

「Self Tuning+Feed Back」형 컨트롤러의 개발

사에구사 다가하루(야마다케빌딩시스템)
다나카 마사토(야마다케빌딩시스템)
(공기조화 · 위생공학회 학술강연회 강연논문집 2002.9.11~13 후쿠오카)

번역 : 서 길 진 / 정회원 한국야마다케주식회사(kiljin-suh@yamatake.co.kr)

머리말

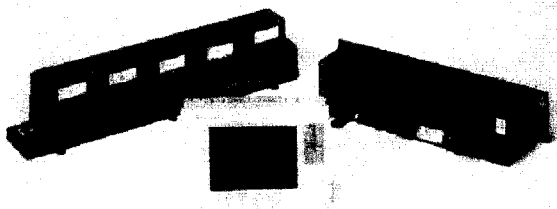
공조기 제어의 성능 향상을 목표로 「Self Tuning + Feed Forward」형 컨트롤러를 개발하였다. self tuning은 process gain의 변동에 따라 적응 제어한다. feed forward는 feed back(FB)에서는 즉각적으로 대응할 수 없는 가습 냉각에 의한 외란(급격한 습도 하강)을 해결한다. 이 기능을 내장한 컨트롤러를 변풍량 공조기의 급기온도제어에 적용하였다.

1. 적용건물

표 1의 건물에 적용하여 1년간의 데이터를 수집하였다.

〈표 1〉 적용건물과 계통

건물과 계통	도내 오피스 3F 인테리어 계통
공조설비	AHU (싱글코일)와 VAV4대
온도제어	급기온도 PID제어, 설정은 실내부하에서 적성화
습도제어	환기습도에 의한 on/off 제어
실장대상	공조용 컨트롤러 (그림 1)



[그림 1] 본 제어를 실장한 공조 컨트롤러

2. PID Self Tuning

2.1 공조제어계의 특징

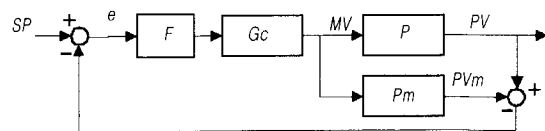
공조제어계에서는 풍량이나 송수압력 · 온도 등의 변동으로 인해 process gain이 크게 변동한다. 그러므로, 정적인 제어 tuning으로는 "hunting" 또는 "느린 응답"이 되기 쉽다. 그 중에서도 hunting은 실내 환경에 악영향을 미치고, 기기를 현저하게 악화시킨다. 각 계절별로 parameter를 변경시켜 해결할 수도 있으나, 번거롭기 때문에 실용적이지 못하다.

2.2 IMC이론

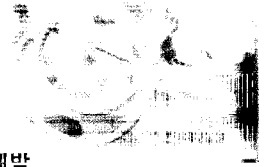
개발된 PID self tuning의 원형은 그림 2의 IMC(내부모델제어, internal model control, morari, 1982)이다. P(실제 process)와 Pm(내부 모델)의 각각을 "일차지연+낭비시간"으로 표현한다. (식(1), (2)) F는 로우 패스 필터이다.

$$P = K_p \frac{\exp(-Lp_s)}{(1 + T_p s)} \quad (1), \quad P_m = K_m \frac{\exp(-Lm_s)}{(1 + T_m s)} \quad (2)$$

* Kp: process gain, Tp: process 지연시간, Lp: process 낭비시간
* Km: 모델 gain, Tm: 모델 지연시간, Lm: 모델 낭비시간



[그림 2] IMC의 블록



Gc는 컨트롤러부로, 내부모델의 역모델(Pm^{-1})이 된다. 컨트롤러부의 출력인 MV는 P와 Pm에 인가되어 양자의 출력차를 feed back한다. 실제 process와 내부모델이 거의 같으면, 뛰어난 제어가 실현된다.

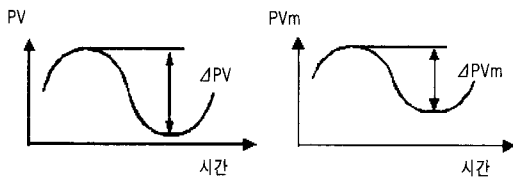
2.3 Gain적용

전술한 바와 같이 공조기의 Process Gain의 변동은 크고, 변풍량 공조에서는 5~20배가 변동된다.

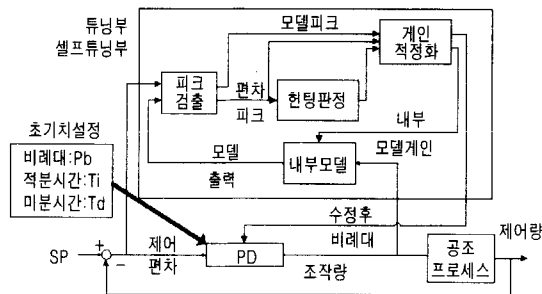
이 성질에서 볼 때, Hunting 발생의 주요인은 제어 gain과 process gain의 잘못된 매치에 있다고 판단된다. 내부 모델과 실 모델의 차이가 커지면 hunting이 일어난다. hunting상태에서는 PV와 PVm 모두 진동파형이 된다(그림 3). 이 파형의 진폭은 각각의 gain(process gain과 모델 gain)으로 결정된다. 따라서, 이 진폭의 비율에 따라 모델 Gain을 수정하면 실 Process와 내부 모델의 gain의 차이가 없어질 것이다. 그 관계를 나타낸 것이 식(3)이다. 이 식(3)이 의미하는 "제어량 파형과 내부모델 파형의 진폭으로 내부모델 gain을 수정"하는 기능이 이 Self Tuning의 핵심이다.

$$\frac{\Delta PV}{\Delta PVm} = \frac{Kp}{Km} \quad \text{즉 } Km \leftarrow Km \frac{\Delta PV}{\Delta PVm} \quad (3)$$

(제어량 파형의 진폭: ΔPV , 내부모델 파형의 진폭: ΔPVm)



[그림 3] Hunting시의 PV와 PVm의 파형



[그림 4] Self Tuning 순서도

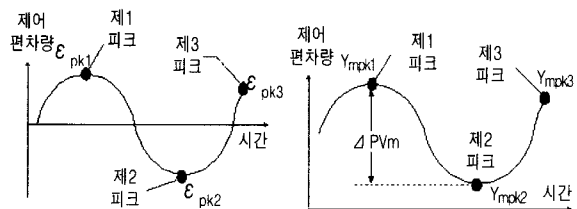
2.4 PID-IMC등가변환

공조에서는 오랜 기간에 걸쳐 PID제어가 이용되며, 그 경험·노하우가 축적되고 있다. IMC이론에서 다루는 "1차 지연", "낭비시간"이라는 parameter가 침투하는 것은 간단하지 않다. Rivera들은 식(4)의 관계를 이용함으로써 IMC(1차 지연+낭비 시간)로의 표현이 PID를 포함하는 블록으로 등가변환시킬 수 있다는 것을 나타낸다. (식(4) 조정자로부터 보면, IMC는 블랙박스과 같은 기능을 하게 된다.

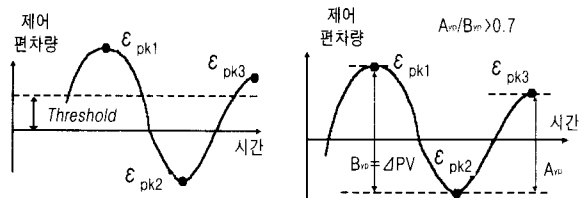
$$Km = \frac{(1-r) \cdot Ti}{2 \cdot Kg \cdot Td}, \quad Tm = Ti, \quad Lm = 2Td \quad (4)$$

2.5 제어 알고리즘

그림 4에 나와 있는 바와 같이 self tuning은 PID 제어루프에 대해 외부설치형으로 작용하며, 비례대를 수정한다. "내부모델부"에서는 식(2)를 바탕으로 내부모델을 계산한다. 식(4)에서 내부모델 parameter초기치(Km, Tm, Lm)는 미리 설정되어 있는 PID parameter초기치(Kg, Ti, Td)로 계산된다. 따라서 조정자가 내부모델 parameter를 직접 설정할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. "피크검출"에서는 그림 5에 나와 있는 바와 같이 내부모델과 제어량의 파형의 상하 피크(직근 3점)를 유지한다. "Hunting판정"에서는 다음 2가지의 조건을 동시에



[그림 5] 피크 검출



[그림 6] Hunting판정

이제 이 값을 다시 조정된(비그림 6).

이제 이 값을 다시 조정된(비그림 6).

이제 이 값을 다시 조정된(비그림 6).

이제 이 값을 다시 조정된(비그림 6).

이제 이 값을 다시 조정된(비그림 6).

2.6 제어 결과

앞에서 언급된 적용건물에 있어서 self tuning을 1년간 실시하였다. 그림 7과 그림 8은 그 대표 데이터이다.

hunting이 발생했을 때, 비례대를 수정하고, 그 후의 hunting의 재발을 방지한다. 이와 같이 프로세스

와 제어 gain(비례대)의 잘못된 매치를 수시로 수정하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 제어를 년간에 걸쳐 계속하였다. 그 결과의 분석은 표 2와 같다.

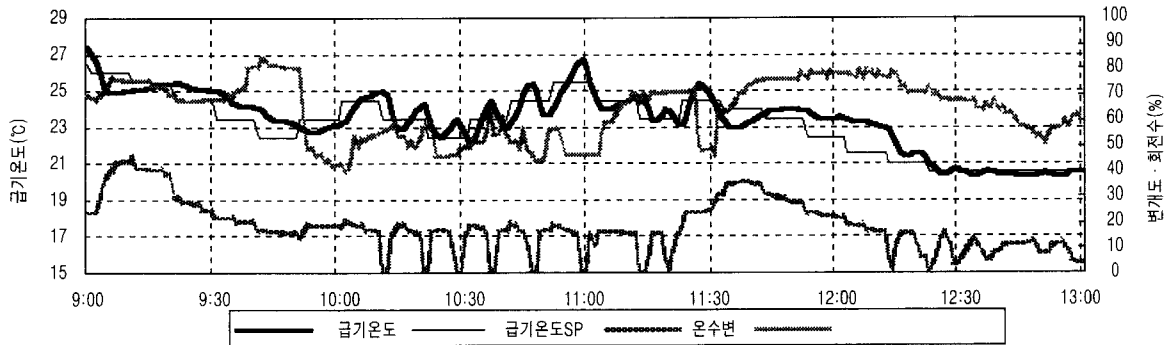
3. Feed Forward 제어

3.1 기습냉각에 의한 외란

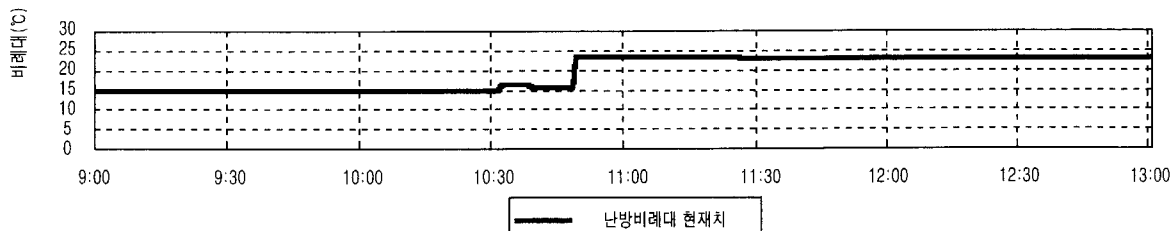
PID self tuning가 실시되었을 때, "답다/춥다" 등

<표 2> PID Self Tuning결과 정리

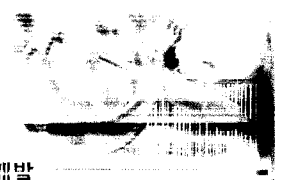
시기	운전점	프로세스 특징	튜닝 결과
중·고부하 냉방기 (5~9월)	<ul style="list-style-type: none"> 고·중개도로 밸브 동작(비교적 linear한 영역) 팬풍량 큼(코일개인 작용) 	<ul style="list-style-type: none"> 프로세스개인 작용 프로세스는 안정 경향 	<ul style="list-style-type: none"> 3~5°C의 비례대에서 변화 설정치의 추종은 빠름, 밸브 동작도 적음
저부하 냉방기 (4,10,11월)	<ul style="list-style-type: none"> 저개도에서 밸브 동작(비선형으로 불감대가 있음) 팬풍량 작음(코일개인 작용) 	<ul style="list-style-type: none"> 밸브 저개도역에서는 특성이 좋지 않아 제어 불능이 된다. 	<ul style="list-style-type: none"> Hunting이 억제되고, 높은 비례대(15°C이상)에서 변화 저개도역에서 발생하는 밸브 변동을 경감
난방기 (12~3월)	<ul style="list-style-type: none"> 1일 중 고→저부하로 변화 저~고개도에서 밸브 동작 팬풍량 대~소로 변동 	<ul style="list-style-type: none"> 프로세스개인이 커서 빈번히 변동하여, 불안정해질 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> Hunting이 억제되고, 높은 비례대에서 변화(15°C이상)



[그림 7] 급기온도제어결과 (2002.3.16)



[그림 8] 비례대의 추이 (2002.3.16)



의 클레임이 있었다. 조사 결과, 기화식 가습기의 가습냉각효과가 원인이라는 것을 알 수 있었다. 이 냉각효과는 급격하게 작용하기 때문에 온도제어에 있어서 외란이 된다. PID제어는 feed back(FB)이므로, 제어량이 변화한 시점에서 조작량을 변화시켜 간다. 그러나, 외란이 클 경우에는 그 추종이 지연되고 만다. 비례대를 작게 하여 제어감도를 주면, 추종 자체는 빨라지나, 전체적으로 불안정할 수 있다.

이 대책으로서 feed forward(FF) 제어에 주목하였다. 가습기의 on/off의 발생은 검지할 수 있다.

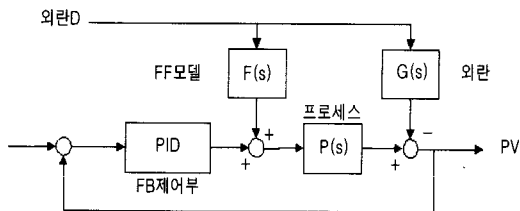
“이 냉각효과 외란이 계에 영향을 미치기 전에 미리 외란을 예측하여 그것을 제거되도록 동작을 수정”하는 FF제어를 실장함으로써 외란을 해결하였다.

3.2 알고리즘

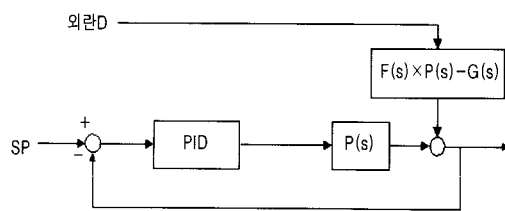
FF제어블록을 그림 9에 나타낸다. 이 블록은 그림 10으로 등가변환된다. 식(5)를 만족시키는 F(s)를

〈표 3〉 FF제어 결과

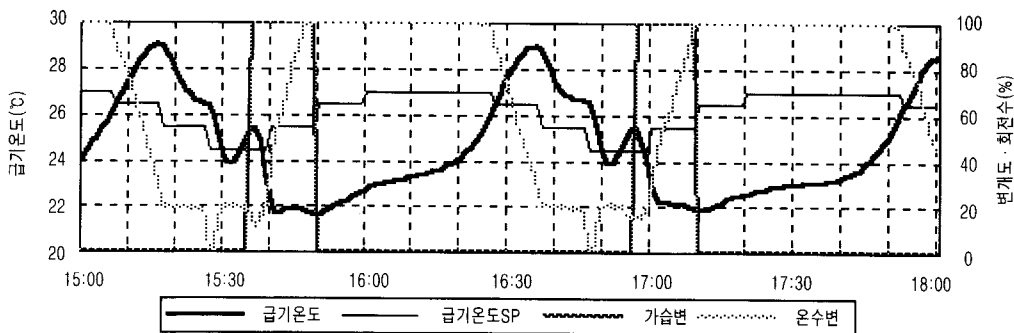
	FF제어가 없었을 때 2/14~2/20	FF제어가 있었을 때 2/21~2/28
가습기 기동 후의 편차	온도편차 3~4℃	온도편차 1℃정도
급기온도 편차평균	1.6℃	0.5℃



〔그림 9〕 FF제어 순서도 (2)



〔그림 10〕 FF제어 순서도 (3)



〔그림 11〕 급기온도제어결과 (FF제어없음)

도출하면 외란의 영향은 적어진다.

$$F(s) \cdot P(s) - G(s) = 0 \quad \text{즉} \quad F(s) = \frac{G(s)}{P(s)} \quad (5)$$

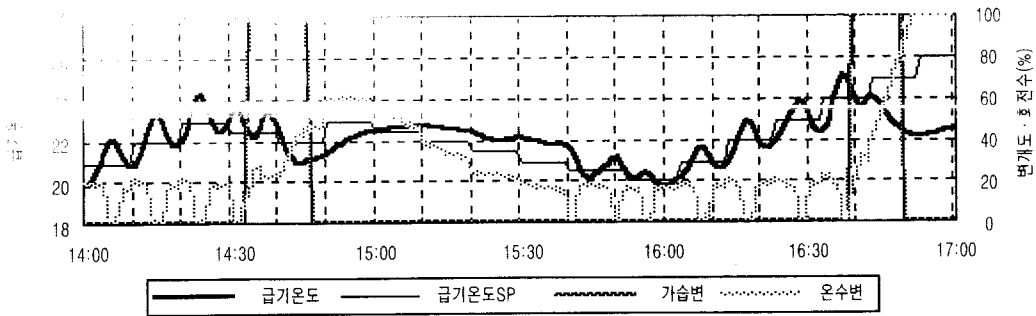
G(s): 전달함수 (가습기 기동에 의한 냉각효과)

P(s): 전달함수 (벨브개도와 코일 온도차)

많은 응답시험결과에서 P(s)와 G(s) 모두 "1차지연+낭비시간"에 가까운 응답을 보이고 있다. 또, 설계치(급수량, 함수량, 코일능력)를 미리 알면 gain이나 지연 등의 parameter를 측정할 수 있다.

3.3 제어결과

앞에서 언급한 적용건물에서 FF제어의 유무의 제어결과를 비교하였다. 기간은 2/14~2/28이다. FF제어의 효과만을 검증하기 위해 PID제어 parameter는 비례대 10℃, 적분시간 5분, 미분시간 0분으로 고정시켰다. 대표결과는 그림 11과 그림 12와 같다. FF제어(그림 11)없이 가습기 기동직후부터 온도제어지연이 발생하며, 3℃이상의 편차가 발생하였다. 기간중의 전체계로가는 표 3과 같다. FF제어에 의해 큰 개선이 있었다는 것을 알 수 있다.



[그림 12] 급기온도제어결과 (FF제어있음)

4. 맺음말

self tuning을 이용하면 조정하지 않아도 적절한 제어Gain에 적응시킬 수 있다. 공조제어로의 활용을 생각하면 ①공조용 컨트롤러에 실장할 수 있는 것 ② 조정이 필요 없다는 것이 필수조건이 된다. 지금까지 많은 튜닝방법이 제안되어 왔으나, 이 조건들을 중시 하면 최선책이 될 것으로 생각된다. 단, 가습냉각의 외란에 대해서는 PID, 즉 FB제어에서는 응답지연이 발생하게 된다. FF제어를 부가하면 이 지연을 해결 할 수 있다. 1년간의 검증 결과, 이 두 가지 기능에 의해 양호한 제어성능으로 개선·유지된다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Garcia, C. E. and M. Morari. 1982. Internal Model Control, 1. A unifying review and some new results, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 21, 308.
- 2) Rivera, D. E., M. Morari and S. Skogestad. 1986. Internal Model Control, 4. PID controller design, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 25, 252.
- 3) 「피드포워드제어의 기초」, 計裝1991年Vol34