



### 공학박사 학위논문

# 내부피폭 연구를 위한 알파선 조사장치 구축 및 선량전달특성 평가

Construction and Dose Delivery Characterization of an Alpha–Particle Irradiator for Research of Internal Exposure

2015년 8월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

이 기 만

# 내부피폭 연구를 위한 알파선 조사장치 구축 및 선량전달특성 평가

지도 교수 김 은 희

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함 2015년 8월

> 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 이 기 만

이기만의 공학박사 학위논문을 인준함 2015년 8월

위 원	!장_	최	희	동	(인)
부위	원장 _	김	ە ل	회	(인)
위	원_	 심	형	진	 (인)
위	원_	 선	광	민	 (인)
위	원_	김	7]	현	<u>(인)</u>

초 록

라돈 딸핵종이 방출하는 알파선에 의한 내부피폭 연구를 위해 알파선 조사장치를 구축하였다. 이 조사장치는 기존의 연구에서 제안한 장치들의 구조적인 문제점을 보완하여 세포에 조사되는 알파선의 에너지 영역을 개선하였다. 알파선 조사장치의 선원으로는 방사능이 각각 3.793과 0.3711 MBq인 두 Am-241 선원을 사용하였다. 알파선의 에너지 스펙트럼은 불감층 효과가 매우 작고, active area는 450 mm<sup>2</sup>인 이온 주입형 실리콘 검출기로 측정하였다. 조사함은 상·하판의 지름은 380 mm, 전체 높이는 110 mm, 내부 부피는 6.9 L인 stainless steel 조사함이며, 작은 양의 헬륨으로도 조사함 내부를 헬륨기체 환경으로 조성할 수 있도록 조사함의 구조를 최적화 시켰다. 또한 조사함의 모든 접합부에 패킹(O-링)을 사용하여 내부에 주입된 헬륨이 유출되지 않도록 하였다. 선원과 세포배양접시 사이의 거리는 선원 고정장치에 연결된 마이크로미터 헤드를 이용하여 0.01 mm 단위로 조절 가능하며, 조절 범위는 5~30 mm로 한정하였다.

알파선 조사장치의 특성을 평가하기 위하여 선원으로부터 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 원과 검출기 사이의 거리를 변화시키며 측정하였다. 측정된 스펙트럼은 AASI (Advanced Alpha spectrometric SImulation, Siiskonen and Pollanen, 2004, 2005) 몬테카를로 코드로 계산한 스펙트럼과 비교하였다. 또한 선원과 샘플 사이의 기하적인 관계 식을 이용하여 알파선속의 공간적 분포를 계산하였다. 이 결과들을 토대로 에너지 손실을 줄이면서 알파선을 균일하게 조사할 수 있는 선원과 샘플 사이의 거리를 결정하였다. Gamma-H2AX assay용의 세포배양접시는 선원으로부터 20 cm 떨어진 거리에서 5.12 MeV의 알파선이 조사 될 수 있으며, 이때 알파선속 분포의 공간적 변화는 ± 9 % 이내였다. Clonogenic assay에 사용되는 세포배양 접시를 사용할 경우 선원으로부터 30 cm 떨어진 위치에서 4.96 MeV의 알파선이

i

조사될 수 있으며, 알파선속 분포의 공간적 변화는 최대 19 %였다.

기존의 대표적인 두 선량평가방법으로 세포배양면적 및 선원과 샘플 사이의 거리와 같은 정보가 포함된 선량률을 계산하였다. 선량률 계산의 정확성을 높이기 위하여 새로운 보정계수를 포함한 식을 제안하였다. 그 결과 두 선량평가방법에 의해 계산된 선량의 백분율 차이가 각각 2% 와 6 %로 오차범위 이내였다. 하지만 두 선량평가 방법의 계산 효율을 비교하면, AASI 코드를 이용한 방법은 알파선의 거동을 독립적으로 추적하므로 현실적인 track length와 LET를 반영할 수 있기 때문에 보정계수를 요구하지 않는다. 따라서 알파선 조사장치의 선량평가는 최종적으로 AASI 코드를 이용한 전산모사로 수행하였으며, 계산 결과의 상대 오차가 0.1 % 이하가 되기에 충분한 시행을 하도록 하였다. 그 결과로, 알파선 조사장치는 clonogenic assay와 gamma-H2AX assay에 적합한 각각의 세포배양접시에 대하여 0.028 ~ 3.02 Gy/min과 0.031 ~ 5.66 Gy/min 선량률을 제공할 수 있음을 확인하였다.

알파선 조사장치에서 Am-241 선원에서 방출되는 감마선에 의해 세포가 받는 선량도 MCNP5 몬테카를로 전산모사로 계산하였다. 계산된 광자에 의한 선량과 알파선에 의한 선량의 비는 선원과 샘플간의 거리에 따라 최소 6.03×10<sup>-6</sup> 에서 최대 8.02×10<sup>-6</sup> 사이었다. 따라서 광자에 의해 세포에 전달되는 선량은 알파선에 의한 선량에 비해 무시할 만큼 작으며, Am-241은 라돈 딸핵종을 대신하는 선원으로 사용할 수 있다.

구축한 알파선 조사장치는 향후 알파선에 의한 세포영향평가 연구에서 다양하게 활용될 것이다. 나아가서 단층으로 배양된 세포뿐만 아니라 실제 인체조직과 유사한 상황을 재현하기 위해 3차원으로 배양된 세포(3-dimensional cell culture)에 대한 피폭 특성 평가에도 활용될 전망이다.

주요어: 알파선 조사장치, 스펙트럼 측정, 선량평가, AASI 전산모사, MCNP5 전산모사, 선량보정계수 학번: 2011-30290

ii

CO	N	Τ	Έ.	N	Т	'S
	ТИ	L.	Г.	ГЛ	Ŧ	$\mathbf{v}$

Ι.	서론1
Ⅱ.	배경 이론9
	2.1 라돈(Rn-222)의 붕괴사슬과 라돈 딸핵종에 의한 내부피폭 경로9
	2.2 Am-241의 알파붕괴 과정에서 방출되는 방사선13
	2.3 알파선의 에너지 손실18
	2.4 각 매질에 대한 알파선의 선손실 에너지21
	2.5 저 에너지 광자와 조직의 상호작용24
	2.6 흡수선량과 선량분포 및 선량률 변화인자27
Ш.	장치 설계 및 제작29
	3.1 개념 설계29
	3.2 상세 설계 및 제작32
	가. 알파선원
	나. 조사함 설계34
	다. Mylar 세포배양접시 제작40
	라. 알파선 조사장치와 Mylar 세포배양접시 제작 결과43
	마. 헬륨 환경조성

3.3 분광계통 구성	50
Ⅳ. 특성분석 및 선량평가	56
4.1 알파선 에너지 스폑트럼 측정 및 전산모사	56
4.2 알파선속의 공간분포	66
4.3 알파선 조사장치 선량평가	74
4.4 Am-241 선원에서 방출되는 광자에 의한 선량률	89
Ⅴ. 결론	92
참고문헌	96
APPENDIX A	103
APPENDIX B	105
APPENDIX C	111
ABSTRACT	112

## LIST OF TABLES

Table 1	Summary of previous studies for alpha-particle irradiator
Table 2	Analysis of previous studies for alpha-particle irradiator
Table 3	Radiation emissions from the alpha decay of $Am-24117$
Table 4	Factors for dose calibration of alpha-irradiator28
Table 5	Specifications of the alpha sources
Table 6	Specifications of the alpha-particle detector53
Table 7	Specifications of the components of the alpha-particle spectroscopy system
Table 8	The peak energy of alpha-particle energy spectrum62
Table 9	Average LET for alpha-particle in tissue equivalent medium calculated with measured and simulated energy spectrum in accordance with SSDs65
Table 10	The fitting function for the probability distribution of fluence and the average fluence rate70

- Table 13
   Specifications of alpha-particle irradiator

   in SNU RadBio
   95

## LIST OF FIGURES

Figure 1	A decay chain of $Rn-222$ and classification of
	radon progenies11
Figure 2	The decay scheme of Po-21412
Figure 3	The decay scheme of Po-21013
Figure 4	An energy level diagram of Am-24116
Figure 5	Plots of energy distribution of a beam of initially
	mono-energetic charged particles at various
	penetration distances, E is particle energy and
	X is the distance along the track [37]20
Figure 6	Linear energy transfer of alpha-particle
	in helium and air22
Figure 7	Linear energy transfer of alpha-particle
	in MS20 tissue substitute, water and Mylar film23
Figure 8	The mass attenuation coefficient $(\mu/\rho)$
	and the mass energy-absorption coefficient ( $\mu_{en}/\rho$ )
	as a function of photon energy for soft tissue [40]25
Figure 9	A schematic of the alpha-particle irradiator
	in RadBio Lab at SNU31

Figure 10	Detailed drawings for upper and lower plate of
	irradiation chamber
Figure 11	Detailed drawings for petri dish holder and window
	cover with IISD37
Figure 12	Detailed drawings for (A) irradiation shutter and
	(B) source holder
Figure 13	Micrometer head (model: 152-103, MITUTOYO,
	JAPAN) for control of source location-control
	range: 0 to 50 mm, resolution: 0.01 mm,
	accuracy: $\pm 2 \ \mu$ m
Figure 14	(A) A drawing and (B) the picture of the dish
	frame mold42
Figure 15	(A) An external appearance of the alpha-particle
	irradiator and a condition display device,
	(B) the top view of the irradiator with an IISD
	attatched to the stainless cover,
	(C) the top view of the irradiator with a Mylar
	cell culture dish, (D) $Am-241$ source holders and
	(E) IISD and $Am-241$ source on the holder in the
	alpha-particle irradiator44
Figure 16	(A) A Mylar cell culture dish for alpha-particle

irradiation and its components. The Mylar cell culture dish can be made of a plastic frame,

	a 4 $\mu$ m-thick Mylar film and a Teflon ring.
	(B) Stainless frames for holding the dish.
	(C) Alpha-particle irradiation to cell cultured
	on the Mylar cell culture dish45
Figure 17	Alpha-particle energy spectr measured
	before and after helium injection for 30 seconds47
Figure 18	Typical system for alpha-particle spectroscopy52
Figure 19	A commercial vacuum chamber and a portable
	pump station55
Figure 20	Alpha-particle energy spectrum measured
	in vacuum chamber (A: before, B: after energy
	calibration of MCA)58
Figure 21	Measured (A) and simulated (B) alpha-particle
	energy spectrum at the Mylar cell culture dish
	position in accordance with SSDs
	(5, 10, 15, 20, 25 and 30 mm)61
Figure 22	Measured (A) and simulated (B) alpha-particle
	energy spectrum at the SSD of 5 mm64
Figure 23	A geometrical representation of alpha-particle
	irradiaton to Mylar cell culture dish
	in the irradiator68

Figure 24	The probability distribution of fluence in cell layer
	and the fitting fucntion in accordance with SSDs69
Figure 25	Ratios between fluence rate at the radial
	distance x and average value
	(diameter of dish: 14.14 mm)72
Figure 26	Ratios between fluence rate at the radial
	distance x and average value
	(diameter of dish: 31 mm)73
Figure 27	Probability distribution of alpha-particles
	calculated with AASI-code at entrance
	and exit to cell layer
	(diameter of cell layer: 14.14 mm, SSD: 20 mm)79
Figure 28	Probability distribution of alpha-particles
	calculated with AASI-code at entrance
	and exit to cell layer
	(diameter of cell layer: 31 mm, SSD: 30 mm)80
Figure 29	Probability distribution of alpha-particle obtained
	from measured alpha-particle energy spectrum
	at the SSDs of 20 and 30 mm82
Figure 30	The dose calibration curve for alpha-particle
	irradiator (diamter of dish: 31 mm)87

- Figure 31 The dose calibration curve for alpha-particle irradiator (diamter of dish: 14.14 mm) ......88
- Figure 32 Dose rates at the cell layer by photon emissions from Am-241 as a function of SSD......91

## I. 서 론

인류는 자연방사선으로 인하여 연간 수 mSv의 방사선 피폭을 받는다고 알려져 있다. 핵 방사능 효과에 관한 유엔 과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation)에 의하면, 인류가 자연방사선으로부터 받는 피폭은 우주방사선(16 %), 지각방사선(20 %)에 의한 외부피폭과 호흡(52 %), 섭취(12 %)에 의한 내부피폭을 포함하며 특히 라돈과 라돈 딸핵종에서 방출되는 알파선에 의한 내부피폭이 가장 큰 원인이었다 [1]. 실제로 단 반감기 라돈 딸핵종이 호흡에 의해 호흡기 계통에 침적될 경우 폐 기저세포에 상당량의 선량이 피폭될 수 있다 [2, 3, 4]. 또한 장 반감기 딸핵종 중 알파선을 방출하는 Po-210은 천연방사성 핵종에 오염된 물질의 섭취에 의해 체내에 축적되며 이로 인한 내부피폭은 섭취에 의한 전체 피폭 중 7 %를 차지한다 [5]. 지금까지 라돈에 의한 피폭의 생물학적 효과에 대한 연구는 주로 역학조사로 수행하였지만 대부분의 연구에서 특정한 결론을 내리기에는 한계가 있다고 언급하였다 [6-15]. 알파선 피폭에 의한 세포영향 연구도 광범위하게 수행되었지만 [16-20], 라돈 딸핵종이 방출하는 알파선에 의한 내부피폭 연구는 지속적으로 요구 되고 있다.

알파선 피폭에 의한 세포영향 연구분야에서 in vitro 세포조사실험을 위한 알파선 조사장치들은 계속해서 제안되어왔다 [21-32]. 하지만 기존 연구들의 장치 제작 목적은 라돈 딸핵종에 의한 알파선 피폭에 관한 연구를 위한 것 보다는 주로 방사선 조사 시 세포의 방관자 효과(bystander effect)를 집중적으로 확인 하기 위한 것이었다. 기존연구들에서 제시한 알파선 조사장치 및 그 특성과 선량을 평가한 방법에 대한 내용을 요약하여 표 1에 나타내었다. 요약한 내용을 토대로 분석한 공통적인 결점들은 표 2에 정리하였다.

기존 알파선 조사장치에서 주로 사용되었던 알파선원은 Am-241과

1

Pu-238이며, 보조적으로 Cm-244도 낮은 선량률 제공을 위하여 사용되었다. 조사장치의 내부는 헬륨으로 채웠으며, 선원에서 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼은 PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) 검출기로 측정하거나 AASI (Advanced Alpha spectrometric SImulation, Siiskonen and Pollanen, 2004, 2005) 또는 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) 코드를 사용하여 계산하였다. 알파선 조사장치의 선량평가는 AASI 코드를 이용하거나 또는 인체조직에서의 알파선의 평균 LET (Linear Energy Transfer)와 총 알파선속을 통하여 선량을 도출해내는 식을 이용하여 수행하였다.

기존 연구들에서 나타난 문제점은 알파선 조사장치 내부에 장착된 선원의 오염을 방지하거나 또는 장치 내부에 주입한 헬륨의 누출을 막기 위하여 추가적인 Mylar 필름을 사용한 것이다 [28-32]. 또한 bystander effect 연구를 위하여 세포단위의 알파선 조사를 위한 콜리메이터를 설치하였는데 [24, 25, 26, 32], 이러한 추가적인 장치들에 의해 세포에 조사되는 알파선의 선속과 에너지 영역이 감소하였다. 라돈 딸핵종에 의한 실제 내부피폭 상황에서는 5.30, 6, 7.69 MeV의 알파선이 각각의 라돈 딸핵종에서 방출되어 다양한 에너지 감쇠 과정을 거친 후 기저 세포에 피폭된다. 하지만 일반적인 알파선원에서 방출되는 알파선의 에너지 영역은 5 ~ 5.5 MeV이므로, 세포에 조사되는 알파선의 에너지 범위를 라돈 딸핵종에 의한 피폭상황과 유사하게 만들기 위해서는 에너지 감소를 최소화시킬 필요가 있다.

또한 기존 연구에서는 저선량 영향평가에 사용되는 gamma-H2AX assay 방법에 적절하지 않은 세포배양접시를 사용하였으며, 세포 배양접시의 크기 및 선원과 샘플 사이의 거리(Source to Sample Distance-SSD)를 고려하지 않고 선량평가를 수행하였다 [24, 26, 28, 29, 30, 31, 32]. 선량평가는 한 가지 방법으로만 수행하였으며 그 결과를 다른 방법으로부터 도출된 결과와 비교하는 작업을 하지 않았다 [24, 26, 27, 28, 30, 31, 32]. 심지어 선량평가를 수행하지 않았거나 선량정보를 제시하지 않은 연구들도 존재하였다 [24, 25, 26, 29].

Reference	Source	Spectrometry	Dosimetry	SSD (mm)	Purpose	Note
J. Dahle et al. 2011 [32]	Pu-238 (D: 30 mm)	PIPS detector & AASI-code	AASI-code (difference in the energies of the $\alpha$ as they enter and leave cell layer)	12.8	Bystander effect study	<ul> <li>Collimator</li> <li>Chamber exit window</li> <li>(3 μm Mylar)</li> <li>No dish information</li> </ul>
N. Tisnek et al. 2009 [31]	Pu-238 (D: 30 mm)	PIPS detector & AASI-code	AASI-code (difference in the energies of the $\alpha$ as they enter and leave cell layer)	5 & 45	Bystander effect study	<ul> <li>Chamber exit window</li> <li>(3μm Mylar)</li> <li>No dish information</li> </ul>
G. Esposito et al. 2009 [30]	Am-241 (D: 9.4 mm) Cm-244 (D: 20 mm)	PIPS detector & SRIM-code	LET $\times$ F*	58	Bystander effect study	<ul> <li>Source protector <ul> <li>(0.7 μm Mylar)</li> </ul> </li> <li>Dish of 56 mm diameter <ul> <li>(T-25 flask)</li> </ul> </li> <li>Evaluate the influence of gamma (Geant4 code)</li> </ul>

 Table 1. Summary of previous studies for alpha-particle irradiator.

 $\overline{F^*}$ : Fluence rate measured with CR39 or calculated with mathematical equation.

Reference	Source	Spectrometry	Dosimetry	SSD (mm)	Purpose	Note
A. Hakanen et al. 2006 [29]	Pu-238 (D: 30 mm)	AASI-code	No dosimetry	5, 30, 50	Bystande effect study	r-Chamber exit window (3 µm Mylar) - No dish information
G. Esposito et al. 2006 [28]	Cm-244 (D: 20 mm)	PIPS detector & TRIM-code	LET $\times$ F <sup>#</sup>	59	Low dose effect study	<ul> <li>Source protector</li> <li>(0.7 μm Mylar)</li> <li>Dish of 56mm diameter</li> <li>(T-25 flask)</li> </ul>
R. Wang et al. 2005 [27]	Am-241	PIPS detector	LET $\times$ F <sup>#</sup>	5	Bystande effect study	-F: PIPS detector vs CR39 r (CR39>PIPS detector: x1.4) -Air condition (E of alpha: 3.14 MeV) -3.81 cm-diameter-Mylar

 $F^{#}$ : Fluence rate measured with CR39.

(Continued)

Reference	Source	Spectrometry	Dosimetry	SSD (mm)	Purpose	Note
P. V. Neti et al. 2003 [26]	Am-241	PIPS detector	LET $\times$ F <sup>#</sup>	No data	Bystander effect study	-Collimator -No dose rate information
S. J. Wang et al. 2003 [25]	Am-241	PIPS detector	No dosimetry	No data	Cell response	-Collimator -Dish of 36 mm diameter -No dose rate information
C. Soyland et al. 2000 [24]	Pb-241/ Bi-212 (half life =10.6 h)	PIPS detector	LET × F'	60	Cell response	-Collimator -Dish of 50 mm diameter -No dose rate information

 $F^{#}$ : Fluence rate measured with CR39, F<sup>'</sup>: Fluence rate measured with LR115.

Table 2. Analysis of previous studies for alpha-particle irradiator.

Point to be improved	Reference
Additional Mylar layer: chamber exit window or source protecting layer	[28, 29, 30, 31, 32]
Collimator for bystander effect study	[24, 25, 26, 32]
Condition of air	[27]
Absence of dish information in dose calculation	[26, 29, 31, 32]
Inappropriate size of dish	[24, 28, 30]
No dosimetry	[25, 29]
No dose rate data	[24, 25, 26, 29]
Dose rate calculation with LET X F	[24, 26, 27, 28, 30]
Dose rate calculation with AASI-code	[31, 32]
<ul> <li>Energy loss of alpha-particle incident to cell</li> <li>Using the inappropriate dish for gamma-H2AX assay</li> </ul>	

- Dose calculation without considering the size of dish and SSD

– Absence of comparison on result of AASI–code calculation and LET  $\, imes\,$  F method

이 연구에서는 라돈 딸핵종이 방출하는 알파선에 의한 세포 영향 연구를 위해 서울대학교 방사선 생명공학연구실에 알파선 조사장치를 구축하였다. 이 장치는 기존장치들의 구조적인 문제점들을 보완하여 세포에 조사되는 알파선의 에너지 영역을 개선하였다. 장치의 조사함은 stainless steel 재질로 만들었으며, 장치 설계 및 제작에 있어서 in vitro 세포실험에 대한 적합성 및 헬륨의 누출을 방지하는 것을 최우선으로 하였다. 알파선 세포조사 실험에 적합한 세포배양접시는 4 μm 두께의 Mylar 필름과 특수 제작한 부속품으로 만들었으며, 저선량 연구에 적합한 gamma-H2AX assay 조건도 고려하였다. 장치의 세부 설계자료 및 제작 과정은 3절에서 상세하게 다루었다.

조사장치의 특성평가를 위하여 이온 주입형 실리콘 반도체 검출기 (Ion-Implanted Silicon Detector)로 조사장치 내부의 선원으로부터 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 선원과 검출기 사이의 거리 변화에 따라 측정하였으며 그 결과를 AASI 코드로 계산한 스펙트럼과 비교하였다. 또한 선원과 샘플간의 기하적인 관계로부터 도출된 식으로 알파선속의 공간적 분포를 계산하였고, 이러한 자료들을 토대로 세포에 조사되는 알파선의 에너지를 최대로 하면서 공간적으로 균일한 선속의 알파선을 전달할 수 있는 선원과 샘플 사이의 거리를 결정하였다.

기존의 알파선 조사장치 연구에서 사용되었던 두 선량평가방법으로 세포배양접시의 크기와 선원과 샘플 사이의 거리정보가 포함된 선량률을 계산하였으며, 두 평가방법의 결과를 비교하였다. 선량평가의 정확성을 높이기 위하여 보정계수 도입을 제안하였고, 각 조사조건에 적합한 보정계수를 계산하였다. 두 선량평가방법 중 더 효율적인 방법으로 알파선 조사 실험장치의 선량평가를 선원과 샘플의 거리 변화에 따라 수행하였고, 그 결과들로부터 dose calibration function을 구하였다. 추가적으로 라돈 딸핵종들은 광자를 거의 방출하지 않는다는 것을 고려하여 라돈 딸핵종을 대신하는 Am-241 선원의 방출광자들이 세포에 전달하는 선량을 몬테카를로 전산모사로 계산하였다. 계산 결과는 알파선과의 상대적 영향성 평가를 위하여 Am-241 선원에서 방출되는 알파선에 의한 선량과의 비로 나타내었다.

최종적으로 구축 완료한 알파선 조사장치의 사양 및 구성 정보, 제공 가능한 선량률과 조사조건 등은 결론에 제시하였다.

### Ⅱ. 배경 이론

# 2.1 라돈(Rn-222)의 붕괴사슬과 라돈 딸핵종에 의한 내부피폭 경로

라돈(Rn-222)은 자연적으로 발생한 천연방사성 핵종으로 U-238의 긴 방사붕괴과정에서 발생되는 한 핵종이다. 라돈보다 높은 단계에 존재하는 U-238 계열의 핵종들은 상대적으로 매우 긴 반감기를 가지고 있기 때문에 방사선 피폭에 관해서는 고려되지 않지만, 라돈과 라돈의 딸핵종들은 짧은 반감기를 가지고 있어 즉각적으로 붕괴하므로 더 위험하게 여겨진다. 라돈의 반감기는 3.82 일로 Po-218, Po-214와 같은 반감기가 수 분, 수 마이크로 초 단위인 단 반감기 딸핵종에 비해 상대적인 붕괴율이 작다. 이는 라돈 가스가 호흡기 계통에 머무는 짧은 시간 동안 방출 할 수 있는 알파선의 수가 상대적으로 작다는 의미이므로, 라돈보다 라돈의 딸핵종들에 의한 영향을 내부피폭의 가장 중요한 요소로 볼 수 있다.

라돈은 5.48 MeV의 알파선을 방출하며 붕괴하고, 약 1 시간 동안 4 회의 연속적인 붕괴과정을 겪는다. 그 중 2 회의 붕괴에서는 알파선이 방출되며 나머지 두 번의 붕괴에서는 다른 종류의 방사선이 방출된다 [33]. 라돈의 딸핵종들 중에서 비교적 짧은 반감기를 가지는 핵종들은 Po-218(반감기 3 분, α붕괴), Pb-214(반감기 27 분, β<sup>-</sup> 붕괴), Bi-214(반감기 20 분, β<sup>-</sup>붕괴), Po-214(반감기 180 마이크로초, α붕괴)이며 이들을 단 반감기 딸핵종이라 지칭한다. 단 반감기 딸핵종들은 공기 중으로 방출되어 미립자와 결합한 상태로 존재하다가 호흡을 통하여 체내로 들어오게 되며, 호흡기 계통의 점막이나 폐 조직에 침적되어 내부피폭을 일으킨다. 공기 중에서 미립자와 결합한 상태로 남겨진 단 반감기 딸핵종들은 Pb-210(반감기 22 년, β<sup>-</sup>붕괴)을 거쳐 Po-210(반감기 138 일, α붕괴)으로

9

붕괴되며, 지표로 돌아와 토양의 표면이나 식물, 수생환경에 존재하게 된다. [34 - 36]. Po-210은 섭취를 통하여 마침내 체내에 축적되며 장기간 내부 피폭을 일으킨다.

정리하자면 라돈의 단 반감기 딸핵종들 중 Po-218과 Po-214가 호흡을 통하여 체내에 들어와 알파선에 의한 내부피폭을 일으키는 핵종들이며, 이들 중 Po-214가 내부피폭을 일으키는 주된 핵종이다. Po-214는 알파붕괴에 의해 대부분 7.68 MeV 알파선을 방출하며, 만분의 일 확률로 두 개의 여기 에너지 준위를 거쳐 기저상태로 붕괴되면서 각각 799.7(0.01 %), 298(0.000052 %) keV의 감마선을 방출한다. 장 반감기 딸핵종 Po-210은 섭취를 통하여 체내에 축적되어 알파선에 의한 내부피폭을 일으키는데, 알파붕괴를 통해 대부분 5.3 MeV의 알파선을 방출하며 10만분의 1 확률로 803.1 keV 감마선을 방출한다. 라돈의 방사붕괴 사슬과 딸핵종들을 반감기에 따라 분류한 것을 그림 1, Po-214와 Po-210의 에너지 준위도를 그림 2 와 3에 나타내었다.

10



**Figure 1.** A decay chain of Rn-222 and the classification of radon progenies.



Figure 2. The decay scheme of Po-214.



Figure 3. The decay scheme of Po-210.

#### 2.2 Am-241의 알파붕괴 과정에서 방출되는 방사선

Am-241은 여러 경로의 알파붕괴를 통하여 Np-237이 되면서 다양한 종류와 에너지의 방사선을 방출한다. 방출되는 방사선들은 알파붕괴로 방출되는 알파선과 여기 상태로 붕괴된 후 기저상태가 되면서 발생하는 감마선, 내부전환 과정에서 감마선 대신에 발생되는 전환전자(conversion electron), 전환전자에 의해 발생되는 X선, X선 대신에 방출되는 오제전자(Auger electron)이다. X선 대신에 방출되는 오제전자는 전자의 결합에너지가 작은 낮은 원자번호의 원소에서 주로 발생되므로 전환전자에 비해 상대적으로 작은 에너지를 가진다. 일반적인 오제전자의 에너지는 수 keV로 대부분 선원에서 selfabsorption 되거나 검출기의 검출 창에 흡수된다 [37].

대표적으로 방출되는 알파선들의 에너지는 5.389(1.6 %), 5.443 (13 %), 5.486(84.5 %), 5.513(0.22 %), 5.545(0.34 %) MeV이며, 이들 중 가장 주된 알파선의 에너지는 5.486 MeV로 84.5 %의 비율로 방출된다. 위의 알파선들과 동반되어 대표적으로 26.34, 33.2, 43.42, 59.54, 98.97 keV의 에너지를 가진 감마선들이 각각 2.4, 0.126, 0.073, 35.9, 0.0203 %의 비율로 방출되며, 특히 59.54 keV 감마선의 방출 비율이 35.9 %로 가장 우세하다. 감마선 대신에 방출되는 전환전자는 주로 L-shell에서 방출되며, 가장 우세한 방출비율(30.2 %)을 가진 전환전자의 에너지는 해당 부각(subshell)에서의 최대 에너지 37.1 keV이다. 알파선 조사장치에서 전환전자들은 오제전자와 마찬가지로 선원에서 self-absorption 되거나 세포에 도달하기 전 세포배양접시의 Mylar 필름에서 대부분의 에너지를 잃는다. 또한 세포에 온전히 도달한다 하여도 세포에서의 선손실 에너지(40 keV 전자의 LET는 7.78 MeV/cm)는 5 MeV 알파선의 선손실 에너지(5 MeV 알파선의 LET는 886 MeV/cm)의 1 % 이하이기 때문에 알파선 조사장치의 선량평가에서 고려되지 않는다. 또한 전환전자 방출 후 Np-237 전자의 천이에 의하여 주로 L-shell의 L<sub>a</sub>, L<sub>b</sub>, L<sub>y</sub> X선이 방출되는데, 이들의 평균 에너지는 13.9 keV이고, 총 발생비율은 36.9%이다[33].

Am-241의 에너지 준위도는 그림 4에 나타내었고, ORAU (Oak Ridge Associated Universities)의 웹(http://www.orau.org)에서 제공하는 ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File)에서 요약한 Am-241이 방출하는 주요 알파선, 감마선, 전환전자, X선, 오제전자의 에너지와 방출비율을 표 3에 정리하였다. 표 3에서 각 입자 뒤에 붙은 숫자들은 방출되는 입자들을 에너지의 크기로 나열한 순서를 의미한다.



Figure 4. An energy level diagram of Am-241.

	Energy (keV)	Yield (%)
alpha26	5,389	1.6
alpha28	5,443	13
alpha30	5,486	84.5
alpha31	5,513	0.22
alpha32	5,545	0.34
gamma2	26.34	2.4
ce-L	3.9*	14.4
ce-M	20.6*	3.84
gamma5	33.2	0.126
ce-L	$10.8^{*}$	17.4
ce-M	$27.5^{*}$	4.41
gamma8	43.42	0.073
ce-L	21*	9.05
ce-M	$37.7^{*}$	2.39
gamma13	59.54	35.9
ce-L	$37.1^{*}$	30.2
ce-M	$53.8^{*}$	8.11
gamma23	98.97	0.0203
L X-ray	13.9ª	36.9
Auger-L	10.1ª	35.3

Table 3. Radiation emissions from the alpha decay of Am-241.

a: average energy (keV), \*: maximum energy (keV) for subshell.

#### 2.3 알파선의 에너지 손실

알파선이 매질 내로 입사하게 되면 매질의 원자와 충돌하여 여기, 이온화, 핵과의 충돌 등에 의해 에너지를 잃게 된다 [38]. 원자 크기의 단위는 1 Å(10<sup>-10</sup> m)이고 원자핵 크기의 단위는 10<sup>-15</sup> m이므로, 원자핵이 원자 전체 부피에서 차지하는 비율은 10<sup>-15</sup> 이다. 따라서 알파선의 에너지 손실은 주로 매질 내에서 전자와의 비 탄성 충돌에 의해 발생된다. 에너지의 손실은 일반적으로 물질이 방사선을 저지하는 능력을 나타내는 저지능으로 표현되며, 이는 매질 속에서 입자의 단위 진행거리 당 에너지 손실량(dE/dx)으로 정의 된다. 알파입자의 에너지가 1 MeV 이상인 영역에서는 매질 내에서 알파입자가 전자를 모두 잃어버린 상태로서 입자의 운동에너지가 증가함에 따라 궤도 전자와의 Coulomb 충돌시간이 감소하므로 에너지손실이 감소하게 된다. 이 영역에서 저지능은 Bethe의 이론인 (2.1)식과 같이 표현된다 [37].

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{m_e v^2} \text{NB} \quad (2.1)$$

여기서, Z<sub>1</sub>은 입자의 원자번호, e는 전자의 전하량, m<sub>e</sub>는 전자의 질량, v는 입자의 속도, N은 매질의 원자밀도이며, B는

$$B \equiv Z_2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e v^2}{l} \right) - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.2)$$

여기서, Z<sub>2</sub>는 매질 원자의 원자번호, I는 매질의 궤도 전자의 여기 및 이온화에 필요한 평균 에너지이다. (2.1)식에 따르면 저지능은 근사적으로 알파선의 에너지에 반비례하며 매질의 원자의 원자번호와 밀도가 클수록 증가한다.

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{NZ_2}{v^2}$$
 (2.3)

선원에서 방출된 알파선은 매질 내에서 주변원자핵 또는 전자와의 충돌에 의해 에너지를 잃으며, 이때의 에너지 손실과 충돌 횟수는 통계적인 요동을 갖는다. 따라서 단일에너지의 알파선이 일정 두께의 매질을 통과하면 항상 에너지 퍼짐(energy straggling) 현상이 발생된다. 에너지 퍼짐의 정도는 입자가 매질 내에서 이동한 궤적거리에 따라 증가한다. 그림 5는 단일에너지의 하전입자가 매질을 통과하는 과정에서 발생되는 에너지 퍼짐 현상을 나타낸 그림이다. 하전입자의 궤적 X가 증가할수록 에너지 스펙트럼의 peak 에너지는 감소하고, 에너지분포의 범위가 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 비정의 끝에서는 에너지분포의 범위가 다시 좁아지는데 그 이유는 하전입자의 평균에너지가 상당히 감소되었기 때문이다.



**Figure 5.** Plots of energy distribution of a beam of initially monoenergetic charged particles at various penetration distances, E is particle energy and X is the distance along the track [37].

#### 2.4 각 매질에 대한 알파선의 선손실 에너지

선손실 에너지(LET)는 방사선이 물질을 통과 할때, 그 경로의 단위 길이당 잃는 에너지를 말한다. 선손실 에너지의 크기는 방사선의 종류, 에너지 및 통과하는 물질에 따라 다르다. 선손실 에너지는 매질 속에서 입자의 단위 진행거리당 에너지 손실량으로 정의되는 저지능에서 복사성 에너지 손실을 제외한 것으로 MeV/cm 단위로 표현된다.

알파선 조사장치 내에서 알파선은 Am-241 선원으로부터 방출되어 헬륨 또는 공기, Mylar 필름. 세포 층 등의 여러 매질을 통과하게 된다. 따라서 알파선 조사장치에서 알파선의 거동을 예측하기 위해서는 각 매질에서의 선손실 에너지 정보를 확인할 필요가 있다. 각 매질에 대한 선손실 에너지 정보는 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 ASTAR program (http://physics.nist.gov)에서 제시한 저지능 표를 참고하였다. ASTAR 데이터베이스는 ICRU report 37과 49에 언급된 방법(2 MeV 이상의 에너지에 대한 알파선의 저지능은 Beth의 저지능 계산식을 이용하고, 그 이하의 에너지영역에서는 실험 자료를 fitting)을 토대로 알파선, 베타선, 양성자의 저지능과 비정을 계산한다.

그림 6는 헬륨과 공기에서의 알파선의 선손실 에너지를 비교한 그래프이다. 그래프에서 5 MeV 에너지 알파선의 공기에 대한 선손실 에너지는 헬륨에 대한 값 보다 크기 때문에, 알파선 조사장치에서 공기 대신에 헬륨을 사용하는 것이 알파선의 에너지손실을 최소화하는데 효과적이다. 그림 7은 물, MS20 조직등가물질, Mylar 필름에서의 알파선의 선손실 에너지를 비교한 그래프이다. 5 MeV 주변 에너지 알파선의 물에 대한 선손실 에너지와 MS20 조직등가물질에 대한 선손실 에너지의 차이는 3 % 이하이며, 물도 조직등가물질로 간주된다. Mylar 필름은 알파선이 세포에 조사되기 직전 통과하는 세포배양접시의 아랫면이며, 플라스틱 재질이기 때문에 물과 큰 차이를 보이지 않는다.

21



Figure 6. Linear energy transfer of alpha-particle in helium and air.


**Figure 7.** Linear energy transfer of alpha-particle in MS20 tissue substitute, water and Mylar film.

# 2.5 저 에너지 광자와 조직의 상호작용

광자는 매질에 입사하여 광전흡수(Photoelectric absorption), 컴프턴산란(Compton scattering), 쌍생성(Pair production)과 같은 상호작용에 의해서 에너지를 잃으며, 매질의 원자번호와 광자의 에너지영역에 따라 주요 상호작용이 달라진다 [39].

Am-241 선원에서 방출되는 광자의 에너지는 대부분 60 keV 이하이며, 59.54 keV 에너지를 가진 감마선이 방출 비율 35.9 %로 가장 우세하다. 이 에너지 영역의 광자는 인체조직에 입사되었을 때 광전 흡수반응을 통하여 에너지를 잃는다. 광전흡수 과정에서 입사한 광자는 완전히 조직에 흡수되고 광전자를 방출한다. 광자의 에너지가 K-shell 전자의 결합에너지보다 커지면 광전흡수는 급격하게 감소하고 컴프턴 산란이 중요해진다. 따라서 광자의 에너지가 증가하면 조직에서의 감쇠계수는 급격하게 감소하게 된다. 광자가 조직에 입사되었을 때의 질량감쇠계수(Mass attenuation coefficient)와 질량에너지흡수계수 (Mass energy absorption coefficient)를 그림 8에 에너지에 대한 함수로 나타내었다 [40].



**Figure 8.** The mass attenuation coefficient  $(\mu/\rho)$  and the mass energy-absorption coefficient  $(\mu_{en}/\rho)$  as a function of photon energy for soft tissue [40].

### 2.6 흡수선량과 선량분포 및 선량률 변화인자

방사선이 물질과 상호작용을 한 결과로, 그 물질의 단위 질량당 흡수되는 에너지를 흡수선량(absorbed dose)이라고 한다. 즉, 물질의 질량 dm에 대해서 에너지 dE가 주어졌을 때 흡수선량 D는 다음과 같다.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (Gy) \quad (2.4)$$

흡수선량은 방사선의 종류, 피폭대상의 종류에 관계없이 사용된다. 흡수선량의 단위로 그레이(Gray, 단위기호 Gy)가 사용되는데 1 Gy는 물질 1 kg에 1 J의 에너지가 흡수되었을 때의 흡수선량을 말한다. 흡수선량률은 시간 dt내의 흡수선량의 증가 dD를 dt로 나눈 몫이다. 단위로는 Gy/s, Gy/min 등이 쓰여지고 있다.

선량분포는 피폭체 내에 주어진 방사선량이 어떻게 분포되는가를 나타내는 것으로 피폭체는 주로 인체가 된다. 선량과 선량분포의 계산 및 측정은 주로 인체를 대신하는 팬텀(phantom)에서 수행된다, 팬텀은 방사선의 흡수와 산란의 성질이 인체 내 조직과 유사한 물질로 조직등가물질(tissue equivalent materials)로도 표현된다. 대표적인 팬텀으로는 물을 사용하는 액체 팬텀과 물 등가 고분자 물질인 아크릴을 사용하는 고체 팬텀이 있다.

하전입자 피폭에 의한 선량률 계산은 주로 피폭체에 조사되는 입자의 총 선속률과 입자의 평균 선손실 에너지(average LET)의 곱으로 수행된다. 선량 및 선량분포를 변화시키는 인자로는 선원의 종류, 방출되는 방사선의 에너지범위, 선원의 방출면적(active area), 선원과 샘플 사이의 거리(Source to Sample Distance-SSD), 피폭체의 인자(크기, 입사부의 형태, 형질), 조사방향 등이 있다. 위의 변화인자들 중 선원의 방사선 방출면적, 선원과 샘플 사이의 거리, 피폭체의 크기, 피폭체 입사부의 형태, 조사방향 등은 선속률의 영향을 주는 인자들이고 선원의 종류, 피폭체에 조사되는 방사선의 에너지범위, 피폭체 형질은

평균 선손실 에너지에 영향을 준다.

따라서 정확한 선량평가를 위해서는 위의 인자들을 모두 고려하여 선량을 계산해야 하며, 계산 결과를 인자들의 조합에 따라 세분화 시킬 필요가 있다. 이 연구에서 구축한 알파선 조사장치의 선량평가에서 고려된 인자들과 그 수치를 표 4에 나타내었다.

Factors	Figures	
Radiation type	Alpha-particle	
Active diameter of source	9.5 mm	
Radiation energy	5.389(1.6 %), 5.443 (13 %), 5.486(84.5 %), 5.513(0.22 %), 5.545(0.34 %) MeV	
Emission angle	4 π	
SSD	5 – 30 mm	
Beam exposure area	31, 14.14 mm diameter circle	
Target	Cell layer (water phantom)	
Target thickness	5 µm	

Table 4. Factors for dose calibration of alpha-irradiator.

# Ⅲ. 장치 설계 및 제작

# 1. 개념 설계

알파선원을 이용한 내부피폭연구를 위한 실험관 내 세포실험용도의 알파선 조사장치의 개념도는 그림 9와 같다. 조사장치에서 이용할 선원으로는 시중에서 구매할 수 있는 알파 선원 중 가장 높은 방사능을 가진 Am-241로 정하였다. Am-241은 베타입자 방출이나 전환전자에 의한 간섭이 작고 432.17 년의 반감기를 가지고 있어 장시간 안정적으로 알파선을 방출시킬 수 있으므로, 시중에서 구매 가능하지만 반감기가 매우 짧은 라돈 딸핵종인 Po-210(반감기 138.401 일)보다 알파선 조사장치의 선원으로 적합하다. Am-241은 알파선 조사장치 내부에 설치된 마이크로 단위로 높이 조절이 가능한 조절 봉 상단에 위치하게 되며 선원을 보호하기 위한 고정장치에 삽입된 상태로 조절 봉에 탈 부착이 가능하게 하였다.

알파선원에서 방출되는 알파선을 측정하기 위한 검출기는 불감층이 매우 얇아 알파선 검출에 적합한 이온 주입형 실리콘 검출기(Ion Implanted Silicon charged particle Detector - IISD)를 선택하였고, 검출기는 알파선 조사장치의 조사창을 덮는 덮개에 부착하도록 하였다. 덮개의 검출기 커넥터는 상용화된 진공 챔버에서 사용되는 방식(덮개의 외부 BNC male, 내부 Microdot female)과 같게 하였다. 검출 시스템에 대한 자세한 사양은 Ⅲ-3 분광계통 구성에서 설명하였다.

조사장치는 기체를 충분히 충전할 수 있는 원형 조사함 형태이며, 세포배양접시를 올려놓을 수 있는 조사창은 조사함 윗면에 만들었다. 조사시간을 결정하는 셔터의 회전공간을 확보하면서 조사함의 내부 부피를 최소화하기 위하여 조사창은 조사함 윗면의 정 중앙이 아닌 측면에 위치시켰다. 선원에서 방출된 알파선의 에너지손실을 최소화하기 위하여 알파선 조사장치의 내부에 선원 보호막을 고려하지 않았기 때문에 Mylar 세포배양접시가 파손될 경우 세포 배양 배지에 선원이 오염되는 문제가 발생된다. 따라서 조사함의 내 외부의 기압 차가 발생되지 않도록 진공이 아닌 기체를 충전하기로 하였으며, 충전 기체는 알파선의 에너지 손실을 최소화하면서 폭발 위험성이 존재하지 않는 안전한 기체인 헬륨을 선택하였다. 적은 양의 헬륨으로 조사함의 내부를 순수 헬륨 환경으로 만들기 위해서는 조사함의 부피를 최소로 해야 한다. 이를 위하여 조사함의 부피를 증가시키는 요인을 모두 배제하였다. 대표적으로 조사함 내부에 디지털화된 장비를 사용하면 조사함의 부피가 커질 수 밖에 없으므로 조사시간을 조절하는 셔터와 선원의 높낮이를 조절하는 조절 봉 모두 수동으로 작동하게 하였다. 조사함의 내부를 헬륨으로 채우기 위하여 조사함의 상단에 헬륨 주입구를, 하단에 배출구를 만들었다. 조사함 내부에 헬륨을 지속적으로 주입하면 헬륨이 조사함의 상단부터 채워지면서 헬륨보다 무거운 공기는 하단의 배출구로 배출된다.

일반적으로 사용되는 세포배양접시는 플라스틱의 한 종류인 폴리스티렌으로 만들어지며, 세포가 배양되는 아랫면의 두께는 1 mm이다. 이러한 세포배양접시를 알파선을 이용한 세포조사 실험에 사용하게 되면, 알파선이 접시의 아랫면을 통과하면서 상당량의 에너지손실이 발생된다. 따라서 기존의 세포배양접시는 알파선에 의한 세포영향 실험에 적합하지 않으므로, 알파선조사 조건에 적합한 세포배양접시를 따로 제작하였다. 세포배양접시의 아랫면은 매우 얇은 두께의 Mylar 필름이며, 세포배양접시 제작에 대한 자세한 내용은 Ⅲ-2 상세 설계 및 제작에서 다루었다.

알파선 조사장치의 내부환경을 실시간으로 확인 할 수 있는 내부환경 표시장치도 장착하였다. 이 장치는 조사함 내부의 기압을 실시간으로 측정하여 기압이 1.2 kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 증가하면 경고음이 울리도록 하였으며 내부의 온도도 표시할 수 있도록 하였다.



**Figure 9.** A schematic of the alpha-particle irradiator in RadBio Lab at SNU.

# 2. 상세 설계 및 제작

## 가. 알파선원

알파선 조사장치에서 알파선 조사 용도로 사용되는 선원으로 두 모델의 Am-241 선원(AM1A2100U & AM1A210U, Ecker & Ziegler, USA)을 선택하였다. 두 선원의 방사능은 각각 3.793 과 0.371 MBq이며, 방사능을 제외한 알파선 방출에 영향을 주는 특성들이 모두 일치하는 선원을 선택하였다. 두 선원의 active diameter는 9.5 mm, 반감기는 432.17 ± 0.66 년 이며 gold matrix에 Am-241이 포함되어 있는 형태로 둘 다 커버는 존재하지 않는다. 똑같은 특성이면서 약 10 배 차이의 방사능 수치를 가진 두 알파선원을 사용하는 이유는 알파선에 의한 세포영향 실험에서 선원과 샘플간의 거리나 조사시간과 같은 조건을 변화시키지 않으면서도 선량률을 큰 폭으로 조절하기 위함이다.

알파선 검출 시스템의 채널-에너지 검정을 위하여 서로 다른 peak 에너지를 가진 Am-241(AFR-241, Ecker & Ziegler, USA)과 Cm-244(AF-244-A1, Ecker & Ziegler, USA) 표준 알파선원을 사용하였다. Am-241 선원의 방사능은 30.63 kBq (2014. 06. 01 기준), 오차는 신뢰수준 99 %에서 ± 3 % 이고, active area의 직경은 5 mm이었다. Cm-244의 방사능은 3.918 kBq (2014. 06. 01 기준) 이고, 오차와 active area의 직경은 Am-241 선원의 값과 동일하였다. Am-241 표준 알파선원을 따로 사용한 이유는 위의 알파선 조사용 선원은 방사능이 높아 채널-에너지 검정용 표준선원으로는 적합하지 않았기 때문이다. 선원들에 대한 자세한 사양은 표 5에 정리하였고, 제작사에서 발행한 선원에 대한 증서를 APPENDIX B에 첨부하였다.

Table 5. Specifications of alpha-sources.

	Am-241 (AM1A2100U)	Am-241 (AM1A210U)	Am-241 (AFR-241)	Cm-244 (AF-244-A1)
Purpose	Alpha irradiation	Alpha irradiation	Energy calibration	Energy calibration
Contained radioactivity	3.793 MBq	371.1 kBq	30.63 kBq	3.918 kBq
Reference date	2014.03.01	2014.06.01	2014.06.01	2014.06.01
Half-life	432.17 ± 0.66 y	$432.17 \pm 0.66 \; \mathrm{y}$	432.17 ± 0.66 y	18.11 ± 0.02 y
Nature of active deposit	Am-241 incorporated in gold matrix	n Am-241 incorporated in gold matrix	Electrodeposited and diffusion bonded oxide	Electrodeposited and diffusion bonded oxide
Active diameter	9.5 mm	9.5 mm	5 mm	5 mm
Backing	Aluminum	Silver	Platinum	Platinum
Cover	None	None	None	None
Manufacturer	Eckert & Ziegler	Eckert & Ziegler	Eckert & Ziegler	Eckert & Ziegler

#### 나. 조사함 설계

조사함은 두께 9 mm의 stainless steel (SUS 304)로 제작하였다. SUS는 Special Use Steel의 약자로 이 제품은 크롬과 니켈의 함량이 13 % 이상이고 내식성이 우수하며 자성이 없는 특징을 가진다. 조사함 상 하부 plate의 전체 지름은 380 mm, 전체 높이는 110 mm이며, 상하부 plate를 제외한 몸통의 외경은 320 mm, 내경은 309 mm, 높이는 92 mm이다.

조사장치 내부에 콜리메이터 등의 추가 장치를 손쉽게 추가할 수 있도록 상 하부 plate 개폐식의 조사함을 만들었다. 개폐 부분에서 발생하는 헬륨의 누출을 막기 위하여 원형의 실리콘 패킹(O-링)을 사용하였고, 조사함의 상 하부 plate와 몸통의 결속을 위하여 지름 10 mm의 원형 고리 볼트 6개를 사용하였다. 제작완료 후 패킹이 들어가는 결합부의 거친 절단면이 문제가 되어 헬륨의 누출이 발생하였고, 반복적인 개선작업을 수행하여 가스 밀봉이 완벽히 되도록 하였다.

조사함 상 하부 plate의 상세 단면도를 나타낸 그림 10을 보면, 상부 plate에는 윗면의 한쪽에 121 mm 지름의 창이 나 있다. 창 주변으로는 세포배양접시 및 실리콘 검출기가 달린 덮개를 장착할 수 있게 하는 원형고리 볼트를 사용하기 위해 6.2 mm 지름의 홀을 6 개 만들었다. 실리콘 검출기가 달린 덮개와 세포배양접시 홀더에는 절연 및 가스 밀봉을 위하여 결합 면에 고무 O-링을 부착하였다. 검출기가 부착된 덮개와 세포배양접시 홀더의 세부 도면을 나타낸 그림 11를 보면, 스테인리스 재질(SUS304)로 만들어진 세포배양접시 홀더들은 각각 35,53,98 mm 지름의 상용화된 세포배양접시를 지지할 수 있도록 하였다. 세포배양접시를 지지하기 위하여 접시를 놓는 부분 최 하단의 지름은 세포배양접시의 지름보다 1 mm 작게 하였다. 또한 조사창 덮개에 이온 주입형 실리콘 검출기를 부착하기 위하여 ORTEC 사의 상용화된 진공 챔버에서 사용되는 커넥터인 Microdot-BNC 단자를 제작하여 덮개의 중심에 삽입하였다.

또한 알파선 조사 시간 조절을 위한 조사셔터의 조절 바를 삽입

하기 위하여 18 mm 지름의 홀도 만들었다. 조사함의 하부 plate에는 선원의 높낮이를 마이크로 단위로 조절 할 수 있는 마이크로미터 헤드(152-103, MITUTOYO, Japan)를 조사창의 중심과 일치하는 지점에 설치하였다. 마이크로미터 헤드를 이용한 위치 조절은 최소 눈금 0.01 ± 0.002 mm단위로 0 ~ 50 mm까지 가능하며, 마이크로미터 헤드에 선원을 고정하는 용도의 플라스틱 홀더를 10 mm 높이 차로 3개 제작하여 추가적인 높이 조절이 가능하도록 하였다. 그림 12의 (A)와 (B)는 각각 알파선 조사셔터와 선원의 고정을 위한 홀더의 제작을 위한 도면들이고, 그림 13은 알파선 조사장치에 사용된 마이크로미터 헤드의 사진이다. 원판 형태의 셔터는 5 MeV 알파선의 차폐에 충분한 두께 0.8 mm의 stainless steel (SUS 304)로 제작하였고, 선원 홀더는 성형이 쉽고 마이크로미터 헤드에 무리가 가지 않는 무게의 플라스틱으로 만들었으며, 상단에는 선원을 하단에는 마이크로미터 헤드를 견고하게 고정할 수 있도록 하였다.



Figure 10. Detailed drawings for upper and lower plate of irradiation chamber.



Figure 11. Detailed drawings for petri dish holder and window cover with IISD.



Figure 12. Detailed drawings for (A) irradiation shutter and (B) source holder.



**Figure 13.** Micrometer head (model: 152-103, MITUTOYO, JAPAN) for control of source location – control range: 0 to 50 mm, resolution: 0.01 mm, accuracy:  $\pm 2 \ \mu$  m.

#### 다. Mylar 세포배양접시 제작

세포배양접시는 대상 실험 재에 알파선을 균일하게 조사하기 위하여 아랫면이 평탄해야 한다. 또한 외부오염으로부터 차단되어야 하고, 접시 내에 있는 배양액이나 세포가 새어 나오지 않아야 한다. 알파선 조사실험에 사용되었던 세포배양접시들의 공통적인 특징은 세포가 붙어 자랄 수 있는 얇은 두께의 Mylar 필름을 사용한 것이다 [27-30]. Mylar 필름은 폴리에틸렌 테레프탈레이트 (polyethylene terephthalate) 폴리에스테르 필름의 상품명으로 미국의 뒤퐁사에서 제조하였으며 얇은 막으로 만들 수 있고, 기계적인 강도와 내열성이 있는 재료이다. 이 연구에서는 알파선의 에너지 손실을 최소화하면서 기계적인 강도를 확보할 수 있는 4 μm 두께의 Mylar 필름을 선택하였다.

Mvlar 필름을 바닥재로 하여 세포배양 접시를 만들기 위해서는 세포배양배지를 담는 공간을 확보해줄 플라스틱 틀, 이 틀의 바닥에 Mylar 필름을 감은 상태를 고정시켜줄 고정장치가 필요하다. 일반적인 세포배양접시에서 아랫면이 제거된 형태의 플라스틱 틀을 만드는 방법은 두 가지이다. 첫 번째는 상용화된 세포배양접시를 구매하여 아랫면을 제거하는 방법, 두 번째는 원하는 형태의 플라스틱을 만들 수 있는 금형틀로 플라스틱 틀을 사출 성형하는 방법이다. 첫 번째 방법은 세포배양접시의 아랫면을 제거하면 절단면이 날카로워져 Mylar 필름을 손상시킬 가능성이 존재하고, 대량으로 제작하는 것이 불가능하다는 단점이 있다. 따라서 금형틀로 사출 성형하는 방법을 선택하였다. 사출 성형이란 성형재료를 가열 실린더와 사출 실린더를 통하여 체결 장치로 밀폐된 금형 내로 고압으로 사출하여 성형품을 만드는 기법이다. 이 기법을 사용하면 워하는 형태의 틀을 대량으로 만들 수 있고 절단면이 존재하지 않는 장점이 있다. 플라스틱 틀을 제작하기 위한 금형틀은 상용화된 세포배양접시들의 본을 떠서 만들었고, 플라스틱 틀의 성형재료는 폴리스티렌으로 하였다. 금형틀의 도면 및 완성품은 그림 14에 나타내었다.

Mylar 필름을 평평한 상태로 플라스틱 틀에 고정시킬 수 있는 고정

장치로는 Teflon 재질의 원형 링을 사용하였다. Teflon 원형 링은 사출 성형으로 재작한 플라스틱 틀의 중간 부의 외경에 맞춰 제작하였다. Teflon은 뒤퐁사의 4불화 에틸렌 수지의 상품명으로 마찰계수가(0.2 ~ 0.04) 모든 고체 중에서 가장 작기 때문에 Mylar 필름에 손상을 주지 않으며 탄성이 작아서 플라스틱 틀에 부착하여도 변형을 일으키지 않는다.



Figure 14. (A) A drawing and (B) the picture of the dish frame mold.

#### 라. 알파선 조사장치와 Mylar 세포배양접시 제작 결과

위에서 언급한 설계를 바탕으로 제작 완료한 알파선 조사장치를 그림 15, Mylar 세포배양접시를 그림 16에 나타내었다. 그림 15의 (A)는 알파선 조사장치의 전면으로 선원과 검출기가 장착된 조사함과 조사함 내부의 환경을 감시할 수 있는 condition display를 확인할 수 있다. 그림 15의 (B)는 조사함 윗면의 사진으로 선원에서 방출되는 알파선을 검출하기 위하여 검출기가 부착된 덮개를 장착한 상태이고, (C)는 검출기가 부착된 덮개를 제거하고 조사창에 세포배양 접시를 장착하여 알파선 조사실험을 수행하는 사진이다. 그림 15의 (D)는 마이크로 미터 헤더에 장착할 서로 다른 세 길이의 선원 고정장치를 제작한 사진이고, (E)에서는 선원 고정장치와 실리콘 검출기가 실제 조사장치 내부에 장착되어 있는 모습을 확인할 수 있다.

그림 16의 (A)는 Mylar 세포배양접시를 만드는데 필요한 재료들을 나열한 사진으로 왼쪽으로부터 사출 성형으로 제작한 플라스틱 틀, 4 µm 두께의 Mylar 필름, Teflon 재질의 Mylar 필름 고정 링이고, 마지막은 완성된 모습의 Mylar 세포배양접시이다. 그림 16의 (B)는 알파선 조사장치에서 Mylar 세포배양접시를 지탱하는 stainless steel 재질의 세포배양접시 홀더를 보여주는 사진이고, 홀더는 다양한 크기의 세포배양접시를 지지할 수 있도록 세포배양접시의 크기 별로 제작되었다. 그림 16의 (C)는 세포가 배양되어 있는 Mylar 세포배양접시 완성품이 알파선 조사장치에 원형고리볼트에 의해 장착되어 있는 사진이다.



**Figure 15.** (A) An external appearance of the alpha-particle irradiator and a condition display device, (B) the top view of the irradiator with an IISD attached to the stainless cover, (C) the top view of the irradiator with a Mylar cell culture dish, (D) Am-241 source holders and (E) IISD and Am-241 source on the holder in the alpha-particle irradiator.



Figure 16. (A) A Mylar cell culture dish for alpha-particle irradiation and its components. The Mylar cell culture dish can be made of a plastic frame, a 4  $\mu$ m-thick Mylar film and a Teflon ring. (B) Stainless frames for holding the dish. (C) Alpha-particle irradiation to cell cultured on the Mylar cell culture dish.

#### 마. 헬륨 환경조성

알파선 조사장치의 선원에서 발생한 알파선이 세포에 전달되는 동안 에너지 손실을 최소화 하기 위해서는 조사장치 내부를 고순도의 헬륨 환경으로 유지하는 것이 중요하다. 따라서 알파선 조사장치에 사용되는 헬륨은 순도 99.999 %의 초고순도 제품을 사용하고 있으며, 헬륨을 안정된 압력으로 내보낼 수 있는 레귤레이터(Model 896, HARRIS, USA)를 사용하였다. 이 모델은 두 단계로 가스의 압력을 조절하며 첫 단계에서 실린더 압력의 90 %까지 감소시키고 두 번째 단계에서 배출하는 압력을 정확하게 조절한다. 레귤레이터에서 일정한 유량으로 배출되는 헬륨은 외경 8 mm, 내경 5 mm, 길이 2 m의 실리콘 튜브를 통하여 알파선 조사장치에 주입된다.

내부 부피가 6.9 L인 알파선 조사장치 내부에 헬륨 환경이 조성되는 시간을 확인하기 위해서 검사를 반복 수행한 결과, 매뉴얼로 조절하는 레귤레이터의 헬륨 배출량을 최소(약 0.1 bar의 기압)로 한 후 헬륨 가스를 주입하면 주입 30 초 후부터 측정되는 알파선 에너지 스펙트럼의 개형 및 peak 에너지가 고정된다. 헬륨을 주입하기 전과 후의 측정되는 알파선 에너지스펙트럼의 차이는 그림 17에 나타내었다. 그림 17의 빨간색 스펙트럼은 30 초 동안 헬륨을 주입한 후 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼이며, 검정색 스펙트럼은 헬륨을 주입하지 않고 공기에서 측정한 스펙트럼이다. 알파선 검출 시스템이 측정 가능한 최소 에너지는 약 3 MeV이기 때문에 공기에서의 알파선 에너지 스펙트럼은 일부분만 표현되었다.

따라서 알파선 조사는 세포배양접시를 조사창에 부착한 후 헬륨 주입 시작 30 초 후에 시작하도록 하였다. 또한 조사 완료된 샘플을 다른 샘플로 교체하는 과정에서 조사함 내부의 헬륨이 누출되므로 위의 과정을 샘플마다 반복해서 실행하도록 하였다.



**Figure 17.** Alpha-particle energy spectra measured before and after helium injection for 30 seconds.

알파선 조사장치 내로 주입되는 헬륨의 유량을 근사적으로 확인하기 위하여 이론 식을 이용한 계산을 수행하였다.

유체가 흐르는 상황에서 유체의 Reynolds number가 2,330보다 큰 값을 가질 때, 해당 유체의 흐름은 난류(turbulent flow)가 된다. 층류 (laminar flow)와 난류를 구분하기 위해서 베르누이 방정식(Bernoulli equation)을 통해 Reynolds number를 구해보았다.

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho V^2 = constant$$
 (3.1)

여기서 p는 압력, g는 중력가속도, h는 중력가속도 방향의 거리, ρ는 헬륨 기체의 밀도로 그 값을 0.166 kg/m<sup>3</sup> 이다. 중력에 의한 영향은 무시한다고 가정하였을 때, 유체의 속도를 제외한 다른 상수들은 알고 있는 값이므로 대입을 통해 간단하게 유체의 속도를 구해보았다. 압력을 구하기 위해 레귤레이터의 잠금 부분을 닫았을 때와 평소 실험에 사용하는 배출량이 되도록 열었을 때의 기압 차이를 확인한 결과, Regulator 상에서 읽을 수 있는 최소 단위인 0.1 bar에 근사한 움직임을 확인하였다. 따라서 헬륨 압력 차를 0.1 bar로 가정하고 베르누이 방정식에 대입하였다.

$$10,000 = \frac{1}{2} \cdot 0.166 \cdot V^2$$
$$V = 347.1 \text{ m/s}$$

Reynolds number를 구하기 위해 필요한 상수는 다음과 같다. 헬륨이 흐르는 관의 직경(d)은 5 mm, 헬륨의 점성도(μ, viscosity)는 0.0000194 Pa·s이다. 이에 따라 Reynolds number를 구하면 다음과 같다.

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho V d}{\mu} = 14,850.2 > 2,330 \quad (3.2)$$

따라서 본 유체는 난류이기 때문에 위와 같이 간단하게 속도를 구할

수 없다. 난류의 흐르는 속도를 구하기 위해 Darcy friction factor의 개념을 가져왔다 [41]. Darcy fraction factor는 차원이 없는 변수로, 관 속에서의 유체 흐름에 대하여 실험적으로 얻은 저항 상수를 의미한다. 층류에서는 고려하지 않아도 되나, 난류에서는 반드시 고려되어야 하는 상수로, 이미 학자들이 이 상수에 대한 여러 관계식을 얻어내었다. 관 속에서의 유체 흐름에 대한 Reynolds number와 Darcy fraction factor의 관계식은 아래와 같다.

$$\frac{1}{f^{0.5}} = 2.0 \log(Re_d f^{0.5}) - 0.8 \quad (3.3)$$

본 방정식을 풀면 *f* 는 0.0278819의 값을 가진다. 지면과 수평적으로 존재하는 관 속 유체의 흐름에서 압력 차와 속도의 관계식은 아래와 같고

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = f \frac{LV^2}{2gd}, \quad V^2 = \Delta p \frac{2d}{fL\rho} \quad (3.4)$$

여기서 L은 헬륨이 알파선 조사장치에 주입되는 통로인 실리콘튜브의 길이이며, 그 값은 2 m이다. 위 식에서 구한 유체의 속도 V를 유량 Q와의 관계를 나타내는 식에 대입하면,

$$Q = A \cdot V, \quad Q = \frac{1}{4} \pi d^2 V$$
 (3.5)

여기서 A는 관의 단면적, d는 관의 내경, V는 유체의 속도를 의미하며 계산 결과는 30.6 L/min이었다.

이론적 계산에 의하면 30 초 동안 알파선 조사장치에 주입되는 헬륨의 부피는 장치 내부 부피인 6.9 L 보다 큰 15.3 L 이며 공기보다 가벼운 헬륨의 특성상 조사장치의 상단부터 채워지므로, 헬륨 주입 시간을 30 초 이상으로 정한 것은 타당하다.

# 3. 분광계통 구성

알파선 조사장치의 선원인 Am-241에서 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 측정하기 위해 알파선 분광계통을 구성하였다. 일반적인 분광계통의 구성도는 그림 18과 같다. 알파선 검출기로는 불감층 효과가 매우 작은 이온 주입형 실리콘 검출기(Ion Implanted Silicon charged particle Detector - IISD, BU-020-450-AS, ORTEC, USA)를 선택하였다. 선택한 검출기의 불감층 두께는 0.05 μm (실리콘 등가)이며, 측정하고자 하는 관심 에너지 범위(4.5 ~ 5.5 MeV)의 알파선이 0.05 μm의 실리콘 층을 통과하면서 잃는 에너지를 NIST (National Institute of Standards and Technology) database의 stopping power and range table을 참고하여 계산하였다. 실리콘 매질에서 5 ~ 5.5 MeV 에너지 범위 알파선의 평균 LET는 0.135 MeV/μm이고, 4.5 ~ 5 MeV 에너지 범위 알파선의 평균 LET는 0.144 MeV/µm이다. 위의 LET 값을 이용하여 0.05 µm의 실리콘 층을 통과할 때 잃는 에너지를 계산하면 각각 0.0072, 0.0068 MeV이다. 이 에너지들은 Am-241 선원에서 방출되는 알파선의 피크 에너지인 5.486 MeV의 0.1 %에 해당하는 수치다. 0.007 MeV의 에너지 차이가 세포층에서의 LET 값에 미치는 영향은 0.07 % (5.486 MeV 알파선의 LET: 804.3 MeV/cm, 5.479 MeV의 LET: 804.9 MeV/cm)이므로 선량계산의 오차도 0.07 %이다. 이 연구에서 알파선 에너지 스펙트럼을 측정한 목적은 구축한 알파선 조사장치의 선원에서 방출되는 알파선이 헬륨 매질을 통과하여 세포배양접시 위치에 도달하는지 확인하는 것과 세포배양접시에서 측정된 알파선 에너지 스펙트럼으로부터 인체조직에 대한 알파선의 평균 LET 값을 계산하는 것이다. 또한 방사선에 의한 선량평가 분야에서 일반적으로 허용되는 오차는 10 %이므로 불감층에 의한 효과를 고려하지 않기로 하였다.

검출기 민감층의 두께는 100 μm이며 13 MeV의 에너지를 가지는 알파선의 비정에 해당되므로, Am-241에서 방출되는 5 MeV대의 알파선은 손실 없이 모두 검출된다. 검출기의 active area는 450

mm<sup>2</sup>이고 에너지 분해능은 Am-241에서 방출되는 5.486 MeV alpha에 대해서 20 keV FWHM (Full Width at Half Maximum)이다. 검출기로 측정할 수 있는 알파선의 최대 에너지 범위는 3에서 8 MeV이다. 더 자세한 검출기의 사양은 표 6에 제시하였고 검출기에 대한 Quality Assurance Data (QAD)를 담은 증서를 APPENDIX C에 첨부하였다.

알파선은 조사장치 윗면의 Mylar 세포배양접시가 놓이는 위치에서 실리콘 검출기에 의해 측정된다. 이때 생성된 신호는 전치 증폭기 (Preamplifier), 분광용 증폭기(Amplifier), ADC (Analog to Digital Converter)를 거쳐 MCB (Multi-Channel Buffer)에 저장되었다가 PC로 전달된다. 실제 측정에서는 전치증폭기, 분광용 증폭기, 판별기가 일체형으로 된 제품(A-576, ORTEC, USA)을 선택하였으며 ADC/MCB (927, ORTEC, USA)로부터 에너지 스펙트럼을 획득하기 위해 ORTEC 사의 스펙트럼 관리 소프트웨어(MAESTRO-32, ORTEC, USA)를 사용하였다. 신호 처리 장치들의 자세한 모델 명 및 특성은 표 7에 정리하였다.

제작한 알파선 조사장치는 진공 챔버가 아니므로 표준알파선원에서 발생되는 알파선의 표준에너지를 측정할 수 없다. 따라서 이온 주입형 실리콘 검출기의 채널-에너지 검정을 수행하기 위하여 알파선 에너지 스펙트럼 측정에 적합한 소형 진공 챔버(807, ORTEC, USA)를 사용하였다(그림 19). 진공 펌프는 ORTEC사의 ALPHA-PPS-230 모델로 소형인 진공 챔버와 함께 이동이 간편한 크기의 제품이며 진공펌프로 만들 수 있는 최대 진공상태는 1 millitorr의 고 진공 상태이다.



Figure 18. Typical system for alpha-particle spectroscopy.

Parameters	Figures	
Type	Ion-implanted silicon detector	
Model	BU-020-450-AS (ORTEC, USA)	
Active area	$450 \text{ mm}^2$	
Active depth	100 <i>µ</i> m	
Resolution for 5.486 MeV alpha from Am-241	20 keV FWHM	
Shaping time constant	1 μs	
Electrode	Ion implanted contacts (< 500 Å Si eq.)	
Leakage current	1 nA	
Operating bias voltage	50 V (Positive)	
Connector Micro dot connector		

Table 6. Specifications of the alpha-particle detector.

Component	Model	Specifications
A-PAD Preamplifier, Amplifier, Discriminator with bias	A-576 (ORTEC)	<ul> <li>Detector and electronic noise: &lt; 25 keV with 450 mm<sup>2</sup> detector. Electronic noise - 5 keV with a slope of 25 eV/pF silicon equivalent.</li> <li>Pulse shaping: Internal 0.5 μs active filter semi Gaussian pulse shaping amplifier - 4 μs wide positive output pulse.</li> <li>Energy ranges: 3~8, 4~7, 3~5, 4~6, 5~7 and 6~8 MeV.</li> <li>Detector bias voltage: 0 to ±100 V, polarity selectable.</li> </ul>
ADC & MCB	927 (ORTEC)	<ul> <li>Type: Successive approximation type.</li> <li>Conversion gain: 16 k.</li> <li>Conversion time: 2 μs.</li> <li>Memory size: 512 k.</li> <li>Gain drift: &lt; 50 ppm/℃.</li> </ul>
Vacuum chamber	807 (ORTEC)	<ul> <li>Materials: Aluminum, chrome-plated brass, stainless steel.</li> <li>Detector to sample distance: up to 12.7 cm.</li> <li>Connector: Female BNC outside, Microdot male inside.</li> </ul>
230-V portable pump station	ALPHA-PPS-230 (ORTEC)	<ul> <li>Measured at the pump inlet flange, 60 Hz.</li> <li>Displacement 6.7 ft<sup>3</sup>/min; 190 liters/min.</li> <li>Ultimate vacuum: 1 millitorr.</li> </ul>

 Table 7. Specifications of the components of the alpha-particle spectroscopy system.



Figure 19. A commercial vacuum chamber and a portable pump station.

# Ⅳ. 특성 분석 및 선량평가

## 1. 알파선 에너지 스펙트럼 측정 및 전산모사

이 연구에서 알파선 에너지 스펙트럼 측정의 주된 목적은 구축 완료한 알파선 조사장치의 Am-241 선원에서 방출되는 알파선이 헬륨 매질을 통과하여 세포배양접시 위치에 도달하는지 확인하는 것이다. 또한 세포배양접시 위치에서 측정된 에너지 스펙트럼으로부터 세포에 조사되는 알파선의 에너지 영역을 확인하고 인체조직에 대한 알파선의 평균 LET 값을 계산하는 것이다.

알파선 조사장치의 Am-241 선원에서 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 측정하기에 앞서 검출 시스템의 채널-에너지 검정을 수행하였다. 알파선 에너지 스펙트럼 측정은 앞선 3장에서 제시한 상용화된 진공 챔버와 Am-241 (AFR-241, Ecker & Ziegler, USA), Cm-244 (AF-244-A1, Ecker & Ziegler, USA) 표준 알파선원으로 수행하였다. Am-241 선원의 방사능은 30.63 kBq (2014. 06. 01 기준), 오차는 신뢰수준 99 %에서 ± 3 % 이고, active area의 직경은 5 mm이었다. Cm-244의 방사능은 3.918 kBq(2014. 06. 01 기준)이고, 오차와 active area의 직경은 Am-241 선원의 값과 동일하였다. Am-241과 Cm-244 선원의 가장 높은 방출율을 가지는 알파선의 에너지는 각각 5.486 MeV(84.5 %의 방출율)와 5.805 MeV (76.4 %의 방출율)이고, 실제 측정하는 알파선의 관심 에너지 영역은 표준 알파선원의 에너지와 유사한 4.7부터 5.5 MeV까지이므로 두 선원의 peak 에너지 정보만으로 채널-에너지 검정을 수행하였다.

표준알파선원은 진공 챔버 내에 부착된 검출기에서 10 cm 떨어진 지점에 배치하였으며 선원의 중심과 검출기의 중심이 일치한 채로 서로 정면으로 바라보도록 하였다. 측정시간은 300 초이며 측정 중 불감시간은 0.6 %였다. 검출 시스템의 채널-에너지 검정 전 후의 알파선 에너지 스펙트럼은 그림 20과 같으며, 에너지를 채널에 대한

선형 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

E (keV) = 0.38886C + 2,564.391096 (4.1)

여기서 C는 채널의 번호이다. 두께 0.05 μm(실리콘 등가)인 실리콘 검출기의 불감층에 의한 효과(5 ~ 5.5 MeV 에너지 범위 알파선이 잃는 에너지의 평균은 0.0072 MeV)는 3장에서 언급했듯이 매우 작으므로 채널-에너지 검정 과정에서 고려하지 않았다.



**Figure 20.** Alpha-particle energy spectrum measured in vacuum chamber (A: before, B: after energy calibration of MCA).
검출 시스템의 채널-에너지 검정 후 알파선 조사장치의 Am-241 선원에서 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 측정하였으며, 채널-에 너지 검정을 위해 진공 챔버에서 사용했던 검출기 센서와 커넥터, 그리 고 분광계통을 그대로 사용하였다. 측정 시 Am-241 선원과 알파선 조 사장치 조사창에 부착된 검출기 사이의 거리는 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm로 하였다. 선원의 중심과 검출기의 중심이 일치한 채로 서로 정면 으로 바라보도록 하였고, 측정시간은 600 초이며 측정 중 불감시간은 0.6%였다.

알파선 조사장치의 Am-241 선원에서 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 확인하기 위하여 AASI(Advanced Alpha spectrometric SImulation, Siiskonen and Pollanen, 2004, 2005) 몬테카를로 코드로 전산모사도 수행하였다. 알파선의 거동을 전산모사 하는 기존 코드들인 TRIM, GEANT, MCNP는 알파선을 위한 전용코드가 아니지만, AASI 코 드는 오직 알파선의 거동을 전산모사하기 위하여 개선된 코드로써 에너 지 스펙트럼에 영향을 주는 모든 주요 효과들을 고려하였으며, 다양한 형태의 선원(aerosol particles, thick samples, non-uniform samples, etc)을 모사할 수 있다 [42]. 기존 몬테카를로 코드인 TRIM과 MCNP 는 에너지 분해능과 같은 검출기의 특성을 반영할 수 없으며, 특히 주로 하전입자의 거동을 전산모사하는 TRIM은 두께를 가진 선원을 직접적으 로 재현할 수 없기 때문에 알파선 조사장치의 특성평가 목적에는 적합하 지 않다.

전산모사에서는 지름 9.5 mm, 두께 0.51 μm의 금으로 된 방사능 37.93 MBq을 가진 Am-241을 선원으로 설정하였으며, 몬테카를로 시 뮬레이션에서 3.793×10<sup>7</sup> 개의 입자를 순서대로 선원의 위치에서 출발 시킨 것을 의미한다. 37.93 MBq은 실제 사용하는 선원의 방사능보다 10 배 높은 수치로 3.793 MBq 방사능의 선원을 10 초간 측정한 것과 같다. 전산모사의 입력명령에 필요한 검출기의 특성은 지름 24 mm, 에 너지 분해능 20 keV, 민감층 두께 100 μm, 불감층 두께 0.05 μm,

그대로 적용하였다. 알파선의 에너지 스펙트럼 계산은 실제 측정과 동일 하게 5, 10, 15, 20. 25. 30 mm의 선원과 샘플 사이의 거리에서 수행되 었다.

실리콘 검출기로 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼과 AASI 코드를 이용한 전산모사로 계산한 결과를 그림 21 (A)와 (B)에 각각 나타내었 다. 모든 선원과 샘플 사이의 거리에서 실제측정과 전산모사를 통하여 얻은 스펙트럼들의 peak 에너지 차이는 0.03 MeV 이하였으며, 선원과 샘플 사이의 거리에 따른 에너지 스펙트럼의 peak 에너지를 표 8에 정 리하였다.



**Figure 21.** Measured (A) and simulated (B) alpha-particle energy spectrum at the Mylar cell culture dish position in accordance with SSDs (5, 10, 15, 20, 25 and 30 mm).

SSD (mm)	Peak energy (MeV)			
	Measurement	Simulation		
5	5.33	5.36		
10	5.25	5.28		
15	5.18	5.2		
20	5.11	5.12		
25	5.03	5.04		
30	4.95	4.96		

 $Table \ 8. \ The \ peak \ energy \ of \ alpha-particle \ energy \ spectrum.$ 

비교적 가까운 5 mm의 선원과 샘플 사이의 거리에서는 두 스펙트럼의 개형과 에너지 분포범위가 상당히 일치하지만(그림 22), 선원과 샘플 사이의 거리가 멀어질수록 실제 측정한 에너지 스펙트럼의 분포범위는 넓어진 것에 반해 AASI로 계산한 스펙트럼의 개형은 변함이 없었다. 이는 AASI 코드가 검출기의 에너지 분해능 특성은 반영하지만 헬륨에 의한 에너지 퍼짐(energy straggling) 효과는 제대로 반영하지 못한다고 해석할 수 있다. AASI 코드의 내부 기능 중에서 Gaussian energy straggling 적용이 존재하지만, 실제로는 에너지 퍼짐 적용의 유무에 관계 없이 계산된 에너지 스펙트럼의 분포범위가 일정한 것을 확인하였다.

하지만 AASI 코드의 최종 역할은 알파선 조사장치에서 알파선이 세포에 전달하는 선량을 계산하는 것이다. 2 MeV 이상의 에너지 영역에서 알파선의 LET는 알파선의 에너지의 역수에 비례하지만(II-3장의 식 2.3 참고), 5 MeV의 에너지 전후에 위치한 실제 스펙트럼의 에너지 분포 범위는 0.5 MeV이하이며, 이와 같은 좁은 범위에서 알파선의 LET는 에너지 변화에 대하여 선형적인 차이를 나타낸다. 따라서 검출기로 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼이 AASI 코드로 계산한 스펙트럼보다 넓은 에너지 분포를 가져도 두 스펙트럼의 peak 에너지가 일치한다면, Gaussian 분포라는 가정하에 평균 에너지와 평균 LET는 동일하다.

그림 19의 두 에너지 스펙트럼으로부터 구한 각각의 평균 LET를 서로 비교해본 결과, 두 스펙트럼의 에너지 분포 범위 차이가 가장 큰 30 mm 선원과 샘플 사이의 거리에서 평균 LET의 차이는 0.55 %를 보였다. 각 알파선 에너지에 대한 LET 값은 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 ASTAR program database (http://physics.nist.gov)에서 제시한 알파선의 에너지에 대한 저지능 표에 보간법(Interpolation)을 이용하여 구하였다. 선원과 샘플 사이의 거리 변화에 따른 평균 LET의 비교 결과는 표 9에 정리하였다.



**Figure 22.** Measured (A) and simulated (B) alpha-particle energy spectrum at the SSD of 5 mm.

SSD	Average LET	Difference		
(mm)	Measurement	Simulation	(%)	
5	823.5	822	0.18	
10	829	828.9	0.01	
15	835.8	837.7	0.22	
20	843.6	846.4	0.33	
25	851.8	855.5	0.43	
30	860.4	865.1	0.55	

**Table 9.** Average LET for alpha-particle in tissue equivalent medium calculated with measured and simulated energy spectrum in accordance with SSDs.

# 2. 알파선속의 공간분포

세포배양접시에 배양된 세포에 전달되는 선량의 공간적 균일성은 조 사되는 알파선의 에너지가 동일하다는 가정하에 알파선속의 공간분포로 부터 추론할 수 있다. 세포배양접시에서 알파선속의 공간분포는 그림 23에 나타낸 선원과 Mylar 세포배양접시의 기하학적 관계로부터 도출 한 식으로 계산할 수 있다. 그림 23에서 하단의 원은 알파선 조사장치 Am-241 선원의 active area를 의미하며, 상단의 원은 조사창에 장착한 Mylar 세포배양접시의 단면 또는 실리콘 검출기의 검출영역을 의미한다.

그림 21에서 두 원의 위치 관계로부터, 세포배양접시의 한 점 dS에 서 differential fluence rate (dF)는 (4.2)식으로 나타낼 수 있다.

$$dF = \mathbf{A} \frac{dA_s}{\pi R^2} \cdot \frac{1}{4\pi s^2} \cdot \cos \beta \quad (4.2)$$

여기서 A는 선원의 방사능, R은 선원의 반지름, dAs는 선원의 한 generic surface element, s는 dAs와 dS의 거리, β는 dS를 향하는 벡 터와 수직 벡터가 이루는 각을 의미한다.

h = s cos 
$$\beta$$
,  $dA_s = rdrd\alpha$ , s =  $\sqrt{(h^2 + x^2 + r^2 - 2rx \cos\beta)}$ 

이므로 세포배양의 중심으로부터 반지름 방향에서의 한 점 x에 대한 함 수로 나타낸 알파선속률 (fluence rate) F(x)는 (4.3)식으로 나타낼 수 있다.

$$F(\mathbf{x}) = \frac{A}{4\pi^2 R^2} \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^R \frac{r \cdot h}{(h^2 + x^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot \cos \alpha)^{1.5}} dr \right] d\alpha \quad (4.3)$$

여기서 r은 선원의 중심으로부터 선원 위의 임의의 한 점에 이르는 거리 이며, h는 선원과 세포배양접시까지의 거리, α는 x와 선원 위에서 세포 배양접시 위로 투사된 r이 이루는 각도이다. 또한 (4.3)식을 이용하여 평균 알파선속률은 아래의 (4.4)식으로 표현될 수 있다.

$$\overline{F} = \frac{\int_0^X 2 \cdot \pi \cdot F(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x} \, d\mathbf{x}}{\pi \cdot X^2} \quad (4.4)$$

X는 세포배양접시의 반지름을 의미하며, clonogenic assay에 적합한 세포배양접시에서 세포가 배양되는 아랫면의 반지름(15.5 mm)과 저선 량 연구를 위한 gamma-H2AX assay에 적합한 세포배양 접시 아랫면 의 반지름(7.07 mm)을 고려하였다.

하지만 (4.4)식의 적분은 F(x)가 매우 복잡한 이유로 MATLAB, Wolframalpha computational knowledge engine등의 컴퓨터 계산 프로 그램에서 계산되지 않는다. 평균 알파선속률은 이 연구에서 중요도가 매 우 낮으며 단순히 알파선속률의 공간적 분포를 나타내는데 필요한 기준 을 구하는 것이므로, (4.3)식으로 계산한 각 x에서의 알파선속률을 fitting하여 구한 간단한 fitting함수를 (4.4)식 분자의 F(x) 대신에 사 용하였다. 참고로 이 fitting 함수들은 어떠한 물리적 의미도 가지지 않 으며 단순히 적분 계산을 쉽게 하기 위한 수단이다. Fitting 함수를 그린 그래프는 그림 24, fitting 함수들은 표 10에 나타내었다. 알파선속의 분 포와 균일성은 세포배양접시 위 한 점에서의 알파선속률과 평균 알파선 속률의 비인 (4.5)식으로 평가하였다.

 $\frac{F(x)}{\bar{F}} \quad (4.5)$ 



**Figure 23.** A geometrical representation of alpha-particle irradiation to Mylar cell culture dish in the irradiator.



**Figure 24.** The probability distributions of fluence in cell layer and the fitting functions in accordance with SSDs.

SSD (mm)	Fitting function F(x)	Adj. R-Square	Average fluence rate (#/sec) for 31 mm diameter area	Average fluence rate (#/sec) for 14.14 mm diameter area
5	Exp(-6.2301 -0.0307x -0.01507x <sup>2</sup> )	0.996	1591.5	4484.5
10	Exp(-7.2747 -0.0255x -0.00602x <sup>2</sup> )	0.996	1086.6	1972.0
15	Exp(-8.0093 -0.0133x -0.00357x <sup>2</sup> )	0.998	728.9	1059.1
20	Exp(-8.5582 -0.0068x -0.00242x <sup>2</sup> )	0.999	504.2	648.1
25	Exp(-8.9923 -0.0037x -0.00175x <sup>2</sup> )	0.999	362.3	433.1
30	Exp(-9.3502 -0.0021x -0.00132x <sup>2</sup> )	1	270.0	308.3

 $Table. \ 10 \ {\rm The \ fitting \ function \ for \ the \ probability \ distribution \ of \ fluence \ and \ the \ average \ fluence \ rate.}$ 

그림 25와 26은 세포가 배양되는 아랫면의 지름이 각각 14.14, 31 mm인 두 세포배양접시 위에서 접시 중심으로부터 반지름 방향의 거리 에 따라 위치 x에서의 선속과 평균선속의 비를 나타낸 그래프이다. 그래 프에서 함수 값 y가 1에 가까울수록 선속의 공간적 분포가 균일하다고 판단할 수 있다.

지름이 14.14 mm인 gamma-H2AX assay 전용의 세포배양접시 조 건에서는 20 mm이하의 선원과 샘플 사이의 거리에서 모든 y 값과 1의 최대 차이가 9 % 이하를 나타낸다. 따라서 gamma-H2AX assay를 이 용한 알파선 조사실험에서는 20 mm의 선원과 샘플 사이의 거리가 알파 선속의 공간적 균일성을 확보하면서 알파선의 에너지 감소를 최소화 시 킬 수 있는 조건이다. 지름이 31 mm인 clonogenic assay에 적합한 세 포배양접시 조건에서는 선원과 샘플 사이의 거리 30 mm에서 모든 y 값 과 1의 최대 차이가 19 %였다. 비록 알파선속의 공간적 균일성은 뛰어 나지 않지만, 알파선의 에너지를 고려하여 clonogenic assay를 이용하는 세포실험에서의 선원과 샘플 사이의 거리는 30 mm로 정하였다.



Figure 25. Ratios between fluence rate at the radial distance x and average value (diameter of dish: 14.14 mm).



Figure 26. Ratios between fluence rate at the radial distance x and average value (diameter of dish: 31 mm).

## 3. 알파선 조사장치 선량평가

알파선 조사장치를 구축한 기존 연구들에서 사용한 선량평가 방법은 서론에서 언급한 것처럼 2 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 AASI 코드를 이용한 선량계산으로 가장 최근의 연구들에서 사용되었다 [31, 32]. 알파선이 세포층을 통과하기 전 후의 에너지 차이는 알파선이 세포층에서 잃는 에너지를 뜻하며, 아래 (4.6)식으로 표현 할 수 있다.

## $E_{\text{loss to cell}} = F_{\text{in}} * \sum_{E} Ef_{\text{in}}(E) - F_{\text{out}} * \sum_{E} Ef_{\text{out}}(E) \quad (4.6)$

여기서 E<sub>loss to cell</sub>은 알파선이 세포층에서 잃는 에너지, F<sub>in</sub>은 세포층으로 입사하는 알파선의 개수, *Ef*<sub>in</sub>(*E*) 은 세포층에 입사하는 알파선의 확률분포에서 각 에너지 bin에 해당하는 비율과 에너지를 곱한 값, *Ef*<sub>out</sub>(*E*)은 세포층을 통과한 알파선의 확률분포에서 확률분포에서 각 에너지 bin에 해당하는 비율과 에너지를 곱한 값이다.

알파선은 세포층의 전자와 충돌하면서 에너지를 잃고, 전자의 이온화 포텐셜을 제외한 나머지 에너지는 발생되는 이차전자와 fluorescence X-ray에 전달된다. 이들 대부분은 세포층 안에서 에너지를 잃고 흡수되며, 세포층 밖으로 빠져나간 부분은 charge compensation 효과에 의해 보충된다. 세포가 배양되는데 필요한 세포배지는 대부분 조직등가물질인 물로 구성되어 있으므로, 세포층 주변으로 조직등가물이 둘러 쌓여 있는 상황으로 가정할 수 있다. 따라서 알파선이 세포층을 통과하면서 잃는 에너지는 세포층에 흡수된 에너지로 볼 수 있다. 세포층 통과 전 후의 알파선이 가지는 에너지를 전산모사로 계산하여 그 차이를 세포층의 질량으로 나누면 최종적으로 선량 값이 계산된다.

전산모사에서 선량평가의 대상은 세포배양접시의 아랫면에 단층으로 붙어 있는 세포들이며, 이 세포층의 두께는 세포핵의 지름인 5 µm로 하였다. 세포핵 주변의 세포질은 세포가 배양접시 바닥에 붙으면서 핵

주변으로 퍼지기 때문에 세포층의 두께로 고려하지 않았다. 세포층의 지름은 14.14와 31 mm로 설정하여 두 가지 세포배양 접시 조건을 모두 재현하였다. 선원은 4.1장에서 알파선의 에너지 스펙트럼 계산에 사용한 조건과 동일한 지름 9.5 mm, 두께 0.51 μm의 금으로 된 방사능 37.93 MBq을 가진 Am-241로 설정하였으며, 계산된 선량의 상대 오차가 0.1 % 이하가 되기에 충분한 시행 수로 선택하였다.

두 번째 선량평가 방법은 아래의 (4.7)식으로 계산하는 것이다.

$$\frac{\mathrm{dD}}{\mathrm{dt}} \left[ \frac{Gy}{s} \right] = 1.6 \times 10^{-19} \left[ \frac{J}{ev} \right] \cdot F[cm^{-2} \cdot s^{-1}] \cdot L[\frac{MeV}{cm}] \cdot \rho^{-1} \times 10^3 [\frac{cm^3}{kg}] \qquad (4.7)$$

여기서 F는 단일 면적, 시간에 대해서 세포층을 통과하는 총 알파선의 수, L은 세포층에 입사하는 알파선들의 평균 LET,  $\rho$ 는 세포층의 밀도이다. 평균 LET는 이온 검출기로 측정한 에너지 스펙트럼을 알파선들의 에너지에 대한 확률분포로 나타내고, 각 에너지 bin에 해당하는 LET 값을 곱한 후 전체 범위에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 이 계산식을 이용하는 것은 기존 연구들에서 선량평가를 위해 사용된 가장 보편적인 방법이었다 [24, 26, 27, 28, 30]. 하지만 (4.7)식은 알파선 조사장치의 선량평가를 위한 방법으로 완벽하지 않았으며, 정확한 선량계산을 위해서는 추가적인 보정계수를 필요로 했다.

따라서 보다 정확한 선량계산을 수행하기 위하여 (4.7)식에 새로운 보정계수들을 추가하여 (4.8)식으로 표현하였다.

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{D}}{\mathrm{dt}_{\mathrm{m}}} \left[ \frac{Gy}{s} \right] = \frac{\mathrm{d}\mathbf{D}}{\mathrm{dt}} \left[ \frac{Gy}{s} \right] \cdot \mathbf{M}_{T} \cdot \mathbf{M}_{L} \quad (4.8)$$

여기서 M<sub>T</sub>는 track length correction, M<sub>L</sub>은 average LET correction을 의미한다.

(4.7)식에는 모든 알파선이 세포층을 수직으로 통과한다는 가정이

내재되어 있다. 하지만 가까운 선원과 샘플 사이의 거리에서는 알파선들이 세포층을 비스듬하게 통과하기 때문에 세포층에서의 궤적이 수직으로 통과할 때보다 증가하게 된다. 이를 교정하기 위한 계수가 track length correction M<sub>T</sub>이며, 궤적의 평균 증가 비를 의미한다. 궤적의 증가 비는 그림 23에서 알파선이 입사하는 방향의 벡터와 세포층의 수직 벡터가 이루는 각도의 코사인 값의 역수인 (cosβ)<sup>-1</sup>로 표현될 수 있으며, 궤적은 최대 1.2 배까지 증가된다.

평균  $(\cos \beta)^{-1}$  값은 random number sampling 방법으로 계산하였다. Random number sampling 방법은 MATLAB과 같은 컴퓨터 계산 프로그램과 함께 이용하면 복잡한 적분 계산을 대신할 수 있다.

그림 23에서 Am-241 선원의 중심을 3차원 좌표 계의 원점이라 가정하면, 선원에서 알파선이 발생되는 임의 지점의 좌표(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)는 아래의 조건을 가진다.

#### $x_1^2 + y_1^2 \le R^2$ , $z_1 = 0$

 $-4.75 \le x_1 \le 4.75, -4.75 \le y_1 \le 4.75, (4.9)$ 

여기서 R 은 Am-241 선원의 반지름이며, 그 수치는 4.75 mm이다.

또한 알파선이 세포층에 조사될 때 입사지점의 좌표(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>)는 아래의 조건을 갖는다.

$$x_2^2 + y_2^2 \le X^2$$
,  $z_2 = h$ 

$$-X \le x_2 \le X, \ -X \le y_2 \le X, \ (4.10)$$

여기서 h는 선원과 샘플간의 거리이며 X는 세포층의 반지름을 의미한다. Random number sampling 방법을 이용하면 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{1} &= -4.75 + 9.5\xi_{1}, \quad (0 \leq \xi_{1} \leq 1) \\ \mathbf{y}_{1} &= -\sqrt{4.75^{2} - x_{1}^{2}} + 2\sqrt{4.75^{2} - x_{1}^{2}}\xi_{2}, \quad (0 \leq \xi_{2} \leq 1) \\ \mathbf{x}_{2} &= -\mathbf{X} + 2\mathbf{X}\xi_{3}, \quad (0 \leq \xi_{3} \leq 1) \\ \mathbf{y}_{2} &= -\sqrt{\mathbf{X}^{2} - x_{2}^{2}} + 2\sqrt{\mathbf{X}^{2} - x_{2}^{2}}\xi_{4}, \quad (0 \leq \xi_{4} \leq 1) \end{aligned}$$
(4.11)

여기서 *ξ*<sub>1</sub>, *ξ*<sub>2</sub>, *ξ*<sub>3</sub>, *ξ*<sub>4</sub>는 각각 0과 1 사이에서 추출한 임의의 한 실수이다.

거의 모든 몬테카를로 코드에서는 10 MeV 이하의 알파선은 매질에서 직진한다는 가정을 사용하며 [43], 게다가 알파선에 의해 발생된 델타선의 비정 및 알파 입자 궤적의 너비(~100 nm)는 주로 연구되는 세포핵의 크기에 비해 매우 작기 때문에 무시된다 [44]. 따라서 알파선 궤적의 평균 증가 비는 (4.12)식과 같이 표현된다.

$$\cos\beta^{-1} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + h^2}}{h}$$
(4.12)

평균 증가 비를 계산하기 위하여 총 4×10<sup>9</sup> 개의 random number를 추출하였으며, 총 시행 수는 10<sup>9</sup> 이었고 각 시행의 결과들을 저장한 후 평균 값을 구하였다. 계산 코드는 MATLAB 프로그램으로 만들었으며 코드의 세부내용은 APPENDIX A에 기술하였다.

(4.8)식의 average LET correction M<sub>L</sub>은 알파선이 세포층을 통과하면서 증가되는 LET를 교정해주기 위한 계수로, 증가된 LET의 평균과 처음 입사할 때 가지는 LET와의 비로 나타낼 수 있다.

$$M_{L} = \frac{\text{Median value for the LET at entrance and exit to cell layer}}{\text{LET of alpha-particles at entrance to cell layer}} (4.13)$$

(4.13)식에서 증가된 LET의 평균은 세포층 통과 전 후 알파선이 가지는 LET의 중간 값으로 계산하였으며, 세포층에서의 LET는 알파선의 작은 에너지 변화에 따라 선형적으로 변한다고 가정하였다.

그림 27은 20 mm 선원과 샘플 사이의 거리와 14.14 mm 지름의 세포층, 그림 28은 30 mm 선원과 샘플 사이의 거리와 31 mm 지름의 세포층에서 AASI 코드로 계산한 알파 입자의 세포층 통과 전후의 에너지 스펙트럼을 에너지에 대한 확률분포로 나타난 그림이다. 알파선의 평균 LET는 확률분포의 각 에너지 bin에 해당하는 LET를 해당 확률과 곱한 후 적분하여 계산하였다.



**Figure 27.** Probability distribution of alpha-particles calculated with AASI-code at entrance and exit to cell layer (diameter of cell layer: 14.14 mm, SSD: 20 mm).



**Figure 28.** Probability distribution of alpha-particles calculated with AASI-code at entrance and exit to cell layer (diameter of cell layer: 31 mm, SSD: 30 mm).

(4.7)식에 새로운 보정계수를 도입한 (4.8)식으로 선량계산을 하기 위해서는 세포층으로 입사하는 알파선의 총 선속률 F와 평균 LET값이 필요하다. 그림 29 는 20 과 30 mm의 선원과 샘플 사이의 거리에서 실리콘 검출기로 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼을 에너지에 대한 확률분포 그래프로 나타낸 그림이다. 하지만 검출기로 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼은 세포가 붙어 있는 4 μm 두께의 Mylar 필름에 의한 감쇠 효과가 반영되어 있지 않다. 이에 대한 보정은 Mylar 필름에서의 알파선의 LET 값을 이용하여 수행하였으며, 각 알파선 에너지에 대한 LET 값은 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 ASTAR program database (http://physics.nist.gov)에서 제시한 알파선의 에너지에 대한 저지능 표와 보간법을 이용하여 구하였다.

세포층에 입사하는 총 알파선속은 AASI 코드로 계산한 값을 사용하였다. 실리콘 검출기로 측정한 알파선속 값을 사용하지 않은 이유는 검출기의 측정 영역을 세포배양접시의 크기로 변경할 수 없고, 검출기의 고유 효율이 존재하여 정확한 측정이 불가능 했기 때문이다. 검출기의 고유 효율은 검출기의 물성, 방사선 입사 방향으로의 물리적 두께, 방사선의 에너지 등에 의해 결정된다[37]. AASI 코드와 검출기로 측정한 알파선속 및 고유 효율을 표 11 에 정리하였다.



**Figure 29.** Probability distribution of alpha-particle obtained from measured alpha-particle energy spectrum at the SSDs of 20 and 30 mm.

SSD (mm)	Number of alpha emitted from source	Geometrical efficiency	Number of alpha incident to detector	Fluence calculated with AASI	Fluence measured with IISD	Intrinsic efficiency of AASI detector	Intrinsic efficiency of IISD
20	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	0.070	$1.288 \times 10^{6} \\ \pm 3.9 \times 10^{4}$	$1.279 \times 10^{6}$	$1.137 \times 10^{6} \\ \pm 1 \times 10^{3}$	0.99	$0.89 \pm 0.03$
30	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	0.035	$6.47  imes \ 10^5 \ \pm \ 1.9 \  imes \ 10^4$	$6.480 \times 10^5$	$\begin{array}{ccc} 6.020 \  imes \ 10^5 \ \pm \ 8 \  imes \ 10^2 \end{array}$	1	0.93 ± 0.03

Table 11. Fluence and intrinsic efficiency measured with IISD and those calculated with AASI-code.

최종적으로 두 조사조건에서 (4.8)식으로 계산한 선량률과 계산에 필요한 총 알파선속 F, 알파선의 평균 LET L, track length correction M<sub>T</sub>, average LET correction M<sub>L</sub>, 그리고 AASI 코드로 계산한 선량률을 표 12에 나타내었다. Gamma-H2AX assay 실험조건(20 mm SSD, 14.14 mm 지름의 세포층)은 clonogenic assay 실험조건(30 mm SSD, 31 mm 지름의 세포층)에 비해 작은 피폭 면적임에도 불구하고 선원과 샘플 사이의 거리가 더 가깝기 때문에 총 알파선속 F의 값이 2.4 배 더 컸으며, 두 조사조건에서의 알파선의 평균 LET 차이는 2 %로 매우 작았다. Track length correction M<sub>T</sub>는 조사면적이 더 큰 clonogenic assay 실험조건이 gamma-H2AX assay 실험 조건보다 약 3 % 더 큰 값을 나타냈으며, average LET correction ML은 에너지 변화에 따른 LET의 변화율이 작은 구간이므로 두 실험조건에서의 값은 1.040과 1.044로 매우 유사하였다. 두 선량평가방법으로 계산한 선량률은 gamma-H2AX assay 실험조건에서 0.63과 0.64 Gy/min이고, 그 차이는 2 %로 매우 근사한 값을 나타냈다. Clonogenic assay 실험조건에서는 0.26과 0.28 Gy/min의 선량률로 두 값의 차이는 6 %이며 허용 오차범위 내의 값을 나타냈다.

Diameter of dish (mm)	SSD (mm)	Fluence rate F (#/sec)	Average LET L (MeV/cm)	M <sub>T</sub> (Fractional std.)	ML	Dose rate by equation (4.8) (Gy/min)	Dose rate by AASI-code (Gy/min)	Difference (%)
14.14	20	$6.50 \times 10^{4}$ $\pm 2.0 \times 10^{3}$	$\begin{array}{c} 889.6 \\ \pm \ 5.4 \end{array}$	1.05 (0.0000004)	1.04	$0.63 \pm 0.03$	0.64	2
31	30	$2.72 \times 10^4$ $\pm 8 \times 10^2$	911.1 ± 8.3	1.08 (0.0000004)	1.04	$0.26 \pm 0.01$	0.28	6

Table 12. Calculated values for the correction factors, dose rate calculated with equation (4.8) and AASI-code.

두 선량평가 방법으로 계산한 선량률을 비교해본 결과, 두 방법 모두 알파선 조사장치의 선량평가에 적용할 수 있다는 결론을 내릴 수 있었다. 하지만 (4.8)식을 이용한 선량계산은 이온검출기로 측정한 알파선의 에너지 스펙트럼을 활용한 선량계산이 가능하다는 점을 제외하면, 알파선 조사 조건이 변함에 따라 그 조건에 맞춘 보정계수를 항상 계산해야 한다. 그에 반해 AASI 코드를 이용한 방법은 알파선의 거동을 독립적으로 추적하므로 현실적인 track length와 LET를 반영 할 수 있기 때문에 별도의 보정계수를 요구하지 않는다. 또한 AASI코드를 이용한 계산 결과와 (4.8)식을 이용한 계산 결과의 일치를 이미 확인하였으므로 알파선 조사장치의 선량평가방법은 AASI 코드를 이용한 계산으로 결정하였다.

알파선 세포조사실험의 다양성을 확보하기 위하여 다양한 선원과 샘플 사이의 거리(5, 10, 15, 20, 25, 30 mm)에서 AASI 코드를 활용한 선량평가를 수행하였으며, 각 거리에서의 선량률을 fitting하여 선원과 샘플간의 거리에 대한 dose calibration fucntion을 구하였다. 그림 30에 나타낸 clonogenic assay 실험조건의 결과에서는 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm의 선원과 샘플 사이 거리에서 각각 3.02, 1.44, 0.85, 0.55, 0.38, 0.28 Gy/min의 선량률을 나타내었고, 그림 31에서 gamma-H2AX assay 실험 조건에서의 선량률은 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm의 선원과 샘플 사이 거리에서 각각 5.66, 2.11, 1.07, 0.64, 0.42, 0.31 Gy/min이었다. 각 실험조건에서의 dose calibration function은 물리적 의미를 고려하지 않은 SSD의 증가에 따른 선량률의 감소 경향을 가장 잘 표현하는 함수로 선택하였으며, 함수 식은 각 그림의 우측 상단에 나타내었다.



**Figure 30.** The dose calibration curve for alpha-particle irradiator (diameter of dish: 31 mm).



**Figure 31.** The dose calibration curve for alpha-particle irradiator (diameter of dish: 14.14 mm).

# 4. Am-241에서 방출되는 광자에 의한 선량률

라돈 딸핵종의 알파붕괴 과정에서 발생되는 광자의 수는 무시할 만큼 작다. 하지만 알파선 조사 실험장치의 선원으로 사용되는 Am-241은 모든 알파붕괴 과정에서 감마선과 X선을 발생 시킨다. 대표적으로 26.34, 33.2, 43.42, 59.54, 98.97 keV의 에너지를 가진 감마선들이 각각 0.024, 0.00126, 0.00073, 0.359, 0.000203의 비율로 방출되며, 특히 59.54 keV의 에너지를 가진 감마선의 방출 비율이 가장 우세하다. 또한 내부 전환(internal conversion)에 의해 X선이 발생되며, 그 중 방출 비율이 가장 높은 L-shell X선은 평균 13.9 keV의 에너지로 방출된다 [33].

알파선 조사장치의 방사능이 3.793 MBq인 Am-241 선원에서 방출되는 감마선에 의해 세포가 받는 선량을 MCNP5 몬테카를로 전산모사로 계산하였다. MCNP5 코드는 3차원으로 정의된 매질에서 중성자, 광자, 전자의 수송해석이 가능한 전산프로그램이다 [45]. 전산모사에서 선원의 사양은 위에서 언급한 대표적인 5개의 감마선과. 13.9 keV의 평균에너지를 가진 L-shell X선으로 하였고, 선량평가의 대상인 세포층의 특성은 4.3절에서 알파선에 의한 선량을 전산모사 할 때 사용한 조건과 동일하게 하였다. 선량계산을 위하여 MCNP 계산 기능 중 입자의 충돌에 의한 에너지 전달을 계산해주는 F6 tally를 사용하였다. F6 tally에 의한 계산 결과는 입자 하나에 의해 세포층에 전달되는 에너지로 표현되며, 이 값을 세포층의 질량으로 나누고 선원으로부터 방출되는 입자의 수를 곱하면 선량으로 환산이 가능하다. 모든 계산 결과는 상대 오차 R이 1 %보다 작은 값을 나타내는데 충분한 10° 개의 입자를 추적한 결과로부터 도출하였다. 상대 오차 R은 MCNP5 코드에서 전산모사의 지속여부를 결정하는 변수로써, 1 %보다 작은 R은 계산 결과가 매우 정확하다는 것을 의미한다.

Am-241 선원에서 방출되는 광자에 의해 세포가 받는 선량을 계산한 결과를 그림 32에 나타내었다. 다양한 에너지를 가진 광자들에 의한 총 선량률은 5, 10, 15 20, 25, 30 mm의 선원과 샘플 사이의

거리에서 각각 23.6, 12.9, 7.6, 4.9, 3.4, 2.4 μGy/min이었으며, 모든 계산 결과의 상대 오차 R은 1 %이내였다. 총 선량률의 80 %는 13.8 keV L-shell X선에 의한 선량이었는데 가장 낮은 에너지의 광자가 총 선량률에 가장 높은 기여도를 보인 이유는 13.9 keV 광자의 방출비율 및 LET가 가장 높았기 때문이다.

계산된 광자에 의한 선량과 알파선에 의한 선량과의 비는 선원과 샘플간의 거리에 따라 최소 6.03 × 10<sup>-6</sup>(5 mm SSD)에서 최대 8.02 × 10<sup>-6</sup>(25 mm SSD)이었다. 따라서 알파선에 의한 선량이 세포에 전달되는 선량의 대부분이며 Am-241은 라돈 딸핵종을 대신하는 선원으로 사용 가능하다.



**Figure 32.** Dose rates at the cell layer by photon emissions from Am-241 as a function of SSD.

# V. 결 론

라돈 딸핵종에 의한 내부피폭상황에서 기인하는 알파선피폭에 의한 세포영향 연구를 위하여 서울대학교 방사선 생명공학연구실에 알파선 조사장치를 구축하였다. 이 조사장치는 세포에 조사되는 알파선의 에너지 영역을 개선하기 위하여 불필요한 Mylar 필름 제거하고 선원과 샘플 사이의 거리를 줄였으며 적합한 크기의 세포배양접시를 사용하였다. 암파선 조사장치의 선원은 조사조건을 변화시키지 않고 선량률을 약 10 배 단위로 조절 가능하도록 방사능이 3.793 과 0.3711 MBq이고 방사능을 제외한 알파선 방출에 영향을 주는 특성들이 모두 일치하는 두 Am-241 선원을 사용하였다. 두 선원의 active diameter는 9.5 mm, 반감기는 432.17 ± 0.66 년 이며 gold matrix에 Am-241이 포함되어 있다. 조사장치에서 알파선의 에너지 스펙트럼 측정에 사용되는 이온 주입형 실리콘 검출기는 불감층(두께: 0.05 μm) 효과가 매우 작고, active area는 450 mm<sup>2</sup>, 분해능은 5.486 MeV의 Am-241 알파선에 대하여 20 keV이다. 특히 우주방사선과 같은 백그라운드 방사선 검출을 최소화 하기 위한 신호처리시스텎에 의하여, 측정 가능한 알파선의 에너지 영역은 3 ~ 8 MeV 이다. 장치는 상·하판의 지름은 380 mm, 전체 높이는 110 mm, 내부 부피는 6.9 L인 stainless steel 재질의 조사함으로 만들어졌으며, 작은 양의 헬륨으로도 조사함의 내부를 헬륨환경으로 조성할 수 있도록 구조를 최적화시켰다. 또한 조사함의 모든 접합부에 패킹(O-링)을 사용하여 내부에 주입된 헬륨이 유출되지 않도록 완벽하게 밀봉하였다. 내부 부피가 6.9 L인 알파선 조사장치 내부에 헬륨 환경이 조성되는 시간은 가스 주입 시작 30초 후이며, 이 시간은 검출기를 이용한 알파선의 에너지 스펙트럼 측정과 이론 식을 이용한 계산으로 확인하였다. 조사장치에서 선원과 세포배양접시 사이의 거리는 선원 고정장치에 연결된 마이크로미터 헤드를 이용하여 0.01 mm 단위로 조절 가능하며, 조절 범위는 5 ~ 30 mm로 한정하였다.

알파선 조사장치의 특성을 평가하기 위하여 조사장치 내부의 선원으로부터 방출되는 알파선의 에너지 스펙트럼을 이온 주입형 실리콘 검출기로 선원과 검출기 사이의 거리 변화를 변화시키며 측정하였다. AASI 코드로 계산한 스펙트럼과 비교한 결과 5 ~ 30 mm의 선원과 샘플 사이의 거리 범위에서 세포배양접시에 도달하는 알파선의 에너지 스펙트럼 peak 에너지 범위는 4.96 ~ 5.36 MeV였으며, 측정과 계산에 의한 에너지 스펙트럼의 peak 에너지의 차이는 모든 선원과 샘플 사이의 거리에서 0.6 % 이하였다. 또한 선원과 샘플간의 기하적인 관계로부터 도출된 식으로 알파선속의 공간적 분포를 계산하였으며, 계산한 자료들을 토대로 세포에 조사되는 알파선의 에너지를 최대로 하면서 공간적으로 균일한 선속의 알파선을 전달할 수 있는 선원과 샘플 사이의 거리를 결정하였다. 면적이 1.57 cm<sup>2</sup>(지름: 14.14 mm)인 gamma-H2AX assav용의 세포배양 접시는 선원으로부터 20 cm 떨어진 거리에서 5.12 MeV의 알파선이 조사 될 수 있으며, 알파선속 분포의 공간적 변화는 ± 9 % 이내였다. Clonogenic assay에 주로 사용되는 세포배양면적이 7.54 cm<sup>2</sup>(지름: 31 mm)인 세포배양접시를 사용할 경우 선원으로부터 30 cm 떨어진 위치에서 4.96 MeV의 알파선이 조사될 수 있으며, 알파선속의 공간적 분포 차이는 최대 19 %였다.

이전 연구에서 사용되었던 두 선량평가방법으로 세포배양접시의 크기와 선원과 샘플 사이의 거리정보가 포함된 선량률을 계산하였다. 평균 LET와 알파선속을 통하여 선량을 도출해내는 (4.7)식을 이용한 선량계산 방법의 정확성을 높이기 위하여 새로운 보정계수를 포함한 (4.8)식을 제안하였다. 그 결과 두 선량평가 방법에 의해 계산된 선량의 백분율 차이가 각각 2 와 6 %로 오차범위 이내였다. 하지만 (4.8)식을 이용한 선량계산은 알파선 조사 조건이 변함에 따라 보정계수를 항상 계산해야 한다. 그에 반해 AASI 코드를 이용한 방법은 알파선의 거동을 독립적으로 추적하므로 현실적인 track length와 LET를 반영 할 수 있기 때문에 별도의 보정계수를 요구하지 않는다. 또한 AASI코드를

이용한 계산 결과와 (4.8)식을 이용한 계산 결과가 일치하였으므로 알파선 조사장치의 선량평가는 AASI 코드로 수행하였다. 선량평가 결과 알파선 조사장치는 clonogenic assay와 gamma-H2AX assay 각각의 세포배양 접시조건에 대하여 0.028 ~ 3.02 Gy/min과 0.031 ~ 5.66 Gy/min 선량률을 제공할 수 있음을 확인하였다.

추가로 알파선 조사장치에서 Am-241 선원으로부터 방출되는 감마선에 의해 세포가 받는 선량을 MCNP5 몬테카를로 전산모사로 계산하였다. MCNP 계산 기능 중 입자의 충돌에 의한 에너지 전달을 계산해주는 F6 tally를 사용하였고, 계산된 선량률은 5, 10, 15 20, 25, 30 mm의 선원과 샘플 사이의 거리에서 각각 23.6, 12.9, 7.6, 4.9, 3.4, 2.4 μGy/min이었으며, 계산 결과의 상대오차 R은 모두 1 % 이하였다. 계산된 광자에 의한 선량과 알파선에 의한 선량의 비는 선원과 샘플간의 거리에 따라 최소 6.03 × 10<sup>-6</sup> 에서 최대 8.02 × 10<sup>-6</sup> 사이었다. 따라서 광자에 의해 세포에 전달되는 선량은 무시할 수 있으며, Am-241은 라돈 딸핵종을 대신하는 선원으로 사용할 수 있다.

위와 같이 알파선 조사장치 구축 및 선원으로부터의 거리에 따른 선량평가와 조사조건 결정을 완료하였으며, 인간세포를 이용한 실험관내 세포실험에 대한 알파선 조사장치의 활용성도 확인하였다. 최종적인 장치의 사양 및 제공 가능한 알파선 조사 조건들은 표 13에 정리하였다. 본 연구는 알파선 조사장치를 구축하고 선량전달특성을 평가

함으로써 서울대학교 생활방사선안전연구센터에서 추진하는 천연방사성 핵종의 내부피폭특성 연구의 기반을 만들었다는 것에 의의를 둘 수 있다. 향후 이 알파선 조사장치는 천연방사성 핵종에서 방출되는 알파선에 의한 세포영향평가를 위해 다양하게 활용될 전망이다. 나아가 단층으로 배양된 세포에 대한 영향뿐만 아니라 실제 인체조직과 유사한 상황을 재현하기 위해 3차원으로 배양된 세포(3-dimensional cell culture)에 대한 피폭특성 평가에도 활용될 전망이다. 따라서 각 세포실험특성에 적합하도록 장치를 추가하고 피폭 대상의 변화에 따른 추가적인 선량평가 작업이 지속적으로 필요하다.
Parameters		Figures
Size	_	Diameter: 380 mm, Height: 110 mm Inner volume: 6.9 L
Source	_	Am-241 (AM1A series) source Activity: 3.793 & 0.371 MBq Active diameter: 9.5 mm
Spectrometer	_ _ _	Ion-implanted silicon detector Active area: 450 mm <sup>2</sup> Resolution: 20 keV FWHM Energy range: 3~8 MeV
Range of SSD	_	5 ~ 30 mm (by 0.01 mm unit)
E. of αincident to Mylar dish	_	4.96 ~ 5. 36 MeV (5~30 mm SSD)
Injection time for helium condition	_	30 sec [ultrapure helium gas (99.999 %)]
Mylar dish	_	4 μm thickness Mylar film with plastic frame and Teflon ring Sizes for gamma-H2AX & clonogenic assay (14.14, 35 mm diameter)
Dose rate [Dose calibration function]	_	For gamma-H2AX assay: 0.031 ~ 5.66 Gy/min [Exp(2.891-0.2523x+0.004x <sup>2</sup> )] For clonogenic assay: 0.028 ~ 3.02 Gy/min [Exp(1.9422-0.181x+0.0025x <sup>2</sup> )]
Optimal irradiation condition	_	For gamma-H2AX assay: 20 mm SSD & 0.64 Gy/min For clonogenic assay: 30 mm SSD & 0.28 Gy/min

 Table 13. Specifications of alpha-particle irradiator in SNU RadBio.

## 참고 문헌

[1] UNSCEAR, UNSCEAR 2000 – Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000.

[2] B. Altshuler, N. Nelson and M. Kuschner, Estimation of lung tissue dose from the inhalation of radon and daughters, Health Phys. 10, 1137–1161, 1964.

[3] A. K. Haque and A. J. Collinson, Radiation dose to the respiratory system due to radon and its daughter products, Health Phys. 13, 431-443, 1967.

[4] J. S. Puskin and A. C. James, Radon exposure assessment and dosimetry applied to epidemiology and risk estimation, Radiat. Res. 166, 193-208, 2006.

[5] R. A. Bulman, L. W. Ewers and K. Matsumoto, Investigations of the potential bioavailability of Po-210 in some foodstuffs, Sci. Total Environ. 173-174, 151-158, 1995.

[6] M. Bilban and J. Vaupoti, Chromosome aberrations study of pupils in high radon level elementary school, Health Phys. 80(2), 157–163, 2001.

[7] C. Lindholm, I. Mäkeläinen, W. Paile, A. Koivistoinen and S. Salomaa, Domestic radon exposure and the frequency of stable or

unstable chromosomal aberrations in lymphocytes, Int. J. Radiat. Biol. 75(8), 921–928, 1999.

[8] M. C. Alavanja, J. H. Lubin, J. A. Mahaffey and R. C. Brownson, Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri, Am. J. Public Health. 89(7), 1042-1048, 1999.

[9] A. Auvinen, I. Mäkeläinen, M. Hakama, O. Castrén, E. Pukkala, H. Reisbacka and T. Rytömaa, Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland, J. Natl. Cancer Inst. 88(14), 996-72, 1996.

[10] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, H. Deo, R. Falk, F. Forastiere, M. Hakama, I. Heid, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, C. Muirhead, W. Oberaigner, G. Pershagen, A. Ruano-Ravina, E. Ruosteenoja, A. S. Rosario, M. Tirmarche, L. Tomásek, E. Whitley, H. E. Wichmann and R. Doll, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, BMJ. 330(7485), 223-227, 2005.

[11] D. Krewski, J. H. Lubin, J. M. Zielinski, M. Alavanja, V. S. Catalan,
R. W. Field, J. B. Klotz, E. G. Létourneau, C. F. Lynch, J. I. Lyon, D.
P. Sandler, J. B. Schoenberg, D. J. Steck, J. A. Stolwijk, C. Weinberg
and H. B. Wilcox, Residential radon and risk of lung cancer: A
combined analysis of 7 North American case-control studies,
Epidemiology 16, 137-145, 2005.

[12] D. Krewski, J. H. Lubin, J. M. Zielinski, M. Alavanja, V. S. Catalan,
R. W. Field, J. B. Klotz, E. G. Létourneau, C. F. Lynch, J. L. Lyon, D.
P. Sandler, J. B. Schoenberg, D. J. Steck, J. A. Stolwijk, C. Weinberg and H. B. Wilcox, A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer, J. Toxicol. Environ. Health A. 69, 533-597, 2006.

[13] B. Grosche, M. Kreuzer, M. Kreisheimer, M. Schnelzer and A. Tschense, Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998, Br. J. Cancer. 95(9), 1280–1287, 2006.

[14] K. Brand, J. Zielinski and D. Krewski, Residential radon in Canada: an uncertainty analysis of population and individual lung cancer risk, Risk Anal. 25, 253-269, 2005.

[15] S. Menzler, G. Piller, M. Gruson, A. S. Rosario, H. E. Wichmann and L. Kreienbrock, Population attributable fraction for lung cancer due to residential radon in Switzerland and Germany, Health Phys. 95, 179–189, 2008.

[16] J. Thacker, A. Stretch and D. T. Goodhead, The mutagenicity of alpha particles from Pu-238, Radiat. Res. 92, 343-352, 1982.

[17] M. R. Raju, Y. Eisen, S. Carpenter and W. C. Inkret, Radiobiology of alpha particles. III. Cell inactivation by alpha particle traversals of the cell nucleus, Radiat. Res. 128, 204–209, 1991.

[18] W. Hofmann, M. G. Ménache, D. J. Crawford-Brown, R. S. Caswell and L. R. Karam, Modelling energy deposition and cellular

radiation effect in human bronchial epithelium by radon progeny alpha particles, Health Phys. 78, 377–393, 2000.

[19] S. D. Bouffler, J. W. Haines, A. A. Edwards, J. D. Harrison and R. Cox, Lack of detectable transmissible chromosomal instability after in vivo or in vitro exposure of mouse bone marrow cells to Ra-244 alpha particles, Radiat. Res. 155, 345-352, 2001.

[20] W. Hofmann, D. J. Crawford-Brown, H. Fakir and R. S. Caswell, Energy deposition, cellular radiation effects and lung cancer risk by radon progeny alpha particles, Radiat. Prot. Dosimetry 99, 453-456, 2002.

[21] D. T. Goodhead, D. A. Bance, A. Stretch and R. E. Wilkinson, A versatile Pu-238 irradiator for radiobiological studies with alpha-particles, Int. J. Radiat. Biol. 59, 195-210, 1991.

[22] N. F. Metting, A. M. Koehler, H. Nagasawa, J. M. Nelson and J.
B. Little, Design of a benchtop alpha particle irradiator, Health Phys.
68, 710-715, 1995.

[23] C. Soyland, S. P. Hassfjell and H. B. Steen, A new alpha-particle irradiator with absolute dosimetric determination, Radiat. Res. 153, 9-15, 2000.

[24] C. Soyland, S. P. Hassfjell and H. B. Steen, A new alpha-particle irradiator with absolute dosimetric determination, Radiat. Res. 153, 9-15, 2000. [25] S. J. Wang, J. L. Whitlock, C. Soyland, S.P. Hassfjell, T. G. Stinchcomb, J. Rotmensch, R. C. Reba and J. C. Roeske, Characterization of an alpha-particle irradiator for individual cell dosimetry measurements, Cancer Biother. Radiopharm. 18, 437–444, 2003.

[26] P. V. Neti, S. M. de Toledo, V. Perumal, E. I. Azzam and R. W. Howell, A multi-port low-fluence alpha-particle irradiator: fabrication, testing and benchmark radiobiological studies, Radiat. Res. 161, 732-738, 2004.

[27] R. Wang and J. A. Coderre, A bystander effect in alpha-particle irradiations of human prostate tumor cells, Radiat. Res. 164, 711-722, 2005.

[28] G. Esposito, M. Belli, G. Simone, E. Sorrentino and M. A. Tabocchini, A Cm-244 irradiator for protracted exposure of cultured Mammalian cells with alpha particles, Health Phys. 90, 66-73, 2006.

[29] A. Hakanen, T. Siiskonen, R. Pollanen, A. Kosunen, A. Turunen and O. Belyakov, Design, spectrum measurements and simulations for a Pu-238 alpha-particle irradiator for bystander effect and genomic instability experiments, Appl. Radiat. Isot. 64, 864-867, 2006.

[30] G. Esposito, F. Antonelli, M. Belli, A. Campa, G. Simone, E. Sorrentino and M. A. Tabocchini, An alpha-particle irradiator for radiobiological research and its implementation for bystander effect studies, Radiat. Res. 172, 632-642, 2009.

[31] N. Tisnek, E. Kalanxhi, C. W. Serkland, J. Iversen, O. V. Belyakov and J. Dahle, A Pu-238 irradiator for exposure of cultured cells with alpha-radiation: construction, calibration and dosimetry, Appl. Radiat. Isot. 67, 1998-2002, 2009.

[32] J. Dahle, E. Kalanxhi and N. Tisnek, Dosimetry of a Pu-238 based alpha-particle irradiator and its biological application in a study of the bystander effect, Anticancer Res. 31, 2113-2120, 2011.

[33] K. F. Eckerman and A. Endo, MIRD: radionuclide data and decay schemes, SNMMI, 1989.

[34] P. L. Santos, R. C. Gouvea and I. R. Dutra, Accumulation of Po-210 in foodstuffs cultivated in farms around the Brazilian mining and milling facilities on Pocos de Caldas plateau, J. Environ. Radioact. 11, 141-149, 1990.

[35] Z. Pietrzak-Flis and M. Showronska-Smolak, Transfer of Pb-210 and Po-210 to plants via root system and above-ground interception, Sci. Total Environ. 162, 139-147, 1995.

[36] E. Ekdal, T. Karali and M. M. Sac, Po-210 and Pb-210 in soils and vegetables in Kucuk Menderes basin of Turkey, Radiat. Meas. 41, 72-77, 2006.

[37] G. F. Knoll, Radiation detection and measurement, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.

[38] J. F. Ziegler and J. P. Biersack, The stopping and range of ions

in matter, Springer US, 1985.

[39] F. H. Attix, Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, New York: Wiley, 1986.

[40] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer, Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Accessed at http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef on April 3, 2015.

[41] F. M. White, Fluid mechanics 7<sup>th</sup> ed., Mc Graw-Hill, 373-377.2011.

[42] T. Siiskonen and R. Pollanen, Advanced simulation code for alpha spectrometry, Nucl. Instrum. Meth. A. 550, 425-434, 2005.

[43] E. Polig, Localized alpha-dosimetry. In: Eberg MHA, ed.
Current topics in radiation research. Amsterdam: North-Holland;
189-327, 1978.

[44] P. Olko and J. Booz, Energy deposition by protons and alphaparticles in spherical sites of nanometer to micrometer diameter, Radiat. Environ. Biophys. 229(1), 1-17, 1990.

[45] T-5 Monte Carlo Team, MCNP – a general Monte Carlo Nparticle transport code, version 5, vols. 1–3, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, LA-CP-03-0245, and LA-CP-03-028, 2003.

102

## APPENDIX A

### Source of Matlab code for correction factor

a=100000; b=10000; % a\*b = Total running number

h=20;

% Source to sample distance = SSD

r=7.07;

% Diameter of dish

aver=0;

sqaver=0;

N=0;

% N = total running number

for i=1:a for j=1:b

> $x_{1} = -4.75 + 9.5*$  (rand); % Extracted random x in the range of  $-4.75 \le x \le 4.75$

```
y1=-((4.75)^2-(x1)^2)^0.5+(2*(((4.75)^2
(x1)^2)^0.5))*(rand);
% Extracted random y in the range of -((4.75)^2-(x1)^2)^0.5
```

 $\leq y \leq ((4.75)^2 - (x1)^2)^0.5$ 

$$x2 = -r + 2 * r * (rand);$$

% Extracted random x in the range of  $-r \le x \le r$ 

 $y2 = -((r)^{2} - (x2)^{2})^{0.5} + (2*(((r)^{2} - (x2)^{2})^{0.5}))*(rand);$ % Extracted random y in the range of  $-((r)^{2} - (x2)^{2})^{0.5} \le y \le -((r)^{2} - (x2)^{2})^{0.5}$ 

 $c(i,j) = (((x1-x2)^{2}+(y1-y2)^{2}+h^{2})^{0.5})/h;$ %  $c(i,j) = 1/\cos\beta$ 

aver = aver + c(i,j); sqaver = sqaver + (c(i,j))^2; N=N+1; % Counting the particle

end

end

```
aver=aver/(N);
```

% Mean value

```
sqaver=sqaver/(N);
```

```
var=sqaver-(aver)^2;
```

vofm=var/N;

% Variance of the mean estimate

fsd=(vofm^0.5)/aver;

% Fractional standard deviation of the mean estimate

## APPENDIX B

### Certificate of calibration: alpha standard source (Am-241)



24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

## CERTIFICATE OF CALIBRATION ALPHA STANDARD SOURCE

 Radionuclide:
 Am-241

 Half-life:
 432.17 ± 0.66 years

 Catalog No.:
 AM1A2100U

 Source No.:
 L1-802

Customer: P.O. No.: Reference Date: Contained Radioactivity: BOO KYUNG S.M. CO., LTD IPL-131030-72 1-Mar-14 12:00 PST 102.5 μCi 3.793 MBq

#### **Physical Description:**

- A. Capsule type:
- B. Nature of active deposit:
- C. Active diameter/volume:
- D. Backing: E. Cover:

A-2 (12.7 mm OD x 6.35 mm THK) Am-241 incorporated in gold matrix 11 mm (capsule opening is 9.5 mm) Aluminum None

CAUTION! DELICATE SURFACE DO NOT WIPE ACTIVE AREA

#### **Radioimpurities:**

None detected

#### Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

 Peak energy used for integration:
 59.5 keV

 Branching ratio used:
 0.360 gammas per decay

#### **Uncertainty of Measurement:**

Α.	Type A (random) uncertainty:	±	0.2	%
Β.	Type B (systematic) uncertainty:	±	3.0	%
C.	Uncertainty in aliquot weighing:	±	0.0	%
D.	Total uncertainty at the 99% confidence level:	±	3.0	%

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 2 years.

Quality Control

<u>4-Feb-14</u> Date

- ISO 9001 CERTIFIED -

EZIP Ref. No.: 1705-22

Medical Imaging Laboratory 24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355 Industrial Gauging Laboratory 1800 North Keystone Street Burbank, California



24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Tel 661.309.1010 Fax 661.257.8303

## **CERTIFICATE OF CALIBRATION ALPHA STANDARD SOURCE**

Radionuclide: Half-life: Catalog No.: Source No.:

Am-241 432.17 ± 0.66 years AM1A210U L4-388

Customer: P.O. No.: Reference Date: **Contained Radioactivity:** 

A-2 (12.7 mm OD x 6.35 mm THK)

Am-241 incorporated in gold matrix

11 mm (capsule opening is 9.5 mm)

BOO KYUNG S.M. CO., LTD IPL-140321-22 12:00 PST 1-Jun-14 10.03 μCi 371.1 kBq

CAUTION! DELICATE SURFACE DO NOT WIPE ACTIVE AREA

#### Physical Description:

- A. Capsule type:
- B. Nature of active deposit:
- C. Active diameter/volume:
- D. Backing:
- E. Cover:

**Radioimpurities:** 

#### None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	59.5 keV
Branching ratio used:	0.360 gammas per decay

#### Uncertainty of Measurement:

	() of interest entering				
Α.	Type A (random) uncertainty:	±	0.2	%	
Β.	Type B (systematic) uncertainty:	±	3.0	%	
C.	Uncertainty in aliquot weighing:	±	0.0	%	
D.	Total uncertainty at the 99% confidence level:	±	3.0	%	

Silver

None

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 2 years.

**Quality** Control

EZIP Ref. No.: 1732-48

- ISO 9001 CERTIFIED -

Medical Imaging Laboratory 24937 Avenue Tibbitts Valencia. California 91355

Industrial Gauging Laboratory 1800 North Keystone Street Burbank, California



24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

## CERTIFICATE OF CALIBRATION ALPHA STANDARD SOURCE

 Radionuclide:
 Am-241

 Half-life:
 432.17 ± 0.66 years

 Catalog No.:
 AFR-241

 Source No.:
 L4-389

Customer: P.O. No.: Reference Date: Contained Radioactivity:

A-2 (12.7 mm OD x 6.35 mm THK)

Electrodeposited and diffusion bonded oxide

BOO KYUNG S.M. CO., LTD IPL-140321-22 1-Jun-14 12:00 PST 0.8279 μCi 30.63 kBq

> CAUTION! DELICATE SURFACE DO NOT WIPE

ACTIVE AREA

#### **Physical Description:**

- A. Capsule type:
- B. Nature of active deposit:
- C. Active diameter/volume:
- D. Backing:
- E. Cover:

#### /er:

#### Radioimpurities:

#### None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using a windowless internal gas flow proportional counter.

#### Uncertainty of Measurement:

А.	Type A (random) uncertainty:	±	0.4	%	
Β.	Type B (systematic) uncertainty:	±	3.0	%	
C.	Uncertainty in aliquot weighing:	±	0.0	%	
D.	Total uncertainty at the 99% confidence level:	±	3.0	%	

5 mm

None

Platinum

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.

 EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).

- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 2 years.
- This source had a surface emission rate of 924600  $\alpha$ /min in 2 $\pi$  on 5-May-14.

May 14

EZIP Ref. No.: 1732-48

ISO 9001 CERTIFIED -

Medical Imaging Laboratory 24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355 Industrial Gauging Laboratory 1800 North Keystone Street Burbank, California

## Am-241 Alpha Spectrum S/N: L4-389

Acquisition Started:	5/5/14 12:28:19 PM
Elapsed Live Time:	501.02 sec
Elapsed True Time:	502.41 sec
Dead Time:	0.28 %
Geometry:	SBD#3 - 49mm from detector



#### REGION OF INTEREST REPORT

ROI #	From (keV) -		To (keV)	Integral	% Error	Peak(keV)	FWHM(keV)
1	5240.24	-	5582.67	397935	0.41	5464.49	20.25
Errore	are moted	a+ 1	2 580 sima				

Errors are quoted at 2.580 sigma

## Certificate of calibration: alpha standard source (Cm-244)



24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

## CERTIFICATE OF CALIBRATION ALPHA STANDARD SOURCE

 Radionuclide:
 Cm-244

 Half-life:
 18.11 ± 0.02 years

 Catalog No.:
 AF-244-A1

 Source No.:
 1732-53

Customer: P.O. No.: Reference Date: Contained Radioactivity: (Total alpha)  $\begin{array}{c|c} \text{BOO KYUNG S.M. CO., LTD} \\ \text{IPL-140325-23} \\ \text{1-Jun-14} & 12:00 & \text{PST} \\ \text{0.1059} & \mu\text{Ci} & 3.918 & \textbf{kBq} \end{array}$ 

**Physical Description:** 

- A. Capsule type:
- B. Nature of active deposit:
- C. Active diameter/volume:
- D. Backing:
- E. Cover:
- L. 00401

Electrodeposited and diffusion bonded oxide 5 mm Platinum None

A-1 (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)

CAUTION! DELICATE SURFACE DO NOT WIPE ACTIVE AREA

#### Radioimpurities:

See Technical Data Sheet

#### Method of Calibration:

This source was assayed using a windowless internal gas flow proportional counter.

#### Uncertainty of Measurement:

Α.	Type A (random) uncertainty:	±	0.3	%
Β.	Type B (systematic) uncertainty:	±	3.0	%
C.	Uncertainty in aliquot weighing:	±	0.0	%
D.	Total uncertainty at the 99% confidence level:	±	3.0	%

#### Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from "Table of Radioactive Isotopes", edited by Virginia Shirley, 1986.
- This source has a working life of 2 years.
- This source had a total alpha surface emission rate of 118700 α/min in 2π on 30-Apr-14.

Janes Van Dalson nality Control

2-May-14 Date

EZIP Ref. No.: 1732-53

\_\_\_ ISO 9001 CERTIFIED \_\_

Medical Imaging Laboratory 24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355 Industrial Gauging Laboratory 1800 North Keystone Street Burbank, Califori

## Cm-244 Alpha Spectrum S/N: 1732-53

Acquisition Started:	4/30/14 11:29:32 AM
Elapsed Live Time:	1832.34 sec
Elapsed True Time:	1832.90 sec
Dead Time:	0.03 %
Geometry:	SBD#3 - 41mm from detector



#### REGION OF INTEREST REPORT

ROI #	From (keV)	-	To (keV)	Integral	% Error	Peak(keV)	FWHM(keV)
1	5528.90	-	5843.03	158607	0.65	5777.09	19.26
Errors	s are quoted	at	2.580 sigm	a			

## APPENDIX C

### Certificate of conformance: alpha detector



Advanced Measurement Technology, Inc. ORTEC<sup>®</sup> 801 South Illinois Avenue Oak Ridge, TN 37831-0895 Tel. (865) 482-4411 • www.ortec-online.com

### CERTIFICATE OF CONFORMANCE Quality Assurance Data (QAD) Sheet

ULTRA<sup>™</sup> Alpha Detector

Model No.	BU-0	20-450-	AS	Serial No.	53-	045 AA3	
Recommended Bias Voltag	e:	50		V (Positive)			
Warranted Alpha Resolution	n:≤	20	keV FWHM	Measured No	\$0:≤	15	_keV FWHM
Special Notes:		~~~	211				
Data Certified By:	6	191	Thone		_ [sign	ature]	
	1	6				+	

- STORAGE: Store detector at room temperature in clean, non-toxic, non-corrosive surrounding.
- HANDLING: Wear protective latex or polyethylene gloves as finger grease and body salts may destroy the integrity of the electrical contacts.

Keep protective cap on detector when not in use.

Detector should not be subjected to temperatures above +60°C.

Avoid mechanical shocks and mechanical damages. This ULTRA series detector has a thin (~500 Å), ion-implanted contact immediately under the silicon active surface. If the silicon surface is scratched, the detector may fail to perform according to specifications. This and other mechanical damages to the detector will void its warranty.

If a detector must be sent back to AMETEK-ORTEC, use proper care and properly protect the detector's sensitive surface when packaging for shipment. Improper handling or packaging that results in damage during transit may void the warranty.

- CLEANING: If contaminated, the detector's sensitive surface may be gently cleaned by using "fluffed" cotton swabs dampened with methanol to gently brush the contaminant off. DO NOT FLOOD THE DETECTOR SURFACE WITH ANY LIQUID. Blow dry the detector with clean, filtered nitrogen gas. Depending on the amount of moisture that may be left on the detector during cleaning, the detector should be allowed to dry for approximately 30 minutes before putting it into use.
- APPLICATION OF BIAS: The detector connector's central electrode should be provided with positive bias to produce a
  negative output signal. The recommended bias voltage should not be exceeded.
- ALPHA RESOLUTION MEASUREMENT: Specified alpha resolution should be measured in a clean and light-tight vacuum system using standard ORTEC electronics at 1 microsecond Amplifier Shaping time and a uniform, ultra-thin Am-241 source located at a source-to-detector distance of not less than 1.5 times the detector diameter.

## ABSTRACT

# Construction and Dose Delivery Characterization of an Alpha–Particle Irradiator for Research of Internal Exposure

Ki-Man Lee Department of Nuclear Engineering The Graduate School Seoul National University

According to United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR), alpha-particle exposure to radon and its progenies is the most important contributor of internal radiation dose to the world population. Inhalation of short-lived radon gas progenies can lead to substantial radiation dose to the respiratory system. Po-210, a long-lived radon progeny, contributes about 7 % of the effective dose equivalent to man caused by ingesting natural radioactive material. The need for studies on internal exposure to alpha-particle emitted from radon progenies still continues.

Several alpha-particle irradiators for in vitro experiment have been proposed but their purpose was to examine bystander effect in depth not internal exposure to radon progenies. Several of preceding studies used an additional Mylar layer and a collimator with tiny slits that decrease alpha-particle energy down to 3 MeV. In the real situation of internal exposure to radon progenies, basal cell is exposed to alpha-particle with the energy less than 7.69 MeV. So it is necessary to keep the energy of alpha-particle emitted from Am-241 source as high as possible in order to reenact the situation of internal exposure to radon progenies. Furthermore, dish sizes were inappropriate for gamma-H2AX assay and dose rates were calculated without considering SSD (source to sample distance) or dish sizes. They used only one method to calculate a dose rate and did not cross checked the results with those derived from other methods.

In this study, we represent a practical alpha-particle irradiator that has been set up at the Radiation Bioengineering Laboratory (RadBio Lab) at Seoul National University (SNU) for the study of cellular responses to radiation from radon progenies. The irradiation energy level was improved by eliminating the unnecessary Mylar layer, reducing the SSD and using suitably sized Mylar dish. The alpha-particle energy spectrum was measured with ion implanted silicon charged particle Detector - IISD (BU-020-450-AS, ORTEC, USA) at the position of the Mylar dish. The experimental energy spectrum at the Mylar dish layer was compared with the spectrum simulated by the AASI-code. Difference between peak energies was less than 0.03 MeV at all SSD. AASI-code can be adopted as a tool for dose assessment. The optimal irradiation condition that minimizes the SSD and guarantees the dose uniformity was proposed based on the fluence distribution calculated with a geometric formula. In case of a cell culture slide for gamma-H2AX assay, a sample of 1.57 cm<sup>2</sup> area can be irradiated with 5.12 MeV alpha-particle at the SSD of 20 mm. At this distance, spatial variations of the fluence rate were less

than  $\pm$  9 %. And the Mylar dish with 4.5 cm<sup>2</sup> area can be irradiated with 4.96 MeV alpha-particle at the SSD of 30 mm.

Two existing methods for dose rate assessment were also compared. Specific correction factors for dose assessment equation were proposed to increase the accuracy. After applying a newly formed correction factor, differences between the corrected dose rate and the one calculated with AASI-code were 2 and 6 %. While AASI-code can trace an alpha-particle and reflect the incidence angle and LET change, calculation of dose rate with alpha-particle energy spectrum measured by IISD always requires the correction factor for those. Thus dose rate calculation with AASI-code is much fairer way. Dose calibration for the alpha-particle irradiator was conducted at all SSDs. This device can provide dose rates ranging from 0.028 to 3.02 Gy/min for clonogenic assay and 0.031 to 5.66Gy/min for gamma-H2AX assay.

Employing Am-241 as a source simulating radon progenies requires that photon emissions from Am-241 be specified in term of dose contribution. Monte Carlo calculations have been made to characterize the dose contributions of Am-241 photon emissions. For these calculations, F6 tally was used. All calculations were carried out using  $10^6$  particle histories resulting in target cell layer relative error R less than 1 %. The ratio of dose by photon emissions from Am-241 to that by alpha emissions ranges from  $6.03 \times 10^{-6}$ at the SSD of 5 mm to  $8.02 \times 10^{-6}$  at the SSD of 25 mm. Alpha– particles are the major contributor of cellular dose, Am-241 source can be employed as an alternative to radon progenies in performing study on cellular response to alpha–particles.

Usefulness of this irradiation system for in vitro experiment of human cells have been successfully tested. This device will be used for various study of cellular responses to alpha-particle. Also, additional device and dose assessment will be required for 3-dimensional cell culture experiment to reenact the real tissue irradiation.

**Keywords:** Alpha-particle irradiator, Spectrometry, Dosimetry, AASI-code, MCNP5 simulation, Correction factor

**Student number :** 2011–30290