Journal of Radiological Science and Technology, 41(5), 437-444 ISSN 2384-1168(On-line) ISSN 2288-3509(Print)

<원저>

Bed-type과 Stand-type 상용 전신계수기(Whole Body Counter)의 성능 비교

김봉기[1),2)]·하위호[3)]·권태은[3)]·박민석[3)]·이준호[1),2)]·김종민[4)]·이상경[4)]·정규환[1),2),4)]

[1)]과학기술연합대학원대학교·[2)]한국원자력안전기술원·[3)]한국원자력의학원·[4)]고려대학교

Performance Comparison of Bed-type and Stand-type Commercial Whole Body Counter Made by Canberra for Internal Exposure Monitoring

Bong-Gi Kim[1),2)]·Wi-ho Ha[3)]·Tae-Eun Kwon[3)]·Min-Seok Park[3)]·Jun-Ho Lee[1),2)]·Jong-Min Kim[4)]
Sang-Gyung Lee[4)]·Kyu-Hwan Jung[1),2),4)]

[1)]Nuclear and Radiation Safety Engineering, University of Science and technology
[2)]Department of Radiation Safety, Korea Institute Nuclear Safety
[3)]Korea Institute of Radiological and Medical Sciences
[4)]College of Health Science, Koera University

Abstract Whole-Body counters have been used to evaluate the internal contamination of gamma emitting radionuclides. Among the whole-body counters used in domestic nuclear facilities, Fastscan made by CANBERRA contains 2 NaI(Tl) detectors and is generally used to monitor the primary internal exposure. It has the advantage of achieving MDA even with short time measurements. Accuscan is a bed type, and has good energy resolution because it is composed of HPGe detector. Since the Accuscan with better energy resolution than Fastscan has better able to identify radionuclides, it is used to monitor secondary internal exposure. Some nuclear facilities have only Fastscan.

We analyzed statistically whether Fastscan is enough to ensure accuracy and precision comparing with Accuscan. To do this, we prepared a CRM created by the Korea Research Institute of Standards and Science. We also obtained the data of 6 Fastscans and 5 Accuscans in domestic nuclear facilities.

As a result of the study, although Fastscan compared with Accuscan is not as accurate as the Accuscan, the precision is statistically same. However, accuracy of Fastscan is in compliance with international standards except low energy range. In terms of accuracy and precision except radionuclides emitting low energy, it is possible to measure radioactivity inside workers even in nuclear facilities where only Fastscan is used.

Key Words: Accuscan, Fastscan, Internal Exposure, Accuracy and Precision, ANSI

중심 단어: Accuscan, Fastscan, 내부피폭, 정확도와 정밀도, ANSI

Ⅰ. 서 론

방사성핵종은 흡입, 섭취, 또는 피부를 통한 직접적인 흡수에 의해 인체 내부에서 피폭을 줄 수 있다. 방사성핵종의 섭취량을 평가하는 것은 내부선량 평가를 위해 매우 중요하다. 방사성핵종의 섭취량을 평가하기 위한 분석법은 크게 간접 생물정량법과 직접 생물정량법으로 나눌 수 있다. 간접 생물정량법은 생체의 시료, 주로 배설물이나 분비물 시료를 채취하여 함유된 방사능을 계측한 다음 배설함수 등을 이용하여 섭취량을 추산하는 방법이다. 모든 핵종에 대해

Corresponding author: Kyu-Hwan Jung, Nuclear and Radiation Safety Engineering, University of Science and technology / Department of Radiation Safety, Korea Institute Nuclear Safety, 62, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34142, Republic of Korea / Tel: +82-42-868-0658 / E-mail: k482@kins.re.kr
Received 16 August 2018; Revised 09 October 2018; Accepted 21 October 2018
Copyright ⓒ2018 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

적용할 수 있는 장점이 있으나, 대표시료의 채취 및 전처리, 저준위 방사능 계측 그리고 배설함수의 결정 등의 기술적 문제가 있을 수 있다. 반면, 직접 생물정량법은 백그라운드가 낮은 측정환경에서 체내의 방사능을 민감한 검출기로 외부에서 직접 계측하는 방법이다[1]. 일반적으로, 전신계수기를 이용한 방법이 대표적이다. 대상 방사선은 주로 감마선이며, 감마선 방출이 없는 핵종에 대해서는 특성 X선이나 제동복사선을 측정하기도 한다[2]. 직접 생물정량법의 정확도는 해부학적 특성, 감쇠 특성 및 방사성물질의 분포와 관련한 물리적 교정 팬텀과 측정된 개인 간의 유사성에 의존한다[3]. 하지만 각 개인에 대한 해부학적 특징을 모두 반영하기에는 물리적으로 한계가 있어, 방사선 검출기의 정확성과 정밀성 등 품질관리 시스템을 확보해야한다[4].

한편, 국내에는 외부피폭선량 규제와 같은 구체적인 내부피폭에 대한 규제를 시행하고 있지 않다. 하지만, 규제당국의 권고에 따라, 내부피폭 우려가 있는 국내 원자력이용시설에는 일상적 또는 비상시 내부피폭 발생을 모니터링하기 위해 전신계수기를 확보하고 있다. 대부분의 원자력이용시설은 stand up-type의 전신계수기를 확보하고 있으며, 일부는 bed-type의 전신계수기를 함께 보유하고 있다. 두 대의 NaI(Tl) 검출기로 구성되어 있는 stand up-type의 전신계수기는 일반적으로 1차적인 내부피폭을 모니터링하기 위해 많이 사용되어 짧은 시간 측정하여도 최소검출방사능(minimum detectable activity; MDA)를 성취할 수 있는 장점이 있다. 하지만 NaI(Tl)의 비교적 좋지 않은 분해능과 검출기의 위치로 인한 효율의 단점이 존재한다[5,6]. Bed-type의 전신계수기는 bed-type으로서 분해능이 좋은 고순도 게르마늄(HPGe) 검출기로 구성되어 인체 내부의 방사성핵종을 식별하는 능력이 stand up-type의 전신계수기보다 더 좋기 때문에, 2차적인 내부피폭을 모니터링하기 위해 사용된다.

본 연구에서는 국내 원자력이용시설이 확보하고 있는 stand up-type과 bed-type의 전신계수기인 Canberra 사의 Fastscan과 Accuscan을 대상으로, 국제기준에 따른 성능검사를 수행하였다. 그리고 1차 내부피폭 발생을 모니터링하기 위한 Fastscan으로도 Accuscan의 정확도와 정밀도를 확보할 수 있는지 통계적으로 비교했다.

II. 재료 및 방법

1. 재 료

1) 전신계수기

교정이 완료된 6대의 Fastscan과 5대의 Accuscan을 평가했다. Fastscan은 stand up-type으로써, 차폐체로 둘러싸인 평행한 2대의 검출기로 이루어졌다(Fig. 1-(a)). 검출기는 NaI(T1)이고 크기는 7.6 × 12.7 × 40.6 ㎤이며, 상단과 하단에 직렬로 배치된다. Fastscan은 인체 체형 데이터를 기반으로 몸 전체를 측정할 수 있도록 설계되었다[7]. Accuscan은 수평의 bed-type 전신계수기이다. 측정 대상이 누운 상태로 측정되기 때문에 계수시간을 늘릴 수 있고, 직접 보행이 불가능한 대상자를 측정하는데 용이하다(Fig. 1-(b)). Accuscan은 2개의 고순도 게르마늄(HPGe) 반도체 검출기를 포함한다. 고순도 게르마늄(HPGe) 반도체 검출기는 7.6 × 7.6 ㎠이며 NaI(T1) 섬광 검출기의 25%의 상대효율을 가지고 있다. 두 전신 계수기 모두 전면부를 제외하고 모든 면에 10 ㎝ 두께의 특수 제작된 ^{60}Co가 없는 납 차폐체로 둘러싸여 있어 백그라운드를 낮추었다[2,8].

2) 팬 텀

모든 기관의 전신계수기는 RMC Ⅱ를 사용하여 교정되었으며, 본 연구에서 성능평가를 위한 팬텀도 RMC Ⅱ가 사용되었다. RMC Ⅱ는 CANBERRA사에 의해 개발되었으며 전신계수기를 교정하도록 디자인되었다[9,10]. RMC Ⅱ

(a) (b) (c)

Fig. 1 (a) Fastscan, (b) Accuscan, (c) RMC II and Positioning

는 ANSI N13.30-1996 BOMAB 팬텀, ANSI N44.3 갑상선 팬텀, LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 폐 팬텀이 반영되어 효율을 재현하도록 설계되었다[11]. RMC Ⅱ는 크게 두 개의 기본 구성 요소인 투명 아크릴 수지이다. 사람의 목 부분을 형상하는 부분과 상체를 형상하는 부분이다. 목 부분에는 갑상선내 침적된 방사능을 측정할 수 있도록 내부에 선원 Cavity가 있고, 상체 부분에는 폐, 위장 그리고 전신에서의 방사능을 측정할 수 있도록 하는 3개의 내부 선원 Cavity가 있다[12]. Fastscan의 경우에는 표준 남성의 허리 높이에 배치하기 위해 91 ㎝의 원통 위에 설치하고(Fig. 1-(c)), Accuscan의 경우에는 사람이 누웠을 경우에 맞게 배치하였다. 이는 전신계수기를 교정할 때와 같은 배치이다. 본 연구는 전신 측정에 대한 성능평가가 목적이므로 전신 측정용 Cavity에 실린더형 선원을 넣고 측정했다.

3) 인증표준물질

전신계수기의 성능 검사용 선원으로는 한국표준과학연구원에서 제작한 20 mL 크기의 혼합감마 인증표준물질이 사용되었다. 포함된 방사성핵종은 ^{57}Co, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{60}Co으로 구성되었다. ^{60}Co를 제외한 세 가지 핵종의 방사능은 국제표준화기구(ISO)와 미국표준협회(ANSI)에서 제시한 최소시험준위보다 높은 값이 되도록 제작하였다. 여기에서 최소시험준위는 측정에서의 탐지한계로 해석되는 것이 아니라, 시료가 다른 방사성 핵종으로부터 간섭을 받지 않는다고 가정할 때, 시험 기관이 시료의 상대편중과 상대정밀도를 평가하기 위한 적절한 최소량이다[13,14]. Table 1에 해당하는 방사성핵종의 정보를 보여준다.

블라인드 테스트를 위해 참여기관에게 인증표준물질의 방사성핵종은 알리되 방사능을 알리지 않은 상태로 방사능을 측정하도록 했다. 결과는 각 기관으로부터 방사능과 최소검출방사능, 에너지, 측정시간, 효율교정 그리고 최소검출방사능의 결과지를 수집했다. 그리고 각 기관에 각각 코드를 할당하여 평가했다.

2. 방 법

전신계수기에 대한 정확도와 정밀도의 비교를 위해 미국표준협회(ANSI)와 보건물리학회(HPS)가 공동으로 개발한 내부피폭 측정장비에 대한 성능검사 기준인 평균 상대편중과 상대정밀도를 평가하고 통계적으로 비교했다.

1) 정확도

계수의 정확성은 편중을 평가함으로써 얻어졌다. 편중은 다음 식으로 주어진다[13-15].

$$B_{ri} = \frac{(A_i - A_{ai})}{A_{ai}} \quad \text{식(1)}$$

여기에서, B_{ri}는 i번째 측정의 상대적 편중을 나타내며, A_i는 i번째 방사능 관측 값이고, A_{ai}는 참값이다. B_r은 측정의 평균 상대편중이며, 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있다[13-15].

$$B_r = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N} B_{ri}}{N}(\%) \quad \text{식(2)}$$

여기서, N은 전체 측정 횟수를 나타낸다. 평균 상대편중에 대한 미국표준협회(ANSI)의 기준은 -25%에서 50%로 두고 있다.

2) 정밀도

정확도의 기준은 상대정밀도로 계산한다[13,14].

$$s_{B_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(B_{ri} - B_r)^2}{(N-1)}} \quad \text{식(3)}$$

상대정밀도에 대한 기준은 40% 이하이다.

온도 및 습도 등 환경적 영향에 민감한 NaI(Tl)이 장착된

Table 1 Information of CRM(Certified Reference Material)

Radionuclide	Gamma Energy (keV)	Half-life	Radioactivity (Bq)	Minimum Testing Level (Bq)	Relative Uncertainty (%) k=2
^{57}Co	122 (87%)	271.6 d	4,327	2,500	4.0
^{137}Cs	662 (85%)	30.17 y	3,107	3,000	4.0
^{54}Mn	835 (100%)	312.2 d	3,499	3,000	4.0
^{60}Co	1,173 (100%) 1,332 (100%)	5.27 y	2,392	3,000	4.0

Fastscan의 경우 10회 측정하였다. 그리고 측정자가 연속된 5회의 데이터를 선택하여 제출하도록 했다. 이는 환경적 영향으로 인한 계수오류를 어느정도 배제하기 위해서이다. 측정시간은 평가자들이 판단하는 각 장비에 대한 최적시간에 따라 A1장비 2분, A5장비 4분 그리고 그외 장비는 1분을 측정하였다. Accuscan의 경우 각각 5회 연속 측정하였으며 B4장비 5분, B5장비 30분 그리고 그 외 10분을 측정하였다.

3) 데이터의 분석

데이터는 다음 그림과 같이 박스플롯으로 표현하였다(Fig. 2-5). 그리고 일련의 데이터의 분포를 왜곡시킬 수 있는 이상치 값을 판별했다. 박스플롯은 양적 자료에 이상치가 있는지 판단할 때 유용하며, 이상치는 일사분위수와 삼사분위수로부터 사분위수의 1.5배가 넘는 경우인 안쪽 울타리(inner fence)를 초과하는 값으로 정의한다. 이는 2.678δ에 해당하며, 신뢰도 98%에 해당하는 값이다[16].

박스플롯을 이용한 분포는 Fastscan의 ^{57}Co에서 매우 넓은 분포가 나타난 것으로 보인다. 전체적인 데이터의 넓은 분포 때문에 이상치는 없지만, 낮은 에너지에서 Fastscan의 정확성에 대한 불안전성을 보여주고 있다. 박스플롯을 이용한 이상치 판별 결과, 총 7개의 이상치가 발견되었다. 일련의 데이터에서 관찰된 극단적인 값(이상치)은 데이터분석에 있어 심각한 오류일 수 있어, 데이터의 집합에 포함되지 않는 것으로 판단하고 통계적 분석에서는 제외하도록 하였다[15, 17].

Fastscan과 Accuscan의 기관코드, 측정 시간 그리고 각 핵종에 따른 평균 상대편중과 상대정밀도에 대한 값은 Table 2에 보여주며, Fig. 2-5에서 판별된 이상치를 보여준다.

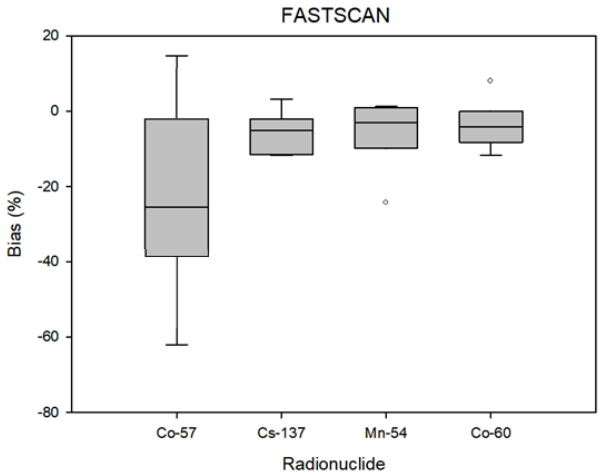

Fig. 2 Boxplots of all bias data for Radionuclides from Fastscan (Moderate outliers are denoted by "○")

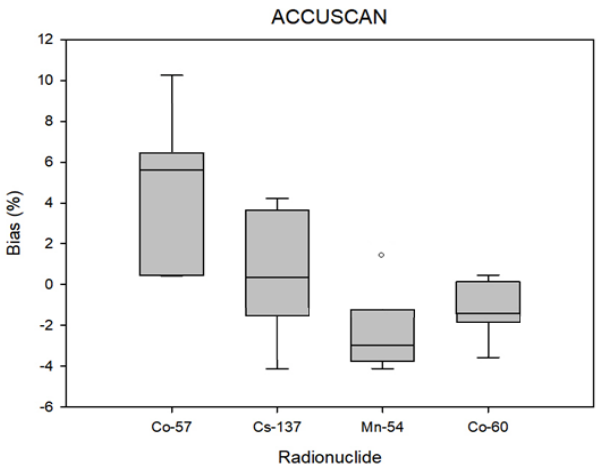

Fig. 3 Boxplots of all bias data for Radionuclides from Accuscan (Moderate outliers are denoted by "○")

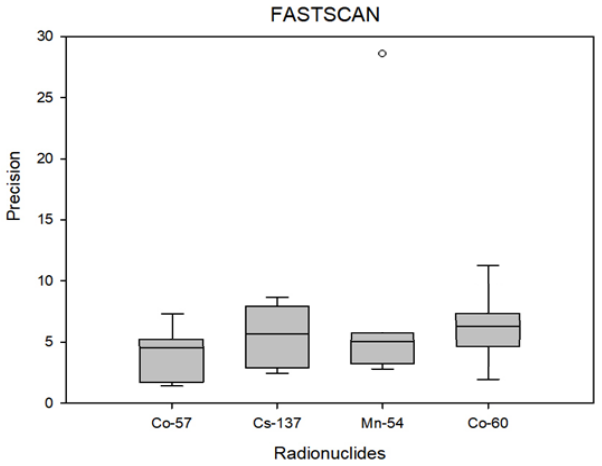

Fig. 4 Boxplots of all precision data for Radionuclides from Fastscan (Moderate outliers are denoted by "○")

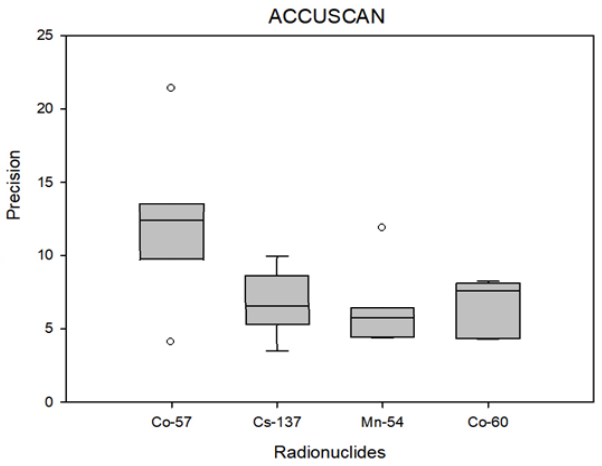

Fig. 5 Boxplots of all precision data for Radionuclides from Accuscan (Moderate outliers are denoted by "○")

Table 2 Identification, Whole-Body Counter Type, Measurement Time, Relative Bias Average and Relative Precision.

ID Code	Type	Time (s)	Relative Bias Average (%)				Relative Precision (%)			
			^{57}Co	^{137}Cs	^{54}Mn	^{60}Co	^{57}Co	^{137}Cs	^{54}Mn	^{60}Co
A1	Fastscan (Stand -up)	120	-62.06	-11.72	-5.13	2)8.25	1.39	7.70	4.43	5.85
A2		60	-37.73	-3.83	2)-24.26	-3.05	7.56	8.67	2)28.02	11.26
A3		60	14.76	3.26	-2.60	-11.7	4.53	3.05	5.64	4.66
A4		60	-25.4	-11.34	-3.25	-5.39	5.49	4.35	5.90	6.70
A5		240	-3.88	-4.26	1.26	-2.74	2.00	6.91	3.32	1.95
A6		60	1)N	-5.84	0.88	-7.05	1)N	2.45	2.80	7.49
B1	Accuscan (Bed)	600	5.60	4.22	-2.99	-0.19	13.35	6.54	6.43	8.24
B2		600	6.49	-1.74	2)1.84	-3.58	12.43	8.66	4.37	4.30
B3		600	10.25	-4.12	-4.12	-1.55	2)21.67	9.96	2)11.77	7.98
B4		300	0.42	0.36	-3.40	-1.41	9.91	3.47	5.77	7.61
B5		1800	0.46	3.07	-1.47	0.46	2)4.33	5.63	4.46	4.33

1) N indicates no results received.
2) Outlier.

본 연구에서 수행하고 있는 두 전신계수기의 각 핵종에 따른 평균 상대편중과 상대정밀도의 정규성 검정(Shapiro-Wilk Test)은 Table 2에 보여주는 이상치를 제외한 값을 이용하여 수행하였고, 정규분포라고 할 수 있는 결과가 산출되었다. 하지만, 표본의 수가 적기 때문에 t-분포라고 가정하여 두 종류의 전신계수기를 통계적으로 분석했다.

Ⅲ. 결 과

Fastscan과 Accuscan의 정확도를 나타내는 평균 상대편중은 ANSI N13.30이 지정하고 있는 허용 편중인 -25%에서 50%를 '상한선'과 '하한선'으로 두고 핵종에 따른 각 기관의 평균 상대편중을 산출했다[14]. Figure 6에서 Figure 9를 통해 각 핵종에 따른 Fastscan과 Accuscan의 평균 상대편중을 보여준다. 그 결과를 보면, 대부분의 평균 상대편중은 허용 편중을 만족하고 있다.

하지만, Fastscan에서 국제 기준을 만족하지 못하는 경우가 발생하였다. ^{57}Co에서 3장비(A1, A2, A4)의 Fastscan은 기준을 만족하지 못하고 -25%아래에 위치한 것을 Figure 6을 통해 알 수 있다. Accuscan의 경우에는 국제 기준을 모두 만족했다.

각 기관의 전신계수기에 대한 평균 상대편중을 이용하여 그 값이 '0'이라고 할 수 있는지 t검정을 통해 평가했다. 모든 것이 동등하다면, 결과의 분포에 대한 평균이 0이라고 할 수 있어야한다. 그 결과 모든 Accuscan 장비는 편중이 0이라 할 수 있지만, Fastscan의 경우에는 ^{60}Co(p=0.02)을 제외한 나머지 핵종에서 편중이 0이라고 판단할 수 있었다. 이는 Figure 9에서도 볼 수 있듯이, 이상치(A1)를 제외한 모든 기관의 ^{60}Co에서 평균 상대편중이 음의 값을 가지며, 평균은 -5.99이고 표본 표준편차는 3.65로 작아 0을 포함하지 않은 결과로 나타난 것이다. 이 결과는 A1(이상치)장비를 제외하고 ^{60}Co에 대한 Fastscan의 효율이 상대적으로 높게 설정되었다는 판단을 할 수 있다. 그렇지만, 이를 통해 ^{60}Co에 대한 정확도가 떨어진다고는 할 수 없다. 그 이유는 ^{60}Co에 대한 모든 기관의 Fastscan이 ANSI N13.30이 제시하고 있는 기준을 충족하고 있으며, 오히려 다른 핵종에 대한 평균과 편차보다 작기 때문이다.

정밀도를 평가하기 위해 상대정밀도를 평가하였다. 상대정밀도는ANSI N13.30의 허용기준인 40%를 상한선으로 두었다.

Figure 10에서 13까지 핵종에 따른 Fastscan과 Accuscan의 상대정밀도를 나타낸 것이다. ANSI N13.30 기준에 모두 만족하는 것을 볼 수 있다.

마지막으로 두 종류의 전신계수기의 성능을 비교하기 위해 이상치를 제외한 각 핵종별 평균 상대편중과 상대정밀도를 유의수준 5%에서 F검정 후, t검정하였다. 그 결과, 평균 상대편중의 경우 95% 신뢰도에서 ^{137}Cs(p=0.03), ^{60}Co(p=0.01) 핵종에 대해 Accuscan의 평균 상대편중이 더 작다고 할 수 있는 결과를 도출하였다. 상대정밀도의 경우 95% 신뢰도에서 ^{57}Co(p=0.001) 핵종에 대해 Fastscan이 크지 않다고 할 수 있는 결과를 도출하였다.

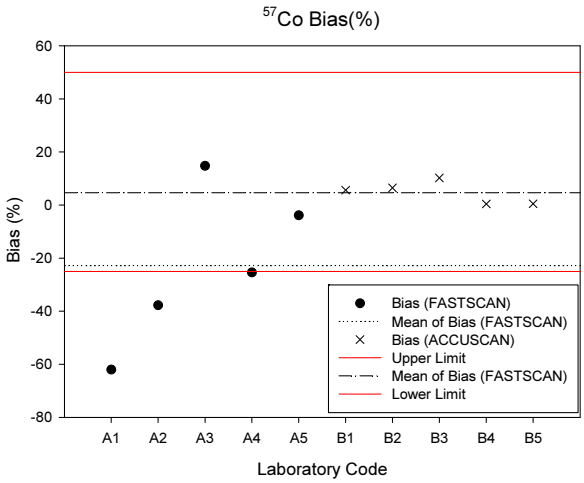

Fig. 6 Relative bias average of Fastscan and Accuscan (^{57}Co)

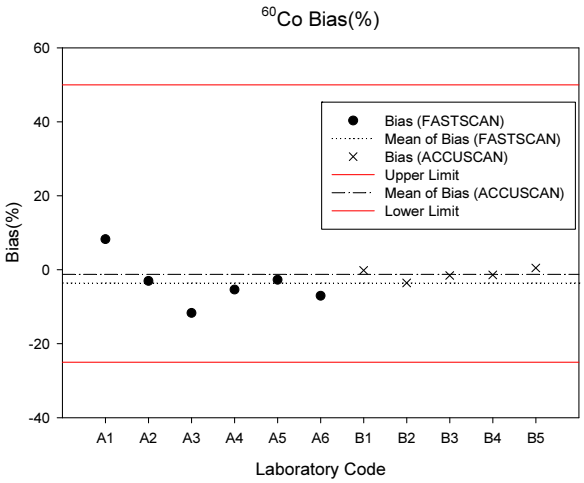

Fig. 9 Relative bias average of Fastscan and Accuscan (^{60}Co)

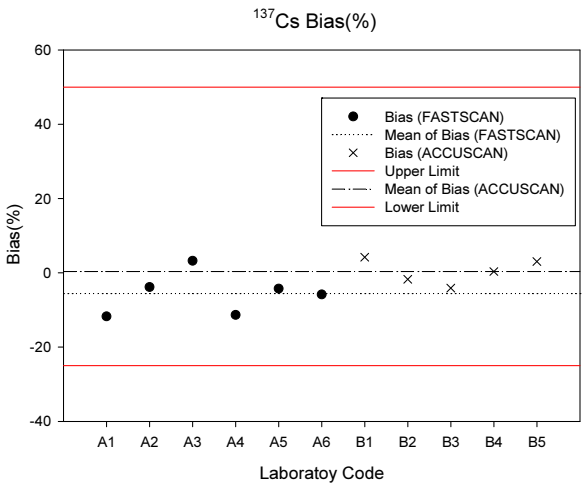

Fig. 7 Relative bias average of Fastscan and Accuscan (^{137}Cs)

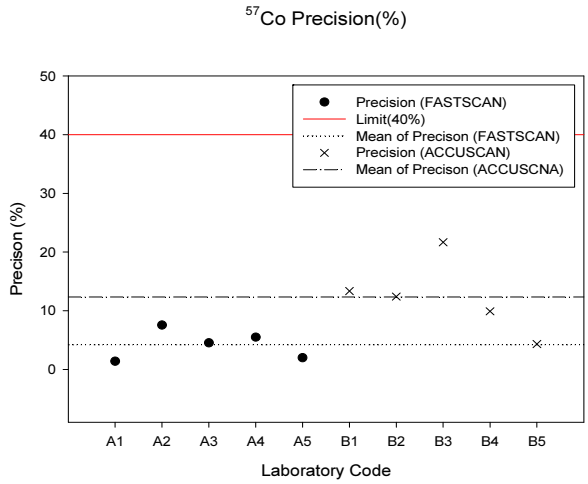

Fig. 10 Relative Precision of Fastscan and Accuscan (^{57}Co)

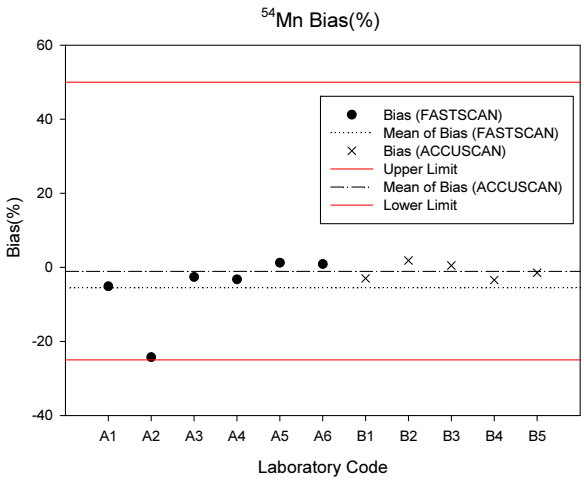

Fig. 8 Relative bias average of Fastscan and Accuscan (^{54}Mn)

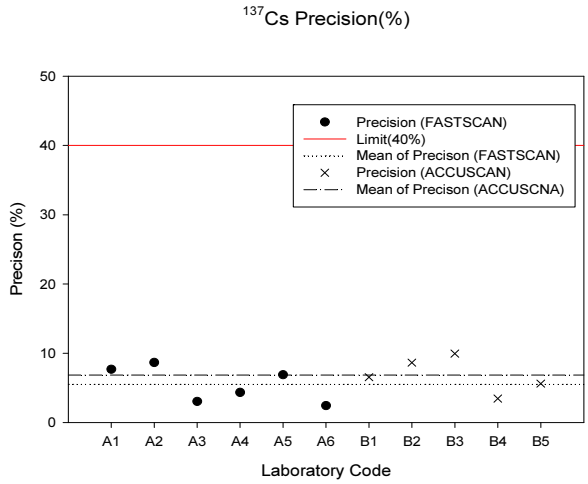

Fig. 11 Relative Precision of Fastscan and Accuscan (^{137}Cs)

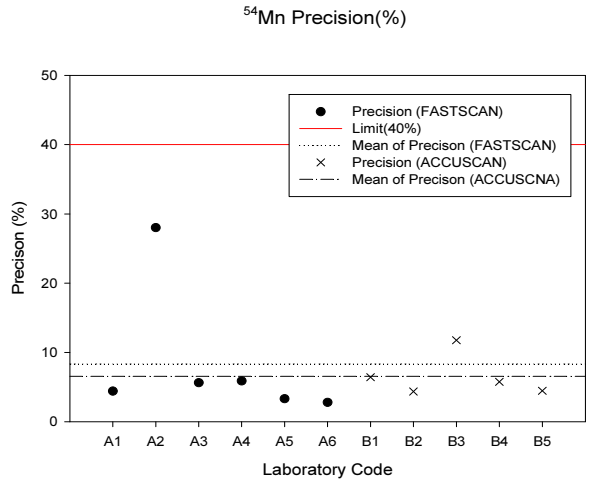

Fig. 12 Relative Precision of Fastscan and Accuscan (^{54}Mn)

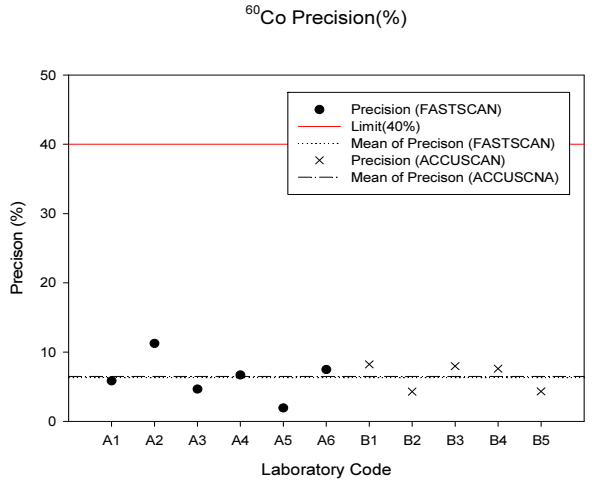

Fig. 13 Relative Precision of Fastscan and Accuscan (^{60}Co)

Ⅳ. 고 찰

본 연구에서는 국내 원자력이용시설에서 보유한 두 종의 전신계수기의 성능을 평가하였고, 그 결과로 통계적인 분석을 수행하였다. 성능평가 결과, Fastscan의 경우 ^{57}Co(122 keV)에서의 평균 상대편중이 몇몇 기관에서 국제기준을 벗어났다. 그리고 통계적 분석을 통해 이상치를 제외한 후 평균이 0이라고 할 수 있는 결과를 얻었지만 매우 넓은 분포를 얻었다. 그 원인은 일부 기관이 보유한 전신계수기의 효율교정이 낮은 에너지 영역에서 높게 설정된 것으로 보인다. 또한, Minjung Park 등은 RMCⅡ 팬텀을 사용하여 보정된 Fastscan의 정확도가 저 에너지 방출 핵종에 대해 낮다는 것을 설명하고 있다[2] 그리고 제조사인 CANBERRA에서도 300 keV 이상의 에너지 영역에서 사용할 것을 권고하고 있다[10].

상대정밀도의 경우, 두 전신계수기 모두 국제기준 범위 내에 들어왔다. 정밀도는 방사성핵종의 붕괴 그리고 측정장치와 방사선과의 상호작용의 통계적 현상에 기인한다. 이는 인증표증물질에 포함되는 방사성핵종의 방사능은 ANSI와 ISO에서 제시한 최소시험준위 보다 높은 양으로 제조하여 충분한 계수가 이루어져 상대정밀도가 국제 기준 상한값에 비해 낮게 나온 것으로 보인다. 그리고 측정시간은 길진 않지만, 정밀도가 국제기준에 부합할 수 있는 충분한 시간을 측정하였기 때문에 기준에 만족하는 결과가 산출되었다. 측정시간을 늘리면 더 많은 계수로 인해 정밀도는 더 낮아 질 수 있다. 측정시간이 길었던 장비(A1, A5, B5)가 평균적으로 전반적인 에너지 범위에서 더 정밀성을 가지고 있는 것을 상대정밀도 산포도를 통해 알 수 있다(Fig. 10-13).

마지막으로, 두 전신계수기에 대한 각 핵종별 평균 상대편중과 상대정밀도를 통계적으로 비교했다. 그 결과, 평균 상대편중의 경우 ^{137}Cs(p=0.03), ^{60}Co(p=0.01) 핵종에서 Accuscan 평균 상대편중이 더 작다고 할 수 있는 결과를 도출하였고 그 외 핵종에서는 다르지 않은 결과를 도출했다. Fastscan에서 ^{57}Co의 경우, 분포가 너무 넓어 통계적으로는 같은 평균 상대편중값이 나올 수 있었기 때문에 큰 의미를 부여할 순 없다. 위 결과로부터 Fastscan이 Accuscan에 비해 전반적인 에너지 영역에서 정확도는 좋지않음을 알 수 있다. 하지만 정밀도의 경우 ^{57}Co(p=0.001)핵종에서 Fastscan이 더 크지 않다고 할 수 있는 결과를 도출하였고 그 외 핵종에 대해서는 다르지 않은 결과를 도출했다. 원자번호가 높고 부피가 큰 NaI는 고순도 게르마늄(HPGe)에 비해 계수효율이 더욱 좋아 짧은 시간을 측정했음에도 불구하고 정밀성을 확보할 수 있었다. 또한 Fastscan은 10회 측정 중 결과가 비슷한 연속된 5회의 측정값을 제출했기 때문에 좋은 정밀성을 확보하는데 영향을 미쳤다.

Ⅴ 결 론

본 연구에서, Fastscan은 Accuscan에 비해 정확도가 좋다고 할 수 없지만, 정밀도는 통계적으로 다르지 않다고 할 수 있는 결과를 도출하였다. Fastscan의 평균 상대편중은 ^{57}Co의 저에너지 방사선 영역을 제외하고 모두 국제기준을 만족했으므로, 저 에너지를 방출하는 방사성핵종을 제외한다면, 정확성과 정밀도 측면에서 Fastscan만으로도 내부에 섭취된 방사성핵종의 방사능을 정확하고 정밀하게 측정할 수 있다고 판단된다. 위에서 언급한데로 Fastscan은

Accuscan에 비해 짧은 시간 측정으로 넓은 범위의 에너지 영역(300 keV이상)에서 정확성과 정밀성을 국제기준에 만족시킬 수 있어, 많은 방사선작업종사자를 보유한 원자력이용시설에서 일상모니터링에 사용될 수 있으며, 방사선비상 등 사고 시 긴급한 상황에서 내부피폭 측정에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

[1] Lee JK. Korean Association for Radiation Application. Principles of Radiation Protection. 2016. 502pp.

[2] Park M, Yoo J, Ha WH, Jin YW. An Intercomparison of Counting Efficiency and the Performance of Two Whole-Body Counters According to the Type of Phantom. J. Radiat. Prot. Res. 2016; 41(3);274-81.

[3] Bento J, Barros S, Teles P, Vaz P, Zankl M. Efficiency Correction Factors of An Accuscan Whole-Body Counter due to The Biodistibution of Cs-134, Cs-137 and Co-60. Radiat. Prot. Dosimetry. 2013;155(1); 16-24.

[4] An GS, Jo HS. Developement of a Monte Carlo Simulation Code(CALEFF) for Calibrating Thyroid Internal Dose Measurement and Detection Efficiency Calculation. Journal of Radiological Science and Technology. 2005;28(2);117-122.

[5] Bronson FL. Canberra Industries. The Accuscan Ⅱ Vertical Scanning Germanium Whole Body Counter. Health. Phys. 1987;21(2);233-44.

[6] Oh JY, Gang CG, Kim JY, Park HH, Oh kB, Kim JS. The Study of Error for Analysis in Dynamic Image from the Error of Count Rates in NaI (Tl) Scintillation Camera. Journal of Radiological Science and Technology. 2013;36(4):291-297.

[7] Bronson FL, Booth LF, Richards DC. A computerized, an anthropometrically designed, high throughput, whole body counter for the nuclear industry. 1998;6-8.

[8] Kramer GH, Capello K, Phan Q. Effect of Mass, at a Fixed Height, on the counting Efficiency of a Bomab Phantom in Three Types of Whole Body Counter Modeled By MCNP5. Health. Phys. 2008;95(2); 234-40.

[9] Idaho National Laboratory. Calibration of the Accuscan Ⅱ In Vivo System for I-125 Thyroid Counting. INL/EXT-11-22663. 2011;97-101.

[1]. Calibration Phantom For In Vivo Whole Body Counter Specifications, Canberra Industries, Inc. Available from: http://www.canberra.com/products/768.asp

[11] American National Standards Institute/Health Physics Society. Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom. ANSI/HPS N13.35. 1999;8-13.

[12] Bento J, Teles P, silva L, Nogueira, Neves M, Vaz P. Performance parameters of a whole body counter. Radiat. Meas. 2010;45(2);147-252.

[13] The International Organizaiton for Standardization. Radiation protection-Performance criteria for radiobioassay. ISO28218. 2010;10-2.

[14] American National Standards Institute/Health Physics Society. Performance Criteria for Radiobioassay. ANSI/HPS N13.30 1996;23-9.

[15] Kramer GH, Loesch RM, Olsen PC. The Second International In-vivo Monitoring Intercomparison Program for Whole-Body Counting Facilities by Canadian and United States Agencies. Health Phys. 2001;80(3);214-24.

[16] Robert D. How significant is a boxplot outlier. J. Stat. Educ. 2011;19(2):1-13.

[17] Kramer GH, Loesch RM, Olsen PC. The 1993 Intercomparison of The Measurement of In Vivo Radioactivity. Radiat. Prot. Dosimetry. 1999; 86(3):197-205.