

## 마이크로 채널에서 물의 비등 열전달 특성

임태우<sup>1</sup> · 유삼상<sup>†</sup> · 최형식<sup>2</sup> · 김동혁<sup>2</sup>

(원고접수일 : 2011년 6월 15일, 원고수정일 : 2011년 8월 4일, 심사완료일 : 2011년 8월 10일)

### Boiling Heat Transfer Characteristics of Deionized Water in Microchannel

Tae-Woo Lim<sup>1</sup> · Sam-Sang You<sup>†</sup> · Hyeung-Sik Choi<sup>2</sup> · Dong-Hyuk Kim<sup>2</sup>

**요 약 :** 본 연구에서는  $500\mu\text{m}$ 의 수력 직경을 가지는 마이크로 채널에서 물에 대한 유동 비등 열전달 계수를 측정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험 영역은 열유속이  $100\sim 400\text{ kW/m}^2$ 이고, 증기 건도가  $0\sim 0.2$  그리고 질량유속이  $200, 400$  그리고  $600\text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 범위에서 이루어졌다. 실험결과 측정된 열전달 계수는 질량유속과 증기건도에는 의존하지 않으며, 열유속에는 다소 의존하는 것으로 나타났다. 또한 측정된 열전달계수는 매크로스케일에서 제안된 몇몇 상관식들과 비교하였으며, 기존의 상관식들은 본 연구의 실험 조건에서 얻어진 유동 비등 열전달계수를 높게 예측하였다.

**주제어 :** 유동 비등, 열유속, 질량유속, 마이크로채널, 증기 건도

**Abstract:** An experimental study was carried out to measure the heat transfer coefficient in flow boiling to deionized water in a microchannel having a hydraulic diameter of  $500\mu\text{m}$ . Tests were performed in the ranges of heat fluxes from  $100$  to  $400\text{ kW/m}^2$ , vapor qualities from  $0$  to  $0.2$  and mass fluxes of  $200, 400$  and  $600\text{ kg/m}^2\text{s}$ . From the experimental results, it is found that the measured heat transfer coefficients is independent of mass flux and quality, and is somewhat dependent of heat flux. Measured data of heat transfer are compared to a few available correlations proposed for macroscale. The previous correlations for macroscale overpredicted the flow boiling heat transfer coefficient for the test conditions considered in this work.

**Key words:** Flow boiling, Heat flux, Mass flux, Microchannel, Vapor quality

### 1. 서 론

최근 시스템이 소형화되면서 기기 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 외부로 방출시켜 시스템이 안정적으로 작동될 수 있도록 하는 냉각 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하는 기술이 마이크로 채널을 이용한 냉각이라 할 수 있다. 오늘날 열교환기에서의 관심사는 냉각을 어떻게 시킬지, 어떻게 비용을 줄여 제조할지 그리고 어떻게 성능을 향상시킬지가 중요한 요소라 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 몇

몇 새로운 기술들이 제안되어 왔으며[1], 또한 이론 및 수치해석에 의해 그리고 실험적 방법에 의해 많은 연구가 이루어져 왔다[2-5].

마이크로채널은 미세 유체 시스템을 적용할 수 있는 좋은 연구 대상 이라할 수 있으며, 현재까지 수많은 연구가 수행되어 왔다. 어떤 연구자들은 마찰 계수와 열전달 특성이 기존의 매크로 채널 흐름과 아주 다르다고 보고하였다.

마이크로 채널에서의 이상 유동 열전달은 단상 액체 유동에 비해 열소산 능력이 대단히 크기 때

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail:ssyou@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4366)

1 한국해양대학교 기관공학부

2 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부

문에 마이크로 채널은 노트북 컴퓨터 칩, 전자 부품, 그리고 항공기의 전기 부품 등과 같은 마이크로 냉각 요소로 사용될 수 있다. 마이크로 채널에서 일어나는 열전달 과정 및 유체역학적 특성은 매크로 스케일에서의 그것과 분명히 다르며[6-10], 매크로 스케일에서 얻을 수 있는 지식의 일부만이 마이크로 스케일에 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 현재 마이크로 채널 구조[11]에서의 유동 비등 열전달에 대한 메커니즘을 이해하기 위한 수많은 연구가 이루어지고 있으며, 핵 비등이 마이크로 채널내에서의 증발을 지배하는 것[12]으로 여러 연구자들에 의해 밝혀지고 있다. 또한 이전의 큰 관에서의 유동 비등의 경우 대류와 핵 비등 열전달을 중요하게 고려하였으며, 총 열전달은 전형적으로 이들 두 개의 성분을 결합하여 취급하였다. 그러나 마이크로 채널에서의 유동은 보통 층류이기 때문에 전통적인 비등 상관식들은 비등 열전달을 높게 예측한 것으로 밝혀졌다[13].

[14]에서는 311-747 $\mu\text{m}$ 범위의 수력직경을 가진 마이크로채널을 사용하여 물과 메탄올의 열전달 특성을 연구하였으며, 그들의 결과는 기존의 대류 특성과 아주 다르게 나타났다. [15-16]에서는 0.133-0.367 mm의 사각 채널에서 물에 대한 열전달과 마찰 계수를 조사하였으며, Reynolds 수가 200-700범위에서 층류에서 난류로 변한다는 것을 확인하였는데, 이것은 기존의 이론과 아주 다른 결과였다. [17]에서는 마이크로채널의 중횡비와 채널 간 거리에 대한 비와 같은 채널 형상이 단상 대류 열전달과 유동 특성에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있다. [18]에서는 사각 채널을 통해 흐르는 물의 열적 특성에 관한 실험과 수치적 해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 예측은 실험 데이터와 잘 일치하였으며, 그들이 사용한 마이크로채널의 치수 내에서는 기존의 해석적 접근이 열전달 거동을 잘 예측할 수 있다고 제안하고 있다. [19]에서는 440 $\mu\text{m}$ 의 수력 직경을 가진 사각 마이크로채널 내를 흐르는 물에 대한 열전달과 압력 강하를 연구하였으며, 실험 결과를 통해 기존의 이론으로 마이크로채널을 통해 흐르는 물에 적용할 수 있다는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 채널에서의 이

상 유동 열전달에 대한 실험적 연구를 통해 마이크로 스케일에서의 열전달 특성을 분석하는 것이며, 또한 얻어진 결과를 기존의 매크로 관에서 얻어진 상관식과 비교·분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 유동 비등 열전달과 압력강하 측정을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 시스템은 입구 저장탱크(reservoir tank), 핫플레이트(hot plate), 시린지 펌프(syringe pump), 필터(filter), 예열기(preheater), 시험구간(test section), 출구 저장탱크(reservoir tank) 그리고 전자저울(electronic balance)로 구성되어 있다. 모든 실험에서 작동유체(de-ionised water)는 핫플레이트에서 일정온도로 가열된 후 시린지 펌프에 의해 필터를 거쳐 예열기로 공급되며, 예열기에서 시험구간 입구의 주어진 엔탈피까지 예열된 후 시험구간으로 들어가 다시 가열되게 되어 있다. 그리고 시험부의 상부는 유동 양식을 관찰할 수 있도록 투명판(polycarbonate)으로 덮여있다. 이 투명판은 또한 입·출구의 작동 유체온도와 압력강하 측정을 위해 사용된다.

Figure 2는 시험부를 나타내며, 마이크로채널은 동판의 상부 표면에 와이어 커팅법(wire cutting method)을 이용하여 깊이와 폭이 각각 0.5 mm인 사각 채널로 Figure 3과 같이 가공된다. 채널 길이는 40 mm의 가열길이를 포함하여 약 80 mm이다. 동판의 하부에는 시간에 따라 일정한 열을 공급하기 위해 필름히터가 부착되며, 이 히터는 0-50 V와 0-3 A의 범위에서 조절되는 DC power supply에 의해 원하는 전류를 공급받는다. 또한 동판의 하부 표면에 100 mm 간격으로 5개의 T-type 열전대가 부착된다. 마지막으로 열손실을 방지하기 위해 필름히터 아래 단열층(thermal-insulating layer)을 둔다.

실험을 시작하기 전에 저장조의 작동유체를 약 1시간 동안 가열시켜 증발시킴으로 가스제거(degassing) 작업을 수행한다. 그리고 시린지 펌프로 물을 순환시켜 전자저울로 유량을 측정하여 원하는 값으로 시린지 펌프를 조절하였다. 마이크로 채널내의 유동 비등 실험은 일정한 유량에서 열유속을 증가시킴으로써 수행되었다. 본 연구에서 작

동유체의 유량은 2.35~7 ml/min이며, 열유속은 100~400 kW/m<sup>2</sup>으로 Table 1에 나타내었다.

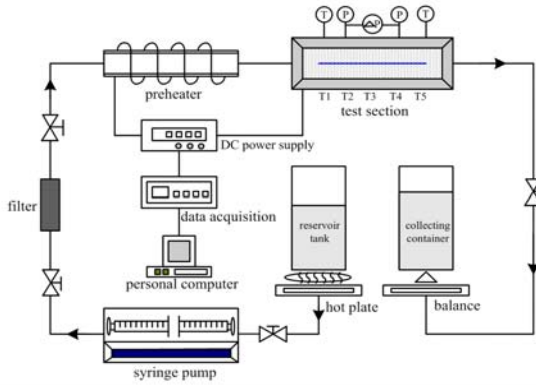


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

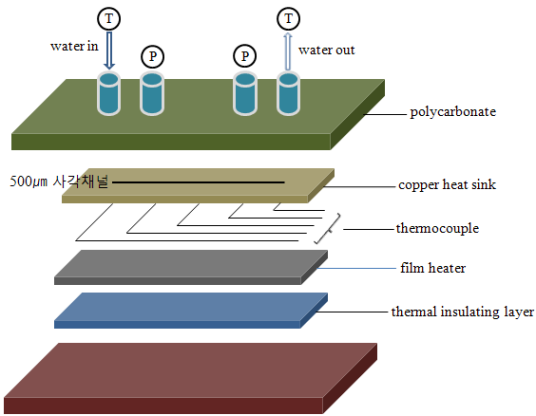


Figure 2: Test section

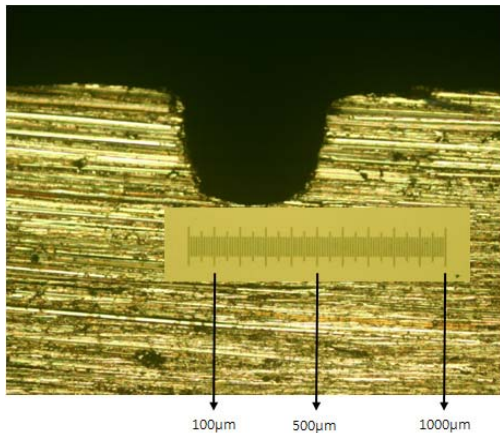


Figure 3: Photograph of microchannel on copper block taken by microscope (50 times)

Table 1: Experimental conditions

Parameter	Value
Working fluid	Deionized water
Hydraulic diameter	500 µm
Mass flux	200, 400, 600 kg/m <sup>2</sup> s
Volume flow rate	2.35, 4.7, 7 ml/min
Heat flux	100~400 kW/m <sup>2</sup>
Outlet quality	0~0.2

작동유체의 입·출구 온도는 입구와 출구에 절대 압력계와 T-type 열전대를 설치하여 측정하였으며, 시험부 입·출구의 압력 강하는 차압계를 사용하여 측정하였다.

본 실험에서 직접 측정된 양은 유량, 압력 강하, 입·출구 압력, 그리고 열 유속 등이다. 이들 측정량의 불확실성은 유량의 경우 ±3~5%였으며, 압력 강하 측정은 풀 스케일에서 0.25%의 정확성을 가지는 차압계 (differential pressure drop transducer) 를 사용하였다. 온도 측정의 불확실성은 T 타입 열전대에서 ±0.3 °C였다. 그리고 열유속은 전압과 전류계로 계산하였고, 그 때의 불확실성은 2~4%의 범위에 있었다. 열전달계수에서의 불확실성은 마이크로채널로 일어나는 열전달률을 결정할 때의 불확실성과 벽면온도 측정으로부터 유발되며, 본 연구에서는 6~12%의 범위에 있는 것으로 평가되었으며, 그 보다 더 큰 불확실성은 낮은 열유속에서 일어났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분석 방법

가열기로부터 작동 유체로의 열유속을 결정하기 위해 전도, 대류 그리고 복사로 인한 열손실이 고려되어야 한다. 동(copper) 블록(히트싱크)으로부터 주위로의 열손실은 단상 열전달 조건하에 유체에 전달된 감열로부터 평가된다.

$$q = \rho C_p Q (T_{f,out} - T_{f,in}) \tag{1}$$

여기서 Q는 유량이고, 밀도와 비열은 입구와 출구의 평균 유체 온도를 토대로 계산된다. 일단 비등이 발생하기 시작하면, 모든 실험에 걸쳐 입력



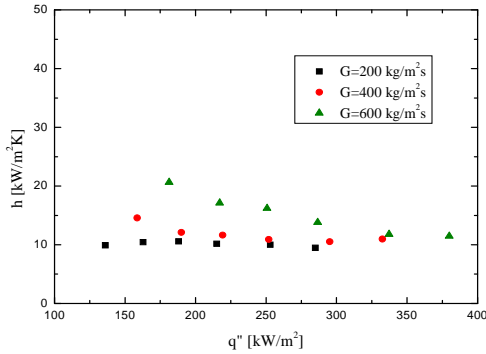


Figure 5: Variation of heat transfer coefficient with respect to heat flux

여기서  $t_b$ 는 동 블록(히트싱크)의 두께이고,  $k$ 는 동을 열전도율을 나타낸다.

출구 증기 건도는 다음과 같이 에너지 평형으로부터 계산된다.

$$x_o = \frac{1}{h_{fg}} \left[ \frac{q}{\rho Q} - C_p (T_{sat} - T_{in}) \right] \quad (11)$$

식 (11)에서  $h_{fg}$ 는 잠열이며,  $Q$ 는 유량이고,  $C_p$ 는 작동 유체의 비열을 나타낸다.

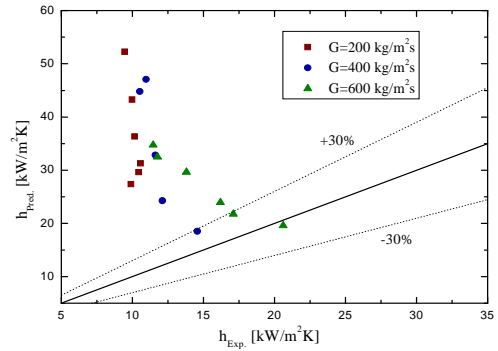
3.2 분석 결과

Figure 4는 세 가지 서로 다른 질량유속 조건에서 증기 건도의 증가에 따른 열전달계수의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 질량유속의 변화가 열전달에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있으며, 저건도 영역( $x < 0.08$ )에서는 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있으며,  $x > 0.08$  이상의 건도에서는 열전달계수가 거의 일정하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 핵비등이 마이크로 채널 내에서의 증발을 지배하고 있다[12]고 할 수 있다. 특히, 오늘날 열전달 메커니즘을 지배하는 것이 마이크로 채널 내에 있는 기포주위의 얇은 액 막의 증발에 의해 야기되는 것으로 간주하고 있다[10, 23-24].

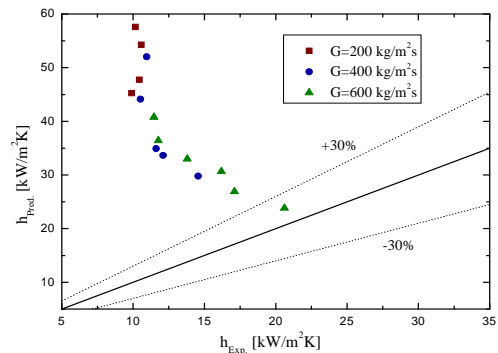
Figure 5는 열유속의 변화에 따른 열전달계수의 영향을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 질량유속 200 kg/m<sup>2</sup>s과 400 kg/m<sup>2</sup>s은 열유속의 영향을 거의 받고 있지 않으며, 600 kg/m<sup>2</sup>s의 질량유속에

서는 열유속의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 핵비등이 마이크로 채널내에서의 증발을 지배한다는 것을 다시 확인 할 수 있다.

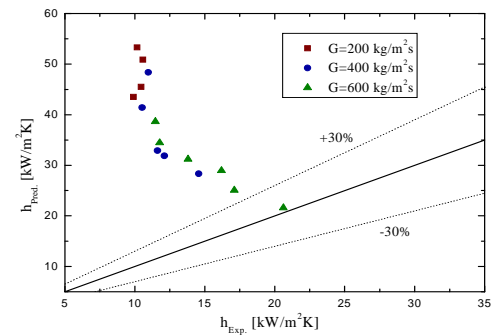
Figure 6은 본 연구에서 얻어진 결과를 기존의 매크로 스케일에 관한 상관식들과 비교한 결과를 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 기존의 상관식들은 본 연구의 결과보다 상당히 높게 예측



(a) Chen



(b) Gungor and Winterton



(c) Kandlikar

Figure 6: Comparison between present date and previous correlations

하고 있다. 이것은 앞에서도 언급하였듯이 기존의 상관식에서 유동영역의 주요 대상은 액상과 기상 모두 난류영역에 해당하며, 마이크로 채널에서의 액상과 기상의 유동영역은 모두 층류에 해당하기 때문에, 기존의 상관식으로 본 실험의 결과를 예측하기는 어렵다고 할 수 있다

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수력직경  $500 \mu\text{m}$ 를 가지는 수평 사각 마이크로 채널에서 유동 비등 열전달 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 얻어진 열전달계수는 질량유속의 영향을 거의 받지 않음을 확인하였으며, 저건도 ( $x < 0.08$ ) 영역에서는 증기 건도가 증가함에 따라 열전달계수는 급격히 감소하였다. 이것은 핵 비등의 영향이 지배적이라고 할 수 있다.

2. 고 질량유속( $G=600 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )에서는 열전달계수가 열유속의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

3. 본 실험 결과를 기존의 매크로스케일에 대한 몇몇 상관식과 비교한 결과 100%까지 오차가 낮으나, 저 질량 유속에서는 100% 이상까지 오차가 발생하였다. 따라서 마이크로 스케일에서의 유동현상을 충족시킬 수 있는 새로운 상관식 개발이 요구된다.

#### 참고문헌

[1] J. Dirker, W. Liu, D. Van Wyk, J.P. Meyer and A.G. Malan, "Embedded solid state heat extraction in integrated power electronic modules", IEEE Trans. Power Electron. vol. 20, no. 3, pp. 694-703, 2005.

[2] E.W. Kreutz, N. Pirch, T. Ebert, R. Wester, B. Ollier, P. Loosen and R. Poprawe, "Simulation of micro-channel heat sinks for optoelectronic", Microsyst. Microelectron. J. vol. 31 pp. 787-90, 2000.

[3] A.G. Fedorov and R. Viskanta, "Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heat sink for electronic packaging", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 43 pp. 399-15, 2000.

[4] W. Qu and I. Mudawar, "Analysis of

three-dimensional heat transfer in microchannel heat sinks", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 45 pp. 3973-985, 2002.

[5] C.Y. Zhao and T.J. Lu, "Analysis of microchannel heat sinks for electronics cooling", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 45 pp. 4857-869, 2002.

[6] C.Y. Soong and S.H. Wang, "Theoretical analysis of electrokinetic flow and heat transfer in a microchannel under asymmetric boundary conditions", Colloid Interface Sci. vol. 265 pp. 202-13, 2003.

[7] X.F. Peng and B.-X. Wang, "Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 36 no. 14, pp. 3421-3427, 1993.

[8] S.G. Kandlikar, "Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels", Exp. Therm. Fluid Sci. vol. 26, pp. 389-407, 2002.

[9] M.W. Wambsganss et al., "Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube", J. Heat Transfer Trans. ASME vol. 115 no. 4, pp. 963-972, 1993.

[10] Thome, J.R., "Boiling in microchannels: a review of experiment and theory". Int. J. Heat and Fluid Flow vol. 25, pp. 128-139, 2004.

[11] G. Hetsroni et al., "Fluid flow in microchannels", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 48 no. 10, pp. 982-1998, 2005.

[12] T.N. Tran and M.W. Wambsganss, D.M. France, "Small circular- and rectangular channel boiling with two refrigerants", Int. J. Multiphase Flow vol. 22, no. 3, pp. 485-498, 1996.

[13] Liu, D. and Garimella, S.V., "Flow boiling in a microchannel heat sink". In: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, FL, November pp. 5-11, 2005.

[14] B.X. Wang and X.F. Peng, "Experimental

- investigation on liquid forced convection heat transfer through microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 37 (suppl.1) pp. 73-82, 1994.
- [15] X.F. Peng, G.P. Peterson and B.X. “Wang, Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular micro-channels, Experimental Heat Transfer vol. 7 pp. 249-264, 1994.
- [16] X.F. Peng, G.P. Peterson and B.X. Wang, “Heat transfer characteristics of water flowing through micro-channels”, Experimental Heat Transfer vol. 7 pp. 265-283, 1994.
- [17] X.F. Peng and G.P. Peterson, “Forced convection heat transfer of single-phase binary mixtures through microchannels”, Experimental Thermal and Fluid Science vol. 12 pp. 98-112, 1996.
- [18] P.S. Lee, S.V. Garimella and D. Liu, “Investigation of heat transfer in rectangular microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 48 pp. 1688-1704, 2005.
- [19] Y. Mishan, A. Mosyak, E. Pogrebnnyak and G. Hetsroni, “Effect of developing flow and thermal regime on momentum and heat transfer in micro-scale heat sink”, International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 50, pp. 3100-3114, 2007.
- [20] W. Qu and I. Mudawar, “Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink”, Int. J. Heat Mass Transfer vol. 45, pp. 2549-2565, 2002.
- [21] Liu, D., Lee, P. -S., Garimella and S. V., “Prediction of the onset of nucleate boiling in microchannel flow”. International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 48, pp. 5134-5149, 2005.
- [22] Wang, G., Cheng, P., and Wu, H., “Unstable and stable flow boiling in parallel microchannels and in a single microchannel”, International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 50, pp. 4297-4310, 2007.
- [23] S.G. Kandlikar and W.J. Grande, “Evolution of microchannel flow passages thermo-hydraulic performance and fabrication technology”, Heat Transfer Eng. vol. 24, no. 1, pp. 3-17, 2003.
- [24] A.E. Bergles, “Boiling and evaporation in small diameter channels”, Heat Transfer Engineering Microchannels-Short History and Bright Future, vol. 24, no. 1, pp. 18-40, 2003.

## 저 자 소 개



### 임태우(林兌禹)

1970년생 6월생, 1995년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1997년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 규슈대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2005년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 교수



### 유삼상(柳三相)

1958년생, 1983년 부산수산대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1990년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 대학원 졸업(석사), 1994년 미국 Iowa State Univ. 대학원 졸업(박사), 1995년 여수수산대학교 기관공학과 전임강사, 현재 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 교수.



### 최형식(崔炯植)

1961년생, 1983년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사), 1989년 Univ. of South Carolina 대학원 졸업(석사), 1993년 North Carolina State Univ 대학원 졸업(박사), 1993년 기계연구원(Post Doctor), 현재 한국해양대학교 기계정보공학부



### 김동혁(金東赫)

1953년생, 1976년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1984년 미국 New Jersey Inst. of Technology 대학원 졸업(석사), 1988년 미국 The Johns Hopkins Univ. 대학원 졸업(박사), 1988년 한국표준과학연구원, 현재 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 교수.