전기자동차 하이브리드 히트펌프의 성능 특성 및 성능 향상에 대한 연구

안 재 환
한국식품연구원 스마트유통시스템연구단
(jhahn@kfri.re.kr)

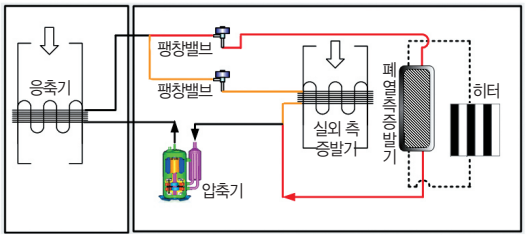
서 론

환경에 대한 관심이 증가하면서 자동차 배기가스에서 발생하는 NOx, 미세먼지 등의 대기환경 오염물질에 대한 규제도 강화되고 있으며, 유럽에서는 신규 출시되는 승용차의 평균 CO_2 가스 배출량을 2012년부터 지속적으로 감소시켜 2021년까지 95 g/km로 줄이는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 환경규제를 극복하기 위한 방법 중 하나로 기존에 사용해왔던 석유자원 대신 전기를 동력으로 하는 전기자동차가 주목을 받고 있다. 전기자동차는 배출오염물질이 없어 친환경적이며, 석유자원에 비해 동일 거리를 저렴한 비용으로 주행할 수 있고, 지나치게 높은 석유에 대한 의존도를 낮춰 에너지 다변화를 꾀할 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 내연기관 자동차에 비해 지나치게 짧은 주행거리와 긴 충전시간, 전용충전소의 부족 및 상대적으로 높은 차량가격 등의 이유로 대중화가 늦어지는 실정이다. 이 중 짧은 주행거리는 실내 냉난방 운전 시 더욱 감소하게 되는데, 자동차 안에서의 쾌적성을 중시하는 차량기술의 트렌드에 따라 냉난방 운전은 더운 여름과 추운 겨울철에 필수적이라고 할 수 있다. 특히, 기존의 내연기관 자동차의 경우 겨울철 난방은 엔진에서의 폐열을 이용하기 때문에 연비에 큰 차이가 없으나 전기자동차의 경우 이용할 수 있는 열원이 없어 배터리의 전력을 이용하여 난방을 할 수밖에 없으며, 난방 시 배터리 전력소모를 최소한으로 하기 위해 고효율의 난방장치가 필요하다. 이를 위해 전기자동차에서는 기존의 에어컨을 재설계 및 보완한 고효율의 난방장치인 히트펌프가 적용되었다.

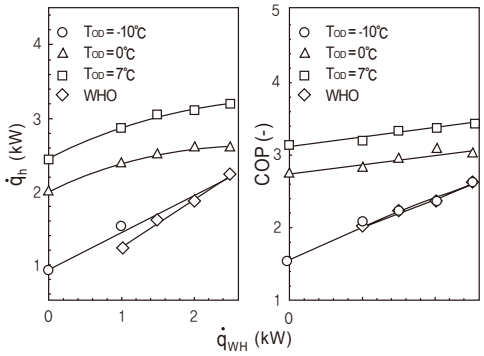
이중열원 이용 히트펌프

전기자동차 히트펌프는 공기열원을 이용하여 실외로부터 열을 흡수하여 실내로 열을 공급하는 방식으로, 외기온도가 낮아지면 난방용량이 급격히 감소하는 단점이 있다. 이에 대해 배터리와 전장에서의 폐열을 추가적으로 이용하여 두 개의 열원을 함께 이용하는 이중열원 이용 히트펌프를 제시하고 저온조건에서의 성능향상 방법을 제시하여 히트펌프가 난방용량을 충족시키기 어려운 조건에서 히터의 난방보조장치로써 최대한의 난방성능을 낼 수 있도록 하여 난방운전에 따른 배터리의 전력소모를 최소한도로 하고자 하였다.

그림 1은 이중열원 이용 히트펌프 시스템의 개략도를 나타낸다. 압축기에서 토출된 냉매는 실내의 응축기에서 열을 방출하고, 각각의 팽창밸브를 지나 실외 측의 증발기와 폐열 측의 증발기를 각각 지나서 압축기로 다시 흡입되는 동작을 반복하게 된다. 폐열 측 증발기는 냉각수와 냉매를 열교환하기 위한 판형 열교환기를 사용하였으며, 냉각수는 배터리 및 전장 측



[그림 1] 이중열원 이용 히트펌프 시스템 개략도

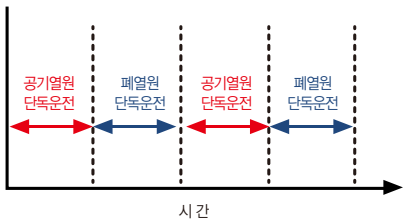


(a) 난방용량 (b) COP

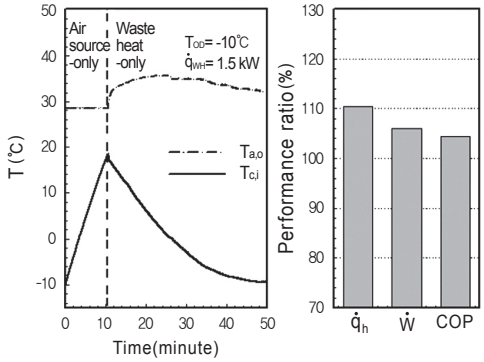
[그림 2] 이중열원 이용 히트펌프

에서 발생하는 폐열을 모사하기 위한 히터에서 가열된다.

이중열원 이용 히트펌프의 성능특성을 고찰하기 위해 폐열원의 폐열량과 공기열원의 온도를 변화시키며 실험을 수행하였다. **그림 2**는 이중열원 이용 히트펌프의 난방용량 및 COP를 나타낸다. 폐열량이 증가함에 따라 난방용량과 COP가 증가하였고, 공기온도가 상승함에 따라 난방용량과 COP가 증가하였다. 한편, 공기온도가 -10℃의 경우에는 폐열원 단독이용 히트펌프(WHO)의 난방용량과 COP의 차이를 나타내지 않았다. 이는 공기온



[그림 3] 공기열원-폐열원 병행 운전



(a) (b)

[그림 4] 공기열원-폐열원 병행운전에서의 냉각수온도, 토출공기온도, 평균성능비

도가 매우 낮은 경우에는 공기열원에서 흡수한 열량이 거의 없음을 의미하며, 그에 따라 폐열원만을 이용한 히트펌프의 난방용량과 COP가 동일한 수준으로 나타났다. 폐열원을 이용하기 위한 냉각수 루프는 폐루프(closed loop)이기 때문에 개루프(open loop)인 공기열원과는 다른 성격을 가진다. 이중열원 이용 히트펌프에서 공기열원의 경우 공기온도가 지나치게 낮아 냉매온도보다도 낮으면 열을 흡수하기 어렵게 되지만 폐열원의 경우 폐루프이기 때문에 일시적으로 냉각수의 온도가 냉매온도보다 낮더라도 냉각수의 온도가 상승하여 냉각수로부터의 열전달이 가능하게 된다.

공기온도가 너무 낮으면 이중열원 이용 히트펌프에서 공기열원 이용의 효과가 없어 폐열원만으로 운전되므로 난방성능을 향상하기 위해 **그림 3**과 같은 열원의 병행운전 방법을 제시하였다. 폐열원의 루프를 일종의 축열조로 이용하여 공기열원 단독운전 동안 폐열을 저장하고, 일정 온도까지 냉각수온도가 상승하면 폐열원을 이용하여 난방운전을 하여 공기열원을 최대한 활용하고자 하였다.

그림 4는 공기온도 -10℃, 폐열량 1.5 kW에서의 병행운전에 따른 냉각수온도와 토출공기온도, 평균성능비를 나타낸다. 공기온도 단독운전 기간에는 냉각수온도가 상승하였으며, 폐열원 단독운전 기간에는 냉각수온도가 하강하였고 토출공기온도는 상승하였다. 이에 따라 이중열원 이용 히트펌

[그림 5] 자동차 유리창의 김서림

프에 비해 향상된 난방용량과 COP를 나타냈다.

제습난방 히트펌프

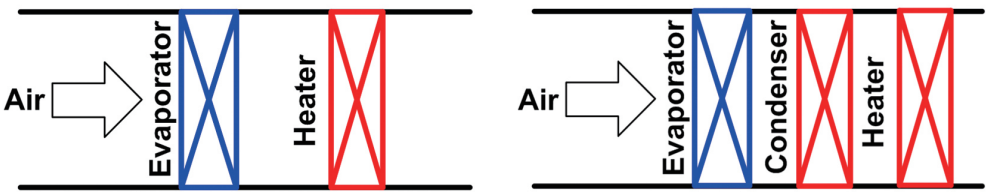
추운 날씨에는 **그림 5**와 같이 자동차 유리창에 김서림이 생기면서 운전자의 시야를 방해하여 자동차 주행사고의 우려가 있으므로 가을~초겨울 시기에는 제습을 하여 김서림을 방지해야 하며 이와 동시에 열적 쾌적성을 만족하기 위해 난방을 해야 한다. 전기자동차에서는 에어컨을 가동하여 제습을 하며 동시에 전기히터를 가동하여 난방을 한다. 그러나 제습을 하기 위한 에어컨 운전은 제습뿐만 아니라 공기의 냉각을 동반하여 히터에서의 불필요한 난방부하를 증가시키게 된다. 이는 공기냉각에 소요되는 에어컨의 전력손실과 히터의 추가적인 운전으로 인한 전력손실로 연결되어 불필요한 전력손실이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 에어컨의 응축기에서 방출되는 폐열을 이용하여 증발기에서 나오는 제습냉각된 공기를 가열하는 제습난방 히트펌프를 제시하였다. **그림 6**은 에어컨&히터 시스템과 제습난방 히트펌프&히터 시스템의 개략도를 나타낸다.

실내 측 증발기만 있는 제습난방 히트펌프에 실외 측 증발기를 추가한 이중증발기 히트펌프를 제시하여 에어컨&히터 시스템과 단일증발기 제습난방 히트펌프의 제습 및 난방 성능을 비교하였다. **그림 7**은 이중증발기 제습난방 히트펌프 시스템의 개략도를 나타낸다. 압축기에서 토출된 냉매는 실내의 응축기에서 열을 방출하고, 각각의 팽창밸브를 지나 실내 측의 제습 목적의 증발기와 실외 측의 흡열 목적의 증발기를 각각 지나서 압축기로 다시 흡입됨을 반복한다.

그림 8은 습구 온도 13℃와 17℃에서 에어컨&히터(AC) 시스템 대비 단일증발기 제습난방 히트펌프 시스템(HP)과 이중증발기 제습난방 히트펌프(DHP)의 성능비율을 나타낸다. 습구온도 13℃에서 HP와 DHP는 AC보다 향상된 제습효율(SMER)과 COP를 나타냈으며, DHP의 제습효율과 COP는 HP보다 높게 나타났다. 습구온도 17℃에서 HP와 DHP는 13℃와 마찬가지로 AC보다 향상된 제습효율(SMER)과 COP를 나타냈으며, DHP와 HP는 서로 큰 차이를 보이지 않았다. DHP의 제습효율과 COP는 저습도 조건에서 특히 우수한 성능을 보였다.

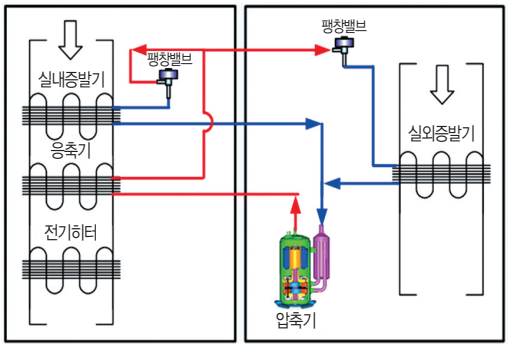
결 론

본 연구에서는 개선된 히트펌프 시스템을 제시하여 자동차의 다양한 난방조건에서 주행거리 감소문제를 최소화하여 전기자동차의 대중화에 기여하고자 하였다. 이를 위해 저온조건 난방 시 이중열원 이용 히트펌프와 제습조건 난방 시 이중증발기 제습난방 히트펌프를 각각 제시하고, 기존의 전기자동차 히트펌프와 비교 및 고찰을 수행하였다. 이중열원 이용 히트펌프는 단일열원 이용 히트펌

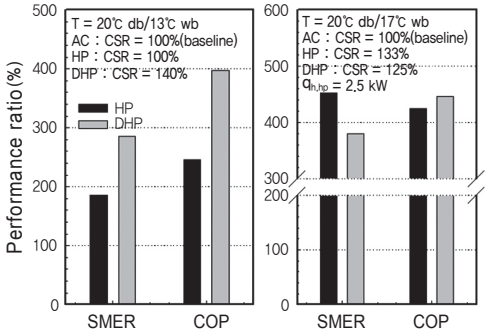


(a) 에어컨&히터 시스템 (b) 제습난방 히트펌프&히터 시스템

[그림 6] 공기 측 개략도



[그림 7] 이중증발기 제습난방 히트펌프 시스템 개략도



(a) 습구온도 13℃ (b) 습구온도 17℃

[그림 8] 습구온도 (a) 13℃와 (b) 17℃에서 에어컨&히터(AC) 시스템 대비 제습난방 히트펌프 시스템(HP, DHP)의 성능비율

프에 비해 우수한 성능을 나타내었고, 저온조건에서 공기열원을 활용하기 위한 병행난방 운전방법을 제시하였다. 또한 이중증발기 제습난방 히트펌프를 기존의 에어컨&히터 시스템과 단일증발기 제습난방 히트펌프와 비교하여 우수한 성능을 보임을 나타내었고, 특히 저습도조건에서 높은 제습효율과 COP를 나타냄을 보였다.

참고문헌

1. Ahn, J.H., Kang, H., Lee, H.S., Jung, H.W., Baek, C., Kim, Y., 2014, Heating performance characteristics of a dual source heat pump using air and waste heat in electric vehicles, Applied Energy, Vol. 119, pp. 1-9.
2. Ahn, J.H., Kang, H., Lee, H.S., Kim, Y., 2015, Performance characteristics of a dual-evaporator heat pump system for effective dehumidifying and heating of a cabin in electric vehicles, Applied Energy, Vol. 146, pp. 29-37.
3. Hosoz, M., Direk, M., 2006, Performance evaluation of an integrated automotive air-conditioning and heat pump system, Energy Conversion and Management, Vol. 47, No. 5, pp. 545-559.
4. Kim, S.C., Kim, M.S., Hwang, I.C., Lim, T.W., 2007, Heating performance enhancement of a CO_2 heat pump system recovering stack exhaust thermal energy in fuel cell vehicles, International Journal of Refrigeration, Vol. 30, No. 7, pp. 1215-1226.
5. Kim, S.C., Kim, M.S., Hwang, I.C., Lim, T.W., 2007, Performance evaluation of a CO_2 heat pump system for fuel cell vehicles considering the heat exchanger arrangements, International Journal of Refrigeration, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1206.
6. Cho, C.W, Lee, H.S., Won, J.P., Lee, M.Y., 2012, Measurement and evaluation of heating performance of heat pump system using wasted heat of electric devices for an electric bus, International Journal of Energies, Vol. 5, No. 3, pp. 658-669.
7. Lee, H.S., Won, J.P., Cho, C.W., Kim, Y.C., Lee, M.Y., 2012, Heating performance characteristics of stack coolant source heat pump using R744 for fuel cell electric vehicles, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, No. 7, pp. 2065-2071.