

## Determining Ion Collection Efficiency in a Liquid Ionization Chamber in Co-60 Beam

Sang Hyoun Choi\*<sup>†</sup>, Chan Hyeong Kim\*

\*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, <sup>†</sup>Research Center for Radiotherapy, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul, Korea

Liquid ionization chamber is filled with liquid equivalent material unlike air filled ionization chamber. The high density material allow very small-volume chamber to be constructed that still have a sufficiently high sensitivity. However liquid ionization chamber should be considered for both initial recombination and general recombination. We, therefore, studied using the Co-60 beam as the continuous beam and the microLion chamber (PTW) for comparing the ion collection efficiency by Greening theory, two-dose rate method and our experiment method. The measurements were carried out using Theratron 780 as the cobalt machine and water phantom and 0.6 cc Farmer type ionization chamber was used with microLion chamber in same condition for measuring the charge of microLion chamber according to the dose rates. Dose rate was in 0.125~0.746 Gy/min and voltages applied to the microLion chamber were +400, +600 and +800 V. As the result, the collection efficiency by three method was generally less than 1%. In particular, our experimental collection efficiency was in good agreement within 0.3% with Greening theory except the lowest two dose rates. The collection efficiency by two-dose rate method also agreed with Greening theory generally less than 1%, but the difference was about 4% when the difference of two dose rates were lower. The ion recombination correction factors by Greening theory, two-dose rate method and our experiment were 1.0233, 1.0239 and 1.0316, respectively, in SSD 80 cm, depth 5 cm recommended by TRS-398 protocol. Therefore we confirmed that the loss by ion recombination was about 3% in this condition. We think that our experiment method for ion recombination correction will be useful tool for radiation dosimetry in continuous beam.

**Key Words:** Liquid ionization chamber, Collection efficiency, Ion recombination

### 서 론

액체 전리함은 의료 방사선 분야에서 Wickman<sup>1)</sup>에 의해 처음 소개된 이후로 방사선 선량 평가를 위한 응용분야에서 많은 연구들이 진행되어 왔다.<sup>2-5)</sup> 액체 전리함은 공기가 채워진 전리함(air-filled ionization chamber, 공동 전리함)과는 달리 감응매질이 물 등 가 물질로 이루어져 있다. 물 등 가 물질은 공기에 비해 밀도가 300배 이상 높아서 소조사면에서도 충분히 많은 신호(signal)를 측정할 수 있으며, 소

조사면 선량 평가를 위해 감응매질을 충분히 작게 만들 수도 있다. 그래서 기존 조사면에서의 물흡수선량 뿐만 아니라 세기조절방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy), 체적회전방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy)와 같은 소조사면을 사용하는 선량 평가에도 적합한 전리함이다.<sup>6,7)</sup> 방사선 선량 평가에 있어서 두드러진 장점을 가진 액체 전리함이지만, 공동 전리함 만큼 널리 사용이 되고 있지 않다. 이는 물과 같은 밀도가 높은 매질에서는 더 많은 이온들이 생성이 되고, 이온의 이동이 매우 낮기 때문에 이온이 재결합하는 현상이 공기에서 보다 많이 일어나기 때문이다. 그러므로 액체 전리함을 사용하기 위해서는 이온 재결합 손실을 정확히 보정해 주어야 한다.

이온 재결합은 초기 재결합(initial recombination)과 일반 재결합(general recombination)으로 나뉜다. 초기 재결합은 단일 입자의 궤적에 따라 이온이 재결합되는 현상으로 선량률에는 영향을 받지 않는다. 단지, 이온화 밀도 즉 선에

This project was supported by Ministry of Sciencr, ICT and Future Planning.

Received 3 March 2014, Accepted 16 March 2014

**Correspondence:** Chan Hyeong Kim (chkim@hanyang.ac.kr)

Tel: 82-2-2220-0513, Fax: 82-2-2220-4059

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

너지전달(Linear Energy Transfer)에 영향을 받는다. 일반 재결합 또는 체적 재결합(Volume recombination)은 서로 다른 궤적으로부터 온 이온전자들이 서로 충돌할 때 초기 재결합에서 벗어난 이온들 사이에서 다시 재결합이 일어나는 현상으로 이온화된 입자들의 밀도 즉 펄스 당 선량률에 영향을 받는다. 두 재결합 손실 모두 인가전압에 의존하며, 일반 재결합 손실은 이온 수집 시간에도 영향을 받는다. 공동 전리함의 경우 초기 재결합에 의한 재결합 손실이 무시할 만하지만, 액체 전리함의 경우 초기 재결합과 일반 재결합에 의존적이기 때문에 공동 전리함에 적용되는 이진압법(Two Voltage method)을 사용할 수 없다. 그러므로 액체 전리함의 초기 이온 재결합 및 일반 이온 재결합에 의한 수집 효율을 구하기 위한 연구들이 수행되어 왔다.

Johansson 등이 감응매질이 테트라메틸실레인(tetraethylsilane)과 이소옥탄(isooctane)으로 구성된 액체 전리함을 이용하여 펄스 빔인 20 MV 광자 빔에서 수집 효율을 구하기 Boag 이론을 적용하여 실험적으로 구하기 위한 연구를 수행하였다.<sup>8)</sup>

또한 Pardo-Montero 등은 Onsager 이론을 사용하여 이진압법(Two-voltage method)과 삼전압법(Three-voltage method)을 이용하여 펄스 빔 및 연속 빔에서 재결합 손실을 계산하였다.<sup>9)</sup> Heikki Tolli 등은 TMS와 이소옥탄으로 채워진 액체 전리함을 이용한 각기 다른 두 펄스 당 선량을 이용하여 펄스 빔에서 재결합 손실을 이선량률법(Two-dose rate method)을 이용하였고,<sup>10)</sup> 이 방법을 이용하여 Anderson 등은 연속 빔인 방사선 동위 원소(<sup>18</sup>F)에서 수집 효율을 측정 을 통해 구하는 연구를 수행하였다.<sup>11)</sup> 많은 연구들이 수행되었음에도 불구하고, 액체 전리함의 이온 재결합 손실을 보정하기 위한 표준화된 방법이 권고되고 있지 않은 실정이다. 이는 액체 전리함의 수집 효율은 연속 빔 및 펄스 빔에 따라 적용하는 방법이 다르고 에너지, 선량률에 의존적

인 반응을 보이기 때문이다.

본 연구에서는 상업용으로 나온 PTW사의 microLion 액체 전리함에 대한 이온 재결합 손실을 구하기 위해서 Greening 이론법<sup>12)</sup>과 Andersson 등이 제안한 이선량률법(Two-dose rate method)을 이용하여 연속 빔인 코발트 빔에 대한 이온 재결합 손실 보정 인자를 결정하고, 본 연구에서 실험을 통해 구하는 방법과 비교, 연구를 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 액체 전리함

본 연구에서 사용한 액체 전리함은 상업용으로 나온 PTW사의 microLion 전리함(Germany, PTW)를 사용하였다. microLion 액체 전리함은 감응면적이 물 등가물질인 이소옥탄(isooctane)으로 구성되어 있으며, 전극 매질은 흑연(graphite)로 이루어져 있다. 감응면적은 핀 포인트 전리함(pinpoint, 0.015 cm<sup>3</sup>)보다도 작은 0.0017 cm<sup>3</sup>이며, 전극 간격은 0.35 mm이고, 지름은 1.25 mm이다. 이 전리함은 유효선량 측정점이 전면 창으로부터 0.975 mm 아래에 위치해 있는 평행 평편형 전리함이다. 최대 가용 전압은 1000 V이며, 제조사에서 권고하는 명목상 전압은 800 V로, UNIDOS- web-line (Germany, PTW) 전위계와 400 V이상의 고전압을 걸어주기 위해 HV supply (Germany, PTW)를 함께 사용하였다. 액체 전리함은 공동 전리함과 달리 측정 전 안정화 과정이 필요하므로, 본 연구에서는 제조사 권고에 따라 최소 15분의 준비 시간을 두고, 3 Gy 이상의 선량을 조사한 이후에 측정을 시행하였다.<sup>13)</sup>

### 2. 실험 구성

본 연구의 실험은 Co-60 감마선 장비인 Theratron780 (AECL Medical, Canada)에서 20×20×30 cm<sup>3</sup>의 크기의 물팬

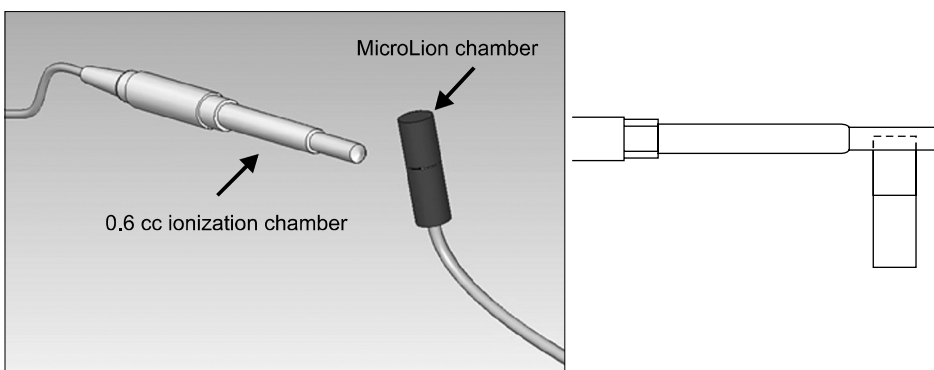


Fig. 1. Diagram showing the setup of the 0.6 cc ionization chamber and microLion liquid ionization chamber in water phantom.

톱(MP3-XS, Germany, PTW)을 사용하여 시행되었다. 조사 면 크기는  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 대하여 선원표면거리(SSD)를 75 cm ~ 155 cm까지 다르게 하거나 측정 깊이를 5 cm ~ 25 cm까지 변화시키며 다양한 선량률에 대한 액체 전리함의 전하량을 1분간 세 번씩 반복 측정하였다. 선량률은 0.6 cc의 체적을 갖는 공동 전리함(PTW 30013 Farmer type ionization chamber)을 이용하여 측정하였고, 국제원자력기구(IAEA)와 국내 의학물리학회(KSMP)에서 권고하는 물흡수선량 프로토콜인 TRS-398에 따라 측정하였다.<sup>14)</sup> 본 연구에서는 선량률에 따른 액체 전리함의 전하량을 측정 시 측정 조건이 달라짐에 따른 불확도를 줄이기 위해서 Fig. 1과 같이 동시에 측정 할 수 있도록 두 전리함을 배치하고, 두 개의 전위계를 사용해서 실시간으로 전하량을 측정하였다. 다른 SSD와 다른 깊이에서 측정 시 매번 공동 전리함의 경우 +400, -400, +200 전압에서 전하량을 측정하여 극성 효과 보정 계수와 이온 재결합 보정 계수를 계산하였다. 액체 전리함의 경우는 +400, +600, +800 전압 및 -800 전압에서 전하량을 측정하였다.

### 3. 수집 효율 이론(Collection efficiency theory)

액체 전리함에 대한 이온 재결합 손실은 Greening이 제안한 이론식과 Anderson 등에 의해 제안된 연속법에서의 이선량률법 (Two-dose rate method)을 이용한 실험적인 방법으로 계산하고 본 연구에서 실험을 통해 계산된 보정 계수와 비교하였다.

먼저 Greening의 이론적인 수집 효율 ( $f$ )을 구하는 식은

$$f = \frac{Q_M}{Q_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{6}\xi^2} \quad (1)$$

으로, 여기서  $Q_M$ 은 측정값이고  $Q_0$ 는 초기 이온 재결합에서 벗어난 전하량이다.  $\xi^2$ 는

$$\xi^2 = \frac{m^2 h^4}{U^2} \left( \frac{Q_0}{Vt} \right) \quad (2)$$

이고,  $m^2 = \frac{\alpha}{ek_+k_-}$ 이므로, (1)식에 (2)식을 넣어서 다시 풀어 쓰면,

$$\frac{Q_0}{Q_M} = 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{\alpha}{ek_+k_-} \right) \frac{h^4}{U^2} \left( \frac{Q_0}{Vt} \right) \quad (3)$$

과 같다. 여기서,  $\alpha$ 는 이온재결합률 상수 ( $5.4 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )이고,  $e$ 는 전자 전하( $1.6 \times 10^{-19} \text{ coulombs}$ ),  $k_{\pm}$ 는 양/음전하의 이동성( $2.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ ),  $h$ 는 전극 간격(0.35 mm),  $U$ 는 전압,  $Vt$ 는 각각 감응면적의 볼륨( $0.0017 \text{ cm}^3$ ) 및 측정시간(60 s)으로 알려진 값이다. 하지만,  $Q_0$ 는 알지 못하는 값이므로,  $Q_0$ 를 식 (3)에서 제거하고 다시 쓰면 수집 효율 (collection efficiency)은

$$f = 1 - \frac{1}{6} \frac{\alpha}{ek_+k_-} \frac{h^4}{U^2} \frac{Q_M}{Vt} \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그러므로 수집 효율은 측정이 이루어진 전압( $V$ )에서 액체 전리함의 온도 및 극성효과가 보정된 전하량 ( $Q_M$ )만 알면 구할 수 있다.

Anderson 등의 이선량률법은 Greening의 이론식인 식 (1)을 수정하여 실험식으로 만든 것으로 다음과 같다.

$$f = \frac{\left( \frac{Q_{Lic}(d_1)}{Q_{Lic}(d_2)} - 1 \right)}{\left( \frac{Q_{air}(d_1)}{Q_{air}(d_2)} - 1 \right)} \quad (5)$$

여기서  $d_1$ 과  $d_2$ 는 서로 다른 선량률이고,  $Q_{Lic}$ 는 액체 전리함의 보정된 전하량이며,  $Q_{air}$ 는 공동 전리함의 보정된 전하량이다. 이는 다른 선량률, 같은 조건(같은 깊이, 같은 선원과 표면간의 거리)에서 측정한 두 전리함의 전하량을 이용하여 구할 수 있음을 보여준다.

### 결과 및 고찰

공동 전리함과 액체 전리함의 포화전압을 확인하기 위해서 Fig. 2와 같이 5 V ~ 400 V, 10 V ~ 900 V까지 전압을 각각 다르게 하여 전하량을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 공동 전리함은 100 V 이상이 되는 전압에서 전하량이 포화가 되는 것을 확인 할 수 있지만, 액체 전리함은 900 V 전압에서도 전하량이 계속적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 낮은 전압에서는 일반 재결합에 의한 이온 손실이 발생한 이후 어느 전압이상에서는 초기 이온 재결합이 지배적이기 때문으로, 초기 이온 재결합을 무시할 수 있는 공동 전리함에서 사용할 수 있는 이전압법을 사용하여 이온 재결합 손실율을 액체 전리함에서는 구할 수 없음을 보여준다.

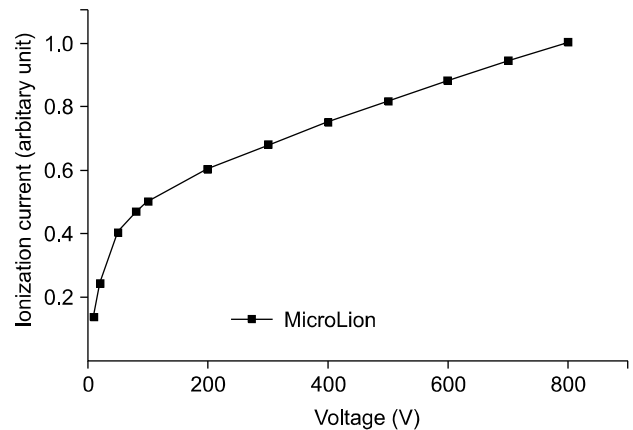
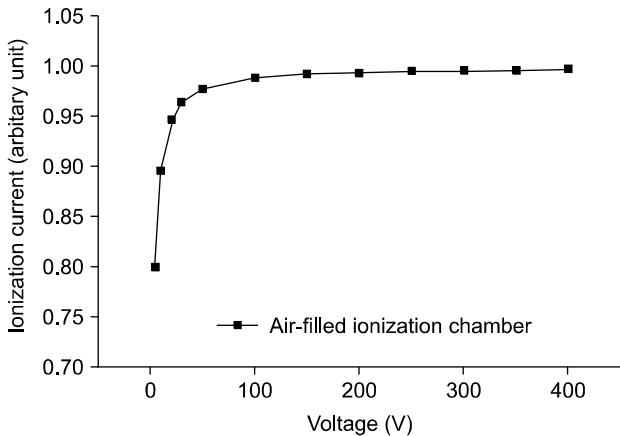


Fig. 2. The ionization current of air filled ionization chamber (left) and microLion liquid ionization chamber (right) versus applied voltage for Co-60 beam.

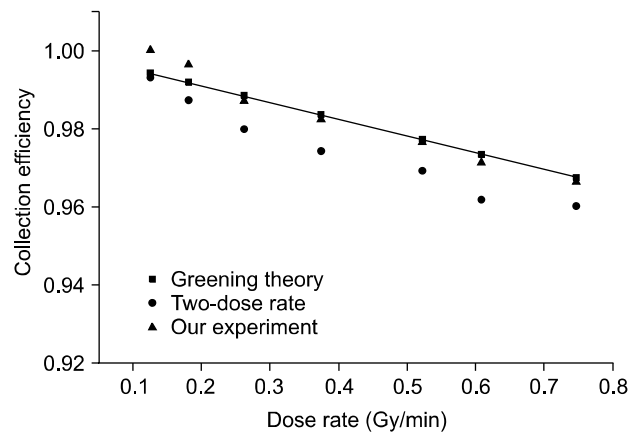
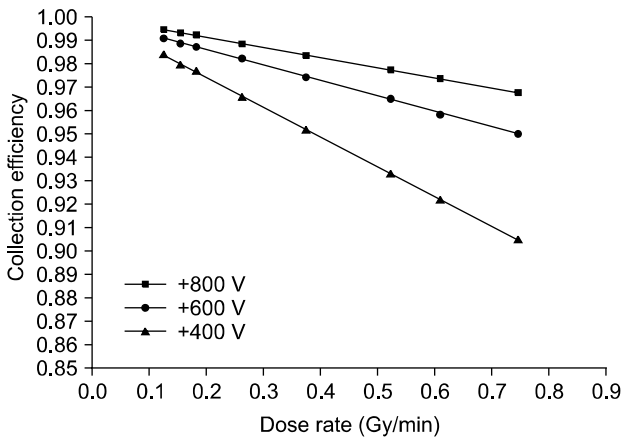


Fig. 3. General correction efficiency relative to the dose rates (Gy/min) of the microLion chamber in different voltages (+800, +600 and +400) determined by Greening theory.

Fig. 4. Comparison of correction efficiency obtained by the Greening theory, two dose rate method and our experiment method.

Fig. 3은 식 (4)를 이용하여 계산된 선량률에 따른 microLion 전리함의 수집 효율을 도식화한 것이다. 공동 전리함으로 결정한 기준 선량률은 각 선원 및 표면간의 거리(SSD)와 깊이 별로 측정된 전하량에 온도/기압( $K_{TP}$ ), 극성 효과( $K_{pol}$ ) 및 이온 재결합 보정 계수( $K_s$ )를 곱하여 보정하고, 교정기관으로부터 발급된 전리함의 물흡수선량 교정 계수( $N_{D,w,Q_0}$ )를 곱하여 결정하였으며, 그 결과 0.125~0.746 Gy/min이었다. 800 V의 전압에 대한 microLion 전리함의 수집 효율은 0.125 Gy/min의 경우 0.994이었으며, 0.746 Gy/min의 선량률까지 -0.0178의 기울기로 감소하는 선형성을 보였다. 600 V와 400 V에서 또한 수집 효율은 선량률이 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며, 전압이 감소할수록 수집 효율도 감소하는 경향을 보였다. 이는 인가전

압이 낮을수록 이온 간의 재결합율이 높아져서 이온 재결합 손실이 증가함을 의미한다. 400 V의 전압에서는 수집 효율이 0.746 Gy/min에서 최대 10% 이상의 손실이 발생함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 Greening의 수집 효율 이론식과 더불어 Anderson이 제안한 이선량률을 계산하여 비교하였으며, 또한 각기 다른 선량률에서 측정된 microLion 전리함의 전하량과 공동 전리함의 보정된 전하량의 비율을 이용하여 수집 효율을 추정하여 같이 비교하였다(Fig. 4). 본 연구에서는 측정에 의한 수집 효율을 다른 선량률에서 두 전리함의 전하량의 비를 이용하여 결정하였다. 이 방법은 다음과 같이

$$f = \left( \frac{Q_{air}(d_2)}{Q_{Lic}(d_2)} \right) / \left( \frac{Q_{air}(d_1)}{Q_{Lic}(d_1)} \right) \quad (6)$$

정의 하였으며, 여기서  $d_2$ ,  $d_1$ 은 각기 다른 선량률을 의미한다.  $d_2$ 는 수집 효율이 1에 근접할 정도로 충분히 작은 선량률이어야 한다. 본 연구에서 측정된 가장 작은 선량률은 0.125 Gy/min이므로, 이 때 선량률에서의 비율을 기준으로 수집 효율을 구하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 세 가지의 방법이 모두 선량률이 증가함에 따라 수집 효율이 감소하는 경향을 보이며, 이선량률 방법은 Greening 이론값에 비해 대체로 낮은 수집 효율을 보였지만, 세 측정법 간의 차이는 1.5% 이내로 잘 일치하였다. 이 전하 비율법의 경우에는 낮은 선량률에서는 Greening 이론값에 비해 높은 값을 보이지만, 나머지 선량률에서는 잘 일치함을 보였다. 이는 본 연구에서 실험한 가장 낮은 선량률(0.125 Gy/min)에서 microLion 전리함의 수집 효율이 1에 가까운 값을 갖는다는 것을 의미한다. Table 1은 세 가지 방법을 이용해 구한 수집효율로 얻어진 이온 재결합 보정 계수이다. 가장 낮은 선량률에서 Greening 방법과 이선량률법에 의한 이온 재결합 보정 계수는 각각 1.0056, 1.0069로 1 보다 높은 값을 갖는 반면 본 연구에서 실험으로 결정하는 방법은 이선량률에서의 값을 1로 정하였으므로, 0.1254 Gy/min에서 약 0.7% 낮은 값을 보임을 확인 할 수 있다. 0.1813 Gy/min 인 선량률에서는 Greening 이론법과는 0.5% 이내로 잘 일치하였으며, 0.2620 Gy/min 이상의 선량률에서는 0.3% 이내로 잘 일치하였다. 결과에서 볼 수 있듯이, 전압이 높을 수록 수집효율이 증가하므로, 전압은 제조사에서 권고하는 800 V를 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

TRS-398 물흡수선량 프로토콜에서 권고하는 표면과 선

원간의 거리가 80 cm이고, 깊이 5 cm에서 Greening 이론법과 이선량률법, 본 연구에서 실험을 통해 얻은 방법에 의한 이온 재결합 보정 계수는 각각 1.0233, 1.0239, 1.0316으로, 이 조건에서 대략 3%의 이온 재결합에 의한 손실이 발생함을 확인하였다.

Anderson 등이 제안한 이선량률법은 Greening 이론법과는 달리 식 (5)에서 볼 수 있듯이 실험에 의해서만 구할 수 있으며, 식 또한 간단해서 사용자가 사용하기 편리한 장점이 있다. 하지만, Table 2와 같이  $d_1$ 의 선량률을 고정하고,  $d_2$ 를 변화시켜서 계산하면, 수집효율이 일정한 값을 갖지 않으며,  $d_1$ 과  $d_2$ 의 선량률의 차이가 적은 경우에는 최대 4%이상의 차이를 보였다. 선량률의 비율이 2 이상 차이가 나는 경우에는 이온 재결합 보정 계수는 1.0097~1.0069로 0.3% 이내의 차이를 보였다. 선량률의 차이가 가장 많이 날 경우 즉  $d_1$ 과  $d_2$ 가 각각 2.299 nC/min, 13.66 nC/min일 때 수집 효율이 Greening 이론법과 잘 일치함을 보였는데, 이는 이선량률법은 서로 다른 선량률이 차이가 많이 날 때 유효하게 쓸 수 있는 방법이라 판단된다.

본 연구에서도 실험만으로 수집효율을 계산할 수 있는 이 전하량 비율법은 수집효율이 1에 가까운 정도로 낮은 선량률에서 측정을 해야 하며, 그 지점에서 공동 전리함과 액체 전리함과의 전하량 비율이 기준값이 되기 때문에 충분히 낮은 선량률이 아닐 경우 오차가 커진다는 단점이 있다. 하지만, 본 실험에서 가장 낮은 선량률 0.1254 Gy/min은 선원과 표면간의 거리가 80 cm이고, 깊이 25 cm에서 Greening 이론식에 의하면 이온 재결합 보정 계수가 1.0056으로 0.6% 이하의 차이를 보이므로, 동일 깊이에서 SSD를 충분히 멀리 한다면 오차를 충분히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Ion recombination correction factor ( $k_s$ ) for a microLion chamber by Greening theory, two dose rate method and our experiment method at different dose rate.

Dose rate (Gy/min)	Greening theory	Two-dose rate method	Our experiment method
0.1254	1.0056	1.0069	1.0000
0.1813	1.0082	1.0127	1.0038
0.2620	1.0117	1.0202	1.0130
0.3743	1.0167	1.0263	1.0179
0.5218	1.0233	1.0316	1.0239
0.6083	1.0272	1.0396	1.0295
0.7457	1.0333	1.0413	1.0345

Table 2. Collection efficiency by Two-dose rate method at different dose rates ( $d_1$ ,  $d_2$ ) in Cobalt 60 beam.

Dose rate	ionization current (nC/min)		Collection efficiency ( $d_1$ )
	0.6 cc ionization chamber	microLion chamber	
$d_1$	2.299	1.261	
$d_2$	2.836	1.570	1.0385
	3.323	1.816	0.9913
	4.789	2.601	0.9904
	6.855	3.697	0.9913
	9.562	5.124	0.9925
	11.165	5.940	0.9919
	13.660	7.247	0.9931

## 결 론

액체 전리함은 감응매질이 물 등가물질로 이루어져 있어서 이온 재결합 손실을 보정하는 방식이 공동 전리함과는 다르다. 그러므로 본 연구에서는 이론식에 의한 방법인 Greening 이론 방법과 실험에 의한 방법인 이선량률법 및 본 연구의 실험법을 이용하여 연속 빔인 코발트 60 빔에서 수집효율을 결정하였다. 측정된 데이터를 이용하여 결정된 수집효율은 세 가지 방법들 간의 차이가 대체로 1% 이내로 잘 일치하였으며, 물흡수선량 프로토콜인 TRS-398에서 코발트 빔에 대하여 권고하는 조건인 선원과 표면간의 거리가 80 cm이고, 깊이가 5 cm인 경우 이온 재결합 보정 계수는 1.0233~1.0316이었다. 본 연구에서 실험을 통해 수집효율을 구하는 방식은 선량률이 충분히 낮은 지점에서 전하량을 측정 하면 다른 선량률에서의 액체 전리함의 보정된 전하량을 이용하여 손쉽게 결정 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 실험을 통해 구한 수집효율은 가장 낮은 두 선량률을 제외하고는 Greening 이론법과 0.2% 이내로 잘 일치함을 보여, 코발트 빔에서 선량 평가 시 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다. 향후 본 연구에서의 액체 전리함에 대한 실험적 수집효율 결정방법을 이용하여 다른 연속 빔에서도 유용성을 평가해 볼 필요가 있다고 사료된다.

## References

1. Wickman G: A liquid ionization chamber with high spatial resolution. *Phys Med Biol* 19:66-72 (1974)
2. Wickman G, Nyström H: The use of liquids in ionization chambers for high precision radiotherapy dosimetry. *Phys Med Biol* 37:1789-1812 (1992)
3. Daşu A, Löfroth PO, Wickman G: Liquid ionization chamber measurements of dose distributions in small 6 MV photon beams. *Phys Med Biol* 43:21-36 (1998)
4. Pardo J, Franco L, Gómez F, et al: Development and operation of a pixel segmented liquid-filled linear array for radiotherapy quality assurance. *Phys Med Biol* 50:1703-1716 (2005)
5. Choi SH, Kim CH, Huh HD, Kim SH, Kim KB: Determination of the beam quality correction factor  $k_{Q,Q_0}$  for the microLion chamber in a clinical photon beam. *J Kor Phys Soc* 62(1): 152-158 (2013)
6. Eberle K, Engler J, Hartmann G, Hofmann R, Hörandel JR: First tests of a liquid ionization chamber to monitor intensity modulated radiation beams. *Phys Med Biol* 48:3555-3564 (2003)
7. Chung E, Soisson E, Seuntjens J: Dose homogeneity specification for reference dosimetry of nonstandard fields. *Med Phys* 39:407-414 (2012)
8. Johansson B, Wickman G, Bahar-Gogani J: General collection efficiency for liquid isooctane and tetramethylsilane in pulsed radiation. *Phys Med Biol* 42:1929-1938 (1997)
9. Pardo-Montero J, Gómez F: Determining charge collection efficiency in parallel-plate liquid ionization chambers. *Phys Med Biol* 54:3677-3689 (2009)
10. Töllli H, Sjögren R, Wendelsten M: A two-dose-rate method for general recombination correction for liquid ionization chambers in pulsed beams. *Phys Med Biol* 55:4247-4260 (2010)
11. Andersson J, Töllli H: Application of the two-dose-rate method for general recombination correction for liquid ionization chambers in continuous beams. *Phys Med Biol* 56:299-314 (2010)
12. Greening J: Saturation characteristics of parallel-plate ionization chambers. *Phys Med Biol* 9:143-154 (1964)
13. PTW, Ionization chamber Type 31018 (microLion), User Manual (2007)
14. International Atomic Energy Agency (IAEA): Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water IAEA Technical Report Series (TRS) 398 (Vienna: IAEA) (2000)

## Co-60 빔에서 액체 전리함의 이온 수집 효율 결정 연구

\*한양대학교 원자력공학과, † 한국원자력의학원 방사선의학연구소 방사선치료연구부

최상현\*<sup>†</sup> · 김찬형\*

액체 전리함은 공동 전리함과 달리 감응매질이 물 등가물질로 이루어져 있어서, 감도가 매우 높아서 충분히 작게 만들 수 있기 때문에 기준 조사면 뿐만 아니라 소조사면의 선량 평가에 유용하다는 장점이 있지만, 이온 재결합 손실 계산에 있어 초기 재결합과 일반 재결합을 모두 고려해야 하므로, 사용상에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 연속 빔인 코발트 60 빔에서 PTW사의 microLion 액체 전리함을 이용하여 Greening 이론식과 이선량률법 및 다른 실험을 이용하여 수집 효율을 구하고, 비교하는 연구를 수행하였다. 이는 코발트 장비인 Theratron 780과 물팬텀을 이용하여 수행하였으며, 선량률에 따른 microLion 전리함의 전하량을 측정하기 위해 0.6 cc 공동 전리함을 같은 조건에서 동시에 측정하였다. 이때 선량률의 범위는 0.125~0.746 Gy/min이었으며, 각 선량률에서 +400, +600 및 +800 전압에 대하여 액체 전리함을 이용하여 전하량을 측정하였다. 측정된 데이터를 이용하여 세 가지 방법에 따라 계산된 수집효율은 대체로 1% 이내로 일치하였다. 특히 본 연구에서 실험을 통해 구한 수집효율은 가장 낮은 두 선량률을 제외하고는 0.3% 이내로 잘 일치함을 보였다. 이선량률법의 경우 Greening 이론식과 비교하여 대체로 1% 이내의 차이를 보였지만, 두 선량률의 차이가 적을 때 대략 4% 가까운 차이를 보임을 확인하였다. TRS-398 물흡수선량 프로토콜에서 권고하는 표면과 선원간의 거리가 80 cm이고, 깊이 5 cm에서 Greening 이론법과 이선량률법, 본 연구에서 실험을 통해 얻은 방법에 의한 이온 재결합 보정 계수는 각각 1.0233, 1.0239, 1.0316으로, 이 조건에서 대략 3%의 이온 재결합에 의한 손실이 발생함을 확인하였다. 본 연구에서 실험을 통해 이온 재결합 손실을 계산하는 방법은 다른 두 선량률에서 액체 전리함의 보정된 전하량을 이용하여 손쉽게 결정할 수 있기 때문에 연속 빔에서 선량 평가 시에 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

---

**중심단어:** 액체 전리함, 수집 효율, 이온 재결합