

피벗식 패드 추력베어링의 성능 비교

이 경 우* · 김 중 수**

Comparison of the Performance of Pivoted Pad Thrust Bearings

K. W. Lee* · J. S. Kim**

Key words : Line pivot(라인피벗), Point pivot(포인트피벗) Pivot position(피벗위치), Running characteristics(운전특성인자)

Abstract

In this paper, the lubrication performances of line pivoted pad thrust bearing and point pivoted pad thrust bearing are studied by a numerical analysis. The running characteristic parameters such as nondimensional load carrying capacity, nondimensional friction power loss, nondimensional flow rate and film thickness ratios are calculated for various circumferential pivot positions. The results provide a useful data for the selection of pivot position in a pivoted pad thrust bearing.

1. 서 론

추력베어링은 선박의 추진축계, 증기 및 가스터빈, 원심펌프 등과 같이 추력을 발생하거나 추력 그 자체를 목적으로 하는 회전기계에서 이 추력을 지지하거나 전달해 주기 위해서 사용되는 주요 기계요소이다.

추력베어링에는 많은 종류가 있지만, 저속, 소형 회전기계외에는 주로, 유체윤활베어링이 사용되고 있고, 유체윤활베어링은 유막을 형성하는 방식에 따라 고정식 패드 추력베어링과 피벗식 패드

추력베어링으로 나뉜다.

피벗식 패드 추력베어링은 피벗을 중심으로 패드가 자유로이 운동을 하여 운전조건의 변화에 따라 유막을 형성하므로 가혹한 운전조건에서도 그 윤활성능이 안정적이어서, 현대 산업기계의 고속화, 고출력화에 따라 그 사용이 증대되고 있는 추세이다.

피벗식 패드 추력베어링은 톨딩 패드 추력베어링으로 주로 불리며, 그 피벗의 형상에 따라 라인 피벗식 추력베어링과 포인트 피벗식 추력베어링으로 나눌수 있다.

* 한국선급 (원고접수일 : 97년 11월)

** 한국해양대학교 기계냉동자동차공학부

포인트 피봇식 추력베어링은 패드가 한점을 중심으로 자유로이 기울어질 수 있는 형태이며, 라인 피봇식 추력베어링은 반경방향으로의 한 라인을 중심으로 패드가 기울어지는 형식이다.

Fig. 1은 포인트 피봇식 추력베어링과 라인 피봇식 추력베어링의 개략적인 형상을 나타낸 것으로 그 차이점을 보여주는 것이다.

포인트 피봇식 추력베어링은 성능이 뛰어난 반면에 그 설계와 제작이 어려워 고가이므로, 발전소의 터빈기관, 고출력 선박용 축계등과 같이 아주 가혹한 운전조건에서 주로 사용되고, 일반적인 증소형 회전기계나 증소형 선박의 축계에서는 제작이 쉽고, 저가인 라인 피봇식 추력베어링이 주로 사용되고 있는 실정이다.

현재까지의 연구결과들을 살펴보면, 포인트 피봇식 추력베어링에 대해서는 여러 가지 경계조건과 운전조건에 따른 성능해석이 이뤄져 있으나, 라인 피봇식 추력베어링에 대해서는 그 성능해석의 결과가 보고된 예가 미미하다[1-6].

Etsion[7]이 포인트 피봇식과 라인 피봇식 추력베어링의 성능을 동시에 해석한 바가 있지만, 계측이 어려운 틸팅각을 피봇위치에 대한 변수로 제시한 점과 피봇위치를 구하는 방식에 문제가 있어 실제의 베어링 설계자들에게 직접적인 도움을 줄 수는 없다.

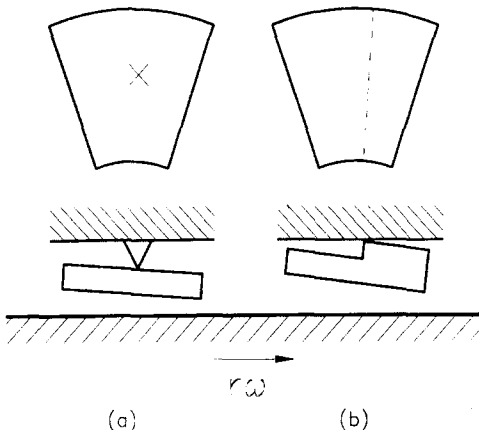


Fig. 1 Illustrations of a point pivoted and a line pivoted pad thrust bearing

(a) point pivoted, (b) line pivoted

Gardner[8]는 포인트 피봇식과 라인 피봇식 추력베어링에 대하여 피봇위치에 따른 성능변화를 실험적으로 연구한 바가 있으나, 한정된 피봇위치에 대한 연구결과여서, 실제의 설계에 적용하기에는 무리가 있다.

그러므로, 본 연구에서는 라인 피봇식 추력베어링의 성능해석을 수행하고 그 결과를 라인 피봇식 추력베어링의 설계자료로 제공하기 위하여, 틸팅패드 추력베어링의 가장 중요한 설계인자인 피봇위치에 따른 라인 피봇식 추력베어링의 운전특성인자들의 변화를 알아보고, 이러한 결과를 동일한 형상의 패드를 가지는 포인트 피봇식 추력베어링의 피봇위치에 따른 운전특성인자들의 변화와 비교한다.

2. 기본방정식

본 연구에서 사용되는 피봇식 패드의 개략적인 형상, 유막의 형상 그리고 패드의 좌표계는 Fig. 2와 같다. 피봇식 패드 추력베어링의 유막에서 발생하는 압력을 지배하는 레이놀즈방정식과 포인트 피봇식 추력베어링과 라인 피봇식 추력베어링에서 유막의 두께를 구하는 식은 식(1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r}(h^3 r \frac{\partial p}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta}) = 6\mu r \omega \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (1)$$

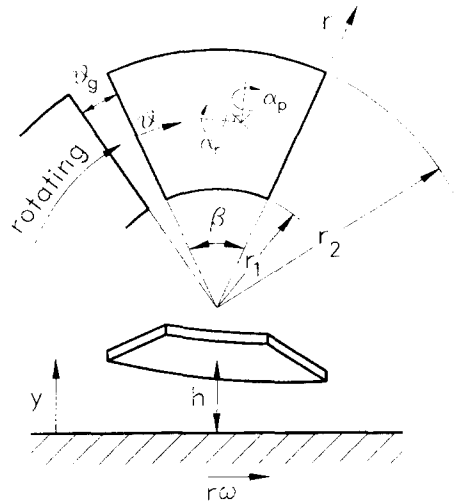


Fig. 2 Geometry and coordinate system of a pad

포인트 피봇식 추력베어링에 대한 유막두께 :

$$h = h_p + r \sin(\theta_p - \theta) \alpha_p + \{r_p - r \cos(\theta_p - \theta)\} \alpha_r \quad (2)$$

라인 피봇식 추력베어링에 대한 유막두께:

$$h = h_p + r \sin(\theta_p - \theta) \alpha_p \quad (3)$$

여기서, h_p 는 피봇위치에서의 유막두께를 나타내고 α_p, α_r 은 각각 패드의 피칭 및 롤링각을 나타낸다. 그리고 μ 는 윤활유의 점도이고 ω 는 회전원판의 각속도이다. 그리고 틸팅 패드 추력베어링의 운전특성인자중에서 마찰동력손실과 윤활유량을 구하기 위해서는 유막 내에서의 속도분포를 알아야 하는데, 유막내의 속도분포는 식(4), (5)와 같다.

$$v_\theta = (h - y) \left(\frac{r\omega}{h} - \frac{y}{2\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) \quad (4)$$

$$v_r = y(y - h) \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

여기서 y 는 유막두께 방향으로의 좌표이고, h 는 임의의 위치에서의 유막두께이다. 틸팅패드 추력베어링의 유막에서 발생하는 유막압력의 지배방정식인 레이놀즈 방정식에서 유막압력을 구하기 위해서는 패드의 가장자리에서의 압력경계조건이 필요하며, 본 연구에서는 패드의 가장자리에서의 압력이 대기압이 되도록, 다음과 같이 정의하였다.

$$p(r_1, \theta) = p(r_2, \theta) = p(r, 0) = p(r, \beta) = 0 \quad (6)$$

3. 운전특성인자

기본방정식들과 경계조건이 주어지면 레이놀즈 방정식으로부터 유막내에서 발생하는 유막압력을 계산할 수 있으며, 유막압력이 구해지면 틸팅패드 추력베어링의 식(7)~(11)과 같은 여러 가지 운전특성인자들을 구할 수 있다.

무차원 부하용량 :

$$\overline{W} = \frac{n_p h_0^2}{\mu r_1^2 \omega A} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r d\theta dr \quad (7)$$

무차원 마찰동력손실 :

$$\overline{T_f} = \frac{n_p h_0}{h r_1^2 \omega A} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta \mu \left[\frac{\partial v_\theta}{\partial y} \right]_{y=0} r^2 d\theta dr \quad (8)$$

무차원 윤활유량 :

$$\overline{Q} = \frac{n_p}{h_0 \omega A} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta [v_\theta]_{\theta=0} dy dr \quad (8)$$

원주방향의 무차원 압력중심 :

$$\Theta_p = \frac{\theta_p}{\beta} \\ \theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{\int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r \sin \theta dr d\theta}{\int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r \cos \theta dr d\theta} \right) \quad (10)$$

반경방향 무차원 압력중심:

$$R_p = \frac{r_p - r_1}{r_2 - r_1} \\ r_p = \frac{\sqrt{\left(\int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r^2 \sin \theta dr d\theta \right)^2 + \left(\int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r^2 \cos \theta dr d\theta \right)^2}}{\int_{r_1}^{r_2} \int_0^\beta p r d\theta dr} \quad (11)$$

여기서, $A = \pi (r_2^2 - r_1^2)$ 이고, n_p 는 패드의 개수이며, h_0 는 최소유막두께이다. 윤활유량은 각 패드의 입구에서 공급되는 윤활유량이며, 압력중심은 유막압력에 의해서 발생하는 모멘트의 합이 0 이 되는 곳으로 틸팅 패드 추력베어링에서는 이곳이 피봇위치가 된다.

4. 수치해석

본 연구에서는 패드의 외반경과 내반경의 비가 1.7077이고, 패드각이 30°, 패드의 수가 10개인 베어링을 선정하였다. 이러한 형상을 가지는 라인 피봇식 추력베어링에 대해서 광범위한 피봇위치에 대한 설계자료를 얻기위하여 무차원 원주방향 피봇위치를 0.53부터 0.65까지 변화시켜가며 여러 가지 운전특성인자들을 조사하였다.

그리고, 동일한 제원의 포인트 피봇식 추력베어링을 선정하여, 라인 피봇식 추력베어링과 동일한 무차원 원주방향 피봇위치에 대해 운전특성인자를 조사하였으며, 이 결과를 라인 피봇식 추력베어링의 결과와 비교하여 보았다.

이때, 포인트 피봇식 추력베어링은 반경방향의

피벗위치에 따라 운전특성인자의 변화가 크게 되기 때문에 하중지지능력이 최대가 되는 반경방향 피벗위치를 선정하여 비교하였다. 본 연구에서 사용한 패드의 형상조건에서는 무차원 반경방향 피벗위치가 0.52일 때 무차원 부하용량이 전체적으로 가장 크게 됨을 확인하였다.

수치해석은 유한차분법으로 행하였으며 이를 위하여 패드를 반경방향과 원주방향으로 각각 20 등분하여 수행하였다.

주어진 피벗위치에 대한 수렴조건은 다음과 같이 정의하였으며, 주어진 피벗위치를 만족하는 틸팅각을 구하는데는 뉴턴랩슨법을 사용하였다.

포인트 피벗식 추력베어링:

$$\sqrt{(R_p - R_p^c)^2 + (\Theta_p - \Theta_p^c)^2} < 10^{-5} \quad (12)$$

라인 피벗식 추력베어링:

$$\sqrt{(\Theta_p - \Theta_p^c)^2} < 10^{-5} \quad (12)$$

여기서, 상첨자 c는 식(10)과 식(11)에 의해 계산된 결과를 말한다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 3은 본 논문에서 선정한 라인 피벗식 추력베어링 및 포인트 피벗식 추력베어링의 무차원 원주방향 피벗위치, Θ_p 에 따른 무차원 부하용량의 변화를 나타낸 것으로서, 라인 피벗식 추력베어링

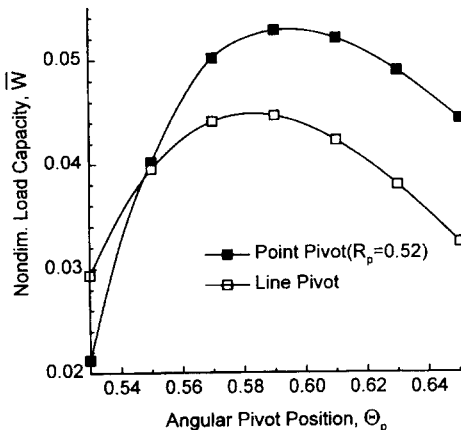


Fig. 3 Nondimensional load carrying capacity

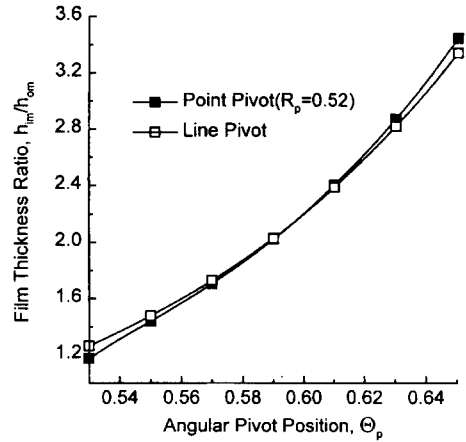


Fig. 4 Film thickness ratio at mean radius

은 $\Theta_p=0.58$, 포인트 피벗식 추력베어링은 $\Theta_p=0.59$ 일 때 무차원 부하용량이 최대가 되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 입구부와 출구부의 유막두께비가 2.0 정도일 때 베어링의 무차원 부하용량이 최대가 되는 것으로 알려져 있는데, Fig. 3과 Fig. 4를 살펴보면 본 논문에서 선정한 제원의 베어링에서도 입구부와 출구부의 유막두께비가 2.0정도일 때 무차원 부하용량이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 그리고 $\Theta_p=0.55$ 이하에서는 라인 피벗식 추력베어링의 무차원 부하용량이 포인트 피벗식 추력베어링보다 크지만, $\Theta_p=0.55$ 이상에서는 포인트 피벗식 추력베어링의 무차원 부하용량이 더 커지는

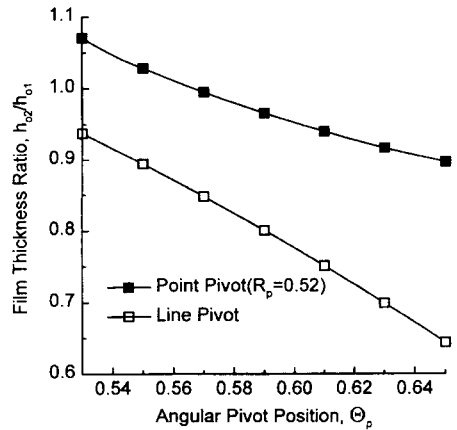


Fig. 5 Film thickness ratio at trailing edge of pad

것을 알 수 있는데, 이것은 평균반경에서 출구측 유막두께에 대한 입구측의 유막두께비를 나타낸 Fig. 4에서 알 수 있듯이 Θ_p 가 0.55이하일 때에는 입구부와 출구부의 유막두께비가 라인 피벗식이 포인트 피벗식 보다 약간 더 크기 때문이다. Fig. 5는 출구측에서 내반경에 대한 외반경에서의 유막 두께비를 보여주는 것인데, Θ_p 가 0.55이하에서는 포인트 피벗식 추력베어링에서 최소유막두께가 패드의 출구측 내반경에서 발생하게 되므로, 윤활 면적이 더 큰 외반경 쪽에서 유막압력이 작게 발생하여 부하용량을 작게 됨을 알 수 있다. 그러므로 출구측의 유막두께가 반경방향으로 거의 평형을 유지하게 되는 경우에는 출구측 외반경에서 최소유막을 발생시키는 라인 피벗식 추력베어링의 무차원 부하용량이 포인트 피벗식 추력베어링의 무차원 부하용량 보다 더 커지게 되는 것이다.

Fig. 6은 무차원 마찰동력손실을 나타낸 것으로서 모든 피벗위치에 대해서 포인트 피벗식 추력베어링이 라인 피벗식 추력베어링의 무차원 마찰동력손실보다 더 크다는 것을 알 수 있고, 또, 피벗 위치가 출구부쪽으로 이동할수록 무차원 마찰동력 손실이 줄어드는 것을 알 수 있는데, 이는 무차원 마찰동력손실의 크기는 유막두께에 반비례하는데, Fig. 4에서처럼 피벗 위치가 출구부쪽으로 이동할수록 유막두께비가 커짐으로써 전체적인 유막두께가 커지게 됨에 따라 이러한 현상이 생기는 것이다.

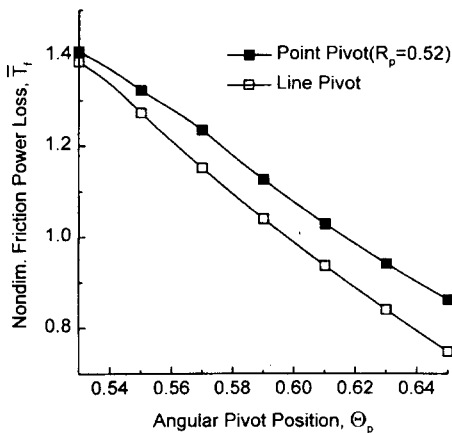


Fig. 6 Nondimensional friction power loss

Fig. 7은 무차원 윤활유량을 나타낸 것으로서 식(9)에서 설명한 바와 같이 패드의 입구부에서 새로이 공급되는 윤활유량이어서 앞서의 무차원 마찰동력손실과는 반대로 패드 입구부의 유막두께의 크기와 비례하게 된다. 그리고, 모든 피벗위치에서 라인 피벗식 추력베어링이 포인트 피벗식 추력베어링의 무차원 윤활유량보다 더 큰 것을 알 수 있고, 또 원주방향 피벗 위치가 출구부쪽으로 이동할수록 윤활유량이 점점 더 커지는 것을 알 수 있는데, 이것 또한 피벗 위치가 출구부쪽으로 이동할수록 유막두께비가 더 커져서 입구부의 유막두께가 점점 더 커지기 때문이다.

라인 피벗식 추력베어링은 그 형태상의 특징 때문에 출구측 외반경에서 최소유막이 발생하게 되고, 피벗라인이 입구부쪽으로 이동할수록 피벗라인과 출구측 외반경과의 거리가 멀어지므로, 피벗라인이 입구부쪽으로 이동할수록 최소유막두께의 크기가 틸팅각에 더 많은 영향을 받게 되는데, Fig. 5를 보면 피벗라인이 입구부쪽으로 이동할수록 출구부에서의 외반경과 내반경의 유막두께비가 오히려 1에 가깝게 되는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 피벗라인이 입구부쪽으로 이동할수록 패드가 점점 더 평형을 이루면서 틸팅 각 자체가 점점 더 작아지기 때문에 이러한 현상이 생기는 것이다.

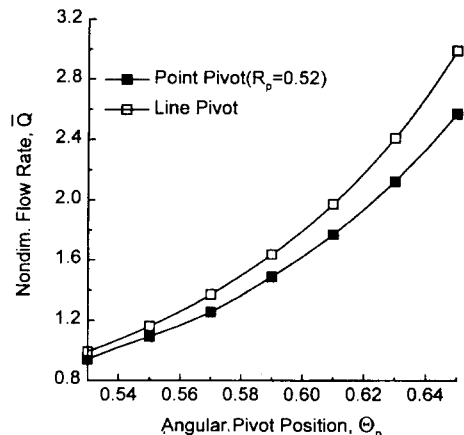


Fig. 7 Nondimensional lubricating flow rate

6. 결 론

본 연구에서는 선정된 베어링 제원을 가지는 라인 피봇식 추력베어링의 성능해석을 수행하고, 그 결과를 동일한 제원을 가지는 포인트 피봇식 추력베어링의 성능을 해석하여 얻은 결과와 비교해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 논문에서 선정된 제원의 패드를 가지는 라인 피봇식 추력베어링에서는 $\theta_p = 0.58$, 포인트 피봇식 추력베어링에서는 $\theta_p = 0.59$ 일 때 무차원 부하용량이 최대가 되는 것을 알 수 있었다.

(2) 전체적으로 포인트 피봇식 추력베어링의 무차원 부하용량이 라인 피봇식 추력베어링의 무차원 부하용량보다 더 크지만, 원주방향 피봇위치가 패드중앙부에 위치할 때에는 포인트 피봇식 추력베어링의 반경방향 피봇위치에 따라서는 라인 피봇식 추력베어링의 무차원 부하용량이 더 커지는 것을 알 수 있었다.

(3) 무차원 마찰동력손실은 모든 피봇위치에서 포인트 피봇식일 때가 라인 피봇식일 때보다 크다.

(4) 무차원 윤활유량은 모든 피봇위치에서 라인 피봇식일 때가 포인트 피봇식일 때보다 더 크다.

(5) 본 논문에서는 일정한 형상을 가지는 라인 피봇식 추력베어링에 대해 광범위한 피봇위치에 대하여 성능해석을 수행하여 설계자료로서 제공할 수 있었으며, 동일한 형상에 대하여 포인트 피봇식 추력베어링의 성능해석을 통하여 두 피봇형식에 따른 성능을 비교할 수 있었다. 본 논문에서 얻어진 설계자료들을 활용한다면, 사용목적에 좀 더 적합한 틸팅 패드 추력베어링을 설계할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. Hashimoto, H., Wada, S. and Yoshida, T., "Pressure Boundary Conditions of High Speed Thrust Bearings", JSME Inter. Journal, Series III, Vol.32, pp.269-280, 1989

2. Rodkiewicz, C. M., Kim, K. W. and Kennedy, J. S., "On the Signification of the Inlet Pressure Build-up in the Design of Tilting-Pad Bearings", Trans. ASME, J. of Tribology, Vol.112, pp.17-22, 1990

3. Hashimoto, H., "Performance Characteristics Analysis of Sector-Shaped Pad Thrust Bearings in Turbulent Inertia Flow Regime Under Three types of Lubrication Conditions", Trans. ASME J. of Tribology, Vol.112, pp.477-485, 1990

4. 김종수, 김경용, "부채꼴형 추력베어링의 설계에 있어서 선단압력의 영향", 한국윤활학회지, 제10권, 제4호, pp.33-42, 1994

5. 김종수, "틸팅 패드 추력베어링의 동특성 해석", 한국윤활학회지, 제13권, 제3호, pp.27-38, 1997

6. 이경우, 김종수, "선단압력이 틸팅패드 추력베어링의 운전특성에 미치는 영향", 한국박용기관학회 97년도 춘계학술대회 초록집, pp36-41, 1997

7. Etsion, I., "Design Charts for Arbitrarily Pivoted, Liquid-Lubricated, Flat-Sector-Pad Thrust Bearing", Trans. ASME J. of Lub. Tech. Vol.100, pp.279-286, 1978

8. Gardner, W. W., "Tilting Pad Thrust Bearing Tests - influence of Pivot Location", Trans. ASME J. of Tribology, Vol.110, pp.609-613, 1988

저 자 소 개



이경우(李京祐)

1972년 3월생. 1996년 2월 한국해양대학교 기계공학과 졸업. 1997년 3월~현재 동대학원 석사과정. 1996년 3월~현재 한국선급.



김종수(金鍾濤)

1962년 10월생. 1985년 2월 부산대학교 기계설계학과 졸업. 1987년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1991년 8월 동대학원 졸업(박사). 1991년 9월~현재 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부 부교수.