

## 250kW급 폐열회수 시스템용 유기랭킨사이클 배관 열유동해석에 관한 연구

김경수\*, 방세경\*, 서인호\*, 이상윤\*, 이종섭\*\*,#

\*(주)영광, \*\*한국승강기대학교 승강기공학부

### Thermal and Flow Analysis of Organic Rankine Cycle System Pipe Line for 250 kW Grade Waste Gas Heat Recovery

Kyoung Su Kim\*, Se Kyoung Bang\*, In Ho Seo\*, Sang Yun Lee\*, Chung Seob Yi\*\*,#

\*Young Kwang. CO.,LTD, \*\*Korea Lift Collage, School of Lift Engineering

(Received 3 January 2019; received in revised form 7 February 2019; accepted 12 February 2019)

#### ABSTRACT

This study is a thermal and flow analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) pipe line for 250 kW grade waste gas heat recovery. We attempted to obtain the boundary condition data through the process design of the ORC, which can produce an electric power of 250 kW through the recovery of waste heat. Then, we conducted a simulation by using STAR-CCM+ to verify the model for the pipe line stream of the 250 kW class waste heat recovery system. Based on the results of the thermal and flow analyses of each pipe line applied to the ORC system, we gained the following conclusion. The pressure was relatively increased at the pipe outside the refracted part due to the pipe shape. Moreover, the heat transfer amount of the refrigerant gas line is relatively higher than that of the liquid line.

**Key Words :** Waste Gas Heat Recovery(폐열회수), Heat Balance(열정산) ORC(유기랭킨사이클)

### 1. 서 론

최근 연료 및 전력단가의 지속적인 상승과 온실 가스 배출 규제 강화로 산업 전반적으로 이에 대한 대응방안으로 공정 간에 발생하는 폐열을 회수하여 재이용 하는 기술 개발이 중요 이슈로 부각되고 있다. 2010년 전후를 기반으로 중 저온 폐열발전의 개발이 가속화되어 상용화단계까지 개발이 되었으나 투자대비 회수율(효율)이 떨어져 산업계에서는

직접적인 투자를 회피하고 있는 실정이다.

기존 산업에서 많이 사용하는 폐열회수 방식으로는 대표적으로 HRSG(Heat Recovery Steam Generator)와 스팀발전 등을 주로 사용하고 있고, 일반적으로 스팀발전이 가능한 온도대인 400°C 이상의 온도는 이미 활용을 하고 있어 현재 개발 대상을 많이 버려지고 있는 중저온대의 폐열 회수를 할 수 있는 폐열회수 시스템 개발이 필요한 시점이다<sup>[1-3]</sup>.

중저온 폐열회수 기술은 현재 외국에서 개발을 완료하여 사업을 하고 있는 유기랭킨발전시스템(Organic Rankine Cycle)을 이용하여, 스마트 그리

# Corresponding Author : [csyi@klc.ac.kr](mailto:csyi@klc.ac.kr)

Tel: +82-55-949-2266, Fax: +82-55-949-2200

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <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.

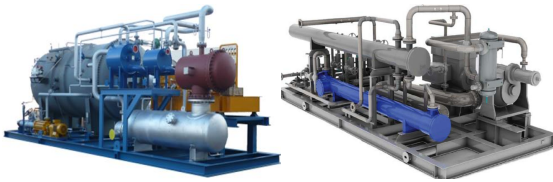


Fig. 1 250kW grade ORC system

드 시대에 맞추어 차세대 다중전원을 선도할 대표적인 발전설비 개발이 필요하다. 또한 하이브리드 복합발전 시스템의 개발과 관련된 기술을 유관산업에 적용할 경우 국내외의 시장규모 및 수출 성을 고려할 때 국가에 미치는 경제적, 기술적 파급효과 기대할 수 있다<sup>4-8)</sup>.

본 연구는 Fig. 2와 같은 ORC 시스템을 개발하기 위한 설계 자료를 확보하기 위하여 공정설계를 통한 열정산 설계 자료를 바탕으로 3D 모델링을 수하여 각 요소부품간에 설치된 배관에서의 열유동 해석을 수행하고자 한다.

## 2. ORC 시스템 설계

본 연구에서 250kW급 폐열회수 시스템에 대한 공정 설계에 대한 모델링은 APSEN HYSYS를 사용하여 시뮬레이션을 우선 수행하였다<sup>9)</sup>.

Fig. 2와 같이 예열기, 증발기, 과열기, 냉각기, 회복기로 장치가 구성되어 있고, 작동유체는 예열기, 증발기, 과열기를 통해 고온-고압의 Superheating vapor 상태로 터빈에 유입된 후 고온-저압의 Vapor 상태로 팽창된다. 팽창과정에서 생성된 기계에너지는 발전기를 통해 전기에너지를

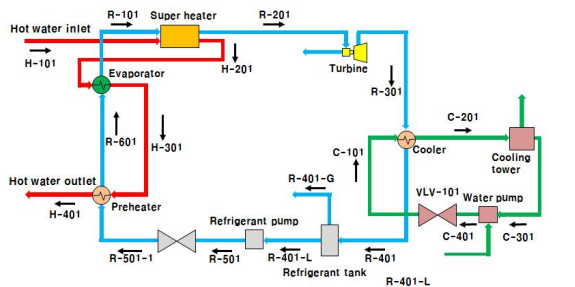


Fig. 2 Diagram of heat balance for ORC system

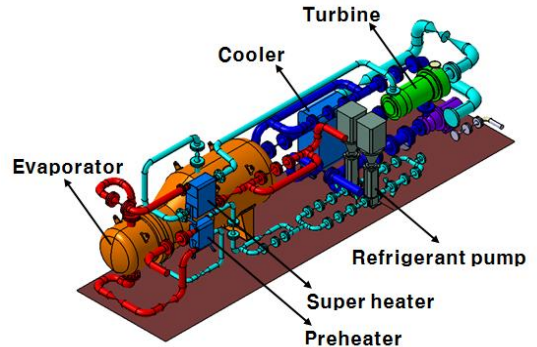


Fig. 3 3D modeling of final design for 250kW ORC system

생산한 후 회복기와 냉각기를 거쳐 Saturated liquid 상태로 냉매펌프에 공급되고, 냉매펌프는 터빈 입구의 압력까지 압력강하를 고려한 가압이 이루어진다.

## 3. 배관 유동해석

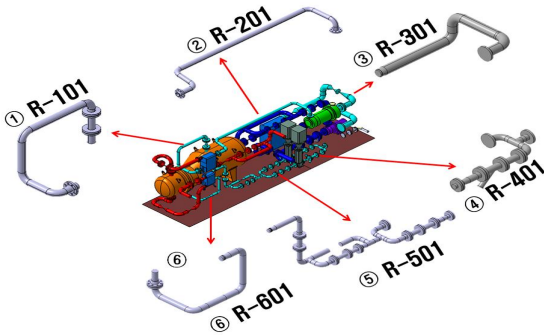
본 연구에서는 배관 내부를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하 유동해석을 수행하였다. 배관에서 속도분포 및 압력을 산출하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이며, 난류모델은 이미 산업계에서 타당성을 검증받은  $k-\epsilon$  모델을 사용하고자 하였다.

수치해석 기법으로는 지배방정식에서 압력과 속도의 연결은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)에 따른 Segregate Flow 알고리즘을 사용하였으며, 본 연구를 위해 적용되는 수치해석 코드인 STAR-CCM+는 배관유동을 해석하기 위해 다음과 같은 수치알고리즘으로 계산을 수행하게 된다. 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 판정은 출구 유량이 변하지 않고 안정적인 값으로 고정된 계산결과가 나타날 때와 정상 상태에서 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 판정은 잔차 값이  $10^{-3}$ 이하에 도달하면 수렴 판정의 기준으로 삼았다.

열유동해석에서 적용되는 경계조건은 R-201 라

**Table 1 Properties of R-245fa**

Properties	State	Value
Density	Vapor	5.921 kg/m <sup>3</sup>
	Liquid	1339 kg/m <sup>3</sup>
Heat capacity	Vapor	0.8931 kJ/kg-K
	Liquid	1.36 kJ/kg-K
Thermal conductivity	Vapor	0.0125 W/m-K
	Liquid	0.081 W/m-K
Viscosity	Vapor	10.3 μ Pa-S
	Liquid	402.7 μ Pa-S



①	Between evaporator outlet and superheater inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 21bar • Temperature : 127℃
②	Between superheater outlet and turbine inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 20.8bar • Temperature : 133℃
③	Between turbine outlet and cooler inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 21bar • Temperature : 127℃
④	Between cooler outlet and refrigerant pump inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 2.2bar • Temperature : 36.13℃
⑤	Between refrigerant pump outlet and pre heater inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 21.2bar • Temperature : 37.3℃
⑥	Between preheater outlet and evaporator inlet • Mass flow : 7.933kg/s • Pressure : 21.2bar • Temperature : 108.7℃
Wall condition • Heat transfer coefficient : 1.0W/m <sup>2</sup> -K • Thermal resistance : 9.9E <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> -K/W • Ambient temperature : 30℃	

**Fig. 4 Pipe line name and boundary conditions**

인인 과열기 출구에서 터빈 입구까지 설계자료를 활용하여 경계조건으로 사용하였다. 또한 냉매 물 성치는 Table 1과 같이 Honeywell사에서 제공하는 Genetron245fa 데이터를 활용하였다.

배관 열유동해석을 위해 Fig. 4과 같이 경계조건을 부여하여 수치해석을 진행하였다. 열유동해석을 위해 우선 계산도메인의 초기조건은 R245fa가 Vapor 상태가 100%가 있다고 가정하였고, 경계조건인 입구에서 R245fa가 유입되는 조건을 그림과 같이 부여하였다. 또한 출구의 경우 압력강하를 예측하기 위해 유량만 동일하다고 가정한 후 계산을 수행하였다. 배관에서의 열전달되는 현상을 파악하기 위하여 입구에 유입될 때 온도를 계산할 수 있도록 설정하였고, 배관 자체는 Wall 조건으로 Boundary에 대기온도가 30℃일 경우 배관 표면에서의 열전달계수와 열저항 값을 부여하여 계산하였다. 열전달 계수의 경우 자연대류조건에 가까운 1.0w/m<sup>2</sup>-K를 부여하였고, 이는 시스템 자체가 컨테이너 내부에 설치되기 때문에 강제대류의 영향을 받지 않기 때문이다. 또한 열저항의 경우 배관에 사용되는 재질이 일반적인 배관자재를 적용하기 때문에 아래의 식과 같이 적용하여 열저항을 계산하였다.

$$R = \frac{0.006338m}{63.9W/m-K} = 0.00099 [m^2 \cdot K/W]$$

#### 4. 배관 유동해석 결과 및 고찰

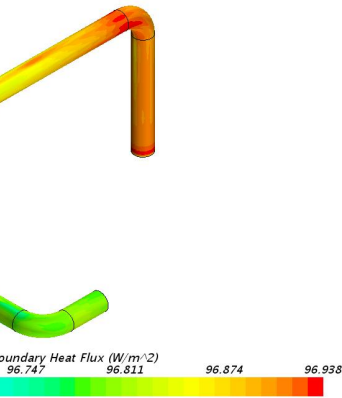
Fig. 5는 증발기와 과열기 사이에 설치된 배관에 대한 내부 단면에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포를 나타내고 있다. 압력분포의 경우 그림에서 보는 것과 같이 배관 굴절부에서 압력이 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

배관 특성상 굴절되는 바깥쪽 부위에서 압력이 다소 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 굴절되는 바깥쪽 부위의 유속이 안쪽에 비해 상대적으로 낮기 때문에 유속감소로 인한 압력이 증가된 것을 확인할 수 있었다.

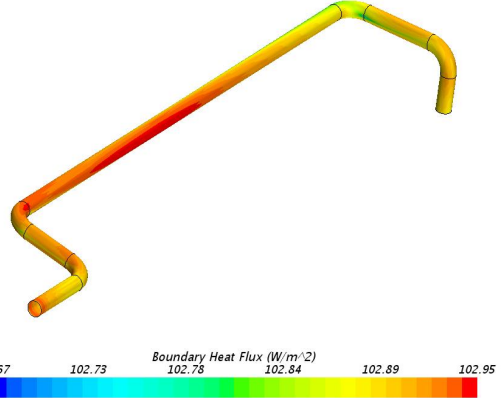
전체적으로 증발기 출구에서 과열기 입구 배관 내부에 작용하는 전체 압력강하는 0.0034bar가 발



(a) static pressure



(a) static pressure



(b) heat flux

**Fig. 5 Results of static pressure and heat flux between evaporator outlet and superheater inlet pipe line**

**Fig. 6 Results of static pressure and heat flux between superheater outlet and turbine inlet pipe line**

생함을 확인할 수 있었다.

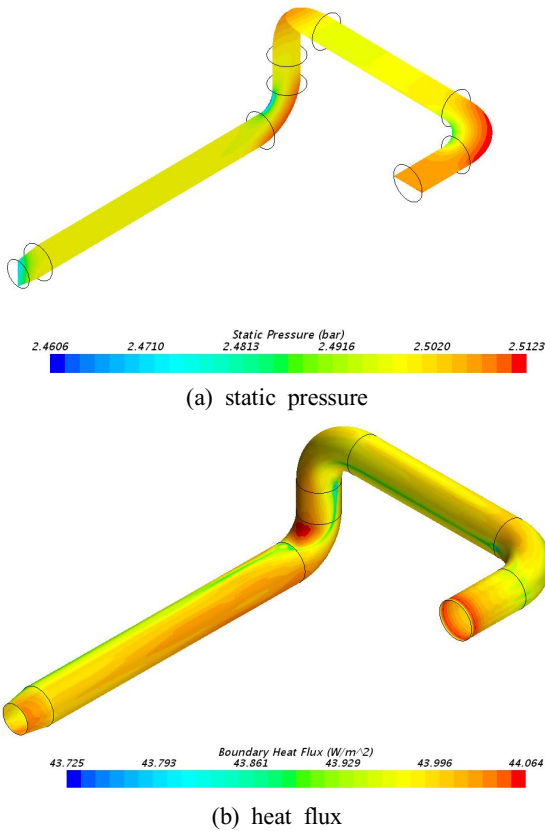
열유속의 경우 증발기 출구쪽인 배관 입구쪽에서 가장 높은 열유속을 나타내고 있었고, 출구로 빠져나가면서 배관 표면과 대기온도와의 열전달로 판단된다. 따라서 배관 표면에서의 열유속 분포를 나타내고 있다. 전반적으로 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $96W/m^2$  정도로 나타났다.

Fig. 6은 과열기와 터빈사이에 설치된 배관에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포를 나타내고 있다. 우선 내부 단면에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 과열기 출구쪽에 설치된 배관 입구의 경우 곡관으로 설치

되어 있기 때문에 압력이 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 굴절되는 가장자리 부에서 유동이 부딪치게 되고 이로 인해 유속이 감소하여 압력이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

배관 표면에서의 열유속 분포를 보면 전반적으로 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $102W/m^2$  정도인 것으로 나타났다.

Fig. 7은 터빈과 냉각기 사이에 설치된 배관에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포를 나타내고 있다. 압력분포의 경우 배관 굴절부에서 압력이 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 전술한 다른 배관과 마찬가지로 배



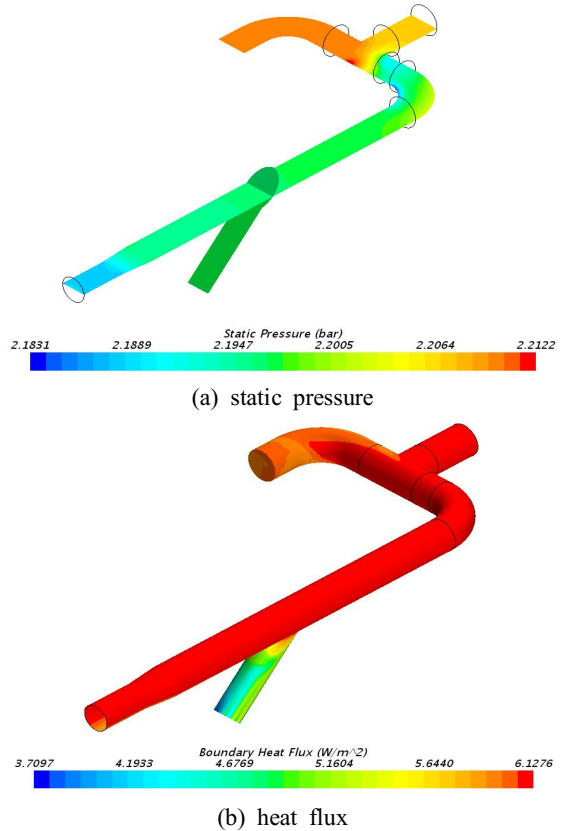
**Fig. 7 Results of static pressure and heat flux between turbine outlet and cooler inlet pipe line**

관 특성상 굴절되는 바깥쪽 부위에서 압력이 다소 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 굴절되는 바깥쪽 부위의 유속이 안쪽에 비해 상대적으로 낮기 때문에 유속감소로 인한 압력이 증가된 것을 확인할 수 있었다. 대체적으로 앞서 전술한 배관 형태가 거의 직관과 굴절부로 연결되어 있기 때문에 유사한 유동 패턴이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

배관 표면에서의 열유속 분포를 살펴보면, 전반적으로 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $44\text{W/m}^2$  정도인 것으로 나타났다.

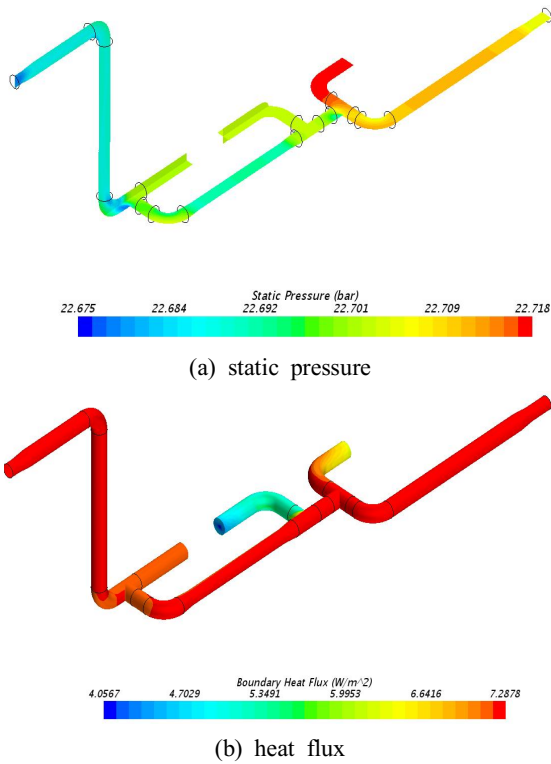
Fig. 8은 냉각기와 냉매펌프 사이에 설치된 배관에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포를 나타내고 있다.

압력분포의 경우 출구 방향 두 군데 중에 한군



**Fig. 8 Results of static pressure and heat flux between cooler outlet and refrigerant pump inlet pipe line**

데는 대기 상태이므로 배관 중간에 밸브가 잠겨져 있다. 따라서 한쪽 배관은 중간에 단절되어 있는 상태이기 때문에 유동이 흐르지 않고 막혀있게 된다. 이로인해 입구에 유입되어 양쪽으로 배분되어 통과되는 작동유체는 한쪽이 막혀있기 때문에 이로 인해 압력이 증가되는 것을 확인할 수 있었고, 출구로 향하는 배관 쪽의 경우 서서히 압력강하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 본 배관라인의 경우 작동유체인 R-245fa가 액체상태이기 때문에 기본적으로 비압축성 유체이다. 따라서 유체에 의한 압력강하는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다. 배관 표면에서의 열유속 분포를 보면, 전반적으로 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $6.1\text{W/m}^2$  정도인 것으로 나타났다.

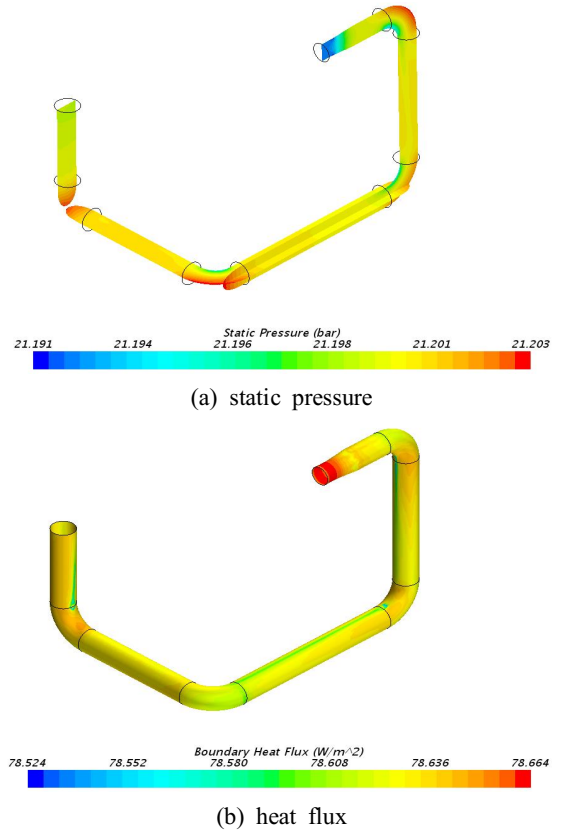


**Fig. 9 Results of static pressure and heat flux between refrigerant pump outlet and pre heater inlet pipe line**

Fig. 9는 냉매펌프와 예열기 사이에 설치된 배관에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포를 나타내고 있다. 압력분포를 보면 입구에서 유입되어 출구로 이동하면 중간중간에 막혀있는 배관에서 압력이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 막혀있는 배관은 중간에 밸브가 잠겨져 있어 유동장이 발생되지 않기 때문에 해석에서 제외시켰기 때문에 중간에 배관연결이 끊겨 있다. 밸브에 의해 잠겨 있는 배관에는 유동이 흐르지 않고 정체되어 있기 때문에 압력이 증가되는 것을 알 수 있었다.

배관 표면에서의 열유속 분포를 보면 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $7.2\text{W/m}^2$  정도인 것으로 나타났다.

Fig. 10은 예열기와 증발기 사이에 설치된 배관에 대한 압력분포와 배관 표면에서의 열유속분포



**Fig. 10 Results of static pressure and heat flux between preheater outlet and evaporator inlet pipe line**

를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 배관 중간 중간 설치되어 유로의 방향을 전환시켜주는 굴절부에서 유속변화로 인한 압력차가 발생하였고, 전반적으로 압력강하가 작게 발생되는 것을 알 수 있었다. 입구의 경우 압력이 낮게 나타나는데 이는 배관 직경이 작기 때문에 이로 인한 유속 증가로 인해 압력이 낮아지게 되고, 입구 쪽에 굴절부 설치되어 있기 때문에 압력이 증가되어 상대적으로 압력이 낮아 보이게 되는 것을 확인할 수 있었다.

배관 표면에서의 열유속 분포는 전반적으로 배관에서 빠져나가는 열유속은 약  $78\text{W/m}^2$  정도인 것으로 나타났다.

Fig. 11은 냉매라인 별 Input 압력과 압력강하 분포를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이

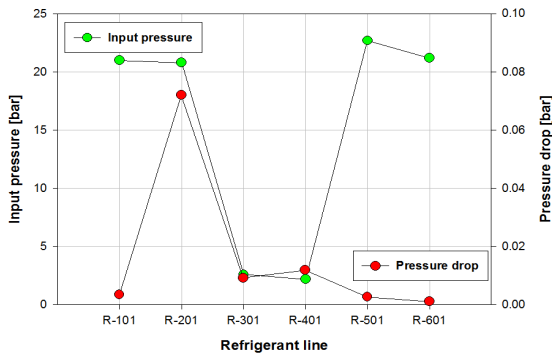


Fig. 11 Comparison of input pressure and pressure drop distribution by refrigerant line

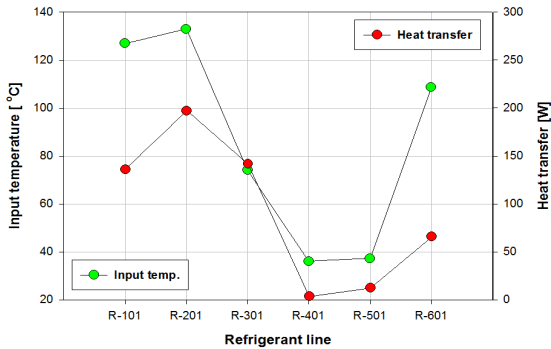


Fig. 12 Comparison of input temperature and heat transfer distribution by refrigerant line

우선 냉매 기체라인에서 R-101의 경우 Input 압력이 높은 반면 압력강하가 낮고, R-201의 경우 압력강하가 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 이는 R-201의 경우 과열기에서 터빈 입구까지의 배관이 상대적으로 길었기 때문이다.

냉매 액체라인의 경우 R-501과 R-601의 경우 Input 압력이 높음에도 압력강하가 낮은 이유는 냉매가 액체상태인 비압축성이기 때문이다. 반면 R-401의 경우 상대적 높은 압력강하가 발생하는 이유는 입구에서 대기상태 배관으로 분리되는 구간인 입구에 바로 설치되어 있기 때문에 입구에서 정체압의 영향으로 압력이 증가되었기 때문이다. 결국 압력강하를 다소 낮추기 위해서는 R-401과 R-501의 유로를 재설계할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 12는 냉매라인 별 Input 온도와 배관과 대기와의 열전달량 분포를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 Input 온도가 높을수록 열전달량이 증가되고, 온도가 낮을수록 열전달량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

냉매 기체라인의 경우 액체라인에 비해 상대적으로 열전달량이 다소 높은 것을 알 수 있는데 이는 기체상태의 경우 액체상태에 비해 밀도가 현저하게 낮기 때문에 배관내부에서 흐르는 작동유체가 열을 보관하는 능력이 떨어지게 된다. 따라서 대기와 열전달이 촉진되기 때문에 열전달량이 증가된 것이다. 만일 강제대류가 발생하는 조건일 경우는 대류열전달계수가 증가되기 때문에 열전달량은 보다 크게 증가할 것으로 보여진다. 따라서 컨테이너 내부에서 설치되어 실내에서 운전되기 때문에 컨테이너 내부 공기는 일종의 단열재 역할을 수행할 것으로 예상되기 때문에 배관 외부에 별도의 단열재는 필요하지 않을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

폐열회수를 통해 250kW의 전력을 생산할 수 있는 유기랭킨발전시스템에 대한 공정설계를 통해 확보된 데이터를 경계조건으로 활용하여 각 배관에 대한 열유동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

냉매 액체라인 R-501과 R-601에 대한 배관의 경우 입구압력이 높음에도 비압축성 유체의 특성으로 인해 압력강하가 낮게 나타났으며, R-401의 경우 입구에서 분지관으로 설치되기 때문에 압력이 증가됨을 알 수 있었다.

배관 표면에서의 열전달량을 보면 기체라인의 경우 액체라인에 비해 상대적으로 열전달량이 높은 것을 확인할 수 있었다.

## 후기

본 논문은 2017년 산업통상자원부 에너지기술개발사업(실증형과제 : 20172010000640)지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Yamamo, T., Furuhata, T., Arai, N. and Mori, K., "Design and testing of the organic Rankine cycle," *Journal of the Energy*, vol. 26, no. 3, pp. 239-251, 2001.
2. Yamada, N., Hoshi, A., and Ikegami, Y., "Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant," *Journal of the Renewable Energy*, Vol. 34, No. 7, pp. 1752-1758, 2009.
3. Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Ouyang, M., Zhao, Y., and Mu, Q., "Study of working fluid selection of organic Rankine cycle(ORC) for engine waste heat recovery," *Journal of the Energy*, Vol. 36, No. 5, pp.3406-3418, 2011.
4. Wang, D., Ling, X. and Peng, H., "Performance analysis of double organic Rankine cycle for discontinuous low temperature waste heat recovery," *Journal of the Applied Thermal Engineering*, Vol. 48, pp. 63-71, 2012.
5. Tchanche. B. F., Petrissans. M., and Papadakis. G., "Heat resources and organic Rankine cycle machines", *Journal of the Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, pp. 1185-1199, 2014.
6. Kim, J. S., Kim, D. Y., Kim, Y. T., Kang, H. K., "Performance analysis of an organic Rankine cycle for ocean thermal energy conversion system according to the working fluid and the cycle", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 9 pp. 881~889, 2015.
7. Ryoo. Y. S., Kim. J. H., Jeong. S. H., "Performance Evaluation of Closed Co-axial Ground Heat Exchanger in the case of 2000m-Depth Single Well", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp.83-92, 2016.
8. Han, M. S., Cho, J. U., "A Study on the Shape Design of a Radiator Panel for Effective Heat Release", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp.25-30, 2016.
9. Kim, K. S., Bang, S. K., Jeong, E. I., Yi, C. S., "A Study on the Engineering Design for 20kW-Grade Waste Gas Heat Recovery", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp.91-96, 2018.