

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.7.471>

ISSN 1226-4881(Print)

2288-5324(Online)

동위원소 생산공정에서 발생한 방사성 폐기물 장기저장소 온도평가

정 남 균* · 조 대 성**†

* 인하공업전문대학 기계공학과, ** 경북대학교 기계공학부

Temperature Evaluation on Long-term Storage of Radioactive Waste Produced in the Process of Isotope Production

Namgyun Jeong* and Daeseong Jo**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Technical College,

** School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received December 14, 2015 ; Revised March 21, 2016 ; Accepted May 23, 2016)

Key Words: Temperature Evaluation(온도평가), Long-Term Storage(장기저장소), Radioactive Waste(방사성폐기물), Isotope Production(동위원소 생산), Molybdenum-99(몰리브덴-99)

초록: 본 연구는 의료용 동위원소 생산공정에서 발생하는 방사성폐기물을 저장하는 장기저장소의 온도를 두 가지 방법으로 평가한 결과를 보여준다. 방사성폐기물에서 발생하는 열을 Volume source와 Point source로 가정하여 장기저장소의 온도를 평가한 결과, 폐기물 저장위치에 따른 최대온도분포는 유사하게 나타났으나 그 크기에 있어서 최대 5°C 정도의 차이를 보였다. 따라서, 개념설계를 위해서는 해석 시간이 오래 걸리는 Volume source를 이용한 3차원 해석보다는 Point source를 이용한 2차원 해석이 보다 효율적이지만, 상세 설계를 위한 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 Volume source를 이용한 3차원 해석이 수반되어야 함을 알 수 있다.

Abstract: In the present study, temperature evaluations on long-term storage of radioactive waste produced in the process of isotope production were performed using two different methods. Three-dimensional analysis was carried out assuming a volumetric heat source, while two-dimensional studies were performed assuming a point source. The maximum temperature difference between the predictions of the volumetric and point source models was approximately 5 °C. For the conceptual design level, a point source model may be suitable to obtain the overall temperature characteristics of different loading locations. For more detailed analysis, the model with the volumetric source may be applicable to optimize the loading pattern in order to obtain minimum temperatures.

- 기호설명 -

T : 온도

dx : x 방향 격자 거리
 dy : y 방향 격자 거리
 E_{in}^{\square} : 에너지 유입량
 E_{out}^{\square} : 에너지 방출량
 $E_{generation}^{\square}$: 에너지 생성량
 k_c : 콘크리트의 열전도도
 k_f : 방사성폐기물의 열전도도
 q^{\square} : 단위체적당 생성되는 발열량

1. 서론

의료용 동위원소의 국내 수요는 계속적으로 증가하고 있으나, 대부분 수입에 의존하고 있어 이에 대한 문제점이 지속적으로 제기되어 왔다. 의료용 동위원소로 대표적으로 많이 사용되는 Mo-99는 캐나다 NRU원자로에서 전세계 수요의 40%를 담당하고 있는데, 2018년에 정지될 예정으로 국내 의료용 동위원소의 공급 부족이 예상된다.⁽¹⁾ 이에 2011년 정부는 의료용 동위원소의 국내 수급

† Corresponding Author, djo@knu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

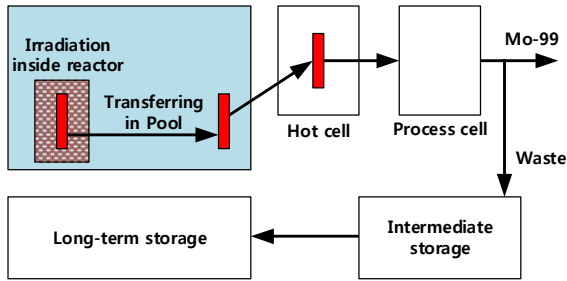


Fig. 1 Schematic diagram of Mo-99 production process

문제를 근본적으로 해결할 뿐 아니라 해외로 수출하여 산업화에도 기여할 목적으로 동위원소 전용 생산로 건설 프로젝트를 발표한다.⁽²⁾ 본 연구는 이러한 동위원소생산 전용 연구로의 건설에 필요한 방사선편폐기물 저장소의 설계를 위해 수행되었다.

Mo-99는 동위원소는 Mo-98에 중성자를 흡수시켜 변환시키는 방법과 Uranium-235를 핵분열 시켜 생산하는 방법으로 나누어지는데^(3,4) 많은 양의 동위원소를 생산하기 위해서는 U-235를 원자로 노심에서 핵분열 시키는 방법이 사용된다. Mo-99는 U-235 핵분열하는 과정에서 생성되는데, 일반적으로 U-235는 원자로 노심에서 5일에서 7일 동안 방사선조사(Irradiation)받는다.^(5,6) 핵분열에 의해 생성된 핵종은 많은 양의 에너지를 열의 형태로 배출하여 조사 후 몇 분간은 원자로 노심 내부에서 강제냉각되고 그 후 24시간 동안 원자로 수조 내에서 자연냉각된다. 먼저, 핵연료에서 Mo-99를 추출하기 위해 핫셀(Hot cell)에서 분리/해체 작업이 이루어지고, Process cell에서 Mo-99를 화학적으로 추출하는 공정이 이루어진다. U-235가 Mo-99로 전환되는 비율은 대략 47%이며, 전환되지 않은 대부분의 핵종은 방사성 폐기물로 분류되어 중간저장소(Intermediate storage)로 이송된다. 중간저장소에서 대략 9개월 정도 강제 냉각된 방사성폐기물은 고형화 형태로 장기저장소(Long-term storage)로 이송되어 원자로 수명기간 동안 안전하게 보관된다. 현재 설계되고 있는 동위원소 전용 생산로의 수명은 대략 50년임을 감안한다면, Mo-99 생산공정에서 발생한 방사성 폐기물은 50년 동안 장기저장소에 보관되어야 한다.⁽²⁾ 방사성 폐기물은 이송의 어려움과 높은 처리 비용으로 인해 생산공정이 이루어지는 곳(Site)에 저장되며, 오랜 기간 동안 내·외부의 영향을 받지 않고 방사성 폐기물에서 발생하는 잔열(Decayed heat)을 안전하게 제거되어야 한다. 현재 많은 나라에서 채택되고 있는 장기저장소의 냉각방식은 피동냉각(Passive cooling)방식이다.^(5,6) Fig. 1은 Mo-99 생산공정으로 U-235가 원

Table 1 Decay power fraction with time

Row #	Decayed time [Month]	Decay fraction [%]
1	9	7.21e-4
2	64	4.37e-5
3	119	1.93e-5
4	174	1.85e-5
5	229	1.58e-5
6	284	1.39e-5
7	339	1.26e-5
8	394	1.15e-5
9	449	1.07e-5
10	504	1.00e-5
11	559	9.42e-6
12	614 (~51.2 yr)	8.92e-6

자로 노심에서 조사될 때부터 조사 후 공정과정을 거쳐 오랜 기간 저장되는 과정을 보여준다. 본 논문에서는 방사성 폐기물이 원자로 건물 바닥에 장기 저장될 때 시간에 따라 변화하는 저장소의 온도를 평가하였고, 폐기물에서 발생하는 열은 Point source와 Volume source 두 가지로 가정하여 해석되었다.

2. 장기저장소 온도 평가

2.1 장기저장소 형상 및 조건

Fig. 2는 장기저장소 형상과 저장 공간의 배치를 보여준다. 저장 공간은 콘크리트 블록 내 총 780개의 홀이 12개의 열과 65개의 행으로 배열되어 있다. 동위원소 생산과정에서 하나의 홀을 채우는데 소요되는 시간은 대략 3주이다. 동위원소 전용 생산로의 운전일이 연간 300일이라고 가정하면, 12개 열 중 한 열을 모두 채우는 데는 대략 55개월(~4.6년) 시간이 소요된다. Process cell에서 Mo-99가 추출되고 나머지는 방사성 폐기물로 분류되어 중간저장소에서 대략 9개월 강제 냉각된 후 장기저장소에 저장된다. 이 때 방사성 폐기물에서 발생하는 열량은 99 kW의 0.00072%이다. 이 열량은 자연붕괴에 의해 시간에 따라 감소하며, 이 변화량은 Table 1에 정리되어 있다.⁽⁷⁾

Fig. 2는 장기저장소의 형상, 크기 및 저장공간 배치를 보여준다. 장기저장소의 크기는 가로 4.2 m, 세로 15.5 m, 높이 6.0 m이다. 저장공간의 직경은 대략 80 mm이고, 저장공간 사이의 간격은 대략 200 mm이다. 이 형상에 대한 3차원해석을 수행하기 위해서는 많은 계산 량과 오랜 계산 시간이 요

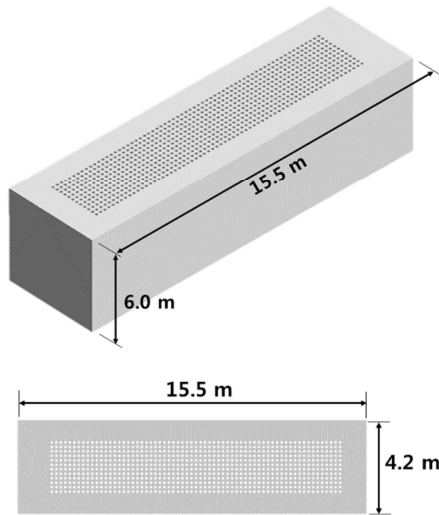


Fig. 2 Configuration of Long-term storage

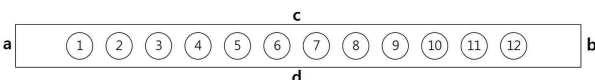


Fig. 3 Computational domain for temperature evaluation

구된다. 그리하여, Fig. 3과 같이 장기저장소에서 가장 온도가 높은 중간지점의 12개 저장공간으로 구성된 형상을 이용하면, 해석에 요구되는 계산량과 시간을 줄일 수 있다. 이러한 해석은 장기저장소의 정확한 온도를 파악하기 보다는, 가능한 최대 온도를 공급하므로 설계한계를 확인할 수 있다.

12개의 저장공간으로 구성되어 있는 해석영역은 위 면(c)와 아래 면(d)은 대칭 경계조건을 가져 온도구배가 없으며, 왼쪽 면(a)와 오른쪽 면(b)는 온도 경계조건을 가져 항상 일정한 온도(30 °C)를 유지한다. 보수적인 계산결과를 위해 장기저장소 상부와 하부로부터의 열전달은 무시하였다. 온도평가에 적용된 방사성폐기물의 열전도도는 0.23 W/mK 이고, 콘크리트 블록의 열전도도는 2.3 W/mK이며, 공기의 열전도도는 0.026 W/mK이다. 장기저장소로 이송된 방사성 폐기물은 저장공간 1번에서 12번으로 순차적으로 채워진다. 예를 들어, 1번에 폐기물이 저장될 때에는 다른 곳은 모두 공기로 채워져 있는 상태이며, 1번에 저장되는 방사성폐기물에서 발생하는 열량은 99 kW의 0.00072%가 된다. 그리고 2번에 새로운 폐기물이 저장될 때에는 1번과 2번에 방사성 폐기물이 저장되고 나머지 저장 공간은 공기로 채워지게 되며, 1번과 2번에 저장되는 폐기물에서는 각각 99 kW의 0.00044%와 0.00072%의 열량이 발생하게 된다. 이처럼 새로이 저장되는 폐기물이 가장 높은 발열량을 가지게 되기 때

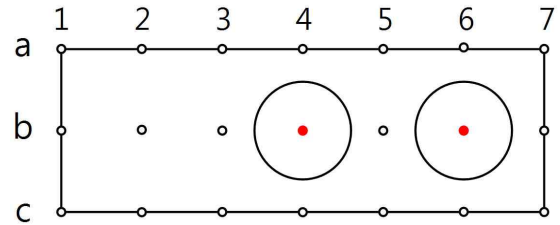


Fig. 4 Nodalization for the calculation using EES

문에, 저장소에서 가장 높은 발열량을 가지는 저장공간의 위치는 시간에 따라 변하게 된다.

2.2 해석결과

장기저장소 내부의 온도평가를 위해서 상용해석 코드인 CFX와 차분화된 에너지방정식을 푸는 EES(Engineering Equation Solver) 코드를 사용하여 계산을 수행하였다. 저장소에 보관되어 있는 폐기물에서 발생하는 열은 Volume source와 Point source로 가정될 수 있는데, 3차원 해석이 가능한 CFX에서는 Volume source로 가정하였고, 2차원으로 해석을 하는 EES 코드에서는 Point source로 가정하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

저장소의 개념설계 단계에서는 EES 코드를 이용하여 손쉽게 온도분포를 예측할 수 있는데, 해석을 위하여 Fig. 4와 같은 형태의 격자(Node)가 사용되고, 계산격자에서의 온도는 식 (1)에 보여진 에너지방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$E_{in}^n = E_{out}^n + E_{generation}^n = 0 \quad (1)$$

각 격자에서 에너지 평형은 온도의 함수로 표현된다. Point source 가 위치한 b4격자에서의 에너지 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$k_f \frac{T_{b3} - T_{b4}}{dx} dy + k_f \frac{T_{b5} - T_{b4}}{dx} dy + k_f \frac{T_{a4} - T_{b4}}{dy} dx + k_f \frac{T_{c4} - T_{b4}}{dy} dx + q_{b4}(dxdy) = 0 \quad (2)$$

Point source가 위치하지 않은 b3격자에서의 에너지 방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$k_c \frac{T_{b2} - T_{b3}}{dx} dy + k_f \frac{T_{b4} - T_{b3}}{dx} dy + k_c \frac{T_{a3} - T_{b3}}{dy} dx + k_c \frac{T_{c3} - T_{b3}}{dy} dx = 0 \quad (3)$$

Fig. 5는 폐기물 저장위치에 따른 최대온도분포

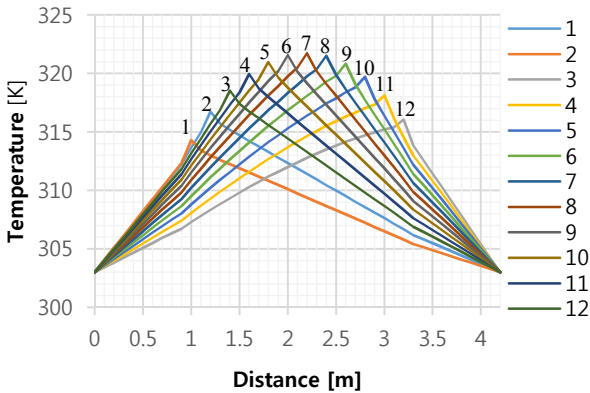


Fig. 5 Temperature distribution with loading (EES)

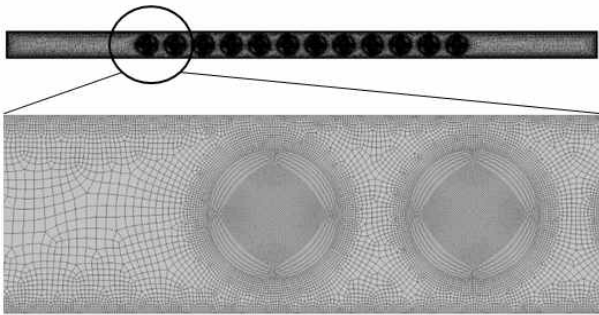


Fig. 6 Grid system for the calculation using CFX

를 EES코드를 이용하여 평가한 결과이다. 발열량이 높은 저장공간에서 가장 높은 온도가 발생하는 것을 알 수 있으며, 방사성폐기물이 7번에 저장될 때 저장소 내의 최대온도가 약322 K(~49°C)으로 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 CFX 해석에 사용된 격자를 보여준다. 전산해석에 있어서 격자의 질은 해석결과에 큰 영향을 미치기 때문에 보다 정확한 해석을 위하여 전체 계산 영역에서 삼각격자 대신 사각형태의 격자를 사용하였다. 또한 콘크리트-방사성폐기물 또는 콘크리트-공기 사이의 열전도도 차이로 인하여 저장소의 원통형 저장공간의 경계에서 온도변화가 심할 것으로 예상되므로, 해당 경계에 격자를 밀집시켜 격자를 생성하였다. 격자의 개수에 따른 해석 결과의 차이를 비교해 보기 위하여 1번 저장공간에 새로운 폐기물이 채워진 경우에 대해 40,000개의 격자와 100,000개의 격자를 이용하여 해석을 수행하였다. 저장소 내의 온도분포를 계산한 결과 40,000개와 100,000개의 격자를 사용한 경우의 최대온도가 각각 315.9 K과 316.0 K으로 나타나 격자에 따른 결과의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 방사성 폐기물이 1번에서부터 12번까지 순차적으로 저장될 때 변화하는 온도에 대한 CFX

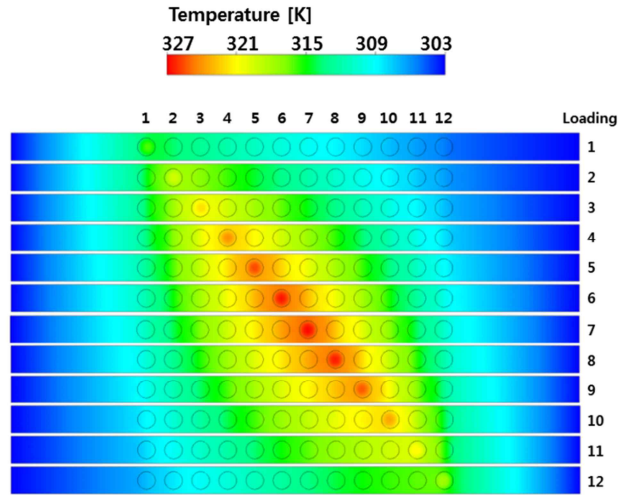


Fig. 7 Temperature distribution with loading

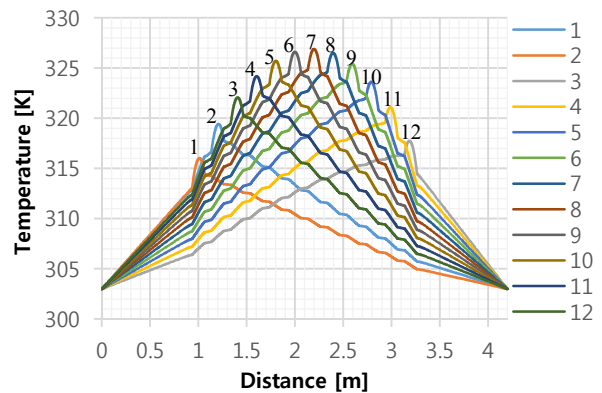


Fig. 8 Temperature distribution with loading (CFX)

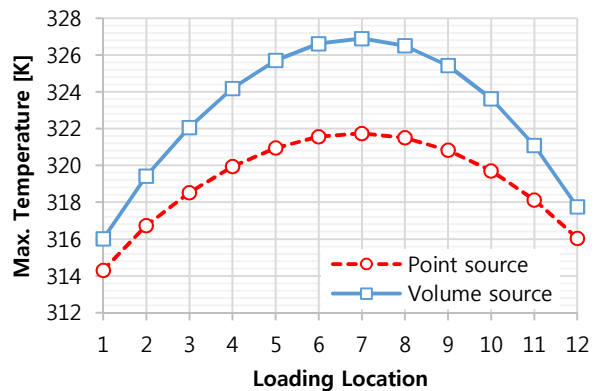


Fig. 9 Maximum temperatures with loading location

해석결과이다. 모든 계산에서 100,000개의 격자를 이용하였고, EES의 계산결과와 마찬가지로 발열량이 높은 저장공간에서 가장 높은 온도가 발생하는 것을 알 수 있다. 보다 정량적인 계산 결과를 보이기 위하여 Fig. 8에 폐기물 저장위치에 따른 최

대온도분포를 나타내었는데, 방사성폐기물이 7번에 저장될 때 저장소 내의 최대온도가 약 327 K(~54 °C)으로 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 방사선폐기물에서 발생하는 열량을 Point source로 가정한 EES와 Volume source로 가정한 CFX 결과를 비교한 그림으로, 새로운 폐기물이 저장되는 위치에 따른 저장소 내의 최고온도 변화를 보여준다. 열원을 Point source로 가정하여 평가하였을 때 보다 Volume source로 가정하였을 때 저장소내의 최고 온도가 최대 대략 5°C 정도 높음을 알 수 있다. 이것은 EES를 이용하여 계산을 수행하는 경우 폐기물이 저장되는 공간의 형상이 고려되지 않았고, 각 저장 공간 안에서의 온도가 한 Point에서의 값으로 평균된 값으로 나타났기 때문으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 의료용 동위원소 생산공정에서 발생하는 방사성폐기물을 저장하는 장기저장소의 온도를 EES 코드와 상용해석 코드인 CFX를 이용하여 예측하였다. 방사성폐기물에서 발생하는 열을 Volume source와 Point source로 가정하였으며, CFX와 EES를 이용한 해석에 각각 사용되었다.

장기저장소의 온도를 평가한 결과, 저장위치에 따라 변하는 최대온도분포는 유사하게 나타났으나 장기저장소 내의 최대온도의 크기에 있어서 두 해석 방법으로 예측한 결과는 최대 5°C 정도의 차이를 보였다.

따라서, 3차원 형상을 모사한 CFX 해석의 경우는 형상 및 격자 생성 과정을 포함하여 전체 해석에 소요되는 시간이 EES 해석보다 많으므로, 방사성폐기물 장기저장소의 개념설계를 위해서는 열원을 Point source로 가정하여 온도평가를 하는 것이 계산 시간과 계산량을 줄일 수 있지만, 보다 상세한 설계를 위한 정확한 해석을 위해서는 Volume source를 이용한 3차원 해석이 수반되어야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 새로운 방사성 폐기물이 순차적

으로 저장될 때 저장위치에 따른 온도변화를 보여준다. 하지만, 보다 정확한 장기저장소의 온도평가를 위해서는 방사성 폐기물의 저장패턴이 중요한 요소이며, 이를 평가하기 위해서는 장기저장소 전체에 대한 평가가 수행되어야 한다.

참고문헌

(References)

- (1) Nuclear Technology Review 2010, "Production and Supply of Molybdenum-99," International Atomic Energy Agency.
- (2) Wu, S., Song, J. S., Kwon, T. H., Kim, J. Y., Lim, I. C. and Ha, J. J., 2013, "New Research Reactor Project in Korea," 15th International Group on Research Reactor, Oct. 13-18, 2013, Daejeon, Korea.
- (3) Ball, R. M., 1999, "Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m: Characteristics of Nuclear Reactors used for the Production of Molybdenum-99," IAEA-TECDOC-1065.
- (4) Lambrecht, R. M., Sekine, T. and Vera Ruiz, H., 1999, "Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m: the Accelerator Production of Molybdenum-99," IAEA-TECDOC-1065.
- (5) Jo, D., Lee, K. H., Kim, H. C. and Chae, H., 2014, "Neutronic and Thermal Hydraulic Analyses of LEU Targets Irradiated in a Research Reactor for Molybdenum-99 Production," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 71, pp. 467~474.
- (6) Mohammad, A., Mahmood, T. and Iqbal, M., 2009, "Fission Moly Production at PARR-1 using LEU Plate Target," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp. 521~525.
- (7) ANS/5.1/N18.6, 1973. Decay Energy Release Rates Following Shutdown of Uranium-fueled Thermal Reactors. ANS-5.1
- (8) ANSYS, "CFX-Solver Theory Guide (Release 15.0)," ANSYS, Inc., Canonsburg, 2013.
- (9) Jo, D. and Seo, C. G., 2015, "Effects of Transverse Power Distribution on Thermal Hydraulic Analysis," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 81, pp. 16~21.
- (10) Klein, S and Nellis, G., "Mastering EES," F-Chart Software, Madison, 2012.