히트펌프식 냉난방장치의 철도차량 적용에 관한 연구

A study on the apllication Heat Pump to Rolling Stock Air conditioner

권태균* 송영정** 정광무***

Kweon, Tae-Kyun Song, Young-Jeong Jeong, Gwang-Moo

ABSTRACT

Heat pumps transfer heat by circulating a substance called a refrigerant through a cycle of evaporation and condensation. But Heat pumps system by only using heat-source is not efficient. Because the mean temperature of North Korean winter season is low, economy of air heat-source heat pump descend. This paper is practiced the simulation on evaluation criteria for Heat pump heating and cooling systems to Rolling Stock. Efficiency of the heat pump in order improving from certainly the development of the technique will be able to prevent a freezing actual condition must proceed.

As a result, Below -10℃ used heating and cooling systems of heat pump format even in cold winter season and is serviceable confirmed with heat source supply circle of the Rolling Stock

---

1. 서 론

히트 펌프는 저온의 열원에서 열을 흡수하여 고온의 수열체에 반송하는 장치로써 구동에 필요한 동력에너지보다 훨씬 더 많은 에너지를 열에너지 형태로 공급하는 에너지 절약적인 열 공급 장치이다. 히트펌프와 냉방장치는 동일한 구조로 구성되어 있으므로 냉매 유동경로의 적절한 조절을 통하여 동절기에는 히트펌프 사이클을 구동시켜 열을 공급하고 하절기에는 냉동장치로 작동시켜 열을 흡수하는 냉난방 장치로 활용할 수 있다.

철도 차량의 경우 북위 산간 지역일수록 동절기 평균 기온이 낮고 고속 운행 시 난방 효율성이 저하되기 때문에 현실적으로 국내 전동차에는 적용이 불가하였다.

본 연구에서는 동절기 온도 조건에 따른 히트펌프의 난방효율에 대해 Simulation을 통하여 최저 온도에서의 난방장치 작동 문제점과 내구성을 향상 시킬 수 있는 시스템의 구성하여 철도차량에 적용 가능성에 대한 검토와 해결과제에 대해 고찰 하고자 한다.

---

* 저자1: 현대로템 주식회사 기술연구소, 제품개발1팀, 비회원
E-mail : vstol@hyundai-rotem.co.kr
TEL : (031)460-1889 FAX : (031)460-1789

** 저자2: 현대로템 주식회사 기술연구소, 제품개발1팀, 비회원
E-mail : yjsong@hyundai-rotem.co.kr
TEL : (031)460-1078 FAX : (031)460-1789

*** 저자2:현대로템 주식회사 기술연구소, 제품개발1팀, 비회원
E-mail : moo9466@hyundai-rotem.co.kr
TEL : (031)460-1353 FAX : (031)460-1789

2. 성능 프로그램을 이용한 Simulation

2.1 시스템의 구성

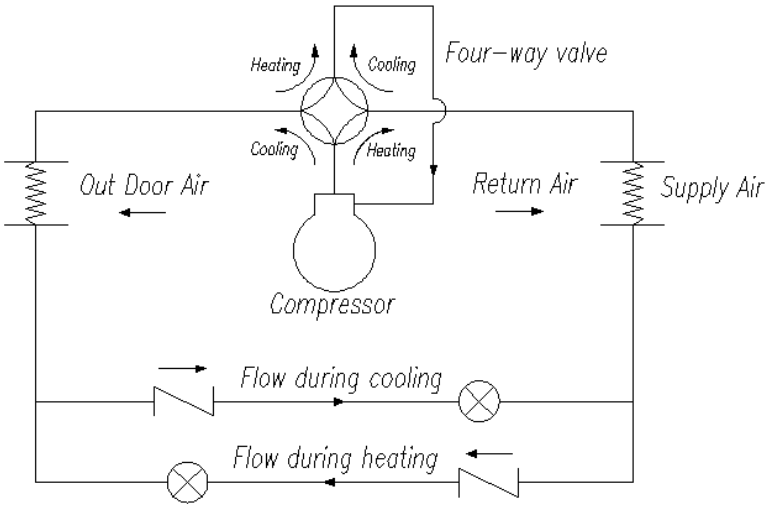


그림 1. 히트펌프 시스템 개략도

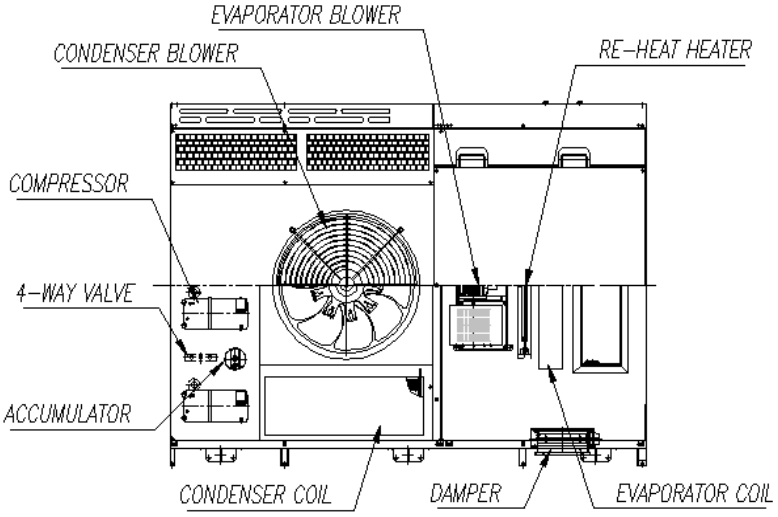


그림2. 히트펌프 시스템 내부 구조

기존 철도차량의 냉난방 장치는 전동차의 ROOF에 설치되어 냉방시에는 냉동 사이클을 이용하여 객실내에 cooling된 air를 공급하는 형태이며, 난방시에는 천정 내부에 설치 된 전열 히터에 송풍시켜 객실내로 유입 시키는 방식과, 객실 바닥에 설치된 전열히터를 자연 대류를 통해 객실 내에 공급하는 개념이었다.

본『히트펌프식 냉난방 장치의 철도차량 적용에 관한 연구』에는 주 히터를 이용하지 않고 냉동사이클과 역 냉동 사이클을 이용하여 외기온도에 따른 성능의 변화를 확인 하는 Simulation을 통해 히트펌프의 문제점과 향후 개발방향에 대해 고찰하고자 한다.

히트펌프를 단독으로 한 시스템을 차량에 적용하는 것은 가능성이 희박하기 때문에 시스템을 보완할 부가 장치들의 개발이 필요하며 주요 기능 부품은 아래 열거 사항과 같다.

①Re-Heat Heater : Evaporator의 결빙 현상을 방지하기위한 보조히터

②Compressor: Compressor내에 열선이 포함되어 동절기 동파 대비

③Heater : 혹한기 실내의 급속 난방을 위해 초기 구동하여 난방열량 확보

④증발기,응축기 열교환기에 냉매회로 개선

2.1.1 실외 온도 변화에 따른 Simulation

-실험 표준 조건

KS C 9306 에어컨디셔너 시험방법의 표준 조건

도표2. KS C 9306 에어컨디셔너 온도 표준조건

시험조건	실내 공기 상태		실외측 공기 상태(공랭식)	
	건구온도(℃)	습구온도(℃)	건구온도(℃)	습구온도(℃)
저온	20±0.5	15±0.5	-8.5±0.5	-9.5±0.5

: Roof Mount type

: 냉방용량 ⇒ 21,000kcal/h

: 난방용량 ⇒ 8,000kcal/h

: 열교환기의 결빙에 의한 성능저하 조건 제외

: 냉매 조건 ⇒ R22

도표1. 실외온도에 따른 난방장치의 성능 비교

실외 온도	공기측 온도(℃)		냉매측 온도(℃)		성능(W)	소비전력(W)	COP비(W/W)
	응축기출구	증발기출구	응축기입구	응축기출구			
15	10.49	43.10	14.34	8.95	25,209	10,268	2.46
10	6.05	40.75	9.72	4.77	22,528	9,568	2.36
5	1.61	38.54	5.16	0.34	22,335	8,886	2.25
0	-2.86	36.47	0.62	-4.24	17,644	8,206	2.15
-5	-7.41	34.54	-3.92	-9.11	15,444	7,512	2.06
-10	-11.98	32.80	-8.30	14.38	13,453	6,772	1.99
-15	-16.59	31.34	-12.13	-20.03	11,793	5,984	1.97
-20	-21.49	29.97	-15.0	-27.86	10,230	4,702	2.18

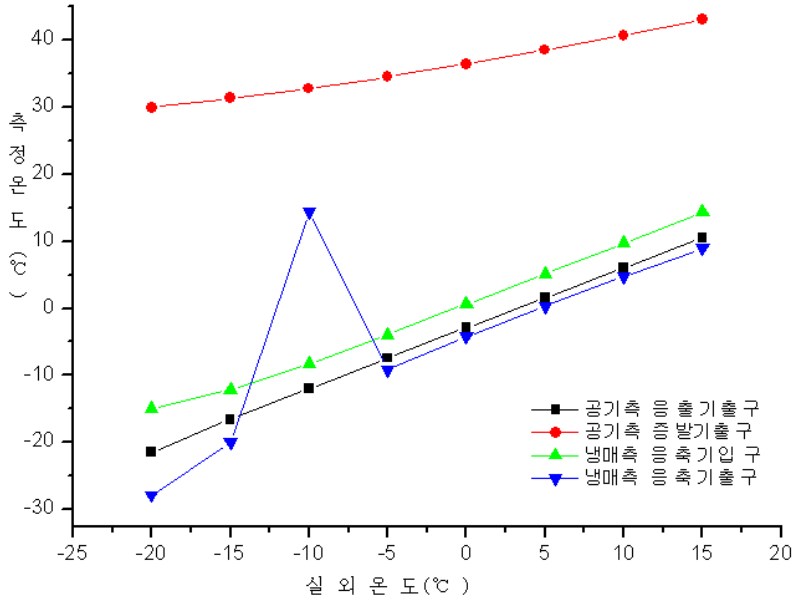


그림3. 온도 변화에 따른 열교환기의 온도분포

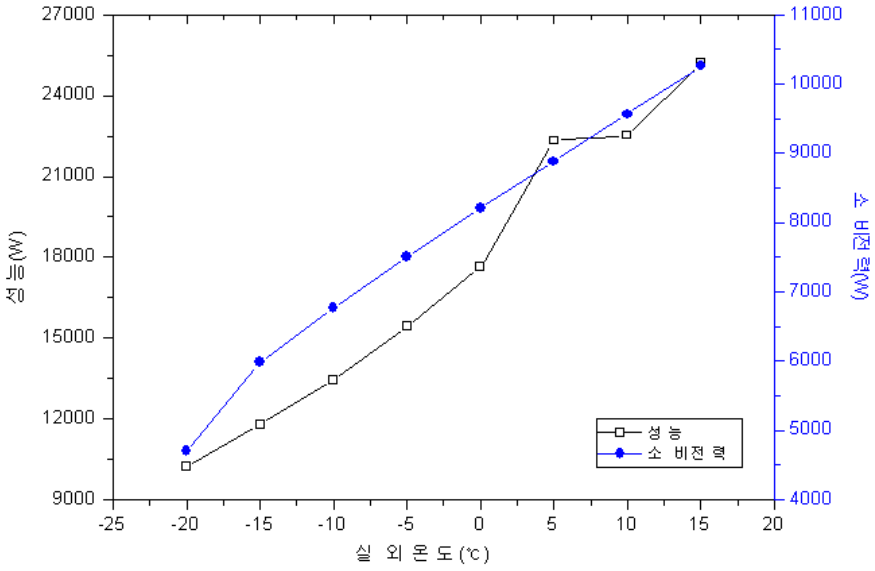


그림4. 온도변화에 따른 난방능력 성능비교

2.1.2 난방능력 측정

- 난방 능력은 열량계의 실내 공기측에서 결정하고,다음 식에 따라 산출한다.

$$\Phi_{hr} = \Phi_r - \sum P_r + \Phi_{2p} + \Phi_{2r} \quad \text{----------(1)}$$

여기에서 Φ_{hr}: 실내측 열량계에서 결정한 전 난방 능력(W)

Φ_r: 실내측 열량계에서 냉각코일로 제거한 열량(W)

$\sum P_r$: 실내측 열량계에서 전 입력의 합계(W)

Φ_{2p}: 실내측과 실외측의 중앙 격벽을 통하여 실내측으로부터의 열누설 (W)

Φ_{2r}: 바닥,벽(중앙 격벽을 제외),천장을 통하여 실내측으로부터의 열누설(W)

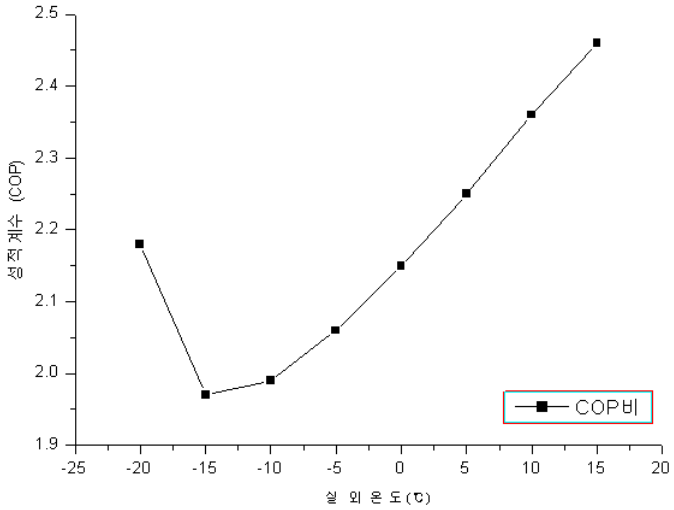


그림5. 온도변화에 따른 성적계수(COP비)비교

2.2 실험 결과

실외온도 조건만으로 Simulation을 수행하여 난방 성능 측정 시 상온 5℃기준 -15℃와 비교 시 성능이 47%까지 저하됨을 확인할 수 있다. 외기온도가 내려가면 난방부하는

증가하지만 히트펌프의 난방용량은 감소한다. 난방부하와 히트펌프의 난방용량이 교차하는 점을 평형점이라하며 보통 -5℃ ~ 0℃사이에 평형점을 형성하게 된다. 이 평형점을 지나면 히트펌프의 용량이 필요한 난방열보다 적으므로 다른 난방기를 추가로 하여 부족한 난방용량을 보충하지 않으면 실내의 온도가 평형점의 온도보다 강하한다. 그러므로 외기 온도가 평형점 이하로 강하하여 증발기의 성능이 저하되는 혹한기 시 보조히터, 제상운전, 시스템의 개발을 통하여 부족한 난방용량을 보완하여야 한다. 제상운전의 경우 운전시간에 따라 난방기 가동 시간이 차이가 있기 때문에 Field Test를 통해 반드시 검증해야 한다.

히트펌프 출력열량을 입력전력으로 나누는 COP(Coefficient Of Performance)비는 보통 2이상으로 소비전력 대비 난방능력의 효율이 상승하지만 위 실험과 같이 -5℃ ~ 0℃ 영역대의 난방효율은 실험 결과 약14,000W로 상온 5℃의 난방능력과 비교 시 63% 정도의 난방 성능을 출력한다.

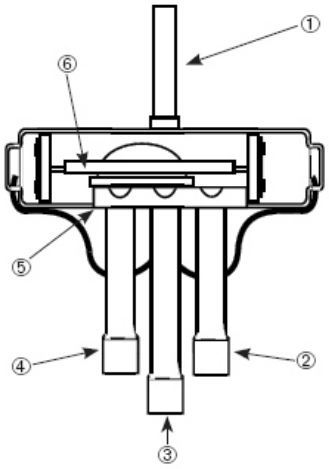
상기 그래프상의 -20℃에서 COP비가 상승하는 것은 실험조건의 불규칙성 때문인 것으로 판단된다.

실외 조건이 저온으로 내려 갈수록 히트펌프 자체만을 이용한 난방 장치의 구성은 시스템을 불가능하는 것으로써 현재 철도 차량의 운행 환경 조건 +45℃ ~ -25℃을 만족 하기 위해서는 별도 부가적인 부품의 개발 및 성능 개선 등이 필요한 당면 과제이다.

2.2.1 부품의 개발

가) Four way valve 개발

- 냉매의 유동량을 조절함으로써 냉방 및 난방 능력을 조절하는 장치로써 고압의 냉매에 대하여 내구성 및 냉매제어 반복정확도 기술이 검증이 되어야 할 것이다.



1. Discharge connection
2. Connection to evaporator/condenser
3. Suction connection
4. Connection to condenser/evaporator
5. Valve body
6. Sliding mechanism

그림6. Four way valve의 구조

나) Compressor 개발

- 고온 고압 냉매의 조건을 만족하기 위해서는 Compressor 성능향상이 가장 중요한 과제이다. 또한 하절기,동절기 시 동일 Compressor의 사용으로 인해 내구 수명문제 또한 문제시 될 수 있다. 히트펌프 Compressor는 기존제품에 비해 고가이며 매2~3년을 주기로 유지보수를 해야한다. 5~8년 정도의 짧은수명을

가지고 있기 때문에 유지보수 및 비용적인 면에서도 불리하다. 이러한 철도 차량의 열악한 환경조건을 만족하기 위해서는 기술 개발이 시급하다.

- 지구 온난화의 주원인인 온실효과 가스배출 규제로 인해 친환경적인 대체 냉매의 개발에 따라 Compressor의 성능향상이 필요하게 되었으며, 친환경 냉매로는 R-410A,R-407C등이 사용되고 있으며, 현재 운행차량에는 일부 R-22,R-407C, R-134a,R-410A가 사용되고 한다.

  현재 상용화 되고 있고 향후 대체냉매로는 R-407C,R-410A가 대두 되고 있으며 R-410A의 경우 준비공비 혼합물로 시스템의 조성비(R32/R125)가 일정하여 취급이 용이하지만, 증기압이 R-22에비해 50% 높고, 체적용량은 50%정도 낮기때문에 Compressor를 높은 압력 및 베어링 부하에 견딜 수 있는 설계조건을 만족하여야 한다.

다) 열교환기,배관,팽창밸브의 개발

친환경 냉매 적용 시 고압 냉매의 특성을 만족시키기 위해서는 배관,연결부위 leak방지, 냉매주입 및 교체 등 유지 보수에 대한 기술개발이 필요하다.

라) 사용 환경 조건에 대한 기술 개발

동절기 노지에 정차된 철도 차량의 경우 눈이 쌓이거나 녹아서 결빙이 되었을 경우 열교환기의 가동 및 동작 이상에 대한 대응이 필요하고 저온으로부터의 열을 흡수하기 위하여 열교환기의 열전달 성능을 향상시키기 위한 부품개발이 필요하다.

또한 냉난방장치의 설치 위치가 Roof 혹은 객실 하부위치에 따라 전동차의 하부 구조,상부구조가 크게 변경 되어야하며 국내에는 Heat pump 방식의 냉난방 장치가 철도 차량에 적용된 실적이 없기 때문에 성능 시험 및 본선 운행조건에 대한 시험이 철저히 검증이 되어야한다.

도표2. 각 도시별 동절기 평균 기온(℃)

		12월		1월		2월	
No	도시명	평균기온	최저기온	평균기온	최저기온	평균기온	최저기온
1	서울	1.7	-6.4	-1.6	-7.2	-1.1	-6.9
2	동두천	-0.4	-7	-3.5	-9.1	-2.5	-7
3	문산	-0.9	-6.4	-4.2	-10.2	-3.6	-7.8
4	인천	2.5	-5.1	-1.5	-6.9	-0.7	-5.9
5	수원	1.5	-5.4	-1.5	-6.7	-1.6	-5.8
6	양평	0.4	-5.2	-2.3	-8	-2.4	-7.2
7	이천	-0.4	-6.1	-2.5	-8.4	-2.4	-6.5
8	철원	-2.4	-8.3	-5.4	-11.5	-4.7	-10.3
9	춘천	-0.9	-6.3	-3.6	-9.9	-2.9	-7.5
10	원주	-0.1	-6.4	-2.4	-8.1	-2.3	-7.2
11	홍천	-1.5	-7.2	-4.2	-10.6	-3.9	-9
12	속초	3.5	-4.7	0	-4.6	1.3	-3.5
13	강릉	4.4	-3.7	1.1	-3.5	2	-2.6
14	대관령	-3.6	*-12*	-7.2	*-15*	-7.5	*-13.8*
15	동해	4.1	-3.4	1.3	-3.6	1.8	-2.6
16	태백	-1.6	-9.5	-4.6	-11.1	-4.9	-10.2
17	청주	2.1	-5.1	-1	-6.2	-1	-5.4
18	충주	0	-5.9	-2.3	-7.7	-2.7	-7.5
19	대전	2	-4.9	-0.8	-6.6	-0.9	-5.2
20	천안	1.4	-4.9	-2	-7.1	-2.5	-7.3

2007.12 ~ 2008.02까지의 중부 이북지역의 겨울철 평균기온 및 최저온도를 비교할 때 대관령의 경우 -15℃가 최저 온도로 관측되었다 이는 환경 조건인 +45℃ ~ -25℃의 기준에 부합하지만 실제적인 차량의 온도는 저하 될 수 있기

때문에 운행 구간에서의 온도한계 범위는 -25℃를 기준으로 조건을 맞추는 것이 바람직하다. 기존의 냉난방기의 경우 동절기에는 작동을 하지않기 때문에 ROOF에 장착된 냉난방기 부품에 대한 성능을 고려하지 않았으나 히트펌프 냉난방장치의 적용을 할 경우 상시 동작이 가능하고 출차 시간의 쾌속 난방 조건을 만족하는 부품의 성능을 지녀야 한다.

3.해외 기술 동향

3.1 환경 기준

- 히트펌프는 상온기준 0℃에서 COP비가 높기 때문에 전기에너지 효율면에서 탁월한 성능을 발휘하며, 친환경 냉매의 사용으로 인해 지구온난화 방지 법규에 대응할 수 있는 효과가 있다
- 현재 운행되고 있는 해외 철도차량의 난방능력 성능시험조건은 실외기준 0~+1℃이다. 기준온도가 높은 이유는 히트펌프가 실외 온도가 저하 될 때에 난방능력이 급격히 저하되기 때문이다.
- 일본의 경우 우리나라와 지형적인 특성이 유사하여 운행중인 차량에 대한 시스템을 적용하기 용이하다. 현재 우리나라에는 히트펌프 적용 실적이 없기 때문에 기초 기술에 대한 개발이 시급한 상태로 해외 차종의 Bench Marking을 통해 국내 차량의 조건에 맞게 시스템을 구축해야 할 것이다.

3.2 일본

도표2. 일본 히트펌프 적용 철도 차량

장치명	냉방능력 (KW)	난방능력 (KW)	적용노선	제작 연도	비고
AU405K	24.4	17.4	JR 九州	1991	
AU83	29.1	19.8	JR東海100系 新幹線	1984	
RPU-1102H	48.9	20.3	東京急行電鐵	1998	
TAU31A	58.1	39.5	JR東海300系 新幹線	1991	
TAU31B	61.6	39.5	JR東海300系 新幹線	1992	
TAU32A	33.7	19.8	JR東海700系 新幹線	1998	
WAU501G2	61.6	39.5	JR西日本300系 新幹線	1992	
WAU83	33.7	19.8	JR西日本300系 新幹線	1999	
MITSUBISHI	61	23	東京急行電鐵	2008	

3.3 해외 기타

도표3. 해외 적용 히트펌프 적용 철도 차량

제작사	냉방능력 (KW)	난방능력 (KW)	적용차종	제작 연도	비고
CAF	34.9	32.6	Passenger Train Car	1994	R-22
CAF	29.1	30.9	Passenger Train Car	1990	R-22
CAF	40.7	39.5	Passenger Train Car	1990	R-22
Vossloh	35	42	Metro valencia	1994	R-407C
CAF Alstom	41.2	43	Catalonia city railway	1994	R-407C
CAF	24.4	20.9	Buenos Aires city Railway	1995	R-22
SIEMENS	24.4	18.8	Lisbon Tram	2000	R-134a
SIEMENS	26.5	19.2	Valencia tram	1999	R-22

4. 결론 및 향후 연구방향

히트펌프 방식의 냉난방 장치는 냉방이 필요한 온대 기후지역에서 처음 사용되었다.
그러나 히트펌프 기술수준의 향상과 생산비용 감소는 이 시스템이 냉대기후 지역에서도 적용이 가능함을 보여 주고 있다.
최근 국내에서도 화석연료의 한계와 친환경 특성을 고려하여 지역난방 및 하수처리에 사용되는 대형화된 히트펌프 적용 응용기술이 도입되고 시행되어지고 있다.
본 논문은 히트펌프의 원리를 이용하여 국내 전동차 냉난방 장치 시스템에 적용하기 위한 기술개발 방향과 향후 설계 시 고려해야할 문제점에 대한 선행 연구이다.
위 조건은 외기 온도 기준으로 한 Simulation이었으나 실험을 통해 철도차량의 냉난방 장치의 기본 문제점을 확인 할 수 있었다.
현재 우리나라에는 히트펌프를 적용하여 운행 중인 철도 차량이 없으며 기술기반이 일본, 미국, 유럽 국가에 비해 낮은 편이다. 앞서 언급한 해외 부품 의존도가 높은 Compressor, Motor, Heat-exchanger의 원천기술 연구개발을 함으로써 향후 철도차량의 냉난방 장치에 대한 기술력을 향상시키기 위한 종합적인 접근이 필요하다.

5. 참고문헌

1. Mc Quiston 외 (1997), “공기조화 및 냉동”, 희중당.B5(176×250㎜).
2. “중부이북지방 겨울철 평균기온”, 기상청 통계자료 (2007.12~2008.02).
3. KS C 9306-9 (에어컨디셔너) “난방능력 시험”, 2007
4. JARN(JapanAir-conditioningHeating&RefrigerationNews) http://www.jarn.co.jp