

## 대표인 개념 도입에 따른 확률론적 선량평가 시 국내 원자력발전소 주변 일반인 섭취선량 변화 분석

김지우<sup>1</sup>, 진용호<sup>1</sup>, 곽민우<sup>1</sup>, 김혁재<sup>1</sup>, 김광표<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 원자력공학과

## Analysis of the Ingestion Dose Change of the General Public around Korean Nuclear Power Plants by Applying Probabilistic Dose Assessment Methodology Based on Representative Person Concept

Ji Woo Kim<sup>1</sup>, Yong Ho Jin<sup>1</sup>, Min Woo Kwak<sup>1</sup>, Hyeok Jae Kim<sup>1</sup> and Kwang Pyo Kim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoung-Daero, Giheoung-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 17104, Republic of Korea

**Abstract** The International Commission on Radiological Protection recommended the representative person concept and the newly proposed probabilistic dose assessment methodology. As a probabilistic methodology is newly proposed, it is necessary to analyze the tendency of change in dose when applying the methodology. Existing dose assessment experience showed that over 90% of the dose was due to food ingestion during normal operation of nuclear power facilities, and therefore, the tendency of change in dose can be judged through the ingestion dose assessment. In this study, probabilistic dose assessment was performed on a trial basis for the ingestion exposure pathways. Then, the values were compared with the deterministic dose assessment results to analyze the change trends of dose. Factors such as source term, exposure pathway, atmospheric dispersion factor, and intake were considered in the dose assessment. A single APR-1400 unit was assumed as the source term. The exposure pathways were selected based on the model specified in the domestic regulatory guidelines. The atmospheric dispersion factor was assessed using the XOQDOQ code for the actual agricultural production area. For intake, domestic data was analyzed based on raw data from the National Health and Nutrition Examination Survey. Probabilistic dose assessment was performed by applying the Monte Carlo methodology to the analyzed intake distribution. As a result of the probabilistic dose assessment, the ingestion dose was  $5.56 \times 10^{-3}$  mSv  $y^{-1}$ , which was 2.3% smaller than the deterministic dose assessment result. These differences appeared mainly for the younger age groups and the exposure pathways related to liquid effluents and were judged to be due to the small number of samples and wide variation in intake distribution. It is judged that it is necessary to systematize the distribution data of variables such as intake for more accurate probabilistic dose assessment in the future. The results of this study can be used as basic data when introducing the representative person concept in Korea in the future.

**Key words:** Representative person, Probabilistic dose assessment, Ingestion dose, ICRP 103

<http://www.ksri.kr/>

Copyright © 2022 by  
Korean Society of Radiation Industry

\*Corresponding author. Kwang Pyo Kim

Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr

Received 6 December 2022 Revised 16 December 2022 Accepted 21 December 2022

## 1. 서론

국제방사선방호위원회(ICRP)는 원자력이용시설 주변 주민에 대한 방사선량 평가 시 보수성을 유지하면서도 합리적인 선량평가를 위해 대표인 개념의 사용을 권고하였다. 그리고 대표인 개념을 적용한 선량평가 방법론으로 결정론적 방법론과 확률론적 방법론을 제시하였다[1,2]. 대표인은 보다 높은 수준으로 피폭하는 개인들이 받는 대표적인 선량을 피폭하는 개인을 의미하며 결정집단의 평균 구성원에 해당하는 개인으로 정의된다. 결정론적 방법론은 선량평가 인자에 대해 단일한 값을 사용하여, 상대적으로 쉽고 빠르게 결과를 도출할 수 있다. 그리고 확률론적 방법론은 방사성핵종 농도, 습관자료 등 선량평가 인자에 대해 데이터의 분포를 사용하며, 인자의 불확실성을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

ICRP에서는 확률론적 대표인 선량평가 시 인자들의 분포를 조합하여 선량 발생확률에 따른 선량 범위의 조합분포를 도출할 것을 제시하였다. 확률론적 선량평가 시 도출한 조합분포의 95백분위 이상의 값을 대표인 선량으로 정의할 것을 제시하였다[1]. 국제원자력기구(IAEA)에서는 방사선원에 대한 확률론적 안전성 평가(PSA) 기술의 연구 사례를 조사하였다. PSA는 중대사고와 같은 외부 재해에 대해 이루어지며 확률론적 안전성 평가 시 안전 중요도가 낮거나 정보가 제한적인 인자에 대해 보수적인 값을 대신 사용할 수 있음을 제시하였다[3]. Assel Batu 등은 비상상황에서 작업자에 대한 확률론적 선량평가를 수행하였다. 선량평가 수행 시 작업 시간, 선원과 거리 등을 정규분포로 가정하고 분포를 조합하여 선량평가를 수행하였다[4]. 서현수 등은 대표인 개념 도입 시 습관자료 변경에 따른 선량 변화를 분석하였다. 대표인 개념을 적용한 선량평가 시 결정론적 선량평가 방법론을 활용하여 선량평가를 수행하였다[5].

기존 선량평가 경험에서, 원자력발전소 정상운영 시 방사성유출물에 대한 결정론적 선량평가 결과 피폭경로 중 섭취경로에 의한 선량은 유효선량의 약 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다[6-8]. 따라서 섭취선량 평가를 통해 원자력발전소 주변 주민 유효선량 평가 결과 변화에 대한 경향성을 판단할 수 있다.

국내의 경우 원자력이용시설 주변 주민선량평가 시 결정론적 방법론을 활용하고 있다[6-8]. 국내 규제체계 내

대표인 개념을 도입할 경우 결정론적 방법론 외에도 확률론적 방법론이 함께 도입될 수 있다. 국내 규제체계 내 ICRP 103 권고를 도입하려는 노력이 진행 중에 있으며, 이에 따라 선량평가 방법론 중 새롭게 제시된 확률론적 선량평가 방법론의 적용 시 방법론 변경에 따른 주민 선량 변화를 파악해야 한다.

따라서 본 연구에서는 ICRP 103 권고의 대표인 개념 및 확률론적 선량평가 방법론 적용에 따른 선량 변화 경향성을 파악하기 위해, 시범적으로 원자력발전소 정상운영 시 주변 일반인의 섭취선량 평가를 수행하였다. 이를 위해 섭취선량 평가 시 선원항, 피폭경로, 대기확산인자, 섭취량 등 인자의 데이터를 조사, 분석하였다. 그리고 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 시범적으로 확률론적 선량평가를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 선원항 설정

원자력발전소 정상운영 시 기체상, 액체상 방사성유출물이 방출된다. 원자력발전소 주변 일반인에 대한 선량평가 수행 시 연간 방사성유출물을 선원항으로 설정할 수 있다. 원자력발전소는 APR-1400 원전 1개 호기를 가정하였으며, APR-1400 설계인증문서 상에 제시된 원전 정상운영 중 예상되는 방사성유출물을 선원항으로 설정하였다[9].

### 2.2. 피폭경로 설정

Table 1에 방사성유출물 배출경로별 섭취선량 평가 시 고려한 피폭경로를 나타내었다. 피폭경로는 국내 규제지침에 명시된 모델을 기반으로 기체상, 액체상 유출물에 의한 피폭경로를 고려하였다[10]. 본 연구에서는 섭취선량 평가를 수행하였으며, 이에 따라 시범적 선량평가 시 1) 농·축산물 섭취, 2) 수산물 섭취에 의한 내부피폭 경로를 고려하였다. 농·축산물은 총 9개 식품군으로, 수산물은 4개 식품군으로 구성되어 있다. 원자력발전소의 경우 해양으로 모든 액체상 방사성유출물을 방출한다고 가정하였다. 이에 따라 액체상 유출물에 대해 오염된 물을 관개수로 활용하는 경우 농·축산물 섭취 및 음용수 섭취 등 피폭경로는 고려하지 않았다.

**Table 1.** Exposure pathways considered in this study

Effluent type	Exposure pathways
Gaseous effluents	Ingestion of agricultural products
	Ingestion of livestock products
Liquid effluents	Ingestion of fish
	Ingestion of shellfish
	Ingestion of mollusks
	Ingestion of algae

### 2.3. 대기확산인자 평가

농·축산물 섭취선량 평가 시 음식물 내 방사능 농도 평가를 위해 대기확산인자, 침적인자를 활용하였다. 대표인 개념을 적용한 선량평가를 위해서는 실제 농산물 생산지역을 고려해야 한다. 따라서 대기확산인자 평가 시 지적편집도 등을 활용하여 실제 원자력발전소 주변 16방위별 농산물 생산지역 위치를 확인하였다. 그리고 해당 농산물 생산지역에 대해 XOQDOQ 전산프로그램을 활용하여 대기확산인자, 침적인자를 평가하였다. 대기확산인자, 침적인자는 보수성을 위해 선정 지점 중 대기확산인자 및 침적인자 값이 가장 높은 지점의 대기확산인자를 사용하였다.

### 2.4. 섭취량 분석

본 연구에서는 섭취량의 확률론적 고려에 따른 섭취선량 변화를 분석하였다. 그리고 이를 위해 섭취량 분석을 수행하였다. 섭취량은 2019년도 국민건강영양조사 식품섭취조사 원시자료를 기반으로 분석하였다[11]. ICRP에서는 1세, 10세, 성인 등 3개 연령군을 사용할 것을 권고하였다. 이에 따라 섭취량 분석 시 각 연령군에 대해 0~5세, 6~15세, 16세 이상 등 3개 연령군으로 구분하여 분석하였다. 식품군은 기체상 배출물 관련 피폭경로에 대해 곡류, 김치류, 엽채류, 근채류, 과일류, 소고기류, 돼지고기류, 닭고기류, 우유류의 9개 식품군으로 구분하였다. 그리고 액체상 배출물 관련 피폭경로에 대해 어류, 갑각류, 해조류, 연체류의 4개 식품군으로 구분하였다. 분석 시 과자, 육수, 아이스크림, 통조림 등 가공품에 대한 섭취와 석류, 아보카도 등 수입 과일에 대한 섭취는 국내 원전 부지 주변 농산물 생산지역에서 생산된 식품으로 보기 어렵다고 판단되어 섭취량 통계에서 제외하였다.

### 2.5. 확률론적 선량평가

마지막으로 선정 인자들을 통해 확률론적 선량평가를 수행하였다. 선량평가 시 내부피폭 선량환산인자는 ICRP 72에 제시된 연령별 섭취선량 환산인자를 사용하였다[12]. 이외 선량평가 시 사용되는 인자는 KINS 규제지침 2.2에 제시된 입력인자를 사용하였다[10].

ICRP에서는 대표인 선량을 결정집단의 평균 선량으로 정의하였다. 이에 따라 1세, 10세, 성인의 3개 연령군에 대해 인구비율을 고려하여 평균 선량을 계산하였다. 그리고 ICRP에서는 대표인 선량 정의 시 집단에서 임의 추출한 사람이 대표인보다 큰 선량을 피폭할 확률이 5% 이내가 되도록 정의할 것을 제시하였다. 이에 따라 확률론적 선량평가 시 도출한 선량분포의 95백분위값에 해당하는 선량을 대표인 선량으로 정의하였다.

최종적으로 앞서 선정된 인자들과 섭취량 분포를 기반으로 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 몬테카를로 시뮬레이션 수행 시 Crystal ball 프로그램을 활용하였다. Crystal ball은 스프레드시트 기반으로 확률 분포를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하는 프로그램으로, 몬테카를로 시뮬레이션이 필요한 관련 산업 분야에서 주로 사용되고 있다[13]. 본 연구에서는 섭취량 인자에 대한 확률 분포를 이용하여 섭취선량 평가를 수행하였다. 평가는 대표인, 성인, 10세, 1세 연령군과, 기체상 및 액체상 유출물 관련 피폭경로에 대하여 총 6번 각각 수행하였으며, 각 수행 당 10<sup>6</sup>번 시행하였다.

## 3. 결 과

본 연구에서는 확률론적 방법론 적용에 따른 선량 변화 경향성 파악을 위해 시범적으로 섭취선량을 평가하였다. 섭취선량 평가에 앞서 선원항, 피폭경로 등 인자를 조사하였다. 그리고 대기확산인자, 섭취량을 평가, 분석하였다. 최종적으로 조사, 분석한 선량평가 인자를 기반으로 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3.1. 섭취량 분석 결과

Table 2에 섭취량 분석 결과를 나타내었다. 섭취량은 총 13개 식품군으로 구분하였으며, 식품군별 섭취량 분석 결과 0의 섭취량을 갖는 경우는 분포 가정 시 제외되었다.

**Table 2.** Intake data considered in this study

Type	Intakes data (g day <sup>-1</sup> )					
	1-year infant		10-year child		Adult	
	Average	95 <sup>th</sup> percentile	Average	95 <sup>th</sup> percentile	Average	95 <sup>th</sup> percentile
Grain	157.3	327.7	206.7	453.0	242.8	537.1
Kimchi	25.8	88.9	62.1	180.1	116.8	317.2
Leafy	40.8	156.3	60.1	198.8	130.2	369.8
Root	48.3	150.6	69.6	208.5	102.2	303.4
Fruit	155.2	362.4	168.1	492.6	228.1	691.6
Beef	27.5	83.3	44.2	176.2	60.5	206.1
Porks	32.3	91.5	82.2	241.2	99.8	320.1
Poultry	47.6	134.7	79.9	253.4	87.3	281.0
Milks	242.9	582.4	273.6	572.0	228.8	520.0
Fish	18.0	57.2	29.9	98.0	51.3	185.9
Shellfish	5.6	21.2	16.3	68.7	25.8	96.9
Mollusks	13.6	68.1	20.6	72.5	31.7	122.0
Algae	3.6	10.2	4.4	12.4	8.4	33.6

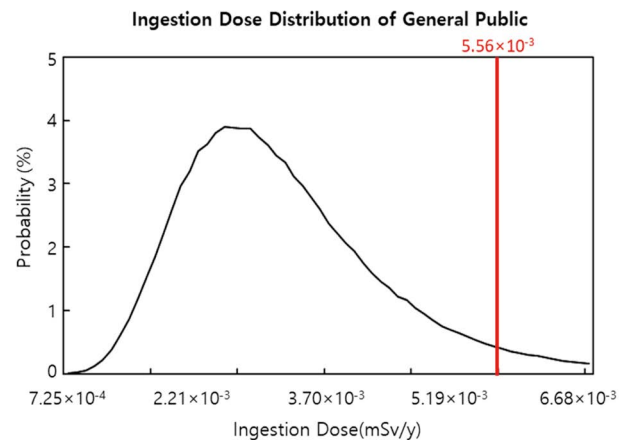
성인의 경우 곡류, 과일류 식품군에 대한 섭취량이 가장 높게 나타났으며, 10세 연령군의 경우 곡류 및 과일류, 1세 연령군의 경우 곡류, 과일류, 우유류 식품군에 대한 섭취량이 가장 높게 나타났다. 확률론적 고려 시 모든 식품군에 대해 로그정규분포가 가정되었다.

### 3.2. 섭취선량 평가 결과

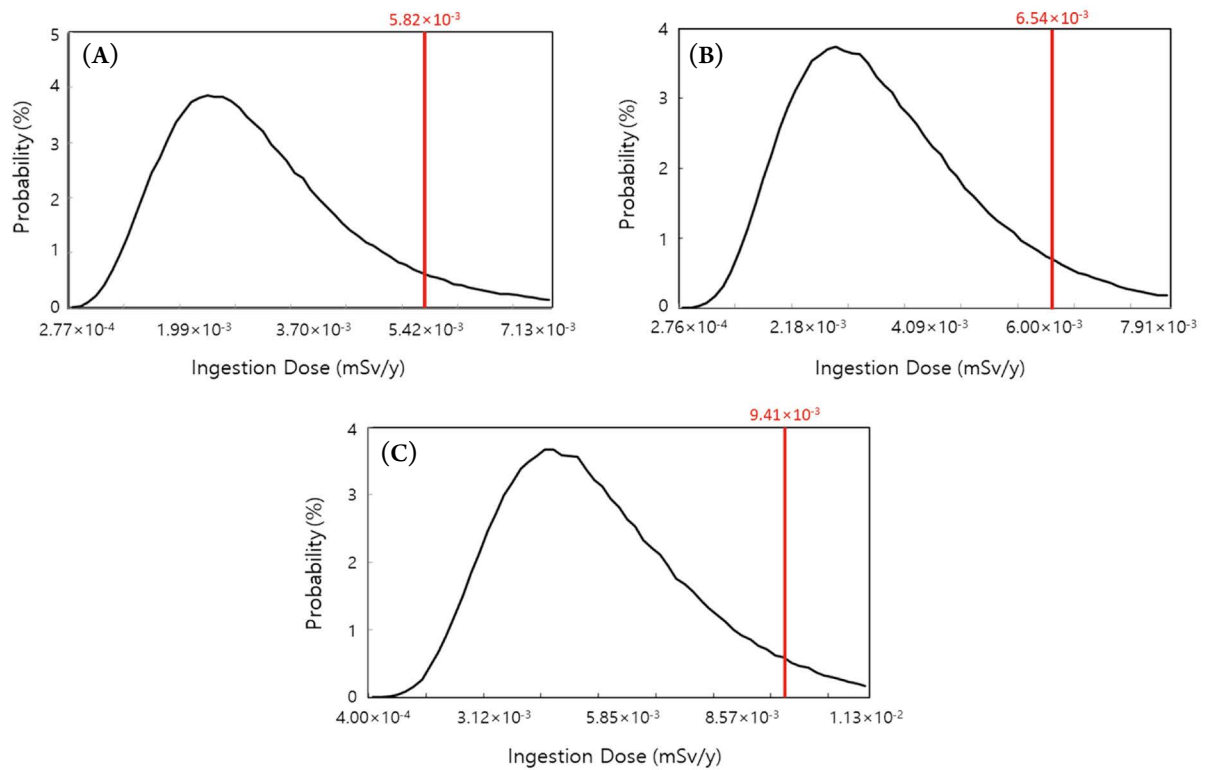
Fig. 1에 본 연구에서 도출한 대표인 섭취선량 분포를 나타내었다. 대표인 섭취선량은  $6.75 \times 10^{-4} \sim 1.80 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup> 범위로 나타났다. 대표인 선량 값은 선량분포의 95백분위값에서 정의하였으며, 확률론적 선량평가 결과 대표인 섭취선량은  $5.56 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다.

Fig. 2에 본 연구에서 평가한 연령군별 섭취선량 평가 결과를 나타내었다. 성인 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과 섭취선량은  $2.02 \times 10^{-4} \sim 2.08 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup> 범위로 나타났으며, 95백분위값은  $5.82 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다. 10세 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과 섭취선량은  $2.12 \times 10^{-4} \sim 1.69 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup>인 것으로 나타났으며, 95백분위값은  $6.54 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다. 1세 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과 섭취선량은  $3.09 \times 10^{-4} \sim 1.95 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup>인 것으로 나타났으며, 95백분위값은  $9.41 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다.

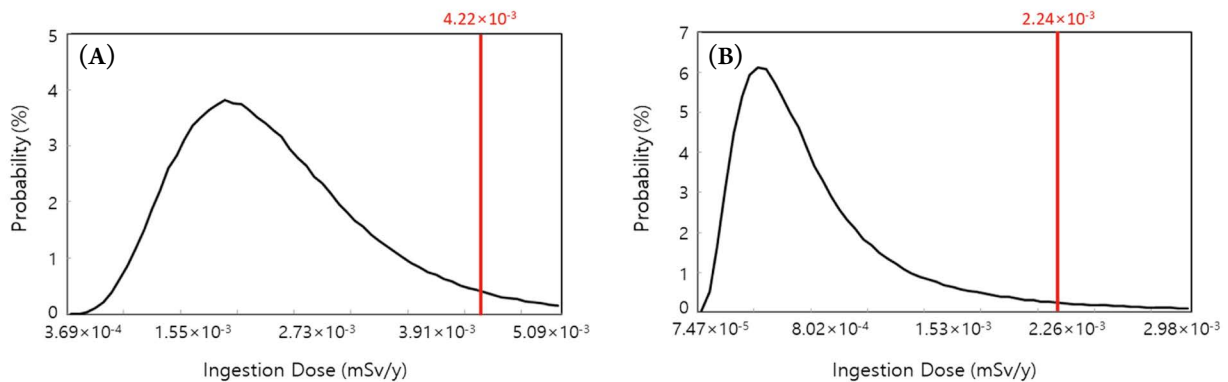
Fig. 3에 본 연구에서 평가한 유출물의 종류별 대표인 섭취선량 평가 결과를 나타내었다. 기체상 유출물에 대한 확률론적 평가 결과 섭취선량은  $3.30 \times 10^{-4} \sim 1.01 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup>인 것으로 나타났으며, 95백분위값은  $4.22 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다. 그리고 액체상 유출물에 대한 확률론적 평가 결과 섭취선량은  $5.05 \times 10^{-5} \sim 1.26 \times 10^{-2}$  mSv y<sup>-1</sup>인 것으로 나타났으며, 95백분위값은  $2.24 \times 10^{-3}$  mSv y<sup>-1</sup>로 나타났다.



**Fig. 1.** Dose distribution of general public around APR-1400 nuclear power plant.



**Fig. 2.** Ingestion dose distribution by age groups (A: adult group, B: 10-year child, C: 1-year infant).



**Fig. 3.** Ingestion dose distribution by effluent type (A: gaseous, B: liquid).

## 4. 고찰

### 4.1. 평가 방법론별 섭취선량 비교 분석

확률론적 선량평가 결과 대표인 섭취선량은  $5.56 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로, 결정론적 선량평가 결과인  $5.69 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 에 비해 약 2.3% 작게 나타났다. 연령군별, 유출물의 종류별 섭취선량 평가 결과, 해당 차이는 주로 1세, 10세 연령군 및 액체상 유출물에 의한 피폭경로에서 선량평가 방법

론에 따른 섭취선량 간 차이에 의해 나타난 것으로 판단된다.

Table 3에 연령군별 섭취선량 평가 결과를 비교하였다. 성인 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과는  $5.82 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로 나타났다. 결정론적 선량평가 결과는  $5.82 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로, 방법론에 따른 선량평가 결과 간 차이는 거의 없었다. 10세 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과는  $6.54 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로 나타났으며, 결정론적 선



**Table 3.** Ingestion dose assessment results by age group

Age group	Ingestion dose (mSv y <sup>-1</sup> )		Differences ( B-A /A)	Population ratio
	Deterministic (A)	Probabilistic (B)		
1-year infant	6.58 × 10 <sup>-3</sup>	9.41 × 10 <sup>-3</sup>	30.1%	5.6%
10-year-child	4.25 × 10 <sup>-3</sup>	6.54 × 10 <sup>-3</sup>	35.1%	11.4%
Adult	5.82 × 10 <sup>-3</sup>	5.82 × 10 <sup>-3</sup>	0.0%	83.0%
Representative person	5.69 × 10 <sup>-3</sup>	5.56 × 10 <sup>-3</sup>	2.3%	-

**Table 4.** Ingestion dose assessment results by effluent type

Effluent type	Ingestion dose (mSv y <sup>-1</sup> )		Difference ( B-A /A)
	Deterministic (A)	Probabilistic (B)	
Gaseous effluent	4.72 × 10 <sup>-3</sup>	4.22 × 10 <sup>-3</sup>	11.9%
Liquid effluent	9.72 × 10 <sup>-3</sup>	2.24 × 10 <sup>-3</sup>	56.6%
Total effluent	5.69 × 10 <sup>-3</sup>	5.56 × 10 <sup>-3</sup>	2.3%

량평가 결과는 4.25 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로, 확률론적 선량평가 적용 시 섭취선량이 약 35.1% 크게 나타났다. 1세 연령군에 대한 확률론적 선량평가 결과는 9.41 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로 나타났으며, 결정론적 선량평가 결과는 6.58 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로, 확률론적 선량평가 적용 시 섭취선량이 약 30.1% 크게 나타났다. 연령군별 섭취선량 평가 결과, 성인 연령군(0.0%)에 비해 1세(30.1%), 10세(35.1%) 연령군의 경우 확률론적 방법론 적용 시 결정론적 선량평가 결과와의 차이가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 다만 대표인 섭취선량 평가 시 인구비율을 고려하였으며, 이 중 성인 인구의 비율은 80% 이상으로 나타났다. 이에 따라 대표인 섭취선량에 대해 인구비율이 낮은 1세, 10세 연령군에 의한 영향은 상대적으로 작을 것으로 판단된다.

Table 4에 유출물의 종류별 대표인 섭취선량 평가 결과를 비교하였다. 기체상 유출물에 대한 확률론적 평가 결과는 4.22 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로 나타났으며, 결정론적 선량평가 결과는 4.72 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로, 확률론적 선량평가 적용 시 섭취선량이 약 11.9% 작게 나타났다. 그리고 액체상 유출물에 대한 확률론적 평가 결과는 2.24 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로 나타났으며, 결정론적 선량평가 결과는 9.72 × 10<sup>-3</sup> mSv y<sup>-1</sup>로, 확률론적 선량평가 적용 시 섭취선량이 약 56.6% 크게 나타났다. 유출물의 종류별 섭취선량 평가 결과, 기체상 유출물(11.9%)에 비해 액체상 유출물(56.6%) 관련 피폭

경로의 경우 확률론적 방법론 적용 시 결정론적 선량평가 결과와의 차이가 상대적으로 크게 나타났다.

#### 4.2. 섭취선량 비교 결과에 따른 섭취량 DB 분석

본 연구에서는 섭취선량 평가 시 습관자료 중 섭취량에 대해 확률론적 방법론을 적용하였다. 따라서 섭취선량 변화 원인 분석을 위해 섭취량 데이터를 추가 분석하였다. 섭취량은 연령군별, 관련 유출물의 종류별로 구분하였다.

Table 5에 연령군별, 유출물의 종류별 섭취량 데이터의 표본수를 나타내었다. 섭취량 분석결과 성인 연령군에 비해 1세, 10세 연령군의 경우 식품군별 섭취량 표본수가 적은 것으로 나타났다. 그리고 기체상 유출물 관련 피폭경로에 비해 액체상 유출물 관련 피폭경로의 경우 식품군별 섭취량 표본수가 적은 것으로 나타났다. 성인 연령군의 경우 식품군별 섭취량 표본수는 총 38,997개로 나타났고, 10세 연령군의 경우 총 6,571개, 1세 연령군의 경우 총 3,641개로, 10세, 1세 연령군 모두 성인 연령군의 약 16.9%, 9.3% 수준으로 적게 나타났다. 특히 1세 연령군의 경우 가장 표본수가 적은 식품군은 갑각류, 연체류 식품군으로, 섭취량 표본수는 각각 84개, 66개로 나타났다. 반면 성인 연령군의 경우 가장 표본수가 적은 식품군은 갑각류, 연체류 식품군으로, 섭취량 표본수는 각각 919개, 966개로 나타났다. 그리고 기체상 유출물 관련 피폭경로에 대한 식품

**Table 5.** Number of sample of intake data by age group and effluent type

Effluent type	Ingestion type	Number of samples (#)		
		1-year infant	10-year child	Adult
Gaseous effluent	Grain	418	765	4,854
	Kimchi	248	624	4,180
	Leafy	402	743	4,747
	Root	404	747	4,755
	Fruit	282	464	2,826
	Beef	245	392	2,068
	Porks	265	593	3,068
	Poultry	337	623	3,395
	Milks	295	378	1,369
Liquid effluent	Fish	314	543	3,470
	Shellfish	84	136	919
	Mollusks	66	151	966
	Algae	281	412	2,380

군별 섭취량 표본수는 총 39,487개로 나타났고, 액체상 유출물 관련 피폭경로에 대한 식품군별 섭취량 표본수는 총 9,722개로, 기체상 유출물의 약 24.6% 수준으로 적게 나타났다. 특히 액체상 유출물의 경우 각 연령군에 대해 가장 표본수가 적은 식품군은 각각 갑각류(성인: 919개, 10세: 136개), 연체류(1세: 66개)로 나타났다. 반면 기체상 유출물의 경우 각 연령군에 대해 가장 표본수가 적은 식품군은 우유류(성인: 1,369개, 10세: 378개), 소고기류(1세: 245개)로 상대적으로 많이 나타났다. 따라서 저연령군, 액체상 유출물 관련 피폭경로에 대해 적은 섭취량 표본수로 인해 선량평가 결과 간 차이가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6에 연령군별 및 유출물의 종류별 섭취량 분포를 나타내었다. 섭취량 분석결과 기체상 유출물 관련 피폭경로에 비해 액체상 유출물 관련 피폭경로의 경우 식품군별 분포 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 기체상 유출물 관련 피폭경로의 경우 섭취량의 평균값과 분포의 99.99백분위값 간의 차이는 약 6.0~19.3배로 나타났고, 액체상 유출물 관련 피폭경로의 경우 섭취량의 평균값과 분포의 99.99백분위값 간의 차이는 약 17.2~38.5배로 나타났다. 반면 표준편차는 기체상 유출물 관련 식품군의 경우 약 86.6~268.4 g day<sup>-1</sup>로 값들이 상대적으로 균일하고 낮게 나타났으며, 액체상 유출물 관련 식품군의 경우 18.8~76.6

g day<sup>-1</sup>로, 큰 변동폭에 비해 표준편차 값은 작아 그래프의 변동이 크게 나타났다. 따라서 넓은 변동폭 및 작은 표준편차에 의해 선량평가 결과 간 차이가 발생한 것으로 판단된다. 향후 보다 정확한 확률론적 선량평가를 위해, 섭취량 등 변수의 분포자료 체계화가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대표인 개념과 함께 확률론적 방법론이 새롭게 제시됨에 따라 해당 방법론 적용 시 선량 변화 경향을 분석하였다. 이를 위해 선량평가 인자를 조사 및 분석하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 확률론적 선량평가를 수행하였다.

섭취선량 평가를 위해 1) 선원항, 2) 피폭경로, 3) 대기 확산인자, 4) 섭취량 등 입력인자를 선정, 분석하였다. 선원항은 APR-1400 원자력발전소 1개 호기를 가정하였다. 그리고 피폭경로는 기체상, 액체상 유출물 관련 섭취경로만을 가정하였다. 대기확산인자의 경우 기상청 자료를 조사하여 XOQDOQ 프로그램을 통해 평가하였다. 섭취량은 2018년 국민건강영양조사 원시자료를 활용하여 분석하였다.

선정한 선량평가 인자를 통해 몬테카를로 시뮬레이션

**Table 6.** Intake data by age group and effluent type

Age group	Effluent type	Ingestion type	Intakes data (g day <sup>-1</sup> )			Differences (B/A)
			Average (A)	99.99 <sup>th</sup> percentile (B)	Standard deviation	
1-year infant	Gaseous effluent	Grain	157.3	642.6	91.1	4.1
		Kimchi	25.8	254.5	36.7	9.9
		Leafy	40.8	413.7	50.6	10.1
		Root	48.3	478.8	54.8	9.9
		Fruit	155.2	1,809.4	168.6	11.7
		Beef	27.5	182.3	26.7	6.6
		Porcs	32.3	273.1	37.6	8.5
		Poultry	47.6	410.2	51.7	8.6
		Milks	242.9	891.8	160.5	3.7
	Liquid effluent	Fish	18.0	102.1	20.1	5.7
		Shellfish	5.6	81.8	12.1	14.6
		Molluscs	13.6	127.2	23.4	9.4
		Algae	3.6	141.8	9.4	39.4
	10-year child	Gaseous effluent	Grain	206.7	970.7	123.2
Kimchi			62.1	387.9	61.0	6.2
Leafy			60.1	476.7	68.5	7.9
Root			69.6	951.8	80.3	13.7
Fruit			168.1	1,345.3	189.5	8.0
Beef			44.2	405.9	63.3	9.2
Porcs			82.2	900.9	93.1	11.0
Poultry			79.9	893.2	91.8	11.2
Milks			273.6	1,496.4	163.8	5.5
Liquid effluent		Fish	29.9	407.3	42.2	13.6
		Shellfish	16.3	157.7	27.9	9.7
		Molluscs	20.6	190.7	30.0	9.3
		Algae	4.4	150.0	10.4	34.1
Adults		Gaseous effluent	Grain	242.8	1,497.4	154.2
	Kimchi		116.8	813.0	103.1	7.0
	Leafy		130.2	1,329.1	127.5	10.2
	Root		102.2	1,608.5	116.0	15.7
	Fruit		228.1	4,004.9	268.4	17.6
	Beef		60.5	1,150.1	86.6	19.0
	Porcs		99.8	1,282.8	121.8	12.9
	Poultry		87.3	1,681.6	115.1	19.3
	Milks		228.8	1,373.9	153.4	6.0
	Liquid effluent	Fish	51.3	1,006.4	76.6	19.6
		Shellfish	25.8	993.1	67.9	38.5
		Molluscs	31.7	544.0	45.5	17.2
		Algae	8.4	320.0	18.8	38.1



을 수행하여 확률론적 선량평가를 수행하였다. 대표인에 대한 확률론적 섭취선량 평가 결과 선량분포의 95백분위값은  $5.56 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로 나타났다. 연령군별, 유출물의 종류별 선량평가 결과, 1세, 10세, 성인 연령군에 대해 섭취선량은 각각  $9.41 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ ,  $6.54 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ ,  $5.82 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로 나타났다. 그리고 기체상, 액체상 유출물에 의한 피폭경로에 대해 섭취선량은 각각  $4.22 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ ,  $2.24 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 로 나타났다.

선량평가 방법론에 따른 평가 결과의 차이는 자연연군 및 액체상 유출물 관련 피폭경로에서 상대적으로 크게 나타났다. 이는 자연연군 및 액체상 유출물 관련 피폭경로 섭취선량 DB의 적은 표본수 및 넓은 변동폭, 작은 표준편차에 의한 것으로 판단된다. 향후 보다 정확한 확률론적 선량평가를 위해, 섭취선량 등 변수의 분포자료 체계화가 필요할 것으로 판단된다. 연구에서 분석한 확률론적 선량평가 시 선량 변화 경향성은 추후 대한민국에 ICRP 103 권고 도입 시 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805016).

## 참고문헌

1. ICRP. 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP publication 101 A. Ann. ICRP 36(3).
2. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
3. IAEA. 2016. Attributes of full scope level 1 probabilistic safety assessment (PSA) for applications in nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1804.
4. Batu A and YU H. 2018. Probabilistic Assessment of Dose to Workers due to Radiological emergency Situation. Proceedings of the KNS 2018 Fall Meeting, (p. v). Korea, Republic of: KNS.
5. Seo HS, Jin YH, Lee SJ, Lee BM and Kim PK. 2021. Analysis of the Radiation Dose Change of the General Public Living around Korean Nuclear Power Plants by Changing Habit Data Based on Representative Person Concept. *J. Radiat. Ind.* **15**(4):259-266. <https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.2>.
6. KHNP. 2020. The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Power Plant.
7. KHNP. 2021. The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Power Plant.
8. KHNP. 2022. The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Power Plant.
9. NRC. 2018. APR1400 Design Control Document Tier 2.
10. KINS. 2016. Assessment of Residents Exposure Dose. KINS/GR-N02.02.
11. KNHANES. 2018. Korea National Health and Nutrition Examination Survey Food Intake Survey Raw Data.
12. ICRP. 1995. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
13. ORACLE. 2010. Crystall Ball User's Guide.
14. KINS. 2000. Development of Methodology for Radiological Emergency and Environmental Assessment. KINS/GR-199.
15. NRC. 1982. XOQDOQ: Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Stations, NUREG/CR-2919, Nuclear Regulatory Commission.
16. NRC Reg. Guide 1.111.
17. NRC Reg. Guide 1.109.
18. KINS. 2011. Study for an improvement of INDAC (Integrated Dose Assessment Code Package). Technical Report, KINS/RR-808.
14. Gyeong Ju-si. 2020. Statistical Yearbook of Gyeongju.
19. Gijang-Gun. 2020. Gijang-County statistical Yearbook.
20. Uljin-Gun. 2020. Uljin-Gun statistical Yearbook.
21. Ulju-Gun. 2020. Ulju-Gun statistical Yearbook.