

## 지역 난방 시스템(Ⅳ)

### District Heating System(Ⅳ)

오 후 규

H. K. Oh

부산수산대학교 냉동공학과

### 3. 지역배관망

기호

1,2 : 배관의 입구와 출구에 대한 index

A : 배관단면

AA : 신축계수(평활의 경우)

a : 정수

a : 음속

B : 地中溝의 폭

b : 暗渠의 폭

C : 하중계산계수

c : 복사정수

$C_1$  : 허용오차 할증정수

$C_2$  : 부식 할증계수

$C_p$  : 비열

$C_p$  : 정압비열

$C_s$  : 하중계산계수

$C_v$  : 하중감소계수

D : 증기

D/K : 수증기/응축수

d : 관직경

d : 호칭경

d : 입자경

$d_j$  : 단열재를 포함한 배관의 외경

dt/dl : 온도와 길이의 미분

E : Young 계수

E : 탄성계수

$E_{st}$  : 강 탄성율

$E_t$  : 온도 탄성계수

g : 중력가속도

$F_E$  : 토압(土壓)에 의한 수직력

$F_F$  : 평면하중

FL : 지상배관

$F_R$  : 마찰력

$F_v$  : 용량에 의한 하중

H : 지중구(地中溝) 높이

$\Delta H$  : 고도차

HK : 暗渠 배관

$\Delta H_T$  : 0 수평면에서 관 중심선까지의 고도차

HW : 고온수

h : 기준높이에 대한 관 중심선 높이

h : 暗渠 높이

h/l : 구배

$\Delta h_{21}$  : 동엔탈피증기교축 끝점 2i의 과열 엔탈피(그림 3.9 참조)

I	: 배관단면의 관성 모멘트(Moment)	l	: 유효 배관길이
I	: 융통성의 정도	$l_0$	: 연장 배관길이
i	: 절점(節点)에서 시작되는 분기배관의 수	$l_{igu}$	: 상당길이
i	: 질량유량의 수	$\Delta l$	: 길이의 변화
j	: 절점(節点)에 들어오는 분기배관의 수	$\Delta ID$	: 신축계수(伸縮繼手)의 계산에 대응한 유효열팽창
j	: 분기배관의 수	$l_E$	: 배관 지지간격
K	: 접속점(지역배관망의 배관과 공급점과의 접속점) 수	$l_s$	: 지지간격
K	: 응축수	$\Delta l_v$	: pre-stress량
k	: 보온을 한 배관의 열통과율	$l_{zul}$	: 허용지지간격
k	: 支持材의 배관본수에 대한 계수	$\Delta l_{zul}$	: 표에 의한 허용열팽창량
k	: 열통과율	$\Delta l_{zul,k}$	: 보정된 허용열팽창량
k	: 절점(節点) 분기배관의 총수	LS	: 배관 시스템
k	: Rankine의 토압(土壓) 계수	M	: 시스템내의 총수량
k	: 흙(土)의 통과계수	m	: sub 시스템의 수
$k_1$	: 보정표에 의한 보정계수	$\dot{m}$	: 질량유량
$k_{100}$	: 호칭경 100에 대한 배관 건설비	$\dot{m}_m$	: 평균 고온수 유량
$k_A$	: 출력에 의한 순환펌프의 설치가격	$\dot{m}_{max}$	: 최대 고온수 유량
kD	: 신축계수(伸縮繼手) 없음(無 신축계수)	$\dot{m}_N$	: 지역배관망의 순환질량유량
$k_d$	: 호칭경 800에서 1000까지의 배관 건설비	$\Delta \dot{m}_{TV}, \Delta \dot{m}_{TR}$	: 수송 및 반송 질량유량의 변화
k/d	: 상대상당조도(거칠은 정도)	n	: 배관 j의 분리총수
$k_E$	: 순환펌프의 에너지 가격	n	: 배관구배(길이에 대한 높이의 차)
$k_j$	: 단열재 두께에 의한 단열재 가격	NW	: 호칭경
KL	: 暗渠(지하배수) 없음	P	: 폐쇄밸브에 미치는 반작용의 힘
$k_M$	: 단위면적당 피복재 가격	p	: 흐르고 있는 매체(媒體)의 압력
$k_{Q,A}$	: 열의 종량 요금	$\Delta p$	: water hammer에 의한 수격압
$k_{Q,L}$	: 열의 기본 요금	$\Delta p$	: 압력손실
$k_R$	: 배관경, 배관단위 길이에 따른 배관 가격	$\Delta p$	: 배관의 최대압력과 최소압력의 차
$k_R$	: 배관비용	$p_{Azul}$	: plant의 허용운전압력
$k_V$	: 단위 용적당의 단열재 가격(마크)	$\Delta p_D$	: 안전할증
$k_w$	: 물 압축율	$p_i$	: 내압력
l	: 관 길이	$p_M$	: 평균압력
l	: 배관의 연장길이	$p_{max}$	: 배관 최대압력
l	: 배관길이	$p_{min}$	: 배관 최소압력
l	: 길이	$p_R$	: 마찰력
l	: 도로길이	$\Delta p_R$	: 마찰손실
		$p_{Red}$	: 반력
		$p_s$	: 포화압력
		$\Delta p_{TD}$	: 가압장치의 편차
		$p_v$	: 교통하중
		q	: 단위길이의 배관질량

R	: 기체정수	WA	: bellows형 신축계수
R	: 반송관의 단열재 두께	z	: 년간 고정부
r	: 증발잠열	$Z_i$	: 재료의 성질에 따른 열전도율의 할증 계수
r	: 모세관 반경	z	: 지역배관망 분기(접속점간의 접속) 수
$Re$	: Reynolds수	a	: 수직에 대한 모세관의 경사각도
s	: 배관벽 두께	a	: 열팽창계수
$S_0$	: 최저 배관벽 두께	a	: 온도팽창계수
$T_0$	: 엑서지(Exergy)를 결정할 때의 온도	$a_a$	: 외측 열전달률
$T_1$	: 배관의 최초지점의 증기온도	$a_1$	: 내측 열전달률
$T_m$	: 증기의 평균온도	$a_{PR}$	: 관의 압축계수
$T_u$	: 주위온도	$a_{PW}$	: 물의 압축율
t	: 열매온도	$a_s$	: 복사 열전달률
$\Delta t$	: 배관온도와 주위온도와의 차	$a_{TR}$	: 관 팽창계수
$\Delta t$	: 온도차	$a_{TW}$	: 물 팽창계수
$\Delta t$	: 온도변화	$\beta_i$	: 분기배관 i에서 시작되는 sub-system의 정수
$\Delta t$	: 수송온수의 온도변화	$B_{i=1}$	: 분배시스템이 존재하지 않는 경우
$\Delta t_{max}$	: 차가운 상태와 운전상태의 온도차	$\beta_m$	: 정수
$t_{min}$	: 차가운 상태의 최저온도	r	: 배관의 경사각
$t_{mon}$	: 조립시 온도	$\epsilon$	: $\Delta l / l_0$
$\Delta t_{Mon}$	: 조립시 온도와 최저온도의 차	$\eta$	: 물의 동점도
$t_u$	: 주위온도	$\eta_{dyn}$	: 용접효율
U	: 배관둘레 길이	$\eta_p$	: 순환펌프의 효율
U-B	: U자형 bend관	$\theta$	: 주위온도 $T_u$ 에 대한 온도차 $T - T_u$
V	: 수송관의 단열재 두께	$\lambda$	: 관 마찰계수
V	: pre-stress의 비율	$\lambda$	: 배관 마찰저항계수
$V_A$	: 분기관 부분의 용접효율	$\lambda$	: 관 마찰계수
$V_A$	: 팽창 tank 용적( $m^3$ )	$\lambda_B$	: 열전도율
$V_B$	: 곡관부의 용접효율	$\lambda_j$	: 단열재의 열전도율
$V_{Bmax}$	: 팽창수량( $m^3/h$ )	$\lambda_R$	: 배관의 열전도율
$V_N$	: 지역배관망의 내용적	$\lambda_Z$	: 시공법에 따라 정해지는 열전도율의 할증계수
$V_P$	: 압력 P하에서의 배관용적	$\mu$	: 부착 마찰계수
$V_V$	: 수송온수용적	$\mu'$	: 매립한 홈과 구(溝) 벽판 사이의 마찰 계수
$V_{VT}$	: 수송온수용적	v	: 용접효율(직관부분)
$V_{res}$	: 상당용접효율	$v_N$	: 용접효율
$v_v, v_r$	: 수송 및 반송의 운수 비용적(첨자 0은 초기상태)	$\rho$	: 고온수 밀도
w	: 배관단면의 저항 moment	$\rho$	: 물의 밀도
w	: 공기속도(風)	$\rho'$	: 마찰각도
w	: 흐르고 있는 매체의 속도		
$\Delta w$	: 속도변화		
$w_0$	: 초속		

- $\rho_E$  : 복토(覆土) 밀도
- $\sigma$  : 표면장력
- $\sigma_a$  : (배관외) 축응력
- $\sigma_r$  : (배관외) 원단면 반경방향 응력
- $\sigma_t$  : (배관외) 접선응력
- $\sigma_{zul}$  : 허용응력 값
- $\sigma_{zul, t}$  : 온도에 따른 허용응력
- $\tau$  : 전단응력
- $\tau_B$  : 운전시간
- $\tau_b$  : 사용시간
- $\tau_s$  : 폐쇄밸브의 폐쇄시간
- $\tau_T$  : 보급 또는 방출시간
- $\varphi$  : 충격력의 계수

### 3.1 지역배관망의 형상

지역배관망의 비율은 지역열공급 시스템 전체 투자액의 약 30~35%를 차지하고 있으며, 특수한 경우는 50%까지 이르고 있다. 그래서 비용문제 때문에 플랜트는 시스템의 중앙부에 배치된다. 아래의 설명은 온수·증기열매의 재래 지역 난방배관망에 관한 것이다. 표 3.1에 세계의 우수한 열반송 시스템 자료를 나타내었다. 표기의 주요 파라메타와 함께 지역배관망의 구성이 지역 열분배의 중요한 특징이다. 이것은 지역조건, 시스템의 확장조건, 공급의 신뢰성 조건 및 투자조건에 의해 결정된다. 지역배관망은 기본적으로 다음의 3종류로 분류된다.

표 3.1 각국의 지역열반송 시스템

고온수

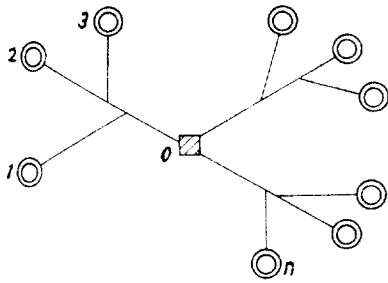
국 가	지역명	최종압력 (MPa)	출 력 (mW)	최초온도 (°C)	최대관경 (mm)	관 장 (km)
소비에트 연합	백 러 시 아		2270	180	1200	20
	중 앙 유 럽		1910	150	1000	15
	볼 카		1585	150	1000	24
	우 라		1165	180	800	26
	중 앙 시 베 리 아		2790	150	1000	14
	동 시 베 리 아		1630	200	900	25.5
폴 란 드	극 동		326	150	800	22
	바 르 샤 바		800	150	1100	6
	바 르 샤 바		525	150	1000	6
체코슬로바키아	프 로 라 프		400	150	900	3
	오 스투라 프		250	170	500	6
스 웨 덴	바 르 세 벨 그		230	130	700	15

증 기

국 가	지역명	최종압력 (MPa)	출 력 (mW)	최초온도 (°C)	최대관경 (mm)	관 장 (km)	
소비에트 연합	중 앙 유 럽 러 시 아	1.3	390	300	800	4.0	
	중 앙 아 시 아	1.3	130	300	500	7.7	
	우 라	1.0	110	280	400	6.4	
루 마 니 아	프 로 이 에 슈 더	1.6	210	300	600	9.5	
	아 메 리 카	런 덴 a	1.0	360	232	750	1.9
	런 덴 b	5.1	277	400	400	1.9	
덴 마 크	뉴 욕	2.8	300	231	600	3.0	
	펜 하	1.8	550	300	500	2.6	
	코펜 하	1.8	325	230	700	4.5	

1) 방사상 지역배관망

이 구성은 부하가 크거나 공급의 중심점이 공간적으로 상호간에 멀리 떨어져 있을 경우에 선정된다. 방사상 지역배관망은 확장해서 더욱 더 큰 시스템으로 발전한다. 이 경우 주관의 관경은 처음 시작하는 유량에서 결정되고 있다는 것에 유의해야 한다. 이 구성은 검사나 출력조건 제어를 하기 쉬운 잇점을 가지고 있다.(그림 3.1 참조)



0 : 열원 1...n : 열부하  
그림 3.1 방사상 지역배관망

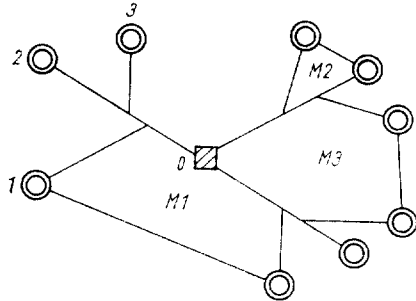
로 채용되고 있다.(그림 3.3)

지역배관망의 특징을 결부시키기 위하여 특성량(特性量)으로서 융통성(融通性)을 나타내는 V를 이용할 수 있다.

$$V = \frac{Z - (K - 1)}{K}$$

여기서, K : 접속점(지역배관망에 있어 배관과 공급점과의 접속점) 수

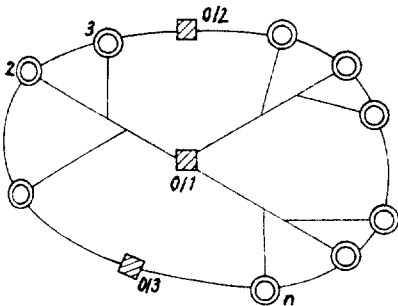
Z : 지역배관망 분기(접속점간의 접속) 수



0 : 열원 M1 ~ M3 : 망목(綱目)  
그림 3.3 망목상 지역배관망

2) 환상지역 배관망

이 지역배관망의 형태는 주로 방사상 지역배관망을 더 확장시킨 것이고, 주관이 결합되어 1개 또는 2, 3개의 큰 원형이 된다.(그림 3.2) 이렇게 함으로 해서 지역열공급 시스템의 공급안전성이 현저히 높다.



/1 ~ 0/3 : 열원 1...n : 열부하  
그림 3.2 환상 지역배관망

지역배관망의 표준비례는 수송관과 반송관의 2관 방식으로 할 수 있다. 특수한 배열에는 1관 방식(수송관만)과 3관 방식(2관 수송, 1관 수송)이 있다. 병렬로 부설된 관수는 반송되어야만 하는 출력과 기계제작 조건에 의존한다.

3.2 수력학적 분석

3.2.1 기본식

원형단면에서 마찰이 있는 흐름은 아래의 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$\rho g dh + dp + \rho w dw + \frac{\lambda dl}{d} \frac{w^2}{2} \rho = 0$$

여기서, h : 기준높이에 대한 관의 중심선 높이

p : 흐르는 매체의 압력

w : 흐르는 매체의 속도

l : 관 길이

d : 관 직경

λ : 관 마찰계수

이것을 적분함으로써 임의의 경계조건에 대

3) 방목상 지역배관망

이 지역배관망의 형태는 안전공급이 강력히 요구되는 인구밀집지역에서 특히 확장수단으

한 계산식을 얻을 수 있다.

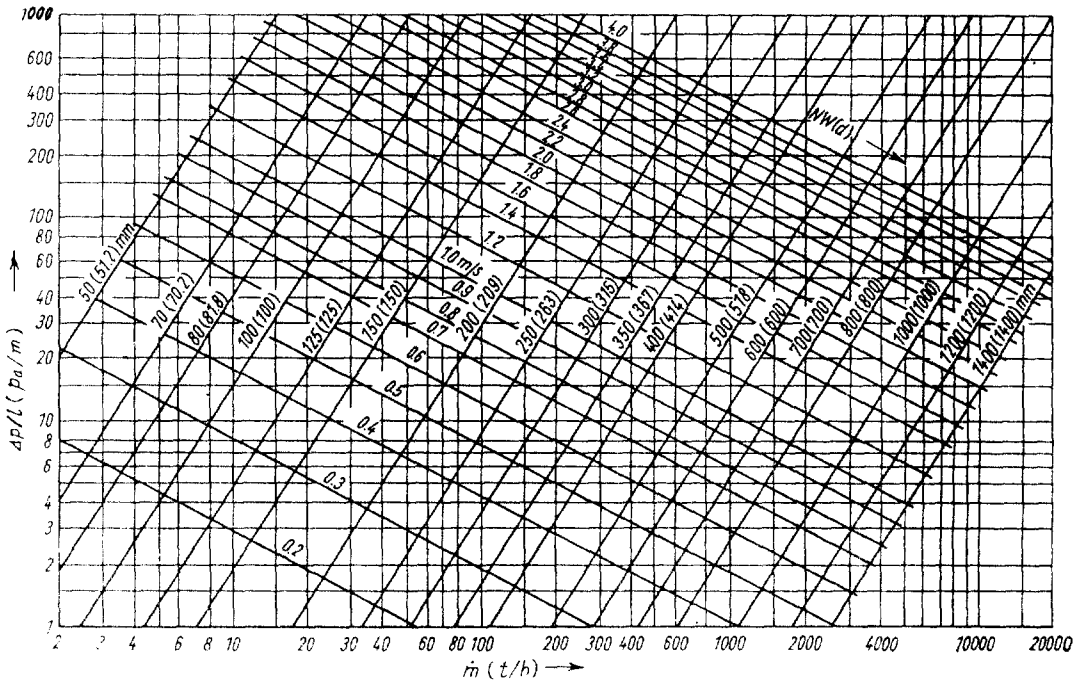
3.2.2 고온수 배관의 압력강하

고온수 및 온수는 비압축성유체라고 할 수 있다. ( $\rho \approx$  일정)

이 조건하에서 비압축성 유체의 정상운동에 대해 앞에 나타낸 미분방정식을 풀면 다음의 베르누이 방정식을 얻을 수 있다.

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{\lambda l}{d} - \frac{w^2}{2g}$$

첨자 1,2는 배관의 최초와 최종을 나타낸다. 차  $(w_1^2 - w_2^2) / 2g$ 는 다른 항과 비교해서 무시할 정도로 작으므로, 직선 배관에서는 2점간의 압력강하에 대해 아래의 식이 성립된다.



기준온도 100°C. 관의 조도  $k=0.15\text{mm}$ , NW=Nennweite 호칭경

그림 3.4 고온수 배관의 압력손실 약계산<sup>(3,3)</sup>

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\lambda l}{d} \frac{\rho w^2}{2} + (h_2 - h_1) g \rho$$

곡부, 분기, 벨로우즈, 밸브, 팽창탱크 등과 같은 배관요소에서의 흐름저항은 상당장  $l_{agu}$ 로 생각하여, 여기에 연장배관길이  $l_0$ 을 더한 다음의 계산식에 의한 배관장  $l$ 를 사용한다.

$$l = l_0 + l_{agu}$$

정의에 의해, 상당길이는 아래 식으로 계산될 수 있다.

$$l_{agu} = \sum \zeta \frac{d}{\lambda}$$

임의의 배관 section 또는 배관망의 압력강하에 다음의 식이 적용될 수 있다.

$$\Delta p = p_1 + p_E + (h_2 - h_1) g \rho$$

여기서, 마찰에 의한 직관의 압력손실은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\Delta p_1 = \frac{\lambda_0 \rho}{2d} W^2$$

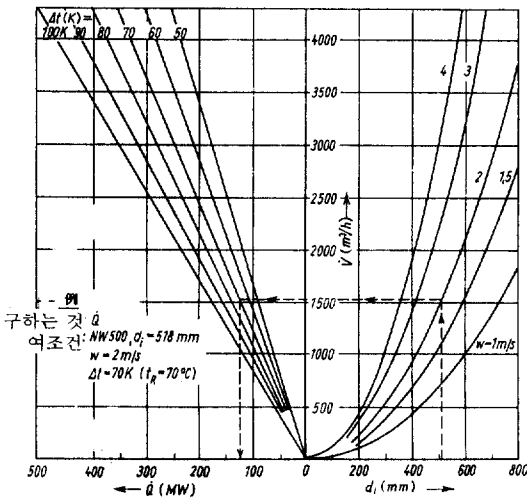


그림 3.5 고온수 배관의 열수송 용량을 평가하기 위한 계산도표

또, 국부저항에 의한 압력손실은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\Delta p_E = \sum \zeta \frac{w^2}{2} = \frac{\lambda_{\text{agu}}}{d} \frac{\rho}{2} w^2$$

압력손실의 약식 계산은 그림 3.4을 사용하여 구할 수 있다. 또 열수송 용량은 그림 3.5를 이용하여 계산할 수 있다.

### 3.2.3 과열 증기배관의 압력강하

절대압력과 비교해서 현저한 압력강하가 있는 길이가 긴 배관에 있어서는, 증기 또는 기체의 압축성을 고려해야만 한다. 압축성 매체의 압력손실 계산에 일반적으로 사용되는 식은 아래의 가정을 근거로 하고 있다.

i) 기체 및 증기는 밀도가 작기 때문에 배관 각 점 높이의 차는 대개 무시할 수 있다.

$$\text{즉 } \rho g dh \approx 0$$

ii) 증기는 이상기체로 볼 수 있기 때문에 기체식  $P = \rho RT$ 를 적용할 수 있다.

iii) 압력강하가 일어날 때, 밀도의 감소에 의해 일어나는 흐르고 있는 증기의 운동에너지 증가에 의한 압력변화는 무시할 수 있다.

$$\text{즉 } \rho w dw \approx 0$$

수송될 수 있는 증기의 온도는 아래의 식에 나타낸 것처럼 열손실에 의해 변한다.

$$T = T_1 - (T_1 - T_v) \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{kUI}{mc_p} \right] \right\}$$

여기서,  $T_1$ : 배관의 최종 증기온도,  $T_v$ : 주위 온도,  $k$ : 보온을 한 배관의 열통과율,  $U$ : 배관의 원주길이,  $l$ : 배관의 연장 길이,  $m$ : 질량 유량,  $c_p$ : 정압비열

표 3.2 증기교축에 의한 온도구배

	증기 온도 (°C)						
	100	150	200	250	300	350	400
증기압력(MPa)		0.5	1.0	1.5	2.2	4.0	6.0
온도구배(k / 100kPa)	6.38	3.78	2.50	1.69	1.23	0.92	0.74
	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.5	2.6
	3.61	3.74	2.43	1.66	1.22	0.92	0.71
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2
	3.61	4.04	2.37	1.69	1.22	0.90	0.75

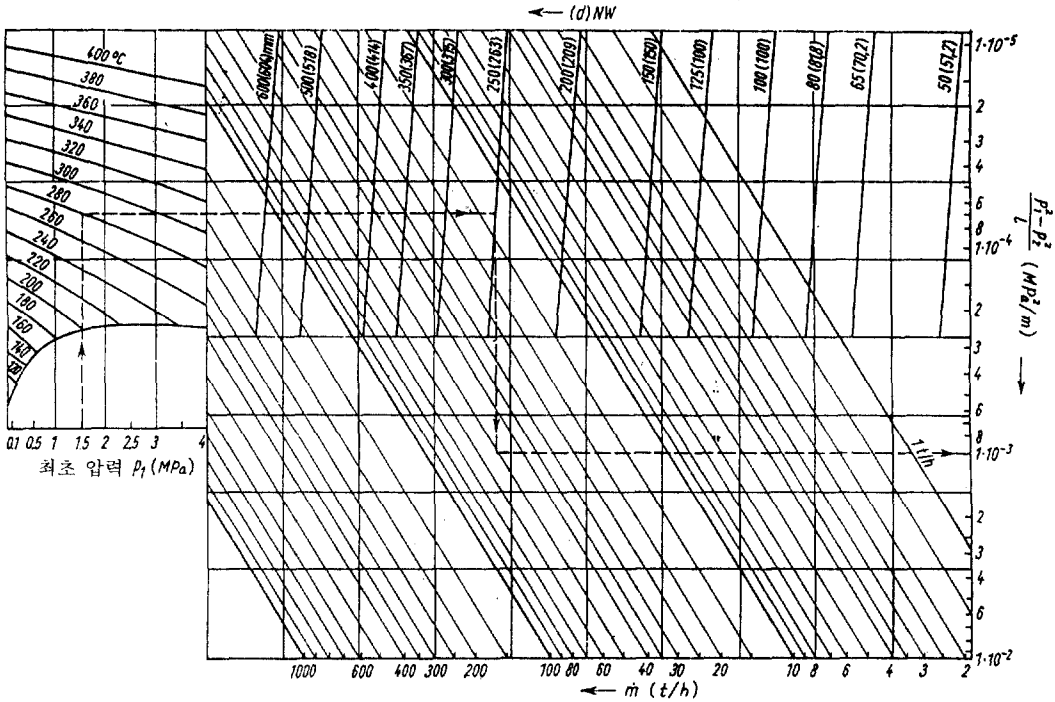


그림 3.6 증기배관의 압력손실 약(略)계산(3.3)

직경이 일정한 배관에서는  $w\rho = \text{一定}$ 이므로 연속의 식이 적용될 수 있다. 이상의 조건 하에서 기본식을 적분하여 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_1 \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{w_{101}^2}{p_1} \frac{\lambda l}{d} \frac{T_m}{T_1}} \right]$$

또는, 질량유량  $m$ 으로 나타내면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta p = p_1 \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{16}{\pi^2} \frac{m^2}{d^5} \frac{\lambda l}{\rho p_1} \frac{T_m}{T_1}} \right]$$

좋은 근사값을 얻을 수 있기 때문에 대수평균 온도  $T_m$ 은 산술평균

$$T_m = (T_1 + T_2) / 2$$

또는,  $T_m = T_1 - 0.5(\Delta t_{dr} + \Delta t_r)$ 로써 근사할 수 있다.

증기교축에 의한 온도강하  $\Delta t_{dr} = (dt/dp)$   $\Delta p$ 는 압력과 온도에 의존한다.<sup>(3.3)</sup> 열손실에 의한 온도강하는 다음의 식으로 나타내어진다.

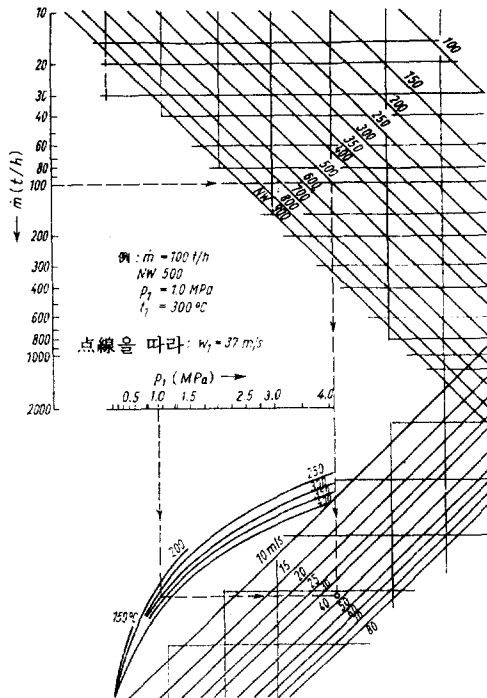


그림 3.7 증기반송에 대한 질량유량과 속도의 산정



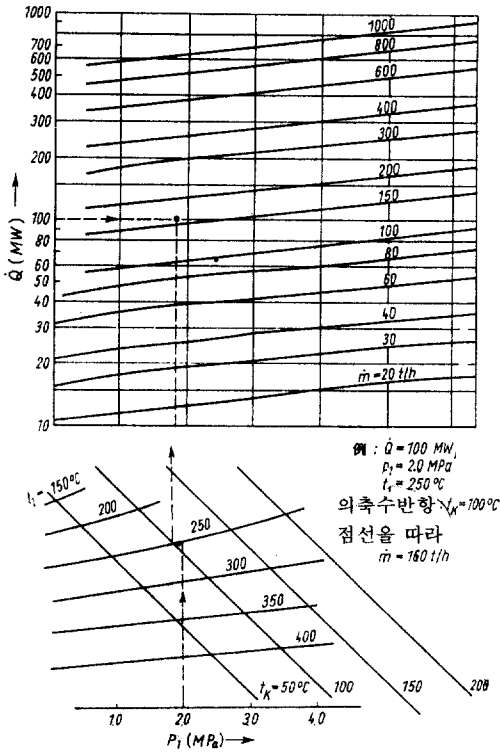


표 3.8 증기지역 배관망의 열반송 유량의 약(略) 산정

$$\Delta t_v = (T_1 - T_w) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{kUI}{m\dot{c}_p}\right] \right\}$$

배관이 끝나는 곳의 증기상태에 관해서는 앞의 다음과 같이 된다.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_2 \left( \sqrt{1 + \frac{\lambda l}{d} \frac{w_2^2 \rho_2}{p_2} \frac{T_m}{T_2}} - 1 \right)$$

또는,

$$\Delta p = p_2 \left( \sqrt{1 + \frac{16}{\pi^2} \frac{m^2}{d^5} \frac{\lambda}{\rho_2 p_2} \frac{T_m}{T_2}} - 1 \right)$$

다음 식에 의해 증기압력강하 계산의 오차 평가를 할 수 있다.

$$\Delta p = -\frac{1}{1 - \frac{\Delta p}{2p_1}} \frac{\lambda}{d} \frac{w_1^2}{2} \rho_1$$

그림 3.6의 계산도표를 사용해서 압력손실의 개략값을 얻을 수 있다. 그림 3.7 및 그림

3.8은 증기지역 배관망에서 속도 및 반송유량의 산정에 보조적으로 사용할 수 있다.

### 3.2.4 포화증기배관의 압력손실

그림 3.9에 있어서 압력강하  $\Delta P$ 를 발생시킬 때의 열손실  $\Delta q_v / \Delta P$ 가, 포화증기선(그림 3.9의 곡선 2)에 의해 주어지는 상태  $\Delta h_2 / \Delta P$ 를 초과해서, 습증기지역의 상태(예를 들면 그림 3.9의 곡선 1)에 들어가는 즉시 배관내에서 응축이 일어난다. 이때 발생하는 이상류의 형태(분출류, 환상류, 맥동류 또는 와류)는 흐름의 경계조건에 의존한다.<sup>(3, 2)</sup>

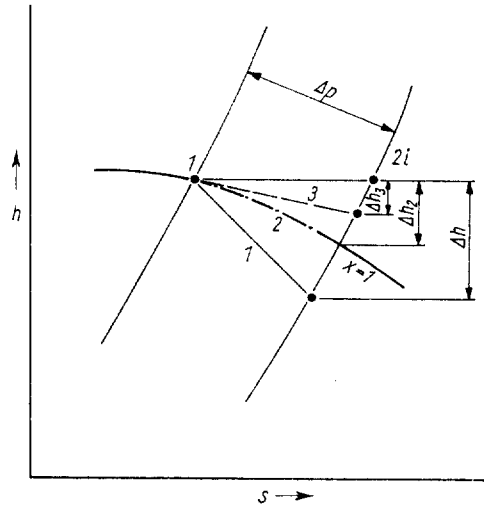


그림 3.9 포화증기의 반응을 설명하기 위한 h, s 선도

교축 또는 마찰에 의한 압력강하로 발생하는 열손실이 작을 경우에는, 증기는 과열증기 구역에 있는 상태로 되어서 증기는 건조 또는 과열이 일어난다.(그림 3.9의 곡선 3) 응축수가 완전히, 또 정상적으로 배출될 경우에는 배관내에 정상적인 포화증기가 존재하여 증기의 상태변화는 포화증기 선상을 움직인다.(그림 3.9의 곡선 2)

이와 같이 이상적인 조건하에서 다시 위치항 및 가속도항을 무시할 수 있다고 가정하여, 앞에서 설명한 미분방정식으로부터 다음의 계산식을 유도할 수 있다.

$$\Delta p = p_1 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{w_1^2 \rho_1}{p_1} \frac{\lambda l}{d} \frac{m_2}{m_1}} \right)$$

또는,

$$\Delta p = p_1 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{16}{\pi^2} \frac{m_2^2}{d^5} \frac{\lambda l}{d} \frac{m_2}{m_1}} \right)$$

배관의 최초와 최종장소의 증기흐름 상태에 대해서 다음 식을 적용할 수 있다.

$$\frac{m_2}{m_1} = 1 - \frac{kU\theta l}{r m_1} + \frac{\Delta h_{23}}{r}$$

여기서,  $\Delta h_{23}$ : 등엔탈피 증기교축 끝점 2의 과열엔탈피(그림 3.9 참조)

$r$  : 증기잠열

$\theta$  : 주위온도  $T_U$ 에 대한 온도차  $T - T_U$

압력강하에 의한 비용적의 증가는 식  $pv =$  일정으로서 아주 잘 근사시킬 수 있다.

### 3.2.5 관마찰계수와 저항계수

마찰계수  $\lambda$ 는 무차원양으로써, 흐르고 있는 매체의 마찰에 의한 흐름저항을 특징지우는 것이다. 이것은 아래의 식에 나타난 것처럼 관벽과 흐르는 매체사이의 전단응력  $\tau$ 와 동압과의 비례계수로써 정의될 수 있다.

$$\tau = \frac{\lambda}{4} \frac{w^2}{2} \rho$$

마찰계수  $\lambda$ 는 흐르는 상태와 벽조도와의 관계로부터 레이놀즈수  $Re$ 와 상대상당조도  $k/d$ 의 관계로 나타내면 사용상 편리하다. 상

당 조도(사조도(砂粗度)라고도 함)는 조도의 형상이 마찰에 영향을 주기 때문에 대개의 경우에는 관벽 돌출평균높이는 일치하지 않는다. 그래서 아래의 모든 식을 기초로 해서 실험적으로 정하고 있다. 가장 중요한 모든 예에 대한 조도값을 표 3.3에 열거하였다.

층류( $Re < 2300$ )에 대해서는 다음 식을 적용할 수 있다.

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

대개의 경우 관내흐름 매체는 난류이다. 이 영역에 대해서는 Colebrook와 White가 제안한 다음식을 적용할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{2.71d} \right)$$

이 식으로부터  $k/d \neq 0$ 으로서 매끄러운 관에 대해 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg Re \sqrt{\lambda} - 0.8$$

레이놀즈수가 클 때, 즉 다음의 조건하에서

$$Re > \frac{200d}{k} \quad \text{또는} \quad 0.0465 \frac{k}{3.71d} > \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}$$

완전히 난류에 대한 관마찰계수의 식이 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{3.71d}{k} = 2 \log \frac{d}{k} + 1.14$$

표 3.3 관에 대한 조도값 [표준치] (mm)

관종 · 표면상태 · 운전상태	TGL에 의함 <sup>(3.3)</sup>	배관핸드북에 의함 <sup>(3.4)</sup>	ALTSCHUL과 KISELEV에 의함 <sup>(3.5)</sup>
강관(인발)			
신관	0.03~0.05	0.03~0.05	
사용한 조금 부식된 관	0.1~0.3	0.1~0.3	
아스팔트 도장관	0.04		
강관(이음매 없음)	0.03~0.05	0.03~0.05	0.01~0.02
신관		0.05~0.06	
아스팔트 도장관			
수 · 증기관, 연수사용후 정확한 관	0.04	0.04	수년운전 후
부식으로 우묵하게 들어감. 국부부			0.15~0.3
식으로 덮힌, 침전물이 없는 관	0.1~0.2	0.1~0.6	
조금 부식되어 있고, 조금은 침전물	0.4	0.4	0.3~0.7
이 있는 관			
다수의 부식을 발생시키고, 침전물	3	3	2~4
이 많은 관			
과열증기용의 보온을 실시한 증기	0.1	0.2~0.4	
관, 압력배출관이 있고, 그 위에 약			
제세정을 하는 고온수관			
주기적으로 운전하는 증기관 및 개	0.5	1.0	
방계의 응축수관		0.2	
주기적으로 운전하는 응축수관, 압	1.0		
력배출관이 없고, 약제선정을 하지			
않는 온수관, 포화증기관 및 온수관			
강관(용접)			
신관(도장수)	0.04~0.1	0.04~0.1	0.03~0.1
신관(아스팔트 도장)	0.05	0.02~0.2	
신관(시멘트 도료)	0.18	0.18	
사용한 매끄럽고 부식이 있는 관,	0.15~0.18	0.15~0.2	(선정에 의함)
압력배출관이 있고, 그 위에		0.1~0.2	
약제선정을 행한 고온수관			
가벼운 부식, 작은 침전물이 있는 관	1.5	1.5	
다수의 부식이 있는 관	2~4	2~4	
증기관 및 가압증기관(수년 운전후)		0.2~0.4	
수관계(평균치)	0.003	0.4~1.2	
PE관 · PVC관	0.007		
사용한 관			
신관(접속은 고려하지 않음)			

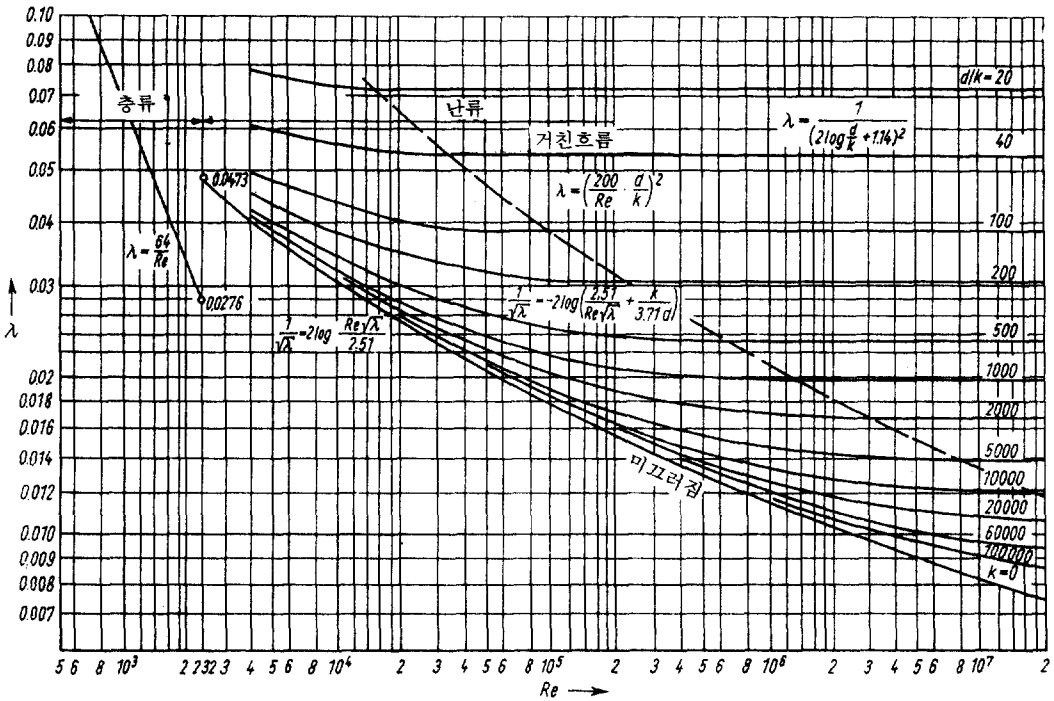


그림 3.10 관벽의 운할성질 및 조도성질에 대한 관마찰계수특성(Moody diagram)

그림 3.10은 이러한 식을 선도로써 나타낸 것이다. 실제 계산에서는 반복없이 해결되기 때문에, Altschul<sup>(3,5)</sup>이 추천되고 있다. 이것은  $d/k=400\sim 2500$  영역에서 Colebrook과 대단히 잘 일치된다.

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

Re값이 대단히 클( $Re > 1700 d/k$ )일 때에는 이 식은 난류 흐름영역에 대한 Springsong이 된다.

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{k}{d} \right)^{0.25}$$

전 난류영역에 있어서, 반복을 피해 앞에서 설명한 식보다도 더 작은 오차로써  $\lambda$  계산을 해야만 할 경우에는 다음의 계산을 채용할 수 있다.

$$\lambda = \frac{\left( A + \sqrt{A^2 - 4B \frac{2.51}{Re}} \right)^2}{4B^2}$$

여기서,

$$A = 0.8686 \frac{2.51}{Re} (2 + \ln A_1) + A_2$$

$$B = 0.8686 \left( A_2 \ln A_1 - 2 \frac{2.51}{Re} \frac{1}{\sqrt{\lambda_G}} \right)$$

$$A_1 = \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re} - \frac{1}{\sqrt{\lambda_G}}$$

$$A_2 = 2 \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re} - \frac{1}{\sqrt{\lambda_G}}$$

매끄러운 관( $k/d=0$ )의 관마찰계수  $\lambda_G$ 에 대해서는 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$2300 < Re < 10^5$$

$$\lambda_G = 0.3164 Re^{-1/4}$$

$$10^5 < Re < 10^8$$

$$\lambda_G = 0.0036 + 0.2665 Re^{-0.2538}$$

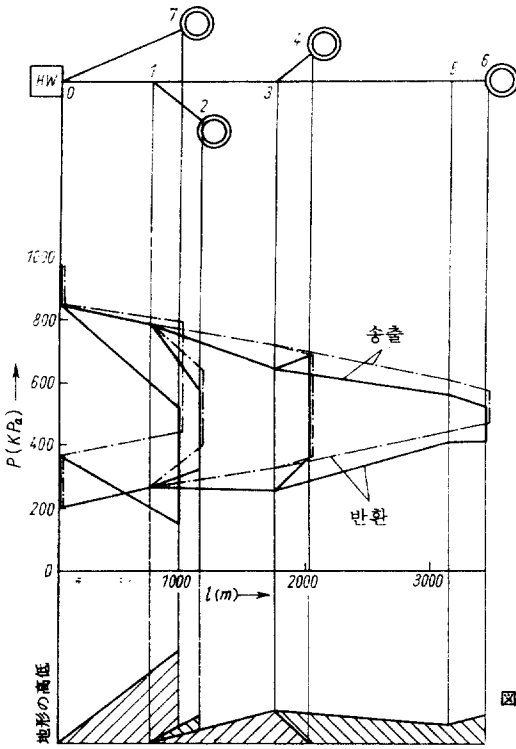


그림 3.11 지형의 높이와 운수압력의 관계

[역주] 실선은 지형의 고저를 고려하지 않는 경우의 압력선도, 일점쇄선은 지형의 고저를 고려한 경우의 압력선도

3.2.6 지역배관망의 분석

지역배관망의 압력손실 계산은 실제 배관망의 구성하에서는 복잡하고, 분기의 수나 유통성의 정도 I가 증가되면 전산기를 사용하여 겨우 합리적으로 해석할 수 있다. 비압축성 매체의 경우에는 압력손실의 계산에 필히 관선의 고도 위치를 고려해야만 한다.

$$\Delta p = \Delta p_R + \rho g \Delta H$$

여기서,  $\Delta p_R$  : 마찰손실,  $\Delta H$  : 고도차

그 외에 가장 불리한 위치에 있는 수요가의 압력은 수송온도의 포화압력에 증발을 회피하는 장소의 안전 할증분을 첨가시킨 값보다 작아서는 안된다. 또 송수관의 압력만 착안해서 방사상 지역배관망과 망목상 지역배관망을 다

르게 취급해야만 한다.

1) 방사상 지역배관망

펌프의 필요양정산정에는 전혀 문제가 없고, 이것은 부분압력손실의 총계로서 결정할 수 있다. 이 경우 분기에서는 접속점에서 나오고 있는 배관의 가장 큰 압력손실을 고려해야만 한다.

$$\Delta p_{zs} = \sum_{i=1}^n \Delta p_{maxi}$$

그림 3.11에 나타낸 식성에서는 구분 6의 단말(端末)에 있는 수요가가 가장 불리한 수요가이다. 정압, 즉 그외 지방의 지형을 고려하면 경우에 따라서는 그렇지 않는 경우도 일어날 수 있다.

2) 망목상 지역배관망

망목상 지역배관망의 경우에는 압력손실의 계산에 아래의 2개 조건이 활용된다.

- (1) 들어오고 있는 질량의 총합은 나가고 있는 질량유량의 총합과 같다.

(키르히호프 제1법칙)

$$\sum \dot{m}_i = 0$$

- (2) 망목내 압력손실의 총합은 0이다.

(키르히호프의 제2법칙)

$$\sum p_j = 0$$

여기서, i : 질량유량의 수, j : 분기배관의 수

따라서 그림 3.12에 나타낸 망목(網目)은 다음과 같은 등식이 성립된다.

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$$

$$\Delta p_a + \Delta p_b + \Delta p_c - \Delta p_d = 0$$

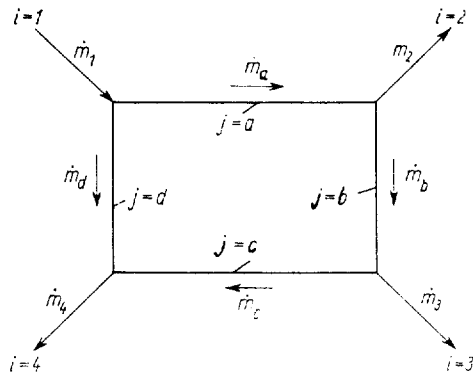


그림 3.12 지역배관망의 망목(網目)

압력손실의 계산은 이 단계에서 직접 하는 것이 아니고, 반복법으로 한다. 다음의 식과 같이 나타내면

$$\frac{\lambda \cdot 8l}{\pi \rho d^5} = R$$

아래의 식으로 된다.

$$R_a \dot{m}_a^2 + R_b \dot{m}_b^2 + R_c \dot{m}_c^2 - R_d \dot{m}_d^2 = 0$$

다음은 망목내의 흐름방향을 결정해야만 한다. 그래서 단계(step) 1에서  $\Delta p_b = 0$ , 즉  $\dot{m}_b = 0$ 이라고 가정한다.

따라서  $\dot{m}_a = \dot{m}_2$ ,  $\dot{m}_c = -\dot{m}_3$ ,  $\dot{m}_d = -(\dot{m}_3 + \dot{m}_4)$  (시계방향으로) 된다.

$R_a \dot{m}_a^2 > (R_c \dot{m}_c^2 - R_d \dot{m}_d^2)$  일 때는  $\dot{m}_b < 0$ 으로 되고, 또 역의 경우에는  $\dot{m}_b > 0$ 이 된다. 다음 단계(Step)2에서  $\dot{m}_c = 0$ , 즉  $\dot{m}_a = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ ,  $\dot{m}_b = \dot{m}_3$ ,  $\dot{m}_d = \dot{m}_4$ 로 가정한다.  $R_a \dot{m}_a^2 > (R_b \dot{m}_b^2 + R_d \dot{m}_d^2)$  일 때는  $\dot{m}_c > 0$ 으로 되고, 역의 경우에는  $\dot{m}_c < 0$ 이 된다.

이와 같은 방법으로(이 같은 경우에는  $\dot{m}_a, \dot{m}_b, \dot{m}_c > 0$ ),  $\dot{m}_a$ 부터  $\dot{m}_d$ 까지의 질량유량을 추정할 수 있다. 그러나 일반적으로 이 추정 근사치는 다음의 식과 같이 되고, 키르히호프 제2법칙을 만족시키지 않는다.

$$R_a \dot{m}_a^2 + R_b \dot{m}_b^2 + R_c \dot{m}_c^2 - R_d \dot{m}_d^2 = \delta P$$

이 단계에서 추정값으로써 만족시킬 수 있도록 전체질량 유량을  $\delta m$ 으로 보정하여, 다음 식을 얻는다.

$$R_a (\dot{m}_a - \delta \dot{m})^2 + R_b (\dot{m}_b - \delta \dot{m})^2 + R_c (\dot{m}_c - \delta \dot{m})^2 - R_d (\dot{m}_d - \delta \dot{m})^2 = 0$$

$\delta m$ 을 충분히 작다고 가정하면, 최후의 두 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$2\delta \dot{m} \sum R_j |\dot{m}_j| = \delta P$$

또는

$$\delta \dot{m} = \frac{\delta P}{2 \sum R_j |\dot{m}_j|}$$

이 경우, 질량유량 분배는 유한한 다수의 단계로써 충분히 정확히 결정할 수 있다.<sup>(3, 8)</sup>

### 3. 2관지역 배관망

2관지역 배관망의 경우에 계산은 분항의 초

기에 설명한 것처럼 합리적으로 할 수 있다. 모든 분기관으로부터 접속점의 압력이 균등히 되도록 반송관의 관경을 결정하는 것 및 수요가의 차압을 선정하는 것에 유의해야 한다.

### 3.3 열해석

열해석은 장소와 시간의 온도변충 열손실을 나타내는 것을 목적으로 하고 있다. 배관의 미소길이(그림 3.13)에 대해 다음의 에너지 평형식이 성립된다.

$$-\dot{m} c_p dt = k d_j dl (t - t_u)$$

여기서,  $\dot{m}$ : 질량유량,  $c_p$ : 비열,  $t$ : 열매온도,  $k$ : 열통과율,  $t_u$ : 주위온도,  $d_j$ : 단열을 포함한 배관의 외경,  $dt/dl$ : 온도와 길이의 미분

에너지 평형식을 적분하므로써 온도변화의 계산식을 구할 수 있다.

$$t = (t_o - t_u) \left\{ \exp \left[ \frac{-k d_j \pi}{m c_p} l \right] \right\} + t_u$$

$t_o$ 는 배관 최초입구의 열매온도이다.

이것에 의해 열손실은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_e = \dot{m} c_p (t_o - t_u) \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-k d_j \pi}{m c_p} l \right] \right\}$$

원통형 배관의 열통과율은 단열이 아닐 경우 외표면적은  $2\pi d a l$ 로 되기 때문에 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$k = \frac{1}{\frac{d_a}{a_j d_j} + \frac{d_a}{2} \left( \frac{1}{\lambda_k} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_j}{d_a} \right) + \frac{d_a}{\alpha d_j}}$$

여기서 사용한 기호는 그림 3.14에 나타나 있다. 지역난방배관에서는 내측의 열전달저항, 배관의 열전도율은 무시할 수 있으므로, 다음과 같이 근사식을 얻을 수 있다.

$$K = \frac{1}{\frac{d_a}{2\lambda_j} \ln \frac{d_j}{d_a} + \frac{d_a}{\alpha d_j}}$$

개개의 계수에 대해서 설명하기로 한다.

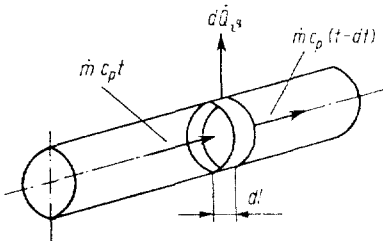
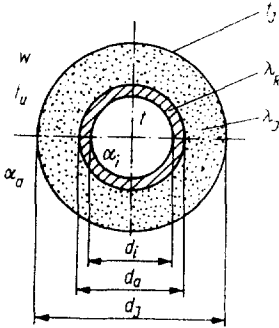


그림 3.13 배관의 미소부분



$\alpha_i, \alpha_j$ : 열전달율,  $\lambda_k, \lambda_j$ : 열전도율,  $w$ : 공기속도

그림 3.14 배관단면

1) 외측 열전달

열전달률  $\alpha_o$ 는 대류열전달과 복사열전달인 2개의 요소로 구분할 수 있다.

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s$$

정지공기에 대한 대류열전달률은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$\alpha_k = 1.86(t_j - t_o)^{0.24} \text{ W/m}^2\text{K}$$

유동공기에 대해서는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\alpha_k = 4.17 \frac{w^{0.8}}{d_j^{0.2}} \text{ W/m}^2\text{K}$$

복사요소에 대해서는 다음 식을 이용할 수 있다.

여기서,  $\alpha_s = ac$

$$c = 4.65 \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$a = \frac{\left(\frac{T_j}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_o}{100}\right)^4}{T_j - T_o} \quad (T_j, T_o \text{는 } K)$$

실내나 暗渠에서는 외측열전달률을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha_o = 9.42 + 0.0523(t_j - t_o) \text{ W/m}^2\text{K}$$

2) 단열재의 열전도

지역배관용 단열재는 다음 사항이 요구된다.

표 3.4 활증계수  $Z_i$

$Z_i$	열상황
1.0	대단히 양호
1.2	양 호
1.5	보 통
2.0	불 량
3.0 이상	열 악

표 3.5 열전도율 활증( $\lambda_j$ )

배관지지 재료	활 증(W/mK)
도자기재 설치구	0.0035
선단고정 침부착 강제 설치구	0.0093
단열재, 배관피복이 있는 강제 설치구	0.0116
단열재 없고 배관피복이 있는 강제 설치구	0.014

표 3.6 부속부품의 활증

부속부품의 종류	배관 상당길이				
	배관경 (mm)	100℃		400℃	
		옥내	옥외	옥내	옥외
노출밸브	100	6	15	16	22
	500	9	19	26	32
단열된 밸브	100	3	6	6	8
	500	4	7	10	11
노출플랜지(1대)	100	2	5	5	7
	500	3	6	9	11
단열된 플랜지	100	2	2	2	2
	500	2	2	2	2
배관지지재	실	내	열손실의 15% 증가		
	부풍(無風)의 옥외	열손실의 20% 증가			
	유풍(有風)의 옥외	열손실의 25% 증가			

- i) 가능한 한 열전도율이 작을 것
- ii) 형상이나 이음매가 고정되어 있을 것
- iii) 밀도가 작을 것
- iv) 사용중의 온도에서는 안정되어 있을 것 (130~200℃)
- v) 투습성이 작을 것
- vi) 부식성이 없을 것(비록 합습상태에 있어도)

이용빈도가 높은 단열재는 단열재 평균온도에 대한 열전도율  $\lambda_m$ 을 그림 3.15에 나타내었다. 실제 이용에서의 열전도율  $\lambda_b$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\lambda_b = \sum Z_i \lambda_{M_i} + \sum \lambda_z$$

여기서,  $Z_i$ : 밀도의 변화, 습도의 영향, 기계적 요구를 고려한 할증계수,

$\lambda_z$ : 시공정도, 시공방법 등에 의해 정해지는 할증

개산(概算)에 의한 열손실계산에서는  $\sum \lambda_z$  부분은 고려할 필요가 없다. 상세한 문헌(3, 9, 10)에 기술되어 있다. 할증계수  $Z_i$ 의 값을 표 3.4에 나타내었다. 열전도율의 할증, 부착된 부속품 등을 배관에 치환한 경우의 길이를 경험치로써 표 3.5와 표 3.6에 나타내었다.

### 3.4 최적설계

배관의 최적기준에는 사회에서 통용되고 있는 가격이 적용된다. 분기가 없는 배관단면은 목적관수(目的關數)로서 다음 식을 적용할 수 있다.

$$K = K(d_1, d_2) \Rightarrow \text{최소}$$

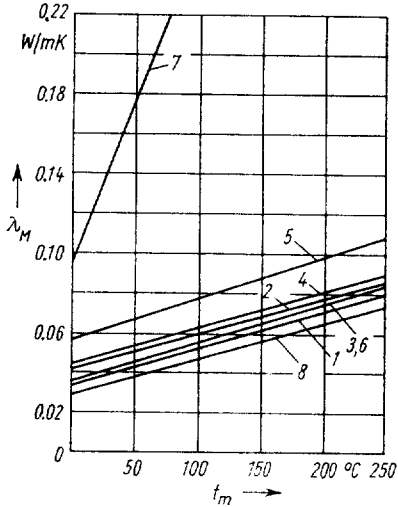
최적화 문제와는 분리해서 부분적으로 충분한 정도로 최적단열재의 경(또는 최적단열재 두께)과 최적배관의 내경이 정해진다.

최적단열재 두께는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\delta^2 \ln \delta} = C_1 + \frac{C_2}{\delta}$$

여기서,

$$\delta = \frac{d_1}{d_2}$$



1. 경질 카바 또는 두꺼운 종이피복을 부착한 글라스울
2. 합석 카바 부착한 글라스울
3. 경질 카바 또는 두꺼운 종이피복 부착 그외의 광물섬유 단열재
4. 합석 카바 부착 그외의 광물섬유 단열재
5. 특히 단열하지 않은 기포콘크리트
6. 단열재 부착배관
7. 구조토 단열재
8. 경질발포 폴리우레탄

그림 3.15 단열재료의 열전도율

a) 단열할 때의 피복의 비용을 고려하면

$$C_1 = \frac{k_v z d_a^2}{4\lambda_j \Delta t (k_{QL} + k_{QA} \tau_b)}$$

$$C_2 = \frac{k_M d_a z}{2\lambda_j \Delta t (k_{QL} + k_{QA} \tau_b)}$$

b) 단열두께에 비례해서 증대하는 비용

$$C_1 = \frac{d_a k_j z}{4\lambda_j \Delta t (k_{QL} + k_{QA} \tau_b)}$$

$$C_2 = 0$$

여기서,  $k_v$ : 단위용적당의 단열재 가격(마크),  $Z$ : 연간 고정비용,  $k_M$ : 단가면적당의 피복재 가격,  $k_j$ : 단열재 두께에 의한 단열재 가격,  $k_{QL}$ ,  $k_{QA}$ : 열의 기본요금, 종량(從量)요금,



$\tau_b$ ; 사용시간,  $\Delta t = t_1 - t_u$

그림 3.16에 배관의 최적단열경을 구하는 도표를 나타내었다. 고온수 난방배관의 최적 내경은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$d = \sqrt[6]{\frac{40m_{max}^2 \lambda [k_A Z + k_E \tau_B (\frac{m_m}{m_{max}})^3]}{\pi^2 \rho^2 \eta_p k_R z}}$$

여기서,  $m_m, m_{max}$ : 평균 또는 최대의 고온수 유량,  $\eta_p$ : 순환펌프의 효율,  $\tau$ 을 운전시간,  $\lambda$ : 배관의 마찰저항계수,  $k_R$ : 배관경, 배관단위 길이에 의한 배관가격,  $k_A$ : 출력에 의한 순환 펌프의 설치가격,  $k_E$ : 순환펌프의 에너지 가격,  $\rho$ : 고온수 밀도,  $z$ : 년간 고정비

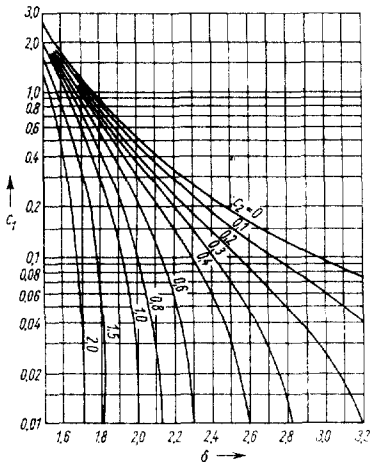


그림 3.16 배관의 최적단열경을 구하는 계산도

과열증기에 대해서는 엑서지 가격  $k_{ex}$ 를 이용하여, 배관에 들어가는 증기류의 최적배관경을 다음 식으로부터 반복법에 의해 구해질 수 있다.

$$\frac{\left[ \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^2 - 1 \right]^{1/5}}{\left( \frac{p_1}{p_2} \right)^2} = \frac{2k_R l z}{5mk_{ex} \tau_B T_{OR}} \left[ 0.1251 \frac{m^2 \lambda l T_m}{\rho_2 p_2 T_2} \right]^{1/5}$$

여기서, 1: 배관장,  $T_o$ : 엑서지를 결정하는 실제 온도, R: 기체정수, 1,2: 배관단면 입출구의 index,  $T_m$ : 증기 평균온도

전 배관망을 최적설계를 할(개개의 배관최

적 내경 결정) 때는 수요가측의 안전압력과 열교환스테이션(station)의 가열면에 있어 최대압력과 차를 완전히 없도록 한다. 이렇게 함으로써 배관비용  $k_R$ 를 최소화할 수 있다.

$$K_R = \sum_{i=1}^n K_{Ri}(d_i) \rightarrow \text{최소}$$

여기에 다음의 조건이 만족되어야만 한다.

$$\Delta P_{\geq s} = \text{一定}$$

배관비용에 비례하는 부분으로

$$K_R = \sum_{i=1}^n K_{ROi} l_i z + \sum_{i=1}^n K_{Ri} d_i l_i z$$

여기서,

$$Z = \sum_{i=1}^n l_i d_i \rightarrow \text{최소}$$

이 식이 중요한 목적관수(目的關數)이다.

차압  $\Delta P_i$ 에 대한 분배문제에는 여러가지 해법이 존재한다. 정확한 해를 얻는데에는 “동적최적화”를 사용할 필요가 있다.(3.11) 그림 3.17에 나타낸 것과 같이 방사상 배관망에 대해서는 계산식이 주어질 수 있다. 일반적으로 배관 j의 최적 압력손실은 분배구역 m에서 시작된다.

$$\Delta p_{j, opt} = \beta_m \Delta p_m$$

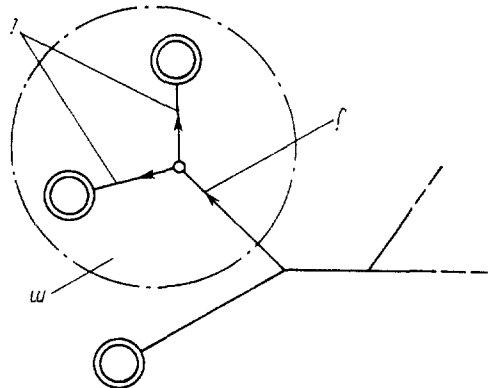


그림 3.17 방사상 배관망의 설명도

이 분배는 배관의 근원까지 응용할 수 있다. 최적해는 반대방향을 추적하므로써 구할 수 있다. 즉, 열원에서부터 수요가의 방향으로 추적하므로써 최적해를 구할 수 있다. 또 정수  $\beta_m$ 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\beta_m = \frac{l_j R_j^{*1/6}}{1 + \left( \sum_{i=1}^k \frac{l_i^{6/5} R_i^{*1/5}}{\beta_i} \right)^{5/6}}$$

또

$$\Delta p_i = \frac{8\lambda m_i^2}{\pi^2 \rho} \frac{l_i}{d_i^5} = R_i * \frac{l_i}{d_i^5} \lambda = \text{일정}$$

여기서, i: 절점에서 시작되는 분기 배관수, j: 절점에 들어가는 분기 배관수, k: 절점분기하는 배관총수, m: subsystem수,  $\beta_i = 1$ : 분기 system이 존재하지 않는 경우,  $\beta_i$ : 분기배관 i에서 시작되는 subsystem수

이밖에 동적 최적화법과 그렇게 차이는 없지만, 간단한 방법으로 다음과 같은 방법이 있다. 최대압력손실은 배관에 따라 최원단의 수요가까지 영향을 미친다. 따라서 배관망을 절점에서 분리하면, 배관망과 배관망의 부분 합계로부터 대단히 좋은 근사값으로써 최소의 전체비용을 얻을 수 있다.

$$K_{ges, min} = \sum_{j=1}^r K_{j, min}$$

$$K_j = \sum K_{Rj} \rightarrow \text{최소}$$

$$Z_j = \sum_{i=1}^n l_i d_i \rightarrow \text{최소}$$

여기에 첨가한 부수조건으로써

$$\Delta p_j = \sum_{i=1}^n \Delta p_i = \sum_{i=1}^n R_i * \frac{l_i}{d_i^5}$$

여기서, i는 배관 j는 분리수, n은 배관 j의 분리총수이다.

따라서 비용  $k_j$ 의 최소값은

$$\frac{\partial K_j}{\partial d_i} = l_i \frac{\partial d_i}{\partial d_i} + l_i = 0$$

여기서

$$\frac{\partial d_i}{\partial d_i} = - \frac{R_j^*}{R_i^*} \frac{l_i}{l_i} \left( \frac{d_i}{d_i} \right)^6$$

부수조건을 미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\left( \frac{d_i}{d_{i,opt}} \right) = \left( \frac{R_j^*}{R_i^*} \right)^{1/6}$$

또는

$$\left( \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i,opt}} \right) = \frac{l_i}{l_i} \left( \frac{R_j^*}{R_i^*} \right)^{1/6}$$

이것에 의해 배관망의 최초배관분배 최적압력손실을 구할 수 있다.

$$\Delta p_{j,1,opt} = \Delta p_{j,1} \frac{l_{j,1}}{\sum_{i=1}^n l_{j,1} \left( \frac{R_{j,i}^*}{R_{j,1}^*} \right)^{1/6}}$$

또는 전체배관망의 최초배관분배에 관해서는

$$\Delta p_{j,1,opt} = \Delta p_{ges} \frac{l_i}{\sum_{i=1}^k l_i \left( \frac{R_i^*}{R_i^*} \right)^{1/6}}$$

이 방법에 의해 수요가의 방향으로 향하는 최적압력손실 또는 배관경을 구할 수 있다. 최적배관경은 아래와 같이 해서 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta p_i}{l_i} = \frac{\Delta p}{\sum_{i=1}^k l_i}$$

그러나 배관매설방법이나 배관부설방법(도로의 횡단 등) 등에 의해 다른 system의 단위량당 배관가격에 까지 언급하면, 여기서 사용된 목적관수(目的關數)를 응용하는 것은 문제이다. 이와같은 경우는 보정된 수정배관길이를 계산에 이용한다. system중에서 가장 일반적인 배관비용을  $k_R$ , 이것과는 다른 배관비용을  $k_{RV,i}$ 로 표시하면 보정된 수정 배관길이는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$l_{v,i}^* = l_{v,i} \frac{k_{RV,i}}{k_R}$$

이것에 의한 목적관수(目的關數)의 응용은

$$Z = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^k l_{v,i}^* d_{v,i} \rightarrow \text{최소}$$

로써 같은 방법으로 구할 수 있다.