

모듈러 관류형증기발생기의 열적최적설계

윤주현, 김궁구, 이두정, 장문희
한국원자력연구소

요약

일체형원자로에 적용될 모듈러 관류형증기발생기의 열적최적설계방법론을 제시하였다. 한국원자력연구소에서 개발된 ONCESG 프로그램을 사용한 scoping계산을 통해, 직관과 나선전열관을 사용하는 관류형 증기발생기의 서로다른 최적화 방법론이 제시되었다. 또한 전체플랜트의 열평형설계와 관류형 증기발생기의 열적최적설계 사이의 상호관계 및 관류형증기발생기의 사용이 일체형원자로의 제어논리설계에 미치는 영향도 연구되었다.

1. 서론

세계의 원자력선진국에서는 원자력에너지 응용범위의 다양화 및 안정성향상 등의 여러가지 이유로 인해 중소형 신형원자로를 개발하고 있으며, 이들의 노형은 거의 모두 일체형으로 설계되고 있다. 일체형 원자로에서는 방사능으로 오염된 일차계통 냉각수를 하나의 압력용기 안에 국한시킴으로 인해 안정성이 높고, 노심 손상 가능성이 작기 때문이다. 일체형원자로에서는 일차계통유로의 단순화로 인해 자연순환에 의한 잔열제거가 가능하며, 자연순환만으로 정상출력을 낼 수 있도록 설계된 원자로도 있다. 일체형 원자로에서는 압력용기에 대한 중성자 조사량의 감소로 인해 압력용기의 수명이 길어질 뿐만아니라, 공장 조립생산 비율이 증가해 공기가 단축되고 품질보증이 용이하고, decommissioning이 간단하며, site의 재사용이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 일체형원자로의 장점은 모두 증기발생기를 압력용기안에 위치 시킴으로인해 얻어지는 것이다. 대부분의 상용원자로에서 사용되고 있는 재순환형 증기발생기의 경우 습분분리기와 증기건조기 등이 많은 공간을 요구하고 있고, 또한 증기발생기를 압력용기안에 위치시킬 경우 일차측과 이차측의 냉각수 유로형태, 유동장의 안정성 문제 때문에 일체형 원자로에서는 관류형 증기발생기의 도입이 일반화 되어 있다. 따라서 일체형 원자로의 개발을 위해서는 관류형 증기발생기의 설계기술이 가장먼저 선행되어야 할 요소기술 중의 하나이다.

본 연구는 한국원자력연구소에서 개발된 ONCESG 컴퓨터 코드를 사용해 scoping계산을 통한 관류형증기발생기의 열적최적설계에 관한 것이다. 관류형 증기발생기에는 직관을 사용하는 경우와 나선형 전열관을 사용하는 경우가 있는데, 두 형태의 관류형 증기발생기의 열적 최적설계를 위해서는 전열관의 수, 전열관 수와 압력강하 관계, pinch point 에서의 일차측과 이차측의 온도차, 증기유량, 증기의 과열정도 그리고 증기압력과 상관관계 등이 검토 되어야 한다. 증기발생기를 압력용기안에 위치시키기 위해서는 단위부피당 열전달율이 높고, 사용가능한 공간을 최대한 활용 할 수 있는 compact한 증기발생기의 설계가 요구되지만, 전체계통의 최적화를 위해서는 플랜트의 열평형설계측면도 함께 고려되어 전체계통의 효율성을 높이는 방향으로 설계되어야 하는데, 이러한 사항은 scoping 계산을 통해 고려되었다.

정량적인 비교분석을 통한 최적설계를 위해 모듈러 증기발생기의 전열관 밖으로 흐르는 일차측조건은 다음의 상수를 사용 하였다.

열용량 : 4.7 MW
일차측 유량 : 19.2 kg/sec
Hotleg 압력 : 15 MPa
Hotleg 온도 : 300°C

전열관으로는 외경이 10 mm, 두께 1.2 mm인 부식균열에 대한 저항성이 높은 Titanium 혹은 Inconel-690 합

금을 가정하였다. 직관형 증기발생기의 경우 한모듈의 단면적은 0.1653 m^2 , 그리고 나선형 모듈의 경우는 외경 10 cm의 안쪽 core와 내경 32 cm의 바깥쪽 shell 사이에 반경방향 pitch가 14 mm로 전열관다발을 10 열로 감아올린 것으로 가정하였다. 또한 전열관 속에서 이차측의 압력강하를 비슷하게 유지하기 위해 각열에 감긴 전열관의 수를 다르게 해 각전열관의 길이가 비슷한 것으로 가정하였다. 나선형 모듈의 경우 수직방향의 pitch는 11.5 mm로 가정하였고, 전열관이 수직방향으로 정열된 격자와 비정열된 격자의 비율을 각각 50%로 가정하였다. 또한 두형태 모두에서 전열관 지지구조물이 일차측의 유로단면적의 15%를 점유한다고 가정하였다.

2. 직관과 나선관류형 증기발생기의 최적설계 및 비교분석

일체형원자로에 사용될 목적으로 직관을 사용하는 관류형 증기발생기를 설계 할 때는 직관의 길이가 곧 증기발생기의 길이가 되기 때문에 현실적으로 전열관의 길이에 제한이 있게된다. 앞에 언급된 바와 같이, 한 모듈의 단면적이 0.1653 m^2 으로 고정된 경우에는 전열관 사이의 pitch를 작게해 많은 수의 전열관을 사용해서 증기발생기의 키를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 삼각형(hexagonal)의 전열관 배열을 가정했으며, 전열관 사이의 pitch를 $pitch[m]$ 로 가정하면, 아래식에의해 한 모듈당 사용가능한 전열관의 수를 결정할 수 있다.

$$N = 0.1653 / \frac{\sqrt{3}}{2} pitch^2 \quad (1)$$

그림 1(a)는 방정식 (1)을 나타내며 그림 1(b)는 이와 같이 결정된 전열관의 수를 사용하는 경우, 한 모듈에 대한 부하 4.7 MW를 전달하기위해 필요한 평균 전열관의 길이 및 총 열전달 면적을 나타낸다. 그림 1(c)는 증기발생기의 단위 부피당 전달되는 열용량을 나타내는데 pitch가 작아질수록 열전달 밀도가 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 전열관의 수가 증가 할수록 일차측(shell-side)의 유로단면적이 작아져 유속이 빨라지고, 이로인해 이차측의 이상열전달계수보다 상대적으로 작은 일차측의 단상열전달계수가 증가하기 때문이다[1,2]. 그림 1(d)는 전열관이 감긴 유효전열관 부분에서의 일차측의 압력강하를 나타내며, 증기발생기의 downcommer, orifice등에서의 압력강하는 포함되지 않았다. Pitch를 작게 할수록 열전달 밀도가 증가하고 증기발생기의 키는 작아지지만, pitch가 일정한 값(12 mm)이하로 작아지면 일차측의 압력강하가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이차측의 경우는 pitch가 작아질수록 전열관의 수가 증가하고 평균 전열관의 길이가 짧아져, 압력강하가 작아지는 것을 그림 1(d)에서 볼 수 있다. 따라서, 그림 1(a)-(d)로부터 전열관 사이의 pitch를 12 mm로 결정 할 경우, 평균 2.1 m의 전열관을 1326개 사용 할 수 있으며, 총 전열면적은 88 m^2 이고 열전달밀도는 13.4 MW/m^3 으로 결정 할 수 있다.

전열관이 나선형으로감긴 나선형 증기발생기의 설계시에는 전열관의 길이에 제한이 있는 것이 아니라 전열관이 감긴 coil의 유효높이가 주요 설계상수가 된다. 앞서 기술된 직관형 증기발생기의 설계시에는 주어진 한 모듈의 단면적에 배치 할 수 있는 최대 전열관의 수를 일차측(shell-side)의 압력강하와 관련하여 결정하였는데, 나선형증기발생기의 경우는 감아올린 전열관 coil층 사이의 반경방향 간격 P_r 이 일차측의 압력강하를 결정하는 주요상수가 된다. 나선형 증기발생기에서는 감긴 전열관의 길이가 서로 다를경우 각 전열관마다 이차측(tube-side)의 압력강하가 다르게되어, 생산된증기의 과열정도의 제어가 어렵고, 또한 유동장의 불안정 등의 문제가 발생하게된다. 따라서 전열관을 감을 경우 내측layer에는 작은수, 외측layer에는 많은 수의 전열관을 동시에 감아 전열관의 길이가 거의 균일해지도록 조정하게된다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 전열관 coil층의 반경방향 pitch P_r 이 일정한 값(13~14 mm)이하가 될 경우 일차측의(shell-side)의 압력강하가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 반경방향 pitch를 14 mm로 결정 할 경우 앞에서 기술된 나선형모듈의 안쪽 core(외경 10cm)와 바깥쪽 shell(내경 32cm) 사이에 10개의 전열관 coil층을 위치 시킬 수 있게된다.

그림 2(b) - (f)는 위에서 결정된 바대로 전열관층은 10열로 고정시키고, 각 열에 감긴 전열관의 수를 증가시켜, 전체 전열관수의 변화에따른 나선관류형 증기발생기의 특성을 계산한 결과이다. 그림 2(b)와 (c)에서 볼 수 있듯이 필요로 하는 전체 전열면적과 coil높이가 최소값을 갖는데, 이는 그림 3에서 볼 수 있듯이 전체

전열관수가 증가함에 따라 일차측과 이차측의 평균온도차는 증가하는 반면에, 증기발생기 전체 평균열전달계수는 감소하기 때문이다[1,2]. 따라서 그림 2(f)에서 볼 수 있듯이 열전달밀도 또한 전체 전열관수가 60정도에서 최대값을 갖는다. 그런데 그림 2(d)와 (e)에서 볼 수 있듯이 전열관 수가 일정한 값(70 - 80)보다 작아지면 전열관의 길이가 길어지면서 이차측(tube-side)의 압력강하가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

따라서 이상의 분석을 바탕으로 우리가 설계하는 관류형 증기발생기는 다음과 같이 결정될 수 있다. 반경 방향 pitch는 14 mm, 전체 전열관수는 70개, 이 때 총 전열면적은 23 m^2 , 평균 전열관 길이는 10.5 m, 전열관이 감긴 유효 높이는 1.1 m, 그리고 이 때의 열전달밀도는 37.2 MW/m^3 으로 결정될 수 있다. 그림 2(f)는 모듈러 증기발생기의 안쪽 core volume이 고려되지 않은 값인데, 이를 고려하면 열전달밀도는 33.6 MW/m^3 이 된다. 따라서 앞에서 결정된 바와 같이 직관을 사용하는 경우에는 전열관의 길이가 2.1 m인데, 나선형의 경우는 전열관이 감긴 유효높이가 1.1 m이므로 증기발생기의 높이를 50 %정도 줄일 수 있다. 열전달밀도 또한 나선형의 경우에 50 %이상 더 큰 것을 알 수 있다. 그러나 그림 1(d), 그림 2(e)와 그림 3의 비교에서 알 수 있듯이 직관형과 나선형의 경우 일차측과 이차측의 압력강하는 비교가 되지 않을 정도로 직관형의 경우가 작다. 따라서 직관형의 경우 현재 고려중인 전열관의 외경 10 mm 보다 작은 세관을 사용할 수 있고 따라서 열전달밀도를 높일 수 있는 가능성이 아주 많다. 그러나 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 전열관 직경을 작게 하고 pitch를 작게 할 경우 전체 사용된 전열관의 수가 급격하게 증가하며, 이로 인해 필요로 하는 전열관의 용접수가 급격하게 증가하고, tube plate에 어느 정도 밀도 이상으로 조밀하게 전열관을 용접할 수 없는 제작상의 문제점에 부딪힐 것으로 예상된다.

이제까지의 계산을 위해서는 증기유량 1.7 kg/sec, 증기압력은 3 MPa, 급수온도는 응축기의 압력 0.00739 MPa에서의 포화온도 40°C를 사용했다. 또한 직관형의 경우 일차측은 Cairn 열전달 상관식을, 이차측은 Dittus-Boelter, Chen 그리고 Bishop 열전달 상관식을 각각 과냉각, 비등, 과열증기영역을 위해 사용했다[1,2]. 나선형 증기발생기의 경우에는 일차측은 Zukauskas 열전달 상관식을, 이차측은 Seban-McLaughlin, Chen 그리고 Modified Bishop 열전달 상관식을 각각 과냉각, 비등, 과열증기 영역을 위해 사용했다.

3. 관류형 증기발생기의 열적설계 최적화

앞에서는 전열관 사이의 pitch와 압력강하, 그리고 전체 전열관수와 열전달밀도 등의 관계로부터 전열관의 수와 배열 등을 최적화하고, 직관형과 나선형 증기발생기의 서로 다른 최적화 특징을 살펴보았다. 여기서는 증기유량, 증기압력, 증기의 과열정도 그리고 일차측과 이차측의 pinch point에서의 온도차 등이 어떠한 상호 관계를 가지고 있으며, 전체계통의 열적평형에 어떠한 영향을 미치는지를, 편의상 나선전열관을 사용하는 관류형 증기발생기를 중심으로 살펴보기로 한다. 그림 4(a)-(d)는 앞에서 설계된 나선형 증기발생기의 증기압력을 변화시켰을 때의 운전특성을 보여준다. 증기발생기를 설계할 때는 천이운전시의 이차계통의 특성과, 또한 증기발생기의 크기를 적당한 크기로 유지하기 위해 pinch point에서의 일차측의 온도차를 20~30 °F 이상으로 유지하는 것이 보통이다[3]. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 증기압력이 3.8 MPa 이상이 되면 pinch point에서의 일차측의 온도차가 17°C 이하로 되고 그림 4(c)에서 볼 수 있듯이 증기압력이 3 MPa 일 때 보다 전열면적이 40%이상 증가하는 것을 볼 수 있으며, 증기의 과열 정도도 38°C이하로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 4(d)에서 볼 수 있듯이 증기압력이 올라갈수록 증기발생기의 열전달밀도가 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 증기압력이 올라가면 계통 전체의 효율을 높아지므로 증기발생기의 크기와 계통전체의 효율 사이에 최적화 설계가 필요함을 알 수 있다.

그림 5(a)~(d)는 증기압력이 3 MPa 그리고 3.5 MPa 인 경우에 대해, 증기유량을 변화시키며 증기발생기의 운전특성을 계산한 결과이다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 그림 5(a)에서도 증기압력에 따라 pinch point에서의 일차측의 온도차가 큰 것을 볼 수 있지만, 증기유량의 변화에 따른 일차측의 pinch point에서의 온도차는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이, 증기유량이 증가함에 따라 증기의 과열정도는 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 증기유량이 1% 증가함에 따라 증기온도가 8.5°C 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 증기온도를 40°C 과열로 설계시 증기유량이 4.7% 증가하면 곧바로 포화증기와 함께 물이 터빈으로 들어갈 가능성이 있다. 따라서 습분 분리기와 증기건조기가 없는 관

류형 증기발생기를 사용하는 일체형 원자로의 경우, 부하중운전을 위해서는 급수유량을 조정해서 터빈으로 물이 들어가는 경우(water carryover)와 전열관 내부의 물이 모두 증발되는 경우를 방지할 수 있도록 제어논리를 설계해야 한다. 뿐만 아니라 관류형 증기발생기를 사용하는 일체형 원자로에서는 노심 출력도 정상출력의 20~100% 범위에서는 음의 냉각재온도계수(negative moderator temperature coefficient)를 사용해 제어부의 움직임 없이 제어하는 것이 일반적이며, 이를 위해서는 복잡한 자동제어 계통이 필요하게 된다. 물론 위의 4.7%의 증기유량 변화 시 40℃의 과열증기가 포화증기가 되는 현상은 steady-state 계산결과이므로 가장 보수적인 수치이다. 원자로의 천이운전 시에는 일정한 시간(~sec order) 이내에 급수유량을 조절함으로 인해 4.7% 이상의 증기 및 급수유량이 변해도 water carryover나 전열관 내부의 물이 모두 증발되는 경우를 방지할 수 있다. 이러한 목적의 분석을 위해 현재 한국원자력연구소에서는 증기발생기의 천이운전 분석을 할 수 있는 컴퓨터 코드가 개발 중에 있다. 그림 5(c)-(d)는 증기유량이 증가함에 따라 열전달 밀도가 상승함을 보여주고 있다.

앞의 모든 계산에서는 전열관 재질로서 Titanium합금을 사용했는데, Inconel-690을 전열관 재질로 사용할 경우 전열 면적에 미치는 영향을 평가해 보았다. 앞에서 설계된 Titanium을 사용하는 증기발생기의 경우 23.0 m²의 전열 면적에 37.2 MW/cm³의 열전달밀도를 얻었는데, Inconel-690을 사용할 경우 전열면적이 21.7 m²으로 5.9%의 작은 전열면적이 필요했다. 직관형 증기발생기의 경우에는 마찬가지로 앞에서 결정된 설계상수를 사용할 경우, Titanium을 사용시 88.1 m²의 전열면적과 13.4 MW/m³의 열전달밀도를 얻었다. Inconel-690을 사용했을 경우에는 전열면적이 86.8 cm²으로 전열면적의 감소가 1.4%정도였다. 나선형 증기발생기와 직관형 증기발생기의 경우 재질을 Titanium에서 Inconel-690으로 바꿀 경우 전열면적의 감소율에 차이가 있는 것은, 나선형 증기발생기의 경우 열전달밀도가 높기 때문에 전열관재질의 열전도계수 증가가 열전달면적의 감소에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 한국원자력연구소에서 개발된 관류형 증기발생기의 열적설계를 위한 컴퓨터코드 ONCESG를 사용해 직관과 나선전열관을 사용하는 모듈형 관류형 증기발생기의 최적 설계방법을 제시하였다. Scoping 계산을 통한 전열관 사이의 pitch 및 압력강하 등의 최적 결정방법을 제시하였다. 또한 플랜트 전체계통의 열평형 설계와 관류형 증기발생기의 열적 설계에 공통적으로 중요한 pinch point에서의 일, 이차측의 온도차, 증기유량, 증기의 과열정도, 증기압 등의 최적 결정방법을 제시하였다. Titanium 및 Inconel-690 전열관 재질이 전열면적에 미치는 영향을 평가했으며 관류형 증기발생기의 사용이 일체형 원자로의 제어논리 설계에 미치는 영향도 연구되었다. 이의 보다 자세한 연구를 위해 관류형 증기발생기의 천이운전을 모델링 할 수 있는 컴퓨터코드의 개발 필요성도 언급되었다.

참고 문헌

1. 이두정, 관류형증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, 1995년 5월.
2. 윤주현, 김궁구, 이두정, 장문희, 관류형증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석프로그램, ONCESG,의 개발, '95 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
3. J.H. Rust, Nuclear Power Plant Engineering, Haralson Publishing Company, 1979.

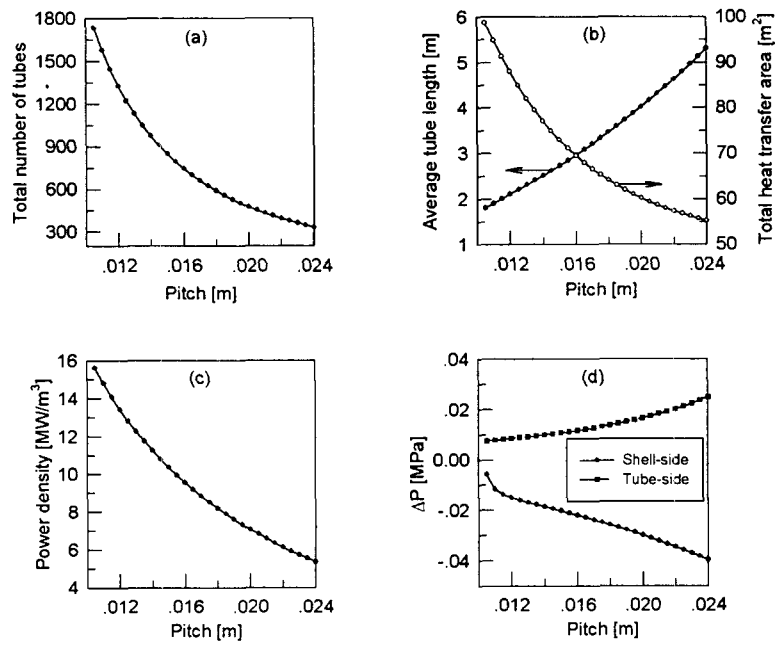


그림 1. 직관형 증기발생기의 최적설계를위한 scoping 계산

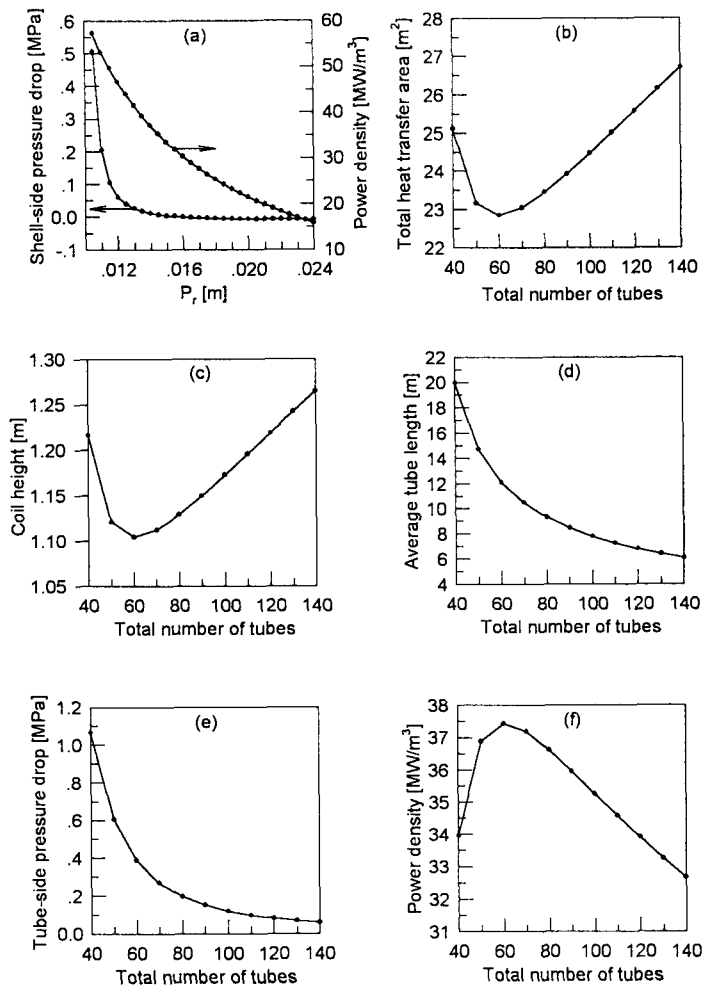


그림 2. 나선형 증기발생기의 최적설계를위한 scoping 계산

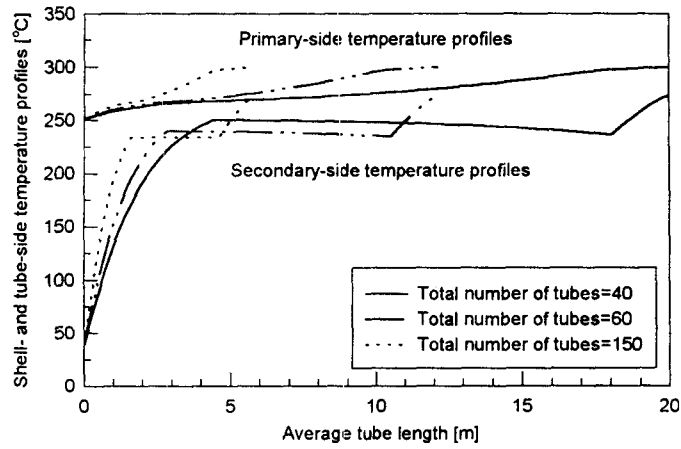


그림 3. 전체 전열관 수가 40, 60, 150인 경우의 일.이차측의 온도분포

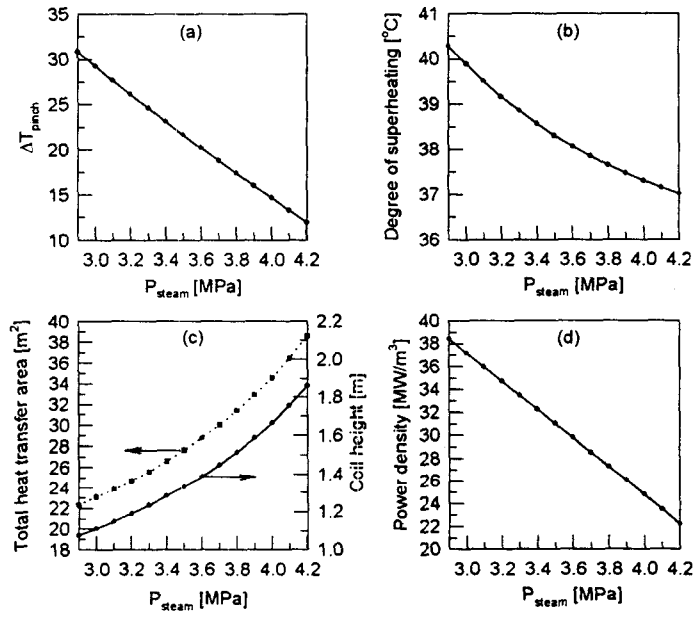


그림 4. 나선관류형 증기발생기의 증기압력변화에 따른 운전특성

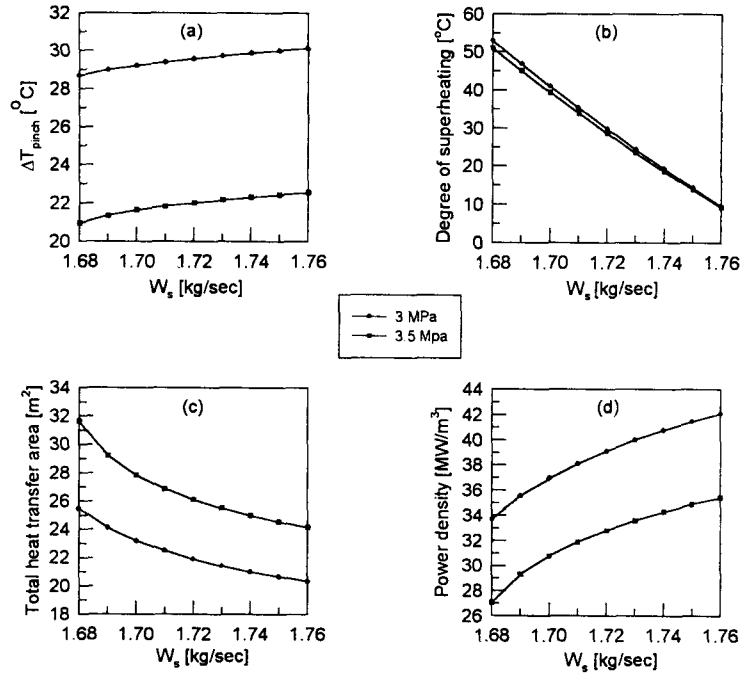


그림 5. 나선관류형 증기발생기의 증기유량변화에 따른 운전특성