

일체형원자로 주냉각재펌프의 검증시험

박상진* · 윤의수* · 허필우* · 김덕종* · 오형우**

Qualification Test of Main Coolant Pump for an Integral Type Reactor

Sang-Jin Park*, Eui-Soo Yoon*, Pil Woo Heo*, Duckjong Kim*, Hyoung Woo Oh**

Key Words : Main Coolant Pump (주냉각재펌프), Integral Type Reactor (일체형원자로), Qualification Test (검증시험), Primary System (일차계통), Nuclear Grade Pump (원자력급펌프)

ABSTRACT

Main coolant pump (MCP) is a canned-motor-type axial pump to circulate the primary coolant between nuclear fuel rods and steam generators in an integral type reactor. The reactor is designed to operate under condition of 310 oC and 14.7MPa. Thus MCP has to be tested under same operating condition as reactor design condition in order to verify its performance and safety. In present work, a test loop to simulate real operating situation of the reactor has been designed and constructed to test MCP. And then, as a part of qualification test, canned motor functional test and pump hydraulic performance test have been carried out upon a prototype MCP. Canned motor efficiency and pump hydraulic characteristics including homologous curves and NPSH curves were obtained from the qualification test.

1. 서 론

일체형원자로(integral type reactor)는 안전성의 획기적인 제고와 경제성 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 하나의 압력용기에 설치하여 기존 분리형(loop type)원자로의 주요한 설계기준인 대형 냉각재상실사고를 근원적으로 배제할 수 있다.

MCP는 일체형 원자로인 SMART 연구로의 1차계

통 냉각수를 핵연료 및 증기발생기사이로 순환시키는 펌프로써 캔드모터형 축류식 펌프이다. 작동환경은 310 °C, 14.7MPa이며, 설계점에서의 사양은 유량 922 m³/h, 수두 9m이다. 운전속도는 3600 rpm이고 440 V 3상 전원으로 구동되며 정격 35kW이다. 중량은 1030 kg, 길이 2300 mm이다. Fig. 1은 시제품형의 사진이다.

원자로 일차계통은 경미한 이상발생시에도 중대사고로 이어지기 때문에 주냉각재펌프의 개발을 위해서는 검증시험을 통해 설계요구사항을 충족하는 지 확인하고 제반 규정에서 요구하는 내구성 및 건전성을 입증하며 각종 사고상황시 거동을 예측할 수 있는 기본 자료를 도출하여야 한다. 원자력급펌프의 경우 성능, 안전성, 구조적 건전성을 관계법령에 따라 개발단계에서 충분히 입증하여야 하나 1차계통 냉각재순환펌프를 국내에서 제작·공급한 경험이 없어 검증시험시설이나 기술 및 체계가 미비한 실정이다.

* 한국기계연구원 에너지기계연구센터

** 충주대학교 기계공학과

E-mail : giant@kimm.re.kr

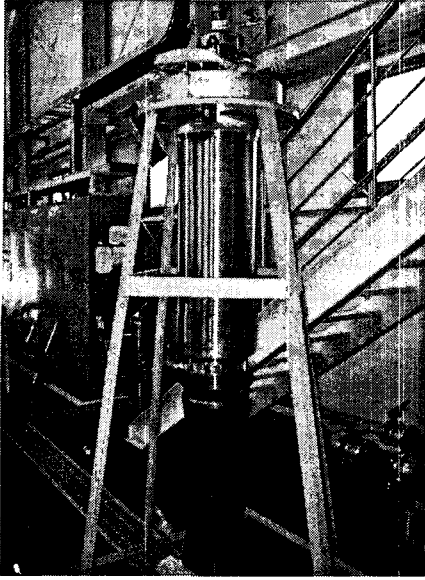


Fig. 1 Prototype main coolant pump

본 연구에서는 원자력급펌프의 검증시험기술을 개발하고 일체형원자로 운전조건을 모사한 성능시험장치를 설계·제작하였으며 이를 이용하여 MCP 시제원형의 검증시험을 수행하였다. 검증시험은 전동기, 냉각장치, 내부순환유로 등의 기능 및 특성을 확인하는 기능시험, 수력성능 및 비정상작동시의 펌프거동을 알기 위한 성능시험, 수명기간동안의 성능 및 구조건전성을 입증하는 내구성시험 및 가혹환경 하에서 기기 건전성을 확인하는 환경시험으로 이루어져있으며, 본 논문에서는 기본적인 수력성능시험을 중심으로 시험내용 및 결과를 기술하였다. 본 논문의 범위는 펌프효율을 계산하기 위한 MCP 전동기의 특성시험, 수력성능곡선 생산시험, 호모로고스 곡선작성, NPSH 특성시험이다.

2. 성능시험장치

MCP 성능시험장치(Test Loop)는 MCP가 장착되는 원자로의 작동조건을 모사하고 1장에 기술한 검증시험의 수행이 가능하도록 설계하였다. 시험장치는 Fig. 2에 나타낸 개략도와 같이 순환루프로 이루어져 있다. 루프 내의 온도 및 압력은 310°C, 14.7MPa이며, 상온, 상압부터 원하는 조건으로 조절이 가능하다. 탈설계점에서의 시험을 고려하여 최대 1200 m³/h까지의 유동형성 및 1/2/3/4상환(flow-rpm plane)에서 시험이 가능하

도록 구동/역구동용 보조펌프를 설치하였다^(1,2,3). 보조펌프는 캔드모터형 원심펌프로 정격에서 수두 25m, 유량 600 m³/h이다. 시험에서 요구하는 유량범위를 만족시키기 위하여 2대를 병렬 연결하여 사용하였다. 보조펌프 주위에 Fig. 2의 개략도와 같이 4개의 게이트 밸브를 설치하여 필요에 따라 유동방향을 바꿀 수 있도록 하였다.

주순환배관은 고온강도가 우수한 A335 재질의 12인치 Schedule-160 파이프로 구성하였다. 내경은 252mm, 총 연장은 31m이다. 주순환배관의 설계점에서의 수두 손실은 8.5m이다. 주순환배관에는 MCP 장착용 치구, 가압기, 히터, 보조펌프, 수처리설비, 배출수냉각기가 설치되거나 연결되어 있다. 또 MCP 장착용 치구 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 175kW이다. 작동유체는 일체형 원자로 주냉각재와 같은 성상이 되도록 수처리설비에서 탈산소소순수를 생산하여 시험장치로 공급한다. 이밖에 냉각계를 두어 기기냉각수가 필요한 MCP, 보조펌프, 배출수냉각기에 냉각수를 공급한다.

시험장치의 상태는 각 부에 설치된 온도계, 압력계, 유량계, 액면계의 신호로 확인하고 MMIS를 통해 자동 또는 수동으로 조절할 수 있도록 되어있다. 본 시험장치에 설치된 계측기는 ASME PTC 8.2의 Type A 시험 요건을 만족하도록 선정하였다⁽⁴⁾. 계측기의 신호는 MMIS 및 DAS로 보내져 화면에 표시되거나 저장된다. 본 시험장치에서 독립적으로 조절 가능한 물리량은 온도, 압력, 유량, MCP 회전수 및 회전방향, 유동 방향이며, 그밖에 MCP 냉각수의 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 압력경계면 안에 내장된 캔드모터형이므로 성능시험시 펌프로 공급

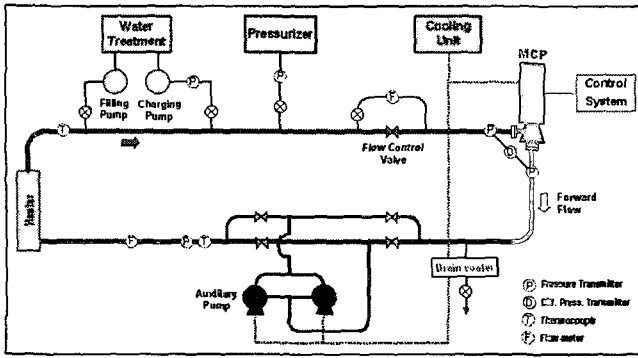


Fig. 2 Schematic diagram of MCP test loop

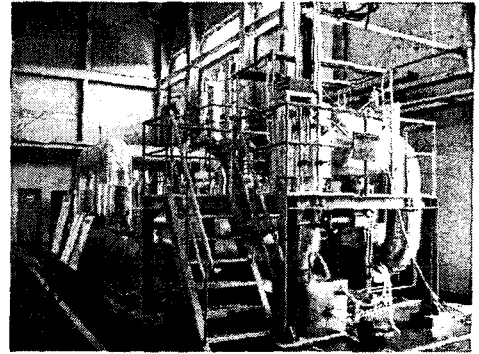


Fig. 3 MCP test loop at KIMM

되는 토크(또는 파워)를 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 펌프 자체의 수력성능을 정확하게 알기 위해서는 펌프성능시험에 앞서 캔드모터의 특성을 시험을 통해 먼저 구해야 한다. 본 시험에서는 MCP의 임펠러를 제거한 상태에서 회전축을 와전류형 동력계에 연결하고 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) 중 기계적 전달손실, 내부유체순환을 위한 보조임펠러 구동손실을 제외한 부분이 임펠러로 전달된다. 본 전동기 시험에서 구한 효율은 이러한 제 손실을 포함하고 있다. Fig. 4는 시험을 통하여 구한 총효율을 슬립의 함수로 도시한 결과이다. 여기서 슬립, s 는 다음 식과 같이 정의한다⁽⁵⁾.

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1)$$

여기서 N 은 회전수, N_s 는 동기회전수(synchronous speed)이다. 각 회전속도에서 최대효율은 설계속도인 3600 rpm(72%)보다 1800 rpm(76%)에서 더 크게 나타나는데, 이는 보조임펠러에서의 손실이 3600 rpm에서 4배 정도 크기 때문으로 보인다.

3.2 수력성능시험

주냉각재펌프의 수력성능을 알아보기 위하여 펌프 운전환경인 310 °C, 14.7 MPa의 1/2/3상환에서 수력성능시험을 수행하였다. 수력성능시험은 각 시험점(회전속도, 유량 매트릭스 상)에서 유량, 흡입/토출간 차압, 입력전력을 측정하여 유량-수두곡선 및 유량-토크곡선과 임펠러 수력효율을 구하는 순서로 수행되었다. 수두는 디퓨저후단과 임펠러전단을 기준으로 하였으며, 흡입유로 및 토출유로에서의 압력손실 및 단면적변화에 따른 동압을 보정한 값을 산출하였다. 유로의 압력손실은 실물과 동일한 모델에 대하여 FLUENT로 수치해석한 결과로부터 계산하였다. 임펠러로 공급되는 토크, T_h 는 입력전력에 각 시험점에서 슬립량을 기준으로 계산한 전동기 총효율(Fig. 4)을 곱하여 구하였다. 시험방법은 ASME PTC 8.2⁽⁴⁾에 따랐다.

Fig. 5는 900, 1800, 2700, 3600 rpm일 경우의 유량-수두곡선을 도시한 것으로 설계점인 3600 rpm, 922 m³/h에서 수두는 9.5m로 설계기준치인 9m를 상회하는 것으로 나타났다. 유량-토크곡선은 Fig. 6에 나타내었다. 시험결과 수력성능면에서 MCP 원형이 설계기준

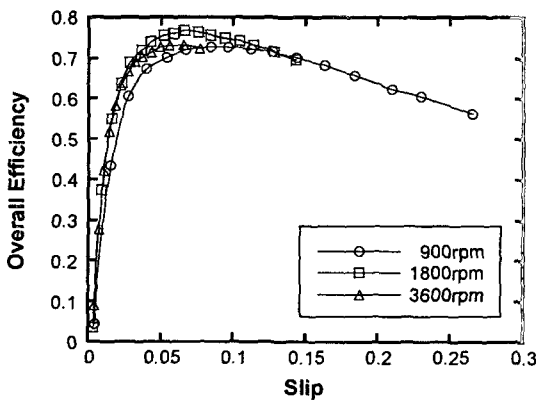


Fig. 4 Overall efficiency of MCP motor as a function of slip with respect to speed

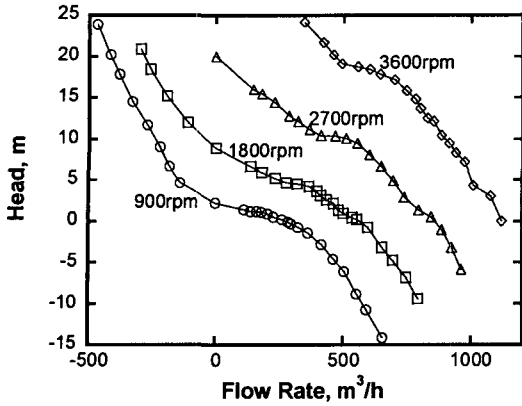


Fig. 5 Hydraulic head of MCP in the first and second quadrants

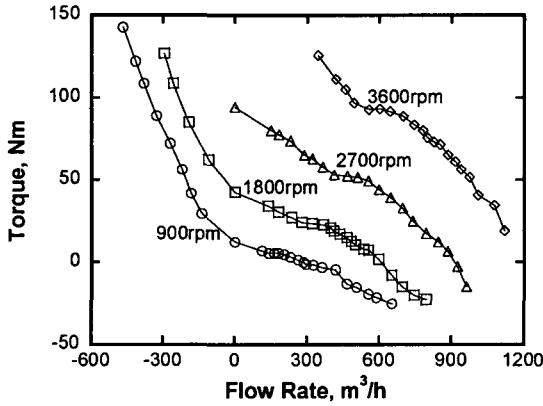


Fig. 6 Hydraulic torque of MCP in the first and second quadrants

치를 만족하는 것으로 나타났다.

한편, 임펠러의 수력(기계적)효율은 임펠러로 공급되는 축일(shaft power)에 대한 임펠러의 수동력(hydraulic power)의 비로서 다음식과 같이 정의한다.

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

Fig. 7은 식(2) 및 수력성능시험결과로부터 계산한 임펠러의 효율곡선이다. 그림과 같이 각 회전속도의 설계유량보다 낮은 유량에서 최대효율점이 나타났다.

3.3 호모로고스 곡선 (Homologous Curves)

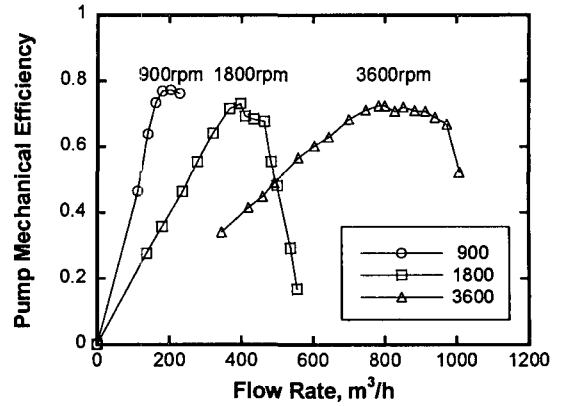


Fig. 7 Hydraulic efficiency of MCP impeller

위의 3.2절에서 측정된 수력성능자료(1/2/3상한)를 바탕으로 원자력 1차계통 펌프개발시 안전해석 입력자료로서 필수적인 호모로고스곡선을 생산하였다⁽⁷⁾. 호모로고스 상사변수의 정의는 다음과 같다.

$$\nu \equiv \frac{Q}{Q_R} \quad (3)$$

$$\alpha_N \equiv \frac{N}{N_R} \quad (4)$$

$$\frac{\nu}{\alpha_N} = \frac{Q/Q_R}{N/N_R} = \frac{Q/ND^3}{Q_R/N_R D^3} \quad (5)$$

여기서 하첨자 R 은 설계점을 의미한다. 한편 수두상사변수 및 토크상사변수는 다음과 같이 정의한다.

$$h \equiv H/H_R \quad (6)$$

$$\beta_N \equiv \frac{T_h}{T_{hr}} \frac{\rho_R}{\rho} \quad (7)$$

3.2의 시험결과를 위에서 정의한 변수로 변환하여 나타내면 Fig. 8과 9의 호모로고스 수두 및 토크곡선을 구할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 수력측정 결과의 상관성이 우수하였고 정회전시와 역회전시의 곡선이 흡사한 축류식 펌프의 특징을 보여주고 있다⁽⁶⁾. 여기서 각 곡선에 표시한 영문자 중 첫 글자, H와 B는 각각 수두와 토크를 나타내며, A와 V는 각각 수평축변수 분모가 α_N , ν 인 경우를 의미한다. N(normal), D(dissipation), T(turbining)는 각각 1/2/3상한을 표시

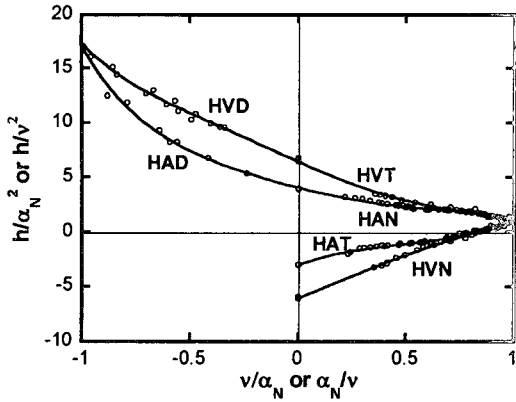


Fig. 9 Homologous head curve of MCP

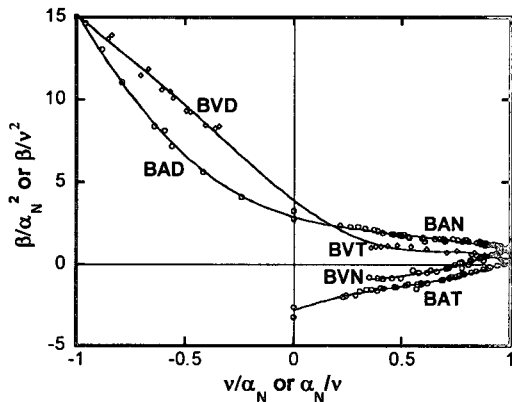


Fig. 10 Homologous torque curve of MCP

한 것이다.

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 최소 NPSH가 문제가 될 수 있다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 상온조건에서 유량을 일정하게 유지하면서 흡입구의 압력을 조절하여 수두변화를 측정하는 일정유량법(constant capacity method)으로 NPSH 특성곡선을 구하였다⁽⁴⁾. Fig. 12는 900, 1800, 3600 rpm 운전시 각 설계유량에서의 NPSH 변화에 따른 수두의 변화를 보여주고 있다. 회전속도가 증가할수록 최소흡입수두(NPSHR)가 커지는데, NPSHR3% 지점은 900 rpm에서 11 m, 1800

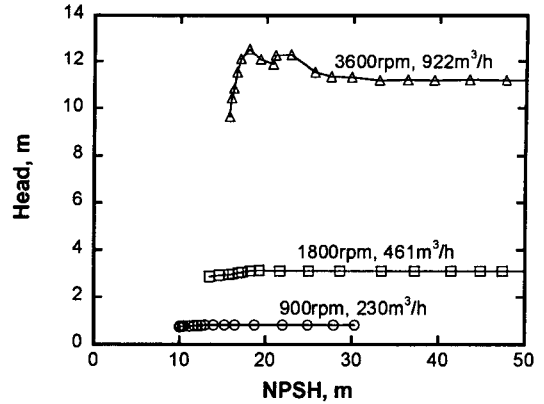


Fig. 11 NPSH test result of MCP by constant capacity method

rpm 17 m, 3600 rpm 17 m이다.

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 일체형원자로 1차계통의 운전조건인 310°C, 14.7MPa에서 수행되었으며, 전동기특성, 수력성능, NPSH 특성을 시험을 통하여 구하였다. 그동안 시험기술 및 설비의 미비로 국내 원자력급 펌프의 개발 및 검증이 활발하지 못하였지만 본 연구를 통하여 입증된 시험기법 및 시험설비가 관련 기기개발 및 산업발전에 기여할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Swanson, W.M., 1953, "Complete Characteristic Circle Diagrams for Turbomachinery," Transactions of ASME, Vol.73, pp.819-826
- (2) Kittredge, C.P., 1956, "Hydraulic Transients in Centrifugal Pump System," Transactions of ASME, Vol.76, pp.1307-1322
- (3) Knapp, R.T., 1959, "Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behavior," Transactions of ASME,

Vol.79, pp.683-689

(4) ASME, 1990, Centrifugal Pumps - Performance Test Codes, ASME PTC 8.2

(5) Wildi, T., 2002, Electrical Machines, Drives, and Power Systems - 5th Ed., Prentice Hall, Chap.13

(6) Stepanoff, A.J., 1957, Centrifugal and Axial Flow Pump - 2nd Ed., John Wiley & Sons, Chap.8

(7) 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, in press

(8) Grist, E., 1999, Cavitation and the Centrifugal Pump: a Guide for Pump Users, Tayler and Francis