

FEMS 기반의 폐열을 활용한 히트펌프 적용 방안 연구

서기정^{1*}, 김소연¹, 정민규¹, 구돈익¹, 송지원¹, 노현규², 양현민², 정연태², 임연우², 김민성^{1,2**}
중앙대학교 지능형에너지산업융합학과¹, 중앙대학교 에너지시스템공학부²

koki8235@cau.ac.kr*, minsungk@cau.ac.kr**

A Study on the Application of Heat Pumps Utilizing Waste Heat Based on FEMS

¹Kijeong Seo, ¹Soyeon Kim, ¹Mingyu Jung, ¹Donik Ku, ¹Jiwon Song, ²Hyungyu Noh,
²Hyunmin Yang, ²Yeontae Jeong, ²Yeonoo Lim, ^{1,2}Minsung Kim

¹Department of Intelligent Industry and Energy, Chung-Ang University

²School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

요약

제지 공장의 에너지 효율을 개선하는 것은 탄소 중립과 경제적 이익을 동시에 달성하는 산업 분야의 중요한 과제이다. 본 연구는 대표 에너지다소비 공정인 제지공정의 폐열을 활용하고 스팀을 생성할 수 있는 스팀히트펌프(SGHP)를 모델링하고 그 성능을 해석한다. 에너지밸런스분석을 통해 폐열에너지를 정량적으로 산정하고 120°C 포화 스팀을 달성하기 위해 MATLAB 프로그래밍 환경에서 시스템을 모델링한다. 작동냉매로서 HFC 계열의 R245fa 로 사용되는 SGHP 에 대한 여러 선행연구가 있으나, 이는 높은 GWP 와 약가연성의 성질을 가진다. 본 연구에서는 대체 냉매로서 HCFO 계열의 R1224yd(Z)를 시뮬레이션에 사용한다. 열교환기 크기 결정을 위해 Secant Method 기법을 활용하여 사이클을 수립하고, 열 교환기의 전체 크기를 유지함으로써 증발기 크기 비율에 기초한 시스템의 성능을 분석한다. 이 과정에서, 시스템의 성능을 비교하기 위한 지표로 COP, 스팀 생산량, 압축일의 세 가지 중요한 변수를 선택합니다. 시뮬레이션 결과, 기존 수립기법과 비교하여 사이클의 성능이 향상하는 것을 확인하였으며, 이에 대한 경제성 분석을 진행하였다.

I. 서론

스팀은 2000kJ/kg 이상의 잠열 열교환을 통해 빠른 열전달 속도와 일정한 온도 유지를 하는 장점이 있어, 여러 산업용 건조공정에서 널리 사용되고 있는 열원이다.[1] 주로 열병합발전소에서 가스보일러를 통해 물을 끓여 스팀이 생산되는데, 이때 연료를 태우는 과정에서 많은 비용이 들 뿐만 아니라 2050 탄소중립 목표 달성을 위해 지속가능한 열원을 통해 스팀을 생산해야 하는 것이 큰 과제이다. 이에 관한 여러 연구 중 스팀히트펌프는 산업공장에서 발생하는 폐열원을 이용한 히트펌프 사이클을 통해 물을 끓여 스팀을 생산하는 기술이다. [2]

본 연구에서는 주어진 폐열 조건에서 스팀생산량이 최대가 되도록 하는 최적의 히트펌프 사이즈를 결정하는 방법에 대해 소개한다. 작동냉매는 R245fa 와 열역학 특성이 유사하면서 GWP 가 낮아 고온 히트펌프에서 사용되는 R1224yd(Z)로 선정하였으며[3] MATLAB 프로그래밍 환경에서 히트펌프 시스템 모델링을 진행하여 성능을 확인하였다.

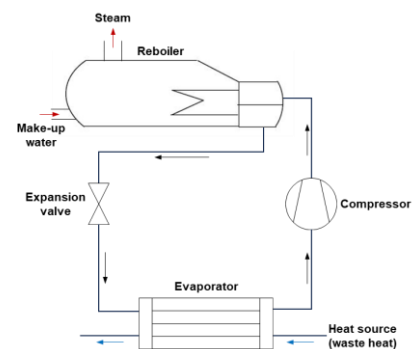
II. 본론

본 연구에서는 펄프제지산업 내 열에너지다소비공정인 초지공정을 대상으로 분석을 진행하였다. 공정의 열에너지 소비 현황 파악을 위해 에너지밸런스 분석이 선행되어야 한다. HMI 분석을 통해 계통별 에너지

흐름도를 나타내고 열역학 제 1 법칙 기준의 열량 계산을 통해 에너지밸런스를 도출할 수 있다. 에너지밸런스 정확도를 통해 모델의 적합성을 확인하고, 이를 통해 초지공정의 폐열에너지를 정량적으로 확인할 수 있다.

스팀히트펌프 시스템은 기본 구성요소인 증발기, 압축기, 응축기, 팽창밸브로 구성하였다. 증발기를 통해 폐열을 회수하고, 압축기를 지난 고온고압의 냉매는 응축기에서 물과 열교환하여 스팀을 생산한다. 이후, 팽창밸브를 지난 저온저압의 냉매가 다시 증발기에서 폐열을 회수하는 사이클을 설계하였다. 히트펌프의 개략도는 Fig. 1 과 같다.

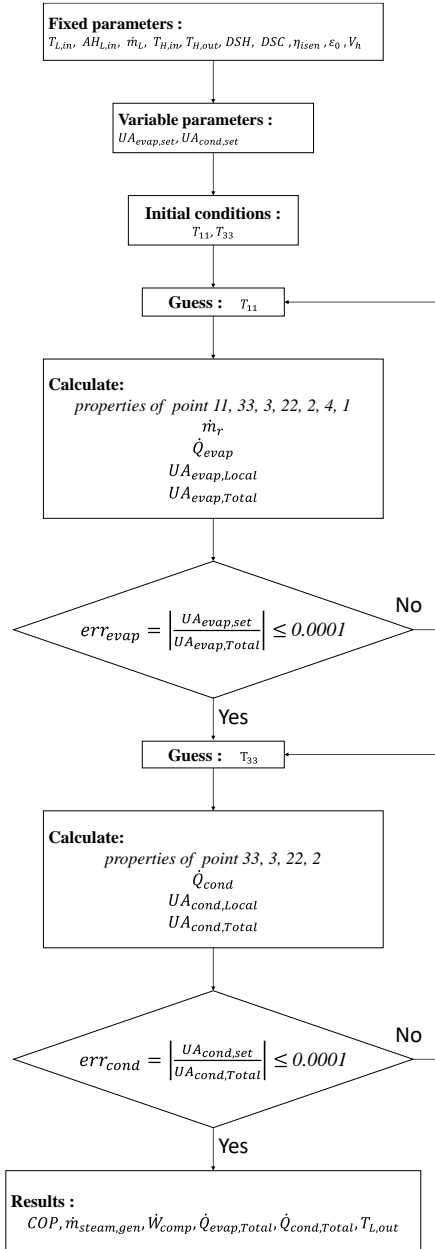
Fig. 1 Schematic of SGHP system



시뮬레이션은 Matlab 프로그래밍 환경에서 진행하였다. 주어진 열원 조건 하에 생산 스팀의 목표 온도에 도달하도록 열교환기 수렴을 진행하였다. 우선, 열교환기 사이즈(UA)를 결정하기 위해 LMTD 기준으로 사이클

해석을 진행하였으며, 이때 수렴 방법으로 Domanski 모델인 Secant Method 를 사용하였다. [4] 이후에, 열교환기 전체 사이즈가 결정되면 폐열을 회수하는 증발기 사이즈 비율에 따른 사이클 성능을 분석하였다. 이때, 열역학 제 2 법칙에 따르면서 폐열 회수라는 Open-cycle 특성을 고려하여 스팀생산량이 최대가 되는 열교환기를 결정하였다.[5]

Fig. 2 Flow chart of MATLAB simulation



에너지밸런스 분석 결과 약 94.7%의 높은 정확도를 나타내었으며, 해당 모델의 정합성을 바탕으로 폐열의 정량적인 열에너지를 파악하였다. 사이클 성능 비교 분석을 위한 변수로 COP, 생산 스팀 유량, 압축일, 그리고 증발열량과 응축열량 또한 확인하였다. 각 변수마다 변곡점이 존재하였으며 이때의 trade-off 가 발생하는 것을 확인하였다. 앞서 설명한 스팀생산량이 최대가 되는 열교환기를 최적 설계점으로 제시하고, 각 폐열 조건에 따라 동일한 알고리즘을 적용하였다.

그 결과, 각 폐열조건에 적합한 열교환기 사이즈를 결정하여 최대 스팀생산량을 도출할 수 있었으며, 이때

압축기 총 소요동력을 계산하여 알고리즘 적용 전과 성능을 비교하였다.

III. 결론

산업공정에서 널리 사용되는 스팀을 생산하는 과정은 2050 탄소중립을 달성하기 위해 반드시 개선되어야 할 분야이다. 본 연구에서는 초지공정에서 발생하는 폐열을 활용한 스팀히트펌프에 관한 모델링을 진행하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 약 94.7%의 높은 에너지밸런스 정확도를 기반으로 초지공정에서 발생하는 폐열 에너지를 정량적으로 확인하였고, 이를 활용한 스팀히트펌프 모델링을 진행하였다.
- (2) 선행 연구들은 R245fa 냉매를 사용하였으나, 높은 GWP 문제로 인하여 대체냉매로 R1224yd(Z)를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.
- (3) 시뮬레이션 결과를 바탕으로 스팀 생산량이 최대가 되는 열교환기 크기를 결정하였으며, 알고리즘 적용 전과 성능 비교를 통해 최적점을 제시하였다.
- (4) 추후에, 산업공정에 적용하는 목적에 부합하도록 경제성 측면과 배출권 측면을 반영하여 시스템 설계를 진행해야 할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단(RS-2024-00394625)과 한국 에너지기술평가원(20202020900290, 20212050100010, RS-2024-00423446), 한국에너지기술연구원(KIER2024-360-05-03-01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Parry, William T., et al. "ASME international steam tables for industrial use." (2009): 1-292.
- [2] Kang, Dae Hoon, Sun-Ik Na, and Min Soo Kim. "Recent researches on steam generation heat pump system." International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 25.04 (2017): 1730005.
- [3] Arpagaus, Cordin, and Stefan Bertsch. "Experimental Comparison of HCFO and HFO R1224yd (Z), R1233zd (E), R1336mzz (Z), and HFC R245fa in a High Temperature Heat Pump up to 150 C Supply Temperature." (2021).
- [4] Domanski, P., and D. Didion. "Mathematical model of an air-to-air heat pump equipped with a capillary tube." International Journal of Refrigeration 7.4 (1984): 249-255.
- [5] Kim, Soyeon, Young-Jin Baik, and Minsung Kim. "Thermodynamic analysis of general heat engine cycle with finite heat capacity rates for power maximization." Case Studies in Thermal Engineering 35 (2022): 102067.