

착상조건에서 연속난방이 가능한 히트펌프 성능 향상 기술

전창덕^{1*}

¹한국교통대학교 기계공학과

Performance Improvement Technology on a Continuous Heating Heat Pump at Frost Condition

Chang-Duk Jeon^{1*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요 약 히트펌프는 에너지 효율이 높고, 지열, 폐열, 공기열 등 다양한 열원 사용이 가능하기 때문에 보급이 빠르게 확대되고 있다. 공기를 열원으로 이용하는 공랭식 히트펌프의 경우는 실외기 표면에 형성되는 서리를 제거하기 위해 제상운전이 요구된다. 일반적으로 사용하는 역사이클(reverse cycle) 제상운전 방법은 연속난방이 불가능하며 이로 인해 성능계수가 감소하는 원인이 된다. 본 연구에서는 실외기 코일용 환-관 열교환기를 3열로 구성하고 난방과 제상이 동시에 가능하도록 일정시간 간격으로 열교환기의 한 개의 열을 응축기로, 나머지 열은 증발기로 교번 운전을 수행하여 KS C 9306에 규정된 제상-난방 시험조건(건구온도 2℃, 습구온도 1℃)에서 최소 180분 이상 연속난방이 가능함을 실증하였으며 역사이클 제상방법을 사용하는 일반적인 히트펌프 대비 COP가 약 20% 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract Heat pumps come into wide use because high energy efficiency can be obtained and diverse heat sources like geothermal heat, waste heat and air are available. It is necessary for an air source heat pump to defrost in order to remove frost on the surfaces of an outdoor heat exchanger. It is impossible for continuous heating if reverse cycle operation is used as defrosting method, furthermore it causes the degradation of COP. In this study an fin-tube heat exchanger with three rows was used as an outdoor coil. One row among three rows of the heat exchanger was used like a condenser in order to remove frost on it, the others were used as evaporator to accomplish continuous heating. Each row was switched in order from a condenser to an evaporator in specified time interval. Tests were carried out during minimum 180 minutes at the defrost-heating test condition(dry bulb temperature 2℃, wet bulb temperature 1℃) described in KS C 9306. Time-averaged COP was about 20% higher than that of conventional defrosting method.

Key Words : Heat Pump, Continuous Heating, COP, Frost, Defrosting

1. 서론

에너지 자원 고갈에 따른 에너지비용의 상승 등으로 인해 에너지를 절감할 수 있는 고효율 히트펌프의 성능 향상에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 히트펌프는 하나의 기기로 냉방과 난방을 할 수 있을 뿐만 아니라 일반적인 전열 난방기기에 비해 효율이 매우 높고, 보일러와 같이 이산화탄소를 직접적으로 발생시키지 않기 때문에 대표적인 냉난방기기로 자리를 잡아가고 있다. 공기를 열

원으로 사용하는 공랭식 히트펌프의 경우 단순한 외기온도조건에서 히트펌프를 사용하면 실외기 코일 표면에 서리가 형성되는 착상현상이 발생한다. 착상이 발생하면 실외기 코일의 증발능력 감소에 따른 난방능력의 감소를 가져오기 때문에 제상운전을 통해 서리를 주기적으로 제거해야 한다. 가장 보편적인 제상방법으로는 히트펌프를 냉방운전모드, 즉 실외기를 응축기로 실내기를 증발기로 작동시키는 역사이클 운전(reverse cycle operation) 방법이다. 그러나 역사이클 방법으로 제상하는 경우 제상기간

본 논문은 2012년 한국교통대학교 교내학술 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Chang-Duk Jeon (Korea National University of Transportation)

Tel: +82-43-841-5134 email: cjjeonr@cju.ac.kr

Received November 9, 2012

Revised (1st December 5, 2012, 2nd January 9, 2013)

Accepted February 6, 2013

동안 난방이 불가능해지며, 특히 히트펌프 냉온수기(heat pump water heater)의 경우에는 냉수가 생산되기 때문에 가급적 제상 사이클 운전횟수를 줄이기 위해 실외기 회전상[1], 부동액 도포[2], 열교환기내장형 어큐물레이터 개발[3] 등 다양한 착상 지연 방법이 연구되고 있다.

본 연구에서는 히트펌프를 착상시험조건(건구온도 2℃, 습구온도 1℃)에서 운전 시 실외기 코일에 형성되는 서리를 제거하기 위한 방법[4]으로 실외기 코일을 3열로 제작하여 제상이 요구되기 시점에 이르면 3열 중 한 개의 열을 응축기로 전환함으로써 제상을 수행하되 일정 주기 간격으로 응축기로 작동하는 열을 바꿔가며 제상하는 교번 제상 방법을 통해 교번 제상, 교번 제상 열량 등이 시스템 전체 난방능력 및 성능계수(COP)에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 압축기는 Copeland사에서 제작한 5HP 급 정속형 스크롤 압축기(모델번호 ZR61KC-TF5/7/D)를 사용하였으며, 수랭식 열교환기는 자체 제작한 무게 6.0kg, 가로, 세로, 높이 296x296x55mm, 응축능력 16 kW 급 직교류형 알루미늄 열교환기[5]를 사용하였다. 또한 실외기 코일을 구성하는 모든 열을 개별적으로 증발기에서 응축기로 또는 역으로 전환하기 위해서는 삼방밸브(3-way valve)가 요구되는데 냉동-공조용으로 시판되는 제품이 없어 수배관용 전동식 삼방밸브를 사용하였다. 일반적으로 수배관용 삼방밸브의 허용 최대압력은 10bar이고 R-22 냉매의 시스템 최대 작동 압력은 20bar 내외로 장시간 사용할 때는 누설 등의 문제가 예상되지만 단시간 성능평가를 위해서 사용하는 경우에는 큰 문제가 없었다. 응축기로 전환된 실외기 코일 열에 공급되는 핫가스(hot gas)량을 조절하기 위해 Sporlan사의 바이패스 밸브(모델명 SDR-3)를 사용하였다. Fig. 1은 본 실험의 사용된 시스템의 구성도이다.

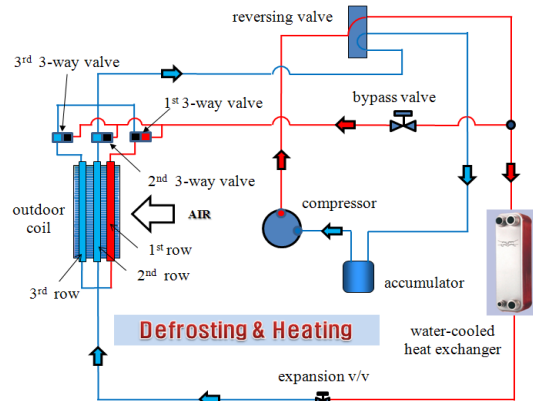
2.2 실험방법

실외기 열교환기에 형성된 서리를 제상하기 위하여 역 사이클 운전 방법을 사용하여 제상을 하게 되면 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 제상운전 시간 동안 난방능력은 0이 된다. 또한 역사이클 운전이 의미하듯이 난방에서 냉방, 그리고 다시 난방으로 운전 모드를 전환하기 위해서는 압축기를 정지시켜 한다. 압축기 운전을 정지한 재가동하면 정상상태에 도달하기 까지 일정 시간이 소요되고 이것

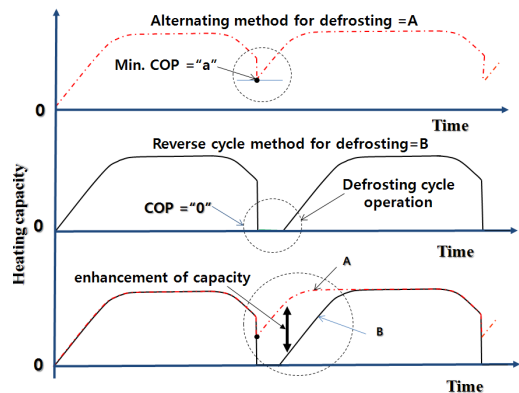
또한 난방능력을 감소시키는 원인이 된다.

그러나 실외기 코일 열중 일부 열만을 응축기로 전환하여 제상하는 교번제상방법의 경우에는 압축기 운전을 정지시킬 필요가 없으며 한 열만을 충분히 제상할 수 있을 정도의 핫가스만을 사용하면 되기 때문에 이론적으로는 정격 제상난방능력의 2/3수준까지 난방능력 확보가 가능하다.

교번제상방법에서 제상 효과는 교번주기, 제상시간 그리고 핫가스에 의한 제상열량에 따라 변할 것이다. 이를 알아보기 위해 두 가지 경우에 대해 예비실험을 수행하였다. 예비실험에 사용한 히트펌프 냉온수기 장치는 본 실험에 사용한 장치와 동일하나 수랭식 열교환기는 SWEP사 B25TH26(5RT급) 관형열교환기를 사용하였다. SWEP사 관형열교환기를 사용한 첫 번째 이유로는 신뢰성이 입증된 양산용 제품을 사용함으로써 예비실험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위한 것이며 두 번째 이유로는 본 실험에 사용한 알루미늄 수랭식 열교환기와 성능을 간접적으로 비교하기 위해서 이다.

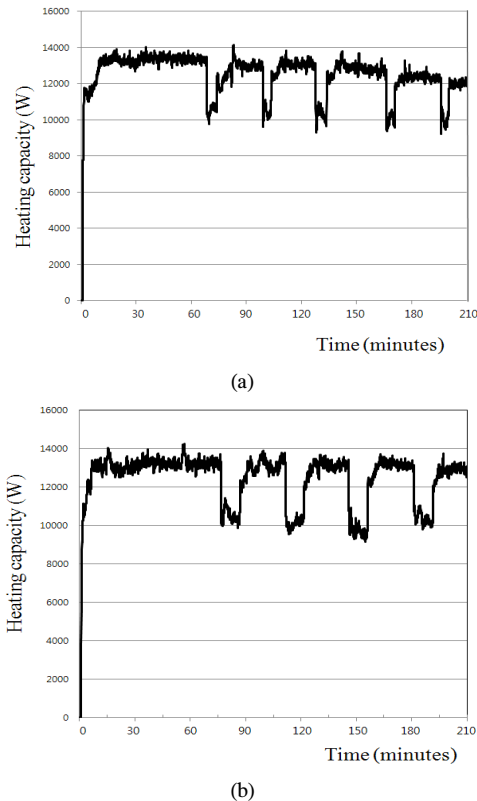


[Fig. 1] Schematic diagram of test apparatus



[Fig. 2] Effects of continuous heating

Fig. 3은 예비실험에 대한 결과로, Fig. 3(a)는 제상순서 1번열->2번열->3번열 순서로 하여 제상시간을 10분, 핫가스 제상열량을 약 2 kW 정도로 하였을 경우 시간에 따른 난방열량의 변화를 나타낸 그림이고, Fig. 3(b)는 제상순서 1번열->2번열->3번열 순서로 하여 제상시간을 5분, 핫가스 제상열량을 약 4 kW로 하였을 경우 시간에 경과에 대한 난방열량의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)의 경우 210분 동안의 평균 난방능력은 12,460 W이었으며 Fig. 3(b)의 경우는 210분 동안 평균 난방능력은 12,415 W 이었다. 따라서 두 경우 모두 20 kW·min(=5분×4 kW, 10분×2 kW)의 제상열량을 공급하였지만 Fig. 3(a)의 경우가 평균 난방능력이 약간 높게 나타났다. 그러나 시간이 경과할수록 난방능력의 감소폭이 Fig. 3(a)의 경우가 훨씬 커짐을 볼 수 있다. 그러므로 동일한 제상열량을 공급하더라도 제상열량과 제상시간을 어떻게 조합하여 설정하느냐에 따라 안정적으로 연속난방 기간을 늘릴 수 있음을 알 수 있다.



[Fig. 3] Effects on the performance according to defrosting time and amount of heating for defrosting (a) 10 min. defrosting time, 2 kW heating capacity for defrosting (b) 5 min. defrosting time, 4 kW heating capacity for defrosting

본 실험은 KS C 9306[6]에 언급된 제상-난방 시험조건에 맞춰 수행하였다. 앞서 Fig. 3에서 설명하였듯이 교번 제상 효과는 교번주기, 제상시간 및 핫가스 제상열량에 따라 변한다. 본 실험에서는 3개의 열을 모두 교번하지 않고 1번열과 3번열만을 교번하여 제상하는 방법을 채택하였다. 그러한 이유는 다음과 같다. 실외기 코일 열 교번 제상을 하기 위해서는 각 열마다 1개의 삼방밸브가 요구된다. 소형 전동 볼밸브 형식의 삼방밸브는 현재 국내에서 구입할 수 있는 제품이 없으며 미국 Muller사 제품의 경우 대당 가격이 약 20만 원 정도로 매우 고가이며 부피도 크고 응답성 또한 좋지 않다. 코일 열 교번 제상 방법을 히트펌프에 적용하기 위해서는 가급적 삼방밸브의 사용 개수를 줄이는 것이 필요하다. 따라서 본 실험에서는 1번열과 3번열만을 교번시킬 경우에도 제상 효과가 역사이클 제상방법보다 우수한 지를 알아보려 하였다. 실험절차를 간단하게 설명하며 다음과 같다. 칼로리미터실의 건습구 온도를 제상-난방시험 조건(건구온도 2℃/습구온도 1℃)에 맞춘 후 실험 장치의 소비전력, 난방능력이 안정화되면 데이터를 취득하기 시작한다. 시험 시작 후 시간이 20분 경과되면 핫가스 바이패스 밸브와 1번 삼방밸브의 냉매유로방향을 전환하여 실외기 코일 1번열을 5분 동안 응축기로 동작시켜 25분 동안 실외기 코일 1번열에 착상된 서리를 제거한다. 이 때 실외기 코일 1번열로 바이패스되는 핫가스 양은 제상기간 동안 평균 COP가 2.0 이상이 되도록 핫가스 바이패스 밸브 구동 전압을 조절하여 제어한다. 실외기 코일 1번열을 응축기로 5분간 작동시킨 다음, 핫가스 바이패스 밸브와 1번 삼방밸브를 동작시켜 실외기 코일 전체가 증발기가 되도록 하여 히트펌프 냉온수기가 최대 난방능력을 달성할 수 있도록 한다. 그 후 시간이 25분 경과하면 핫가스 바이패스 밸브와 3번 삼방밸브의 냉매유로방향을 전환하여 실외기 코일 3번열을 5분간 응축기로 동작시켜 실외기 1번열에 형성된 서리를 제거한다. 실외기 코일 1번열 제상방법과 동일하게 제상기간 동안 평균 COP가 2.0 이상이 되도록 핫가스 바이패스 냉매량을 제어한다. KS C 9306[6]의 9.8.5절 a)항에는 “1 제상 사이클이 3시간을 넘는 경우에는 1 제상 사이클 동안만을 측정한다.”라고 언급되어 있지만 본 실험에서는 최소 180분간 실험을 수행하여 3시간 동안 완벽하게 제상을 할 수 있는지 여부를 관찰하였으며, 평균 COP는 3 사이클에 대한 데이터를 사용하여 계산하였다.

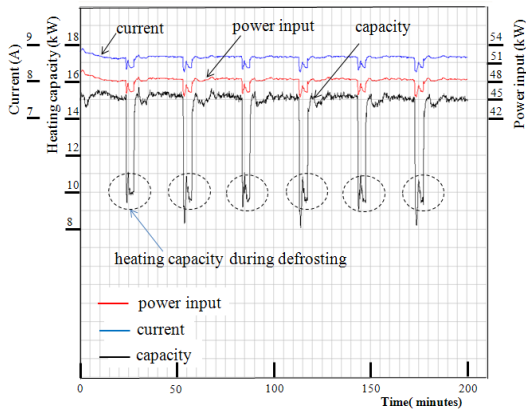
그러므로 난방제상기간의 동안 평균 COP는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$COP = \frac{\text{average heating capacity} (W)}{\text{average power consumption} (W)}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 난방능력 및 COP

일반적인 히트펌프의 경우 착상이 형성될 수 있는 외기조건에서 일정시간 가동하면 실외기 코일에 서리가 형성되어 난방능력이 급격히 감소하게 된다. 일반적인 히트펌프가 채택하고 있는 역사이클 제상방법에서는 50 분~60 분 주기로 제상 사이클을 작동시키며, 착상정도에 따라 차이가 있지만 총 제상운전에 소요되는 시간은 대략 10분정도이다. 이러한 경우 제상기간을 포함하여 평균 COP를 계산하면 제상 사이클이 작동하지 않는 구간의 COP 대비 50분 제상 주기인 경우에는 약 17 %, 60 분 제상 주기인 경우에는 14 % 정도 COP가 감소한다. 따라서 제상주기를 길게 할수록 평균 COP를 높일 수 있다.



[Fig. 4] Heating capacity variation with defrosting coil work alternatively under frost condition

Fig. 4는 제상 난방조건(건구온도 2 °C/습구온도 1 °C)에서 240 분간 히트펌프 냉온수기를 가동할 때 실외기 코일 열을 연속적으로 교번하여 제상과 동시에 난방이 가능하도록 시스템을 작동시켰을 경우에 대한 난방능력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 제상 회로를 작동하지 않는, 즉 실외기 코일 전체를 증발기로 작동시키는 구간의 평균난방능력은 15,020 W, 소비전력은 4,829 W로 평균 COP는 약 3.11로 나타났다. 실외기 코일 열을 제상회로로 작동시키는 경우 이 구간 평균 COP가 최소 2.0 이상이 되도록 핫가스 바이패스 밸브 개도 조절하여 3,000 W~5,000 W의 제상에 필요한 열량을 공급한 결과 평균 COP는 약 2.15로 나타났다. 그러므로 180 분의 총 운전시간동안 총 150 분간의 정상작동상태(제상회로 미가동)와 총 30 분간의 제상회로 작동시간에 대한 평균 COP는 2.95로 산출되었다. 이는 정상작동 시

평균 COP 3.11 대비 약 5 % 감소된 수치이며, 역사이클 제상방법을 적용하는 경우(제상 주기가 50 분인 경우 평균 COP=2.59)보다 최소 10 % 이상 COP를 향상시킬 수 있었다. COP가 향상되는 이유는 제상회로 작동시간 동안 2.0 이상의 COP를 얻을 수 있다는 점과 Fig. 2에서 설명하였듯이 제상회로가 종료되면 냉매회로가 빠르게 안정화되어 난방능력이 신속하게 정상상태의 값으로 회복되기 때문이다.

역사이클 제상방법을 사용하는 공랭식 히트펌프의 경우 제상운전 기간 동안 실내기 팬을 정지시키므로서 난방공간으로 냉기가 유입되는 것을 차단할 수 있어 사용자는 크게 불편함을 느끼지 못한다. 그러나 히트펌프 냉온수기, 즉 수랭식 열교환기를 사용하는 경우에는 물을 계속해서 순환시켜야 한다. 실내기 팬을 정지시키는 공랭식 히트펌프의 경우처럼 물 순환 펌프를 정지시키면 수랭식 열교환기 내의 물이 결빙되어 열교환기가 파손되기 때문이다. 따라서 제상운전 시 증발기로 작동되는 수랭식 열교환기는 계속해서 냉수를 생산할 수밖에 없으며 생산된 냉수는 물탱크 내에 저장된 물의 온도를 낮추게 된다. 제상 난방 조건(건구온도 2 °C/습구온도 1 °C)에서 수랭식 열교환기 입구 물 온도는 40 °C, 출구 물 온도는 45 °C이다. 일정시간 제상 난방 운전을 하였다면 물탱크 내에는 40 °C 이상의 온수가 들어있게 된다. 제상운전을 하기 위해 역사이클로 히트펌프 냉온수기를 작동시키면 증발기로 역할이 전환된 수랭식 열교환기로 유입되는 물의 온도가 40 °C 정도이므로 증발이 매우 잘된다. 동시에 실외기 코일로 유입되는 공기 온도는 2 °C 이므로 응축 또한 매우 효과적 일어난다. 따라서 제상 난방 운전 시의 발생하는 난방열량보다 역사이클 제상운전 시에 발생하는 냉각열량이 일반적으로 더 클 수밖에 없다.

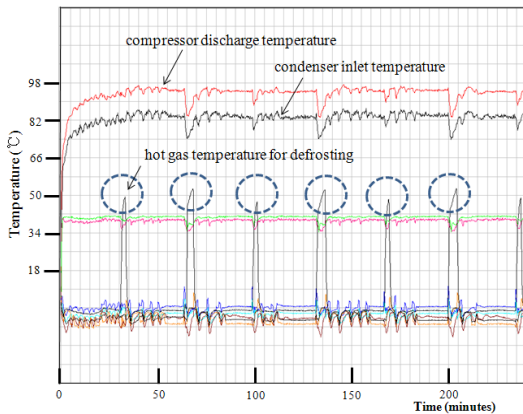
그러므로 이러한 점을 고려한다면 연속난방이 가능한 교번 제상-난방 시스템은 특별히 히트펌프 냉온수기의 경우 큰 장점을 갖는다.

역사이클 제상방법을 사용하는 히트펌프 냉온수기의 경우 제상기간 동안 난방능력으로 0로 산정하여 COP를 0으로 계산하지만 실제로는 냉수가 생산되기 때문에 음의 난방열량(증발열량)까지 반영한다면 -COP가 되기 때문이다. 이러한 효과까지 모두 고려한다면 역사이클 제상방법을 사용하는 히트펌프 냉온수기의 실제 평균 COP는 2.0 수준 밖에 되지 않을 것이다.

3.2 온도변화

Fig. 5는 제상 난방조건(건구온도 2 °C/습구온도 1 °C)에서 240 분간 히트펌프를 가동하여 실외기 코일 열을 교번하여 제상회로로 작동시켰을 경우 시스템 주요 위치

에서의 온도 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 실외기 코일 열을 제상회로로 작동하는 경우 코일 열 입구 냉매 온도는 50 ℃ 이상의 냉매가 유입되어 실외기 코일에 착상된 서리를 제거할 수 있다. 코일 열에서 응축된 냉매가 증발기로 직접 유입되므로 제상이 종료된 직후 일시적으로 온도 변화가 발생하지만 일정시간이 경과하면 압축기 입구 온도, 압축기 출구온도, 팽창밸브 전후의 온도 등 주요 지점에서의 온도가 안정화되는 것을 볼 수 있다. 이로부터 본 실험에 적용한 실외기 코일 열 교번 제상방법은 안정적으로 작동이 가능한 신뢰할 수 있는 제상방법임을 알 수 있다.



[Fig. 5] Temperature variation as a function of time under frost condition

4. 결론

KS C 9306에 따른 제상 난방시험 조건(건구온도 2 ℃/습구온도 1 ℃)에서 실외기 코일 열을 순차적으로 교번하여 제상하는, 즉 제상과 난방이 동시에 가능한 교번제상-난방회로를 적용하여 난방능력의 변화 추이 및 COP 향상효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일반적인 역사이클 제상운전 방법보다 교번제상-난방회로를 적용하는 경우 평균 COP를 최소 10% 이상 향상시킬 수 있으며 역사이클 제상방법을 사용하는 히트펌프에서는 불가능한 연속난방을 180 분 이상 수행할 수 있었으며 180 분 운전이후에도 난방능력의 감소가 미미하였다.
- (2) 본 연구에서는 실외기 코일 열을 교번 제상하는 시간과 주기를 고정시킨 시간주기 제어방법을 사용하였으나 보다 효과적으로 제상시점 및 종료시점

을 결정할 수 있는 온도에 의한 제상구동 장치 또는 광센서에 의한 제상구동 장치를 도입하여 유연하게 제어하다면 보다 향상된 COP를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. Xia, Y. Zhong, S. Hrnjak, M. Jacobi, "Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-fin tube heat exchanger", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, pp. 1066-1079, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.03.005>
- [2] Y. S. Chang and S. Y. Oh, "An experimental study on the frost prevention of heat exchanger by spreading antifreezing solution", *Proceedings of the summer spring annual conference of the KSME*, pp. 2148-2153, 2005.
- [3] W. Nutter and L. O'Neal, "Shortening the defrost cycle time with active enhancement within the suction-line accumulator of an air-source heat pump", *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 36, pp. 59-68, 1996.
- [4] C. D. Jeon, "Heat Exchanger", Korean Intellectual Property Office, 10-2009-0079191.
- [5] C. D. Jeon, "Heat Pump", Korean Intellectual Property Office, 10-2010-0070410.
- [6] KS C 9306, Air Conditioner, 2002.

전 창 덕(Chang-Duk Jeon)

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 1992년 4월 : 현대모비스 마북리연구소 연구원
- 1995년 9월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

냉동 및 공기조화, 열교환기 설계, 히트펌프