

## EV 배터리 재활용 공정을 위한 폐루프형 히트펌프 하이브리드 열풍 건조 공정 시뮬레이션 연구

# Numerical Analysis of Closed Loop Hot Air Dryer and Heat Pump Hybrid System for EV Battery Recycling Process

이정길\*†  
Jung-Gil Lee\*†

(Received 13 July 2023, Revision revised 01 September 2023, Accepted 06 September 2023)

**초록 :** 전 세계적인 탄소 배출량 규제 강화로 인해 기존 내연기관 자동차 시장이 전기 자동차 시장으로 급격하게 전환되고 있다. EV 배터리의 핵심 원자재인 리튬, 코발트, 망간 등은 우리나라에서 채굴되지 않으며 세계적으로도 채굴량이 한정되어 있기 때문에 소재 확보를 위한 국제적 무역 긴장이 팽배해지고 있다. 따라서 우리나라뿐만 아니라 국제적으로 폐 EV(Electric Vehicle) 배터리 재활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 기존 산업용 보일러의 열원을 활용하는 습식 제련을 포함하는 EV 폐 배터리 재활용 공정의 건조공정 에너지 소비량 및 탄소 배출량을 획기적으로 저감시킬 수 있는 폐루프형 히트펌프 하이브리드 열풍 건조 공정을 제안하고 세 가지 서로 다른 HFO (Hydro Fluoro-Olefin) 계열 Low-GWP(Low-Gobal Warming Potential) 냉매 적용한 폐루프형 히트펌프 하이브리드 열풍 건조 공정 시스템 성능을 분석하여 최적 냉매와 최적 운전조건을 선정하였다. R1233zd(E) 냉매를 적용하고 증발기 및 응축기 온도를 각각 38℃와 82℃로 설정했을 때, 최대 COP(Coefficient Of Performance)와 SMER(Specific Moisture Extraction Rate)값은 각각 5.42와 1.51이었다.

**키워드 :** EV 배터리 재활용 공정, 폐루프형 건조, 열풍 건조기, 히트펌프, 사이클 시뮬레이션

**Abstract :** Due to tightening global regulations on carbon emissions, the existing internal combustion engine vehicle market is rapidly converting to the battery vehicle market. Since lithium, cobalt, manganese, etc., which are the core raw materials of EV batteries, are not mined in South Korea and the amount of mining is limited, the international trade tensions to secure materials are increasing. Therefore, the interest in recycling waste electric vehicle (EV) batteries is increasing. This study proposed a closed-loop heat pump hybrid hot air drying process that can drastically reduce energy consumption and carbon emissions in the EV waste battery recycling process, including wet smelting using the heat sources from industrial boilers. The optimal refrigerant and optimal operating conditions were selected by analyzing the system performance with three different HFO (Hydro Fluoro-Olefin) and low-GWP (Low-Gobal Warming Potential) refrigerants. When the R1233zd (E) refrigerant was applied in the proposed system and the evaporator and condenser temperatures were set to 38℃ and 82℃, respectively, the maximum value of COP (Coefficient Of Performance) and SMER (Specific Moisture Extraction Rate) were 5.42 and 1.51, respectively.

**Key Words :** EV Battery Recycling Process, Closed-loop Drying, Hot Air Dryer, Heat Pump, Cycle Simulation

\*† 이정길(<http://orcid.org/0000-0001-6005-4279>) : 수석연구원, 한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부  
E-mail : [jglee@kitech.re.kr](mailto:jglee@kitech.re.kr), Tel : 041-589-8325

\*† Jung-Gil Lee(<http://orcid.org/0000-0001-6005-4279>) : Principle Researcher, Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology.  
E-mail : [jglee@kitech.re.kr](mailto:jglee@kitech.re.kr), Tel : 041-589-8325

— 기 호 설 명 —

COP : 성능계수[-]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]  
 h : 엔탈피 [kJ/kg]  
 SMER : 비제습률 [kg/kWh]  
 T : 온도 [°C]  
 Q : 열량 [kW]  
 $\dot{W}$  : 압축일 [g/kg<sub>da</sub>]  
 w : 절대습도 [g/kg<sub>da</sub>]

하첨자

Dry : 건조기  
 EVA : 증발기  
 CON : 응축기  
 CON,Ex : 외부 응축기  
 H : 히트펌프  
 a : 절대  
 d : 건구  
 e : 증발기출구  
 i : 건조기입구  
 o : 건조기출구  
 da : 건공기

1. 서 론

국내외 탄소 배출량 규제 강화로 인해 기존 내연기관 자동차 시장이 전지자동차 시장으로 급격하게 전환되고 있다.<sup>1)</sup>

Fig. 1은 글로벌 친환경 자동차 시장의 규모와 성장을 나타낸다. 2022년 상반기 친환경 자동차 판매량은 전년 동기 대비 38.0% 증가한 697만대로 2020년 상반기 이후 계속 확대되는 추세로 판매량 증가가 이루어지고 있고, 이 중 전기차 비중은 지속적으로 증가하는 추세이다. 또한 전문가들은 중국 및 미국의 각종 세제 혜택과 미국의 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act, IRA)에 의해 시장확대 추세가 지속적으로 이어질 것으로 예측되고 있다.

전기자동차의 수요가 증가함에 따라 EV 배터리 생산 및 제조기술에 대한 수요가 증가하고 있으며, 핵심소재인 리튬, 코발트, 망간 등에 대한 막대하고 지속적인 수급이 요구된다. 하지만 우리나라에서는 핵심 원자재인 리튬, 망간 그리고 코발트 등이 자체적으로 생산되지 않고 있으며, 국제적인 채굴량은 한정되어 있다. 또한 EV 폐 배터리를 매립이나 소각하여 폐기물을 처리하면 중금속으로 인한 심각한 환경오염을 초래할 수 있다.

EV 배터리 단가 중 원자재가 차지하는 비중이 매우 높기 때문에 핵심 소재 확보에 대한 국제적 무역 긴장이 팽배해지고 있으며, 이를 재활용할 수 있는 친환경 및 저에너지 소비 공정개발에 대한 수요가 증가하고 있다.

우리나라에서도 정책적으로 발 빠르게 EV 폐 배터리 재활용 연구를 지원 및 육성하고 있으며, 세계적인 자동차 제조산업들도 각국의 노력으로 EV 폐 배터리 재활용 산업을 육성하고 있다.<sup>2,3)</sup> EV 폐 배터리 재활용 산업의 육성을 통해 우리나라 입장에서 배터리 공급망 선순환, 자원보유국에 대한 의존도 저감 등의 이득을 취할 수 있다.

습식 제련을 활용하는 EV 폐 배터리 재활용 공정 순서는 다음과 같다. 우선 폐배터리가 입고되고 방전, 해체 파쇄 및 분쇄가 수반되는 물리적 전처리를 거쳐 침출 및 용매추출공정인 습식 정제 공정이 수행되고 여기서 나오는 부산물들을 전해, 채취, 증발, 농축 및 건조공정을 거쳐 소재화하게 된다.

EV 폐 배터리 재활용 공정 중 소재화 공정에 포

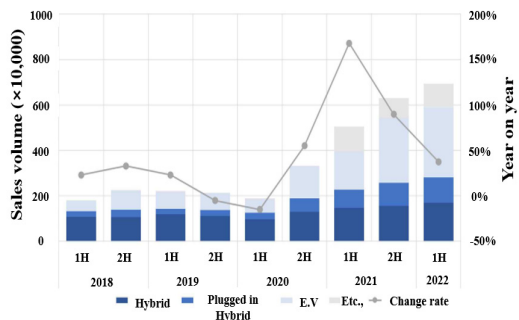


Fig. 1 Green Cars Market Global Size and Growth (Korea Eximbank, 2022)

합되는 건조공정은 전체 공정의 약 60% 이상의 에너지를 소비하는 에너지 다소비 공정이며 건조가 된 피건조물은 1% 이하의 초 저습수율을 요구한다.<sup>4)</sup>

기존의 건조 공정을 운전하기 위해서 산업용 보일러를 사용하여 열원을 공급하였으나 화석연료기반의 산업용 보일러는 대표적인 에너지 다소비 기기 및 고 탄소 배출 기기이기 때문에 이를 대체 에너지 고효율 및 저탄소 배출 에너지기기로 대체 하고자 하는 수요가 빠르게 증가하고 있다.

대체 고효율 및 저탄소 배출 에너지 기기 중 가장 각광받고 있는 기술은 히트펌프 기술이며 난방의 경우 약 3.5 이상의 높은 COP를 낼 수 있으며, 전력기반이기 때문에 상대적으로 낮은 이산화탄소 배출 기기이다. 최근 히트펌프의 성능을 향상시키고 이를 활용하여 산업용 보일러를 대체하여 산업용 열원기기의 에너지 소비 및 탄소배출 저감에 기여하는 연구들이 전 세계적으로 수행 중이다.<sup>5-16)</sup>

기존의 열풍 건조의 경우, 대류 전열 건조라고도 하며 열풍과 재료가 직접 접촉하여 열을 전달하여 수분을 증발시키는 방식이며, 온도가 낮아지고 습도가 올라간 공기는 외부로 배출하는 개루프(Open-loop)타입이 주를 이루고 있었기 때문에 낮은 에너지 효율 및 대기 환경오염과 같은 문제점을 야기하고 있다.

본 연구에서 제안하는 폐루프(Closed-Loop)타입 히트펌프 하이브리드 열풍 건조기는 기존 열풍 건조기와 달리 피 건조물 건조 후 배출되던 습공기를 회수하고 회수된 습공기에서 수분을 응축시켜 응축수를 따로 배출하고 수분이 제거된 공기를 고온으로 재가열하여 건조기 내부로 재공급하는 하는 에너지 고효율 및 친환경 시스템이다. 제안된 공정을 EV 폐배터리 재활용 공정 중 소재화 공정의 건조공정에 적용하면 탄소배출 저감 및 에너지 효율 향상을 달성할 수 있으며 분진 발생으로 인한 환경오염을 저감시킬 수 있다.

본 연구에서는 폐루프(Closed-Loop)타입 히트펌프 하이브리드 열풍 건조기를 제안하고 최적 냉매 및 운전조건을 도출하기 위한 사이클 시뮬레이션 툴을 만들고 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

시뮬레이션 연구를 통해 세 가지 서로 다른 HFO 계열 Low-GWP 냉매를 적용한 폐루프타입 히트펌프 하이브리드 열풍 건조기의 COP 그리고 SMER을 증발기 및 응축기 온도 변화에 따라 평가하였고 최적 냉매 및 운전조건을 선정하였다.

## 2. 연구 방법

Fig. 2는 본 연구에서 제안한 폐루프형 히트펌프 하이브리드 열풍 건조 공정의 개략도이다. 본 공정을 간략히 설명하면 (1) 히트펌프의 뜨거운 응축기를 통과하여 생성된 고온의 건공기가 건조기 내부로 유입된다. (2) 유입된 고온의 건공기는 피 건조물의 수분을 빼앗아 다시 히트펌프 증발기 쪽으로 유입된다. (3) 유입된 습공기는 증발기를 통과하면서 수분이 응축되어 따로 배출되게 된다. (4) 온도가 낮아지고 수분이 배출된 습공기는 다시 응축기를 통과하며 고온의 건공기로 건조기 내부로 유입된다. 본 공정을 위해 증발기와 응축기가 직렬로 배치되어 습공기가 순차적으로 통과할 수 있도록 설계되었다. 응축기와 증발기의 열평형(Heat balance)을 고려하여 외부 응축기를 두었고 응축수는 펌프를 통해 외부로 강제 배출되도록 설계하였다.

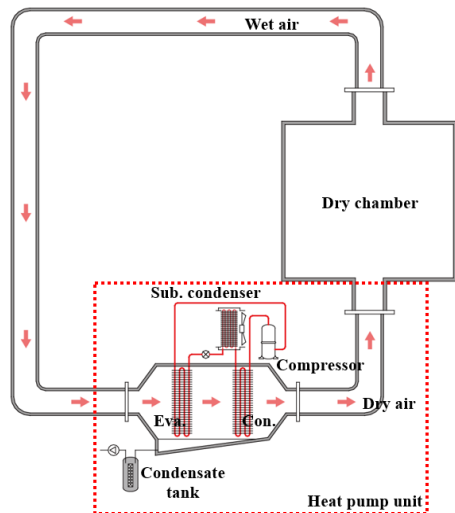


Fig. 2 Schematic diagram of closed loop hot air dryer and heat pump hybrid system

Table 1 Critical points of HFOs refrigerant

Refrigerant (HFO)	Critical point	
	Temperature (°C)	Pressure (kPa)
R1233zd(E)	109.36	3,635
R1234ze(Z)	150.12	3,531
R1336mzz(Z)	171.35	2,903

강화되고 있는 냉매 사용 규제에 대비하여 본 연구에서는 Low-GWP 냉매인 HFO 계열 냉매를 적용한 시스템을 설계하였다. HFO 냉매군 중에서 제안된 시스템에 적용될 수 있는 세 가지 서로 다른 냉매 R1233zd(E), R1234ze(Z) 그리고 R1336mzz(Z)를 후보 냉매로 선정하였다. 세 가지 서로 다른 냉매의 임계온도와 압력을 비교했을 때 R1336mzz(Z)의 임계온도가 171.35°C로 가장 높았고, R1233zd(E)의 임계압력이 3,635 kPa로 가장 높다.

본 연구의 목표 피건조물은 EV 폐배터리 재활용 공정에서 회수되는 황산망간(MnSO4)이다. 황산망간은 EV 배터리 생산의 가장 기초적이고 중요한 소재이며 많은 배터리 생산에 많은 양이 소모되지 않지만 배터리 안정성을 높이는데 필수적이다. 최대 생산국은 중국이며, 수급에 차질이 생길 시에 전기차 배터리 생산에 악영향을 미칠 수 있다. 황산망간은 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 EV 폐배터리 재활용 공정의 소재화 공정에서 건조되어야 하는 황산망간이 약 10 wt%의 수분을 포함할 때, 페루프형 히트펌프 하이브리드 열풍 건조 시스템을 통하여 함수율을 통해 배출되는 재활용 양극재 재료를 히트펌프 열원을 활용하여 건조하는 히트펌프 하이브리드 건조기 개발의 첫 번째 연구이기 때문에 재활용되는 양극재 재료 중 요구 함수율이 가장 높은 황산망간(1.5 wt%)을 타겟으로 하였다. 또한 초기 함수율을 10 wt%로 한 이유는 습식제련 후 1차 건조 공정에서 배출되는 피 건조물의 함수율이 10 wt%에서 15 wt%이기 때문에 부하가 적은 10 wt%를 선택하였다. 건조시간은 2시간이고 총 제거 수분량은 8.5kg이다. 건조기 입출구 절대습도 차이는 4.32 g/kgda이다. 건조기 입출구 온도는 각각 70°C와 80°C이다. 증발기 온도는 40°C로 고정하였

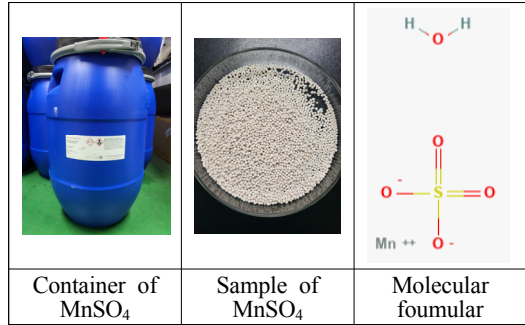


Fig. 3 Picture of MnSO4 sample

Table 2 Operating conditions

Parameter	Value
Total amount of moisture removal (kg)	8.5
Target removal time (hr)	2
Absolute humidity difference between inlet and outlet of drying chamber (g/kg <sub>da</sub> )	4.32
Air temperature of outlet of drying chamber (°C)	70
Outlet air temperature of evaporator (°C)	40
Outlet air temperature of condenser (°C)	80
Dry air mass flow rate (kg/s)	0.27
Degree of superheating (°C)	10
Degree of subcooling (°C)	3
Isentropic efficiency (-)	0.75

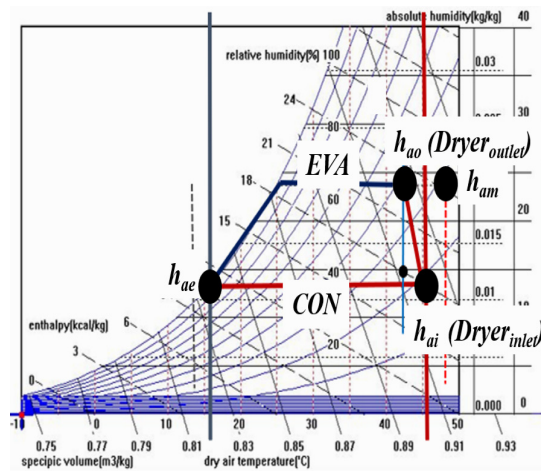


Fig. 4 Psychrometric chart of drying process (Example)

다. 과열 및 과냉도는 각각 10℃와 3℃이다. 압축기의 등엔트로피효율은 0.75이다.

Fig. 4는 습공기 선도를 활용하여 건조 공정을 표현하였다. 시뮬레이션 연구를 통해 최적 냉매와 운전조건을 산출하기 위해 Visual C++을 활용하여 Inhouse Code를 작성하였다. 건조공정 모사를 위해 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$Q_{Dry} = \dot{m}_{da} \times [h_{ao}(T_{do}, AH_{ao}) - h_{ai}(T_{di}, AH_{ai})] \quad (1)$$

$$Q_{EVA} = \dot{m}_{da} \times [h_{ae}(T_{de}, AH_{ae}) - h_{ai}(T_{do}, AH_{ao})] \quad (2)$$

$$Q_{CON} = \dot{m}_{da} \times [h_{ai}(T_{di}, AH_{ai}) - h_{ae}(T_{de}, AH_{ae})] \quad (3)$$

$$Q_{CON,Er} = Q_{CON,Heatpump} - Q_{CON} \quad (4)$$

사이클 설계를 위해 습공기의 온도와 습도를 고려하여 엔탈피를 산출하고 이를 활용하여 건조, 증발기, 응축기 및 외부 응축기 열량을 산출할 수 있도록 하였다. 또한 건조 시스템의 효율을 계산할 수 있도록 COP와 SMER를 산출하였고, 사용된 식은 다음과 같다.

$$COP = \frac{Q_H}{W} \quad (5)$$

$$SMER = \frac{\dot{m}_{da} \times (w_o - w_i)}{W} \quad (6)$$

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 히트펌프 사이클 시뮬레이션

세 가지 서로 다른 냉매를 적용했을 때, 응축기 및 증발기의 온도에 따른 필요 냉매유량과 증발기 및 응축기 열량을 비교하였다.

R1233zd(E) 냉매를 제안된 시스템에 적용했을 때 응축기 및 증발기 온도에 따른 필요 냉매유량과 증발기 및 응축기 열량을 산출하였다. 증발기 온도는 30℃에서 38℃로 증가시켰고, 응축기 온도

는 82℃에서 90℃까지 증가시켜 가며 증발기 열량, 응축기 열량 그리고 요구 냉매 유량을 산출하였다. 운전조건을 변화하여도 증발 열량은 12.41

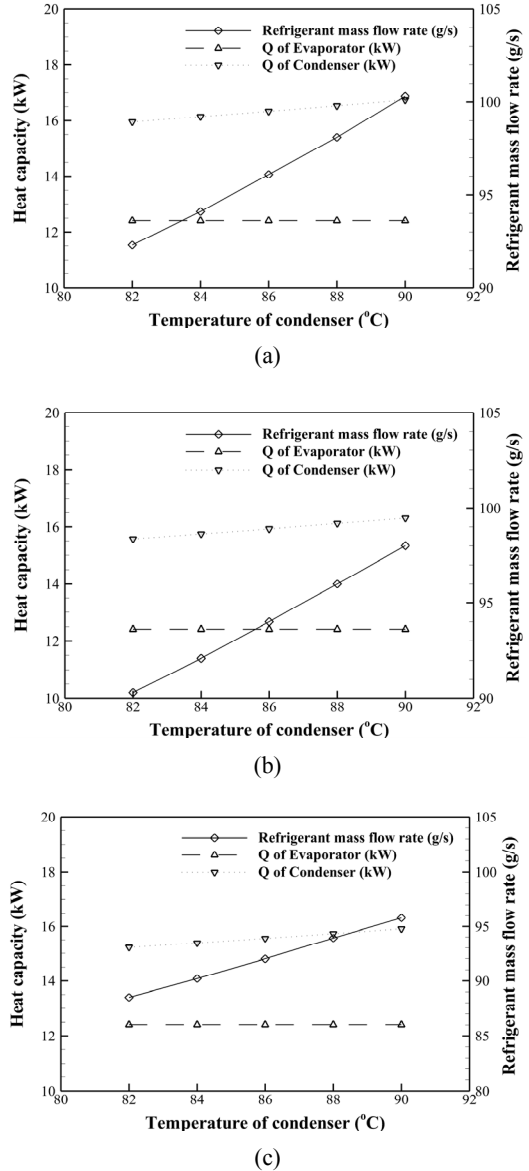


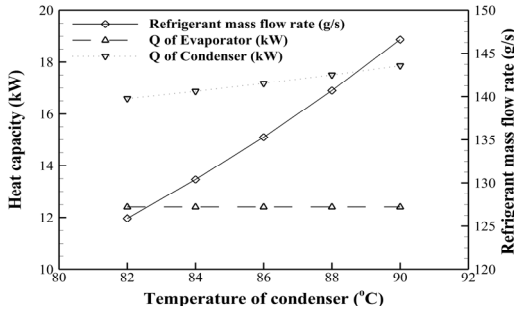
Fig. 5 Influence of temperature of condenser on heat capacity of evaporator and condenser and refrigerant flow rate with 1233zd(E) (Temperature of Evaporator : (a) 30℃, (b) 34℃, (c) 38℃)

kW로 고정되었으며, 이는 입출구에서 절대습도 차이를 고정하고 계산을 수행했기 때문이다.

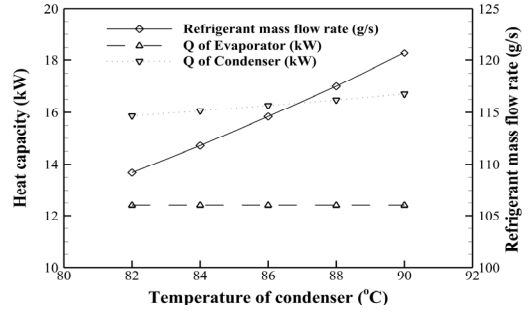
최저와 최대 응축기 열량은 각각 15.22 kW와 16.74 kW이었으며, 이때 응축기 및 증발기의 목표 온도는 각각 32°C와 90°C 그리고 각각 38°C와 82°C였다. 또한 증발기와축기 온도의 차이가 커질

수록 냉매유량이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 이는 증발기 온도가 증가함에 따라 냉매의 응축 엔탈피 차이가 감소하기 때문이다.

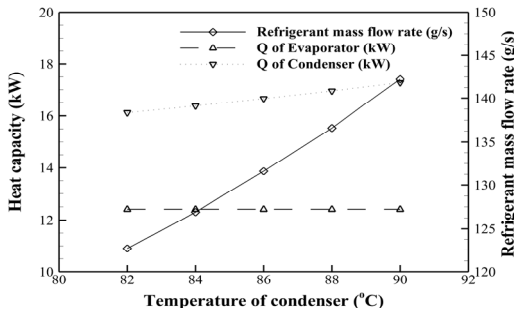
R1234ze(E) 냉매를 제안된 시스템에 적용했을 때 R1233zd(E)를 적용했을 때와 마찬가지로 증발기 열량이 12.41 kW로 고정이었으며, 이유는 상동



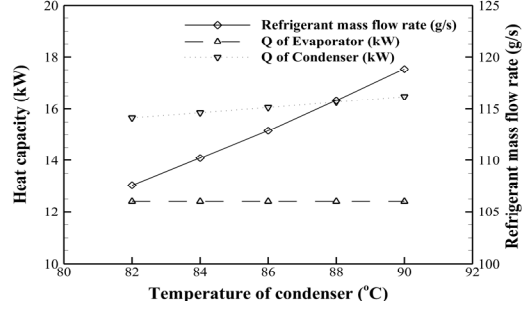
(a)



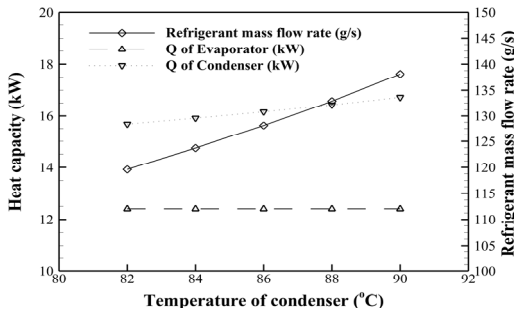
(a)



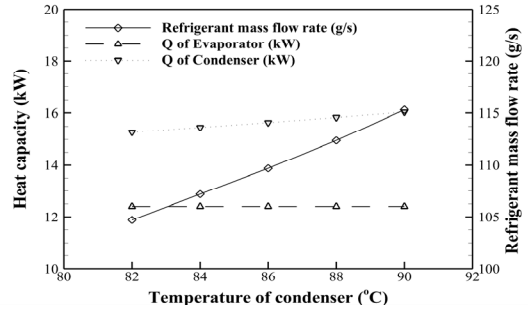
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 6 Influence of temperature of condenser on heat capacity of evaporator and condenser and refrigerant flow rate with 1234ze(E) (Temperature of Evaporator : (a) 30°C, (b) 34°C, (c) 38°C)

Fig. 7 Influence of temperature of condenser on heat capacity of evaporator and condenser and refrigerant flow rate with 1336mzz(Z) (Temperature of Evaporator. : (a) 30°C, (b) 34°C, (c) 38°C)

이다. 최저 및 최대 응축기 열량은 각각 15.67 kW와 17.86 kW이었으며, 이때 응축 및 증발기의 목표 온도는 각각 32℃와 90℃ 그리고 각각 38℃와 82℃였다. 증발기와 응축기 목표 온도에 따른 냉매유량 변화 경향 역시 R1233zd(E) 냉매를 사용했을 때와 같았다.

R1336mzz(Z) 냉매를 제안된 시스템에 적용했을 때 최저와 최대 응축열량은 각각 15.28 kW와 16.7 kW이었으며, 이때 응축 및 증발기의 목표 온도는 각각 32℃와 90℃ 그리고 각각 38℃와 82℃였다.

R1234ze(E)를 제안된 시스템에 적용했을 때 응축기 열량은 17.86 kW로 가장 높았으나 냉매 유량에 따른 엔탈피 차이는 126.65 kJ/kg으로 가장 낮았고, 최대 응축기 열량이 16.74 kW인 R1233zd(E)를 사용했을 때 169.07 kJ/kg으로 가장 높았다.

### 3.2 건조 성능 평가

제안된 건조기 시스템 성능을 평가하기 위해 각 냉매가 적용되었을 때, 히트펌프 COP, SMER 그리고 압축기의 압축비를 증발기 및 응축기 목표온도에 따라 산출하였다.

세 가지 서로 다른 냉매 중 최적 냉매 및 운전 조건을 도출하고자 목표 증발 및 응축온도에 따른 COP와 SMER을 산출하였으며, 부가적으로 증발기 및 응축기의 압력비를 산출하였다.

목표 운전조건 하에서 응축기와 증발기의 목표 온도 차이가 증가할수록 압축기의 압축비가 증가하는 경향을 볼 수 있었다. R1234ze(E) 냉매를 사용했을 때, 증발기 및 응축기 목표온도에 따른 압축비가 평균 3.53으로 가장 낮았다. 가장 높은 압축비는 R1336mzz(Z) 냉매를 사용했을 때 평균 4.82였다. R1233zd(E) 냉매를 사용했을 때는 평균 4.32로 중간 값을 가졌다.

R1233zd(E) 냉매를 제안된 시스템에 적용했을 때, 최저와 최대 COP는 각각 3.86과 5.42였으며, 이때 응축 및 증발기의 목표 온도는 각각 32℃와 90℃ 그리고 각각 38℃와 82℃였다. SMER 역시 COP와 비슷한 경향을 보였고, 최저 및 최대 SMER이 각각 0.98 및 1.51이었다. R1234ze(E) 냉매를 제안된 시스템에 적용했을 때, 최저와 최대

COP는 R1233zd(E) 냉매를 적용했을 때보다 낮았고, 최저 그리고 최댓값이 각각 3.23과 4.78이었다. SMER 역시 R1233zd(E) 냉매를 적용했을 때보다 낮았으며, 각각 최저와 최대가 0.78 그리고 1.3이었다. R1336mzz(Z) 냉매를 적용 시 최저와 최대 COP가 각각 3.89과 5.32였고, 최저와 최대 SMER

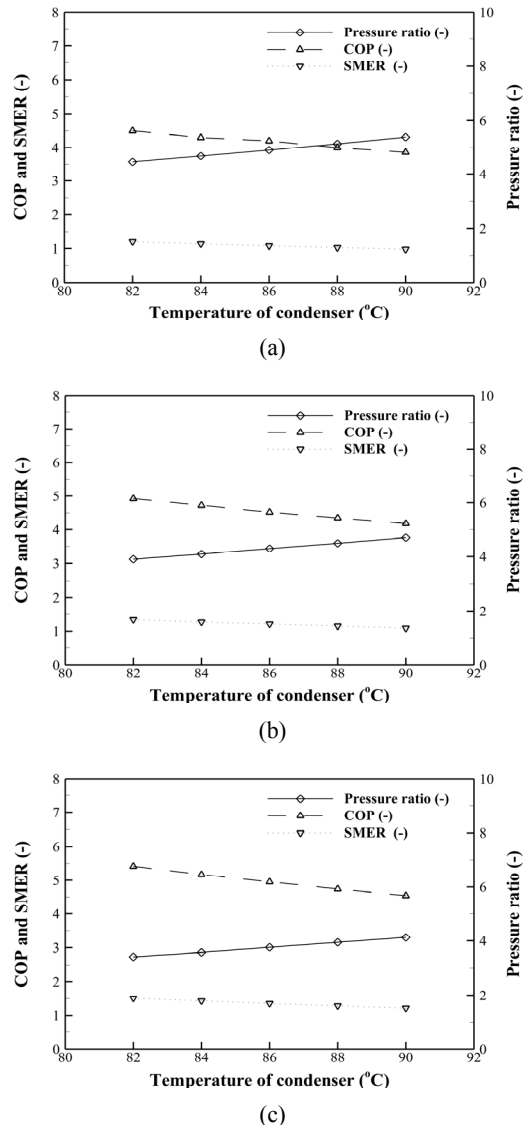


Fig. 8 Influence of temperature of condenser on COP and Pressure ratio of pump with 1233zd(E) (Temperature of Evaporator : (a) 30℃, (b) 34℃, (c) 38℃)

은 각각 0.99 그리고 1.48이었다.

본 연구에서 수행한 시뮬레이션 결과를 분석했을 때 세 가지 서로 다른 냉매 중 제안된 시스템에 가장 적합한 냉매는 R1233zd(E)이었으며, 최적인전조건은 증발기 및 응축기 목표온도가 각각 38℃ 그리고 82℃일 때였고, 이때 최대 COP 5.42 그리고 최대 SMER 1.51이었다.

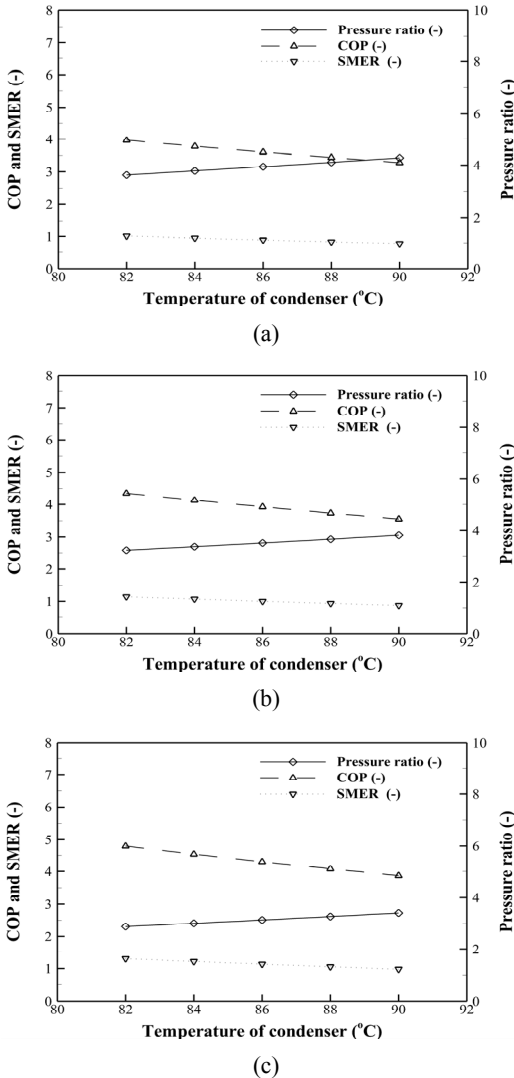


Fig. 9 Influence of temperature of condenser on COP and Pressure ratio of pump with 1234ze(E) (Temperature of Evaporator : (a) 30℃, (b) 34℃, (c) 38℃)

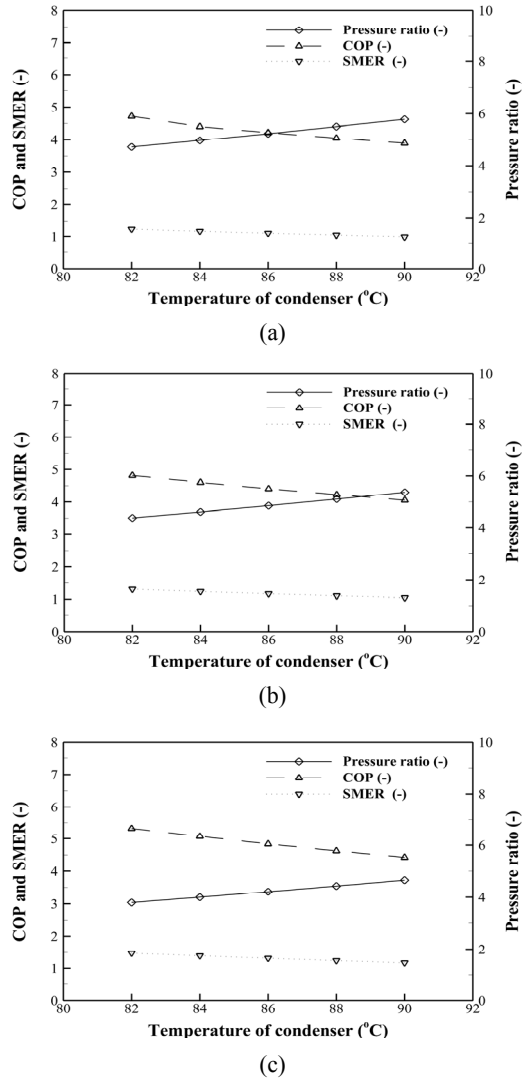


Fig. 10 Influence of temperature of condenser on COP and Pressure ratio of pump with 1336mzz(Z) (Temperature of Evaporator : (a) 30℃, (b) 34℃, (c) 38℃)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 탄소배출 저감, 에너지소모량 저감 그리고 환경오염 저감을 동시에 실현할 수 있는 EV 폐 배터리 재활용 공정의 건조 공정용 펌프 타입 히트펌프 하이브리드 열풍 건조기 시스템을 제안하였고, 시뮬레이션 연구를 통해 COP



및 SMER 비교를 통해 최적 냉매 및 최적 운전조건을 도출하였다.

설정된 고정조건 하에서 증발기 및 응축기 목표온도를 변화시켜 가면서 증발기 및 응축기 열량을 평가하였으며, 결과는 다음과 같다.

1) 건조기 입출구 절대 습도를 고정하였기 때문에 증발기 열량은 응축 및 증발온도가 변화하여도 12.41 kW로 고정되었다.

2) R1233zd(E), R1234ze(E) 그리고 R1336mzz(Z) 냉매를 사용했을 때 최대 응축기 열량은 17.86 kW, 16.84 kW 그리고 16.03 kW로 산출되었으나 응축기 엔탈피 차이는 R1233zd(E) 냉매를 사용했을 때 169.07 kW로 가장 높음을 알 수 있었다.

3) R1234ze(E) 냉매를 적용했을 때 가장 낮은 COP 그리고 SMER(3.277 그리고 0.780)을 얻을 수 있었으며, 이때 응축기 및 증발기의 목표온도는 각각 32°C와 90°C였다.

4) R1233zd(E) 냉매를 적용했을 때 가장 높은 COP와 SMER(5.42 그리고 1.51)을 얻을 수 있었으며, 응축기 및 증발기의 목표온도는 각각 38°C 그리고 82°C였다.

5) 본 연구를 통해 R1233zd(E)가 제안된 시스템에 최적의 냉매인 것을 알 수 있었고, 최적운전조건은 응축기 및 증발기의 목표온도는 각각 38°C 그리고 82°C일 때임을 알 수 있었다.

본 연구의 후속연구로 본 연구에서 제안된 운전조건 및 냉매를 고려한 실험실 규모의 실험 연구를 계획하고 있으며, 시스템 설계값을 비교 검증할 계획이다.

## 후 기

“본 논문은 산업통상자원부 기계장비산업기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(연구개발 과제번호: 20018410)”.

## Author contributions

J. G. Lee; Conceptualization, Methodology, Simulation, Writing-original draft, Writing-review & editing.

## References

1. B. Alexandre et al., 2020, “Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials”, *Sustainability*, 12, 5837. (<https://doi.org/10.3390/su12145837>)
2. N. Panda et al., 2023, “Review on lithium ion battery recycling: challenges and possibilities”, *Geosystem Engineering*, 26, 101-119. (<https://doi.org/10.1080/12269328.2023.2228799>)
3. T. Yang et al., 2023, “Enabling Future Closed-Loop Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: Direct Cathode Regeneration”, *Advanced materials*, 2203218. (<https://doi.org/10.1002/adma.202203218>)
4. A. S. Mujumdar, 2014, “Handbook of industrial drying”, CRC press. (<https://doi.org/10.1080/07373937.2013.822648>)
5. K. Lee, O. Kim, 2009, “Investigation on drying performance and energy savings of the batch-type heat pump dryer”, *Drying Technology*, 27(4), 565-573. (<https://doi.org/10.1080/07373930802715708>)
6. M. Fatouh et al., 2006, “Herbs drying using a heat pump dryer”, *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2629-2643. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.022>.)
7. K. J. Chua et al., 2007, “Heat Pump Drying: Recent Developments And Future Trends”, *Drying technology*, 20(8), 1579-1610. (<https://doi.org/10.1081/DRT-120014053>)
8. M. Zielinska et al., 2013, “Microwave vacuum - assisted drying of green peas using heat pump and fluidized bed: A comparative study between atmospheric freeze drying and hot air convective drying”, *Drying Technology*, 31(6), 633-642. (<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.751921>)
9. D. Sun et al., 2017, “Study on combined heat pump drying with freeze drying of Antarctic krill and its effects on the lipids”, *Journal of*

- Food Process Engineering, 40(6), e12577.  
(<https://doi.org/10.1111/jfpe.12577>)
10. P. K. Adapa, S. Sokhansanj and G. J. Schoenau, 2002, "Performance study of a re-circulating cabinet dryer using a household dehumidifier", *Drying Technology*, 20(8), 1673-1689.  
(<https://doi.org/10.1081/DRT-120015407>)
  11. V. Sosle, G. S. Raghavan and R. Kittler, 2003, "Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier", *Drying technology*, 21(3), 539-554.  
(<https://doi.org/10.1081/DRT-120018461>)
  12. X. Zhang, K. N. Rhee and G. J. Jung, 2020, "Simulations for the Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump Cooling System Combined with Hot Water Heat Pump", *Journal of Power System Engineering*, 24(2), 64-72.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.2.064>)
  13. J. H. Moon et al., 2022, "Review for Domestic Applicability of OTEC-HP Combined Cycle", *Journal of Power System Engineering*, 26(4), 81-88.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.4.081>)
  14. S. T. Lim, H. J. Kim and H. S. Lee, 2016, "The Performance Analysis of Sea Water Heat Pump applied Low GWP Refrigerants", *Journal of Power System Engineering*, 20(5), 92-97.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.5.092>)
  15. J. I. Yoon et al., 2014, "Performance Comparison of Supercritical Heat Pump for a Variety of Refrigerants", *Journal of Power System Engineering*, 18(5), 42-47.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.042>)
  16. K. J. Bae, D. A. Cha and O. K. Kwon, 2016, "Analysis and Verification of High Temperature Heat Pump Dryer using Waste Heat Recovery Type for R245fa Refrigerant", *Journal of Power System Engineering*, 20(2), 73-78.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.2.073>)