◎ 논 문

DOI: 10.5293/KFMA.2010.13.5.005
ISSN (Print): 1226-9883

5MW 연구용 원자로의 1차 냉각 계통 유동 특성

박용철† · 이용섭**

Flow Characteristics of a Primary Cooling System in 5 MW Research Reactor

Young-Chul Park† , Young-Sub Lee**

Key Words : Flow characteristics(유동 특성), Primary cooling system(1차 냉각 계통), Research reactor(연구로)

ABSTRACT

5MW, open pool type research reactor, is commonly used to education and experimental purpose. It is necessary to prepare a standardization of system designs for considering a demand. HANARO has prepared the standardization of 5MW research reactor system designs based on the design, installation, commissioning and operating experiences of HANARO. For maintaining an open pool type reactor safety, a primary cooling system (after below, PCS) should remove the heat generated by the reactor under a reactor normal operation condition and a reactor shutdown condition. For removing the heat generated by the reactor, the PCS should maintain a required coolant flow rate. For a verification of the required flow rate, a flow network analysis of the PCS was carried under a normal operating condition. Based on the flow network analysis result, this paper describes the PCS flow characteristics of a 5MW open pool type research reactor. Through the result, it was confirmed that the PCS met design requirements including design flow rate without cavitation.

1. 서 론

5MW, 연구용 원자로는 교육 및 실험용으로 많이 사용되고 있다. 이런 수요를 충족시키기 위해 적기에 설계가 되어야 하므로 한국 원자력 연구원이 운영중인 30MW급 하나로(1)의 설계, 설치, 시운전 및 운전 경험을 바탕으로 5MW급 연구로를 표준화하고 있다.

연구로는 100% 출력 운전 중에 노심에서 핵분열시 핵연료의 발열, 수조 내 임시 저장되는 핵연료의 발열, 냉각수 순환 펌프 모터에 의한 발열 등으로 가열된다(2). 연구로는 상업로와 달리 이 열을 제거하여 원자로를 안전하게 유지하여야 한다. 그러기 위해 1차 냉각 계통은 원자로에서 발생한 열을 안전하게 제거하여야 한다.

1차 냉각 계통은 순환 펌프를 가동하여 1차 냉각수를 노심과 열교환기를 순환시킨다. 이 1차 냉각수는 노심을 지나면서 열을 흡수하고, 열교환기를 지나면서 흡수한 열을 2차 냉각수에 열교환한다. 2차 냉각수에 전달된 열은 냉각탑을 지나면서 대기와 열교환하여 제거된다(3). 따라서 원자로를 안전하게 유지하기 위해서는 1차 냉각수의 유량이 확보되어야 한다.

본 논문에서는 5MW급 연구로의 1차 냉각수 유량을 확인하기 위해 유동 해석을 하였다. 본 논문은 서론, 본론 및 결론의 순서로 구성되어 있으며 1차 냉각 계통의 특성 및 유동 해석 방법과 결과를 기술하고 있다.

2. 1차 냉각 계통 특성

1차 냉각 계통이 제거하여야 하는 열량은 정상 운전 중에 노심에서 핵분열시 발생하는 열량 5MW와 수조 내에 임시 저장되는 핵연료 및 순환 펌프 모터의 발열 등을 추가하여 5.5MW이다. 이 열을 제거하기 위하여 원자로 냉각수의 온도 조건은 하나로와 동일하게(3) 35℃로 유입되고 44.2℃로 유출된다. 이때 요구되는 유량은 약 146kg/s이다.

* 한국원자력연구원
** 한국원자력연구원
† 교신저자, E-mail : ycpark@kaeri.re.kr

이 성능을 유지하기 위하여 1차 냉각 계통은 하나로와 마찬가지로 Fig. 1과 같이 50 % 용량의 1차 냉각 펌프와 50 % 용량의 열교환기를 각각 병렬로 구성하여 요구 유량을 확보하였다. 그리고 운전 중인 두 대의 펌프 중 한 대가 고장 나더라도 나머지 한 대가 운전되므로 최소한의 냉각 유량을 확보하여 냉각 기능을 유지할 수 있다.

그러나 냉각수의 유동 방향은 하나로와 달라 하향 유동(downward flow)이다. 따라서 냉각 펌프의 토출 유량은 하나로와 달리 연구로의 하부 플레넘(plenum)으로 유입되지 않고 모두 수조로 유입된다. 냉각 펌프가 수조수를 흡입하므로 노심을 지나면서 열을 흡수한다. 그리고 원자로의 하부 플레넘을 거쳐 열교환기를 지나면서 흡수한 열은 2차 냉각수와 열교환한다.

펌프 전단에는 하나로와 달리 주변 방사선 준위를 최소화하기 위하여 100% 용량의 반감기 탱크를 추가하였다. 이는 노심을 지나는 냉각수는 많은 종류의 방사성 물질을 포함하고 있다. 그 중에서 N-16과 Ar-41은 강한 감마 방사선을 가지므로 1차 계통 주변의 방사선 준위가 높아진다(4). 그러나 이들의 반감기가 지나면 방사선 준위가 떨어지므로 반감기 탱크는 냉각수가 탱크 내에서 약 70초간 흐르게 하여 방사선 준위를 저감한다.

원자로 정지시에는 하나로와 마찬가지로 수조수를 이용하여 자연 대류가 이루어지도록 원자로의 냉각수 출구관에 두 대의 플랩 밸브를 설치하였다. 이 밸브는 원자로가 가동 중인 때에는 순환 펌프의 가압에 의해 닫혀 있고, 순환 펌프 정지시에는 자중에 의해 개방된다. 이 때 노심의 잔열에 의해 데워진 냉각수는 밀도차에 의해 상승하고 수조의 찬 냉각수는 개방된 이 밸브를 통해 노심에 유입되므로 노심의 잔열을 안전하게 제거할 수 있다(5).

원자로를 안전하게 냉각하기 위해서는 원자로 노심은 수조수 속에 잠겨 있어야 한다. 하나로와 마찬가지로 평상시에는 정상 수위를 유지하도록 저수위가 되면 자동으로 충수된다. 비상시에는 누수로 수조수가 상실되더라도 비상 보충수가 공급되어 노심이 항시 냉각수에 잠겨 안전하게 유지된다(5).

냉각수는 핵연료, 원자로, 등의 접수면 부식이 발생하지 않도록 Fig. 1에서 보여 주는 바와 같이 총유량의 약 10 %가 1차 정화 계통(Primary purification system, PPS)을 지나도록 하였다. 이를 통해 냉각수는 약산성의 상태를 유지하여 부식을 방지한다.

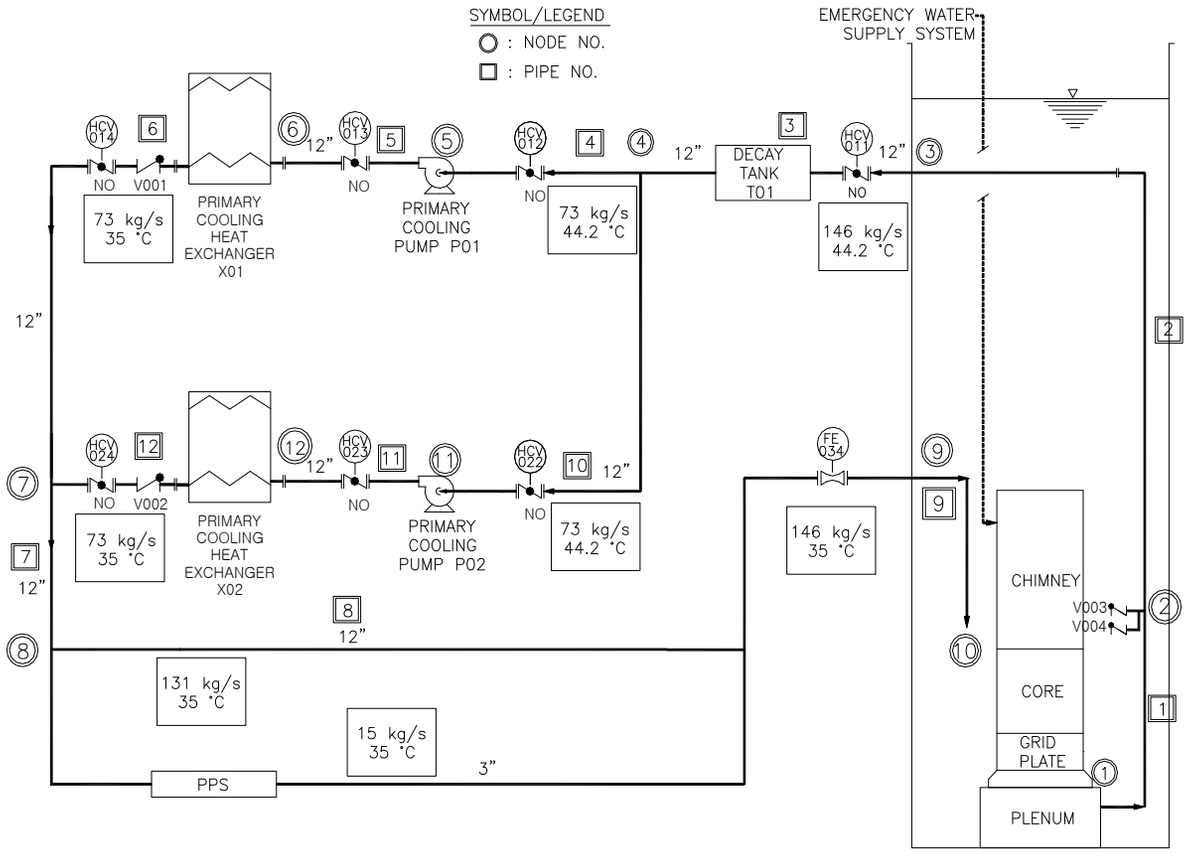

Fig. 1 Flow diagram including node no. and pipe no. for flow analysis

3. 유동 해석

3.1 유동 해석 방법

1차 냉각수의 유량 확보 등 유동 특성을 확인하기 위하여 상용 프로그램(6)을 이용하여 유동 해석을 하였다. 1차 냉각 계통은 Fig. 1과 같이 고도, 관경 및 유량의 변화를 기준으로 해석점과 배관을 각각 12개로 구분하였다. 해석 조건은 Table 1과 같이 운전 조건과 동일하게 적용하였다.

그리고 해석 방법은 초기 압력을 가정하여 예상유량을 계산하고 이를 반복 계산하여 각 해석점의 압력과 유량을 계산하였다. 초기 압력의 가정이 정확할수록 계산이 간단하다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 해석점 1은 바닥에서 0.3m 위치에 있고, 9m의 수두층이 유지되므로 8.7m의 수두 압력이 걸림을 예측할 수 있어 해석점 1에 걸리는 압력을 초기 압력으로 정하였다.

계통 내의 압력 손실은 배관과 기기에 의해 발생한다. 배관은 표면의 거칠기에 따라 마찰 손실이 발생하므로 난류 유동에 적합한 하젠-윌리엄 상수(Hazen-Williams coefficients)를 적용하였다. 이에 따라 스테인리스강 배관 표면은 대단히 매끄러운 상태로 간주하여 마찰 손실 계수를 지정하였다(6).

기기의 압력 손실은 유동 표면의 마찰과 유동 방향과 유속의 변화에 따라 발생한다. 이를 보상하기 위하여 배관 관경과 레이놀즈수를 보상한 복합 K 방식(multiple K method)(7)을 적용하였다. 관계식은 식 (1)과 같다.

$$K = \frac{K_1}{\mathrm{Re}} + K_2\left(1+\frac{1}{D}\right) + K_3 \qquad (1)$$

여기서, K, K_1, K_2, K_3: 압력 손실 계수

Re: 레이놀즈수

D: 관경이다.

그리고 원자로 노심, 반감기 탱크, 열교환기의 압력손실 계수는 제작자가 제공한 압력 손실에 대해 Table 2와 같이

Table 1 Conditions for flow analysis

Description	Conditions	Unit
Total flow rate	146	kg/s
Purification flow	15	kg/s
System head	33	mAq
Maximum operating temperature	44	℃
Reactor coolant out let pressure	8.7	mAq
Coolant vapor pressure	1	mAq

Table 2 Pressure loss coefficient

Description	Pressure loss		Pressure loss coefficient
	kPa	mAq	
Core	170	17.3	85
Decay tank	64	6.5	32
Heat exchanger	64	6.5	128

하겐 포아젤 관계식(Hagen-Poiseuille equation)으로 계산하였다(8). 표에서와 같이 열교환기와 반감기 탱크는 동일한 차압이 발생한다. 그러나 압력 손실 계수는 Fig. 1과 같이 반감기 탱크의 유량이 열교환기에 비해 2배의 유량이 흐르기 때문에 4배의 큰 값을 가진다.

펌프의 특성 곡선은 참고 자료에 따라 식 (2)와 같이 포물선의 관계식으로 표시할 수 있다(9). 이 식의 상수는 포물선 식이므로 두 개의 운전점을 적용하여 구하였다.

$$\Delta P = A + B \times Q^2 \qquad (2)$$

여기서, $\triangle P$: 압력손실, mAq

A, B: 상수

Q: 유량, kg/s이다.

3.2 유동 해석 결과

3.2.1 계통 압력 손실

정상 운전 조건으로 설계 유량이 계통 내에 흐르는 경우에 대하여 각 파이프의 압력 손실을 계산하여 그 결과를 Fig. 2에서 보여 주고 있다. 그림에서 막대 그림은 압력 손실을, 실선은 압력 손실 누계를 각각 나타내고 있다. 각 배관의 압력 손실 누계인 계통 압력 손실은 약 33mAq로 계산되었다. 이는 펌프의 정격 유량을 만족하기 위한 요구 양정에 해당하므로 펌프는 최소한 이 조건을 만족하여야 설계

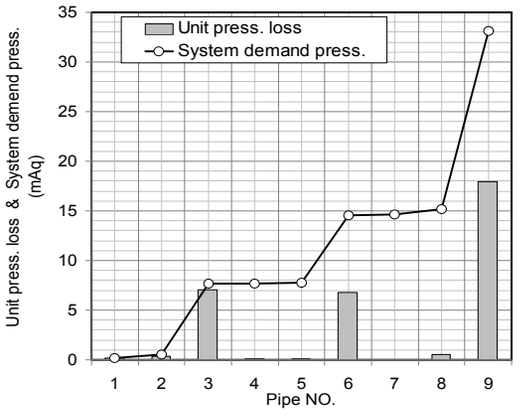

Fig. 2 Pressure loss of primary cooling system

유량을 만족할 수 있다.

계통 압력 손실의 주요 부분은 3, 6 및 9 배관이다. 각 배관에는 반감기 탱크, 열교환기 및 원자로 노심이 각각 설치되어 있어 계통 압력 손실을 유발하고 있다. 원자로 노심에서는 170kPa의 차압이 발생하여 전체 압력 손실의 약 50%가 발생한다. 나머지 기기의 압력 손실을 합치면 30.3mAq를 지시한다. 그리고 기기 손실을 제외하면 12인치 배관, 이음관 및 밸브 등에 의한 손실이다. 이는 기기에서 발생하는 손실의 약 10%에 해당하여 계통 압력 손실에 크게 영향을 미치지 않는다.

3.2.2 펌프의 성능 곡선

Fig. 3은 제작자가 제공한 펌프 성능 예상 곡선이다. 여기에는 유량에 대한 양정, 축동력, 효율 및 요구흡입 수두(NPSHr)에 대한 값을 보여 주고 있다. 정격 유량 73kg/s가 흐르기 위해서는 최소한 약 33mAq의 양정이 필요하다. 그러나 향후 변경 가능한 불확실성을 감안하여 약 10 % 여유를 가진 약 37mAq를 정격점으로 선정하였다. 이때의 펌프 효율과 요구 흡입 수두는 약 71%와 2.4m를 각각 보여 주고 있다.

그리고 식 (2)에 따라 정격 운전점과 체절 운전점을 각각 지나는 펌프 특성 곡선식을 구하였다. 이 곡선식을 이용하여 양정을 계산하고 제작자 성능 곡선과 비교하여 그림에 나타내었다.

그 결과, 평균 상대 오차는 약 2%를 보여 제작자성능 곡선과 잘 일치함을 보여 주고 있다. 최대 상대 오차는 정격 유량의 약 1.33배 지점에서 약 9.5%를 보여 주고 있다. 이는 펌프의 정격 유량점을 벗어나는 지점이므로 계통의 유동 특성을 예측하는 데에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로

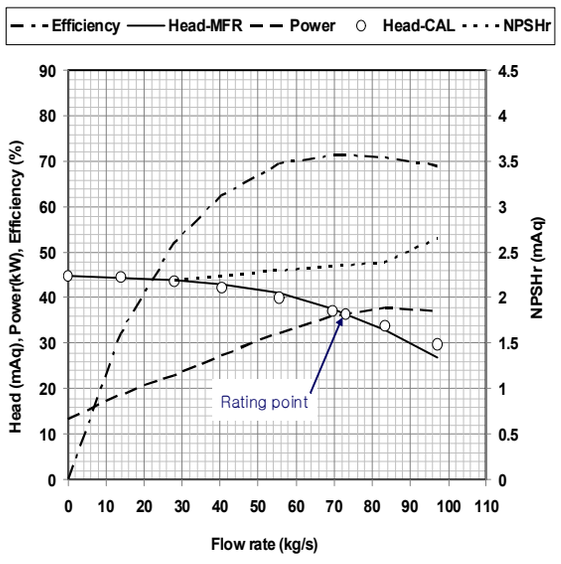

Fig. 3 Pump performance curve of primary cooling system

Table 2 Error of calculated pump performance curve

Flow rate (kg/s)	Head-MFR (mAq)	Head-CAL (mAq)	Head relative error (%)
0	45.0	45.0	0.0
14	44.5	44.7	0.4
28	43.8	43.8	0.5
41	42.4	42.4	1.5
56	40.0	40.0	2.4
69	37.3	37.3	1.4
73	36.5	36.5	0.0
83	33.0	33.9	2.5
97	27.0	29.8	9.5
AVERAGE			2.0

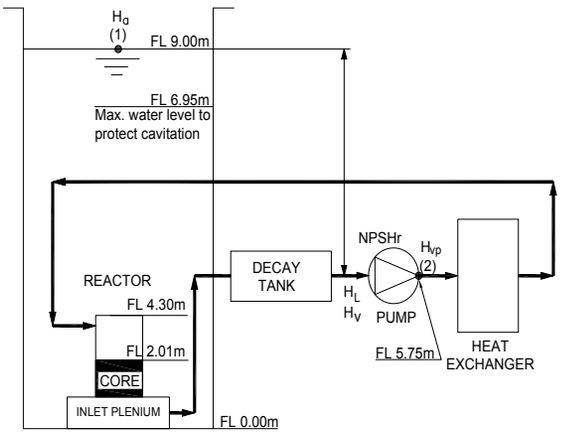

Fig. 4 Schematic diagram for pump cavitations

판단된다.

3.2.3 캐비테이션

펌프가 적정 유량을 공급하기 위해서는 안정된 상태로 가동되어야 한다. 운전 중에 캐비테이션이 발생하면 진동이 발생하고 유량 및 양정의 변화가 생긴다. 뿐만 아니라 심하게 발생하면 점침식 등으로 회전차의 날개가 손상될 수 있다. 따라서 펌프는 캐비테이션 없이 안전하게 운전하는 것이 필요하다.

캐비테이션을 막기 위한 임계점을 계산하기 위해 Fig. 4와 같이 기기 배치 상태를 개략적으로 나타내었다. 캐비테이션은 펌프의 회전차 중심에서의 압력이 유체의 증기압 보다 낮은 경우에 증발하여 기포가 발생하는 현상이다. 이 기포가 유동 중에 가압되어 회전차 날개나 케이싱 면에 부딪치면 깨어져 심한 진동을 유발하고 점침식을 유발(10)한다. 이를 막기 위해서는 펌프를 적합한 위치에 설치하여야 한다.

그 위치는 그림에서 펌프가 흡입하는 유체 표면과 순환펌프의 회전차 중심까지의 거리 H_s로 나타내었다. 따라서 수조 표면 (1)과 펌프의 중심 (2)에 대하여 캐비테이션이

생기는 경우 베르누이 방정식을 세울 수 있다. 그리고 H_s는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$H_s = H_a - (H_{vp} + H_v + H_L + NPSHr) \quad (3)$$

여기서, H_a: 흡입 표면 대기압 수두
H_{vp}: 흡입 유체의 증기압 수두
H_v: 펌프 흡입관 속도 수두
H_L : 흡입관의 마찰 손실 수두이다.

관경이 12인치이고, 냉각수의 최대 운전 온도가 44oC인 경우 증기압 수두는 1mAq, 요구흡입수두는 (NPSHr)은 Fig. 3에서 2.4mAq, 흡입관 마찰 손실 수두는 Fig. 2에서 5번 배관까지의 압력 손실 합인데 약 7.8mAq이다. 흡입관 속도 수두 손실은 작은 값이므로 무시하면 H_s는 수면보다 약 1.2 m(수위 7.8 m) 아래에 있어야 한다. 따라서 2m의 여유를 고려하면 펌프는 수면에서 3.2m(수위 5.8m) 이하에 있으면 안전할 것이다.

실제는 흡입관 위치가 수면 보다 3.25m(수위 5.75m) 아래에 있어 캐비테이션 영향 없이 안전하게 운전할 수 있다. 그리고 이 위치는 수조 바닥에서 약 2m 높이(수위 2m)에 있는 노심 상부 보다 높은 위치이므로 누수가 발생하여 사이폰 현상이 생기더라도 노심은 냉각수로 채워져 안전하게 냉각할 수 있다. 그러나 수위가 수면보다 2.05m(수위 6.95m) 아래로 떨어지면 캐비테이션 방지 요구 수위 1.2m를 만족하지 못하므로 그 이상의 수위를 유지하여야 한다.

3.2.4 계통 압력 분포

순환 펌프가 정상적으로 운전하는 경우 각 해석점의 압력 분포를 절대 압력으로 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 해석점 1번에서 10번까지는 펌프가 원자로 플레넘에서

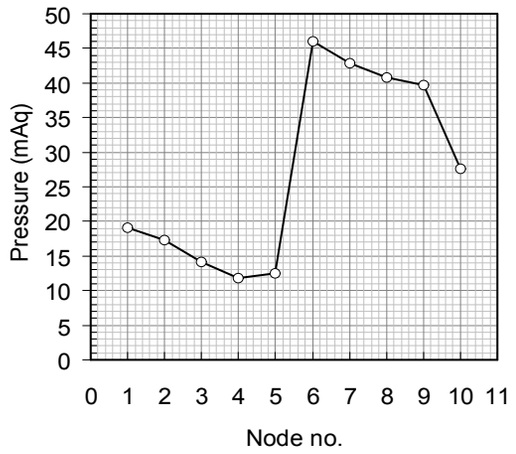

Fig. 5 Node pressure of primary cooling system

냉각수를 흡입하여 반감기 탱크, 펌프, 열교환기를 거쳐 원자로 노심으로 재순환 과정을 보여 주고 있다. 해석점 11번과 12번은 펌프와 열교환기가 병렬로 설치된 지점이므로 해석점 5 및 6과 동일한 압력 분포를 나타내므로 제외하였다.

펌프가 설치된 해석점 5의 압력은 냉각수의 증기압 보다 큰 값이므로 캐비테이션 없이 펌프를 안전하게 운전할 수 있음을 보여 주고 있다. 그리고 해석점 5와 6의 압력 차이는 펌프 양정을 표시하는데 약 34mAq를 지시하여 계통 특성을 잘 모사하고 있다.

해석점 10과 1은 냉각수가 원자로로 유입되는 지점과 유출되는 지점을 각각 나타낸다. 이 해석점들의 압력 차이는 약 9mAq이다. 유입점이 유출점보다 높으므로 가압할 수 있어 충분한 유량을 공급할 수 있다.

4. 결 론

1차 냉각 계통의 유동 특성을 확인하기 위하여 유동 해석한 결과 1차 냉각 계통은 캐비테이션의 영향 없이 설계 유량을 공급할 수 있음을 확인하였다. 이와 관련되는 결론은 다음과 같다.

(1) 펌프와 열교환기를 50%씩 병렬로 배치하는 경우 설계 유량 146kg/s를 유지하기 위해서는 계통에 요구되는 차압 손실은 33mAq이다.

(2) 향후 불확실성을 감안하면 약 10% 여유를 고려하여 펌프가 양정 37mAq일 때 설계 유량을 만족하도록 펌프 사양을 정하였다.

(3) 양정과 유량이 37mAq 및 73kg/s일 때 펌프 성능 곡선 관계식을 구하여 제작자 성능 곡선과 비교하면 평균 상대 오차 2% 범위에서 잘 일치하였다.

(4) 펌프의 캐비테이션을 막아 안전하게 운전하기 위해서는 펌프는 수조 표면 보다 3.2m 아래에 설치하여야 한다.

(5) 현재 펌프의 위치는 수조 표면에서 3.25m에 설치되어 있어 캐비테이션뿐만 아니라 누수 손실이 발생하여도 사이폰의 영향을 막을 수 있어 노심은 항시 수조수에 잠기게 되므로 안전하게 냉각된다.

(6) 유동 해석 결과 해석점의 압력 분포는 펌프의 가압 양정 특성을 잘 나타내고 있어 유동 특성을 잘 모사하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Young-Chul Park, Jong Sub Wu, 1996, “System Performance Test in HANARO,” the 5th ASRR Vol. 1, pp. 240-246.

(2) Young-Chul Park et. al, 2004, “Improvement of Temperature Control Function for HANARO Flow Simulation Test Facility”, Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 97.

(3) Young-Chul Park et al., 2000, “Evaluation for the Cooling Capability of Secondary Cooling Tower in HANARO”, Proceeding of the KFMA Annual Meeting 2000, pp. 345~350

(4) Young-Chul Park, Jong-Ho Park, 1999, “The Reduction Effects of Pool Top Radiation Level by Hot Water Layer,” Journal of Fluid Machinery, Vol. 2 No. 4, pp. 40~47.

(5) KAERI, “Safety Analysis Report of Research Reactor, HANARO, KAERI/TR-710/96, Vol. 3, pp. 12-1~12-3, 1996.

(6) Flow Network Analysis, 5.0C, “User”s Manual,“ Kelix Software Co. 1985

(7) Hooper, W. B. 1981, “The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings,” Chem. Engr. Aug. 24. pp. 97-100

(8) Y. C. Park, et al., 1999, “Design and Test of ASME Strainer for Primary Cooling System in HANARO”, Journal of Fluid Machinery, Vol. 2 No. 3, pp. 24~29.

(9) Merie C. Potter and Elaine P. Scott, “An Introduction to Fluid Mechanics,” Thomson.

(10) Hydraulic Inst., “Hydraulic Institute Standards for Centrifugal Rotary & Reciprocating Pumps”, 14th. Edition, 1983.