

축류형 펌프에서 펌프전력을 이용한 유량산정 방법에 관한 연구

이 준 · 서재광 · 박천태 · 김영인 · 윤주현

The Study on a Flow-rate Calculation Method by the Pump Power in the Axial Flow Pumps

J. Lee, J. K. Seo, C. T. Park, Y. I. Kim and J. Yoon

Abstract It is the common features of the integral reactors that the main components of the RCS are installed within the reactor vessel, and so there are no any flow pipes connecting the steam generator or the pump whose type is the axial flow. Due to no any flow pipes, it is impossible to measure the differential pressure at the RCS of the integral reactors, and it also makes impossible measure the flow-rate of the reactor coolant. As a alternative method, the method by the measurement of the pump power of the axial flow pump has been introduced in this study. Up to now, we did not found out a precedent which the pump power is used for the flow-rate calculation at normal operation of the commercial nuclear power plants. The objective of the study is to embody the flow-rate calculation method by the measurement of the pump power in an integral reactor. As a result of the study, we could theoretically reason that the capacity-head curve and capacity-shaft power curve around the rated capacity with the high specific-speeded axial flow pumps have each diagonally steep incline but show the similar shape. Also, we could confirm the above theoretical reasoning from the measured result of the pump motor inputs. So, it has been concluded that it is possible to calculate the flow-rate by the measurement of the pump motor inputs.

Key Words : Pump power, Axial flow, Integral Reactor, Reactor Coolant System

1. 서 론

일체형원자로로는 원심형 펌프가 설치되어 있는 상용 원자로(이하 “상용로”라 한다.)와는 달리 축류형 펌프가 설치되어 있는 점이 공통적인 특징이다. 일반적으로 축류형 펌프는 양정은 크지 않지만 송출유량은 크게 요구되는 경우에 사용된다. 즉, 펌프를 설치해야 하는 시스템 구조가 양정을 크게 할 수 없는 구조이나 반면에 송출유량은 크게 요구되는 경우에는 축류형 펌프가 적합하다고 할 수 있다.

또한 일체형원자로로는 일반적으로 원자로냉각재계통(RCS)을 구성하는 주요 기기들이 원자로용기내 설치되어 있으며 원자로냉각재계통 내에 펌프나 증기발생기를 연결하는 대형 유로배관이 없다는 점이 공통적인 특징이다. 유량측정 관점에서 살펴보면, 상용로의 경우는 대형 유로배관 상에 펌프가 설치되어 있어 펌프 전, 후단

에서의 압력차를 측정함으로써 유량을 산정하고 있는데 반해, 일체형원자로의 경우는 펌프를 연결하는 유로배관이 없어 유량측정을 위한 별도의 목적의 유로배관을 만들지 않는 한 압력차를 측정하기는 불가능한 실정이다.

본 연구에서는 이에 대한 대안으로서 축류형 펌프의 전력을 이용한 유량산정 방법을 구현함으로써, 일체형 원자로 원자로냉각재계통의 하나의 유량측정 방법으로 사용하고자 함이 본 연구의 목적이다. Fig. 1은 일체형 원자로(예. System integrated modular advanced reactor, SMART)의 원자로냉각재계통의 유로도를 나타낸다.

본 연구에서는 첫째, 상용로 원자로냉각재계통의 유량측정 현황을 파악하여 일체형원자로에 적용성 여부를 검토하였다. 둘째, 펌프의 전력을 이용한 유량산정 방법의 구현에 관해 기술하였다. 여기서는 먼저 이론적 배경을 검토하였으며, 또한 펌프의 양정 및 전력을 계산/측정하여 구현 가능성을 평가하였다.

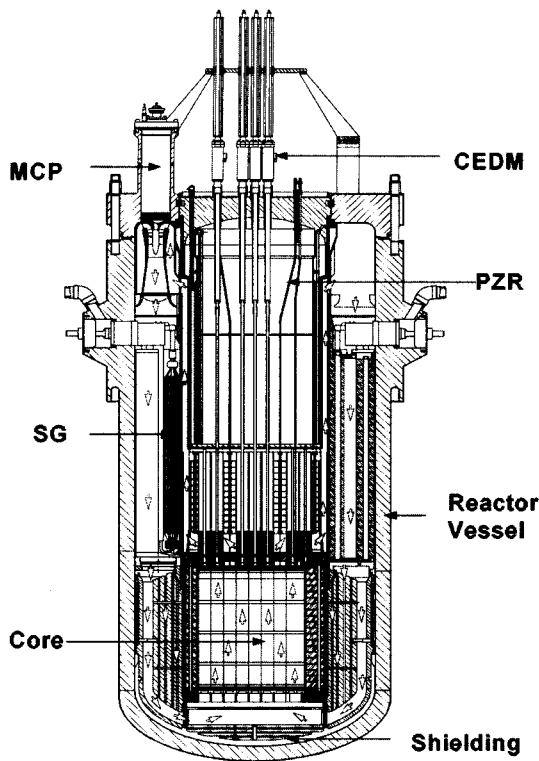


Fig. 1. RCS Flow Path of Integral Reactor(Ex. SMART)

2. 상용로 원자로냉각재계통의 유량측정 현황 및 일체형원자로에 적용성 검토

2.1 상용로 원자로냉각재계통의 유량측정 현황

상용로에서는 핵연료가 위치하고 있는 원자로냉각재계통에서의 유량측정을 위해 통상 2가지 방법, 즉 펌프 전, 후단에서의 압력차(이하 “Pump dP”라 한다.)를 이용한 유량측정 방법 및 펌프 회전속도(이하 “Pump speed”)라 한다.)를 이용한 유량측정 방법을 동시에 사용하고 있다[1].

상용로의 원자로냉각재계통에서 사용하는 상기 유량측정 방법들은 측정결과와 사용처, 목적, 관계식, 장단점 등을 각각 달리하고 있다[2].

2.2 일체형원자로에 적용성 검토

일체형원자로의 원자로냉각재계통의 유량측정 방법으로 상기 상용로에서 사용하는 방법들을 모두 적용하는 것은 가능하다. 하지만 일체형원자로의 고유 특성에 적합하고 보다 현실적으로 적용가능하며, 실효성이 있는 유량측정 방법을 선정하는 것이 중요하다고 여겨진다. 따라서 상기 상용로에서 사용하는 방법들을 일체형

원자로에 적용성 측면에서 검토해 보면 다음과 같다.

첫째, Pump dP를 이용한 유량측정 방법의 경우 펌프의 전, 후단에 압력탭을 설치하여야 하는데 이는 원자로 압력용기에 구멍을 뚫어야 하는 문제가 생겨 현실적으로 어려울 것으로 여겨진다. 더구나 상용로 경우와는 달리 일체형원자로의 경우 펌프 전, 후단의 압력차가 크지 않으며 압력탭이 위치하는 곳의 유동장이 안정화된 영역이 아닐 것으로 보여 이 방법을 이용한 유량측정 시에는 적지 않은 오차가 있을 것으로 예상된다.

둘째, Pump speed를 이용한 유량측정 방법의 경우 일체형원자로에 적용하는 데는 특이 고려해야 할 사항이 없는 것으로 판단된다. 그러나 이 방법은 실제유량을 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 따라서 이 방법과 더불어 원자로보호계통용으로 사용 가능한 유량측정 방법이 추가로 하나 더 요구된다.

상기 2가지 방법을 검토한 결과 일체형원자로의 원자로냉각재계통의 유량측정을 위해서는 현실적으로 적용하기 어려운 Pump dP를 이용한 유량측정 방법을 대신할 수 있는 다른 대안이 요구된다.

이에 대한 대안으로서 펌프의 전력(이하 “Pump power”라고 한다.)을 이용한 유량측정 방법이 가능할 것으로 여겨지며, 이 방법으로 원자로냉각재계통의 유량정보를 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 이 방법은 펌프의 형태에 따른 고유 특성과 직접 연관되어 있으므로 Pump power의 특성 및 이용가능 여부 등 구현방법의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

3. 축류형 펌프의 전력을 이용한 유량산정 방법의 구현

3.1 이론적 배경

유량-양정 곡선 또는 유량-전력 곡선 등 모든 유량측정 관련 곡선을 사용하기 위해서는 유량변화에 따른 종속인자의 변화추이를 계측할 수 있어야 하며 그 계측값의 변화추이가 명확하게 나타나야 한다. 예를 들어 유량변화에 따른 전력의 변화추이가 별다른 변화를 보이지 않는다면 전력을 이용한 유량측정은 불가하며, 전력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖는다면 전력을 이용한 유량측정은 일단 가능할 것으로 판단된다.

펌프에는 수십 가지 종류가 있지만 비속도에 의한 분류를 하면 크게 반경류형(Radial flow) 펌프, 넓은 의미의 혼류형(Mixed flow)에 속하는 사류형 펌프, 그리고 축류형(Axial flow) 펌프 등이 있다. 반경류형 펌프는 유동이 반경 방향이고 유동이 샤프트로부터 출구 방향으로 흐르는 펌프이며, 축류형 펌프는 원심형 펌프에서의 유동이 샤프트 회전축과 평행하게 흐르도록 변형된

펌프이며, 그리고 사류형 펌프는 이 2가지 펌프의 특성을 혼합시켜 놓은 펌프이다.

반경류형 및 사류형 펌프의 비속도는 일반적으로 각각 100~600, 400~1500 정도의 값을 지니고 있으며, 축류형 펌프의 비속도는 일반적으로 1200~3000 정도의 값을 지니고 있다. 따라서 반경류형이나 사류형 펌프에 비해 축류형 펌프의 경우 비속도가 크며, 유량변화에 따른 축동력의 변화추이가, 특히 정격유량 근처에서의 축동력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있으며, 또한 유량변화에 따른 축동력의 기울기의 정도와 양정의 기울기의 정도와의 그 변화추이가, 특히 정격유량 근처에서의 변화추이가 더욱 더 근사함을 알 수 있다[3].

비속도는 회전차의 상사성 또는 펌프특성 및 형식결정 등을 논하는 경우에 이용되는 값이다. 회전차의 형상, 치수 등을 결정하는 기본요소는 펌프회전수(n), 토출량(Q), 양정(H) 등 3가지가 있으며 비속도(N_s)는 다음 식에서 구해진다.

$$N_s = \frac{n \times Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

SMART에 설치되어 있는 펌프는 축류형 펌프로서 Fig. 2에 나타나 있다. 정상운전시 펌프회전수는 3600 rpm, 토출량은 15.4 m³/min, 양정은 9 m 이므로, 펌프의 비속도 값은 2716 이다. 이는 축류형 펌프 중에서도 큰 비속도 값에 해당한다. 따라서 유량변화에 따른 전력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있어 Pump power를 이용한 유량측정이 가능한 것으로 판단된다.

3.2 펌프의 양정 및 전력 계산/측정 결과

펌프의 유량과 양정은 원자로에서 요구되는 특성에 따라 정해지며 양정의 결정은 펌프가 노심에서 가열된 냉각수를 증기발생기로 강제 순환시킬 때 원자로 내부 구조물 사이로 유동되면서 생기는 수력손실 등을 고려하여 결정한다. 그리고 유량은 노심에서 가열된 냉각수가 증기발생기에서 열 교환의 방법으로 증기를 생산하는 양에 따라 결정된다.

펌프에 대한 양정의 계산결과는 Fig. 3에 나타나 있으며, 여기서 계산된 양정 값은 CFD 해석으로 생성한 값이다. 80-120% 사이의 유량에서의 계산된 양정의 추이는 축류형 펌프의 일반적인 양정의 추이와 크게 다르지 않다. 그러나 약 60% 이하의 저 유량에서의 양정은 펌프 흡입구 형상의 영향으로 감소하는 추이를 나타내며 약 30% 이하의 저 유량에서의 양정은 다시 증가하는 추이를 나타낸다. 이러한 추이는 저 유량시 임펠러 블레이드의 흡입면에서 발생하는 경계층의 박리 현상에 기인한다. 또한 펌프에 대한 양정의 계산결과는 양정의

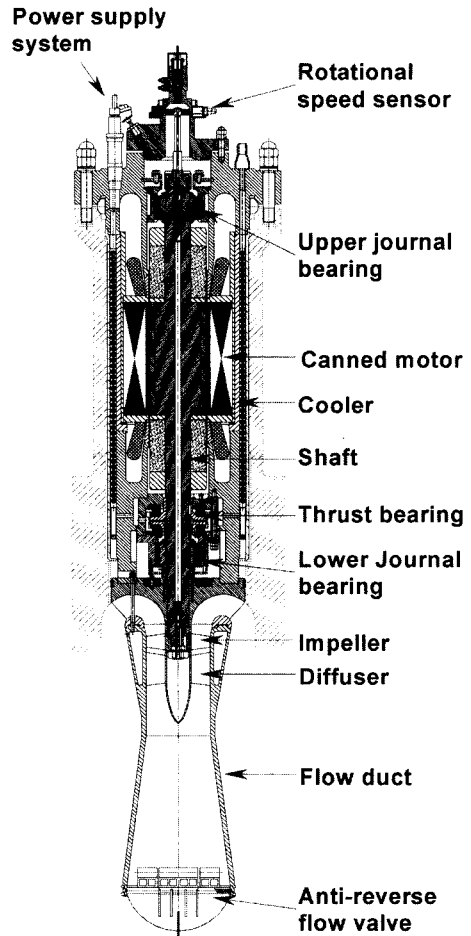


Fig. 2. Main Coolant Pump

측정결과와 오차범위 내에서 거의 일치하고 있음을 알 수 있다[4].

일반적으로 전동기의 축동력을 결정하기 위해서는 펌프의 필요 유량과 양정이 결정되어야 된다. 펌프 전동기의 출력 흐름은 Table 1과 같다.

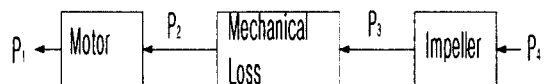


Table 1. Calculation of pump motor power

- P_4 : hydraulic power = γQH
- P_3 : impeller power = P_4/η_{hyd}
- P_2 : shaft power = P_3/η_{mech}
- P_1 : motor input = P_2/η_{motor}

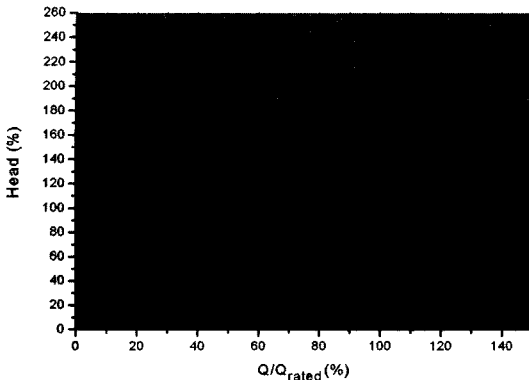


Fig. 3. Computed Capacity-Head Curve

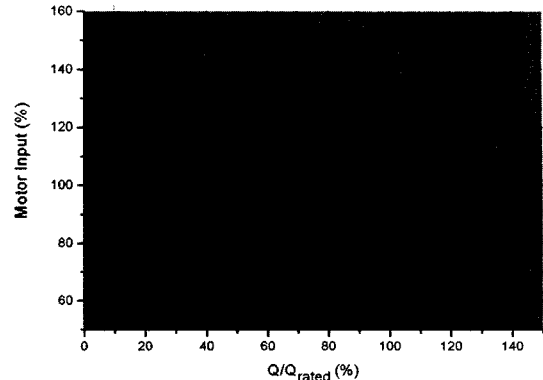


Fig. 4. Measured Capacity-Motor Input Curve

SMART의 경우, 원자로냉각수를 순환시키기 위해 요구되는 펌프의 유량은 922 m³/h, 양정은 9 m 이며, 정상운전시 조건(14.7 MPa, 310°C)에서의 물의 비중량은 703 kg/m³ 이므로 이론적으로 요구되는 펌프의 수동력 (P₄)은 다음과 같다.

$$P_4 = \gamma QH = \frac{(703 \times 9.806) \times \left(\frac{922}{3600}\right) \times 9}{1000} \approx 16[\text{kW}]$$

또한 펌프의 기계적 효율(0.67), 수력학적 효율(0.75), 그리고 전동기 효율(0.78) 등을 가정하여 수동력으로부터 다음과 같이 이론적으로 요구되는 전동기의 축동력 (P₂) 및 전동기의 소요동력(P₁)을 구할 수 있다.

$$P_2 = \frac{P_4}{\eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{hyd}}} \approx 32[\text{kW}]$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\text{motor}}} \approx 40[\text{kW}]$$

일체형원자로는 고유 설계개념상 별도의 축밀봉 장치가 필요하지 않고 따라서 이와 관련된 배관이 필요하지 않는 캔드모터 펌프를 채택하는 것이 일반적인 추세이다. SMART에 설치되어 있는 펌프도 캔드모터 형태이다. 일반 펌프의 경우 전동기 회전축과 임펠러 구동축이 커플링으로 연결되어 작동하는 구조를 지니고 있는 반면에, 캔드모터 펌프의 경우 임펠러 구동축과 전동기 회전축이 일체형으로 작동하는 구조를 지니고 있다. 따라서 캔드모터 펌프의 경우 측정하기 어려운 전동기의 축동력 대신 전동기의 소요동력을 측정하여 이용하는 것이 바람직하다.

펌프에 대한 전동기 소요동력의 측정 방법은 Fig. 2

에서의 Power supply system에 440V, 60 Hz 전원이 연결된 상태에서 Power supply system과 전원의 중간 지점에 Power analyzer를 연결하여 Power analyzer에서 전동기 소요동력을 직접 측정한다. 펌프에 대한 전동기 소요동력의 측정결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

Fig. 4에서는 80-110% 사이의 유량에서의 측정결과가 나타나 있는데 모두 정상운전시 조건(14.7 MPa, 310°C)에서의 측정결과이다. 유량이 적을수록 소요동력이 거의 선형적으로 점점 많이 요구되는 이유는 효율이 저하되어 이에 상응하여 요구되는 소요동력이 더 많아지기 때문이다. 또한 펌프는 비속도가 매우 큰 축류형 펌프로서 Fig. 4에서 알 수 있듯이 유량변화에 따른 소요동력의 변화추이, 특히 정격유량 근처에서의 소요동력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있으며 따라서 Pump power를 이용한 유량측정이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 축류형 펌프에 대한 전동기 소요동력의 측정결과 유량변화에 따른 소요동력의 변화추이, 특히 정격유량 근처에서의 소요동력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있어 Pump power를 이용한 유량측정 방법이 실제 사용 가능함을 알 수 있었다.

2) 일체형원자로의 원자로냉각재계통의 유량측정 방법으로서 현실적으로 적용하기 어려운 Pump dP를 이용한 유량측정 방법 대신 Pump power를 이용한 유량측정 방법을 사용함으로써 원자로냉각재계통의 유량정보를 실시간으로 파악하고 나아가 원자로냉각재계통에서의 저 유량 원자로정지 목적으로도 사용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력증장기개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] “한국형 표준원전 계통 실무”, 한국원자력연구소, 1996.
- [2] 이준 외, “SMART 일차계통 유량측정 방안”, KAERI/TR-1902/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [3] “효성펌프편람”, 효성EBARA주식회사, pp. 50-54, 1996.
- [4] 김민환 외, “일체형원자로 SMART 냉각재 순환펌프의 전산성능예측”, 한국전산유체공학회지, 제8권, 제3호, pp. 32-40, 2003.
- [5] A. J. Stepanoff, “Central and Axial Flow Pumps”, John Wiley & Sons, Inc., 1957.