

# 하나로 핵연료 시험 루프 주냉각수 계통의 유량 제어에 대한 유동 해석

박용철\*† · 이용섭\* · 지대영\*

## Flow Network Analysis for the Flow Control of a Main Cooling Water System in the HANARO Fuel Test Loop

Young-Chul Park\*†, Yong-Sub Lee\*, Dae-Yong Chi\*

Key Words : Fuel test loop(핵연료 시험 설비), Flow network analysis(유동 해석), Flow control(유량 제어)

### ABSTRACT

A nuclear fuel test loop(after below, FTL) is installed in the IRI of an irradiation hole in HANARO for testing the neutron irradiation characteristics and thermo hydraulic characteristics of a fuel loaded in a light water power reactor or a heavy water power reactor. There is an in-pile section(IPS) and an out-pile section(OPS) in this test loop. When HANARO is operated normally, the fuel loaded into the IPS has a nuclear reaction heat generated by a neutron irradiation. To remove the generated heat and to maintain the operation conditions of the test fuel, a main cooling water system(MCWS) is installed in the OPS of the FTL. The MCWS is composed of a main cooler, a pressurizer, two circulation pumps, a main heater, an interconnection pipe line and instruments. The interconnection pipeline is a closed loop which is connected to an inlet and an outlet of the IPS respectively. The MCWS is under a cold function test during a start-up period. This paper describes the system flow network analysis results of the flow control of a main cooling water system in the HANARO fuel test loop. It was confirmed through the results that the flow was met the system design requirements.

### 1. 서론

가압 경수로(light water power reactor, PWR)와 중수로(heavy water power reactor, CANDU)에 사용되는 핵연료의 중성자 조사 특성 및 열수력 특성을 시험하기 위하여 하나로<sup>(1)</sup> IRI(irradiation hole NO. 1) 조사공에 핵연료 시험 루프(fuel test loop, FTL)<sup>(2)</sup>를 설치하였다. 이 루프는 노내 시험부(in-pile section, IPS)와 노외 시험부(out-pile section, OPS)로 구성된다.

노내 시험부에 장전된 시험 핵연료는 하나로 노심의 중성자

에 조사되어 핵 반응열이 발생한다. 이 반응열을 제거하고 시험 핵연료의 운전 조건을 유지하기 위하여 주냉각수 계통(main cooling water system, MCWS)이 설치되었다.<sup>(3)</sup> 이 계통은 냉각기, 가압기, 냉각 펌프, 가열기, 배관 및 계장 기기로 구성된다.

이 계통의 배관은 시험 핵연료가 장전되는 IPS와 연결되어 폐루프(closed loop)를 구성하고 있다. 이 배관을 따라 냉각 펌프는 시험 핵연료에서 발생하는 열을 제거하고 운전 조건을 유지하여야 한다.

본 계통이 정상적으로 가동되기 위해서는 상온 기능 시험 및 핵연료 장전 전과 후에 각각 고온 기능 시험을 수행하여야 한다. 본 논문에서는 상온 기능 시험 측정 자료를 바탕으로 계통의 유량 제어 특성에 대해 유동 해석을 하고 그 결과를 기술

\* 한국원자력연구원

† 교신저자, E-mail: ycpark@kaeri.re.kr

하였다.

## 2. 주냉각수 계통

### 2.1 계통의 구성

가압 경수로나 중수로의 핵연료 특성을 시험하기 위해 시험 루프의 운전 조건은 상업용 발전소와 동일하다. 이 운전 조건은 하나로와 비교하면 Table 1 과 같이 고온도이고 고압력의 상태이다. 그리고 가압 경수로의 운전 조건은 중수로부터 발열량과 냉각 수량이 적지만 더 높은 운전 온도와 압력을 유지하여야 한다. 주냉각수 계통은 Fig. 1 과 같이 냉각기(X001), 가압기(T004), 냉각 펌프(P02A/B), 가열기(J003), 배관 및 계장기기로 구성된다. 주냉각수 계통의 유량은 병렬로 설치된 100% 용량의 냉각 펌프 중 한 대가 가동하여 순환된다. 이 유량은 IPS 입구측에 설치된 유량 계측기(FT022)로 측정된다. 이 양에 따라 주유량 제어 밸브(FV002)가 Table 1에 표시된 운전 모드별 요구 유량을 확보하고 그 나머지는 우회 유량 제어 밸브(FV001)를 따라 시험 핵연료를 우회한다.

계통내의 온도는 가열기 입구측에 설치된 온도 계측기(TE043)로 측정된다. 이 온도에 따라 냉각기(X001) 전단에 설

Table 1 Operation and design conditions of the MCWS

Description	PWR	CANDU	HANARO
IPS heat load (kW)	112.3	116.2	30,000
Coolant inlet pressure (Mpag)	15.5	10	0.5
Coolant inlet temperature (°C)	300.3	276.7	35
Coolant outlet temperature (°C)	312	290	45
Coolant flow rate (LPM)	96	97.8	46800
Design temperature (°C)	350	350	93
Design pressure (Mpag)	17.4	17.4	1

치된 유량 제어 밸브(FV031)가 작동하여 냉각기를 우회한다. 그리고 온도가 낮으면 주가열기가 가열되어 냉각수 온도를 조절한다.

계통내의 압력은 냉각 펌프 중심보다 약 5m 높게 설치된 가압기로 가압된다. 가압기에 설치된 압력 전송기(PT057과 PT060)로 압력을 측정하여 압력이 낮으면 가압기에 설치된 가열기가 가열되어 가압된다. 압력이 높으면 압력 조절 밸브(PV041)가 개방되어 냉수를 살수하여 감압된다.

계통의 수위는 가압기 수위가 주냉각수 계통의 냉각 수량을

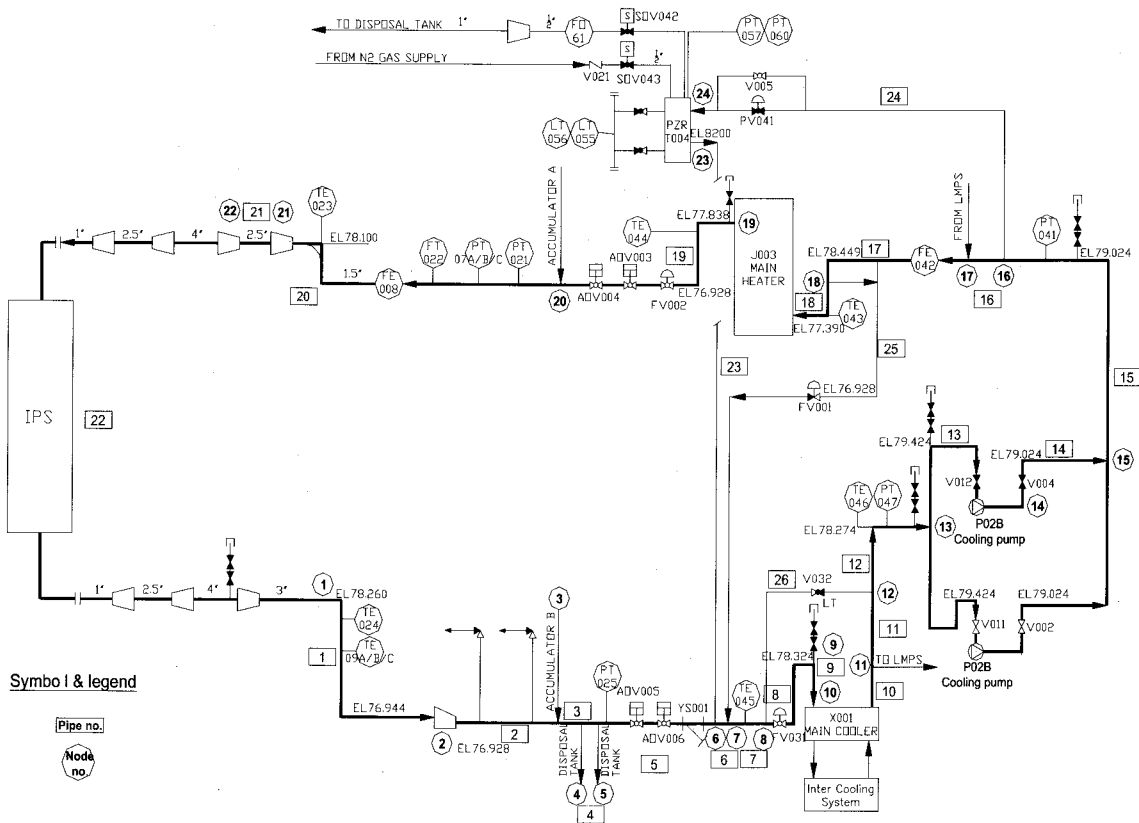


Fig. 1 MCSW flow diagram including node no. and pipe no. for network analysis

지시하므로 가압기 수위로 제어된다. 가압기에는 수위 전송기(LT055와 LT056)가 설치되어 있어 가압기의 수위를 측정할 수 있다. 수위가 낮으면 정화 계통(letdown, makeup and purification system)으로부터 냉각 펌프 후단으로 복귀되는 정화 복귀 유량이 증가한다. 그리고 수위가 높으면 펌프 전단에서 정화 계통으로 유출되는 취출 유량이 증가한다.

## 2.2 설계 변경 사항

펌프에 흡입되는 냉각수는 시험 핵연료를 지나면서 핵반응열을 흡수한 상태이다. 이 흡수한 열은 냉각수가 냉각기를 지나면서 열교환되어 제거되므로 IPS에서 냉각기 전단과 후단을 구분하여 각각 고온부(hot leg)와 저온부(cold leg)라 한다. 이 고온부의 열용력을 흡수하기 위해 냉각기 전단에는 역 U 자형 배관이 설치되어 있다.

계통 운전 조건이 고온 고압이므로 누수를 최소화하기 위해 수압 시험 후 배기구를 모두 차단하였다. 그러나 초기 시운전 시에는 배기가 충분히 되지 못해 펌프 가동이 원활하지 못하였다. 이를 개선하기 위해 펌프 전후단의 고수위 배관에 배기구가 각각 추가되고 밀봉된 배기구를 개봉하여 배기가 가능하도록 하였다. 상온 기능 시험 중에 펌프의 토출측에 설치한 역지 밸브가 열리지 않았다. 이는 스프링 역지 밸브인데 디스크를 안내하기 위한 스프링이 설계 압력에서 작동되도록 제작되었기 때문이다. 이 역지 밸브는 역류를 방지할 목적으로 설치하였으나 가동 중인 펌프가 정지하면 예비 펌프가 가동되지 않고 원자료가 정지되도록 설계 변경되어 역지 밸브의 기능이 불필요하여 제거되었다.

운전 중에 핵연료가 손상되면 그 일부는 펌프를 거쳐 관내로 순환되거나 유로를 막아 냉각을 어렵게 한다. 이를 예방하기 위하여 IPS 출구 가까이 스트레이너(YS001)가 추가되었다.

시험 핵연료의 핵반응열을 흡수한 냉각수는 냉각기에서 열교환되어 열이 제거된다. 너무 많이 제거되면 운전 온도를 유지하기 위해 다시 가열을 하여야 한다. 이를 조절하기 위해 냉각기 전단에 유량 제어 밸브(FV031)와 냉각기를 우회할 수 있도록 우회 밸브(V032)가 각각 추가되었다.

## 3. 유동 해석

### 3.1 유동 해석 방법

주냉각수 계통의 고수위 배관과 설계 변경으로 인한 압력 손실의 변화가 예상되고, 캐비테이션의 영향 및 유량 제어 특성의 변화가 예측된다. 이를 확인하기 위해 상용 프로그램<sup>(4)</sup>을

이용하여 유동 해석을 하였다. 유동 특성을 확인하기 위해 Fig. 1 과 같이 주냉각수 계통은 고도 및 관경의 변화 및 유량 입출점을 기준으로 해석점과 배관을 각각 24개와 26개로 구분하였다.

해석 조건은 Table 1과 같이 운전 조건과 동일하게 적용하였다. 그리고 해석 방법은 시뮬레이션(simulation) 방법과 시퀀스(sequence) 방법<sup>(4)</sup>을 혼용하였다. 가압기는 상온 기동 시 대기 압력으로, 정상 운전 시에는 N<sub>2</sub> 가스로 가압하여 5MPag, 10MPag 및 15MPag 압력으로 가압되므로 가압기의 압력을 초기 압력으로 정하였다.

계통 내의 기기 압력 손실은 아래 관계식에 따라 압력 손실 계수를 정하였다. 이 식은 배관 관경과 레이놀즈수를 보상한 복합 K 방식(multiple K method)<sup>(5)</sup>으로 압력 손실 계수를 계산하였다.

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

여기서,  $K, K_1, K_2, K_3$ : 압력 손실 계수  
 $Re$ : 레이놀즈수  
 $D$ : 관경

이다.

펌프의 특성은 참고 자료<sup>(6)</sup>에 따라 식 (2)와 같이 관계식으로 표시될 수 있다. 이 식의 상수는 설계 유량을 만족하는 정격 및 재질 운전점을 각각 적용하여 구하였다.

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

여기서,  $\Delta P$ : 압력손실(mAq)  
 $A, B$ : 상수  
 $Q$ : 유량(LPM)

이다.

### 3.2 유동 해석 결과

#### 3.2.1 펌프의 성능 곡선

Fig. 2 는 현장에서 측정한 주냉각수 펌프 A와 B의 성능 특성을 각각 보여 주고 있다. 그림상의 측정값은 각 점에서 5회 측정한 평균값이다. 이 측정값을 기준으로 성능 추세선을 도시하고 관련 관계식을 각각 표시하였다. 이 추세선은 2차 포물선의 관계식을 이용하여 구하였다. 실제 값과는 약 3% 오차 범위 내에서 잘 일치하였다.

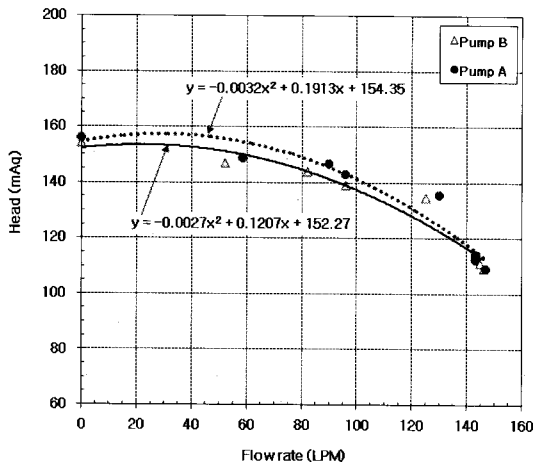


Fig. 2 Pump performance curves of pump A and B under a operation temperature of 20°C

그림에서 설계 유량 96LPM일 때 펌프 A와 B의 양정은 약 143mAq와 139mAq를 각각 나타내었다. 이는 설계 양정의 약 98%와 95%에 해당한다. 결과적으로 설계 변경으로 인하여 펌프 전단에 냉각기 유량 제어밸브, 스트레이너 설치 등으로 압력 손실이 증가하여 유량이 감소하였다.

펌프 A는 펌프 B보다 조금 더 높은 양정을 가지므로 140mAq의 동일 양정에서는 펌프 A가 약 6LPM 더 많은 유량이 흐른다. 이 양은 약 6%의 차이를 보이고 있다. 그리고 두 펌프 모두 유량 변화에 따른 양정 곡선의 변화가 아주 완만하므로 계통 내에 차압을 유발하는 시설물을 설치하는 경우 압력 손실 상승에 따른 유량 변화를 충분히 고려하여야 한다.

### 3.2.2 계통 압력 손실

가압기의 압력을 대기 압력으로 가정하였을 때 상온(20°C)에서 각 파이프에서의 압력 손실은 Fig. 3 에서 보여 주는 바와 같다. 그림에서 막대 그림은 각 파이프의 압력 손실을, 실선은 각 파이프의 압력 손실 누계를 각각 나타내고 있다. 해석 결과, 계통 압력 손실이 145mAq를 나타내어 계통의 성능을 잘 묘사하고 있다.

계통 압력의 주요 손실은 배관 번호 5, 8, 19 및 22에서 나타났다. 여기에는 스트레이너(YS001), 냉각기 유량 제어 밸브(FV031), 주유량 제어 밸브(FV002) 및 IPS가 각각 설치되어 있어 해당 압력 손실의 대부분을 유발하고 있다.

고수위 배관의 공기 고입이 발생할 수 있는 곳은 배관 번호 7번, 13번 및 18번이다. 각 배관에서 역류하거나 진공을 나타내는 현상은 발견되지 않았다. 따라서 배관 내에 냉각수가 100% 채워진다면 냉각수가 순환할 수 있음을 보여 주고 있다.

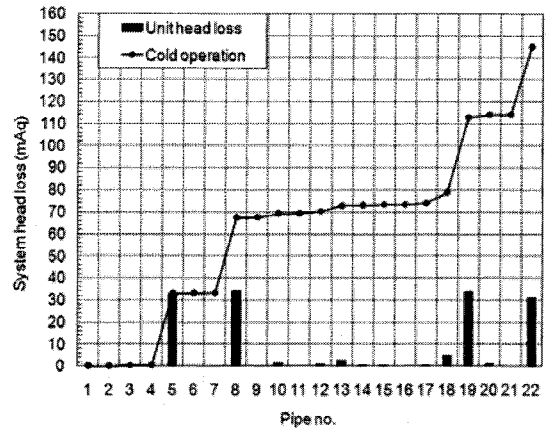


Fig. 3 System pressure loss at operation temperature of 20°C

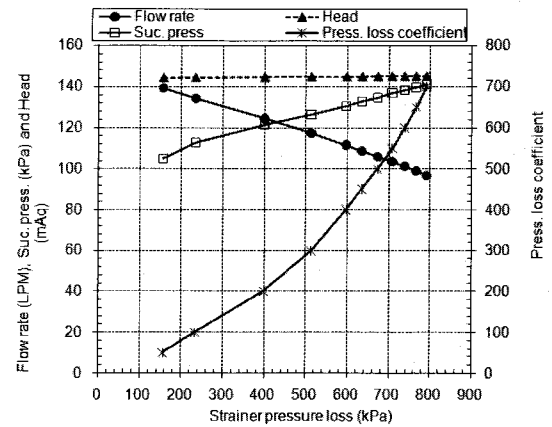


Fig. 4 Variations of main flow rate and pump head as an increasement of strainer (YS001) pressure loss

그리고 캐비테이션이 발생하면 발산하여 계산 결과를 얻을 수 없다. 그 결과를 얻은 것은 캐비테이션의 영향 없이 잘 수렴함을 보여 주고 있다. 이는 가압기의 약 5m 정압 수두가 물 울림 탱크의 기능을 하므로 펌프의 NPSHr(약 1.2m)을 만족하여 펌프 흡입을 가압해 주기 때문이다.

### 3.2.3 스트레이너 압력 손실에 의한 영향

설계 변경에서 기술한 바와 같이 핵연료 손상, 계통 내 기기들의 손상으로 인한 이물질 제거를 위해 스트레이너(YS001)가 추가되었다. 이로 인하여 계통 차압이 증가하므로 스트레이너의 압력 손실에 따른 계통 유량과 펌프 양정 그리고 압력 손실 계수의 관계를 계산하여 Fig. 4 에 각각 나타내었다.

해석 결과 스트레이너의 압력 손실이 증가하면 펌프 양정

및 흡입 압력이 증가하고 반대로 유량이 감소한다. 압력 손실이 800kPag(81.6mAq)를 상회하면 유량은 설계 유량 이하로 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 스트레이너에 이물질이 여과되면 주기적으로 관찰하여 스트레이너의 스크린을 청소하여야 한다.

스트레이너의 압력 손실이 증가하면 흡입 압력 손실이 증가하여 유효 흡입 수두가 감소하므로 이 수두가 펌프의 요구 흡입 수두 보다 낮아지면 캐비테이션이 발생할 수 있다. 금번 계산에서 스트레이너의 압력손실의 증가는 약 140kPag(1.4mAq) 이므로 가압기의 정압 수두 이하이므로 캐비테이션이 발생하지 않았다.

### 3.2.4 냉각기 유량 제어

냉각기는 냉각수가 흡수한 핵반응열을 냉각하여 60°C 이하에서 냉각수를 정화하고 펌프를 안전하게 운전한다. 그러나 냉각기에 많은 양의 냉수가 흐르면 냉각수가 과냉되어 가열기의 열부하를 증가시키게 된다. 냉각 유량의 조절 가능성을 확인하기 위하여 냉각기 유량 제어 밸브(FV031)의 개폐에 따른 유동 특성을 해석하여 Fig. 5 에 나타내었다.

냉각기 유량 제어 밸브와 우회 밸브(V032)를 모두 개방하면 그림에서와 같이 약 47%가 주배관으로 흐르고 나머지가 우회 배관으로 흐른다. 이는 우회 배관의 차압 손실이 적어 더 잘 흐르기 때문이다.

냉각기 유량 제어 밸브를 약 10%를 닫으면 냉각수는 설계 유량을 만족한다. 그리고 유량 제어 밸브를 약 20% 닫으면 유량 변화가 심하지만 그 이상에서는 아주 완만하게 흐름을 알 수 있다. 그리고 그림에서와 같이 펌프의 흡입 압력이 감소하

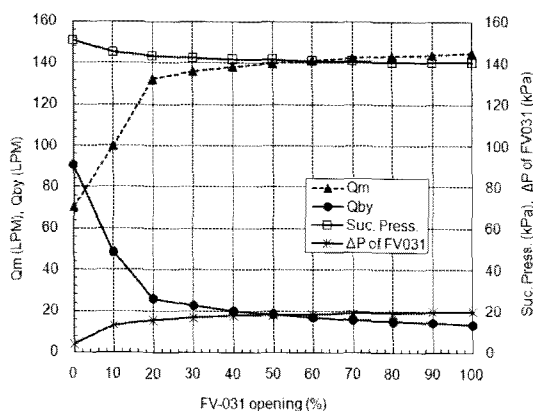


Fig. 5 A variation of main flow rate, bypass flow rate, pump suction pressure and difference pressure as the FV031 closing

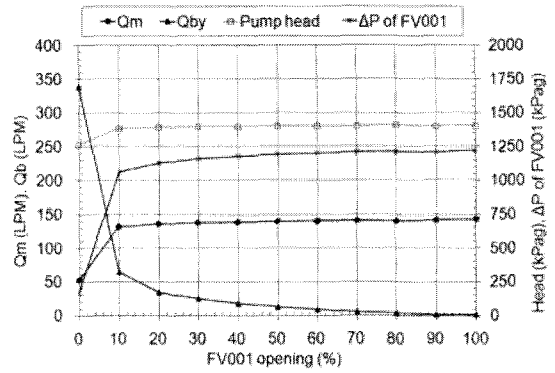


Fig. 6 A variation of main flow rate and bypass flow rate, as FV001 closing

지만 정압 상태를 유지하므로 스트레이너의 경우와 마찬가지로 캐비테이션이 발생하지 않았다. 따라서 냉각기 유량을 최대한 줄여 냉각기를 우회하여도 캐비테이션의 영향이 없음을 보여주고 있다.

### 3.2.5 주유량 제어

주유량은 유량 제어 밸브(FV002)에 의해 설계 유량을 확보하고 나머지는 우회 유량 제어 밸브(FV001)로 흐르게 하여 시험 핵연료를 우회한다. 주유량 제어 밸브가 고착되면 시험 핵연료쪽으로 냉각수가 흐르지 않아 냉각이 불가능하다. 따라서 유량 제어 밸브를 완전히 개방한 상태에서 우회 유량 제어 밸브로 주유량을 조절하는 방안을 모의하여 Fig. 6 과에 나타내었다.

주유량과 우회 유량의 제어 밸브를 모두 완전히 개방하면 그림에서와 같이 약 10%의 유량이 주유량 제어 밸브를 지나고 나머지가 모두 우회한다. 그리고 우회 유량 제어 밸브를 약 5% 닫으면 주유량은 약 100LPM의 유량이 흘러 설계 요건을 만족하였다. 우회유량 제어 밸브를 약 10% 닫을 때까지는 유량 변화가 심하지만 그 이후에는 완만하게 변하므로 실제적인 유량 조절은 10% 이내에서 이루어짐을 알 수 있다.

주유량 제어 밸브의 압력 손실을 검토하기 위하여 그림에서 펌프의 양정을 압력 손실과 동일한 단위로 나타내었다. 유량의 변화와 마찬가지로 10% 닫히기까지는 압력 변동이 심하지만 그 이후에는 완만하게 변함을 알 수 있다. 이는 차압의 변동이기 때문에 앞서 기술한 유량 조절 기능과 동일한 특성을 보이고 있다.

## 4. 결론

주냉각수 계통의 유량 제어에 대해 유동 해석을 한 결과는

계통의 설계 요건을 만족하고 캐비테이션 없이 정상적인 유량 제어가 가능함을 보여 주었다. 이와 관련되는 결론은 다음과 같다.

(1) 설계 유량 96LPM일 때 펌프 A와 B의 양정은 약 143mAq와 139mAq를 각각 나타내었다. 이는 설계 양정의 약 98%와 95%에 각각 해당하였다.

(2) 가압기의 압력을 대기 압력으로 지정하였을 때 상온에서 각 파이프의 계통 압력 손실을 계산한 결과 계통 압력 손실이 145mAq를 나타내어 계통의 실제 운전 상태를 잘 묘사하였다.

(3) 스트레이너(YS001) 차압이 800kPag(81.6mAq)를 상회하면 유량은 설계값 이하로 떨어지므로 주기적으로 관찰하여 스트레이너의 스크린을 청소하여야 한다.

(4) 냉각기의 유량을 최소화하기 위해서는 냉각기 우회 밸브(V032)를 완전히 개방한 상태에서 냉각기 유량 제어 밸브(FV031)를 닫으면 캐비테이션의 영향 없이 안전하게 냉각기 유량을 제어할 수 있다.

(5) 주유량을 조절하기 위해서는 주유량 제어 밸브(FV002)를 완전히 개방한 상태에서 우회 유량 제어 밸브(FV001)를 조절하면 주유량 제어 밸브의 고착에 따른 어려움 없이 안전하게 유량을 조절할 수 있다.

(6) 가압기의 약 5m 정압 수두는 펌프의 흡입을 가압하므로 냉각 펌프가 캐비테이션의 영향 없이 안전하게 유지될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구 개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 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.