

고온용 압전 레벨 스위치 개발

김나리, 이영진^a

한국세라믹기술원 전자소재융합본부

Development of Piezoelectric Level Switch for High Temperature

Na-Ri Kim and Young-Jin Lee^a

Electronic Materials Convergency Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

(Received October 7, 2015; Revised November 23, 2015; Accepted November 24, 2015)

Abstract: This paper describes the development of a piezoelectric level switch, which aims to effectively monitor the level status in high ambient temperatures. In order to adjust the impedance near the resonant frequency and temperature characteristics, the effect of the case and backing layer materials on its performance was analyzed using the finite element method (FEM). The suggested prototype new level switch has three heat-sink plates attached to SUS bar of 230 mm long, and case of PEEK which contains PZT sensing part. To illustrate the validity of this level switch, 10 samples are prepared and investigated the sensing performance through the high and low temperature ambient.

Keywords: Level switch, High temperature, FEM (finite element method), Piezoelectric transducer

1. 서론

레벨 스위치는 액체면의 높이가 일정한 레벨이 되었을 때에 신호를 출력하는 스위치로서, 레벨 게이지(센서)가 레벨의 연속측정에 사용되는데 대하여, 레벨의 상하한을 관리하는 목적에 사용되며, 정밀도보다도 신뢰성이나 안정성이 중요하다 [1]. 기존의 초음파식 레벨 스위치는 2개로 구성된 압전 소자(piezoelectric element) 및 구동회로로 구성되며, 한쪽의 압전 소자의 진동에 의해 발생된 음향파의 반대 압전 소자로의 전달 변화에 따라 매질의 유무를 검출하는 비교적 간단한 원리를 사용하며, 일반적으로 액체가 있을 경우 전달이 용이한 반면, 공기인 경우 전달이 되지 않는다.

비접촉 측정이 가능하여 취수, 오수, 약품 등 정밀계측에 적용이 확대되고 있는 추세이나 대부분 수입제품에 의존하여 사용 중이며, 최근 차량용 연료, 화학약품 등 180°C에서 동작이 가능한 고온용 레벨 스위치에 대한 요구가 급증하고 있음에 반해 상용제품이 전무한 상황이다 [2,3].

본 연구에서는 180°C까지 사용이 가능한 고온용 레벨 스위치를 개발하고자 하였으며, 이를 위해서 감지소자로 주로 활용되는 PZT5계열의 압전 소자를 선정하고, 최적의 레벨 스위치 구조 및 재질 등의 구조설계를 통하여, 고온에서 안정적 동작이 가능한 레벨 스위치의 새로운 구조를 제안하고, 제작 실험을 통해 제안 구조의 타당성을 확인하고자 하였다.

a. Corresponding author; yjlee@kicet.re.kr

2. 실험 방법

2.1 기본 구조 및 설계

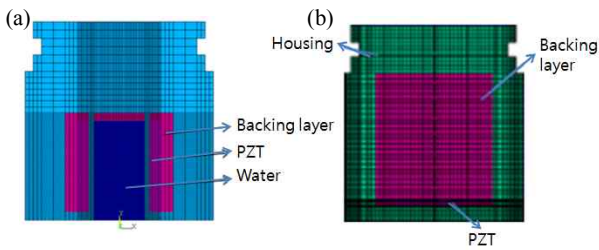


Fig. 1. Structure of the level switches. (a) conventional model, (b) proposed model.

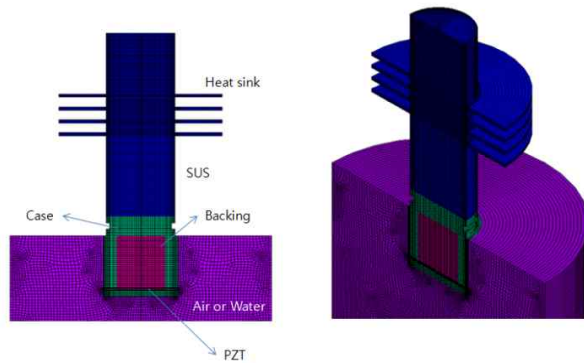


Fig. 2. Numerical analysis of the proposed level sensor.

기존의 초음파식 레벨 스위치의 기본 구조는 2개로 구성된 압전 소자 중 한쪽 압전 소자의 진동에 의해 발생된 음향파가 반대 압전 소자로의 전달 시, 매질의 변화에 따라 변화되는 수신파의 세기를 판별하여 매질의 유무를 검출하는 비교적 간단한 원리를 이용한다. 일반적으로 액체가 있을 경우 전달이 용이한 반면, 공기인 경우 전달이 거의 되지 않는다.

압전 세라믹의 음향 임피던스(Z_p , acoustic impedance)는 밀도(ρ , Density)와 음속(v , sound velocity)의 곱으로 표현되며, 통상 30 Mrayl의 값을 가진다. 반면, 공기의 음향 임피던스는 400 rayl 정도로 무려 만 배 정도의 차이로 인해 압전 소자에서 발생한 진동에너지가 원활하게 공기 중으로 전파되는 것이 매우 어렵다 [4-6]. 따라서 압전 소자와 공기의 중간이 되는 음향 임피던스를 가지는 정합층(matching layer)을 배치하여 레벨 스위치 케이스가 정합재료 역할을 동시에 할 수 있도록 최적의 재질 및 크기를 도출하고자 하였다.

그림 1은 기존 제품과 제안된 모델의 기본 구조를 나타내고 있다. 본 논문에서 제안된 모델은 기존 제품과 달리 한 개의 압전 소자를 이용하는 구조로서, 송수신 초음파의 감쇄를 비교 검출하는 기존 제품에 비해 감

지물질 접촉 시 음향 임피던스의 변화를 바로 검출하는 원리이다. 따라서 구조가 비교적 간단하고 정확하고 빠른 계측이 가능하며, 정합재료의 재질이나 구조가 매우 중요한 요소가 된다. 또한, 간단한 구조로 인해 작업성이 용이하며 원가 측면에서도 유리하다. 특히 구동회로에서 감지 물질에 대한 임피던스 변화에 맞는 적절한 미세 조정을 수행할 경우, 우수한 감지 특성을 가질 수 있는 장점이 있다. 기존의 레벨 스위치에서 압전 세라믹은 초음파의 송수신을 통해 물질의 유/무를 판단하는 반면, 제안된 레벨 스위치에서의 압전 세라믹의 역할은 음향 임피던스 변화에 의한 유전을 변화를 검출하는 방식으로 사용된다. 따라서 180°C 이상에서도 압전 특성을 잃지 않는 T_c 값이 300°C 이상인 소자를 적용하여 해석 및 실험을 진행하였다.

레벨 스위치의 설계를 위해 상용 유한요소해석 도구인 ANSYS v10.0을 이용하여 레벨 스위치의 케이스부의 재질 및 형상 변수를 도출하였다. 시뮬레이션에 사용된 element 요소는 PLANE42, PLANE13 및 공기 또는 물과의 FSI (fluid-structure interfaces) 적용을 위해 FLUID29 요소를 사용하였으며, 그림 2와 같이 2차원 축대칭 구조로 모델링 하였다. 케이스 하단에 압전 소자를 배치하고 그 뒤에 후방층 유무 및 케이스 밖 하단부에 물 접촉 유무에 따른 임피던스 특성 및 열전달 특성을 유한요소 해석의 조화 해석(harmonic analysis)을 통해 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소 해석

모델링 된 레벨 스위치는 압전 소자 두께 1 mm에 대한 두께 모드인 약 2 MHz 대역에서 공진 특성을 가지며, 그림 3은 공기 및 물 접촉 시의 조화 해석을 통한 모드 형태의 결과를 나타낸 것이다. 해석 결과 공기 중에서도 물 접촉 시 압력 및 변위의 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 특히 변위는 큰 차이가 없으나 압력은 350,000배의 차이가 나타남을 알 수 있다. 계산 값은 상대 비교를 위한 임의 단위(arbitrary unit) 기준이다.

그림 4는 각 케이스 재질 별 임피던스 변화를 해석한 결과를 나타내고 있다. PI (polyimide), POM (polyoxymethylene), PEEK (polyetheretherketone), PTFE (polytetrafluoroethylene) 네 가지의 대표 재질을 선정하여 재질별 음향 특성을 해석하여 케이스로서

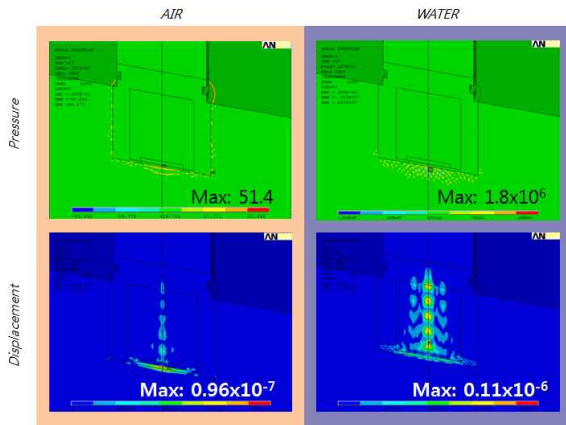


Fig. 3. Effect of the existence of water on the pressure and displacement.

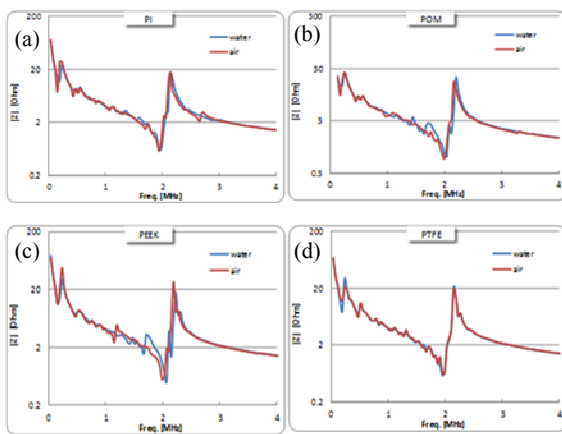


Fig. 4. Effect of the existence of water on the type of the case materials. (a) PI, (b) POM, (c) PEEK, and (d) PTFE.

가장 우수한 재료를 도출하고자 하였다. 해석 결과 케이스 재질이 PEEK일 경우 공기에서 물로 변화를 주었을 때 임피던스 변화가 가장 큰 결과를 보임을 조화해석을 통해 확인하였으며, PEEK를 제외한 재질들은 공기에서 물로 변화를 주었을 때 임피던스가 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 그림 5(a)는 PEEK 재질의 케이스에 후방층이 비어있을 경우의 임피던스 조화해석 결과로서 물 접촉 유무에 따른 임피던스의 변화를 나타내고, (b)는 후방층이 있을 경우의 임피던스 변화를 나타낸다. 큰 차이는 없으나, 후방층이 있을 경우에 물의 유무에 따른 공진 주파수의 이동 및 값의 변화가 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

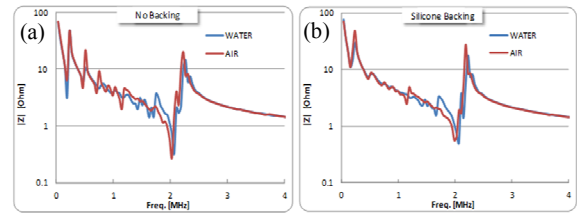


Fig. 5. Effect of the existence of water on the kind of backing layer. (a) no backing layer, (b) silicone backing layer.

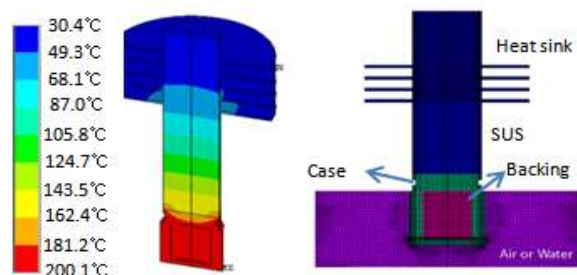


Fig. 6. Structure of level switch with additional heat dissipation.

안정적인 회로 구동 및 처리단 동작을 위해 앞서 설계된 레벨 감지부와 최대한 멀게 배치를 해야 하며, 따라서 센서의 가장 위쪽에 배치하고 추가로 그 중간에 전달되는 열을 막아주는 방열 기능이 필요하다. 따라서 그림 6과 같이 하부의 감지부 위쪽에 SUS 재질의 연결봉 및 방열판을 배치하여 방열 기능을 추가하였으며, 연결봉의 길이 및 방열판 수에 따른 방열효과를 ANSYS 열해석을 통해 시뮬레이션하고, 그 결과로부터 최적의 봉 길이 및 방열판 수를 결정하고자 하였다.

그림 7은 SUS 재질의 봉 길이를 10 mm에서 100 mm까지 증가시켜 온도 변화를 시뮬레이션 한 결과이다. 200°C의 외부 온도 인가 조건에서, 연결봉의 길이가 100 mm까지 증가함에 따라 압전 소자 위치에서 최대 상승 온도가 120°C까지 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 일반적으로 안정적인 회로 동작을 위한 50°C 이하로 유지하기 위해서 지나치게 긴 공간이 필요함을 알 수 있다. 따라서 봉의 길이를 50 mm로 고정한 후, 방열판의 수 증가에 따른 온도 특성을 시뮬레이션 하였다.

그림 8은 방열판 수에 따른 해석 결과를 나타내고 있는 것으로서 방열판이 없을 경우 온도는 160°C까지 상승하나, 방열판을 추가할 경우 온도는 점점 낮아져 방열판이 5개일 때는 60°C까지 낮아지는 것을 알 수 있다.

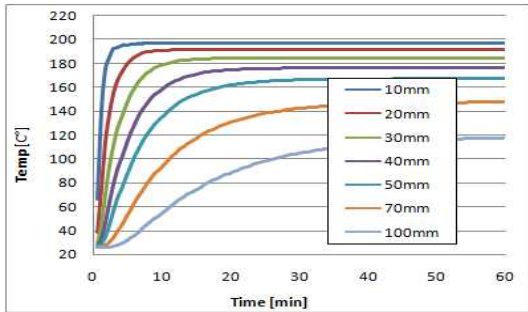


Fig. 7. Effect of the SUS bar length on the temperature at PZT ceramic.

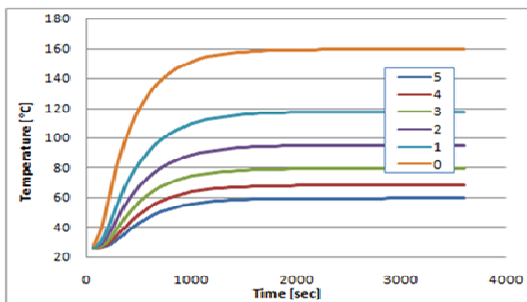


Fig. 8. Effect of number of heat-sink plate on the temperature at PZT ceramic.

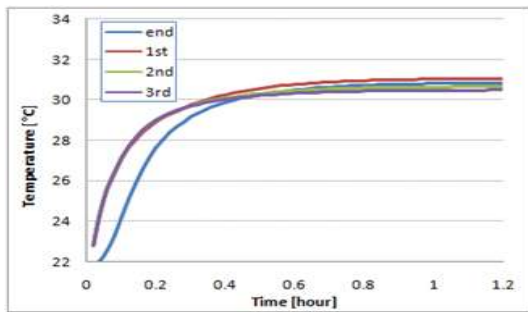


Fig. 9. Simulation results of temperature profile of the prototype level switch.

유한요소해석 결과 및 실제 적용 환경 등을 고려하여 선정된 시제품의 형상은 SUS 방열판 3개, SUS 연결봉 길이 230 mm로 선정하였으며, 케이스 재질은 PEEK로 결정하였다.

그림 9는 최종 모델로 선정된 시제품의 열전달 특성을 해석한 것으로, 22°C에서 200°C까지 온도가 증가하더라도 회로단이 존재하는 가장 위쪽 부위가 32°C 이

상 상승하지 않음을 알 수 있다.

3.2 제작 및 실험

3.2.1 레벨 스위치 제작

이상의 과정을 통해 선정된 최종 모델을 PEEK 재질의 케이스로 가공한 후, 내부에 직경 20 mm, 두께 1 mm의 압전 소자를 배치하고, 내부에 후방층인 실리콘 에폭시(다우코닝 3140)로 충전한 후, 그림 10과 같이 조립 가공하였다. 가장 왼쪽의 감지부와 연결되는 SUS 연결봉 및 3개의 방열판을 배치하였다. 가장 오른쪽에 배치된 레벨 스위치 구동 및 신호처리회로는 크게 신호 발생부, 제어부 및 출력부로 구성되어 있으며, 공진주파수 대역을 이용하지 않는 비공진 구동용으로 설계되어 있으며, 물의 접촉 유무에 따른 임피던스 변화를 직접 검출하는 원리를 이용한다.



Fig. 10. Prototype sample of the level switch.

3.2.2 성능평가

제작된 10개의 레벨 스위치를 고온 및 저온에서 정상적으로 작동을 하는지 성능평가를 통해 판단하였다. 성능평가는 레벨 스위치가 정상적으로 작동할 경우 ON, 그렇지 않을 경우 OFF로 판단되어진다. 일반적인 온도 챔버는 본 과제의 성능 검증을 위한 온도 구간인 -40~180°C를 충족시키기가 어려우며, 특히 회로단이 포함되어 있는 방열판 이후 상부는 상온에 배치해야 하는 특수한 조건으로 인해 그림 11과 같은 온도 평가 장치를 제작하였다. 그림 11(a)는 180°C의 고온 특성을 평가하기 위한 셋업으로서, 레벨 스위치를 자체 제작한 2중 고강도 유리 튜브 내에 배치하며 1차 튜브에 코일을 통해 온도를 인가한다. 코일의 전류는 전원 공급 및 온도 제어기(써모텍, THTC-1000)를 이용하였으며, 180°C까지 승온이 가능한 SKY THERM(SK 케미컬)을 이용하여 기포 발생 등의 평가 시 발생할 수 있는 오차 인자를 최소화 하였다.



Fig. 11. Test setup to evaluate the temperature characteristics. (a) high, (b) low temperature.

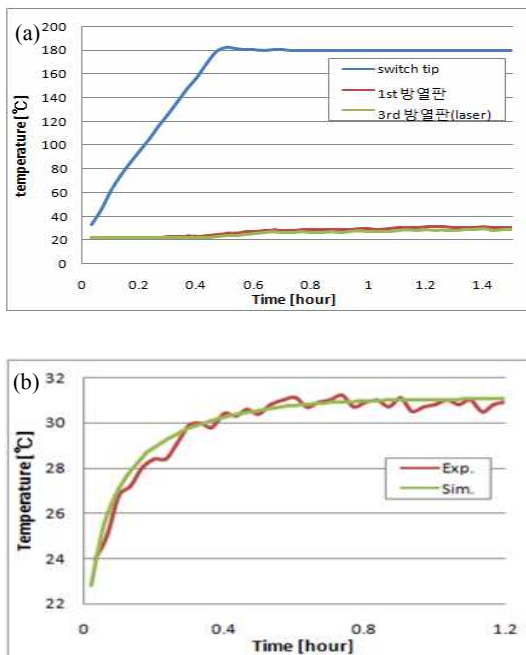


Fig. 12. Temperature profile at the first heat-sink plate: simulation & experiment results.

그림 11(b)는 -40°C 의 저온 실험에 대한 평가 셋업으로서, 전체 튜브를 액체질소에 담근 후, 히팅을 동시에 적용하여 해당 온도를 제어하였다. 시험에 적용한 시제품의 총 10개이며 해당 온도에서 레벨 스위치의 매질 접촉에 따른 동작 유무를 상부 회로단의 LED 점등 유무를 통해 확인하였으며, 10개의 시제품 모두 정상적인 고온, 저온 동작을 나타내었다.

방열 특성평가를 위하여, 대상물질 접촉부인 PEEK 부에 온도 180°C 를 인가하고 각각의 방열판의 온도를

직접 측정 평가하는 방법을 진행하였다. 실험은 앞서 진행된 고온 실험장비를 그대로 적용하였으며, 방열판의 온도 측정 역시 온도 제어 컨트롤러의 K형 열전쌍을 이용하였다. 22°C 의 실온 환경에서 측정한 결과를 그림 12에서 보이고 있으며, 180°C 까지 감지부 온도 상승에 따라 방열판의 온도가 서서히 증가하는 결과를 보이고 있으나, 최대 35°C 를 넘지 않음을 확인할 수 있었다. 그림 12(b)는 가장 아래 첫 번째 방열판의 실제 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 실험을 통한 측정 결과는 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 -40°C 에서 180°C 의 온도 범위에서 사용이 가능한 새로운 구조의 레벨 스위치를 제안하고 시제품으로 제작하여 특성을 확인하였다. 최적의 레벨 스위치 형상을 확보하기 위해 유한요소해석을 진행하여 케이스 구조 및 재질 등을 설계하였으며, 제안된 레벨 스위치의 구조는 압전 소자 한 개를 사용하는 구조로서 물 등의 감지물질 접촉 시 기계적 임피던스의 변화를 바로 이용하는 원리를 이용한다.

케이스 일체 정합재료는 물의 유무에 따라 임피던스 변화가 가장 큰 PEEK 재질을 선정하였고, 180°C 까지 안정된 동작을 확보하기 위하여 SUS 방열판 3개, SUS 연결봉 길이는 230 mm로 설계하였다. 선정된 모델을 바탕으로 PEEK 재질의 케이스를 가공한 후, 내부에 직경 20 mm, 두께 1 mm의 압전 소자를 바로 부착하고, 내부에 후방충진 실리콘 에폭시 계열로 충전하고 제작한 후, 성능평가를 위해 레벨 스위치 구동 및 신호처리 회로를 설계 제작하였다. 시제품으로 제작된 10개의 레벨 스위치는 모두 고온 및 저온에서 정상적인 작동을 하였으며, 방열 특성도 시뮬레이션과 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 개발된 레벨 스위치는 물 뿐만 아니라 타 유체 계측 분야에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] K. I. Park, H. G. Kim, K. H. Shin, and G. Sagong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **4**, 756 (2003).
- [2] C. T. Chiang and P. C. Tsai, *IEEE Sens. J.*, **15**, 3311 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2388216>]

- [3] K. I. Ha, M. H. Kim, G. J. Kang, B. G. Hyun, M. G. Chae, and G. Imano, *J. Korean. Sens. Soc.*, **10**, 320 (2001).
- [4] Y. J. Lee and J. I. Im, *J. Inst. Electron. Eng. Korea*, **43**, 30 (2006).
- [5] S. W. Lee, Y. B. Kim, J. T. Ryu, and H. D. Nam, *J. Acous. Soc. Korea*, **26**, 80 (2007).
- [6] J. H. Lee, C. I. Kim, J. H. Paik, J. H. Cho, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, and S. Nahm, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 859 (2011).