

하나로 비상 보충수 공급시스템의 노심 주입 냉각유량 해석

박 용 철^{1*}, 김 봉 수², 김 경 연³, 우 종 섭⁴

THE ANALYTIC ANALYSIS OF THE CORE INJECTION COOLING FLOW RATE FOR EMERGENCY WATER SUPPLY SYSTEM IN HANARO

Yong-Chul Park, Bong-Soo Kim, Kyung-Ryun Kim and Jong-Sub Wu

In HANARO, a multi-purpose research reactor of 30 MWth, the emergency water supply system consists essentially of an emergency water storage tank located in the level of about thirteen meter (13 m) above the reactor core, a three inch (3") diameter water injection pipe line including injection valves from the tank to the reactor cooling inlet pipe and a test loop to do periodic system performance test. When the water level of the reactor pool comes down to the extremely low due to a loss of reactor pool water accident the emergency water stored in the tank should be fed to the core by the gravity force and at that time the design flow rate is eleven point four kilogram per second (11.4 kg/s). But it is impossible periodically to measure the injection flow rate under the emergency condition because the normal water level should be maintained during the reactor operation. This paper describes a flow network analysis to simulate the flow rate under the emergency condition. As results, it was confirmed through the analysis results that the calculated flow rate agrees with the design requirement under the emergency condition.

Key Words: 하나로(HANARO), 비상보충수(Emergency Water Supply System), 유동해석(Flow Network Analysis), 중력주입유량(Gravity Injection Flow Rate)

1. 서 론

30 MWth의 연구용 원자로인 하나로⁽¹⁾는 수심이 약 12 m 인 개방형 수조 속에 설치되어 있어 노심을 안전하게 냉각할 수 있다. 그러나 이 수조를 관통하고 있는 1차 배관이나 빔포트의 파단 또는 원자로 수조 라이너 플레이트가 손상되어 누수로 인하여 원자로 수조수를 상실하는 사고가 발생할 수 있다.

이 경우를 대비하여 비상보충수 계통이 설계되었다. 비상보충수 계통은 정상운전 시 원자로 배수조에 수집된 물을 폐기물 계통으로 이송하는 기능과 사고 시 저장하고 있는 비상보충수를 노심에 주입하는 기능을 가지고 있다.

이 기능은 사고로 인하여 원자로 수조가 극저수위에 도달하면 주입밸브가 개방되어 비상보충수가 주입유량 조절밸브를 통해 노심에 공급되어 원자로를 안전하게 냉각하여야 한다⁽²⁾.

비상시에 이러한 기능을 보장하기 위해서는 주기적인 점검

을 하여 그 성능이 입증되어야 한다. 그러기 위해서는 원자로 수조가 극저수위로 모의되어야 하므로 방사능에 오염된 다량의 1차 냉각수를 극저수위까지 배수하는 것은 현실적으로 불가능하다.

따라서 원자로 수조를 극저수위로 낮추지 않고 주기적으로 기능을 점검할 수 있는 방안이 필요하여 유동해석을 하게 되었다.

이 유동해석을 하기 전에 먼저 주입시험관을 통해 비상보충수가 흐를 수 있는 유량을 주입유량 조절밸브의 개도에 따라 측정하였다. 이 측정결과를 유동해석 결과와 비교하여 계산의 타당성을 확인하여 유동해석 방법을 검증하였다.

그리고 검증된 해석방식으로 사고 시 노심에 주입되는 유량을 예측하고, 설계주입유량을 만족하는 주입유량의 밸브개도를 설정하였다. 이 개도에 따라 주입시험관로 흐르는 유량을 주기적으로 측정함으로써 사고시의 비상보충수의 노심주입유량을 점검할 수 있는 방안을 확립하였다.

본 논문에서는 원자로 수조수 상실사고로 인하여 극저수위

때의 주입유량을 예측하기 위한 유동해석에 대해 기술하였으며 비상보충수계통의 설명, 주입시험관의 유량 측정, 주입시험관의 유량해석 방법 검증 및 계산, 검증된 해석방법에 의한 비상보충수의 주입유량 계산 및 결론에 대해 각각 기술하였다.

2. 본 론

2.1 비상보충수계통의 설명

하나로가 안전하게 운전할 수 있는 것은 수심이 약 12 m 인 원자로 수조 속에 수조수에 설치되어 있어 안전하게 냉각시킬 수 있기 때문이다. 그러나 이 수조를 관통하고 있는 1차 냉각수 배관이나, 빔 튜브가 파손되거나, 수조내벽에 설치되어 있는 수조 라이너가 파손되어 수조수 상실사고가 발생할 수 있다. 이러한 사고를 대비하여 비상보충수 공급계통은 원자로를 냉각하기 위해 비상보충수를 공급하여야 한다.

비상보충수 계통은 그림 1과 같이 탱크, 배수조, 배수조 펌프, 밸브를 포함한 배관, 계통기능시험을 위한 주입시험관 그리고 계측제어 기기 등으로 구성되어 있다. 원자로가 정상적으로 가동하고 있는 경우에는 탱크에 50 톤의 비상보충수가 두 대씩 병렬로 설치된 주입밸브(LV001, 002, 003, 004)와 주입시험밸브(HV005)로 가두어져 있다.

정상운전 시에는 비상보충수 탱크가 증발 등으로 저수위(탱크 바닥에서 5.65 m)에 이르면 순수공급밸브(V007)가 개방되어 고수위(탱크바닥에서 5.75 m)를 유지한다.

원자로 수조수 상실사고가 발생하는 경우, 원자로 수조가 극저수위에 도달하면 주입밸브가 모두 개방되어 비상보충수가 3 인치 배관과 16 인치 1차 냉각수 주입관을 거쳐 노심에 11.4 kg/s의 설계주입유량이 유입되어야 한다. 그리고 수위가 회복되어 저저저 수위에 이르면 주입밸브가 모두 닫히게 되어 수위 변화에 따라 반복적으로 비상보충수를 공급하여 원자로 노심을 안전하게 냉각하여야 한다.

이때의 주입유량을 조절하기 위해 수동으로 조작되는 주입유량 조절밸브(V009)가 설치되어 있다. 이 밸브는 글로브 밸브로서 설계유량에 맞도록 개방되어야 하고, 시간 경과에 따라 노심잔열이 줄어든 경우에는 이 밸브를 닫아 유량을 줄여야 한다.

한편 상실된 수조수는 배수조에 수집된다. 배수조 수위가 고수위에 이르면 수집된 수조수가 범람하지 않도록 폐기물 송출밸브(LV007)가 개방되어 배수조 펌프로 폐기물 저장탱크로 이송한다. 이때 원자로 수조 수위가 극저수위에 이르면 폐기물 송출밸브가 닫히고, 수집된 수조수는 원자로 노심에 공급되어 원자로를 안전하게 냉각한다.

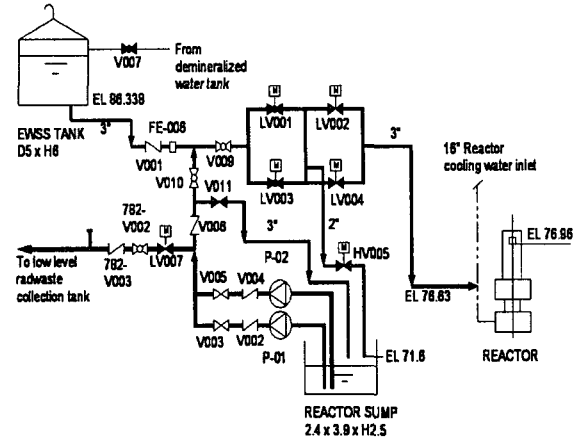


Figure 1 Flow diagram of the emergency water supply system

2.2 유동해석의 이론적 고찰

사고시 비상보충수의 노심 주입유량은 상용화된 배관 유동해석(flow network analysis) 프로그램⁽⁵⁾을 이용하여 계산하였다. 이 프로그램의 계산방법을 이론적으로 고찰해 보았다.

그림 2와 같이 고도(Z_i, Z_j)와 압력(P_i, P_j)이 다른 임의의 관 내면을 흐르면서(Q_{ij}) 관과 마찰하여 압력손실이 발생하며 레이놀드 수(Re), 관경(D) 및 내면의 거칠기에 따라 압력손실이 다르다.

Darcy-Weisbach의 관마찰 손실식에서 관마찰 계수를 계산하기 위한 Hazen-William 실험식은 식 (1)과 같이 표시된다⁽³⁾⁽⁴⁾. Hazen-William 공식은 난류영역의 유동에 대한 관마찰 손실계수를 계산하기 위한 실험식으로서 관의 거칠기를 관형식에 따라 실험계수(C_{HW} , Hazen-William coefficient)를 지정하므로 관 형식이 정해지면 관마찰 손실계수가 정해진다⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

$$f = \frac{6.33g}{C_{HW}^{1.052} D^{0.018} R_e^{0.148} (v/\rho)^{0.148}} \quad (1)$$

유체가 관을 따라 이송하면서 관마찰 외에도 이음관과 밸브류 등에 의한 부차적 마찰 손실이 발생하며 이 마찰 손실계수를 K 라 하면 관경과 레이놀드 수의 함수로 식 (2)와 같이 표시된다⁽⁷⁾.

$$K = \frac{K_1}{Re} + K_2 \left(1 + \frac{1}{D}\right) + K_3 \quad (2)$$

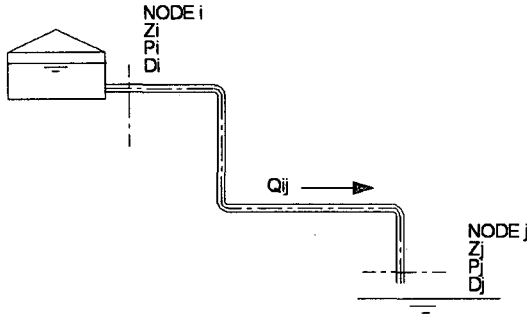


Figure 2 Nomenclature of an arbitrary single pipe

이 관계식은 모든 유동영역에 적용되며 실험식으로써 이음관과 밸브의 형식이 정해지면 압력 손실계수가 결정된다. 여기서, K_3 는 관의 입출구에 적용되며 K_1 및 K_2 는 이음관의 종류에 따라 적용된다.

식 (4) 및 (5)에 의하여 손실계수가 계산되면 Hazen-William의 지수식에 의하여 식 (6)과 같이 마찰 손실을 압력 에너지의 관계식으로 표시할 수 있으며 여기서, a 와 b 는 단위 환산을 위한 상수이다⁽⁸⁾.

$$(P_i - P_j)_{friction} = \left(a \rho \frac{Q_{ij}^2}{D_{ij}^4} \right) \left(b \frac{f_{ij} L_{ij}}{D_{ij}} + \sum K_{ij} \right) \quad (6)$$

유체가 펌프와 같은 기계적 도움 없이 중력으로만 흐르는 경우 총압력손실은 식 (7)과 같이 고도차에 의한 위치에너지가 추가 된다.

$$(P_i - P_j)_{total} = \left(a \rho \frac{Q_{ij}^2}{D_{ij}^4} \right) \left(\frac{b f_{ij} L_{ij}}{D_{ij}} + \sum K_{ij} \right) - d \rho (Z_i - Z_j) \quad (7)$$

이를 유량 Q_{ij} 에 대하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$Q_{ij} = \left(\frac{E_{ij}}{C_{ij}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

여기서,

$$C_{ij} = \left[\left(\frac{a \rho}{D_{ij}^4} \right) \left(\frac{b f_{ij} L_{ij}}{D_{ij}} + \sum K_{ij} \right) \right]^{-0.5}$$

$$E_{ij} = [(P_i - P_j) + d \rho (Z_i - Z_j)]$$

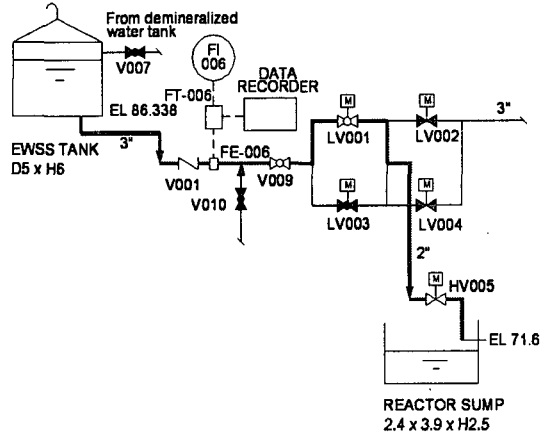


Figure 3 Test loop for measuring the flow rate from the emergency water storage tank to the reactor sump

임의의 해석점 j 에 연결된 각 파이프의 유량의 합에 상응하는 유량 수정값 (Q_j)를 더하거나 빼게 되면 해석점 j 의 유량의 합은 0이 되며 유량 수정값을 포함한 개정된 유량, $f(P_j)$ 은 식 (9)와 같다⁽⁹⁾.

$$f(P_j) = Q_j + \sum \left(\frac{E_{ij}}{C_{ij}} \right)^{0.5} \quad (9)$$

따라서 식 (9)를 각 해석점에 대하여 반복 계산하여 오차 범위 이내로 수렴하는 유량 수정값을 구하여 유량을 결정하고 그 때의 압력변화를 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다.

2.3 주입시험관의 주입유량 측정

비상보충수계통의 설계주입유량을 검증하기 위해 주입시험관으로 흐르는 유량을 측정하였다. 주입시험관은 Fig. 3과 같이 비상보충수가 탱크에서 V009, 유량계 (FE-006), 주입밸브 LV001 및 HV005를 거쳐 원자로 배수조로 유입되도록 정하였다. 그리고 시험조건은 다음과 같이 정하였다.

- 비상보충수 탱크의 수위는 탱크바닥에서 5.745 m를 유지하며 배기구를 통해 대기압과 동일한 압력을 유지한다.
- 탱크의 하부 출구관에 연결된 주입시험관 입구는 5.745 m의 수두압력이 작용한다.
- V009 및 LV001이 개방되고, 나머지 밸브는 모두 닫혀 있어 HV005 이전까지는 비상보충수가 가득 채워져 있다.
- 주입시험관 출구는 고도가 76.1 m이고, 원자로 셉프가 저수위를 유지하므로 시험 중에 주입시험관 출구가 물에 잠기지 않고 대기압 상태를 유지한다.

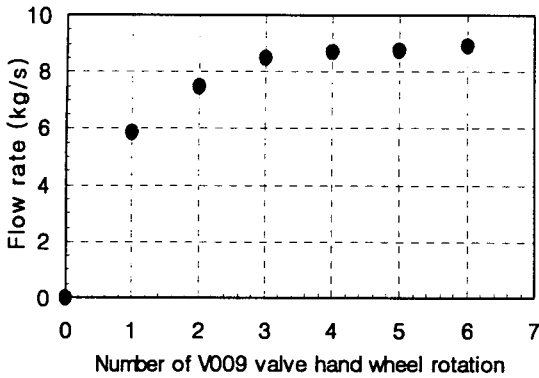


Figure 4 Measured flow rate through the test loop as the opening of the flow control valve (V009)

유량측정은 Fig. 3과 같이 계통에 설치되어 있는 유량계 (FE-006)를 통해 유량지시계 (FI-006)로 1분 간격으로 5회 연속 측정하여 그 평균값을 구하였다. 그리고 유량측정을 검증하기 위해 데이터 기록장치로 동시에 유입량을 측정하였다.

측정방식은 주입유량 조절밸브를 매 개방 시 마다 완전히 발달된 유량의 평균유량으로 표시하였다. 측정결과는 Fig.4에 나타난 바와 같이 HV005를 개방한 후 주입유량 조절밸브를 1바퀴씩 닫으면서 유량을 측정하였다. 유량지시계로 측정된 것이나 데이터 기록장치로 측정된 유량은 큰 차이가 없었다. 주입유량 조절밸브는 6바퀴를 회전하면 완전히 개방되었다.

3 바퀴 닫을 때까지는 유량감소가 완만하게 변화였으나, 그 이상 닫았을 때에는 매 회전 시 마다 많은 양의 유량이 감소되었다. 이는 글로브 밸브의 특성에서 볼 수 있듯이 유량 조절이 가능함을 보여 주고 있다. 최대유량은 주입유량 조절 밸브를 완전히 개방한 상태에서 8.91 kg/s가 주입되었다.

2.4 주입시험관의 주입유량 계산

주입시험관의 유동해석을 위한 해석점 (node)과 파이프를 Fig. 5와 같이 정하였다. 각 해석점은 각 파이프의 끝점으로 표시되며 본 해석에 사용한 것은 6개이고 파이프는 5개이다.

계산조건은 시험조건과 동일하며 경계조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 주입시험관 관 입구에는 5.745 m의 수두압력이 걸리므로 157.638 kPaa (22.875 psia)의 절대압력이 걸린다.
- 주입시험관 관 출구에는 대기압 상태이므로 101.3 kPaa (14.7 psia)의 절대압력이 걸린다.
- 유체의 온도는 20 °C를 기준하며 밀도와 점도는 각각 998 kg/m³ (62.4 lb/ft³)과 0.01 cp (centi-poise)이다.

오차 범위는 1E-6로하고 시행착오방식으로 계산하여 그 결과를 표 1에 나타내었다. 표에서와 같이 주입유량 조절밸브의 개도에 따른 유량은 총유량을 계산한 상태에서 추가차압 (K₃)을 주어 유량을 계산하고 그 값이 실험값과 유사한 경우에 각각의 값을 비교하여 표시하였다.

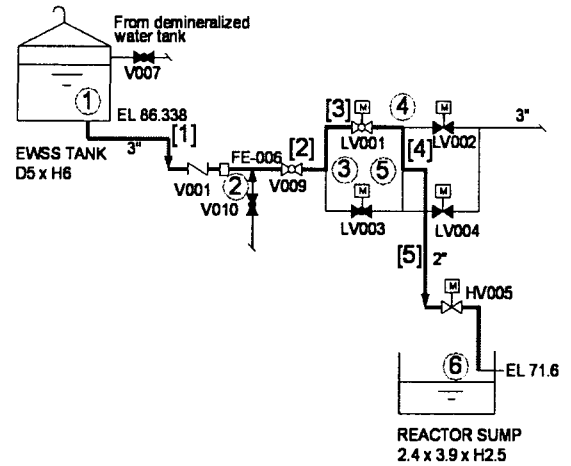


Figure 5 Node diagram of the test loop flow from the emergency water storage tank to the reactor sump

Table 1 Calculation results of the flow rate through the test loop

Number of V009 hand wheel rotation	Measured flow rate (kg/s)	Calculated flow rate (kg/s)	Error (%)	Additional K3
1	5.849	5.9	0.864	120
2	7.464	7.489	0.334	40
3	8.504	8.539	0.410	10
4	8.723	8.716	0.080	6
5	8.782	8.808	0.295	4
6	8.905	8.958	0.592	0

2.5 검증된 계산방법에 의한 비상보충수의 노심 주입 유량 계산

원자로 수조수위가 원자로 수조수 상실사고로 인하여 그 수위가 극저수위에 도달하는 경우 비상보충수가 주입되어야 한다. 이때의 유입경로는 Fig. 6과 같이 비상보충수 탱크, 주입밸브 및 16인치 1차 냉각수관을 거쳐 노심에 유입된다.

그리고 운전조건은 아래와 같이 가장 흐르기 어려운 조건으로 가정하였다.

- 비상보충수 탱크의 수위는 저수위 상태를 유지한다.
- 두 대씩 병렬로 설치된 주입밸브는 각 루프별 하나씩 고장이 나고 그것도 유체가 흐르기 어렵도록 LV002와 LV003이 고장 나 유체가 주입밸브 LV001과 LV004를 지나는 경우로 가정한다.
- 주입관의 출구는 고도 76.63 m에서 1차 냉각계통의 16인치 원자로 냉각수 흡입관에 연결된다.
- 비상보충수는 중력으로 주입된다.
- 이때의 냉각수 온도는 상온 (20°C)로 가정하고 밀도 및 점성은 각각 998 kg/m^3 및 0.01 cp 이다.

유동해석을 위한 해석점과 파이프를 그림과 같이 정하였다. 각 해석점은 각 파이프의 끝점으로 표시되며 본 해석에 사용한 것은 6개이고 파이프는 5개이다. 주입시험관 해석과 다른 점은 [5]번 파이프의 끝점인 해석점 6이 16 인치 1차 냉각배관에 연결되어 있다.

유동해석을 하기 위한 경계조건은 다음과 같이 정하였다.

- 주입관의 입구는 비상 보충수 탱크의 수위에 의해 5.65 m의 수두압력이 걸린다.
- 주입관의 출구는 극저수위의 수위차에 의해 0.33m의 수두압력이 걸린다.

유동해석 방법은 주입유량 조절밸브와 주입밸브가 완전히 개방된 초기 상태에서 가장 많은 유량이 흐르므로 이때의 유량을 계산하였다.

그리고 주입유량 조절밸브를 한 바퀴씩 닫은 상태의 유량을 측정한다. 이때의 주입유량 조절밸브의 부분적 닫힘 상태는 주입시험 배관에서 구한 추가차압으로 모의하였다.

이 조건에서 유동해석한 결과는 그림 8과 같이 주입시험 배관에서 계산으로 구한 유량과 시험으로 구한 유량을 주입유량 조절밸브의 개도에 따라 각각 나타내었다. 유량조절밸브를 완전히 개방하였을 때 흐를 수 있는 최대유량은 약 12.85 kg/s 로 계산되어 설계주입유량을 상회함을 확인하였다.

주입유량 조절밸브를 3바퀴와 4 바퀴를 열었을 때 각각 11.37 kg/s 와 11.89 kg/s 의 유량이 흐르므로 이 밸브를 3.5 바퀴개방하면 설계주입유량을 만족할 것으로 판단된다. 이때의 주입시험관으로 흐르는 유량은 측정 자료에 따라 산술적으로 계산하면 8.6 kg/s 로 계산된다.

따라서 정상운전 시에는 주입유량 조절밸브가 3.5 바퀴로 고정된 상태에서 주입시험관의 유량을 측정하여 이 유량을

만족하고 있다면 원자로 수조수 상실로 인한 극저수위 상태의 모의 없이도 비상보충수의 기능을 점검할 수 있다.

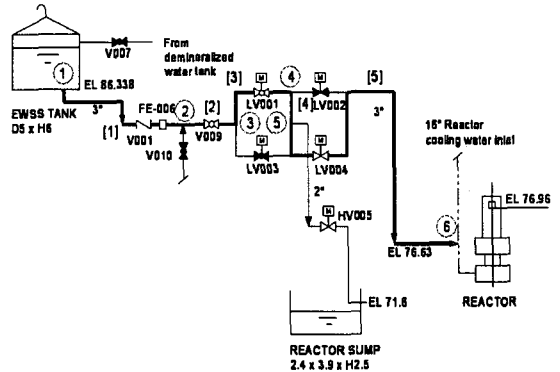


Figure 6 Node diagram of the core injection loop flow from the emergency water storage tank to the reactor core

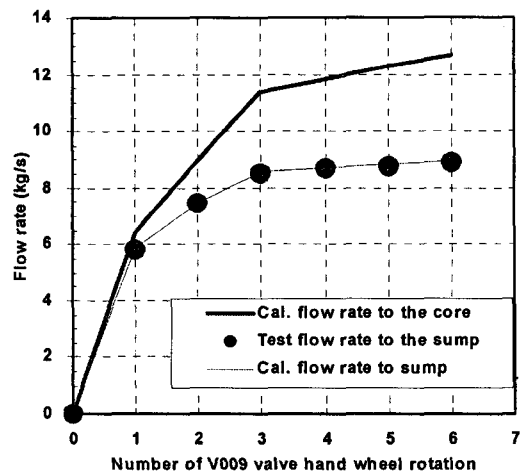


Figure 7 Calculated flow rate through the core injection loop as the opening of the flow control valve (V009)

4. 결 론

하나로는 약 12 m의 원자로 수조 속에 설치되어 있어 안전하게 노심을 냉각할 수 있다. 그리고 원자로 수조수 상실 사고가 발생하더라도 극저수위에 도달하면 비상 보충수가 공급되어 원자로를 안전하게 냉각시킬 수 있다.

그러나 이러한 기능은 정상운전 시에도 주기적으로 점검되어야 하나 원자로 수조를 극저수위로 모의할 수 없으므로 유동해석을 통해 노심주입유량을 예측하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.



1. 주입시험배관을 통해 원자로 배수조에 유입되는 유량은 주입유량 조절밸브의 개도에 따라 측정하였으며 최대 유량은 8.905 kg/s이었다.
2. 이 주입시험관으로 유입되는 유량을 유동해석으로 계산하였을 때 최대 유량은 8.958 kg/s이었다.
3. 주입시험관의 해석에서 추가차압을 모의 하여 유량조절밸브의 개도에 따른 유량이 실험결과와 비교하였을 때 1%의 오차범위 이내에서 잘 일치하여 유동해석 방법을 검증할 수 있었다.
4. 검증된 유동해석 방법으로 원자로 수조수 상실로 인해 원자로 수조 수위가 극저수위에 도달하는 경우를 모의하였을 때 증력으로 유입되는 비상보충수 유량은 설계주입유량을 상회하였다.
5. 설계주입유량에 상응하는 유량은 실험결과를 산술평균하였을 때 약 8.6 kg/s이며 이 이상의 유량을 유지하기 위해서는 유량 주입밸브가 3.5 바퀴이상 개방되어야 한다.
6. 이에 따라 주입시험관에서 설계유량에 상응하는 유량을 주기적으로 측정함으로써 사고시의 유량을 검증할 수 있는 방안을 확립하였다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Park, Y.C. et al. 1996, "System Performance Test in HANARO", the 5th ASRR Vol.1, p.240-246.
- [2] KOPEC, 1992, "Design Manual for KMRR Emergency Water Supply System," KM-346-DM-P001 rev. 1.
- [3] Flow Network Analysis, 5.0.C, "User Manual," Kelix Software Co., 1985.
- [4] Park, Y.C. et al. 1999, "Study for Reduction Effect of Pool Top Radiation in Research Reactor by Using Ion Exchanger of Hot Water Layer," J of Fluid Machinery Vol. 2-4, pp. 40~47.
- [5] Jepson, R. W. "Analysis of Flow in Pipe Networks," Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1977.
- [6] Hydraulic Institute, "Hydraulic Institute Standards for Piping Friction Loss", 14th. Edition, 1983.
- [7] Hooper, W. B. "The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings," Chem. Engr., pp. 97-100, 1981.
- [8] J.A. Roberson, J.J. Cassidy & M.H. Chaudhry, "Hydraulic Engineering", John Wiley and Sons, Inc., 2ed, 1998.
- [9] Hardy Cross, Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors, Univ. Ill. Bull. 286, 1936.