

소형 모세관식 알카리 금속 열전변환소자의 사이클해석

윤석구* · 구재현* · 이재근** · 田中 耕***

Cycle Analysis of an Alkali Metal Thermo-Electric Converter for Small Capillary Type

Suk Goo Yoon, Jae Hyun Ku, Jae Keun Lee and Kotaro Tanaka

Key Words: Direct Energy Conversion(직접에너지변환), Thermoelectric Conversion(열전변환), Solid Electrolyte(고체 전해질), Capillary(모세관), Alkali Metal(알카리금속)

Abstract

This paper describes the design of a small size Alkali Metal Thermal to Electric Converter (AMTEC) which employs a capillary structure for recirculating sodium working fluid. The cycle is based on the simple and small capillary type β'' -alumina and wick tube element. The proposed cell consists of the 37 conversion elements with capillary tube of 50 μ m in diameter and the sealed cylindrical vessel of 22 mm in outer diameter. Results on the cycle analysis of sodium flow and heat transfer in the cell showed that the expected power output was 4.65 W and the conversion efficiency was 19% for the source temperature of 900 K.

기호설명

F : 패러데이 상수 [C/mol]

D : 직경 [m]

J : 출력전류밀도 [A/cm²]

L : 길이 [m]

P : 압력 [Pa]

Q : 열량 [W]

T : 온도 [K]

μ : 점성계수 [Pa s]

σ : 표면장력 [N/m]

c_v : 용기내의 열전달

c_w : 위크의 열전달

e : 증발

f : 유동

g : 중력

p_e : 다공성 전극

s : 나트륨

w : 위크

<아래첨자>

c : 모세관

* 부산대학교 공과대학 대학원

** 부산대학교 기계공학부

*** Shizuoka Institute of Science and Technology, Japan

1. 서론

알카리 금속 열전변환(AMTEC : Alkali Metal Thermal to Electric Converter)은 β'' -알루미나 고체 전해질인 Na 이온전도성을 이용해서 열에너지로부터 전기에너지로 직접변환하는 발전방식이다. AMTEC의 발전방식은, 간단한 구조로 통

에 접속된 외부 부하에 전력을 발생하고 다공성 박막전극에 도달한다. 응축된 액체 나트륨은 다시 전자기펌프나 위크로 고온부분으로 공급시켜 연속적으로 발전을 하게 하는 사이클이 형성된다.

3. 성능해석 방법

AMTEC사이클은 나트륨의 순환에 의해 성립되며, 이 순환에서 중요한 것은 모세관부의 압력차이다. 모세관부로부터의 압력증가 ΔP_{wc} 는 작동 온도 T_2 와 T_1 에 대응하는 나트륨 증기압력차 ($P_2 - P_1$)보다 클 필요가 있으며 나트륨이 이동하기 위해서는 그림에서 제시한 각 압력손실항의 합보다 클 필요가 있다. 저온부분으로부터 BASE의 음극으로 나트륨이동에 대하여, 각 압력손실에 관한 조건은 식 (1)로 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\Delta P_{wc} \geq (P_2 - P_1) + \Delta P_{wf} + \Delta P_{ve} + \Delta P_{if} + \Delta P_{uc} + \Delta P_g \quad (1)$$

여기서, ΔP_{wf} 는 모세관내의 나트륨액상유동의 압력손실이고, ΔP_{ve} 및 ΔP_{uc} 는 나트륨증발 및 응축에 관한 압력손실이며, ΔP_{if} 및 ΔP_g 는 기상의 유동 및 수두차에 관한 압력손실 항이다. Fig. 3은 소형 모세관식 발전소자의 구성을 나타낸 것으로서 하나의 고체 전해질관의 하부에 한 개의 모세관을 부착한 형태로 구성되는 간단한 구조를 갖는 것이 특징이다. 나트륨액은 하부로부터 모세관 내부를 상승하여 전해질관 내의 음극에 공급된다. 종래의 형식과 비교하면 용기 내 분할점의 접촉 셀 구조, 지지구조 등의 부품이 간략화가 가능하고 셀 부품의 제작과 조립이 간단히 된다는 점이 기대된다. 그러나 하부에 Na액이 모이는 형식은 설치방향에 제약을 받기 때문에 지상이용에 한정된다.

3.1 모세관부의 압력

모세관경이 감소하면 모세관 압력차는 증가하나, 유동 압력손실은 크게 된다. AMTEC의 작동

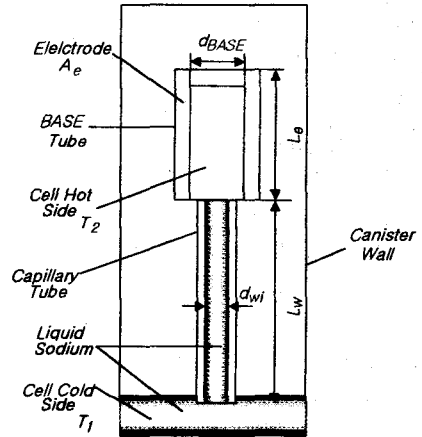


Fig. 3 Schematic diagram of wick type elements

조건에 대응하는 Parameter설계가 필요하여 Fig. 3에 나타낸 각 부분의 치수에 대해 검토를 하였다. 모세관 내경이 d_{wi} 일 때, 모세관 압력차 ΔP_{wc} 는 다음과 같은 식으로 구해질 수 있다.

$$\Delta P_{wc} = 4 \sigma_s / d_{wi} \quad (2)$$

여기서, σ_s 는 나트륨의 표면장력이다. AMTEC의 발전출력과 관련시킨 유동압력 손실 ΔP_{wf} 는 다음과 같은 식에 의해 계산되어진다.

$$\Delta P_{wf} = \frac{32 \mu_s L_w j M r_{ew}}{F \rho_s (d_{wi})^2} \quad (3)$$

여기서, μ_s , ρ_s , M 는 나트륨의 점성계수, 밀도, 몰비질량이고, F 는 Faraday정수이다. Parameter인 r_{ew} 는 전극면적과 모세관 단면적의 비(A_e/A_w)이다. 또한, 모세관의 길이 L_w 는 50 mm로 정했다.

3.2 모세관부에서 Anode전극부 사이의 압력손실

모세관의 끝 부분에서 나트륨이 증발할 때의 압

력차 ΔP_{ve} 와 증기유동 압력손실 ΔP_{vf} 는 각각 다음과 같은 식으로 계산되어진다.

$$\Delta P_{ve} = \frac{r_{ev} j M (2 \pi R T_2)^{0.5}}{2 F} \quad (4)$$

$$\Delta P_{vf} = \frac{128 \mu_{sv} L_e j M A_w r_{ev}}{\pi (d_{BASEi})^4 \rho_{sv} F} \quad (5)$$

여기서, R는 가스상수이고 L_e 및 d_{BASEi} 는 고체 전해질부분의 길이와 내경이다.

4. 성능해석 결과

4.1 모세관부의 압력

Fig. 4와 Fig. 5는 나트륨의 포화증기압력을 온도의 함수로 하여 계산해서, 고온부분의 온도 T_2 을 가로축에, $\Delta P_{wc} - (P_2 - P_1)$ 을 세로축에 나타낸 것이다.

Fig. 4는 각 모세관경에 대한 최고 작동온도를 나타낸 것으로서 T_2 를 800~1200 K, T_1 을 500 K일 때의 온도와 내경이 100~5 μm 로 했을 때의 변수로 구한 값이다. T_1 이 400~700 K까지의 각각의 조건에서도 Fig. 4와 같은 경향성이 나타남을 알 수 있었다. AMTEC의 작동온도 조건으로서 $T_1=500$ K으로 했지만, P_1 은 이 온도에서 1 Pa 이하로 그 영향은 적다. 세로축인 $\Delta P_{wc} - (P_2 - P_1)$ 은 나트륨의 유동이 없는 상태에서 모세관부의 압력차를 나타내는 것으로서 곡선이 가로축과 거의 수직으로 교차하는 점은, 각 모세관의 내경 d_{wi} 에 대응하는 최대이용온도이다. 그림으로부터, $d_{wi} = 100 \mu\text{m}$ 일 때 T_2 의 최대치는 약 920 K, 50 μm 일 때는 975 K, 25 μm 일 때는 1025 K가 된다.

Fig. 5는 하나의 모세관 내경에 대한 고온부에서의 적합한 최대이용 온도범위를 나타낸다. 100 μm 일 때 910~930 K, 75 μm 일 때 930~950 K, 50 μm 일 때 965~980 K, 25 μm 일 때 1020~1040 K, 10 μm 일 때 1105~1130 K, 5 μm 일 때 1180~1200 K의 온도가 최대이용 온도임을 알 수 있다.

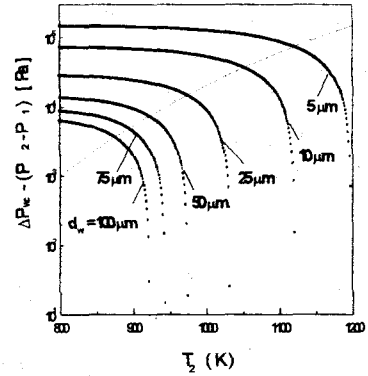


Fig. 4 Capillary Pressure as a function of T_2 at $j=0$, $T_1 = 500$

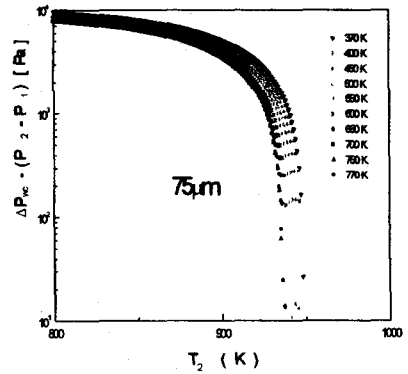


Fig. 5 Limit temperature as a function of $d_{wi} = 75 \mu\text{m}$

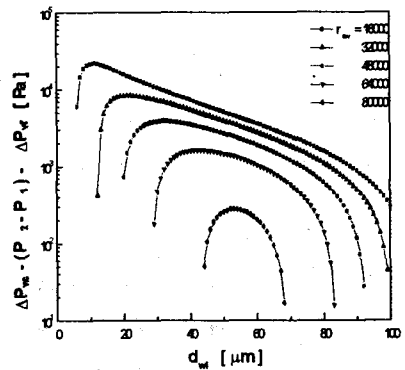


Fig. 6 Capillary pressure as a function of d_{wi} at $T_2 = 900$ K

AMTEC는 통상 열기관과 같이 최대변환효율은 Carnot효율에 제한되어서 T_2 을 보다 높이 함으로써 그 성능은 향상된다. 현재 연구가 진행되고 있는 우주용 AMTEC셀의 고온부분의 온도는 1100 K 이상이다. 그러나 이 온도영역에 있어서는 재료의 문제점이 지적되어진다. 그러한 고급 재료를 이용해서 해결하는 방법으로는 지상이용 셀에는 적합하지 않다는 것을 지적할 수 있다. 본 연구에서는 지상이용을 목적으로서 하고 있고, 고온부 온도 T_2 를 900 K으로 설정했다.

Fig. 6은 $T_2 = 900$ K이고, 발전부분의 전극면 적당 전류밀도가 $j = 2 \times 10^3$ A/m²일 때의 유동 압력손실 ΔP_{wf} 을 포함한 모세관부의 압력차를 계산한 결과이다. 그림에서 각 곡선의 밑 부분의 범위가 AMTEC의 작동조건을 나타내고 있고, 이 그림으로부터 r_{ew} 와 d_{wi} 관계를 구할 수 있다.

즉, 같은 r_{ew} 일 때 d_{wi} 를 증가시키면 모세관력 ΔP_{wc} 가 작게되고, 또 반대로 d_{wi} 를 감소시키면 ΔP_{wc} 는 커진다.

Fig. 7에서는 온도변화에 따른 모세관의 압력차를 보여준다. 각 내경에서 온도가 증가함에 따라 ΔP_{wc} 가 감소됨을 알 수 있다.

유동압력손실 ΔP_{wf} 의 증가를 유도하기 위해서는, 어떠한 관의 경에 대해서 얻어지는 압력차를 이끌어 내어야하는데, 여기서는 $r_{ew} = 48000$, $d_{wi} = 50 \mu\text{m}$ 을 선정했다. 이 조건에서의 압력차 $\Delta P_{wc} - (P_2 - P_1) - \Delta P_{wf}$ 는 약 2 kPa이 된다. 그리고 수두차에 의한 압력차 ΔP_g 는 약 400 Pa으로 계산되어 남은 압력차는 1600 Pa이 된다.

4.2 모세관부에서 Anode전극부 사이의 압력손실 식 (4)와 식 (5)에서 $r_{ew} = 5 \times 10^4$ 일 때의 ΔP_{ve} 의 계산 값은 540 Pa이 되고, d_{BASEI} 을 1 mm로 하면 L_e 는 21 mm로 계산되어진다. 이 때의 ΔP_{wf} 는 0.01 Pa로 아주 작은 값이다. 또 응축에 의한 압력손실 ΔP_{vc} 도 증발과 비교해서 응축면

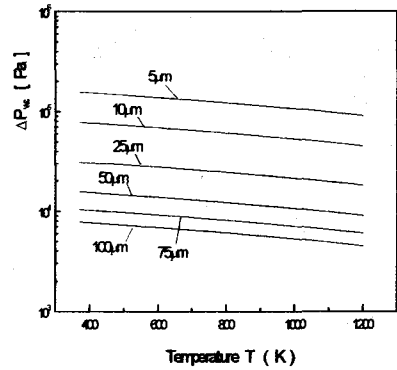


Fig. 7 Difference of capillary pressure as a function temperature

적이 크기 때문에 무시할 수 있을 정도로 작다. 이상으로, 결정된 parameter에 의한 압력차는 식 (1)을 만족하고 있고, 50 μm의 모세관에 의한 셀 구성이 가능하게 된다.

4.3 열 이동에 따른 성능관계

전극부분의 성능은 종래의 측정치로부터 유도해 낸 해석수법⁽⁶⁾에 의해 출력 전력밀도 $P_o = 1.2 \times 10^3$ W/m²로 계산된다. 전체 셀 용기의 내경을 22 mm로 해서, 증발유동, 리드구조의 간격을 고려하면 앞에서 서술한 발전요소는 37개가 설치가능하다. 이때 총 전극면적은 3.6×10^{-3} m²이고, 총 출력밀도는 4.65 W가 된다.

열효율은 용기의 열전도 Q_{cv} , 방사열 Q_r , 나트륨 이동의 현열 Q_s , 잠열 Q_e 의 열 손실을 고려하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + Q_e + Q_s + Q_{cv} + Q_{cw} + Q_{cs} + Q_r} \quad (6)$$

전극부분과 전력 취출을 위한 리드저항을 고려해서 $P_o = 4$ W, 그 밖의 열 손실은 각각 $Q_e = 5.7$ W, $Q_s = 0.5$ W, $Q_{cv} + Q_{cw} + Q_{cs} = 8$ W, $Q_r = 3$ W일 때 변환효율 η 는 19%가 계산되어진다.

5. 결론

소형 모세관을 이용한 AMTEC 사이클의 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출했다.

- (1) 고온과 저온을 매개변수로 사용했을 때의 핵심인 위크형 모세관 발전소자에 대한 설계가 가능하다.
- (2) $T_1 = 500$ K, $T_2 = 900$ K의 조건에서, 모세관내경은 50 μ m, AMTEC의 성능은 19%의 변환효율이 기대된다.
- (3) 종래의 형태와 비교해서 간단한 구조이고 새로운 배열에너지회수 기술 등에 있어서의 응용이 기대된다.

참고문헌

- (1) Hunt, T.K., Sievers, R.K., Butkiewicz, D.A., Pantolin, J.E. and J. F. Ivanenok(1993), "Small Capillary Pumped AMTEC System", Proc. 10th Symp. Space Nuclear Power Systems, M. S. El-Genk and M. D. Hoover, eds., pp. 891-896, Albuquerque, USA
- (2) Sayer, M., Bell, M.F.B. Judd, A., Sherrit, S., El-Assal, K. and B. Kindl(1990), "A Recirculating Thermoelectric Generator Based on Sodium β - Alumina", J. Appl. Phys., 67, pp. 832-841
- (3) Sievers, R.K., Hunt, T.K., Butkiewicz, D.A. and J.E. Pantolin(1992), "Operation of Low Temperature AMTEC Cells", Proc. 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 3, pp. 129-134, San diego, USA
- (4) Tanaka, K., Negishi, A., Nozaki, K. and T. Masuda(1991), "Fundamental Study on the Electrodes for Alkali Metal Thermoelectric Converter (2nd report, Impedance Measurement and Generating Characteristics)", Trans. Japan Soc. Mech. Eng., 57, pp.4229-4234
- (5) Masuda, T., Tanaka, K., Negishi, A., Honda, T. and T. Fujii(1993), "Alkali Metal Thermoelectric Converter(AMTEC)", Bulletin of the Electrotechnical Lab., 57, pp. 551-568
- (6) Tanaka, K.(1997), "Thermal Design for wick Recirculation of AMTEC Cells", Kagaku Kogaku Ronbunshu, Vol. 23, pp. 701-706
- (7) Schock, A., Noravian, H., Kumar, V. and C. Or(1997), "Effect of Design Variations on AMTEC Cell Efficiency, and of Operating Parameters on Performance of OSC Cell Design", Proc. 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, pp. 1136-1151, Honolulu, USA
- (8) Cole, T.(1983), "Thermoelectric Energy Conversion with Solid Electrolytes", Science Vol. 221, No. 4614
- (9) Tanaka, K.(1998), "Effect of Design Parameters on Free-Standing Type AMTEC Cells", Japan Soc. Mech. Eng., Koen Ronbunshu III, Vol. 75, No. 98-1, pp. 353-354