

하나로 핵연료 시험루프의 주냉각수 계통 유동해석

박용철* · 이용섭** · 지대영*** · 안성호**** · 김영기*****

The flow characteristics of a Main Cooling Water System for Nuclear Fuel Test Loop Installed in HANARO

Young-Chul Park*, Young-Sub Lee**, Dai-Yong Chi***, Seong-Ho Ahn****, and Yong-Ki Kim*****

Keywords : HANARO (하나로), Fuel test loop(핵연료시험장치), Main cooling water system(주냉각수계통), Flow network analysis(유동해석)

Abstract

A nuclear fuel test loop (after below, FTL) is installed in IR1 of an irradiation hole in HANARO for testing neutron irradiation characteristics and thermo hydraulic characteristics of a fuel loaded in a light water power reactor (PWR) or a heavy water power reactor (CANDU). There is an in-pile section (IPS) and an out-pile section (OPS) in this test loop. When HANARO is normally operated, the fuel loaded in the IPS has a nuclear reaction heat generated by a neutron irradiation. To remove the generated heat and to maintain an operation condition of the test fuel, a main cooling water system (MCWS) is installed in the OPS of the FTL. The pump can not continuously suck a fluid and not pressurize the fluid during a cold function test. To verify the flow characteristics of the MCWS, a flow net work analysis has been conducted. When the higher elevation pipelines wholly filled with coolant, it was confirmed through the analysis results that the pump pressurized the coolant normally. And the analysis results described the system characteristics with operation temperature and pressure variation satisfactorily.

1. 서론

하나로⁽¹⁾는 IR1 조사공에 가압경수로 (light water power reactor, PWR)와 중수로 (heavy water power reactor, CANDU)에 사용되는 핵연료의 중성자 조사 특성 및 열수력 특성을 실험하기 위해 핵연료 시험루프 (FTL, fuel test loop)⁽²⁾를 설치하였다. 이 루프는 노내 시험부 (IPS, in-pile section)와 노외 시험부 (OPS, out-pile section)로 구성된다. 하나로가 정상적으로 가동하는 경우, IPS에 장전된 핵연료에서 중성자 조사로 인하여 열이 발생한다. 이 열을 제거하고 운전조건을 유지하기 위해 OPS에 주냉각수 계통 (MCWS, main cooling water system)을 설치하였다⁽³⁾. 상온기능시험 중에 순환펌프는 냉각수를 연속적으로 흡입하지 못해 유체를 가압할 수 없었다. 본 논문은 이를 확인하기 위해 주냉각수 계통에 대하여 상용화된 유동해석 프로그램⁽⁴⁾으로 유동해석한 내용을 기술하고 있다. 그리고 이 논문은 고온 고압시의 운전자료로 활용할 예정이다.

2. 본론

2.1 주 냉각수 계통의 구성

FTL은 가압경수로와 중수로에 사용되는 핵연료의 중성자 조사특성 및 열수력 특성을 실험한다. IPS의 운전조건은 Table 1과 같다. 이 운전조건을 유지하기 위해 주냉각수 계통은 Fig. 1과 같이 주냉각기 (X001), 냉각수 펌프 (P002A 및 P002B), 주가열기 (J003), 유량조절밸브 (FV-001 및 002), 격리밸브 (AOV-003, 004, 005와 006), 배관 및 계기 등으로 구성된다.

Table 1 Operation and design conditions of the MCWS

Description	PWR mode	CANDU mode
Generated heat (kW)	112.3	116.2
Operating pressure (Mpag)	15.5	10
IPS inlet temperature (°C)	300.3	276.7
IPS outlet temperature (°C)	312	290
Flow rate (LPM)	96	97.8
Design pressure (Mpag)	17.4	
Design temperature (°C)	350	

* 원자력(연), ycpark@kaeri.re.kr

** 원자력(연), yslee3@kaeri.re.kr

*** 원자력(연), dychi@kaeri.re.kr

**** 원자력(연), shahn2@kaeri.re.kr

***** 원자력(연), ykkim1@kaeri.re.kr

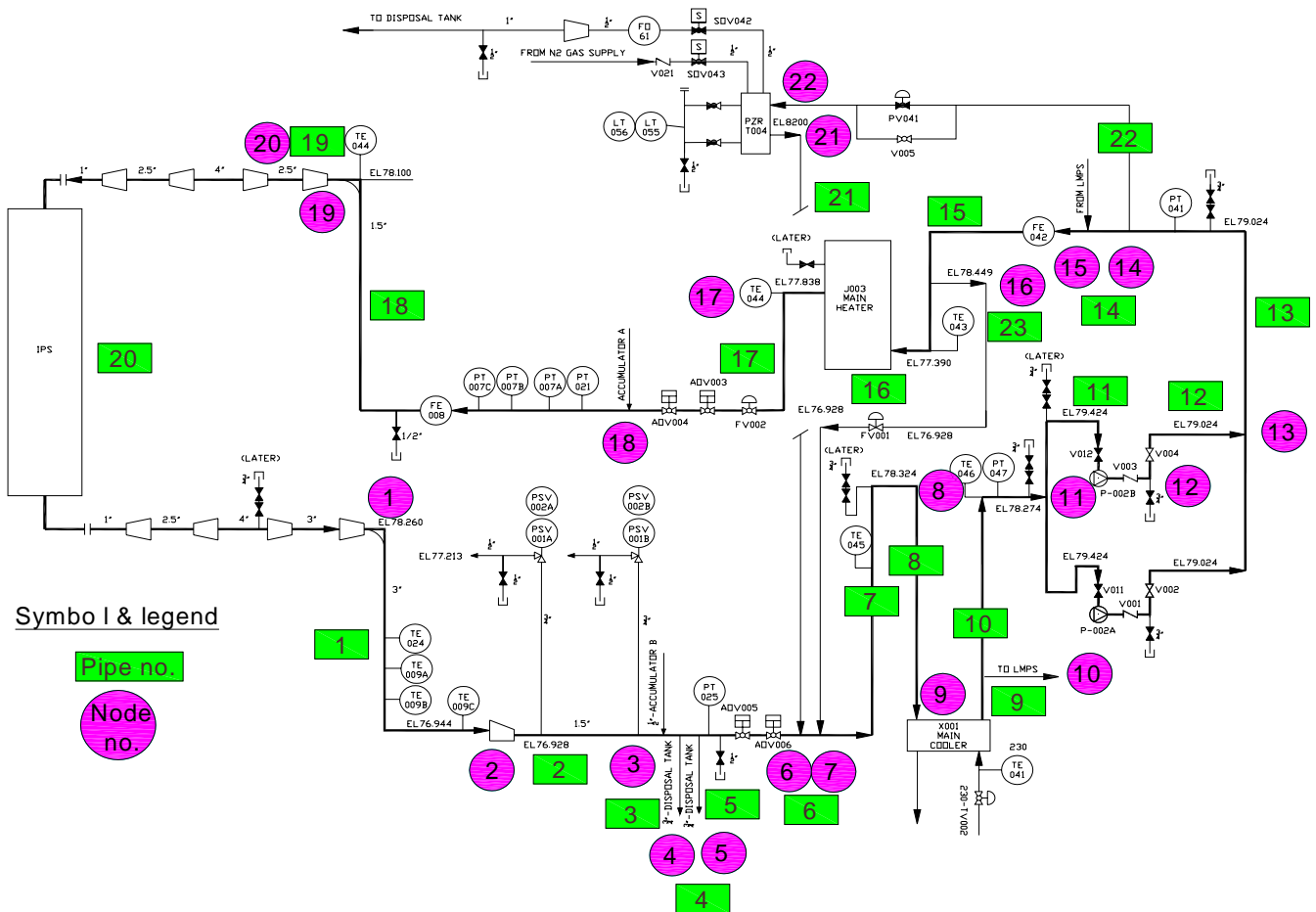


Fig. 1 Flow diagram of the MCWS with node and pipe diagram

주냉각수 계통의 유량은 병렬로 설치된 냉각수 펌프에 의해 형성된다. 형성된 유량은 IPS 입구측에 설치된 유량 계측기 (FT-022)로 측정하여 주유량 제어 밸브가 Table 1에 표시된 운전 모드별 요구유량을 확보한다. 그 나머지 유량은 우회유량 제어밸브 (FV-001)를 개방하여 IPS를 우회한다.

계통내의 온도는 주가열기 입구측에 설치된 온도 계측기 (TE-043)로 측정하고 주냉각기 (X001)를 통과하는 중간냉각계통의 냉각수 유량을 조절하여 제어한다. 계통내의 압력은 가압기에 설치된 압력전송기 (PT-057과 PT-060)로 측정하고 압력이 낮으면 가열기로 가열하여 가압한다. 압력이 높으면 압력조절밸브 (PV-041)를 개방하여 냉수를 살수하여 감압한다.

가압기 수위가 주냉각수 계통의 냉각수량을 지지하므로 계통내의 수위는 가압기에 설치된 수위 전송기(LT-055와 LT-056)로 측정하고 수위가 낮으면 정화 복귀 유량을 증가시킨다. 수위가 높으면 취출 유량을 증가시킨다.

2.2 상온기능 시험 시의 문제점

계통구성을 위해 1.5 인치의 주냉각수 배관에 고수위 배관이 다음과 같이 형성되었다. 그러나 고압계통이므로 누수를 최소화하기 위해 배기밸브를 설치하지 않거나 밀봉하여 배기할 수 없었다. 따라서 고수위 배관의 공기 고임으로 인해 펌프가 유체를 계속적으로 흡입할 수 없었다.

- 냉각기 흡입관: 열팽창을 흡수하기 위해 약 1 m 높이의 역 U 자 형의 배관을 구성하여 고수위 배관 형성
- 냉각수 펌프 흡입관: 설치공간이 좁아 냉각수 펌프가 수직으로 설치되어 흡입구 연결을 약 2 m의 고수위 배관 형성
- 주가열기의 배기구: 주가열기가 수직으로 세워져 있어 유체가 측면으로 유입되어 측면으로 유출되므로 주가열기 상부에 공기 고임 발생
- IPS 배관: 펌프보다 약 2 m 높은 위치에 설치되어 고수위 배관 형성

이와 같은 고수위 배관의 공기 고임을 제거하기 위해 강제 배기를 시도하였다. 그러나 펌프를 체질상태로 가압하였을 때에는 가압되었으나 펌프의 송출 밸브를 개방하면 유량이 형성되지 않았다. 이는 연속적으로 용수가 흡입되지 못하기 때문으로 추정된다.

2.3 유동해석

2.3.1 유동해석 방법

주냉각수 계통이 정상적으로 작동하지 않으므로 그 원인을 파악하고 유동특성을 확인하기 위해 유동해석을 하였다. 유동해석은 상용 프로그램을 이용하여 주냉각수 배관에 대해 수행하였다. 이 배관은 Fig. 1과 같이 내압과 유량을 확인하기 위해 고도변화, 관

경 변화 및 유량 입출점을 기준으로 해석점을 지정하였다. 해석점은 22 개이고 배관은 22 개로 구분하였다.

해석조건은 Table 1 과 같이 운전조건과 동일하게 적용하였다. 그리고 해석방법은 simulation 방법과 sequence 방법을 혼용하였다⁽⁴⁾. 가압기는 상온가동 시에는 대기압력, 운전 시에는 N₂ 가스로 가압하여 5 MPag, 10 MPag 및 15 MPag 로 각각 가압하므로 이를 초기압력으로 지정하였다.

계통내 기기의 압력손실은 아래 관계식에 따라 압력손실계수를 지정하였다. 이 식은 배관 관경과 레이놀드수를 보정한 multiple K 방식⁽⁵⁾으로 압력손실계수를 예측하였다.

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

여기서, K, K_1, K_2, K_3 : 압력손실계수

Re: 레이놀드수

D: 관경

소구경 배관에 사용한 체크밸브는 spring load piston type 이다. 이 밸브는 스프링 장력이 작용하므로 그 이상의 힘으로 가압할 때 개방된다. 작동방식은 lift type 과 동일하므로 이에 해당하는 압력손실계수를 적용하였다. 그리고 가압기, 가열기, 냉각기, 유량제어 밸브 등은 single K 방식으로 차압에 해당하는 압력손실을 K_3 값으로 보증하였다.

펌프의 특성은 식 2 와 같이 간편식으로 표시할 수 있다. 이 식의 상수는 정격 유량점과 체절점을 이용하여 상수를 각각 구하였다. 이들은 실제 제작사 공장에서 실험한 결과를 각각 적용하였다.

$$\Delta P = A + B \times Q^2 \text{-----} (2)$$

여기서, dP : 압력손실

A, B: 상수

Q: 유량

2.3.2 유동해석 결과

2.3.2.1 계통압력손실

가압기의 압력을 대기압력으로 지정하였을 때 운전온도의 변화에 따라 각 파이프의 계통압력손실(system pressure loss, SPL)을 Fig. 2 에 나타내었다. 그림에서 SPL20, SPL290 및 SPL312 는 운전온도 20℃, 290℃ 및 312℃인 경우의 계통압력손실을 각각 의미한다. 그리고 막대 그림은 각 파이프의 압력손실을 나타낸다. 해석결과, 계통압력손실이 145 mAq 일 때 유량은 143.5 LPM 을 나타내어 정격운전 상태를 나타내므로 계통의 성능을 잘 모사하고 있다.

고수위 배관의 공기 고임이 발생할 수 있는 곳은 7 번, 11 번 및 16 번 파이프이다. 이 파이프에서 역류하거나 진공을 나타내는 현상은 발견되지 않았다. 따라서 배관 내에 냉각수가 100% 채워진다면 냉각수가

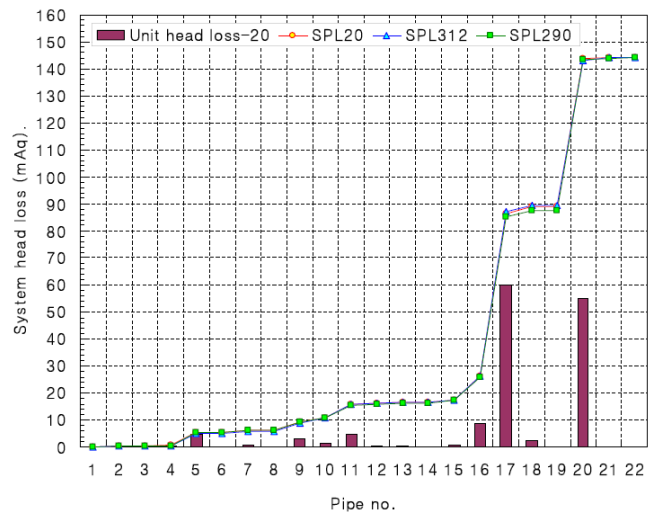


Fig. 2 System pressure loss at operation temperature, 20 °C, 290 °C for CANDU mode and 312 °C for PWR mode

순환할 수 있음을 보여 준다. 이는 유동해석의 전제 조건이 배관 내에 유체가 100% 채워진 상태로 흐른다고 가정하기 때문이다.

그리고 계통특성 상으로 가압기의 의해 약 5 m 의 펌프 정압수두가 유지되고 있다. 이는 펌프의 NPSHr (약 1.2m) 을 만족하지만 배기가 잘 되지 않은 상태에서는 펌프로 계통을 가압하기 힘들다. 따라서 고수위 배관에서는 충분히 배기될 수 있도록 배기밸브가 설치되어야 한다. 그림 1 에 배기밸브가 설치되어야 할 지점에 배기밸브를 설치하고 “(LATER)”로 각각 표시하였다.

2.3.2.2 계통압력

가압기를 가압하는 경우 각 해석점에서의 압력변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 그림에서 범례에 표시된 K0, K1, K2 and K3 는 가압기가 대기상태 (0 MPag), 5 MPag, 10 MPag 및 15 MPag 로 가압하는 경우 각 해석점의 압력변화를 나타낸다.

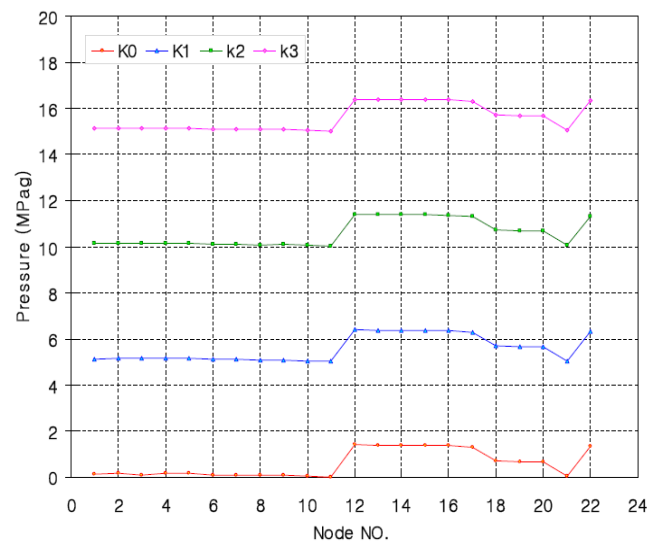


Fig. 3 System pressure variation at operation pressure, 0 MPag, 5 MPag, 10 MPag and 15 MPag

그림에서 해석점 11번과 12번은 11번 파이프의 끝점을 각각 나타낸다. 여기에 냉각수 펌프가 설치되어 계통을 약 1.4 MPag (14 bar) 만큼 가압해 주고 있다. 그리고 가압기의 초기압력을 5 MPa 씩 증가하였을 때 계통압력도 마찬가지로 상승함을 보이고 있다. 이는 물이 비압축성이기 때문에 초기압력이 흡수되지 않고 계통전체를 가압할 수 있다. 따라서 가압기를 이용하면 운전압력을 모의할 수 있다.

해석점 20은 IPS의 입구지점이다. 그림에서와 같이 해석점 20은 해석점 21번과 22번과 연결되어 있고 IPS를 지나 해석점 1과도 연결되어 있다. 펌프가 약 1.4 MPag (14 bar)를 가압하여도 IPS에 이르기 까지 약 0.7 MPag (7 bar)의 압력손실이 생기므로 IPS에는 펌프에 의한 가압 0.7 MPag (7 bar)와 가압기에 의한 가압을 합친 압력이 작용됨을 보여주고 있다.

2.3.2.3 유량

운전온도와 가압기의 압력변화에 따른 유량변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 가로축은 운전온도에서 초기압력의 변화를, 세로축에서는 운전온도에서의 유량변화를 각각 나타내고 있다.

해석결과, 상온에서 물은 비압축성이므로 압력이 증가하여도 계통압력손실이 변하지 않아 유량이 변하지 않았다. 그러나 운전온도가 상승하면 유량이 증가함을 보여주고 있다. 이는 운전온도가 상승하면 물이 팽창하여 밀도가 낮아지므로 압력손실이 감소하기 때문이다⁽⁶⁾. 그리고 압력손실이 감소하면 펌프특성에 의해 유량이 증가한다. 더욱이 이 계통의 펌프와 같이 펌프 특성곡선이 완만할수록 압력손실이 적어도 유량변동이 크게 나타날 수 있다.

그림에서 운전온도 290℃에서 운전압력이 상승할수록 유량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 운전온도 312℃에서는 반대로 유량이 상승하는 경향

을 보이고 있다. 그 변화량이 평균유량의 3% 이내이므로 큰 변화는 보이지 않았다.

3. 결론

주냉각수 배관에 대하여 유동해석으로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 계통차압손실은 145 mAq 일 때 유량은 143.5 LPM을 나타내어 정격운전 상태를 나타내므로 계통의 성능을 잘 모사하고 있다.
- (2) 고수위 배관에서도 충분히 배기되면 펌프로 가압하여 유체가 흐름을 알 수 있다. 따라서 고수위 배관에서 공기가 고이지 않도록 충분한 배기가 필요하다.
- (3) 가압기를 가압하는 경우 물은 비압축성이므로 압력을 흡수하지 않고 전체적으로 압력이 상승하여 운전압력을 모의할 수 있다.
- (4) 운전온도가 상승하면 물은 팽창하여 밀도가 낮아 압력손실이 감소하므로 펌프특성에 의해 유량이 증가하였다.
- (5) 운전온도 290℃에서 운전압력이 상승할수록 유량이 감소하는 경향을 보이고 운전온도 312℃에서는 반대로 유량이 상승하는 경향을 보였으나 그 변화량이 평균유량의 3% 이내이므로 큰 변화는 보이지 않았다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Y. C., Park, et al., 1996, "System Performance Test in HANARO," the 5th ASRR Vol. 1, pp. 240-246.
- [2] KAERI, 2006, "Safety Analysis Report of Fuel Test Loop,"
- [3] HEC, 2005, "Design Manual of Mechanical," HAN-FL-E-D70-DM-H001, Operation condition
- [4] Flow Network Analysis, 5.0C, "User's Manual," Kelix Software Co., 1985
- [5] Hooper, W. B., 1981, "The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings," Chem. Engr., Aug. 24. pp. 97-100
- [6] Merie C. Potter and Elaine P. Scott, "An Introduction to Fluid Mechanics," Thomson.

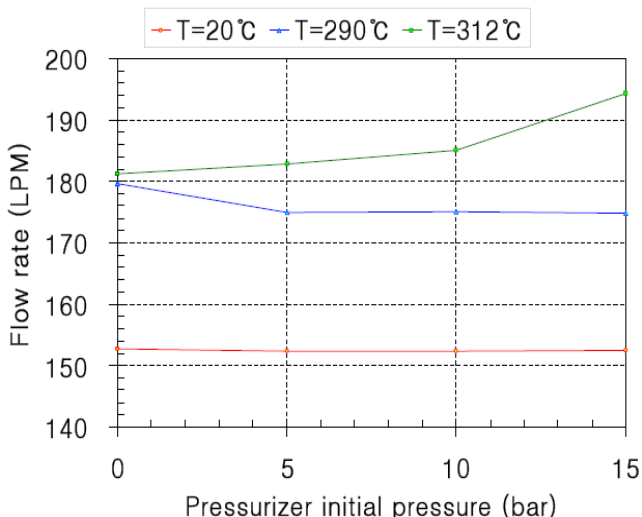


Fig. 4 Flow rate at operation temperature, 20°C, 290°C for CANDU mode and 312°C for PWR and operation pressure, 0 MPag, 5 MPag, 10 MPag and 15 MPag