1 열전발전모듈용 소재 및 공정 기술

글_문승필 선임연구원 | 한국전력공사 전력연구원
김성웅 교수 | 성균관대학교 에너지과학과
이규형 교수 | 강원대학교 나노응용공학과

1. 서론

화석연료의 고갈 문제가 대두되면서 태양전지, 풍력발전 등 신재생에너지 기술과 더불어 에너지 사용 고효율화를 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 산업 및 수송 분야 등에서 에너지원 중 60% 이상이 폐열로 손실되고 있어, 이를 효과적으로 이용할 수 있는 실효적 기술 개발의 중요성이 부각되고 있다. 폐열활용 기술 중 열전발전(TEG, thermoelectric power generation)은 제벡효과(Seebeck effect)에 의해 폐열로부터 형성 가능한 온도차를 이용하여 직접 전기를 생산할 수 있는 기술이다. 열전발전의 최대효율(η_{max})은 다음 식(1)에 의해 정의되기 때문에, 구동환경 및 시스템 구성 등에 의해 온도차가 결정되면 열전소재의 성능(ZT(dimensionless figure of merit) = $\sigma S^2T/\kappa$, σ : 전기전도도(electrical conductivity), S: 제벡계수(Seebeck coefficient), T: 절대온도(absolute temperature), κ: 열전도도(thermal conductivity))이 효율을 결정하는 핵심요소가 된다.

$$\left[\frac{T_H - T_C}{T_H}\right]\left[\frac{(1+ZT_{avg})^{1/2}-1}{(1+ZT_{avg})^{1/2}+T_C/T_H}\right] \quad (1)$$

식(1)에서 T_H와 T_C는 각각 열전모듈의 고온부(heat source temperature)와 저온부의 온도이고, ZT_{avg}는 고온부와 저온부의 온도구간에서 열전소재의 평균 ZT이다. 그림 1에 저온부의 온도를 300 K로 설정하고, 식(1)을 이용하여 산출한 온도차와 ZT에 따른 이론적인 열전발전효율을 나타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 자동차의 폐열 발생 환경(온도차 ~400℃)과 현재 상용열전소재의 ZT ~1.0을 고려하면 최대 10% 수준의 발전효율을 구현할 수 있으며, ZT = 2의 고성능 소재가 개발될 경우 온도차 300℃ 조건에서도 발전효율은 16% 이상으로 증가한다. 이러한 이유로 차량용 열전발전

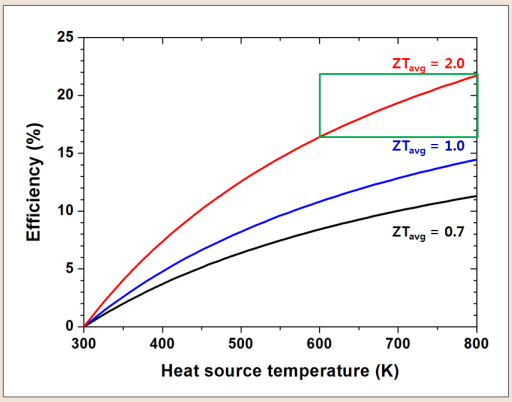

그림 1 ▸ 열전소재의 성능(ZT_{avg})과 고온부 온도에 따른 열전발전효율(저온부의 온도는 300 K로 설정).

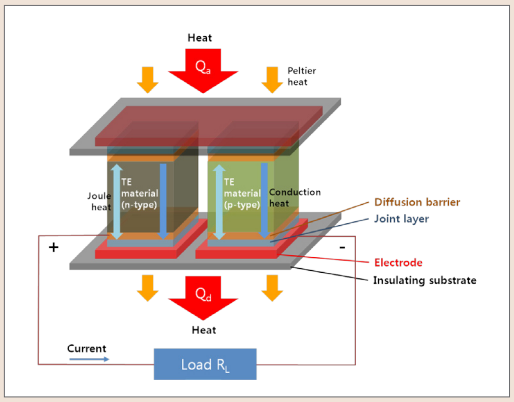

그림 2 ▸ p-n 1쌍 Π형 열전발전모듈 구조 모식도 및 구동 원리 (TE: thermoelectric).

(ATEG, automotive thermoelectric power generator)을 중심으로 중고온 열전발전을 위한 고성능 열전소재 개발 연구가 상대적으로 ZT가 높은 skutterudite계, silicide계 및 half-Heusler계 소재 등에 대해 집중적으로 진행되고 있다 [1].

한편, 실제 시스템에서 열전발전의 효율은 그림 1에 나타낸 이론발전효율 대비 70% 수준의 낮은 성능을 나타내고 있어 효율 손실 저감을 위해 필수적인 열전모듈(thermoelectric module) 관련 소재 및 공정 기술 개발도 진행되고 있다. 이러한 모듈화 기술은 열전모듈의 성능 증대 뿐 아니라 구동신뢰성 확보에 따른 장수명 시스템 구현을 가능하게 하므로 열전발전의 상용화 경제성 확보를 위한 또 다른 핵심요소 기술로 인식된다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 열전발전시스템의 단위 디바이스인 열전모듈은 절연기판(insulating substrate) - 전극(electrode) - 열전소자(thermoelectric element) - 전극 - 절연기판의 대칭적이고 간단한 구조를 형성하고 있다. 중고온용 열전발전의 경우, 모듈의 한쪽면이 고온에 노출되며, 모듈 양단에 큰 온도차가 발생하기 때문에 구동 신뢰성 확보를 위해서는 모듈을 구성하는 소재 뿐 아니라 각 소재를 접합하는 공정기술 개발이 필수적이다.

본 논문에서는 skutterudite계 열전소재를 적용한 중고온용 열전발전모듈을 중심으로 고효율과 고신뢰성을 동시에 구현할 수 있는 모듈화 소재 및 공정기술에 대해 고찰하고자 한다.

2. 열전발전모듈의 효율 및 발전출력

2.1 열전발전의 에너지 관계 및 특성

그림 2에 나타낸 바와 같이 모듈 상부의 절연기판이 높은 온도 T_H에 부착되면 p형 및 n형 열전소재를 통해 열에너지가 하부로 전달되어 T_H 비교하여 상대적으로 낮은 T_C의 온도로 외부로 방열된다. 이러한 과정으로 열전소재의 상하 간에 온도차가 유발되고 제벡효과에

의해 p형 소재 전극에는 (+), n형 소재 전극에는 (-)의 전압이 발생한다. 상부 절연기판에서의 입력열량이 Q_a, 하부 전극에서의 방열열량이 Q_d가 되어 정상상태에 도달 시에는 외부 부하 R_L 조건에서 일정한 전류 I가 흐르게 된다. 또한, 고온부에서 $S_{pn}T_HI$(S_{pn}: T_C ~ T_H 범위에서 p형 및 n형 열전소자의 평균 제벡계수)의 열량이 흡수되고, 저온부에서 $S_{pn}T_CI$의 열량이 방출되므로 $S_{pn}(T_H-T_C)I$의 열량이 흡수 된다. 열전발전모듈 구동 시 이 에너지와 joule열(= rI^2, r: 내부저항)의 차이가 전기적 에너지로 얻어지게 된다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 열전발전모듈에서의 입력열량 Q_a와 방열열량 Q_d는 다음 식 (2) 및 (3)으로 표현할 수 있다.

$$Q_a = S_{pn}T_HI - 1/2 \times rI^2 + K(T_H-T_C) \quad (2)$$

$$Q_d = S_{pn}T_CI + 1/2 \times rI^2 + K(T_H-T_C) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 K는 재료의 열전도도이다.따라서, 열전발전에서 제벡효과와 펠티에효과(Peltier effect) 간에는 밀접한 관계가 있으며 제벡효과에 의해 열기전력이 발생되고 여기에 부하저항을 연결하면 전류가 흐르게 됨을 알 수 있다.

열전모듈을 구성하고 있는 소재와 열전발전모듈의 구동 특성으로부터 이론적인 발전출력 및 효율은 식 (2)와 (3)으로 부터 산출되지만, 실제 열전발전모듈의 출력과 효율은 이론값에 미치지 못하는 낮은 특성을 나타낸다. 이는 열전소재 이외에 모듈화에 필요한 부가적인 소재와 각 구성소재를 접합하여 모듈로 제작하기 위한 공정기술의 부재에서 기인한다.

2.2 열전소자

그림 2에 나타낸 바와 같이 p형 및 n형 열전소재의 상하부 면에는 확산방지층을 형성하는 것이 필수적이며, 일반적으로 확산방지층 등 기능층이 부착된 열전소재를 열전소자라 한다. 확산방지층은 고온에서 열전소재와 접합소재/전극 간의 물질 이동을 방지하는 역할을 하기 때문에, 저온용 Bi-Te계 모듈에도 적용되고 있으며(일반적으로 Ni을 사용함) 상대적으로 고온에서 작동하는 중고온용 열전발전모듈의 경우에는 그 중요성이 매우 크다. n형 소재의 기본 조성이 Co_4Sb_{12}이고, p형 소재의 기본 조성이 $(Fe,Co)_4Sb_{12}$인 skutterudite계 열전소재의 경우 [2-5], 확산방지층 소재로 Mo계, Ti계, Ni계를 주로 사용하고 있다 [6-10]. 열전소재에 확산방지층을 형성하는 공정으로는 열용사법이 이용되었으나, 최근 확산방지층의 특성개선 및 접합특성 증대를 위해 그림 3과 같은 동시소결법을 적용하고 있다 [5,8,11].

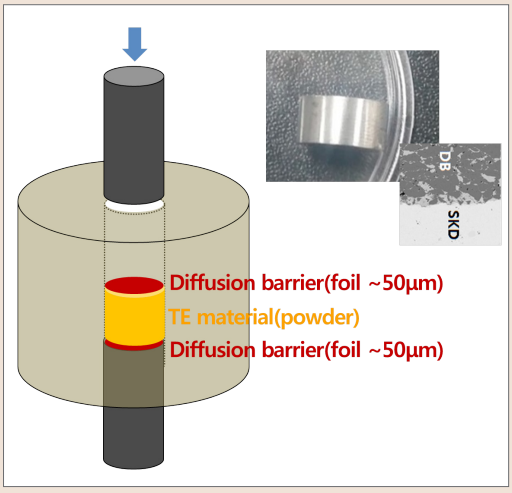

그림 3 ▸ 동시소결법에 의한 확산방지층 형성 공정 모식도 및 샘플 사진(DB: diffusion barrier(확산방지층), SKD: skutterudite계 열전소재).

열전소재와 확산방지층 foil을 접합하기 위한 동시소결 설비로는 hot pressing(HP) 및 spark plasma sintering(SPS) 등 가압소결 기반의 공정은 종류에 상관없이 활용이 가능하다. 그림 3에 나타낸 바와 같이, (1) graphite 몰드에 하부 punch을 위치시키고, (2) 확산방지층 소재의 foil을 하부 punch 위에 올려놓고, (3) 열전소재의 분말을 넣은 후, (4) 다시 확산방지층 foil을 열전소재 분말 위에 올려놓고, (5) graphite 몰드에 상후 punch를 위치시킨 후, (6) HP 또는 SPS 공정을 진행함에 의해 열전소자 제조를 위한 샘플을 제조할 수 있다. Skutterudite계 열전소재의 경우 소결체 제조를 위한 SPS 공정 온도인 670 ~ 730℃의 온도범위에서 동시소결을 진행할 경우 우수한 부착특성을 구현할 수 있다. 그림 3에 나타낸 확산방지층이 접합된 열전소재 샘플 사진에서 알 수 있듯이 확산방지층의 박리 현상 또는 불균일 접합에 대한 현상을 관찰되지 않았으며, 열전소재와 확산방지층 계면에 대한 미세구조 관찰 결과 열전소재와 확산방지층 소재 간 반응이나 dry joint 등의 결함구조가 없는 매우 균일한 계면구조를 형성할 수 있다. 이렇게 제조한 샘플을 설계된 크기로 가공하여 열전소자를 제조할 수 있다.

2.3 전극소재

열전발전모듈의 전극소재로는 Cu, Al, Ni 등이 많이 사용되고 있으나 [8,10,12,13], 열전소재로 skutterudite계 소재를 사용하는 경우 열전소재와 전극소재의 열팽창계수 차이가 커서 300℃ 이상의 고온에서 장시간 구동 시에 열팽창계수 차이로 발생하는 열응력 때문에 열전소자와 전극의 접합계면이 파괴되는 문제가 발생할 수 있다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 열전모듈은 열전소자와 전극이 접합되는 구조로 제조하기 때문에 skutterudite n형 Co_4Sb_{12}계 및 p형 $(Fe,Co)_4Sb_{12}$계 열전소재를 이용하여 열전발전모듈을 제조함에 있어 열전소재와 전극소재의 열팽창계수를 매칭하는 것은 열전발전모듈의 신뢰성과 직결되는 중요한 요소가 된다. Skutterudite계 열전소재의 열팽창 계수는 조성에 따라 차이가 있으나, 7.5 ~ 13.5× 10^{-6}/K 범위의 값을 나타낸다 [9,14,15]. 따라서 상온에서 열팽창계수가 각각 17 × 10^{-6}/K과 23.1 × 10^{-6}/K인 Cu와 Al을 전극소재로 사용하게 되면 skutterudite계 열전소재와의 열팽창계수 차이로 고온에서 모듈 구동 시 기계적 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 skutterudite계 열전소재와 열팽창계수가 유사한 새로운 전극소재의 개발이 요구된다. 열팽창계수가 큰 Cu와 열팽창계수가 상대적으로 작은 Mo, W, Ti 등의 합금을 제조하여 열팽창계수 매칭특성을 확보하는 것이 가능하나, 이들 금속원소들은 Cu와 합금화가 용이하지 않은 특성을 나타낸다. 이러한 기술적 한계는 Cu-Mo, Cu-W, Cu-Ti의 복합체 제조를 통하여 효과적으로 해결할 수 있다 [13,15,16]. 그림 4에 기계적혼합 및 SPS로 제조한 Cu-W 복합체의 미세구조 사진을 나타내었다.

평균입경 5 μm의 Cu 분말과 W 분말을 ball milling을 이용하여 혼합한 후, 혼합분말을 원료로 SPS 공정으로 소결체형 전극소재를 제조한 결과, 그림 4에 나타낸 바와 같이 특성크기가

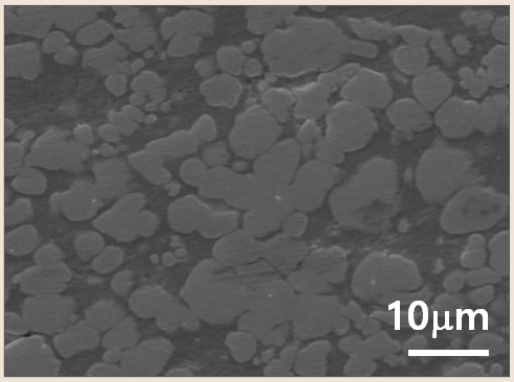

그림 4 ▸ 기계적 혼합 및 SPS 공정으로 제조한 Cu-W 복합체의 미세구조.

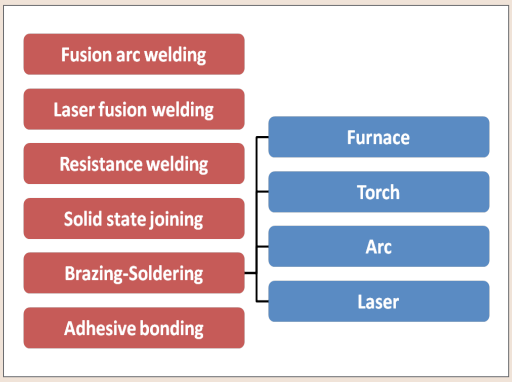

그림 5 ▸ 중고온용 열전모듈 제조 시 열전소자 - 전극 접합을 위한 공정기술.

10 μm 이하인 복합체 구조를 형성하였다. 복합체형 소결체 전극소재의 열팽창계수를 측정한 결과 Cu와 W의 혼합비율에 따라 7.5 ~ 13.5 × 10^{-6}/K 범위의 값을 나타내어 skutterudite계 열전소재와 유사한 값을 구현할 수 있음을 확인하였다. 향후, 원료분말의 특성, 혼합 비율, 제조 공정 등을 변화하여 열전소재와의 열팽창계수 매칭 뿐 아니라 전극소재에 요구되는 기능특성에 부합하는 소재 개발이 가능할 것으로 기대된다.

2.4 열전소자 – 전극 접합소재

열전소자와 전극소재를 접합하는 소재 및 공정 기술은 열전발전모듈의 성능과 구동 신뢰성과 직결되는 핵심요소 중 하나이다. 열전소자 - 전극 접합층은 기본적으로 신뢰성 있는 물리적 접합상태를 유지해야 하며, 전기적/열적 손실이 적고 고온에서 화학적인 안정성을 유지해야 하는 여러 가지 조건을 모두 충족해야 한다. 접합층을 형성할 시에는 chemical reaction state를 형성한 후 thermal diffusion state가 진행되지 않는 상태로 유지하는 것이 이상적인 접합층의 상태이며, 최초의 물리적 접합 구현 시 접합강도가 낮은 문제 해결을 위해서는 physical contact state를 형성하는 것이 필요하다. 이는 기본적으로 열전소자에 코팅한 확산방지층과 전극에 대한 접합소재의 wetting 특성을 향상하여 해결할 수 있다.

중고온용 열전발전모듈의 열전소자 - 전극 접합재료로 가장 많이 연구되고 있는 소재 중 하나는 Ag 및 Al계 paste이다. Ag, Al의 함량, 특성 및 크기, 유기물의 종류 및 배합, 첨가제 등에 의해 특성이 변화하므로 열전소재, 확산방지층, 전극소재의 열적/화학적 안정성을 고려하여 적용하는 접합공정에 맞는 소재를 선택하는 것이 필요하다. 열전소자와 전극의 접합을 위해 활용 가능한 공정기술은 그림 5에 나타내었다. 중고온용 열전발전모듈 제작을 위해서는 일반적으로 통전가압(resistance welding) 및 브레이징(brazing) 공정이 많이 이용되고 있다.

Ag계 또는 Al계 paste를 접합소재로 사용하여 그림 6에 나타낸 공정과 같이 paste 도포(printing), paste 건조(drying) 및 가압열처리(pressure induced heat treatment)를 통하여

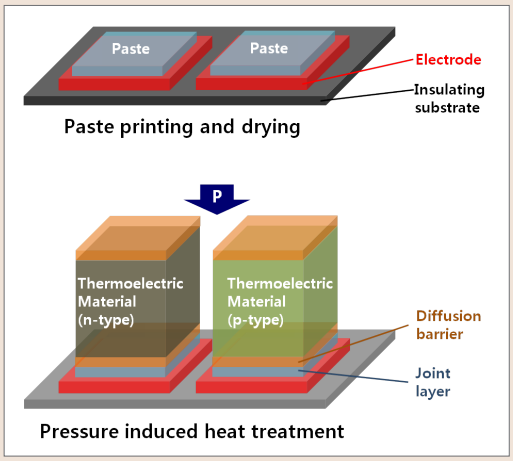

그림 6 ▸ Paste 접합소재를 이용한 열전소자 – 전극 접합 공정.

Mo을 확산방지층으로 코팅한 skutterudite계 열전소자와 Cu-W 복합체 전극소재의 접합을 진행한 결과 결함구조가 거의 없는 접합계면을 형성하였다.

그러나, 인장시험으로 평가한 접합강도가 3 MPa 이하로 낮은 특성을 나타내었다. 이는 paste 내의 Ag 또는 Al 입자와 열전소자 및 전극과의 젖음(wetting) 특성이 좋지 않은 것이 원인으로 판단된다. 이러한 문제를 개선하기 위한 효과적인 방법 중 하나는 젖음성을 개선할 수 있는 첨가제를 혼합한 paste를 사용하는 것이다. Ag paste의 젖음성 개선을 위해 첨가제로 많이 사용되는 산화물 유리를 사용하게 되면, 젖음성 개선에는 효과적일 수 있으나 산화물 유리의 전기전도도와 열전도도가 매우 낮아 열전모듈의 성능을 감소하는 원인이 된다. 따라서 젖음성을 개선함과 동시에 전기전도도 및 열전도도의 저하가 발생하지 않는 첨가제의 개발이 요구되며, 이를 위한 효과적인 첨가제 중 하나는 비정질 합금(bulk metallic glass) 소재이다.

산화물 유리를 첨가제로 사용한 경우와 달리, 첨가제로 비정질 합금을 사용한 경우에는 paste 내에 존재하는 Ag 입자와 전극소재와의 접합특성이 개선됨은 물론 매우 얇은 젖음층 형성이 가능할 것으로 기대된다. Ag 입자와 Si 기판과의 젖음성 증대 및 얇은 특성 두께의 계면 형성은 태양전지 모듈에서 확인된 바 있다 [17]. 또한 열처리 후 비정질 합금이 결정화되면서 높은 열전도도와 전기전도도 특성을 발현하게 되어 열전모듈의 발전출력에 큰 영향을 미치지 않는 장점이 있다. 비정질 합금은 융점 이하의 온도에서 유리전이거동을 나타내며 유리전이온도 부근에서 급격한 점도의 저하를 나타내기 때문에 이러한 거동을 가능하게 할 것으로 기대된다. 비정질 합금 분말은 일반적으로 급속응고공정으로 제조가 가능하며, 급속응고공정으로는 gas atomization, melt spinning 등의 공정이 활용될 수 있다.

Metal filler도 열전소자 - 전극 접합소재로 이용되고 있다 [16]. 예를 들어, Ag, Cu, Zn, Sn이 주성분인 metal filler는 구성성분의 비율에 따라 600 ~ 800℃ 온도범위에서 융점조절이 용이하여 조성과 미세구조에 따른 skutterudite계 열전소재의 소결온도를 고려한 접합소재의 선택이 용이하다. Paste와 metal filler 이외에 고온 solder(braze alloy)도 접합소재로 사용 가능하며, ribbon, wire, paste 등 다양한 형태로 제조할 수 있다. 조성에 따라 공정 온도의 범위가 매우 넓으며, Ag, Cu를 주성분으로 In, Ti 등을 첨가하면 600 ~ 800℃ 온도범위에서 공정이 가능한 solder를 제조할 수 있다.

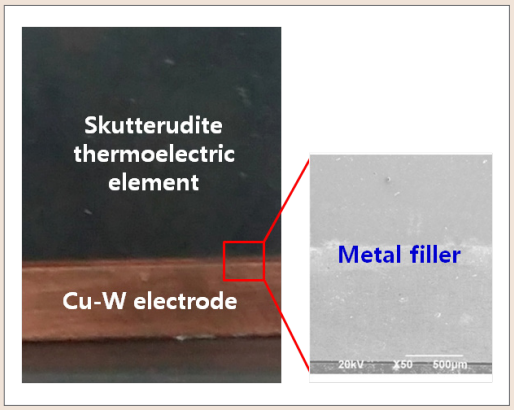

그림 7 ▸ Metal filler를 이용하여 통전가압법으로 제조한 열전소자 – 전극 접합 샘플.

Metal filler와 고온 solder를 이용한 접합에는 그림 5에 나타낸 바와 같이 다양한 공정이 가능하지만, 통전가압 또는 브레이징 공정을 사용할 경우 가장 우수한 특성이 구현되고 있다. 통전가압은 접합면에 높은 압력을 인가하면서 이와 동시에 높은 전류를 인가하여 저항 형성으로 열이 가해져 접합이 되는 공정이다. 그림 3의 모식도와 유사한 형태로 열전소자와 전극 사이에 고체상태의 metal filler 또는 고온 solder를 위치하고 SPS 설비를 이용하면 접합을 진행할 수 있다. 그림 7에 Ag계 metal filler를 이용하여 SPS로 접합한 열전소자 - 전극 샘플 사진 및 계면에 대한 미세구조를 나타내었다. Skutterudite계 열전소자와 Cu-W 전극 간 계면구조는 dry joint 등 결함이 관찰되지 않는 우수한 특성의 계면을 형성하였고, 원소 분석 결과 열전소자와 전극소재 간 물질 확산이 없는 화학적으로도 안정한 구조가 형성되었다.

통전가압 공정인자로는 (1) 압력, (2) 온도, (3) metal filler 또는 고온 solder의 종류, (4) 분위기, (5) roughness 등이 있으며, 접합계면 구조 최적화를 위해서는 이들 공정인자의 최적화 연구가 필요하다. 통전가압 공정의 기술적 어려움은 접합계면에서 균일한 온도를 형성하는 것으로 현재의 기술로는 동일한 조건에서 제조한 샘플 간에도 접합저항 값의 편차가 큰 문제가 있다. 이를 해결하기 위한 요소기술이 확립되어야만 신뢰성 있는 모듈의 양산이 가능하다.

통전가압법 이외에 브레이징 공정도 열전소자 - 전극 접합공정으로 많이 활용되고 있다. Skutterudite계 모듈 제조 시 일반적으로 브레이징 설비의 지그에 절연기판/전극 - 접합소재 - 열전소자 - 절연기판/전극 구조의 모듈제작용 시료를 장착하고 모듈의 한쪽만을 가열하여 접합을 진행한 후 다른 한쪽을 다시 접합한다. 이를 위해 모듈의 상단부에는 방열부가 설치되어 있고, 하단부에는 가열부가 설치되어 있는 설비를 이용한다. 이는 모듈에서 요구되는 접합특성 구현을 위한 브레이징 공정 온도가 skutterudite계 열전소재의 소결온도 보다 높기 때문에 발생하는 열전소재의 구조적/화학적 변화를 방지하기 위함이다. 특히, 고성능의 나노구조화 열전소재를 적용할 경우 접합공정 중에 미세구조의 특성크기가 급격하게 증가하여 열전성능이 감소하는 문제가 발생한다. 이상과 같은 2단계의 브레이징 공정을 이용하면, 그림 8에 나타낸 바와 같이 열전소자에 코팅된 확산방지층과 전극 간에 결함구조가 없는 우수한 계면구조를 형성할 수 있다.

최근, 2단계의 브레이징 공정의 간소화와 접합특성의 개선을 위해 100℃/min 이상의 급

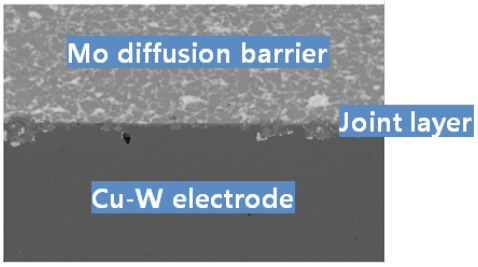

그림 8 ▸ 브레이징 공정으로 제조한 열전모듈의 열전소자 – 전극 계면 미세구조.

그림 9 ▸ 유도가열 방식을 채용한 고속승온 브레이징 설비.

속 승온이 가능한 브레이징 설비 개발이 진행되고 있다(현재 상용 브레이징 설비의 최대 승온속도는 약 10℃/min 수준). 그림 9에 나타낸 유도가열(induction heating) 방식을 채용함에 의해 기존 저항가열식 설비와 비교하여 승온속도를 10배 수준 증가할 수 있는 브레이징 설비 구현이 가능하다. 이러한 고속 승온 설비는 매우 빠른 시간 내에 접합공정을 가능하게 하므로, 열전소재가 고온에 노출되는 시간이 짧아 나노구조화 소재를 적용하는 경우에도 활용이 가능한 장점이 있다.

그림 9의 상단 왼쪽 사진은 브레이징 설비의 챔버로 고진공 분위기 형성을 위해 실링이 가능한 구조를 적용하였고, 브레이징 공정 후 접합특성 발현을 위한 고속 냉각을 위해 챔버 외부에 냉각수 라인을 설치하였다. 그림 9의 상단 오른쪽 사진은 열전모듈의 브레이징 공정이 진행되는 graphite 재질의 내부 챔버와 고속 승온을 위한 induction heating 시스템에 대한 사진이며, 하단의 사진은 graphite 내부 챔버의 사진이다. 이와 같은 방식으로 브레이징 공정을 진행하면 고진공의 분위기 형성이 가능하며, induction heating 시 graphite 내부 챔버가 급속하게 가열되어 100℃/min 이상의 급속 승온 조건에서 접합공정을 진행할 수 있기 때문에 매우 짧은 시간 내에 접합공정이 완료되어 열전소재의 구조적/화학적 변화를 수반하지 않음과 동시에 1회의 브레이징 공정으로 모듈제작이 가능할 것으로 기대된다.

3. 맺음말

본 논문에서는 skutterudite계 열전소재를 적용한 중고온용 열전발전모듈 제작에 요구되는 소재 및 공정 기술에 대해 기술하였다. 열전발전모듈의 성능과 신뢰성 확보를 위한 소재 기술로는 열전소재에 적용되는 확산방지층 소재, 열전소자와 열팽창계수 매칭 특성이 우수한 전극소재 및 열전소자와 전극소자를 접합할 수 있는 접합소재의 개발이 요구되며, 현재 소재 설계 및 합성 기술을 이용하여 열전소재의 특성을 고려한 다양한 소재군이 확보되고

있다. 모듈화를 위한 공정 기술 측면에서는 확산방지층의 형성 및 전극소재의 제조와 관련한 공정기술은 최적화 연구를 통해 완성도가 높은 기술 확보가 가능할 것으로 기대된다. 하지만 열전소자와 전극소재를 접합하는 공정기술은 아직 모듈 상용화에 요구되는 특성을 구현하지 못하는 실정으로 모듈의 특성에 영향을 미치는 세부 공정인자의 규명 및 공정능을 혁신적으로 개선할 수 있는 설비개발이 함께 요구된다.

참/고/문/헌

[1] G. J. Snyder and E. S. Toberer, *Nat. Mater.*, 7, 105 (2008).

[2] B. C. Sales, D. Mandrus, and R. K. Williams, *Science*, 272, 1325 (1996).

[3] G. S. Nolas, D. T. Morelli, and T. M. Tritt, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 29, 89 (1999).

[4] J. R. Sootsman, D. Y. Chung, and M. G. Kanatzidis, *Angew. Chem.*, 48, 8616 (2009).

[5] M. Rull-Bravo, A. Moure, J. F. Fernández, and M. Martín-González, *RSC Adv.*, 5, 41653 (2015).

[6] S. M. Choi, K. H. Kim, S. M. Jeong, H. S. Choi, Y. S. Lim, W. S. Seo, I. H. Kim, *J. Electron. Mater.*, 41, 1004 (2012).

[7] J. Q. Guo, H. Y. Geng, T. Ochi, S. Suzuki, M. Kikuchi, Y. Yamaguchi, and S. Ito, *J. Electron. Mater.*, 41, 1036 (2012).

[8] J. R. Salvador, J. Y. Cho, Z. Ye, J. E. Moczygemba, A. J. Thompson, J. W. Sharp, J. D. Koenig, R. Maloney, T. Thompson, J. Sakamoto, H. Wang, and A. A. Wereszczak, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 12520 (2014).

[9] T. Ochi, G. Nie, S. Suzuki, M. Kikuchi, S. Ito, and J. Q. Guo, *J. Electron. Mater.*, 43, 2344 (2014).

[10] E. Alleno, N. Lamquembe, R. Cardoso-Gil, M. Ikeda, F. Widder, O. Rouleau, C. Godart, Yu. Grin, and S. Paschen, *Phys. Status Solidi A*, 211, 1293 (2014).

[11] J. R. Salvador, J. Y. Cho, Z. Ye, J. E. Moczygemba, A. J. Thompson, J. W. Sharp, J. D. Koenig, R. Maloney, T. Thompson, J. Sakamoto, H. Wang, A. A. Wereszczak, and G. P. Meisner, *J. Electron. Mater.*, 42, 1389 (2012).

[12] G. C. Jorge, V. P. Anthony, K. Andreas, V. Paz, and M. Gao, *J. Electron. Mater.*, 42, 1369 (2012).

[13] Q. H. Zhang, X. Y. Huang, S. Q. Bai, X. Shi, C. Uher, L. D. Chen, *Adv. Engineer. Mater.*, 18, 194 (2016).

[14] G. Rogl, L. Zhang, P. Rogl, A. Grytsiv, M. Falmbigl, D. Rajs, M. Kriegisch, H. Müller, E. Bauer, J. Koppensteiner, W. Schranz, M. Zehetbauer, Z. Henkie, and M. B. Maple, *J. Appl. Phys.*, 107, 04507 (2010).

[15] W. Liu, Q. Jie, H. S. Kim, and Z. Ren, *Acta Mater.*, 87, 357 (2015).

[16] P. Zong, R. Hanus, M. Dylla, Y. Tang, J. Liao, Q. Zhang, G. J. Snyder, and L. Chen, *Energy Environ. Sci.*, 9, 517 (2016).

[17] S. S. Jee, S. Y. Kim, S. J. Kim, J. M. Park, K. H. Lee, J. H. Lee, K. H. Park, J. N. Heo, S. M. Lee, I. T. Han, K. R. Lim, W. T. Kim, D. H. Kim, and E. S. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 084104 (2012).

저 / 자 / 약 / 력

성명 문 승 필

학력

1996년	경상대학교 전기공학과 공학사
1998년	경상대학교 전기공학과 공학석사
2003년	경상대학교 전기공학과 공학박사

경력

2002년 - 2007년	한국전력공사 전력연구원 연구원
2007년 - 현재	한국전력공사 전력연구원 선임연구원
2010년 - 현재	대한전기학회 편집위원

성명 김 성 웅

학력

1998년	전남대학교 금속공학과 공학사
2000년	전남대학교 금속공학과 공학석사
2003년	동경공업대학교 재료공학과 공학박사

경력

2003년 – 2004년	일본과학진흥기구 연구원
2004년 – 2008년	동경공업대학교 연구원
2008년 – 2012년	동경공업대학교 부교수
2012년 – 현재	성균관대학교 에너지과학과 교수

성명 이 규 형

학력

1997년	연세대학교 세라믹공학과 공학사
1999년	연세대학교 세라믹공학과 공학석사
2005년	연세대학교 세라믹공학과 공학박사

경력

2005년 – 2007년	일본과학진흥기구 연구원
2007년 – 2014년	삼성전자종합기술원 전문연구원
2014년 – 현재	강원대학교 나노응용공학과 조교수