

## 수출전략형 연구로의 1차 냉각계통 개념설계

박용철\* · 김경련\*\*

### The Conceptual Design of Primary Cooling System for an Advanced Research Reactor

Yong-Chul, Park\*, Kyung-Ryun, Kim\*\*

*Key Words* : An advanced research reactor(수출전략형연구로), Core cooling system(노심냉각계통), Primary cooling system(1차 냉각계통), Conceptual design(개념설계)

#### ABSTRACT

An advanced Research Reactor (ARR) consists of an open-tank-type reactor assembly within a light water pool and generates thermal power of 20 MW. The thermal power is including a fission heat in the core, a fuel generated heat temporary stored in the pool, a circulating pumps generated heat and a neutron reflecting heat in the reflector vessel of the reactor. In order to remove the heat load, the primary cooling system will be installed. In this study, the conceptual design of the primary cooling system has been carried out using a design methodology of HANARO within a permissible range of safety. As results, it has been established that the conceptual design of the primary cooling system including design requirements, performance requirements, design restrictions, system descriptions and system operation to maintain the system functions.

#### 1. 서론

수출 전략형 연구로는 출력이 20 MW인 개방수조형 연구로이다. 이 연구로의 원자로 냉각계통은 원자로가 100% 출력운전 중에 노심에서 핵연료의 핵분열시의 발열량, 수조 내 임시 저장되는 핵연료의 발열량, 냉각수 순환펌프에 의한 발열량 및 원자로 반사체 탱크의 반사체 발열량을 제거하여 핵연료를 안전하게 냉각하여야 한다.

이 발열량을 제거하기 위해 원자로 냉각계통은 노심의 잔열을 제거하는 1차 냉각계통, 반사체 탱크에서 발생하는 열을 제거하기 위한 반사체 냉각계통과 냉각

수 수질을 유지하기 위한 1차 냉각수 정화계통으로 구성된다.

이러한 계통을 구성하기 위해서는 냉각열량, 냉각수량, 냉각수의 입출구 온도차 등이 정해져야 하나, 이 연구로는 개념설계단계이므로 이러한 주요 설계인자들을 하나씩 설정해 나가야 한다.

30 MW의 연구용 원자로인 하나로는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 안전하게 정상운전을 하고 있다. 하나로 노심냉각계통의 설계방법을 이용하여 20 MW의 수출전략형 연구로의 1차 냉각계통에 대한 설계개념을 확립해 보았다.

본 보고서에는 1차 냉각계통의 설계방안, 주요 설계자료의 가정 및 계통설계로 구분하여 작성하였으며 계통설계에는 설계요건, 계통성능, 계통설명 및 계통운전에 관한 사항이 포함되어 있다.

\* 한국원자력연구소

\*\* 한국원자력연구소

E-mail : ycpark@kaeri.re.kr

## 2. 설계방안

수출전략형 연구로의 1차 냉각계통은 핵연료를 안전하게 냉각할 수 있도록 설계되어야 한다. 그리고 본 계통의 설계에서 얻은 자료는 1차 냉각수를 냉각해 주는 냉수설비 (2차 냉각계통) 등 연계계통의 설계 입력 자료로 사용된다.

하나로의 설계경험을 바탕으로 수출전략형 연구로의 냉각계통 설계에 필요한 주요 인자를 도출하기 위해 관련인자들의 연계관계를 하나로와 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 1차 냉각계통의 냉각열량은 열교환기에 의해 2차 냉각수로 제거되어 1차 냉각수의 온도가 유지된다. 냉각수의 입출구 온도가 정해지면 대수평균온도차가 정해지고, 전열판 총 열전달계수를 적용하면 열전달 면적이 계산되어 열교환기의 외형과 차압이 정해 질 수 있다.

냉각수량은 순환펌프의 동력을 계산하기 위한 유량으로 사용되고, 냉각수량에 따른 관로의 관경이 결정됨으로서 관로 손실과 노심, 열교환기 등의 부가 차압 손실을 고려하여 양정이 결정된다. 유량과 양정이 정해지면 순환펌프의 동력이 정해진다. 이 동력은 순환펌프의 발열량으로 나타나며 공급한 동력이 모두 발열<sup>(1),(2)</sup>되므로 이 발열량도 냉각되어야 한다.

하나로의 경우 1차 냉각펌프는 방사선 차폐체에 의해 격리되므로 이때 발생하는 열은 펌프의 베어링 온도 및 권선 온도에 영향을 미치므로 이를 냉각하기 위해 기기실 냉각기의 냉각 부하로 적용된다.

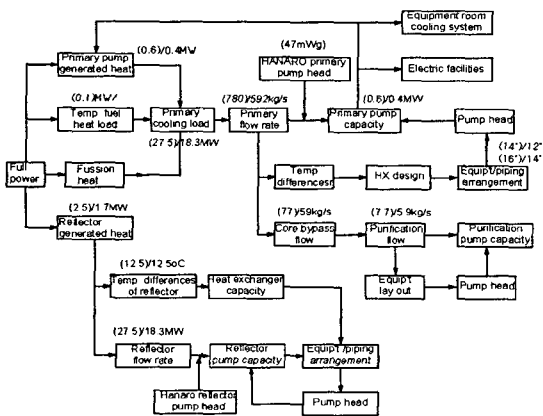


Fig. 1 The Interconnection of design parameters

그리고 반사체 냉각계통이나 1차 냉각수 정화계통도 유량과 발열량이 정해지면 동일한 방식으로 설계할 수 있다.

## 3. 주요 설계 자료에 대한 가정

### 3.1 냉각열량

원자로 출력은 노심의 핵반응열, 임시저장 핵연료 발열량, 순환펌프의 발열량 및 반사체 발열량이 포함된다. 반사체 발열량은 반사체 냉각계통에 의해 냉각되고, 그 외의 발열량은 1차 냉각계통에 의해 냉각된다. 하나로의 경우 1차 냉각계통과 반사체 냉각계통이 감당하여야 하는 열량은 각각 27.5 MW와 2.5 MW이므로 전체열량의 91.7 %와 8.3 %이다<sup>(3)</sup>.

수출전략형 연구로도 동일한 비율로 배분하면 Table 1에 나타낸 바와 같이 1차 냉각계통과 반사체 냉각계통의 냉각열량은 각각 18.3 MW와 1.7 MW이다.

### 3.2 냉각유량

노심 냉각유량은 원자로가 정상상태나 쉘이 혹은 사고상태에서도 냉각능력을 유지하여 핵연료 및 노심의 건전성이 유지되어야 한다.

열수력 예비계산을 통해 얻은 노심 냉각유량과 노심우회 냉각유량은 Table 2와 같이 533 kg/s와 59 kg/s로 잠정적으로 제안되었다<sup>(4)</sup>. 여기에는 노심 구조물을 냉각하기 위한 겹 유량은 불필요한 것으로 평가되어 고려되지 않았다. 그리고 냉각수의 밀도와 비열은 40°C를 기준하였다.

이 노심 냉각유량은 같은 노심 출력을 갖는 호주 RRR의 유속 (8.1 m/sec), 유로면적 (0.0652 m<sup>2</sup>) 및 유량 (523 kg/sec)과 유사한 값이다<sup>(4)</sup>.

Table 1 Heat loads

Description (MW)	ARR	HANARO	Remarks
Full power	20	30	
Core generated heat			
- Fission heat			
- Temporary stored fuel heat	18.3	27.5	91.7% of full power
- Pump generated heat			
Reflector generated heat	1.7	2.5	8.3% of full power

Table 2 Core cooling water

Design parameters	Design value
Flow velocity (m/s)	8
Flow section area of core (m <sup>2</sup> )	0.0673
Flow rate (kg/s)	533
Core bypass flow rate (kg/s)	59
gab flow rate (kg/s)	0
Total flow rate (kg/s)	592
Estimated cooling water temperature increase for passing through the core (°C)	9
Density (kg/m <sup>3</sup> ) @40°C	992
Specific heat (kJ/kg-K) @40°C	4.178

### 3.3 온도차

냉각열량과 유량이 정해지면 냉각수의 온도차는 식 (1)의 발열량 관계식에 의해 계산할 수 있다.

$$Q = m \times Cp \times (T_i - T_o) / 1000 \quad (1)$$

여기서, Q: 발열량 (MW)

m: 유량 (kg/s)

Cp: 비열 (kJ/kg-k)

T<sub>i</sub>: 입구온도 (K)

T<sub>o</sub>: 출구온도 (K)

수출전략형 연구로의 경우 원자로 냉각수의 입출구 온도차는 식 (1)을 이용하여 계산하였으며 Table 3에 나타낸 바와 같이 7.6 °C로 계산되었다. 이 값은 원자로를 중심으로 입구온도와 출구온도의 차이이며 노심우회유량에 의한 온도변화를 제외하면 비슷한 값으로 추정된다. 반사체 탱크의 반사체 입출구의 온도차는 하나로의 경우, 12.5 °C이며 수출로의 경우도 잠정적으로 동일한 값으로 가정하였다.

Table 3 Temperature differences Inlet and outlet of core cooling water and reflector for the reactor

Description	ARR	HANARO	Remarks
Core cooling water (°C)	7.6	8.4	
Reflector (°C)	(12.5)	12.5	

## 4. 계통설계

### 4.1 설계요건

원자로 냉각계통은 원자로 노심에서 핵분열 시 발생하는 열을 냉각하여 원자로를 안전하게 유지하여야 하므로 설계요건을 다음과 같이 정하였다<sup>(5)</sup>.

<운전성에 대한 요건>

- (1) 원자로의 정상출력이 만족되도록 냉각되어야 한다.
- (2) 원자로 정지 후 노심의 잔열은 자연 순환으로 제거되어야 한다.
- (3) 원자로실 내의 공기가 과도하게 습해지는 것을 방지하기 위하여 정상운전 시 원자로 수조수의 온도는 50 °C 이하로 유지되어야 한다.

<안전성 관련 요건>

- (1) 노심에서 생성되는 Ni6이 붕괴하기 전에 수조표면에 도달하는 것을 억제하여야 한다.
- (2) 냉각재의 누출과 오염 확산을 방지하기 위하여 순환펌프, 열교환기 및 배관에서의 누수를 수집할 수 있고, 감지할 수 있어야 한다.
- (3) 수조수위 감소를 감지할 수 있어야 한다.
- (4) 계통의 누수로 인하여 수조수를 상실할 경우 노심이 대기에 노출되는 것을 방지하기 위하여 순환펌프, 열교환기, 배관 등을 노심보다 높은 위치에서 설치하여야 한다.
- (5) 1차 냉각계통의 흐름에 의한 기기나 배관에서의 진동은 허용치 이내이어야 한다.
- (6) 원자로 수조내의 배관과 기기의 설계온도는 120 °C이고, 수조 밖의 배관과 기기의 설계온도는 93 °C이어야 한다.
- (7) 배관과 기기의 설계압력은 1.0 MPa이어야 한다.
- (8) 안전정지지진 (safety shutdown earthquake, SSE) 상태에서 작동성과 건전성을 유지하여야 한다.
- (9) 지진 시에도 내진등급으로 분류된 배관에 걸리는 하중이 콘크리트 구조물로 잘 전달되도록 배관지지물을 설계하여야 한다.

### 4.2 계통성능

1차 냉각계통의 설계유량은 592 kg/s이다. 여기서 노심 유량은 전체 유량의 90%인 533 kg/s이고, 노심 우회유량은 전체 유량의 10%인 59 kg/s이다. 1차 냉각수가 18.3 MW의 열을 제거하기 위해서는 원자로의

입출구 온도차가 약 7.6 °C를 유지하여야 하므로 원자로 노심의 입구온도가 40 °C인 경우 출구온도는 47.6 °C로 예상된다. 이온도는 정상운전 시 원자로실 내부의 공기가 과도하게 습해지는 것을 방지하기 위해 50 °C이하로 유지하여야 하는 조건을 만족하고 있다.

자연대류는 원자로가 정지하는 경우 노심의 잔열을 제거하기 위해 온도차에 의한 대류현상이므로 2차 냉각계통이 정상적으로 작동하고 있을 때에는 열교환기에 의해 1차 냉각수와 열교환이 이루어지므로 원자로의 잔열은 자연대류에 의해 냉각수 순환유로를 통해 제거된다.

2차 계통이 작동되지 않을 경우에는 노심과 노심외부의 수조수 온도차에 의해 밀도차가 발생하며 밀도차에 의한 미세한 압력차에 의해 개방될 수 있는 플랩 밸브를 설치하여 노심과 수조수 간의 온도차에 의한 자연대류에 의해 잔열이 제거된다.

### 4.3 계통설명

1차 냉각계통은 원자로가 100% 출력운전 중일 때 노심의 핵분열 시의 발열량, 냉각수 순환펌프 발열량, 수조 내 임시저장핵연료의 발열량을 제거하기 위해 Fig. 2와 같이 두 대의 순환펌프와 열교환기를 병렬로 구성하였다. 한 대의 순환펌프와 열교환기는 50% 용량의 열을 제거할 수 있다.

냉각수는 각각의 흡입관을 통해 순환펌프에 흡입되어 각각의 열교환기를 거쳐 냉각되고, 공동 송출관을 따라 흐른다. 이 송출관에서 총유량의 10% 유량이 분기되고, 나머지 유량은 원자로 하부 유입구로 유입되어 핵연료를 냉각하므로 노심 냉각유량이라 한다<sup>(6)</sup>.

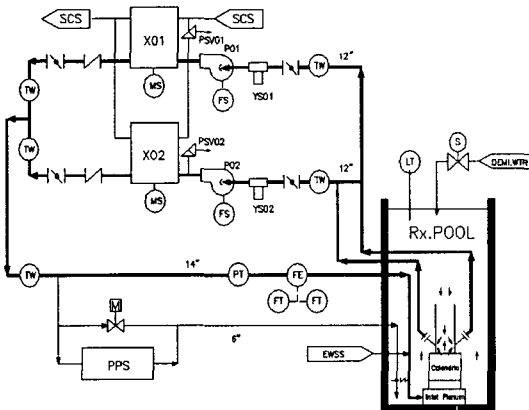


Fig. 2. Flow diagram of primary cooling system

그리고 노심을 지난 냉각수는 침니 하단에 이르러 순환펌프에 흡입된다.

한편, 송출관에서 분기된 총유량의 10%는 우회관을 따라 원자로 지지판을 냉각하기 위하여 수조 하부로 유입된다. 이 유량은 원자로 외벽을 따라 상승하여 침니 상부를 통해 침니 하단에 이르러 순환펌프에 의해 흡입된다. 이 유량은 노심을 우회하여 흐르므로 노심 우회 냉각유량이라 하고 흐름 방향이 노심 냉각유량과 반대이므로 노심 냉각유량의 손구침을 억제한다.

#### 4.3.1 1차 냉각수 열교환기 (X01/02)

열교환기는 판형 (plate type)이며 스테인리스 강판으로 제작된 전열판을 니트릴 개스킷으로 밀봉된다. 각 전열판 사이를 1차와 2차 냉각수가 차례대로 교차하여 흐르므로 열전달 면적이 넓어 셸 앤드 튜브형 (shell and tube type) 보다 크기가 작아 설치공간 및 보수공간을 적게 차지한다. 전열판의 취부가 간단하므로 열량 변화에 따른 유동성이 크다<sup>(7)</sup>.

한편, 판형 열교환기는 수격 현상이 발생하는 경우 전열판 밀봉이 플랜지 볼트의 조임으로 이루어지므로 누수가 발생할 수 있다. 그러나 수출로의 경우는 저온 저압 상태이고, 하나로의 경험에 비추어 보면 큰 어려움이 없이 보수가 가능하므로 판형 열교환기로 선정하였다.

향후 열교환기는 1차와 2차 냉각수의 입출구 온도가 정해지면 대수평균온도를 구하고, 전열판의 총열전달계수를 구하여 전열판 개수와 전열면적을 결정할 수 있을 것이다.

#### 4.3.2 1차 냉각수 펌프 (P01/02)

1차 냉각수 펌프 (P01/02)는 배관을 따라 냉각수를 순환한다. 펌프의 모터 동력은 펌프의 임펠러를 회전하여 케이싱 내에서 냉각수를 가압하여 계속 순환하게 되므로 마찰열이 소멸되지 않고 축적되어 모터의 공급동력만큼 냉각수를 가열하므로 열교환기에 의해 냉각되어야 한다. 하나로의 양정과 펌프 효율을 고려하였을 때 순환펌프의 모터 축동력 (BHP)은 171.8 kW로 계산되었다.

운전 중 1차 냉각수 펌프의 전원상실로 모두 정지될 경우 냉각수량의 급격한 감소를 완화시키기 위해 관성력을 가진 관성바퀴가 부착된다. 냉각수 순환펌프는 공랭식 유도전동기에 의해 작동되며 펌프축과 전동기축은 신축성 커플링 (Flexible Coupling)으로 연결된다.

펌프축은 기계니칼 씬(Mechanical seal)로 밀봉하여 누수를 최소화하여야 한다.

#### 4.3.3 배관

배관의 크기는 관 마찰 손실과 배관 진동 등을 고려하여 하나로와 동일한 유속을 가지도록 설계하였다. 이 경우 펌프의 흡입관과 송출관 및 우회관의 크기는 각각 12 인치 (유속: 4 m/s), 14 인치 (5.5 m/s) 및 6 인치 (유속: 4.3 m/s)로 선정하였다.

원자로 냉각계통의 배관은 냉각수의 수질을 유지하기 위해 습동면은 모두 스테인리스강으로 하였다. 그리고 배관의 누수를 최소화하기 위해 용접구조물로 설치하며 2 인치 이하의 소구경은 소켓 용접, 2 1/2 인치 이상의 대구경은 맞대기 용접으로 각각 연결한다.

원자로 정지 시 잔열을 제거하기 위해 원자로 입구 배관에 이중으로 플랩밸브 (V03/04)를 설치하여 자연 대류에 의해 수조수로 원자로 노심을 냉각할 수 있도록 하였다. 적용규격의 요건에 따라 밸브재료시험, 열처리시험, 액체침투시험, 방사선투과시험, 수압시험 및 내진시험을 통하여 구조적 건전성이 입증되고, 성능을 만족하여야 한다.

원자로 수조에 이물질이 투입, 관로 내의 부품 파손 및 시험장치의 일부가 파손되는 경우 파손부품이 관로를 따라 순환하게 되어 원자로 유입구에 모이게 되며 이는 핵연료와 충돌하여 핵연료를 파손시키고, 유로를 막아 냉각기능을 저해할 수 있다. 이물질이 원자로에 유입되지 않고 제거될 수 있도록 각각의 펌프 전단에 스트레이너를 설치하였다. 여과기의 유효 투과율은 관경 대비 100% 이상이어야 차압손실에 영향 없이 기능을 유지할 수 있다<sup>(8)</sup>.

#### 4.4 계통운전

##### 4.4.1 정상운전

냉각계통은 냉각펌프가 기동되면 가압된 냉각수가 순환하면서 열교환기를 통해 냉각기능을 유지하여야 한다. 냉각펌프가 기동하기 위해서는 다음조건이 만족되어야 안전하게 운전할 수 있다.

- 순환펌프의 입출구 밸브가 개방되어 있어야 한다.
- 원자로 수조수의 수위는 저저수위 이상을 지시하여야 한다.

초기조건이 만족하지 않는 경우에는 펌프가 기동되지 않도록 연계되어 있다. 연계기능이 정상상태를 유지하는 경우에만 관련 펌프의 스위치를 가압하면 정상적으로 작동하도록 하였다.

원자로가 기동하여 핵반응이 이루어지면 N16과 같은 방사능을 가진 노심 냉각수가 원자로 수조표면으로 상승하는 것을 억제하기 위해 10%의 노심 우회유량이 유지되도록 하였다. 노심 우회냉각수 일부가 수조상부로 상승하는 것을 억제하기 위해서는 1차 냉각계통을 가동하기 전에 고온층을 가동하여 수조상부에 고온층이 형성되어야 한다<sup>(9),(10)</sup>.

운전 중에 1차 냉각계통에서 누수가 발생할 수 있는 곳은 열교환기, 펌프 및 배관이다. 열교환기의 경우 1차 냉각계통과 2차 냉각계통의 경계를 형성하고 있는 전열판에서 누수가 발생되면 1차 냉각계통의 압력이 2차 계통 보다 높으므로 원자로 냉각수가 감소하게 된다. 2차 냉각수는 1차 냉각수에 의해 방사능에 오염되므로 2차 냉각계통 배관에서 주기적으로 방사선 준위를 측정하여야 한다.

그리고 열교환기의 개스킷을 통해 누수가 생기면 열교환기 하부의 기기실 바닥에 액체폐기물 처리계통으로 연결된 배수 홈이 있어 누출된 냉각수는 이곳으로 모인다. 홈에 설치되어 있는 누수감지기가 작동하면 제어실 CRT에 경보가 발생하여 운전원에게 알려준다. 순환펌프의 기계니칼 씬이나 배관에 누수가 있는 경우에도 열교환기와 동일한 방식으로 제어실 CRT에 경보가 발생하도록 하였다.

원자로 냉각수의 누수나 증발은 수조수위의 감소로 나타난다. 수조수의 수위측정을 위해 수위 전송기가 사용되며 수위가 저수위에 수위에 도달하면 순수 공급계통의 공급밸브가 열리고 고수위에 도달하면 공급밸브가 닫힌다.

수위가 저저 상태이면 CRT 경보 및 경보 표시기가 동시에 작동되며 만약 동 경보가 노심유량의 저유량 또는 고유량과 동시 발생하였을 경우에는 배관 파단으로 누수가 있는 것으로 간주하고 냉각수 펌프는 자동으로 정지된다. 또한 수위가 극저수위에 도달하면 비상보충수가 공급되고 저저저 수위에서 공급이 정지된다.

1차 냉각펌프는 핸드 스위치에 의해 정지할 수 있으나, 필히 원자로가 정지되어야 하고 노심잔열제거를 위해 수조수 온도가 기준온도를 유지하여야 하므로 일정시간 가동 후 정지하여야 한다.

#### 4.4.2. 비정상 운전

원자로에 공급되는 외부전원이 상실되면 1차 냉각 펌프가 정지되고 동시에 원자로 정지계통에 의해 원자로도 정지된다. 이 경우 펌프에 부착되어 있는 관성바퀴로부터 관성력에 의해 냉각수량이 급격하게 감소되는 것을 완화시킬 수 있다. 이러한 펌프의 관성력이 없어지면 냉각계통 유로를 통한 자연 순환 냉각이 이루어지며, 냉각수가 계통을 순환할 수 없는 상태에 도달되면 수조 내 냉각수 유입관에 설치되어 있는 플랩 밸브를 통하여 수조수를 열 흡수원으로 한 자연 순환 냉각이 이루어진다.

2차 냉각수가 상실되면 원자로 제어계통의 증성자 출력과 열출력 간의 차이로 인하여 원자로가 정지된다. 만일 제어계통에 의해 원자로가 정지되지 않으면 1차 냉각계통의 고 출구온도 신호에 의해 원자로가 정지된다.

2차 냉각펌프를 즉시 재가동할 수 있을 때에는 1차 냉각펌프를 계속 가동하여 수조수와 냉각계통수를 혼합하여 잔열을 제거할 수 있으나, 2차 냉각펌프를 즉시 재가동할 수 없을 때는 1차 냉각펌프가 계속 가동되어 발열되므로 1차 냉각펌프를 정지하고 자연 순환으로 잔열을 제거한다. 수조수를 통한 자연 순환 시 원자로 수조수의 온도는 점차 증가하며 표면으로부터의 증발열이 원자로 잔열보다 커지면 다시 감소하기 시작한다.

### 5. 결론

수출전력형연구로 계통설계해석 과제에서 원자로 냉각계통에 대한 개념연구를 수행하였다. 설계에 필요한 1차 냉각계통이 제거하여야 하는 열량은 하나로의 30 MW로 운전하는 경우와 동일한 비율을 고려하여 91.7%가 1차 냉각계통에 의해 열을 제거하도록 하고 나머지는 반사체 냉각계통에 의해 제거하도록 설계 개념을 정하였다.

1차 냉각계통의 경우 순환펌프는 하나로와 양정과 효율을 고려하여 모터의 축동력은 171.8 kW로 계산되었다. 이는 잠정적인 값이지만 전력 설계, 기기설의 냉방설계, 노심의 출력량을 계산하는 데 필요한 자료로 활용할 수 있다.

그러나 이 자료는 향후 상세 설계를 통해 1차 냉각계통의 정확한 양정이 계산되면 수정되어야 하며 관련 설계도 개정되어야 한다.

### 참고문헌

- (1) Y. C. Park, et. al, "Temperature Control Function for HANARO Flow Simulation Test Facility," 2003, Proceedings of HANARO WORKSHOP.
- (2) Y. C. Park, et. al, "Improvement of Temperature Control Function for HANARO Flow Simulation Test Facility," 2004, Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju, Korea, pp. 97.
- (3) KAERI, "Safety Analysis Report of Research Reactor," 1996. HANARO, KAERI/TR-710 /96, Vol. 2.
- (4) H. T. Chae, "Core Cooling flow rate of ARR," 2004, Technical memo, ARR-TH-CR-370-04-011.
- (5) KOPEC, "Design Requirement for Primary Cooling System," 1992, KM-331-DR-P001.
- (6) Kim, H. I, et. al. "Flow Characteristics of Korea Multi-Purpose Research Reactor," 1995, Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics.
- (7) KOPEC, "Design Manual of Primary Cooling System," 1992, KM-331-DM-P01.
- (8) Y. C. Park, J. H. Park, "Design and Test of ASME Strainer for Coolant System of Research Reactor," 1999, J. of Fluid Machinery, Vol. 2-3, pp. 24-29.
- (9) Y. C. Park, J. H. Park, "Study for Reduction Effect of Pool Top Radiation in Research Reactor by Using Ion Exchanger of Hot Water Layer," 1999, J of Fluid Machinery, ISSN 1226-9883.
- (10) Y. C. Park, "Reduction Characteristics of Pool Top Radiation Level in HANARO," 2002, J of Fluid Machinery, Vol. 5-1, pp.49~54.