

Original article

실질 장기 체적 기반 ^{18}F -FDG PET 방사성의약품 투여량 보정 모델 분석

이주영, 교수^{*}, 박정민, 학생
신구대학교 방사선학과

Analysis of a Parenchymal Organ Volume-Based Dose Correction Model for ^{18}F -FDG PET Radiopharmaceuticals

Joo-Young Lee, Professor^{*}, Jeong-Min Park, Undergraduate Student
Department of Radiological Science, Shingu College

***Corresponding Author:** Joo-Young Lee, PhD. Department of Radiological Science, Shingu College. 377 Gwangmyeong-ro, Jungwon-gu, Seongnam, Republic of Korea(13174). Tel: +82-10-9259-9875, E-mail: ljy0706@shingu.ac.kr

Abstract

Purpose: Quantitative analysis and dose determination in ^{18}F -FDG PET imaging are commonly based on total body weight; however, such approaches do not adequately account for individual differences in body composition, including fat and lean tissue proportions. This study aimed to propose and validate a radiopharmaceutical dose correction model based on organ volume derived from CT images, reflecting metabolically active tissue. **Materials and Methods:** Parenchymal organ volume data (liver, kidneys, and spleen) from 790 adults were extracted from the TotalSegmentator open-source dataset. A weighted sum model was established based on a standard adult (65 kg), incorporating a sensitivity (damping) factor and a clamping technique ($\pm 30\%$) to prevent excessive dose variation. Model optimization was performed using 5-fold cross-validation, and clinical feasibility was evaluated using CT data from nine patients. **Results:** At the optimal sensitivity parameter ($S=0.5$), more than 95% of the simulated cohort fell within the clinically recommended dose range (148~208 MBq), with a mean calculated dose of 178.00 ± 16.65 MBq. External validation demonstrated that, despite substantial variations in liver volume (730~2,965 cm^3), the predicted doses consistently remained within the safety range, effectively preventing both over-administration and under-administration of radiopharmaceuticals. **Conclusion:** The proposed organ volume-based model enables stable and reasonable dose estimation without relying on total body weight information. This approach may serve as a practical and safe alternative for personalized dose optimization and provides a foundational framework for future AI-based automated prescription systems.

Keywords: FDG-PET, Radiopharmaceutical Dosage, Organ Volume, Dosage Optimization, Open-source Data, Personalized Nuclear Medicine, ALARA

서론

^{18}F -FDG PET/CT 검사에서 방사성의약품 투여량은 일반적으로 환자의 총 체중(Total Body Weight, TBW)에 비례하여 산정된다. 이러한 체중 기반 방식은 임상 현장에서 적용이 간편하며, 평균적인 체형의 환자군에게 비교적 일관된 영상 품질을 제공한다는 장점이 있어 널리 사용되어 왔다[1].

Received April 20, 2026

Revised May 16, 2026

Accepted May 18, 2026

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC BY 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하지만 총 체중을 기준으로 투여량을 결정하는 방식은 개인별 체성분(Body Composition), 특히 지방과 제지방의 비율 차이를 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. ^{18}F -FDG는 대사적으로 활발한 제지방 조직(Lean Tissue)에 주로 섭취되며, 대사 활동이 적은 지방 조직에는 거의 축적되지 않는 특성이 있다. 따라서 고도 비만 환자에게 체중 비례 투여를 적용할 경우 실제 요구량보다 과다한 방사능이 투여되어 불필요한 피폭을 유발할 수 있으며, 반대로 저체중 환자에서는 진단에 필요한 최소 계수율을 확보하지 못할 우려가 있다. 이러한 제지방률의 개인차는 SUV(Standardized Uptake Value, 표준섭취계수)와 같은 정량 지표의 변동성을 높여 진단의 정확도를 저하시키는 원인이 된다[4][11].

이를 보완하기 위해 제지방 체중(Lean Body Mass, LBM)이나 체표면적(Body Surface Area, BSA)을 활용한 투여량 정규화 방법들이 제시되어 왔다. 그러나 이러한 방식들은 키와 체중 등 추가적인 환자 정보가 필수적으로 요구되며, 각 추정식마다 인구통계학적 특성에 따른 오차가 존재한다는 제약이 있다[4][11].

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 CT 영상에서 인공지능(Artificial Intelligence, AI)을 통해 자동 추출 가능한 실질 장기 체적(간, 신장, 비장) 정보를 체성분 대리 지표로 활용하는 새로운 투여량 보정 모델을 제안한다. 이는 ^{18}F -FDG가 지방 조직에는 거의 축적되지 않고 대사적으로 활발한 주요 실질 장기(Solid organs)에 주로 섭취된다는 점을 고려할 때, 이들 장기의 해부학적 체적이 단순 외형 지표(체중, 체표면적)보다 환자의 실제 대사 요구량을 더욱 직접적으로 반영할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 제안된 모델이 환자의 체중 정보 없이도 임상 권장 범위 내에서 안정적인 선량을 산출할 수 있는지를 시뮬레이션과 파일럿 검증을 통해 평가하고, 향후 AI 기반 자동화 처방 시스템 구축을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 모델 파라미터 최적화를 위한 최적화 코호트(Optimization Cohort)와 실제 임상 적용 가능성을 평가하기 위한 외부 검증 코호트(External Validation Cohort)로 이원화하여 수행되었다.

1. 1. 최적화 코호트

전신 CT 영상과 장기 분할(Segmentation) 정보를 포함하는 오픈소스 데이터셋인 TotalSegmentator (Wasserthal et al.)를 활용하였다 [7]. 전체 데이터셋 중 복부 주요 장기인 간(Liver), 신장(Kidney), 비장(Spleen)의 질환이 없는 건강한 성인 790명의 데이터를 최종 선별하였다.

1. 2. 외부 검증 코호트

임상 적용 가능성을 평가하기 위한 파일럿 검증 코호트로서 후향적으로 무작위 추출(retrospectively and randomly sampled)된 9명의 CT 영상을 수집하였다. 본 단계의 목적은 권장 범위 내에서 알고리즘이 안정적으로 작동하는지를 확인하는 데 있다. 해당 코호트는 마른 체형부터 과체중, 장기 비대(Organomegaly) 환자까지 다양한 해부학적 변이를 포함하고 있으며, 수집된 모든 영상 데이터는 DICOM 형식이 아닌 볼륨정보를 가지고 있고, AI 처리가 가능한 NIfTI 형식으로 변환하여 분석에 사용하였다. 개인 식별 정보는 완전 비식별(De-identification)상태로 처리하였다.

2. 데이터 처리 및 자동화 분석 프로세스

대규모 의료 영상 데이터의 효율적이고 일관성 있는 처리를 위해, Python 기반의 자동화 분석 파이프라인을 구축하였다. 전체 분석 과정은 AI 기반 장기 분할, 부피 정량화, 데이터 구조화의 3단계로 구성하였다.

2. 1. AI 기반 장기 분할

입력된 CT 영상(NIfTI)은 TotalSegmentator를 통해 자동으로 분석되며, 간, 신장, 비장의 해부학적 영역이 복셀(Voxel) 단위로 분할된 마스크(Mask)를 생성한다.

2. 2. 부피 정량화(Volumetric Quantification)

생성된 마스크로부터 장기 부피를 산출하기 위해 의료 영상 처리 라이브러리인 Nibabel을 활용하였다. 단순한 복셀 개수 측정이 아닌, 영상 헤더(Header)의 Affine 행렬 정보를 독해하여 각 복셀의 물리적 크기(mm^3)를 정확히 계산하고 이를 적산함으로써, 해상도가 서로 다른 데이터 간에도 정밀한 부피(cm^3)를 산출하였다.

3. 투여량 보정 모델 설계(Dose Optimization Model)

표준 성인(65 kg)을 기준으로 하는 선형 편차 기반 보정 모델을 설계하였다. 환자의 장기 부피가 모집단 평균 대비 가지는 편차를 가장 합산하여 최종 투여량을 산출하였다[14].

3. 1. 보정식

$$Dose_{final} = C \times 65 \times \left[1 + S \times \sum_{i \in \{L, K, S\}} \left(w_i \times \text{clamp} \left(\frac{V_i}{\bar{V}_i} - 1 \right) \right) \right]$$

3. 2. 변수 설정

장기별 본 연구의 투여량 보정식에 사용된 장기별 가중치(W)는 FDG의 생리적 분포 특성 및 PERCIST 1.0의 배경 섭취 표준화 기준을 참고하여 간 0.5, 신장 0.3, 비장 0.2로 각각 설정하였다.

3. 3. 클램핑(Clamping) 기법

해부학적 이상치에 의한 과도한 투여량 변동을 제어하기 위해, 보정 폭을 기준치 대비 $\pm 30\%$ 로 제한하는 클램핑을 적용하였다.

3. 4. 가상 시나리오 분석

제안된 단일 표준 모델(65 kg 기준)이 특정 성별이나 연령대에서도 일관된 안전성을 유지하는지 평가하기 위하여 가상 시나리오(Demographic Simulation Scenarios) 분석을 추가로 수행하였다. 전체 코호트를 ICRP Publication 128에서 제시하는 연령 및 성별에 따른 생리학적 표준 변이 모델을 기반으로 청년 남성(Young_Male, <65세), 고령 남성(Old_Male, ≥ 65 세), 청년 여성(Young_Female, <65세), 고령 여성(Old_Female, ≥ 65 세) 등의 집단으로 세분화하였으며, 각 시나리오별로 장기 부피의 스케일 계수(w_{eff}) 및 편차 분포가 투여량 산출에 미치는 영향을 평가하였다[14].

4. 파라미터 최적화 및 통계적 분석(Optimization and Statistical Analysis)

민감도 계수(S)의 최적값을 도출하기 위해 0.5에서 1.0까지 0.05 간격으로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다.

모델의 일반화 성능 검증을 위해 5-Fold 교차 검증(5-fold cross-validation)을 적용하였으며, 최종적으로 도출된 모델을 외부 검증 코호트에 적용하여 임상적 안정성을 확인하였다.

결 과

1. 장기 체적 특성 분석

최적화 코호트 790명을 대상으로 간, 신장, 비장의 체적을 분석한 결과, 각 장기의 평균 체적과 표준편차는 다음과 같다[Table 1]. 간은 $1,493.4 \pm 513.8 \text{ cm}^3$, 신장은 $235.9 \pm 135.2 \text{ cm}^3$, 비장은 $231.4 \pm 190.2 \text{ cm}^3$ 였다.

Table 1. Volumetric characteristics of the optimization cohort and External validation cohort

Volumetric characteristics of the optimization cohort				
Organ		Liver	Kidney	Spleen
Measurement Value	Mean Volume (cm^3)	1,493.4	235.9	231.4
	Standard Deviation (cm^3)	± 513.8	± 135.2	± 190.2

External validation cohort				
Organ		Liver	Kidney	Spleen
Measurement Value	Mean Volume (cm^3)	1,562.4	311.7	266.5
	Standard Deviation (cm^3)	± 612.3	± 90.2	± 154.8

오픈소스 기반 데이터의 체적 분포는 모든 장기에서 정규분포에 근사하였으며, 특정 구간에 편중되지 않는 통계적 다양성을 보였다. 이는 모델 학습 및 일반화에 적합한 데이터 특성을 갖추고 있음을 시사한다.

반면, 외부 검증 코호트는 장기 체적의 표준편차가 상대적으로 크게 나타나는 등 다양한 해부학적 변이를 포함하고 있었으며, 표준 체형뿐만 아니라 극단적인 체형의 환자에게도 적용 가능한지를 검증하기에 적합한 데이터셋으로 확인되었다.

2. 민감도 분석 및 파라미터 최적화

민감도 계수(S)를 0.5에서 1.0까지 단계적으로 변화시키며 5-fold 교차 검증을 수행한 결과, S 값이 증가할수록 임상 권장 투여량 범위(148~208 MBq)를 만족하는 비율은 감소하는 경향을 보였다[Fig.1]. 시뮬레이션 결과, S 값과 적정 투여량(148~208 MBq) 만족도(Valid Rate) 사이에는 역의 상관관계가 관찰되었다.

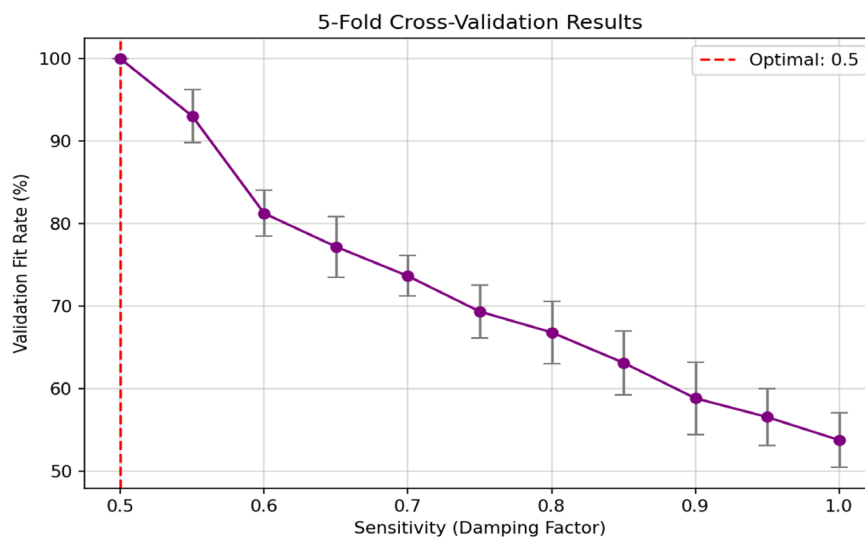


Fig. 1. Optimization of the sensitivity (damping factor) using 5-fold cross-validation

특히 $S=0.5$ 에서 전체 코호트의 약 96.2%가 권장 범위 내에 포함되어 가장 높은 적합률(Peak Accuracy)을 나타냈으며, 평균 투여량은 178.00 ± 16.65 MBq로 산출되었다. 이는 장기 부피의 편차를 50% 수준으로 감쇠하여 반영하는 것이 가장 안정적임을 시사한다.

반면, S 값이 1.0에 근접할수록 적합률은 유의하게 감소하였다. 데이터 분석 결과, 장기 부피가 표준보다 현저히 큰 환자들에게서 투여량이 220 MBq 이상으로 치솟는 과다 투여(Overdose) 현상이 발생했기 때문이다.

또한 개별 장기 편차를 30%로 제한하는 Clamping 기법을 적용한 결과, 보정계수(F_{org})값은 0.85~1.15 범위 내에서 안정적인 분포를 보였다. 이는 극단적인 체형에서도 투여량 변동이 효과적으로 제한되는 것으로 나타났다.

3. 투여량 분포 특성 및 통계적 검증

최적화된 모델($S=0.5$, Clamping 적용)을 시뮬레이션 코호트와 실제 임상 환자군에 적용하여 모델의 동작성을 평가하였다.

기존 체중 기반 투여 방식이 환자의 체중 분포에 따라 넓게 퍼진 산포도(Wide variance)를 보였던 것과 대조적으로, 제안된 모델의 결과값은 목표 투여량인 185 MBq(5 mCi)를 중심으로 좁고 높은 정규분포 형태(Narrow bell curve)를 형성하였다[Fig. 2].

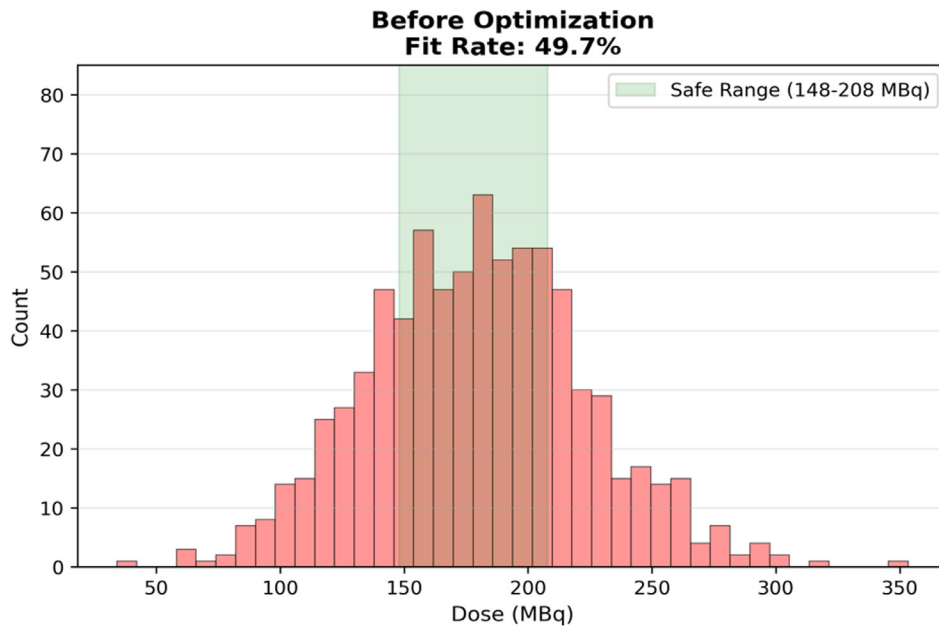


Fig. 2. The unoptimized linear model ($S=1.0$) shows a wide variance with a low fit rate (49.7%), indicating a high risk of over- or under-administration of radiopharmaceuticals

최종 산출된 평균 투여량은 178.00 ± 16.65 MBq로, 임상적으로 요구되는 영상 화질을 유지할 것으로 기대되면서도 불필요한 피폭을 최소화하는 안정적인 분포를 보였다[Fig. 3].

또한 본 연구의 알고리즘을 실제 PET/CT를 시행한 9명의 환자 데이터에 적용하여 개별 사례를 분석하였다[Fig. 4-7].

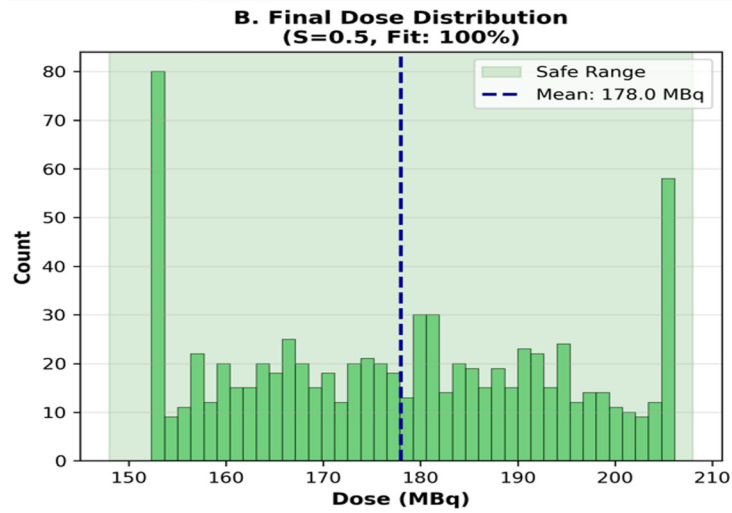


Fig. 3. Frequency distribution of calculated ^{18}F -FDG doses using the optimized model ($S=0.5$)

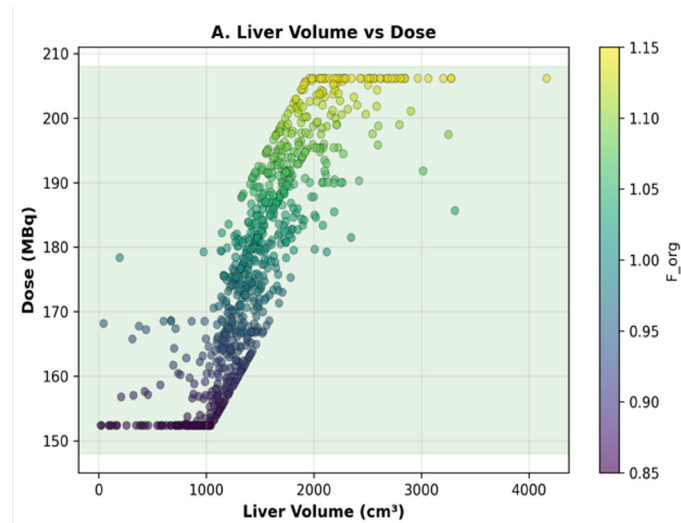


Fig. 4. Scatter plots illustrating the relationship between organ volumes (Liver)

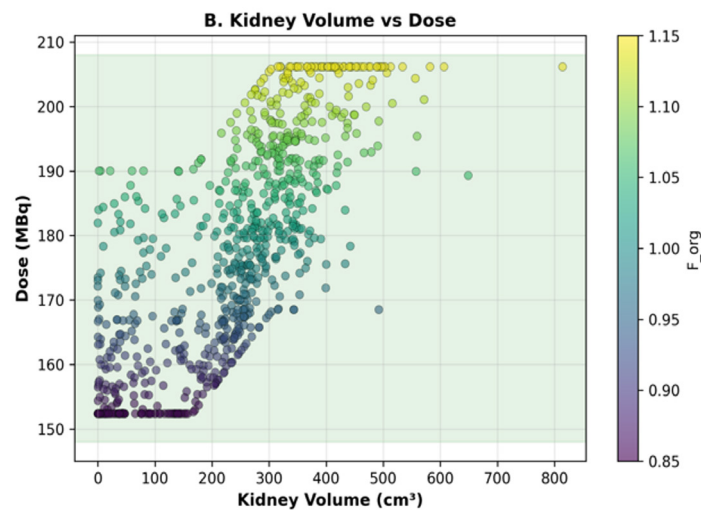


Fig. 5. Scatter plots illustrating the relationship between organ volumes (Kidney)

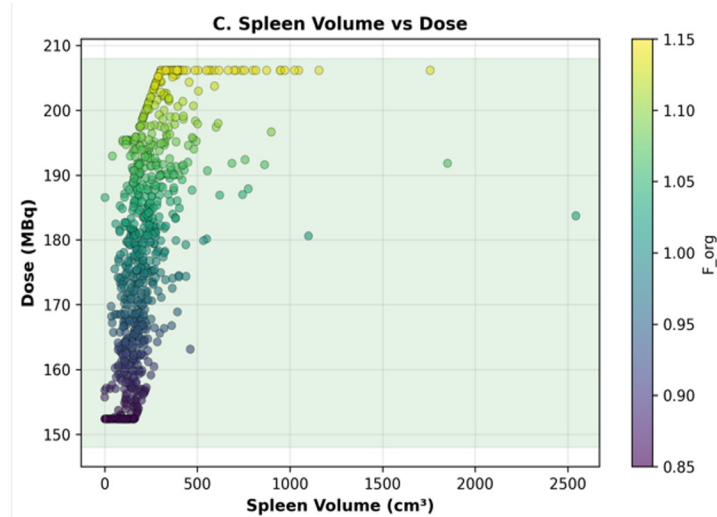


Fig. 6. Scatter plots illustrating the relationship between organ volumes (Spleen)

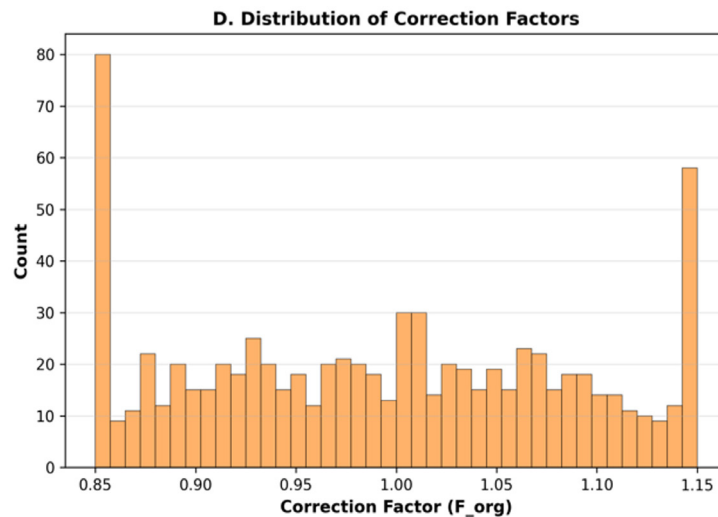


Fig. 7. Histogram showing the distribution of the correction factors (F_{org}), confirming that adjustments are centered around 1.0

특히 간 체적이 약 2배 이상 증가한 환자($2,965.92 \text{ cm}^3$)의 경우, 단순 선형 모델($S=1.0$)을 적용할 경우 300 MBq 이상의 과다 투여가 예상되었으나, 제안된 모델($S=0.5$)은 이를 206.15 MBq로 보정하여 안전 범위(Upper Limit 208 MBq) 내로 유지하였다.

반대로 간 체적이 작은 환자(730.03 cm^3)의 경우에도 152.37 MBq가 산출되어, 과도한 감량 없이 진단에 필요한 최소 계수율(Counts)을 확보할 수 있었다.

결과적으로 본 초기 타당성 검증(pilot-level validation)에서 제한된 표본($n=9$) 내에서 모두 안전 범위 내 투여량이 산출되었다.

4. 시나리오 기반 분석 결과

연령 및 성별에 따른 해부학적 변이를 반영하기 위해, 전체 코호트를 청년 남성(Young males), 고령 남성(Old males), 청년 여성(Young females), 고령 여성(Old females)으로 구분한 가상 시나리오 분석을 수행하였다. 각 시나리오에서는 장기 체적 스케일 계수(w_{eff})와 편차 분포를 반영하여 투여량 산출 결과, 모든 그룹에서 투여량 분포 중심은 약 180~230 MBq 범위에 위치하였다.

5. 요약 통계 및 재현성 평가

전체 시나리오 평균 투여량은 약 202.2 MBq였으며, 중앙값은 약 198.4 MBq로 나타났으며 그룹간 평균 차이는 분산분석(ANOVA)에서 통계적으로 유의하지 않았다($p=0.284$). 이는 제안된 모델이 인구학적 변수에 관계없이 일관된 투여량 산출이 가능함을 의미한다.

또한 동일한 입력 데이터 구조를 유지할 경우, 분석 파이프라인은 완전한 재현성(reproducibility)을 보였으며, 모델의 안정성과 신뢰성을 확인할 수 있었다.

고찰

본 연구는 환자의 체중이나 성별 정보를 알 수 없는 비식별 환경에서도 장기 부피만으로 방사성의약품의 적정 투여량을 산출할 수 있는지에 대한 가능성을 평가하였다. 연구 결과, 장기 체적을 기반으로 한 보정 모델은 기존의 체중 기반 방식에 비해 보다 일관되고 안정적인 투여량을 산출할 수 있음을 확인하였다.

특히 간, 신장, 비장을 체성분 대표 지표로 선정한 것은 임상적 및 생리학적 근거에 기반한다. 간은 FDG-PET 정량 평가에서 배경 섭취를 표준화하기 위한 기준 장기(Reference organ) 역할을 하며, 신장은 FDG의 주요 배설 경로로서 환자의 생리적 변동을 직접적으로 반영한다. 비장 또한 면역 및 혈액 대사와 관련된 변이를 포착할 수 있어, 이들 장기의 체적 조합은 체내 대사 활성 조직의 분포를 대표하는 최소 집합으로 타당하다.

본 연구에서 설정한 장기별 가중치(간 0.5, 신장 0.3, 비장 0.2)는 생리학적 기여도에 기반한 이론적 가설을 데이터로 입증하기 위한 최적의 파라미터 조합이다. 우선, 간에 0.5의 비중을 둔 것은 PERCIST 1.0 가이드라인에서 간을 대사 활성의 핵심 참조 영역으로 정의한 것에 근거한다. 신장의 0.3은 혈중 방사능 농도의 동적 평형에 기여하는 배설 장기로서의 중요성을, 비장의 0.2는 그물내피계의 대사적 특성을 계층적으로 반영한 수치이다. 이러한 가중치 설정의 객관성은 결과 데이터에서 명확히 드러난다. 해당 설정을 기반으로 한 모델은 최적화 과정에서 96.2%라는 높은 적정 투여량 적합률을 달성하였으며, 그룹 간 투여량 분포의 유의미한 차이가 나타나지 않았다($p=0.284$). 특히 간 체적이 730 cm^3 에서 2,965 cm^3 에 이르는 극단적인 해부학적 변이군에서도 모든 산출 투여량이 임상 안전 범위(148~208 MBq) 내에 안정적으로 유지된 점은, 본 연구의 가중치 배분이 주관적 가정을 넘어 임상적 실용성과 안정성을 충분히 확보했음을 시사한다.

또한 본 모델에 기준치 대비 $\pm 30\%$ 의 클램핑(Clamping) 기법을 필수 제약 조건으로 적용한 이유는 방사선 방어의 기본 원칙인 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)를 준수하고 임상적 안전성을 확보하기 위함이다. 심각한 간비대(Hepatomegaly)나 장기 절제 환자와 같은 해부학적 이상치(Outlier)가 투여량 산정에 선형적으로 전파될 경우, 과다 피폭이나 진단 불가 수준의 저선량이 산출될 위험이 있다. 또한 이는 AI 기반 자동 분할 알고리즘 자체의 불가피한 오차를 방어하는 이중 안전장치로 작용한다.

따라서 위의 근거를 통해 진행된 본 연구의 핵심 발견은 다음과 같다.

첫째, 해부학적 부피와 대사 활성도의 비선형성(Non-linearity)을 반영한 최적화이다. 우리는 실험을 통해 장기 부피 증가분을 투여량에 100% 반영하는 완전 비례($S=1.0$)보다, 50% 수준으로 감쇠하여 반영하는 $S=0.5$ 모델이 임상적으로 더 안전하고 적합함을 확인하였다. 이는 장기의 외형적 크기(Anatomical Volume)가 커진다고 해서 실제 대사량(Metabolic Demand)이 정비례하여 증가하지 않기 때문이다. 예를 들어, 간의 부피가 비대해진 경우(Hepatomegaly), 이는 순수한 간 실질 세포(Hepatocyte)의 증식보다는 지방간(Fatty change)이나 부종, 섬유화 등 비대사적 조직(Non-metabolic tissue)의 증가에 기인하는 경우가 많다. 이러한 조직들은 FDG를 섭취하지 않거나 적게 섭취하므로, 부피가 커졌다고 해서 투여량을 똑같이 늘리면($S=1.0$) 불필요한 과다 피폭을 유발하게 된다. 본 연구의 $S=0.5$ 설정은 이러한 해부학적 허수(Artifact)를 보정하여, 실제 필요한 대사 요구량에 근접한 투여량을 산출하게 하는 핵심 기전으로 작용한다.

둘째, 단일 표준 모델의 효율성과 안전성이다. 기존의 일부 연구들은 환자를 비만도에 따라 여러 그룹으로 나누어 각기 다른 계수

를 적용하는 시도를 해왔다. 그러나 이러한 그룹화(Grouping) 방식은 경계선에 있는 환자에게 계단식 선량 차이(Step artifact)를 유발하고, 임상 적용을 복잡하게 만든다. 우리는 한국인 성인 평균인 65 kg 단일 모델에 $S=0.5$ 와 Clamping을 결합함으로써, 복잡한 분류 없이도 저체중부터 고도비만 환자까지 하나의 공식으로 커버할 수 있음을 제시하였다. 임상 검증 데이터에서 확인된 바와 같이, 간 부피가 700 cc인 환자와 3,000 cc인 환자 모두에게서 안전 범위 내의 선량이 산출된 것은 이 방식의 범용 가능성을 뒷받침한다.

셋째, AI 기반 워크플로우의 임상 적용 가능성이다. 본 연구는 단순히 이론적 식을 제안하는 데 그치지 않고, TotalSegmentator라는 딥러닝 모델을 활용하여 이 과정을 자동화할 수 있음을 보였다. 이는 향후 임상 현장에서 CT 촬영 직후 별도의 수작업 없이 즉시 환자 맞춤형 투여량이 계산되어 처방 시스템(OCS)으로 전송되는 완전 자동화된 개인 맞춤형 핵의학 검사의 초석이 될 것이다.

또한, 본 연구는 투여량 산출 알고리즘의 기술적 타당성을 제시하는 데 주안점을 두었으므로, 실제 환자의 영상 품질(SNR 등)에 대한 정량적 분석은 수행하지 않았다. 다만 본 연구의 투여량 보정 모델은 SUV 계산 자체를 대체하기 위한 목적이 아니라, 환자의 대사 활성 조직량을 보다 반영한 투여량 산출 가능성을 탐색하기 위한 접근이다. SUV는 여전히 체중 기반 정규화를 기반으로 계산되며[1][8], 본 연구에서는 투여량 산출 단계의 개인화 가능성에 초점을 두었다. 따라서 향후 연구에서는 본 모델을 적용한 실제 PET 영상에서 SUV 안정성 및 정량 정확도 변화를 직접 비교·검증할 필요가 있다.

결론적으로, 본 연구가 제안하는 장기 체적 기반 투여량 보정 모델은 기존 체중 기반 방식의 한계를 보완하고, 과다 피폭의 위험 없이 영상 화질을 균질화할 수 있는 현실적이고 안전한 선량 산출 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구는 CT 영상 기반 장기 체적 정보를 활용하여, 환자 체중 및 성별 정보 없이도 ^{18}F -FDG PET 방사성의약품 투여량을 개인화할 수 있는 모델을 제안하였다. 시뮬레이션 및 외부 검증 결과, 임상 권장 범위(약 148–208 MBq) 내에서 안정적인 선량을 산출하였으며, 과다 및 과소 투여를 효과적으로 방지할 수 있음을 확인하였다. 이는 기존의 단순 체중 기반 투여 방식이 가지는 체성분 미반영 문제를 보완할 수 있는 현실적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.

다만, 제안된 보정식은 실제 PET 영상의 신호대잡음비(SNR), 병변 검출능, SUV 재현성 등을 직접 평가하지 못하였다는 중요한 한계를 가진다. 따라서 본 모델이 실제 임상 영상 품질 향상으로 이어지는지에 대해서는 추가적인 임상 검증이 반드시 필요하다. 따라서 본 결과는 실질 장기 체적 정보를 활용한 새로운 투여량 보정 가능성을 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 다만 본 모델은 초기 파일럿 수준의 시뮬레이션 기반 연구이며, 실제 영상 품질 및 SUV 정량성에 대한 추가 검증이 필요하다. 또한 본 연구에서 설정한 $\pm 30\%$ 의 클램핑 한계값은 절대적인 기준이라기보다, 향후 장비 성능이나 기관별 처방 정책 및 목표 범위 설정에 따라 조정 가능한 운영 기본값(Default setting)으로 해석되어야 한다. 향후 다기관 의 실제 임상 데이터(Real-world data)를 기반으로 $\pm 20\%$ 또는 $\pm 40\%$ 등 다양한 제약 한계값 설정에 따른 영상 품질(SNR) 및 정량성 변화를 체계적으로 검증하는 후속 연구가 요구된다.

향후 연구에서는 IRB 승인 하에 실제 환자 데이터를 이용해, 제안식의 유효성과 방사선 안전성 이점을 정량적으로 검증할 계획이다. 궁극적으로 본 연구의 알고리즘은 향후 AI 기반 자동화 처방 시스템(Automated Prescription System) 구축을 위한 핵심 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다[13].

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Funding

This research received no external funding.

References

1. Boellaard R, Delgado-Bolton R, Oyen WJ, Giammarile F, Tatsch K, Eschner W, et al. FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2015;42(2):328-354.
2. Lodge MA. Repeatability of SUV in oncologic (18)F-FDG PET. *J Nucl Med*. 2017;58(4):523-532.
3. Kinahan PE, Fletcher JW. Positron emission tomography-computed tomography standardized uptake values in clinical practice and assessing response to therapy. *Semin Ultrasound CT MR*. 2010;31(6):496-505.
4. Zasadny KR, Wahl RL. Standardized uptake values of normal tissues at PET with 2-[fluorine-18]-fluoro-2-deoxy-D-glucose: variations with body weight and a method for correction. *Radiology*. 1993;189(3):847-850.
5. Hamberg LM, Hunter GJ, Alpert NM, Vicentini GE, Babich JW, Fischman AJ. The dose uptake ratio as an index of glucose metabolism: useful parameter or oversimplification? *J Nucl Med*. 1994;35(8):1308-1312.
6. Clark K, Vendt B, Smith K, Freymann J, Kirby J, Koppel P, et al. The Cancer Imaging Archive (TCIA): maintaining and operating a public information repository. *J Digit Imaging*. 2013;26(6):1045-1057.
7. Wasserthal J, Breit HC, Meyer MT, Pradella M, Hinck D, Sauter AW, et al. TotalSegmentator: robust segmentation of 104 anatomical structures in CT images. *Radiology: Artificial Intelligence*. 2023;5(5):e230024.
8. Delbeke D, Coleman RE, Guiberteau MJ, Brown ML, Royal HD, Siegel BA, et al. Procedure guideline for tumor imaging with 18F-FDG PET/CT 1.0. *J Nucl Med*. 2006;47(5):885-895.
9. Beyer T, Townsend DW, Brun T, Kinahan PE, Kessler M, Canadas R, et al. A combined PET/CT scanner for clinical oncology. *J Nucl Med*. 2000;41(8):1369-1379.
10. Huang SC. Anatomical and physiological modeling for PET quantification. *Eur J Nucl Med*. 2000;27(5):611-620.
11. Vriens D, Visser EP, de Geus-Oei LF, Oyen WJ. Measuring SUV in PET: clinical implications. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2010;37(11):2017-2034.
12. Kwon SY, Kim TS, Kang SH, Park SY, Lee SW, Chung JK. Body composition indices as predictors of FDG uptake. *Nucl Med Mol Imaging*. 2020;54(3):170-178.
13. Park J, Lee J, Kim K, Kang S, Kim S. Radiomics and explainable AI in PET/CT dose optimization. *Eur J Radiol*. 2023;164:110844.
14. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: A compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. *Ann ICRP*. 2015;44(2S):1-321.
15. Wahl RL, Jacene H, Kasamon Y, Lodge MA. From RECIST to PERCIST: Evolving considerations for PET response criteria in solid tumors. *J Nucl Med*. 2009;50(Suppl 1):122S-150S.