라 층(Infra Layer)은 로컬시스템의 근간을 이루는 4가지 요소인 운영체제, 개발언어, 프레임워크, 화면구성 컴포넌트에 대하여 각각 윈도우 운영체제(Windows OS), 씨샵(C#) 언어, 닷넷 프레임워크(.NET framework), 사용자 인터페이스 컴포넌트(UI Components)로 구성하였다.

두번째는 데이터 접근 층(Data access layer)은 데이터베이스 저장·관리를 위한 관계형 데이터베이스 관리 시스템(Relational Database Management System, RDBMS), 데이터베이스와 프로그램 연동 모듈로써 각각 SQLite, ADO.NET를 채택하였다. 상기의 2개의 층에서 사용된 상용도구들에 대한 세부 사양, 제조사 및 버전은 표로 정리하여 제시하였다(Table 1).

세번째는 데이터웨어하우스 층(Data-warehouse layer)이다. 데이터웨어하우스(Data-warehouse, DW)는 데이터 분석에 최적화하여 구획화하고, 정리해둔 일종의 데이터 저장소(소위, 창고)를 의미하며, HERA의 DW층은 노출평가 연산에 최적화되어 적용될 수 있도록 구조화하여 저장한 데이터셋이다. DW는 노출평가의 대상이 되는 유해물질 코드와 수산생물의 분류체계·품목 코드체계를 기반으로, 유해물질별로 공신력 있는 기관별 HBGVs 데이터베이스가 구축되도록 구성하였다. 마지막으로, DW 층의 핵심인 농도 데이터셋 DW (Concentration DW), 식품섭취량 데이터셋 DW (Food consumption DW)로 구성하였다.

최상위 층은 식이 노출 및 위해성 평가 층(Dietary exposure and risk assessment layer)은 4가지 컴포넌트로 구성하였다. 첫 번째는 시료 및 농도 데이터 관리(Sample and concentration data management) 컴포넌트로서 수산생물의 세부적인 시료정보 및 시료별로 측정된 농도 결과값 데이터를 관리한다. 두 번째는 식품섭취량 및 농도 데이터 연계(Linking food consumption and concentration data) 컴포넌트로 농도 데이터셋과 섭취량자료의 품목코드를 상호 연결한다. 세 번째는 노출평가(Exposure assessment) 컴포넌트로서 수산생물 중 화학물질의 노출량 산출 및 연산결과를 출력하는 역할을 담당한다. 끝으로 위해도 결정(Risk characterization) 컴포넌트는 유해물질의 인체 노출량을 HBGV값과 연계하여 위해도를 출력하는 기능을 수행한다.

2. 수산생물 분류 및 유해물질 코드 표준화

수산생물의 분류코드 체계는 향후 수산생물별 노출기여율의 식별의 용이성을 위하여 품목분류와 품목으로 계층화하여 코드화 할 수 있도록 데이터 모델링을 실시하였다. 특히, 품목 분류 체계는 수산생물의 특성 즉 수산생물종(예, 어류, 패류 등), 서식 특성(예, 회유성, 저서성 등) 및 생산방법(예, 자연산, 양식산 등)을 분류하여 다단계로 입력할 수 있도록 설계하였다. 또한, 유해물질 코드는 고유식별자로서 CAS No.를 비롯한 국문 및 영문명칭과 약어를 구성하였고, HBGV는 유해물질별로 공신력 있는 해당 분야 기관, 종류 등의 값을 수록하도록 데이터베이스 컬럼을 설계하였다(Table 2).

3. 수산생물의 노출계수 산출을 위한 데이터파이프라인 설계

수산생물의 섭취량 데이터셋은 대한민국의 대표적인 식이 조사 프로그램인 질병관리청의 국민건강영양조사 식품섭취조사 원시자료(이하, 국건영)를 이용하여 설계하였다. 국건영은 연간 약 7,000여명의 조사대상자들을 대상으로 약 4,000여 식품을 대상으로 연간 약 500,000건의 데이터를 산출하고 있으며, 3개년간의 자료를 기수로 하여 통합하고 이를 활용한다. 따라서, 기수 단위로 약 150만여건의 대규모 자료가 생성되므로, 원시 자료를 그대로 활용할 경우, 노출평가 시 상당한 성능 상의 문

Table 1. Specification for development environments used at infra and data access layer

No	Environment	Specification	Manufacturer	Version
1	Language	C#	Microsoft	5.0
2	Framework	.NET Framework	Microsoft	4.5
3	Operating System (OS)	Windows	Microsoft	Windows 7 SP1 or Later
4	UI Components	DevExpress	Developer Express	16.1.7
5	RDBMS	SQLite	SQLite Consortium	1.0.103

Table 2. Columns and their definition for major standardized entities

Entity name	No	Column name	Description	Data type (maximum length)
Fish and fishery products (FFPs)	1	FFPS_CD	Item code for FFPs	Text (12)
	2	FFPS_NM	Item name for FFPs	Text (255)
	3	CLS_CD	Classification code for FFPs	Text (10)
	4	CLS_NM1	1st classification name for FFPs	Text (150)
	5	CLS_NM2	2nd classification name for FFPs	Text (150)
	6	CLS_NM3	3rd classification name for FFPs	Text (150)
	7	CLS_NM4	4th classification name for FFPs	Text (150)
	8	CLS_NM5	5th classification name for FFPs	Text (150)
	9	RMK	Remarks	Text (255)
Hazardous chemical (HC)	1	CHEM_CD	Chemical code for HC	Text (6)
	2	CHEM_CLS_CD	Chemical classification code for HC	Text (1)
	3	CHEM_NM_KOR	Korean HC name	Text (255)
	4	CHEM_NM_ENG	English HC name	Text (255)
	5	CHEM_NM_ABBR	Abbreviation for HC	Text (50)
	6	CAS_NO	The Chemical Abstracts Service number for HC	Text (100)
	7	RMKS	Remarks	Text (255)
Health-based guidance value (HBGV)	1	CHEM_CD	Applied chemical code	Text (6)
	2	HBGV_ORG_CD	The unique code for the organization information that issued HBGV	Text (6)
	3	HBGV_TYP	The type of the HBGV (e.g., Tolerable daily intake ((TDI))	Text (2)
	4	HBGV_VAL	The numeric value for HBGV	Number
	5	HBGV_UNIT_CD	The unit for HBGV	Text (3)
	6	HBGV_REF	The reference for HBGV	Text (255)

제점을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 수산생물의 노출평가에 요구되는 시나리오별 노출계수들에 대하여 쉽게 연산할 수 있는 형태로 통계량들을 미리 산출하는 데이터파이프라인(Data-pipeline) 기법을 적용하였다. 데이터파이프라인은 원시자료원으로부터 데이터분석이 용이한 DW로 추출, 변환 및 로딩 등을 수행하는 빅데이터 관련 기법이다. HERA의 데이터파이프라인은 1) 국건영 24시간 회상 식이 조사 원시자료로부터 수산생물 섭취량 자료 추출, 2) 성별·인구집단별 섭취량 통계량 산출을 통한 변환작업, 3) 섭취량 통계량 자료 저장 등 3단계 프로세스로 모델링을 실시하였고, 최종적으로 규모 축소된 노출계수 DW를 산출하도록 모델링을 실시하였다.

III. 결 과

1. HERA의 기초 데이터베이스 구축

II.2절의 수산생물 분류 및 유해물질 코드 표준화에서 설계한 데이터 모델에 의거하여, 테이블 및 표준코드 데이터를 생성하였다. 노출평가의 대상 매체인 수산생물 유형과 품목은 각각

총 13분류, 167건의 수산생물에 대하여 코드를 구축하였다. 유해물질은 수산생물에 노출가능한 2,741개 물질에 대한 식별자정보 및 고유 코드들을 생성하고, 프로그램내에 장착하였다. HBGVs는 평가 시 이용자가 직접 최신의 정보를 찾아 평가 전에 데이터베이스에 입력할 수 있도록 하였다. 또한, II.3절의 노출계수 산출 데이터파이프라인 구축을 통하여, 국건영 내부에 수록된 166품목의 수산생물에 대하여 전체 및 섭취 인구집단에 대하여, 성별·연령그룹별로 총 4,151건의 섭취량 관련 통계량을 미리 산출하여, 연산 성능을 최적화할 수 있도록 노출계수 DW를 구축하였다.

2. HERA의 전체 시스템 기능 워크플로우

수산생물의 식이 노출평가 및 위해성 평가를 단계적으로 지원하는 로컬PC의 윈도우 환경에서 독립적으로 구동되는 HERA 프로그램을 구현하였다(Fig. 2). HERA 프로그램의 거시적인 기능 워크플로우는 사전 설정을 담당하는 준비 프로세스(Preparation process)와 모니터링 자료를 입력한 후, 노출량 산출 및 위해도 결정 보고서를 다면적으로 출력하는 메인 프로세

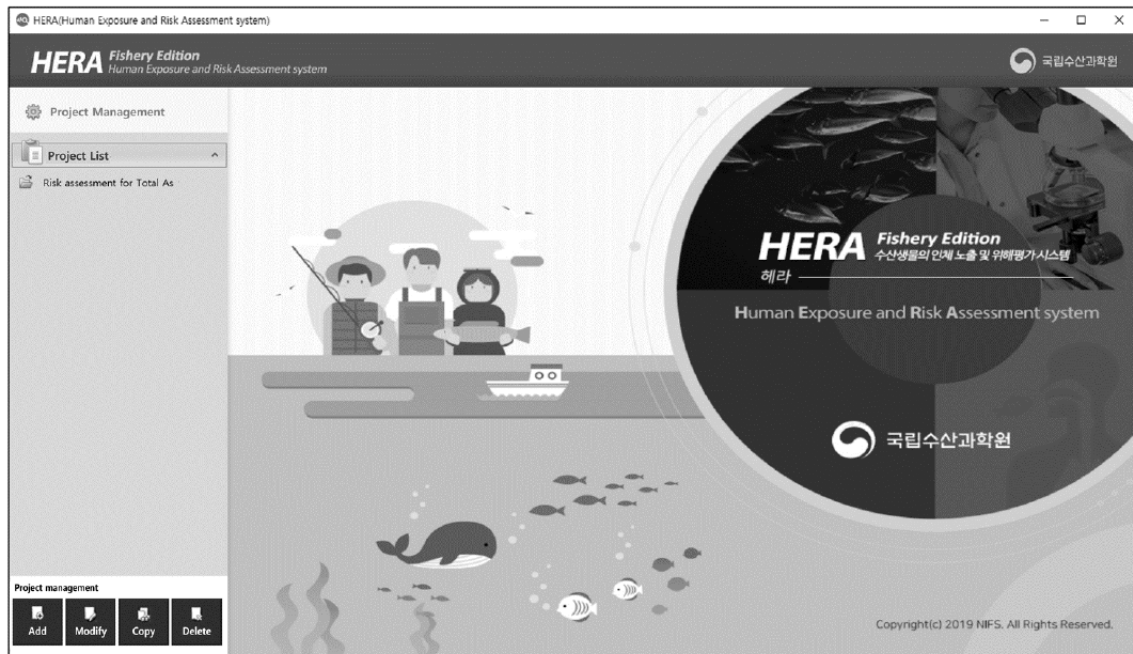


Fig. 2. The main screen of the implemented system

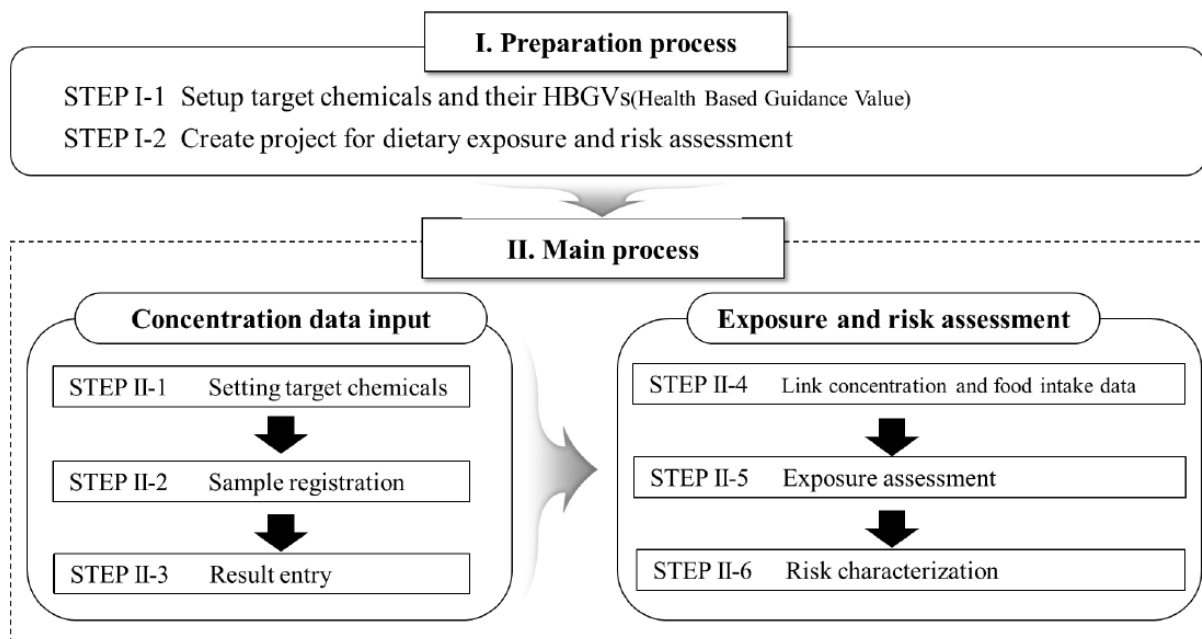


Fig. 3. The function process and workflow of the implemented system

스(Main process)로 구성하였다(Fig. 3). 각 프로세스내에 속하는 세부 기능의 단계들은 다음에 상세히 설명한다.

3. HERA의 준비 프로세스 구현 결과

노출 및 위해평가에 앞서 사전 데이터 설정을 하는 프로세스

로 다음과 같은 두 가지 단계로 구성하였다.

3.1. (1단계) 대상 물질의 기본정보 및 HBGVs값의 설정
평가 대상 유해물질의 기본 식별정보와 그 물질의 HBGV 값을 입력하여 설정하는 기능을 구현하였다. 기본 식별정보는

국·영문 보고서 산출에 이용되며, 약어는 데이터 입력 폼 및 표 출력 시 활용하도록 하였다. 또한, HBGVs는 출처기관별로 값의 유형(예, Provisional Tolerable Weekly Intake (PTWI) 등), 기준 값 및 단위 등을 등록하도록 구현하여, 향후 출처기관별로 위해도를 산출하여 비교할 수 있도록 함은 물론 기준 값의 유형에 따라 물론 유해지수, 노출안전역 등 위해도 산출방법이 자동 결정되도록 구현하였다.

3.2. (2단계) 노출 및 위해평가를 위한 프로젝트 생성

HERA는 위해평가자가 수산생물의 농도 데이터셋을 데이터베이스화 할 수 있도록, 파일을 저장하는 폴더 개념으로 단일 농도 데이터셋을 프로젝트 단위로 관리할 수 있도록 구현하였다. 프로젝트의 메타 데이터(예, 생산연도, 책임자 등)를 입력하여 향후 노출평가 자료원 선정 시 식별이 가능한 수준으로 구현하였다.

4. HERA의 메인 프로세스 구현 결과

메인 프로세스는 1) 수산생물 중 농도 데이터 입력 (Concentration data input)과 2) 노출 및 위해평가(Exposure and risk assessment) 서브 프로세스로 진행되며, 각 서브 프로세스별 3단계의 절차로 다음의 6가지 기능 단계로 구현하였다 (Fig. 3).

4.1. (1단계) 평가대상 유해물질의 설정

3.2절의 과정을 통하여 수산생물의 농도 데이터셋 프로젝트가 생성되면, 모니터링을 수행한 유해물질 및 분석방법을 입력한다. 모니터링 대상 물질을 선정하고, 물질별로 노출 평가 시 불검출 자료 처리를 위한 검출한계(Limit of Detection, LOD), 정량한계(Limit of Quantification, LOQ) 등의 분석 조건 및 방법을 입력하도록 구현하였다.

4.2. (2단계) 시료정보 등록

본 단계는 모니터링을 통하여 측정된 대상 수산생물 시료정보를 입력하는 단계로 개별시료에 관한 명칭, 품목코드, 원산지, 시료 채취 지역 등에 관한 정보를 등록한다. 이때, 사용자 편의성을 고려하여 품목코드와 원산자가 동일한 종류의 시료는 일괄 입력이 가능하도록 시스템을 구현하였다.

4.3. (3단계) 시료 별 농도 결과값 입력

2단계에서 시료정보가 입력되면, 수산생물의 시료 별 유해물질에 대하여 모니터링을 수행한 농도 결과값을 입력한다. 이때, 불검출(Not detected, ND) 데이터의 경우 출력 옵션(ND output)을 통하여 ND값을 0, 1/2 Lower of detection (LOD) 및 LOD값으로 치환하여 노출평가 시 낙관적 혹은 보수적으로 농도 값을 입력할 수 있도록 시스템을 구현하였다.

4.4. (4단계) 농도 및 식품섭취량 데이터셋 연계

농도와 식품섭취량 데이터셋은 각각 위해평가자, 국민영 등식이 조사 자료에서 생산되므로 수산생물의 품목 집합이 서로 다르다. 따라서, 식이 노출 평가 과정에서 수산생물의 품목코드에 대하여 특정 수산생물의 식품섭취량의 존재 유무 및 모니터링을 수행한 수산생물과 식품섭취량 데이터셋 내의 품목을 매핑하는 작업은 매우 중요하다. 본 단계는 농도 데이터셋내 존재하는 식품을 출력하고, 각 품목별로 식품섭취량 데이터셋의 식품을 매핑하는 과정을 지원한다.

4.5. (5단계) 노출 평가

수산생물의 품목별 노출량을 산출하는 단계이다. 노출량은 기본값으로 물질별로 연령그룹 및 성별로 평균 값을 출력한다. 또한, 4가지 사용자 옵션 1) 대상물질 선택, 2) 분포 통계량, 3) 출력 단위 및 4) 인구집단을 제공한다. 대상 물질 선택 옵션을 이용하여 노출평가의 대상이 되는 물질의 변경할 수 있다. 통계량 옵션은 평균값, 극단 값(95백분위수, 97.5백분위수, 99백분위수)를 선택할 수 있다. 노출량 출력 단위 옵션은 ppm 혹은 ppb단위 등으로 변경하여 출력할 수 있으며, 인구집단은 조사 대상자 전체와 섭취자 그룹을 대상으로 산출방식을 선택할 수 있다.

4.6. (6단계) 위해도 결정

본 단계는 수산생물의 유해물질별 노출량에 HBGV값을 적용하여 위해도를 산출하여 출력하는 단계이다. 노출량과 관련된 옵션은 5단계와 모두 동일하게 적용되며, 전처리 프로세스에서 입력한 HBGV값을 적용하여 위해도를 산출할 수 있다. 또한, 모든 단계에서 출력된 자료는 하단의 스프레드 파일형식으로 다운로드 받아 다양한 위해평가 보고서 작성에 활용할 수 있도록 하였다.

IV. 고 찰

수산환경 생태계의 유해물질 오염상태 및 국민의 식생활 습관은 매년 변하고 있다. 따라서, 유해물질에 대한 국가적 차원에서 다양한 인구집단에 대한 정기적인 노출 수준의 파악은 수산생물의 유해물질에 대한 기준규격 마련 및 유해물질 저감정책 마련을 위해 매우 중요하다.²³⁾ 그러므로, 수산생물 중 유해물질에 대한 오염도 자료를 축적하고, 지속적인 노출량 및 위해도의 변화를 신속하고 편리하게 평가⁶⁾ 할 수 있는 수산생물의 유해물질의 노출 및 위해도 평가 시스템의 마련은 필수적이다. 현재 HERA는 국민영 최신 자료를 이용하여 노출계수가 산출되어 적용되어 있으나, 매년 국민영 자료가 신규로 발행되므로, 기수 내지는 차수 발행 시점에 맞추어 노출계수의 업데이트 정책 마련하고, 실행할 필요가 있다.⁹⁾ 다만, 현재의 HERA는 노

출평가에 초점을 맞추었기 때문에, 기준치인 HBGV에 대한 정보만을 관리하고 있다. 그러나, 향후 수산생물별 유해물질 잔류기준 등 오염도 기준치를 입력 후 농도 데이터 입력 시 잔류기준 초과 수산생물을 쉽게 검색할 수 있도록 함으로써 규제기관의 수산생물의 오염수준 안전관리를 지원 기능을 강화할 필요가 있다.

HERA는 정보기술 측면에서 웹시스템이 아닌 로컬시스템으로 개발되었다. 웹시스템은 서버를 통하여 다중 사용자가 통합적으로 데이터베이스를 구축할 수 있고, 매번 컴퓨터에 프로그램을 설치하지 않아도 되는 장점을 가지고 있는 반면 고가의 인적·물적 자원이 소요되고, 기능개발 및 개선에 소요 공수가 로컬시스템에 비해 상대적으로 많이 소요된다.²⁴⁾ 반면, 로컬시스템은 입력이 편리하고, 빠른 프로토타이핑 개발이라는 장점이 있어, DIAMOND 등은 노출평가 프로그램의 초기 모델에서 채택된다. 하지만, 모델이 일정 수준이상 안정화되면 로컬시스템을 다중 사용자 이용이 용이한 웹시스템으로 전환 개발하여 고도화하고 있다.¹³⁾ HERA는 웹시스템의 인프라가 준비되지 않은 상황에서 단 기간내에 초기 모델이 개발될 필요성이 있어 로컬시스템으로 개발되었다. 그러나, HERA는 중장기적으로 컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어 인프라 등의 자원 계획 수립을 통하여 웹시스템으로 고도화 할 필요가 있을 것으로 생각한다.

또한, 현재 HERA는 수산생물 중 유해물질의 위해도만을 제시하고 있다. 그러나, 최근 수산생물의 위해성 평가 연구는 유해물질의 위해성과 수산생물의 영양기능적 유용성을 함께 제시하고 있다.²⁵⁻²⁶⁾ 예를 들어, 특정 어류에 함유되어 있는 불포화지방산인 오메가-3 지방산 등의 함량을 함께 제시함으로써²⁷⁻²⁹⁾ 정책결정자가 단순히 유해물질 저감을 위해 수산물 섭취를 금지시키는 것이 아니라 수산생물의 유용성에 따른 건강상의 긍정적 영향을 고려한 균형적 관점에서 의사결정을 할 수 있도록 하고 있다. 따라서, HERA는 향후 수산생물의 유용성 평가 모델을 확대 개발할 필요가 있으며, 궁극적으로 위해성-유용성(Risk-Benefit)을 동시에 평가할 수 있는 체계로 발전시켜야 할 것으로 생각된다.

V. 결 론

수산생물에 대한 유해물질의 오염도 자료를 체계적으로 축적하고, 수산생물의 국민영 섭취량자료와 연계하여 노출 경로 중 식이를 통한 노출량 및 위해도를 신속하고 정확하게 평가할 수 있는 로컬시스템 HERA를 개발하였다. 우려할 수준의 위해도가 아닌 경우 국민들의 공연한 불안감에 따른 국내 수산생물의 어가소득 감소를 초래할 수 있고, 위해도가 우려되는 수준의 경우 정부의 신속한 위해관리 정책 마련이 필요하므로 HERA는 국가 단위 위해평가 도구로써 지속가능한 정책 의사결정 도구로 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 국립수산물학원 수산과학연구사업(R2019051)의 지원으로 수행된 연구입니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Duran A, Tuzen M, Soylyak M. Assessment of trace metal concentrations in muscle tissue of certain commercially available fish species from Kayseri, Turkey. *Environ Monit Assess.* 2014; 186(7): 4619-4628.
- Djedjibegovic J, Marjanovic A, Tahirovic D, Caklovica K, Turalic A, Lugusic A, et al. Heavy metals in commercial fish and seafood products and risk assessment in adult population in Bosnia and Herzegovina. *Sci Rep.* 2020; 10(1): 13238.
- Olmedo P, Pla A, Hernández AF, Barbier F, Ayouni L, Gil F. Determination of toxic elements (mercury, cadmium, lead, tin and arsenic) in fish and shellfish samples. Risk assessment for the consumers. *Environ Int.* 2013; 59: 63-72.
- Ferrante M, Zanghi G, Cristaldi A, Copat C, Grasso A, Fiore M, et al. PAHs in seafood from the Mediterranean Sea: an exposure risk assessment. *Food Chem Toxicol.* 2018; 115: 385-390.
- Jeong JY, Choi CW, Ryeom TK, Cho KH, Park SR, Shin HS, et al. Analysis and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seafood from oil contaminated bay. *Anal Sci Technol.* 2010; 23(2): 187-195.
- Lee SG, Kang EH, Kim AH, Choi SH, Hong DH, Karaulova EP, et al. Concentrations and risk assessment of heavy metal in shellfish and crustacean collected from Vladivostok Area in Russia. *Korean J Fish Aquat Sci.* 2019; 52(5): 452-460.
- Im R, Youm HC, Kim DW, Bae HS, Ahn SJ, Ryu DY, et al. Dietary exposure assessment of arsenic in Korean adults. *Environ Health Toxicol.* 2010; 25(4): 307-314.
- World Health Organization. Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food. Geneva: World Health Organization; 2009. p.6-11~6-12.
- Kwon N, Suh J, Lee H. Data cleaning and integration of multi-year dietary survey in the Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES) using database normalization theory. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(4): 298-306.
- Yoon H, Seo J, Kim T, Kim J, Jo A, Lee B, et al. Development of Korean exposure factors for children in Korea. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(3): 167-175.
- Xue J, Zartarian VG, Liu SV, Geller AM. Methyl mercury exposure from fish consumption in vulnerable racial/ethnic populations: probabilistic SHEDS-Dietary model analyses using 1999-2006 NHANES and 1990-2002 TDS data. *Sci Total Environ.* 2012; 414:

- 373-379.
12. Lee H, Lee K, Park JY, Min SG. Korean Ministry of Environment's web-based visual consumer product exposure and risk assessment system (COPER). *Environ Sci Pollut Res Int.* 2017; 24(14): 13142-13148.
 13. Boon PE, Cunningham J, Moy GG, Ormerod D, Peterson BJ, Reuss R. Automated programs for calculating dietary exposure. In: Moy GG, Vannoort RW. editors. *Total Diet Studies*. New York: Springer; 2013. p.445-452.
 14. Guo Z. Development of a Windows-based indoor air quality simulation software package. *Environ Model Softw.* 2000; 15(4): 403-410.
 15. Fielding RT, Taylor RN. Principled design of the modern Web architecture. Paper presented at: Proceedings of the 2000 International Conference on Software Engineering. ICSE 2000 the New Millennium; 2000 June 9; Limerick, Ireland. New York: ACM Transactions on Internet Technology, 2002. p. 115-150.
 16. Kang HS, Kwon NJ, Jeong J, Lee K, Lee H. Web-based Korean maximum residue limit evaluation tools: an applied example of maximum residue limit evaluation for trichlorfon in fishery products. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019; 26(7): 7284-7299.
 17. Xue J, Zartarian V, Wang SW, Liu SV, Georgopoulos P. Probabilistic modeling of dietary arsenic exposure and dose and evaluation with 2003-2004 NHANES data. *Environ Health Perspect.* 2010; 118(3): 345-350.
 18. European Food Safety Authority (EFSA), Brancato A, Brocca D, Ferreira L, Greco L, Jarrar S, et al. Use of EFSA pesticide residue intake model (EFSA PRIMo revision 3). *EFSA J.* 2018; 16(1): e05147.
 19. DiNovi M. International Peer Review of FSANZ Dietary Modelling Team Practices and Procedures. *Majura: Food Standards Australia & New Zealand*; 2007. p.4-10.
 20. Chen Y, Dennis SB, Hartnett E, Paoli G, Pouillot R, Ruthman T, et al. FDA-iRISK--a comparative risk assessment system for evaluating and ranking food-hazard pairs: case studies on microbial hazards. *J Food Prot.* 2013; 76(3): 376-385.
 21. van der Voet H, de Boer WJ, Kruisselbrink JW, Goedhart PW, van der Heijden GW, Kennedy MC, et al. The MCRA model for probabilistic single-compound and cumulative risk assessment of pesticides. *Food Chem Toxicol.* 2015; 79: 5-12.
 22. Jeong DI, Kang HS, Hwang MS, Hwang IG, Min SG, Lee H. The trend of monitoring database and risk assessment systems for food chemical in national and regional levels. *Safe Food.* 2015; 10(3): 3-11.
 23. Kim JA, Jo IS, Shin Y, Jang JI, Kim SJ, Jung JH, et al. Analysis and risk assessment on arsenic, chrome, and nickel in dried marine products. *J Food Hyg Saf.* 2021; 36(2): 135-140.
 24. Duan Y, Edwards JS, Xu MX. Web-based expert systems: benefits and challenges. *Inf Manag.* 2005; 42(6): 799-811.
 25. Vilavert L, Borrell F, Nadal M, Jacobs S, Minnens F, Verbeke W, et al. Health risk/benefit information for consumers of fish and shellfish: FishChoice, a new online tool. *Food Chem Toxicol.* 2017; 104: 79-84.
 26. Domingo JL. Nutrients and chemical pollutants in fish and shellfish. Balancing health benefits and risks of regular fish consumption. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2016; 56(6): 979-988.
 27. Domingo JL, Bocio A, Falcó G, Llobet JM. Benefits and risks of fish consumption Part I. A quantitative analysis of the intake of omega-3 fatty acids and chemical contaminants. *Toxicology.* 2007; 230(2-3): 219-226.
 28. Domingo JL, Bocio A, Martí-Cid R, Llobet JM. Benefits and risks of fish consumption Part II. RIBEPEIX, a computer program to optimize the balance between the intake of omega-3 fatty acids and chemical contaminants. *Toxicology.* 2007; 230(2-3): 227-233.
 29. Domingo JL. Omega-3 fatty acids and the benefits of fish consumption: is all that glitters gold? *Environ Int.* 2007; 33(7): 993-998.

〈저자정보〉

이재원(선임연구원), 이승우(주임연구원),
최민규(해양수산연구원), 이현주(대표이사)