

확률론적 내부피폭 평가 전산코드 개발

노시완^{1*}, 이재기², 이효직¹

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

²한양대학교, 서울특별시 성동구 왕십리로 222

*snoh@kaeri.re.kr

1. 서론

방사성물질의 섭취로 인해 발생하는 내부피폭은 외부피폭과 달리 간접적인 측정과 인체 내 거동을 예측하는 수학적 모델에 의해 평가된다. 이 수학적 모델은 제한된 동물 및 인체실험에 근거한 모델이며 개인 간 차이가 발생하므로 그 불확도가 매우 크다. 이뿐만 아니라 내부피폭 평가에는 섭취시점, 섭취경로, 화학형 등 중요한 인자를 가정하는 경우가 많으므로 그 불확도는 더욱 커진다. 그럼에도 불구하고 평가의 편의성을 위해 중앙값 또는 평균값에 의존하는 단일값 평가가 수행된다. 그러나 원전, 핵연료주기시설, 병원 내 핵의학과 등에서 사고로 인해 다량의 방사성물질을 섭취하는 경우 이러한 단일값 평가는 무의미 할 수 있다. 따라서 이러한 경우 불확도를 고려한 분포형태의 평가가 요구되지만 내부피폭 평가절차가 매우 복잡하고 관련 인자가 매우 다양하므로 정량화가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 몬테카를로 기법 및 베이지안 추정과 같은 통계적인 기법들을 적용한 확률론적 내부피폭 평가가 연구되어 왔으나[1-3] 실제 사고 시 적용하기 위한 컴퓨터 전산코드는 가용하지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실제 다량의 방사성물질 섭취 사고 시 확률론적 평가를 통해 분포형태의 내부피폭 선량을 평가할 수 있는 전산코드를 개발하고 이를 예제 시나리오에 적용하여 선량분포를 도출하였다.

2. 내부피폭 불확도 인자

내부피폭 평가에는 수많은 인자들이 사용되며 각 인자들은 각각의 불확도를 갖는다. 이러한 인자들은 크게 섭취와 관련된 인자, 측정에 관련된 인자, 생체역동학(Biokinetic) 모델에 관련된 인자, 기타 인자로 나눌 수 있으며 이외에도 통계적 기법을 통한 섭취량 추정에도 불확도가 발생한다. 본 연구에서 반영한 불확도 인자들은 Table 1과 같다.

Table 1. Uncertainty components used to calculate internal dose distribution

Group	Component
Intake	- Intake time - Intake mode - Intake route - Chemical form - AMAD
Measurement	- Type A uncertainty - Type B uncertainty
Biokinetic Model	- Transfer rate - Deposition fraction - Fractional absorption
Others	- Organ mass

3. 평가코드 개발

3.1 확률론적 평가 방법론

내부피폭 평가에는 매우 다양한 인자들이 적용되며 선형대수, 통계적 추정과 같은 수학적 기법들이 사용되므로 해석적인 방법으로 내부피폭 선량의 분포를 산출하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 몬테카를로 방법과 베이지안 추정법을 이용하여 내부피폭 선량의 분포를 산출하고자 하였다. 베이지안 추정법은 기존에 널리 사용되던 최소자승법, 최대우도법과 달리 통계적 추정에서 오는 불확도를 고려한 분포형태의 추정이 가능한 기법이다.

본 연구에 사용된 방법론에서는 우선 내부피폭 평가에 필요한 인자들을 각각의 분포에서 추출하고 이를 이용하여 베이지안 추정의 사후분포를 결정한다. 이렇게 산출된 사후분포는 단 한 번의 추출에 의해 결정된 결과이므로 통계적 유의성을 위해 이를 충분히 반복하여 여러 개의 사후분포를 얻고 이를 이용하여 최종적인 내부피폭 선량분포를 획득한다.

3.2 평가코드 개발

앞서 정의된 인자별 불확도와 평가 방법론을 이용하여 실제 상황에 적용 가능한 확률론적 내부피폭

평가코드를 개발하였다. MATLAB 언어를 사용하였으며 텍스트 및 엑셀 기반의 입출력을 사용한다. 현재는 불확도 자료가 비교적 충분한 Cs, Sr, I에 대한 평가가 가능하며 향후 다른 핵종에 대한 평가 기능을 추가할 계획이다. 이와 함께 rank correlation coefficient를 사용한 민감도 분석 기능을 추가하여 내부피폭 불확도 저감의 최적화에 활용할 수 있도록 하였다.

3.3 예시 시나리오 적용

개발된 평가코드를 이용하여 세 가지 예시 시나리오에 대한 내부피폭 선량분포 계산을 수행하고 민감도 분석을 수행하였다. 각 시나리오에 대한 설명은 Table 2와 같다. Fig. 1, 2는 각각 시나리오 1, 2에 대한 전신선량 분포를 보여주며 Fig. 3은 시나리오 3에 대한 갑상선선량 분포를 보여준다. 민감도 분석결과 첫 번째 시나리오의 경우 소변 배설 속도, 두 번째 시나리오의 경우 섭취시간, 세 번째 시나리오의 경우 입자크기가 가장 주요한 인자로 평가되었다.

Table 2. Example Scenario for Internal Dose Distributions Calculation

No	Description
1	- Whole body count - 5×10^5 Bq ^{137}Cs measured - Inhalation - intake 3 day before
2	- Urine sample - 1000 Bq/L ^{90}Sr measured - Unknown intake route - Intake between 4 day before and yesterday
3	- I-131 intake and thyroid monitoring - IAEA inter-comparison Case 4 [4]

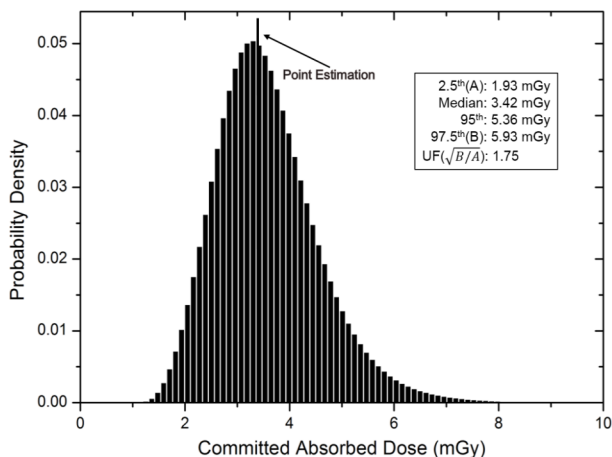


Fig. 1. Total body committed absorbed dose distribution for the scenario 1.

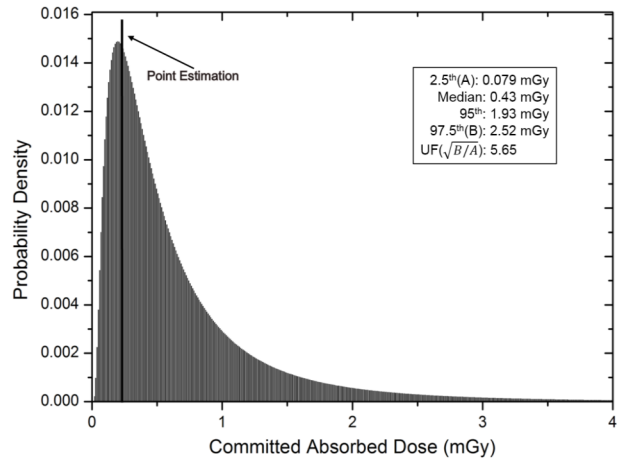


Fig. 2. Total body committed absorbed dose distribution for the scenario 2.

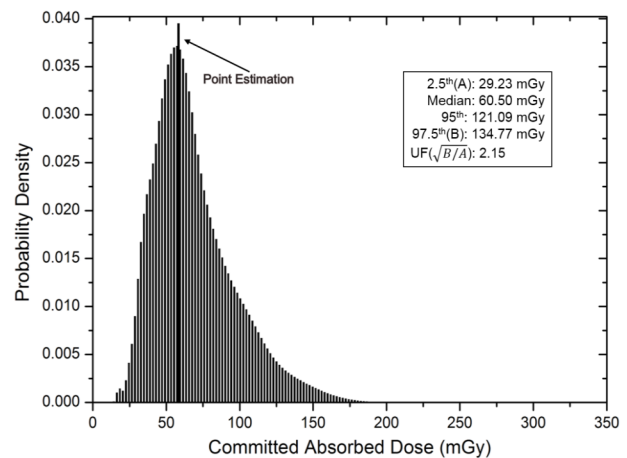


Fig. 3. Thyroid committed absorbed dose distribution for the scenario 3.

4. 결론

본 연구에서는 내부피폭 선량을 단일값이 아닌 분포형태로 평가할 수 있는 확률론적 내부피폭 평가코드를 개발하였고 이를 세 가지 예시 시나리오에 적용하여 내부피폭 선량 분포를 산출하였다. 이를 통하여 사고 발생 시 보다 적절한 사후조치가 가능하며 민감도 분석결과를 통해 보다 효과적인 불확도 감축전략을 수립할 수 있게 된다.

5. 참고문헌

- [1] NCRP, NCRP Report No.164, (2009).
- [2] M. Puncher, et al., Rad. Prot. Dosim. 156(2), 131-140 (2013).
- [3] G Miller, et al., Rad. Prot. Dosim. 98(2), 191-198 (2002).
- [4] IAEA, IAEA-TECDOC-1568 (2007).