

地域暖房플랜트의 經濟的 設計*

= 編輯委員會 =

要 約

第 1 部에서는 地域暖房配管網의 特異性을 說明한다. 暖房負荷에 있어서 피이크値는 別로 자주 使用되는 것이 아니며 이에 所要되는 에너지는 少量이므로 最小의 資本投資를 하도록 하여야 한다. 地域暖房配管網의 建設期間동안 設備容量중의 많은 部分이 使用되지 않은 狀態로 나타나 建設期間중의 利子를 고려할 때 投資費를 增加시키게 된다. 建設期間동안에는 특히 投資가 加급적 적게되도록 하여야 한다.

第 2 部에서는 動力發生과 熱發生에 있어 가장 經濟的이 되도록 간단하고 實用的인 方法을 說明한다. 에너지함량을 使用하여 가장 간단한 方法으로 各 部門에 대한 에너지의 換算을 할 수 있다. 이로서 熱併合發電方式으로부터 熱을 發生시키는 경우와 熱만을 生産할 때의 年間 生産費를 計算할 수 있다. 電氣에너지에 대한 收入을 고려하고 最小現價를 決定할 수 있다.

第 3 部에서는 暖房網의 增加를 包含하여 地域暖房플랜트의 段階的 확장에 대하여 說明한다.

1. 地域暖房網의 特異性

1.1 完成段階에서의 熱出力

完成된 地域暖房網에서 必要한 熱出力은 1 日 中の 時間과 外氣溫度, 季節과 氣候에 따라 變化한다. 1 日 中の 變動은 暖房된 室內에 있는 사람들의 生理學的 要求로 發生하게 되어 負荷는 一般的으로 밤에는 낮게 되고 아침에 최고치에 이르렀다가 10 時경까지 감소하게 된다. 外氣溫度에 따른 變化量은 暖房度日에 맞추어 理論的으로 計算할 수 있으나 經驗的으로 보면 보통 修正이 必要하다. 氣候와 季節에 따라 年間의 負荷는 크게 變化한다. 必要한 熱出力의 變化가 그림 1 에 표시되어 있다.

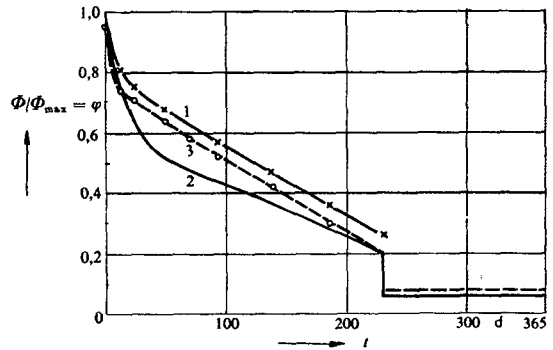


그림 1. 地域暖房의 負荷曲線

曲線 1은 단순히 1 日의 平均値만을 고려한 것이나 實際 地域暖房供給所는 1 日 中の 最大値에 對하여 設計되어야 하므로 이를 30%늘려야 採擇한 것이 곡선 2 이다. 曲線 3은 다른 方式에 依하여 제안된 負荷를 나타낸다. 이 曲線들에는 여름철동안의 溫水需要量이 包含되어 있다.

地域暖房플랜트의 運轉費를 計算하기 위하여

* A. Schwarenbach, Economical Design of District Heating Power Plants, Brown Boveri Review 9-77.

는 에너지供給量 w 를 熱出力 Φ 의 函數로 나타내는 것이 편리하므로 $w = \int_{\Phi_{max}}^{\Phi} t d\Phi$ 를 計算하여 Φ 에 대하여 圖示할 수 있다. 여기서 積分下限 $\Phi = \Phi_{max}$ 은 曲線의 形態를 分明하게 표시하기 위하여 편의상 使用된 것이다. 이를 無次元으로 하기 위하여

$$\phi = \Phi / \Phi_{max}$$

$$w = W / W_a$$

를 使用하여 표시한 것이 그림 2이다. 여기서 Φ_{max} 은 最大暖房負荷이고 W_a 는 暖房에너지의 年間合計를 표시한다. 3個의 曲線은 서로 別差異가 없다. 熱出力이 높은 部分에서의 暖房에너지는 비교적 적은 量이며 여기서는 少量의 燃料만이 使用되므로 ϕ 의 값이 낮은 쪽에서만 電力과의 租合使用이 有利하게 된다. 變動되는 熱出力은 地域暖房網의 全負荷에 대한 有用時間으로 잘 特性을 살려 나타낼 수 있다. 즉

$$D = \frac{\text{年間暖房用에너지 } W_a}{\text{最大熱出力 } \Phi_{max}}$$

을 計算할 수 있으며 이를 各各 다른 單位를 使用하여 나타낸 것이 表 1이다.

表 1. 地域暖房網의 有用時間

全出力에서의 有用時間	曲線			單位
	1	2	3	
D	132.7	105.4	121.2	d / a
D	3184	2529	2910	h / a
D	11.5	9.1	10.5	Ms / a
D	0.36	0.29	0.33	a / a

앞에서 說明되었듯이 外氣溫度에 따른 熱出力의 變化를 위하여는 可變熱供給溫度 t_v 가 必要하게 되며 現代式的 配管網에서 t_v 는 대개 80°C에서 120°C의 범위에 있다. 여름철에 있어서도 溫水溫度는 下限線以下로 내려가지는 않을 것이므로 가정용溫水를 충분히 공급이 된다. 스위스의 경우에는 아직도 180°C의 溫度를 使用

하여 非經濟的인 경우가 있으나 이의 확장에 있어서는 이 溫度를 기준으로 할 수 밖에는 없다.

1.2 配管網의 建設

地域暖房配管網이 完了되기에는 보통 10 내지 20년이 所要된다. 이 期間동안 最大容量은 그림 3에서의 曲線과 같이 增加하게 된다.

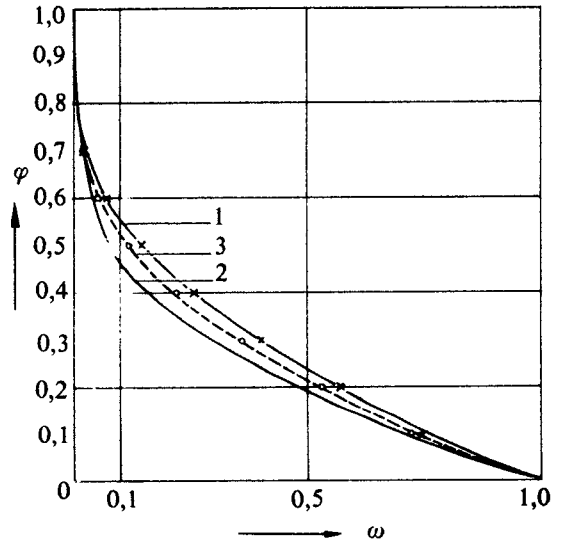


그림 2. 地域暖房에 對한 無次元에너지 曲線

어느 時點에 있어서나 出力曲線과 에너지합량선은 最大出力과 연관이 지어져있다. 氣候는 年間단위로 볼 때에는 變化하지 않으므로 그림 2

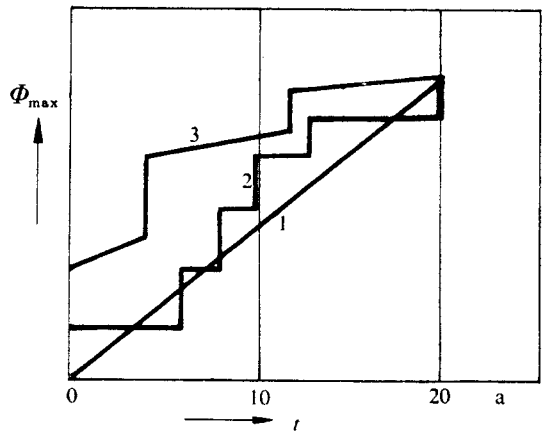


그림 3. 地域暖房 配管網의 建設方式

에서의 無次元化된 曲線은 建設期間동안 變化하지 않게 된다. 그림 3의 확장계획의 曲線은 다음의 가정에 기반을 두고 있다.

(1) 地域暖房의 費用이 個別住宅暖房과 비교하여 겨우 경쟁적이 되어 地域暖房이 확장된다. (曲線 1)

(2) 廉價의 移動式 補助보일러를 使用하여 局部的인 配管網의 建設이 이루어진다. 長距離擴張은 部分的으로 이루어진다. (曲線 2)

(3) 熱供給費用이 극히 廉價가 되어 配管網의 連結이 거의 必須의이 되어 配管網의 部分的 連結이 個別暖房이 使用中에 이루어지고 地域暖房이 群別로 시작된다. (曲線 3)

이 그림은 最大熱出力 20- 1000 Gcal/h, 즉 23- 1160 MW인 경우에 대하여 기반을 둔 것이다. 人口 1人에 대한 暖房設備負荷를 表II에 2個都市에 대하여 예를 들었다. 地域이 形成되어 가는 방식에 따라 地域暖房供給所에 連結되는 配管網의 길이는 크게 달라진다. 예를 들면 最大熱出力 50 MW로서 人口 10,000名에서 25,000名の 地域이 이에 連結될 수 있다.

表 II. 地域의 形態에 따른 地域暖房網의 特性

	散開된 住宅	大規模 빌딩 Volketswil Berne		單位
土地利用率	0.3	0.75	1.02	-
1人當熱出力 Φ_{max}	5	3.1	2	KW/人
單位熱出力 Φ_{max} 當人口數	0.2	0.32	0.5	人/KW

2. 地域暖房플랜트에 의 經濟的 動力發生

2.1 熱과 電力生産

熱出力 ϕ 와 에너지消費量 w 의 관계에서 低負荷에서는 熱과 電力을 적당히 配分生産하여야 한다. 이러한 事實은 投資費와 燃料費의 關係를 고려하면 分明하게 된다. 近似的으로 좁은 범위

에 있어서 投資費 Y 는 高溫水 暖房負荷에 比例하며 이는 小型의 暖房보일러나 熱과 電力의 同時發生設備 어느 쪽에나 해당된다. 여기서 電力生産은 熱需要에 따라 함께 變化한다고 가정한 다. 蒸氣터어빈에서는 生蒸氣의 條件이 一定할 때의 背圧터어빈 경우와 抽氣複水터어빈에서 抽氣된 蒸氣와 電力發生에 함께 적용이 된다. 複水部는 보통의 火力發電과 같이 취급할 수 있으므로 여기서는 더 이상 설명하지 않는다. 가스터어빈에 대하여는 暖房負荷에 따른 比例의 性質이 보통은 成立되지 않으나 溫度가 同一할 때 規模가 다르더라도 電力生産의 比率 $P/\Phi_H = E/W_H$ (E 는 年間電力에너지)이 거의 同一하므로 함께 취급할 수 있다. 相異한 暖房方法에 따라 投資費는 자연 다르게 된다. 예를 들면 同一한 暖房出力에 대하여 純粹한 暖房보일러 費用은 熱回收보일러를 가진 가스터어빈의 35%에 불가하다.

燃料費 BK 는 供給熱量 W_{supp} 에 比例한다. 各種 플랜트의 방식에 따라 供給熱은 다음과 같이 計算된다.

— 暖房보일러

$$W_{supp} = \frac{1}{\eta_k} W_H$$

여기서 η_k 는 보일러效率이다.

— 가스터어빈

$$W_{supp} = W_H \frac{E/W_H + 1}{\epsilon} = W_H \frac{e + 1}{\epsilon}$$

여기서 有用率 ϵ 와 電力生産係數 e 는

$$\epsilon = \frac{E + W_H}{W_{supp}}, \quad e = \frac{E}{W_H}$$

로 定義된 것이며 이는 熱效率 η_{th} 와 보일러熱率 η_k 로부터 計算될 수 있다.

즉 가스터어빈의 경우는

$$\epsilon = \eta_{th} + \eta_k (1 - \eta_{th})$$

$$e = \frac{\eta_{th}}{\eta_k} \frac{1}{1 - \eta_{th}}$$

로 된다. 이들은 모두 가스터어빈과 熱回收 보일러의 設計에 따라 決定이 되며 가스터어빈의 크기에는 거의 無關하다.

— 蒸氣터어빈

背压蒸氣터어빈이나 抽氣部에 있어서는 熱損失이 무시될 때

$$W_{supp} = W_H \frac{e + 1}{\eta_k}$$

가 된다. 最適條件을 찾기위하여 그림 2의 無次元에너지線을 그림 4에서 다시 使用하여 點線으로 配分點을 표시하고 이 때의 因子들을 다음과 같이 나타내었다.

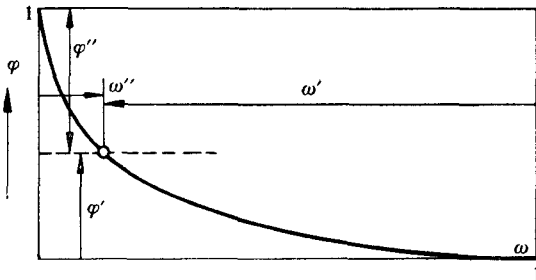


그림 4. 熱에너지, 電力 및 피크보일러 使用의 區分

出 力 에 너 지

피크보일러	ϕ''	w''
熱 및 電力의 組合	ϕ'	w'
關係式	$\phi' + \phi'' = 1$	$w' + w'' = 1$
基準值	Φ_{max}	W_a
關係式	$\Phi_{max} \cdot D_a = W_a$	

(D_a 는 全에너지曲線의 有用時間이다.)

最適條件은 플랜트의 現價를 計算하여 決定한다. 임시 投資費를 總資本財投資費에 加算하여야 하며 다음의 사항이 고려되어야 한다.

(1) 材料 및 賃金上昇에 따른 費用增加

- (2) 運轉開始日까지의 建設期間동안의 利子
- (3) 投資費에 對한 年間稅金의 現價
- (4) 火災, 水災 및 기타 損失에 對한 年間保險金의 現價

1項과 2項은 固有의 資本投資費를 의미하며 3, 4項의 年間循環固定費는 플랜트의 運轉이 시작된 後의 投資로서 보상이 된다. 따라서 이들 年間費用을 資本化하여 資本投資費에 包含시키는 것이 經濟的인 面에서 타당하다. 經驗에 의하면 가스터어빈에 對한 附帶費의 因子는 약 1.5이다.

이들 現價는 모두 ϕ' 의 函數이며 2個의 現價의 總의 最小值가 最適值 ϕ' 이 된다. 따라서 ϕ'' , w' , w'' 의 最適值도 알려져진다. 現價 BW는 다음과 같이 구성된다.

$BW = 投資費 Y \times 附帶費因子 N + 資本化된 燃料費 BK - 資本化된 電力收入 EE$. (11)
投資費 Y는 單位價格 β' 과 β'' 으로부터 計算되어

$$Y' = \beta' \phi' \Phi_{max} \quad (12)$$

$$Y'' = \beta'' \phi'' \Phi_{max} \quad (13)$$

이 된다. 供給熱 W_{supp} 는 가스터어빈의 경우 式(5)로 計算된다. 즉

$$BK' = y_B' \frac{W_a w' + E}{\epsilon} \frac{1}{\psi} \quad (14)$$

$$EE = E y_E \frac{1}{\psi} \quad (15)$$

$$BK'' = y_B'' \frac{W_a w''}{\eta_k} \frac{1}{\psi} \quad (16)$$

$$BW = Y'N + Y''N + BK' - EE + BK'' \quad (17)$$

이며 여기서 y_B 는 熱에너지와 관계된 燃料費, y_E 는 電氣에너지와 關係된 現在의 價格이며 ψ 는 年賦率이다. 現價 BW의 總은 最小가 되어야 하며 이를 式(9), (10)을 使用하여 Φ_{max} 으로 나누고 E/W' 를 e 로 代치하면

$$b\Phi = \frac{BW}{\Phi_{max}} = [\beta'\phi' + \beta(1-\phi')]N + \left[y_B \frac{w' + ew'}{\epsilon} - e y_E w' + y_B'' \frac{1-w'}{\eta_k} \right] \frac{0}{\psi} \quad (18)$$

이 되며 이를 變形하여

$$b\Phi = [\beta'' + \phi'(\beta' - \beta'')]N + \frac{y_B''}{\eta_k} \frac{0}{\psi} + w' \left[y_B \frac{1+e}{\epsilon} - y_E \frac{y_B''}{\eta_k} \right] \frac{0}{\psi} \quad (19)$$

로 쓸 수 있다. 最小現價를 決定하기 위하여 實際價格의 微分値를 0으로 놓는다. 에너지線이 $\phi = f(w'')$ 으로 표시되므로 w' 을 $(1-w'')$ 으로 대치하면

$$\frac{db\Phi}{dw''} = 0 = \frac{d\Phi'}{dw''} (\beta' - \beta'')N - F \quad (20)$$

가 된다. 여기서 F는 運轉費因子로서

$$F = \left[y_B \frac{1+e}{\epsilon} - y_E \frac{y_B''}{\eta_k} \right] \frac{0}{\psi}$$

이다. 따라서

$$\frac{d\phi'}{dw''} = \frac{F}{(\beta' - \beta'')N}$$

이 된다. $d\phi'/dw''$ 은 그림 2의 에너지線의 接線의 기울기를 표시하여 一般的으로 分子는 陰의 값을 갖는다. 반면 $\beta' > \beta''$ 인 경우만을 고려할 수 있으므로 分母는 陽의 값이 된다.

最小値는 式(21)에 따른 기울기를 가진 直線을 平行移動시켜 그림 2의 曲線에 接하게 하여 구할 수 있다. 實際 中小規模의 플랜트價格은 出力에 比例하지 않으며 $\alpha\Phi^n$ 의 形態로 더 잘 나

타낼수 있다. 이러한 形態의 式이 使用되면 複雜한 數式이 전개되어야 할 것이다. 더 正確한 價格函數는 다음과 같이 反復方法으로 구할 수 있다.

(1) Y' 과 Y'' 을 Φ 에 대하여 로그-로그 그래프에 그린다.

(2) β' 과 β'' 을 Φ 에 대하여 로그-로그 그래프에 그린다. 보일러나 터빈에 급작한 變化가 있으면 β 에 대한 不安定 曲線으로 표시된다.

(3) $0.5\Phi_{max}$ 에서의 β 의 값으로 式(21)을 계산하여 ϕ' 과 ϕ'' 을 구한다.

(4) 앞의 계산으로부터 Φ' 및 Φ'' 에서의 β 의 값으로 式(21)을 使用하여 새로운 ϕ' 과 ϕ'' 의 값을 구한다.

(5) 必要에 따라 (4)이 方法을 反復한다. 에너지線의 接點을 위에서 설명한 바와 같이 그리면 最適條件에 대한 數値인 ϕ'_{opt} , ϕ''_{opt} , w'_{opt} , 및 w''_{opt} 을 구할 수 있다. 完全히 建設된 配管網에 대하여 알려진 Φ_{max} 과 W_a 의 값으로

$$\Phi'_{opt} = \phi'_{opt} \Phi_{max} \quad (22)$$

$$\Phi''_{opt} = \Phi_{max} - \Phi'_{opt}$$

$$W'_{opt} = \phi'_{opt} W_a$$

$$W''_{opt} = W_a - W'_{opt}$$

을 구할 수 있다. 最適條件에 대한 影響은 有用時間에 대한 영향으로 분명하게 나타낼 수 있다. 즉

$$D' = \frac{W'}{\Phi'} \frac{w'}{\phi'} D_a$$

(23)

$$D'' = \frac{W''}{\Phi''} = \left(\frac{1-w'}{1-\phi'} \right) D_a$$

가 된다. 그림 5의 直線들의 기울기가 $D = w/\phi_{max}$ 이므로 有用時間의 直接的인 尺度가 된다.

直線 b의 기울기가 D_a 를 나타내며 點線으로 표시된 C의 기울기가 式(23)에서의 有用時間 D' 이다. 또한 線 d의 기울기는 D'' 를 나타낸다. 여기서 $D' \gg D_a$ 이고 $D'' \ll D_a$ 가

됨은 명확하다.

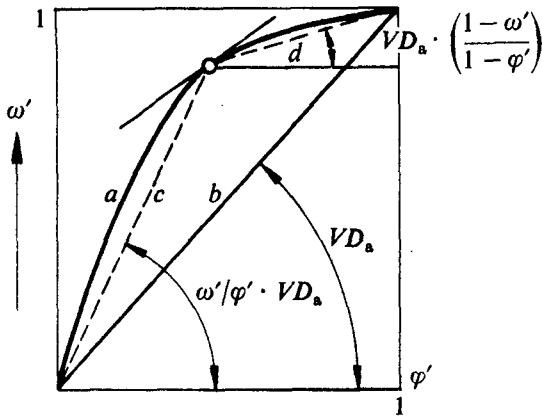


그림 5. 基本負荷와 피크負荷에 따른 有用時間의 變化
2.2 最適化

最適條件은 式 (21)로서 決定되며 이 式의 分子는 比資本費를 나타내고 分母는 運轉費를 표시한다.

만약 $\beta' = \beta''$ 이면 $\frac{d\phi'}{d\phi''} = \infty$ 이고 이

解는 $\phi' = 1, \phi'' = 0$ 로 된다. 이 경우 플랜트에서 電力生産은 불가피하다. 만약 $y_B' = y_B e$ 이면 運轉費係數 F는

$$F = \left[\frac{y_B'}{\epsilon} - \frac{y_B''}{\eta_k} \right] \frac{D_a}{\psi} \quad (24)$$

가 된다. 대부분의 경우 $y_B' = y_B''$ 이고 $\epsilon \approx \eta_k$ 이므로 $F \approx 0$ 이 된다. 그러면 水平線으로 나타난 接線은 電力과 熱을 同時에 生産하는 解를 가지지 못하며 이에 적합한 解가 얻어지기 위하여는 電力收入 y_E 가 y_B/ϵ 의 倍數로 되어야 한다. 이 關係式이 모든 地域暖房플랜트에서의 主條件이 된다.

2.3 最適條件計算의 例

日間最大熱出力 200 MW의 가스터어빈 地域暖房發電所의 最終建設段階에 對한 最適條件을 計算하고자 한다. 出力曲線으로부터 全負荷에서의 有用時間도 $D_a = a M_s / a = 2500 \text{ h} / a$ 임을 알 수 있다. 환경보호의 觀點에서 輕油를 가스

터어빈과 피크보일러에 使用한다. 다음과 같은 가정으로 問題를 解決한다. 輕油의 價格은 $y_B' = y_B'' = 8 \text{ SF}_r / \text{GJ}$ 이며 電力供給價格은 $0.06 \text{ SF}_r / \text{kwh} = 16.7 \text{ SF}_r / \text{GJ}$ 이며 投資費에 對한 年利率은 12%이다. 投資는 부수비係數가 $N = 1.5$ 로 된다. 熱效率을 $\eta_{th} = 0.26$, 보일러效率을 $\eta_k = 0.70$ 으로 할 때 有用係數가 0.78로 되고 特性値는 $e = 0.5$ 로 된다. 單位價格이 그림 6에 표시되어 있다. 運轉費係數는 $-329.5 \text{ SF}_r / \text{kwh}$ 로 되며 $\phi' = \phi'' = 0.5$ 로 가정할 때 $\Phi' = \Phi'' = 100 \text{ MW}$ 가 되고 그림 6으로부터 $\beta' = 270 \text{ SF}_r / \text{kwh}$, $\beta'' = 92 \text{ SF}_r / \text{kwh}$ 를 얻을 수 있다. 式 (21)로부터

$$\frac{d\phi'}{d\phi''} = \frac{-329.5 \text{ SF}_r / \text{kwh}}{178 \text{ SF}_r / \text{kwh} \cdot 1.5} = -1.2$$

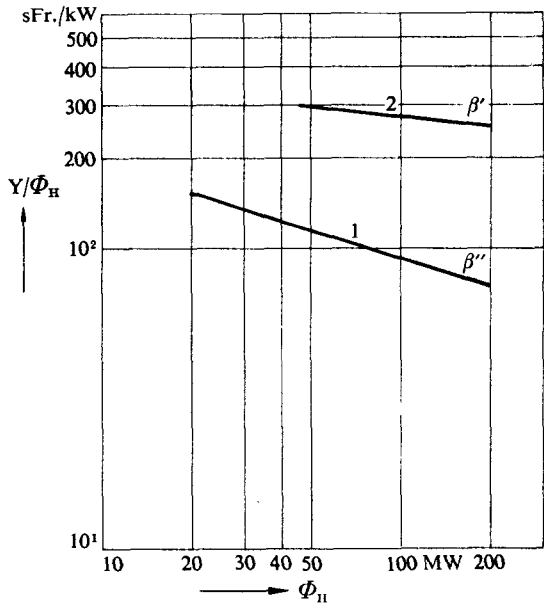


그림 6. 熱出力에 따른 單位價格

이므로 그림 2에 $d\phi' / d\phi'' = -1.2$ 되게 接線을 曲線 2에 그리면 接點은 $\phi' = 0.44$ 이다. 따라서 $\Phi' = 88 \text{ MW}$, $\Phi'' = 112 \text{ MW}$ 가 된다. 이 數値로부터 修正된 β 값을 얻을 수 있다. 반복계산하면 $\phi' = 0.43$, $\Phi' = 86 \text{ MW}$ 와 $\Phi'' = 114 \text{ MW}$

가 된다. 이 두 暖房플랜트에서 $w' = 00875$ 와 $w'' = 00125$ 를 에너지로 바꾼다. 計算結果에서 有用時間은 $D' = 18.3\text{MS/a} = 5087\text{h/a}$ 와 $D'' = 197\text{MS/a} = 548\text{h/a}$ 가 된다.

3. 地域暖房플랜트의 段階的 完成

地域暖房網과 함께 플랜트의 完成期間동안 投資費는 加급적 적어야한다. 電力生産은 다만 電力이 有用될 수 있는 경우에만 타당성이 있다.

따라서 建設期間동안 利子が 節約되고 地域暖房發電所로부터의 熱에너지가 經濟性이 된다. 다

음과 같은 사항이 준수되어야 한다.

(1) 最終完成計劃

피크보일러에서의 純粹한 熱發生과 電力生産의 區分은 위에서 說明한 方式으로 決定한다.

(2) 中間段階計劃

配管網의 建設期間中에는 어느 경우에나 一時的인 熱피크부하 Φ_{max} 으로부터 電力-熱의 同時生産의 量이 最終完成計劃에 의하여 定해진 量보다 크지 않아야 한다. 미완성상태에서 서서히 增加되는 熱出力은 資本投資가 많지 않은 純粹熱보일러로 充當하여야 한다.