

원자로냉각재펌프의 완전특성 시험

윤의수* · 유일수* · 박무룡* · 황순찬* · 김수원* · 임영철* · 오인균* ·
강민호** · 최원철***

Complete Characteristics Test for a Reactor Coolant Pump

Euisoo Yoon* · Ilsu Yoo* · Mooryong Park* · Soonchan Hwang* · Suwon Kim* ·
Youngchul Yim* · Inkyun Oh* · Minho Kang** · Wonchul Choi***

ABSTRACT

An experimental test facility for the complete characteristics of pumps is constructed at KIMM(Korea Institute of Machinery and Materials). This paper describes the test facility and test technique of the complete characteristics of pumps, together with a experimental test result for a reactor coolant pump.

초 록

한국기계연구원에서는 원자로냉각재펌프의 완전특성을 시험할 수 있는 시험 설비를 구축하였다. 이 설비는 유량은 최대 2,000 m³/hr, 동력은 최대 132 kW까지 펌프 및 수차의 시험이 가능하다. 본 논문에서는 완전특성 시험장치 및 시험방법, 이를 이용한 원자로냉각재펌프의 시험결과를 소개하고자 한다.

Key Words: Complete Characteristics(완전특성), Hydraulic Model(수력모델), Reactor Coolant Pump(원자로냉각재펌프)

1. 서 론

두산중공업이 공급하는 APR1400급 원자로 1차 계통에는 2기의 증기발생기가 설치되고, 각 증기발생기에는 2기의 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump; RCP)가 병렬로 장착된다. 병렬로 운전되는 RCP 가운데 어느 하나에 전원차단,

축의 파단 또는 고착, 배관계의 파손 또는 막힘 등의 고장이 발생할 경우, 냉각재 유량의 급격한 감소 또는 증가, 역류가 발생하거나 임펠러 회전수의 급격한 증가, 감소 또는 역회전 등 비정상적인 운전이 초래될 수 있다. 이러한 이상운전 현상은 RCP 뿐만 아니라 원자로 핵증기공급 시스템(NSSS)에 커다란 영향을 주기 때문에 원자력발전소 건설허가 단계에서 이상운전 성능특성(완전특성)을 원자로 안전해석 입력자료로서 제출하는 것이 의무로 되어 있다. 완전특성은 규격 IEC 60193^[1]에 따라 RCP 수력모델에 대하여 상

* 한국기계연구원 에너지기계연구실

** 충남대학교 대학원

*** 한국과학기술원 대학원

† 교신저자, E-mail: esyoon@kimm.re.kr

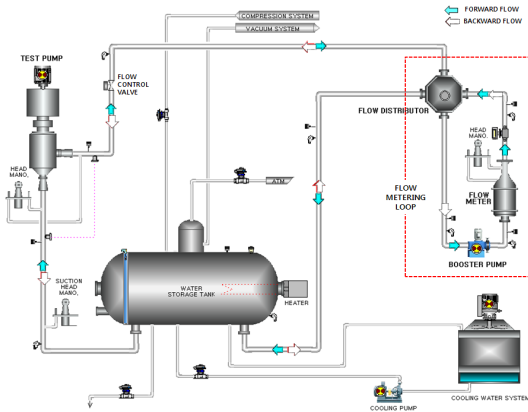


Fig. 1 Pump Test Loop

온상압의 청수를 작동유체로 하여 완전특성(4상한특성) 시험을 통해 측정된다.

이와 같은 펌프의 완전특성에 관한 연구는 Knapp^[2]에 의해 처음 시작되었다. 완전특성에서 펌프의 작동 조건은 정전-정류(정회전-정유동; 1상한)의 정상적인 작동 조건뿐만 아니라 역전-역류(역회전-역유동; 3상한), 정전-역류(2상한), 역전-정류(4상한)의 비정상적인 작동 조건까지 포함하여 모두 네 가지 운전모드로 분류된다. 본 논문에서는 이 네 가지 작동조건(4상한)을 모사할 수 있는 시험설비와, 이를 이용하여 시험한 후 결과를 분석한 4상한 성능특성인 Karman circle diagram에 대하여 기술하기로 한다.

2. 시험 설비

2011년 한국기계연구원에서는 상기에서 언급한 네 가지 작동 조건에 대한 펌프 시험이 가능하도록 4상한 시험설비를 Fig. 1과 같이 구축하였다. 시험 펌프로 유입되는 유체의 유동 방향을 전환시키기 위해 시험설비의 배관계에 4방밸브(flow distributor)를 설치하였으며, 그 4방밸브의 2구 사이에 유량측정부(flow metering loop)를 장착하였다. 유량측정부는 벤츨리유량계와 가압펌프로 구성되어 유량을 측정 및 조절하는 기능을 한다. 4방밸브의 조절에 의해 모든 4상한 운전조건에서 유동의 방향은 항상 동일한 방향(유

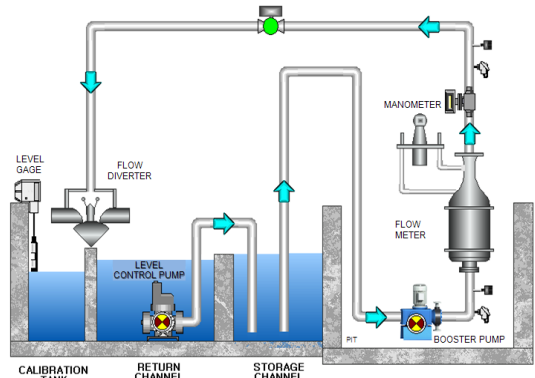


Fig. 2 In-Situ Calibration for Flow Measurement

량계)에 대하여 정방향)을 유지하는 구조로 되어 있다.

유동의 방향(정류/역류)은 4방밸브로 조절되고, 유량은 시험펌프의 하류에 설치된 유량조절밸브의 개도 또는 유량측정부에 설치된 가압펌프의 회전수(인버터)에 의해 조절된다. 그리고 시험펌프의 회전수 및 회전방향(정전, 역전)은 인버터로 조절한다.

이 설비로서 유량이 최대 2,000 m³/hr, 동력이 최대 132 kW까지의 펌프 및 수차에 대하여 시험이 가능하다. 또한 이 설비는 NPSH_{Req}, 캐비테이션 가시화, 압력맥동, 임펠러 수력학적 힘 등 펌프 및 수차 모델 시험에 필요한 거의 모든 항목의 측정이 가능하지만, 본 논문에서는 이에 대한 설명을 제외하기로 한다.

3. 시험 방법

3.1 계측기 교정

시험설비는 압력, 유량, 토크 등 중요한 변수를 측정하는 센서에 대하여 IEC 60193^[1] 규격을 준수하고 1차법(primary method)을 사용하여 현장 교정(in-situ calibration)할 수 있는 교정시스템을 구비하고 있다.

압력계는 수은마노미터를 이용하여 교정한다.

유량계는 Fig. 2와 같은 1차적인 용적법(volumetric method) 교정설비로 교정하였으며,



Fig. 3 Built-in Dynamometer

이는 저장조(storage channel), 회수조(return channel) 및 교정조(calibration tank)의 세 개 수조로 구성되어 있다. 교정을 위해 펌프(booster, level control)를 켜 이후, 유량이 정상적인 운전 상태에 도달하기 전까지는 저장조와 회수조 사이의 폐회로에서 작동유체가 순환한다. 유동이 정상상태에 도달하면 4방밸브를 이용하여 유동의 방향을 회수조, 저장조, 교정조 순서의 개방회로로 전환시킨다. 유량계의 입구압력을 일정하게 유지시키기 위해 저장조의 수위가 변하지 않는 구조(수위조절펌프에 의해 저장조가 항상 조금씩 넘치는)로 되어 있다. 유량계를 통과한 유량은 교정탱크에서 취수한 양을 시간으로 나누어 산출하고 유량계를 교정한다.

임펠러의 수력학적 힘(axial, radial)과 모멘트(torque, moment) 측정할 수 있는 BID (built-in dynamometer)를 Fig. 3과 같이 설계, 제작하였다. 베어링과 씰의 마찰 힘을 배제하고 오로지 임펠러의 수력학적인 힘을 측정하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 BID를 임펠러와 축 사이에 장착하였다. BID는 레버암과 분동을 이용하여 1차법으로 교정한다.

3.2 완전특성 시험

완전특성시험은 4상환에서 시험 펌프의 펌프/펌프제동/수차/수차제동/역전펌프 등의 작동모드에서 성능특성을 측정하는 것으로서, 이 특성은 펌프의 과도현상을 해석하고 원자로의 안전해석 입력자료로서 사용된다.

펌프 모드의 시험은 정전/정류 상태에서, 펌프 제동 모드는 정전/역류, 역전 펌프 모드는 역전/정류의 운전 영역에서 각각 수행된다. 역전/역

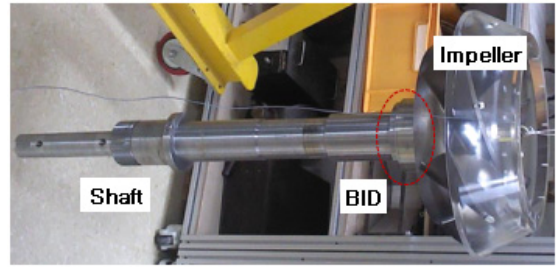


Fig. 4 BID between Impeller and Shaft

류의 운전 영역은 무구속($T=0$) 속도를 기준으로 무구속 속도 이하의 영역인 수차 모드와 무구속 속도 이상의 영역인 수차 제동 모드로 나뉜다.

각 영역에서 측정되는 변수 가운데 완전특성 해석에 필요한 것은 전양정과 유량, 회전속도와 토크이다. 전양정은 시험 펌프의 흡입부와 토출부에 설치된 압력계와 온도계를 이용하여 산출하였으며, 이에 필요한 시험 용수의 밀도는 IEC 60193^[1]에 제시된 Herbst & Roegeners의 공식을 이용하였다.

유량은 유량측정부의 벤츨리유량계를, 토크는 BID를 각각 이용하여 측정하였다.

3.3 무차원 수

측정된 완전특성 시험 결과를 Karman circle diagram(Fig. 5 head curve, Fig. 6 torque curve)으로 도시하기 위하여 세 개의 무차원수인 회전수 계수($n_{ED} = ND / \sqrt{gH}$)와 유량 계수($Q_{ED} = Q / (D^2 \sqrt{gH})$), 토크 계수($T_{ED} = T / (D^3 \sqrt{gH})$)를 정의하였다. 여기서 N , D , H , Q , T 는 각각 임펠러의 회전수, 기준직경, 양정, 유량, 축토크를 각각 나타낸다. 그리고 n_{rated} 와 Q_{rated} , T_{rated} 는 각각 정격점에서의 n_{ED} 와 Q_{ED} , T_{ED} 를 각각 의미한다.

4. 시험 결과

Figure 5 및 6은 원자로 안전해석 입력자료를 위해 상기에 정의된 무차원 수를 정격 운전 조건에 대한 무차원 수로 정규화하여 각각 도시한 양정 및 토크 관련 완전특성곡선이며, 여기서 사용된 시험펌프는 한국기계연구원에서 독자 설계

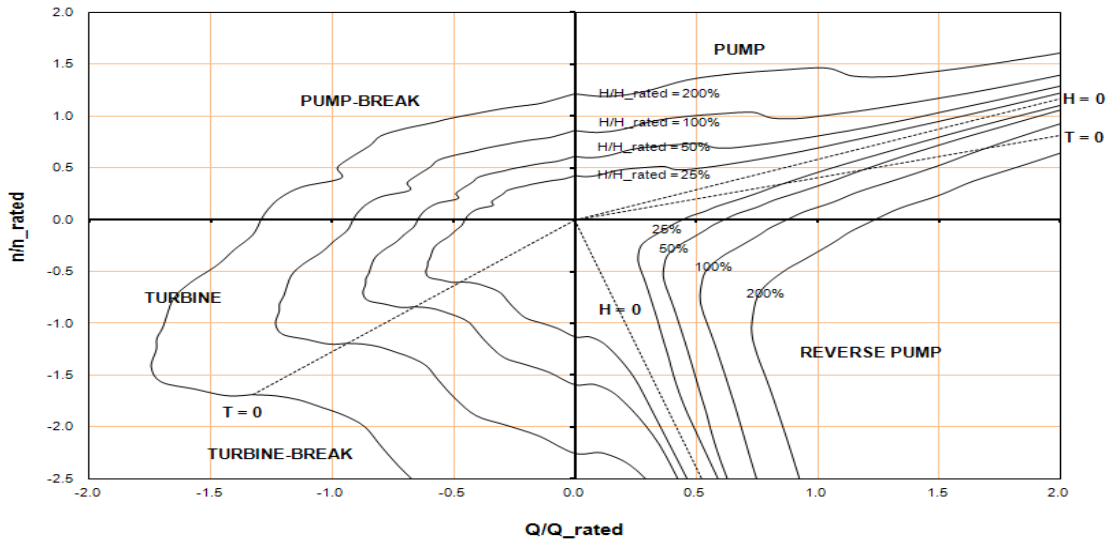


Fig. 5 Karman Circle Diagram of Reactor Coolant Pump (Head Curve)

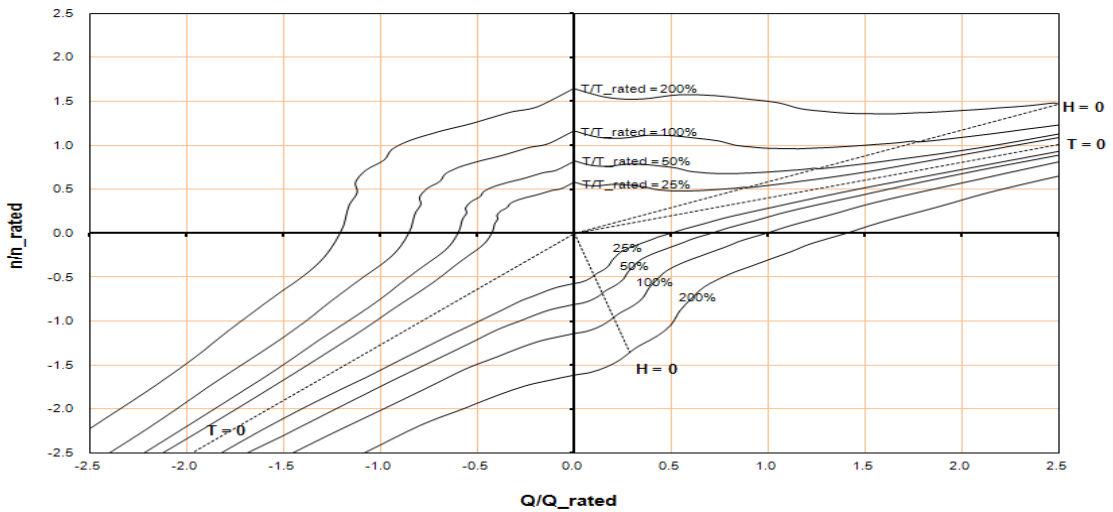


Fig. 6 Karman Circle Diagram of Reactor Coolant Pump (Torque Curve)

한 APR1400 Plus용 RCP의 40% 축소 수력모델 펌프이다. 그림에서 T=0선은 입력 토크가 0이 되는 선으로서 무구속 속도를 나타내며, 펌프 영역과 수차영역에 존재한다. H=0선은 펌프의 전양정이 0가 되는 선으로 펌프 영역과 역전 펌프 영역에서 존재하며, 두선 사이는 매우 비정상적인 조건에서 운전되는 영역으로서, 펌프의 축으로 입력된 에너지가 소산하는 영역이 된다.

참고 문헌

1. IEC 60193, "Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines - Model Acceptance Tests," 1999
2. Knapp, R. T. "Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in Prediction of Transient Behavior," Trans. ASME, Vol. 59, 1937, pp.683-689