

# 소형 모세관식 알카리 금속 열전변환소자의 사이클해석

윤석구<sup>\*</sup>· 구재현<sup>\*</sup>· 이재근<sup>\*\*</sup>· 田中 耕<sup>\*\*\*</sup>

## 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(고체전해질), 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  $\beta''$ -alumina and wick tube element. The proposed cell consists of the 37 conversion elements with capillary tube of 50  $\mu\text{m}$  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]

$cv$  : 용기내의 열전달

$D$  : 직경 [m]

$cw$  : 위크의 열전달

$J$  : 출력전류밀도 [A/cm<sup>2</sup>]

$e$  : 중발

$L$  : 길이 [m]

$f$  : 유동

$P$  : 압력 [Pa]

$g$  : 중력

$Q$  : 열량 [W]

$pe$  : 다공성 전극

$T$  : 온도 [K]

$s$  : 나트륨

$\mu$  : 점성계수 [Pa s]

$w$  : 위크

$\sigma$  : 표면장력 [N/m]

### <아래첨자>

$c$  : 모세관

### 1. 서 론

알카리 금속 열전변환(AMTEC)은  $\beta''$ -알루미나 고체 전해질인 Na 이온전도성을 이용해서 열에너지로부터 전기에너지로 직접변환하는 발전방식이다. AMTEC의 발전방식은, 간단한 구조로 통

\* 부산대학교 공과대학 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

\*\*\* Shizuoka Institute of Science and Technology, Japan

상의 열기관보다 우수한 20~30% 고효율과 단위 면적당 1~2 W/cm<sup>2</sup>의 높은 출력밀도를 얻을 수 있으며, 신뢰성이 높고 발전규모와 열원의 선택이 자유롭다는 장점을 지닌다. 최근 들어 NaS전지의 개발과 함께  $\beta''$ -알루미나 고체 전해질 재료는 보다 높은 이온전도율과 안정성을 얻을 수 있게 되었고 AMTEC 연구도 동시에 많은 진전이 되고 있다. 현재, 우주용 또는 지상용의 소규모 분산형 전원 등으로 응용되고 있으나, 지상용으로는 그에 대한 연구가 부족한 실정이다.

AMTEC의 연구에 있어서 문제점중의 하나는 셀의 직렬접합화와 나트륨 순환방식의 개발이다. AMTEC의 출력특성이 저 전압(0.5~1.0 V)·고 전류(0.5~1.5 A/cm<sup>2</sup>)이기 때문에 셀의 직렬접합화가 필요하다. 그리고 AMTEC는 작동매체로 나트륨을 사용하기 때문에 순환경로를 공통으로 하는 셀은 전기적으로 병렬접합으로 이루어진다. 따라서 셀의 소형분할화에 의한 직접접합화 방식이 적합하며, 종래방식인 전자기펌프에 의한 순환방식은 소형화에 적합하지 않다. 이에 대한 해결책으로 연구된 것이 위크(Wick)의 모세관력을 이용한 나트륨순환방식으로, 위크 순환방식이 가능하게 된다면 셀구조는 더욱 간단히 직접접합이 쉽게되고 펌프작동용 전원도 필요없게 된다. 한편, 위크양단에 온도차를 부여하는 위크순환형의 기본적 작동원리로 인한 전도열손실의 증가는 피할 수 없고, 또 셀구조 및 작동조건에 관해서도 종래방식과 다른 검토가 필요하게 된다. 현재까지 위크순환형 AMTEC의 기초연구가 Sayer et al., (1990); Sievers et al., 1992; Hunt et al., (1993)에 의해 보고되고 있으나,<sup>(1)~(3)</sup> 이러한 선행연구로부터 위크순환형 셀의 작동은 확인되고 있으나, 효율적인 측면에서 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는, 위크순환형 AMTEC 셀의 성능 향상에 필요한 기초사항인, 위크모세관 경과 모세관압력차, 나트륨유동의 압력손실 등에 대한 검토를 함으로써 지상 발전용으로서의 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. AMTEC 발전원리

Fig. 1은 AMTEC의 전체적인 발전원리의 개략

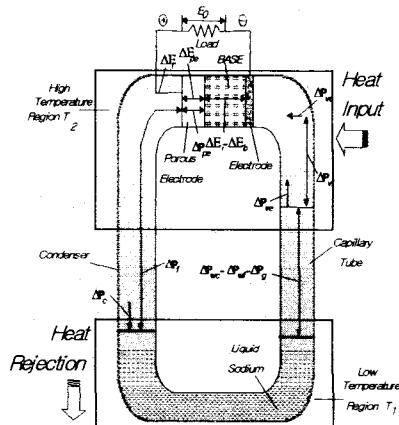


Fig. 1 Principle of capillary type AMTEC cycle

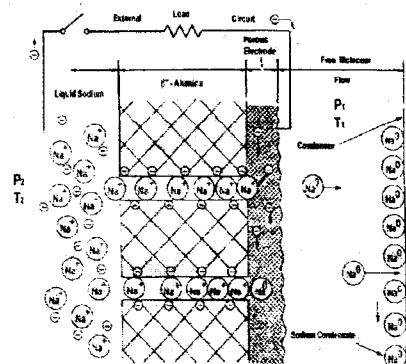


Fig. 2 Schematic diagram of AMTEC in BASE

도를 나타내는 것으로, 그림 하부에 있는 저온부(400~700 K)에서 용축한 나트륨액은 모세관에 의해 저온부로부터 고온부(800~1200 K)로 이동해서 증발한다. 이때 증기압은 저온부가  $3.0 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^2$  Pa이고 고온부는  $1.0 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^5$  Pa이 된다. Fig. 2는 BASE안에서의 나트륨에 의한 발전원리를 나타낸 상세 모형도로서,<sup>(8)</sup>  $\beta''$ -알루미나 고체전해질(BASE) 안의  $Na^+$  이온은 이 증기압차에 의해서 고온부로부터 저온부로 구동되어진다. 그리고  $\beta''$ -알루미나의 고온부 계면에서 발생한 전자는 액체 나트륨(음극)과 다공성 박막전극(양극)사이

에 접촉된 외부 부하에 전력을 발생하고 다공성 박막전극에 도달한다. 용축된 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  $\Delta P_{wc}$ 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.<sup>(9)</sup>

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

여기서,  $\Delta P_{wf}$ 는 모세관내의 나트륨액상유동의 압력손실이고,  $\Delta P_{ve}$  및  $\Delta P_{uc}$ 는 나트륨증발 및 용축에 관한 압력손실이며,  $\Delta P_{vf}$  및  $\Delta P_g$ 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 용기내 분할점의 접촉 셀 구조, 지지구조 등의 부품이 간략화가 가능하고 셀 부품의 제작과 조립이 간단히 된다는 점이 기대된다. 그러나 하부에 Na 액이 모이는 형식은 설치방향에 제약을 받기 때문에 지상이용에 한정된다.

#### 3.1 모세관부의 압력

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

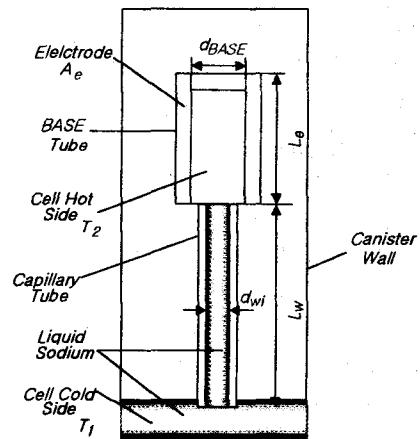


Fig. 3 Schematic diagram of wick type elements

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

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

여기서,  $\sigma_s$ 는 나트륨의 표면장력이다.

AMTEC의 발전출력과 관련시킨 유동압력 손실  $\Delta P_{wf}$ 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,  $\mu_s$ ,  $\rho_s$ ,  $M$ 는 나트륨의 점성계수, 밀도, 물비질량이고,  $F$ 는 Farday정수이다. Parameter인  $r_{ew}$ 는 전극면적과 모세관 단면적의 비( $A_e/A_w$ )이다. 또한, 모세관의 길이  $L_w$ 는 50  $\text{mm}$ 로 정했다.

#### 3.2 모세관부에서 Anode전극부 사이의 압력손실

모세관의 끝 부분에서 나트륨이 증발할 때의 압

력차  $\Delta P_{ve}$ 와 증기유동 압력손실  $\Delta P_{vf}$ 는 각각 다음과 같은 식으로 계산되어진다.

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

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

여기서,  $R$ 은 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  $T_2$ 를 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  $\mu\text{m}$ 로 했을 때의 변수로 구한 값이다.  $T_1$ 이 400~700 K까지의 각각의 조건에서도 Fig. 4와 같은 경향성이 나타낼 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  $\mu\text{m}$ 일 때는 975 K, 25  $\mu\text{m}$ 일 때는 1025 K가 된다.

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

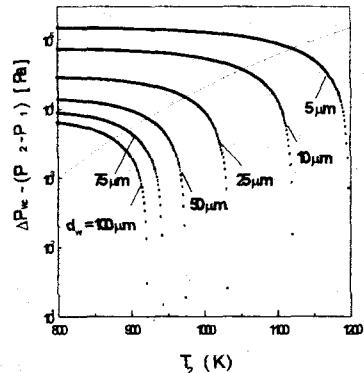


Fig. 4 Capillary Pressure as a function of  $T_2$  at  $j=0$ ,  $T_1 = 500$

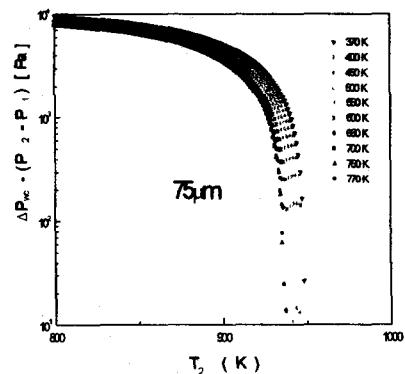


Fig. 5 Limit temperature as a function of  $d_{wi} = 75 \mu\text{m}$

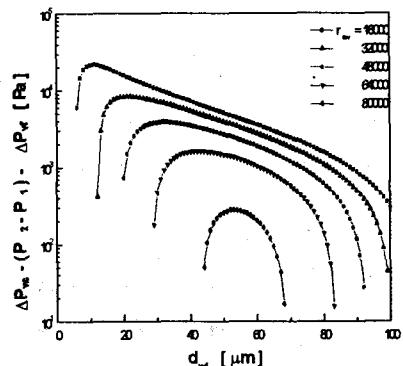


Fig. 6 Capillary pressure as a function of  $d_{wi}$  at  $T_2 = 900$  K

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 방책으로는 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/m<sup>2</sup>일 때의 유동 압력손실  $\Delta P_{wf}$ 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  $\Delta P_{wc}$ 가 작게되고, 또 반대로  $d_{wi}$ 를 감소시키면  $\Delta P_{wc}$ 는 커진다.

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

유동압력손실  $\Delta P_{wf}$ 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  $\Delta P_g$ 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  $\Delta P_{ve}$ 의 계산 값은 540 Pa이 되고,  $d_{BASE}$ 을 1 mm로 하면  $L_e$ 는 21 mm로 계산되어진다. 이 때의  $\Delta P_{vf}$ 는 0.01 Pa로 아주 작은 값이다. 또 응축에 의한 압력손실  $\Delta P_{vc}$ 도 증발과 비교해서 응축면

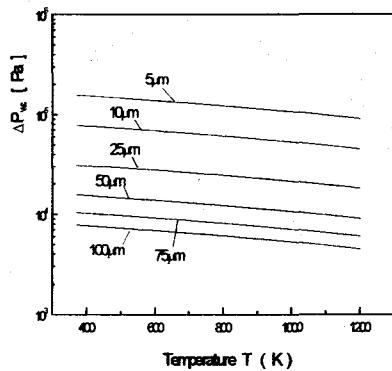


Fig. 7 Difference of capillary pressure as a function of temperature

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 유도해낸 해석수법<sup>(6)</sup>에 의해 출력 전력밀도  $P_o = 1.2 \times 10^3$  W/m<sup>2</sup>로 계산된다. 전체 셀 용기의 내경을 22 mm로 해서, 증발유동, 리드구조의 간격을 고려하면 앞에서 서술한 발전요소는 37개가 설치가능하다. 이때 총 전극면적은  $3.6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>이고, 총 출력밀도는 4.65 W가 된다.

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

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

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,  $Q_{cv} + Q_{aw} + Q_{cs} = 8$  W,  $Q_r = 3$  W일 때 변환효율  $\eta$ 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  $50 \mu\text{m}$ , 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  $\beta$ -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 Thermo electric 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