

옵셋 스트립 흰의 흰피치가 고 Prandtl 유체 열전달 특성에 미치는 영향

강 덕 종* · 양 대 일** · 전 승 환*** · 정 형 호****

A Study on the Effect of Fin Pitch of Offset Strip Fin on Heat Transfer of High Prandtl Fluid

D-J Kang* · D-I Yang** · S-H Jun*** · H-H Jung****

Key words : Offset strip fin(옵셋 스트립 흰), Oil flow(오일유동), Heat Transfer Coefficients (대류열전달계수), Separated Bubble(박리된 버블)

Abstract

In the present study, heat transfer characteristics of oil flow over offset strip fins were predicted by the numerical methods. Oil flow in the plate-fin passage was idealized by 2 dimensions. The flow patterns and heat transfer characteristics were predicted in details. Numerical results shows that the average convective heat transfer coefficients are almost independent on the rows of fins and affected by fin pitches. At the rear face of fin, there exists minimum point of heat transfer coefficients where stream are separated from the fin surfaces. The convective heat transfer coefficients were effected by separation bubbles which appeared at the wake region of offset strip fins.

기호설명

p	:압력 [kN/m^2]
q_x''	:열유속 [W/m^2]
t	:흰의 두께 [m]
T	:온도 [$^\circ\text{C}$]
u, v	:x, y방향의 속도 [m/s]
W	:흰의 폭 [m]
x, y	:직교좌표

h	:대류열전달계수 [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]
K	:열전도도 [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]
L	:흰피치 [m]
Nu_{ui}	:국소 Nusselt 수 [-]
Nu	:평균 Nusselt 수 [-]

* 한국해양대학교 대학원

** (주)일신랩

*** 한국해양대학교 운항시스템공학부

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

그리스 문자

a	: 열확산계수 [m^2/s]
v	: 동점성 계수 [m^2/s]
ρ	: 유체의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

공학분야에서 오일은 디젤기관의 연료유로, 상대운동기구의 마찰면의 내마모를 위해서 그리고 밀봉과 방열을 위한 매체로 이용되고 있다. 일반 유체와는 달리 오일의 점도는 아주 크고 열전달도, 비열, 밀도 등 다른 물성치는 물과 비슷한 크기를 갖고 있다. 오일의 점도가 다른 일반 유체에 비해 상대적으로 크기 때문에 에너지 확산에 비해 운동량확산이 지배적이며 온도 경계층 두께는 속도 경계층 두께에 비해 아주 적으며 속도 경계층의 발달 정도가 온도 경계층 발달보다 훨씬 빠르게 된다.

그리고 오일의 점도는 온도에 따라 크게 변하는 특성을 갖고 있어, 오일을 수송할 때에는 오일을 가열하고 유동성을 좋게 하여 펌프동력비용을 적게 한다. 또한 오일은 고온의 환경에 오랜 시간 동안 노출되면 열화 현상에 의해 오일 본연의 기능을 발휘하지 못하므로, 오일을 냉각하여야 한다. 오일을 가열하는 오일히터는 최근 셀 앤 플레이트 형식을 사용하고 있으며 가열 매체로는 고압증기를 사용하기도 한다. 고압증기로 가열하는 셀 앤 플레이트 오일히터에서 증기 측은 응축잠열을 이용하므로 열용량률이 무한대이며, 오일측의 열저항이 전체 열저항의 대부분을 차지한다. 그러므로 오일히터의 성능을 향상시키기 위해서는 오일측 유동의 열전달과 압력강하 특성이 중요하다. 오일측 열저항을 줄이기 위한 기구들은 많이 개발되어 있다. 그중 본 연구는 옵셋 스트립 흰으로 구성된 유로에서 열전달과 압력강하 특성을 대상으로 하였다.

본 연구에서 대상이 되는 오일히터는 실제 사용되는 것이며, 옵셋 스트립 흰의 형상은 Fig. 1과 같다. 프레스로 흰 소재를 절단 절곡하여, 위와 아래의 평편한 판 사이에 흰을 용접시켜 제작한다. 옵셋 스트립 흰으로 열전달 면적이 증가하고, 옵셋 스트립 흰에 의해 유동이 교란되어 열전달을 촉진

시키고 사용유체가 잘 섞이도록 한다. 보통의 경우에는 사용유체가 흰을 따라 흐르도록 되어 있다.

옵셋 스트립 흰에 대한 연구로는 Kays와 London^[1]과 Wieting^[2]은 실험을, Patankar^[3]는 수치해석적인 방법을 이용하였다.

Suzuki 등^[4]은 폐열회수를 목적으로 사용되는 옵셋 스트립 흰을 2차원으로 가정하여 혼합대류 영역의 열전달 특성을 연구하였다. 그리고 Suzuki 등은 옵셋 스트립 흰의 흰파치가 열전달에 큰 영향을 준다고 하였다. Bergles^[5]는 옵셋 스트립 흰에서 상류에 있는 흰의 하류에서 발생하는 후류가 하류 흰의 열전달 계수를 감소시킨다고 하였으며 이 효과는 약 10%정도라 발표하였다. DeJong 등^[6]은 옵셋 스트립 흰에 대해서 실험과 수치해석을 수행하여 3차원 효과는 레이놀즈수 1300 이상에서 중요하다고 하였다. Manglik과 Bergles^[7]는 열전달 계수와 마찰인자를 실험에 의해 구하였으며 기존 상관식과 비교하였다.

옵셋 스트립 흰에 대한 연구에는 공기, 물과 같은 저점도 유체에 국한된 것이며, 오일과 같은 고점성 유체에 대해서는 거의 이루어져 있지 않다. 그리고 유동을 가로질러 놓여 있는 옵셋 스트립 흰에 대한 연구 결과는 거의 찾아 볼 수 없다. 본 연구에서는 유동방향에 가로질러 놓여 있는 옵셋 스트립 흰의 중심단면에서 유동을 2차원으로 가정하여 고점성 유체의 유동특성과 열전달 특성을 수치적으로 해석하였으며 오일 입구부 부분에서 흰파치 변화에 의한 열전달 특성과 압력강하 특성을 예측하였다.

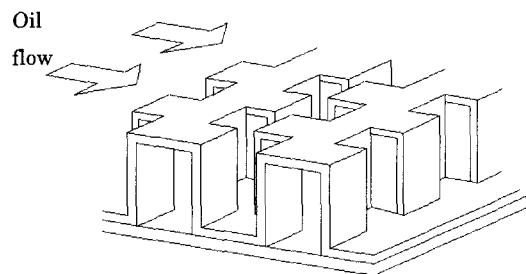


Fig. 1 Configuration of offset strip fin and oil flow.

2. 01 론

2. 1 해석모델

본 연구에서 해석하고자 하는 옵셋 스트립 흰의 단면에 대한 2차원의 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

점성이 매우 큰 오일이 주기적으로 일정한 간격을 갖는 수직한 흰에 대해 직교유동을 하고 계산영역은 절반에 해당하는 얇은 수직 흰을 6개로 잡아 직사각형 ABCD로 설정하였다. 그럼에서 t 는 수직 흰의 두께, W 는 수직 흰의 폭, L 은 수직 흰 사이의 간격, y' 은 대칭면에서 흰 방향을 나타낸다.

오일은 점성이 매우 커서 레이놀즈수는 매우 작다고 볼 수 있으므로 층류로 가정하여 해석하였다.

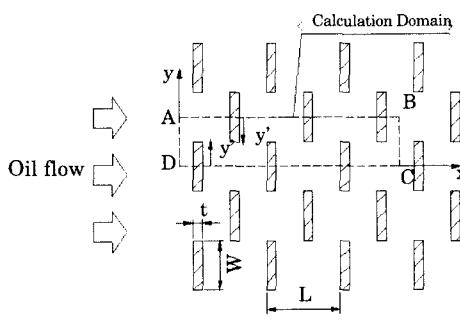


Fig. 2 Schematic diagram of a transverse fin array, coordinate and geometric data.

2. 2 지배방정식 및 경계조건

옵셋 스트립 흰에서의 오일유동은 비압축성, 층류로 가정하였다. 점성소산을 무시하면 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

모델에 대한 입력조건 및 경계조건들은 Table 1에 나타내었다.

2. 3 열전달계수

넷셀수는 Fourier법칙과 Newton의 냉각법칙을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$h = \frac{q''}{T_s - T_m}, q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h l}{k} \quad (6)$$

Table 1 Boundary conditions.

section	boundary conditions	remark
D-A	$u = u_{in}, v = 0, T = T_{in}$	inlet condition
A-B	$\frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=W} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} \Big _{y=W} = 0$	symmetric condition
B-C	$\frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=3L} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} \Big _{x=3L} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} \Big _{x=3L} = 0$	Neumann condition
C-D	$\frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=0} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} \Big _{y=0} = 0$	symmetric condition
fin	$T = 167^\circ\text{C}$	constant temperature

식(6)에서 특성길이 l 은 유동특성을 나타내는 등가길이로 본 연구에서는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$l = \frac{\text{자유유동체적}}{\text{접수면적}} \approx \frac{L}{2} - 1.5 t \quad (7)$$

유체의 속도와 온도는 단면을 통과하는 평균속도 u_m 과 평균온도 T_m 을 사용하였다. 넷셀수는 l 을 특성길이로 하여 식(6)과 같이 정의하였다.

3. 계산결과 및 검토

3.1 유선 및 압력강하

유속은 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0m/s까지 7가지 경우에 대하여 계산했으며, 저속에서는 흰 좌우로 대칭적인 유선이 형성되었으나 유속이 증가함에 따라 대칭의 형상은 사라지고 흰 후면에서의 후류의 영향이 강하게 나타났다. 흰피치에 따른 유동특성은 흰피치비가 작아질수록 흰 후면에서의 후류의 영향은 비교적 저속에서 발견되었다. 흰피치비가 5일 경우에는 유속이 0.1m/s에서 후류가 생성되기 시작했으며, 흰피치비가 3.6일 때에는 0.2m/s에서 흰피치비가 2.5에서는 0.5m/s에서 후류가 나타났다.

Fig. 3은 유속이 0.2m/s일 때의 유선을 흰피치비에 따라 나타낸 그림이다. 흰피치비가 2.5에서는 후류의 영향을 찾아볼 수 없으며, 3.6보다 5에서 후류의 영향이 더 강하게 나타남을 알 수 있다.

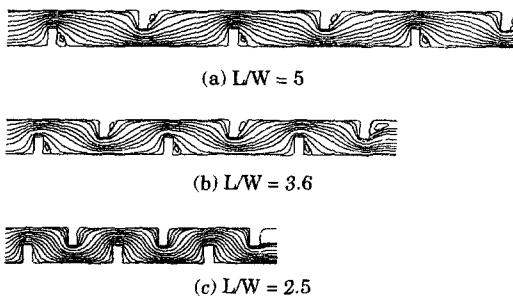


Fig. 3 Stream lines ($u_{in}=0.2\text{m/s}$).

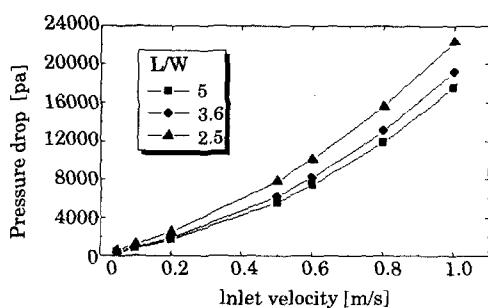


Fig. 4 Pressure drops for fin pitch ratio.

Fig. 4에 속도에 따른 압력강하를 흰피치비에 따라 나타내었다. 입구 속도가 0.2m/s 이하인 경우에는 압력강하가 선형적으로 증가하나 이 속도 이상에서는 비선형적으로 증가하였다. 흰피치비가 클수록 유동방향거리가 증가하고 압력강하는 작아짐을 알 수 있다. 저속에서는 압력강하가 흰피치에 크게 영향받지 않으며, 유속이 증가할수록 압력강하는 흰피치에 영향을 받음을 알 수 있다.

3.2 온도장

3.2.1 등온선

관내 융셋 스트림 흐르는 유동에서의 온도분포는 유속에 크게 영향을 받는다. 후류의 생성 역시 온도분포에 영향을 미치며, 흰 후면에서의 박리된 유동에서의 온도분포는 주유동에서 떨어져 나온 베블을 따라 형성되었다. 유속이 증가할수록 주유동과 분리된 베블의 크기는 커졌으며, 흰 후면에서의 온도분포는 가파르게 형성되었는데 박리된 유동에 의해 경계층이 깨어져 얇게 되었기 때문이라 생각된다. Fig. 5는 속도 0.1m/s에서의 등온선을 흰피치에 따라 나타낸 그림이다. 흰피치비가 5인 경우 흰 후면에서 미세한 후류가 생성되어 등온선이 퍼져 나가지 못하고 겹여지고 있으며, 62°C 등온선을 조사하면 피치비가 증가함에 따라 점차 얇아지고 있다. 코어영역에서는 등온선 형상은 유사하나 벽 가까운 곳에서는 흰피치비가 온도분포에 영향을 미침을 알 수 있다. 80°C의 등온선을 조사하면, 흰피치비가 작을수록 등온선과 흰 후면이 이루는 면적이 커진다. 이는 Fig. 3에서 검토한

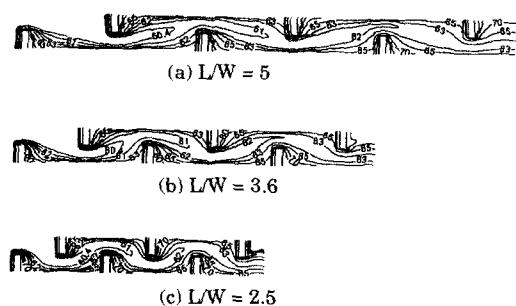


Fig. 5 Isothermal lines ($u_{in}=0.1\text{m/s}$).

바와 같이 흰피치비가 작을수록 후류의 세기가 증가하여 열전달이 향상되었기 때문이라 사료된다.

3.2.2 대류 열전달계수

흰 전면부에서는 국소대류열전달 계수는 거의 균일한 분포를 하고 있으며 입구 속도가 커짐에 따라 증가하였다. Fig. 6에 흰 후면부에서의 국소넛셀수를 나타내었다. 흰피치비가 적을수록 흰 후면

부에서의 국소넛셀수는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 흰피치가 적을수록 유선의 곡률이 커지고 후류에서 생성되는 버블의 크기가 적어지기 때문이라 생각된다. 입구 속도가 0.05m/s 이하에서는 국소넛셀수는 흰 길이 방향으로 단순 증가하는 경향을 보여 주고 있으며, 흰피치비가 5, 3.6 그리고

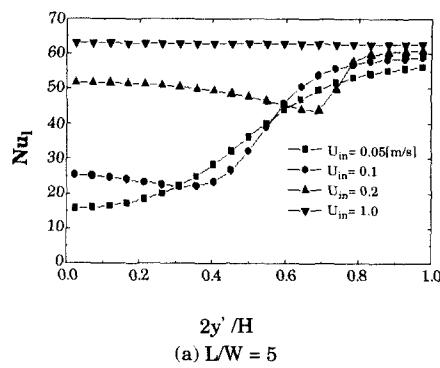
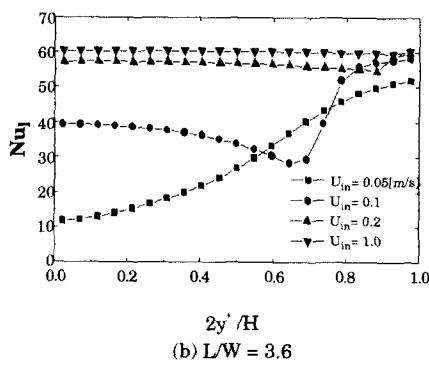
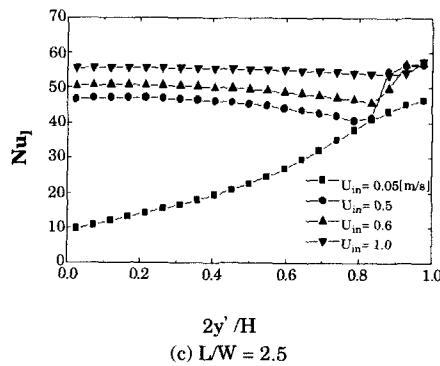
(a) $L/W = 5$ (b) $L/W = 3.6$ 

Fig. 6 Local Nusselt number at rear faces(1st fin).

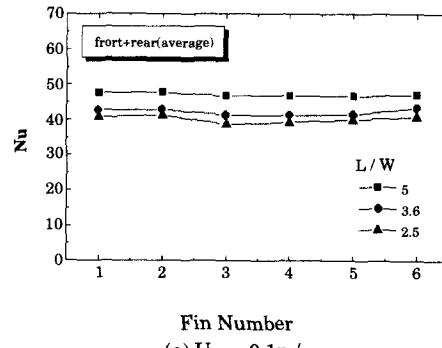
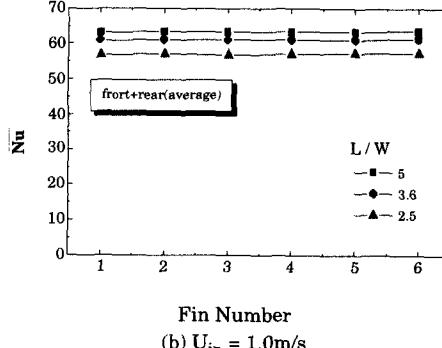
(a) $U_{in} = 0.1 \text{ m/s}$ (b) $U_{in} = 1.0 \text{ m/s}$

Fig. 7 Average Nusselt number for fin number (front + rear).

Table 2 Comparison of average convective heat transfer coefficients and Nu. No. at 2nd fin ($u_{in}=0.1 \text{ m/s}$).

흰피치비	평균대류열전달계수 [W/m ² · K]	평균Nusselt 수
5	1420	47.7
3.6	1850	42.8
2.5	2770	41.3

2.5일 때 리된 베블에 의해 생기는 입구속도가 각각 0.1m/s , 0.2m/s , 0.5m/s 이며 국소넷셀수가 최소가 되는 점은 $2y'/H$ 가 각각 0.4 , 0.63 , 0.75 임을 알 수 있었다. 이 위치는 유선이 박리되는 위치와 거의 일치하였다. 입구 속도가 큰 경우에는 흰 끝에서 유선이 박리되는데 흰 후면부에서 국소넷셀수는 거의 일정한 값을 보여 주고 있다.

Table 2는 2번재 옵셋 스트립 흰에서 평균 열전달 계수와 평균 Nusselt수를 비교한 것이다. 유동을 대표하는 길이 l 을 특성길이로 흰피치비가 작아질수록 특성길이가 또한 감소한다. 그러므로 평균 열전달 계수는 증가하지만 평균 Nusselt수는 감소하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 7은 흰 전후면에서의 평균넷셀수를 나타내고 있다. 각 흰에서의 평균값은 거의 일정한 분포를 가지며, 입구속도가 빠른 경우 평균넷셀수는 증가하고 흰피치비가 감소할 때 평균넷셀수가 적어짐을 알 수 있다. 흰피치비가 5일 경우 유속이 0.1 에서 1.0m/s 로 빨라지면 평균넷셀수는 대략 30%정도가 증가하지만, 유속 0.1m/s 에서 같은 속도에 흰피치비가 2.5로 작아지면 넷셀수는 약 15%정도 감소함을 알 수 있다.

또한, Fig. 7에서 흰피치에 따른 평균넷셀수 증분을 조사하면, 입구속도가 0.1m/s 와 1.0m/s 에서 차이를 보이고 있다. Fig 6의 입구속도 증가에 의한 대류열전달계수의 증가분을 조사하면 흰피치비가 클수록 포화상태, 즉 입구속도 변화에 의한 넷셀수 변화가 줄어드는 효과를 보인다. 이 이유로 인하여 흰피치비 증가에 따른 평균넷셀수의 변화는 차이가 난다고 사료된다.

결과적으로 흰피치비의 감소는 높은 열전달 효과를 가져오지만 압력강하 역시 크게 작용하기 때문에 두 인자를 고려한 적절한 케이스의 선택이 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 옵셋 스트립 흰을 가로질러 흐르는 오일 유동에 대해서 열전달 특성과 압력강하 특성을 수치적으로 연구하였다. 격자계는 비균일 격자계로 110×44 로 하였으며 하향이완하여 안전하게 수렴시켰다. 흰피치를 변화시키면서 계산한 결과를 검토

한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 유속이 적은 경우 압력강하는 선형적으로 변한다.
- (2) 평균넷셀수는 상류로부터 흰 열수에 대한 영향은 거의 받지 않으며, 흰피치에 따라 크게 변한다.
- (3) 흰 후면에서의 국소넷셀수는 박리점 근방에서 최소값을 가지며, 박리점의 위치는 입구속도와 흰피치에 영향을 많이 받는다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 현

- [1] W. M., Kays and A. L., London, *Compact Heat Exchangers*, McGraw-Hill, NewYork, 1964.
- [2] A. R., Wieting, "Empirical Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Offset Fin Plate Heat Exchangers", *J. of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 488, 1975.
- [3] S. V., Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [4] K., Suzuki, E., Hirai and T., Miyake, "Numerical and Experimental Studies on a Two-Dimensional Model of an Offset- Strip-Fin Type Compact Heat Exchanger used at Low Reynolds number", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 4, pp. 823-836, 1985.
- [5] A. E., Bergles, "Heat Transfer Enhancement The Maturing of Second Generation Heat Transfer Technology", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 47-55, 1997.
- [6] N. C., DeJong, L. W., Zhang, A. M., Jacobi, S., Balachandar, D. K., Tafti, "A Complementary Experimental and Numerical Study of the Flow and Heat Transfer in Offset Strip-Fin Heat Exchangers", *Transactions of the ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 690-698, 1998.
- [7] R. M., Manglik and A. E., Bergles, "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Rectangular Offset Strip Fin Compact Heat Exchanger", *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 10, pp. 171-180, 1995.

저 자 소 개

강덕종(姜德鍾)

1974년 12월 7일생. 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과 재학중.



양대일(梁大一)

1975년 8월 22일생. 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업. 박사과정. (주) 일신립 근무.



전승환(田承桓)

1958년 5월 27일생. 한국해양대학교 운항시스템 공학부 교수.



정현호(鄭亨鎬)

1957년 11월 20일생. 한국해양대학교 기계·정보공학부 부교수. 본 학회 정회원.

