

공조 시스템의 센서 고장 검증 기술

이 원용, 신 동열
한국에너지기술연구소

Sensor Validation for an Air Handling Unit

Won-Yong Lee, Dong-Ryul Shin
Korea Institute of Energy Research.

Abstract - In order to improve the operational reliability, it is necessary to validate the measured sensor data, isolate any failed sensor and recover the failed critical measurement. This paper describes the use of estimating equation to identify failed sensors and to recover the feedback signal for control purpose when the sensor measurement is determined to be erroneous. Simulation results show that the proposed sensor validation scheme can adequately identify the failed sensor and provide reasonable estimates for control purposes.

1. 서 론

최근의 공조설비를 비롯한 에너지 설비들은 복잡화 대형화되고 있는 추세로 운전자가 전체 시스템의 성능을 파악하기가 점점 어려워지고 있어 자동제어 시스템의 도입이 일반화되고 있다. 컴퓨터에 의해 제어되고 성능이 감시되는 설비의 이상 유무를 파악하기 위해 컴퓨터에 의한 진단 시스템을 도입하는 것이 합리적이며 이에 대한 연구가 최근에 활발하게 진행되고 있다. 이러한 자동제어 운영 시스템은 다수의 센서에 의존하여 시스템이 운전되는 것은 물론 운전자에게 성능 정보를 제공하고 있다.

실시간으로 운전중인 설비의 고장 검출 및 진단 시스템은 자동제어를 위한 제어센서는 물론 성능감시를 위한 여분의 센서가 사용되고 있는데, 이러한 센서에 고장이 생긴 경우 용도에 따라 자동 제어는 물론 잘못된 정보에 의해 시스템의 운영이 어려워 질 수 있는 위험이 있어 이에 대한 신뢰성 향상 연구가 필요하다.

공조설비에서 발생할 수 있는 고장의 종류는 매우 다양하며, 제어기 구동기, 설비자체, 그리고 센서 등에서 손상과 성능저하 현상이 발생할 수 있다. 같은 제어 계통에서 고장이 발생한 경우 겉으로 드러나는 증상이 비슷하여 구별이 쉽지 않으며, 경제적인 이유로 공조설비나 위험성이 수반되지 않는 에너지 설비의 경우 복수개로 여분의 센서가 동일 목적으로 설치되지 않기 때문에 구체적으로 고장을 진단하거나 센서 고장 발견시 복구가 쉽다. 따라서 이론적인 증명법을 통해 산출된 잔차를 이용하는 것이 공조설비의 센서측정값을 평가하는 하나의 방법이 될 수 있다. 여기서 잔차는 관계식으로부터 예측된 값과 직접 측정된 값과의 차로 정의된다. 공조시스템의 경우 경제적인 이유로 물리적인 중첩법을 사용하기가 어려워며 수학적으로 예측된 값을 사용하는 이론적인 중첩법을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는

특성방정식과 통계적인 회귀식으로 관계식을 유도하였으며 이론적인 중첩법에 의해 산출된 잔차를 이용하여 고장을 검출하였다.

본 논문은 공조설비에 사용되는 센서를 중심으로 고장 검출 및 진단은 물론 센서에 고장이 발생한 경우에 시스템이 정상적으로 운전될 수 있도록 복구시킬 수 있는 접근법을 보여주기 위한 것으로, 감시 제어되는 설비와 측정 센서에 대해 간단히 기술하였으며, 해석적 중첩법을 사용한 센서 검증 방법을 전산해석을 통해 검토하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

공조기를 위한 제어 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있다. 전체 제어시스템은 실내온도 제어기를 제외하면, 급기 온도제어계, 급기 압력제어계, 급기와 순환공기 유량차 제어계, 그리고 이코노마이저 제어계 등 4개로 구성될 수 있는데, 급기 온도제어계는 냉각 및 가열코일, 그리고 제어밸브, 급수 펌프 그리고 센서 등으로 구성되어 있으며 실내로 공급되는 공기의 온도를 부하에 관계없이 일정한 온도로 유지시키기 위한 역할을 한다. 급기 덕트 압력제어 시스템은 각 실내로 공급되는 유량의 변화에 관계없이 일정한 압력을 유지시키기 위한 것으로 압력신호에 따라 인버터를 이용하여 송풍기의 회전수를 조절하게 된다. 공기 유량차 제어는 실내로 공급되는 급기와 실내에서 다시 공조기로 순환되는 공기 유량의 차를 제어하여 일정량의 외기 온도를 공급하기 위한 것으로 순환 송풍기를 통해 유량차를 제어하게 된다.

2.2 공조기 센서 구성

공조기를 실시간으로 제어하고 성능을 감시하기 위해서는 많은 수의 센서가 사용되고 있는데, 본 연구에서는 그림 2와 같이 13개의 센서를 해석적 중첩을 위한 관계식 유도에 사용하였다. 이 중 6개는 제어를 위한 센서이며 나머지 7개는 각 부위별 성능을 감시하기 위해 사용된 센서이다. 13개의 측정 센서는 다음과 같다.

온도 센서: 급기온도, 순환 공기온도, 외기 램퍼
입구온도, 대기온도, 혼합 공기온도,
냉각 코일 출구온도, 가열 코일 출구
온도

압력 센서: 급기 덕트 압력, 공기 필터 압력차

공기 유량 센서: 급기 유량, 순환 유량

습도 센서: 급기 온도 습도, 혼합 공기 습도

2.3 센서 관계

선택된 측정 및 제어신호를 이용하여 각 신호간 관계도를 그림 2와 같이 유도하였다. 이 관계도를 이용하여 각 신호들이 다른 신호에 미치는 파급효과를 알 수 있다. 각 신호는 하나 이상의 관계식에 사용되고 있다. 관계식은 정상상태에서의 자료를 이용하여 산출된 것으로 관계식으로 유도된 잔차의 허용치 검사를 통해 시스템이 정상인지 비정상인지를 파악하게 된다. 허용치로는 품질관리에서 일반적으로 사용되는 표준편차값의 3배값을 하였으며 분류기술을 적용하여 고장 부분을 진단 할 수 있다. 13개의 서로다른 위치의 센서 측정값과 제어신호를 관계식 유도에 사용하였으며 11개의 관계식을 유도하였다. 측정신호만으로 관계식을 유도하는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 측정신호가 충분하지 않고 별도로 설치해야하는 센서의 수를 최소화하기 위하여 제어신호도 사용하였다. 제어 신호를 사용할 경우 센서신호만 사용할 경우와 달리 센서의 고장과 더불어 제어기의 고장을 검출 구분해야 하는 단점이 있어 고장 진단법이 포괄적으로 구성되어야 한다.

11개의 관계식 중 대표적으로 급기온도, 급기압력, 유량차 등에 대한 관계식을 표시하면 다음과 같다.

급기온도 제어 시스템:

$$R1 = Ts - Ts, es1$$

$$Ts, es1 = F(Tm, Hi, Qs, Ps, Ucc, Uhc, Up)$$

혼합공기:

$$R6 = Tm - Tm, es$$

$$Tm, es = F(Tfr, Tci, Qs, Qre, Udmp)$$

유량차 제어 시스템:

$$R9 = Qd - Qd, es$$

$$Qd, es = F(Qs, Udmp, Up)$$

여기서 Ts는 급기온도이며 Tm은 혼합 공기온도, Hi는 혼합 공기습도, Qs는 급기 유량, Ps는 급기 압력, 그리고 Ucc, Uhc, Up는 각각 냉각코일, 가열코일, 그리고 송풍기 제어신호이다. 하첨자 es는 예측값을 나타낸다. 또한 Tfr, Tci는 각각 외기흡입온도, 순환 공기온도이며, Qre, Qd는 순환 공기유량과 유량차이며, Udmp는 혼합공기 덤퍼 제어신호이다.

표 1은 관계식을 이용하여 구한 것으로 고장 진단에 중요한 패턴을 제공하고 있다. 예로서 R1은 급기온도 제어시스템을 위한 관계식이다. R1을 위한 신호, 즉 Ts, Tm, Hi, Qs, Ps, Ucc, Uhc, 그리고 Up에 이상이 발생한 경우 예측식에 변화를 일으키게 되므로 R1에 관계된 모든 신호에 0로 표시를 하였다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 모든 센서 고장에 대한 증상은 서로 다른 증상을 보이고 있다. 따라서 증상을 통해 개별적으로 센서의 고장을 검출 할 수가 있다. 이 방법의 성능을 검증하기 위하여 13개 센서와 7개 설비에 대한 고장 자료를 전산해석을 통해 산출하였다. 센서 고장은 시스템이 정상적으로 작동하는 도중에 발생하였다 가정하였다.

2.4 정상 상태 검출

사용된 관계식들은 정상 상태(Steady state)에서 유도된 것으로, 상태 변화 기술키를 이용하여 과도 특성을 검출하는 방법을 사용하였다. 주어진 구간에서 최대, 최소, 그리고 평균값을 구하여 정규화된 기술키를 구하였

다. 사용된 변수는 급기온도, 급기압력, 유량차 등이다.

$$X_{slope} = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{mean}}$$

2.4 해석 프로그램 구성

시스템의 해석 프로그램은 MATLAB을 이용하여 구성하였다. 전체 프로그램은 고장 등을 인위적으로 선택할 수 있는 주 프로그램과 부품별 해석을 위한 부프로그램으로 구성하였다. 부 프로그램은 냉각코일 해석과, 제어기, 실내 부하 계산, 덕트의 압력과 유량 해석, 그리고 덕트를 통한 열손실 해석 프로그램 등으로 구성되어 있다. 프로그램은 각 부위별 대표적인 고장과 성능저하를 해석할 수 있도록 구성하였다.

2.5 결과 분석

표 2와 표 3이 센서 고장과 설비 고장시의 실제 잔차 변화를 표시한 것으로 관계식을 통해 유도된 표 1에서 예측한 바와 같이 고장에 따라 서로 다른 패턴이 얻어지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 고장에 따른 서로 다른 패턴이 나타나는 것을 이용하여 설비의 고장과 구분될 수 있는 센서의 고장을 검출 및 진단을 할 수 있다. 고장 검출은 허용값 검사를 통해 수행할 수 있으며 고장 진단은 표 1에 주어진 패턴을 미리 학습시킨 후 분류를 통해 수행할 수 있다. 대표적인 분류기법으로는 신경망 회로를 이용할 수 있으며 [1], 군집화 방법 등도 효과적으로 이용할 수 있다 [2]. 고장 진단후 센서 고장으로 판단된 경우 제어기용 제한신호일 경우에, 즉 급기온도 센서, 급기 압력센서 유량 센서에 고장이 발생한 경우 이론적인 중첩을 이용하여 복구를 시킬 수 있으며, 그 밖의 센서에 고장이 난 경우에는 실시간 성능감시 감시에서 측정을 제외시키게 된다. 그림 3이 압력센서에 고장이 발생한 경우 예측값을 이용하여 제어를 수행시킨 것으로 정확하게 실제값으로 복구되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

이론적 중첩법을 이용하여 공조 시스템에 발생할 수 있는 단일 고장을 검출, 진단하는 방법을 제시하였다. 고장 검출 및 진단을 위하여 부분 시스템별 측정 신호와 제어 신호 사이의 관계식을 유도하였으며, 전체 신호의 관계를 망으로 도출하였다. 기존 방식은 정상상태의 자료를 이용하여 유도하였으며 설비 및 센서에 고장이 발생한 경우 기준식의 예측값과 실제값의 잔차를 이용하여 고장을 검출할 수 있도록 하였다. 여기서 제안된 방법은 전산 해석 프로그램으로 산출된 자료에 적용하여 효율성을 분석하였다.

본연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과입니다.

[참 고 문헌]

- [1] Lee, W.Y., J. M. House, D. R. Shin. "Fault diagnosis and Temperature Sensor Recovery for an Air-Handling Unit." ASHRAE Trans. 103(1), 1997.
- [2] Lee, W.Y., J. M. House, D. R. Shin. "Classification Techniques for Fault detection and diagnosis of an Air Handling Unit." IEA ANNEX34 meeting, Boulder, USA, 1997.
- [3] 이 원용, 에너지 시스템 운영최적화 및 고장 진단과 처리기술 연구, KIER-966414, 1997

표 1. 센서 및 제어 신호 관계

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Ts	o	o									
Tco		o	o		o						
Tho			o	o	o						
Tm				o		o					
Tci							o				
Tfr							o	o			
Tamb	o										
Ps											o
Dpf											o
Qs	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Qr							o	o	o		
Hmi	o		o		o						
Hmo						o					
Ucc	o		o								
Uhc	o			o							
Usf	o	o								o	o
Urf								o			
Udmp							o	o	o	o	

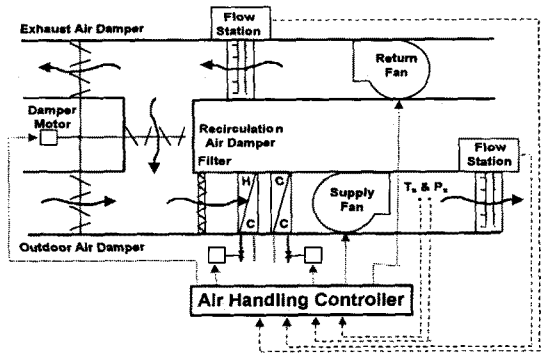


그림 1 VAV AHU 개요도

표 2. 센서 고장 후 실제 잔차 변화

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Ts	o	o									
Tco		o	o		o						
Tho			o	o	o						
Tm	o			o		o					
Tci							o				
Tfr							o	o			
Tamb								o			
Ps											o
Dpf	o										o
Qs	o	o	o					o		o	o
Qr							o	o	o		
Hmho	o		o		o						
Hmco						o					

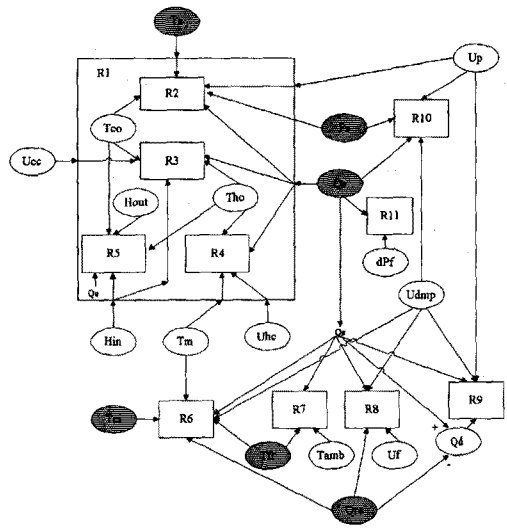


그림 2 신호 관계 선도

표 3. 설비 고장 후의 잔차 변화

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
C.C. valve stuck		o		o							
C.C. Fouling		o		o							
H.C. Leak		o			o						
Damper stuck							o	o	o	o	
S.F. fault		o	o							o	
R.F. fault								o			
Air filter clogging										o	o

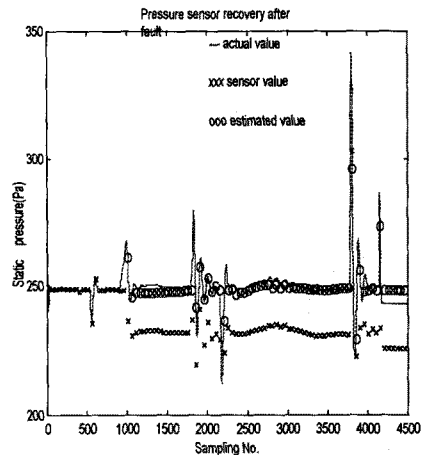


그림 3 센서 복구 예(압력 센서)