

전산유체해석을 이용한 연구용원자로 수조수관리계통 열교환기 설계 및 수조수 온도 예측

정남균[†]

인하공업전문대학 기계과

(2016년 4월 18일 접수, 2016년 6월 2일 수정, 2016년 6월 16일 채택)

Design of the Heat Exchanger in Pool Water Management System of a Research Reactor and Estimation of the Pool Water Temperature Using CFD

Namgyun Jeong[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Inha Technical College

(Received 18 April 2016, Revised 2 June 2016, Accepted 16 June 2016)

요 약

연구용원자로에서 여러 수조 및 일차냉각계통 내부에 존재하는 냉각재를 정화시키기 위해 설치되는 수조수관리계통은 일차냉각계통 펌프가 정지한 후 원자로에서 발생하는 노심 붕괴열을 제거한다. 또한, 작업수조 내의 조사물과 사용후핵연료저장조 내에 저장된 사용후핵연료에서 발생하는 열을 제거하여 수조수의 온도를 제한 값 이내로 유지하는 기능도 수행한다. 본 연구에서는 수조수관리계통의 설계와 운전 방법을 설계 초기단계에서 결정하기 위해서 상용프로그램인 Flowmaster를 이용한 전산해석방법으로 수조수관리계통의 열교환기를 설계하고, 각 수조수의 온도를 시간에 따라 예측하였다.

주요어 : 연구용원자로, 수조수관리계통, 판형 열교환기, 전산유체해석

Abstract - The pool water management system, which is installed for purification of the coolant in the pools and the primary cooling system of a research reactor, removes the decay heat from the reactor core when the primary cooling system stops. It also removes the heat generated from the irradiated objects in the service pool and the spent fuels in the spent fuel storage pool to keep the temperature of the pools within a limited value. In this study, the heat exchanger of the pool water management system is designed by CFD method using a commercial code Flowmaster, and the temperature of the pools is estimated along the time to conclude the design and operation method of the pool water management system

Key words : Research Reactor, Pool Water Management System, Plate-type Heat Exchanger, CFD

1. 서 론

풀-타입원자로(pool-type reactor)는 원자로를 개방된 수조수 안에 설치하여 접근성이 용이하고, 일차냉각계통 내의 압력을 일반 발전용 원자로와 같이 고압으로 유지

하지 않아도 된다는 장점을 가지고 있다. 중성자 생성을 주목적으로 건설되는 연구용원자로는 이러한 풀-타입원자로의 대표적인 예라고 할 수 있으며, 원자로수조 및 작업수조, 사용후핵연료저장조등과 같은 수조에 냉각수를 채워 원자로 및 사용후핵연료와 같은 방사화된 물질들의 최종적인 열제거원으로 사용한다.

연구용원자로에서는 수조수관리계통을 설치하여 여러 수조 및 일차냉각계통 내부에 존재하는 냉각재를 정

[†]To whom corresponding should be addressed.
100 Inha-ro Nam-gu Incheon 402-752 Korea
Tel : 032-870-2132 E-mail : nkjung@inhac.ac.kr

화시키게 되는데, 수조수관리계통은 이러한 수질유지 기능뿐만 아니라 부수적으로 일차냉각계통정지 시에 원자로수조의 온도를 유지시키기도 한다. 또한, 원자로 전체 운전 기간 동안 사용후핵연료저장조에 저장된 사용후핵연료에서 방출되는 붕괴열과 작업수조에 저장된 조사물, 중성자 핵변환도핑 잉곳, 핵분열 몰리브데늄 시료, 반사체로부터 방출되는 열을 제거하여 작업수조 및 사용후핵연료저장조의 수조수 온도를 제한 값 이하로 유지하는 목적으로도 사용된다.

이러한 다양한 상황에서의 열제거 목적으로 수조수관리계통 내에 열교환기를 설치하게 되는데, 수조수관리계통의 공간적 설계와 운전 방법을 설계 초기단계에서 결정하기 위해서는 사전에 각 수조수의 온도를 예측하고 열교환기에 대한 대략적인 설계 인자를 결정할 필요가 있다. 각 수조수의 온도를 예측하기 위한 가장 쉬운 방법은 열교환기의 입구온도 조건에 상관없이 일정한 열교환 성능을 갖는 열교환기를 가정하는 것이지만, 실제 열교환기에서의 교환 열량(김석권[1])을 고려할 때 열교환기에 유입되는 유체의 입구온도에 변화가 있을 경우 열교환 열량에 차이가 발생하기 때문에, 수조수의 온도 예측 결과가 실제와 많은 차이가 있을 수 있다.

본 연구에서는 상용 프로그램인 Flowmaster를 이용하여 수치해석적인 방법으로 실제 열교환기와 가깝게 열교환기를 모델링하고, 모델링된 열교환기를 이용하여 각 수조수의 시간에 따른 온도변화를 계산하였다. Flowmaster는 1차원적인 해석방법을 이용한 유체 배관시스템 해석 전문 프로그램으로 3차원해석보다 빠른 결과를 도출할 수 있으므로, 배관시스템 설계의 초기, 검증, 설계 과정 등에서 설계최적화와 그 성능 향상을 위한 해석에 주로 활용되고 있다(Flowmaster V7[2]). 또한 sub cooled water, flashing water, steam, two-phase steam water mixture 등 다양한 유체에 적용이 가능하여 원자력분야 유체계통해석(Icleanu et al.[3]) 및 차량 연료공급시스템의 유동해석(윤정의[4])등에도 많이 사용되고 있다.

2. 본 론

본 논문에서 고려하고 있는 원자로는 개방수조형 원자로로써 원자로집합체는 원자로수조에 잠겨있다. 정상출력운전 중에 원자로에서 발생하는 노심 붕괴열은 일차냉각계통 펌프를 통해 형성되는 노심 내 유동을 통하여 제거되고, 작업수조 및 사용후핵연료저장조 등에서 발생하는 열은 수조수관리계통을 통하여 제거된다. 일차냉각계

통 및 수조수관리계통을 통해 제거 된 열은 각 계통의 열교환기를 통해 이차냉각계통으로 전달되어 냉각탑을 통해 대기로 방출된다.

수조수관리계통의 주 기능은 원자로수조, 작업수조, 사용후핵연료저장조의 수조수 및 일차냉각계통 냉각재를 정화하여 수질 요건을 만족시키고, 사용후핵연료저장조에 저장된 사용후핵연료에서 방출되는 붕괴열과 작업수조에 저장된 조사물 등에서 방출되는 열을 제거하여 수조수 온도를 유지하는 것이다. 그리고 일차냉각계통이 정지되었을 때 원자로수조수의 온도가 붕괴열에 의해 일정온도 이상 증가하지 않도록 수조수관리계통을 통해 열을 제거해야 한다. 따라서 수조수관리계통의 열교환기 크기는 원자로수조의 노심 붕괴열, 작업수조에 저장된 조사물 등과 사용후핵연료저장조에 저장된 사용후핵연료의 발열량을 제거하기에 충분하도록 결정되어야 하고, 이를 위한 각 수조수의 온도를 사전에 예측할 필요가 있다.

2-1. 수조수관리계통 운전

수조수관리계통에 배치되는 주요기기로는 펌프, 이온교환기, 스트레이너, 열교환기, 신수지공급탱크가 있고 그 밖에 관련 배관, 밸브 및 계측기가 설치되는데, 원자로의 정상 운전 및 운전 정지 시에는 원자로수조와 작업수조 및 사용후핵연료저장조에서 취수된 수조수를 열교환기, 필터, 이온교환기 및 스트레이너에서 냉각 및 정화한 후 원자로수조, 작업수조, 사용후핵연료저장조로 다시 복귀시킨다. 원자로 유지보수 시에는 원자로수조로부터 흡입되거나 복귀하는 유량은 없고, 대신 동일한 유량을 사용후핵연료저장조에 추가적으로 흡입 및 복귀시켜 전체 유량을 정상 운전 시의 유량과 동일하게 유지한다.

2-2. 수조수 온도 계산을 위한 Flowmaster 모델링

수조수관리계통의 운전 유량은 14.0 kg/s 이며, 원자로 정상운전 및 운전정지 시 원자로수조수 배관, 작업수조수 배관, 그리고 사용후핵연료저장조 배관으로 각각 7.1 kg/s, 4.9 kg/s, 2.0 kg/s의 유량이 흐른다. 또한, 원자로 유지보수 시에는 작업수조수 배관과 사용후핵연료저장조 배관으로 각각 4.9 kg/s, 9.1 kg/s의 유량이 흐르게 되는데, 각 수조수의 온도 계산을 위해서 전체 시스템을 세밀하게 모델링하는 것은 시간적 소모가 크므로 Fig. 1과 같이 시스템을 단순화하였다. 각 수조수의 용량과 운전조건에 따른 각 수조에서의 발열량 및 유, 출입유량을 Table 1에 나타내었다. 원자로운전 정지 시 원자로수조에서 발생하는 노심붕괴열은 2.4 절에서 자세히 나타내었다.

Table 1. Heat sources and flow rates at the pools

Operation mode	Reactor pool (140m ³)		Service pool (43.2m ³)		Spent fuel storage pool (97.8m ³)	
	Heat source	Flow rate	Heat source	Flow rate	Heat source	Flow rate
Reactor operation	0kW	7.1kg/s	55kW	4.9kg/s	30 kW	2.0kg/s
Reactor stop	Decay heat	7.1kg/s	55kW	4.9kg/s	30 kW	2.0kg/s
Reactor management	0kW	0 kg/s	35kW	4.9kg/s	100 kW	9.1kg/s

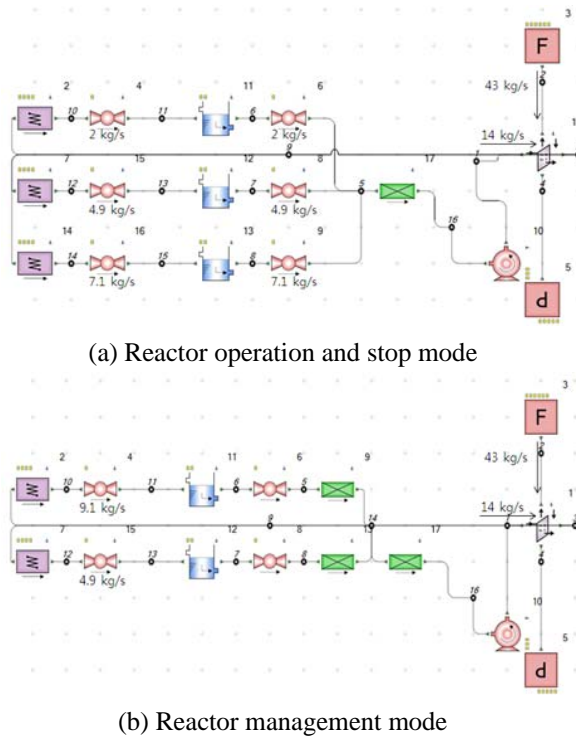


Fig. 1. Flowmaster modeling for calculation of the pool water temperature

각 수조로 유입 및 복귀되는 유량은 각 수조 전 후단에 control valve를 설치하여 일정하게 유지되도록 하였고, Fig. 2와 같은 펌프성능곡선을 사용하였을 때 각각의 수조와 열교환기에 원하는 유량을 흐르게 하기 위해 펌프 전단에 손실계수(K factor)입력을 위한 Discrete를 추가 하였다.

2-3. 열교환기 모델링

수조수관리계통 열교환기의 열교환 능력은 수조수 정화 및 냉각에 필요한 유량과 수조수관리계통으로부터 열을 원자로 외부로 방출시키는 이차냉각계통의 냉각수 유입 온도 등을 고려하여 결정하게 되는데, 본 연구에 필요

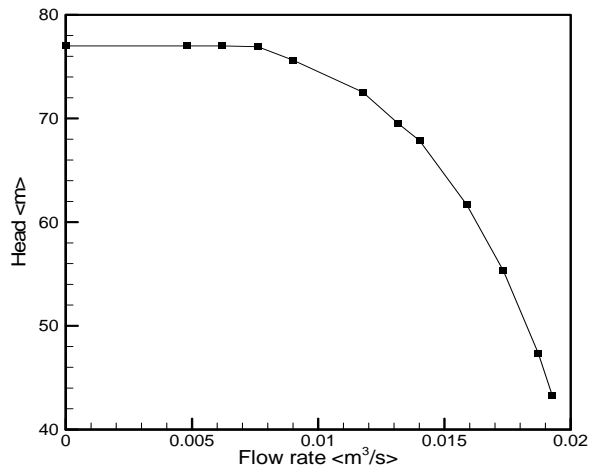


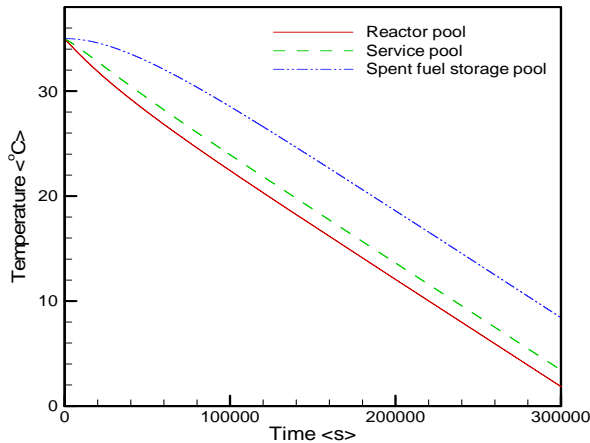
Fig. 2. Pump performance curve

한 열교환기는 1차측과 2차측 입구온도가 각각 36 °C, 32 °C인 경우에 205 kW의 열교환 성능을 갖도록 설계되어야 한다. 만일, 이 열교환기가 1,2차측 입구온도 조건에 상관없이 일정한 열교환 성능을 갖는다는 가정 하에 수조수 온도를 계산하게 되면 각 수조수의 온도는 식(1)과 (2)를 이용하여 단순하게 예측할 수 있다.

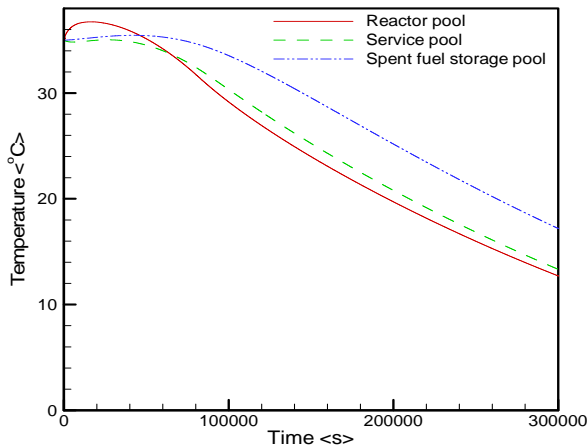
$$M_i C_p \frac{dT_i}{dt} = \dot{m}_i C_p (T_{HX} - T_i) + \dot{Q}_i \quad (1)$$

$$\sum (\dot{m}_i C_p T_i) - \dot{Q}_{HX} = (\sum \dot{m}_i) C_p T_{HX} \quad (2)$$

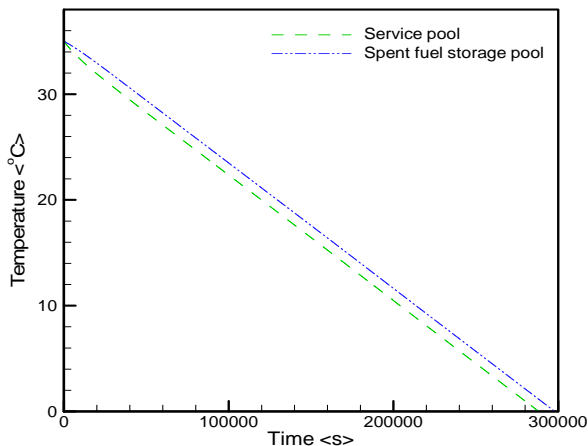
여기서, M_i , T_i , \dot{m}_i , \dot{Q}_i 는 각 수조수의 질량, 온도, 각 수조로 유입 및 출입되는 질량유량, 그리고 각 수조에서 발생하는 열량을 의미하고, C_p , \dot{Q}_{HX} , T_{HX} 는 수조수의 비열, 열교환기에서 제거되는 열량, 그리고 열교환기 1차측 출구온도이다. 식(1)과(2)를 이용하여 수조수의 온도를 시간에 따라 계산하면 각 수조수의 온도는 Fig. 3과 같이 시간에 따라 지속적으로 감소하는 결과를 보인다.



(1) Reactor operation mode



(2) Reactor stop mode



(3) Reactor management mode

Fig. 3. Pool water temperature: Ideal heat exchanger

그러나 실제 열교환기의 경우 1차측 온도가 36°C보다 높게 되면 효율이 높아지고 반대가 되면 낮은 효율의 열교환 성능을 갖게 되며, 2차측으로 유입되는 냉각수의 온

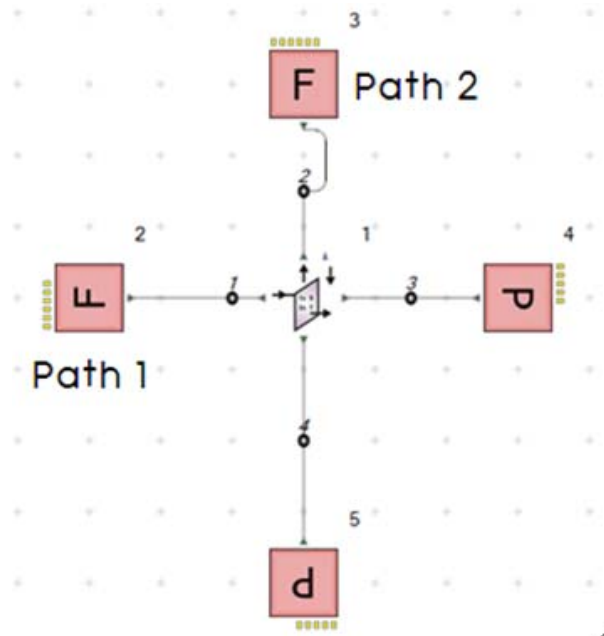


Fig. 4. Flowmaster modeling for design of the heat exchanger

도가 32°C로 유지될 때 1차측의 출구온도는 32°C보다 낮아질 수 없다. 따라서 실제 열교환기를 설치하여 수조 수관리계통을 운전하게 되면 각 수조수의 온도는 이상적인 열교환기를 가정하여 예측한 결과와 많은 차이가 있을 것이다. 본 연구에서는 최대한 실제와 가까운 수조수 온도를 예측하기 위해 Flowmaster에서 제공하는 열교환기 모델을 이용하여 가상의 열교환기를 설계하였다.

열교환기는 크게 판형과 쉘앤튜브형으로 나뉘는데, 수조수관리계통의 공간배치의 효율성을 고려하여 판형 열교환기를 선택하였다. 판형 열교환기는 부피에 비하여 넓은 열전달 면적을 갖기 때문에 효과적으로 열을 전달시킬 수 있고, 다양한 크기와 유로 배열을 통하여 유연하게 설계할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Kakac and Liu[5]). 때문에 판형 열교환기에 대해 다양한 분야에서 많은 연구(Martin[6], Metally and Manglik[7], Fernandes et al.[8], Naik and Matawala[9], Asadi and Khoshkhoo [10])가 진행되어 왔는데, Flowmaster에서는 기존의 연구 결과들을 토대로 판형 열교환기를 목적에 맞게 직접 모델링할 수 있도록 지원하고 있고, 장진아 등[11]이 수행한 원자력발전소의 기기냉각해수계통의 운전여유도 분석에서 판형 열교환기 모델을 이용한 해석결과가 실험값과 2% 이내의 오차를 보여 해석의 신뢰도가 검증된 바 있다.

Fig. 4는 수조수관리계통의 열교환기를 수치해석적으

Table 2. Major design parameters of the heat exchanger

Property	Value
No of plates	137
Horizontal distance between ports	0.238 m
Vertical distance between ports	0.7178 m
Plate thickness	0.5 mm
Plate material type	Steel - Low carbon
Channel gap	2.8 mm
Chevron angle	70 deg

로 설계하기 위한 Flowmaster 모델링을 보여준다. 1차측으로 36 °C의 수조수가 14 kg/s 로 공급되고 2차측에 이차냉각계통으로부터 32 °C의 냉각수가 43 kg/s 로 공급된다고 했을 때, 열교환기에 대한 설계 값을 변경하면서 205 kW의 열교환 성능이 나올 때까지 계산을 반복하였다. 최종적으로 도출된 주요 설계 값은 Table 2에 나타나 있다.

2-4. 수조수 온도 계산 결과

2.3절에서 설계된 판형 열교환기를 사용하였을 때, 각 수조수의 온도가 제한 값인 36 °C이하로 유지 되는지 알아보기 위하여 원자로의 여러 운전 조건 하에서 각 수조수의 온도를 계산하였다. 각 수조수의 초기 온도는 35 °C로 가정하였고, 5초의 시간 간격으로 300000초 동안의 온도변화를 계산하였다.

원자로가 정상 운전상태인 경우 원자로수조에서 발생하는 열원은 일차냉각계통에 의하여 제거되므로, 사용후핵연료저장조와 작업수조에서만 열원이 존재하며 발생량은 각각 30 kw, 55 kW이다. 시간에 따른 각 수조수의 온도 계산결과를 Fig. 5에 나타내었다.

원자로수조수의 경우는 50000초까지 급격하게 감소하다 시간이 지나면서 32.3 °C정도를 유지하게 되는데, 이는 이상적인 열교환기를 가정하였을 경우와 달리 실제 열교환기에서는 1차측 온도가 36 °C보다 작은 경우 열교환기의 열교환 효율이 크게 떨어지기 때문이다. 작업수조수는 35 °C근처에서 거의 변하지 않고, 사용후핵연료 저장조수의 경우는 온도가 점차 증가하다가 36 °C로 근접해 감을 알 수 있다.

원자로운전이 정지되면 일차냉각계통펌프가 정지되어 더 이상 일차냉각계통에 의한 열제거가 이루어지지 않으므로, 원자로 수조에 Fig. 6와 같이 노심에서 발생하

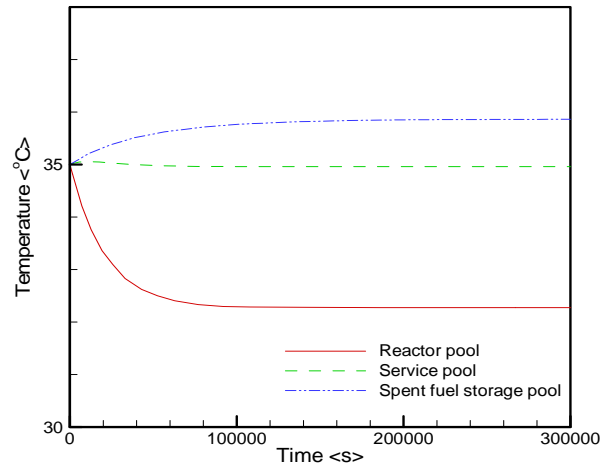


Fig. 5. Pool water temperature: Reactor operation mode

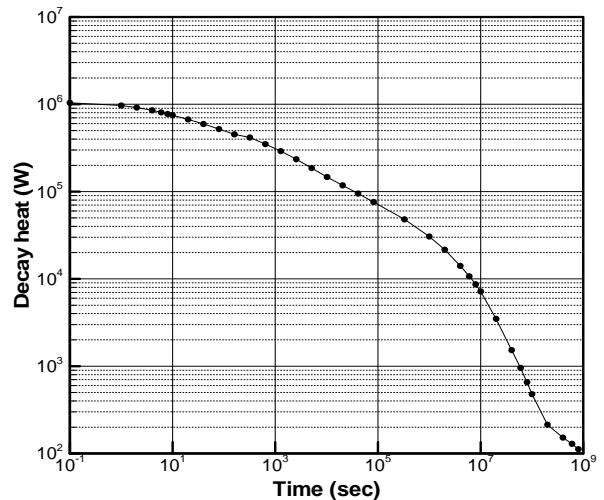


Fig. 6. Decay heat of reactor core

는 붕괴열이 열원으로 추가되게 된다. 사용후핵연료저장조와 작업수조에서의 열원은 원자로 정상운전 시와 동일하다.

Fig. 7에 계산 결과를 나타내었는데, 원자로수조수는 초반부에 노심 붕괴열로 인하여 37 °C까지 증가하다가 약 20000초 후부터 감소하기 시작하여 약 130000초 후부터는 35 °C이하로 내려가게 된다. 따라서 원자로수조수의 온도가 제한 값을 넘게 되는 구간에서 일차냉각계통의 일시적인 운전이 필요할 것으로 예상된다. 작업수조수의 경우는 초반에 35 °C보다 약간 높아지다가 약 30000초 후부터 감소하여 35 °C정도의 온도를 유지하게 되며, 사용후핵연료저장조수 온도는 시간에 따라 점차 증가하다가 약 36 °C정도의 온도를 유지하게 된다.

원자로 유지보수 시에는 24시간 냉각 후 원자로에서

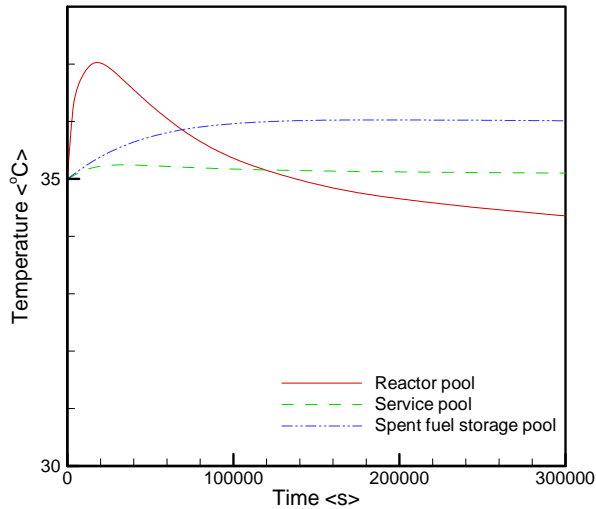


Fig. 7. Pool water temperature: Reactor stop mode

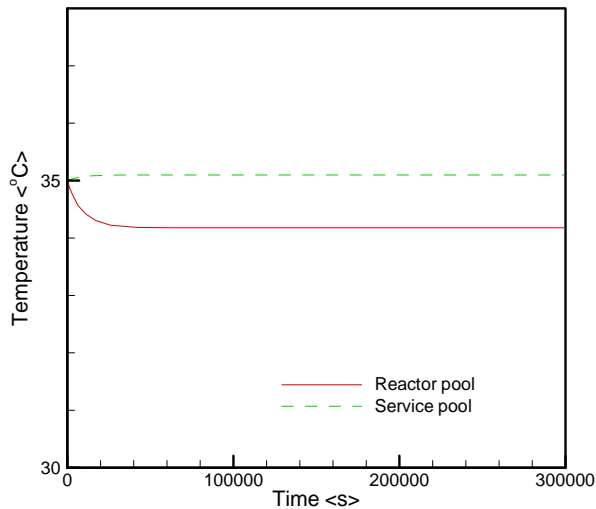


Fig. 8. Pool water temperature: Reactor management mode

사용후핵연료저장조로 옮겨진 1회분의 핵연료에서 방출되는 붕괴열을 고려해야 하므로, 사용후핵연료저장조와 작업수조에서의 열원은 각각 100 kW와 35 kW 이다. 원자로 유지보수 시 각 수조수의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 8에 나타내었는데, 작업수조수의 온도는 초반에 빠르게 감소하다 약 25000초 후부터 34 °C정도로 온도를 유지하게 되고, 사용후핵연료저장조수의 경우는 초반에 약간 증가하다가 35.1 °C정도의 온도를 유지하게 된다.

3. 결론

본 연구에서는 수조수관리시스템의 설계와 운전 방법을

설계 초기단계에서 결정하기 위해서 수조수관리시스템에 설치되는 열교환기를 전산해석적인 방법으로 설계하고, 수조수 온도 계산에 적용하였다.

전산해석 프로그램으로는 1차원적 시스템 해석프로그램인 Flowmaster를 이용하였으며, 프로그램에서 제공하는 열교환기 모델링 기능을 통하여 수조수관리시스템 열교환기를 가상적으로 설계할 수 있었다. 설계된 열교환기를 이용하여 원자로의 여러 운전 상황에서 원자로수조와 작업수조, 사용후핵연료저장조의 시간에 따른 수조수 온도변화를 계산하였고, 이상적인 열교환기를 가정하여 예측한 온도변화와 비교하였다. 열교환기의 1차측 온도에 상관없이 일정한 열교환 성능을 보이는 이상적인 열교환기와 달리, Flowmaster 열교환기 모델링을 이용하여 해석한 결과는 1차측 온도가 열교환기 설계온도보다 작은 경우 열교환기의 열교환 효율이 크게 떨어지는 양상을 보이며 각 수조수의 온도를 실제와 가깝게 예측하였다.

References

1. 김석관: “열교환기 설계와 열적 계산법”, 신기술, (2000)
2. Flowmaster V7: "New user training", version 10
3. Icleanu, D. L., Prisecaru, I., Jianu, I. N.: "Cooling the intact loop of primary heat transport system using Shutdown Cooling System in case of LOCA events", EPJ Nuclear Sci. Technol, Vol. 1, 13, (2015)
4. 윤정의: “가스분사 방식 LPG 엔진의 연료공급시스템 관로 유동해석”, 대한기계학회논문집 B권, 제35권, 제10호, 1019-1024, (2011)
5. Kakac, S and Liu, H.: “Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design”, CRC press, Florida, 380-381, (2002)
6. Martin, H.: “A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers”, Chemical Engineering and Processing, Vol.35, 301-310, (1996)
7. Metally, H. M. and Manglik, R. M.: "Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in lamina flows in sinusoidal corrugate-plate channels", Heat and Mass Transfer, Vol.47, 2283-2292, (2004)
8. Fernandes, C. S., Dias, R. P., Nobrega, J. M., Maia J. M.: "Friction factors of power-law fluids in chevron-type plate heat exchangers", Journal of Food Engi-

- neering, Vol.89, 441-447, (2008)
9. Naik, V. R. and Matawala, V. K.: "Experimental Investigation of single phase Chevron Type Gasket Plate Heat Exchanger, International Journal of Engineering and Advanced Technology", Vol.2, 362-369, (2013)
 10. Asadi, M. and Khoshkhoo, R. H.: "Effects of Chevron Angle on Thermal Performance of Corrugated Plate Heat Exchanger", International Journal of Engineering Practical Research, Vol.3, 8-12, (2014)
 11. 장진아, 김원민, 김봉환: "진단시험기반 기기냉각해수계통 운전여유도 분석", 한국전력기술주식회사 발간자료, 2013