

< 논문 >

SMART 연구로 주냉각재펌프의 검증시험

박상진[†] · 윤의수* · 오형우**

(2006년 4월 6일 접수, 2006년 6월 19일 심사완료)

Qualification Test of a Main Coolant Pump for SMART Pilot

Sang-Jin Park, Eui-Soo Yoon and Hyoung Woo Oh

Key Words : Main Coolant Pump(주냉각재펌프), SMART Pilot(스마트연구로), Qualification Test(검증시험), Primary System(일차계통), Nuclear Grade Pump(원자력급 펌프)

Abstract

SMART Pilot is a multipurpose small capacity integral type reactor. Main coolant pump (MCP) of SMART Pilot is a canned-motor-type axial pump to circulate the primary coolant between nuclear fuel and steam generator in the primary system. The reactor is designed to operate under condition of 310°C and 14.7MPa. Thus MCP has to be tested under same operating condition as reactor design condition to verify its performance and safety. In present work, a test apparatus to simulate real operating situations of the reactor has been designed and constructed to test MCP. And then functional tests, performance tests, and endurance tests have been carried out upon a prototype MCP. Canned motor characteristics, homologous head/torque curves, coast-down curves, NPSH curves and life-time performance variations were obtained from the qualification test as well as hydraulic performance characteristics of MCP.

기호설명

A_d : 토출구 단면적[m²]
 A_s : 흡입구 단면적[m²]
 D : 수력직경[m]
 g : 중력가속도[m/s²]
 H : 전양정[m]
 h : 호모로고스 양정상사변수
 N : 회전속도[rpm]
 N_s : 주파수 동기 회전속도[rpm]
 Δp : 차압[Pa]

Q : 유량[m³/s]
 s : 슬립
 T_h : 토크[N·m]
 α_N : 회전속도상사변수
 β_N : 호모로고스 토크상사변수
 η : 총효율(total-to-total)
 ν : 유량상사변수
 ρ : 순환유체의 밀도[kg/m³]

하첨자

R : 설계기준점

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터
E-mail : giant@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7360 FAX : (042)868-7335

* 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

** 회원, 충주대학교 기계공학과

1. 서론

소형 가압경수로(pressurized water reactor)인 SMART 연구로는 안전성의 획기적인 제고와 경

제성 향상을 구현하기 위하여, 핵증기 공급계통을 구성하는 주냉각재펌프(main coolant pump, 이하 MCP), 가압기(pressurizer), 증기발생기(steam generator), 제어봉구동장치(control element drive mechanism) 등의 주기가 노심과 함께 동일한 압력용기에 설치되는 일체형(integral type) 원자로이며, 이것은 기존 분리형(loop type)원자로의 주요한 단점인 대형 냉각재상실사고 가능성을 근본적으로 배제할 수 있다.⁽¹⁾

SMART 연구로에서는 일체형 구현을 위하여 1차계통 주기를 새롭게 개발하고 있는데, MCP의 경우 기존 냉각재펌프의 씰(seal)을 통한 냉각재상실을 근본적으로 없애기 위하여 캔드모터형(canned motor type)을 채택하였다. MCP는 일체형 원자로인 SMART 연구로의 1차계통 냉각수를 핵연료와 증기발생기사이로 순환시키는 펌프로써 캔드모터형 축류식 펌프이다. 작동환경은 310 °C, 14.7 MPa이며, 설계점에서의 사양은 유량 922 m³/h, 전양정 9 m(임펠러 전단과 디퓨저 후단 기준)이다. 운전속도는 3,600 rpm이고, 440 V 3상 전원으로 구동되며 정격 35 kW이다. 원형의 중량은 1,030 kg, 길이 2.300 m이다. Fig. 1은 시제품의 사진이다.

새로이 개발된 MCP의 경우 성능, 안전성, 구조적 건전성을 충분히 입증하여야 하나 그동안 주냉각재펌프를 비롯한 1차계통 원자력급 펌프를 국내에서 제작·공급한 경험이 없어 국내 검증시험 시설이나 기술 및 체계가 미비한 실정이다. 원자

로 일차계통은 경미한 이상 발생 시에도 증대사고로 이어지기 때문에, 주냉각재펌프의 개발을 위해서는 검증시험을 통해 설계요구사항을 충족하는 지 확인하고 제반 규정에서 요구하는 내구성 및 건전성을 입증할 뿐 만 아니라 각종 사고 상황 발생시 거동을 예측할 수 있는 기본 자료를 도출하여야 한다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 MCP 시제품형⁽¹⁾의 성능검증 및 건전성을 확인하기 위하여 원자력급 펌프의 검증시험기술을 개발하고 일체형원자로 운전조건을 모사한 성능시험장치를 설계·제작한 후, 이를 이용하여 검증시험을 수행하였다. 검증시험은 기능시험, 성능시험, 내구성시험, 환경시험으로 이루어져있으며, 본 논문에서는 환경시험을 제외한 세 가지 항목에 대한 시험내용 및 결과를 기술하였다.

2. 시험항목 및 시험장치

2.1 검증시험 항목

본 검증시험의 항목은 Table 1에 정리한 바와 같이, 크게 기능시험, 성능시험, 내구성시험으로 구분된다. 기능시험은 MCP 구성요소가 설계시 고려한 기능을 수행하는 지 확인하는 것으로 캔드모터의 특성을 파악하는 전동기시험, 가스제거 유로의 기능확인, 전동기를 보호하는 냉각기의 기능시험으로 구성되어 있다.

Table 1 List of MCP qualification test items

Category	Test item	Remark
Function Test	Canned motor test	Measurement of shaft torque and efficiency of MCP motor
	Gas removal test	Measurement of gas removal rate
	Cooling module test	Verification of performance of cooling coil for the motor
Performance Test	Hydraulic test	Measurement of hydraulic performance of MCP
	Coastdown test	Transient behavior of MCP during coastdown
	NPSH test	Net positive suction head
	Pressure pulsation test	Measurement of pressure pulsation at the pump discharge
Durability Test	Durability test	3,000h continuous operation Transient operations Overload operations

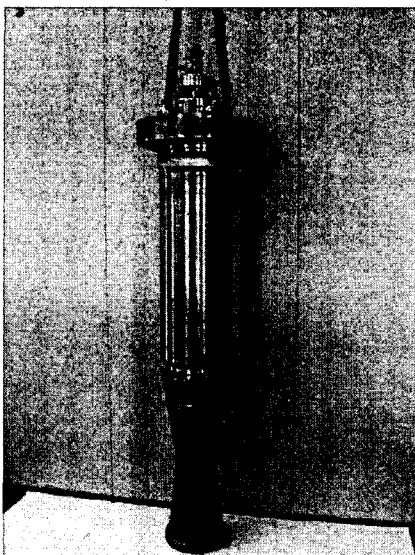


Fig. 1 Prototype of main coolant pump

성능시험은 설계점과 탈설계점에서 펌프의 성능을 평가하고, 이상작동 시의 거동을 실험적으로 예측하는 시험이다. 펌프의 기본적인 수력성능을 측정하여 호모로고스(homologous) 곡선을 생산하고 최소흡입수두를 산정하기 위한 NPSH 곡선과 운전 중 전원차단 시의 코스트다운(coastdown) 곡선을 성능시험을 통하여 구한다. 또 펌프에서 생성된 압력맥동이 원자로 전체의 안전에 영향을 미칠 수 있으므로 토출구에서의 압력맥동을 측정한다.

내구성시험은 MCP의 설계수명인 10년 동안 성능 및 구조적 건전성이 유지되는 지 확인하는 시험으로 3,000시간(2,000+1,000) 연속운전 및 과도 운전, 과부하운전으로 구성되어 있다.

2.2 성능시험장치

MCP 성능시험장치(Test Loop)는 MCP가 장착되는 원자로의 작동조건을 모사하고, 2.1절에 기술한 검증시험항목의 수행이 가능하도록 설계하였다. 성능시험장치는 Fig. 2에 나타낸 개략도와 같이 순환루프로 이루어져 있다. 루프 내의 온도 및 압력은 상온·상압부터 MCP의 실제가동조건인 310°C, 14.7 MPa 이상까지 조절이 가능하다. 탈설계점에서의 시험을 고려하여 최대 1,200 m³/h까지의 유량범위 및 1/2/3/4상환(flow-rpm plane)에서 시험이 가능하도록 구동/역구동용 보조펌프(auxiliary pump)를 설치하였다. 보조펌프는 캔드모터형 원심펌프로서 정격에서 양정 25 m, 유량 600 m³/h이다. 시험에서 요구하는 유량범위를 만족시키기 위하여 보조펌프 2대를 병렬 연결하여 사용하였다. Fig. 2의 개략도와 같이 보조펌프 주위에 4개의 게이트밸브를 설치하여 필요에 따라

유동방향을 바꿀 수 있도록 하였다.

주순환배관은 고온강도가 우수한 A335 재질의 12인치 Schedule-160 파이프로 구성하였다. 내경은 252 mm, 총연장은 31 m이다. 주순환배관의 손실수두는 유량 920 m³에서 8.5 m이다. 주순환배관에는 MCP 장착용 치구, 가압기, 히터, 보조펌프, 수처리설비, 배출수냉각기가 설치되거나 연결되어 있다. 또 MCP 장착용 치구의 흡입구 전단에 유량조절밸브를 설치하여 밸브개도에 따라 주순환유량을 조절할 수 있도록 하였다. 유량은 MCP 및 보조펌프의 회전수로도 조절이 가능하다.

루프의 압력은 압축질소가스를 가압기에 주입하여 조절하고, 주입펌프(charging pump)로도 가압이 가능하도록 하였다. 온도는 주배관 내에 삽입된 전열식 히터로 조절한다. 히터의 용량은 175 kW이다. 작동유체는 일체형 원자로 주냉각재와 같은 성상이 되도록 수처리설비에서 탈산소초순수를 생산하여 시험장치로 공급한다. 이밖에 냉각계통을 두어 기기냉각수가 필요한 MCP, 보조펌프, 배출수냉각기에 냉각수를 공급한다.

시험장치의 상태는 각 부에 설치된 온도계, 압력계, 유량계, 액면계의 신호로 확인하며 MMIS(man and machine interface system)를 통해 자동 또는 수동으로 조절할 수 있도록 되어있다. 본 시험장치에 설치된 계측기는 ASME PTC 8.2⁽²⁾의 Type A 시험 요건을 만족하도록 선정하였다. 주요 계측장치의 사양 및 정밀도는 Table 2에 정리한 바와 같다. 계측기의 신호는 MMIS 및 DAS(data acquisition system)로 보내져 화면에 표시되거나 저장된다. 본 시험장치에서 독립적으로 조절 가능한 물리량은 온도, 압력, 유량, MCP 회전수 및 회전방향, 유동방향이며, 그밖에 MCP 냉각

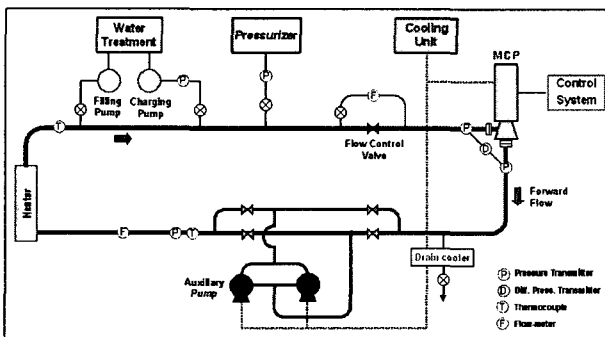


Fig. 2 Schematic diagram of MCP test loop

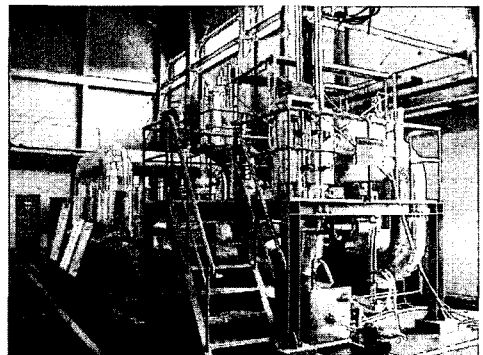


Fig. 3 Photograph of MCP test loop at KIMM

Table 2 Description of instruments

Instrument	Maker & Model	Accuracy
Flowmeter	Daehan Ins. M-PITOT-2	20 °C: 0.8 % 310 °C: 1.0 %
Pressure Transmitter	Honeywell Smart-TM	±0.5 %
Temperature Sensor	Omega K-type	±0.6 °C
Tachometer	Order made Tachogenerator	±1 digit
Electric Powermeter	Yokogawa WT230	±0.2 %
Dynamometer	Tokyo Schenk 230kW	Torque: ±0.3 % Speed: ±1 dgt.

수의 조건(유량 및 온도)도 조절이 가능하다. Fig. 3은 한국기계연구원에 설치되어 있는 시험장치의 전경이다.

3. 시험결과

3.1 전동기 특성시험

MCP의 경우 모터가 임펠러와 같은 압력계면 안에 내장된 캔드모터형이므로, 성능시험 시 펌프로 공급되는 토크(또는 축동력)를 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 펌프 자체의 수력성능을 정확하게 알기 위해서는 성능시험에 앞서 캔드모터의 특성을 시험을 통해 먼저 구해야 한다. 본 시험에서는 MCP의 임펠러를 제거한 상태에서 회전축을 와전류형 동력계에 연결한 후, 회전수가 일정하게 유지되도록 입력전원의 주파수를 조절하면서 축에 걸리는 부하(토크)에 따른 전동기 효율을 측정하였다. 전동기의 효율은 전동기로 공급된 전력량을 측정하고, 이에 대한 회전속도와 토크 곱의 비로 계산하였다.

MCP는 모터의 전기적 출력(electrical power) 증가계적 전달손실, 내부유체순환을 위한 보조임펠러, 구동손실을 제외한 부분이 임펠러로 전달된다. 본 전동기 시험에서 구한 효율은 이러한 제손실을 포함하고 있다. Fig. 4는 슬립이 0일 때 토크가 0이 되도록 보정한 전기적 토크를 슬립의 함수로 도시한 결과이다. 여기서 슬립, s 는 다음 식과 같이 정의하였다.⁽³⁾

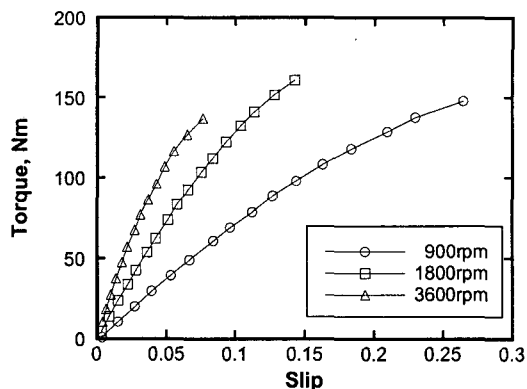


Fig. 4 Variation of electrical torque of MCP motor as a function of slip with respect to speed

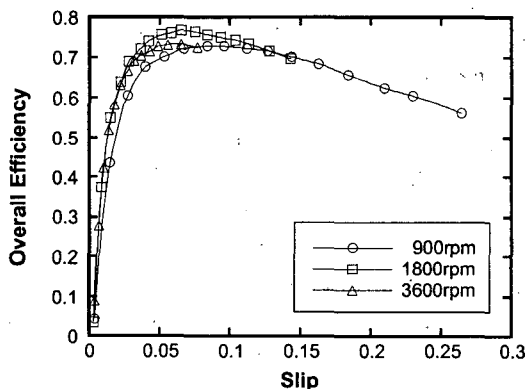


Fig. 5 Overall efficiency of MCP motor as a function of slip with respect to speed

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{1}$$

여기서 N 은 회전수, N_s 는 동기회전수(synchronous speed)이다.

한편 제손실을 포함한 MCP 전동기의 효율 곡선은 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 각 회전속도에서 최대효율은 설계속도인 3,600 rpm(72%)보다 1,800 rpm(76%)에서 더 크게 나타나는데, 이는 보조임펠러 구동손실이 3,600 rpm에서 4배 정도 크기 때문으로 보인다.

3.2 수력성능시험

가장 기본적인 수력성능을 알아보기 위하여 펌프 운전환경인 310 °C, 14.7 MPa에서 1/2/3 상한에

대하여 수력성능시험을 수행하였다. 수력성능시험은 각 시험점(회전속도, 유량 매트릭스 상)에서 유량, 흡입/토출간 차압, 입력전력을 측정하여 유량-전양정곡선, 유량-토크곡선 및 임펠러 수력효율을 구하는 순서로 수행되었다. 양정은 MCP의 흡입구 및 토출구에 설치된 압력측정용 탭의 설치위치를 기준으로 하였으며, 단면적변화에 따른 동압을 보정한 전양정을 산출하였다. 흡입유로 및 토출유로에서의 압력손실은 실물과 동일한 모델에 대하여 FLUENT™로 수치해석한 결과로부터 얻었으나, 본 논문에서는 수치해석에 따른 불확실성을 배제하기 위하여 측정점을 기준으로 전양정을 산출하였다. 참고로 고온조건 설계유량에서 흡입·토출유로의 수두손실은 0.7 m 정도이다. 임펠러로 공급되는 토크, T_h 는 입력전력에 각 시험점에서 슬립량을 기준으로 계산한 전동기 총효율(Fig. 5)을 곱하여 구하였다. 수력계산에 사용된 작동유체의 물성치는 PROPATH® v.11.1을 이용하여 구하였다.

Fig. 6은 900, 1,800, 2,700, 3,600rpm일 경우의 1상한과 2상한에서 유량-전양정곡선을 도시한 것으로 설계점인 3,600 rpm, 922 m³/h에서 흡입·토출유로의 수두손실을 포함한 전양정은 7.5 m로 나타났다.(임펠러전단과 디퓨저후단을 기준으로 환산하면 8.2 m) 유량-토크곡선은 Fig. 7에 나타낸 바와 같으며, 이는 Fig. 6의 전양정곡선과 거의 흡사한 형태를 가지고 있다.

한편, 임펠러의 수력(기계적, total-to-total)효율은 임펠러로 공급되는 축동력(shaft power)에 대한 임펠러의 수동력(hydraulic power)의 비로서 다음식과 같이 정의한다. T_h 는 축을 통해 임펠러로 공급되는 토크이다.

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{2\pi T_h N / 60} \quad (2)$$

Fig. 8은 식 (2) 및 수력성능시험결과로부터 계산한 임펠러의 효율곡선이다. 그림과 같이 설계회전속도(3,600 rpm)의 설계유량(922 m³/h) 보다 낮은 유량(약 820 m³/h)에서 최대효율이 나타났다.

유량(Q) 및 전양정(H)의 불확실도(uncertainty)는 다음의 식으로 계산할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\delta Q = 0.01 Q \quad (3)$$

$$\delta H = \left\{ \left(\frac{\delta(\Delta p)}{\rho g} \right)^2 + \left[\frac{Q \delta Q}{g A_d^2} \left(1 - \frac{A_d^2}{A_s^2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$= \left\{ \left(\frac{0.005 \Delta p}{\rho g} \right)^2 + \left[\frac{0.359 Q^2}{g} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

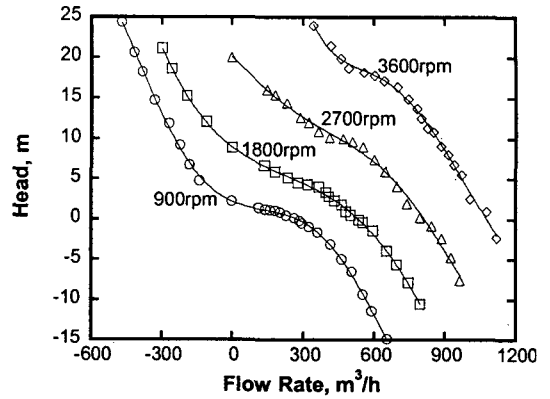


Fig. 6 Total head of MCP in the first and second quadrants

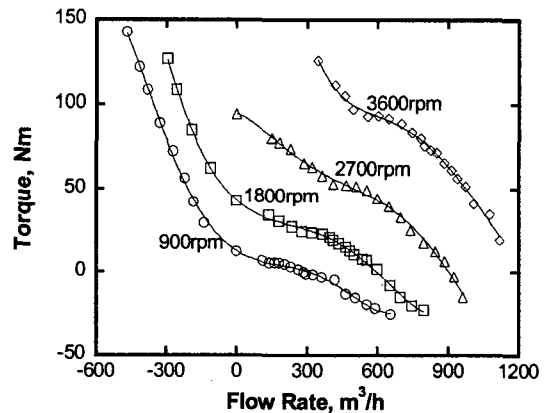


Fig. 7 Shaft torque of MCP in the first and second quadrants

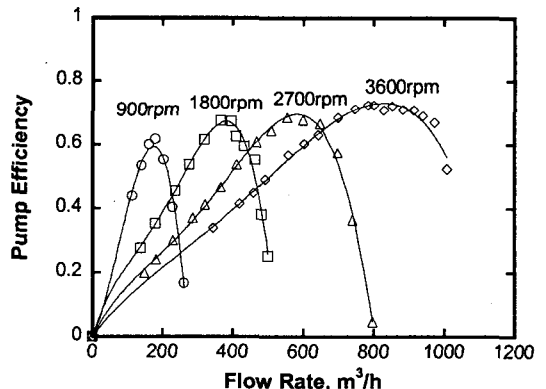


Fig. 8 Hydraulic efficiency of MCP impeller

전 시험영역에서 유량의 불확실도는 1%, 전압 정의 불확실도는 0.5% 이하로 나타났다.

3.3 호모로고스 곡선 (Homologous Curves)

위의 3.2절에서 정리한 수력성능자료(1/2/3상한)를 바탕으로 1차계통 펌프개발 시 필수적으로 요구되는 호모로고스곡선을 생산하였다. 호모로고스곡선은 일반 펌프의 펌프완전특성곡선⁽⁵⁻⁷⁾을 무차원화한 개념으로 호모로고스 상사변수의 정의는 다음과 같다.

$$\nu \equiv \frac{Q}{Q_R} \tag{5}$$

$$\alpha_N \equiv \frac{N}{N_R} \tag{6}$$

$$\frac{\nu}{\alpha_N} = \frac{Q/Q_R}{N/N_R} = \frac{Q/ND^3}{Q_R/N_R D^3} \tag{7}$$

한편 양정상사변수 및 토크상사변수는 다음과 같

이 정의한다.

$$h \equiv H/H_R \tag{8}$$

$$\beta_N \equiv \frac{T_h}{T_{hr}} \frac{\rho_R}{\rho} \tag{9}$$

여기서 T_h 는 축을 통해 임펠러로 공급되는 토크를 나타낸다. 3.2의 시험결과를 위에서 정의한 변수로 변환하여 나타내면, Fig. 9와 10의 호모로고스 양정 및 토크곡선을 구할 수 있다. 하첨자 R은 설계점(유량 922 m³/h)의 값을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 수력측정결과와 상관성이 우수하였고 정회전시와 역회전시의 곡선이 흡사한 축류식 펌프의 전형적인 특징^(8,9)을 보여주고 있다. 여기서 각 곡선에 표시한 영문자 중 첫 글자, H와 B는 각각 양정과 토크를 나타내며, A와 V는 각각 수평축변수 분모가 α_N, ν 인 경우를 의미한다. N(normal), D(dissipation), T(turbining)는 각각 유량-회전속도 평면상의 1/2/3상한을 표시한 것이다.

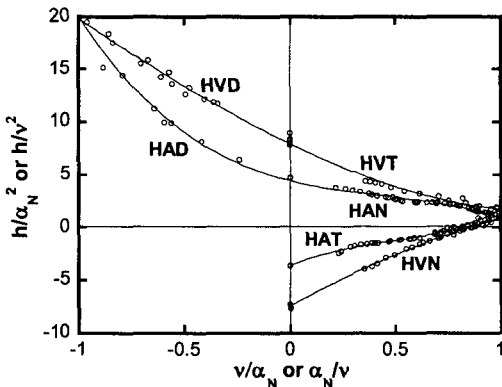


Fig. 9 Homologous head curve of MCP

3.4 압력맥동 측정

원자로에서는 냉각재순환펌프에서 발생한 압력맥동으로 인하여 연료봉이 공진하는 경우, 중대 사고로 이어질 가능성이 있으므로 냉각재순환펌프 개발시 맥동의 진폭 및 주요 주파수를 측정하여 전체 시스템 설계시 고려하여야 한다. 본 연구에서도 MCP에서 생성된 맥동특성을 시험을 통하여 계측하였다.

압력맥동은 토출측 압력을 측정하기 위하여 설

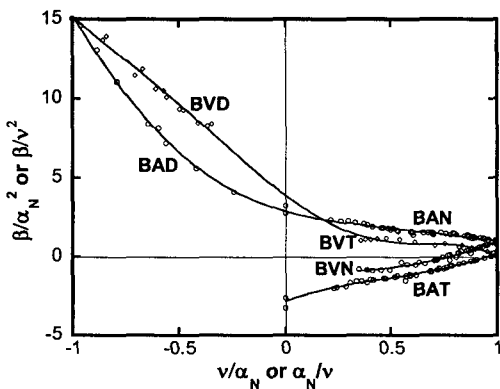


Fig. 10 Homologous torque curve of MCP

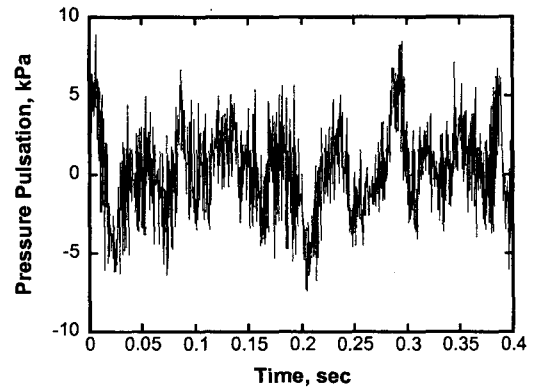


Fig. 11 Pressure pulsation at the discharge port of MCP at 3,600rpm

치한 4개의 압력탭 중 하나를 선택하여 측정하였고, 시간에 따른 미세한 압력변화를 정확하게 잴 수 있는 쿼츠형 다이내믹 압력센서(quartz type dynamic pressure sensor)를 사용하였다. Fig. 11은 설계속도인 3,600rpm에서 측정된 맥동성분을 나타낸 것으로 맥동 진폭의 RMS값은 2.82 kPa로 원심펌프인 상용로 RCP (reactor coolant pump)에 비하여 50% 이하의 진폭을 보였다.⁽¹⁰⁾ 본 시험결과를 FFT 분석으로 주파수 특성을 해석하여 회전 주파수(RF, 60 Hz) 및 회전외통과주파수(BPF, 300 Hz)의 영향을 많이 받음을 확인하였다.

3.5 NPSH 측정

MCP는 310 °C의 포화압력인 9.9 MPa 보다 가압한 14.7 MPa에서 동작하므로 NPSH(net positive suction head) 특성이 정상운전 중에는 영향을 끼치지 않지만, 원자로 기동시 상압에서 운전을 시작하므로 이때 최소흡입수두 (NPSH_R)가 문제를 일으킬 수 있다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 상온조건에서 유량을 일정하게 유지하면서 흡입구의 압력을 조절하여 수두변화를 측정하는 일정유량법(constant capacity method)^(2,12)으로 NPSH 특성곡선을 구하였다. Fig. 12는 900, 1,800, 3,600 rpm 운전시 각 설계유량에서의 NPSH 변화에 따른 전양정의 변화를 보여주고 있다. 회전속도가 증가할수록 최소흡입수두(NPSH_R)가 커지는데, NPSH_R 3% 지점은 900 rpm에서 11 m, 1,800 rpm에서 17 m, 3,600 rpm에서 17 m이다.

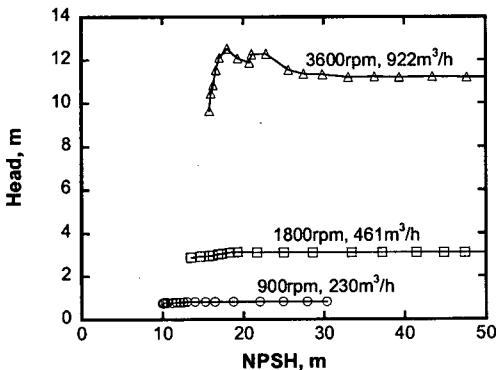


Fig. 12 NPSH test result of MCP by constant capacity method

3.6 코스트다운(coastdown)시험

코스트다운시험(또는 과도현상시험)은 펌프 가동 중 공급전원이 갑자기 차단될 경우의 펌프거동을 예측하는 시험으로 각종 사고상황시 원자로거동을 모사하기 위한 중요한 안전해석 입력자료이다.⁽¹³⁾

Fig. 13은 MCP를 정상상태 운전 중 전원을 차단했을 때부터의 펌프회전속도, 유량 및 펌프 흡입·토출구간 차압 변화를 나타낸 것이다. 펌프가 완전히 정지한 후에도 루프 내 유체의 관성에 의하여 유동이 일정시간 동안 지속됨을 알 수 있다. 참고로 MCP 회전축의 질량은 67 kg, 관성모멘트는 0.094 kg·m²이며, 역회전방지장치는 장착되어 있지 않다.

3.7 내구성시험

내구성시험은 2,000시간 및 1,000시간 연속운전

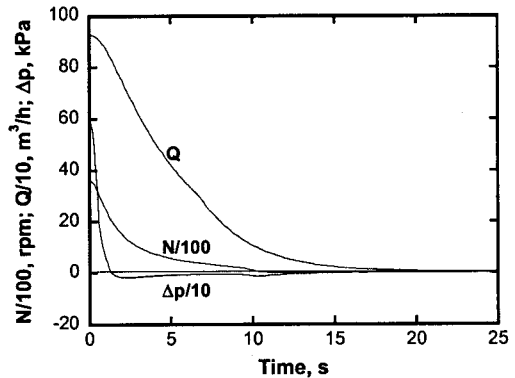


Fig. 13 Coastdown curves from 3,600rpm

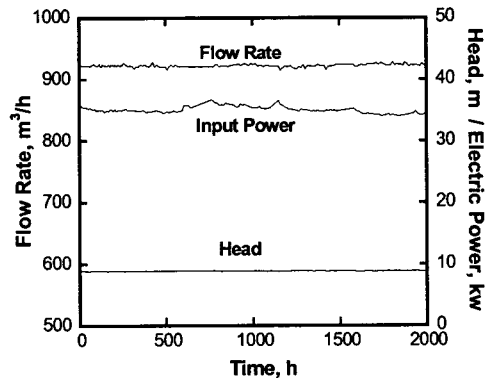


Fig. 14 Performance variation during 2,000 hour continuous endurance test

으로 이루어져 있고, 각각은 수명기간동안의 각종 운전모드 변경횟수를 반영한 과도운전시험 및 정격의 125, 150% 과부하운전시험을 포함한다. MCP를 2,000시간동안 설계조건에서 운전하면서 측정된 유량, 전양정, 입력전력의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 시험 기간 중 전양정 및 유량은 유의수준 이내에서 유지되었고 입력전력의 경우 공급 전원의 상태(전압)가 시험 중 변동한 관계로 $\pm 6\%$ 이내에서 변화였다. 내구성시험 종료시 펌프의 기본성능을 확인한 결과, 시험 전에 비하여 저하되지 않았다.

4. 결론

일체형원자로인 SMART 연구로의 1차계통에 탑재하기 위하여 개발한 MCP 원형의 검증시험을 수행하였다. 이를 위하여 원자력급 펌프의 검증시험기술을 개발하고, 성능시험장치를 설계·제작하였다. 검증시험은 시제원형을 대상으로 원자로 1차계통의 운전조건인 310°C , 14.7MPa 에서 수행되었으며, 전동기특성, 수력성능, NPSH, 압력맥동, 코스트다운, 내구특성 등을 시험을 통하여 구하거나 입증하였다. 그동안 시험기술 및 설비의 미비로 국내 원자력급 펌프의 개발 및 검증이 활발하지 못하였지만, 본 연구를 통하여 입증된 시험기법 및 시험설비는 관련 기기개발 및 산업발전에 기여할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) <http://www.smart.re.kr>.
- (2) ASME, 1990, *Centrifugal Pumps - Performance Test Codes*, ASME PTC 8.2.
- (3) Wildi, T., 2002, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems - 5th Ed.*, Prentice Hall, New Jersey, Chap. 13.
- (4) Holman, J.P., 1989, *Experimental Methods for Engineers - 5th Ed.*, McGraw-Hill, New York, Chap. 3.
- (5) Swanson, W.M., 1953, "Complete Characteristic Circle Diagrams for Turbomachinery," *Trans. of ASME*, Vol. 73, pp. 819~826.
- (6) Kittredge, C.P., 1956, "Hydraulic Transients in Centrifugal Pump System," *Trans. of ASME*, Vol. 76, pp. 1307~1322.
- (7) Knapp, R.T., 1959, "Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behavior," *Trans. of ASME*, Vol. 79, pp. 683~689.
- (8) Stepanoff, A.J., 1957, *Centrifugal and Axial Flow Pump - 2nd Ed.*, John Wiley & Sons, New York, Chap.8.
- (9) Shepherd, D.G., 1957, *Principles of Turbomachinery*, The Macmillan Company, New York, Chap. 10.
- (10) Coon, M.T., Leavitt, J.W., Baumgarten, S., Knierim, C. and Moon, S.H., 2005, "Hydraulic Design of the Reactor Coolant Pumps for APR 1400," *Proceeding of 2005 International Congress on Advances in Nuclear Power Plant*.
- (11) Grist, E., 1999, *Cavitation and the Centrifugal Pump; a Guide for Pump Users*, Tayler and Francis.
- (12) Avellan, F., 1993, "Cavitation Tests of Hydraulic Machines; Procedure and Instrumentation," *Proceedings of ASME Winter Annual Meeting*, pp. 91~102.
- (13) Gillette, J.L., Singer, R.M., Tokar, J.V. and Sullivan, J.E., 1980, "Experimental Study of the Transition from Forced to Natural Circulation in EBR-II at Low Power and Flow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 102, No. 3, pp. 525~530.