

# 디젤機關의 傳達函數測定 方法에 關한 研究

盧 彰 注

## A Study on the Identification Method of Transferfunction of a Diesel Engine

No Chang Joo

### 目 次

1. 序 論	3. 實驗 및 結論
2. 本 論	4. 結 論
2.1 調速機의 傳達函數	附 錄
2.2 機關의 傳達函數	參考文獻
2.3 廻轉系統의 傳達函數	

### Abstract

In this paper, the transfer function that is indispensable for analyzing the speed characteristics of the diesel engine is obtained in a simple method without using the complicated experimental apparatus and the analogue computer.

Whole speed control system is divided into three parts governor, engine, and rotator.

(1) Governor: Under the condition of the engine driven in rated speed by external power the displacements of rack are recorded and the gain and transferfunction of the governor are determined from the recorded curve.

(2) Engine: The gain of the engine is determined by the ratio of output power to rack displacement which controls the amounts of fuel oil injected.

(3) Rotator: The equivalent viscositious friction coefficient of the rotator is determined from the speed rise curve when the loads are reduced with the rack motion sticked.

Moment of inertia of the ratator is calculated from speed retarding curve when the fuel oil suddenly cut out.

The whole block diagram of the speed control system of the diesel engine is completed with the above three elements.

## 1. 序 論

오늘날 디젤 發電機가 船舶을 비롯하여 一般工場의 非常·自家發電機로 널리 利用되고 있는 理由は 數百KW 以下の 發電用으로는 compact 型으로된 便利한 發電裝置이기 때문이다. 그러나 이 發電機는 주로 他電源과 聯繫되지 않고 單獨으로 電力을 供給하기 때문에 速度 變動率이크고 整定 時間이 길어서 問題로 되고있다.

船舶에서는 위에서 말한 缺點에서 오는 被害를 줄이기 위해 需用電力보다 훨씬 큰 約2倍 容量의 發電機를 設置하고 있는 實情이다<sup>1)</sup>. 또 最近 디젤엔진의 平均 有効壓力 上昇, 廻轉 速度 增加 등으로 엔진의 크기가 작아지는 경향으로 말미암아 速度 變動率은 더욱 커져서 深刻한 問題점으로 擡頭되고 있다<sup>2)</sup>.

筆者는 이 點에 着眼하여 디젤 엔진의 速度 特性을 研究하는 데 必要한 가장 適合한 傳達 函數를 求하기로 한다.

엔진의 速度特性에 影響을 주는 要素(parameter)數는 상당히 많아 어느 部分에 重點을 두느냐에 따라, 엔진의 類類에 따라 傳達函數가 다르게 나온다.

傳達函數에 依한 엔진의 速度를 비롯한 諸特性 解析法은 이미 여러 사람들에 의해 試圖되었다<sup>2)-5)</sup>. 한편 엔진의 速度特性에 가장 主된 因子는 調速機 特性이고 이것에 關한 研究結果는 많이 發表 되어있다<sup>6)-11)</sup>. 이런 方法들은 巨大한 測定施設에 여러가지 裝置가 動員되었지만 小型 디젤 發電機를 對象으로 하여 簡單한 方法으로 調速機를 包含한 엔진의 全廻轉系統에 對한 傳達函數를 求한 研究結果는 아직 發表된바가 없다.

筆者는 運轉中인 發電機의 데이터로부터 各要素의 傳達函數를 求하는 方法을 提示하고 例로서는 本 大學에서 使用中인 caterpillar 發電機를 모델로 選定하여 이것의 傳達函數를 求해 보기도 한다.

그리고 本 研究를 爲해서 다음의 몇가지 假定을 세운다.

1) 廻轉數의 設定值 및 負荷 廻轉力의 變化는 標準狀態에서 微小히 變하고 標準狀態인 動作點 近傍에서는 各要素의 非線型性은 線型化한다.

2) 엔진의 燃燒狀態는 負荷의 大小에 關係없이 一定하고 大氣壓, 外氣溫度, 濕度, 燃料의 性質 등 諸般條件은 變化없는 것으로 본다.

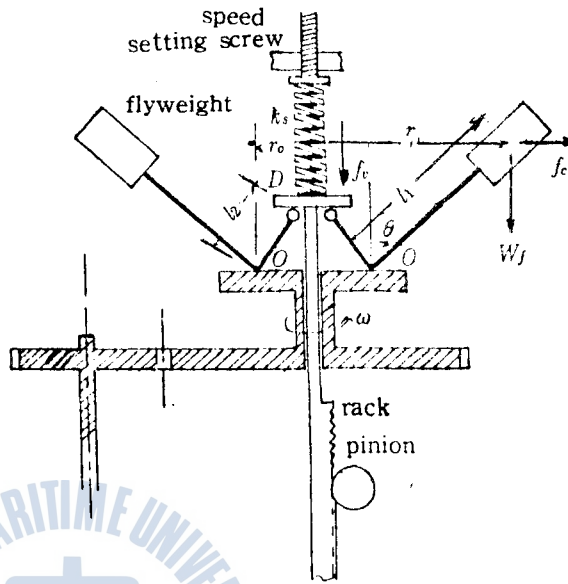
## 2. 本 論

### 2.1 調速機의 傳達函數

調速機는 오랜 歷史를 가진 것이라 改善·改良되어 오늘날에 와서는 種類도 많아졌고 優秀한 性能을 가진 것도 登場하게 되었다. 그 中에서 筆者가 다룬 엔진의 調速機는 遠心式 機械型 調速機 이므로 이것에 關해서 論하고자 한다.

原理的 構造는 그림·1과 같고, 各部의 치수도 주어져 있다. 엔진이 定常的인 平衡狀態에서 角速度가 變하여 fly weight에 생기는 遠心力의 變化로 새로운 壓縮된 자리에서 平衡되게 된다. 이때 랙(rack)이 移動하여 엔진에 噴射되는 燃料量을 加減하게 된다.

$\omega_1$ 의 運轉狀態에서  $\omega_2$ 로 變하는 경우 랙을 移動케 하는 D板의 運動式이 바로 랙의 運動式이다. fly weight가 廻轉運動을 하면서 半徑經方向으로 移動하므로 廻轉體 運動方程式을 써야 하겠지만 엔진 全體에서 보면 fly weight의 무게 적어 考慮할 必要가 없다.



그림·1

D板에서 step 狀으로 힘을 주었다면 랙의 可動部分이 運動하는데 있어서 이것에는 重量, 용수철, 粘性摩擦抵抗 乾性摩擦抵抗을 包含하고 있으므로 二次系의 非線型 減衰振動이 된다.

$$m_1 \ddot{x} + c \dot{x} + k_s x = f_v \pm f_1 \dots \dots \dots (1)$$

$x$ : 랙의 平衡 位置로 부터 移動한 變位

$m_1$ : 랙 可動部分의 全質量으로서 랙本體와 이것과 聯動되는 모든 部分의 等價質量을 가 르킴.

$c$ : 粘性抵抗係數

$k_s$ : 용수철 彈性係數

$f_v$ : D板에서 作用하는 힘

$f_1$ : 乾性摩擦力

$f_1$ 은 一定한 힘으로 항상 運動과 反對方向으로 作用하고 있다. 이 힘은 非線型力이고 이것이 포함되면 線型 解析이 不可能하므로 일단 等價한 粘性抵抗運動系로 바꿔졌다고 假定하면,

(1)式은

$$\ddot{x} + 2\zeta \omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{f_v}{m_1} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{但} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{m_1 k_s}} \quad \omega_n^2 = \frac{k_s}{m_1}$$

$f_v$ 는 랙運動系에 對해서는 外力이 되고 랙용수철  $k_s$ 가  $x$ 만큼 壓縮된 힘과 平衡된다.

즉

$$f_v = k_s x$$

調速機의 作動範圍가  $\omega_0$ (定格速度의 平衡點)에서 微小한 變化라고 假定한다면 近似的으로 다음과 같이  $f_v$ 를 표시할 수 있다.

그림·1에 보면 0점을 基準으로한 平衡式에서

$$f_v = \frac{2l_1}{l_2} (\tan \theta W_f + f_v) \dots\dots\dots(3)$$

을 얻고  $\frac{df_v}{d\omega}$ 를 求하면

$$\frac{df_v}{d\omega} = \frac{2l_1}{l_2} W_f \left[ (\sec^2 \theta + \frac{l_1}{g} \omega^2 \cos \theta) \frac{d\theta}{d\omega} + \frac{2}{g} (r_0 + l_1 \sin \theta) \omega \right]$$

$df_v/d\omega$ 와  $d\theta/d\omega$ 간에는 一定한 比率關係가 있으므로  $df_v/d\omega = k_m d\theta/d\omega$ 라 두면  $k_m = -k_s l_2 \sin \theta$  이고

$$\left. \frac{df_v}{d\omega} \right|_{\omega=0} = \frac{\frac{4l_1 W_f}{g l_2} (r_0 + l_1 \sin \theta_0) \omega_0}{\frac{2l_1 W_f}{k_s l_2^2 \sin \theta_0} (\sec^2 \theta_0 + \frac{l_1}{g} \omega_0^2 \cos \theta_0) - 1} \dots\dots\dots(4)$$

한편 平衡點을 中心으로한 微小한  $\omega$ 의 變化에 對해서는

$$f_v = k_s x = k_s \left( \frac{dx}{d\omega} \right)_{\omega=0} \cdot \omega = \left. \frac{df_v}{d\omega} \right|_{\omega=0} \cdot \omega \dots\dots\dots(5)$$

인 故로 (3), (4), (5)式을 (2)式에 代入하여 整理하면

$$\ddot{x} + 2\zeta \omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{k_1}{m_1} \cdot \omega \dots\dots\dots(6)$$

但  $k_1 = \frac{4l_1 W_f \omega_0}{g l_2 k_s} (r_0 + l_1 \sin \theta_0) / \left[ \frac{2l_1 W_f}{l_2^2 k_s \sin \theta_0} (\sec^2 \theta_0 + \frac{\omega_0^2}{g} l_1 \cos \theta_0) - 1 \right] \dots\dots\dots(6)$

(6)式을 初期條件  $\dot{x}=0, \dot{x}=0, x=0$  下에서 라플라스 變換하면

$$X(s) = \frac{\omega_n^2 k_1}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \Omega(s) \dots\dots\dots(7)$$

$X(s) \Omega(s)$ ,  $x$   $\omega$ 의  $s$  함수

$k_1$ 은 調速機의 게인이다.

萬一 調速機에 單位 角速度의 step狀 變化가 일어 났다면 렉의 運動은

$$x(s) = k_1 \left[ 1 + \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right) \right] \dots\dots\dots(8)$$

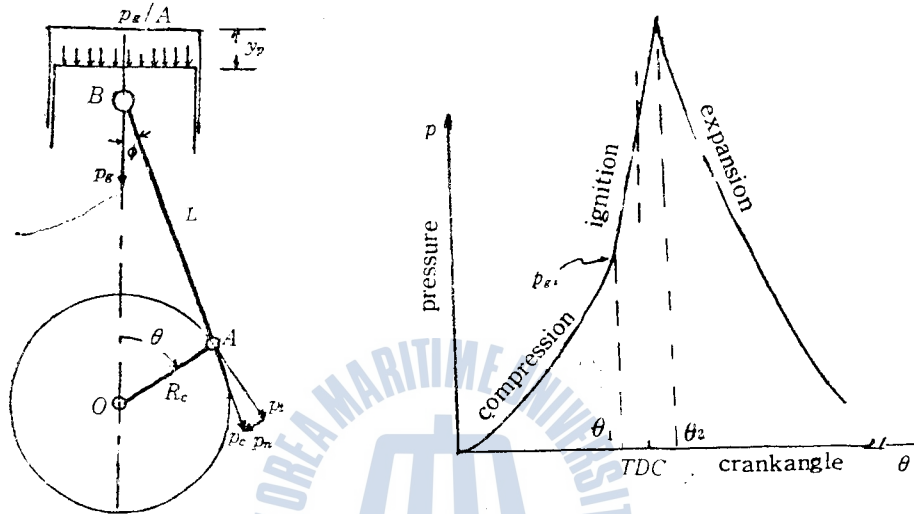
인 減衰振動을 하게 될 것이다.

## 2.2 機關의 傳達函數

여기서 말하는 機關이란 調速機에서 들어온 信號(렉變位  $x$ )에 따라 燃料 噴射量이 制御되어 실행된 內에서 가스 暴發로 인한 壓力이 廻轉系統에 廻轉力을 내어놓게 하는 部分을 말한다.

發電機의 定常運轉中 負荷의 變化나 렉移動等 外亂이 加해 있을때 過渡期를 지나 또 다른 定常狀態로 들어가는 데 있어서 렉變位  $x$ 가 달라짐에 따라 機關의 有效廻轉力( $\tau_e$ )이 어떻게 달라지는가 機關 傳達函數의 要点이 된다.

실린더 内の 壓力을 크게 3段으로 나눈다. (그림·2 참조) 처음 공기를 吸入하여 壓縮하고 燃料가 噴射되어 暴發하고, 다음에 膨脹하고 排氣하는中 실린더 壓力은 항상 變하고 실린더의 壓力과 連接棒과 크랭크 位置關係에 따라 廻轉力의 크기가 달라진다.



그림·2

廻轉力의 크기를 正確하게 數式化하기는 어려우나 原理的으로 表示하면 한 사이클당 실린더에서 發生하는 廻轉力은 排氣와 吸入行程의 壓力은 無視하면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{1}{2\pi i} \left[ \int_{\theta_1}^{\theta_2} (i) \Gamma d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} (ii) \Gamma d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} (iii) \Gamma d\theta \right] \dots\dots\dots (9)$$

$\tau$  : 실린더에서 發生하는 有效廻轉力

$i=1$  : (2사이클 엔진)  $i=2$  (4사이클 엔진)

$\theta_1$  : 壓縮完了되는 크랭크 角

$\theta_2$  : 燃燒完了時의 크랭크 角

(i) : 壓縮行程中 실린더 内の 各 瞬間의 有效壓力

(ii) : 燃燒中 실린더 内の 各 瞬間의 有效壓力

(iii) : 膨脹行程中 실린더 内の 各 瞬間의 有效壓力

$$\Gamma = R_c \sin \theta \left( 1 + \frac{\mu \cos \theta}{\sqrt{1 - \mu^2 \sin^2 \theta}} \right)$$

$$\mu = R_c / L$$

高速 엔진에서는 往復運動體의 慣性力은 瞬時 壓力에 影響을 미치나 平均 壓力에는 影響을 미치지 않으므로 考慮할 必要가 없다. 이 廻轉力 中 一部가 軸을 通해서 外部로 나가는 것이다.

$$\tau_e = \tau - \tau_f \dots\dots\dots (10)$$

$\tau_e$  : 有效 廻轉力

$\tau_f$  : 摩擦廻轉力 機械의 諸摩擦 以外에 附屬裝置의 驅動 動力도 이것에 包含됨.

(9)式의 廻轉力中  $x$ (택의 絶對變位)에 影響을 많이 받는 것은 세째 項이다.  $x$ 가 증가면  $\tau$ 도 증가하므로 平衡點 前後한 微小한  $x$  變化에 對하여  $\tau_f$ 는 一定,  $\tau$ 는  $x$ 의 函數이므로 결국  $\tau_e$ 는  $x$ 의 函數로서  $x$ 의 크기에 따라 機關의 有效 廻轉力이 制御된다.

多氣筒 機關에서는  $x$ 가 變하는 경우 同時에 모든 실린더에 壓力 變化가 일어나는 것이 아니고 燃燒 順序에 따라 變化가 일어나므로 機關 한 사이클(2사이클 機關에서는 1廻轉, 4사이클 機關에서는 2廻轉)이 지나야 택 變位  $x$ 에 相當하는 多氣筒 機關의 制御된 廻轉力이 나오게 된다. 이런 時間的 늦음을 近似的으로 一次 늦음 要素로 看做하고  $x$ 에 依한 廻轉力을 時定數  $\tau_E$ 와 계인으로 表示하면 機關 傳達函數는

$$T_e(s) = \frac{k_2}{s\tau_E + 1} X(s) \dots\dots\dots(11)$$

$\tau_E$  : 機關의 時定數

$$k_2 = \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{\partial \tau_e}{\partial x} \text{ 機關의 계인}$$

$T_e(s), X(s)$  :  $\tau_e, x$ 의  $s$  函數

### 2.3 廻轉系統의 傳達函數

엔진의 가장 重要한 三大 媒介變數는 廻轉角速度( $\omega$ ), 택의 變位( $x$ ), 有效廻轉力( $\tau_e$ )인 것이다. 이 3者 間에는 서로 函數關係가 있다. 어느 平衡點( $\tau_0, \omega_0, x_0$ )에서 微小한 範圍內에서의 變化는 線型解析的 이라고 본다. 機關의 有效 廻轉力( $\tau_e$ )은  $\omega$  및  $x$ 의 函數, 負荷廻轉力( $\tau_i$ )은 負荷의 크기( $\tau_r$ )와  $\omega$ 에 關係한다고 보면

$$\tau_e = \tau_e(\omega, x) \quad \tau_i = \tau_i(\tau_r, \omega) \dots\dots\dots(12)$$

엔진 全體의 廻轉系統(發電機 包含)의 慣性 모우멘트( $J$ )와 關係는

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_e - \tau_i \dots\dots\dots(13)$$

즉  $\tau_e = \tau_i$  인 平衡狀態에서는 廻轉系統의 角速度變化는 없지만 平衡이 깨어지면 그때부터 廻轉系統에 角加速度가 생긴다. (12)式은 平衡點 近傍에서는

$$\tau_e = \left. \frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \right|_x \omega + \left. \frac{\partial \tau_e}{\partial x} \right|_\omega x \dots\dots\dots(14)$$

$$\tau_i = \left. \frac{\partial \tau_i}{\partial \tau_r} \right|_\omega \tau_r + \left. \frac{\partial \tau_i}{\partial \omega} \right|_{\tau_r} \omega \dots\dots\dots(15)$$

로 나타낼 수 있다. (14), (15)式을 (13)式에 代入하여

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \omega + \frac{\partial \tau_e}{\partial x} x - \frac{\partial \tau_i}{\partial \tau_r} \tau_r - \frac{\partial \tau_i}{\partial \omega} \omega \\ &= \left( \left. \frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \right|_x - \left. \frac{\partial \tau_i}{\partial \omega} \right|_{\tau_r} \right) \omega + \left. \frac{\partial \tau_e}{\partial x} \right|_\omega x - \frac{\partial \tau_i}{\partial \tau_r} \tau_r \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

$\left. \frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \right|_x$   $x$  變化가 없을때  $\omega$ 의 變化에 對한 엔진의 廻轉力 增加率이다. 往復動 機關에서는 廻

轉力은 壓力에서 나오고 (9)式에서 보면 廻轉力은 廻轉速度와는 直接 關係없는 것으로 되어있다. 그러나 實엔진에서는 影響을 받고있다<sup>8)</sup>. 그 理由는 速度가 增加 할수록 引擎의 摩擦力이 增加하여 結果的으로 有效 廻轉力이 減少되는 것과 같다.

$\frac{\partial \tau_l}{\partial \omega} \Big|_{\tau_r}$  이는 負荷 自體의 크기 變化는 없으나 引擎의 速度가 增加함에 따라 負荷가 增加하는 率을 말한다. 一般的으로 負荷는 이런 性質을 가진것이 大部分이다.

$\frac{\partial \tau_l}{\partial \tau_r} \Big|_{\omega} \cdot \tau_r$  角速度가 一定할 경우 負荷廻轉力의 增加로 負荷의 絶對 크기의 變化量을 말한다

$\frac{\partial \tau_l}{\partial x} \Big|_{\omega} x$  x 變化로 引擎의 噴射 燃料量이 加減될 경우 有效廻轉力 增加量으로서 速度와 關係없는 一定摩擦力은 包含되지 않는다.

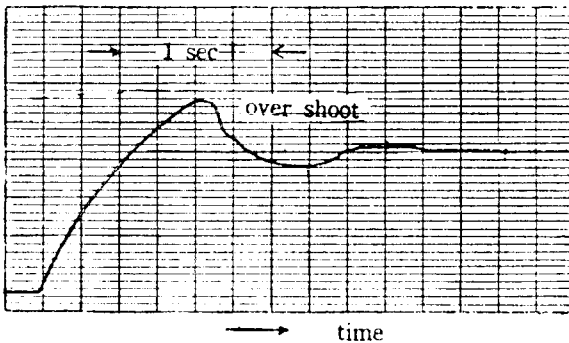
(16)式을 다른形으로 表示하면

$$\frac{\partial \tau_e}{\partial x} \Big|_{\omega} x = J \frac{d\omega}{dt} + \left( -\frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \Big|_x + \frac{\partial \tau_l}{\partial \omega} \Big|_{\tau_r} \right) \omega + \frac{\partial \tau_l}{\partial \tau_r} \Big|_{\omega} \tau_r \dots\dots\dots(17)$$

電壓→廻轉力, 電流→角速度로 이나로지 한系와 比較하면  $\frac{\partial \tau_e}{\partial x} \Big|_{\omega} x$ 는 電源電壓이 되고,  $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ 는 인덕턴스에 依한 電壓,  $-\frac{\partial \tau_e}{\partial \omega} \Big|_x$ 는 電源의 内部 抵抗,  $\frac{\partial \tau_l}{\partial \omega} \Big|_{\tau_r}$ 는 線路抵抗에 해당한다. 引擎의 角速度를 論하는데 마지막 内部抵抗과 線路抵抗을 全内部 抵抗으로 보고 k로 둔다면

$$J \frac{d\omega}{dt} + k\omega = -\frac{\partial \tau_e}{\partial x} \Big|_{\omega} \cdot x - \frac{\partial \tau_l}{\partial \tau_r} \Big|_{\omega} \cdot \tau_r \dots\dots\dots(18)$$

그런·3은 (18)式의 關係를 電氣回路로 나타낸 것이다.



그림·3

平衡된 狀態에  $\omega_0$ 인 一定速度로 廻轉하고 있을 때  $\frac{\partial \tau_e}{\partial x} \Big|_{\omega} \cdot x_0 = \frac{\partial \tau_l}{\partial \tau_r} \Big|_{\omega} \cdot \tau_r \frac{d\omega}{dt} = 0$ ,  $\omega=0$ , 즉 角速度變化가 없다는 뜻이다. (18)式의 右邊에 있어서 引擎에서 發生하는 廻轉力이나 負荷 廻轉力의 크기에 變化가 생기면 廻轉系統은 角加速度가 생기고 새로운 角速度點에서 平衡된다. 이 差廻轉力  $\tau'$ 는

$$J \frac{d\omega}{dt} + k\omega = \tau' = \tau_e - \tau_r \dots\dots\dots(19)$$

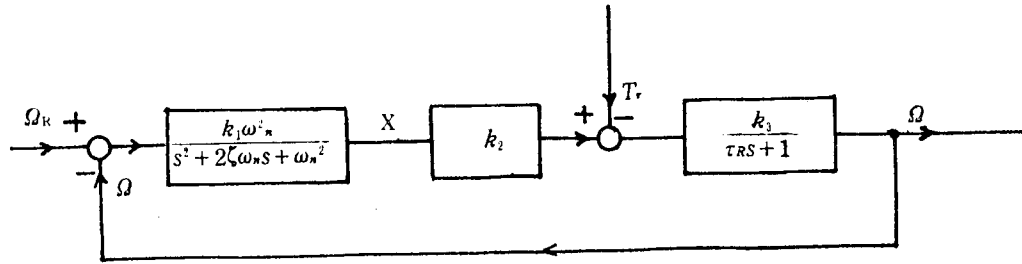
(19)式을 初期條件  $t=0, \omega=0 \dot{\omega}=0$  下에서 라플라스 變換하면

$$\Omega(s) = \frac{1}{Js+k} T'(s) = \frac{k_s}{\tau_R s + 1} [T_e(s) - T_R(s)] \dots\dots\dots(20)$$

$$\tau_R = J/k, \quad T_e, T_r, T': \tau_e, \tau_r, \tau' \text{의 } s \text{ 函數}$$

$$k_3 = 1/k$$

지금까지 調速機, 機關 그리고 廻轉系統으로 나누어 各各의 傳達函數를 理論的으로 求했다. 이것을 엔진의 速度制御系가 形成되도록 블록 線圖를 完成시킨 것이 그림·4 이다.



$$k_1 = \frac{(4l_1 W_f / g l_1 k_s)(r_0 + l_1 \sin \theta_0) \omega_0}{(2l_1 W_f / l_1 k_s \sin \theta_0)(\sec^2 \theta_0 + \omega_0^2 l_1 \cos \theta_0 / g) - 1}$$

$$k_2 = \frac{\partial \tau_e}{\partial x} \Big|_{\omega} \quad k_3 = \frac{1}{k}$$

그림. 4

### 3. 實驗 및 結果

調速機의 傳達函數는 (7)式에, 機關의 傳達函數는 (11)式에, 廻轉系統의 傳達函數는 (20)式에 各各 理論的으로 誘導되어 있다. 여기서는 엔진 速度制御系에 포함된 各 傳達函數의 定數를 試驗엔진으로부터 求하는 것이 實驗의 目的이다.

試驗 엔진은 Caterpillar Model D 315 4 cylinder, 4 cycle 1200 rpm, 45HP, 直結된 發電機는 3相, 6極, 線間電壓 240V, 容量 33.8KVA 力率 0.8인 定格을 가진 것이다.

#### 3.1 調速機 傳達函數

(17)式에서 보면  $\zeta$ ,  $\omega_n$ ,  $k_1$  만 求해지면 調速機의 傳達函數는 決定된다.

調速機의 可動部分의 運動方程式은 어디까지나 엔진 動作狀態와 같은 條件下에서 階段狀角速度變化를 주었을때 軸의 運動을 測定하여 決定해야 한다. 稼動되고 있는 엔진의 調速機를 띠어 낼수도 없고 階段狀 角速度 變化를 줄 수도 없다. 그러므로 筆者는 계인  $k_1 = \frac{dx}{d\omega}$  와  $k_1 = 1$  로 하였을 때의 軸運動을 分離하여 測定하기로 하였다.

實驗 엔진과 直結된 同期 發電機가 있으므로 이것을 他電源과 並列로 運轉시킨다음 實驗엔진의 燃料를 遮斷하여 發電機가 電動機로 動作하도록 하였다. 이 狀態하에서는 調速機의 fly weight 는 엔진이 살아 있을때와 똑같이 動作하고 있다. 이 때 人爲的으로 軸의 可動部分을 당겼다 놓으면 마치  $\Delta\omega$ 의 信號가 階段狀으로 들어가는 格이 되고, 可動部分이 原位置로 되돌아 가는



테 이 때 맥 運動은 그림·5와 같이 記錄되  
었다. 이 曲線이 近似 二次線型 減衰振動曲  
線이므로 이것으로부터  $\zeta$ ,  $\omega_n$ 를 求하기로  
한다.

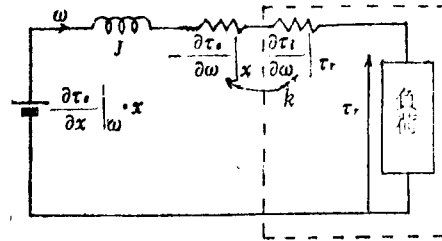


그림. 5

그림·(5)는 (8)式의 曲線을 實驗的으로 구  
한 것인 데 乾性抵抗, lost motion 等に 의하  
여 깨끗한 減衰振動曲線과 많은 差가 있다.

最大 overshoot  $\Theta_m$ 은  $\zeta$  만의 函數로서

$$\Theta_m = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \dots\dots\dots(21)$$

인 關係가 있다<sup>15), 19)</sup>.

overshoot를 測定하면 1.21 즉 0.21을 (21)式에 代入하여  $\zeta$ 를 求하면  $\zeta=0.45$ 가 얻어진다.

(8)式을 微分하여  $\frac{dx}{dt}=0$ 가 되는 時間을 구하면

$$\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t = n\pi \dots\dots\dots(22)$$

$$n=1, 2, 3, \dots\dots$$

(22)式에  $n=2$ , 그림·5에서 測定되는 週期  $t=1.25$ 초를 代入하여  $\omega_n$ 를 구하면

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{1-0.45^2}} \cdot \frac{2\pi}{1.25} = 5.62 \text{ rad/sec} \dots\dots\dots(23)$$

over shoot가 일어나는 곳의 1사이클 時間이 1.25초 보다 조금 길지만 1.25초로 定했다.

계인은  $\frac{dx}{d\omega}$ 로서 發電機의 定格速度를 基準으로 하여 角速度가 조금 變하는 경우 맥이 얼마  
나 움직인가의 比率이다.

實驗發電機를 電動機化하여 엔진을 廻轉시켜주면 fly weight는 돌려 주는 角速度에 따라 밀어  
지게 되고, 이에 聯動되는 모든 部分은 準 動作狀態와 같이 움직이고  $\omega$ 를 바꾸면서  $x$ 를 記錄하  
면  $\frac{\Delta x}{\Delta \omega}$ 를 計算할 수 있다.

1200 rpm에서 1300으로 변하는 데 맥은 0.86V (附錄參照)의 電壓을 얻었다.

$$\left| \frac{\Delta x}{\Delta \omega} \right| = \frac{3.23}{\frac{70 \times 27}{60}} = 0.44$$

따라서 구하는 傳達函數는

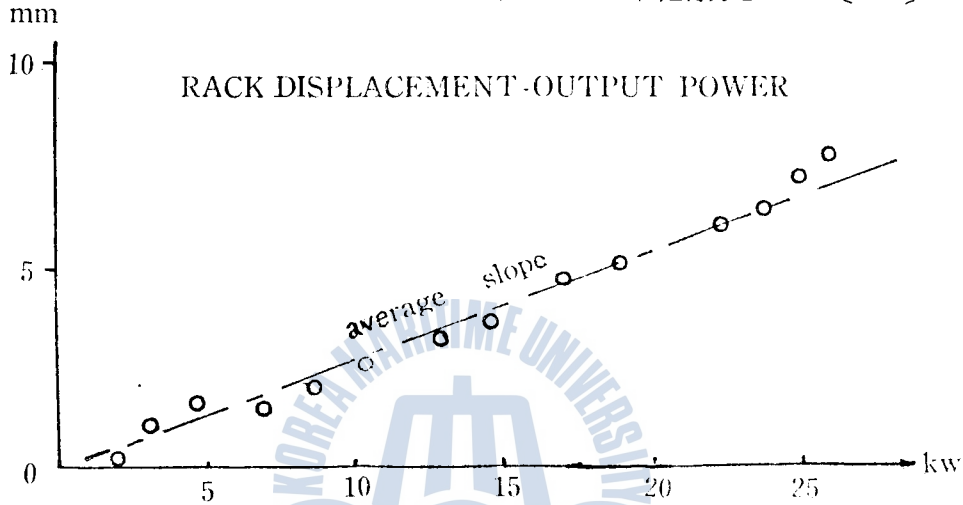
$$G_o = \frac{k_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{0.44 \times 31.58}{s^2 + 5.06s + 31.58} \dots\dots\dots(24)$$

### 3.2 機關의 達函數

(11)式의  $k_2$ 는 機關의 계인으로서 理論的 計算은 別뜻이 없고 實驗的으로 다음과 같이 求  
한다.

엔진을 定格速度로 維持 시키고서 發電機의 負荷를 增加시킬 때 電力計에서 얻어지는 電力值 와 랙(rack)의 變位  $x$ 에 해당하는 電壓을 記錄하여 (附錄參照) 平均 기울기를 구할 수 있다. (그림·6).

有效廻轉力  $\tau_e$ 는 電力值를  $\omega_0(40\pi)$ 로 나누면 求해지고  $x$ 는 測定電壓에서 다시 換算해야 한다. 그림·6에서 平均 기울기는  $24\text{ KW}/2\text{V}=12\text{ KW/V}$ ,  $24\text{ KW}$ 의 廻轉力은  $190.99[\text{N}\cdot\text{m}]$



그림·6

$$k_2 = \frac{\partial \tau}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial \tau_e}{\partial x} = \frac{\partial \tau_e}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{190.99 \text{ [N}\cdot\text{m}]}{2 \text{ [V]}} \cdot \frac{2.4 \text{ [V]}}{9 \text{ [mm]}}$$

$$= 25.45 \left[ \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{mm}} \right] \dots\dots\dots(25)$$

$v$  : 附錄參照

(11)式에 論한  $\tau_e$ 는 試驗 엔진에서는 0.1초 以下 이므로 다음에 나오는 廻轉系統의 時定數에 比해 너무나 짧으므로 無視하고 보면  $k_2$ 가 바로 機關의 傳達函數이다.

3.3 廻轉系統의 傳達函數

엔진이 定常狀態에서 一定速度로 廻轉하고 있을 때 廻轉力에는 平衡이 成立되고 있다. 즉

$$\tau = M_{f_0} + \frac{P_0}{\omega_0} \dots\dots\dots(26)$$

$M_{f_0}$  : 角速度  $\omega_0$ 에서 엔진의 全摩擦 모우멘트

$P_0$  : 角速度  $\omega_0$ 에서의 出力

랙을 固定시키면 出力 負荷를 減少시키면 機關에서 發生하는 廻轉力은 變化 없으므로 엔진의 速度가 增加하여 粘性 抵抗 모우멘트에 의한 損失과 맞서게 된다.

$$\tau = M'_{f_0} + \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots(27)$$

$M'_{f_0}$  : 角速度  $\omega$ 에서의 엔진의 全摩擦 모우멘트

$P$  : 角速度  $\omega$ 에서의 出力

(26)式과 (27)式의 差를求하면  $M_{f_0} - M'_{f_0} = k\omega$  즉 速度와 關係없는 抵抗은 相殺되고 增加된 粘 粘抵抗에 의한 모우멘트만 남는다.



$$k\omega = \frac{P_0}{\omega_0} - \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots(28)$$

0.5~1 KW의 負荷를 除去하였을 때 速度가 增加하는 實驗을 되풀이 하였다.

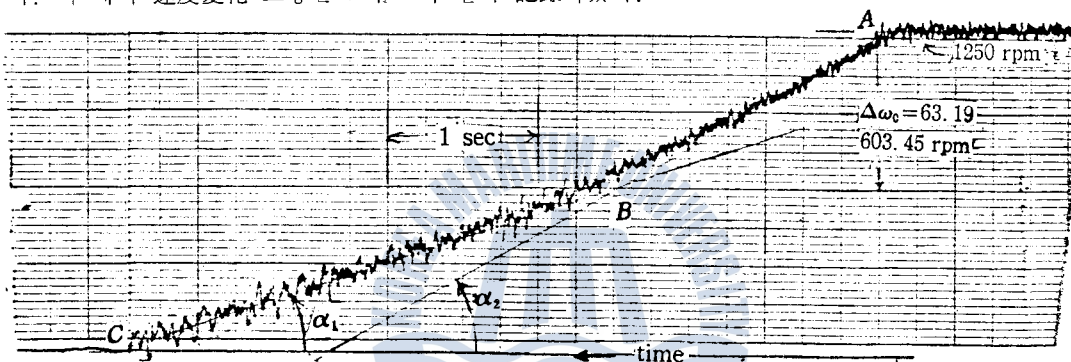
0.48 KW를 除去時  $\Delta\omega=61.25$   $k=0.6$

1.08 KW를 除去時  $\Delta\omega=147$   $k=0.56$

$k$ 가 0.6 전후에서 變하므로  $k=0.6$  으로 定했다.

慣性모우멘트의 測定

엔진을 運轉中에서 갑자기 停止레버를 제쳐 停止 시켰을 때 엔진은 數秒를 지난후 停止하였다. 이 때의 速度變化 모양은 그림·7과 같이 記錄되었다.



그림·7

曲線을 AB와 BC 두 部分으로 나누어 생각한다. 처음 A에서 B까지는 速度가 빠르므로 粘性 摩擦抵抗과 乾性摩擦 抵抗으로 減速되다가 速度가 減少함에 따라 粘性摩擦 抵抗은 消滅되고 速度와는 關係없는 乾性摩擦만 남게되어 一定한 減角加速度로 되는 部分이 BC 이다.

엔진의 廻轉力의 平衡式에서

$$\tau - M_{f_0} = J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots(29)$$

無負荷 定常 狀態에서는  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ,  $\tau = M_{f_0}$ 로 되어 있던중 엔진을 끄는 瞬間

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_2 = M_{f_0} \dots\dots\dots(30)$$

잠시후 減速되어 粘性 抵抗을 無視할 수 있는 速度 (그림·7에서 BC 영역)에 도달하면

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_1 = M_f \dots\dots\dots(31)$$

인 式이 成立하게 된다.

이번에는 並列運轉을 거쳐 發電機를 電動機로 바꾼 다음 엔진을 定格速度 1200 rpm로 廻轉시 키는데 要求되는 電力을 測定하면 엔진의 摩擦馬力이 測定된다. 이 값이 17.16 KW, 이 中에서 發電機 損失 1 KW, 線路 抵抗에 의한 損失을 0.16 KW로 보고 나면  $16000/\omega_0$ 가 엔진의 摩擦抵抗 모우멘트  $M_{f_0}$ 와 맞서게 된다. 즉,

$$\frac{16,000}{\omega_0} - M_{f_0} = 0 \dots\dots\dots(32)$$

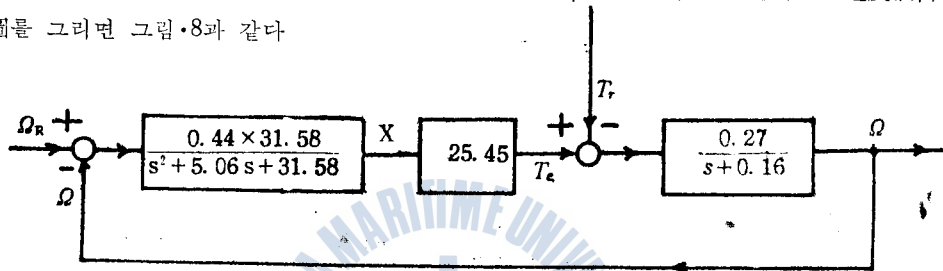
따라서 구하는  $J$ 는

$$J = -\frac{1}{\alpha_2} \frac{16,000}{\omega_0} = \frac{-1}{-34.91} \times \frac{16,000}{40\pi} = 3.65[\text{kg}\cdot\text{m}^2] \dots\dots\dots(33)$$

(20)式에서 要求되는 모든 定數가 定해 졌기 때문에 廻轉系統의 傳達函數는

$$\Omega(s) = \frac{1/k}{\tau_R s - 1} (T_e - T_r) = \frac{1.67}{6.085 + 1} (T_e - T_r) \dots\dots\dots(34)$$

(24)式의 調速機, (25)式의 機關, (34)式의 廻轉系統을 結合하여 엔진의 全速度制御系의 블록圖를 그리면 그림·8과 같다



그림·8

### 4. 結 論

엔진의 速度制御 系統에 가장 重要한 調速機의 傳達函數를 결정 하는데 非線型 要素가 포함 되어 over shoot는 크면서도 振動角周波數는  $\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 에 해당하는 값보다 느린 것을 要求 하나 標準 二次減衰振動 函數에는 그런 것이 없다.

機關에 있어서  $x$ 와  $\tau$  관계는 正比例하지 않고 Idle 상태에서의 微小 負荷變動에 對한 轉位置가 浮動的이 있으며 重負荷에서는 機關의 燃燒狀態의 不安定으로 負荷크기 調整이 힘들어 게인 측정이 어려웠다.

廻轉系統에 있어서는 負荷를 減少 시켰을 때 速度의 上昇하는 過程(速度와 時間)과 負荷를 增加를 시켰을 때의 速度減少 過程과는 差가 있었고 負荷를 增加시켰을 때는 速度가 떨어지면서 즉시 不安定 상태로 突入함으로 부득불 負荷를 減少시켰을 때를 基準으로 하여  $k$ 를 測定하였다.

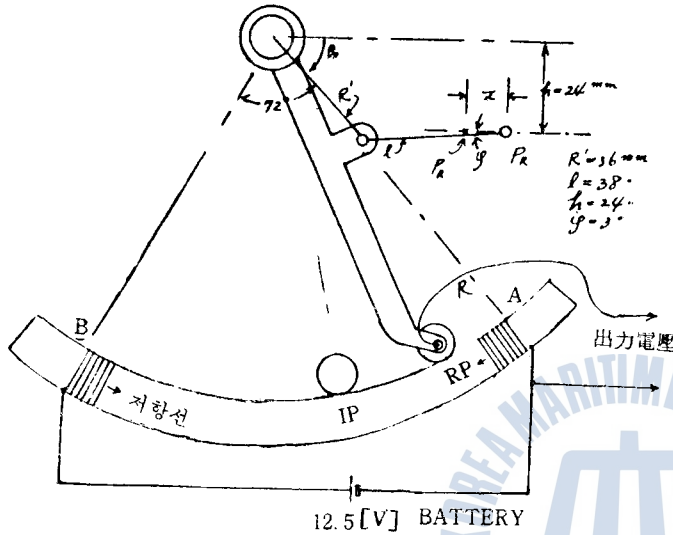
重負荷 상태에서는 0.5 KW 程度의 負荷變化에는 速度變化가 浮動的으로 散亂된 測定值가 나왔기 때문에 輕負荷 상태에서  $k$ 를 구함이 適當함을 알았다.

電子計算機나 高價한 測定裝置를 사용치 않고 다만 並列運轉과 轉의 變位만으로 엔진의 傳達函數를 구할 수 있으나 엔진이 커지면 外部에서 並列 운전시킬 電源 확보가 어려워 지므로 問題點이 생긴다.

本論文에서는 使用中인 柴油엔진의 傳達函數를 어떤 방법으로 測定해 가는가의 方法에 對한 설명내지 結果를 提示 하였고 이 결과로서 速度特性 改良을 위어 어떻게 다루어 나갈 것인가에 對해서는 계속 研究中이고 現在까지 연구결과를 發表하는 바이다.

附 錄

Rack 變位( $\hat{x}$ )와 測定電壓과의 關係



그림·부 1

랙의 微小한 移動을 記錄計에서 記錄 하려면 變位를 電壓으로 바꾸는 裝置가 rack 移動 할때 crank-lever 機構를 거쳐 lever 끝에 작은 롤러가 均一하게 감겨져 있는 抵抗線과 接觸하도록 만들었다.

롤러 接觸 位置에 따라 DC 電源電壓 (12.5V)의 一部가 電位差計 原理에 依하여 出力電壓으로 나타난다.

RP(rest position)의 位置를  $\theta_0, \varphi_0$  任意位置로 옮겼을 때 랙 變位  $\hat{x}$ 는 ( $\hat{x}$ 는 랙의 絶對變位)

$$\hat{x} = R'[\cos \theta_0 - \cos(\theta_0 + \theta)] + l[\cos \varphi_0 - \cos(\varphi_0 + \varphi)] \dots \dots \dots (1)$$

記號 그림·부-1 참조

다시 式을  $\theta$  函數로 바꾸면

$$\hat{x} = R'[\cos \theta_0 - \cos(\theta_0 + \theta)] + l \left[ \cos \varphi_0 - \sqrt{1 - \left( \frac{R' \sin(\theta_0 + \theta) - h}{l} \right)^2} \right] \dots \dots (2)$$

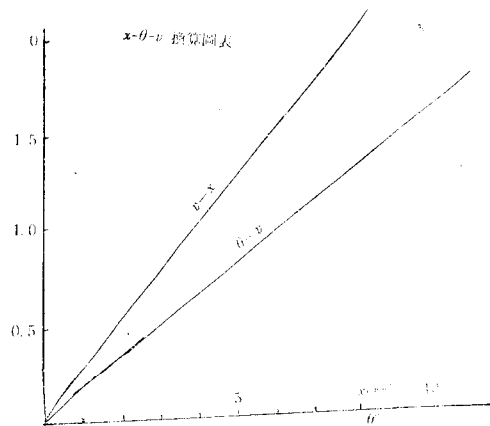
RP를 基準으로하여 運動方程式을 表示하면  $R' = 36 \text{ mm}$ ,  $l = 38 \text{ mm}$ ,  $\varphi_0 = 3^\circ$ ,  $\theta_0 = 47.3^\circ$ ,  $h = 24 \text{ mm}$ 를 얻었다.

이 RP에서 IP(Idle position)로 옮기면  $\theta = 17.5^\circ$ 가 變하고 이를 (2)式에 代入하면  $\hat{x} = 10.0 [\text{mm}]$ 를 얻는다.

AB 간에 12.5V,  $\theta_B - \theta_A = 72^\circ$ , 랙의 變位에 의한 電壓  $v$ 와 lever의 變位角  $\theta$  간에는

$$\theta = \frac{72^\circ}{12.5} v \dots \dots \dots (3)$$

롤러의 移動에 따른  $\theta$  값을 (2)式에 代入하면  $\hat{x}$ 가 얻어 지는데 IP를 基準으로 하려면  $\theta_0 = 47.3^\circ + 17.5^\circ = 64.8^\circ$ 로 수정하면 되고 엔진 運轉 範圍 내에서  $v$   $\theta$  關係를 계산하여 表를 만들면 다음과 같다.



그림·부 2

$v$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
$\theta$	1.15	2.30	3.46	4.61	5.76	6.91	8.06	9.22	10.37	11.52	12.67	13.82
$\hat{x}$	0.76	1.46	2.21	2.95	3.70	4.44	5.19	5.95	6.70	7.46	8.21	8.96

위의 그래프 상에 위의 값들을 plotting 하면  $v-\theta-\hat{x}$  간의 관계를 알수 있는데 거의 直線(比例)的이다.

### 參 考 文 獻

- 1) 李成瓚, 最近商船에 있어서 發電機 容量에 對한 考察, 韓國海洋大學 論文集 第9輯, 1974, p-6
- 2) 藏村修一, 表原功 2사이클 타이저 엔진의 動特性, 三菱重工技報, vol.3, No.5, 1966-9
- 3) 伊藤堅, 카소린 엔진의 動特性, 計測自動制御學會 論文集, 1966, 第3卷 第2號, p-21
- 4) 葉山眞治, 小泉啓夫: 船用 타이저 엔진의 動特性, vol.9, No.100, 1970.8
- 5) D. E. Bowns MI Mech E: The Dynamic transfer characteristics of reciprocating engine, Proc-Instn Mech. Engrs 1970-71 vol.185, 16/71
- 6) 高橋利衛, 內燃機關의 調速에 對한(その1) 日本機械學會誌, 第62卷 第483號, 1959.4
- 7) 同人 同 題目 (その2) 日本機械學會誌, 第62卷 第484號, 1959.5
- 8) 荻野英夫, 中村入州夫, 田中規稔: 流体가바나 內燃機關, 8卷 9號, 1969-9
- 9) FERBER R SCHLERLF RAYMOND R, ANGELL: Governor tests by simulated isolation of hydraulic turbine units, IEEE transaction on power apparatus and system vol pas-87, No.5 May. 1968
- 10) NG ALVIS: Electric hydraulic governor control for industrial and commercial gas turbine use, Transaction of the ASME Journal of Engineering for power July, 1966/243
- 11) DG RAMEY JOHN W SKOOG LUND: Detailed hydrogovernor reciprocating for system stability studies의 appendix 1, IEEE transaction on power apparatus and system vol. pas-89 No.1 January: 1970
- 12) 中田考, 自動制御의 理論, 오름社 東京, 1967.5, p.125
- 13) 亓理厚, 機械力學, 共立全書, 86, 東京, 1956.5, p-13
- 14) Benjamin C kuo automatic control system 2nd Ed Prentice hall INC, 1967, p-23
- 15) 河注植, 自動制御, 海事圖書出版部, 釜山 1974, p-106
- 16) 14) 揭書, p-41
- 17) 長尾不二夫, 內燃機關講義, 養賢堂, 東京 1968 4, p-225
- 18) (4) 揭書 p-13
- 19) Gordon J. Murphy Basic Automatic control theory D. VAN Nostrand company, INC London, p-419
- 20) 日本船用機關學會誌, 船用 타이저 發電裝置의 速度變動率에 對한, 日本船用機關學會, 中小型 타이저 엔진 機關研究委員會, 1974. 9月號