

전산유체해석을 통한 퓨즈캡 솔더링 시의 용융솔더 넘침 문제 해결방안 연구

정남균
인하공업전문대학 기계과

Study on the solution for the overflow of molten solder during the soldering of fuse cap through CFD analysis

Nam-Gyun Jeong

Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약 전기 소자 중의 하나인 퓨즈는 전기 부품에 비정상적으로 흐르게 되는 과전류로 인한 전로나 기기 보호를 위하여 사용 및 개발되고 있다. 대표적인 형태로는 유리관퓨즈가 많이 사용 되고 있는데, 최근 납이 함유된 솔더의 사용에 대한 국내 및 국제 규제가 강화 되면서 무연 솔더로의 변경으로 인한 문제가 대두 되고 있다. 본 연구에서는 유리관퓨즈의 솔더링 공정에서 솔더를 기존의 납이 함유된 솔더에서 무연 솔더로 변경 한 후, 퓨즈캡을 가용체와 솔더링할 때 용융된 솔더가 퓨즈 바깥으로 넘쳐흐르는 현상을 수치해석으로 모사하였고, 해석 결과를 바탕으로 솔더의 넘침 현상을 막을 수 있는 방안을 찾고 그 효과를 검증하였다. 검증 결과, 솔더링 실시 전에 유리관 내부의 온도를 충분히 증가시키는 것이 솔더의 넘침을 예방하는데 도움이 되며, 중력이 솔더가 흘러나가는 반대방향으로 작용하도록 솔더링을 하게 되면 넘침을 막는 데 효과가 있음을 확인하였다.

Abstract Fuses are used to protect electric circuits or devices from excess current. Glass-tube fuses are typically used, but problems have arisen due to the mandated switch from conventional solder to lead-free solder. This study used CFD to simulate the phenomenon of molten solder being poured out of a fuse during the soldering process for a fuse cap and fuse element. In addition, a method is proposed to prevent solder from overflowing, and its effectiveness was verified based on the analysis results. The results show that a sufficient increase of the temperature inside the glass tube before soldering and gravity can help to prevent the solder from overflowing.

Keywords : Fuse, Lead free solder, Reflow soldering, Glass tube fuse, CFD

1. 서론

전기부품에 비정상적으로 흐르게 되는 과전류로는, 전로에서 부하에 이르는 도중 혼축할 때 정상시보다 대단히 큰 전류가 흐르게 되는 단락전류, 부하의 변동으로 통상전류의 수배이상인 흐르게 되는 과부하전류, 아주 짧은 시간동안만 존재하나 자연 감쇠하여 없어지는 과도 전류 등이 있다. 최근 국가 산업의 발달과 국민들의 생활

수준의 향상으로 대용량의 전기기기 사용이 증가하면서, 위와 같은 이상전류로 인해 발생하는 전기화재가 늘어나고 있다.

전기소자 중의 하나인 퓨즈는 이러한 과전류를 차단하여 전로나 기기를 보호하는 부품으로 전기기구의 다양화와 대용량화에 따라 다양한 형태의 퓨즈가 개발되고 있고, 퓨즈의 형태에 따른 전기화재 원인분석에 대한 연구도 진행되었다[1]. 가장 대표적으로 사용되고 있는 형

이 논문은 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Nam-Gyung Jeong(Inha Technical College)

Tel: +82-32-870-2132 email: nkjung@inhac.ac.kr

Received July 25, 2018

Revised (1st August 23, 2018, 2nd September 17, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

태로는 유리관퓨즈를 들 수 있는데, 유리관퓨즈는 과전류에 의하여 퓨즈의 가용체가 녹아 절단되어 전류를 차단하는 원리로 작동을 한다. 유리관퓨즈의 정격 전류는 0.1~10 A까지 있으며 주로 가정용 전기 기구의 전원 보호용으로 사용되는데, 그 구조는 Fig. 1과 같다. 원통내부에 가용체가 있고 원통의 양쪽 끝에 캡(Cap)을 씌워 제작되며, 가용체(Element)와 캡은 솔더링(Soldering)을 통하여 전기적으로 연결이 되게 된다.

가용체와 캡을 접합시키는 솔더로 기존에는 납(Pb)이 함유된 솔더를 사용하였으나, 인체의 유해성 문제로 지난 2007년 7월부터 시행된 RoHS(유해물질규제지침) 법령에 의해 유럽에서 사용이 규제가 되었고, 미국, 일본, 중국 등에서도 점차로 사용의 제한이 강화되었다[2]. 이에 따라 납이 함유되어 있지 않은 무연 솔더의 실용화 연구가 활발하게 진행되고 있다.

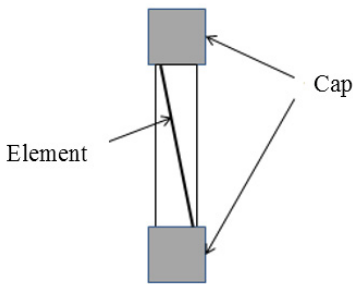


Fig. 1. Schematic diagram for the glass tube fuse

특히, 기존 전자부품 생산 공정이 주석(Sn)과 납으로 이루어진 솔더 합금을 전제로 하기 때문에, 무연 솔더로의 대체화에 따른 여러 가지 문제들이 발생할 수 있다.

본 연구는 가용체와 퓨즈캡을 기존의 납이 함유된 솔더 대신 무연 솔더를 이용하여 솔더링하는 경우, 퓨즈 캡 바깥으로 솔더가 넘쳐 흘러나오게 되는 문제를 해결하는데 목적이 있다. 솔더의 넘침이 발생하게 되면, 솔더링 실시 후 작업자가 넘친 부분을 직접 제거해야 하는 번거로움이 있고, 다량의 퓨즈를 자동공정으로 생산하게 되는 경우는 작업의 효율이 급격히 떨어지게 되어 생산업체의 생산비용 절감에 막대한 지장을 끼치게 된다. 그러나 무연 솔더를 PCB(Printed circuit board) 솔더링에 적용하는 경우에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으나[3,4], 유리관퓨즈에서의 솔더링 공정과 같은 경우에서의 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 수치해석적인 방법을 이용하여 솔더의 넘침 현상을 모사하고, 기존 솔더의 경우와 결과비교를 통하여 현재 변경된 솔더와의 차이를 분석하였다. 그리고 분석된 결과를 바탕으로 문제 해결 방안을 찾아 이에 대한 효과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

솔더링 방법으로는 인두 솔더링, 침적 솔더링, 리플로우 솔더링(Reflow Soldering) 등이 있는데, 리플로우 솔더링은 온도 및 노즐의 조절이 용이하여 비용절감 효과가 큰 장점이 있다[5]. 유리관퓨즈의 솔더링 시에도 리플로우 솔더링 방식을 사용하는데, 퓨즈 캡 내부에 미리 적량의 솔더를 공급한 다음 외부로부터 열을 가하여 솔더를 용융시키게 된다.

이와 같은 솔더링 공정을 모사하기 위해서 솔더의 용해(Melting) 과정에 대한 해석이 필수적이고, 이를 위하여 본 연구에서는 ANSYS FLUENT에서 제공하는 Solidification/melting 해석 모델을 사용하였다[6]. ANSYS FLUENT는 용해과정을 해석할 때 고-액상의 경계를 명시적으로 추적하는 방법대신에, 엔탈피-다공도(Enthalpy-porosity) 방법을 이용하여 엔탈피(Enthalpy)의 균형에 기초한 액상의 분율(fraction)을 매 계산 시마다 구하게 된다.

잠열(Latent heat)을 고려한 에너지방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (1)$$

여기서 H 는 엔탈피, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 유체속도, 그리고 S 는 생성항이다. 물질의 엔탈피 H 는 현 엔탈피(Sensible enthalpy)와 잠열의 합으로 아래와 같이 계산된다.

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3)$$

여기서 h_{ref} 는 기준 엔탈피, T_{ref} 는 기준 온도, c_p 는 등압비열이다. 그리고 ΔH 는 액상의 분율(β)과 잠열(L)의 곱으로 $\Delta H = \beta L$ 과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 해석조건

실제 유리관퓨즈의 형상은 Fig. 1과 같이 가용체가 원

통 양쪽 끝에 씌워지는 퓨즈캡에 연결이 되나, 솔더의 넘침 현상이 아래쪽 캡의 솔더링 시에는 발생하지 않고, 위쪽의 캡을 솔더링하는 공정에서만 발생하므로 해석의 단순화를 위하여 위쪽 캡에 솔더링되는 일부분의 가용체만 고려하였다. 또한 아래쪽 캡 부분은 이미 솔더링이 끝난 상태이기 때문에 결과에 미치는 영향이 미미할 것이므로 해석에서 배제하였다. 사용된 형상에 대한 크기는 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 3에 계산에 사용된 격자를 나타내었는데, 원통형의 퓨즈 형상과 퓨즈 내부에 존재하는 가용체로 인하여 대부분의 격자를 사면체의(Tetrahedral) 형상을 갖는 격자로 구성하였고, 용융된 솔더가 벽을 타고 흐를 때 벽면의 영향을 잘 반영시키기 위하여 벽 근처에서는 프리즘 격자를 이용한 격자 층을 생성하였다. 격자의 크기는 유리관퓨즈의 원통과 퓨즈 캡 사이의 좁은 간격 및 가용체 주변에는 조밀한 격자를, 퓨즈의 외부영역에는 계산 시간의 단축을 위하여 보다 성긴 격자를 사용하였다.

본 연구에서는 솔더의 용해현상에만 초점을 두고 응고 현상에는 관심을 두지 않으므로, 위쪽 캡의 윗면만 솔더의 용융점보다 높은 온도로 유지된다고 가정하였고, 다른 면들은 단열조건을 가정하였다.

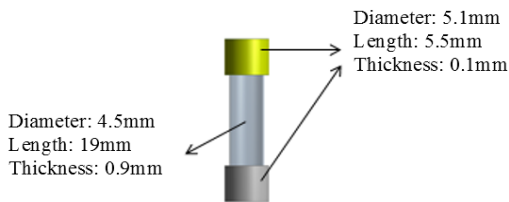


Fig. 2. Geometry of the glass tube fuse

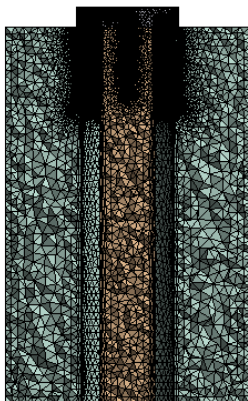


Fig. 3. Grid system for the calculation

솔더에 대한 주요물성치는 표1에 기존의 솔더와 함께 나타내었고, 온도에 따른 밀도와 표면장력은 Fig. 4와 Fig. 5에 비교하여 도시하였다[7]. 기존 솔더로는 납이 함유된 Sn60Pb40을 고려하였고, 무연솔더는 SC07을 고려하였다. 두 솔더의 물성치를 전반적으로 비교를 해보면, 기존에 사용되어 오던 솔더가 무연 솔더보다 점도와 밀도가 높고, 용융점과 표면장력이 낮음을 알 수 있다.

Table 1. Calculation conditions

Solder	Viscosity (cP)	Thermal conductivity (W/m-K)	Specific heat (J/g-°C)	Latent heat (J/g)	Liquidus (°C)
Sn60Pb40	2.0	49.8	0.173	37.0	190
SC07	1.8	65.3	0.23	58.0	227

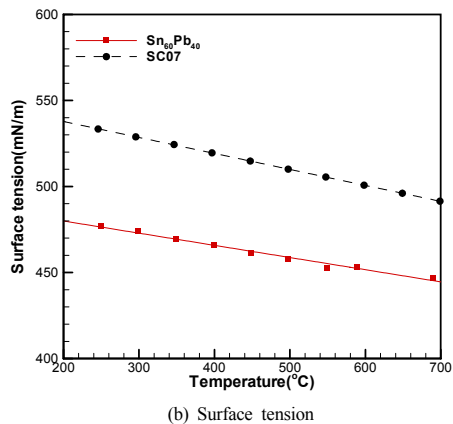
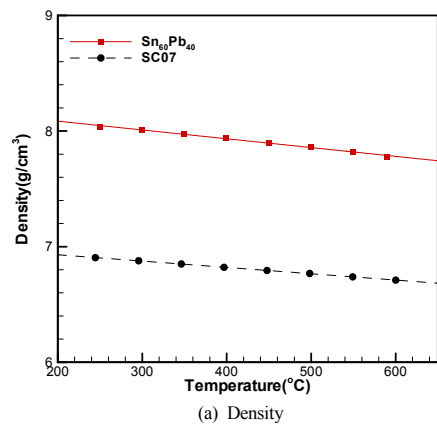


Fig. 4. Density and Surface tension change of solders along the temperature

2.3 계산결과

문제가 되는 무연 솔더의 넘침 현상을 모사하기 위하여 2.2절에 나타낸 솔더의 정보를 이용한 해석을 수행하였다. 고품의 무연 솔더가 초기에 Fig. 5와 같이 퓨즈 캡 윗부분에 위치한다고 가정하고, 퓨즈캡의 온도를 300°C로 했을 때 시간에 따른 솔더의 거동을 해석하였다. 유리 관퓨즈 내부 및 외부 공기의 초기온도는 27°C로 가정하였다. 식(1)~(3)을 이용하여 계산이 진행되면, 퓨즈캡으로부터 전달된 열로 인하여 솔더의 온도가 증가하는데, 솔더의 온도가 고상선(Solidus) 보다 작은 경우에 $\beta=0$, 액상선(Liquidus) 보다 큰 경우에 $\beta=1$ 이다. 액상선과 고상선 사이에 존재하면 선형비례를 이용하여 구한다.

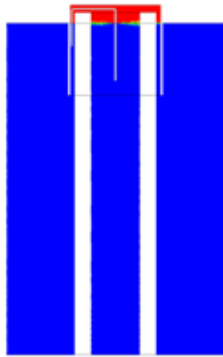


Fig. 5. Initial position of solder

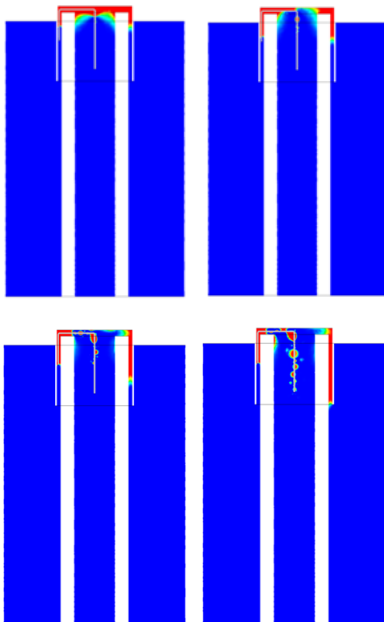


Fig. 6. Behavior of melting solder along the time

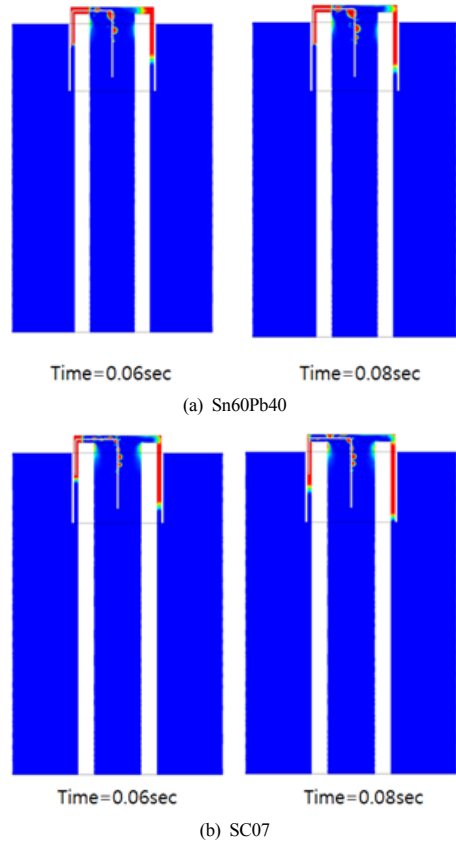


Fig. 7. Comparison of the results between Sn60Pb40 and SC07 solders

Fig. 6에 나타낸 결과를 보면, 시간이 지남에 따라 고품의 솔더가 용융되고, 퓨즈의 원통 내부에서 가열된 공기의 부피증가로 인하여 밀려난 액상의 솔더가 퓨즈캡과 원통 사이로 흘러내려 최종적으로 캡의 외부로 빠져나오는 모습을 볼 수 있다.

기존 솔더와의 결과비교를 위하여, 동일한 조건에서 기존 솔더를 이용한 계산을 수행하였고 Fig. 7에 무연 솔더와 결과를 비교하였는데, 무연 솔더를 이용하는 경우가 기존 솔더를 이용한 경우보다 문제 발생의 여지가 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 기존 솔더는 밀도가 현재 사용되는 무연 솔더보다 높기 때문에 원통 내부의 공기 부피가 증가하면서 액상의 솔더를 퓨즈 외부로 밀어내려 할 때 보다 큰 저항이 작용할 것이고, 높은 점성계수로 인하여 퓨즈캡과 원통 사이의 캡 내부를 흐를 때에도 저항이 커지기 때문으로 판단된다.

문제 해결을 위한 방안으로 원통내부의 초기 공기온도를 높여주는 방법과 퓨즈를 뒤집어서 솔더링하는 방법

을 적용하여 그 효과를 알아보았다. Fig. 8에 원통내부에 존재하는 공기의 초기 온도를 60°C와 100°C로 올렸을 경우에 대한 결과를 나타내었고, Fig. 9에는 퓨즈를 뒤집어서 솔더링하는 경우에 대한 결과를 나타내었다. 해석 결과, 원통 내부에 존재하는 공기의 초기온도를 증가시키면 따라 원통과 퓨즈 캡 사이의 갭으로 흐르는 솔더의 양이 점점 줄어드는 일관된 해석 결과를 보이고 있어, 솔더링 실시 전에 유리관 내부의 온도를 충분히 증가시키는 것이 솔더의 넘침을 예방하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 뒤집힌 방향으로 솔더링을 하게 되면 중력이 솔더가 흘러나가는 반대방향으로 작용하게 되어 넘침을 막는 효과가 있음을 확인하였다.

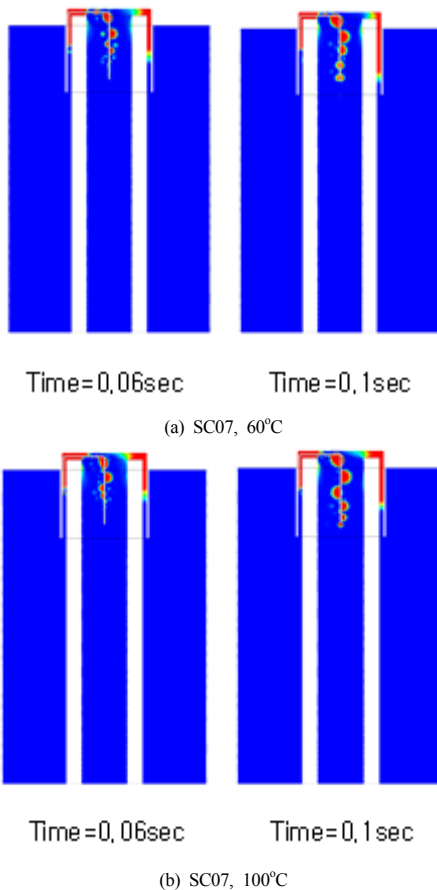


Fig. 8. Calculation results for different initial temperatures

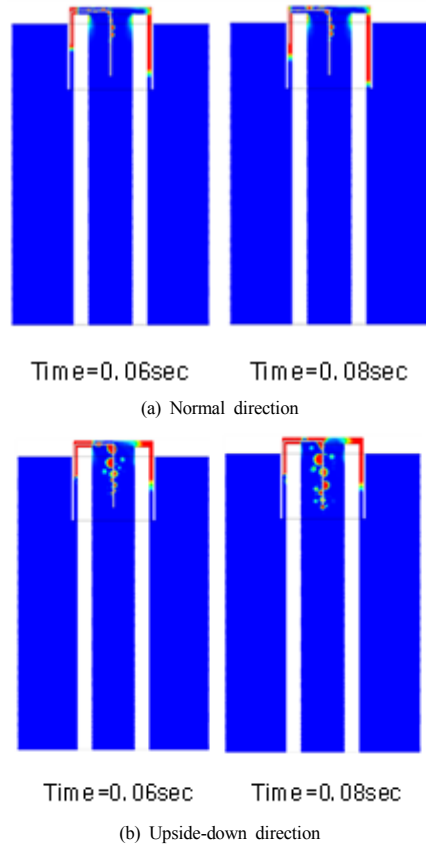


Fig. 9. Calculation results for different direction

3. 결론

본 연구에서는 유리관퓨즈의 솔더링공정에서 솔더를 기존의 납이 함유된 솔더에서 무연 솔더로 변경 한 후, 퓨즈캡을 가용체와 솔더링할 때 용융된 솔더가 퓨즈 바깥으로 넘쳐흐르는 현상을 수치해석으로 모사하였고, 기존 솔더의 경우와 결과비교를 통해 현재 변경된 솔더와의 차이를 분석하였다. 또한, 분석된 결과를 바탕으로 솔더의 넘침 현상을 막을 수 있는 방안을 찾고 이에 대한 효과를 검증하였다. 해석결과 솔더가 넘치는 현상을 막기 위해서 솔더링을 실시하기 전에 원통 내부의 공기를 최대한 높여주고, 솔더링 방향을 기존과 반대로 뒤집어서 실시하는 방안을 적용하게 되면 솔더의 넘침 방지에 효과가 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] C. H. Lee, S. K. Kim, K. J. Ok, " A Study on the Causal Analysis of Electric Fire by Using Fuse", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol.22, No.1, pp. 24-28, 2008. http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE_01464366
- [2] J. H. Lee, N. H. Kang, C. W. Lee, J. H. Kim, " Necessity of Low Melting Temperature Pb-free Solder Alloy and Characteristics of Representative Alloys", *Journal of KWS*, Vol.24, No.2, pp. 17-28, 2006. <http://e-jwj.org/upload/PDF/0/71/22/0712255.pdf>
- [3] W. S. Hong, C. M. Oh, "Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics", *Journal of KWJS*, Vol.31, No.3, pp. 22-30, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.3.22>
- [4] S. H. Kim, B. R. Lee, G. T. Park, J. M. Kim, S. H. Yoo, Y. B. Park, "Effects of PCB surface finishes on the Mechanical and Electrical Reliabilities of Sn-0.7Cu Pb-free Solder Bump", *Korean J. Met. Mater.*, Vol.53, No.10, pp. 735-744, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2015.53.10.735>
- [5] E. Y. Yoon, S. W. Kim, Y. S. Yang, S. J. Lee, G. H. Lee, "A study on PCB Failure prediction of forced convection reflow soldering process with Thermal-Structure coupled simulation", *The Korean Society of Mechanical Engineer Conference*, Nov., 2009. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01291669>
- [6] ANSYS Inc., "ANSYS FLUENT User's Guide"
- [7] I. Kaban, S. Mhiaoui, W. Hoyer, J. G. Gasser, "Surface tension and density of binary lead and lead-free Sn-based solders", *J. Phys.:Condens Matte*, Vol.17, pp. 7867-7873, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/17/50/007>

정 남 균(Nam-Gyun Jeong)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2010년 10월 : 삼성 전자 책임연구원
- 2010년 11월 ~ 2015년 2월 : 한국 원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과교수

<관심분야>

전산유체역학, 다상유동