

# 소화배관의 수리계산법 약설(Ⅱ)

金相旭

(김상욱 방재기술연구소 소장 / 소방기술사)

## 4. 배관내의 유수와 마찰손실

⑪ 식에서  $P_v$ 를 구하면,

$$P_v \approx (2.3)q^2 d^{-4} \dots \dots \dots \textcircled{15}$$

위의 식에서 볼 때 배관내의 유량(Volumetric Flow Rate)과 관의 내경을 알면 동압(Velocity Pressure)을 구할 수 있게 된다.

이 식에서는 동압이 유량과 관내경의 함수로 나타나지만 ⑦ 식에서 볼 때는  $P_v = v^2/20g$ 의 관계가 성립되므로 동압은 유속(Flow Velocity)만의 함수가 되는 것도 알 수 있다. 이러한 함수관계들은 유속, 유량 및 흐름단면적과의 관계식인 ⑨ 식에서 볼 때 명백해진다.

실제 현실에서 배관의 유수시 동압이 차지하는 상대적인 크기는 매우 작은 것이 보통이어서 수리계산시 동압을 무시하는 경우가 많다. 가령 배관내의 유속이 5m/sec 라고 할때 동압의 크기는  $P_v = 5^2/20g \approx 0.120\text{kg/cm}^2$ 밖에 되지 않는다. 동압은 오로지 유량 및 관내경, 또는 유속에 따라 결정될 뿐 현실적으로 존재하는 마찰에 의한 에너지손실과는 무관하다.

실제로 모든 종류의 배관을 통하여 물이 흐를 때는 마찰에 의한 에너지손실이 일어나며 그 손실은 결과적으로 수두 또는 압력의 손실로 나타나지만, 그 압력손실은 곧 정압(Normal Pressure)의 손실이 된다.

에너지의 손실이 일어나는 데에는 여러가지 요인이 복합적으로 작용한다. 유체의 점성으로 인하여 일어나는 관내벽과 물과의 마찰, 물입자 및 분자들간의 마찰등이 그것이다.

이러한 마찰은 유속이 변하거나 흐름의 방향이 변함으로써 야기되는 난류현상(Turbulence)에 기인한다. 층류(Laminar Flow)에 있어서는 흐름의 패턴이 배관의 방향과 동일하게 선형적(Linear)이므로 Turbulent Flow에 비해 에너지의 손실이 적고 변화의 양상도 비

교적 규칙적이다.

그러나 일반적으로 배관내의 물흐름은 Turbulent Flow의 패턴을 가지므로 마찰손실을 순수한 이론해석만으로 구하기는 대단히 어렵고 학자들의 오랜 노력으로 만들어진 실험식에 의존하게 된다.

그중 가장 대표적인 것의 하나가 헤이전-윌리엄스(Hazen-Williams) 공식으로서 오늘날에는 물소화배관의 수리계산시에 이 공식을 사용하는 것이 국내의 적으로 거의 보편화되어 있다. 이 공식을 압력손실의 크기로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{6.174 \times q^{1.85} \times 10^5}{C^{1.85} \times d^{4.87}} \dots \dots \dots \textcircled{16}$$

여기서,  $\Delta P$  = 마찰손실에 의한 배관길이 1m당 압력강하(kg/cm<sup>2</sup>),  $q$  = 관내의 유량(리터/분)  
 $d$  = 관의 내경(mm),  $C$  = 관의 Roughness Coefficient로서 무차원(Dimensionless)임.

위의 식에서 보이는 C는 배관의 재질 및 내부면의 표면처리와 부식성의 조건등에 따라 결정되는 값으로서 보통 다음표의 값들이 적용된다.

Pipe or Tube	"C" Value
Unlined Cast or Ductile Iron	100
Black Steel (Dry Systems including Pre-action)	100
Black Steel (Wet Systems including Deluge)	120
Galvanized (all)	120
Plastic—Underground	150
Cement Lined Cast or Ductile Iron	140
Copper Tube	150

이 자료는 NFPA의 FIRE CODE에서 인용한 것임.

위의 표에서 아연도탄소강관(백관)의 C값은 120이다. 그러나 실제 신품의 C값은 대체로 140정도이다.

그럼에도 불구하고 계산시 120을 적용하는 것은 완성된 물소화배관의 시간경과에 따른 관내조도의 변화를 미리 고려하기 때문이다. 물론 120이라는 수치는 이론해석에 의해 도출된 값이 아니고 어디까지나

실험에 의하여 현실성이 있도록 설정된 값이다.

위의 공식을 표에서의 C값을 이용하여 현재 국내에서 불소화배관용으로 가장 많이 사용되고 있는 KSD 3507 탄소강강관용 백관에 대해 호칭구경별로 환산하면 실제 계산시 편리하게 이용할 수 있는 식들을 다음과 표와 같이 얻을 수 있다.

호칭구경 (m)	배관길이 1m당 마찰손실압력 (kg/cm <sup>2</sup> )
25	$\Delta P = 8.6 \times 10^{-6} \times q^{1.85}$
32	$\Delta P = 2.26 \times 10^{-6} \times q^{1.85}$
40	$\Delta P = 1.08 \times 10^{-6} \times q^{1.85}$
50	$\Delta P = 3.46 \times 10^{-7} \times q^{1.85}$
65	$\Delta P = 9.75 \times 10^{-8} \times q^{1.85}$
80	$\Delta P = 4.46 \times 10^{-8} \times q^{1.85}$
90	$\Delta P = 2.22 \times 10^{-8} \times q^{1.85}$
100	$\Delta P = 1.24 \times 10^{-8} \times q^{1.85}$
125	$\Delta P = 4.44 \times 10^{-9} \times q^{1.85}$
150	$\Delta P = 1.86 \times 10^{-9} \times q^{1.85}$
200	$\Delta P = 4.37 \times 10^{-10} \times q^{1.85}$

호칭의 경우 C=100의 값을 적용하고자 할 경우에는 위의 식들에 1.4를 곱해주면 된다. 그것은  $120^{1.85}/100^{1.85}$  즉 1.4이기 때문이다.

이제까지 직관에 있어서의 마찰손실에 의한 압력강하에 대해 살펴보았다.

그런데 일상적인 배관은 순전히 직관들로만 구성되지 않고 배관의 연결 또는 배관방향의 전환이 있을 때는 반드시 연결부속이 필요하게 되는 바, 이들 부속은 주로 재질이 주철제의 경우가 많고 제조공정도 직관의 경우와 달라서 내부면의 조도(Roughness)가 다를 뿐 아니라 부속에 의해 물의 흐름방향이 바뀔 경우에는 보다 심한 Turbulence가 일어남으로써 물분자 또는 입자간의 상호마찰이 커지기 때문에, 직관과 동일한 구경의 부속은 그 부속을 통해 물이 흐르는 거리가 동일구경의 직관을 흐르는 거리와 같은 경우라도 압력의 강하는 직관에 비해 커지게 된다.

따라서 배관내에서의 압력강하를 구하는 데에는 별도로 관부속의 영향을 고려해야 하지만, 실제 현실에서는 자료화된 관부속의 등가길이를 이용하는 것이 보통이다.

등가길이(Equivalent Length)는 관부속에만 국한되지 않고 각종 밸브류에도 함께 응용된다. 관부속 또는 밸브류의 등가길이는 곧 이들을 통과하는 물흐름에 의한 압력강하와 동일한 크기의 압력강하를 나타내는 동일구경의 직관의 길이이다.

관부속 및 밸브류등에 대해 등가길이의 개념을 활용하면 이들이 접속되어 있는 배관을 마치 직관만으로 구성된 배관처럼 가상하여 압력강하를 구할 수 있게 되므로 대단히 편리하다.

KSD 3507 탄소강강관의 접속에 적합한 배관부속과, 각종 밸브류의 등가길이를 예시하면 다음과 표와 같

다. 이 표에서 알람체크밸브와 준비작동식밸브의 등가길이는 메이커에 따라 다소 차이가 있을 수 있다.

종 별	호칭구경	25	32	40	50	65	80	90	100	125	150	200
관 사 시	45° 엘보	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.1	1.3	1.5	1.8	2.2	2.9
	90° 엘보	0.8	1.1	1.3	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.9	4.7	6.2
	티 또는 크로스류(속)	1.7	2.2	2.5	3.2	4.1	4.9	5.6	6.3	7.9	9.3	12.3
부 용 접 속	45°엘보 long	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.2
		Short	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	2.1	2.5
	90° long	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3	1.6	1.9	2.5
		티 또는 크로스류(속)	1.3	1.6	1.9	2.4	3.1	3.6	4.2	4.7	5.9	7.0
밸 브 류	게이트밸브	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.3
	앵글밸브	4.6	6.0	7.0	8.9	11.3	13.5	15.6	17.6	19.9	26.0	34.2
	백크밸브(스왕형)	2.3	3.0	3.5	4.4	5.6	6.7	7.7	8.7	10.9	12.9	17.0
	알람체크밸브	-	-	-	-	-	6.7	-	8.7	-	12.9	-
	준비작동식밸브	-	-	-	5.5	-	8.9	-	10.7	-	10.1	-

### 5. 배관의 수리계산

배관의 수리계산은 관찰대상이 되는 배관상의 어느 지점에서의 유량과 소요압력을 구하고자 하는 데에 있다.

물론 어느 경우에 있어서도 살수장치를 통하여 방사하고자 하는 최소한의 살수량을 충족시킬 수 있는 정도의 유수량과, 이 흐름을 일으켜 줄 수 있는 최소한의 소요압력을 산정하고자 하는 것이다.

Hydraulically Designed Sprinkler System(아직 우리나라 소방법규에는 이에 대한 사항이 규정되어 있지는 않지만)에 있어서는 Sprinkler Operated Area와 Water Application Density에 따라 수리계산에 포함되어야 할 헤드의 갯수가 정해지지만, 일단 그 수가 정해지고 나면 수리계산은 Water Supply Source에서 Supply해야 할 소요유량 및 소요압력을 산정하는 데에(때로는 이미 정해진 Residual Pressure를 가진 Water Supply Source로 부터 逆으로 Match시켜 나가는 경우도 있다) 초점이 두어진다.

수리계산은 관내의 마찰손실에 따른 정압 변화만을 고려하는 것이 통상적인 관습이나, 엄밀하게는 동압(수두로 나타낼 때는 속도수두)을 계산에 포함시켜야 한다.

동압을 계산에 포함시킬 경우에는 시행착오법(Trial and Error Method)에 의한 반복계산을 하거나, 아니면 다소 복잡하지만 방정식을 유도하여 대입하는 방법도 있다.

물론 프로그래밍된 컴퓨터를 이용하여 계산하는 것이 편리한 경우가 많으나 대개의 경우 다소 시간은

걸리지만 Hand Calculation으로 비교적 만족한 결과를 얻을 수가 있다.

그러나 Loop Piping(또는 Ring Piping)의 경우에는 배관내의 분배유량(Flow Distribution Rate)을 동시에 결정해야 하므로 계산이 더욱 복잡해진다.

분배유량을 구하기 위해서는 Hardy Cross 계산법이란 것을 사용하게 되지만, 단일 Loop형 배관에는 이 계산법으로 Hand Calculation에 의해 실제에 적용할 수 있는 비교적 만족한 결과를 얻을 수가 있으나 배관의 형태가 Grid방식이 되었을 때는 Hand Calculation만으로는 엄청난 시간과 노력이 소요되는 경우가 대부분이므로 이 때는 프로그래밍된 컴퓨터에 의존하는 것이 실제적이다.

일반적으로 배관의 구성형태는 Dead-end Piping과 Loop Piping의 두가지 기하학적 형태로 나눌 수 있으므로(Grid배관은 다양화 된 Loop Piping에 속한다) 수리계산방법도 이에 따라 생각해 볼 수 있다.

5.1 Dead-end Piping 수평배관상의 임의 지점에서의 총압은 그지점에서의 정압과 동압의 합과 같다.

$$\text{즉 } P_t = P_n + P_v \dots \dots \dots (17)$$

여기서,  $P_t$  = 총압(Total Pressure)

$P_n$  = 정압(Normal Pressure)

$P_v$  = 동압(Velocity Pressure)

정압과 동압의 두 물성량에 있어서 이들의 벡터는 정압의 경우 관내벽에 수직으로, 동압에 있어서는 물의 흐름방향이 된다.

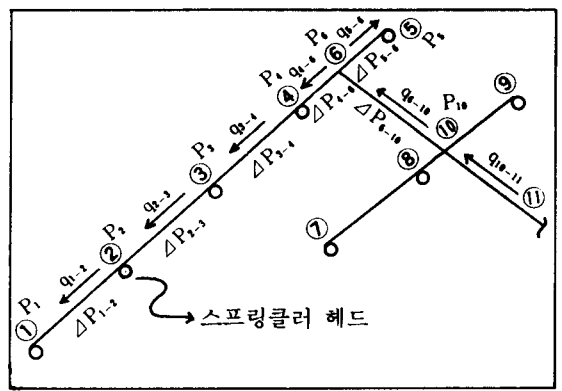
앞서 언급한 바와 같이 수리계산시 동압을 무시하는 경우와 계산에 포함시키는 경우를 실례로서 다음 그림과 같이 스프링클러배관에 대해 생각해 보자.

이 그림에서 계산을 단순화하기 위해 다음과 같이 전제한다.

- (1) 헤드는 가지관에 직결되어 있다.
- (2) 각헤드의 방출계수는 동일하며, 방출계수는 방수압력의 변화와 관계없이 일정하고, 그 값은 K이다.
- (3) 그림에서의 헤드만이 개방되어 있다.
- (4) Section Point ①이 수리적으로 최원거리(Hydraulically Most Remote)이고, 이 지점에서 주어 져야 할 최소방수압은  $P_1 \text{ kg/cm}^2$ 이다.
- (5) 배관구간마다 구경과 등가길이는 이미 알고 있는 값이다. <그림참조>

5.1.1 동압을 무시하는 경우

동압을 무시할 때는 (17)식에서  $P_t = P_n$ 이 되므로 계



산은 매우 간단해진다. 그것은 각 Head Point에서의 총압이 곧 그 헤드에서의 방수압이 되기 때문이다. 그림에서  $\Delta P_{a-b}$ 의 형태로 표시된 것은 Pipe Section ① - ②간의 마찰손실압력을,  $P_1, P_2, \dots$ 등으로 표시된 것은 그 Point에서의 총압을,  $q_{a-b}$ 의 형태로 표시된 것은 Point ①에서 ②로 흐르는 유량을 나타낸다.

$\Delta P_{a-b}$ 의 값은 그 구간을 흐르는 유량과 그 구간의 배관구경 및 총등가길이(Total Equivalent Length)를 알면 Hazen-Williams 공식으로부터 쉽게 구해 질 수 있는 값이다.

따라서 Section ① - ⑥간의 각 Point에서의 총압과 매 구간마다의 유량은 일단 다음과 같은 계산 순서로 구할 수 있다.

$$q_{1-2} = K\sqrt{P_1}$$

$$q_{2-3} = q_{1-2} + K\sqrt{P_2} = q_{1-2} + K\sqrt{P_1 + \Delta P_{1-2}}$$

$$q_{3-4} = q_{2-3} + K\sqrt{P_3} = q_{2-3} + K\sqrt{P_2 + \Delta P_{2-3}}$$

$$= q_{2-3} + K\sqrt{P_1 + \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3}}$$

$$q_{4-6} = q_{3-4} + K\sqrt{P_4} = q_{3-4} + K\sqrt{P_3 + \Delta P_{3-4}}$$

$$= q_{3-4} + K\sqrt{P_1 + \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4}}$$

이와 같은 계산순서로  $q_{4-6}$ 과 Point ⑥에서의 총압 즉  $P_6$ 의 값이 일단 구해진다.

그러나 계산의 핵심은  $q_{5-6}$ 를 구하는 데에 있다.  $P_5$ 는  $P_1$ 과 결코 같지 않으며 그 값이 얼마인지 당장은 알 수 없다. 그렇지만 가령 Point ⑤에서의 예상 압력을 일단 가정하여 계산하더라도 이 계산결과에 의해 구해지는 Point ⑥에서의 값이 앞에서 실시한 계산순서에 의해 구해진  $P_6$ 의 값과 일치해야 할 것이다.

따라서 수차례 시행착오법을 사용하면  $P_5$  및  $q_{5-6}$ 를 구할 수가 있겠으나 많은 반복계산에 따른 노력과 시간이 소요된다. 그러므로 이 경우에 있어서는

간이한 방법으로 하나의 가정을 착상한다.

이 착상은 수리적으로 결코 정확한 것은 아니지만, 실제에 적용하는 공학계산에 있어서는 무리없는 한 다소간의 오차는 허용될 수 있으므로 가장 보편적으로 사용되고 있다.

즉 Section ⑤-⑥간의 배관과 헤드 ⑤의 복합상태의 성능과 등가적인 방수성능을 가진 하나의 노즐이 Point ⑥에 바로 직결되어 있다고 가정하는 것이다.

따라서 Point ⑤에서 임의로 설정한 압력  $P'_6$  (가급적  $P'_6 < P_6$ 의 것이 좋다)를 생각할 때 구간 ⑤-⑥간의 유량을  $q_{5-6}$ 라 하면  $q_{5-6} = K\sqrt{P'_6}$ 이고, 이 경우 Point ⑥에서의 총압을  $P'_6$ 라고 하면  $P'_6 = P'_6 + \Delta P_{5-6}$ 이므로 ( $\Delta P_{5-6}$ 은 유량  $q_{5-6}$ 에 의한 마찰손실압이므로 Hazen-Williams 공식으로부터 쉽게 산출된다), 앞에서 가정한 등가노즐은 방수압이  $P'_6$ 일때 방수량이  $q_{5-6}$ 가 되는 살수특성을 가진 노즐이라는 뜻으로 결론지어진다.

즉 이 등가노즐의 방출계수를  $K'$ 라고 하면 다음의 관계가 성립된다는 뜻이다.  $q_{5-6} = K'\sqrt{P'_6}$ .....⑱

따라서 이 노즐에  $P_6$ 의 방수압이 걸릴때의 방수량이 곧  $q_{5-6}$ 가 될 것이며 다음 관계식도 성립될 것이다.  $q_{5-6} = K'\sqrt{P_6}$ .....⑲

⑱, ⑲식에서  $K'$ 를 소거하면  $q_{5-6}$ 를 구할 수 있다. 즉  $q_{5-6} = q_{5-6}\sqrt{P_6/P'_6}$ 이다.

이상의 계산과정에 의해 구간 ⑥-⑩간의 유량 즉  $q_{6-10}$ 은  $q_{4-6} + q_{5-6}$ 이 되므로 이 유량에 따른 마찰손실압력  $\Delta P_{6-10}$ 을  $P_6$ 와 합한 값이  $P_{10}$ 이 될 것이다.

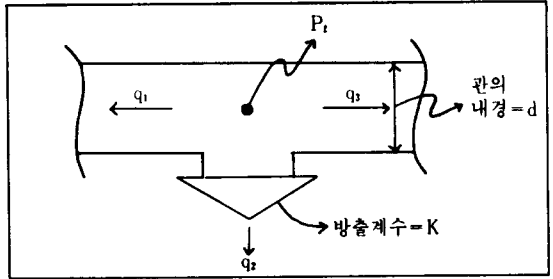
즉  $P_{10} = P_6 + \Delta P_{6-10}$ 이다.

구간 ⑦-⑩ 및 ⑨-⑩간의 유량을 구하는 것도 앞에서 전개한 등가노즐의 가정방식에 의하여 동일한 계산법으로 각 구간의 유량을 구할 수가 있으며 각각의 유량을  $q_{6-10}$ 과 합하면  $q_{10-11}$ 이 된다. 물론 ⑪에서의 소요압력도 계산된다.

### 5.1.2 동압을 포함하는 경우

동압을 포함하는 경우에는 시행착오법에 의해 반복하여 보정해가면 결과를 얻을 수 있으나 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 특히 숙달되지 않으면 혼란을 주기 쉽다.

따라서 다소 복잡하더라도 다음과 같이 식을 유도하여 대입하는 것이 편리하다. 배관에서 헤드가 취부된 (일단 배관에 직결되어 있다고 가정한다) 임의의 부분을 취하여 다음 그림과 같이 생각한다.



그림에서 다음과 같은 식들이 성립된다.

$$P_1 = P_n + P_v \dots\dots\dots ⑳$$

$$q_3 = q_1 + q_2 \dots\dots\dots ㉑$$

$$q_2 = K\sqrt{P_n} \dots\dots\dots ㉒$$

$$\text{⑮式으로부터, } P_v = 2.3q_3^2 d^{-4} \dots\dots\dots ㉓$$

위의 ㉒식  $q_2 = K\sqrt{P_n}$ 에서  $\sqrt{\text{안의 값이 } P_n}$ 이 됨을 유의할 필요가 있다. 헤드에서의 방수압은 헤드의 오리피스를 통하여 외부로 방수되었을 순간에는 동압 (Pitot계로 측정되는 값)만으로 전환되지만 그 값의 크기는  $P_n$ 과 같다. 그것은 관내의 총압  $P_1$ 의 구성성분 중 관내벽에 수직방향의 벡터는  $P_n$ 이기 때문이다.

$$\text{㉒ 및 ㉓식에서, } P_n = P_1 - 2.3q_3^2 d^{-4} \dots\dots\dots ㉔$$

$$\text{㉑ 및 ㉒식에서, } q_3^2 - 2q_1 q_3 + q_1^2 = K^2 P_n \dots\dots\dots ㉕$$

㉔식의  $P_n$ 을 ㉕식에 대입한 다음  $q_3$ 를미지수로 보고  $q_3$ 에 대한 2차방정식을 풀면  $q_3$ 에 대한 해 (Solution)는 다음과 같다.

$$q_3 = \frac{q_1 + K\sqrt{P_1} + 2.3d^{-4}(K^2 P_1 - q_1^2)}{1 + 2.3K^2 d^{-4}} \dots\dots\dots ㉖$$

㉖식을 활용하는 방법은 매우 간단하다. 「5.1.1 동압을 무시하는 경우」의 계산법에서 예로 든 그림에 대해 적용해 보자.

Point ①에서는  $P_1$ 의 압력은 설계조건에 의해 주어지게 되므로  $q_{1-2}$ 와  $\Delta P_{1-2}$  및  $P_2$ 는 쉽게 산출된다. 따라서 Point ②에서의 헤드를 기준으로 하여 ㉖식의 결론을 도출하기 위하여, 예로 든 앞의 스프링클러배관도면에 대해 고찰할 때  $q_{1-2}$ 는 ㉖식의  $q_1$ 에 해당하며,  $q_{2-3}$ 은  $q_3$ 와 같고  $P_3$ 는 곧  $P_2$ 와 동일하므로  $q_{2-3}$ 은 이 식으로부터 즉각 계산된다.

이렇게 계산되고 나면 동일한 방식으로 Point③에서의 헤드를 기준으로 하여 ㉖식을 적용하면, 이 때는 구해진  $q_{2-3}$ 이  $q_1$ 이 되고  $q_{3-4} = q_3$ 가 되며  $P_4 = P_3 + \Delta P_{3-4}$ 가 되므로  $q_{3-4}$ 도 잇달아 산출되는 것이다.

이러한 방법으로 ㉖식을 사용하여 순차적으로 계산하되 등가노즐방식의 계산법은 5.1.1의 경우와 마찬가지로 적용하면 되는 것이다. (다음호 계속) ■