

전신계측기를 이용한 원전종사자의 ^{131}I 내부방사능 측정 경험 및 개선방향에 대한 연구

김희근, 공태영

한전 전력연구원

2009년 5월 15일 접수 / 2009년 7월 13일 1차수정 / 2009년 7월 20일 채택

국내 원전의 계획예방정비기간 중에 원자로계통의 개방 과정에서 원자로건물 내 공기 중으로 누설된 ^{131}I 의 체내 흡입으로 원전 종사자의 내부피폭이 발생하였다. 이에 따라 원전에서 보유하고 있는 전신계측기(Whole Body Counter)를 이용하여 방사선작업 종료 후 즉시 원전종사자의 체내에 침적된 내부방사능을 측정하였고, 수일 경과 후 재측정하였다. 이러한 전신계측 결과를 이용한 섭취량 산정 값을 원전종사자가 출입한 원자로 건물 내 공기 중의 ^{131}I 방사능 농도 측정결과와 원자로건물 출입기록에 근거하여 계산된 ^{131}I 체내 섭취량과 비교 평가하였다. 그 결과 전신계측기를 이용한 체내 방사능측정 결과와 공기중 농도를 이용한 섭취량 산정 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 평가되었다.

중심어: ^{131}I , 내부피폭, 전신계측기, 공기중농도, 섭취량 산정

1. 서론

국내 원전종사자의 전체적인 피폭방사선량(man-mSv)은 원전 가동 초창기에는 운영경험의 부족과 가동 호기 수의 증가로 인해 늘어나는 경향을 보였으나, 2000년 이후에는 가동 호기 수의 증가에도 일정한 수준을 유지하거나 감소하는 추세를 보이고 있다¹⁾. 한편 원전종사자의 피폭방사선량 중에서 내부피폭 방사선량은 약 7% 미만으로 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타나고 있다. 이들 내부피폭 방사선량 중에서 중수로원전에서 삼중수소의 체내흡입에 의한 내부피폭 선량이 99% 이상을 차지하고 있으며, 감마선을 주로 방출하는 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{131}I , ^{95}Nb , ^{54}Mn 등에 의한 내부피폭 방사선량은 1% 미만으로 극히 낮게 나타나고 있다²⁾.

국내 원전에서는 감마선을 방출하는 핵종에 의한 원전종사자의 내부피폭 방사능을 측정하기 위해 전신계측(Whole body counting)을 실시하고 있다. 이러한 전신계측은 방사선작업종사자로 등록하는 최초에 실시하고 있으며, 정기적으로 1년에 한번 모든 종사자에 대해 실시하고 있다. 또한 신체의 일부 또는 전부가 오염된 것으로 판단되면 오염부위를 찾고, 전신계측을 병행 실시하여 내부피폭 여부를 확인하고 있다. 특히 원전 계획예방정비의 시작과 종료 시점에 전신계측을 일괄적으로 실시하고 있으며, 주요 방사선작업을 완료한 경우 전신계측을 추가적으로 실시하고 있다. 이외에 중수로원

전에서는 전신계측 방법에 의한 내부피폭 감시에 추가하여 뇨시료 중의 삼중수소 방사능을 주기적으로 측정하고 있다.

2002년 올진 3호기의 계획예방정비기간 중에 원자로계통의 개방 작업과정에서 원자로건물 내 공기 중으로 방사성 물질이 누설되었다. 이에 따라 이 당시 원자로건물에 출입하였던 다수의 종사자가 원자로건물 내 공기 중으로 누설된 ^{131}I 의 체내 흡입에 의한 내부피폭이 발생하였다. 이들 종사자는 원자로건물 내에 설치된 방사선감시기의 경보와 원자로건물 출입 종료 후에 실시하는 포털 모니터(Portal monitor) 또는 휴대용 오염감시기를 이용한 신체 오염검사 과정에서 방사능오염 경보가 울림에 따라 피부오염 검사를 완료한 후 전신계측을 실시하였다. 이 결과 상당수 종사자가 ^{131}I 의 체내 흡입에 의한 내부피폭이 발생한 것으로 나타났다^{3,4)}.

^{131}I 에 의한 내부피폭의 발생으로 방사선작업 종료 후에 즉시 해당 종사자에 대해 전신계측을 실시하였다. 그런데 초기단계에서 요오드의 신체대사모델과 전신계측기(Whole Body Counter: WBC)의 방사선학적 반응 특성을 정확히 이해하지 못해 전신계측 과정에서 약간의 혼선이 있었다. 일부 종사자의 경우 방사선작업 종료 후 여러 차례의 반복 전신계측을 실시하였는데, 측정시점마다 체내 보유 핵종은 동일하나 방사능이 서로 달랐으며, 일부 오염된 종사자에 대해 안전세척과 샤워 후 전신계측을 바로 실시한 결과 방사능이 검출

책임저자: 김희근, hkdgm@keprie.kr, 한전전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

*한국 원자력안전기술원, 원자력안전전문위원회 원자로계통분과 보고자료, 올진 3호기 냉각재 교방사능 정보관련 현황보고, 2002.12.4.
<http://www.kins.re.kr>.

되지 않아 단순 체외오염으로 판명되기도 하였다. 또한 일부 종사자는 전신계측 바로 다음날 다시 전신계측을 실시한 결과 방사능이 전혀 검출되지 않아 역시 체외오염으로 판명되는 경우도 발견되었다.

본 논문은 국내 원전의 올진 3호기 계획예방정비기간 중 ^{131}I 의 체내 흡입에 따른 WBC를 이용한 내부피폭 방사능측정 과정과 경험을 기술하고 있다. 또한 특정 원전종사자가 출입한 원자로건물 내 공기 중 ^{131}I 방사능농도 측정결과와 원자로건물 출입기록에 근거하여 ^{131}I 체내 섭취량을 계산에 의해 평가한 과정과 경험을 기술하고 있다. 이러한 경험을 바탕으로 원전종사자의 전신계측에 대한 간략한 개선방안을 제시하고 있다.

2. 요오드 누설과 내부피폭 발생

올진 3호기는 1,000 MWe급 한국표준형원전(Korean Standard Nuclear Power Plant: KSNP)으로 1997년 12월에 최초 임계에 도달하였고, 다음해 8월에 상업운전을 시작하였다. 2002년 말경 제 4차 계획예방정비를 위해 원자로를 수동 정지하였고, 이어서 원자로계통을 개방하였다. 그런데 원자로계통의 개방과 함께 초기에 출입한 종사자 대부분이 원자로계통에서 누설된 ^{131}I 의 체내 흡입으로 내부피폭이 발생하였다. 이러한 ^{131}I 내부피폭 발생과정을 시간대별로 요약하면 아래와 같다[4].

- 2002.11.23 올진 3호기 제 4차 계획예방정비 착수
- 2002.11.28 01:40~04:40 원자로헤드스터드 볼트 Detensining
- 2002.11.28 02:20~03:45 증기발생기 맨웨이 개방
- 2002.11.28 05:15 증기발생기 맨웨이 개방작업자 철수 과정 중 방사능 오염검출
- 2002.11.28 07:20 격납건물 작업종사자 전원철수
- 2002.11.28 08:50 격납건물내 작업 재개
- 2002.11.28 12:00 내부피폭 방사능측정 및 선량평가(이후 계속)
- 2002.11.29 11:00 격납건물내 작업중지
- 2002.11.30 09:00 격납건물내 작업 재개

한편 올진 3호기는 제 4주기 운전기간 동안 연료손상이 있었고, 따라서 계통 내에서 기체방사능 핵종의 농도가 증가된 상태로 유지되었다[4*]. 이에 따라 계획예방정비를 위한 원자로의 정지 후 증기발생기 맨웨이 개방과 함께 계통 내에 존재하는 ^{131}I 이 원자로건물 내로 누설되어 공기 중 방사능 농도가 증가하였다. 따라서 원자로건물 내에 설치된 방사선감시기의 정보가 발생하게 되었고, 원자로 건물 내에서 계획예방정비 작업에 참여하였던 종사자가 작업을 중지하고 철수하였다. 그런데 이 당시 원자로건물에 출입하였던 종사자 대다수가 낮은 농도의 ^{131}I 흡입으로 인한 내부피폭이 발생하였다. 이는 증기발생기의 개방으로 인한 ^{131}I 의 누설과 증발에 따른 원자로건물 내 공기 중으로 요오드의 빠른 확산을 사전에 충분히 예상하지 못했기에 있었다[4*].

3. 국내 원전의 전신계측 절차와 장비

국내 원전에서는 방사선작업종사자의 내부피폭 방사능을 감시하기 위해 전신계측 방법과 뇨시료 중의 방사능계측 방법

등을 이용하고 있다. 이러한 전신계측과 뇨시료 중의 방사능계측은 방사선작업종사자로 등록하는 최초에 실시하고, 정기적으로 1년에 한번 모든 종사자에 대해 실시하고 있다[5]. 또한 계획예방정비 작업을 시작하기 전과 종료한 후 전체 방사선작업종사자를 대상으로 전신계측을 실시하며, 주요 방사선작업의 완료 후에도 전신계측을 추가적으로 실시하고 있다. 이외에 중수로원전에서는 종사자의 뇨시료를 채집하여 삼중수소의 방사능을 측정하고 이에 따른 내부피폭 선량을 평가하여 보고하고 있다[5]. 이러한 전신계측(직접법)과 삼중수소 방사능측정(간접법)에 대한 요약은 그림 1에 제시되어 있다[5].

한편 방사선작업을 완료하고 방사능 오염검사를 실시하여 신체의 일부 또는 전체부위가 체외 오염된 것으로 판명되면 오염부위를 찾고, 피부오염 관리기준을 초과하는 경우 피부선량을 평가하고 있다[2,5]. 한편 오염된 피부에 대한 제염과 함께 전신계측을 실시하여 내부피폭 여부를 병행하여 확인하고 있다. 특히 계획예방정비기간에는 주요 방사선작업이 완료되면 이들 종사자 전원을 대상으로 전신계측을 실시하고 있다. 이러한 전신계측을 통해 원전 방사선작업종사자의 내부피폭 핵종과 방사능을 측정하여, 내부피폭 방사선량을 평가하고 있다. 이외에 중수로원전에서는 전신계측 방법 이외에 모든 종사자를 대상으로 14일 주기로 뇨시료를 제출하도록 요구하여 삼중수소의 방사능 측정과 이에 따른 선량평가를 실시하고 있다. 한편 주요 계통의 계획예방정비작업 완료 후에 작업에 참여한 모든 종사자에게 추가 뇨시료를 반드시 제출하도록 요구하고 있다[5].

국내 원전에서는 원전종사자의 전신계측을 위해 NaI 검출기가 탑재된 WBC를 이용하고 있다[5,6]. WBC에는 $7.6 \times 12.7 \times 40.6$ cm 크기의 대형 NaI 섬광검출기 두개를 내장하고 있으며, 직립 선형 측정구조(Stand type linear geometry)를 채택하고 있다. 본 계측기는 300 keV에서 1.8 MeV의 광자에서 발생하는 방사선을 효과적으로 검출할 수 있으며, 짧은 계측시간으로 신속하게 방사성핵종을 찾아내는 특징이 있다. 이에 따라 1분간의 방사능측정으로 ^{60}Co 에 대해 최소검출준위(Lower Limit of Detection: LLD)가 약 150 Bq 정도로 우수하게 나타나고 있다. 이외 원전 부지별로 고성능반도체 검출기(HPGe detector)를 갖춘 침대형 선형 측정구조(Bed type linear geometry)의 WBC를 추가적으로 확보하여 운영하고 있다[6,7]. 그림 2에 원전에서 사용 중인 두 종류의 선형 측정구조 형태의 WBC 외관을 나타내었다.

국내원전에서 보유하고 있는 WBC는 방사성핵종의 인체 내부 침적위치를 고려하여 갑상선(Thyroid), 폐(Lung), 하복부(Gastrointestine: GI) 및 전신(Whole body) 등 4가지 측정모드를 갖추고 있다. 이에 따라 6개월에서 1년 주기로 수행되는 WBC 교정(Calibration) 과정에서는 인체모형팬텀이나 또는 교정용 Transfer phantom을 이용하여 이러한 4가지 측정모드 각각에 대해 교정을 수행하고 있다. WBC 교정 완료 후에는 ANSI N13.30의 지침에 따라 WBC의 교정결과를 검증하는 과정을 거치고 있다[5,8]. 그림 3에 원전에서 WBC 교정에 사용되고 있는 팬텀을 나타내었다[6,7].

원전에서의 내부방사능 측정 경험에 의하면 WBC의 측정모드로서 전신 측정모드(Whole body geometry)를 제외하고는 다른 측정모드는 거의 사용하지 않고 있다[2]. 이는 원전 방

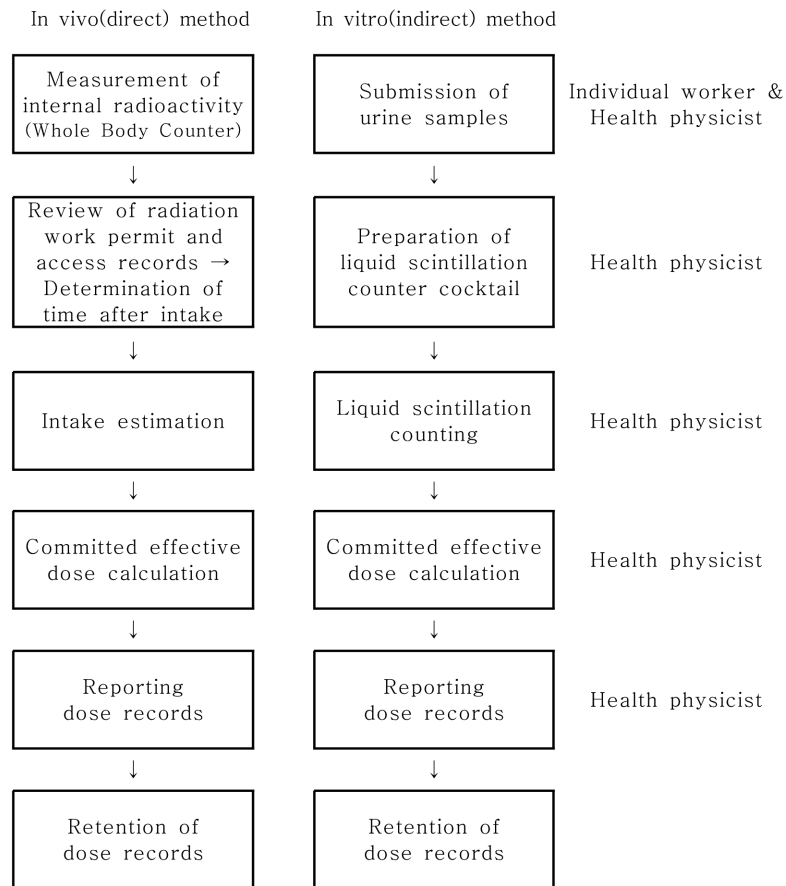


Fig. 1. Systematic diagram for measurement and assessment of internal radioactivity.



Fig. 2. Whole body counters at nuclear power plants (Fastscan and Accuscan).

사전작업과정에서 흡입된 방사성핵종을 모르고, 방사성핵종의 체내 침적여부를 정확히 모르기 때문에, 전신부위에 대한 방사성핵종의 검출목적으로 전신 측정모드를 이용하고 있다

고 판단된다. 특히 원전의 계획예방정비기간에는 방사선작업 종료 후에 바로 전신계측을 하기 때문에 체내에 방사성물질의 침적 발생시점과 전신계측과의 시간 간격이 비교적 짧다. 이

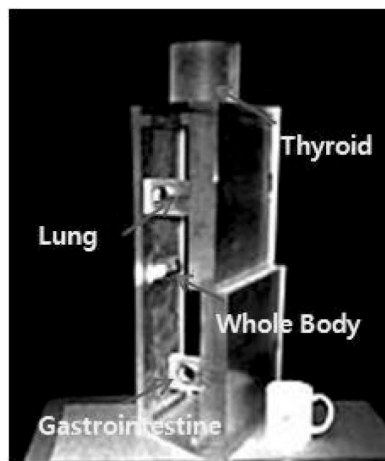


Fig. 3. Canberra's transfer phantom (Model No. 2257A).

경우 방사성핵종은 특정장기에 축적이 일어나지 않는 시점으로 폐나 전신에 분포하고 있으며, 따라서 이러한 인체대사 특성을 고려하여 전신측정모드를 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 특히 WBC 측정모드에서 전신 측정모드가 가장 보수적인 방사능계측 결과를 제시하고 있고, 방사성핵종 오염의 위치에 따른 계측과정에서의 오차가 가장 적게 나타나기 때문에 전신측정모드 사용이 적절하다고 판단된다⁶⁾. 그런데 만약 체내에 침적된 방사성핵종을 정확히 알고 있고, 섭취된 시점을 정확히 알고 있는 경우에는 체내 침적위치의 방사능을 적절히 검출할 수 있는 WBC 측정모드로 변경한 전신계측이 필요하다고 판단된다. 원전에서 보수적인 전신측정모드를 이용하더라도 문제가 되지 않는 이유는 WBC를 이용한 내부방사능 계측 값이 실질적으로 매우 낮아, 섭취량(Intake)과 예탁 유효선량(Committed effective dose) 평가결과 원전에서 관심

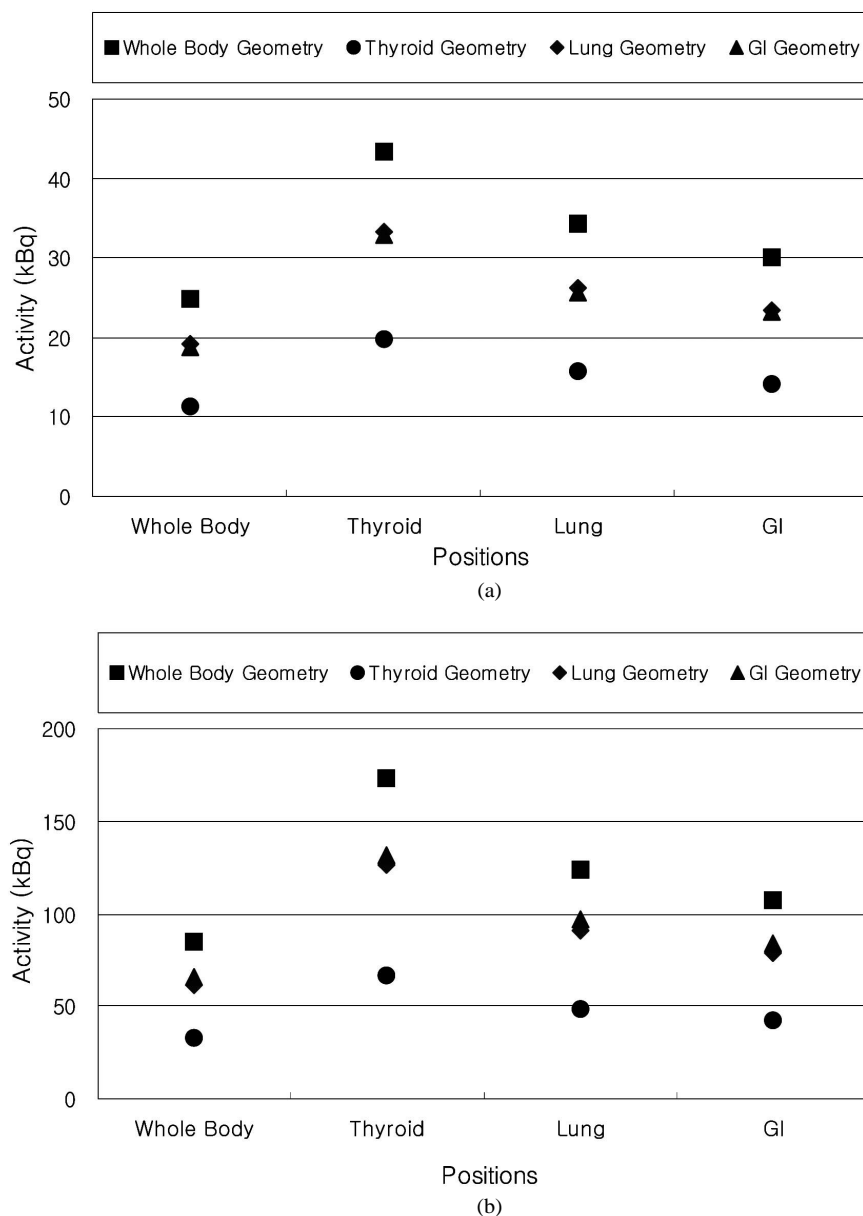


Fig. 4. Comparison of detected activities depending on the WBC geometry: (a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs .

을 가지고 있는 준위 이상으로 산출된 적이 거의 없었기 때문이다. 국내 원전에서의 방사선관리 경험에 의하면 WBC를 이용한 내부방사능 계측은 예약효선량을 평가하기 위한 목적보다는 작업장이 방사성물질로 오염되지 않았다는 사실을 확인하는 목적으로 주로 이용하여왔다[2].

이러한 전신계측 측정모드를 이용한 방사능 측정 결과의 보수성은 최근 WBC를 이용하여 주요 방사성핵종에 대한 WBC 측정모드 선정에 관한 실험결과에서 확인되었다[9,10]. 이 실험에서는 방사성핵종의 체내 침적위치를 고려하여 표준방사선원을 각각 갑상선, 폐, 하복부 및 전신에 위치시키고 WBC의 측정모드를 계속 변경하면서 방사능을 측정하였다. 그 결과 전신 측정모드를 적용하여 체내 보유 방사능을 측정할 경우가 다른 측정모드로 측정한 경우보다 최대 2배 정도 높게 나타났다. 이러한 결과는 각 측정모드 중에서 전신 측정모드가 가장 보수적으로 방사능을 측정하고 있다는 사실을 단적으로 보여주고 있다[9,10]. 이 결과를 그림 4에 나타내었다.

4. ^{131}I 흡입에 따른 전신계측 경험

일반적으로 전신계측은 방사성물질의 체내흡입 후 일정 시간이 경과하여 신체 내에서 평형에 도달한 후에 전신계측을 하여야만 신뢰성 있는 체내 방사능 측정값을 얻을 수 있다. 그런데 울진원전의 ^{131}I 내부방사능 오염의 경우 작업종사자의 원자로건물 출입 종료 후 즉시 전신계측을 실시함에 따라, 체내로 유입된 요오드가 신체 내에서 평형에 도달하기 전에 전신계측이 이루어졌다. 이 때 가장 빠른 전신계측은 요오드 섭취 후 약 3시간 경과한 후 실시되었다[3]. 이렇게 방사선작업 완료 즉시 전신계측을 실시하였던 이유는 원전 계획예방정비 기간 중에는 방사선작업이 동시 다발적으로 이루어지고, 또한 방사선작업종사자가 여러 종류의 방사선작업에 투입되는 경우가 있기 때문에 방사선관리 차원에서 방사선작업을 종료한 즉시 전신계측을 실시하고 있다. 그래야만 해당 작업에서

피폭받은 방사선작업종사자의 내부피폭을 확인할 수 있고, 체계적이고 효율적인 방사선관리가 가능하기 때문이다.

그런데 요오드 핵종은 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)의 내부피폭 선량평가 지침과 외국 기술 자료에 의하면 측정과 선량평가가 복잡한 핵종으로 인식되고 있다. 요오드는 휘발성이 크며 화학적 특성으로 인해 신체 내에서 흡수와 배설이 빠르게 이루어지며, 일부는 갑상선으로 축적된 후 다시 제거가 일어나는 특이한 핵종이다[11]. 이러한 이유로 요오드 체내 섭취에 따른 전신계측이 어렵고 방사능 측정과정에서 오차가 수반되고 있다. 미국원자력규제위원회(U. S. Nuclear Regulatory Commission: USNRC)의 내부방사능 측정지침에서는 요오드 섭취 후 일정한 시간 경과 후 내부피폭 방사능 계측(Bioassay)을 하도록 요구하고 있다[12]. 또한 ICRP에서도 섭취 후 하루 이후부터 섭취잔류분율(Intake retention fraction: IRF) 자료를 제공하고 있다[11,13].

2002년 국내 원전의 원자로건물 공기 중으로 누설된 ^{131}I 의 체내 흡입으로 인해 원전종사자의 내부피폭이 발생함에 따라 이들 방사선작업종사자에 대해 WBC의 전신 측정모드를 선택하여 전신계측을 실시하였다. 그런데, 방사선작업 종료 즉시 전신계측을 실시함에 따라 일부 종사자는 반복적인 전신계측의 과정에서 체내 보유 핵종은 동일하나 체내 보유 방사능이 다르게 나타나기도 하였다. 또한 일부 종사자는 안면 세척과 샤워 후 전신계측 결과 방사능이 검출되지 않아 단순 체외오염으로 판명되기도 하였으며, 다음날 다시 전신계측을 실시한 결과 전혀 방사능이 검출되지 않는 경우도 나타났다[3]. 이에 따라 WBC의 정상동작 여부와 방사성핵종의 측정에 사용된 WBC의 교정 상태를 점검하기 위해 ^{131}I 에 의해 내부 피폭된 동일 방사선작업종사자에 대해 울진원전 본부 내에 다른 발전소에서 보유하고 있는 동일 기종의 WBC와 부지 내에서 보유하고 있는 침대형 구조의 WBC를 이용하여 다시 측정하였다. 그 결과 방사능 측정값이 거의 동일하게 나타나 WBC는 정상으로 동작되고 있고, 교정이 적절히 이루어진

Table 1. Whole Body Counting for Inhalation of ^{131}I .

No.	Whole Body Counting				
	Initial Count (Bq)	Time after Intake (Days)	Time after intake (Hours)	Recount (Bq)	Time after Intake (Days)
1	7,092	1.47	-	2,149	12.62
2	10,420	0.50	12	2,670	10.39
3	2,667	0.22	5.3	2,515	12.22
4	12,330	0.39	9.3	4,563	12.46
5	8,244	1.21	-	2,458	12.27
6	4,819	0.23	5.5	2,177	11.43
7	5,775	1.2	-	2,408	12.30
8	13,170	0.57	13.7	2,490	11.86
9	5,556	0.31	7.4	5,786	12.60
10	1,548	0.41	9.8	984	9.38

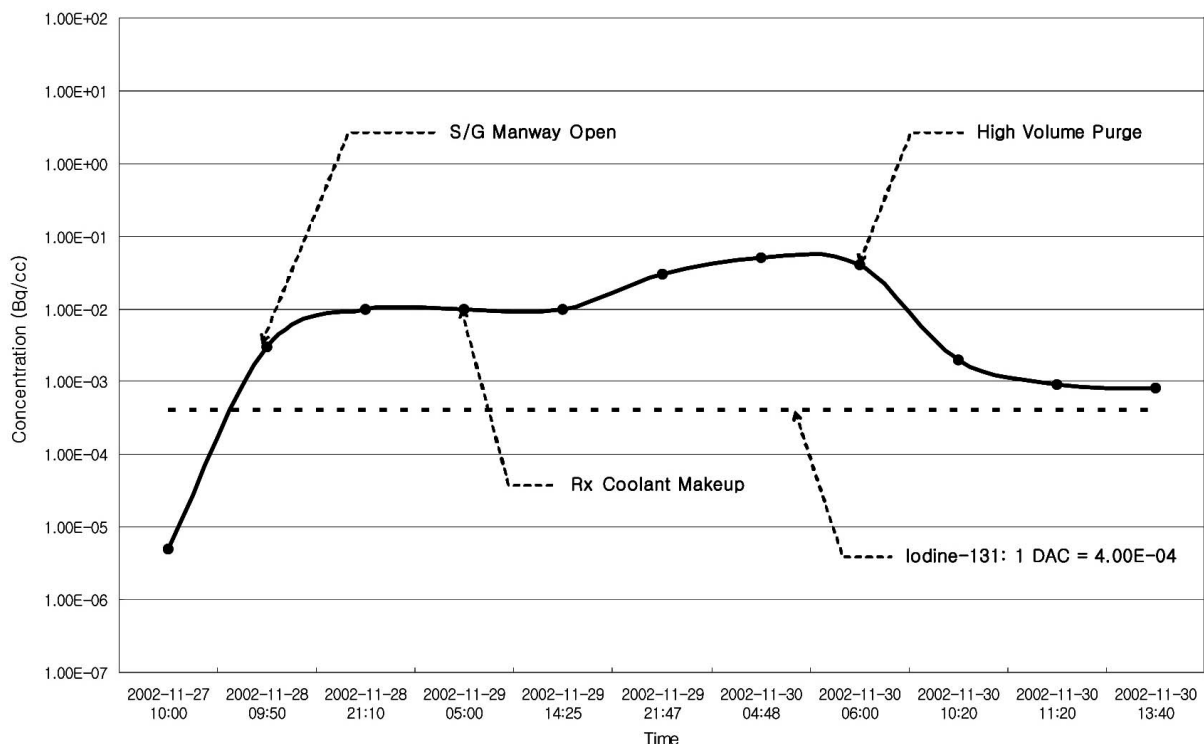


Fig. 5. Trend of airborne concentration of ^{131}I after reactor vessel opening.

것으로 확인되었다[3].

한편 이러한 전신계측 과정에서의 내부방사능 측정의 편차와 불확실성을 고려하여 ^{131}I 섭취 최소 약 2~3일 경과 후 전신계측을 다시 실시하였다. 이 경우 WBC 측정모드는 갑상선 측정모드와 전신 측정모드 2가지를 이용하였으나, 섭취량은 전신 측정모드를 이용한 방사능 측정값을 기준으로 보수적으로 평가하였다. 이 경우 전신 측정모드의 보수적 전신계측 측정값의 선택으로 섭취량과 내부피폭 선량평가에서 일부 보수적인 평가를 나타낼 수 있으나, 섭취된 방사성핵종과 체내 침적부위를 모르고 있어 전신 측정모드의 선택이 적절한 것으로 판단되었다. 한편 이 측정결과에 근거한 내부피폭 선량평가 결과가 선량한도에 비해 매우 낮기 때문에 방사선관리 측면에서 영향은 낮은 것으로 판단되었다.

이러한 전신계측 과정에서 재 측정을 수행한 배경에는 ICRP와 USNRC의 지침을 근거로 결정하였다. 즉, ICRP-54와 ICRP-78의 내부피폭 방사능 측정지침에 관한 보고서에 따르면 ^{131}I 의 갑상선 IRF는 체내 섭취 후 초기에 급격히 증가하여 1~2일이 경과한 시점에 정점에 도달한 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 따라 ^{131}I 섭취 후 신체 내에서의 평형에 도달하여 안정된 전신계측이 가능한 기간을 고려하고 있는 것으로 판단되었다[11,13]. WBC 전신 측정모드를 이용한 섭취량 산정은 기본적으로 전신에 대한 IRF 자료를 이용하여야 하나, ICRP 보고서에서 전신 IRF를 제공하고 있지 않아 갑상선 IRF를 기준으로 판단하였다[11,13]. 이 경우 섭취 후 비교적 짧은 경과 시간 후에는 두 IRF의 차이로 섭취량이 차이를 보이나, 섭취 후 수일 경과 후에는 갑상선 IRF와 전신 IRF가 거의 동일해지기 때문에 섭취량 산정에서 차이가 크지 않

은 것으로 확인되었다. 한편 이러한 전신계측 결과 중에서 대표적인 10명의 방사능측정 결과를 표 1에 나타내었다[3].

5. 섭취량 산정과 공기중 농도를 이용한 섭취량의 비교

^{131}I 내부피폭의 발생과 짧은 시간에 이루어진 초기 전신계측 결과로 얻어진 체내 보유 방사능에 대한 적절성을 검토하였다. 이는 초기 전신계측결과로 얻어진 체내보유량과 갑상선 IRF를 이용한 섭취량 평가 값이 예상보다 비교적 높게 나타났기 때문이었다. 이에 따라 섭취시점과 전신계측 시점과의 시간 차이가 짧은 특정 작업종사자를 대상으로 공기중 ^{131}I 농도와 출입시간을 근거로 체내 섭취량을 계산하였다.

원자로계통을 개방한 당시 약 3일 동안 공기중 ^{131}I 의 농도 측정값은 $1 \times 10^{-2} \text{ Bq/cc}$ 수준으로 거의 일정하게 유지되어 큰 변화가 없었다. 이러한 결과는 원자로 개방 당시의 공기중 ^{131}I 농도를 측정된 결과에서 확인되었다. 이를 그림 5에 나타내었다. 특히 요오드는 휘발성이 강하기 때문에 계통에서 누설되면 짧은 시간에 작업 공간 내 공기중으로 고르게 확산되는 특성이 있고, 특히 공기중 농도를 이용하여 섭취량을 산정한 2명의 작업종사자는 이들이 원자로 건물 내의 특정 지역에서 방사선작업을 수행한 것이 아니라, 원자로 건물 내를 순회 점검하였기 때문에 원자로 건물내 공기중 ^{131}I 평균 농도를 사용하더라도 공기중 ^{131}I 농도의 차이로 따른 섭취량의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단되었다. 이들은 원자로 건물 출입기록부에 2002년 11월 28일에 25분, 29일에 65분 총 90분

동안 원자로 건물을 출입한 것으로 기록되어 있어, 이 출입시간을 근거로 호흡량을 산정하였다. 이 경우 방호용 호흡기의 방호계수는 적용하지 않았다. 공기중 ^{131}I 농도를 이용한 섭취량을 아래와 같이 계산하였다.

섭취량 (I) =

$$\begin{aligned} & \text{공기중농도} (C, \text{Bq m}^{-3}) \times \text{표준인 호흡율} (V, \text{m}^3 \text{hr}^{-1}) \times \text{체류시간} (T, \text{hr}) \\ &= \frac{1 \times 10^{-2} \text{ Bq}}{\text{cc}} \times \frac{1.2 \text{ m}^3}{\text{hr}} \times \frac{10^6 \text{ cc}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \times (25 + 65) \text{ min} \\ &= 1.84 \times 10^4 \text{ Bq} \end{aligned}$$

그런데 WBC로 계측한 이들의 ^{131}I 내부방사능 보유량은 각각 18,170 Bq, 13,170 Bq로 나타났다. 이에 따라 원자로 건물내 공기중 ^{131}I 농도를 이용하여 계산으로 산출한 내부방사능 값과는 최대 약 30%의 차이를 보였다. 이러한 결과는 전신계측에 의한 방사능 측정결과와 공기중 농도를 이용한 방사능 값의 계산결과 차이가 크지 않아 비교적 잘 일치하는 것을 보여주고 있다[3]. 한편 ^{131}I 섭취 후 24시간 이내에 수행된 WBC 측정결과와 갑상선 IRF를 이용한 섭취량 산정 과정에서의 시행착오, 전신 IRF 계산과 이를 이용한 섭취량 산정 및 예탁유효선량 평가경험에 대해서는 대한방사선방어학회 논문 “국내원전에서 ^{131}I 내부흡입에 따른 섭취량 산정과 내부피폭 방사선량 평가 경험과 개선방향에 대한 연구”와 전력연구원에서 발행된 기술보고서 등에 자세히 제시되어 있다[14-16].

6. 결론

2002년 올진 3호기의 계획예방정비기간 중에 원자로 계통의 개방 작업과정에서 원자로 건물 내 공기 중으로 방사성 물질이 누설되었고, 이 당시 원자로 건물에 출입하였던 다수의 종사자가 원자로 건물 내 공기 중으로 누설된 ^{131}I 의 체내 흡입에 의한 내부피폭이 발생하였다. 이에 따라 원전에서 보유하고 있는 WBC를 이용하여 원전종사자의 체내에 침적된 내부방사능을 즉시 측정하였으나, 발생초기에 WBC의 특성을 적절히 이해하지 못하고 ^{131}I 인체대사모델의 복잡함으로 인한 시행착오를 경험하였다.

국내원전에서 ^{131}I 의 내부피폭 발생 초기 혼선에도 불구하고 ^{131}I 전신계측과 섭취량 평가에 대한 국내외 기준을 검토하였고, WBC 방사능측정 방법을 신속하고 적절히 결정하였다. 또한 신체 내에서 ^{131}I 가 안정한 상태에 도달하는 수일 경과 후 WBC 재계측을 통해 신체보유 방사능을 최종 결정하였다. 이 과정에서 부지내 동일 기종의 WBC를 이용하여 내부방사능 측정값을 확인하였고, 특정 원전종사자가 출입한 원자로 건물 내 공기 중의 ^{131}I 방사능농도와 출입기록에 근거하여 ^{131}I 체내 보유량을 계산하고 평가하였다. 이러한 과정을 통해 섭취량이 적절하게 일치하는 것을 확인하였으며, 결과

적으로 국내 원전에서 내부방사능 측정에 관한 기술수준을 향상시키는 계기가 되었다.

이러한 국내원전에서의 ^{131}I 의 전신계측 경험을 토대로 판단하면 원전에서 운용중인 전신계측기의 최적 측정모드 선정과 운용에 대한 개선이 필요하다고 본다. 또한 국내원전의 ^{131}I 측정에서 나타난 단순 외부오염의 확인방법과 전신계측 과정에서 외부와 내부 방사능오염을 구별하고 확인할 수 있는 방안의 수립도 필요하다고 판단된다. 이외에도 내부피폭 선량평가와 연계하여 원전에서 발생가능한 주요 방사성 핵종의 인체대사모델에 대한 연구와 신뢰성 있는 피폭평가를 위해 입자크기와 화학형 등 선량평가 데이터베이스 구축을 위한 추가적인 기술개발 등이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주)의 기술지원 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국수력원자력(주). 2008년도 원자력발전소 방사선관리연보 2008.
2. 한국수력원자력(주). 내부 방사능 오염 측정 및 평가 검증체계 기술개발. I05NJ14. 2006.
3. 김희곤. 요오드-131 흡입에 따른 내부피폭 선량평가 방법의 고찰. 2003 KINS 방사선안전평가 심포지엄. 교육문화회관. 2003.
4. 한국수력원자력(주) 원자력교육원. 제 21기 방사선(안전, 방제) 관리자. 2005.
5. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준기술행정절차서, 내부피폭 방사선량 측정 및 평가, 표준기행 방사선-06. 2003.
6. Canberra. Model 2250 FASTSCAN, High-Throughput Whole Body Counter. 2002.
7. Canberra. Abacos Plus Body Burden System Operation, SU-425-4. 2003.
8. American National Standard Institute. Performance Criteria for Radiobioassay. ANSI HPS N13.30. 1996.
9. 김희곤, 공태영. 전신계측기를 이용한 원전종사자의 방사성 오염위치 확인과 내부방사능측정 개선에 관한 연구. Journal of Radiation Protection, 2009 March;34(1):37-42.
10. Kong TY, Kim HG. Improvement to Whole-Body Counting Procedures at Nuclear Power Plants. Radiation Protection Dosimetry, 2009 January;133(2):89-96.
11. International Commission on Radiological Protection. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, ICRP Publication 78. Pergamon Press. 1997.
12. United States Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 8.20, Application of Bioassay for I-125 and I-131, USNRC. 1979.
13. International Commission on Radiological Protection. Individual Monitoring for Intakes of radionuclides by Workers: Design and Interpretation, ICRP Publication 54. 1987.
14. 한진전력연구원. 일본 방사선종합연구소(NIRS) 소속 방사선량 평가 전문가 초청결과 보고서, TM.02NE07.P2003.062, 2003.
15. 한진전력연구원. 내부피폭 선량평가 및 방사선피폭저감 기술개발 관련 세미나 결과보고서, TC.02.NE07.W2003.158, 2003.
16. 한진전력연구원. 내부피폭 선량평가 코드(KIDAC) 섭취잔류분율 및 화학형 개정보고서, TM.02NE07.P2003.168, 2003.

The Whole Body Counting Experience on the Internal Contamination of ¹³¹I at Korean Nuclear Power Plants

Hee Geun Kim and Tae Young Kong
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - During the maintenance period at Korean nuclear power plants, internal exposure of radiation workers occurred by the inhalation of ¹³¹I released to the reactor building when primary system was opened. The internal radioactivity of radiation workers contaminated by ¹³¹I was immediately measured using a whole body counter and the whole body counting was performed again after a few days. In this study, the intake estimated from the record history of entrance to radiation control areas and the measurement results of air sampling for ¹³¹I in those areas, were compared with that from the results of whole body counting. As a result, it was concluded that the intake estimation using whole body counting and air sampling showed similar results.

Keywords : ¹³¹I, Internal Exposure, Whole Body Counter, Radioactive Concentration in Air, Intake Estimation