

## 參 考 文 獻

1. 腐蝕防蝕協會編：新版 金屬防蝕技術便覽. 機電研究社, p. 587-589. (1972).
2. 村井東助, 田村祐一：流電陽極用 Al合金, 日本特許公報, 1380 (1981).
3. 田大熙：腐蝕斗 防蝕斗 管理, p. 364~374. 太和出版社 (1979).
4. 重野準太：アルミニウム陽極について, アルミニウム, No. 496, p. 21-23 (1974).
5. R. A. Hine & M. W. Wei: How Effective are Aluminum Anodes in Sea Water?, *Materials Protection*, Vol. 3, No. 11, p. 49-55 (1964).
6. J. T. Reding & J. J. Newport: The Influence of Alloying Elements on Aluminum Anodes in Sea Water, *Materials Protection*, Vol. 5, No. 12, p. 15-18 (1966).
7. 田大熙：流電陽極試験法斗 同解説, 韓國腐蝕學會, Vol. 7, No. 2, p. 8-17 (1978).
8. T. J. Lennox, Jr., M. H. Peterson, and R. E. Groover: A Study of Electrochemical Efficiencies of Aluminum Galvanic Anodes in Sea Water, *Materials Protection*, Vol. 7, No. 2, p. 33-37 (1968).
9. L. L. Shreir: Sacrificial Anode, *Corrosion*, Vol. 2, p. 11-21 (1976).
10. T. Sakano, K. Tada & M. Hanada: Tests on the Effects of Indium for High Performance Aluminum Anodes, *Materials Protection*, Vol. 8, No. 12, p. 45-48 (1966).
11. E. G. Hancy, G. W. Kurr: Sea Water Efficiency Tests on Aluminum Alloy Anodes Containing Zinc, Indium and Cadmium, *Materials Performance*, Vol. 15, No. 5, p. 27 (1976).
12. S. N. Smith, J. T. Reding and R. L. Riley, JR.: Development of a Broad Application Saline Water Aluminum Anode—"Galvalum III", *Materials Performance*, Vol. 3, No. 11, p. 32-36 (1978).
13. 村井東助, 田村祐一：流電陽極用 Al合金, 日本特許公報, 100115 (1978).
14. 内山郁雄, 佐藤榮一：熱交換器に用いた Al-1100と流電陽極用 Al-Zn系合金の腐食, 防食技術, Vol. 25, No. 1, p. 11-17 (1976).
15. 電氣學會：新版電食土壤腐食ハンドブック, p. 229. 朝日社 (1977).
16. 村井東助, 三浦清政, 田村祐一：Al-Zn-In系合金の流電陽極の研究(第1報), 防食技術, Vol. 23, No. 4, p. 191-195 (1974).
17. 小林豊治, 田村祐一：新 Al陽極の流電陽極特性, '84春期學術講演大會 講演豫稿集, 日本腐食防食協會, p. 198-201 (1984).
18. 山本郁雄, 篠田吉夫：高性能 アルミニウム系 陽極材の開発, '84春期學術講演大會 講演豫稿集, 日本腐食防食協會, p. 194-197 (1984).
19. 田大熙, 金基俊：國産 Al地金を用いた Al-Zn-In系と Al-Zn-In-Sn系 Al合金陽極の性能, 韓國海洋大學論文集, Vol. 11, No. 1 (1982).
20. 金垣學, 金榮大：低純度 Al地金を使用した Al-Zn-In-Mg系 Al合金流電陽極の特性에 관한 연구, 韓國海洋大學, 學位請求論文 (1984).

# Smith制御系の安定도에 관한 研究

金 仁 泰

(A Study on the Stability of Smith Control System)

*In-tae Kim*

## 目 次

記號說明

Abstract

1. 序 論
  2. Smith 制御系の 考察
    2. 1) 理想 Smith 制御系
    2. 2) 實際 Smith 制御系
  3. 制御要素의 設定
    3. 1) 制御對象의 傳達函數
    3. 2) 制御裝置의 傳達函數
  4. 理想 Smith 系の 安定度
    4. 1) 原形系の 安定度
    4. 2) 等價系の 安定度
    4. 3) 理想 Smith 系の 安定度比較
  5. 實際 Smith 系の 安定度
    5. 1) 遲延時間差에 依한 安定度
    5. 2) 動特性相異에 依한 安定度
    5. 3) 遲延時間差 및 動特性相異에 依한 安定度
  6. 結 論
- 參考文獻

## 記 號 說 明

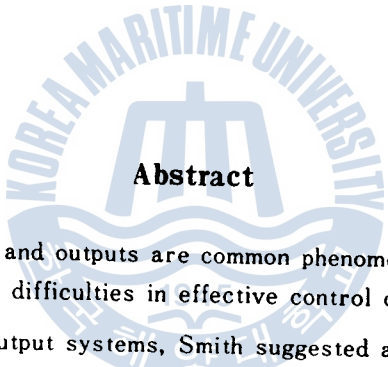
$R(s)$ : 目標值	$G_{m\rho(s)}$ : $G_m(s)$ 의 推定函數 (豫測器)
$C(s)$ : 制御量	$T_{L\rho}$ : $T_L$ 의 推定遲延時間
$E(s)$ : 動作誤差信號	$V_{KS}$ : $V_K$ 의 推定利得
$V(s)$ : 局部歸還信號	$C_{KS}$ : $C_K$ 의 推定利得
$G_{c(s)}$ : 主制御器의 傳達函數	$T_{KS}$ : $T_K$ 의 推定利得
$P_K$ : 主制御器의 利得	$T_{vS}$ : $T_v$ 의 推定時定數
$T_d$ : 微分時間	$T_{\rho S}$ : $T_\rho$ 의 推定時定數
$T_i$ : 積分時間	$T_{tS}$ : $T_t$ 의 推定時定數
$G_{o(s)}$ : 制御對象의 傳達函數	$O_s$ : 原形系의 一巡傳達函數
$G_{m(s)}$ : 制御對象의 特性函數	$O_{\omega w}$ : $O_s$ 의 周波數傳達函數
$T_L$ : 制御對象의 遲延時間	$O_{K's}$ : 等價系의 一巡傳達函數
$G_s$ : 理想Smith系의 閉回路傳達函數	$O_{K'\omega}$ : $O_{K's}$ 의 周波數傳達函數
$G_{\rho(s)}$ : 實際Smith系의 閉回路傳達函數	$\Delta T_L$ : 遲延時間差 ( $T_{L\rho}$ 와 $T_L$ 의 差)
$G_{v(s)}$ : 制御 valve의 傳達函數	$O_{hS}$ : $\Delta T_L$ 의  경우 實際系의 一巡傳達函數
$V_K$ : 制御 valve의 利得	$O_{h\omega}$ : $O_{hS}$ 의 周波數傳達函數
$T_v$ : 制御 valve의 時定數	$O_{a(s)}$ : 動特性相異 ( $G_{m\rho(s)} \neq G_{m(s)}$ )의  경우 實際系의 一巡傳達函數
$G_{\rho(s)}$ : 熱交換器의 傳達函數	$O_{a(\omega)}$ : $O_{a(s)}$ 의 周波數傳達函數
$C_K$ : 熱交換器의 利得	$O_{a(s)}$ : $G_{m\rho(s)} \neq G_{m(s)}$ , $T_{L\rho} \neq T_L$ 의  경우 實際系의 一巡傳達函數
$T_\rho$ : 熱交換器의 時定數	$O_{a(\omega)}$ : $O_{a(s)}$ 의 周波數傳達函數
$G_{b(s)}$ : 熱電對을  갖는 變換器의 傳達函數	
$T_K$ : 變換器의 利得	
$T_t$ : 熱電對의 時定數	

# Smith制御系の安定度에 關한 研究

金 仁 泰

(A Study on the Stability of Smith Control System)

*Kim in tae*



## Abstract

Dead times between inputs and outputs are common phenomena in many industrial processes and cause considerable difficulties in effective control of such processes.

For single input-single output systems, Smith suggested a dead time compensation scheme called Smith predictor. Smith predictor had found little use with industrial analogue controllers. With the advent of microprocessor and the increasing use of microcomputer in process control, it becomes attractive to implement the Smith predictor in industrial control equipment.

This paper is concerned with the stability of the dead time system in incorporating a Smith predictor whose control equipment is heat exchanger. It is shown that an ideal Smith control system and its equivalent control system is not equivalent in stability properties. If the estimated errors exist between a predictor and a control equipment in practical Smith control system, the system may become unstable. For the reason that the variation of the dead-time difference exerts an important effect upon stability problems, one must pay attention to the design for a system with Smith predictor. The remarkable feature is that the design for a system is stable if the time constant of predictor is larger than the time constant of control plant.

## 1. 序 論

反應裝置, 熱交換器等의 溫度制御系에서는 閉回路内部에 遲延時間(Dead time)이 存在하기 때문에 良好한 制御性能을 期待하기 힘들다. 一般적으로 遲延時間을 갖는 系는 利得(gain)을 적게 하거나, 適當한 補償要素에 依하여 安定度를 改善하고 있다. 그러나, 큰 遲延時間이 存在하면 通常的인 直列補償器인 P, PI, PID制御器으로는 安定度의 確保가 힘들고 根本的인 制御方式의 變更이 必要하게 된다.

遲延時間을 갖는 系를 安定化하는 데에 有效한 補償方法의 하나로서 O. J. M. Smith 가 考案한 方法이 있다. 이 方法은 主制御器에 豫測器(Smith Predictor)을 歸還(feed back)각 局部制御回路을 形成시켜 줌으로서 遲延時間을 補償하도록 한 것이다. Smith方法은 다른 遲延時間의 補償方法에 比하여 比較的 簡單한 方法으로 補償할 수 있어 마이크로프로세서(Micro-Processor)의 出現과 함께 現在 脚光을 받고 있는 方法이다.

Smith 制御系는 豫測器를 導入함으로써 閉回路傳達函數의 特性方程式內에 遲延時間이 除去되어 等價系가 存在하게 된다.

그러나, 이 等價系는 入力과 出力面에서 原形系와 서로 等價關係가 成立하다, 制御系의 設計時에 重要한 安定度面에서도 等價인가 하는 問題가 생기게 된다. 또 다른 問題는 實際프로세스(process)의 制御分野에 適用할 때에는 制御對象과 豫測器의 사이에 不完全結合(Mismatch)이 發生함으로써 安定度에 問題가 생기게 된다.

制御系의 安定度를 判別할 수 있는 方法은 いろいろ이 있으나 그 중, 라우스-호비츠(Routh-Hurwitz)方法은 系의 特性方程式內에 遲延時間項이 抱含되어 있으면 S次數의 定係數로 整理되지 않으므로 適用하기 不可能하다. 그러나, 나이퀴스트(Nyquist)方法은 遲延時間項을 抱含한 系의 安定度解析에도 직접 適用할 수 있다. 本研究에서는 熱交換器를 制御對象으로 하는 Smith制御系에서 原形系와 等價系가 安定度에서 等價인가를 糾明하고, 制御對象과 豫測器 사이에 發生하는 不完全結合의 程度에 따라 安定度가 어떻게 달라지는가를 나이퀴스트方法으로 解析하였다. 또한, 그 解析結果를 比較檢討함으로써 豫測器의 設計時 基礎자료가 되도록 하였다.

## 2. Smith制御系の 考察

### 2.1) 理想Smith制御系

閉回路内に 遅延時間 存在할때 그 對策으로서 O.J.M. Smith가 創案한 方法이 그림·1의 制御系이다.<sup>3)</sup>

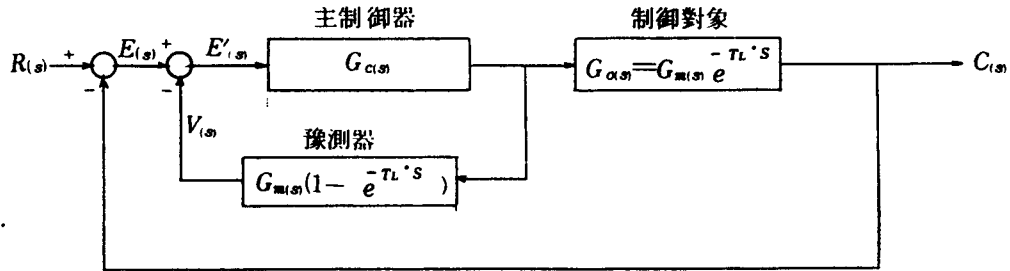


Fig. 1. Original Smith control system.

그림·1에서 制御對象의 傳達函數  $G_{cs}$ 는 對象의 特性을 表示하는 特性函數  $G_{ms}$ 와 主制御器로 制御不可能한 遅延時間  $T_L$ 로서 이루어진다.

$$G_{cs} = G_{ms} e^{-T_L s} \dots\dots\dots(1)$$

主制御器는 通常的인 P, PI, PID制御器로서 構成되어진다.

豫測器 (Smith Predictor)의 役割은 局部歸還信號  $V(s)$ 가 遅延時間  $T_L$ 을 包含하고 있으므로 動作誤差  $E(s)$ 가 미리 修正된 修正動作誤差  $E'(s)$ 로 되어 主制御器로 보내진다. 따라서  $E(s)$ 가 막바로 主制御器로 보내지므로서 發生될 수 있는 過度한 修正動作을 미리 除去시켜 주는 役割을 하고 있다.

그림·1에서 豫測器의 傳達函數內에 制御對象의 特性函數  $G_{ms}$ 와 遅延時間  $T_L$ 이 그대로 適用되었다. 이때가 理想的인 Smith制御系가 形成된 경우로서 目標值  $R(s)$ 와 制御量  $C(s)$ 사이의 閉回路傳達函數  $G(s)$ 는

$$G(s) = \frac{G_{cs} G_{ms} e^{-T_L s}}{1 + G_{cs} G_{ms}} \dots\dots\dots(2)$$

로 주어진다. 式(2)에서 알 수 있듯이 特性方程式內에 遅延時間이 包含되어 있지 않다. 이것은 遅延時間을 갖는 制御對象이 豫測器의 導入으로서, 遅延時間項을 閉回路 밖으로 除去할 수 있어, 制御性能의 改善을 期待할 수 있음을 알 수 있다. 式(2)로서 블록(Block)線圖를 再構成하면 그림·2가 된다.

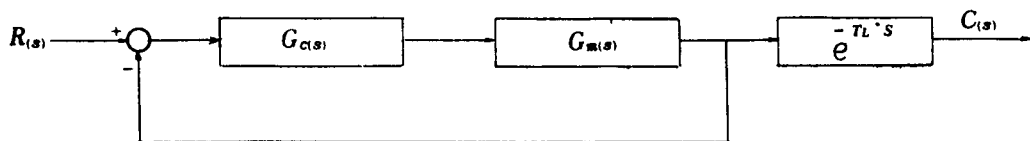


Fig. 2. Equivalent control system for fig.1.

그림·2는 그림·1과 入力-出力面에서 서로 等價系로서, 미리 遲延時間을 除外한 制御對象의 特性函數  $G_m(s)$ 만을 主制御器  $G_{cs}$ 로 閉回路制御하는 것이 되어  $G_{cs}$ 의 設計가 容易하게 된다.

理想的Smith制御系の 設計問題는 그림·1보다는 그림·2의 等價系로써 主로 行하여져 왔다<sup>7)</sup>. 여기서 하나의 問題點은 비록 入力과 出力面에서는 서로 等價이지만 安定度面에서도 等價인가 하는 點이다. 本研究에서는 그림·1과 그림·2의 系가 安定度에서 相對的으로 어떻게 다른가를 比較하게 된다.

2·2) 實際Smith制御系

Smith의 方法을 實際制御對象에 適用할 때에는 對象의 同定誤差, 패러미터 (Parameter)의 變動에 依하여 豫測器와 制御對象 사이에 그림·1과 같이 理想的의 結合이 힘들며 不完全結合 (Mismatch)이 發生하여 그림·3과 같이 된다<sup>8)</sup>.

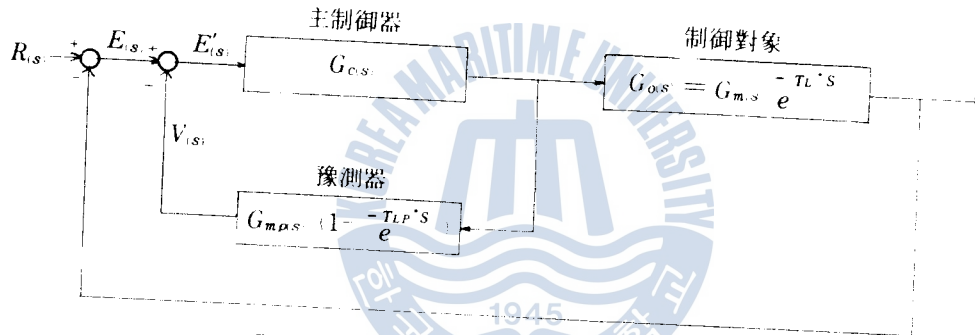


Fig. 3. Practical Smith control system.

그림·3에서 豫測器의  $G_{mps}$ 는  $G_{ms}$ 의 推定函數이고  $T_{LP}$ 는  $T_L$ 의 推定時間을 表示하고 있다. 즉 豫測器와 制御對象 사이에는

$$G_{mps} \neq G_{ms} \quad T_{LP} \neq T_L \dots \dots \dots (3)$$

이 存在하므로서  $R_s$ 와  $C_s$ 사이의 閉回路傳達函數  $G_{cs}$ 는

$$G_{cs} = \frac{G_{cs} \cdot G_{ms} \cdot e^{-T_L \cdot s}}{1 + G_{cs} \{ G_{mps} - G_{mps} \cdot e^{-T_{LP} \cdot s} + G_{ms} \cdot e^{-T_L \cdot s} \}} \dots \dots \dots (4)$$

로 주어진다. 式(4)에서 特性方程式內에 遲延時間이 存在하므로 制御系가 그 影響을 받게 되어 安定度에 問題가 發生하게 된다.

元來, Smith方法은 遲延時間의 影響을 받지 않게 함으로서 制御系를 最適設計할 수 있다는 것이나<sup>10)</sup>, 實際로 適用할 때에 發生하게 되는 不完全結合의 程度에 따라서 安定度의 問題가 어떻게 달라지는가를 패러미터 (Parameter)의 變動에 依하여 調査해 보아야 한다. 여기에서는 熱交換器를 制御對象으로 하여 安定度를 解析하였다.

### 3. 制御要素의 設定

#### 3-1) 制御對象의 傳達函數

安定度分析을 하기 위하여 制御對象의 傳達函數  $G_{o(s)}$ 를 制御밸브(Control valve), 熱交換器, 熱電對를 갖는 變換器의 傳達函數로 合成된 것으로 하며<sup>11)</sup> 各 傳達函數는 다음과 같다.

制御밸브의 傳達函數를  $G_{v(s)}$ 라 하면  $G_{v(s)}$ 는 밸브의 質量을 無視하였을 때 1次系로 求해진다<sup>12)</sup>.

$$G_{v(s)} = \frac{V_k}{T_v S + 1} \dots\dots\dots (5)$$

단,  $V_k$ : 制御밸브의 利得,  $T_v$ : 制御밸브의 時定數

熱交換器의 傳達特性은 매우 複雜하여 正確하게 把握하기는 困難하다. 一般的으로 遲延時間을 갖는 1次系로 近似化한 傳達函數로서 動特性을 分析하고 있다<sup>13)14)</sup>. 그 傳達函數를  $G_{p(s)}$ 라하면 式(6)과 같다.

$$G_{p(s)} = \frac{C_k e^{-T_L s}}{T_p S + 1} \dots\dots\dots (6)$$

단,  $C_k$ : 熱交換器의 利得,  $T_L$ : 遲延時間,  $T_p$ : 熱交換器의 時定數.

熱電對를 갖는 變換器의 傳達函數는 뉴튼(Newton)의 冷却法則에 依하여 一次系로 求해진다<sup>15)</sup>. 그 傳達函數를  $G_{b(s)}$ 라 하면 式(7)과 같다.

$$G_{b(s)} = \frac{T_k}{T_t S + 1} \dots\dots\dots (7)$$

단,  $T_k$ : 變換器의 利得,  $T_t$ : 熱電對의 時定數

式(5), 式(6), 式(7)을 考慮하였을 때 制御對象의 傳達函數  $G_{o(s)}$ 는

$$G_{o(s)} = G_{m(s)} e^{-T_L s} = G_{v(s)} G_{p(s)} G_{b(s)} = \frac{V_k C_k T_k e^{-T_L s}}{(T_v S + 1)(T_p S + 1)(T_t S + 1)} \dots\dots\dots (8)$$

으로 求해진다. 여기서 制御對象의 特性函數  $G_{m(s)}$ 는 遲延時間項을 除外한 것이므로 式(9)로 주어진다.

$$G_{m(s)} = \frac{V_k C_k T_k}{(T_v S + 1)(T_p S + 1)(T_t S + 1)} \dots\dots\dots (9)$$

#### 3-2) 制御裝置의 傳達函數

主制御器는 PID制御器를 使用하기로 하며 그 傳達函數를  $G_{c(s)}$ 라 하면 다음 式(10)으로 주어진다.



$$G_{c.m.s.} = \frac{P_k (T_d T_i S^2 + T_i S + 1)}{T_i S} \dots \dots \dots (1)$$

단,  $P_k$ : 主制御器의 利得,  $T_i$ : 積分時間,  $T_d$ : 微分時間,

豫測器의 傳達函數는  $G_{m.p.} = \frac{e^{-T_p S}}{1 + e^{-T_p S}}$  이고,  $T_p$ : 制御對象의 遲延時間의 推定 遲延時間을 示하며,  $G_{m.c.s.}$ 는  $G_{m.s.}$ 의 推定特性函數로서 式(3)과 式(9)를 考慮하여 다음 式으로 示한다.

$$G_{m.c.s.} = \frac{V_{ks} C_{ks} T_{ks}}{(T_{vs} S + 1)(T_{ps} S + 1)(T_{ls} S + 1)} \dots \dots \dots (10)$$

단,  $V_{ks}, C_{ks}, T_{ks}$ :  $V_k, C_k, T_k$ 의 各 推定利得  
 $T_{vs}, T_{ps}, T_{ls}$ :  $T_v, T_p, T_l$ 의 各 推定時定數

以上의 주어진 制御對象 및 制御裝置의 傳達函數를 Smith 制御系의 安定度를 理想적인 場合와 實際적인 場合로 比較하여 解析하기로 한다.

### 4. 理想 Smith 系의 安定度

#### 4.1) 原形系의 安定度

그림·1의 原形系에서 一巡傳達函數를  $Q_s$ 라 하면

$$Q_s = \frac{G_{c.s.} G_{m.s.} e^{-T_i S}}{1 + G_{c.s.} G_{m.s.} (1 + e^{-T_i S})} = \frac{Q_{s1} e^{-T_i S}}{1 + Q_{s1} e^{-T_i S}} \dots \dots \dots (12)$$

로 주어진다. 式(12)에서  $Q_{s1}$ 는 式(13)으로 定義되며 式(9)와 式(10)을 代入하면 式(14)로 求해진다.

$$Q_{s1} = \frac{G_{c.s.} G_{m.s.}}{1 + G_{c.s.} G_{m.s.}} \dots \dots \dots (13)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{P_k V_k C_k T_k (T_d T_i S^2 + T_i S + 1)}{T_i S (T_v S + 1) (T_p S + 1) (T_l S + 1)} \\ &= \frac{P_k V_k C_k T_k (T_d T_i S^2 + T_i S + 1)}{1 + \frac{P_k V_k C_k T_k (T_d T_i S^2 + T_i S + 1)}{T_i S (T_v S + 1) (T_p S + 1) (T_l S + 1)}} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

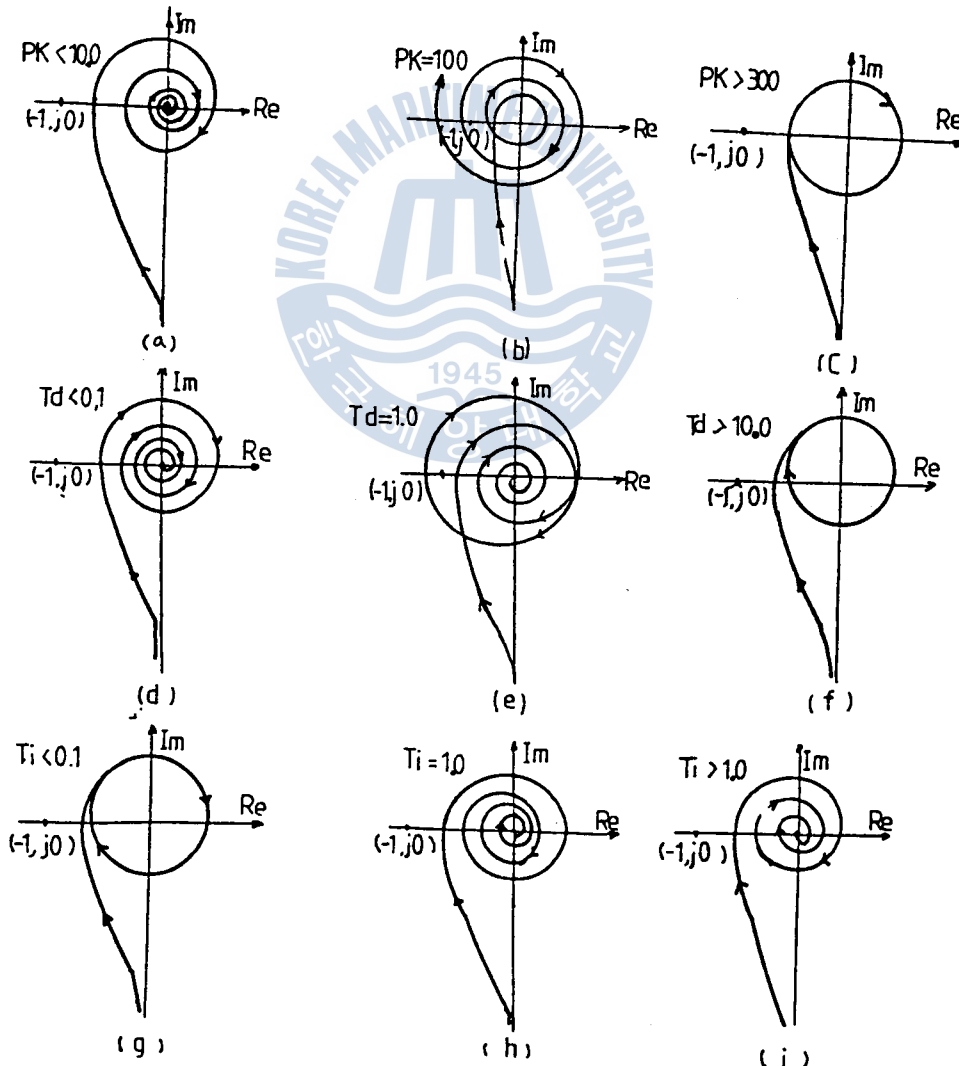
式(12)의 周波數傳達函數는 式(15)와 같다.

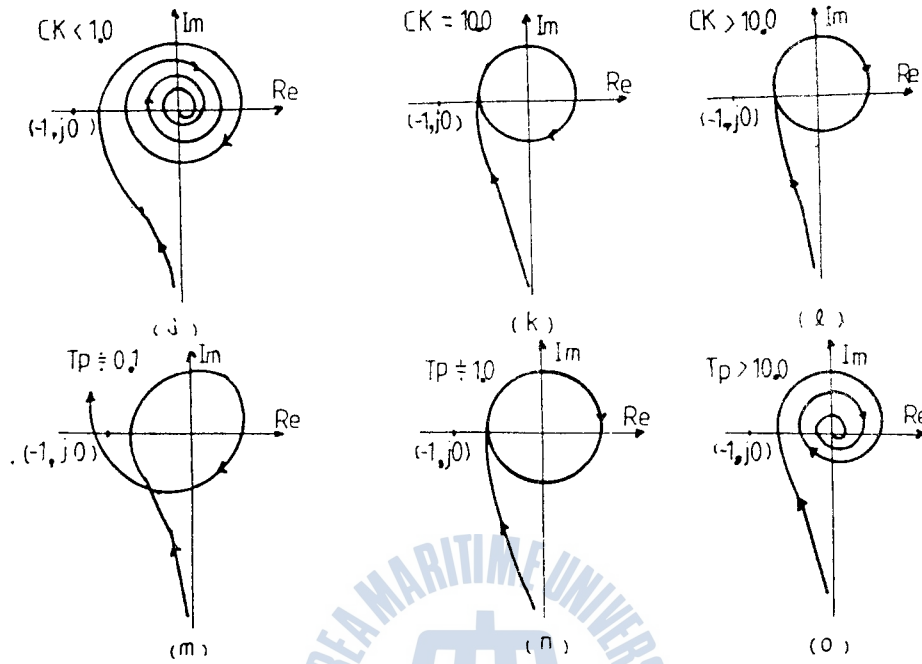
$$Q_{j\omega} = \frac{Q_{j\omega 1} e^{-jT_i \omega}}{1 + Q_{j\omega 1} e^{-jT_i \omega}} \dots \dots \dots (15)$$

原形系가 安定하기 위한 條件은 式(15)에서  $|Q_{j\omega}| < 1$  이어야 한다.  $\omega = \frac{\pi}{T_i}$  의 나이퀴스트 曲線

는 크기가 일정值 1 이므로 式(15)의 나이퀴스트軌跡에 對한 크기에는 影響을 미치지 않지만, 位相에는  $T_i \cdot \omega$ 만큼 그 影響을 주게 된다. 式(12)에 對한 나이퀴스트線圖는 그림·4와 같으며 數值計算을 위한 基準값은 圖表의 數値와 같다.

圖表의 數値를 基準으로 하여 그 基準값을 變化시켰을 때 系의 安定度는 다음과 같다. 主制御器의 利得  $P_k$ 가 10以下에서는 安定하나 100에서는 不安定하게 되고 300以上이면 限界사이클(Limit cycle)이 存在하게 된다. 微分時間  $T_d$ 의 影響은 0.1以下에서 安定하나 1.0으로 增加하면 不安定하여지며 10以上 되면 限界사이클이 存在한다. 積分時間  $T_i$ 는 1.0以上 되면 安定하고 0.1以下로 減少하면 限界사이클이 存在한다. 熱交換器의 利得  $C_k$ 에 依한 系의 安定度는 1.0以下에서 安定하나 10以上 되면 限界사이클이 存在한다. 時定數  $T_b$ 에 依한 影響은 約0.1에서 不安定하고 約1.0에서 限界사이클이 形成되며 10以上에서 安定한 系가 된다.





$P_k$	$T_a$	$T_i$	$V_k$	$T_v$	$C_k$	$T_p$	$T_k$	$T_t$	$T_L$
50.0	0.5	5.0	1.0	0.1	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0

Fig-4. Nyquist diagrams for fig-1.

4.2) 等價系의 安定度

그림·2에서 系의 一巡傳達函數를  $O_{g(s)}$ 라 하면

$$O_{g(s)} = G_{c(s)} G_{m(s)} = \frac{G_{c(s)} G_{m(s)}}{1 + G_{c(s)} G_{m(s)}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

으로 求해진다. 式(16)은 式(13)에 依하여 다음 式(17)로 變形되어진다.

$$O_{g(s)} = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式(17)의 周波數傳達函數는 式(18)로서 이 式에 依하여 等價系의 安定度를 解析할 수 있다.

$$O_{g(j\omega)} = \frac{Q(j\omega)}{1 - Q(j\omega)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

等價系가 安定하기 위한 條件은  $|Q(j\omega)| < 1$  이어야 한다.

函數  $Q(j\omega)$ 가 安定하다면 等價系는 安定하게 된다. 式(18)에 對한 나이퀴스트線圖는 그림·5와 같다.

圖表의 數值를 基準값으로 하여 그 重要값을 變化하였을 때 系의 安定度變化는 다음과 같다. 主制御器의 利得  $P_k$  및 微分時間  $T_d$ 는 增加하거나 減少하거나 系는 安定하다. 그러나, 積分時間  $T_i$ 가 變化하게 되면 系의 安定度도 變化하고 있음을 알 수 있다. 즉  $T_i$ 값 0.1에서 系는 條件部安定이나 0.01以下로 되면 不安定한 系가 된다. 熱交換器의 利得  $C_k$  및 時間數  $T_p$ 는 增加하거나 減少하거나 系는 安定領域에 있다.

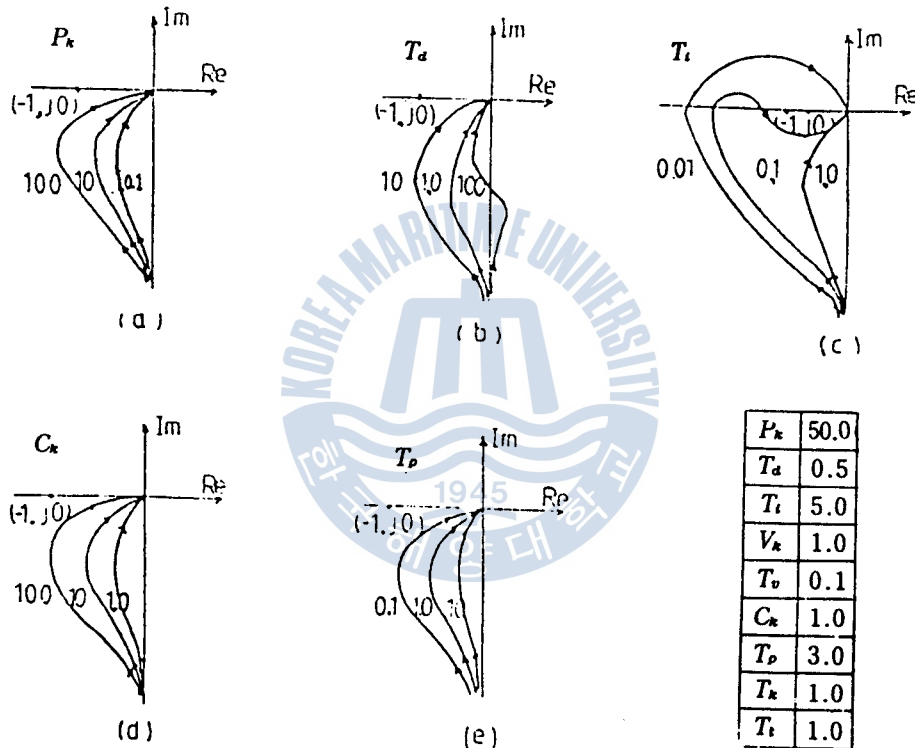


Fig.5. Nyquist diagrams for fig.2.

#### 4.3) 理想Smith系의 安定度比較

그림·1의 原形系와 그림·2의 等價系가 安定度面에서 서로 等價인가를 區別하기 위하여 그림·4와 그림·5에서 代表的인 線圖만을 그림·6에 모았다. 그림·6에서 主制御器의 利得  $P_k$ 가 100일 때 原形系는 不安定하지만 等價系는 安定하다. 微分時間  $T_d$ 가 1.0일 때 原形系는 不安定하지만 等價系는 安定한 系이다. 積分時間  $T_i$ 가 0.1일 때 原形系는 限界사이클을 갖지만 等價系는 條件部安定이다. 熱交換器의 時定數  $T_p$ 가 0.1일 때 原形系는 不安定하지만 等價系는 安定함을 보여주고 있다.

以上の結果から、Smith 制御系外等価系は、元の系に相対的な安定余裕 (gain margin) と位相余裕 (phase margin) の両方を増大させる効果があることが、制御結果から確認できる。この結果から、Smith 制御系外等価系は、元の系に相対的な安定余裕 (gain margin) と位相余裕 (phase margin) の両方を増大させる効果があることが、制御結果から確認できる。

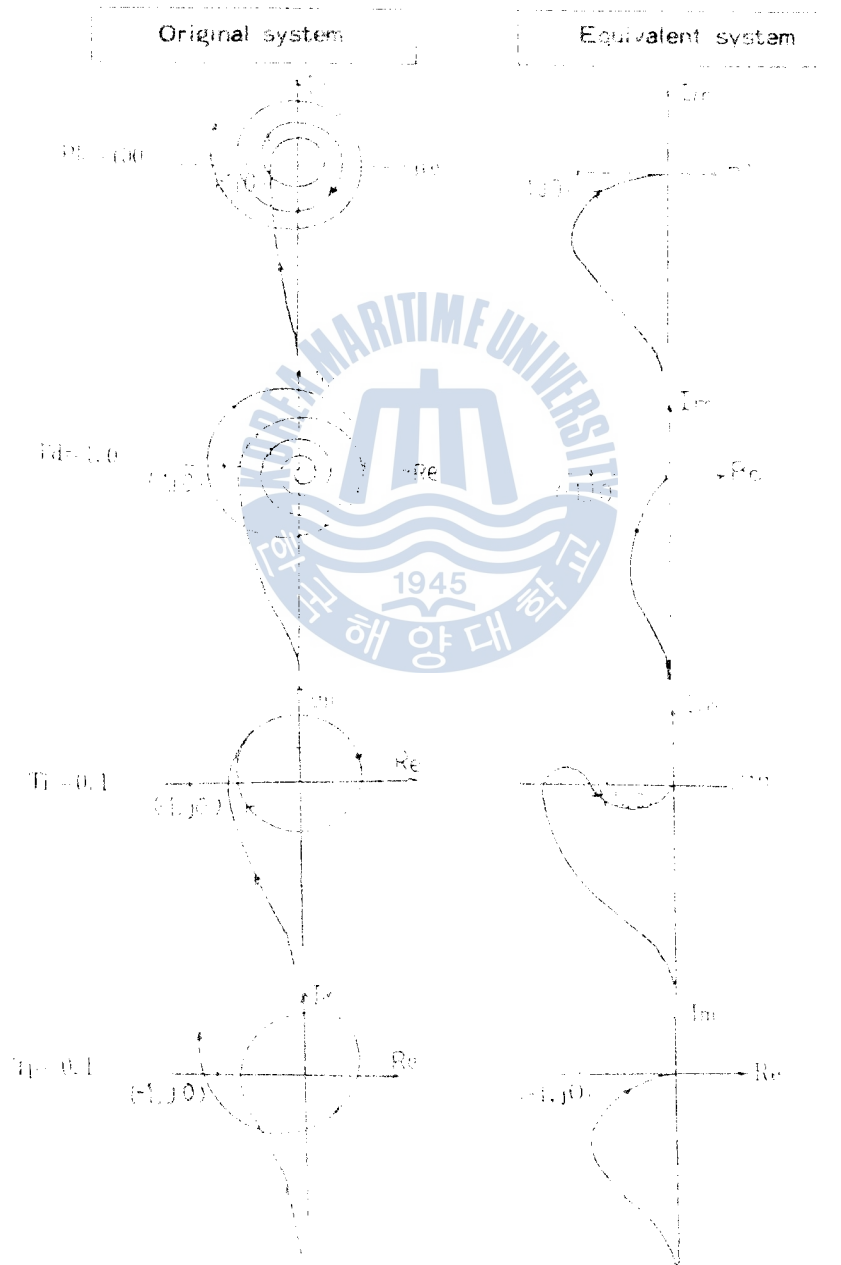


Fig. 10. Comparison of Nyquist diagrams for original and equivalent systems

## 5. 實際 Smith 系の 安定度

### 5.1) 遲延時間差에 依한 安定度

Smith 方法을 實際 프로세스의 制御對象에 適用할 때는 制御對象과 豫測器 사이에 不完全結合 (Mismatch) 이 發生하게 된다. 그 程度가 式(19)로 주어졌을 때,

$$G_{m,p}(s) = G_{m}(s), \quad T_{Lp} \neq T_L \dots\dots\dots (19)$$

그림·3의 一巡傳達函數  $O_{1(s)}$ 는 式(20)으로 求해진다.

$$O_{1(s)} = \frac{G_{c(s)} G_{m}(s) e^{-T_L \cdot s}}{1 + G_{c(s)} G_{m}(s) \{1 - e^{-T_{LP} \cdot s}\}} \dots\dots\dots (20)$$

式(20)를 式(13)에 依하여 變形하면 式(21)로 된다.

$$O_{1(s)} = \frac{Q_{1(s)} e^{\Delta T_L \cdot s}}{e^{T_{LP} \cdot s} - Q_{1(s)}} \dots\dots\dots (21)$$

式(21)에서 遲延時間差  $\Delta T_L$ 는

$$\Delta T_L = T_{LP} - T_L \dots\dots\dots (22)$$

으로서  $\Delta T_L$ 에 依한 系の 安定與否는 式(21)로 判別할 수 있다.

式(21)의 周波數傳達函數는 式(23)과 같으며 式(23)에 對한 나이퀴스트線圖는 그림·7과 같다.

$$O_{1(j\omega)} = \frac{Q_{1(j\omega)} e^{j\Delta T_L \cdot \omega}}{e^{jT_{LP} \cdot \omega} - Q_{1(j\omega)}} \dots\dots\dots (23)$$

그림·7에서 遲延時間差  $\Delta T_L$ 가 2.0이고 主制御器의 利得  $P_k$ 가 50일 경우 系는 不安定하며 線圖의 回轉方向이 反時計方向이다. 그러나  $P_k$ 를 10으로 減少시키면 線圖의 回轉方向이 時計方向이 됨을 알 수 있다. 즉 遲延時間差가 存在할 때 主制御器의 利得를 調整함에 따라 進相 (Lead phase) 이 되거나 遲相 (Lag phase) 이 된다.

遲延時間差  $\Delta T_L$ 의 變化에 따른 系の 安定度는 0.0~0.4에서 安定하지만 0.6以上되면 不安定하여진다. 또한 遲延時間差가 負일 때는 0.0~-0.2에서 安定하고 -0.2以下로 되면 不安定하게 된다. 그러므로 遲延時間差가 相對적으로 커짐에 따라 系는 不安定하여짐을 알 수 있다.

以上の 分析을 通하여 다음과 같은 結果를 얻을 수 있다. 즉 豫測器와 制御對象 사이에 遲延時間差가 存在하더라도 Smith 制御系를 安定하게 設計할 수 있는 限界가 있게 된다.

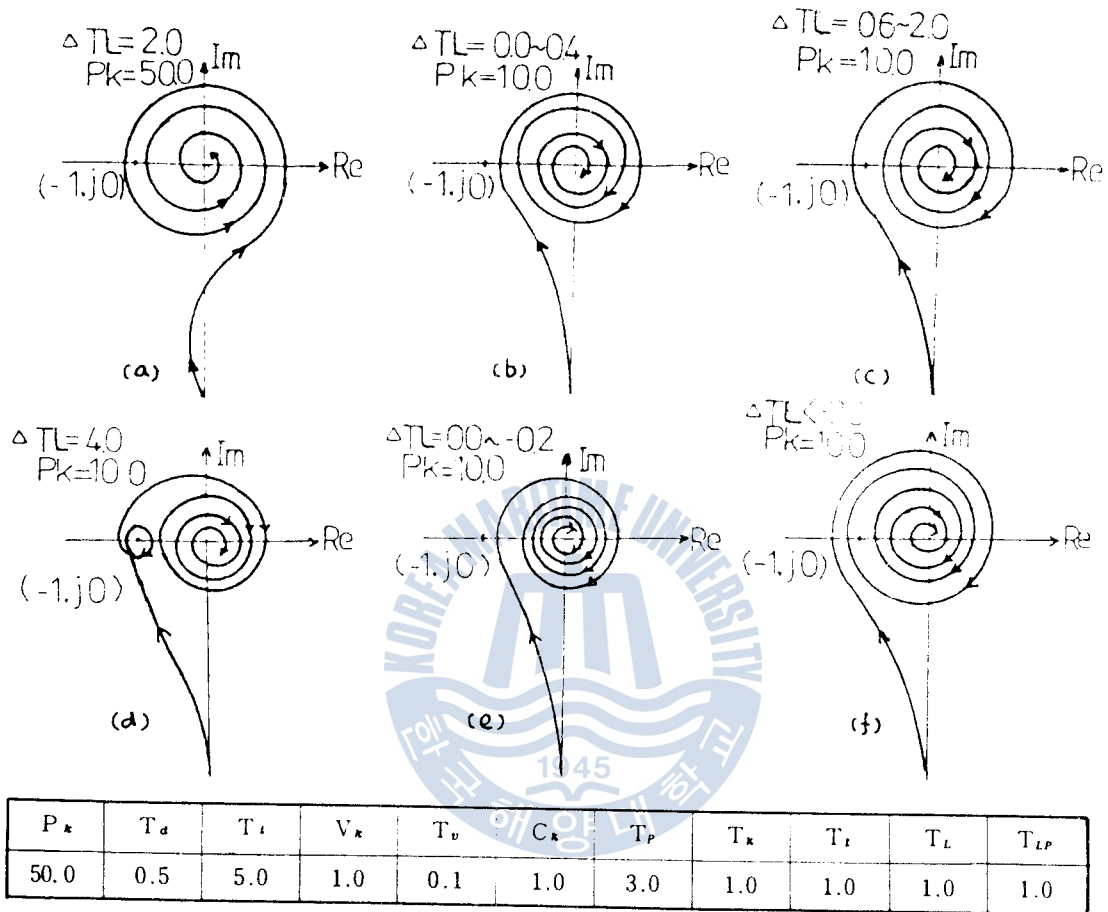


Fig. 7. Nyquist diagrams for the difference of dead time.

5.2) 動特性相異에 依한 安定度

制御對象과 豫測器 사이에 遲延時間은 一致되었지만 制御對象의 動의特性을 表示하는 函數  $G_{m,s}$  와 豫測器의 推定特性函數  $G_{m,p,s}$  가 不完全結合되었다면 制御對象과 豫測器 사이에는

$$G_{m,p,s} \neq G_{m,s}, T_{LP} = T_t \dots\dots\dots (24)$$

이 成立한다. 이때 그림·3의 一巡傳達函數을  $O_{d,s}$  라면

$$O_{d,s} = \frac{Q_{d,s} e^{-T_t s}}{1 - Q_{d,s} P_{(s)} e^{-T_t s}} \dots\dots\dots (25)$$

으로 주어진다. 단, 式(25)에서  $Q_{d(s)}$ 와  $P_{(s)}$ 는 各各 式(26), 式(27)과 같다.

$$Q_{d(s)} = \frac{G_{c(s)} G_{m(s)}}{1 + G_{c(s)} G_{m(s)}} = \frac{P_k V_k C_k T_k (T_d T_i S' + T_i S + 1)}{T_i S (T_v S + 1) (T_p S + 1) (T_l S + 1) + \frac{P_k V_{ks} C_{ks} T_{ks} (T_d T_i S' + T_i S + 1)}{T_i S (T_{vs} S + 1) (T_{ps} S + 1) (T_{ls} S + 1)}} \quad (26)$$

$$P_{(s)} = \frac{G_{m(s)}}{G_{m(s)}} = \frac{V_{ks} C_{ks} T_{ks} (T_v S + 1) (T_p S + 1) (T_l S + 1)}{V_k C_k T_k (T_{vs} S + 1) (T_{ps} S + 1) (T_{ls} S + 1)} \quad (27)$$

制御對象과 豫測器 사이에 利得 및 時定數相異가 存在할 때 系의 安定與否는 式(25)의 周波數傳達函數로 判別할 수 있다. 式(25)의 周波數傳達函數는 式(28)과 같다.

$$O_{d(j\omega)} = \frac{Q_{d(j\omega)} e^{-jT_L \omega}}{1 - Q_{d(j\omega)} P_{(j\omega)} e^{-jT_L \omega}} \quad (28)$$

式(28)의 數值計算에 依한 나이퀴스트線圖는 그림·8과 같다.

數值計算의 結果, 時定數相異에 依한 系의 安定度는 利得相異에 比하여 그 變化가 적으므로 그림·8에서는 利得相異에 依한 나이퀴스트線圖만을 나타내었다.

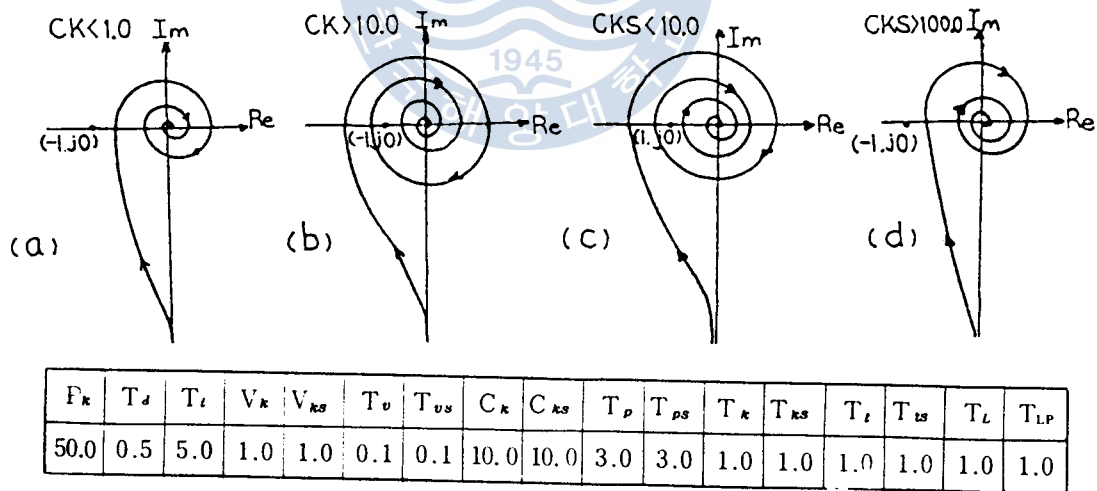


Fig. 8. Nyquist diagrams for the variation of  $C_k$  and  $C_{ks}$ .

그림·8에서 特異할 點은 熱交換器의 利得  $C_k$ 와 豫測器의 推定利得  $C_{ks}$ 가 一致되지 않았을 때 推定利得  $C_{ks}$ 를 相對的으로 크게 함으로서 오히려 系가 安定하게 되는 點이다.

그러므로 遲延時間差가 存在하지 않을 때 豫測器의 推定利得을 制御對象의 利得 보다 크게 할수록 實際Smith系를 安定하게 設計할 수 있다.



5.3) 遲延時間差 및 動特性相異에 依한 安定度

制御對象과 豫測器 사이에 不完全結合의 程度가 式 (29)로 주어졌을 때,

$$G_{mP(s)} = G_{d(s)}, \quad T_{LP} = T_L \dots \dots \dots (29)$$

그림·3에서 一巡傳達函數를  $O_{d(s)}$  라면

$$O_{d(s)} = \frac{Q_{d(s)} e^{\Delta T_L s}}{e^{T_{LP} s} - Q_{d(s)} P(s)} \dots \dots \dots (30)$$

으로 求해진다. 단, 式 (30)에서  $Q_{d(s)}, T_{LP}, P(s)$ 는 各各 式 (26), 式 (22), 式 (27)과 같다.

實際Smith制御系에서 豫測器와 制御對象 사이에 모든 要素들이 不完全結合되었을 때 系統의 安定度와 否는 式 (30)의 固波數傳達函數로 判別할 수 있다. 式 (30)의 周波數傳達函數는 式 (31)과 같다.

$$O_{d(j\omega)} = \frac{Q_{d(j\omega)} e^{j\Delta T_L \omega}}{e^{jT_{LP} \omega} - Q_{d(j\omega)} P(j\omega)} \dots \dots \dots (31)$$

式(31)에 數值計算을 行한 結果, 遲延時間差가 存在하더라도 時定數相異는 系統의 安定度에 甚大인 影響이 利得相異에 比하여 적게 나타났다. 그림·9는 遲延時間差가 있을 때 制御對象인 熱交換器의 利得  $C_k$  變化에 對한 線圖이다. 利得  $C_k$ 의 推定利得  $C_{ks}$ 는 서로 相對的이므로 그림·9에서 다음 事實을 알볼 수 있다.

遲延時間差가 存在하더라도 豫測器의 推定利得을 制御對象의 利得보다 크게 할 수록 系統은 安定하게 된다. 이 事實은 그림·8에서 얻은 結果와 잘 附合된다.

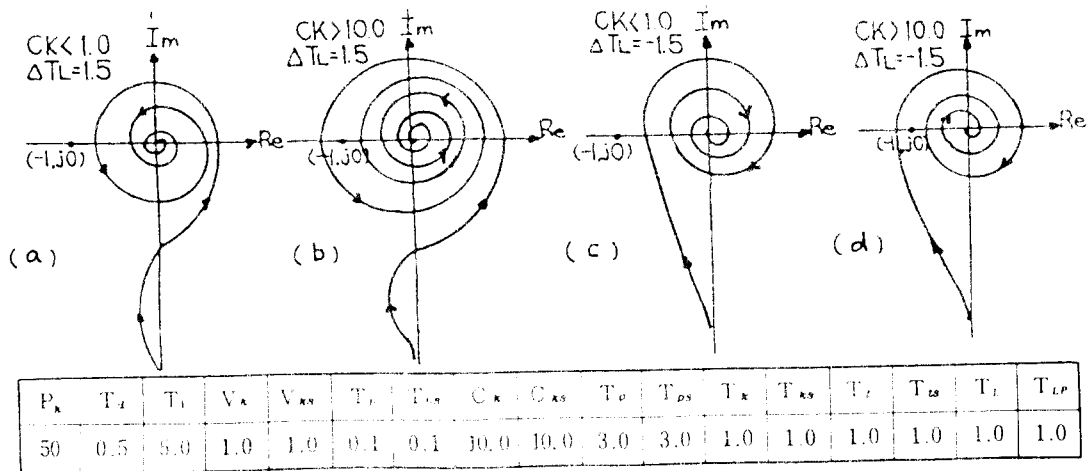


Fig. 9. Nyquist diagrams for the difference of dead time and the variation of CK.

## 6. 結 論

以上같이 熱交換器를 制御對象으로 하는 Smith制御系를 나이퀴스트線圖에 依한 安定度解析의 結果 다음 事實을 얻을 수 있었다.

1) 實際Smith制御系에서 制御對象과 豫測器 사이에 存在하는 不完全結合 (Missmatch)의 程度에 따라 系의 安定度가 달라지고, 安定度에 가장 크게 影響을 주는 要素는 遲延時間差이며 다음이 利得相異로 나타났다. 時定數相異는 過渡特性에 影響을 미칠 것으로 생각되나 安定度에는 별 影響을 주지 못하였다.

2) 遲延時間差가 存在하더라도 모든 系가 不安定하여지는 것이 아니며 實際 Smith制御系를 安定하게 設計할 수 있는 限界가 있다.

3) 特異할 點은 實際Smith制御系를 安定하게 設計하기 위해서는 制御對象의 利得보다 豫測器의 利得을 相對적으로 크게 하는 것이 有利하다는 點이다.

4) 理想Smith制御系에서 原形系와 等價系는 入力과 出力面에서 서로 等價로 다루어져 왔으나 安定度面에서는 서로 다른 安定特性을 갖고 있다. 그러므로 安定度解析은 原形系로 行하여져야 한다.



## 參考文獻

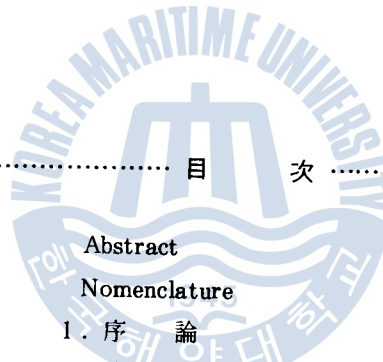
1. 河津植：自動制御工學，海事圖書出版，釜山，PP. 187~189，(1976)
2. 棋木義一：自動制御工學，查智堂發行，東京，P. 227，(1984)
3. O.J.M.Smith：Closer Control of Loops with Dead Time, Chemical Engineering Progress, Vol. 53, No. 5, PP. 217~219, (1957)
4. 渡部慶二：Smith(死)外品に對する制御特性の改善，計測自動制御學會論文集，第10卷第3號，P.187，昭和58
5. A.C.Ioannides：Stability Limits of A Smith Controller in Single Systems Containing A Time Delay, INT. J. Control, Vol. 29, PP. 57~63, (1979)
6. B.C.Kuo：Automatic Control system, Prentice-Hall, Inc., PP. 590~593, (1987)
7. J.F.Donoghue：A Comparison of The Smith Predictor and optimal Design Approaches for Systems with Delay in The Control, IEEE, Trans. Indus. Electron. Control Instrum., Vol. 24, NO. 1, PP. 109~117, (1977)
8. 中西英二：操作量に右の時間を有する系と変數時系に對する Smith Predictor の設計法，計測自動制御學會論文集，第16卷第6號，PP. 846~851,昭和55
9. Z.Palmer：Stability Properties of Smith Dead Time Compensator Controllers, INT. J. Control, Vol. 32, NO. 6, PP. 937~949, (1980)
10. 棋木義一：前掲書 2, P. 228
11. 河津植，柳吉生：PID制御器의 最適調節에 關한 研究，韓國海洋大學 大學院論文集，Vol. 5, P. 91, (1979)
12. K.Ogata：Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., PP. 166~167, (1970)
13. J.M.Douglas：Process Dynamics and Control, Vol.1, Prentice-Hall, Inc., PP. 262~263, (1972)
14. H.M.Paynter：A New Method of Evaluating Dynamic Response of Counter-flow and Parallel-flow Heat Exchangers, Transactions of The ASME, PP. 749~758, (1956)
15. 千原英：自動制御解析과 制御機器，請文閣，서울，P. 257, (1982)

# 물 噴射 펌프에 있어서 面積比가 效率에 미치는 影響

朴 炳 翰

The Effect of Area Ratio on  
Water Jet Pump Performance

*Byeon-han Park*



目 次

Abstract

Nomenclature

1. 序 論
  2. 噴射 펌프의 構造 및 作動原理
  3. 噴射 펌프의 效率 및 壓力比
  4. 實驗裝置 및 實驗方法
    4. 1 實驗用 噴射 펌프
    4. 2 測定裝置
    4. 3 循 還 部
    4. 4 驅動壓力의 決定
    4. 5 實驗方法
  5. 實驗結果 및 考察
    5. 1 壓力變化過程
    5. 2 效率 및 壓力比
  6. 結 論
- 參考文獻