

하나로 유동모의 설비의 온도 제어기능의 개선

Improvement of Temperature Control Functions for HANARO Flow Simulation Facility

박용철, 우종섭, 조영갑, 이중희, 김양곤

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

30 MWth의 다목적 연구용 원자로인 하나로는 개방수조형이며 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 정상운전 중에 있다. 하나로의 이용을 활성화하기 위해서는 많은 실험들이 안전하게 수행되어야 한다. 이를 위해 하나로 유동모의 설비는 실험 장치를 하나로에 장전하기 전에 구조적 건전성과 그 성능을 예측하기 위해 설치하였다. 이 설비는 별도의 열원 없이 펌프의 발열량을 이용하여 순환유체를 데우고, 냉각탑의 냉각능력으로 일정한 온도를 유지하여 하나로와 동일한 운전온도를 유지하여야 하나, 냉각용량이 부족하여 운전온도를 유지할 수 없었다. 본 논문에서는 온도 제어기능의 개선방안 및 실험결과를 기술하였다. 결과적으로, 순환펌프에서 발열되는 열량은 그 펌프의 축동력과 비슷하다. 그리고 그 이상의 냉각능력을 가질 때 펌프의 발열량을 제거하여 운전온도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

The HANARO, a multi-purpose research reactor of 30 MWth open-tank-in-pool type, has been under normal operation since its initial criticality in February, 1995. Many experiments should be safely performed to activate the utilization of the HANARO. A flow simulated test facility was developed for the verification of structural integrity of those experimental facilities and for the prediction of their performances prior to loading in the HANARO. Without any other heat source, a heat

generation of a circulation pump is applied to heat a circulation flow and a cooling capability of a cooling tower is used to take the heat out of the flow for maintaining a similar operating temperature with that of HANARO. But the operating temperature can not be maintain the required limits, due to the lack of the cooling capacity. This paper describes an improvement to control the operating temperature and the test results. As results, it was confirmed through the test results that the heat generation of the pump is similar with the break horse power of the pump and that the cooling capability exceeded the power is possible to maintain the operating temperature as taking out of the heat generation of the pump.

1. 서 론

30 MWth의 연구용 원자로인 하나로는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 정상운전 중에 있다. 하나로의 이용을 활성화하기 위해서는 많은 실험들이 안전하게 수행되어야 한다. 이를 위해 하나로 유동모의설비는 실험 장치를 하나로에 장전하기 전에 구조적 건전성과 그 성능을 예측하기 위해 설치하였다. 이 설비는 하나로 노심의 약 반으로 구성된 1/2 노심 구조물 집합체에 핵연료 대신에 유동모의 오리피스를 장전하여 방사능의 피폭 없이 시험할 수 있는 이점이 있다.

이 설비가 하나로와 동일한 유동특성을 모의하기 위해서는 1/2 노심 구조물 집합체에 하나로와 동일한 노심유량과 노심우회유량을 공급하여야 하고, 하나로와 동일한 운전온도를 모의하여야 한다. 이 설비는 별도의 열원 없이 순환펌프의 발열량에 의해 순환유체를 데우고, 이에 맞는 냉각능력을 유지하여 운전온도를 유지한다. 1차 설계에서는 펌프의 손실 에너지가 발열되어 순환유체를 데우는 것으로 간주하고 냉각설비를 하였으나 냉각용량이 부족하여 순환유체의 온도가 점점 상승하였다.

본 논문에서는 냉각능력을 개선하기 위해 실험하였으며 하나로 유동모의 설비의 구성, 실험방법, 개선 전의 냉각능력, 순환펌프의 발열량 실험, 개선 후의 냉각능력에 대해 각각 기술하였다.

2. 본론

2.1 하나로 유동모의 설비의 구성

이 설비는 1/2 노심 구조물 집합체 (이하 집합체)와 유체순환계통 및 보조계통으로 구

성된다. 이 집합체는 하나로와 마찬가지로 플레넘, 그리드 플레이트, 노심, 침니 및 모의 수조로 이루어진다. 이 집합체의 노심은 그림 1과 같이 하나로의 반에 해당하는 육각 유동관 13개와 외부 노심 3개를 포함한 원형 유동관 7개로 구성된다. 하나로와 다른 점은 각 유동관에는 핵연료 대신에 핵연료와 동일한 유동을 모의하기 위해 설계차압 ($210 \text{ kPag} \pm 10\%$)을 유발할 수 있는 유동모의 오리피스가 장착되어 방사선의 피폭 없이 실험할 수 있다.

집합체가 하나로와 동일한 유동특성을 모의하기 위해 육각 유동관과 원형 유동관에 각각 설계유량 19.6 kg/s 와 12.7 kg/s 및 겹 유량을 포함하여 369 kg/s 의 노심유량이 공급된다. 그리고 노심유량이 상향유동이므로 노심을 지나면 단면적의 변화에 의해 침니에서 노심제트가 발생하므로 이를 억제하기 위해 총 유량의 10%에 해당하는 41 kg/s 의 노심우회유량이 공급된다. 이 유량은 침니의 상부 유입구로 공급되어 침니 하부에 있는 출구를 통해 순환펌프에 흡입되므로 그 흐름방향이 노심유량과 반대가 되어 노심제트를 억제한다⁽¹⁾.

노심유량과 노심우회유량을 포함한 410 kg/s 의 총유량을 공급하기 위해 유체순환계통을 설치하였다⁽²⁾. 이 계통은 그림 2와 같이 순환펌프, 노심유량 배관, 노심우회유량 배관, 노심우회유량 조절밸브 (이하 조절밸브), 계기류, 현장 제어반 및 데이터 기록장치로 구성된다.

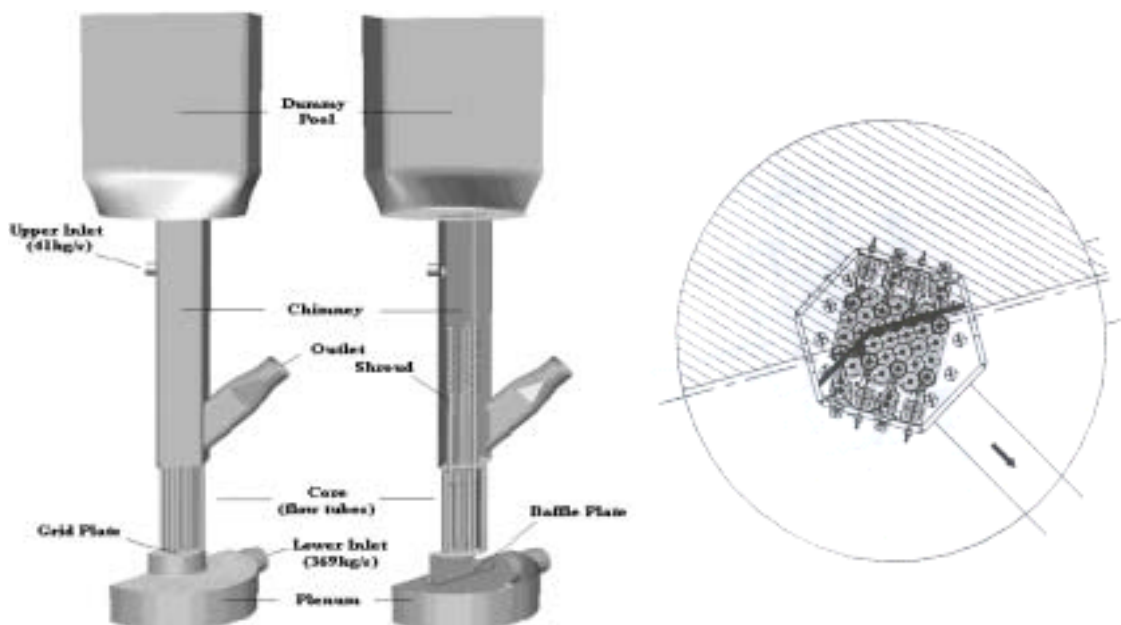


Fig. 1 Half core structure assembly

순환펌프는 침니의 하부 출구를 통해 노심유량과 노심우회유량을 흡입하여 플레넘의 유입구에 노심유량을 공급하고, 노심우회유량을 순환펌프의 송출관에서 분기시켜 노심우회유량 배관을 따라 침니의 상부 유입구로 공급한다. 모의수조는 집합체의 수위를 유지하며 수위에 따라 솔레노이드 밸브가 자동으로 개폐된다.

하나로와 동일한 유동특성을 모의하기 위해 동일한 운전온도와 수질을 유지하기 위해 보조계통이 설치되었다⁽³⁾. 이 계통은 그림 2에 표시한 바와 같이 정화펌프, 여과기, 열교환기, 냉각탑, 냉각수 펌프, 온수기, 계기류 및 배관으로 구성된다. 그리고 보조계통은 순환펌프가 정지되는 경우 동파방지를 위해 집합체와 보조계통의 입출구 온도가 모두 5°C 이하가 되면 자동으로 온수기와 정화펌프가 가동되어 가열된 물이 순환된다.

그러나 냉각능력을 시험한 결과, 냉각시설은 순환펌프에서 발생하는 열을 제거하지 못하여 순환유체의 온도가 하나로의 운전온도를 상회하였다. 이를 개선하기 위하여 그림 1과 같이 노심우회유량 배관에 열교환기를 설치하고, 이 열교환기의 냉수를 공급하기 위해 옥외에 냉각탑과 냉수를 순환하기 위한 냉각펌프를 각각 설치하였다. 그리고 유동모의설비의 오리피스 유동특성을 실험하기 위해 실험대를 추가 하였다.

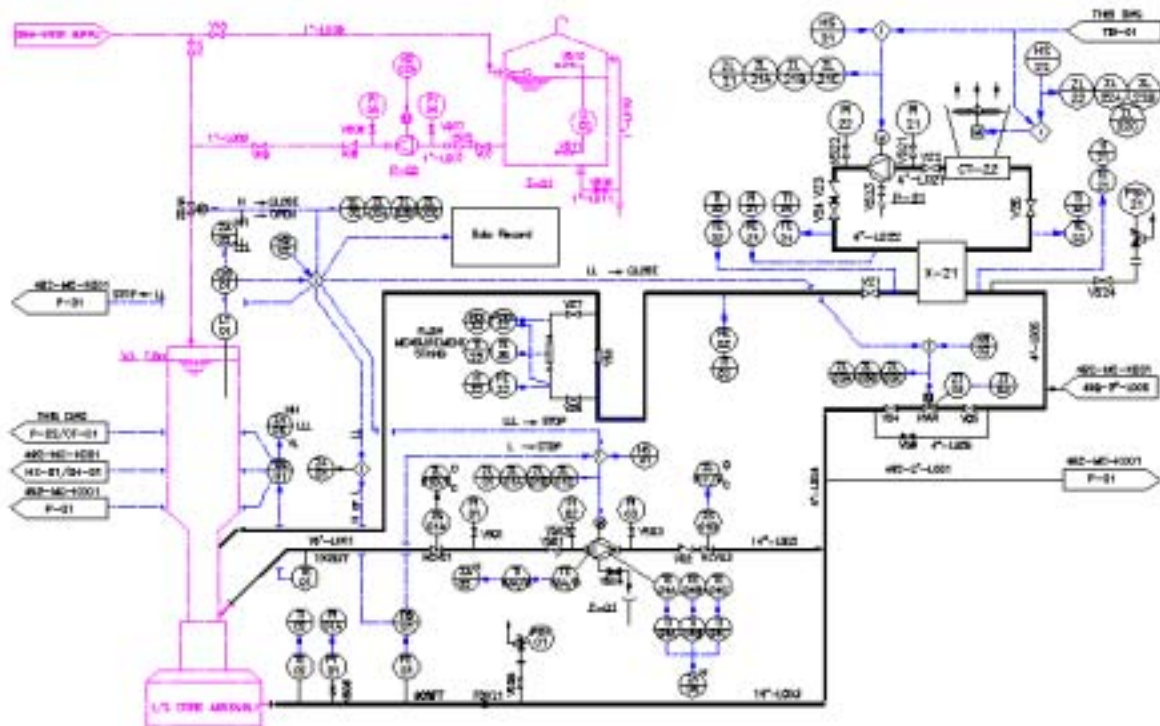


Fig. 2 P&ID of flow circulation system

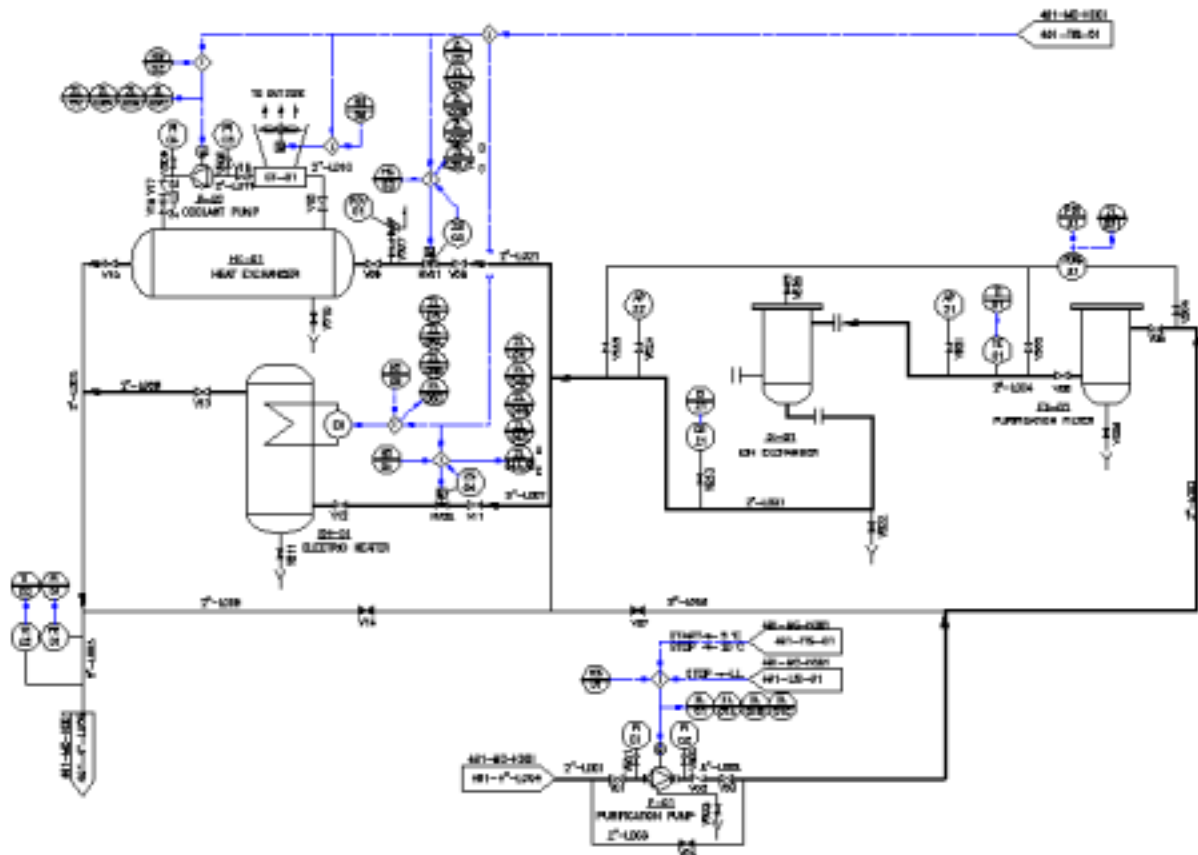


Fig. 3 P&ID for support system

그리고 보조계통에는 순수인 순환유체의 수질을 유지하기 위해 그림 2와 같이 이온교환기와 전도도계를 추가하였다⁽⁴⁾.

2.2 온도조절방법

하나로 유동모의 설비는 하나로와 달리 핵연료를 장전하지 않고 하나로와 동일한 유동특성을 모의하기 위해 유동모의 오리피스를 장전하므로 방사능의 위험 없이 실험할 수 있다. 그러나 하나로와 동일한 운전온도를 유지하기 위해서는 별도의 열원 없으므로 순환 펌프에서 발열되는 열을 이용하고, 적절한 냉각설비로 하나로와 동일한 운전온도를 유지하여야 한다. 순환펌프는 35 mAq의 양정에서 410 kg/s의 유량을 공급하므로 수동력은 140.6 kW이고, 펌프효율 75%를 고려하면 187 kW의 축동력이 필요하여 225 kW의 모터를 설정하였다.

에너지 보존법칙에 의해 모터의 전기 에너지는 펌프의 임펠러를 가동하여 유체 에너지

지로 이용된다. 한편 전기 에너지의 일부는 임펠러의 수력손실, 체적손실 및 기계적 손실에 의해 손실된다. 이 손실 에너지는 대부분이 마찰에 의한 열손실로 표시되며 순환유체를 가열한다. 이를 수식으로 표시하면 수온은 식 (1)과 같이 증가하고, 이를 식 (2)에 대입하면 열손실량을 계산할 수 있다⁽⁵⁾. 따라서 순환펌프가 물을 가열하는 열량 (발열량)은 펌프의 비효율 에너지인 약 47 kW와 비슷하여 50 kW로 정하였다.

$$\Delta T = \frac{100 - \eta p}{427 \eta p} \cdot H \quad (1)$$

$$Q = \frac{C_p \cdot \gamma \cdot m \cdot \Delta T}{859.846} \quad (2)$$

여기서, ΔT : 수온 상승량 (°C)

ηp : 펌프의 효율 (%)

H : 펌프의 전양정 (m)

Q : 펌프의 발열량 (kW)

C_p : 펌프입구수온에 따른 정압비열 (kcal/kg°C)

γ : 펌프 입구 수온에 따른 물의 비중량 (kg/m³)

m : 유량 (kg/s) 이다.

이 발열량에 따라 정화유량이 4.1 kg/s이면 순환유체를 냉각할 수 있는 온도차가 2.9 °C이므로 열교환기의 온수 입출구 온도는 각각 37 °C와 40 °C로 정하였다. 냉수는 온수와 동일한 유량으로 정하고, 열교환기의 냉수 입출구 온도는 각각 32 °C와 35 °C로 정하였다. 그리고 냉각탑의 냉각용량은 50 kW로 정하고 냉각탑 회전수를 3단으로 조절하여 50%, 100% 및 150% 조절이 용이하도록 하였다.

2.3 실험조건 및 방법

유동모의설비의 온도조절 기능실험은 정상적인 운전상태에서 수행되어야 하므로 각 기기에 대한 기능시험을 절차서^{(6),(7)}에 따라 수행하였으며 표 1과 같이 각 기기는 설계요건을 만족하였다. 노심유량과 노심우회유량은 그림 4와 같이 조절밸브를 70% 조정하였을 때 노심유량과 노심우회유량은 410 kg/s와 36.2 kg/s를 나타내어 설계요건을 만족하였다.

표 1 실험기준 및 결과

내용			실험기준	실험결과	실험방안
순환 펌프	설계유량	kg/s	410	410	노심유량, 노심우회유량 및 펌프 입출구 차압 측정
	설계양정	mAq	35	36.2	
노심유량		kg/s	369	369	노심우회유량 조절밸브를 70% 개방
노심우회유량		kg/s	41	42	
정화 펌프	설계유량	kg/s	4.1	7.5	정화유량 및 펌프 입출구 차압 측정
	설계양정	mAq	35	35.7	
냉수 펌프	설계유량	kg/s	4.1	6.1	조음과 유량계로 유량을 측정하고, 펌프 입출구 차 압측정
	설계양정	mAq	35	42.3	
열 교 환 기	총열량	kW	50	74.6	온수 출구온도 및 냉수 출 구온도 측정
	유량	kg/s	4.1	4.78	
	온도차	°C	3	3.74	
	입구온도	°C	40	42.92	
	출구온도	°C	37	39.18	
냉 각 탑	총열량	kW	50	74.4	
	유량	kg/s	4.1	6.1	
	입구온도	°C	32	30.4	
	출구온도	°C	35	33.32	

유동모의설비의 정상운전방식은 충수용 솔레노이드 밸브를 자동위치에 놓으면 1/2 노심 구조물의 집합체와 배관에 순수가 충수된다. 모의수조의 수위가 저수위 이상이면 배기시켜 수위는 고수위까지 충수한다. 유체순환계통의 순환펌프, 냉각펌프, 냉각탑 및 보조계통의 정화펌프, 온수기, 온수기 입구밸브, 열교환기 입구밸브의 스위치를 차례대로 자동위치에 놓으면 순환펌프와 정화펌프가 기동하여 순환유체를 정화하고 순환유체의 온도가 상승된다.

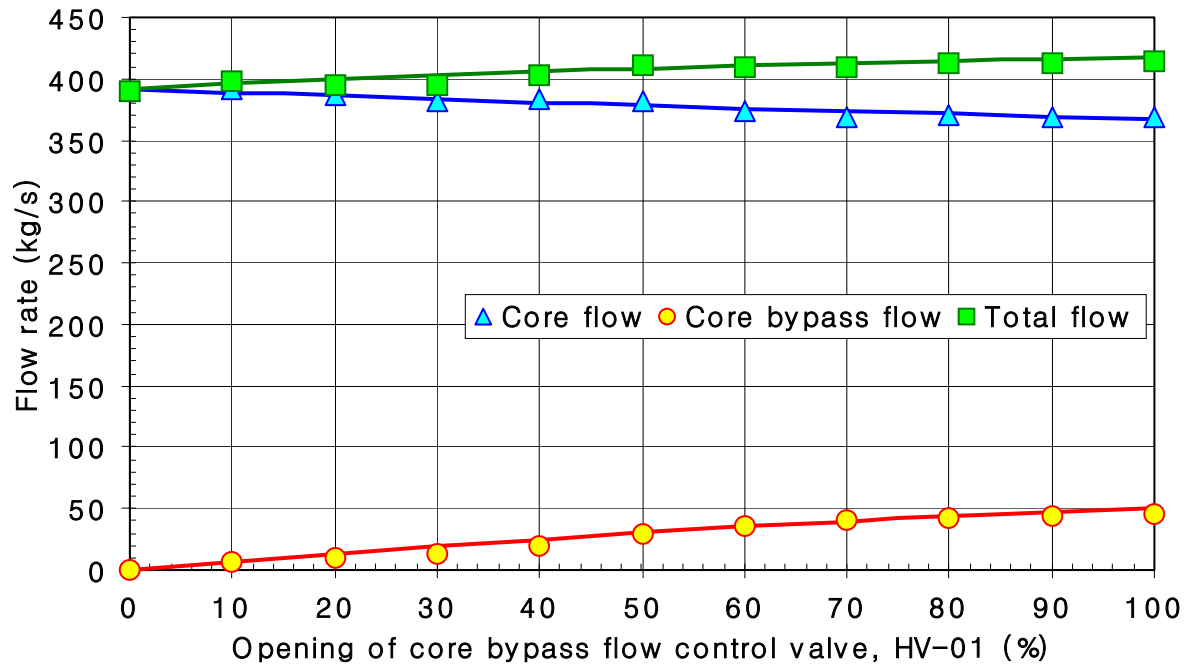


Fig. 4 Core flow and core bypass flow control by the opening of bypass control valve

집합체의 출구온도가 35 °C에 이르면 온도 감지기 (TE-01)에 의해 온수기 입구 밸브가 닫히고 온수기가 정지하며 동시에 보조계통의 열교환기 입구밸브가 열린다. 수온이 40 °C에 이르면 보조계통의 냉각펌프 및 냉각탑의 냉각팬이 가동한다. 수온이 38 °C에 이르면 냉각펌프와 냉각팬이 정지한다.

냉각능력을 개선한 이후에는 보조계통의 냉각펌프와 냉각팬이 작동하는 온도에서 노심우회유량 배관에 추가된 냉각펌프와 냉각탑이 작동하며 이 냉각팬은 50%, 75% 및 100%의 냉각능력으로 운전되므로 온도부하에 따라 냉각용량을 수동으로 선택하여야 한다. 각 기기가 정상적으로 가동되고 있을 때 온도조절기능을 시험하기 위한 온도 감지기, 유량계, 수위조절기 및 압력계는 그림 1과 같이 현장 제어반을 통해 데이터 기록장치에 의해 기록, 저장된다.

2.4 실험결과 및 고찰

2.4.1 개선 전의 온도제어

성능시험 단계에서 유동모의 오리피스가 제작 중이므로 노심에서의 설계차압을 유발하기 위해 세정 시에 사용한 스트레이너를 사용하였으며 오리피스와 동일한 차압을 모사할 수 있어 순환펌프의 성능을 시험할 수 있었다.

각 기기의 성능이 입증된 상태에서 순환펌프, 보조계통의 정화펌프, 냉수펌프 및 냉각탑을 약 150분간 가동하여 온도제어 기능을 점검하여 그림 5에 나타내었다. 집합체의 출구온도가 30 °C 이전, 30 °C - 40 °C 및 그 이후로 구분하여 냉각탑을 50%, 100% 및 150%의 냉각능력으로 각각 가동하였다. 측정결과, 냉각능력을 100%로 가동하여도 순환유체의 온도가 제어되지 않고 선형적으로 변화하였다. 냉각능력을 150%로 가동하였을 때에는 순환유체의 온도상승은 둔화되었지만 45°C 이상으로 상승함을 보였다.

그리고 냉각탑과 열교환기의 성능이 유지되는 상태에서는 냉수에 의해 냉각된 열교환기의 온수 출구온도는 150%의 냉각용량으로 전환한 시점에서는 일시적으로 낮아지는 경향을 보였으나 그 후 계속 상승함을 보여 냉각능력이 충분하지 못한 것으로 판단되었다.

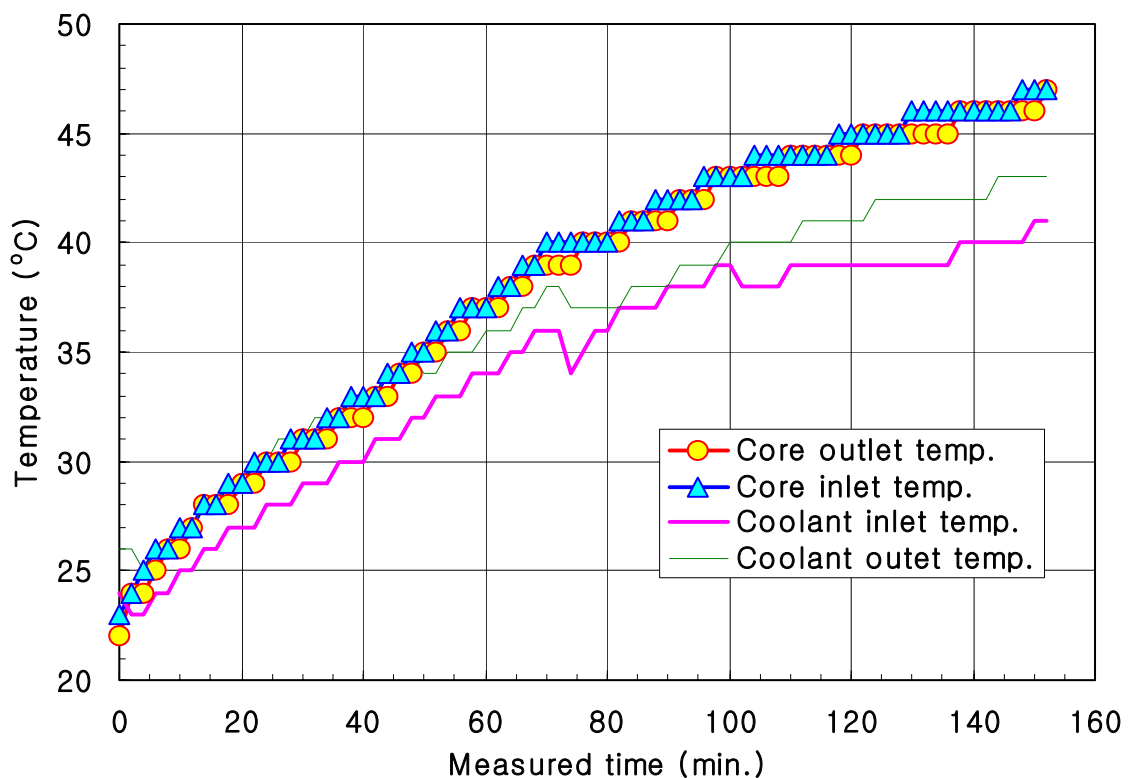


Fig. 5 Temperature control of flow simulation facility

2.4.2. 순환펌프의 발열량

실제 순환펌프의 발열량을 확인하기 위하여 순환펌프만 약 2시간 가동하여 순환유체의 온도상승을 조사하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 집합체의 입구온도 (Ti)와 출구온도 (To)를 측정하여 각각 점으로 나타내고, 추세선을 추가하였다. 입출구의 온도차는 평균적 약 1.2 °C를 나타내었다. 이는 표면에서 대기온도와의 온도차에 의한 열손실로 보인다. 시간이 경과할수록 온도 차이가 늘어나므로 보수적으로 출구온도를 기준으로 표 2와 같이 발열량을 계산하였다.

순환유체의 온도는 운전온도인 40 °C를 기준하였을 때 계산된 열량은 172 kW이며 이는 순환펌프에 공급되는 전력의 75%에 해당한다. 하나로의 경우에는 1차 냉각펌프에 의한 발열량을 실험한 결과 공급전력의 100%에서 80%에 해당하였다⁽⁸⁾. 이러한 발열은 유동모의 설비와 같이 유체가 계속 순환되는 경우에는 유체 에너지가 소모되지 않고 모두 열에너지로 나타나는 것으로 간주된다.

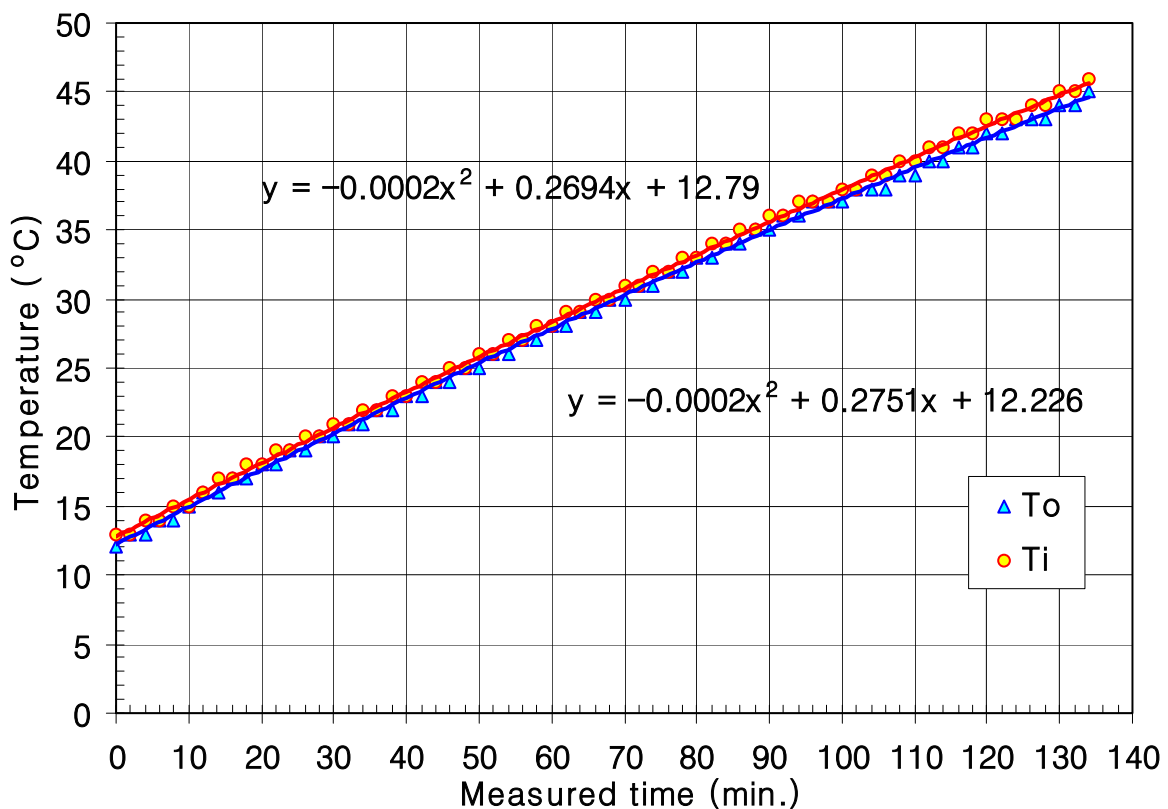


Fig. 6 Temperature variation of circulation water heated by circulation pump

표 2 유동모의설비의 순환펌프에 의한 발열량

내용	단위	유동모의설비
시작온도	°C	12
끝 온도	°C	45
온도차	°C	33
유체질량	kg	1.00E+04
비열	kJ/kg°C	4.187
시간차	min. (sec.)	134 (8040)
펌프의 발열량	kW	172

표 3 230 kW의 냉각능력을 보완하기 위한 주요기기 사양

내용		열교환기	냉각탑	냉각펌프
형식		판형	옥외용	원심형
입출구 온도 (°C)	온수	40-38.7	-	-
	냉수	34-36	36-34	-
순환유량 (kg/s)	온수	41	-	-
	냉수	27.5	27.5	27.5
습구온도 (°C)		-	28	-
양정 (mAq)		-	-	35
유체 접촉면 재질		Stainless steel	PVC	Stainless steel

따라서 혹서기의 대기온도를 고려하면 열손실이 많지 않으므로 순환펌프와 정화펌프에 공급되는 전력은 모두 열에너지로 나타나는 것으로 간주하여 발열량은 230 kW로 정하였다. 기존의 냉각능력은 75 kW이며 발열량의 약 33%에 해당한다. 이는 발열량이 예상보다 증가하거나, 냉각능력이 저하되는 경우를 대비한 예비기기로 사용할 계획이다.

2.4.3 개선후의 온도조절기능

냉각능력 230 kW를 보완하기 위해서는 열교환기의 유량이 증가하므로 이 유량을 감수할 수 있는 노심우회유량 배관에 열교환기를 설치하였다. 열교환기와 냉각탑의 사양을 표 3과 같이 설정하였다. 열교환기는 장소가 제한되므로 판형 열교환기를 사용하였다. 냉각탑은 옥외에 설치하고 대기를 이용하여 냉각팬으로 강제 냉각하는 방식을 사용하였으며 공기와 냉각수의 흐름은 교차방식을 적용하였다.

노심에는 육각 및 원형 유동관에 유동모의 오리피스가 장전되고, 순환유량을 조절하기 위해 유량조절 오리피스를 장전한 상태에서 냉각능력을 50%, 75% 및 100% 용량으로 온도를 조절할 때, 노심의 입출구 유량의 온도변화를 그림 7, 8 및 9에 나타내었다.

그림 7에서 50% 용량으로 운전하는 경우 노심의 출구온도가 약 40 °C일 때 냉각팬이 기동하여 37.95 °C로 낮춘 후에는 온도변화가 정체됨을 보여주고 있다. 이는 발열량과 냉각능력이 같은 상태이며 최소한의 냉각용량임을 알 수 있다.

그림 8과 9에서 75%나 100%의 용량에서는 노심의 출구온도가 40 °C에서 낮아지기 시작하여 계속적으로 낮아짐을 보이고 있다. 이는 냉각능력이 발열량을 상회하여 순환유체의 온도가 낮아지므로 충분한 냉각능력이 유지됨을 알 수 있다.

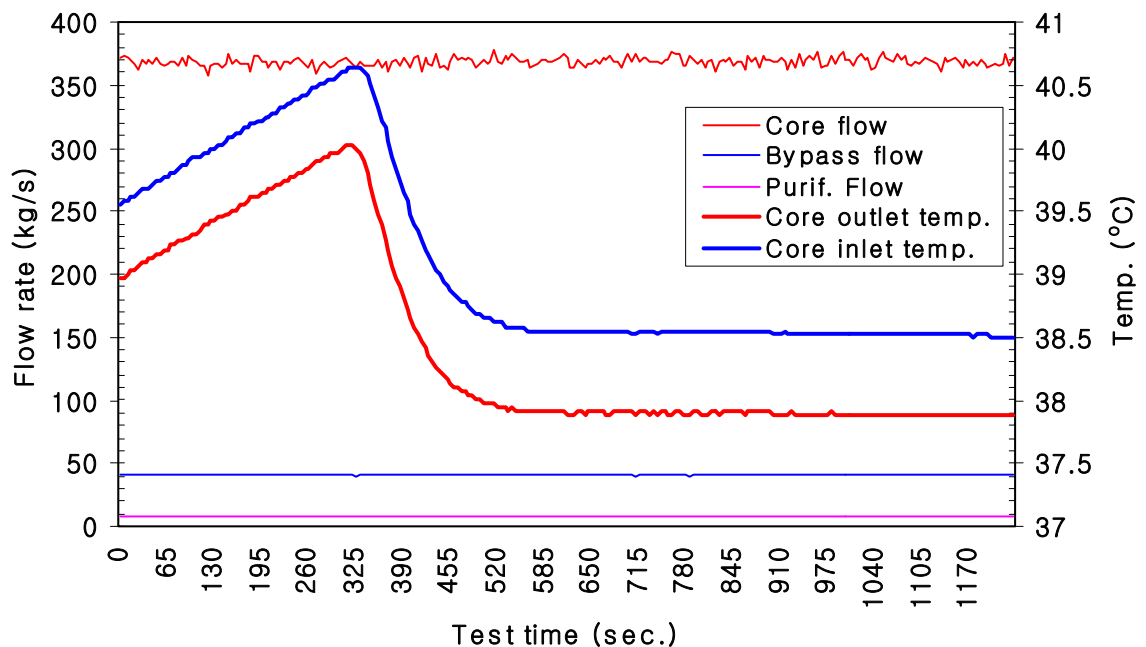


Fig. 7 Temperature variation of core flow under 50% of cooling capacity

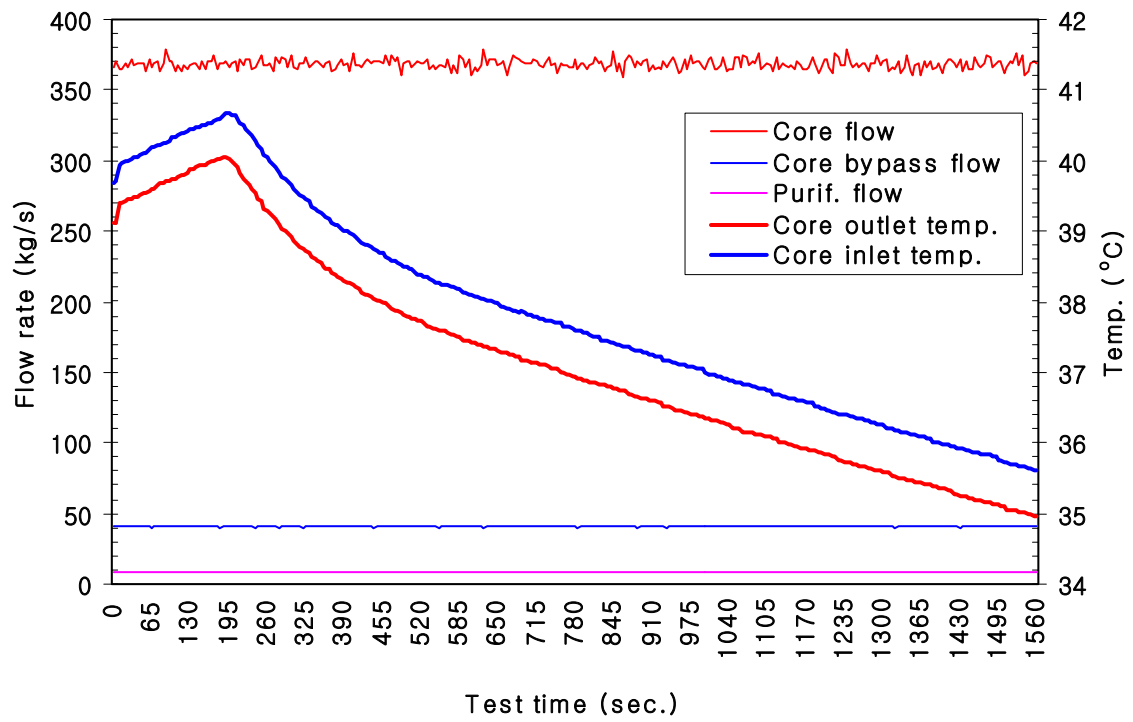


Fig. 8 Temperature variation of core flow under 75% of cooling capacity

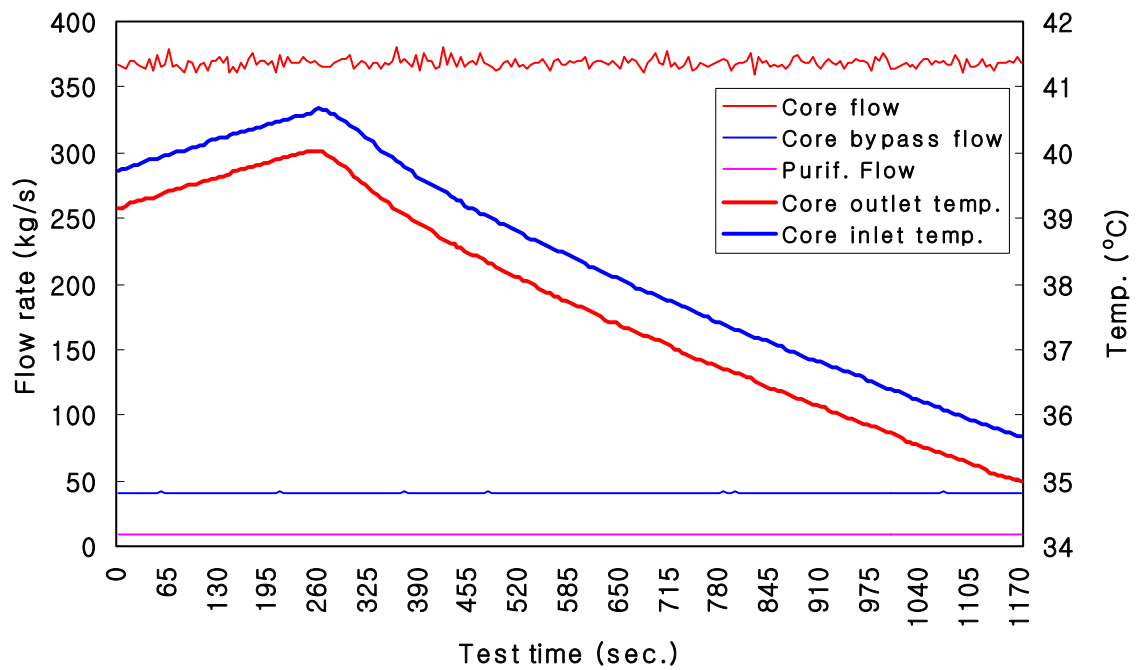


Fig. 9 Temperature variation of core flow under 100% of cooling capacity

3. 결론

하나로 유동모의 설비는 하나로와 달리 핵연료 대신에 유동모의 오리피스를 이용하여 유동특성을 모의하므로 순환유체는 다른 열원 없이 순환펌프의 발열량에 의해 가열된다. 하나로와 운전온도와 동일한 온도를 유지하기 위해 냉각시설을 설치하였으며 그 성능을 시험하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 순환펌프의 손실에너지가 열로 전환된다고 가정하여 냉각용량을 정한 경우 펌프의 발열량이 냉각능력을 상회하여 순환유체의 온도를 조절할 수 없었다. 이는 순환유체가 노심과 배관 등에서의 마찰열이 발생하여 온도가 상승하는 것으로 판단된다.

(2) 순환펌프에서 발생하는 열을 시험하였을 때 순환펌프의 발열량은 172 kW가 발생하였으며 공급 전력의 약 75%에 해당하였다. 흑서기 등 주변 대기 조건을 고려하여 모든 전력이 발열된다고 판단하고 냉각능력을 230 kW로 정하고 냉각시설을 개선하였다.

(3) 개선한 냉각용량의 50%로 냉각하는 경우, 노심의 출구온도가 약 40 °C일 때 냉각팬이 기동하여 37.95 °C로 낮춘 후에는 온도변화가 정체됨을 보여주고 있다. 이는 발열량과 냉각능력이 같은 상태이며 최소한의 냉각용량임을 알 수 있다.

(4) 그리고 75%와 100%의 냉각용량에서는 노심의 출구온도가 40 °C에서 낮아지기 시작하여 계속적으로 낮아짐을 보이고 있다. 이는 냉각능력이 발열량을 상회함으로 순환유체의 온도가 낮아지므로 충분한 냉각능력이 유지됨을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Y.C.Park, et., al, "Flow Analysis of HANARO Flow Simulated Test Facility", Proceedings of the fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference, Nagoya, Japan, (2002).
- [2] Y.C.Park, et., al., "Technical Specification for Fabrication of Flow Circulation System in HANARO Flow Simulation Facility", KAERI/TR-2290/2002 (2002).
- [3] Y.C.Park, et., al, "Technical Specification for Fabrication of Support System in HANARO Flow Simulation Facility", KAERI/TR-2299/2002 (2002).
- [4] Y.C.Park, et., al, "Technical specification of design verification equipment in HANARO flow simulation experimental facility", KAERI, HAN-DS-491-K002, 2003.

- [5] “JRR-3 1次 冷却系 熱計算書” p2, JAERI
- [6] Y.C.Park, "Performance Test Procedure", HAN-491-TP-K01, KAERI, 2002.
- [7] Y.C.Park, "Performance Test Procedure", HAN-492-TP-K01, KAERI, 2002.
- [8] 김현일, “하나로 펌프 열출력”, Speed memo, SM-TS-080, KAERI, 1995.