

## 배관을 흐르는 압축성 유체의 누설량 측정 방법

이재용  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

산업 현장에서 널리 쓰이는 압축성 유체가 밸브 등을 통하여 원하지 않은 누설이 발생할 경우 그 배관의 외부 온도만을 측정하여 누설량을 개략적으로 구하는 방법을 보였다. 특히 배관라인 등 유량 제한 요소가 없는 계통은 Fanno Line 방법을 적용하고 오리피스나 벤추리등 유량 제한 요소가 있을 경우는 노즐 모델링 방법을 적용하면 누설량을 구할수 있고 노즐모델링 방법으로 구한 누설량이 Fanno Line 방법으로 구한 누설량의 약 50% 였다.

### 1. 개 요

산업 현장에서 압축공기 및 고온 증기의 쓰임은 매우 다양하다. 특히 발전소에서는 대부분의 배관에 공기 및 증기가 흐르고 있음을 감안하면 각종 밸브를 통한 원하지 않는 누설이 발생하게 되고 이 누설량을 적절히 추정해야되는 필요성이 대두된다. 그런데 대부분의 계통에서 누설량 측정 설비는 되어 있지 않으므로 얻을 수 있는 한정된 자료로써 적절히 누설량을 추정하는 방법을 기술하고 다음과 같은 실제적인 예를 통해 이 방법을 적용해 보기로 한다.

그림 1은 원전의 주증기관에서 컨덴서로 이어지는 증기덤프 배관으로서 정상운전중에는 제어밸브 B가 닫혀있다. 그러나 이 밸브 전후단 압력차가 900psi 이상 되는 고압 상태이므로 이 밸브를 통한 누설로 전기출력의 감소를 야기한다. 본 고에서는 이 배관의 외부 온도를 계측하여 배관을 흐르는 누설량을 계산함으로써 전기출력 감소분을 계산할수 있음을 보였다.

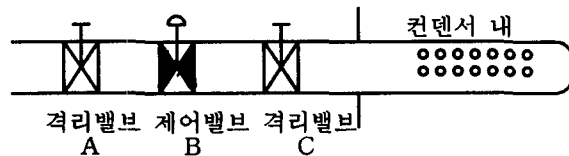


그림 1 : 원전 증기 덤프배관 개략도

### 2. 누설량 추정 방법 및 그 사례

#### 2.1 대상 계통 및 계측 자료

분석 계통은 9개의 증기 덤프관으로 이 배관에는 두 개의 격리밸브 (A,C)와 하나의 제어 밸브

(B)가 있다. 각각의 배관은 컨덴서로 40 ft 가량 뻗어 있으며 직경 0.5"짜리 구멍이 507 - 510개가 있어 컨덴서와 통한다. 누설량을 추정하기 위해 측정한 자료는 아래표 1과 같으며 측정 온도 ( $T_1$ )는 그림 1의 밸브 C 근처의 관 외부 온도이다.

<표 1> : 누설부위 온도계측값

밸브	$T_1$ (° F)		
	TEST 1	TEST 2	TEST 3
TV - 1	97.8	102	113.6
TV - 2	95.8	98	101.2
TV - 3	161	124	110.8
TV - 4	113	175	92
TV - 5	140	110	95.8
TV - 6	104	113.6	104.2
TV - 7	154	121	109.4
TV - 8	113	120	113.2
TV - 9	102	122.4	118.8
주중기 온도	540.4	540.0	540.4
컨덴서압력(PSIA)	0.658	0.658	0.668

## 2.2 Fanno Line 적용 방법

그림 1의 증기덤프관을 그림 2와 같은 Vent관으로 단순화 하면 밸브를 통한 누설 유동은 그림 3과 같은 경로를 거친다. 즉 누설 경로를 통한 흐름은 질식(Chock)되며 이 과정에서 응축도 일어난다(A → B). 누설후 흐름은 급격히 전 배출관 면적으로 확장된다. 이 팽창으로 증기는 과열 영역으로 된다(B → C). 여기에 다음과 같은 가정을 하여 Fanno Line에 적용되는 식을 이용하여 누설량을 계산한다.

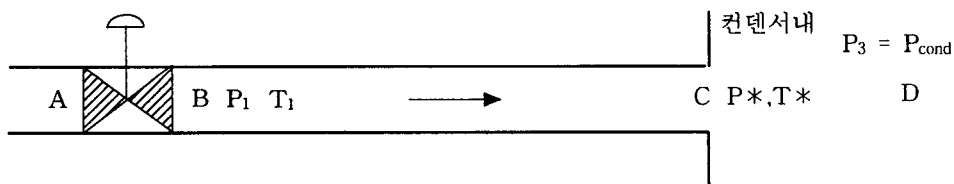


그림 2 : Fanno Line 모델링

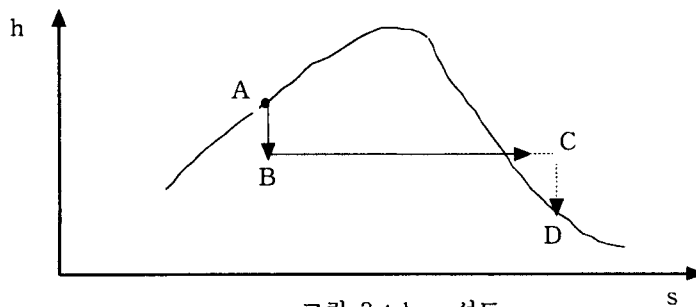


그림 3 : h-s 선도

가. 가 정

- i) 누설증기를 이상기체로 가정
- ii) 누설증기는 동일 단면적의 배관을 지나는 1차원 정상류임
- iii) 단열과정임
- iv) 단위 길이당 압력강하는 배관의 위치에 관계없이 일정함
- v) 관의 출구에서 컨덴서로 들어가는 흐름은 질식됨 (M=1)

나. 계산 절차 및 결과

Fanno Line인 경우 마찰 손실과 마하수와의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\frac{fL}{D} = \frac{1}{k} \left( \frac{1}{M^2 - 1} \right) + \frac{k+1}{2k} \ln \left[ M^2 \frac{k+1}{(k-1)M^2 + 2} \right] \text{ -----(1)}$$

여기서 f = Friction Factor

L = 관의 길이 ( =103" )

D = 관의 내경 ( =14.3" )

k = Specific Heat Ratio ( =1.3 )

M = Mach Number

여기서 f = 0.015로 가정하여 Trial-and-Error 방법으로 그림 3, B 점에서의 마하수를 구한다 ( M=M<sub>1</sub> = 0.775). B 점에서의 압력 P<sub>1</sub>은 마하수로부터 얻어진다.

$$P_1 = \frac{P^*}{M_1 \sqrt{\alpha_1}} \text{ -----(2)}$$

여기서 P\*은 출구 C (M=1) 에서의 압력이고 α<sub>1</sub> 은 아래와 같다.

$$\alpha_1 = \frac{(k-1)M_1^2 + 2}{k+1} = 0.9479 \text{ -----(3)}$$

출구에서의 압력은 컨덴서 압력이므로 P\* = P<sub>condenser</sub> = 0.7 psia이고 P<sub>1</sub> 은 0.928 psia이다.

이상기체의 상태방정식  $\nu_1 = RT_1 / P_1$ 로부터 비체적을 구하고 B점에서의 증기의 속도를 구해보면,  $C_1 = \sqrt{k g_c R T_1}$  을 이용하여 증기의 속도 u<sub>1</sub> 은 M<sub>1</sub> C<sub>1</sub> 이고 유량은 연속 방정식으로부터  $W = \rho A u_1$  로 구할수 있다. 각각의 온도에 대해 유량을 구해보면 표 2와 같으며 온도가 오를수록 유량이 약간 감소하는 이유는 증기의 밀도가 온도가 오를수록 감소하기 때문이다. 여기서 온도가 150°F 인 경우에 증기의 속도 u<sub>1</sub>은 1148 ft/sec이고 이에 해당하는 레이놀드수 (Re) 는

$$Re = \frac{uD}{\nu} = \frac{(1148 \text{ ft/sec})(1.19 \text{ ft})}{2.2 \times 10^{-3} \text{ ft}^2/\text{sec}} = 6.21 \times 10^5 \text{ -----(4)}$$

Moody 도표에서 Re = 6.21 × 10<sup>5</sup> 에 해당하는 f 는 0.015 이므로 원래 선택한 f = 0.015 는 적절하다.

$$\frac{T^*}{T_1} = \alpha_1 \text{ 으로부터 출구조건을 점검해 보면, } T^* = T_1 \alpha_1 = (610^\circ \text{ R})(0.9479) = 118.2^\circ \text{ F}$$

이고 출구에서 응축이 일어나는 조건을 구해보면,  $P^* = P_{sat}$ ,  $T^* = T_{sat}$  이고, 이 출구압력에 해당하는 온도는  $T_{sat} = 80^\circ F$ 이다.  $T^* = T_{sat}$  을 유발하는 B 점에서의 온도는  $109^\circ F (=569^\circ R)$ 이고 또 계측점이 금속의 표면이므로 그 안쪽의 증기온도와 차이를  $1 - 2^\circ F$  로 두면 표 1에서  $108^\circ F$  보다 높은 온도가 계측된 관에 대해서는 출구에서 응축이 일어나지 않는다고 볼 수 있다. 또한 증기의 온도가  $108^\circ F$  이하에서는 출구에서 응축이 일어나는데 응축이 일어나면 누설 유량은 급격히 감소하며 컨덴서 온도인  $80^\circ F$  에서는 흐름이 거의 없다. 이를 토대로 표 1의 자료를 다음 기준으로 분류해서 누설량을 구한다.

- i)  $108^\circ F$  보다 높은 밸브는 표 2를 근거로 약 12000 lbm/hr의 누설이 있다
- ii)  $90^\circ F$  보다 낮은 밸브에서의 누설은 무시한다.
- iii)  $90 - 108^\circ F$  사이의 누설량은 온도에 비례한다.

이 기준으로 누설량을 구해보면 표 3과 같다.

<표 2> : B점의 온도 ( $T_1$ )에 해당하는 누설 유량

온도 ( $T_1$ ° F)	누설량 (lbm/hr)	온도 ( $T_1$ ° F)	누설량 (lbm/hr)
108	12177	130	11949
110	12158	140	11849
112	12136	150	11752
114	12115	160	11608
120	12051	175	11518

<표 3> : Fanno Line 을 이용한 누설량

TEST	밸브	온도	누설량	누설량 합계
TEST 1	TV-3,4,5,7,8	$> 108^\circ F$	60000	86400 (lbm/hr)
	TV - 1	97.8	5200	
	TV - 2	95.8	3800	
	TV - 6	104	9400	
	TV - 9	102	8000	
TEST 2	TV-3,4,5,6,7,8,9	$> 108^\circ F$	84000	97300 (lbm/hr)
	TV - 1	102	8000	
	TV - 2	98	5300	
TEST 3	TV-1,3,7,8,9	$> 108^\circ F$	60000	72200 (lbm/hr)
	TV - 2	101.2	7600	
	TV - 4	92.0	1300	
	TV - 5	95.8	3800	
	TV - 6	104.2	9500	

### 2.3 노즐을 통한 이상기체 유동 적용방법

실제 증기 덤프관은 보통 Vent 관이 아니라 그림 1에서와 같이 컨덴서 내로 약 40 ft 정도 뻗어나간 Sparger 배관으로 되어 있어 2.2 항으로 누설 유량을 구하는 것보다 더 정확하게 모델링

을 하여 누설량을 구할 수 있다. 여기서는 Sparger 배관에 있는 구멍을 그림 4와 같이 노즐로 모델링하여 누설 유량을 구한다.

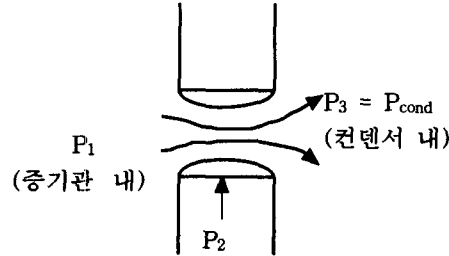


그림 4 : Nozzle 모델링

가. 계산시 이용되는 가정

- i) 증기를 이상 기체로 가정
- ii) 증기가 가역 단열 팽창함 (Reversible Adiabatic Expansion)
- iii) 관 내에서의 압력강하는 없음 (관의 압력 P1은 일정)

나. 계산 절차 및 결과

- i) 격리밸브 C의 온도를 측정해서 이것을 관내 증기의 온도로 한다(T1). 또한 증기가 가역 단열 팽창으로 가정되기 때문에 관내는 포화 증기로 유지되고 증기표에서 T1에 해당하는 포화압력 P1을 읽는다.
- ii) 컨덴서 압력 (P3)는 일정하게 유지되며 이는 측정할 수 있다.
- iii) 그림 4에서 Convergent-Divergent Nozzle을 통과하는 이상기체의 유량은 다음식으로 쓰인다.

$$W = CA_2P_2 \left[ \frac{2g_c}{RT_1} \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{k-1/k} \left\{ \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{k-1/k} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad \text{-----}(5)$$

여기서 C = Discharge Coefficient (약 0.86)

A2 = Hole Area (Total Area = 99.549 in<sup>2</sup>)

g<sub>c</sub> = 32.174 ft-lbm/sec-lbf

R = Perfect Gas Constant, 85.81 ft-lbf /lbm° R

- iv) 이때 상수 C는 Flat Orifice에서 실험적으로 구해지며 Throat 부분 압력 P2는 아래식 (6)으로 구할 수 있다.

$$P_2 = P_1 - \frac{P_1 - P_3}{\alpha} \quad \text{-----}(6)$$

여기서 α는 β(노즐 직경대 파이프 직경)의 함수로 나타내지며 실험적으로 구한다. 본 계통은 β가 아주 작아 α는 약 0.98이다.

- v) Throat에서의 유체의 속도가 M = 1 이 되면 식(7)의 관계가 성립한다.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad \text{-----}(7)$$

이때의 유량은 식(8)과 같이 쓰인다.

$$W = CA_2 P_1 \left\{ \frac{g_c}{RT_1} k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k+1/k-1} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

흐름이 Chocked 될 조건은 식(7)을 만족시키는  $P_2 = P_2^*$  가 컨테서 압력  $P_3$ 보다 클 때이다.

vi) 계측되는 값  $P_1$  및  $P_3$ 로 (7)식을 만족시키는  $P_2$ 를 구하고 이 값보다  $P_3$ 가 작으면 식(8)로 유량을 구하고 그렇지 않으면 식(5)로 유량을 구한다.

vii) 위의 방법으로 표 1을 이용하여 구한 누설량은 표 4와 같다. 표 4에서 보정누설량이라 함은 그림 3에서와 같이 증기덤프 밸브 후단을 흐르는 누설증기가 포화증기가 아닌 과열증기라서 이를 감안하여 보정한 양이다. 증기의 과열도는 실측치를 이용하였다.

<표 4> : 노즐 모델링으로 구한 누설량

밸브	누설량 ( lbm/hr )		
	TEST 1	TEST 2	TEST 3
TV - 1	4316	5227	7434
TV - 2	3827	4367	5029
TV - 3	24552	9850	6880
TV - 4	7308	33563	2549
TV - 5	14868	6725	3755
TV - 6	5483	7434	5645
TV - 7	20844	9090	6613
TV - 8	7308	8852	7351
TV - 9	5227	9439	8568
계	93733	94547	53824
보정 누설량	46143	48419	34899

### 3. 결 론

압축성 유체의 밸브를 통한 누설량이 두가지 방법으로 계산되었다. 이 중 Fanno Line 방법은 Vent 및 Drain 배관에 설치된 밸브의 누설량을 계산하는데 적합하며 Nozzle 모델링 방법은 Sparger 배관처럼 밸브 후단에 유량제한요소가 있을 때 적용함이 적합하다. 증기덤프 배관을 예시로 계산하여본 결과 Fanno Line 방법에 비해 Nozzle 모델링 방법을 적용했을 때는 유량제한요소로 인하여 누설률이 약 50% 정도였다.

### 4. 참고문헌

- 1) A. Acrivos, B.D. Babcock and R.L. Pigford, Flow Distributions in Manifolds, Chemical Engineering Science, Vol.10,1959
- 2) An Investigation of Steady Compressible Flow through Thick Orifices, Proc.Instn.Mech Engrs,Vol 180,1965-1966
- 3) Standard Handbook for Mechanical Engineers,Seventh Edition,McGraw-Hill
- 4) Crocker and King, Piping Handbook, 6th Edition
- 5) L.J. Klim, Alternative Performance Test, Westinghouse, 1987
- 6) Fluid Meters,Sixth Edition,ASME,1971