

Original article

축 방향 시야가 다른 PET-CT에서 정도관리 방사선원의 통합 사용에 따른 품질 보증 평가

이충운, 방사선사*, 유연욱, 방사선사, 이태형, 방사선사, 장경태, 방사선사, 윤상혁, 방사선사, 김윤철, 방사선사
국립암센터 핵의학과

Quality Assurance Evaluation of Integrated Quality Control Radiation Source Usage in PET-CT with Different Axial Field of View

Choong-Woon Lee, Radiological Technologist*, Yeon-Wook You, Radiological Technologist, Tae-Hyeong Lee, Radiological Technologist, Gyeong-Tae Jang, Radiological Technologist, Sang-Hyeok Yun, Radiological Technologist, Yun Cheol Kim, Radiological Technologist
Department of Nuclear Medicine and Research Institute, National Cancer Center, Gyeonggi-do, Korea

*Corresponding Author: Choong-Woon Lee, Department of Nuclear Medicine and Research Institute, National Cancer Center, 323 Ilsan-ro, Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10408, Republic of Korea. Tel: +82-31-920-0166, E-mail: dackmani@ncc.re.kr

Abstract

Purpose: This study evaluated the usefulness of using a single annulus phantom for daily quality assurance (DQA) of two PET/CT systems with different specifications and axial field-of-view (AFOV) lengths. Because of differences in AFOV, system-specific ^{68}Ge annulus phantoms of different sizes have conventionally been used for each scanner. **Materials and Methods** A 55 MBq ^{68}Ge annulus phantom (Eckert & Ziegler Isotope Products, Germany) was used for both the Discovery MI and OMNI Legend PET/CT systems (GE Healthcare, USA). Based on the manufacturer's recommended DQA program, PET detector status was monitored over 60 working days before and after the transition in phantom use and evaluated using visual inspection and parameter reports. For image analysis, the NEMA IEC Body phantom was prepared with a 10:1 sphere-to-background activity ratio according to the EARL recommendation. Images were reconstructed using Q.clear+TOF+PSF, Q.clear+OSEM+PSF, TOF+PSF, TOF, OSEM+PSF, and OSEM, in accordance with the institution's standard torso imaging protocols. Statistical analysis was performed using R. **Results:** DQA results showed minimal changes in the major parameters: coincidence mean (-0.1%), coincidence variance (0.4%), singles mean (-0.5%), singles variance (-0.3%), block busy mean (3.0%), timing mean (2.1%), and energy shift (-1.1%). Paired t-test results showed no statistically significant differences ($P > 0.01$). In the NEMA IEC Body phantom analysis, maximum recovery coefficient (RC) values varied from -0.31% to 0.63% compared with individual phantom use, while mean RC values ranged from -0.13% to 0.10%. These differences were also not statistically significant ($P > 0.01$). Regarding radiation safety, the operator's annual external exposure was estimated to be 15.124 μSv for phantom handling and 1.089 $\mu\text{Sv}/\text{m}$ during transport. The average annual external radiation exposure was approximately 100 μSv when the total transport distance was 77.94 m. **Conclusion:** This approach may improve the efficiency of radioactive source management and provide economic benefits by reducing the cost of purchasing multiple sealed sources. These findings suggest that the integrated use of a single annulus phantom is a practical and efficient strategy for quality control in PET/CT systems.

Keywords: Daily Quality Assurance, Annulus Phantom, PET-CT

서론

각종 질병치료의 가장 중요한 첫 단계는 신속하고 정확한 진단에 있을 것이다. 특히 암 환자의 경우 F-18-Fluorodeoxyglucose (FDG)를 이용한 PET-CT 검사는 양성과 악성종양의 감별, 병기설정, 종양의 치료 효과 판정 및 종양의 재발진단 등에 널리 이용되고 있는 검사법이다[1].

PET-CT 영상 검사의 수행에 있어서 고도의 효율성과 신뢰성을 얻기 위해서는 적절한 품질 보장 체계를 필요로 한다. 정도관리는 품질관리를 보증하는 하나의 방법이며 진료의 질을 향상시키고 환자의 안전을 도모하는데 필수적이다[2]. 현재 관련 학회나 제조사 차원에서 여러 주기에 따른 정도관리가 권고되고 있으며 PET-CT에 대한 기본평가로 수행하는 것은 National Electrical Manufacturers Association (NEMA) 및 International Electrotechnical Commission (IEC)에서 제안한 UN2-1994와 UN2-2001의 성능평가 방법이 있다[3-6]. 기능 영상을 제공하는 PET-CT 장비를 효율적으로 사용하기 위해서는 표준화된 성능평가 방법과 정확한 생체현상 측정 및 질병 진단을 위한 일상적인 정도관리를 충실히 수행해야 한다[7].

최근 PET-CT 기술은 축 방향 시야(Axial field of view)의 확장과 고도화된 영상 알고리즘을 통해 비약적인 성능 향상을 이루었다. 이는 시스템의 민감도를 높여 검사 시간을 단축시킬 뿐 아니라 하드웨어적 진보를 통해 환자의 방사선 피폭량을 유의미하게 절감하고 임상적 효율성과 진단적 가치를 동시에 극대화하고 있다[8].

본 연구의 목적은 규격 및 축 방향 시야 길이가 다른 PET-CT 2대 이상 근거리에서 운영 시 축 방향 시야의 길이 차이로 인하여 크기가 다른 정도관리 방사선원 ^{68}Ge 환형 팬텀(Annulus Phantom)을 각각 개별 사용하여 정도관리를 하는데 이를 축 방향 시야의 길이가 긴 쪽의 환형 팬텀 1개로 통합 사용하고 사용 유형에 따른 PET일상품질보증(Daily Quality Assurance)과 그에 따른 외부피폭 방사선량 평가를 실시한다. 또한 NEMA IEC Body 팬텀 실험을 통하여 PET-CT 영상을 비교하고 정도관리 방사선원인 환형 팬텀 통합 사용에 따른 유용성에 대하여 평가하고자 한다.

대상 및 방법

1. 장비 및 방사선원

본원에서 사용하고 있는 Discovery MI (General Electric Healthcare, USA) PET-CT 장비를 이용하였으며, OMNI Legend (General Electric Healthcare, USA) PET-CT 장비를 위한 환형 팬텀(Eckert & Ziegler Isotope Products, Germany) 55MBq을 사용하였다. 장비 및 환형 팬텀의 세부사항은 아래와 같다(Fig. 1, 2) (Table 1, 2).



A

Fig. 1. PET-CT systems used in this study: (a) Discovery MI PET-CT and (b) OMNI Legend PET-CT.



Fig. 1. PET-CT systems used in this study: (a) Discovery MI PET-CT and (b) OMNI Legend PET-CT. (continued)

Table 1. Characteristics of PET-CT

	Discovery MI	OMNI Legend
Scintillator material	LBS-Lutetium Based scintillator	Digital BGO with SiPM
Scintillator dimension	3.95mm × 5.3mm × 25mm	4.1mm × 4.1mm × 30mm
Axial field of view	20cm	32cm
Transaxial field of view	70cm	70cm
PET transaxial spatial resolution	FWHM@1cm: 3.9mm/2.1mm FWHM@10cm: 4.4mm/2.1mm	FWHM@1cm: 3.9mm/1.4mm FWHM@10cm: 4.4mm/1.5mm
PET axial spatial resolution	FWHM@1cm: 4.4mm/3.4mm FWHM@10cm: 4.7mm/3.4mm	FWHM@1cm: 3.8mm/2.5mm FWHM@10cm: 4.2mm/3.0mm
Sensitivity	7.5 cps/kBq	11.8 cps/kBq
Scatter fraction	41%	35%
Coincidence window	4.9ns	6.5ns
CT Minimum slice thickness	0.625mm	0.625mm
CT spatial resolution	0.28mm	0.28mm
Number of slices	128	128



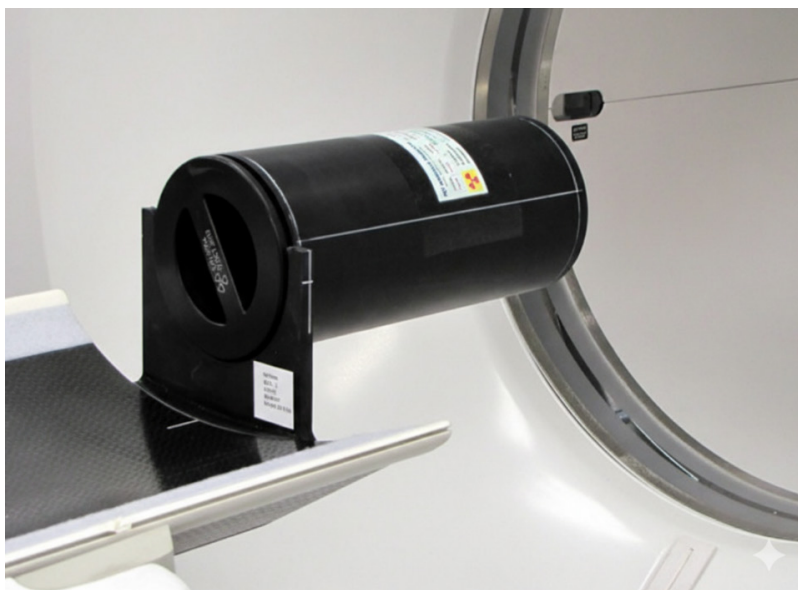
Fig. 2. Ge-68 Annulus phantom used for (a) Discovery MI PET-CT and (b) OMNI Legend PET-CT.

Table 2. Characteristics of Annulus phantom

	Annulus phantom for DMI	Annulus phantom for OMNI
Volume (mℓ)	1260	1580
Diameter (mm)	135	135
Height (mm)	300	370
Radioactivity (MBq)	55	55
manufacturer	Eckert & Ziegler	Eckert & Ziegler

2. PET일상품질보증

Discovery MI PET-CT 장비를 이용하였으며 제조사에서 권고하는 PET일상품질보증 프로그램은 PET검출기의 현재 상태를 측정하고 품질 보증용으로 사용할 수 있는 시각적 및 매개변수 데이터를 보고서로 저장하고 평가하였다(Fig. 3)[9]. 정량 정확성 보장을 위해 스캐너, 설비 시계 동기화를 하여 오차를 최소화하고 환형 팬텀 교체 전후 현장 서비스 엔지니어가 일상품질보증 기준 도수를 생성하여 이 기준과 시행일 도수를 비교하고 일상품질보증이 완료되면 요약보기(View Summary)를 통하여 도수 기준과 비교하여 그래프로 표시되며 상태를 나타내는 빨간색(해당 값이 기준 도수와의 편차 허용 범위 밖)/노란색(시스템에 기준 도수와의 편차가 증가한 것으로 결함이 없는 한 사용 가능)/녹색(해당 값이 기준 도수와의 편차 허용 범위 안) 표시기가 포함된 수치표를 저장하였다(Fig. 4). 이를 통하여 환형 팬텀을 개별 사용하였을 때의 30근로일간 도수표와 축 방향 시야가 긴 쪽의 환형 팬텀을 통합 사용하였을 때의 30근로일간 도수표를 비교하고 분석하였다.

**Fig. 3.** Setup of the annulus phantom on the scanner bed for daily quality assurance(DQA).

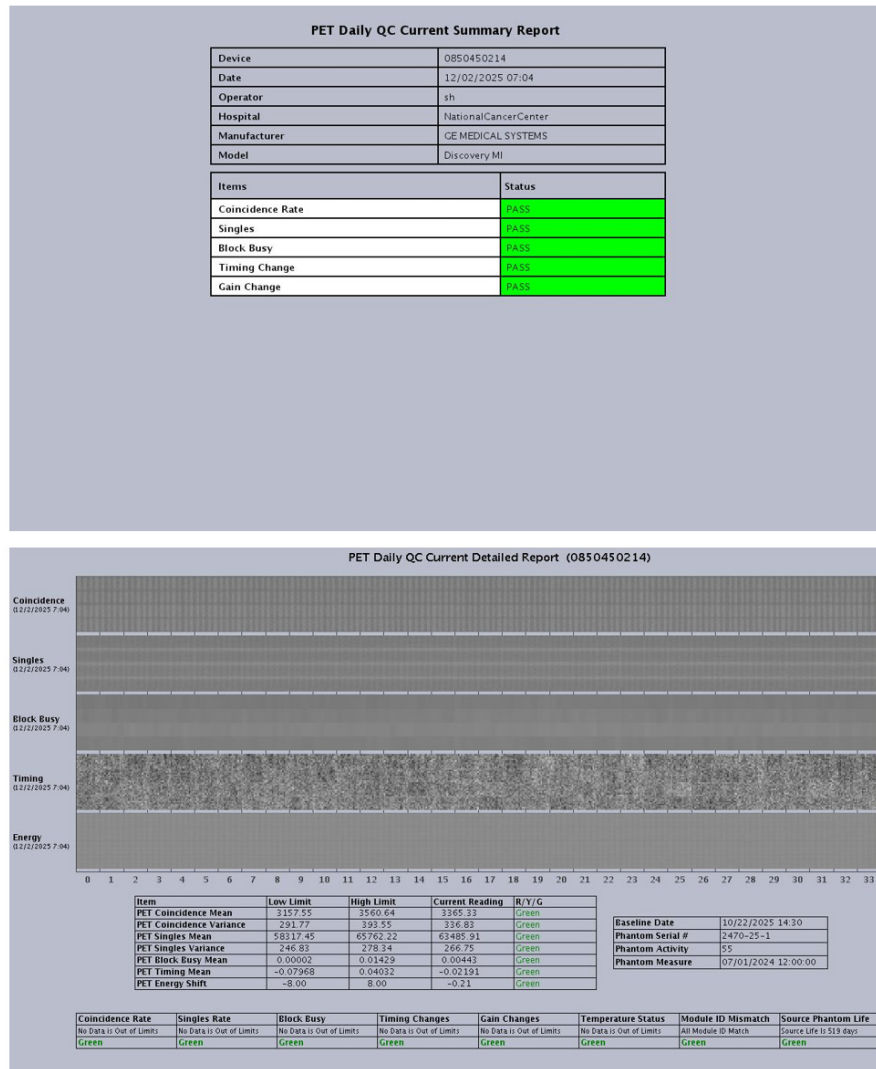


Fig. 4. Daily Quality Assurance(DQA) current detailed reports and evaluation results.

3. NEMA IEC Body Phantom

회복계수(Recovery Coefficients)는 부분 체적효과(Partial volume effect)와 같은 요인에 의해 영향을 받는 방사성의약품 흡수 값을 보정하기 위한 것이다. 실제 방사능의 농도에 대한 측정된 방사능의 농도로서 아래와 같이 유도되었으며 회복계수는 NEMA 2002 및 IEC 1998 표준에서 제안한 대로 추정되었다[10-11]. 또한 EARL은 2019년 ^{18}F PET-CT 인증사양의 표준인 Standards2 사양을 개발하였다(Table 3)[12].

$$RC = \frac{AC_M - AC_{BG}}{AC_I - AC_{BG}} \quad \text{Eq. 1}$$

RC - Recovery concentration for a ROI

AC_M - Radiopharmaceutical activity concentration measured in the ROI (Bq/mL)

AC_{BG} - Radiopharmaceutical activity concentration measured in the ROI of BG (Bq/mL)

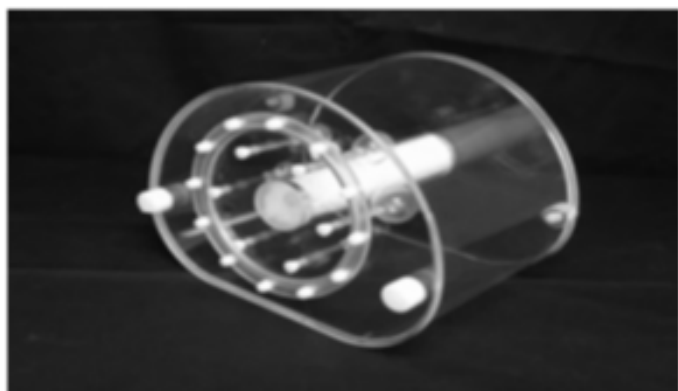
AC_I - Radiopharmaceutical activity concentration inserted in the ROI (Bq/mL)

AC_{BG} - Radiopharmaceutical activity concentration inserted in the ROI of BG (Bq/mL)

Table 3. SUV Recovery Coefficients for ^{18}F standards2 effective as quarter 3 of 2020

NEMA IEC phantom spheres		^{18}F standards2 RCs	
Diameter (mm)	Volume (mL)	max	mean
37	26.52	1.05-1.29	0.85-1.00
28	11.49	1.01-1.26	0.85-1.00
22	5.57	1.01-1.32	0.80-0.99
17	2.57	1.00-1.38	0.76-0.97
13	1.15	0.85-1.22	0.63-0.86
10	0.52	0.52-0.88	0.39-0.61

EANM Research Ltd (EARL)에서 권고하는 방사능 농도 기준으로 설정하기 위해 NEMA IEC Body 팬텀 (Diameter 194 mm, volume 9700 cm³)의 Sphere 6개에 ^{18}F 를 20 kBq/mL, 배후방사능에 2 kBq를 주입하여 최대 방사능 농도의 회복계수를 기준으로 배후방사능의 비율이 10:1이 되도록 ^{18}F 를 희석하여 팬텀에 주입하였다(Fig. 5)[13].

**Fig. 5.** NEMA IEC Body Phantom set up for image quality and recovery coefficient evaluation.

4. 영상 획득

Discovery MI PET-CT 기기를 이용하였으며, 팬텀을 FOV에 중앙에 위치시킨 후 CT영상은 본원의 Torso촬영 파라미터와 같은 관전압 120 kV, 관전류 Auto mA (Min 10/Max 100/Smart mA), 0.5 s/rotation, Pitch 0.984:1, speed 39.37 mm/rot를 이용하여 영상을 획득하였고, PET영상도 마찬가지로 matrix size 256×256, Slice thickness 3.75 mm, interval 2.79 mm, diameter 50 cm, Q.clear Quantitation 500, 나머지는 iteration 3, subset 16, step 당 120초로 1 step PET 영상을 획득하였다. 팬텀 영상 획득 후 CT영상을 이용하여 PET영상을 감쇠보정하였다.

5. 결과 분석

GE Healthcare사의 판독용 AW (Advantage Workstation) 4.7 소프트웨어 프로그램 (General Electric Healthcare, USA)을 이용하여 PET 영상과 CT영상을 융합한 후 CT 영상에서 6개 구의 크기에 맞게 관심 영역을 설정하여 측정하였다(Fig. 6). 환형 팬텀 개별 사용에서 통합 사용 적용 전후 Q.clear+TOF+PSF, Q.clear+OSEM+PSF, TOF+PSF, TOF, OSEM+PSF, OSEM로 재구성하고 Q.Clear를 제외한 영상에는 본원에서 사용하는 Gaussian filter (Full Width at Half maximum, FWHM) 5.0 mm 조건으로 각각 영상을 분석하였다. R ver.4.2.0 (The R Foundation) 통계분석 프로그램을 이용하여 재구성 방법, 환형 팬텀의 사용 유형 전후 대응표본 t-검정(Paired t-test) 분석을 하였다.

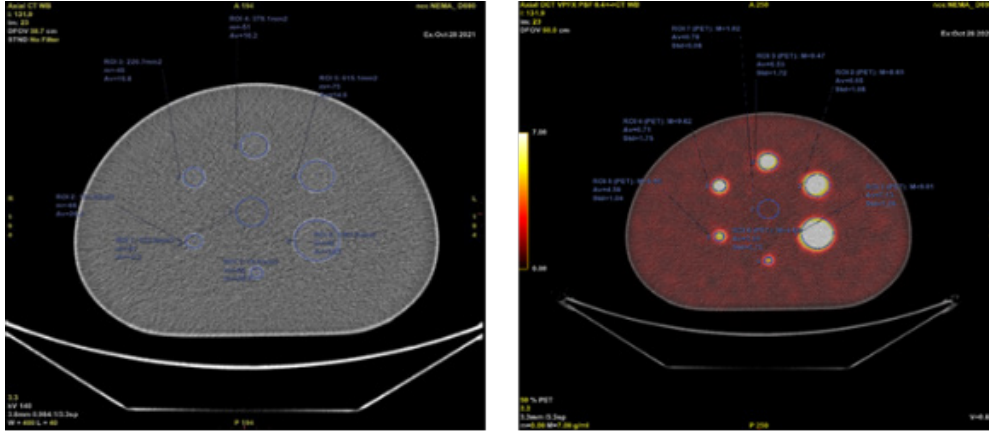


Fig. 6. Region of interest(ROI) setting and image analysis on the GEAW 4.7 workstation.

6. 방사선안전

환형 팬텀 이동 장치를 위한 방사선피폭은 인체에서 평균 30 cm 거리에서 받는 방사선량을 기준으로 산정하였다. 환형 팬텀을 시술자의 위치에서 방사선측정기(Tracerco T402, UK)로 10회 실측정한 방사선량을($\mu\text{Sv/h}$ at 30 cm)을 선택하고 성인 평균 도보 속도를 적용하여 이동거리, 장착 및 해제에 따른 외부피폭 방사선량을 산정하였다. 제조사의 사용자매뉴얼에 따라 환형 팬텀 반감기에 따른 평균 내구연한을 2년으로 하여 시술자가 받는 연간 외부피폭 방사선량을 산출하고 1년 365일 중 근로일 246일 분율로 보정하였다. 이를 통하여 정도관리 업무로 하여금 시술자의 연간 평균 방사선량, 이동거리 미터 당 받는 연간 평균 방사선량을 산출하였으며 정도관리 업무로 인한 방사선 피폭의 비용-편익 분석을 검토하기 위하여 시술자의 거리 30 cm과 주변인 3명의 거리 200 cm로 하여 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC) 간행물 NUREG-153014) 기준으로 비교 분석하였다[14].

$$D = Y \times WF \times \int_0^{365 \times 2} D_0 \times e^{-\lambda t} dt \quad \text{Eq. 2}$$

D_0 – Radiation dose rate at 30 cm ($\mu\text{Sv/d}$)

D – Annual average radiation dose for quality control

WF – Ratio of working days in a year

Y – Ratio of years during the period

λ – Decay constant

t – Time

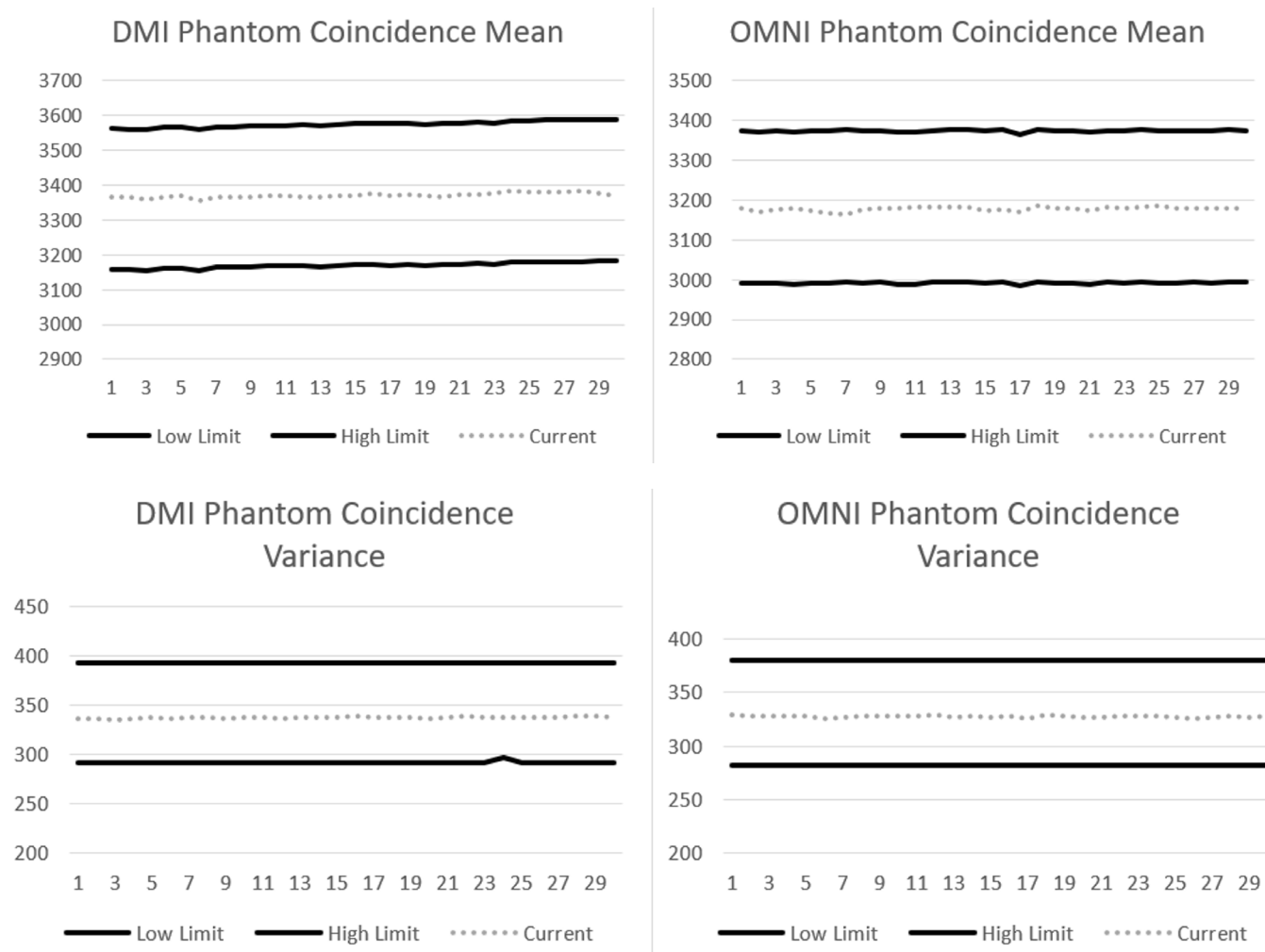
결과

1. 환형 팬텀 통합 사용에 따른 PET임상품질보증

PET임상품질보증은 환형 팬텀을 개별 사용하였을 때와 통합 사용하였을 때 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 사용 유형 전후 각 30근로일 모두 제조사의 요약보기를 통하여 동시 발생 비율, 단일 발생 비율, 블록 사용 시간, 타이밍 변화, 게인 변화 등 모두 상태가 녹색이며 해당 값이 기준 도수와와의 편차 허용 범위 안임을 확인하였다. 일상품질보증 프로그램에서 권고하는 전후 하한과 상한에 대한 현재 평균값은 Coincidence Mean -0.1%, Coincidence Variance 0.4%, Singles Mean -0.5%, Singles Variance -0.3%, Block Busy Mean 3.0%, Timing Mean 2.1%, Energy Shift -1.1%로 증감하였으며 대응표본 t-검정(Paired t-test) 결과 P 값은 모두 0.01 이상으로 통계적으로 의미 있는 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다(Table 4)(Fig. 7).

Table 4. Discovery MI PET-CT Daily Quality Assurance Current Detailed Report

	Item	Low Limit	High Limit	Current	P-value
Annulus Phantom for DMI	Coincidence Mean	3169.78 ± 7.90	3574.53 ± 8.92	3370.36 ± 6.26	-
	Coincidence Variance	291.97 ± 1.08	393.55 ± 0.00	337.64 ± 0.76	-
	Singles Mean	58324.57 ± 40.82	65770.28 ± 46.05	62729.07 ± 480.64	-
	Singles Variance	246.84 ± 0.08	278.36 ± 0.09	264.64 ± 1.34	-
	Block Busy Mean	0.00002 ± 0.00	0.01451 ± 0.00	0.00668 ± 0.00	-
	Timing Mean	-0.07968 ± 0.00	0.04032 ± 0.00	-0.01992 ± 0.00	-
	Energy Shift	-8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	-0.29 ± 0.20	-
Annulus Phantom for OMNI	Coincidence Mean	2991.44 ± 2.29	3373.33 ± 2.58	3177.74 ± 5.28	0.842
	Coincidence Variance	282.17 ± 0.00	380.60 ± 0.00	327.63 ± 0.84	0.795
	Singles Mean	51587.08 ± 234.52	58172.66 ± 264.46	55213.25 ± 480.28	0.912
	Singles Variance	225.95 ± 0.49	254.80 ± 0.55	241.47 ± 1.24	0.887
	Block Busy Mean	0.00003 ± 0.00	0.01883 ± 0.00	0.00892 ± 0.00	0.954
	Timing Mean	-0.07847 ± 0.00	0.04153 ± 0.00	-0.01921 ± 0.00	0.988
	Energy Shift	-8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	-0.46 ± 0.35	0.884

**Fig. 7.** Comparison of PET Daily Quality Assurance(DQA) parameters between individual phantom and integrated phantom use in Discovery MI PET-CT over 30 working days.

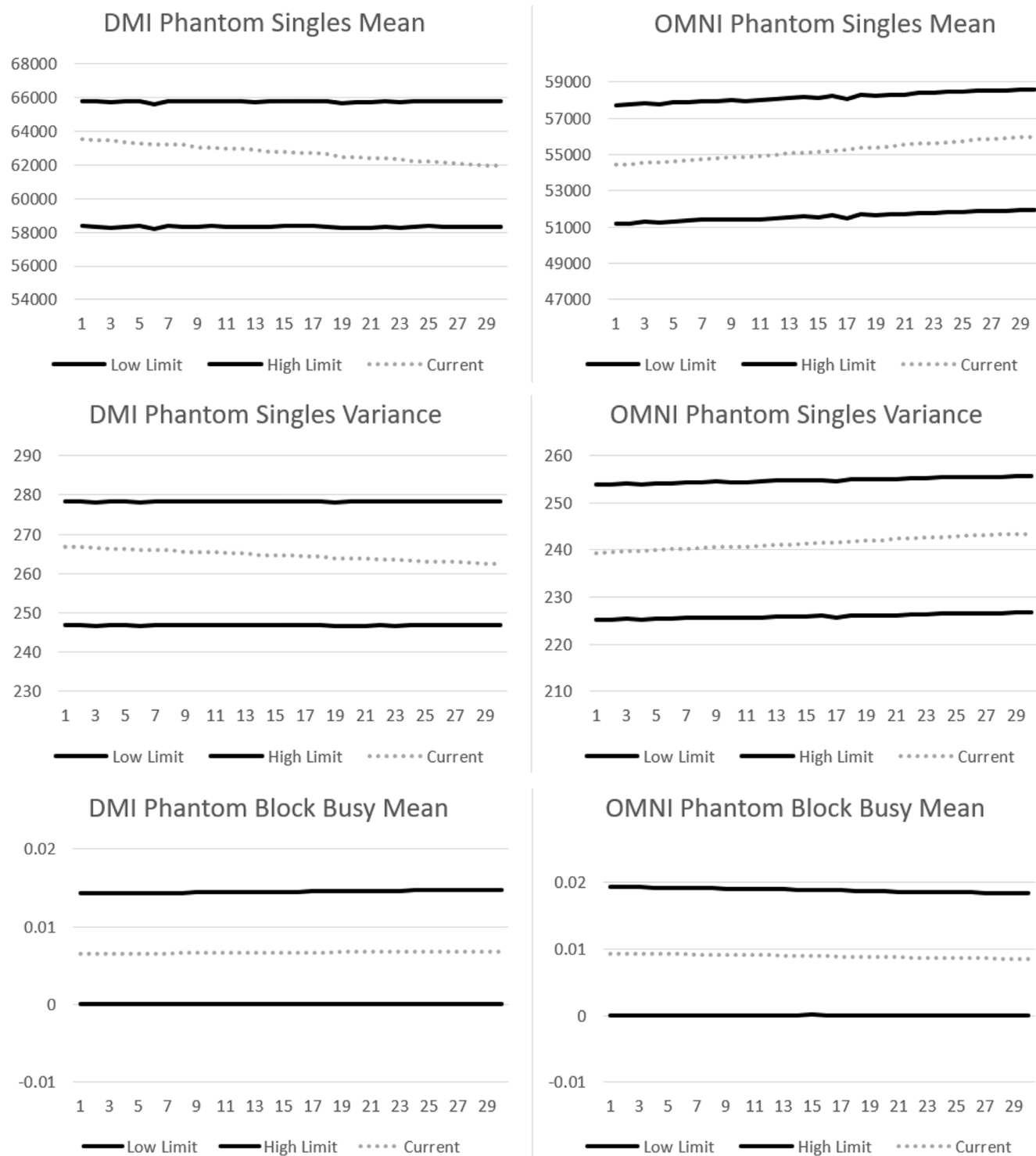


Fig. 7. Comparison of PET Daily Quality Assurance(DQA) parameters between individual phantom and integrated phantom use in Discovery MI PET-CT over 30 working days (continued).

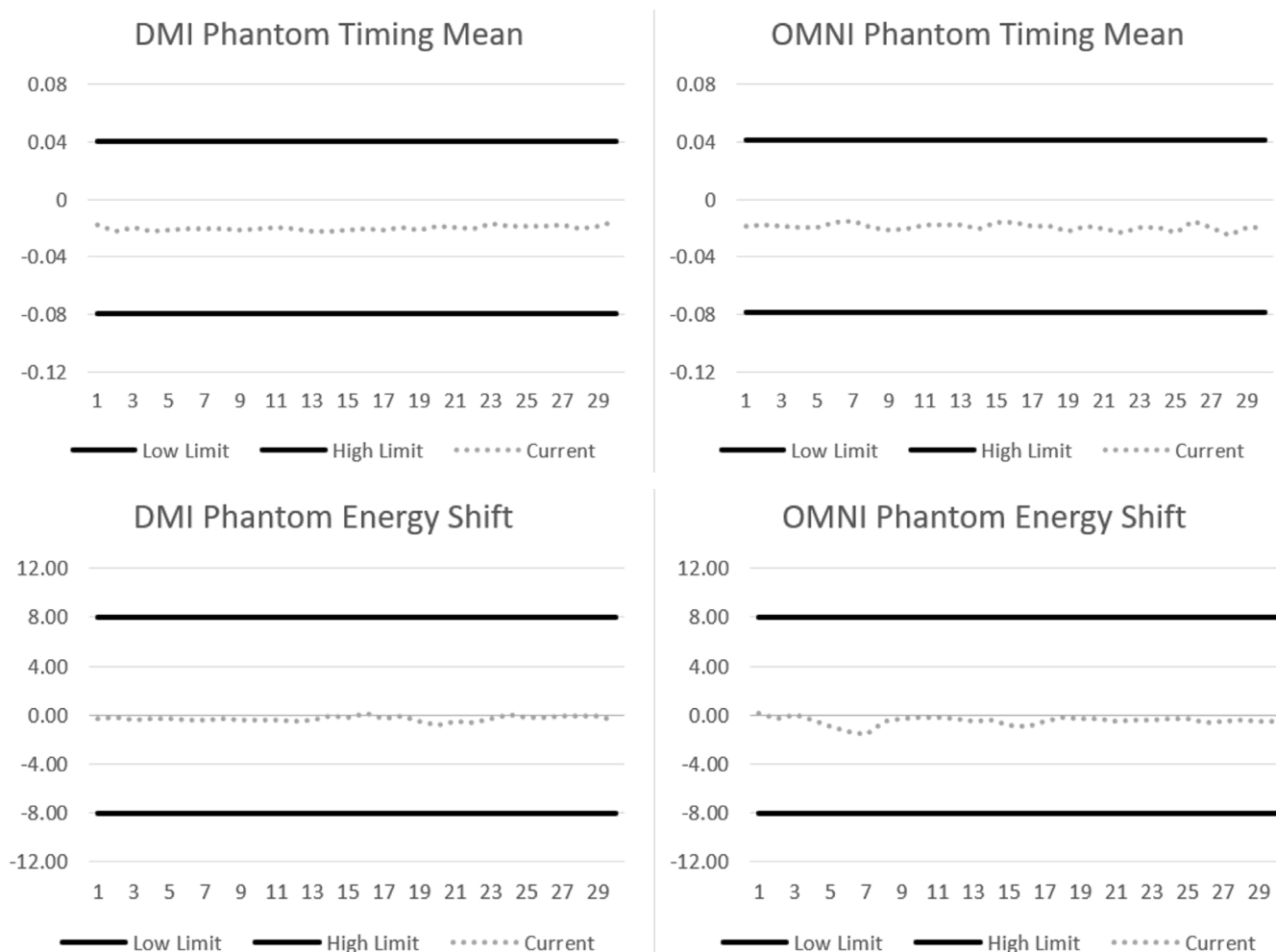


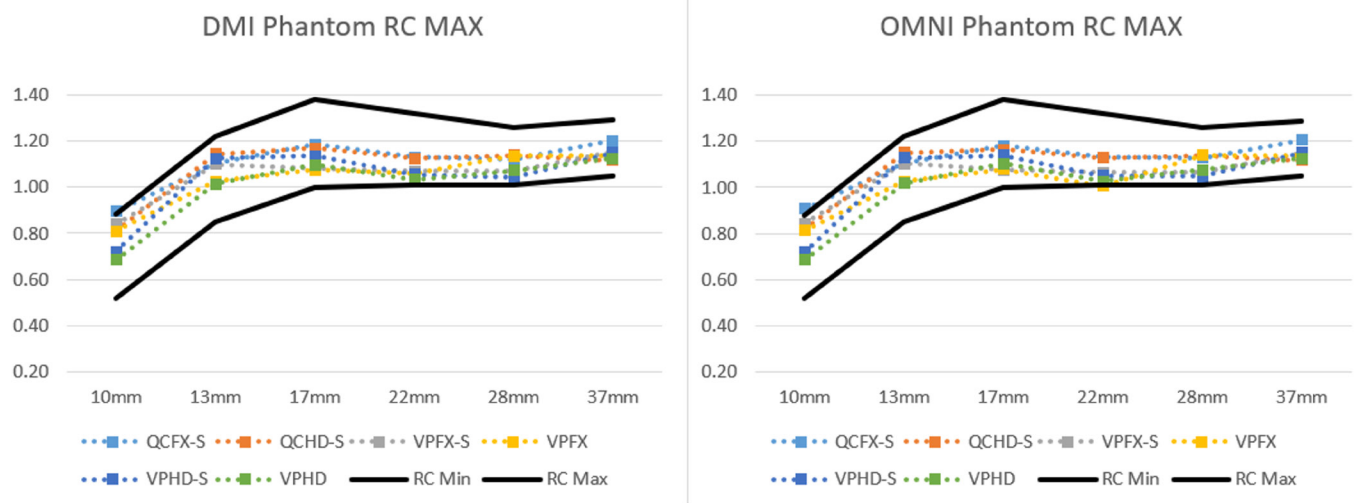
Fig. 7. Comparison of PET Daily Quality Assurance(DQA) parameters between individual phantom and integrated phantom use in Discovery MI PET-CT over 30 working days (continued).

2. 환형 팬텀 통합 사용에 따른 회복계수

동일한 구의 직경에서 환형 팬텀 사용 유형에 따른 NEMA IEC Body 팬텀 영상의 회복계수는 전반적으로 큰 차이가 없었다. 회복계수 최대값은 개별 사용에 비해 평균 Q.Clear+TOF+PSF -0.021 (-0.31%), Q.Clear+OSEM+PSF -0.013 (-0.20%), TOF+PSF 0.004 (0.06%), TOF 0.040 (0.63%), OSEM+PSF -0.007 (-0.10%), OSEM -0.006 (-0.09%) 증감하였고 회복계수 평균값은 Q.Clear+TOF+PSF -0.004 (-0.08%), Q.Clear+OSEM+PSF 0.005 (0.09%), TOF+PSF -0.006 (-0.13%), TOF 0.002 (0.03%), OSEM+PSF 0.004 (0.09%), OSEM 0.005 (0.10%) 증감하였다(Fig. 8, 9). 마찬가지로 재구성기법이 최신기법 일수록 회복계수가 증가하여 EARL ^{18}F 인증사양인 Standards2에 더 적합하게 변화하는 것을 확인하였으며 환형 팬텀의 개별 사용과 통합 사용 회복계수의 대응표본 t-검정 결과 P 값이 0.01 이상으로 통계적으로 의미 있는 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다(Table 5)(Fig. 8).

Table 5. Discovery MI RC according to DMI Phantom and OMNI Phantom uses

	Sphere diameter	Q.clear TOF PSF	Q.clear OSEM PSF	TOF PSF	TOF	OSEM PSF	OSEM
RC max	10mm	0.90	0.81	0.84	0.81	0.72	0.68
DMI Phantom	13mm	1.11	1.14	1.10	1.02	1.13	1.02
	17mm	1.19	1.17	1.08	1.07	1.13	1.10
	22mm	1.13	1.13	1.07	1.06	1.06	1.03
	28mm	1.12	1.14	1.07	1.14	1.04	1.07
	37mm	1.20	1.12	1.15	1.14	1.15	1.13
RC max	10mm	0.91	0.81	0.84	0.81	0.72	0.69
OMNI Phantom	13mm	1.11	1.15	1.10	1.03	1.13	1.02
	17mm	1.18	1.16	1.08	1.08	1.14	1.10
	22mm	1.13	1.13	1.07	1.01	1.05	1.03
	28mm	1.13	1.14	1.07	1.14	1.05	1.08
	37mm	1.21	1.12	1.15	1.14	1.15	1.12
RC mean	10mm	0.67	0.55	0.58	0.58	0.55	0.52
DMI Phantom	13mm	0.87	0.77	0.77	0.68	0.80	0.71
	17mm	0.88	0.83	0.77	0.74	0.77	0.73
	22mm	0.90	0.87	0.80	0.79	0.77	0.76
	28mm	0.91	0.90	0.87	0.87	0.84	0.83
	37mm	0.97	0.95	0.95	0.92	0.91	0.89
RC mean	10mm	0.67	0.55	0.58	0.58	0.56	0.52
OMNI Phantom	13mm	0.86	0.77	0.76	0.68	0.79	0.70
	17mm	0.88	0.83	0.77	0.74	0.77	0.73
	22mm	0.90	0.87	0.80	0.79	0.77	0.76
	28mm	0.91	0.90	0.87	0.87	0.84	0.83
	37mm	0.97	0.94	0.95	0.92	0.91	0.89
P- value		0.062	0.038	0.055	0.041	0.078	0.112

**Fig. 8.** Maximum(RC max) and mean(RC mean) recovery coefficients for Discovery MI PET-CT reconstructed with various algorithms, compared between individual phantom and integrated phantom use.

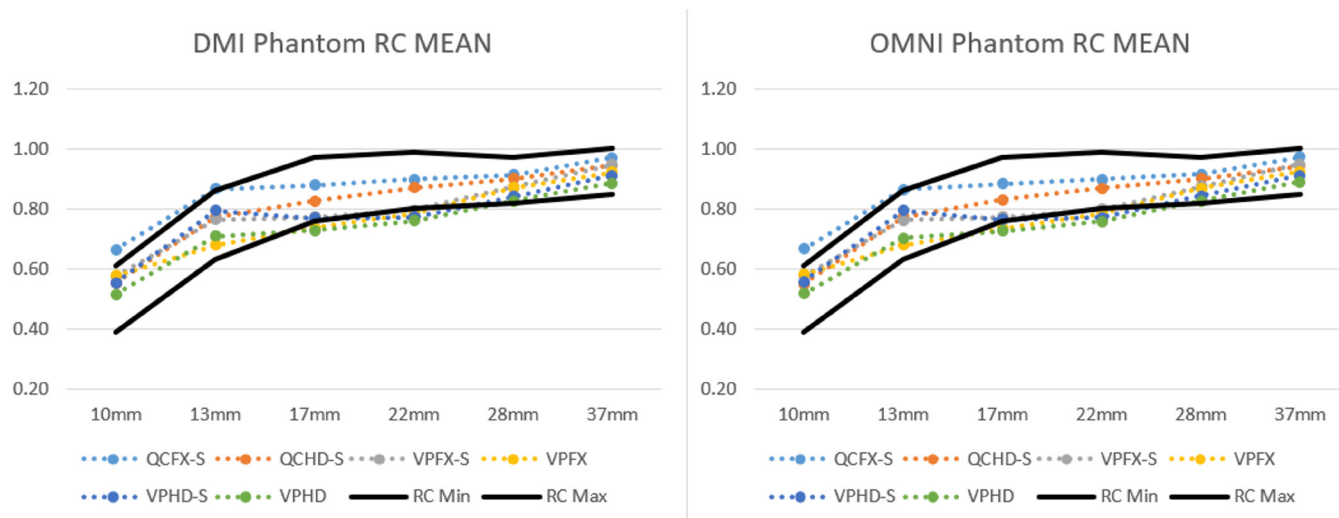


Fig. 8. Maximum(RC max) and mean(RC mean) recovery coefficients for Discovery MI PET-CT reconstructed with various algorithms, compared between individual phantom and integrated phantom use (continued).

3. 환형 팬텀 통합 사용에 따른 방사선안전

환형 팬텀을 시술자 위치의 실제 측정된 평균 방사선량율에서 자연 방사선량율을 감산하여 $49.00 \pm 1.690 \mu\text{Sv/h}$ at 30 cm per 55 MBq 값을 선택하고(Fig. 9) 마찬가지로 주변인 위치의 실제 측정된 방사선량율에서 자연 방사선량율을 감산하여 $1.94 \pm 0.103 \mu\text{Sv/h}$ at 200 cm per 55 MBq 값을 선택하여 외부피폭 방사선량을 산출하였다. PET-CT 장비에 대한 환형 팬텀의 실제 장착 및 해제에 보수적으로 가장 늦은 시간인 하나의 장비 당 5초, 총 10초로 평가하고 운반 이동시간은 성인의 평균 도보 속도 미터 당 0.72초로 하였다 [15].

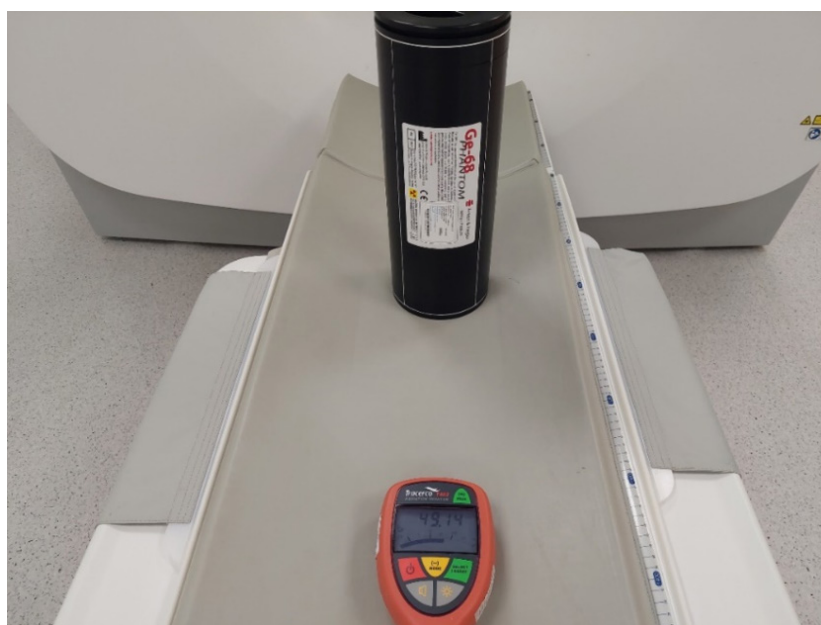


Fig. 9. Measurement of radiation dose rate at the operator's position using a portable radiation monitor.

본원에서는 개별 사용 시 각 보관함과 각 PET-CT 장비까지의 실측정한 동선 총 16m와 통합 사용 시 총 23m로 산정하였다. PET-CT에 환형 팬텀 장착 및 해제에 따라 받는 시술자의 외부피폭 방사선량은 연간 평균 15.124 μSv 이며 운반에 따라 받는 외부피폭 방사선량은 미터 당 연간 평균 1.089 μSv , 주변인에 대한 외부피폭 방사선량은 미터 당 연간 평균 0.083 μSv 로 나타났다(Table 6).

Table 6. Radiation dose for mounting and transportation

(Unit: μSv)	Operator's annual average radiation dose	Bystander's annual average radiation dose
Radiation dose for mounting	15.124	-
Radiation dose for distance(/m)	1.089	0.083
Radiation dose for Quality Control (distance 20m)	36.904	1.660
Radiation dose for Quality Control (distance 50m)	69.574	4.150
Radiation dose for Quality Control (distance 77.94m)	100.000	6.469

이를 통하여 시술자의 총 환형 팬텀 운반거리가 77.94 m일 때 정도관리를 위한 연간 평균 외부피폭 방사선량이 100 μSv 임을 확인하였다[16]. 본원에서는 정도관리 업무로 받는 연간 평균 외부피폭 방사선량은 개별 사용 시 32.547 μSv , 통합 사용 시 40.170 μSv 이며 그에 대한 차이는 7.623 μSv 이다(Table 7).

Table 7. Radiation dose according to individual and integrated usage in National Cancer Center

	Individual use	Integrated use	Difference
Annual average radiation dose	32.547 μSv	40.170 μSv	7.623 μSv

또한 환형 팬텀의 통합 사용에 따른 시술자와 주변인 3명의 연간 받는 추가적인 집단 선량은 2025년 5월 환형 팬텀 견적일 환율로 가격을 고려하여 미국 원자력규제위원회 간행물 NUREG-1530 비용-편익 분석 기준 5,200 dollar per person-rem와의 비는 0.0012로 매우 낮게 나타났다(Table 8).

Table 8. Comparison of radiation dose between NUREG-1530 and NCC

	NCC(2y)	NUREG-1530	Ratio
Person-rem	0.0017	1	0.0023
Dollar	7592	5200	1.4600
Person-rem per 5200 dollar	0.0012	1	0.0012

고찰 및 결론

제조사가 권고하는 정도관리를 시행하여 주기적으로 교정을 한다면 축 방향 시야의 길이가 긴 쪽의 환형 팬텀 1개로 축 방향 시야가 서로 다른 PET-CT 장비 2대에 통합 사용하여 평가한 PET일상품질보증과 NEMA IEC Body 팬텀 결과 유의미한 차이를 보이지 않았다. 또한 PET-CT 검사실에 대한 시술자의 환형 팬텀 총 운반 거리가 77.94 m인 경우 정도관리를 위한 연간 평균 외부피폭 방사선량이 100 μSv 임을 확인하였다. 본원에서는 시술자와 주변인의 추가적인 집단 선량이 2년간 0.0017 person-rem per 7,592 dollar로 미국 원자력규제위원회 NUREG-1530의 5,200 dollar per person-rem과 비교하여 0.0012배로 미미하여 비용-편익 분석에서 경제성이 있다고 도출됐다.

또한 환형 팬텀의 효율적 운영에 따른 방사성물질 관리나 밀봉선원 누설점검 등 방사선안전에 대한 업무를 보다 효율적으로 운영할 수 있으며 PET-CT 장비의 정도관리를 위한 밀봉선원 구매에 해마다 약 3,796달러의 경제적 편익을 가져올 수 있다고 사료된다.

본 연구에서는 같은 제조사의 축 방향 시야가 다른 PET-CT 장비로 실험을 하여 여러 제조사의 PET-CT 장비의 환형 팬텀 통합 사용

의 검토에는 제한이 있으며 PET-CT 검사실 간에 정도관리를 위한 외부피폭 방사선량을 더욱 낮추기 위하여 환형 팬텀 운반 시 바퀴가 있는 이동식 선반을 이용하여 시술자와 방사선원 사이의 거리를 멀게 하거나 방사성물질 운반함 등의 사용을 고려하여야 한다.

본 연구를 통하여 정도관리 방사선원의 효율적인 운영으로 장비에 관리적, 업무적 이득 경제적 편의성 및 상호호환의 기회가 될 것으로 사료된다.

References

1. Lee MC, M.D. Current Status and Future Perspective of PET. *Nucl Med Mol Imaging*. 2002;36(1):1-7.
2. American Association of Physicists in Medicine. AAPM Report No. 126: PET/CT acceptance testing and quality assurance. College Park (MD): American Association of Physicists in Medicine; 2019. Available at: https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT_126.pdf
3. Koole M, Armstrong I, Krizsan AK, Stromvall A, Visvikis D, Sattler B, et al. EANM guidelines for PET-CT and PET-MR routine quality control. *Z Med Phys*. 2023;33(1):103-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2022.08.003>
4. Korea Society of Nuclear Medicine Technology. Guidelines for PET and PET-CT quality control items and measurement methods [in Korean]. Korea Society of Nuclear Medicine Technology; 2009. Available at: <https://www.ksnmt.or.kr/>
5. National Electrical Manufacturers Association NEMA Standard Publication NU 2-1994. Performance measurements of positron emission tomography. National Electrical Manufacturers Association, 1994. USA.
6. National Electrical Manufacturers Association NEMA Standard Publication NU 2-2001. Performance measurements of positron emission tomography. National Electrical Manufacturers Association, 2001. USA.
7. Lee BI. Quality assurance and performance evaluation of PET/CT. *Nucl Med Mol Imaging*. 2008;42(2):137-144. Available at: <https://www.koreascience.kr/article/JAKO200821036724235.page>
8. Dimitrakopoulou-Strauss A, Pan L, Sachpekidis C. Long axial field of view (LAFOV) PET-CT: implementation in static and dynamic oncological studies. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2023;50(11):3354-3362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00259-023-06222-3>
9. General Electric Healthcare. Technical publication: Discovery™ MI User Manual 5720964-1KO. 2020. USA.
10. National Electrical Manufacturers Association. Performance measurements of positron emission tomographs. NEMA Standards Publication NU 2:2007. Rosslyn (VA): National Electrical Manufacturers Association; 2007. Available at: https://psec.uchicago.edu/library/applications/PET/chien_min_NEMA_NU2_2007.pdf
11. International Electrotechnical Commission. Radionuclide imaging devices—Characteristics and test conditions—Part 1: Positron emission tomographs. IEC 61675-1:1998. Geneva: International Electrotechnical Commission; 1998. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/8230/5f2d35ab08874a12b513cb0b481df47f/IEC-61675-1-1998.pdf>
12. Kaalep A, Burggraaff CN, Piepenbosch S, Verwer EE, Sera T, Zijlstra J, et al. Quantitative implications of the updated EARL 2019 PET-CT performance standards. *EJNMMI Phys*. 2019;6(1):28. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40658-019-0257-8>
13. Sunderland JJ, Boellaard R, Dickson JC, Graves SA, Bailey DL. Standardization of PET/CT performance requirements for whole-body quantitative imaging: an international proposal. *J Nucl Med*. 2025;66(10):1506-1515. DOI: <https://doi.org/10.2967/jnumed.124.269349>
14. United States Nuclear Regulatory Commission. Reassessment of NRC's dollar per person-rem conversion factor policy. NUREG-1530, Revision 1. Washington (DC): U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2022. Available at: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1530/r1/index>
15. Lee JM, Kim EJ, Kim KE, Yang SP, Choi SJ, An SH. Influence of walking distance and timing protocol on 5-m and 10-m walk test outcomes. *PNF Mov*. 2025;23(2):347-357. DOI: <https://doi.org/10.21598/JKPNFA.2025.23.2.347>
16. Kwon TE, Jeong A, Ha WH, Lee D, Seo S, Cho J, et al. Organ dose reconstruction for the radiation epidemiological study of Korean radiation workers: the first dose evaluation for the Korean Radiation Worker Study (KRWS). *Nucl Eng Technol*. 2023;55(2):725-733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.10.030>