기관 폐열 회수를 위한 열교환기의 Baffle 길이 변경에 따른 성능 예측에 관한 수치 해석적 연구

류규현*, 김구성, 이영훈, 강석호, 박기범**

An Investigation on Flow and Structural Characteristics of Heat Exchanger in Rankine Steam Cycle for Co-generation System

Kyuhyenn Ryu*, Kusung Kim, Younghum Lee, Seokho Kang and Gibeom Park**

Abstract

A 2-loop waste heat recovery system with Rankine steam cycles for the improvement of fuel efficiency of gasoline vehicles has been investigated. A high temperature loop is used to recover waste heat from exhaust gas and a low temperature loop is used to recover waste heat from cold engine coolant. This paper has dealt with a layout of low temperature loop system, the review of the velocity contours through numerical analysis. According to the result of analysis, the designed heat exchanger. And comparing with flow analysis results, LT Boiler is safe to operation.

Key words

Engine Waste Heat Recovery System(엔진 폐열 회수 시스템), Rankine Steam Cycle(랭킨 스팀 사이클), Heat Exchanger(열교환기), Exhaust Gas(배기가스), Working Fluid(작동유체)

(접수일 2013. 10. 11, 수정일 2013. 11. 25, 게재확정일 2013. 11. 25)

* 인천대학교 기계공학부 (Dept. of Mechanical system Engineering, University of Incheon)

■ E-mail : khryu@incheon.ac.kr ■ Tel : (032)835-8673 ■ Fax : (02)910-4718

** 국민대학교 자동차공학 전문대학원 (Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University)

■ E-mail : kikum1010@kookmin.ac.kr ■ Tel : (02)910-5033 ■ Fax : (02)910-4718

1. 서론

최근 동력 에너지로 변환되지 못하고 배기가스나 엔진 냉각수로 버려지는 엔진 폐 에너지를 회수하여 전기 에너지 또는 기계 에너지로 재생시키는 기술 개발들이 미국, 독일, 일본 등 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 이 기술은

연료의 연소 시스템과 폐 에너지 회수 시스템의 두 가지 동력 발생 시스템으로 구성되기 때문에 Co-generation 시스템이라고 한다.

다양한 Co-generation 기술 중 하나인 랭킨 사이클은 시스템의 구성과 제어가 비교적 간단하고 사이클 효율이 높으므로 실제차량의 폐열회수 시스템으로 적용하기에 적합한 사

이클이다.^(1,2)

랭킨 스팀 사이클 기술은 배기가스에서 폐열을 회수하는 One-Loop 방식과 온도 레벨이 다른 두 가지의 폐 열원으로 부터 각각 다른 작동유체를 사용하여 폐열 회수의 효율을 높일 수 있는 Two-Loop 방식으로 구분할 수 있다.⁽³⁾

Two-Loop 방식은 고온인 배기가스 측의 HT(High Temperature) Loop과 상대적으로 저온인 엔진 냉각수 측의 LT (Low Temperature) Loop로 구성되며, 엔진 폐열 회수 시스템의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

폐열 회수 시스템의 효율을 높이기 위한 핵심은 열교환기의 효율을 높이는 것이다. 열교환기는 폐열 회수 시스템뿐만 아니라 자동차 내에서 엔진냉각시스템, 에어컨, 히터시스템에도 사용 되고 있기 때문에 폐열 회수 시스템 외의 다른 여러 분야에도 사용이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 열교환기의 효율 개선을 위한 실험 장치비용 및 실험 대상물의 제작 비용과 실험 자체에도 많은 시간이 소요되며 이를 대응하기 위한 방법으로 진보된 컴퓨터 기술을 바탕으로 수치해석 기법을 도입하여 여러 모델링을 이용하여 고효율의 열교환기를 설계하고 실험하는 것이 경제적으로나 시간적으로 유리하고, 매우 작은 형상 변화에 대해서도 표현이 자유롭고 물리적으로도 타당한 결과를 낼 수 있기 때문에 설계 변수에 대한 정성적 및 정량적인 결과를 예측하기 위해 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상용 CFD 코드 중 하나인 CFX를 이용하여 Rankine Steam Cycle 내의 냉각수 폐열 회수를 위한 저온 루프에 사용 되는 LT Boiler의 Baffle 길이 변경에 따른 내부 유동 해석 및 온도변화 해석을 수행하였으며 향후 기관

폐열 회수 시스템 연구 개발에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.⁽¹⁾

2. LT Boiler의 구조 및 수치해석 조건

2.1 LT Boiler의 구조

LT Boiler는 Fig. 2와 같이 고온의 냉각수와 저온의 LT 측 작동유체를 열 교환시켜 LT 측 작동유체의 상태를 포화증기상태로 만드는 역할을 한다. 이렇게 만들어진 포화증기는 LT Expander를 통해 동력이 발생되며 기계적인 일로 변환된다.

본 연구에서 사용된 LT Boiler는 두 유체의 이동이 일정 축 방향으로 왕복하는 구조이기 때문에 각각 유체에 대한 결과를 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 Side 1(Fig. 2의 상단)과 Side 2(Fig. 2의 하단)로 구별하여 결과를 확인하였다.

Fig. 2 Structure of LT Boiler

Fig. 3 Definition of check boundary for thermal and fluid analysis

Fig. 1 Schematic diagram of Co-generation system

2.2 수치해석 기법

유체 유동의 지배 방정식은 유동하고 있는 유체의 보존방정식으로부터 유도된다. 열 및 에너지 전달을 고려하지 않을 경우에 가장 대표적인 유체 유동의 보존특성은 다음과 같다.

- 유체의 질량은 보존 된다.
- 운동량 변화율은 유체에 가해진 힘의 합과 같다(Newton's second law).

(1) Continuity Equation

질량보존은 검사체적 안에서 질량변화율이 같은 그 내부에서의 순질량 유동과 균형을 이루어야 함을 의미한다. 첫 번째 항은 밀도의 변화율, 두 번째 항은 검사체적의 순질량 유동을 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (a)$$

(2) Momentum Equation

운동량방정식은 각 좌표에 대한 유체 분자의 운동량 변화율이 표면력으로 인한 각 요소에 가해지는 힘의 총량과 체적력에 의해 생긴 운동량의 증가율과의 합과 같다고 가정함에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (b)$$

여기서 각각의 요소에 따라 식에 대입하여 구하게 되고, 점성응력 텐서(viscous stress tensor) τ 는 다음 식의 변형률에 관계되어 계산 된다.

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad (c)$$

(3) Total Energy Equation

이동되는 유체의 요소는 내부에너지와 운동에너지 모두를 가지게 되며 두 에너지의 합을 총 에너지(Total Energy)라고 한다. 시간에 따른 총 에너지의 질량의 변화가 주어지게 된다.

$$\frac{\delta (\rho h_{tot})}{\delta t} - \frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (d)$$

여기서, h_{tot} 는 총 엔탈피를 나타내며, 정적 엔탈피 $h(T, p)$ 를 통해 구하게 된다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (e)$$

2.3 Baffle 길이에 따른 유동해석조건

본 연구에서 Rankine Steam Cycle system에서 상대적으로 저온인 냉각수의 폐열을 회수하는 2-loop 방식의 LT Boiler를 적용하여 수치 해석을 진행하였다. LT Boiler 내부에는 엔진 냉각수와 작동유체가 움직이게 되고 열 교환기내의 두 유체 유동에 따라 열전달이 이루어지게 된다. LT Boiler에 대한 각 부분의 두께 및 유동 영역의 특징은 아래와 같다.

- 작동유체가 들어가는 판의 두께: 0.2mm
- 작동유체의 유동 영역 넓이: $1.2 \times 1.2 \text{mm}^2$
- 작동유체의 유동 영역 개수: 한 Side당 120개
- 작동유체 유로의 두께를 제외한 나머지 부분의 두께: 1mm

Baffle의 길이에 따른 유동해석은 길이 변화가 실제 열전달에 어떤 영향을 미치는가에 대한 분석을 하기 위해 전체 작

Fig. 4 Changes in the modeling according to difference baffle length: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm

Table 1. Comparison of Models According to Baffle Length

구 분	Baffle Length (mm)
Type 1	21.8
Type 2	14.5
Type 3	7.2

Table 2. Flow Analysis Conditions of LT Boiler

구 분	Coolant	R134a
Inlet (kg/s)	0.3195	0.13
Temperature (°C)	100	55

Table 3. Characteristics of R134a

Refrigerant	R134a
Molar Mass (kg/kmol)	102.03
Density (kg/m ³)	1210
Specific Heat Capacity (cal/gK)	0.3452
Viscosity (kg/ms)	$2.2e^{-4}$
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.081

동유체의 유동 영역 높이에 따라 3가지로 변화시켜 연구를 진행하였다. Fig. 4와 Table 1은 Baffle의 길이를 나타낸다.

2.4 Baffle 길이에 따른 온도 해석 조건

고온의 엔진 냉각수와 저온의 작동유체에 대한 LT Boiler에 열전달 및 두 유체의 열 교환을 측정하기 위해 FEM 상용 코드인 ANSYS CFX로 수치 해석을 진행하였으며 최적의 열 교환이 이루어지는 조건을 알아보았다. LT Boiler의 작동유체는 자동차 업계에서 많이 사용되는 냉매 중 하나인 R134a로 선정하여 수치 해석을 진행하였다.⁽⁴⁾

난류 모델은 가장 보편적으로 많이 사용되는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며,⁽⁵⁾ Table 2와 Table 3은 LT Boiler의 유동해석 조건과 R134a의 특성을 각각 나타내었다.

3. 수치해석 결과

3.1 Baffle 길이에 따른 유동해석결과

Baffle의 길이가 길수록 냉각수 유동의 제약이 생겨 실질

Fig. 5 Velocity contours according to three difference baffle length in LT boiler: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm

적인 유체 유동통로의 길이가 길어진다는 장점이 있지만 냉각수가 이동할 수 있는 유동 면적이 좁아지게 된다. Fig. 5와 Fig. 6는 각각 Baffle 길이에 따른 Velocity Contour 그래프와 Velocity Vector를 나타낸다. Baffle 길이가 21.8mm일 때 실질적인 유동 면적이 다른 Case의 유동 면적보다 작은 것을 확인 할 수 있다. Baffle의 길이가 길어질 경우, Baffle 전·후단에 유동 박리 현상으로 인해서 실제 유체가 이동할 수 있는 단면적은 줄어들게 된다. 줄어든 유동 면적으로 인해 유속이 증가하기 때문에 Baffle의 길이가 가장 긴 21.8mm인 조건에서의 유동이 가장 빠르게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 6 Velocity vectors according to three difference baffle length in LT boiler: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm

빠른 유동은 냉각수의 충분한 열 교환이 이뤄지는 시간을 단축시킬 뿐만 아니라 LT Boiler의 구조적 특성상 무리를 줄 수 있다.

Baffle의 길이가 7.2mm인 경우, 다른 유체보다 유속도 느리게 되고 안정적인 유동을 구현하여 다른 Case보다 열전달량이 늘어날 것으로 판단된다.

3.2 Baffle 길이에 따른 온도 해석 결과

국부적인 유동 박리 현상이 발생되는 영역은 실제 유동하는 부분보다 온도가 낮게 나타난다. 이는 열전달이 일어난 유체가 다음 Baffle로 이동하지 못하고 박리 영역에서 맴돌기 때문에 박리 영역의 중심부로 주위 온도보다 저온인 냉각수가 이동하게 된다.

Fig. 7은 냉매와 냉각수의 입구로부터의 거리에 따른 두 유체의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 냉매는 저온에서 고온으로 올라가는 형태를, 냉각수는 고온에서 저온으로 내려오는 형태를 나타내게 된다.

Fig. 7 Temperature changes according to the Coolant and R134a flow dimensions in LT Boiler at baffle length

Fig. 8 Temperature contour plots change the coolant domain in LT boiler at three difference baffle length: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm (Top view)

Baffle의 길이가 7.2mm인 조건에서는 냉각수와 냉매의 열전달이 빠르게 일어나 열교환기를 처음 통과할 때 온도가 전체적으로 균일해지기 때문에 연속적으로 통과 할 때는 온도 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 판단되며, Baffle의 길이가 21.8mm인 조건에서는 유동 속도가 높기 때문에 냉각수의 온도하강 속도가 느려지는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 전체적인 냉각수의 흐름에 따른 온도 변화를 나타내는 Contour 그래프이다.

Baffle의 길이가 짧은 7.2mm인 조건에서는 냉각수의 느린 유동에 따라 열전달이 충분히 일어나 온도하강속도가 빨라지는 것을 확인 할 수 있다. 냉각수의 유동이 빠른 21.8mm 조건에서는 냉각수가 처음으로 LT Boiler를 통과하는 Side 2영역에서 열전달이 거의 일어나지 않기 때문에 온도가 동일한 것으로 판단되며, 두 번째로 통과하는 Side 1 영역에서는 열전달로 인해 미량의 온도변화가 일어나는 것으로 판단된다.

Fig. 9은 전체적인 냉매의 유동에 따른 온도 변화를 Contour 그래프로 나타낸 것이다.

고온인 냉각수는 Baffle에 부딪혀 국부적으로 고온인 영역

Fig. 9 Temperature contour plots change according to R134a domains in LT boiler at three difference baffle length: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm

Fig. 10 Heat Flux contour of R134a and Coolant in LT boiler at three difference baffle length: 21.8 mm, 14.5 mm, 7.2 mm

을 생성하게 되고 냉매에도 냉각수의 영향에 의해 국부적으로 고온인 영역을 생성하게 된다. 국부적인 고온 영역은 냉각수의 유속이 가장 빠른 21.7mm 조건에서 가장 눈에 띄게 생성되고, 7.2mm 조건에서는 그 현상이 미약한 것을 확인할 수 있다. Fig. 10는 냉각수와 냉매의 열 유동(Heat Flux)를 나타낸 Contour 그래프이다. 앞서 확인한 결과에 의해 Baffle의 길이가 제일 긴 21.8mm 조건에서 가장 높은 유속과 낮은 열전달을 확인 하였고, 냉각수의 온도는 배출구 전까지 높은 평균 온도를 가지고 있는 것을 확인하였다.

열전달을 받는 냉매의 온도는 투입 직후이기 때문에 낮은 온도를 가지고 있고, 이 부근에서 높은 열 유동이 국부적으로 형성되는 것으로 판단된다. 국부적으로 높은 열 유동 영역은 Baffle의 길이가 짧은 7.2mm 조건에서 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

랭킨 스팀 사이클 엔진 폐열 회수 시스템에 적용되는 핵심부품인 LT Boiler의 상세설계를 위하여 Baffle의 길이 변화에 대해 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Baffle의 길이가 증가할수록 Coolant의 유동 면적이 좁아져 유속이 빨라지게 되고, Coolant 유동속도에 의한 열전달의 시간적 제약이 생겨 열전달 성능이 저하되는 것을 확인하였다.
- (2) Baffle의 길이가 증가할수록 Baffle 전·후단의 유동박리 영역의 생성으로 냉각수의 온도분포가 균일하지 못하게 되고, 박리영역으로 인해 냉각수 열교환의 공간적 제약

이 생겨서 열전달의 성능의 저하를 유발하는 것으로 확인되었다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] H. S. Heo and S. J. Bae, 2010, "Technology Trends of Rankine Steam Cycle for Engine Waste Heat Recovery", Auto Journal of KSAE, Vol. 32, No. 5, pp. 23-32.
- [2] H. S. Heo, S. J. Bae, J. S. Hwang, H. K. Lee, D. H. Lee, J. S. Park and H. Y. Lee, 2011, "Performance Design of Boiler for Waste Heat Recovery of Engine Coolant by Rankine Steam Cycle", KSAE, Vol. 19, No. 5, pp. 58-66.
- [3] J. Ringler, M. Seifert, V. Guyotot and W. Hübner., 2009, "Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of IC Engines", SAE 2009-01-0174.
- [4] S. J. Bae, H. S. Heo, H. K. Lee, Y. D. Choung, J. S. Hwang and C. B. Lee, 2009, "An Investigation on Working Fluids for an Exhaust Waste Heat Recovery System of a Gasoline Engine", Annual Conference of KSAE, pp. 151-158.
- [5] Hinze, J. O., 1975, "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., New York. Hong, K. D., 1992, "Stability Improvement of Center Lathes", J. of KSPE, Vol. 2, No. 2, pp. 123-126, 1992.

류 규 현

1974년 2월 단국대학교 기계공학과 공학사
1981년 2월 단국대학교 기계공학과 공학석사
1999년 2월 국민대학교 기계공학과 공학박사

현재 인천대학교 기계시스템공학부 교수
(E-mail : Khryu@incheon.ac.kr)

김 구 성

2011년 2월 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과
공학사
2013년 2월 국민대학교 자동차공학전문대학원
공학석사

현재 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사과정연구원
(E-mail : ks_kim@naver.com)

이 영 훈

2005년 2월 한국교육개발원 기계공학 공학사
2008년 2월 국민대학교 자동차공학대학원 석사
2013년 2월 국민대학교 자동차전문대학원
박사(수료)

현재 LS MOTORS 대표이사(LS MOTORS)
(E-mail : lyh12250815@naver.com)

강 석 호

2008년 2월 홍익대학교 기계정보공학과 공학사
2012년 국민대학교 자동차공학전문대학원
공학석사

현재 국민대학교 자동차공학전문대학원 박사과정연구원
(E-mail : seokhokang@kookmin.ac.kr)

박 기 범

2013년 2월 인천대학교 기계자동차공학과 공학사

현재 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사과정연구원
(E-mail : kibum1010@kookmin.ac.kr)