

原子爐에 있어서 Xenon 毒素의 最適制御

(Optimal Control of Xenon Poison In Nuclear Reactor)

郭 殷 鎬* · 高 丙 俊*

(Kwack, Eun Ho and Koh, Byung Joon)

要 約

高束熱中性子爐에서 正常 運轉中인 原子爐를 運轉停止하였다가 再稼動할 때 가장 問題가 되는 것은 核分裂 生成物인 Xe^{135} 의 毒素作用이다. 이것은 Xe^{135} 가 原子爐 出力에 影響을 주는 熱中性子에 대한 吸收斷面積이 크고 그의 半減期가 길기 때문이다.

그러므로 原子爐의 一時的 運轉停止가 要求될 때 이의 再稼動에는 반듯이 이 毒素을 能過할 수 있는 充分한 超過反應度를 가해 주든지, Xe^{135} 가 崩壞되어 그의 濃도가 줄어든 이후에야 原子爐의 再稼動이 可能하게 된다.

위와 같은 問題는 事實상 原子爐 運轉時 安全性 뿐만 아니라 經濟性에도 큰 影響을 주고 있다. 本 論文에서는 이 點을 考慮하여 Pontryagin의 最大原理를 利用하여 運轉停止를 最適化시키므로써 언제든지 原子爐를 全出力으로 再稼動할 수 있도록 運轉停止 方法을 改善하였다. 그러나 制御過程에서나 그 以後에도 X 濃도는 制限된 許容值를 넘지 않고 最小時間 以內에 모든 制御를 끝내도록 하였다.

Abstract

The buildup of fission product, i.e. $Xe-135$ poisoning, is a prime factor in restarting a nuclear reactor from the shutdown, which was under normal operation in the high flux thermal reactor. It is caused by the high absorption crosssection of $Xe-135$ to thermal neutrons and its long half life, from which the thermal power is affected.

It is then possible to restart a nuclear reactor after the sufficient excess reactivity to override this poisoning must be inserted, or its concentration is decreased sufficiently when its temporary shutdown is required.

As matter of fact, these have an important influence not only on reactor safety but also on economic aspect in operation.

Considering these points in this study, the shutdown process was optimized using the Pontryagin's maximum principle so that the shutdown method was improved so as to restart the reactor to its full power at any time, but the xenon concentration did not exceed the constrained allowable value during and after shutdown, at the same time all the control actions were completed within minimum time from beginning of the shutdown.

* 한국원자력연구소 선임연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

接受日字: 1976年 8月25日

**한국원자력연구소 전자기기실장
正會員 Koh Byung Joon Korea Atomic Energy
Research Institute

1. 緒 論

正常狀態로 運轉중인 原子爐를 一時 停止시키면 核分裂 生成物인 Xe^{135} 의 毒素作用 때문에 어느 一定期間 以內에는 原子爐의 再稼動이 어렵다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. (1)(2)(3)(4)

이 現象은 熱中性子束이 높으면 높을수록 顯著하게 나타나며 특히 高束熱中性子爐나 動力爐에서 原子爐의 補修나 核燃料裝填 같은 短時間의 運轉停止가 要求되는 경우 큰 問題로 되고 있다.

이 問題를 解決하기 위하여 初期에는 이 毒素作用을 能가할 수 있을 정도의 高濃縮 核燃料를 더 가하여 주거나 또는 長期間 原子爐를 停止 狀態로 放置하여 Xenon의 自然 崩壞로 그의 濃度가 減衰되도록 기다린 후 再稼動하는 方法을 擇하여 왔다.

그러나 最近 制御理論이 發達됨에 따라 이와같은 問題는 非經濟的인 方法으로 看做되어 近代 制御方式으로 이 過程을 處理함으로써 이 毒素作用을 줄여 줄 수 있는 많은 研究가 이루어졌다. (5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)

本 研究에서도 最近의 制御理論의 하나인 最大原理를 適用하여 이 毒素作用을 最小로 줄여주는 數學的인 制御方法을 究명하고 모든 制御動作을 加급적 最小時間 이내에 끝냄으로써 原子爐를 언제든지 再稼動할 수 있도록 하였다. 이것은 中性子束을 制御變數로 하여 濃度의 最高值를 最適化시킴으로써 時間에 관계없이 原子爐를 再稼動할 수 있도록 하는 長點을 갖게 된다.

2. 動特性 方程式

原子爐에서 生成되는 X_e 과 I 의 關係를 나타내는 點動特性 方程式은 다음과 같이 表示된다. (1)(2)(12)

$$\frac{dI}{dt} = -\lambda_I I + \gamma_I \Sigma_f \phi \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_I I + \gamma_x \Sigma_f \phi - \lambda_x X - \sigma_x \phi \quad (2)$$

여기서 I 는 I^{135} 의 濃度이고 X 는 Xe^{135} 의 濃度이며 γ_I 와 γ_x 는 各各 I^{135} 와 Xe^{135} 의 生成率이고, Σ_f 는 u^{235} 의 核分裂 巨視斷面積, ϕ 는 熱中性子束, λ_I 와 λ_x 는 各各 I^{135} 와 Xe^{135} 의 崩壞常數, σ_x 는 熱中性子에 대한 Xe^{135} 의 微視吸收斷面積이다.

(1)과 (2)式을 正格化시켜 マト릭스로 表示하면 다음과 같다.

$$\dot{Z} = AZ + Bu \quad (3)$$

$$\text{단 } Z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ X \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_I & 0 \\ \lambda_I \gamma_I (\omega + \gamma_o) - \lambda_I + \gamma_o u & \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \lambda_I \\ \lambda_I \gamma_x (\omega + \gamma_o) \end{bmatrix}$$

$$\gamma_o = \sigma_x \phi_o / \lambda_I, \quad \gamma_1 = \gamma_I / (\gamma_I + \gamma_x), \quad \gamma_2 = / (\gamma_I + \gamma_x)$$

$$\omega = \lambda_x / \gamma_I, \quad u = \phi / \phi_o$$

여기에서 初期條件은 各各 $x(0) = 1, y(0) = 1$, 이며 ϕ_o 는 原子爐가 正常狀態에서 運轉中일 때의 熱中性子束이다.

原子爐를 正常稼動하다 急停止시켜 熱中性子束이 $10 \sim 10^4$ 程度 떨어지면, Xe 濃度는 急激히 增加하여 10時間 前後하여 그의 濃度가 絶頂에 到達하며, 熱中性子束에 따라 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 Xe 은 서서히 崩壞되는데 中性子束이 10^{16} 이면 正常運轉時 Xe 濃度의 約 230倍까지 올라가게 된다. 따라서 그림 1이 나타내는 方程式을 다음과 같이 表示할 수 있다.

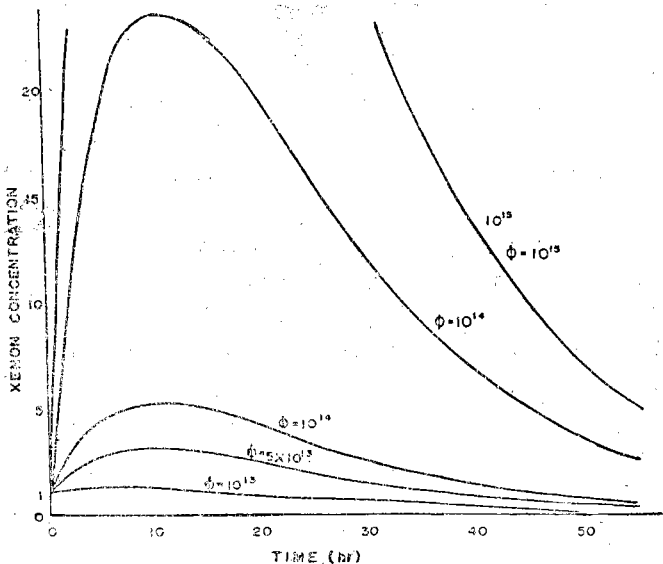


Fig. 1 XENON CONCENTRATION

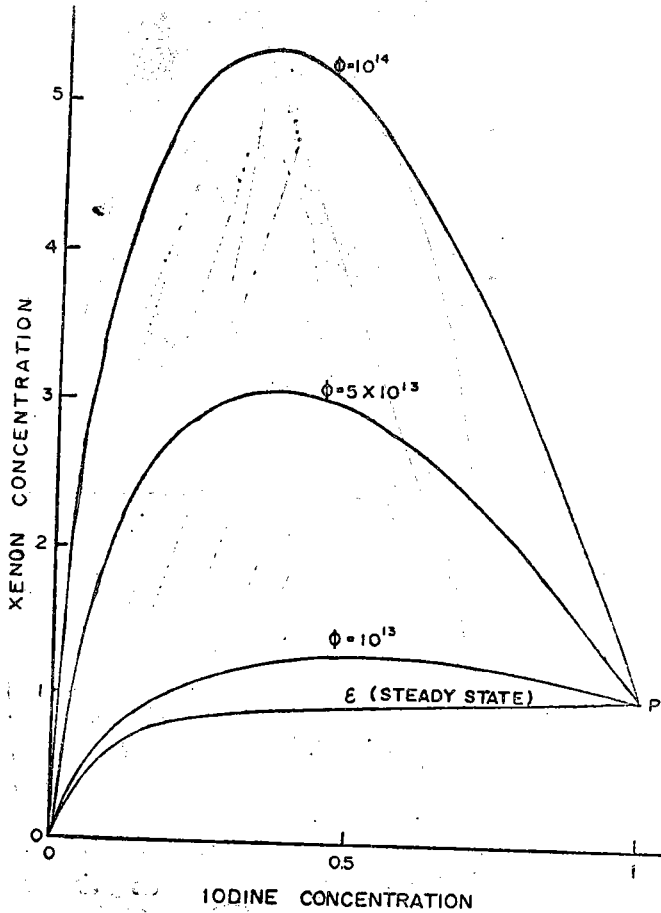


Fig. 2 XENON, IODINE STATE SPACE

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} \\ \left(1 + \frac{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}{1 - \omega}\right) e^{-\lambda_1 \omega t} - \frac{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}{1 - \omega} e^{-\lambda_1 t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)式에서 t를 소거하여 Xe과 I의 位相平面에서 나타내는 그림 2의 方程式을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y = \left[1 + \frac{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}{1 - \omega}\right] x^\omega - \frac{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}{1 - \omega} x \quad (5)$$

그림에서 ϵ 는 原子爐가 正常狀態에서 稼動될 때 Xe과 I의 軌道曲線으로 다음의 式으로 表示된다.

$$y = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2 u)(\omega + \gamma_0)}{\omega + \gamma_0 u} - \frac{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}{\omega + \gamma_0 u - 1} (u - x) + \left[\frac{\gamma_1}{\omega + \gamma_0 u - 1} - \frac{\gamma_1 + \gamma_2 u}{\omega + \gamma_0 u} \right] (\omega + \gamma_0)(u - x)^{(\omega + \gamma_0)} \quad (6)$$

다시 말하면 原子爐가 正常的으로 運轉되면 Xe과 I濃度는 점차 增加되어 어느 期間이 經過하면 飽和值에 到達하는데 그림에서는 P點에 해당된다. 그리고 原子爐가 運轉停止된 以後 Xe이 最高值에 到達하였을 때

그 값은 (6)式으로부터 얻는다.

$$y_{max} = (1 - \omega) \left(1 + \frac{\omega}{m}\right) \left(\frac{1}{m + \omega}\right) - \frac{\omega}{1 - \omega} \quad (7)$$

$$\text{단 } m = \frac{\omega(1 - \omega)}{\gamma_1(\omega + \gamma_0)}$$

3. 最適制御

우리가 구하고자 하는 것은 原子爐를 制御하는 過程에서 $u(t)$ 를 制御變數로 하여 y 의 極值(y_{max})를 最大한 줄여주면서 모든 制御作用을 짧은 時間內에 끝마침으로써 原子爐의 再稼動을 언제든지 可能케 하는 方法을 규명하려고 한다.

다시 말하여 制御變數인 $u(t)$ 를 最適化시켜 xc濃度가 到達 가능한 許容最大値 \bar{y} 를 넘지 않고 制御動作을 最小時間에 끝마침으로써 Xe濃度를 最適化시키려고 한다.

이러한 最適制御를 完成시켜 주는 것은 그림 3에서 볼수 있는데 여기에서 Xe과 I의 位相平面에서 標的曲

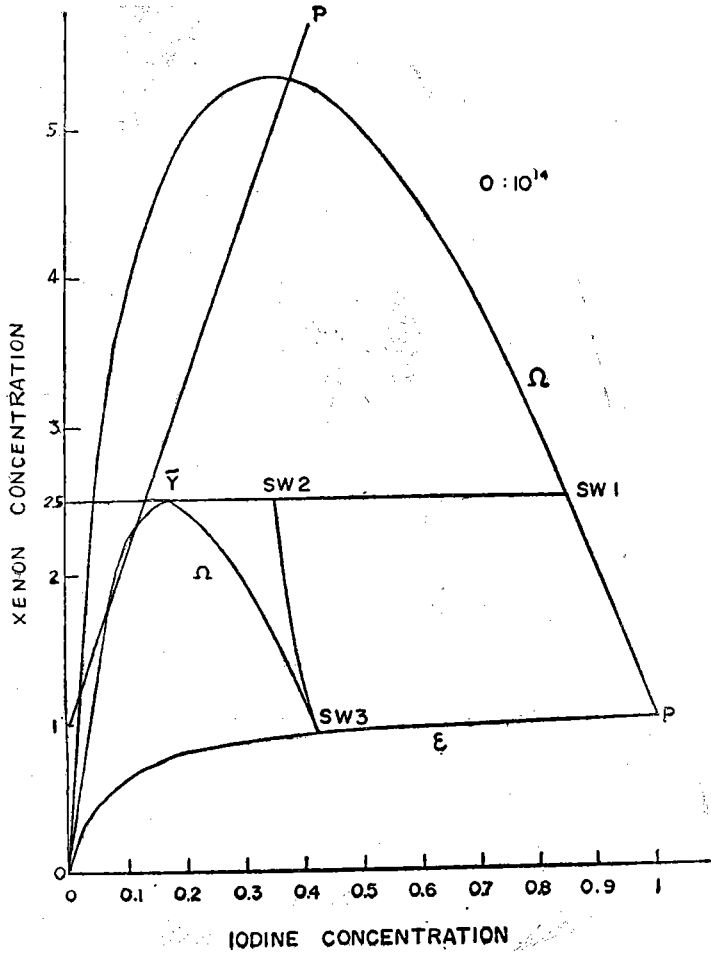


Fig. 3 TIME OPTIMAL TRAJECTORIES IN THE CONSTRAINED STATESPACE

線이 Ω 를 그릴 때 最適制御變數인 $u(t)$ 의 값을 操作하여 $Xe-I$ 의 軌道를 처음 正常狀態 p 에서 出發하여 가장 짧은 時間內에 Ω 에 到達시키면서 Ω 가 \bar{y} 의 許容 範圍 以內에서 制御되도록 하려고 한다.

만약 制御變數인 $u(t)$ 가 最適制御變數이고 이렇게 하여 얻은 $Xe-I$ 의 軌道가 最適制御 軌道라고 하면 이 軌道는 最大原理에 의하여 다음 條件을 반듯이 滿足시킨다. (13), (14), (15), (16).

- ① 制御變數 $u(t)$ 가 0이 되는 Xe 軌道는 最大原理를 滿足시킨다.
- ② 各 스윙칭 點에서 점프條件을 滿足시킨다.
- ③ 境界領域 \bar{y} 에서도 最大原理는 滿足한다.
- ④ 各 不連續點인 스윙칭 點에서 Hamiltonian은 連續的이며 그의 값은 最大常數가 維持된다.
- ⑤ 위의 모든 條件을 주는 隨伴函數가 반듯이 存在한다.

따라서 制御動作을 最小時間에 끝내려던 다음과 같은 價値函數 J 를 生覺할 수 있다.

$$J = \int_0^t dt \tag{8}$$

定義에 (13)(15) 의하여 Hamiltonian은 다음과 같이 表示된다.

$$H = 1 + \Psi[AZ + Bu] \\ = 1 - \lambda_I x \Psi_1 + \gamma_I \gamma_1 (\omega + \gamma_0) x \phi_2 - \lambda_I \omega y \phi_2 - k u \tag{9}$$

$$\text{단 } k = -\lambda_I \phi_1 + \lambda_I \gamma_0 y \phi_2 - \lambda_I \gamma_2 \omega \phi_2 - \lambda_I \gamma_0 \gamma_2 \phi_2$$

여기에서 $u(t)$ 의 操作範圍는 $0 \leq u \leq 1$ 이고 y 은 $y \leq \bar{y}$ 로 拘束되어 있다.

(9)式에서 隨伴函數는 다음과 같이 表示된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_I & -\gamma_I \gamma_1 (\omega + \gamma_0) \\ 0 & (\omega - \gamma_0 u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

(9)式的 H 가 u 의 線型方程式임으로 H 가 最大値를 갖기 위해서는 다음의 制御條件을 滿足시켜 주도록 制

御變數를 維持시켜 주면 된다.

$$\begin{aligned}
 u=1 \quad k>0 \quad \frac{\partial H}{\partial u} > 0 \\
 u=0 \quad k<0 \quad \frac{\partial H}{\partial u} < 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

制御變數 u 의 값은 H 가 最大值를 維持하는 最適操作變數로써 $x-y$ 軌道가 拘束되지 않은 領域에서의 값을 나타낸다.

3:1. Transversality條件과 標의 曲線

만약 $t=0$ 에서 原子爐를 運轉停止시켜서 $t=t_f$ 에서 制御變數 $u(t)$ 의 操作이 完全히 끝난다면 SW_3 에서 $u=0$ 이며 이 點에서 標의 曲線 Ω 의 구배를 S 라고 하면

$$S = \frac{dy}{dx} \Big|_{t=t_f} \tag{12}$$

이고 이 點에서의 Transversality條件인 $\langle \psi(t_f), \Lambda(x) \rangle = 0$ 을 滿足시킨다면 다음의 式이 成立한다.

$$\psi_1(t_f) + S\psi_2(t_f) = 0 \tag{13}$$

단 $\Lambda(x) = [1, d\Omega/dx]$ 이고 $y = \Omega(x)$ 이다.

(13)式은 SW_3 에서 $\psi(t_f)$ 와 $\Lambda(x(t_f))$ 가 서로 直交하며 모든 制御動作이 끝났음을 의미하고 $y \in \Omega$ 에서 $\psi_2(t_f) = 0$ 이 된다.

標의 曲線 Ω 는 다음 式으로 表現될 수 있는 曲線이다

$$\Omega(x) = y = \frac{1}{\delta(1-\omega)} \left[\frac{x^\omega}{(\delta y)^{\omega-1}} - \omega x \right] \tag{14}$$

단 $\delta = \omega/r_1(\omega + r_0)$

3:2 拘束領域에서의 最適條件

拘束領域 \bar{y} 에서는 Hamiltonian과 隨伴函數를 적절히 修正하여야 하지만 最大原理는 그대로 滿足되어야 한다. 이 拘束領域에서 $x-y$ 의 狀態方程式은 다음과 같이 쓸 수 있고^{(9),(14)},

$$g(x) = y - \bar{y} = 0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \left[\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y} \right] = [0, 1] \tag{16}$$

(15)式을 時間에 대한 變化率로 表示하면 다음과 같다

$$\frac{dg}{dt} = [0, 1] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \dot{y}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= \lambda_I [-(\omega + r_0 u)y + r_1(\omega + r_0)x + r_2(\omega + r_0)u] \\
 &= q(z, u) = 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

이 拘束領域上에서는 y 가 時間에 대해 獨立變數로 (9)式을 그대로 適用할 수 없으므로 다음과 같은 새로운 Hamiltonian을 生覺할 수 있다. ⁽¹⁴⁾

$$H^* = H + \varphi q \tag{18}$$

여기에서 φ 는 拘束領域에서의 最適條件을 滿足시켜 주는 새로운 倍數(Multiplier)이다. 그러나 (17)式에서 볼 수 있는 바와 같이 Hamiltonian에는 아무런 影響이 없으므로 拘束領域에서도 H^* 는 最大值를 維持하며 最大原理는 여전히 成立하고 連續의이라 할 수 있다. 따

라서 隨伴函數는 다음과 같다.

$$\frac{dH^*}{dz} = -\Delta^T \psi - \Psi \frac{dq}{dz} \tag{19}$$

그런데 H^* 가 恒常 最大定數를 갖어야 함으로 制御變數 $u(t)$ 는 $0 < u < 1$ 의 拘束範圍에서 주어지는 다음과 같은 값이 된다.

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \frac{\omega \bar{y}}{r_2(\omega + r_0) - \omega \bar{y}} - \frac{r_1(\omega + r_0)}{r_2(\omega + r_0) - r_0 \bar{y}} \\
 &\left\{ \frac{\omega \bar{y}}{(r_1 + r_2)(\omega + r_0) - r_0 \bar{y}} + X_{b_0} \text{Exp} \right. \\
 &\left. [-\lambda_I \frac{r_0 \bar{y}}{r_2(\omega + r_0) - r_0 \bar{y}}] t \right\}
 \end{aligned} \tag{20}$$

단 X_{b_0} 는 SW_1 에서의 X_{b_0} 初期값이다

그리고 이 拘束領域上에서 x 의 變化는 다음과 같은 減小函數이다.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\omega \bar{y}}{(r_2 + r_1)(\omega + r_0) - r_0 \bar{y}} + X_{b_0} \text{Exp} \\
 &\left[\frac{(r_1 + r_2)(\omega + r_0) - r_0 \bar{y}}{r_2(\omega + r_0)} - r_0 \bar{y} \right] \lambda_I t
 \end{aligned} \tag{21}$$

y 가 最適軌道이고 u 가 이를 위한 制御變數이면 拘束領域上에서 H 는 一定常數로 時間과는 완전히 獨立의임으로 다음이 成立된다.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} + \frac{\partial H}{\partial \psi} \frac{d\psi}{dt} = 0 \tag{22}$$

그런데 $q=0$ 이고 \bar{y} 에서 $dy/dy=0$ 이며 이 軌道가 最適軌道임으로 Transversality條件을 滿足시켜 주면 $H = 1 + \Psi_1 x |_{y=\bar{y}} = 0$ 이다. 따라서 $\psi_1 = \frac{1}{\lambda_I(u-x)}$ 이고 (9)式으로부터 $\frac{\partial H}{\partial u} = k=0$ 이고 이로부터 다음 式을 얻는다.

$$\psi_2 = \frac{\psi_1}{r_0 \bar{y} - \omega r_2 - r_0 r_2}$$

이 式을 (10)式에 代入하여 정리하면 拘束領域上에서 隨伴函數 $\psi_1(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\psi}_1(t) = \lambda_I \frac{r_0 \bar{y} - (r_1 + r_2)(\omega + r_0)}{r_0 \bar{y} - r_2(\omega + r_0)} \varphi_1 \tag{23}$$

(19)와 (23)式으로부터

$$\psi_2 + \varphi = \frac{\psi_1}{r_0 \bar{y} - r_2 \omega - r_0 r_2} \tag{24}$$

을 얻고 다시 이 結果를 (22)式에 代入하면

$$\dot{\psi}_2(t) = \frac{\omega + r_0 u}{r_0 \bar{y} - r_2 \omega - r_0 r_2} - \lambda_I \psi_1 \tag{25}$$

을 얻고 (24)와 (25)式으로부터 倍數 $\varphi(t)$ 을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &= \frac{r_0 \lambda_I \psi_1}{(r_0 \bar{y} - r_0 \omega - r_0 r_2)^2} \{ \bar{y} - r_1(\omega + r_0)x - (r_1 + r_2) \\
 &\quad - r_2 \omega \} \left(1 + \frac{\omega}{r_0} \right)
 \end{aligned} \tag{26}$$

(23), (25), 및 (26)式은 拘束領域下에서의 隨伴函數로서 Hamiltonian을 最大定數를 維持시켜 준다.

3:3 점프 條件 및 端點의 隨伴函數

위에서 얻은 $x-y$ 軌道가 時間 最適軌道이고 u 가 이

를 위한 最適制御變數라고 하면 ϕ 는 각 스위칭 코너에서 점프條件을 滿足시킨다. (13)

$$\phi(af) = \phi(on) + \eta \quad (27)$$

換言하면 $Z(t)$ 가 最適軌道이고 SW_2 가 이를 위한 스위칭點이라면 (27)式은 반듯이 滿足하고 y 가 Ω 에 到達하는 $t=t_f$ 에서 Hamiltonian은 0이 되어야 함으로(9)式으로부터

$$H(t_f) = 1 + \Psi_1 x | \bar{u} + \Psi_2 | \bar{u} = 0 \quad (28)$$

이고 (13)式을 代入 整理하면 最終固定點 SW_3 에서의 隨函數를 얻는다.

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1(t_f) \\ \dot{\phi}_2(t_f) \end{cases} = \begin{cases} \frac{1}{x} \left[\frac{R}{S} - 1 \right] \\ \frac{1}{y} \left[\frac{S}{R} - 1 \right] \end{cases} \quad (29)$$

단 $R = \dot{y}/\dot{x}$ 이고 \bar{u} 는 u 의 極值이다.

따라서 (29)式은 곧 標의 曲線과 制御操作이 끝나는 點에서 $H(t_f)$ 에 最適條件을 주는 隨伴函數이다.

4. 結 果

(11)式의 條件으로 보아 (9)式의 H 가 最大值를 維持하기 위해서 각 스위칭點에서 u 의 값이 0과 1로 서로 바뀔때 k 의 값이 變化됨으로써 H 의 값은 恒常 一定하게 할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 條件을 주는 스위칭 函數는 곧 (10)式으로써 充分하다. 그러나 拘束領域에서 Hamiltonian은 (18)式으로 表示되지만 H^* 는 여전히 一定한 값을 維持함을 알 수 있고 ($H^* = H$)

이때의 $u(t)$ 는 $0 < u < 1$ 의 範圍에서 (20)式으로 주어지는 값이다. 이 값은 (21)式의 x 값을 주며 H^* 가 最大定數를 갖도록 하는 隨伴函數는 (23), (25), (26)式에 의해 決定됨을 알 수 있다.

이상의 結果로 보아 H 와 H^* 는 變化가 없는 一定한 값이고 H^* 가 一定하게 維持되기 위해서는 隨伴函數 (23), (25), (26)式을 써서 $u(t)$ 의 값을 그림 7에서와 같이 操作시켜 주면 우리가 구하고자 하는 最適制御軌道를 얻을 수 있다. 그런데 스위칭이 일어날 수 있는 條件은(27) $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ 이고 스위칭 範圍는 $\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial H}{\partial u} \right] \leq 0$

로써 그림 3에서 Γ 의 오른쪽 領域에 해당한다. 이 때 y 의 값은 (9)式으로부터

$$y = r_1(\omega + \gamma_0)x + \frac{\gamma_1(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_2\omega)}{\gamma_0 \gamma_1} \quad (30)$$

을 얻을 수 있고 이 結果를 (3)式에 代入하면 Γ 의 값을 얻는다.

$$U\Gamma = \frac{1}{(\omega + \gamma_0)(\gamma_1 - \gamma_2) + \gamma_0\gamma} \left\{ (2 - \omega)y - \frac{2}{\gamma_0}(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_2\omega)(\omega + \gamma_0) \right\} \quad (31)$$

(31)式은 (30)式의 X_0 값을 갖는 制御變數가 된다.

위에서 얻은 結果를 標 1과 같은 原子爐 定數를 갖는 原子爐에 適用하였을때 最適制御變數인 中性子束과 X_0 의 變化는 그림 3과 4에서 볼 수 있고 이 때의 最適時間과 스위칭點은 表 2에서 볼 수 있다.

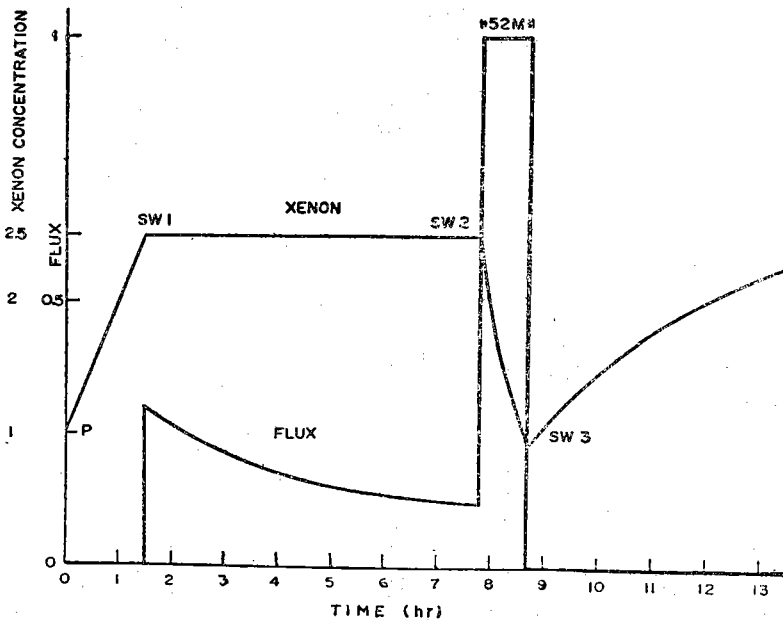


Fig 4. TIME OPTIMAL SHUTDOWN SOLUTION WITH CONSTRAINT

Table 1. Parameters of Xenon Kinetics

$\lambda_I = 2.852 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$
$\gamma_I = 0.061$
$\lambda_x = 2.109 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$
$\gamma_x = 0.002$
$\sigma = 3.21 \times 10^6 \text{ b} = 3.21 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
$\gamma_0 = \sigma \phi_0 / \lambda_I = 1.1255 \times 10^{-13} \phi_0$
$\gamma_1 = \gamma_I / (\gamma_x + \gamma_I) = 0.9683$
$\gamma_2 = \gamma_x / (\gamma_x + \gamma_I) = 0.03186$
$w = \phi / \phi_0 = 0.7395$
$u = \phi / \phi_0$
$\phi_0 = 10^{14}$

Table 2. Time Optimal Switching Points and Time

Switching Points	SW 1	SW 2	SW 3
Switching Time (hr)	1.5	7.8	9.6

5. 結 論

一時的으로 停止된 原子爐를 再稼動하기 위해서는 여러가지 便宜한 方法이 있겠지만 原子爐를 완전히 停止하기 전에 一定한 時間을 두어 制御過程을 最適化시킴으로써 Xe Builtup을 막고 再稼動을 容易하게 할 수 있는 時間 最適制御가 가장 便利한 方法의 하나가 될 것으로 생각되며 특히 動力爐와 같은 發電用 原子爐에 應用한다면 利點이 많을 것으로 본다.

예를 들면 從來의 再稼動的 便宜를 돕기 위하여 高濃縮 核燃料을 넣어 주었지만 그러나 이와같은 制御方法을 따르면 過剩反應도가 要求되지 않으므로 무엇보다 經濟적으로 利得이 크다.

그러나 여기에서의 結果는 點 모델에 대한 것으로 실제 原子爐에서는 爐心에서의 中性子 分布가 空間의 으로 틀리기 때문에 正確하게 맞지는 않겠지만 크게 誤差는 없을 것으로 본다.

위에서 볼 수 있는 바와 같이 制御理論은 雜하고 電子計算機를 써서 스윕點點과 操作變數인 制御變數를 얻었지만 일단 이 값을 구하였으면 原子爐 制御, 過程은 간단하게 처리할 수 있다.

參 考 文 獻

1. Glasstone, Samuel and Milton C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand and Co., Inc. (1952)
2. Lamarsh, John. Ro, Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley Publishing Co. Inc. (1966).
3. Ash, Milton, Optimal Shutdown Control of Nuclear Reactors, Academic Press (1966).
4. Weston, M. Stacey, Jr., Xenon Induced Spatia Power Oscillation, Reactor Technology, Vol. 13, No.3 Summer (1970)
5. Ash, Milton, Nuclear Science and Engineering, 24, 77-86 (1966)
6. Lee, John.C., Nuclear Science and Engineering 54, 206-214 July (1974)
7. Roberts John. J. and Harold P. Smith Jr., Nuclear Science and Engineering, 22, 470-478 (1965)
8. Rosztoczy, Zoltan R. and Lynn E. Weaver, Nuclear Science and Engineering, 50, 46-52 (1973)
9. Salo, Sappo, Nuclear Science and Engineering, 50 46-52 (1973)
10. Tsouri N., J. Rootenberg and L. J. Lidofsky, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-22, Feb. (1975)
11. Brunson, G.S., R.M. Fryer and R.V. Strain, Vol. 13, Jau. (1972)
12. Christie, A.M. and C.G. Poncelet, Nuclear Science and Engineering, 51, 10-24 (1973)
13. Pontgyayin, L.S., V.G. Votvanskii, R.V. Gankrelidze and E.F. Mishchenko, The Mathematical Theory of Optimal Process, John Wiley & Sons (1962)
14. Lewins, Jeffery and R.D. Benham, Time Optimal Xenon Shutdown on the Xenon Boundary, BNWL-186 May (1966)
15. Mohler, Ronald R. and C.N. Shen, Optimal Control of Nuclear Reactor, Academic Press (1970)