

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.7.665>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

알칼리금속 열전기변환장치의 접합과 출력성능 §

서민수^{*†} · 이욱현^{*} · 우상국^{*}

* 한국에너지기술연구원

Joining and Performance of Alkali Metal Thermal-to-electric Converter (AMTEC)

Min-Soo Suh^{*†}, Wook-Hyun Lee^{*} and Sang-Kuk Woo^{*}

* Korea Institute of Energy Research

(Received March 22, 2016 ; Revised December 28, 2016 ; Accepted January 3, 2017)

Key Words: Alkali-Metal(알칼리금속), Thermoelectric Converter(열전기변환장치), Beta"-alumina Solid Electrolyte (베타"-알루미나 고체 전해질), Joining(접합), I-V character(전류-전압특성)

초록: 알칼리금속을 이용한 열전기변환장치(Alkali-Metal Thermal-to-electric Converter)는 열을 전기로 직접 변환하는 기술이다. AMTEC 기술은 기존 에너지기술 대비 고효율성과 고밀도성을 지니는 정적 에너지 변환 장치로서 이론 발전효율이 40%로 높고 단위발전량이 500 W/kg, 2.01 W/cm²로 우수하다. AMTEC의 작동원리는 작동유체인 소듐이 분압차이에 의해서 고체전해질인 베타알루미나(BASE)의 내부에서 외부로 이온화를 거쳐며 통과하는데, 이때 전자를 주고 받으며 전기를 생성한다. BASE내외부의 분압차 형성을 위해서는 고온내구성과 기밀성이 높은 접합기술이 요구된다. 개발된 접합기술을 이용하여 BASE/절연부/금속부 시스템의 안정적인 전기적/구조적 시스템을 구성하고 멀티-셀 모듈들을 제작하여 개방회로 전압과 전류-전압특성을 측정하는 방법으로 AMTEC 모듈전지들의 출력성능과 수명을 평가하였다.

Abstract: The alkali-Metal Thermal-to-electric Converter (AMTEC) is one of the promising static energy conversion technologies for the direct conversion of thermal energy to electrical energy. The advantages over a conventional energy converter are its high theoretical conversion efficiency of 40% and power density of 500 W/kg. The working principle of an AMTEC battery is the electrochemical reaction of the sodium through an ion conducting electrolyte. Sodium ion pass through the hot side of the beta"-alumina solid electrolyte (BASE) primarily as a result of the pressure difference. This pressure difference across the BASE has a significant effect on the overall performance of the AMTEC system. In order to build the high pressure difference across the BASE, hermeticity is required for each joined components for high temperature range of 900°C. The AMTEC battery was manufactured by utilizing robust joining technology of BASE/insulator/metal flange interfaces of the system for both structural and electrical stability. The electrical potential difference between the anode and cathode sides, where the electrons emitted from sodium ionization and recombined into sodium, was characterized as the open-circuit voltage. The efforts of technological improvement were concentrated on a high-power output and conversion efficiency. This paper discusses about the joining and performance of the AMTEC systems.

1. 서 론

1.1 AMTEC기술의 역사

AMTEC 기술은 이온전도성 베타-알루미나 고체

전해질과 소듐을 작동유체로 열을 전기로 직접 변환 시키는 기술로 지난 50년간 연구되어 왔으며, AMTEC의 가능성에 대하여 소재, 소듐순환, 열 설 계 등의 다양한 기술분야에서 여러 제작, 실험, 성능평가를 통한 기술적 진보가 이루어져 왔다.

AMTEC 초기연구는 1962년 Ford Motor사의 Joseph T. Kummer과 Neill Weber에 의하여 SHE (sodium heat engine)로 알려진 sodium-sulfur battery

§ 이 논문은 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2016년도 춘계학술대회(2016.4.7.-8., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, mssuh@kier.re.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

를 만드는 과정에서 시작하여 1974년 liquid-anode AMTEC cell 작동원리를 Weber가 발표하였다.^(1,2)

이후, AMPS (Advanced Modular Power Systems)와 AFRL (Air Force Research Laboratory)의 Pluto 행성 탐사를 목표로 한 NASA 우주 발사체용의 전기 공급을 위한 PX (Pluto express) 셀 시리즈의 개발로 이어져왔다. PX 시리즈 셀들은 8,000 시간 연속 구동은 실증되었으나 Pluto 우주항해에 필요한 신뢰성은 확보하지 못하였다. 당시 전기출력은 3V 인가전압에 6-10 W로 에너지 변환효율은 14-18%로 알려져 있다.⁽³⁻⁵⁾

AMTEC 연구는 liquid-anode와 vapor-anode 기술의 개발을 위한 프로그램으로 진행되었으며 JPL, ETL, AMPS, ERI, AFRL, UNM 등의 해외기관에서 수행되었다.⁽³⁻⁵⁾ Liquid-anode 변환기는 저전압, 고전류이며, 용적효율이 제한적으로 출력밀도의 한계가 문제로 대두되었는데 BASE 셀들을 직렬로 연결하여 단자전압을 높일 수 있는 연구로 발전하게 되었다. 1990년대에 vapor-anode 방식으로 멀티-셀(multi-cell)을 적용하여 단자전압을 높이는 연구가 실증되었다.^(6,7)

국내에서는 2001년 한국에너지기술연구원에서 기초연구가 진행되었고 2007년과 2010년 KIER와 KICET에서 기획연구를 수행하였다. 2012년 KIER에서 AMTEC 요소기술 및 시스템 기술개발연구가 2014년 성공적으로 마무리되었고 그 다음 기술 단계로 고효율 및 고신뢰성 요소기술 개발 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 AMTEC 기술에 대한 원천기술 연구가 거의 진행되지 않았으며, 이러한 AMTEC 기술의 우주에서 지상으로의 응용확대와 열병합 발전, 고온폐열 및 태양열을 이용한 직접 열변환 발전기술 개발을 촉진시키기 위해서는 AMTEC의 요소기술에 대한 연구개발의 필요성과 선도적으로 추진해야 할 필요성이 크다.

1.2 알칼리금속 열전변환원리

Alkali-Metal Thermal-to-Electric Converter(AMTEC) 기술은 정적인 장치로서 열을 전기로 직접 변환한다. 전기 발전은 동적인 변환과 정적인 변환으로 구분되는데 각각 기계 구동부의 동작으로 전자기 발전을 통하여 전기 에너지로 변환되는 형태와 기계구동부가 없이 전기를 생산하는 형태이다. 기술의 발전과 에너지문제가 대두되고 있는 현 시점에서 정적 변환 시스템의 중요성은 높아지고 있다.

AMTEC은 열을 전기로 변환하는 열기관이며 고온의 이온전도성 전해질을 이용하는 전기화학 장치(electrochemical device)로서 기본 작동원리는 알

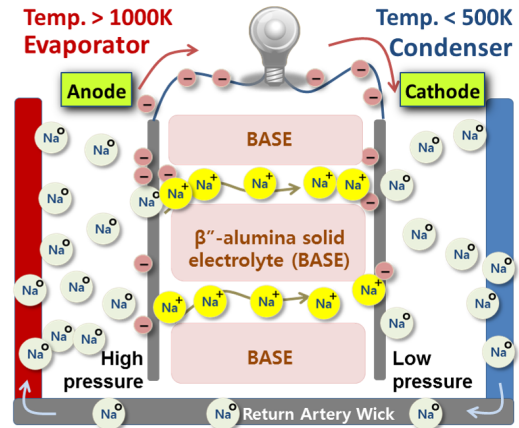


Fig. 1 Working principle of AMTEC

칼리 금속인 소듐(Na, sodium)이 이온전도성이 높은 베타"-알루미나 고체 전해질인 BASE(beta"-alumina solid electrolyte) 내벽에서 외벽으로 이온전도층을 통하여 전자를 잃고 얻으며 이온교환을 하며 통과한다. 이때, Fig. 1과 같이 BASE를 기준으로 두 가지의 영역으로 구분되는데 내부의 고온(900-1300K) 고압(20-100 kPa) 영역과 외부의 저온(400-700K) 저압(< 100 Pa) 영역이다.⁽⁸⁾

BASE 내벽의 자유전자들은 anode에서 전기부하를 통과하여 cathode로 돌아와서 BASE 외벽으로 나오는 이온과 재결합을 함으로써 기전력을 발생시킨다. 증발부인 BASE 내벽에서 외벽으로 cathode를 통과하여 발산된 중성의 소듐은 응축부인 다공성 Wick(wick)을 통하여 모세관력(capillary force)에 의하여 artery로 들어가고 다시금 증발부에서 재사용되는 작동유체의 순환을 거치게 된다.

AMTEC의 이론변환효율은 40%로 높으며 작동유체의 순환이 시작되면 연료주입(refuel)과 MRO (maintenance, repair, and overhaul)이 불필요하므로 열적으로 지속가능하고 경제성이 높은 장치이다. 알려진 출력밀도는 2.01 W/cm^2 , 500 W/kg 로 비교적 높은 효율성을 지니며 작동유체 이외의 기계적 구동부가 없으며 단순성과 경량성이 특징으로 우주동력부의 후보로서의 연구에 많이 집중되었다.

AMTEC의 열 입력은 약 900 K-1300 K 범위이론적으로 최대 40%의 변환효율로 직류전기를 생산한다. 시스템 내부의 나트륨은 고온 저장조(heat reservoir)와 저온 저장조 사이의 폐쇄계 열역학 사이클을 순환하며 구동된다.

BASE 양단의 열역학적 potential energy에 의하고 온부의 BASE 내벽에서 소듐금속의 이온화가 일어나고 소듐 이온은 분압차에 의하여 BASE를 통과하며 방출된다. AMTEC의 특징은 고압 활성 영

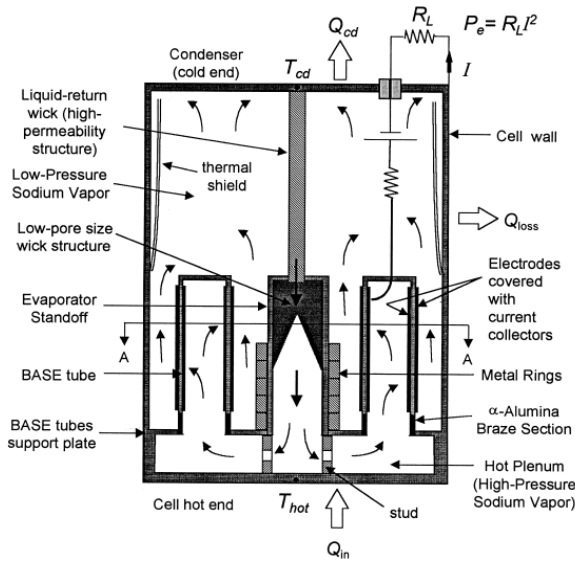


Fig. 2 Cross sectional view of typical vapor-anode multi cell AMTEC⁽⁴⁾

역과 저압 활성 영역 사이에서 나트륨 이온전도로 소듐증기가 열역학적으로 등온선과 거의 가깝게 팽창하는 것을 한 사이클로 단일 전기화학적 셀의 개방회로전압(OCV, open circuit voltage)은 1.6V 이상이 얻어지는 것이다.

1.3 AMTEC 모듈의 기본구조

AMTEC 기술의 이론변환효율은 40%로 높지만 알려진 실증효율들은 20%에 도달하지 못하였다. 고효율화를 위해서는 BASE의 이온전도율, 전극의 고효율화, BASE 내외부의 분압차, 소듐의 순환구조, 열역학적인 설계 등이 총괄적으로 요구되고 있다. 전극은 주로 몰리브덴(Mo)가 사용되었는데 알려진 바에 의하면 Mo전극은 시간에 따른 입자성장으로 전극효율이 점진적으로 떨어진다.⁽⁸⁾

BASE는 치밀하고 기체투과성이 없는데 두께가 얇을수록 이온투과성은 높아지나 열에 의한 구조 안정성이 떨어질 수 있다. BASE의 균열발생으로 분압차가 떨어지면 소듐의 이온전도에 의한 투과율이 현저히 저하된다. BASE 외부표면은 다공성 cathode 전극이 도포되며 외부부하로 전자의 이동 경로를 제공한다. Liquid-anode 방식에서는 금속 액체인 sodium 자체가 전기전도체로서의 역할을 하므로 내부전극 anode가 필요하지 않다.

기본적으로 BASE 튜브는 Fig. 2와 같이 절연체(α -alumina)에 접합된 후 증발부의 내부플렌지(support plate)에 고정되는 금속구조체와 brazing으로 고정된다. 외부 다공성 전극(electrode)은 내부 전기 손실저감과 전기 집전을 위하여 금속 mesh

(current collector)로 감싸진다. BASE와 증발부의 열 전달을 위한 열전도 구조체와 방사 구조체(radiation shield)가 설치되어 열효율을 향상시킨다. 하우징에서의 상하부 열손실을 줄이기 위하여 BASE 상부에 열 차폐막(thermal shield)을 설계하고 응축부의 워 구조 또한 연속적인 액상 소듐 박막의 형성으로 열손실을 줄여주어 AMTEC 시스템의 전체 변환효율을 높여주도록 설계되어 있다.⁽⁷⁾

워는 응축부(condenser)와 증발부(hot plenum), 양측을 연결하는 artery(liquid-return wick)로 구성되는데 응축부 워의 모세관력은 유체 정역학적인 지구의 중력보다 한 자릿수가 더 크므로 워의 표면에 균일하게 액체 소듐이 펼쳐지며 응축하게 된다.^(4,5) 이러한 기공들은 응축된 액상 소듐의 흐름을 가능하게 하고 유체 역학적으로 액상-순환 워로 연결된다. Liquid-return wick은 응축 워보다 작은 기공크기를 가지는데 기공크기와 투과성은 상반되는 효과를 나타낸다. 기공의 크기를 줄이면 워의 모세관 이동력이 높아지지만 투과효과가 감소하게 되고 압력의 손실이 증가하게 되어 워의 모세관 수두를 초과하게 되면 증발부까지의 소듐순환이 일어나지 않게 되므로 복합 워 구조설계를 통하여 액상-순환 워의 압력손실이 낮고 모세 압력수두는 높은 형태로 설계되어야 한다.

El-Genk와 Tourmier(1998)에 의하면 증발부 워의 기공크기는 미세한 구조를 가져야 하며 이는 높은 모세관 이동력과 증기화를 제공한다.⁽⁴⁾

1.4 고효율 및 고신뢰성 AMTEC 기술

AMTEC의 성공적인 구동과 고효율화를 위한 핵심기술은 전극 및 전해질 핵심소재 제조기술과 전해질/절연체/시스템의 접합·절연·밀봉 기술, 금속유체순환시스템 설계기술 그리고 증발응축 기술이다. 그 중 접합기술은 시스템의 모든 요소들의 구조/전기 연결과 절연, 밀봉 등을 범위로 하므로 높은 기술적 난이도에 비하여 보고된 자료는 많지 않다. 소재간의 열팽창률을 최소화하고 발생하는 응력의 흡수능력을 높여야 하며, 기밀성과 전기 절연성 및 높은 접합강도와 함께 낮은 취성을 동시에 갖추어야 한다.

BASE 내외부의 기밀성은 분압차 형성에 중요하며 소듐의 등온팽창에 의한 증발부-응축부간 압력의 차이가 소듐의 일방향 순환을 유도하도록 하기 위하여 접합면의 공차설계와 접합소재, 접합 필러, 접합방법 선정이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 AMTEC 단위셀 구성요소 개발, 접합기술 개발, 순환워 및 응축 열해석 기술 등을

통하여 AMTEC 요소기술들을 개발하고 최종적으로 시스템화한 모듈제작을 통하여 전류-전압 특성과 출력 성능을 평가하였으며 그 범위는 다음과 같다.

- 1) BASE 접합기술
- 2) AMTEC모듈 제작 기술
- 3) 전류-전압 특성 및 출력 성능 평가

2. 실험방법

2.1 AMTEC 접합과 BASE 조성변화

AMTEC 시스템 작동온도는 1300K로 높으므로 고온내구성이 높은 기밀접합이 이루어져야 한다. BASE 내외부 anode와 cathode간의 전기적 회로가 형성 될 수 있도록 절연부(insulator)를 설계하고 전해질-절연체-금속 구조체의 전기적 절연성과 구조적 안정성을 위해 BASE와 절연부, 절연부와 금속부 접합에 각각 세라믹 본딩법과 필러금속 브레이징법을 적용하여 요소 접합을 수행하고 이에 대한 접합강도와 전기적 절연성을 조사하였다.

접합소결공정은 가열을 동반하므로 고체전해질(BASE, beta alumina solid electrolyte)의 조성변화에 따른 이온전도도 저하 문제가 발생되므로 화학적 손상이 없도록 하는 것이 기술적 관건이다. 또한, 시스템의 작동 중 고온의 소듐에 대한 내부식성을 지니는 것이 주요한 접합의 요건이다.

BASE/절연부 접합은 고온의 작동온도에 대응하여 장기운전이 가능한 내구성과 강도를 고려 하였고BASE와 알루미나 부품들과의 이질성이 낮은 CaO-Al₂O₃ 계를 선정하였다.⁽⁹⁾

CaO와 Al₂O₃는 최저융점 조건으로 혼합하였고 paste 형태로 제조하여 절연부에 도포한 후 건조하였으며 1420 °C에서 최종 소결하였다.

절연부/금속부 접합은 브레이징으로 하였으며 작동온도를 고려하여 Ti-Cu-Ni 계의 필러금속을 선정하였다. 유도브레이징(induction brazing)과 진공 브레이징(vacuum brazing)으로 수행 하였고 접합 온도는 1000°C - 1200°C 범위를 실험하였다.

실제 요소부품들로 접합을 수행하였는데 1인치 직경을 가지는 BASE와 절연부, 이를 플렌지와 연결해주는 금속구조체로 구성되는데 접합부의 기밀성 확인을 위하여 헬륨 디텍터로 누설 테스트를 수행하였다. 접합강도는 크기 5×10×3 mm 플레이트들을 접합하여 Fig. 3과 같이 off single lap compression 법으로 측정하였다.⁽¹⁰⁾

고온에서 진공소결을 한 경우의 BASE는 출력 성능이 저하되는 것을 확인하였으며 이는 BASE

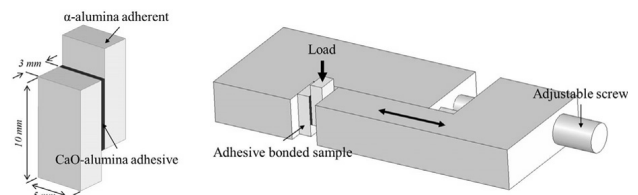


Fig. 3 Geometry of joining and shear strength test

내부의 Na 휘발에 기인한 것으로 확인되었다. 진공소결공정 온도범위(1100°C-1300°C)에서의 BASE 내 Na 조성변화를 시험분석하고, Na 휘발을 억제하기 위하여 파우더 함침, 도가니 소재변경 등 다양한 조건에서 소결하고 BASE 내 소듐 함량소실 정도를 조사하여 실험조건에 반영하였다.

2.2 AMTEC 모듈 제작

요소부품과 시스템 요소기술의 효율적 융합을 검증하기 위하여 3셀과 4셀의 멀티-셀 AMTEC모듈을 제작하였다. 3셀 모듈은 liquid-anode 방식으로 접합부가 없이 밀봉하였으며 익이 없으므로 분압차 형성을 위해서 응축부에 진공펌프로 인위적인 순환을 유도하였다. 4셀 모듈은 vapor-anode 방식으로 네 개의 BASE셀로 구성하였으며 각 셀과 절연부, 금속부를 브레이징 접합하였으며 익이 존재하므로 인위적인 압력 형성이 없이 순환하도록 설계하였다.

각 모듈들의 집전을 위하여 셀의 anode는 금속 구조체를 cathode는 금속집전체(current collector)를 이용하여 집전하였다. 완성된 BASE셀들은 BASE의 금속부와 하우징 내부플렌지(support plate)를 구조적으로 연결하고 wire lead를 이용하여 각 셀의 anode/cathode를 전기적으로 연결하고 모듈을 구성하였다. 3셀 모듈은 직렬 회로를 형성하였고 4셀 모듈은 독립 전기회로로 직렬과 병렬 성능 모두 실험검증 할 수 있도록 하는 모듈화 공정을 수행하였다. 이후, 하우징과 feedthrough(FT)의 용접, anode/cathode wiring, 하우징 밀봉, 소듐충진을 순차적으로 실시하였다. 하우징과 FT는 용접하고 내부에서 커넥터를 이용하여 단위셀의 양극단과 FT를 연결하여 외부단자로 빼내었다.

하우징의 밀봉과 진공도는 모듈의 성능과 직결되며 중요하므로 하우징의 기밀성과 작업성을 높이기 위하여 상부/하부 플렌지를 분리 체결하였다.

헬륨 감지기로 누설 테스트를 수행하여 밀봉을 확인한 후 소듐을 충전하였으며 모듈조립 전후의 전기적 통전 및 전기 저항 테스트, 진공도 등을 측정함으로써 성능 평가 시 문제가 일어나지 않도

록 하였다. 완성된 모듈은 히터에 연결하고, 압력 센서와 온도센서를 부착하고 출력효율을 높이기 위하여 단열재로 마감하였다.

응축부에 블로어를 연결하고 각종 장비들에 모듈을 연결하고 실험 전 기밀테스트를 수행하였다. Na의 끓는점 감소를 통하여 최소 열량으로 효율을 극대화 하고자 진공 및 저압 분위기를 조성하기 위하여 진공도를 높였다. 또한 가압 후 150시간 이상 유지시켜 가압테스트를 수행하였다.

2.3 출력성능평가

회로의 안전성과 워에 의한 소듐의 순환확인을 위하여 모듈은 직렬회로연결모듈과 독립회로연결모듈, 워이 없는 경우와 워이 있는 경우로 나누어 제작하였다. 전기히터를 열원으로 사용하였으며 슬라이닥스(slidacs)로 온도를 제어하였다. 모듈의 출력 성능을 평가하기 위하여 셀 단위와 모듈 단위의 OCV(개방회로전압)와 I-V특성을 측정하였다.

직렬연결모듈의 성능평가를 위하여 potentiostat 장치를 이용하여 출력성능 측정실험을 수행하였다. 출력은 700°C부근에서 OCV를 확인하고 운전시 전류-전압 특성 확인을 위하여 전류를 인가하였다.

모듈가열 시의 전기히터는 슬라이닥스를 통하여 입력전원을 공급받아서 필요한 출력전압으로 변환시키며 출력을 제어하였다. 이를 통하여 모듈 내부에 삽입된 히트파이프를 가열하고 모듈 하부 플렌지와 내부 온도를 올리는 방식을 채택하였다.⁽¹¹⁾

3. 실험결과 및 고찰

Mo 전극을 코팅한 BASE셀을 각각 3셀과 4셀로 집적시킨 후 3셀은 워이 없는 liquid-anode방식으로, 4셀은 워이 있는 vapor-anode로 구분하여 AMTEC 모듈 시스템을 제작하였다. 4셀 모듈의 접합은 BASE와 알루미늄 세라믹, 세라믹과 금속구조체를 동시에 vacuum brazing법으로 수행하고 각 셀들의 성능측정을 위하여 모듈내부와 외부 모두 전기적으로 독립된 연결을 하였다. 성능평가 시 FT를 통해서 외부로 나오는 회로들을 일부 또는 전체 연결하여 직렬회로를 형성하였다.

3.1 접합

세라믹-세라믹 접합인 BASE/절연부의 접합강도 시편을 CaO-Al₂O₃ 세라믹 접합제로 접합한 경우 소결온도 1420°C에서 접합강도 35 MPa를 확보 하였다. 소결온도 1500°C에서는 2배 가량의 더 높은 접합강도를 확인하였으나 요구되는 접합강도와 세라믹의 입자성장 등을 고려하여 최적의 접합 소결

온도는 1420°C로 선정하였다.

Na 분위기에 노출에 따른 접합성능의 확인을 위하여 접합시편을 200°C의 Na 용액에 담그고 100 - 1,000시간 후의 접합강도의 변화를 시험하였다. 노출시간과 무관하게 평균적으로 40 MPa의 접합 강도가 확보되었고 이를 통하여 Na 분위기에 서의 안전성과 신뢰성을 검증하였다.

세라믹 접합제의 우수한 밀봉 효과를 확인하기 위하여 800°C Na 용액에서 밀봉성을 실험하였다. Glass 접합제의 경우 노출 100시간이 안되어 BASE 내부와 외부의 용융소듐으로 인하여 통전 되었으나 세라믹 접합제는 노출 400시간 이상에서도 통전이 일어나지 않고 밀봉이 유지되었다.

절연부/금속부의 금속-세라믹 접합은 Ti-Cu-Ni 브레이징을 하였고 접합강도 시편을 접합 한 경우 설계에 요구되는 강도를 상회하는 15 MPa를 확보 하였다. 금속-세라믹의 최고접합강도는 37 MPa로 실제 부품을 1,100°C 접합공정 시의 기밀성은 leak rate 10⁻⁵ Torr-l/sec로 전기적 단락 방지와 충분한 분압차의 형성과 유지가 가능하였다.

소재 간의 열팽창률을 최소화하고 발생하는 응력의 흡수력을 높이도록 하기 위하여 고접합강도와 함께 저취성이 동시에 요구된다. 증발부 응축부 간의 기밀성이 유지되도록 건전접합을 하였다. 이를 통하여 분압차가 발생 및 유지되어 소듐의 일방향순환을 가능하게 되도록 접합면의 공차설계와 접합소재, 접합필러, 접합방법, 접합조건 등을 연구조사 적용하였다. 또한, 고효율 집전과 함께 접합과 절연을 강화하였다. 접합공정 프로파일에 따라 BASE셀 외부에 필러금속이 이음되는 경우가 발생하였으나 최적화를 통하여 개선하였고 전체적으로 순도가 높은 접합계면을 얻을 수 있어 모듈 제작 시에 접합기술을 적용하였다.

3.2 모듈 출력성능

3셀 모듈(liquid-anode, 직렬회로, 순환워 없음, 분압차 형성용 진공펌프사용)의 최대출력밀도 MPD (max. power density)는 BASE 온도 720°C에서 25W로 셀 당 8W의 출력을 보였다(Fig. 4).

전기히터의 열 입력에 대한 변환효율은 8.33%, 단위면적당 출력밀도는 0.13 W/cm²이다.

4셀 모듈(vapor-anode, 독립회로, 순환워 있음)의 개방회로전압 평가를 수행하였다. 온도의 상승에 따라 OCV가 점진적으로 상승하였으며 600°C 부근에서 7V(셀당 1.75V)까지 상승하였다.

Fig. 5와 같이 AMTEC 독립모듈의 최대온도와 최저온도를 보여주는 T_{high} 곡선과 T_{low} 곡선은

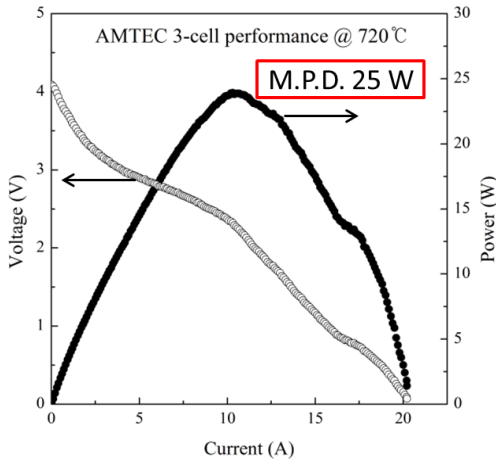


Fig. 4 I-V character of 3-cells module without wick

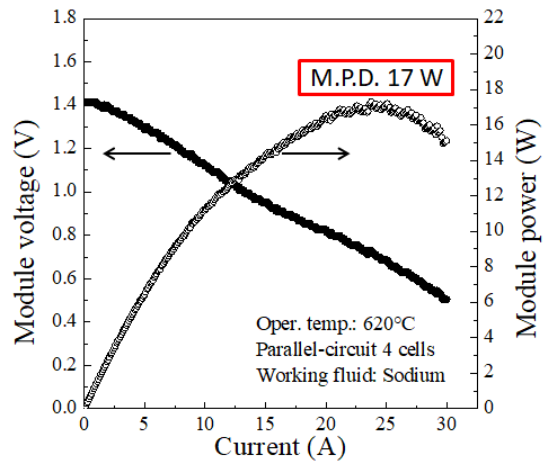


Fig. 6 I-V characteristic of AMTEC 4-cells module

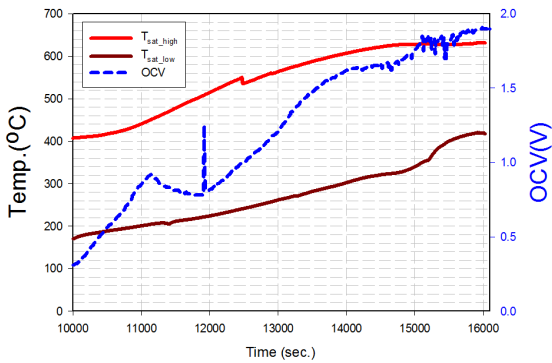


Fig. 5 Open circuit voltage of unit cell in 4-cells module

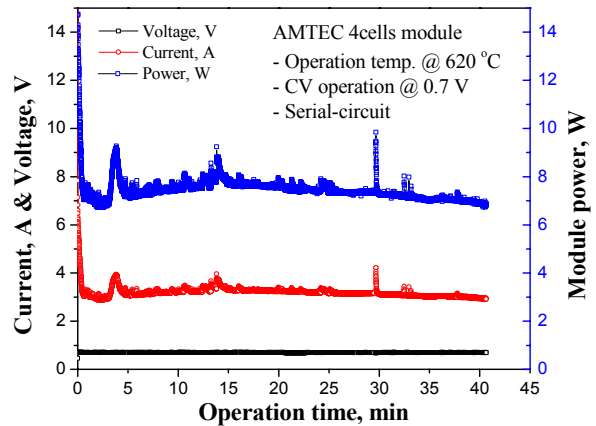


Fig. 7 Serial-circuit performance of 4-cells AMTEC module with wick circulation

각각 붉은색과 갈색으로 나타난다. 모듈 내 단위 셀의 OCV는 푸른선으로 나타난다. 모듈 내 하나의 셀에서 최고 2 V에 상응하는 값이 측정되었으며 4셀에서 최대 총 8 V의 OCV를 보여주었다. OCV 측정치는 기존 연구들의 이론치나 실측치와 크게 다르지 않게 나타났다.^(2,3,10,11)

고온부 620°C와 저온부 330°C의 평균작동 온도 조건에서 4셀 모듈의 병렬 전류-전압 특성으로 최대출력밀도는 17W, 변환효율은 5.66%, 출력밀도는 0.07 W/cm²로 3셀에 비해 낮았으며 이는 작동유체인 소듐이 액상(3셀 모듈)과 기상(4셀 모듈)으로 집적밀도가 다른 구동방식의 차이로 확인되었으며 충분한 압력차 형성이 필요해 보였다.

두 실험의 고온부 온도는 720°C와 660°C로 동일한 조건으로 가열 및 유지를 하지 못하였는데 이는 4셀 모듈의 비교적 큰 용적과 열용량으로 이에 반하여 히터의 낮은 성능에 기인하였다.

3.3 수명

정전압 0.7 V, 온도 620°C로 유지한 조건에서 운

전시의 초기성능을 시험하였다.

4셀 모듈의 각 셀들에 대한 출력은 2.2 W에서 1.8 W로 확인되었고 10분 가량 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다. 2개의 셀들을 직렬회로로 연결하여 10분간 운전 시 초기 4 W에서 3.2W까지 점진적으로 하락하였다.

4셀 모듈의 각 셀들을 직렬회로로 구성하여 40분동안 작동 시, 각 셀 당 1.9 W 내외의 출력을 보였고(Fig. 7) 모듈은 7 W 내외의 안정적인 출력을 연속적으로 생산하였다. 모듈의 출력이 셀들의 출력 합보다 낮은 것은 전기적으로 최적화되지 않은 회로구성에 기인하였다.

웁이 없는 3셀 모듈은 진공펌프를 통한 인공적 분압차 유지를 멈추자 10분 내외로 출력이 급격히 하강하여 분압차에 의한 이온교환이 멈추는 것을 확인하였다. 4셀 모듈의 경우 인위적인 압력차 형성없이 6시간 정도의 작동을 확인하였다.

4. 결 론

AMTEC 모듈의 제작을 위하여 고온기밀성의 접합기술을 개발하고 다양한 방법의 전기회로 구성을 통하여 제작된 모듈들의 출력성능을 600 - 700 °C 부근에서 평가하였다.

세라믹-세라믹 접합인 CaO-Al₂O₃ 세라믹 본딩의 소결온도 1420°C에서 접합강도 35 MPa를 확보하였다. 200°C 소듐용액 내에서의 접합강도 유지와 800°C 고온에서의 기밀성 유지를 확인하였으나 고온의 진공 소결 과정에서 BASE 내의 Na 소실이 관찰되었다.

금속-세라믹 접합인 Ti-Cu-Ni 브레이징으로 최고 접합강도 37 MPa를 확보하였고, 1,100°C 접합공정에서 헬륨 누설 테스트로 10⁻⁵ torr-l/sec의 누설 및 기밀성을 확인하였다. 브레이징 기술을 적용하여 접합한 AMTEC 모듈들로 수명성능을 시험하였고 4 셀 모듈에서 4시간여의 승온과정과 2 시간여의 운전성능측정 과정을 견뎌 내었다.

Liquid-anode 방식으로 제작한 3 셀 직렬연결 모듈의 OCV는 셀당 2.7V 정도로 총 8V로 나타났고, 최대출력밀도는 25W로 셀당 8W의 출력성능을 보였다. Vapor-anode 방식으로 제작한 4 셀 독립연결 모듈의 OCV는 셀당 2V 정도로 총 8V로 나타났고, 최대출력밀도는 17W로 셀당 4W 정도의 출력성능을 보였다.

3 셀 모듈은 워(wick)의 부재로 연료인 소듐이 순환 공급 될 수 없는 시스템으로 인위적인 순환을 중지하자 출력이 급격히 떨어져 연속 운전이 불가하였다. 4 셀 모듈은 4개의 직접된 BASE와 중앙에 워가 위치해 있는 시스템으로 0.7 V의 정전압 운전조건에서 7 W 내외의 초기성능을 40분간 안정적인 유지하였으며 워에 의한 소듐연료의 순환으로 6시간 가량의 연속 운전이 가능하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행함.(B7-2411-01)

참고문헌

(References)

- (1) Kummer, J.T. and Weber Neill, 1968, "A Sodium-Sulfur Secondary Battery," *Trans. S.A.E.*, Vol. 76, pp. 1003~1007.
- (2) Weber, N., 1974 "A Thermoelectric Device based on Beta-alumina Solid Electrolyte," *Energy Conversion*, Vol. 14, No. 1, pp. 1~8.
- (3) Cole, T., 1983, "Thermoelectric Energy Conversion with Solid Electrolytes," *Science*, Vol. 221, No. 4614, pp. 915~920.
- (4) El-Genk, M.S. and Tournier, J.-M., 1998, "Recent Advances in Vapor-anode, Multi-tube, Alkali Metal Thermal-to-electric Conversion Cells for Space power," *Eur. Space Agency Spec. Publ. SP*, 416, pp. 257~264.
- (5) Wu, S.-Y., Xiao, L. and Cao, Y.-D., 2009, "A Review on Advances in Alkali Metal Thermal to Electric Converters (AMTECs)," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 33, No. 10, pp. 868~892.
- (6) Tournier, J.-M. and El-Genk, M.S., 1999, "Performance Analysis of Pluto/Express, Multitube AMTEC Cells," *Energy Convers. Manage.*, Vol. 40, No. 2, pp. 139~173.
- (7) Tournier, J.-M. and El-Genk, M.S., 1999, "Analysis of Test Results of a Ground Demonstration of a Pluto/Express Power Generator," *Energy Convers. Manage.*, Vol. 40, No. 11, pp. 1113~1128.
- (8) Williams, RM, et al., 1990, "Kinetics and Transport at AMTEC Electrodes -I. The Interfacial Impedance Model," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137, No. 6, pp. 1709~1716.
- (9) Jerebtsov, D.A. and Mikhailov G.G., 2001, "Phase Diagram of CaO - Al₂O₃ System," *Ceram. Int.*, Vol. 27, pp. 25~28.
- (10) Suh, M.S., et al, 2014, "Dissimilar Joining of Metal-Ceramics and Joining Strength," *Proc. Korean Soc. Mech. Eng.*, 2014 Spring, pp. 71~72.
- (11) Suh, M.S., et al, 2015, "Joining and Their Performance of Alkali Metal Thermoelectric Converter (AMTEC)," *Proc. Korean Soc. Mech. Eng.*, 2015 Spring, p. 80.