二路 溫度係數 饋還路에서의 安定性 解析

論 文 16—2—2

(Stability Analysis in a Two-path. Temperature Coefficient Feedback Reactor)

盧 潤 來*
(Eun-rae Roh)

Abstract

In reactor operation, it is widely known that the absolute stability may not exist for multiple feedback paths even though the single lumped negative temperature coefficient feedback case is clearly stable at all frequencies above those creating xenon poisoning effects. However, interesting and uesful stability information may be obtained from a two-path temperature coefficient feedback which can be represented in a water-cooled, water-moderated heterogeneous reactor.

In this paper, the outline of an operating stability of a reactor having two-path temperature coefficient feedback is analyzed and described neglecting poison effects.

I. 緖 論

一般的으로 原子爐의 運轉時에 그 安定은 溫度係數와 xenon 의 毒作用(xenon poisoning)에 따라 크게 左右된다. 그러나 出力準位가 낮은 爐에서 xenon 의 毒作用은 無視될 수 있으므로 本論에서는 溫度係數만을 饋還으로 하는 原子爐에 對해서 그 安定性을 考察코저 한다.

普通, 負溫度係數를 單一 饋還으로 하는 原子爐에 있어서는 出力增加에 其因하는 溫度上昇에 對하여 그 反應度는 低減함으로 絕對 安定하다는 것이 明白해졌으나, 多重 饋還路를 갖는 原子爐에 있어서는 絕對的 安定性이란 반드시 保障될 수 없다. 그러나 輕水冷却, 輕水減速爐에서 볼 수 있드시 二路 溫度係數를 饋還으로 하는 原子爐에 있어서는 그 두 溫度係數(燃料溫度係數와 輕水溫度係數)의 附號와 絕對値의 크기 및 이들의 相關關係에 따라 安定하기도 하며 不安定하기도 하다.

本 論文에서는, 이 두 溫度係數를 饋還으로 하는 原子爐에 있어서의 安定性에 對하여 Nyquist 의 傳達函數(Transfer Function) 解析方法을 適用하고 原子爐 運轉上의 安定性에 關한 理論的 解析을 加하고저 한다.

II. 理論的 解析

그림 1은 二路 溫度係數 饋還爐의 代表的인 Block diagram 을 表示한다. 原子爐가 稼動되면 먼저 燃料要素內에서 核分裂에 依한 熱出力이 發生된다. 燃料要素가 加熱됨에 따라 漸次로 그 熱出力은 輕水로 傳達된다. 한편 燃料는 그 自體의 溫度係數(α_f)를 갖이고 있어서 爐의 反應度를 早速히 變化시킬 수 있다고 豫想된다. 또한 輕水도 獨立된 自己溫度係數(α_w)를 갖이고 있으며, 이 饋還路에 依한 反應度의 影響은 單一溫度係數饋還爐의 경우와 거의 같고 그 時定數도 퍽 類似하다고 생각된다.

燃料溫度係數는 이른바 Doppler 効果에 依하여 基因된다. 그 代表的 例로서 多量의 U-238 을 包含하는 低濃縮 使用爐인 경우를 들 수 있다. 中性子가 U-238 에 吸收되어 核分裂을 일으킬 수 없게 되는 確率은 대체로 燃料의 溫度에 比例한다. 따라서 燃料의 溫度가 上昇함에 따라 原子爐의 反應度는 効果的으로 減少된다. 이와 같이 하여 U-238 內에서의 Doppler 効果는 負溫度係數를 超來하게 되는바 때때로 이를 Doppler 係數라고도 한다. 燃料要素로 使用된 物質에 따라 Doppler 係數는 正 또는 負의 値를 갖게 된다. 不良한 電導度를 갖는 低濃縮의 UO_2 燃料要素에서 高度의 溫度와 實質的인 反應度 變化를 얻을 수 있다.

그림 1은 燃料溫度와 被覆溫度 사이에 時間的 遲延이 存在치 않는 이른바 單一 燃料要素 被覆體의 熱特性을 表示한다. 이는 金屬燃料에는 適用될 수 있으나 嚴密히 말해서 酸化物 燃料에는 適用될 수 없을 것이다.

그림 1에 表示된것과 같이 簡單한 饋還路를 갖는 原子爐의 時間從屬 方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$P=\mu_f\frac{dT_f}{dt}+P_w \quad \cdots\cdots(1)$$

$$P_w=\mu_w\frac{dT_w}{dt}+P_e \quad \cdots\cdots(2)$$

$$P_e=\xi(T_f-T_w) \quad \cdots\cdots(3)$$

但, T_f=燃料溫度

* 韓國電力株式會社 技術部 正會員

T_w=輕水溫度

$\mu_f=W_fC_f$=燃料 무게와 燃料 比熱의 積

$\mu_w=W_wC_w$=減速材 무게와 減速材 比熱의 積

ξ=燃料와 輕水 사이의 熱傳達係數. ξ는 普通 出力準位의 函數이지만 本論에서 취급될 微少한 正弦的 變化에 對해서는 常數로 간주해도 無放하다.

P_c=減速材 冷却材인 輕水에서 取한 出力. 이것도 常數로 取扱해도 無放하다.

P_w=燃料에서 輕水로 傳達된 熱.

上記 세 等式은 熱傳達 狀況을 表示하는 基本 關係式이다. **그림 1**에서 燃料 및 輕水의 溫度를 周波數의 函數로 誘導한 後, 局部溫度係數와 相積하여 反應度 饋還을 얻을 수 있다.

一定한 準位에 固定된 出力 附近에서의 微少한 正弦的 變化만을 考慮하면, 式 (1),(2),(3)은 一次 線形化될 수 있어 Laplace 變換시키면 $T_f(s)$ 및 $T_w(s)$는 各各 다음과 같이 된다.

$$T_w(s)=\frac{\delta P(s)\xi}{s[\xi(\mu_f+\mu_w)+\mu_f\mu_w s]} \qquad \cdots\cdots(4)$$

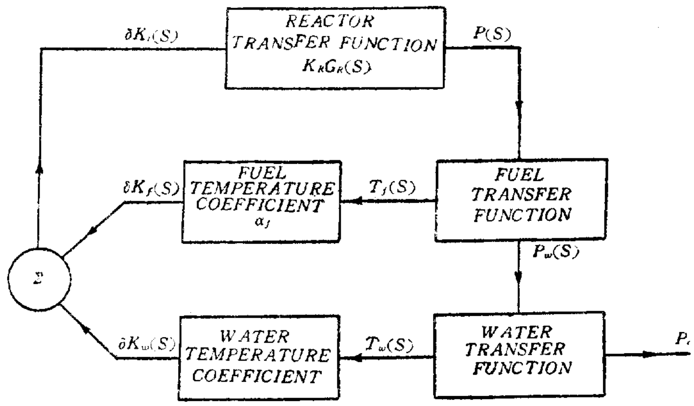


그림 1 Two-loop feedback system의 Block Diagram

$$T_f(s)=\frac{\delta P(s)(\xi+\mu_w s)}{s[\xi(\mu_f+\mu_w)+\mu_f\mu_w s]} \qquad \cdots\cdots(5)$$

따라서 全 饋還 反應度는

$$\begin{aligned}\delta K_t(s)&=\delta K_f(s)+\delta K_w(s)\\&=\alpha_f T_f(s)+\alpha_w T_w(s)\\&=\frac{\delta p(s)[\xi(\alpha_w+\alpha_f)+\alpha_f\mu_w s]}{s[\xi(\mu_w+\mu_f)+\mu_f\mu_w s]} \qquad \cdots\cdots(6)\end{aligned}$$

로 되며 總合된 反應度 饋還의 傳達函數(Transfer Function)는 다음과 같이 表示된다.

即

$$\begin{aligned}K_FF_F(s)&=\frac{\delta K_t(s)}{\delta P(s)}\\&=\frac{\xi(\alpha_w+\alpha_f)+\alpha_f\mu_w s}{s[\xi(\mu_w+\mu_f)+\mu_f\mu_w s]} \qquad \cdots\cdots(7)\end{aligned}$$

式 (7)에 나타난 傳達函數는 다음과 같은 形態의 基本式으로 表示된다.

$$\text{即} \quad K_FG_F(s)=A\frac{1+\tau_1 s}{s(1+\tau_2 s)} \qquad \cdots\cdots(8)$$

但

$$A=\frac{\alpha_w+\alpha_f}{\mu_w+\mu_f},\quad \tau_1=\frac{\alpha_f\mu_w}{\xi(\alpha_f+\alpha_w)},\quad \tau_2=\frac{\mu_f\mu_w}{\xi(\mu_f+\mu_w)} \qquad \cdots\cdots(9)$$

上式에서 τ_2는 항상 正이지만 A와 τ_1은 局部溫度係數의 附號에 따라서 正 또는 負의 値를 가질 수 있다는 것이 明白하다.

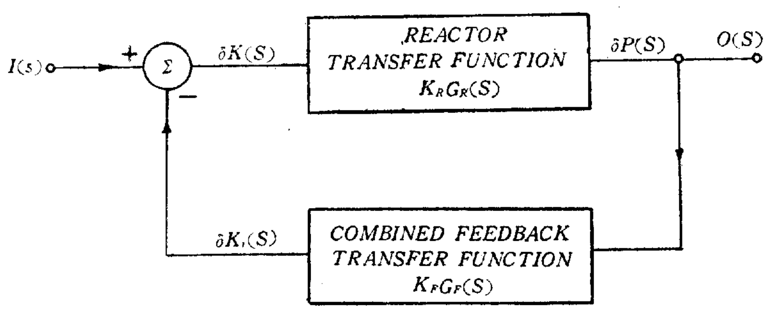


그림 2. 原子爐와 全體溫度 饋還으로 構成된 簡易 Block Diogram

그림 2는 原子爐와 그 全體의 溫度係數를 單一의 饋還으로 하는 簡單한 Bock diagram을 表示한다. 本 閉循還管路에서 보인바와 같이 系統의 安定度를 檢討하기 爲하여 Nyquist의 傳達函數 解析을 適用하면 .一般的으로 遲發 中性子의 近似 傳達函數를 考慮하여

$$K_RG_R(s)\cdot K_FG_F(s)=A\frac{n_0(s+\bar{\lambda})\ \ (1+\tau_1 s)}{l^*s(s+\bar{\gamma})s(1+\tau_2 s)}$$

$$=C\frac{[1+(1/\bar{\lambda})s](1+\tau_1 s)}{[1+(1/\bar{\gamma})s](1+\tau_2 s)s^2}\cdots(10)$$

但 $C=\frac{A\bar{\lambda}n_0}{\bar{\gamma}l^*}$

이제 어떤 溫度係數가 어느 範圍 以內면 系統이 安定될 수 있는지를 多角度的인 面에서 檢討해야 될것이다.

그림 2에 보인 Block diagram의 附號上의 約速과 다음 式

$$\frac{O(s)}{I(s)}=\frac{K_RG_R(s)}{1+K_RG_R(s)\cdot K_FG_F(s)}\ \cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

으로 表示되는 閉循還管路 한還 傳達函數(Closed-loop Feedback Transfer Function) 方程式에 따라 式 (10)을 適用할때에는 α_f와 α_w의 附號를 逆으로 使用해야 된다.

即, α_f가 負溫度係數를 나타내는 경우에는 式 (10)에 正의 値를, 正溫度係數를 나타내는 경우에는 負의 値를

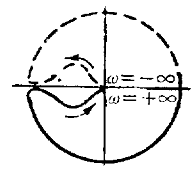
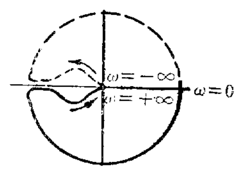
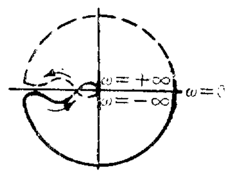
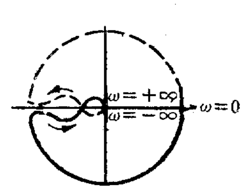
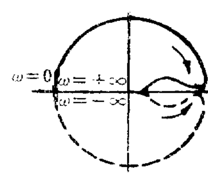
Temperature Coeffient Range	Stability	Open-Loop Nyquist plot Form
α_w Positive α_f Negative $\lvert\alpha_f\rvert>\lvert\alpha_w\rvert$	Completely Stable (May Have Poor Transient Response)	
α_w Negative α_f Negative $\left\lvert\frac{\alpha_w}{\alpha_f}\right\rvert<\left\lvert\frac{\mu_w}{\xi}(\bar{\gamma}-\bar{\lambda})+\frac{\mu_w}{\mu_f}\right\rvert$	Completely Stable	
α_w Negative α_f Negative $\left\lvert\frac{\alpha_w}{\alpha_f}\right\rvert>\left\lvert\frac{\mu_w}{\xi}(\bar{\gamma}-\bar{\lambda})+\frac{\mu_w}{\mu_f}\right\rvert$	Stability, Depends Upon Gain	
α_w Negative α_f Positive $\lvert\alpha_f\rvert<\lvert\alpha_w\rvert$	Stability Depends on Gain	
α_w Positive α_f Negative	Unstable	
α_w Positive α_f Negative $\lvert\alpha_w\rvert>\lvert\alpha_f\rvert$		
α_w Negative α_f Positive $\lvert\alpha_f\rvert>\lvert\alpha_w\rvert$		

그림 3. 數種의 局部 溫度係數 範圍에 對한 原子爐의 安定性

代入한다.

局部溫度係數로서의 各種 數値와 範圍를 式 (10)에 代入하고 各各의 α_f와 α_w에 對하여 Nyquist 方法에 依한 安定度의 解析을 適用한 結果는 **그림 3**과 같다. 同解析에 依하면 어떤 範圍의 溫度係數에 對하여 原子爐는 絕對 安定하며, 또 다른 範圍內에서는 利得에 따라 安定하기도 하며 或은 絕對 不安定하다는것이 明白히 되었다. 原子爐 安定性의 利得에 對한 依存度는 一般的으로 그 原子爐가 運轉되고 있는 出力準位의 函數的 關係로 表示된다.

以上에서 論及된 安定性의 狀況을 **그림 4**와 같이 輕水溫度係數 α_w 對 燃料溫度係數 α_f의 相關圖로 要約할 수 있다. 基礎物理的 見地에서 보더라도 α_f와 α_w가 모두 正이면 全體의 溫度係數는 正이 되어 循還管路는 明白히 不安定하게 된다. α_f와 α_w를 如何히 合치더라도 正溫度係數와 負溫度係數의 合이 正이 되면 循還管路는 또한 不安定하다. 이같은 경우는 **그림 4**에 그려진 45° 線 右側의 面積으로 表示된다.

또한 直觀的으로도 α_f가 가장 優勢한 溫度係數임을 곧 알 수 있다. 原子爐內에서 發生된 熱을 燃料로부터 輕水로 傳達하는데는 時間的으로 遲延되므로, 燃料를 通한 饋還이 輕水를 通한 饋還보다 더 빠르다. 따라서 α_f가 負이고 그 絕對値가 正인 α_w보다 클때 循還管路가 항상 安定하게 된다는 것은 當然한 일이다. 反對로 α_w가 負이고 그 絕對値가 正인 α_f보다 큰 경우에는 循還管路의 完全한 安定은 保障되지 못한다. 이런 경우에는 式 (10)에 주어진 C의 값으로 表示되는 系統의 利得에 따라 循還管路를 安定될 수도 있고 또는 不安定될 수도 있게 된다.

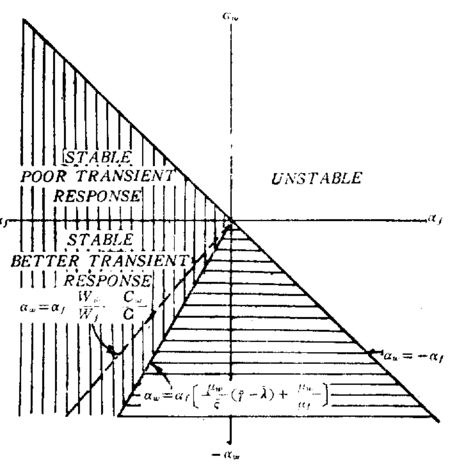


그림 4. 各種 變數에 對하여 安定區域을 나타내는 α_f 對 α_w의 相關圖

α_f와 α_w가 모두 負인 경우, 位相角의 式 (12)와 같은 條件을 滿足하는 限, 循還管路는 變數의 廣範한 區域에 결쳐 無條件 安定性이 保障된다.

即

$$\frac{(s+\bar{r})(s+1/\tau_1)}{(s+\bar{r})(s+1/\tau_2)} > 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

式 (12)의 角을 하나씩 比較하기 爲하여 다음과 같이 分離하면

$$\tan^{-1}\frac{\omega}{\bar{\lambda}} - \tan^{-1}\frac{\omega}{\bar{\gamma}} + \tan^{-1}\frac{\omega}{1/\tau_1}$$

$$-\tan^{-1}\frac{\omega}{1/\tau_2} > 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

으로 表示된다.

式 (13)에서 正接項의 合이 正이 될때 角의 合도 正으로 볼 수 있으므로, 이 關係를 適用하면 原子爐의 安定性을 簡單히 解析할 수 있다. 따라서 原子爐에서의 安定性의 評價基準을 다음 式으로 表示된다.

$$\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} < \bar{r} - \bar{\lambda} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

τ_1과 τ_2의 値를 式 (14)에 代入하면

$$\frac{\xi}{\mu_w}\left(\frac{\alpha_f+\alpha_w}{\alpha_f} - \frac{\mu_f+\mu_w}{\mu_f}\right) < \bar{r} - \bar{\lambda} \quad \cdots\cdots\cdots (15)$$

或은

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_f} < \frac{\mu_w}{\xi}(\bar{r}-\bar{\lambda}) + \frac{\mu_w}{\mu_f} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

위의 式 (15) 또는 (16)은 原子爐에서 連續的 振動이 發生치 않는 範圍內에서 適用될 수 있는 負溫度係數 饋還의 上限値를 設定한다고 하겠다.

勿論 어떤 原子爐의 設計에 있어서는 $\mu_w/\xi(\bar{r}-\bar{\lambda})$의 値를 μ_w/μ_f보다 적게 하는 경우도 있다. 그러나 如何한 경향에 있어서도 두개의 局部溫度係數(α_f, α_w)가 모두 負일때 絕對 安定性을 確保하기 爲한 原子爐 設計上의 安全하고도 簡單한 條件은

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_f} < \frac{\mu_w}{\mu_f} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

이다.

循還管路 주위의 負 饋還이 커질수록 反應度의 過渡變化에 對한 反應이 더욱 順調롭지 못하다는 事實은 是認될 수 있다. 따라서 無條件 安定性이 保障되는 區域보다는 實上 어떤 條件下에서만 安定하게 되는 區域內에서 原子爐를 運轉하는것이 바람직하다는 말이 되겠는데, 이는 어떠한 出力準位에서도 最良의 運轉을 期할 수 있기 때문이다.

燃料 또는 輕水의 溫度係數를 求하기는 매우 困難한 일이고 설사 얻었다 해도 그의 正確度가 매우 의심스러우므로, 式 (17)의 適用에 있어서는 近似方法의 使用이 不可避할 것이다. 例컨데 原子爐 設計에 있어서는 式 (17) 대신 이의 近似式을 導入하여 安全하고 簡單한 設

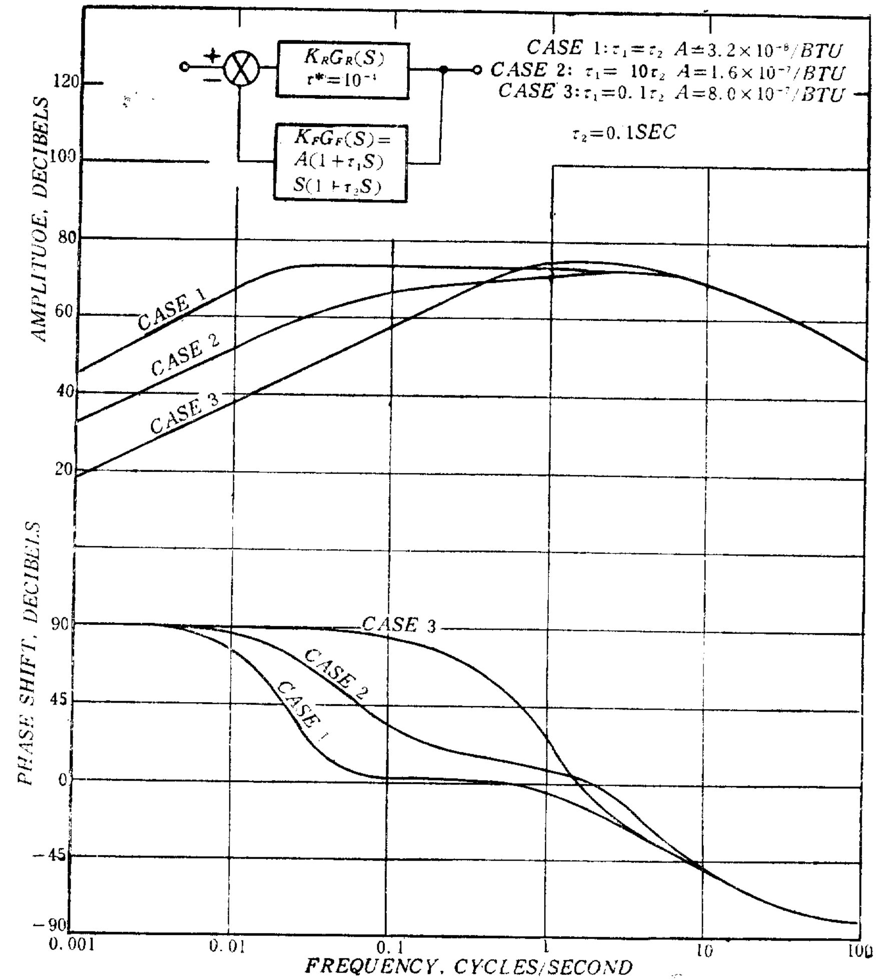


그림 5. 二路 溫度係數 饋還爐의 傳達函數(數値的實例)

計基準을 設定해야 될것이다.

卽 原子爐에서 燃料要素와 輕水가 爐心內에서 唯一한 有効 負 饋還路를 이루는 경우에는

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_f} < \left|\frac{\text{輕水}}{\text{金層}}\right|_{\text{重量}} \frac{C_w}{C_f} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

式 (18)을 設計 目的으로 代用한다.

同式에 따라 安定上의 見地에서 原子爐를 設計할 때에는 原子爐內의 輕水 對金屬 重量比를 採擇할 수 있다.

Ⅲ. 安定性 解析의 適用

그림 2에 表示된 閉循還管인 原子爐系統에서 그 傳達函數를 廣範한 變數 區域에 걸쳐 作圖해 보므로서 지금까지 論及된 理論的 解析을 實際로 適用해 보기로 한다.

그림 5는 各各 다른 變數를 갖는 세 경우의 負溫度係數 饋還爐에 對하여 그 振幅과 位相遷移(phase-shift)를 보인다. 同 例에서는 어느 경우를 막론하고 xenon의 効果를 無視한 것이다.

—參 考 文 獻—

1. 盧潤來; 原子爐의 反應度와 溫度係數(電氣學會誌 Vol. 15 No. 5, 1967)
2. Little, D., & M.A. Schultz, Designing Heterogeneous Reactors for Stability (IRE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-4, No. 1, March 1957)
3. R. Siegel & H. Hurwitz, Jr. The Effect of Positive Temperature Coefficient on Reactor Stability and Reactor Transfer Function, KAPL-1138, 1955.
4. J.H. Bowen; Automatic Control Characteristics of Thermal Neutron Reactors; Proc. Inst. Elec. Engrs. (London) Vol. 100, 1953.