

두 대의 펌프가 병렬로 설치된 장치의 유량 특성

박정근,^{*1} 박종호,² 박용철³

¹시스템 디엔디(주) 안전 해석부

²충남대학교 기계, 기계설계, 메카트로닉스공학과

³한국원자력(연) 연구로 계통 설계부

FLOW CHARACTERISTICS OF A SYSTEM WHICH HAS TWO PARALLEL PUMPS

J.G. Park,^{*1} J.H. Park² and Y.C. Park³

¹Safety Analysis Department, System Design Development

²Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

³Research Reactor Fluid System Design Department, Korea Atomic Energy Research Institute

During a reactor normal operation, two parallel 50% capacity cooling pumps circulate primary coolant to remove the fission reaction heat of the reactor through heat exchangers cold by a cooling tower. When one pump is failure, the other pump shall continuously circulate the coolant to remove the residual heat generated by the fuels loaded in the reactor after reactor shutdown. It is necessary to estimate how much flow rate will be supplied to remove the residual heat. We carried out a flow network analysis for the parallel primary pumps based on the piping network of the primary cooling system in HANARO. As result, it is estimated that the flow rate of one pump increased about 1.33 times the rated flow of one pump and was maintained within the limit of the cavitation critical flow.

Key Words : 병렬펌프(Parallel Pumping), 유량특성(Flow Characteristics), 유동해석(Flow Net Work Analysis), 하나로(HANARO)

1. 서 론

30MWth의 연구용 원자로인 하나로는 약 12m 깊이의 개방 수조에 설치되어 있다. 하나로의 노심(core)에서 핵분열에 의해 발생하는 열은 1차 냉각수로 냉각하여 노심을 안전하게 유지한다. 이를 위해 1차 냉각 계통은 50% 용량의 2대의 냉각 펌프와 2대의 열교환기가 병렬로 설치되어 있다[1].

펌프를 병렬로 설치한 이유는 충분한 유량을 공급하기 위한 것이다. 운전 중에 펌프 한 대가 고장 나는 경우 저유량 정지 변수에 의해 원자로가 정지된다. 나머지 한 대로 원자로의 잔열을 안전하게 제거할 수 있다.

이러한 사항은 유동 해석을 통하여 충분히 검토한 상태에서 예상 유량을 확인하고 이에 맞는 펌프를 선정하였다. 그리고 현장 시험을 통해 예상 유량을 확인하여 안전하게 운전할 수 있음을 확인하였다.

하나로와 같이 두 대가 병렬로 설치되는 경우뿐만이 아니라 다수의 펌프가 병렬로 설치되는 경우도 많이 있다. 이러한 펌프는 대부분이 유량과 양정에 맞는 것을 사용하기 위해 최적의 펌프를 주문 제작하므로 납기가 길다. 따라서 예비 펌프를 확보함으로써 연속 운전이 가능하다.

펌프를 다수 설치하면 펌프가 고장 날 확률이 높아진다. 그러나 적은 용량으로 예비 펌프를 확보할 수 있는 이점도 있다. 또한 설치한 펌프들을 조합하여 운전하는 경우 유량 변동에 따라 효율적으로 대처할 수 있는 운전 방안도 도출할 수 있다.

본 논문에서는 다수의 펌프를 조합하는 경우 그 특성을 분석하기 위해 하나로 1차 냉각 계통을 모델로 하여 두 대가 병렬로 설치된 펌프 장치에 대해 유동 해석을 하였다. 이는

Received: June 22, 2011, Revised: November 26, 2012,

Accepted: November 27, 2012.

* Corresponding author, E-mail: 79piano@hanmail.net

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.4.001>

© KSCFE 2012

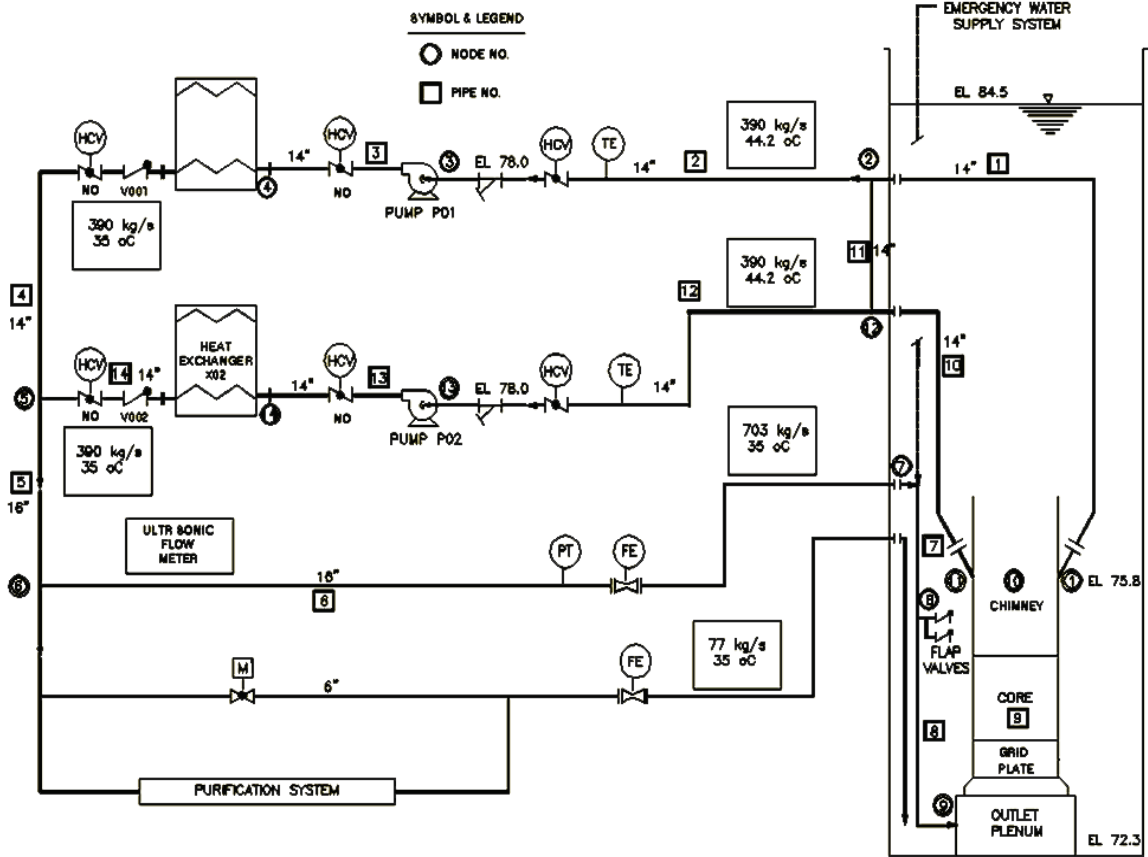


Fig. 1 Flow diagram including node No. and pipe No. for flow analysis

그 결과를 실험 자료와 비교 평가하여 해석 방법의 적합성을 검증하기 위함이다. 검증된 해석 방법으로 펌프 한 대 운전시의 유량 특성을 분석하였다. 그리고 펌프 운전 제한 조건인 캐비테이션 현상을 분석하여 운전 유량을 검증하기 위한 방법을 논의하였다.

2. 하나로의 1차 냉각 계통

하나로는 노심을 중심으로 그 상부에 침니(chimney)가 있어 냉각 유량의 유출을 안내하고 정지봉 등을 장착하였다. 노심 주변에는 중성자가 노심 내부에 머물도록 반사해 주는 반사체(reflector)가 들어 있는 반사체 탱크가 있다. 여기에 조사공들(irradiation holes)을 설치하여 중성자를 이용한 각종 시험을 수행할 수 있다. 그리고 그 하부에는 상부의 무게를 지탱하고 유입 냉각수를 유도하는 그리드 플레이트 (grid plate)와 플레넘(plenum)이 차례대로 설치되어 있다.

하나로의 1차 냉각 계통(primary cooling system, PCS)은 정

상 운전 중에 노심에서 핵분열시 발생하는 열, 수조 내에 임시 저장되는 핵연료에서 발생하는 열 및 순환 펌프의 모터에서 발생하는 열등을 합한 약 28 MWth의 열을 제거한다. 그리고 반사체 냉각 계통(reflector cooling system, RCS)은 노심 주변에 중성자를 반사해 주는 반사체에서 발생하는 열량을 냉각하는 이를 합하여 하나로의 열출력은 30 HWth이다[2].

1차 냉각 계통은 원자로 냉각수가 35°C로 유입되어 44.2°C로 유출된다. 이때 요구되는 설계 냉각 유량은 780 kg/s이다. 이 성능을 유지하기 위하여 1차 냉각 계통은 Fig. 1과 같이 50% 용량의 1차 냉각 펌프와 50% 용량의 열교환기를 각각 병렬로 구성하여 요구 유량을 확보하였다. 그리고 운전 중인 두 대의 펌프 중 한 대가 고장 나더라도 나머지 한 대가 계속 가동되어 원자로 정지 후 노심의 잔열을 제거할 수 있다.

1차 냉각 펌프가 모두 정지한 후에는 노심과 수조수의 온도차에 의해 입구 배관에 설치된 플랩 밸브(flap valve)가 개방된다. 이는 자연 대류 현상에 의해 수조수가 순환할 수 있는 유로를 제공하여 노심의 잔열을 제거한다. 또한 이는 발전

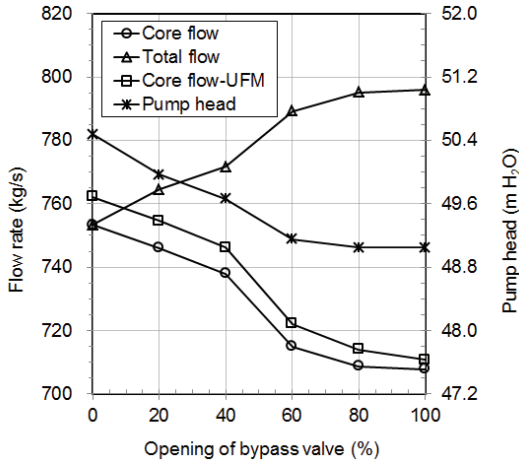


Fig. 2 Test results for the flows and pump head measurement of two pumps operation in the PCS of HANARO

소의 비상 냉각 기능에 해당하며 비상 전원 없이 자연 현상을 이용하여 잔열을 냉각할 수 있다.

노심 냉각수의 유동 방향은 상향 유동(upward flow)이다. 냉각 펌프의 유입 유량의 90%는 연구로의 하부 플레넌으로 유입된다. 그리고 노심을 지나면서 잔열을 흡수한 냉각수는 침니 하부에 모인다. 이때 냉각수는 좁은 노심 사이를 흐르므로 노심 제트 유동(core jet flow)이 형성되어 상부로 솟구칠 수 있다.

나머지 10% 유량은 노심을 우회하므로 노심 우회 유량(core bypass flow)이라 한다. 그리고 우회 유량의 약 10%는 정화 계통(primary purification system, PPS)을 거치면서 냉각수 내의 방사성 이온을 제거하여 원자로 및 노심 재료의 부식을 억제한다. 정화된 우회 유량은 원자로 수조 바닥에 유입되어 원자로의 외부를 따라 상승하면서 원자로 외부에 발생한 열을 흡수하여 침니 상부에 도달한다.

냉각 펌프의 흡입력에 의해 침니 상부의 냉각수는 침니를 따라 아래로 흘러 침니 하부에 설치된 유출관에 흡수된다. 이는 노심을 지난 유량과 유동 방향이 반대이므로 노심 제트 유동을 억제하고 노심 유량과 함께 펌프에 흡입된다[3]. 열을 흡수한 냉각수는 펌프 후단의 판형 열교환기(plate type heat exchanger)에 유입된다.

이 열교환기의 냉수 측에는 2차 냉각수(secondary cooling water)가 흐른다. 1차 냉각수가 흡수한 열은 전열관을 지나면서 2차 냉각수에 전달된다. 열을 흡수한 2차 냉각수는 냉각탑을 지나면서 외기에 열을 전달하고 찬 냉각수가 되어 재순환된다[4].

원자로를 안전하게 냉각하기 위해 원자로 노심은 수조수에 잠겨 있어야 한다. 운전 중에 증발 등으로 수조수 수위가 저

수위에 이르면 중력을 이용하여 순수 공급 계통(de-mineralized water supply system, DWSS)으로부터 냉각수가 자동으로 충수된다. 누수 등으로 수조수 수위가 저지 수위에 도달하면 원자로가 정지된다. 그리고 냉각수 유량이 감소하거나 증가하면 배관 파단으로 간주하고 냉각수 펌프도 정지된다.

누수로 인하여 수조 수위가 극저수위에 도달하면 비상 보충수 계통(emergency water supply system, EWSS)으로부터 비상 보충수가 유입되어 노심은 항시 냉각수에 잠겨 안전하게 유지된다[5]. 그리고 모든 냉각수 공급 계통이 노심 상부에 설치되어 있어 중력으로 냉각수를 공급할 수 있으므로 노심을 안전하게 냉각할 수 있다.

3. 현장 시험

3.1 현장 시험 방법

현장 시험은 정상 가동 후 펌프 전단에 이물질 제거를 위한 스트레이너를 설치한 후에 하였다. 계통의 성능을 확인하기 위해 상온 상태에서 유량과 압력을 각각 측정하였다[6]. 그 결과 1차 냉각 계통의 성능이 안전하게 유지됨을 확인하였다. 또한 이 자료는 본 논문에서 유동 해석한 결과와 비교 평가할 수 있는 참고 자료로 활용하였다.

Fig. 1에서 보여 주는 바와 같이 유량은 원자로 입구관에 설치된 유량계(FE)로 노심 유량을, 우회관(bypass pipe)에 설치된 유량계(FE)로 우회 유량을 각각 측정하였다. 각 유량계는 원자로의 열출력을 계산하기 위한 것으로 세 개의 채널로 구성되어 있다. 그리고 이를 보충하기 위해 초음파 유량계(ultrasonic flow meter, UFM)를 추가로 설치하여 노심 유량을 측정하였다.

펌프 양정은 펌프 전 후단에 설치된 압력계로 각각 측정하여 그 차로 계산하였다. 이를 보충하기 위해 원자로 입구관에 설치된 원자로 보호용 압력 전송기(PT)로 압력을 측정하였다. 이는 세 개의 채널로 구성되어 계통의 운전 상태가 저압력이나 고압력이 되면 이상 상태로 간주하고 원자로를 정지한다.

시험 중 펌프의 발열에 의해 유체의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위해 2차 냉각수를 가동하여 일정하게 유지하였다. 온도는 열교환기 전 후단에서 각각 측정하였다. 그리고 이온도를 보충하기 위해 원자로 유입관에 설치된 원자로 보호용 온도계(TE)로 운전 온도를 측정하였다.

시험 방법은 우회 유량 밸브의 개도(the opening of core bypass valve)를 따라 노심 유량과 우회 유량을 변경시킬 수 있으므로 우회 밸브의 개도를 20% 씩 개방하여 유량과 압력 및 온도를 각각 측정하였다. 그리고 설계값 주변에서는 필요한 시험값을 구하기 위해 추가로 측정하였다. 각 측정 인자는 10초 간격으로 5회 기록하고 그 평균값을 택하였다.

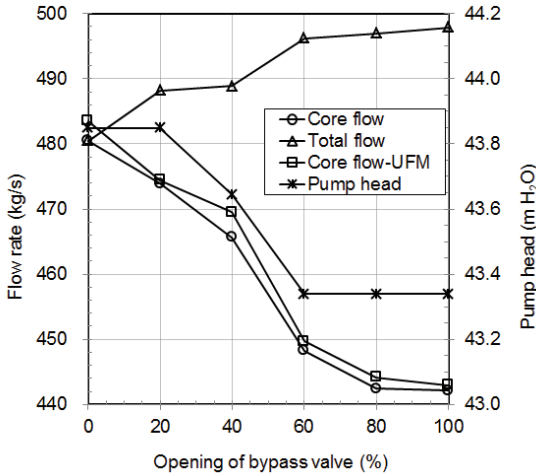


Fig. 3 Test results for the flows and head measurement of one pump operation in the PCS of HANARO

3.2 현장 시험 결과 및 분석

3.2.1 펌프 두 대가 운전하는 경우

1차 냉각 펌프 두 대를 가동(two pumps and two heat exchangers operation, TPTH operation)하여 시험 온도를 일정하게 유지되는 상태에서 우회 밸브의 개도에 따라 원자로 노심 유량, 우회 유량 및 펌프의 양정을 각각 측정하였다. 그 결과는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 노심 유량과 우회 유량을 합하여 총유량을 표시하고 총유량과 노심 유량의 차이로 우회 유량을 각각 표시하였다. 그리고 양정은 펌프의 입출 압력을 각각 측정하고 계기의 높이차를 고려하였다.

노심 유량에 대해서는 그 변화를 확인하기 위하여 초음파 유량계로 측정된 값도 함께 표시하였다. 그 결과 측정된 유량은 정상 운전용 유량계로 측정된 것보다 1.2%~0.4% 높게 나타났다. 이는 계기의 정확도에 의한 차이로 간주된다.

우회 밸브를 완전히 닫으면 총유량은 설계 유량의 약 3.5% 감소함을 보이고 있다. 이는 유량이 모두 노심으로 흐르기 때문에 유량 증가에 따른 압력 손실의 증가로 유량이 감소하였음을 보이고 있다. 우회 밸브를 48%로 개방하였을 때의 유량은 정격 유량 780 kg/s를 만족하였다. 그리고 우회 밸브를 완전히 개방하였을 때의 총유량은 795 kg/s를 기록하여 정격 유량을 약 2% 상회하였다.

펌프 양정은 유량과 마찬가지로 우회 밸브를 48% 개방하였을 때 49.5 mH₂O(485.4 kPa)를 나타내었다. 이는 설계 양정(42 mH₂O, 411.9 kPa)의 약 1.2배 큰 값을 나타내었다. 따라서 우회유량 밸브를 48% 개방하였을 때 정격 유량 780 kg/s를 만족하였다. 그리고 이때 양정은 49.5 mH₂O (485.4 kPa)를 기록하여 펌프는 계통의 유량 특성을 잘 나타내었다.

3.2.2 펌프 한 대가 운전하는 경우

펌프 한 대가 운전(one pump one heat exchanger operation, OPOH operation)하는 경우도 시험 온도를 일정하게 유지한 상태에서 우회 밸브의 개도에 따라 원자로 노심 유량, 우회 유량 및 펌프의 양정을 각각 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3에 각각 나타내었다. 마찬가지로 노심 유량의 변화를 확인하기 위하여 초음파 유량계로 측정된 노심 유량도 함께 표시하였다.

우회 밸브를 완전히 닫았을 때 노심 유량은 480 kg/s이다. 우회 밸브를 48% 개방하였을 때 노심 유량, 우회 유량, 총유량 및 펌프 양정은 각각 약 458 kg/s, 34 kg/s, 492 kg/s 및 43.5 mH₂O(426.6 kPa)이다. 총유량은 한 대의 정격 유량 (rated flow, 390 kg/s)의 1.26배이다. 펌프 양정은 한 대의 정격 양정의 약 88%를 나타내었다.

우회 밸브를 완전히 개방하는 경우 노심 유량, 우회 유량, 총유량 및 펌프 양정은 각각 442 kg/s, 56 kg/s, 498 kg/s 및 43 mH₂O(421.7 kPa)이다. 따라서 한 대 운전하는 경우 정격 유량보다 더 많이 흐를 수 있다. 이는 펌프의 입출구관에서 유량이 증가하여 압력 손실이 증가하지만 16 인치 원자로 냉각수 공동 입구관에서는 두 대 운전 시 보다 유량이 감소하여 압력 손실이 감소하므로 펌프의 양정이 낮아져 총유량이 증가하기 때문이다.

4. 유동 해석

4.1 유동 해석 조건 및 방법

1차 냉각수의 유동 특성을 확인하기 위하여 상용 프로그램 [7]을 이용하여 유동 해석을 하였다. 1차 냉각 계통은 Fig. 1과 같이 고도, 관경 및 유량의 변화를 기준으로 해석점(node)과 배관을 각각 14개로 구분하였다. 해석 조건은 Table 1과 같이 실제 운전 조건을 적용하였다.

그리고 해석 방법은 초기 압력을 가정하여 예상 유량을 계

Table 1 Conditions for flow analysis

Description	Operation conditions		Unit
	TPTH	OPOH	
Opening of bypass valve	48		degree
Total flow rate	780	492	kg/s
Core flow	728	453	kg/s
Bypass flow	52	34	kg/s
Pump head	49.5 (485.4)	43.5 (426.6)	mH ₂ O (kPa)
Maximum operating temperature	44.2		℃
Reactor coolant outlet pressure	19.03 (186.7)		mH ₂ O (kPa)
Coolant vapor pressure	1 (9.8)		mH ₂ O (kPa)
Density	998		kg/m ³

산하고 이를 반복 계산하여 각 해석점의 압력과 유량을 계산하였다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 해석점 1과 11은 침니에 부착된 원자로 냉각수 출구이며 EL 75.8 m에 위치한다. 그리고 바닥에서 3.5 m에 위치하고 그 위로 수조수가 8.7 m 채워져 있다. 이 지점의 압력은 19.03 mH₂O(186.6 kPa)로 예측 가능함으로 초기 압력으로 지정하였다.

4.2 압력 손실 계수

계통 내의 압력 손실은 배관과 기기에 의해 발생한다. 배관은 표면의 거칠기에 따라 마찰 손실이 발생하므로 난류 유동에 적합한 하젠-윌리엄 상수(Hazen-Williams coefficients)를 적용하였다. 이에 따라 스테인리스강 배관 표면은 대단히 매끄러운 상태로 간주하여 마찰 손실 계수를 지정하였다[7]. 기기의 압력 손실은 유동 표면의 마찰과 유동 방향과 유속의 변화에 따라 발생한다. 이를 보상하기 위하여 배관 관경과 레이놀즈수를 보정한 복합 K 방식(multiple K method)[8]을 적용하였다. 관계식은 식 (1)과 같다.

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

여기서, K_1, K_2, K_3 : 압력 손실 계수, R_e : 레이놀즈수, D : 관경이다.

그리고 계통의 차압을 유발하는 주요 기기들은 원자로 노심, 열교환기, 유량계, 스트레이너이다. 이들에 대한 압력 손실 계수는 Table 2에 나타내었다. 이들은 제작자가 제공한 값과 현장 시험으로 얻은 값을 기준으로 유속에 따라 달시(Darcy) 방정식[9]으로 구하였다.

펌프의 특성 곡선은 참고 자료[9]에 따라 식 (2)과 같이 포

Table 2 Pressure loss coefficient

Description	Unit	Value
Core ΔP	kPa	189.4
	mAq	19.3
	psi	27.3
	K	8.6
Heat exchanger ΔP	kPa	85.0
	mAq	8.7
	psi	12.3
	K	8.8
Flow meter ΔP	kPa	1.58
	mAq	0.16
	psi	0.23
	K	0.07
Strainer ΔP	kPa	23.1
	mAq	2.4
	psi	3.4
	K	2.4

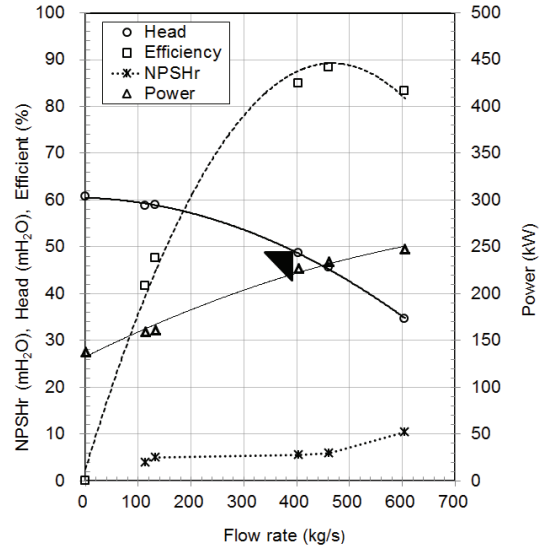


Fig. 4 Pump performance curve of primary cooling system

물선의 방정식으로 표시할 수 있다. 이는 포물선 식이므로 두 개의 운전점으로 구하였다.

$$\Delta P = A + BQ^2 \quad (2)$$

여기서, ΔP : 압력 손실(mH₂O), A, B : 상수, Q : 유량(kg/s)이다.

4.3 유동 해석 결과

4.3.1 펌프의 성능 곡선

Fig. 4는 현장에서 측정된 하나로 1차 냉각 계통의 펌프 성능 곡선을 보여 주고 있다. 여기에는 유량에 따라 양정, 축동력, 효율 및 펌프 요구 흡입 수두(NET POSITIVE SUCTION HEAD REQUIRED, NPSHR)의 값을 표시하고 있다. 각 표식은 측정된 값, 표식의 선은 추세선을 각각 나타낸다.

추세선은 펌프 한 대의 정격 운전점과 체절점(shutoff point)을 기준으로 식 (2)에 따라 구한 양정 곡선이다. 식에서 상수 A와 B는 각각 60.8과 -7.1E-05이다. A는 유량이 0인 경우의 압력이며 계통 내에서 가장 높은 압력을 나타낸다.

그리고 B는 양정 곡선의 기울기이다. 기울기가 클수록 양정 변화에 따른 유량의 변화가 작다. 하나로로 경우 체절 양정이 정격 양정의 약 1.25배이며 양정의 변화에 따른 유량의 변화가 큰 편이다.

이 곡선식을 이용하여 양정을 계산하고 현장에서 측정된 값과 비교하여 평균 상대 오차를 구하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 최대 상대 오차는 정격 유량의 약 30%인 점에서

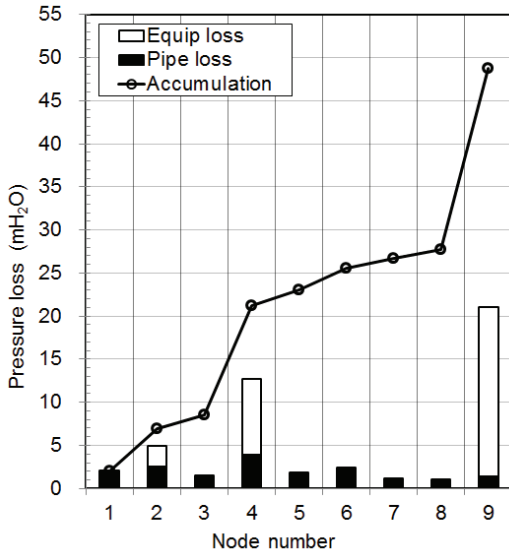


Fig. 5 Pressure loss of primary cooling system

1.84%를 보여 주었다. 그리고 평균 상대 오차는 약 0.8%를 보여 실제 운전 상태를 잘 묘사하므로 유동 해석을 위한 펌프 성능 곡선식으로 정하였다.

4.3.2 계통 압력 손실

정상 운전 조건으로 설계 유량이 계통 내에 흐르는 경우 각 파이프의 압력 손실을 계산하였다. 그 결과는 Fig. 5에서 보여 주고 있다. 막대 그림은 배관의 각 해석점을 구분하기 위하여 번호(node number)로 지정하고 각 해석점에서의 배관과 기기의 압력 손실을 나타내었다. 그리고 실선은 압력 손실 누계(accumulation)를 나타낸다.

정격 유량 390 kg/s의 유량이 흐르는 경우 계통 압력 손실은 약 49 mH₂O(480.5 kPa)로 계산되었다. 이는 실험값의 약

Table 3 Error of calculated pump performance curve

Flow rate (kg/s)	Actual head mH ₂ O (kPa)	Cal. Head mH ₂ O (kPa)	Error(%)
0	60.78 (596.0)	60.80 (596.2)	0.038
114	58.77 (576.3)	59.87 (587.1)	1.842
132	58.92 (577.8)	59.56 (584.1)	1.074
403	48.55 (476.1)	49.20 (482.5)	1.316
461	45.66 (447.8)	45.68 (448.0)	0.051
605	34.53 (338.6)	34.71 (340.4)	0.497
Average			0.803

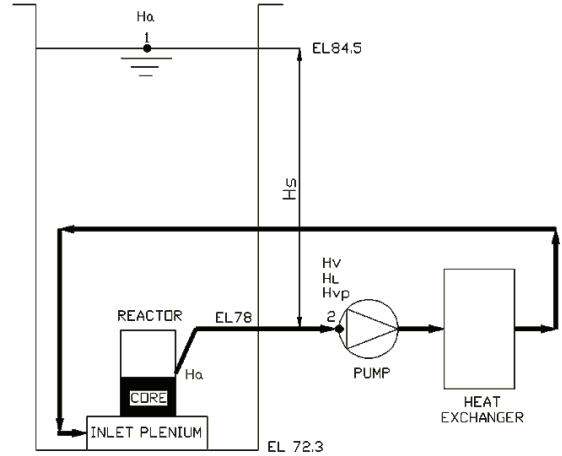


Fig. 6 Schematic diagram for pump cavitations

99%이다. 따라서 실제 계통의 압력 손실을 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.

4.3.3 캐비테이션(Cavitation)

펌프가 적정 유량을 안정적으로 공급하기 위해서는 캐비테이션 없이 가동되어야 한다. 캐비테이션은 펌프의 회전차 중심에서의 압력이 유체의 증기압 보다 낮은 경우에 증발하여 기포가 발생하는 현상이다. 이 기포가 유동 중에 가압되어 회전차 날개나 케이싱 면에 부딪히면 깨어져 심한 진동을 유발하고 점침식을 유발한다[10].

이를 막기 위해서는 충분한 정압 흡입 수두(static pump suction head)를 가지는 위치에 펌프를 설치하여야 한다. 그 위치를 계산하기 위해 하나로의 펌프 설치 상태를 개략적으로 Fig. 6에 표시하였다. 그림에서 펌프의 정압 흡입 수두는 유체 표면과 순환 펌프의 회전차 중심까지의 수직 거리 H_s 로 나타내었다.

이 값이 양의 값을 가지면 흡입 상태이다. 이는 수면이 펌프 중심보다 높아 그 만큼 수두 압력을 받으므로 쉽게 흡입할 수 있다. 반대로 음의 값을 가지면 물을 빨아올리므로 흡상(lift)이라 하며 빨아올리는 일을 펌프가 하게 되므로 흡입 손실이 크다.

이러한 손실 등을 제외하고 펌프가 흡입할 수 있는 가능한 흡입 수두를 유효 흡입 수두(Net positive suction head available)라 한다. 이를 구하기 위하여 수조 표면 (1)과 펌프의 중심 (2)에 대하여 베르누이 방정식을 세웠다. 이를 정리하면 펌프의 유효 흡입 수두는 식 (3)과 같이 표시된다.

$$NPSHa = H_s + H_a - (H_{vp} + H_v + H_L) \tag{3}$$

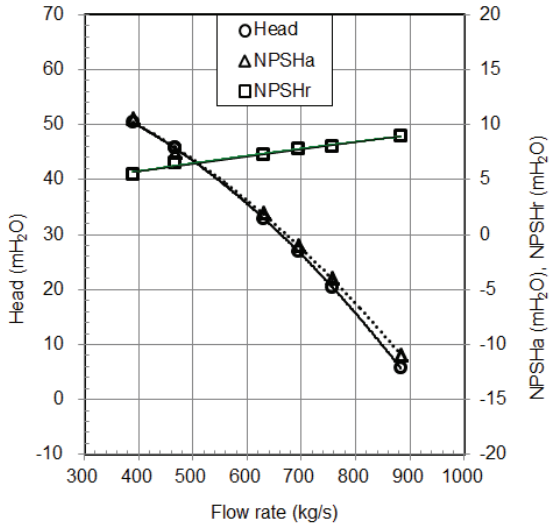


Fig. 7 Predictive flow rate under one pump trip and the other pump operation

여기서, H_a : 흡입 표면 대기압 수두, H_{vp} : 흡입 유체의 증기압 수두, H_p : 펌프 흡입관 속도 수두, H_L : 흡입관의 마찰 손실 수두이다.

냉각 펌프 두 대가 운전하는 경우 냉각수의 최대 운전 온도가 44.2°C이므로 이때의 증기압 수두는 1 mH₂O(9.8 kPa)이다. 속도 수두는 흡입 속도의 에너지를 나타내므로 약 1 mH₂O(9.8 kPa)이다. 펌프의 흡입 수두 손실은 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 해석점 1에서 3까지의 압력 손실의 합으로 표시되며 약 7 mH₂O(68.6 kPa)이다.

펌프의 정압 흡입 수두는 6.5 mH₂O(63.7 kPa)이고 대기압 수두는 10.33 mH₂O(101.3 kPa)이다. 이들 값들을 식 (3)에 대입하여 계산하면 펌프의 유효 흡입 수두는 7.8 mH₂O(76.5 kPa)이다. 하나로의 경우 제작자가 제공한 펌프의 요구 흡입 수두는 Fig. 4에서 보여 주는 바와 같이 약 5.5 mH₂O(53.9 kPa)이다. 따라서 펌프의 유효 흡입 수두는 요구 흡입 수두보다 약 2.3 mH₂O(22.6 kPa)크므로 캐비테이션 없이 안전하게 운전할 수 있다.

이 의미를 원자로 운전과 비교하여 설명하면 수조수의 높이가 일정하면 펌프의 정압 흡입 수두도 일정하다. 따라서 이 수위가 2.3 m 낮을 때까지는 캐비테이션이 발생하지 않으므로 펌프를 안전하게 가동할 수 있음을 의미한다.

4.3.4 펌프 한 대 운전시의 유동 특성

정상적인 운전 상태에서 50% 용량의 두 대의 펌프가 운전한다. 그 중에서 펌프 한 대가 고장 나면 나머지 한 대로 원자로가 정지한 후에도 잔열을 제거하여야 한다. 이 경우에 대

하여 실험으로 그 결과를 Fig. 3에서 보여 준 바와 같이 우회 유량 밸브를 완전히 개방하는 경우 총유량은 약 498 kg/s를 나타내었다.

유효 유량을 예측하기 위해 유동 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 한 대의 정격 유량을 기준으로 총유량을 늘려가면서 펌프의 유효 흡입 수두와 요구 흡입 수두를 각각 계산하였다. 이는 유량이 증가하면 흡입관 압력 손실이 증가하여 펌프의 유효 흡입 수두가 감소하나, 요구 흡입 수두는 유량이 증가하면 반대로 마찰 손실이 증가하여 증가함을 보이고 있다.

계산 결과 유량이 약 520 kg/s인 점에서 펌프의 유효 흡입 수두 선도와 요구 흡입 수두 선도가 교차하였다. 이 점은 캐비테이션이 발생하는 임계점이다. 현장에서 측정된 유량은 이 유량보다 약 4% 낮은 값을 유지하였다.

이는 캐비테이션의 영향 없이 안정된 유동 상태를 보여준다. 따라서 펌프 두 대로 운전할 수 있는 유로에서 한 대로 운전하는 경우 정격 유량보다 더 많이 흐를 수 있다. 그러나 그 한계점은 캐비테이션 임계점 이하임을 알 수 있다.

4. 결 론

하나로 1차 냉각 계통의 두 대의 냉각 펌프로 운전하는 유로에서 한 대가 고장이 나서 나머지 한 대로 운전하는 경우에 대해 예상 유량을 구하기 위해 유동 해석을 하였다. 이 경우 유량은 한 대의 정격 유량을 상회하여 증가하나 이의 한계치는 캐비테이션 임계 유량 이하임을 알 수 있었다. 이와 관련하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장 시험 결과, 우회유량 밸브를 48% 개방하였을 때 정격 유량 780 kg/s를 만족하였다. 그리고 이때 양정은 49.5 mH₂O(485.4 kPa)를 기록하여 펌프는 계통의 유량 특성을 잘 나타내었다.
- (2) 현장 시험 결과를 바탕으로 유동 해석을 하기 위한 펌프의 성능 곡선식을 구하였다. 이는 평균 상태 오차 범위 0.8%를 나타내어 실제 운전 상태를 잘 묘사하였다.
- (3) 정상 운전 조건으로 두 대의 펌프가 가동하는 경우에 대해 유동 해석한 결과 펌프 양정을 1% 오차 범위 내에서 만족하므로 유동 해석 방법은 실제 상태를 잘 묘사하고 있음을 검증하였다.
- (4) 하나로 냉각 펌프의 유효 흡입 수두는 요구 흡입 수두보다 약 2.3 mH₂O(22.6 kPa) 큰 값을 가지므로 그 이상의 수면을 유지하면 캐비테이션의 영향 없이 펌프는 안정되게 운전할 수 있다.
- (5) 펌프 두 대로 운전할 수 있는 유로에서 한 대로 운전하는

경우 정격 유량보다 약 33% 더 많이 흐를 수 있으나 그 한계점은 캐비테이션 임계점 이하이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 1996, Y.C. Park, J.S. Wu, "System Performance Test in HANARO," *the 5th ASRR*, Vol.1, pp.240-246.
- [2] 2004, Y.C. Park et. al, "Improvement of Temperature Control Function for HANARO Flow Simulation Test Facility," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, pp.97.
- [3] 2005, Y.C. Park, S.I. Woo, "The Analytic Analysis of Suppressing Jet Flow at Guide Tube of Circular Irradiation Hole in HANARO," *J of Computational Fluids Engineering*, Vol.10 No.2, pp1-6.
- [4] 2000, Y.C. Park et al., "Evaluation for the Cooling Capability of Secondary Cooling Tower in HANARO," *Proceeding of the KFMA Annual Meeting 2000*, pp.345-350.
- [5] 2007, Y.C. Park, et, al., 2007, "The Results of the Emergency Water Core Injection Flow Rate Test in HANARO," *Transactions of the Korean Nuclear Society 2007 Autumn Meeting*.
- [6] 1999, Y.C. Park, et al., "Design and Test of ASME Strainer for Primary Cooling System in HANARO," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.2 No.3, pp.24-29.
- [7] 1985, Flow Network Analysis, 5.0C, "User's Manual," Kelix Software Co.
- [8] 1981, Hooper, W. B. "The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings," *Chem. Engr. Aug. 24*. pp.97-100.
- [9] Merie C. Potter and Elaine P. Scott, "An Introduction to Fluid Mechanics," Thomson.
- [10] 1983, Hydraulic Institute, "Hydraulic Institute Standards for Centrifugal Rotary & Reciprocating Pumps," 14th. Edition.