

칼만 필터를 이용한 原子爐 熱出力 測定方法 改善

Improvement of a Method of Reactor Thermal
Power Measurement Using Kalman Filter

鄭 南 教

韓電 古里原子力 第2發電所 電氣部長

1. 序 論

原子力發電에 의한 電力供給이 차지하는 比重이 增加함에 따라 이에 相應하는 稼動率, 經濟性, 利用率 提高 및 原電의 安全性 확보 등은 原子力事業의 重要變數임에 틀림이 없다.

특히 安全性 分析의 주된 目的은 사고시 核燃料 및 核燃料 피복재 表面의 溫度를 제한치 이내로 유지함으로써 核燃料의 健全성을 保障하는 것이므로 설정된 安全性 관련 變數 및 그 운 轉값들을 原子爐 熱出力과 연관시켜 安全性 측 面에서 分析하여 불 때 原子爐 熱出力을 精確하 게 평가하는 것은 매우 重要한 것이며, 또한 熱 出力 測定誤差가 增加한다면 安全性 관련 變數 들이 그 제한치 내를 超過하지 않도록 出力을 조절하여야 하므로 經濟的 損失을 同伴할 수도 있다.

현재의 原子力發電所 熱出力 測定方法은 2차 측 熱出力을 測定하여 原子爐 熱出力을 決定하 고 이에 따라 熱出力 計測設備(爐外 核計裝)를

교정(Calibration)하며, 그 지시값을 基準으로 原子爐를 運轉한다.

本文에서는 고압 터빈 1단 壓力的 함수로서 의 터빈 出力, 에너지 平衡關係를 이용한 原子 爐 出力 등의 實際變數를 綜合, 選擇하여 보다 精確한 熱出力을 計算할 수 있는 Kalman Filter 를 利用한 熱出力 測定의 새로운 技術을 紹介, 尙後 그 기법을 改善하여 熱出力 測定의 正確度 를 향상시켜 運轉餘裕度 增加에 따른 原電의 安全 性 增大 및 經濟的 利得이 確信되므로 관련기 術 適用結果를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 熱出力 測定法

原子爐 熱出力은 $QRX = mCP \Delta T$ (단, $m =$ RCS Flowrate, $CP =$ 등압비열, $\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$)의 기본식과 相關된 1차계통 變數를 精確히 測定함이 타당하나 RCS Flowrate (m)와 ΔT 를 精確히 測定하기 어려워 原子爐 熱出力을 평가하는 현재의 方法은 1차측 熱出力과 2

차측 熱出力이 같다는 조건하에서 2 차측 熱平衡 原理를 적용, 2 차측 熱出力을 測定한 후 이 값에 1 차系統의 熱損失을 加減하여 原子力 熱出力을 평가한다.

가. 方程式 展開

系統의 狀態를 나타내는 變數의 精確한 값을 알기 위하여 각 變數와 線型的 關係를 갖는 測定 Data를 觀察하기 위한 System/Parameter Estimation은 다음과 같은 項目으로 構成된다.

○ Estimation할 變數

○ 測定 Data

○ 測定 Data와 變數의 聯關性을 묘사하는 數學的 Model

○ 測定方法, 計器狀態 및 Modeling 과정 등에 포함된 불확실도 (Uncertainty)

○ 최적의 Estimation 方法 여부를 판단할 수 있는 評價範圍

(1) 系統狀態 決定 및 測定 Model

系統狀態 및 測定 Model을 Direct Identification 方法에 의하여 표현하면 다음과 같은 표준方程式으로 표현할 수 있다.

$$X(k+1) = \Phi x(k) + W(k) \quad (1)$$

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (2)$$

여기서 $X = n \times i$ State Vector

$\Phi = n \times n$ State 變換行列

$W = n \times i$ Process Noise Vector

$Z = m \times i$ 測定 Vector

$H = m \times n$ 測定 行列

$V = m \times i$ 測定 Noise Vector

(2) 原子爐의 Identified Dynamic Model의 適用

原子爐의 Dynamic Model은 式 (3)에서 System Identification Algorithm과 실제 測定 Data를 이용하여 原子爐 熱出力(Qpri), 2 차측 熱出力(Qsec), NIS出力(Qcore)의 關係를 구하는 것이다.

Qpri, Qsec는 溫度, 壓力 및 流量의 非線型

函數로 주어지지만 여기서는 직접 測定할 수 있는 Data로 取扱한다.

Φ_i 에 관한 m개의 行列方程式

$$[\hat{\Phi}_1 \hat{\Phi}_2 \dots \hat{\Phi}_m] = r^{-1} [\hat{r}_1 \hat{r}_2 \dots \hat{r}_m] \quad (3)$$

$$(r_i = r \Phi_i, \Phi_i = \hat{r}^{-1} \hat{r}_i)$$

式 (3)의 結過式으로부터 다음 關係式을 구한다.

$$\begin{bmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \Phi_{11,1} & \Phi_{12,1} & \Phi_{13,1} \\ \Phi_{21,1} & \Phi_{22,1} & \Phi_{23,1} \\ \Phi_{31,1} & \Phi_{32,1} & \Phi_{33,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{bmatrix}_{k-1} \quad (4)$$

k는 k번째 Time Step이다.

각 出力變數간의 Dynamic Connection이 약할 경우 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \Phi_{11,1} & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_{22,1} & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_{33,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{bmatrix}_{k-1} \quad (5)$$

Qpri, Qsec, Qcore는 다음과 같이 계산한다.

$$Q_{pri} = mpri(Hhe - Hcl) - Q_{pp} + Q_{ls} + Q_{pcc} \quad (6)$$

$$Q_{sec} = mfw(Hg - Hfw) + mbd(Hf - Hg)$$

$$- Q_{pp} + Q_{ls} + Q_{pcc} - \frac{C}{\sqrt{f}}(Hf - Hf) \frac{L}{T} \quad (7)$$

Qcore = NI Reading

* 熱出力 測定 Instrumentation Data

mfw : 主給水 流量 (m³/hr)

Tfw : 主給水 溫度 (°C)

Pfw : 主給水 壓力 (kg/cm²)

mbd : 取出水 流量 (m³/hr)

Ps : 蒸汽壓力 (kg/cm²)

C : 保定常數

ΔL : 蒸汽發生器 水位變化 (m)

ΔT : Time Step Size (sec)

Th : Hot Leg 溫度 (°C)

Tc : Cold Leg 溫度 (°C)

Tamb : 大氣溫度 (°C)

mpcc : 1 차 機器 冷却系統流量 (m³/hr)

Tdl : 原子爐 冷却材 Pump Downstream 溫度 (°C)

TUE : 原子爐 冷却材 Pump Upstream 温度 (°C)

mpri : 原子爐 冷却材 流量 (m³/hr)

Pp : 原子爐 系統 压力

Ni : Nuclear Instrumentation

Hf : 取出水 엔탈피

Hg : 蒸汽 엔탈피

Hfw : 主給水 엔탈피

Qpp : 原子爐 冷却材 Pump에 의한 熱量 (MW)

Qppc : 1차機器 冷却 系統을 통한 熱損失 (MW)

Qls : 原子爐 容器, 配管 등을 통한 熱損失 (MW)

나. 熱出力 計算 重要課程

1) 主給水 엔탈피 상기 主給水 温度와 压力 測定值를 이용, 蒸汽表에서 내삽법으로 구한다.

2) 蒸汽의 엔탈피를 現場計器로부터 測定한 蒸汽压力, 大氣压力 配管压力 損失, 수두를 고려하여 보정증기 压力을 계산한 후 Ps포화压力에 대한 蒸汽 엔탈피 + (HS) = XHG + (1 - X) Hf를 계산한다. (단, X: 蒸汽의 건도).

3) 취출수(Blowdown) 엔탈피는 포화수의 엔탈피 Hf를 適用, 결정한다.

4) 流量의 계산

○給水 및 취출수 流量測定 計器의 노즐 상수

$$\alpha = \sqrt{\frac{359.1d^2C}{1 - (d/D)^4}}$$

여기서, d : 노즐 목 직경

D : 노즐 출구 직경

C : 노즐 출구 計數(流量計數)

○노즐의 열팽창 計數(Fa)는 해당 温度에 대응하는 값을 그래프에서 찾는다.

○극수 및 取出水 流量

$$W = \alpha Fa \sqrt{\Delta P / U}$$

여기서, W : 流量

α : 노즐 상수

Fa : 열팽창 計數

ΔP : 差压

U : 비체적

상기의 관련 과정을 고려하여 熱出力은 식 (2)에 의거 遂行한다.

3. Kalman Filter 의 適用

本文에서는 앞 장에서 기술한 바와 같은 2차측 熱出力에만 의존하고 있는 熱出力 測定方法을 改善하여 Kalman Filter를 利用, 原子爐 熱出力, 2차측 熱出力 및 NI (Nuclear Instrumentation) 지시값 등 3가지 Data를 결합함으로써 原子力發電所 熱出力 測定信賴度를 높이는 方法인 Kalman Filter의 適用方法을 紹介하기 위해서 系統狀態를 표시하는 變數들중 직접 測定이 불가능한 것은 관련 Data로부터 測定해야 한다.

이러한 Data에는 系統의 制御方式, 系統變數와 測定 Output 사이의 不確實性이 포함되므로 系統變數의 精確한 추정이 어려워진다. 게다가 測定計器는 Noise, 고유편차, 測定誤差 등의 영향을 받으므로 不確實性이 큰 信號로부터 精確한 情報를 얻는 方法이 필요하게 된다.

Kalman Filter는 測定 Data와 系統 및 測定計器의 特性을 利用하여 統計的 Error가 최소화되도록 系統變數를 추정하는 것이다.

가. Kalman Filter Algorithm

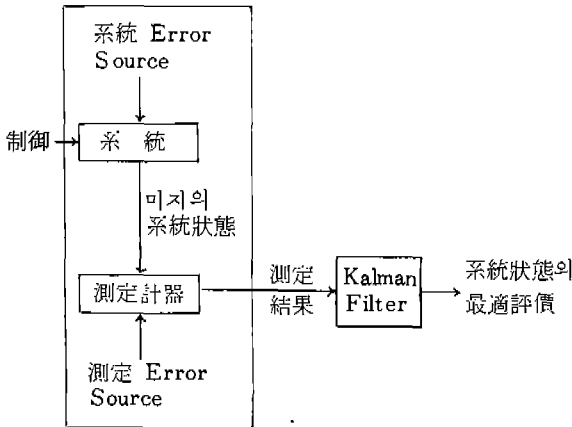
Filter의 狀態 Vector를 Xk라 하고 이 Vector는 1차측, 2차측, NI出力 및 실제 原子爐出力의 Bias로 구성된다.

여기서 k는 k번째 Time Step을 표시한다.

Algorithm은 다음과 같은 行列定義 및 計算課程으로 이루어진다.

定義 :

1) Estimation된 狀態 Vector \hat{X}_k 의 Covariance 行列



(그림 1) Kalman Filter

$$P_k = E[(\hat{X}_k - \bar{X}_k)(\hat{X}_k - \bar{X}_k)^T] = \text{COV}(\hat{X}_k) \quad (8)$$

2) 測定 Noise 行列: R_k

3) 測定行列: H

H 는 $Z_k = HX_k + V_k$ 로 定義되고, 여기서 Z_k 는 測定 Vector, V_k 는 White Noise Term 이다.

4) Kalman Gain 行列: K_k

K_k 는 P_k , R_k 및 H 로 定義된다.

Filter Algorithm :

1) 초기값 \hat{X}_0 , P_0 를 설정한다.

2) Filter Update전의 狀態變數 Propagation

$$\bar{X}_k = \Phi \bar{X}_{k-1}$$

(-)는 測定 Update 직전의 狀態變數 Estimate를 표시한다.

다음 測定時間에 대한 Covariance

$$P_k = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q_{k-1} \quad (9)$$

3) Kalman Gain K_k 를 계산한다.

$$K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1} \quad (10)$$

4) 狀態變數 Update

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k (Z_k - H\bar{X}_k) \quad (11)$$

本研究에서 Estimation하는 Time Step 내에서 狀態變數는 Constant로 가정하므로 $\bar{X}_k = \hat{X}_{k-1}$ 이다.

5) Covariance Update

$$P_k = (1 - K_k H) P_k (1 - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (12)$$

6) 모든 測定值가 처리될 때까지 2) - 5)를 반복한다.

$K \gg 1$ 이면 K_k 는 일정하게 된다. 즉 Filter는 正常狀態(Steady State)가 된다.

나. Kalman Filter의 適用

本研究에서 사용된 Kalman Filter는 다음 4 Element를 가진 狀態 Vector 및 3 Element를 가진 測定 Vector로 構成된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}_{k-1} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1001 \\ 0101 \\ 0011 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}_k \quad (14)$$

X_1 : 原子爐 熱出力 Q_{pri} 에 대한 Bias

X_2 : 2차측 熱出力 Q_{sec} 에 대한 Bias

X_3 : NI 出力에 대한 Bias

X_4 : 실재出力 Level

Z_1 : 原子爐 熱出力 Q_{pri} 測定值

Z_2 : 2차측 熱出力 Q_{sec} 測定值

Z_3 : NI出力 測定值

V_1, V_2, V_3 : Uncorrected White Measurement Noise

系統의 狀態變數(出力 Level)들 간에는 Cross-Coupling이 약하므로 T_c (Correction Time) 이상의 Sampling Interval을 주면 Uncorrected 狀態로 볼 수 있고, 식(11), (12)와 같이 Model을 단순화시킬 수 있다.

系統狀態가 상수화되므로 Q 는 4×4 의 영행렬로 주어진다. 測定 Noise Covariance 行列 R 는 실측 Data의 Covariance 分析으로 구한다.

초기 Estimation Error Covariance 행렬 P_0 는 系統狀態 變數가 Uncorrected이므로 다음

과 같은 대각행렬로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_4^2 \end{pmatrix}$$

α 는 狀態變數 α_i 의 표준편차이다. 식 (13)으로부터 初期狀態 Estimate \hat{X}_0 를 설정한다. 이렇게 하여 식 (11), (12)의 系統 및 測定 Model과 統計 Data Q, R 및 初期條件 P_0, X_0 를 Filter Alogrithm에 대입하는 각 出力變數를 구한다.

4. 運轉中 原子爐의 熱出力 變化變數

가. 出力 再分布에 따른 出力應答

爐心內 核燃料 燃燒狀態는 爐心初期에는 爐心末期로 감에 따라 核燃料 分布形態가 달라진다.

즉, 爐心중심 燃料보다 爐心外殼 部分의 燃料가 담당하는 出力分布(Power Sharing)가 증가하므로 中性子 누설률이 증가하게 되어 爐心 外殼에 설치된 爐外 核計測設備의 出力領域 검출기는 더욱 많은 中性子를 감지하게 됨으로써 동일 出力에서도 높은 電流值를 지시하게 된다.

특히 기존 OUT-IN 장전 모형을 배제하고 中性子 利用率向上을 위한 저누설 장전모형(Low Leakage Loading Pattern)을 도입하여 爐心 外殼 위치에 저농축 核燃料를 장전하게 됨에 따라 爐心初期에서 爐心末期로 燃燒가 진행됨에 따라 外殼 燃料가 상대적으로 더욱 높은 出力을 담당한다.

나. 核燃料의 燃燒에 따른 爐心 上部溫度變化

爐心初期(BOL)에서는 爐心 중앙부분 核燃料의 燃燒率이 爐心 外殼자리보다 커서 中性子 속의 분포가 높고, 爐心 가장자리는 낮다가 爐心 末期(EOL)로 감에 따라 爐心 中央부분 核燃料의 燃燒는 初期에 많은 燃燒 영향으로 점점 줄어들게 되고 상대적으로 爐心 가장자리 燃料의 燃燒가 점점 증가하게 된다.

이에 따라 爐心 上部의 溫度分布 또한 爐心 外殼部分의 燃料溫度는 增加하고 爐心 中央部分의 燃料溫度는 減少하는 現狀을 나타낸다.

다. 變數測定機器의 經年變化

(1) 主給水流量 測定用 벤츄리

發電所의 電氣出力이 減少하는 結果가 發生했을 때 벤츄리 표면을 문질러서 닦아내고 高壓, 高速의 물로 세정한 후 發電所를 運轉한 결과 약 2~3%의 發電所 電氣出力이 상승되고 熱消費率도 改善된다는 것은 잘 알려진 사실이다.

그러므로 原電의 熱出力 값의 가장 큰 變數로 작동되는 主給水 流量測定用 벤츄리 관리는 응축급수 Train 설비들의 일반적인 腐蝕生成物과 응축수도는 보충수 系統의 누설에 의한 것으로 보이는 Copper, Iron과 약간의 Nickel과 Zinc가 포함된 침전물 관리가 주안점이 될 것이다.

(2) 中性子 測定用 計測設備

測定계기 固有로 지니고 있는 Bias 오차 및 中性子 計測設備의 經年變化

<표 1>

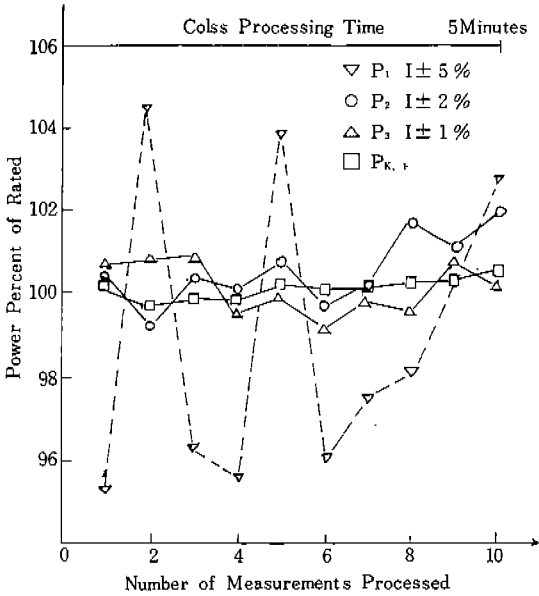
(例: 燃燒度 150MWD/MTU 基準)

燃燒度 채널	150 (MWD/MTU)	1000 (MWD/MTU)	2000 (MWD/MTU)	4000 (MWD/MTU)	6000 (MWD/MTU)	8000 (MWD/MTU)
平均(μA)	138.03	140.9	143.7	145.93	152.3	155.38
出力換算 외형지시치	100%	102.1%	104.1%	105.7%	110.3%	112.6%

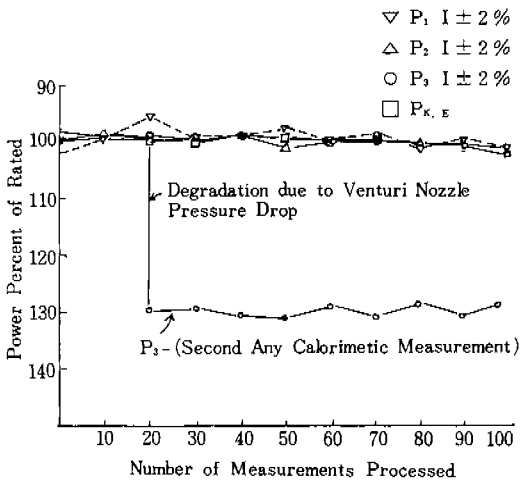
라. 豫想效果

(1) 精確한 熱出力의 평가가능

그림 2는 3개 (P₁, P₂, P₃)의 5분간 독립적



〈그림 2〉 Kalman Filtering Estimator 에 의한 熱出力



〈그림 3〉 主給水 Venturi Degrading 效果와 거의 獨立的으로 熱出力을 評價할 수 있는 Kalman Filtering 에 의한 熱出力

인 熱出力 측정 값이 최대 Uncertainty인 상태로 측정될 때 Kalman Filtering에 의한 熱出力 측정값을 도식화한 것인데, 큰 폭의 등락없이 참값에 접근하고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 主給水 Venturi Degrading에 따른 2차측 Calorimetric 계산 값이 현격히 증가할 때도 Kalman Filtering에 의한 추정된, 熱出力 값은 여기에 크게 영향을 받지 않고 참값에 가까운 값을 計算한다는 것을 볼 수 있다.

단, P₁, P₂, P₃는 다음의 5가지 중에서 선택적으로 취할 수 있다.

- 고압 터빈 1단 壓力 함수로서의 터빈 出力
- 에너지 평형관계를 이용한 1차측 熱出力
- 爐外 核計測器를 이용한 原子爐 出力
- 에너지 평형 관계를 이용한 2차측 熱出力

(2) 計器 正確度向上의 經濟性 評價

計 器 名	感 度
主給水 제어밸브 P	0.001 MW/PA
主給水 溫度	0.14 MW/℃
Blowdown 流量 溫度	0.11 MW/℃
高溫管 溫度	0.09 MW/℃
低溫管 溫度	0.07 MW/℃
펌프 및 制御系統 冷却水 溫度	0.05 MW/℃

단, 上記資料는 50MW급 실험로 (LOFT)에서 Kalman Filtering 方法을 利用하여 取得한 資料임.

동 자료를 이용하여 計器 正確度 向上으로 인한 經濟性을 평가해 보면 定格 熱出力 300MW를 기준으로 主給水 제어 밸브 P Bias는 약 55배 (2775/50) 增加하여 感度가 0.06MW/Pa이 된다.

P Bias 誤差 10% (11PA)를 減少시키는데 드는 費用은 \$500,000소요된다 가정하면 이로 인한 총오차 減少는

$$2\Delta\sigma POW = 2(0.06)^2 \frac{(110)}{(60)} \frac{(11)}{(0.176)} = 0.83MW$$

이다.

가) Filter 성능 검증 실험결과

본 자료는 50MW급 LOFT 실험로에서 검증한 결과 자료로서 기준 測定方法과 비교하면 표 2 와 같다.

단, 검증결과는 상호간의 熱出力 차이의 표준 편차가 아래와 같이 식을 만족하여 信賴度를 확인하였다.

$$\sigma_{DIFF} \leq \sqrt{2} \sigma_{CAL} = 2(0.22) = 0.31$$

나) 線型誤差 分析結果

○Filter 構造에 의한 誤差

測定 Data의 入力에 따른 Steady State 상태로 熱出力을 계산하기 위해서는 약 60번의 Filter를 통과해야 하는데 각 Filter 통과시 소요되는 시간은 5.1초로서 총 약 5분간의 시간이 Kalman Filter 방법에서 소요되며, Filter 통과

수에 대한 誤差는 그림 4와 같다. 즉, 수만개의 Filter를 통과해도 <0.012MW의 誤差를 나타내고 있다.

○測定計器의 Bias에 의한 誤差

그림 5에서 볼 수 있듯이 몇개만의 Filter를 통과시에도 오차 Covariance가 0.025MW²를 나타내고 있다.

○測定計器의 Random 잡음에 의한 誤差

그림 6에서 볼 수 있듯이 誤差 Covariance는 10개의 Filter 통과시에는 <0.04MW²로 나타났고 60개 Filter 통과시에는 <0.006MW²로 나타나는 것을 알 수 있다.

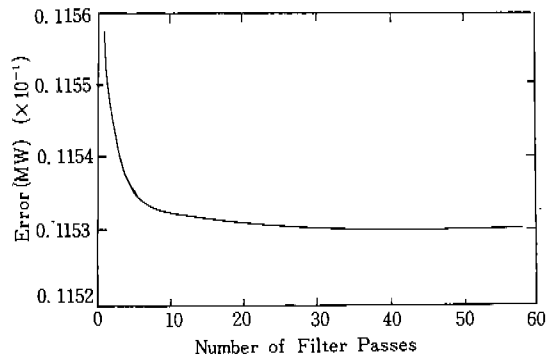
○合計誤差

상기 誤差를 조합하여 $COV(X) = COV(E')$

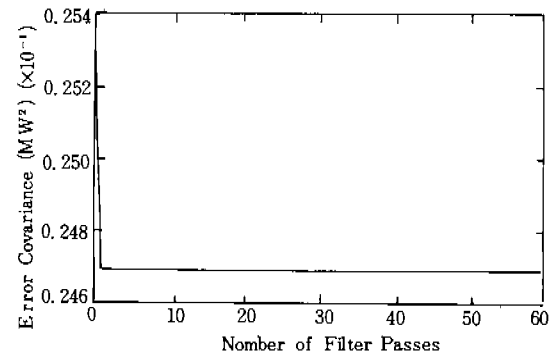
〈표 2〉 Comparison of Filter with Secondary Calorimetric

Test Name	Start Time	Kalman Power (MW)	Secondary Power (MW)	Difference (MW)
L8-2	00:33:46	46.4360	46.1986	0.2374
L8-2	06:47:37	47.0725	46.5428	0.5297
L8-1	04:34:57	43.4957	43.5297	-0.0340
L5-1	05:45:24	44.7439	44.6762	0.0677
L5-1	06:09:23	44.6760	44.5194	0.1566
L5-1	07:42:19	44.3897	43.6997	0.6900
L5-1	07:45:46	45.0968	44.6903	0.4063
L5-1	08:52:47	47.2434	46.6206	0.6228
L5-1	10:54:25	46.9832	46.2838	0.6994
L5-1	12:34:32	43.6725	43.7773	-0.1045
L5-1	12:56:08	43.6942	43.6261	0.0701
L5-1	13:07:06	43.3456	43.3156	0.03
BY-2	11:04:46	43.9523	43.7234	0.2289
BY-2	11:14:58	44.3543	44.1533	0.201
TP	04:47:28	37.8687	37.7361	0.1326

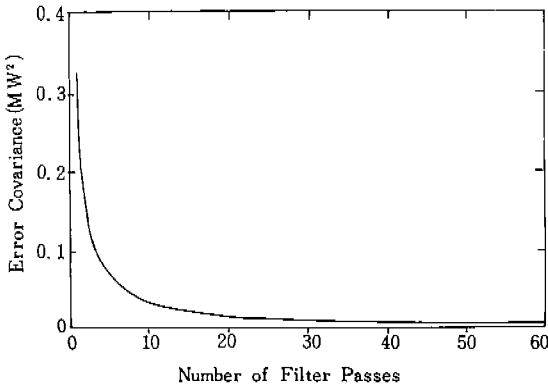
Sum of Differences = 3.9339MW
 Mean Difference = 0.2623MW
 Standard Deviation = 0.2647MW
 Maximum Difference = 0.6994MW



〈그림 4〉 Power Estimate Error With Perfect Data



〈그림 5〉 Power Estimate Error Due to Biases



〈그림 6〉 Power Estimate Error Due to Noise

$$+COV(E^3) + \dots \text{식에 대입 계산하면}$$

$$COV(\text{Power}) \leq 0.025 + 0.006 + 0.00014$$

$$= 0.031 \text{ MW}^2 \text{ 또는 } \sigma \text{Power} \leq 0.176 \text{ MW}$$

이는 5분내에 0.36MW ($2\sigma \text{Power}$)의 정확도로 熱出力을 취득할 수 있다는 것을 의미한다.

5. 結 論

Direct Identification方法에 의한 原子爐의 Parameter Estimation과 그에 따른 熱出力測定方法에 Kalman Filter를 適用, 誤差 및 經濟性分析 등의 技法을 適用함으로써 Kalman Filter의 固有의 特徵과 長點은 다음과 같다.

(1) 重要 特徵

○系統 및 計器 잡음을 제거하여 熱出力測定에 正確性을 기할 수 있다.

○모든 測定變數에 대해 가중함수(Weighting Function)를 統計的으로 결합하여 標準偏差가 큰 測定值에 대해서는 熱出力 계산시 덜 가중 적용되도록 한다.

○ON-Line, 실시간(Real-Time) 및 正常狀態, 過度狀態하에서도 적용할 수 있다.

○관련된 測定變數가 많으면 많을수록 참 熱出力(True Power)의 Uncertainty 값은 더욱

더 작아진다.

○Kalman Filter는 Transition 행렬의 計統 Model과 벡터의 測定 Model로 構成되는데 이들 Model은 Filter 이득값과 誤差 Covariance를 계산함으로써 해석되어 진다. 이 Model은 熱出力이 시간에 따라 변하더라도 正確한 熱出力을 계산할 수 있다.

(2) 長 點

○기존의 熱出力 測定方法에서는 適用되지 않는 原子爐 熱出力 Opri Data를 Filter에 포함시켜 測定 Bias에 의한 誤差를 減少시킬 수 있다.

○Kalman Filter는 出力 Data뿐 아니라 큰 計器 및 Data測定方法에 適用 가능하다.

○NIS교정을 Filter 결과에 따라 正確하게 할 수 있다.

○Sensitivity分析을 遂行하여 計器의 誤差發生을 줄일 수 있다. 특히, 原子力 發電所의 熱出力 測定誤差 한계에 비추어 볼 때 상업용 原子爐 수준에서 熱出力測定 正確度를 높이는 것은 運轉 여유증가에 따른 安全性 增大 및 經濟的으로도 많은 利得을 얻을 수 있다.

本 研究를 더욱 發展시키기 위해서는 다음과 같은 작업이 계속 遂行되어야 한다.

○正確한 Kalman Gain 計算을 위한 새로운 Estimation 理論이 適用

○Modeling의 正確度를 높이기 위한 많은 양의 實際出力 Data 分析

○實際 適用을 위한 Interface System의 開發 및 Numerical Processor의 導入

主給水 流量計測用 Venturi교정의 의미는 직접 실험을 통해 얻어지는 실제의 流量과 그 Venturi가 지시하는 差壓에 의해 計算되는 計算상의 理論 流量과의 차이를 보상에 주기 위한 배출상수 "C"값을 구하기 위함에 있으므로 Venturi교정기술을 適用 철저한 관리를 기하여야 한다.