Korean Journal of Nuclear Medicine Technology, Volume 30, Number 2, Article 23, November 2026.
Korean J Nucl Med Technol 2026;30(2):23. https://doi.org/10.12972/kjnmt.2026.30.2.23
pISSN 1229-9901
eISSN 2982-8406

Original article

방사성폐기물 운반용 전동 납 차폐 카트의 유용성 평가

이수진, 방사선사, 유연욱, 방사선사, 최호용*, 방사선사, 윤상혁, 방사선사, 김윤철, 방사선사
국립암센터 핵의학과

Utility of an Electric Lead-Shielded Cart for Radioactive Waste Transport

Su-Jin Lee, Radiologic Technologist, Yeon-Wook You, Radiologic Technologist, Ho-Yong Choi*, Radiologic Technologist, Sang-Hyuk Yoon, Radiologic Technologist, Yun-Cheol Kim, Radiologic Technologist
Department of Nuclear Medicine, National Cancer Center

Corresponding Author: Ho-Yong Choi, Department of Nuclear Medicine, National Cancer Center, 323 Ilsan-ro, Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10408, Republic of Korea. Tel: +82-31-920-0171, E-mail: h6993@ncc.re.kr

Abstract

Purpose: Radioactive waste generated during radioiodine therapy must be transported safely while minimizing workers' radiation exposure and physical burden. Increasing lead shielding lowers the ambient dose rate but also increases cart weight, and therefore the effort required to push a manual cart. Motorized propulsion may allow thicker shielding to be applied without imposing this additional effort on the worker. This study therefore aimed to evaluate the clinical utility of an electric lead-shielded cart by comparing its shielding effectiveness, working posture, and transport efficiency with those of the manual lead-shielded cart previously used at our institution. **Materials and Methods:** Thirty batches of radioactive waste were collected from patients who received at least 3.7 GBq (100 mCi) of I-131 evaluated between March 4 and June 26, 2026. Ambient dose rates were measured at 50 and 100 cm from the center before shielding and from the cart handle end after shielding. Ten measurements over 5 minutes were averaged after stabilization, and background-corrected shielding effectiveness was compared between carts using paired t-tests. Working posture was assessed with the Rapid Entire Body Assessment, and transport efficiency was evaluated by measuring round-trip travel time once for each cart along the same route. **Results:** At a measurement distance of 100 ㎝, shielding effectiveness was 53.90±20.47% for the manual cart and 97.09±2.57% for the electric cart, a difference of 43.20 percentage points (95% confidence interval, 35.46-50.93; P<0.001). At 50 ㎝, the corresponding values were 55.35±19.64% and 96.78±2.20%, a difference of 41.43 percentage points (95% confidence interval, 33.87-49.00; P<0.001). The final Rapid Entire Body Assessment score was 3 for the manual cart and 1 for the electric cart, indicating low and negligible risk levels, respectively. Round-trip travel time was 1,140 seconds for the manual cart and 1,120 seconds for the electric cart, a reduction of 20 seconds or 1.75%. **Conclusion:** The electric lead-shielded cart provided markedly higher shielding effectiveness and a lower working posture risk level than the manual lead-shielded cart, whereas the reduction in travel time was minimal. These findings suggest that the electric lead-shielded cart is clinically useful mainly for lowering the ambient dose rate during transport and for reducing the postural burden on workers, rather than for shortening transport time.

Keywords: Radioactive waste transport, Radiation shielding, Rapid entire body assessment

Received October 02, 2026 **Revised** October 27, 2026 **Accepted** October 30, 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.

서론

2023년 국가암등록통계에 따르면 국내 신규 암 발생자 수는 288,613명이었고, 이 중 갑상선암이 35,440명으로 가장 많이 발생하였다[1]. 방사성요오드(I-131)는 분화갑상선암의 치료에 널리 이용된다[2]. 분화갑상선암에서는 수술 후 재발 위험도와 임상적 상태에 따라 잔여 갑상선조직의 제거 또는 재발·전이 병변의 치료를 목적으로 고용량 I-131 치료가 시행되며, I-131은 갑상선조직 및 요오드 섭취능을 가진 종양세포의 요오드 섭취 특성을 이용하여 표적 치료 효과를 나타낸다[3, 4]. 고용량 I-131을 투여받은 환자는 방사선 피폭을 최소화하기 위해 치료병실에서 격리 치료를 받으며, 퇴원 전에는 원자력안전위원회 고시 「의료분야의 방사선안전관리에 관한 기술기준」 제12조 및 별표 2에 따라 환자 신체 표면으로부터 1 m 거리에서 방사선량률을 측정하고, 70 μSv/h 이하의 기준을 충족하는지 확인한 후 퇴원한다[5].

이러한 일련의 과정에서 환자가 생활하며 발생한 방사성폐기물을 납 차폐 카트를 이용해 보관·처분 장소인 폐기물실까지 핵의학과 방사선작업종사자가 운반하게 된다. 방사성폐기물에는 잔류 I-131이 포함되어 투과력이 강한 감마선이 방출되므로 주변 사람이나 가족에게 불필요한 방사선 피폭을 초래할 수 있다[6]. 한편 핵의학 업무 수행자의 직업적 피폭 선량은 일반 방사선 업무보다 높고 변동성도 커 업무 특성을 고려한 지속적인 피폭관리가 요구되는데, 특히 폐기 및 운반 과정에서도 외부피폭이 발생할 수 있으므로, 방사선작업종사자의 피폭을 최소화하기 위한 적절한 차폐 수단을 적용할 필요가 있다[6-8].

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)는 방사선 방호의 최적화를 위해 경제적·사회적 요인을 고려하여 피폭을 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지하는 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)원칙을 권고한다[9]. 따라서 병원에서 사용하는 방사성폐기물 운반 장비는 이러한 방호 최적화 요구에 따라 충분한 차폐 성능과 함께 이동 경로에서 안전하고 원활하게 조작할 수 있는 구조를 갖추어야 한다.

본 기관에서 기존에 사용되던 수동 납 차폐 카트는 작업자가 손잡이를 잡고 직접 힘을 가해 추진하는 방식이었다. 그러나 차폐 성능을 위해 두꺼운 차폐벽을 추가할 경우 총 중량의 증가로 작업자의 부담이 커질 수 있으므로 적절한 차폐 구조를 형성하는 데 제약이 있었다. 특히 방사성폐기물 보관 장소에서 치료병실까지 이동 경로에 주차장과 경사구간이 포함되어 있어 무거운 카트의 출발과 방향조절 및 경사로 이동 과정, 밀기 · 당기기 작업 시 바닥 경사도와 상태, 취급 중량에 따라 소요되는 최대 힘이 차이가 있어 작업자의 부담이 증가할 가능성이 있다[10, 11]. 따라서 운반 장비를 평가할 때에는 방사선 차폐성능뿐만 아니라 실제 운반 과정에서 작업자에게 미치는 신체적 부담과 조작의 편의성도 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 기관은 전동 모터 장치와 차폐벽을 갖춘 방사성 폐기물 운반 카트를 도입하였다. 현재 사용하고 있는 전동 납 차폐 카트는 두꺼운 차폐체로 인해 증가한 중량을 작업자가 인력으로 추진하지 않도록 하여 작업자의 운반 부담을 줄이는 동시에 방사선 차폐를 강화할 수 있도록 설계되었다. 이에 본 연구는 기존 수동 납 차폐 카트와 비교하여 전동 납 차폐 카트의 차폐 성능, 작업 자세 및 운반 효율성을 평가하고 방사성폐기물 운반업무에서의 임상적 유용성을 확인하고자 하였다.

대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 2026년 3월 4일부터 2026년 6월 26일까지 방사성 요오드 치료를 위해 3.7 GBq (100 mCi) 이상의 I-131을 투여 받고 치료병실에 입원한 환자들의 치료 과정에서 발생한 방사성폐기물을 대상으로 진행하였다. 본 연구에서는 환자별 I-131 투여량 및 폐기물의 초기 선량률을 일정하게 통제하지 않고, 실제 임상 환경에서 발생한 방사성폐기물 1~2개를 측정 대상으로 선정하였다. 폐기물별 초기 선량률에는 차이가 있었으나 차폐 전후 선량률을 이용하여 산출한 차폐율을 주요 평가 지표로 활용하였다.

2. 연구 장비

2.1 납 차폐 카트

치료병실에서 발생하는 방사성폐기물 운반에 사용되는 수동 납 차폐 카트 (manual lead-shielded cart, 이하 수동 카트)와 전동 납 차폐 카트 (electric lead-shielded cart, 이하 전동 카트)를 연구 장비로 사용하였다(Fig. 1). 두 카트의 구조적 및 기능적 특성을 확인하기 위해 크기, 차폐체 두께, 구동방식 등 주요 사양을 비교하였다(Table 1). 본 연구에서 평가하는 전동 카트는 구동방식만 변경한 장비가 아니라 전동 이동기능과 차폐구조가 결합된 운반 시스템이다.



Fig. 1. Manual lead-shielded cart (A) and electric lead-shielded cart (B) were used for transporting radioactive waste.

Table 1. Comparison of specifications between manual and electric lead-shielded carts

Specification	Manual cart	Electric cart
Size (mm)	680 × 680 × 600	1000 × 500 × 1000
Shielding	Pb 1 mm	Pb 10 mm
Drive system	Manual propulsion	Electric drive
Fabrication method	Custom-made	Custom-made
Handle type	Fixed push handle	Lever-type electric control handle
Wheel type	Caster wheels	Large rubber tires
Braking system	Foot-operated wheel lock	Electrically controlled braking system
Cart weight (kg)	100	800

2.2 공간선량률 측정기

공간선량률 측정에는 모든 실험에서 동일한 T402 Dose Rate Monitor (Tracerco Limited, Billingham, United Kingdom) 1대를 사용하였다(Fig. 2). 장비는 오르비텍에서 교정 받았으며, 측정 전 배터리 상태와 정상 작동 여부를 확인하였고, 모든 측정에서 동일한 장비, 측정모드 및 표시단위를 적용하였다. 본 연구에서는 모든 측정값을 μSv/h 단위로 측정하였다.



Fig. 2. The Tracerco T402 dose rate monitor was used in this study.

3. 평가방법

3.1 차폐성능 평가

수동 카트와 전동 카트의 차폐 성능은 동일한 폐기물에 대해 각 카트의 차폐율을 산출하여 비교하였다. 차폐 전 방사선량률은 폐기물 중심을 기준으로 50 ㎝ 및 100 ㎝ 떨어진 지점에서 측정하였다. 각 카트에 적재한 후에는 손잡이가 작업자를 향하도록 배치하고, 손잡이 끝단을 기준으로 작업자 방향의 50 ㎝ 및 100 ㎝ 떨어진 지점에서 방사선량률을 측정하였다. 이러한 측정 방법은 실제 운반 과정에서 작업자가 위치하는 방향의 방사선량률 감소 정도를 평가하기 위해 적용하였다. 검출기의 높이와 방향은 모든 측정에서 동일하게 유지하였다.

측정값은 장비의 지시 값이 안정되는 것을 확인한 후 5분 동안 총 10회 연속 측정하였으며, 측정값의 평균을 최종 분석에 사용하였다. 이를 바탕으로 폐기물별 차폐율을 산출하고, 동일 폐기물에서 얻은 수동 및 전동 카트의 차폐율을 대응시켜 비교하였다. 배경선량은 각 폐기물 측정 직전에 동일한 장소와 측정조건에서 측정하였다. 차폐율은 Eq. 1을 이용하여 산출하였다. 수동 및 전동 카트의 측정 거리별 차폐율은 폐기물 간 평균과 표준편차(mean±SD)로 제시하였다.

$$Shielding\ Efficiency(\%) = \left(1 - \frac{D_S - D_b}{D_0 - D_b}\right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

D_0: Ambient dose rate of radioactive waste

D_S: Ambient dose rate after shielding

D_b: Background ambient dose rate

동일한 방사성폐기물에서 산출된 수동 카트와 전동 카트의 차폐율 차이에 대한 정규성은 각 측정 거리에서 Shapiro-Wilk 검정으로 평가하였다. 각 거리에서 두 카트의 차폐율은 양측 대응 표본 t-test로 비교하였으며, 전동 카트와 수동 카트 간 차폐율의 평균 차이(전동-수동)와 다중비교 보정을 적용하지 않은 95% 신뢰구간으로 제시하였다. 모든 통계분석은 Python version 3.12.14와 SciPy version 1.18.1을 이용하였으며, 통계적 유의수준은 P<0.05로 설정하였다.

3.2 작업자세 평가

수동 카트와 전동 카트 사용에 따른 작업자의 근골격계 부담 및 작업 위험성을 비교하기 위하여 REBA (Rapid Entire Body Assessment)를 활용하였다. 작업 자세 평가에서 사용한 REBA는 의료 및 서비스 분야에서 나타나는 다양하고 예측하기 어려운 작업 자세의 근골격계 위험도를 신속하게 평가하기 위해 Hignett와 McAtamney가 2000년에 개발한 도구이다[12]. REBA는 목·몸통·다

리로 구성된 Group A와 상완·전완·손목으로 구성된 Group B를 각각 평가한 후, 손잡이 결합(Coupling) 및 활동(Activity) 항목을 반영하여 최종 점수를 산출한다[12]. 동일 작업자의 수동 및 전동 카트 운반 장면에서 주요 신체 부위의 자세가 명확하게 관찰되는 측면 사진을 선정하여 시행하였다. 목, 몸통, 다리, 상완, 전완 및 손목의 관절각을 추정하고, 이를 REBA 기준에 적용하여 점수화 하였다(Fig. 3). 각 신체부위 점수를 이용하여 Group A와 Group B 점수를 산출한 후, Coupling 및 Activity 항목을 적용하여 최종 REBA 점수를 산정하였다.

REBA의 Load/Force 항목은 실제 하중 또는 힘의 측정을 필요로 하나, 본 연구에서는 작업자가 가한 추진력을 직접 측정하지 못하여 두 카트 모두 0점으로 처리하였다. 이에 따라 두 카트 간 추진력의 차이는 REBA 점수에 반영되지 않았다. 밀기·당기기 작업의 신체 부하는 작업자세와 함께 작업조건별 허용 추진력을 고려하여 평가할 수 있으므로, 이를 보완하기 위해 수동 카트가 경사구간에서 요구하는 최소 힘을 추정하고자 총 중량 100 kg과 경사각 14°를 이용하여 경사방향 중력성분($F = mg\sin\theta$)을 산출하였다[13]. 전동 카트에서는 이 힘을 모터가 부담하므로 작업자 부하의 지표로서 동일한 계산을 적용하지 않았다. 산출된 값은 실제 작업자가 가한 추진력과 구분되는 보조적 지표로 활용하였다. 이를 바탕으로 수동 카트와 전동 카트를 이용한 폐기물 수거 및 운반 작업에서 작업자의 대표적인 작업자세를 평가하고, REBA 점수 및 위험 수준을 비교하였다.



Fig. 3. The operator's working postures while using a manual lead-shielded cart (A) and an electric lead-shielded cart (B) on a ramp along the transport route to assess the operator's musculoskeletal workload.

3.3 운반효율 평가

수동 카트와 전동 카트의 작업 효율성을 비교하기 위하여 폐기물실과 대상 병실 간 왕복 이동시간을 측정하였다. 왕복 이동시간은 폐기물실에서 대상 병실까지의 이동시간과 병실에서 폐기물실까지의 이동시간을 합산하여 산출하였다. 각 이동시간은 카트가 출발하는 시점부터 목적지에 도착하여 이동을 종료하는 시점까지 측정하였으며, 병실에서의 폐기물 적재 및 하역에 소요되는 시간은 측정에서 제외하였다. 수동 카트와 전동 카트의 이동거리 및 이동경로를 동일하게 설정하고, 동일 작업 조건에서 측정하였다. 각 카트의 왕복 이동시간을 1회씩 측정하고, 수동 카트 대비 전동 카트의 왕복 이동시간 감소율은 Eq. 2를 이용하여 산출하여 운반 효율성을 비교하였다.

$$Travel\ Time\ Reduction\ Rate(\%) = \frac{T_{manual} - T_{electric}}{T_{manual}} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

T_{manual}: Round-trip travel time using the manual cart

$T_{electric}$: Round-trip travel time using the electric cart

결과

1. 차폐성능평가

총 30건의 방사성폐기물을 대상으로 측정한 결과, 수동 카트와 전동 카트의 차폐율은 각각 50 ㎝에서 55.35±19.64% 와 96.78±2.20% 였으며, 100 ㎝에서는 각각 53.90±20.47% 와 97.09±2.57% 였다. 50 ㎝거리에서 전동 카트가 수동 카트보다 평균 41.43%p 높았고(95% CI, 33.87–49.00%p; t(29)=11.20, *P*<0.001), 100 ㎝거리에서는 43.20%p 높았다(95% CI, 35.46–50.93%p; t(29)=11.42, *P*<0.001). 두 평가거리에서는 동일한 경향을 나타냈으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

동일 폐기물에서 산출한 전동 카트와 수동 카트의 차폐율 차이에 대한 Shapiro-Wilk 검정 결과 두 측정 거리 모두 정규성 가정에서 유의한 이탈은 관찰되지 않았다. 양측 대응표본 t-test에서 전동 카트의 차폐율은 두 거리 모두 수동 카트보다 유의하게 높았다(Table 2).

Table 2. Comparison of shielding effectiveness between manual and electric lead-shielded carts

Distance (cm)	n	Manual cart (%)	Electric cart (%)	Mean difference (95% CI), %	*t*	*P*
100	30	53.90 ± 20.47	97.09 ± 2.57	43.20 (35.46–50.93)	11.42	<0.001
50	30	55.35 ± 19.64	96.78 ± 2.20	41.43 (33.87–49.00)	11.20	<0.001

2. 작업자세 평가

수동 카트 사용 시 목은 약 20-25° 굴곡되어 2점, 몸통은 약 25-35° 전방 굴곡되어 3점으로 평가되었다. 반면 전동 카트 사용 시 목은 10~15° 굴곡되어 1점, 몸통은 5~15° 굴곡되어 2점으로 평가되었다(Table 3). 또한 수동 카트에서는 무릎 굴곡으로 인해 다리 점수가 2점으로 평가된 반면 전동 카트에서는 1점으로 평가되었다. 상완, 전완 및 손목의 자세 점수는 두 카트에서 동일하였으며, 두 카트 간 점수 차이는 주로 목, 몸통 및 다리로 구성된 Group A에서 나타났다(Fig. 4).

두 카트 모두 손잡이를 손 전체로 안정적으로 쥘 수 있어 Coupling점수는 0점으로 평가하였고, 1분을 초과하는 정적 자세 유지, 분당 4회를 초과하는 작은 범위의 반복 동작과 급격한 자세 변화 또는 불안정한 지지 상태로 이루어지는 작업이 아니므로 Activity 항목 또한 두 카트 모두 0점으로 평가하였다. 수동 카트와 전동 카트의 작업 자세를 비교한 결과, 수동 카트의 최종 REBA 점수는 4점(Medium risk), 전동 카트는 1점(Negligible risk)으로 나타났다(Table 4).

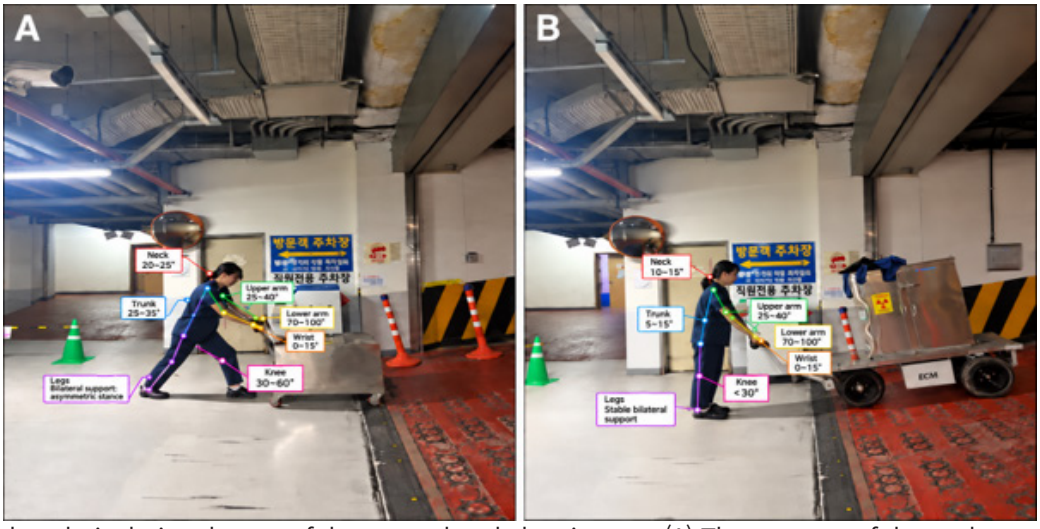


Fig. 4. Postural analysis during the use of the manual and electric carts. (A) The postures of the neck, trunk, upper arm, lower arm, wrist, and legs were evaluated according to the joint angles during manual cart use. (B) The same body regions were evaluated using the same method during electric cart use.

경사 구간의 물리적 부담을 보조적으로 설명하기 위해 수동 카트의 총 중량 100 kg과 경사각 14°를 이용하여 산출한 경사방향 중력성분은 약 237.3 N (24.2 kgf)이었다(Table 5).

Table 3. Detailed REBA assessment of working posture with manual and electric carts

REBA component	Manual cart posture	Score	Electric cart posture	Score
Neck	Approx. 20-25° flexion	2	Approx. 10-15° flexion	1
Trunk	Approx. 25-35° flexion	3	Approx. 5-15° flexion	2
Legs	Bilateral support; asymmetric stance	2	Stable bilateral support	1
Upper arm	Approx. 25-40° flexion	2	Approx. 25-40° flexion	2
Lower arm	Approx. 70-100°	1	Approx. 70-100°	1
Wrist	Approx. 0-15°	1	Approx. 0-15°	1

Table 4. Comparison of REBA score calculation between manual and electric carts

Assessment item	Manual	Electric
Table A posture score	5	2
Load/Force	0*	0*
Score A	5	2
Table B posture score	1	1
Coupling	0	0
Score B	1	1
Table C score	4	1
Activity	0	0
Final REBA score	4	1
Risk level	Medium	Negligible

*REBA, Rapid Entire Body Assessment. Table A posture score was calculated from the neck, trunk, and legs, while Table B posture score was calculated from the upper arm, lower arm, and wrist. Score A and Score B were determined by applying Load/Force and Coupling adjustments, respectively. Table C score was obtained by combining Scores A and B, and the final REBA score was calculated by adding the Activity score. *No additional Load/Force score was applied because the actual pushing force was not measured. Activity was scored as 0 because repetitive movements or sustained postures could not be confirmed from a single photograph. Risk levels were classified according to the REBA criteria.

Table 5. Slope condition and supplementary physical indicator for the manual cart

Parameter	Value
Total cart mass	100kg
Slope angle	14°
Gravitational acceleration	9.81 m/s^2
Gravity component along slope	237.3 N
Equivalent force	24.2 kgf

3. 운반 효율 평가

수동 카트와 전동 카트의 동일 이동 경로에서 왕복 이동 시간을 비교한 결과, 수동 카트는 19분(1,140초), 전동 카트는 18분 40초(1,120초)로 측정되었다. 전동 카트의 왕복 이동 시간은 수동 카트보다 20초 짧았으며, 수동 카트 대비 이동시간 감소율은 약 1.75%였다. 따라서 본 측정에서는 전동 카트 사용 시 왕복 이동 시간이 소폭 단축되는 경향을 보였으나, 두 카트 간 절대적인 시간 차이는 크지 않았다(Table 6).

Table 6. Comparison of round-trip travel time between manual and electric carts

Outcome	Manual	Electric	Difference	Reduction rate (%)
Round-trip travel time	19 min 00 s (1,140 s)	18 min 40 s (1,120 s)	20 s	1.75

고찰

본 연구에서는 I-131 치료병실에서 발생한 방사성폐기물의 운반에 사용하던 수동 카트와 새로 도입한 전동 카트를 비교하였다. 전동 카트는 100 ㎝와 50 ㎝ 두 측정거리 모두에서 유의하게 높은 차폐율을 나타내었고, REBA 점수 또한 4점에서 1점으로 감소하였다. 반면 왕복 이동시간은 20초, 1.75% 단축되는 데 그쳤다. 전동 구동 방식은 상대적으로 두꺼운 납 차폐체의 중량에 따른 운반 부담을 줄일 수 있어 작업자의 신체적 부담 완화와 방사선 방호를 동시에 고려할 수 있는 운반 수단으로서 임상적 유용성이 있는 것으로 판단된다.

전동 카트의 차폐율이 수동 카트보다 높게 나타난 것은 전동 카트에 적용된 10 ㎜ 두께의 납 차폐체가 주요 요인으로 판단된다. 특히 전동 카트는 증가된 차폐체의 중량을 전동 모터의 추진력으로 보완할 수 있도록 설계되어 차폐 성능을 높이고, 운반 시 작업자의 근골격계 부담을 줄일 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한 전동 카트의 차폐율은 두 측정거리 모두 97% 내외였으며 표준편차 또한 2~3%로 작았다. 반면 수동 카트는 표준편차가 20% 내외로 컸다. 폐기물마다 방사능량이 상이함에도 전동 카트는 일정한 차폐 성능을 유지하였으며, 이는 평균 차폐율뿐만 아니라 실제 운용환경에서도 고려해야 할 중요한 특성이다. 다만 전동 카트에서 측정된 공간선량률은 배경선량률에 근접하였고, 100 ㎝에서는 30건 중 7건이 배경선량률과 동일하였다. 따라서 97%라는 값은 사용한 계측기의 검출 하한에 의해 제한된 값일 가능성이 있으며, 잔여 선량이 배경 준위와 구별되지 않는 수준까지 감소하였다고 해석하는 것이 적절하다. 이러한 결과로 본 연구에서 사용된 전동 카트의 활용이 치료 병실에서 발생한 방사성폐기물 담당 업무를 수행하는 방사선 작업 종사자의 외부피폭 저감 효과를 기대할 수 있을 것이라고 판단된다.

기존 연구에서는 119 구급 대원의 환자 운반 작업에 REBA를 적용하여 운반 방법에 따른 작업 자세의 근골격계 위험도를 평가하였고, 종합병원 간호사의 업무 및 작업자세에 REBA를 적용하여 의료 현장에서의 근골격계 위험도를 보고하였다[14, 15]. 또한 간호업무의 REBA 최빈값은 2점 이하였고 최댓값은 병실순회 시 상지에서 7점이었다[15]. 본 연구의 수동 카트 4점은 이와 유사한 수준이나, 해당 연구가 작업 샘플링을 통해 다수의 장면을 평가한 데 비해 본 연구는 대표 장면 하나를 평가하였으므로 직접적인 비교에는 한계가 있지만, 본 연구 환경과 같이 의료 현장에서의 운반 작업과 다양한 작업 자세를 평가하는 데 REBA가 좋은 도구로 활용될 수 있음을 보여준다.

REBA를 적용한 결과, 수동 카트 사용 시에는 REBA 점수가 4점으로 중위험 수준이었던 반면, 전동 카트는 1점으로 무시할 만한 위험 수준이었다. 상완, 전완 및 손목 점수는 동일하였으나 전동 카트에서 목과 몸통의 전방 굴곡이 감소하고 무릎 굴곡이 완화되면서 다리 점수도 낮아졌다. 이러한 자세 변화에 따른 Group A점수의 감소가 최종 REBA 점수 차이에 주로 영향을 미친 것으로 판단된다. 이는 전동 카트에서 모터의 추진으로 작업자가 직접 카트를 미는 부담이 줄었을 가능성을 보여준다. 본 연구에서 수동 카트의 총 중량 100 ㎏과 이동 경로에 포함되어 있는 경사로의 14° 경사 조건을 적용해 산출한 경사방향 중력 성분은 237.3 N (24.2 ㎏f)이었다. 이는 경사구간에서 카트를 정지 상태로 유지하는 데 필요한 최소 힘이며, 구름저항과 가속에 필요한 힘은 포함하지 않는다. 전

동 카트에서는 이 부하를 모터가 담당하므로 두 카트 간 실제 추진력 차이는 상당할 것으로 추정된다. 다만 본 연구의 REBA 점수는 Load/Force를 두 카트 모두 0점으로 처리한 결과이므로, 관찰된 4점과 1점의 차이는 작업자세 차이만을 반영한 보수적 추정치이다[12]. 실제 추진력을 반영할 경우 두 카트 간 차이는 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

왕복 이동시간은 수동 카트 1,140초, 전동 카트 1,120초로 전동 카트가 20초 짧았으나 감소율은 1.75%에 불과하였다. 이는 전동화가 반드시 전체 운반 시간의 뚜렷한 단축으로 이어지는 것은 아님을 보여준다. 실제 병원 내 운반 과정에서는 카트의 주행속도뿐 아니라 엘리베이터 대기, 통행 인원, 주차 차량 및 회전·정지 구간과 같은 환경 요인이 전체 소요시간에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 측정에서도 엘리베이터 대기 시간과 주차장에서 차량을 피해 이동한 시간이 통제되지 않았으므로, 관찰된 20초 차이를 카트 구동 방식의 효과로 보기는 어렵다. 따라서 전동 카트의 효율성은 단순한 소요시간보다 경사로 통과의 용이성, 작업자의 주관적 피로도, 운반 중 정지·재출발 횟수 및 안전성 등을 포함해 종합적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 전동 카트 도입에 따르는 구입비와 유지·관리비, 충전 및 점검에 소요되는 운영 부담을 검토하지 못하였다. 작업자의 숙련도에 따라 이동 속도와 조작성이 달라질 수 있다는 점 또한 확인하지 못하였다. 둘째, 단일 기관에서 수집한 폐기물 30건과 하나의 운반 경로를 대상으로 하였으므로 다른 기관이나 상이한 운반 조건에 일반화하기 어렵다. 셋째, 차폐 성능은 지정된 거리에서 측정한 공간선량률로 평가하였으며 운반 중 작업자의 개인피폭선량은 측정하지 않았다. 따라서 차폐율의 향상이 실제 피폭 저감으로 이어지는 정도를 수치로 제시하지 못하였다. 넷째, 작업 자세 평가는 동일 작업자의 대표 사진을 바탕으로 관절각을 시각적으로 추정하였으므로, 평가자의 판단에 따른 오차가 발생할 가능성이 있다. 또한 정적인 사진을 이용한 평가로 실제 운반 과정에서 나타나는 연속적인 자세 변화와 순간적인 신체 부담을 충분히 반영하지 못하였다. 제한된 장면의 관찰만으로는 작업 전반의 자세 노출과 그 개선 정도를 충분히 반영하기 어렵다[16]. 본 연구 역시 동일 작업자의 대표 사진에서 관절각을 추정하였으므로 운반 과정 전체의 자세 변화와 작업자 간 차이를 반영하지 못하였다. 추진력을 측정하지 못하여 Load/Force 항목을 두 카트 모두 0점으로 처리한 것 또한 REBA 점수를 과소평가하는 요인으로 작용하였다. 다섯째, 이동시간 측정에서 엘리베이터 대기와 주차장 통행 조건을 통제하지 못하였고 측정 횟수도 제한적이어서 두 카트 간 차이를 통계적으로 검증하지 못하였다. 여섯째, 두 카트는 납 두께와 차폐체 구조가 상이하였으나 개구부와 폐기물 배치가 차폐 성능에 미친 영향을 각각 구분하여 분석하지 못하였다.

향후에는 다양한 기관과 운반 환경에서 작업자의 개인피폭선량과 실제 추진력을 측정하고, 연속적인 자세 관찰을 통해 작업 부담을 평가할 필요가 있다. 또한 장기적인 피로도와 근골격계 증상의 변화 또한 함께 살펴보아야 한다. 아울러 도입 및 유지·관리 비용과 작업자 교육, 숙련도를 함께 검토한다면 전동 카트의 임상적·운영적 유용성을 보다 명확히 확인할 수 있을 것이다.

결론

본 연구는 I-131 치료병실에서 발생한 방사성폐기물의 운반에 도입한 전동 납 차폐 카트의 유용성을 기존 수동 카트와 비교하여 평가하였다. 전동 카트는 두 측정거리 모두에서 수동 카트보다 유의하게 높은 차폐율을 나타내었고 작업자세의 위험 수준 또한 낮았으나, 왕복 이동시간의 차이는 크지 않았다. 전동 납 차폐 카트의 유용성은 운반시간의 단축이 아니라 운반 중 공간선량률의 저감과 작업자세의 개선에 있는 것으로 볼 수 있다. 다만 본 연구에서는 실제 개인피폭선량과 추진력을 직접 측정하지 못하였으므로, 향후 반복 측정과 다수 작업자를 포함한 추가 연구를 통해 효과를 검증할 필요가 있다.

References

1. Korea Central Cancer Registry, National Cancer Center. Annual report of cancer statistics in Korea in 2023. Ministry of Health and Welfare; 2026. Korea.

2. Ringel MD, Sosa JA, Baloch Z, Bischoff L, Bloom G, Brent GA, et al. 2025 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with differentiated thyroid cancer. Thyroid. 2025;35(8):841-985. DOI: https://doi.org/10.1177/10507256251363120.
3. Lee J, Hong CM, Ha JH. Second primary malignancy after radioiodine treatment of thyroid disease: current status. Int J Thyroidol. 2023;16(1):101-10. DOI: https://doi.org/10.11106/ijt.2023.16.1.101.
4. Ahn BC. Sodium iodide symporter for nuclear molecular imaging and gene therapy: from bedside to bench and back. Theranostics. 2012;2(4):392-402. DOI: https://doi.org/10.7150/thno.3722.
5. Nuclear Safety and Security Commission. Technical standards for radiation safety management in the medical field. NSSC Notice No. 2024-13; 2024 Dec 31. Article 12 and Appendix 2. [cited 2026 Oct 26].
Available from: https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000252292
6. Oumano M, Wendt R, Botti J, Busse N, Hintenlang D, Leon S, et al. Shielding resources for four common radiopharmaceuticals utilized for imaging and therapy: Tc-99m, F-18, I-131, and Lu-177. J Appl Clin Med Phys. 2025;26(5):e70084. DOI: https://doi.org/10.1002/acm2.70084.
7. Villoing D, Borrego D, Preston DL, Alexander BH, Rose A, Salasky M, et al. Trends in occupational radiation doses for U.S. radiologic technologists performing general radiologic and nuclear medicine procedures, 1980-2015. Radiology. 2021;300(3):605-12.
DOI: https://doi.org/10.1148/radiol.2021204501.
8. Kang S, Kim BI, Kim IJ, Bom HS, Lee GH, Lee J, et al. Radiation safety in the treatment of patients with thyroid disease by 131I. J Korean Thyroid Assoc. 2012;5(1):6-14. DOI: https://doi.org/10.11106/jkta.2012.5.1.6.
9. International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP. 2007;37(2-4):1-332. DOI: https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003.
10. Argubi-Wollesen A, Wollesen B, Leitner M, Mattes K. Human body mechanics of pushing and pulling: analyzing the factors of task-related strain on the musculoskeletal system. Saf Health Work. 2017;8(1):11-8. DOI: https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.07.003.
11. Hoozemans MJM, Knelange EB, Frings-Dresen MHW, Veeger HEJ, Kuijer PPFM. Are pushing and pulling work-related risk factors for upper extremity symptoms? A systematic review of observational studies. Occup Environ Med. 2014;71(11):788-95.
DOI: https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101837.
12. Hignett S, McAtamney L. Rapid entire body assessment (REBA). Appl Ergon. 2000;31(2):201-5.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3.
13. Snook SH, Ciriello VM. The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. Ergonomics. 1991;34(9):1197-213. DOI: https://doi.org/10.1080/00140139108964855.
14. Son JW. Assessing the risk of work-related musculoskeletal disorders in 119 EMT: a focus on patient-carrying tasks. Korean J Emerg Med Serv. 2023;27(3):33-46. DOI: https://doi.org/10.14408/KJEMS.2023.27.3.033.
15. Park JK. Features of work and posture analysis outputs in general hospital nurses. J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2019;29(3):375-82.
DOI: https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.375.
16. Mathiassen SE, Paquet V. The ability of limited exposure sampling to detect effects of interventions that reduce the occurrence of pronounced trunk inclination. Appl Ergon. 2010;41(2):295-304. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.08.006.