

균일유동에서 백연저감용 전열판 형태에 대한 열유동 특성

손준¹, 차재민¹, 왕젠후안¹, 권영철^{2*}

¹선문대학교 기계공학과 대학원생, ²선문대학교 기계공학과

Heat Flow Characteristics on Type of Heat Transfer Plate for White Smoke Reduction under Uniform Flow Condition

Jun Son¹, Jae Min Cha¹, Zhen Huan Wang¹, Young Chul Kwon^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Mechanical Eng., Sunmoon University

²Dept. of Mechanical Eng., Sunmoon University

요약 굴뚝의 백연을 줄이기 위하여 6종의 전열판을 선정하여 각각에 대한 열유동 특성을 연구하였다. 본 연구에서는 전열판의 열전달 성능(열전달 능력, 압력강하, 난류운동 에너지, 열전달계수 등)을 조사하기 위하여 상용 전산유체역학 프로그램인 ANSYS CFX Ver.14를 활용하여 균일유동 조건에서 수치해석을 수행하였다. 다른 유로구조를 가지는 6종의 전열판에 대한 전산해석으로부터 기본형, 사각형, 삼각형, 파형 열교환기의 열유동 과정이 모사되었다. 균일유동 해석으로부터 6종 열교환기들의 열전달 능력, 압력강하, 난류운동 에너지, 열전달계수들은 다른 경향을 보였으며, 유로 내의 열유동 특성은 주어진 유량, 전열판 형상, 종횡비에 좌우됨을 알 수 있었으며, 동일 파형에서는 종횡비가 낮을수록 열전달 성능이 우수하였다. 본 연구의 결과는 백연저감용 열교환기의 설계 기초자료로 활용될 것이다.

Abstract Numerical analyses were performed on the heat flow characteristics of a heat transfer plate with six different shapes (basic, rectangle, triangle, wave type) to reduce the level of white smoke at a stack. In this study, to examine the heat transfer performance (heat transfer capacity, pressure drop, turbulence kinetic energy, heat transfer coefficient) on the heat transfer plates, simulations were conducted using the commercial computational fluid dynamics software, ANSYS CFX Ver.14 under uniform flow conditions. The thermal flow phenomenon in a channel with six heat transfer plates could be predicted adequately under uniform flow conditions. The heat transfer capacity, pressure drop, turbulence kinetic energy, and heat transfer coefficient were affected by the flow rate, aspect ratio and plate shape. These results provide guidelines to design an effective heat exchanger with the wave type to reduce white smoke.

Keywords: Heat flow, Heat transfer plate, Pressure drop, Uniform flow, White smoke

1. 서론

열교환기는 열전달 과정을 이용하여 고온유체에서 저온유체로 열에너지를 이동시키는 기기이다. 발전소, 자동차, 가정용 공조기 및 백연저감용 등 다양한 산업분야에 사용된다. 최근 들어 환경오염 문제에 대한 인식변화 및 법규강화로 산업분야에서 환경오염 문제는 설계단계

에서부터 우선적으로 고려되고 있다. 일반적으로 냉각수를 사용하여 설비나 제품 등을 냉각하는 산업에서는 필연적으로 수증기를 포함하는 배기가스가 발생된다. 배기가스는 다량의 수분과 여러 물질을 함유하고 있어 굴뚝으로 배출시 백연(white smoke) 현상이 발생한다(fig. 1). 대기온도가 낮고 습도가 높을수록 수증기가 냉각 응축하여 작은 물방울로 가시화된 백연의 발생량이 많아진

본 논문은 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업지원으로 수행되었다.

*Corresponding Author : Young Chul Kwon (Sunmoon University)

Tel: +82-10-8523-0923 email: yckweon1@sunmoon.ac.kr

Received September 18, 2015

Revised October 8, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016



Fig. 1. White smoke at stack

다. 백연을 저감하기 위해서는 굴뚝에서 뜨거운 배기가스가 토출되기 전에 배기가스에 포함된 수증기를 냉각 및 제습방법을 이용하여 제거하는 것이 효과적이다. 따라서 기존연구 및 기술개발 필요성을 검토하였고, 굴뚝에서의 백연 형성기구와 백연저감 방법 그리고 백연저감 기술동향 등을 조사하였다.

Zukauskas [1]는 직교류에서 관군의 열전달 및 압력강하를, Yoo et. al [2]은 정렬배열 직교류 열교환기의 간격비, 배치, 속도를 변수로 국소열전달을 연구하였다. 그 외에도 열교환기의 열전달 성능을 향상시키기 위하여 열교환기와 핀 형상에 따른 열교환기 최적설계 연구가 진행되고 있다. Lee et al. [3]은 웨브론형, 파형, 뎀플형 등의 전열판으로 만들어진 냉각탑 충전재에 대한 성능실험을 수행하였다. Yoo et al. [4, 5]은 배열 회수용 플라스틱 판형 열교환기의 열전달 성능을 향상시키는 방안으로 난류촉진형, 파형, 뎀플형에 대한 성능시험을 수행하여 열전달 성능은 파형이 가장 크게 나타남을 제시하였다. Chung et al.[6]은 고성능 전열판(난류촉진형, 웨이브형, 뎀플형)의 전열량 및 압력손실에 대한 수치해석을 수행하였다. 특히 파형의 경우 전열판 영역에서 유동혼합이 강해져 열전달 성능이 향상된다고 보고하였다. Kim et al. [7]은 직교류 공랭식 판형 열교환기에서 파형(단일 / 이중 웨이브)이 열전달 성능 및 압력손실에 미치는 영향을 검토하였다.

본 연구에서는 열교환기의 전열판 구조를 기존의 사각과 삼각형이 아닌 파형의 형태로 구성하여 열유동 특성이 우수한 전열판을 선정하는데 목적이 있다. 전열판은 열전달 효과를 최대화하기 위하여 주름모양의 파형을 형성하여 열전달 면적을 극대화하고, 유체의 흐름을 활발하게 하여 우수한 냉각 제습효과를 확보하고자 한다.

본 논문은 백연저감을 위한 냉각제습용 파형 열교환기의 설계해석 기초연구로 진행되었으며, 균일 유동조건에서 여러 종류의 전열판 형태에 따른 열유동 특성을 이해하고자 열유동 프로그램을 이용하였다. 이를 통해 향후 백연저감 설비에 최적 전열판을 적용하여 실험을 수행할 예정이다.

2. 해석이론 및 방법

2.1 해석이론

수치해석을 통한 열교환기의 열전달 해석법은 해석대상 모델링 작업과 경계조건 등이 제공되면 해석이 가능하다. 전산해석을 통해 유동장내의 속도, 압력, 온도 등의 분포를 알 수 있으므로, 본 연구에서는 ANSYS의 유동해석 범용 프로그램을 이용하여 백연 저감을 위한 파형 열교환기의 열유동 특성을 이해하고자 하였다. 해석 준비 및 결과를 위한 전후처리 프로그램으로 형상 모델링을 위해 Solidwork 2013, ANSYS Design Modeler를, 격자생성을 위해 ANSYS Meshing, ICEM-CFD를, 전산해석을 위한 solver로 ANSYS CFX(Ver.14)를 사용하였다.

다양한 전열판 형태를 가지는 열교환기의 열유동에 대한 수치해석 비교를 위해 비압축성, 정상상태 조건하에서 사각 채널 내의 열유동을 계산하였다. 이 때 모든 열적 상태량은 일정하다고 가정하였으며, 부력효과는 고려하지 않았다. 난류유동을 해석하기 위해서 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 격자는 67만개의 사면체 형태를 가지며, 해석의 수렴을 위해 임계오차 값을 10^{-4} 으로 설정하였다.

2.2 해석모델

Fig. 2는 균일유동 모델해석에 사용된 사각 채널(a)과 채널 내에 삽입된 기본형, 사각판, 삼각판, 파형판의 형상(b~f)을 나타낸다. 파형 열교환기와 일반 열교환기의 열유동 특성을 비교하기 위하여 사각 채널 내에 전열판을 삽입하였다. 전열판의 형태에 따른 열유동 특성을 비교하기 위하여 6종의 전열판을 모델링하였다. 상부 채널에 고온 유체가 하부 채널에 저온 유체가 유입되어 전열판에 따른 유동변화와 열유동과정을 이해하고자 하였다. 채널 내부의 전열판의 형상에 의한 열유동 특성을 파악

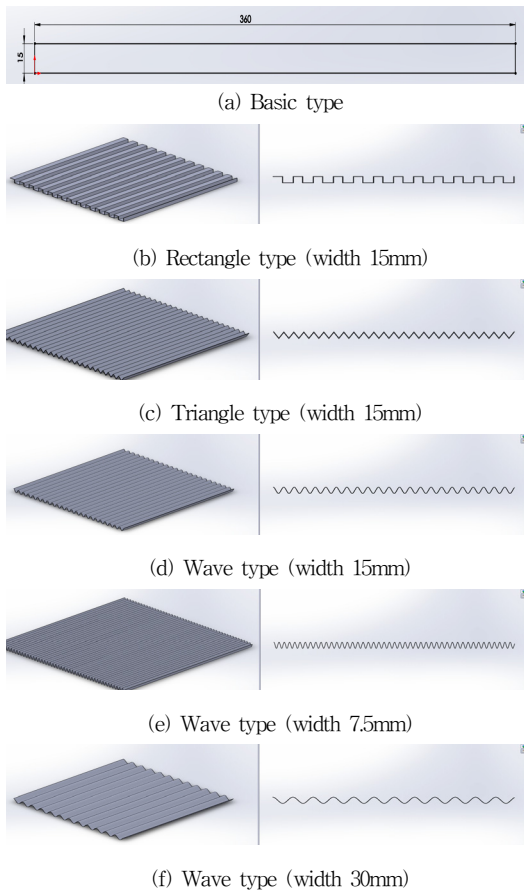


Fig. 2. Shapes of heat transfer plate

하기 위하여 입구에서 유동은 균일 속도를 갖는 균일유동 모델을 고려하였다. Table 1은 채널과 전열판의 형상에 대한 사양을 나타낸다. 사각 채널 내에 삽입되는 판의 종횡비(aspect ratio)는 폭(W)과 높이(H)로 결정된다. 본 연구에서 높이를 15mm 고정하고 판의 형상과 폭을 변화시켰다. 판이 없는 직사각형(fig.2 (a))을 기준으로 폭 15mm(종횡비 1)의 사각형(fig. 2 (b)), 삼각형(fig. 2 (c)) 파형(fig. 2 (d))의 판 형상에 대한 특성과, 동일 파형에서 폭이 7.5mm(fig. 2 (e))인 종횡비 0.5와 30mm(fig. 2 (f))인 종횡비 2에 대한 특성을 파악하였다.

수치해석을 위하여 열유체분야의 상용코드인 ANSYS CFX를 사용하였다. 사용한 지배방정식을 유한체적법으로 이산화 하였으며, 압력장을 얻기 위해 SIMPLEC 방법을 사용하였다. 경계조건으로 입구는 균일 유속과 온도조건을, 출구에서는 대기압 조건을 부여하였다. 사각채널과 전열판의 모든 벽 경계조건은 점착

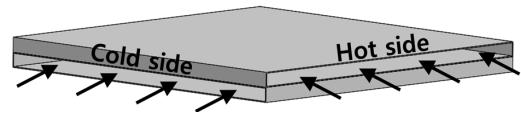


Fig. 3. Flow direction of cold side and hot side

Table 1. Specifications of heat exchanger(mm)

Size	Type	Heigh	Width	Aspect ratio
15(H) * 360(W) * 360(L)	Rectangular (no fin)	15	-	-
	Rectangular Triangle Wave (with fin)		15	1
			7.5, 15, 30	0.5, 1, 2

Table 2. Analysis condition on uniform flow model

	Cold side	Hot side
Flow rate (lpm)	15, 30, 50	15, 30, 50
Temperature (°C)	10	25

Table 3. Properties on SUS 304 and water

	Stainless steel (304)	Water
Density(kg/m ³)	7854	998
Viscosity(kg/m-s)	-	8.9E-4
Specific heat capacity (J/kg-K)	-	4181
Thermal conductivity (W/m-K)	60.5	0.6069

(no-slip)조건을 적용하였다. 작동유체는 액상의 물로 저온측과 고온측은 fig. 3에 표기하였으며, 열교환기는 SUS 304를 사용하였다. 해석조건은 table 2와 같으며, 본 수치해석 연구에서 사용한 물성치는 대기압, 25°C의 데이터를 사용하였으며 table 3과 같다.

3. 해석결과

균일유동 모델 해석을 통하여 전열판의 형상과 종횡비에 따른 사각 채널 내 열유동 과정을 이해하고자, 사각 채널 내 속도분포, 열전달 능력, 압력강하, 난류 운동에너지, 열전달계수 등을 계산하였다. 계산된 수치해석 값들은 모델링된 전체 계산 도메인의 평균값이다. 전열판은 열전달 효과를 최대화하기 위하여 주름모양의 파형을

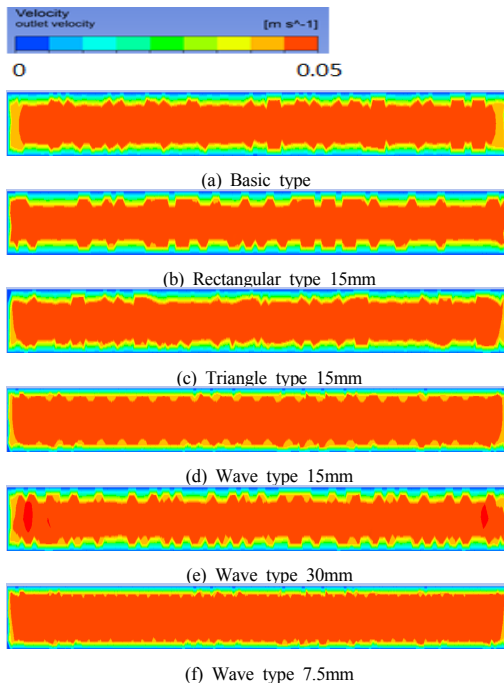


Fig. 4. Exit velocities of channel under uniform flow model

형성하여 열전달 면적을 극대화하였고, 유체의 흐름을 활발하게 하기 위해 종횡비를 변경하였다.

Fig. 4는 채널의 출구속도를 나타낸다. 전열판 형상에 따라서 속도분포는 서로 상이하다. 삼각판과 사각판의 출구속도는 벽 근처에서 불균일한 속도분포를 보이지만, 파형판에서는 상대적으로 균일한 속도분포를 보이며 벽 근처에서도 속도감소가 낮았다. 그리고 파형판의 경우에 종횡비가 낮을수록 속도분포가 가장 균일하였다.

Fig. 5는 균일유동 모델해석에서 전열판이 없는 기본형과 사각형, 삼각형, 파형판의 열전달 능력을 보여준다. 전열판의 형태에 따라 열전달 능력이 변화하며, 기본형 대비 열전달 능력은 파형판이 가장 우수하였다. 동일 형상인 파형판의 종횡비에 따른 열전달 능력은 종횡비 0.5가 1.5~3배로 종횡비 2의 0.3~1.3배보다 높다. 또한 유량 15, 30, 50lpm에서 종횡비 1을 기준으로 종횡비가 2일 때, 열전달 능력은 67, 54, 42% 감소, 종횡비가 0.5일 때 열전달 능력은 51, 37, 33% 증가하였다. 즉, 종횡비가 가장 작은 파형판의 열전달 능력이 가장 우수하였다. 이는 전열판의 주름모양이 열전달 면적을 향상시켜 전열판을 통한 열전달 효과가 증가되었기 때문이다.

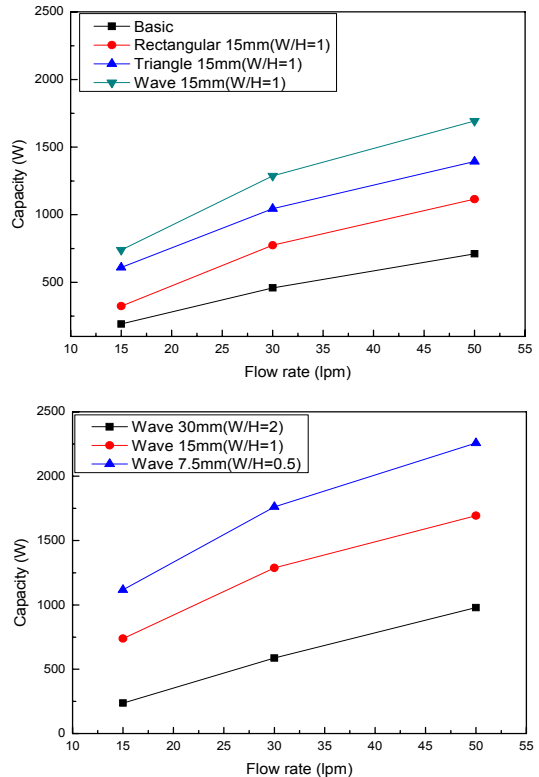


Fig. 5. Heat transfer capacities under uniform flow model

Fig. 6은 5종 전열판에 대한 압력강하를 보여준다. 전열판 형상에 의한 압력강하는 삼각형과 파형이 5~65배로 가장 높았다. 동일 형상인 파형판의 종횡비에 따른 압력강하는 종횡비가 0.5일 때 2~25배로 가장 높았다. 이는 종횡비가 감소할수록 수력직경이 줄어들어 압력강하가 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 유량 변화에 따른 평균 난류운동 에너지를 나타낸다. 종횡비가 1의 경우에, 유량 15, 30, 50lpm에서 파형판의 평균 난류운동 에너지가 2.5~32배로 가장 높으며, 삼각판은 2~23배, 사각판은 1.7~19배, 기본형은 1~12배 이었다. 동일 형상인 파형판의 종횡비에 따른 평균 난류운동 에너지는 종횡비가 0.5일 때 2.9~36배로 종횡비 1, 2보다 높았다. 이는 종횡비가 작을수록 유로 내 유속이 증가하고 전열판 위와 아래 영역에서 유체운동이 활발하여 유동 혼합이 강해지기 때문이다. 그 결과 열전달 성능이 향상되게 된다. 균일유동 해석으로부터 판 형상과 종횡비가 열유동 특성인 난류 운동에너지에 영향 주며, 그 결과 열전달 능력과 압력강하가 달라지는 것을 알 수 있었다.

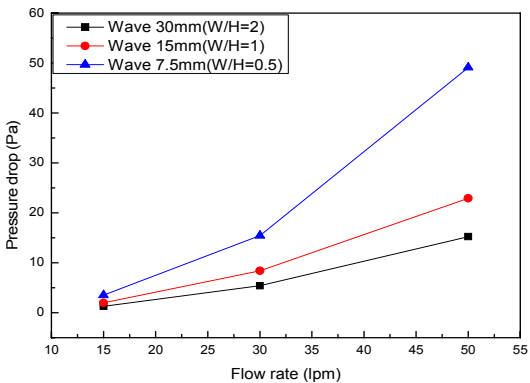
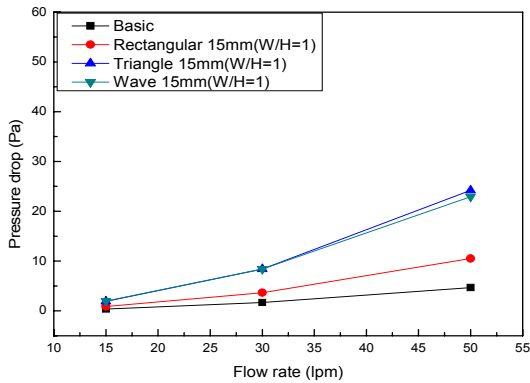


Fig. 6. Pressure drops under uniform flow model

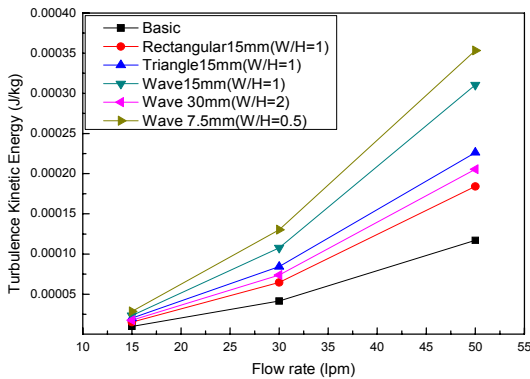


Fig. 7. Turbulence kinetic energies under uniform flow model

Fig. 8은 유량 변화에 따른 평균 열전달계수로, 전열판의 형상에 따라 열전달계수가 다르다. 유량이 증가할수록 열전달계수는 증가하며, 기본형보다는 채널 내 열전달 판이 있을 때 높은 열전달계수를 보인다. 종횡비가 1의 경우에, 유량 15, 30, 50lpm에서 평균 열전달계수는 파형판이 1.5~5.9배로 가장 높으며, 삼각판은 1.4~5배,

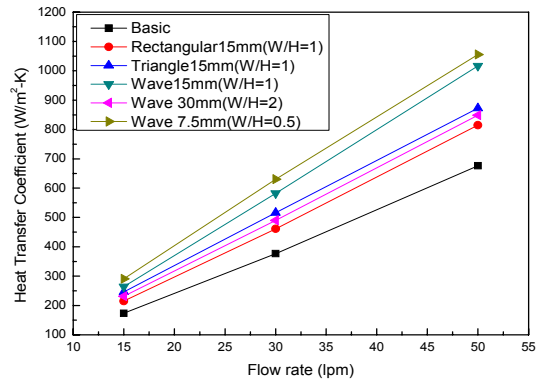


Fig. 8. Heat transfer coefficients under uniform flow model

사각판은 1.2~4.7배, 기본형은 1~2.3배 증가하였다. 동일 형상인 파형판의 종횡비에 따른 평균 열전달계수는 종횡비 0.5일 때 1.7~6.1배로 가장 높으며, 종횡비 2에서는 1.3~4.8배로 나타났다.

4. 결론

백연저감을 위한 전열판 형태에 따른 열교환기의 성능을 조사하기 위하여 다양한 형태의 전열판에 대한 비교 연구를 하였다. 이를 위해 균일유동 조건에서의 열유동 특성 연구를 상용 전산유체역학 프로그램인 ANSYS CFX Ver.14를 이용하여 계산을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전열판 형상에 따라서 속도분포는 다르게 관찰되었으며, 파형판이 활발한 유동혼합으로 다른 전열판에 비해 채널 내 속도분포가 균일하였다.
- (2) 동일 형태의 파형에서는 종횡비가 낮은 0.5에서 가장 높았다. 이는 전열판의 주름모양이 열전달 면적을 증가시켜 전열판을 통한 열전달 효과가 향상되었기 때문이다. 파형 전열판의 종횡비가 줄어들수록 열전달과 압력강하는 증가하였다.
- (3) 균일유동 해석으로부터 채널 내의 열유동 특성은 전열판의 형상과 종횡비에 좌우됨을 알 수 있었다. 종횡비가 작을수록 유로 내 유속이 증가하고 유체운동이 활발해지기 때문에 난류운동 에너지와 열전달계수는 파형의 전열판에서 가장 우수하였다.
- (4) 전열판 형태에 따른 열전달 결과로부터 종횡비가 적은 파형 열교환기가 백연저감 측면에서 유용할 것

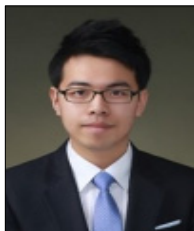
로 판단되었다. 따라서 파형 열교환기를 제작하여 백연저감 설비에서 실증실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] A. Zhukauskas, Heat Transfer of Cylinder Flow, Hemisphere Publishing Co. 1985.
- [2] S. Y. Yoo, H. K. Kwon, K. I. Jang, and J. T. Park, A study on local heat transfer characteristics for cross flow heat exchanger of in-line arrangement, Fall Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineering, pp. 2023-2028. 2006.
- [3] E. J. Lee, J. S. Kim and N. H. Kim, Performance comparison of heat transfer plates for cooling tower air heater through numerical analysis, J. Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 12, pp. 5676-5683, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5676>
- [4] S. Y. Yoo, M. H. Chung, K. H. Kim and J. M. Lee, An Experimental Study on the Performance of Plastic Plate Heat Exchanger, Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, pp. 117-124, 2005.
- [5] S. Y. Yoo, M. H. Chung and Y. M. Lee, A Study on the Factors Affecting the Performance of Plastic Plate Heat Exchanger, Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, pp. 839-848, 2005.
- [6] M. H. Chung, S. Y. Yoo, K. H. Han and H. I. Yoon, A Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Plastic Plate Heat Exchanger, Proceedings of the Summer Annual Conference, SAREK, pp. 1366-1371, 2008.
- [7] M. Kim, J. H. Lee, S. R. Park, H. S. Ra, J. H. Jeong and H. Lim, Experimental Investigation of an Cross-Flow Air-Cooled Heat Exchanger with Single-Wave and Double-Wave Plates, Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, pp. 347-354, 2009.

손 준(Jun Son)

[준회원]



- 2014년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>

냉동공조, 수치해석, 플랜트 설계

차 재 민(Jae Min Cha)

[준회원]



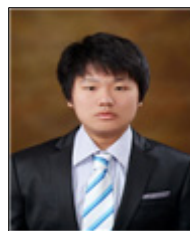
- 2015년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>

냉동공조, 수치해석

왕편후안(Zhen Huan Wang)

[준회원]



- 2014년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>

냉동공조, 수치해석

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한국 전력 전력연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

냉동공조, 열전달