

관류형 증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석 프로그램, ONCESG, 의 개발

윤주현, 김금구, 이두정, 장문희
한국원자력연구소

요약

증기발생기가 원자로압력용기안에 위치한 일체형원자로의 개발을 위해서 가장먼저 개발되어야 할 요소기술은 관류형 증기발생기의 설계기술이다. 증기발생기는 기존의 상용로에서 사용되고 있는 재순환형 증기발생기와 관류형 증기발생기로 분류 할 수 있는데, U-튜브를 사용하는 재순환형 증기발생기의 경우 습분분리기와 증기건조기 등이 많은 공간을 요구하고 있고, 또한 증기발생기를 압력용기 안에 위치시킬 경우 일차측과 이차측의 냉각수 유로형태, 유동장의 안정성 등의 문제때문에 일체형원자로에서는 관류형 증기발생기의 도입이 일반화 되어있기 때문이다. 본 연구에서는 관류형(직관 및 나선 전열관형) 증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석을 위한 프로그램, ONCESG를 개발했다. 개발된 모델링 및 컴퓨터코드의 검증에 위해 외국의 관류형 증기발생기(직관형:미국/영국의 SIR, 나선형:일본의MRX, SPWR)의 설계자료를 ONCESG프로그램을 사용해 모사한 결과와 이미 발표된 설계자료와의 비교분석을 수행했다. 모사결과 계산된 관류형 증기발생기의 열전달면적, 압력 및 온도분포가 외국의 발표된 설계자료와 잘 일치했으며, 개발된 ONCESG코드를 일체형 원자로의 개념설계시 다양한 목적으로 활용 할 수 있음을 보였다.

1. 서론

현재 세계각국에서 개발되고있는 대부분의 중소형신형원자로는 compact한 설계 및 안전성향상 등의 여러가지 이유로인해 일체형으로 개발되고 있으며, 일체형원자로의 개발을 위해서는 관류형 증기발생기의 설계기술개발이 선행되어야한다. 본 연구는 이러한 배경에서 관류형(직관 및 나선 전열관형) 증기발생기의 설계 및 해석과 관련하여 증기발생기의 열수력학적설계의 기본이 되는 열전달 면적의 계산과 증기발생기의 성능분석을위한 프로그램의 개발을 목적으로 하고있다.

관류형 증기발생기는 직관을 사용하는 경우와 나선전열관을 사용하는 경우가 있는데, 직관형은 설계와 제작이 용이하고 일,이차계통의 압력강하가 작다는 장점을 가지고있다. 그러나, 직관을 사용하는 관류형 증기발생기는 과열증기를 발생시키기 위해 전열관의 길이가 어느정도 이상 길어야하며, 따라서 증기발생기의 길이가 길어져야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기위해 전열관을 코일 형태로하여 작은수의 긴 전열관을 사용한 설계개념이 나선전열관형 증기발생기이다. 나선전열관을 사용한 증기발생기는 다음과 같은 이유로 인해 직관을 사용한 증기발생기에 비해 열전달 효율이 높은 것으로 알려져있다. 1) 전열관이 길어지면 과냉각영역 및 과열증기 영역에서 필요로하는 열전달 면적은 거의 변하지 않는 반면 비등 영역이 차지하는 비율이 커진다. 그런데 비등 영역의 비등열전달 계수가 단상인 과냉각 및 과열증기 영역의 열전달 계수보다 훨씬 크기때문에 결과적으로 전체적인 평균 열전달 계수가 커지게 된다. 2) 전열관의 수가 작아질수록 이차측과 일차측 모두 유로단면적이 감소하는 효과가 있기 때문에 유속이 빨라져 열전달 계수가 커지는 효과가 있다. 3) 나선전열관속에서 유체가 흐르는 수직방향으로 원심력에 의한 이차와류가 형성되기 때문에 전열관 안쪽에서 열전달 계수가 증가 할뿐만아니라, shell side에서도 직관형의 경우 냉각수가 전열관다발과 평행하게 흐르는데 반하여 나선전열관을 사용하는 경우 냉각수가 전열관과 수직으로 흐르게 되어서 역시 열전달계수를 상승시키는 역할을 한다. 나선전열관형 증기발생기는 위에 설명된 이유로인해 열전달 효율이 높아져 작고 compact한 증기발생기를 설계 할 수 있는 장점외에도 여러 가지 장점들이 있으나[1], 설계 및 제작이 어렵다는 단점이 있다.

한국원자력연구소에서는 일체형원자로의 개념설계를 수행하고 있는데, 이를위해서는 관류형증기 발생기의 크기 및 형태의 결정을위해, 정량적으로 관류형 증기발생기의 열수력학적 성능을 평가 할 수 있는 컴퓨터 코드의 필요성이 대두 되었다. 예를들면 직관형과 나선전열관형 증기발생기의 장단점, 또는 원자로의 CSB(Core Support Barrel)과 PV(Pressure Vessel) 사이의 공간에 여러개의 증기발생기를 사용하는 모듈러타입과 하나의 유니트를 사용하는 형태에 대한 정량적인 비교평가를 통한 증기발생기 형태에대한 선정이 필요하다. 본연구를 통해 개발된 ONCESG 프로그램은 위와같은 목적의 업무를 수행하기위해 직관형과 나선전열관형 증기발생기를 모두 모델링 할 수 있으며, 그외의 다양한 목적으로도 사용 될 수 있다. 이 논문의 나머지 부분에서는 관류형 증기발생기의 모델링 및 수치해법, ONCESG 프로그램의 검증을 위한 모사 계산, ONCESG 프로그램의 활용방안에 대해 기술했다.

2. 관류형 증기발생기의 모델링 및 수치해법

관류형 증기발생기를 모델링하기 위해서 증기발생기가 하나의 특성전열관으로 대표될 수 있다고 가정했다[2,3]. 이 특성전열관 안쪽에서의 물과 증기의 혼합된 형태에 따라 증기발생기를 3개의 영역으로 나누었는데, 과냉각, 비등 그리고 과열증기 영역이 그것이다. 이차측의 급수는 과냉각 상태로 특성전열관으로 주입돼 과열증기로 변해 증기발생기를 떠나며 일차측 냉각수는 전열관 바깥쪽에서 이차측과 반대방향으로 흐르며 이차측에 열을 전달해준다. 증기발생기의 수치모사를 위해서는 위의 3개의 영역과는 관계없이 임의의 수의 control volume을 사용해 모사할 수 있도록 프로그램을 개발했다. 복잡한 증기발생기를 수학적으로 모델링하기 위해 다음의 가정들을 도입했다. 1) 물과 증기등 액상의 혼합상태에 관계없이 전열관의 축방향으로는 열전달이 없다. 2) 각 control volume 내에서는 균질한 유체의 특성을 가지고 있다. 3) 비등영역에서는 물과 증기의 두 상사이에 열적평형을 유지하고 있다. 4) 일차측과 이차측 유체의 역류는 허용되지 않는다. 5) 일차측 유체는 상의변화가 없는 것으로 가정했다. 특성전열관의 물리적 모델링을 위해서는 각영역에서 지배방정식, 열전달 및 압력강하 상관식, 상태방정식 이외에도 basic thermal-sizing 방정식이 필요한데 각각에 대해 차례로 기술하기로한다.

관류형 증기발생기를 수치모사하기 위해 일차측과 이차측의 질량, 에너지 보존 방정식 그리고 운동방정식을 사용했다 [1]. 질량보존 방정식은 일차측과 이차측의 유량이 상수라고 가정했고, 에너지 보존방정식은 일차측의 i 번째 control volume에서 전달된 열량이 모두 인접한 이차측의 i 번째 control volume으로 전달되었다고 가정했다. 정상상태에서의 운동 방정식은 압력강하 계산식으로 표현 될 수 있는데, i 번째 control volume에서의 총 압력강하는 같은 control volume에서의 friction, acceleration, gravity 그리고 form loss에 의한 압력강하의 합으로 계산된다. 이차측 (튜브안쪽)의 마찰압력강하, 계산을 위해서는 헬리컬튜브의 경우 Mori-Nakayama 상관식[4]을 직관형의 경우 Moody diagram [5]을 사용했다. 일차측의 마찰압력강하 계산을 위해서는 헬리컬튜브의 경우 Zukauskas의 상관식 [5,6]을 직관형의 경우 hexagonal과 square array of the rod bundle geometry에 대한 상관식 [5]을 사용했다. 그 외에도 압력강하 계산을 위해 필요한 경험적 상관식들이 많은데, 자세한 방정식은 참고문헌 [1]의 부록2에 상세히 기술되어 있고, 물과 증기의 물성치는 참고문헌 [7]에 기술되어 있는 프로그램을 사용했다.

각 control volume에서의 열전달 면적은 다음의 식을 사용해 계산 할 수 있다.

$$dA_{o,i} = \frac{dQ_{o,i}}{H_{o,i} * LMTD_{o,i}} \quad (1)$$

여기서 $dA_{o,i}$ 는 튜브의 외경에 기초한 열전달 면적이고 $dQ_{o,i}$ 는 control volume i 에서 전달되는 열량이며 $H_{o,i}$ 는 튜브외경에 기초한 평균 열전달 계수이고, $LMTD_{o,i}$ 는 일차측과 이차측의 Log Mean Temp Difference이다. 증기발생기의 thermal sizing 계산 절차에서 불확실성이 가장 많이 개입되는 곳은 방정식 (1)에서 평균 열전달계수, $H_{o,i}$ 의 계산이다. 평균 열전달 계수는 튜브의 안쪽과 바깥쪽 표면에서의 열전달 계수와 튜브의 열전도 계수의 합수로 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{1}{H_{o,i}} = \frac{1}{h_{i,i}} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2k_{w,i}} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_{o,i}} \quad (2)$$

여기서 $h_{o,i}$, $h_{i,i}$ 그리고 $k_{w,i}$ 는 각각 i 번째 control volume에서 튜브 바깥쪽 표면과 안쪽 표면에서의 열전달 계수와 튜브의 열전도 계수를 나타내는데, 전열관 재질중 Inconel-600[1,8,9], Inconel-690[1,10] 및 Incoloy-800[1,8]의 열전도계수를 위한 경험식이 ONCESG프로그램에 내장되어있다.

대류 열전달 계수는 경험적상관식을 사용해서 계산하는것이 일반화된 방법이다. 경험식에서는 열전달 계수가 Nusselt 무차원수의 일부로 주어지는데, 강제대류에서의 열전달 계수는 유체의 열적성질, 운전조건과 난류의 정도 등의 함수로 주어진다. 직관형과 나선형 증기발생기에서는 유동장의 특징이 상이하기 때문에 열전달 계수를 계산하기 위한 경험적 상관식도 다를 수밖에 없다. 직관의 안쪽에서 열전달 계수는 주로 난류의 정도 즉 유속의 함수로 주어진다. 그러나 나선형전열관 안쪽에서는 원심력때문에 전열관 축과 수직방향으로 double vortex의 이차유동장이 형성된다. 따라서 반경방향으로 diffusion 현상뿐만아니라 대류현상에 의해서도 열전달이 일어나는데, 이러한 이차대류현상에 의한 열전달이 지배적이기 때문에 직관에서보다 단위 길이당 열전달율이 향상되는 것으로 보고되고 있다 [5,11,12]. 일차측의 유동장도 직관형과 나선형의 경우 매우 다르다. 직관형의 경우 유체의 흐름방향과 전열관이 평행한데, 나선형의 경우 거의 수직인 상태가 된다. 직관다발 사이로 흐르는 유체에 대한 열전달 계수는 Weisman[13,14]이 제안한 핵연료 다발에 대한 열전달 상관식을 사용했다. 나선형 전열관다발에 대한 열전달 계수는 Zukauskas가 개발한 튜브 다발에 수직으로 흐르는 유체에 대한 열전달 상관식을 사용했다. 전열관 안쪽에서의 각영역과 일차측에서의 열전달 계수를 계산하기 위해 ONCESG프로그램에 내장된 상관식들을 직관형과 나선형 전열관의 경우에 대해 표1에 정리해 두었다.

ONCESG프로그램은 앞에기술된 지배방정식들을 임의의 수의 control volume을 사용한 반복계산법에 의해 해석한다. ONCESG프로그램의 계산의 흐름도와 반복계산도중 이차측 비등영역의 이동, 전열관의 길이가 새로계산됨에따른 control volume크기의 변화, 비등영역 경계를 포함하는 control volume에서의 평균열전달계수의 계산 등에 대한 자세한 기술은 참고문헌 [1]을 참고하기 바란다.

3. ONCESG 프로그램 검증을 위한 모사 계산

개발된 ONCESG 프로그램의 검증을 위해 MRX[15], SPWR[16,17] 그리고 SIR[18]의 설계에 도입된 관류형 증기발생기를 모사했다. 이들 세노형의 증기발생기를 모사대상으로 선택한 이유는 관류형증기발생기의 개념을 도입한 설계개념중 수치모사가 가능할 정도의 자세한 데이터가 공개된 노형이기 때문이다. MRX와 SPWR은 나선형전열관을 사용하고 있고 SIR은 직관의 전열관을 사용하고 있다. 제3장에서는 이들 관류형 증기발생기의 수치모사 결과를 기술한다.

3.1 MRX 나선전열관형 증기발생기의 모사

MRX는 일본 JAERI에서 개발중인 열출력 100 MW의 선박용원자로인데 나선형 전열관을 사용하는 관류형 증기발생기를 도입한 일체형원자로이다. MRX의 증기발생기는 388개의 Inconel-800전열관을 CSB(Core Support Barrel)와 PV(Reactor Pressure Vessel) 사이에 나선형으로 감은 구조를 갖고 있다. 나선형전열관의 배열은 반경방향으로 25열을 감았는데, 감긴 전열관의 길이를 비슷하게 하기위해 CSB쪽의 최내열은 13개의 전열관을 그리고 PV쪽 최외열은 21개의 전열관을 감아올린 구조이다. 참고문헌 [15]에 주어진 MRX 증기발생기의 제원 및 운전조건 그리고 ONCESG를 사용해 모사한 결과가 표2에 요약되어있다.

나선형증기발생기의 모델링시 반경방향으로 감긴 전열관 열의수는 일차측(shell-side)의 유로단면적 및 유속 그리고 압력강하에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유로단면적의 계산시 표2에 주어진바와 같이 25열을 사용했다. 반면에 수직방향으로 감긴 전열관의 수는, MRX설계에서는 전열관의 길이를 비슷하게 맞추기위해 각 열마다 다르게 했으나, ONCESG에서는 관류형 증기발생기를 하나의 특성전열관으로 모델링했기 때문에 각열마다 다른 전열관의 수는 모델링 할 수 없었다. 따라서 실제 MRX 설계에서는 388개의 전열관을 사용했는데 본 연구에서는 반경방향의 열의 수를 25열로 고정하고 25의 배수의 전체 전열관 수 (즉 25x15, 25x16)에 대한 모사를 했다. 그림 1과2는 각각 참고문헌 [15]에 실린 MRX 증기발생기의 온도분포도와 ONCESG를 사용해 모사한 결과이다. 일차측과 이차측의 입출력온도는 설계치가 각각 297.5/282.1과 289/185 인데 계산치는 297.5/282.6과 289/184.9이며, JAERI의 설계치와 ONCESG에 의한 계산값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 경계조건을 포함한 다른 모든 조건은 표2에 주어진바와 같고 전체 전열관의 수만 바꾸면서 민감도를 분석한 결과이다. 필요로하는 전체 열전달면적이 전체 전열관수 425 근처에서 최소값을 갖는데 이는 전체 전열관수가 증가함에 따라 일차측과 이차측의 평균온도차는 증가하는 반면에 증기발생기 전체 평균 열전달계수는 감소하기 때문이다[1]. 방정식 (1)에서 볼 수 있듯이 열전달면적은 평균 열전달계수와 일차측과 이차측의 평균온도차의 곱에 반비례하기 때문이다. 그림3에서 볼 수 있듯이 전체 전열관수 388개와 425개 주변에서 전열관 수의 변화에따른 열전달면적의 변화율이 아주 작아, 전열관수가 최소의 열전달면적이 필요하도록 선택되었다고 할 수 있다.

3.2 SPWR 나선전열관형 증기발생기의 모사

SPWR(System-integrated PWR)은 일본 JAERI에서 개발중인 1800MWt 용량의 피동형 신형원자로 개념으로서, 나선 전열관형 증기발생기를 압력용기 안에 배치한 일체형 개념을 도입하고 있다[16,17]. 1992년에 1100MWt에서 1800MWt로 용량을 격상한 설계개념을 발표한 후[17], 최근에 용량은 1800MWt로 같으면서 일차측과 이차측의 유량과 주증기 온도및 압력을 변경시킨 새로운 설계 개념을 발표했다[16]. 위의 두개의 다른 설계개념에서 필요로하는 증기발생기의 총 열전달 면적은 표3에 정리된 바와 같이 다르다. 본 연구는 개발된 ONCESG 프로그램의 검증을 목적으로 하기 때문에 위의 두 다른 설계개념을 모두 모사해 JAERI에서 발표한 설계치와 계산된 값을 비교분석하였다. 표3에는 위의 두 경우의 수치모사 결과도 함께 정리되어 있는데 계산된 총열전달면적이 4%의 오차범위 내에서 잘 맞고있음을 볼 수 있다. 또한 coldleg과 feedwater의 온도차는 1°C이내인데 이오차는 ONCESG의 모사계산시에 downcomer region이 모델되지 않았기 때문이다[1]. 그림4는 SPWR 증기 발생기 CASE I 설계개념에 대해 전체 전열관수가 변함에 따른 열전달면적의 변화를 보여준다. 총열전달 면적은 전체 전열관수 7790개에서 $1.58 \times 10^4 \text{ m}^2$ 의 최소값을 갖는데 설계에 사용된 전열관수와 열전달면적은 각각 5400개와 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 이었다. 이는 최적 전열관수보다 31% 작은 전열관수 그리고 최적 열전달면적보다 8% 많은 열전달 면적을 사용했다. 이는 증기발생기의 설계시 열전달 효율 이외에도 고려되어야 할 사항이 많이 있음을 말해준다. 예를들면 SPWR의 경우 너무 많은수의 전열관을 사용하는 경우 증기발생기가 반경방향으로 커져서 압력용기의 반경 또한 커져야하는 문제가 있었을 것으로 예측된다. 대용량 일체형원자로의 설계시 설계에 가장 영향을 많이 미치고, 주의 해야 할 사항중의 하나가 바로 반경이 큰 압력용기의 제작 가능성이다. 이에 대해서는 다음절에 더 논의되었다.

3.3 SIR 직관형 증기발생기의 모사

SIR(Safe Integral Reactor)는 미국의 ABB-CE(Asia Brown Bobery - Combustion Engineering), 영국의 RRA(Rolls-Royce & Associates, Ltd.), AEA Technology 그리고 S&W(Stone & Webster Engineering cooperation)가 공동으로 개발한 피동 일체형원자로로서 열출력 1000MWt(320MWe)로 설계되었다. SIR에서 도입하고 있는 관류형 증기발생기는 앞서 기술된 MRX와 SPWR의 나선형전열관 증기발생기와는 다르게 전열관으로서 많은 수의 Inconel-690 직관을 사용하고 있다. 참고문헌[18]에 주어진 SIR 증기발생기의 주요제원, 운전조건과 함께 ONCESG 모사결과가 표4에 요약되어 있다.

직관을 사용하는 SIR 증기발생기의 모사를 위해서 전열관의 배치는 32,736개의 전열관이 본래의 SIR 증기발생기에서 사용하고 있는, 전열관간격(pitch)이 17.3mm인 infinite triangular array를 가정했다[18]. 표4에서 볼 수 있듯이 모사결과 계산된 일차측의 coldleg 온도와 이차측의 급수온도는 0.3% 이내의 오차범위에서 잘 맞았다. 참고문헌[18]에 의하면 SIR의 증기발생기 설계개념은 12개의 모듈형 증기발생기중 1개는, 비상시나 유지보수의 목적으로, 정상운전시에도 운전하지 않게 설계되어 있다. 뿐만아니라 SIR의 관류형 증기발생기는 열전달면적에 충분한 여유도("ample margin")가 고려되었다고 발표되었다[18]. 표4의 모사결과는 위에 설명된 가동되지 않는 1개의 모듈과 충분한 여유도를 고려하지 않았기 때문에 계산된 열전달 면적에 비해 34%정도 작았다. 이런관점에서 SIR는 30%이상의 대단히 많은 열전달 여유도를 보유하고 있는 것으로 판단된다. 그림 5와 6은 전체 전열관수가 변함에 따라 열전달 면적과 평균전열관의 길이의 변화를 보여준다. 그림 4와 5의 비교를 통해, SPWR과 SIR의 서로 다른 목적의 증기발생기 설계개념을 알 수 있다. 그림4와 표3에서 볼 수 있듯이 SPWR은 전체 전열관 수가 7790개에서 최소의 필요한 열전달면적 $1.58 \times 10^4 m^2$ 을 갖는데 실제 설계에 사용된 전열관 수와 열전달 면적은 각각 5400개와 $1.7 \times 10^4 m^2$ 이었다. 반면에 그림 5와 표4에서 볼 수 있듯이 SIR의 경우 전체 전열관의 수가 8000개에서 최소의 필요한 열전달 면적이 $4.83 \times 10^3 m^2$ 이었는데 실제 설계에 사용된 전열관수와 열전달면적은 각각 32736개와 $1.114 \times 10^4 m^2$ 이었다. 여기서 SPWR의 경우는 열용량이 1800MW로서 일체형 원자로 압력용기 직경의 크기가 제작 한계치에 가까워서 될 수 있으면 작은수의 전열관을 사용하는 헬리컬 증기발생기를 도입했다. 반면에 열용량 1000MW의 SIR의 경우는 압력용기 직경의 크기에 제약받지 않으나, 직관을 사용하기 때문에 전열관의 길이가 길어지면 비례해서 증기발생기의 키가 커지므로 전열관 수를 늘리고 길이를 줄여야 할 필요성이 있다. 그러나 원자로의 천이시에도 과열증기가 나오도록 보장하기 위해서는 전열관의 길이가 어느정도 이상 길어야 하는데, 표4와 그림6에서 볼 수 있듯이 전열관 수가 SIR의 설계에 도입된 32736개 일때 길이가 5.6m 이면 되는데 SIR의 설계치는 8.5m 이다. 이와같은 이유로 인해 늘어난 열전달 면적은 사용하지 않는 모듈을 첨가하는 등의 안전 및 유지보수 등의 설계항상 측면에서 활용되었다.

4. ONCESG 프로그램의 활용방안

본 연구에서 개발된 ONCESG프로그램은 제3장에서 토의 되었듯이, 외국의 관류형 증기발생기 설계자료와의 비교를 통한 검증계산 결과 관류형 증기발생기의 설계 및 실험원자로 계통 설계시 다음과 같은목적으로 활용 될 수 있다고 판단된다.

- (1) 직관형과 나선형전열관 증기발생기의 특성비교분석 및 증기발생기의 형식결정
- (2) 관류형 증기발생기의 열전달면적의 계산을 통한 증기발생기의 크기결정
- (3) 그림 3,6,7에서 볼 수 있듯이 관류형 증기발생기의 열전달 효율을 극대화하기 위해 필요한 전열관 수의 결정을 위한 scoping계산에 활용
- (4) 증기발생기내의 온도 및 압력분포의 계산
 - 증기발생기의 기계설계시 입력으로 사용. 즉 유체기인 진동해석 및 열응력 해석에 활용
 - 계통설계시 일차측과 이차측의 온도 및 압력의 경계조건 설정
- (5) 증기발생기 내에서 일차측과 이차측의 압력강하 계산
 - RCP의 용량 결정 및 일차측의 자연순환 능력 평가에 활용
 - 급수펌프의 용량결정

위와같이 ONCESG 프로그램은 다양한 목적으로 사용될 수 있으며 실험원자로의 개발을위해 꼭 필요한 요소기술 중의 하나이다. 그러나 ONCESG프로그램을 기본설계 및 상세설계에 사용하기 위해서는 실제 개발할 실험원자로와 운전조건이 같은 조건하에서의 실험에 의한 검증이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 관류형 증기발생기(직관형 및 나선전열관형)의 열수력학적 설계 및 성능분석용 computer 코드, ONCESG,를 개발하였다. 관류형 증기발생기는 일체형 신형원자로의 설계시 가장 먼저 개발되어야 할 요소기로서 국내에서는 설계 및 제작 경험이 없는 기기이다. 본 연구에서 개발된 ONCESG 프로그램은 일체형 신형원자로의 개념설계시 제4장에서 토의된 바와같이 증기발생기 열적크기 산정 및 성능분석등의 여러가지 목적으로 유용하게 사용 될 수 있다.

개발된 ONCESG 프로그램의 검증은 일본의 MRX, SPWR 및 미국/영국의 SIR에 도입된 관류형 증기발생기의 설계자료와 ONCESG를 사용해 모사한 결과를 비교 검토하여 수행하였으며, 검증결과 증기발생기내의 온도 및 압력분포 그리고 열전달 면적이 발표된 설계자료와 잘 일치함을 볼 수 있었다. ONCESG 프로그램을 기본설계 및 상세설계에 사용하기 위해서는 실험결과와의 비교분석을 통한 더많은 검증작업이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 이두정, 관류형증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, 1995년 5월.
2. Consolidated Nuclear Steam Generator for Merchant Ship Application: A Conceptual Design, The Babcock & Wilcox Company, BAW-1243, Lynchburg, Virginia, August 1962.
3. G. Berry, Model of a Once-Through Steam Generator with Moving Boundaries and a Variable Number of Nodes, 83-WA/HT-19.
4. Y. Mori and W. Nakayama, Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes, Int. J. Mass Transfer, Vol. 10, pp. 37-59, 1967.
5. N.E. Todreas and M.S. Kazimi, Nuclear Systems I : Thermal Hydraulic Fundamentals, Hemisphere Publishing Co., 1990.
6. A.A. Zukauskas, Heat Transfer from Tubes in Cross Flow in Adv. Heat Transfer, Academic, Vol. 8, pp. 93-106, 1972.
7. 황순택, Introduction to IBM PC compatible ASME steam table with Air Properties, '90 추계 학술발표 대회 논문집, 한국원자력학회, 1990, 10월.
8. SAFE computer code and manuals, 1984.
9. ATHOS3: A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators : Volume 1: Mathematical and Physical Models and Method of Solution, EPRI NP-4604-CCM, Vol. 1, July, 1986.
10. A Calculation note for the LAZY code.
11. A. Owahdi, K.J. Bell and B. Crain, Jr., Forced Convection Boiling Inside Helically-Coiled Tubes, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1779-1793, 1968.
12. H. Ito, Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes, J. of Basic Eng., June 1959.
13. J. Weisman, Elements of Nuclear Reactor Design, Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
14. A.J. Donaldson, Once-Through Steam Generator Heat Transfer Models for SIR, Dynamics and control in nuclear power stations, Thomas Telford, London, 1991.
15. 원자력선 연구개발현황, 일본원자력연구소, 1993.
16. IAEA 중소형 원자로에 관한 기술위원회의 참석보고서, 한국원자력연구소, 1994년 5월.
17. K. Sako, et.al., Passive Safe Reactor SPWR, Proc. ANP 92, Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo (1992).
18. Simplified Passive Advanced Light Water Reactor: Safe Integral Reactor(SIR): Program Summary, ABB-CE Inc., AEA Technology, Rolls Royce and Associates Limited and Stone & Webster Eng. Co., Jun. 1990.

표1. ONCESG프로그램에 coding된 경험적 열전달 상관식

	직 관		헬리컬 전열관	
	Tube-side	Shellside	Tube-side	Shell-side
과열증기	Dittus-Boelter Bishop	Weisman Caira	Modified Bishop Mori-Nakayama	Zukauskas
핵 비 등	Chen Thom		Chen Thom Kozeki	
과 냉 각	Dittus-Boelter		Mori-Nakayama Seban-McLaughlin	

표2. MRX 증기발생기의 제원 및 운전조건과 수치모의 결과

		MRX	수치모의 결과		
입 력	열용량[MWt]	100	100	100	
	전열관수	388	375	400	
	전열관 재질	Inconel-800	Inconel-800	Inconel-800	
	전열관 내경/외경[mm]	14.8/19	14.8/19	14.8/19	
	전열관 배열	25x(13~21)	25x15	25x16	
	반경방향pitch[mm]	25	25	25	
	수직방향pitch[mm]	25	25	25	
	$D_{o,CSB}$ [m]	2.07	2.07	2.07	
	$D_{i,FPV}$	3.32	3.32	3.32	
	일차측 유량[kg/sec]	1250	1250	1250	
	이차측 유량[kg/sec]	46.67	46.67	46.67	
	Phot[MPa]	12	12	12	
	Thot [°C]	297.5	297.5	297.5	
	Psteam[MPa]	4	4	4	
	Tsteam[°C]	289	289	289	
	출 력	Tcold [°C]	282.1	282.6	282.6
		Tfeed[°C]	185	184.9	184.9
열전달면적[m ² ,내측]		754	671.4	667.4	
유효높이 [m]		2.1	1.7	1.7	
평균전열관 길이[m]		-	38.5	35.9	
일차측압력손실[kPa]	9	7.7	7.6		
이차측압력손실[MPa]	0.64	0.582	0.499		

표 3. SPWR 증기발생기의 제원 및 운전조건과 수치모의 결과

		CASE I [16]		CASE II [17]		
		SPWR	수치모의	SPWR	수치모의	
입 력	열용량[MWt]	1800	1800	1800	1800	
	전열관수	-	5412	5400	5412	
	전열관 재질	I-800	I-800	I-800	I-800	
	전열관 내경/외경[mm]	14.8/19	14.8/19	14.8/19	14.8/19	
	전열관 배열	82x(33~?)	82/66	82x(33~?)	82x66	
	반경방향pitch[mm]	25	25	25	25	
	수직방향pitch[mm]	25	25	25	25	
	$D_{o,CSB}$ [m]	2.004	2.004	2.004	2.004	
	$D_{i,PV}$	6.104	6.104	6.104	6.104	
	일차측 유량[kg/sec]	12222.2	12222.2	11944.4	11944.4	
	이차측 유량[kg/sec]	905.56	905.56	916.67	916.67	
	Phot[MPa]	13.5	13.5	13.2	13.2	
	Thot [°C]	314	314	314	314	
	Psteam[MPa]	5.49	5.49	5.3	5.3	
	Tsteam[°C]	295	295	285	285	
	출 력	Tcold [°C]	288	287.7	288	287.1
		Tfeed[°C]	210	210.3	210	209.5
열전달면적[m ² ,외측]		17000	16901.9	15900	15281.9	
유효높이 [m]		-	6.7	-	6.1	
평균전열관 길이 [m]		-	52.3	57	47.3	
일차측압력손실[kPa]		74	105.1	90	88.9	
이차측압력손실[MPa]		0.932	0.830	0.7	0.796	

표 4. SIR 증기발생기의 제원 및 운전조건과 수치모의 결과

		SIR	수치모의 결과	
입 력	열용량[MWt]	1000	1000	
	전열관수	32736	32736	
	전열관 재질	Inconel-690	Inconel-690	
	전열관 내경/외경 [mm]	10/12.7	10/12.7	
	Pitch[mm]	17.3	17.3	
	일차측 유량[kg/sec]	7500	7500	
	이차측 유량[kg/sec]	516	516	
	Phot[MPa]	15.5	15.5	
	Thot [°C]	318	318	
	Psteam[MPa]	5.5	5.5	
	Tsteam[°C]	298	298	
	출 력	Tcold [°C]	295	294.5
		Tfeed[°C]	224	223.5
		열전달면적[m ² ,외측]	11140	7374.1
		전열관 길이 [m]	8.5	5.65
		일차측압력손실[kPa]	50	46.6
	이차측압력손실[kPa]	-	24.8	

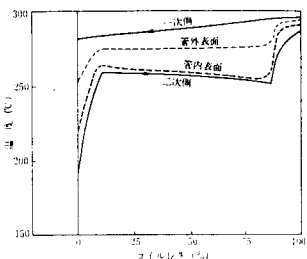


그림 1. MRX 증기발생기내 온도분포도 (JAERI 설계자료)

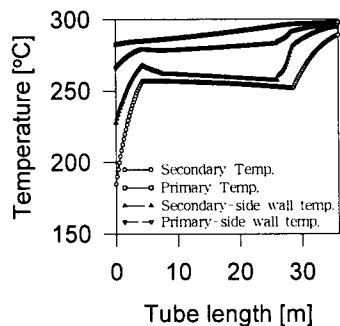


그림 2. MRX 증기발생기내 온도분포도 (ONCESG 모사결과)

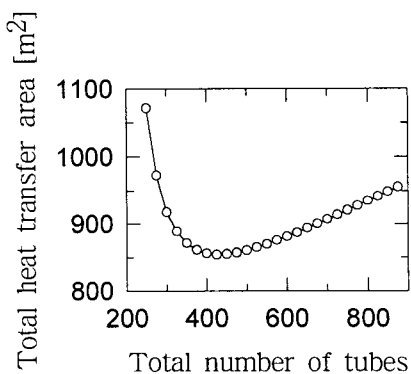


그림 3. MRX 증기발생기의 전체 전열관 수와 열전달면적

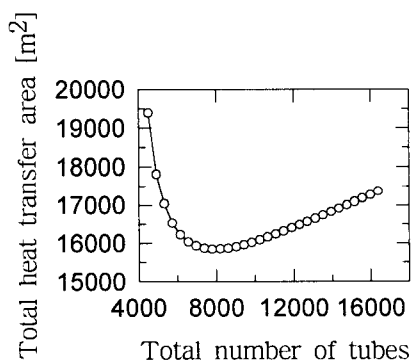


그림 4. SPWR 증기발생기의 전체 전열관 수와 열전달면적

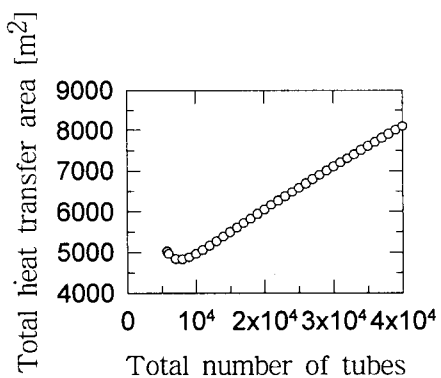


그림 5. SIR 증기발생기의 전체 전열관 수와 열전달면적

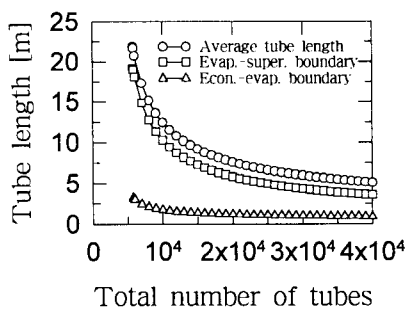


그림 6. SIR 증기발생기의 전체 전열관 수와 평균 전열관길이 및 비등영역의 경계위치