

솔레노이드 밸브 설계검증 방법론

Design verification methodology for a solenoid valve

박창대 · 임병주 · 정경열

C. D. Park, B. J. Lim and K. Y. Chung

1. 서 론

그림 1과 같은 솔레노이드 밸브(Solenoid Operated Valve, SOV)는 가격이 저렴하고 오염에 강하면서도 빠른 동적응답으로 인하여 거의 모든 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 솔레노이드 밸브의 설계 및 개발과 관련하여 많은 선행 연구들이 수행되었다.

Tao 등[1]은 솔레노이드 밸브의 성능에 영향을 미치는 3가지 자성재료의 물성치와 기하학의 효과를 고려하여 솔레노이드 밸브의 자기장에 대한 최적 설계방법을 제안하였다. 그들은 코일 턴수와 코일 길이와 같은 구조적 변수만을 대상으로 최대 자기력과 최소 소비전력을 달성하는 설계 방법을 제안하였다. Yehia [2]는 다이어프램이 없는 솔레노이드 밸브의 상세설계 방법을 제안하였다. 그는 밸브 몸체의 설계에 초점을 두었고, 솔레노이드 밸브 설계의 핵심 부분인 코일의 설계 과정을 다루지 않았다. Sung 등[3]은 ON/OFF형 솔레노이드 구동기(actuator)에 대한 설계 프로그램을 개발하였다. 그들의 설계에서는 전자기 이론, 실험적 결과 및 경험을 토대로 22개의 입력변수와 18개의 설계변수를 제안하였다. Kajima and Kawamura [4]는 고속 솔레노이드 밸브를 개발하기 위하여 수학적 모델을 기초로 시뮬레이션과 시험을 수행하였다. 그들은 솔레노이드의 크기와 코일턴수 같은 설계변수가 밸브의 전환속도 또는 반응속도에 미치는 영향을 보였다. Vaughan and Gamble [5]은 솔레노이드 모델링에 초점을 두고 솔레노이드 구동 비례밸브의 전기기계적(electromechanical) 거동을 예측하는 방법을 제시하였다. 이 모델은 입력 전압에 대하여 밸브의 전류와 플런저 위치와 같은 동적/정적 반응을 모두 예측하였다.

이상과 같이 대부분의 솔레노이드 밸브에 대한 선행연구는 솔레노이드 구동기 특히 코일과 플런저에 대한 정적/동적 거동에만 집중되어 있고, 솔레노이드 밸브의 실제 설계 과정과 설계를 검증하는 기

술적 문헌은 충분하지 않다. 따라서 솔레노이드 밸브의 재료와 크기뿐만 아니라 밸브 몸체에 대한 설계를 포괄하는 전체 설계과정과 설계검증 기술을 체계화할 필요가 있다. 게다가 대부분의 국내 솔레노이드 밸브 제조업체는 특수용도의 솔레노이드 밸브의 개발과 국산화를 달성하지 못하여서 대부분의 고부가가치 밸브는 수입에 의존하고 있다. 이것은 역설계나 경험에 의존하여 밸브를 설계 및 제작하여 온 국내 제조업체가 개념 및 기본 설계 관련 기술이 취약하기 때문으로 판단된다. 최근 Park 등[6]은 산업용 솔레노이드 밸브의 설계 기술과 관련한 연구결과를 발표하여 체계적 설계 방법론을 제시하였다. 하지만 여전히 대부분의 다른 기기들의 설계 방법과 마찬가지로 솔레노이드 밸브도 최적설계보다는 안전설계 관점에서 접근하고 있어 최적설계 방법론의 정립이 필요하다. 이것은 설계 기술의 정립과 더불어 설계의 최적화 및 설계검증 기술의 개발로 가능할 것으로 판단된다.

본 글에서는 산업용 솔레노이드 밸브의 최적 설계와 관련한 설계검증 기술을 제시하고자 한다. 적절한 경험과 이론식에 의하여 설계된 솔레노이드 밸브의 최적화를 위하여 설계검증 기술 및 실제 제작된 시작품에 대한 실험적 검증 결과를 제시하여 보다 경제성 및 신뢰성 있는 설계가 가능하도록 한다.

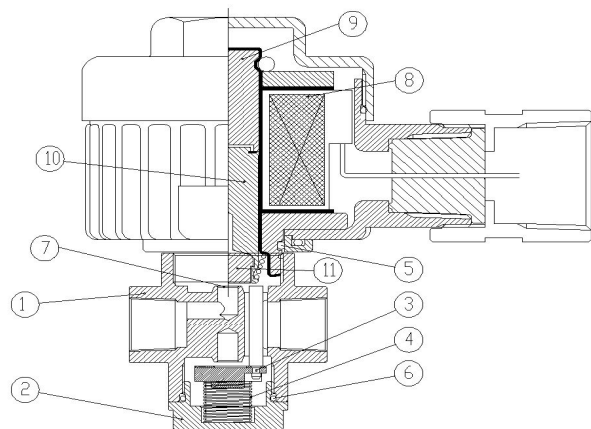


Fig. 1. Direct-acting solenoid operated valve

2. 솔레노이드 밸브 설계 방법

솔레노이드 밸브를 설계할 때 대부분의 설계 개념은 이미 잘 알려져 있거나 역설계나 기존 모델에 근거하여 경험에 의해 수행되기 때문에 솔레노이드 밸브의 개념설계 과정은 종종 무시되곤 한다. 그러나 이러한 설계 접근 방식은 중요한 설계 인자를 빠뜨리기 쉽고, 창의적인 설계를 기대할 수 없게 한다. 따라서 기본설계에 앞서 개념설계를 체계화하고 모든 입력변수를 선정하는 것은 매우 중요하고 후속 설계과정에 요하는 시간을 크게 줄일 수 있게 한다. 일반적으로 대부분의 입력조건은 사용자 요구서, 다양한 기술 기준/표준, 그리고 기술사양서를 포함하는 구매사양서로부터 선정할 수 있다.

최근 Park 등[6]은 솔레노이드 밸브를 설계하는 일반적인 과정을 체계화하고, 설계 flowchart를 그림 2와 같이 제시하였다. 이 설계 절차와 방법은 설계자, 설계 논리, 주어진 입력변수 또는 설계 목적에 따라 다소 변경될 수 있고, 또한 설계 최적화의 관점에서 설계 결과의 적정성 검증이 필요할 것으로 판단된다. 솔레노이드 밸브의 설계 목표는 주어진 소비전력과 허용 온도 범위 내에서 최대 흡인력과 좋은 응답특성을 나타내도록 각 설계변수들을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 소비전력 관점에서의 설계 최적화와 설계 결과의 적정성 검증은 설계자의 경험과 물리적/전자기적 이론을 접목하여 체계화할 수 있다.

3. 솔레노이드 밸브 설계검증

솔레노이드 밸브를 설계한 후 제작과 시험을 진행하기에 앞서 설계의 적정성 및 목표 사양과 부합성 등을 검증할 수 있으면 개발에 많은 도움이 된다. 본 글에서는 이론적 검증식을 제시하고 실제 제작된 시작품의 실험결과와 비교하여 설계검증 과정과 설계 최적화 방법을 제시한다.

3.1 이론적 검증

그림 2에 나타낸 바와 같이 솔레노이드 코일의 설계는 AWG(American Wire Gauge) 표에서 설계자의 경험에 의하여 코일 선경 d_w 을 선택하는 것으로 시작한다. 이 선경 d_w 의 선택은 연이은 코일 높이 h , 코일 층당 턴수 n_c , 코일 층수 N_i , 코일의 폭 W , 코일 외반경 r_o 등을 계산할 수 있게 한다. 하지만, 이 d_w 값은 식 (1)로부터 유도되는 식 (2)에 의

하여 이론적으로 검증될 수 있다.

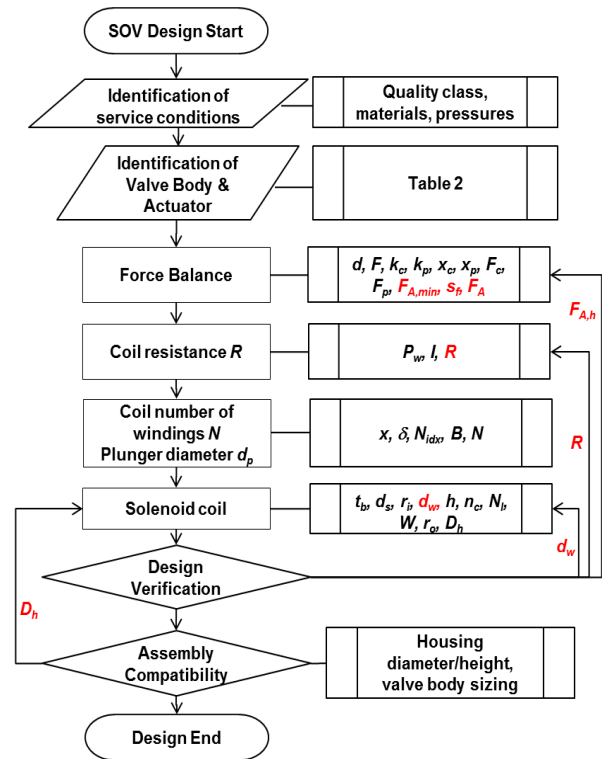


Fig. 2 Design flowchart for SOVs

$$V = IR = \frac{4\rho(r_i + r_o)NI}{d_w^2} \tag{1}$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4\rho(r_i + r_o)NI}{V}} \tag{2}$$

설계자의 경험에 의하여 선정된 d_w 값과 이 검증식에 의한 값의 비교는 코일 선 저항 ρ 과 코일 내 반경 r_i , 외반경 r_o , 총권수 N 같은 코일의 크기에 대한 설계값들을 재검토할 수 있게 한다. 설계자는 이 두 d_w 값의 차이가 크다면 d_w 를 다시 선정하여야 할 것이다.

주어진 목표 소비전력 P_w 및 사용 전압 V 으로부터 옴의 법칙(Ohm's law)에 의하여 얻어지는 코일의 저항 R 은 다음의 식 (3)에 의하여 검증될 수 있다.

$$R = R_o \times L \tag{3}$$

여기서, R_o [Ω/m]는 20 $^{\circ}C$ 의 코일온도에서 단위 길이당 코일의 저항이며, L [m]은 코일 선의 총 길이이다. R_o 는 AWG 표에서 선정된 d_w 값으로부터 구할 수 있고, L 은 솔레노이드 코일의 기하학으로부

터 얻어지는 식 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$L = n_c N_l \pi \{ (N_l - 1)(d_w + t_i) + d_b \} + N_r \pi \{ 2N_l(d_w + t_i) + d_b \} \quad (4)$$

여기서, d_b 는 코일 내직경 $2r_i$ 로 가정할 수 있는 보빈(bobbin)의 직경이며, N_r 은 코일의 잔류 층수, 즉 N/n_c 의 나머지도이다. 식 (4)의 우변의 첫째 항은 N_l 층까지의 코일 길이이고, 두 번째 항은 N_l+1 층에 대한 잔류 코일 길이이다. 이 코일 총저항 R 에 대한 검증은 소비전력의 목표값을 얻기 위한 솔레노이드 코일의 r_i , N_l , n_c 에 대한 설계값들의 적합성을 검증할 수 있게 한다.

솔레노이드 코일 내부의 온도는 밸브의 작동시간과 함께 처음에는 상승하다가 어떤 온도에서 포화된다. 이 온도 증가는 코일의 저항을 증가시켜 코일의 전류를 감소시키므로 결과적으로 솔레노이드 밸브의 흡인력 감소를 초래한다. 그러므로 설계 흡인력 F_A 와 이 온도 증가 θ 에 의한 감소된 흡인력 $F_{A,h}$ 을 비교하는 것은 설계의 적정성 관점에서 중요하다. 온도 증가에 의한 코일의 저항 상승값 R_h 은 20 °C에서의 코일 저항인 R_{20} 의 함수로서 식 (5)와 같이 구할 수 있다[7].

$$R_h = R_{20} \times \left(\frac{234.5 + T_h}{234.5 + 20} \right) \quad (5)$$

여기서, T_h [°C]는 코일의 포화온도이다. 이 포화온도는 보수적으로 설계할 경우 코일의 절연등급에서 결정되는 허용 최대온도로 가정할 수 있다. 이 증가된 저항 R_h 는 옴의 법칙에 의하여 전류를 감소시키고, 이 감소된 전류 I_h 는 식 (6) 및 식 (7)에 따라서 자속밀도 B_h 와 흡인력 $F_{A,h}$ 를 각각 감소시킨다.

$$B_h = \frac{\mu_0 I_h N}{\zeta(x + \delta)} \quad (6)$$

$$F_{A,h} = \frac{1}{2} \frac{B_h^2 \cdot S_g}{\mu_0} \quad (7)$$

이 감소된 흡인력 $F_{A,h}$ 는 코일의 최대온도 T_h 에서도 밸브를 적절하게 작동시키기 위해서 최소 흡인력 $F_{A,min}$ 보다 커야한다. 이 비교는 최소 흡인력 $F_{A,min}$ 으로부터 설계 흡인력 F_A 를 결정하는 안전계수 s_f 의 적정성을 검증하게 해준다. 안전계수는 설계

흡인력 F_A 뿐만 아니라 감소된 흡인력 $F_{A,h}$ 에게도 영향을 주므로 주어진 소비전력에서 최적의 설계 흡인력으로 설계할 수 있게 한다. 또한 이 수정된 흡인력 F_A 는 솔레노이드 밸브 몸체의 오리피스 직경 d 의 적정성 검토 및 필요시 재선정을 할 수 있는 근거를 줄 수 있다. 오리피스 직경 d 의 선정은 솔레노이드 밸브 설계의 시작점이라는 점에서 이 검증 과정은 설계의 처음부터 설계의 전체과정 검토와 검증이 이루어질 수 있는 자가 검증논리를 포함한다.

3.2 실험적 검증

앞서 기술한 설계검증 방법의 적절성을 시작품을 실제 제작하여 실험을 통하여 검토하였다. 그림 3은 제작된 시작품이며, 표 1은 설계값 및 제작된 사양을 보여주고 있다.

표 2는 앞서 기술한 설계검증 방법에 의하여 검증된 값들을 보여주고 있다. 코일 선경 d_w 와 저항 R 은 표 1의 설계값과 꽤 잘 일치하고 있다. 표 2는 설계자에 의해 선택된 d_w 는 0.16 mm와 0.14 mm 모두 적절함을 의미한다. 이 표는 또한 코일의 온도 증가가 밸브의 흡인력에 미치는 영향을 보여준다. 흡인력은 코일의 온도가 180 °C로 증가할 때 21.4 N에서 8.07 N으로 감소한다. 이 온도는 코일의 절연등급 (H중)을 감안하면 가장 보수적인 조건이다. 이 감소된 흡인력 $F_{A,h}$ 은 최소 흡인력 $F_{A,min}$ (5.36 N)보다 여전히 크다는 것을 주목할 필요가 있다. 이것은 표 1에서 선택한 안전계수 4가 최적값이 될 수 있음을 의미한다. 그림 4는 그림 2와 표 2의 방법으로 계산된 안전계수에 따른 감소된 흡인력 $F_{A,h}$ 및 최소 흡인력 $F_{A,min}$ 의 상대적 크기를 보여준다.



Fig. 3. Prototype of direct-acting solenoid valves

Table 5. Design specification of manufactured solenoid valve

Design parameters	Design Value	Prototype Spec.	Unit
Orifice size, d	4.4	←	mm
Cap spring constant, k_c	0.033	←	kgf/mm
Plunger spring constant, k_p	0.076	←	kgf/mm
Stroke, x	1.5	←	mm
Cap spring initial displacement, x_c	12.2	←	mm
Plunger spring initial displacement, x_p	16	←	mm
Min. attraction force, $F_{A,min}$	5.36	←	N
Safety factor, s_f	4	←	-
Design attraction force, F_A	21.4	24.5	N
Power consumption, P_w	20.9	←	W
Rating current, I	0.167	0.16	A
Coil resistance, R	747.6	744	Ω
Anti-remanence gap, δ	0.5	←	mm
Magnetic flux density, B	0.6051	←	T
Coil number of windings, N	7660	7678	-
Plunger diameter, d_p	13.7	13.3	mm
Cv at sizing ΔP & flow	0.08	←	-
Operation flow, Q	10.9	←	m ³ /h
Bobbin thickness, t_b	1	1	mm
Coil inner radius, r_i	7.9	7.5	mm
Bobbin diameter, d_b	15.8	15.0	mm
Coil wire diameter, d_w	0.16	0.16	mm
Max. rising temperature, T_m	180	←	°C
Temperature rise, θ_f	155	←	°C
Solenoid height, h	28.6	29.0	mm
Number of turns per layer, n_c	178.7	←	turns
Total layer of coil, N_l	42.88	←	layers
Coil width, W	11.1	11.0	mm
Coil outer radius, r_o	19.0	18.5	mm

Table 2. Design verification by theoretical calculation

Design parameters	Verified value
Coil wire diameter, d_w	0.14 mm
Coil resistance per length, R_l	0.856 Ω /m
Total coil length, L	922.8 m
Coil resistance, R	789.9 Ω
Maximum temperature, T_h	180 °C
Elevated resistance, R_h	1208.0 Ω
Reduced current, I_h	0.1026 A
Reduced flux density, B_h	0.3713 T
Reduced attraction force, $F_{A,h}$	8.07 N

이 그림에서 알 수 있듯이 최적설계 관점에서는

안전계수 3이 필요하고, 안전설계의 관점에서는 3 이상이 필요하지만, 어느 정도 더 큰 값으로 할 것인가는 여전히 설계자의 경험에 의존해야 한다.

그림 5는 작동 시간에 따른 솔레노이드 코일의 전류에 대한 실험 결과를 보여준다. 최대 전류는 약 0.16 A로서, 표 1의 설계값 0.167 A와 거의 동일하다. 코일의 전류는 그림 5에서 보는 바와 같이 코일의 온도 상승 때문에 작동시간에 따라 감소한다. 이 실험 결과에서는 코일 온도 약 143.6 °C에서 전류의 포화값이 0.107 A로 나타난다. 표 2에서 보는 바와 같이 최대 온도 180 °C에서 감소된 전류 I_h 가 0.1026 A로서 거의 동일함을 주목할 필요가 있다. 따라서 이러한 실험 검증 결과는 제시된 설계 검증 방법이 솔레노이드 밸브의 설계에 적합함을 보여준다.

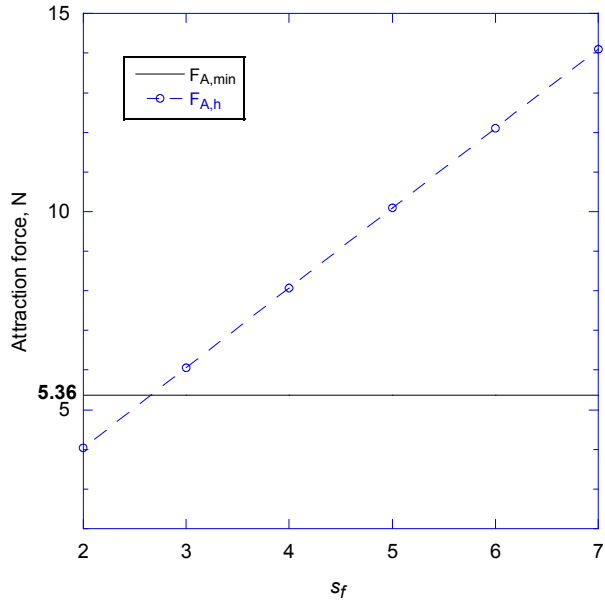


Fig. 4 Reduced attraction forces with safety factors

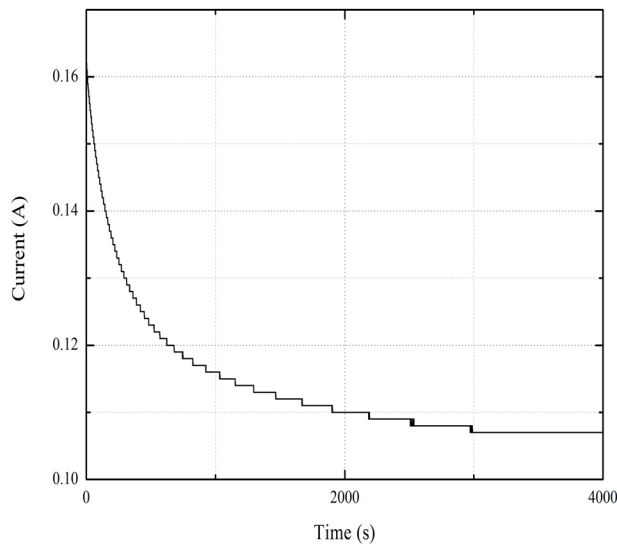


Fig. 5 Experimental current of the prototype with operation time

4. 결론 및 토의

솔레노이드 밸브를 설계하는 단순한 목표는 주어진 소비전력과 허용 온도 범위에서 최대 흡인력과 좋은 응답특성을 나타내도록 설계변수들을 결정하는 것이다. 본 해설에서는 그림 2에서 제시된 설계 방법을 포함하여 다양한 방법에 의하여 설계되는 솔레노이드 밸브의 설계 결과들을 실제 제작 및 시험에 앞서 검증하는 이론식과 실제 적용 사례들을 제시하였다. 이 검증 과정은 코일 선경, 코일 저항,

그리고 코일의 발열에 의한 감소된 흡인력의 계산을 포함한다. 특히 최소 흡인력보다 커야 하는 이 감소된 흡인력은 사용 환경의 제한이나 안전계수의 재선정을 고려해야 한다. 이것은 설계 흡인력을 결정하기 위하여 사용된 안전계수의 최적화를 이끌 수 있다. 결과적으로 재결정된 흡인력은 일반적으로 감소되므로 코일의 요구 전류를 감소시키고 밸브의 소비전력을 감소시킬 수 있는 기회를 준다. 따라서 이 검증 방법은 솔레노이드 밸브 설계에서 거의 시작점인 흡인력 계산의 최적화를 유도하므로, 솔레노이드 밸브의 최적 설계를 가능하게 한다. 이 검증 방법은 설계 결과의 신뢰성을 향상시키고, 제작과 시험에 필요로 하는 기간과 비용의 감소를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) G. Tao, H. Y. Chen, Y. Y. J, and Z. B. He, Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve, *J. Materials Processing Technology*, 129 (2002) 555 - 558.
- 2) K. A. Yehia, A design of modified solenoid valve without diaphragm, *J. Applied Sci. Research*, 3 (8) (2007) 741 - 746.
- 3) B. J. Sung, E. W. Lee, and H. E. Kim, Empirical design of an On and Off type solenoid actuator for valve operation, *KIEE Int'l Sections on Electrical Machine and Energy Conversion Systems*, 4B (2) (2004) 39 - 46.
- 4) T. Kajima and Y. Kawamura, Development of a high-speed solenoid valve-Investigation of solenoids, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 42 (1) (1995) 1-8.
- 5) N. D. Vaughan and J. B. Gamble, The modeling and simulation of a proportional solenoid valve, *ASME J. Dyn. Syst., Measur. Control*, 118 (1) (1996) 120 - 125.
- 6) C. D. Park, B. J. Lim, and K. Y. Chung, Design process of solenoid valve for nuclear power plant, *NTHAS 8, Beppu, Japan* (2012) 9-12.
- 7) A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, Jr., and S. D.

Umans, Synchronous machines, in Electric machinery, 6th ed. McGraw-Hill, New York, USA (2003) 263 - 265.

[저자 소개]



박창대(책임저자)
 E-mail : parkcdae@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7931
 1971년 12월 24일생.
 1998년 서울대학교 열공학 석사, 2004년
 류큐대학 에너지생산공학 박사. 2005년
 한국기계연구원 입사. 스마트 플랜트 기

기 개발, IT 융합 플랜트 진단/운영 기술, 원전기기 국산화
 개발, 태양열 해수담수기 개발 연구에 종사. 대한기계학회,
 한국원자력학회 등의 정회원, 공학박사.



임병주
 E-mail : bzoo77@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7322
 1977년 10월 23일생.
 2005년 한양대학교 원자력공학과 석사
 과정 졸업. 2005년 한국기계연구원 입사.
 스마트 기기 개발, IT 융합 플랜트 안전
 기기 개발, 원자력기기검증 기술개발 연구에 종사. 유체기계
 공업학회, 소음/진동공학회, 대한기계학회, 원자력학회 등의
 회원, 공학석사.



정경열
 E-mail : kychung@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7333
 1960년 생.
 1997년 해양대학교 시스템엔지니어링 박
 사. 1987년 한국기계연구원 입사. 발전플
 란트 IT 융합 기술, 해양공학 연구에 종
 사. 마린엔지니어링학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사.