

碩士學位論文

Panorama식 ^{60}CO 감마선 조사시설내의
선량분포 평가



濟州大學校 大學院

에너지工學科

文 盛 愛

2005年 12月

Panorama식 ^{60}CO 감마선 조사시설내의 선량분포 평가

指導教授 朴 在 雨

文 盛 愛

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



文盛愛의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審查委員長 鄭 釩 津 印

委 員 朴 在 雨 印

委 員 李 光 萬 印

濟州大學校 大學院


2005年 12月

Evaluation of the radiation dose distribution
of a panoramic cobalt-60 gamma irradiation facility

Seong-Ae Moon
(Supervised by professor Jae Woo Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of engineering

2005. 12.

 제주대학교 중앙도서관
This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Jae-woo Park, Prof. of Nuclear and Energy Engineering
.....
.....
.....

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 방사선량의 정의	3
2. 선량계	4
1) 화학선량계(FeSO_4 용액)	4
(1) 기본 원리와 반응 메카니즘	4
(2) Fricke 용액의 제조	6
(3) 흡광도 측정	7
(4) 선량계산	8
2) 열형광선량계(TLD)	10
(1) KCT-300 소자	10
(2) 선량 관독	10
3) 전리함 선량계	12
(1) 전위계 (electrometer)	13
(2) 선량계산	14
4) MOSFET 선량계	15

(1) 동작원리	15
(2) 선량측정	16
III. 재료 및 방법	19
1. 방사선 조사시설의 구조	19
2. 선량계 배열	23
3. 방사선 조사와 선량 측정	24
4. 실험 방법	26
VI. 측정 결과 및 분석	28
1. 거리에 따른 선량 분포	28
2. 전리함에 대한 상대 선량비	31
3. 선량 분포 지도 작성	33
4. 시간에 따른 선량률의 변화	39
5. 공간 방사선량 분포의 균일성 (등방성 비교)	40
6. 시료 용기에 따른 선량비교	41
VII. 결 론	45
참 고 문 헌	46

LIST OF FIGURES

Fig 1. Absorbance measurement system of the spectrophotometer	8
Fig 2. FeSO ₄ solution vials for dosimetry	8
Fig 3. Dose characteristic curve of KCT-300 TLD pallets (High-dose)	11
Fig 4. Dose characteristic curve of KCT-300 TLD pallets (Low-dose)	11
Fig 5. KCT-300 pallets placed in acryl case for dosimetry	12
Fig 6. Electrometer and Farmer-type ionization chamber shield cap	13
Fig 7. Schematic of the cylindrical ionization chamber showing connections from triaxial cable to chamber electrodes	13
Fig 8. Simplified circuit diagrams for ground-referenced electrometer (shown with polarity of collecting electrode of chamber at a positive potential relative to the cap)	14
Fig 9. Simplified circuit diagrams of the n-channel	16
Fig 10. MOSFET AutoSense System Block Diagram	17
Fig 11. Calibration Factors of MOSFET dosimeters	18
Fig 12. Comparison of dose ratio measured by MOSFET with MOSFET not using the bolus	18
Fig 13. The plane view of the Cobalt-60 gamma irradiation facility	20
Fig 14. The vertical view of the Cobalt-60 gamma irradiation	

facility	20
Fig 15. The running motor and control cable of the source holder	21
Fig 16. The schematic diagram of the irradiator with shields ·	22
Fig 17. Configuration of the dose reducing shields : cylindrical lead shields are lined with stainless steel plates	22
Fig 18. The dose measuring points on the horizontal plane in the irradiation chamber	23
Fig 19. The vertical of dose measuring point and source	24
Fig 20. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (no shield) ·	29
Fig 21. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (one shield) ·	29
Fig 22. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (two shields)	30
Fig 23. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (three shields)	30
Fig 24. Comparison of dose distributions measured with the ionization chamber and MOSFET dosimeters (one shield)	31
Fig 25. Ratio of the absorbed dose measured by TLD's with respect to ion chamber	32
Fig 26. Ratio of the absorbed dose measured by Fricke dosimeter with respect to ion chamber	32
Fig 27. Ratio of the absorbed dose measured by MOSFET	

dosimeters with respect to ion chamber.	33
Fig 28. Three-dimensional view of dose rate distribution	34
Fig 29. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with no shield (Gy/hr)	35
Fig 30. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with one shield (Gy/hr)	36
Fig 31. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with two shields (Gy/hr)	37
Fig 32. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with three shields (Gy/hr)	38
Fig 33. Angular anisotropy of dose rate distribution	41
Fig 34. Dosimetry for the mouse irradiation	42
Fig 35. Measured points at well plate used for holding test tubes (Left) and test tubes of different volumes (Right)	43
Fig 36. Dose rate distribution along the height of the source rod	44

LIST OF TABLES

Table 1. G-values of free radicals and molecules for ^{60}Co gamma rays	6
Table 2. Dose rate range of the irradiation facility	40
Table 3. Dose rate of dosimetry for mouse irradiation	42
Table 4. Relative dose-rate variation along the size of well dish	43
Table 5. Comparison of dose rate at different positions of the test tubes containing the sample	43



SUMMARY

Co-60 irradiation facilities are used for various irradiation purposes such as induction of mutations in agricultural and ornamental plants, food sterilization and irradiation of biological. Suitable dosimetric procedures must be carried out to establish facility operational parameters, such as the general dose distribution, dose uniformity, and maximum and minimum dose positions prior to the use of the facility. A panoramic Co-60 irradiation facility with an initial activity, as of February 20, 2004, of 400 TBq (10,800Ci) was constructed in Applied Radiological Science Research Institute of Cheju National University.

Mapping of the dose distribution inside the irradiation chamber can be performed by measurement using several types of dosimeters. We chose to use an ionization chamber, a chemical dosimeter of FeSO₄ solution, CaSO₄:Dy thermoluminescence dosimeters (TLD) and MOSFET dosimeters.

The source rod is contained inside cylindrical pipes surrounded by dose reducing lead shields. The measured data are radiation absorbed doses at different distances from the center of the source rod for different exposed times. Since it is generally accepted that the ionization chamber is most correct in measuring the absorbed dose from a gamma ray source, we have compared the measured data obtained with a Farmer type ionization chamber and with other types of the aforementioned dosimeters. In order to evaluate the accuracy of the dosimeters, we have investigated the linearity between the absorbed dose and exposed time for all of the dosimeters. As was expected, the ionization chamber has shown good linearities between the absorbed dose and the exposed time, while other types of dosimeters have

shown very limited linearities within certain ranges of the absorbed dose.

After this confirmation, we have chosen to use the ionization chamber to determine the dose distribution inside the irradiation chamber. The chemical dosimeter produces inaccurate results over 600 Gys because the Fricke solution becomes saturated. In general, it produces lower values than the ionization chamber. With surrounding the lead shield around the source, the TLD and chemical dosimeters have shown incorrect results below 40 Gys.

The MOSFET dosimeters, which are often used in medical applications such as dose verification in radiation therapy, also show good linearity but generally show higher values than the ionization chamber.

We have found that by combination of placing the lead shields and increasing the distance between the source and the object to be irradiated, the irradiation chamber can deliver a dose rate range of 0.40~1,600 Gy/hr.



I. 서 론

감마선 및 전자선 등 방사선조사는 다양한 분야에 이용되어지고 있는데 특히 ^{60}Co 을 이용한 감마선조사는 동·식물 유전자의 기능 규명을 통한 농작물 및 관상식물의 돌연변이 신품종 개발(W.Y. Park 등 2002, A. Dodbiba 등 2003), 식품 멸균처리(Meixu Gao, 2003), 농·수산물의 저장성 향상(J. Farkas, 1998) 및 방사선 조사로 인한 전자제품의 성능 변화 연구(C.C.Yui 등 2003) 등에 많이 활용되고 있으며 최근에는 방사선 방어제 및 민감제와 항암제 등 기능성 물질의 개발(R. Arora 등, 2005, Jie-Young Song 등, 2003)에도 널리 이용되고 있으며, 앞으로도 방사선 조사 분야가 점점 확대될 것으로 예상된다.

이러한 다목적 방사선 조사시설의 경우 조사할 시료와 목적에 따라 조사할 방사선량의 범위가 다르고 넓기 때문에 이에 따라 조사 과정에 앞서 선량의 균일성이나 최대, 최소 선량 위치와 같은 조사시설 전체의 정확한 선량평가가 수행되어야 한다(K, Farah 등 2005).

따라서 본 연구는 2004년 2월 제주대학교에 설치된 방사능이 400 TBq (10,807 Ci) Co-60 감마선 조사실의 여러 가지 인자인 선량조절용 납 차폐체와 선원중심과 조사지점 사이의 이격거리를 변수로 하여 실제로 측정된 방사선량을 기준으로 하여 정확한 선량률 분포지도를 작성하고자 하였다.

방사선조사실의 선량분포는 몇 가지 유형의 선량계로 측정이 가능하다. 상업용 조사시설과 같이 선량이 매우 높은 경우 일반적으로 Fricke 선량계 또는 세륨선량계를 이용한 화학적 선량측정법이 사용되고 있으나 제주대학교 방사선조사실의 경우 선량이 그에는 미치지 못하고 반면 일반적인 환경에서 사용하는 선량 수준보다는 훨씬 높기 때문에 본 연구에서는 Farmer형 전리함, FeSO_4 용액을 이용한 Fricke 선량계, 한국원자력연구소에서 개발한 열형광선량계(TLD)인 KCT-300소자, 방사선치료에서 선량 검증에 활용하는 MOSFET를 사용하였다.

일반적으로 감마선장의 선량측정에는 전리함이 가장 정확한 것으로 알려져 있

으나 각 선량계의 정확성을 평가하기 위하여 노출시간과 선량의 선형성을 측정하였다. 이러한 측정결과를 바탕으로 전리함을 이용하여 방사선 조사실 내부의 선량분포를 측정하였고 다른 선량계의 정확성을 평가하였다. 선원으로부터 거리에 따른 선량변화 곡선을 그리고 최소자승법에 의하여 거리에 따른 선량률 변화 함수를 도출하였다. 이로부터 방사선조사실 내부의 등선량곡선(isodose curve)을 작성하였으며, 조사 가능한 선량률 범위를 결정하였다.



II. 이론적 배경

1. 방사선량 관련 물리량 및 이론

1. 흡수선량 (absorbed dose; D)

방사선량 분야의 중요한 물리량 중의 하나가 흡수선량인데 흡수선량이란 조사된 물질의 단위질량당 흡수된 에너지로 정의되고, $D = \frac{dE}{dm}$ 으로 표시된다. 여기서 dE 는 조사된 물질의 질량 dm 에 흡수된 방사선의 평균에너지이다. 단위는 [J/kg]이고, SI단위로는 Gy를 사용한다.

2. 조사선량 (Exposure dose; X)

조사선량은 질량이 dm 인 공기의 체적내에서 X선 또는 γ 선으로 인해 방출된 2차 전자가 공기중에서 생성된 이온쌍 중 양전하 또는 음전하가 공기 중에서 정지했을 때 그 중 어느 한쪽 부호의 전체 전하 dQ 를 dm 으로 나눈 값, 즉

$$X = \frac{dQ}{dm} \text{ 이고, 단위는 [C/kg]이다.}$$

여기에서 조사선량의 정의를 통해 선량을 측정할 때 γ 선의 물질에 대한 상호작용 과정은 간접전리 방사선이기 때문에 1차 과정에서 발생된 광전자나 콤프턴 전자와 같은 하전입자선의 전리에 따라 이온쌍이 생성된다. 따라서 공기의 일정 질량(dm)중에서 발생된 하전입자선이 형성한 이온쌍 수(dQ)를 수집하게 되는데 공기중 일정 질량 영역을 V를 정하고, 이 영역에서 발생된 하전입자의 비적에 따라 생성되는 이온쌍 수는 모두 수집하고, 이 영역 외의 공기로부터 발생된 하전입자가 생성한 이온쌍 수는 제외해야 된다. 따라서 이 영역에서 이온쌍 수를 선택하여 제외시키는 것은 하전입자평형(CPE)에 의해서 이것을 해결할 수 있다.

3. 하전입자 평형상태 (CPE: Charge-particle Equilibrium)

하전입자 평형상태의 정의는 다음과 같이 주어진다. 임의의 체적 v 내에서 이 체적을 이탈하여 나가는 일정한 에너지를 가진 전하의 양과 이 체적 내로 들어오는 같은 에너지를 가진 동일한 전하의 양이 같은 경우 이 체적 v 는 하전입자 평형상태에 있다고 한다. 특히, 선원이 체적 v 의 외부에 위치하는 경우 전리방사선에 대한 임의의 체적 v 에서의 하전입자 평형상태 조건은 매질의 원자구조와 밀도가 균일하여야 하고, 체적 v 내에서 전리 방사선에 의한 선장이 일정함 (또는, 방사선이 체적 v 를 지나갈 때 감쇠현상이 무시할 정도로 작아야 한다.)은 물론 비 균일 전기장이나 자기장이 존재하지 않아야 한다.

2. 선량계

1) 화학선량계 (FeSO₄ 용액)

FeSO₄ 용액을 사용하는 Fricke dosimeter (Hugo Fricke와 Edwin J. Hart, 1996)는 현재 연구가 가장 많이 되어 있고, 선진 표준기관에서 널리 개발하고 있는 화학선량계인데, 용액 제조가 용이하고 ⁶⁰Co 감마선 조사시 용액으로의 전이가 작아서 방사선의 선질에 따른 G값의 변화가 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 일반적으로 대선량의 측정에 적합하고, 약 $4 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$ Gy 범위에서는 선량의존성이 적으며 안정성과 재현성이 좋다.

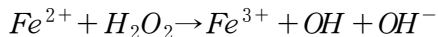
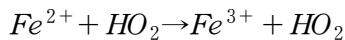
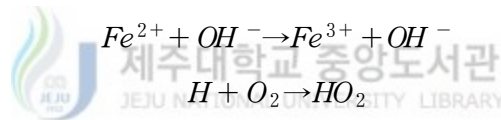
(1) 기본 원리와 반응 메카니즘

수용액 상의 선량계는 보통 희석용액으로 구성되어 있으며, 방사선은 물과 작용하여 10^{-10} sec 이내에 화학적으로 활성적인 일차 산물을 생성해 낸다고 가정한다. 이 생성물은 쌍을 이루지 못한 전자를 갖고 있는 H⁺나 OH⁻와 같은 유리기와 H₂나 H₂O₂와 같은 분자 생성물들을 포함하고 있는데 이들은 하전입자의 궤도를 따라 불균일하게 분포하고 있다. 그러나 처음 상호작용이 일어난 후 10^{-6} sec 정도가 될 때까지 이들 일차 생성물의 공간적 분포는 확산이나 용질과의 화학작용에 의하여 균질하게 변화하여 간다 (Frank H. Attix, 1986).

G-value는 물질에 방사선이 조사되었을 때 어느 정도의 화학변화가 일어나는가를 나타내는 것으로 100 eV의 방사선 에너지에 의해서 생성되거나 변화하는 분자 또는 원자수로 정의되고 있다. 또한, ICRU가 1980년도에 정의한 산물 X에 대한 방사선의 화학적 수율인 G(X)로 표시하기도 한다. G(X)는 그 단위가 moles/J로 표현되며, G값에 1.037×10^{-7} 곱하여 구할 수 있다.

$$G(X) = G\text{-value} \times 1.037 \times 10^{-7}$$

화학선량계를 통한 흡수선량 측정은 방사선이 용액을 통과할 때 물의 방사선 분해에 의해 생성된 H• 및 OH• 등의 유리기와 이들의 반응생성물에 의해 황산 제1철 용액의 Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되는 현상을 이용하는데 이 화학 변화가 흡수된 에너지에 비례한다.



여기서, 각 수소원자는 HO₂ radical을 형성하게 되며 이러한 radical이 3개의 Fe²⁺이온을 산화시켜서 Fe³⁺를 생성해내며, 각 OH radical이 하나의 Fe²⁺이온을 산화시키며 2개의 H₂O₂ 분자는 3개의 Fe²⁺이온을 산화시키게 된다. 따라서 Radiation chemical yield G(Fe³⁺)는 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$G(Fe^{3+}) = 2G(H_2O_2) + 3G(H) + G(OH)$$

위 식에 Table 1의 각각의 G-value 값을 대입하면 ⁶⁰Co-γ에 대하여 G(Fe³⁺)

= 15.5 (100 eV) 이 된다.

Table 1. G-values of free radicals and molecules for ^{60}Co gamma rays

Radiation	Solution	G(H)	G(OH)	G(H ₂)	G(H ₂ O ₂)	G(e-aq)
^{60}Co 감마선	0.8 N H ₂ SO ₄	3.70	2.92	0.39	0.78	0.00

(2) Fricke 용액의 제조

표준 Fricke dosimeter는 3차 증류수로 만들어진 0.001 M의 FeSO₄ 용액 또는 Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ 용액 그리고 포화처리가 된 0.8 N의 H₂SO₄ 용액으로 이루어져 있다. 여기서 M이란 용액 1000 cm³ 속에 녹아있는 그램으로 표시한 물질의 분자량을 말하며, N이란 용액의 노르말농도(normality)로 용액 1리터에 녹아있는 동일한 그램분자량으로써 그램으로 표시된 분자량을 그 분자 당 수소원자의 수로 나누어 준 양을 의미한다.

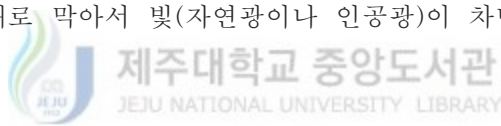
만일 첨가하는 물의 순도가 떨어지는 경우 NaCl을 추가하는데 NaCl 용액은 유기불순물에 의한 dosimeter의 영향을 둔감하게 하는 작용을 하기 때문이다. 이런 경우 표준 Fricke dosimeter 용액에 0.001 M의 NaCl을 추가하여 제조한다. 그러나 0.001 M의 NaCl을 가하게 되면 용액의 유기 불순물에 대한 감도를 감소시킬 수가 있지만 radiation chemical yield rate의 증가를 유발하므로 고선량(약 10 Gy/μs 이상) 측정시에는 NaCl 이 Fe³⁺ 이온의 생성에 영향을 주기 때문에 그런 경우에는 NaCl 용액을 추가해서는 안 된다 (고성진 등, 2001). 또한 저장해 둔 FeSO₄ 용액은 시간이 지남에 따라서 [Fe₂(SO₄)₃]용액으로 산화가 일어나기 때문에 가장 정확한 측정결과를 위해서는 용액을 사용하기 바로 전에 만드는 것이 바람직하다.

- ① 2 L 플라스크를 5회 이상 깨끗하게 세척하고 3차 증류수로 약 3/4 정도 (1500g)를 채운다.
- ② 순도 97 %의 FeSO₄ 용액을 청결하게 세척된 비이커를 이용하여 혼합한다.

비커는 사용 전에 산을 이용해서 5회 이상 세척하며 만일 가하는 H₂SO₄의 농도가 다를 때에는 다음 식으로부터 가하는 산의 양을 결정한다.

$$Mass [g] = \frac{0.4[M] \cdot 2[L] \cdot 98.08 [g \cdot mol^{-1}] \cdot 100}{\% mol}$$

- ③ 0.784 g의 FeSO₄ 분말을 혼합한다.
- ④ 혼합용액 속에 남아있는 유기불순물의 효과를 줄이기 위하여 0.1169 g의 NaCl을 첨가한다.
- ⑤ 이 혼합용액에 3차 증류수를 더하여 최종 질량이 2043.4 g인 Fricke 용액을 만든다.
- ⑥ Fricke 용액을 골고루 흔들고 주기적으로 마개를 열어서 공기가 유입되도록 하여 포화공기 용액이 되도록 한다.
- ⑦ 이 용액을 마개로 막아서 빛(자연광이나 인공광)이 차단된 암상태인 장소에 보관한다.



이렇게 제작된 최종 dosimeter 속에 포함된 성분은 다음과 같다.

FeSO₄ : 1.00 × 10⁻³ mol/L

H₂SO₄ : 4.00 × 10⁻¹ mol/L

NaCl : 1.00 × 10⁻³ mol/L

(3) 흡광도(Absorbance) 측정

Fe³⁺의 양은 흡수분광분석법(absorption spectroscopy)으로 측정하는데 이 방법은 측정이 빠르고 정확하며 특히 저 농도의 Fe³⁺를 포함한 FeSO₄ 용액이나 미량의 용액에서의 측정에도 유리하다는 장점 때문에 많이 활용되고 있으며 특히 spectrophotometer를 이용하면 선량계 용액 속의 Fe³⁺이온에 대한 분석을 더 쉽

계 수행할 수 있다.

분석에 주로 쓰이는 단색광의 파장은 304 nm로 Fe^{3+} 는 자외선을 흡수하지만 Fe^{2+} 는 흡수하지 않는다. 따라서 Fe^{3+} 는 304 nm의 자외선을 특히 강하게 흡수하기 때문에 분광광도계의 파장을 304 nm로 설정하고 흡광도를 측정한다.

단색화 장치를 통과해 나온 단색 파장의 빛은 시료를 통과하여 광전자증배관 검출기에 의해 측정되고 흡광도는 투과된 빛(I_t)에 대한 입사광의 광도(I_0)로 나타내며 이 흡광도를 통해 이 수용액 속의 흡수 에너지를 알 수 있다.

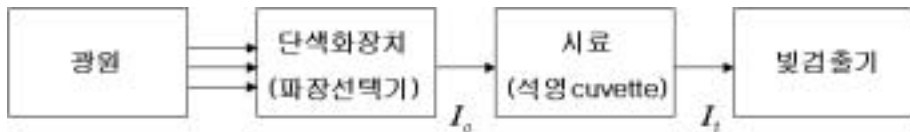


Fig 1. Absorbance measurement system of the spectrophotometer



Fig 2. FeSO_4 solution vials for dosimetry

(4) 선량 계산

임의의 단일 파장에서 용액에 흡수되는 선량은 광밀도와 molar extinction coefficient에 대한 관계에 따라 다음과 같은 흡수선량식으로 나타낼 수 있다(A. Olszanski 등 2002).

$$D_w = \frac{\Delta OD \cdot R_w^F \cdot k_{vial} \cdot k_{dd} \cdot k_E}{\epsilon \cdot G(Fe^{3+}) \cdot \rho \cdot L}$$

여기서

ΔOD = Fe^{2+} 에서 Fe^{3+} 로의 변화에 의한 흡광도를 차이,

R_w^F = 같은 가정하에서 대조위치에서 벽이 없는 용기에서 물에서의 흡수선량
과 Fricke에서의 흡수선량 비 (^{60}Co 에 대해서 $R_w^F = 1.0032$),

K_{vial} = Fricke solution vial의 벽에 의한 변동요소를 고려한 보정인자
(^{60}Co 에 대해서 $K_{vial} = 1.0000$),

K_{dd} = 바이알의 직경을 지나는 조사 영역의 불균일을 고려한 보정인자
(^{60}Co 에 대해서 $K_{dd} = 1.0031$),

K_E = $G(Fe^{3+})$ 의 에너지 의존성을 고려한 보정인자
(^{60}Co 에 대해서 $K_E = 1.0000$),

$\epsilon \cdot G(Fe^{3+})$ = 열량계의 비교에 의해 결정된 Fe^{3+} 의 화학적 산물과 분자 소멸계
수의 곱 (^{60}Co 에 대해서 $\epsilon \cdot G(Fe^{3+}) = 3.5060 \text{ cm}^2 \text{ J}^{-1}$),

ρ = 25°C에서 Fricke 용액의 밀도 ($\rho = 1.0227 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$),

L = spectrophotometer에서 측정 cuvette의 길이(cm)

를 각각 나타낸다.

2) 열형광선량계 (TLD)

(1) KCT-300 소자

열형광선량계는 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TL계열의 소자를 바탕으로 인(P) 화합물을 접착 매질로 사용한 KCT-300 이라 명명된 소자이다. KCT-300 소자는 소량의 P-화합물을 첨가하였기 때문에 이미 상용화 되어 쓰이고 있는 Teflon을 첨가한 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TL 소자에 비하여 감도가 높고($100 \mu\text{R} \sim 10^6 \text{ R}$), fading 특성이 좋으며 선량 의존성의 범위가 넓어 개인 선량계 및 환경 선량계로 매우 적합한 것으로 보고된 바 있다(Jeong Sun Yang 등 2002).

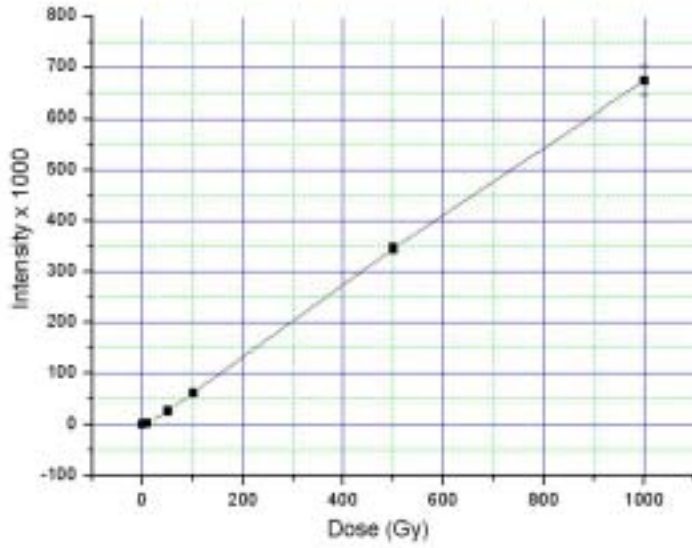
이 소자는 선량이 30 Gy 이상이 되면 선형영역에서 다소 벗어나 초선형 양상을 보이지만 포화되기 전까지는 선량에 비례하여 증가하므로 고선량 영역의 선량 측정도 가능한 것으로 예상된다.

(2) 선량 판독

KCT-300 소자를 Co-60 선원으로 조사시킨 후 발생하는 열형광량으로부터 방사 흡수선량을 판독하기 위해서는 우선 KCT-300 소자(그림 3)의 열형광량과 흡수선량에 대한 특성 곡선을 얻어야 한다. 이를 위해 먼저 KCT-300 소자를 열처리(annealing)한 후 한국원자력연구소의 Co-60 표준조사시설을 이용하여 10^{-5} Gy부터 10^3 Gy 범위에 있는 선량을 조사시킨 후 소자는 fading 효과를 고려하여 24시간 이상 경과 후 판독하였다.

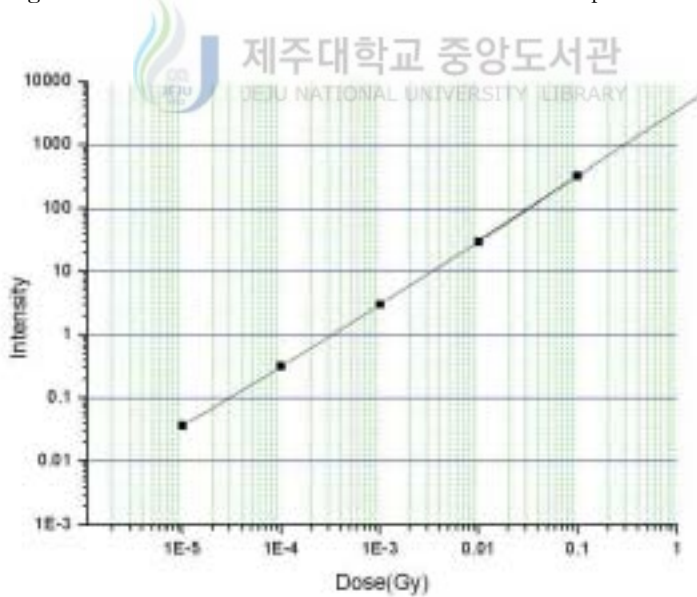
소자 판독에 이용된 TLD 판독기는 Harshaw 4500으로 소자 판독시의 TTP (Time-Temperature Profile)는 125 °C에서 6초간 pre-heating 후 20 °C/sec의 가열율로 320 °C까지 상승시키면서 판독 후 320 °C에서 6초간 가열(annealing)하였다. 여기서 125 °C에서 6초간 pre-heating하는 이유는 실제 선량 평가에는 적용되지 않는 저온 피크의 영향을 인위적으로 없애기 위함이다.

그림 3과 4는 KCT-300 소자의 특성곡선을 보인 것이다. 수직축은 발생한 열형광의 강도를, 수평축은 흡수선량을 가리킨다. 고선량 그림에서 보인 바와 같이 30 Gy 부근에서 선량특성 곡선의 기울기가 약간 변함을 알 수 있으며 그 이후에



(a) High-dose

Fig 3. Dose characteristic curve of KCT-300 TLD pallets.



(b) Low-dose

Fig 4. Dose characteristic curve of KCT-300 TLD pallets.

는 거의 선형적임을 알 수 있다.



Fig 5. KCT-300 pallets placed in acryl case for dosimetry

3) 전리함

전리함은 PTW Farmer-type으로 용적의 0.6 cm^3 이고 벽물질은 아크릴 (PMMA)과 흑연(C)으로 구성되어 있다. 이 thimble type의 전리함은 내부로 공기가 자유롭게 드나들 수 있기 때문에 온도 및 기압에 대한 보정이 필요하다 (Gavin Cranmer-Sargison 등 2003).

그리고 인체 등가물질인 아크릴 소재의 케이스에 내장되어 있어서 조사선량을 흡수선량으로 변환할 수 있다.

전리함에 생성된 전하량은 전위계(electrometer)를 사용하여 측정할 수 있는데 선량을 측정할 때 전리된 공기로부터 전하를 발생시키기 위해서 분극전압은 챔버 안 공기의 부피에 따라 적용된다. 전리함의 응답성은 전압의 크기와 챔버 안의 전기장의 방향에 의존하고 그 장의 방향은 전극 전압과 치료 선량측정에서의 전극에 적용되는데(ARPANSA, 2005) 이것이 전위계의 기능이다.

그림 6은 전위계와 아크릴 케이스를 씌운 Farmer-type 전리함의 모습이다.



Fig 6. Electrometer and Farmer-type ionization chamber with shield cap.

그림 7은 triaxial 케이블에서 thimble 챔버의 모식도를 나타낸다. Outer electrode는 케이블의 outer shield와 연결되어지고 collecting electrode는 central conductor와 연결된다. 케이블의 inner shield는 stem 내에서 공동과 방해물들로 이동하는 guard electrode과 연결된다.

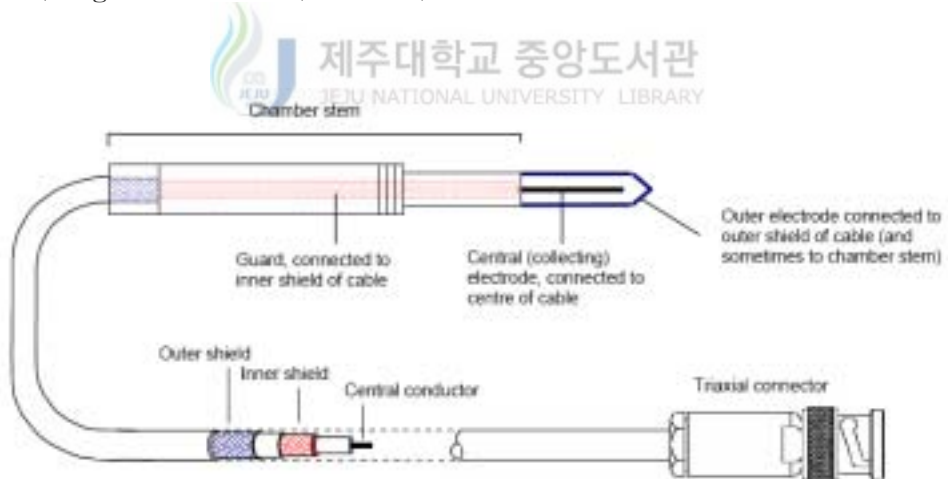


Fig 7. Schematic of the cylindrical ionization chamber showing connections from triaxial cable to chamber electrodes.

(1) 전위계 (electrometer)

a. Ground referenced electrometers

그림 8과 같이 이 시스템에서 증배관에 입력한 전위계는 비전도를 접지면에 입력한다. 챔버의 수집전하는 증배관의 상호작용에 의해 가상 접지면에서 유지되는 전도 입력과 연결되어진다. 분극전압은 outer shield와 outer electrode에 적용되고 이에 따라 충격 위험이 나타난다. 어떤 전리함은 전기적으로 stem과 연결된 챔버 캡을 가진다. 만약 이 챔버가 ground referenced 전위계로 사용된다면 stem은 또한 충격위험이 일어날 것이므로 짧은 분극전압공급을 피하기 위해서 접지로부터 이 챔버의 stem을 절연시키는 것이 필수적이다. 따라서 접지루프를 피하기 위해서는 모든 경우에 stem을 절연하는 것이 바람직하다.

그리고 모든 경우에 수집전극은 증배관의 작용에 의해 보호됨으로써 같은 전위를 유지하게 되고 음극 전위는 챔버 캡에 적용되고 양극 전위는 Guard로써 챔버 내에 전기장 방향과 같아진다.

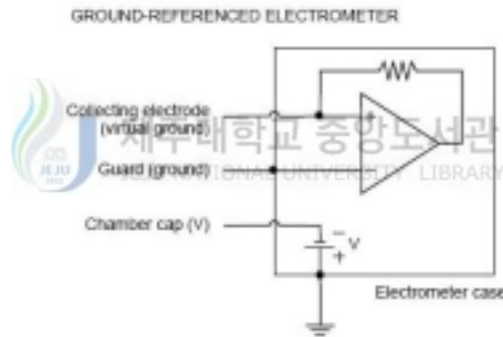


Fig 8. Simplified circuit diagrams for ground-referenced electrometer (shown with polarity of collecting electrode of chamber at a positive potential relative to the cap)

(2) 선량 계산

유효전리체적 $A \cdot L$ 과 전하량 Q 를 정확히 측정하였다면 전리공기의 기압과 온도를 보정하여 조사선량은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$X[Ckg^{-1}] = \frac{Q(C)}{A \cdot L[m^3]} \cdot \frac{1}{\rho[kgm^{-3}]} \cdot \frac{T[K]}{273.2} \cdot \frac{101.3}{(p - 0.238p_1)[KPa]}$$

여기서

Q = 측정된 전하량,

$A \cdot L$ = 유효전리체적으로 0.6 cm^3 ,

T = 전리조내의 공기의 절대온도,

P = 측정시의 대기압,

ρ = 표준상태의 공기의 밀도 (1.293 kg/m^3),

P_1 = 대기중 수증기의 증기압

이다.

4) MOSFET

MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) 선량계는 초기에 공간 방사선 환경에서의 선량 감시를 위해 고안되었다. 이 MOSFET 선량계는 고감도이며 소형이고, 실시간 측정이 가능하고 사용하기 쉬운 장점을 가지고 있다.

최근에 이 선량계는 방사선 치료와 진단 분야에서의 선량평가와 같은 다양한 의학 분야에서 널리 사용되고 있다. 그리고 감도가 증가함에 따라 이 선량계는 저선량을 포함하는 방사선 방호 분야에 실용적으로 사용되고 있다 (Brian Wang 등 2005).

(1) 동작원리

MOSFET은 전도채널의 형식에 따라 채널이 구분되며, n-채널 증가형일 경우 게이트전압이 0 일 때에는 드레인 전류가 흐르지 않으며 게이트 전압의 증가에 따라 출력전류가 증가한다.

P형기관인 실리콘에는 전류의 자유전자 수가 매우 적으므로 source와 drain 사이의 높은 전압을 가해도 기관의 저항이 너무 크기 때문에 전류가 흐를 수 없

다. 그러나 게이트 전압을 가하면 중간의 절연체인 Oxide 때문에 전류가 흐를 수 없다가 기판과 Oxide 경계면에 전자가 모이게 되어 전도채널(Conduction channel)이 형성되어 전류가 통하게 되는 원리를 이용한 것이다.

그림 9는 증가형 n-채널의 형태와 증가형의 일반 구조를 나타낸 것이다.

MOSFET은 0.2 x 0.2 mm 크기의 실리콘칩으로 케이블선 끝부분에 1 mm 두께의 검정 에폭시로 덮여있다.

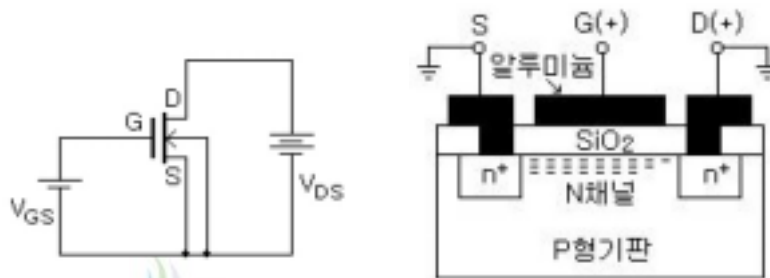


Fig 9. Simplified circuit diagrams of the n-channel

(2) 선량 측정

Calibration은 선량이 정확히 알려진 조건하에서 행해져야하기 때문에 표준과 학연구원에서 ^{60}Co 표준조사시설을 이용하여 실시하였으며 전리함을 통해서 알려진 선량값 50 cGy를 조사하여 각각의 Calibration factor(CF's)를 구하였다. 이때 25 x 25 x 6.5 cm의 폴리스틸렌 팬텀 중심에 MOSFET 선량계를 1 cm 간격으로 고정시킨 후 하전입자평형(CPE)를 확보하기 위해 조직등가물질인 1 cm 두께의 bolus를 선량계 전면부에 부착하여 각 선량계의 정확한 교정인자를 산출하기 위해 20 개의 선량계를 3 회씩 조사하고 그 결과를 평균하였다.

방사선이 흡수됨에 따라 출력전류가 증가하게 되는데 이 선량계는 ^{60}Co 선원일 경우 약 9 mV/cGy의 감도를 나타내며, 최대 20,000 mV의 수명을 가지고 있어서 고선량 측정시 금방 소진되어 버리기 때문에 적합하지 않다.

조사 후 측정되는 전압(mV)에 각각의 CF로 나눠주면 선량을 알 수 있다.

$$CF = \frac{MOSFET\ mV\ Reading(mV)}{Known\ radiation\ value(cGy)}$$

그림 10은 MOSFET AutoSense System에 대한 하드웨어 기능을 간략히 나타낸 그림으로 이 소프트웨어는 CF들과 각 Bias supplies (A~D)에 연결된 각각의 선량계(1~5)의 위치를 정의하여 최대 20개까지 저장할 수 있다.

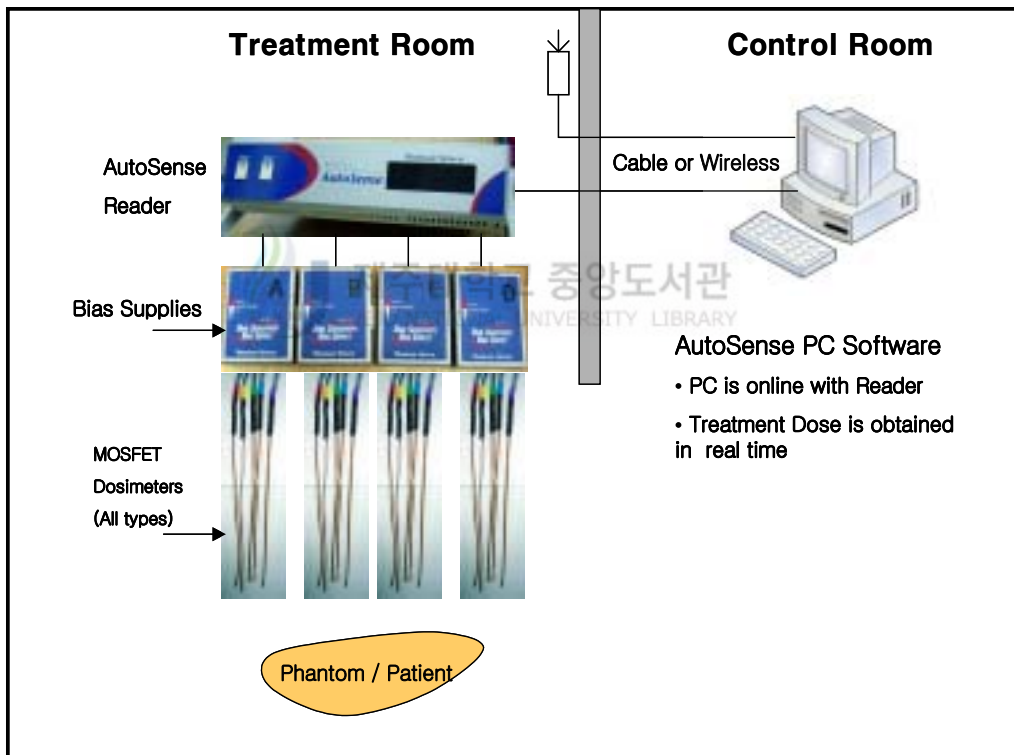


Fig 10. MOSFET AutoSense System Block Diagram

그림 11은 MOSFET 각 선량계의 교정인자이며 대부분의 선량계가 8~8.35 사이의 값을 나타내었다.

그림 12는 bolus의 사용여부에 따른 선량값을 비교한 그래프인데 차폐체가 하

나일 때 거리에 따른 선량식(그림 23)으로부터 각각 임의의 거리에서의 선량을 계산하여 얻어낸 데이터의 비를 나타낸 그림이다. 구해진 비를 통해 시료에 따라 bolus를 사용하지 못하더라도 선량을 변환할 수 있을 것으로 예상된다.

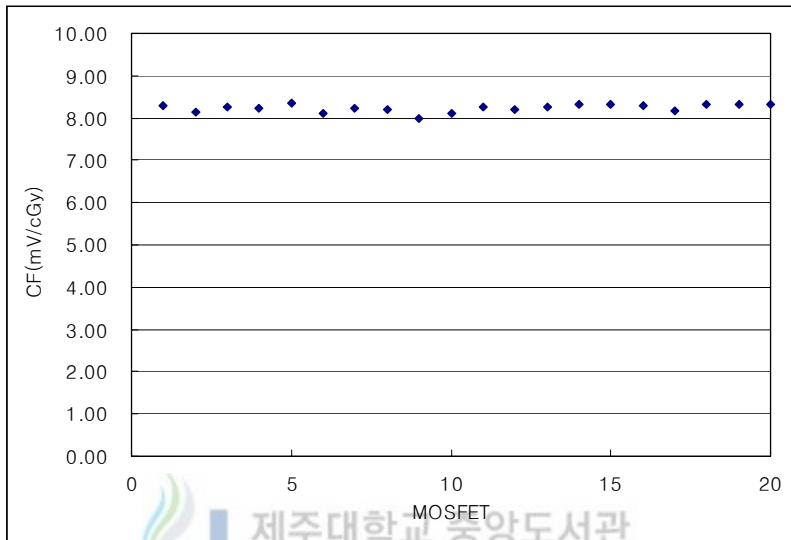


Fig 11. Calibration Factors of MOSFET dosimeters

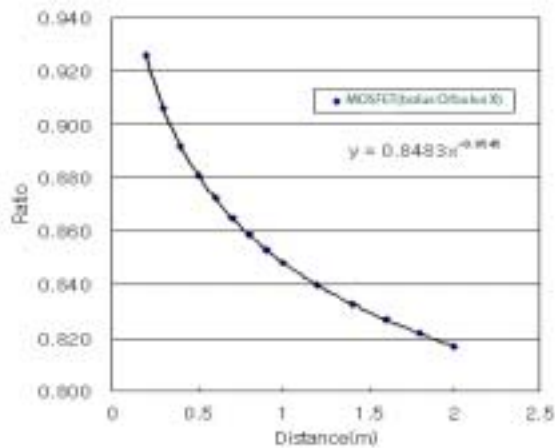


Fig 12. Comparison of dose ratio measured by MOSFET not using the bolus

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 방사선 조사시설의 구조

제주대학교 방사선응용과학연구소는 2004년 2월 ^{60}Co 선원(400 TBq (10,807 Ci))을 도입하여 선원주위 다양한 크기의 대상물을 조사할 수 있고, 모든 방향에서 방사선조사가 가능한 파노라마 형의 다목적 감마선조사시설을 구축하였다.

방사선조사시설의 구조는 조사실과 운전제어실로 구성된다. 그림 13, 14는 각각 조사시설의 평면구조와 수직단면을 보인 것으로 조사실은 직육면체 구조이고, 3200 x 4200 x 2700 mm (D x W x H)의 용적을 가지고 있으며 선원은 조사실의 중앙에서 세로방향으로 약 500 mm정도 떨어진 곳에 위치한다. 제어실에서 조사실로 통하는 출입통로는 감마선이 산란하여 빠져 나오는 것을 막기 위하여 “ㄱ”자로 꺾어진 차폐벽 구조로 되어있으며 납으로 제작된 차폐문을 두 군데 설치하였다. 조사실과 제어실 사이의 벽에는 납유리 창을 설치하여 조사실 내부의 상황과 선원의 위치를 직접 눈으로 확인할 수 있게 하였다.

선원은 차폐용 납용기에 저장하는 건식형으로, 직경이 11 mm이고 길이가 400 mm인 Co-60 선원을 저장용기에 봉입한 상태이다. 이 저장용기는 두께가 25 cm인 납차폐체로 제작된 원주형 용기이고 외부는 스테인리스로 피복하였다. 이 선원봉은 plug 형태의 선원홀더에 수용되어 있어 조사를 하지 않을 때는 선원홀더가 선원저장용기에 삽입된 상태로 있고, 조사시에는 선원 취급 케이블을 통하여 저장용기로부터 인출되어 guide tube를 따라 상하 축 방향으로 직선 이동한다. 이 때 선원 취급 케이블은 제어실에 있는 구동모터에 의해 제어된다 (그림 15).

서베이미터로 측정된 제어실 안의 백그라운드 선량률은 160 nSv/hr ~ 720 nSv/hr 이었다.

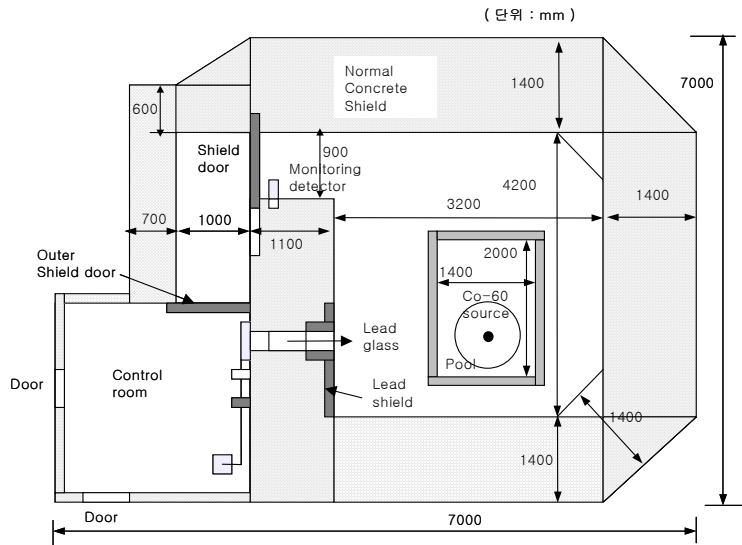


Fig 13. The plane view of the Co-60 gamma irradiation facility

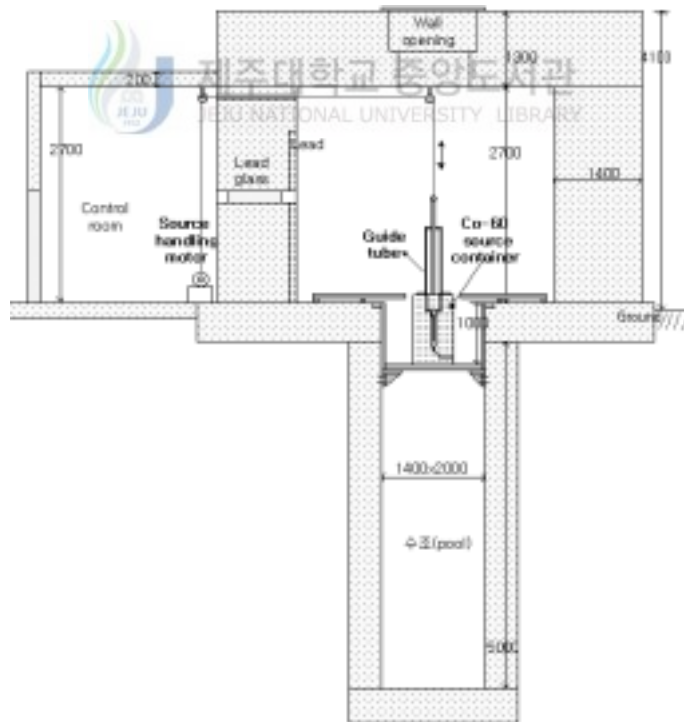


Fig 14. The vertical view of the Co-60 gamma irradiation facility



Fig 15. The running motor and control cable of the source holder

현재 조사실 내부의 선원으로부터의 최대 거리는 2.5 m 미만으로 선원과 시료 간의 이격거리만으로 선량률을 조절하는 데는 한계가 있기 때문에 낮은 선량 조사를 대비하여 선량감소를 위한 가변형 보조 차폐체를 갖추었다.

선량 조절용 보조 차폐체는 납으로 된 반 원통형 조각 2개를 조립하여 원통형으로 선원주위를 둘러쌀 수 있도록 제작되었다(그림 16, 17). 보조 차폐체는 두께가 30 mm인 납 원통으로 3개가 제작되어 원하는 선량에 따라 보조 차폐체를 1개, 2개 내지 3개를 이용하여 선량을 감소시킬 수 있다. 차폐체는 조립식으로 하여 수동으로 이동레일을 따라 이동시킬 수 있게 하였다.

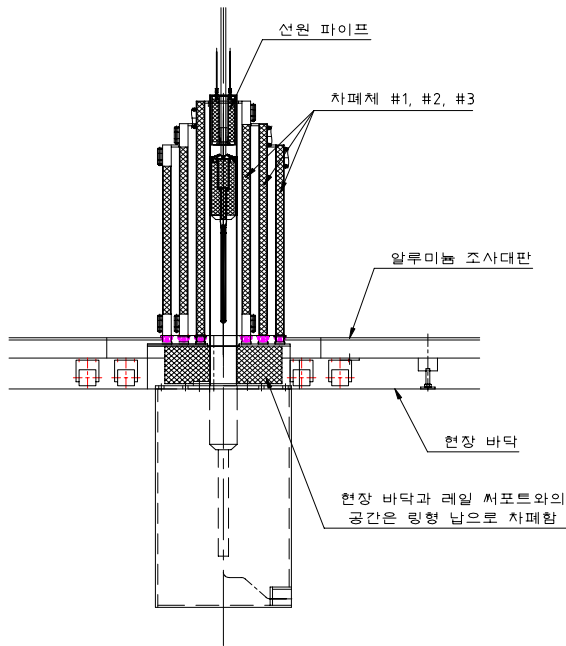


Fig 16. The schematic diagram of the irradiator with shields

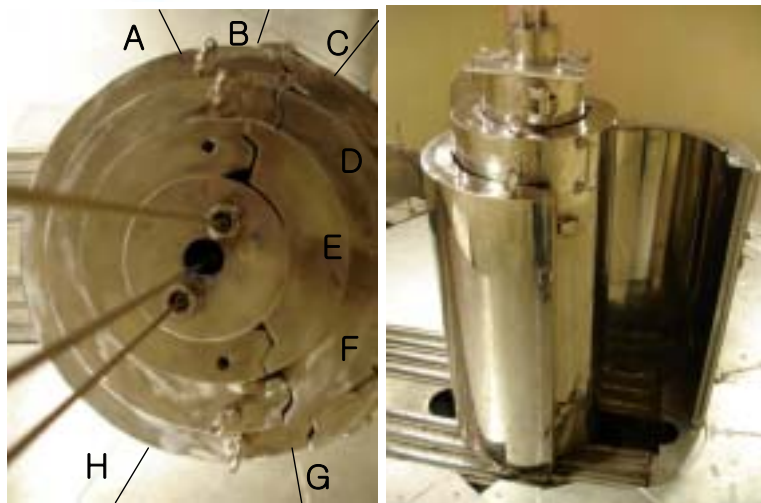


Fig 17. Configuration of the dose reducing shields: cylindrical lead shields are lined with stainless steel plates

2. 선량계의 배열

선원 ^{60}Co 의 감마상수는 $1.32 R \cdot m^2/hr/ci$ 로 400 TBq 점선원으로부터 1 m 떨어진 곳의 이론적 최대 선량률은 약 140 Gy/h로 매우 높다. 따라서 일반적인 선량계로는 측정이 곤란하여 본 연구에서는 흡수선량 측정을 위하여 고선량 측정에 적합한 자체 제조한 화학선량계(FeSO_4) 용액과 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자, Cardinal Health사의 Farmer형 전리함 (Model 30013-1264) 및 Thomson Neilsen사의 MOSFET (Model TN-1002RD)을 사용하였다.

길이 40 cm이고 직경이 약 1 cm인 봉형 선원으로부터 이격 거리에 따른 선량변화를 측정하기 위하여 그림 18과 같이 선원을 중심으로 동일한 간격의 중심원을 조사대에 표시하고 각 지점에서 선원의 중심 높이에 해당하는 위치에 Fricke 선량계용 vial 3개, TLD 소자 5개, 전리함(반복 3회 측정) 및 MOSFET (반복 3회 측정)을 배치한 후 각각 그 값을 측정하여 평균하였다. 이 과정은 선량조절용 차폐체를 1겹, 2겹, 3겹 설치한 상태에서도 반복하여 차폐체 사용에 따른 선량 분포를 측정하였다.

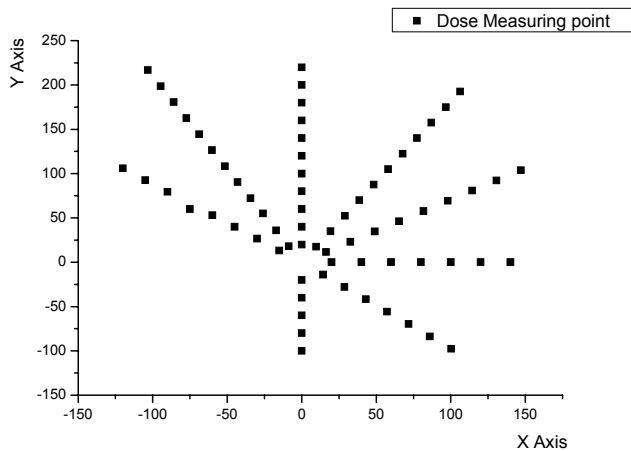


Fig 18. The dose measuring points on the horizontal plane in the irradiation chamber

그림 19는 선원과 선량계의 선량측정 위치를 보여주고 있는데 조사시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 350 mm정도 상승하게 되어 그 중심에서 선량을 측정할 경우에는 250 mm 높이의 조사대위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하였다.

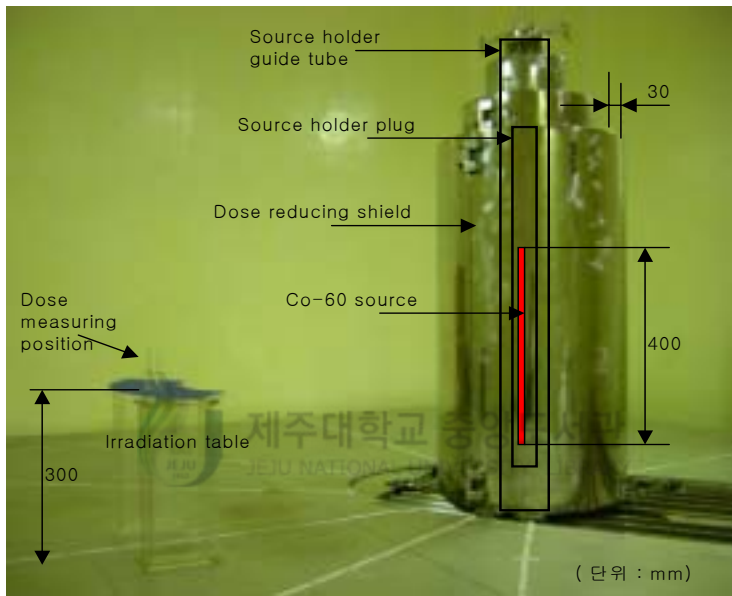


Fig 19. The vertical position of dose measuring point and source

3. 방사선 조사와 선량 측정

1) 화학선량계

제조된 FeSO_4 용액은 vial에 넣어서 방사선에 조사를 하게 되는데 vial의 불순물에 의한 오염을 방지하기 위하여 사용시 입구를 불로 구웠다가 측정시 부러뜨려 사용하는 일회용 앰플(유리, 5 ml)을 사용하였다. 용액을 채운 vial은 조사방향에 수직으로 세우고 beam의 중심에 오도록 위치시키고 방사선을 조사하였다.

Vial은 조사 후 측정할 때까지 빛이 차단되도록 하고 수직으로 세워두었다.

흡광도 측정은 UV-vis spectrometer (SECOMAM Co, UVIKON XL)를 이용하여 흡광도 측정용 3 ml의 Quartz cuvette에 우선 control 용액(방사선에 조사되지 않은 기준 용액 의미)을 넣고 기준 광밀도 값을 결정하고 조사된 용액의 광밀도(Optical density)를 측정하여 흡수선량식에 대입한 후 선량을 구하였다.

2) KCT-300 소자

아크릴 소재의 케이스에 5개의 KCT-300 소자를 담고 Co-60 선원으로 조사시킨 후 TLD 판독기를 통해 발생된 열형광량 값을 얻었다. 그 열형광량을 그림 2, 3의 그래프에 대입하여 선량을 구하였다.

3) 전리함

Thimble 타입의 선량계에 아크릴 소재의 캡을 씌운 후 원하는 지점의 선원 중심에 세워두고 제어실에서 전위계의 전하량을 측정하여 전하량과 전리공기의 기압과 온도를 보정하여 조사 선량식에 대입하여 선량값을 얻었다.

4) MOSFET

MOSFET은 원하는 측정지점의 선량을 20개를 한꺼번에 측정할 수 있는 장점이 있어 선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원 위의 8지점 각각의 선량을 측정하였다. 20,000 mV의 수명이 있는 점을 고려하여 차폐체가 하나 있을 때 거리에 따른 선량을 비교하였다. 그리고 쥐의 국부 조사와 well plate의 선량 측정(그림 15, 16)에도 사용하여 한꺼번에 각각의 지점에서의 선량을 구하였다.

MOSFET의 경우 조사시 방사선이 흡수됨에 따라 출력전류가 증가하게 되는데 제어실의 AutoSense System을 통해 조사 후 측정되는 전압(mV)에 각 Bias supplies (A~D)에 연결된 선량계 각각의 CF로 나누어 선량을 구하였다.

4. 실험 방법

1) 거리에 따른 선량비교

거리에 따라서 차폐체가 있을 때와 없을 때의 선량을 평가하기 위하여 차폐체 별 거리에 따른 선량을 비교하였는데 각각의 선량계를 이용하여 20 cm 간격으로 측정을 하였으며, 조사시간은 1시간으로 하였다.

2) 전리함에 대한 상대 선량비

실험 결과를 통해 방사선 조사실의 선량평가를 위해서 TLD와 화학선량계를 사용하는 것보다는 전리함을 사용하는 것이 유리하다고 판단되었다. 따라서 전리함의 선량 측정을 가장 정확하다고 볼 때 전리함에 대한 각 선량계의 선량비를 계산하였다.

3) 선량 분포 지도 작성

조사실 내 특성을 고려한 전체적인 선량분포를 파악하기 위해 조사실 내부를 x, y축으로 잡고 z축을 선량으로 하는 3차원의 그래프와 실험을 통해 측정된 선량값을 기준으로 하여 각 지점들 사이의 선량값까지 함께 고려하여 같은 선량을 받는 지점들을 연결한 등고선 형태의 선량 분포 지도를 작성하였다.

4) 시간에 따른 선량률의 변화

전리함 선량률을 기준으로 거리와 시간(^{60}CO 의 반감기 고려)에 따른 선량률의 변화식을 나타내었다. 이를 통해 선량 평가일을 기준으로 방사선 조사실의 조사 가능한 선량률의 범위를 구하였다.

5) 공간 방사선량 분포의 균일성 (등방성 비교)

선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 벽과의 거리에 따른 산란이나 차폐체 자체의 불균일성 등으로 인해 모든 선량값을 균일하게 얻을 수는 없다.

따라서 조사실 내 바닥에서 55 cm 높이의 평면을 각각 8지점으로 나누어 선원으로로부터 1 m 거리에서 1시간 조사하였을 때의 선량 분포를 조사하였다. 또한 이 때 같은 조건에서 차폐체를 사용하지 않은 경우와 1, 2 및 3점을 사용했을 경우를 구분하여 측정하였다.

6) 시료 위치에 따른 선량비교

(1) 동물시료의 경우

시료에 방사선을 조사시킬 때 각 부위별로 선원과의 거리가 다르며 또한 시료에 의한 자체 차폐가 발생하기 때문에 이러한 영향을 분석하기 위하여 부위별에 따른 선량을 조사하기 위하여 쥐의 머리, 등 및 배 부위를 나누어 각 위치별 MOSFET 선량계를 부착하여 선량을 측정하였다.

(2) 세포시료의 경우

세포시료는 방사선 조사시 96-well plate 또는 50이나 15 ml 용량의 test tube를 많이 사용하는데 각 용기의 위치나 시료의 용량에 따른 선량의 차이가 발생하는지를 조사하였다. 측정은 96-well plate의 경우는 well plate 중심을 기준으로 하여 400초간 조사시켰을 때의 선량을, test tube에 시료를 조사시킬 때는 시료 10 ml를 똑같이 넣은 상태에서 400초간 조사시켜 선량값을 비교검토하였다.

(3) 수직 높이에 따른 선량 측정

조사실의 선원은 구동시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 350 mm정도 상승하게 되어 250 mm 높이의 조사대위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하여 선원의 중심에서 선량을 측정하였다. 이 선원 중심을 기준으로 조사용 선량계 받침대의 높이를 변화시키면서 높이에 따른 선량을 측정하였다.

IV. 측정 결과 및 분석

1. 거리에 따른 선량 분포

그림 20~24는 각각 선량조절용 차폐체를 사용하지 않은 경우, 차폐체를 각각 한 겹, 두 겹, 세 겹 사용한 경우에 대한 선원과 선량계간의 거리에 따른 선량의 변화를 나타낸 그림이다. 각 경우 측정된 데이터를 최소자승법으로 연결하는 2차 함수의 추세곡선으로 나타내었다. 거리(x)와 선량(y)간의 함수는 선원의 형태가 점선원이 아니기 때문에 정확하게 거리의 역자승의 법칙은 성립되지 않지만 비교적 거리의 제곱에 반비례하는 형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

차폐체를 사용하지 않은 경우에서 보듯이 화학선량계는 선량이 약 600 Gy 이상에서는 포화상태가 되어 측정이 불가능하였으며 열형광선량계에서는 약 1,200 Gy까지는 측정이 가능하였으나 그 이상에서는 부정확한 값을 보였다. 그리고 차폐체를 세 겹을 사용했을 때 저선량 영역에서 각각의 선량계가 큰 오차를 보였으며, 화학선량계의 경우 1 Gy 미만에서도 측정이 불가능하였다.

MOSFET의 경우 전리함과 비슷한 추세곡선을 나타내었으나, 대체적으로 전리함보다 높은 값을 보였다.

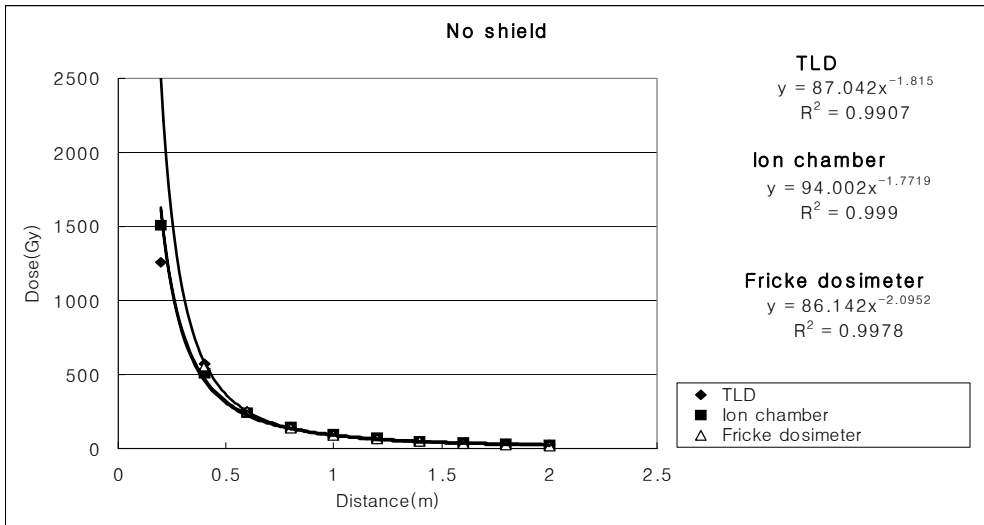


Fig 20. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (no shield)

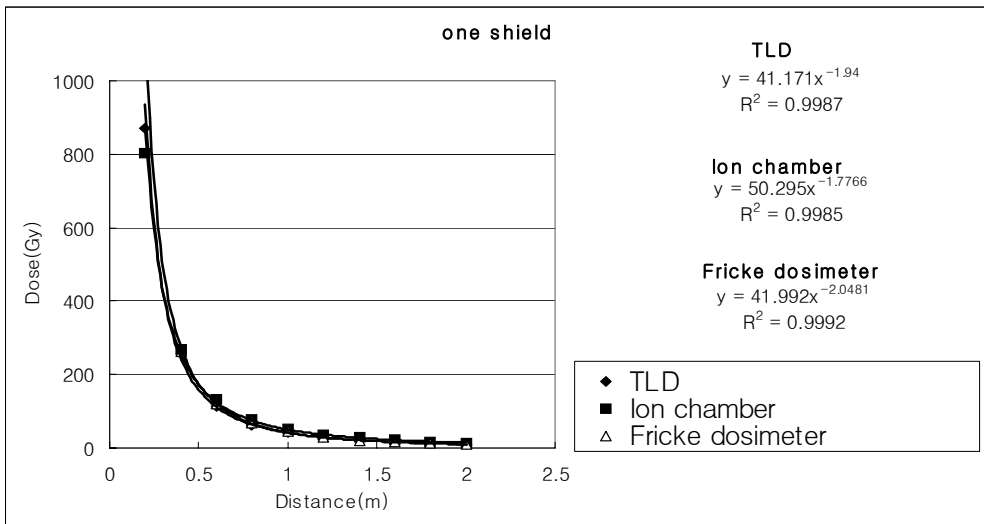


Fig 21. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (one shield)

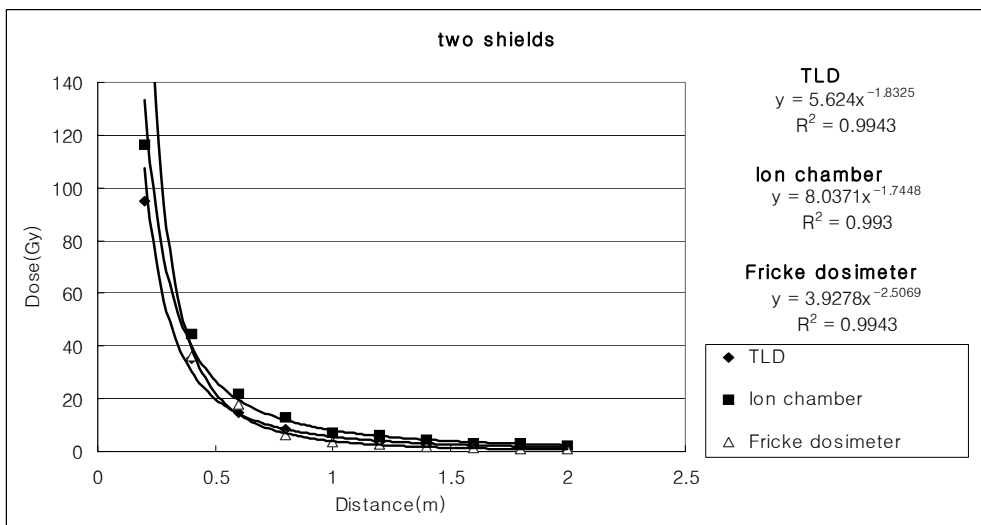


Fig 22. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (two shields)

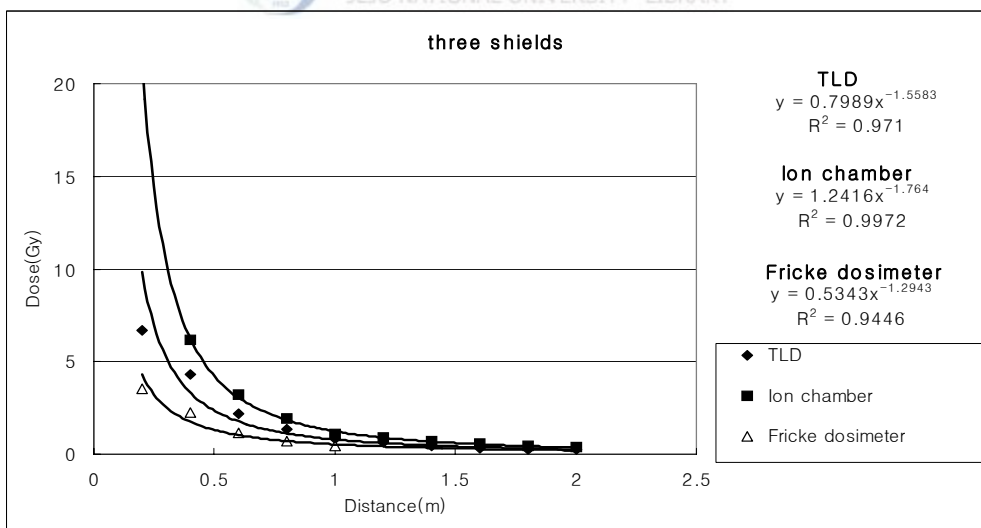


Fig 23. Dose distributions measured as a function of the distance from the source with different dosimeters (three shields)

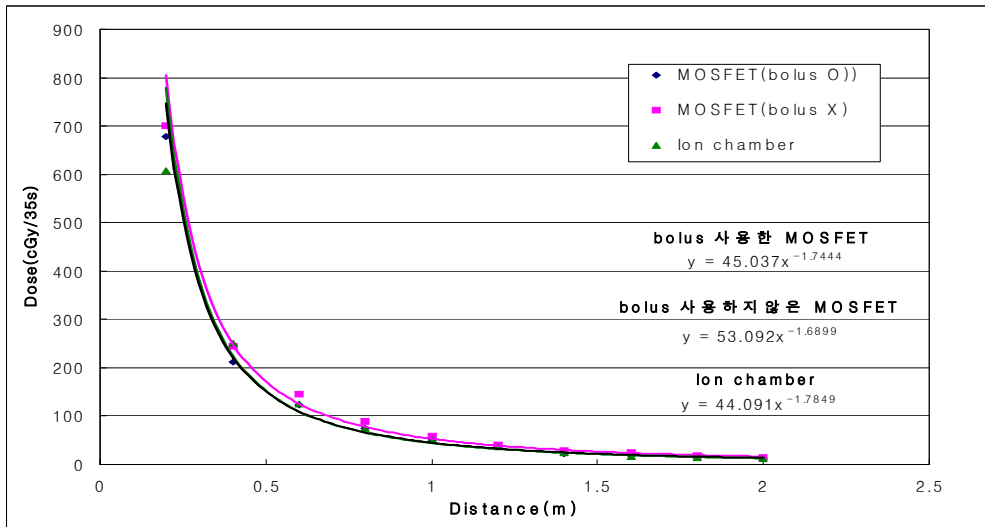


Fig 24. Comparison of dose distributions measured with the ionization chamber and MOSFET dosimeters (one shield)



2. 전리함에 대한 상대 선량비

그림 25~27은 선량 측정값을 오름차순 정리하여 전리함에 대한 각 선량계의 선량비를 계산한 것이다. 전리함의 선량 측정값을 가장 정확하다고 볼 때 열형광선량계의 경우 150~250 Gy 영역에서, 화학선량계의 경우 150~350 Gy 범위에서 오차가 ± 2~5 % 이내로 비교적 정확하게 나타났으며, 전반적으로 열형광선량계와 화학선량계는 실제보다 낮은 측정값을 나타내었으며 선량 조절용 차폐체를 두 겹, 세 겹 이용하여 저선량 영역으로 갈수록 상대적인 편차가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 저선량 영역에서는 화학선량계가 열형광선량계보다 더 큰 오차를 보였다. MOSFET의 경우 전반적으로 선량이 전리함보다 높은 값을 보였다.

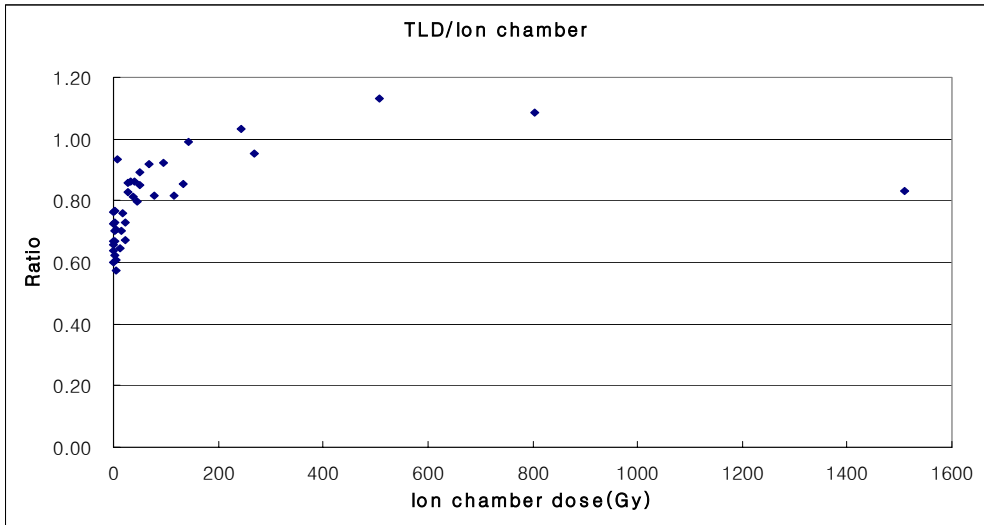


Fig 25. Ratio of the absorbed dose measured by TLD's with respect to ion chamber.

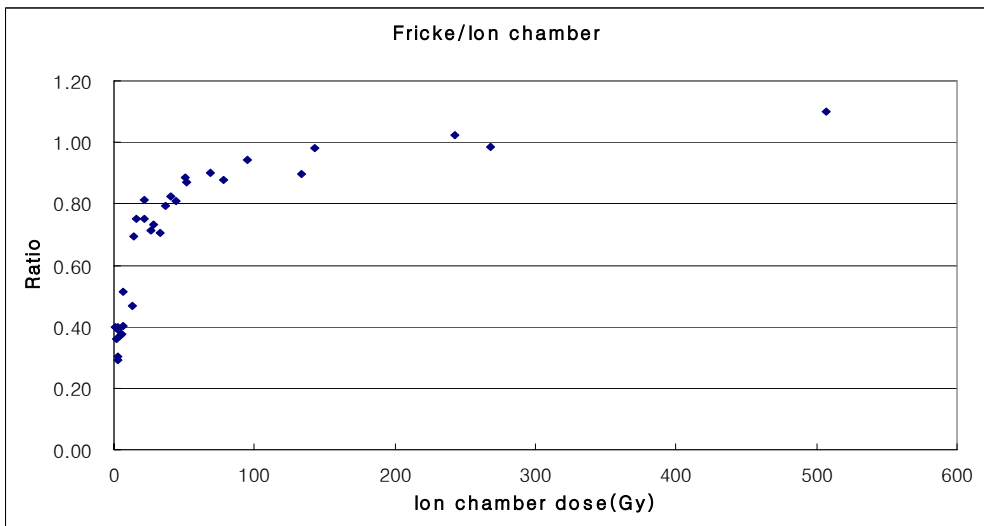


Fig 26. Ratio of the absorbed dose measured by Fricke dosimeter with respect to ion chamber

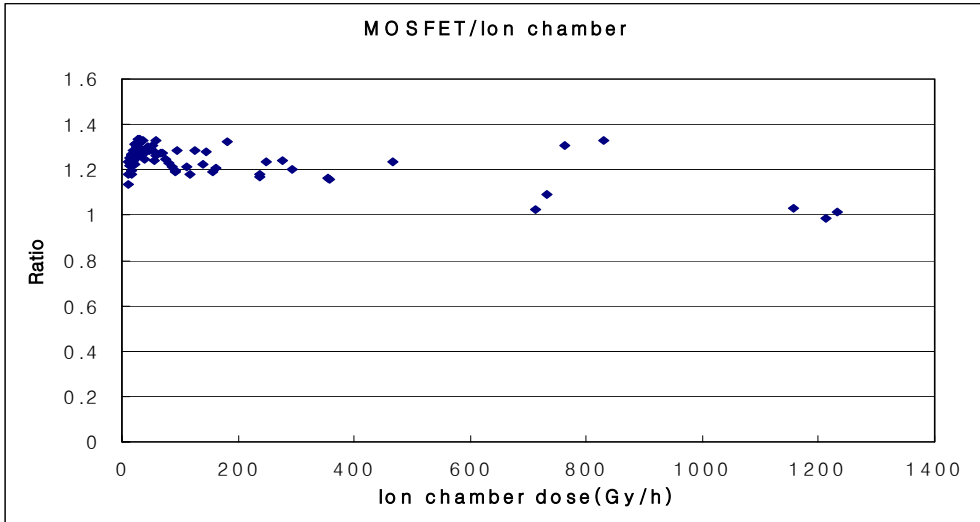


Fig 27. Ratio of the absorbed dose measured by MOSFET dosimeters with respect to ion chamber



3. 선량분포지도 작성

그림 28은 조사실 내부를 X축, Y축으로 잡고, Z축을 선량으로 두어 그린 3차원 선량 분포 그림이다. 선원 중심에서 선량이 가장 높고, 선원에서 멀어질수록 선량이 낮아지는 형태를 보이고 있다.

선량분포지도를 그릴 때 SURFER 7.0 이라는 등고선을 그리는 프로그램을 이용하였다. 이 때 실험을 통해 측정된 선량값들을 입력하여 이를 기준으로 하여 각 지점들 사이의 선량값들도 함께 고려하여 같은 선량을 받는 지점들을 연결하였다. 최적의 과정을 통해 얻어낸 선량 분포 지도는 그림 29~32와 같다.

지도의 왼쪽 아래 부분은 차폐체의 레일이 있는 곳이라 선량을 측정할 수가 없어서 찌그러진 원의 형태를 보이고 있다. 그리고 중심에 선원과 차폐체의 위치를 표시해보았는데 차폐체를 사용하지 않았을 때 그림 29에서 보듯이 동심원 위

치에 비슷한 선량값들을 가졌으나, 차폐체를 사용했을 때는 그림 29~32 모두 왼쪽으로 약 30° 정도 기울어진 긴 타원형의 형태를 보였다. 이것은 차폐체 조립시 틈새로 빠져나오는 선량의 영향에 따른 것으로 틈이 표시된 위치에서 선량값이 높게 나왔음을 발견하였다.

이 선량분포지도를 통해 차폐체별 거리에 따른 선량 분포 범위를 알 수 있었다.

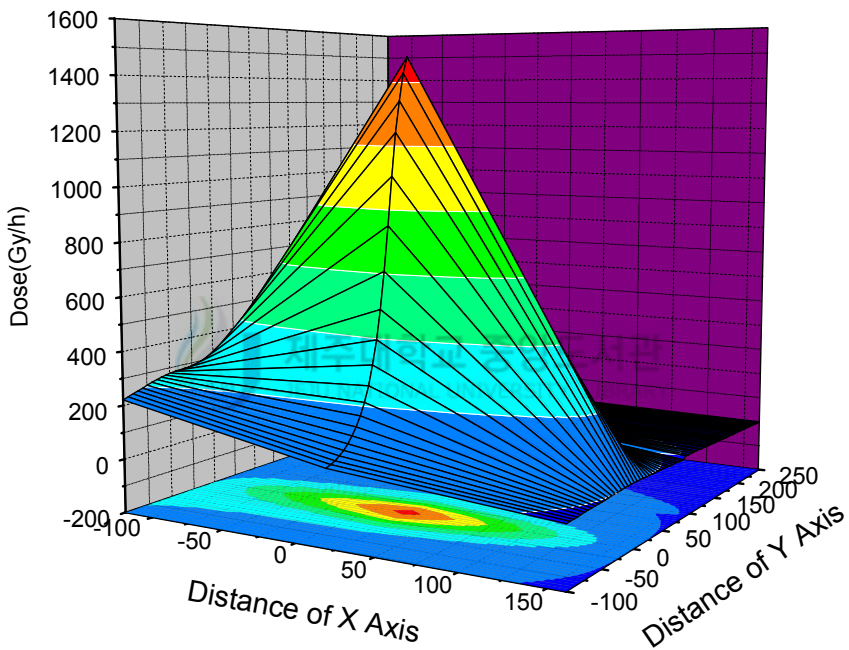


Fig 28. Three-dimensional view of dose rate distribution

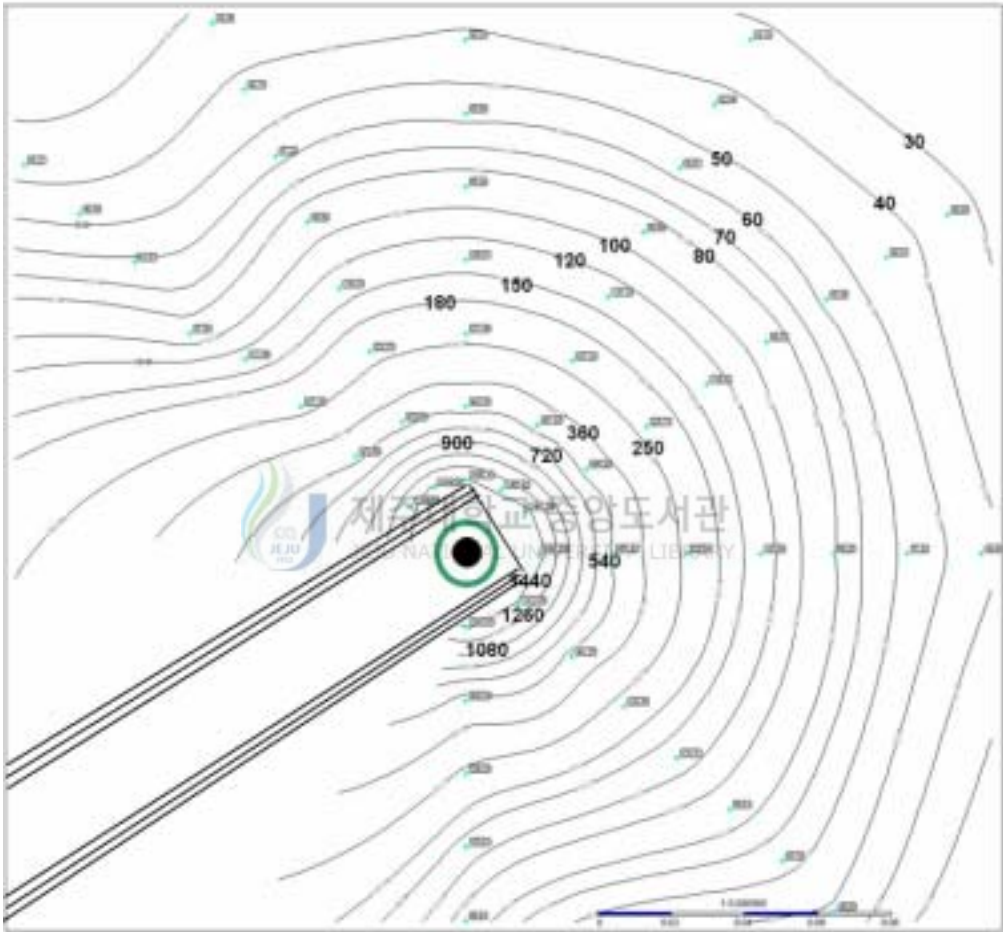


Fig 29. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with no shield (Gy/hr)
(2005.10.26 기준)

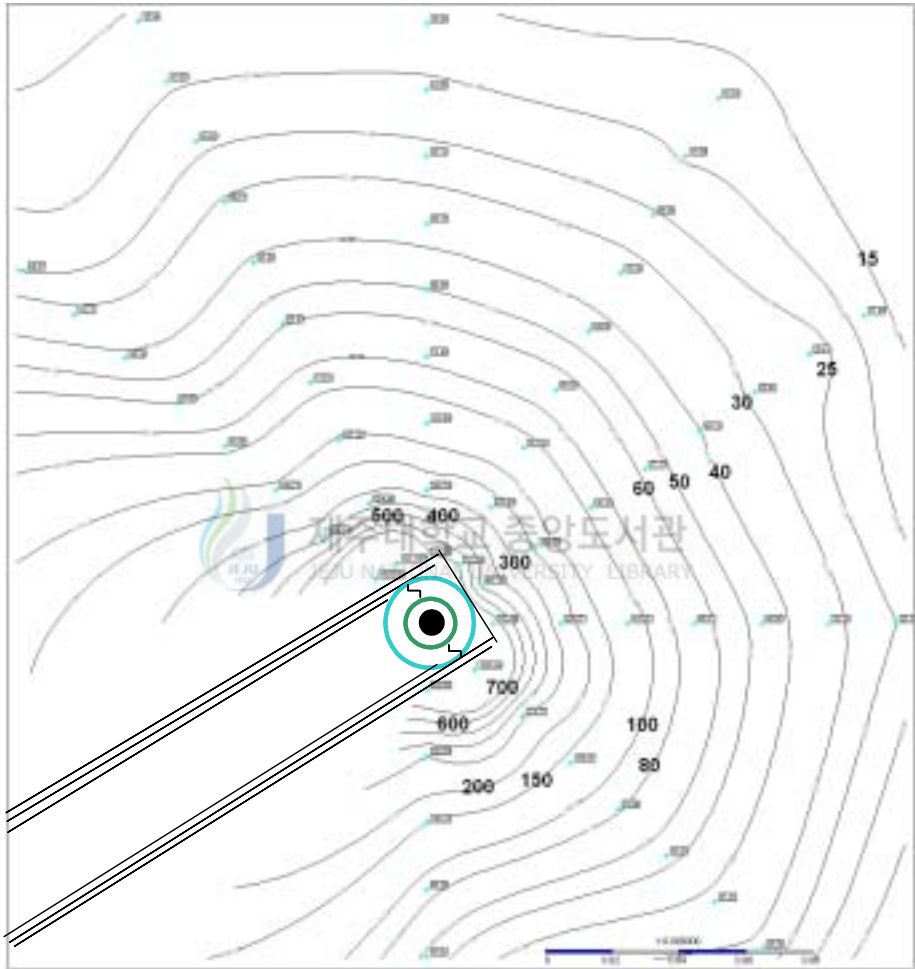


Fig 30. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with one shield (Gy/hr)
(2005.10.26 기준)

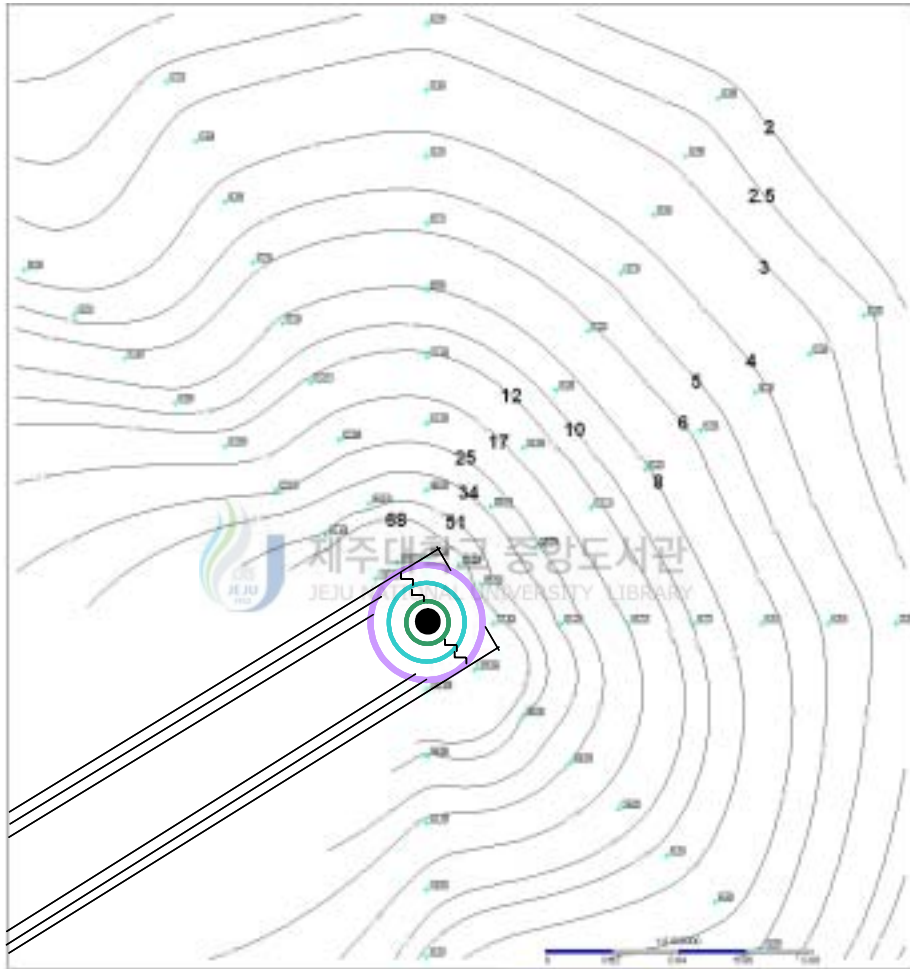


Fig 31. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with two shields(Gy/hr)
(2005.10.26 기준)

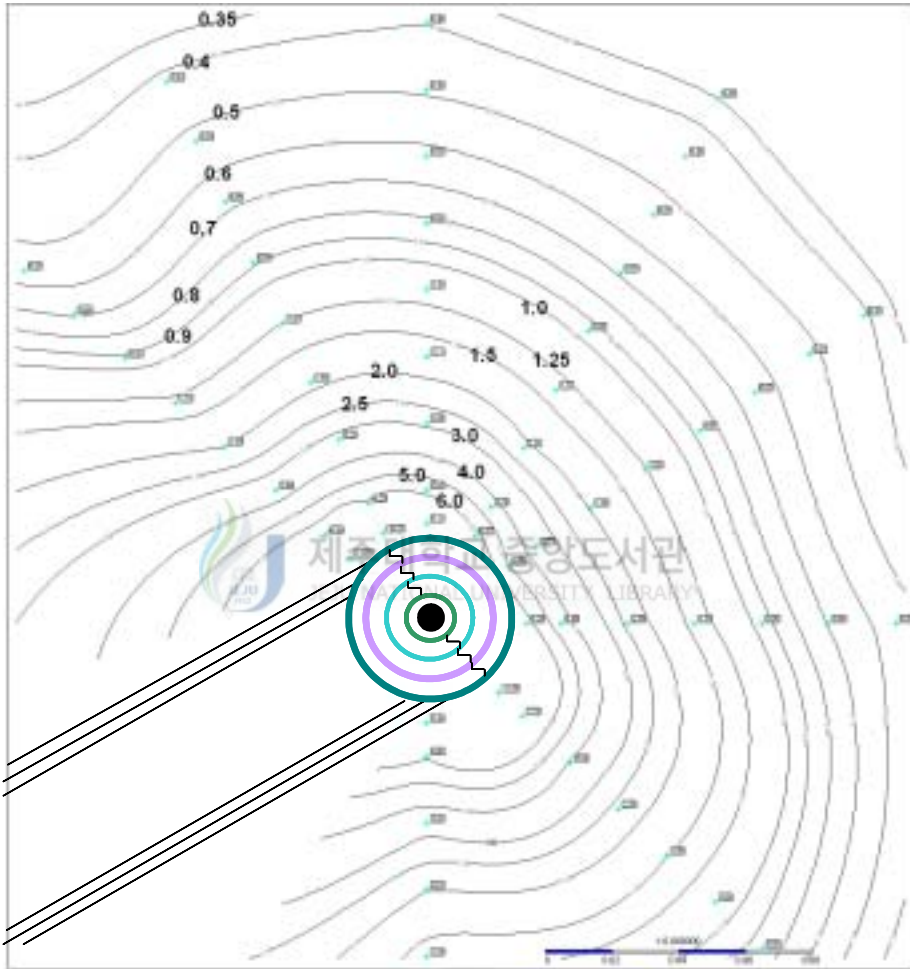


Fig 32. Horizontal isodose curves in the irradiation chamber with three shields (Gy/hr)
(2005.10.26 기준)

4. 시간에 따른 선량률의 변화

실험 결과를 통해 방사선조사실의 선량평가를 위해서 TLD와 화학선량계를 사용하는 것보다는 전리함을 사용하는 것이 유리하다고 판단되었다.

전리함의 거리에 따른 선량률 감소 추세곡선의 경우 차폐체에 따른 각 식의 지수가 -1.7 까지는 같은 점으로 미루어 정확한 것으로 판단된다. 따라서 전리함 선량률을 기준으로 거리와 시간에 따른 선량률의 변화는 다음과 같이 표시된다.

$$\text{차폐체가 없는 경우 : } D=94\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.772} (\text{Gy/h})$$

$$\text{차폐체를 1겹 사용한 경우: } D=50.3\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.777} (\text{Gy/h})$$

$$\text{차폐체를 2겹 사용한 경우: } D=8\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.745} (\text{Gy/h})$$

$$\text{차폐체를 3겹 사용한 경우: } D=1.24\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.764} (\text{Gy/h})$$

위에서 $t-t_0$ 는 선량평가를 실시한 기점 ($t_0 = 2005$ 년 3월 30일)부터 현재까지 경과한 일수이다. 선량 평가일을 기준으로 방사선 조사실의 조사 가능한 선량률의 범위는 표 2에 나타났다.

선량률의 최대값은 차폐체를 사용하지 않은 경우 선원 중심에서 20 cm 떨어진 곳에서 1,628 Gy/h이고, 최소값은 차폐체를 3 겹 사용한 경우 2 m 떨어진 곳에서 0.37 Gy/h이다. 이 선량률 범위에서는 차폐체 사용과 거리 조절을 통하여 선량률 조절이 가능하다.

Table 2. Dose rate range of the irradiation facility

선량 조절용 차폐체 사용	선량률 최대값(Gy/h) (선원으로부터 20cm 위치)	선량률 최소값(Gy/h) (선원으로부터 2m 위치)
차폐체 사용하지 않은 경우	1,628	27.5
차폐체 1겹 사용한 경우	878.3	14.6
차폐체 2겹 사용한 경우	132.7	2.3
차폐체 3겹 사용한 경우	21.2	0.37

5. 공간 방사선량 분포의 불균일성 (등방성 비교)

선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 벽과의 거리에 따른 산란이나 차폐체 자체의 불균일성 등으로 인해 모든 선량값을 균일하게 얻을 수는 없다.

그림 33은 조사실 내 바닥에서 55 cm 높이의 평면을 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 225°, 270°의 8 지점(각각 A-H로 정한다)으로 나누어 선원으로부터의 1 m 거리에서 1시간 조사하였을 때 각각의 선량을 비교하였다. 이 때 차폐체에 따라서도 측정하였는데 차폐체의 조립부분의 틈에서 빠져나온 선량의 영향으로 틈이 있는 부분인 A, B와 G, H 위치에서 더 높은 선량률을 보였다(그림 18).

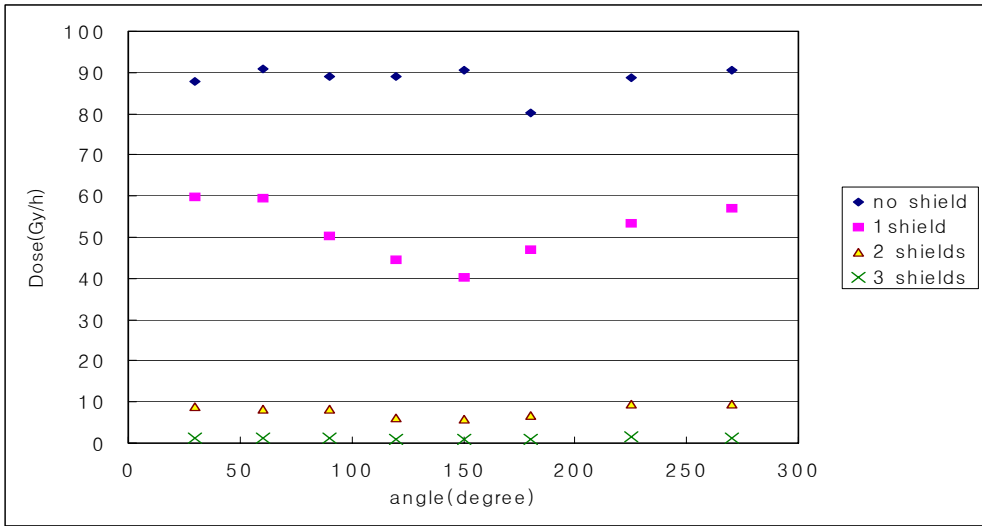


Fig 33. Angular anisotropy of dose rate distribution



6. 시료 용기에 따른 선량비교

1) 동물시료

선원으로부터 1 m 떨어진 지점에서 400 초간 조사했을 때, 10.85 Gy의 선량을 얻을 수 있다. 그림 34에서 보는 바와 같이 몸길이 5 cm, 높이 2.5 cm의 쥐의 머리, 등, 배의 각각의 선량을 측정하였을 때의 선량을 비교하였는데 표 3에서 보는 것처럼 오차가 0.2 % 이내로 거의 차이를 보이지 않았다.



Fig 34. Dosimetry for the mouse irradiation

Table 3. Dose rate of dosimetry for mouse irradiation

	Dose(Gy/400s)	Average(Gy/400s)	STDEV	RSD(%)
point 1-Head	10.83	10.85	0.02	0.22
point 2-back	10.87			
point 3-abdomen	10.86			

2) 세포시료의 경우

그림 35의 왼쪽과 같은 12.5 cm x 8.3 cm 크기의 well plate의 경우, 5번 지점(선원으로부터 1 m 거리)을 중심으로 조사시켰을 때 선량 범위는 9.44~11.47 Gy로, 상대적 선량비는 표 4에서 보는 것처럼 약 1~13% 까지의 분포를 보였다.

그리고 그림 35의 오른쪽과 같은 50 ml와 15 ml의 test tube에 각각 10 ml의 세포시료를 취했을 때 선원으로부터 1 m 거리에서 400 초간 조사하였을 때 각 지점에서의 선량값을 비교해 보면 표 5와 같다. 15 ml 용기의 선량에 비해 50 ml의 용기의 선량이 더 큰 오차를 보였다.

위 실험을 통해 시료나 시료용기의 높이차보다 너비의 차가 선량에 더 영향을 미친다는 것을 알았다(B.L. Gupta 등 2000).

Table 4. Relative dose-rate variation along the size of well dish

1.05	1.06	1.04
0.99	1.0	0.92
0.94	0.95	0.87

Table 5. Comparison of the dose rate at different positions of the test tubes containing the sample

	Dose(Gy/400s)	Average(Gy/400s)	STDEV	RSD(%)
50ml 앞벽-1.7cm	11.21	10.76	0.41	3.83
50ml 뒷벽+1.7cm	10.41			
50ml 높이+1.8cm	10.66			
15ml 앞벽-1.0cm	10.86	10.62	0.20	1.91
15ml 뒷벽+1.0cm	10.51			
15ml 높이+6.5cm	10.50			

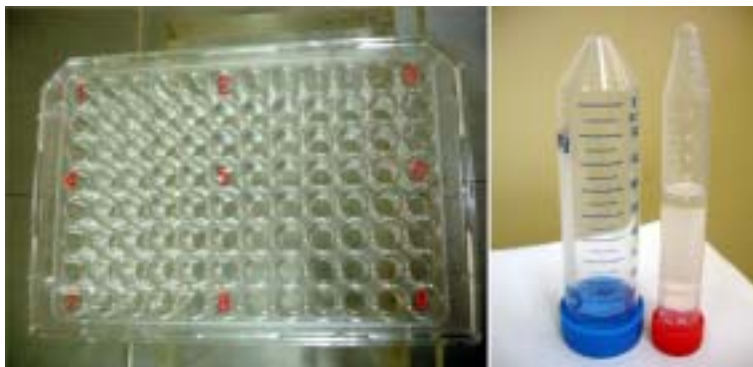


Fig 35. Measured points at well plate used for holding test tubes (Left) and test tubes of different volumes (Right).

3) 선원의 높이에 따른 선량

조사시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 350 mm 정도 상승하게 되어 250 mm 높이의 조사대위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하여 선원의 중심에서 선량을 측정하고자 한다.

선원의 높이에 따른 선량비교 측정 결과 조사대의 높이를 150~500 mm로 변화시켰을 때, 그림 36과 같이 300 mm 높이에서 가장 높게 나왔다.

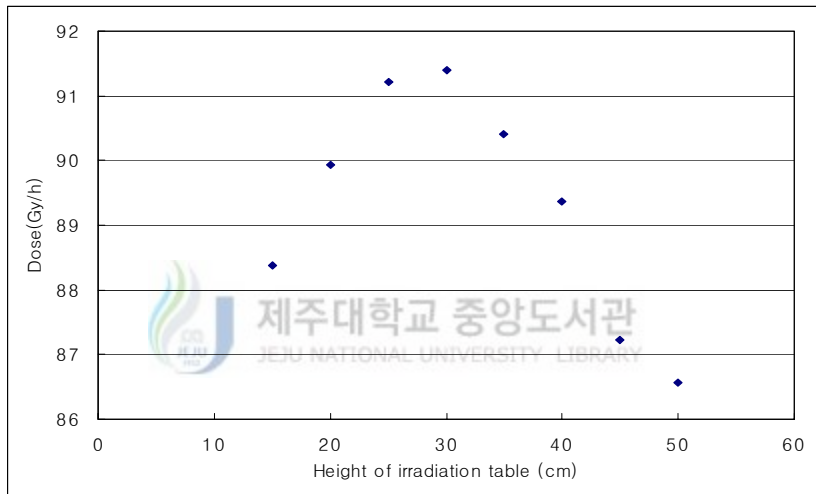


Fig 36. Dose rate distribution along the height of the source rod

V. 결 론

본 연구는 2004년 2월 도입된 방사능이 400 TBq인 제주대학교 방사선응용과학연구소의 ^{60}Co 감마선 조사실의 흡수선량분포를 측정하는 데 목적을 두었다. 흡수선량 측정을 위하여 자체 제조한 화학선량계(FeSO_4)용액과 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자, Farmer형 전리함 및 MOSFET 선량계를 사용하였다.

조사시간에 따른 선량 직선성을 측정한 결과 전리함이 가장 정확하였으며 화학선량계의 경우 선량이 600 Gy 이상에서는 포화상태에 달하여 측정이 불가능하였으며, 선량이 1 Gy 이하에서도 측정이 불가능하였다. 전반적으로 TLD와 화학선량계는 150~300 Gy 영역에서 오차가 5 % 이내로 정확한 선량값을 보였으나, 차폐체를 이용하여 저선량 영역으로 갈수록 상대적인 편차가 증가함을 알 수 있었다.

일반적으로 전리함의 선량측정을 가장 정확한 것으로 간주할 수 있으므로 두 선량계 모두 실제보다 낮은 값을 보였고, MOSFET 선량계 또한 전반적으로 전리함보다 높은 값을 보였다.

따라서 전리함 선량률을 기준으로 하고, ^{60}Co 의 반감기(5.26년)를 고려하여 거리와 시간에 따른 선량률의 변화식을 구하였다. 이 식에 따라 선량 평가일을 기준으로 하여 차폐체의 사용과 거리의 조절을 통해 조사 가능한 선량률의 범위는 0.37~1,628 Gy/hr 임을 알 수 있었다.

그리고 선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 조립식 차폐체 자체의 불균일성으로 인해 틈이 나 있는 쪽 선량값이 높게 나타나서 같은 동심원 위치의 모든 선량값을 균일하게 얻을 수 없었다.

이렇게 얻어진 측정값을 통해 작성되어진 선량분포지도로 바탕으로 하여 제주대학교 방사선응용과학연구소의 조사시설이 여러 연구분야에 더 많이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

A. Dodbiba, I. Stamo and A. Kraja, August 25-29, 2003, "Irradiation of wheat and ornamental plant seeds in the GU-3 gamma irradiator, BPU-5", Fifth General Conference of the Balkan Physical Union, Vrnjačka Banja, Serbia and Montegro.

A. Olszanski, N. V. Klassen, C. K. Ross and K. R. Shortt, 2002, "The IRS Fricke Dosimetry System", PIRS-0815, *Ionizing Radiation Standards Institute for National Measurement Standards National Research Council*, Ottawa, Ontario. 61 pp.

ARPANSA by D Butler, 2005, Specifying the polarity of the polarizing voltage of ionization chamber, IRS section, Yallambie, 1st edition.

B.L. Gupta, R.M. Bhat, G.R. Narayan, S.R. Milekani, 2000, "Chemical dosimetry techniques for various applications under different geometries", *Radiation Physics and Chemistry* 59, pp. 18-90

Brian Wang, X. Geoge Xu and Chan-Hyeong Kim, 2005, "Monte carlo study of MOSFET dosimeter characteristics : dose dependence on photon energy, direction and dosimeter composition", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol.113, No.1, pp. 40-46

C.C.Yui, S.S.McClure, B.G.Rax, J.M.Lehman, T.D.Minto, M.D.Wiedeman, 2002, "Total dose bias dependency and ELDRS effects in bipolar linear devices", *2002 IEEE Radiation Effects Data Workshop Record*, pp. 131-137

Frank H. Attix, 1986, Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, pp.418-425, John Wiley and Sons, New York

Gavin Cranmer-Sargison, Wayne Beckham, Mike Roney, 2004 "PTW-Freiburg ionization chamber and electrometer characterization", Canadian undergraduate physics journal. Vol.2, issue.2

Hugo Fricke and Edwin J. Hart, 1996, *Chemical Dosimetry in Radiation Dosimetry* edited by F. H. Attix and W. C. Roesch, 167-239 (Academic Press, New York)

J. Farkas, "Studies on Low-Dose Irradiation of Prepackaged Prepared Vegetables". IAEA, Progress Rep. Time period covered: 1 April 1997 - 1 February 1998.



Jeong Sun Yang, Doo Young Kim, Jang Lyul Kim, Jung Il Lee, Bong Whan Kim, Si Young Chang, Jae Woo Park, 2002, "Development of Phosphorous-compound $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (KCT-300) TL Pellets", *J. Korean Nucl. Soc.*, Vol. 34, No. 2.

Jie-Young Song, et al, 2003, "Rasioprotective Effects of Ginshan, an Immunomodulator", *Radiation Research* 159, pp.768-774.

K. Farah, T. Jerbi, F.Kuntz, A. Kovacs, 2005, " Dose measurements for characterization of a semi-industrial cobalt-60 gamma-irradiation facility"

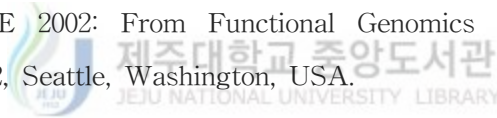
고성진, 김승국, 노경석, 박명환, 안봉선, 2001, 방사선계측학, 청구문화사, pp.79-97, 211-216

Meixu Gao, Nov. 24, 2003, "Status of food irradiation in China", Proceedings of Korea-China Joint Symposium on Nuclear Agriculture and Life Science, Applied Radioisotope Institute of Cheju National University.

R. Arora, et. al, 2003, "Radioprotection by plant products: present status and future prospects "Phytotherapy Research 19, pp.1-22.

T.D Naquin, R.C. Bhatt, G.R. Kahles, and D.M. Mckown, 2001, "A Low Gamma Dose Rate Cobalt-60 Facility", Radiation Protection Management, Vol.18. No.2. pp. 31-36

W.Y.Park et. al, 2002, "Gene Expression Profiling on Radiation Responses" TRANSCRIPTOME 2002: From Functional Genomics to Systems Biology, March 10-13, 2002, Seattle, Washington, USA.



감사의 글

학위 논문 마지막 페이지를 펴놓고 보니 더 잘할 수 있었는데 많이 아쉽기도 하고 에너지공학과에 입학하여 보낸 6년간의 학교생활이 떠올라 슬며시 웃음도 나옵니다. 먼저 부족한 저를 세심한 조언과 배려를 아끼지 않으시며 여기까지 이끌어주신 박재우 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 와중에도 논문에 대해 조언해주시고 심사해 주신 정범진 교수님과 전자공학과 이광만 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 김 신 교수님, 천원기 교수님, 김남진 교수님께도 학부때부터 지금까지 그간의 많은 가르침과 조언에 감사드립니다.

실험을 하면서 항상 가까이서 신경도 많이 써주고 직접적으로 너무나 많은 도움을 주신 방사선응용과학연구소의 송성준 선생님과 홍경애 선생님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 제 논문에 많은 관심을 보여주시고 실험에 도움을 주신 표준과학연구원 전리방사선실의 전국진 박사님과 이철영 박사님께도 감사드리며, 한라병원의 김영환씨께 받은 도움 또한 감사드립니다.

그리고 매번 여러 가지로 신경 쓰고 챙겨주신 김지훈, 구윤희, 이승원 조교선생님께도 고마운 맘을 전합니다. 항상 철없는 후배에게 힘이 되어주신 영주언니, 준호오빠에게도 고맙고 원자력연구소에 있어 자주 보진 못하지만 멀리서 힘이 되어준 정선, 현조 언니 그리고 상범, 계홍, 인혁 오빠들에게도 고마운 맘을 전합니다.

석사과정동안 같이 부대끼면서 생활한 두혁, 상혁, 형석 오빠들 또한 고맙고 좋은 결과가 있길 바랍니다. 그리고 덕원, 상범, 희철, 제철, 덕지, 봉진 오빠들 모두 지금처럼 항상 열심히 하는 모습으로 앞으로 더 좋은 결과가 있기를 바랍니다.

대학생활 내내 즐거움을 주었던 입학동기인 6공주들 경희, 찬희, 형진, 소연, 보나 그리고 찬주, 재훈, 용호, 석주, 순일, 민기에게도 고마운 맘과 함께 항상 좋은 일만 가득하고 행복하길 바라는 맘을 전합니다. 그밖에도 일일이 나열할 순 없지만 에너지공학과에 계신 선후배님들께 감사드립니다.

그리고 고등학교 때 만나 지금도 옆에서 기쁨과 슬픔을 같이 해주는 소중한 친구인 민성, 귀비와 은혜에게 큰 고마움을 전하고 싶습니다.

본 연구를 수행할 수 있게 연구비를 지원해주신 과학기술부와 한국과학재단에도 감사를 드립니다.

마지막으로 근면함과 강한 책임감을 갖고 항상 제 의견을 존중해주시며 든든한 마음의 후원자이신 사랑하는 부모님께 항상 고마운 마음을 투정으로 대신하는 딸이 사랑과 감사의 마음을 담아 이 부족한 논문을 바치며 더 노력하는 모습으로 더 큰 은혜에 보답하겠습니다.

