

선박의 배기가스 폐열을 활용한 열전발전시스템에 관한 기초 열해석

김명준*† · 가광진** · 채규훈** · 김인섭***

*, ** 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템공학과

*** 선박안전기술공단 선박융복합기술실

Fundamental Heat Analysis about the Thermoelectric Generation System
Using the Waste Heat of Exhaust Gas from Ship

Myoung-Jun Kim*† · Gwang-Jin Ga** · Gyu-Hoon Chea** · In-Seup Kim***

*, ** Department of Power System Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea

*** Ship Convergence Technology Department, Korea Ship Safety Technology Authority

요 약 : 해상에서는 UN산하 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 선박에서 배출하는 CO₂량을 2030년까지 30%까지 줄이는 것을 목표로 설정하고 있다. 본 연구는 이러한 상황에 대응하고 친환경기술의 개발을 목표로 선박용 내연기관에서의 폐열을 이용하는 열전발전시스템 개발에 최종목표를 두고, 본 논문에서는 선박용 열전발전시스템 개발에 앞서 기초 열해석을 실시하고 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 열전발전시스템의 효율향상에 관한 유효한 방법을 얻어 낼 수 있었다. 1) 고온측 열원과 모듈간 온도차를 줄여 모듈의 온도차를 늘리는 것으로 열전발전시스템의 효율이 8.917%로 향상되는 것을 알 수 있었다. 2) 외부부하저항의 변화에 따른 시스템 효율은 약 6%로 그 변화폭이 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 3) 동일 계산 조건에서 방형관의 재질이 스테인레스인 경우의 시스템 효율이 8.707%로 두랄루민(8.605%), 동(8.607%)보다 높을 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 열전소자, 열해석, 제백계수, 열컨덕턴스, 열전성능계수, 총괄열전달계수

Abstract : IMO (International Maritime Organization) in the UN (United Nations) set up that aim at reducing CO₂ emission from ship by up to 30 percent until 2030. The final purpose of this study is the development of marine thermoelectric generation system using waste heat from vessel of internal combustion engines. Before the development of marine thermoelectric generation system, this paper carried out the fundamental heat analysis of marine thermoelectric generation system. It was able to obtain the valuable results about the efficiency improvement of the thermoelectric generation system. The results is as follows : 1) It was confirmed that the efficiency of thermoelectric generation system improves to 8.917% with increasing the temperature difference of peltier module by reducing the temperature difference between peltier module and heat source at the hot side. 2) System efficiency according to change in the external load resistance was confirmed that the change width of about 6% which does not significantly occur. 3) System efficiency in the case stainless steel at the same condition is 8.707%. System efficiency could be confirmed that the stainless steel is higher than duralumin (8.605%), copper (8.607%).

Key Words : Peltier element, Heat analysis, Seebeck coefficient, Heat conductance, Thermoelectric figure of merit, Overall heat transfer coefficient

1. 서 론

육·해상에서 화석연료를 사용하여 1차적으로는 고갈위기에 처해있고, 동시에 유가 상승이 일어나고 있다. 2차적으로는 온실가스 배출 등으로 인해 에너지와 환경에 대한 문제

를 두고 전 세계가 여러 방안을 찾고 있는 실정이다. 육상은 물론 해상에서도 환경오염 수준은 이미 지구가 감당하기 힘든 수위까지 다다른 상황이고, 인간의 생명에도 악영향을 미치는 수준이라고 말할 수 있다. 이러한 상황을 극복하기 위해 신재생에너지의 기술 수준을 2020년까지 선진국의 96% 수준까지 육성하고 태양광, 풍력, 연료전지 분야는 선진국과 동일한 수준까지 개발하는 것을 목표로 지원을 강화하고 있

† Corresponding Author : mjkim@kunsan.ac.kr, 063-469-1849

다). 그러나 기존 신재생에너지의 기술 개발도 중요한 사항이지만 다른 새로운 신재생에너지원의 개발 또한 중요한 사항이라고 말할 수 있다.

열전을 통해 얻을 수 있는 열전 효과는 열에너지와 전기 에너지가 상호작용하는 효과를 총칭한다. 즉, 열을 전기로 바꾸거나 반대로 전기를 열로 전환하는 것이 가능하다는 것이다(Uemura and Nishida, 1988). 이러한 변환 현상을 열전현상이라고 하며 이를 이용한 열전발전 모듈이나 열전냉각 모듈의 제작에 대한 연구가 진행되어 왔다(Ioffe, 1957; Kim and Chea, 2012; Munoz-Garcia et al., 2013; Kyoung et al., 2000).

최근 공장폐열이나 자동차 폐열 등의 열에너지를 전기 에너지로 직접 변환하는 기술으로써 열전소자에 온도차를 주어 기전력을 발생시키는 제백(Seebeck)효과를 이용한 열전변환 기술이 주목받고 있으나 열전변환기술을 통한 에너지 변환 효율이 5% 정도로 높지 않은 상황이다²⁾. 그러나 열전변환 기술은 가동부분이 없고 열전소자만으로 발전할 수 있는 메리트 가지고 있어 차세대 발전기술, 에너지절감 기술이라고 말할 수 있다³⁾.

해상에서는 UN산하 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 선박에서 배출하는 CO₂량을 2030년까지 30% 까지 줄이는 것을 목표로 설정하고 있고 본 연구는 이러한 상황에 대응하고 환경발전기술의 개발을 목표로 선박용 내연기관에서의 폐열회수를 제백효과를 이용하는 열전모듈발전장치에 대한 기초 열해석을 실시하여 분석하였다.

2. 열전모듈에 관한 해석

2.1 모듈의 특성치 추정

열전변환 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 모듈에 대한 특성치가 다음과 같이 필요하다.

- 제백계수 $a[V/K]$: 온도차에 대한 모듈의 기전력비이다.
- 열컨덕턴스 $K[W/K]$: 모듈의 총괄열전달계수와 표면적과의 비이다.
- 내부전기저항 $R[\Omega]$: 모듈의 성능을 나타내기 위해서는 성능계수 $Z[1/K]$, Z 와 온도 T 와의 비인 무차원수 ZT 가 지표 많이 사용한다.

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR_i} \quad (1)$$

모듈의 흡열량을 Q_c , 모듈 고온측의 온도를 T_{hj} , 모듈 저온측의 온도를 T_{cj} , 양자의 온도차를 ΔT_j , 모듈내의 전류를 I 라 하면, Q_c 에 관해서 식(2)로 상관식이 성립한다.

$$Q_c = \alpha T_{cj}I - K(T_{hj} - T_{cj}) - \frac{1}{2}R_i I^2 \quad (2)$$

$$= \alpha T_{cj}I - K\Delta T_j - \frac{1}{2}R_i I^2$$

식(2)의 우변 제1항은 페르체 흡열에 관한 항, 제2항은 온도차가 발생함에 따른 열전달항, 제3항은 저항에 기인하는 줄열에 관한 항이다.

본 연구에서 사용하는 페르체 모듈은 아래의 사양과 같다.

- ① 최대온도차 ΔT_{jmax} : 모듈이 완전 단열되어 있고 $Q_c=0$ 으로 되었을 때 고온측과 저온측의 온도차이다.
- ② 최대전력 I_{max} : 모듈이 완전 단열되어 있고 $Q_c=0$, 또한 $\Delta T_j=\Delta T_{jmax}$ 일 때의 전류값이다.
- ③ 최대흡열량 $Q_{cmax} : I=I_{max}$, 또한 온도차에 대해서 $\Delta T_j=0$ 일 때의 흡열량이다.
- ④ 최대전압 $V_{max} : \Delta T_j=\Delta T_{jmax}$, 또한 $I=I_{max}$ 일 때의 전압값이다.

여기서 ①과 ②를 사용해 물성치를 추정한다. 식(2)에 관해서 $Q_c=0$ 로써 ΔT_j 에 관해서 식을 나타내면,

$$\Delta T_j = \frac{2\alpha T_{cj}I - R_i I^2}{2K} \quad (3)$$

식(3)을 I에 관해서 미분하면,

$$\frac{\partial}{\partial I}(\Delta T_j) = \frac{\alpha T_{cj} - R_i I}{K} \quad (4)$$

$\Delta T_j=\Delta T_{jmax}$ 일 때, 아래의 조건이 성립한다.

$$\frac{\partial}{\partial I}(\Delta T_j) = 0 \quad (5)$$

식(4)에 있어서 식(5)가 성립하는 조건은

$$\alpha T_{cj} - R_i I_{max} \quad (6)$$

이것으로부터

$$I_{max} = \frac{\alpha}{R_i} T_{cj} \quad (7)$$

식(7)을 식(4)에 대입하면,

$$\Delta T_{jmax} = \frac{2\alpha T_{cj}I_{max} - R_i I_{max}^2}{2K} = \frac{\alpha^2}{KR_i} \frac{T_{cj}^2}{2} = Z \frac{T_{cj}^2}{2} \quad (8)$$

1) 지식경제부(2010), 범부처 신재생에너지 R&D 추진전략(안), pp. 2-7.
 2) 공면식, 김희규(2013), 자동차 폐열을 이용한 10W급 열전발전시스템 및 충전장치 개발, 중소기업 기술개발사업 최종보고서, pp. 12.
 3) 오민욱, 박수동(2011), 최신 열전소재 연구 동향, 전기전자재료, Vol. 24, No. 6, pp. 14.

선박의 배기가스 폐열을 활용한 열전발전시스템에 관한 기초 열해석

한편, ③에 관해서는 $\Delta T_j=0$ 및 식(7)을 (2)에 대입하면,

$$Q_{cmax} = \alpha T_{cj} I_{max} - \frac{1}{2} R_i I_{max}^2 = \frac{\alpha}{R} \frac{T_{cj}^2}{2} \quad (9)$$

④에 관해서는 식(7)과 식(8)을 식(4)에 대입하면,

$$Q_c = KZ \frac{T_{cj}^2}{2} - \frac{1}{2} V_{max} \frac{\alpha}{R_i} T_{cj} \quad (10)$$

식(10)으로부터 Q_c 가 판명되면 물성치의 산정이 가능하게 된다. 그 결과와 열전모듈 사양을 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1. The specifications of peltier element

Country of Manufacture	China	Japan
Maker	Chiefly Choice Electronics	kyocera
Model No.	TES1-12705	40 × 40 Module

Table 2. The peltier element properties

Item	Unit	China	Japan
Length	[mm]	30	40
Width	[mm]	30	40
Area, S	[mm ²]	900	1600
Thickness	[mm]	3	2.3
Temp. at the hot side, T_{hj}	[°C]	80	20
Temp difference, ΔT_j	[°C]	76	67
Temp. at the cold side, T_{cj}	[°C]	4	-47
Aver. Temp., $(T_{hj}+T_{cj})/2$	[°C]	42	-13.5
Seebeck coefficient, a	[V/K]	5.166E-03	4.836E-03
Internal resistance, R_i	[Ω]	3.200E+00	1.900E+00
Internal resistance rate, ρ_i	[Ωm]	9.600E-01	1.322E+00
Internal heat conductance, K	[W/K]	4.214E-03	4.908E-03
Internal thermal conductivity, λ_i	[W/mK]	1.405E-02	7.055E-03
Thermoelectric figure of merit, Z	[1/K]	1.979E-03	2.508E-03
Non-dimensional thermo-electric figure of merit, ZT	[-]	6.237E-01	6.512E-01

2.2 모듈 내부의 열전도율

일반적인 열전모듈의 구조는 Fig. 1과 같다. 중국제 모듈과 교세라 모듈의 열전소자는 Bi-Te계의 것을 사용하고 있다. 이 Bi-Te계는 n형 반도체와 p형 반도체를 전극을 이용해서 서로 달리 접속하고 그 위에 절연기판을 붙인 구조로 되어 있다. 따라서 열은 모듈의 표면으로부터 수직방향으로 전기

는 소자 내를 수평방향으로 각각 흐른다. 중국제의 전열기판의 재질은 알루미늄이나 세라믹스이고 교세라의 것은 동(구리)로 구성되어 있다.

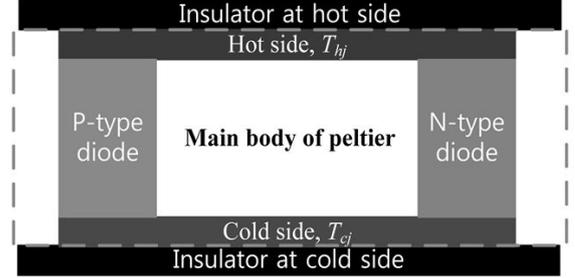


Fig. 1. Schematic diagram of peltier element.

모듈 내의 열전소자(전극을 포함한)의 열전도율 λ_{pn} 을 구하기 위해 소자의 두께 t_{pn} , 절연기판의 열전도율 λ_w , 한 장당 두께를 t_w 라고 하면,

$$\frac{1}{K} = \frac{t_{pn}}{\lambda_{pn} S} + \frac{2t_w}{\lambda_w S} \quad (11)$$

식(11)을 열전소자의 열전도율에 관해서 정리하면,

$$\lambda_{pn} = \frac{t_{pn}}{\frac{S}{K} - \frac{2t_w}{\lambda_w}} \quad (12)$$

식(12)로부터 모듈 내의 열전도율을 추정된 결과는 Table 3과 같고, 결과값을 Fig. 2와 같이 비교하였다. 참고로 모듈의 열전도율 λ_i 도 추가한다. Fig. 2로부터 소자의 열전도율이 절연기판의 값보다 낮게 가공되어 있음을 알 수 있다.

Table 3. Thermal conductivity of peltier module

Item	Unit	China	Japan	
Main body of peltier	Quality of peltier	[-]	Bi-Te	Bi-Te
	Thickness, t_{pn}	[mm]	1.5	2
	Thermal conductivity, λ_{pn}	[W/mK]	7.026E-03	6.135E-03
Insulator of peltier	Quality of insulator	[-]	Alumina ceramics	copper
	Thickness, t_w	[mm]	0.75	0.15
	Thermal conductivity, λ_w	[W/mK]	2.000E+01	4.030E+02
Thermal conductivity of peltier module, λ_i	[W/mK]	1.405E-02	7.055E-03	

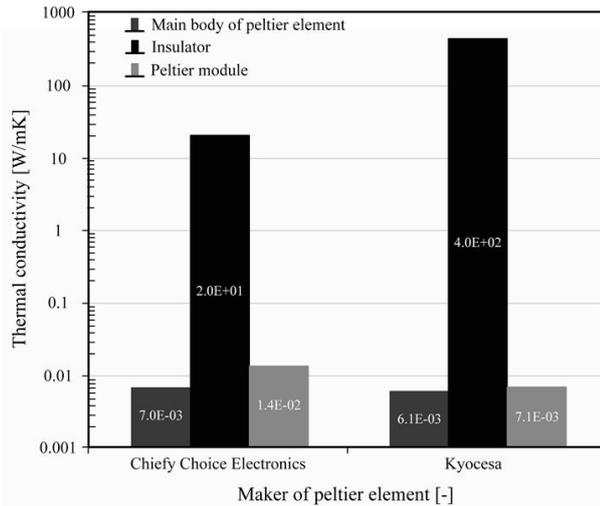


Fig. 2. Thermal conductivity of peltier module.

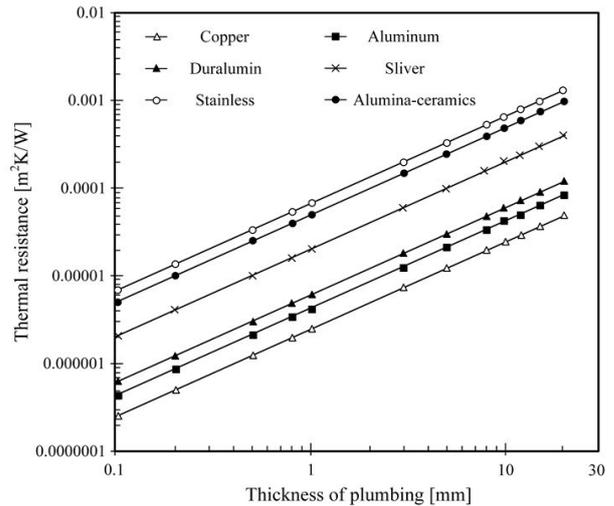


Fig. 3. Thermal resistance with variation of thickness.

3. 열원과 방형관의 총괄열전달계수

3.1 방형관의 열저항

열전변환 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 모듈에 대한 성능뿐 아니라 열원과 소자표면과의 열전달도 고려할 필요가 있다. 현재는 열전발전시스템의 열원인 유체가 흐르는 방형관(덕트)의 외벽에 모듈을 설치하는 구조로 많이 사용되고 있기 때문에 방형관의 재질이나 관벽의 두께도 시스템의 성능에 고려해야 할 인자이다.

Table 4는 관벽으로 사용될 수 있는 재질의 열전달율을 비교한 결과이다. 그 중 동은 시판하는 금속 중 가장 열전도율이 높고, 두랄루민은 열전모듈의 성능평가 장치에 사용한 관의 재질이다. 스텐인레스는 통상의 부식방지를 위한 관으로 사용되고 있고, 알루미늄 세라믹스는 열전모듈에서 사용되고 있는 것과 같은 것으로 가정하였다.

Fig. 3은 관벽의 두께에 따른 열저항($=t/\lambda$) 변화를 나타냈다. Fig. 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 두께가 증가할수록 열저항이 증가해 열이 통과하기 어렵게 되고, 관벽의 내측과 외측의 온도차가 발생하기 쉽게 되는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Quality & Thermal conductivity of plumbing

Quality of plumbing [-]	Thermal conductivity [W/mK]
Copper	403.0
Aluminum	236.0
Duralumin	164.0
Sliver	50.0
Stainless	15.0
Alumina-ceramics	20.0

3.2 열매체가 기체인 경우 총괄열전달계수

열저항은 열원인 유체의 열전달율을 포함한 열원측의 총괄열전달계수에 영향을 미친다. 열매체가 강제대류 조건인 기체(고온)라고 가정하면, 열전달율의 일반적인 개략치는 60~170 W/m²K이다. 열원 자체의 열전달율 h_h 를 60 W/m²K로 가정하고 총괄열전달계수 U_h 는 식(13)과 같다.

$$\frac{1}{U_h} = \frac{1}{h_h} + \frac{t_h}{\lambda_h} \quad (13)$$

Fig. 4는 t_h 를 0~20mm로 설정한 경우 U_h 를 그래프로 나타낸 것이다. 동이나 알루미늄 등 $\lambda > 100$ W/mK인 경우의 배관을 사용하는 경우는 t_h 를 늘려도 열원의 열전달율과 비교해 거의 감소하지 않았다. 한편, 스텐인레스 등 $\lambda < 100$ W/mK인

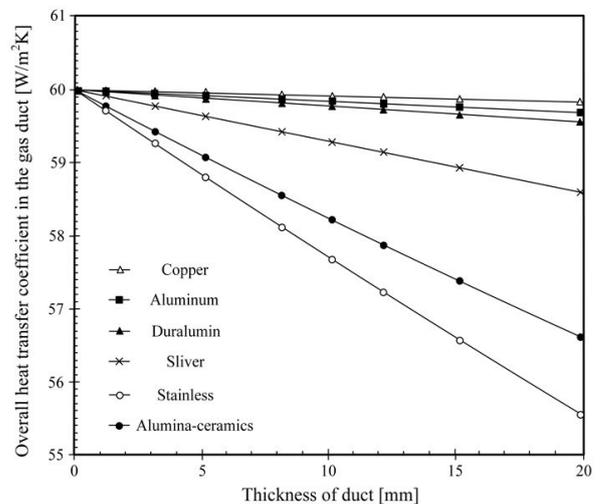


Fig. 4. Overall heat transfer coefficient in the gas heat source.

선박의 배기가스 폐열을 활용한 열전발전시스템에 관한 기초 열해석

배관을 사용하면 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 스테인레스를 사용한 경우 $t_h=20\text{ mm}$ 에서의 U_h 는 열원의 열전달율 90% 정도까지 감소하는 것을 알 수 있었다.

3.3 열매체가 물인 경우 총괄열전달계수

열매체가 강제대류 조건의 물(저온)이라고 가정하면, 열전달율의 일반적인 개략치는 약 $2800\sim 5700\text{ W/m}^2\text{K}$ 이다. 열원 자체의 열전달율 h_c 를 $3000\text{ W/m}^2\text{K}$ 로 고정하고 각 재료의 방형관에서 총괄열전달계수 U_c 는 식(14)와 같다.

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_c} + \frac{t_c}{\lambda_c} \quad (14)$$

Fig. 5는 두께 변화에 따른 U_c 를 그래프로 나타내었다. 관의 재질이나 두께가 총괄열전달계수에 미치는 영향은 열매체가 기체인 경우보다 물인 경우가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 동과 같이 높은 열전도율을 가지는 재질에 있어서도 $t_c=20\text{ mm}$ 에서의 U_c 는 열원 열전달율의 약 90% 정도까지 내려가는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 낮은 열전도율의 재료의 경우는 총괄열전달계수에 미치는 영향이 더욱 커 열원 열전달율의 1/2~1/5까지 내려가는 경향이 있는 것을 파악할 수 있었다.

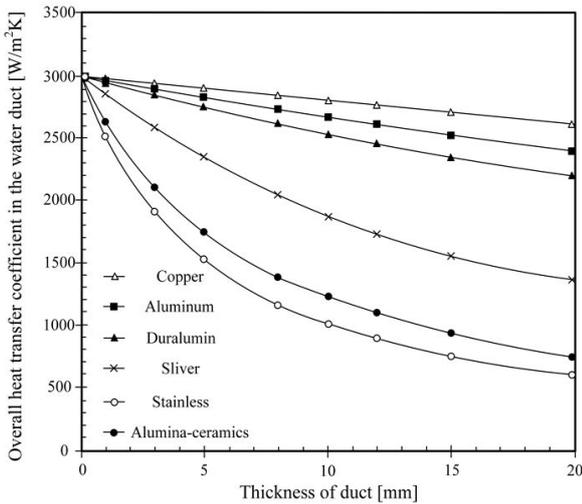


Fig. 5. Overall heat transfer coefficient in the water heat source.

4. 열전발전시스템에 있어서의 열해석

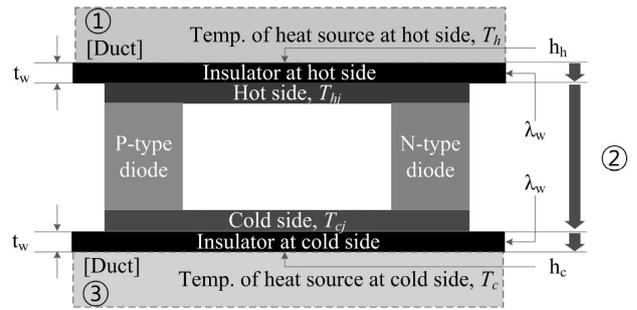
4.1 해석 모델

본 연구는 선박 엔진 등에서 배출되는 폐열을 효율적으로 회수하는 것을 목적으로 제백효과를 이용하는 열전소자에 대한 기초 계산으로써 열전 모듈 1개를 이용한 열해석을 수

행하였다. 1차원 열전달 모델은 Fig. 6과 같다. 전기 모듈은 고온측 열원이 흐르는 방형관과 저온측 열원이 흐르는 방형관 사이에 놓여 있고, 양자의 온도차에 의해 발전된다.

열해석은 다음과 같은 조건으로 계산된다.

- ① 시스템 전체를 고온열원측, 모듈 내부, 저온열원측의 3개로 크게 나눈다. 열전달 특성에 관해서는 고온측 열원은 총괄열전달계수를 U_h , 모듈 내부는 열컨덕턴스 K , 고온열원측의 총괄열전달계수 U_c 를 대표값으로 한다.



- ① Overall heat transfer coefficient at the hot side
- ② The heat conductance of peltier element (The reciprocal of heat resistance)
- ③ Overall heat transfer coefficient at the cold side

Fig. 6. 1-Dimensional Heat analysis model.

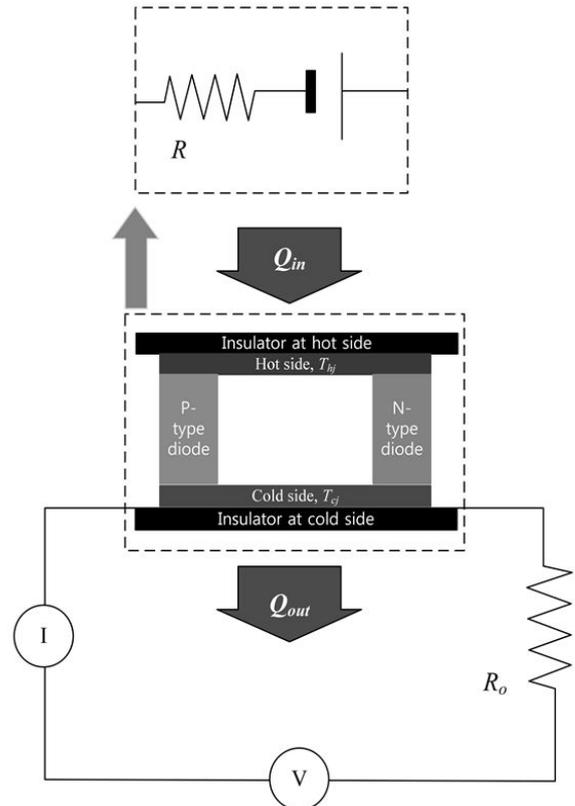


Fig. 7. Electric circuit model of peltier module.

- ② 열원온도는 고온측과 저온측 쌍방 모두 알고 있는 값으로 한다.
- ③ 고온측으로부터 저온측으로의 에너지 수지로부터 소자의 고온 및 저온 온도를 추정한다.
- ④ 소자내부의 줄열은 고려한다.
- ⑤ 모듈을 포함한 전기회로에 있어 외부부하저항 R_o 도 고려한다(Fig. 7).

소자내부의 줄열의 취급에 있어서는 이하의 모듈 고온측과 저온측의 에너지 수지를 이용해 검토하였다.

$$Q_h = K(T_{hj} - T_{cj}) + \alpha T_{hj}I - 0.5I^2R_i \quad (15)$$

$$Q_c = K(T_{hj} - T_{cj}) + \alpha T_{cj}I + 0.5I^2R_i \quad (16)$$

식(15)와 (16)에 있어서 우변 제1항은 소자로 전도되는 열유속, 제2항은 페르체 흡열량, 제3항은 줄열을 각각 표시하고 있다. 식(15)는 식(2)와 같은 식이지만 열량의 방향이 반대이기 때문에 열의 흐름도 변한다.

식(15)와 (16)의 우변 각항의 자릿수 비율을 검토한 결과 제1항이 1인 경우 제2항은 약 10%, 제3항은 1%로 되고, 제3항은 무시해도 무방하게 보인다. 그러나 식(15)와 (16)의 차를 취하면,

$$P = Q_h - Q_c = \alpha(T_{hj} - T_{cj})I - I^2R_i \quad (17)$$

로 된다. 여기에서 P 는 모듈의 전기출력으로 우변 제1항은 제백효과에 의한 기전력을 나타내고 있다. 즉 차를 취하면 식(15)와 (16)의 우변 제1항은 식(17)과 완전히 같은 것이 된다. 따라서 식(17) 우변 제1항의 자릿수를 1로 하면 제2항은 10%로 되고 전기 에너지 관점에서 제2항도 무시할 수 있게 된다. 그렇기 때문에 본 해석에서는 줄열을 고려하지 않는 것으로 가정하였다. 또한, Fig. 6의 전기회로로부터 모듈로부터의 출력 P 는 R_o 가 있어야 성립하기 때문에 R_o 는 고려하였다.

본 계산은 Mathcad Prime 3.0으로 수행하였고, 위의 열해석 조건을 만족하는 반복계산은 Mathcad의 내장함수(Given Find)를 이용하여 결과를 도출하였다.

4.2 해석법

열원으로부터 소자로의 열유속에 관해서는 식(15), (16)과 함께 식(18), (19)가 성립하게 된다.

$$Q_h = U_h S(T_h - T_{hj}) \quad (18)$$

$$Q_c = U_c S(T_{cj} - T_c) \quad (19)$$

식(18)과 (19)의 차를 취하면,

$$P = Q_h - Q_c = U_h(T_h - T_{hj})S - U_c(T_{cj} - T_c)S \quad (20)$$

식(15) ~ (20)으로부터 소자 온도 간 온도차에 관해서의 식을 구하면,

$$T_{hj} - T_{cj} = \frac{(T_h - T_c) - \frac{\alpha I}{S} \left(\frac{T_h}{U_c} + \frac{T_c}{U_h} \right) + \frac{0.5RI^2}{S} \left(\frac{1}{U_h} - \frac{1}{U_c} \right) - \frac{\alpha RI^3}{U_h U_c S^2}}{1 + \frac{K}{S} \left(\frac{1}{U_h} + \frac{1}{U_c} \right) + \frac{\alpha I}{S} \left(\frac{1}{U_h} - \frac{1}{U_c} \right) - \frac{1}{U_h U_c} \left(\frac{\alpha I}{S} \right)^2} \quad (21)$$

이 때 주의할 것은 식(21) 우변에 포함된 I 도 소자온도차 $T_{hj}-T_{cj}$ 에 관한 함수이다.

여기서, 식(22)로 I 가 정리된다.

$$I = \frac{V}{R_i + R_o} = \frac{\alpha(T_{hj} - T_{cj})}{R_i + R_o} \quad (22)$$

즉, 식(21)과 (22)를 반복 계산하면 먼저 소자 간 온도차 $T_{hj}-T_{cj}$ 를 구할 수 있다.

소자간 온도차가 확정되면 식(23)으로 T_{hj} 를 구한다.

$$T_{hj} = \frac{F_2 T_c + F_3 T_h + F_4}{F_1} \quad (23)$$

여기서,

$$F_1 \equiv 1 + \frac{K}{S} \left(\frac{1}{U_h} + \frac{1}{U_c} \right) + \frac{\alpha I}{S} \left(\frac{1}{U_h} - \frac{1}{U_c} \right) - \frac{1}{U_h U_c} \left(\frac{\alpha I}{S} \right)^2 \quad (24)$$

$$F_2 \equiv \frac{K}{U_h S} \quad (25)$$

$$F_3 \equiv \left(1 + \frac{K - \alpha I}{U_c S} \right) \quad (26)$$

$$F_4 \equiv \frac{0.5RI^2}{U_h S} + \frac{K - 0.5\alpha I}{U_h U_c S^2} RI^2 \quad (27)$$

식(21)과 (23)으로부터 T_{cj} 도 구할 수 있다.

또한, 세밀한 온도분포가 필요한 경우는 고온측의 층을 통과하는 열량 Q_h , 저온측의 층을 통과하는 열량 Q_c 가 각각 일정하다는 조건하에서 보간이 가능하다. 예를 들어 고온측 배관내벽의 온도를 T_{h1} 이라고 하고, 열전모듈 벽면의 온도를 T_{h2} 라고 하면, 식(28), (29)의 관계가 성립한다.

선박의 배기가스 폐열을 활용한 열전발전시스템에 관한 기초 열해석

$$Q_h = U_h S(T_h - T_{hj}) = h_h S(T_h - T_{h1}) \quad (28)$$

$$Q_h = U_h S(T_h - T_{hj}) = \frac{\lambda_w S}{t_w} (T_{h2} - T_{hj}) \quad (29)$$

여기서, U_h 는 식(30)으로 구할 수 있다.

$$U_h = \frac{1}{\frac{t_h}{\lambda_h} + \frac{1}{h_h} + \frac{t_w}{\lambda_w}} \quad (30)$$

식(31), (32)을 각각 T_{h1} , T_{h2} 에 관한 식이라 하면,

$$T_{h1} = T_h - \frac{U_h}{h_h} (T_h - T_{hj}) \quad (31)$$

$$T_{h2} = T_h + \frac{U_h t_w (T_h - T_{hj})}{\lambda_w} \quad (32)$$

로 된다.

마지막으로 시스템의 효율 $\eta = P/Q_h$ 은 식(35)으로 구한다. 여기서,

$$\eta_c = \frac{T_{hj} - T_{cj}}{T_{hj}} \quad (33)$$

식(34)에서 m 을 M_0 으로 구하면,

$$m = M_0 = \sqrt{1 + Z \frac{T_{hj} + T_{cj}}{2}} \quad (34)$$

$$\eta = \frac{\eta_c (M_0 - 1)}{M_0 + \frac{T_{cj}}{T_{hj}}} \quad (35)$$

4.3 케이스별 해석 결과

본 계산의 조건은 최적의 효율을 나타내는 열전달 조건과 덕트의 재질을 고려하여 총 8개의 CASE로 계산을 수행하였다.

4.3.1 [CASE 1] 배기가스가 고온 열원, 냉각수가 저온 열원의 경우

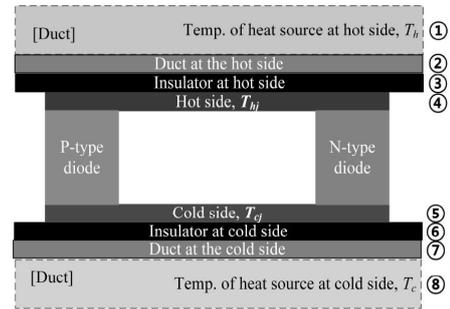
해석 결과로써 먼저 아래의 조건으로 설정하였다.

- ① 열전모듈은 중국제 TES1-12705으로 하고, 물성치는 Table 2를 참조한다.
- ② 고온측 열원은 배기가스로 가정하고, $T_h=300^\circ\text{C}$, $h_h=80 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 고정한다.
- ③ 저온측 열원은 강제대류의 냉각수로 가정하고, $T_c=25^\circ\text{C}$, $h_c=3500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 고정한다.

- ④ 고·저온측 열원이 흐르는 배관의 재질은 두랄루민($\lambda_h = \lambda_c = 164.0 \text{ W/mK}$)라고 가정하고, 관벽면의 두께는 $t_c = t_h = 6.0 \text{ mm}$ 로 한다.

- ⑤ 외부저항 R_0 는 열전 모듈 내부저항 R_i 과 같다고 가정한다. 즉, $m=1.0$ 이다.

본 해석에 있어서 위치와 온도의 정의를 Fig. 8에 나타내고 여기에 대응하는 CASE 1에 관한 온도분포의 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 결과에 따르면 배기가스의 열전달율이 냉각수의 값과 비교해 낮기 때문에 열원간의 온도차가 280°C 에 다다름에도 불구하고 열전소자의 고온측 온도는 277.965°C 까지 내려가고 온도차는 252.388°C 로 되는 것을 확인할 수 있었고, 이때의 시스템의 효율의 계산 결과는 8.605%로 확인할 수 있었다.



- | | |
|---|--|
| ① Heat source of hot side | ⑤ Peltier module at the cold side |
| ② Inside surface of duct at the hot side | ⑥ Inside surface of insulator at the cold side |
| ③ Inside surface of insulator at the hot side | ⑦ Inside surface of duct at the cold side |
| ④ Peltier module at the hot side | ⑧ Heat source of cold side |

Fig. 8. Define of heat analysis position.

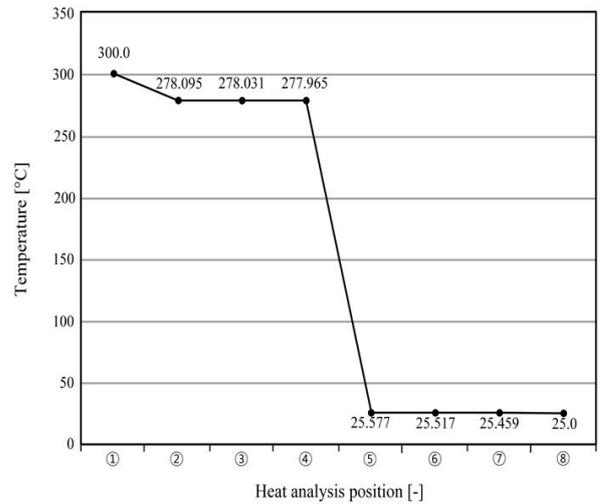


Fig. 9. Result of CASE 1.

4.3.2 [CASE 2] 강제대류조건인 공기가 저온측 열원의 경우

CASE 1을 기준으로 다양한 파라미터를 변경시켜 그 영향을 알아보았다. CASE2의 조건은 저온측 열원이 강제대류조건인 공기로 설정하였다($T_c=25^{\circ}\text{C}$, $h_c=80\text{ W/m}^2\text{K}$). 그리고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9와 비교해 보면 열전소자의 고온측 온도는 1.854°C 상승하는 반면 열전소자의 저온측 온도는 18.436°C 상승해 열전소자의 온도차가 235.361°C 까지 내려가는 것을 확인할 수 있었다. 이때의 시스템 효율은 8.001%로 계산되었다.

4.3.3 [CASE 3] 자연대류조건인 공기가 저온측 열원의 경우

CASE 3에서는 저온측 열원이 자연대류조건인 공기라고 가정하였다($T_c=25^{\circ}\text{C}$, $h_c=15\text{ W/m}^2\text{K}$). 이 해석 결과는 Fig. 11의 그래프에 나타내었다. CASE 1과 비교해 열전소자의 고온측 온도는 6.108°C 상승하는 한편 열전소자의 고온측 온도도 78.979°C 상승해 모듈 온도차는 179.516°C 로 열원 온도차와 비교해 약 65.279%까지 저하하는 것을 확인할 수 있었다. 이때의 시스템 효율은 6.044%로 확인할 수 있었다.

4.3.4 [CASE 4] 방형관(덕트) 재질이 동인 경우

본 항에서는 열원의 조건을 CASE 1으로 되돌리고 재질의 영향에 대해 검토한다. 방형관 벽의 재질을 동($\lambda_h=\lambda_c=403\text{ W/mK}$)으로 바꾼 경우의 해석결과를 Fig. 12에 나타낸다. 저온측 열원과 열전소자의 저온측 온도의 차이는 0.551°C , 고온측에서의 열원과 열전소자와의 온도차는 22.003°C 로 Fig. 9와 비교해 온도분포의 차가 거의 없음을 알 수 있다. 이때의 시스템 효율은 8.607%로 확인되었다.

4.3.5 [CASE 5] 방형관(덕트) 재질이 스테인레스인 경우

본 항에서는 방형관의 재질을 스테인레스($\lambda_h=\lambda_c=15\text{ W/mK}$)로 바꾼 경우의 해석결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 9와 12를 비교하면 저온측의 열원과 열전소자와의 온도차가 0.577°C 에서 2.831°C 로 약 5배 증가한다. 한편 고온측에서는 열원과 열전소자와의 온도차는 22.035°C 에서 22.660°C 로 거의 변하지 않는다. 3.3항에서 고찰한 바와 같이 열매체의 열전달이 충분히 크면 상대적으로 열전도가 낮은 재질 쪽이 온도분포에 영향을 미치지 때문이고, 이때 시스템의 효율은 8.707%로 확인되었다.

4.3.6 [CASE 6] 외부 부하 저항이 3.2Ω 에서 1.5Ω 으로 변화시킨 경우

본 항에서는 CASE 1의 조건에 외부 부하 저항 R_o 를 변화시켜 검증하였다. 그리고 R_o 를 3.2Ω 에서 1.5Ω 으로 변화시킨

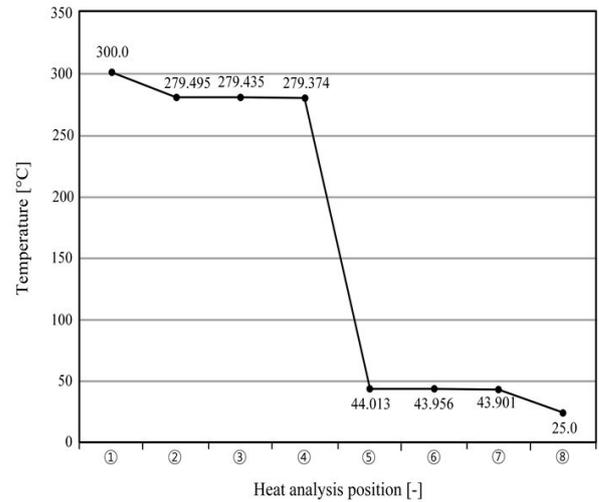


Fig. 10. Result of CASE 2.

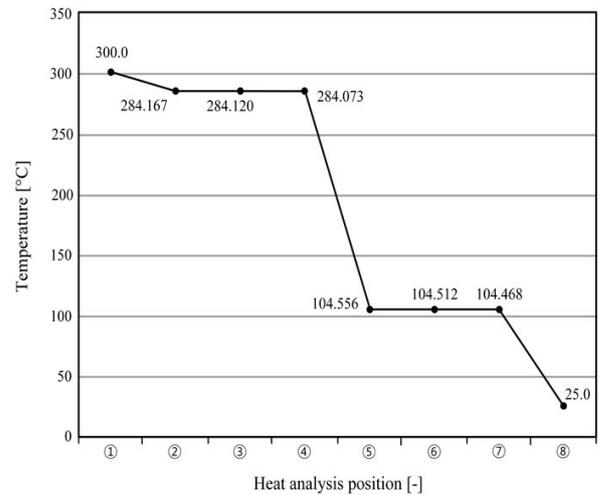


Fig. 11. Result of CASE 3.

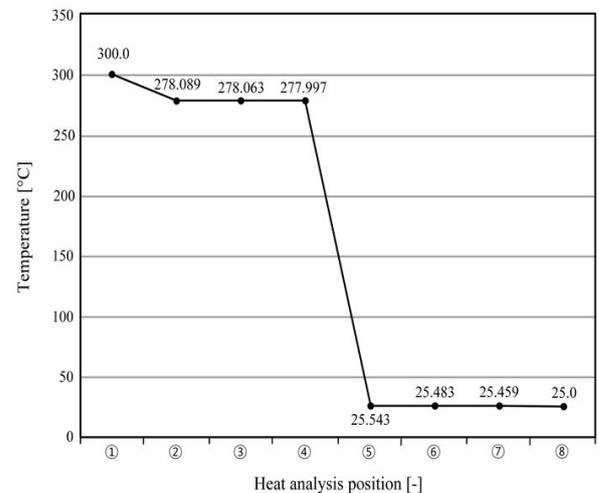


Fig. 12. Result of CASE 4.

선박의 배기가스 폐열을 활용한 열전발전시스템에 관한 기초 열해석

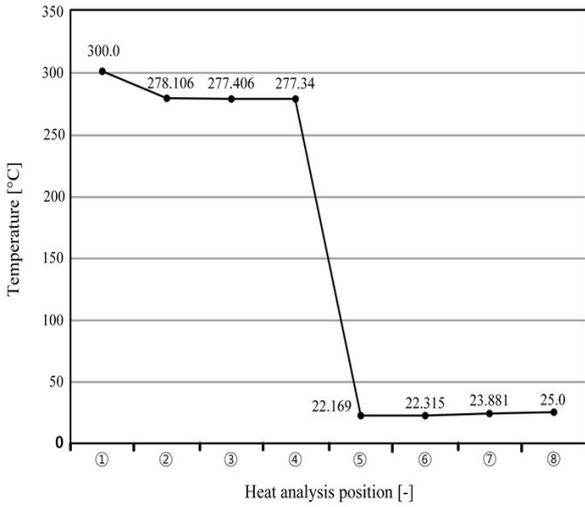


Fig. 13. Result of CASE 5.

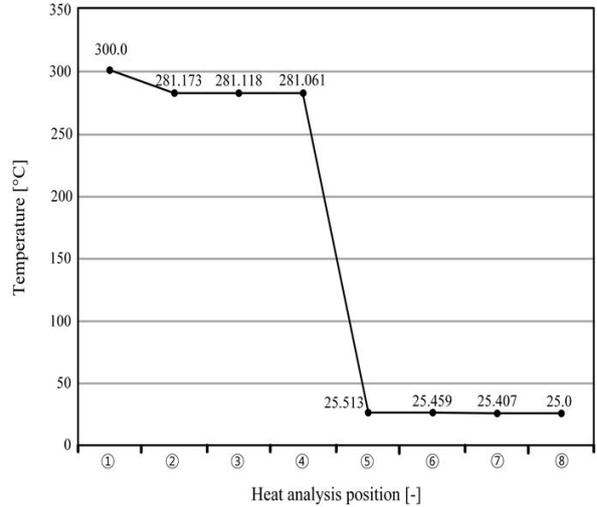


Fig. 15. Result of CASE 7.

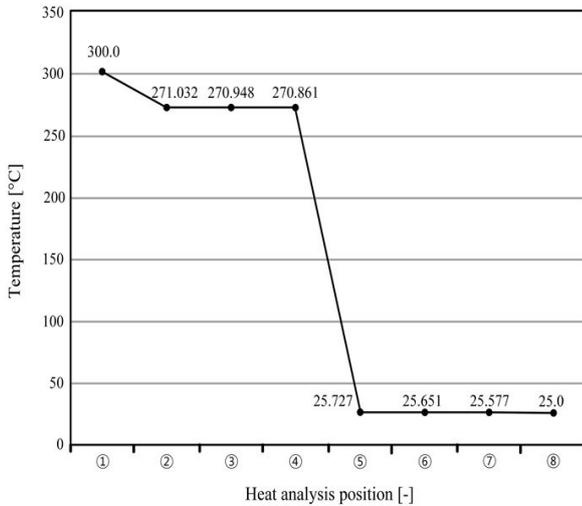


Fig. 14. Result of CASE 6.

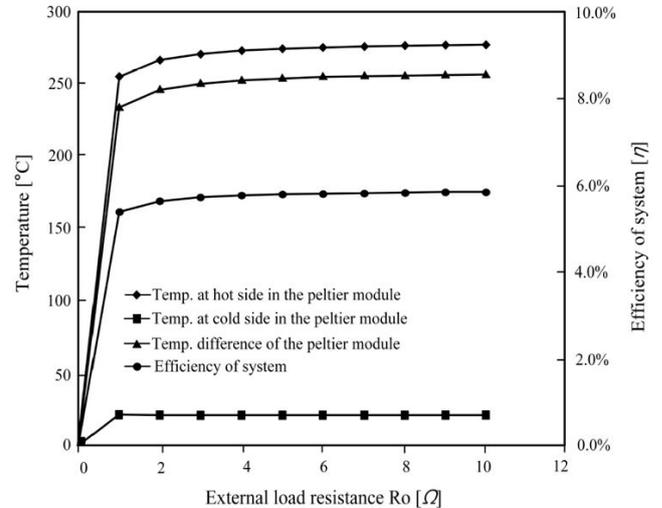


Fig. 16. Variation of module temp. & efficiency of system depend on the external load resistance.

경우로 해석결과를 Fig. 14에 그래프로 나타내었다. Fig. 9와 비교해 열전소자의 고온측 온도가 7.104°C 저하되는 것을 확인하였다. 또한, 모듈의 온도차는 245.134°C까지 저하되고, 시스템 효율은 8.386%로 확인되었다.

4.3.7 [CASE 7] 외부 부하 저항이 3.2Ω에서 6.0Ω으로 변화시킨 경우

외부 부하 저항 R_o 를 3.2Ω에서 6.0Ω으로 증가시킨 경우로 해석결과를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 9와 비교해 열전소자의 고온측 온도는 281.061°C이고, 모듈의 온도차는 255.548°C로 증가하였다. 그리고 시스템 효율은 8.701%로 계산되었다.

CASE6과CASE7에서의 결과를 포함해 R_o 를 파라미터로 한 온도분포 해석을 수행하였다. Fig. 16은 외부 부하 저항을 x축

에 모듈 고온측 온도, 저온측 온도, 모듈 온도차는 y1축, 시스템 효율을 y2축에 나타낸 그래프이다.

Fig. 16으로부터 외부 부하 저항을 0Ω에서 증가시키면 모듈 고온측 온도가 증가해 시스템 효율이 증가하지만 너무 커지면시스템 효율의 변화폭이 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이것은 제백 효과에 의한 기전력이 저항으로 인한 줄열로 소비되는 비율이 증가해 미소하지만 전기출력이 감소했기 때문이다.

4.3.8 [CASE 8] 배기가스 열전달율을 2배 상승 시킨 경우

배기가스의 유로에 전열촉진을 시키기 위한 방법으로 열전달율을 2배(160 W/m²K)로 증가시킨 경우의 열해석 결과를

Fig. 17에 나타내었다. 열전소자 고온측의 온도는 277.965°C에서 288.4°C로 증가하였고, 모듈 온도차 역시 252.388°C에서 262.798°C로 증가한 것을 확인하였다. 또한, 시스템 효율은 8.605%에서 8.917%로 증가하였다. 이러한 결과로부터 열전달율이 낮은 열원의 유로에 전열촉진법을 실시하면 시스템 효율 향상에 기여함을 알 수 있었다. 또한, 외부 저항의 변화에 대한 영향보다는 열전달 촉진 효과가 높을수록 시스템 효율이 향상되는 것을 알 수 있었다. 단 전열 촉진법 중 유로의 압력손실의 증가가 동반되는 경우가 있어 압력손실과의 관계를 명확히 해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

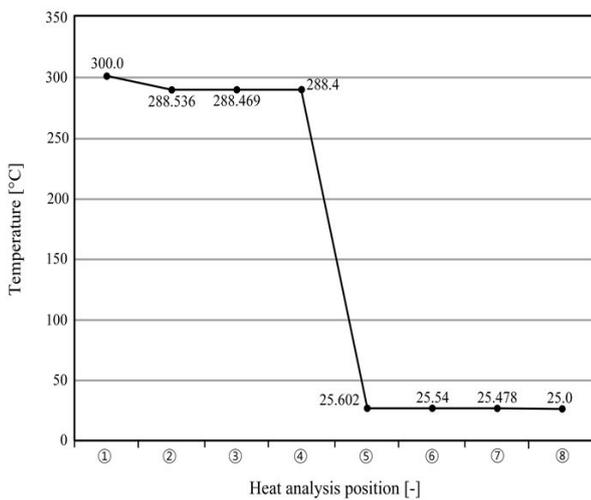


Fig. 17. Result of CASE 8.

4. 결론

배기가스를 고온측 열원, 냉각수를 저온측 열원으로 한 열전변환 모듈 1장으로 구성되는 열전 변환 시스템에 있어 온도분포 해석과 시스템 효율에 관해서 저온측 열원의 변경도 포함한 파라미터 영향을 수행해 보았다. 그 결과를 포함한 열전 변환 시스템의 효율향상에 관해 유효한 방법을 나열하면 다음과 같다.

- ① 배기가스(고온열원) 측의 전열촉진책 : 고온측 열원과 모듈간 온도차를 줄여 모듈의 온도차를 늘리는 것으로 열전 변환 시스템의 효율이 8.917%로 향상되는 것을 알 수 있었다.
- ② 외부부하저항의 변화에 따른 시스템 효율은 약 6%로 그 변화폭이 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.
- ③ 열원이 흐르는 방형관의 재질에 대한 검토 : 동일 계산 조건에서 방형관의 재질이 스테인레스인 경우의 시스템 효율이 8.707%로 두랄루민(8.605%), 동(8.607%)보다 높을 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역 혁신창의 인력양성사업(NRF-2015064366)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Ioffe, A. F.(1957), Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling, Inforsearch Ltd., London, pp. 82-91.
- [2] Kim, M. J. and G. H. Chea(2012), Study on the PV Driven Dehumidifying System with Oyster Shell and Thermoelectric Device, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18, No. 3, pp. 287-293.
- [3] Kyoung, M. H., W. H. Hwang, K. P. Dong and C. C. Seung(2000), The Packaging Technology Thermoelectric Generator, Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 7, No. 3, pp. 1-6.
- [4] Munoz-Garcia, M. A., G. P. Moreda, M. P. Raga-Arroyo and O. Marin-Gonzalez(2013), Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy, Computers and Electronics in Agriculture, No. 93, pp. 60-67.
- [5] Uemura, K. and I. Nishida(1988), Thermoelectric Semiconductor and Theri Application, Nikkan-Kogyo Shimbun Press, Tokyo, p. 145.

Received : 2016. 07. 07.

Revised : 2016. 08. 12. (1st)

: 2016. 08. 26. (2nd)

Accepted : 2016. 08. 29.