

〈論 文〉

産業用 GAS 보일러의 動特性에 관한 研究(I)

임중한* · 이종원**

(1992년 1월 8일 접수)

A Study on the Dynamics Characteristics for Control of Gas-Fueled Industrial Gas Boiler (I)

Jong Han Lim and Jong Won Lee

Key Words : Drum Pressure(드럼 압력), Super-heated Steam Temperature(과급기 증기온도), Combustion Chamber Pressure(연소실 압력), Feed Water Temperature(급수온도), Heat Transfer Rate(열전달률)

Abstract

Boilers, which are considered to be one of the basic equipment in industry, consume large portion of nation's petroleum and their demand is growing everyday. In recent, the technology improvement in production of high efficiency boilers and their effective utilization is needed for design of boiler which steam condition is the large capacity of high temperature and high pressure. It is necessary that boiler control system be studied for high efficiency, high reliability and smooth operation. The control of drum pressure and water level particularly becomes an important task for greater accuracy with the avail ability of boiler operation. To achieve this aim, dynamic analysis of a boiler is accomplished by choosing a boiler as a model. Transfer function thus obtained is made a comparison of measurement with reckoning to technical design data. The results of comparison makes it possible to verify thermodynamical analysis on the dynamic behavior of the overall system.

기 호 설 명

A : 면적	S : 복합변수
CO_2 : 연소가스 중의 CO_2 함량	s : 엔트로피
C : 비열	T : 시간상수
h : 수위	t : 시간
i : 엔탈피	V : 체적
M : 질량유동	v : 비체적
m : 질량	Q : 온도
P : 압력	i' : 증기의 엔탈피
Q : 열량	i'' : 과열 증기의 엔탈피
r : 증발열	x : 증기량
	ρ : 밀도

*정회원, 경희대학교 대학원

**정회원, 경희대학교 기계공학과

oil : 연료
 ST : 증기
 SE : 절탄기에서 급수
 V : 체적
 BS : 증발장치
 P : 압력
 R : 관
 S : 비등상태
 s : 등엔트로피
 U : 순환
 W : 드럼급수
 SW : 급수
 ST : 증기
 WT : 보일러 총급수
 - : 불변수
 → : 벡터
 F : 드럼수위면 급수

1. 序 論

蒸氣보일러란 燃料를 燃燒시켜서 생긴 熱에 의하여 蒸氣를 發生하는 傳熱面을 갖춘 裝置이며, 보일러에서 發生한 蒸氣는 蒸氣터빈 또는 蒸氣熱 利用에서 作業流體로 사용되어 추진동력, 혹은 發展動力 및 熱로 이용하는 에너지원을 生産하는 原動所의 한 裝置이다. 19世紀에서 20世紀로 科學의 進歩와 더불어 使用되는 蒸氣의 高溫高壓化의 요구는 날로 增大하였다. 1930년대 처음으로 건설된 發電用 보일러는 小容量에 불과하였고 1950年代 中半에는 中容量火力이 많이 건설 되었으며 蒸氣條件이 100~170bar, 450~566°C, 原動所 效率 38~40%, 出力 125~375Mw, 1970年代에는 650°C 原動所 效率 40% 出力 450~1,000Mw, 1990年代에는 出力이 600~1,200Mw인 大容量의 原動所 效率 42%로 初期와 比較하여 三倍以上으로 增加하게 되었다.⁽¹⁾ 最近 보일러는 蒸氣條件이 高溫高壓이고 容量은 大型化 추세로 高壓보일러의 制御問題는 經濟的인 면에서나 安全的인 측면에서 또한 圓滑한 가동을 위해서도 매우 艱박한 현실에 놓여있다.⁽²⁾

現在의 보일러 燃料는 油의 주종을 이루었으나 천연가스의 개발이 활발해지면서 가스연료의 利用이 增加하고 있다. 가스 보일러의 燃燒室은 油보일러의 연소실에 비하여 그 容積이 상대적으로 크기 때문에 제어에 미치는 동특성에도 많은 문제

를 야기시킨다. 보일러에서의 負荷, 즉 蒸氣需要量의 變動에 대해 드럼의 水位變化와 壓力變化가 發生하더라도 대형사고를 예방하고 安全 운전을 위하여 신속하게 이들의 制御가 必要하게 되었다. 初期에 보일러 드럼은 大型이며 보일러 全體含有한 水量의 40% 이상을 차지하고 있어서 負荷變動에 그리 민감하지 않았으나, 現代 보일러는 大容量인데 비해 相對的으로 드럼이 小型이며 보일러 全體 水量의 10%에 불과하기 때문에 負荷變動에 따라 드럼水位가 신속히 制御되어야 한다.⁽³⁾ 보일러내에 燃料, 燃燒 空氣 및 給水가 들어가며 蒸氣 및 배기가스가 보일러로부터 外部로 나간다. 이들이 出入하는 에너지 및 物質 平衡을 유지 할때는 正常狀態가 지속되지만, 非正常狀態가 되면 보일러의 制御量인 드럼壓力, 드럼水位등이 變化하므로 이 變動量을 設定値로 되돌리기 위하여 操作量인 燃料量, 空氣量, 給水量을 調節해야 한다. 드럼 壓力의 增加나 감소로 인하여 드럼水位 變化가 일어나는 것은 자명한 사실이며, 만일 水位가 增加하면 鍋爐기 내의 물의 일부가 乾飽和蒸氣와 함께 휩쓸려 들어가 鍋爐기 관내면이 부식되어 過熱 原因이 되고, 수위가 減少하면 강수관에서 물의 자유유동이 저지되어 물순환이 攪亂되기 때문이다. 따라서 本論文에서는 産業用 가스전소자연순환보일러를 모델로 선정하여 이 모델에 영향을 주는 인자에 대하여 動的 解析을 하였다. 水位와 壓力을 연결한 自然循環 보일러의 制御를 위한 총괄적인 블록 선도를 提示하였고, 이 선도를 토대로 전산프로그램을 개발하고 計算値와 실제 측정치를 비교, 검토하여 이론 해석상의 모순이 없음을 확증하였다. 연구결과를 産業용 자연순환 gas 보일러의 설계에 응용하도록 하여 보일러의 동특성을 제시하고 이것에 의한 制御시스템의 신속하고 精確한 설계치를 제시하여 응용사용토록 하여 무엇보다도 전보일러시스템의 안전운전과 경제성(제작비 및 가동비)을 제고하는데 있다. 本論文을 제1부, 제2부로 나누어 發表해야 하므로 제1부는 結論을 포함시키지 못하며 제2부에서 결론을 제시하겠으니 참조하여 주시기 바랍니다.

2. 自然循環보일러의 多變數시스템

多變數시스템이란 多數의 入力과 多數의 出力을 갖는 시스템을 意味한다. 自然循環보일러의 入·出

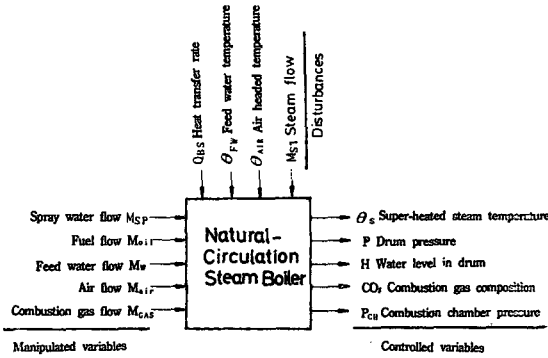


Fig. 1 General schematic block diagram of manipulated controlled variables and disturbances on natural-circulation Gas boiler system

力 그리고 外亂變數들이 서로 相互 影響을 複合的으로 作用하면서 正常狀態와 非正常狀態에서 하나의 全體의인 多變數 시스템을 형성한다. (3,4)

作業量, 制御量, 外亂의 세 變數들 사이의 複合的인 相互關係에 대한 作用方向을 Fig. 1에 圖示하였다. 이 操作量, 制御量 그리고 外亂들의 全 變數에 대해 相互影響을 動的 解析을 하고 制御를 하기에는 너무나 複雜하여 어떤 變數는 보일러에 매우 큰 影響을 미치나, 어느 變數는 무시할 수 있을 정도로 극히 작은 影響을 미치는 變數들로 구성된 函數도 있다.

우선 이 세가지 變數들의 特徵을 고찰해 보자.

外亂 (Disturbance)

① 熱量外亂 (Q_{BS}), ② 給水溫度 (Q_{FW}), ③ 燃燒空氣溫度 (θ_{air}), ④ 蒸氣量 (M_{ST}) 操作量 (manipulated variables)

① 噴射量 (M_{SP}), ② 燃料量 (M_{oil}), ③ 給水量 (M_w), ④ 燃燒 가스량 (M_{gas}) 制御量 (controlled variables)

① 蒸氣溫度 (steam temperature) θ_{ST} ② 蒸氣壓力 (steam pressure) P

③ 드럼水位 (water level in drum) h ④ CO_2 (combustion gas composition)

⑤ 연소실압력 (combustion chamber pressure)

P_{ch}

制御特性을 고려하여 制御시스템을 連結시스템 (coupling system)과 自然循環蒸氣시스템 (natural circulation system)으로 구분되며 이 두부분을 조합하면 하나의 全體의인 制御시스템이 된다. 外亂

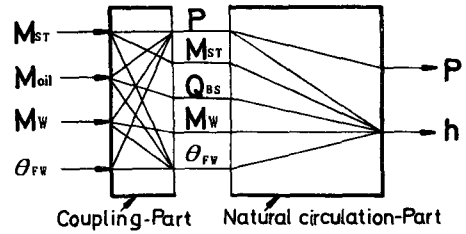


Fig. 2 Schematic block diagram of pressure control and water level control in the drum on natural circulation Gas boiler system

入力變數 M_{ST} 와 θ_{FW} 는 操作量 變數와 같이 制御 시스템에 外亂影響을 주는 因子들이므로 M_{Gas} , M_w 와 함께 연결 System의 入力變數가 된다. 또한 自然循環蒸氣 시스템의 入力變數들은 壓力 P , 蒸氣流量 M_{ST} , 蒸發器의 熱量 Q_{BS} , 給水量 M_w , 給水溫度 θ_{FW} 가 된다. 이러한 入力變數들에 의하여 드럼水位 h 와 壓力 P 가 最終的으로 影響을 미치게 된다.

Fig. 2에 圖示된 바와 같이 드럼水位 (h)는 5개의 變數에, 壓力 P 는 4개의 入力變數에 影響을 받으며 보일러 시스템을 형성함을 알 수 있다. 이와 같이 입력변수에 의하여 드럼水位 h 와 壓力 P 가 制御되는데 多變數入力에 의한 制御의 傳達函數는 다음과 같다.

① 水位制御 傳達函數

$$F(S) : F(S) : F(S) : F(S) : F(S)$$

$$\bar{P} \rightarrow \bar{h} \quad \bar{M}_{ST} \rightarrow \bar{h} \quad \bar{Q}_{BS} \rightarrow \bar{h} \quad \bar{M}_w \rightarrow \bar{h} \quad \bar{\theta}_{FW} \rightarrow \bar{h}$$

② 壓力制御 傳達函數

$$F(S) : F(S) : F(S) : F(S) :$$

$$\bar{M}_{ST} \rightarrow \bar{P} \quad \bar{M}_{oil} \rightarrow \bar{P} \quad \bar{M}_w \rightarrow \bar{P} \quad \bar{\theta}_{FW} \rightarrow \bar{P}$$

이들 전달함수는 시간 (t)의 함수로 나타내며 총괄적인 블록선도를 構成하고 要求하는 설정치로 調節하여 制御를 하게 된다.

위 水位制御와 壓力制御 傳達函數로 구한 계산치와 측정치를 比較 檢討하여 理論的인 解析相의 矛盾이 없음을 立證하고자 한다.

3. 理論 解析에 대한 背景

動的 解析은 일반적인 代數學的 解析 (方法 I)과 熱力學的 解析 (方法 II)로 나누어 전개했다. (方法 II 및 전체의 결론은 연구 제 2에 수록함.) 方法 I은 熱力學的 상태과정은 고려하지 않고 처음, 최

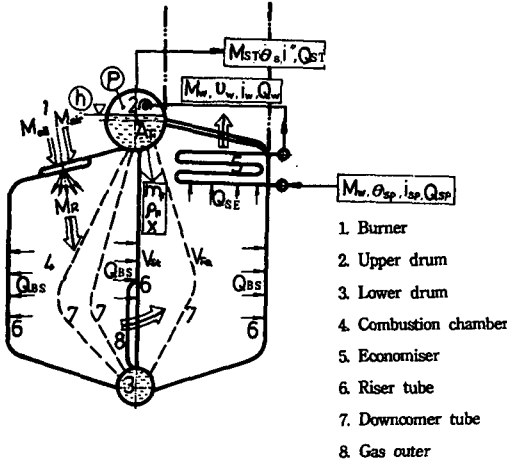


Fig. 3 Scheme of water level control for natural circulation boiler

중상태만 해석했고, 方法 II는 보일러의 蒸氣시스템에 대해 作業流體의 狀態變化를 고려하여 보다 精確하게 解析하였다.

前者는 測定값과 比較하였을 때 오차가 발생하는 단점이 있으나 용이하게 해석할 수 있고, 後者는 해석상 복잡하나 精確성을 기할 수 있다. 水位의 動的解析은 方法 I, II를 壓力의 動的解析은 方法 II를 사용했다. Fig. 3은 自然循環蒸氣보일러의 概략도이다.

터어빈에서 나온 응축된 給水量 M_{SE} , 給水엔탈피 i_{FW} , 熱量 θ_{FW} 로 燃料기로 들어간 給水는 가스 통로를 지나는 餘熱에너지를 받아 M_w, θ_w, i_w 상태로 된 다음 上部 드럼으로 給水된다. 給水는 강수관을 통하여 下部 드럼으로 循環되고 이때는 熱交換이 이루어지지 않는다. 下部 드럼에서 승수관을 통하여 循環도리때 熱燒室에서 연소된 연소가스로 부터 열량 Q_{BS} 를 받는다. 이때 승수관 내부에 ☆이 발생하고 氣泡가 形成되어 상부 드럼에서 濕蒸氣로 된다. 이때의 蒸氣狀態 $M_{ST}, \theta_{ST}, Q_{ST}$ 가 과열기로 들어가 에너지를 받고, 過熱蒸氣狀態 $M_{ST}, \theta, i, Q_{sup}$ 로 터어빈으로 들어간다. 이때 순환되는 물의 질량을 m_F , 밀도를 ρ_F 이며, 드럼내에서 드럼水面의 면적 A_F , 체적은 V_F 라 한다.

3.1 일반적인 대수학적 해석에 의한 水位의

傳達函數-方法 I

燃料기에서 給水量이 M_{SE} , 이때 가열열량이 Q_{SE} 이다. 이 蒸發시스템에서 狀態變化에 따른 水位制

御를 위한 基本 方程式은 다음과 같이 誘導한다. 물의 질량 m_F 의 變化는 질량평형으로부터

$$\frac{dm_F}{dt} = M_w(t) + M_{SE}(t) - M_{ST}(t) \tag{1}$$

正常狀態下에서는 時間에 따른 質量流動變化는 없으므로

$$\bar{M}_w(t) + \bar{M}_{SE}(t) - \bar{M}_{ST}(t) = 0 \tag{2}$$

시간에 따른 각각의 質量流動變化는 正常狀態의 質量과 微小質量變化와의 合이므로,

$$M_w(t) = \bar{M}_w + \Delta M_w = M_w \tag{3}$$

$$M_{ST}(t) = \bar{M}_{ST} + \Delta M_{ST}$$

식 (1)에 의해서

$$\frac{dm_F}{dt} = \bar{M}_w + \Delta M_w + \bar{M}_{SE} + \Delta M_{SE} - \bar{M}_{ST} + \Delta M_{ST}$$

$$\frac{dm_F}{dt} = \Delta M_w - \Delta M_{SE} - \Delta M_{ST} \tag{4}$$

發熱시스템의 에너지 공급으로 인한 전체에너지의 단위시간당 에너지의 變化도 質量平衡과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \Delta Q_{BS} + \Delta Q_w + \Delta Q_{SE} - \Delta Q_{ST} \\ &= Q_{BS} - \Delta M_{ST} i'' \end{aligned} \tag{5}$$

윗식은 에너지의 변화의 미분 방정식이다.

식(4)와 식(5)를 線形化하기 위해 熱量 Q 에 대해 각각의 인자들을 정리하면

$$\begin{aligned} \Delta Q_w &= \bar{i}_w \Delta M_w + \bar{M}_w \Delta i_w \\ \Delta Q_{SE} &= \bar{i}'' \Delta M_{SE} \\ \Delta Q_{ST} &= M_{ST} \Delta i'' \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 만약의 경우 엔탈피의 변화가 주어질때는 윗식에 아래와 같은항을 추가할 수 있다. $\Delta i'' M_w, \Delta i'' M_{ST}$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \Delta Q_{BS} + \Delta M_w \bar{i}_w + \Delta i_w \bar{M}_w - \Delta M_{SE} \bar{i}'' \\ &\quad - \Delta i'' \bar{M}_{SE} + \Delta M_{ST} \bar{i}'' + \Delta i'' \bar{M}_{ST} \end{aligned}$$

보일러의 증발부분의 물의 질량 m_F 가 갖는 에너지

$$E = m_F \cdot i_F = m_F \{ (1-x) i' + x i'' \} \tag{7}$$

질량 m_F 변화에 의한 에너지의 시간 변화율

$$\frac{dE}{dt} = \bar{m}_F \cdot \frac{di_F}{dt} + \bar{i}_F \frac{dm_F}{dt} \tag{8}$$

드럼水面의 면적 A_F 는 구조상의 제한 때문에 거의 일정하게 밖에 할 수 없으므로 드럼수위는 飽和水の 體積變化 ΔV_F 에 기인하게 된다.

$$E = m_F \cdot i' \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{dm_F}{dt} \bar{i}' + \frac{di'}{dt} \bar{m}_F \\ &= \frac{dm_F}{dt} \bar{i}' + \left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \cdot \frac{dP}{dt} \bar{m}_F \end{aligned} \quad (10)$$

微分係數 $\left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t$ 는 時間不變의 항으로 壓力變化에 대한 엔탈피변화의 관계이다.⁽⁹⁾

$$\Delta \rho_F = \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial (\Delta P)} \right)_t \cdot \Delta \dot{P} \quad (11)$$

여기서

$$\Delta h = \frac{1}{\bar{\rho}_F \cdot \bar{A}_F} \cdot \Delta m_F - \frac{\bar{m}_F \cdot \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial (\Delta P)} \right)_t}{\bar{\rho}_F^2 \cdot \bar{A}_F} \cdot \Delta \dot{P} \quad (12)$$

즉, 水位變化는 질량변화와 壓力變化速度에 기인함을 알 수 있다. 이제 水位變化에 影響을 주는 인자 蒸氣量 M_{ST} , 급수량 M_W 와 M_{SE} , 열량 Q_{BS} , 급수온도 θ_w , 시스템壓力 P 들의 壓力變化速度 $\Delta \dot{P}$ 를 구하고 식(12)에 대입하면 水位變化에 대한 미분방정식이 된다.

3.2 蒸氣流量外亂 ΔM_{ST}

制御係의 조정에 고나한 變數關係는 다음과 같이 設定한다.

假定條件, $\Delta M_W ; \Delta Q_{BS} ; \Delta M_{SE} ; \Delta i_w = 0,$

$$\Delta M_{ST} ; \Delta P \neq 0, \Delta i'' = 0$$

$$\text{식 (4) : } \frac{dm_F}{dt} = -\Delta M_{ST}, \Delta m_F = -\int \Delta M_{ST} dt$$

$$\text{식 (5) : } \frac{dE}{dt} = -\Delta M_{ST} \bar{i}''$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dm_F}{dt} \bar{i}' + \left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \cdot \frac{dP}{dt} \cdot \bar{m}_F$$

식(5)와 식(10)을 等致시키면 수위변화에 대한 미분 방정식이 된다.

$$\Delta \dot{P} = \frac{(\bar{i}'' - \bar{i}')}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \bar{m}_F} \Delta M_{ST} \quad (13)$$

$$\Delta h = \underbrace{-\frac{1}{\bar{\rho}_F \bar{A}_F} \int \Delta M_{ST} dt}_{A_D} + \underbrace{\frac{\bar{m}_F \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial (\Delta P)} \right)_t}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F} \Delta M_{ST}}_{B_D} \quad (14)$$

식(14)를 미분하면

$$\Delta \dot{h} = -\bar{A}_D \Delta M_{ST} + \bar{B}_D \Delta \dot{M}_{ST} \quad (15)$$

여기서 \bar{B}_D 의 값에 의하여 격임후의 평형값을 설명하여 주고 있다.

$$\bar{B}_D = \frac{\bar{\gamma} \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial (\Delta P)} \right)_t}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F}$$

水位의 上昇을 調整하는데 A_D 의 상승한 값으로 그 양을 표시한다.

$$\bar{A}_D = -\frac{1}{\bar{\rho}_F \bar{A}_F}$$

식(15)을 Laplace 變換하여 蒸氣流量變化에 대한 水位의 傳達函數는

$$\frac{F(S)_{ST}}{M_{ST} \rightarrow h} = \frac{-\bar{A}_D + \bar{B}_D S}{S}$$

Unit step function으로 입력신호를 주었을때 출력신호는

$$h = -A_D t + B_D$$

3.3 給水流量外亂, ΔM_W

水面上, 下部의 壓力變化速度는

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(\bar{i}' - \bar{i}_w)}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P} \right)_t \bar{m}_F} \Delta M_W = \Delta \dot{P}_{W1} \quad (16)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\Delta \dot{P}_{W2}$$

(1) 水面下部의 給水變化

假定條件: $\Delta Q_{BS} ; \Delta M_{SE} ; \Delta i_w ; \Delta i'' = 0,$

$$\Delta P = 0, \Delta M_D \neq 0$$

보일러 드럼내의 압력은 蒸氣흐름의 變化에 의하여 平衡을 維持한다. 그것은 급수의 변화에 따른 蒸發量의 變化로 인하여 變化된 압력을 調整하여 짐을 考慮해야한다.

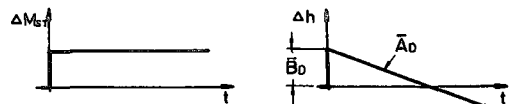


Fig. 4 Transient response for steam flow disturbance

$$\Delta \dot{P}_{w1} = \frac{(\bar{i}' - \bar{i}_w)}{\left(\frac{\partial \bar{i}''}{\partial P}\right)_t \bar{m}_F} \Delta M_w$$

식(4), 식(5), 식(8.1)로부터

$$\frac{dm_F}{dt} = \frac{(\bar{i}'' - \bar{i}_w)}{\bar{i}'' - \bar{i}'} \Delta M_w = \bar{k}_2 \Delta M_w$$

적분하면

$$\Delta m_F = \bar{K}_2 \int \Delta M_w dt$$

수면하의 급수상태에서의 냉각에 의한 계수 K_2 는 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$\bar{K}_2 = \frac{(\bar{i}'' - \bar{i}_w)}{\bar{\gamma}} > 1$$

이것은 보일러에 채워진 무량이 양의방향으로 빨리 변화함을 뜻한다. 蒸氣 흐름의 감소와 증가는 증발 부분의 열량 공급에 따른 증발의 신속성여부와 증발량의 대소에 크게 영향을 미친다.

$$\Delta h_{w1} = \underbrace{\frac{(\bar{i}'' - \bar{i}_w)}{\bar{\gamma} \bar{\rho}_F \bar{A}_F}}_{A_{w1}} \int \Delta M_w dt + \underbrace{\frac{(\bar{i}' - \bar{i}_w) \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \Delta P}\right)_t}{\left(\frac{\partial \bar{i}''}{\partial P}\right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F}}_{B_{w1}} \Delta M_w \quad (17)$$

$$\Delta \dot{h}_{w1} = \bar{A}_{w1} \Delta M_w - \bar{B}_{w1} \Delta \dot{M}_w$$

급수의 교란에 의한 수위의 전달함수는 앞식에 의해서 주어진다.

$$\frac{F(S)}{M_w \rightarrow h} = \frac{\bar{A}_{w1} - \bar{B}_{w1} S}{S} \quad (18)$$

여기서

$$\bar{B}_{w1} = \frac{(\bar{i}' - \bar{i}_w) \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \Delta P}\right)_t}{\left(\frac{\partial \bar{i}''}{\partial P}\right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F}$$

$$\bar{A}_{w1} = \frac{(\bar{i}'' - \bar{i}_w)}{\bar{\gamma} \bar{\rho}_F \bar{A}_F}$$

(2) 드럼水位面 上部에서 給水變化

드럼水位面 上部에서 給水되므로 드럼 상부의 蒸氣실의 蒸氣가 급수에 의하여 冷却되고 이 原因에 의하여 瞬間적으로 壓力降下가 發生하게 된다. 식(12)에 의해

$$\Delta \dot{P}_{w2} = \frac{(\bar{i}' - \bar{i}_w)}{\left(\frac{\partial \bar{i}''}{\partial P}\right)_t \bar{m}_F} \Delta M_w$$

가 되고 앞절의 계산 방법과 같이 유도하면 微分方程式을 얻을 수 있다.

$$\Delta \dot{h}_{w2} = \bar{A}_{w2} \Delta M_w + \bar{B}_{w2} \Delta \dot{M}_w \quad (19)$$

따라서 傳達函數는

$$\frac{F(S)}{M_w \rightarrow h} = \frac{\bar{A}_{w2} + \bar{B}_{w2} S}{S} \quad (20)$$

3.4 熱量外亂 ΔQ_{BS}

(1) 熱量外亂의 特性

蒸發 加熱量外亂이 양의값에 대해서 壓力變化速度는 음의 값으로 정하고 昇水管壁의 온도는 증가하고 따라서 수위도 상승한다.

假定條件: $\Delta M_w; \Delta M_{SE}; \Delta i_w; \Delta i'' = 0$

$$\Delta P = -, \quad E P F M_{ST} = 0$$

$\Delta M_{ST} \neq -$ 의 假定은 M_{ST} 의 變化에 대하여 恆常 壓力의 平衡狀態를 維持하도록 영향을 미치기 때문이다. 식(5)와 식(7)을 變形하면 다음식을 얻는다.

$$\frac{dm_F}{dt} = - \frac{1}{(\bar{i}' - \bar{i}')} \Delta Q_{BS} = - \bar{K}_4 \Delta Q_{BS} \quad (21)$$

앞의 前提들은 다음 사항을 說明해 주고있다. 즉 추가 加熱量 ΔQ_{BS} 는 드럼의 壓力增加 ΔP 를 意味한다. 이것은 蒸氣量의 增加量 ΔM_{ST} 는 관수량 (m_F)가 줄어들음을 의미한다.

$$\Delta m_F = - \bar{K}_4 \int \Delta Q_{BS} dt \quad (22)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{\bar{\gamma}} < 1 \quad (23)$$

관수 Δm_F 의 微小量 變化는 더 많은 加熱量 ΔQ_{BS} 를 필요로 한다. 여기에서는 $\Delta P = 0, \Delta M_{ST} = 0$ 이므로 따라서 $\Delta m_F = 0$ 이다.

식(22), 식(23)을 식(12)에 대입하여 미분하면

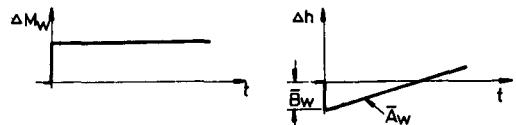


Fig. 5 Transient response for feed water flow disturbance

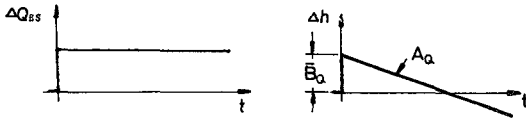


Fig. 6 Transient response for heat transfer rate disturbance

$$\Delta h Q = -\frac{1}{\bar{\gamma} \bar{\rho}_F \bar{A}_F} \int \Delta Q_{BS} dt + \frac{\left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \Delta P}\right)_t}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P}\right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F} \Delta Q_{BS}$$

$$\Delta \dot{h} Q = -\dot{A}_Q \Delta Q_{BS} + \bar{B}_Q \Delta \dot{Q}_{BS}$$

$$\frac{F(S)_{Q_{BS} \rightarrow h}}{Q_{BS} \rightarrow h} = \frac{\bar{A}_Q - \bar{B}_Q S}{S} \quad (24)$$

여기서 係數 \bar{B}_Q 는 드럼위 水位를 위하여 加熱量의 變動에 따라 決定할 수 있다.

$$\bar{B}_Q = \frac{\left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \Delta P}\right)_t}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P}\right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F}$$

平衡을 維持하지 않는 狀態에서 성립되며

$$\bar{A}_Q = \frac{1}{\bar{\gamma} \bar{\rho}_F \bar{A}_F}$$

3.5 給水溫度外亂 $\Delta \theta_w$

(1) 드럼수위면 A_F 하부에서의 급수

假定條件: $\Delta M_w : \Delta M_{SE} : \Delta Q_{BS} : \Delta i'' = 0$

$$\Delta \theta_w : \Delta M_{ST} \neq 0, \Delta P = 0$$

위의 假定은 다음과 같은 前提하에서 취해진 것이다. 蒸氣量의 變化에 따라서 드럼내의 壓力 P 가 變化하고 給水시 給水量의 變化에 의해서 압력 P 가 原狀態로 調整되고 또한 급수온도의 攪亂등에 의해서 다시급 압력이 순간적으로 平衡을 이루기 때문이다.

식(4)와 식(8)은 變形하면

$$\frac{dm_F}{dt} = -\frac{\bar{M}_w}{(i'' - i')} \Delta i_w \quad (25)$$

여기서 $\Delta i_w = C_{PW}(\theta) \Delta \theta_w$ 이며 $P = \text{Constant}$ 인 경우에 성립한다.

熱量外亂으로 給水溫度는 變化하므로 瞬間적으로 發生하는 蒸氣量도 變化한다. 양의 給水溫度變化, ΔQ_w 에 대해 보다 빨리 증발이 始作되고 수위는 減少한다. 식(12)에 의해서 이들을 대입하여 정

리하면

$$\Delta h_{\theta 1} = \frac{\bar{M}_w \bar{C}_P(\theta)}{\bar{\gamma} \bar{\rho}_F \bar{A}_F} \int \Delta Q_w dt + \frac{\left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \Delta P}\right)_t \bar{M}_w \bar{C}_P(\theta)}{\left(\frac{\partial i'}{\partial P}\right)_t \bar{\rho}_F^2 \bar{A}_F} \Delta \theta_w \quad (26)$$

$$\Delta \dot{h}_{\theta 1} = -\bar{A}_\theta \Delta \theta_w + \bar{B}_\theta \Delta \dot{\theta}_w \quad (27)$$

전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{F(S)_{\theta 1}}{\theta_w \rightarrow h} = \frac{-\bar{A}_\theta + \bar{B}_\theta S}{S} \quad (28)$$

(2) 드럼水面 上部에서의 給水

식(12)에 대입하여 同一한 方法으로 유도하면

$$\Delta \dot{h}_{\theta 2} = -A_\theta \Delta \theta_w + \bar{B}_\theta \Delta \dot{\theta}_w \quad (29)$$

전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{F(S)_{\theta 2}}{\theta_w \rightarrow h} = \frac{-\bar{A}_\theta + \bar{B}_\theta S}{S} \quad (30)$$

(3) 部分蒸發에 대한 給水

普通給水는 $\Delta M'_w = \Delta(M_w + M_{SE})$ 로 결합하여 변화한다.

給水溫度變化 $\Delta \theta_w = \Delta \theta_{ST} = 0$

假定條件, $\Delta Q_{BS} : \Delta i'' = 0 ; \Delta P = 0 ; \Delta M_{ST} \neq 0$

同一 정상부하하에서 절단기 내에서 일부 증발된 蒸氣량이 약 7~12% 정도일때 이것에 의하여 蒸氣중의 물의 무게나 에너지의 일부가 거의 무시할 만큼 變한다. 따라서 다음과 같이 가정한다.

$$\Delta M_{SE} = 0 \text{ 여기서 } \bar{\theta}_w = \bar{\theta}_{ST}, \bar{i}_w = \bar{i}' \text{로 한다.}$$

식(4), (5), (8)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta M'_w \bar{i}' + \left(\frac{dm_F}{dt} - \Delta M_w\right) \bar{i}'' - \frac{dm_F}{dt} \bar{i}' = 0$$

$$\frac{dm_F}{dt} = \Delta M'_w \quad (31)$$

M'_w 는 給水流量이며 급수 엔탈피 $\bar{i}_w = \bar{i}'$ 이다. 이것은 압력의 평형을 위하여 蒸氣量의 流動이 필요하다. 蒸氣流量變化에 대해 $\Delta P = 0$ 이므로

$$\Delta m_F = \int \Delta M'_w dt \quad (32)$$

$$\Delta h_{SE} = \frac{\Delta m_F}{\bar{\rho}_F \cdot \bar{A}_F} = \frac{1}{\bar{\rho}_F \cdot \bar{A}_F} \int \Delta M'_w dt \quad (33)$$

$$\Delta \dot{h}_{SE} = \bar{A}_{SE} \Delta M'_w \quad (34)$$

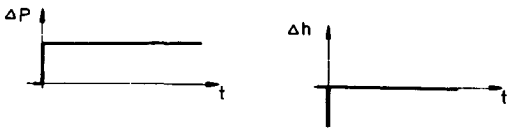


Fig. 7 Transient response for pressure disturbance

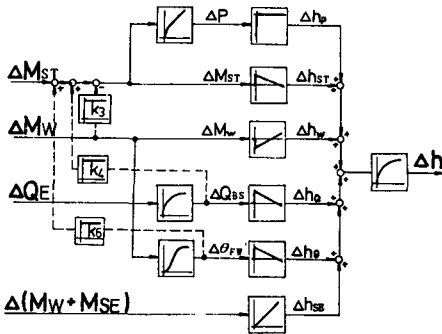


Fig. 8 Block diagram of positive input signal for water level control-method I

$$F(S)_{SE} \frac{\Delta h}{\Delta M_w} = \frac{\bar{A}_{SE}}{S} \quad (35)$$

3.6 드럼 壓力外亂 ΔP

지금까지는 蒸發시스템에서 각 外亂에 대해 水位變化의 傳達函數를 구했다. 이제 드럼 壓力에 대한 水位의 전달함수를 구해보자.

假定條件, $\Delta M_{ST} ; \Delta M_w ; \Delta M_{SE} ; \Delta i_w ; \Delta i'' = 0$

$$\begin{aligned} \frac{dm_F}{dt} = 0 \text{ 식 (12)에서} \\ \Delta h_P = - \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial (\Delta P)} \right)_t \bar{m}_F \Delta P \\ \Delta h_P = - \bar{B}_P \cdot \Delta \dot{P} \end{aligned} \quad (36)$$

微分하고 Laplace變化시켜서 전달함수를 구하면

$$F(S)_{LP} = -B_P \cdot S$$

3.7 總括적인 블록선도

지금까지 水位變化에 影響을 주는 각각의 外亂因子에 대해 전달함수를 구했다. 이 전달함수를 토대로 總括적인 블록 선도를 그리면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

4. 結 論

産業用 GAS전소 自然循環보일러를 모델로 선정

하여 드럼수위제어 및 壓力制御를 위한 動的 解析을 하였다. 操作量인 蒸氣量 M_{ST} , 燃料量 M_{oil} 給水量 M_w 및 給水溫度 θ_{FW} 를 入力信號로 하고 制御量인 드럼 水位 h 와 壓力 P 를 出力信號로 하는 전달함수로 構成된 시스템으로 방대한 制御시스템을 單純化시켰고, 이 시스템에 外的 影響을 주는 주된 因子가 蒸氣量 M_{ST} 와 연료량 M_{oil} 임을 알 수 있었다.

그리고 蒸發部の 壓力과 水位變化를 制御하기 위하여 蒸發시스템에서 狀態變化에 따라 유도한 基本方程式을 토대로 代數學的인 方式(方法 I)과 熱力學的인 方式(方法 II)으로 각각을 해석하였다.

水位變化에 주로 影響을 주는 外亂變數 蒸氣量 M_{ST} , 給水量 M_w , 熱量 Q_{BS} , 壓力 P 에 대해 方法 I과 方法 II로 區分하여 각각의 傳達函數를 구했다.

方法 I : 이 外亂들이 複合하여 作用하는 總括적인 Block 선도를 Fig. 8에 제시하였다. 이 解析은 熱力學的 狀態變化 過程을 考慮하지 않고 처음과 最終狀態만을 考慮하여 解析한 方式으로 測定값과 比較했을 때 方法 II에 비하여 많은 誤差가 發生하였으나 간단하고 용이하게 해석할 수 있었다. 方法 II에 대한 說明 및 壓力에 대한 動的 解析 및 電算 프로그램은 차후의 研究 (II)에 發表 예정입니다.

참고문헌

- (1) Dukelow, S.G., "Boiler Controls," ISA. Trans., Vol. 15, No. 1, p.3.
- (2) Janes, A.B., 1961, "Hydrodynamic Stability of Boiling Channel," KAPV-2170, Oct.
- (3) Lecrique, M., Tessier, M., Rault, A. and Testud, J.L., 1978, "Multivariable Control of a Steam Generator Characteristics and Results," VII, IFACCONGRESS, pp. 73~80.
- (4) Maujean, J.M., 1979, "Advanced Control of a Real Power unit," Trans. ASME, pp. 715~722.
- (5) Isermann, R. und Eichner, M., 1968, "Über Die Lstabhängigkeit Der Damfemper Aturregung Des Mehrgro En-regelsystems," Trommel-kessel, pp. 453~459.
- (6) Chien, K.L., Ergin, E.I., Ling, C. and Allynless. Anaheim, Calif, 1958, "Dynamic analysis of Boiler," Trans. ASME, Now., pp. 1809~1819.

- (7) Thomas, M., "Regelunstechnik 1 und 2, Vorlesungen in der Abt," E-Technik, Tu, Hannover. pp. 88-107
- (8) Tai-seng, Chen., und John, W. Schwrtzenberg., 1964, "Casecade and model Control Methods for Superheater Temperature Control," ISA. Transactions, Vol. 3, Oct. pp. 334~341.
- (9) Profos, P., 1962, "Die Regelung von Damptanlagen," Springer.
- (10) Gorez, R., 1972, "Design of an Optimal Temperature Controller in a Nuclear Power Plant," IFAC Control Science and Technology 8th, pp. 3159~3164.
- (11) Eklund, K. and Gustausson I., 1970, "Identification of Drum Boiler Dynamics," IFAC Symp. pp. 88-107
- (12) Nahavandi, N, and Batenburg, A., 1960, "Steam Generator Water-level Control", Trans. ASME, pp.343~354
- (13) Vchida, M, Nakamura, H. and Kawai K., 1973, "Application of Linear Power Plant Control," IFAC Control Science and Technology 8th, pp. 3033~3038.
- (14) Ogata., 1970, "Modern Control Engineering", Prentice Hall Inc.
- (15) Nanakorn, S, and Anderson, M., 1975, "An analysis and Comparison of Certain Loworder Boiler Models," ISA Trans. vol. 14, No. 1, pp. 17~23.