

다공체 내 연소의 열광전 발전에의 적용과

단일, 다중채널 및 다공체 내 초과 엔탈피 연소의 상사성

이대근*†

Application of Combustion in Porous Inert Medium to Thermophotovoltaic Generation of Electricity and Excess Enthalpy Combustion Similarity to both Single and Multi-channels

Dae Keun Lee*†

ABSTRACT

Thermophotovoltaics is the direct energy conversion technology from thermal to electric (voltaic) energy via photon radiation, without any thermodynamic cycle. It is, in general, accomplished by immersing solid body in high temperature heat source (e.g. combustion field), in order to achieve high intensity irradiation, and by receiving the radiation thereof on photovoltaic cells. In this paper, advantages of combustion in porous inert medium in applying to the thermophotovoltaics are discussed in a view of its excess enthalpy features. In addition, the similarities of flame behaviors in porous inert medium to both in single and multi-channels are described.

Key Words : Thermophotovoltaics, Combustion in porous inert medium, Excess enthalpy combustion, Similarity, Thermal radiation

본 논문에서는 복사에너지의 효과적인 방사체로서 다공체 내 연소를 열광전 발전에 적용하기 위해 진행되고 있는 연구 결과를 소개하고, 더불어 다공체 내 화염의 안정화와 효율적인 연소 및 복사광 방출 제어를 위한 기초적인 연구로서 다공체 내 연소가 가지는 단일 채널 및 다중 채널 내 화염 전파와의 상사성에 대해 논의한다.

열광전(thermophotovoltaic, TPV) 발전은 고온의 열원에서 방사되는 복사 에너지, 즉 광자(photon)를 태양전지와 같은 광전소자(photovoltaic(PV) cell)에 조사하여 전기를 생산하는 기술이다 [1,2]. 연소 열원을 고려할 때 TPV 발전은 열동력학적 사이클을 따르지 않으므로 Carnot cycle의 효율제한을 받지 않는 직접 발전기술이며, 종래의 발전 및 동력기술과 달리 동적 요소를 포함하지 않으며, 압축·착화과 같은 비정상상태가 아닌 정상상태의 고효율 연소가 가능하고, 연소가스가 작동유체로서 작용하지 않으므로 연소와 발전의 완전한 분리를 통해 효과적인 연소제어가 용이한 장점이 있다.

TPV 발전을 위해서는 각 에너지 전환 단계(Fig. 1a, T-to-P and P-to-V)에서 효과적인 전환이 달성되어야 하는데, 특히 첫 단계인 TP 전환에서는 고체복사의 높은 방사율을 활용할 수 있도록 고체 방사체(emitter), 주로 SiC가 채택된다. 후체 또는 회체복사의 과장별 복사에너지의

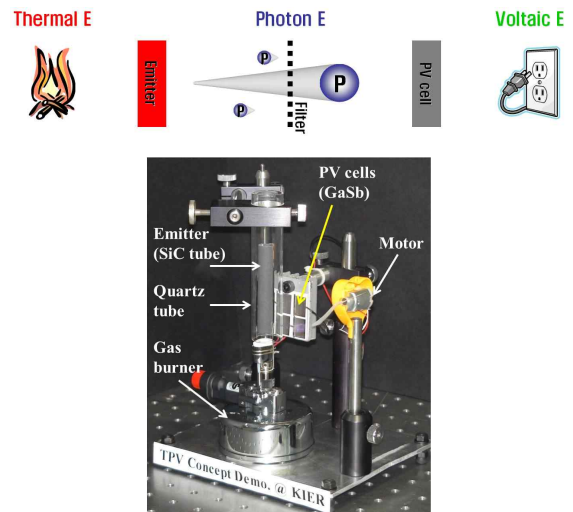


Fig. 1 TPV energy conversion (a, upper) and its concept demonstration at KIER (b, lower)

* 한국에너지기술연구원

† 연락저자, dklee@kier.re.kr
TEL : (042)860-3341

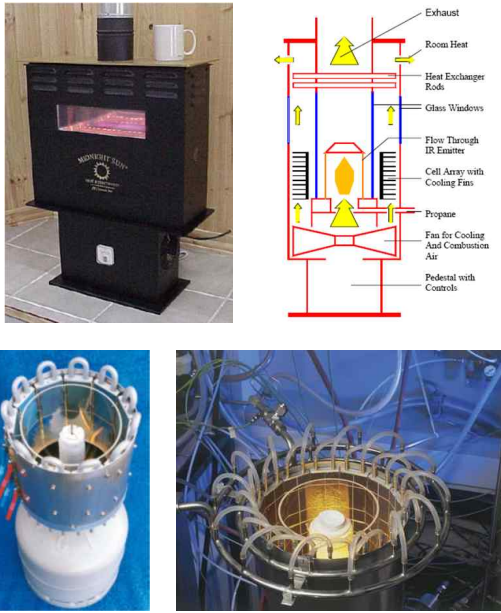


Fig. 2 First commercial TPV CHP system by JX Crystals (upper) and Si-based TPV system by PSI (lower)

스펙트럼은 Wien's law에 따라 4000K 이하에서는 적외선 영역에서 최대값을 가지므로, 연소 열원을 이용할 때는 이와 부합할 수 있는 낮은 밴드갭(bandgap)의 PV cell(대표적으로 GaSb)을 사용해야 한다. 한편 일반적인 회체복사와 달리, 특정 파장대의 빛만을 집중적으로 방사하는 물질이 있는데 대표적인 것이 희토류 금속 산화물이다[3]. 특히 Yb_2O_3 의 경우 $0.827 \sim 1.13 \mu m$ 의 방사대역과 $0.98 \mu m$ 의 최대 방사파장을 가지므로, 저가의 실리콘 태양전지($1.11 \mu m$ 의 밴드갭)와 잘 부합하는 조합이다. 이와 같이 TPV 발전의 고효율화를 위해서는 에너지 전달자 photon의 파장에 따른 방사체와 PV cell의 조합이 중요하다[4].

TPV 발전기술의 개념이 1950년대 중반 H.H. Kolm, P. Aigrain 교수들에 의해 창안된 이래[2], 6-70년대에는 미 육군의 지원 하에 GM 및 Boeing사 등에 의해 연구가 진행되었고, 현재는 JX Crystals, MIT, EDTEK, PSI, CANMET 등에서 연구를 주도하고 있다. 미국의 JX Crystals 사에서는 GaSb cell의 원천특허를 바탕으로 세계



Fig. 3 Combustion in porous SiC media of foam(a), wrapped felt(b) and chopped fiber(c,d)

최초의 TPV CHP 시스템을 개발하여 시판하였고[5], 스위스의 PSI는 희토류금속산화물의 선택복사와 저가의 Si cell을 이용하는 기술을 연구하고 있다[6].

연소 열원을 이용하는 TPV의 발전효율은 현재 5%를 넘지 못하고 있다. 주 요인은 TP 전환에서 열의 재생(thermal recuperation)을 통한 효과적인 복사광 방출이 이루어지지 못하고 있기 때문이며, PV 전환에서는 PV cell의 밴드갭에 부합하지 못하는 복사 스펙트럼 대역의 재생(photon recuperation)이 부족함때 기인한다. 본 연구에서는 효과적인 TP 전환을 위한 다공체 내 연소기술에 대해 연구하였다.

Weinberg 교수에 의해 창안된 초과 엔탈피 연소[7]는 연소장 내에 다공체를 삽입함으로써 달

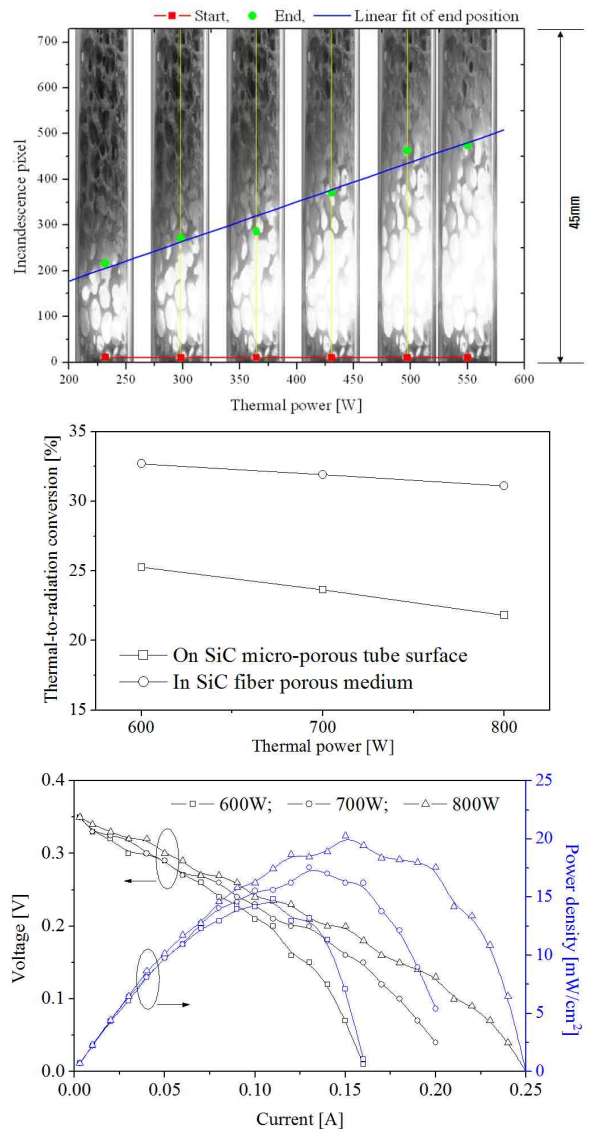


Fig. 4 Irradiation of SiC foam burner (a), and TP conversion (b) and I-V-P profiles (c) of SiC-fiber porous burner

성될 수 있다[8]. 이 때 다공체를 통한 전도 및 복사 열전달에 의해 배기가스의 열에너지가 미연 가스 측으로 재순환되어 단열화염 이상의 온도에도달할 수 있다. 흑체복사의 총 에너지는 온도의 4승에 비례하므로, 다공체 내 고온 연소는 TPV 발전의 방사체로서 적합하다 하겠다. 다공체 내 연소의 효과적인 TP 전환효율은 Fig. 3과 같은 다양한 형태의 다공체 연소기를 통해 확인하였다. 석영관 내부에 설치된 원통형 SiC foam의 아래에서 공급되는 CH₄-air 예혼합기를 적절히 점화하여 화염의 거동 및 복사 열유속을 측정할 결과(Fig. 3a, Fig.4a [4]), 당량비 0.8에서 화염은 부하에 관계없이 다공체의 상류측 입구에 부착된 형태를 보이며, 부하에 따라 발광영역의 선형적 증가 및 TP 전환 효율의 증가(실험 영역 내에서 최대 약 16%)를 관찰하였다. 한편 당량비가 0.95 이상이면 연소부하에 따라 역화가 발생하는데, 다공체 내 화염의 안정화가 주요 관건임은 선행 연구[9,10]를 통해서도 확인할 수 있다.

한편 최대 16%의 TP 전환효율은 기대 이하의 값이며, 이는 원통형 SiC foam의 옆면이 석영관을 통해 외기에 노출되어 복사광을 방출하는 foam의 골격 온도가 상대적으로 낮은 것에 기인한다. 만일 그 골격의 단면 크기가 충분히 작다면 보다 효과적인 열전달을 통해 고온에 도달할 수 있을 것이다. 이를 확인하기 위해 SiC felt를 미세 다공성 관의 주위로 감은 형태의 연소기(Fig. 3b)와 SiC fiber를 짧게 잘라 석영관 내부에 충전한 다공체 연소기를 시험하였다. 먼저 전자의 경우 felt가 매우 촘촘하게 직조되어 그 내부로 화염을 전파시키기 어려웠으며 대부분의 경우 표면연소가 발생하였다. 반면 후자(Fig. 3c,d)의 경우 안정적인 연소가 가능한데, 획득한 TP 전환효율은 최대 약 33%에 달하며 이는 원통형의 SiC micro-porous tube의 표면연소를 통한 TP 전환효율 대비 약 50% 가량 증가한 값이다(Fig. 4b). 한편 JX Crystals사에서 제작한 GaSb 단진지를 이용하여 발전 시험을 수행하였으며, 그 결과(Fig. 4c) PV cell의 전형적인 I-V-P 곡선과 유사하였고 최대 약 20 mA/cm²의 출력밀도를 획득하였다.

이러한 다공체 연소기에서 화염의 안정화 및 효과적인 TP 전환을 도모하기 위해서는 내부 열전달에 의해 발생하는 초과 엔탈피 연소의 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 메소 스케일의 직경을 가지는 단일 채널 내부를 전파하는 화염(Fig. 5a)과 열 재순환에 대해 연구하였다[11]. 그 결과(Fig. 6) 관 내 대류열전달 파라미터에 따라 전혀 다른 두 가지의 regime이 존재함을 이론적으로 보였으며, 화염의 전파 속도 V 가 수-수십 mm/min에 불과한 새로운

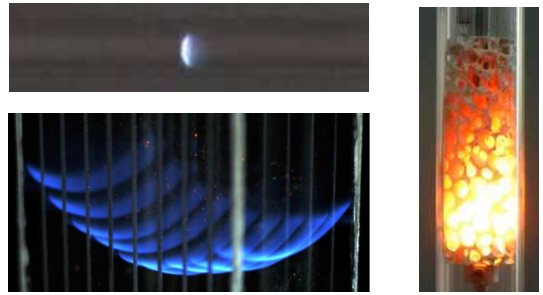


Fig. 5 Flame propagation in a single channel (a, left upper), multi-channel (b, left lower) and porous medium (c, right)

branch는 활발한 열 재순환에 의해 발생하며 이 때 발생하는 초과 엔탈피 연소영역($m > 1$)을 확인하였다. 그러나 단일 채널 내 연소는 다공체 내 화염 전파의 측면 방향으로 발생하는 물리량의 변화를 모사할 수 없는 한계가 있다.

이를 위해 메소 스케일의 사각 채널을 적층한 다중 채널 내 화염 전파 특성을 연구하였으며 [12], 그 대표적인 결과는 Fig. 7과 같다. 유입되는 예혼합기의 당량비(ϕ)와 유속(U_0)에 따라 다양한 현상이 관찰되는데, 특히 안정한 화염으로부터 유속을 감소시킬 때 화염의 역화나 소화가 발생하는 임계 당량비가 존재함을 확인하였으며 이는 단일 채널 내 화염전파와 동일한 결과이다.

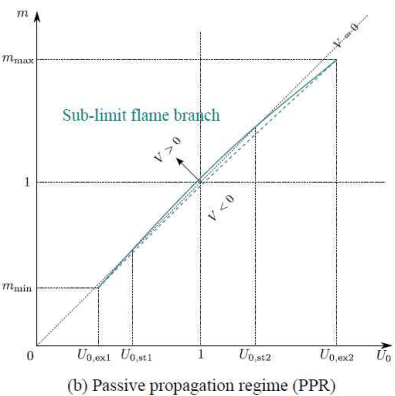
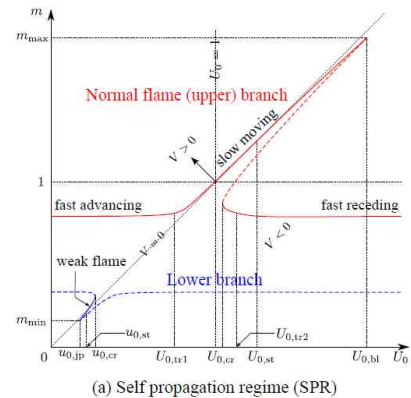


Fig. 6 Flame propagation characteristics in a single meso-scale channel [11]

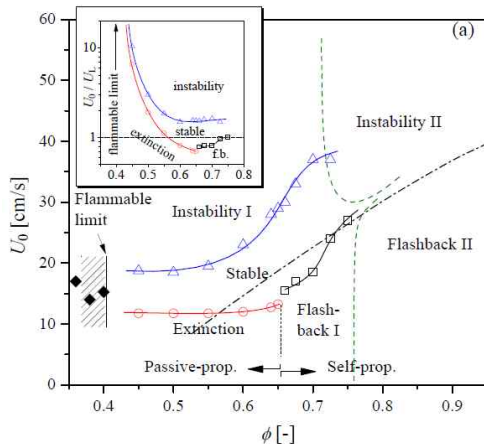


Fig. 7 Flame propagation characteristics in a multi-channel [12]

한편 유속을 증가시켰을 때 발생하는 화염의 진동은 유효 Lewis 수의 증가에 따른 pulsating instability임을 확인하였다. 이러한 다중 채널 내 화염 전파 특성은 일반 다공체 내 연소에서도 확인된다[9,13]. 특히 세라믹 허니컴 내부 화염 안정화 특성(Fig. 8)은 Fig. 7(inset)의 다중 채널 내 화염과 매우 유사함을 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 다공체 내 연소가 고효율의 복사 방사체로서 TPV 발전에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한 그 내부에서의 화염 전파 특성은 동일한 매커니즘의 열 재순환이 발생하는 단일 채널 및 다중 채널 내 화염과 매우 유사함을 이론적·실험적으로 보였다. 이를 통해 TPV 방사체로서 다공체 내 연소의 안정화 및 보다 효율적인 TP 전환을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 기관고유사업의 일환(GP2009-0041/1)으로 수행되었습니다. 본 연구 중 단일 채널 내 연소에 도움을 주신 일본 Tohoku 대학의 Kaoru Maruta 교수와 다중 채널 내 연소에 도움을 주신 중앙대의 김남일 교수께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] D.L. Chubb, Fundamentals of Thermo-photovoltaic Energy Conversion, 2007, Elsevier
 [2] R.E. Nelson, "A brief history of thermo-photovoltaic development", Semicond. Sci. Technol., 18, S141-S143, 2003; This issue of the journal is the special one on TPV.
 [3] G.E. Guazzoni, "High-temperature spectral emittance of oxides of erbium, samarium, neodymium and ytterbium", App. Spec., 26,

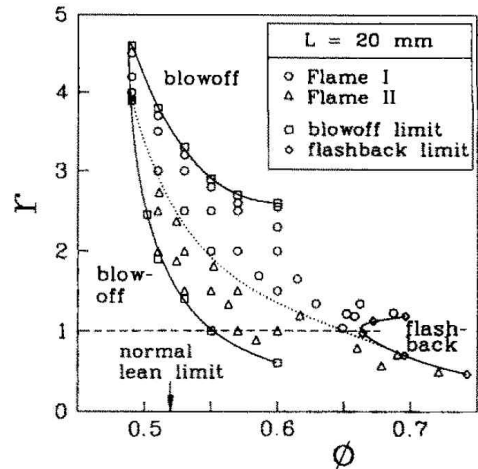


Fig. 8 Flame propagation characteristics in a honeycomb ceramic [13]

60-65, 1972
 [4] D.K. Lee, J.H. Yu, S.J. Ahn, "Preliminary study on the combustion and incandescence of SiC foam combustor aiming at thermophotovoltaic application", 37th KOSCO Symposium, 219-225, 2008
 [5] JX Crystals Inc., <http://www.jxcrystals.com>
 [6] W. Durisch, B. Bitnar, J.-C. Mayor, F. von Roth, H. Sigg, H.R. Tschudi, G. Palfinger, "Small self-powered grid-connected thermophotovoltaic prototype system", App. Energy 74, 149-157, 2003
 [7] G.J. Weinberg, "Combustion temperatures: The future?", Nature, 233, 239-241, 1971
 [8] T. Takeno, K. Sato, "An excess enthalpy flame theory", Combust. Sci. Technol. 20, 73-84, 1979
 [9] M.R. Henneke, J.L. Ellzey, "Modeling of filtration combustion in a packed bed", Combust. Flame 117, 832-840, 1999
 [10] A.J. Barra, J.L. Ellzey, "Heat recirculation and heat transfer in porous burners", Combust. Flame 137, 230-241, 2004
 [11] D.K. Lee, K. Maruta, "Heat recirculation effects on flame propagation and flame structure in a mesoscale tube", Combust. Theory Model., 16, 507-536, 2012
 [12] D.K. Lee, S.I. Park, N.I. Kim, "Experimental study of flame propagation and pulsating instability in a multiple-mesoscale-channel as a model porous medium burner", (will be reported elsewhere)
 [13] D.K. Min, H.D. Shin, "Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic", Int. J. Heat Mass Transfer 34, 341-356, 1991