

&lt;원저&gt;

# 광학 전산화단층촬영 스캐너 사용을 위한 중합체 겔과 BANG™ 겔 선량계의 특성 비교

장경환

극동대학교 방사선학과

## Comparison of Polymer and BANG™ Gel Dosimeters to Use a Optical Computed Tomography Scanner

Kyung Hwan Chang

Department of Radiological Science, Far East University

**Abstract** The purpose of this study was to compare the basic radiological characteristics of in-house polymer gel and commercially-available gel (BANG™) gel dosimeters with a spectro-photometer to use a optical computed tomography (CT) scanner. We investigated the radiological characteristics including dose linearity, absorbance spectrum, dose rate dependency and inter-and intra-reproducibility at wavelengths of 590, 600 and 630 nm. The optimal dose linearities of two gel dosimeters showed  $R^2$  value of 0.939 and 0.948 at wavelengths of 590 nm and 600 nm, respectively. For two polymer gel dosimeters, there is no peak sensitivity within the range of all wavelengths in absorbance spectrum. For in-house gel dosimeter, the dose rate dependency were within 5% for all wavelengths except for the dose rate of 100 MU/min. For BANG™ gel dosimeter, the dose rate dependency showed an error range of  $\pm 5\%$  for all wavelengths. The inter-and intra-reproducibility of two gel dosimeters were within the range of 2.5%. We have confirmed that the two gel dosimeters was appropriate for use with a optical CT scanner.

**Key Words :** Polymger gel, BANG™ gel, Spectrophotometer, Optical CT scanner, Radiological characteristics

**중심 단어 :** 중합체 겔, BANG™ 겔, 분광 광도계, 광학 CT 스캐너, 방사선학적 특성

## 1. 서 론

체적조절회전방사선치료(Volumetric modulated arc therapy: VMAT), 정위체부방사선치료(Stereotactic body radiation therapy: SBRT) 및 나선형 단층치료(Helical tomotherapy: HT) 치료기법들과 같은 최신 방사선치료에서의 정확한 선량 전달 검증을 위해서 환자 맞춤형 선량품질보증(Delivery quality assurance: DQA)이 필수적이다[1,2]. 따라서, 이와 같은 최신 방사선 치료기법을 이용한 방사선치료 시, 환자 선량과 선량 분포를 정확하게 평가하기 위하여, 2차원 및 3차원 선량측정시스템이 요구되고 있다[3-5]. 하지만,

현재 선량품질보증을 위한 선량측정 시스템으로는 3차원 선량분포를 정확하게 평가하기에는 제한점이 있다[6]. 이러한, 단점을 보완하기 위해서 3차원 겔 선량계의 사용이 증대되고 있다[6,7].

일반적으로 겔 선량계는 중합체 겔과 Radiochromic 겔 선량계로 나뉜다[7]. 중합체 겔 선량계의 종류로는 대표적으로 BANG™ 겔 선량계(BANG -1, BANG-2, BANG-3, MGS Research Inc., Guilford, CT, USA)가 있다. 중합체 겔 선량계는 방사선 조사 후, 조사 된 부위가 하얗게 되는 특징이 있다. 중합체 겔 선량계는 Fricke 선량계보다 안정적이고, 방사선에 민감하다는 특징이 있고, 대부분 자기공명영상

Corresponding author: Kyung Hwan Chang, Department of Radiological Science, Far East University, 76-32 Daehak-gil, Gamgok-myeon, Eumseong-gun, Chungbuk, 27601, Republic of Korea / Tel: +82-43-880-3825 / E-mail: nightholicmp@gmail.com

Received 22 February 2023; Revised 03 March 2023; Accepted 14 March 2023

Copyright ©2023 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

장치를 이용하여 선량 평가를 하고 있다[8,9]. Radiochromica 겔 선량계로는 PRESAGE™ 겔 선량계가 있고, 중합체 겔 선량계 보다는 산소에 덜 민감하다는 특징이 있다[10,11]. Radiochromic 겔 선량계는 대부분 광학스캐너 또는 전산화 단층촬영장치를 이용하고 있다[11].

다수의 연구자들은 겔 선량계가 방사선량 측정에 있어 신뢰성 있는 선량계로 사용되기 전에 겔 선량계에 흡수된 선량의 반응을 평가하기 위해 분광광도계, 핵자기공명, 전산화 단층촬영과 라만 분광광도계와 같은 장비를 이용하여 기초적인 연구를 진행했다[12-16]. Deene 등은 선량- $R^2$  반응 곡선을 이용하여 다른 겔 혼합비를 섞어서 MAGIC(Methacrylic and ascorbic acid in gelatin initiated by Copper) 겔 선량계의 방사선 반응을 평가하였다[12]. Haraldsson 등은 자기공명영상장치를 이용하여 저밀도 정상산소 중합체 겔 선량계의 다양한 혼합 비율에 따른 중합체 겔 선량계의 선량- $R^2$ 반응 곡선을 평가했다[13]. Jirasek 등은 엑스레이 전산화 단층촬영장치를 이용하여 화학 조성비를 다르게 한 겔 선량계의 선량 민감도와 해상력을 연구하였다[14]. Jirasek 등은 푸리에변환 Raman spectroscopy를 이용하여 PAG 선량계의 선량 민감도는 단량체와 가교제의 변화에 의존성이 있다는 것을 증명하였다[15]. 이들은 다양한 분광측정법을 이용하여 각각의 겔 선량계에 적합한 최적화된 파장을 발견하였다. 따라서, 우리는 광학 스캐너를 이용하여, 겔 선량계의 3차원 선량 분포를 분석하기 위해서 본 연구진이 개발한 겔 선량계에 맞는 적절한 파장을 찾아야 하는 필요성이 있음을 확인하였다.

본 연구의 목적은 광학스캐너를 사용하기 위하여, 본 연구진이 개발한 중합체 겔 선량계와 상업적으로 이용할 수 있는 BANG™ 겔 선량계(MGS Research Inc., Guilford, CT, USA)의 선량 직선성, 선량률 의존성, 재현성과 같은 기본적인 방사선학적 특징을 비교하는 것이다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 겔 선량계 합성

중합체 겔은 표준 대기 상태에서 제작하였다. 중합체 겔 선량계와 BANG 겔 선량계의 구성성분은 Table 1에 정리하였다. 중합체 겔 선량계는 증류수, 6% 젤라틴(300 bloom, Sigma-Aldrich, St.Louis, USA), 8% 메타크릴 산(MAA, contains 250 ppm MEHQ as inhibitor, 99%, Sigma-Aldrich, St.Louis, USA), 0.14 mL의 테트라 하이드록시메틸 포포늄 클로라이드(tetrakis

hydroxymethyl phosphonium chloride, THPC, 80% in H<sub>2</sub>O, Sigma-Aldrich, St.Louis, USA), and 0.0015 g의 하이드로 퀴논(hydroquinone, Sigma-Aldrich, St.Louis, USA)로 구성되었다[17]. 겔 안으로 들어오는 산소 오염을 막기 위하여 파라필름으로 막은 12.5 × 12.5 × 45 mm<sup>3</sup>의 규격인 polymethyl methacrylate (PMMA) 큐벳(Kartell S.p.A, Via Delle Industrie, Noviglio, MI, Italy) 안에 겔을 부었다. 만들어진 겔 선량계는 고형화하기 위하여 24시간 동안 5°C로 유지된 냉장고에서 보관하였다.

BANG™ 겔 선량계는 출판된 논문과 제조회사의 제조과정 설명서를 참조하여 제작하였다[18]. BANG™ 겔 선량계의 실험을 위해, 겔 선량계의 내부로 산소가 유입되는 것을 막고자 12.5 × 12.5 × 45 mm<sup>3</sup>의 규격인 석영으로 된 큐벳(1001-4, Mecasys, Yuseong-gu, Daejeon, Korea)을 사용하였다. 겔 선량계의 고형화를 위해서, 제작된 선량계는 약24시간 동안 8°C로 유지된 냉장고에서 보관하였다.

### 2. 실험 준비와 분석

모든 측정에서 6 MV 광자선을 발생하기 위하여 선형가속기(Clinac iX, Varian Medical System, Palo Alto, CA, USA)를 이용하였다. 갠트리 각도와 콜리메이터 각도 모두 0도로 하였다. 겔 선량계는 방사선 빔의 중심축에 수직인 곳에 위치시켰다. 1.5 cm 두께의 조직등가볼루스(tissue equivalent bolus, CIVCO Medical Solutions, Kalona, Iowa, USA)를 고체 물 팬텀(solid water phantom, 30 × 30 × 5 cm<sup>3</sup>) 위에 놓여진 큐벳 위에 위치시켰다. 모든 측정은 선원에서부터 볼루스 표면까지의 거리는 100 cm로 하였고, 조사야 크기는 10 cm × 10 cm로 셋업하였다(Fig. 1). 400 MU/min의 조사선량률로 겔 선량계에 방사선을 조사하였고, 이후, 겔이 담긴 큐벳들은 자외선-가시광선 분광광도계(Optizen 2120UV, Mecasys, Yuseong-gu, Daejeon, Korea)를 이용하여 스캔하였다. 파장에 따른 흡광도(absorbance)는 350 nm에서 900 nm 파장 범위에서 50 nm 간격으로 측정하여 분석하였다.

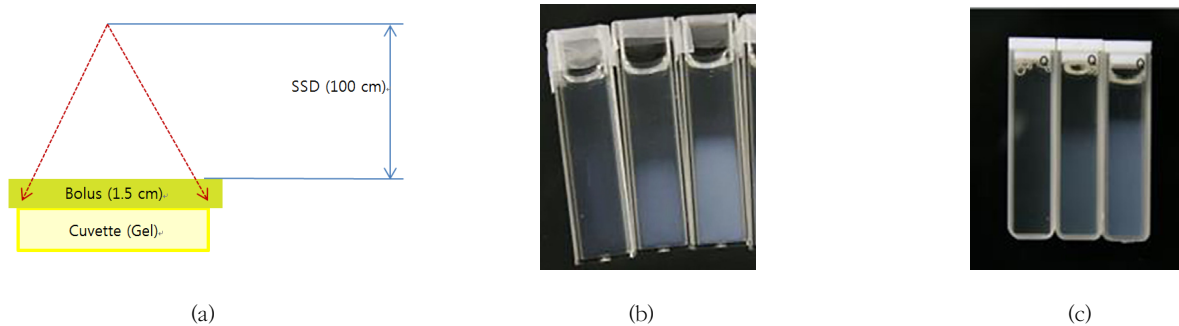
### 3. 선량직선성(Dose linearity)과 흡광도 스펙트럼(Absorbance spectrum)

겔 선량계의 흡광도가 방사선량에 선형적으로 비례한다는 것을 평가하기 위해서 측정하였다. 10 cm × 10 cm의 조사야 크기에서 수행되었다. 6 MV 광자선에서 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 cGy를 조사하여 선량직선성을 평가하였다. 방사선이 조사된 겔 선량계의 흡광도 스펙트럼은 분광광도계를 이용하여 350 nm에서 900 nm까지의 범위에서

**Table 1.** Compositions of the two gel dosimeters

Polymer gel dosimeter		BANG™ gel dosimeter	
Distilled Water	70 mL	MAA monomers in gelatin	250 mL
Gelatin	12 g	S vial	0.1 g
MAA	9.1 mL	M vial	0.01 g
THPC	0.14	C vial	2.5 mL

MAA, methacrylic acid; THPC, tetrakis hydroxymethyl phosphonium chloride; S, oxygen scavenger; M, dose response modifier; C, catalyst



**Fig. 1.** Experimental setup (a) for measurements of the polymer gel (b) and BANG™ gel dosimeter (c).

50 nm 간격으로 분석하였다. 증류수가 담긴 큐벳을 기준으로 사용하였다. 선량 직선성의 결정계수  $R^2$  값을 평가하기 위하여 1차 선형 맞춤 함수(Linear fit function)를 이용하였다.

#### 4. 선량률 의존성(Dose rate dependency)

선량 직선성 측정과 같은 실험 조건하에서, 선량률 의존성은 각각 100, 200, 300, 400, 500, 600 MU/min에서 200 cGy의 방사선량을 조사하여 측정하였다. 그리고 각 겔 선량계의 흡광도는 분광광도계를 이용하여 측정하였다. 흡광도는 400 MU/min 에서 정규화하였다.

#### 5. 겔 선량계 간의 재현성과 겔 선량계 내 재현성 (Inter- and intra-reproducibility)

선량 직선성 측정과 같은 실험 조건에서, 겔 선량계 간의 재현성은 각 방사선량에서 3개의 겔 선량계가 한 개의 셋트로 측정하였다. 1회 조사 시, 각각의 겔 선량계의 흡광도의 평균값과 3회 조사한 겔 선량계의 평균값을 측정하였다. 그리고, 3회 측정값의 평균값을 기준으로 각 측정값의 오차를 계산하였다. 겔 선량계 내의 재현성은 한 개의 겔 선량계를 3번 반복 측정하여 분석하였다. 3회 측정값의 평균값을 계산하고, 이 값을 기준으로 하여, 각 측정값의 오차값을 계산하였다.

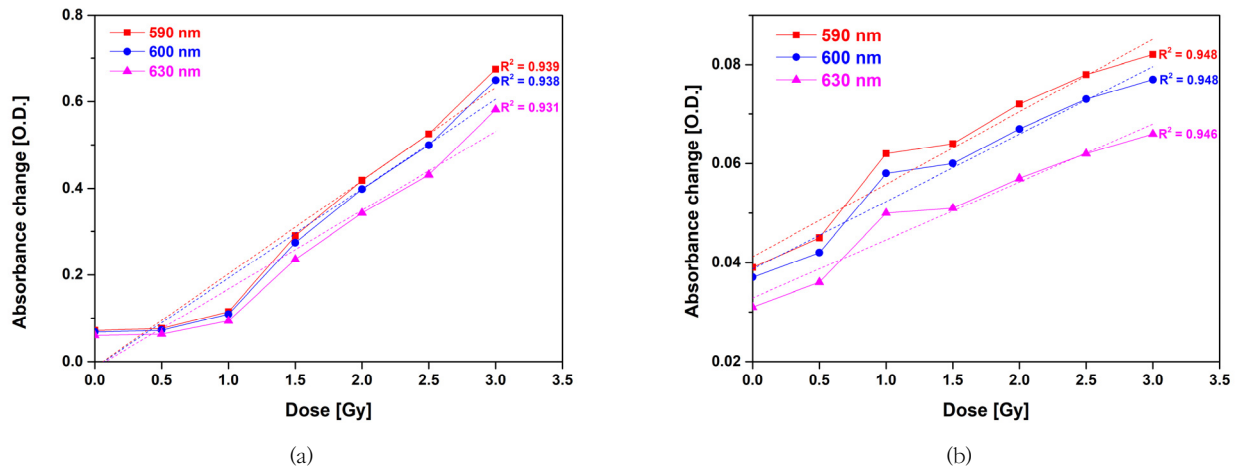
### III. 결과

#### 1. 선량직선성(Dose linearity)과 흡광도 스펙트럼 (Absorbance spectrum)

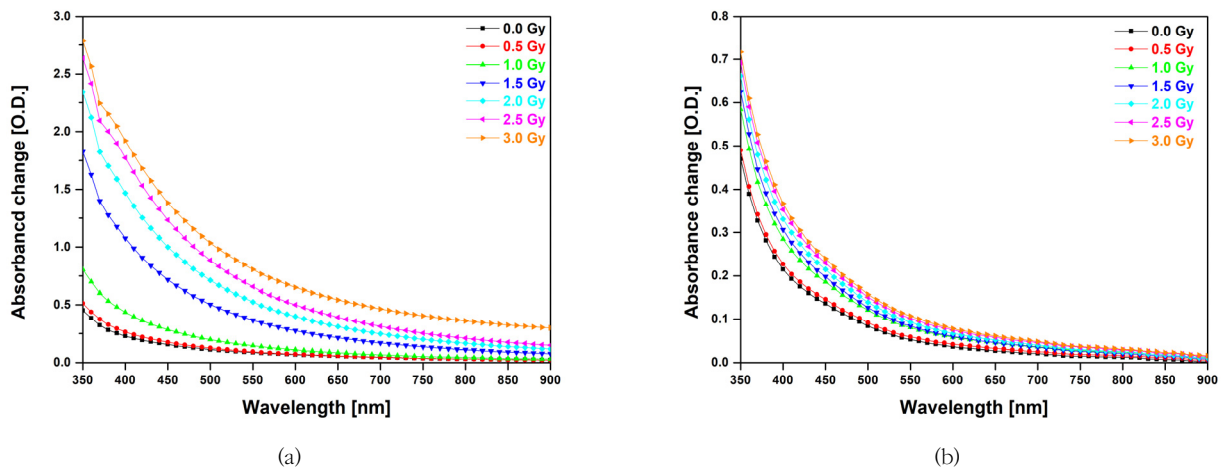
Fig. 2는 두 개의 겔 선량계의 흡광도가 방사선량에 비례해서 증가하고 있는 것을 나타내고 있다. 본 연구진이 직접 개발한 중합체 겔 선량계에서, 3개의 파장에서의 결정계수  $R^2$  값은 모두 0.93 이상이었고, 590 nm의 파장에서, 결정계수  $R^2$  값이 0.939로 가장 높은 결과를 나타내었다(Fig. 2(a)). BANG™ 겔 선량계에서도 방사선량이 증가함에 따라서, 흡광도가 증가하는 것을 확인하였다. 3개의 파장 범위에서의 결정계수  $R^2$  값은 모두 0.946 이상이었고, 590 nm와 600 nm의 파장에서의 결정계수  $R^2$  값이 0.948로 가장 높은 직선성을 기록하였다(Fig. 2(b)).

#### 2. 흡광도 스펙트럼(Absorbance spectrum)

Fig. 3은 350 nm에서 900 nm까지의 파장 범위에서 0 Gy부터 3 Gy까지 방사선이 조사된, 두 종류의 겔 선량계의 흡광도 스펙트럼을 나타내고 있다. 두 종류의 겔 선량계 모두에서, 특정 파장에서의 흡광도 값이 첨두값(peak)을 나타내고 있지 않았지만, 겔 선량계의 흡광도가 방사선량이 증가함에 따라 증가하는 것을 나타내었다.



**Fig. 2.** Linearity curve of the optical density change according to the dose in the (a) polymer gel developed in-house and the (b) BANG™ gel cuvettes irradiated at dose range 0 to 3 Gy using a 6 MV photon beam at wavelength of 590, 600 and 630 nm.



**Fig. 3.** Absorbance spectrum of (a) polymer gel developed in-house and the (b) BANG™ gel cuvettes at doses from 0 to 3 Gy.

### 3. 선량률 의존성(Dose rate dependency)

Fig. 4는 조사선량률을 각각 100, 200, 300, 400, 500, 600 MU/min으로 하여 200 cGy를 조사하였을 때, 모든 파장 범위에서 두 종류의 겔 선량계의 흡광도 변화를 보여준다. 각 조사선량률에 따른 흡광도 값은 400 MU/min에서 정규화하여 분석하였다. 중합체 겔 선량계에서는, 100 MU/min의 조사선량률로 조사하였을 때의 흡광도 값을 제외하고, 다른 조사선량률에서는 모두 5% 이내의 값이 나오는 것을 확인하였다(Fig. 4(a)). BANG™ 겔 선량계에서의 조사선량률 의존성은  $\pm 5\%$  이내의 값을 기록하였다. 400 MU/min 이하의 조사선량률에서는 선량률 의존성이 +5% 이내의 값을 나타냈고, 선량률이 상대적으로 높은 500과 600 MU/min

에서의 값은 모두 -4% 이내의 값을 나타내었다(Fig. 4(b)).

### 4. 겔 선량계 간의 재현성과 겔 선량계 내 재현성 (Inter- and intra-reproducibility)

Table 2는 300 MU/min의 조사선량률에서 200 cGy의 방사선량을 조사하였을 때의, 두 종류의 겔 선량계에서 3개의 겔 선량계를 측정했을 때의 각 선량계 간의 재현성과 한 개의 겔 선량계를 3회 흡광도를 측정했을 때의 겔 선량계 내의 재현성에 대한 결과를 보여준다. 겔 선량계 간의 재현성과 겔 선량계 내의 재현성 모두 허용범위 이내인  $\pm 3\%$  이내로 측정되었다. 중합체 겔 선량계에서, 가장 낮은 겔 선량계 간의 재현성은 약 1.79%로써, 600 nm의 파장에서 나타

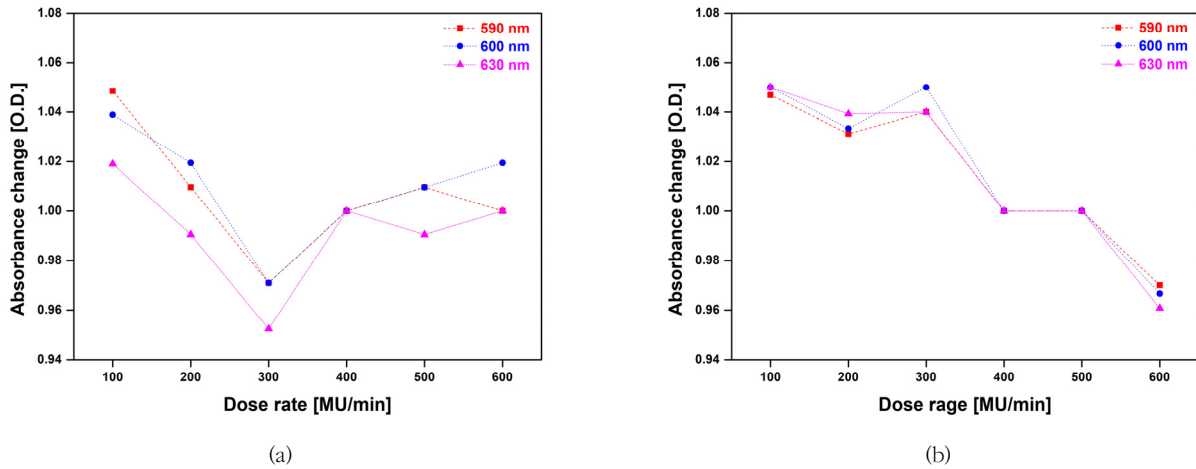


Fig. 4. Dose rate dependency of absorbance measured at dose rate of 100 to 600 MU/min for 200 cGy at wavelength of 590, 600 and 630 nm. The optical densities were normalized to the value at a dose rate of 400 MU/min. (a) polymer gel developed in in-house and the (b) BANG™ gel.

Table 2. Inter-and intra-reproducibility of the two gel dosimeters at 200 cGy at wavelengths of 590, 600 and 630 nm

Wavelength [nm]	In-house polymer gel dosimeter		BANG™ gel dosimeter	
	Inter-reproducibility [%]	Intra-reproducibility [%]	Inter-reproducibility [%]	Intra-reproducibility [%]
590	0.96 ± 0.61	0.73 ± 0.52	0.68 ± 0.30	2.46 ± 1.08
600	1.79 ± 0.55	0.39 ± 0.28	0.92 ± 0.65	0.74 ± 0.26
630	0.30 ± 0.11	0.76 ± 0.39	1.45 ± 0.52	1.28 ± 0.91

내었고, 겔 선량계 내의 재현성은 0.76%로 630 nm에서 가장 재현성이 낮은 결과를 나타내었다. BANG™ 겔 선량계에서, 가장 낮은 겔 선량계 간의 재현성은 약 1.45%로써, 630 nm의 파장에서 나타내었고, 겔 선량계 내의 재현성은 2.46%로 590 nm에서 가장 재현성이 낮은 결과를 나타내었다.

#### IV. 고 찰

본 연구에서는 중합체 겔 선량계와 상업적으로 이용할 수 있는 BANG 겔 선량계를 본 연구진이 개발한 전하결합소자 기반의 광학 스캐너(CCD-based Optical scanner)에 최적화된 파장을 찾기 위하여[6], 분광광도계를 이용하여 선량 직선성, 흡광도 스펙트럼, 선량률 의존성 및 겔 선량계 간의 재현성 및 겔 선량계 내의 재현성을 비교 및 평가하였다. 상업적으로 이용할 수 있는 광학스캐너(Vista™ optical CT scanner, Modus Medical Devices, London, Ontario, Canada)는 590 nm 와 633 nm의 2개 파장을 선택하여 사용하고 있다[4]. OCTOPUS™ optical CT-scanner(MGS Research Inc., Madison, CT, USA)는 PRESAGE™ 겔 선량계를 평가하기

위하여 633 nm의 파장을 이용하고 있다[19]. 또한, 다수의 연구자들은 새로운 optical CT scanner를 개발하고 이에 적합한 543 nm[20], 633 nm[21], 650 nm[22]의 적정 파장을 이용하였다. 본 연구에서는, 두 종류의 중합체 겔 선량계의 방사선학적인 특성을 비교 및 평가하였다[11].

중합체 겔 선량계의 선량 직선성의 결정계수 값은 590 nm에서 0.938로 가장 높은 직선성을 보였다(Fig. 2(a)). 이전에 발표되었던 선량 직선성의 결정계수 값( $R^2 = 0.923$ )보다 0.923과 약간 높은 값을 나타내었다[23]. BANG™ 겔 선량계의 경우, 590 nm와 600 nm의 파장에서 선량 직선성은 약 0.95로 기록되었다. 하지만, 이전에 발표된 연구의 결과 값( $R^2 = 0.99$ ) 보다는 약 4% 정도 감소된 것으로 나타났다[18]. 선량 직선성 감소의 원인은 명확하지는 않지만, 큐벳 내로 산소가 유입되어 겔 선량계의 반응을 낮추게 할 수도 있다고 생각하고 있다. 또한, 이전 연구에서는 자기공명영상장치를 이용해서 선량 직선성의 결과 값의 분석하였고[13,17], 본 연구에서는 분광광도계를 이용하여 분석하여, 선량 직선성의 값이 다르게 나왔을 것으로 추측하고 있다.

두 종류의 겔 선량계의 흡광도 스펙트럼의 결과를 보았을 때(Fig. 3), radiochromic 겔 선량계와 달리 특정 파장에서

첨두값(Peak)을 보이지 않았다[11,19]. 본 연구에서의 흡광도 스펙트럼은 이전 결과와 동일한 경향을 나타내었다.

중합체 겔 선량계의 선량률 의존성의 결과를 보면, 낮은 조사 선량률(100 MU/min)일 때, 상대적으로 다른 조사 선량률 보다 오차가 최대 약 5% 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(a)). 이와 같은 결과는, 선형가속기 장비의 오차일 것으로 추측된다. 일반적으로, 방사선을 조사할 때는 저 선량률을 사용하지 않기 때문에, 실험 당시 교정이 되지 않았을 것으로 판단된다. 따라서, 다음 실험을 진행할 때는, 저 선량률 뿐만 아니라, 다른 선량률 교정을 진행한 후에 실험을 진행하면, 실험 결과의 정확성이 향상 될 것으로 생각된다. BANG™ 겔 선량계의 경우, 선량률이 증가함에 따라서, 오차 값이 음의 방향으로 낮아지고 있는 경향을 보였다. 모든 파장에서, 선량률 의존성의 오차 값이 최대 약 5% 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4(b)). 하지만, Murakami 등은 BANG™ 겔 선량계의 선량률 의존성은 없다고 보고하고 있다[18]. 이 원인도 명확하지는 않지만, Murakami 등은 자기공명영상장치를 사용하여 겔 선량계를 분석하였고, 본 연구에서는 분광광도계를 사용하여 분석하여 차이가 낮을 것으로 판단하고 있고, 또한, 석영 큐벳이 산소에 대한 영향을 완전히 막지 못하는 것으로 판단하고 있다. 그리고, 방사선을 조사하고 실험하는 동안, 가시광선에 영향을 받아 겔 선량계의 반응이 달라질 수 있을 것으로 추측하고 있다. Guo 등은 겔 선량계에 방사선을 조사하고, 2일 후와 5일 후의 겔 선량계의 반응을 비교하였을 때, 약 15% 정도 차이가 나는 것을 확인하였다[10]. 따라서, 앞으로 석영 큐벳을 이용하더라도, 글로브 상자(Glove box)를 사용하여, 산소를 완전히 없앨 수 있는 실험 조건에서 실험을 진행할 예정이다. 또한, 선량률 의존성의 오차 유형이 뚜렷한 경향이 보이지 않기 때문에, 선량률 의존성에 대한 연구를 계획하고 있다.

Table 2는 두 종류의 겔 선량계의 각 선량계 간의 재현성과 한 개의 겔 선량계를 3회 흡광도를 측정했을 때의 겔 선량계 내의 재현성에 대한 결과를 보여준다. 겔 선량계 간의 재현성 및 겔 선량계의 내의 재현성은 모두 2.5% 이내의 범위에 들어오는 것을 확인할 수 있었다. BANG™ 겔 선량계에서, 590 nm에서 겔 선량계 내의 재현성(약 2.46%)이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이를 확인하기 위해서, 분광광도계를 이용하여, 재측정을 해보았지만, 결과는 유의미하게 달라지지 않았다. 이 결과는 겔 선량계의 제작을 수동으로 진행하기 때문에, 겔 선량계 제작 시 또는 실험 환경에서의 차이라고 판단하고 있다. 재현성의 결과는 다른 연구자들의 결과(최소 1%에서 최대 5% 오차 범위)와 비교하였을 때, 큰

차이는 나지 않은 것으로 보였다[10,11,24,25].

본 연구는 실험 조건에 대한 제한점을 가지고 있다. 본 연구에서는, 중합체 겔 선량계의 산소의 영향에 대한 실험을 더욱더 진행해야 할 것으로 판단하고 있다. 비록 본 연구에서 사용한 겔 선량계는 정상 산소 조건에서 실험을 진행할 수 있는 겔 선량계이지만, 실험을 해 본 결과, 정상 대기 조건에서 파라 필름을 사용하여 겔 제작 및 실험을 한 경우에 결과 값이 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 겔 선량계 내부로 유입되는 산소를 완전히 제거할 수 없다는 것을 확인하였다. Deen 등은 정상 산소 중합체 겔 선량계를 사용했을 때, 겔 선량계내의 산소가 겔 선량계의 반응을 저하 될 수 있다는 것을 확인하였다[13]. 따라서, 겔 선량계 제작 시 글로브 상자(Glove box)를 이용하여 산소를 최대한 제거할 수 있는 환경에서 겔 선량계를 제작할 필요가 있다. 본 연구에서는, 겔 선량계를 제작하는 동안 겔 선량계의 온도에 대한 영향을 평가하지 않았다. 비록, 겔 선량계를 제작 온도, 보관 온도 및 치료실 온도를 최대한 유지하도록 노력하였지만, 수동으로 겔 선량계를 제작하기 때문에 약간의 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단하고 있다. 따라서, 겔 선량계의 반응에 영향을 줄 수 있는 온도 변화에 대한 부분을 실험할 예정이다, 겔 선량계의 절대 선량 측정을 위해 온도 교정 계수에 대한 부분도 연구를 계획하고 있다.

## V. 결론

본 연구에서는 중합체 겔 선량계와 상업적으로 이용할 수 있는 BANG™ 겔 선량계를 본 연구진이 개발한 전하결합소자 기반의 광학 스캐너에 최적화된 파장을 찾기 위하여, 분광광도계를 이용하여 선량 직선성, 흡광도 스펙트럼, 선량률 의존성 및 겔 선량계 간의 재현성 및 겔 선량계 내의 재현성을 비교 및 평가하였다. 두 종류의 중합체 겔 선량계가 광학 스캐너 기반에 선량평가에 사용하기에 적합한 것으로 확인하였다. 비록, 수동으로 겔 선량계를 제작, 보관 및 방사선을 조사하기 때문에, 실험에 대한 오차가 있는 것은 확인되었지만, 방사선의 선량 평가를 위한 기본적인 특성을 평가하는 데에는 두 종류의 중합체 겔이 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## REFERENCES

[1] Miften M, Olch A, Mihailidis D, Moran J, Pawlicki

- T, Molineu A, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys*. 2018;45(4):e53–83.
- [2] Intensity Modulated Radiation Therapy Collaborative Working Group. Intensity-modulated radiotherapy: Current status and issues of interest. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2001;51(4):880–914.
- [3] Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: A review with a physics perspective. *Radiat Oncol J*. 2018;36(1):1–10.
- [4] Babic S, Battista J, Jordan K. Three-dimensional dose verification for intensity-modulated radiation therapy in the radiological physics centre head-and-neck phantom using optical computed tomography scans of ferrous xylene-orange gel dosimeters. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2008;70(4):1281–91.
- [5] Oldham M. 3D dosimetry by optical-CT scanning. *J Phys Conf Ser*. 2006;56:58–71.
- [6] Chang KH, Lee S, Jung H, Choo YW, Cao YJ, Shim JB, et al. Development of a 3D optical scanner for evaluating patient-specific dose distributions. *Physica Medica*. 2015;31(5):553–9.
- [7] Mein S, Rankine L, Adamovics J, Li H, Oldham M. Development of a 3D remote dosimetry protocol compatible with MRgIMRT. *Med Phys*. 2017;44(11):6018–28.
- [8] Soliman YS, El Gohary MI, Abdel Gawad MH, Amin EA, Desouky OS. Fricke gel dosimeter as a tool in quality assurance of the radiotherapy treatment plans. *Appl Radiat Isot*. 2017;120:126–32.
- [9] De Deene Y, De Wagter C, Van Duyse B, Derycke S, Mersseman B, De Gerssem W, Voet T, Achten E, De Neve W. Validation of MR-based polymer gel dosimetry as a preclinical three-dimensional verification tool in conformal radiotherapy. *Magn Reson Med*. 2000;43(1):116–25.
- [10] Guo PY, Adamovics JA, Oldham M. Characterization of a new radiochromic three-dimensional dosimeter. *Med Phys*. 2006;33(5):1338–45.
- [11] Chang KH, Ji Y, Lee S, Kim KH, Yang DS, Lee JA, et al. Basic radiological characteristics of a non-scattering gel dosimeter for 3D dosimetry. *J Korean Phys Soc*. 2016;69(11):1694–99.
- [12] Valente M, Molina W, Silva LC, Figueroa R, Malano F, Perez P, Santibañez M, Vedelago J. Fricke gel dosimeter with improved sensitivity for low-dose-level measurements. *J Appl Clin Med Phys*. 2016;17(4):402–17.
- [13] De Deene Y, Hurley C, Venning A, Vergote K, Mather M, Healy BJ, Baldock C. A basic study of some normoxic polymer gel dosimeters. *Phys Med Biol*. 2002;47(19):3441–63.
- [14] Haraldsson P, Karlsson A, Wieslander E, Gustavsson H, Beck SA. Dose response evaluation of a low-density normoxic polymer gel dosimeter using MRI. *Phys Med Biol*. 2006;51(4):919–28.
- [15] Jirasek A, Hiltz M, McAuley KB. Polymer gel dosimeters with enhanced sensitivity for use in x-ray CT polymer gel dosimetry. *Phys Med Biol*. 2010;55(18):5269–81.
- [16] Jirasek AI, Duzenli C. Effects of crosslinker fraction in polymer gel dosimeters using FT Raman spectroscopy. *Phys Med Biol*. 2001 Jul;46(7):1949–61.
- [17] Cho SJ, Shim SJ, Kim CY, Yang DS, Park YJ, Lee S, et al. Analysis of the dosimetric characteristics of normoxic polymer gel by magnetic resonance images. *J Korean Phys Soc*. 2010;56(3):874–79.
- [18] Murakami Y, Nakashima T, Watanabe Y, Akimitsu T, Matsuura K, Kenjo M, et al. Evaluation of the basic properties of the BANGkit gel dosimeter. *Phys Med Biol*. 2007;52(8):2301–11.
- [19] Sakhalkar HS, Adamovics J, Ibbott G, Oldham M. A comprehensive evaluation of the PRESAGE/optical-CT 3D dosimetry system. *Med Phys*. 2009;36(1):71–82.
- [20] Campbell WG, Rudko DA, Braam NA, Wells DM, Jirasek A. A prototype fan-beam optical CT scanner for 3D dosimetry. *Med Phys*. 2013;40(6):061712.
- [21] Papadakis AE, Zacharakis G, Maris TG, Ripoll J, Damilakis J. A new optical-CT apparatus for 3-D radiotherapy dosimetry: Is free space scanning feasible? *IEEE Trans Med Imaging*. 2010;29(5):1204–12.
- [22] Kumar DS, Samue JJ. Investigation on Tissue

- Equivalent Normoxic Polymer Gel Dosimeter using In-house Laser CT scanning system. *J. Phys. Conf. Ser.* 2010;250:012-40.
- [23] Chang KH, Ji Y, Lee S, Kim KH, Yang DS, Lee JA, et al. Spectrophotometric determination of the optimal wavelength for a polymer-gel dosimeter. *J Korean Phys Soc.* 2013;62(8):1194-8.
- [24] Bero MA, Gilboy WB, Glover PM. Radiochromic gel dosemeter for three-dimensional dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry.* 2001;61(3):433-5.
- [25] Solc J, Spevček V. New radiochromic gel for 3D dosimetry based on Turnbull blue: Basic properties. *Phys Med Biol.* 2009;54(17):5095-107.

구분	성명	소속	직위
제1저자/교신저자	장경환	극동대학교 방사선학과	조교수