

콘덴서를 이용한 선형압축기 구동 전기회로 해석

Analysis of electric circuit using capacitor for driving linear compressor

고준석*, 김효봉, 박성제, 홍용주, 염한길, 고득용

Junseok Ko*, Hyobong Kim, Seong-Je Park, Yong-Ju Hong, Hankil Yeom, Deuk-Yong Koh

Abstract: A linear compressor generates pulsating pressure and oscillating flow in a cryocooler such as Stirling cryocooler and pulse tube refrigerator. It is driven by AC power source and designed to operate at resonance of piston motion. The driving voltage level is determined by electric parameters of resistance, inductance and thrust constant of linear motor. From voltage equation on linear motor, the power factor of driving power is inherently less than 1. The phase difference between voltage and current of supplied power can be zero using capacitor and this can minimize a supply voltage level. Especially, the linear compressor of kW class requires high voltage and thus can cause a difficulty in selecting power supply unit due to limitation of voltage level. The capacitor in driving electric circuit is useful to settle this problem. In this study, the electric circuit of linear compressor is analytically investigated with assumption of mechanical resonance. The electric parameters of commercial linear motor are used in the analysis. The effects of capacitor on driving voltage level and power factor are investigated. From analytic results, it is shown that the voltage level can be minimized with using capacitor in driving electric circuit.

Key Words: linear compressor, RLC circuit, resonance

1. 서 론

선형압축기는 소형 극저온 냉동기인 스티어링 냉동기 혹은 스티어링 맥동관 냉동기에서 맥동 압력 및 왕복 유동을 생성하는 필수 구성품이다. 선형압축기에서 피스톤은 선형 모터에 인가되는 교류 전원에 의해 왕복 운동을 하며 맥동 압력을 생성한다. 특히, 피스톤 행정이 구속되어 있는 왕복동식, 스크롤 압축기와 달리 선형 압축기에서는 압축공간에서 생성되는 압력에 따라 발생하는 가스힘에 의해 피스톤 변위가 영향을 받

으며, 이에 따라 입력 전력도 크게 영향을 받는다. 피스톤 양단의 압력차로 인한 가스힘은 피스톤 진동 시스템에서 부가적인 스프링과 감쇠 효과로 나타나 가스힘이 없는 경우에 비해 공진 주파수가 증가하고, 공진 영역에서 진폭이 감소한다[1].

선형 압축기의 압축공간에서 피스톤 운동에 따른 압력 파형은 연결되는 극저온 냉동기 저온부의 형상 및 작동 조건에 따라 결정되기 때문에, 주어진 선형 압축기를 이용하여 전기에너지로부터 압축일의 전달이 효율적으로 되기 위해서는 저온부의 최적설계가 이루어져야 한다. 선형압축기에서 압축일을 많이 생성하기 위해서는 전기에너지 또한 많이 소비해야 하며 이는 공급 전압 혹은 전류의 크기가 증가함을 의미한다. 이 경우에는 전기에너지를 공급하는 전원의 전압 및 전류 제한 조건이 동시에 고려되어야 한다.

본 연구에서는 전기적 특성이 결정된 선형 압축기에 대하여 전달 가능한 압축일의 범위와 요구 전압이 높은 경우에 콘덴서를 이용하여 공급 전압을 낮추는 방법에 대하여 해석 연구를 수행하였다.

2. 선형압축기 해석

2.1. 선형압축기 해석모델

본 연구에서는 여러 방식의 선형 압축기 중에서 Fig. 1에 그려진 복동 압축식 가동 자석형 선형 압축기(double-acting moving magnet type linear compressor)를 해석 모델로 선정하였으나, 본 연구에서의 해석 방법은 가동 코일형을 포함한 다른 방식의 선형 압축기에도 적용이 가능하다.

선형 모터의 코일에 전원이 인가되면 전자기력에 의해 피스톤이 구동되고 피스톤의 운동에 따라 압축 공간에서는 P_0 의 압력 진폭을 갖는 맥동 압력이 생성된다. 이 때, 각각의 피스톤이 받는 힘에 의해 결정되는 피스톤의 운동 방정식은 식 (1)로 표현된다.

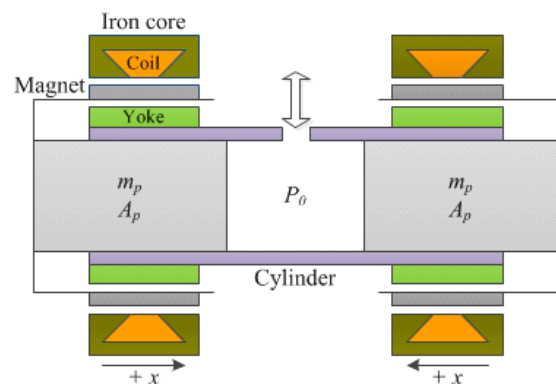


Fig. 1 Schematic diagram of linear compressor.

정 회 원 : 한국기계연구원 극한기계부품연구본부

*교신저자 : jsko@kimm.re.kr

원고접수 : 2012년 07월 17일

심사완료 : 2012년 09월 07일

게재확정 : 2012년 09월 07일

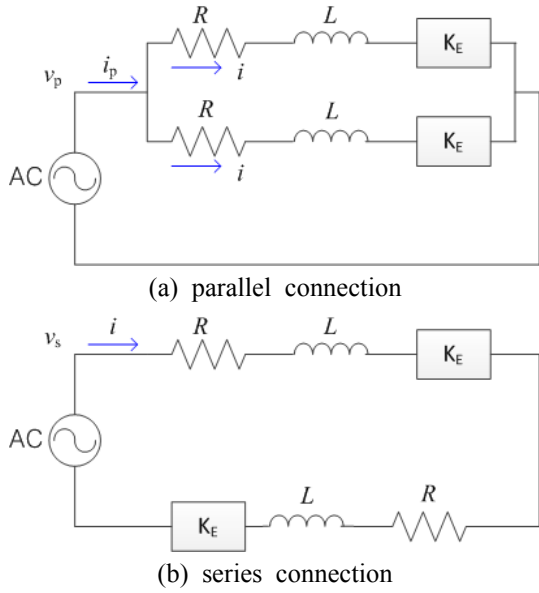


Fig. 2 Electric circuit of double acting linear compressor.

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} = -k_m x - P_0 A_p + K_E i \quad (1)$$

여기에서, x , m_p , k_m , A_p , K_E 는 각각 피스톤 변위, 피스톤 질량, 기계적 스프링 상수, 피스톤 단면적, 선형 모터의 추력 상수를 의미한다.

복동 압축식 선형압축기에는 동일한 두 개의 선형 모터가 사용되는데, 두 개의 모터 코일을 직렬과 병렬로 연결하는 방식에 따라 코일의 전압 방정식은 각각 식 (2)와 (3)으로 표현된다[2-4].

$$v_p = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

$$v_s = 2 \times \left(Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dx}{dt} \right) \quad (3)$$

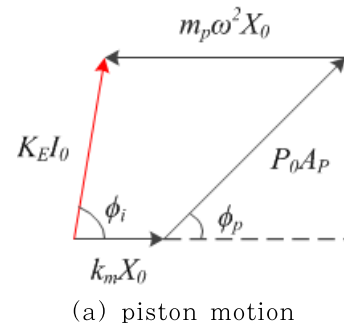
여기에서, v_s , v_p , R , L 은 각각 직렬 연결인 경우의 전압, 병렬 연결인 경우의 전압, 단일 코일의 유효 저항 및 유효 인덕턴스를 의미한다. 유효 저항 및 유효 인덕턴스는 철심 및 요크가 조립된 상태에서 발생하는 유도 전류 및 와전류의 영향을 포함한 값이며, 모터가 조립된 상태에서 LCR 측정기를 이용하여 측정이 가능하다. 두 개의 모터 코일이 직렬로 연결되는 경우에 전류는 코일의 최대 허용 전류가 제한 조건이고, 병렬로 연결되는 경우에는 단일 모터의 최대 허용 전류의 두 배의 전류가 제한 조건이다.

해석에서 사용된 단일 선형 모터의 사양은 상용화된 선형 모터(QDRIVE, 1S175M/A)의 사양을 이용하였으며, 그 값은 Table 1에 나타내었다. 해석에서는 피스톤 변위의 진폭은 스프링 및 자계 회로에 의해 제한되는 최대 변위(X_0)로 가정하였으며, 최대 전류는 선형 모터에 사용되는 코일의 선경 및 열설계에 의해 제한된다.

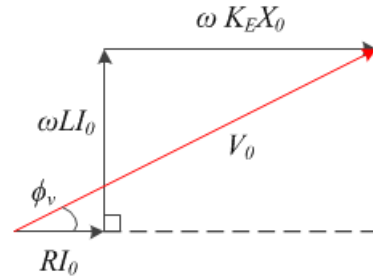
선형 압축기에서 전류, 전압, 피스톤 변위, 압력 파형은 진폭과 위상을 갖는 정현파로 표현이 가능하며 이 경우에는 위상자 해석(Phasor analysis)가 유용하다.

Table 1. Specifications of linear motor.

Effective resistance (R)	3.0 Ω
Effective inductance (L)	65 mH
Thrust constant (K_E)	65 N/A
Max. current (I_{max})	4.5 A _{rms}
Operating frequency (f)	60 Hz
Max. displacement (X_0)	7.5 mm
Moving mass (m_p)	1.2 kg
Flexure stiffness (k_m)	63 kN/m
Piston diameter (D_p)	57.15 mm



(a) piston motion



(b) electric circuit for single linear motor

Fig. 3. Phasor diagram of linear compressor.

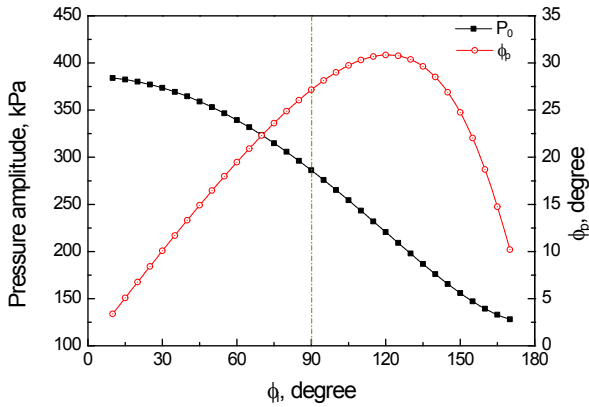
식 (4)는 전압, 전류 및 압축공간에서의 압력이 피스톤 변위에 대한 위상을 갖는 것으로 가정한 경우에 각각의 변수를 시간에 대한 함수로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} x(t) &= X_0 \cos \omega t \\ i(t) &= I_0 \cos(\omega t + \phi_i) \\ v(t) &= V_0 \cos(\omega t + \phi_v) \\ p(t) &= P_m + P_0 \cos(\omega t + \phi_p) \end{aligned} \quad (4)$$

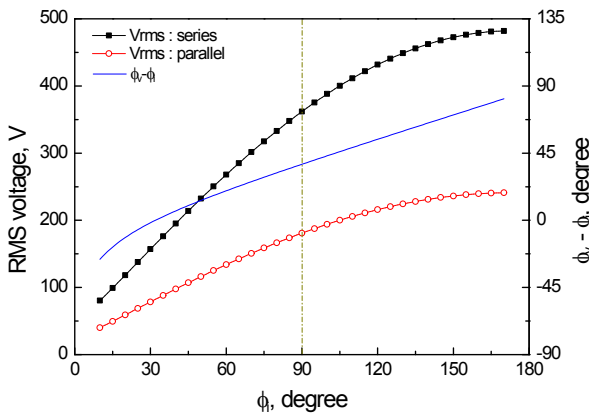
피스톤의 운동 방정식과 단일 선형 모터에 대한 전압 방정식을 위상 선도(Phasor diagram)로 표현하면 Fig. 3과 같다. 피스톤 운동 방정식 계산에서는 기계적인 감쇠 효과는 없는 것으로 가정하였으며, 피스톤 변위 진폭과 전류 진폭이 고정된 조건에서 전류와 피스톤 변위의 위상(ϕ_i)에 따라 압축 공간에서의 압력의 진폭과 위상을 계산하여 피스톤 운동에 따른 압축 일을 계산하였다. 구동 회로에 대한 전압 방정식 계산에서는 주어진 전류와 피스톤 변위 사이의 위상에 대하여 요구 구동 전압의 진폭과 위상을 계산하여 입력 전력, 저항열에 의한 손실, 모터 추력에 의한 일률 및 압축기 효율을 계산하였다.

2.2. 해석 결과

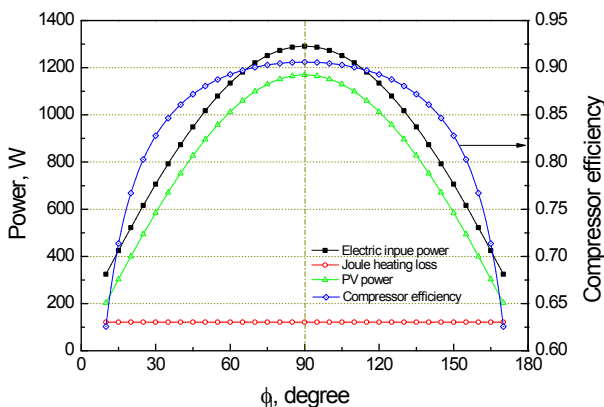
Fig. 4는 Fig. 2에 나타난 직렬 연결과 병렬 연결에 대한 전류와 피스톤 변위의 진폭이 고정된 조건에서 전류의 피스톤 변위에 대한 위상(ϕ_i) 변화에 대한 해석 결과를 보여준다. Fig. 4(a)에서 전류 위상이 증가할수록 압력 진폭은 감소하고, 압력 위상은 증가하다가 감소하는 결과가 나타난다. 전류 위상이 90°인 피스톤 공진을 만족하기 위해서는 압력의 진폭과 위상이 각각 286.2 kPa과 27.15°의 조건이 만족되어야 한다. 압력 파형 조건은 선형 압축기 후단에 연결되는



(a) amplitude and phase of pressure



(b) amplitude and phase of voltage



(c) amount of power transfer and efficiency

Fig. 4 Simulation results as phase difference between piston displacement and current.

Table 2. Analysis results at resonance.

Pressure amplitude (P_0)	286.2 kPa
Pressure phase (ϕ_p)	27.15 °
Input power (\dot{W}_{in})	1291 W
PV power (\dot{W}_{PV})	1169 W
Joule heating loss (\dot{W}_R)	122 W
Series input voltage (V_s)	361.9 V _{rms}
Parallel input voltage (V_p)	180.9 V _{rms}
Power factor (P.F.)	0.793
Efficiency (η_{comp})	0.906

냉동기 저온부의 형상 및 작동 조건에 의해 결정된다. Fig. 4(b)는 직렬 연결과 병렬 연결 시에 압축기를 구동하기 위한 입력 전압의 크기와 전압과 전류의 위상차($\phi_v - \phi_i$) 변화를 보여준다. 직렬 연결의 경우에 병렬 연결의 경우에 비해 두 배의 전압 크기가 필요하며, 전압과 전류의 위상은 전류 위상 변화 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4(c)는 입력 전력, 압축일, 저항열 손실 및 압축기 효율 변화를 보여준다. 공진 조건인 90° 전류 위상을 기준으로 입력 전력, 압축일, 압축기 효율이 대칭되는 것으로 나타났다. 전기 저항을 상수로 가정하였기 때문에 저항열 손실은 일정한 것으로 계산되었다. 이 결과에서 선형 압축기는 피스톤이 공진인 조건에서 입력전력을 최대로 소비하여 가장 좋은 효율로 최대의 압축을 생성함을 알 수 있다. 이 때, 공진 조건을 만족하기 위해서는 진폭과 위상이 각각 286.2 kPa과 27.15°인 조건을 만족하도록 냉동기 저온부의 설계 및 작동 조건 선정이 이루어져야 하는데, 본 논문에서는 이에 대한 내용은 다루지 않는다. 공진 조건에서 선형 압축기의 운전 특성을 나타내는 계산 결과를 Table 2에 나타내었다.

3. 콘덴서 적용 구동회로 해석

해석 결과로부터 선형압축기를 효율적으로 이용하기 위해서는 공진 조건이 필수적이다. 하지만, 공진 조건에서 압축일을 많이 생성하는 만큼 큰 입력 전력이 요구되고, 이는 구동 전압 혹은 전류의 크기가 크다는 것을 의미한다. 본 논문에서의 해석 모델에 대해서는 두 개의 선형 모터가 직렬로 연결된 경우에는 361.9 V_{rms}의 전압이 요구되는데, 이는 사용 가능한 전력 공급원의 종류를 제한하는 조건이 될 수 있다. 일반적으로 전력 공급원(Power supply)은 전압과 전류의 크기가 제한을 받기 때문이다. 예를 들어, 1.5 kW의 전력 공급이 가능한 Chroma 사의 60603 교류 전원 공급기의 경우 최대 전압이 300 V_{rms}로 제한되기 때문에 전력 용량은 충분함에도 불구하고 본 논문의 직렬 연결 선형압축기를 구동할 수 없게 된다. 하지만, Fig. 5와 같이 전기 구동 회로에 콘덴서를 직렬로 연결함으로써 공급 전압의 크기를 낮출 수 있다. 본 장에서는 콘덴서 용량에 변화에 따른 구동 전압 크기, 역률, 콘덴서 내전압 등을 계산하였다.

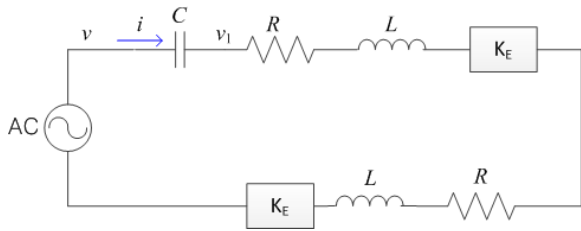
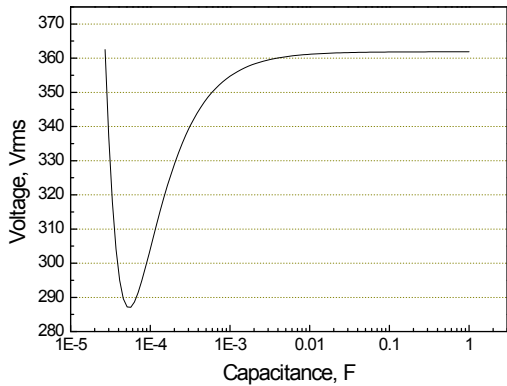
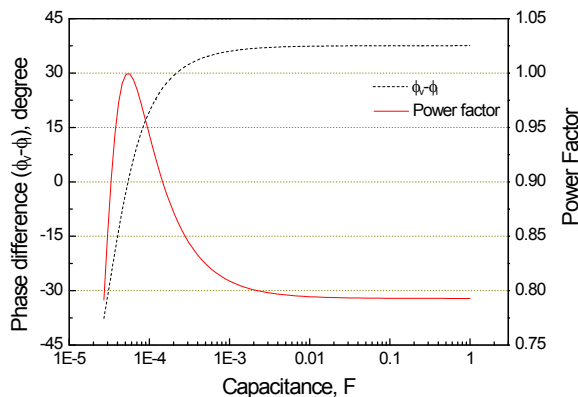


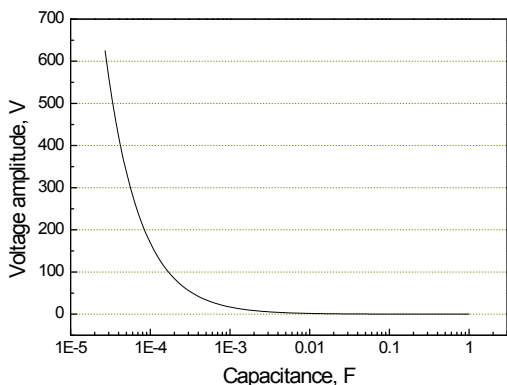
Fig. 5 Electric circuit with capacitor.



(a) power source voltage



(b) phase difference and power factor



(c) capacitor voltage

Fig. 6 Simulation results as capacitance.

콘덴서가 직렬 연결된 경우에 전압 방정식은 식 (5)와 같이 표현되고, 계산 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

$$v_s = 2 \times \left(Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dx}{dt} \right) + \frac{1}{C} \int i dt \quad (5)$$

콘덴서 용량이 54.1 μ F인 조건에서 전압의 최소값을 얻을 수 있으며 그 값은 286.9 V_{rms} 이다. 콘덴서 용량이 큰 경우에는 전압 변화가 상대적으로 완만하며 약 0.01 F 이상의 콘덴서 용량에 대해서는 콘덴서가 없는 경우와 유사한 전압 값으로 포화된다. 반대로 콘덴서 용량이 작아지는 경우에는 전압 크기가 급격히 증가하며 오히려 콘덴서가 없는 경우보다도 더 큰 전압이 요구될 수 있기 때문에 콘덴서 용량의 선정에 세심한 주의가 요구된다.

Fig. 5(b)는 전압과 전류 사이의 위상과 이로부터 계산되는 역률(Power factor)의 변화를 보여준다. 최적 콘덴서 용량 조건에서 1의 역률을 갖는 것으로 나타나며, 콘덴서 용량이 일정 수준 이상인 경우에는 콘덴서가 없는 경우의 역률값인 0.793으로 근접한다. 즉, 콘덴서가 없는 경우에는 이론적으로 1의 역률이 불가능하지만 적절한 용량의 콘덴서를 사용함으로써 공급 전원의 역률을 1에 맞추어 전압 크기를 낮출 수 있음을 의미한다.

Fig. 5(c)는 콘덴서 양단에 걸리는 전압 변화를 보여준다. 이 결과는 콘덴서 선정 시에 용량 외에 내전압 사양을 결정하는 데 필요하다. 최적 콘덴서 용량에서 콘덴서 양단에 걸리는 전압의 진폭은 311.9 V이며, 이 값 이상의 내전압 특성을 갖는 콘덴서가 사용되어야 함을 의미한다.

4. 결 론

피스톤 변위와 공급 전류 사이의 위상 변수에 따른 선형압축기 전기 구동 회로 해석을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 선형압축기는 전류와 피스톤의 위상이 90°이 공진 조건에서 입력 전력, 압축일, 압축 효율이 최적화 되는 것을 해석 결과로부터 확인하였다.
- (2) 선형압축기에 사용되는 선형 모터의 사양으로부터 생성할 수 있는 최대 압축일을 예측하는 해석 방법을 제시하였다.
- (3) 선형압축기의 공진 운전 전에 필요한 구동 전압의 크기가 큰 경우에 구동 회로에 콘덴서를 연결하여 역률을 1로 맞추어 구동 전압의 크기를 낮출 수 있음을 확인하였고, 필요한 콘덴서의 용량 및 내전압 사양을 계산으로부터 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업으로 진행되고 있는 차세대 극저온 냉동기 기술개발 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] M.K. Heun, S.A. Collins, D.L. Johnson, R.G. Ross Jr., "Investigation of gas effects on cryocooler resonance

characteristics", Cryocooler 9, pp. 421-430, 1997.

- [2] N. Bianchi, "Electrical Machine Analysis using Finite Elements", Taylor & Francis, 2005.
- [3] J.F. Gieras, Z.J. Piech, B.Z. Tomczuk, "Linear Synchronous Motors", Taylor & Francis, 2012.
- [4] I. Boldea and S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators", Cambridge University Press, 1997.

저 자 소 개



고준석(高準錫)

1977년 6월 29일생, 1999년 KAIST 기계공학과 졸업, 2002년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 선임연구원.



김효봉(金孝烽)

1960년 4월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2002년 충남대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2012년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 선임기술원.



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



홍용주(洪溶柱)

1968년 3월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2010년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



염한길(廉漢吉)

1966년 9월 3일생, 1990년 인하대 공대 항공공학과 졸업, 1992년 동 대학원 항공공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



고득용(高得龍)

1959년 2월 12일생, 1983년 한양대 공대 기계공학과 졸업, 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2007년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.