

I-131 섭취에 따른 내부피폭 선량측정 및 평가방법 분석
Studies of Internal Exposure Dose Assessment after Intake of Iodine-131

김은주, 이형석, 김희근, 양양희, 김위수
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소에서 Iodine-131은 핵분열 과정 중 핵분열생성물로서 발생한다. 특히 원자력 발전소에서는 핵연료 결함 발생시에 발생할 가능성이 높다. 따라서 핵연료 교체작업이나 원전 보수작업시 Iodine-131로부터 체내피폭이 일어날 수 있다. 본 논문에서는 ICRP-30과 ICRP-60에서 권고하는 선량평가 방법을 비교 검토하였고, 이를 적용하여 원전작업자에 Iodine-131이 흡입되는 경우 내부피폭선량을 평가해 보았다.

Abstract

At Nuclear power plants the radioiodines of principal interests are I-131, associated with reactor operations, especially after defected fuels. After releasing from the defected fuel to working area, I-131 is considered the significant radionuclide from an internal exposure. This paper is to compare and calculate the dosimetric model and committed effective dose(CED) based on International Commission on Radiological Protection's publication 30/54 and 66/78.

1. 방사성요오드의 특성

요오드는 검푸른 빛을 띤 광택이 있는 고체이며 안정동위원소로는 I-127로서 자연에 주로 존재한다. 안정동위원소 I-127은 해초나 해면 혹은 다른 물질 내에 동화작용으로 생성되는 핵종이며, 방사성요오드들은 대부분 핵분열에 의해서 생성된다[1]. 또한 방사성요오드의 동위원소들은 물리적, 화학적 형태가 다양하고 γ , X , β 등을 방출하며 반감기의 범위도 수 분에서 수 백만년 기간을 가진다[2].

호흡 및 음식물, 식수 등의 섭취로 유입된 요오드는 폐와 위장관 계통 등에서 혈액내로

흡수되어 1~2일 경과하는 동안 갑상선으로 모이는 특성을 가지고 있다. 이 때 방사성요오드는 대부분 원전이나 핵연료재처리 시설, 방사능 폐기물 내에 존재하는 등 인공핵반응과 같은 인위적인 행위에 의해서 생성되므로[2], 특히 원전내 작업자들은 핵연료 교체작업이나 원전 보수작업시 호흡에 의한 방사성요오드로부터 내부피폭이 일어날 가능성이 있다.

방사성요오드 중 ICRP에서 관심있는 핵종으로는 I-125, I-129, I-131이 있으며, 원자로 운전으로 인해 발생되고, 체내피폭을 유발하는 핵종의 대부분은 Iodine-131이다[2]. Iodine-131은 반감기 8.04일로 β 선을 방출하여 Xe-131의 안정동위원소로 붕괴되며 0.19 MeV의 β 선과 0.36 MeV의 γ 선을 방출한다.

따라서, 본 논문에서는 ICRP-30과 ICRP-60에서 제시하는 선량평가 모델 및 계산 방법을 Iodine-131을 통해 비교 검토하였고, 원전작업자의 Iodine-131 흡입에 따른 내부피폭선량 차이를 비교 검토해 보았다.

2. 내부피폭선량 측정 장비

국내원전의 경우 내부피폭 선량평가를 위한 방사선모니터링으로 전신카운터(Whole Body Counting System)를 사용하고 있다. 전신카운터 장치는 검출기, 차폐체, 전자회로계(전치증폭기, 주 증폭기, 고압전원, 파고분석기 및 Hardware 제어용 PC) 및 데이터 처리부로 구성되어 있다(그림 1). 차폐를 위해 내부는 10 cm 두께의 Low background steel로 되어 있고, 검출기 전면은 평판형 플라스틱 덮개로 구성되어 있으며 검출기는 NaI(Tl) 섬광계수기(3" (폭)×5" (두께)×16" (길이))로 2개가 상하부로 설치되어 있다. Software Package로는 ABACOS 프로그램이 있고, 이는 γ Scanning 및 Hardware 제어를 담당하고, 에너지교정 및 효율을 보정하며 이를 통해 방사성핵종 선별 및 핵종의 방사능을 측정하는 등 이를 종합적으로 정리하여 작업자 개인의 체내피폭에 대한 Data Base 관리를 담당한다. 그리고, 방사성물질의 체내 섭취량 및 피폭선량평가 계산을 위한 CINDY(Code for internal dosimetry) 코드가 컴퓨터에 설치되어 계측기와 연결되어 있다.

체외오염이 내부피폭선량으로 평가되는 오류를 방지하기 위한 전신오염 측정평가 절차는 그림 2에 나타나 있고, 피검자의 작업내용을 종합적으로 평가하여 최종적인 내부피폭을 확인하는 절차는 그림 3에 도식되었다.

3. 방사성요오드의 인체대사 모델

가. 개요

ICRP 위원회는 ICRP-2 모델을 재검토하여 1979년 ICRP-30 모델을 발표하였다. 이 모델에서는 각 격실에 침적된 입자가 혈액, 임파절 및 소화기로 일정한 생물학적 반감기를 가지고 이동한다고 가정한다. 이 때 입자들의 생물학적 반감기는 흡입될 때의 화학적 형태나 잔류하는 경향에 따라 다르며 호흡기로부터 제거되는 일수를 따져 D(Daily), W(Weekly), Y(Yearly)로 분류하였다. 그러나 ICRP-30을 개정하여 1984년에 기존 호흡기 모델의 보완작업을 수행하였고, 1994년 새로운 ICRP-66 호흡기계통 모델을 발표하였다. 이는 형태학, 생리학, 침적, 제거 및 방사선 효과 등에 대해 검토한 자료와 결과들을 근거로 ICRP-30을 개정한 모델로서 적용 범위를 일반인까지 확대하였고, 물질이 혈액으로 흡수되는 속도에 따라 F(Fast), M(Moderate), S(Slow)로 구분하였다.

이 모델은 방사성입자 및 기체에 의한 피폭선량의 평가뿐만 아니라 생체분석에 근거한 섭취량 평가에도 적용할 수 있다. 접근방법에 있어서의 큰 차이점은 ICRP-30이 폐에 대한 평균선량을 계산하는 데 반하여 ICRP-66은 호흡기를 구성하는 주요 조직의 방사성민감도 차이를 고려한다는 것이다. 또한, 주요 개선사항으로는 단위 흡입에 대한 선량 및 단위농도에 대한 선량 계산 부분을 들 수 있다. 그러나, 소화기 모델은 ICRP-30에 제시된 모델을 그대로 사용하고 있다.

나. ICRP-30/54와 ICRP-66/78의 인체대사모델 비교[3,4]

그림 4에서 사용되는 요오드 대사모델은 1952년 Riggs에 의해서 제안되었고, ICRP에서 수정하였다. 체내에 들어간 요오드 중 70%는 배뇨되고, 나머지 30%는 갑상선을 거쳐 생물학적 반감기를 가지며 체내 조직이나 기관에 균등하게 분포된다고 가정한다. 전신으로 분포된 요오드의 90%는 다시 혈액으로 흡수되고, 10%는 체외로 배출된다. ICRP-54에서는 갑상선에 잔류하는 방사성요오드를 시간에 대한 잔류함수로 다음과 같이 제시한다.

$$R_{B.th}(t) = -3.3 \times 10^{-1} \exp(-0.693 \frac{t}{0.24}) + 1.8 \times 10^{-2} \exp(-0.693 \frac{t}{11}) + 3.1 \times 10^{-1} \exp(-0.693 \frac{t}{120}), \quad t = \text{day} \quad (1)$$

방사성요오드의 체내선량 측정방법으로는 갑상선 측정기나 전신선량계수기를 사용하는 직접법(in-vivo)과 뇨시료를 통해 측정하는 간접법(in-vitro)이 있다.

ICRP-66/78에서 방사성요오드에 대한 물질대사 모델은 ICRP-54에서 주어진 모델과 동일

하게 사용된다(그림 5). 그러나 이 모델이 ICRP-54와 구분되는 것은 ICRP-66에서 제시되는 호흡기계통 모델의 적용에 따라 요오드의 화학형과 흡수타입, 위장관 흡수계수(f_1)가 좀 더 세분화되어 제시된다는 점이고 이는 단일섭취당 체내에 존재하는 방사능 양을 추정하는데 차이를 유발시킨다.

4. 방사성요오드의 내부피폭 선량평가

내부피폭이 의심되는 작업자는 우선 전신선량계측기로 핵종 정보를 파악하고, 체내에 존재하는 방사능량을 계측한다. 그리고 핵종의 섭취경로를 추적하여 고유의 대사데이터를 선택하고, 섭취량을 산정하며 각종 수학적 모델 및 대사모델을 이용하여 ICRP-54의 경우는 다음과 같은 식으로 섭취량을 평가한다. 반면에 ICRP-78의 경우는 섭취잔류분률에 대한 수식이 따로 주어지지 않고, 1일에서 10일까지 일 단위로의 자료만 주어지므로 1일 이하의 시간이나 그 이상부터는 타권고와의 계산 및 결과비교를 위한 기준으로서 모호하다는 단점이 있다.

$$(I) = \frac{M}{m(t)} \quad (M : \text{측정방사능량}, m(t) : \text{섭취잔류분률}) \quad (2)$$

Iodine-131의 내부섭취량에 대한 측정방사능량(M)은 전신카운터의 측정에 의해 결정되며, 섭취잔류분률은 ICRP-54 및 ICRP-78에 제시되어 있다.

ICRP의 권고에 따른 방사성요오드의 흡수타입 정보를 살펴보면 ICRP-30/54에서는 D이고, ICRP-66/78에서는 F이다. 그리고, AMAD(Activity Median Aerodynamic Diameter)에 대한 정보로는 작업장에서의 실측정이 어렵고, 측정자료나 상세정보를 얻을 수 없을 경우 권고치를 이용한 선량평가를 실시하게 된다. 이 때 방사성요오드의 AMAD는 ICRP-30/54에서는 1 μm 이고, ICRP-66/78에서는 5 μm 로 제시되어 있다.

선량평가를 위하여 Iodine-131의 급성섭취시 ICRP-30과 ICRP-60의 선량평가 차이를 비교해보았다(그림 6). 섭취(흡입)후 1일 경과시 ICRP-30에 비해 섭취잔류분률은 약 20% , 유효선량환산계수는 약 25% 이상 차이를 보였다. 또한 흡입후 7일 경과 후에는 유효선량환산계수 차이는 동일하나 섭취잔류분률은 약 50%의 차이를 보였으며 ICRP-78로 평가한 경우 선량이 73% 정도 더 높게 보수적으로 평가되었다. 따라서 흡입(섭취)후 측정까지 시간이 길어질수록 선량평가의 편차는 더욱 증가하게 됨을 살펴볼 수 있었다.

예탁유효선량(Committed Effective Dose : CED)은 섭취량(Bq)과 유효선량환산계수(Sv/Bq)를 이용하여 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$CED = (Bq) \times (Sv/Bq) \quad (3)$$

5. 결과

본 연구에서는 Iodine-131의 ICRP-30과 ICRP-60 권고의 선량평가 방법에 따른 결과를 비교하였다. 급성섭취(흡입)후 ICRP-30에 비해 1일 경과시 섭취잔류분률(Intake Retention Factor : IRF)은 약 20% 이상 차이를 보이고, 유효선량환산계수는 25% 이상 차이를 보였다. 또한 흡입후 7일 경과 후에는 각각 약 50% 및 25% 이상 정도 높게 보수적으로 계산되었다. 이처럼 ICRP-30/54와 ICRP-66/78에 대한 비교시 섭취후 내부피폭 선량측정 시점에 따라 Iodine-131에 의한 내부피폭선량은 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Iodine, Human Health Fast Sheet, ANL, Oct. 2001
2. PNNL-MA-860 Ch 12.0, Sep. 2000
3. Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers : Design and Interpretation, ICRP Publication 54
4. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, ICRP Publication 78

감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력중장기사업 “방사선 피폭저감 기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

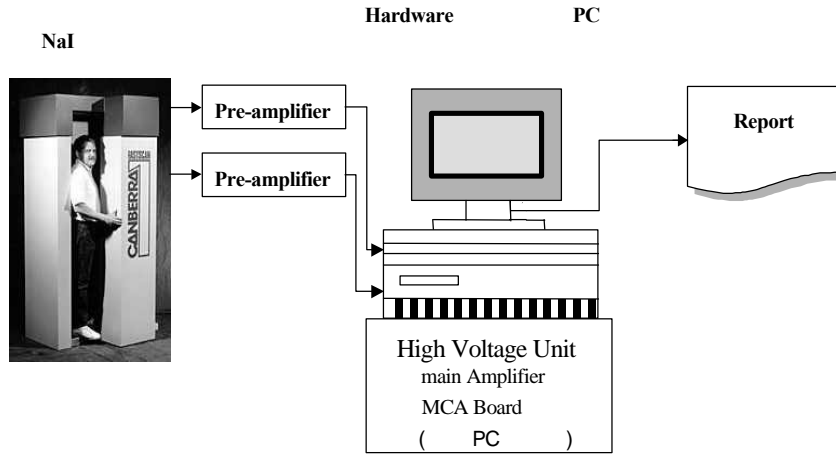


그림 1. FASTSCAN-2250 전신카운터의 구성도

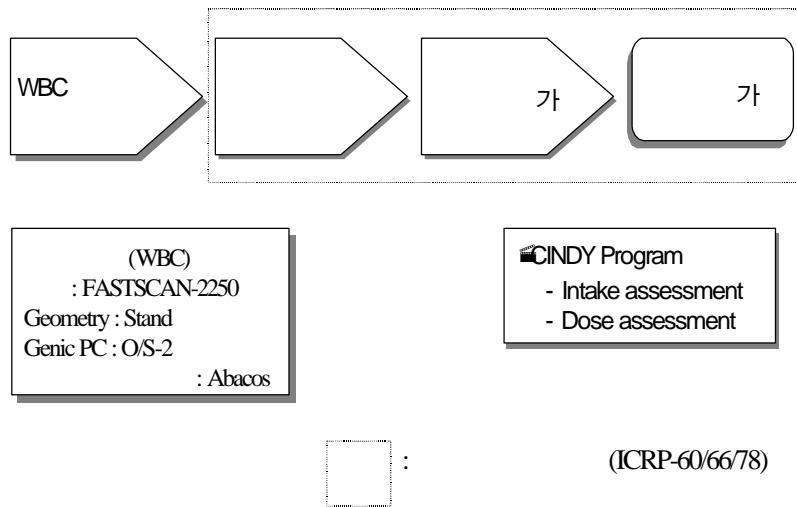


그림 2. 내부피폭 선량평가 방법

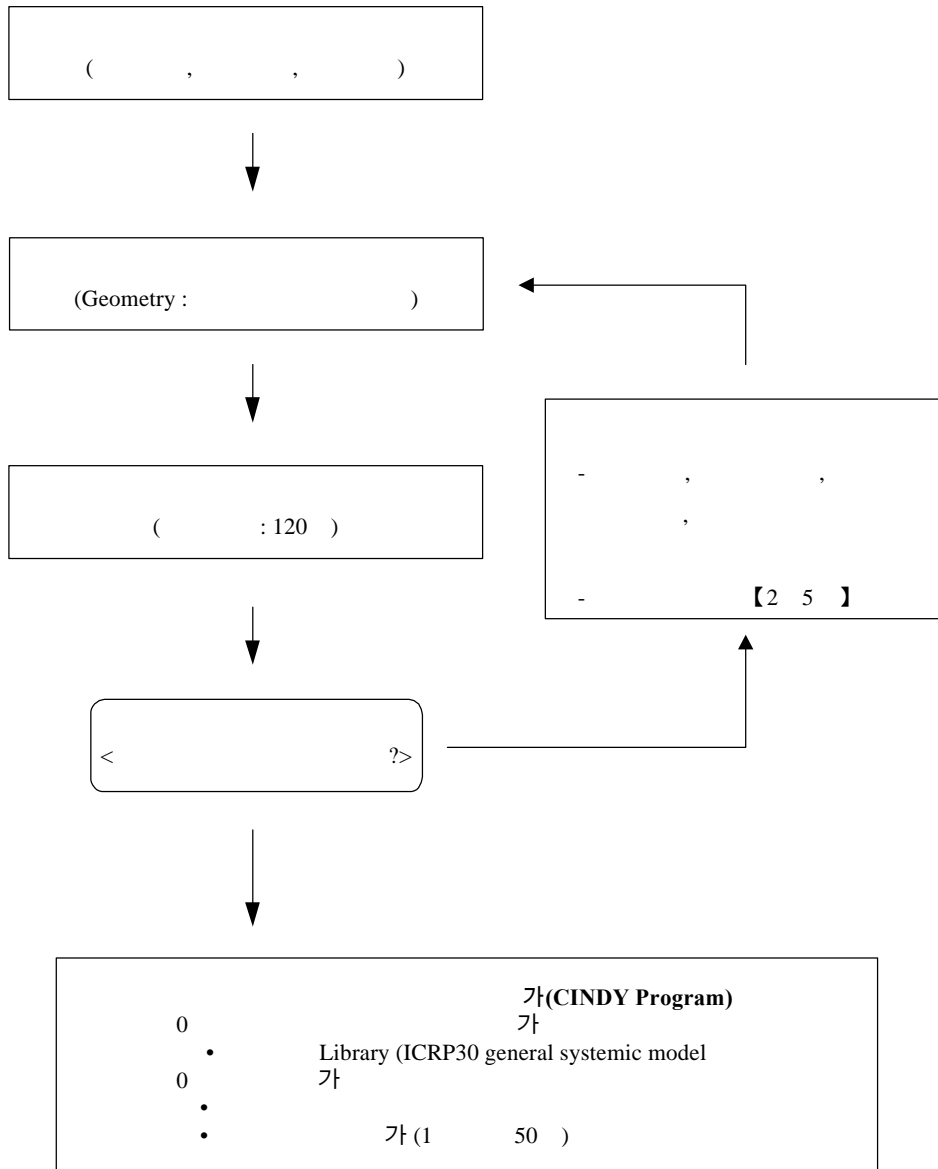


그림 3. 내부피폭 모니터링 절차

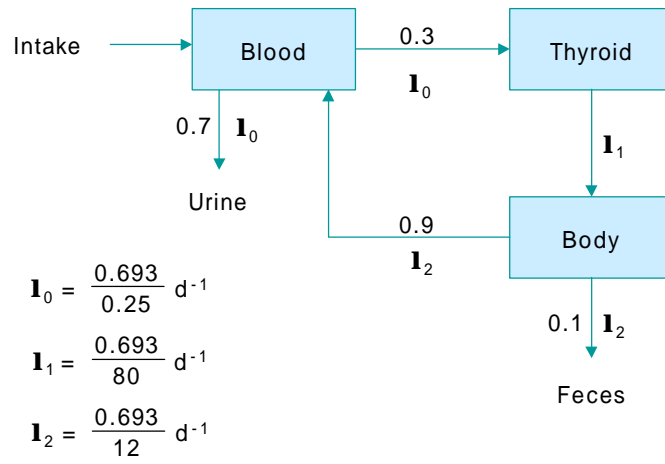


그림 4. 방사성요오드 물질대사를 위한 생물학적 모델(ICRP-54)

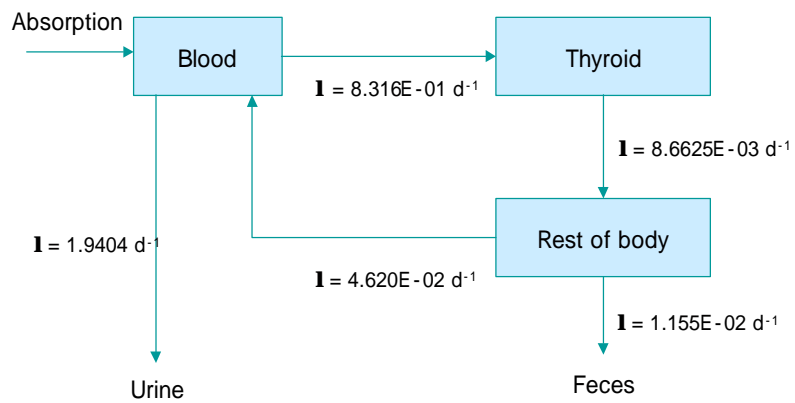


그림 5. 방사성요오드 물질대사를 위한 생물학적 모델(ICRP-78)

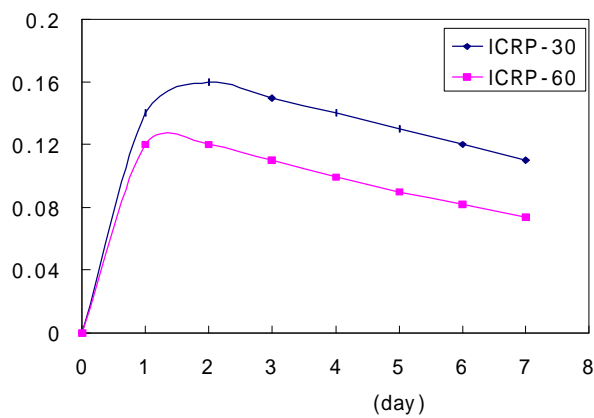


그림 6. I-131에 대한 ICRP-30/54와 ICRP-66/78의 섭취잔류분률(IRF) 평가결과 비교