

공조 시뮬레이터를 이용한 고장진단 실험 연구

태 춘 섭[†], 양 훈 철, 조 수, 장 철 용
한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터

An Experimental Study on Fault Detection in the HVAC Simulator

Choon-Seob Tae[†], Hooncheul Yang, Soo Cho, Cheol-Yong Jang
Building Energy Research Center, KIER, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT: The objective of this study is to develop a rule-based fault detection algorithm and an experimental verification using an artificial air handling unit. To develop an analytical algorithm which precisely detects a tendency of faulty component, energy equations at each control volume of AHU were applied. An experimental verification was conducted on the HVAC simulator. The rule based FDD algorithm isolated a faulted sensor from HVAC components in summer and winter conditions.

Key words: HVAC simulator(공조 시뮬레이터), Fault detection and diagnosis(고장검출과 진단), Control(제어)

기 호 설 명

T : 온도, [°C]
 u : 코일 및 밸브 제어신호(0, 1)

그리스 문자

ϵ : 오차에 의한 허용오차 값
 Δ : 온도상승

하첨자

cc : 냉각코일

hc : 가열코일
ma : 혼합공기온도
oa1 : 외기온도 1
oa2 : 외기온도 2
od : 외기차단용 댐퍼
ra : 환기온도
ref : 참고치
sa : 급기온도
sa,s : 급기온도 설정치
sf : 급기송풍기
t : 온도값

1. 서론

건물을 쾌적한 생활공간으로 유지하기 위해 필수적인 냉난방 공기를 공급하기 위해서는 HVAC 시스템의 최적운전과 제어 및 고장진단에 관한 기술 등이 요구된다. 특히 건물의 냉난방 설비들

[†]Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3232; fax: +82-42-860-3202

E-mail address: cstae@kier.re.kr

이 자동화, 복잡화, 대형화 되면서 고장발생시 경제적인 손실과 위험성이 증대되고 있다.

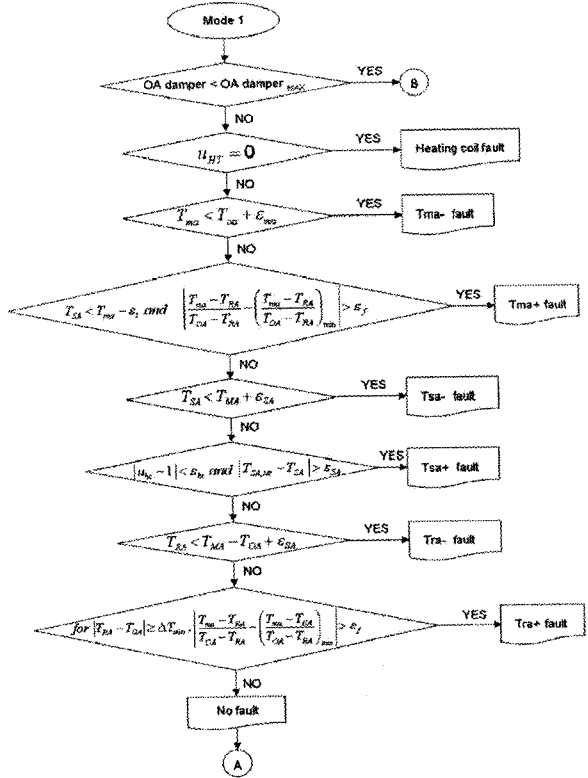
고장진단에 대한 연구 중 전문가의 지식을 기본으로 하는 규칙기반 고장진단 연구는 Liu and Kelly⁽¹⁾와 Anderson et al.⁽²⁾에 의한 규칙기반방법과 통계적인 방법을 공기조화 시스템의 진단에 적용한 사례가 있다. House et al.⁽³⁾은 공조기를 위한 지식기반 방법을 실제 건물에 적용하여 연구하였다. Han et al.^(4,5)은 퍼지 알고리즘, 신경망 알고리즘을 이용한 고장검출 및 진단에 관한 연구를 수행하였다. Yang et al.^(6,7)은 외기조건에 따른 고장진단 알고리즘을 개발하고, 실제 건물을 대상으로 하여 고장발생 실험을 수행하고 알고리즘의 특성을 분석하였다.

고장진단 성능실험을 하기 위해서는 실제적인 건물을 대상으로 하는 것이 좋지만, 그 경우는 연구범위가 제약되고 시간 및 비용적인 측면에서도 많은 부담이 필요하다. 그러나 실제 건물과 동일한 공조시스템을 갖춘 소형의 모의 실험장치 즉 시뮬레이터를 구축한다면 이러한 문제를 극복할 수 있다. 본 연구는 소형 공조 시뮬레이터를 구축하고, 고장진단 알고리즘의 적용 시 고장여부를 정확히 검출하기 위하여 시뮬레이터에 설치된 주요 요소에 대한 인위적 고장발생 실험을 수행하고 분석하였다. 본 장치가 효과적으로 가동된다면 추후 새로운 고장검출 알고리즘을 개발하였을 경우 알고리즘의 특성분석 및 개선에 대한 시간 및 장소에 구애되지 않고 손쉽게 수행할 수 있다.

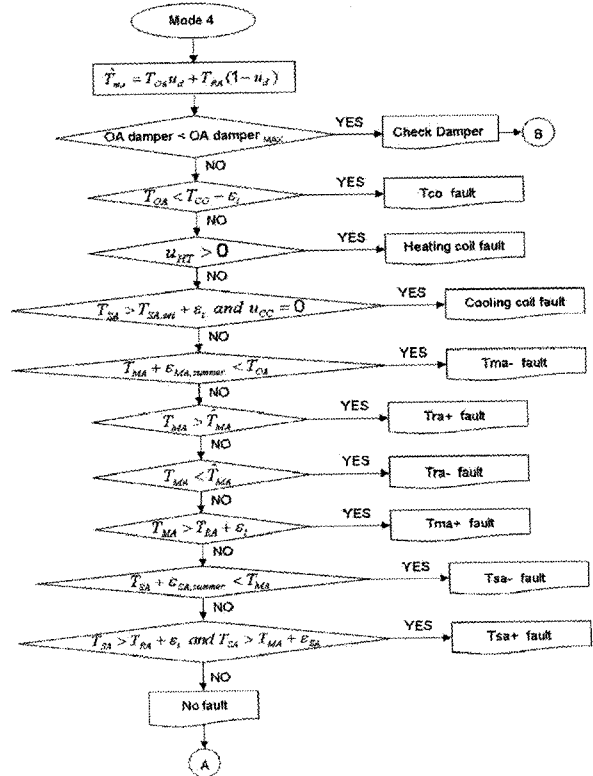
2. 고장검출 알고리즘

공조기의 운전모드는 외기온도와 각 계절별 외기온도 설정치를 이용하여 4가지 모드 즉, 겨울모드(mode 1), 중간기모드(mode 2), 초여름모드(mode 3), 여름모드(mode 4)로 구성된다. 본 연구에서는 겨울모드(mode 1)와 여름모드(mode 4)에 대해서 실험 및 분석을 수행하였다.

규칙기반 고장검출 방법은 고장을 분류함에 있어 설비의 제어방법과 허용범위 등에 의해 진단 규칙을 설정하고 상태 값이나 제어 값이 정해진 규칙을 준수하는지의 여부를 판단하여 고장을 검출한다. 각 모드의 FDD 알고리즘은 Fig. 1과 같다.



(a) Winter mode(mode 1)



(b) Summer mode(mode 4)

Fig. 1 Schematic diagram of fault detection algorithm

규칙에 사용되는 변수값은 디지털제어기로 제어되는 대부분의 공조기에서 획득할 수 있다. 규칙을 사용할 경우에는 고장의 크기, 측정의 정확성, 허용오차의 크기 등이 고장검출에 영향을 미친다. $\mathcal{E}_b, \mathcal{E}_f, \mathcal{E}_{cc}, \mathcal{E}_{oa}, \mathcal{E}_{sa}, \Delta T_{min}$ 과 같은 설정값은 규칙을 평가하는데 사용되며 전문가가 정한다.

고장검출 순서는 다음과 같다. 공조시스템으로부터 측정된 데이터들은 이동평균법으로 필터링하여 측정값의 신뢰도를 높인다. 다음으로 외기온도센서의 고장을 판단하기 위해서 T_{oa1} 신호를 T_{oa2} 신호와 비교하여 그 값의 차이가 한정값 이상이면 외기온도센서 고장으로 판단한다. 측정되는 외기온도의 신호가 고장신호라고 판단되면 이를 진단하여야 한다. 이 후 외기온도에 적합한 운전모드를 결정한다. 각 운전모드에서는 모드에 적합한 규칙들을 적용하여 고장검출을 수행한다. 고장의 원인으로 판단되는 요소는 운전자에게 보고하여 진단하도록 한다.

3. 공조 시뮬레이터

본 공조 시뮬레이터는 모형공간에 대해 실제 건물과 동일한 공조방식을 적용하여 실험에 필요한 정보를 취득하면서 각 포인트에 대한 데이터 전송하는 시스템이다.

본 시뮬레이터의 본체는 Fig. 2, 그리고 제어부는 Fig. 3과 같다. 시뮬레이터 본체의 크기는 1300(W)×1530(H)×850(D)이며 크게 세 부분으로 나눈다. 상단부분은 덕트, 냉각코일, 가열코일, 급기팬, 배기팬, 급기댐퍼, 배기댐퍼, 믹싱댐퍼 등이 설치된 공조기 및 덕트 공간이다. 중단부분은 모형 실험공간이며, 하단부분은 자동제어 시스템(PLC) HC900 및 냉동기 시스템이 설치된 공간으로 구성되어 있다. 제어스테이션에는 제어프로그램(PlantScope Vista software; HS-VSM400)이 설치된 제어용 컴퓨터와 데이터로거용 컴퓨터가 설치되어 있다.

Fig. 4는 시뮬레이터 본체 상단에 설치된 HVAC 시스템의 개략도를 나타낸다. 시스템의 온도제어기는 급기 송풍기 후단의 덕트에서 공급되는 급기온도를 설정값으로 조절하게 된다. 외기는 공조기로 흡입되어 실내로부터 공급되는 환기와 혼합되어 혼합공기를 형성한 후 냉난방코일부에서 냉각/가열되어 온도가 제어된다.

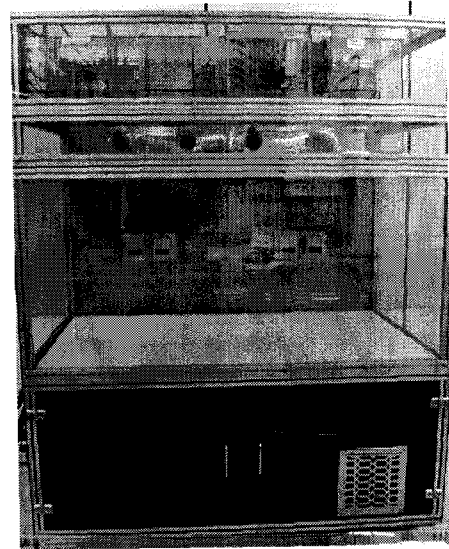


Fig. 2 HVAC simulator

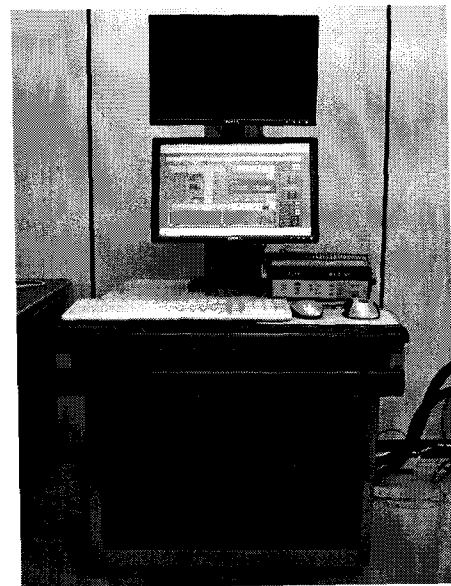


Fig. 3 Control station of HVAC simulator

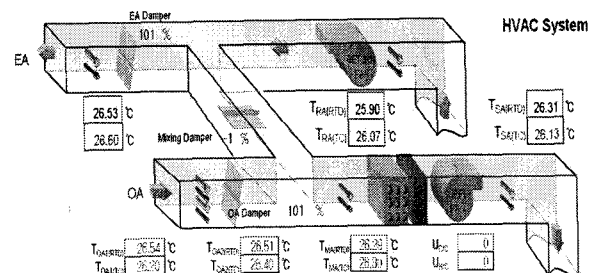


Fig. 4 Schematic diagram of HVAC system in the simulator

4. 실험 및 고찰

4.1 실험방법

분류형 규칙기반 고장검출 및 진단 알고리즘의 시작은 고장진단에 필요한 한정값을 일정한 상수로 지정하는 것이다. 이는 모든 관계식에서 사용되고 있는 ϵ , ΔT 등의 오차값 혹은 한정값 등을 정의하는 것을 의미한다.

시스템의 한정값들이 선정되면 공조기 시스템에 설치되어 있는 요소 혹은 측정 장비에서 출력되는 전압, 온도, 압력 등의 신호를 실시간으로 모니터링한다. 실험설비로부터 측정되는 신호는 데이터로거(Agilent 34970A)와 전용 소프트웨어(MS-Excel 프로그램의 매크로 기능)를 구성하여 데이터를 획득하고 분석하였다.

고장모사 실험은 하절기와 동절기에 대해 수행하였으며 실험조건은 Table 1과 같다. 고장을 모사하는 인자로 외기온도센서, 급기온도센서, 혼합공기온도센서, 환기온도센서를 선정하였다. 하절기에는 급기온도센서 대신에 실내온도센서를 이용하였다. 그 이유는 본 시뮬레이터의 냉방을 위해 직접팽창식 코일을 적용하였는데 이로 인하여 급기온도센서로 온도를 설정할 경우 너무 빈번하게 냉동기가 on-off 되기 때문이다. 각 계절 조건에서 센서의 고장을 발생시키고 각 부위의 신호를 측정 후 고장진단 알고리즘을 이용하여 고장을 검출하는 방법으로 실험을 수행하였다. 주요 측정지점은 T_{sa} , T_{ma} , T_{ra} , T_{oa1} , T_{oa2} , u_{cc} , u_{hc} , u_{od} 이다.

고장진단 알고리즘을 이용하여 고장을 검출하는 화면은 Fig. 5와 유사하다.

4.2 실험결과 및 고찰

겨울철 조건의 실험결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a), (b)는 공조시스템이 정상상태에 도달한 후 외기온도센서에 대해 각각 -10°C , $+10^{\circ}\text{C}$ 만큼 오차를 발생시킨 경우 나타나는 시스템 각 부위의 온도이다. 정상상태 실험에서 외기온도센서의 고장을 인위적으로 유발시켰기 때문에 외기온도를 제외한 다른 센서의 온도는 정상상태와 유사함을 알 수 있다. 고장진단 알고리즘 중에서 아래의 식과 같이 두 개의 외기온도센서 사이의 온도차가

Table 1 Experimental conditions

Case	OA (outdoor air) fault	MA (Mixing air) fault	SA (Supply air) fault	RA (Return air) fault
Fault condition	$T_{OA}=\pm 10^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{MA}=\pm 10^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{SA}=\pm 10^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{RA}=\pm 10^{\circ}\text{C}$ shift

MODE 3			
STEP	Evaluation	Fault detection	Equation
1	Evaluation of T_{sa} sensor fault	Normal	$(T_{sa1}-T_{sa2}) > \epsilon_{OA}$
2	Evaluation of OA damper fault	Normal	$(u_{cc} < u_{cc,MAX})$
3	Evaluation of mode(changeover) fault	Normal	$T_{OA} > T_{OD} + \epsilon_t$
4	Evaluation of heating coil fault	Normal	$u_{H1} > 0$
5	Evaluation of cooling coil fault	Normal	$u_{CC} = 0$
6	Evaluation of T_{sa} fault	Normal	$T_{SA} - T_{SA,ref} > \epsilon_t$
7	Evaluation of T_{ma} fault	Time Fault	$ T_{OA} - T_{RB} > \epsilon_t$
8	Evaluation of T_{sa} fault	Time Fault	$T_{SA} > T_{MA} + dT_{off} + \epsilon_t$
9	Evaluation of T_{ra} fault	Time Fault	$T_{SA} > T_{RA} + dT_{off} + \epsilon_t$
10	Evaluation of cooling coil fault	Time Fault	$ u_{CC} - 1 \leq \epsilon_{CC}$ and $T_{SA} - T_{SA,ref} \geq \epsilon_t$

Fig. 5 View of fault detection

일정한 온도 이상이 되면 고장으로 판단되는 것이다. 이 조건은 모드를 선정하기 전에 고장으로 판단될 수 있다.

$$OA (\pm) \text{ fault} : |T_{Oa} - T_{Oa,ref}| > \epsilon_t$$

Fig. 6(c), (d)는 혼합공기온도센서를 각각 -10°C , $+10^{\circ}\text{C}$ 만큼 오차를 발생시킨 경우 나타나는 시스템 각 부위의 온도이다. 이 고장은 Fig. 2 (a)의 3단계, 4단계 판단식으로 검출된다. Fig. 6(e), (f)는 환기온도센서를 각각 -10°C , $+10^{\circ}\text{C}$ 만큼 오차를 발생시킨 경우 나타나는 시스템 각 부위의 온도이다. 이 고장은 Fig. 2 (a)의 7단계, 8단계 판단식으로 검출된다. Fig. 6(g), (h)는 급기온도센서를 각각 -10°C , $+10^{\circ}\text{C}$ 만큼 오차를 발생시킨 경우 나타나는 시스템 각 부위의 온도이다. 이 고장은 Fig. 2 (a)의 5단계, 6단계 판단식에서 검출된다. 다른 센서의 고장과는 달리 급기온도는 공조시스템의 제어용으로 이용되므로 설정된 급기온도를 유지하기 위하여 가열코일이 작동한다. 따라서 급기온도 자체는 정상적인 것처럼 보이지만 외기온도를 제외한 혼합공기온도, 배기온도, 실내온도에 영향을 미친다. 즉, 음(-)의 고장일 경우는 상기 세 부분의 온도가 상승되고 양(+)의 고장일 경우는 상기 세 부분의 온도가 저하된다.

여름철 조건의 실험은 Fig. 7과 같다. 공조시스템이 정상상태에 도달한 후 외기온도센서, 혼합공기온도센서, 환기온도센서, 실내온도센서에 대해 각

각 -10°C , $+10^{\circ}\text{C}$ 만큼 오차를 발생시킨 경우 나타나는 시스템 각 부위의 온도이다. 겨울철과 마찬가지로 외기온도센서의 고장진단은 겨울철과 동일한 알고리즘을 이용하여 판단된다. 혼합공기온도센서의 고장은 Fig. 2 (b)의 5단계와 8단계 판단식에서 검출되고 환기온도센서의 고장은 Fig. 2 (b)의 6단계와 7단계 판단식에서 검출된다. 실내온도센서의 고장은 Fig. 2 (b)의 9단계와 10단계 판단식에서 검출된다. 여름철에 급기온도센서를 이용하여 제어하는 경우에는 빈번하게 on-off 되는 문제점으로 인하여 실내온도를 이용하여 시스템을 제어하였다. 그 결과 음(-)의 고장일 경우는 설정온도가 낮은 것으로 인식하여 냉동기가 가동하지 않으므로 혼합공기온도, 배기온도, 실내온도가 상승되고 양(+)의 고장일 경우는 설정온도가 높은 것으로 인식하여 냉동기가 과다하게 가동하여 상기 3부위의 온도가 저하된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 고장검출 시뮬레이터는 고장진단 알고리즘을 이용하여 공조기의 구성요소 중 고장요소를 구체적으로 검출하여 진단이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 공조 시뮬레이터를 이용하여 여름철과 겨울철 외기온도 조건에서 공조기를 구성하는 주요 요소의 인위적 고장발생 실험을 수행하고 전문가 규칙 기반의 고장검출 및 진단 알고리즘을 이용하여 고장을 진단함으로써 고장진단 알고리즘의 성능을 분석하고 시뮬레이터의 효용성을 분석하였다.

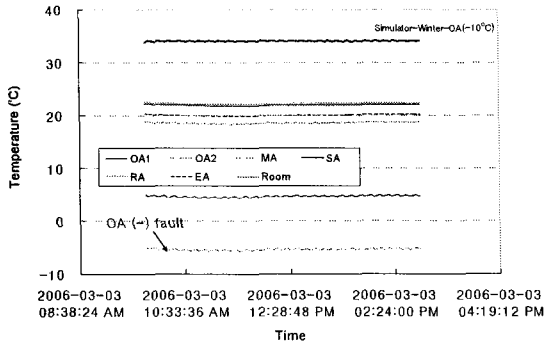
특히 고장부위의 신호에 대한 기준대비 경향성, 즉 양(+)의 방향의 고장신호인지 혹은 음(-)의 방향의 고장신호인지도 판단하는 우수성을 보여준다. 또한 공조 시뮬레이터는 규칙기반 방식의 단일고장검출 고장검출 및 진단 알고리즘이 내제된 컴퓨터를 이용하여 고장의 원인을 구체적으로 검출할 수 있음을 규명하였다.

추후 공조 시뮬레이터는 진보된 고장검출 알고리즘을 단기간에 분석하는데 효과적으로 사용될

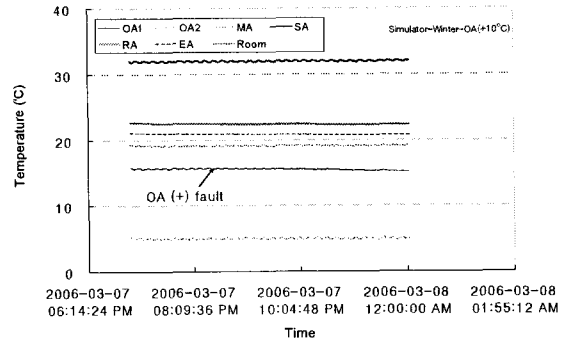
것으로 판단되며, 개발된 알고리즘의 특성분석 및 개선 연구를 손쉽게 수행할 수 있을 것이다.

참고 문헌

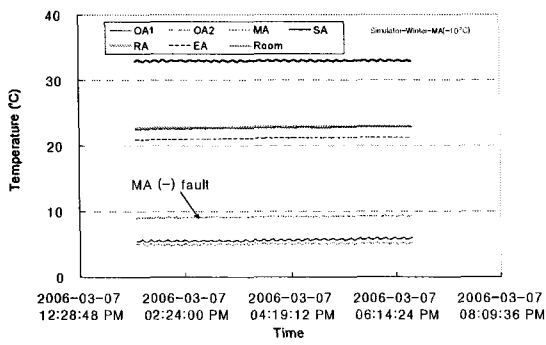
1. Liu, S. T. and Kelly, G. E., 1989, Rule-based diagnostic method for HVAC fault detection, Proceeding of building simulation 89, Vancouver, pp.319-324.
2. Anderson, D., Grave, L., Reinert, W., Kreider, J. F., Dow, J., and Wubbrna, H., 1998, A quasi-real-time expert system for commercial building HVAC diagnosis, ASHRAE Transactions, 95, pp. 954-960.
3. House, J. M., Lee, W. Y., and Shin, D. R., 1999, Classification techniques for fault detection and diagnosis of an air-handling unit, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 1087-1097.
4. Han, D., and Ha, S., 2000, Fault detection and diagnosis of air-conditioning system by using curve fitted type fuzzy algorithm, Proceeding of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 302-307.
5. Han, D., and Hwang, J., 2003, The practical fault detection of an air-conditioning system by the neural network algorithm using normalized input data, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 159-165.
6. H.C. Yang, S.H. Cho, C.S Tae and C.K. Lee, A study of fault detection and diagnosis algorithm in Green Building, Proceedings of the SAREK 2004 Winter Annual Conference, pp.294 ~ 299.
7. H.C. Yang, S. Cho, C.S Tae and C.Y. Jang, A study on rule-based fault detection algorithm in the HVAC system, Proceedings of the SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp.241 ~ 246.



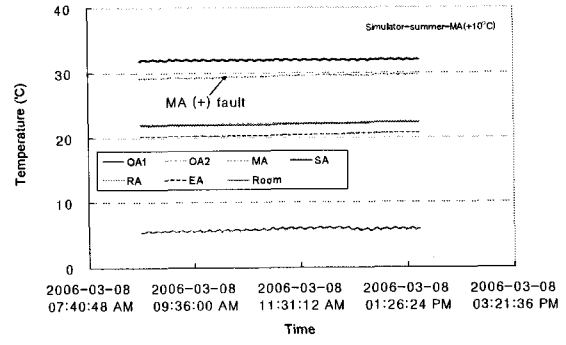
(a) Outdoor air (-) fault



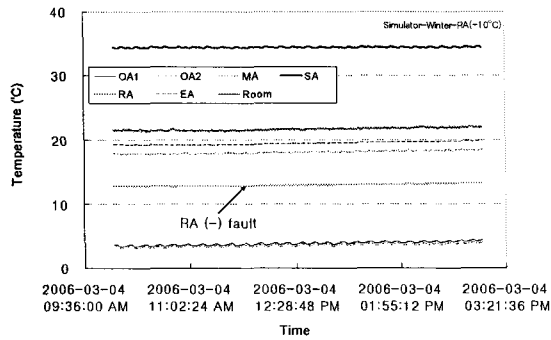
(b) Outdoor air (+) fault



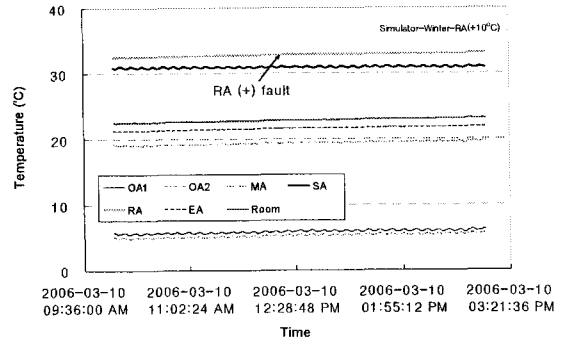
(c) Mixed air (-) fault



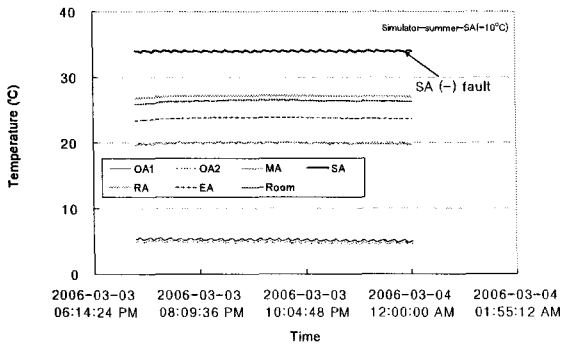
(d) Mixed air (+) fault



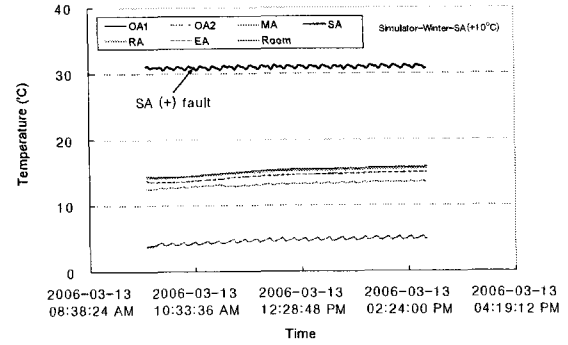
(e) Return air (-) fault



(f) Return air (+) fault

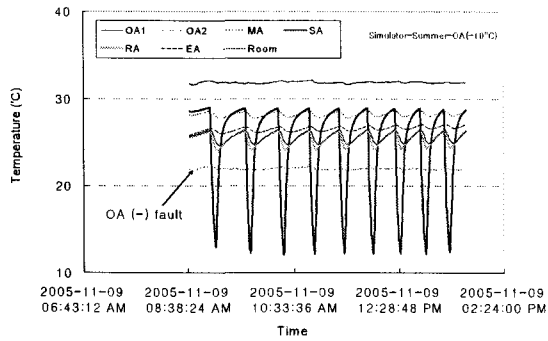


(g) Supply air (-) fault

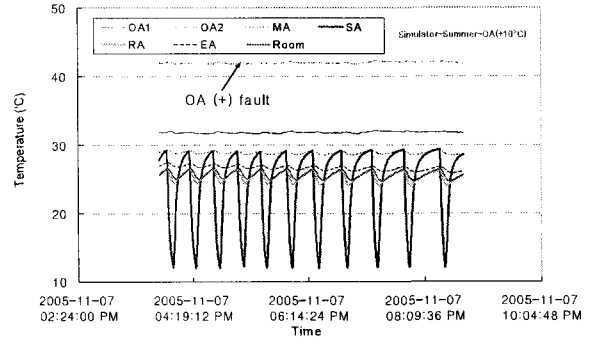


(h) Supply air (+) fault

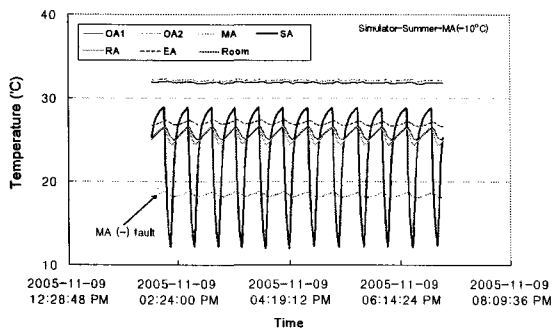
Fig. 6 Graph of fault detections in winter season



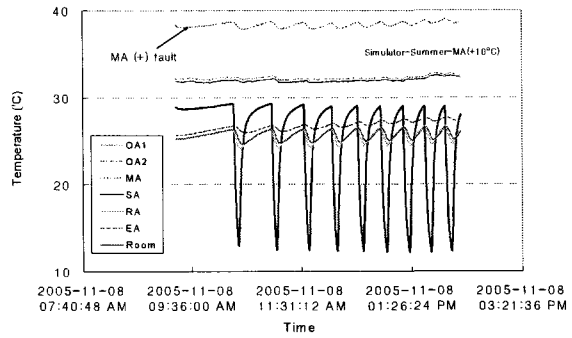
(a) Outdoor air (-) fault



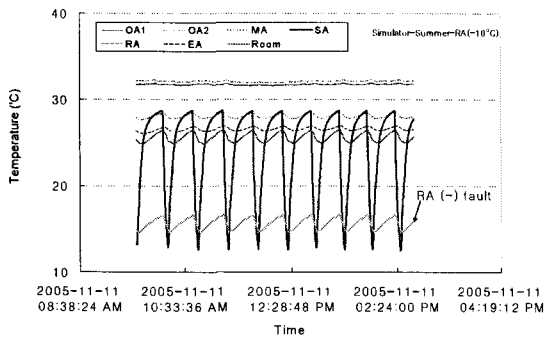
(b) Outdoor air (+) fault



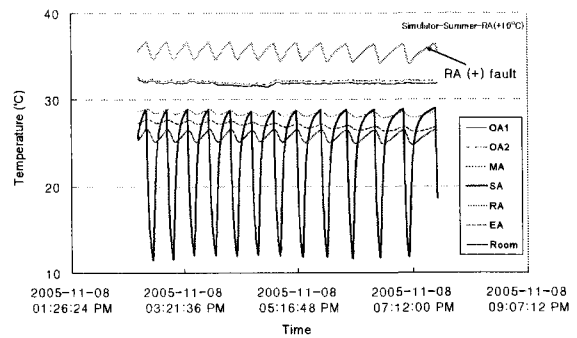
(c) Mixed air (-) fault



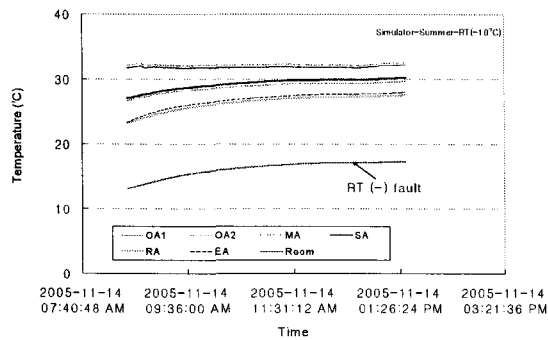
(d) Mixed air (+) fault



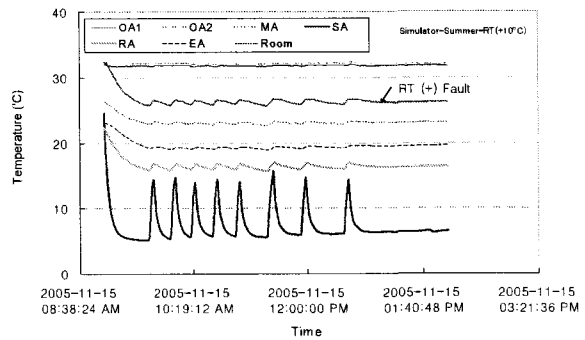
(e) Return air (-) fault



(f) Return air (+) fault



(g) Room temperature (-) fault



(h) Room temperature (+) fault

Fig. 7 Graph of fault detections in summer season