

산업 폐열회수를 위한 열전발전시스템 개발 연구

최병준 · 최영찬 · 홍재창 · 박태준 · 박주석 · D.M. Rowe*

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부
*University of Wales, Cardiff, UK

Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste Heat Recovery

Choi Byoung Jun, Choi Young Chan, Hong Jae Chang, Park Tae Jun,
Park Joo Seok and D.M. Rowe*

Korea Institute of Energy Research, Energy environment research department
*University of Wales, Cardiff, UK

요 약

본 연구에서는 폐열회수를 위한 열전발전기술개발의 일환으로 자체 고안한 열전발전시스템을 구성하였고 상용화된 열전모듈을 적용하여 다양한 온도범위에서 열전모듈의 출력성능을 시험하였다. 시스템에 적용된 실험용 열전소자로는 49개의 열전쌍으로 구성된 미국 A사의 모듈과 127개의 열전쌍으로 구성된 국내 B사에서 제조한 모듈을 사용하였으며, 열전모듈 한 개에 대하여, 그리고 5개의 모듈을 직렬로 연결하여 온도차(ΔT)를 변화시키면서 이때의 출력 변화를 측정하였고, 또한 150°C로 고정된 온도차에서 부하 저항을 변화시키면서 출력성능을 실험하여 발전출력에 미치는 시스템인자들을 조사하고 이를 적용한 발전시스템의 최적조건을 도출하고자 하였다.

Abstract — Thermoelectric Generation (TEG) System was designed for the research on the waste heat recovery technology and performance test of commercial TEG modules was undertaken in the various temperature range. Tested modules were Bi-Tc based module from U.S. consisted of 49 thermocouples and Bi-Tc based module (domestic production) consisted of 127 Thermocouples Output values of one module and of five modules connected in series were examined with the temperature difference (ΔT) change and also with the load change at the given temperature difference ($\Delta T=150^\circ\text{C}$) in order to understand the system factors which dominate the modules performance and optimize the TEG system.

1. 서 론

석유, 천연가스 매장량의 한계성과 화석연료 사용에 따른 공해문제와 지구온난화문제는 오늘날 인류에게 부과된 시급한 해결과제이다. 세계의 많은 국가들은 새로운 에너지 이용기술개발과 환경문제 및 지구온난화문제 해결을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라는 산업체에서 약 4,000만 TOE/yr의 막대한 에너지가 버려지고 있으며^[1], 그간 폐열회수를 위한 많은 노력을 기울여 왔으나 기존기술이 한계에 도달하여 폐열을 회수하여 이용할 수 있는 보다 새로운 기술개발의 필요성이 증

대되고 있다. 최근 반도체의 기술개발에 힘입어 미국, 영국, 소련, 일본 등은 우주선에서의 전력이용, 전자기기, 의료기기 등에 이용하기 위한 열전발전 및 열전냉각 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

열전발전(Thermoelectric Power Generation)이란 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 열과 전기의 에너지직접변환을 이용하는 것으로서, 열전변환소자의 양단에 온도차를 부여함으로써 발생되는 Seebeck 효과를 이용한 발전방식이다^{[2][3]}.

열전발전은 온도차만 부여하면 발전이 가능하며 태양열^{[4][6]}, 해양온도차^[7] 같은 자연 에너지 및 공장의 폐

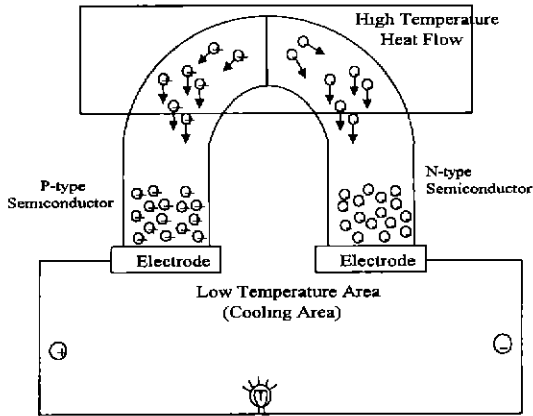


Fig. 1. Basic concept of thermoelectric generation.

수나 폐열 등의 산업폐열 등 이용할 수 있는 열원이 다양하고 에너지의 다단계 이용을 통해 에너지의 이용율을 극대화 시키고, 휴대용 전원이나 고립지역 등의 별도 전원을 구축할 수 있는 발전시스템이며, 저급열을 이용하여 전기를 얻을 수 있는 유일한 방법으로 신 개념의 발전방식이다. 폐열을 이용한 열전발전기술이 보급되면 저온에서 고온영역의 폐열을 활용하여 발전이 가능하므로 가정, 상업지역 등에서 분산전력 시스템을 구축할 수 있으며, 환경 공해 및 지구온난화문제에 크게 기여하게 될 것으로 기대된다^[8]. 또한 열전발전기술은 기존의 Rankine Cycle 발전과 같이 연소 보일러, 증기터빈 등의 연소 및 회전기가 불필요하며 구조가 매우 간

단하다. 최근 반도체 재료기술 발전 등으로 인해 신뢰성이 높고, 소음이 적으며 이용열원이 저온에서 고온도 범위까지 사용범위가 넓은 열전소재가 개발되고 있으나, 현재 개발되고 있는 열전재료의 효율이 기존 발전효율에 비해 매우 낮고 열전재료의 가격이 너무 고가인 것이 문제점으로 남아 있다.

전체 에너지소비량의 97%를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우, 에너지사용실태 측면에서 보면 그간 정부와 기업의 많은 노력에 힘입어 에너지 사용효율은 계속 향상되고 있으나, 현재 에너지 소비량의 절반 이상이 기술적, 환경적, 경제적인 측면에서 각종 폐열의 형태로 버려지고 있는 실정이다^[1]. 따라서, 이러한 막대한 폐열을 이용하여 폐열을 전기로 변환할 수 있는 기술에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 경제적 폐열의 회수를 위한 열전발전기술개발의 일환으로 자체 고안한 열전발전시스템을 구성하였고 상용화된 열전모듈을 이용하여 다양한 온도범위에서 열전모듈의 출력성능을 시험하였으며, 이를 통해 적용온도범위에 알맞은 열전모듈의 선택과 이를 적용한 발전시스템의 최적조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험장치의 구성

열전발전시스템은 외부에서 공급된 열에너지를 전기 에너지로 전환하는 특성을 갖고 있다. 본 시스템에서는 상용화된 열전모듈을 적용하여 이 모듈이 최대의 효율을 발휘할 수 있는 조건을 도출하기 위하여 열발생장치

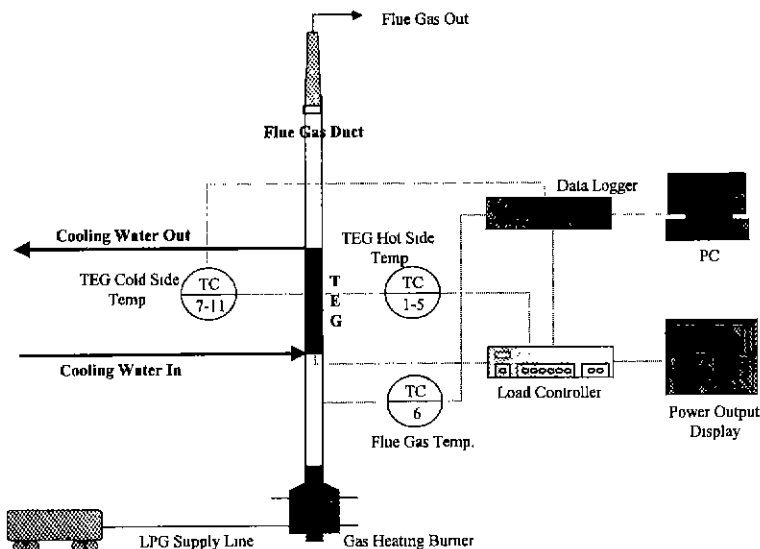


Fig. 2. Schematic diagram of thermoelectric generation system.

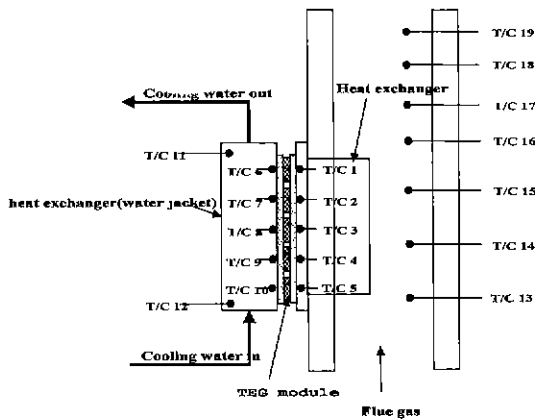


Fig. 3. Schematic diagram of thermoelectric generator.

및 모듈 설치 시스템을 설계 제작하였다. 전체적인 시스템의 구성은 Fig. 2에 나타냈으며 열전발전부(Thermoelectric generator)의 상세도는 Fig. 3에 나타내었다. 주요 구성요소로는 크게 연소버너, 연소로, 열교환장치를 포함하는 열전발전부, 데이터 처리장치 및 부하조절장치로 구성되어 있다.

연소버너는 연소로 내의 온도가 균일하게 될 수 있도록 flat type LPG 버너를 설치하였다. 버너의 용량은 대략 5,000 kcal/hr급으로 설치하였으며, 연소로의 외부는 SUS 304로 300 mm×300 mm의 사각형 단면을 갖도록 설계를 하였고, 연소가스의 배출은 자연압에 의한 형태를 취하였다.

또한 배출가스가 연소압에 의해 쉽게 배출될 수 있도록 연소가스 배출 duct의 길이를 최소화하였다. 연소로의 내부는 고온의 연소가스에 견딜 수 있는 gypsum재를 이용한 단열효과까지 고려하여 설치하였으며, 연소로를 벗어나면 SUS 304를 이용한 배출 line을 그대로 노출시켜 자연냉각이 일어날 수 있도록 하였다.

열전발전부(Thermoelectric Generator)에서는 열전모듈 고온부의 열입력과 저온부의 열방출이 원활하게 이루어질 수 있도록 열교환기를 설계하는 것이 중요하다. 이를 위해 열전도도가 높고 가공이 편리한 Cu를 사용하여, 크기가 60 mm×60 mm인 5개의 열전모듈을 설치할 수 있도록 판형으로 제작하였으며, 전체의 크기는 100 mm×340 mm×20 mm의 직육면체 형상을 갖추도록 하였다. 전면은 열의 유입을 최대화하기 위하여 연소가스의 흐름과 같은 방향으로 parallel fin 형태의 열교환기판을 부착하였으며, 또한 fin의 높이를 60 mm로 하여 열교환이 원활하게 이루어지도록 하였다. 열교환기의 후면은 냉각수가 순환하여 열전모듈에 냉열을 공급함으로써 ΔT가 얻어질 수 있도록 하였고, 냉각효과를 증대시킬 수 있도록 하기 위하여 내면에 냉각수의 흐름과 반하도록 3개의 fin을 부착하여 냉각수 순환장치의 내부에 임의로 난류를 발생시키도록 하였다.

3. 실험 방법

시스템에 적용된 실험용 열전소자로는 미국 A사의 열전발전용 모듈과 국내 B사에서 제조한 열전냉각용 모듈을 사용하였으며, 각 모듈의 사양 및 특성은 Table 1에

Table 1. Specifications and characteristics of modules used for the system.

Physical Properties	미국 A 사 module	국내 B 사 module
Dimension (cm)	W6.27×L6.27×T0.5	W6.2×L6.2×T0.53
Compressive Yield Stress	70 MPa	50 MPa
No. of active couples	49	127
Thermal Properties		
Design Hot Side Temp.	230°C	150°C
Design Cold Side Temp.	30°C	20°C
Max. Continuous Temp.	300°C	163°C
Thermal Conductivity	0.024 W/cm · K	0.0145 W/cm · K
Heat Flux	9.54 W/cm ²	2.94 W/cm ²
Electrical Properties		
Power	13 Watt	6.85 Watt
Load Voltage	1.65 Volts	3.8 Volts
Internal Resistance	0.15Ω	1.59Ω
Current	8 A	2 A
Open Circuit Voltage	3.5 Volts	6.6 Volts
Efficiency	5%	6%

나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 고온부의 최대설계온도 (maximum design temperature)는 미국 A사 모듈의 경우 300°C, 국내 B사 모듈의 경우 163°C이다. 열전모듈의 최고허용온도 이하에서의 사용은 열전모듈의 수명을 길게하고, 사용되는 열전모듈 특성에 맞는 최적의 온도 조건을 유지하는 것은 시스템의 효율 향상에 매우 중요한 요소 중의 하나이다.

각 열전소자의 성능시험은 개당 출력 및 5개의 열전 모듈을 직렬로 연결하여 출력을 측정하는 방법으로 수행되었다. 온도차(ΔT)에 따른 발전출력을 측정하기 위하여 5,000 kcal/hr급 연소버너를 사용하여 연소시 발생하는 배가스를 TEG(Thermoelectric generator) system의 고온열교환부에 부착된 열교환판을 통과하도록 하였으며, 이때 배가스의 온도는 Fig. 3에 나타난 T/C 13의 온도가 최고일 때 약 700°C, 열교환을 마친 배가스의 온도인 T/C 19의 온도가 약 400°C가 되도록 실험을 실시하였다.

열전모듈표면의 고온부(hot side)와 저온부(cold side)의 온도는 K-type, 0.2 mm teflon으로 피복된 열전대를 고온 열원부 및 저온냉각부 판(plate)에 선형의 홈을 내어 그 홈을 따라서 열전모듈의 중앙부에 열전대의 센서(sensor)가 위치하도록 설치하였다. 미국 A사 모듈의 경우는 별도의 전기절연재료가 부착되지 않아 모듈과 열교환기의 고온부 및 저온부 판의 전기절연을 위해서 0.6~1.0 mm의 세라믹판을 부착하였으며, 세라믹판과 모듈면, 세라믹판과 고온부 및 저온부 판과의 접촉면에서의 열저항을 작게 하기 위하여 각각의 접촉면에 열전도성 grease(Wakefield Eng. Inc., Thermal resistance:0.06°C/W)를 바른 후 실험하였다. 국내 B사 모듈의 경우에는 1.0 mm의 세라믹판이 부착되어 있으므로 별도의 절연판이 필요하지 않았다. 모듈의 전극부분과 측정장비와 연결선, 모듈 전극끼리의 접합에는 접촉저항을 최소화하기 위하여 공정온도 183°C의 Pb38-Sn 62 wt%의 조성을 갖는 solder를 이용하여 접합한 후 실험을 하였다. 전극부분이 이와같이 공정온도가 낮은 합금으로 soldering되어 있어 전극부분이 용융되지 않도록 온도를 조절하는데 세심한 주의가 필요하였다.

시스템의 발전출력은 열전소자에 발생하는 온도차(ΔT)가 고정되었을 때 부하저항값에 따라 변화하므로 Fig. 4와 같은 가변저항회로로 구성된 부하조절기(electronic load controller, model No. KW320-03P)를 설치하여 부하변동에 따른 시스템 출력의 영향을 알아보았다. 설정된 온도차(ΔT)는 Table 1에 나타난 바와 같이 국내 B사 모듈의 고온부 설계온도가 약 150°C이므로 두 모듈간의 성능 비교를 위하여 150°C로 설정하였다. 또한 열

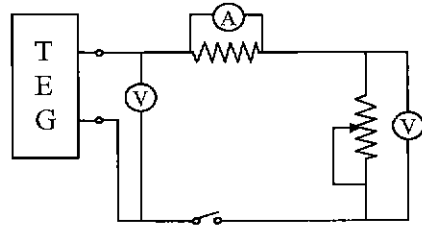


Fig. 4. Electric circuit for experiment^[9].

전소자의 발생전력이 최대가 되는 저항값으로 부하용 저항을 유지하면서 고온부의 온도를 변화시키면서 온도차(ΔT)에 따른 발전출력의 영향을 조사하였다. 고온 및 저온부의 온도, 배가스의 온도, 냉각수의 유량 등의 시스템에서의 실험조건들은 datascan 7000 data logger에 입력되어 computer에 기록되도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 1개의 모듈을 시스템에 적용시

4-1-1. 미국 A사 모듈의 경우

Fig. 5~8은 내부저항값이 0.15(± 0.05) Ω 인 상용 미국 A사 모듈 1개를 Fig. 3의 T/C 9의 위치에 부착하고 그 위치에서 노내의 배가스 온도를 약 650°C로 유지하고 실험하였을 때의 출력을 나타내고 있는데, 출력전력은 부하변동에 따라 측정된 전류와 전압으로부터 계산된 값이다. Fig. 5는 ΔT 를 150°C로 유지한 상태에서 부하의 변화에 따른 출력전력의 변화를 나타낸 것으로, 부하가 0.167 Ω 일 때 최대의 전력 6 W를 얻을 수 있었고 이때의 전류 및 전압은 저항을 변화시킬 때 전류에 대한 전압의 변화 및 이에 따른 출력전력의 변화를 나타낸 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 각각 6 A 및 1 V로 나타났다. Fig. 7은 온도차(ΔT)의 변화에 따른 부하시의 전

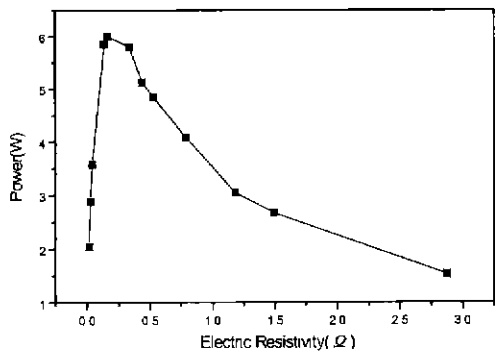


Fig. 5. Power change as a function of electric resistivity ($\Delta T=150^\circ\text{C}$).

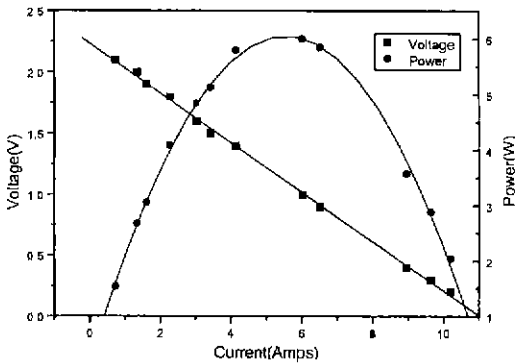


Fig. 6. Voltage and power change as a function of current ($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$).

압(open voltage)과 최대출력을 나타내는 저항값 1.67 Ω 을 부하저항으로 고정시키고 측정한 전압(load voltage)의 변화를 나타낸 것으로 $\Delta T=150^{\circ}\text{C}$ 에서 무부하시 최대 2.2 V의 전압을 얻을 수 있었으며, 저항을 0.167 Ω 으로 고정시키고 ΔT 의 변화에 따른 출력전력의 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 미국 A사 열전모듈의 출력은 온도차(ΔT)

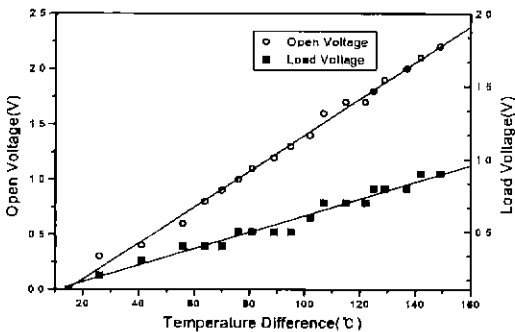


Fig. 7. Open voltage and load voltage change as a function of temperature difference.

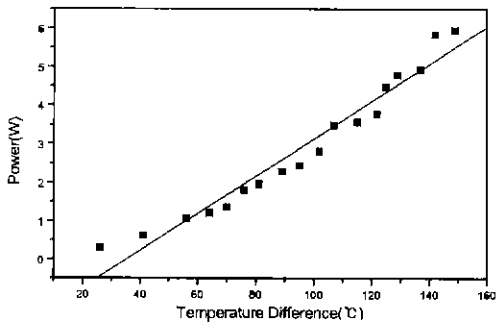


Fig. 8. Power change as a function of temperature difference.

150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 8 W이므로 주어진 모듈의 변환효율조건에서 Table 1에 나타난 모듈의 설계전력값(designed power value)에 대한 본 연구에서 고안된 시스템의 출력효율은 약 75%인 것으로 나타났다.

4-1-2. 국내 B사 모듈의 경우

Fig. 9~12는 내부저항값이 1.59(± 0.05) Ω 인 국내 B사에서 제조한 상용 열전모듈 1개를 미국 A사 모듈을 실험할 때와 같이 T/C 9의 위치에 부착하고 그 위치에서의 배가스 온도를 약 590 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지시키면서 실험한 결과이다. Fig. 9는 온도차(ΔT) 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 부하변화에 따른 출력전력의 변화를 나타내고 있으며, 부하가 2.13 Ω 에서 최대전력 5.74 W. 이때의 전류와 전압은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 각각 1.64 A와 3.5 V였다. Fig. 11은 온도차(ΔT)의 변화에 따른 무부하시의 전압(open voltage)과 최대출력을 나타내는 저항값 2.13 Ω 을 부하저항으로 고정시키고 측정한 전압(load voltage)의 변화를 나타낸 것으로 $\Delta T=150^{\circ}\text{C}$ 에서 무부하시 최대 7.5 V의 전압을 얻을 수 있었으며, 부하저항을 2.13 Ω 으로 고정시

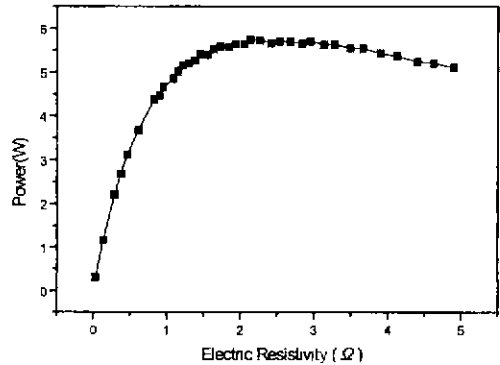


Fig. 9. Power change as a function of electric resistivity ($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$).

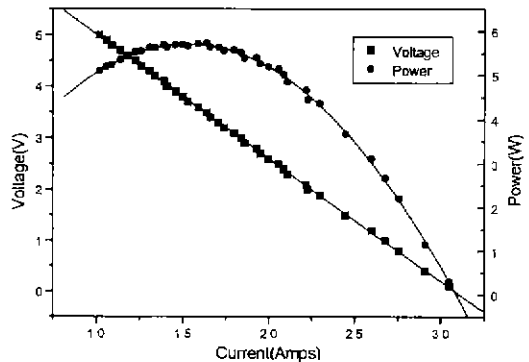


Fig. 10 Voltage and power change as a function of current ($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$).

키고 온도차(ΔT)의 변화에 따른 출력전력을 측정 한 데이터는 Fig. 12에 나타냈다. 부하저항 2.13 Ω 에서 최대 전력이 나타남으로써 이 모듈의 내부저항값인 1.59 Ω 과는 약간의 차이를 보였다. 이는 열전소자의 온도변화에 따른 내부저항값의 변화에 의한 것으로 사료되는데, 미국 A사 모듈의 경우는 부하용 가변저항을 고정시키고 목표하는 실험온도($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$) 범위까지 승온시키는 동안 회로저항의 변화는 약 0.02 Ω 정도의 편차를 갖고 불규칙하게 변화하였으나, 국내 B사 모듈의 경우는 0.2 Ω 정도의 비교적 큰 편차를 갖고 불규칙적으로 변화하였다. 온도상승에 따른 저항변화의 차가 큰 것은 미국 A사 모듈의 경우는 250 $^{\circ}\text{C}$ 까지 안정하게 적용될 수 있으나, 냉각용 모듈인 국내 B사 모듈의 설계값들은 상온 및 그 이하의 온도범위에서 사용할 것을 목적으로 제조된 것이므로 높은 온도에서 적용함으로써 불안정한 저항의 변화를 야기한 것으로 사료된다. 국내 B사 열전모듈의 출력은 온도차, 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 9 W 이므로 이 모듈의 주어진 변환효율조건에서 Table 1에 나타난 모듈의 설계 전력값에 대한 시스템의 출력효율은 약 59%임을 알 수 있었다.

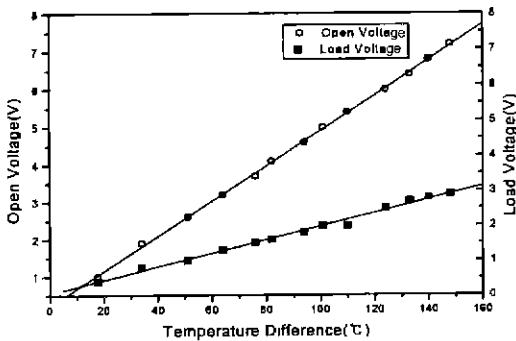


Fig. 11. Open voltage and load voltage change as a function of temperature difference.

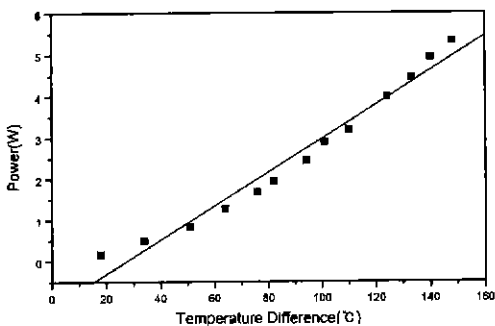


Fig. 12. Power change as a function of temperature difference.

4-2. 5개의 모듈을 직렬로 연결하여 시스템에 적용했을 때

4-2-1. 미국 A사의 경우

Fig 13~16은 미국 A사의 모듈 5개를 직렬로 연결하여 시스템에 적용하여 배가스 온도를 540~700 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하면서 측정한 실험결과이다. Fig. 13은 온도차를 150 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지시키면서 부하변화에 따른 출력전력의 변화를 나타낸 것으로, 부하저항이 1.06 Ω 에서 최대의 전력 23.6 W를 얻을 수 있었으며, 이때의 전압과 전류는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 각각 5 V와 4.72 A였다. 1개의 모듈을 적용했을 때 0.167 Ω 와 비교하여, 5개를 적용시 최대 출력을 내는 저항의 값은 약간 상승하였는데, 이는 본 시스템에서 5개의 모듈이 상하로 부착되어 있어 각각의 모듈위치와 수평으로 대응하는 연소로 내의 위치에서 배가스의 온도는 약간씩 차이를 보이게 되며, 이 온도차만큼 각각의 모듈내부에 있는 열전소자의 내부저항이 약간의 편차를 나타내기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 15는 온도차의 변화에 따른 open voltage와 load voltage의 변화이며 9.2 V의 최대 open voltage를 얻을 수 있

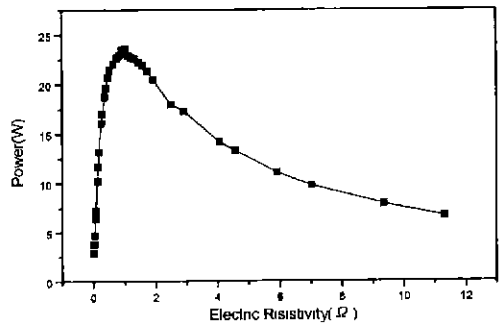


Fig. 13. Power change as a function of electric resistivity ($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$).

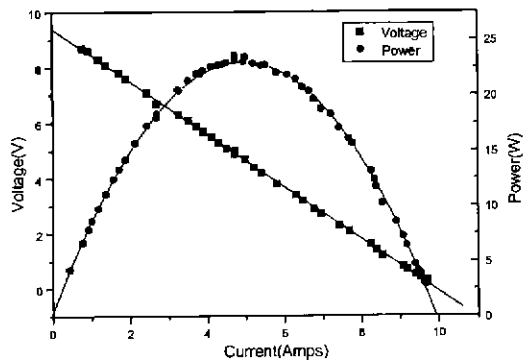


Fig. 14. Voltage and Power change as a function of current ($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$).

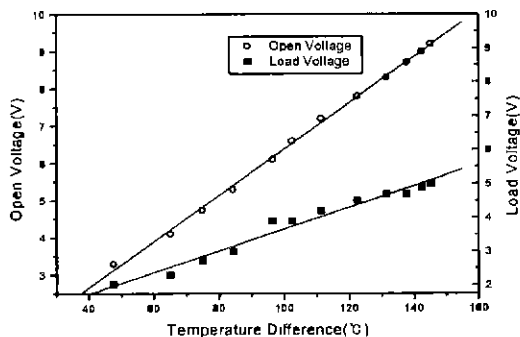


Fig. 15. Open voltage and load voltage change as a function of temperature difference.

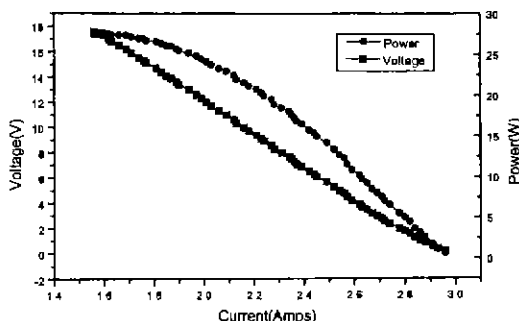


Fig. 18. Voltage and power change as a function of current (Mean $\Delta T=150^\circ\text{C}$).

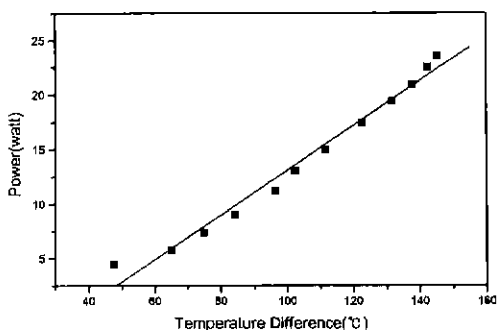


Fig. 16. Power change as function of temperature difference.

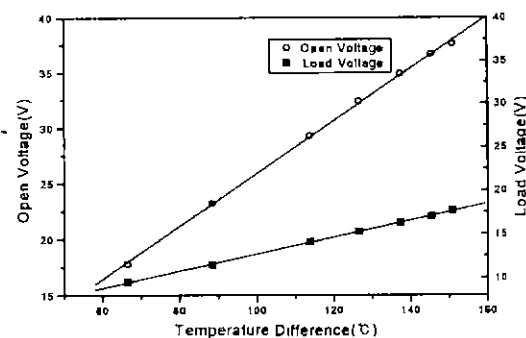


Fig. 19. Open voltage and load voltage change as a function of temperature difference.

었다. Fig. 16은 부하저항을 1.06Ω 으로 유지하고 ΔT 를 변화시키면서 출력전력의 변화를 나타내고 있다.

4-2-2. 국내 B사 모듈의 경우

Fig. 17-20은 국내 B사의 모듈 5개를 시스템에 적용하여 배가스 온도를 $500\sim 650^\circ\text{C}$ 로 유지시키면서 측정할 실험결과이다. Fig. 17은 온도차를 150°C 로 유지시키고 부하저항을 변화시키면서 발생전력의 변화를 나타낸 것으로,

10.81Ω 에서 최대전력 27.6W 를 얻을 수 있었고, 이때의 전압과 전류는 Fig. 17에 나타낸 바 와 같이 각각 17.3V 와 1.6A 였다 부하저항변화에 따른 전류와 전압 및 전력의 변화를 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 19는 온도차(ΔT)의 변화에 따른 open voltage(37.6V , $\Delta T=150^\circ\text{C}$)와 load voltage의 변화를 나타내며, Fig. 20에서는 고정된 저항에서 온도차의 변화에 따른 출력전력의 변화를 도시하였다.

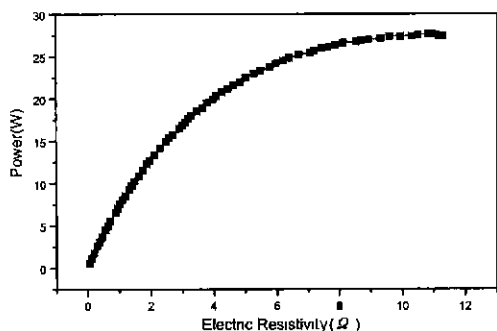


Fig. 17. Power change as a function of electric resistivity (Mean $\Delta T=150^\circ\text{C}$).

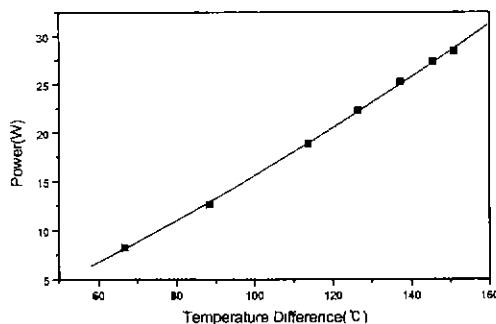


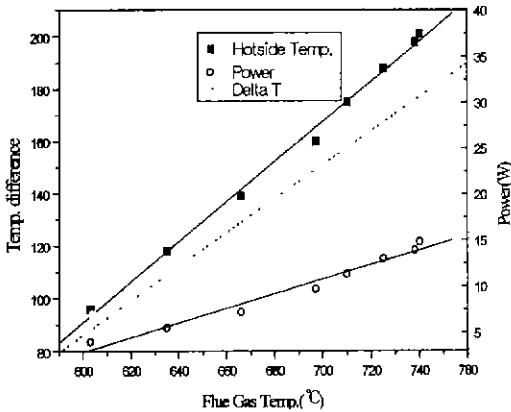
Fig. 20. Power change as a function of temperature difference.

4.3. 접촉면의 불균일성이 발전출력에 미치는 영향
 모듈의 최대 성능을 얻기 위해서는 우선 모듈 양단의 온도차(ΔT)가 커야 하며, 또한 모듈의 전체면적에 균일한 온도분포를 갖어야 하는데 만일 모듈과 접하는 접촉면에서 불완전한 접촉이 있을 경우에는 모듈에 불균일한 온도분포가 생겨 발전출력이 떨어지게 된다. 모듈의 불균일한 온도분포는 첫째, 노내의 배가스 온도의 위치에 따른 편차가 존재하기 때문인데, 본 연구에서 고안된 시스템에서 온도차를 측정 한 결과, 노내의 위치에 따른 온도의 편차에 의해서 각 모듈당 $\pm 5 \sim 15^\circ\text{C}$ 의 hot side에서의 온도편차를 나타냈다 둘째는 모듈면과 고온부 및 저온부와의 불완전한 접촉에 의한 것이다. 본 실험에서 각각의 모듈에서 나오는 출력을 측정해 보면 thermocouple에서 측정된 온도차가 클때가 항상 출력이 높게 나타나는 것은 아니며, 오히려 온도차(ΔT)가 작을 때 큰 전력 값을 얻는 경우도 있었다. Fig. 21의 (a)와 (b)는 배가스의 온도에 따른 hot side의 온도와 출력값을 나타낸

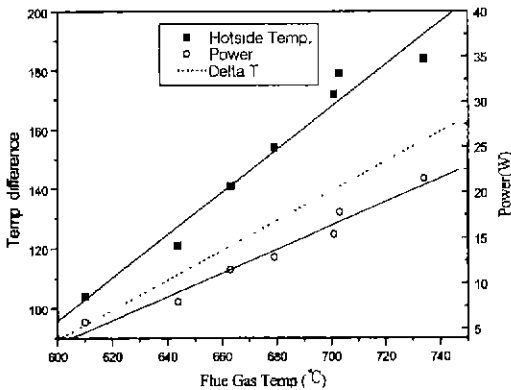
것으로 (a)에서의 ΔT 가 (b)에서의 나타난 것보다 크지만 출력값이 떨어지게 나타남을 볼 수 있다.

모듈의 출력이 작게 나타나는 경우를 접촉면의 균일도에 비추어 살펴보면 첫째로, 모듈면과 저온부쪽에서의 불균일한 접촉으로 모듈면에서 저온부 관쪽으로 원활한 열방출이 일어나지 않아서 저온부의 모듈면의 온도가 상승하여 ΔT 자체가 떨어지는 경우이고, 둘째는, 고온부 판과 모듈면의 불균일한 접촉으로 고온부 판의 충분한 열이 모듈쪽으로 전달되지 않으며 이로 인해 모듈을 통한 고온부 판의 열방출도 제한되어 고온부 판의 온도가 상승하는 경우이다. 이때 thermocouple의 센서는 모듈과 고온부 판의 중간에 위치하고 있어 모듈쪽으로 충분한 열량이 전달되지 않은 경우에 오히려 고온부쪽의 온도가 더욱 상승하게 되고 ΔT 가 높게 나타나는 것처럼 보이지만 출력은 떨어지게 되는 것이다 이런 현상들은 실험모듈의 전면에 균일한 온도분포를 갖지 못하게 하고 국부적인 열전달 집중영역과 열전달 소외지역을 생성시킬 것으로 생각되며 이는 모듈의 출력성능을 저하시키는 원인이 된다.

불균일 접촉면에 의한 열유입 및 방출의 불안정성이 출력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 5개의 모듈을 시스템에 적용하여 열전도성 grease를 얇게 바른 후 실험하고 5개 모듈의 저온부 온도의 표준편차를 Fig. 22에 나타내었는데, 저온부의 온도편차가 작을수록 높은 출력 값을 얻을 수 있었다 이는 앞에서 설명한 저온부에서의 접촉정도에 따른 온도편차의 영향으로, 균일한 접촉면을 가질 때 높은 출력을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 고온부에서의 온도편차도 이러한 영향을 반영할 수 있으나, 노내 배가스가 온도편차에 미치는 영향이 동시에 작용하므로 고온부의 온도편차가 발전출력에 미치는 영향은 저온부보다 적게 나타났다. 이러한 접촉면의 영향들은 모듈자체의 열팽창정도는 매우 작다고 생각한다면 우선 copper plate의 초기가공정도와 고온부의 copper



(a) Case I (high ΔT , low power)



(b) Case II (low ΔT , high power)

Fig. 21. Flue gas temp. vs. hot side temp. and power output from 5 modules from U.S.

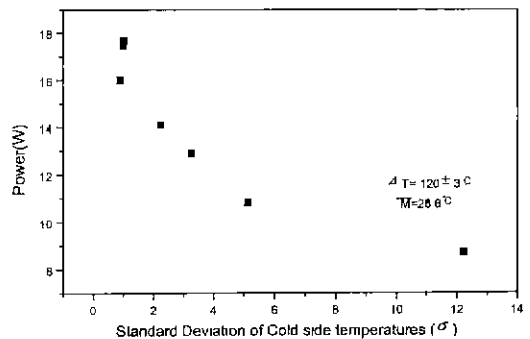


Fig. 22. Variation in standard deviation of cold side temp. at different test conditions.

plate나 저온부의 water jacket이 온도상승에 의한 열팽창과 열응력에 의해서, 또한 계속되는 압축하중에 의해서 휘어짐으로써 발생하는 것으로 생각된다.

본 실험장치에서 측정된 DT는 copper plate와 copper 재질의 water jacket에 신형의 흡을 내어 고온부와 저온부의 각각의 모듈 중심면에 thermocouple의 센서가 위치하도록 하여 측정된 값으로 모듈 한개에 대해서 불완전한 접촉에 의한 국부적인 열전달 집중영역 및 소외영역과 이에 따른 온도편차에 의한 출력의 영향을 측정하기에는 부적합하였다.

국부적인 열집중 및 소외영역이 모듈의 출력에 미치는 영향을 줄이기 위해서 일반적으로는 열전달 계수가 copper등의 금속재료에 비해서 떨어지므로 적은 양을 사용하도록 권장되고 있는 열전도성 grease를 고온부와 저온부에 접촉하는 모듈의 전면에 두껍게 바르고 실험을 수행한 결과, 소량의 grease를 사용했을 때보다 훨씬 높은 출력을 얻을 수 있었다. 즉 이상적인 metal to metal contact보다는 열전도율이 높지 않으나 불균일 접촉면에 의한 국부적 열전달 소외지역을 열전도성 grease로 채움으로써 고온부에서의 열유입과 저온부로의 열방출이 모듈 전면에서 균일하게 이루어짐으로써 이와 같은 출력의 상승을 가져온 것으로 생각된다.

따라서 본 실험장치에서 5개의 모듈을 직렬 연결했을 때가 1개의 모듈이 내는 출력을 고려했을 때보다 저하된 이유는 1개의 모듈에서 측정된 출력은 접촉정도가 가장 양호한 위치에서 측정된 값이며 5개의 모듈을 적용한 경우, 위에서 설명한 바와 같이 개개의 모듈에서 모듈면과 heat source 및 heat sink와의 불완전한 접촉면은 비록 grease로 채워지기는 하였지만 양호한 접촉상태에서 grease를 사용한 경우에 비해서 grease의 열전도율이 떨어지기 때문에 전체적인 출력이 저하된 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구를 위하여 고안한 열전발전 시스템을 이용하여 상용화된 열전모듈의 출력성능을 시험한 결과, 다음

과 같은 결론을 얻었다.

1) 미국 A사 모듈을 시스템에 적용하여 온도차 150°C에서 6 W(1 V, 6 A)의 전력을 얻을 수 있었고 주어진 모듈의 변환효율조건에서 모듈의 설계전력값(designed power value)에 대한 본 연구에서 고안된 시스템의 출력효율은 약 75%인 것으로 나타났다.

2) 국내 B사 모듈을 시스템에 적용시 온도차 150°C에서 5.74 W(3.5 V, 1.64 A)의 전력을 얻을 수 있었고 주어진 모듈의 변환효율조건에서 모듈의 설계전력값(designed power value)에 시스템의 출력효율은 약 59%인 것으로 나타났다.

3) 시스템의 출력을 결정하는 중요한 인자로서 온도차 이외에도 열전발전부에서 열교환이 원활하게 이루어져 모듈면에 균일한 온도분포를 갖게 하는 접촉정도가 매우 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박태준 외: “도시종합에너지시스템 개발연구”, 한국에너지기술연구소. (1999).
2. 심재동, 현도빈, 하현필, 김준명: “Thermoelectric device의 개발 및 응용에 관한 연구”. KIST (1995).
3. Seebeck, T.J.: “Magnetic Polarization der Metalle und Erze durch Temperature different”. Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 265 (1822).
4. Ramakumar. R.: 14th Ann. Frontiers of Power Conf., Stillwater, Oct. II-1~II-12. (1981)
5. Brandstetter, A and Cekutieli, G.: 13th IECEC. 1989 (1978).
6. Dent, C.L. and Cobble, M.H.: 4th ICTEC, 7, (1982).
7. Bohn. M.S., Benson, D.K. and Jayadev. T.S.: J. Solar Energy Engineering, vol. 102, 119-127, (1980).
8. 이희웅 외: “1 kW급 TEG 열전발전 시스템 연구”, 통상산업부, (1997).
9. Rowe, D.M. 외: “Evaluation of thermoelectric modules for power generation”, Journal of Power Source, vol. 73, 193-198, (1998)