

맥스웰 CAE 소프트웨어를 이용한 비례솔레노이드 설계 Design of Proportional Solenoid Actuator using Maxwell CAE Software

윤소남
S. N. Yun

1. 서 론

CAE(Computer Aided Engineering)는 컴퓨터를 이용하여 해석, 분석, 규명 혹은 설계하는 과정을 포함한 하나의 학문 영역으로서, 최근에는 거의 모든 분야에 CAE 개념이 도입되고 있다. 제품을 설계하고 개발하는 과정에 있어서, CAE를 활용하게 되면, 최적의 제품 설계가 가능하게 되어, 시행착오에 의한 비용 손실을 줄일 수 있는 동시에 짧은 시간 내에 만족하는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 오늘날에는 개발 품목이 다양화와 고도화가 요구되고 있고, 중복 설계 혹은 잦은 설계 변경으로 인한 문제점들을 해결하는 방안으로 CAE의 필요성이 강조되고 있다.

본 해설에서는 비례솔레노이드 액추에이터와 CAE 소프트웨어인 맥스웰(Maxwell)을 이용하여 첫째로는 전자장 해석을 하는 과정과 비례솔레노이드 액추에이터의 비례 흡인력 특성에 대해 논의를 하고자 한다. 마지막으로 CAE를 통하여 설계된 비례솔레노이드를 제작하고, 시험을 통하여 CAE의 타당성에 대해서 서술하고자 한다^{1,2)}.

2. 비례솔레노이드 액추에이터 설계

일반적으로 비례솔레노이드 액추에이터 설계는 아래에 보이는 단순 온오프 솔레노이드 설계식을 이용하고 있다.

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot S N^2 \frac{i^2}{x^2} [N] \quad (1)$$

$$F = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} B_g^2 S [N] \quad (2)$$

$$U = NI = B_g l_g / \mu_0 + \Sigma H_i L_i [AT] \quad (3)$$

$$V = IR = 4\rho l_m NI / (\pi d^2) [V] \quad (4)$$

여기에서, F : 흡인력[N], μ_0 : 진공의 투자율[H/m], S : 공극의 유효단면적[m²], N : 코일 감김수

[Turns], i : 전류[A], x : 플런저와 고정자 사이의 거리[m], U : 기자력, V : 전압, B_g : 공극의 자속밀도[T], l_g : 공극의 길이[m], H_i : 철심부의 자계강도[A/m], l_i : 철심부의 자로 길이[m], l_m : 코일의 1회 감김 평균 길이[m], R : 코일 저항[Ω], d : 코일 선경[m] 이다.

앞의 수식을 이용하여 개략적인 솔레노이드 액추에이터 설계가 이루어지면, 다음의 코일 온도 상승 수식을 통하여 최종 결과가 나오게 되고, 이 결과를 통하여 솔레노이드 액추에이터 제작이 가능하게 된다^{3~5)}.

$$\theta_f = \frac{q\rho}{2\lambda\xi T} \left[\frac{NI}{h} \right]^2 [^{\circ}C] \quad (5)$$

여기에서, q : 사용율, ρ : 동선의 저항율[Ω.m], I : 여자 전류[A], λ : 코일의 열발산 계수[W/m² · °C], ξ : 권선의 점적율[Space factor], T : 코일 폭[m] 이다.

전술한 바와 같이 앞의 수식들은 단순 온오프 설계를 위한 수식으로, 비례흡인력을 얻는 액추에이터를 설계하기 위해서는 액추에이터 구조에 대한 상세 유한요소 해석이 이루어져야 한다. 간이 해석법으로 가정자로법을 사용하는 경우도 있으나, 해석 대상 구조에 대하여 상세하게 모델링이 어려운 동시에 최적의 자로를 구현하기가 힘들어 실 제품의 특성을 해석적으로 반영하는 데는 많은 무리가 있다^{5~6)}.

3. 맥스웰 CAE 소프트웨어⁷⁾를 이용한 비례솔레노이드 액추에이터 설계

비례 솔레노이드 액추에이터가 변위에 관계없는 일정한 힘을 얻을 수 있는 이유는, 자속이 플런저와 공극을 통해서 흐르는 On/Off 솔레노이드의 구조와는 다르게, 제어각을 통하여 흐르는 자속이 발생하기 때문이다. 변위가 작아지면서 자속은 점점 많이 발생하지만 그 만큼의 자속이 주공극을 통하여 흐르지 않고 제어각을 통하여 흐르기 때문에 주

공극에서의 자속밀도가 일정하게 유지될 수 있다. Fig. 1에는 비례 솔레노이드 액추에이터의 특성인 변위에 관계없는 일정한 흡인력을 얻기 위한 방법으로 제안된 여러 가지 형상의 제어각과 플런저를 보이고 있다. 각각의 형상은 조금씩 차이가 있지만, 이것은 변위가 작아지면서 플런저와 제어각 사이로 흐르는 자속이 증가하는 현상은 같기 때문에 결과적으로 비슷한 특성을 갖는다.

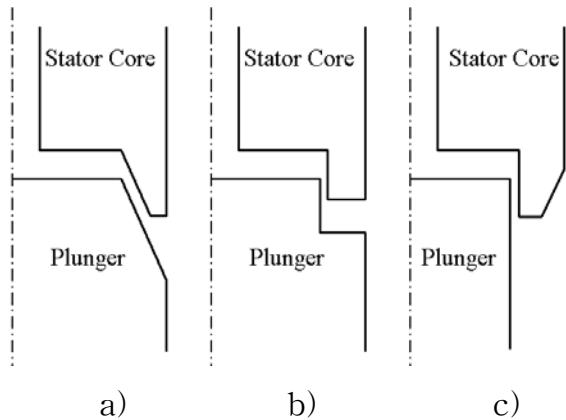


Fig. 1 Various type proportional solenoid actuator

이 해설에서는 현재 많이 적용되고 있는 형상 C)를 이용하기로 한다. Fig. 2는 C) 형상을 갖는 비례 솔레노이드 모델을 보이는 것이고, 비례압력제어밸브 파이로트로 사용되는 밸브이다. Table 1은 해석 대상 비례솔레노이드 액추에이터의 사양을 보이는 것이다.

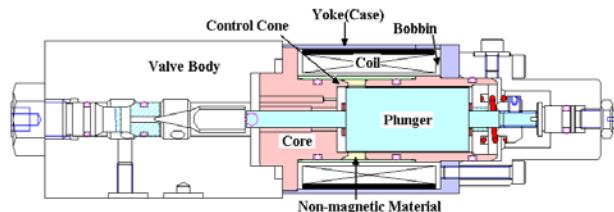


Fig. 2 Proportional solenoid actuator model

Table 1 Specification of proportional solenoid actuator

권선수	1419 [turns]
권선저항	20.5 [Ω]
입력 전류	0.2 ~ 1.2 [A]
스프링 상수	2.755 [kgf/mm]
플런저 무게	78 [g]
변위	3.5 [mm]

제어각의 형상에 따른 솔레노이드의 특성을 해석하기 위해서 설정한 변수들을 Fig. 3에 보이고 있다. 제어각의 길이 L , 제어각의 두께 t_c , 그리고 테이퍼 면의 길이 D 를 변수로 설정하여 각각의 변화에 의한 해석 결과를 비교하였다. Table 2는 해석 모델에 대해서 각각의 치수를 나타낸 것이다. 이 때 입력 전류는 모두 0.8 [A]를 주고 해석하였다.

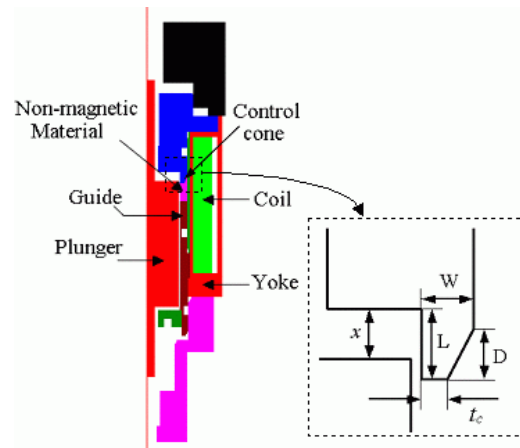


Fig. 3 Control cone shape and design parameters

Table 2 Given data for FEM analysis

Type	L	D	t_c
Type1	3.5mm	2.5 mm	2.25 mm
Type2		2.5 mm	1.34 mm
Type3		2.5 mm	0.25 mm
Type3-2		3.5 mm	0.25 mm
Type4		2.5 mm	0.00 mm
Type4-2		3.5 mm	0.00 mm

3.1 제어각 길이(L) 변화에 따른 특성

Fig. 4는 제어각의 두께가 최대 ($t_c = W$) 일 때, 제어각의 길이 L 에 대한 변위-흡인력 특성 곡선을 보이는 것이다. 플런저 변위 x 가 제어각의 길이보다 큰 경우 ($x \geq L$)에는 제어각이 없는 경우와 비교해서 자기 저항이 작아지기 때문에, 플런저에 작용하는 흡인력이 커짐을 알 수 있다. 그러나 변위가 감소하여 제어각의 길이보다 작은 경우 ($x < L$)에는 주 공극보다는 상대적으로 작은 공극을 갖는 제어각을 통해서 흐르는 자속이 많이 발생하여 공극에서의 자속밀도가 작아져 흡인력이 작아진다. 변위

가 작아질수록 흡인력은 감소하며, 변위가 충분히 작아지면 공극을 통해 흐르는 자속이 다시 증가하여 흡인력은 다시 증가한다. 따라서, 제어각의 길이는 실제 시스템에서 제어 영역으로 사용될 솔레노이드 플런저의 변위에 의해 결정되는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

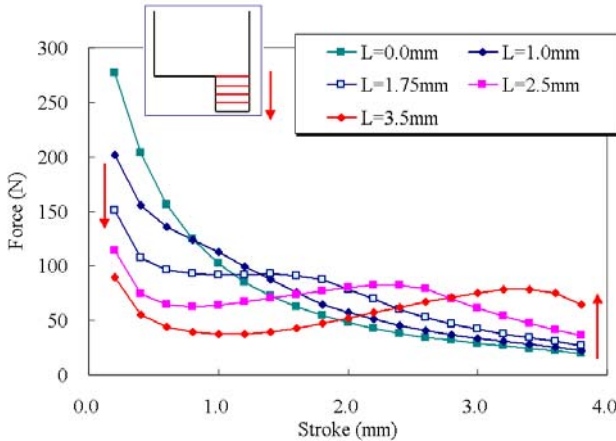


Fig. 4 Attraction force results by control cone length(L) variation

3.2 제어각 두께(t_c) 변화에 따른 특성

제어각의 길이 L 을 3.5mm, 테이퍼 면의 길이 D 를 2.5mm로 하고 두께 t_c 를 변화시켜 솔레노이드의 흡인력 특성을 해석한 결과를 Fig. 5에 보이고 있다. 제어각의 두께 t_c 가 제어각의 전체 폭 W 와 같을 때의 흡인력은, 변위가 제어각의 길이보다 큰 경우에는 다른 경우보다 크게 나타나지만 변위가 작아질수록 점점 흡인력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 변위가 클 때에는 제어각의 하단부를 통하여 흡인력에 영향을 주는 많은 자속이 흐르기 때문에 흡인력이 증가하지만, 변위가 작아질수록 제어각을 통하여 흐르는 자속은 증가하지만 흡인력에 영향을 주지 않기 때문에 흡인력이 작아지는 것으로 판단된다. 두께 t_c 가 작아질수록 초기 흡인력이 작아지고 변위가 작아지면서 발생하는 흡인력의 변화는 작아짐을 알 수 있다. 이것은 제어각의 폭이 좁아지면서 하단부에서는 자기포화가 발생하여 전체적으로 제어각을 통하여 흐르는 자속의 변화가 적어지기 때문으로 판단된다. 따라서 일정한 흡인력을 얻기 위해서는 제조 공정 등을 고려하여 제어각의 폭을 가능한 작게 하는 것이 바람직하다.

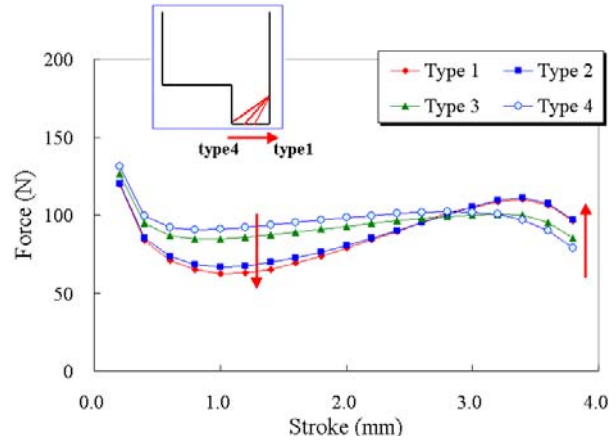


Fig. 5 Attraction force results by control cone thickness(t_c) variation

3.3 테이퍼 길이(D) 변화에 따른 특성

두께의 변화에 따라 발생하는 흡인력 특성이 비교적 양호한 Type 3과 4에 대해서 테이퍼 면의 길이 D 를 변화시켜 특성을 비교한 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 해석 결과에 의하면, 테이퍼 면의 길이가 길수록 특성은 개선되는 것을 알 수 있다. 이것은 테이퍼 면의 길이가 길어질수록 제어각을 통하여 흐르는 자속의 양이 감소하여 흡인력을 발생시키는 자속의 변화가 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 제어각의 두께가 너무 작고 테이퍼 면의 길이가 너무 길면 플런저의 변위가 작아지면서 주공극에서 자속이 계속 증가하게 되어 전체적으로 흡인력이 증가하게 된다. 따라서 일정한 흡인력을 얻기 위해서는 테이퍼 면의 길이와 제어각의 두께를 동시에 고려하면, $t_c=0$ 인 것 보다는 약간의 두께를 가지면서 테이퍼 면의 길이는 제어각의 길이와 같을 때 가장 좋은 특성을 가진다.

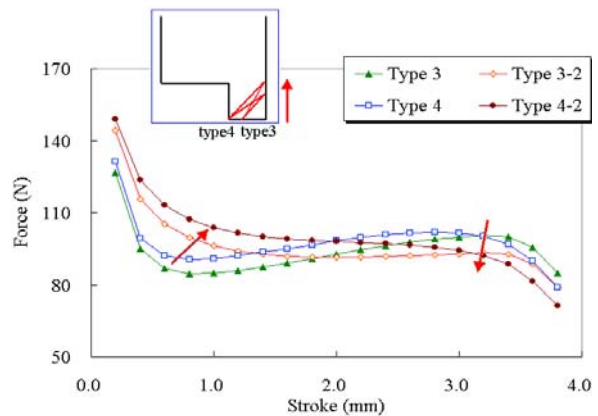


Fig. 6 Attraction force results by taper length(D) variation

3.4 과도상태 해석

구동 전압으로 DC 24V를 인가하고 솔레노이드의 과도상태 응답 특성을 해석하였다. Fig. 7은 솔레노이드의 플런저가 이동하는 과도상태에서의 자속선도를 보이고 있다. 구동 초기에는 플런저에 발생하는 와전류(eddy current)의 영향으로 자속이 플런저 및 고정자 코아의 표면에만 흐르지만 시간이 지나면서 자속은 점점 플런저의 안쪽으로 흐르고 있다. 제어각의 영향으로 많은 양의 자속이 주공극을 통하여 흐르지 않고 제어각을 통해서 흐르는 것을 확인할 수 있다. 과도상태에서의 전류, 흡인력, 변위의 변화를 Fig. 8에 보이고 있다.

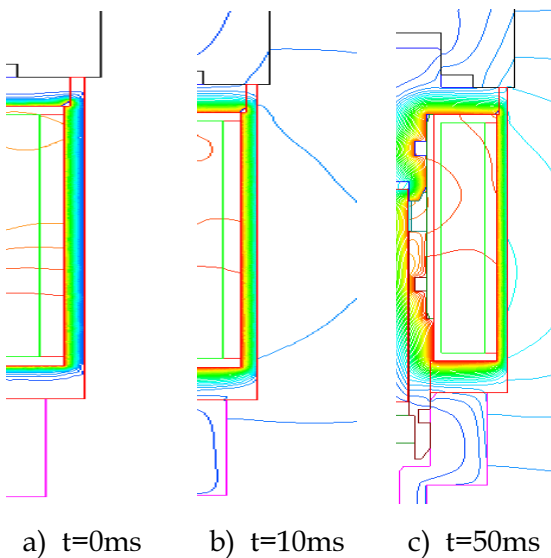


Fig. 7 Flux characteristics on transient state

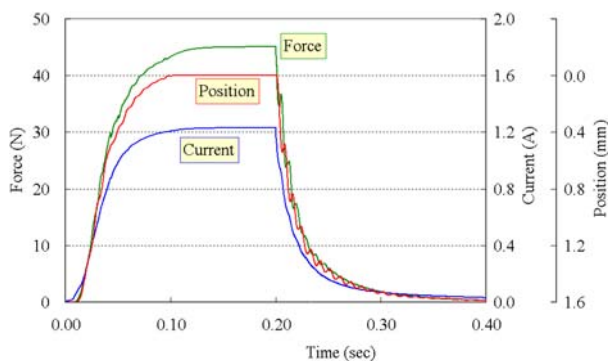


Fig. 8 Response characteristics on transient state

Fig. 9는 Maxwell을 이용하여 설계되고 제작된 비례솔레노이드 액추에이터의 변위와 흡인력을 측정할 수 있는 시험장비를 보이는 것이다. 솔레노이드의 온도 특성에 따라 달라지는 흡인력의 영향을 최소화하기 위하여, 매 스텝마다 빠른 시간내에 측정

을 마쳤으며, 그 결과를 CAE 소프트웨어 Maxwell의 해석 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

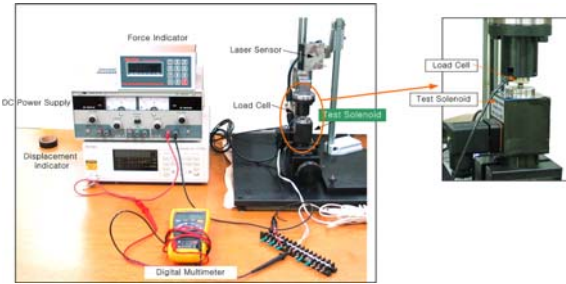


Fig. 9 Experimental setup for attraction force measurement

Fig. 10에 보이는 제어 영역(Control region)은 제작된 밸브의 작동 구간을 의미하는 것으로, 해석을 통하여 얻어진 결과에서 3.0mm 이상으로 움직이지 못하도록 밸브를 설계하였으며, 1.0mm 이하는 와셔 등을 통하여 가동자가 고정자에 붙지 않도록 조치를 한 결과이다. 결국 제작된 밸브의 실제 작동 구간은 2.0mm 이며, Fig. 10에 보이는 것처럼 해석된 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

이 결과는, CAE 기법을 이용한 유공압 시스템 혹은 부품의 설계 및 제작은 빈번한 시행착오를 줄일 수 있는 동시에, 시간과 제작경비를 동시에 줄일 수 있는 장점이 있다는 것을 의미한다.

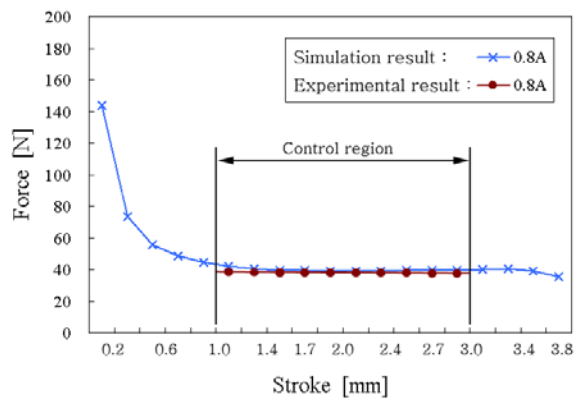


Fig. 10. Attraction force results comparison

Fig. 11 및 12는 각각 제작된 비례전자 밸브의 주파수 응답을 측정하는 구성도 및 주파수 응답 결과를 도시한 것이다. Fig. 12는 정격압력의 50±10% 구간에서 시험된 결과를 보이는 것으로 -3dB 기준 약 16Hz의 성능을 보이는 것으로 확인되었다.

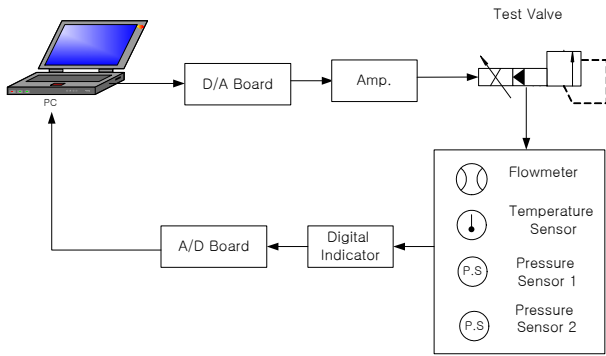


Fig. 11 Experimental setup for frequency response measurement

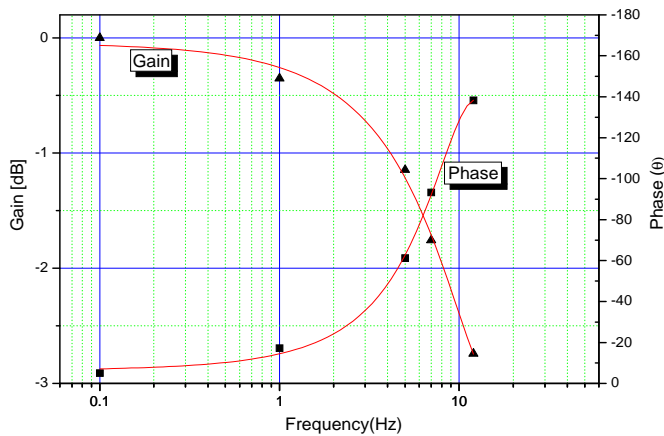


Fig. 12. Bode diagram of prototype proportional solenoid valve designed by CAE software (Maxwell)

4. 결 언

본 해설에서는 단순 온오프 솔레노이드 액추에이터와 비례솔레노이드 액추에이터의 기본 설계 개념을 서술하였으며, CAE의 필요성에 대해서 논의하였다. 최종적으로는 압력제어용으로 사용되는 비례솔레노이드 액추에이터와 CAE 소프트웨어인 맥스웰(MAxwell)을 이용하여 전자장 해석을 하는 과정과 비례솔레노이드 액추에이터의 비례 흡인력 특성에 대해 논의를 하였다.

결론적으로, 유공압 시스템 및 부품 개발에 있어서는 구조해석, 유동해석, 전자장 해석 관련 CAE 기법이 매우 유용하며, 더 나아가서는 전문화된 독립적인 해석들이 서로 다중 물리체계를 이루어 해석할 수 있는 강력한 툴들이 개발되어, 제품의 다양화와 고도화에 쉽게 대처할 수 있기를 희망한다⁸⁾.

참고문헌

- 1) H. Tanaka, "FEM Analysis of Solenoid for Proportional valve", Power Design, Vol. 26, No. 6, pp. 32~41, 1988.
- 2) H. Tanaka, "Proportional Solenoid", Fluid Power System, Vol. 31, No. 3, pp. 200~207, 2000.
- 3) I. Y. LEE, Y. K. Jung, "Using Method of Proportional Valve and High Speed On-off Valve for Hydraulic System Control", Instrument technique, Vol. 9, No.10, pp. 98~105, 2001.
- 4) H. Lausch, S. Helduser, "Development and Optimization of Industrial Proportional Pressure-Relief Valves", Proceedings of the 45th National Conference on Fluid Power, pp. 509~514, 2000.
- 5) G. Geibler, "Modellbildung Von Proportionalmagneten Mittels Konzentrierter Parameter", Oilhydraulik und Pneumatik, Vol. 45, No. 1, pp. 49~52, 2001.
- 6) H. Satoru, "Numerical Analysis of Dynamic Characteristics of Balance Piston Type Relief Valve", Hydraulics and Pneumatics, Vol. 28, No. 2, pp. 232~238, 1990.
- 7) Maxwell® Ver.9.0, 2002, user manual, Ansoft.
- 8) AMESim® Ver.4.0 2002, user manual, Imagine.

[저자 소개]



윤소남(책임저자)
E-mail : ysn688@kimm.re.kr
Tel : 042-868-7155
1963년 7월 29일생.
1990년 부경대학교 기계공학부
석사, 1994년 동 대학원 박사과정 졸업,

2005년 어번대 마이크로나노시스템/재료연구실 객원연구원, 1994년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 스마트 액추에이터, 유공압밸브 및 에너지 수확기 개발 연구에 종사. 유공압 시스템학회, 대한기계학회, 동력기계공학회, 한국정밀공학회, 일본유공압시스템학회 등 회원, 공학박사.