

Minimum Detectable Radioactivity Concentration of Atmospheric Particulate Measurement System for Nuclear Test Monitoring

Jong-Soo Kim, Suk-Chul Yoon, Jang-Soo Shin, Eun-Ho Kwack and Jong-Seo Choi*
Korea Atomic Energy Research Institute, *Kyung Hee University

핵활동 감시를 위한 대기 입자 측정시스템의 최소검출 방사능 농도 결정

김종수 · 윤석철 · 신장수 · 곽은호 · 최종서*
한국원자력연구소, *경희대학교

Abstract—Recently, the conclusion of Comprehensive Test Ban Treaty(CTBT) is globally constructing a network system for nuclear test monitoring. The radionuclide experts of the Conference on Disarmament recommended that the detection of nuclear debris in the atmosphere was an essential factor of nuclear test monitoring and proposed the technical requirements. Based on those requirements, atmospheric radionuclide monitoring system to detect nuclear debris generated from the nuclear explosion test was composed. The system is comprised of high volume air sampler(HVAS), filter paper presser and high purity germanium detector(HPGe). Minimum detectable concentrations(MDCs) of the key nuclides requiring in CTBT monitoring strategies are determined by considering of decay time, counting time and flow rate of the high volume air sampler for the rapid explosion and the optimum measurement condition. The results were selected $10 \pm 2h$, $20 \pm 2h$ and $850 \pm 50m^3/h$ as parameters, respectively. The relation between the natural air-borne radionuclide concentration of ^{212}Pb and MDC were calculated which gave effect in the Compton continuum baseline due to those nuclides in the gamma-ray spectroscopy. These results can be used as an actually tool in the CTBT monitoring strategies.

Key words : CTBT, MDC, sampler flow rate, decay time, counting time

요약—최근 포괄적 핵실험금지조약 (Comprehensive Test Ban Treaty : CTBT)의 체결은 전세계적으로 핵활동 감시 네트워크를 구축하는 것이다. 핵실험금지 위원회의 전문가들은 대기 방사성핵종의 측정을 핵실험 감시에 필수적인 요소로 제안하였으며, 이에 따른 기술적 요구사항을 제시하였다. 본 연구는 이를 근거로 핵활동으로부터 생성된 핵분열생성물을 검출하기 위하여 고성능 공기채집장치(High Volume Air Sampler : HVAS)와 여과지 압축기 그리고 고순도 게르마늄 반도체검출기(HPGe)로 대기 입자 방사성핵종 측정 시스템을 구성하였다. 조속한 시일 내에 탐지와 최적의 측정 조건으로 본 시스템을 운영하기 위하여 CTBT

감시 전략에서 주요 핵종들에 대한 최소검출 방사능 농도(Minimum Detectable Concentration : MDC)를 decay time, counting time 그리고 sampler volumetric flow rate 등을 고려하여 결정하였다. 그 결과 각각 $10 \pm 2h$, $20 \pm 2h$, $850 \pm 50m^3/h$ 정도로 선정하였다. 감마선 스펙트럼 분석에서 ^{212}Pb 방사능 농도의 변화는 Compton continuum의 baseline에 영향을 미치게 되므로 이에 기인한 MDC 관계식을 도출하였다. 이들 결과는 CTBT 감시 전략에 실제적인 도구로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심어 : 포괄적 핵실험금지조약, 최소검출 방사능 농도, 공기흡입율, 붕괴시간, 계측시간

서 론

CTBT 감시 네트워크의 협정은 핵활동 탐지를 목적으로 핵실험으로부터 발생하는 지진파, 대기 방사성핵종, 수증음파 그리고 초저음파 등을 종합 분석하는 전세계적인 감시네트워크의 구축에 있다. 이러한 목적 수행을 위하여 핵실험금지 위원회의 전문가들은 가상의 핵실험(1-kt)을 통하여 이의 결과로부터 기술적 요구 사항을 제시하였다[1,2].

본 연구에서는 이를 근거로 대기입자를 포집하기 위한 HVAS와 채집이 완료된 여과지(590mm×610mm)를 검출기의 기하학적 검출면적에 맞게 지름 170mm 두께 18mm로 축소시키기 위한 여과지 압축기 그리고 여과지에 포집된 방사성핵종을 검출하기 위한 HPGe로 구성하였다[3]. 자체 설계·제작한 HVAS는 $200m^3/h \sim 1300m^3/h$ 까지 flow rate를 변화시킬 수 있는 장치이며 한국원자력연구소에 위치한 30m 높이의 옥상 건물에 설치하였다. 여과지는 100cm/sec의 face velocity로 공기가 여과지로 흡입될 때 지름 0.1 μ m의 입자 크기를 99.9% 포집능력을 갖는 glass-microfiber filter를 사용하였다. HPGe 검출기는 1.33MeV 광자에 에너지에 대하여 25%의 상대검출 효율을 갖는 상업화된 ORTEC 사의 제품을 사용하였다.

대기입자중의 인공 방사성핵종의 검출은 여과지 포집에 의한 공기채취가 기본이다. 채취한 시료(여과지)의 감마선 스펙트럼 분석에 있어서 MDC는 흔히 ROI (Region of Interest)라고 불려지는 해당 핵종 광자에너지 영역의 baseline에 대한 계수치로 평가한다[4]. 시료로부터 방출된 에너지에 의하여 전 에너지 흡수가 검출기에서 일어났을 경우 주변 물질에 산란을 일으키게 되며, Compton continuum에 의하여 생성된 baseline에 영향을 미치게 된다[5]. 실제적으로 대기 방사

성핵종 검출에서 주요 문제는 검출코자 하는 핵종 외에 다른 핵종들이 시료 채취과정에서 항상 포집되어 baseline에 영향을 미치게 된다는 것이다. 이들은 지표로부터 우라늄과 토리움의 붕괴과정에서 기인하는 것으로 ^{238}U 에서 시작하는 라돈 계열은 ^{222}Ra 에서 방사성 입자 형태로 대기중에 존재하게 되며 이의 딸핵종인 ^{218}Po (3min), ^{214}Pb (26.8min), ^{214}Bi (19.9min)의 핵종들이 감마 스펙트럼에 피크가 나타난다. ^{232}Th 에서 시작하는 토리움 계열은 ^{212}Pb (10.6hr), ^{212}Bi (60.6min), ^{208}Tl (3min)의 핵종들과 우주선이 지구대기에서 반응하여 생성되는 7Be (53d)이 마찬가지로 감마 스펙트럼에 피크가 나타난다[6,7,8]. 팔호 안은 핵종의 반감기이다. 이들은 상대적으로 짧은 반감기의 핵종과 시료채취에 의하여 포집된 방사능의 양 그리고 에너지에 따라 계측시 Compton continuum에 의하여 생성되는 스펙트럼의 baseline에 영향을 미치게 되어 MDC가 변화하게 된다. 또한 지형학적 그리고 기상학적 요인에 따라 방사능 농도의 대기중 변화[7]는 MDC 변화의 원인이 된다. 또한 흡입된 공기의 양에 따라 여과지에 포집된 방사능은 달라지게 되며, 계측시간 등은 MDC 변동의 원인이 될 수 것이다. 따라서 자연 부유 방사성핵종의 decay time, counting time 그리고 flow rate를 고려한 MDC의 결정은 시스템의 운영적 측면과 조속한 시일 내의 핵활동 감시에 중요한 요소라 할 수 있다. 이와 같이 최적의 조건을 선택하여 시스템을 운영한다면 핵활동 감시에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 기술적요구사항

핵실험금지 특별위원회의 전문가들은 가급적 빠른 시일 내에 핵실험 여부의 탐지를 목적으로 가상 핵실험

(1-kt) 평가로부터 결과를 제시하였다. 그 결과에 의하면 on-site 감시소는 표 1에 나타난 바와 같이 핵활동시 누출될 수 있는 주요 방사성핵종의 MDC 수준까지 측정할 수 있어야 한다고 제안하였다. 이 MDC 평가 결과는 24 시간 동안 대기중의 공기를 채집하며 채취한 시료(여과지)를 24 시간 동안 decay 시킨 후 그 시료를 24 시간 측정하여 얻은 것으로, 시료채취에서 측정까지 최소한 3일 내에 완료할 것을 권고하고 있다. 공기 흡입율은 적어도 500m³/h 이상 그리고 대기중의 입자를 포집하는데 사용되는 여과지는 지름 0.1μm 입자 크기에 대하여는 최소한 80% 그리고 0.2~5μm 입자 크기에 대하여는 95% 이상의 포집능력이 있어야 하며, 1.33MeV 에너지에 대한 상대 검출효율은 30% 이상이고 분해능 반도체 검출기의 사용과 0~2.7MeV 스펙트럼 범위에 걸쳐 분석할 것을 권고하고 있다. 감시소의 설치 위치로는 고도가 높은 곳이 원거리로부터 날아오는 입자성 핵종의 포집에 바람직하며, 산골짜기와 숲이 울창한 지역 또는 건물 사이 그리고 먼지가 많은 지역은 삼가야 한다.

Table 1. MDCs of key nuclides for nuclear test monitoring

Radionuclide	Half-life	Energy	MDC(μBq/m ³)
⁹⁵ Zr	64 d	756.7	3-10
⁹⁵ Nb	35 d	765.8	5-15
⁹⁷ Zr	17 h	743.4	20-60
⁹⁹ Mo/ ^{97m} Tc	2.65 d	739.58	20-60
¹⁰³ Ru	39 d	479.1	3-10
¹³¹ I	8 d	364.2	>5
¹³² Te	3.3 d	222.8	5-15
¹³³ I	20 h	529.5	>30
¹³⁴ Cs	2.1 y	604.7	3-10
¹³⁶ Cs	13.2 d	818.5	3-10
¹³⁷ Cs	30 y	661.6	3-10
¹⁴⁰ Ba	12.8 d	537.4	10-30
¹⁴³ Ce	1.4 d	293.27	15-50

3. MDC 결정 및 실험방법

포집된 여과지로부터 방출되는 방사성핵종의 방사능 변화는 식 (1)과 같이 나타낸다[9].

$$\frac{dA}{dt} = Q(t)F(t) - \lambda A \quad (1)$$

여기서, A는 시료에 존재하는 시간의존 방사능이고, λ는 붕괴상수이다. Q(t)와 F(t)는 각각 시간의존 공기중 방사능농도와 시간의존 sampler volumetric flow rate이다. 공기채취의 시작점에서 초기상태(A)는 0이다. 시료채취가 끝난 시점에서 해당 핵종에 누적된 계수율(C_{FP})을 구하기 위하여, convolution integral을 식 (1)에 적용한다. 단, sampling time T 동안에 Q와 F를 상수로 가정한다. 또한 각 에너지에 해당하는 검출효율 ε과 감마선 방출율 δ 그리고 시료채취 후 측정시간 전까지의 decay time φ와 counting time μ를 적용하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_{FP} = \frac{\epsilon \delta Q F}{\lambda^2_{FP}} (1 - e^{-\lambda_{FP} \phi}) (1 - e^{-\lambda_{FP} T}) e^{-\lambda_{FP} T} \quad (2)$$

여기서 λ_{FP}는 해당 방사성핵종의 붕괴상수이다.

식 (2)에서 보는바와 같이 C_{FP}는 φ, μ, T 그리고 F와 관련된 함수라는 것을 알 수 있다.

방사능 계측에 있어서 최소검출한도(Lower Limit of Detection : LLD)는 방사능이 존재하지 않음에도 불구하고 측정결과 임계점 이상의 방사능이 존재하는 것으로 결론짓는 위험율을 용인하면서 방사능이 존재하고 있음에도 존재하지 않는 것으로 결론짓는 위험율을 가지고 검출되어질 수 있는 시료내 방사성핵종의 가장 적은 양으로 정의한다[10]. MDC 결정은 L. A. Currie에 의하여 개발된 방법[11]을 사용하여 $LLD = 2.71 + 4.65 \sqrt{u_B}$ 으로 계산하였으며, 95%의 신뢰준위에서 평가하였다. 여기서 u_B는 ROI의 baseline 계수치이다.

LLD 값으로부터 공기시료에 대한 단위체적당 방사능량으로 계산되는 최소검출 방사능 농도는 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$MDC_{air} = \frac{LLD}{\frac{\epsilon \delta k \xi F}{\lambda^2_{FP}} (1 - e^{-\lambda_{FP} \mu}) (1 - e^{-\lambda_{FP} \phi}) e^{-\lambda_{FP} T}} \quad (3)$$

여기서, k는 단위변환상수(3600 sec/hour)이며, ξ는 필터의 포집효율이다. 최적의 운영조건에서 대기방사성핵종 시스템의 운영은 φ, μ 그리고 F를 고려한 MDC 값을 평가하여 각각의 시간을 결정하고, 그 시간 조건으로 시스템을 운영하여 측정된 자연 부유 방사성핵종의 방사능 농도 변화에 따른 MDC 값을 평가하고자 한다.

첫째, 시료채취 후 측정시간 전까지의 시간 즉, decay time을 고려한 MDC를 평가하기 위하여 평균 900m³/h의 흡입율로 24시간 동안 시료를 채취하였다. 채취한 시료를 각각 6, 12, 30, 48, 62 그리고 86 시간 동안 붕괴시킨 후, 측정하여 이에 따른 계수치로부터 MDC를 계산하였다.

둘째, counting time에 따른 MDC를 평가하기 위하여 24시간 동안 900m³/h의 흡입율로 대기중의 공기를 채취하고, 첫 번째 실험으로부터 결정된 decay time으로 시료를 붕괴시킨 후 6시간의 붕괴시간을 거친 후 6, 12, 18, 24, 36, 48, 60, 72 시간동안 시료를 측정하였다.

셋째, 200m³/h, 400m³/h, 600m³/h, 700m³/h, 800m³/h, 900m³/h, 1000m³/h로 흡입율을 변화하여 각각 24시간 동안 공기를 채취한 후, 첫 번째와 두 번째 과정에서 결정된 decay time과 counting time으로 설정하고 flow rate에 변화에 따른 MDC를 평가하였다.

위의 실험은 총 3회에 걸쳐 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

우선 decay time에 따른 MDC의 변화를 보면, 그림 1에서 보는바와 같이 단 수명 방사성핵종의 MDC는 초기에는 감소한다. 그러나 해당 핵종의 대략 1 반감기가 지난 후부터는 증가하기 시작한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 비교적 긴 수명의 방사성핵종의 MDC는 초기에는 급격히 감소하지만 decay time이 증가함에 따라 서서히 감소한다. 만일 긴 수명의 반감기 이상 decay time을 고려한다면 계속 감소하여 그 핵

종의 1 반감기 정도에서 MDC는 증가할 것이다.

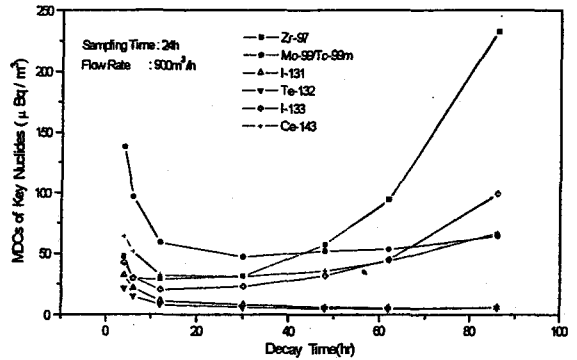


Fig. 1. Observed MDC variation as a function of decay time for the short-lived radionuclides

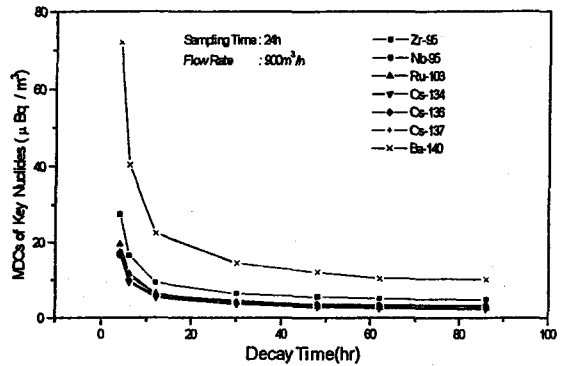


Fig. 2. Observed MDC variation as a function of decay time for the long lived radionuclides

이러한 결과는 백그라운드(detector/blank filter)와 자연 부유 방사성핵종의 반감기의 조합으로 설명할 수 있다. 라돈계열에 의한 MDC 변화는 30분의 반감기로 감소한다. 거의 4시간(대략 8반감기)이 지난 후 라돈 계열의 핵종은 무시할 수 있을 정도로 사라지고, 토론계열 핵종들이 MDC를 지배한다. 토론계열에 의한 MDC 영향은 10.6 시간의 반감기로 감소하여 거의 4일이 지난 후 이에 의한 영향은 없어지게 되지만, CTBT의 감시를 위하여는 많은 시간이 소요된다. 그 다음으로 자연방사성 핵종인 ⁷Be(53.4d)과 검출기의 일정 백그라운드 그리고 blank filter로부터 방출되는 ⁴⁰K(3×10⁹y)가 지배하게 되어 장수명 방사성핵종의 MDC는 천천히 감소한다.

Table 2. Observed MDCs of key nuclides as a function of decay time.

핵 종	반감기	Decay time(h)에 따른 MDCs($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)						
		4	6	12	30	48	62	86
Zr ⁹⁵	64d	27.52	16.44	9.30	6.36	5.56	5.10	5.10
Nb ⁹⁵	35d	16.54	9.95	5.74	4.12	3.72	3.41	3.36
Zr ⁹⁷	17h	47.36	29.33	29.00	31.44	57.09	94.22	232.63
Mo ⁹⁹ /Tc ^{99m}	2.75d	137.6	96.54	58.66	47.28	51.90	53.22	63.83
Ru ¹⁰³	39d	19.44	11.67	6.40	4.05	3.01	2.79	2.58
I ¹³¹	8d	32.34	21.72	11.45	8.01	6.15	5.62	5.99
Te ¹³²	3.3d	21.68	14.77	8.10	6.02	4.97	4.82	5.50
I ¹³³	20h	42.36	30.02	20.33	23.10	31.95	44.79	98.91
Cs ¹³⁴	2.1yr	16.72	9.40	5.29	3.63	2.80	2.52	2.24
Cs ¹³⁶	13.2d	17.21	9.59	5.57	4.15	3.47	3.25	3.30
Cs ¹³⁷	30yr	17.56	10.97	6.22	4.54	3.36	3.35	2.88
Ba ¹⁴⁰	12.8d	72.1	40.40	22.46	14.45	12.01	10.40	10.10
Ce ¹⁴³	1.4d	63.7	51.46	32.14	30.88	35.75	43.32	66.60

따라서 주요핵종에 대하여 붕괴시간에 따른 전반적인 MDC의 변화추이를 살펴볼 때 10±2시간 정도가 CTBT 감시 목적에 적합한 것으로 평가되었다. 표 2는 decay time에 따른 MDC 변화를 나타낸다.

그림 3은 decay time을 12시간으로 선정한 후, 24시간 동안 시료를 채취하여 counting time의 변화에 따른 MDC 변화를 나타내었다. MDC는 $\sqrt{\mu}$ 의 역수로 변화하였다. 이것은 식 (3)으로부터도 알 수 있듯이 decay time ϕ 와 sampling time T 그리고 flow rate F를 일정 상수로 가정한다면 $(1-e^{-\lambda_{FP}\mu})$ 의 역수에 비례하여 MDC가 변화되는 유형과 같음을 알 수 있다.

이 실험 결과로부터 counting time이 길어짐에 따라 MCD는 감소하지만 20±2 시간이 CTBT 감시 목적에 적합하였다.

그림 4, 5 그리고 6에는 flow rate에 따른 핵종별 MDC를 나타내었다. 그림 4에서 보는바와 같이 MDC는 핵종의 반감기(⁹⁷Zr, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹³²Te, ¹³³I, ¹⁴³Ce)가 짧은 경우 flow rate의 변화에 따라 다소 완만하게 변화하였으며, 그림 5에 나타난 바와 같이 좀 더 긴 반감기의 핵종(⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹³⁶Cs, ¹⁴⁰Ba)들은 그림 4에 나타낸 핵종들에 비하여 좀 더 급격히 변화하였다. 그림 5에

나타낸 ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs과 같은 반감기가 긴 핵종들이 가장 급격하게 변화하였다. 이것은 24시간의 sampling time과 비교하여 같은 시간범위(많게는 2일, 적게는 5시간)에 있는 핵종(⁹⁷Zr, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹³²Te, ¹⁴³Ce)들은 시료채취 동안 이전에 포집된 핵종의 붕괴로 그림 5와 6에 나타난 핵종보다 평형상태가 빨리 도달되는 요인 과, F의 증가에 따라 MDC가 감소하는 식 (3)으로부터 알 수 있다. 900m³/h 정도 이상의 flow rate에서 MDC는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 flow rate에 따른 공기의 face velocity가 증가되므로써 여과지의 포집능력이 저하된 것으로 판단된다. 실험 결과로부터 flow rate는 850±50m³/h로 설정하였다.

지형학적 그리고 기상학적 요인에 의하여 자연 부유 방사성핵종들의 농도 변화는 MDC에 영향을 미친다. 라돈계열은 4 시간 정도 붕괴 후 거의 사라지게 되어 이에 의한 MDC 변화는 없다. 그러나 토론계열은 ²¹²Pb (238.6keV, 300.1keV), ²¹²Bi(727.2keV, 785.4keV, 1620.6 keV) 그리고 ²⁰⁸Tl(277.4keV, 510.8keV, 538.2keV, 736.1 keV, 860.6keV, 2614.5keV)의 핵종들이 감마선 스펙트럼의 넓은 에너지 범위에 걸쳐 baseline에 영향을 미친다. ²¹²Bi는 ²⁰⁸Tl의 모핵종이고 ²¹²Pb는 ²¹²Bi의 모

핵종이므로 ^{212}Pb 는 대기방사능 측정에 있어서 하나의 지표로 간주할 수 있다. 따라서 ^{212}Pb 의 공기중 방사능 농도의 변화에 따른 MDC를 3 개의 주요 핵종에 대하여만 그림 7, 8 그리고 9 에 나타내었다. 이들 결과는 96년 10월부터 97년 4월에 걸쳐 주 1회 정도 대기중의 공기를 sampling하여 얻은 것이다. ^{212}Pb 의 농도는 0.0002에서 0.03 까지 변화하였다. ^{140}Ba (그림 7)과 ^{137}Cs (그림 8) 핵종의 MDC는 편차 폭이 적었으나 ^{131}I (그림 9)는 편차의 폭이 크게 나타났다. 이것은 477.6keV의 에너지를 갖는 ^7Be 의 대기중 방사능 농도의 변화가 baseline에 영향을 미쳐 기인한 것이다.

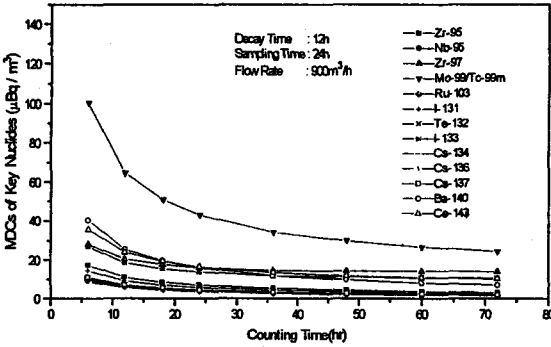


Fig. 3. Observed MDC variation as a function of counting time

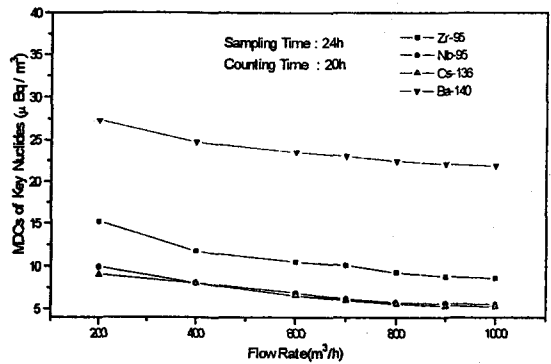


Fig. 4. Observed MDCs of key nuclides as a function of flow rate.

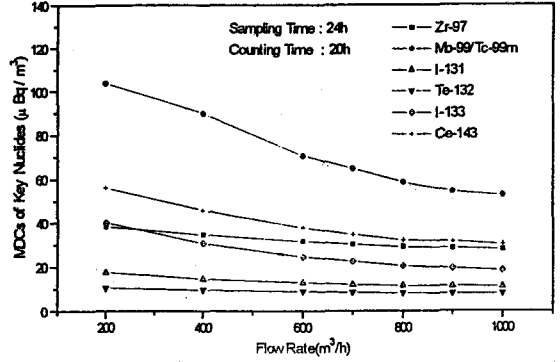


Fig. 5. Observed MDCs of key nuclides as a function of flow rate.

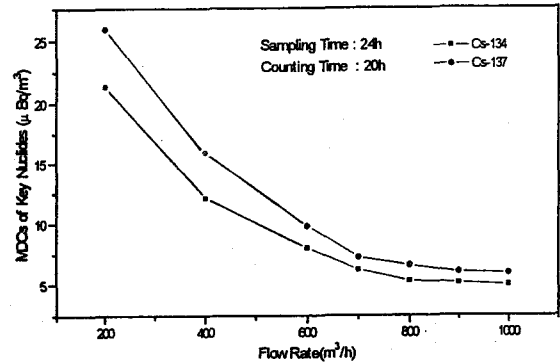


Fig. 6. Observed MDCs of key nuclides as a function of flow rate.

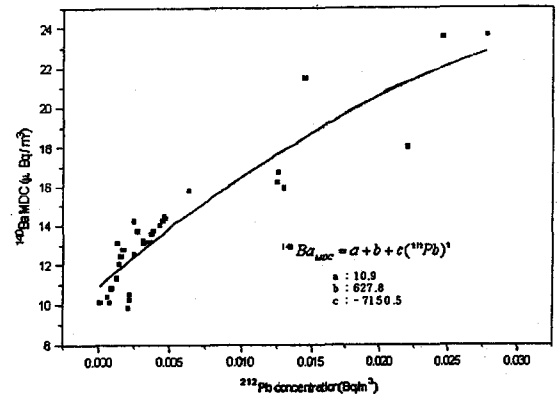


Fig. 7. MDC of ^{140}Ba vs. ^{212}Pb air concentration in atmosphere.

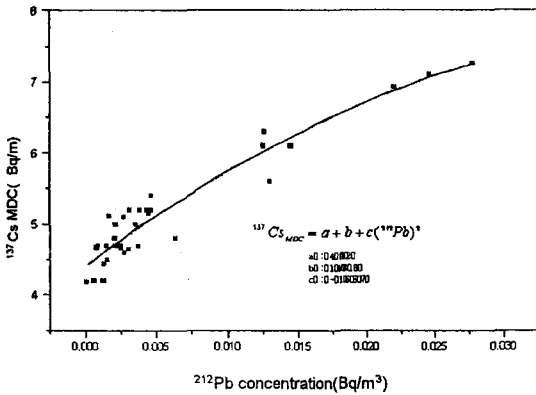


Fig. 8. MDC of ¹³⁷Cs vs. ²¹²Pb air concentration in atmosphere.

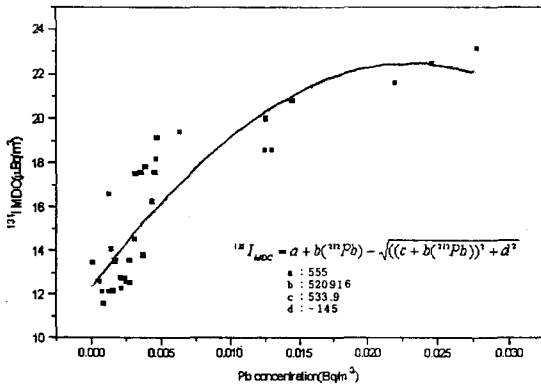


Fig. 9. MDC of ¹³¹I vs. ²¹²Pb air concentration in atmosphere.

5. 결 론

본 연구의 목적은 핵활동 감시를 위하여 최적의 조건으로 한국원자력 연구소에 설치된 대기방사능 측정시스템을 운영하는데 있다. 이를 위하여 decay time, counting time 그리고 flow rate를 고려하여 MDC를 평가하므로써 각각의 값들을 결정 할 수 있었다. 이들 결과로부터 시료채취에서부터 측정 완료까지 2일 6시간 정도가 소요되었다. 작년 10월부터 7개월에 걸쳐 측정된 결과로부터 자연 부유 방사성핵종(²¹²Pb)의 방사능 농도 값이 변화에 따른 주요 핵종들의 MDC를 평가하였다. 이들 결과들은 대기 입자 방사성핵종 측정과 최적 운영을 위한 시스템의 파라메타 결정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Conference on Disarmament, "Verification-International Monitoring System, Working Group I", CD/NTB/WP.171, August (1994).
2. Conference on Disarmament, "Verification-International Monitoring System, Working Group I", CD/NTB/WP.224, March (1995).
3. 김종수, 윤석철, 함영수, 윤여창, 홍종숙, "핵활동 감시를 위한 대기 입자 방사능 측정시스템 개발", 한국원자력학회, '96 춘계학술대회 (1996).
4. J. J. Donn and R. L. Wolke, "The Statistical Interpretation of Counting Data from Measurement of Low-Level Radioactivity", Health Phys., Vol., 32, (1977).
5. K. Debertin and R. G. Helmer, "Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detector", Elsevier Science Pub. B. V., (1988).
6. R. J. Larson and C. G. Sanderson, "Environmental Measurements Lab. Surface Air Sampling Program", U. S. Dep. of Energy, EML-541 (1991).
7. P. K. Hopke, "Radon and Its Decay Products," ACS Symposium Series 331, PP. 42-62, March (1987).
8. H. W. Feely, R. J. Larson and C. G. Sanderson, "Factors that Cause Seasonal Variations in ⁷Be Concentrations in Surface Air," J. of Environmental Radioactivity (1987).
9. W. C. Evans, "Three-Component Decay Chain Concentration Estimation Using Gamma-Ray Spectroscopy", Pacific-Sierra Research Corp., Technical Note, No. 1080, August (1995).
10. International Atomic Energy Agency, "Measurement of Radionuclides in Food and Environment", Technical Reports Series No. 295 (1989).
11. L. A. Currie, "Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination", Analytical Chemistry, 40, 3, 589-583 (1968)