



개방수조형 저출력 연구로의 환경적 열 손실 평가에 대한 분석적 접근

Analytical Approach for the Assessment of Environmental Heat Losses on an Open-pool Type Research Reactor

김현종*† · 김인국* · 서경우* · 김성훈*

Hyun-Jong Kim*†, In-Guk Kim*, Kyoung-Woo Seo* and Seong-Hoon Kim*

(Received 21 August 2019, Revision received 21 October 2019, Accepted 24 October 2019)

Abstract: An analytical assessment of the environmental heat loss in an open-pool type research reactor is described in this study. The assessment was carried out based on the energy balance of the pool water which assumed as a control volume. The heat losses that can occur from the reactor pool to the environment were evaluated using standard analytical techniques. The conductive, convective, and evaporative heat losses under various surrounding conditions are reported; the analysis results show that conductive heat loss through the pool wall appears to be dominant.

Key Words : Research Reactor, Open-pool Type, Heat Loss, Analytical Solution, Energy Balance

— 기 호 설 명 —

A_s : 수조수 수면 넓이 [m^2]	\dot{m} : 증발량 [kg/s]
g : 중력 가속도 [m/s^2]	Nu : Nusselt 수
h : 열전달 계수 [W/m^2K]	P : 수조 둘레 길이 [m^2]
h_{fg} : 수조 표면온도 기준 증발잠열 [kJ/kg]	P_a : 실내공기 이슬점 포화증기압 [kPa]
k : 열전도 계수 [W/mK]	P_w : 수면온도 기준 포화증기압 [kPa]
L_c : 수조 특성길이 [m]	q : 열출력 [W]
	R_a : Rayleigh 수
	RH : 상대습도 [%]

*† 김현종(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9878-6627>)
 : 한국원자력연구원 연구로계통설계부
 E-mail : kimhj@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-2181
 *김인국(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1913-0521>)
 : 한국원자력연구원 연구로계통설계부
 *서경우(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2135-7845>)
 : 한국원자력연구원 연구로계통설계부
 *김성훈(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4235-2333>)
 : 한국원자력연구원 연구로계통설계부

*† Hyun-Jong Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9878-6627>)
 : Korea Atomic Energy Research Institute.
 E-mail : kimhj@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-2181
 *In-Guk Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1913-0521>)
 : Korea Atomic Energy Research Institute.
 *Kyoung-Woo Seo(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2135-7845>)
 : Korea Atomic Energy Research Institute.
 *Seong-Hoon Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4235-2333>)
 : Korea Atomic Energy Research Institute.

- t : 시간 [Second]
- T_∞ : 대기 온도 [°C]
- T_c : 콘크리트 온도 [°C]
- T_w : 수조수 온도 [°C]
- V : 수조상부 공기유속 [m/s]

그리스 문자

- α : 열확산도 [m²/s]
- β : 열팽창 계수 [1/K]
- λ : 물-증기 엔탈피 차 [kJ/kg]
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- ν : 동점성 계수 [m²/s]

1. 서 론

연구로 혹은 연구용 원자로는 핵분열 시 발생하는 중성자원을 이용하여 의료 및 공학적 응용 등을 위한 방사성 동위원소를 생산함과 동시에 기초연구를 위한 기반시설이다. 연구로는 운전 중에도 작업자가 수조상부로 접근할 수 있고 발전용 원자로와는 다르게 가압 계통이 없다는 설계적 특징을 가진다. 정상운전 시 개방수조형 연구로의 수조수는 방사선의 차폐 역할과 사용 후 핵연료의 잔열 제거를 가능하게 하며, 사고 시 수위가 떨어지더라도 충분한 냉각 용량과 시간을 확보할 수 있어 안전적 측면에서 핵심적인 역할을 한다.

개방수조형 연구로 시스템의 열손실 평가는 이 수조수 냉각 계통의 용량을 산정하는데 직접적으로 관련되어 있어 아주 중요한 절차라고 할 수 있다. 무엇보다 노심 냉각계통이 없는 자연대류 냉각방식을 이용하는 저출력 연구로에서는 수조수를 이용하여 노심 열 출력 보정에 활용되기 때문에 이에 파생하는 불확도 저감을 위해 환경적 열손실 평가는 필수적이다.¹⁻⁴⁾

개방수형 원자로 시스템의 열손실 평가 사례로 Amir Zacarias Mesquita 등¹⁾의 연구에서, IPR-R1 TRIGA Mark I 원자로의 수조는 원통형 구조를 가지며 환경으로 손실되는 열은 벽체와 공기에

대한 열손실에 대하여 평가한 바 있고 결과는 원자로 열출력 보정에 활용되었다. 이와 비슷한 수조 형태를 가지는 NIRR-1 원자로를 연구한 S. A. Agbo 등^{2,3)}은 다양한 노심 출력조건과 수조로부터 발생하는 열손실을 계산하여 원자로의 출력 불확도를 평가하였다. TRIGA Mark II를 대상으로 한 연구⁴⁾에서 보다 정밀한 열손실 평가를 위한 실험이 진행되었고 콘크리트 수조를 통해 빠져나가는 벽체 열손실에 대한 새로운 상관식을 제시한 바 있다. 더 나아가, 수조의 열손실 평가 결과를 냉각재 상실사고 시 잔열 제거 성능 평가에 활용한 Rachamin, R. 등⁵⁾의 연구도 찾아볼 수 있다.

이처럼 최근 10년간 개방수조형 원자로의 환경적 열손실을 평가한 대표적인 해외 연구 사례들을 살펴본 결과, 평가된 열손실 데이터는 원자로 출력 보정에 응용하는 것뿐만 아니라 다양한 범위에서 응용될 수 있음을 알 수 있으나, 다양한 환경 조건 하에서 연구로 시스템의 열손실에 대한 국내 연구 사례는 찾아보기 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 개방수조형 저출력 연구로의 수조수 냉각용량 산정과 열 출력 보정에 활용하기 위한 환경적 열손실에 대하여 논의하며, 향후 노심 열출력 보정 및 불확도 분석에 활용 가능하고 연구로 운전 환경에 부합하는 열손실량 참고 자료를 생산하고자한다.

2. 환경적 열손실 평가방법

저출력 연구로의 노심은 노심을 직접 냉각하는 시스템인 1차 냉각계통 없이 수조수의 자연대류 순환을 이용하여 냉각되며, 이 층수된 수조수는 Pool Cooling and Purification System(PCPS)에 의해 정화 및 냉각된다. 수조를 검사체적으로 설정하면 개방수조형 연구로의 열손실 요소는 자유표면에서의 대류 및 증발에 의한 열손실, 수조 벽체를 통한 전도열손실로 구분할 수 있다. Fig. 1은 소형 원자로 수조수의 검사체적을 보여준다. Energy balance는 다음 식 (1)과 같고, 본 연구에서는 PCPS와 노심 열량을 제외한 나머지 요소들에 대한 상관식을 활용하여 1차원적으로 접근하였다.

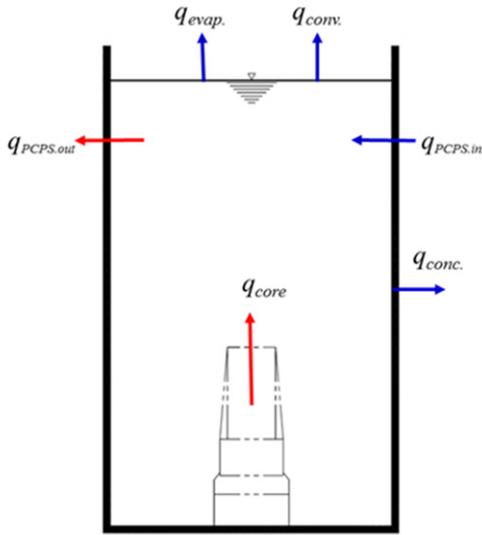


Fig. 1 Schematic of an open pool type reactor

시간에 따른 평가 기준은 24시간 및 48시간 값으로 원자로 가동 후 충분히 시간이 지났을 때의 상황을 고려한다. 본 가정을 토대로 식 (1)을 열손실에 대해서만 정리하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$0 = q_{loss} + q_{pcps,i} - q_{pcps,o} - q_{core} \quad (1)$$

$$q_{loss} = q_{conv.} + q_{cond.} + q_{evap.} \quad (2)$$

열손실 평가를 위하여 고려된 환경온도는 Table 1과 같다. 먼저 연구로 실내 대기온도는 패널을 포함한 기기들의 과열방지 및 근로자의 편의를 위해 온도가 지속적으로 유지됨을 보장하여야 하며 보통 공조 시스템에 의하여 여름철 26℃와 겨울철 21℃를 유지하도록 설계된다. 또한 수조수의 온도는 선행 연구들¹⁻⁴⁾을 참조하여 평균적인 값으로 설정하였다. 마찬가지로 콘크리트 초기온도의 선정을 위해 기 실험된 데이터들^{1,4,6)}을 분석했을 때 슬로베니아 중부에서 최소 14℃, 브라질 중동부에서 최대 28℃로 다양하게 제시되어 있고, 본 연구에서는 우리나라 기후를 고려하여 18℃로 벽체 초기온도를 설정하여 해석하고자 한다. 수조는 7 m 수심을 가지며 수면 넓이는 4 m²를 가진다.

Table 1 Assumptions for calculating heat losses

Parameter	Value	Unit
Atmosphere : T _∞	21, 26	℃
Pool water : T _w	40	
Concrete wall : T _c	18	
Reactor Pool	2(W)×2(L)×7(H)	m

2.1 전도열손실 평가

수조 벽체는 주로 콘크리트로 이루어져 있고, 이 벽체를 반 무한 고체, 벽면에 대한 등온분포를 가정하면 시간에 따른 1차원 두께방향의 온도분포는 다음 식 (3)을 이용하여 계산 가능하다. 식 (4)는 전도에 의한 벽체로 빠져나가는 단위 면적당 열손실을 표현한 식이다.⁷⁾

$$T = (T_c - T_w) \operatorname{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right] + T_w \quad (3)$$

$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{k(T_w - T_c)}{\sqrt{\pi\alpha t}} \quad (4)$$

여기서, k는 1.4 W/m·K를 고려하였고,⁴⁾ erf는 error function을 의미하며, α는 6.917E-07 m²/s를 설정하였다.

2.2 대류 및 증발열손실 평가

실내 열에너지는 시뮬레이션에 기반한 평가⁸⁾를 통해 열손실이 평가되기도 하지만, 수조가 있는 시스템에서는 증발열을 포함하기 때문에 본 연구는 수조자유 표면에서의 열손실은 증발과 자연대류에 의한 열손실로 구분하여 분석적으로 접근하였다. 수면에서부터 공기로 방출되는 열손실 계산은 공조시스템 운전 기준온도(21℃: 여름, 26℃: 겨울) 범위보다 넓은 범위인 18℃에서 32℃를 분석하며, 공기 유속은 실내 환경조건을 고려하여 0.1 m/s를 설정하였다. 증발량과 증발열은 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.⁹⁾

Table 2 Calculated results of Ra, Nu, and h under various ambient temperature conditions

T_{∞}	R_a	Nu	$h(W/m^2 \cdot K)$
18	4.0E+08	110.3	5.8
19	3.8E+08	108.6	5.7
20	3.6E+08	106.3	5.6
21	3.3E+08	104.1	5.4
22	3.1E+08	101.7	5.3
23	2.9E+08	99.4	5.2
24	2.7E+08	96.9	5.1
25	2.5E+08	94.4	4.9
26	2.3E+08	91.9	4.8
27	2.1E+08	89.2	4.7
28	1.9E+08	86.5	4.5
29	1.7E+08	83.7	4.4
30	1.6E+08	80.7	4.2
31	1.4E+08	77.6	4.0
32	1.2E+08	74.3	3.9

$$\dot{m} = A_s (P_w - P_a) (0.089 + 0.0782 V) / h_{fg} \quad (5)$$

$$q_{evap.} = \dot{m} \lambda \quad (6)$$

표면에서의 열손실 계산을 위한 R_a 는 다음 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.^{1-4,6)} 여기서, L_c 는 0.5 m로 식 (8)로 표현할 수 있는 특성길이이며, A_s 는 수면 넓이 4 m², P 는 둘레길이 8 m이다. Table 2에서 계산된 R_a , Nu 와 열전달 계수를 확인할 수 있다. 계산된 R_a 는 10⁸오더로 다음과 같은 Nu 상관식 (9)를 적용할 수 있다.^{6,10)} 최종적으로 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 대류 열손실을 계산한다.

$$R_a = \frac{g\beta(T_w - T_{\infty})L_c^3}{\nu\alpha} \quad (7)$$

$$L_c = \frac{A_s}{P} \quad (8)$$

$$Nu = 0.15R_a^{1/3} \quad \text{for } (10^7 \leq R_a \leq 10^{11}) \quad (9)$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (10)$$

$$q_{conv.} = hA_s(T_w - T_{\infty}) \quad (11)$$

3. 개방수조형 연구로 시스템 열손실

3.1 수조 벽체를 통한 열손실

벽체를 통한 전도열손실 계산 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 초반 과도한 열손실이 계산되는 것으로 나타나지만 실제로는 초기에 물을 본 연구에서 고려된 조건인 40°C로 충수하지 않기 때문에 초기 결과는 매우 큰 값으로 평가되는 것으로 나타난다. 앞서 언급한 평가 기준시간인 24시간이 지났을 때 열손실은 약 8.2 kW, 48시간 기준으로는 약 5.8 kW의 열손실이 계산되는 것을 확인할 수 있고 시간이 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따른 콘크리트 벽 두께에 대한 온도 분포를 시간 변화에 따라 계산한 결과는 Fig. 3과 같다. 두께 방향 2 m까지의 결과를 나타내었으며 시간에 따른 온도 분포를 확인할 수 있다. 결과에서 48시간 기준 1.5 m 두께 정도에서 벽체 초기온도로 설정했던 18°C 근처로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

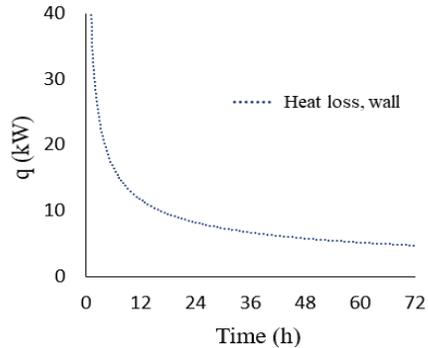


Fig. 2 The rate of heat loss with a time increment

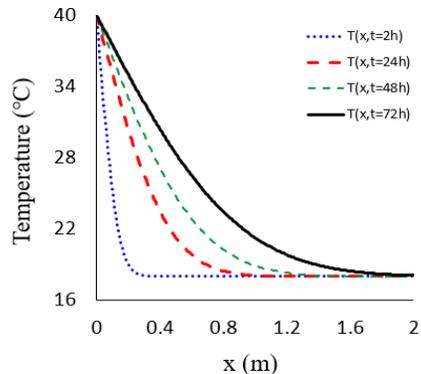


Fig. 3 Temperature distributions on the concrete wall

3.2 수면에서의 열손실

Fig. 4는 상대습도에 대하여 온도 변화에 따른 증발열손실에 대한 계산 결과이다. 대기온도 18℃에서 32℃, 상대습도 40%에서 60%까지 계산된 증발열 손실은 온도증가와 습도에 반비례하며 온도가 높아질수록 공기의 포화증기압이 상승하고 물과 공기압의 포화증기압의 차이가 작아짐에 따라 증발량이 낮아짐으로 인하여 나타나기 때문이다.

40%의 상대 습도 기준으로 21℃와 26℃에서의 증발열손실은 각각 0.0838 kW와 0.0589 kW로 계산되었다.

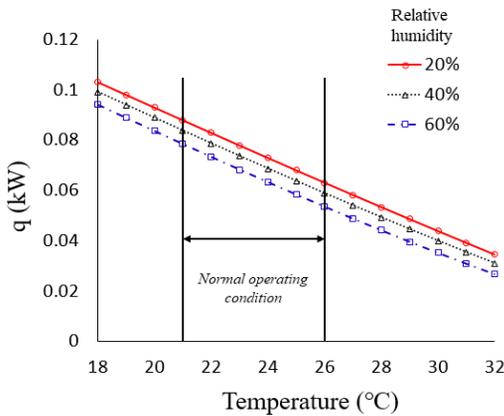


Fig. 4 Relations of the rate of heat losses by evaporation between temperature and relative humidity

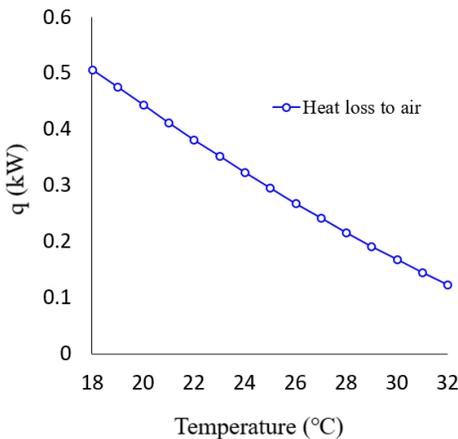


Fig. 5 Convective heat loss on the pool free surface

Table 3 Summarized results of heat losses on an open-pool type research reactor

Parameter	Heat losses(kW)	Note
q_{cond}	8.2	24 hour
	5.8	48 hour
q_{evap}	0.089	21℃, 40% RH
	0.059	26℃, 40% RH
q_{conv}	0.39	21℃
	0.26	26℃

수조 표면에서 온도 변화에 따른 대류 열손실에 대한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 대기온도가 높아질수록 낮은 열손실을 보이는데 이는 수조수와 공기 사이의 온도차가 작아져, 수조 표면 공기와 대기 간의 밀도차가 감소하기 때문에 자연대류 시 공기 부력에 의해 발생하는 운동에너지가 약해져 얻어진 결과라 해석할 수 있다.

3.3 종합적 평가 결과

개방수조형 저 출력 연구로 시스템에서 발생 가능한 종합적인 열손실은 Table 3에 요약하였다. 대기온도 21℃와 24시간 기준으로 열손실을 산정하면 q_{loss} 는 8.68 kW로 가장 크게 얻어지는 것을 알 수 있다. 또한 q_{loss} 의 최저값은 26℃와 48시간 기준으로 6.12 kW가 얻어졌으며, 벽체를 통한 전도열손실 비중이 약 94% 이상을 차지하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 개방수조형 연구로의 열손실에 대하여 전통적으로 활용되고 있는 상관식들과 평가법을 활용하여 분석하였다. 수조를 검사체적으로 설정한 Energy balance를 토대로 벽체를 통한 전도열전달량과 수면에서의 증발 및 대류 열전달량에 대하여 1차원적으로 평가한 결과, 수조벽체를 통한 전도열손실이 가장 큰 비중을 차지하는 것을 확인할 수 있었다. 연구로가 건설되는 장소마다 기후가 다르기 때문에 향후 실제 토양 깊이 혹은 계절별 측정 데이터가 확보된다면 이와 같

은 평가방법을 응용하여 노심 열 출력 보정 평가에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 이와 마찬가지로, 대류 열전달에 대한 상관식들과 계산된 데이터들 역시 향후 운전환경 변화에 따라 유연하게 활용 가능할 것으로 전망되며, 본 논문에서 계산된 열손실 값은 향후 냉각계통 설계와 출력 불확도 예비 산정에 참고 가능하다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과입니다.

Author contributions

H. J. Kim; Writing-original draft & editing. I. G. Kim; Formal analysis. K. W. Seo; Project administration. S. H. Kim; Conceptualization and supervision.

References

1. A. Z. Mesquita, H. C. Rezende and R. M. G. do prado Souza, 2009, "Thermal power calibrations of the IPR-R1 TRIGA reactor by the calorimetric and the heat balance methods", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 53, No. 8, pp. 1197-1203. (<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.08.003>)
2. S. A. Agbo, Y. A. Ahmed, I. O. B. Ewa and Y. Jibrin, 2016, "Analysis of Nigeria research reactor-1 thermal power calibration methods", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 673-683. (<https://doi.org/10.1016/j.net.2016.01.014>)
3. S. A. Agbo, Y. A. Ahmed, B. Yahaya and U. Iliyasu, 2015, "The use of heat balance method in the thermal power calibration of Nigeria Research Reactor-1 (NIRR-1)", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 85, pp. 344-351. (<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.07.013>)
4. Žiga Štancar and L. SNOJ, 2017, "An improved thermal power calibration method at the TRIGA Mark II research reactor", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 325, pp. 78-89. (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.10.007>)
5. R. Rachamin, A. Galperin and E. Elias, 2017, "Analysis of a hypothetical LOCA in an open pool type research reactor", 18th IGORR Conference 2017, Sydney, Australia.
6. T. Zagar, M. Ravnik and A. Persic, 1999, "Analysis of Reactor Thermal Power Calibration Method", *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy In Central Europe'99*, Portoroz, Slovenia, September, pp. 91-98.
7. Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, 2015, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", Fifth Edition, McGraw-Hill Education, New York, pp. 540-541.
8. Sangmu Bae, Kyung-Hee Lee, Seong-Gu Yeo, Eunji Kim, Jae-Kwang Yang, Jae-Young Jeon, Joonhyuk Lee, Yeongmin Bae, Sung-Hoon Kim and Youngmo Kang, 2017, "Comparative Analysis of Energy Performance using Dynamic Simulation", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 62-67. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.062>)
9. ASHRAE, 2011, *ASHRAE Handbook HVAC Applications (SI)*, pp. 5-6.
10. J. R. Lloyd and W. R. Moran, 1974, "Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Planforms", *Journal of Heat transfer*, Vol. 96, No. 4, pp. 443-447. (<https://doi.org/10.1115/1.3450224>)