

AMTEC의 소듐액체 순환회로에서 압력손실 및 열손실해석

이기우^{*†} · 이육현^{*} · 이석호^{**} · 이계복^{**}

* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구단, ** 충북대학교 기계공학부

Analysis of Pressure Drop and Heat Loss in Liquid Sodium Circulation Wick of AMTEC

Ki Woo Lee^{*†}, Wook Hyun Lee^{*}, Seok Ho Rhi^{**} and Kye Bock Lee^{**}

* Energy Efficiency Research Center, Korea Institute of Energy Research

** School of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received June 4, 2012 ; Revised July 13, 2012 ; Accepted July 13, 2012)

Key Words: AMTEC(금속유체열변환기), Capillary Wick(모세관윅), Porosity(기공률), Pressure Drop(압력손실), Evaporator Wick(증발부윅), Artery Wick(순환윅), Particle Size(입자크기)

초록: AMTEC기술은 열을 직접 전기로 변환시키는 기술로서 소듐을 작동유체로 사용하고 있으며, 작동유체의 순환은 모세관윅을 사용한다. 순환계통에는 증발부윅, 순환윅 및 응축부윅으로 구성되고, 각각의 윅은 소듐의 액체 또는 증기가 순환하면서 압력손실이 발생하므로 소듐의 순환을 위해서는 증발부윅의 모세관압력이 윅내의 총압력손실보다 커야만 한다. 본 연구에서는 100 watt급의 AMTEC시제품설계를 위해 소듐의 순환계통으로 구성되는 증발부윅, 순환윅 및 응축부윅에서의 압력손실과 증발부에서 응축부로의 열손실을 순환윅의 직경과 길이에 대해 분석하여 증발부윅의 소결입자 직경과 순환윅의 설계에 활용하고자 하였으며, 분석결과에서 순환계통의 총압력손실보다 큰 모세관압력을 위해서는 증발부윅의 소결입자크기는 10 μm 이 적합한 결과를 얻었다.

Abstract: An AMTEC (alkali metal thermal electric converter) is a device that is used for the direct conversion of heat to electricity. Sodium is used as the working fluid, and its circulation is driven by a capillary wick. The wicks used for circulation include an evaporator wick, artery wick, and condenser wick, and each wick has a pressure drop because of the circulation of liquid and vapor. For the circulation of sodium, the capillary pressure of the evaporator wick must be greater than the total pressure drop in the wicks. In this study, the pressure drop in the evaporator wick, artery wick, and condenser wick and the heat loss from the evaporator to the condenser through the artery wick were analyzed for the design of a 100 W AMTEC prototype. It was found that a particle diameter of 10 μm is suitable for the evaporator wick to maintain a capillary pressure greater than total pressure drop in the circulation loop.

- 기호설명 -

A_w : 윅 단면적 (m^2)
 d_i, d_o : 내경 및 외경 (m)
 d_p : 소결입자의 직경 (μm)
 D_{pg} : 중력에 의한 압력손실 (Pa)

D_{pl}, D_{pv} : 액체 및 증기에 의한 압력손실 (Pa)
 F_l, F_v : 액체/증기의 마찰계수 (N/m^2)/(W-m)
 g : 중력가속도 (m/s^2)
 h_{fg} : 소듐의 증발잠열 (J/kg)
 k : 열전도율 (J/kg-C)
 K_p : 침투율 (m^2)
 L : 길이 (m)
 M_a : 마하수
 P : 압력 (Pa)

† Corresponding Author, kwlee@kier.re.kr

© The Korean Society of Mechanical Engineers

- P_c : 모세관 압력 (Pa)
- r_p : 소결입자의 반경 (μm)
- r_c : 유효모세관 반경 (μm)
- Q : 가열량 (W)
- R : 레이놀드 수
- R_{vc} : 소듐증기의 가스상수(J/kg-K)
- U : 속도(m/s)

아래첨자

- art* : 순환
- cod* : 응축기
- evp* : 증발기
- grv* : 그루브
- wl* : 워크 액체

로마문자

- γ : 소듐 비열비(=1.67)
- ϵ : 기공률
- μ : 점성계수
- ρ : 밀도

1. 서 론

AMTEC(Alkali Metal Thermal Electric Converter)기술은 알카리금속인 소듐을 작동 유체로 하여 고온의 열을 직접 전기로 변환하는 기술이며, 소듐액체가 고온의 열원에 의해 고압영역인 증발부에서 증기상태로 변하여 소듐이온만 베타알루미나 고체 전해질(BASE, Beta Alumina Solid Electrolyte)로 통과하고, 자유전자들은 양극으로부터 전기부하로 통과하여 음극으로 돌아와서 저압영역의 BASE표면에서 나오는 이온과 재결합하므로써 전기를 발생하는 원리이다. 금속유체의 증발부와 응축부의 온도는 각각 900~1100 K와 500~650 K의 온도조건에서 소듐의 증발과 응축으로 열을 직접 전기로 변환하며 열전기변환효율은 35%이상도 가능한 특징을 갖고 있다.⁽¹⁾ AMTEC기술은 터빈과 같은 구동부품이 없이 소듐 증기의 이온만 통과시키면서 전기를 발생시키는 BASE의 특성을 이용하는 기술이며, 소듐의 증기발생에 외부열원을 사용하므로 화석연료를 포함하여 고온폐열, 태양에너지, 방사성 동위원소, 원자로 등의 다양한 열원을 사

용하여 직접 전기로 변환하는 장점을 갖고 있다. 특히 단위질량당 출력밀도가 태양광 발전, 스팀터 엔진에 약 2~3배 정도이므로 우주용, 군사용 및 고온폐열을 이용한 전원기술에 광범위하게 응용이 가능하고 액체금속의 순환을 위한 모세관위를 채용하므로써 기계적인 요소가 불필요하므로 장치의 안정성이 큰 장점을 갖고 있다. 또한 AMTEC기술은 열병합과 복합이용시에는 70%이상의 에너지 이용율을 향상시킬 수 있어 무소음 발전 및 에너지유효이용율의 증대와 피크부하저감 등에 활용이 큰 기술이라고 할 수 있다.

AMTEC기술은 1960년대 중반이후 작동원리, 설계 및 기술을 개발하기 시작하였으며, Ryan 등⁽²⁾은 1968년에 Ford Motor에 양도된 특허에서 BASE의 사용으로 소듐을 통해 전기로의 열변환을 설명했으며, Tournier와 El-Genk⁽³⁾는 AMTEC의 설계최적화에 대한 연구와 액체회환에 대한 모델해석을 수행하였다. Lodhi와 Briggs⁽⁴⁾는 AMTEC전극의 수명에 대한 온도효과 등을 수행하였다. 그러나 국내에서는 AMTEC기술에 대한 구체적인 연구실적이 없어 본 연구에서는 발전용량이 100 watt급인 AMTEC시스템을 개발하고자 Fig. 1과 같이, 증발부워내에 그루브를 형성시켜 증발부워내의 소듐액체를 히트파이프로 가열하고 발생된 소듐 증기는 그루브를 통해 유동이 가능한 AMTEC시스템의 설계를 위해 순환워 및 응축부워내의 압력손실과 열손실을 이론적 근거에 의해 분석하여 100 watt급의 AMTEC 설계자료로 활용코저 하였다.

2. 순환워의 압력 및 열손실의 이론적 분석

2.1 워의 입자크기에 따른 모세관압력

증발부워, 순환워 그리고 응축부워내의 총압력 손실은 증발부워의 소결입자에 의한 최대모세관 압력보다 작아야 하며, 최대모세관압력은 작동 유체인 소듐의 표면장력과 소결입자 직경의 함수로서 Chi⁽⁵⁾의 히트파이프이론에서 다음 식으로 나타내고 있다.

$$P_c = \frac{2\sigma}{r_c} \tag{1}$$

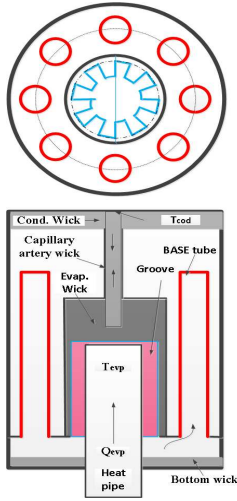


Fig. 1 100 watt prototype of AMTEC

여기서 r_c 는 유효모세관반경으로 소결위에서는 소결위 입자반경, r_p 에 0.41를 곱하여 사용하고 있다.

$$r_c = 0.41 r_p \quad (2)$$

작동유체의 표면장력은 온도의 함수이므로 온도에 따른 모세관압력을 식 (1)을 사용하였다.

2.2 증발부위의 압력손실

발전용량이 100 watt급인 AMTEC시스템의 증발부는 Fig. 2와 같이 증발부의 내부에 그루브를 형성하여 증발부위내에서 발생하는 증기를 배출할 수 있도록 하였으며, 가열은 히트파이프를 증발부 중앙에 삽입하여 사용토록 구성하였다. 증발부내의 소듐액체가 유동하는 부분의 압력손실, D_{plevp} 의 계산을 위해 증발부위의 침투율, K_{pevp} 와 액체유동마찰계수, F_{levp} 는 Chi⁽⁵⁾의 히트파이프이론에서 다음의 식으로 계산한다.

$$K_{pevp} = \frac{r_{pevp}^2 \epsilon_{evp}^3}{37.5(1 - \epsilon_{evp})} \quad (3)$$

$$F_{levp} = \frac{\mu_l}{K_{pevp} A_{wevp} h_{fg} \rho_l} \quad (4)$$

여기서, 증발부에서 액체가 유동하는 부분의 직경을 d_{ievp} 라고 하면 단면적, A_{wevp} 는

$$A_{wevp} = \frac{\pi d_{ievp}^2}{4} \quad (5)$$

로 계산되므로 증발부내의 액체유동길이, L_{evp} 라고 하면 증발부위내에서의 액체유동에 의한 압력손실, D_{plevp} 은 다음과 같이 계산된다.

$$D_{plevp} = F_{levp} Q_{evp} L_{evp} \quad (6)$$

그리고 증발부에서 발생하는 소듐증기의 배출은 증발부위 내면의 그루브를 통해 배출하므로 그루브내에서의 소듐 증기유동에 의한 압력손실, D_{pvevp} 는 그루브내의 증기마찰계수, F_{vevp} 와 가열량, Q_{evp} 및 그루브의 길이, L_{grv} 로부터 계산한다. 여기서 가열량은 1 kW로 하였다.

$$D_{pvevp} = F_{vevp} Q_{evp} L_{grv} \quad (7)$$

여기서 그루브내의 증기마찰계수, F_{vevp} 는 그루브의 수력반경, R_{hv} 와 그루브의 단면적으로부터 레이놀드수와 증기유속의 마하수를 계산하여 그루브내 소듐증기의 레이놀드수가 2,100이하이고, 마하수가 0.2이하인 경우에는 소듐증기의 마찰계수는 Chi⁽⁵⁾의 히트파이프이론에 의해 다음 수식으로 계산한다.

$$F_{vevp} = \frac{16\mu_v}{2R_{hv}^2 A_{wgrv} \rho_v h_{fg}} \quad (8)$$

따라서 그루브내면의 직경 d_{igrv} , 그루브외경 d_{ogrv} 그리고 그루브부분의 내면의 전체 원주길이에 대한 비율을 40 %로 하였으므로 그루브의 단면적, A_{wgrv} 은 다음과 같이 구한다,

$$A_{wgrv} = \frac{\pi(d_{ogrv}^2 - d_{igrv}^2) * 0.4}{4} \quad (9)$$

여기서, $d_{igrv}=0.0432$ m, $d_{ogrv}=0.0752$ m이다. 따라서 이러한 조건에서 그루브내의 증기유속, U_{grv} 에 의한 레이놀드수, R_{evp} 와 마하수, M_{agrv} 가 각각 2,100과 0.2이하인지를 검토하여야 한다.

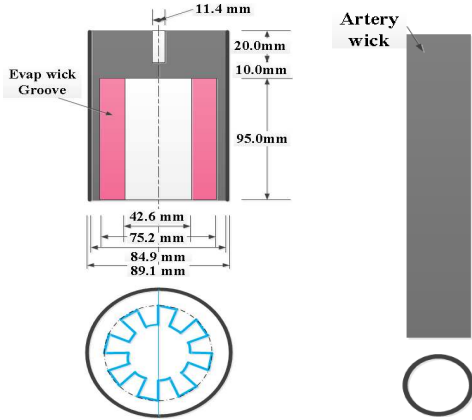


Fig. 2 Evaporator and artery wick

$$U_{grv} = \frac{Q_{evp}}{h_{fg}\rho_v A_{grv}} \quad (10)$$

$$R_{evp} = \frac{\rho_v U_{grv} (2R_{hv})}{\mu_v} \quad (11)$$

소듐증기의 마하수, M_{agr} 는 소듐증기의 속도/음속의 비로 다음과 같이 나타내고 있다.

$$M_{agr} = \frac{U_{grv}}{U_{air}} \quad (12)$$

따라서 공기유속, U_{air} 는

$$U_{air} = \sqrt{\gamma R_{vc} T_v} \quad (13)$$

로 나타내고 있으며, 여기서 R_{vc} 는 소듐증기의 가스상수로서 361.48 J/kg.K 이며, γ 는 소듐증기의 비열비로서 1.67이다.

2.3 순환웁에서의 압력손실

AMTEC시스템의 순환계통에서 압력손실이 크게 발생하는 부분은 순환웁이며, 압력손실을 감소시키기 위해 순환웁의 직경을 증가시키면 증발부로부터 응축부로의 열손실이 증가하게 되고, 열손실을 감소시키기 위해 길이를 증가시키면 압력손실이 증가하므로 설계에 최적조건을 찾아야 한다. 본 해석에서는 Fig. 2와 같이 순환웁을 제작하여 증발부웁의 상부에 삽입하여 연결하는 것으로 하였으며, 증발부에서 발생한 소듐의 유

량이 순환웁을 모두 유동하는 것으로 가정하여 계산하였으나, 실제의 시스템에서는 증발부에서 발생하는 소듐의 증기는 일부분만이 순환웁을 유동한다. 순환웁에서의 액체유동에 의한 압력손실, D_{plart} 는 다음 식으로 표시된다.

$$D_{plart} = F_{lart} Q_{evp} L_{art} \quad (14)$$

여기서, F_{lart} 는 순환웁내의 액체유동마찰계수이며, L_{art} 는 순환웁의 유동길이이다. 순환웁의 모세관입자의 반경 r_{part} , 순환웁 직경 d_{art} 그리고 기공률을 ϵ_{art} 라 하면 액체압력손실계산에 필요한 함수로서 소듐의 액체가 순환웁내의 투과성을 나타내는 참투율은 Chi⁽⁵⁾의 다음 식으로 계산한다.

$$K_{part} = \frac{r_{part}^2 \epsilon_{art}^3}{37.5(1 - \epsilon_{art})} \quad (15)$$

그리고 순환웁의 단면적, A_{wart} 은

$$A_{wart} = \frac{\pi d_{art}^2}{4} \quad (16)$$

이며, 순환웁내의 유동마찰계수, F_{lart} 는 다음의 식으로 계산된다.

$$F_{lart} = \frac{\mu_l}{K_{part} A_{wart} h_{fg} \rho_l} \quad (17)$$

2.4 응축부웁에서의 압력손실

응축부웁은 소듐의 증기를 응축시키는 역할과 흡수하여 순환웁으로 소듐의 액체가 유동하도록 하는 것이다. 따라서 Fig. 3과 같이, 중앙에 순환웁을 삽입할 수 있도록 하였으며, 응축부웁의 압력손실은 중력에 의한 압력손실, D_{pgcod} 과 웁내에서의 액체유동에 의한 압력손실, D_{plcod} 이 있으며, 각각 다음의 식으로 계산한다.

$$D_{pgcod} = \rho_l g L_{ec} \quad (18)$$

$$D_{plcod} = \frac{m \mu_l r_{cod}}{K_{pcod} \rho_{cod} A_{wc}} \quad (19)$$

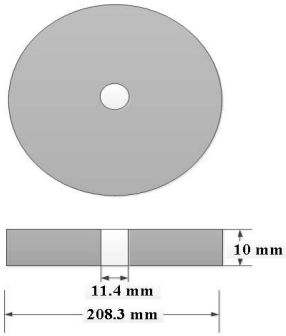


Fig. 3 Condenser wick

여기서, L_{ec} 는 증발부에서 응축부까지의 높이 차이이고, r_{cod} 는 응축부위의 반경이며, A_{wc} 는 응축부에서 순환위로 연결하는 부분의 유동면적, 그리고 K_{pcod} 는 응축부위의 침투율로 Chi⁽⁵⁾의 히트파이프이론에서 다음과 같이 나타낸다.

$$K_{pcod} = \frac{r_{pcod}^2 \epsilon_{cod}^3}{37.5(1 - \epsilon_{cod})} \quad (20)$$

여기서, r_{pcod} 는 위의 입자반경이며, ϵ_{cod} 은 응축부위의 기공률이다.

2.5 순환위를 통한 열손실

AMTEC시스템에서는 응축부에서 응축된 소듐의 액체는 순환위를 통해 증발부로 귀환되며, 순환위의 직경을 크게 하면 순환위에서의 압력손실은 감소하지만 증발부로부터 응축부로의 열손실이 증가하게 되므로 순환위의 직경과 길이의 설계에서 우선적으로 순환위를 통한 열손실을 검토하여야 한다. 열손실은 Fourier의 열전도에 의해 열전도율과 온도차 그리고 단면적의 함수이므로 소결위의 재료에 대한 열전도율과 기공률속에 채워지는 소듐 액체의 열전도율에 의해 다음 식으로 계산한다.

$$k_{wl} = \frac{k_l(k_x + 2(1 - \epsilon_{art}))}{(k_x - (1 - \epsilon_{art}))} \quad (21)$$

여기서, k_x 는

$$k_x = \frac{(k_w + 2k_l)}{(k_w - k_l)} \quad (22)$$

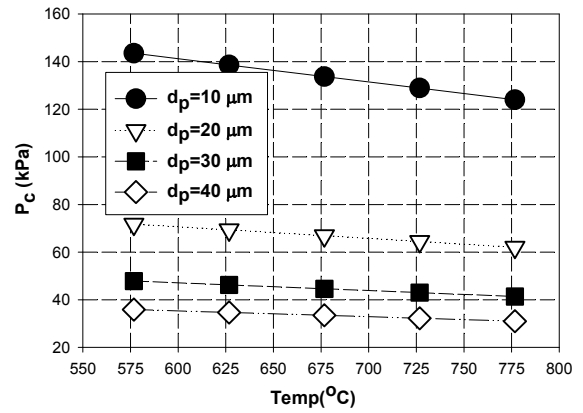


Fig. 4 Capillary pressure by temperature and effective diameter of particle

이며, k_w, k_l 은 각각 소결입자와 소듐액체의 열전도율이다. 따라서 증발부에서 응축부로의 순환위를 통한 전도에 의한 열손실은 단면적을 A_{wart} , 증발온도 T_{evp} , 응축온도 T_{cod} 라 하면 다음 식으로 계산된다.

$$Q_{art} = k_{wl} A_{wart} \frac{T_{evp} - T_{cod}}{L_{ec}} \quad (23)$$

3. 압력손실 및 열손실의 해석결과 고찰

3.1 순환위 입자크기에 따른 모세관압력

작동유체인 소듐의 순환은 소결위의 모세관압력을 이용하며, 모세관압력은 소결입자의 크기와 온도에 직접적으로 영향을 받으며 소듐의 사용온도와 소결입자의 크기에 따른 모세관압력을 Fig. 4에 나타내었다. 소결입자의 직경이 40 μm 일 때는 모세관압력이 35 kPa범위에 있으며, 입자의 크기를 10 μm 으로 하면 온도가 약 575 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 142 kPa에서 온도가 상승하여 약 775 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 123 kPa의 범위에 있다. 따라서 순환계통의 총압력손실보다 모세관압력이 크도록 소결입자의 크기를 선정해야만 작동유체가 순환을 하게 된다.

3.2 증발부내의 소듐유동 압력손실

증발부내 소듐액체의 가열에 히트파이프를 이용하도록 하였으며 증기는 그루브를 통해 배출되므로 증기의 밀도가 증기속도에 영향을 미치게

된다. Fig. 5는 증기온도에 따른 밀도를 나타낸 것으로 사용온도 약 575 °C일 때 0.01 kg/m³에서 증기온도 775 °C일 때 약 0.1 kg/m³으로 사용온도에 따라 크게 변화하므로 그루브의 단면적설계도 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 100 watt급의 시제품설계에서 그루브의 높이와 증기온도에 따른 그루브내의 압력손실을 나타낸 것으로 그루브의 높이를 4 mm에서 16 mm로 변화하여도 증기유속에 따른 압력손실은 0.13 kPa 이하이므로 큰 영향은 없는 것으로 알 수 있다. 그러나 그루브의 높이가 너무 작으면 그루브내의 증기유속이 음속보다 클 수 있으므로 그루브의 높이를 시제품에서는 16 mm로 하였다.

그리고 Fig. 7은 순환웍을 통해 응축부에서 내려오는 소듐 액체가 증발부웍을 통해 가열부로 유동하는 부분의 압력손실을 나타낸 것으로 작동 유체의 순환계통에서 발생하는 총압력손실보다 큰 모세관압력을 유지하여야 하는 부분이다. 따라서 소결입자의 직경이 크면 유동압력손실이 작아서 좋은 점도 있지만, 총순환계통에서 발생하는 압력손실보다 모세관압력이 더 크게 유지시켜줘야 하므로 소결입자를 크게만 할 수는 없다.

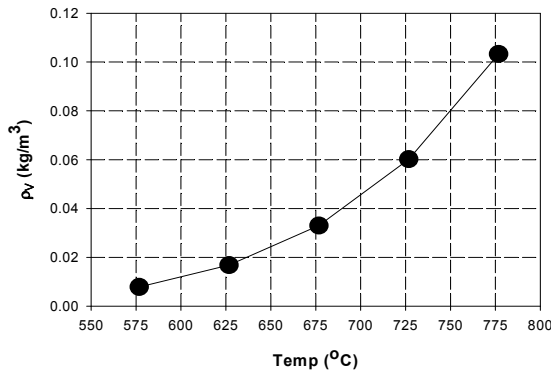


Fig. 5 Specific density of sodium vapor by temperature

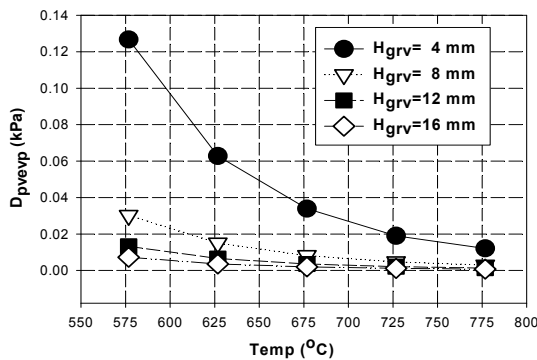


Fig. 6 Pressure drop in evaporator groove

본 시제품의 설계에서는 총압력손실을 고려하여 소결입자의 직경을 10 μm으로 하였으므로 증발부웍에서의 압력손실은 2.0 kPa에서 1.8 kPa까지 발생하는 것으로 파악되었다.

3.3 순환 웍내의 소듐유동 압력손실

Fig. 8은 순환웍의 직경을 11.4 mm, 길이 75 mm 그리고 웍의 기공률을 50 %로 하여 소결입자의 직경을 30 μm, 40 μm 및 50 μm으로 하고, 액체의 온도를 300 °C에서 400 °C까지 변화시켰을 경우에 순환웍 소결입자의 직경에 따른 압력손실을 나타낸 것이다. 응축부의 온도에 따라서는 압력손실에 대한 변화는 크지 않지만, 온도 300 °C이고 입자의 직경이 50 μm일 때는 16 kPa이지만 입자의 직경을 30 μm으로 하면 43 kPa까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 순환웍의 소결입자 직경을 작게 할수록 압력손실이 크게 증가하게 되므로 필요이상으로 소결입자의 직경을 작게 할 필요는 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 시제품에서는 소결입자의 직경을 40 μm으로 하였다.

그리고 Fig. 9는 순환웍의 직경을 11.4 mm, 소결입자의 직경 40 μm, 응축온도 325 °C로 하여 소결입자의 기공률과 순환웍의 길이에 따른 압력손실을 나타낸 것이다. 소결입자의 기공률과 길이에 따라 압력손실이 매우 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 길이 75 mm일 때에 기공률을 40 %에서 60 %로 증가시키면 압력손실은 45 kPa정도가 감소하므로 순환웍을 제조할 때에 가능하면 기공률을 크게 하는 것이 압력손실이 크게 줄어들고 소결입자의 직경을 크게 하여 더욱 압력손실을 감소시킬 수 있게 된다.

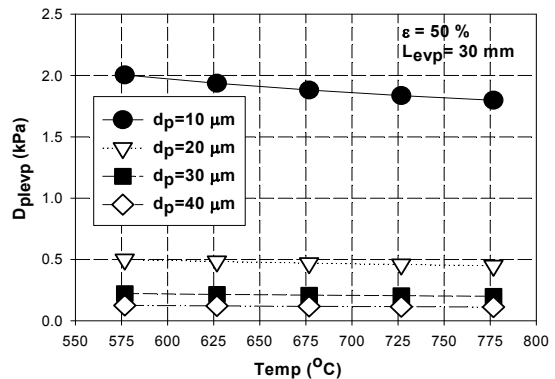


Fig. 7 Pressure drop of liquid flow in evaporator by particle diameter

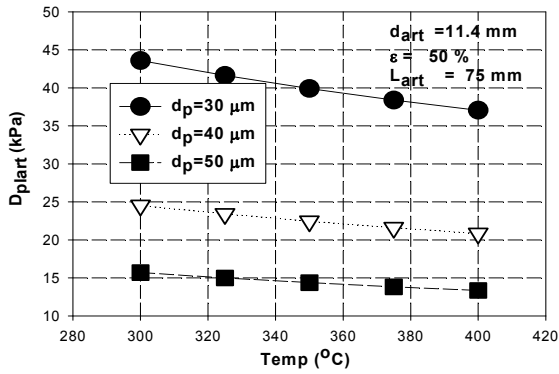


Fig. 8 Pressure drop in artery wick by Tcod and particle diameter

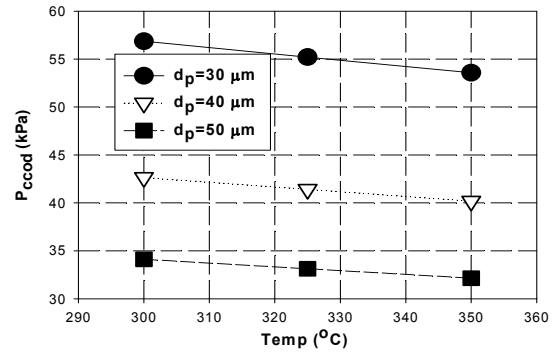


Fig. 10 Capillary pressure in condenser wick by Temperature and particle diameter

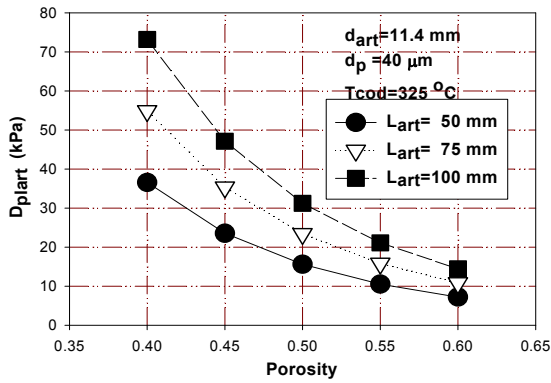


Fig. 9 Pressure drop in artery wick by porosity

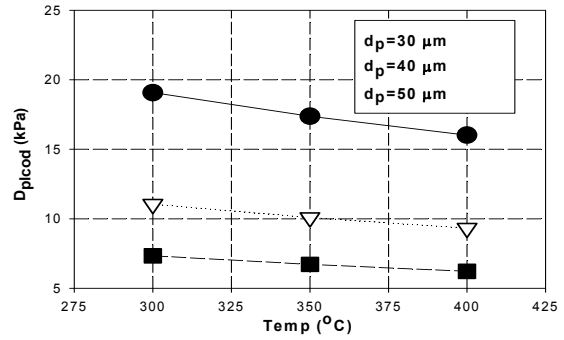


Fig. 11 Pressure drop in condenser wick by temperature and particle diameter

3.4 응축부위내의 압력손실

Fig. 10은 응축부에 사용하는 소결입자의 직경을 30 μm, 40 μm 및 50 μm으로 하는 경우에 최대모세관압력을 응축온도에 따라 나타낸 것이고, Fig. 11은 응축부위의 소결입자를 30 μm, 40 μm 및 50 μm으로 하는 경우에 응축부위에서 발생하는 총압력손실을 증력의 영향까지 포함하여 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11에서 응축온도를 300 °C로 하고 소결입자의 직경을 50 μm로 하는 경우에는 최대모세관압력은 34 kPa이고, 응축부위내에서의 총압력손실은 약 7.2 kPa이며, 소결입자의 직경을 30 μm으로 하면 최대모세관압력은 57 kPa이고 이 때의 압력손실은 약 19 kPa이 된다. 소결입자의 직경을 작게 하면 최대모세관압력도 증가하지만, 응축부위내에서 발생하는 압력손실도 증가하게 되므로 응축부위내에 작동유체의 액체가 유지될 수 있는 정도라면 소결입자의 직경을 크게 하여 압력손실을 감소시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.5 순환위내의 열손실

AMTEC시스템에서 순환위의 직경과 길이를 설계하기 위해서는 순환위내의 압력손실도 작게 하여야 하지만 증발부로부터 응축부로 순환위를 통해 열손실이 발생하게 되므로 직경과 함께 길이를 최적조건으로 설계하여야 한다. Fig. 12는 순환위의 직경을 11.4 mm, 응축부온도를 300 °C로 하고 길이와 증발부온도를 변화시키는 경우에 열손실을 나타낸 것이다. 순환위의 길이가 작을수록, 증발온도가 높을수록 열손실은 증가하며, 증발온도 약 775 °C일 때 순환위의 길이를 100 mm에서 50 mm로 줄이면 약 9 watt의 열손실이 증가하며, 순환위의 길이 75 mm에서 직경을 15.4 mm로 증가시키면 약 20 watt의 열손실이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 증발온도 776.9 °C, 응축온도 400 °C 그리고 순환위의 직경을 11.4 mm로 하여 기공률의 변화에 따른 열손실을 나타낸 것으로 기공률의 변화에 따라 영향을 받지만, 그 영향은 크

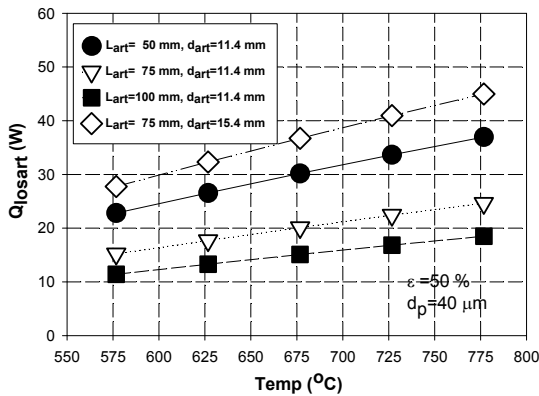


Fig. 12 Heat loss through artery wick by temperature

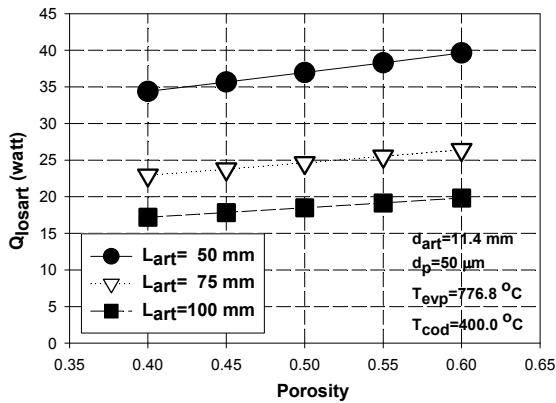


Fig. 13 Heat loss through artery wick by porosity

지 않으며 오히려 길이의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 순환웁의 설계는 길이를 길게 할수록 열손실은 감소하지만, 압력손실이 증가하므로 압력손실의 허용범위내에서 길이와 직경을 설계하여야 한다.

4. 결론

발전용량이 100 watt급인 AMTEC시제품 설계를 위해 AMTEC시스템에서 소듐의 순환웁 계통으로 구성되는 증발부웁, 순환웁 및 응축부웁 내에서 소듐의 액체의 유동에 의해 발생하는 압력손실과 증발부로부터 응축부로의 열손실을 증발부와 응축부 온도, 순환웁의 직경과 길이에 대해 이론적으로 분석하였으며, 증발온도 775 °C,

응축온도 300 °C에서 증발부웁의 소결입자 직경을 10 μm, 순환웁의 소결입자의 직경을 40 μm, 그리고 응축부웁의 소결입자 직경을 40 μm으로 하면 각각의 웁에서 발생하는 총압력손실 37.8 kPa로 계산되었다.

증발부웁의 소결입자 직경은 순환계통의 총압력손실보다 큰 모세관압력을 갖기 위해서는 증발부의 소결입자를 20 μm으로 하면 이 때의 모세관압력이 61 kPa이므로 소듐의 순환이 가능하다는 결과를 얻었다. 그러나 본 분석에서는 순환웁의 핵심 요소에 대해서만 분석을 하였으므로 실제 시스템에서 발생이 가능한 베타알루미나 전해질에서의 압력손실을 고려하여 증발부의 소결입자 직경을 10 μm으로 결정하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요연구 사업으로 수행한 연구결과임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Schuller M., Brad F., Hudson P. and Imran K., 2000, "Performance Measurements of Advanced AMTEC Electrodes," *Space Technology and Applications International Forum-2000*, pp. 1371~1376.
- (2) Ryan M.A., Williams R.M., Lara L., Fiebig B.G., Cortez R.H., et al., 2001, "Advances in Electrode Materials for AMTEC," *Space Technology and Applications International Forum-2001*, pp. 1088~1093.
- (3) Tournier, J.M. and El-Genk, M.S., 2003, "Design Optimization of High-Power, Liquid Anode AMTEC," *Space Technology and Applications International Forum-STAIF 2003*, pp.740~750.
- (4) Lodhi, M.A.K. and Briggs, J.B., 2007, "Temperature Effect on Lifetimes of AMTEC Electrode," *Journal of Power Sources* 168, pp. 537~545.
- (5) Chi, S.W., 1976, "Heat Pipe Theory and Practice a Sourcebook," McGraw-Hill Company.