

## 신경회로망을 이용한 시스템의 실시간 고장감지 및 진단 방법

정진구\*

### The On-Line Fault Detection and Diagnostic Testing of Systems using Neural Network

Jin-Ku Jeong\*

#### 요약

건물에서 사용되는 시스템 기술이 발전됨에 따라 프로세서와 시스템을 운영자가 이해 하기가 어려워 지고 있다. 복잡한 시스템 설비를 운영할 때, 시스템 고장 처리를 위한 결정을 도울 수 있는 도구가 운영자에게 제공 되면 설비를 관리하는데 유리하다. 따라서 본 논문의 주요 목적은 IBS 건물을 최적으로 운전하기 위한 실시간 자동 에러 검출 및 진단시스템을 개발하는 데 있다.

#### Abstract

As technical systems in building are being developed, the processes and systems get more difficult for the average operator to understand. When operating a complex facility, it is beneficial in equipment management to provide the operator with tools which can help in decision making for recovery from a failure of the system.

The main object of the study is to develop real-time automatic fault detection and diagnosis system for optimal operation of IBS building.

---

\* 벽성대학 사무자동화과 전임강사

논문접수 : 98. 5.12

심사완료 : 98.6.20

## 1. 서론

컴퓨터를 이용한 자동화 기술과 통신 기술을 중심으로 한 첨단 기술의 발전이 가속화되면서 건물의 첨단 정보화에 대한 관심이 높아지고 있지만, 정보화 건물의 운전은 자동화 및 설비 시스템의 규모가 대형화, 복잡화되면서 시스템에 대한 종합적인 운영체계를 운영자가 이해하기가 점점 어려워짐에 따라, 새로운 운용 기술의 도입이 요구되고 있다. 건물의 고층화, 지능화로 설비시스템에서 발생하는 고장과 원인, 그리고 고장에 따른 전체 시스템에 미치는 영향을 운영자가 파악하기는 더욱 어렵다. 따라서, 운영자에게 건물 관리의 최적화, 고장감지 및 유지보수 진단 결정을 수행하는데 필요한 정보를 제공해 줄 수 있는 자동 고장감지 및 진단처리 시스템의 도입이 필요하다. 최적 운용을 위한 실시간 자동 고장감지 및 진단 시스템의 주목적은 설비시스템의 각 구성 장치들에 대한 운전 특성을 감시하고, 분석, 진단함으로써 운영자에게 적절한 고장 처리 방법에 대한 정보를 제공하는데 있다.

본 연구에서는 실시간 고장감지 및 진단시스템의 설계 및 개발에 앞서 건물/HVAC 시스템 해석용 프로그램을 사용하여 시스템 변수의 잔차를 이용한 고장감지와 신경회로망을 사용한 고장 진단을 수행하였다. 또한, 실시간 고장감지 및 진단시스템 개발을 위한 시험장치의 구성 및 시험방법에 대해서 제시하였다.

## II. 고장감지 및 진단시스템

### 2.1 시스템 구성

Fig. 1은 고장감지 및 진단(Fault Detection and Diagnosis)시스템 기본 구성을 보여준다.

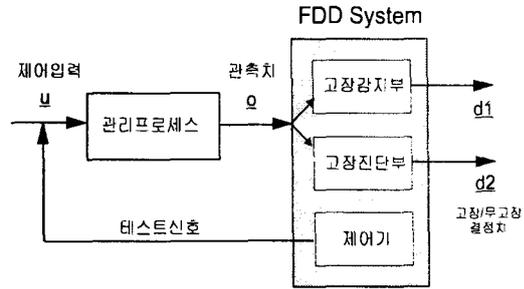


Fig. 1 Fault detection and diagnosis system

관리프로세스의 관측치를 이용하여 고장/무고장 결정을 수행하여, 고장을 감지하고, 고장의 발생 위치, 발생 시점(고장진단) 등을 분석한다. 이러한 고장감지 및 진단 결정은 벡터 구조의 결정값으로 수행된다. 고장감지 벡터는 고장의 영향을 결정하고, 진단결정 벡터는 고장의 발생 위치를 결정한다. 고장감지와 진단 하위 시스템은 기본 구성이 동일한 독립된 시스템으로 구성될 수 있다. 일반적으로 모든 하위 시스템들은 각 시스템별 정보를 교환할 수 있고, 고장감지 및 진단을 할 수 있도록 제어신호를 관리프로세스에 보낼 수 있는 중앙제어기와 정보를 교환할 수 있어야 한다. 간단한 구조의 고장감지 및 진단 시스템의 경우에는 제어기나 진단 시스템을 포함하지 않을 수도 있다.

Fig. 2는 FDD 시스템의 고장감지 및 진단 하위 시스템들의 구성을 보여준다.

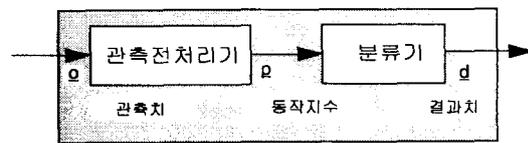


Fig. 2 Components of both the fault detection and diagnosis subsystem of a FDD system

고장감지 및 진단 시스템의 하위 시스템들은 두개의 독립된 관측전처리기와 분류기로 이루어진다. 분류기는 고장감지 및 진단 시스템에서 필수적인 구성장치이다. 분류기는 입력에

따라 설정 범위 내에서 적합한 결정을 내보낸다. 한계 검사기가 가장 간단하고 대표적인 분류기로 상하한 허용 범위를 통해서 입력변수의 값의 변화에 대해서 고장 혹은 정상 상태를 결정한다. 관측전처리기는 고장감지 및 진단 결정을 하기 위한 관측치를 분류기에서 분류하기 쉬운 동작지수로 변형시킨다. 만약 이러한 동작지수들을 이용한다면 관리프로세스의 분석모델들을 전처리기에 포함시킬 수 있다. 측정된 입력값을 이용하여 이 모델들은 고장감지 및 진단결정에 사용되는 동작지수를 이용하여 분류 결정을 수행하여 고장을 감지하고 진단한다.

### 2.2 적용방법

고장감지 및 진단의 적용방법은 다음의 4단계로 이루어진다.

- (1) 잔차발생(Residual Generation)
- (2) 특성계산(Feature Computation)
- (3) 고장 감지 및 진단 결정
- (4) 모델검증

Fig. 3은 고장감지 및 진단시스템의 모델 적용 방법을 보여준다.

## III. 고장감지 및 진단 결과

### 3.1 고장감지

#### 3.1.1 감지방법

윈도우 환경의 건물/HVAC시스템 해석용 프로그램을 이용하여 고장 발생시 시스템의 각 구성 장치의 동작 특성을 분석한 결과를 토대로 시스템의 상태변수의 잔차과 통계적인 방법에 의한  $3\sigma$  허용값을 사용하여 고장을 감지하였다. 시스템 상태변수 이용한 고장감지방법은 고장발생시 정상

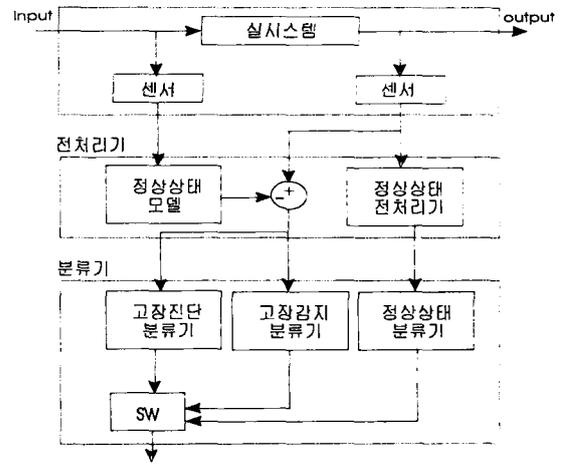


Fig. 3 The overall approach to fault detection and diagnosis

상태에서 예측되는 값과 실제 고장상태에서 측정된 값의 변화 즉, 잔차의 변화를 이용하여 시스템에서 발생하는 고장을 감지할 수 있다. 고장 감지를 위한 시스템의 상태변수의 잔차는 다음 식으로 정의하여 이용하였다.

$$d_T = T_S - T_{SP} \quad (1)$$

$$d_P = P_S - P_{SP} \quad (2)$$

$$d_Q = Q_S - Q_{SP} \quad (3)$$

$$d_D = D_S - D_{SP} \quad (4)$$

여기서,  $T_S$ 는 급기온도,  $T_{SP}$ 는 설정온도,  $P_S$ 는 정압,  $P_{SP}$ 는 설정압력이다.  $Q_S$ 는 유량차,  $Q_{SP}$ 는 설정 유량차이며,  $D_S$ 는 댐퍼개도,  $D_{SP}$ 는 설정 댐퍼개도이다. 고장이 발생할 경우 상태변수값의 변화가 일어난다. 이러한 물리적 상태변수의 잔차를 이용하여 잔차의 변화를 관측한다. 관측된 잔차의 변화값이 미리 설정된 허용 범위를 벗어날 경우 고장으로 간주된다. 고장을 감지하기 위해서는 적합한 허용 범위의 결정이 중요하다. 허용 범위는 통계적인 방법인  $3\sigma$  허용 범위에 의해서 결정하였다. 통계적인 방법인  $3\sigma$  허용 범위는 측정값  $x$ 가 정규 분포되어 있으며 평균값이  $\bar{x}$ , 그리고, 표준편차가  $\sigma$ 이면 주어진 범위 내에 있을  $x$ 의 확률값을 구할 수 있다.

$x$ 의 값이  $[\bar{x}-3\sigma, \bar{x}+3\sigma]$ 의 있을 확률이 99.73%이다. 따라서, 허용 범위는  $|x-\bar{x}|=3\sigma$ 로 나타낼 수 있다. 이 하한 및 상한 범위를 벗어난 경우 고장으로 간주된다.  $\bar{x}$ 와  $\sigma$ 는 예측 평균값과 표준편차이다. 고장진단에 잔차를 이용할 경우,  $|x-\bar{x}|$ 는 상태값의 잔차이다.

### 3.1.2 감지결과

Fig. 4는 순환송풍기 제어용 유량센서에 고장 발생한 경우, 유량차, 급기온도, 밸브개도 변화 특성에 대한 시스템의 잔차 변화 특성을 보여준다.

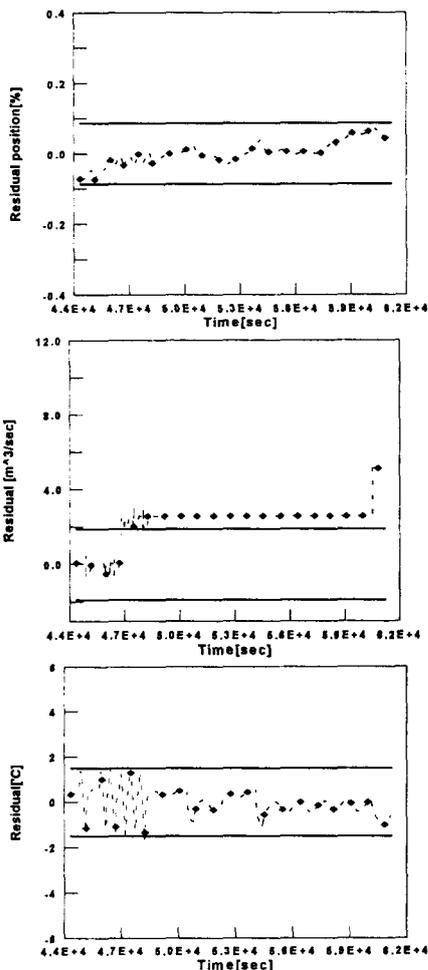


Fig. 4 Residuals characteristic fort fault : flow station fault

순환송풍기는 급기유량과 순환유량과의 차를 제어하는 기능을 수행한다. 그림에서 알 수 있듯이 유량센서의 고장은 유량제어의 정상적인 송풍기의 제어를 수행하지 못하고, 유량차의 급격한 변화를 가져오고, 급기온도와 압력에는 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

실제 건물 및 공조 시스템의 적용에 앞서 건물 및 HVAC 시스템 해석용 프로그램을 이용하여 고장 발생시 시스템의 각 구성장치의 운전 특성과 변화를 분석한 결과, 고장 발생시 상태변수의 잔차 변화의 패턴이 서로 다른 것을 알 수 있다.

이것은 고장진단을 위한 중요한 정보로 이용할 수 있으며, 이러한 서로 다른 패턴에 대한 인식방법이 적용될 경우 고장감지 물론 진단을 수행할 수 있을 것이다.

## 3.2 고장진단

### 3.2.1 진단방법

건물/HVAC 시스템 해석용 프로그램을 사용하여 시스템의 각 구성장치의 동작특성에 대해 조사, 분석한 결과를 이용하여 공조 시스템의 주요 고장과 현상들의 관계를 IF-THEN 규칙을 적용하여 통계적 패턴인식 방법인 신경회로망을 구성하였고, 이들 고장에 대한 반복적인 학습을 통해서 신경회로망을 훈련시켰다. 이러한 반복 학습을 통해서 얻은 학습 결과를 공조 시스템의 고장 진단에 적용하였다.

신경회로망의 학습을 위한 입력으로는 해석용 프로그램의 전산해석 결과를 이용하여 각 구성 장치의 고장 및 현상의 관계를 분석하여 고장 발생시 시스템의 각 구성 장치의 잔차 변화를 관측하였고, 잔차의 변화를  $\pm 1$ 과 0으로 정규화시켰다.

신경회로망의 학습을 위한 이상적인 입출력 학습패턴은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Ideal input and output patterns for faults used in training the ANN

입 력				출 력					고 장 진 단
d <sub>T</sub>	d <sub>P</sub>	d <sub>F</sub>	d <sub>D</sub>						
0	0	0	0	1	0	0	0	0	정상상태
0	0	1	0	0	1	0	0	0	유량센서 고장
0	0	0	1	0	0	1	0	0	댐퍼 고장
1	0	-1	1	0	0	0	1	0	급기센서 고장
0	-1	0	0	0	0	0	0	1	압력센서고장
-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	순환송풍기 고장

입력패턴은 각 시스템에서 관측된 상태변수의 잔차를 이용하였으며, 출력패턴은 관측된 고장/현상들의 관계를 이용하여 5개의 고장과 1개의 정상상태를 구분한 6×6 행렬 구조로 처리하였다. 실제 관측된 시스템 상태변수의 잔차는 학습이 완료된 신경망 회로의 입력으로 사용되어 고장 진단을 수행하기 위해서는 잔차에 대한 정규화가 요구된다. 즉 관측된 잔차의 크기와 관계없이 신경망의 최대 입력값은 ±1로 하였으며, 최대 잔차를 1로 하기 위해 고장 발생시 예측 가능한 최대 잔차를 정규화하여 고장 진단을 위한 입력값으로 사용한다. 신경회로망의 진단결정을 위한 입력값으로 사용하기 위한 급기온도의 잔차의 정규화 방정식은 식(5)와 같이 정의하여 적용하였다.

$$d_T = \frac{T_S - T_{SP}}{|T_S - T_{SP}|_{\max}} \quad (5)$$

T<sub>S</sub> : 급기온도, T<sub>SP</sub> : 급기설정온도

고장 진단을 수행하기 위한 신경회로망의 입력력 패턴은 Fig. 5와 같이 개선된 역전파 알고리즘을 가진 이단전향회로(Two layer feedforward network)의 신경회로망을 사용하여 각 고장에 대해서 반복적으로 학습이 이루어진다. 본 연구에서는 입력층이 4, 은닉층이 5, 그리고 출력층이 6인 4×5×6의 신경회로망을 사용하여 학습하였고, 학습방법은 반복회수가 5000회, 혹은 네크워크의 최소 자승오차가 0.0000001이하가 될 때까지 수행하였다.

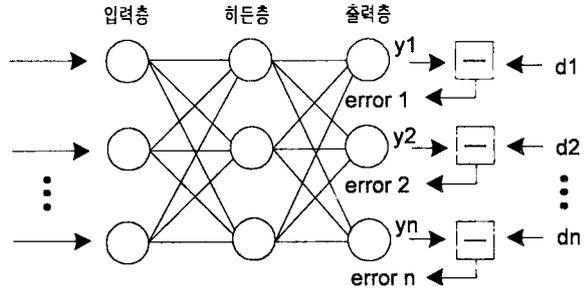


Fig.5 Two-layer backpropagation networks

### 3.2.2 진단결과

건물/HVAC시스템 해석용 프로그램을 사용하여 관측된 변수들의 잔차 벡터를 신경망에 입력시켜 진단하였다. <Table 2>는 고장 발생후 상태 변수들의 잔차값들이다. 이 값들을 신경망의 입력을 사용하여 진단을 하기 위해서 잔차 벡터들을 식(5)을 이용하여 정규화해야 한다. <Table 3>은 신경회로망의 입력으로 사용하기 위해서 정규화시킨 값들이다.

<Table 2> Measured residuals at faults

	고 장	d <sub>T</sub>	d <sub>P</sub>	d <sub>F</sub>	d <sub>D</sub>
1	정상상태	0	0	0	0
2	유량센서 고장	-0.040	0	2.051	0
3	댐퍼 고장	-0.185	0	-0.201	1
4	급기센서 고장	0.997	0	-0.901	1.05
5	압력센서 고장	0.134	-1	-0.196	0
6	순환송풍기 고장	-1.485	-1	-0.201	0

<Table 3> Normalized ANN input for fault diagnosis

	고 장	d <sub>T</sub>	d <sub>P</sub>	d <sub>F</sub>	d <sub>D</sub>
1	정상상태	0.010	0.01	0.010	0.01
2	유량센서 고장	-0.041	0.01	1	0.01
3	댐퍼 고장	-0.185	0.01	-0.201	1
4	급기센서 고장	1	0.01	-1	1
5	압력센서 고장	0.134	-1	-0.209	0.01
6	순환송풍기 고장	-1	-1	-0.196	0.01

<Table 3>의 정규화시킨 잔차를 학습되어진 신경회로망에 적용하여 진단한 결과, <Table 4>와 같이 거의 완벽하게 고장을 진단하는 것을 알 수 있다. 이상적인 훈련 패턴과 실제 패턴 사이에서 잔차의 크기에 차이가 있더라도, 가장 유사한 패턴으로 진단을 수행할 수 있다. 신경회로망을 이용하면 진단에 필요한 훈련 과정은 오프라인(off line)으로 수행하므로 훈련된 결과를 이용하는 진단에는 전달함수 계산만이 필요하므로 연산 시간이 거의 필요하지 않다. 따라서, 실시간 진단에 유효하게 사용될 수 있다. 본 절에서는 신경회로망 회로를 이용한 고장 진단의 적용 가능성을 보여주기 위해서 비교적 구분이 쉬운 5가지의 급격한 손상만을 고려하였지만, 신경회로망은 복잡한 비선형 관계를 훈련을 통해 학습시킬 수 있으므로, 미소 고장에 대해서도 효과적으로 사용할 수 있다.

<Table 4> The faults diagnosis result by ANN trained

고 장	출 령					
정상상태 고장	0.9998	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0002
유량센서 고장	0.0002	0.9998	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
댐퍼 고장	0.0000	0.0006	0.9988	0.0002	0.0000	0.0002
급기센서 고장	0.0003	0.0000	0.0000	0.9997	0.0024	0.0000
압력센서 고장	0.0002	0.0000	0.0000	0.0002	0.9999	0.0002
순환송풍기 고장	0.0001	0.0006	0.0005	0.0000	0.0001	0.9998

#### IV. 실시간 고장감지 및 진단 시스템

##### 4.1 시험장치 구성

Fig. 6은 VAV 시스템의 제어 대상인 전체적 시스템 및 구동기의 구성을 보여준다.

제어기와 구동기는 실내온도를 제어하는 VAV 박스, 실내로 공급되는 공기의 온도를 설정값으로 제어하는 냉난방 코일시스템, 급기 덕트의 정압제어용 급기 송풍기, 유량제어용 순환송풍기, 그리고 외기의 유입량 제어용 혼합 공기 댐퍼로 구성된다.

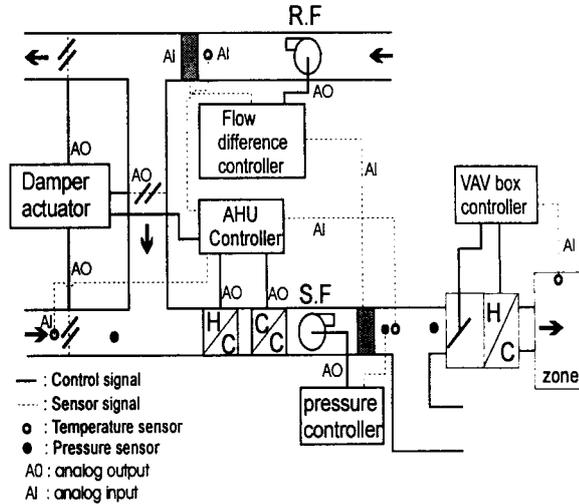


Fig. 6 The demonstration system for On-Line Testing

<Table 5>는 VAV 시스템의 자동제어를 위한 컴퓨터의 입출력 관계를 정리하였다.

<Table 5> I/O for Automatic control

출력점	입력		출력		운 전 모 드		제 어 방 법					
	AI	BI	AO	BO	거주	비거주	급기온도	실내온도	급기압	유량차	이코노마이저	혼합공기 제어
급기송풍기	▲	▲	●		●	●			●			
순환송풍기	▲		●		●	●						●
난방 코일	▲		●		●	●						
냉방 코일	▲		●		●	●						
혼합 댐퍼	▲		●		●	●						●
VAV 댐퍼	▲		●		●	●						●
급기온도	●				●	●						
실내온도	●				●	●						
외기온도	●				●	●						
순환온도	●				●	●						
혼합공기온도	●				●	●						
급기 압력	●				●	●						

▲ : 상태감시나 추가제어를 위한 요소  
● : 기본 제어를 위한 필수 요소

##### 4.2 시스템 구성

고장감지 및 진단 시스템의 개발 작업은 프로세

스 유닛 단위를 사용한 다양한 방법들의 개발로 시작되어야 하고, 이러한 다양한 방법들을 개발하기 위해서는 고장감지 및 진단 시스템이 필요하다.

여러 다양한 프로세스 유닛(건물, 하위 프로세스, 구성 장치)들 혹은 방법들을 제한하지 않도록 고장감지 및 진단 시스템을 설계하여야 한다. 운영 시스템에서 새로운 고장진단 방법들의 개발에 있어서 시스템은 쉬운 확장성과 새로운 프로세스 유닛과의 연결이 용이하게 구성되어야 하며, 구성 장치에 대한 모니터링에 필요한 비용은 적어야만 한다. 이것은 Fig. 7과 같이 시스템의 구조를 계층적, 모듈화 구조로 구성한다.

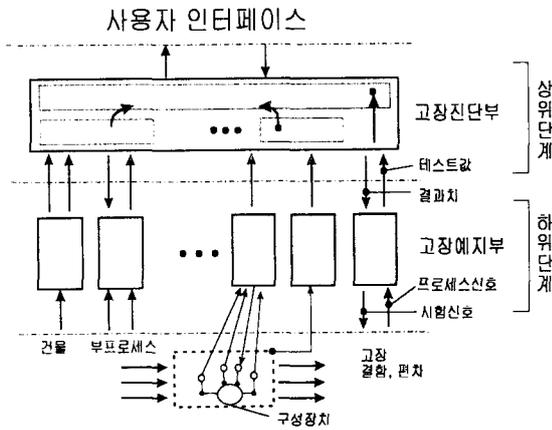


Fig. 7 System structure

### 4.3 시스템 구현

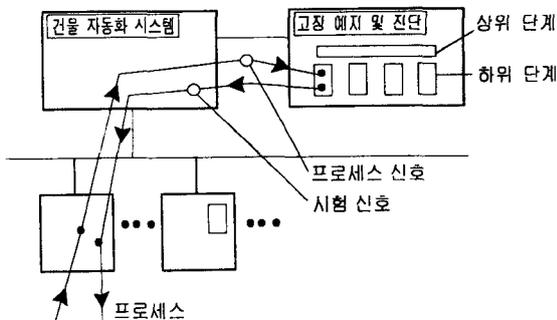


Fig. 8 FDD system in conjunction with a BAS

최적 운용을 위한 고장감지 및 진단 시스템의 개발 목적은 건물 자동화 시스템에 고장감지 및 진단 시스템을 추가로 설치하여 최적의 운용과 고장 진단을 위한 운영시스템을 개발하는 것이다. Fig. 8과 같이 건물 자동화 시스템과 독립적으로 고장감지 및 진단 시스템을 구성하여 시스템간의 데이터 인터페이스를 통해서 모든 정보를 이용하는 시스템을 구현한다.

## 5. 결론

건물/HVAC 시스템 해석용 프로그램을 사용하여 시스템의 정상 및 고장 운전시 각 구성장치의 동작 특성을 비교, 분석한 결과를 토대로 시스템의 상태변수 잔차를 이용한 고장 감지와 통계적 인식 방법인 신경회로망을 사용하여 고장 진단을 수행한 결과 좋은 결과를 얻을 수 있었고, 실시간 시험 장치의 구성, 자동제어, 시스템의 입, 출력관계 등의 시험방법을 제시하였다. 이러한 결과로부터 본 연구의 최종 계획은 실시간 고장감지 및 진단 시스템을 개발하는데 있다.

최적 운용을 위한 실시간 고장 감지 및 진단 시스템의 개발은 설비 시스템의 효율적인운용을 통한 에너지 사용량 및 운전비용의 절감, 쾌적한 실내 환경 조성 및 설비 시스템의 신뢰성 향상 등 국내의 에너지 절약과 설비 시스템의 자동화 기술 발전에 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

## References

- [1] Charless P. Quesenberry, 1993, "The effect of sample size on estimated limits for x and x control charts", Journal of quality technology, Vol.25, No. 4, pp. 237-247.
- [2] Hyvarinen, J., Kohonen, R.(eds.), 1993. "Building optimization and fault diagnosis system concept", Espoo: VTT, Laboratory of heating and ventilation, (IEA, Annex 25).

ISBN 952-9601-16-6

- [3] Kit, C.C., Roes, Ronald, J.M.M., Doe, 1993, "Shewhart-type control charts for individual observation", Journal of quality technology, Vol.25, No.3, pp. 188-198
- [4] Mehra, R.K. & Peschon, I., "An innovations approach to fault detection & diagnosis in dynamic system", Automatica, pp. 637-640
- [5] Papp, F.L.F., Mitchell, J.W. & Beckman, W.A. 1991. "Optimal Control and fault detection in heating, ventilating, and air conditioning systems", ASHRAE Transactions: Symposia, Part 1, pp. 729-736. NY-91-10-5
- [6] Wasserman, P.D., "Combined backpropagation/Cauchy machine", 1988, Proceedings of the International Neural Network Society

### ● 저자소개



#### 정진구

1992년 : 한남대학교 전자계산공학과 (공학사)

1994년 : 한남대학교 대학원 전자계산공학과 (공학석사)

1995년 ~ 현재 : 벽성대학 사무자동화과 전임강사

연구분야 : 시스템 시뮬레이션, 멀티미디어, 컴퓨터그래픽스