

## 하나로 수조 방사선 준위의 저감 특성

박용철\*

### Reduction Characteristics of Pool Top Radiation Level in HANARO

Yong-Chul Park\*

*Key Words:* Hot Water Layer (고온층), Pool Top Radiation (수조 상부 방사선), Heat loss (열손실)

#### ABSTRACT

HANARO, 30 MW of research reactor, was installed at the depth of 13m in an open pool. The 90% of primary coolant was designed to pass through the core and to remove the reaction heat of the core. The rest, 10%, of the primary coolant was designed to bypass the core. And the reactor coolant through and bypass the core was inhaled at the top of chimney by the coolant pump to prevent the radiated gas from being lifted to the top of reactor pool. But, the part of core bypass coolant was not inhaled by the reactor coolant pump and reached at the top of reactor pool by natural convection, and increased the radiation level on the top of reactor pool. To reduce the radiation level by protecting the natural convection of the core bypass flow, the hot water layer (HWL, hereinafter) was installed with the depth of 1.2m from the top of reactor pool. As the HWL was normally operated, the radiation level was reduced to five percent (5%) in comparing with that before the installation of the HWL. When HANARO was operated at a higher temperature than the normal temperature of the HWL by operating the standby heater, it was found that the radiation level was more reduced than that before operation. To verify the reason, the heat loss of the HWL was calculated by Visual Basic Program. It was confirmed through the results that the larger the temperature difference between the HWL and reactor hall was, the more the evaporation loss increased. And it was verified that the radiation level above was reduced more safely by increasing the capacity of heater.

#### 1. 서 론

HANARO<sup>(1)</sup>는 1995년 2월 5일 첫 임계 (원자로내의 중성자수의 생산과 소멸이 평행인 상태)에 도달한 이후 출력 상승시험 중에 있으며 출력이 상승함에 따라 수조표면의 방사선 준위가 원자로 보호계통의 정지변

수를 초과하는 현상이 발생하였다. 그 원인은 냉각펌프의 흡입구가 침니 (chimney) 하부에 있어 원자로 냉각수의 90%가 원자로 하부에서 상부로 흐르면서 노심을 냉각한 다음 상향으로 흡입되고, 나머지 10%의 냉각수가 노심을 우회하여 침니상부를 통해 하향으로 흡입된다. 유동방향이 서로 반대이므로 노심 냉각수의 제트 유동을 억제하나 수조상부보다 높은 온도의 우회 냉각수 일부가 자연대류현상으로 수조상부로 상승함으로써 수조표면의 방사선 준위가 증가되기 때문이다.

\* 한국원자력연구소  
E-mail: ycpark@kaeri.re.kr

이 자연대류현상을 억제하기 위해 수조상부에 고온층을 형성하였으며 정상적으로 형성되었을 때에는 수조상부 방사선 준위가 설치 전과 비교하여 5%로 저감되었다<sup>(1)</sup>. 수조상부 방사선 준위를 더 낮추기 위해 고온층 온도를 정상운전 온도보다 상승시켰을 때, 수조상부 방사선 준위가 더 낮아짐이 발견되었다.

따라서, 본 논문에서는 고온층의 온도를 상승시키기 위해 실내의 온도에 따른 고온층의 열손실을 비주얼 베이직 프로그램<sup>(2)</sup>으로 계산하였으며 실제 운전자료와 비교 평가하여 적절한 운수기 용량을 정하고, 고온층 온도상승에 따른 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 고찰하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 증발손실

고온층은 자연대류를 억제하기 위하여 Fig. 1과 같이 원자로 수조, 수로 및 작업수조 상부에 형성되며 온도차에 의하여 고온층 표면의 증발손실 ( $Q_e$ )과 대류 열전달 손실 ( $Q_c$ ), 수조 벽을 통한 열전달 손실 ( $Q_s$ ) 및 고온층 저면에서의 대류 열전달 손실 ( $Q_b$ )이 발생한다. 이 때의 열평형 방정식은 식 (1)과 같으며 운수기로 가열 ( $Q_h$ )하여 손실열량을 보상함으로써 고온층이 형성된다.

$$Q_h = Q_e + Q_c + Q_s + Q_b \quad (1)$$

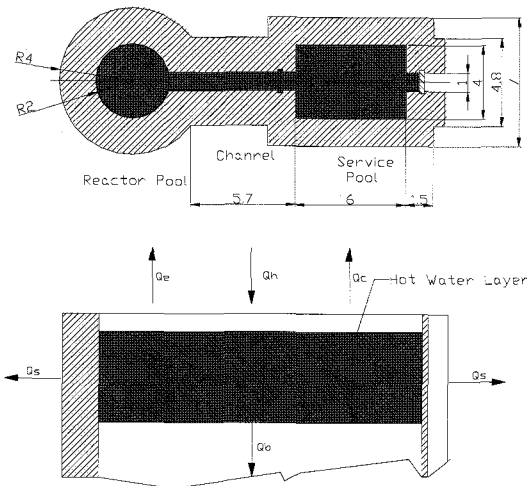


Fig. 1 Heat balance of hot water layer (unit : m)

고온층 표면은 Fig. 1에서와 같이 고온층과 원자로 실 공기의 온도차에 의한 포화 증기압차 ( $P_h - P_a$ )로 증발되므로 열손실은 식 (2)와 같이 표시된다<sup>(3)</sup>.

$$Q_e = A_h(95 + 0.425V_a)(P_h - P_a)C \quad (2)$$

### 2.2 고온층 표면의 대류 열전달 손실

고온층 표면은 Fig. 1에서와 같이 고온층과 원자로 실의 온도차 ( $T_h - T_a$ )에 의해 자연대류가 생기므로 열손실은 식 (3)과 같이 표시된다<sup>(4)</sup>.

$$Q_c = h_h A_h (T_h - T_a) \quad (3)$$

### 2.3 고온층 저면의 대류 열전달 손실

고온층 저면은 Fig. 1에서와 같이 그 아래 유체층과의 온도차 ( $T_h - T_b$ )에 의해 대류현상이 생기므로 열손실은 식 (4)와 같이 표시된다<sup>(4)</sup>.

$$Q_b = h_b A_b (T_h - T_b) \quad (4)$$

고온층 하부는 노심 우회 유량에 의해 유동이 형성되므로 열전달 계수는 식 (5)와 같이 계산된다<sup>(4)</sup>.

$$h_b \times \frac{L_b}{k_b} = 0.644 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (5)$$

### 2.4 수조 벽체를 통한 열전달 손실

원자로 수조, 수로 및 작업수조는 Fig. 1과 같이 원형과 직선의 콘크리트 벽으로 이루어져 있다. 수조 벽체를 통한 열손실은 고온층 온도가 높을수록 벽체 외부와의 온도차가 커 많이 발생하고, 벽체의 열저항이 클수록 열전달이 잘 되지 않으므로 식 (6)과 같이 표시된다<sup>(4)</sup>.

그리고 열저항은 원자로 수조가 원형이고, 작업수조 및 수로가 직선이므로 식 (7)과 식 (8)로 표시된다<sup>(4)</sup>.

$$Q = \Delta T \times \sum \frac{1}{R} \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{k_s/2\pi L} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{\Delta x}{k_s A_s} \quad (8)$$

### 3. 열손실 계산

#### 3.1 계산조건 및 가정

HANARO의 운전기록을 기준하여 고온층의 열손실을 계산하기 위한 계산조건과 가정은 다음과 같다.

- 1) 고온층 및 원자로실의 온도는 균일하게 분포하는 것으로 간주한다.
- 2) 고온층 하부온도와 두께는 각각 34 °C와 5m로 한다.
- 3) 고온층 표면적은 48.27 m<sup>2</sup> (520 ft<sup>2</sup>)이고, 표면에서의 공기유속은 1.5 m/min (= 5 ft/min)로 한다.
- 4) 원자로실의 상대습도는 60%를 기준한다.
- 5) 노심 우회유동은 1차 계통에 의해 고온층 아래에서 수조벽을 따라 상승하여 침니로 다시 유입된다.

#### 3.2 계산방법 및 결과

고온층과 원자로 실내의 온도가 각각 40 °C와 27 °C 일 때 비주열 베이직 프로그램<sup>(2)</sup>으로 열전달 손실을 계산하였다.

##### 1) 고온층 표면의 증발손실

고온층 온도와 실내 공기 온도의 포화 증기압은 각각 55.3 mmHg (2.178 inHg) 및 16.0 mmHg (0.631 inHg) 이므로 이 값들을 식 (4)에 대입하면 고온층 표면에서의 증발손실은 22.9 kW로 계산된다.

##### 2) 고온층 표면의 대류 열전달 손실

자연대류의 열전달 계수가  $5.68 \sim 25.4 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  ( $1 \sim 5 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ )로 추천<sup>(3)</sup>되므로 최저치인  $5.68 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  ( $1 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ )를 적용하여 식 (3)에 대입하면 열손실은 3.6 kW이다.

##### 3) 고온층 저면의 대류 열전달 손실

고온층 저면에서 노심 우회 유량이 원자로 수조에서 수직으로 유동하는 경우 그 유속은 원자로의 수조 내 경이 4m이고, 우회유량이 77 kg/s이므로  $6.17 \times 10^{-3} m/s$ 이다. 노심 우회유량이 고온층의 전체길이를 따라 흐르는 경우 고온층은 길이가 17.9m이면 그 폭이 2.7m 이고 높이가 4.7m인 사각 단면을 흐르게 되므로 이때의 수력지름으로 레이놀드 수를 계산하면 15018이다.

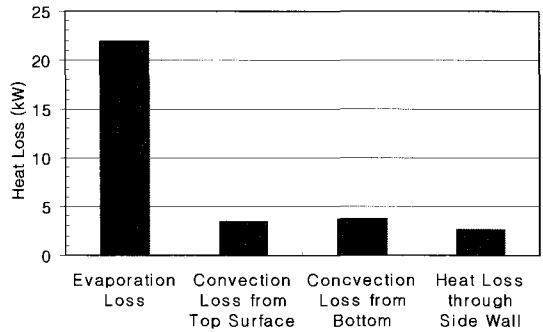


Fig. 2 Heat loss distribution of hot water layer

고온층과 저면의 표면온도는 고온층과 그 하부온도의 산술평균이므로 37 °C이다. 이 때의 물의 물성치에 따라 밀도, 점성계수, 열전달율 및 Prandtl 상수를 식 (5)에 대입하여 열전달 계수를 구하고, 이를 식 (4)에 대입하면 열손실은 3.7kW로 계산된다.

##### 4) 수조 벽체를 통한 열전달 손실

수조 벽체의 열전달율이  $1.5 W/m \cdot ^\circ C$ <sup>(3)</sup>이므로 이를 식 (7)과 (8)에 대입하여 원형 벽체와 직선 벽체의 열저항을 각각 구하고, 이들을 식 (6)에 대입하면 수조 벽체를 통한 열손실은 2.6kW로 계산된다.

계산결과, 증발손실이 고온층의 전체 손실열량 (약 33 kW)의 70%를 차지하였고, 나머지 약 10% 수준이므로 증발손실이 주요 손실임을 알 수 있다.

원자로실을 난방하거나 하지 않는 경우를 고려하면 실내온도가 약 18 °C에서 30 °C로 변하므로 고온층의 열손실은 19 °C를 기준하여 2 °C 간격으로 상기와 동일한 방식으로 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 온수기 한 대를 가동하여 발열량 30kW가 모두 고온층 가열로 손실된다면 고온층 온도는 세로축의 열손실 30 kW

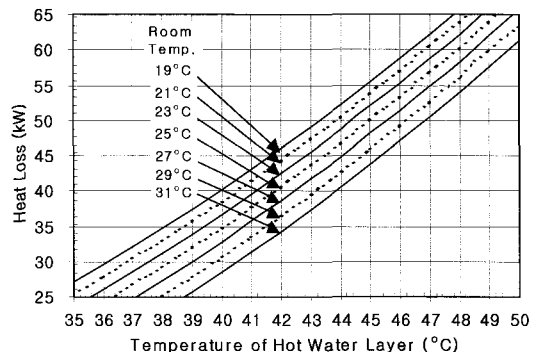


Fig. 3 Heat loss of hot water layer

와 실내온도 27 °C의 교점에서 가로축에 수직선을 그어 만나는 점이며 약 39 °C이다.

이 온도는 고온층의 설계조건인 고온층 아래의 온도 34 °C보다 5 °C 높은 온도를 나타내어 설계조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 실험 장치 및 방법

### 4.1 온도측정

고온층이 형성되는 것은 온수기가 일정한 열용량을 유지하고, 일정온도 이상의 온도차를 내면서 균일하게 유지될 때이다. 고온층이 형성되면 노심 우회유량이 자연대류현상으로 수조상부로 올라오는 것을 억제할 수 있는 효과를 가지며 이러한 효과는 수조 방사선 준위가 저하됨으로서 확인할 수 있다.

고온층은 순환펌프로 수조상부의 수조수를 순환시켜 온수기로 손실열량을 공급함으로써 형성된다. 온수기는 자체 온도 감지기로 설정온도에 따라 자동으로 운전되며 그 성능은 Fig. 4와 같이 입출구의 공통 배관에 설치된 온도 감지기 (347-TE03과 347-TE04)로 온수기의 입출구 온도를 각각 측정하여 확인된다<sup>(5)</sup>.

그리고 수조상부에 설치된 온도 감지기 (333-TE05)와 고온층 표면에서 7m 깊이에 설치된 침니상부 온도계 (331-TE01)는 각각의 온도를 측정하여 고온층이 그 아래 보다 5 °C 이상의 높은 온도로 형성되는지 확인할 수 있다.

### 4.2 수조 방사선 감지장치

수조표면 방사선 계측기 (RU-10A, RU-10B 및 RU-10C)는 수조상부의 방사선 누출을 감시하여 원자로 안전정지

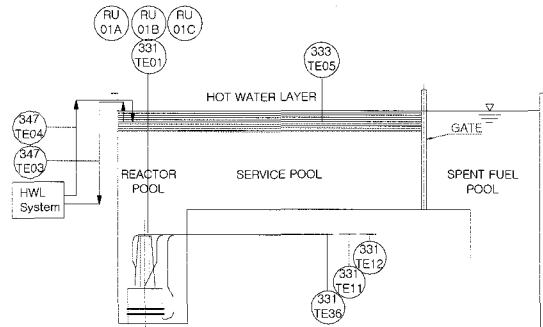


Fig. 4 Schematic diagram of test equipment

설정치를 초과하면 원자로를 정지시키고 경보를 울린다. 이 계측기<sup>(6)</sup>는 이온전리함, 측정장치 (measuring unit), 연결함 (connection box), 기록계, 신호장치 및 test source 로 구성되어 있으며 방사선 검출기인 이온전리함이 원형의 원자로 수조표면으로부터 50 cm 상단에 약 120도 간격으로 설치되어 있다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 고온층 온도에 따른 열손실

고온층 온도에 따른 열손실 결과를 실제 운전상황과 비교하기 위해 HANARO가 24 MW의 출력과 노심 우회 유량이 53 kg/s로 운전될 때, 원자로실을 난방하지 않고 실내온도가 18 °C에서 20 °C로 유지되는 경우 (A)와 난방하여 실내온도가 21 °C에서 30 °C로 유지되는 경우 (B)에 대하여 원자로 운전시간에 따른 고온층 온도, 침니상부 온도 및 수조상부 방사선 준위의 변화를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

(A)의 경우인 Fig. 5를 살펴보면 30 kW의 온수기 외에 예비 온수기도 가동하여 고온층을 형성하였으며 수조상부 방사선 준위는 약 10000 nGy/hr를 나타내었다. 고온층과 침니상부의 평균온도는 각각 46 °C와 34 °C를 나타내어 고온층 하부와 약 12 °C의 온도차를 보였으나 온수기를 수동으로 운전하여도 고온층 온도는 더 이상 상승하지 않았다. 이는 원자로 실내의 평균온도가 약 19 °C이며 Fig. 2에서와 같이 이 때의 열손실이 약 50 kW이므로 온수기가 공급한 열량은 거의 손실되었기 때문이다.

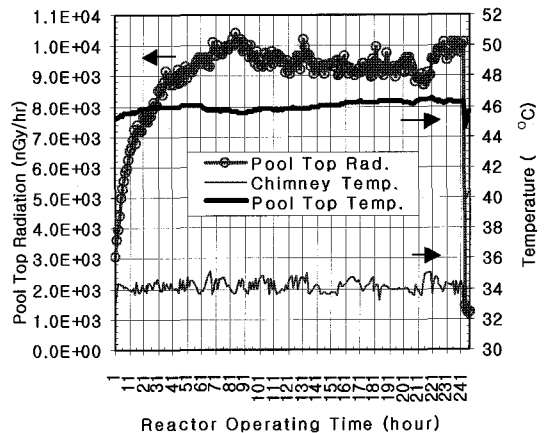


Fig. 5 Hot water layer temperature under reactor hall temperature between 18 °C and 20 °C

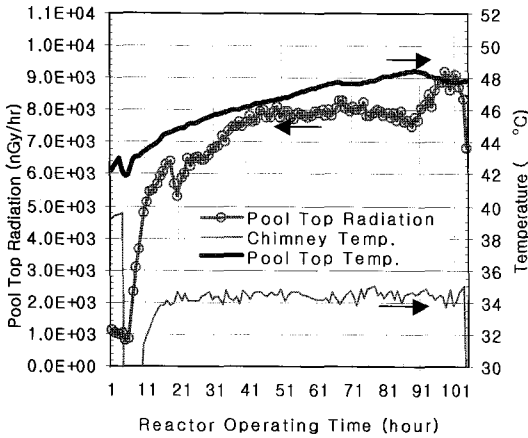


Fig. 6 Hot water layer temperature under reactor hall temperature between 21 °C and 30 °C

(B)의 경우인 Fig. 6을 살펴보면 (A)와 마찬가지로 예비 온수기도 가열한 상태이며 수조상부 방사선 준위와 침니상부 온도는 약 8000 nGy/hr와 35 °C를 각각 유지하였으나 고온층 온도가 48 °C를 상회하므로 온수기를 자동운전으로 전환하고 운전제한 온도 (50 °C)를 넘지 않도록 하였다. 이는 원자로실을 난방하였을 때, 실내 온도가 21 °C에서 점차 상승하여 최고 30 °C를 유지하였으며 평균 실내온도가 약 29 °C이다. 이 온도일 때 Fig. 2에서 손실열량이 약 56 kW를 나타내어 온수기 용량에 여유가 있었기 때문에 고온층 온도가 상승된 것으로 판단된다.

따라서, 고온층의 열손실에 대한 계산결과는 설계조건을 만족하고 실제 운전상황과도 잘 일치하였다.

### 5.2 수조상부 방사선의 저감효과

고온층 온도에 따른 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 검토하기 위해 상기 (A)와 (B)의 경우 외에 (C)의 경우를 추가로 고려하였다. 이 경우는 Fig. 7과 같이 HANARO 출력이 20 MW, 노심 우회유량이 40 kg/s와 원자로 실내온도가 평균 18 °C를 유지할 때, 고온층 온도가 46 °C 이하, 침니상부 온도가 약 34 °C와 수조상부 방사선 준위가 10000 nGy/hr를 나타내었다. (C)의 경우를 앞서 설명한 (A) 및 (B)의 경우와 비교하면 표 1과 같이 출력도 낮고, 노심 우회유량도 적지만 실내온도는 난방한 경우인 (B)의 경우와 동일하고 고온층 온도는 자동운전으로 온도를 조절하였다.

고온층 온도만 비교하면 (A), (B) 및 (C)의 경우 각각 약 46 °C, 46 °C 이상 및 46 °C 보다 낮으므로 고온층

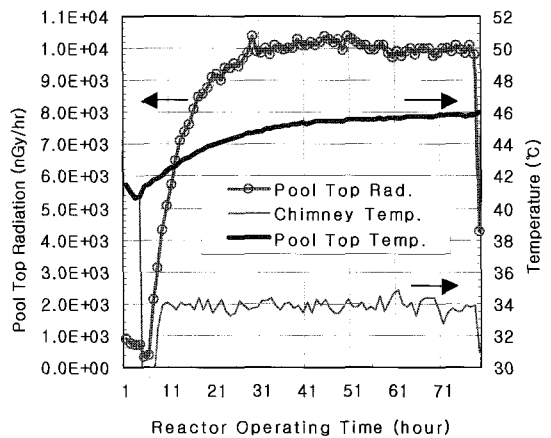


Fig. 7 HANARO operation after adding ion exchanger

Table 1 Operating condition

Case	A	B	C
Operating power (MW)	24	24	20
Core bypass flow (kg/s)	53	53	40
Reactor hall temp. (°C)	18~20	21~30	21~30
Avg. temp. of Reactor hall (°C)	19	29	29
Temp. Hot Water Layer (°C)	46	48	46>

온도에 따른 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 Fig. 8과 같이 고온층과 침니상부의 온도차에 따라 비교하였다. 이 온도차를 고려한 것은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르므로 온도차가 클수록 자연대류의 억제효과가 커 수조상부 방사선 준위가 저하하기 때문이다.

그림에서와 같이 실제 운전을 통하여 고온층 온도가 46 °C 보다 높은 경우 약 8000 nGy/hr, 46 °C 나 그 보다 낮은 경우 약 10000 nGy/hr를 각각 나타내어 고온층 온도가 높을수록 수조상부 방사선 준위는 저감함을 보여 주었다. 특히, 고온층 온도가 48 °C를 유지하는 경우 46 °C를 유지하는 경우 보다 약 20% 방사선 준위가 저감됨을 알 수 있다.

(C)의 경우 고온층 온도가 (A)의 경우 보다 낮지만 방사선 준위 상태가 보다 안정적인 것은 상대적으로 출력도 낮고, 노심 우회유량이 적기 때문이다.

(B)의 경우는 고온층과 침니 상부의 온도차가 12 °C 이상에서, (A)와 (C)의 경우는 11 °C 이상에서 각각 수조상부 방사선 준위는 더 저감되지 않았다.

이 3가지 경우에서 공통적인 사항은 고온층과 침니 상부의 온도차가 일정온도 이상에서는 온도차가 높아도 수조상부 방사선 준위가 더 이상 낮아지지 아니함을

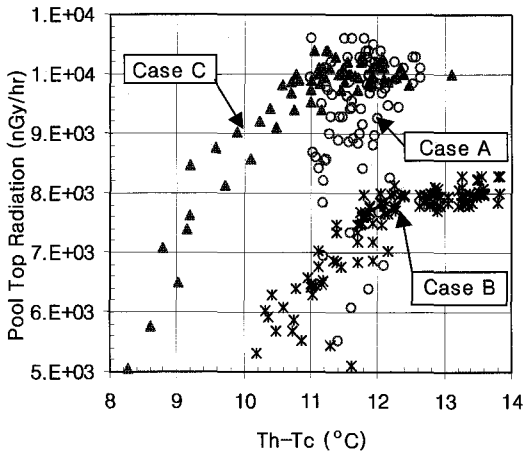


Fig. 8 Pool top radiation for the differential temperature between hot water layer and chimney top

보이고 있다. 이는 고온층을 형성한 목적이 노심 우회 냉각수의 일부가 냉각펌프에 흡입되지 않고 자연대류 현상에 의해 수조상부로 올라오는 것을 억제하기 위한 것인데 억제 가능한 온도 이상에서는 방사선 저감효과가 거의 동일한 것으로 판단된다.

**6. 결 론**

고온층 온도를 상승시키기 위해 고온층의 열손실을 계산하고, 고온층 온도 변화에 따른 수조상부 방사선 준위를 고찰하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 고온층 온도가 높을수록 원자로실의 온도가 낮을수록 온도차가 커 고온층의 열손실이 증가하므로 원자로실의 온도를 가급적 높게 유지할수록 열손실을 줄일 수 있다.
- 2) 고온층의 열손실은 고온층 수조 표면의 증발 및 대류와 수조 벽체를 통해 발생하며 증발손실이 전체

열손실의 70%를 차지하였다.

- 3) 열손실 계산결과는 운전과 잘 일치하였으며 고온층 온도를 46°C 이상으로 유지하기 위해서는 온수기 용량을 60kW로 늘리면 여유 있게 유지할 수 있다.
- 4) 고온층 온도를 48°C로 유지하는 경우는 46°C의 경우보다 수조상부 방사선 준위가 약 20% 저감되었다.
- 5) 고온층과 수조상부 온도차가 클수록 자연대류를 억제할 수 있으나 수조상부 방사선 준위는 일정온도차 이상에서는 동일한 준위를 나타내었다.

**후 기**

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

**참고문헌**

- (1) Park, Y. C., Park, J. H., 1999. "Study for Reduction Effect of Pool Top Radiation in Reacher Reactor by Using Ion Exchanger of Hot Water Layer," J of Fluid Machinery, Vol. 2, No. 4, pp. 40~47.
- (2) Microsoft, Visual Basic Program 6.0 Program Guide, 2000.
- (3) Lim, I. C., 1993, Recommended Pump Operation for Decay Heat Removal, KAERI, TN-TS-001.
- (4) Holman, J. P., 1986, Heat Transfer, 6 ed., McGraw-Hill.
- (5) Park, Y. C., 1998, HANARO 수조고온층계통 설계 지침서, KAERI, HAN-RS-DM-347-K001.
- (6) MGR, 1994, Operation and Maintenance Manual for Surface Pool Monitor, Commission No. 168798, Merlin Gerin Provence Co..