

열전발전을 위한 디젤차량의 전력 및 배열에너지 분석 연구

표영덕, 김강출, 고창조, 권오석, 이영재
한국에너지기술연구소

A Preliminary Study of Thermo-Electric Generation System for Exhaust Heat Recovery of Diesel Engines

Y.D.Pyo, C.J.Koh, G.C.Kim, O.S.Kwon, Y.J.Lee
Korea Institute of Energy Research

1. 서론

국내 자동차 보유대수는 1,100만대를 돌파하여 지속적으로 증가하고 있으며, 총 에너지소비에서 수송분야가 차지하는 비율도 꾸준히 증가하여 국내 총에너지의 약 20%를 소비하고 있다. 한편, 현재 수송분야 교통수단의 대부분을 차지하고 있는 내연기관 자동차는 투입에너지의 70%이상을 열에너지의 형태로 버리고 있기 때문에, 이러한 폐열을 유효 활용함에 의해 대량의 석유에너지를 절약할 수 있다. 따라서, 각종 자동차 폐열 회수·활용기술이 검토되고 있으며, 그 중에서도 자동차에서 버려지는 열에너지의 30% 정도를 차지하고, 열원온도가 높은 양질의 에너지원인 배기가스의 열에너지를 회수하여 차량의 유효에너지를 증대시키기 위한 각종 연구가 진행되고 있다.

자동차 배열이용 열전발전은 선진외국에서도 비교적 최근에 연구개발을 착수한 차세대 기술로서^{1),2)}, 열을 전기로 변환하는 특성을 가진 열전변환소자를 이용하여, 자동차 배기가스로부터 대기 중으로 버려지는 배열에너지를 이용하기 쉬운 전기에너지의 형태로 변환하여 차량 내에서 소비하는 전력계통에 공급하므로써, 기존 차량의 전력발생장치인 알터네이터를 대체하거나, 그의 부담을 크게 줄일 수 있어서, 자동차의 연비 개선 및 CO₂ 저감과 아울러, 엔진부하 경감에 따른 유해 배출가스의 저감에도 기여할 수 있다.

당 연구소에서도, 이러한 열전발전기술을 자동차 배열원에 적용하기 위한 연구를 최근에 착수하였다. 본 연구에서는 이의 기초단계로서, 디젤차량의 전력 및 배열에너지 등을 측정·분석하므로써, 열전변환시스템의 적용가능성을 검토하고, 또한 상용화된 열전소자를 사용하여, 열전소자의 최대성능을 얻기 위한 다양한 조건에서의 출력성능시험을 실시하므로써, 최적설계에 활용하고자 하였다.

2. 자동차 배열이용 열전변환의 개요

가솔린이 가진 화학에너지는 엔진에서 연소하여 기계에너지로 변환되며, 이때의 열효율은 높아도 30%정도에 불과하다. 나머지 에너지는 열의 형태로 라디에이터, 엔진본체, 배기가스로부터, 각기 30%, 10%, 30%정도 외부로 방출된다. 한편, 엔진폐열 중에서 열원의 온도가 높은 쪽이 에너지로서의 효용성이 높으나, 엔진본체나 라디에이터 열원은 100℃정도에 불과하며, 배기온도는 수백도의 높은 온도영역이기 때문에, 자동차의 폐열이용을 고려하는 경우

에, 엔진으로부터 버려지는 배기가스열을 검토하는 것이 가장 적합하다. 한편, 기계에너지는, 기계마찰, 오일펌프·알터네이터 등 보기류의 구동에 소비되어, 실제로 주행에 사용되는 에너지는, 디젤이 가진 총 에너지량의 20%정도에 불과하다. 이때, 알터네이터의 구동에 소비되는 에너지는 차량의 운전상태 및 전력사용상태에 따라서 변화하나, 기본전력 부하에서도 총 투입에너지의 수 퍼센트 정도를 사용하므로, 열전변환에 의해 엔진의 배열을 회수·발전하여 이를 대체하면, 상당한 연비개선을 기대할 수 있다.

이에, 최근에 열전변환소자를 이용한 배열 발전기술의 개발이 추진되고 있다. 열전변환은, 제백효과(Seeback effect)를 이용한 것으로서, 금속 또는 반도체인 제백소자 양단에 온도차를 주는 경우, 고온부와 저온부 사이의 에너지 balance의 변화에 의해 기전력이 발생하는 것을 이용한 발전방식이다. 아직 자동차에는 실용화되어 있지 않으나, 디젤엔진에 배열발전장치를 부착하여 출력을 측정할 예 등이 일부 보고되고 있다.

이 시스템의 커다란 특징은, 기계적인 구동부 없이, 열을 직접 전기로 변환할 수 있다는 점이다. 대표적인 열전재료로서는, Bi-Te계, Pb-Te계, Si-Ge계의 재료 등이 있으며, 열전변환시스템의 실용화를 위해서는, 이들 열전변환소자의 개발과 고효율화 뿐만 아니라, 폐열원의 최적 회수라는 측면에서 열교환시스템의 최적설계도 중요한 인자이다.

3. 실험장치, 실험차량 및 실험방법

3.1 실험장치 및 실험차량

Fig. 1에 시가지 및 고속주행모드에서 디젤차량의 전력 및 배열에너지 등을 측정·분석하기 위하여 사용한 실험시스템의 개략도를 나타낸다. 본 설비는 대별하여 자동차 연비·배출가스 측정설비와 자동차 전력 및 배열에너지를 분석하기 위한 측정장치 등으로 구성된다.

연비·배출가스 측정설비는 항온항습시험실, 차대동력계, Driver's Aid, 배출가스분석기 등으로 구성되며, 롤러상에 설치된 시험차량이 도로상을 실 주행할 때와 유사한 여건 하에서 운전할 때에 배출되는 유해배출가스를 측정하고 연비를 산출한다.

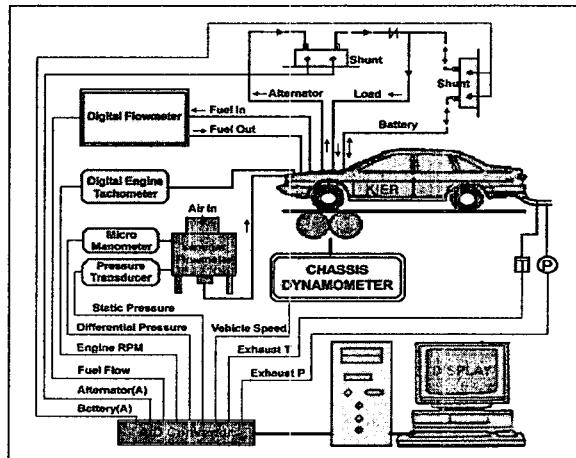


Fig. 1 Schematic Diagram of Test Facility

전력 및 배열에너지를 분석하기 위해 사용된 측정장치는, 자동차의 순시연료유량을 측정하는 디지털 연료유량계, 순시공기유량을 측정하는 증류형 공기유량계, 알터네이터의 발전량

과 배터리의 충방전량을 측정하기 위한 션트 레지스터, 배기가스 온도 및 열용량을 분석하기 위한 디지털 온도계 및 마이크로 마노미터, 디지털 엔진회전속도계, 차량속도계 등으로서, 이들 계측기에서 출력되는 아날로그신호는 A/D컨버터를 통해 리얼타임으로 측정, 컴퓨터에 기록하여, 분석되었다. 시험자동차로서는, 기아자동차(주) 제작의 카니발 2.5L A/T를 사용하였다.

한편, 상용 열전모듈의 특성 및 성능평가 실험을 위하여 사용한 실험장치는 대별하여 열전모듈 가열 및 냉각장치, 가변저항회로, 온도센서, Data acquisition system 등으로 구성된 다. 열전모듈 고온측 표면의 온도 가열은 Hot plate heater를 사용하였으며, 열전모듈 저온측의 냉각은 소형 수냉식 열교환기를 사용하였다. 열전모듈의 부하저항에 따른 열전모듈의 발전출력을 측정하기 위하여, Fig. 2와 같은 가변저항회로를 구성하였으며, 열전대를 사용하여 열전모듈의 고온측과 저온측 표면온도, 냉각수 입·출구온도를 측정하였다.

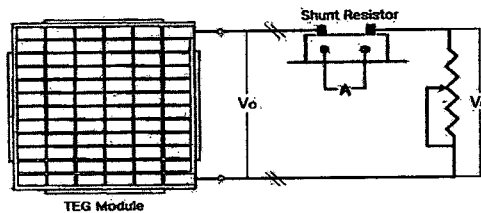


Fig. 2 Variable electric circuit for TEG module

3.2 실험방법

디젤차량의 전력 및 배열에너지 등의 측정·분석 실험은, 항온 항습이 유지된 시험실내에서 사시동력계상에 시험차량을 위치시킨 후, 시가지모드인 CVS-75모드와 고속모드인 HWFET 모드를 추적 주행하면서, 전력부하를 인위적으로 크게 준 조건(실내등, 오디오, 공조기 팬, 뒷유리 열선, 미등, 하향 전조등, 상향 전조등)과 기본전력부하만을 준 조건(통상의 엔진운전 조건)에 대하여 실시하였다.

열전모듈의 특성 및 성능평가 실험은, 먼저 Fig 2의 회로에서 가변저항 양단을 단락시키고 열전모듈의 고온측 표면을 가열하면서, Open circuit 상태에서의 출력 전압(V_o)을 리얼타임으로 연속 측정하였으며, 냉각수량을 각각 변화시키면서 상기의 실험을 반복하였다. 또한, 가변저항회로를 연결시키고 열전모듈의 고온측과 저온측의 온도차(ΔT) 및 냉각수량이 일정한 상태에서 가변저항을 변화시키면서, 전압(V_c , Load voltage)을 측정하므로써, 열전모듈의 발전출력이 최대가 되는 저항값을 구하였다. 이렇게 구한 최대출력 저항값으로 저항을 고정하고, 고온측 표면을 가열키면서, 출력 전압을 리얼타임으로 연속측정 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에 시가지주행모드인 CVS-75모드로 디젤 시험차량을 주행했을 때에, 전력부하를 크게 준 경우와 기본전력부하만을 준 경우에 대하여, 알터네이터로부터의 발전과 배터리의 충방전 현황을 주행속도에 대비하여 나타낸다. 그림에 의하면, 알터네이터의 발전량은 전력부하가 큰 경우에 현저한 증가를 보여 주고 있다. 배터리의 경우에는, 기본전력부하만을 준 조건에서는, 시동 초기를 제외하고는 대부분 충전만이 이루어지나, 전력부하가 큰 조건에서는, 충전량이 적고 차량이 정차하는 시기에 소폭의 충방전이 교차하여 이루어지고 있다. 이 때, 배터리의 방전이 중점적으로 이루어지고 있는 시기와 차량이 정차하고 있는 시기가 거

의 대응하며, 이는 엔진의 공회전시에는 알터네이터로부터의 발전량이 크게 감소하기 때문에, 전력 부족분을 배터리에 의해 충당함에 따른 것으로 생각된다.

Fig. 4에 고속주행모드인 HWFET모드로 시험차량을 주행했을 때에, 전력부하를 크게 준 경우와 기본전력부하만을 준 경우에 대하여, 알터네이터로부터의 발전과 배터리의 충방전 현황을 주행속도에 대비하여 나타낸다. 전술한 Fig. 3에서와 마찬가지로, 알터네이터로부터의 발전량은 전력부하가 큰 경우가 현저히 증가하며, 배터리의 경우에는, 전력부하가 큰 조건에서 충방전이 일부 나타남을 볼 수 있다.

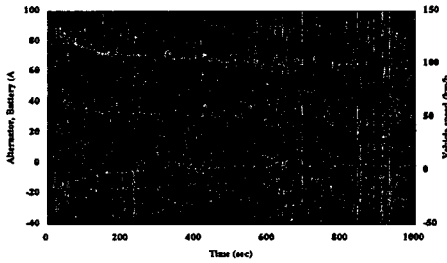


Fig. 3 Electric Energy Balance between Alternator and Battery at City Driving Cycle

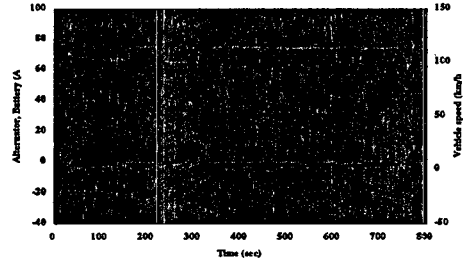


Fig. 4 Electric Energy Balance between Alternator and Battery at Highway Driving Cycle

한편, 그림에 의하면 원으로 표시한 부분과 같은 연속적인 구형과 형태의 알터네이터 발전특성이 보여진다. 이는 엔진온도의 증가에 따른 라디에이터팬의 구동에 기인한 전력부하의 증가에 상응하는 것으로 확인되었다. 구형과 초기부분의 급격한 전류의 증가는 팬의 기동전류에 대응하는 것으로 생각된다.

위에서와 같이, 전력부하를 크게 준 경우에는 알터네이터로부터의 발전량이 크게 증가하며, 이에 따라 알터네이터의 구동마력이 보다 증가해서, 엔진의 손실마력이 증가하고, 차량의 연료소비도 증가할 것으로 생각된다. 이어, Fig. 5와 Fig. 6에서와 같이, 시가지모드와 고속모드 주행시의 순시연료소비율과 순시배기가스온도를 플로트하여 보았다. 그림에 의하면, 전력부하를 크게 준 경우가, 알터네이터 구동마력의 증가에 따라서 모두 순시연료소비비가 증가하며, 이에 따른 엔진출력의 증가로 배기온도 역시 상승함을 볼 수 있다.

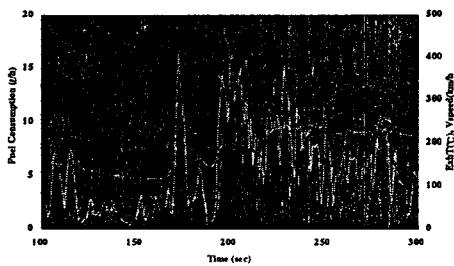


Fig. 5 Fuel Consumption and Exhaust Gas Temperature at City Driving Cycle

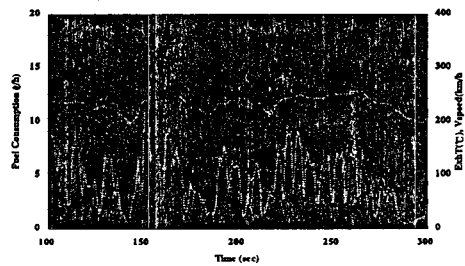


Fig. 6 Fuel Consumption and Exhaust Gas Temperature at Highway Driving Cycle

이러한, 전력부하의 증가는 연비 뿐 아니라 배출가스특성에도 영향을 미칠 것으로 생각되어, Fig. 7에서와 같이 시가지모드와 고속모드 주행시의 각각의 연비와 배출가스 특성을 비교하여 보았다. 그림에 의하면, 전력부하가 큰 경우가 기본전력부하만의 경우에 비해 시가지모드연비가 약 5%, 고속모드연비가 약 4%정도 악화하고 있다. 한편, 전력부하가 큰 경우가

그렇지 않은 경우보다 엔진부하의 증가에 따라서 높은 배출가스 농도를 나타낼 것으로 생각되나, 그림에 의하면 CO, THC 및 PM의 배출농도가 시가지모드에서는 오히려 감소하는 것으로 나타났으며, 이에 대한 원인은 차후에 다시 검토할 계획이다.

Fig. 8에, 시가지모드와 고속모드, 전력부하가 큰 경우와 기본전력부하만의 경우에 대한, 알터네이터 발전에너지, 알터네이터 구동에너지, 배기가스 열에너지를 총 투입에너지에 대비하여 나타낸다. 그림에 의하면, 기본전력부하만을 사용하는 경우에는 시가지모드와 고속모드의 알터네이터 발전에너지가 각기 1.3% 및 0.8%임에 대하여, 전력부하를 크게 준 경우에는 각기 2.7% 및 2.9%로 2~4배 이상 증가함을 볼 수 있다. 여기에 발전효율을 고려하여 알터네이터의 구동에너지를 비교해 보면, 그림에서와 같이 이들은 각기 총 투입에너지의, 4.6%, 2.7%, 9.6%, 6.3%에 상당하여, 발전기의 구동에 소비되는 에너지를 배열이용 열전변환에 의해 대체한다면, 상당한 에너지를 절약할 수 있음을 알 수 있다.

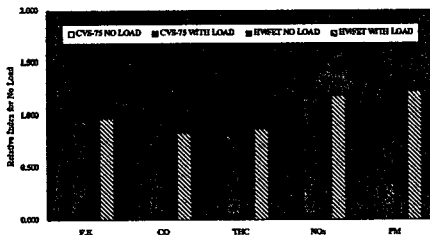


Fig. 7 Fuel Economy and Exhaust Emissions at Various Electric Loads and Driving Cycles

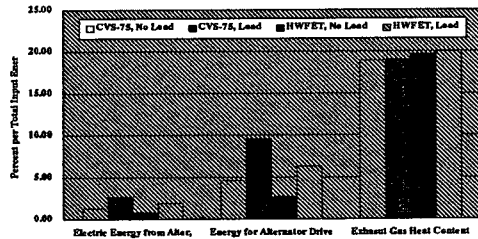


Fig. 8 Energy Balance for Total Input Energy at City and Highway Driving Cycles

열전변환소자를 사용하여 엔진의 배기가스 열에너지를 회수 이용하고자 하는 경우에, 배열원의 온도와 배열량을 파악할 필요가 있다. 따라서, 시가지모드와 고속모드, 전력부하가 큰 경우와 기본전력부하만의 경우에 대하여, 배기가스 온도와 배기 열용량을 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 의하면, 배기가스의 온도가 150℃ 이상인 경우가 대부분을 차지하여, 열전변환소자를 적용하기에 양호한 열원조건임과 동시에, 이용가능한 배열량도 상당함을 알 수 있었다.

열전모듈의 고온측과 저온측의 온도차(ΔT) 및 냉각수 공급량 변화에 대한 Open circuit Voltage를 Fig. 10에 나타낸다. 그림에서와 같이 냉각수 공급량이 80 l/hr 이상인 경우에는 출력전압(V_o)은 거의 일정하였으나 냉각수 공급량이 40 l/hr로 적은 경우에는 온도차(ΔT)가 증가할수록 냉각수 공급량이 많은 경우보다 출력전압이 약 5%정도 적게 발생되었다. 따라서 열전모듈의 성능을 저하시키지 않는 정도에서 최소한의 냉각수를 공급하면 될 것으로 판단된다.

열전모듈의 고온측과 저온측의 온도차(ΔT)가 약 180℃로 일정한 조건에서, 저항을 0~1.0Ω으로 증가시켰을 때 측정된 전압(V_c , Load voltage)과 전류(A) 및 전력(Watt)을 Fig. 11에 나타낸다. 그림에서와 같이 저항이 증가하면 전압은 증가하나 전류는 감소함을 알 수 있으며, 최대 전력발생량은 전압과 전류 곡선이 교차하는 지점인 저항값 0.3Ω인 조건에서 발생함을 볼 수 있다.

따라서, 저항값을 열전모듈의 발전 출력이 최대로 나타나는 0.3Ω으로 고정시킨 조건에서, 고온측과 저온측의 온도차(ΔT)에 대한 열전모듈의 전력(Watt)을 측정하였다(Fig. 12 참조). 그림에서와 같이 온도차(ΔT)가 180℃인 경우에 전력 발생량은 13.3(Watt)로 나타났으며, 이는 열전모듈 제작사에서 제시한 출력성능에 비교할 때 약 78%에 해당하는 것이다. 이와 같이, 출력이 비교적 낮게 발생한 가장 큰 원인은 열원과 heat sink사이에 균일한 압축하중

을 가하지 못하였기 때문에 판단되며, 이는 향후 열전변환시스템의 시제품 제작시에 반영할 계획이다.

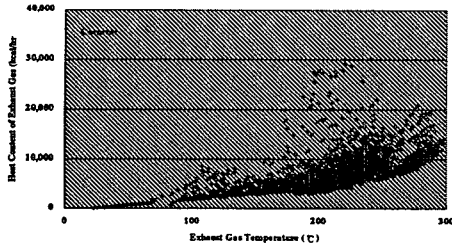


Fig. 9 Temperature and Heat Content of Exhaust Gas at City and Highway Driving Cycles

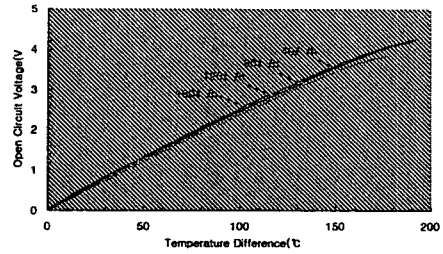


Fig. 10 Relation of Open circuit voltage vs. Temperature difference(ΔT)

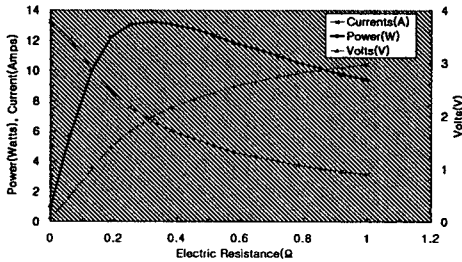


Fig. 11 Relation of Power vs. Electric resistance

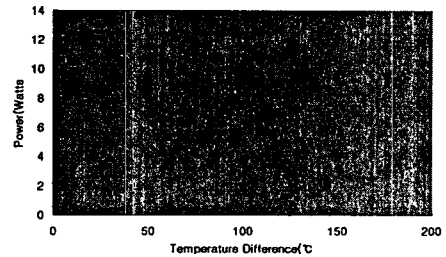


Fig. 12 Relation of Power vs. Temp, difference

5. 결 론

- 1) 알터네이터로부터의 발전량은, 전력부하가 큰 경우가 기본전력부하만의 경우보다 현저히 증가하며, 이로 인해, 기본전력부하시 대비, 시가지 및 고속모드 연비가 각기 5%, 4% 정도 악화하였다.
- 2) 알터네이터 구동에너지는 총 투입에너지 대비 2.7~9.6% 정도로서, 이를 열전변환에 의해 대체한다면, 상당한 에너지를 절약할 수 있을 것으로 생각된다.
- 3) 시가지모드와 고속모드, 전력부하가 큰 경우와 기본전력부하만의 경우에 대해, 배기가스 온도 및 열용량을 분석한 결과, 배기가스의 온도가 150°C 이상인 경우가 대부분을 차지하고, 배열량도 커서, 열전변환을 적용하기에 양호한 조건임을 알 수 있었다.
- 4) 최대발전출력이 얻어지는 저항값 0.3Ω에서, 고온측과 저온측의 온도차가 180°C인 경우에 13.3W의 전력을 발생시킬 수 있었으며, 향후 전력발생량을 보다 높일 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. K. Shinohara, et al., Application of Thermoelectric Generator for Automobile, Jidousya Gijyutsu, Vol. 52, No. 7, pp. 78-82, 1998
2. J. C. Bass, et al. : Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines, Proc. of 13th Int. Conf. on Thermoelectrics, p. 295, 1994