

# 고온층계통의 이온교환기에 의한 연구로 수조 상부 방사선의 저감효과에 대한 연구

박용철\* · 박종호\*\*

## Study for Reduction Effect of Pool Top Radiation in Research Reactor by Using Ion Exchanger of Hot Water Layer

Yong-Chul Park\*, Jong-Ho Park\*\*

*Key Words: Hot Water Layer (고온층), Pool Top Radiation (수조 상부 방사선), Ion Exchanger (이온교환기)*

### ABSTRACT

A hot water layer (HWL hereinafter) was installed at the depth of 1.2m from the pool surface to reduce the radiation level at the pool top. After 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. It was confirmed by the performance test of the pump and the measurement of the pressure difference through the Ion Exchanger and the strainer, that the flow characteristics of HWL system was not adversely affected after the system modification. Also the flow analysis using the pressure loss coefficients of the Ion Exchanger and strainer, calculated by the Darcy formula, could predict the flow variations by pressure changes within 10% error in comparison with the field test results. It was also confirmed that HWL was maintained with the depth of 1.2m from the pool surface because each electric water heater was electrically and thermodynamically maintained at 30kW and the temperature of HWL was maintained with 5°C higher temperature than that of pool water. Finally, it was confirmed that the pool top radiation was saturated and stabilized below 10000 nG/hr within 24 hours as the ion exchanger captured the main nucleus, Na-24 and purified the pool water of HWL.

### 1. 서 론

하나로<sup>(1)</sup>는 1995년 2월 5일 첫 임계에 도달한 이후 출력 상승시험을 수행하였다. 그 과정에서 원자로의 출력이 상승함에 따라 수조 표면의 방사선은 원자로 보호계통의 정지변수를 초과하는 현상이 발생하였다.

그 원인은 원자로 냉각수의 10%가 노심을 우회하여 수조로 방류되어 냉각펌프의 흡입력에 의하여 침니 상부를 통하여 침니 하부에서 노심을 통과한 90%의 냉각수와 함께 흡입됨으로써 우회유동은 방사성 기체가 침니 상부로 솟구치는 것을 억제하는 기능을 한다. 그러나, 수조 상부보다 높은 온도의 우회냉각수 일부가 자연 대류현상에 의하여 수조 상부로 상승함으로써 수조 표면의 방사선 준위가 증가되었다. 방사선 준위를 낮추기 위하여 수조 표면에 고온층을 형성하였으나 원

\* 한국원자력연구소

\*\* 충남대학교 기계공학과 교수

자료실 방사선 준위는 여전히 수조수에서 나오는 방사선이 대부분을 차지하였으며 주요 핵종은 Na-24이었다. 이를 제거하기 위하여 고온층 계통의 여과기 대신에 이온교환기를 설치하였다.

본 논문에서는 개선된 고온층 계통의 펌프 성능시험, 이온교환기 및 스트레이너의 차압 측정, 현장 측정자료를 이용한 유동해석으로 계통의 특성을 확인하고 이온교환기 설치 후 수조 방사선의 저감 효과에 대하여 기술하였다.

## 2. 계통개요

수조 상부에 고온층을 형성하는 경우 열손실은 수조 표면에서의 증발열에 의한 열손실이 전체 열손실의 75%를 차지하였다. 그 외에 수조 표면의 대류에 의한 열전달, 수조 벽면과의 열전달 및 고온층을 형성하였을 때 고온층 하부와 수조수 사이의 대류 열전달에 의한 열손실 등을 포함하여 27.2kW이었다<sup>(2)</sup>. 이 열손실을 보상하고, 수조수 온도보다 5°C 이상 높은 고온층을 수조 표면으로부터 1.2m 깊이로 형성하기 위하여 30kW의 온수기를 선정하였으며 순환유량을 1.44 kg/s로 정하였다. Fig. 1에 개진된 수조 고온층 계통의 흐름도를 도시하였다. 주요 기기인 100% 용량의 순환펌프,

이온교환기 및 온수기를 병렬로 구성하였다. 이온수지는 아황산염(sulphite acid)과 삼중 메틸 암모늄(trimethyl ammonium)을 각각 양이온과 음이온으로 사용하였다. 수조 고온층 계통의 수조수 흡입관과 토출관은 고온층 중심 위치인 수조 표면으로부터 0.6m 깊이에 설치하였다. 순환펌프의 입구와 온수기 출구 배관에 각각 온도 감지기(TE03/04)와 온수기 후단에 유량계(FE01)를 설치하여 계통의 열용량을 점검하였다. 이온교환기의 기능을 유지하기 위하여 이온교환기 후단에 전도계(CE01/02)를 설치하고 수지의 유출을 막기 위하여 스트레이너(YS01/02)를 설치하였으며 차압계(PDIS03/04/05/06)를 각각 설치하여 차압 손실이 많아지는 것을 감시하도록 시설을 개선하였다<sup>(3)</sup>.

## 3. 유동해석

기존에 설치한 여과기를 제거하고 이온교환기와 스트레이너를 설치함으로써 차압이 증가하여 펌프의 양정이 증가하면 유량이 감소하여 계통의 성능을 유지하기 어렵다. 그래서, 압력변화에 따른 유량변화를 예측하기 위하여 유동해석을 수행하였다. 유체가 임의의 구간을 흐를 때 압력변화를 일으키는 각 요소의 에너지 변화상태를 압력변화로 나타내면 식 (1)과 같다.<sup>(4)</sup>

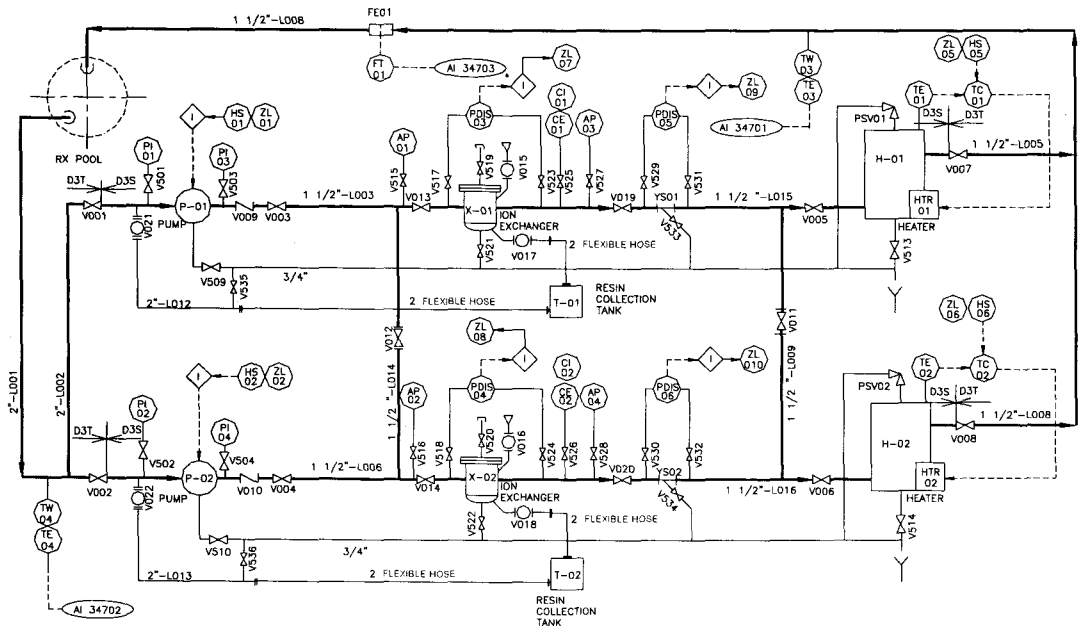


Fig. 1 P&ID for hot thermal layer system

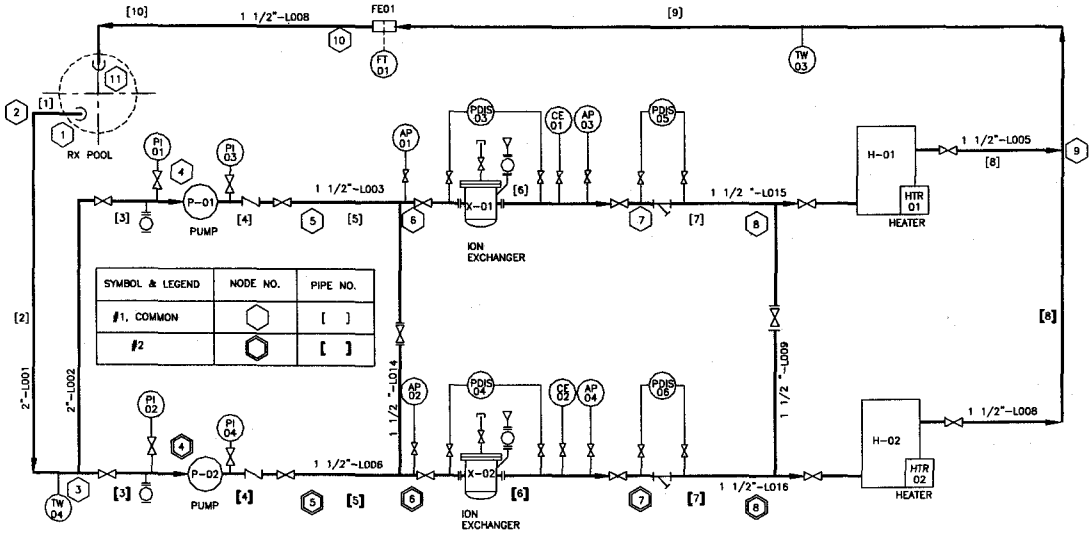


Fig. 2 Node diagram

$$(P_i - P_j)_{total} = \left[ \frac{b \cdot f_{ij} \cdot L_{ij}}{D_{ij}^5} + \sum K_{ij} \right] \times \left[ a \times \rho \times \frac{Q_{ij}^2}{D_{ij}^5} \right] - d \times \rho \times (Z_i - Z_j) - (A_{ij} + B_{ij} \times Q_{ij}^2) \quad (1)$$

상기 식의 우변 2항과 3항은 수두차에 의한 위치 에너지와 펌프에 의한 기계적 에너지이다. 우변 1항은 손실 에너지에 의한 압력변화로서 Hazen-William의 지수식<sup>(5)</sup>으로 나타내었으며 a와 b는 단위환산을 위한 상수이다. 손실 에너지의 마찰 손실계수는 관마찰 손실과 부차적 마찰 손실의 합으로 표시된다. 관마찰 손실 계수,  $f_{ij}$ 는 Hazen-William의 실험식<sup>(5)</sup>으로서 관의 거칠기를 관의 재질에 따라 실험계수가 지정되어 정해진다. 그리고, 부차적 압력 손실계수,  $K_{ij}$ 는 "K" Method<sup>(6)</sup>를 적용하였으며 관경과 레이놀즈 수의 함수로 표시된 실험식이다. 식 (1)을 유량,  $Q_{ij}$ 에 대하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$Q_{ij} = \left( \frac{E_{ij}}{C_{ij}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $C_{ij} = \left[ \left( \frac{a \times \rho}{D_{ij}^5} \right) \left( \frac{b \times f_{ij} \cdot L_{ij}}{D_{ij}^5} + \sum K_{ij} \right) - B_{ij} \right]$ ,  $E_{ij} = [(P_i - P_j) + d \times \rho \times (Z_i - Z_j) + A_{ij}]$ 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 해석점의 압력변화와 유량을 계산하였다. 유동해석은 각 배관루프에 대하여 Fig. 2와 같이 고도, 배관 구경 또는 유량의 변화가 예상되는 점을 기준으로 11개의 해석점으로 나누었다. 해석점 1과 11은 고온층 배관의 입출구 점으로서 유동해석의 경계면이며 수심이 0.6m인 점이므로 0.6mAq의 수두압을 받고 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 성능시험

순환펌프의 성능은 현장실험으로 양정곡선을 구하여 유량과 양정을 확인하였다. 최대유량은 순환펌프 1대 운전 시 이온교환기와 온수기를 각각 2대를 사용하는 경우이다. 각 펌프의 토출밸브를 조정하여 인위적으로 차압을 유발하고 그 때의 유량변화를 Fig. 3에 도시하였다. 펌프 1번과 2번의 최대유량은 각각 3kg/s와 3.1kg/s이며 펌프 2번이 0.1kg/s 많이 발생하였다. 펌프의 설계유량인 1.44kg/s일 때 펌프 1번 및 2번의 양정은 각각 219kPa 및 217kPa를 나타내었으며 정격양정 245kPa(25mAq) 이하를 지시하여 펌프의 성능은 모두 만족한 것으로 판단된다. 펌프의 양정곡선 관계식은 다음과 같이 현장 측정점을 기준으로 2차 포물선의 식으로 표시하였으며 우변 1항은 차단양정(shutoff

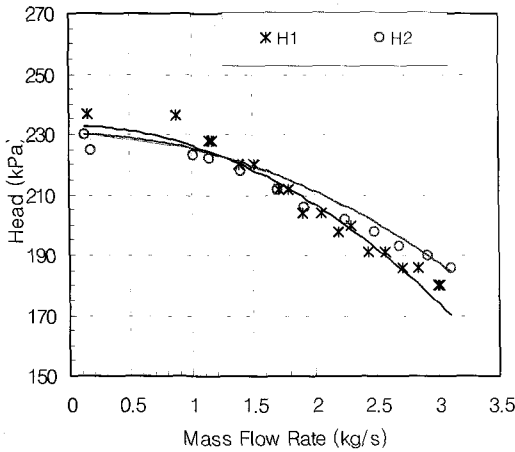


Fig. 3 Performance curves for HWL pumps

head)을 표시하며 우변 제 2항은 유량변화에 따른 압력 변화율을 나타낸다.

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

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

그리고 펌프 1번과 2번의 양정곡선의 평균 오차 범위는 각각 1.6%와 1.4%를 나타내었다.

#### 4.2 이온교환기의 차압측정

이온교환기와 스트레이너에 흐를 수 있는 최대유량과 차압을 확인하기 위하여 펌프의 토출밸브를 조정하여 Fig. 4와 같이 유량 변화에 따른 이온교환기와 스트레이너의 차압을 측정하였다. 배관 루프 1번과 2번의 최대유량은 각각 2.54 kg/s 및 2.32 kg/s를 나타내어 설계 유량(2 kg/s)을 만족하였다. 유량변화에 따른 이온교환기 및 스트레이너의 차압변화는 전·후단에 설치된 차압계(모델명: P623, 우진계기, 정확도:  $\pm 1.5\%$  of full scale,  $\pm 1.5$  kPa)로 측정하였다. 차압의 변화는 유사한 경향을 나타내었으며 유량이 적은 경우에는 차압변화도 적고 유량이 많아질수록 차압도 많이 발생함을 알 수 있다. 2번 루프의 차압이 더 많이 발생하였는데 그 이유는 이온수지의 크기 및 장전량과 이온교환기 및 스트레이너의 제작 특성에 의한 것으로 판단된다. 한편, 이온교환기 및 스트레이너에서 유발되는 차압이 큰 만큼 펌프의 양정에 부과되어 결과적으로 양정이 클수록 유량이 적어지는 펌프의 성능특성을 보여주고 있다.

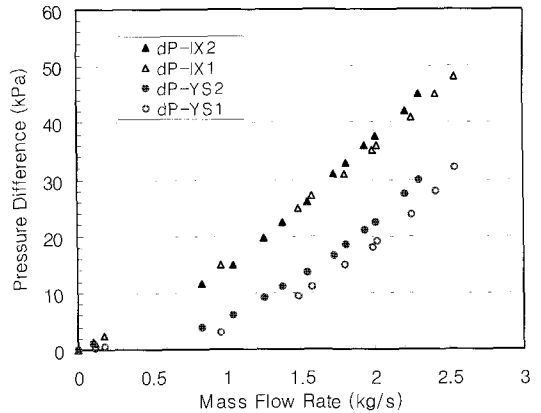


Fig. 4 Flow characteristics of HWL system

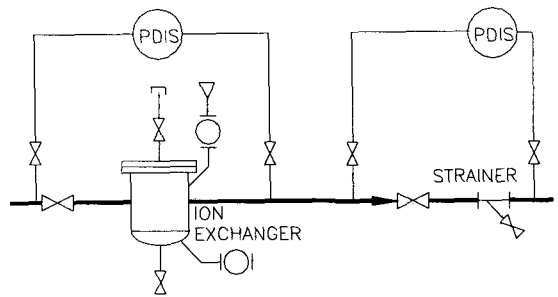


Fig. 5 Schematic dia. for diff. pressure test

다음으로 이온교환기와 스트레이너가 점차적으로 오염되었을 때 계통의 압력 특성을 알기 위하여 Fig. 5와 같이 차압 측정위치를 변경하여 차압을 측정하였다. 일정 유량이 흐를 때 이온교환기나 스트레이너의 유로면적이 이물질로 막혀 통과 면적이 작아지면 차압이 크게 발생되어 유량이 감소된다. 이온교환기와 스트레이너가 본 시설에 설치되어 방사선의 오염 등으로 이러한 상황을 실험하기 어렵다. 따라서, 이러한 상황을 모의하기 위하여 펌프의 토출밸브의 개도를 조정하였을 경우에는 밸브를 닫을수록 유로면적이 적게 되어 차압이 많이 걸리고 유량이 감소하지만 이온교환기나 스트레이너의 입구 유량이 감소된 상태이므로 차압이 적게 걸리고 유량이 많을수록 차압이 많이 걸리게 되어 실제 차압 특성과 반대가 된다. 그러나, 이러한 경우에도 차압 측정점을 펌프의 토출밸브 전단과 이온교환기나 스트레이너 후단의 차압을 측정하면 격리밸브를 포함하여 그 구간을 한 개의 구조물로 간주하면 모의가 가능할 것이다. 한편, 이온교환기나 스트레이너 가까이 설치된 격리밸브를 이용하면 더 간단하게 모의

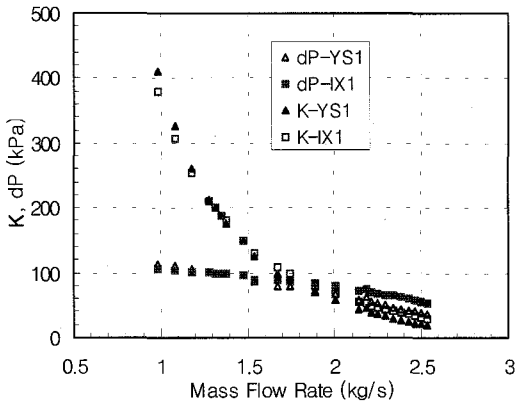


Fig. 6 K of Ion exchanger and strainer in train #1

할 수 있으므로 후자의 방법을 선택하였다.

그리고, Darcy공식<sup>(7)</sup>으로부터 압력 손실계수 k에 대하여 정리하면 식 (3)과 같다. 현장 측정자료를 이용하여 압력 손실계수를 구하여 이온교환기 및 스트레이너의 유체역학적인 고유 특성치인 압력 손실계수로 간주하였다.

$$K = \frac{dP}{\left(\frac{\rho v^2}{2}\right)} \quad (3)$$

각 배관 루프에서 측정된 차압과 압력 손실계수를 Fig. 6에 나타내었다. 설계유량 모의 운전 시 이온교환기 및 스트레이너의 차압은 1번 루프의 경우 모두 96kPa를 지지하였으며 그 때의 압력 손실계수는 151이었다. 그리고 2번 루프의 경우도 유사한 경향을 보였다. 이 물질에 의해서 이온수지가 막히거나 이온수지가 유출되어 스크린이 막히는 경우에는 차압이 커지게 되며 이 때에는 예비 이온교환기로 교체 운전하여야 한다. 그리고, 펌프 한 대에 이온 교환기 한 대를 운전하는 경우에도 설계유량을 상회하여 많은 유량이 흘러 차압이 커지게 되므로 2대의 이온교환기를 사용하여 적정 차압으로 운전하여야 한다.

### 4.3 유동해석

펌프의 유량변동에 따른 이온교환기 및 스트레이너의 차압과 압력 손실계수를 정리하면 Table 1과 같다. 상용화된 Flow Network Analysis 프로그램<sup>(8)</sup>으로 최대 유량으로 운전하는 경우와 이온교환기 및 스트레이너

Table 1 Test results after installation of ion exchanger

Train	Operating Method	Flow kg/s	Head kPa	dP. of Ion Exchanger, kPa (K)	dP. of Strainer, kPa (K)
1	Max. Flow	2.54	191	54 (29)	36 (19)
	Design Flow	1.44	219	96 (151)	96 (151)
2	Max. Flow	2.3	202	47 (30)	35 (23)
	Design Flow	1.44	217	88 (143)	80 (131)

Table 2 Results of flow network analysis

Train	Descript'n	Max. Flow			Design Flow		
		Test	Analysis	Error %	Test	Analysis	Error %
1	Flow kg/s	2.54	2.32	8.6	1.44	1.31	8.9
	Head kPa	19	198	3.8	219	221	1.3
2	Flow kg/s	2.30	2.32	0.8	1.44	1.37	4.9
	Head kPa	202	205	1.4	217	221	2.0

너가 오염되어 설계유량으로 흐르는 경우를 모의하여 각각 해석하였다.

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

### 4.4 온수기 열용량 및 고온층 형성시험

전기적으로 온수기 열용량을 점검하기 위하여 식 (4)를 이용하여 온수기의 열용량을 계산하였다.

$$q = \sqrt{ph} \cdot V \cdot A \quad (4)$$

온수기의 토출온도가 안정된 상태에서 온수기에 부착된 전압계와 전류계는 각각 440V와 39.5A를 지

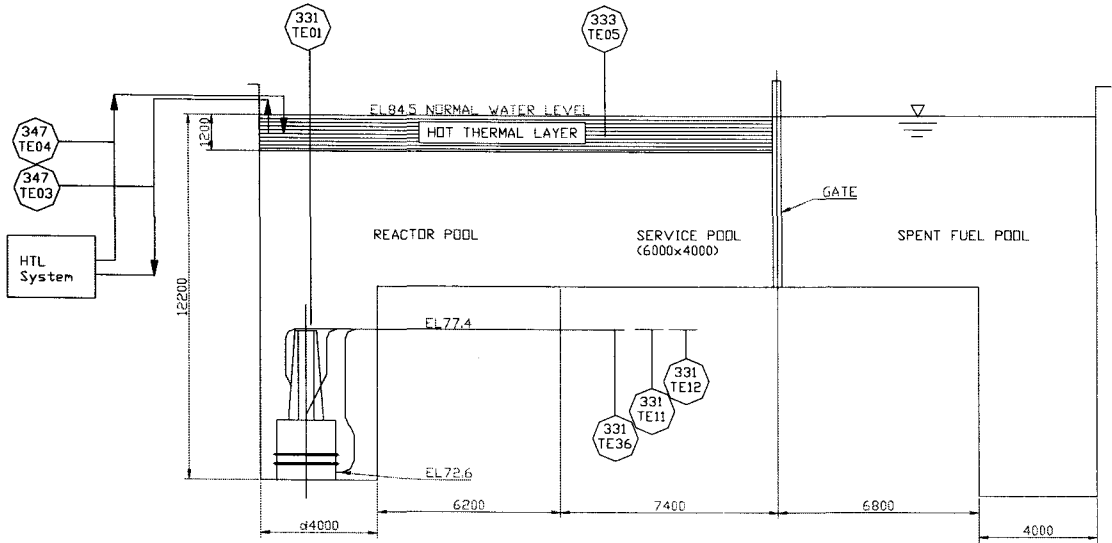


Fig. 7 Location of temperature elements

시하였으며 3상이므로 열용량은 30 kW를 상회하였다.

원자로 수조와 작업수조에 고온층이 형성되는지를 확인하기 위하여 고온층 온도는 Fig. 7과 같이 작업수조 온도 감지기(333-TE05)와 고온층 출구 온도 감지기(347-TE03)로 측정되었다. 고온층 두께 1.2m 이하의 온도는 고온층 하부에서 5.9m 아래에 설치된 침니 상부 온도 감지기(331-TE01)로 측정되었으며 원자로 냉각수 펌프 입구 온도 감지기(331-TE12/TE13)로 원자로 수조 출구 온도가 측정되었다. 그리고, 원자로 냉각수 열교환기 후단의 온도 감지기(331-TE36)로 원자로 수조 출구 온도가 측정되었다.

Fig. 8에는 이온교환기를 설치한 다음 고온층 형성을 확인하기 위하여 각 지점의 온도를 가동시간에 따라 측정된 결과를 도시하고 있다. 고온층 출구온도와 작업수조 온도는 동일한 온도를 지시하였으며 실제적인 고온층의 온도를 표시하였다. 원자로가 가동되기 전에 고온층은 43°C로 가열되어 유지되고 있으며 고온층 아래의 냉각수는 38°C를 유지되었다. 원자로 냉각계통을 가동하였을 때에는 고온층의 온도는 다소 낮아졌지만 원자로 가동 후에는 43°C로 안정되었다. 고온층 이하의 냉각수는 냉각계통에 의해 약 20°C로 낮아졌지만 원자로 가동 후에는 핵 반응열의 영향으로 수조 하부 온도는 33°C로 유지되었고 침니 상부 온도는 38°C로 가열되었다.

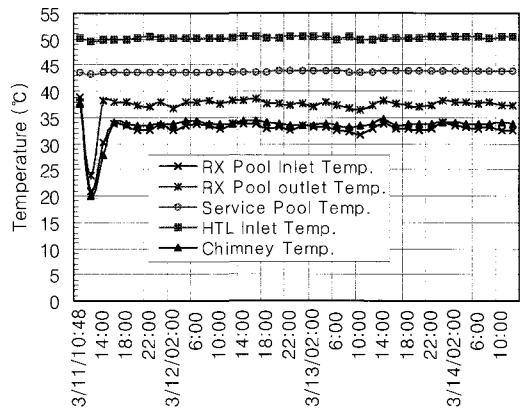


Fig. 8 Temperature variation of HWL under 20MW

다음으로 온수기의 입출구 온도 변화와 유량을 측정하여 식 (5)와 같이 열전달 관계식으로 열역학적으로 온수기의 용량을 계산하였다.

$$q = Q \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

고온층의 입구온도,  $T_2$ 는 50°C, 출구온도,  $T_1$ 은 43°C로 유지되었으며 펌프 한 대를 가동하여 2.13 kg/s의 유량( $Q$ )이 유지되므로 43°C의 비열( $C_p$ ), 4.18 kJ/kg·°C를 고려하면 한 대당 열 출력은 30 kW를 상회하여 온수기는 정상적으로 작동되었다.

따라서, 온수기가 전기적으로나 열역학적으로 성능이 유지되고, 고온층은 원자로 냉각계통에 영향을 받지 않고 침니 상부 보다 5°C 이상 높은 일정한 온도로 유지되므로 고온층이 형성되는 것으로 판단된다.

#### 4.5 고온층의 수조방사능 저감효과

수조 고온층을 처음 설치하였을 때 수조방사선은 기대한 만큼 저감되지 못하였다. 노심 우회유량이 자연대류 현상에 의하여 수조 표면으로 상승하는 것 외에도 원자로 냉각수 정화계통의 유동, 정지봉 구동 펌프의 유동, 수력 이송장치의 냉각수 유동 등은 펌프에 의하여 고온층 수조수와 그 이하의 수조수를 강제적으로 유동시킴으로써 수조 상부 방사능을 증가시켰다.

Fig. 9는 이러한 요소들을 고온층 이하에서 이루어지도록 조정하고 냉각수 정화유량을 40 kg/s<sup>(8)</sup>로 조정(조정 전 설계유량: 77 kg/s)한 다음 이온교환기 설치 후의 저감효과를 확인하기 위하여 설치 전 약 1개월간 운전한 기록 중 가장 대표적인 경향을 보여주고 있다. 원자로가 20 MW 운전시 고온층이 정상적으로 유지되고 있는 상태에서 수조 상부 방사선 준위는 약 10000 nGy/h를 지시하였으며 고온층 설치전의 약 75000 nGy/h<sup>(9)</sup>와 비교하면 약 7분의 1의 수준으로 감소되었지만 방사선의 추세는 점점 누적되는 경향을 보였다. 따라서, 현재의 운전 주기보다도 더 긴 운전 주기로 운전하는 경우 수조 상부 방사선 준위는 10000 nGy/h를 상회할 것으로 예상된다. 그리고, 수조 방사능을 측정하는 3개의 채널 가운데 C 채널이 A, B 채널과 비교하여 낮은 값을 가

지는 것은 주변에 설치된 정지봉 배관이 수조표면에서 6m 아래의 냉각수를 흡입하므로 상대적으로 거리가 먼 C 채널의 방사능은 낮게 지시되었다. 수조수와 관련된 계통의 유로 방향을 변경하고 정화유량을 조정 한 다음에도 수조수의 주요 핵종은 Na-24이었으며 이를 제거하기 위하여 이온교환기를 설치하였다.

Fig. 10은 이온교환기 설치 후 1개월간 운전기간 중 수조 방사선 준위의 대표적인 상태를 보여주고 있다. 설치 전과 비교하여 수조 방사선 준위는 약 10000 nGy/h 이하에서 더 이상 증가하지 않고 안정적인 상태를 보였다. 이러한 변화는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 이온교환기 전·후 단의 시료 채취구(AP01, AP02, AP03, AP04)를 이용하여 100 cc씩 채취하여 핵종을 분석한 결과<sup>(10)</sup>로 설명할 수 있다. 채취한 시료에서 주요 방사선 원은 입자성 방사선 핵종인 Na-24와 기체상 방사성 핵종인 Ar-41과 Xe-135가 검출되었다.

이온교환기를 지난 다음에는 입자성 방사선은 이온교환기에 의해 흡착되었지만 기체 방사선은 이온교환기에 의해 흡착되지 않고 통과되었다. 따라서, Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 수조 방사능이 계속적으로 증가한 원인은 Na-24가 제거되지 못하고 반감기에 의해서 자연 소멸되므로 생산과 소멸을 반복하면서 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 이온교환기를 설치한 후에는 Na-24가 흡착됨으로써 운전 후 하루가 경과하였을 때 수조표면 방사능은 포화상태를 보여 안정적인 경향을 보였으며 운전기간이 길어도 10000 nGy/h 이하의 방사선 준위를 유지할 것으로 판단된다.

따라서 이온교환기는 Na-24를 흡착하여 수조 상부 방사능을 저감시키고 있음을 알 수 있다.

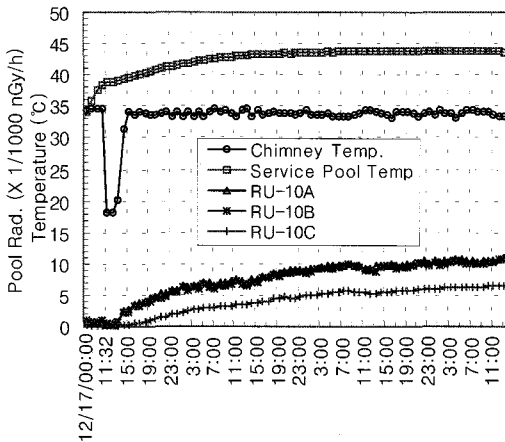


Fig. 9 Pool top rad. before installation of ion exchanger

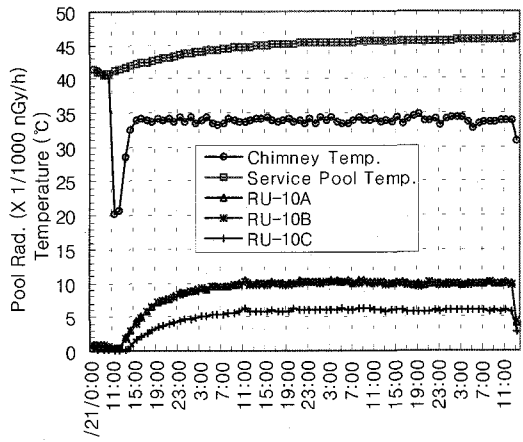


Fig. 10 Pool top rad. after installation of ion exchanger

## 5. 결 론

원자로 수조상부에 고온층을 형성하고 수조상부의 방사능을 저감시키기 위하여 이온교환기를 설치한 후 기능시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수조 고온층 계통에 이온교환수지를 추가 설치하여도 설계유량을 유지하여 계통성능에 영향을 미치지 않으며 수조상부에 5°C 이상의 온도차를 유지할 수 있는 고온층이 형성되었다.
- 2) 수조 고온층 계통의 순환펌프의 특성곡선으로 2% 오차범위로 펌프의 성능을 입증하였으며 이를 이용하여 계통의 압력변화에 따른 유량변화를 예측할 수 있었다.
- 3) 이온교환기 및 스트레이너의 압력 손실계수는 Darcy 공식으로 계산하였으며 이를 이용하여 유동해석을 하였을 때 압력손실에 따른 유량변화는 현장 시험결과와 비교하여 10% 오차범위 내에서 예측할 수 있었다.
- 4) 수조 고온층 계통에 이온교환기를 추가함으로써 수조방사능의 주요 핵종인 Na-24를 포획하고 24시간 이내에 포화상태에 도달하여 수조상부 방사능이 10000 nG/hr 이하에서 안정상태를 유지하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) 유성연, 1998, “하나로 (HANARO)”, 대한기계학회, 기계저널, Vol. 38, No. 11, pp. 64~65.
- (2) Park, C. and Kim, H. I., “하나로 수조상부 고온층 형성을 위한 가열기 용량 결정”, 내부통신문, SM-TS-063, 1995. 11.
- (3) 박용철, “고온층 이온교환기 설치방안”, 내부통신문, HAN-RS-CR-98-011, 1998. 3. 25.
- (4) 손병진, “유체역학”, 탐출판사, 1978, pp. 482.
- (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. Engrg., Aug. 24. 1981, pp. 97~100.
- (7) Brice Carnahan, H. A. Luther, James O. Wilkers, “Applied Numerical Methods,” John Wiley & Cons, Inc. 1969. pp. 171~177 and pp. 319~320.
- (8) 박용철, 조성안, 1998, “유체기계기술사”, 청운문화사 발행, pp. 127.
- (9) 원자력연구소, “97 하나로 운영”, KAERI/MR-314/97, 1998. pp. 78~81.
- (10) 원자력연구소, “98 하나로 운영”, KAERI/MR-328/98, 1999. pp. 58~63.
- (11) 박 상준, “수조고온층 계통의 방사능 핵종분석”, HAN-RO-CR-99-05, 내부통신문, 1999. 2.