Journal of Radiation Industry 12(2) : 103~109(2018)

전신계측기를 이용한 인체 방사능측정 및 방사능오염 구분에 대한 고찰

김 희 근[1] · 공 태 영[2] · 이 경 진[3,*]

[1]위덕대학교 에너지전기공학부, [2]한수원중앙연구원 방사선환경연구소,
[3]조선대학교 원자력공학과

Review of Methods on the Discrimination and Measurement between Internal and External Contamination using Commercial Whole Body Counters

Hee Geun Kim[1], Tae Young Kong[2] and Goung Jin Lee[3,*]

[1]*Division of Energy & Electrical Engineering, UiDuk University*
[2]*Radiation & Environment Laboratory, KHNP-CRI*
[3]*Department of Nuclear Engineering, Chosun University*

Abstract - A whole body counter (WBC) is used in nuclear power plants (NPPs) to identify and measure internal radioactivity of workers who is likely to ingest or inhale radionuclides. A WBC has several counting geometries, i.e. the thyroid, lung, whole body and gastrointestinal tract, considered with the location where radionuclides are deposited in the body. However, only whole body geometry is normally used to detect internal radioactivity during whole body counting at NPPs. It is overestimated internal exposure dose because this measured values are indicated as the most conservative radioactivity values among the them of other's geometry. It is often possible to estimate external contamination as internal contamination due to radionuclides attached to the skin of radiation workers and this leads to an excessively conservative estimation of radioactive contamination. In this paper, the reanalysis of previous experiments for radioactivity depending on the counting geometry of WBC using phantoms and standard radiation sources was carried out in order to improve overestimated internal exposure dose. Quantitative criteria could be used for selecting the optimal WBC counting geometry. Furthermore, discrimination guideline according to ratio of count rates of the upper and lower detectors of the WBC is provided through statistical analysis method.

Key words : Whole body counter, Counting geometry, Internally radioactive contamination, Humanoid phantom, External radioactive contamination, Discrimination of contamination

서 론

국내 원전에서는 방사선작업종사자의 인체 내부에 오염된 방사능을 측정하기 위해 전신계측기(Whole Body Counter;

* Corresponding author: Goung Jin Lee, Tel. +82-62-230-7167, Fax. +82-62-232-9218, E-mail. kjblee@chosun.ac.kr

WBC)를 이용하고 있다(Kong and Kim 2009; Kim and Kong 2012; Ko *et al*. 2014). 이들 WBC는 요오드화나트륨(NaI) 섬광물질을 검출기로 사용하고 있으며, 직립 선형 측정구조(Stand-type linear geometry)를 채택하고 있다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014). 이들 WBC는 원전에서 수많은 종사자를 대상으로 짧은 시간 측정으로 재현성이 있게 방사능 측정값을 얻을 수 있는 장점이 있다(CANBERRA 2002; Kim and Kong 2012; AMERTEK 2013). 이외에 일부 원전 본부별로 보다 정확한 방사능측정을 위해 고순도 게르마늄 검출기(HPGe detector)를 장착한 침대형(Bed type) WBC를 추가로 운영하고 있다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014).

국내 원전의 WBC는 방사성핵종의 인체 내 침적위치를 고려하여 갑상선(Thyroid), 폐(Lung), 전신(Whole body), 하복부(Gastrointestinal tract) 등 4가지 측정 모드(Geometry) 기능을 가지고 있다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014). 이는 내부 방사능측정 과정에서 핵종의 인체 내 침적위치에 따라 측정 모드를 선정할 수 있는 장점이 있다. 그럼에도 전신계측에서는 4가지 측정 모드 중에서 가장 보수적 방사능 측정값을 나타내는 전신 모드(Whole body geometry)를 거의 대부분 이용하고 있다. 이는 종사자를 전신 모드를 기준으로 내부방사능을 측정해도 예탁유효선량이 특별한 경우를 제외하고는 측정값이 기록준위보다 훨씬 낮기 때문에 보수적인 전신모드를 적용하더라도 작업장의 오염여부 확인이 주 목적인 경우에는 별 문제되지 않았다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014).

그러나 원전에서 내부피폭이 실제로 발생하는 경우에는 내부피폭선량이 과대평가되는 잠재적인 문제점을 안고 있다(Kim and Kong 2012). 즉, 기록준위 이상인 내부피폭이 발생된 경우, 내부방사능 침적이 실제로 일어난 인체 부위에 대한 내부 오염여부의 확인이 필요하고, 또한 반복 전신계측을 통해 핵종의 인체 내 침적위치와 방사능량에 대한 보다 상세한 정보를 확보할 필요가 있다. 이를 위해선 우선 전신모드를 적용한 전신계측을 통해 인체 내부 또는 외부 오염이 일어난 위치에 대한 개략적인 확인이 선행되어야 한다. 또한 이 핵종의 인체 내부 또는 외부의 침적위치를 고려한 WBC 측정 모드 변경을 통해 침적된 방사성핵종의 정확한 방사능량을 측정하는 것이 필요하다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014).

일반적으로 WBC는 종사자의 신체 표면이 방사성물질로 외부 오염된 경우 이를 인체 내부에서 발생된 방사능오염과 구별하지 못하는 문제점이 있다. 이에 따라 인체 외부가 방사성물질로 오염되어 있을 경우 이를 인체 내부에 침적된 방사능으로 측정하게 되며, 결과적으로 방사능 측정값은 매우 보수적으로 나타난다(Kong and Kim 2009; Kim and Kong 2012; Ko *et al*. 2014). 이는 인체 내부에 방사능이 침적된 경우 방사선원에서 방출된 방사선이 인체를 통과하면서 감쇄(Attenuation)되어 계측되지만, 인체외부에 오염되었을 경우 방사선이 감쇄가 없이 계측되고, 더욱 인체표면의 방사선원과 검출기와의 거리가 짧아져 방사능 측정값은 상대적으로 높게 나타난다. 즉, WBC는 외부오염을 내부오염으로 평가하는 오류를 범할 수 있으며, 이러한 경우 종사자의 섭취량과 예탁유효선량이 과대평가되는 착오를 범하게 된다(김과 공 2009; Kim and Kong 2012).

이런 점을 개선하고자, 원전에서 사용 중인 WBC별로 다양한 실험을 수행하고, 특히 WBC 상부 및 하부 검출기 계측비율을 근거로, WBC의 측정 모드를 변경하여 재측정을 권고하는 정량적인 기준을 제시하였다. 또한 인체 내부와 외부의 방사능오염을 구별할 수 있는 판단기준을 제시하였다. 이 논문은 과거 논문의 내용을 재검토하여 원전종사자의 인체 내 · 외부 오염을 구별할 수 있는 전신계측 방법과 인체 내부 또는 외부 방사능오염이 일어났을 경우 오염위치를 정확히 밝혀낼 수 있는 일반화된 전신계측 방법을 개선하여 제시하였다.

재료 및 방법

1. 전신계측기(WBC)

국내 원전별로 CANBERRA 사에서 제작한 Fastscan 2250 stand-type WBC 또는 AMETEK/ORTEC 사에서 제작한 StandFast II stand-type 등 두 종류 모델의 WBC를 확보하고 있다(CANBERRA 2002; AMERTEK 2013). 이들 두 종류의 WBC를 Fig. 1에 나타내었다. 이 계측기는 공통적으로 빠른 방사능 측정을 위해 대형 NaI 섬광검출기 두개를 내장하고 있으며, 직립 선형 측정구조(Stand-type linear geometry)를 채택하고 있다. 이 계측기는 300 keV에서 1.8 MeV의 광자에

Fig. 1. Whole Body Counters [(Left) Canberra's Fastscan stand-type WBC and (Right) Oretec's Standfast II stand-type WBC).

서 발생하는 방사선을 효과적으로 검출할 수 있으며, 짧은 계측시간으로 신속하게 핵종을 찾아내는 특징이 있다. 이에 따라 약 30초에서 1분간의 전신계측으로 ^{60}Co 선원에 대해 약 150 Bq 최소검출준위(Lower Limit of Detection: LLD)를 얻을 수 있다(CANBERRA 2002; AMERTEK 2013). 이외 원전 본부별로 보유한 고성능반도체 검출기(HPGe detector)를 채택한 침대형 선형 측정구조(Bed-type linear geometry) WBC를 Fig. 2에 나타내었다(CANBERRA 2002).

2. 인체모형 팬텀(Phantom)

WBC를 이용한 인체 내부 및 외부 방사능오염 측정실험에는 세 종류의 인체모형 팬텀이 사용되었다. 첫째는 한국수력원자력(주) 방사선보건원에서 제작한 표준 한국인 인체모형 팬텀이며, 둘째는 Canberra사에서 제작한 Canberra's transfer phantom이며, 셋째는 CIRS (Computerized Imaging Reference Systems)사에서 제작한 ATOM 인체모형 팬텀이다(CANBERRA 2002; AMERTEK 2013; CIRS 2013). 표준 한국인 인체모형 팬텀은 2 cm 간격의 슬라이스(Slice)로 나누어져 있어, 이들 슬라이스 사이에 방사성물질을 삽입하거나 실험에 따라 분리가 가능하게 제작되었다. Canberra's transfer phantom은 Canberra사의 WBC 교정을 위해 제작된 인체모형팬텀으로 갑상선, 폐, 전신, 하복부 등에 방사선원을 삽입할 수 있도록 제작되었다. ATOM 인체모형팬텀은 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)와 국제방사선단위측정위원회(The International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU)의 규격을 근거로 제작되었으며, 방사선원을 팬텀 내부에 삽입이 가능하도록 25 mm 간격의 슬라이스로 구성되어 있다(CIRS 2013). 이들 세 팬텀의 사진을 Figs. 3-5에 각각 나타내었다.

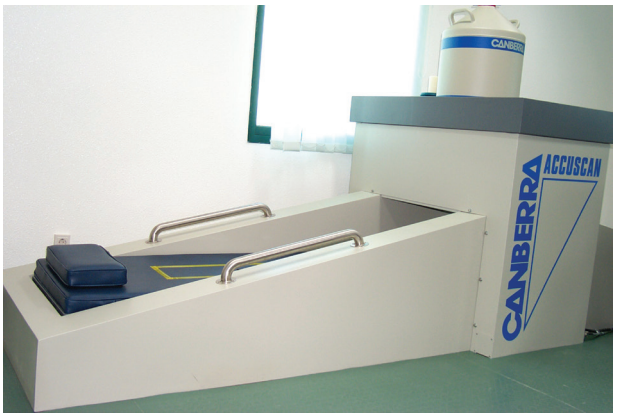

Fig. 2. Whole Body Counter (Canberra's Accuscan Bed-type WBC).

Fig. 3. Humanoid phantom of typical Korean male [(Left) Front-side phantom, (Right) Back-side phantom).

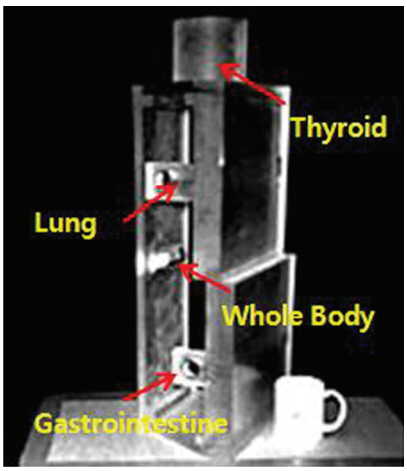

Fig. 4. Canberra's transfer phantom (Thyroid positions, Lung positions, Whole body positions and Gastrointestine positions).

Fig. 5. ATOM phantom with indicated location of contamination.

Fig. 6. Standard radiation source [(Left) ^{137}Cs and (Right) ^{60}Co].

3. 표준방사선원

WBC 측정 모드 최적화 실험은 한국표준과학연구원(KRISS)에서 제작된 표준방사선원인 ^{137}Cs 및 ^{60}Co 점 선원(Point source)을 사용하여 수행하였다(한국표준과학연구원 2010). 인체모형 팬텀의 외부 표면과 팬텀 슬라이스 사이에 점선원을 삽입하여 방사능 측정을 수행하였다. Fig. 6에 표준방사선원을 나타내었다.

4. 실험방법

원전에서 방사선작업 시 방사성핵종의 오염이 주로 일어나는 위치를 가정하여(갑상선, 폐, 전신 및 하복부), 이들 팬텀 위치에 표준선원을 위치시키고, 4가지 측정 모드를 이용하여 전신계측을 수행하였다. 즉, 4개 오염 위치별로 4가지 측정 모드로 번갈아 전신계측을 실시하여 총 16가지의 측정값을 얻었다. 또한 WBC 측정 모드별로 방사성핵종 측정값을 서로 비교하고, 내부방사능 오염 위치별로 WBC의 상부 및 하부 검출기의 계측비율을 분석하였다(Kong and Kim 2009; Kim and Kong 2012; Ko *et al*. 2014).

WBC를 이용한 인체 외부와 내부의 방사성오염을 구분하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 인체 내부와 외부의 표면오염을 구분하기 위해, 표준선원을 팬텀 내부에 위치시키고 전신계측을 수행하였다. 그리고 표준선원을 팬텀 외부에 부착하여 앞뒤로 번갈아 전환하여 전신계측을 수행하였다. 이 경우에도 4가지 측정 모드를 모두 활용하여 전신계측을 실시하였고, 상부와 하부검출기의 비율을 구분하여 취득하였다. Fig. 7에 WBC 측정 모드 실험모습을 제시하였다.

결과 및 논의

1. 인체 내부 및 외부방사능 측정 실험

임체모형 팬텀 외부표면 전면에 표준방사선원을 부착한 경우, WBC 전면과 후면의 방사능 측정값 비율의 차이는 ^{60}Co은 약 8배, ^{137}Cs은 약 13배로 나타났다. 반대로 표준방사선원을 인체모형 팬텀 외부 후면에 부착한 경우, WBC 전면과 후면의 방사능 측정 비율 차이는 ^{60}Co은 약 7배, ^{137}Cs은 약 12배로 나타났다. 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7. Measurement of detection rate using StandFast II stand-type WBC for selection of the optimal counting geometry.

인체 내부에 표준방사선원을 부착한 경우 WBC 전면과 후면으로 측정한 비율의 차이는 ^{60}Co 선원은 약 1.4배, ^{137}Cs 선원은 액 1.5배로 나타났다. 이처럼 내부오염의 경우 전면과 후면의 방사능측정 비율의 차이가 높지 않음을 보여주고 있는데, 이는 원전종사자 전신계측 시 전후 측정을 통해 인체 내부와 외부에 오염된 방사능을 구별할 수 있음을 보여주는 것이다. 이를 Fig. 8과 9에 나타내었다. Canberra사의 WBC 외에 ORTEC사의 WBC에 대한 동일한 실험을 통해 WBC 앞뒤 측정 결과 비율의 차이가 유사하게 나타남을 확인하였다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014). 이러한 내용을 근간으로 WBC 앞뒤 측정비율이 2 미만일 경우 내부방사능 오염으로 간주하고, 2 이상인 경우 외부오염으로 간주하여 오염위치를 찾도록 WBC 측정절차를 구체화하였다(Ko *et al*. 2014).

2. 측정 모드 최적화 실험

방사성핵종이 인체에 침적되는 갑상선, 폐, 전신, 하복부

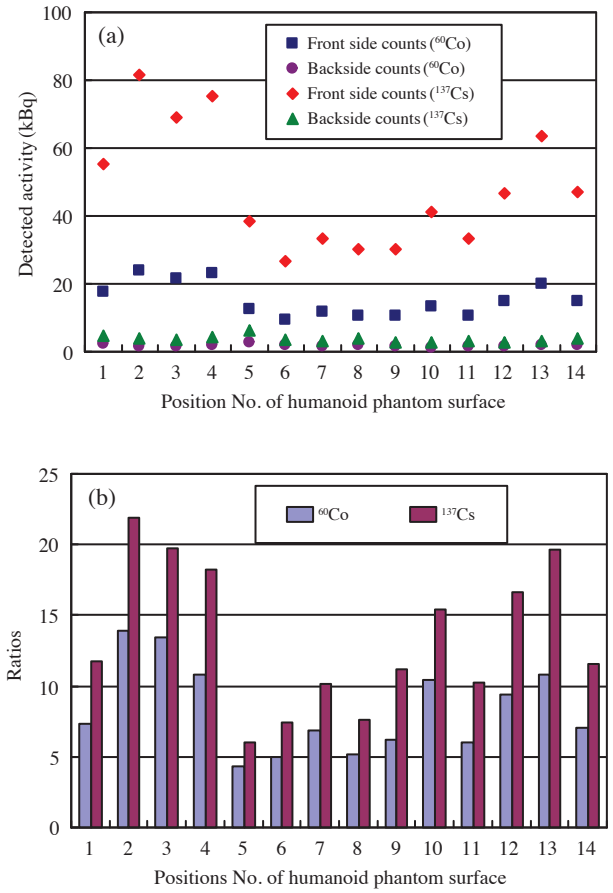

Fig. 8. The detected activities (a) and the average ratios (b) of the front and backside counts from experiments on external (front side) radioactive contamination.

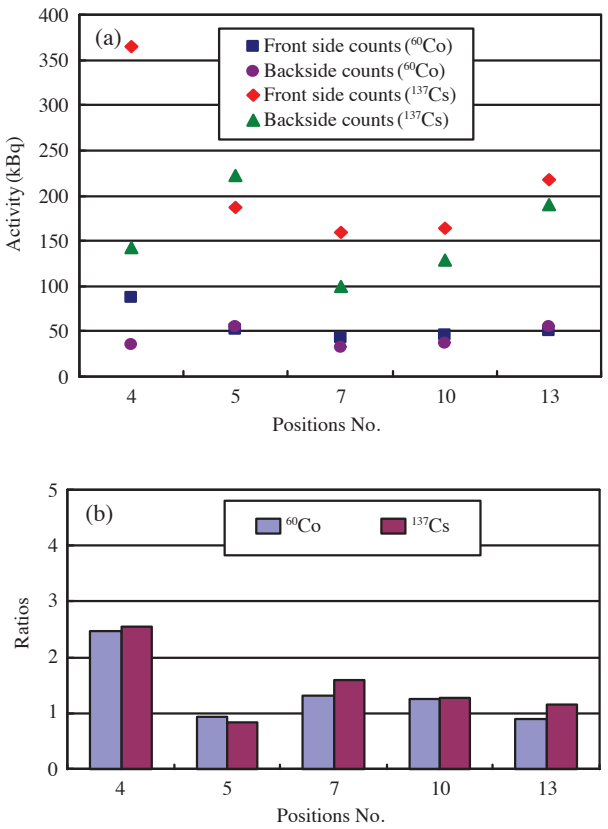

Fig. 9. The detected activities (a) and the average ratios (b) of the front and backside counts from experiments on internal radioactive contamination.

위치에 따라 WBC 측정 모드를 각각 다르게 변경하여 실험을 수행하였다. 그 결과 방사성핵종이 위치한 인체 내부 가상지점에 맞는 WBC 측정 모드를 적용하는 것이 정확한 내부방사능 측정값을 얻을 수 있음을 확인하였다(Kong and Kim 2009; Ko *et al*. 2014). 각 오염핵종의 침적 위치에서 WBC 측정 모드로 계측한 방사능 값의 변경 내용을 Table 1에 나타내었다.

내부방사능 측정과정에서 WBC 상부 및 하부 검출기의 계측비율이 변화됨을 확인할 수 있었다. 내부방사능 오염 위치에 따라 WBC 상부 및 하부 검출기 비율이 달라짐을 확인하였다. 갑상선 위치에서 상부 검출기의 계측비율은 100~88%, 하부 검출기 비율은 0~12%로 나타났다. 폐 위치에서는 상부검출기 비율이 87~70%, 하부 검출기 비율은 13~30%로 나타났다. 전신 위치에서 상부검출기 비율이 69~40%, 하부 검출기 비율이 31~60%로 나타났다. 하복부 위치에서 상부 검출기 비율이 39~0%, 하부 검출기 비율은 61~100%로 나타났다(Kong and Kim 2009). 이를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 1. Comparison of detected activities depending on the WBC geometry

Source position	Geometry	Humanoid phantom Activity (kBq)		Canberra's phantom Activity (kBq)	
		^{60}Co	^{137}Cs	^{60}Co	^{137}Cs
Whole body	Whole-body	**24.8**	**84.5**	**5.8**	**4.0**
	Thyroid	11.4	32.7	2.6	1.6
	Lung	19.3	61.6	4.1	2.9
	GI	18.8	66.2	4.4	3.0
Thyroid	Whole-body	**43.3**	**173.1**	**12.5**	**10.0**
	Thyroid	19.7	66.3	5.6	3.9
	Lung	33.3	126.0	9.6	7.5
	GI	32.9	131.4	9.5	8.2
Lung	Whole-body	**34.4**	**124.2**	**7.3**	**5.5**
	Thyroid	15.7	48.4	3.3	2.1
	Lung	26.3	91.2	5.7	3.7
	GI	25.5	96.9	5.8	4.1
GI	Whole-body	**29.3**	**100.2**	**7.2**	**5.3**
	Thyroid	13.2	38.4	3.3	1.9
	Lung	22.5	73.1	5.8	3.7
	GI	22.3	77.9	5.5	3.8
True activity		27.7±0.1	84.8±1.0	5.6±0.1	3.7±0.1

Bold type represents the highest detected activities in four geometries.

이 결과는 최초 전신계측에서 상부 및 하부 검출기 비율을 근거로 방사성핵종과 내부방사능 오염위치를 확인할 수 있으므로, 동일 작업자에 대한 반복적 전신계측에는 상부 및 하부 검출기 계측비율에 따른 측정 모드의 변경이 가능한 것으로 판단되었다. 전신계측 과정에서 상부 및 하부 검출기 비율을 근거로 개선된 최적 측정 모드를 정하는 기준을 Fig. 11에 도시하였다.

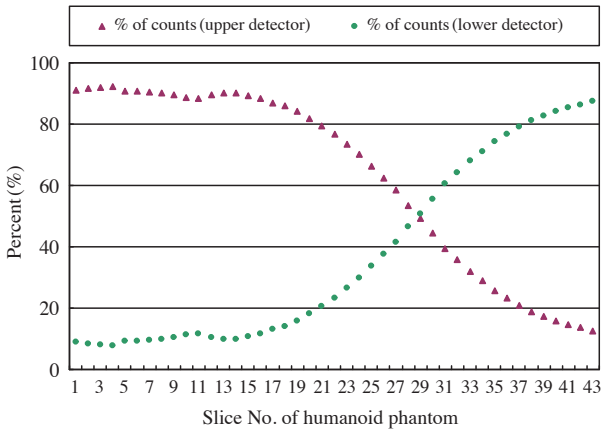

Fig. 10. The percent of counts on upper and lower detectors of WBC.

고 찰

원전에서는 방사선작업 과정 중에 방사선작업종사자의 인체 내부 또는 외부에 방사성오염이 발생할 수 있다. 이 경우를 가정하여 방사선작업종사자의 인체 내부 또는 외부에 오염된 위치를 찾아 정확한 피폭방사선량을 평가하는 것은 방사선안전관리의 중요한 업무의 하나이다. 이를 위해 표준 방사선원을 인체모형 팬텀의 외부와 내부에 위치시켜 전신계측기의 측정 모드 선정과 내부 및 외부 방사능 값 측정실험이 이루어졌다.

이 실험결과 전신측정 모드가 인체 내부의 방사능 측정값을 가장 보수적으로 측정하는 것으로 나타났다. 이와 관련하여 원전에서는 내부방사능 오염이 발생한 경우, 특별한 경우를 제외하고는 전신측정 모드를 적용하고 있어, 방사선

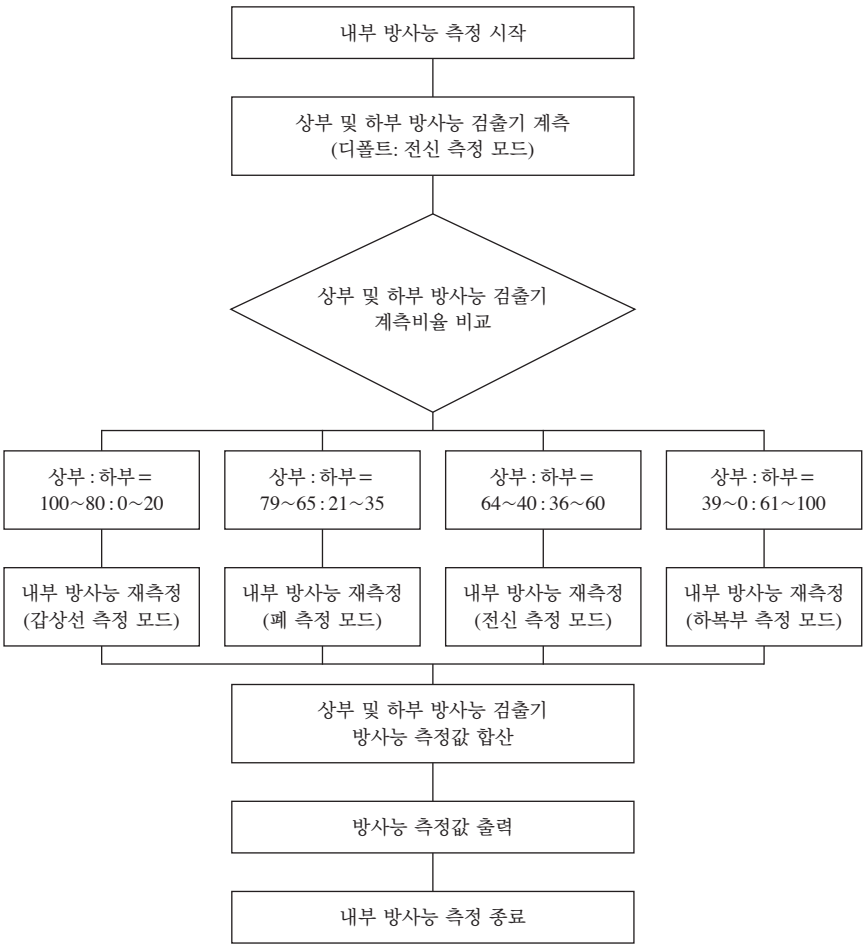

Fig. 11. WBC measurement geometry.

안전관리 측면에서 보수적으로 안전하게 수행하고 있는 것으로 확인되었다. 그럼에도 불구하고 방사성핵종과 섭취 후 시간을 알 수 있는 재측정 과정에서는 핵종의 침적위치를 고려한 측정 모드의 변경이 바람직하다고 판단되었다.

한편 인체모형팬텀 내의 방사성오염 위치에 따른 전신계측기의 상하 검출기의 방사능 측정값의 비율을 조사하였다. 이 결과 전신계측기 상하검출기의 측정값 비율은 표준방사선원의 위치에 따라 일정한 형태를 보이는 것으로 나타났다. 이는 전신계측기의 상하검출기 측정값의 비율을 이용하여 원전종사자의 인체 내부 방사성 오염부위나 침적부위를 찾는 것이 가능한 것으로 확인되었다.

이 실험결과를 통해 전신계측기의 전면과 후면의 방사능 측정값의 비율 차이가 2배 이상인 경우에는 외부오염으로 판단할 수 있다. 이러한 연구결과는 원전에서 방사선안전관리를 수행하는데 많은 도움이 되었으며, 이를 근거로 원전의 전신계측 절차가 개정되었다. 새롭게 개발한 전신계측기준 적용 시 내부방사능 측정과정에서 오차율을 크게 개선하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실제 원전 방사선작업종사자의 내부방사능 측정과 피폭방사선량 평가 업무에 대한 개선에 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 그렇지만 원전 방사선안전관리와 피폭방사선량 평가 업무에 신뢰성 있는 적용을 위해 추가 연구는 필요하다고 판단되었다.

결 론

국내 원전에서 보수적으로 WBC의 측정 모드를 전신 모드로 적용하는 것은, 내부피폭 방사선량을 과대평가할 수 있고, 때로는 원전 작업종사자에게 과다한 방사선위해에 대한 오해를 유발시킬 수 있어, 내부방사능 측정과정의 개선을 위해 이 실험이 이루어졌다. 그 결과, 전신계측기로 방사선작업종사자의 전면과 후면의 방사능을 측정하여, 이 측정값의 비율 차이가 2배 이상인 경우에는 외부 방사능오염으로, 2 미만인 경우 내부 방사능오염으로 결론지었다. 이러한 전신계측기의 상하 검출기의 비율을 근거로 방사성핵종의 인체 내 침적위치에 따라 WBC 최적 측정 모드를 선정하기 위한 지침을 제시하였다. 이를 원전 종사자의 방사선관리에 적용하여 피폭방사선량을 보다 정확히 평가하는 계기가 되었다.

참 고 문 헌

김희근, 공태영. 2009. 전신계측기를 이용한 원전종사자의 방사성오염 위치확인과 내부방사능 측정 개선에 관한 연구. *J. Radiat. Prot. Res.* **34**(1):37-42.

한국표준과학연구원(KRISS). 2010. 표준 점선원 인증서.

AMETEK Inc. 2013. Phantom for Whole-Body Counter. available at http://www.ortec-online.com/Solutions/whole-body-counters.aspx.

CANBERRA Industries, Inc. 2002. Model 2250 Fastscan high-throughput whole body counter. Brochure of Canberra's Whole Body Counting System.

CIRS (Computerized Imaging Reference Systems, Inc.) 2013. Dosimetry Verification Phantoms. available at http://www.cirsinc.com/products/solution/33/atom-dosimetry-verification-phantoms/.

Kim HG and Kong TY. 2012. A Bioassay Experience and Lessons Learned on the Internal Contamination of Iodine-131 During Maintenance Periods in a Korean Nuclear Power Plants. *Radiat. Prot. Dosimetry* **151**(2):386-390.

Ko JH, Kong TY, Akabani G, Kim HG and Lee GJ. 2014. Applicability Test of Methods for Discrimination between External and Internal Contamination using ORTEC Whole Body Counter. *Radiat. Prot. Dosimetry* **162**(4):657-662.

Kong TY and Kim HG. 2009. Improvement to Whole-Body Counting Procedures at Nuclear Power Plants. *Radiat. Prot. Dosimetry* **133**(2):89-96.

Received: 15 February 2018
Revised: 3 March 2018
Revision accepted: 20 May 2018