

AMTEC내 저압용기에서의 열복사차단막 형상에 따른 발전량 향상 해석

정원식¹, Ri-Guang Chi¹, 이육현², 이계복¹, 이석호^{*}
¹충북대학교 기계공학부, ²한국에너지기술연구원 에너지절약연구실

Analysis on Improving Power of Thermal Radiation Shield in Low Pressure Chamber of AMTEC

Won-Sik Chung¹, Ri-Guang Chi¹, Wook-Hyun Lee², Kye-Bock Lee¹, Seok-Ho Rhi^{*}

¹School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

²Industrial Energy Efficiency Research Center, Korea Institute of Energy Research

요약 열을 전기로 바꾸는 장치로 가장 효율이 우수한 장치인 AMTEC은 알칼리금속을 작동유체로 하여 열을 직접적으로 전기로 변환시키는 장치이다. AMTEC은 저압용기, 고압용기, 베타 알루미늄 나 고체 전해질, 그리고 순환웁으로 이루어져 있다. AMTEC에서의 열손실은 주요하게 저압용기에서의 BASE와 응축부 사이에서 발생하는 열복사손실이며, 압력의 발전량은 BASE의 온도유지력에 영향을 받기에 BASE의 표면온도를 고온으로 유지시켜주어야 고효율 발전량은 일정하게 유지할 수 있다. 이를 위하여 저압챔버에서의 복사 열손실을 줄이고 BASE온도는 상승시키고, AMTEC 시스템의 발전량 향상을 위하여 저압용기 내부의 6가지 형태의 열복사차단막에 따른 출력을 전산유체해석을 통하여 분석하였다. 분석에서 최적의 열복사차단막 형상은 수직부에 곡률을 가질 때이며, 그 때의 온도에 대한 무차원수(응축부온도/BASE온도 비)는 0.665 정도이고 출력은 약 17.69 W 정도로 다른 형상에 대비하여 높은 발전량을 갖는 것으로 계산되었다. 높이에 따른 발전량의 차이에서는 수평차단막이 BASE 상부로부터 멀리 떨어진 경우 발전량이 가장 우수하며, 17.58W 정도로 나타났다. 여러 개의 작은 홀과 다중수평차단막을 설계한 경우는 기준이 되는 형상보다 오히려 발전량이 감소하였으며, 각각 0.91W, 2.06W 정도 감소하였다.

Abstract The most efficient system for converting heat to electricity, AMTEC (Alkali Metal Thermal-to-Electric Converter), is a device that directly converts heat energy to electricity using an alkali metal (sodium) as the working fluid. The AMTEC consists of a low pressure chamber, high pressure chamber, BASE (Beta-Alumina Solid Electrolyte), and artery wick. The main heat loss of the AMTEC system occurs in the low pressure chamber. A high power generation rate is thought to be obtainable by using a high temperature in the BASE. Therefore, to reduce the radiation heat loss, 6 types of radiation shields were examined to reduce the radiative heat loss in the low pressure chamber. The power generation rate of the AMTEC varied depending on the shape of the radiation shield. CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses were carried out to optimize the shape of the radiation shield. As a result, the optimum radiation shield was found to consist of a curvature formed at the vertical point, in which case the dimensionless temperature (condenser temperature/BASE temperature) is approximately 0.665 and the maximum power generated is calculated to be 17.69W. Increasing the distance between the BASE and condenser leads to an increase in the power generated, and the power generated with the longest distance was 17.58 W. The shields with multiple holes and multiple horizontal layers showed power reduction rates of 0.91 W and 2.06 W, respectively.

Keywords : AMTEC, Low Pressure Chamber, Radiation Shield, Alkali Metal, BASE

This work was conducted under the framework of Research and Development Program 2016 of Korea Institute of Energy Research (KIER B6-2416-02)

*Corresponding Author : Seok-Ho Rhi (Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-2444 email: rhi@cbnu.ac.kr

Received April 5, 2016

Revised May 17, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

–Nomenclature–

- A_B : Area of BASE, m^2
- F : Faraday's constant, C/mole
- G : Dimensionless shape factor
- h_{tot} : Specific total enthalpy, kJ/kg
- I_B : Total cell current
- I_b : Blackbody emission intensity
- I_v : Mean radiation intensity
- I_{vo} : Radiation intensity leaving the boundary
- J : Electrode current density, A/cm^2
- M : Molecular weight of sodium, g/mole
- P_d : Pressure drop in low pressure chamber, N/m^2
- P_v : Saturated pressure of sodium, N/m^2
- R : Electric resistance, Ω
- T : Static temperature, K
- T_B : Temperature of BASE, K
- T_{cond} : Temperature of condenser, K
- t_B : Thickness of BASE, mm
- V_B : Voltage of BASE, V

Greek Letters:

- μ : Dynamic viscosity, Ns/m^2
- ρ : Density, kg/m^3
- τ : Shear stress, N/m^2

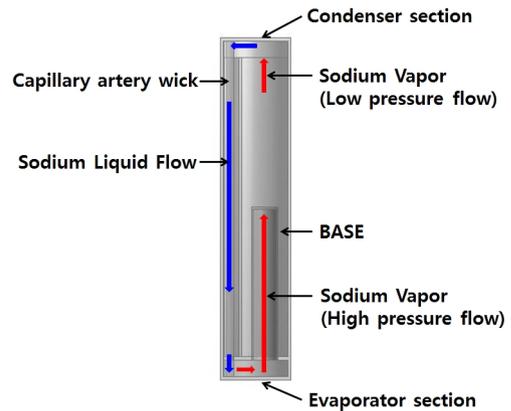
1. 서론

AMTEC은 우주선이나 인공위성의 발전기로 개발되었다. 우주용 발전시스템에 있어서 단위 질량당 높은 출력밀도와 시스템의 신뢰성은 매우 중요하다. AMTEC의 출력밀도는 $0.8 - 1.2 W/cm^2$ 정도이며 효율이 30% 이상이므로 이에 적합하며, 전기에너지를 만드는 시스템으로서 고온 측 작동 열원을 쉽게 얻을 수 있는 이점이 있다.[1, 2]

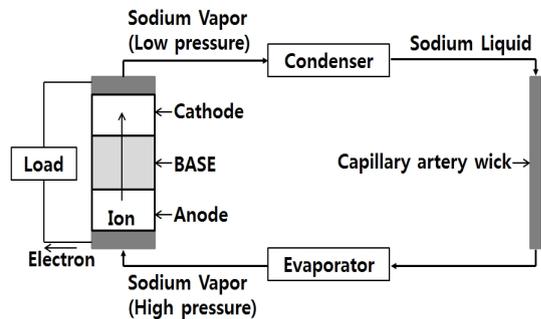
Fig. 1에서 볼 수 있듯이 AMTEC은 나트륨이나 포타슘의 순환이 주된 작동 원리이다. 이온 전도성을 갖는 베타 알루미늄 양단에 온도차를 주면 베타 알루미늄에서

나트륨 이온의 이동이 일어나게 된다. 베타 알루미늄을 통과한 이온들은 저압용기에서 전자와 재결합 되어 전기를 발생한다. 재결합한 나트륨 증기는 응축부에서 응축되며, 모세관력이 작용하는 벽에 의해 다시 증발부로 회귀하게 된다. 이 때 출력형태는 $0.7-2.0 V$ 이며 전류는 $0.7-1.2 A/cm^2$ 정도로서 저 전압, 고 전류가 발생한다.[1, 3]

BASE를 지난 알칼리 금속이 전기를 발생하기 위해서는 증발부에 $1000-1300 K$, 응축부에는 $600K$ 정도의 온도가 필요하며 BASE의 온도가 모든 구간에서 일정할 때 좋은 발전량을 나타낸다. 하지만 BASE가 고압용기와 저압용기에 걸쳐서 설치되기 때문에 일정 온도를 유지시키는 것은 매우 어렵다. 또한 저압용기 내부에서는 BASE로부터의 열복사가 알칼리 금속의 응축부에서의 응축에 악영향을 주어 작동유체의 순환이 원활하지 않게 된다.[4]



(a) Interrelationship of oboc AMTEC



(b) Schematic diagram

Fig. 1. Schematics of AMTEC

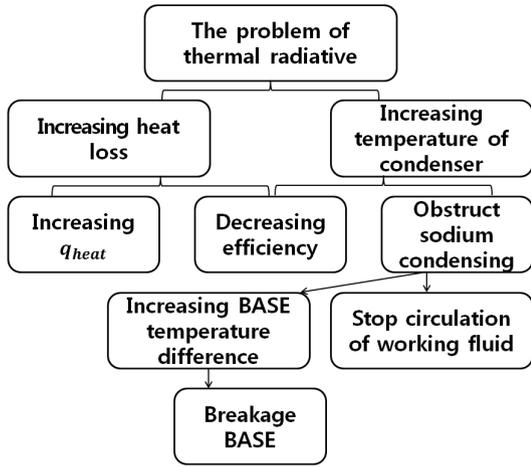


Fig. 2. Thermal radiative problems in AMTEC

AMTEC에서의 열전달 문제점은 Fig. 2로 귀납할 수 있다. 이를 보완하여 저압용기 내부에 설치하는 열복사 차단막이 고안되었다. 일반적으로 열복사차단막은 BASE와 응축벽 사이에 설치되며, 복사를 차단하여 작동유체의 순환에 방해가 되는 요인을 감소시킨다.[5]

본 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델링을 통해 열복사차단막이 없는 경우의 발전량을 분석한 후, 열복사차단막을 설치한 경우와 비교하여 열복사차단막이 필요함을 보인 뒤 다양한 형상의 차단막을 설계하여 최적의 형상을 찾기 위한 해석을 수행하였다. 1990년대 미국의 연구 자료를 기반으로 내부 열 저항은 대류를 무시하고, 전도-복사로 모델링 하였으며, 선행 사례를 확인할 때 이 방법으로 예측한 전산해석 온도분포도가 실험값과 잘 맞는 것으로 나타난다.[5, 6]

2. AMTEC의 발전량 및 전산해석 방법

2.1 AMTEC 발전량계산

AMTEC에서 BASE의 온도와 응축부의 온도는 발전량을 계산할 수 있는 요소이다. AMTEC의 셀을 통과한 전압은 다음 식으로 표현된다.[3]

$$V_B = \left(\frac{RT_B}{F}\right) \ln \left[\frac{P_v T_B}{P_v T_{Cond} \times \left(\frac{T_B}{T_{Cond}}\right)^{1/2} + (2\pi MT_B)^{1/2} \times \frac{J}{F} + P_d} \right] - JR \quad (1)$$

여기에서, T_B 는 BASE의 온도이며, T_{Cond} 는 응축부 온도, F 는 패러데이 상수로서 약 96500 Coulombs/mole, J 는 전류밀도이며 0.5 amp/cm^2 의 값을 가진다. P_v 는 주어진 온도에서의 나트륨 포화 압력이며 식 (2)를 통해 구해진다.[3]

$$\ln P_v = 11.9463 - \frac{12633.73}{T} - 0.4672 \ln T \quad (2)$$

식 (1)에서 P_d 는 저압용기 내에서 확산에 의한 압력 강하로서 다음 식으로 계산한다.[3]

$$P_d = \left(\frac{0.75 GJ}{F}\right) \left(\frac{MRT_B}{2\pi}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$R = R_B + R_{Contact} + R_{Elec} + R_{cable} \quad (4)$$

식 (3)에서 M 은 나트륨 분자량으로서 약 23 g/mole이며, G 는 기체 나트륨 압력 강하에 의한 무차원 형상계수로서 실험값인 40을 취하여 계산하였다. R 은 AMTEC 장치 전체의 전기저항으로서 그 값은 식 (4)로 표현할 수 있다. R_B 는 BASE의 저항이며 다음의 식으로 계산할 수 있다.[3]

$$R_B = t_B T_B \times \left[4.03 \times 10^{-4} \times \exp\left(\frac{1420}{T_B}\right) + 3.24 \times 10^{-7} \times \exp\left(\frac{4725}{T_B}\right) \right] \quad (5)$$

위의 식에서 t_B 는 BASE 두께이다.

발전량 W_{cycle} 은 다음 식과 같이 표현된다.[3]

$$W_{cycle} = V_b \times J \times A_B = V_b \times I_B \quad (6)$$

위의 식 (6)에서 A_B 는 BASE의 면적이다.

2.2 AMTEC내 열복사현상의 전산해석

전산유체역학은 2차 편미분 방정식인 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes Equation)을 한번 적분하여 이산화한 FVM(Finite Volume Method)을 사용하며, 해석형상 격자를 생성하여 이를 기반으로 문제를 해결한다. 일반적인 전산해석 상용 코드로는 Fluent, CFX,

STAR-CCM+ 등이 있으며 본 해석에서는 ANSYS 상용 코드인 Fluent V16.2를 이용하였다.

열전달을 해석하기 위해서는 시스템 구성 물질의 특성 및 형상을 고려하여야 하지만, 해석을 위해 단순화하기 위하여 몇 가지 가정을 사용하였다. 우선 작동유체는 비압축성이며 저 레이놀즈수 층류유동으로 가정하여 난류 모델을 사용하지 않는다. 이는 AMTEC 내부를 순환하는 나트륨의 평균 유량이 1.1149E-5 kg/s 정도로 매우 낮은 유량을 가지기 때문이다. 또한 AMTEC의 외부 표면은 단열로 가정하며, AMTEC이 원형 대칭 구조이므로 대칭조건(symmetry)을 사용하여 해석하였다.[6] AMTEC 내부 고압용기와 저압용기 내부는 나트륨 증기로 가득 차있다고 가정하였으며, 전산해석을 위하여 Table. 1과 같은 경계조건을 설정하였다.

Table 1. Boundary condition of CFD

Numerical Model	Boundary Condition
	Heating : 1200K Cooling : 700K Adiabatic wall Symmetric analysis Beta-Alumina emissivity : 0.2 Stainless Steel emissivity : 0.66 Artery wick emissivity : 0.05 RTE Model : DO

전산해석에 사용한 Fluent V16.2 에서의 지배방정식은 다음과 같다.[3]

(1) 연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도를 나타내며 u_i 는 유체의 i 방향 속도이다.

(2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \nabla \cdot (\rho u_i \times u_j) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau_{ij} + S_M$$

$$\tau = \mu \left(\nabla \cdot u + (\nabla \cdot u)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot u \right) \quad (8)$$

식 (8)에서 p 는 정압, τ_{ij} 는 유체에 작용하는 전단응력 텐서이며, μ 는 유체의 점성계수, S_M 은 중력과 외력에 의한 체적력을 나타낸다.

(3) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_{tot})$$

$$= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + u \cdot S_M + S_E$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} u^2 \quad (9)$$

여기서, h_{tot} 은 전체 엔탈피, $\nabla \cdot (u \cdot \tau)$ 는 점성응력에 의한 유동, $u \cdot S_M$ 은 운동량에 의한 유동이다.

(4) 열복사 방정식

$$\frac{dI_\nu(r,s)}{ds} = -(K_{av} + K_{sv})I_\nu(r,s) + K_{av}I_b(\nu, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\nu(r,s') d\Omega' + S$$

$$I_\nu(r,s) = I_{\nu 0} \exp[-(K_{av} + K_{sv})s] + I_{\nu b} [1 - \exp(-K_{sv}s)] + K_{sv} \bar{I}_\nu \quad (10)$$

여기서, I_ν 는 위치와 방향에 따른 평균 방사강도, $I_{\nu 0}$ 는 표면에서 방출되는 방사강도, $I_{\nu b}$ 는 흑체 방사강도이다.[6]

Fluent에서는 5가지의 열복사 모델을 제공하고 있다. 이는 Surface-to-Surface (S2S), Discrete Ordinates (DO), Discrete Transfer Radiation Model (DTRM), P-1 (Spherical Harmonics Model), Rosseland Model 이다.[7] 열복사 방정식 모델에서는 광학두께에 의해 모델의 적용여부가 결정되는데[8], 본 해석에서는 모든 광학 두께에서 적용이 가능한 DO 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.[7]

본 해석에서는 Fig. 3의 OBOC(One BASE in One Case)형상의 AMTEC을 기본으로 하여 모델링을 하였으며, 열복사차단막의 비교를 위한 기준으로 Type A를 설정하였다. 기준 차단막의 형상은 Fig. 3의 오른쪽에 위치하며, 열복사차단막의 최적설계를 위해 다양한 형상의 차단막을 Fig. 4와 같이 설계하여 해석을 수행하였다.

Fig. 4에서 Type A의 열복사차단막 형상과는 다르게 Type B에서는 수직차단막에 곡률을 생성하여 순환위를 감소도록 설계하였다. Type C는 Type A와 같은 형상의 차단막으로서 Type A보다 10 mm 하단에 위치하였고, Type D는 Type A보다 10 mm 상단에 위치하였다.

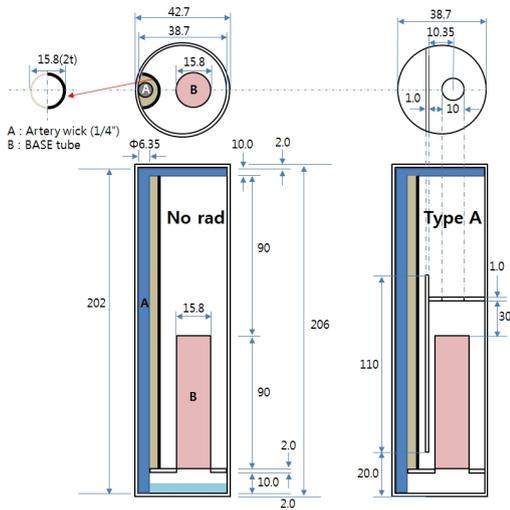


Fig. 3. Numerical model of OBOC

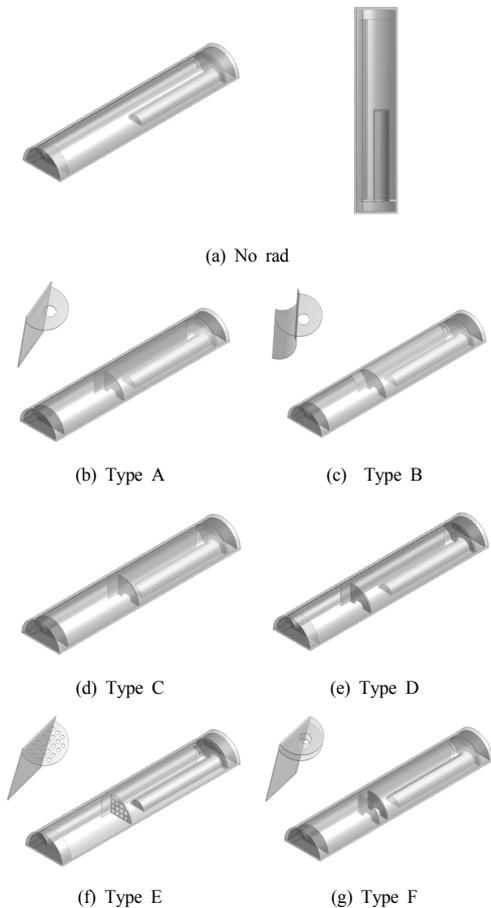


Fig. 4. CFD modeling of various type

Type E는 큰 홀이 한 개인 Type A에 비해 여러 개의 작은 홀로 되어있고, Type F는 Type A의 단일 수평 차단막과 다르게 2층 차단막으로 되어있다.

격자의 경우 ANSYS Workbench에 내장되어 있는 Mesh 툴을 사용하여 격자를 생성하였으며 Fig. 5와 같은 비정렬격자인 삼각격자(Tetrahedron)를 사용하였다. 격자 생성 후 격자 품질에 가장 큰 영향을 미치는 직교성(Orthogonal quality)과 등방성(Skewness)에 대한 품질 검사를 수행하였다. 일반적으로 직교성 품질의 경우 0.01이상이며, 등방성 품질의 경우 0.95이하이면 전산해석에 있어서 문제가 없다.[9] Table. 2에서 볼 수 있듯이 모든 형태의 직교성과 등방성 품질이 모두 전산해석에 있어서 문제가 없을 것으로 판단되었다.



Fig. 5. Tetrahedron mesh

Table 2. Grid quality of the geometry of OBOC

	Nodes	Skewness (Max)	Orthogonal Quality (Min)
No shield	606755	0.79995	0.24783
Type A	849130	0.79998	0.23182
Type B	850015	0.79923	0.23530
Type C	832216	0.79974	0.24288
Type D	870426	0.79906	0.22458
Type E	882575	0.79983	0.23784
Type F	912450	0.79997	0.22374

격자의 크기는 해석 결과와 신뢰성 및 수렴성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 격자의 크기가 커지는 경우 전산해석의 결과를 신뢰하기 어려우며, 반대로 격자의 크기가 너무 조밀한 경우 해석결과의 정확도는 증가하나 해석 소요 시간이 증가한다. 이에 전산해석에 필요한 최소 격자의 개수를 찾기 위해 Type A 형상을 통해 격자수를 달리한 경우의 발전량을 비교하였다. 격자의 수는

15만개, 35만개와 55만개를 비교하였으며 각 경우에 따른 발전량은 Fig. 6을 통해 나타내었다. 비교한 결과 35만개 격자수 이후부터 발전량의 차이가 거의 없었으며, 55만개의 격자를 가지는 경우와 0.03 W의 차이를 나타내었다. 15만개 격자수를 전산해석 하는 경우 35만개의 격자와 약 0.42 W 정도의 발전량 차이를 나타내었다. 결과를 바탕으로 격자의 개수가 35만개 이상인 경우라면 전산해석의 결과를 신뢰할 수 있다고 판단하였으며, 모든 경우에서 만족하였다.

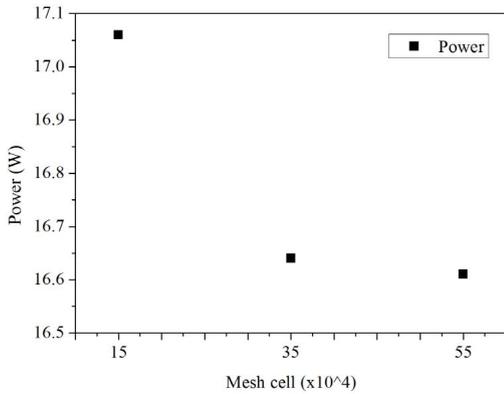


Fig. 6. Generated power according to mesh numbers

3. 열복사차단막 형상에 따른 해석결과

BASE의 온도를 파악하기 위하여 Fig. 7의 붉은 선과 같이 BASE 표면의 Z-방향으로 선을 그어서 200개의 샘플의 온도를 측정하였고, 응축부의 온도를 비교하기 위해서는 Fig. 7의 파란 선과 같이 응축위의 X-방향으로 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그어 얻은 100개의 샘플을 통해 평균온도를 계산하여 비교하였다. 아울러 기본적으로 복사차단막의 유무와 T_{BASE}가 발전 성능을 좌우하는 온도이기 때문에 T_{BASE}온도에 대하여 기본구조인 Type A와의 비교를 수행하였다.

Fig. 8은 열복사차단막이 없는 경우와 차단막 있는 경우의 온도등고선이다. 결과에서 볼 수 있듯이 차단막이 있는 경우 저압용기의 응축부 부근에서의 온도분포가 차단막이 없는 경우보다 낮게 분포하며 온도 차이는 1.28K 정도였다. BASE의 평균 온도는 Type A가 30.97K 정도 높게 분포하였다.

Fig. 9에서 보면 Type B는 Type A 보다 BASE평균

온도가 4.23K 높게 유지되는 것으로 나타났으며 응축부의 평균온도는 705K 정도로 비슷한 형상을 나타내었다.

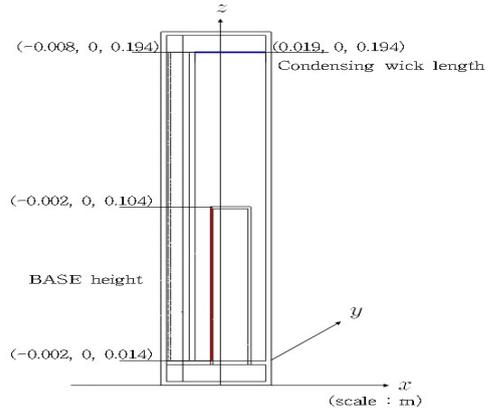


Fig. 7. Reference line of BASE height and condensing wick length

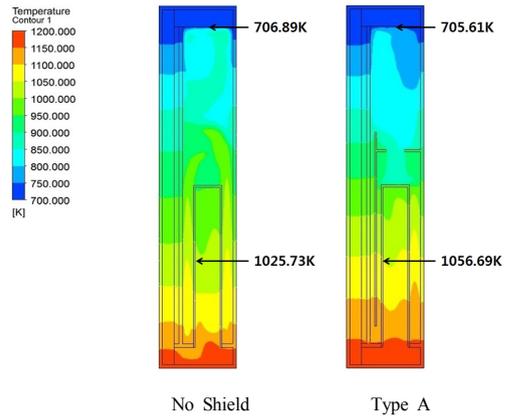


Fig. 8. Effect of Radiation Shield on TBASE.

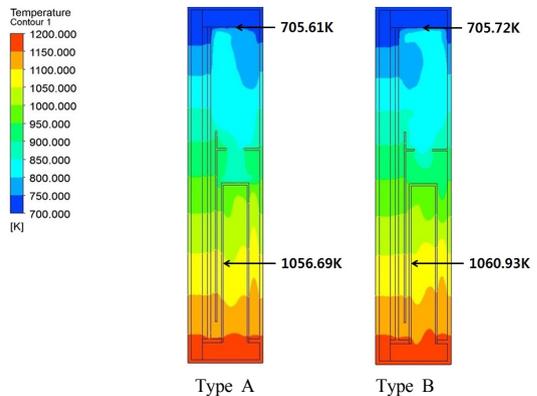


Fig. 9. Effect of Different Shape of Shield on TBASE.

Fig. 10는 복사차단막의 설치높이에 대한 해석결과이다. 그림에서 보듯이 Type D의 경우 BASE의 평균온도가 1058.75K로 가장 높게 유지되었다. 이는 복사차단막의 높이가 높으면 나트륨 증기의상승시간이 필요하여 BASE는 오히려 다소 높은 온도를 유지하는 것으로 판단되나 그리 큰 영향은 없었다.

Fig. 11은 Type A와 Type E의 온도등고선 비교이다. 단순히 증기이동통로의 수를 늘리고 전면적으로 증기는 빠른 이동이 가능하도록 Type E를 구현했으며, 해석결과 Type E는 1043.11K으로 Type A보다 13.58K 낮았고, 응축부의 온도는 Type A에서 0.49K정도 높은 분포를 나타냈다.

Fig. 12는 차단막의 층수에 대한 해석결과이다. Type F의 경우 차단막을 다층(Multi-Layers)으로 구성하였으며, 응축부의 온도가 706.22K으로 높게 분포되고 BASE 평균온도는 1028.36K으로 낮게 분포하였다. AMTEC의 발전량의 비교에 있어서 응축부와 BASE의 온도에 대한 무차원수(T_{Cond}/T_B)를 평가하는 것은 매우 중요하다. 온도에 대한 무차원수를 통해 식 (1)에서 전압을 구할 수 있으며, 전압을 토대로 발전량을 계산할 수 있다. Fig. 13는 각 타입 별 온도에 대한 무차원수와 발전량을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 온도에 대한 무차원수가 증가함에 따라 출력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 무차원수의 값이 가장 작은 형태는 Type B로서 약 0.665 정도였다. 이에 따른 출력은 17.69 W정도로 모든 Type의 출력 중 가장 우수한 출력을 나타내었다.

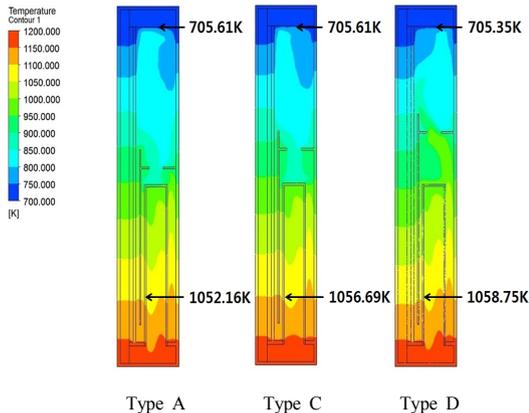


Fig. 10. Effect of Shield Height on TBASE..

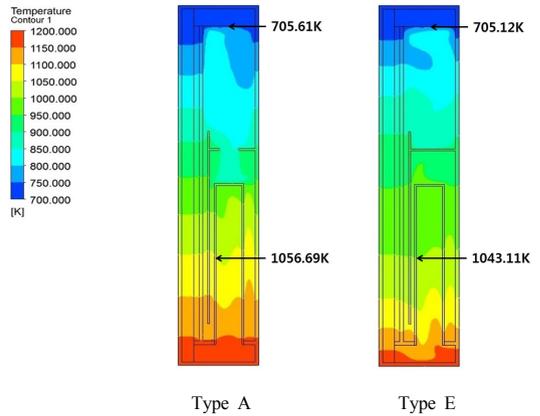


Fig. 11. Effect of Number of Vapor Passing Holes in Radiation Shield on TBASE.

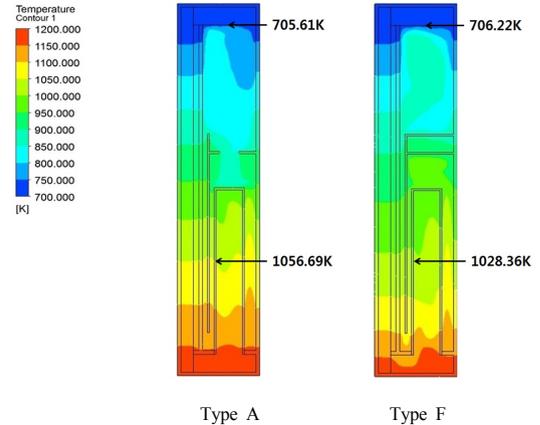
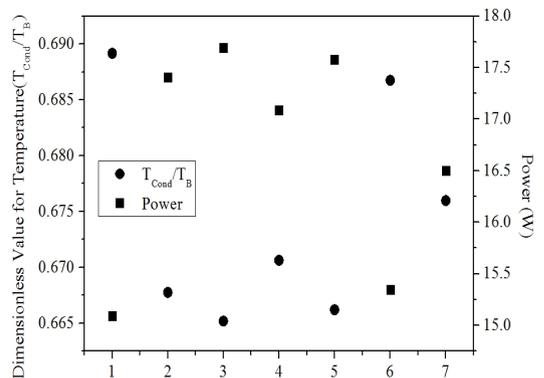


Fig. 12. Effect of Number of Shield Layer on TBASE.



1. No rad 2. Type A 3. Type B 4. Type C 5. Type D 6. Type E 7. Type F

Fig. 13. Dimensionless value for temperature and power depend on types of shield

아래의 Fig. 14은 BASE와 응축윅들의 온도를 비교한 그래프이다. 열복사차단막이 설치되지 않은 경우에서 BASE의 온도가 가장 낮고 응축윅의 온도가 가장 높게 분포함을 볼 수 있었으며, Type B의 경우 BASE의 온도가 가장 높게 분포하며 응축윅의 온도가 가장 낮게 분포함을 확인할 수 있었다. 모든 형태에서의 전압과 출력은 식 (1)과 (6)을 통해 계산할 수 있으며, Table. 3을 통해 확인할 수 있다.

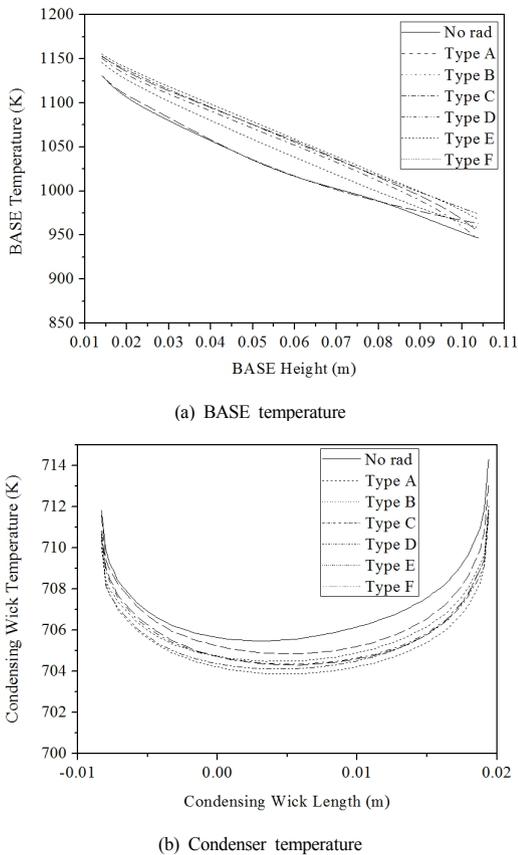


Fig. 14. Temperature profile

Table 3. Comparison of quantity of heat and power

	T_{BASE}	q_{heat}	Volt	Power
No shield	1025.73K	39.41W	0.68V	15.09W
Type A	1056.69K	27.92W	0.78V	17.41W
Type B	1060.93K	26.71W	0.79V	17.69W
Type C	1052.16K	28.94W	0.77V	17.09W
Type D	1058.75K	28.08W	0.79V	17.58W
Type E	1028.36K	38.80W	0.69V	15.35W
Type F	1043.11K	31.81W	0.74V	16.50W

4. 결론

본 해석은 AMTEC 시스템의 발전량 향상을 위하여 저압용기 내부의 6가지 형태의 열복사차단막에 따른 출력을 CFD 해석을 통하여 분석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가장 우수한 발전량을 나타내는 형상은 수직차단막에 곡률을 형성한 경우이며 발전량은 17.69W 정도로 계산되었다.
- 2) 높이에 따른 발전량의 차이에서는 수평차단막이 BASE 상부로부터 멀리 떨어진 경우 발전량이 가장 우수하며, 17.58W 정도로 나타났다.
- 3) 여러 개의 작은 홀과 다중 수평차단막을 설계한 경우는 기준이 되는 형상보다 오히려 발전량이 감소하였으며, 각각 0.91W, 2.06W 정도 감소하였다.
- 4) 결과를 토대로 가장 우수한 발전량을 내기 위한 형상은 수직차단막에 곡률을 형성하고, 수평차단막이 BASE 상부로부터 멀리 떨어져있는 경우로 판단된다. 하지만 수평차단막의 정확한 높이와 수직차단막의 곡률을 파악하기 위해서는 더 다양한 형상을 설계하여 비교를 진행하여야 할 것으로 판단되며, 전산해석의 결과는 완벽히 신뢰할 수 없으므로 실험을 통한 증명이 뒷받침 되어야 한다고 생각한다.

References

- [1] S. K. Woo et al., "Development of core and system technology for AMTEC by solar thermal," Research Report, KIER B22436, Korea Institute of Energy Research, pp. 185-207, 2012.
- [2] K. W. Lee, W. H. Lee, S. H. RHI, K. B. Lee, "Analysis of Pressure Drop and Heat Loss in Liquid Sodium Circulation Wick of AMTEC", KSME Journal B, Vol. 36, No. 9, pp. 953-954, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.9.953>
- [3] S. H. Rhi, K. B. Lee, K.L. Chai, Y. W. Kim, S. H. Lim, J. S. Lee, H. C. Hwang, "Study on the capillary circulation and Condenser performance of AMTEC system ", Research Report, KIER B32436, Korea Institute of Energy Research, 2013.
- [4] C. S. Mayberry, D. Radzykewycz, K. Reinhardt, Alkali metal thermal-to-electric converter development, Renewable energy 23, pp. 451-461, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00150-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00150-6)
- [5] J. M. Tournier, M. S. El-Genk, Lianmin Huang,

Experimental Investigations, Modeling, And Analyses Of High-Temperature Devices For Space Applications, Us Air Force and Institute for Space and Nuclear Power Studies Department of Chemical and Nuclear Engineering, University of New Mexico, 1999.

- [6] J. S. Lee, Characteristic Study of Thermal Radiative Effect on Low Pressure Chamber in AMTEC, A thesis for the degree of Master in Chungbuk National University, 2015.
- [7] ANSYS, Inc, ANSYS CFD FLUENT Heat Transfer & Multiphase Theory Guide, USA, 2013.
- [8] P. Asinari, *Radiation Heat Transfer : Basic Physics and Engineering Modeling*, POLITECNICO DI, TORINO, 2007.
- [9] ANSYS, Inc, ANSYS Fluent Theory guide, R-17, USA, 2016.

정 원 식(Won Sik Chung)

[정회원]



- 2016년 2월 : 충북대학교 공과대학 기계공학과 (기계공학사)
- 2016년 3월 : 충북대학교 공과대학 원 기계공학과 입학 (기계공학석사 이수중)

<관심분야>
기계공학, 열전달, 응용열공학

CHI RIGUANG

[정회원]



- 2010년 7월 : 중국 하얼빈공정대학교 (학사)
- 2015년 8월 : 한국 충북대학교 (석사)

<관심분야>
열 관련 에너지 분야

이 옥 현(Wook Hyun Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과 (공학석사)
- 2000년 7월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과 (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2002년 5월 : LG전자(주) 선임연구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 책임연구원

<관심분야>
열변환발전, 전열촉진 및 열교환, 냉동공조

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
난류유동, 유체기계, 전산유체

이 석 호(Seok-Ho Rhi)

[정회원]



- 1996년 3월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2000년 10월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
열교환기, 히트파이프, 열전발전, 열공학