

## 단프라스트를 적용한 간접식 증발냉각 장치의 냉각 성능 예측

김명호, 김병재\*  
충남대학교 기계공학부

### Prediction of Cooling Performance for Indirect Evaporative Cooling System Using Danpla Sheet

Myung-Ho Kim, Byoung Jae Kim\*  
School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

**요약** 본 연구에서는 간접식 증발냉각 장치의 냉각 성능을 예측하고 다양한 공기 유량 및 물 분무 유량 조건을 만족하는 성능 상관식을 제안한다. 기존의 플라스틱 열교환기는 공조 공간의 크기에 따라 금형을 새로 제작해야 하기 때문에 높은 효율에도 불구하고 잘 사용하지 않았다. 한편 단프라스트는 일반적으로 두께가 얇아 열교환이 우수하고, 특히 제작이 매우 용이하다. 따라서 열교환기를 단프라스트로 제작할 경우 금형이 별도로 필요하지 않아 열교환기 제작 비용을 크게 절감할 수 있다. 이에 본 연구에서는 단프라스트로 다채널 열교환기를 제작하여 간접식 증발냉각 장치를 제작하였다. 성능 실험장치는 열교환기, 물 분사 노즐, 터보팬, 항온조, 순환 펌프, 온도 센서, 습도 센서, 차압식 유량계 및 자료획득 장치로 구성하였다. 증발냉각 시 공기 유량이 증가하면 유용도가 감소하였고, 수공비에 따라 유용도 최적점이 존재하였다. 등은 조건에서 냉각 성능을 예측하는 상관식과 실내 환기 온도와 외기 상태를 반영하는 성능 상관식을 제안하였다. 상관식들의 냉각 성능 오차는 4 % 이내였다.

**Abstract** Previous plastic heat exchangers are expensive because the mold must be newly manufactured depending on the air conditioning space. On the other hand, danpla is so thin that the heat exchange performance is excellent. Moreover, danpla can be used easily in ventilation systems in view of fabrication. This study proposes correlations for the cooling performance of an indirect evaporative cooling system. The experimental apparatus consisted of a heat exchanger, spray nozzle, fan, thermostat, pump, and measuring sensors for temperature, humidity, and airflow rate. The results showed that the effectiveness decreased gradually as the airflow rate increased. In addition, there was an optimal condition in terms of effectiveness. The performance prediction correlations were determined using the experimental data from various conditions. The proposed correlations showed performance accuracies within 4 % error.

**Keywords** : Danpla Sheet, Exhaust Heat Recovery, Indirect Evaporative Cooling, Performance Prediction, Plastic Heat Exchanger

본 논문은 충남대학교 LINC+ 사업단의 지원을 받아 수행되었음.

\*Corresponding Author : Byoung-Jae Kim(Chungnam National Univ.)

email: bjkim@cnu.ac.kr

Received September 4, 2020

Revised October 12, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

## 1. 서론

국제 에너지기구(WEO: World Energy Outlook)에 따르면 인구 증가, 도시화 가속화 및 경제성장으로 인해 세계 에너지 수요는 '17년 ~ '40년 동안 25 % 이상 증가할 것으로 전망하고 있다[1]. 국토교통부에서는 에너지 소비를 줄이기 위해 '녹색건축물 기본계획'을 5년마다 수립하여 건물에너지 사용량을 줄이고자 노력하고 있다. 우리나라는 '16년 11월 발표된 파리협정으로 '30년까지 온실가스 배출 BAU 대비 37 % 감축을 목표로 하고 있다. 이를 달성하기 위해서는 재생에너지 사용뿐만 아니라 수송, 건물 등에서의 탄소 배출량 감소도 동반해야 한다[2].

건물의 냉방을 위해 사용되는 증기 압축 냉동기는 압축기로 인해 높은 전력이 소비되며 냉매의 사용으로 환경적 문제가 대두되고 있다. 반면, 흡수식 냉동기의 경우 도시가스를 주원료로 사용하여 전력 소비가 적으나 부대 설비가 많아 비용이 많이 들고 효율이 상대적으로 떨어진다는 단점이 있다. 그러나 최근에는 이중, 삼중효용 사이클을 적용하여 COP 1.6 이상의 고효율 흡수식 냉동기를 개발하고 있다[3,4].

건축의 에너지 손실을 최소화하는 패시브 건물의 보급이 확대됨에 따라 단열과 기밀이 강화되어 실내 공기질(IAQ: Indoor Air Quality)은 점점 악화되고 있는 추세이다. 따라서 패시브 건물에는 환기가 필수적이며, 환기시 발생하는 배기열을 효율적으로 회수하는 기술의 개발이 필요하다.

건축물의 환기시설에서 배기열을 회수하기 위해 다양한 형태의 배기열 회수용 열교환기가 사용되고 있다. 일반적으로 알루미늄 재질의 열교환기를 많이 사용하나, 부식에 강하고 내열성이 뛰어난 스테인레스 재질의 열교환기도 적용되고 있다. 최근에는 두께가 얇으면 열저항이 알루미늄과 같은 금속과 유사한 점을 이용하여 플라스틱 재질의 열교환기를 사용하기 시작했으며[5], 알루미늄의 내식성, 내화학성을 개선시키기 위해 표면에 플라스틱을 코팅한 알루미늄 판형 열교환기에 대한 연구가 수행되기도 하였다[6].

본 연구그룹은 선행연구를 통해 열전달 촉진기술을 적용한 플라스틱 열교환기를 적용한 증발냉각장치의 성능을 분석하고 상관식을 제시한 바 있다[7]. 하지만 열전달 촉진기술을 적용하기 위한 플라스틱 판형 열교환기를 제작하기 위해서는 표면이 가공 처리된 특수 금형이 필요하며, 복잡한 형상으로 인해 제작비용이 상당하다는 단점이 있다.

다양한 크기의 환기시설에 배기열 회수 열교환기를 적용하기 위해서는 성능뿐만 아니라 열교환기 제작의 용이성이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 포장재, 단열재, 차음재 등으로 많이 쓰여 시장에서 쉽게 구매가 가능하고 다양한 크기로 제작하기에 용이한 단프라스트(Danpla sheet)를 간접식 증발냉각장치에 적용하여 성능을 분석하였다. 또한, 기존의 열교환기와 성능 및 유동 방향의 차이를 고려하여, 단프라 시트를 적용한 열교환기의 성능 상관계수를 제안하였다.

## 2. 간접식 증발냉각장치 성능 분석

### 2.1 증발냉각용 열교환기 설계 및 제작

본 연구에서 제작한 다채널 열교환기는 255 x 255 mm<sup>2</sup> 면적을 갖는 정사각형 모양의 플라스틱 판형 열교환기이다. 플라스틱으로 만든 이 열교환기는 0.16 W/(m<sup>2</sup>K)의 매우 낮은 열전도도를 가져 열전달 성능의 저하가 우려되나, 판의 두께가 0.3 ~ 0.5 mm 정도로 매우 얇기 때문에 열전도계수의 차이에 의한 열전달 성능 저하는 미미한 수준이다[8].

열교환기는 Fig. 1과 같이 3 mm 크기의 정사각형 모양의 구멍으로 공기가 통할 수 있도록 제작되었으며, 직교류로 열교환을 하기 위해 엇갈려서 300 mm 높이로 적층하였다. 판의 전체 면적을 접착하여 쌓을 경우 열전도가 일어나는 플라스틱 두께가 두 배로 늘어나 전도 열저항이 커지므로 판과 판 사이에 얇고 긴 플라스틱 막대를 덧대어 적층하였다.

### 2.2 간접식 증발냉각장치 성능실험

증발냉각 성능실험장치는 Fig. 2와 같다. 열교환기에 분사되는 물은 작은 입자 형태로 분사시켜 공기와 접촉하는 표면적을 넓게 하여 증발이 잘 이루어지도록 제작하였다. 펌프에 인버터를 달아 전압의 세기로 물 분무량을 조절하였다. 증발되지 않고 장치 하단으로 흐르는 물은 바닥으로 빠져나와 수조에 채워입 되고 펌프를 통해 재순환된다. 분무되는 물은 펌프를 통해 순환하면서 온도가 거의 일정해지므로 증발냉각 성능에 거의 영향을 미치지 않는다고 판단하여 따로 온도를 측정하지 않았다. 물 분무유량은 저울을 이용하여 일정 시간 동안 나온 물의 양을 평균하였다.

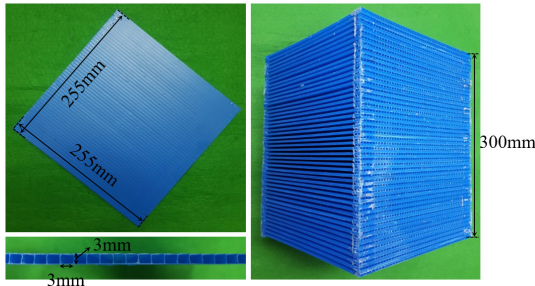
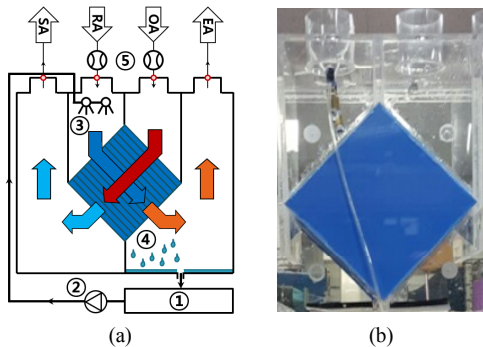


Fig. 1. Photograph of heat exchanger(HEX)



●: Measurement points for Temperature and Humidity

- ①: Water tank      ②: Pump      ③: Water spray
- ④: Heat exchanger      ⑤: Nozzle

Fig. 2. Experimental apparatus for indirect evaporative cooling system: (a) Schematic; (b) Photograph

물과 접촉하지 않는 주 유동에서는 외기(OA: Outdoor Air)가 장치로 유입되어 급기(SA: Supply Air)를 통해 실내로 공급되며, 물과 직접적으로 접촉하는 2차 유동에서는 실내 환기(RA: Return Air)로 공기가 유입되어 배기(EA: Exhaust Air)로 배출된다. 공기 유동은 터보팬으로 발생시키고, 공기 유량은 슬라이더스로 조절하여 노즐을 이용한 차압식 유량계로 측정하였다. 외기 온도는 항온조에 공기 가열용 열교환기를 연결하여 일정 온도의 물을 순환시켜 조절하였으며, 습도는 덕트 입구 측에 가습기를 배치하여 분무량을 조절하였다. 외기-급기와 환기-배기의 두 유로는 열교환기에 의해 서로 분리되어 있기 때문에 물질전달은 일어나지 않는다.

건구온도와 습구온도는 T-type 열전대를 사용하여 측정 부위를 세 부분으로 나누어 측정하였다. 측정된 데이터는 자료 획득 장치(DAS: Data Acquisition System)를 이용하여 수집하였으며, 위치에 따른 편차를 최소화하도록 측정값을 산술평균하여 저장하였다. 증발냉각 실험은 약 30분간 예비가동을 하여 정상상태까지

도달시켰으며, 외기 및 실내온도 변화를 고려한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental conditions

Type	Variables	Unit	Value				
			50	100	150	200	250
Latent heat	Air flow rate	m <sup>3</sup> /h	50	100	150	200	250
	Water flow rate	m <sup>3</sup> /h	0.012	0.015	0.018		
Latent heat	OA	℃	30 ~ 41				
		%	13 ~ 35				
	RA	℃	24 ~ 28				
		%	26 ~ 38				

외기조건은 증발냉각의 냉각성능을 최대한으로 이용할 수 있는 여름철의 기상조건을 모사하여 30 ~ 41 ℃ 범위로 조절하였다. 또한, 실내조건은 에너지 절약을 위한 공공기관의 실내온도 조건인 24 ~ 28 ℃ 범위로 변화시켜가며 실험하였다. 이때 공기 유량은 슬라이더스의 전압 가용범위에 따라 50 ~ 250 CMH 까지 50 CMH 단위로 조절하였다. 이를 Re수로 환산하면 70 ~ 350 범위에 속한다. 물 분무유량은 소형 펌프의 전압 가용범위에 맞춰 0.012 ~ 0.018 CMH (200 ~ 300 mL/min) 범위로 조절하여 물 분무유량에 따른 효과도 확인하였다.

### 2.3 간접식 증발냉각장치 성능실험결과

환기 측에 공급되는 물 분무로 인해 최대로 냉각될 수 있는 온도는 환기의 습구온도까지 가능하다. 따라서 최대 열전달률은 Eq. (1)과 같이 계산된다. 증발냉각의 경우 현열냉각처럼 차가운 유체와 뜨거운 유체의 평균 열전달률을 사용하기 어려우므로 Eq. (2)처럼 물이 직접적으로 닿지 않는 주 유동의 열전달률로만 계산한다. 증발냉각시 유용도는 가능한 최대 열전달률에 대한 실제 열전달률의 비로 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\dot{Q}_{\max} = (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{OA_{DB}} - T_{RA_{WB}}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{actual}} = \dot{m}_{OA} c_{p,OA} (T_{OA_{DB}} - T_{SA_{DB}}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \dot{Q}_{\text{actual}} / \dot{Q}_{\max} \quad (3)$$

식에서  $\dot{m}$ 은 공기의 질량유량을,  $c_p$ 는 비열을 말하고 온도 T의 하첨자 DB, WB는 각각 건구(Dry-Bulb)와 습구(Wet-Bulb)의 약자이다.

Fig. 3은 실내-외 조건을 일정하게 유지시켰을 때 공기 유량(a)과 물 분무유량(b)을 변화시켜가며 유용도 변화를 확인한 것이다. 공기 유량이 많아지면서 공기가 열교환기에 체류하는 시간이 점차 줄어들기 때문에 열교환

기의 유용도는 점차 감소하게 된다. 물 분무유량의 경우 유용도는 증가하다가 0.015 CMH 이후 점차 감소하였다. 이는 물이 증발하다가 분무량이 증발량을 넘어서는 순간 외기가 분무되는 물을 증발시키기보다는 온도를 올리는데 쓰이기 때문이다.

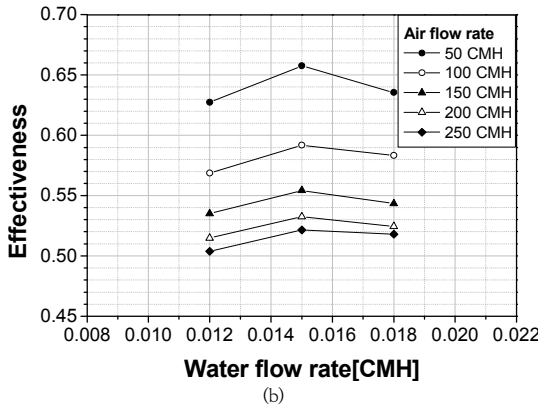
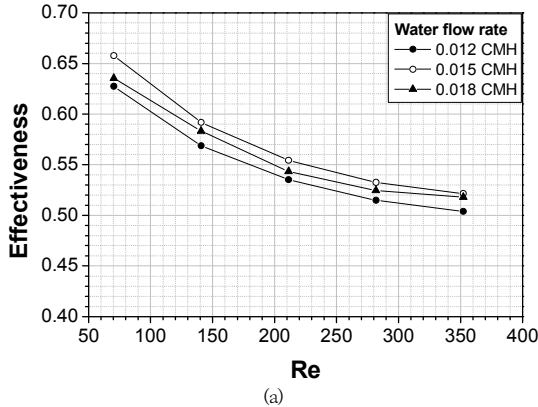


Fig. 3. Variation of effectiveness with air flow rate and water flow rate in case of cross-flow (a) Variation of air flow rate, (b) Variation of water flow rate

증발냉각을 이용한 실험은 물, 공기온도 및 유량, 유동 방향, 기상조건 등 고려해야 할 변수가 많기 때문에 성능을 예측하기가 쉽지 않다. 따라서, 유성연 등[9]은 대항류로 흐르는 육각물결형 플라스틱 열교환기를 적용한 간접식 증발냉각장치의 유용도 상관식을 실험적으로 제안한 바 있으며, 실험값과의 오차는 3 % 미만이었다.

실험에 의한 예측 상관식은 동일한 열교환기를 사용하였을 경우, 성능을 비슷한 수준으로 예측하여 설계의 기초자료로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 같은 방법으로 직교류의 다채널 열교환기의 유용도 상관식을 새로이 제안하였으며, 이는 Eq. (4)와 같다.

$$\varepsilon = 0.99279 Re^{-0.0866} (\dot{m}_w / \dot{m}_a)^{0.05211} \quad (4)$$

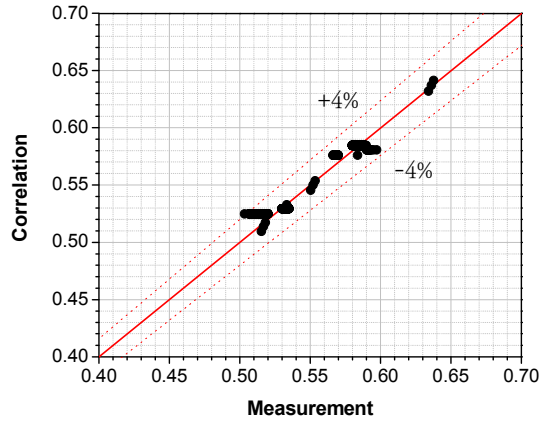


Fig. 4. Comparison of measured effectiveness with those of correlation calculated by Re and water to air ratio

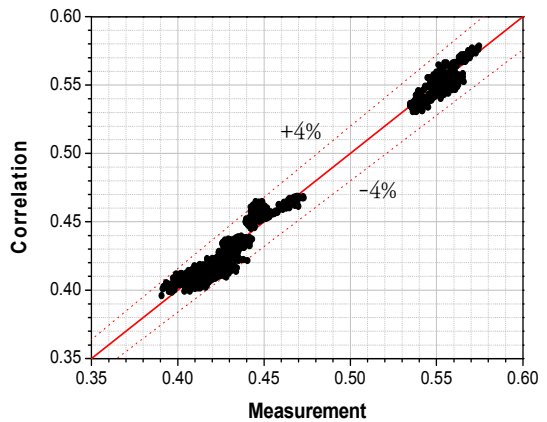


Fig. 5. Comparison of measured effectiveness with those of correlation at various RA and OA temperatures

식에서 Re는 공기의 레이놀즈 수이며,  $(\dot{m}_w / \dot{m}_a)$ 는 물의 질량유량( $\dot{m}_w$ )을 공기의 질량유량( $\dot{m}_a$ )으로 나누어 무차원화 시킨 항으로 수공비라고 명명하였다. 해당 식은 등온조건에서 실험한 데이터 약 3,000여 개를 통합하여 만들어졌다. 실험값과 예측값은 Fig. 4를 통해 비교하였으며, 예측값은 실험값과 4 % 이내의 오차를 보였다.

실제로는 실내 환기온도와 외기상태가 시시각각 변하게 된다. 이를 반영하기 위해 외기온도와 환기온도의 차를 두 온도의 평균값으로 무차원화하여 기존 Eq. (4)에 추가하여 Eq. (5)와 같은 폴의 유용도 상관식을 도출하였

다. 선행연구에서 대항류의 육각물결형 플라스틱 열교환기에 대한 해당 식의 정확도를 검증한 바 있다[7]. 본 연구에서는 동일한 방법으로 직교류 다채널 판형 열교환기의 유용도 상관식을 Eq. (5)와 같이 제안하였다.

$$\varepsilon = aRe^b(\dot{m}_w/\dot{m}_a)^c \left( \frac{T_{OA_{DB}} - T_{RA_{DB}}}{(T_{OA_{DB}} + T_{RA_{DB}})/2} \right)^d + e \quad (5)$$

여기서 계수 a, b, c는 공기 유량 및 물 분무유량에 영향을 받는 인자이기 때문에 Eq. (4)와 동일하며, d, e는 실내 환기온도와 외기온도에 영향을 받는 인자로 각각 0.02941, 0.01285로 계산되었다. 실험 데이터는 각 Case 별 Table 1의 온도조건으로 실험하였으며, 약 12,000여 개의 측정값을 이용하여 높은 신뢰도의 유용도 상관식을 제안하였다. 상관식은 Table 1과 같은 실험 조건에서 실험값과 4 % 이내의 오차를 보임을 확인하였다.

### 3. 결론

시중에서 값싸고 손쉽게 구할 수 있는 단프라스트를 이용하여 직교류의 다채널 열교환기를 설계·제작하고, 이를 간접식 증발냉각장치에 적용하였다. 또한, 다양한 공기/물 분무유량에서 실험하여 성능을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단프라스트로 만든 다채널 열교환기를 적용한 간접식 증발냉각장치는 물 분무유량 0.012, 0.015, 0.018 CMH에서 유용도는 각각 0.627 ~ 0.504, 0.658 ~ 0.522, 0.635 ~ 0.518까지 변화하였다.
- (2) 분무량이 너무 많을 경우 외기온도가 물을 충분히 증발시키지 못하고 분무되는 물의 온도만을 올리기 때문에 증발량과 분무량 사이의 최적점을 찾는 것이 중요하다.
- (3) 실내 환기온도와 외기상태를 반영하는 상관식을 제안하여 해당 유량 범위 및 기상 조건에서 오차 4 % 이내의 정확도를 보이는 것을 확인하였다.

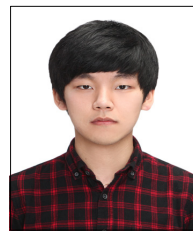
### References

[1] E. S. Yang, S. J. Lee, A. R. Kim, IEA World Energy Outlook 2018 Analysis, Investigation Report, Korea Energy Economics Institute, Korea, p.3.  
 [2] M. R. Jo, Korean Climate Change Assessment Report 2020, p.362, Ministry of Environment, 2020, pp.14-15.

[3] C. W. Park. "Research and development trends of absorption chillers at domestic and abroad", *The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 43, p.19, 2014.  
 [4] S. M. Woo, S. Y. Lee, K. Y. Kim, H. S. Kim, "A Study on the Development of Triple Effect Absorption Chiller", *Proceedings of The Society Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Conference on Summer*, SAREK, Pyeongchang, Korea, pp.412-416, June 2019.  
 [5] I. O. Mikulionok, "Use of Polymer Materials in Heat Exchangers (Review of Patents)", *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol.55, Nos.7-8, pp.687-695, August 2019.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10556-019-00680-z>  
 [6] G. H. Choi, Y. I. Kim, M. S. Kim, "A Numerical Study on the Performance of Plastic Coated Aluminium Plate Heat Exchanger", *Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol.14, No.1, pp.22-29, February 2018.  
 DOI: <https://doi.org/10.17664/ksgee.2018.14.1.022>  
 [7] S. Y. Yoo, T. H. Kim, M. H. Kim "Study on Performance Prediction and Energy Saving of Indirect Evaporative Cooling System", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, Vol.39, No.9, pp.743-749, September 2015.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.9.743>  
 [8] S. Y. Yoo, M. H. Chung, Y. M. Lee, "A Study on the Factors Affecting the Performance of Plastic Plate Heat Exchanger", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.17, No.9, pp.839-849, September 2005.  
 [9] S. Y. Yoo, T. H. Kim, M. H. Kim "Performance of Heat Recovery System using Evaporative Cooling", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, Vol.39, No.1, pp.37-43, January 2015.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.1.037>

김 명 호(Myung-Ho Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학 석사)
- 2018년 10월 ~ 2020년 6월 : 에코에너지 기술연구소 주임연구원
- 2020년 7월 ~ 현재 : 충남대학교 첨단수송제연구소 전임연구원

<관심분야>

HVAC, 히트펌프 시스템, 유동가시화, CFD

김 병 재(Byoung Jae Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학학사)
- 2003년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)

- 2008년 12월 ~ 2016년 8월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2016년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 조교수

<관심분야>

2상유동, 원자로열수력, 유동가시화