

SMART 이차계통 운전특성에 관한 연구

A Study on the Operation Characteristics of the Secondary System for SMART Plant

이준, 강한옥, 서재광, 박천태, 유승엽, 윤주현, 김궁구

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 관류형 증기발생기를 사용하고있는 SMART 330 MWt의 이차계통의 운전 특성에 대해 분석을 수행하였다. 이차계통의 주요 변수인 급수온도, 총급수유량, 증기압력, 총증기유량, 증기온도 등에 대해 출력별로 상용로와 비교하여 분석하였다. 본 연구 결과, 20% 출력 이하에서의 증기온도는 노심출구온도와 거의 일치한다. 이는 급수유량이 저유량인 경우에는 전열관내 급수온도가 과열증기 영역에 의해 지배되고 있기 때문이다. 20~40% 사이 출력에서의 증기온도는 일차측 노심출구온도와 거의 일치하여 상승하다가, 약 40% 출력부터는 증기온도는 노심출구온도와 점차 차이를 갖기 시작하며 약 80% 출력에서 고점을 이룬다. 약 80% 출력 이상에서의 증기온도는 노심출구온도와 좀더 차이를 벌리면서 감소하게 된다. 이러한 요인들은 전반적으로 관류형 나선형 증기발생기의 열수력 모델에 기인하고 있기 때문인 것으로 평가된다.

Abstract

In this paper, the operation characteristics of the secondary system for SMART 330 MWt plant which the once-through helically-coiled steam generators have been installed was analyzed. The feedwater temp., total feedwater flow rate, steam pressure, total steam flow rate and steam temp. was analyzed vs. steam generator power on conditions of a constant feedwater temp. and steam pressure, and was compared with the commercial nuclear power plants. After the present analysis, it was evaluated that at the range of low power (about below 20%) the steam temp. is

nearly same as the core outlet temp., and at the range of middle power (about between 20~80%) it show gradually a upward trend, and at the range of high power (about between 80~100%) it show gradually a downward trend. These phenomena result from the once-through steam generator's model which consists of the 3 different type of regions, i.e., subcooled, boiling, and superheated region.

1. 서론

SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor) 330 MWt 플랜트는 해수담수 목적으로 개발 중인 일체형 원자로로서 노심, 제어봉구동장치 12개, 주냉각재펌프(MCP) 4대, 증기발생기 카세트 12개, 가압기 등의 주요 기기가 원자로용기 내에 설치되어 있다.⁽¹⁾ Fig. 1은 SMART 원자로 집합체를 보여준다.

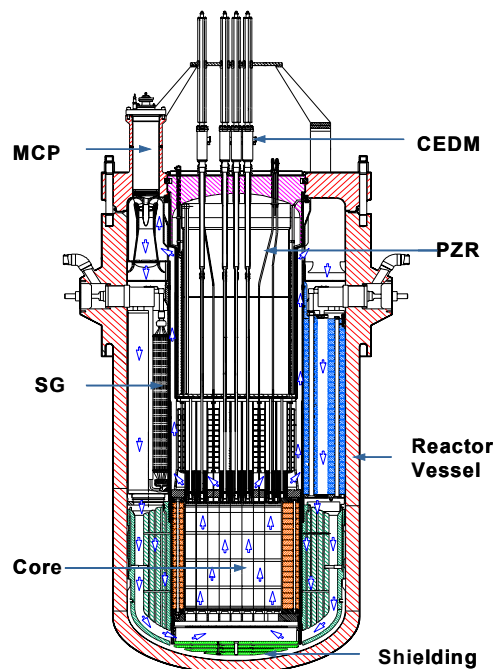


Fig. 1 SMART Reactor Assembly

이중 증기발생기는 원자로용기내 중간 높이 위치의 환형공간에 소형(cassette) 타입으로 12개의 카세트가 환형을 이루며 설치되어 있는데, 노심에서 생성된 열을 이차계통으로 전달하는 핵증기공급계통의 주요 열수력 현상을 결정하는 핵심 기기이다. 따라서 증기발생기의 형태에 따라 이차계통의 설계특성은 크게 달라질 수 있다.

SMART의 경우 현재 관류형(once-through type) 나선형 증기발생기를 채용하여 기기 제작 및 관련 계통설계를 수행 중에 있다.

관류형 증기발생기는 직관형과 나선형이 있다. 나선형의 경우 전열관이 길어지면 과냉각 영역 및 과열증기 영역에서 필요로 하는 열전달 면적은 거의 변하지 않는 반면 비등 영역이 차지하는 비율이 커지는데, 비등 영역의 비등열전달 계수가 단상인 과냉각 및 과열증기 영역의 열전달 계수보다 훨씬 크기 때문에 결과적으로 전체적인 평균 열전달 계수가 커지게 된다. 이외 여러 가지 이유로 나선형의 경우 직관형에 비해 열전달 효율이 높은 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

따라서 본 논문에서는 관류형 나선형 증기발생기를 사용하는 SMART 플랜트에 대한 이차계통의 운전특성을 분석/평가하고자 한다. 2항에서는 분석/평가를 위한 SMART 증기발생기 카세트의 설계특성을 기술하였으며, 3항에서는 원자로냉각재계통 및 증기발생기의 설계자료 등 이차계통에의 영향을 미치는 영향인자에 대해 고찰하였다. 영향인자 중 노심입구온도 및 증기발생기의 열전달면적 계산은 한국원자력연구소에서 개발한 관류형 증기발생기의 열수력 설계 및 성능 해석 코드⁽²⁾를 사용하여 얻은 설계자료이다. 4항에서는 관류형 증기발생기를 사용하고있는 SMART 이차계통의 운전특성에 대해 분석을 수행하였다. 이차계통의 주요 변수인 급수온도, 총급수유량, 증기압력, 총증기유량, 증기온도 등에 대해 출력별로 상용원자로(CNPP)(이하 “상용로”라 한다.)와 비교하여 분석하였다.

2. SMART 증기발생기 카세트

SMART 증기발생기 카세트(이하 “카세트”라고 한다.)는 원자로 운전 시에는 과열증기를 생산하고 원자로 냉각 시에는 일차측 냉각재(원자로 냉각재)의 열을 제거하는 기능을 한다. 열수력 적인 측면에서 카세트는 정격출력운전 시 40℃ 이상의 과열증기를 생산하며, 과도운전 시에는 10℃ 이상의 과열증기를 생산한다.

카세트내 유로는 이차측 급수가 나선형 전열관(tubes)의 내부로 흐르고 일차측 냉각재가 나선형 전열관 외부로 흐른다. 전열관내 이차측 급수는 일차측 냉각재로부터의 열전달에 의해 가열되면서 과냉각유동에서 이상유동으로, 이상유동에서 과열증기유동으로 상 전환된 후 증기발생기 헤드를 통해 터빈으로 방출된다. Fig. 2는 증기발생기 카세트 단면도를 보여준다.

단위 카세트는 6개의 모듈로 구성되어 있으며 또한 324개의 전열관으로 구성되어 있다. 전열관 재질은 Titanium Alloy(Type : PT-7M)가 사용되었다.

이외 카세트의 급수노즐/증기노즐은 원자로용기 외벽을 관통한 후 3개씩 4개의 구역(section)으로 합해져 이차계통으로 연결된다.

Fig. 2에서 이차측 급수는 상부 측면으로부터 공급되어, 카세트 중앙상부에서 중앙 하부로 내려와 나선형 전열관을 통해 상부로 이동하면서 일차측 냉각재와 열교환을 하게 된다. 관류형 나선형 카세트의 열수력 모델⁽²⁾을 살펴보면, 나선형 전열관의 입구에서부터 출구까지 과냉각 영역, 비등영역, 과열증기 영역 등 3개의 영역으로 구성할 수 있는 것으로

로 알려져 있다. 이러한 구성에서 정격 급수유량 대비 급수유량(%)과 과냉각 영역, 비등 영역, 과열증기 영역이 차지하는 전열관 전체 길이 대비 전열관 길이(%)를 나타내는 하나의 예는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 급수유량이 저유량인 경우에는 전열관내 급수온도가 과열증기 영역에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 급수유량이 75% 유량인 경우에는 비등 영역과 과열증기 영역에 의해 지배되고 있음을 알 수 있으며, 정격유량인 100% 유량인 경우에는 비등 영역에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 따라서 급수유량이 저유량인 경우에는 전열관내 급수온도가 일차측 냉각재의 온도와 거의 같게 될 것이라는 현상을 예상할 수 있다. 또한 급수유량이 약 75% 유량 이상인 경우에는 전열관내 급수온도가 일차측 냉각재의 온도보다 계속 낮아지게 될 것이라는 현상을 예상할 수 있다.

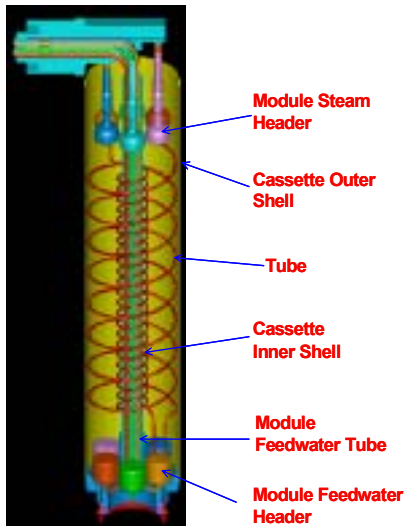


Fig. 2 Steam Generator Cassette

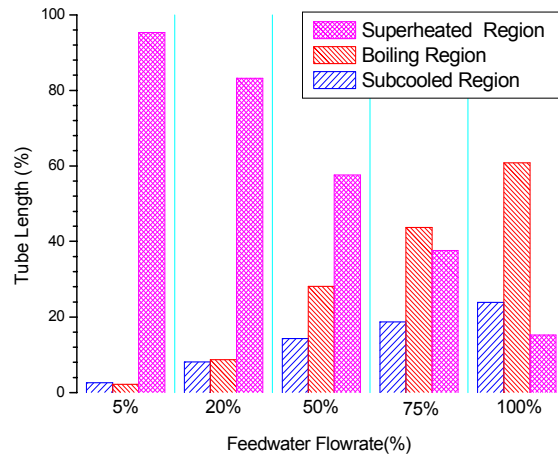


Fig. 3 A Example of Tube Length(%) for each region of Once-through Helically-coiled Cassette Model vs. Feedwater Flow Rate(%)

3. 이차계통에의 영향인자 고찰

본 연구에서 사용된 SMART에 대한 100% 출력시 주요 설계변수는 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서의 노심입구온도 및 카세트 열전달면적, 카세트 유효 높이, 평균 전열관 길이 등은 카세트의 열적크기 산정 결과 얻은 설계자료이다⁽²⁾.

Fig. 4는 SMART에 대한 노심출구온도-출력 제어 프로그램을 보여준다. Fig. 4에서는 20% 출력에서 주냉각재펌프 회전속도가 변환되고 있음을 알 수 있다. 또한 출력범위에서 요구출력수준에 맞는 열을 노심에서 생성하고 이를 증기발생기를 통해 방출하기 위해 노

심출구온도-출력 및 출력-급수유량을 제어하는 프로그램을 사용한다. 이 제어 프로그램의 사용으로 노심출구온도는 출력에 따라 선형으로 비례하도록 제어되며 또한 출력은 급수유량에 따라 동일한 퍼센티지로 선형으로 비례하도록 제어된다.

상용로의 경우 대부분 포화증기를 생산하는 U-tube형 증기발생기를 사용하는데 열수력 설계특성으로 출력이 감소함에 따라 단계적으로 급수온도는 감소하고 증기압력은 증가되며 증기온도 또한 단계적으로 증가하도록 설계되어 있다. 과열증기를 생산하는 관류형 증기발생기를 사용하는 경우는 2항에서 기술한 관류형 나선형 카세트의 열수력 모델에 의거 급수유량이 저유량에서는 전열관내 급수온도가 일차측 냉각재의 온도와 거의 같게 되므로 급수온도가 별로 영향을 미치지 못한다. 따라서 급수온도를 출력 대비 일정하게 할 수 있으며 또한 증기압력을 일정하게 조절함으로써 아래 식에 의해 급수유량으로 출력을 제어하는 것이 가능하게 된다.

$$Q_{SG} = \dot{m} \Delta h$$

상기 식에서 엔탈피는 온도와 압력의 함수이므로 급수온도와 증기압력이 일정하다면 엔탈피 차는 일정하고 따라서 증기발생기 출력은 급수유량만의 함수가 된다.

Table 1. Design Parameters at 100% Power

Primary System	
Thermal Power (Mwt)	330
Operating Pressure (MPa)	15
Coolant Flow Rate (kg/sec)	1,556
Core Inlet Temp. (T_{cold}) ()	270
Core Outlet Temp. (T_{hot}) ()	310
Secondary System	
SG Type	Helically-coiled Once-through
No. of SG Cassettes (EA)	12
Heat transfer Area/Cassette (m^2)	168.8
Axial Height (m)	2.8
Average Tube Length (m)	15.8
Steam Pressure (MPa)	3.4
Total Steam Flow Rate (kg/sec)	152.7
Superheat ()	40
Feedwater Temp. ()	180

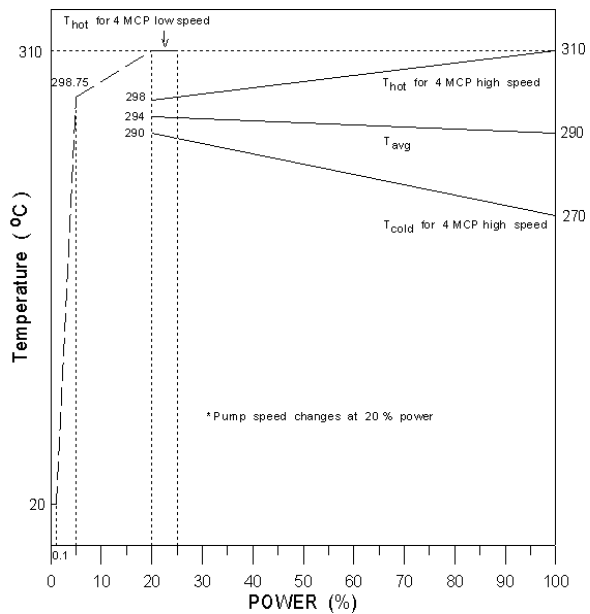


Fig. 4 Core Outlet Temp.-Power Control Program

4. 분석 결과

본 연구에서는 관류형 증기발생기를 사용하고있는 SMART 이차계통의 운전특성에 대

해 분석을 수행하였다. 이차계통의 주요 변수인 급수온도, 총급수유량, 증기압력, 총증기유량, 증기온도 등에 대해 출력별로 상용로와 비교하여 분석하였다.

Fig. 5에서는 급수온도를 보여준다. 상용로의 경우 100% 출력에서 250°C, 20% 출력에서 153°C를 나타낸다. 출력이 감소함에 따라 급수온도가 단계적으로 감소하도록 설계되어 있다. SMART의 경우 급수온도가 출력에 관계없이 일정하도록 설정되어 있는데, 3항에서 기술한 바와 같이 급수유량이 저유량에서는 전열관내 급수온도가 일차측 냉각재의 온도와 거의 같게 되므로 급수온도가 별로 영향을 미치지 못한다. 따라서 급수온도를 출력 대비 일정하게 하는 것이 가능하다. 참고적으로 상용로의 출력에 따른 급수온도 커브를 SMART에 적용(100% 출력에서 180°C, 20% 출력에서 114°C)하여 모의한 결과 증기온도는 급수온도를 일정하게 한 경우와 차이가 별로 없는 것으로 분석되었다.

Fig. 6에서는 총급수유량을 보여준다. 상용로의 경우 20% 출력 이하에서는 급수가 downcomer 노즐을 통해 선형적으로 공급되고, 20% 출력 이상에서는 downcomer 노즐을 통해 10%, economizer 노즐을 통해 선형으로 비례하여 공급된다. SMART의 경우 5% 출력 이상 전 출력에서 급수가 급수노즐을 통해 선형으로 비례하여 공급되며 5% 출력 이하에서는 정격유량의 5%가 계속 공급된다.

Fig. 7에서는 증기압력을 보여준다. 상용로의 경우 출력이 증가함에 따라 증기압력은 다소 감소한다. 20% 출력에서는 downcomer 노즐과 economizer 노즐을 통한 급수유량 조합의 변경으로 인해 증기압력이 일시적으로 상승하는 현상이 나타난다. SMART의 경우 20% 출력 이하에서는 증기압력은 1.6 MPa로 일정하게 유지하며 20% 출력 이상에서는 증기압력은 터빈유량을 조절하여 3.4 MPa로 일정하게 유지한다. 이는 일정한 급수온도와 조합하여 엔탈피 차를 일정하게 유지할 수 있게 하며, 결과적으로 급수유량을 제어하여 출력 제어를 가능하게 하는 관류형 증기발생기의 채택으로 인한 주요 특성이기도 하다.

Fig. 8에서는 총증기유량을 보여준다. 상용로의 경우 출력이 증가함에 따라 총증기유량은 증가하나 선형으로 비례하지 않는다. 출력이 증가함에 따라 엔탈피 차가 줄어들어 증기유량이 다소 증가하게 된다. SMART의 경우 출력이 증가함에도 엔탈피 차가 일정하여 유지됨으로서 총증기유량은 선형으로 비례하여 증가하며 급수유량과 동일하다.

Fig. 9에서는 증기온도를 보여준다. 상용로의 경우 증기온도는 포화온도이므로 출력 대비 증기온도의 거동은 증기압력의 거동과 같다.

SMART의 경우 Fig. 9에 나타난 20% 출력 이하에서의 증기온도는 Fig. 4에서의 노심 출구온도와 거의 일치한다. 이는 2항에서 기술된 바와 같이 급수유량이 저유량인 경우에는 전열관내 급수온도가 과열증기 영역에 의해 지배되고 있기 때문이다. 따라서 Fig. 9에 나타난 20% 출력 이하에서의 증기온도가 가파르게 상승하는 요인은 일차측 냉각재의 온도에 기인하고 있기 때문이다.

20~40% 사이 출력에서의 증기온도는 일차측 노심출구온도와 거의 일치하여 상승하다

가, 약 40% 출력부터는 증기온도는 노심출구온도와 점차 차이를 갖기 시작하며 약 80% 출력에서 고점을 이룬다. 약 80% 출력 이상에서의 증기온도는 노심출구온도와 좀더 차이를 벌리면서 감소하게 된다.

이러한 요인들은 전반적으로 2항에서 기술된 바와 같이 관류형 나선형 증기발생기의 열수력 모델에 기인하고 있기 때문인 것으로 평가된다.

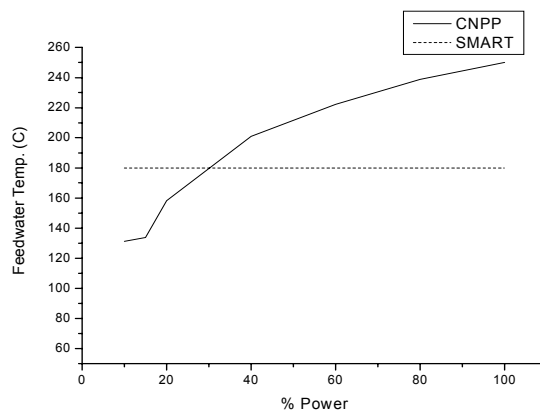


Fig. 5 Feedwater Temp. vs. Percent Power

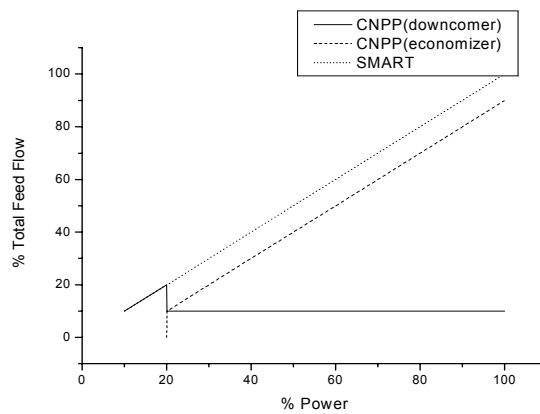


Fig. 6 Total Feed Flow vs. Percent Power

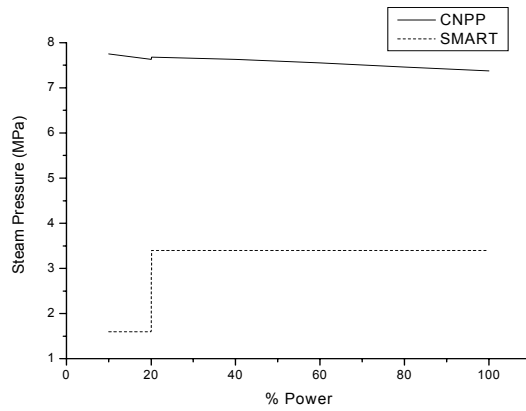


Fig. 7 Steam Pressure vs. Percent Power

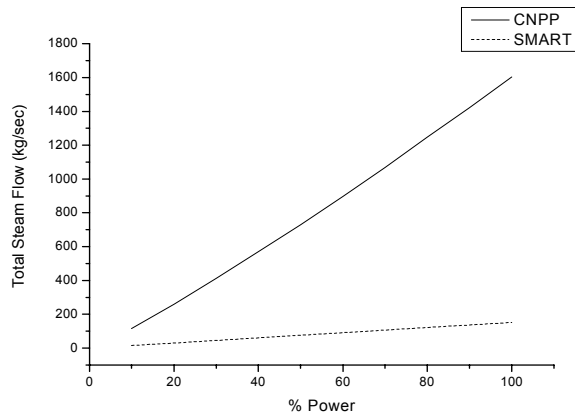


Fig. 8 Total Steam Flow vs. Percent Power

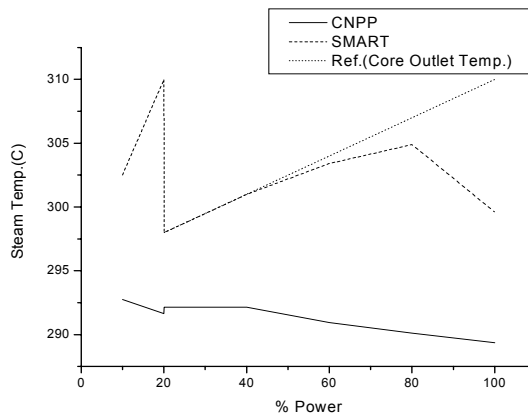


Fig. 9 Steam Temp. vs. Percent Power

5. 결론

본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SMART의 경우 급수온도가 출력에 관계없이 일정하도록 설정되어 있는데, 급수유량이 저유량에서는 전열관내 급수온도가 일차측 냉각재의 온도와 거의 같게 되므로 급수온도가 별로 영향을 미치지 못한다. 따라서 급수온도를 출력 대비 일정하게 하는 것이 가능하다.

(2) SMART의 경우 5% 출력 이상 전 출력에서 급수가 급수노즐을 통해 선형으로 비례하여 공급되며 5% 출력 이하에서는 정격유량의 5%가 계속 공급된다.

(3) SMART의 경우 20% 출력 이하에서는 증기압력은 1.6 MPa로 일정하게 유지하며 20% 출력 이상에서는 증기압력은 터빈유량을 조절하여 3.4 MPa로 일정하게 유지한다. 이는 일정한 급수온도와 조합하여 엔탈피 차를 일정하게 유지할 수 있게 하며, 결과적으로 급수유량을 제어하여 출력 제어를 가능하게 하는 관류형 증기발생기의 채택으로 인한 주요 특성이기도 하다.

(4) 상용로의 경우 출력이 증가함에 따라 총증기유량은 증가하나 선형으로 비례하지 않는다. 출력이 증가함에 따라 엔탈피 차가 줄어들어 증기유량이 다소 증가하게 된다. SMART의 경우 출력이 증가함에도 엔탈피 차가 일정하여 유지됨으로서 총증기유량은 선형으로 비례하여 증가하며 급수유량과 동일하다.

(5) 상용로의 경우 증기온도는 포화온도이므로 출력 대비 증기온도의 거동은 증기압력의 거동과 같다. SMART의 경우 20% 출력 이하에서의 증기온도는 노심출구온도와 거의 일치한다. 이는 급수유량이 저유량인 경우에는 전열관내 급수온도가 과열증기 영역에 의해 지배되고 있기 때문이다. 20~40% 사이 출력에서의 증기온도는 일차측 노심출구온도와 거의 일치하여 상승하다가, 약 40% 출력부터는 증기온도는 노심출구온도와 점차 차이를 갖기 시작하며 약 80% 출력에서 고점을 이룬다. 약 80% 출력 이상에서의 증기온도는 노심출구온도와 좀더 차이를 벌리면서 감소하게 된다. 이러한 요인들은 전반적으로 관류형 나선형 증기발생기의 열수력 모델에 기인하고 있기 때문인 것으로 평가된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 일체형원자로 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) "Basic Design Report of SMART", KAERI/TR- 2142/2002, KAERI, 2002
- (2) J. Yoon, etc, "Development a Computer Code, ONCESG, for the

Thermal-Hydraulic Design of a Once-Through Steam Generator," Nucl. Tech.,
Vol. 37, No. 5, p. 445-454, 2000

- (3) "Design Requirements for the Main Steam and Feedwater Systems
Components", NO291-FS- DR310-C, KAERI, 1995