2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 캐비테이션 방지 다단오리피스 설계

# Development of Anti-Cavitation Multi-Stage Orifice Design

김창호, 정장규, 김은기, 노태선

한국전력기술㈜ 설계개발단

요약

원자력발전소와 화력발전소에서 높은 압력을 감소시키기 위해 수많은 오리피스가 사용되고 있으나, 원자력발전소에서 오리피스 후단 배관이 파손되는 사례가 여러 차례 보고된 바 있다. 이러한 파손의 근본적인 원인은 운전 중에 발생되는 오리피스의 캐비테이션 침식에 기인하는 것으로 보고되었다. 따라서, 높은 압력의 감압을 위해서는 캐비테이션과 침식이 방지되는 오리피스의 설계가 요구되나 이에 대한 체계적인 방법 및 절차가 제시되어 있지 않다. 본 논문에서는 유량제어 및 감압을 위해 많이 사용되는 오리피스의 캐비테이션과 침식이 방지될 수 있는 설계 절차 및 방법을 제시하였으며 이를 이용하여 전산 프로그램을 개발하였다.

Abstract

A lot of orifices have been used to reduce the extremely high pressure to moderate pressure in the power plants. However, some plants experienced the failure or damage at the downstream piping of the orifice. According to the examination results, it was concluded that the root cause of the piping damage was mainly the cavitation erosion. There are little information on the systematic procedure and methodology to exclude the cavitation and erosion. In this paper, presented are the procedure and methodology of the orifice design and the evaluation results obtained from the computer program that was developed with the above procedure and methodology.

## 1. 서론

현재 운전중인 원자력 발전소나 화력 발전소에서는 고온 고압의 냉각재를 정화운전에 요구되는 저온 저압의 유체조건으로 감압 감온시키거나 펌프의 최소 우회유량을 제한하기 위해 높은 압력을 감압시키기 위해 오리피스가 사용된다. 특히, 고온 상태에서의 과도한 감압요건을 만족시키기 위해서 발전소 공급자에 따라 다양한 형태의 오리피스가 제작/설치되어 운전 중에 있으며, 경수로형 원자력 발전소의 화학체적제어계통내에 있는 유출 오리피스의 경우 오리피스 후단에 있는 배관이 파손 또는 손상된 사례가 여러 번 보고되었다[1]. 조사결과 파손의 근본적인 원인은 운전 중에 발생되는 오리피스에서의 캐비테이션 혹은 캐비테이션 침식으로 결론지어 졌다[1]. 이러한 캐비테이션 침식은 오리피스를 손상시킬 뿐만 아니라 캐비테이션을 가속화시켜 오리피스를 더욱 더 손상시킨다. 한번 손상된 오리피스는 오리피스 내의 빠른 유속과 함께 유체유발진동을 야기하여 후단 배관의 피로 파괴를 야기할 수 있다. 그러므로, 설계 초기단계에서 캐비테이션과 침식이 방지될 수 있는 감압 및 유량조절을 위한 오리피스의 설계가 매우 중요한 사안이나, 이에 대한 체계적인 설계절차 및 방법이 제시되어 있지 않다. 또한, 문헌에 제시되어 있는 방법들은 모두가 단편적인 것으로 설계에 반영하기 위해서는 복잡한 계산을 여러 번 반복 수행해야만 한다[2,3,4].

따라서, 본 연구에서는 판형 오리피스에서 캐비테이션과 침식이 방지될 수 있는 방법과 다단 오리피스의 설계 절차를 제시하고 이것을 전산 프로그램화하여 최적 오리피스의 설계 방법론을 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 단단 오리피스 설계

판형 오리피스 축류부(throat point)에서 압력손실과 유량의 관계식은 아래의 식 (1)과 같이 주어진다[5,6].

$$Q = NF_a CD^2 \sqrt{\frac{h_w r_f}{1 - b^4}} \tag{1}$$

여기서,
$Q$ : 표준온도조건에서의 체적 기준 유량, gpm
$N$ : 상수, 44.74932
$F_a$ : 열팽창에 따른 보정계수
$r_f$ : 운전온도에서의 유체의 밀도, $lb/ft^3$
$C$ : Corner tap 에서의 유출계수
$D$ : 배관의 내부 직경, inch
$b$ : 조임비 (beta ratio, 배관 직경에 대한 구멍 직경의 비)
$h_w$ : 탭(tap)에서 차압을 표준조건기준 수두로 표기한 값, inch

### 가. 설계 절차

오리피스의 구멍은 설계운전유량, 배관크기와 요구되는 차압을 만족시키도록 결정되어야 하나 식 (1)의 유량식은 초기에 알려져 있지 않은 변수를 갖고 있다. 따라서, 알려진 변수만으로 구성한 Miller 의 SM 인자를 이용하여 아래와 같은 절차를 통해 오리피스 구멍의 크기를 결정한다.

1) 탭에서 차압($h_w$)을 가정한다. 모든 경우에 오리피스의 후단에서 일부의 압력이 회복됨에 따라 회복이 불가능한 차압(요구되는 감압)은 탭에서의 차압보다 작다. 그 차이는 조임비가 클수록 증가된다[5,6].

2) Miller 의 SM 인자를 결정한다[7].

$$SM = \frac{r_b Q}{NF_a D^2 \sqrt{r_f h_{w,J-1}}} \tag{2}$$

여기서, $r_b$ : 표준온도에서의 유체의 밀도, $lb/\ ft^3$

3) 초기 조임비(beta ratio)를 결정한다[7].

- Reynolds 수가 200,000 보다 작은 경우

$$b_o = [1 + (\frac{0.6}{S_M} + 0.06)^2]^{-1/4} \tag{3}$$

- Reynolds 수가 200,000 보다 큰 경우

$$b_o = [1 + (\frac{0.6}{S_M})^2]^{-1/4} \tag{4}$$

4) 조임비(beta ratio)를 근거로 유출계수, C를 결정한다. Corner 탭에서의 유출계수가 사용된다[5,6].

- 배관의 지경이 2 인치 이상인 경우

$$C = 0.5959 + 0.0312\, b^{2.1} - 0.1840\, b^{8} + 91.71\, b^{2} R_D^{-0.75} \tag{5}$$

- 배관의 지경이 1.5 인치 이하인 경우

$$C = \left[0.5991 + \frac{0.0044}{D} + \left(0.3155 + \frac{0.0175}{D}\right)\left(b^{4} + 2b^{16}\right)\right] \sqrt{1-b^{4}} + \left[\frac{0.52}{D} - 0.192 + \left(16.48 - \frac{1.16}{D}\right)\left(b^{4} + 4b^{16}\right)\right] \sqrt{\frac{1-b^{4}}{R_D}} \tag{6}$$

5) 절차 4에서 결정된 유출계수를 근거로 조임비(beta ratio)를 결정한다.

$$b_I = [1 + (\frac{C}{S_M})^2]^{-1/4} \tag{7}$$

6) $b_I - b_{I-1}$의 차가 0.0001 이하가 될 때까지 절차 4 와 5를 반복한다.

7) 탭에서 압력 손실을 결정한다[5,6].

$$h_{w,J} = \frac{\sqrt{1-b^{4}} + Cb^{2}}{\sqrt{1-b^{4}} - Cb^{2}}\, h$$

8) $h_{w,J} - h_{w,J-1}$의 차가 1 이하가 될 때 까지 절차 2 – 8를 반복한다.

그림 1에서 이러한 오리피스의 설계 절차를 자세히 기술하였다.

나. 프로그램 결과 및 비교

단단 오리피스의 설계에 대한 방법 및 절차와 이를 기준으로 작성된 프로그램(ORI-CV)을 검증하기 위해 영광 5,6호기 유출배관에 설치된 3개의 오리피스 설계에 대한 평가가 수행되었다. 표 1은 영광 5,6호기 유출배관에 설치되는 오리피스의 설계 요건을 요약한 내용이다. 표 2는 표1에 기술된 요건을 기준으로 설계된 제작자 자료, 상용프로그램인 Flo-series 분석결과 및 ORI-CV에 의해 계산된 결과를 요약한 것으로 3 가지의 결과가 잘 일치함을 보여준다.

## 2.2 다단 오리피스 설계

### 가. 캐비테이션 평가

판형 오리피스에서의 압력분포는 그림 2과 같이 압력이 급격히 감소하여 최소유량 면적부에서 최소압력까지 낮아진 후 일부의 압력이 회복된다. 최소 단면적부에서의 압력이 유체의 증기압보다 작아질 경우 기포가 발생하고 후단부에서의 압력회복에 따른 압력이 증기압보다 커지면 기포가 내파(implosion) 되면서 캐비테이션을 일으킨다. 기포의 내파에 의한 캐비테이션은 소음, 진동 및 배관의 침식을 야기하고 가속시켜 배관 및 후단에 위치하는 기기들의

기계적 건전성을 위협한다. 캐비테이션의 정도를 정량화시키기 위해 Tullis 와 Govindarajan 은 캐비테이션의 지수를 다음과 같이 표기하여 사용하였다[2].

$$s = {(P_d - P_v)}\Big/{\Delta P} \tag{8}$$

또한, Tullis 와 Govindarajan 은 실험을 통해 캐비테이션 임계지수를 그림 3 과 같이 제시하였는데 이는 배관의 크기와 오리피스의 조임비(beta ratio)값에 의존한다. 오리피스에서 캐비테이션을 방지하기 위해서는 식 (8)에 의해 계산된 캐비테이션의 지수가 그림 3 의 임계지수보다 켜야 한다. 캐비테이션 지수가 임계 지수보다 작을 경우 캐이테이션이 발생되므로 오리피스는 두단 이상의 오리피스를 사용하여 하나의 단에서의 압력차를 감소시켜야 한다.

운전되는 유체가 용해된 기체를 함유하고 있을 때 캐비테이션은 촉진되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 포화된 기체의 포화 압력이 유체의 증기압력보다 높을 경우에는 식 (8)에서 증기압대신 기체의 포화 압력이 사용되어야 한다[5].

### 나. 침식에 의한 손상 평가

오리피스에서 유체가속부식(FAC; Fluid Accelerated Corrosion), 유체충격침식(LIE; Liquid Impact Erosion)과 캐비테이션에 의한 손상을 포괄적으로 침식/부식이라 한다. 이중 캐비테이션에 의한 손상은 캐비테이션 지수가 임계값 이상일 경우 발생하지 않는 것으로 평가된다. 또한, 유체충격침식은 오리피스 구멍에서 분사된 유체의 속도가 다음 단의 오리피스 판에 도달하기 전에 급격히 감소하기 때문에 오리피스의 손상에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 유체의 속도에 영향을 받는 것은 유체가속부식으로 유체의 속도가 증가할수록 증가되므로 오리피스의 설계단계에서 축류부에서 유체속도에 대한 제한치가 요구된다. Kellogg 는 산업계의 경험을 근거로 최고 제한치를 200 ft/sec 로 제시하였으나 보수적인 설계를 위해 오리피스의 설계에서는 제한치를 150 ft/sec 로 결정하였다[8].

### 다. 오리피스 판간 거리

다단 오리피스의 경우에 오리피스 사이의 간격은 완전한 압력의 회복이 가능하도록 충분한 간격을 유지해야 한다. Teyssandier 는 오리피스의 후단에서 압력회복에 필요한 길이는 조임비(beta ratio)에 따라 그림 4 과 같음을 실험을 통해 제시하였다[9].

### 라. 설계 절차

다단 오리피스에서 캐비테이션이 발생하지 않는 운전을 보장하기 위해서는 각각의 단에서 캐비테이션이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 또한, 침식에 의한 오리피스의 손상을 막기위해 각각의 단에서 최대 유속이 150 ft/sec 를 초과하지 않도록 설계되어야 한다. 이러한 설계 기준을 갖는 고-에너지의 감압용 다단 오리피스의 설계를 위해 다음과 같은 절차를 제시하였다.

1) 설계를 위한 입력자료를 확정한다. 입력자료로는 유량, 온도, 입구압력, 차압이 요구된다.

2) 입력 자료를 근거로 단단 오리피스의 구멍크기를 단단 오리피스 설계절차에 의해 결정한다.

3) 오리피스에서의 침식가능성을 평가한다.

4) 크기가 결정된 오리피스에서 캐비테이션 발생 가능성을 평가한다.

5) 침식 및 캐비테이션의 발생 가능성이 존재하면 오리피스의 단 수를 증가시킨다.

6) 전체 차압 요건이 만족될 때까지 절차 1-5 를 반복한다.

7) 그림 4 를 이용하여 오리피스의 판간 거리를 계산한다

라. 다단 오리피스 설계 전산프로그램을 이용한 감압용 오리피스의 설계

다단 오리피스의 설계 방법 및 절차를 기준으로 작성된 프로그램(MULTIORI-CV)을 이용하여 다음의 설계요건을 갖는 감압용 오리피스를 설계하였다.

- 입구압력 : 1404 psig
- 운전 온도 : 150 $^{o}$F
- 차압 : 1376 psid
- 유량 : 30 gpm
- 유체 : 순수
- 배관 내경 : 2.624 inch

프로그램(MULTIORI-CV)을 통해 설계한 결과 캐비테이션과 침식을 방지하면서 위의 설계요건을 만족시키기 위해서는 최소한 6 단의 오리피스가 요구되며 설계 결과는 표 3 에 기술되어 있다. 캐비테이션 지수와 임계 지수는 오리피스 단마다 다르게 나타나며, 모든 단에서 계산된 캐비테이션 지수가 그 단에서의 임계 지수보다 크기 때문에 캐비테이션 가능성이 낮다고 평가할 수 있다. 모든 단에서의 오리피스내 최대 유속이 허용 값인 150 ft/sec 보다 작아 빠른 유속에 의한 침식가능성 또한 낮다고 평가할 수 있다.

3. 결론

단단 오리피스의 설계 절차 및 방법이 제시되었으며 이를 근거로 작성된 프로그램 (ORI-CV)의 결과는 상용프로그램 및 원자력발전소에 공급되는 오리피스 제작자의 설계결과와 잘 일치함을 보였다. 또한, 문헌에 제시된 캐비테이션 평가방법을 이용하여 캐비테이션과 침식이 방지될 수 있는 다단 오리피스의 설계 절차 및 방법이 제시되었으며 이를 근거로 감압용 오리피스 설계 및 캐비테이션 평가를 위한 전산 프로그램(MULTIOR-CV)을 개발하였다. 개발된 프로그램(MULTIOR-CV)을 이용하여 감압용 다단 오리피스를 설계하였고, 설계된 오리피스의 캐비테이션을 평가해본 결과 캐비테이션 지수가 임계 지수보다 크고, 오리피스내 최대 유속이 허용 기준치 보다 작아 캐비테이션과 침식 가능성이 낮은 것으로 평가되어 오리피스 설계 결과 및 작성된 전산프로그램이 적절했음을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구결과 오리피스 설계에 대한 복잡한 과정을 프로그램화하여 손쉬운 설계가 가능하도록 하였으며 본 프로그램 개발로 캐비테이션을 방지할 수 있는 최적 오리피스의 설계 및 제작된 오리피스의 캐비테이션 평가가 가능하다. 또한, 이 프로그램은 오리피스 형태의 유량계의 설계에도 이용이 가능하다.

참고문헌

1. NRC Information Notice 98-45, “Cavitation Erosion of letdown Line Orifice resulting in Fatigue Cracking of pipe Weld
2. Tullis, J. P. and Govindarajan, R., Cavitation and Size-Scale Effects for Orifices”, J. of hydraulic Div. American Soc. Of Civil Engineers. March. 1973
3. Mikasinovic, M. and Tung, P.C., “Sizing of Throttling Orifices”, Heating/Piping/Air Conditioning, Dec. 1978
4. Tung, P.C. and Mikasinovic, M, “Eliminating Cavitation from Pressure-Reducing Orifices”, Chemical Engineering, Dec. 1983
5. ASME MFC-3M-1989, “Measurement of Fluid Flow in Piping Using Orifice, Nozzle and Venturi”, ASME

6. ASME MFC-14M-1991, 'Measurement of Fluid Flow in Piping Using Small Bore Precision Orifice Meter', ASME
7. R.W. Miller, "Flow Measurement Engineering handbook, Second Edition, 1989, McGraw-Hill Publishing Company
8. H.H. Kellogg, "International Symposium, Quantitative Description of Metal Extraction Processes", 1991
9. Teyssandier., R.G. and Wilson, M.P., "The Paradox of the Vena Contracta", ASME Paper No. 73-WA/FM-9

표 1 영광 5,6 호기 유출 오리피스의 설계 요건

| 오리피스 | 입구압력 psia | 차압 psid | 정격온도 °F | 정경유량 gpm |
|---|---|---|---|---|
| #1 | 2194 | 810 | 150 | 30.3 |
| #2 | 2096 | 770 | 290 | 49.9 |
| #3 | 1834 | 660 | 290 | 70.2 |

표 2 영광 5,6 호기 유출 오리피스의 구멍 크기

| 오리피스 | 차압 psid | 영광 5,6 호기 제작자 자료 | Flo-series 결과 | ORI-CV |
|---|---|---|---|---|
| #1 | 810 | 0.242 | 0.241 | 0.2412 |
| #2 | 770 | 0.308 | 0.307 | 0.308 |
| #3 | 660 | 0.378 | 0.377 | 0.377 |

표 3 월성 2,3,4 호기 체적제어계통의 오리피스 설계 결과

| 오리피스 단 | 구멍크기, inch | 후단 길이, inch | 차압, psid | 임계 지수 | 캐비테이션 지수 | 최대유속, ft/sec |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 단 | 0.287 | 12.2 | 406 | 0.507 | 2.422 | 148 |
| 2 단 | 0.286 | 12.2 | 410 | 0.507 | 1.398 | 149 |
| 3 단 | 0.292 | 12.2 | 380 | 0.509 | 0.509 | 144 |
| 4 단 | 0.388 | 11.7 | 120 | 0.539 | 0.611 | 81 |
| 5 단 | 0.508 | 11.1 | 40. | 0.595 | 0.833 | 47 |
| 6 단 | 0.601 | 10.6 | 20 | 0.653 | 0.665 | 34 |

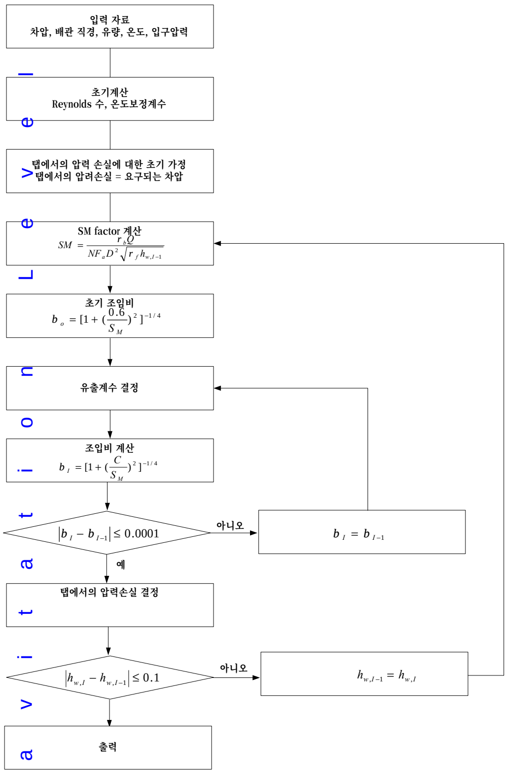


**그림 1 단단오리피스 설계 절차의 흐름도**

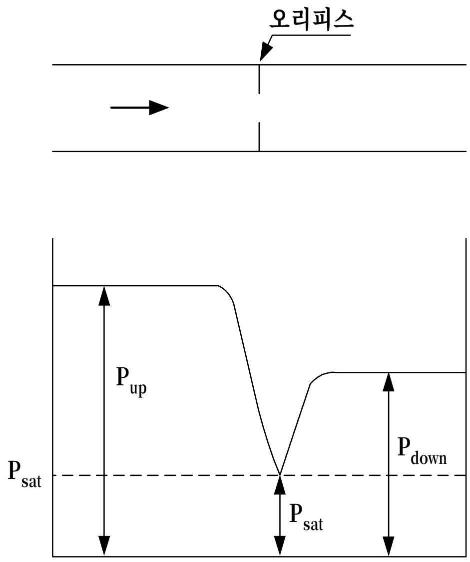


**그림 2 단단 오리피스에서 압력 분포**

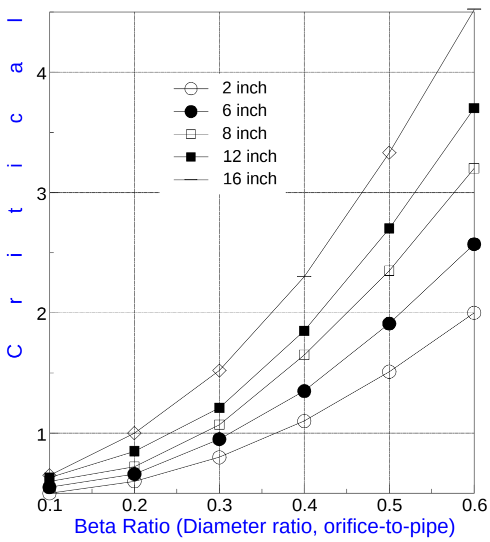


**그림 3 조임비(beta ratio)따른 허용가능한 케비테이션 지수**

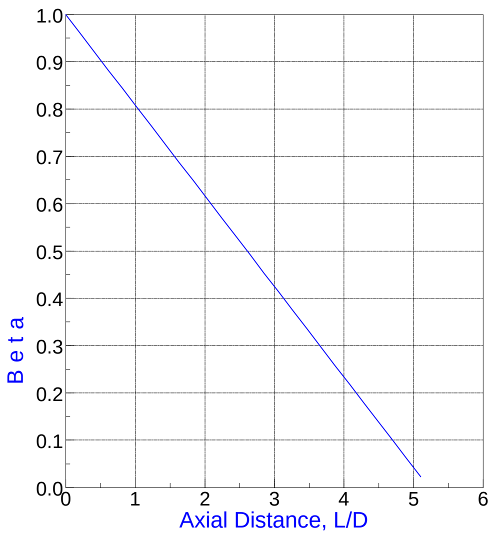


**그림 4 완전한 압력회복을 위해 요구되는 오리피스의 후단 거리**