

지역 난방 시스템 (XIV) District heating system (XIV)

오 후 규
H. K. Oh
부경대학교 냉동공학과

7.2.4 공급온도가 일정한 때, 서브스테이션에서의 온수순환과 수온의 계산
필요한 지역배관으로부터의 온수량의 비 κ 는 다음과 같은 계산으로 구한다.

$$\kappa = \frac{\text{부분 부하의 온수량}}{\text{피크 부하의 온수량}}$$

우선, $\beta_H = 0.229$ (외기온 $t_a = 12^\circ\text{C}$ 에 대응하는 난방한계)에서 급탕재열기의 온도강하 Δt_N^{NW} 를 구한다.

$$\Delta t_N^{NW} = 9.3\text{K}$$

이를 위해 재열기의 하류로 공급되는 공급수 온도는

$$t'_{VN} = 70^\circ\text{C} - 9.3^\circ\text{C} = 60.7^\circ\text{C}$$

송수온도가 일정할 때, 난방을 위한 필요 온수량의 비 κ 는 실내 난방배관의 순환량 \dot{m}_H 가 일정하면 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\kappa = \frac{1}{\frac{t'_{VN} - t_l}{B_H} \Delta t_N} + \frac{\Delta t_m^{HK}}{\Delta t_{N^*}} \beta_H \frac{n}{n+1} + 0.5 \frac{\Delta t_H^*}{\Delta t_{N^*}}$$

여기서,

$$\Delta t_H = t_{VH} - t_{RH}$$

$$\Delta t_m^{HK} = \frac{t_{VH} - t_{RH}}{\ln \frac{t_{VH} - t_l}{t_{RH} - t_l}}$$

$$\Delta t_H' = t'_{VH} - t_{RH}$$

$$\tilde{B}_H = \frac{\beta_H}{\beta_H^*} = \frac{t_l - t_a}{t_l - t_a^*}$$

첨자 기호 *는 $\beta_H = 0.294$ $\kappa = 1.0$ 에서 경계치에 대한 모든 값을 곱한 것이다. 실내 난방에 대한 환수 온도 t_{RH} 는 난방을 위한 온수량의 변화에 있어서

$$t_{RH} = t'_{VN} - \Delta t_N^* \frac{\beta_H}{\kappa}$$

여기서, $t_{VN}^* = 70^\circ\text{C}$, $\Delta t_N^{NW} = 5.35\text{K}$

$$t'_{VN}^* = 64.65^\circ\text{C}, t_{RH} = 41.15^\circ\text{C}, \Delta t_N^{VW} = 6.65\text{K}$$

$$t'_{RN}^* = 34.50^\circ\text{C}, t_{VH}^* = 46.95^\circ\text{C}, \Delta t_m^{VW} = 24\text{K}$$

$$\Delta t_H^* = 5.8\text{K}, \Delta t_H^* = 23.5\text{K}$$

를 대입하면 난방부하율 $\beta_H = 0.299$ 에 대해

$$\beta_H = \frac{0.229}{0.294} = 0.778$$

급탕량의 비는

$$\kappa = 0.796$$

난방을 위한 환수 온도는

$$t_{RH} = 60.7^{\circ}\text{C} - 23.5 \frac{0.778}{0.7960} K = 37.75^{\circ}\text{C}$$

급탕가열기에서의 환수 온도강하 Δt_N^{VW} 는 급탕 열교환기의 운전특성으로부터

$$\Delta t_N^{VW} = \Delta t_{NO}^{VW} \frac{t_{RH} - t_{WN}}{t_{RHO} - t_{WN}}$$

$$\frac{0.35\Delta t_{NO}^{VW} + 0.65\Delta t_{WO}^{VW} + \Delta t_{MO}^{VW}}{0.35\Delta t_{NO}^{VW-1} + 0.65\Delta t_{WO}^{VW} + \Delta t_{MO}^{VW-1/2}}$$

$$\Delta t_{WO}^{VW} = t_{WZO} - t_{WN}$$

: 최저외기온도시의 급탕예열기의 가열량

$$\Delta t_{MO}^{VW} = \frac{(t_{RNO} - t_{TN}) - (t_{RHO} - t_{WZO})}{\ln \frac{t_{RNO} - t_{WN}}{t_{RHO} - t_{WZO}}}$$

: 급탕예열기의 평균대수온도차

$$\Delta t_{NO}^{VW} = 12\text{K}, t_{RH} = 37.75^{\circ}\text{C}, t_{RNO} = 58^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{WO}^{VW} = 60^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C} = 55\text{K}, t_{WZO} = 60^{\circ}\text{C}$$

$$t_{WN} = 5^{\circ}\text{C}, t_{RHO} = 70^{\circ}\text{C}, \Delta t_{MO}^{VW} = 25.7\text{K}$$

를 이용하여 $\beta_H = 0.229$, $\kappa = 0.796$ 일 때를 계산하면

$$\Delta t_N^{VW} = 5.70\text{K}$$

급탕용 열교환기 양쪽에서의 온도강하는

$$\Delta t_N^{GW} = \frac{\Delta t_{NO}^{GW}}{\kappa} = \frac{12\text{K}}{0.796} = 15.08\text{K}$$

따라서, 재열기의 온도강하는

$$\Delta t_n^{NW} = 15.08\text{K} - 5.7\text{K} = 9.38\text{K}$$

이 값은 앞서 구한 값과 일치한다. 환수 온도는

$$t_{RN} = t_{RH} - \Delta t_n^{NW} = 37.75\text{K} - 5.70\text{K} = 32.05\text{K}$$

7.3 지역배관망의 크기 계산

7.3.1 순환수량 \dot{m}_i 의 계산

급탕용의 열부하 비율을 $\alpha_{GWW} = 0.15$ 로 고려하여

$$\dot{m}_i = \frac{\dot{Q}_i}{c_p(t_v - t_{RH})(1 + \alpha_{GWW})} \quad (\text{표 7.4 참조})$$

$$t_v = 150^{\circ}\text{C} \quad (\text{송수 온도})$$

$t_{RH} = 70^{\circ}\text{C}$ (실난방만에만 사용되는 경우의 환수 온도)

위 식에서 구한 각 수용가에 이르기까지의 수량 \dot{m}_i 는 표 7.4와 같다.

따라서, 총수량은

$$\dot{m}_{ges} = \sum_{i=1}^{16} \dot{m}_i = 2,337\text{t/h}$$

계산을 위해 전열부하로부터 구한 총수량은

$$\dot{m}_{ges} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{c_p(t_v - t_{RH})(1 + \alpha_{GWW})} = 2,340\text{t/h}$$

7.3.2 최적압력강하의 결정

압력손실은 다음과 같이 가정하여 계산한다.

$$\frac{\Delta p_i}{l_i^*} = \text{일정}$$

여기서, Δp_i : i 번째 구간에 있어서의 압력손실, l_i^* : i 번째 구간의 상당 관길이를 나타낸다.

이론적인 최적치를 근사적으로 구할 수 있다. 각 구간의 상당길이에 대해서 여러가지 배관 비용을 고려하여 입력하고, 보정은 그 시스템에서 가장 많이 이용되는 배관비용과 관련시켜 한다. 여러가지 압력강하에 대해서 다음과 같은 전비용 K 를 목적함수로 하여 최소화한다.

$$K = \sum_{i=1}^n (k_{ROi} + k_{Ri}d_i)l_i + Pk_{ET}\epsilon$$

표 7.4 유량분배

수요가 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
\dot{m}_i (t/h)	327	112	75	168	94	112	56	140	168	131	94	224	94	140	262	140

여기서, P : 펌프 능력, k_E : 전력요금, τ_b : 전부하를 처리하기 위한 운전시간이다. 슈프리션의 저항계수를 이용하여

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

$$\Delta p_i = \frac{0.88 k^{0.25}}{\pi^2 \rho} \frac{l_i \dot{m}_i^2}{d_i \cdot 5.25}$$

여기서, ρ : 밀도, k : 조도라 하면

$$x_i = \frac{\Delta p_i}{l_i} \text{ 그리고 } A = 0.88 \frac{k^{0.25}}{\pi^2 \rho}$$

$$d_i = \left(A \frac{\dot{m}_i^2}{x_i}\right)^{\frac{4}{21}}$$

여기서, $x = \frac{\Delta p_{ges}}{l_{ges}}$, $x_i = \alpha_i x$, l_{ges} : 플랜트와 가장 멀리 떨어진 수요가와의 거리 α_i 이 되는 정수

a) 가장 먼 거리의 분지관에는

$$\alpha_i = \frac{l_i^*}{l_i}$$

로 되고,

b) 다른 분지관에는

$$\alpha_i = \frac{\sum l_j^*}{\sum l_i^*}$$

여기서, l_i^* : 분지관 i 에 대해 2의 분지관 i 에 접속시킨 경우에 가장 불리한 수요까지의 거리이다. l_i^* : 분지관 i 의 분지점에서 본관을 따라 측정할 경우, 가장 불리한 수요까지의 거리.

$$\frac{l_i^*}{l_i}: \text{흡내의 배관}$$

$$\frac{l_i^*}{l_i} = \frac{k_{RF}}{k_{RK}} = C_R: \text{지상으로 노출된 배관}$$

이에 의하여 아래의 목적함수 K 를 최소화한다.

$$K = \sum_{i=1}^n \left[k_{Roi} + k_{Ri} \left(\frac{\dot{m}_i^2}{\alpha_i}\right)^{\frac{4}{21}} \left(\frac{A}{x}\right) l_i \right]^{\frac{4}{21}}$$

$$+ \frac{\dot{m}_{ges} l_{ges} k_E \tau_b}{\rho \eta_p} \rightarrow \text{최소}$$

$dK/dx=0$ 이므로 x_{opt} 는

$$x_{opt} = \left[\frac{4}{21} \frac{A^{4/21} z \rho \eta_p}{\dot{m}_{ges} l_{ges} k_E \tau_b} \sum_{i=1}^n k_{Ri} l_i \left(\frac{\dot{m}_i^2}{\alpha_i}\right)^{\frac{4}{21}} \right]^{\frac{21}{24}}$$

이상과 같은 것을 예로 들어, 다음의 수치를 이용하여 풀어 본다.

$$\tau_b = 5,300 \text{h/a}$$

$$k_E = 0.095 \text{M/kWh}$$

$$k = 0.4 \text{mm}$$

$$\eta_p = 0.75$$

$$k_{RF} = 4,020 \text{천마르크/km 지상노출배관}$$

$$k_{RK} = 5,900 \text{천마르크/km 매설 배관}$$

$$\rho = 940 \text{kg/m}^3$$

표 7.5의 수치를 이용하면 가장 불리한 수요가에 이르는 분지관 $K0 \sim A1$ 에 대해 최적치는 $x_{opt} = 0.0666 \text{MPa/km}$ 가 된다.

이 때문에 플랜트에서 가장 멀리 떨어진 수요가에 이르기까지의 압력손실은 시공비나 도중의 분지를 무시하면 최적치로서

$$\begin{aligned} \Delta p_{ges, opt} &= x_{opt} l_{ges}^* \\ &= 0.0666 \left(\frac{4,020}{5,900} \cdot 9.2 + 0.8\right) \end{aligned}$$

$$\Delta p_{ges, opt} = 0.47 \text{MPa} (= 47 \text{mAq})$$

7.3.3 최적관경의 결정

이상에서 얻어진 수치를 아래 식에 대입하여 관경을 구할 수 있다.

$$d = (1.04 \cdot \frac{\dot{m}_i^2 \cdot 10^{-8}}{x_i})^{1/5.25}$$

호칭구경으로 정리된 배관일람표를 고려하여 비연속성의 구경을 결정한다. $K0$ 부터 $K1$ 까지의 분지에 대해서는

$$d_i = (1.04 \cdot 10^{-8} \frac{944^2}{0.666})^{1/5.25} = 0.442 \text{m}$$

로부터 호칭구경 400A의 구경을 선정하고, 특

표 7.5 α 값의 계산

K0~K1	K1~A1	K4~A2	K3~A3	K2~K4
1	C_R	$C_R l_{K4, A1} / l_{K4, A2}$	$C_R \sum_{K3}^{A1} l_i / l_{K3, A3}$	$C_R \sum_{K2}^{A1} l_i / l_{K2, A4}$
1	0.68	3.06	4.07	13.6

K1~K7	K5~A5	K6~A6	K0~A8	K12~A9
$C_R \sum_{K1}^{A1} l_i / \sum_{K1}^{A7} l_i$	$\alpha_{K1, K7} \sum_{K5}^{A7} l_i / l_{K5, A5}$	$\alpha_{K1, K7} l_{K6, K7} / l_{K6, A6}$	$\sum_{K0}^{A1} l_i^* / \sum_{K0}^{A8} l_i$	$\alpha_{K0, A8} l_{K12, A8} / l_{K12, A9}$
2.09	5.36	2.61	3.53	5.29

K0~K7	K7~A16	K7~K8	K8~A14	K10~A12
$\sum_{K0}^{A1} l_i / \sum_{K0}^{A14} l_i^*$	$\alpha_{K0, K7} \sum_{K7}^{A14} l_i^* / l_{K7, A16}$	$\alpha_{K0, K7}$	$\alpha_{K0, K7} C_R$	$\alpha_{K0, K7} \sum_{K10}^{A14} l_i / l_{K10, A12}$
2.36	6.1	2.36	1.61	5.24

A11~A13	K8~A10	K9~A11	K0~A15	
$l_{K0, K7} C_R l_{K11, A14} / l_{K11, A13}$	$\alpha_{K0, K7} C_R \sum_{K8}^{A14} l_i / \sum_{K8}^{A10} l_i$	$\alpha_{K8, A10} l_{K9, A10} / l_{K9, A11}$	$\sum_{K0}^{A14} l_i^* / l_{K0, A15}$	
3.32	3.22	4.83	2.82	

(주) K0, A1은 각각 절점 0, 수요가 1을 나타낸다. K4~K2에서는

$$\frac{l_{K4A1}}{l_{K4A2}} = \frac{1.8}{0.4} = 4.5 \therefore 0.68 \times 4.5 = 3.06$$

표 7.6 최적관경(호칭경)

i	K0~K2	K2~K4	K4~A1	K4~A2	K3~A3	K2~A4	K1~K5	K5~K6	K6~A7
NW	400	350	300	150	150	150	250	200	150

i	K5~A5	K6~A6	K0~A12	K12~A8	K12~A9	K0~A8	K7~A16	K8~K10
NW	150	150	250	150	150	350	150	300

i	K10~K11	K11~A14	K10~A12	K11~A13	K8~K9	K9~K10	K9~A11	K0~A15
NW	250	200	200	150	200	150	150	200

제품의 내경은 $d_{i,i} = 0.414m$ 로 한다. 이 때의 압력강하는

$$x_i = x_{i, opt} \left(\frac{d_i}{d_{i,i}} \right)^{5.25} = 0.0947 MPa/km$$

즉, K1부터 A1까지의 분지에 대해 이용할 수

있는 압력손실은

$$\Delta p_i = \Delta p_{gs} - x_i l_{K0, K1} = 0.394 MPa$$

K1~A1 사이의 분지관에서의 압력손실은

$$x_2 = \frac{\Delta p_i}{l_{K1, A1}} = 0.0492 MPa/km$$

표 7.6에 이상의 계산을 정리하여 나타내었다.

$$s \geq s_0 + C_1 + C_2$$

7.4 고온수 배관망에서의 압력손실 계산

$$s_0 \geq \frac{pd_s}{2\nu\sigma_{at} + p}$$

7.4.1 레이놀즈수의 계산

레이놀즈수는 다음 식과 같다.

$$Re = \frac{wd}{\mu\nu}$$

감소계수 $\nu=0.8$, 제작오차와 부식을 고려한 여유율로서 $C_1+C_2=1.6\text{mm}$ 을 고려하면 s_0 및 s 의 값은 표 7.8과 표 7.9와 같다. 이러한 결과로부터 관경과 두께의 선정이 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

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

$k=0.4\text{mm}$ 일 때, d/k 는 250~1,000이다. 또한 공급수 온도가 150°C 일 때,

$$\mu_w = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{kg/ms}, \nu_w = 1.091 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{kg}$$

환수되는 급탕온도가 70°C이면

$$\mu_R = 4 \cdot 10^{-4} \text{kg/ms}, \nu_R = 1.023 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{kg}$$

이고, 표 7.7에서와 같이 Re 수가 구해진다. 아래의 Re 수 범위에서 k 의 값이 이상과 같은 값일 경우에 마찰계수 λ 는 일정치로 한다.

마찰저항의 총괄을 표 7.10에 정리하였다.

7.4.3 배관계에 대한 마찰저항계수의 선정
독일규격 TGL 190-261, 제1부에 의해 다음과 같은 값이 이용된다. 일직선상에 설치된 절환 밸브의 저항계수는 무시할 수 있다. 관이 확대 또는 축소되는 경우에도 저항계수는 무시할 수 있다.

7.4.2 내경의 계산

내경을 선택하기 위해서 관의 두께를 확인해야 한다. 규격표에 표시된 관 두께 s 는 다음식을 이용하여 선택한다.

분지되는 곳마다 개구비 0.5인 오리피스를 이용한다($\zeta_{or}=4$).

물흐름의 축소 또는 분류는 ζ_v 값을 이용하고, 루프형의 신축이음매에 대해서는 표 7.11에 나타난 평균저항계수 ζ_A 를 이용한다.

표 7.7 송수관과 환수관의 레이놀즈수

dk	250	1,000		
$w(\text{m/s})$	1.0	3.0	1.0	3.0
Re_w	$5.1 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^6$	$6.1 \cdot 10^6$
Re_R	$2.4 \cdot 10^5$	$7.3 \cdot 10^5$	$9.8 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^6$

표 7.8 관두께의 계산치 $s_0(\text{mm})$

호 칭 경	100	150	200	250	300	350	400
호칭압력 16(1.6MPa)	0.66	0.97	1.18	1.48	1.76	2.04	2.30
호칭압력 25(2.5MPa)	1.01	1.49	1.81	2.26	2.69	3.12	3.53
$\nu=0.8$	St356 이음매 없는 강관 St52-3 용접						

표 7.9 관두께 $s(\text{mm})$

호 칭 경	100	150	200	250	300	350	400
호칭압력 16(1.6MPa)	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9
호칭압력 25(2.5MPa)	2.6	3.1	3.4	3.9	4.3	4.7	5.1

7.4.4 유속의 검토

유속의 한계는 3m/s로 하고, 이것을 초과하지 않도록 한다.

$w = km$ 인 연속방정식으로 계산한다. 여기서

$$k = \frac{4\nu}{\pi d^2}$$

표 7.10 총 괄

호칭구경(mm)	100	150	200	250	300	350	400
관 두께(mm)	4	4.5	5	5	5	6	6
내경(mm)	100	150	209	263	315	365	414
마찰저항계수	0.0277	0.0250	0.0231	0.0217	0.0208	0.0200	0.0194

표 7.11 루프형 신축이음매(繼手)에서의 저항계수 평균치

호칭경(mm)	100	150	200	250	300	350	400
ζ_A	7.15	7.15	6.25	6.25	5.55	5.55	5

표 7.12 k 값의 총괄

(단위 : $\frac{mh}{ts}$)

호칭경(mm)	100	150	200	250	300	350	400
송수관	0.0387	0.01721	0.00885	0.00559	0.0039	0.00290	0.00226
환수관	0.0363	0.01613	0.00832	0.00525	0.00363	0.00272	0.00212

표 7.13 가장 먼 수요가의 송수관내의 압력 손실

분지관 명칭	K0~A2	K0~A10	K0~A6	K0~A15
Δp_v (MPa)	0.634	0.616	0.557	0.736

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{v, K0, A15} + \Delta p_{r, K0, A15} + \Delta p_{wu} + \Delta p_A$$

$$= 0.736 + 0.687 + 0.022 + 0.1 = 1.545 \text{MPa}$$

k 값은 표 7.12에 정리되어 있고, 각 배관부분에 대한 유속은 표 7.14에 있다. 유속은 어느 것도 한계치 3m/s를 초과하지 않음을 알 수 있다.

7.4.5 압력손실의 결정

토지의 고저차를 고려하지 않은 압력손실은 표 7.14와 같다. 가장 먼 거리의 수요가에 대한 해석에 의해 관경이 계단형상이기 때문에 K0로부터 A1에 이르는 경로가 아니고, K0부터 K15에 이르는 경로의 압력손실이 최고인 것을 알 수 있다(표 7.13).

$\sum \zeta_{wu} = 15$ 이고, 유속 $v = 1.8 \text{m/s}$ 인 2대의 열교환기가 있는 것으로 하여

$$\Delta p_{wu} = \sum \zeta_{wu} \frac{\rho}{2} w^2 = 0.022 \text{MPa}$$

즉, 수요가내의 압력강하를 $\Delta p_A = 0.1 \text{MPa}$ 로 가정하면 전체 압력손실은

7.5 고온수 배관망에서의 압력분포에 대한 계산

다음 식과 펌프의 흡입압력 0.25MPa로 계산한 결과는 표 7.15와 같다.

$$p_i - p_{i+1} = \lambda \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho}{2} w^2 + \rho g (H_{i+1} - H_i)$$

그림 7.4~그림 7.6에는 전체 압력분포의 양상을 나타내었다.

플러싱(Flushing)에 대한 조건

송수 온수의 경우

- 송수 온도 $t_v = 150^\circ\text{C}$
- 안전을 위한 여유온도 $\Delta t_v = 20\text{K}$
- 상당 비등압력 $p_{v, min} = 0.792 \text{MPa}$

환수 온수의 경우

- 환수 온도 $t_v = 70^\circ\text{C}$
- 안전을 위한 여유온도 $\Delta t_v = 10\text{K}$
- 상당 비등압력 $p_{v, min} = 0.0474 \text{MPa}$

도면으로부터 배관망의 어느 부분에서도 최저압력 이하로 떨어지지 않음을 알 수 있다. 호칭

표 7.14 배관망의 고유값

	송관 호칭경 (mm)	\dot{m} (t/h)	ξ_A	ξ_{Dr}	ξ_{vr}	l_{eq} (m)	w (m/s)	Δp (MPa)
K0 ~K1	400	944	4	4	5.0	280	2.13	0.105
K1 ~K2	400	682	6	4	2.3	260	1.54	0.0743
K2 ~K3	350	514	11	4	3.5	340	1.49	0.1301
K3 ~K4	350	439	23	4	7.5	630	1.27	0.1952
K4 ~A1	300	327	10	4	3.5	270	1.27	0.101
K4 ~A2	150	112	3	4	1.5	50	1.93	0.128
K3 ~A3	150	75	7	4	1.5	80	1.29	0.137
K2 ~A4	150	168	3	4	1.0	50	2.88	0.2830
K1 ~K5	250	262	7	4	2.0	160	1.46	0.1095
K5 ~K6	200	168	5	4	0.5	90	1.49	0.100
K6 ~A7	150	56	7	4	0.7	70	0.964	0.0759
K6 ~A6	150	112	6	4	1.5	70	1.93	0.248
K5 ~A5	150	94	5	4	1.0	60	1.61	0.1505
K0 ~K12	250	308	9	4	2.0	180	1.72	0.1763
K12~A8	150	140	4	4	0.5	50	2.41	0.2880
K12~A9	150	168	3	4	0.8	50	2.88	0.281
K0 ~K7	350	823	2	4	2.5	160	2.39	0.0806
K7 ~A16	150	140	1	4	2.0	40	2.41	0.074
K7 ~K8	350	683	2	4	7.5	250	1.98	0.064
K8 ~K10	300	458	3	4	1.5	130	1.79	0.071
K10~K11	250	234	9	4	0.5	160	1.31	0.1011
K11~A14	200	140	7	4	0.8	110	1.24	0.1020
K11~A13	150	94	4	4	2.5	60	1.61	0.1304
K10~A12	200	224	5	4	2.0	100	1.98	0.1786
K8 ~K9	200	225	6	4	1.0	100	1.99	0.220
K9 ~A10	150	131	4	4	0.5	50	2.25	0.251
K9 ~A11	150	94	3	4	2.5	60	1.61	0.0910
K0 ~A15	200	262	15	4	2.5	200	2.32	0.736
K0 ~K1	400	944	4	4	0.6	180	2.00	0.0899
K1 ~K2	400	682	6	4	0.8	230	1.45	0.0690
K2 ~K3	350	514	11	4	0.8	290	1.39	0.1187
K3 ~K4	350	439	23	4	0.4	500	1.19	0.1783
K4 ~A1	300	327	10	4	0.8	220	1.20	0.0940
K4 ~A2	150	112	3	4	0.7	50	1.81	0.1200
K3 ~A3	150	75	7	4	0	70	1.21	0.1191
K2 ~A4	150	168	3	4	0.8	50	2.72	0.2720
K1 ~K5	250	262	7	4	0.8	140	1.37	0.1010

	송관 호칭경 (mm)	\dot{m} (t/h)	ξ_A	ξ_{Dr}	ξ_r	l_{ag} (m)	w (m/s)	Δp (MPa)
K5 ~K6	200	168	5	4	1.4	100	1.40	0.0956
K6 ~K7	150	56	7	4	0.8	70	0.934	0.0770
K6 ~A6	150	112	6	4	1.4	70	1.81	0.232
K5 ~A5	150	94	5	4	0.8	60	1.52	0.143
K0 ~K12	250	308	9	4	0.8	170	1.62	0.166
K12~A8	150	140	4	4	0.8	50	2.26	0.271
K12~A9	150	168	3	4	2.4	60	2.71	0.275
K0 ~K7	350	823	2	4	0.8	120	2.24	0.070
K7 ~A16	150	140	1	4	0	30	2.26	0.0543
K7 ~K8	350	683	2	4	0.4	120	1.86	0.050
K8 ~K10	300	458	3	4	1.3	120	1.68	0.0655
K10~K11	250	234	9	4	3.0	190	1.23	0.0974
K11~A14	200	140	7	4	1.8	120	1.16	0.0960
K11~A13	150	94	4	4	1.0	50	1.52	0.1224
K10~A12	200	224	5	4	1.0	90	1.86	0.166
K8 ~K9	200	225	6	4	0.8	100	1.87	0.208
K9 ~A10	150	13	4	4	1.8	60	2.12	0.241
K9 ~A11	150	94	3	4	1.2	50	1.52	0.0845
K0 ~A15	200	262	15	4	0.7	180	2.18	0.687

표 7.15 절대압력 일람표

i	K0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	
송수 온수압력 p_v (MPa)	1.773	1.668	1.594	1.464	1.268	1.469	1.261	
환수 온수압력 p_R (MPa)	0.25	0.440	0.590	0.628	0.806	0.445	0.430	
i	K7	K8	K9	K10	K11	K12	A1	
송수 온수압력 p_v (MPa)	1.692	1.628	1.264	1.557	1.456	1.381	1.167	
환수 온수압력 p_R (MPa)	0.32	0.37	0.423	0.436	0.533	0.352	0.899	
i	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
송수 온수압력 p_v (MPa)	1.140	1.327	1.311	1.246	0.743	1.131	0.99	
환수 온수압력 p_R (MPa)	0.926	0.747	0.781	0.066	0.512	0.375	0.623	
i	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
송수 온수압력 p_v (MPa)	1.154	0.797	1.119	1.378	1.326	1.354	1.037	1.628
환수 온수압력 p_R (MPa)	0.519	0.434	0.461	0.601	0.655	0.629	0.937	0.374

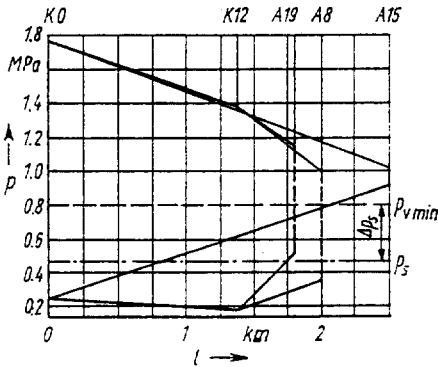


그림 7.4 배관의 압력 분포 K0...A15, K0...A8 과 K0...A9

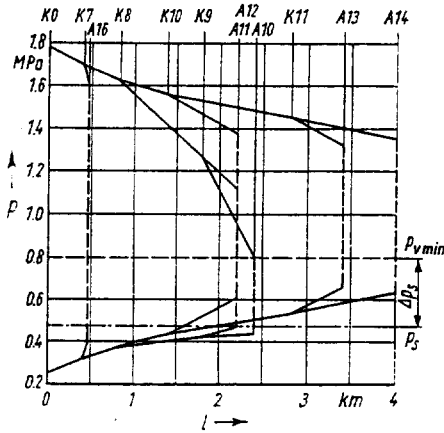


그림 7.5 배관 K0...A16, K0...A14, K0...A13, K0...A11 및 K0...A10의 압력분포

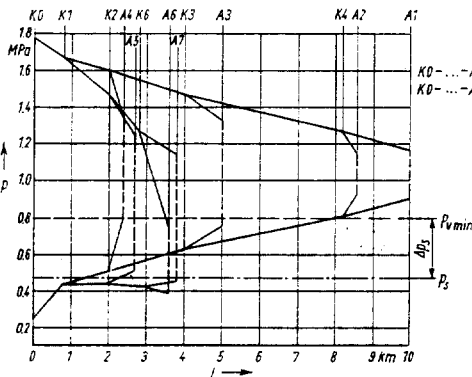


그림 7.6 배관 K0...A1, K0...A2, K0...A3, K0...A4, K0...A5, K0...A6 및 K0...A7의 압력분포

압력으로서 ND25(2.5 MPa)가 선정된다.

7.6 증기배관의 관경 선정

7.6.1 증기의 조건과 전력출력의 계산

배압증기의 모든 조건에 대한 계산에는 $P_F=12.8\text{MPa}$, $t_f=565^\circ\text{C}$ 인 보일러 출구증기의 조건과 터빈효율 $\eta_t=0.84$ 의 일정값이 사용되었다. 이상과 같은 조건에서 구해진 결과들은 표 7.16과 그림 7.7에 나타내었다.

표 7.16 배압터빈의 Balance값

p_G (MPa)	h_a (kJ/kg)	h_f-h_G (kJ/kg)	P (MW)	v_G (m^3/kg)
0.5	2,818	692	38.5	0.41
0.6	2,852	658	36.4	0.35
0.7	2,880	630	35.0	0.31
0.8	2,904	606	33.7	0.28
0.9	2,922	588	32.7	0.26
1.0	2,940	570	31.7	0.237
1.1	2,960	550	30.6	0.215
1.2	2,976	534	29.6	0.200
1.3	2,996	514	28.6	0.188
1.4	3,008	502	27.9	0.179
1.5	3,020	490	27.2	0.167
1.6	3,032	478	26.6	0.160
1.7	3,046	464	25.8	0.152
1.8	3,056	454	25.2	0.145
1.9	3,067	443	24.6	0.139
2.0	3,078	432	24.0	0.133

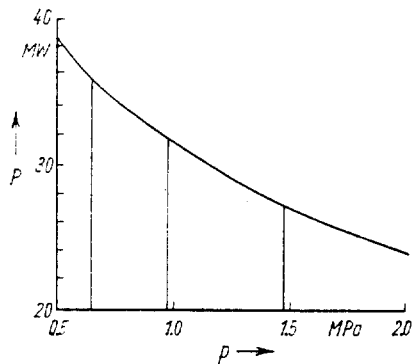


그림 7.7 증기의 조건함수로서의 전력출력

7.6.2 수증기속도와 배관경의 결정

압력손실 계산으로부터 등은 흐름인 경우의 관경은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = 0.1 \sqrt[5]{\frac{125 \dot{m}^2 l \lambda_0}{\rho_c p_c (1 - \pi^2)}} \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_0}}$$

여기서, $\pi = p_2/p_c$ 이다. $\dot{m} = 200t/h$, $l = 2.5km$, $\lambda_0 = 0.025$ 라 하면, 그림 7.8과 같은 관계가 얻어진다. $\sqrt[5]{\lambda/\lambda_0}$ 에 의한 보정의 영향은 작고, 신중하게 직경을 선정할 필요는 없기 때문에 보정할 필요는 없다. 허용속도는 $w = 40 \sim 50m/s$ 가 된다.

7.6.3 관경의 선정

호칭경으로 정리된 표 7.17에서 배관의 단위 길이당 가격이 구해진다. 이 때의 조건으로서는 $l = 2.5km$, $z = 0.0829a$ 가 사용되고 있다. 전기 에너지출력으로부터 매상은 다음과 같이 계산되고, 이것을 그림으로 나타내면 그림 7.9와 같다.

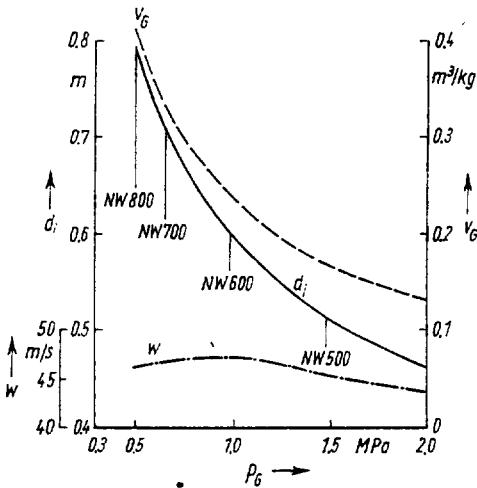


그림 7.8 증기속도와 배관경과의 관계

표 7.17 배관비용(어느 실례)

호칭경(mm)	500	600	700	800
$K_R(TM^*/km)$	2,140	2,570	3,060	3,370
$K_{FR}(TM/a)$	444	531	635	697

* $TM = 1,000M$ (마르크)

$$E = P k_{\epsilon} \epsilon b$$

경제적인 관점을 배려하여 배압이 적을 때 배관경이 두꺼운 것을 고려하여 보급수 예열분으로서 $p_c = 0.5MPa$ 을 예상하고 있다. 따라서, 증기 배관의 여러가지 조건을 다음과 같이 된다.

- 입구 조건 0.5MPa
- 출구 조건 0.2MPa
- 수량 200t/h
- 관경 호칭경 800

7.7 고온수 배관, 증기배관망의 단열재 두께와 열손실의 산정

7.7.1 고온수 배관의 최적 단열두께의 산정
최적 단열두께는 반복법에 의해 다음 식으로 계산된다.

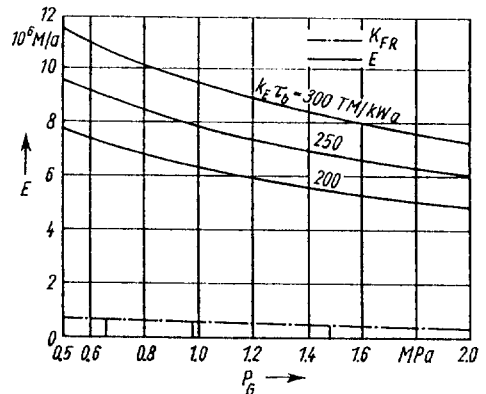
$$\frac{C_K k_2 \mu k_{l1}}{\epsilon} = \delta \ln^2 \delta$$

$$C_K = \frac{2k_Q \tau_B \dot{m} c_p \theta_c}{K_l d_a l z}$$

$$\mu = \frac{k_0 A}{\dot{m} c_p}$$

$$\epsilon = \frac{k_0 d_i}{2\lambda_i}$$

$$\delta = \frac{d_j}{d_a}$$



K_{FR} : 연간 고정비, E : 전력의 매상

그림 7.9 전력의 총매상액과 고정비

여기서, k_1, k_2 는 보정계수이다.

$$d_i = d_a + 2s \quad (d_a \text{는 관외경, } s \text{는 단열재 두께})$$

계산치는 배관망의 온도가 제어되고 있으므로, 연간 부하선도로부터 평균온도차 θ_e 를 계산하던지, 혹은 최대온도차를 이용하여야 한다. 이 때, 운전시간 τ_B 는 이용시간수 τ_a 로부터 구해진다. 최초의 근사식은 다음과 같다.

$$\tau_a = 0.5\tau_B = 2,640\text{h/a}$$

단열비용은 아래와 같다.

$$K_I = C_d d_a$$

여기서 단위용적당 가격은 다음과 같다.

$$C_I = 780\text{M/m}^3 \quad (1 \leq \delta \leq 1.6 \text{인 경우})$$

$$C_I = 1,375\text{M/m}^3 \quad (1.6 \leq \delta \leq 2.0 \text{인 경우})$$

보정계수 k_1 와 k_2 는 고온수 배관망에서 $k_1=0.98, k_2=1.0$ 이라는 값이 채용된다. 1MWh당 열량 가격은 다음과 같이 계산된다.

$$k_Q = k_{QA} + \frac{k_{QL}}{\tau_a} = 28.8 + \frac{68,800}{2,640}$$

$$k_Q = 54\text{M/MWh}$$

여기서, k_{QA} : 종량부분(從量部分), k_{QL} : 기본부분이다.

표 7.18은 열매와 주위온도 t_u 와의 차이를 나타낸 것이다. 온도차는 $\theta_E = t - t_u$ 로 계산된다.

단열재로서 섬유계 단열재가 이용된다. 송수관의 단열재 평균 온도는 $t_m = 90^\circ\text{C}$, 열전도율은 $\lambda_i = 0.0607\text{W/mK}$ 로 된다.

환수관의 단열재 평균 온도는 $t_m = 35^\circ\text{C}$, 열전도율은 $\lambda_i = 0.0517\text{W/mK}$ 로 된다.

동독 규격 TGL 24581/01에서는 단열재 열전

도율을 보충하기 위해 배관과 단열재의 틈새를 무시하고 있다. 이때의 보정치는 0.0093W/mK 이다(강재를 사용하여 간격이 유지되는 경우).

이상과 같은 보정치를 고려하여 계산한 결과, 각각의 열전율은 다음과 같다.

$$\text{송수관} \quad \lambda_i = 0.07\text{W/mK}$$

$$\text{환수관} \quad \lambda_i = 0.061\text{W/mK}$$

최적의 단열두께는 배관경 d_a 와는 거의 관계없이 다음 식으로 계산된다.

$$s = d_a \left(\frac{\delta - 1}{2} \right)$$

주어진 값으로부터 구한 값이 표 7.19에 정리되어 있다. 열손실을 계산하는 데는 표 7.20에 나타난 무차원 단열재경이 사용된다.

7.7.2 고온수배관의 열손실 계산

(1) 열통과율

열통과율을 계산하는 데는 단열재를 통한 열저항과 외부의 열전달을 고려해야 한다.

$$k = \frac{1}{\frac{d_a}{\lambda_i} \ln \delta + \frac{1}{\alpha_A \delta}} = \frac{1}{R_i + R_A}$$

열전도율에 대해서는 이미 설명하였고, 외부의 열전달에 대해서는 아래와 같은 식을 사용하여 계산한다.

i) 정지공기의 경우(실내, 지하 배수로 등)

표 7.18 열매와 주위의 온도차

	암거(暗渠)배관		가공(架空)배관	
	공급	환수	공급	환수
t_u ($^\circ\text{C}$)	5	5	-15	-15
θ_E (K)	145	53	165	73

표 7.19 최적 단열재 두께

	송 수 배 관		환 수 배 관	
	암거(暗渠) 배관	가공(架空) 배관	암거(暗渠) 배관	가공(架空) 배관
s(mm)	133	143	70	83

표 7.20 무차원 단열재 지름 δ^*

$d_o(m)$	공 급 배 관		환 수 배 관	
	암거(暗渠) 배관	가공(架空) 배관	암거(暗渠) 배관	가공(架空) 배관
0.426	1.625	1.670	1.328	1.390
0.377	1.705	1.760	1.372	1.440
0.325	—	1880	—	1.510
0.273	1.975	2.050	1.513	1.308
0.219	2.215	2.305	1.640	1.758
0.159	1.675	2.800	1.880	2.045

주) $\delta = 1 + \frac{2s}{d_o}$ 로부터 구함. 예를 들면 $\delta = 1 + 2 \frac{0.122}{0.426} = 1.625$

$$\alpha_A = 9.42 + 0.0532\theta_i \frac{W}{m^2 K}$$

ii) 외부의 경우(바람의 영향이 있는 경우)

$$\alpha_A = \alpha_K + \alpha_S$$

$$\alpha_K = 4.17 \frac{w^{0.8}}{d_i^{0.2}} \frac{W}{m^2 K}$$

$$\alpha_S = aC, C = 4.65 Wm^2 K^3,$$

$$a = \frac{\left(\frac{T_i}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_L}{100}\right)^4}{T_i - T_L}$$

여기서, θ_i : 단열재의 외표면과 공기온도와의 차(K), T_i : 단열재의 외표면 온도(K), T_L : 공기온도(K)

송수관에 대해서는 아래와 같은 값이 사용된다.

$$\theta_i = 25 K(\text{암거(暗渠) 배관})$$

$$T_i = 303 K = 10^\circ C(\text{가공(架空) 배관})$$

환수관에 대해서는

$$\theta_i = 5 K(\text{암거(暗渠) 배관})$$

$$T_i = 283 K(\text{가공(架空) 배관})$$

표 7.21에는 풍속을 5m/s로 가정하여 계산한 열통과율을 정리하였다.

(2) 열손실

열손실은 아래의 식을 계산된다.

$$\dot{Q}_V = \dot{m} c_p \theta_E \left\{ \exp\left[\frac{kA}{mc_p}\right] - 1 \right\}$$

지수 $\left[\frac{kA}{mc_p}\right]$ 는 상당히 작기 때문에 다음과 같은 근사식으로 정리될 수 있다.

$$\dot{Q}_V = kA \theta_E$$

앞서 서술한 시스템에서의 지수는 다음과 같다.

$$\left[\frac{kA}{mc_p}\right] < 0.007$$

근사식으로 구한 값과 해석으로 구한 값은 거의 일치한다.

경로 마지막에서의 열매와 공기의 온도차 θ_E 는 가장 먼 거리에 있는 수요가에서의 온도차라는 것을 알 수 있다. 경로의 출발점의 온도는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_A = \theta_E \exp\left[\frac{kA}{mc_p}\right]$$

이것에 의해 앞서 이야기한 경로의 말단 온도를 알 수 있다. 가장 조건이 나쁜 수요가의 송수관 총계로서 온도차(강하)가 있다. 다른 수요가에서는 이와 같은 온도강하는 상당히 적다. 이와 같이 최소 온도차가 생기는 경우, 앞서 이야기한 배관망의 열손실계산에서는 무시하여 계산하는 것이 좋다.

배관 방열 표면적은 다음과 같다.

$$A = \pi d_o l_{ges}$$

배관의 전길이 l_{ges} 는 다음 식과 같이 여러가지 길이에 대한 합계이다.

$$l_{ges} = l + l_D + l_{Fl} + l_{Sch}$$

$$l_D = l_u Z_D = l_u \frac{l}{\Delta l_D}$$

여기서, l : 본래의 경로길이, l_D : 경로중에 있는 U벤트 신축이음매의 총길이, $l_{Fl, Sch}$: 플랜지, 절환밸브에서의 열손실을 고려한 상당길이, l_u : U벤트 신축이음매의 평균길이, Δl_D : U벤트 신축이음매의 간격

플랜지와 절환밸브의 상당길이 산정은 TGL 24581/01에 의해 계산한다. 시스템에서는 각 경로에 2개의 절환밸브, 각 절환밸브에는 2개의 플랜지를 설치하는 것으로 한다. 이들 장치는 모두 단열하여야 한다.

한 예로서 경로 K0로부터 K1의 결과로서는 NM(호칭경) 400, $l=800m$ 암거(暗渠)배관에서는

$$l_D = 56m, l_{Sch} = 8m, l_{Fl} = 8m, l_{ges} = 872m$$

이다. 다른 경우에 대해서는 표 7.21에 정리되어 있다.

여기서 얻어진 열손실에 대해 배관의 지지대 혹은 지주에 의한 열손실의 증가분을 고려해야 할 필요가 있다. 독일규격 TGL 24851/01에 의하면 이 증가분은

실내에서는 열손실의 15%

바람이 없는 옥외에서는 열손실의 20%

바람이 있는 옥외에서는 열손실의 25%로 보고 있다.

지금 예로 들고 있는 지역난방 시스템에서는 암거(暗渠) 배관에서 15%, 옥외배관에서 25%의 증가를 예상한다. 그 결과, 표 7.21에 정리된 것과 같은 실제의 열손실 Q_v 가 얻어진다. 총합계 송수배관에서의 열손실은 3.55MW, 환수배관에서의 열손실은 1.87MW가 된다. 고온수 시스템의 전열손실은 5.42MW이고, 이것은 전열출력의 2.17%에 달한다.

표 7.21 열통과율과 열손실

경로	전길이 $l_{ges}(m)$	$k(W/m^2K)$		$Q'_v(kW)$	
		송수관	환수관	송수관	환수관
K0 ~K1	872	0.668	0.943	27	63
K1 ~K2	1,306	0.633	0.855	227	127
K2 ~K3	2,160	0.650	0.877	334	187
K3 ~K4	4,510	0.650	0.877	67	390
K4 ~A1	1,932	0.670	0.900	270	151
K4 ~A2	444	0.848	1.065	38	20
K3 ~A3	1,076	0.848	1.065	91	49
K2 ~K4	444	0.848	1.065	38	20
K1 ~K5	1,312	0.735	1.020	134	65
K5 ~K6	864	0.781	1.065	76	36
K6 ~A7	1,070	0.870	1.150	75	35
K6 ~A6	862	0.870	1.150	61	29
K5 ~A5	754	0.870	1.150	53	25
K0 ~K12	1,524	0.735	1.020	156	76
K12~A8	646	0.870	1.150	45	21
K12~A9	438	0.870	1.150	31	15
K0 ~K7	441	0.675	0.962	57	28
K7 ~A16	122	0.870	1.150	9	4
K7 ~A8	441	0.675	0.962	57	28
K8 ~K10	655	0.675	0.900	91	51
K10~K11	1,530	0.710	0.926	188	104
K11~A14	1,300	0.757	0.970	138	75
K11~A13	652	0.848	1.065	55	30
K10~A12	870	0.757	0.970	93	50
K8 ~K9	1,074	0.781	1.065	95	45
K9 ~A10	646	0.870	1.150	45	21
K9 ~A11	438	0.870	1.150	31	15
K0 ~A15	2,674	0.781	1.065	236	113

7.7.3 증기배관 및 복수배관의 최적 단열두께와 열손실

3교대 생산을 하는 섬유공장에 증기가 공급된다. 한공정 5시간 사이에 200t/h의 증기가 소비된다. 이 때 소비되는 증기로서는 0.5MPa, 183°C인 것이 사용된다.

추기, 배압증기의 열가액은 사용시간수가

$$\tau_s = 15h/d \cdot 365d/a = 5,475h/a$$

이기 때문에

$$k_o = 28.8 + \frac{68,800}{5,475} = 41M/MWh$$

로 된다.

단열재의 단위용적당 단가는 다시, $C_1 = 1,375M/m^3$ 를 사용하였다. 열전도율은 평균 단열재 온도 $105^\circ C$ 로 하고, 배관과의 틈새 공기의 단열성능을 0.0093으로 예상할 때,

$$\lambda_f = 0.072W/mK$$

로 하였다. 이 수치로부터 수요가에서 열매온도와 실온의 차이가 $196K$ 일 때, 최적 단열두께 $s = 220mm$ 가 된다. 열통과율은 단열재 외측의 온도를 $35^\circ C$ 로 하고, 가공(架空)배관에서 그 총 길이가 $l_{ges} = 2,782m$ 인 경우, $x = 0.403W/m^2K$ 가 된다.

증기배관의 경우, 초기온도는 플랜트의 온도와 같다. 따라서, 열손실은

$$\dot{Q}_v = \dot{m}c_A \theta_A \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{kA}{mc_p} \right] \right\} = 0.566MW$$

가 된다.

배관지주로부터의 열손실에 대한 여유값으로서 $\dot{Q}_v = 0.707MW$ 을 예상한다.

이것은 말단에서의 온도강하가

$$t_E = \theta_E + t_u = \theta \exp \left[\frac{-kA}{mc_p} \right] + t_u = 178.5^\circ C$$

로 했을 경우의 값이다.

단열재 두께의 계산에서 말단온도는 $t_E = 181^\circ C$ 로 하였다. 이것을 사용하여 반복계산하면 $s = 217mm$ 의 값을 얻을 수 있다. 이러한 2개의 값 차이는 실제의 단열시공시에서는 그다지 문제시 되지 않고, 열손실에 대한 효과 등에서도 무시할 수 있다. 복수배관의 단열재 두께 계산은 온도를 $151^\circ C$ 로 한 경우의 복수(復水)의 단위 열가격, 고온수인 경우의 가격으로부터 계산된다. 이 값은 다음과 같다.

복수량	67t/h
배관	호칭경 150
단위 열가격	19.9M/MWh
열전도율	0.07W/mK

이상의 값으로부터 복수배관에 대해 계산하면 다음과 같은 값을 얻는다.

최적단열두께	$s = 188mm$
열통과율	$k = 0.722W/m^2k$
열손실의 여유값	$\dot{Q}_v = 0.021MW$