

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.3.243>

ISSN 1226-4881

수치해석을 통한 엔진 배기가스의 조건 변화에 따른 열전소자 발전 특성에 관한 연구

인 병 덕* · 이 기 형**

* 한양대학교 기계공학과

Study of Thermoelectric Generator with Various Thermal Conditions for Exhaust Gas from Internal Combustion Engine using Numerical Analysis

Byung Deok In* and Ki Hyung Lee**

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received March 5, 2012 ; Revised November 20, 2012 ; Accepted November 20, 2012)

Key Words: Numerical Analysis(수치해석), Thermoelectric Module(열전소자), Seebeck Coefficient(지벡 계수), Figure Of Merit(성능 지수)

초록: 내연기관은 연료로 공급되는 에너지의 30~40%만을 동력에너지로 전환되고 나머지 60~70%는 손실에너지와 배기에너지로 버려지게 된다. 따라서 배기 에너지를 회수한다면 기계적 에너지 또는 전기적 에너지로 변환시킬 수 있다. 열전발전기는 배기관에 위치하여 고온 열원과 저온 열원 사이에 온도차를 이용한다. 두 열원 사이에 온도차를 이용하여 전기적 에너지를 발생시켜 동력 에너지 등 여러 에너지로 변환 가능하다. 이 논문에서는 이러한 열전발전기의 특성을 예측하기 위해 수치해석을 통하여 여러 조건에 따른 열전발전기 특성을 예측하였다. 수치해석 결과 고온 열원과 저온 열원 간의 온도 차이가 클수록 발생하는 전력 역시 증가하는 것을 알 수 있었다.

Abstract: Internal combustion engines typically expel 30%-40% of the energy supplied by fuel to the environment through their exhaust system. Therefore, further significant improvements in the thermal efficiency of IC engines are possible by recovering the waste heat from the engine exhaust gas. With this fact in mind, a numerical simulation was carried out to investigate the potential of using thermoelectric generation with an internal combustion engine for waste heat recovery. Physical parameters such as the exhaust temperature and mass flow rate were evaluated in the exhaust system, and the optimum location for inserting a thermoelectric generator (TEG) into the system was determined. The TEG will be located in the exhaust system and will use the energy flow between the warmer exhaust gas and the external environment. The optimum position of the temperature distribution and the TEG performance were predicted through numerical analysis. The experimental results obtained showed that the power output significantly increases with the temperature difference between the cold and hot sides of the TEG.

1. 서 론

세계 각국에서는 지구온난화의 주범인 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 법률적으로 연비규제를 강화하고 있는 추세이다. 내연기관은 연료의 약 30-40%만이 동력에너지로 변환되고 나머지는 모두 냉각수와 배기가스에 의한 냉각 손실로 버려진다. 따라서 냉각손실과 배기손실을 최소화하면 자동차용 엔진의 효율을 향상시킬 수가 있다.

이를 위하여 자동차 배기가스의 폐열을 이용하는 기술이 주목을 받고 있다.⁽¹⁾

Hi-Z Technology Inc.⁽²⁾에서는 대형 디젤엔진의 폐열을 이용하여 발전기를 대체할 수 있는 1kW 급 열발전 시스템을 개발하였고, 연비를 개선할 수 있는 결과를 도출하였다. Douglas 등⁽³⁾은 승용 자동차에서 발전기와 TEG를 병합할 수 있는 연구를 하였고, Richard⁽⁴⁾는 승용 자동차에서 수치해석을 통해 6%의 연비저감 효과를 도출하였다.

연비 향상을 위한 기술 분야 중 열전발전장치는 열에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 에너지 변환 장치로써 열원이 존재하는 경우 다른

† Corresponding Author, hylee@hanyang.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

기계적 구동요소 없이 전력을 발생시켜 사용할 수 있는 이점을 가지고 있는 친환경적인 기술이다. 이 기술은 열전소자의 다른 두 금속을 연결하고 양단간의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 지백(Seebeck) 효과를 이용하여 열전모듈의 흡·발열 현상에서 전류가 흐르게 되는 원리이다.

본 연구에서는 실제 열전소자 실험에 앞서 시뮬레이션 모델링을 통해 열전소자의 성능을 미리 예측해 보았다.

2. 수치해석 및 방법

2.1 수치해석

엔진 배기온도와 배기관 위치에 따른 온도를 시뮬레이션 모델링을 통하여 예측하였다. 우선 전체적인 엔진 배기온도와 배기관 위치에 따른 온도를 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 시뮬레이션 모델링을 이용하여 2000cc급 디젤 엔진 시스템에서의 온도 분포를 예측하였고, 이러한 결과를 토대로 실제 작동하는 디젤 엔진 배기관의 위치에 따른 폐열 회수를 위한 최적의 조건을 파악하였다. 또한 이와 같은 모델링을 이용하여 폐열 회수에 따른 열효율 향상효과를 분석하였다.

시뮬레이션의 예측정도를 충분히 검증한 후, 고온 열원과 저온 열원의 온도를 변경시켜 각각의 조건에 따른 전력발생량과 전압발생량을 예측하였다. 이러한 결과값을 기준으로 운전 조건에 따른 배기관의 최적 온도 분포 위치를 선정함으로써 향후 연구에 기초를 마련할 수 있는 데이터를 확보하였다.

모델링 엔진에서의 보어는 83mm로 설정하였고, 스트로크는 92mm로 설정하였다. 그리고 압축비는 18.4:1을 선정하였다. 혼합기 형성 온도는 350K로

설정하였고 인젝터 노즐의 크기는 0.1mm로 설정하였다. 또한 인젝터의 스프레이의 각은 40°로 선정하였다.

2.2 수치해석방법

시뮬레이션 모델링을 수행하기 위하여 몇 가지 실험조건을 설정하였다. 우선 엔진 구동 회전수를 1000rpm부터 4000rpm까지 500rpm씩 증가시키며 모델링을 수행하였다. 이에 대한 배기가스 온도를 총 4가지 조건에서 취득하였다. 첫 번째로 실린더 출구 부근인 배기포트에서 배기가스 온도를 취득하였고 나머지 3가지 조건은 배기포트로부터 점점 멀어지는 세 위치의 덕트(751, 777, 784)에 대하여 배기가스 온도를 취득하였다. 취득한 배기가스 온도로부터 열전모듈의 흡·발열 현상에 의하여 전류가 흐르게 되는 원리를 설명하기 위해 열전모듈의 소재 중 한가지인 Bi₂Te₃ 계열의 모듈이라는 가정 하에 결과를 도출하였다. 모듈의 저온 부분은 120°C로 고정하여 실험을 진행하였다.

열발전 성능은 식 (1)-(3)으로 표현되며⁽⁵⁻⁷⁾ 식 (1)로부터 열전소자의 지백계수(α)와 전기저항(R)을 실험적으로 구하였다.⁽⁸⁾ 무부하 상태(I=0)일 때 발생하는 전압(V)과 열전소자의 양단 온도차를 이용하여 지백계수를 구하였고 발생하는 전기저항을 평균하여 계산하였다. 그리고 열전모듈 열저항을 계산하였다.

$$P = VI = (\alpha \Delta T - IR)I \tag{1}$$

$$Z = \alpha^2 \theta / R \text{ [K-1]} [\theta : \text{전기전도도}] \tag{2}$$

$$Q_h = \alpha T_h + \frac{\Delta T}{\theta} - \frac{1}{2} I^2 R \text{ [W]} \tag{3}$$

Table 1 Specification of engine

Description	Specification
Displacement	1991cc
Bore	83mm
Stroke	92mm
Compression ratio	18.4
Max. Power(PS/rpm)	126/4000
Max. Torque(kg·m/rpm)	29.5/2000

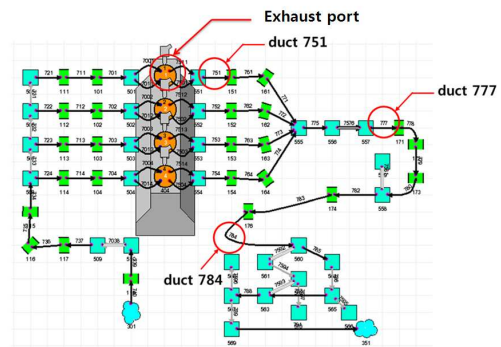


Fig. 1 Diagram of simulation modeling

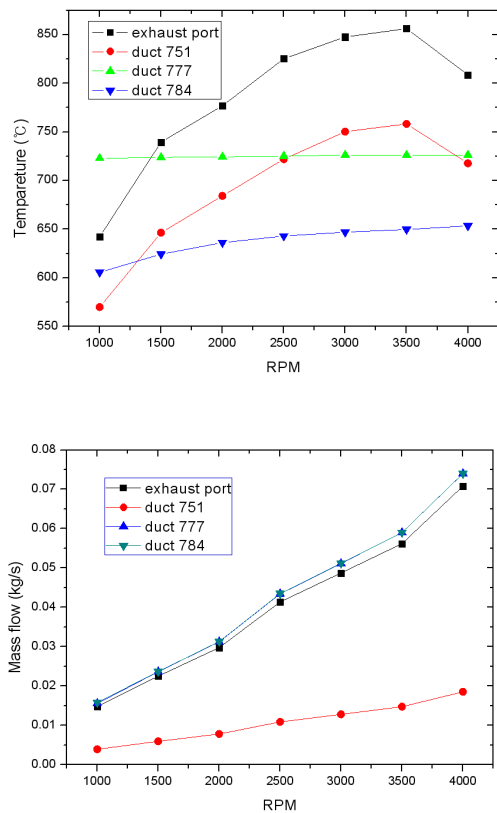


Fig. 2 The characteristic of exhaust gas temperature and mass flow

3. 수치해석결과 및 고찰

3.1 수치해석을 통한 폐열회수 시스템의 온도 분포 예측

자동차용 폐열회수 시스템에서는 배기가스의 유량과 온도가 가장 중요한 인자이다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 배기온도와 유량을 예측해 보았다. Fig. 2는 각 위치에서의 엔진 회전수(RPM)에 따른 배기 온도 및 유량 특성을 보여주고 있다.⁽⁹⁾

우선 duct 751은 4개의 실린더 중 한 개만의 실린더에 부착된 duct이기 때문에 다른 조건보다 유량의 값이 현저히 적다. 따라서 duct 751은 각 위치에 따른 유량 값 비교에서는 제외하였다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 우선 duct 751의 배기가스의 유량 값은 duct 777과 784보다 현저히 적다는 것을 알 수 있으며, duct 777과 784는 거의 비슷한 유량 값을 나타내고 있는 사실을 알 수 있다. 배기 온도의 경우, 엔진에서 멀어질수록 온도가 저하되고 있음을 알 수 있다. 그리고 회

전수에 따른 배기온도 특성은 배기 포트 지점과 duct 777 및 784의 세 위치 모두에서 유사한 경향성을 띄며 회전수에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 다른 세 가지 위치 조건에서는 RPM에 따라 온도의 변화가 심하지만, duct 777의 경우 RPM에 따른 온도의 변화가 거의 없이 일정하다는 사실을 알 수 있다. 특히 배기 포트 부근의 경우 저 RPM과 고 RPM 영역에 걸쳐서 온도 편차가 가장 크게 나타났다. 즉, 1000RPM일 경우 약 645°C이고 3500RPM일 때는 약 850°C로서, 최고 온도와 최저 온도의 차이가 약 200°C 정도로 나타났다. duct 751의 경우 1000RPM일 경우 약 570°C이었고 3500RPM일 때는 약 750°C로서, 최고 온도와 최저 온도의 차이가 약 180°C 정도로 나타났다. 반면, duct 784의 경우 1000RPM일 경우 약 600°C이었고 4000RPM일 때는 약 640°C로서, 최고 온도와 최저 온도의 차이가 약 40°C 정도로 나타났다. 이 예측결과로부터 duct 777의 경우 다른 위치와 달리 온도 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 유량의 결과 값과 배기가스 온도의 일정함을 고려한다면 최종적으로 duct 777이 열전소자를 설치하기에 가장 안정적인 위치라고 판단된다.

3.2 배기관 특성 고찰

배기관에 설치할 열전소자의 최적 위치를 선정하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 배기온도 분포 특성을 파악하였다. 발전효율을 극대화하기 위해서는 열전소자의 위치가 가장 중요하다.

기준 위치로 정한 duct 777에서의 결과 값과 비교하기 위해 온도변화가 가장 큰 배기포트 부근의 온도를 이용하여 열전모듈의 특성을 예측해 보았다. duct 777 위치와 배기포트 부근 위치에서의 온도를 이용하여 열전모듈의 지백 계수와 전기저항 및 성능지수를 구하여 그 결과를 Fig. 3~5와 같이 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4는 duct 777 위치에 열전모듈을 설치했을 경우를 가정하여 열전모듈의 지백계수와 저항을 식 (1) ~ (3)을 이용하여 계산해 본 그림이다. 회전수 조건이 1000RPM의 경우 지백 계수와 저항 모두 최대치를 나타냈으며, 3000RPM까지 점차 감소하는 경향을 보였다. 3000RPM 이후부터 4000RPM까지는 두 경우 모두 거의 일정

하게 나타났다.

Fig. 5는 duct 777 위치에 열전모듈을 설치했을 경우에 대한 열전모듈의 성능지수를 예측해 본 그림이다. 앞의 결과들과 유사하게 회전수 조건이 1000RPM의 경우 성능지수가 최대치를 나타냈으며, 3000RPM까지 점차 감소하는 경향을 보였고, 3000RPM 이후부터 4000RPM까지는 거의 일

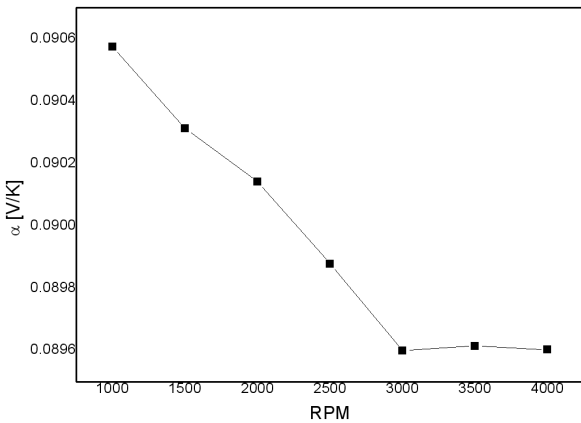


Fig. 3 Seebeck coefficient of TEM

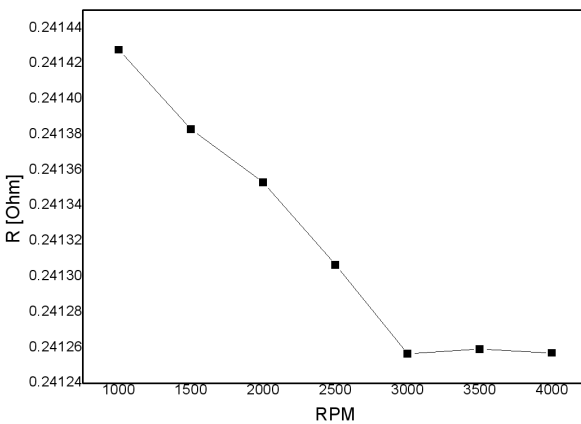


Fig. 4 Electrical resistance of TEM

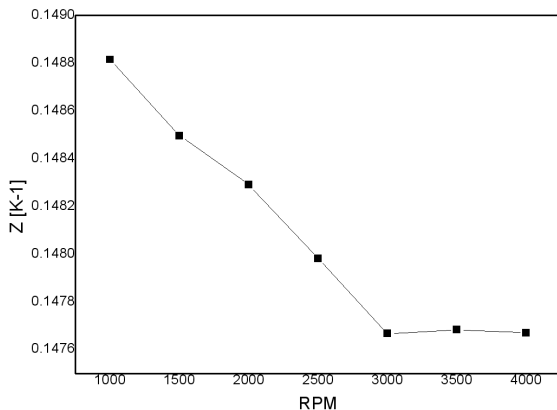


Fig. 5 Figure of merit

정하게 성능지수가 나타났다.

이는 RPM 상승에 따른 배기유량의 증가에 의한 것으로 사료된다.

이러한 결과들로부터 duct 777의 경우 지백계수는 RPM이 증가할수록 감소하다 어느 RPM영역 이상에서 일정해지는 것을 알 수 있었다. 또한 전기저항 및 성능지수도 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 따라서 저 RPM일수록 열전모듈의 지백계수와 전기저항 및 성능지수가 더 우수하다는 사실을 알 수 있었다.

다음은 최적 위치로 선정한 duct 777에서의 열전 모듈의 전압과 전력 특성을 파악하였다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 회전수가 1000RPM와 1500RPM일 때 duct 777 위치에 열전모듈을 설치했을 경우를 가정하여 열전모듈의 전류에 따른 전압과 전력을 예측해 본 결과이다. 그림에서 보이는 것처럼 식 (1)을 이용하여 계산하였을 때 전류가 0일 경우 전압이 약 8V로 최대치를 나타냈으며 전류가 상승할수록 전압은 감소하는 경향이 나타났다. 전력의 경우 전류가 약 12A일 때까지 상승하여 약 43W의 최대치를 나타냈으며, 약 12A 이상의 전류에서는 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig. 6의 (c)와 (d)는 회전수 조건이 2000RPM과 2500RPM일 때의 duct 777 위치에 열전모듈을 설치했을 경우, 열전모듈의 전류에 따른 전압과 전력을 예측해 본 결과이다. 앞의 결과와 마찬가지로 전류가 0일 경우 전압이 약 8V로 최대치를 나타냈으며, 전류가 상승할수록 전압은 감소하는 경향이 나타났다. 전력의 경우 전류가 약 12A일 때까지 상승하여 약 44W의 최대치를 나타냈으며, 약 12A 이상의 전류에서는 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

다음으로 Fig. 6의 (e), (f), (g)는 고속 조건인 3000RPM, 3500RPM, 4000RPM일 때 duct 777 위치에 열전모듈을 설치했을 경우에 대한 열전모듈의 전류에 따른 전압과 전력을 예측해 본 결과이다. 이 경우도 다른 RPM과 마찬가지로 전류가 0일 경우 전압이 약 8V로 최대치를 나타냈으며, 전류가 상승할수록 전압은 감소하는 경향이 나타났다. 전력의 경우 전류가 약 12A일 때까지 상승하여 약 43W의 최대치를 나타냈으며, 약 12A 이상의 전류에서는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 duct 777 위치에 열전모듈을 설치하면 전력은 최소 43W에서 최대 44W까지 얻을 수 있

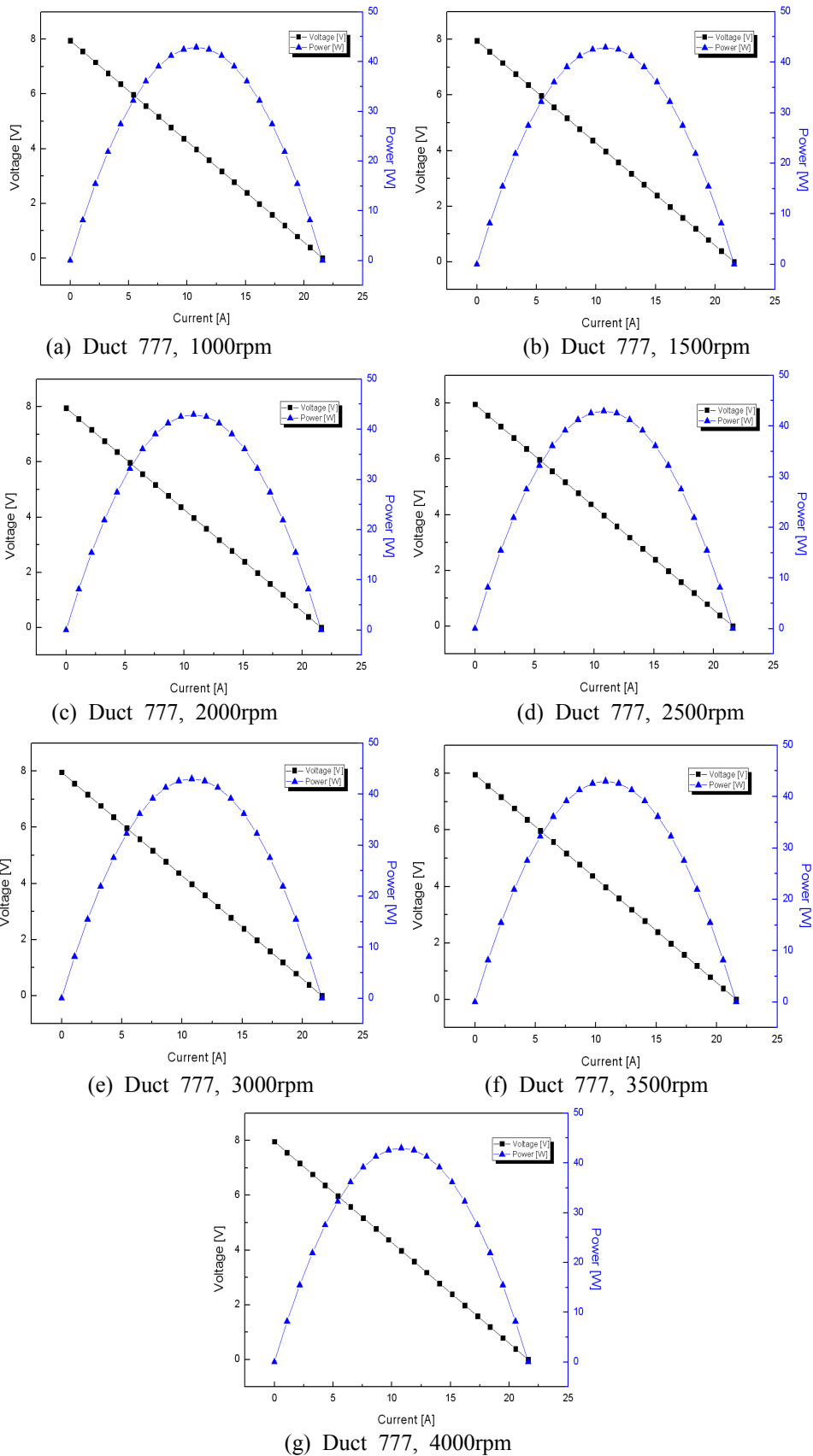


Fig. 6 Performance curves according to RPM

음을 알 수 있었다.

이러한 결과를 토대로 RPM이 증가할수록 배기 유량이 늘어나기 때문에 발전성능이 향상된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션 모델링을 통하여 배기 가스 온도 데이터를 취득하였고, 이 결과를 이용하여 열전모듈의 성능을 예측하였다. 또한 일정한 온도 분포를 보이는 배기관 위치를 파악하였고 이 위치에 있어서의 열전모듈의 지백계수, 전기저항, 성능지수 및 전력과 전압을 파악하였다.

(1) 시뮬레이션 결과, 온도의 편차가 적고 일정하게 유지되는 duct 777 위치에서 열전모듈을 구동하였을 경우 일정한 성능과 효율을 발생시킬 수 있을 것이라고 기대된다.

(2) duct777의 경우 RPM이 증가할수록 열전모듈의 지백계수와 전기저항 및 성능지수가 감소하다가 일정해지는 것을 확인하였다.

(3) 저 RPM일 경우 지백계수와 전기저항 및 성능지수가 더 크다는 것을 알 수 있었다. 이 경우 전류가 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 감소하고 출력전력은 증가 후 감소하여 최대출력 점이 나타나는 경향을 보였다.

(4) duct 777의 경우 고온 열원의 온도가 일정하기 때문에 각 조건에 따른 최대값은 거의 차이가 없는 것으로 확인되었다.

이를 통하여 열전발전에 있어서 양단 온도차의 열적 조건이 발전성능을 결정하는 주요 인자임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0011537).

참고문헌

- (1) Endo, T., Kwajiri, S., Kojima, Y., Takahashi, K., Baba, T., Ibaraki, S., Takahashi, T. and Shinohara, M., 2007, "Study on Maximizing Exergy in Automotive Engines," SAE Technical Paper 2007-01-0257.
- (2) Aleksandr, S.K., John, C.B., Saeid, G., Norbert, B.E., Richard, A.B., David, F. and Mike, M. 2001, "Thermoelectric Development ay Hi-Z Technology," Technical Paper.
- (3) Crane, D., Jackson, G. and Holloway, D., 2001, "Towards Optimization of Automotive Waste Heat Recovery Using Thermoelectrics," SAE Technical Paper 2001-01-1021.
- (4) Stobert, R. and Milner, D., 2009, "The Potential for Thermo-Electric Regeneration of Energy in Vehicles," SAE Technical Paper 2009-01-1333.
- (5) Rowe, D. M., 2007, "Thermoelectric Handbook Macro to Nano," Taylor and Francis Group Press, Wales.
- (6) Bass, J. C., Elsner, N. B. and Leavitt, F. A., 1994, "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," *Proceedings of the 13th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 295~298.
- (7) Wu, C., 1996, "Analysis of Waste-Heat Thermoelectric Power Generators," *Applied Thermal Eng.*, Vol. 16, No. 1, pp. 63~69.
- (8) Huang, B. J. Chin, C. J. and Duang, C. L., 2000, "A Design Method of Thermoelectric Cooler," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, pp. 208~218.
- (9) Aleksandr, S.K., John, C.B., Saeid, G., Norbert, B.E., Richard, A.B., David, F. and Mike, M. 2001, "Thermoelectric Development ay Hi-Z Technology," Technical Paper.