

遲發中性子が 原子爐制御에 미치는 影響에 대하여

朴 進 吉

On the effect of delayed neutrons in a nuclear reactor control

Jingil Park

<目 次>	
要 約	2-1-3) 高出力原子爐系統의 블록線圖
記號說明	2-2) 遲發中性子의 安定度
1 序 論	2-2-1) 遲發中性子가 없는 경우의
2 本 論	安定性과 安定度
2-1) 高出力原子爐系統	2-2-2) 遲發中性子가 있을 경우의 安定度
2-1-1) 零出力原子爐의 傳達函數	2-2-3) 核燃料와 安定度
2-1-2) 溫度效果에 의한 피이드백	3 結 論
傳達函數	參 考 文 獻

Abstract

There are many papers dealt with the effect of delayed neutrons on stability of a powered nuclear reactor but a few paper are described the degree of stability and transient response.

In this paper the effect of delayed neutrons is theoretically studied on a reactor without delayed neutrons and is measured from the solution obtained by the analog computer when a reactor has delayed neutrons.

From the above studies it is cleared that the delayed neutrons enhance the longer time constant in stable or unstable power variation without any vibration, and exert less oscillation in power fluctuation accompanying with vibration when the step reactivity is given in an operating reactor.

It is able to be explained that the delayed neutrons has improved both the degree of stability and the transient response compared with a reactor without the delayed neutrons.

記 號 說 明

B: 挫屈(Buckling)

- β : 遲發中性子の 全生成比率
 β_i : i 번째 遲發中性子群의 生成比率
 C_i : i 번째 遲發中性子群의 先行核의 濃度(個/cm³)
 L : 擴散距離(cm)
 D : 擴散係數(cm)
 l_∞ : 無限媒質內에서의 中性子壽命(sec)
 l : 中性子の 生成時間(sec)
 k_∞ : 無限媒質內에서의 中性子增倍係數
 k_{eff} : 中性子の 實効增倍係數
 λ_i : i 번째 遲發中性子群의 崩壞定數(sec⁻¹)
 ϕ : 中性子束密度(個/cm²·sec)
 n : 中性子密度(個/cm³)
 Σ_a : 巨視的斷面積(cm⁻¹)
 ρ : 反應度
 v : 中性子の 速度(cm/sec)
 ∇^2 : 라플라스演算子
 $S_1, S_{(0)}$: 中性子發生源 및 中性子源의 中性子密度(個/cm³)
 C_f : 核燃料의 단위길이당 熱容量(cal/cm·°C)
 C_m : 減速材의 단위길이당 熱容量(cal/cm·°C)
 P : 核燃料의 단위길이당 發熱量(cal/cm·sec)
 θ_c : 冷却材의 溫度(°C)
 θ_f : 核燃料의 溫度(°C)
 θ_m : 減速材의 溫度(°C)
 μ_f, μ_m : 단위길이당 發熱量에 대한 核燃料 및 減速材에서 發生한 發熱量의 比
 H_1, H_2 : 核燃料와 冷却材, 減速材와 冷却材사이의 熱傳達係數(cal/cm·°C·sec)
 T_f : 核燃料의 時定數(sec)
 T_m : 減速材의 時定數(sec)
 α_f : 核燃料의 溫度係數
 α_m : 減速材의 溫度係數
 H_m
 H_f
 K_f
 K_m
 K
- 傳達函數들의 利得

1. 序 論

遲發中性子が 原子爐에 미치는 影響에 대한 研究는 지금까지 많은 사람에 依하여 發表되었

다.¹⁻⁴⁾ 그러나 制御系統을 設計하는데는 安定性의 判別도 重要하지만 이것만으로는 充分하다고 할 수 없으며 따라서 過渡現象이 어떻게 變하는가를 잘 파악하고 있으야만 制御系統의 設計基準의 設定과 良否判定이 容易해진다. 理論적으로 位相과 利得의 餘裕, 根軌跡等으로 어느 程度 過渡現象의 推定이 可能하지만, 原子爐는 核工學, 流體力學, 熱傳達 等の 여러가지 現象이 複雜하게 얽혀있으므로 이를 理論적으로 正確히 推定하는 것은 거의 不可能하다. 本論文에서는 精度는 낮으나 比較的 프로그램밍이 간편하고 實時間演算이 可能한 아나로구電子計算機를 使用하여 遲發中性자가 運轉中인 原子爐의 過渡現象과 安定度에 미치는 影響을 檢討하고자 한다.

2. 本 論

2-1. 高出力原子爐系統

原子爐制御系統의 解析에는 分布定數系와 集中定數系가 있으나 여기에서는 中型 및 小型原子爐의 解析에 比較的 誤差가 적은 一點爐近似法을 使用하여 運轉中인 가스冷却爐(AGCR)系統에 對하여 檢討하고자 한다.

2-1-1. 零出力原子爐의 傳達函數

原子爐의 出力變動率은 中性子の 擴散方程式으로 부터 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{dn(t)}{dt} &= \text{生成} - \text{漏出} - \text{吸收} = S(t) + D\nabla^2\phi(t) - \Sigma_a\phi(t) \\
 &= D\nabla^2\phi(t) - \Sigma_a\phi(t) + k_{\infty}\Sigma_a\phi(t)(1-\beta) + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \\
 &= -DB^2\phi(t) - \Sigma_a\phi(t) + k_{\infty}\Sigma_a\phi(t)(1-\beta) + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \\
 &= k_{\infty}v\Sigma_a \left[(1-\beta) - \left(\frac{B^2D}{k_{\infty}\Sigma_a} + \frac{1}{k_{\infty}} \right) \right] n(t) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \\
 &= k_{\infty}v\Sigma_a \left[(1-\beta) - \left(\frac{B^2L^2}{k_{\infty}} \right) \right] n(t) + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \\
 &= \frac{k_{\infty}}{\ell_{\infty}} \left[\left(1 - \frac{1}{k_{eff}} \right) - \beta \right] n(t) + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \\
 &= \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6\lambda_i C_i(t) + S_{(0)} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \beta_i k_{\infty} \Sigma_a \phi(t) - \lambda_i C_i(t) = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda_i C_i(t) \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 定常狀態로부터 變化分을 考慮하면

$$\left. \begin{aligned}
 \rho(t) &= \rho_{(0)} + \delta\rho(t) \\
 n(t) &= n_{(0)} + \delta n(t) \\
 C_i(t) &= C_{i(0)} + \delta C_i(t)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(3)식을 (1)식 및 (2)식에 代入하여 整理하면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = \frac{\rho_{(0)} - \beta}{\ell} \delta n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \delta C_i(t) + \frac{n_{(0)}}{\ell} \delta \rho(t) + \frac{1}{\ell} \delta \rho(t) \delta n(t) \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{d\delta C_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} \delta n(t) - \lambda_i \delta C_i(t) \dots \dots \dots (5)$$

(4)식에서 빗췌항의 $\delta \rho(t)$ 와 $\delta n(t)$ 는 모두 微少量이므로 $\frac{\delta \rho(t) \delta n(t)}{\ell} \rightarrow 0$ 로 생각하여 이를 省略하면 (6)식과 같은 線形動特性方程式을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \delta n(t) \\ \delta c_1(t) \\ \delta c_2(t) \\ \delta c_3(t) \\ \delta c_4(t) \\ \delta c_5(t) \\ \delta c_6(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\rho_{(0)} - \beta)/\ell & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 \\ \beta_1/\ell & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2/\ell & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_3/\ell & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_4/\ell & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 \\ \beta_5/\ell & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_5 & 0 \\ \beta_6/\ell & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta n(t) \\ \delta c_1(t) \\ \delta c_2(t) \\ \delta c_3(t) \\ \delta c_4(t) \\ \delta c_5(t) \\ \delta c_6(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{(0)}/\ell \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta \rho(t) \dots (6)$$

(6)식을 Laplace 變換하고 단위길이당 核燃料의 出力變化量 $\delta P(s)$ 는 $\delta N(s)$ 에 比例하므로 $\delta N(s)$ 代身 $\delta P(s)$ 를 代入하면 $\delta \rho(s)$ 를 入力 $\delta P(s)$ 를 出力으로 하는 原子爐의 零出力傳達函 $G_R(s)$ 를 얻을 수 있다.

$$G_R(s) = \frac{\delta P(s)}{\delta \rho(s)} = \frac{P_0}{s + \beta - \rho_{(0)} - \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{s + \lambda_i}} \dots \dots \dots (7)$$

2-1-2. 溫度效果에 依한 피이드백傳達函數

原子爐는 燃料棒集合體와 減速材로 構成되어 있으며 嚴密한 意味로는 各燃料棒集合體單位마다 그 特性이 相異하나 單位길이의 燃料棒과 이의 減速材가 全爐心の 平均値를 나타내며, 또 이를 代表한다고 보아도 誤差는 比較的 적으므로 燃料과 減速材의 溫度에 對한 動特性方程式은 아래와 같이 된다.

$$C_f \frac{d\theta_f}{dt} = u_f P(t) + H_1(\theta_c - \theta_f) \dots \dots \dots (8)$$

$$C_m \frac{d\theta_m}{dt} = u_m P(t) + H_2(\theta_c - \theta_m) \dots \dots \dots (9)$$

(8)식과 (9)식에서 定常狀態로부터 變化分만을 고려하여 이를 整理하면 (10)식과 (11)식이 된다.

$$C_f \frac{d\delta \theta_f}{dt} = u_f \delta p(t) + H_1(\delta \theta_c - \delta \theta_f) \dots \dots \dots (10)$$

$$C_m \frac{d\delta \theta_m}{dt} = u_m \delta p(t) + H_2(\delta \theta_c - \delta \theta_m) \dots \dots \dots (11)$$

中性子, 中性微子, γ 線 등은 冷却材에서는 거의 減速이 일어나지 않으므로 $\delta \theta_c \rightarrow 0$ 로 보아도 무방하다.

(10)식과 (11)식을 Laplace 變換하면 단위길이당 出力의 變化를 入力으로 溫度變化를 出力으



로 하는 溫度變化에 對한 傳達函數를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial P(s)} = \frac{u_f/H_1}{(C_f/H_1)S+1} = \frac{K_f}{T_f S+1} \dots\dots\dots (12)$$

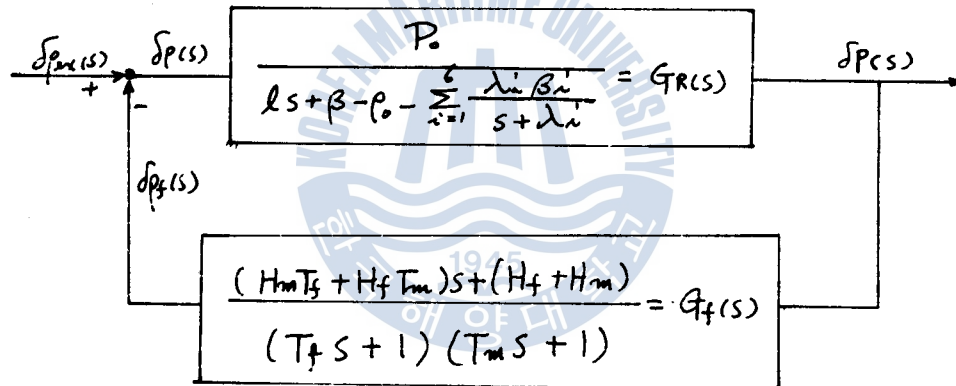
$$\frac{\partial \theta_m}{\partial P(s)} = \frac{u_m/H_2}{(C_m/H_2)S+1} = \frac{K_m}{T_m S+1} \dots\dots\dots (13)$$

(12)식과 (13)식에 溫度係數를 곱한후 合하면 溫度效果에 依한 피드백 傳達函數 $G_f(s)$ 를 얻는다.

$$\begin{aligned} G_f(s) &= \frac{\delta \rho_f(s)}{\delta P(s)} = \alpha_f \frac{\partial \theta_f(s)}{\partial P(s)} + \alpha_m \frac{\partial \theta_m}{\partial P(s)} = \frac{K_f \alpha_f}{T_f S+1} + \frac{K_m \alpha_m}{T_m S+1} \\ &= \frac{H_f}{T_f S+1} + \frac{H_m}{T_m S+1} = \frac{(H_f T_m + H_m T_f)S + (H_f + H_m)}{(T_f S+1)(T_m S+1)} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

2-1-3. 高出力原子爐系統의 블록線圖

零出力原子爐의 傳達函數 $G_R(s)$ 와 溫度效果에 對한 傳達函數 $G_f(s)$ 에서 高出力原子爐系統을 表示하는 블록線圖를 그리면 그림·1과 같이 된다.



그림·1 高出力原子爐系統의 블록線圖

2-2. 遲發中性子和 安定度

2-2-1. 遲發中性子が 없는 경우의 安定性和 安定度

遲發中性子が 없는 경우 零出力原子爐의 傳達函數 $G_o(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_o(s) = \frac{\delta P(s)}{\delta \rho(s)} = \frac{P_{(0)}}{l s} = \frac{K}{s} \dots\dots\dots (15)$$

따라서 遲發中性子が 없는 高出力原子爐系統을 等價變換하면 (16)식과 같이 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta p(s)}{\delta \rho_{ex}(s)} &= \frac{G_o(s)}{1+G_f(s)G_o(s)} = \frac{K/S}{1 + \frac{K}{S} \left[\frac{(H_f T_m + H_m T_f)S + H_f + H_m}{(T_f S+1)(T_m S+1)} \right]} \\ &= \frac{K(T_f T_m S^2 + (T_f + T_m)S + 1)}{T_f T_m S^3 + (T_f + T_m)S^2 + \{K(H_f T_m + H_m T_f) + 1\}S + K(H_f + H_m)} \\ &= \frac{K/T_f T_m \{T_f T_m S^2 + (T_f + T_m)S + 1\}}{S^3 + \left(\frac{T_f + T_m}{T_m T_f}\right)S^2 + \left\{\frac{K(H_f T_m + H_m T_f) + 1}{T_f T_m}\right\}S + \frac{K(H_m + H_f)}{T_f T_m}} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

入力 $\delta\rho_{ex}(t)$ 에 대한 출력 $\delta P(t)$ 의 過渡現象은 (16)식의 特性方程式과 密接한 關係가 있으며 特性方程式은 (17)식과 같이 表示된다.

$$S^3 + \left(\frac{T_f + T_m}{T_f T_m} \right) S^2 + \left\{ \frac{K(H_m T_f + H_f T_m) + 1}{T_f T_m} \right\} S + \frac{K(H_m + H_f)}{T_f T_m} \dots (17)$$

여기에서 p 및 q 를 다음과 같이 定하고

$$p = \frac{1}{3} \left\{ 3 \left(\frac{K(H_m T_f + H_f T_m) + 1}{T_m T_f} \right) - \left(\frac{T_f + T_m}{T_f T_m} \right)^2 \right\}$$

$$q = \frac{2}{27} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} \right)^3 - \frac{1}{3} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} \right) \left\{ \frac{K(T_m H_f + T_f H_m) + 1}{T_m T_f} \right\} + \frac{K(H_m + H_f)}{T_m T_f}$$

(가) $q^2 + 4p^3 > 0$ 이면 (17)식은 (18)식과 같이 하나의 實根과 2個의 共軛複素虛根을 가진다.

$$(s + \sigma_1)(s + \sigma_2 + j\omega_0)(s + \sigma_2 - j\omega_0) \dots (18)$$

但

$$\sigma_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} \right) + \left\{ \frac{\sqrt{q^2 + 4p^3} + q}{2} \right\}^{\frac{1}{3}} - \left\{ \frac{\sqrt{q^2 + 4p^3} - q}{2} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} - \sigma_1 \right)$$

$$\omega_0 = \left\{ \frac{K(H_m T_f + H_f T_m) + 1}{T_f T_m} - \sigma_2^2 - 2\sigma_1 \sigma_2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$\delta\rho_{ex}(s)$ 가 계단상 入力일 경우 (16)식은 다음과 같이 된다.

$$\delta P(s) = \frac{K/T_m T_f \{ T_m T_f S^2 + (T_m + T_f)S + 1 \}}{s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2 + j\omega_0)(s + \sigma_2 - j\omega_0)}$$

$$= \frac{C_0}{s} + \frac{C_1}{s + \sigma_1} + \frac{C_2}{s + \sigma_2 + j\omega_0} \times \frac{C_3}{s + \sigma_2 - j\omega_0} \dots (19)$$

(19)식을 Laplace 逆變換하면 $\delta\rho_{ex}(t)$ 가 階段狀函數일 경우 $\delta P(t)$ 의 解는 다음과 같다.

$$\delta P(t) = C_0 + C_1 e^{-\sigma_1 t} + 2|C_2| e^{-\sigma_2 t} \cos(\omega_0 t + \theta) \dots (20)$$

(20)식에서 $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$ 이면 $\delta P(t)$ 는 振動하면서 C_0 出力으로 收斂한다. 따라서 出力變動은 곧 安定되며 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$ 이면 不安定하며 $\sigma_1 < 0, \sigma_2 > 0$ 이면 出力은 不安定하며 時間이 經過하면 ∞ 로 振動하면서 發散하여 暴走하게 된다. $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$ 인 경우 根이 複素平面의 原點과 實軸에서 가까울수록 安定度는 작아지며 멀어질수록 增大한다. $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ 인 경우에는 反對로 原點과 實軸에서 가까울수록 安定度는 크지고 멀어질수록 減少한다.

(나) $q^2 + 4p^3 \leq 0$ 이면 (17)식은 3個의 實根을 가지며 $q^2 + 4p^3 = 0$ 인 경우에는 이중 2個는 等根이다. 따라서 特性方程式은 (21) 및 (22)식과 같이 된다.

$$(s + \sigma_1')(s + \sigma_2')^2 = 0 \dots (21)$$

$$(s + \sigma_1'')(s + \sigma_2'')(s + \sigma_3'') = 0 \dots (22)$$

여기에서

$$\sigma_1' = \frac{1}{3} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} \right) + 2 \left(\frac{q}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_2' = \frac{1}{2} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} - \sigma_1' \right)$$

$$\sigma_3'' = \frac{1}{3} \left(\frac{T_m + T_f}{T_m T_f} \right) - 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \left(\frac{\phi + 2\pi k}{3} \right)$$

但 $k=1, 2, 3,$

$$\cos\phi = \pm \sqrt{-27q^2/4p^3}$$

$\delta\rho_{ex}(t)$ 가 계단상 입력일 경우 (16)식의 해는 (23) 및 (24)식과 같이 求해진다.

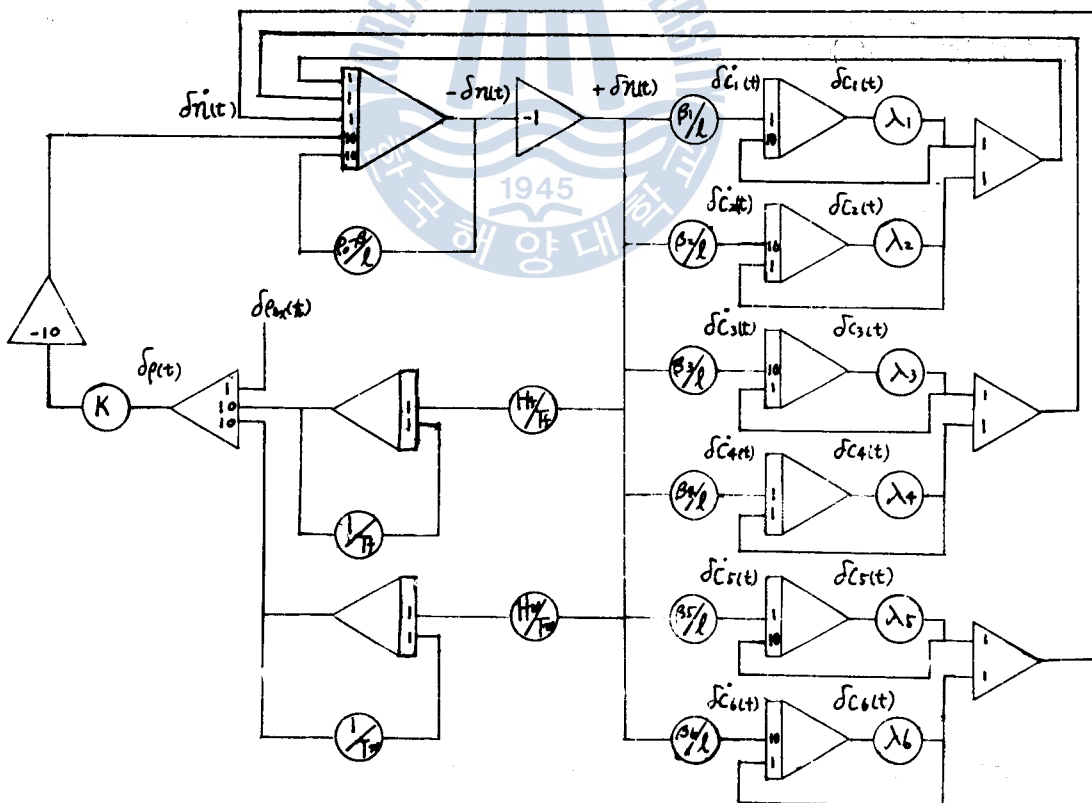
$$\delta P(t) = C_0' + C_1'e^{-\sigma_1't} + (C_2' + C_3')e^{-\sigma_2't} \dots \dots \dots (23)$$

$$\delta P(t) = C_0'' + C_1''e^{-\sigma_1''t} + C_2''e^{-\sigma_2''t} + C_3''e^{-\sigma_3''t} \dots \dots \dots (24)$$

$\sigma_1' < 0, \sigma_2' < 0, \sigma_1'' < 0, \sigma_2'' < 0, \sigma_3'' < 0$ 인 경우에는 $\delta P(t)$ 는 安定하며 모든 根은 複素平面的 左半面に 있으므로 根의 位置가 原點에서 멀어질수록 安定度가 크지며, $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_1'', \sigma_2'', \sigma_3''$ 根中 하나라도 0보다 큰것이 存在하면 出力變動은 振動없이 ∞ 로 發散하여 暴走하게 되며 根은 複素平面的 右半面に 存在하게 되므로 原點에 가까울수록 安定度는 크진다.

2-2-2. 遲發中性子が 있는 경우의 安定度

輕水, 炭素, 炭化水素系의 有機化合物을 減速材로 使用하는 原子爐에서는 6群의 遲發中性子が 發生하는데 이를 모두 考慮하여 安定度를 理論的으로 解析하는 것은 不可能하므로 여기서는 一안로 計算機를 使用하여 이를 檢討하고자 한다. 그림·1의 高出力原子爐系統에 대한 一안로 計算機의 結線圖는 그림·2와 같다. 여기서는 核燃料가 相異한 原子爐 3가지를 골라 遲發中性子の 役割과 그 效果를 檢討하고자 하며 核燃料와 遲發中性子에 대한 資料는 表·1과 같다.

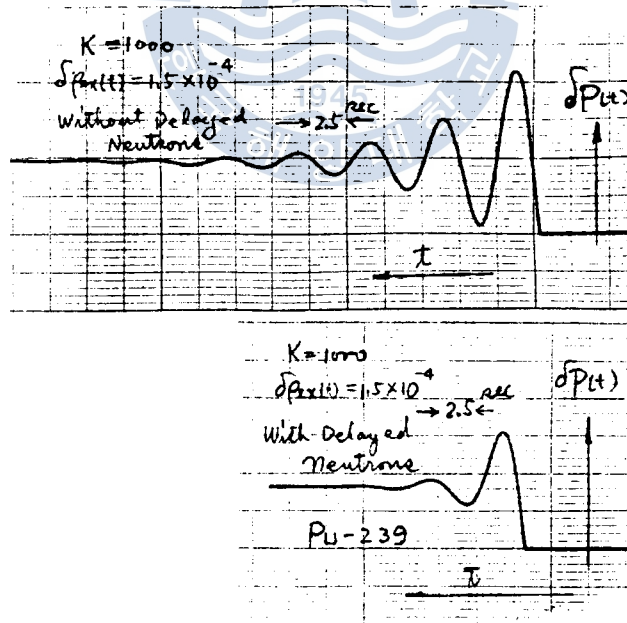


그림·2 高出力原子爐系統에 對한 一안로 計算機의 結線圖

表 1 遲發中性子群의 生成比率 및 崩壞定數

核燃料	U-233	U-235	Pu-239
係數			
β	0.0026	0.0064	0.0021
β_1	0.000086	0.00027	0.000093
β_2	0.000133	0.00074	0.000684
β_3	0.000722	0.00253	0.000443
β_4	0.000651	0.00125	0.000625
β_5	0.000773	0.00140	0.000179
β_6	0.000224	0.00021	0.000072
λ_1	2.50	3.01	2.70
λ_2	1.13	1.14	1.12
λ_3	0.326	0.301	0.326
λ_4	0.139	0.111	0.124
λ_5	0.034	0.0305	0.0301
λ_6	0.0126	0.0124	0.0128

가) $q^2 + 4p^2 > 0$ 이고 $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$ 인 경우 $\delta\rho_{in}(t)$ 가 階段狀入力일 경우 $\delta P(t)$ 의 解를 電子計算機로 求하면 그림·3과 같다.



그림·3 $q^2 + 4p^2 > 0$ 이고 모든 根이 0보다 작을 경우 전자계산기에 의한 $P(t)$ 의 解

그림·3에서 (a), (b)를 比較해 보면 遲發中性子가 있을 경우에는 없을 경우에 比較하여 週期는 不變이나 振幅과 整定時間은 모두 짧은 것을 알 수 있다. 이는 遲發中性子가 出力振動을 減

衰시키는 效果를 가지고 있음을 알 수 있으며 遲發中性子は 運轉中인 原子爐에서 安定度를 顯著히 增大시킨다.

(나) $q^2 + 4p^2 \leq 0$ 이고 $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_1'', \sigma_2''$ 의 根중 하나 이상이 0보다 클 경우 $\delta p_{ex}(t)$ 가 계단상 入力일 경우 $\delta p(t)$ 의 過渡現象은 그림 4와 같다

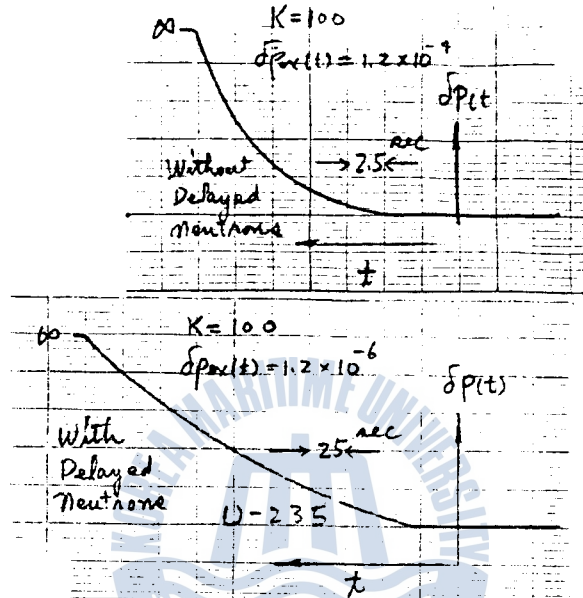


그림 4 $q^2 + 4p^2 \geq 0$ 이고 根중 하나 이상이 0보다 클때의 전자계산기에 의한 $P(t)$ 의 解

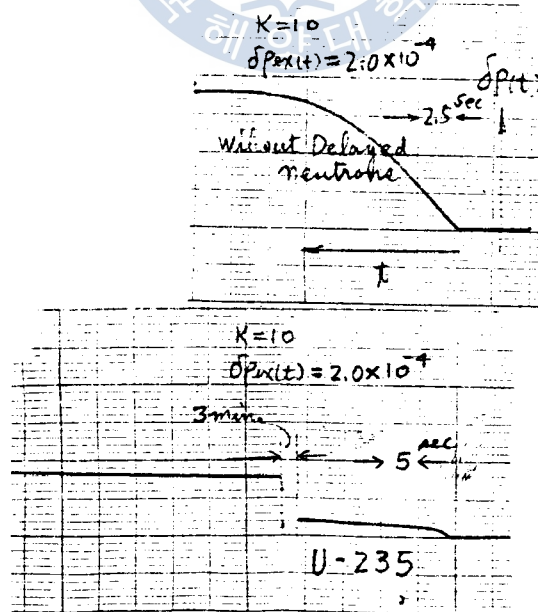
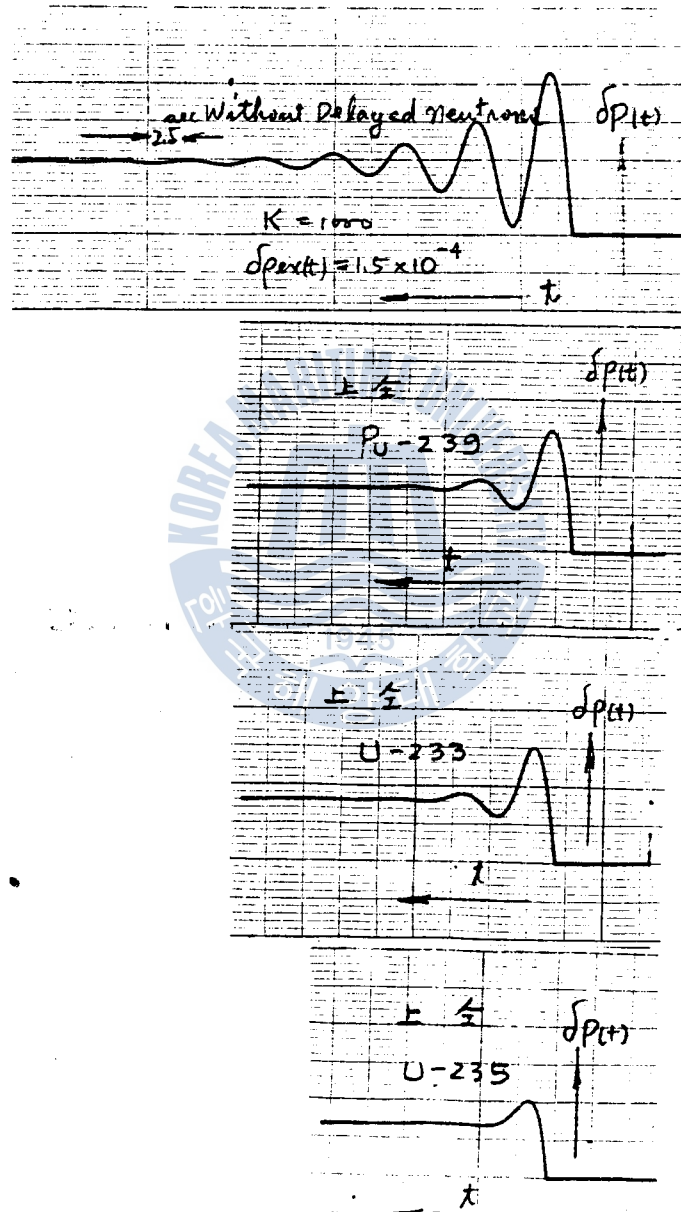


그림 5 $q^2 + 4p^2 \leq 0$ 이고 모든 根이 0보다 작을 때의 전자계산기에 의한 $P(t)$ 의 解

이 경우에는 遲發中性子の 有無에 關係없이 出力은 振動없이 ∞ 로 發散하므로 不安定하다. 그러나 遲發中性子が 있을 경우에는 發散의 速度가 느림으로 出力을 安定시킬 時間的인 餘裕를 가지게 되며 따라서 安定度도 크진다고 볼 수 있다.

(다) $q^2 + 4p^3 \leq 0$ 이고 $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_1'', \sigma_2'', \sigma_3''$ 모두 0보다 적을 경우, 모든 根이 複素平面的 左半面



그림·6 核燃料가 상이할 경우 同一反應度에 對한 $P(t)$ 의 전자계산기에 依한 解

에 存在하므로 系統은 安定하다.

그림·5는 $\delta\rho_{ex}(t)$ 가 1% 以下の 反應度일 때 出力 $\delta P(t)$ 의 解를 求한 것이다. 그림·5에서 遲發中性子が 있을 경우에는 없을 경우에 比較하여 時定數는 增大하고 出力變動幅은 줄어들므로 安定度가 相當히 增加함을 알 수 있다.

2-2-3) 核燃料와 安定度

表·1에서 알 수 있는 바와 같이 核燃料에 따라 遲發中性子の 生成比率과 崩壞定數等이 서로 相異하므로 이 資料에 依하여 同一한 反應度の 階段狀 入力에 대한 $\delta p(t)$ 의 解를 求한 것이 그림·6이다. 그림·6에서 보던 振動週期는 대체로 비슷하나, 振幅은 減衰하고, 整定時間도 P_u-239 , $U-233$, $U-235$ 順으로 減少함을 알 수 있다. 이는 遲發中性子の 生成比率과 一致하는 것으로 보아 이의 比率이 클수록 減衰效果는 크지며 따라서 原子爐의 安定度는 增大되는 것으로 생각된다.

3. 結 論

運轉中인 原子爐에서 遲發中性子는 安定度를 增大시킨다. 安定하나 出力이 振動하는 原子爐에서는 振幅은 減衰하고 整定時間은 短縮된다. 振動하지 않을 경우에는 出力變動幅을 減少시키며 時定數도 크게 한다. 爐가 不安定하여 出力이 振動없이 發散하여 暴走할 경우에는 暴走速度를 減少시키고 따라서 發散할 때까지의 時間을 延長시킴으로 爐制御는 어느程度 容易하게 된다.

參 考 文 獻

1. Arne Lundby "Effect of photoneutrons on the transfer function of a heavy water reactor". Journal of Nuclear Energy. V-1, 53~56p, 1954.
2. "英國形動力爐制御系의 一解析" 三井田純一, 須田信英, 自動制御, 第7卷 3號, 134~141p. 1960.
3. E. P. Ggftopoulos, J. Devought "Effect of delayed neutrons on nonlinear reactor stability" Nuclear Sci. & Eng, 8. 244~250p. 1960.
4. Miida J, Suda N. "General stability criteria for nuclear reactor with two feed back paths of single time constant", Nuclear Sci & Eng. . 11, 55~60p. 1961.
5. Wiktor B. Kenneth M. "Effect of delayed neutrons on stability of a nuclear power reactor", Nuclear sci, & Eng. 24, 356~361p, 1966.
6. H. B. Smets "On the effect of delayed neutrons in reactor dynamics", Nuclear Sci, & Frg. 25. 220~241, p. 1966.
7. Tan, S "On the stabilizing effect of delayed neutrons", Nuclear Sci, & Eng. 37, 520~526p, 1960.
8. Tan, S "stabilty and degree of stability under the effects of delayed neutrons", Nuclear Sci. & Eng. 38. 167~169p. 1967.
9. D. L. Hetrick "Dynamic of Nuclear Reactors." the University of Chicago Press, 11p. 1971

