급기가압제연설비의 누설량 산출공식의 유도(I)

— 내무부고시 제1996—53호 별표 1과 관련하여 —

김 상 욱
(소방인연합회장, 기술사)

○··· 본 글에서는 1996년 9월 23일 고시된 급기가압제연설비의 기술기준 중 별표 1에 나타나 있는 누설량의 산출공식에 대해 그 유도과정을 기술하여 이 설비를 공부하는 분들에게 도움이 될 수 있게 하고자 한다. 공식들의 유도를 위하여는 먼저 급기가압에 관한 기초적 사항을 다소 숙지할 필요가 있으므로, 이에 대해 살펴본 다음 공식의 유도과정에 들어가기로 한다. ···○

1. 급기량 산출을 위한 기본사항

급기가압하고자 예정된 폐쇄공간(Enclosed Space)에 소요차압(Pressure Differential)을 형성시켜주기 위한 급기율은 그 공간으로부터 외부에로의 공기누설율(Air Leakage Rate)에 의해 결정된다. 공기누설율은 누설경로가 되는 틈새의 면적(Air Leakage Area)에 대체로 비례한다. 급기율, 차압의 크기 및 누설면적은 상호 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

$$Q = K \times A \times P^{1/n}$$

여기서, Q＝급기율

A＝누설면적

P＝차압

n＝누설면적과 관계되는 상수로서 보통 일반 출입문의 경우 2, 창문의 경우 1.6의 값을 갖는다.

위의 식에서 급기율, 차압 및 누설면적의 단위를 SI단위로 취하는 경우, 즉 Q의 단위를 m^3/sec, A의 단위를 m^2, P의 단위를 Pa(Pascal, N/m^2)로 할 경우 K의 값으로 약 0.827을 취하게 된다.

여기서 먼저 기초적으로 알아두어야 할 것이 있다. 그것은 가압공간(Pressurized Space)을 기준으로 한 누설경로(Leakage Path)들의 배열상태에 따른 상호관련성을 파악하는 일이다. 누설경로들의 배열상태는 병렬배열과 직렬배열의 두가지 성격(또는 이들의 공존상태)으로 나눌 수 있으며, 각각의 상태에 따라 누설면적들간의 상관관계를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 누설경로의 병렬배열(Leakage Path in Parallel) 〈그림 1〉과 같은 경우의 누설경로들은 병렬배열의 한 예인 바, 각 경로의 누설면적 상호간에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$A_t = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

단, A_t＝유효등가누설면적

A_1, A_2, A_3, A_4＝각 누설경로의 누설면적

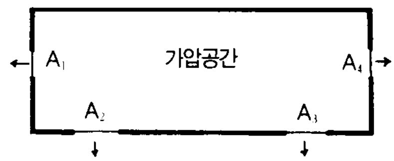


그림 1. 병렬배열의 누설경로

위의 식은 다음과 같이 생각할 때 간단이 도출된다.

가압공간의 기압과 그 외부기압간의 차압을 P라 할 때 누설면적 A_1을 통한 누설율 Q_1은

$$Q_1 = KA_1^{1/n}$$

마찬가지로, 누설면적 A_2, A_3, A_4를 통한 누설율을 각각 Q_2, Q_3, Q_4라고 하면,

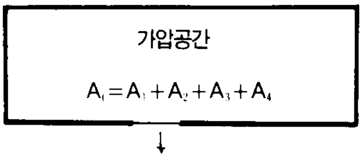
$$Q_2 = KA_2P^{1/n}$$
$$Q_3 = KA_3P^{1/n}$$
$$Q_4 = KA_4P^{1/n}$$

각 누설율을 합한 것이 가압공간으로부터의 총 누설율로써 이는 곧 총 소요급기율과 같다. 이것을 Q라고 하면

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \\ &= K(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)P^{1/n} \\ &= KA_tP^{1/n} \end{aligned}$$

이 식은 누설면적의 합계와 같은 크기를 가진 하나의 누설면적을 통한 누설율과 동등한 상황임을 뜻하고 있다.

즉 〈그림 2〉의 경우는 〈그림 1〉의 경우와 동등한 상황이다.



〈그림 2〉 하나의 유효등가 누설면적을 가상한 경우

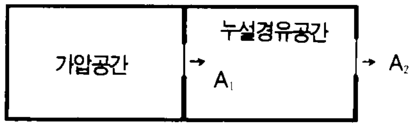
(2) 누설경로의 직렬배열(Leakage Path in Series)

〈그림 3〉과 같은 경우의 누설경로들은 직렬배열의 한 예인 바, 각 누설면적 상호간에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\frac{1}{A_t^n} = \frac{1}{A_1^n} + \frac{1}{A_2^n}$$

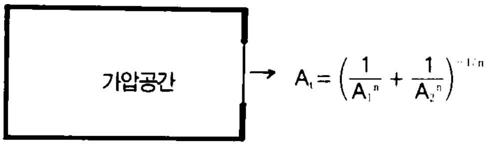
또는 $A_t = \left(\frac{1}{A_1^n} + \frac{1}{A_t^n}\right)^{-1/n}$

단 A_t=총등가누설면적



〈그림 3〉 누설경로의 직렬배열

위의 식은 이 식에 부합되는 A_t의 값을 가진 하나의 누설 틈새만이 존재하는 가압공간을 직접가압하는 것과 동등한 상황을 의미한다. 즉, 〈그림 3〉의 경우에 대한 급기가압과 〈그림 4〉의 경우에 대한 급기가압이 동등상황임을 뜻하는 것이다.



〈그림 4〉 〈그림 3〉과 동등한 상황을 나타내는 유효등가 누설면적

위의 식은 다음의 관계에서 쉽게 도출될 수 있다.

〈그림 3〉에서 가압공간내의 기압을 P_1, 누설경유공간의 기압을 P_2, 두 공간 외부의 기압을 P_3, 가압에 요하는 급기율을 Q라 하면, 당연히 $P_1 > P_2 > P_3$의 관계가 성립될 뿐 아니라, 다음의 연립방정식도 동시에 성립된다.

$$Q = KA_1(P_1 - P_2)^{1/n} \cdots\cdots ①$$
$$= KA_2(P_2 - P_3)^{1/n} \cdots\cdots ②$$

〈그림 4〉에서와 같이 동등한 가압상황을 나타낼 수 있는 가상누설틈새 즉, 등가누설면적을 A_t라 하면, 다음의 관계식도 또한 성립된다.

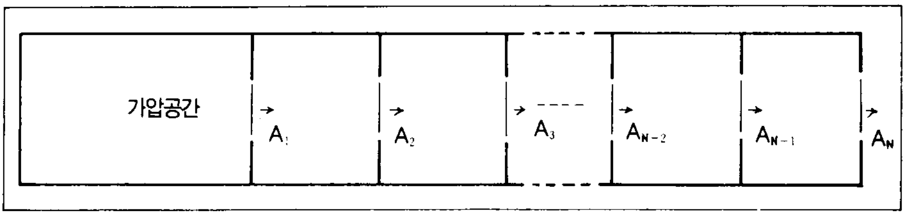
$$Q = KA_t(P_1 - P_3)^{1/n} \cdots\cdots ③$$

여기서 ①, ②, ③으로 구성된 연립방정식을 풀어보기로 하자.

①, ②식에서

$$KA_1(P_1 - P_2)^{1/n} = KA_2(P_2 - P_3)^{1/n} \cdots\cdots ④$$

④식에서 K를 소거한 다음 남은 양변을 n승하면,



〈그림 5〉 누설경유공간이 2 이상 연속하여 직렬관계에 있는 경우

$$A_1^n(P_1-P_2)=A_2^n(P_2-P_3)$$

이 식을 다시 전개하면,

$$A_1^nP_1-A_1^nP_2=A_2^nP_2-A_2^nP_3$$
$$(A_1^n+A_2^n)P_2=A_1^nP_1+A_2^nP_3$$

$$\therefore\ P_2=\frac{A_1^nP_1+A_2^nP_3}{A_1^n+A_2^n} \quad \cdots\cdots\cdots⑤$$

②, ③식에서,

$$KA_2(P_2-P_3)^{1/n}=KA_t(P_1-P_3)^{1/n} \quad \cdots\cdots⑥$$

④식에서의 경우와 마찬가지로 ⑥식에서도 K를 소거한 다음 남은 양변을 n승 하면,

$$A_2^n(P_2-P_3)=A_t^n(P_1-P_3)$$

즉, $A_2^nP_2-A_2^nP_3=A_t^n(P_1-P_3)$ ……⑦

⑤식의 P_2 값을 ⑦식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$A_2^n\cdot\frac{A_1^nP_1+A_2^nP_3}{A_1^n+A_2^n}\ A_2^nP_3=A_t^n(P_1-P_3)$$

$$\frac{A_1^nA_2^nP_1+A_2^{2n}P_3-A_1^nA_2^nP_3-A_2^{2n}P_3}{A_1^n-A_2^n}$$
$$=A_t^n(P_1-P_3)$$

$$\frac{A_1^nA_2^n(P_1-P_3)}{A_1^n+A_2^n}=A_t^n(P_1-P_3)$$

$$\therefore\ \frac{A_1^nA_2^n}{A_1^n+A_2^n}=A_t^n$$

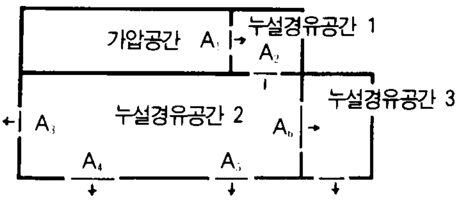
$$\therefore\ \frac{1}{A_t^n}=\frac{1}{A_1^n}+\frac{1}{A_2^n}$$

지금까지 설명한 것은 누설경유공간이 1개일 경우였지만, 누설경유공간이 〈그림 5〉와 같이 2 이상일 경우에도 확대될 수 있으므로 그 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{A_t^n}=\frac{1}{A_1^n}+\frac{1}{A_2^n}+\cdots\cdots+\frac{1}{A_{N-1}^n}+\frac{1}{A_N^n}$$

(2) 누설경로가 병렬 및 직렬상태로 공존하는 경우

그러나 현실적으로 건물의 내부구조가 누설경로의 병렬 또는 직렬 단독만으로 존재하는 경우는 오히려 많지 않고, 이 두가지의 상태가 공존하는 일이 많다. 예컨대 〈그림 6〉과 같은 경우를 생각해 보자. 이 경우 가압코자 목적하는 공간 이외의 공간들은 누설경유공간으로써 별도의 급기조치는 없는 것으로 전제한다.



〈그림 6〉 누설경로가 직렬 및 병렬로 공존하는 경우

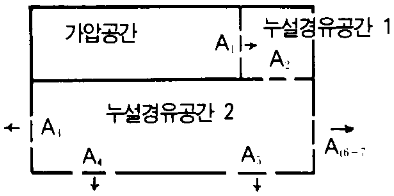
〈그림 6〉과 같은 누설경로가 병렬 및 직렬상태로 공존하는 경우라도 궁극적으로는 이와 동등한 가압효과를 나타낼 수 있는 하나의 가상 틈새면적 즉 총유효등가누설면적을 가진 하나의 가압공간을 가상 유도함으로써 기본식 $Q=KAP^{1/n}$을 적용할 수 있게 하면 되는 것이다.

이와 같이 목적하는 바의 상태로 수렴해 들어가기 위해서는 항상 가압공간으로부터 순차적으로 가장 먼 쪽의 누설경유 공간에서부터 시작하면 된다. 따라서 〈그림 6〉의 경우에 있어서는 누설경유공간 3이 최종경유공간이므로 이 공간을 기준

으로 할 누설면적, A_6와 A_7은 상호 직렬관계이므로 이 관계와 동등상황을 줄 수 있는 유효등가 누설면적을 A_{t6-7}이라 하면,

$$\frac{1}{A_{t6-7}^{\,n}}=\frac{1}{A_6^{\,n}}+\frac{1}{A_7^{\,n}}$$ 이 성립된다.

따라서, $$A_{t6-7}=\frac{A_6A_7}{\sqrt[n]{A_6^{\,n}+A_7^{\,n}}}$$



〈그림 7〉

그러므로 〈그림 6〉은 〈그림 7〉의 상황과 동등효과를 나타내는 상황으로 바꾸어 나타낼 수 있는 것이다.

이제는 〈그림 8〉의 경우에서 생각해 보자.

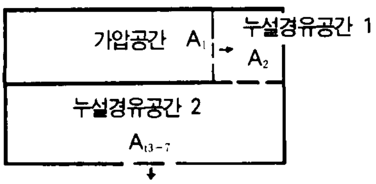
누설경유공간 2에서 존재하는 틈새들은 A_2, A_3, A_4, A_5, A_{t6-7}이다. 이 중 A_3, A_4, A_5, A_{t6-7}는 상호병렬관계에 있음을 쉽게 알 수 있다. 따라서, 이 4개의 누설틈새와 동등효과를 줄 수 있는 유효등가 누설면적을 A_{t3-7}이라 하면

$A_{t3-7}=A_3+A_4+A_5+A_{t6-7}$이 된다.

여기서 A_{t6-7}은 앞에서 계산되어 이미 알고 있는 값이다.

이제 누설경유공간 2에서의 유효등가누설면적 A_{t3-7}이 구해졌으므로 〈그림 7〉과 동등한 상황이 되는 또 하나의 가상된 누설상황으로써 〈그림 8〉이 설정될 수 있다.

그러므로 계속해서 〈그림 8〉의 경우에 대해 생각해 보자. 〈그림 8〉의 누설 경유공간 2에서 존재하는 누설틈새는 A_2와 A_{t3-7}이며 이들은 상호



〈그림 8〉

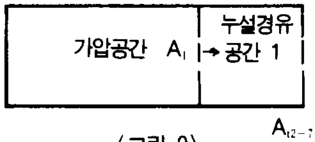
직렬관계이므로 그 유효등가 누설면적을 A_{t2-7}이라 할 때 그 값은 다음의 관계식에서 얻어진다.

$$\frac{1}{A_{t2-7}^{\,n}}=\frac{1}{A_2^{\,n}}+\frac{1}{A_{t3-7}^{\,n}}$$

$$\therefore\ A_{t2-7}=\frac{A_2\cdot A_{t3-7}}{\sqrt[n]{A_2^{\,n}+A_{t3-7}^{\,n}}}$$

여기서 A_{t3-7}도 A_{t6-7}과 마찬가지로 앞에서 계산된 것이므로 이미 알고 있는 값이다.

A_{t2-7}의 값이 구해졌으므로 〈그림 9〉는 〈그림 8〉과 동등상황을 나타낸다.



〈그림 9〉

〈그림 9〉의 누설경유공간 1에서는 누설틈새로서 A_1과 A_{t2-7}이 존재하고 이들 또한 직렬관계이므로 이들과 동등한 유효등가 누설면적이 우리가 구하고자 하는 최종적인 총 유효등가 누설면적이 된다. 이것을 A_{t1-7}이라고 할 때 그 값은 다음과 같다.

$$\frac{1}{A_{t1-7}^{\,n}}=\frac{1}{A_1^{\,n}}+\frac{1}{A_{t3-7}^{\,n}}$$

$$\therefore\ A_{t1-7}=\frac{A_1\cdot A_{t3-7}}{\sqrt[n]{A_1^{\,n}+A_{t2-7}^{\,n}}}$$

따라서 〈그림 6〉은 최종적으로 다음의 〈그림 10〉과 그 상황이 동등하게 되었으므로, 가압공간의 소요급기율은 다음과 같이 계산된다.

$$Q=KA_{t1-7}P^{1/n}$$

〈그림 10〉

〈다음호에 계속〉