

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, 30MW of research reactor, was installed at the depth of 13m of 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 protect that the radiated gas was 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 with 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. It was confirmed through the results that the larger the temperature difference between the HWL and reactor hall was, the more the evaporation loss was increased. And it was verified that the radiation level above was reduced more safely by increasing the capacity of heater.

1. 서 론

하나로⁽¹⁾는 1995년 2월 5일 첫 임계에 도달한 이후 출력 상승시험을 수행중에 있으며 출력이 상승함에 따라 수조표면의 방사선 준위가 원자로 보호계통의 정지 변수를 초과하는 현상이 발생하였다. 그 원인은 냉각 펌프의 흡입구가 침니 하부에 있어 원자로 냉각수의 90%가 원자로 하부에서 상부로 흐르면서 노심을 냉각한 다음 상향으로 흡입되고, 나머지 10%의 냉각수가 노심을 우회하여 침니 상부를 통해 하향으로 흡입되므로 유동방향이 서로 반대가 되어 노심 냉각수의 제트 유동을 억제한다. 그러나 수조상부보다 높은 온도의 우회냉각수 일부가 자연 대류현상에 의하여 수조상부로 상승함으로써 수조표면의 방사선 준위가 증가되

기 때문이다. 이 자연 대류현상을 억제하기 위해 수조 상부에 고온층을 형성하였으며 고온층이 정상적으로 형성되었을 때 수조상부 방사선 준위가 설치 전과 비교하여 5%로 저감되었다⁽¹⁾. 그러나 고온층 온도를 정상운전 온도보다 더 올렸을 때 수조상부 방사선 준위가 더 낮아짐을 발견하였다.

그래서 고온층 온도를 높이기 위해 고온층의 열손실을 계산하였으며 고온층 온도상승에 따른 수조 상부 방사선 준위의 저감효과를 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 증발손실

고온층은 자연 대류를 억제하기 위하여 그림 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. 열평형 방정식을 세우면 식 (1)과 같으며 손실 열량을 온수기로 가열 (Q_h)하므로써 고온층이 형성된다.

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

고온층 표면은 그림 1에서와 같이 고온층과 원자로 실 공기의 온도차에 의한 포화 증기압차에 의해 증발되므로 고온층 온도가 높을수록 많은 손실이 발생하며 식 (2)와 같이 표시된다⁽²⁾.

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

2.2 고온층 표면의 대류 열전달 손실

고온층 표면은 그림 1에서와 같이 고온층과 원자로 실의 온도차에 의해 자연대류가 발생하므로 고온층 온도가 높을수록 많은 손실이 발생하며 식 (3)과 같이 표시된다⁽³⁾.

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

2.3 고온층 저면의 대류 열전달 손실

고온층 저면의 대류 열전달 손실은 그림 1에서와 같이 고온층과 그 아래 유체층과의 온도차에 의해 대류현상이 발생하므로 고온층 온도가 높을수록 많은 손실이 발생하며 식 (4)와 같이 표시된다⁽³⁾.

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

고온층 하부는 노심우회 유량에 의해 유동이 형성되므로 유체 유동에 따른 열전달 계수는 식 (5)와 같이 계산된다⁽³⁾.

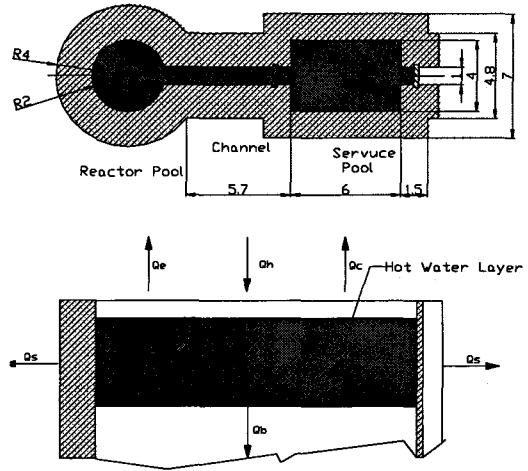


Fig. 1 Heat Balance of Hot Water Layer

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

2.4 수조벽체를 통한 열전달 손실

원자로 수조, 수로 및 작업수조는 그림 1과 같이 원형과 직선의 콘크리트 벽으로 이루어져 있다. 수조 벽체를 통한 열손실은 고온층 온도가 높을수록 벽체 외부와의 온도차가 커므로 많은 손실이 발생하고 벽체의 열저항이 클수록 열전달이 잘 되지 않으므로 식 (6)과 같이 표시된다⁽³⁾.

그리고 열저항은 형상에 따라 다르며 원자로 수조는 원형이고, 작업수조 및 수로는 직선이므로 각각의 열저항은 식 (7)과 식 (8)로 표시된다⁽³⁾.

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

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

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

3. 열손실 계산

3.1 계산조건 및 가정

하나로 운전기록을 기준하여 고온층의 열손실을 계산하였으며 계산조건과 가정은 다음과 같다.

- 1) 고온층 및 원자로실의 온도는 균일하게 분포하는 것으로 간주한다.
- 2) 고온층 하부온도와 두께는 각각 34 °C와 5 m로 한다.
- 3) 고온층 표면적은 520ft² (48.27m²)이고, 표면에서의 공기유속은 1.5 m/min (= 5 ft/min)로 한다.
- 4) 원자로실의 상대습도는 60 %를 기준한다.
- 5) 노심우회 유동은 1차 계통에 의해 고온층 아래에서 수조벽을 따라 상승하여 침니로 다시 유입된다.

3.2 계산방법 및 결과

고온층의 열손실은 비주얼 베이직 연산 프로그램⁽⁴⁾으로 계산하였다. 고온층 온도가 40°C이고, 원자로 실내의 온도가 27°C일 때 고온층 표면에서의 증발 손실과 대류 열전달 손실, 고온층 저면과 그 아래의 유체층과의 대류 열전달 손실 및 수조 벽체를 통한 열전달 손실을 계산해 보았다.

1) 고온층 표면의 증발손실

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

2) 고온층 표면의 대류 열전달 손실

자연대류의 열전달 계수 범위는 1~5

$\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$ 로 추천⁽²⁾되므로 최저치인 1

$\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \left(= 5.68 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ 를 적용하여 식 (3)에 의해 고온층 표면에서의 대류 열전달 손실은 3.6 kW로 계산된다. 여기서 자연대류의 열전달 계수값을 1 $\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$ 로 적용하였을 때 실제 운전과 잘 일치하였다.

3) 고온층 저면의 대류 열전달 손실

고온층 저면에서 노심우회 유동에 의해 원자로 수조에서 수직으로 유동하는 경우 그 유속은 원자로의 수조 내경이 4 m 이고, 우회유량이 77 kg/s 이므로 6.17×10^{-3} m/s 이다. 노심 우회유량이 고온층의 전체길이를 따라 흐르는 경우 고온층은 길이가 17.9 m

이면 그 폭이 2.7 m 이고 높이가 4.7 m 인 사각 단면을 흐르게 되므로 이 때의 수력지름으로 레이놀드 상수를 계산하였다. 고온층과 저면의 표막온도는 고온층과 그 하부온도의 산술평균으로 계산되므로 37°C이다. 이때의 물의 물성치에 따라 밀도, 점성계수, 열전달을 및 플란틀 상수를 식 (5)에 대입하여 열전달 계수를 구하고 이를 식 (4)에 대입하면 고온층 저면에서의 대류 열전달 손실은 3.7 kW로 계산된다.

4) 수조 벽체를 통한 열전달 손실

수조 벽체의 열전달율이 1.5 W/m²·°C⁽²⁾이므로 이를 식 (7)과 (8)에 대입하여 원형 벽체와 직선 벽체의 열저항을 각각 구하고, 이들을 식 (6)에 대입하면 수조 벽체를 통한 열손실은 2.6 kW로 계산된다.

원자로실의 실내 온도는 난방하는 경우 약 21°C에서 30°C, 난방을 하지 않는 경우 18°C에서 20°C 범위에서 각각 유지된다. 그래서 원자로실의 온도가 19°C에서 31°C로 변할 때 2°C 간격으로 원자로 실내의 온도가 변화에 따른 고온층의 열손실을 계산하여 그림 2에 나타내었다.

이론적 고찰에서와 같이 고온층 온도가 높을수록 그리고 실내 온도가 낮을수록 온도차가 크게 발생하므로 고온층 열손실이 증가함을 보여주고 있다.

그리고 고온층 열손실의 주요 원인을 조사하기 위해 각각의 열손실 분포를 그림 3에 나타내었다. 증발 손실이 고온층 열손실의 약 70%를 차지하므로 주요 손실임을 알 수 있다.

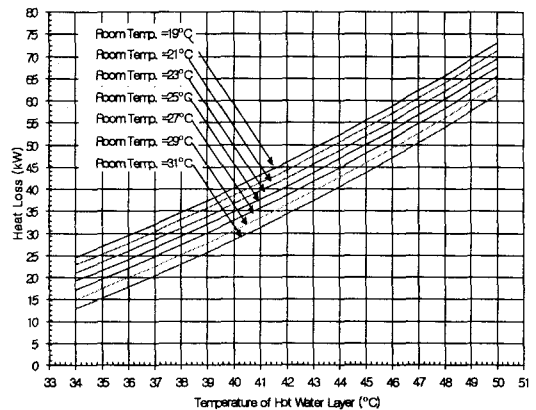


Fig. 2 Heat Loss of Hot Water Layer

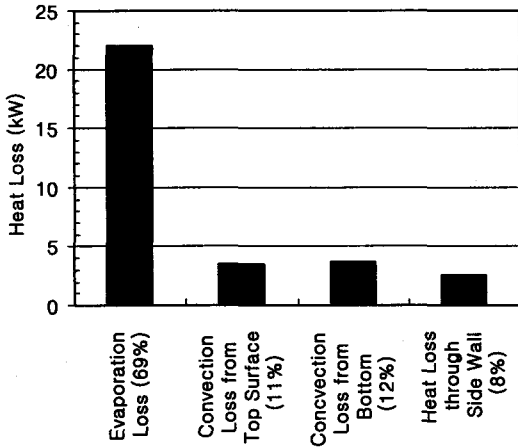


Fig. 3 Heat Loss of Hot Water Layer

4. 실험 장치 및 방법

4.1 온도측정

고온층이 형성되는 것은 온수기가 일정한 열용량을 유지하고, 고온층이 일정 온도 이상의 온도차를 내면서 균일하게 유지될 때이다. 고온층이 형성되면 노심 우회 유량이 자연대류 현상으로 수조 상부로 올라오는 것을 억제할 수 있는 효과를 가지며 이러한 효과는 수조 방사선 준위가 저하됨으로서 확인할 수 있다.

고온층은 순환펌프를 가동하여 수조상부의 수조수를 순환시키면 각 온수기 출구에 설치된 온도 감지기에 의해 온수기가 설정 온도에 따라 자동으로 운전된다. 온수기의 입출구 온도는 그림 4와 같이 입출구의 공통 배관에 설치된 온도 감지기 (347-TE03과 347-TE04)로 각각 측정하여 온수기가 일정한 열량을 공급하도록 하였다⁽⁶⁾.

고온층이 형성되는지를 확인하기 위하여 수조 상부에 설치된 온도 감지기 (333-TE05)로 고온층 온도를 측정하고, 고온층 표면에서 7 m 깊이에 설치된 침니 상부 온도계 (331-TE01)로 고온층 하부 온도를 측정하여 일정한 온도차를 유지하도록 하였다.

4.2 수조 방사선 감지장치

수조 상부의 방사선 누출량을 감시하고 원자로 안전 정지 설정치를 초과하면 원자로를 정지하고 경보를 울리도록 원자로 수조 표면 방사선 계측기 (RU-10A, RU-10B 및 RU-10C)를 설치하였다. 방사선 검출기로

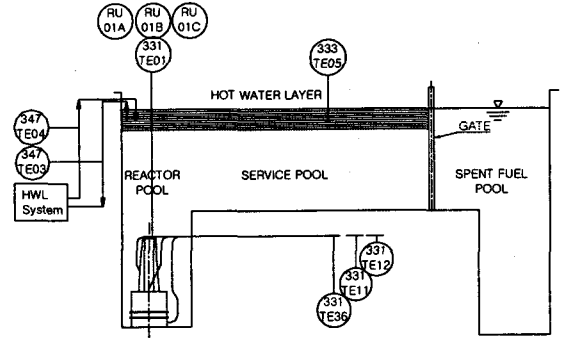


Fig. 4 Schematic Diagram of Test Equipment

이온 전리함을 사용하였으며 원자로 수조 표면으로부터 50 cm 상단에 약 120도 간격으로 3개의 감지기를 설치하였다. 이 감지기는 이온 전리함, 측정 장치 (measuring unit), 연결함 (connection box), 신호 장치 및 test source로 구성되어 있으며 Merlin Gerin Provence Co.에서 제작하였다⁽⁶⁾.

5.0 결과 및 고찰

5.1 고온층 온도에 따른 열손실

앞서 계산한 고온층 온도에 따른 열손실 결과를 실제 운전상황과 비교하기 위해 하나로가 24 MW의 출력과 노심 우회유량이 53 kg/s로 운전될 때 원자로 실의 온도가 18°C에서 20°C로 유지되는 경우 (A)와 원자로실의 온도가 21°C에서 30°C로 유지되는 경우 (B) 원자로 운전시간에 따른 고온층 온도, 침니 상부 온도 및 수조상부 방사선 준위의 변화를 그림 6과 7에 나타내었다.

A의 경우 30 kW의 온수기 용량 외에 예비온수기를 추가로 가동하여도 고온층 온도는 약 46°C를 유지하고 그 이상 상승되지 않았다. 이 경우 원자로 실내의 평균 온도가 약 19°C이므로 그림 2에서 고온층의 열손실은 약 59 kW를 나타내고 있어 온수기가 공급한 열량은 거의 손실되었기 때문에 고온층 온도가 상승되지 않은 것으로 판단된다.

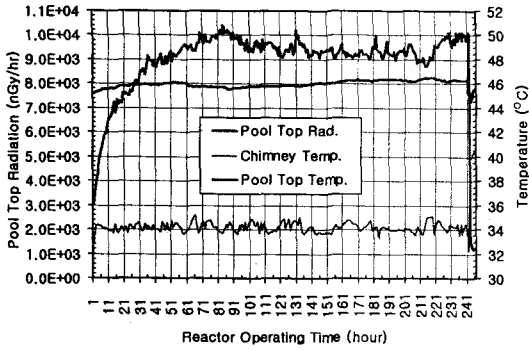


Fig. 5 Hot Water Layer temperature under Reactor Hall Temperature between 18°C and 20°C

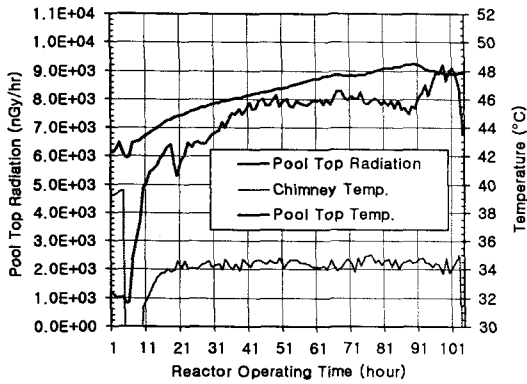


Fig. 6 Hot Water Layer temperature under Reactor Hall Temperature between 21°C and 30°C

B의 경우 예비온수기를 추가로 가동하였을 때 48°C 까지 고온층 온도를 상승시킬 수 있었고 48°C에서 자동방식으로 전환하여 고온층 온도를 관리하였다.

이 경우 원자로실의 평균 온도가 29°C이므로 그림 2에서 손실열량이 약 56kW를 나타내어 온수기 용량에 여유가 있었기 때문에 고온층 온도가 상승된 것으로 판단된다.

그리고 온수기 한 대를 가동하는 경우 발생열량이 30 kW이므로 그림에서 고온층 온도는 약 36°C에서 40.5°C를 유지할 수 있으며 원자로실의 온도가 27°C를 유지하는 경우 약 40°C를 유지할 수 있음을 보여주고 있다. 그래서 침니 상부 온도가 평균적으로 34°C를 유지하는 경우 5°C 높은 고온층을 형성할 수 있으므로 설계조건을 만족하고 있다.

따라서 고온층의 열손실에 대한 계산 결과는 설계

조건을 만족하고 실제 운전 상황과도 잘 일치함을 보여주었다.

5.2 수조상부 방사선의 저감효과

고온층 온도에 따른 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 검토하기 위해 상기 A와 B의 경우 외에 운전 조건이 다르지만 그림 7과 같이 하나로가 20 MW로 운전하고, 노심 우회유량이 40 kg/s를 유지할 때 고온층 온도가 46°C까지 계속 상승하고 침니 상부 온도가 약 34°C를 유지하는 경우를 추가로 고려하였다. 이는 고온층 온도에 따른 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 비교하기 위해 고온층 온도가 A의 경우 46°C이상, B의 경우 약 46°C 그리고 C처럼 46°C 이하를 유지하는 경우를 각각 고려하였다. 이 세 가지 경우에 대하여 수조상부 방사선 준위의 저감효과를 그림 8과 같이 고온층과 침니 상부의 온도차에 따라 비교하였다.

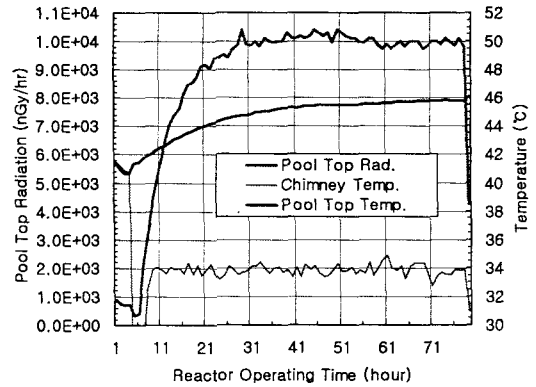


Fig. 7 HANARO Operation after Adding Ion Exchanger

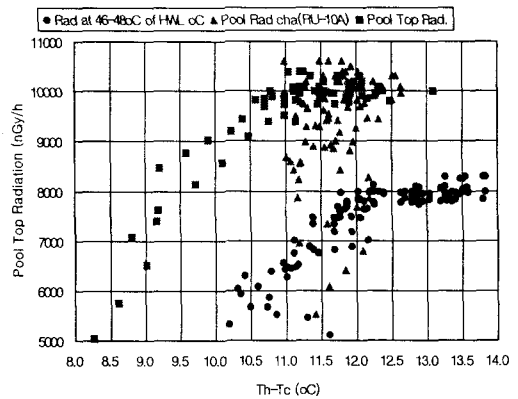


Fig. 8 Pool Top Radiation for the Differential Temperature between Hot Water Layer and Chimney Top

고온층과 침니 상부의 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 온도를 46°C 보다 높게 유지하는 경우 약 8000 nGy/hr, 고온층 온도가 46°C나 그 이하를 유지하는 경우 약 10000 nGy/hr을 각각 나타내어 고온층 온도가 높을수록 수조상부 방사선 준위는 저감함을 보여 주었다.

그리고 A의 경우는 고온층과 침니 상부의 온도차가 12°C 이상에서, B와 C의 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 안음을 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 주요 열손실은 고온층 수조 표면의 증발손실 및 대류손실과 수조 벽체를 통한 열손실이 증가하며 증발손실이 열손실의 70%를 차지하였다.

3) 열손실 계산결과는 하나로 운전과 잘 일치하였

으며 고온층 온도를 46°C이상으로 유지하기 위해서는 온수기 용량을 60 kW로 늘리면 여유 있게 유지할 수 있다.

4) 고온층 온도를 48°C로 유지하는 경우는 46°C의 경우보다 약 20%의 수조 상부 방사선 준위가 저감되었다.

5) 고온층과 수조상부 온도차가 클수록 자연대류를 억제할 수 있으나 수조상부 방사선 준위는 일정 온도차 이상에서는 동일한 준위를 나타내었다.

후 기

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

참고 문헌

(1) Y. C. Park, J. H. Park, 1999. "Study for Reduction Effect of Pool Top Radiation in Reacher Reactor by Using Ion Exchanger of Hot Water Layer", J of Fluid Mechinery, ISSN 1226-9883.

(2) I. C. Lim, 1993, "Recommended Pump Operation for Decay Heat Removal", KAERI, TN-TS-001.

(3) J. P. Holman, 1986, "Heat Transfer", 6ed., McGraw-Hill.

(4) Microsoft, "Visual Basic Program 6.0 Program Guide",

(5) Y. C. Park, 1998, "하나로 수조고온층계통 설계 지침서", KAERI, HAN-RS-DM-347-K001.

(6) MGR, "Operation and Maintenance Manual for Surface Pool Monitor ", Commission No. 168798, Merlin Gerin Provence Co. 1994.