'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 하나로 수조 고온층 계통의 설계 및 성능시험
# (Design and Performance Test for Hot Water Layer System is HANARO)

박 용철, 류 정수, 조 영갑, 이 번헌

한국원자력연구소
대전광역시 덕진동 150번지

박 종호

충남대학교 기계공학과
대전광역시 유성구 궁동

**요 약**

수조상부의 방사선 준위를 줄이기 위하여 수조표면에서 1.2 m 깊이의 고온층을 설치하였다. 설치 후 방사선 준위는 설치 전과 비교하여 약 4분의 1로 감소되었지만 원자로실 방사선은 수조표면에서의 방사선이 대부분이었고 주요 핵종은 Na-24이었다. Na-24를 포획하고 고온층의 수조수를 정화하여 궁극적으로 수조상부 방사선 준위를 저감하기 위하여 수조 고온층 계통의 여과기를 제거하고 이온교환기를 설치하였다. 계통개조 후 펌프의 성능시험과 이온교환기 및 스트레이너의 차압을 측정하여 수조 고온층 계통의 유동특성이 정상적으로 유지됨을 확인하였다. 또한, 달시 공식으로 계산한 이온교환기와 스트레이너의 압력손실계수를 이용하여 유동해석을 하였으며 현장측정자료와 비교하여 10 % 오차범위 내에서 압력변화에 따른 유동변화를 예측할 수 있었다. 이온교환기를 추가하여도 수조수보다 5 ℃ 높은 고온층의 온도를 유지하므로서 고온층이 형성됨을 확인하였다. 최종적으로, 수조상부 방사선 준위는 이온교환기가 주요 핵종인 Na-24를 포획하므로서 24시간이내에 포화상태에 도달하며 10000 nGy/hr이하에서 안정상태를 유지하는 것을 확인하였다.

**Abstract**

A hot water layer (HWL hereinafter) was installed at the depth of 1.2 m from the pool surface to reduce the radiation level at the pool top. The radiation level at the pool top was reduced to about one-fourth in comparison with that before the installation of HWL, but the major part of radiation level of reactor hall was still the radiation from pool surface and the main nucleus was Na-24. Therefore the HWL system was improved by the replacement of the filter with the ion exchanger to capture the Na-24, to purify the pool water of HWL and finally to reduce the radiation at the pool top. After modification of HWL system, it was confirmed through the field test that the flow characteristics of HWL system were not adversely affected. Each pressure loss coefficient of ion exchanger and strainer was calculated by Darcy equation using the each pressure difference through ion exchanger and strainer and the flow rate measured during the performance test. And these are useful data to predict flow variations by the pressure difference within 10% through the flow net work analysis. Finally, it was confirmed that the pool top radiation was saturated and stabilized below 10000 nGy/hr within 24 hours as the ion exchanger captured main nucleus, Na-24 and purified pool water of HWL.

## 1. 서론

하나로[1]는 1995년 2월 5일 첫 임계에 도달한 이후 출력 상승시험을 수행하였다. 그 과정에서 원자로 출력이 상승함에 따라 수조표면의 방사선 준위는 원자로 보호계통의 정지변수를 초과하는 현상이 발생하였다. 그 원인은 원자로 냉각수의 10 %가 노심을 우회하여 수조로 방류되어 냉각펌프의 흡입력에 의하여 침니상부를 통해 침니하부에서 노심을 통과한 90 %의 냉각수와 함께 흡입되므로서 방사성 기체가 침니상부로 솟구치는 것을 억제하는 기능을 한다. 그러나, 수조상부보다 높은 온도의 우회 냉각수 일부가 자연대류 현상에 의하여 수조상부로 상승하므로서 수조표면의 방사선 준위가 증가하였다. 이 방사선 준위를 낮추기 위하여 수조표면에 고온층을 형성하였으나 원자로실 방사선 준위는 여전히 수조수에서 나오는 방사선이 대부분을 차지하였다. 주요 핵종은 Na-24이었으며 이를 제거하기 위하여 고온층 계통의 여과기 대신에 이온교환기를 설치하였다. 본 논문에서는 개선된 고온층 계통의 펌프 성능시험, 이온교환기 및 스트레이너의 차압 측정, 이를 이용하여 달시 공식으로 구한 압력손실계수, 이를 이용한 유동해석으로 계통의 특성을 확인하고 이온교환기 설치 후 수조방사선의 저감효과에 대하여 기술하였다.

## 2. 계통개요

수조상부에 고온층을 형성할 경우 열손실량은 수조표면에서의 증발열에 의한 열손실이 전체 열손실의 75 %를 차지하였으며 그 외에 수조표면의 대류에 의한 열전달, 수조벽면과의 열전달 및 고온층 하부와 수조수 사이의 대류 열전달에 의한 열손실 등을 포함하여 27.2 kW이었다[2]. 수조수온도보다 5 ℃ 높은 고온층을 수조표면으로부터 1.2 m 깊이로 형성하기 위하여 30 kW의 온수기를 선정하였으며 순환유량을 1.44 kg/sec로 정하였다. 그림 1에 최종 개정된 수조 고온층 계통의 흐름도를 도시하였으며 계통은 주요 기기인 100 % 용량의 순환펌프, 이온교환기 및 온수기를

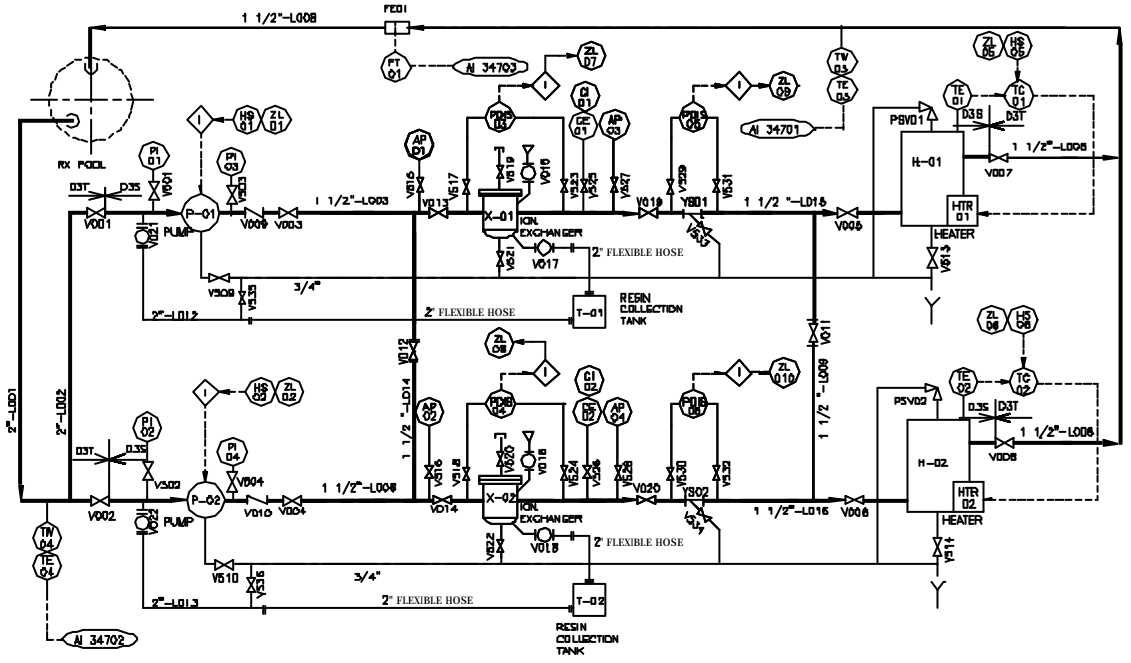


Fig. 1 P&ID for Hot Water Layer System

병렬로 구성되었다. 이온수지는 아황산염 (Sulphate acid)과 삼중 메틸 암모니움 (tri-methyl ammonium)을 각각 양이온과 음이온으로 사용되었다. 수조 고온층 계통의 수조수 흡입관과 토출관은 고온층 중심위치인 수조표면으로부터 0.6 m 깊이에 설치되었다. 온수기의 열용량을 점검하기 위하여 순환펌프 입구와 온수기 출구배관에 각각 온도감지기 (TE03 & 04)를 설치하고, 온수기 후단에 유량계 (FE01)를 설치하였다. 그리고, 이온교환기의 기능을 유지하기 위하여 이온교환기 후단에 전도계 (CE01 & 02)와 스트레이너 (YS01 & 02)를 설치하였으며 차압계 (PDIS 03, 04, 05 & 06)를 각각 설치하여 고차압을 감시하도록 시설을 개선하였다[3].

## 3. 유동해석

기존에 설치한 여과기를 제거하고 이온교환기와 스트레이너를 설치하므로서 차압이 증가하면 순환펌프의 유량이 감소하여 계통성능을 유지하기 어렵다. 그래서 압력변화에 따른 유량변화를 예측하기 위하여 유동해석을 실시하였다. 유체가 임의의 구간을 흐를 때 각 에너지의 변화상태를 압력변화로 나타내면 식 (3-1)과 같다[4].

$$(P_i - P_j)_{total} = \left[\frac{b * f_{ij} * L_{ij}}{D_{ij}} + \sum K_{ij}\right] * \left[a * \rho * \frac{Q_{ij}^2}{D_{ij}^4}\right] - d * \rho * (Z_i - Z_j) - (A_{ij} + B_{ij} * Q_{ij}^2) \qquad (3\text{-}1)$$

상기 식의 우변 2항과 3항은 수두차에 의한 위치 에너지와 펌프에 의한 기계적 에너지의 압력변화이다. 우변 1항은 손실 에너지에 의한 압력변화로서 Hazen-William의 지수식[4]으로 나타내었으며 a와 b는 단위환산을 위한 상수이다. 손실 에너지의 마찰손실계수는 관마찰손실과 부차적 마찰손실의 합으로 표시된다. 관마찰손실계수, $f_{ij}$는 Hazen-William의 실험식[5]으로서 관의 거칠기를 관 재질에 대한 실험계수로 정하였다. 그리고, 부차적 압력손실계수, $K_{ij}$는 "$K$" Method [5]를 적용하였으며 관경과 레이놀드수의 함수로 표시된 실험식이다. 식 (3-1)을 유량, $Q_{ij}$에 대하여 정리하면 식 (3-2)와 같다.

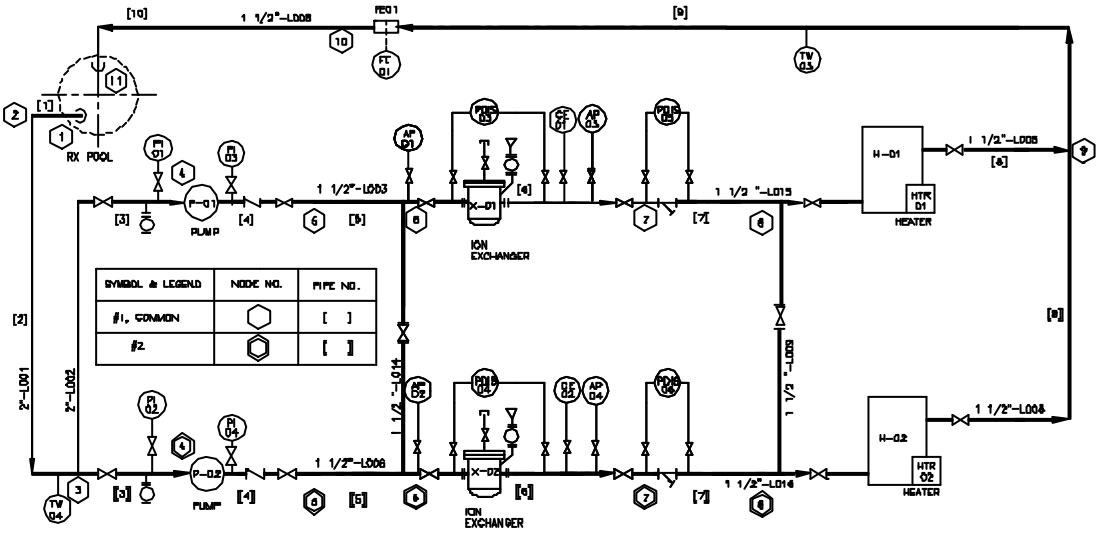


Fig. 2 Node Diagram

$$Q_{ij}=\left(\frac{E_{ij}}{C_{ij}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}2)$$

여기서, $C_{ij}=\left[\left(\frac{\alpha*\rho}{D_{ij}^4}\right)\left(\frac{b*f_{ij}*L_{ij}}{D_{ij}}+\Sigma K_{ij}\right)-B_{ij}\right]$, $E_{ij}=[(P_i-P_j)+d*\rho*(Z_i-Z_j)+A_{ij}]$ 이다. 임의의 해석점 j에 연결된 각 파이프의 유량의 합에 상응하는 유량 수정값, $(Q'_j)$를 더하거나 빼게 되면 유량의 합은 0이 되므로 유량 수정값이 오차범위 내에 들도록 반복적으로 계산하여 각 해석점에 대한 압력변화와 유량을 계산하였다. 유동해석은 각 배관루프에 대하여 그림 2와 같이 고도, 배관 구경 및 유량변화가 예상되는 점을 기준으로 11개의 해석점으로 나누어 계산하였다. 해석점 1과 11은 고온층 배관의 입출구로서 유동해석의 경계면이며 각 지점은 0.6 m 물속에 위치하므로 0.6 mAq의 수두압을 받고 있다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 펌프의 성능시험

순환펌프의 성능은 현장실험을 통하여 양정곡선으로 확인하였다. 최대유량은 순환펌프 1대 운전 시 이온교환기 2대와 온수기 2대를 사용하는 경우이다. 각 펌프의 토출밸브를 조정하여 차압을 유발하고, 이에 따른 유량변화를 그림 3에 도시하였다. 펌프 1번과 2번의 최대유량은 각각 3 kg/s와 3.1 kg/s이며 펌프 2번이 0.1 kg/s 많이 발생하였다. 펌프의 설계유량인 1.44 kg/s일 때 펌프 1번 및 2번의 양정은 각각 219 kPa 및 217 kPa를 나타내었으며 정격양정 245 kPa (25 mAq) 이하를 지시하여 모두 만족한 것으로 판단되었다. 펌프의 양정곡선 관계식은 다음과 같이 현장 측정점을 기준으로 2차 포물선의 식으로 표시하였으며 우변 1항은 체절양정을 표시하며 우변 제 2항은 유량변화에 따른 압력변화율을 나타낸다.

1번 펌프 (P-01): $H_1=232.81 - 6.484*Q_1^2$

2번 펌프 (P-02): $H_2=230.07 - 4.694*Q_2^2$

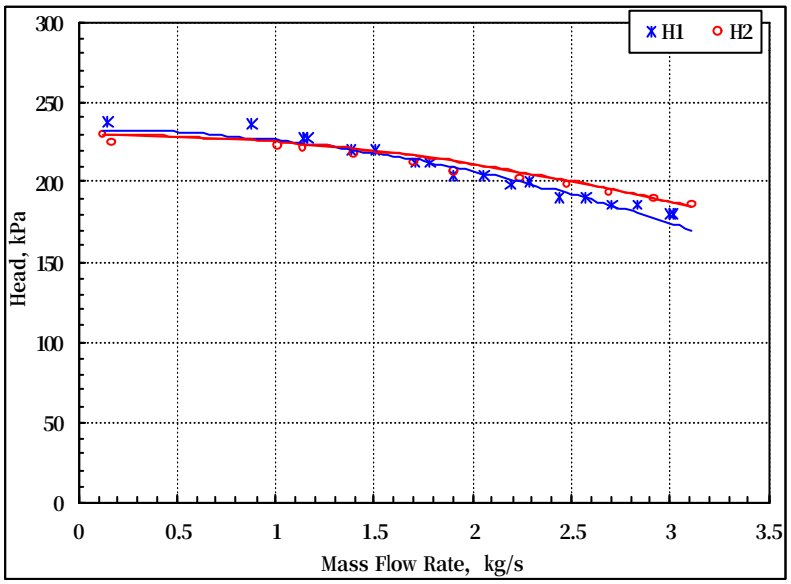


Fig. 3 Performance Curves for HWL Pumps

펌프 1번과 2번의 양정 곡선식의 평균 오차범위는 각각 1.6 %와 1.4 %를 나타내었으며 측정치와 잘 일치하였다.

### 4.2 이온교환기의 차압측정

이온교환기와 스트레이너에 흐를 수 있는 최대유량과 차압을 확인하기 위하여 펌프의 토출밸브를 조정하여 그림 4와 같이 유량변화에 따른 이온교환기와 스트레이너의 차압을 측정하였다. 배관 루프 1번과 2번의 최대유량은 각각 2.54 kg/s 및 2.32 kg/s를 나타내어 설계유량 (2 kg/s)을 만족하였다. 유량변화에 따른 이온교환기 및 스트레이너의 차압변화는 유사한 값으로 나타내었지만 2번 루프의 차압이 더 많이 걸린다. 그 이유는 이온수지의 크기 및 장전량과 이온교환기 및 스트레이너의 제작특성에 의한 것으로 판단된다. 한편, 이온교환기 및 스트레이너에서 유발되는 차압이 큰 만큼 펌프의 양정에 부과되어 결과적으로 양정이 클수록 유량이 적어지는 펌프의 성능특성을 보여주고 있다.

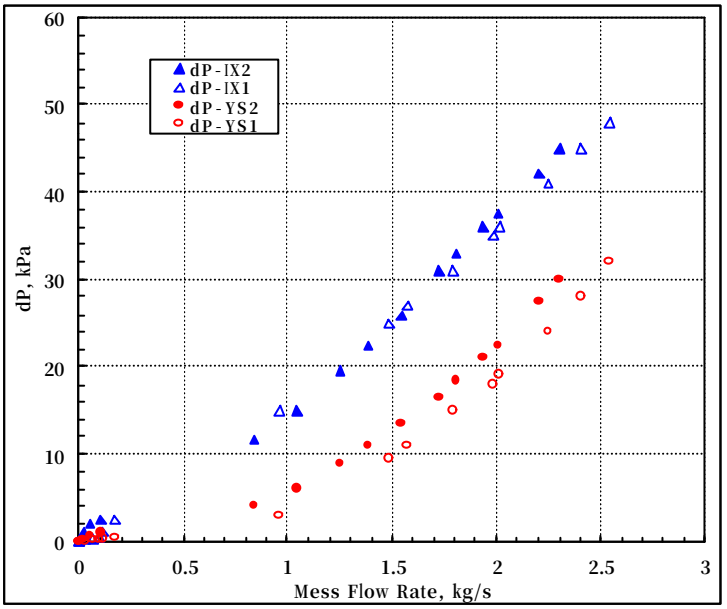


Fig. 4 Flow Characteristics of HWL System

다음으로 이온교환기와 스트레이너가 점차적으로 오염되었을 때 계통의 차압특성을 알기 위하여 그림 5와 같이 차압 측정위치를 변경하여 격리밸브에 의하여 이온교환기 및 스트레이너의 차압을 모의하였다. 그리고, 달시 (Darcy) 공식[7]으로부터 압력손실계수, K에 대하여 정리하면 식 (4-1)과 같으며 이를 이용하여 현장에서 측정한 유량 및 차압 자료로 계산한 압력손실계수를 이온교환기 및 스트레이너의 유체역학적인 고유 특성치인 압력손실계수로 간주하였다.

$$K = \frac{dP}{\left(\frac{v^2}{2g}\right)} \qquad (4\text{-}1)$$

그림 6에는 각 배관 루프에서 측정된 차압과 압력손실계수를 레이놀드 상수 대신에 실제 유량에 대하여 나타내었다[8]. 설계유량을 모의하였을 때 1번 루프의 이온교환기 및 스트레이너의 차압

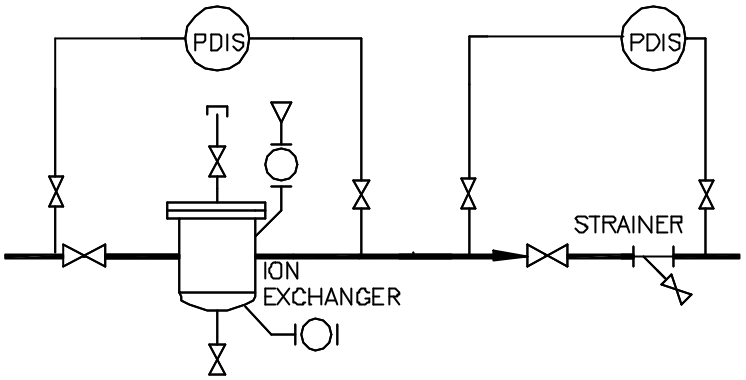


Fig. 5 Schematic Dia. for Diff. Pressure Test

은 모두 96 kPa를 지시하였으며 그 때의 압력 손실계수는 151이었다. 그리고 2번 루프의 경우도 유사한 경향을 보였으며 이온교환기 및 스트레이너의 차압은 각각 88 kPa와 80 kPa를 나타내었으며 압력 손실계수는 각각 143와 131이었다. 고차압은 이온수지 등이 유출되어 막히는 경우에 발생하며 이 때에는 예비 이온교환기로 교체하여야 한다. 그리고, 펌프 한 대에 이온교환기 한 대를 운전하는 경우에도 유량이 많아 고차압이 발생할 수 있으므로 이온교환기 2대를 운전하여 유량을 적절히 배분하여야 한다.

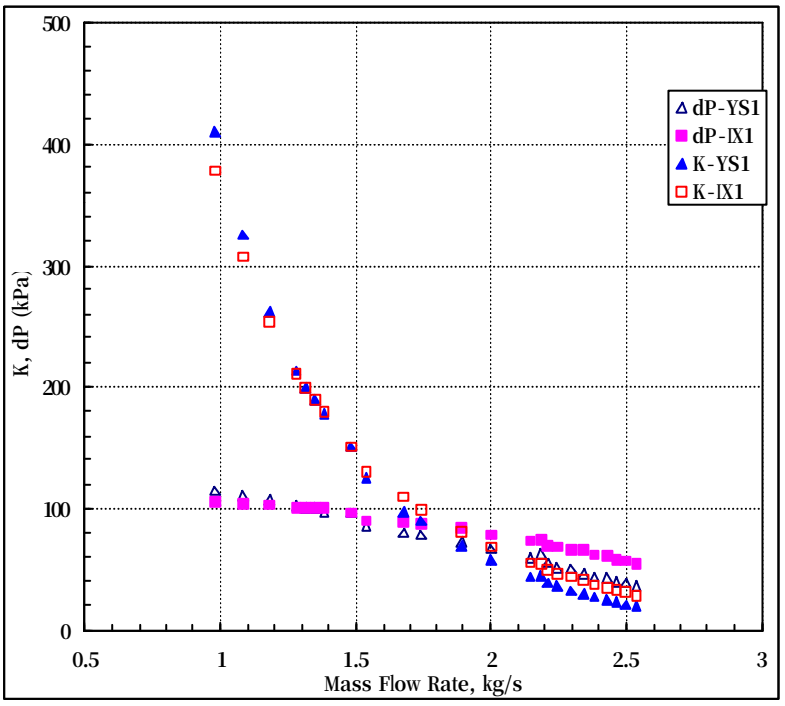


Fig. 6 K of Ion Exchanger and Strainer in Train #1

### 4.3 유동해석

펌프의 유량변동에 따른 이온교환기 및 스트레이너의 차압과 압력손실계수를 정리하면 표 1과 같다. 상용화된 Flow Network Analysis 프로그램[5]으로 최대유량으로 운전하는 경우와 이온교환

기 및 스트레이너가 오염되어 설계유량으로 흐르는 경우를 모의하여 각각 해석하였다.

Table 1 Test Results after Installation of Ion Exchanger

| 배관 루프 | 운전방법 | 유량 kg/s | 양정 kPa | 이온교환기차압, kPa (압력손실계수) | 스트레이너차압, kPa (압력손실계수) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 최대 유량운전 | 2.54 | 191 | 54 | 36 |
| | | | | (29) | (19) |
| | 설계유량 모의운전 | 1.44 | 219 | 96 | 96 |
| | | | | (151) | (151) |
| 2 | 최대유량 운전 | 2.3 | 202 | 47 | 35 |
| | | | | (30) | (23) |
| | 설계유량 모의운전 | 1.44 | 217 | 88 | 80 |
| | | | | (143) | (131) |

해석결과는 표 2와 같으며 이온교환기 및 스트레이너의 격리밸브에 의해서 모의된 압력손실계수를 사용하여도 배관루프 1번과 2번은 각각 최대 9 %와 5 %의 오차범위 내에서 실험값과 잘 일치하였다. 모의양정과 유량의 계산값은 양정 곡선식에 의해 계산되므로 이러한 오차를 줄이기 위해서는 펌프 성능곡선이 정확할수록 오차범위도 적게 나타날 것으로 판단된다.

Table 2 Results of Flow Network Analysis

| 배관 루프 | 내용 | 최대유량 운전 | | | 설계유량 모의운전 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 실험결과 | 해석결과 | 오차 % | 실험결과 | 해석결과 | 오차 % |
| 1 | 유량, kg/s (gpm) | 2.54 (40.26) | 2.32 (36.79) | 8.6 | 1.44 (22.83) | 1.31 (20.78) | 8.9 |
| | 양정, kPa (psi) | 191 (27.72) | 198 (28.78) | 3.8 | 219 (31.78) | 221 (32.18) | 1.3 |
| 2 | 유량, kg/s (gpm) | 2.302 (36.49) | 2.32 (36.81) | 0.8 | 1.44 (22.83) | 1.37 (21.69) | 4.9 |
| | 양정, kPa (psi) | 202 (29.31) | 205 (29.73) | 1.4 | 217 (31.49) | 221 (32.12) | 2.0 |

### 4.4 온수기 열용량 및 고온층 형성시험

온수기의 전압 ( $V$)과 전류 ( $A$)를 측정하여 전기적으로 온수기 열용량을 식 (4-2)로 계산할 수 있다.

$$q = \sqrt{3} \cdot V \cdot A, \qquad (4\text{-}2)$$

온수기를 가동하여 토출온도가 안정된 상태에서 온수기의 전압과 전류는 각각 440 V와 39.5 A를 지시하였다. 3상이므로 열용량은 30 kW를 상회하는 것으로 계산되었다.

고온층 온도는 그림 7과 같이 작업수조 온도감지기 (333-TE05)와 고온층 출구 온도감지기 (347-TE03)로 측정되었다. 고온층 두께 1.2 m 이하의 온도는 고온층 하부에서 5.9 m 아래에 설치된 침니상부 온도감지기 (331-TE01)로 측정되었으며 원자로 냉각펌프 입구 온도감지기 (331-TE12/TE13)로 원자로 수조 출구온도가 측정되었다. 그리고, 원자로 냉각수 열교환기 후단의 온도감지기 (331-TE036)로 원자로 수조의 입구온도가 측정되었다.

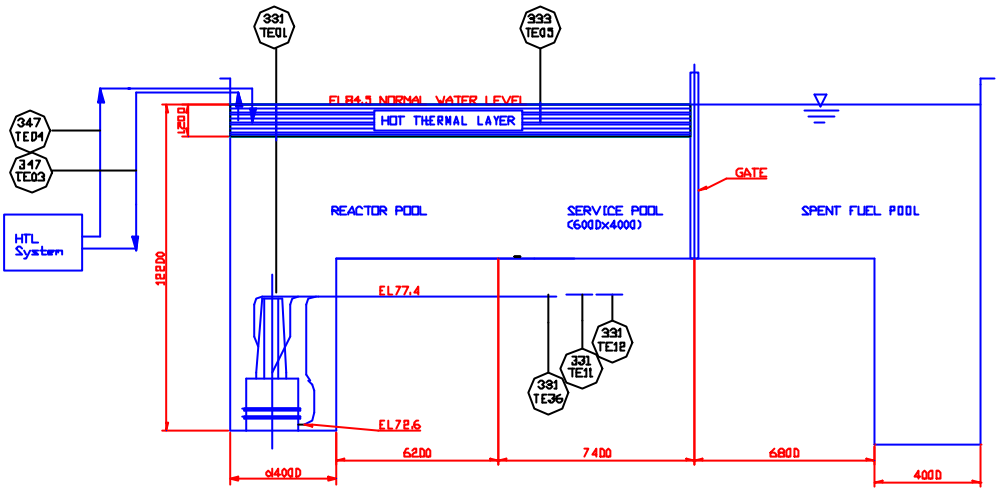


Fig. 7 Location of Temperature Elements

그림 8에는 이온교환기를 설치한 다음 온도감지기를 이용하여 고온층 형성을 확인하기 위하여 각 지점의 온도를 원자로 가동시간에 따라 측정한 결과를 도시하였다. 고온층 출구온도와 작업수조 온도는 동일한 온도를 지시하였으며 실제적인 고온층 온도를 표시하였다. 원자로가 가동되기 전에 고온층 온도는 43 ℃로 가열되었으며 고온층 아래의 냉각수는 38 ℃를 유지하였다.

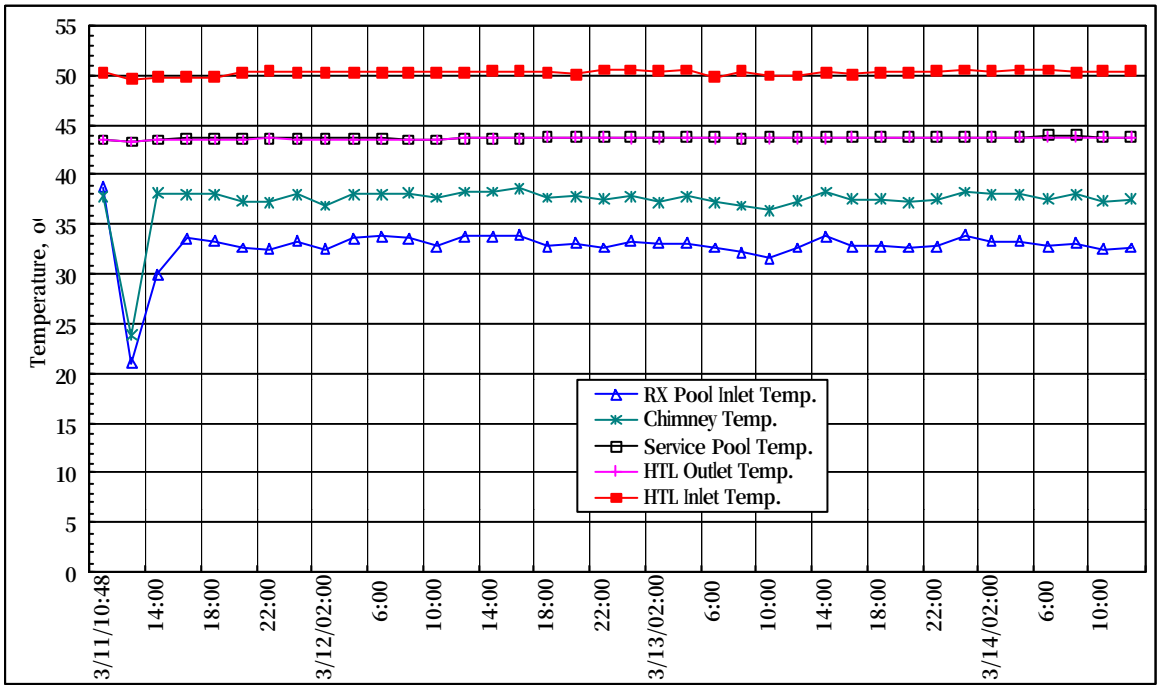


Fig. 8 Temperature Variation of HWL under 20 MW

원자로 냉각계통과 2차 냉각계통을 가동하였을 때에는 고온층 아래의 냉각수는 냉각계통에 의해 냉각되어 약 20 ℃ 로 낮아졌지만 원자로 가동 후 수조하부 온도와 침니상부 온도는 각각 33 ℃와 38 ℃로 유지되었다. 고온층 온도는 원자로를 가동하여 냉각수 계통이 작동되어도 거의 영향을 받지 않고 일정온도로 고온층이 유지됨을 알 수 있다.

그리고, 온수기 입출구 온도변화와 유량을 측정하여 식 (4-3)으로 열전달 관계식을 이용하여 열역학적으로도 온수기의 용량을 계산해 보았다.

$$q = Q \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \qquad (4\text{-}3)$$

고온층 입출구 온도, $T_1$과 $T_2$는 각각 43 ℃와 50 ℃를 유지하고, 펌프 한 대 가동시의 유량, $Q$가 2.13 kg/s이므로 43 ℃의 비열, $C_p$는 4.18 kJ/kg℃를 고려하면 열출력은 30 kW를 상회하므로 온수기는 정상적으로 작동되었다.

따라서, 온수기가 전기적으로나 열역학적으로도 성능을 유지하고 고온층 온도가 일정온도를 유지하므로 정상적으로 고온층이 형성되는 것으로 판단된다.

### 4.5 이온교환기에 의한 수조 방사선 준위의 저감효과

수조 고온층을 처음 설치하였을 때 수조 방사선은 기대한 만큼 저감되지 못하였다. 노심 우회유량이 자연대류 현상에 의해 수조표면으로 상승하는 것을 억제하기 위하여 고온층을 형성하였으나 수조 표면의 방사선 준위는 원자로 냉각수 정화계통의 유동, 정지봉 구동펌프의 유동, 수력이송장치의 냉각수 유동은 펌프에 의해 강제적으로 고온층 수조수와 그 이하의 수조수를 유동시킴으로서 충분히 저감될 수 없었다.

그림 9는 이러한 요소들을 고온층 이하에서 이루어지도록 조정하고, 냉각수 정화유량을 약 40 kg/s[8]로 조정 (조정 전 설계유량: 77 kg/s)한 다음 이온교환기 설치 전 1개월간 운전한 자료 중 대표적인 수조상부 방사선의 준위를 보여 주고 있다. 고온층의 온도는 약 43 ℃로 유지되었으며 침니상부 온도는 34 ℃로 유지되었다. 수조상부 방사선 준위는 수조상부에 설치된 세 개의 이온 챔버 (RU-10A/10B/10C를 이용하여 측정되었고, 점점 누적되어 가는 경향을 보였으며 약 20000 nGy/h로 유지되었다. 고온층 설치 전과 비교하여 4분의 1의 수준(설치 전: 75000 nGy/h[10])으로 감소되었지만 여전히 수조수의 주요 핵종은 Na-24이었다. 그리고, 세 개의 이온 챔버에 의해 측정한 방사선 준위는 A와 B 채널이 동일하지만 C 채널이 A, B 채널과 비교하여 낮은 값을 지시하였다. 이는 각 채널 주변에 설치된 정지봉 배관이 수조표면에서 6 m 아래의 냉각수를 흡입하므로 상대적으로 거리가 먼 C 채널의 방사선은 낮게 지시되어 도시하지 않았다.

그림 10은 이온교환기 설치 후 1개월간의 운전기간 중 수조상부 방사선 준위의 대표적인 상태를 보여주고 있다. 설치 전과 비교하여 수조상부 방사선 준위는 약 10000 nGy/h이하에서 더 이상 증가하지 않고 안정적인 상태를 보였다. 이러한 변화는 이온교환기 전후 단의 시료채취구 (AP01-AP04)를 이용하여 100 cc씩 채취하여 핵종 분석한 결과[11]로 설명할 수 있다. 채취된 시료에서의 주요 방사선원은 입자성 방사성 핵종인 Na-24 (9.42 Bq/cc)와 기체상 방사성 핵종인 Ar-41 (0.98 Bq/cc)과 Xe-135 (0.926 Bq/cc)가 검출되었다. 이온교환기에 의해 입자성 방사선은 흡착되었지만 기체 방사선은 흡착되지 않았다. 따라서 그림 9에서 보여주는 바와 같이 수조 방사선이 계속적으로 증가한 원인은 Na-24가 제거되지 못하고 반감기에 의해서 자연 소멸되므로 생

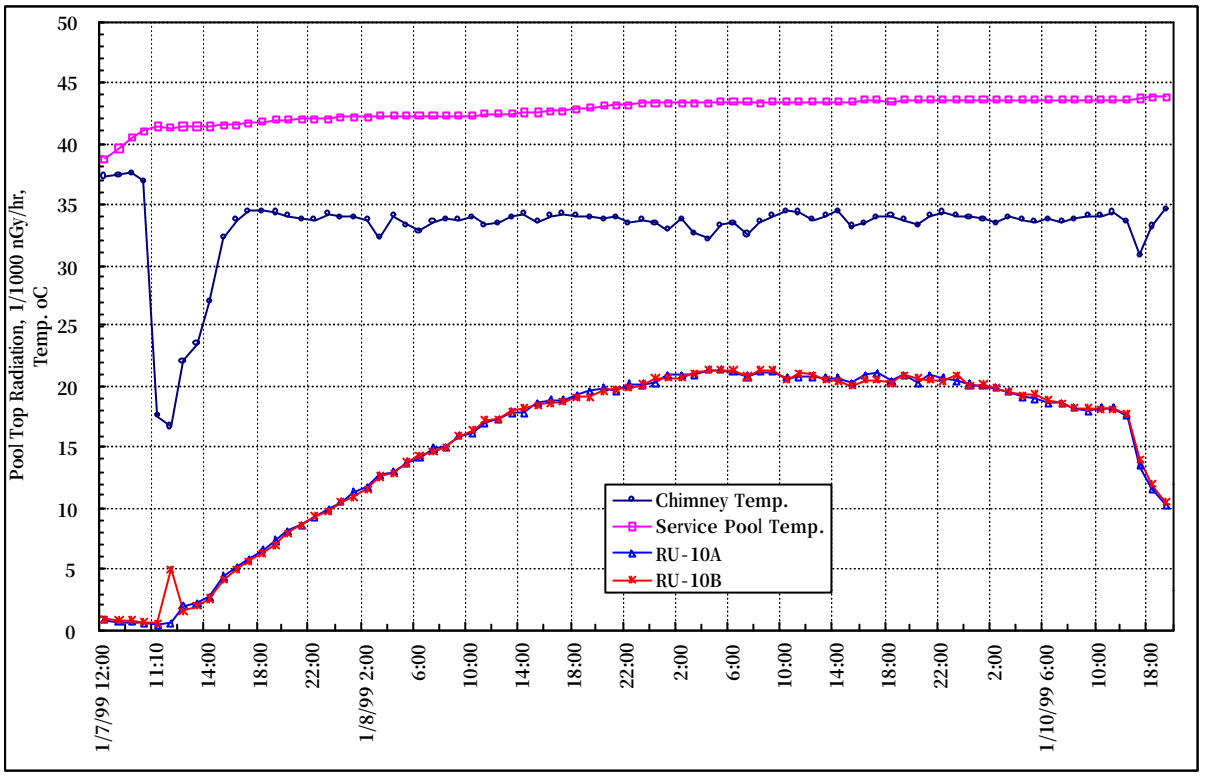


Fig. 9 Pool Top Rad. before Installation of Ion Exchanger

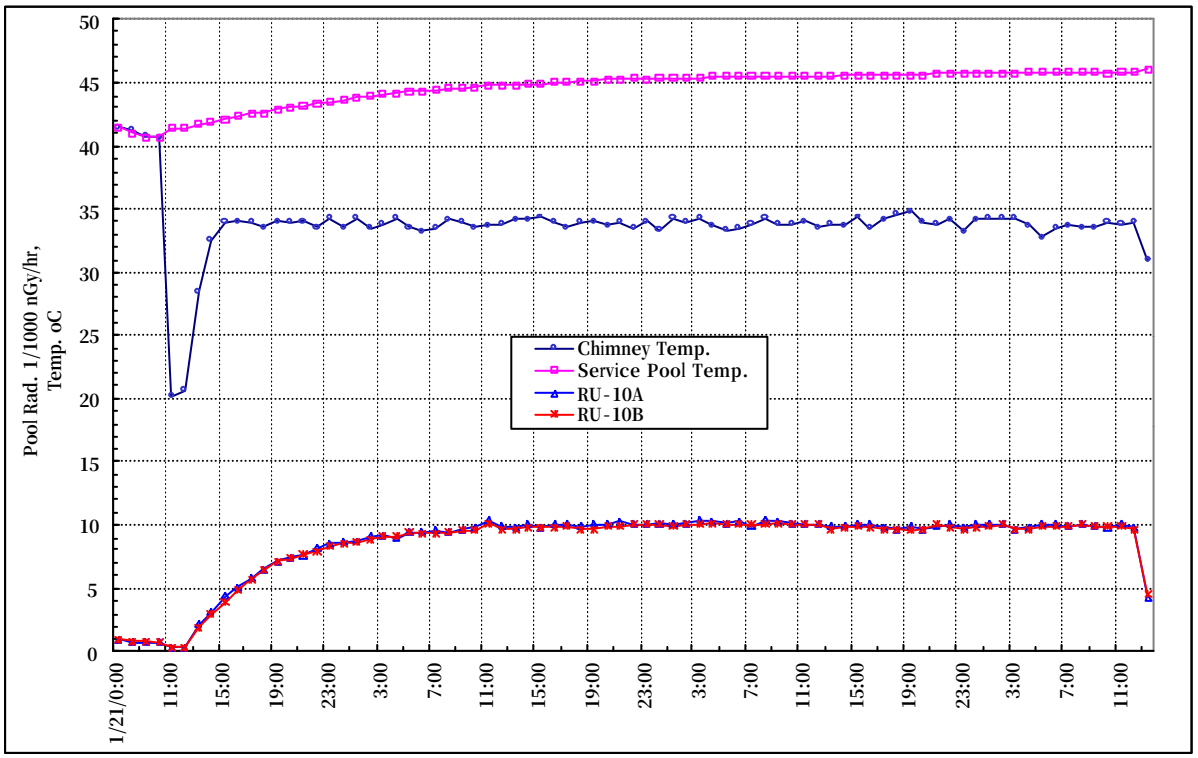


Fig. 10 Pool Top Radiation after Installation of Ion Exchanger

산과 소멸을 반복하면서 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이온교환기를 설치한 후에는 Na-24가 흡착되어 운전 후 하루가 경과하였을 때 생산과 소멸이 평형상태를 이루어 안정적인 경향을 보였으며 운전기간이 길어도 10000 nGy/h이하의 방사선 준위를 유지할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

원자로 수조상부에 고온층을 형성하고 수조상부의 방사선을 저감시키기 위하여 이온교환기를 설치한 후 성능시험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 수조 고온층 계통에 이온교환수지를 추가 설치하여도 설계유량을 유지하여 계통기능에 영향을 미치지 않으며 수조상부에 5 ℃ 이상의 온도차를 유지할 수 있는 수조 고온층이 형성되었다.
2) 수조 고온층 계통의 순환펌프에 대한 2 %오차 범위 내에서 잘 일치하는 양정곡선을 구하여 펌프의 성능을 입증하였으며 이에 따라 계통의 압력손실에 따른 유량변화를 예측할 수 있었다.
3) 이온교환기 및 스트레이너의 압력손실계수는 달시 (Darcy) 공식으로 계산하였으며 이를 이용하여 유동해석을 하였을 때 압력손실에 따른 유량변화는 현장 시험결과와 비교하여 10 % 오차 범위 내에서 예측할 수 있었다.
4) 수조 고온층 계통에 이온교환기를 추가하므로서 수조 방사선의 주요 핵종인 Na-24를 포획하고 24 시간 이내에 포화상태에 도달하여 수조상부 방사선 준위는 10000 nG/hr 이하에서 안정상태를 유지하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고 문헌

[1] 유 성연, 1998, "하나로 (HANARO)", 대한기계학회, 기계저널, vol.38, No.11, P64-65.
[2] C. Park, H. I. KIM, "하나로 수조상부 고온층 형성을 위한 가열기 용량 결정", 내부통신문, SM-TS-063, 1995. 11.
[3] 박 용철, "고온층 이온교환기 설치방안", 내부통신문, HAN-RS-CR-98-011, 1998. 3. 25.
[4] 손 병진, "유체역학", 탑출판사, 1978, p482
[5] Flow Network Analysis, 5.0C, "User's Manual", Kelix Software Co., 1985
[6] Hooper, W. B., "The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings," Chem. Engr. ,Aug. 24, 1981, pp. 97-100
[7] 박 용철, 조 성안, 1998, "유체기계기술사", 청운문화사 발행, 페이지 127.
[8]H. J. Chung, S. Cho, S. K. Yang and M. K. Chung, Turbulent Flow in a Axially Finned Rod and Bundle with Spacer Grids, *j. Korean Nuclear Society*, **30**, 332 (1998).
[9] 원자력연구소, "97 하나로 운영", 운영보고서, KAERI/MR-314/97, 1998. pp 78-81.
[10] 원자력연구소, "98 하나로 운영", 운영보고서, KAERI/MR-328/98, 1999. pp 58-63.
[11] 박 상준, "수조 고온층 계통의 방사선 핵종 분석", HAN-RO-CR-99-05, 내부통신문, 1999. 2. 23.