

工程統制用 意思決定支援시스템

A Decision Support Systems Design for Process Control

金 貞 植*

Abstract

This paper deals with the case analysis of second order processes under sampled-data. Proportional-Integral-Derivative (PID) control, and development of Decision Support Systems(DSS) for such processes.

In this paper three techniques were described for identifying the dynamics of closed loop stable processes. The first, called pulse testing, is a frequency-domain method, which yields the frequency response diagram of an open loop process. The second is a time-domain method which yields the gain and time constants of the process model. The third technique is based on step response and gives the parameters of PID controllers.

The development of DSS design programs consisting of above three techniques will provide very powerful tools in the microcomputer based process control.

1. 序 論

여러 가지 統制(control)를 行함으로써 우리는 組織體(organization)를 管理하게 된다. 이 중에서 특히 生産工程을 効率的으로 管理하기 위해서는 工程統制(process control)가 必要하다.

工程統制는 化學製品工場, 石油 정제 공장, 제강공장과 같은 분야에서 매우 다양하게 活用되고 있는데, 이러한 장치산업분야에서 工程統制技法이 크게 개발된 것은 화학공학 및 전기공학 덕분이라고 생각한다.

工程的 監査·통제에 있어서 디지털 컴퓨터의 사용은 최근에 장치산업 외에도 많은 生産分野에 擴散되고 있으며, 이중 특히 중시해야 할 분야중의 하나는 금속·기계작업, 壓縮作業, 電氣部品·製造作業 및 組立作業등과 같은 離散的 部品(discrete parts) 製造·組立作業이다.

최근에 있어서의 마이크로컴퓨터(micro computer)의 우수한 性能과 보다 저렴해진 가격으로 工程統制를

하는데 보다 편리해지고, 신속·정확해졌기 때문에 裝置産業은 물론 離散的 部品·製造産業에 마이크로 컴퓨터를 活用한 工程統制가 活氣를 띄게 된 것이다.

本 論文은 裝置産業이든 離散的 部品·製造産業이든 간에 入-出力 資料를 求得할 수 있다면, 非專門家라도 마이크로 컴퓨터를 活用하여 工程統制에 따른 意思決定을 보다 精確하고 迅速하게 할 수 있도록 意思決定支援시스템을 設計하는데 目的을 두었다.

2. 關係理論

計測器로 測定된 工程的 入·出力 資料를 Fourier 變換시켜, 周波數(frequency), 振幅比(amplitude ratio), 位相角(phase angle)으로 구성된 Bode 線圖를 그려서 利得(gain), 工程時間常數(process time constant: x_1, x_2) 및 無効時間(dead time)값을 求하도록 周波數領域(frequency domain)에서의 펄스分析(pulse analysis)을 하였고,

工程的 入·出力資料와 利得 및 bode 線圖에 의한 工程時間常數, 無効時間등은 時間에 따라 變하는 動的

*空軍士官學校 講師 接受日: 1987. 9. 4.

인 특성을 갖는 수치이므로 擬似函數(pseudo function)의 概念을 活用하여서 非線形 回歸式에 의하여 最適利得 및 最適工程時間常數를 時間領域(Time Domain)에서 modeling을 最適化 시켰으며,

이제까지 얻은 利得, 工程時間常數, 無効時間과 샘플링주기를 活用하여 單位階段函數로서 설정점변화(set point changes)를 比例-積分-微分式 統制를 통하여 必要한 意思決定常數값을 決定해 줄 수 있도록 設計하여 이런 절차로 實驗 및 考察을 시행하여 그 結果를 現場化 시켰다. 따라서 關係理論은 그림-1과 같다.

3. 實驗 및 考察

3.1 周波數領域에서의 펄스分析

工程의 入·出力資料가 그림-2와 같을 때 Fourier 變換을 이용하여 표-1을 얻어서 Bode 線圖를 그리면 그림-3과 같다. 그림-3에서 절점 주파수를 구하면 1.4와 6을 얻는다. 또한 <위상각=Action(공정시간상수×주파수)의 式으로부터 표-2을 구하여 그림-4를 그린다.

그림-4에 의하여 2차 公程의 위상각 90°와 일치하는 주파수 2.95를 얻을 수 있으며, 총 무효시간에 의한 위상각은 -94°이다.

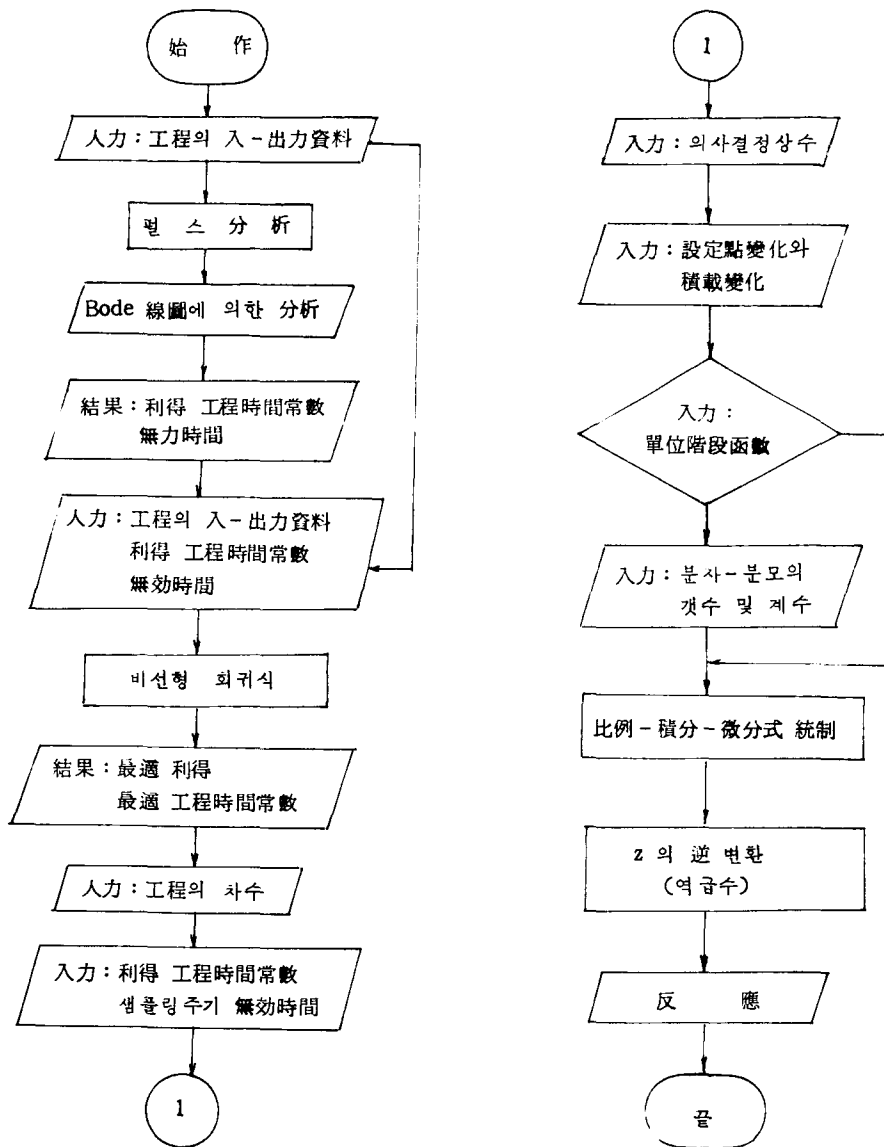


그림-1. 關係理論

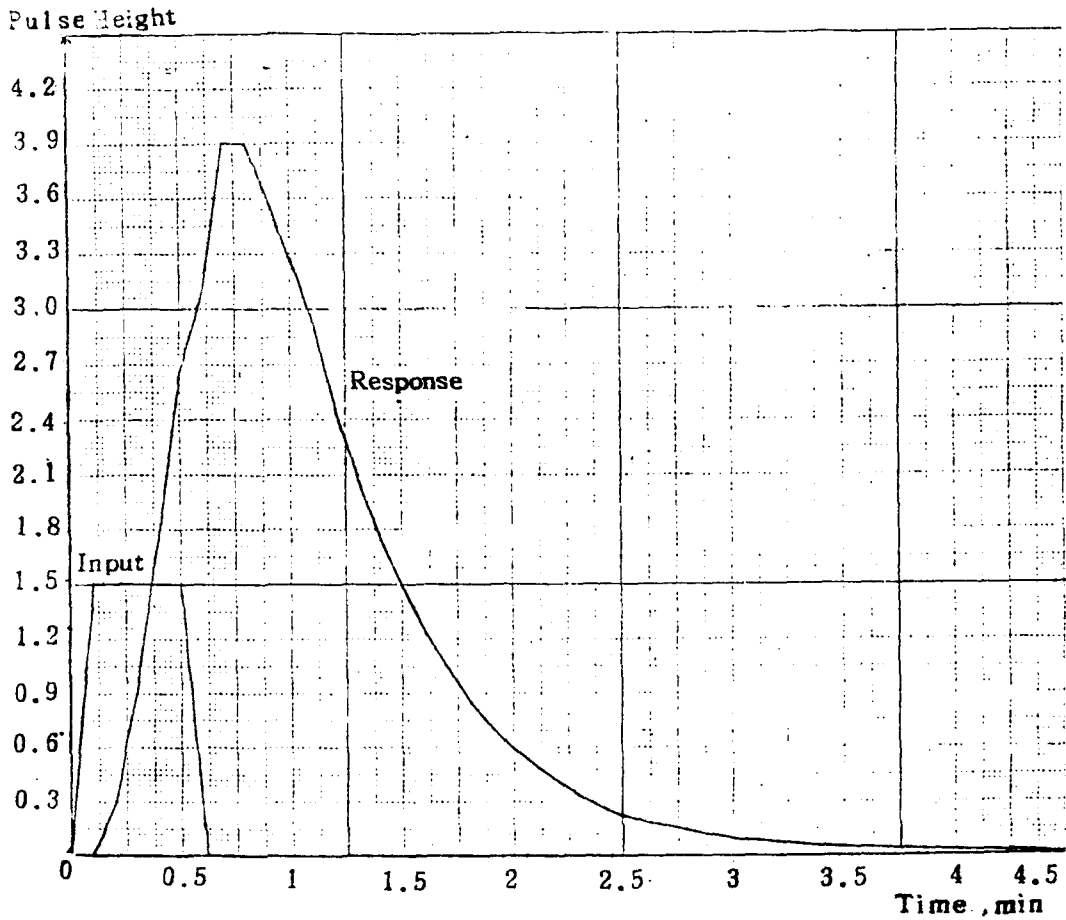


그림-2. 펄스 入-出力의 資料

표-1. 펄스分析值

1ISA - FREQUENCY RESPONSE FROM PULSE TEST DATA

!! FREQUENCY RESPONSE FROM PULSE TEST DATA !!
 !! SAMPLE PROBLEM TO TEST COMPUTER PROGRAM

LIST 3 DATA 1. 2. 0. 0.

LIST 4 DATA 0. 3. 10. .10000

LIST 6 DATA ***** PULSE NO. = 1 EX## !!

HEIGHT AT 0- .0000E+00 MULTIPLIER 1.0000 CLOSURE CODE 2.
 BASE LINE DRIFT .0000E+00 SUMMARY CODE 1. NO. SECTIONS 2.

SECTION NUMBER 1 2
 TIME INTERVAL .100E+00 .112E+00
 LAST POINT NO. 5. 45.

42 金貞植

PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE
1	1.500	2	1.500	3	1.500	4	1.500	5	1.500
6	.000	7	.000	8	.000	9	.000	10	.000
11	.000	12	.000	13	.000	14	.000	15	.000
16	.000	17	.000	18	.000	19	.000	20	.000
21	.000	22	.000	23	.000	24	.000	25	.000
26	.000	27	.000	28	.000	29	.000	30	.000
31	.000	32	.000	33	.000	34	.000	35	.000
36	.000	37	.000	38	.000	39	.000	40	.000
41	.000	42	.000	43	.000	44	.000	45	.000

LIST 6 DATA ***** PULSE NO. = 2 EX## !!

HEIGHT AT 0- .0000E+00 MULTIPLIER 1.0000 CLOSURE CODE 2.
 BASE LINE DRIFT .0000E+00 SUMMARY CODE 1. NO. SECTIONS 2.

SECTION NUMBER 1 2
 TIME INTERVAL .100E+00 .131E+00
 LAST POINT NO. 29. 45.

PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE	PT,	VALUE
1	.000	2	.297	3	.969	4	1.790	5	2.650
6	3.460	7	3.900	8	3.880	9	3.620	10	3.250
11	2.850	12	2.450	13	2.090	14	1.760	15	1.480
16	1.230	17	1.030	18	.851	19	.705	20	.583
21	.481	22	.397	23	.327	24	.269	25	.222
26	.183	27	.150	28	.124	29	.102	30	.084
31	.069	32	.057	33	.047	34	.038	35	.032
36	.026	37	.021	38	.018	39	.014	40	.012
41	.010	42	.008	43	.007	44	.005	45	.001

LISA - FREQUENCY RESPONSE FROM PULSE TEST DATA

!! FREQUENCY RESPONSE FROM PULSE TEST DATA !!
 !! SAMPLE PROBLEM TO TEST COMPUTER PROGRAM

PULSE NO. = 1 EX## !! INPUT

TOTAL TIME SPAN = 4.8800
 PULSE AREA = .6840
 FINAL VALUE ASSUMED TO PERSIST TO INFINITY

PULSE NO. = 2 EX## !! OUTPUT

TOTAL TIME SPAN = 4.8960
 PULSE AREA = 4.1703
 FINAL VALUE ASSUMED TO PERSIST TO INFINITY

STEADY STATE GAIN = 6.0970

FREQUENCY RESPONSE (OUTPUT/INPUT) ::
 FOURIER TRANSFORM OF THE INPUT CURVE FOURIER TRANSFORM OF THE OUTPUT CURVE

FREQUENCY AMPLITUDE LOG PH. DIF ;
 REAL PART IMAG. PART AMPLITUDE PH.ANG REAL PART IMAG. PART AMPLITUDE PH.ANG

RAD./TIME	RATIO	AMP. RAT	DEGREES ;				
			DEG.				DEG.
.100	6.081	.78399	-4.49				
.684	-.016	.684	358.69	4.138	-.421	4.159	354.19
.130	6.074	.78349	-5.76				
.684	-.020	.684	358.29	4.119	-.540	4.154	352.53

.160 .683	6.066 -.025	.78287 .684	-7.05 357.90	4.095	-.659	4.148	350.85
.200 .683	6.051 -.031	.78164 .684	-8.76 357.37	4.056	-.817	4.138	348.61
.250 .682	6.029 -.039	.78024 .684	-10.90 356.72	3.996	-1.010	4.122	345.82
.320 .682	5.990 -.050	.77743 .683	-13.89 355.80	3.891	-1.271	4.093	341.91
.400 .680	5.935 -.063	.77341 .683	-17.27 354.75	3.744	-1.553	4.054	337.48
.500 .678	5.851 -.078	.76724 .682	-21.44 353.44	3.526	-1.875	3.993	331.99
.630 .674	5.721 -.098	.75745 .682	-26.74 351.73	3.195	-2.237	3.899	324.99
.800 .669	5.520 -.124	.74197 .680	-33.42 349.50	2.704	-2.604	3.754	316.08
1.000 .660	5.255 -.154	.72057 .678	-40.87 346.87	2.094	-2.882	3.562	306.00
1.300 .644	4.829 -.198	.68387 .674	-51.19 342.93	1.205	-3.022	3.254	291.75
1.600 .624	4.402 -.240	.64365 .668	-60.57 339.00	.431	-2.911	2.943	278.43
2.000 .592	3.857 -.292	.58527 .660	-71.86 333.75	-.359	-2.520	2.545	261.89
2.500 .543	3.233 -.350	.50960 .647	-84.12 327.20	-.946	-1.864	2.090	245.08
3.200 .463	2.517 -.417	.40083 .623	-97.86 318.03	-1.199	-1.012	1.569	220.16
4.000 .360	1.918 -.468	.28276 .591	-110.30 307.56	-1.082	-.336	1.132	197.26
5.000 .225	1.396 -.493	.14483 .542	-122.78 294.51	-.748	.109	.756	171.73
6.300 .062	.942 -.463	-.02572 .467	-134.88 277.62	-.350	.266	.440	142.74
8.000 -.088	.584 -.346	-.23338 .357	-147.36 255.74	-.066	.198	.209	108.38

金貞植

10.000 -.141	.327 -.172	-.48585 .222	-158.50 230.06	.022	.069	.072	72.36
13.000 -.037	.136 -.017	-.86494 .040	.72 204.23	-.005	-.002	.005	204.95
16.000 .069	.228 -.050	-.64171 .086	-167.09 323.93	-.018	.008	.020	156.84
20.000 .018	.079 -.132	-1.10487 .134	-181.60 277.77	-.001	.010	.011	96.18
23.000 -.039	.012 -.043	-1.91020 .058	-116.40 228.17	.000	.001	.001	111.77
32.000 .023	.010 -.058	-1.97945 .062	-23.47 291.54	.000	-.001	.001	268.07
40.000 -.008	.044 -.027	-1.35883 .028	42.96 254.50	.001	-.001	.001	297.26
50.000 -.003	.006 -.032	-2.21157 .033	-129.61 265.43	.000	.000	.000	135.82
63.000 .001	.003 -.022	-2.54442 .022	73.44 172.96	.000	.000	.000	346.40
80.000 .004	.043 -.020	-1.36928 .021	-142.66 280.74	-.001	.001	.001	138.09
100.000 -.002	.004 -.015	-2.44555 .015	-24.42 263.54	.000	.000	.000	239.12

$\phi_{Total} = -90^\circ =$ 무효시간에 의한 위상각 ϕ_w

또는

$$\sim 94^\circ = -W_c \theta d \left(\frac{180}{\pi} \right) - 90^\circ$$

$$= -(2.95) \theta d \left(\frac{180}{\pi} \right) - 90^\circ$$

따라서 무효시간(dead time)은 0.024min 이다.

$$G_p = \frac{6.097e^{-0.024s}}{(0.714S+1)(0.167S+1)}$$

과 같은 공정 모델을設計할 수 있다.

3.2 時間領域에서의 分析

非線形 回歸式에 의하여 무효시간 0.024와 샘플링

주기 0.05로 놓고 초기값 값을 Bode 線圖의 절점 주파수에 의하여 얻은 $K=6.097$, $\tau_1=0.714\text{min}$, $\tau_2=0.167\text{min}$ 와 入出力 資料를 재入力하여 表-3과 같이 最適值 $K=5.432$, $\tau_1=0.212\text{min}$, $\tau=0.141\text{min}$ 을 구할 수 있다.

여기서 最適工程모형은 다음과 같다.

$$G_p = \frac{5.432e^{-0.024s}}{(0.212S+1)(0.141S+1)}$$

3.3 過渡應答 分析

時間應答를 過渡分은 時間이 저점에 따라 需으로 되는 부분이다. 過渡應答은 오직 系統 통일때만 중요하다. 왜냐하면 불만성 系統에 대한 過渡應答은 감소하지 않고 調節할 수도 없기 때문이다.

統制系統의 過渡評價는 單位階段 入力를 사용하여

Amplitude Ratio

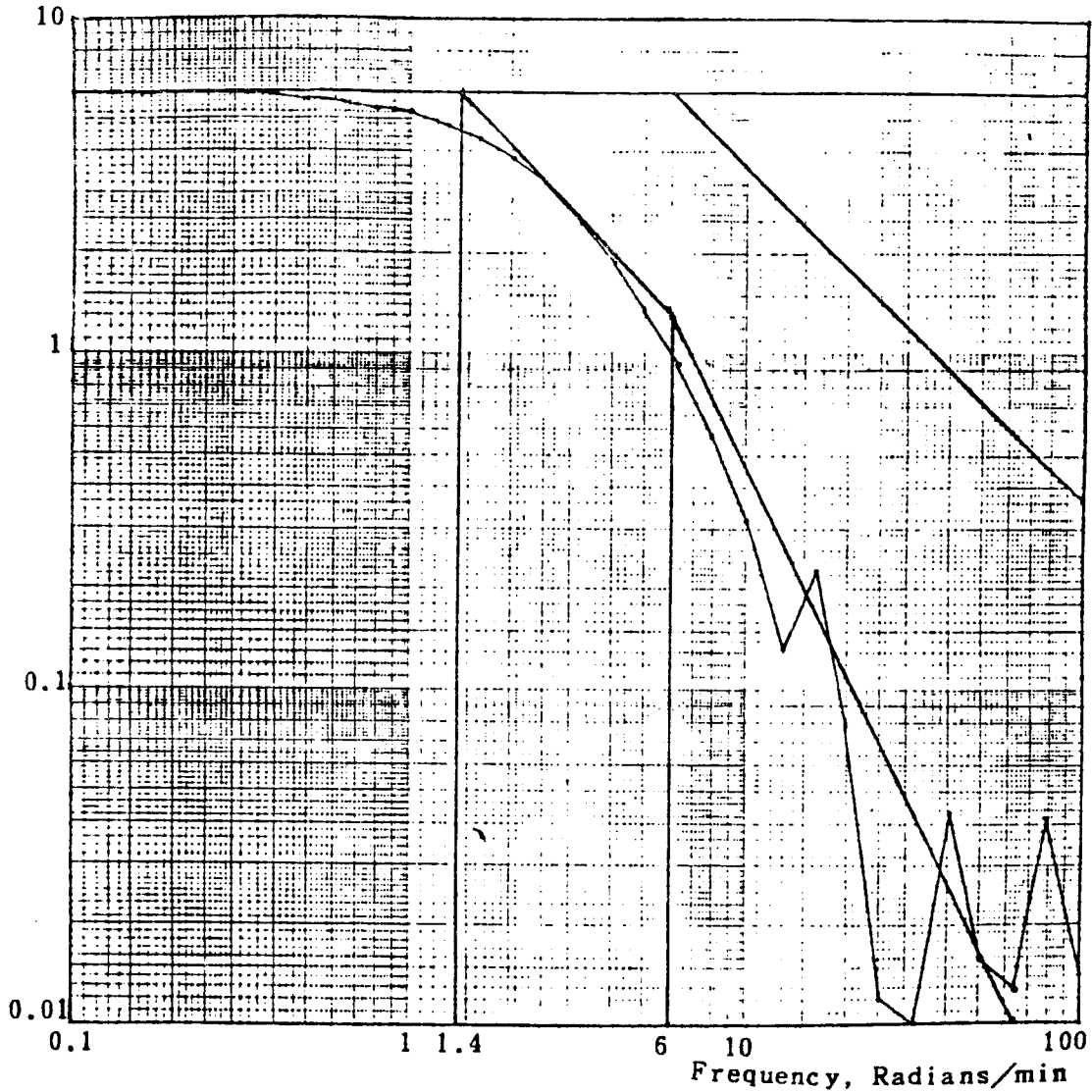


그림-3. 周波數에 대한 振幅比

보통 特性化시킨다. 單位段階入力에 대한 過渡應答을 特性化 시키기 위해서 사용되는 대표적인 評價函數는 오우버슈트(overshoot) 遲延時間 上昇時間과 整定時間으로 評價할 수 있는데 이것은 그림-5와 같다.

① 最大 오우버슈트는 過渡狀態중 段階入力을 초과하여 나타나는 出力의 最大偏差로서 정의한다. 最大 오우버슈트는 系統의 상대적인 安定度를 測定하는데 이용되며, 階段應答에서 最終值로서 百分率로 나타낸다.

② 遲延時間은 階段應答에 대해서 그 應答 最終值의 50%에 도달하는데 必要的 時間으로 정의한다.

③ 上昇時間은 階段應答에 대해서 應答 最終值의 10%에서 90%까지 도달하는데 必要的 時間으로 정의하며, 때로는 應答이 最終值의 50%인 순간 階段應答 기울기의 逆으로 上昇時間을 나타내는 방법도 있다.

④ 整定時間은 階段應答이 감소하여 그 應答 最終值의 特定 百分率 以內에 머무르는데 必要的 時間으로 정의하며, 보통 사용되는 量은 5%이다.

3.4 意思決定常數의 決定

最適工程모형을 이용하여 바람직한 出力이 되도록 統制하기 위해서 意思決定常數값을 決定해야 하는데,

표-2. 工程에 의한 位相角

주파수	0.714에 의한 위상각	0.167에 의한 위상각	합계
0.1	4.1	1	5.1
0.13	5.3	1.2	6.5
0.16	6.5	1.5	8
0.2	8.1	1.9	10
0.25	10.1	2.4	12.5
0.32	12.9	3.1	16
0.4	15.9	3.8	19.7
0.5	19.6	4.8	24.4
0.63	24.2	6	30.2
0.8	29.7	7.6	37.3
1	35.5	9.5	45
1.3	42.9	12.2	55.1
1.6	48.8	15	63.8
2	55	18.5	73.5
2.5	60.7	22.7	83.4
3.2	66.4	28.1	94.5
4	70.7	33.7	104.4
5	74.4	39.9	114.3
6.3	77.5	46.5	124
8	80.1	53.2	133.3
10	82	59.1	141.1
13	83.9	65.3	149.2
16	85	69.5	154.5
20	86	73	159
25	86.8	76.5	163.3
32	87.5	79.4	166.9
40	88	81.5	169.5
50	88.4	83.2	171.6
63	88.7	84.5	173.3
80	89	85.7	174.7
100	89.2	86.6	175.8

이것은 다음의 過渡應答分析을 사용하여 分析하면 표-4와 같다. 이 중 上昇時間과 遲延時間이 最小值인 過渡應答은 그림-6과 같고 $K_c=0.27$, $x_1=0.2$, $x_D=0.0001$ 에서 얻을 수 있다.

實驗 및 考察을 통해 過渡應答의 特徵을 다음과 같이 얻을 수 있다.

- ① 比例常數가 增加함에 따라 最大 오우버슈트는 增加하고, 遲延時間, 上昇時間, 整定時間은 감소한다.
- ② 積分常數가 증가함에 따라 最大 오우버슈트와 整定時間은 감소하고, 遲延時間과 上昇時間은 增加한다.
- ③ 微分常數를 增加시키면 不安定하다.

4. 結 論

(1) 非專門家라도 入-出力 資料만 있으면 最終적으로 工程統制用 常數인 比例常數(K_c), 積分常數(x_1), 微分常數(x_D)를 얻게끔 자동적으로 意思決定을 손쉽게 내릴 수 있다.

(2) 工程時間常數를 얻기 위하여 工程의 入·出力 資料를 Fourier 變換시킴으로써 周波數領域에서의 利得 및 振幅比를 구할 수 있는 펄스分析으로 2次 工程時間常數를 正確하게 算定할 수 있다.

(3) 時間에 따라 변하는 工程時間常數를 다시 擬似函數의 性質을 利用하여 最適工程時間常數를 추정하여 이를 工程에 반영시킬 수 있다.

(4) 本 研究에서 제시하고 있는 方法論을 채택할 것 같으면 손쉽게 設置할 수 있는 마이크로 컴퓨터를 活用함으로써 工程分析과 統制가 용이해지고, 分析과 統制를 하는데 時間과 努力을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 보다 精確하고 迅速하게 意思決定을 할수 있도록 工程統制用 意思決定支援시스템을 經濟적으로 손쉽게 構築할 수 있다.

Phase Angle, Degrees

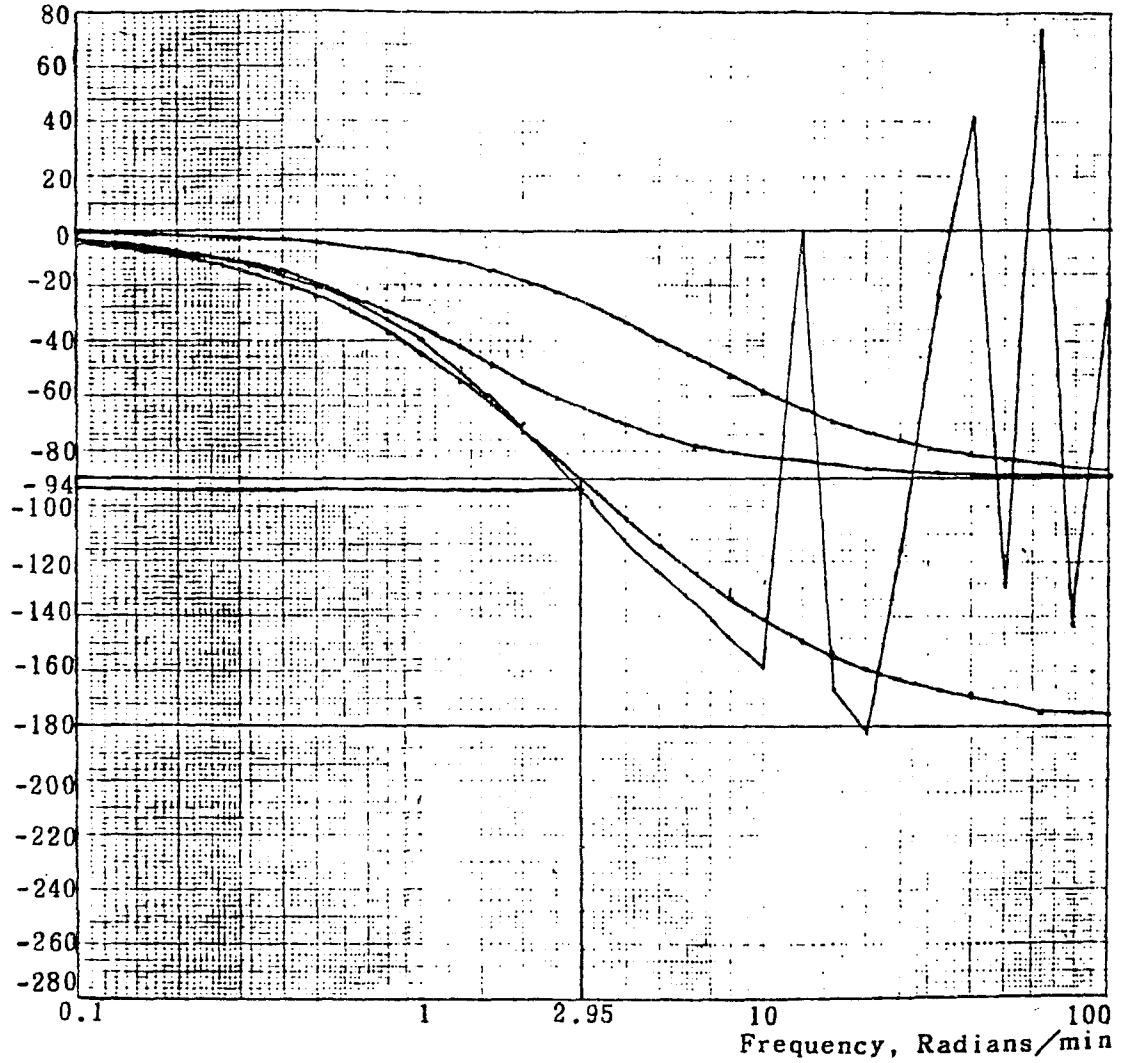


그림-4. 周波數에 대한 位相角

표-3. 非線形 回數式에 의한 最適值

```

1 !! FREQUENCY RESPONSE FROM PULSE TEST DATA !!
2 !! SAMPLE PROBLEM TO TEST COMPUTER PROGRAM
3
4     2         0         0
5     3         10        0.1
6 EX## !!!!!
7     0         0         1         1         2         2
8 0.1     5     0.112     45
9 45
10 1.5     1.5     1.5     1.5     1.5     0     0
    
```

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
6	EX##	!!!!				
2	0	0	1	1	2	2
.1	29	.131	45			
45						
0	.297	.969	1.79	2.65	3.46	3.90
3.88	3.62	3.25	2.85	2.45	2.09	1.76
1.48	1.23	1.03	.851	.705	.583	.481
.397	.327	.269	.222	.183	.15	.124
.102	.084	.069	.057	.047	.038	.032
.026	.021	.018	.014	.012	.010	.008
.007	.005	.001				
99						
7						

OSTARTING VALUES

	K	T1	T2
	6.097000	.714000	.167000
CYCLE 1	6.989130	.251994	.149916
CYCLE 2	5.719400	.214883	.146532
CYCLE 3	5.485460	.209254	.144868
CYCLE 4	5.439220	.209254	.143589
CYCLE 5	5.431310	.210473	.142325
CYCLE 6			
OOPTIMUM VALUES	5.431510	.211957	.141068

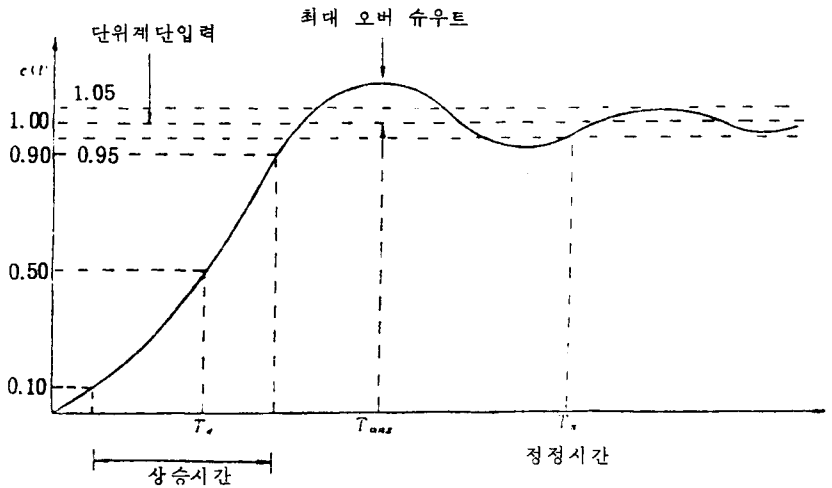


그림-5. 디지털 시스템의 單位 階段應答의 形態

표-4. 過渡應答에 대한 分析表 單位: min

比例常數	積分常數	微分常數	샘플링주기	最 大 오 류 비 율	遲延時間	上昇時間	整定時間
0.25	0.20	0.0001	0.05	31.7	0.196	0.202	1.180
0.26	0.20	0.0001	0.05	33.3	0.192	0.197	1.160
0.27	0.20	0.0001	0.05	34.7	0.188*	0.192*	1.141
0.25	0.21	0.0001	0.05	29.2	0.198	0.206	1.168
0.26	0.21	0.0001	0.05	30.8	0.193	0.200	1.152
0.27	0.21	0.0001	0.05	32.3	0.189	0.195	1.136
0.25	0.22	0.0001	0.05	26.9	0.200	0.210	1.159
0.26	0.22	0.0001	0.05	28.5	0.195	0.204	1.144
0.27	0.22	0.0001	0.05	30.0	0.191	0.198	1.130
0.26	0.23	0.0001	0.05	26.4	0.196	0.207	1.132
0.27	0.23	0.0001	0.05	27.9	0.192	0.202	1.121
0.28	0.23	0.0001	0.05	29.1	0.188*	0.196	1.107
0.26	0.24	0.0001	0.05	24.3	0.198	0.210	1.121
0.27	0.24	0.0001	0.05	25.9	0.194	0.205	1.112
0.28	0.24	0.0001	0.05	27.2	0.190	0.199	1.100
0.26	0.25	0.0001	0.05	22.4	0.199	0.204	1.108
0.27	0.25	0.0001	0.05	24.0	0.195	0.208	1.100
0.28	0.25	0.0001	0.05	25.3	0.191	0.202	1.091
0.26	0.26	0.0001	0.05	20.7	0.200	0.218	1.095
0.27	0.26	0.0001	0.05	22.2	0.196	0.211	1.092
0.28	0.26	0.0001	0.05	23.6	0.192	0.205	1.082
0.26	0.27	0.0001	0.05	19.0	0.202	0.221	1.085
0.27	0.27	0.0001	0.05	20.5	0.197	0.213	1.085
0.28	0.27	0.0001	0.05	21.9	0.193	0.208	1.077
0.26	0.28	0.0001	0.05	17.4*	0.203	0.225	1.078
0.27	0.28	0.0001	0.05	19.0	0.199	0.217	1.075
0.28	0.28	0.0001	0.05	20.4	0.194	0.210	1.068
0.29	0.29	0.0001	0.05	20.1	0.191	0.207	1.057
0.3	0.30	0.0001	0.05	20.3	0.189	0.204	1.044*

* 最適值

JRUN
ENTER THE ORDER OF THE PROCESS

IO => 2

ENTER KP, T1, T2, TS, TA AS REAL

KP => 5.432
T1 => 0.212
T2 => 0.141
TS => 0.05
TA => 0.024

ENTER KC & TI,TD OF CONTROLLER AS REAL

KC => 0.27
TI => 0.2
TD => 0.0001

IS THIS LOAD CHANGE OR SET-POINT CHANGE ?
ENTER 1 FOR LOAD CHANGE & 0 FOR SET-POINT CHANGE ?

K1 => 0

DO YOU WANT THE RESPONSE FOR A UNIT STEP ?
ENTER 1 FOR YES & 0 FOR NO ?

K0 => 1

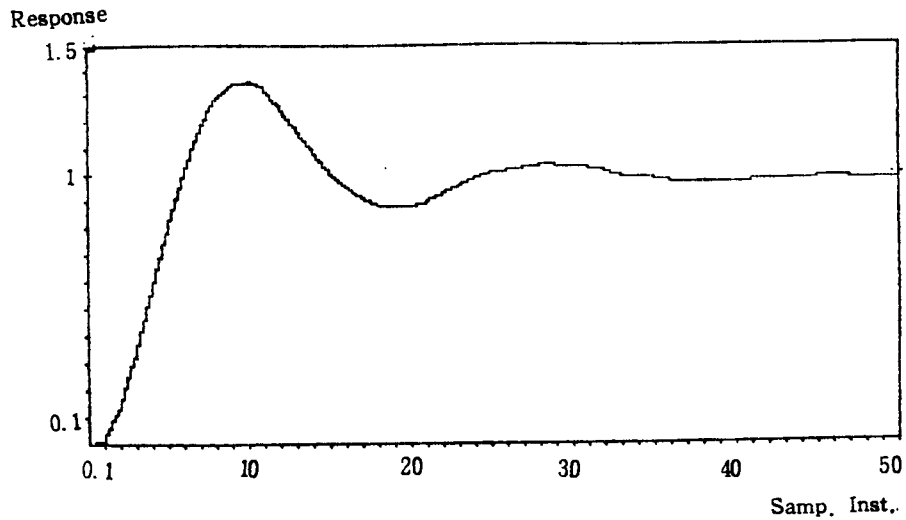


그림-6. 표5에서 遲延時間과 上昇時間이 最小值인 過渡應答

參考文獻

1. Åström K.T., "Process Control Past Present and Future", *IEE Automatic Control*, 8, 1985
2. Åström K.T. and Mark, B.W., *Computer Controlled Systems Theory and Design*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1984
3. Bristol, E., Process Control: "An Application Theorist's view of Control", *IEEE Control Systems Magazine*, 3, 1982.
4. Buchner, M.R. and Lefkowitz, L., "Distributed Computer Control for Industrial Process Systems: Characteristics Attributes. An Experimental", *IEEE Control Systems Magazine*, 3, 1982.
5. Cooley, J.W., and J.W. Tukey: "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Math. Comp.*, 19, 1965, pp. 297-301.
6. Coughnour & Koppel. *Process Systems Analysis and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1965
7. Deshpand & Ash. *Elements of Computer Process Control with Advanced Control Application*, I.S.A., 1981
8. Dumont, G.A. and Belanger, P.R., "Successful Industrial Application of Advanced Control Theory to a Chemical Process." *IEEE Control Systems Magazine*, 1981.
9. Groover, M.P. and Zimmers, E.W., Jr., *CAD/CAM*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1984
10. Himmelblau, D.M., *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, N.Y., 1972
11. Kosorok, J.R., "Program for Obtaining Inverse Z-Transforms", *Instrument & Control Systems*, #1(6), 1968
12. Tretter, S.A., *Introduction to Discrete-Time Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc., 1976
13. Winograd, S.: "On Computing the Discrete Fourier Transform", *Math. Comp.*, 32, 1978, pp. 175-199.