

태양열 시스템 고장진단을 위한 유체 센서

이 원 철, 홍 희 기*†

경희대학교 기계공학과 대학원, *경희대학교 기계공학과

Fluid Sensor for Trouble Detection of Solar Thermal System

Won-Chul Lee, Hiki Hong*†

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

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

ABSTRACT: Typical trouble patterns in solar thermal systems are such as 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 collector pipe in order to check the fault of solar system. Working fluid level in the pipe is 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 0~70°C of temperature and 0~40% of concentration. The response surface analysis by using a central composite design was performed and the regression equation was derived from the relationship between electric resistance, temperature and concentration. The reliability of regression equation was verified through comparing electric resistances between measured by experiment and calculated by regression equation.

Key words: Solar thermal system(태양열 시스템), 고장진단(Fault diagnosis), 전기저항(Electric resistance), 반응표면분석(Response surface analysis), 유체 센서(Fluid sensor)

기 호 설 명

- 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

국내의 태양열 시스템은 1990년대부터 본격적으로 보급되기 시작했다. 하지만 태양열 이용분야의 기초단계인 태양열 온수기의 보급 및 정착이 원활하게 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다. 이는 영세한 태양열 온수기 제작업체의 난립으로 성능이 검증되지 않은 제품을 만들어 보급하고, 고장시 A/S의 미비 등으로 소비자들에게 외면당하면서 발생되었다.⁽¹⁾

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

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

발견하기가 대단히 어렵다.

사례조사 결과⁽²⁾ 태양열 시스템의 대표적인 고장사례인 순환펌프 이상은 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 농도계를 적용하는 것은 실용상 적합하지가 않다. 이를 위해 유체의 전기저항(electric resistance)을 측정하는 유체센서를 자체 제작하였다. (Fig. 1) 열매체의 전기저항과 온도, 농도와의 관계를 회귀방정식으로 도출하여 농도를 산출하고 외기온도로부터 동파 위험에 노출되는지 파악하도록 한다.

2. 실험장치 및 방법

일반적으로 태양열 시스템에 사용하는 열매체인 프로필렌글리콜 수용액의 온도와 농도에 따른 전기저항을 측정하도록 하였다. 실험장치는 유체센서에 전원을 공급하는 전원공급장치, 전압을 측정하기 위한 데이터로거, 프로필렌글리콜 수용액의 온도를 변화시켜주기 위한 항온수조, 전기저항을 측정하기 위한 회로로 구성되어 있다.

실험방법은 프로필렌글리콜 수용액이 담긴 항온수조에 유체센서를 삽입하여 고정저항의 전위차를 측정하였다. Fig. 2는 실험에 사용한 전원공급장치에 유체센서와 데이터로거를 연결한 회로도이다. 입력전압은 교류 10V이며, 주파수는 60 Hz이다. 직류전원 대신 교류전원을 공급하는 이유는, 직류전원을 공급하게 되면 유체센서 전극 양단에 이온화 현상으로 인해 기포가 발생하여 전기저항을 측정하는 데 영향을 미치기 때문이다. 회로도에 사용된 고정저항은 100 kΩ을 사용하였으며, 프로필렌글리콜 수용액의 전기저항 R 은 식(1)을 통해 계산하였다.

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

본 연구에서는 실험계획법 중 중심합성계획법(central composite design)을 이용한 반응표면분석(response surface analysis)을 통해 열매체의 전기저항과 온도, 농도와의 관계를 회귀방정식으로

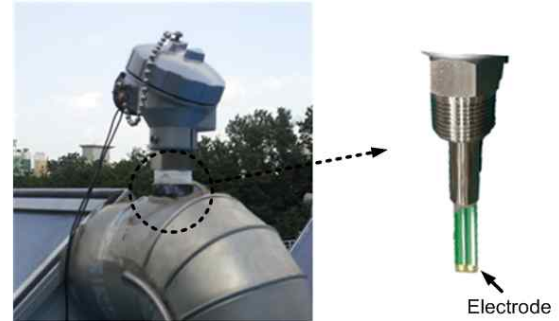


Fig. 1 Fluid sensor

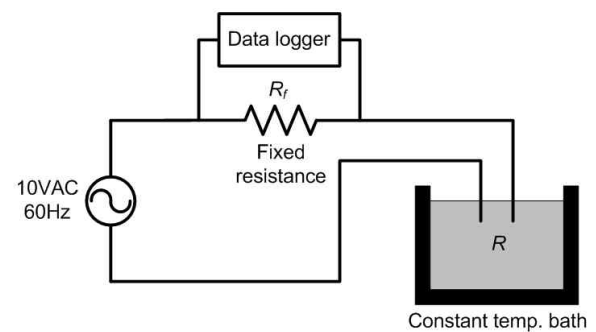


Fig. 2 Circuit diagram to measure electric resistance of PG solution.

로 도출하였다. 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°C, 농도 0~40% 범위에서 Table 1과 같이 총 13 회의 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

용액의 전기전도도는 전기저항의 역수이며, 전극의 표면적에 비례하고, 전극 사이의 거리에 반비례하며, 운반체의 수와 이동도, 원자가(valence), 용액의 농도, 그리고 측정온도에 따라 영향을 받는다.⁽³⁾ 액체와 기체 상태의 전기저항은 크게 다르다. Table 1과 같이 실험을 통한 프로필렌글리콜 수용액의 전기저항은 온도 0~70°C, 농도 0~40% 범위에서 20.2~211.5 kΩ이다. 반면에, 공기의 전기저항은 1500 kΩ 이상이다.

반응표면실험의 분석을 위해 통계 분석 프로그램인 MINITAB을 사용하였다. 실험을 통해 얻어진 전기저항의 분산분석 결과는 결정계수가

Table 1 Design of experiment and results

No.	T ($^{\circ}\text{C}$)	C (%)	Resistance ($\text{k}\Omega$)	
			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

0.995로 나타나 분석을 통하여 얻어진 회귀식이 매우 정확함을 알 수 있다. 위의 분석결과로부터 열매체의 온도와 농도에 따른 전기저항을 식 (2)에 나타내었다.

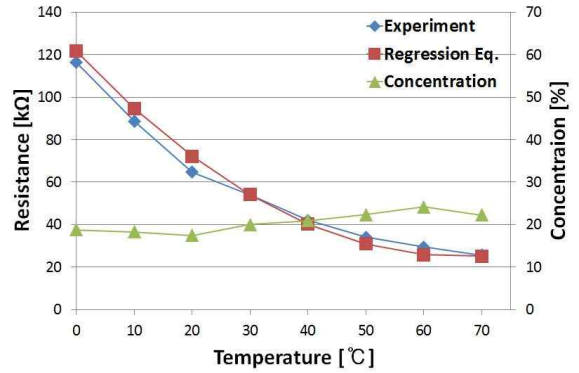
$$R = 0.035906C^2 + 2.78072C + 0.021855T^2 - 1.73707T - 0.05854CT + 51.6582 \quad (2)$$

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

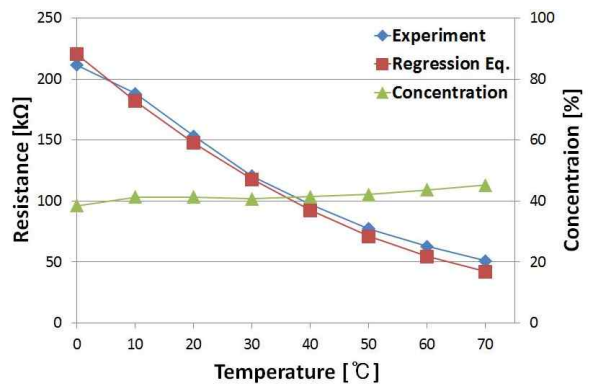
$$C = \frac{-aT + \sqrt{(aT)^2 - 4(bT^2 - cT - dR + e)}}{2} \quad (3)$$

where, $a = 75.814, b = 0.609, c = 48.378, d = 27.85, e = 1438.715$

식 (3)의 제곱근 내의 값이 음수가 되면 식의 적용이 불가능하다. 음수가 되는 경우는 열매체의 온도가 50°C 이상, 전기저항이 $30 \text{ k}\Omega$ 이하로서 이때의 열매체 농도는 10% 이하이다. 따라서 음수인 조건에서 열매체의 농도는 10% 이하로 간주하고 동과 가능성이 매우 높은 것으로 판단한다. 실제로 Fig. 1의 유체센서는 집열기 출구 부근인 태양열 시스템 최상부에 설치하게 된다. 배관 내 열매체 누수가 있는 경우 순환펌프의 작동이 멈추게 되면 최상부 배관의 열매체부터 빠



(a) Concentration 20%



(b) Concentration 40%

Fig. 3 Resistance comparison between experiment and regression equation

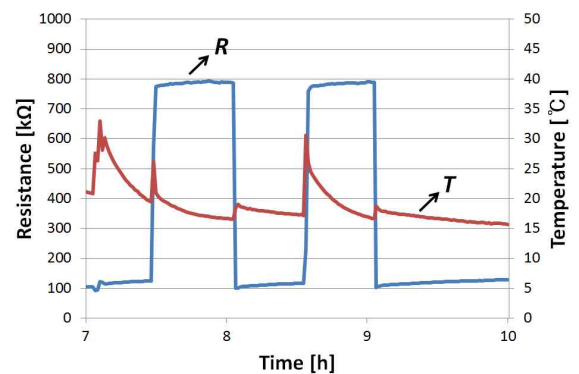


Fig. 4 Resistance of PG solution and air

져나가기 때문이다. 순환펌프의 작동이 멈추고 일정시간이 경과한 후 유체센서의 저항값을 감지하게 되므로 배관 내 온도가 동절기 50°C 은 드물다.

Table 1에는 실험값과 함께 식 (2)를 통해 산

출한 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 측정하였다. 농도 20%와 40%에 대한 것을 Fig. 3에 나타내었는데 농도와 온도가 낮을수록 측정된 저항값과 식 (2)을 통해 계산된 오차가 다소 커지는 경향이다. 함께 나타낸 농도는 식 (3)을 통해 구한 것인데 일정한 값을 보여야 하지만 온도가 증가함에 따라 다소 커지는 경향을 보인다. 그러나 전술한 바와 같이 순환펌프가 정지상태일 때 유체센서에서 전기저항을 측정하기 때문에 농도의 오차가 커지는 열매체의 온도 50℃ 이상은 열매체의 농도를 추정하기 위한 관심범위가 아니다. 또한, 제작된 유체센서의 목적이 농도의 정확한 계측에 있는 것이 아니고 10%p 정도의 차이를 파악하는 것이므로 적절한 것으로 판단된다.

배관 내 유체의 수위를 측정하기 위하여 실제의 태양열 시스템에 유체센서를 설치하여 열매체의 전기저항을 측정하였다(Fig. 4). 실험은 3시간 정도 진행하였고, 30분 간격으로 열매체의 주입과 배출을 반복하였으며, 데이터는 1분 간격으로 획득하였다. 열매체의 전기저항은 온도 15.7~32.9℃ 범위에서 91.8~128.4 kΩ이며, 열매체가 빠져나간 상태에서 공기의 전기저항은 758.6~792.6 kΩ으로 측정되었다. 앞서 공기 중에 노출된 실험에서 1500 kΩ인데 반해 태양열 시스템에 설치된 유체센서에서 측정한 공기의 전기저항이 차이가 나는 이유는, 열매체의 수위가 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 저항값이 500 kΩ 이상이면 열매체가 누설된 것으로 간주하고 사용자에게

계 이상을 알리게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 유체의 전기저항을 측정하는 유체센서를 자체 제작하여, 프로필렌글리콜 수용액의 농도와 온도에 따른 전기저항을 측정하는 실험을 수행하였다. 중심합성계획을 이용한 반응표면분석을 통해 열매체의 전기저항과 온도, 농도와의 관계를 회귀방정식으로 도출하였다.

실제의 태양열 시스템에 설치된 유체센서에서 열매체의 전기저항과 공기의 전기저항을 측정하여 배관 내 열매체의 수위를 판단하였다. 이를 토대로 유체센서를 통해 열매체의 누설 여부를 진단할 수 있음을 확인하였다.

농도가 10, 20, 30, 40%인 프로필렌글리콜 수용액을 제조하여 온도 0~70℃ 범위에서 전기저항을 측정하였고, 식 (2)을 통해 계산된 전기저항과 비교함으로써 식의 신뢰성을 확보하였다.

식 (3)을 통해 계산된 열매체의 농도가 20% 이하, 외기온도가 0℃ 이하일 때, 동파의 위험이 있다고 판단하여 동파를 예방하기 위해 사용자 및 관리자에게 알람을 통해 경보한다.

참고문헌

1. Lee, W. C. and Hong, H., 2013, Effective fault diagnosis method of solar thermal system, Proceedings of the KSES, To be submitted.
2. Solar Thermal Association of Korea, 2012. 11, Report of Study on Activation Plan for Residential Solar System, Ministry of Knowledge Economy.
3. 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.