한국자동차공학회논문집 제 10 권 제 1 호, pp.99-105

열전발전 적용을 위한 가솔린차량의 전력 및 배기열 에너지 분석 연구

Analysis of the Electric Energy and Exhaust Heat Energy for the Application of Thermo-Electric Generation in a Gasoline Vehicle

이 영 재*, 표 영 덕*, 김 강 출*
Youngjae Lee, Youngduk Pyo, Gangchul Kim

ABSTRACT

About 70% of energy input to internal combustion engine is rejected to atmosphere by heat. By utilizing this waste heat, a plenty of energy can be conserved in nationwide. One of possible ways is the thermoelectric generation to utilize engine's waste heat to provide auxiliary electric power. Under this concept, we have been developing the thermoelectric generation system to replace the alternator by converting the waste heat in the engine's exhaust directly to electricity. This system may reduce the shaft horse power of the engine, then improves the vehicle fuel economy and the exhaust emissions. In the present study, the characteristics of the electric energy and exhaust heat energy in city and highway mode driving conditions are analysed by using a gasoline passenger car. These results would be used to determine the optimum design parameters of the thermoelectric generation system.

주요기술용어 : Internal combustion engine(내연기관), Waste heat recovery(폐열회수), Alternator(발전기), Fuel economy(연비), Thermoelectric generation(열전발전)

1. 서 론

자동차는 투입에너지의 70% 이상을 열에너지의 형태로 버리고 있기 때문에, 이러한 폐열을 유효 활용함에 의해 대량의 석유에너지를 절약할 수 있다.

자동차의 폐열을 회수·활용하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 최근에 열전변환소자를 이용한 열전변환기술을 자동차 배기계에 적용하여 버려지고 있는 열에너지를 이용하기 쉬운 전기에너지의 형태로 변환하여 차량내에서 소비하는 전력계통에 공급함으로써, 알터네이터의 구동부하를 대체 또는 경감하여 연비를 향상시키고자 하는 시도가 이루어지고 있다.[1,2]

당 연구소에서도 이러한 열전발전기술의 자동차 배기열원에의 적용에 대한 연구를 최근에 착수하였다. 본 연구에서는 이의 기초단계로서 가솔린차량의 전력 및 배기열 에너지 등을 측정·분석하고, 열전발전시스템의 적용 가능성을 검토함으로써 시스템 최적설계에 활용하고자 하였다.

* 회원, 한국에너지기술연구원

2. 배기열 이용 열전발전의 개요

자동차에서의 에너지흐름을 Fig. 1에 나타낸다. 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, 엔진에서 얻어진 기계에너지는 기계마찰이나 오일펌프 · 알터네이터 등 보기류의 구동에 소비되어, 실제로 주행에 사용되는 에너지는 가솔린이 가진 총에너지량의 20% 이내에 불과하다. 이때, 알터네이터의 구동에 소비되는 에너지는 차량의 운전상태 및 전력사용상태에 따라서 변화하나, 기본전력부하시에도 수퍼센트를 소비하는 것으로 알려져 있다.

위에서 기술한 엔진폐열중에서 열원의 온도가 높은 쪽이 에너지로서의 효용성이 높다. 엔진본체나 라디에이터 열원은 100℃ 정도에 불과하나 배기열은 수백도의 높은 온도영역이기 때문에 자동차의 폐열이용을 고려하는 경우에, 엔진의 배기열을 검토하는 것이 가장 적합하다.

상술한 바와 같이, 차량 주행시에는 알터네이터 구동에 총 투입에너지의 수퍼센트가 소비되므로, 열전변환에 의해 엔진의 배기열을 회수 · 발전하여 이를 대체하면 이에 상당하는 연비향상을 기대할 수 있다.

열전변환은 Bi-Te계, Pb-Te계, Si-Ge계 등의 금속 또는 반도체 소자나, β''-알루미나세라믹 등의

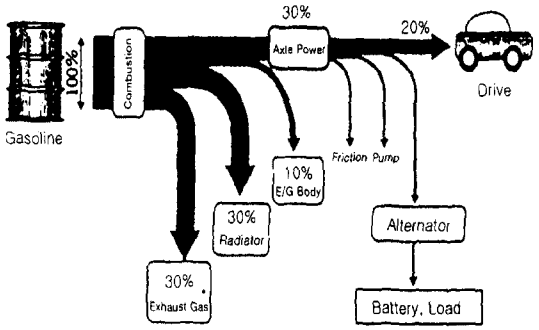

Fig. 1 Energy flow in automobile

세라믹 소재를 이용하여 열에너지를 이용가치가 높은 전기에너지로 직접 변환하여 이용하는 것으로서 현재 단 셀의 열전변환 효율은 전자의 경우가 약 10% 전후, 후자의 경우가 약 20%로 아직 효율이 낮고 가격이 비싸기 때문에 소자의 고효율화와 아울러 저가격화가 지속적으로 추진되고 있다.[3-6]

이 시스템의 커다란 특징은 기계적인 구동부 없이 열을 직접 전기로 변환한다는 점으로서 이미 오래 전부터 벽지용 전원시설, 혹성탐사선(보이저 II) 등에 사용된 실적이 있고, 최근에는 쓰레기 소각로 폐열이용발전, 지열발전, 해양온도차발전 등에도 적용이 검토되고 있다.

자동차 분야에서는 디젤엔진에 배기열 발전장치를 부착하여 1kW 정도의 출력을 발생한 예, 가솔린승용차의 배기계에 배기열 발전장치를 부착하여 기초발전시험을 실시한 예가 외국에서 일부 보고되고 있으나, 아직 실용화되어 있지는 않다.

한편, 열전발전시스템의 실용화를 위해서는 열전변환소자의 고효율화와 저가격화도 중요하나, 자동차 배열로부터 가능한 많은 폐열을 회수해 내기 위해서는 스택에서의 열교환 최적 설계기술도 중요한 요소의 하나이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 2에 실험시스템의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 대별하여 자동차 연비 · 배출가스 측정설비, 자동차 전력 및 배기열 에너지를 분석하기 위한 측정장치 등으로 구성된다.(Table 1 참조)

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.

전력 및 배기열 에너지를 분석하기 위해 사용

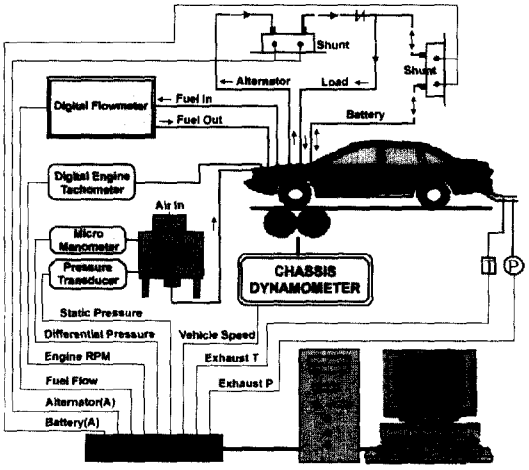

Fig. 2 Schematic diagram of test facility

Table 1 Measuring items and equipments

No.	Measuring Items	Measuring Equipment
1	Fuel Economy	Chassis Dynamometer/Exhaust Gas Analyzer (Clayton DCE-80/ Horiba Mexa 9200)
2	Exhaust Emissions	
3	Instant Fuel Flow rate	Digital Flowmeter (Ono Sokki MF-220, DF-2420)
4	Instant Air Flow rate	Laminar Flowmeter (Cussions Tech. P7209/155)
5	Alternator and Battery Current	Shunt Resistor (Yokogawa 100A/75A)
6		
7	Exhaust Gas Temperature	Digital Thermometer (Yokogawa 2423A)
8	Exhaust Gas Pressure	Micro Manometer (Furness Controls Limited FC012)
9	Vehicle Speed	Chassis Dynamometer
10	Engine RPM	Digital Engine Tachometer (Ono Sokki FA-300)
11	Data Acquisition	A/D Converter (National Instrument AT-MIO-16)

된 측정장치는 자동차의 순시연료유량을 측정하는 디지털 연료유량계, 순시공기유량을 측정하는 층류형 공기유량계, 알터네이터의 발전량과 배터리의 충방전량을 측정하기 위한 션트 레지스터, 배기가스 온도 및 열용량을 분석하기 위한 디지털 온도계 및 마이크로 마노미터, 디지털 엔진회전속도계, 차량속도계 등이다.

이들 계측기에서 출력되는 아날로그신호는 A/D컨버터를 통해 리얼타임으로 측정, 컴퓨터에 기록하여, 분석되었다.

시험자동차로서는 현대자동차(주) 제작의 소나타 II 1.8L M/T를 사용하였다

3.2 실험방법

실험은 항온 항습이 유지된 시험실내에서 차대동력계상에 시험차량을 위치시킨 후, 시가지 주행모드인 CVS-75모드와 고속 주행모드인 HWFET 모드를 추적 주행하면서 전력부하를 인위적으로 크게 준 조건(실내등, 오디오, 공조기 팬, 뒷유리 열선, 미등, 하향 전조등, 상향 전조등을 작동)과 기본 전력부하만이 부가된 조건(통상적인 차량 운전조건)에 대하여 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에 엔진시동초기의 알터네이터의 발전 및 배터리의 충방전 특성을 나타낸다. 그림에서 배터리의 경우, 음의 값은 알터네이터로부터 배터리로의 충전을, 양의 값은 배터리로부터의 방전을 나타낸다. 그림에 의하면, 엔진 크랭킹시에는 배터리에 축적된 전기에너지가 사용되기 때문에 배터리의 방전량이 급격히 증가하므로 알터네이터에서의 발전량이 크게 증가하여 배터리로의 충전이 이루어지며 어느 정도 충전이 완

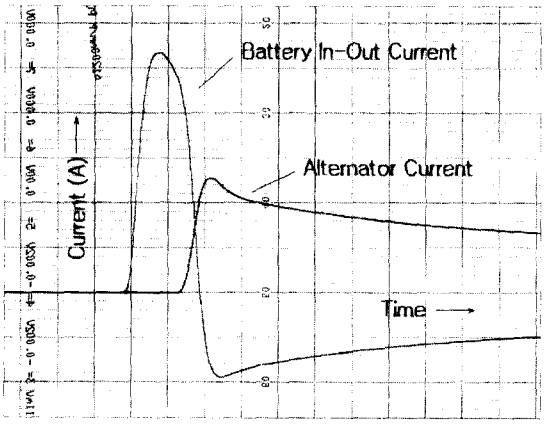

Fig. 3 Electric currents from alternator and battery at engine start

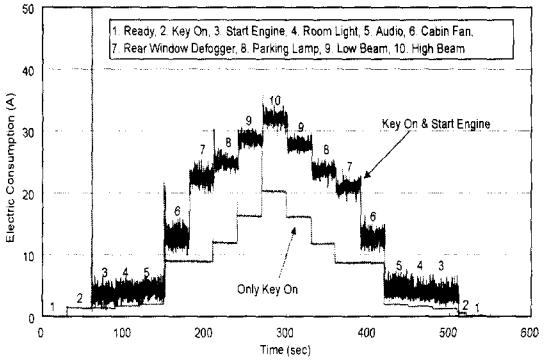

Fig. 4 Electric energy consumption variation with electric load increase

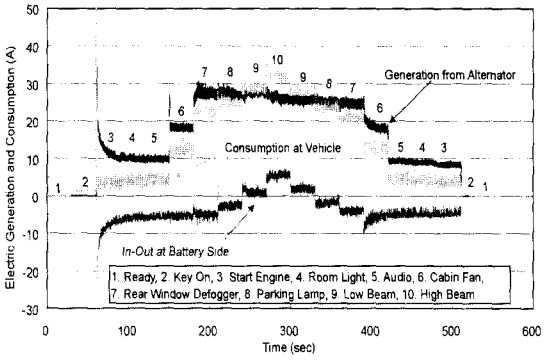

Fig. 5 Electric energy balance between alternator and battery with electric load increase

료되면, 점차 알터네이터로부터의 발전량과 배터리로의 충전량이 안정화 되어감을 볼 수 있다.

Fig. 4에 전원키만 투입, 전원키 투입 · 엔진시동의 두가지 조건에서 전력부하를 점차 증가시켰다가 역순서로 다시 감소시켰을 때의 전력소비량의 변화패턴을 나타낸다. 그림에 의하면, 엔진을 시동하지 않은 조건에서는 각 전력부하 투입초기에 서지전류가 보여지기는 하나, 매끄러운 계단상으로 전력소비패턴이 변화하는 데에 대하여 엔진을 시동한 경우에는 점화, 인젝터구동 등 간헐적인 전력소비가 추가됨에 따라서 순시전력소비량이 상하로 크게 변화하면서 계단상으로 변화하고, 전력소비량도 기본전력부하시에 비해 증가함을 볼 수 있다.

한편, 전원키만을 투입한 경우에는 거의 좌우대칭인 형태를 보여주나, 엔진을 시동한 경우에는 좌우대칭형태에서 약간 벗어남을 볼 수 있으며 이는 뒷유리 열선(엔진 운전시에만 작동)의 온도제어에 따라 전력소비량이 변화함에 따른 것으로 생각된다.

Fig. 5에 Fig. 4의 전원키 투입 · 엔진시동의 조건에 대응하는 알터네이터와 배터리의 발전 및 충방전 특성을 나타낸다. Fig. 3에서와 같이 엔진 시동초기에는 알터네이터의 발전량과 배터리의 방전량이 급속히 변화한 후 점차 안정상태에 들어가나, 그후 전력부하를 점차 증가시키면 알터네이터로부터의 발전량은 초기에 증가하다가 부하가 더욱 증가하면 그 이상 증가하지 않으며, 이때의 전력 부족분을 충당하기 위하여 배터리는 충전측에서 방전측으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 전력부하가 작은 경우에는 알터네이터에서 생산되는 전기에너지가 전력부하를 담당하고, 나머지를 배터리에 충전하는 데에 대하여 전력부하가 큰 경우에는 알터네이터로부터의 전력발생만으로는 부족하기 때문에 배터리 저장된 전기에너지를 사용(방전)하여 충당하기 때문이다.

Fig. 6에서는 전력부하를 크게 준 경우와 기본전력부하만을 준 경우에 대하여 시가지주행모드인 FTP-75모드로 시험차량을 주행했을 때의 알터네이터로부터의 발전과 배터리의 충방전 현황을 주행속도에 대비하여 나타낸다. 그림에

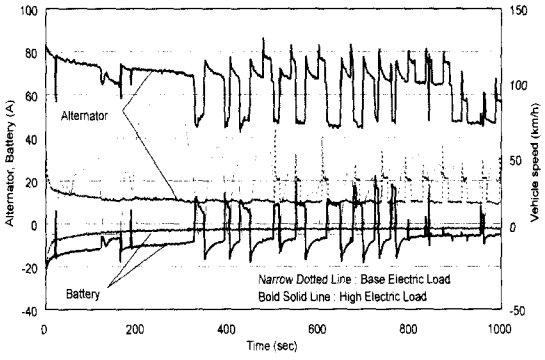

Fig. 6 Electric energy balance between alternator and battery at city driving cycle

의하면, 알터네이터의 발전량은 전력부하가 큰 경우에 현저한 증가를 보여 주고 있다. 배터리의 경우에는 기본전력부하만을 준 조건에서는 대부분 충전만이 이루어지나, 전력부하가 큰 조건에서는 충방전이 교차하여 이루어지고, 그의 변화폭도 큼을 볼 수 있다.

이때, 배터리의 방전이 중점적으로 이루어지고 있는 시기와 차량이 정차하고 있는 시기가 거의 대응하며 이는 엔진의 공회전시에는 알터네이터로부터의 발전량이 크게 감소하기 때문에 전력부족분을 배터리에 의해 충당함에 따른 것으로 생각된다.

Fig. 7에 전력부하를 크게 준 경우와 기본전력부하만을 준 경우에 대하여, 고속주행모드인 HWFET모드로 시험차량을 주행했을 때의, 알터네이터로부터의 발전과 배터리의 충방전 현황을 주행속도에 대비하여 나타낸다.

전술한 Fig. 6에서와 마찬가지로, 알터네이터로부터의 발전량은 전력부하가 큰 경우가 현저히 증가하며, 배터리의 경우에도, 기본전력부하만을 준 조건에서는 대부분 충전만이 이루어지나, 전력부하가 큰 조건에서는 충방전이 교차하는 횟수가 증가하고 그의 변화폭도 큼을 볼 수 있다. 그러나, 시가지모드에 비해 충방전 교차횟수와 기간이 현저히 적으며, 이는 고속모드에서는 차량이 정차하는 기간이 없고, 주행속도대가 높아서, 알터네이터로부터의 발전만에 의해서도 차량의 전력부하를 대부분 충당할 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

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

위에서와 같이, 전력부하를 크게 준 경우에서는 알터네이터로부터의 발전량이 크게 증가하며, 이에 따라 알터네이터의 구동마력이 보다 증가해서 엔진의 손실마력이 증가하고, 차량의 연료소비도 증가할 것으로 생각된다. 이에 Fig. 8에서와 같이, 기본전력부하만의 경우와 전력부하를 크게 준 경우 두 가지에 대하여 시가지모드 주행시의 순시 연료소비율과 순시 배기가스온도를 플로트하여 보았다. 그림에 의하면, 전력부하를 크게 준 경우가 기본전력부하만의 경우에 비하여 전력소비의 증가에 따른 알터네이터 구동마력의 증가에 따라서 순시 연료소비가 증가하고, 이에 따른 엔진 부하의 증가로 배기온도 역시 상승함을 볼 수 있다.

이러한 전력부하의 증가는 연비 뿐 아니라 배출가스특성에도 영향을 미칠 것으로 생각되어 Fig. 9에서와 같이 시가지모드와 고속모드 주행시의 각각의 연비와 배출가스 특성을 비교하여

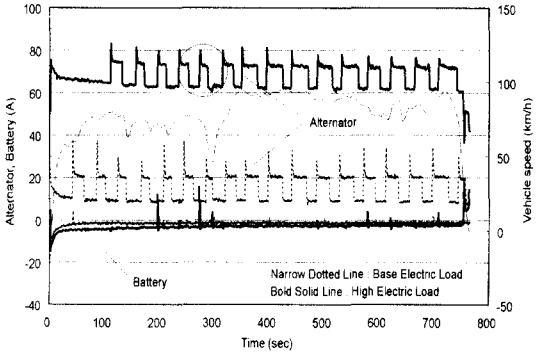

Fig. 7 Electric energy balance between alternator and battery at highway driving cycle

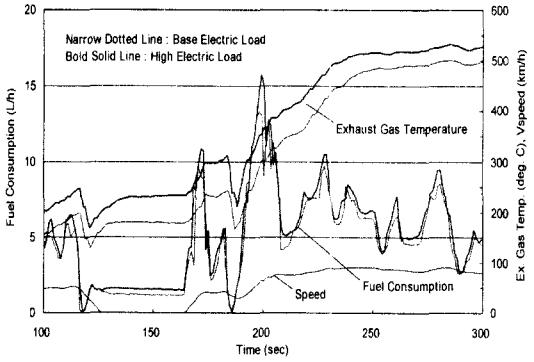

Fig. 8 Fuel consumption and exhaust gas temperature at city driving cycle

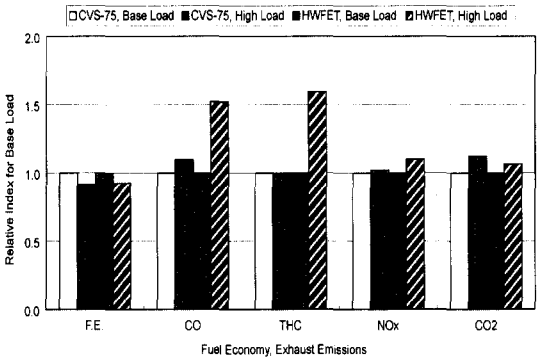

Fig. 9 Fuel economy and exhaust emissions at various electric loads and driving cycles

보았다.(각기 기본전력부하의 경우를 1.0으로 놓은 경우에 대한 증감치임) 그림에 의하면, 전력부하가 큰 경우가 기본전력부하만의 경우에 비해 시가지모드연비가 약 9%, 고속모드연비가 약 8% 정도 악화하며 CO, THC, NOx 등의 배출량도 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 10에는 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 총 투입에너지의 0.6% 및 0.5%임에 대하여 전력부하를 크게 준 경우에는 각기 2.8% 및 2.0%로 4배 이상 증가함을 볼 수 있다.

여기에 발전효율을 고려하여 알터네이터의 구동에너지를 비교해 보면 그림에서와 같이 이들은 각기 총 투입에너지의 2.3%, 2.3%, 10.6%, 9.7%에 상당하여 발전기를 배기열 이용 열전발전에 의해 대체한다면 에너지 절약에 유효함을 알 수 있다.

예로서, 열전변환소자의 효율을 15%로 가정하고 열전변환시스템의 열교환 효율을 90%로 가정하여 단순 계산하면 Fig. 10에서의 엔진 배열량(배기온도, 배기가스량, 배기가스의 비열 등에 의해 구한 것으로서, 총 투입에너지의 각기 15.9%, 17.4%, 21.1%, 21.8%)에서 총 투입에너지의 각기 2.1%, 2.3%, 2.8%, 2.9%에 해당하는 에너지를 전력으로 회수할 수 있으며, 이에 의해 알터네이터에서의 발전에너지인 총 투입에너지의 0.5~2.8%를 충당할 수 있음을 알 수 있다.

그러나, 열전변환소자의 효율은 저온단과 고온단의 온도차이가 작을수록 감소하고, 클수록 좋아지기 때문에 엔진 배기온도의 변화에 따라서 효율이 변화하며 소자에 따라 다르나 고온단의 온도가 대략 200°C 이상은 되어야 양호한 효율범위에서 운전할 수 있다. 따라서, 시가지모드와 고속모드, 전력부하가 큰 경우와 기본전력부하의 경우에 대하여 매 초당의 배기온도를 Fig. 11에서와 같이 정리하여 보았다. 참고로, 그림에는 각각의 배기온도에서의 배열량을 동시에 나

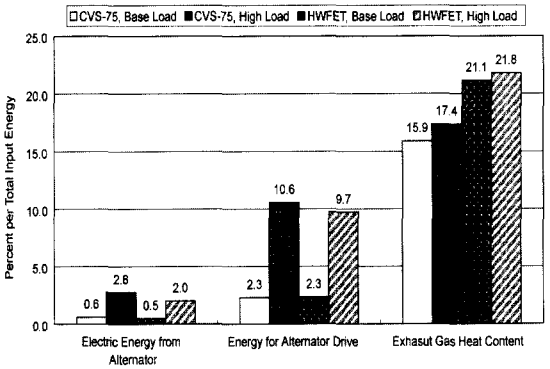

Fig. 10 Energy balance for total input energy at city and highway driving cycles

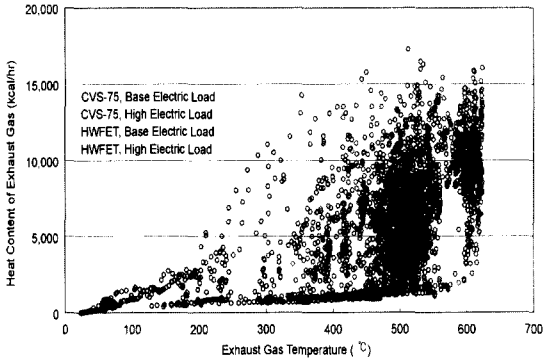

Fig. 11 Temperature and heat content of exhaust gas at city and highway driving cycles

타내었다.

그림에 의하면, 배기가스의 온도가 200°C 이상인 경우가 대부분을 차지하여 비교적 양호한 효율로 열전변환소자를 운전할 수 있는 조건임을 알 수 있었다.

5. 결 론

1) 엔진 크랭킹시에는 배터리에 축적된 전기에너지가 사용되어 배터리의 방전량이 급격히 증가하므로 알터네이터로부터의 발전량이 크게 증가하여 배터리로의 급속한 충전이 이루어지며 어느 정도 충전이 완료되면 점차 알터네이터로부터의 발전량과 배터리로의 충전량이 안정화된다.

2) 전력부하가 큰 경우와 기본 전력부하만을 사용하는 경우, 알터네이터로부터의 발전량은 전력부하가 큰 경우가 현저히 증가하며, 배터리의 경우에는 기본전력부하만을 사용하는 조건에서는 대부분 충전만이 전력부하가 큰 조건에서는 충방전이 교차하는 횟수와 기간이 증가하였다. 이는 전력부하의 증가에 따른 발전 부족분을 배터리에서 충당하기 때문인 것으로 생각된다.

그러나, 고속모드에서는 시가지모드에 비해 충방전 교차횟수와 기간이 감소하였으며, 이는 고속모드의 경우 정차기간이 없고 주행속도대가 높아서 알터네이터로부터의 발전만에 의해서도 차량의 전력부하를 대부분 충당할 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

3) 전력부하가 큰 경우에는 알터네이터로부터의 발전량이 크게 증가하며, 이에 따른 알터네이터 구동마력의 증가로 기본전력부하만의 경우에 비해 시가지모드연비가 약 9%, 고속모드연비가 약 8% 정도 악화하였고, CO, THC, NOx 등의 배출량도 증가하였다.

4) 기본전력부하만을 사용하는 경우에는 시가지모드와 고속모드의 알터네이터 발전에너지가 총 투입에너지의 각기 0.6% 및 0.5%임에 대하여, 전력부하를 크게 준 경우에는 각기 2.8% 및 2.0%로 4배 이상 증가하였다. 알터네이터의 발전효율을 고려하는 경우에 이는 총 투입에너지의 2.3~10.6%에 상당하여 배기열 이용 열전발전에 의해 발전기를 대체한다면 에너지 절약에 유효할 것으로 생각된다.

5) 열전변환소자의 효율을 15%로 가정하고 열전변환시스템의 열교환 효율을 90%로 가정하여 단순 계산하면 엔진 배기 열에너지에서 총 투입에너지의 2.1%~2.9%에 해당하는 에너지를 전력으로 회수할 수 있으며, 이에 의해 알터네이터로부터 생산되는 전력에너지를 충당할 수 있음을 알 수 있었다.

6) 열전변환소자의 효율은 저온단과 고온단의 온도차이에 따라서 변화하며 엔진의 배기온도가 200°C 이상은 되어야 양호한 효율범위에서 운전할 수 있다. 시가지모드와 고속모드, 전력부하가 큰 경우와 기본전력부하의 경우에 대하여 매 초당의 배기온도를 분석하여 본 결과, 배기가스의 온도가 200°C 이상인 경우가 대부분을 차지하여, 비교적 양호한 효율로 열전변환소자를 운전할 수 있는 조건임을 알 수 있었다.

현재 이러한 열원특성에 맞추어 열전발전시스템을 제작・시험중에 있다.

참 고 문 헌

1) J. C. Bass, et al. "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," Proc. of 13th Int. Conf. on Thermoelectrics, p.295, 1994.
2) K. Shinohara, et al., "Application of Thermoelectric Generator for Automobile," Jidousya Gijyutsu, Vol.52, No.7, pp.78-82, 1998.
3) D. M. Rowe : CRC Handbook of Thermo- electrics, CRC Press, Inc., pp.1-17, 1994.
4) 梶川武信 外 : 熱電發電システム技術總 攬, リアルライズ社, pp.107-205, 1997.
5) セラミックス 熱電變換技術開發可能性 調査, NEDO-P-8608, NEDO 研究報告書, 1987.
6) 半導體を利用した熱電變換技術の可能性に關する調査, NEDO-P-9212, NEDO 研究報告書, 1993.