

## 원자로 냉각재 펌프의 완전 특성 곡선

유일수\*†, 박무룡\* · 황순찬\* · 윤의수\*

### Complete Characteristic Curve for a Reactor Coolant Pump

IlSu Yoo\*†, MuRyong Park\*, SoonChan Hwang\*, EuiSoo Yoon\*

Key Words : Complete characteristics(완전특성), Mixed-flow pump(사류펌프), Reactor coolant pump(원자로냉각재펌프)

#### ABSTRACT

An experimental test facility for the complete characteristics of pumps is constructed at KIMM(Korea Institute of Machinery and Materials). All sensors instrumented in test facility for measuring flow rate, pressure, force and moment are in-situ calibrated by primary method. This paper describes the test facility and test technique of the complete characteristics of pumps, together with an experimental test results for a reactor coolant pump which is designed at KIMM for the first time in Korea. The test results for the mixed-flow type pump of  $n_s = 1.425$  are presented by three curves: constant head, torque, and speed.

#### 1. 서 론

원자로 냉각재 펌프는 원자력 발전소의 1차측에 설치되어, 원자로 냉각재를 강제 순환시켜 핵연료에서 발생된 열을 2차측의 증기발생기로 전달하는 역할을 한다. 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 정전, 축의 과단 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<sup>(1)</sup>에 따라 RCP 수력모델에 대하여 상온상압의 청수를 작동유체로 하여 측정된다.

펌프의 완전특성에 관한 연구는 Knapp<sup>(2)</sup>에 의해 처음 시작되었다. 완전특성은 펌프의 전체 작동 조건에 대한 펌프의 특성을 나타낸 것이다. 펌프의 작동 조건은 펌프의 회전 방

향 및 유동 방향에 따라 정회전-정방향 유동(1상한)의 정상적인 작동 조건뿐만 아니라 역회전-역방향 유동(3상한), 정회전-역방향 유동(2상한), 역회전-정방향 유동(4상한)의 비정상적인 작동 조건까지 포함하여 네 가지로 분류된다. 4가지 작동 조건에 따른 펌프 운전 상태는 펌프 모드, 수차 모드, 역전 펌프 모드, 역전 수차 모드와 에너지가 소산되는 4가지 제동 모드를 포함하여 총 8가지로 분류된다.<sup>(3)</sup> 본 논문에서는 이 네 가지 작동조건(4상한)을 모사할 수 있는 시험설비를 자체 설계하여 구축한 후 시험된 펌프의 완전 특성곡선을 제시하고자 한다.

#### 2. 시험 설비

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 4방 밸브(flow distributor)를 설치하였으며, 4방 밸브의 2구는 유량 측정부(flow metering loop)와 연결하였다. 유량 측정부는 벤츄리 유량계와 가압펌프로 구성되어 유량을 측정 및 조절하는 기능을 한다. 4방 밸브의 조절에 의해 모든 4상한 운전조건에서 유동의 방향은 항상 동일한 방향(유량계에 대하여 정방향)을 유지하는 구조로 되어 있다. 유동의 방향(정류/역류)은 4방 밸브로 조절되고, 유량은 시험펌프의 하류에 설치된 유량조절밸브의 개도 또는 유량측정부에 설치된 가압펌프의

\* 한국기계연구원 한국기계부품연구본부  
† 교신저자, E-mail : isyoo@kimm.re.kr

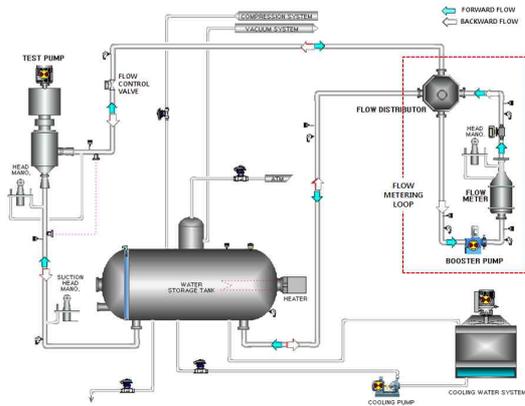


Fig. 1 Pump Test Loop

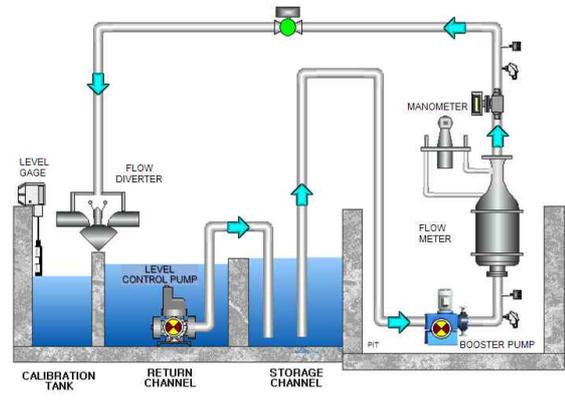


Fig. 2 In-Situ Calibration for Flow Measurement

회전수(인버터)에 의해 조절된다. 그리고 시험펌프의 회전수 및 회전방향(정회전/역회전)은 인버터로 조절한다.

이 설비로서 유량이 최대 2,000 m<sup>3</sup>/hr, 동력이 최대 132 kW까지의 펌프 및 수차에 대하여 시험이 가능하다. 또한 이 설비는 NPSH시험, 캐비테이션 유동 가시화, 압력맥동, 임펠러 수력학적 힘 등 펌프 및 수차 모델 시험에 필요한 거의 모든 항목이 측정 가능하다.

### 3. 시험 방법

#### 3.1. 계측기 교정

시험설비는 압력, 유량, 토크 등 주요 성능 변수를 측정하는 계측기들에 대한 교정시스템을 구비하고 있다. 이 교정 시스템은 IEC 60193<sup>(1)</sup>에 따라 1차법(primary method)을 사용하여 현장 교정(in-situ calibration)하도록 되어 있다. 압력계는 수은마노미터를 이용하여 교정하였으며, 유량계는 1차법 중 용적법(volumetric method)으로 교정하였다.

Fig. 2는 유량계 교정설비의 개략도를 나타낸 것으로서, 저장조(storage channel), 회수조(return channel) 및 교정조(calibration tank)의 세 개 수조로 구성되어 있다. 교정 방법은 먼저 가압 펌프와 수위조절펌프를 켜 이후, 유량이 정상 상태에 도달하기 전까지는 저장조와 회수조 사이의 폐회로에서 작동유체가 순환하도록 한다. 유동이 정상 상태에 도달하면 4방 밸브를 이용하여 유동의 방향을 회수조, 저장조, 교정조 순서의 개방 회로로 전환시킨다. 유량계의 입구 압력을 일정하게 유지시키기 위해 저장조의 수위가 변하지 않는 구조(수위조절펌프에 의해 저장조가 항상 조금씩 넘치는)로 설계하였다. 유량계를 통과한 유량은 교정탱크에서 취수한 양을 시간으로 나누어 산출한 후, 이를 이용하여 유량계를 교정한다.



Fig. 3 Built-in Dynamometer



Fig. 4 BID between Impeller and Shaft

임펠러의 수력학적 힘(축방향력, 반경방향력)과 모멘트를 측정할 수 있는 BID(built-in dynamometer)를 Fig. 3과 같이 설계/제작하였다. 베어링과 실의 마찰 힘을 배제하고 오로지 임펠러의 수력학적인 힘만을 측정하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 BID를 임펠러와 축 사이에 장착하였다. BID는 레버암과 분동을 이용하여 1차법으로 교정하였다.

#### 3.2. 완전특성 시험

완전특성시험은 4상한에서 시험 펌프의 펌프/수차/역전펌프/역전수차/제동 모드에서 성능특성을 측정하는 것으로서, 이 특성은 펌프의 과도현상을 해석하고 원자로의 안전해석 입력자료로서 사용된다.

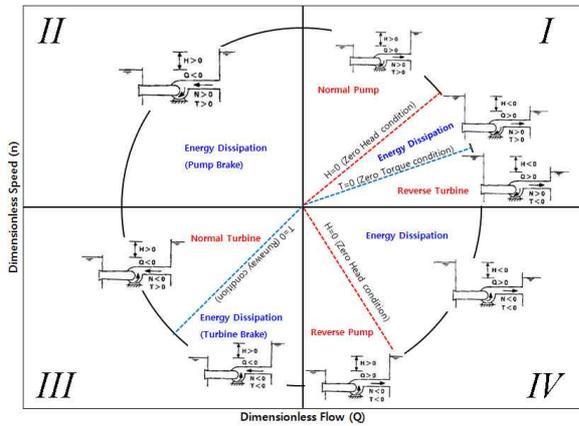


Fig. 5 Possible pump operation flow conditions for complete characteristics

펌프의 성능 특성은 유량과 회전수에 의해 결정된다. 펌프의 회전 방향 및 회전수 제어는 인버터를 이용하여 구현한다. 유량은 배관계 시스템 저항을 조절하여 제어하며, 유동 방향은 4방 밸브를 이용하여 조종한다. 배관계 저항을 조절하기 위하여 유량제어밸브와 시험 펌프 후단에 가압펌프를 직렬 연결하였다. 유량제어밸브의 개도와 가압 펌프의 회전수 제어를 통해 시스템 저항을 조절한다.

Fig. 5는 펌프의 모든 작동 조건과 운전 상태를 도시한 것이다. 펌프의 완전 특성은 유동 방향 및 펌프 회전 방향에 의해 정의되는 4가지 작동 조건(4상한 영역)에 따라 나타나는 8가지 운전 상태에 따른 전반적인 펌프 특성이다. Fig. 5를 보면 각 운전 영역은  $N=0, Q=0, H=0, T=0$ 인 경계선을 기준으로 나뉘지기 때문에, 완전특성 시험에서는 이 경계선을 찾는 것이 중요하다.

정회전-정류 상태의 1상한 영역에서는 Fig. 5에 도시된 바와 같이 펌프 모드와 역전 수차 모드 그리고 에너지가 소산되는 역전 수차 제동 모드의 세 가지 운전 모드가 나타난다. 펌프 모드란 체질 유량에서부터 시스템 저항이 0이 되는 최대 정방향 유량까지의 영역을 말하며, 이 영역에서 펌프의 전양정 및 축동력은 모두 (+)로 나타난다. 정진, 정류의 운전 상태에서 축동력이 0이 되는 무구속 속도 이하의 정류 영역은 역전 수차 영역이라 하는데, 이 영역에서는 축동력이 소요되는 것이 아니라 발생되는, 즉 수차와 같다. 펌프 영역과 역전 수차 영역 사이의 영역은 역전 수차 제동 영역이라 하며, 제동 영역이란 효율이 0이하의 에너지 소산 영역을 일컬으며, 이 영역에서 축동력은 소요되지만 전양정은 (-)로 나타난다. 2상한 영역은 정회전, 역류 상태의 운전 영역으로 펌프 제동 영역이라 하며, 에너지가 소산되는 운전 영역이다. 3상한 영역은 역회전, 역류 상태의 운전 영역으로 무구속 속도를 기준으로 두가지 운전 상태로 나뉜다. 무구속 속도 이하의 역류 영역을 수차 영역이라 하며 무구속 속도 이상의 역류 영역은 수차 제동 영역으로 에너지가 소산된다. 4

상한 영역은 역회전, 정류의 작동 상태에서 전양정이 양수로 나타나는 역전 펌프 모드와 전양정이 음수로 나타나는 역전 펌프 제동 모드로 나뉜다.

### 3.3. 무차원 수

펌프의 수력 성능을 정의하기 위한 필수 매개 변수들은 임펠러 기준 직경, 회전수, 유량, 전양정과 토크이다. 펌프의 성능 곡선은 상사 법칙에 따른 무차원 수로 표현하는 것이 유용하다. 필수 매개 변수는 일반적으로 임펠러 직경과 회전수를 이용하여 다음과 같이 무차원화된다.

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \tag{2}$$

$$\tau = \frac{T}{\rho N^2 D^5} \tag{3}$$

식(1)~(3)은 각각 유량계수, 양정계수, 토크계수를 정의하며,  $N$ 은 회전수,  $D$ 는 임펠러 기준 직경,  $\rho$ 는 유체 밀도이다. 상기 무차원 계수들은 동일한 회전수 조건에 대한 유량 대비 양정, 토크 변화 추이를 나타낼 때 유용하다.

완전 특성과 같이 회전수가 연속적으로 변하는 성능 특성 해석에는 원주속도( $ND$ ) 대신 압력에 의한 제트속도( $\sqrt{gH}$ )를 이용한 무차원 수를 정의하기도 한다.

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{gH}} \tag{4}$$

$$N_{ED} = \frac{ND}{\sqrt{gH}} \tag{5}$$

$$T_{ED} = \frac{T}{D^3 \rho gH} \tag{6}$$

식(4)~(6)은 각각 유량인수, 회전속도인수, 토크인수를 정의한 것이다.

## 4. 시험 결과

### 4.1. 시험 대상

시험 대상 펌프는 Fig. 6과 같은 형태의 사류 펌프로서, 기준 지름은 368.2 mm이며 무차원 비속도는 1.425이다.

Fig. 7은 제작된 임펠러와 디퓨저를 포함한 시험 펌프의 조립 사진이다. 시험 대상 펌프는 수직형 펌프로서 사류형 임펠러와 디퓨저, 콜렉터로 구성되어 있다. 캐비테이션 가시화를 위해 임펠러 슈라우드 케이싱을 아크릴로 제작하였다.

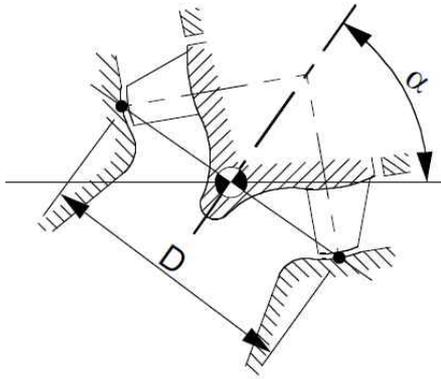


Fig. 6 Schematic drawing of test pump<sup>(4)</sup>



Fig. 7 Assembly of test pump

4.2. 성능 측정

펌프 흡입압력과 토출압력은 펌프 시험 규격<sup>(5)</sup>을 준수하여 흡토출부로부터 관경의 2배되는 위치에서 측정되었다. 시험 용수 온도 역시 압력 측정부와 동일한 곳에서 측정되었으며, 측정된 압력 및 온도를 이용하여 식 (7)과 같이 전양정을 산출하였다.

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho_w(p_1, t_1) + \rho_w(p_2, t_2)} + \frac{\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 - \left(\frac{Q}{A_1}\right)^2}{2g} \quad (7)$$

식(7)에서 시험 용수의 밀도는 IEC 60193<sup>(1)</sup>에 제시된 Herbst & Roegeners의 공식을 이용하였다.

IEC 60193<sup>(1)</sup>에서는 각 측정점에 대한 측정치 안정화 수준을 제시하도록 되어 있으며, 안정화 기준은 표준편차를 이용한다. IEC 60193에서는 각 측정 변수에 대한 최대 허용 표준편차를 압력 및 유량에 대해서는 ±2%, 회전수에 대해서는

±0.3%, 축동력의 경우 ±1% 이내로 명시하고 있다. 시험 결과 정격 조건에 대한 측정 안정화 수준은 압력의 경우 ±0.58%, 유량의 경우 ±0.14%, 회전수의 경우 ±0.04%, 축동력의 경우 ±0.81%로 모든 편차가 허용 범위 이내에서 만족되었다.

4.3. 완전특성곡선

Fig. 8과 9는 비속도 1.425급 사류 펌프의 양정 및 토크 특성을 나타낸다. 횡축에 유량계수를, 종축에 양정계수 및 토크계수를 취하고 있으며, 최고 효율 운전점(아래첨자 R)에서의 성능에 대해 정규화된 값으로 표현되었다. Fig. 8과 9는 정회전 및 역회전인 경우에 대한 유량-양정 및 유량-토크 특성을 나타낸 것이다. 이러한 그래프는 회전속도가 일정한 경우에 대한 유량에 따른 양정 및 토크 변화 추이를 직접적으로 파악할 수 있다는 측면에서 유용하다. 그러나 회전수가 0인 경우에 대해 특이점이 존재하는 단점이 있다.

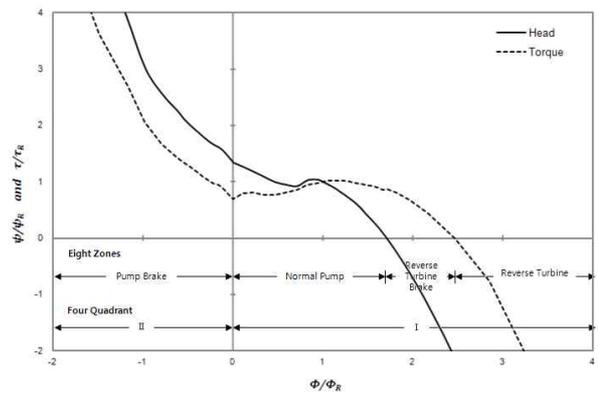


Fig. 8 Homologous head and torque characteristics for mixed-flow pump( $n_s = 1.425$ ) for positive rotation

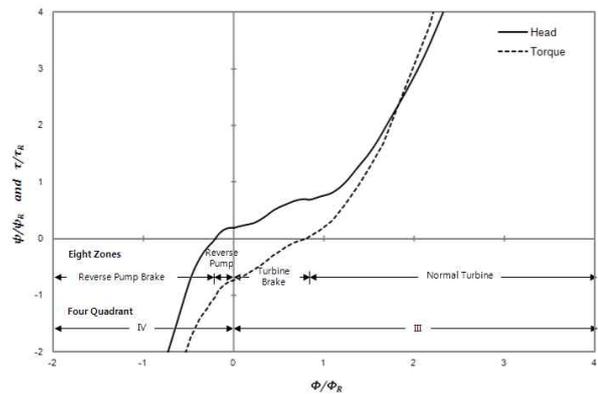


Fig. 9 Homologous head and torque characteristics for mixed-flow pump( $n_s = 1.425$ ) for negative rotation

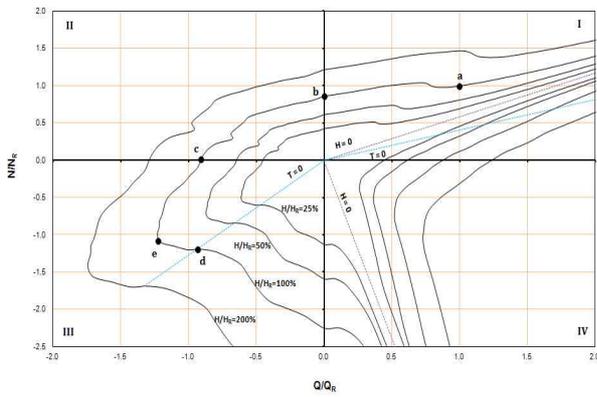


Fig. 10 Complete four-quadrant head characteristics of mixed-flow pump ( $n_s = 1.425$ )

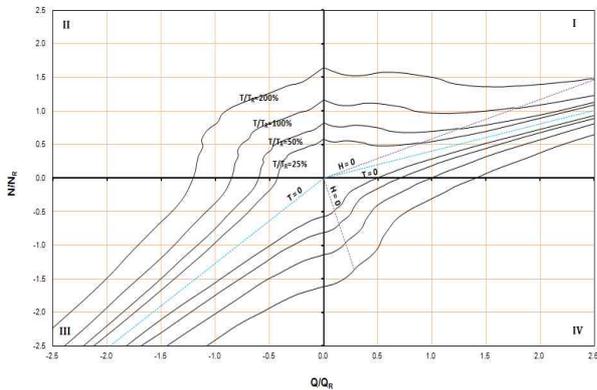


Fig. 11 Complete four-quadrant torque characteristics of mixed-flow pump ( $n_s = 1.425$ )

펌프의 전반적인 특성을 Fig. 8과 9와 같이 회전 방향에 따라 두 개로 나뉜 그래프 형태로 나타내는 것보다는 하나의 4상한 도해 위에 표현하는 것이 완전 특성을 이해하는데 더욱 유용하다. 완전 특성 시험의 작동 조건을 결정하는 것은 유동 방향 및 회전 방향이므로, 이들을 축으로 한 4상한 특성 곡선이 요구된다.

Fig. 10과 11은 유량과 회전수를 축으로한 완전 특성 곡선이다. Fig. 10은 전양정이 일정한 경우에 대한 유량-회전수 특성 곡선이다. 전양정이 정격 양정의 25%, 50%, 100%, 200%로 동일한 곳을 등치선으로 연결하였다. 그래프의 종축 및 횡축은 정격 조건에 대한 값으로 정규화된 유량 인수 및 회전속도인수로서 다음과 같이 정의된다.

$$Q/Q_R = \frac{Q_{ED}}{Q_{ED,R}} \sqrt{\frac{H}{H_R}} \quad (8)$$

$$N/N_R = \frac{N_{ED}}{N_{ED,R}} \sqrt{\frac{H}{H_R}} \quad (9)$$

Fig. 10에서는 점 a는 정격 조건을 나타낸 것이다. 만약 정격 상태인 점 a에서 작동하던 펌프의 축 과단이 발생할 경우 펌프는 토크가 0이 되는 작동 상태(점 d)로 다음의 과정을 거쳐 이동하게 된다. 먼저 펌프의 회전수가 감소되면서 유량이 감소하게 된다. 회전수가 정격 회전수의 86.2%가 되면 유량이 역류하기 시작한다(점 b). 역방향 유량이 증가하면서 결국 펌프는 일시적으로 정지(점 c)하게 되는데, 이는 역방향 유량이 정격 유량의 91.4%가 될 때 발생된다. 역방향 유량이 더욱 증가하게 되면 펌프는 역회전하기 시작한다. 역방향 유량은 점 e에서 최대가 되며, 이를 기점으로 서서히 감소하기 시작한다. 점 d는 토크가 0이 되는 운전 상태이다. 본 시험 대상의 경우 역방향 유량이 정격 유량의 94%가 되고 정격 회전수의 120%의 속도로 역회전하면 토크가 0인 무구속 상태가 되는 것으로 나타났으며, 이때의 회전수를 무구속 속도라 한다.

Fig. 11은 토크가 동일한 조건에 대한 유량-회전수 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11 역시 정격 조건에 대해 정규화된 유량 인수 및 회전속도인수를 사용하여 도식하였으며, 무차원 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Q/Q_R = \frac{Q_{ED}}{Q_{ED,R}} \sqrt{\frac{T}{T_R} \frac{T_{ED,R}}{T_{ED}}} \quad (10)$$

$$N/N_R = \frac{N_{ED}}{N_{ED,R}} \sqrt{\frac{T}{T_R} \frac{T_{ED,R}}{T_{ED}}} \quad (11)$$

Fig. 10과 11의 그래프 형태에는 Fig. 8과 9에서 나타나는 특이점 대신 점근선이 나타난다. Fig. 10의 전양정 일정 곡선의 경우에는  $H=0$ 인 선이 점근선이 되고, Fig. 11의 토크 일정 곡선의 경우에는  $T=0$ 인 선이 점근선이 된다.

## 5. 결 론

최대 시험 유량 2,000 m<sup>3</sup>/hr, 동력 135kW급 완전 특성 시험 설비를 구축하였다. 본 시험 설비에 대한 간략한 소개 및 이를 활용한 원자로 냉각재 펌프의 완전 특성 곡선을 도출하였다. 본 논문에서 제시한 완전 특성 곡선은 비속도 1.425급 수직축 사류 펌프에 대한 것으로서, 유량-양정 및 유량-토크, 유량-회전수를 축으로 하는 세 가지 형태의 그래프로 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 원자력발전기술개발사업 “APR1400 급용 RCP의 핵심부품 설계기술개발 및 국내 독자모델 설계” 과제의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) IEC 60193, 1999, Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines-Model Acceptance Tests.
- (2) Knapp, R. T., 1987, "Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in Prediction of Transient Behavior," Trans. ASME, Vol. 59, pp. 683~689.
- (3) Martin, C. S., 1983, "Representation of Pump Characteristics for Transient Analysis," ASME Symposium of Performance Characteristics of Hydraulic Turbines and Pumps, November 13-18, pp. 1~13.
- (4) KS B IEC 61364, 2006, 수력발전소 기계류의 작성법.
- (5) KS B 6301, 2001, 원심펌프, 사류펌프 및 축류펌프의 시험 및 검사 방법.