2001 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

관류형증기발생기 전열관입구 오리피스 설계

Orifice Design for Once-through Steam Generator Tubes

윤주현, 김용완, 이두정, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 사서함 105

요 약

관류형증기발생기의 유동불안을 방지하기위해 전열관 입구에 설치하는 오리피스의 형상을 설계했다. 본 연구에서 추구하는 오리피스는 유동불안을 방지하기위해 요구된 큰 압력강하를 시키면서, 각 전열관 입구에 설치해야 하는 특수성 때문에 compact한 설계가 필요한데, 반면에 장기간 운전시 발생하는 crud의 영향과 열팽창 및 수축의 영향을 최소화 하기위해 유로단면적이 커야하는 상반된 설계요건을 만족해야 한다. 이러한 설계요건을 고려해 3가지의 오리피스 형상을 고려했고 경험식을 이용해 압력강하 성능 및 제작공차가 압력강하에 미치는 영향을 평가하고 추후 연구방향을 제시했다.

Abstract

Orifices are installed at each tube inlet in a once-through steam generator. The purpose of those orifices is for preventing flow instabilities inside the once-through steam generator. In this study, the orifices are designed and evaluated in terms of pressure drop performance and effect of manufacturing tolerance on the pressure drop performance. Because of the installation location of the orifices, there were contradicting design requirements, e.g., compact and high pressure drop performance but a big flow area to minimize the effect of crud deposition and thermal expansion and contraction. Three candidate orifice designs were proposed and evaluated. Further study directions are also proposed.

I. 서 론

일체형원자로에서 도입하고있는 관류형증기발생기는 과냉각상태의 급수를 받아들여 과열증기를 생산해 낸다. 따라서 냉각수는 전열관내부에서 과냉각, 비등 그리고 과열증기상태로의 상변화를 하며 흐른다. 이러한 비등전열관 내에서는 정적 그리고 동적 유동불안을 나타낼 가능성이 많은 것으로 알려져 있다. 이러한 유동불안을 방지하기위한 설계방안은 여러가지가 있을 수 있으나, 가장 현실적인 방안은 전열관입구에 유동저항이 큰 오리피스를 설치하는 것이라 할 수 있다 [1]. 본 논문은 이와 같은 유동불안

정해석을 통해 결정된, 전열관 입구에서 필요한 압력강하를 구현해 줄 수 있는 오리피스의 설계에 대한 연구이다.

본 연구에서 추구하는 오리피스 설계는 각각의 많은 전열관 입구에 설치해야 하므로 구조가 간단하고 compact해야 하고 또한 유동불안을 방지하기위해 요구되는 큰 압력강하를 일으켜야 하는반면, 장기간 운전중 발생하는 crud 및 열팽창.수축에 의한 영향을 최소화 하기위해 유로단면적이 큰 설계이어야 한다. 또한 제작오차의 영향을 최소화 하기위해 오리피스 치수의 오차가 압력강하 오차에 미치는 영향이 작은 설계 이어야 한다.

본 연구에서는 이러한 설계요건을 염두에 두고 3가지의 서로 다른 설계를 고안 했으며, 각 오리피스 설계의 특징에 적합한 압력강하 경험식을 적용해 설계된 오리피스의 압력강하 성능과 제작공차가 오리피스 설계압력강하의 일관성에 미치는 민감도를 분석했다.

II. 오리피스 설계

본 연구에서는 그림 1, 2 그리고 3에 도시한 바와 같은 형태의 오리피스를 설계 안으로 상정하고 앞에서 언급한 설계요건 측면에서 평가하였다. 세가지 설계안에 대한 비교평가를 목적으로 같은 길이와 직경의 오리피스에서 비슷한 압력강하가 일어나는 치수를 정했으며, 이에대한 성능 및 민감도 평가를 수행했다. 그림 1의 나선형 오리피스는, 나사산의 높이와 폭이 각각1.5mm이고 나사산의 피치가 3mm인 수나사 형태의 오리피스코아를 내경이 7.7mm인 오리피스외피에 넣은 형태이다. 오리피스코아를 오리피스외피에 고정하는 방법은 오리피스외피 밖에서 오리피스코아의 나사산을 따라 레이저 용접을 하는 방안과, 오리피스코아의 나사산에 다시 작은 나사산을 만들고, 오리피스외피 내부에 같은크기의 암나사를 만들어 체결하는 방안이 있을 수 있다. 나선형 오리피스 설계에서는 유체가 오리피스코아의 나사홈과 오리피스외피가 형성하는 1.5X1.5 mm^2 크기의 나선형의 사각홈을 따라 흐른다. 본 설계안의 압력강하는 나선형의 사각홈으로 유체가 고속으로 흐르면서 형성되는 난류에의한 마찰압력강화와 작은곡율반경의 지속적인 방향전환에의한 form loss의 합으로 나타난다[2].

그림 2의 의 미로형 오리피스에서는 오리피스코아에 깊이 1.5mm 폭 3mm인 환형홈을 4.5mm 피치 간격으로 만든후, 환형홈과 홈 사이를 180°간격으로 엇갈리게 1.5X1.5mm^2의 유로를 파놓은 형태이다. 나선형 오리피스에서와 마찬가지로 오리피스 코아를 내경이 7.7mm인 오리피스외피 안에 고정시켜 제작한다. 오리피스코아를 외피에 고정시키는 방안은 나선형 오리피스에서와 같은 방안을 사용 할 수 있을 것이다. 미로형 오리피스에서는 유체가 환형홈과 홈사이를 연결하는 사각유로를 통과하자 마자 대칭 wye에서와 같이 90° 의 방향전환과함께 유량배분이 일어난다. 이과정에서의 압력강하는 곡율반경이 영인 90° 엘보에서의 압력강하 현상과 유사하다. 축방향으로 90°방향전환을 한 유체는 다시 반경방향으로 180° 방향전환을 하게 되고, 배분되었던 유체는 다시 만나 90°방향전환을 하며 다음 환형홈으로 흘러 들어가게 된다. 이 단계에서의 압력강하는 대칭 wye에서와 같이 유동혼합 및 90° 방향전환에의해 일어나며, 유동장이 정면충돌하면서 혼합될 때 발생하는 충격압력강하와 곡율반경이 영인 90°회전에 따른 압력강하의 합으로 나타난다[2].

그림 3의 간극형오리피스는 전형적인 labyrinth seal형태의 오리피스로서 유체가 좁은 간극을

통과 할 때의 마찰에의한 유체 저항과, 간극통과후 환형홈내에서의 에너지 손실에의해 압력이 강하하게 된다. 환형홈 내에서의 에너지 손실은 환형홈내부의 위치에따라 유체가 보유하고 있는 에너지의 차에 의한 것과, 다음 간극으로 유체가 들어갈때의 유로단면적의 급작스런 변화에 의한 압력강하의 합으로 구성된다[2]. 다음장에서는 기술된 3가지 설계안에 대한 압력강하 성능 및 제작공차가 압력강하에 미치는 영향 측면에서 평가 하였다.

III. 오리피스에서의 압력강하 평가

오리피스에서의 압력강하 평가방법은 경험식에 의존했다[2]. 본 논문은 위에 기술된 세가지의 서로다른 오리피스 설계의 장단점 비교평가를 통해 추후 제작 및 실험을 통한 심도있는 연구방향의 설정을 목적으로 하기 때문에 현단계에서 경험식에만 의존하는 데는 큰 문제가 없으리라 판단된다. 또한 비교평가를 목적으로 하는 계산이기 때문에 같은크기의 오리피스에서 비슷한 크기의 압력강하를 주는 치수를 정하고, 제작공차가 압력강하변화에 미치는 영향을 평가하였다. 오리피스의 크기로는 외피내경을 7.7mm 유효부분길를 60mm로 가정하였다. 그림3의 간극형오리피스에서는 오리피스코아와 오리피스외피 사이에 간격이 있기 때문에 오리피스코아를 외피에 고정하기위한 설계를 함께 보여주고있다. 또한 오리피스 유로의 표면 거칠기도 0.025mm로 같게 가정 하였다. 이 수치는 상용 탄소강배관의 표면거칠기 (0.05mm)보다는 작지만 선삭가공 표면거칠기 (0.006mm) 보다는 큰 값이다. 3가지 설계의 압력강하를 평가할 때 오리피스 입구 및 출구에서의 압력강하는 무시했다.

오리피스에서의 압력강하를 평가하기 위한 오리피스 통과유량은 다음과 같이 정했다. 관류형증기발생기 전열관입구에 설치하는 오리피스의 주 목적은 정상운전 열출력범위내에서 증기발생기 카세트내의 서로다른 전열관사이에 병행유로 유동불안을 방지하기 위함이다. 그런데 관류형증기발생기의 유동불안은 유량이 작을수록 취약한 것으로 알려져있다 [1,3]. 따라서 오리피스의 성능을 평가하기위한 목적으로 저유량 운전조건을 가정했으며, 오리피스입구에서의 열수력변수 및 병행유로 유동불안을 방지하기위한 오리피스에서 요구되는 최소압력강하를 표1에 정리한 바와 같이 가정했다[3,4].

나선형 오리피스에 대한 압력강하를 평가하기 위해서는 Idelchik handbook[2]의 Diagram 6-2 경험식을 사용했다. 사용된 경험식 Diagram 6-2는 smooth한 배관에 대한 경험식이기 때문에 표면거칠기는 고려하지 못했지만, 거칠기를 고려하면 압력강하가 커져 보수적인 설계방향이 된다. 또한 동 경험식은 배관의 곡율반경과 열수력직경의 비가 3보다 크거나 같은 ($R_o/D_o \geq 3$) 완만하게 감긴 튜브에 대한 경험식인데 반해, 나선형 오리피스 유로의 곡율반경과 열수력직경의 비는 1.83으로 작아 동 경험식의 적용범위를 벗어난다. 이 또한 곡율반경이 작을수록 form loss가 커져 압력강하가 커지므로 보수적인 설계방향이 된다. 동 경험식으로 계산한 그림1의 설계치수에 대한 압력강하, 그리고 오리피스코아의 나사산 높이, 넓이 그리고 나선형유로의 축방향 넓이에 모두 -10μm와 +10μm의 제작 공차가 있다고 가정했을 때 각각 계산된 압력강하를 표2에 정리했다. 계산된 압력강하는 오리피스에서 요구되는 압력강하 25kPa보다 크게 계산되었으며, ±10μm의 제작공차를 고려했을때 설계값으로부터의 압력강하 오차는 4%이내로 제어 가능함을 볼 수 있었다.

그림1의 나선형 오리피스 유로의 곡율반경은 위에 언급된 바와 같이 Idelchik handbook[2]의 Diagram 6-2 경험식의 적용범위보다 작다. 이와 같이 작은 곡율반경에 대한 압력강하를 계산 할 수 있는

경험식을 발견 할 수 없었으며, 적용범위를 벗어남으로 인한 서로다른 경험식의 압력강하 평가결과의 오차정도를 알아보기 위해 다른 경험식을 적용해 압력강하를 평가해 보았다. Ito[5]가 발표한 smooth 곡관에서의 마찰계수는 다음과 같다.

$$f = \left[0.029 + 0.304\left\{\mathrm{Re}(r_o / R)^2\right\}^{-0.25}\right] \Big/ \left(R / r_o\right)^{1/2} \; ; \; 0.034 < \mathrm{Re}(r_o / R)^2 < 300$$

여기서 Re는 Reynolds수, r_o는 튜브반경 그리고 R은 튜브중심축의 곡율반경이다. 그림1의 오리피스 치수에서는 $\mathrm{Re}(r_o / R)^2$ 값이 427 이어서 Ito의 경험식 또한 적용범위 밖에 있는 것을 알 수 있다. Ito의 마찰계수를 사용해서 계산한 압력강하 값은 20.3 kPa로 계산 되었다. 또한 러시아의 SKBK[6]사에서 개발한 곡관의 압력강하식은 다음과 같다.

$$\Delta P = \left(f_s \frac{L}{d} + \frac{0.1}{p} \frac{L}{D_c} \right) \frac{r\, v^2}{2}$$

여기서 f_s는 직관의 마찰계수, L은 유로길이, d는 튜브내경, L은 유로길이, D_c은 튜브 coil직경이다. 위의 식을 이용해 그림1의 나선형오리피스 치수에 대한 압력강하를 계산한 결과는 23.9 kPa이었다. 여기서 직관에서의 마찰계수 f_s를 계산할때 튜브의 거칠기는 0.025 mm로 가정했다. 따라서 Idelchik과 Ito식을 이용한 압력강하 계산결과는 40%정도의 오차를 보이고 있다. 이는 두 경험식 모두 적용범위를 벗어난 유로에 대해 적용했기 때문이다.

그림2의 미로형 오리피스의 압력강하를 계산하기 위해서는 Idelchik handbook[2]의 Diagram 6-4와 7-23 경험식을 사용했다. 앞서 기술했듯이 미로형 오리피스에서의 압력강하는 대칭 wye에서와 같이 축방향으로의 90^o 방향전환시의 압력강하와, 다시 대칭 wye에서의 유동혼합과 90^o 방향전환시의 압력강하가 반복된다. 대칭 wye에서의 90^o 방향전환시의 압력강하 현상을 고려하기위해 Diagram 6-4경험식을 사용했다. 이때 유체가 90^o회전후 균등배분된다고 가정하여, 입구유로 단면적으로 미로형 오리피스의 환형홈 사이를 이어주는 유로단면적의 절반을 가정했다. 또한 대칭 wye에서의 유동혼합과 90^o 방향전환시의 압력강하를 고려하기위해 Diagram 7-23의 경험식을 사용했다. 환형 홈에서의 180^o회전과 이때의 마찰에 의한 압력강하는 무시했다. 이는 환형홈에서의 유로단면적이 환형홈사이를 연결하는 유로의 단면적에 비해 작고, 또한 이 영역이 위에서 고려한 두 경험식에서 고려된 flow separation효과가 실제로 일어나는 영역이기 때문에 이부분 에서의 압력강하가 이미 고려 됐다고 볼 수 있었기 때문이었다.

경험식 Diagram 7-23에서 볼 수 있듯이 환형홈 사이를 연결해주는 유로의 단면적에 비해 환형홈에서의 유로단면적이 작을수록 압력강하가 커진다. 이는 환형홈에서 유로단면적이 작을수록 유속이 빨라지고, 따라서 환형홈내에서 유동이 충돌.혼합 할 시에 많은 에너지를 잃게 되기 때문이다. 그런데 그림 2의 미로형 오리피스 치수에서는 환형홈의 유로단면적(1.5X3 mm)을 환형홈사이를 이어주는 유로단면적(1.5X1.5 mm) 보다 2배 크게 설계 했는데, 이유는 미로형 오리피스의 경우 계산된 압력강하가 너무 커서, 이를 표1에서 요구한 압력강하에 맞추기 위한 이유가 있었다. 또 다른 이유로는 미로형 오리피스코아의

제작용이성을 고려했다. 오리피스코아 제작시 환형홈사이를 이어주는 연결유로를 만들기위해서는 인접한 홈의 나사산을 상하지 않게 해야 하는데, 이때 많은 어려움이 예상되었기 때문이다. 참고로 환형홈 유로의 단면적을 1.5X1.5mm로 할경우 계산된 압력강하는 67kPa이나 되었다. 제작공차의 민감도를 보기위해 미로형 오리피스에서 가장 민감한 부분인 환형홈 사이의 연결유로의 제작공차가 ±10μm일때의 압력강하영향을 표2에 정리했다. 환형홈의 유로단면적은 연결유로의 단면적에 비해 크기 때문에 제작공차의 영향이 작을 것으로 예상해 민감도 계산에서는 고려하지 않았으며, 압력강하 오차는 3%이내 인 것을 볼 수 있었다.

그림 3의 간극형 오리피스의 압력강하계산을 위해서는 Idelchik handbook[2]의 Diagram 9-27 경험식을 사용했다. 전형적인 labyrinth 밀봉에서의 압력강하 경험식인데, 특이한 것은 이 경험식에 의하면, 환형홈의 깊이가 어느정도 이상 깊어지면 환형홈의 깊이가 압력강하에 영향을 미치지 않는 다는 것이다. 그림 3의 치수에서 오리피스코아의 환형홈내경이 4.48mm로 되어있는데, 환형홈 내경이 최대 6.76mm가 되어도 계산된 압력강하는 현재의 치수에서 계산된 값과 같다. 단지 오리피스를 장기간 사용시 curd가 발생 할 수 있고, 이의 영향을 최소화 하기위해 환형홈의 깊이를 필요이상으로 깊이 설계했다. 표2에 그림 3의 치수에서의 압력강하와, 오리피스코아와 외피 사이의 간극 제작공차를 ±10μm로 가정했을때의 압력강하 계산값 들을 정리했다. 표2에서 볼 수 있듯이 간극형 오리피스에서는 간극의 넓이가 압력강하에 미치는 영향이 너무커서 (~35%), 제작공차를 고려 할 때 오리피스에서 일관된 압력강하를 얻기 어려울 것으로 판단되며, 관류형증기발생기의 전열관입구 오리피스로서 채택 할 수 없는 설계이다.

IV. 결 론

관류형증기발생기의 유동불안을 방지하기위한 목적의 전열관입구 오리피스를 설계했다. 경험식을 이용해 3가지의 서로다른 설계에 대한 압력강하 성능을 평가하였으며, 제작공차가 압력강하에 미치는 영향을 평가하였다. 간극형 오리피스의 경우 제작공차가 압력강하에 미치는 영향이 너무커 의도된 목적으로는 사용 할 수 없다고 판단된다. 압력강하성능 측면에서는 미로형 오리피스가 월등히 우수하고, 제작공차의 영향도 최소인 것으로 나타났다. 그러나 동 설계의 경우 환형홈 사이의 연결유로를 제작하는데 어려움이 예상된다. 나선형 오리피스의 경우 압력강하를 평가하는데 있어서 경험식이 적용범위를 벗어나 압력강하계산에 불확실도가 큰 것을 볼 수 있었으나, 압력강하 성능이 좋고, 제작공차의 영향이 작으며 제작에 어려움이 없는 설계로 평가 되었다. 추후 연구로는 미로형 오리피스의 경우 제작성을 검토해야 하고, 나선형 오리피스의 경우 실험을 통해 압력강하 성능을 검증하고 실험식을 개발 할 필요가 있다.

References

1. J.M. Delhaye, et al., “Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering”, McGraw-Hill Book Comp., 1981.

2. I.E. Idelchik, “Handbook of Hydraulic Resistance”, Hemisphere Publishing Co., 1986.

3. 강한옥, “SMART 증기발생기 이차측튜브입구 오리피스 throttling 계수평가”, SMART-FS-CA009, 1999.

4. Juhyeon Yoon, et. Al., “Development of a Computer Code, ONCESG, for the Thermal-Hydraulic Design of a Once-Through Steam Generator”, J. of Nuc. Sci. and Tech., Vol. 37, No. 5, pp.445~454, May 2000.

5. H. Ito, “Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes”, Transactions of the ASME, June 1959.

6. SKBK, “Steam generator with helically coiled heat transfer area, Analytical Method (IZH ER.500609.001)”, SKBK internal report, 1984.

표1. 오리피스평가를 위해 가정된 열수력변수

오리피스당 유량	0.0042 kg/sec
오리피스 입구압력	3.59 MPa
오리피스 입구온도	50 ^{o}C
오리피스에서 요구되는 압력강하	25 kPa

표2. 오리피스 압력강하 및 제작공차 영향평가 결과

	나선형 오리피스	미로형 오리피스	간극형 오리피스
설계압력강하 [kPa]	33.7 (Idelchik) 20.3 (Ito) 23.9 (SKBK)	35.6	31.6
-10μm 제작공차를 고려한 압력강하 [kPa]	35.0 (Idelchik) (+3.69%)	36.6 (+2.71%)	42.6 (+34.95%)
+10μm 제작공차를 고려한 압력강하 [kPa]	32.5 (Idelchik) (-3.54%)	34.7 (-2.62%)	24.6 (-22.2%)

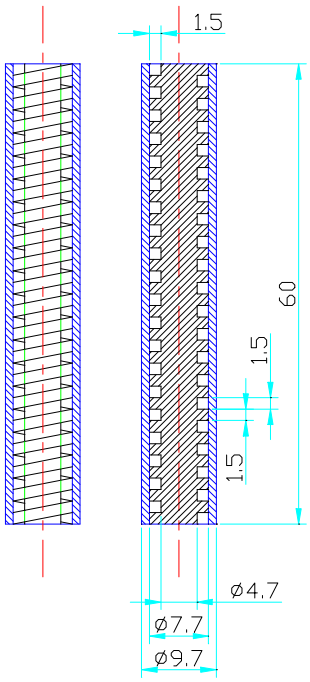

그림1. 나선형 오리피스

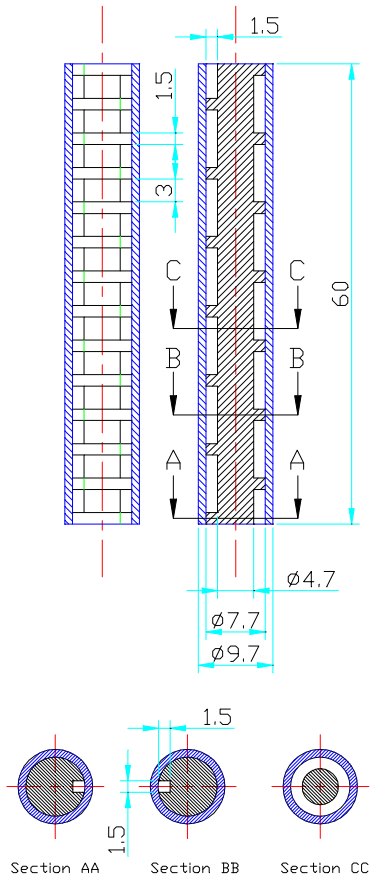

그림2. 미로형 오리피스

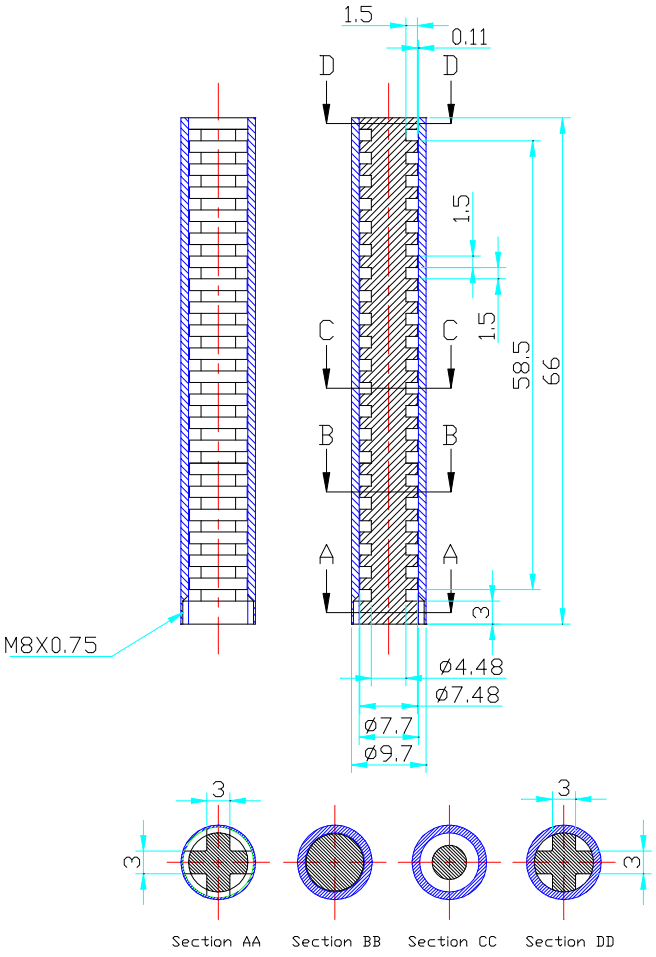

그림3. 간극형 오리피스