

# Smith Predictor의 적용에 관한 연구

변승현, 이찬주, 김은기  
전력연구원 시스템통신연구소

## A Study on the application of Smith Predictor

S.H.Byun, C.J.Lee, E.G.Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 프로세스에서의 시간지연은 프로세스의 제어에 있어서 어려움을 초래하며, 시스템의 성능 저하의 원인이 되고 있다. 이러한 프로세스의 시간지연을 극복하고자 해서 제안된 제어기의 구조가 기존의 제어기에 smith predictor를 결합한 형태이다. 본 논문에서는 몇 개의 프로세스를 선택하고, PI 제어기와 smith predictor와 결합되어진 PI 제어기에 대해서 프로세스의 지연시간에 따른 컴퓨터 모의실험을 통해 smith predictor의 효용성을 논하고자 한다.

에서는 대상으로 삼을 프로세스 모델들을 나열하고, 4절에서는 그 모델에 대한 컴퓨터 모의 실험 결과들을 기술하고, 5절에서 결론을 맺고자 한다.

### 1. 서론

프로세스에서의 시간지연은 프로세스의 제어에 있어서 어려움을 초래하며, 시스템의 성능 저하의 원인이 되고 있다. 시간 지연이 없는 프로세스와 비교해서, 프로세스의 시간 지연은 제어 시스템의 해석을 복잡하게 하며, 제어를 더 어렵게 한다.

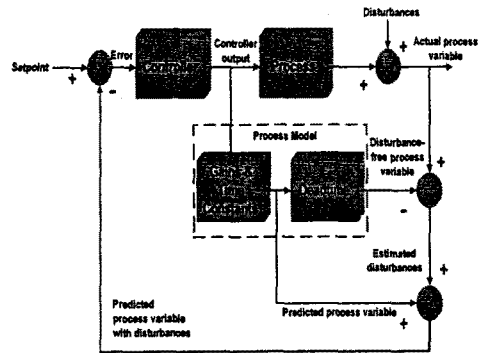
이런 시간 지연을 가지는 프로세스에 대해 제안되어진 제어기의 한 형태가 데드 타임을 보상하는 Smith Predictor 모델이다. Smith Predictor 모델은 상용 제어기에 프로세스의 모델을 결합해서 시간 지연을 보상한 기법을 이용하고 있다.[2]

한편, 발전소 등의 대형 공정 플랜트에서 사용되고 있는 대부분의 상용 제어기는 PID 제어기이며, 그 중에서도 PI 제어기가 상당 부분을 차지하고 있다. 제어기의 성능은 제어기 파라미터의 값에 의해서 결정되므로, PI 제어기의 튜닝 또한 중요하다. PI 제어기의 튜닝 방법은 여러가지가 있으나, Ziegler-Nichols의 임계이득과 임계주파수에 근거한 튜닝 방법은 넓은 영역의 산업 프로세스에 대해서 PI 제어기의 파라미터의 좋은 설정치를 결정하는 꽤 정확한 경험적인 방법으로 알려져 있다.[1]

본 논문에서는 몇개의 프로세스를 선정하고, 릴레이 피드백에 근거한 Z-N 튜닝과 Z-N 튜닝의 개선되어진 방법[1], 그리고 Smith Predictor 모델에 근거한 PI 제어기에 대한 컴퓨터 모의 실험을 통해서 Smith Predictor의 효용성을 논하고자 한다.

2절에서는 Smith Predictor 모델을 기술하고, 3절

### 2. Smith Predictor 모델



The Smith Predictor Model

그림 1. Smith's Strategy

smith predictor는 보통의 피드백 루프와 피드백 패스에 두 개의 특별한 항을 도입한 내부 루프로 구성되어진다. 첫번째 항은 외란이 없을 때의 프로세스 값의 추정치로써 부하 외란의 효과를 무시한 프로세스 모델을 통하여 얻을 수 있다. 외란이 없는 프로세스 변수를 얻는데 이용되어지는 수학적 모델은 일반적으로 프로세스 이득과 시상수를 포함하는 상미분 또는 차등방정식으로 구현되어지는 데드타임에 영향을 받지 않는 프로세스와 단순히 시간지연인 데드타임으로 구성되어진다. 피드백 패스에 도입되는 두번째 항은 외란과 데드타임이 없을 때의 프로세스 변수의 추정치로써 시간지연 요소를 배제한 이득과 시상수로 이루어진 프로세스를 통하여 얻을 수 있다. 이리하여 데드타임이 경과한 후의 외란이 없는 프로세스 변수 값을 예측할 수 있다.

실제의 공정 변수로부터 외란이 없는 공정 변수를

빠면 외란의 추정치를 얻을 수 있고, 외란의 추정치를 추정되어진 공정 변수에 더함으로써, smith predictor는 외란은 포함하지만 데드타임은 포함하지 않는 피드백 변수들을 생성하여 루프 밖에 데드타임을 가진 피드백 제어 시스템을 구성한다.

### 3. 프로세스 모델

모의 실험에서 이용되어진 모델은 다음과 같다:

$$G_1(s) = \frac{1}{(s+1)} e^{-d}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)(s+10)} e^{-d}$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(s+1)^2} e^{-d}$$

각 모델에 대해서 시상수와 이득을 구하면 표 2와 같다.

표 2. 각 모델에 따라 구한 시상수와 이득

모델	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>
시상수	1	12	2.2
이득	1	1	1

모의 실험에서는 산업에서 가장 많이 이용되어지고 있는 PI 제어를 채용하였다. 제어기 파라미터들은 각각의 모델에 대해서 relay feedback을 이용하여, 임계 이득 Ku와 임계 주기 Tu를 구한 후, Ziegler-Nichols 튜닝 방법과 개선되어진 Z-N 방법을 통해 구한 값을 이용하였다. Z-N 방법과 개선되어진 Z-N 방법에 의해 구한 PI 제어기의 파라미터를 각각 K<sub>p</sub>, T<sub>i</sub>, RK<sub>p</sub>, RT<sub>i</sub>라 하면 제어기의 파라미터를 구하는 식은 각각 다음과 같다.

$$Z-N : K_p = 0.45 \cdot K_u, T_i = 0.85 \cdot T_u \quad (1)$$

$$\frac{K_p}{K_u} = \frac{5}{6} \left( \frac{12+k}{15+14k} \right) \quad 1.2 < k < 15$$

$$\text{개선 Z-N: } \frac{T_i}{T_u} = \frac{1}{5} \left( \frac{4}{15} k + 1 \right) \quad 1.2 < k < 15, \quad (2)$$

$$\text{where } k = \text{프로세스이득} \times K_u$$

각각의 모델에 대해서 일정한 시상수 대 시간 지연 비에 따라 정한 시간지연에 대해서 PI 파라미터를 구하면 표 3과 같다.

smith predictor와 결합할 PI 제어기의 파라미터를 구하기 위해서 표 1에서 구한 각 모델에 따른 시상수와 이득에 기반한 모델을 이용해 식 (2)에 의해 개선되어진 PI 파라미터를 구할 때 k 값이 식 (2)의 만족범위를 넘어간다. 그러나 식 (2)는 시뮬레이션 결과에 의해 나온 경험적인 식이므로, 본 논문에서는 그 식을 근사적으로 k 값이 클 때에도 적용한 후, 시간 지연이 있는 프로세스에 대해서 해결책의 하나로 제시되고 있는 detuning에 착안하여, smith predictor의 PI 제어기의 파라미터에 적용될 파라미터 CK<sub>p</sub>, CT<sub>i</sub>를 다음과 같이 결정하였다.

$$CK_p = \min(K_p, RK_p), CT_i = \max(T_i, RT_i) \quad (3)$$

식(1),(2),(3)과 표 1을 이용하여 구한 smith predictor에 들어갈 PI 제어기 파라미터는 다음과 같다.

표 3. 각 모델에 따라 구한 PI 파라미터 값

G <sub>1</sub>	d1	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
	K <sub>p</sub>	1.36	0.86	0.66	0.6	0.58	0.57
	T <sub>i</sub>	1.53	2.72	4.59	6.29	9.86	18.36
	RK <sub>p</sub>	0.66	0.53	0.46	0.44	0.43	0.43
	RT <sub>i</sub>	0.65	0.97	1.5	2.01	3.11	5.79
G <sub>2</sub>	d1	6	12	24	36	60	120
	K <sub>p</sub>	1.21	0.81	0.63	0.59	0.57	0.57
	T <sub>i</sub>	19.55	31.96	54.06	74.97	115.91	217.89
	RK <sub>p</sub>	0.63	0.51	0.45	0.44	0.43	0.43
	RT <sub>i</sub>	7.9	11.13	17.46	23.8	36.56	68.67
G <sub>3</sub>	d3	1.1	2.2	4.4	6.6	11.0	22.0
	K <sub>p</sub>	1.03	0.7	0.59	0.58	0.57	0.57
	T <sub>i</sub>	4.42	6.63	10.37	14.28	21.75	40.45
	RK <sub>p</sub>	0.58	0.48	0.44	0.43	0.43	0.43
	RT <sub>i</sub>	1.68	2.21	3.29	4.5	6.86	12.75

표 4. Smith Predictor의 PI 제어기 파라미터

모델	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>
CK <sub>p</sub>	2.14	3.67	2.30
CT <sub>i</sub>	0.31	3.50	0.68

### 4. 모의 실험

본 논문에서는 컴퓨터 모의 실험을 위해 프로세스 모델에 대해서는 Runge-Kutta 4차를 이용하였으며, PI 제어기는 이상적인 PI 제어기를 이용하였다.

$$u = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (4)$$

디지털 PI 제어기는 적분 항을 사다리꼴의 합의 형태로 근사화함으로써 구현할 수 있다.[3]

$$u(kT) = K_p \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} \right\} \quad (5)$$

본 논문에서 Z-N 튜닝 방법과 개선 되어진 Z-N 튜닝 방법, 그리고 smith predictor에 의한 제어 성능을 비교하기 위해서 설정치 응답과 부하 외란 응답의 에러 적분(IE), 에러 절대치 적분(LAE), 정정시간(t<sub>s</sub>, settling time), 설정치 응답 오버슈트, 부하 외란 응답 언더 슈트를 성능 지수로 이용하였으며, 정정시간의 임계치는 5%로 활용하였다. 부하 외란응답은 일정한 외란이 프로세스 입력에 인가되게끔 하였다.

$$IE = \int e(t) dt, LAE = \int |e(t)| dt \quad (6)$$

각 모델에 대한 설정치 응답과 부하 외란 응답의 에러 적분 시간은 표 5와 같다.

표 5. 각 모델에 따른 에러 적분 시간

에러 적분 시간	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>
설정치 응답	0-150초	0-450초	0-250초
부하 외란 응답	150-300초	450-900초	250-500초

표 6. 프로세스 G<sub>1</sub>의 제어 응답

		시간지연(d1)		3.0		5.0		10.0	
설정치	Z-N	IE	IAE	10.48	10.48	16.98	16.98	31.3	31.3
		OV	t <sub>s</sub>	0	36.7	0	59.4	0	111.7
	개선 Z-N	IE	IAE	4.57	5.17	7.23	8.04	13.47	15.21
		OV	t <sub>s</sub>	0.10	13.9	0.09	22.5	0.12	41.6
smith predictor	IE	IAE	3.14	3.46	5.14	5.46	10.14	10.46	
	OV	t <sub>s</sub>	0.2	4.7	0.2	6.7	0.2	11.7	
부하 외란	Z-N	IE	IAE	10.48	10.48	16.99	16.99	31.91	31.91
		US	t <sub>s</sub>	0.95	40.7	0.99	65.5	1.01	123.81
	개선 Z-N	IE	IAE	4.57	4.96	7.23	7.87	13.47	15.1
		US	t <sub>s</sub>	0.96	13.9	0.99	28.4	1.0	52.6
	smith predictor	IE	IAE	3.14	3.46	5.14	5.14	10.14	10.14
		US	t <sub>s</sub>	0.95	9.1	0.99	13.1	1.0	23.1

표 7. 프로세스 G<sub>2</sub> 제어 응답

		시간지연(d2)		12.0		24.0		36.0	
설정치	Z-N	IE	IAE	39.44	39.44	84.16	84.16	118.8	118.8
		OV	t <sub>s</sub>	0	139.8	0	300.91	0	445.32
	개선 Z-N	IE	IAE	21.82	25.84	38.8	43.29	54.09	60.97
		OV	t <sub>s</sub>	0.09	60.9	0.09	87	0.1	171.5
smith predictor	IE	IAE	12.85	19.47	24.85	31.78	36.85	43.99	
	OV	t <sub>s</sub>	0.28	47.4	0.28	69.3	0.28	93.4	
부하 외란	Z-N	IE	IAE	39.45	39.45	85.19	85.19	123.82	123.82
		US	t <sub>s</sub>	0.76	164.1	0.93	338.25	1.0	500.71
	개선 Z-N	IE	IAE	21.82	23.38	38.8	41.2	54.08	58.95
		US	t <sub>s</sub>	0.78	61.22	0.92	113.71	0.97	214.78
	smith predictor	IE	IAE	12.85	12.88	24.85	25.19	36.85	37.52
		US	t <sub>s</sub>	0.72	64.62	0.91	98.81	0.97	135

표6, 표7, 표8의 컴퓨터 모의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 부하 외란 응답에 있어서 smith predictor를 채용한 PI 제어기가 smith predictor를 채용하지 않은 PI 제어기보다 훨씬 좋은 응답을 보여준다. 그리고 시간 지연이 크면 클수록 그 효과가 현저함을 볼 수 있다. 그러나 설정치 응답에 있어서는 smith predictor에 의한 오버슈트가 큼을 볼 수 있다. 설정치 응답에 있어서 큰 오버슈트를 줄이기 위해서는 설정치에 필터를 두는 방법이나 설정치에 가중치를 두는 방법 그리고 K<sub>p</sub>값을 낮추고, T<sub>i</sub>를 높이는 방법을 생각할 수 있다. 설정치 가중치 β를 이용한 제어기를 식 (5)와 같다.

$$u = K_p \left( (\beta s p - p v) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (5)$$

where *s*는 설정치, *p*는 프로세스변수

설정치에 가중치를 두는 방법은 부하 외란 응답에는 영향을 주지 않고 설정치 응답에만 영향을 준다. G<sub>3</sub>(d3=22초)에 대해 설정치 가중치를 적용하여 β값을 0.26을 주었을 때 표 6의 결과와 비교할 경우, 부하 외란 응답은 같고, 설정치 응답은 IE 값은 22.7, IAE값은 26.6, 정정시간은 97초, 오버슈트는 0.27로 개선되었다. 또한 β값을 0.26으로 준 상태에서 T<sub>i</sub>를 현재의 0.68에서 2.5로 올렸을 때 설정치응답의 오버슈트는 0.06으로, 정정시간은 51.1초로 개선되었으며,

부하 외란 응답의 정정시간도 74.51초로 개선되었다. 그 때의 프로세스 출력 결과는 그림 2와 같으며 횡축의 시간 단위는 [초]이며, 종축은 프로세스 출력이다.

표 8. 프로세스 G<sub>3</sub>의 제어 응답

		시간지연(d3)		6.6		11		22	
설정치	Z-N	IE	IAE	24.61	24.61	37.89	37.89	66.23	66.23
		OV	t <sub>s</sub>	0	86.1	0	132.7	0	246.41
	개선 Z-N	IE	IAE	10.47	11.32	15.95	17.63	29.65	33.14
		OV	t <sub>s</sub>	0.07	31.8	0.1	48.7	0.14	90.4
smith predictor	IE	IAE	6.8	11.44	11.2	16.03	22.2	27.01	
	OV	t <sub>s</sub>	0.36	46.3	0.36	65	0.36	120.1	
부하 외란	Z-N	IE	IAE	24.62	24.62	38.08	38.08	69.28	69.28
		US	t <sub>s</sub>	0.99	94.81	1.0	146.11	1.04	276.72
	개선 Z-N	IE	IAE	10.47	11.11	15.95	17.46	29.66	33.04
		US	t <sub>s</sub>	0.99	40.31	1.0	61.61	1.0	114.31
	smith predictor	IE	IAE	6.8	8.82	11.2	13.32	22.2	24.36
		US	t <sub>s</sub>	0.99	34.91	1.00	52.41	1.00	96.41

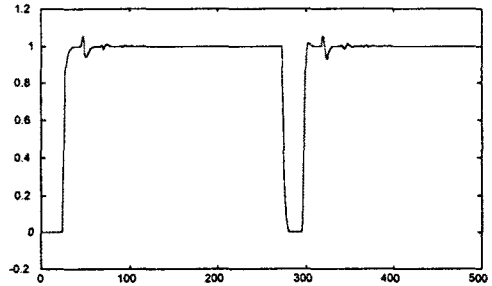


그림 2. G<sub>3</sub> 프로세스의 smith predictor에 의한 응답 (β=0.26, K<sub>p</sub>=2.3, T<sub>i</sub>=2.5, d3=22)

### 5. 결론

시간 지연이 현저한 프로세스에 대해서는 smith predictor를 채용한 PI 제어기가 부하 외란 응답에 훨씬 좋은 반응을 보이며, 제어기 파라미터 값을 줄이고, 설정치에 가중치를 줌으로써 모델 오차에 근거해서 유발되는 설정치 응답의 큰 오버슈트를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. smith predictor에서 채용한 모델의 단순함으로 인해 제어기 파라미터를 선정하는데 있어서 파라미터의 감쇠가 요구된다.

### [참고 문헌]

[1] C.C.Hang, K.J.Astrom and W.K.Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", IEE Proceedings-D, Vol. 138, No. 2, March, pp111-118, 1991  
 [2] Vance J. Vandoren, "The Smith Predictor: A Process Engineer's Crystal Ball", Control Engineering, May, PP61-62, 1996  
 [3] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Systems", Printice-Hall International Editors, pp199-204, 1987