

Variation of Indoor Average Ozone Concentration within the Radiation Therapy Room by High Energy Radiation

Jin-kook Lee,¹ Hyo-Yeong Lee,² In-Chul Im^{2*}, Yun-Sik Yu²

¹Department of Biomedical Health Science, Graduate School of Dongeui University

²Department of Radiological Science, Dongeui University

Received: February 18, 2016. Revised: March 19, 2016. Accepted: April 25, 2016

ABSTRACT

This study was to evaluate the change in characteristics of concentration of ozone after exposure to high energy radiation in linac room. Background ozone concentration of linac room was measured and compared to ozone concentration around linac room. Background ozone concentration of linac room was mean 17.4 ± 7.9 ppb. It was 50% of the ozone concentration (36.8 ± 22.3 ppb) around linac room ($p < 0.05$). The concentration of ozone after exposure to high energy radiation in linac room was elevated to double of background ozone level, intensity after exposure. with exposure time concentration of ozone increased proportionally. It showed maximum level at 130~180seconds and slowed a tendency to saturate. It required more than 10 minutes for ozone concentration in linac room to drop to ozone concentration around linac room. The concentration of ozone after exposure to high energy radiation is high enough to cause specific physical symptoms, such as acute dyspnea or chest pain due to dry cough. Exposure to high concentration of ozone in sealed linac room can aggravate pulmonary disease, so special attention is needed.

Keyword : High energy radiation, Radiation therapy room, Indoor ozone concentration, Ambient air ozone concentration.

I. INTRODUCTION

인간의 생활권에 존재하는 오존(ozone, O_3)은 대기 중 질소산화물(nitrogen oxide, NO_x) 또는 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOCs) 등의 오존 전구물질(precursors on ozone)들이 자외선과 광화학적 반응(photochemical reaction)을 일으켜 생성되는 유해한 대기오염물질로 알려져 있다.^[1,2] 오존의 유해성과 관련하여 세계보건기구(World Health Organization, WHO)^[3]는 지표 오존 농도가 0.01ppm 증가함에 따라 인구 사망률이 0.5% 내지 0.8% 증가되는 것으로 보고하였으며 Wisthaler 등^[4]은 오존이 피부 지질과 반응하여 생성되는 휘발성 물질과 비휘발성 물질이 장시간 동안 인간의 건강을 위협할 수 있다고 보고하였다. 특히 오

존이 호흡기 내 유입되어 천식 등 다양한 질환들을 유발할 수 있다는 일관적인 연구 결과들을 토대로 건강에 대한 오존의 유해성 문제가 사회적으로 대두되고 있다.^[5,6]

특히 실내 오존은 대기 환경적인 오존 전구물질뿐만 아니라 사무실에서 사용되는 복사기나 레이저 프린터와 같은 일반 전자 기기나 방사성 물질 또는 방사선 발생 장치에서 방출되는 방사선 등 다양한 원인에 기인되어 발생할 수 있다.^[7,8] 미국 방사선방호측정심의회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP) 보고서 51^[9]에 따르면 방사선치료실에서 선형가속기에 의해 생성되는 실내 오존은 방사선 방호와 무관하지만 지속적인 노출 우려가 있는 환자 또는 방사선작업종사자의 안전을 위협할 수 있는 위험 요인

*Corresponding Author: In-Chul Im

E-mail: icim@deu.ac.kr

Tel: +82-51-890-2678

으로 분류하여 관리할 것을 권고하고 있다. 임상적으로 방사선치료실은 NCRP 보고서⁹⁻¹²⁾에서 제시하는 고 에너지 방사선의 안전성 평가를 위한 차폐 방법론적 해석과 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA) 안전 보고서^{13,14)}에서 요구하는 방사선 치료 시설의 설계 및 엄격한 차폐 기준을 충족하게 만족시켜야 되기 때문에 대부분 사람의 점유율(occupancy factor)이 낮은 건물 지하에 설치·운영되고 있다.

일반적으로 실내 공간에서 오존 농도는 대기 중 오존 전구물질의 유입이 어렵기 때문에 대기 환경의 오존 농도에 비하여 약 10%에서 30% 정도의 낮은 수준으로 알려져 있으나^{15,16)} 방사선치료실은 고 에너지 방사선에 의해 생성된 오존이 자연적으로 희석될 확률이 희박하고 인공적 설비를 통한 공기 순환으로 오존 농도가 지속적으로 증가될 우려가 있기 때문에 환자 또는 방사선작업종사자가 고농도 오존에 장시간 노출될 수 있다. 이러한 상황들은 다양한 연구들을 통해 인체의 기도(respiratory tract), 폐포(pulmonary alveoli) 등에 존재하는 신경 수용체(nerve receptors)가 자극을 받아 평활근(smooth muscle)들이 수축되어 기관지 또는 폐 질환을 악화시킬 수 있으며 기도 협착(respiratory stenosis)에 의하여 호흡이 힘들어지거나 두통(headache), 기침(cough) 등의 증상이 동반될 수 있다¹⁷⁻¹⁹⁾. 특히 폐 기능이 약한 폐암(lung cancer) 환자나 기관지 천식(bronchial asthma)이 있는 환자 등이 밀폐된 방사선치료실에서 고농도 오존에 장시간 노출될 경우 폐기종 및 천식을 악화시킬 수 있기 때문에 각별한 주의가 요구되고 있다²⁰⁾. 그럼에도 불구하고 오존과 관련된 연구는 오존 전구물질인 NO_x 또는 VOCs의 광화학적 특성에 따른 오존 농도 분석, 대류 현상에 의한 오존 분포 특성과 오존 저감화 대책, 수학적 통계 모델을 적용한 오존 예측, 오존이 인체에 미치는 영향 등 대부분 대기 환경 중심의 오존에 국한되어 있으며 고 에너지 방사선에 의해 생성된 오존과 관련된 연구는 현재까지 전무한 상태이다. 따라서 본 연구는 방사선치료실을 출입하는 환자 또는 방사선작업종사자가 일정 농도의 오존에 노출되어 미칠 수 있는 보건 및 건강상의 안전성 평가를 위한 선행적 연구로서 방사선치료실 내 평균 배경 오존 농도를 측정하여 고 에너지 방사선에 기인된 방사선치료실 내 평균 오존 농도의 변화를 비교·분석하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 연구의 가설 및 모형 설계

일반적으로 지표 오존은 대기 중 오존 전구물질인 NO_x 또는 VOCs의 농도와 밀접한 관계가 있으며 VOCs의 조성 성분에 따른 오존의 생성 기전은 이론적으로 정립되어 있으나 구조적으로 NO_x 또는 VOCs 등의 오존 전구물질이 유입되기 어려운 방사선치료실은 기존 이론으로 설명하기 어렵다.

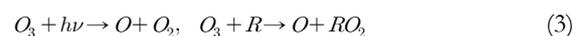
따라서 본 연구는 고 에너지 방사선과 산소 분자들의 광화학적 반응에 의한 오존 생성 기전을 가정하여 Figure 1에 제시한 바와 같이 가설을 설정하였다. 선형 가속기에서 방출된 연속 스펙트럼을 갖는 고 에너지 방사선은 치료실 내 산소 분자(O₂)와 충돌하여 2개의 산소 원자(O)를 생성한다(STEP 1).



생성된 산소 원자는 다양한 반응을 유도하는 과정에서 주변 산소 분자와 결합하여 오존을 생성한다(STEP 2). 여기서 M은 치료실 내에서 방사선 에너지를 흡수하는 제3의 물질이며 에너지와 운동량이 보존된다.



생성된 오존은 3개의 산소 원자 중 하나를 다른 물질에게 빠르게 부여되기 때문에 방사선 에너지를 흡수하여 산소 분자(O₂)와 산소 원자(O)로 해리되거나 다른 물질(R)과 화학적으로 결합하여 과산화물을 생성하면서 오존은 소멸된다(STEP 3, 4).



매우 불안정한 오존은 대기 중에서 온도, 습도, 압력 등에 의존하여 자기 분해 속도가 결정될 수 있으나 방사선 치료실은 선형가속기의 성능에 따른 고 에너지 방사선의 방출 특성을 일정하게 유지시키기 위하여 24시간 항온·항습기를 가동하기 때문에 방사선치료실의 온도, 습도, 압력에 따른 분해 의존성은 본 연구에서 배제되었다.

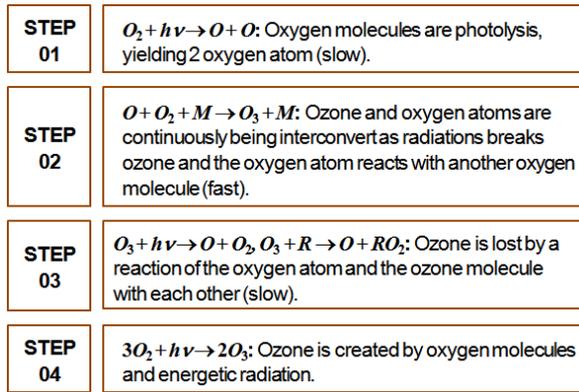


Fig. 1. Schematic diagram for the process of ozone production in radiotherapy room by the photochemical reaction of the high energy radiation and oxygen molecular.

2. 연구 장비 및 오존 측정 기술

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 고감도 오존 분석기(Ozone analyzer DIGS 130, Dong-il Greensys Co. LTD., Korea)를 보여준다. 고감도 오존 분석기는 미국 환경 보호국(US Environmental Protection Agency. US-EPA), 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology. NIST) 등에서 대기 또는 실내 오존을 측정하는 방법으로 인증되어 사용되고 있는 자외선 흡수 방식(UV photometric method)이 적용되었으며 오존에 대하여 최대흡수강도를 갖는 254 nm의 자외선을 광학 필터에 의해 선택적으로 측정 셀(cell)내에 유입시켜 방사선치료실 내 오존 농도를 연속적으로 측정 및 분석할 수 있다. 본 연구에 사용된 오존 분석기에 대한 자세한 기술적 특성은 Table 1에 제시하였다.

고감도 오존 분석기의 광학 필터를 통해 측정 셀 내 오존 시료에 입사하는 자외선 강도(intensity. I)를 I_0 라 하고 오존 시료를 투과한 자외선 강도를 I라 할 때 투광도(transmittance. T)와 흡광도(absorbance. A)는 정의에 따라 다음 식(Eq. 4)과 식(Eq. 5)와 같이 주어진다^[21].

$$T = \frac{I}{I_0} \leq 1 \tag{4}$$

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log \frac{I}{I_0} = -\log T \tag{5}$$

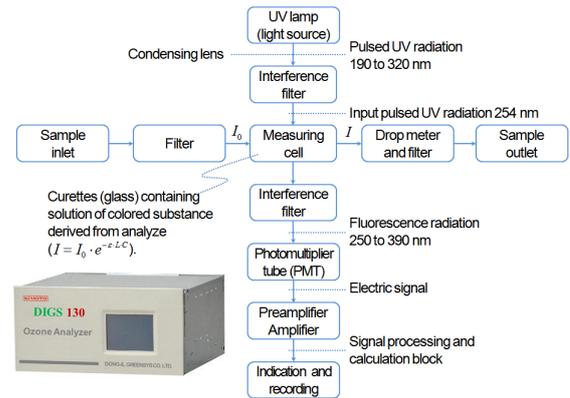


Fig. 2. Shows the ozone analyzer (Model: DIGS 130) used to measure the concentration of ozone generated by the high-energy radiation in radiotherapy room, and the flow diagram of data processing for the ozone analysis.

Table 1. Technical specifications of the ozone analyzer (DIGS 130 model) used in this study.

Specifications	Descriptions
Measurement:	
Item	Ozone (O ³)
Method	UV photometry (absorption) ¹
Selectable range	0-200, ~500 ppb, and ~20 ppm
Units ²	ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³
Mechanical features:	
Noise	0.25 ppb
Low detectable limit	0.50 ppb
Zero drift	Within 1.0 ppb/day
Span drift	Within 1.0% of full scale/day
Response time (95%)	Within 20 sec
Linearity	Within ±1 ppb or 1%
Sampling flow	Stabilized flow control by 2L/min

¹, Measured the ozone by UV absorption photometry in a narrow wavelength interval at 254 nm.

², ppb: parts per billion, ppm: parts per million.

투광도(T)는 오존 시료의 농도와 무관하지만 흡광도(A)는 오존 시료의 고유한 특성에 따른 흡광 계수(absorption coefficient. ϵ [mol⁻¹·cm⁻¹]), 측정 셀의 길이(light path length. L[cm]), 그리고 오존 시료의 농도(molar concentration. C[mol])와 일정한 상관관계를 갖는다. 따라서 흡광도 A는 다음 식(Eq. 6)과 같이 구할 수 있다^[21].

$$A = \epsilon \times L \times C \tag{6}$$

주어진 식(Eq. 5)와 식(Eq. 6)을 자연대수 로그함수로 치환하면 다음 식(Eq. 7)과 같이 풀이할 수 있으며 이를 Lambert-Beer의 법칙이라 한다^[21].

$$I = I_0 e^{-\epsilon \cdot L \cdot C} \quad (7)$$

주어진 식(Eq. 7)을 오존 농도(C)에 대한 관계식으로 풀이하면 다음 식(Eq. 8)과 같이 풀이할 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{e^{\epsilon \cdot L \cdot C}}, \quad C = \frac{1}{\epsilon \cdot L} \times \ln \frac{I_0}{I} \quad (8)$$

여기서 오존 측정기의 Zero 교정을 위한 온도 및 기압을 각각 T1(K: 273+25°C), P1(1,013 hPa)이라 하고 측정 시 온도 및 기압을 각각 T2, P2라 할 때 온도 및 압력을 보정한 최종 오존 농도(C)는 다음 식(Eq. 9)와 같이 주어진다.

$$C = \left(\frac{1}{\epsilon L} \right) \times \left(\frac{T_1}{T_2} \times \frac{P_2}{P_1} \right) \times \left(\ln \frac{I_0}{I} \right) \quad (9)$$

3. 연구 방법 및 통계 분석

본 연구는 대구광역시 소재 일개 대학병원의 방사선 종양학과에서 운영하고 있는 방사선치료실을 대상으로 고 에너지 방사선 조사에 기인된 치료실 내 평균 오존 농도를 비교·분석하기 위하여 치료실 주변 대기 중 오존 농도와 치료실 내 배경 오존 농도, 그리고 방사선 조사시간에 따른 치료실 내 오존 농도를 측정하였다. 치료실 주변 대기 중 오존 농도는 대구광역시 보건환경연구원에서 운영하고 있는 실시간 대기정보시스템의 대기 질 분석 자료를 토대로 2012년 1월부터 2014년 12월까지 일일 오존 농도가 가장 낮은 오전 08시에 발표된 대구광역시와 수창동의 대기 중 오존 농도를 분석하였다²²⁾. 수창동 측정소는 본 연구 대상 치료실에서 서쪽으로 약 3 km 이내의 거리에 인접한 대기 오염 측정망으로 결측치가 비교적 적어 장기간 대기 질 분석 자료를 신뢰할 수 있는 곳이다. 또한 치료실 내 배경 오존 농도는 2015년 3월 2일부터 7월 30일까지 5개월간 주변 대기 중 일일 오존 농도가 가장 낮은 오전 0시부터 8시 30분까지 약 30분간 연속적으로 측정하였다. 이 때 고 에너지 방사선과 무관하게 고전압을 사용하는 주변 전자 기기로부터 부가적으로 발생할 수 있는 오존 농도를 최소화하기 위하여 방사선치료실의 출입문을 개방하고 선형가속기를 비롯하여 모든 전자 기기의 전원이 차단된 상태에서 측정하였다.

Fig. 3은 조사시간에 따른 방사선치료실 내 오존 농

도를 측정하기 위한 기하학적 구조를 보여준다. 선형가속기(Clinac 21EX, Varian Medical Systems Inc., Palo Alto, USA)에서 방출되는 6, 10 MV X선과 6, 9, 12, 16, 20 MeV 전자선을 대상으로 고감도 오존 분석기의 공기 흡입구(air intake)를 선속 중심에 위치시키고 선원 중심간 거리(source to axis distance, SAD) 100 cm, 조사야 10×10 cm², 선량률(dose rate) 300 MU/min으로 하여 조사시간을 20초부터 200초까지 20초씩 증가시키면서 오존 농도의 변화를 측정하였으며 정확도 및 신뢰도 향상을 목적으로 각각 10회 반복 측정하였다.

본 연구에서 수집된 자료는 SPSS 통계 프로그램(SPSS statistics window ver. 20.0, IBM Co., Chicago IL, USA)을 사용하여 분석하였다. 각각 10회씩 반복하여 측정된 오존 농도는 평균과 표준편차를 구하였으며 무작위 거동(random)하는 오존의 공간적 확률 분포를 통계적으로 분석하기 위하여 오존 농도를 크기에 따라 순차 배열하여 누적분포함수 f(x)를 갖는 백분위수(percentile)를 구하였다.

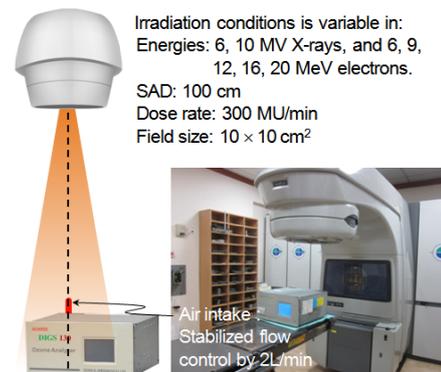


Fig. 3. Shows the geometric structure of a linear accelerator and an ozone analyzer for measuring the indoor ozone concentration in the radiotherapy room.

2015년 3월부터 7월까지 5개월간 방사선치료실 내에서 측정된 월간 평균 배경 오존 농도와 방사선치료실 주변의 대기 중 평균 오존 농도가 유의한 차이를 보이는지를 검정하기 위하여 단일 표본 T 검정(one-sample T-test)을 시행하였다. 또한 조사시간에 따른 방사선치료실 내 오존 농도는 배경 오존 농도와 비교하여 통계적으로 유의하게 증가되었는지를 검정하기 위하여 독립 표본 T 검정(Independent -sample t-test)을 시행하였다. 각 변량의 동질성 여부를 파악하기 위하여 Levene 등분산 검정(F-value)을 시행하여 F값이 유의확률 0.05

보다 작으면 등분산이 가정되지 않은 것으로 가설 검증을 하였으며 F값이 유의확률 0.05보다 크면 등분산이 가정된 것으로 가설을 검증하였다. 모든 오존 농도에 대한 통계 분석의 유의수준은 0.05로 하였다.

III. RESULT

1. 방사선치료실 내 배경 오존 농도의 변화

Fig. 4는 2012년부터 2014년까지 최근 3년간 대구시와 수창동의 대기 중 월평균 오존 농도를 보여준다. 방사선치료실 주변의 대기 중 월평균 오존 농도는 대구시와 유사한 오존 농도 변화를 보였으며 봄철인 3월부터 점차 증가하다가 5월에 최고치를 보였다. 특히 3월부터 7월까지 5개월간 평균 오존 농도는 연간 평균 오존 농도보다 약 1.3배 높게 Table 2에 나타났다.

Fig. 5는 2015년 3월부터 7월까지 본 연구에서 적용된 5개월간의 측정 기간 동안 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도와 방사선치료실 내 배경 오존 농도를 보여준다.

Table 2. Comparison of the annually and five-monthly average ozone concentrations in the atmosphere around the radiotherapy room (Suchang-dong).

Years	Average ozone concentrations (ppb)		
	Annually	Five-monthly ¹	% changed ²
2012	28.0	38.4	1.37
2013	25.7	35.2	1.37
2014	29.0	38.6	1.33

¹, Means average ozone concentrations from March to July.

², Were divide by the five-monthly and annually average ozone concentrations.

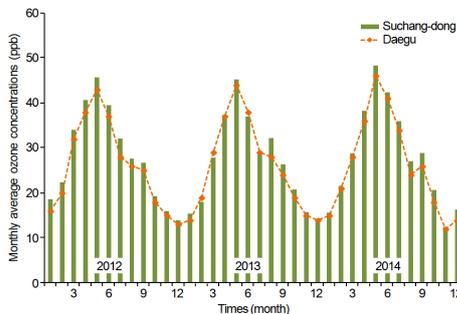


Fig. 4. Monthly average ozone concentrations in the atmosphere of Daegu and Suchang-dong from 2012 to 2014 in the last three years.

측정 기간 동안 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도는 대기 환경의 변화에 따라 3월부터 급격하게 증가하다가 5월에 최고치를 나타냈으며 그 이후부터 점차 감소하였다. 또한 무작위(random)로 거동하는 오존의 공간적 확률 분포를 나타내는 척도로서 누적분포함수 $f(x)$ 를 갖는 백분위수(percentile)는 방사선치료실 주변의 대기 중 전체 오존 데이터의 25%와 75%를 차지하는 75번째와 25번째 백분위수 구간이 평균 17.12ppb로 비교적 넓게 분포되어 오존 농도 범위가 다양한 분포를 나타냈으며 3월과 5월의 오존 농도 변동률(variation ratio)이 5개월간 평균 오존 농도와 비교하여 각각 23.09%, 27.98%로 대기 환경에 따라 매우 크게 Table 3에 나타났다. 그러나 방사선치료실 내 배경 오존 농도는 75번째와 25번째 백분위수 구간이 평균 5.42ppb로 백분위수의 분포가 매우 좁게 분포되어 대기 환경의 조건 변화와 무관하게 일정한 수준의 오존 농도 분포를 보였으며 3월을 제외하고 배경 오존 농도의 변동률이 5개월간 평균 오존 농도와 비교하여 약 15% 미만으로 매우 작게 Table 3에 나타났다. 또한 유의확률(significance probability, p-value)이 0.05보다 작은 유의수준에서 방사선치료실의 배경 오존 농도는 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도보다 약 1/2 수준으로 유의하게 낮게 나타났다.

2. 조사시간에 따른 방사선치료실 내 오존 농도의 변화

Fig. 6은 6 MV X선과 12 MeV 전자선을 선원에서 중심간 거리(SAD) 100 cm, 조사 범위 10×10 cm², 선량률 300 MU/min으로 하여 조사시간을 20초부터 200초까지 20초씩 증가시켰을 때 조사시간에 따른 방사선치료실내 평균 오존 농도의 변화를 보여준다. 각 조사 조건에 따라 10회씩 반복 측정된 전체 오존 농도에서 상위 5%와 하위 5%를 차지하는 95번째와 5번째 백분위수는 95% 신뢰구간을 벗어나는 결측치로 간주하여 평균 오존 농도에서 제외되었다. 방사선이 조사되기 전 배경 오존 농도 수준을 보이던 방사선치료실 내 오존 농도는 방사선이 조사됨과 동시에 6 MV X선의 경우 33.2±18.2ppb, 12 MeV 전자선의 경우 32.1±16.8ppb로 배경 오존 농도와 비교하여 약 2배 정도 급격하게 증가되었다.

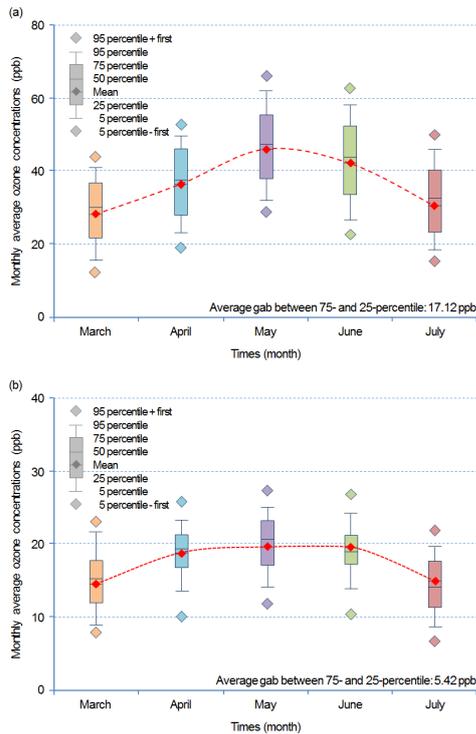


Fig. 5. Monthly average ozone concentrations for the Suchang-dong in atmospheric (a) and background of radiotherapy room (b) during the measurement period (from March to July 2015).

Table 3. Compared the annually and from march to June average ozone concentrations (ppb).

Measured period (month)	Monthly average ozone concentrations (ppb)				P-values ³
	In the atmosphere around the radiotherapy room (Suchang-dong)		Indoor background ozone of the radiotherapy room		
	Values ¹	% changed ²	Values	% changed	
March	28.3±17.2	-23.09	14.3±6.8	-17.81	.007
April	35.6±20.8	-03.26	18.6±8.2	06.90	.000
May	47.1±24.7	27.99	19.5±8.9	12.07	.023
July	42.3±22.0	14.95	19.5±7.6	12.07	.018
June	30.8±19.4	-16.30	15.1±8.7	-13.21	.002
Five-month	36.8±22.3		17.4±7.9		.008

¹ Monthly ozone concentration for the average ± standard deviation.
² Variation ratio is a measure of statistical dispersion in nominal distributions. It is defined as the proportion of cases which are not the mode. The formula for calculating the variation ratio is, thus: variation ratio = [(monthly average ozone concentrations) / five-month average ozone concentrations) - 1] × 100%.
³ P-values are statistically significant at the 0.05 level as compared with atmospheric ozone concentration around the radiotherapy room (One-sample T-test).

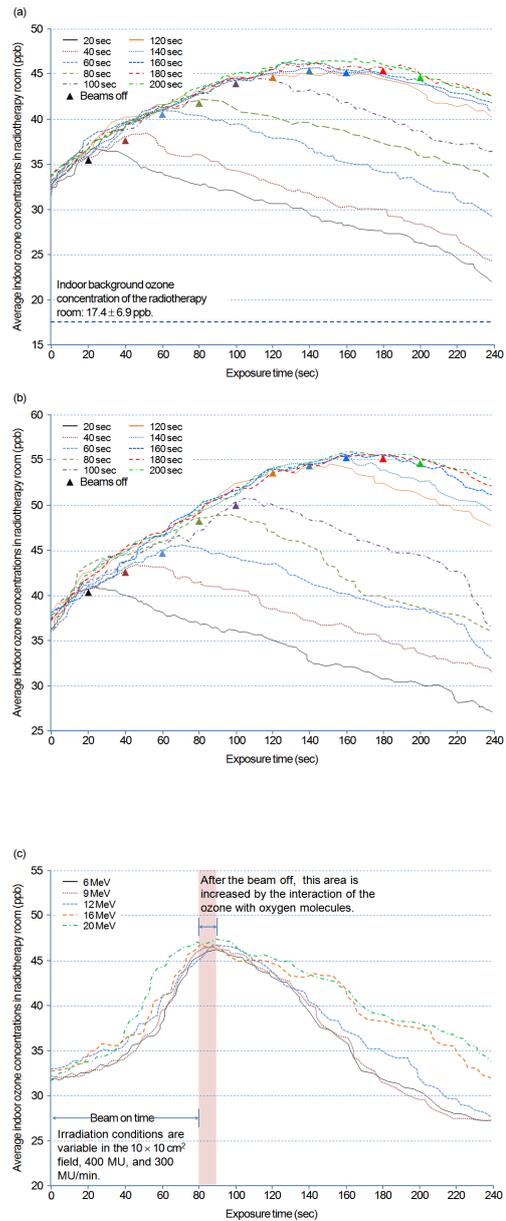


Fig. 6. Variation of the indoor ozone concentration in radiotherapy room for the photon and electron beams according to the exposure times from 20 sec to 200 sec. (a) 6 MV X-ray, (b) 12 MeV electron, and (c) characteristic of electron beams in 80 sec.

조사시간이 증가됨에 따라 방사선치료실 내 오존 농도는 일정한 기울기(slope)를 갖는 증가 추이를 보이다가 6 MV X선의 경우 조사시간이 약 150초 부근, 12 MeV 전자선의 경우 조사시간이 약 180초 부근에서 최대 오존 농도를 이루고 점차 포화되는 경향을 보였다. 특히 시간의 경과에 따라 60초 부근에서 방사선치료실 내 오존 농도는 총 조사시간을 각각 60초, 120초, 180

초 동안 조사했을 때 6 MV X선의 경우 각각 40.9 ± 11.6 ppb, 41.7 ± 10.2 ppb, 41.2 ± 10.7 ppb, 12 MeV 전자선의 경우 각각 39.1 ± 12.1 ppb, 39.2 ± 13.4 ppb, 40.3 ± 10.9 ppb로 동일 방사선 조사 조건에서 시간의 경과에 따라 방사선치료실 내 오존 농도는 조사시간의 증가와 무관하게 유사한 농도 분포를 보였다(Fig. 6(a), (b)). 또한 최대 오존 농도를 보이는 조사시간 이전까지 방사선치료실 내 오존 농도는 선형가속기에서 방출되는 X선의 조사가 종료되었음에도 불구하고 6 MV X선의 경우 약 10초 동안, 12 MeV 전자선의 경우 약 20초 동안 지속적으로 오존 농도가 증가되는 경향을 보였으며 대부분 10분 이내에 방사선치료실 내 생성된 오존이 배경 오존 농도로 감소되었다(Fig. 6(c)).

IV. DISCUSSION

인체의 피부 또는 호흡기를 통해 체내에 유입된 오존은 화학적으로 매우 강한 활성 기체로서 주변 물질과 쉽게 화학적 결합을 이루고 분해되기 때문에 단백질(protein), 지질(sebaceous), 탄수화물(carbohydrate) 등의 인체 구성 물질과 작용하여 유리기 과산화물(free radical peroxidation)을 생성하여 비가역적 손상을 초래할 수 있다^[23,24]. 또한 0.001ppm 정도의 매우 낮은 오존농도에서 단시간 동안 노출 되었다 할지라도 어떠한 형태로든지 오존에 의한 확률적 위험(stochastic risk)이 생물학적으로 발현될 수 있다는 점에서 인간의 생활권에 존재하는 오존을 관리하고 보건 및 건강상의 유해성을 평가하는 것은 매우 중요하다^[3]. 그럼에도 불구하고 인간의 생활권에 존재하는 오존에 대한 유해성 평가는 대부분 대기 중 질소산화물(NO_x)이나 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 오존 전구물질과 관련된 대기 환경 중심의 제한적 평가에 국한되어 있다^[7,9]. 따라서 치료용 선형가속기에서 방출된 고 에너지 방사선에 의해 생성되는 오존의 광화학적 특성을 규명하고 시·공간적으로 분포하는 오존 농도를 측정하여 방사선치료실을 출입하는 환자 또는 방사선작업종사자에게 미치는 생물학적 영향을 평가할 수 있는 기반 연구가 반드시 필요하다.

현재까지 고 에너지 방사선에 의한 오존 생성 기전(mechanism)과 관련된 기반 연구가 보고된 바 없으며 이론적으로 명문화되지 않았기 때문에 본 연구는 고

에너지 방사선에 의해 방사선치료실 내 산소 분자(O₂)의 공유된 전자 결합이 물리·화학적으로 절단되고 이온화된 산소 원자(O)가 다른 산소 분자와 결합하는 광화학적 반응을 기반으로 방사선치료실 내 오존(O₃)이 생성되는 기전을 가정하였다. 본 연구의 가설을 바탕으로 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도와 배경 오존 농도를 측정하여 방사선치료실 내 오존 농도의 분포 특성을 비교·분석하였다.

2015년 3월부터 7월까지 5개월간 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도는 평균 36.8 ± 22.3 ppb로 연간 평균 오존 농도보다 약 1.3배 높게 나타났다(Fig. 5). 방사선치료실 내 배경 오존 농도는 평균 17.4 ± 7.9 ppb로 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도보다 약 50% 정도 통계적으로 유의하게 낮게 Table 3에 나타났다($p < 0.05$). 이러한 결과는 멕시코시티 남부에 있는 도심 지역의 실내 오존 농도가 대기 중 오존 농도보다 10% 내지 30% 정도 낮은 수준으로 보고한 Cortez-Lugo 등^[15]의 연구와 차이를 보였으며 방사선치료실은 출입문 또는 창문이 실내 공간과 일체형 구조를 갖는 일반 실내 환경과 달리 방사선 방호 문제를 최소화하기 위하여 사람의 점유율이 낮은 공간에 외부와 철저히 독립된 구조로 주변의 외부 공기의 유입이 어려울 뿐 만 아니라 고 에너지 방사선에 의해 생성된 오존이 자연적으로 희석될 확률이 희박하여 오존 농도가 지속적으로 증가될 우려가 있을 것으로 판단되었다^[25]. 조사시간에 따라 방사선치료실 내에서 생성되는 오존 농도를 분석한 결과, 방사선을 조사하기 전 배경 오존 농도 수준을 보이던 방사선치료실 내 오존 농도는 방사선이 조사됨과 동시에 배경 오존 농도의 약 2배 수준으로 급격하게 증가되었으며 조사시간이 증가함에 따라 기울기(slope)가 일정한 증가 추이를 보였다. 특이한 점은 조사시간이 약 130초에서 150초 부근에서 최대 오존 농도를 이루고 점차 포화되는 경향을 보였으며 최대 오존 농도 이전의 조사시간에서 방사선 조사가 종료되었음에도 불구하고 약 10초 이상 방사선치료실 내 오존 농도가 증가되는 경향을 보였다(Fig. 6). 또한 동일 방사선 조사 조건에서 조사시간의 증가에 따른 방사선치료실 내 오존 농도는 조사시간의 증가와 무관하게 유사한 농도 분포를 보였으며 배경 오존 농도 수준으로 감소되는데 걸리는 시간은 약 10분 정도 소요되었다. 현재까지 이러한 결과와 유사한 연구 동향은 전 세계적으

로 보고된 바 없으나 방사선을 조사한 직후의 농도가 가장 높고 5분 내지 10분의 시간이 경과됨에 따라 배경 오존 농도로 감소된다고 보고한 Kwak 등^[26]의 연구와 부분적으로 일치하였다. 본 연구 결과를 토대로 방사선치료실 내 오존 농도는 방사선 조사시간에 따라 조사 범위 내의 일정한 농도의 산소 분자가 광화학적 반응에 의해 대부분 이온화되어 오존 농도가 일정 수준으로 포화되며 방사선 조사 범위 밖의 산소 분자가 유입되어 조사시간이 증가해도 오존 농도가 일정한 농도 수준으로 유지될 것으로 추정할 수 있었다. 또한 최대 오존 농도 이전의 조사시간에서 조사 종료 후 오존 농도가 일정 시간 동안 증가되는 이유는 방사선 에너지를 부여 받은 이온화된 산소 원자 또는 이온화 전자가 주변 산소 분자와 지속적으로 상호작용하는 과정으로 분석할 수 있었다.

V. CONCLUSION

방사선치료실 내 오존 농도는 방사선 조사선량이 증가함에 따라 일정한 기울기를 갖는 증가 추이를 보이다가 포화되는 경향을 보였으며 이러한 결과는 방사선 조사 범위 내의 일정한 농도의 산소 분자가 광화학적 반응에 의해 대부분 이온화 과정이 완료되는 것으로 분석할 수 있어 고 에너지 방사선과 산소 분자의 광화학적 반응으로 가정한 본 연구의 가설이 이론적으로 정당하다는 것을 입증할 수 있었다. 본 연구 결과를 토대로 고 에너지 방사선에 의해 생성된 방사선치료실 내 오존 농도는 대기 환경적으로 연간 오존 경보제가 집중되는 3월에서 7월까지의 방사선치료실 주변 대기 중 오존 농도보다 높은 수준으로 나타났으며 후각을 자극하는 오존의 특이한 냄새를 맡거나 순간적인 호흡 곤란과 마른기침으로 가슴 통증 등의 신체적 증상이 나타날 수 있는 수준으로 나타났다. 또한 인체에 유입된 오존은 분자 수준에서 단백질 또는 피부 지질 등과 반응하여 과산화물을 생성하고 호흡기계, 신경계, 순환기계 등의 다양한 장기들의 심각한 질환들을 유발할 수 있다는 일관적인 연구 결과들이 보고되어 있으며 방사선치료실 내에서 폐 기능이 약한 폐암(lung cancer) 환자나 기관지 천식(bronchial asthma)이 있는 환자 등이 밀폐된 방사선치료실에서 고농도 오존에 장시간 노출될 경우 폐 질환을 악화시킬 수 있기 때문에 각별한 주의가 요구된다.

Reference

- [1] B. J. Finlayson-Pitts, N. Pitts, "VOCs, NOx and ozone production", *Journal of the Air Waste Management Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 1093-1101, 1993.
- [2] K. Movassaghi, M. V. Russo, P. Avino, "The determination and role of peroxyacetyl nitrate in photochemical processes in atmosphere", *Journal of the Chemical Cent*, Vol. 6, No. 2, pp. S8, 2012.
- [3] M. Amann, "Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution", *Copenhagen, WHO Regional Office Europe*, pp. 30-31, 2008.
- [4] A. Wisthaler, C. J. Weschler, "Reactions of ozone with human skin lipids: sources of carbonyls, dicarbonyls, and hydroxycarbonyls in indoor air", *Proc. Natl. Academy SCI USA*, Vol. 107, No. 15, pp. 6568-6575, 2010.
- [5] E. W. Triche, J. F. Gent, T. R. Holford, K. Belanger, M. B. Bracken, W. S. Beckett, L. Naeher, J. E. McSharry, B. P. Leaderer, "Low-level ozone exposure and respiratory symptoms in infants", *Environ. Health Perspect*, Vol. 114, NO. 6, pp. 911-916, 2006.
- [6] L. L. Chen, I. B. Tager, D. B. Peden, D. L. Christian, R. E. Ferrando, B. S. Welch, J. R. Balmes, "Effect of ozone exposure on airway responses to inhaled allergen in asthmatic subjects", *Chest*, Vol. 125, No. 6, pp. 2328-2335, 2004.
- [7] C. He., L. Morawska, L. Taplin, "Particle emission characteristics of office printers", *Environ SCI Technology*, Vol. 41, No. 17, pp. 6039-6045, 2007.
- [8] K. Kubesch, R. Zona, S. Solar, P. Gehringer, "Degradation of catechol by ionizing radiation, ozone and the combined process ozone-electron-beam", *Radiat. Phys. Chem.*, Vol. 72, No. 4, pp. 447-453, 2005.
- [9] NCRP Report No. 51, "Radiation protection design guidelines for 0.1-100 MeV particle accelerator facilities", Washington D.C., National Council on Radiation Protection and Measurements, 1977.
- [10] NCRP Report No. 49, "Structural shielding design and evaluation for medical use of X-rays and gamma rays of energies up to 10 MeV", Washington D.C., National Council on Radiation Protection and Measurements, 1976.

- [11] NCRP Report No. 144, "Radiation protection for particle accelerator facilities", Washington D.C., National Council on Radiation Protection and Measurements, 2003.
- [12] NCRP Report No. 151, "Structural shielding design and evaluation for Mega-voltage X-rays and gamma-ray radiotherapy facilities", Washington D.C., National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005.
- [13] IAEA Safety Series No. 115, "International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources", Vienna, International Atomic Energy Agency, 1996.
- [14] IAEA Safety Reports Series No. 47, "Radiation protection in the design of radiotherapy facilities", Vienna, International Atomic Energy Agency, 2006.
- [15] M. Cortez-Lugo, A. Mercado-García, M. Hernández-Avila, F. Meneses-González, E. Palazuelos-Rendón, "Evaluation of the indoor and outdoor air quality in a nursery school in Mexico City", *Salud. Publica. Mex.*, Vol. 40, No. 5, pp. 415-420, 1998.
- [16] L. Pieri, M. Vignudelli, F. Bartolucci, F. Salvatorelli, C. Di Michele, N. Tavano, P. Rossi, G. Dinelli, "Integrated environmental quality monitoring around an underground methane storage station", *Chemosphere*, Vol. 131, pp. 130-138, 2015.
- [17] W. D. Bennett, M. J. Hazucha, L. J. Folinsbee, P. A. Bromberg, G. E. Kissling, S. J. London, "Acute pulmonary function response to ozone in young adults as a function of body mass index", *Journal of the Inhalation Toxicology*, Vol. 19, No. 14, pp. 1147-1154, 2007.
- [18] W. C. Adams, "Comparison of chamber and face-mask 6.6-hour exposures to ozone on pulmonary function and symptoms responses", *Journal of the Inhalation Toxicology*, Vol. 14, No. 7, pp. 745-764, 2002.
- [19] A. H. Schultheis, D. J. Bassett, A. D. Fryer, "Ozone-induced airway hyperresponsiveness and loss of neuronal M2 muscarinic receptor function", Vol. 76, No. 3, pp. 1088-1097, 1994.
- [20] W. F. McDonnell, P. W. Stewart, M. V. Smith, "Prediction of ozone-induced lung function responses in humans", *Journal of the Inhalation Toxicology*, Vol. 22, No. 2, pp. 160-168 (2010).
- [21] K. Fuwa, B. L. Valle, "The Physical Basis of Analytical Atomic Absorption Spectrometry. The Pertinence of the Beer-Lambert Law", *Journal of the Analytical Chemistry*, Vol. 35, No. 8, pp. 942-946, 1963.
- [22] <http://air.daegu.go.kr/html/board/boardList.jsp?boardCode=data1>.
- [23] T. Tanaka, Y. Morino, "Coriolis interaction and anharmonic potential function of ozone from the microwave spectra in the excited vibrational states," *Journal of Molecular Spectroscopy*, Vol. 33, No. 3, pp. 538-551, 1970.
- [24] K. M. Mack, J. S. Munte, "Stark and Zeeman properties of ozone from molecular beam spectroscopy", *Journal of the Chemical Physics*, Vol. 66, pp. 5278-5283, 1977.
- [25] M. A. Kim, Y. D. Kwon, J. Y. Je, "A study on the Interior Structure and Scattered Radiation Measurement of Radiotherapy Room," *Journal of the Korean Society Radiology*, Vol. 6, No. 3, pp. 191-195, 2012.
- [26] Y. K. Kwak, I. K. Yoon, J. H. Lee, S. H. Yoo, "Consideration about ozone generation in the treatment room while treating a patient", *Journal of the Korean Society Radiation Therapy*, Vol. 21, No. 2, pp. 75-82, 2009.

고 에너지 방사선에 기인된 방사선치료실 내 평균 오존 농도의 변화

이진국¹, 이효영², 임인철^{2*}, 유윤식²

¹동의대학교 대학원 보건의과학과

²동의대학교 방사선학과

요 약

본 연구는 고 에너지 방사선 조사에 기인된 방사선치료실 내 오존 농도의 변화를 비교·분석하고자 하였다. 이를 위하여 치료실 주변 대기 중 오존 농도와 치료실 내 배경 오존 농도를 분석하여 고 에너지 방사선 조사에 기인된 치료실 내 평균 오존 농도를 비교하였다. 치료실 내 배경 오존 농도는 평균 17.4 ± 7.9 ppb로 방사선치료실 주변의 대기 중 오존 농도(평균 36.8 ± 22.3 ppb)보다 약 50% 정도 통계적으로 유의하게 낮게 나타났다($p < 0.05$). 고 에너지 방사선 조사에 기인된 치료실 내 오존 농도는 방사선이 조사됨과 동시에 배경 오존 농도의 약 2배 수준으로 급격하게 증가되었으며 조사시간이 증가함에 따라 기울기가 일정한 증가 추이를 보이다가 약 130초에서 180초 부근에서 최대 오존 농도를 이루고 점차 포화되는 경향을 보였으며 배경 오존 농도로 감소하는데 소요되는 시간은 약 10분 이상이었다. 본 연구 결과를 토대로 고 에너지 방사선 조사에 기인된 방사선치료실 내 오존 농도는 후각을 자극하는 오존의 특이한 냄새를 맡거나 순간적인 호흡 곤란과 마른기침으로 가슴 통증 등의 신체적 증상이 나타날 수 있는 수준으로 밀폐된 방사선치료실에서 고농도 오존에 장시간 노출될 경우 폐 질환을 악화시킬 수 있기 때문에 각별한 주의가 요구된다.

중심단어: 고 에너지 방사선, 방사선치료실, 실내 오존 농도, 대기 중 오존 농도