

디젤 機關의 系統識別 — 시뮬레이션 연구 —

System Identification of a Diesel Engine — Simulation Study —

趙 漢 根*, 리차드 스미스**, 스티브 말리**
H. K. Cho, R. J. Smith, S. J. Marley

Summary

A frequency-domain, system-identification method using a binary multifrequency signal was developed to find the transfer function between smoke intensity and throttle position in a diesel engine. This paper describes the simulation study performed to test the identification method developed. With an assumption of a diesel operation in a limited region about the normal operating state, the linear theory was adopted. Because that air fuel ratio is one of the most important operating variables causing smoke production in diesel combustion, single-input and single-output model was adopted.

1. 緒 論

지난 70年代와 80年代에 있었던 두차례의 에너지危機로 말미암아, 機關의 設計와 運轉時 燃料의 經濟성을 높이기 위한 努力이 極激히 增加되어 왔다. 또한 化石燃料의 일부 또는 전부를 代用할 수 있는 代替 에너지의 開發도 중요한 研究課題로 주목받아 왔다. 環境汚染에 대한 높아진 關心으로 인하여 內燃機關에서 挑出되는 挑氣가스로 인한 大氣汚染을 輕減시키기 위한 研究와 開發이 促進되었다. 따라서 挑氣가스의 大氣 汚染도가 낮고, 燃料의 經濟성이 높은 새로운 엔진의 開發이나, 이에 필요한 制御裝置의 開發이 移動型 動力裝置의 生産分野에서는 實質的인 關心 對象이 되어 왔다. 요즘은 登場하는 새로운 形態의 內燃機關에는 마이크로컴퓨터를 廣範圍하게 利用한 制御設備가 裝置되고 있고, 앞으로는 좀더 복잡한 制御裝置가 附着되어, 더욱 改善된 形態의 內燃機關이 出現할 것으로 期待된다.

制御係(Control system)의 設計에는 被制御係의 動的特性에 관한 情報가 반드시 필요하다. 이러한 情報는 施行錯誤(Trial and error)를 이용한 制御

變數 調節과 같은 단순한 방법에 의하여 구할 수도 있고, 복잡하고 확장된 數學的 模型(Mathematical model)에 의존할 수도 있다. 디젤기관의 경우, 燃燒工程의 複雜性 때문에 실용 가능한 動的模型(Dynamic model)을 開發하기가 어려워서 디젤기관의 制御裝置 設計는 보통 간단한 模型을 사용하는 경향이 있었다. 일반적으로 柔軟性, 만족할 만한 性能 및 컴퓨터 응용에의 適合의 등의 이유 때문에 標準型的 PID制御機(Proportional, integral, and derivative controller)가 많이 사용되어 왔다.

디젤기관의 운전시 실제의 運轉狀態, 燃料의 種類, 또는 작용 荷重의 變化에 의한 動的要因의 變化와 正常狀態의 變化가 制御係의 係數誤差를 惹起시킨다. 어느 特定系를 系가 갖고 있는 總壽命 期間에 걸쳐 諸性能을 유지 관리하기란 制御 技術者에게 있어서는 극복하기가 가장 어려운 문제들 중의 하나이다. 이러한 계수변화의 문제를 극복하기 위한 방법으로 適應制御法(Adaptive control method)이 채택된다. 適應制御法은 系統의 係數의인 構造的 變化에 적응할 수 있도록 변형된 모든 형태의 제어 전략들을 포함하고 있다. 適應制御의 設計를 위하

* 忠北大學校 農科大學 農業機械工學科

** 美國 Iowa State University 工科大學 農工學科

여는 系統識別(System identification)이 짧은 시간 내에 완료되어, 工程의 변화에 適應하면서, 系統의 성능을 유지할 수 있도록 해야 한다. 또한 制御機를 설계하고 조절하는데 필요한 정보를 제공하는 적당한 識別方法은 단순해야 하며, 사용이 편리하여야 한다.

Backhouse와 Winterbone(1987)은 周波數 方法에 의하여, 過渡期 상황에서 터보과급식(Turbocharged) 디젤기관의 토오크와 매연량을 측정하여, 공기 연료비의 관계를 규명하였다. Morris 등(1982)은 가솔린 엔진에서의 토오크의 스로틀의 개폐 정도에 대한 반응을 규명하기 위하여 Landau의 식별방법을 사용하였다. Wellstead와 Zanker(1981)는 적응제어법의 활용에 관한 예로서 Self-turning에 의한 적응제어법을 이용하여 엔진의 속도 제어방법에 관하여 보고하였다.

本 研究의 目的은 디젤 機關의 適應制御機 設計에 필요한 傳達函數(Transfer function)를 實驗的인 方法으로 求하기 위하여 적당한 識別方法을 開發하고 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 사용 가능 여부를 判定하기 위한 것이다.

2. 識別方法(Identification method)

가. 背景

識別(Identification)이란 物理的인 系統의 각 부분의 動的 性能을 적당히 特性化하는 傳達函數(Transfer function)와 같은 數學的 模型(Mathematical model)을 決定하는 過程이다. 識別方法은 일반적으로 確率的인 방법(Stochastic method)과 決定的인 방법(Deterministic method)으로 구분되어 질 수 있다. 확률적 방법은 雜音(Noise)이 많은 系統을 처리하기에 적당하지만, 결정적 방법은 사용하기가 간단하다. 식별방법은 결과의 형태에 따라 다음과 같이 구분되기도 한다.

特異 運動 方程式(Specific dynamic equation)의 매개변수를 구해주는 매개변수법과 시간영역에서의 주파수 응답 자료나 衝擊響應와 같은 매개변수 결과를 제공하는 비매개변수법이 있다. 두가지 방법이 모두 特異適應(Specific application)에 적당

하지만, 매개변수법이 시간영역에서는 자주 사용되며 잡음이 많은 계통에 우월하다. 비매개변수법은 사용하기가 쉬워 周波數 領域에서 자주 이용된다. 階段入力, 等速入力, 脈搏入力 또는 三角函數 入力 등에 의한 전통적 식별법은 사용하기가 쉽고 분석하기도 쉽다. 일정 주파수 응답법은 다른 방법에 비해 더 많은 동적 정보를 제공해 주지만, 상당히 긴 실험시간을 요하는 단점이 있다(Cusset and Melli-champ, 1975). 또한 이들은 정확한 동적 정보를 얻기 위해 잡음 효과를 극소화하려면, 계통을 비교적 크게 교란시켜야 하는 이유 때문에 항상 실용적이지 못하다. 이러한 이유 때문에 설계가 비교적 간단한 二進列(Binary sequence)이 사용되며, 이들은 疑似 任意 二進列(Pseudo random binary sequence), 最適 二進列(Optimal binary sequence) 및 二進 多周波列(Binary multifrequency sequence) 등으로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 二進 多周波列(Van Den Bos, 1967)이 사용되었다.

디젤연소 과정이 대부분의 화학반응들과 같이 非線型이지만, 디젤기관이 正常 運轉狀態 주위의 제한영역 내에서 운전되고 있다고 가정하면, 系統 識別時 線型理論(Linear theory)을 適用할 수 있다. 線型模型의 時不變效果(Time invariant effect)에 根據하여 周波數領域 分析法(Frequency domain analysis)이 適用되었다. 디젤 燃燒에 있어서 煤煙의 發生要因으로는 設計 및 運轉係數들인 空氣燃料比(Air fuel ratio), 燃料噴射時間(Injection timing), 엔진 回傳速度(Engine speed) 등이 있으나, 空氣燃料比(A/F ratio)가 가장 중요하고 제어 가능한 운전변수로 보고된 바있다(Bryzik and Smith, 1978).

따라서 單一入力(연료주입률) 및 單一出力(매연강도)를 갖는 模型이 선정되었다. 時不變 線型 演算은 合成積(Convolution integral)에 의해 支配되므로 다음 式으로 표현된다.

$$y(t) = \int_0^t h(\tau) x(t-\tau) d\tau \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서 x(t) : 入力信號
- h(t) : 特性函數
- y(t) : 出力信號

이 식을 주파수 영역으로 치환하면,

$$Y(s) = H(s) \cdot X(s) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $Y(s)$, $H(s)$ 및 $X(s)$ 는 $y(t)$, $h(t)$ 및 $x(t)$ 각각의 Laplace 변환

入力 $x(t)$ 와 出力 $y(t)$ 를 갖는 系の 傳達函數 $H(s)$ 는 系가 갖는 초기 에너지가 零인 상태에서의 주파수 영역으로 치환된 출력 신호의 비로 定義된다 (Cazdow and Landingham, 1985).

따라서 傳達函數는 式(3)으로 표현된다.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \text{ 零의 초기에너지 } \dots\dots\dots (3)$$

正常狀態에서의 周波數應答를 구하기 위하여는 Fourier 變換에 의하여 s 를 jw 로 치환하면 式(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$H(jw) = \frac{Y(jw)}{X(jw)} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 w : Frequency

나. 最適化(Optimization)

傳達函數의 複素數형태인 非媒介變數 형태의 결과들을 媒介變數 형태의 模型으로 치환하기 위하여 Box(1965)의 複合方法(Complex method)이 적용되었다. 이 複合 探索 알고리즘은 非線型 不等制限 (Nonlinear inequality constraints)을 받고 있는 非線型 目的函數(Nonlinear objective function)의 문제들을 해결하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 이 알고리즘은 적당한 始作點과 追加點들인 初期 複素數 集합으로 시작되어, 初期直들이 제한 값들과 비교되어 경계를 벗어날 경우에는 境界내부의 새로운 수로 변경된다. 각 점에서 目的函數를 계산하여 最大치를 갖는 수는 나머지 점들의 圓心(Centroid)에 의해 구해진 수로 치환된다. 最大치를 갖는 수가 반복될 경우에는 나머지 점들의 도심을 향해 거리의 1/2 되는 곳으로 이동한다. 이러한 과정은 미리 설정한 오차범위 내에 수렴될 때까지 반복된다. 그림 1은 전체의 과정을 나타내는 흐름도(Flow chart)를 보여 준다.

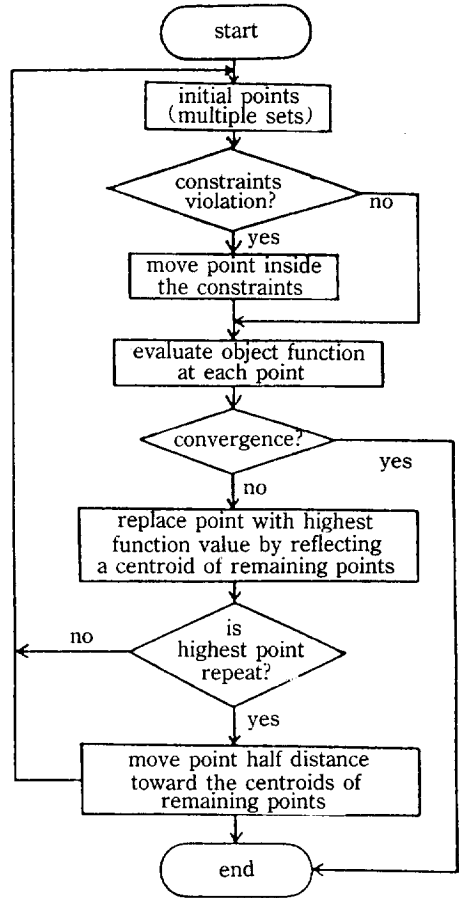


Fig. 1. Flow chart of the optimization procedure for parameter search

다. 過程 시뮬레이션(Process simulation)

디젤기관의 연소 과정중 특히 연료주입율과 매연 강도와와의 관계를, 일반적인 화학 반응과정에서 전형적으로 볼 수 있는 不動作時間(Dead time)을 포함하는 2차 모형과 不動作時間(Dead time)을 포함하지 않는 2차, 3차 또는 4차 모형 중의 하나로 가정할 수 있고, 傳達函數로 표현하면 式(5)와 같다.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p e^{-Ds}}{(\tau_1 s + 1) \dots (\tau_n s + 1)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 : K_p = 過程利得係數(Process gain)

D = 不動作時間(Dead time)

τ_n = 時定數(Time constant),

$n=2, 3, \text{ and } 4$

식 (5)에 나타난 傳達函數의 模型은 디젤 燃燒의 動的 模型의 近似形態에 불과하지만, 실제의 물리적 模型과 비교할 경우, 制御係의 設計에는 보다 더 적합한 것으로 알려져 있다 (Wellstead and Zanker, 1985). 식(5)는 時間領域으로 置換되어 微分方程式의 형태로 바뀌어 Runge-Kutta 방법을 이용한 數值 解析으로 그 解를 구하였다.

1. 入力信號(Input signals)

가. 基準

二進 多周波 信號란 出力의 대부분이 선택되어진 周波數에만 分布되어 있는 信號로서 Vad Den Bos (1967)에 의해 발표된 방법에 의해 제작이 가능하다. 信號製作 順序는 체계적이고, 임의의 探索에 의존하며, 最適解를 반드시 구할 수는 없다. 그러나 충분히 좋은 準最適의 信號는 반복을 통해서 구할 수 있다. 最少값이 되어야 될 基準 I는 다음과 같이 定義될 수가 있다.

$$I = \sum_{i=1}^N \{P(\text{ideal})_i - P(\text{actual})_i\}^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서 : P()_i : Power at the selected frequency
N : Number of selected frequencies

週期的인 信號 u(t)에 함유된 전체 出力 P_{total}은 다음 式으로 표현된다.

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{2T} \int_0^T u^2(t) dt \dots\dots\dots (7)$$

여기서 u(t) : ± 1 for a binary signal

그러므로 P_{total}의 값은 1이 된다. 가급적 많은 出力이 N개의 선택된 周波數에 걸쳐 分布되어야 하므로 P(ideal)_i은 1/N로 規定된다.

$$P(\text{actual})_i = 2 |F(j\omega_i)|^2 \dots\dots\dots (8)$$

따라서 기준값 I는 최종적으로 다음과 같이 바뀐다.

$$I = \sum_{i=1}^N \{1/N - 2 |F(j\omega_i)|^2\}^2 \dots\dots\dots (9)$$

나. 方法

제작될 信號는 時間 軸에 대하여 偶函數이므로, 基本週期の 前半部만 고려하면 된다. 前半部의 二進 信號가 任意로 가정되고, 基準置 I가 式(9)에 의해 계산된다. 다음 이 신호중 임의의 구간을 역신호로 즉, 1은 -1이 되고 -1은 1로 바꾼다. 바뀐 신호의 기준치 I가 향상되면 즉, 값이 감소하면 다음 구간에서 반복되고, 기준치 I가 악화되면 즉, 값이 증가하면 본래의 값으로 환원되어 다음 구간에서 반복되어 기준치 I에 더이상의 변화가 없을 때까지 계속된다. 전체의 節次가 여러번 반복되어 最善의 信號가 선택된다. 특정한 주파수(기본 주파수의 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 및 16배)에서 최선의 출력분포는 75%로 나타났다. 그림 2는 이 방법으로 구한 신호를 보여주고 있고, 그림 3은 주파수 영역에서의 신호 크기로서 관심 주파수에서의 출력분포를 보여주고 있다.

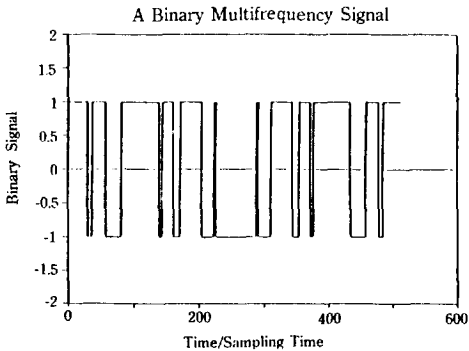


Fig. 2. A binary multifrequency signal in time domain

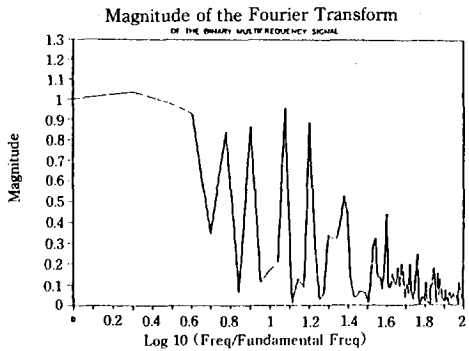


Fig. 3. Magnitude of binary signal in frequency domain

4. 識別 시뮬레이션(Simulation of identification)

가. 시뮬레이션 節次(Simulation procedure)

전체의 시뮬레이션에서는 그림 4에 보이는 바와 같이 開루프 試驗이 수행되었다. 모든 프로그램은 Fortran 77로 작성되었고, 사용된 Compiler로는 Lahey compiler(F77L)로서 Zenith PC에서 작동되었다. 프로그램은 과정의 係數를 읽은 후 過程 模型의 解를 구해 주는 서브루틴에 의해 주어진 二進 信號에 따른 公정의 出力을 계산한다. 출력의 과도 기(Transient state)가 지난 후에 정상상태(Steady state)의 入出力 信號들은 高速 Fourier 變換(fast fourier transform) 서브루틴에 의해 周波數 領域으로 置換된다. 變換 서브루틴은 變換된 入出力 信號를 근거로 傳達函數(Transfer function)를 계산하고 最適化를 위한 서브루틴은 係數들을 決定한다.

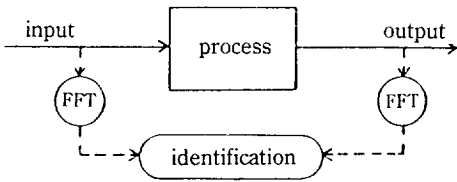


Fig. 4. Block diagram of the system identification

나. 過程 및 雜音 시뮬레이션(Simulated process and noise)

識別方法을 判定하기 위하여, 일반적으로 정의되는 4 集團의 系들이 선택되었다. 표 1은 실험에 사용된 4 集團의 過程模型의 係數들을 보여주고 있다.

系統識別에서의 雜音效果를 判定하기 위하여 亂數로서 雜音을 生成한 후, 디지털 저역 통과필터로 濾過를 한 후에 적당히 환산하여 사용하였다. 이렇게 구한 雜音을, 入力信號와 雜音 絕對值의 平均과의 比를 一定하게 유지하며 入力信號에 添加하여 사용하였다.

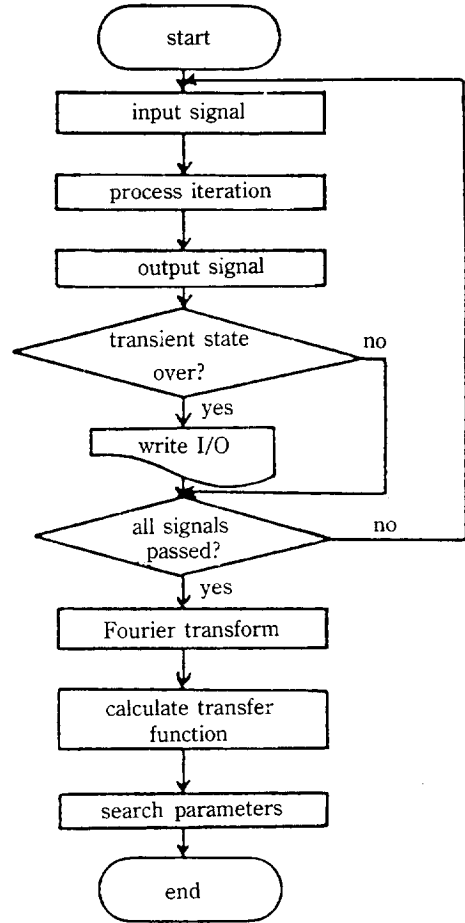


Fig. 5. The flow chart of simulation procedure

Table 1. The parameters of simulated process

System order	Gain	Time constants (min)	Dead time (min)
2nd order	1.0	0.5 1.0	N/A
2nd w/dead	1.0	0.5 1.0	0.3
3rd order	1.0	0.1 0.4 1.0	N/A
4th order	1.0	0.1 0.5 1.0 1.5	N/A

5. 結果 및 考察

앞節에서 서술한 識別 方法의 判定을 위하여, 二進 多周波信號(Binary multi-frequency signal)를 이용한 二群의 實驗이 遂行되었다. 미분방정식의 해를 구하기 위하여 4차 Runge-Kutta 수치해석법이 사용되었으며, 채택된 단계의 수는 單位 샘플링 時間當 10이었다. 實驗들은 모두 開루프系(Open loop system)로 進行되었는데, 첫번째 실험은 잡음이 포함되지 않은 신호가 사용되었고, 두번째 실험은 잡음이 10% 포함된 신호가 사용되었다. 표 2와 3은 이러한 실험들의 결과를 보여주고 있다. 그림 6에서 9는 실험에 사용된 과정의 開루프 傳達函數를 나타내는 Nyquist선도(Polar plot)를 보여준다.

그림 10에서부터 13까지는 각 過程의 周波數 應答線圖를 보여주고 있다. 잡음이 포함되지 않은 신호가 적용된 경우, 과정모형의 매개변수와 거의 같은 매개변수를 구할 수 있었고, 잡음이 포함된 경우에는 모형과정과 다소 상이한 결과가 나타났고, 신호와 잡음의 비가 커질수록 오차가 증가함을 보였다. 이러한 자료는 실제의 계통모형을 구하는 데는 큰 도움이 되지 않지만, 제어계의 설계에는 충분한 도움이 된다. 때로는 이러한 잡음의 문제는 신호의 진폭을 실험이 허용하는 범위까지 증대시켜 제거하는 방법이 있다. 일반적으로 제어기의 설계에서 不動作時間이 系에 미치는 영향을 다루기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 계통분석에 있어서 不動作時間의 포함여부에 관계없이 별다른 차이가 없음을 보여 주었다.

Table 2. The results of noise-free identification

System order	Gain	Time constants (min)	Dead time (min)
2nd order	1.0	0.48 1.02	N/A
2nd w/dead	1.0	0.50 1.00	0.3
3rd order	1.0	0.09 0.41 0.99	N/A
4th order	1.0	0.09 0.53 0.94 1.54	N/A

Table 3. The results of noisy identification with 10% noise

System order	Gain	Time constants (min)	Dead time (min)
2nd order	1.09	0.48 1.11	N/A
2nd w/dead	1.06	0.60 0.94	0.28
3rd order	0.91	0.00 0.53 0.84	N/A
4th order	1.10	0.09 0.69 0.69 1.81	N/A

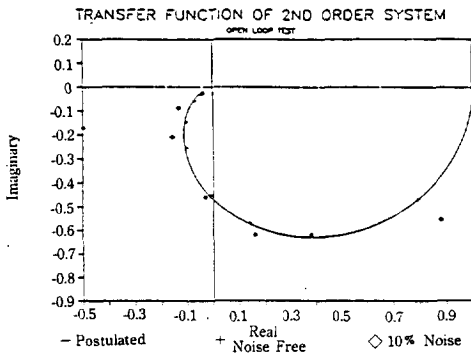


Fig. 6. Nyquist plot of 2nd order system identification

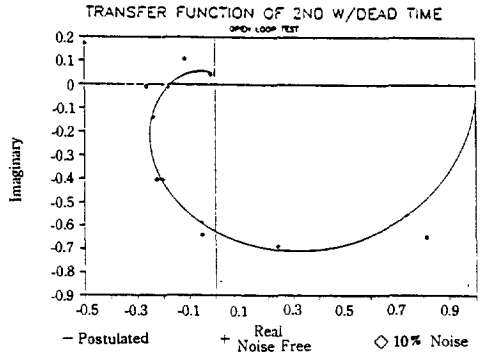


Fig. 7. Nyquist plot of 2nd order w/dead time identification

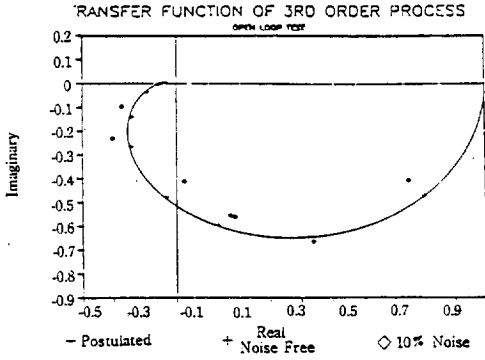


Fig. 8. Nyquist plot of 3rd order system identification

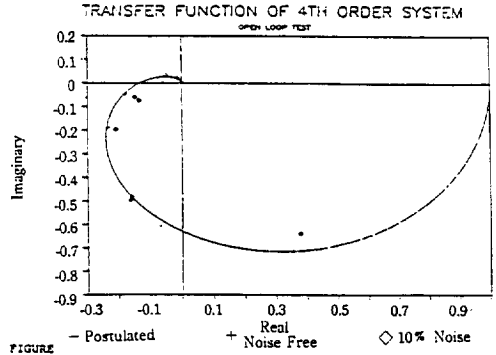


FIGURE 9. Nyquist plot of 4th order system identification

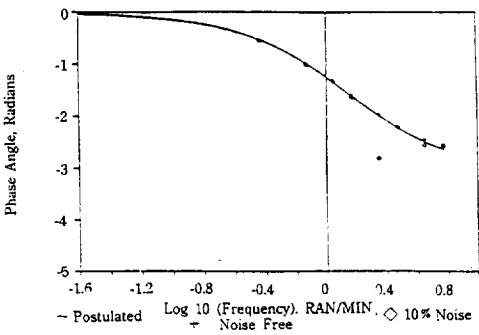
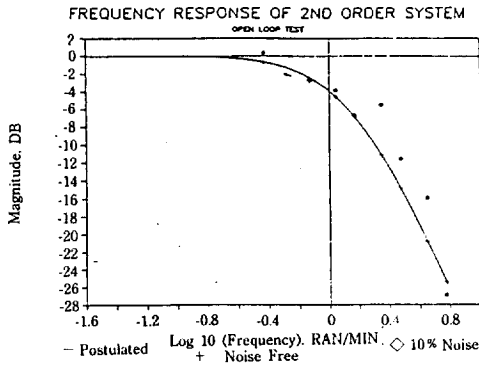


Fig. 10. Frequency response plot of 2nd order system identification

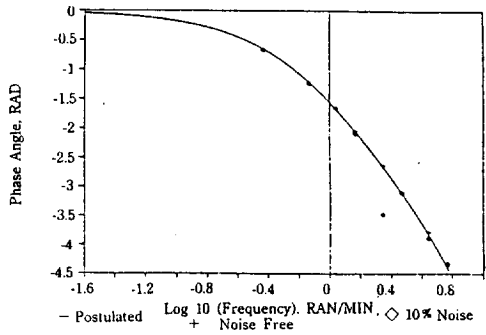
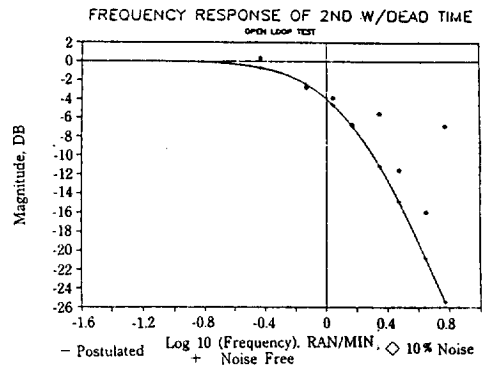


Fig. 11. Frequency response plot of 2nd order w/dead time identification

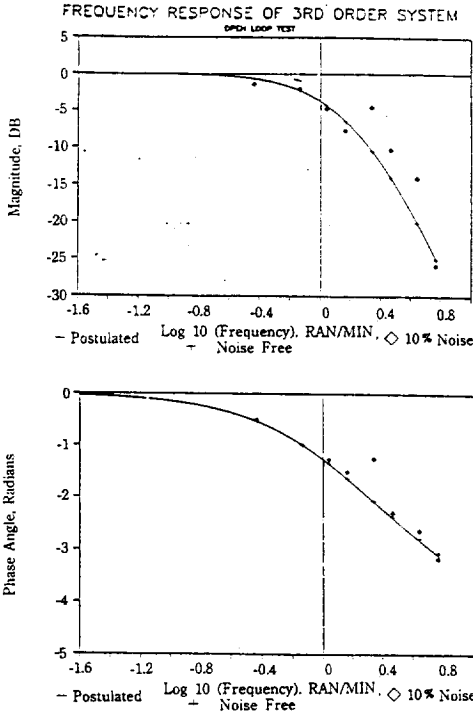


Fig. 12. Frequency response plot of 3rd order system identification

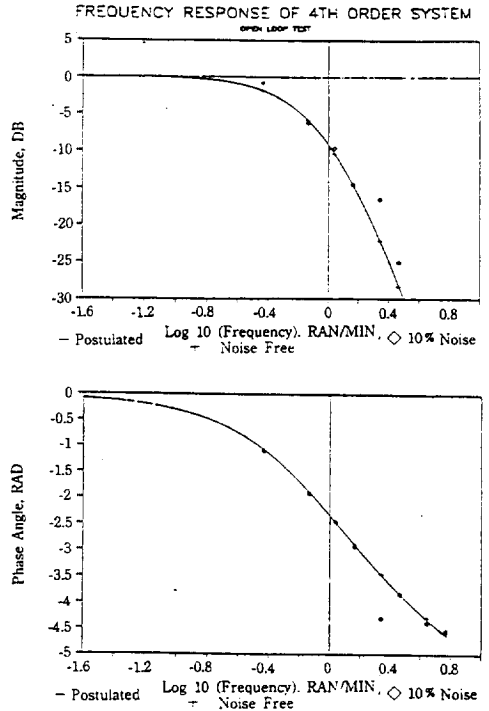


Fig. 13. Frequency response plot of 4th order system identification

6. 結果 및 要約

二進信號를 使用하는 周波數 領域에서의 識別方法이 開發되었으며, 이 方法은 디젤 機關의 煤煙強度 對 燃料噴射率과의 傳達函數를 求하기 爲하여 使用될 수 있는 것으로 나타났다. 디젤기관的 正常狀態 주위에서의 제한된 운전을 가정하여, 線型理論(Linear theory)을 適用하였고, 線型模型의 時不變效果(Time invariant effect)에 根據하여 周波數 領域 分析法(Frequency domain analysis)을 適用하였다. 煤煙을 誘發하는 原因으로 空氣燃料比(A/F ratio)가 가장 重要하기 때문에 單一入力(연료주입율) 및 單一出力(매연강도)을 갖는 模型을 선정하였다. 複素數 形態의 傳達函數 結果를 媒介變數 形態의 模型으로 바꾸기 爲하여 複合方法(Complex method)의 最適化 알고리즘을 適用하였다. 雜音이 포함된 入力信號가 系統識別에 미치는 影響을 分析

하기 爲하여, 亂數를 利用하여 만든 雜音을 적당히 처리한 後, 入力信號에 添加하여 使用하였다. 入력 信號가 雜音을 포함하지 않은 경우에는 식별과정에서 얻어진 結果를 실제의 물리적 모형의 계수로도 직접 使用할 수 있으며, 雜音을 포함하는 경우에는 識別結果는 制御機 設計에 充分히 使用할 수 있는 것으로 나타났다. 이 方法은 信賴性이 좋고, 適用이 容易하고, 識別時間이 비교적 적게 소요되고, 식별 시 系의 傳達狀態를 攪亂시키지 않는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

- 1) Backhouse, R. and D. E. Winterbone. 1987. Dynamic behaviour of a turbocharged diesel engine. Society of automotive engineers, SAE Paper No. 860453

- 2) Bos, A. Van. 1967. Construction of binary multifrequency test signals. Identification in automatic control systems. Part II. Preprints of the IFAC Symposium. Proaque, Czechoslovakia. 12-17, June 1967
- 3) Box, M. J. 1965. A new method of constrained optimization and comparison with other methods, *Comput. J.*, 8, No. 1, 42-52
- 4) Bryzik, W. and C. O. Smith. 1978. Relationships between exhaust smoke emissions and operating variables in diesel engines. *Trans. of SAE* 770718
- 5) Cadzow, James A. and Hugh F. Van Landingham. 1985. *Signals, systems and transforms*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- 6) Cooley, J. W. and J. W. Tukey. 1965. An algorithm for machine calculations of complex Fourier series. *Math. Comput.*, 19. N. 90, 297-301
- 7) Cusset, B. F. and D. A. Mellichamp. 1980. On-line identification of process dynamics: Use of multifrequency binary sequences. *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.* 19, 166-174
- 8) Koppel, Lowell B. 1968. *Introduction to control theory*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- 9) Morris, R. L., R. H. Borcherts, M. V. Warlick and H. G. Hopkins. 1982. Spark ignition engine model building—An identification approach to throttle-torque response
- 10) Wellstead, P. E., and P. M. Zanker. 1981. Application of self-tuning to engine control. In: *Self-tuning and adaptive control: Theory and applications*, C. J. Harris and S. A. Billings, Eds., Peregrinus, London, Ch. 12