Journal of Radiation Industry 15(4) : 207~211(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.207

방사성동위원소 용액 분배용 리프트 장치 및 이를 이용한 분배 방법

남 성 수[1] · 박 울 재[1] · 조 은 하[1,*]

[1]한국원자력연구원 동위원소연구부

Lift Device for Distribution of Radioactive Solution and its Application Method

Seong Soo Nam[1], Ul Jae Park[1] and Eun Ha Cho[1,*]

[1]*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute 34057, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

Abstract - Radiation emitted from radiopharmaceuticals is medically utilized for diagnosis or treatment of patients. However, radiation produced during the production of radiopharmaceuticals may result in unnecessary exposure to workers. This study concerns an automatic distribution system of radioactive solutions to minimize radiation exposure by workers in the production of radiopharmaceuticals. We automated the process of recovering radioactive solutions into syringes and distributing recovered solutions to empty vials to reduce exposure during the ^{131}I radiopharmaceuticals production process. In addition, we developed a distribution system that allows the placement of a number of empty vials and the movement of the tray with empty vials in order to perform the production process conveniently. The reduction in radiation exposure that workers receive is directly related to worker safety. If this system is applied to the actual production process, it is expected to contribute to the safe performance of the radiopharmaceuticals production process.

Key words : Radioisotope distribution, Iodine-131, RI application device

서 론

방사성동위원소가 방출하는 방사선은 일반적으로 알려진 위험성의 존재에도 불구하고 대체하기 어려운 물리적 특성을 지녔기에 다양한 산업분야에서 활용되고 있다(Mushtaq 2010). 방사성동위원소는 각 원소별로 고유의 물리적 특성에 해당하는 특정 에너지 대의 방사선을 방출하고 각기 다른 반감기를 지니고 있다(Kossert *et al*. 2013). 이러한 특성을 토대로 방사선을 활용하고자 하는 목적 및 환경에 따라 적절한 방사성동위원소가 선택된다. 의료적으로 활용되는 방사성동위원소의 경우 체내 이미지 확보를 통한 진단 목적으로 사용되는 경우에는 일반적으로 감마선과 같이 투과력이 높은 방사선을 방출하는 반감기가 짧은 핵종들이 선호되고, 암세포 사멸을 통한 치료 목적으로 사용되는 경우에는 베타선/알파선과 같이 투과력은 낮으나 강한 에너지의 방사선을 방출하며 치료효과를 나타내기에 적절한 시간을 유지할 수 있는 반감기를 지니는 핵종들이 선호된다(Wang *et al*.

* Corresponding author: Eun Ha Cho, Tel. +82-42-868-8512, Fax. +82-42-864-1621, E-mail. choeh36@kaeri.re.kr

2018). 핵종마다 가지고 있는 고유의 특성은 방사성동위원소를 생산하는 과정에서도 고려되어야 한다. 방사성동위원소를 생산하는 작업자가 받는 방사선 피폭은 방사성동위원소의 활용 과정에서 존재하는 가장 큰 위험 중의 하나이기에 이를 최소화할 수 있는 시설 및 공정에 대한 연구는 끊임없이 진행되어져 왔다(Wrzesien and Albiniak 2016).

방사성동위원소를 발생시키는 대형 시설은 크게 원자로와 가속기로 나눌 수 있다(Khorshidi 2016). 이 중 국내에서 방사성동위원소 생산을 위해 활용 가능한 원자로는 한국원자력연구원의 하나로(HANARO)가 있으며 여기에서 조사된 표적이 동위원소생산시설로 이동되어 실제 활용 가능한 형태로의 방사성동위원소 생산 공정을 거치게 된다. 동위원소생산시설 내에는 방사성동위원소 생산 공정을 수행하기 위해 방사선 차폐가 가능한 특수한 작업 공간인 핫셀이 마련되어 있다. 핫셀은 작업자가 받게 되는 방사선 피폭을 막기 위한 격리된 공간이기에 해당 작업공간 내에서의 조작은 원격 조작기를 활용하여 수행되는데, 원격 조작으로는 수행이 어려운 섬세한 일부 작업들은 핫셀의 문을 열고 작업자가 직접 손을 활용하여 수동 작업으로 진행되고 있다. 물론 방사선을 차단하기 위한 보호구를 착용하고 진행하지만 방사성동위원소 생산 과정에서 방출되는 방사선을 전부 막아내기는 불가능하기에 작업 중 공정을 확인해야 하는 눈을 비롯한 얼굴과 직접 작업을 수행하는 손 등에 가해지는 피폭을 완전히 차단하기는 어려운 점이 존재한다.

본 연구에서는 방사성동위원소 생산 과정 중 작업자의 피폭을 최소화하기 위한 장비를 제작하였다. 다수의 바이알을 동시에 장착한 상태에서 특정량의 방사성 용액을 분배할 수 있는 분배 장치를 제작하였고, 특이 사항 발생 시 작업자가 직접 수동 작업을 하는 경우에도 방사선 노출을 최소화할 수 있도록 하였다.

재료 및 방법

스텝 모터, 볼 스크류, LM 가이드, 바이알 홀더, 클램프 장치 등의 구성을 통해 용액 분배 장치를 제작하였다. 전체적인 구조는 장비의 상하 및 좌우 구동이 원활하고 장시간 가동에도 문제 발생 확률을 최소화하기 위해 단순한 구조를 적용하였고, 방사선에 노출될 수 밖에 없는 장비의 활용 조건을 고려하여 대부분의 부품은 내방사선이 우수하고 부식 방지가 가능한 재질로 제작하였으며, 또한 구동 유니트의 컨트롤러는 사용하기 쉬운 단순한 제어 형태의 패널로 구성하였다. 바이알 리프트 유니트는 바이알이 분배 위치까지 도달할 수 있도록 상하 조절이 가능하게 제작하였고, 장비의 하단에는 미끄럼 방지를 위해 우레탄 패드를 부착하여 조작 과정에서의 안정성을 확보하도록 하였다. 바이알 이송 유니트는 바이알의 교체가 용이하도록 입구를 라운드 형태로 가공 처리하였으며, 좌우 이송이 원활하도록 하고, 분배 시 내용물을 육안으로 확인할 수 있는 형태로 제작하였다. 또한 바이알 이송 유니트의 좌우 이송 핸들은 원격 조작기로 잡기 편한 사각 구조로 하였으며, 장치의 컨트롤러는 방사선에 의한 변성 및 화학 물질 접촉으로 유발되는 부식을 방지하기 위해 스테인레스 스틸을 사용하였고, 커버는 조립이 용이하도록 조립형 구조로 제작하였다.

본 연구에서는 장치의 제작과 함께 작업자의 작동 편의성을 확보하고 피폭을 최소화할 수 있는 작업 방법에 대한 실증도 함께 진행하였다. 우선 원격 조작기를 이용하여 바이알을 이송 홀더에 장착하는 작업이 원활하게 수행 가능한지를 확인하였고, 컨트롤러의 상하 스위치 조작을 통해 원하는 일정 지점까지 정확하게 이동이 가능한지를 확인하였다. 그리고 방사성 용액의 분배를 위해 원격 조작기로 바이알 이송 홀더의 사각 핸들을 조작하여 바이알을 분배 지점 중앙에 정확하게 맞추어 이동 가능한지를 확인하였고, 용액 분배 후 핫셀 외부에서 투과 창을 통해 바이알에 담긴 용액의 양이 육안으로 확인되는지를 검증하였다. 마지막으로, 분배를 마친 바이알이 담긴 이송 홀더와 연결된 사각 핸들을 원격 조작기를 이용하여 좌우 이동을 통해 원하는 지점까지 이동시킨 후 캡핑을 완료하고 이온 챔버로 이동시켜 방사능을 측정하는 생산 공정의 후반 작업이 원활하게 수행되는지 확인하였다.

실제 장비를 사용했을 경우 기존 방법과의 비교를 위해 ^{131}I 용액을 분배하는 작업에 대한 비교 실험을 진행하였다. 분배를 위해 ^{131}I 용액을 준비하고 각각의 방사능 값을 측정하였다. 분배 장치에는 최대 4개의 바이알을 분배할 수 있고 먼저 준비한 ^{131}I 용액 1 바이알을 분배 장치를 이용하여 4개의 바이알에 원하는 용량을 분배하고 방사능 값을 측정하였다. 준비한 ^{131}I 용액 3 바이알을 이용해 분배 장치에서 각각 3번, 한 번에 4개의 바이알, 총 12개의 바이알에 분배를 하고 각각의 방사능 농도 및 작업자가 착용한 선량계에 표기되는 선량 값을 측정하였다. 이와 함께 분배 과정에 소요되는 시간을 측정하여 기존 작업 방식에 소요되는 시간과 비교할 수 있도록 하였다.

결 과

본 연구를 통해 개발되어 제작된 방사성 용액 분배용 리프트 장치는 Fig. 1과 같다. 장치의 기본 골격을 이루는 몸체부의 경우 스테인레스 스틸 재질로 제작하여 방사선과 화학 물질에 의한 영향을 최소화하였다. 핫셀 내에 설치되어야 하는 장비이기에 크기에 제약이 있어 가능한 작은 크기로 제작하고자 하였고 제작 결과 크기는 248×205×566

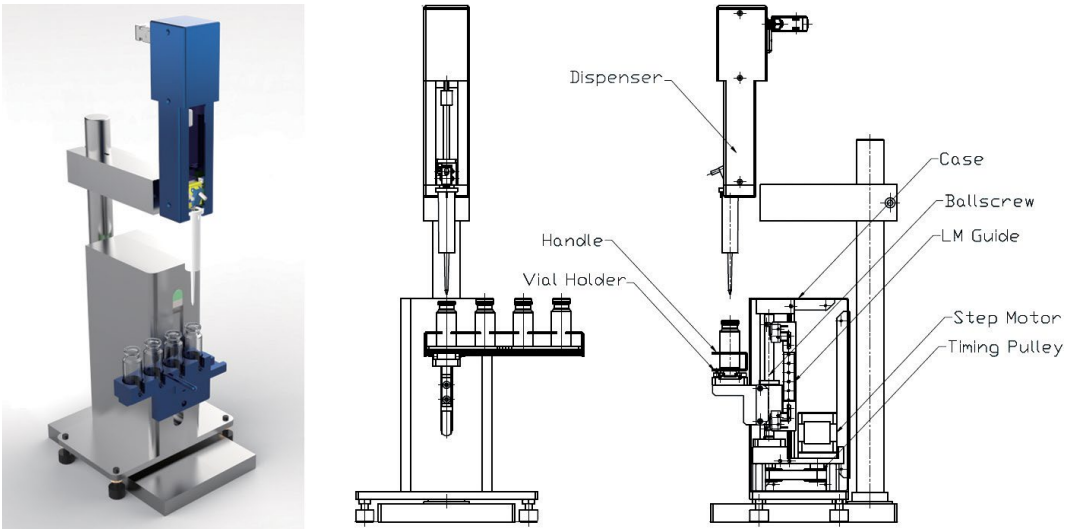


Fig. 1. Rendering image and design drawing of lift device for distribution of radioactive solution.

mm (W×D×H)로 핫셀 내부에 설치하여 원격 조작기를 통해 장비를 조작하는 데 용이하였다. 바이알 트레이는 분배 전의 방사성 용액이 수용된 바이알과 분배 후의 방사성 용액을 수용할 빈 바이알을 모두 탑재 가능하도록 하기 위해 4개의 바이알 탑재 공간을 두도록 하였다. 바이알 트레이에는 5 mm 두께의 사각 형태의 손잡이가 돌출되도록 하여 원격 조작기를 활용한 좌우 이동을 통해 시린지 토출구에 바이알 입구를 정확하게 이동시킬 수 있도록 하였다. 바이알 트레이의 구조상 복수 개의 바이알을 동시에 장착한 상태에서 방사성 용액을 분배하게 되므로 전체 분배 작업 시간을 단축시킬 수 있게 된다. 또한, 복수 개의 바이알에 순차적으로 방사성 용액을 분배할 때 손잡이를 활용하여 단순한 슬라이딩 방식으로 바이알을 이동시키므로 이동 과정에서 바이알이 파손되거나, 바이알에 분배된 방사성 용액이 넘치면서 바이알의 외부로 유출되는 것을 방지할 수 있게 된다. 아울러 이와 같이 방사성 용액이 담겨 있는 바이알은 작업자가 수동으로 이동시키되, 원격 조작기와 같은 구성을 이용해서 손잡이를 잡고 이동시키므로 작업자가 방사선에 노출되지 않을 수 있어서 작업자의 방사선 피폭량을 최소화시킬 수 있고, 방사성 용액이 담겨 있는 바이알의 주변은 작업자가 수동으로 작업할 수 있도록 구성함으로써 방사선 노출에 따른 장치의 오작동 문제가 발생하지 않도록 제작하였다.

바이알 트레이는 바이알의 하면을 지지하는 베이스판과, 바이알의 측면을 지지하는 지지판과, 베이스판과 지지판을 연결하는 연결판을 포함하고, 연결판은 베이스판과 지지판 사이에 이격 공간이 형성되도록 베이스판과 지지판의 후단에 구비되도록 제작하였다. 지지판에는 바이알이 장착되는 수용 홈을 형성하도록 하였고 이를 바이알의 교체가 용이하도록 라운드 가공 처리하였다. 특히 기존 바이알 트레이의 차폐를 위해 바이알이 2/3 이상 가려지는 높이의 것으로 사용하여 작업 중 바이알 속 내용물을 육안으로 확인할 수 없는 불편함이 있었기에, 본 장치의 경우 지지판을 10 mm의 높이로 낮게 제작하여 적재의 안전성을 확보한 상태에서 작업자가 내용물을 확인 가능하도록 외부로 노출되게 하였으며, 전면부에는 홈을 만들어 작업자가 바이알 안에 충진된 용액의 상태 및 용량을 육안으로 확인 가능하도록 하였다 (Fig. 2).

시린지가 장착되는 Dispenser의 경우 장치 내부에 설치된 스텝 모터를 통해 용액의 토출 및 회수를 위한 적절한 높이로 설정하기 위해 상하 이동이 가능하도록 하였으며, 작동은 외부에 설치되는 컨트롤러를 이용하여 조작이 가능하도록 제작하였다. 방사선 구역에서 사용되는 장비인 만큼 최대한 단순하게 꼭 필요한 기능만 포함되도록 컨트롤러를 구성하고자 하였고, Fig. 3과 같이 전원 및 바이알 상하 이동 기능만을 탑재하도록 제작하였다. 이와 같이 구성하면 방사성 용액의 분배를 자동화할 수 있으므로 작업자의 방사선 피폭량을 최소화시킬 수 있다. 또한, 바이알 트레이의 승강 또는 하강을 위한 구조가 단순해져서 유지 및 보수가 용이하며, 단순한 구조로 구성되는 만큼 방사성 용액이 강력한 방사선 에너지를 방출해도 안정적인 동작이 가능한 효과가 있다.

본 장비를 활용하여 실제로 방사성 용액을 분배하여 보았다. 5 mCi의 방사능량을 나타내는 10 mL 부피의 방사성 용액을 분배 전 용액으로 설정하여 바이알 트레이의 제일 왼쪽에 탑재하고, 3개의 빈 바이알들을 나머지 공간에 탑재시켰다. 바이알 탑재 후 분배 전 용액을 시린지로 취한 후 3개의 빈 바이알에 각각 1 mL씩 분배하였다. 분배 후 방사능량을 측정해 본 결과 세 바이알의 방사능량 모두 예상 방사

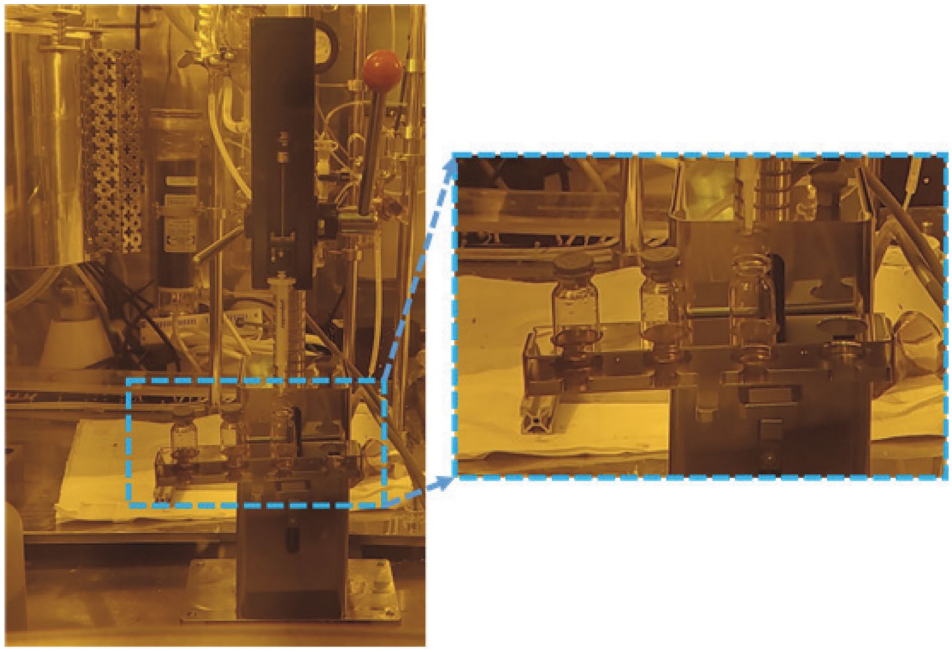


Fig. 2. Distribution machine installed inside the hot cell. It is possible to check the amount of solution contained in vials at the working location outside the hot cell.

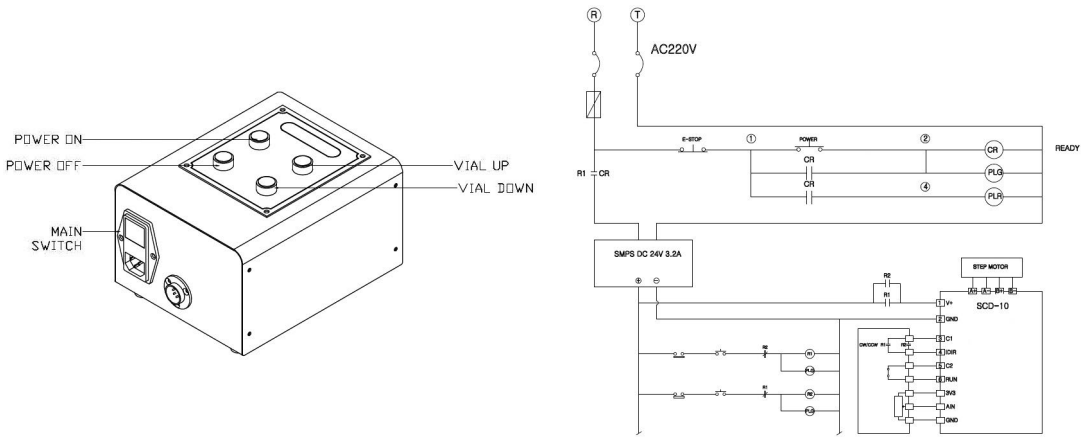


Fig. 3. Design drawing of controller and schematic diagram of lift device for distribution of radioactive solution.

능량인 0.5 mCi 의 95% 범위 내 값으로 측정된 것을 확인할 수 있었다. 더욱이 분배 및 방사능량 측정에 걸린 시간은 총 5분을 넘지 않았으며, 모든 공정을 차폐 설비인 핫셀 외부에서 진행하는 동안 작업자가 받은 피폭량도 의미 있는 수치 값을 나타내지 않음을 확인하였다.

기존 방법과의 비교 실험을 통해 작업 시간과 작업자가 받게 되는 피폭 선량이 감소됨을 확인할 수 있었다. 기존 방법으로 작업을 수행하였을 경우 작업에 소요되는 시간은 10분 이상이었으며 작업자가 착용한 선량계(RADEYE G-10) 기준으로 피폭 선량의 평균값은 291.33 $\mu Sv \cdot hr^{-1}$였다. 하지만 본 장비를 사용하여 작업을 진행할 경우 작업

Table 1. Comparison of radiation dose and dispensing time of before (Exisiting method) and after (New method) using dispensing device

No.	Exposure dose ($\mu Sv \cdot hr^{-1}$)		Dispensing time (min : sec)	
	Exisiting method	New method	Exisiting method	New method
1	299	2.75	11 : 46	3 : 46
2	295	2.60	12 : 02	3 : 12
3	280	1.26	11 : 58	3 : 51
Average	291.33	2.20	11 : 55	3 : 36

시간은 4분 이내로 단축되었고, 피폭 선량의 평균값은 2.2 $\mu Sv \cdot hr^{-1}$로 100배 이상 저감되는 것을 확인하였다 (Table 1).

고찰 및 결론

본 연구에서는 방사성 용액의 분배 과정에서 작업 효율을 높이고 작업자가 받게 되는 피폭을 최소화 할 수 있는 장치를 설계 및 제작하였다. 방사성동위원소 및 방사성의약품 생산 과정에서 발생하는 작업자 피폭은 작업자의 작업 가능 시간을 제한하여 결국 정해진 인원이 투입되었을 때 생산 가능량을 결정하는 요소로 작용하기에 안전 관점을 넘어 경제적 관점으로도 중요시되는 사안이다(Kumar *et al*. 2014). 본 연구를 통해 실제 방사성 용액 생산의 핵심 공정인 분배 과정에서 도출되었던 문제점들을 극복할 수 있는 장치 및 이를 이용한 분배 방법을 개발하여 작업의 효율성 및 작업 시간 단축을 통해 생산 공정의 효율화를 추구할 수 있게 되었고, 더불어 작업자가 받는 피폭을 줄임으로써 작업자의 안전까지 확보할 수 있었다. 현재 본 연구를 통해 제작된 장치는 연구용 방사성동위원소 생산 공정에 실제 투입되어 분배 과정에 사용되고 있으며, 의약품 생산 장비로 사용되기 위해 필요한 일부 요소들을 보완하여 궁극적으로 방사성의약품을 분배할 수 있는 생산 장비로도 활용할 예정이다.

참 고 문 헌

Khorshidi A. 2016. Gold nanoparticles production using reactor and cyclotron based methods in assessment of ^{196,198}Au production yields by ^{197}Au neutron absorption for therapeutic purposes. *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl*. **68**:449-454.

Kossert K, Jorg G and Gostomski CL. 2013. Experimental half-life determination of ^{176}Lu. *Appl. Radiat. Isot*. **69**(5):785-789.

Kumar R, Sonkawade RG, Tripathi M, Sharma P, Gupta P, Kumar P, Pandey AK, Bal C, Damle NA and Bandopadhayaya G. 2014. Production of the PET bone agent (18)F-fluoride ion, simultaneously with (18)F-FDG by a single run of the medical cyclotron with minimal radiation exposure- a novel technique. *Hell. J. Nucl. Med*. **17**(2):106-110.

Mushtaq A. 2010. Reactors are indispensable for radioisotope production. *Ann. Nucl. Med*. **24**(10):759-760.

Wang T, Vineberg JG, Honda T and Ojima I. 2018. Design and synthesis of tumor-targeting theranostic drug conjugates for SPECT and PET imaging studies. *Bioorg. Chem*. **76**:458-467.

Wrzesien M and Albiniak Ł. 2016. Hand exposure of workers in ^{18}F-FDG production centre. *J. Radiol. Prot*. **36**(4):N67-N76.

Received: 30 August 2021
Revised: 6 October 2021
Revision accepted: 6 October 2021