

# 본드그래프모델링 방식을 이용한 直流電動機의 速度應答改善에 관한 研究

正會員 愼 璋 絳\* 正會員 河 泓 坤\*\*

## Improvement on the Speed-Response of DC Motor Using Bond Graph Modeling Method

Wee Jae SHIN\* Hong Gon HA\*\* *Regular Members*

**要 約** 본 논문에서는 기준신호와 응답의 편차를 억제하기 위해서 이용하는 적분기와 직류전동기를 본드그래프로 구성하여 직류전동기의 속도 제어계에서 관성이나 외란 그리고 부하변동에 의한 파라미터나 응답변동에 대해서 높은 적응성을 갖는 모델추종형 servo제어기를 본드그래프로 설계하였으며 이 본드그래프 모델링기법이 제어기의 동작해석 및 설계에 유효함을 확인하였다.

**ABSTRACT** In this paper, the integrator used to reduce the error between the reference signal and response, and DC motor are constructed by bond graph.

Then the model following servo controller which have the high adaptation with respect to inertia, disturbance and/or load variation in the speed control system of DC motor is designed by the bond graph, and then the usefulness of this modeling method is confirmed in operating analysis and design on controller.

### 1. 緒 論

H.M. paynter가 다중포트를 ()과 1-접합으로 定義하여 파워保存 및 構造를 본드그래프로 도식한 이래<sup>1-2)</sup> 系の 狀態方程式을 유도하고, 解析하기 위해서 系를 본드그래프로 도식하는 方法과 線形動的의 시뮬레이션 技法들이 연구개발되어 여러 工學分野에서 이모델링方法이 利用되어왔다.<sup>3-6)</sup> 이 본드그래프는 에너지흐름과 變換의 觀點에서 系를 그래프로 도식하는 技法으로 系の 特性을明確히 記述하고 블록(BLOCK) 線圖에서 보다 용이하게 狀態方程式을 유도할 수 있으며 系の 물리적성질과 變數相互間의 因果關係를 간단히 記號로, 그리고 요구되는 相互關係를 函數로 記述할 수 있으므로 制御系에서 주로

油壓 및 空氣壓制御系의 모델링에 많이 이용되고 있다.<sup>7-10)</sup> 또한 본드그래프 시뮬레이션(BGSP : Bond Graph Simulation Program)은 다른 시뮬레이션의 技法에 비해서 時間에 關係하는 系の 파라미터는 式 또는 數式으로 프로그래밍할 수 있고 변환신호는 변환되는 信號의 加算점에서 加算되어 信號로처리되기 때문에 계를 기술하는 본드그래프에는 전혀 영향을 미치지 않으며 연속 시간제어계를 디지털 제어계로 변환하지 않고 시뮬레이션 할 수 있는 이점이 있다.

本 研究에서는 이 본드그래프의 基本概念을 간단히 요약설명하였고, 制御系에서 基準信號와 出力信號의 偏差를 억제하기 위해서 많이 利用하는 積分器를 본드그래프로 표현하여 一般 信號線圖에서 이 본드그래프를 사용할 수 있게 하였다

그리고 電機子電壓制御形 直流電動機도 본드그래프로 구성하여 이 直流電動機를 驅動源으로 하는 直流電動機의 速度制御系에서, 慣性이나

\*慶南大學校 電子工學科  
Dept. of Electronics, Kyungnam Nat'l Univ.

\*\*東義大學校 電子工學科  
Dept. of Elec. Eng. Dongeui Univ.  
論文番號 : 91-29(接受1990. 11. 12)

外亂 그리고 負荷變動에 의한 파라메터나 應答變動에 대해서 높은 適應性을 갖는 모델追從形制御理論을 이용하여 모델追從形制御器를 본드그래프로 設計하였다. 그리고 이 制御器를 BGSP-Enport7 로 시뮬레이션하여 속도응답특성을 평가함으로써 最適한 設計을 위한 係數들을 設定하였으며 제작된 추종제어시스템의 實驗結果를 通하여 본드그래프 모델링方法이 速度應答改善을 위한 直流電動機의 動作解析 및 시뮬레이션에 有效하며 設計에도 有用한 手段임을 確認하였다.

## 2. 速度制御系의 본드그래프 圖示化와 制御器의 設計

### 2.1 본드그래프의 基本要素의 概念

物理 또는 工學系에 많이 利用하는 본드그래프를 制御系에 應用하기 위해서 이것에 대한 基本要素와 概念에 대해서 설명한다.<sup>13)14)</sup> 먼저 物理 또는 工學系統을 構成하는 基本要素로 에너지발생, 저장 및 발산, 變換要素를 나타내는 본드그래프의 要素와 이 要素들을 相互結合 시키는 結合要素를 선정하여야 한다. 이 본드와 系에 信號를 인가하는 信號線圖는 그림 1의 (가)와 (나)같이 표시한다.



그림 1. 본드 및 신호의 기호  
Fig. 1. Symbols of Bond and Signal

본드그래프로 圖示되는 어떤 系에서 電壓源(Se), 電流源(Sr)로 表示하고 損失要素는 R이며 축적에너지, 觀望소는 에너지저장 및 발산요소이며 TF(transformer)와 GY(gyrator)는 에너지 變換要素이지만, TF는 2變數 增幅器, GY는 2變數 變數變換의 機能을 동시에 수행한다.<sup>15)</sup> 物理 또는 工學系統에

서 한 본드에 2개의 變數가 동시에 關連되어 있으면한 變數만이 한 본드에서 獨立的으로 지정되므로 因果關係(Causality)를 設定해 줄 필요가 있다. 電壓變數 Se와 電流變數 Sr에 대해서 因果關係는 그림 2와 같이 유일하게 결정된다.



그림 2. 電壓變數와 電流變數의 因果關係  
Fig. 2. Causalities of effort and flow variable

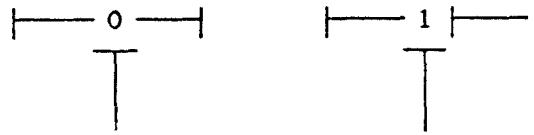


그림 3. 0과 1접합의 因果關係  
Fig. 3. Causalities of 0 and 1-Junction

그리고 接合要素에 대한 因果關係는 다음과 같다. 0 接合(병렬接續)에서는 effort變數가 結合

표 1. 物理 信號에 대응시킨 본드그래프의 表現  
Table 1. Representation of the band graph causality with block diagrams

BG(1-port)	특성식	Block diagram
	$e = (Rf)$	
	$f = (e/R)$	
	$e = 1/C \int f dt$	
	$f = C \frac{de}{dt}$	
	$f = 1/I \int e dt$	
	$e = I \frac{df}{dt}$	

BG(2-port)	특성식	Block diagram
	$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	
	$e_2 = e_1/m$ $f_1 = f_2/m$	
	$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	
	$f_1 = e_2/r$ $f_2 = e_1/r$	
BG(3-port)	특성식	Block diagram
	$e_2 = e_1$ $e_3 = e_1$ $f_1 = f_2 + f_3$	
	$f_2 = f_1$ $f_3 = f_1$ $e_1 = e_2 + e_3$	

된 모든 본드에 共通이므로, effort 變數는 하나의 본드에서 獨立적으로 지정되어 다른 모든 요소에 flow를 가하게 되고, 1 결합(直列接續)에서는 flow變數가 結合된 모든 요소에 共通이므로 flow變數는 하나의 본드에서 獨立적으로 지정되어 다른 모든 요소의 effort에 影響을 주게 되므로 그림 3과 같이 因果關係를 表示할 수 있으며 표 1에 블록선도로 表現된 본드그래프의 인과關係를 도시하였다.

이러한 본드그래프를 電壓 및 電流制御形回路에 利用하기 위해서 그림 1(나)의 信號線圖와  $S_e, S_r$ 를 利用하여 그림4와 같이 도시할 수 있다.

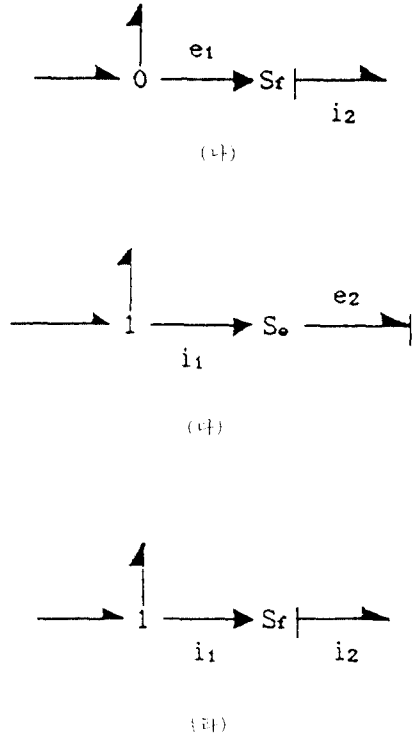
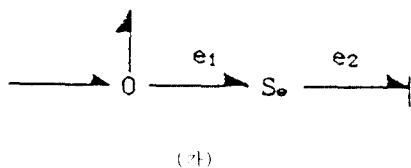


그림 4. (가) 전압제어 전압원 (나) 전압제어 전류원 (다) 전류제어 전압원 (라) 전류제어 전류원  
Fig. 4. Controlled-source models of electronic amplifiers: (가) voltage controlled voltage source (나) voltage e-controlled current source (다) current-controlled voltage source (라) current-controlled current source

### 2.2 積分器와 直流電動機의 본드그래프

一般적으로 制御系에서 基準信號와 出力信號의 偏差를 0으로 하기 위해서 많이 사용하는 積分器의 積分係數를  $K_i$ , 入力信號를  $e_1$ , 出力信號를  $e_2$ 라 하면  $e_2$ 는

$$e_2 = K_i \int e_1 dt \quad (1)$$

로 信號만을 積分하는 積分器이다. 이 積分器를 본드그래프요소와 그림 4를 利用하여 그림 5와 같이 본드그래프로 表現하였다.

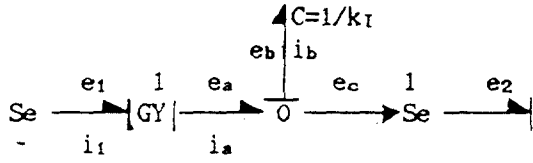


그림 5. 적분기 본드그래프  
Fig. 5. Bond graph of intertgrator

그림 5의 본드그래프에서 電壓 $e_1$ 이 GY에 인가 되면 GY에서  $e_1$ 을  $i_a$ 로 變換시키 0 積함에 電流  $i_a$ 를 흐르게 한다. 그러면 C에  $i_a=i_b$ 가 흘러 C 兩端電壓  $e_b$ 는

$$e_b = K_1 \int e_1 dt \quad (2)$$

가 된다. 0 積함은 竝列接續이므로 GY의 出力電壓  $e_a$ 와 信號線圖電壓  $e_c$ 는  $e_a=e_b=e_c$ 가 된다. Se의 利得이 1이므로 Se에서 다음의 接合要素에  $e_2=e_c$ 의 電壓을 인가하게 되므로 式(1)을 滿足하게 된다. 그리고 이  $e_a$ 에 의해서 入力電流 $i_1$ 는  $e_a$ 가 되며 直流電動機를 그 等價回路에 의해 본드그래프로 구성하면 그림 6과 같이 된다.

여기에서  $e_a$ 와  $i_a$ 는 電氣子電壓과 電流,  $R_a$ 와  $L_a$ 는 電氣子抵抗 및 Inductance,  $e_b$ 는 逆起電力,  $K_a$ 는 逆起電力常數,  $T_m$ 과  $T_L$ 은 回轉 및 電荷토크,  $K_1$ 는 토크상수,  $\omega$ 는 角速度,  $J$ 는 慣性모멘트,  $B$ 는 黏性摩擦係數이다. 그리고  $i_a$ 를  $T_m$ 으로,  $\omega$ 를  $e_b$ 로 즉 電氣的 變數를 機械的 變數로, 또는 이 逆으로 變數變換하여야 하므로 GY가 필요하게 된다. GY係數를  $r$ 라 하면  $e_b=r\omega$ ,  $T_m=r i_a$ 가 되며 GY계수는 비선형특성을 갖는 MGY(Modified Gyrator)를 이용하였다.

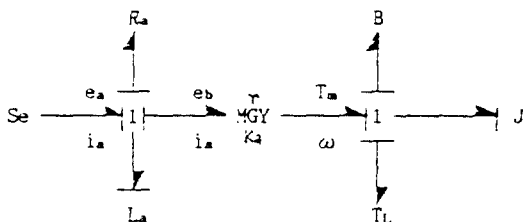


그림 6. MGY를 이용한 직류전동기 본드그래프  
Fig. 6. Bond Graph of DC Motor using MGY

그림 6의 直流電動機의 본드그래프에서 MGY를 사용하면 逆起電力常數와 토크常數를 동시에 設定할 수 없는 결점이 있다. 이 역기전력상수와 토크 상수를 동시에 설정하기 위해서 그림 4의 전류제어전압원을 이용하면 그림 6은 그림 7과 같이 나타낼 수도 있다. 그림 7의 본드그래프에서  $e_b$ 는  $e_a$ 에 변환되는 信號로  $e_a$ 와  $e_b$ 를 가산하면 積함요소는 1-積함이 되어야 한다.  $e_b$ 가  $e_a$ 에 가산될 때  $e_b$ 信號만 가산되므로 電壓原 Se를 사용하였다. 그리고  $T_m$ 은  $i_a$ 에서 발생되고  $T_L$ 은  $T_m$ 에 負로 作用하므로  $T_1$ 이  $T_m$ 에 1接合으로 인가되도록 하였다.

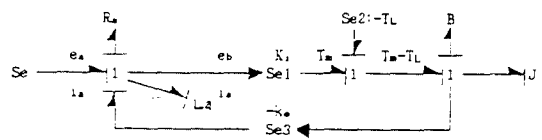


그림 7. 전압원을 이용한 직류전동기의 본드그래프  
Fig. 7. Bond Graph of DC Motor using voltage source

### 2.3 Model 追從形 Servo 制御器의 設計

그림 6에서 各要素에 대한 方程式과 要素를 연결하는 信號 및 본드에 의해 에너지를 傳達하는 接合方程式을 표1을 이용하여 動態方程式을 誘導하면 다음과 같다.

$$df \times E_2 / dt = 1 / L_a \times eE_2 \quad (3)$$

$$df \times M_2 / dt = 1 / J \times eM_2 \quad (4)$$

식(3)에 대한 接合方程式은

$$eE_2 = e_a - eE_3 \quad (5a)$$

$$eE_3 = R_a \times fE_3 \quad (5b)$$

식(4)에 대한 接合方程式은

$$eM_2 = eM_2 - eM_3 \quad (6a)$$

$$eM_1 = (K_a \times i) - T_L \quad (6b)$$

$$eM_3 = B \times fM_3 \quad (6c)$$

$$fM_1=fM_2=fM_3=\omega$$

$$i=fE_1=fE_2=fE_3=ia$$

(5)식에서

$$eE_2=ea-Ra \times fE_3 \quad (7)$$

$$fE_2=fE_3=ia \quad (8)$$

(7)식과 (8)식을 (3)식에 대입하면

$$dia / dt=1 / La \times (ea-Ra \cdot ia) \quad (9)$$

그리고 (6)식에서

$$eM_2=(ka \times i-TL)-B \times fM_3 \quad (10a)$$

$$i=ia \quad (10b)$$

$$fM_3=fM_2=\omega \quad (10c)$$

(10)식을 (4)식에 대입하면

$$d\omega / dt=1 / J \times (ka \times ia-TL)-B \times \omega \quad (11)$$

(9)식과 (11)에서 直流電動機의 狀態方程式을 구하면

$$\begin{bmatrix} dia / dt \\ d\omega / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Ra / La & 0 \\ ka / j & -B / J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 / La \\ 0 \end{bmatrix} ea + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} TL \quad (12)$$

出力 方程式은

$$y_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 制御對象의 動態 方程式은

$$X_p = A_p X_p + B_p e_a + E_p T_L \quad y_p = C_p X_p \quad (14)$$

식(14)에서  $X_p$ 는 狀態벡터,  $e_a$ 는 制御入力,  $y_p$ 는 出力,  $T_L$ 은 負荷토크이며  $A_p$ ,  $B_p$ 는 가제어  $C_p$ 는 可觀測하며 狀態 방정식의 係數行列은

다음과 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} -Ra / La & 0 \\ ka / J & -B / J \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 1 / La \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15a)$$

$$E_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 / J \end{bmatrix} \quad C_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式 (14)의 制御出力  $y_p$ 를 다음의 線形時不變系 모델

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m r \quad (16a)$$

$$y_m = C_m X_m \quad (16b)$$

의 스텝응답에 접근시킬 수 있는 制御系를 設計하려고 한다. 식(16)에서  $X_m$ 는 狀態 Vector,  $r$ 는 스텝입력,  $y_m$ 는 모델의 출력이고 이 모델은 可制御 可觀測하다. 여기서 設計하려고 하는 制御器는 閉루프系를 안정하게 하고, 正常狀態에서 制御된 出力  $y_p$ 를 目標値에 一致하고 모델의 스텝응답에 접근도록 하여야 한다. 식(14)에서  $T_L$ 은 負荷토크이므로 負荷토크 변동에 대해서 積累電動機의 速度변동이 적어야 하므로 토크의 시간에 대한 변화량이 0이 되어야 한다. 直流電動機의 出力  $y_p$ 와 모델의 出力  $y_m$ 의 偏差를  $e$ 라 하면  $e$ 는

$$e = y_p - y_m \quad (17)$$

이다. 식(14) (15) (16)을 微分하여 狀態方程式으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{X}_p \\ e \\ \dot{X}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ C_p & 0 & -C_m \\ 0 & 0 & A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{e}_a \quad (18)$$

式 (18)에서  $(\cdot)$ 는 時間에 대한 미분을 의미한다.

式 (18)에서 最適制御入力  $e_a$ 를 구하기 위해서 다음의 評價函數을 最小化한다.

$$J = \int (\dot{X}'Q\dot{X} + \dot{e}_a^2)dt \quad \dot{X} = [\dot{X}_p \ e \ \dot{X}_m] \quad (19)$$

식 (19)에서 Q는 正定對稱行列로 荷重行列이다. 이 式을 最小化하는 最適制御入力  $e_a$ 와  $\dot{e}_a$ 는

$$\dot{e}_a = K_1 \dot{X}_p + K_2 e + K_3 \dot{X}_m \quad (20a)$$

$$e_a = K_1 X_p + K_2 \int edt + K_3 X_m \quad (20b)$$

가 된다. 式(20a)에서  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $X_p \rightarrow 0$ ,  $e \rightarrow 0$ 이 되므로 케루프는 안정되고 정상상태에서 直流電動機의 速度 즉 出力  $y_p$ 는 원하는 목표치와 일치하게 될 것이다. 그리고  $y_p$ 가 모델의 스텝응답  $y_m$ 에 접근하기 위해서 직류전동기의 영점을 모델의 영점에 최대한 접근시키야 하므로  $K_3 \dot{X}_m$ 의 feedforward 항이 필요하다. 이 식(20b)에서 상태변수  $x_p, x_m$  출력  $y_p, y_m$ 과 그림5의 직분기를 이용하면 제이기는 그림 8과 같이 설계된다. 행렬 P를 正定對稱行列 그리고 最適制御入力  $\dot{e}_a = -K\dot{x}$ 라 할때 최적게환이득 K는

$$K = -B'P \quad (21)$$

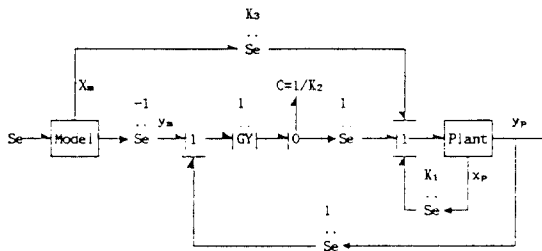


그림 8. 모델 추종 제어 제이기의 본드 그래프.  
Fig. 8. Bond graph of the model following servo controller. 最適制御理論에 의해서 滿足되어야 한다. 식(18)과 (20a)에서

$$[K_1 \ K_2] = -[B_p' \ 0]P_{11}, \quad K_3 = -[B_p' \ 0]P_{12} \quad (22)$$

가 된다. 식 (22)에서 행렬P는 Riccati 정상행렬 방정식

$$Q + A'P + PA - PBB'P = 0 \quad (23)$$

을 滿足한다. 式 (23)을 滿足하는 行列 P를 求하기 위해서 式(18)의 상태 방정식에서 係數行列을 다음과 같이 分割行列로 分割하여 計算한다.

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ 0 & A_m \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_0 \end{bmatrix}$$

이요 식(24)에서 행렬  $A_1 \ A_2 \ B_1$ 은

$$A_1 = \begin{bmatrix} -A_p & 0 \\ -C_p & 0 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -C_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}$$

이 式(23)과 (24)에서

$$A_1 P_{11} + P_{11} A_1 - P_{11} B_1 B_1' P_{11} + Q = 0 \quad (26a)$$

$$A_1 P_{12} + P_{11} A_2 + P_{12} A_r - P_{11} B_1 B_1' P_{12} = 0 \quad (26b)$$

이다. 式(22)에서  $K_1, K_3$ 는  $(1 \times 2)$ 行列,  $K_2$ 는  $(1 \times 1)$ 行列이 되어야 하므로 直流電動機의 狀態係數  $w_p, i_{pa}$ 에 대한 最適게환 利得을  $K_{11}, K_{12}$  그리고 狀態變數  $w_p, i_{am}$ 에 대한 최적 feedforward 利得을  $K_{21}, K_{22}$ 라 하면 그림 7의 直流電動機의 본드그래프를 이용하여 그림 9와 같이 그림 8의 제이기는 설계된다.

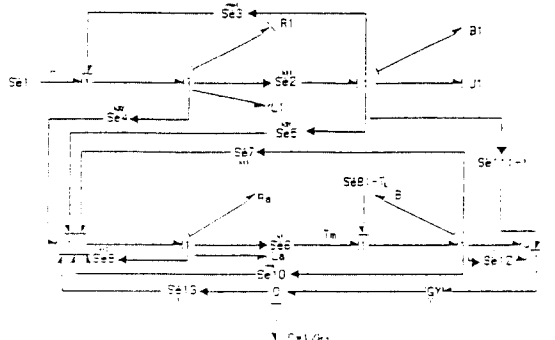


그림 9. 모델 추종 제어 제이기를 갖는 직류전동기의 속도제어 제이기의 본드 그래프.  
Fig. 9. Bond graph on the Speed control system of DC motor with the Model following Servo Controller

### 3. 본드그래프 시뮬레이션 (Bond graph simulation)

본드그래프로 구성된 直流電動機 및 Model 追從形 Servo제어계를 ENPORT-7로 시뮬레이션하여 제어계의 速度應答을 관찰함으로써 제계수들을 표3과 같이 最適化 시켰다.

표 2. 모델과 플랜트를 이용한 직류전동기의 계수  
Table 2. Coefficients of DC motor using Model and Plant

상 수 명	Model	Plant
전기자 inductance [mH]	2	23.7
전기자 저항[Ω]	1.25	1.64
역기전력 상수[V · sec / rad]	0.056	0.457
토크 상수[N · m / A]	0.056	0.457
관성 moment[N · m sec <sup>2</sup> / rad <sup>2</sup> ]	$3.88 \times 10^{-5}$	$6.8 \times 10^{-2}$

그림 7의 直流電動機 시뮬레이션에서 直流電動機의 電氣子電壓  $e_a$ 는 단위 step함수로 각본드에 사용한 諸定數는 表2의 plant 정수들을 이용하여 直流電動機의 速度應答을 시뮬레이션하였다. 이 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같이 양호하였다.

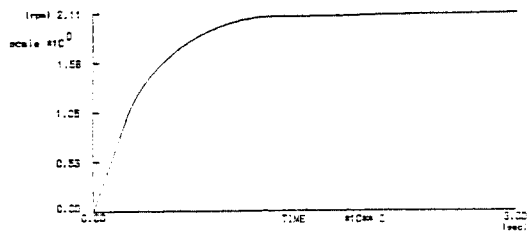


그림 10. 직류전동기의 속도응답  
Fig. 10. Speed response of DC motor

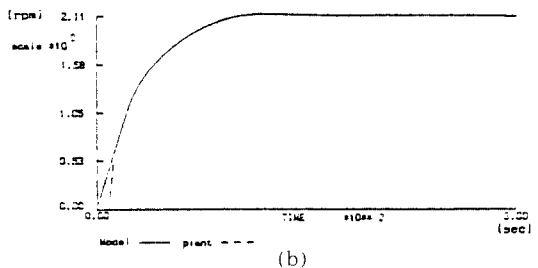
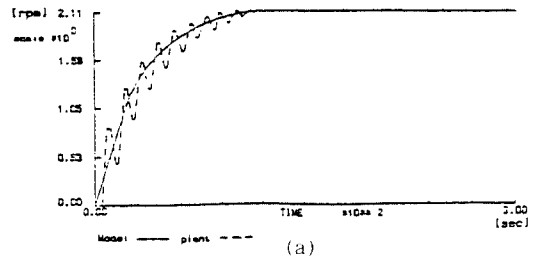
그림 10의 속도응답에서 점성마찰계수 B는 일반적으로 負荷토크에 포함하므로 무시하였다. 본 연구에서 제안한 Model 追從形 直流電動機의 速度制御系의 계수를 설정하기 위해서 直流電動機는 表1의 Model 및 plant 정수들을 이용하여 식(24)와 식(25)의 行列 A, B, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>을 계산하

였고, 식(24)의 荷重行列 Q의 Q<sub>0</sub>를 0.01, 0.1, 1로 설정하여 MAT LAB PROGRAM으로 直流電動機의 速度 및 전류 制御계수 K<sub>11</sub>, K<sub>12</sub>, 적분계수 K<sub>2</sub> 그리고 Model의 速度 및 電流의 Feedforward 계수 K<sub>31</sub>, K<sub>32</sub>를 表3와 같이 계산하였다.

표 3. 제어기의 계수  
Table 3. Coefficients of Controller

Q <sub>0</sub>	K <sub>11</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>31</sub>	K <sub>32</sub>
0.01	-0.1991	-0.0314	0.0891	0.5834	0.1147
0.1	-0.3462	-0.0548	0.2581	1.3298	0.2283
1	-0.6019	-0.0959	0.6952	3.2008	0.4799

이 계수들을 이용하여 본드그래프 시뮬레이션을 행한 最適한 결과가 그림 11의 (a), (b), (c)이고 그림 11의 Q<sub>0</sub>는 (a)가 0.01, (b)가 0.1, (c)가 1이다. Q<sub>0</sub>가 작을수록 速度應答에 過渡應答狀態를 보이고 있으며 클수록 直流電動機가 Model에 비해서 起動時間이 길어 오히려 定常狀態에 도달하는 시간이 늦게 되는것을 알 수 있다.



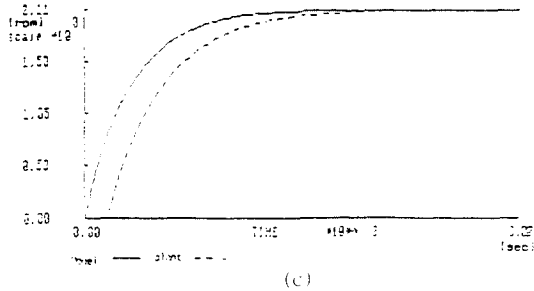


그림 11. 본드그래프로 구성된 속도제어계의 속도 응답  
Fig. 11. Speed-Response of speed control system constructed by the bond graph

#### 4. 實驗 및 考察

본 연구에서 제안한 Model追從形 制御器를 실제의 直流電動機의 速度制御系에 적용하여 直流電動機의 速度應答이 Model의 應答에 追從하는지를 실험적으로 고찰하였다. 이 速度制御系에서 사용한 直流電動機의 定數는 表2 plant이며 直流電動機가 1000[rpm]일때 入力電壓(設定速度)가 7[V]이므로 速度應答은 速度檢出器에서, 電氣子電流는 DC Hall Current Sensor에서 檢出하여 1000[rpm]일 때 각각 7[V]가 되도록 조정하여 ADC를 거쳐 microcomputer(CPU 8086)에 인가하였고 Model 및 積分器는 C-언어로 프로그래밍하여  $K_{11}, K_{12}, K_2, K_{31}, K_{32}$ 는 설정할 수 있게 하였으며 이 制御器의 出力은 DAC를 거쳐 PWM power converter에 인가하였다. 이 전압에 의해서 電流電動機 電氣子電壓을 制御하도록 하였다. 여기서 Model의 應答 및 直流電動機의 速度應答의 Microcomputer에 축적시켜 이것을 printer로 출력하였으며 直流電動機의 速度를 1000[rpm]로 설정하여 시뮬레이션과 比較하였다. 表3의 계수를 이용한 速度應答이 그림 12의 (a)(b)(c)이다. 그림 12의 (a)(b)(c)에서  $Q_0$ 는 0.01, 0.1, 1이다.

그림 12에서  $Q_0$ 가 작거나 클때 直流電動機 電氣子電壓이 과대 혹은 과소 보상되어서 直流電動機의 速度應答이 Model의 應答을 追從하는데 양호하지 못함을 알 수 있다.

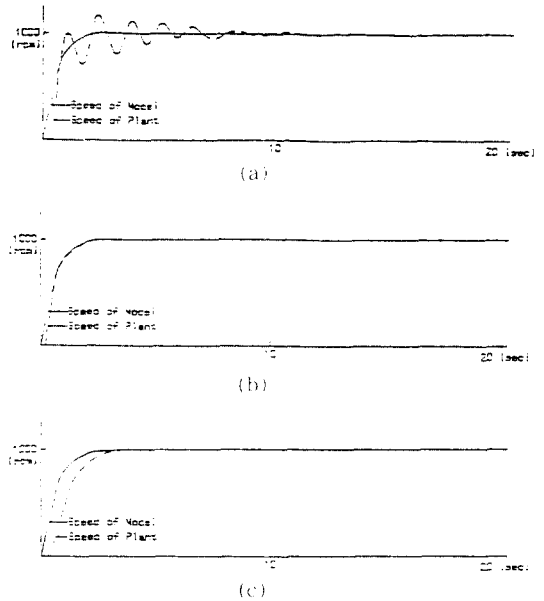


그림 12. 모델 추종 서보 제어기를 이용한 직류전동기의 속도응답  
Fig. 12. Speed Response of DC motor using Model following Servo controller

#### 5. 結 論

本 研究에서는 基準信號와 出力信號의 偏差를 억제하기 위해 많이 사용하는 積分器와 直流電動機를 본드그래프로 구성하였으며, 이 積分器와 直流電動機를 이용하여 속도제어계의 속도를 制御하는 追從形 Servo 制御器를 본드그래프로 설계하였다. 설계된 追從形 Servo 制御器는 안정하고, 정상상태에서 直流電動機의 속도응답이 목표치에 일치하게 되고, 直流電動機의 영점이 모델의 영점에 최대한 접근하게 되므로 관성이나 외란, 부하변동에 대한 응답변동, 파라미터변동에 대해서 높은 적응성을 갖게된다.

荷重行列  $Q$ 의  $Q_0$ 가 작을수록 直流電動機의 速度應答에 過渡應答狀態를 보였으며 클수록 直流電動機의 起動時間이 길어 Model의 應答에 追從하는 時間이 길어짐을 본드그래프 시뮬레이션 결과 평가할 수 있었다. 그러므로  $Q_0$ 을 적당



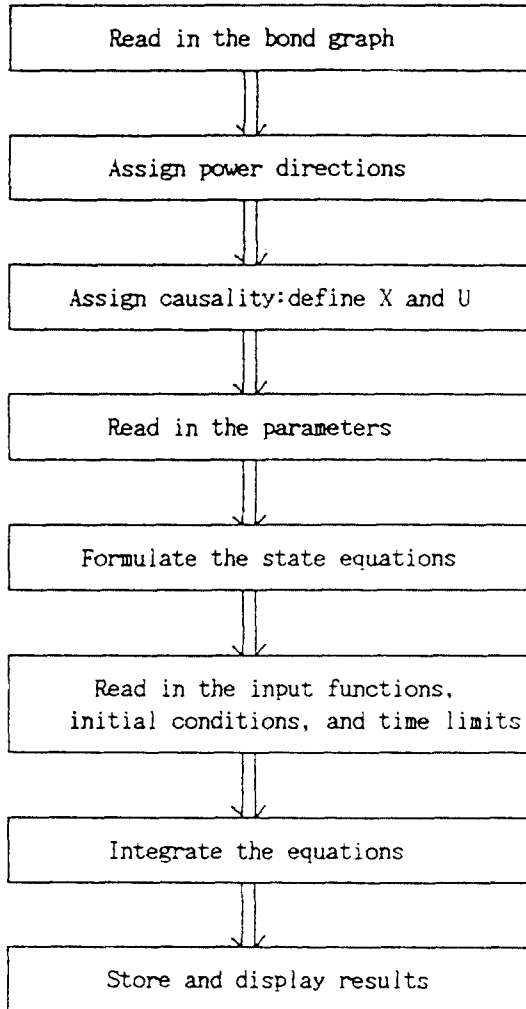
히 선택하므로써 直流電動機의 速度應答이 Model 의 應答에 양호하게 追從하는 것을 실제의 실험에서 알 수 있었으며 實驗結果도 시뮬레이션과 一致되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본드 그래프 모델링 방법이 직류전동기 速度制御系의 解析과 시뮬레이션 및 設計에 유용한 手段이 됨을 확인하였다.

이 연구는 1989년 한국과학재단 기초연구지원비에 의하여 이루어졌음

### 참 고 문 헌

1. H.M. Paynter and D.C. Karnopp "Design and Control of Multiport of Engineering system of IFTV. TOKYO Symposium", pp. 443~454, 1965.
2. R.C. Rosenburg and D.C. Karnopp "A Definition of the Bond Graph Language" Journ.Dyn. Sys. Mea. and Contr., pp.1-4, Sept. 1972.
3. Penfield,Jr "Description of electrical network using wring oprators" proc. IEEE,60, pp.49-53, 1972.
4. Dixhorn J.J,van "Network Graphs and Bond Graphs in Engineering Modeling" Annals of System Reserch, vol.2, pp. 22-38,, 1972.
5. L.S. Bonderson "Vector Bond Graphs Applied to one Dimensional Distributed System" Journ. Dyn. Sys.Me. and Cotrol., pp.75-, Mar. 1975.
6. P.C. Breedveld "Multibondgrph Elements in physical Systems Theory" J.Franklin Inst., vol. 319, No.1 / 2, pp.1-36, 1985.
7. B.W. BARNARD and DRANSFIELD "Predicting Response of a proposed Hydraulic Control System Using Bond graphs" Journ. Dyn. Sys. Mea. and Contr., vol.99, No.1 pp.1-8, Mar. 1977.
8. W.A. Bond and H.R. mortin, "Computer-Aided Designed A Hydrostatic Transmission System using Bond Graphs" Journ. Flu. Contr., vol.13, No. 3, pp. 69-80, 1981.
9. 則次復郎, 和田 力, 清水 頭 "ボンドグラフによる 空氣 壓 モ タ 速度 制御係의 特性解析と 設計"昭和 60年 秋季油空壓講演會 pp.13-16, 1985. 11. 14.
10. 田中和傳 "ボンドグラフ의 應用" 日本油空壓學會 第17券 第2號 pp. 13-16, 1985. 11. 14.
11. 田中和傳 高橋浩羽 飯田洋行 "BGSP による 油壓回路의 動特性의 ッソコレーション" 昭和61年 春季油空壓講演會 pp 13-16, 1987. 5. 27
12. Itsya Muta and Masahiro Iguchi "DC Motor control by Model Following Servo Controller" 電氣學會論文誌 B, vol. 106, No. 3, pp.25-32, 1986.
13. Rosenberg,R.C and Karnopp, D.C "Introduction to physical system Dynamics" McGraw-Hill Inc., pp. 148-288, 1983.
14. Takayoshi Totani, Kenzou Nonami and Hitoshi Okamura "A Method for Realizing Linear optimal Control by Time-invariant Control Low and Compensation Input" 計測自動制御學會論文集 第20券 第3號 pp.187-192, 1984.

## THE ENPORT-7 MAIN FLOWCHART



慎 璋 緯 (Wee Jae SHIN) 正會員  
1949年 7月 7日生  
1975年 2月 : 東亞大 전자공학과 졸업  
1979年 2月 : 東亞大 學校 大學院 電子工學  
科 (工學碩士)  
1983年 2月 : 慶南大 併設 工專 助教授  
1990年 2月 : 東亞大 學校 大學院 電子工學  
科 (工學博士)  
1983年 3月 - 現在 : 慶南大 學校 電子工學  
科 副教授



河 泓 坤 (Hong Gon HA) 正會員  
1950年 11月 27日生  
1973年 2月 : 東亞大 學校 電子工學科 卒業  
(工學士)  
1977年 2月 : 東亞大 學校 大學院 電子工學  
科 卒業 (工學碩士)  
1984年 8月 : 中央大 學校 大學院 電子工學  
科 卒業 (工學博士)  
1985年 3月 - 現在 : 東義大 學校 電子工學  
科 副教授