

## IC-10계열의 이온전리함과 TG-21을 이용한 장기간 선형가속기의 출력선량 평가 비교

계명대학교 의과대학 의공학교실<sup>1</sup>, 방사선종양학교실

최태진<sup>1</sup> · 김진희 · 김옥배

### The Comparison the Output dose of a Linear Accelerator Photon Beams by Using the Ionization Chamber IC-10 Series Through TG-21 Protocol to Postal Monitoring Output of MDACC for One and Half Decade

Tae Jin Choi, Ph.D., Jin Hee Kim, M.D., Ok Bae Kim, M.D.

*Department of Medical Engineering and Physics<sup>1</sup>, Radiation Oncology,  
Keimyung University School of Medicine, Daegu, Korea*

#### Abstract

This study is to provided the accuracy and stability of the output dose of linear accelerator photon beams by using the IC-10 and IC-15 air ionization chambers through the Task Group 21 protocol. The gas absorbed dose calibration factor  $N_{\text{gas}}$  is determined by using the Bragg-Gray cavity theory for the air exposure calibration factor  $N_x$  of Co-60 gamma rays which is delivered from manufacture through NBS calibration. The ionization chamber of IC-10 series composit the Shonka C-552 material with density 1.76 g/ml which is equivalent to air material. the authors provided the  $A_{\text{wall}}$  from correction equation for air absorbed calibration factor  $N_{\text{gas}}$  and ion recombination correction factor  $A_{\text{ion}}$  from  $P_{\text{ion}}$  analytic measurement. The absorbed dose in water phantorm is derived from the  $N_{\text{gas}}$  including the correction factors mass stopping power ratio of water to that of gas, ion recombination and replacement for 6 and 23 MV X rays, respectively. The determined absorbed dose of water phantom exposed to a postal TLD block for output evaluation in MDACC's postal monitoring program. The results of comparisons of evaluated absorbed dose to that of MDACC have shown the  $1.000 \pm 0.012$  for 6 MV and  $1.001 \pm 0.013$  discrepancy for 23 MV X rays for a long term followed. This study shows the evaluated outputs

---

교신저자: 최태진, 700-712 대구광역시 중구 달성로 56, 계명대학교 의과대학 의공학교실  
Tae Jin Choi, Ph.D., Department of Medical Engineering and Physics  
56 Dalseong-ro, Jung-gu, Daegu 700-712, Korea  
Tel: +82-53-250-7666 E-mail: tjchoi@dsmc.or.kr

for linear accelerator photon beams are very close to that of international output monitor with small discrepancy of 1.3% for one and half decade.

**Key Words :**  $N_{\text{gas}}$ ,  $N_x$ , Output dose, TG-21, TLD monitor

## 서 론

국내 중앙치료에 이용되는 고에너지광자선은 대개 선형가속기에서 방출하는 수MV X선에서 15 MV X선 범위이다. 고에너지광자선의 기준선량은 Co-60 감마선에 교정된 공동전리함과 전위계와 물펜텀을 사용하여 평가하게 된다. 천연 Co-59 에 중성자를 충돌시켜 일어나는 Co-59 (n,r) Co-60 핵반응의 감마선은 1.17 MeV와 1.33 MeV의 에너지스펙트럼을 가지고 있으며, 방사선학적으로 흡수가 동일한 2개의 광자를 방출하나, 에너지는 단일에너지의 감마선과 같이 다루어 표준선원으로 이용되고 있다. 대부분의 선형가속기는 2종류의 광자선과 여러개의 전자선을 방출하게 되어 선택조사할 수 있게 발전되어, Co-60 감마선을 치료에 이용하는 기관은 더 이상 찾아볼 수 없게 되었다. 이는 선형가속기 광자선의 선량평가지 이용할 수 있는 선량교정과 교차선량검증이 임상에서는 쉽지 않음을 의미하게 된다.

선형가속기의 광자선은 가속관 내에서 광속에 근접한 속도로 가속된 펄스류의 전자선속이 에너지에 따라 휨을 달리하게 하는 휨자장을 통해 선별된 전자류가 얇은 텅스텐합금체와 부딪혀 나오는 저지선들이므로, 에너지스펙트럼은 연속선을 보이게 되며, 표준선원으로 이용되지 못하는 이유가 되기도 한다. 연속스펙트럼을 가진 고에너지광자선의 조직흡수선량은 열선량계나 화학선량계와 같은 절대선량계로 직접평가할 수 있으나 실험실에서 이루어지며, 임상에서는 비교적 안정적인 원주형 공동이온전리함이 주로 이용되고 있다. 조직내 흡수선량은 공동전리함에 입사된 기체전리로부터 Bragg-Gray의 공동이론을 이용하여 구한다[1,2].

본원 방사선종양학과에서는 IC-10과 IC-15 이온전리함을 사용해서 1989년부터 2004년까지

TG-21 프로토콜에 따라 선형가속기(Mevatron, Siemens, German)의 6MV 과 23MV 광자선에 대한 물흡수선량을 구했으며, 2007년부터 TG-51(AAPM) 규정서에 따라 물흡수선량을 구하였다[3,4]. 본 연구는 1989년부터 2004년까지 IC-10 계열의 전리함을 사용하여 선형가속기의 광자선에 대한 흡수선량을 MD ANDERSON CANCER CENTER(MDACC)에서 우수한 열형광선량계에 조사후 반송하여 관독한 결과와 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 우송 열형광선량계

MDACC에서 우송된 TLD (LiF powder)는 6 MV X선과 23 MV X선에 적합한 전자평형두께의 폭과 높이를 가진 Lucite 블록의 중앙에 열형광분말 캡슐을 나란히 3개를 심어두었다[5]. 시험기관인 본원의 선형가속기의 방출선량은 Farmer 전리계(Farmer2570, England)와 IC-10 (0.146 ml), IC-15 (0.13 ml)의 전리함(Wellope, German)과 가로, 세로, 높이가 각각 30 cm인 물펜텀을 사용하여 TG-21 규정서를 이용하여 물에 흡수된 선량을 평가하고, 정량적으로 300cGy를 TLD에 조사한 후 반송하여 선량을 평가, 비교를 하였다. 선형가속기(Mevatron, Siemens, German)의 6 MV와 23 MV X-선에 대한 출력선량 평가기간은 1989년부터 2004년까지(15년 간) 매년 1회 이상 총 23회 비교하였다.

### 2. 흡수선량평가 배경

임상에 사용되는 고에너지광자선 선량평가의

1세대 규정서에는 Bragg-Gray 및 Spencer-Attix 공동이론을 적용하여 교정국에서 제공하는 교정계수를 사용하여 흡수선량으로 변환하는데 오차가  $\pm 3.3\%$ 에 이른다고 ICRU 14에서 밝히고, 몇몇 연구자들은 이 오차보다 더 크다고 발표한 바 있다[6]. 종양의 방사선치료의 성패는 종양치료선량의 5% 이상 넘지 않는데 달려 있다고 일찍 발표된 바 있으며, 종양-치료확률이나 최적화된 시간-선량 스케줄 및 방사선생물학적 효과 등의 기준은 선량평가에 포함된 종합적 불확실도가 Tumor-Volume과 Response를 측정할 때의 오차보다는 상당히 작아야 한다고 알려져 있다[7]. 선량평가에 대한 정확성을 향상시키기 위해 필요한 지침서가 TG-21(1983) 프로토콜이며, 선량변환과정을 보다 간소하게 줄여 물흡수선량을 결정하는 TG-51 프로토콜(1999)이 발표되었다. 방사선선량평가의 개념화가 진전되고, 방사선물리학적 자료축적과 선량계측기 제작기술의 발달에 힘입어 공동기체전리량을 조직흡수선량으로 전환하는 선량평가는 치료선량의 불확실도를 줄이기 위해 주기적으로 시행되어야하며 방사선물리학자의 중요한 임무가 되었다.

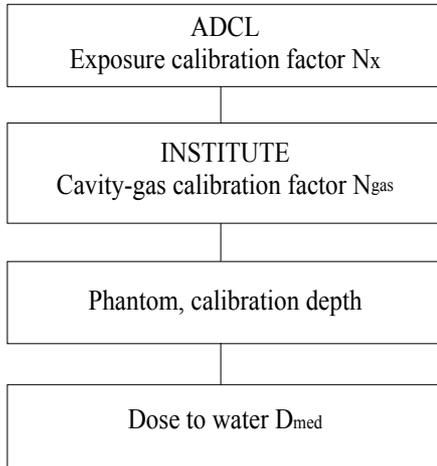
선량평가 초기에 적용한 공기중 선량으로부터 흡수선량을 구하기 위해 에너지별 흡수선량 변환계수  $C_A$ 를 사용해 왔으나[6,8], 이 변수는 전리함의 구조나 전리함벽의 재질에 대한 물리적 특성에 따라 선량값이 변하는 것을 간과했다고 TG-21에서 지적하고 있고 오차의 원인이 되었다. 따라서 TG-21에서는 다음과 같은 논리적 발전과 정확한 선량 결정에 일관성이 없는 부분을 지적하였다. 첫째, 이온전리함의 공기 중 조사선량교정계수는 펜텀 내 깊이나 조사면적의 크기에 관계없이 일정한 값을 적용하고 있다. Co-60 감마선의 경우 조사면  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이고 물 5 cm 깊이의 물흡수선량은 에너지가 약 20% 정도 떨어진 산란선이 도달된다. 그럼에도 불구하고 교정계수는 일차선에 의한 전자평형두께에 해당되는 Buildup cap을 씌워 구해진다. 이것은 광자선의 에너지가 약 200 KeV 감쇄된 조사선량 교정계수를 갖는 것이 된다. 공동을 둘러싸고 있는 전리함 벽물질에 흡수된 에너지에 의해 발생된 전자에 의해 일어난 전리로부터 흡수선량을 구하는

수학적 변환은 Bragg-Gray 공동이론으로 잘 알려져 있다. 전리함에 적용된 Bragg-Gray 이론은 근본적으로 2 단계 과정이 있다. 첫 단계는 공동 내 가스로 선량이 결정되고, 다음은 가스에 주어진 선량이 물질에 주는 선량으로 변환된다는 것이다. 이 공동이론의 직접응용은 전리함의 용적이 충분히 작아 주위물질에 입사된 전자의 수나 분포가 공동이 없을 때와 같이 변화가 없어야 한다는 점을 전제로 한다[9]. 둘째, 일반적으로 광자선에 대한 선량-변환인자( $C_A$ )는 펜텀 내 광자선에 의해 생성된 전자스펙트럼과 일치하지 않는다. 셋째, 조직에 대한 공동전리함의 교체에 의한 보정계수는 전리함의 직경과 길이와 심부선량곡선의 기울기와 관련된 함수인데 이 상수가 이들과 독립적으로 적정치 못하게 다루어졌다. 넷째, 선량에 영향을 주는 이온전리함벽의 구성재질이 다르고, 펜텀이 다르나 감안이 되지 않았다. TG-21에서는 이들을 포함한 선량평가 지침을 제공하며, 선량평가절차는 Fig.1과 같이 Co-60에 대한 이온전리함의 조사선량교정계수  $N_X$ 로부터 공동흡수선량계수 ( $N_{gas}$ )를 먼저 구하게 된다. TG-21은 이상의 미비점을 보완하여 이론적 전개와 임상적 자료획득 절차를 통해 흡수선량평가의 정확성에 진전을 가져오게 하였다.

### 3. Cavity-gas calibration factor, $N_{gas}$

전리함의 기체(공기)에 흡수된 선량은 Bragg-Gray 이론을 통해 전리함의 벽에서 생성된 전자가 공동에 정지할 때까지의 전리량으로부터 선량을 얻게 된다. 또한 벽물질에서 생성된 전리량은 전리함이 없는 공기의 선량과 관계될 수 있으며, 전자평형이 이루어진 가정하에서 공동 내 기체에서 선량은 이온전리함의 조사선량교정계수와 비례관계를 갖게 된다. Co-60 감마선에 대한 조사선량은 NBS (National Bureau of Standard, USA)에서 다양한 두께의 전리함벽으로 된 구형 흑연전리함으로 측정하여 확정하고 있다. 조사선량  $X$  는

$$X = \frac{I}{k} J_{gas} \left( \frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{wall} \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (\beta_{wall})^{-1} \prod_i K_i \quad (1)$$



**Fig. 1.** Flow chart shows the determination of water absorbed dose from exposure calibration factor which can be obtained from an Accredited Dosimetry Calibration Laboratory (ADCL) at time of the  $^{60}\text{Co}$  exposure calibration.

으로 구한다. 여기서  $X$ 는 조사선량( $R$ ),  $k$ 는 단위선량당 벽재질의 단위질량당 생성된 전하( $2.58 \times 10^{-4} \text{Ckg}^{-1}\text{R}^{-1}$ )이며,  $J_{\text{gas}}$ 는 전리함내기체의 단위질량당전하로 단위는  $\text{C/kg}$ 이다. 또  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{gas}}^{\text{wall}}$ 는  $\text{Co-60}$  감마선에 의해 전리함 내 기체에서 방출된 2차전자의 평균질량저지능비에 대한 흑연벽재질의 평균질량저지능비이다.  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{air}}^{\text{wall}}$ 는  $\text{Co-60}$  감마선을 조사했을 때 흑연벽에 대한 기체의 평균질량에너지흡수계수의 비를 의미한다[10].  $\beta_{\text{wall}}$ 은 전리함 벽안에서 2차전자의 충돌로 air kerma 에 미량 흡수된 선량몫으로 1.005이다.  $\prod_i K_i$ 는 공기에 함유된 수분량과 이온재결합손실, 전리함지지체산란, 벽두께 “0”에 대한 보정 및 미세한 보정에 대한 각 인수( $i$ )의 곱을 의미한다. 조사선량은 표준국에서 전리함이 제거되고 공기로 바꾸어 놓을 때 흑연전리함의 중앙위치점에서 식(1)로 계산된 선량이다. 사용자의 전리함에 대한 교정계수는 흑연전리함이 놓인 동일위치에 두고 식(1)의 알려진 선량에 의해 얻어진다. 즉, 사용자 전리함의 교정계수( $N_x$ )는

$$N_x = X/M \quad (2)$$

이 되고, 여기서  $M$ 은 쿨롱C 단위로 측정된 이온전하값이다. 표준국에서 제공되는 교정계수는 기온

$22^\circ\text{C}$ , 표준 1기압으로 규격화 되었으나, 이온재결합은 보정되지 않고 있으며,  $N_x$ 의 단위는  $\text{R/C}$ 이다. 이온전리함 내 기체의 선량은 기체의 단위질량당전하량에 직접 관계가 되므로 기체의 선량( $D_{\text{gas}}$ )은

$$D_{\text{gas}} = J_{\text{gas}} (W/e) \quad (3)$$

로 주어지며 단위는  $\text{Gy}$ 이다. 여기서  $W/e$ 는 전자의 전하에 의한 한 개의 전리쌍을 생성하는데 소요되는 평균에너지의 몫으로 임상광자에너지영역에서는 일정하며, TG-21에서는  $33.7\text{J/C}$ 를 적용하고 있다. 또 전하량을 측정하는 전위계의 감도가 전리함 내 기체의 단위질량당전하( $J_{\text{gas}}$ )에 직접적으로 연결되어 있으므로, 전위계의 판독값 $M$ 으로 나눈  $D_{\text{gas}}$ 의 몫은 전리함의 크기와 재질에 따라 일정하다. 이 몫을 공동기체 교정계수( $N_{\text{gas}}$ )라 한다. 즉 공동기체계수는

$$N_{\text{gas}} = D_{\text{gas}} \cdot A_{\text{ion}} / M \quad (4)$$

으로 둔다. 여기서  $A_{\text{ion}}$ 은 교정국에서 교정시 전리전하직접효율이다. 우리는 교정국에서 전리함과 전위계를 일체로 교정하여 공기중선량계수( $N_x$ )를 받게 되므로, 이온전리함의 기체 내 교정계수( $N_{\text{gas}}$ )로 변환할 필요가 생긴다. 이는 식(1)~(4)를 이용하면,

$$N_{\text{gas}} = N_x \frac{k(W/e)A_{\text{ion}}A_{\text{wall}}\beta_{\text{wall}}}{(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{gas}}^{\text{wall}}(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{air}}^{\text{wall}}} \quad (5)$$

와 같다. 여기서  $A_{\text{wall}}$ 은 전리함 벽과 Buildup cap 내에서 감쇠와 산란에 대해 보정한 계수이다. 전리함벽과 Buildup cap의 재질이 다를 때,  $N_{\text{gas}}$ 는 이론에 바탕을 둔 실험식으로 구한다.

$$N_{\text{gas}} = N_x \frac{k(W/e)A_{\text{ion}}A_{\text{wall}}\beta_{\text{wall}}}{\alpha(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{gas}}^{\text{wall}}(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{air}}^{\text{wall}} + (1-\alpha)(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{gas}}^{\text{bldcap}}(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{air}}^{\text{bldcap}}} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 전리함벽에서 생성된 전자의 전리비율이고,  $(1-\alpha)$ 는 buildup cap에서 전자에 의한 전리비율을 의미한다.  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{\text{gas}}^{\text{bldcap}}$ 는 기체에 대한

Buildup cap 재질의 평균질량저지능비를 의미하고,  $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{air}^{B_{cap}}$ 는 buildup cap에 대한 air의 평균질량에너지흡수계수를 나타낸다. 인체내조직흡수선량은 Buildup cap을 장착해  $N_x$ 가 정해진 전리함의 Buildup cap을 제거하고 물펜텀의 조사면 중심의 기준깊이( $D_{max}$ )나 전자평형이 이루어진 임의의 깊이)에 두고 물흡수선량을 정한다. Co-60 감마선에 대한 물흡수선량계수 $N_D$ 를 NBS에서 제공한다면 ( $N_D$ )의 정의는

$$N_D = D_{water} / M \quad (7)$$

로 주어지게 된다. 여기서  $D_{water}$ 는 물흡수선량으로 전리함이 물로 교체되고 전리함의 중심위치에서 물흡수선량(Gy)을 의미하며, M은 이온재결합보정이 안된 전하량(C)을 뜻한다. 흡수선량교정계수는 공동-기체교정계수와 다음

$$N_{gas} = N_D \frac{A_{ion} A_{repl}}{(\frac{\bar{L}}{\rho})_{gas}^{wall} (\frac{\mu_{en}}{\rho})_{water}^{wall}} \quad (8)$$

의 관계가 있다.  $A_{repl}$ 은 전리함벽의 감쇠산란에 대한 보정항이다. 물재질 내 한 지점의 물흡수선량( $D_{med}$ )은 Spencer-Attix 식을 일반화하여 절삭에너지 이상의 에너지에서 기체에 대한 물(med)의 평균질량저지능비를 이용하여 구한다. 물질의 흡수선량과 기체의 흡수선량간에는 다음의 관계가 있다 [1,11].

$$D_{med} / D_{gas} = (\frac{\bar{L}}{\rho})_{gas}^{med} \quad (9)$$

$N_{gas}$ 를 얻는 데 주의를 요하는 일 중에 하나는 표준국에서  $N_x$ 만을 제공하고 나머지는 임상물리학자가 개별적으로 이론을 배경으로 결정되게 하였다. 따라서 임상현장의 이온전리함에 맞게  $A_{ion}$ 과  $A_{wall}$ 을 구하였다. 펜텀의 재질이 물인 경우  $D_{water}$ 는 물흡수선량을 의미하며 선형가속기의 출력선량이 된다. 환부의 매회 분할치료선량은 선형가속기의 정해진 MU를 조사하게 되며 MU는 분할중앙치료선량을 모니터단위에 대한 출력선량의 비로 정의하는 출력선량계수로 나누어 결정된다.

방사선선량평가에는 개인오차와 기기오차가 종합적으로 나타나게 되므로, MDACC의 TLD 시료에 본원의 평가선량을 조사 후 반송하여 TLD의 흡수선량을 판독하여 본원 선형가속기의 지정 에너지의 평가선량에 대한 MDACC의 평가선량의 비로 비교하였다. 열형광선량계는 미량(20~30 mg)의 분말체(200 mesh)인 LiF이며 합성플라스틱 캡슐(내경 약 1 mm)에 넣고 전자평형두께의 Lucite 블록 중앙에 삽입하여 공기 중에서 조사된다. TLD에 조사되는 선량은 시험기관의 물펜텀을 이용하여 평가된 물흡수선량으로 결정되며 평가의 비가 1.00인 경우 시험기관의 선량평가가 매우 정확하게 평가하고 있는 것을 의미하며, 1.00보다 낮은 값은 본원에서 기준출력선량을 높게 평가하는 것이며, 1.00보다 높은 경우는 반대로 출력선량을 낮게 평가하는 것이 된다.

## 성 적

### 1. 이온전리함 IC-10의 구성

방사선프로토콜에 이용한 전리함은 모델 IC-10 (Wellope 사, German)으로 구조와 재질은 Fig. 2와 같이 조사되었다. 선량결정에 필요한 전리함의 외경은 6.8 mm, 내경은 6.0 mm, 전리함 벽 두께는 0.4 mm이고, 검출용적의 길이는 6.3 mm (IC-15는 5.8 mm)이며, 공동용적은 0.147 ml (IC-15는 0.13 ml), 내부중심전극은 직경 1 mm 이고 벽과 중심전극재질은 모두 Shonka C-552로 구성되어 있으며, C-552의 구성 성분은 Table 1과 같다.

고에너지광자선에서 산란과 흡수는 재질의 전자밀도에 따라서 달라지므로, 전리함벽의 재질에 따라 보정이 따라야함으로 air에 대한 질량저지능과 벽재질의 질량저지능의 비가 필요하다. 각 구성 물질의 전자밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{전자밀도} (\rho_e) = \sum_{i=1}^n N_a Z_i / A W_i M\% \quad (10)$$

여기서  $N_a$ 는 아보가드로상수를,  $Z_i$ 는  $i$ 번째 구성성분의 원소의 원자번호를 의미하고,  $AW$ 는 원자질량과  $M\%$ 는 중량의 비이다. IC-10계열의 전리함벽재질인 Shonka C-552의 각 성분 에 대한 전자밀도 합은  $3.02 \times 10^{23}$ 개 이고, 공기는  $3.01 \times 10^{23}$ 개로 C-552재질로 된 전리함벽은 공동과 거의 동등한 전리흡수체인 것으로 나타났다. 기체전리함을 이용하여 물흡수선량을 결정하기 위해서는 선량표준국(NBS 또는 ADCL)의 Co-60 표준선원에 대한 공기중조사선량 교정계수( $N_x$ ) 또는 흡수

선량교정계수(Air kerma,  $N_k$ )를 가져야 한다. Air kerma는 고에너지감마선에 의해 이탈된 전자평형을 위해 Buildup cap (Acrylic 0.5 g/cm<sup>2</sup>) 속의 공동 중에 흡수된 선량으로 측정되며 Table 2와 같이 제공된다. 2차 표준국에서 물펜텀이나 Acrylic 펜텀의 5~10 cm 깊이에서 측정하여  $N_x$ 를 환산하여 제공될 수도 있다. 따라서 물펜텀내 기체전리함으로 선량을 측정할 때는 전리함 벽의 재질이 펜텀과 다르고, 공동기체로 대체되어 플루언스의 변화에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에 사용된 공동전리함은

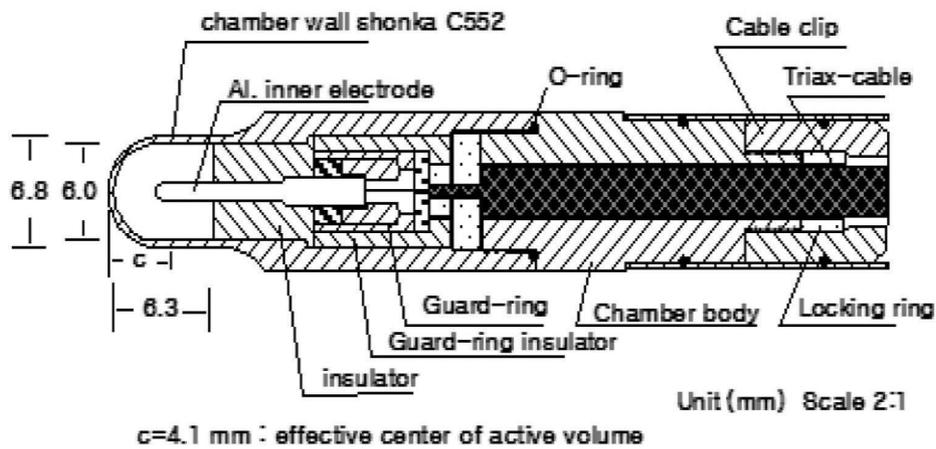


Fig. 2. Schematic diagram of IC-10 Ionization Chamber.

Table 1. The composition of % weight for chamber wall material C-552 of IC-10 series

Element	H	C	O	F	Si	density
%						
atomic No. %	26.860	45.810	0.310	26.810	0.150	1.76 g/cc
% mass	2.473	50.161	0.453	46.529	0.384	

Table 2. The parameters of ionization chamber IC-10 and IC-15 are provided from the manufacture and NBS for the exposure calibration factor  $N_x$  of which Co-60 gamma ray

Chamber type	inner radius (cm)	chamber wall material	Wall thickness (g/cm <sup>2</sup> )	Buildup material/thick (g/cm <sup>2</sup> )	SN	active volume length	$N_x$ R/nc	T <sub>0</sub> (°C)	P <sub>0</sub> (mmHg)
IC-10	0.3	C-552	0.07	Acrylic 11.70	351	0.63	21.746	22	760
IC-15	0.3	C-552	0.07	PMMA 5.97	3352	0.58	26.860	22	760

IC-10 (Serial No. 351, Wellope사, German)과 IC-15로 Table 2에서 각각의 규격과 교정계수 $N_x$ 는  $21.746 \times 10^9$  R/C,  $26.860 \times 10^9$  R/C 이다. 이 자료를 근거로 Co-60 감마선 조사시 공동전리합의 기체에 흡수되는 선량교정계수 ( $N_{gas}$ )를 구하였다.

## 2. A<sub>wall</sub> 결정

A<sub>wall</sub>은 전리합의 벽과 전리합의 Buildup cap 속에서 표준선원의 일차선이 감쇠되거나 산란이 일어나는 일을 보정하는 계수이다. 이 보정은 전리합 벽과 Buildup cap 속에서 산란도 감쇠도 일어나지 않은 전하량에 대해 전리합의 공기의 단위질량당 실질전하에 관계한다. 조사선량 교정계수( $N_x$ )는 표준선원(Co-60 감마선)의 2차 전자가 전리합에 모두 집적될 수 있는 평형두께의 buildup을 사용하여 제시되는 계수이다. 벽 재질의 두께와 buildup 두께로 인해 2차전자의 감쇠와 산란이 일어나 보정이 필요하게 된다. TG-21의 프로토콜에서 제시된 전리합의 모델이 있는 경우 A<sub>wall</sub> 값을 이용할 수 있으나, IC-10 또는 IC-15에 대해서는 제시되지 않았다. 이 경우 공동전리합의 내경과 내부길이에 따라 다음과 같이 구한다.

$$A_{wall} = 1 - t\gamma/100 \quad (11)$$

여기서 t는 Buildup cap과 전리합 벽두께의 합 ( $g/cm^2$ ),  $\gamma$ 는 길이와 내경에 따른 감쇠산란율을 나타낸다. 본 연구에 사용된 전리합 IC-10과 IC15는 A<sub>wall</sub>이 모두 0.988 로 나타났다.

## 3. 전리전하수집효율 A<sub>ion</sub>과 이온재결합보정계수 P<sub>ion</sub>

전리합의 전하가 모두 수집되지 않으면 식(5)와 식(6)의 선량이 적게 나타나게 되므로 보정이 필요함을 뜻하게 된다. 전리전하수집효율(A<sub>ion</sub>)은 전리합 내 전리전자의 재결합과 관련되므로 이온재결합에 대한 보정은 전리전하수집효율의 역수가 된다. 전리합의 벽에서 발생한 2차전자의 수집효율(A<sub>ion</sub>)

은 전리합의 양전극간 전위차를 바꾸어 측정하여 구한다. 조사선량교정에 사용하는 선량률은 대개 100R 이하이며, 전위차는 180~360V 설정된다. 전리합의 벽에서 발생한 2차전자의 수집효율(A<sub>ion</sub>)은 공기 중 조사선량교정에 적용되며, 대개 0.995 내지 1.000이 된다고 발표되고 있다[7]. 그러나 이온재결합은 방사선선원이 연속형방사선과 펄스형방사선에 따라서 달라진다. 특히 표준국에서 전리전하수집효율은 제공하지 않으므로 기체흡수선량의 기준선량인 N<sub>gas</sub>를 얻기 위해서는 전리전하수집효율이 필요하다. 전리수집효율은 공동전리합의 규격에 따라 달라지며, 이온재결합율의 역수로 구한다. 선형가속기의 빔은 펄스형방사선(펄스 주기는 약 25  $\mu$ sec)을 방출하므로, 임상에서 2전압법을 이용해서 이온재결합에 대한 보정을 구한다. 2전압법은 통상 전리합의 전압의 1/2전압에 의한 전하량Q<sub>2</sub>에 대한 전리합의 V<sub>1</sub> 전압의 전하량Q<sub>1</sub>의 비로 이온재결합보정계수P<sub>ion</sub>를 얻게 된다. IC-10의 펄스형방사선에 대해 P<sub>ion</sub>을 구하기 위해 적용된 전압은 300V<sub>1</sub>과 150V<sub>2</sub>이며, IC-10과 전위계(Capintec 192A, German)에 의한 Q<sub>1</sub>/Q<sub>2</sub> 전리비는 1.01로 P<sub>ion</sub>은 1.01을 얻었다. Co-60 감마선과 같이 연속형방사선에서는 동일한 전리비에 대해 P<sub>ion</sub>은 1.005를 얻게 되며, N<sub>gas</sub>를 구하는 이온재결합손실에 대한 보정A<sub>ion</sub>은 P<sub>ion</sub>의 역수로 0.995를 얻었다.

N<sub>gas</sub>를 구하는 식(6)의 a는 전리합 벽에서 생성된 전자의 전리비율이며 벽두께( $g/cm^2$ )에 따라 전리비율을 구하게 되며, (1-a)는 buildup cap에서 생성된 전리비율로 각각 0.57과 0.43을 각각 얻었다.  $(\frac{L}{\rho})_{air}^{wall}$ 와  $(\frac{L_{en}}{\rho})_{air}^{wall}$ 은 표준선원 사용 시 공동전리합 기체의 평균질량저지능에 대한 전리합의 벽재질의 평균질량저지능비와 전리합벽재질의 평균질량에너지에 대한 기체의 평균질량에너지의 비로 Shonka C-552의 경우 각각 1.000을 얻었다.

$(\frac{L}{\rho})_{air}^{cap}$ 는 기체에 대한 Buildup cap의 평균질량저지능의 비이며 1.103을 얻었고, 평균질량에너지흡수계수의 비는 0.925를 얻었다. 식 (6)에 의한 기체흡수선량교정계수(N<sub>gas</sub>)는 (Table 3)과 같이 IC-10의  $1.852 \times 10^8$ 과 IC-15의  $2.288 \times 10^8$

Gy/C를 각각 얻었으며, 차이는 두 전리함의 공동용적의 차이에 의한 것으로 나타났다.

#### 4. 물흡수선량결정 $D_{med}$

물펜텀과 기체전리함 IC-10을 사용해 펄스형 선속으로 조사할 때, 물속 지정위치의 흡수선량은 전리함의 기체에 대한 물의 평균질량저지능비  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{gas}^{med}$ 와 물속에서 전리함으로 대체되어 전자기동에 따른 보정항들을 사용하여 평가한다. 물흡수선량( $D_{med}$ )은

$$D_{med} = M \cdot N_{gas} \cdot (\frac{\bar{L}}{\rho})_{gas}^{med} \cdot P_{ion} \cdot P_{repl} \cdot P_{wall} \quad (12)$$

로 구하였다. 여기서 M은 전위계로 측정된 전하량(nC)에 기온과 기압에 대한 보정을 한 전리전하량이며,  $P_{ion}$ 은 연속형방사선( $Co^{60}$  감마선) 또는 펄스형방사선의 에너지별 이온재결합보정계수를,  $P_{repl}$ 은 Gradient 보정을,  $P_{wall}$ 은 산란감쇠보정을 각각 의미한다.  $P_{repl}$ 은 측정지점이 심부선량곡선의 기울기가 있는 지점에 있을 때 전리함의 공동반경과 방사선에너지에 따라 보정이 필요하며, 측정점이 선량최대지점에 있을 때는 1.00이 되며, TG-21 프로토콜을 이용한 선량평가는 최대선량지점에서 이루어졌다.  $P_{wall}$ 은 전리함 벽과 펜텀의 재질이 동일할 때 1.00이 되고, 구성 재질이 다른 경우 전자에 의해 일어난 총 전리전하량 중 전리함 벽에서 일어난 분량(a)과 펜텀재질에서 일어난 분량(1-a)으로부터 다음 식(13)과 같이 보정계수를 구한다.

$$P_{wall} = \frac{\alpha (\frac{\bar{L}}{\rho})_{wall}^{med} (\frac{\mu_{en}}{\rho})_{wall}^{med} + (1-\alpha) (\frac{\bar{L}}{\rho})_{air}^{med}}{(\frac{\bar{L}}{\rho})_{air}^{med}} \quad (13)$$

이다. 여기서  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{wall}^{med}$ 는 공기에 대한 전리함벽의 평균질량저지능비이며, 6 MV X선에서는 0.993, 23 MV X선에서는 0.962를 얻었으며,  $(\frac{\bar{L}}{\rho})_{air}^{med}$ 는 공동기체에 대한 물의 평균질량저지능비로 6 MV X선에서 1.128, 23 MV X선에서 1.095이다.  $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{wall}^{med}$ 는 전리함 벽에 대한 물펜텀의 평균질량에너지흡수계수의 비를 의미하며,  $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{air}^{med} / (\frac{\mu_{en}}{\rho})_{air}^{wall}$ 로부터 구

한다. 6 MV X선에서 공기에 대한 물펜텀의 평균질량에너지흡수계수의 비는 1.111로, 공기에 대한 전리함벽은 1.000이 되어 전리함벽에 대한 물의 평균질량에너지흡수계수의 비는 1.111을 적용하게 되었으며, 23 MV X선에서는 각각 1.094, 0.992로부터 1.103을 얻었다. 각 인수의 값을 식(13)에 대입한 결과  $P_{wall}$ 은 Table 5와 같이 6 MV X선과 23 MV X선에서 모두 0.995를 얻었다. 출력선량평가는 선형가속기의 모니터단위선량계수(cGy/MU)를 결정하고, 처방된 선량cGy를 제하여 병소표적에 조사할 모니터단위MU를 구하게 되며 처방선량은 TLD에 조사할 선량이 된다.

MDACC의 TLD 시료는 Lucite 블록과 함께 우송되어 평가된 물펜텀의 흡수선량을 조사하고, 반송하여 판독하게 된다. 시험기관의 평가선량에 대한 MDACC의 판독선량의 비를 장기적으로 다년간 비교한 결과(Fig. 3)과 같이 나타났다. 평가선량은 6 MV X선에서 평균  $1.000 \pm 0.012$ , 23 MV X선에서  $1.001 \pm 0.013$ 의 선량편차를 보였으며, 최대 2.3%의 오차를 나타냈다. 이 결과는 년 1회 이상 23회 동안 본원의 선량평가의 평균이 1.000과 표준오차 1.3%의 오차를 보여 매우 정확하고 안정적인 선량을 평가했음을 말해주고 있다.

## 고 찰

방사선치료는 생물학적 치료효과를 증강하는 분할치료와 정상장기를 보호하기 위한 제한된 조사면을 기반으로 조사하게 된다. 방사선치료기간은 분할치료에 근거하여 4주 내지 6주간 치료하게 되고 처방된 선량이 정확하게 종양에 도달되어야 하며, 방사선치료의 성패에 가장 영향을 주는 요인으로 작용하는 것이 선량결정이다.

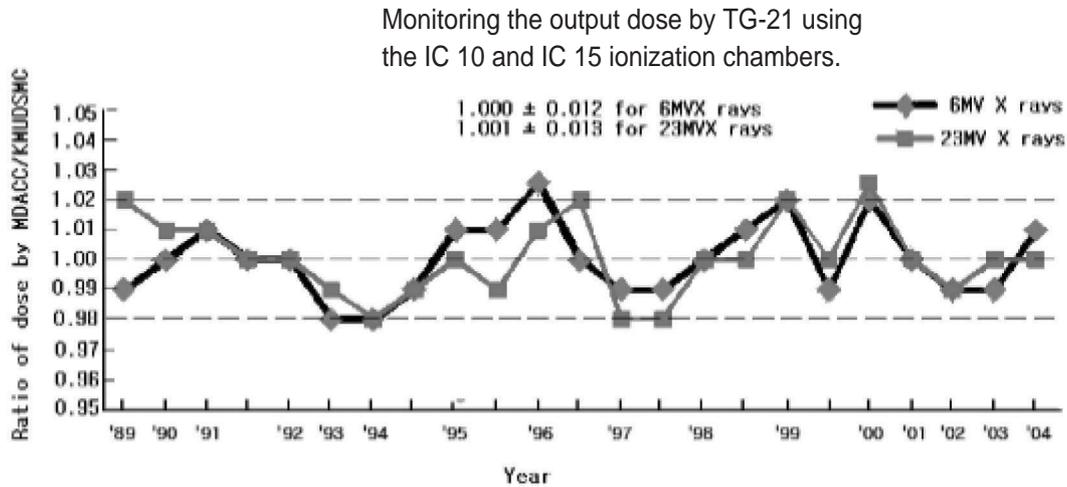
일찍 Flectcher는 방사선종양 치료선량의 5% 범위 이내의 오차일 때 치유확률을 기대할 수 있다고 주장하였으며[12], IAEA의 ICRU 24에서도 상기 선량범위 이내의 정확성으로 선량을 평가하도록 권장하고 있으며[13], AAPM Report 40에서는 선형가속기의 전반적인 성능보증 시방을 포함한 권

**Table 3.** The parameter of ionization chamber IC-10 and IC-15 for getting the  $N_{gas}$  from exposure calibration factor  $N_x$

Chamber type	SN	$N_x$ R/nc	$A_{ion}$	$A_{wall}$	$\alpha$	$(\bar{L}/\rho)_{air}^{wall}$	$(\bar{u}_{en}/\rho)_{air}^{wall}$	$1-\alpha$	$(\bar{L}/\rho)_{air}^{cap}$	$(\bar{u}_{en}/\rho)_{air}^{cap}$	$N_{gas}$
IC-10	351	21.746	0.995	0.988	0.57	1.000	1.000	0.43	1.103	0.925	$1.852 \times 10^8$
IC-15	3352	26.860	0.995	0.988	0.57	1.000	1.000	0.43	1.103	0.925	$2.288 \times 10^8$

**Table 4.** The parameters of ionization chambers IC-10 and IC-15 in pulsed radiation beam for water absorbed dose (Gy)

Chamber type	SN	$N_{gas}$ (Gy/C)	Xray Energy (MV)	$(\bar{L}/\rho)_{gas}^{med}$	$P_{ion}$	$P_{repl}$	$P_{wall}$
IC-10	351	$1.852 \times 10^8$	6	1.128	1.01	1.00	0.995
			23	1.095	1.01	1.00	0.995
IC-15	3352	$2.288 \times 10^8$	6	1.128	1.01	1.00	0.995
			23	1.095	1.01	1.00	0.995



**Fig. 3.** The dose evaluations of output dose of linear accelerator (Mevatron, Siemens) verified constancy for 15 years long term from 1989 to 2004. The constancy have shown the  $1.000 \pm 0.012$  for 6 MV and  $1.001 \pm 0.013$  for 23 MV X rays.

장문서를 제공하고 있으며 [14], AAPM Report 86은 성능보증프로그램에서 RTOG가 표적선량의 5% 이내의 오차범위에서 도달되어야 한다고 제시하고 있다 [15]. 표적병소에 처방선량의 오차가 5%

이내 있기 위해서는 표적에 도달하는 선량의 결정에 영향을 주는 단계별 오차는 이보다 훨씬 작아야 한다. 이 성능범위를 유지하기 위한 단계로는 선량 계획 시뮬레이션, 중앙일체형 조사면크기, 장치조

직의 불균질성 및 경계선량계산, 셋업 오차 등이 있으며, 이외에도 선형가속기의 출력은 방사성물질의 출력선량과 달리 기온, 기압, 장비의 온도 등 선량 모니터링에 영향을 주는 변화와 공급전원, 전파의 펄스폭과 높이, 인젝터의 타이밍 등 가속전자류의 최적화변동과 전자빔자장의 변화에 의한 선량분포의 비균등성 유발 등 장비의 안정성 변화에 영향을 주는 요인들과 종합되어 오차로 나타나게 된다. AAPM Report 142에서는 Report 40 (1994) 이후 Multi-leaf collimator (MLC) 기기오차와 방사선세기조절치료의 연속된 분할조사면의 선량오차 등 MLC를 이용한 새로운 치료기술법의 확산은 출력선량의 정확성을 유지할 수 있도록 매일 출력선량을 모니터링하여 3%의 오차범위에 있는 지 확인하고, 매일 1회 이상 2% 이내의 오차범위에서 교정되어야 한다고 밝히고 있다[16,17].

표적선량을 결정하는 모든 치료계획에 포함되는 출력선량의 오차는 전 선량계획에 영향을 주게 되므로 정확한 출력선량을 결정하도록 항상 강조되고 있다. 출력선량은 선형가속기 자체의 전리함에서 제시하는 모니터단위(Monitor Unit, MU)당 절대선량계에 교정한 외부 전리함을 이용한 조직흡수선량의 비로 결정된다. 외부 공동전리함은 표준선원을 조사하여 제공되는 조사선량교정계수 $N_x$ 로부터 공동에 흡수된 선량교정계수 $N_{gas}$ 로 나타나게 한다. 공동기체전리함을 이용하여 물흡수선량을 얻기 위해 IAEA에서 제시한  $C_k$ 계수가 있으나, 이 방법은 공동기체전리함의 구조나 벽재질에 대한 보정이 없어 시스템적 오차를 줄일 수 없었다.

저자들은 최신 프로토콜이 발표되기 전부터 TG-21 프로토콜을 이용하여 미국내 300개 기관에서 사용하는 800여대의 선형가속기의 출력선량을 모니터링하는 MDACC에 의뢰하여 TLD 우송을 통해 본원 선형가속기의 출력선량을 비교 평가하였으며, 800여대의 평균선량비가  $0.999 \pm 0.027$ 임을 볼 때 본원의 성적은 우수한 편이라고 생각되며, 본 연구는 장기간 선량평가의 안정성을 볼 수 있는 점에서 의의가 더욱 크다고 생각한다.

TG-21은 NBS 또는 ADCL에서 Co-60 감마선원을 표준선원으로 공기중에 Buildup cap을 씌

워 구한 조사선량교정계수가 제공되므로 선형가속기의 방사선출력방법이 펄스형이고 방사선에너지가 Co-60 감마선과 다르므로 물의흡수선량을 평가하기 위해서는 보정이 필요하다. 그러나 공기 중 조사선량으로부터 공동기체흡수선량과 공동을 물로 대체한 물흡수선량의 변환과정은 상당히 물리학적 지식과 적용의 난해성을 보여 선량평가에 기계 오차와 함께 개인오차의 영향을 증가시키는 요인이 되고 있다. 1983년 발표된 Task Group 21은 Bragg-Gray 변환이론으로 공동전리함을 통해 동일 위치의 흡수선량으로 변환하는 지침서이다[7]. 이 지침서는 공기 중 조사선량교정계수에서 기체흡수선량인 Air-KERMA로 변환한 다음  $N_{gas}$ 를 구하고, 물펜넬 내 공동기체전리로부터 물흡수선량으로 변환함으로써 인체의 조직선량을 평가한다. TG-21은 이론과 실험결과가 병용하여 흡수선량을 평가함에 따라 변환식이 다소 난해하고 사용하는 전리함의 구조에 따라 적용할 변수의 값들이 복잡하여 공동전리함에 적용할 때 불확실도가 곳곳에 있으며, 선량해석 오차를 1~2% 이내 유지하기 위해서는 수련된 방사선물리학적 지식과 오차 요인이 되는 변수의 셋업 오차를 줄이는 데 있다. TG-21과 TG-51 프로토콜을 비교한 결과 미국과 캐나다에서 평가한 흡수선량의 결과가 1.1%의 오차를 보였다고 발표한 바 있다[18]. 선량결정 중 가장 큰 불확실도는 TG-21 프로토콜에서 제시되지 않는 전리함을 구매해 사용하는 경우이다. 즉, 프로토콜이 발표된 이후, 선량계의 개발이 이루어진 경우와 전리함의 공동내경과 길이의 근접치를 이루어 등방성을 유지하도록 개발된 전리함이거나 컴퓨터 프로그램에 의한 원격 3차원 스캔기능 등의 발전이 되어 프로토콜에서 상업화된 전리함에 대하여 교정계수가 제공되지 않을 수 있다. 제시된 전리함의 종류에 포함되지 않은 경우는 실험식을 이용해 직접 구하여야 한다. 본원에서 사용한 IC-10과 IC-15는 전리영역의 등방성을 위해 내경(0.6 cm)과 공동의 길이(0.63 cm)가 거의 같은 크기로 제작되어 있으며, TG-21 프로토콜에서 선량자료가 제시되지 않은 전리함이다. 선량평가 지침서에 제시되지 않은 전리함은 보정계수를 공동이론(Cavity theory)에

**Table 5.** Determination of  $P_{wall}$  of ionization chambers IC-10 and IC-15 for 6 MV X and 23 MV X rays, respectively

Chamber	E (MV)	$\alpha$	$(\frac{\bar{L}}{\rho})_{air}^{med}$	$(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho})_{air}^{med}$	$(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho})_{air}^{wall}$	$(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho})_{air}^{med}$	$1-\alpha$	$(\frac{\bar{L}}{\rho})_{air}^{wall}$	$P_{wall}$
IC-10	6	0.25	1.128	1.111	1.000	1.111	0.75	0.993	0.995
	23	0.15	1.095	1.094	0.992	1.103	0.85	0.963	0.995
IC-15	6	0.25	1.128	1.111	1.000	1.111	0.75	0.993	0.995
	23	0.15	1.095	1.094	0.992	1.103	0.85	0.963	0.995

근거하여 구하였다. IC-15의 공동길이는 0.58 cm로 약간 짧고, IC-10의 전리함 용적이 0.146 ml, IC-15가 0.13 ml로 IC-10의 감도가 조금 높으나 벽재질과 두께가 동일하여  $A_{wall}$ ,  $A_{ion}$ 이 유효숫자 범위에서 동일한 값을 얻었으며, 각각의  $N_{gas}$ 를 구하였다. 물흡수선량( $D_{water}$ )은 방사선에너지별 식(12)에 따라 결정 평가되었다. 공동전리함의 교체보정계수  $P_{repl}$ 은 물재질에서 공동전리함으로 대체됨에 따라 전자플루언스가 변하게 되어 보정이 필요하게 되며, 공동의 유한규격으로 측정점이 심부선량기울기상에 있을 때 기술표정법과 전자평형에 의한 전자플루언스 보정법이 있다. 전자평형에 관한 전자플루언스 보정은 선량증가영역에서 2차 전자평형이 일어나지 않은 영역의 전자플루언스에 대한 보정이므로, 최대선량점  $D_{max}$  이상의 깊이에서는 전자평형이 일어난 영역이므로 오로지 선량기울기에 의한 플루언스 변화를 적용하였다. 본 연구의 IC-10의 내경은 6 mm이고 6 MV와 23 MV X선에 대한  $P_{repl}$ 은 최대선량점에서 평가함에 따라 Table 4와 같이 1.00을 적용하였다. 본원의 선형가속기 출력선량은 해마다 MDACC의 TLD 우송선량비교 프로그램에 참여하여 장기간 선량오차범위를 2% 이내 유지하고 있음을 알 수 있다.

MDACC의 TLD의 선량평가서에는 5% 범위를 벗어나지 않을 것을 권장하고 있으나 치료선량에 미칠 오차의 누적을 감안하여 2%를 넘지 않아야 한다. 선량평가 오차를 줄이는 방법 중 강조되는 사항은 가능한 프로토콜에서 제시하는 공동기체전리함을 준비하는 것이 중요하며, 전위계는 150-400

V 범위에서 높은 전압과 낮은 전압에 의한 전리량을 비교할 수 있어야 하고, 전리함의 전극의 변환이 가능해서 분극효과에 의한 평균전리전류를 얻을 수 있는 전위계가 필수적이다. 조사선량계수로부터 물의 흡수선량을 변환하는 TG-21은 변환식의 복잡성과 표준전리함의 종류가 미흡해 이론적 변환의 미세한 오차가 누적되어 예상하지 못한 오차를 일으켜 중앙치료결과에 악영향을 초래할 수 있으므로 흡수선량변환식의 향마다 엄격히 정의에 입각한 해석이 필요하다. 따라서 출력선량프로토콜의 전산화와 외국의 선량평가기관의 선량모니터프로그램의 지속적 참여와 개선된 선량평가프로토콜의 응용으로 보다 안정된 선량평가를 할 수 있을 것으로 생각된다.

## 요 약

기체전리함 IC-10과 IC-15의 조사선량계수  $N_x$ 는 TG-21 프로토콜에 따라 기체에 대한 전리함벽재질의 평균질량저지능비와 평균질량에너지흡수계수의 비로 기체흡수선량계수( $N_{gas}$ )를 구하였다. 전리함의 계측값은 기온기압 보정을 하였으며, 광자선의 에너지에 따라 기체에 대한 물의 평균질량저지능비, 이온재결합보정, 기체전리함의 교체보정을 통해 펜텀의 물흡수 선량을 구하여 출력선량을 결정하였으며, 선형가속기의 출력선량은 모니터단위선량계수 cGy/MU로 나타내어, 임의의 중앙치료선량을 열형광선량계에 조사하여 선량평가의 정확성을 모니터하였다.

MDACC의 열형광선량계 우송을 이용하여 선형 가속기의 6 MV X선과 23 MV X선에 대한 15년간 출력선량을 평가비교한 결과 각각  $1.000 \pm 0.012$ 와  $1.001 \pm 0.013$ 을 얻어 표준오차가 1.3% 이내 있어 신뢰성 높은 선량평가가 이루어졌음을 알 수 있다.

### Acknowledgment

The author deeply thanks for a professor Marilyn Stovall, Ph.D. to support and give me a chance to participate the postal output comparison program for long years.

### 참고 문헌

- Burlin TE. *Radiation Dosimetry*. 2nd ed. New York: Academic press;1968, p. 255.
- Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH. *The dosimetry of ionizing radiation*. Vol II. Orland: Academic press;1987, p. 169-75
- A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 1983;**10**(5):741-71.
- Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, Hanson WF, Huq MS, Nath R, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 1999;**26**(9):1847-70.
- Kirby TH, Hanson WF, Gastorf RJ, Chu CH, Shalek RJ. Mailable TLD system for photon and electron therapy beams. *Int J Radiation Oncol Biol Phys* 1986;**12**(2):261-5.
- ICRU Report No.14. Radiation dosimetry: X-Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0.6 and 50MeV. ICRU, Washington, D.C.1969, p. 1-36.
- White GA Hr, Gibbs GL. Comments on "A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams". *Med Phys* 1985;**12**(1):114.
- Johns HE, Cunningham JR. *The Physics of Radiology*. 4th ed. Springfield, : Charles C Thomas; 1977, p. 272-310.
- Khan FM. *The Physics of Radiation Therapy*. 4th ed. Philadelphia. : Lippincott Williams & Wilkins; 2009, p. 95-137.
- Nahum A.E. Water/air mass stopping power ratios for megavoltage photon and electron beams. *Phys Med Biol* 1978;**23**(1):24-38.
- Tomé WA, Palta JR. On the calculation of mean restricted collision stopping powers. *Med Phys* 1998;**25**(5):758-72.
- Fletcher GH. *Textbook of radiotherapy*, 3rd ed. Philadelphia: Lea and Febiger; 1981, p. 37.
- ICRU Report No.24. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures. Washington, D.C: ICRU;1976, p. 1-55.
- Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, Hanson WF, Leibel S, Morton RJ, et al. Comprehensive QA for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med Phys* 1994;**21**(4):581-618.
- American Association of Physicists in Medicine. *AAPM Report No.86. Quality assurance for clinical trials: A primer for physicists*. Madison: Medical Physics Publishing;2004, p. 1-63.
- Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin FF, Simon W, Dresser S, et al. Task Group 142, American Association of Physicists in Medicine. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. *Med Phys* 2009;**36**(9):4197-212.
- Khan FM. *The Physics of Radiation Therapy*. 4th ed. Philadelphia. Lippincott Williams & Wilkins; 2009. 375-403.
- Ding GX, Cygler JE, Kwok CB. Clinical reference dosimetry: Clinical reference dosimetry: comparison between AAPM TG-21 and TG-51 protocols. *Med Phys* 2000;**27**(6):1217-25.