

## 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법

### The Flow Measurement Methods for the Primary System of Integral Reactors

이 준, 서재광, 이두정

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

일체형원자로는 일반적으로 일차계통 주요 기기들이 RV내 설치되어 있으며 일차계통 내에 RCP나 SG를 연결하는 대형 유로배관이 없다는 점이 공통적인 특징이다. 유량측정 관점에서 보면 상용원자로의 경우는 대형 유로배관 상에 RCP나 SG가 설치되어 있어 각 기기 전후단에서의 압력차를 측정함으로써 유량을 측정하고 있는데 반해 일체형원자로의 경우는 RCP나 SG를 연결하는 유로배관이 없어 이를 위한 별도 목적의 유로 배관을 만들지 않는 한 압력차를 측정하기는 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법을 마련하고자 한다. 연구결과 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법으로 Pump speed를 이용한 유량측정, HBM을 이용한 유량측정, 그리고 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법 등이 사용 가능한 방법으로 평가되었다. 특별히, 상용원자로나 각 국에서 개발중인 일체형원자로의 경우 motor power와 유량과의 관계를 직접 이용하는 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법은 그 예를 찾아볼 수 없었다. 따라서 일체형원자로에 이 방법을 이용하기 위해서는 이에 관한 후속조치 사항들에 유의할 필요가 있다고 여겨진다.

#### Abstract

It is the common features of the integral reactors that the main components of the primary system are installed within the reactor vessel, and so there are no any flow pipes connecting the reactor coolant pumps or steam generators. Due to no any flow pipes, it is impossible to measure the differential pressure at the primary system of the integral reactors, and it also makes impossible measure the primary coolant flow rate. The objective of the study is to draw up the flow measurement methods for the primary system of integral reactors. As a result of the review, we have made a selection of the flow measurement method by pump speed, by HBM, and by pump motor power as the flow measurement methods for the primary system of integral reactors. Peculiarly, we did not found out a precedent which the direct pump motor power-flow rate curve is used as the flow measurement method in the existing commercial nuclear power reactors. Therefore, to use this method for integral reactors, it is needed to bear the follow-up measures in mind. The follow-up measures is included in this report.

## 약어

|       |   |
|-------|---|
| bhp   | break horsepower (제동마력)                               |
| COLSS | Core Operating Limit Supervisory System (노심운전제한치감시계통) |
| CPC   | Core Protection Calculator (노심보호연산기)                  |
| DNBR  | Departure of Nuclear Boiling Rate (핵비등이탈률)            |
| HBM   | Heat Balance Method (이차측 열평형을 이용한 일차측 유량산정 방법)        |
| PPS   | Plant Protection System (발전소보호계통)                     |
| PZR   | Pressurizer (가압기)                                     |
| RCP   | Reactor Coolant Pump (원자로냉각재펌프)                       |
| RCS   | Reactor Coolant System (원자로냉각재계통)                     |
| RG    | Regulatory Guide (미국 원자력 규제지침)                        |
| RV    | Reactor Vessel (원자로용기)                                |
| RX    | Reactor (원자로)   |
| SAFDL | Specified Acceptance Fuel Design Limit (허용핵연료설계제한치)   |
| SG    | Steam Generator (증기발생기)                               |
| SMART | System-Integrated Modular Advanced Reactor(‘고유명사’)    |
| UFM   | Ultrasonic Flow Meter (초음파유량계)                        |

## 1. 서론

일체형원자로는 일반적으로 일차계통 주요 기기들이 RV내 설치되어 있으며 일차계통 내에 RCP나 SG를 연결하는 대형 유로배관이 없다는 점이 공통적인 특징이다. 유량측정 관점에서 보면 상용원자로의 경우는 대형 유로배관 상에 RCP나 SG가 설치되어 있어 각 기기 전후단에서의 압력차를 측정함으로써 유량을 측정하고 있는데 반해 일체형원자로의 경우는 RCP나 SG를 연결하는 유로배관이 없어 이를 위한 별도 목적의 유로 배관을 만들지 않는 한 압력차를 측정하기는 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법을 마련하고자 한다. 먼저 상용원자로의 일차계통 유량측정 현황을 검토하고 유량측정 방법 및 특성을 분석하였다. 그리고 각각 일체형원자로 유량측정 관점에서 본 특이사항을 검토하여 일체형원자로에 적용가능 여부를 평가하고 또한 구체적인 유량측정 방법을 구현하였다.

## 2. 본론

“상용원자로“는 CE Type 원자로(영광 3&4 또는 울진 3&4 호기) 및 한국형 표준원전을 참조 원자로로 하여 기술하였으며, 이외의 ”상용원자로“에 대한 내용에 대해서는 해당 원자로 Type을 별도 명시하였다.

### 2.1 상용원자로 일차계통 유량측정 현황 검토

상용원자로에서 RCP는 전출력 조건 하에서 노심에서 발생하는 열을 제거하기 위한 노심 유량을 제공한다. 핵연료집합체는 핵연료와 감속재의 붕괴열이 통제될 수 있는 기하학적인 유로 형태를 제공한다. 상용원자로에서 노심 유량은 다양한 방법으로 측정되며 유량측정 값은 원자로 감시

및 보호계통에 제공된다. 계통 운전에서 측정된 선형 열출력(peak linear heat rate) 및 최소 DNBR 등의 노심 변수들이 안전해석의 결과로 설정된 운전제한치 이내로 유지되도록 노심출력 분포 및 냉각재 조건들이 감시되고 제어된다. 운전제한치는 기술운영지침서(technical specification) 상에서 COLSS 및 CPC 각각에 대하여 주어져 있다. COLSS 및 CPC의 감시 및 보호기능에 의하여 연속적으로 노심출력 분포, 노심/계통 유량 등의 공정변수들이 온라인으로 제공된다. 어떤 이유에 의해 핵연료설계제한치에 대한 여유도가 계속적으로 감소하는 사고의 경우, CPC가 원자로를 정지시킴으로서, 규정된 SAFDL을 초과하지 않도록 조치한다. RCP speed는 CPC의 입력 공정변수로 사용된다.

앞서 언급한 바와 같이 RCP는 정상운전 동안 원자로 노심으로부터 발생하는 열을 적절하게 제거하기 위하여 원자로냉각재계통에 충분한 강제순환 유량을 제공한다. RCP 유량(예. 설계유량)의 하한 값은 SAFDL이 초과되지 않는다는 것을 보장할 수 있도록 설정된다.

상용원자로에서 사용되는 일차계통 유량측정 방법은 아래와 같다. ①, ②, ③, ④항에 관련된 내용은 참고문헌 [1]에 기술되어 있다.

- ① RV 압력차를 이용한 유량측정
- ② SG 압력차를 이용한 유량측정
- ③ RCP 압력차를 이용한 유량측정
- ④ RCP speed를 이용한 유량측정
- ⑤ HBM을 이용한 유량측정
- ⑥ UFM을 사용한 유량측정 (하나로원자로)
- ⑦ Pump motor power를 이용한 유량측정 (영광 1&2 호기)

## 2.2 일체형원자로 일차계통 유량측정 현황 검토

일체형원자로는 일반적으로 일차계통 주요 기기들이 RV내 설치되어 있으며 일차계통 내에 RCP나 SG를 연결하는 대형 유로배관이 없다는 점이 공통적인 특징이다. 유량측정 관점에서 보면 상용원자로의 경우는 대형 유로배관 상에 RCP나 SG가 설치되어 있어 각 기기 전후단에서의 압력차를 측정함으로써 유량을 측정하고 있는데 반해 일체형원자로의 경우는 RCP나 SG를 연결하는 유로배관이 없어 이를 위한 별도 목적의 유로 배관을 만들지 않는 한 압력차를 측정하기는 불가능한 실정이다. 또한 현재 각 국에서 개발중인 일체형원자로의 경우 일차계통 유량측정에 관해서는 구현기술 또는 기술개발 정보는 물론 상용원자로 요건 만족성 여부 등 모든 관련 정보가 노출되지 않아 파악이 불가능한 실정이다.

다만, 현재 각 국에서 개발중인 일체형원자로의 경우 일반적으로 일차계통 주요 기기들이 RV내 설치되어 있으며 일차계통 내에 RCP나 SG를 연결하는 대형 유로배관이 없다는 공통적인 특징을 제외하고는 서로 다른 설계개념들을 지니고 있다. 예를 들어, 일부 주요 기기가 RV밖에 있는 경우도 있고, RV내 주요 기기도 기기 Type이 다르거나 설치위치, 배치형상 등이 상이하다. 이러한 다른 설계개념들은 제각기 원자로 성능 향상 및 요건 만족 여부와 연계되어 있음을 예상할 수 있다. 일차계통 유량측정 관점에서 보면 압력차 측정을 고려한 펌프 배치, 아니면 Pump motor power를 이용하기 위한 펌프 Type 선정 등의 서로 다른 설계개념들을 엿볼 수 있다.

여하튼 일체형원자로의 일차계통 유량측정은 원자로의 운전/제어/보호 및 요건 등 모든 측면에서 반드시 구현하여야 할 필수 사항이다. 상용원자로에서 사용되고 있는 유량측정 설비 및 방법을 참조로 하여 각 국의 해당 일체형원자로의 고유 특성에 적합하고 상용원자로에 상응하는 다양한 유량측정 설비 및 방법을 갖추어야 할 것으로 여겨진다. 그림 1은 일체형원자로 일차계통 유로도(예. SMART)를 나타낸다.

## 2.3 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법

### 2.3.1 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법 선정

일체형원자로 일차계통 유량측정 방법으로 상기 상용원자로에서 사용되는 방법을 모두 적용하는 것은 가능하다. 하지만 일체형원자로의 고유 특성에 적합하고 보다 현실적으로 적용가능하며, 실효성이 있는 유량측정 방법을 선정하는 것이 중요하다고 여겨진다. 따라서 본 항에서는 상기 상용원자로에서 사용되는 방법에 대해 각각 일체형원자로 유량측정 관점에서 본 특이사항을 검토하여 일체형원자로에 적용가능 여부를 평가하고 또한 구체적인 유량측정 방법을 구현함으로써 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법을 선정하고자 한다. 일체형원자로 일차계통에 적용 가능한 몇 개의 유량측정 방법에 대한 선정이유는 아래와 같으며 그 내용은 표1에 요약하여 정리하였다.

상기 ①~③항은 압력차를 이용한 유량측정 방법들이다. 대부분의 일체형원자로의 경우 현재 이 방법들은 고려되고 있지 않는 것으로 여겨진다. ①~③항은 모두 각각의 기기의 전후단에 압력탭을 설치하여야 하는데 이는 원자로 압력용기에 구멍을 뚫어야 하는 문제가 생겨 현실적으로 어려울 것으로 여겨진다. 더구나 ③항은 상용원자로 경우와는 달리 일체형원자로의 경우 펌프 전후단의 압력차가 불과 10~20 m 이내로 크지 않으며 압력탭이 위치하는 곳의 유동장이 안정화된 영역이 아닐 것으로 보여 이 압력차를 이용한 유량측정에 적지 않은 오차가 있을 것으로 예상된다.

대안으로서 일부 일체형원자로의 경우 boron을 사용하지 않으며 또한 SG tube 재료가 titanium이므로 노심에서의 부식생성물을 감시 안하는 설계개념을 지향하고 있으므로 ①항의 방법을 채택할 필요성이 없는 것으로 판단된다. 또한 일부 일체형원자로의 경우 출력운전시 일부 펌프 정지운전을 허용하는 설계개념을 지향하고 있으므로 ②항의 방법은 채택할 필요성이 없는 것으로 판단된다. 또한 ③항의 방법의 대안으로 Pump motor power 이용 방법을 선정하였다. 이 방법으로 상용원자로에서 사용되는 RCS dP 유량측정 방법의 목적인 RCS 유량정보를 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

상기 ④항은 Pump speed를 이용한 유량측정 방법이다. 일체형원자로에 이 방법을 적용하는데는 특이 고려해야 할 사항이 없는 것으로 판단되며 따라서 일체형원자로 유량측정 방법의 하나로 선정하였다. 그러나 이 방법은 실제유량을 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 따라서 이 방법과 더불어 PPS용으로 사용 가능한 유량측정 방법이 추가로 요구된다. 이 방법의 보정은 주기적으로 HBM으로부터 보정할 수 있다.

상기 ⑤항은 이차측 열평형을 이용한 일차측 유량산정 방법이다. 일체형원자로에 이 방법을 적용하는데는 특이 고려해야 할 사항이 없는 것으로 판단되며 따라서 일체형원자로 유량측정 방법의 하나로 선정하였다. 그러나 이 방법은 일,이차측 열평형이 되어야 이용 가능한 단점을 지니고 있으며 현재 상용원자로에서는 주기적으로 관련 dP 관계식의 상수를 보정하는데 사용되고 있다. 따라서 이 방법과 더불어 일,이차측 열평형이 되지 않는 상태에서도 이용 가능한 유량측정 방법이 추가로 요구된다.

상기 ⑥항은 유량을 직접 유량계측기로 측정하는 방법이다. 일체형원자로에 이 방법을 적용하는 것은 현재 불가한 것으로 여겨진다. 이 방법은 현재 원통배관에만 적용이 가능한 것으로 알려져 있으며 이외 사용온도 측면에서 상용원자로 일차계통에 적용하기에는 여유도가 작은 것으로 알려져 있다. 대안으로서 상용원자로에서 기사용되어 온 HBM을 이용하면 되는 것으로 판단된다.

상기 ⑦항은 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법이다. 일체형원자로에 이 방법을 사용하는 것은 펌프 Type에 따른 고유 특성과 직접 연관되어 있으므로 일체형원자로 펌프에 대한

motor power 특성 연구 및 이용가능 여부 등 구현방법의 검토가 필요하며 추후 오차에 대한 연구도 필요한 것으로 판단된다. 앞서 기술된 바와 같이 실용화 측면에서 살펴보면, 상용원자로의 경우 펌프의 motor power를 이용한 일차계통 유량측정에 관해서는 관련 정보가 전무한 실정이다. 이는 상용원자로의 경우 유로배관이 있어 dP를 이용한 일차계통 유량측정 방법을 쉽게 구현할 수 있으며 또한 정확도 면에서도 우수하기 때문에 이외의 방법을 고민할 필요가 없기 때문인 것으로 여겨진다. 그러나 본 일체형원자로 유량측정 방법에서는 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법에 대한 개념검토 결과 이 방법을 일체형원자로 유량측정 방법의 하나로 선정하였다.

### 2.3.2 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법의 구현방법

상기 항 및 표 1에서 기술된 바와 같이 Pump speed를 이용한 유량측정, HBM을 이용한 유량측정, 그리고 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법을 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법으로 선정하였다. 이 3가지 방법에 대한 구현방법은 다음과 같으며 그 내용은 표 2에 요약하여 정리하였다.

#### 가. Pump speed를 이용한 유량측정

일체형원자로에서의 목적은 상용원자로에서와 같다. 즉 CPC 및 COLSS에 입력자료를 제공함으로써 RCS 저유량 DNBR 트립이 목적이다. 일체형원자로의 경우도 상용원자로의 경우와 같이 통상 펌프당 4채널의 speed를 계측(보호용)하도록 설계되어 있으므로 상용원자로 가동 기기인 CPC나 COLSS 등에 입력자료를 제공하는데는 문제가 없는 것으로 판단된다. 따라서 일체형원자로에 상기 ④항을 적용하는데는 특히 고려해야 할 사항이 없는 것으로 판단되며 또한 일체형원자로에 구현방법도 상용원자로의 경우와 동일한 방법이므로 문제가 없는 것으로 판단된다. 이 방법의 보정은 주기적으로 HBM으로부터 보정할 수 있다.

#### 나. HBM을 이용한 유량측정

일체형원자로에서의 목적은 상용원자로에서와 같다. 즉 시운전시 사용 및 유량보정이 목적이다. 일체형원자로도 이차측 열평형을 이용한 일차측 유량산정이 가능하므로 일체형원자로에 적용가능 여부 및 구현방법도 문제가 없는 것으로 판단된다. 추가하여 시운전시(Power Ascension Test) Power Level이 20, 50 %에서도 상용원자로에서 사용하는 RCP dP 방법을 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 다. Pump motor power를 이용한 유량측정

헤드-유량 곡선 또는 전력-유량 곡선 등 모든 유량측정 관련 곡선을 사용하기 위해서는 유량변화에 따른 종속인자의 변화추이를 계측할 수 있어야 하며 그 계측 값의 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. 따라서 일체형원자로에 이 방법을 사용하는데는 표 1에서와 같이 펌프 Type에 따른 고유 특성과 직접 연관되어 있으므로 일체형원자로 펌프에 대한 motor power 특성 연구 및 이용가능 여부, power 측정방법, 용도 및 보정방법, 후속조치 등 구현방법의 검토가 필요하다.

## 1) power 특성 연구 및 이용가능 여부

펌프에는 수십 가지 종류가 있지만 여기서 논의하고자 하는 원심형 펌프는 크게 반경류형(Radial flow) 펌프, 축류형(Axial flow) 펌프, 넓은 의미의 혼류형(Mixed flow)에 속하는 사류형 펌프 등이 있다. 원심형 펌프는 본질적으로는 유동이 반경 방향이고 유동이 샤프트로부터 출구 방향으로 흐르는 펌프이다. 반경류형 펌프는 이 원심형 펌프를 말하며, 축류형 펌프는 원심형 펌프에서의 유동이 샤프트 회전축과 평행하게 흐르도록 변형된 펌프이며, 사류형 펌프는 이 2가지 펌프의 특성을 혼합시켜 놓은 펌프이다. 이와 관련된 자세한 내용은 참고문헌 [2][3]에 기술되어 있다.

축류형 펌프는 일반적으로 비속도가 1200 이상의 값을 지니고 있다. 축류형 펌프는 반경류형 펌프나 사류형 펌프에 비해 표 3에서와 같이 비속도가 높으며 그림 2에서와 같이 유량변화에 따른 전력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있다.

비속도는 회전차의 상사성 또는 펌프특성 및 형식결정 등을 논하는 경우에 이용되는 값이다. 회전차의 형상, 치수 등을 결정하는 기본요소는 펌프회전수, 토출량, 헤드 등 3가지가 있고 비속도는 다음 식에서 구해진다.

비속도  $N_s$ 는

$$N_s = \frac{n \times Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad \text{여기서, } n : \text{펌프회전수, } Q : \text{토출량, } H : \text{수두}$$

예를 들어, SMART의 경우 펌프는 축류형 펌프로서 100 % 출력운전시  $n$ 은 3600 rpm,  $Q$ 는  $33.4 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $H$ 는 17.5 m 이므로, 펌프의 비속도는  $N_s=2432$  이다. 이는 축류형 펌프 중에서도 높은 비속도 값을 지니고 있다. 따라서 유량변화에 따른 전력의 변화추이가 상당한 기울기를 갖고 있어 전력을 이용한 유량측정이 가능한 것으로 판단된다.

그림 2는 펌프 형태에 따른 토출량 대비 헤드, 축동력, 효율을 나타낸다. 축류형 펌프의 경우 토출량 대비 축동력의 기울기의 정도가 헤드의 기울기의 정도와 그 변화추이를 같이하고 있으며 특히 100 % 토출량 시에는 그 변화추이가 더욱 더 근사함을 알 수 있다.

결론적으로 축류형 펌프를 채택하는 일체형원자로의 경우 펌프에 대한 motor power 특성 연구 및 이용가능 여부에 대한 검토 결과 펌프의 motor power를 이용한 유량측정이 가능한 것으로 평가할 수 있다. 참고로 축류형 펌프의 경우 그림 2(b), 2(c)에서와 같이 토출량이 적을수록 축동력이 많이 요구되는 이유는 효율이 저하되어 이에 상응하여 요구되는 축동력의 상대치가 더 많아지기 때문이다.

## 2) power 측정방법

일체형원자로는 고유 설계개념상 별도의 축밀봉 장치가 필요하지 않고 따라서 이와 관련된 배관이 필요하지 않는 캔드 모터 펌프를 채택하는 것이 일반적인 추세이다. 캔드 모터 펌프는 임펠러 구동축과 전동기 회전축이 일체형으로 일반 펌프와 같이 전동기 회전축과 임펠러 구동축이 커플링으로 연결되어 작동하는 펌프와는 구조가 아주 다르다. 캔드 모터 펌프에서의 출력 흐름(예. SMART)은 그림 3과 같으며 전동기의 축동력( $P_2$ )을 결정하기 위해서는 펌프의 필요 유량과 수두가 우선적으로 결정되어야 된다. 펌프의 유량과 수두는 원자로에서 요구되는 특성에 따라 정해지며 수두의 결정은 펌프가 노심에서 가열된 냉각수를 증기발생기로 강제 순환시킬 때 원자로 내부구조물 사이로 유동되면서 생기는 수력손실 등을 고려하여 결정한다. 그리고 유량은 노심에서 가열된 냉각수가 증기발생기에서 열 교환의 방법으로 증기를 생산하는 양에 따라 결정된다.

예를 들어, 원자로의 일차 냉각수를 순환시키기 위해 요구되는 펌프의 유량은  $2006 \text{ m}^3/\text{h}$ , 수

두는 17.5 m 이며, 물의 비중은  $1000 \text{ kg/m}^3$  이다. 그러므로 필요한 수동력은 다음과 같다.

$$P_4 = \gamma \cdot Q \cdot H = \frac{1000 \times 9.806 \times 2006 \times 17.5}{1000 \times 3600} = 95.6 [\text{kW}]$$

펌프의 기계적 효율, 그리고 수력학적 효율을 고려하여 이론상 요구되는 수동력으로부터 다음과 같이 전동기의 축동력을 구할 수 있다.

$$P_2 = \frac{P_4}{\eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{hyd}}} \approx 180 [\text{kW}]$$

### 3) 용도 및 보정방법, 후속조치

Pump motor power를 이용한 유량측정 방법은 상용원자로에서 사용되는 상기 ③항인 RCS dP 방법(RCS 유량정보 파악 목적)을 대응할 수 있을 것으로 판단되며 나아가 RCS 저유량 트립 목적으로도 사용 가능할 것으로 판단된다. Pump motor power를 이용한 유량측정 방법의 보정은 앞서 일체형원자로에서의 하나의 유량측정 방법으로 선정한 HBM으로부터 주기적으로 보정할 수 있다. 상기 용도에 사용하기 위해서는 아래와 같은 후속조치가 강구되어야 할 것으로 여겨진다.

- 전력-유량 (축동력-토출량) 곡선 필요, 예) 관련식  $Q_{PUMP} = A_i W + B_i$
- 오차에 대한 실험자료 필요
- 축동력 측정체계 구축
- 계통 허용오차 연구 필요
- 시운전시 RCS 유량 시험 필요, 예) 관련식  $Q_{RCS} = A_i W + B_i + \Delta B$
- 축동력 계측제어체계 구축

### 3. 결 론

상용원자로의 일차계통 유량측정 현황을 검토하고 유량측정 방법 및 특성을 분석하였다. 그리고 각각 일체형원자로 유량측정 관점에서 본 특이사항을 검토하여 일체형원자로에 적용가능 여부를 평가하였다. 연구결과 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법으로 Pump speed를 이용한 유량측정, HBM을 이용한 유량측정, 그리고 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법 등이 사용 가능한 방법으로 평가되었다. 특별히, 상용원자로나 각 국에서 개발중인 일체형원자로의 경우 motor power와 유량과의 관계를 직접 이용하는 Pump motor power를 이용한 유량측정 방법은 그 예를 찾아볼 수 없었다. 따라서 일체형원자로에 이 방법을 이용하기 위해서는 이에 관한 후속 조치 사항들에 유의할 필요가 있다고 여겨진다.

표 1 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법 선정

| 순번 | 상용원자로 유량측정 방법    | 일체형원자로 유량측정 관점에서 본 특이사항                         | 일체형원자로 유량측정 방법 선정 |  |  |
|----|------------------|---|-------------------|--|--|
|    |                  |   | 선정 여부             | 미선정시 대안  | 선정시 고려해야 할 사항  |
| ①  | RV dP            | -RCS 총 유량 감시/보호 기능과 무관<br>-dP 사용                | X                 | -일부 일체형원자로의 경우 boron을 사용하지 않으며 또한 SG tube 재료가 titanium 이므로 노심에서의 부식생성물을 감시 안하는 설계개념 지향 | -  |
| ②  | SG dP            | -dP 사용  | X                 | -일부 일체형원자로의 경우 출력운전시 1 펌프 정지운전을 허용하는 설계개념 지향   | -  |
| ③  | RCP dP           | -dP 사용  | X                 | -대안: Pump motor power  | -  |
| ④  | RCP speed        | -실제유량 반영 못함                                     | O                 | -  | -특이 고려해야 할 사항 없음   |
| ⑤  | HBM              | -일,이차측 열평형 되어야 이용 가능<br>-보정용                    | O                 | -  | -특이 고려해야할 사항 없음  |
| ⑥  | UFM              | -상용원자로 도입 안됨<br>-하나로원자로 사용중(보정용)<br>-원통배관에만 적용됨 | X                 | -대안:HBM 대응   | -  |
| ⑦  | Pump motor power | -영광1&2호기에서 일부 Test시 사용<br>-dP도 있어야 사용가능         | O                 | -  | -dP 없이 적용할 수 있는 방법을 강구해야 함<br>-Pump motor power를 이용하는 것은 Pump Type에 따른 고유 특성과 직접 연관되어 있으므로 일체형원자로 Pump에 대한 motor power 특성 연구 및 이용가능 여부 등 구현방법의 검토가 필요함 |

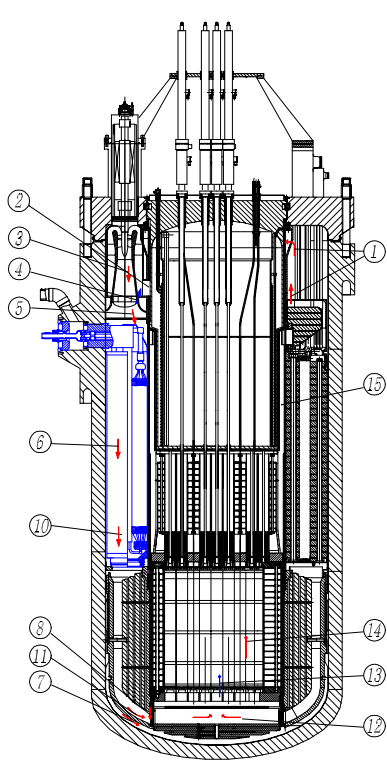


표 2 일체형원자로 일차계통 유량측정 방법의 구현방법

| 순번 | 일체형원자로 유량측정 방법   | 구현방법 항목               | 내 용  |
|----|------------------|-----------------------|--|
| ④  | RCP speed        | 특이사항                  | - 특이 고려해야 할 사항 없음.   |
|    |                  | 용도 및 보정방법, 후속조치       | - 용도 : RCS 저유량 DNBR 트립(상용원자로와 동일)<br>- 보정방법 : HBM (주기적)<br>- 후속조치 : 해당없음.  |
| ⑤  | HBM              | 특이사항                  | - 특이 고려해야 할 사항 없음.   |
|    |                  | 용도 및 보정방법, 후속조치       | - 용도 : 시운전시 사용 및 유량보정(상용원자로와 동일), 또한 시운전시(Power Ascension Test) Power Level이 20, 50 %에서도 RCP dP 방법을 대신할 수 있을 것으로 판단됨.<br>- 보정방법 : 해당없음.<br>- 후속조치 : 시운전시 사용하기 위한 허용오차 연구 필요.   |
| ⑦  | Pump motor power | power 특성 연구 및 이용가능 여부 | - Pump의 motor power를 이용한 유량측정 가능 (* 본문 참조)   |
|    |                  | power 측정방법            | - Pump의 motor power 측정방법 구현 (* 본문 참조)  |
|    |                  | 용도 및 보정방법, 후속조치       | - 용도 : RCS dP 방법(RCS 유량정보 파악 목적)을 대응할 수 있을 것으로 판단되며 나아가 RCS 저유량 트립 목적으로도 사용 가능할 것으로 판단됨.<br>- 보정방법 : HBM (주기적)<br>- 후속조치 : 전력-유량 (축동력-토출량) 곡선 필요 / 오차에 대한 실험자료 필요 / 축동력 측정체계 구축 / 허용오차 연구 필요 / 시운전시 RCS 유량 시험 필요 / 축동력 계측제어체계 구축 |

표 3 펌프 형태에 따른 비속도<sup>[4]</sup>

| 펌프 형태   | 비 속 도          |
|---------|----------------|
| 반경류형 펌프 | 100 ~ 600      |
| 사류형 펌프  | 400 ~ 1500     |
| 축류형 펌프  | 1200 ~ 3000 이하 |



| 번호 |       | 일차계통 유로           | 유량(kg/s)  |
|----|-------|-------------------|-----------|
| 1  | MCP   | 가압기 우회유로          | 23.5      |
| 4  | 우회    | MCP 입구와 혼합구 사이    | 11.5      |
| 2  |       | MCP 입구            | 1540      |
| 3  |       | MCP 출구            | 1585      |
| 5  |       | SG 입구유로           | 1550      |
| 6  |       | SG 튜브측 유로         | 1540      |
| 7  |       | SG 출진계/RV 우회유로    | 2,3715    |
| 8  | SG 우회 | 출진계/노심보호통 사이 우회유로 | 4,5358    |
| 9  |       | SG 카세트/출진계 우회유로   | 3,0827    |
| 10 |       | SG 출구             | 1543.0921 |
| 11 |       | 노심하향유로            | 1543.0927 |
| 12 |       | 노심입구              | 1550      |
| 13 |       | 핵연료집합체유로          | 1540      |
| 14 | 노심우회  | 핵연료집합체 우회유로       | 10        |
| 15 |       | PZR Riser 유로      | 1550      |

그림 1 일체형원자로 일차계통 유로도(예. SMART)