

태양열 시스템 고장진단을 위한 유체센서와 알고리즘

Fluid Sensor and Algorithm for Trouble Detection of Solar Thermal System

이원철(Won-Chul Lee)¹, 홍희기(Hiki Hong)^{2*}

¹경희대학교 기계공학과 대학원, ²경희대학교 기계공학과

¹Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

(Received December 3, 2013; revision received February 5, 2014; Accepted: May 7, 2014)

Abstract Typical trouble patterns in solar thermal systems include working fluid leakage and freezing other than breakdown of pump. A fluid sensor for measuring electric resistance of fluid was developed and installed at the top of the collector piping in order to check the fault of solar system. Working fluid level in the pipe was determined by measuring electric resistance from a fluid sensor. On the base of this, it was confirmed that the fluid sensor diagnoses leakage of fluid. Electric resistance of propylene glycol aqueous solution was measured in the range of 0~70°C and 0~40% of concentration. The response surface analysis was performed by using a central composite design, and the regression equation was derived from the relationship between electric resistance, temperature, and concentration. Through the experiment in a real solar system, we can estimate a concentration of working fluid when a pump is not operating and predict a possibility of freezing. Finally, an effective algorithm for trouble shooting was proposed to operate and maintain the solar system.

Key words Solar thermal system(태양열 시스템), Trouble detection(고장진단), Electric resistance(전기저항), Response surface analysis(반응표면분석), Fluid sensor(유체센서)

* Corresponding author, E-mail: hhong@khu.ac.kr

기호설명

V_s : 공급전원 전압 [VAC]
 V_f : 고정저항의 전위차 [VAC]
 R_f : 고정저항 [kΩ]
 R : 열매체 전기저항 [kΩ]
 C : 열매체 농도 [%]
 T : 열매체 온도 [°C]

1. 서 론

태양에너지는 무공해 에너지원으로 화석연료를 바탕으로 하는 기존 에너지 생산을 대체함과 동시에 환경문제도 해결하여 인류가 풍요롭고 쾌적한 삶을 영위하도록 도와주는 청정에너지이다.⁽¹⁾ 기후협약과 원유 가격의 급등으로 신재생에너지 보급의 필요성이 증가하는 추세이다. 신재생에너지 분야에서도 변환형태가 열에너지인 태양열 시스템은 경제성 및 활용도가 높아 충분한 경쟁력을 갖춘 분야로 평가된다.⁽²⁾ 한국의 태양열 산업은 국내에 보급된 신재생에너지원 중 가장 먼저 도입되었으며, 1990년대부터 본격적으로 사용되기

시작했다. 하지만 1990년대 후반 기저부하 창출을 위해 보급하였던 심야전력 보일러의 이용이 급속히 증가하면서 같은 용도인 태양열 온수급탕 시스템의 보급은 더욱 위축되었다. 그러나 태양열 시스템의 근본적인 보급부진의 원인은 영세한 업체가 검증되지 않은 제품을 만들어 보급하고, 소비자가 만족할 수 있는 사후관리가 제대로 이루어지지 않은 점이 가장 큰 요인이라고 할 수 있다.

태양열 시스템은 태양열을 집열하여 축열조에 온수 형태로 저장하였다가 필요할 때 이용하기 때문에 시스템이 다소 복잡해질 수밖에 없다. 더욱이 태양열 시스템의 경우 상당수의 구성요소가 옥외에 설치되어 있고, 보조히터가 설치되어 있어 고장이 발생하여도 시스템은 외관상 정상적으로 작동하는 것처럼 보여 일반 사용자가 초기에 발견하기가 대단히 어렵다. 고장이 발생한 상태로 방치되면, 시스템의 성능저하 및 수명 단축을 초래하며, 장기간 지속되면 치명적인 고장으로 이어져 가동불능 상태가 된다.

사례조사⁽³⁾에 따르면 태양열 시스템의 대표적인 고장으로는 순환펌프 이상, 열매체 누수, 시스템 동파 등이

Table 1 Design of experiment and results

No.	T (°C)	C (%)	Resistance(kΩ)	
			Experiment	Regression
1	0	20	115.1	121.6
2	70	20	25.5	25.2
3	60	34	48.4	42.7
4	10	6	51.3	50.9
5	35	20	46.6	46.6
6	10	34	162.5	152.6
7	35	20	46.6	46.6
8	35	20	46.6	46.3
9	60	6	19.2	23.0
10	35	40	94.9	104.4
11	35	0	20.8	19.6
12	35	20	46.6	46.6
13	35	20	46.6	46.6

있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 Baek and Jang⁽⁴⁾은 유량계와 유동센서를 사용하여 순환펌프 고장과 열매체 누수를 진단하였으며, Shin and Kim⁽⁵⁾은 유동센서를 사용하여 순환펌프 고장과 열매체 누수를 예측하였다. 하지만 고가의 유량계를 사용해야 하는 등 현실적인 적용에 어려움이 있었다.

따라서 본 연구에서는 태양열 시스템의 순환펌프 고장, 열매체 누수, 시스템 동파 등의 문제점들을 해결하기 위하여 태양열 고장진단 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 집열기 출구와 출열조 하부의 온도차를 이용하여 순환펌프의 on/off 신호를 결정하는 차온 제어기에 고장진단기능을 추가하였다. 순환펌프 고장은 시판되는 유동센서를 활용하여 비교적 손쉽게 진단할 수 있다. 하지만 열매체 누수 및 시스템 동파의 가능성을 찾아내는 일은 훨씬 더 어렵다. 열매체 누수는 수위센서를 사용하고, 동파 가능성은 농도를 측정하여 예측할 수 있으나 고가의 농도계와 수위센서를 적용하는 것은 실용상 적합하지가 않다. 이를 위해 유체의 전기저항을 측정하는 유체센서를 자체 제작하였다. 유체센서는 저렴하게 보급할 수 있도록 배관삽입형 온도센서 헤더에 전기저항을 측정할 수 있는 전극을 사용하여 제작하였다(Fig. 2). 열매체의 전기저항을 측정하여 열매체의 수위를 판단하고, 전기저항과 온도, 농도와의 관계를 회귀방정식으로 도출하여 농도를 산출한다. 그리고 실제 시스템에 적용하여 동파의 가능성과 열매체 누수를 진단할 수 있는지 파악하도록 한다.

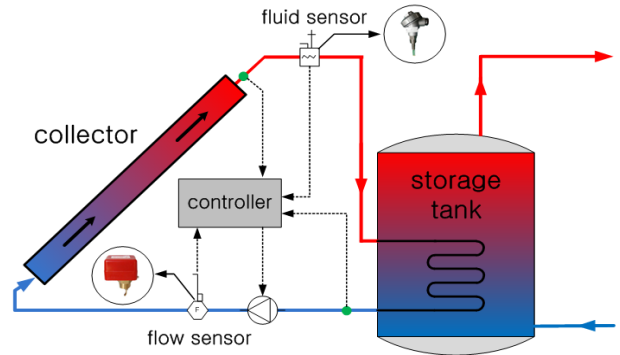


Fig. 1 Schematic diagram of trouble detection in solar thermal system.

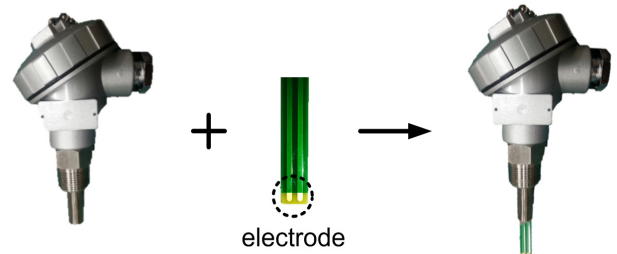


Fig. 2 Fluid sensor made in this work.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

태양열 시스템에 널리 사용되는 열매체인 프로필렌 글리콜 수용액의 온도와 농도에 따른 전기저항을 측정하는 실험을 진행하였다. 실험장치는 유체센서에 전원을 공급하는 전원공급장치, 고정저항의 전위차를 측정하기 위한 데이터로거, 프로필렌글리콜 수용액의 온도를 변화시켜주기 위한 항온수조, 전기저항을 측정하기 위한 회로로 구성되어 있다.

Fig. 3은 실험에 사용한 전원공급장치에 유체센서와 데이터로거를 연결한 회로도이다. 입력전압은 교류 10V이며, 주파수는 60 Hz이다. 교류전원을 공급하는 이유는, 직류전원을 공급하게 되면 유체센서 전극 양단에 이온화 현상으로 인해 기포가 발생하여 전기저항을 측정하는 데 영향을 미치기 때문이다. 회로에 사용된 고정저항은 100 kΩ을 사용하였으며, 프로필렌글리콜 수용액의 전기저항 R은 식(1)을 통해 계산하였다.

$$R = R_f \frac{V_s - V_f}{V_f} \quad (1)$$

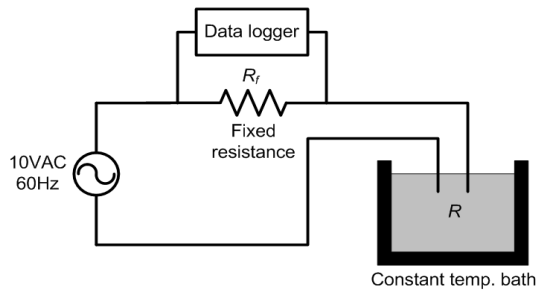


Fig. 3 Circuit diagram to measure electric resistance of PG solution.

2.2 실험방법

다양한 실험계획법⁽⁶⁾ 중 중심합성계획(central composite design)을 이용한 반응표면분석(response surface analysis)을 통해 열매체의 전기저항과 온도, 농도와 관계를 회귀방정식으로 도출하였다. 반응표면분석이란 실험결과의 추정치들을 지나는 선이나 면을 반응표면(response surface)이라 하는데, 반응표면의 관심영역에서 최적조건을 찾는 방법이다.⁽⁷⁾ 중심합성계획법에는 cube 모형과 axial 모형이 있으며, 본 실험에서는 축점(axial point), 중심점(center point), 요인 실험점(cube point)을 갖는 axial 모형으로 설계하여 온도 0~70℃, 농도 0~40% 범위에서 Table 1과 같이 총 13회의 실험을 계획하여 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 반응표면분석

용액의 전기전도도는 전기저항의 역수이며, 전극의 표면적에 비례하고, 전극 사이의 거리에 반비례하며, 운반체의 수와 이동도, 원자가(valence), 용액의 농도, 그리고 측정온도에 따라 영향을 받는다.⁽⁸⁾ 액체와 기체 상태의 전기저항은 크게 다르다. 제작된 전극을 대상으로 Table 1과 같은 조건에서 프로필렌글리콜 수용액의 전기저항은 온도 0~70℃, 농도 0~40% 범위에서 20.2~211.5 kΩ이고, 공기의 전기저항은 1500 kΩ 이상이다.

결과 분석을 위해 통계 분석 프로그램인 Minitab을 사용하였다. 실험을 통해 얻어진 전기저항의 분산분석 결과는 결정계수가 0.995로서 회귀모형의 구축이 잘 이루어졌다고 판단되며, 회귀모형에 대한 분산분석 결과 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의함을 확인하였다. 분석 결과로부터 열매체의 온도와 농도에 따른 전기저항을 회귀방정식으로 나타내었다.

$$R = 0.035906C^2 + 2.78072C + 0.021855T^2 - 1.73707T - 0.05854CT + 51.6582 \quad (2)$$

실제로는 온도 T 와 전기저항 R 로부터 농도 C 를 산출해야 하므로 이를 C 에 대해 다시 정리하면

$$C = \frac{-aT + \sqrt{(aT)^2 - 4(bT^2 - cT - dR + e)}}{2} \quad (3)$$

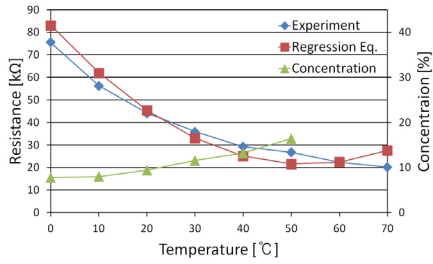
$$\text{where, } a = 75.814, b = 0.609, c = 48.378, \\ d = 27.85, e = 1438.715$$

3.2 실험과 회귀방정식의 전기저항 비교

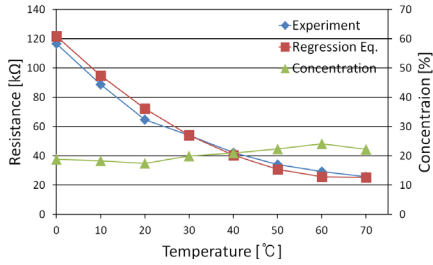
Table 1에는 실험을 통해 측정된 전기저항과 함께 식(2)을 통해 계산한 전기저항을 나타내었다. 실험을 통해 측정된 전기저항은 식(2)을 통해 계산된 결과와 실험조건의 중심인 온도 35℃, 농도 20%에서는 정확히 일치하였고, 최대오차는 9.85 kΩ이다.

결과를 검증하기 위해 농도가 10, 20, 30, 40%인 프로필렌글리콜 수용액을 제조하여 온도 0~70℃ 범위에서 전기저항을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 농도와 온도가 낮을수록 측정된 전기저항과 식(2)을 통해 계산된 전기저항의 오차가 다소 커지는 경향이다. 함께 나타낸 농도는 식(3)을 통해 구한 것인데 열매체의 농도가 10%, 온도 50℃ 이상에서는 식(3)의 제공근 내의 값이 음수가 되어 식의 적용이 불가능하다. 음수가 되는 경우는 열매체의 온도가 50℃ 이상, 전기저항이 30 kΩ 이하로서 이때의 열매체 농도는 10% 이하이다. 따라서 음수인 조건에서 열매체의 농도는 10% 이하로 간주하고 통과 가능성이 매우 높은 것으로 판단한다. 실제로 유체센서는 Fig. 5와 같이 집열기 출구 부근인 태양열 시스템 최상부에 설치하게 된다. 배관 내 열매체 누수가 있는 경우 순환펌프의 작동이 멈추게 되면 최상부 배관의 열매체가 아래로 내려가기 때문이다. 순환펌프의 작동이 멈추고 일정시간이 경과한 후 유체센서의 저항값을 감지하게 되므로 동절기에 배관 내 온도가 50℃ 이상은 드물다.

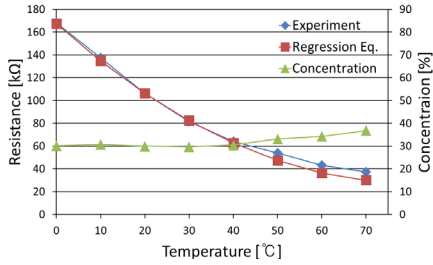
농도에 관한 회귀방정식(3)을 통해 구한 농도는 일정한 값을 보여야 하지만 온도가 증가함에 따라 다소 커지는 경향을 보인다. 그러나 전술한 바와 같이 순환펌프가 정지상태일 때 전기저항을 측정하기 때문에 농도의 오차가 커지는 열매체의 온도 50℃ 이상은 열매체의 농도를 추정하기 위한 관심범위가 아니며, 제작된 유체센서의 목적이 농도의 정확한 계측에 있는 것이 아니고, 10%p 정도의 차이를 파악하는 것이므로 용도상 적절한 것으로 판단된다.



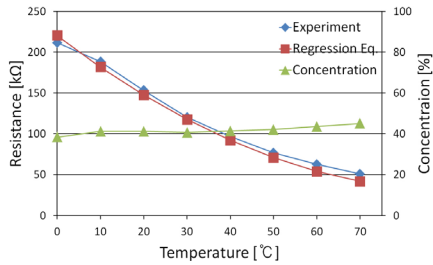
(a) Concentration 10%



(b) Concentration 20%



(c) Concentration 30%



(d) Concentration 40%

Fig. 4 Resistance comparison between experiment and regression equation.

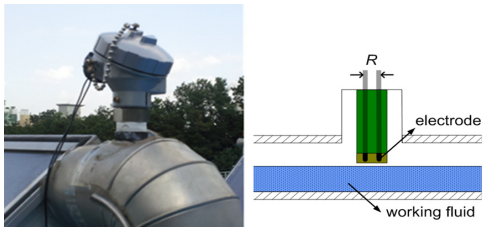
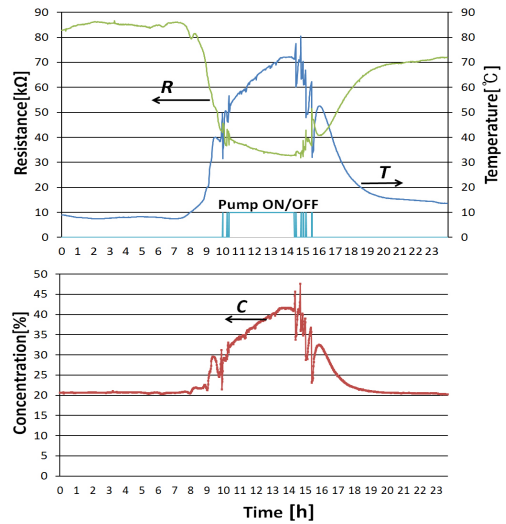


Fig. 5 Fluid sensor installed at the toppest point in solar thermal system.

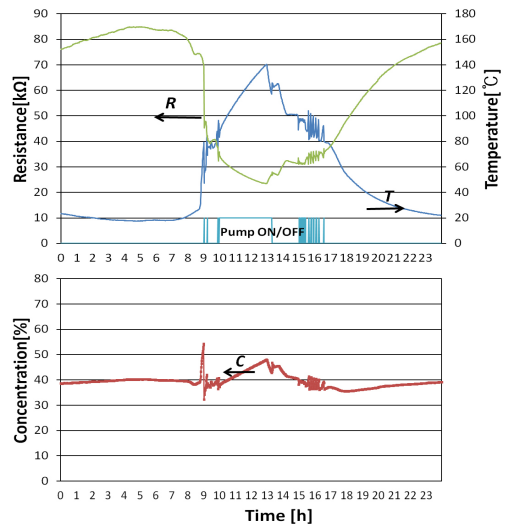
4. 실증실험

4.1 열매체 농도 측정

실제 배관 내 열매체의 농도를 측정하기 위하여 경희대학교 공과대학 실험동 옥상에 설치된 태양열 시스템에 유체센서를 설치하였다(Fig. 5). 실험은 태양열 시스템 열매체의 농도를 20%와 40%로 바꾸어가면서 진행하였다. 집열기 출구측 배관에서 열매체의 전기저항과 온도를 1분 간격으로 측정하였다. 측정된 열매체의 전기저항과 온도 및 농도식(3)을 통해 계산된 열매체의 농도를 Fig. 6에 보였다.



(a) Concentration 20%



(b) Concentration 40%

Fig. 6 Calculated concentration from measured temperature and electric resistance of heating medium.

순환펌프가 작동상태일 때는 펌프의 노이즈, 유체의 유동 등이 전기저항을 측정하는 데 영향을 주기 때문에 열매체의 농도를 정확히 구하기 어렵다. 또한, 일사가 있는 상태에서는 급격한 온도변화로 인해 계산된 열매체 농도가 정확하지 않다. 하지만 열매체의 온도변화가 작은 0~8시, 18~24시 사이에서는 농도식(3)을 통해 계산된 열매체의 농도가 태양열 시스템에 주입된 열매체의 농도와 상당히 정확하게 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 열매체의 농도는 열매체의 온도변화가 작은 0~8시, 18~24시 사이에서 열매체의 온도와 전기저항을 측정하고 동과가능성 등을 파악하게 된다.

4.2 열매체 누수 측정

유체센서에서 측정된 열매체의 전기저항으로 배관 내 열매체의 누수 여부를 판단할 수 있다. Fig. 7과 같이 실험은 3시간 정도 진행하였고, 30분 간격으로 열매체의 주입과 배출을 반복하였으며, 데이터는 1분 간격으로 획득하였다. 열매체의 전기저항은 91.8~128.4 kΩ이며, 열매체가 빠져나간 상태에서 공기의 전기저항은 758.6~792.6 kΩ으로 측정되었다. 앞서 공기 중에 노출된 실험에서 유체센서에서 측정한 전기저항은 1500 kΩ인데 반해 태양열 시스템에 설치된 유체센서에서 측정한 공기의 전기저항이 차이가 나는 이유는, 열매체의 수위가 전극 이하로 낮아졌음에도 불구하고, 유체센서 전극표면에 소량의 열매체가 묻어 있어 낮게 측정되는 것으로 판단된다. 하지만 연구의 관심영역인 온도 0~70℃, 농도 0~40% 범위에서 측정된 열매체의 최대 전기저항은 211.5 kΩ이기 때문에 공기의 전기저항이 낮게 측정되어도 충분히 열매체의 수위를 판단할 수 있다. 따라서 측정된 전기저항이 500 kΩ 이상이면 열매체가 누설된 것으로 간주하고 사용자에게 이상을 알리게 된다.

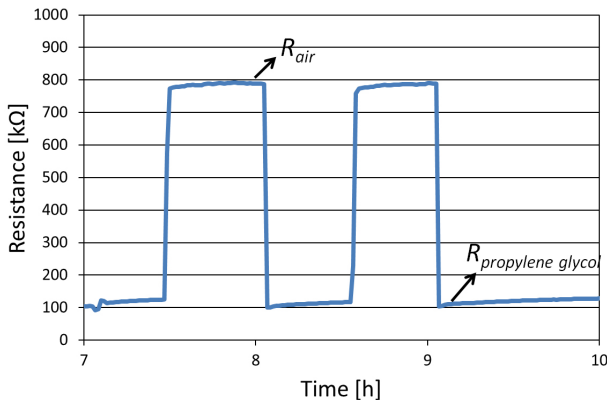


Fig. 7 Resistance of PG solution and air.

5. 고장진단 알고리즘

태양열 시스템을 효율적으로 운영·관리할 수 있는 고장진단 알고리즘을 Fig. 8에 제시하였다. 순환펌프의 고장을 진단하기 위하여 순환펌프의 신호와 유동센서의 신호를 배타적 논리합(XOR)을 사용하여 순환펌프의 고장을 진단한다. Table 2에 이를 정리하였으며 펌프의 작동이 멈춘 상태(0)에서 유동이 있다는 신호(1)가 나오거나 그 반대이면 XOR 출력값은 1이 되며 고장으로 간주한다.

전술한 바와 같이 순환펌프가 정지 상태이고, 열매체의 온도변화가 작은 0~8시, 18~24시 사이이면 유체센서에서 열매체의 전기저항을 측정한다. 측정된 열매체의 전기저항이 500 kΩ 이상이면 열매체가 누설된 것으로 간주하고, 사용자에게 알람을 통해 정보한다. 이상이 없을 경우 농도식(3)을 통해 열매체의 농도를 계산한다. 계산된 열매체의 농도가 20% 이하이고, 외기온도가 0℃ 이하이면, 동파의 위험이 있다고 판단하여 예방 차원에서 사용자 및 관리자에게 알람을 통해 정보하게 된다.

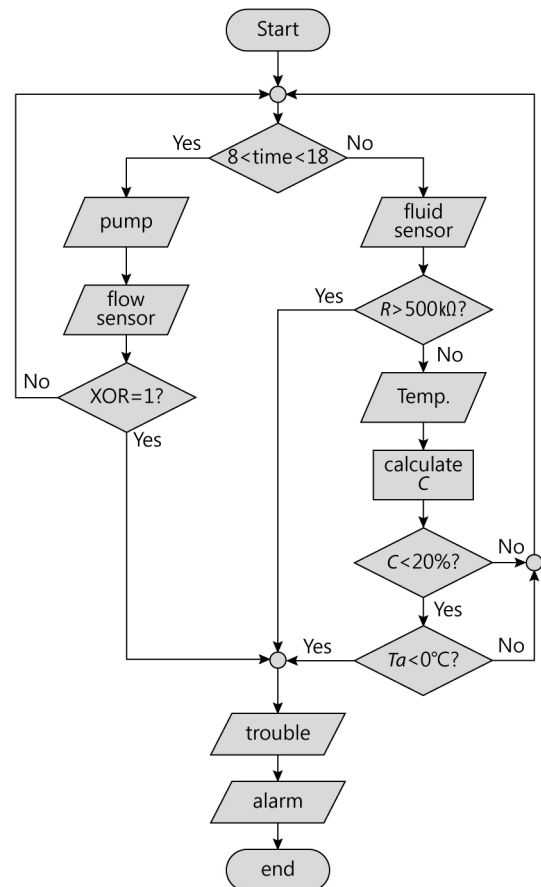


Fig. 8 Fault diagnosis algorithm of solar thermal system.

Table 2 Input and output signal

Input		Output
Pump Signal	Flow Sensor Signal	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

6. 결 론

본 연구에서는 열매체의 전기저항을 측정하는 유체 센서를 자체 제작하여, 프로필렌글리콜 수용액의 농도와 온도에 따른 전기저항을 측정하는 실험을 수행하였다. 중심합성계획을 이용한 반응표면분석을 통해 열매체의 전기저항과 온도, 농도와의 관계를 회귀방정식으로 도출하였다. 농도가 10, 20, 30, 40%인 프로필렌글리콜 수용액을 제조하여 온도 0~70℃ 범위에서 전기저항을 측정하였고, 회귀방정식을 통해 계산된 전기저항과 비교함으로써 식의 신뢰성을 확보하였다.

실제의 태양열 시스템에 설치된 유체센서에서 측정된 열매체의 전기저항과 배관 내 열매체의 온도를 농도에 관한 회귀방정식에 적용하여 열매체의 농도를 계산하였으며, 계산된 농도를 태양열 시스템에 주입된 열매체의 농도와 비교하였다. 그 결과 순환펌프의 작동이 멈추고 배관 내 온도가 낮아지는 18시~8시 사이에는 충분히 정확한 농도 측정이 가능함을 보였다. 계산된 열매체의 농도가 20% 이하, 외기온도가 0℃ 이하일 때, 동파의 위험을 알리게 된다. 또한, 유체센서에서 측정된 열매체의 전기저항으로부터 배관 내 열매체의 누설 여부를 손쉽게 진단할 수 있음을 확인하였다.

또한 태양열 시스템의 대표적인 고장사례인 순환펌

프 고장, 열매체 누수, 시스템 동파 등의 문제점들을 해결하기 위해 유동센서와 유체센서를 이용하여 사용자가 초기에 신속하게 대응하고 효율적으로 운영·관리할 수 있는 고장진단 알고리즘을 제시하였다.

한편 장기간 시스템을 사용함에 따라 열매체의 열화 및 유체센서의 파울링 등이 측정결과에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 분석과 대책을 향후 정립할 계획이다.

References

1. MOCIE and KEMCO, 2007, RD&D strategy 2030 of new and renewable energy(Part : Solar Heat), Report of KEMCO, pp. 4-5.
2. Hong, H. K., 2004, 3% Use of alternative energy in 2006 and solar thermal system, Magazine of the SAREK, Vol. 33, No. 11, pp. 47-54.
3. Solar Thermal Association of Korea, 2012, Report of study on activation plan for residential solar system, Ministry of Knowledge Economy.
4. Baek, N. C. and Jang, C. Y., 2005, Trouble diagnostic system of solar thermal system, Patent No. 20-0387031, Korea.
5. Shin, U. C. and Kim, S. H., 2005, Trouble diagnostic system of solar thermal system, Patent No. 20-0387032, Korea.
6. Park, S. H., 2003, Design of experiment, Minyoungsa, pp. 372-398.
7. Park, S. H. and Kim, J. U., 2010, Design of experiment, Minyoungsa, p. 422.
8. Cha, Y. D., 2008, Measurement of electrical conductivity by a dynamic temperature compensation method, MS thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea.