

공기열원 및 수열원을 이용한 열펌프 시스템의 성능특성에 관한 연구

고원빈¹ · 박윤철[†]

(Received April 1, 2016 ; Revised August 2, 2016 ; Accepted August 16, 2016)

A study on the comparison of the performance of a heat pump system with air and water heat sources

Won-Bin Ko¹ · Youn-Cheol Park[†]

요약: 본 연구는 연료전지 자동차용 공기조화기의 난방성능평가를 위하여 기존의 전반적인 히트펌프 시스템 중 공기열원 히트펌프 시스템의 증발기를 판형열교환기로 교체하여 시스템에 흐르는 냉매와 연료전지 스택 폐열을 직접 열교환이 가능한 수열원 이용이 가능한 난방시스템의 성능실험을 수행하였다. 실험결과에서 압축기의 회전수가 높을수록 소비동력이 증가하였다. 공기열원 이용방식의 경우 압축기 회전수가 1,200rpm이고 EEV개도가 25%인 경우 COP_h가 2.03으로 가장 높게 나타났고, 같은 압축기의 회전수에서 수열원 시스템은 EEV개도가 75% 및 스택 폐열의 온도가 50℃인 경우 COP_h가 9.42로 가장 높게 나타났다.

주제어: 공기열원, 수열원, 히트펌프, 판형열교환기, 스택 폐열

Abstract: In this study, experiments were conducted to evaluate the performance of a heat pump system. A heat pump system with an air as heat source is adapted as reference. The developed system uses a plate heat exchanger an evaporator to absorb heat from a stack of fuel cell driven electric vehicles. Hence, the system functions as a water source heat pump system. The results indicated that the; power consumption increased with the rotational speed of the compressor. A system performance(COP_h) of 2.03 at an electronic expansion valve(EEV) openings of 25% and a compressor speed of 1200 rpm was observed in the reference system. However, at the same compressor speed, the COP_h of the water source heat pump system corresponded to 9.42 at an EEV openings of 75%. It was found that the water source heat pump system exhibited the highest performance at a water temperature of 50℃.

Keywords: Air heat source, Water heat source, Heat pump system, Plate heat exchanger, Stack waste heat

1. 서론

최근 계속해서 증가하고 있는 화석연료의 사용으로 점점 악화되어가는 환경오염 문제를 해결하기 위하여 다양한 신재생에너지를 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 자동차로 인한 대기오염과 지구 온난화, 석유의 대량소비 등 환경 에너지 문제에 대비하기 위하여 지금 전 세계 선진 자동차회사에서는 화석에너지를 대체할 수 있는 방안의 확보를 위한 친환경 자동차 개발에 심혈을 기울이고 있다[1].

우선 미국의 경우 EPA를 중심으로 차량의 연비 측정에 SC03 모드를 포함하여 에어컨을 가동하였을 때 연비에 미치는 영향을 평가하고, GHG 규제 최종법안에는 에어컨 크레딧(credit)로 에어컨에서의 CO₂ 배출을 줄이기 위한 친환경적인 기술과 노력 외에도 Super 크레딧을 부여하여 PHEV나, EV 또는 FCEV와 같은 친환경차의 개발을 장려하

고 있다[2][3].

그리고 차량을 주행함에 있어서 쾌적한 실내 환경을 위한 차량 내부 난방은 없어서는 안될 중요한 요소 중 하나이다. 기존의 내연기관 차량에서는 차량 내부의 난방을 위하여 차량의 엔진을 식힐 때 라디에이터를 통해 밖으로 배출되는 폐열을 이용하여 내부를 난방하지만, 연료전지 자동차에서는 엔진의 부재로 이용할 수 없는 기술이다. 자동차의 난방에너지 소비는 연비에 큰 영향을 미치는 인자 중의 하나이다. 연료전지 차량의 짧은 주행거리의 문제는 겨울철 자동차 내부 난방 시 더욱 심각해진다. M. Ogburn *et al.* [4]의 연구에 따르면 연료전지에서 발생하는 열은 기존의 내연기관 자동차와 비교 시, 스택의 온도가 현저히 낮아서 외부 공기와의 열전달량이 부족하여 차량 실내 난방에 직접 사용하기에 부적합하다.

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8055-182X>): Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Arail-dong, Jeju-si, Jeju-do, 690756, Korea, E-mail: Ycpark@jejunu.ac.kr, Tel: 064-754-3626

¹ Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, E-mail: kwb3750@samwoneng.net Tel: 064-754-3606

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Y. C. Kim *et al.* [5]의 연구 결과에 따르면 현재 대부분의 연료전지 차량에서는 겨울철 난방을 위하여 전기히터를 사용하고 있는데, 특히 겨울철 난방을 위한 공기가열식 PTC히터의 사용은 고전압 배터리의 에너지를 바로 쓸 수 있다는 장점이 있지만 소비량이 5~8kW에 달하여 연비 및 주행거리단축에 악영향에 대하여 확인하였다.

Umezū *et al.* [6]의 보고에 따르면 전기히터의 과도한 전력 소모량으로 인하여 자동차의 주행가능거리가 운전 모드에 따라 30~60%까지 감소한다고 알려져 있으며, 최근 일본의 Mitsubishi Motors의 기술고서[7]를 보면 i-MiEV 전기자동차의 경우를 보면 히터 사용 시에 사용하지 않은 주행거리 대비하여 최대 63%까지 단축이 된다고 보고되고 있다.

연료전지 자동차용 난방시스템의 성능향상을 위해 Kim *et al.* [8]은 히트펌프와 보조히터 개념인 PTC(Positive temperature coefficient)히터와의 결합시스템을 제작하여 압축기의 회전속도를 변화시키면서 성능을 관찰하였다. PTC히터는 서미스터를 이용한 전기발열체 소자라서 전류제한을 통하여 그 온도가 일정한 히터로써, 이 때 최대성능은 7kW로, PTC히터만을 사용하는 것을 기준으로 할 때와 히트펌프 시스템만을 사용할 경우 효율이 최대 100% 증가하는 것으로 나타났다.

히트펌프 시스템의 효율성에서 살펴보면 D. W. Lee *et al.* [9]는 연료전지 자동차용 전기히터와 히트펌프 난방 시스템을 비교 실험한 결과, 외기온도가 0°C인 조건에서 히트펌프 시스템이 전기히터 대비 난방능력은 약 70% 이상 향상되고, 에너지 소모는 더 적은 것으로 보고되었다. 그러나 외기온도가 -10°C와 같은 저온에서는 차 실내의 쾌적성을 위하여 히트펌프 시스템과 일부 전기히터와 병행하여 사용하는 것을 권장하였다.

그밖에도 C. W. Cho *et al.* [10]은 전기버스에서 전자장비의 폐열을 이용한 히트펌프의 난방 성능특성에 대해 연구하여 전기버스에서 폐열이용 히트펌프는 짧은 주행거리의 제약이 있는 전기버스에서의 난방장치로써 적용 가능성을 나타내는 등 자동차의 폐열을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차용 공기조화기의 난방성능 평가를 위하여 히트펌프 난방시스템을 도입하고 증발부의 구조변경을 통해 외부열원으로부터 에너지를 흡수하는 부분에 있어서 공기열원을 얻는 방법과 수열원을 얻는 방법을 선택적으로 이용 가능한 시스템을 구성하였고, 자동차 운전특성 및 열원 이용방식에 따른 난방능력 분석에 관한 연구를 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 연료전지 차량이 발생하는 스택의 폐열을 모사하기 위하여 제작한 스택 폐열 모사장치는 용량이 1m³의 크기로 최대 1Ton의 물 온도를 일정하게 유지할 수 있

도록 15kW(5kW*3) 전기히터봉을 설치하고, SCR(Silicon controlled rectifier)을 통해 자동제어 하였다.

공기열원 이용방식을 Figure 1에 나타낸 바와 같이 화살표 방향에 따라 냉매가 흘러가면서 증발기가 외부의 공기와 열교환을 통해 외부의 열을 흡수하는 공기열 시스템으로 작동하며 그 때의 시스템의 성능변화를 측정하였다.

수열원 이용방식의 흐름도를 Figure 2와 같이 시스템의 증발기를 관형열교환기로 교체하여 화살표 방향에 따라 시스템의 냉매가 관형열교환기로 흐르게 된다. 동시에 폐열 모사장치에서도 펌프가 작동하여 화살표 방향에 따라 관형열교환기로 물이 흐르게 되어 냉매와 스택 폐열이 직접 열교환 하는 방법이다.

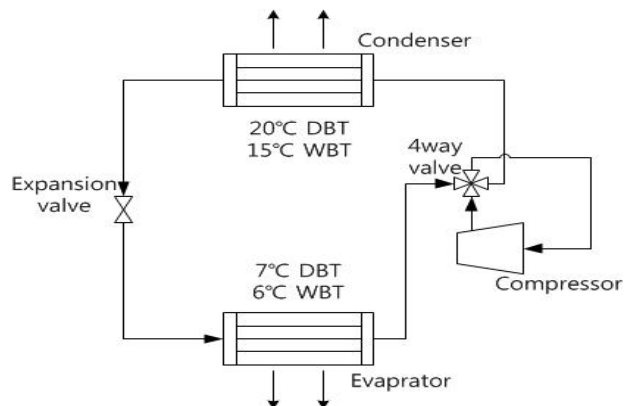


Figure 1: Flow chart of the system using the air as heat source

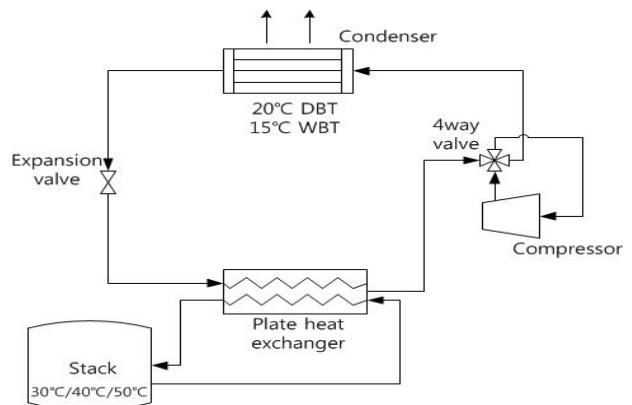


Figure 2: Flow chart of the system using the water as heat source

2.2 실험방법

실험조건은 실외 건구온도(Dry bulb temperature, DBT) 7°C, 습구온도(Wet bulb temperature, WBT) 6°C 및 풍량 10m³/min 이고 실내조건은 건구온도 20°C, 습구온도 15°C 및 풍량 8m³/min로 하였다. 팽창장치는 전자식팽창밸브(Electric expansion valve, EEV)를 사용하였으며, EEV개도별 성능특성을 파악하기 위하여 25%, 50%, 75%로 변경하며 진행하였다. 압축기의 회전수는 1,200rpm, 1,800rpm 및 2,400rpm로 변화시켰으며, 실험조건을 정리하면 Table 1과 같다.

난방시스템은 2가지 운전 모드로 진행되며, 첫 번째 방식은 기존의 시스템 운전방식대로 공기열원을 이용하였을 경우에 시스템의 성능 변화를 측정 하였고, 두 번째 방식은 열교환 할 열원이 부족할 경우를 대비하기 위하여 증발기를 판형열교환기로 교체하고 시스템을 흐르는 냉매와 스택의 폐열을 모사한 물을 직접적으로 열교환 하는 수열원 이용 방식이다.

Table 1: Experimental conditions

Outdoor air conditions		
Dry bulb temperature		7°C
Wet bulb temperature		6°C
Air flow rate		10m ³ /min
Indoor air conditions		
Dry bulb temperature		20°C
Wet bulb temperature		6°C
Air flow rate		8m ³ /min
System control	Compressor RPM	1,200, 1,800, 2,400
	EEV opening	25%, 50%, 75%
Water inlet		30°C, 40°C, 50°C

3. 이론 해석

냉동기나 히트펌프의 성능은 성능계수로 표시하고 있다. 이 성능 계수 COP(Coefficient of Performance)는 종래의 시험방법에서는 정격 조건에서 얻은 오직 하나만의 고정상수로 성능을 제시하는 방법이다. 동력(W)을 공급받아 저 열원(Q₂)으로부터 열을 흡수하여 고열원(Q₁)으로 방출하므로 열기관과 다르게 그 양부를 판단한다. 하지만 냉동기는 열을 흡수함으로써 저열원의 온도를 내리게 하고, 히트펌프는 고열원으로 열을 공급함으로써 온도를 높이는 장치이다. 난방성능계수는 식 (1)과 같이 COP_c로 나타내었으며, 난방성능계수는 식 (2)와 같이 COP_h로 나타내었다.

$$\text{즉, } COP_c = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (1)$$

$$COP_h = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \quad (2)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 공기열원 이용 방식

소비동력의 변화는 Figure 3에 나타난 바와 같이 압축기의 회전수가 증가함에 따라 EEV개도가 25%인 경우

1,300W, 2,272W 및 3,136W로 증가하며, 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 74.8%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 38%증가하였다. EEV개도가 50%인 경우 2,367W, 3,325W 및 4,528W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 40.5%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 40.5%증가하였다. EEV개도가 75%인 경우 1,216W, 2,068W 및 2,946W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 70.1%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 42.5%증가하였다. EEV개도가 50%인 경우와 75%인 경우 비슷한 소비동력 변화를 보이며 EEV개도가 25%일 때 소비동력이 가장 높게 측정됨을 알 수 있다.

난방용량의 변화는 Figure 4에 나타난바와 같이 압축기의 회전수가 증가함에 따라 EEV개도가 25%인 경우 2,642W, 3,961W 및 4,849W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 49.9%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 22.4%증가하였다. EEV개도가 50%인 경우 2,367W, 3,325W 및 4,528W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 40.5%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 36.2%증가하였다. EEV개도가 75%인 경우 1,599W, 2,342W 및 3,454W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 46.5%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 47.4%증가하였다. 평균적으로 EEV개도가 25%에서 EEV개도가 50%로 변경된 경우 -10.8%의 난방용량 저하를 보이며, EEV개도가 50%에서 EEV개도가 75%로 변경된 경우 -27.6%로 저하되었다.

Figure 5는 압축기 회전수에 따른 EEV개도별 성능계수를 나타낸 것으로서 EEV개도가 50%인 경우 압축기의 회전수가 증가함에 따라 2.01, 1.60 및 1.49로 나타났으며 압축기의 회전수가 1,200rpm이고 EEV개도가 25%인 경우 COP_h가 2.03으로 가장 높게 나타났고, 압축기 회전수가 1,800rpm이고 EEV개도가 75%인 경우 1.13으로 가장 낮게 측정되었다.

실험결과를 보면 압축기의 회전수가 증가할수록 난방용량이 증가하지만, 난방용량 증가율에 비하여 압축기의 소비동력 증가율이 더 크기 때문에 점차 COP_h가 저하됨을 알 수 있으며 EEV개도가 적을수록 성능계수가 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 외기온도가 낮음으로 인하여 증발부에서 얻을 수 있는 열원의 한계가 있어 EEV개도가 적을 때 성능계수가 가장 좋게 나타난 것으로 보인다.

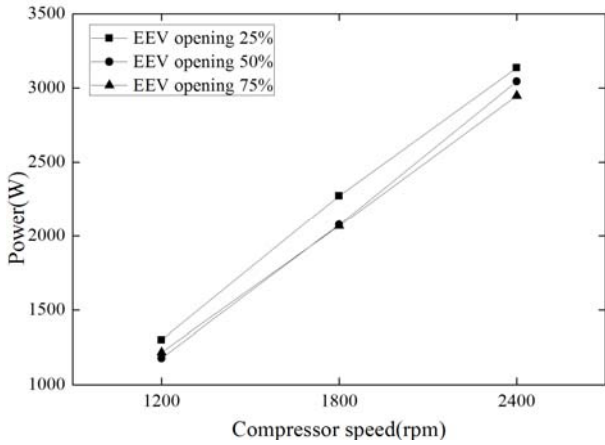


Figure 3: Variation of power consumption with change of compressor speeds and EEV openings in the air source heat pump system

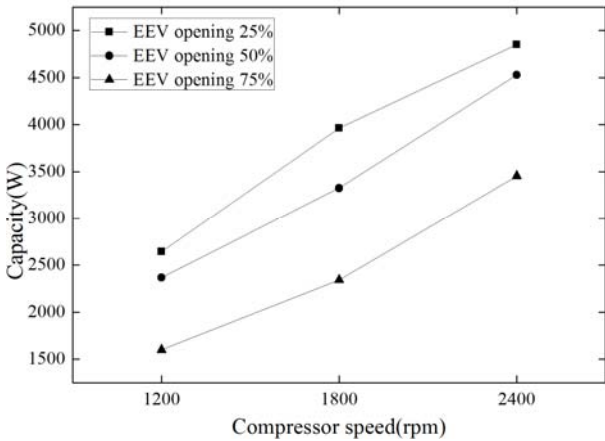


Figure 4: Variation of heating capacity with change of compressor speeds and EEV openings in the air source heat pump system

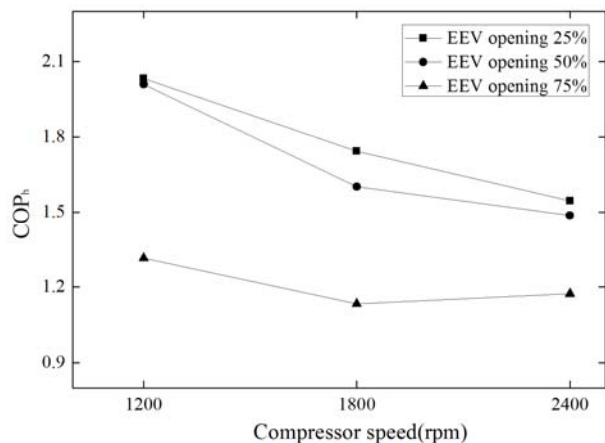


Figure 5: Variation of COP_h with change of compressor speeds and EEV openings in the air source heat pump system

4.2 수열원 이용 방식

수열원 이용방식에서 EEV개도가 50%인 경우 압축기 회전수 변화에 따른 스택 폐열 온도별 소비동력과 난방용량

변화를 Figure 6에 나타내었다. 소비동력의 경우 압축기의 회전수가 증가함에 따라 약 1,381W, 2,232W 및 3,059W로 증가하며 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 61.7%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 37%증가하여 공기열원 이용방식 소비동력 변화패턴과 일치하는 것으로 나타났다.

난방용량의 변화를 살펴보면, 압축기의 회전수가 증가함에 따라 스택 폐열온도가 30℃인 경우 5,435W, 5,824W 및 6,754W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 7.2%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 16%증가하였다. 스택 폐열온도가 40℃인 경우 7,271W, 8,480W 및 10,192W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 16.6%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 20.2%증가하였다. 스택 폐열온도가 50℃인 경우 10,230W, 11,225W 및 11,900W로 나타나 압축기 회전수가 1,200rpm에서 1,800rpm으로 변경된 경우 약 9.8%증가하고, 압축기 회전수가 1,800rpm에서 2,400rpm으로 변경된 경우 약 6.5%증가하였다.

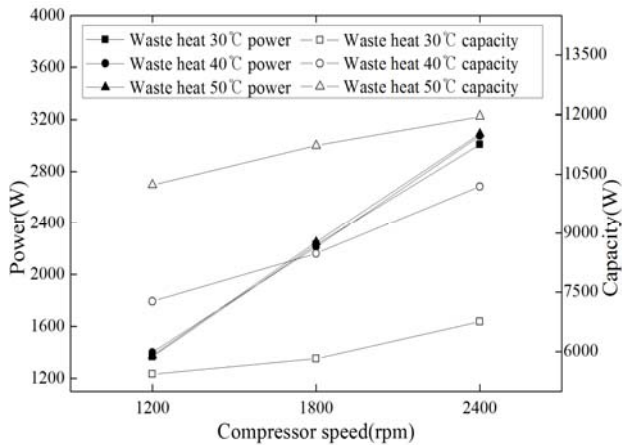


Figure 6: Variation of power consumption and heating capacity with change of compressor speeds and EEV openings in the water source heat pump system

Figure 7 ~ 9는 스택 폐열 온도에 따른 EEV개도별 성능계수 변화를 압축기 회전수별로 구분하였다. 압축기 회전수가 1,200rpm일 때 EEV개도가 75%이고 스택 폐열의 온도가 50℃인 경우 성능계수가 9.42로 가장 높고, EEV개도가 25%이고 스택 폐열의 온도가 30℃인 경우 2.53으로 가장 낮게 측정되었다. 압축기 회전수가 1,800rpm일 때 EEV개도가 75%이고 스택 폐열의 온도가 50℃인 경우 성능계수가 6.57로 가장 높고, EEV개도가 75%이고 스택 폐열의 온도가 30℃인 경우 1.88로 가장 낮다. 압축기 회전수가 2,400rpm일 때 EEV개도가 75%이고 스택 폐열의 온도가 50℃인 경우 성능계수가 5.08로 가장 높게 측정되었고, EEV개도가 25%이고 스택 폐열의 온도가 30℃인 경우 1.63으로 가장 낮다.

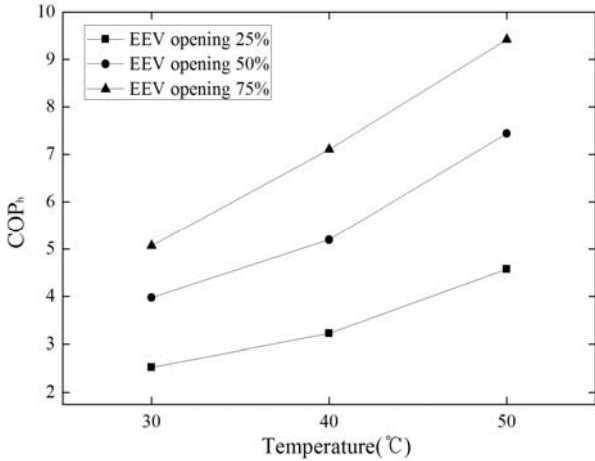


Figure 7: Variation of COP_h at 1,200rpm of compressor speed with change of waste heat temperatures and EEV openings in the water source heat pump system

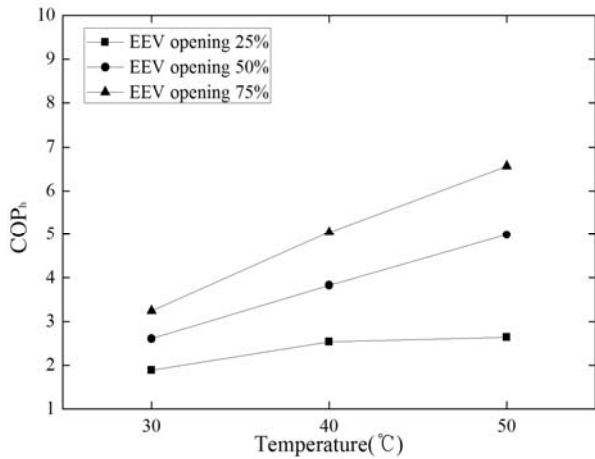


Figure 8: Variation of COP_h at 1,800rpm of compressor speed with change of waste heat temperatures and EEV openings in the water source heat pump system

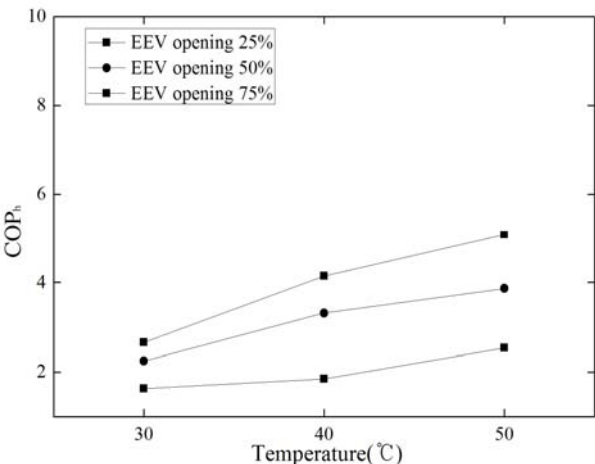


Figure 9: Variation of COP_h at 2,400rpm of compressor speed with change of waste heat temperatures and EEV openings in the water source heat pump system

5. 결 론

공기열원 이용방식의 경우 압축기의 회전수를 1,200rpm, 1,800rpm 및 2,400rpm 일 때 EEV개도를 25%, 50% 및 75% 변화시키기에 따라 난방용량 및 시스템의 운전특성을 비교를 위하여 실험을 수행하였다. 수열원 이용방식의 경우 스택의 폐열을 모사한 물과 관형열교환기를 통해 직접 열교환을 하였고 압축기의 회전수를 1,200rpm, 1,800rpm 및 2,400rpm 일 때 EEV개도를 25%, 50% 및 75%변화하고 스택 폐열의 온도 30℃, 40℃ 및 50℃로 변화시키면서 실험을 진행하였다.

(1) 공기열원 이용방식에서 압축기의 회전수가 1,200rpm, EEV개도가 25%인 경우 성능계수가 2.03으로 가장 높게 나타났고, 압축기의 회전수가 1,800rpm, EEV개도가 75%인 경우 성능계수가 1.13으로 가장 낮게 나타났다.

(2) 공기열원 이용방식에서 압축기의 회전수 및 EEV의 개도가 작을수록 시스템의 성능계수가 높게 나타났다.

(3) 수열원 이용방식의 경우 소비동력이 가장 적은 1,200rpm, EEV개도가 75%이고 스택 폐열의 온도가 가장 높은 50℃일 때 9.42로 가장 높은 성능계수를 나타내었고, 압축기의 회전수가 2,400rpm, EEV개도가 25%이고 스택 폐열의 온도가 30℃일 때 1.63으로 가장 낮게 나타났다.

후 기

본 연구는 2014년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었으며, 고원빈의 석사학위논문(“폐열원 이용 방식에 따른 자동차용 난방시스템의 성능평가에 관한 실험적연구”)를 개선한 것이다.

References

- [1] Y. S. Park, H. R. Kwon, S. G. Kim, C. M. Kim, and T. W. Lym, “The movement installation development of hydrogen fuel cell motor vehicle system,” *Journal of Fluid Machinery*, vol. 9, no. 2, pp. 69-73, 2006 (in Korean).
- [2] M. S. Kwon, “Development trends and challenges of environmental friendly vehicles,” *The Korean Society of Automotive Engineers, HEV and FCEV Workshop, Special Material*, 2007 (in Korean).
- [3] D. Lee, “An experimental study on the heating performance of coolant heat source heat pump system for zero emission vehicles,” *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 22, no. 7, pp. 57-62, 2014 (in Korean).
- [4] M. Ogburn, D. J. Nelson, W. Luttrell, S. Postle, and R. Fahrenkrong, “Systems integration and performance issues in a fuel cell hybrid electric vehicle,” *Proceeding of Society of Automobile Engineers*, pp.

- 3-76, 2000.
- [5] Y. C. Kim, S. N. Sup, K. S. Jin, and H. T. Cho, "Consideration of high voltage PTC heater," The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 5, pp. 560-564, 2011.
 - [6] K. Umezu and H. Noyana, "Air conditioning system for electric vehicles, i-MiEV," Society of Automotive Engineers of Japan, 2010.
 - [7] Mitsubishi Motors Technical Review, "Joint on-road monitoring of i-MiEV new generation electric vehicle with power companies," no. 21, pp. 22-29. 2010.
 - [8] K. Kim, S. Kim, and M. Kim, "Experimental studies on the heating performance and efficiency for electric vehicle," The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 5, pp. 1871-1876, 2010 (in Korean).
 - [9] D. W. Lee, D. H. Oh, and Y. J. Jee, "Investigation of R134a heat pump system for zero emission vehicle," The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 11, pp. 595-600, 2011 (in Korean).
 - [10] C. W. Cho, H. S. Lee, J. P. Won, and M. Y. Lee, "Measurement and evaluation of heating performance of heat pump system using wasted heat of electric devices for an electric bus," Energies, vol. 3, pp. 658-669, 2012.