

수계 소화장치 설계용 프로그램의 개발

이경우

(사) 한국선급 기관기술부

The Development of Program for Design of Water-based Fire Extinguishing System

Kyoungwoo Lee

Machinery Department, Korean Register of Shipping

1. 서론

화재를 진압하기 위해 사용되는 소화장치는 일반적으로 설치형태에 따라 휴대식과 고정식 소화장치로 구분된다. 그리고, 고정식 소화장치는 일반적으로 사용되는 소화제의 종류로 구분한다. 많은 종류의 소화장치들이 있지만, 일반적으로 사용되는 고정식 소화장치로는 스프링클러장치(Sprinkler System), 가압수분무장치(Water Spray System), 미세분무소화장치(Water Mist System), 이산화탄소소화장치(Carbon-Dioxide Fire Extinguishing System), 포말소화장치(Foam Fire Extinguishing System) 등이 있다. 이러한 소화장치들 중 이산화탄소소화장치 이외의 소화장치는 모두 수계소화장치이다. 여기서, 수계소화장치가 가장 널리 사용되는 소화장치라는 것을 알 수 있다.

소화장치를 설계할 때, 설계자에게 요구되는 가장 중요한 사항은 소화장치에 요구되는 소화성능을 만족하면서도, 배관의 크기와 펌프의 용량을 가장 작게 만드는 것이다. 수계소화장치의 소화성능은 일반적으로 노즐에서 분출되는 물의 양으로 정의된다. 일정한 형태의 소화장치가 설치되었을 때, 그 소화장치의 노즐에서 방출되어야 할 물의 양을 단위면적당 유량으로 정의하는 것이다. 즉, 소화장치의 각 소화노즐 중에서 물이 가장 작게 분출되는 노즐에서 최소한 분출되어야 하는 양을 정하는 것이다. 그리고, 모든 유체는 배관 내를 흐를 때 압력손실을 동반한다. 그러므로, 수계소화장치를 올바르게 설계하기 위해서는 수계소화장치에 배치되는 각 노즐에서의 유량을 예측할 수 있어야 하며, 각 노즐에서의 유량을 예측하기 위해서는 수계소화장치 배관의 각 지점에서의 유량과 압력을 예측할 수 있어야 한다.

하지만, 압력손실은 관의 관벽 거칠기에 의한 마찰손실과 여러 가지 관부착품의 유동 특성에 의한 에너지손실로 크게 나눌 수 있고, 마찰손실과 에너지손실은 관 및 관부착품의 종류에 따라 달라지며, 관 및 관부착품의 재료, 제조자, 제조방법 등에 따라서 크게 달라지게 된다. 이러한 이유로 해서 수계소화장치 배관의 각 지점에서 실재의 유량과 압력을 정확하게 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그러므로, 일반적으로 관 및

관부착품의 압력손실계수를 표준화하여 사용한다. 그리고, 압력손실계수를 정할 때에는 관 및 관부착품의 부식, 제작오차 등을 고려하여 안전계수의 개념을 도입하게 되는데, 안전계수의 크기는 압력손실계수를 정하는 작업에서 가장 중요한 사항이므로, 공개된 것이 드물다. 그러므로, 각종 규격에서 정하는 압력손실계수들을 주로 사용하게 되는데, 각종 규격에서 정하고 있는 압력손실계수들 또한 안전계수를 포함한 것이다.

하지만, 관 및 관부착품에 대한 압력손실계수를 안다고 하더라도, 수계소화장치와 같이 관 및 관부착품이 복잡하게 연결된 배관장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 산정하는 것은 매우 어렵다. 배관장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 산정하는 것을 배관망 해석(Pipe Network Analysis)라고 하는데, 배관망해석을 이용하면, 수계소화장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 해석해 낼 수 있으며, 이것으로부터 수계소화장치의 소화성능을 설계단계에서 미리 예측할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 배관망해석 기법을 이용하여 수계소화장치 설계용 프로그램을 개발하였으며, 이를 수계소화장치 설계자료로서 제공하고자 한다.

2. 압력손실산정

배관망해석이란 배관장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 해석해 내는 것을 말한다. 배관망해석은 수리역학이라고도 불리며, 토목공학에서 상수도관장치 및 도시가스관장치의 설계에 주로 사용된다. 배관망해석을 수행하기 위해서는 기본적으로 각 배관장치에서의 유동압력손실을 산정할 수 있는 압력손실산정식을 결정하여야 한다. 관내유동에 대한 압력손실산정식은 사용하는 유체의 종류, 적용상황 등에 따라 매우 많은 종류가 있다.

하지만, 수계소화장치의 배관 내를 흐르는 유체는 물이다. 그리고, 수계소화장치의 소화성능을 검증하기 위한 것이므로 수계소화장치가 작동되어 노즐에서 물이 분출될 때의 상황에 대한 유동압력손실을 산정하므로, 비압축성 점성유체의 정상상태 유동에 대한 압력손실산정식을 사용하여야 한다.

비압축성 점성유체의 정상상태 유동에 대한 압력손실산정식도 많은 종류가 있지만, 대표적인 것으로 Darcy Equation과 Hazen-Williams Equation이 있으며, 각각 식(1), 식(2)와 같다.

$$P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2g} \quad (1)$$

$$P_L = 6.05L \frac{Q^{1.85}}{C^{1.85} D^{4.87}} \times 10^5 \quad (2)$$

그리고, 서론에서 밝힌바와 같이 관 및 관부착품의 손실계수는 각종 규격에서 정하는 값을 사용하게 되는데, 본 연구에서는 스프링클러장치에 대한 국제규격인 NFPA Code 13에서 정하는 값을 사용하였다. NFPA Code 13에서는 압력손실산정식으로 식(2)의 Hazen-

Williams Equation을 사용하도록 하고 있으며, 관부착품에 대한 손실을 관의 직경에 대한 등가길이(Equivalent Length)로서 정하고 있다.

3. 배관망해석

앞서 말한바와 같이 배관망해석은 배관장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 해석하는 것이다. 배관망해석은 크게 두 가지로 구분되는데, 하나의 넓은 의미로서 모든 형태의 배관장치에 대해서 유량과 압력을 해석하는 것을 의미하고, 두 번째는 좁은 의미로서 폐회로(Loop)를 이루는 배관장치에서의 유량과 압력을 해석하는 것을 말한다.

먼저, 넓은 의미의 배관망해석에서는, 배관장치의 각 지점에서의 유량과 압력을 아래의 두 가지 원칙을 이용하여 해석하게 된다.

- 연속방정식 - 배관장치의 어느 한지점에 유입되는 유량과 유출되는 유량의 합은 0이다.

- 압력의 등방성 - 배관장치의 한 지점에서의 압력은 모든 방향으로 일정하다.

이 두 가지 원칙을 이용하면, 배관장치에서 각 지점에서의 유량과 압력을 계산할 수 있다.

Fig. 1을 보면, 2번 Node로 유입되는 유량과 유출되는 유량은 같아야 한다.

$$Q_{12} = Q_{23} + Q_{24} \quad (3)$$

그리고, 2번 Node의 압력은 1번, 3번 및 4번 Node로의 방향으로 모두 같다. 이 두 가지 원리와 어느 한 Node에서의 압력과 한 구간에서의 유량이 주어지면, 나머지 Node에서의 압력과 나머지 구간에서의 유량을 알 수 있다.

두 번째로 좁은 의미의 배관망해석에서는 아래의 두가지 원리를 이용하여 Loop에서의 유량과 압력을 해석한다.

- 연속방정식 - 배관장치의 어느 한지점에 유입되는 유량과 유출되는 유량의 합은 0이다.

- Loop방정식: 모든 Loop에서의 압력손실의 합은 0이다.

Fig. 2에서 각 Node로 유입되는 유량과 유출되는 유량의 합은 0이 되어야 한다. 그리

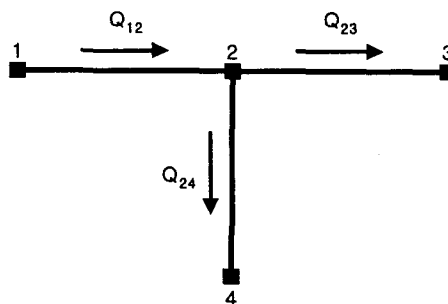


Fig. 1. Simplified pipe network

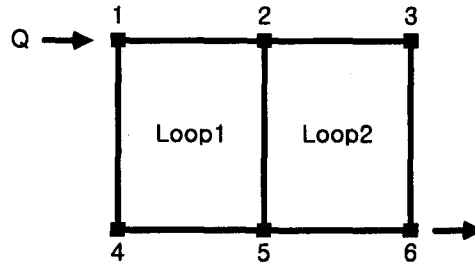


Fig. 2. Looped pipe network

고, Fig. 2에 표시되어 있는 두 개의 Loop에서 각 Loop를 이루는 관에서의 압력손실의 합은 0이 되어야 한다. 이때 Loop를 이루는 관의 압력손실은 시계방향과 반시계방향 중 어떤 한 방향을 양(+)으로 잡아서 계산하게 된다.

통상적으로, 배관망해석이라 하면, 폐회로 배관장치에 대한 것을 의미한다. 폐회로 배관장치에 대한 배관망해석 기법으로는 크게 아래의 세 가지 방법을 들 수 있다.

- Hardy-Cross Method
- Newton-Raphson Method
- Linear Method

Hardy-Cross Method는 폐회로 배관망해석에 대한 최초의 해법으로 평가받는 방법으로, 이후에 개발되는 모든 배관망해석 기법의 근간이 되는 방법이라 할 수 있다. 그리고, Newton-Raphson Method는 각 Loop에서 얻어지는 연립비선형 방정식을 연립비선형 방정식에 대한 Newton-Raphson Method를 이용하여 해석하는 방법이다. 마지막으로 Linear Method는 비선형 연립방정식을 선형 연립방정식으로 변환하여 해석하는 방법이다. Bernoulli Equation 등에 의해 유체의 유동마찰 손실은 유량에 대한 비선형 방정식 ($\Delta P \propto Q^n$)으로 주어지게 되는데, 유량을 분리하여($\Delta P \propto Q \cdot Q^{n-1}$), 선형화하여 해석하는 방법이다.

이외에도 많은 방법이 있을 수 있지만, 대표적인 배관망해석 기법은 위의 세 가지이다. 하지만, 이 세 가지 방법들은 공통적으로 수계산을 목적으로 개발되었거나, 전산 프로그램에 적용하기에는 적절하지 못한 단점을 가지고 있다. 기본적으로 위의 세 가지 방법을 이용하여 전산 프로그램을 작성하기 위해서는 Loop에 대한 정보를 입력해 주어야 하거나 또는 프로그램이 Loop를 인식할 수 있도록 해주어야 한다. 하지만, 전자는 사용자의 입장에서 매우 불편한 사항이고, 후자는 프로그램을 작성하는 사람의 입장에서 매우 어려운 문제이다. 그리고, 위의 세 가지 방법은 계산시간, 초기치 문제 등에 있어서 약간의 단점을 가지고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 수치해석의 기본개념을 배관망해석에 도입하여 새로운 배관망해석 기법을 개발하였으며, 새로이 개발된 배관망해석 기법을 SIS(Section Iterative Scheme)라고 부른다.

4. SIS(Section Iterative Scheme)

SIS는 수치해법인 FDM과 FEM의 개념을 배관망해석 기법에 도입한 것이다. 불특정한

형태를 가지는 대상에 대해 역학적 거동을 고찰하고자 할 때, 고찰 대상의 형태가 지배 방정식을 직접 적용하기에 부적절할 경우에 역학적 거동을 명확하게 알 수 있는 단위로 고찰하고자 하는 대상을 분할하여 역학적 거동을 고찰하는 FDM 또는 FEM처럼, 복잡한 배관장치에서의 유량분배와 압력손실을 산정할 때 복잡한 배관장치를 직접적으로 해석하는 것은 매우 어렵기 때문에 앞서 설명한 것들과 같은 배관망해석 기법들이 제안된 것이다.

하지만, SIS는 배관장치를 이루는 각각의 관에 대해 압력손실을 산정하고, 이 관장치를 조합할 때의 유량분배를 고려해 줌으로써 전체 배관장치에서의 유량과 압력을 해석하게 된다. 앞서 밝힌바와 같이 NFPA Code 13에서는 유동압력손실 산정식으로서 Hardy-Cross Equation을 사용하고 있으므로, 본 연구에서도 이 산식을 이용한다. 먼저, 식(2)에서 손실압력과 유량을 제외한 모든 항은 배관장치의 제원으로부터 얻어지는 상수이므로, 식(2)를 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_L = FLTQ^{1.85} \quad (3)$$

식(3)에 Linear Method의 개념을 도입하여 변환하면 식(4) 및 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_L = FLTQ^{0.85} \cdot Q = FQ \quad (4)$$

$$Q = RP_L \quad (5)$$

식(4)와 식(5)는 SIS에서 유동압력손실과 교차점(Junction)에서의 유량분배를 산정할 때 사용되는 기본방정식들이다.

Fig. 1에서 설명한 바와 같이 Fig. 1과 같은 배관장치에서는 어느 한 Node에서의 압력과 어느 한 Section에서의 유량이 경계조건으로 주어지면, 다른 Node와 Section에서의 압력과 유량을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3와 같이 복잡한 배관장치에서도 마찬가지이다. 여기서, 수계소화장치에 사용되는 Nozzle은 식(6)과 같은 특성을 가지므로, 수계소화장치에서는 어느 한 Nozzle에서의 압력 또는 유량만 주어지면, 전체 배관장치를 해석할 수 있다.

$$Q = K\sqrt{P} \quad (6)$$

앞서 말한 바와 같이, SIS는 배관장치를 구성하는 각각의 관에 대해서 압력손실을 산정하고 조합하여 전체 배관장치를 해석한다. 하지만, 배관장치의 각각의 관에 대해서 압력손실을 산정함에 있어서 경계조건을 고려해주지 않으면, 해를 구할 수 없다. 여기서, 경계조건을 전체 배관장치를 구성하는 관에 대해 고려해 주도록 하는 것이 SIS이다.

예를 들어, Fig. 3를 보자. Fig. 3는 모든 이 50A Schedule 40의 관으로 구성된 것으로 가정하였으며, 모든 Nozzle의 K값은 100으로 가정하였다. Fig. 3에서 18번 Node에 있는 Nozzle에서의 압력을 1bar로 가정하였다.

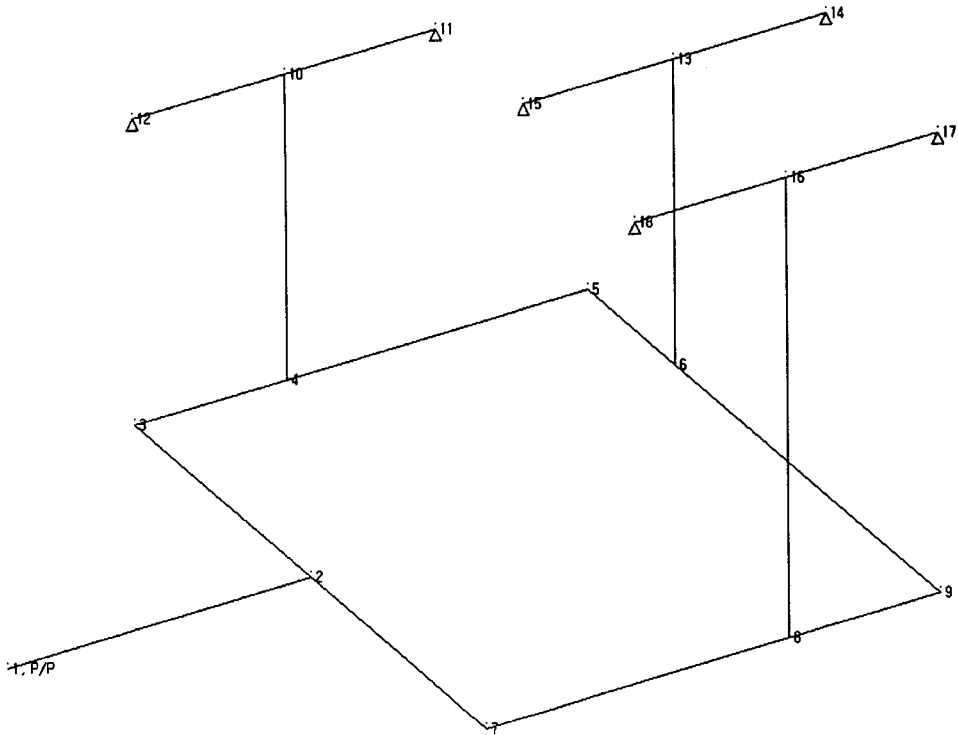


Fig. 3. Pipe network for Analysis

전산프로그램에서 각각의 관의 압력손실을 해석함에 있어서, SIS 변수를 사용하여, 경계조건이 되는 Node를 포함하는 Section의 값은 1로 하고 다른 Section에 대해서는 0으로 하여 계산을 시작한다. 연결된 Section의 SIS 변수의 값이 0인 경우에는 계산을 하지 않고, 연결된 Section의 값이 1인 경우에만 압력손실 계산을 수행하고, 압력손실 계산이 수행된 Section에 대해서는 SIS 변수의 값을 1 또는 2로 변경한다. 이렇게 해서, 전체 배관장치에 대하여 한번의 계산이 완료되면, SIS 변수의 값이 0인 Section이 없어질 때까지 전체 배관장치에 대해 계산을 반복한다. 이렇게 계산을 반복하게 되면, 결과적으로 배관장치를 구성하는 모든 관은 경계조건으로부터 직·간접적으로 영향을 받게 된다. 이렇게 해서 전체 배관장치에 대해 압력손실계산이 완료되면, 유량 분배에 대한 계산을 수행하여야 한다.

일반적인 배관장치에서의 유량분배는 연결된 Section들의 유량의 합이므로 계산이 간단하지만, 교차점(Junction)에서의 유량분배를 평형상태를 이루도록 고려해 주어야 하므로 복잡하다. Fig. 3에서 6번 Node는 5-6 Section과 9-6 Section의 유량이 13-6 Section의 유량이 평형상태에 맞도록 분배되어야 한다. 이러한 상황에서는 식(5)를 이용하여 유량 분배를 계산할 수 있다. 먼저, 6번 Node에서의 연속방정식은 식(7)과 같다.

$$Q_{13-6} = Q_{5-6} + Q_{9-6} \quad (7)$$

식(7)에서 5-6 Section과 9-6 Section은 에너지 평형을 이루어야 하고, 유량은 압력손실

에 비례한다. 즉, 유량이 크면 압력손실이 증가하고, 유량이 작으면 압력손실은 줄어든다. 그러므로, Q_{5-6} 와 Q_{9-6} 은 각 Section에서 압력손실의 크기에 비례하게 된다. 그리고, Q_{5-6} 와 Q_{9-6} 은 식(8)과 같이 표현할 수 있으므로, 식(8)로부터 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{5-6} &= R_{5-6} (P_5 - P_6) = S_{5-6} \\ Q_{9-6} &= R_{9-6} (P_9 - P_6) = S_{9-6} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_{5-6} &= Q_{13-6} \frac{S_{5-6}}{S_{5-6} + S_{9-6}} \\ Q_{9-6} &= Q_{13-6} \frac{S_{9-6}}{S_{5-6} + S_{9-6}} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)를 일반화하여 표현하면 식(10)과 같다.

$$Q_N = Q_{OUT} \frac{R_N \Delta P_N}{\sum R_{IN} \Delta P_{IN}} \quad (10)$$

식(10)에서 N 은 임의의 Section을 OUT 은 N Section으로부터 유출되는 유량의 합, IN 은 N Section의 한 Node로 유입되는 Section들을 의미한다.

5. 계산결과

Fig. 3로 주어지는 배관장치를 SIS를 적용하여 계산한 결과로서, 각 Nozzle에서의 유량은 Table 1과 같고, 이때 1번 Node에서 요구되는 Pump의 성능은 $617.9\text{ lpm} \times 1.57\text{ bar}$ 이다.

Table 1. Result of Calculation

Node	P(bar)	Q(lpm)
11	1.110	105.35
12	1.110	105.35
14	1.073	103.58
15	1.073	103.58
17	1.000	100.00
18	1.000	100.00

6. 결론

본 연구에서는 새로운 개념의 배관망해석 기법인 SIS를 개발하였으며, 이 기법을 이용하여 NFPA Code 13에 따른 수계소화장치의 소화성능을 설계단계에서 검증할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 전산 프로그램을 수계소화장치의 설계작업에 적용한다면, 각종 규격에 적합한 수계소화장치를 효율적으로 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 1) Rolf H. Sabersky, 강창수, 유정열, 조강래 공역, “유체유동”, 개정3판, pp. 170-171, 범한서적주식회사, (1992)
- 2) John J. Titus, “Hydraulic”, NFPA, Section 1, Chapter 1, “Fire Protection Engineering”.
- 3) Russel P. Fleming, “Automatic Sprinkler System Calculations”, NFPA, Section 3, Chapter 2, “Fire Protection Engineering”.
- 4) T. J. Casey, “Water and Wastewater Engineering Hydraulics”, Oxford University Press, (1992)