

## 가솔린엔진을 개조한 분산전원용 11kW급 천연가스엔진의 성능 최적화

이영재<sup>1)</sup> · 표영덕<sup>1)</sup> · 김강출<sup>1)</sup> · 오시덕<sup>2)</sup>

한국에너지기술연구원 수송에너지연구센터<sup>1)</sup> · 효성중공업<sup>2)</sup>

## An Optimization of 11kW Gas Engine for Distributed Energy Source Modified from Gasoline Engine

Youngjae Lee<sup>1)</sup> · Youngdug Pyo<sup>1)</sup> · Gangchul Kim<sup>1)</sup> · Sidoek Oh<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

<sup>2)</sup>Hyosung Corporation, Bangbae Bldg., 1006-2 Bangbae-dong, Seocho-gu, Seoul 137-850, Korea

(Received 28 October 2004 / Accepted 11 January 2005)

**Abstract :** Cogeneration is an energy conversion process, where electricity and useful heat are produced simultaneously in one process. Also, carbon dioxide emissions can be reduced as well. The cogeneration process may be based on the use of steam, gas turbines or combustion engines. However, there have been few models with an output of less than 100 kilowatt. In the present study, a spark ignited gas engine with generation output of 10 kilowatts was developed for micro cogeneration package. The gas engine shows 29.2% of thermal efficiency under Stoichiometric combustion and 33.6% of thermal efficiency under lean combustion. NOx emission shows less than 10ppm at 13% oxygen under stoichiometric combustion and about 100ppm at 13% oxygen under lean combustion.

**Key words :** Cogeneration(열병합발전), Gas engine(가스엔진), Distributed energy source(분산형 에너지소스), Electricity(전기), Stoichiometric(이론공연비), Lean burn(희박연소), Automotive gasoline engine(자동차용 가솔린 엔진)

### 1. 서 론

열병합발전시스템은 하나의 에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 발생시키는 종합에너지시스템으로서 발전에 수반하여 발생하는 엔진 배열을 회수 활용하여 에너지이용효율을 높일 수 있을 뿐 아니라 이산화탄소의 저감도 꾀할 수 있다.<sup>[4]</sup> 또한, 전력 및 열 수요의 퍼크시에 가동하여 하절기 또는 주간의 전력부하 평준화에 기여함으로써 전기와 가스의 수요를 관리할 수 있다.

이에 따라서 국내외적으로 열병합발전시스템의 보급이 확대되고 있으나, 민생용 소규모 건물에 적합한 수십kW 용량의 마이크로급 열병합발전시스템이나 그의 가스엔진은 양산화 실적이 극히 적다.

저자들은 전보에서<sup>5)</sup> 발전출력 10kW급 초소형 열병합발전시스템에 적용하기 위한 도시가스(천연가스)를 사용하는 스파크점화 전소방식의 이론공연비 가스엔진을 시제작하였다.

본 보에서는 본 가스엔진의 점화시기를 최적화하여 효율을 제고하였고, 희박연소에 의한 그 이상의 성능개선을 시도하였다.

\*To whom correspondence should be addressed.

yjl@kier.re.kr

## 2. 실험 엔진 및 장치

### 2.1 가스엔진의 시제작

가스엔진은 기아자동차의 산업용 B5C 엔진을 개조하여 시제작하였다. 베이스엔진은 배기량 1,498 cc의 기화기방식 가솔린엔진으로서 디스트리뷰터에 의한 점화방식을 채택하고 있다.

가스엔진으로의 개조를 위하여, 베이스엔진의 기화기와 연료펌프를 탈거하고, 가스믹서, 압력 레귤레이터, 차단밸브 등으로 구성되는 천연가스엔진 용 연료공급계를 장착하였다. 엔진의 흡기계는 가스연료와 공기의 원활한 혼합을 위하여 서지탱크가 장착된 흡기다기관으로 교체하였고, 배기계에는 NOx의 저감을 위하여 가솔린엔진용 삼원촉매컨버터를 장착하였다. 기관 회전속도의 일정한 제어를 위하여, ECU, 액튜에이터 및 드로틀바디가 일체화된 속도제어유닛을 장착하였으며, 엔진 플라이휠 기어 부근에 마그네틱 센서를 설치하여 회전속도제어용 신호로 사용하도록 하였다.

### 2.2 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 시험시스템은 크게 나누어 엔진 동력계 및 주변기기, 배기 가스분석기로 구성된다. 각 기기류에서 출력되는 신호는 데이터 애플리케이션시스템에 의해 매초 간격으

Table 1 Specifications of test equipment

	Specifications
Engine dynamometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>ED30, Onosokki</li> <li>Eddy current type</li> <li>Max. speed : 8,000 rpm</li> <li>Max. torque : 85 kg · m/3,000 rpm</li> </ul>
Exhaust gas analyzer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mexa 9100D, Horiba</li> <li>THC/O<sub>2</sub> analyzer : FMA-125</li> <li>NO/NO<sub>x</sub> analyzer : CLA-150M</li> <li>CO(H/L) analyzer : AIA-120</li> </ul>
A/F meter	<ul style="list-style-type: none"> <li>AFRecorder 2400, ECM</li> <li>Air-fuel ratio : 9 to 30 AFM</li> </ul>
Difference pressure meter	<ul style="list-style-type: none"> <li>FCO332-3W, Furness Controls</li> <li>Scale : 100 mbar / 100 mmH<sub>2</sub>O</li> </ul>
Gas meter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mass flow meter 5860E, Brooks</li> <li>0 ~ 18m<sup>3</sup>/hr under 0.3kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>

로 샘플링 된 후에 분석되었다.

측정변수는 엔진 회전속도, 토크, 배기ガ스농도, 흡입공기량, 온도(윤활유, 엔진 냉각수, 흡입공기 등), 압력(흡기관 부압, 윤활유, 천연가스공급압력 등), 냉각수 유량, 공연비, 천연가스 소비량 등으로서 주요 시험장치의 제원은 Table 1에서와 같다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 이론공연비엔진의 효율 최적화

전보에서는 천연가스 연료계의 최적 매칭을 통하

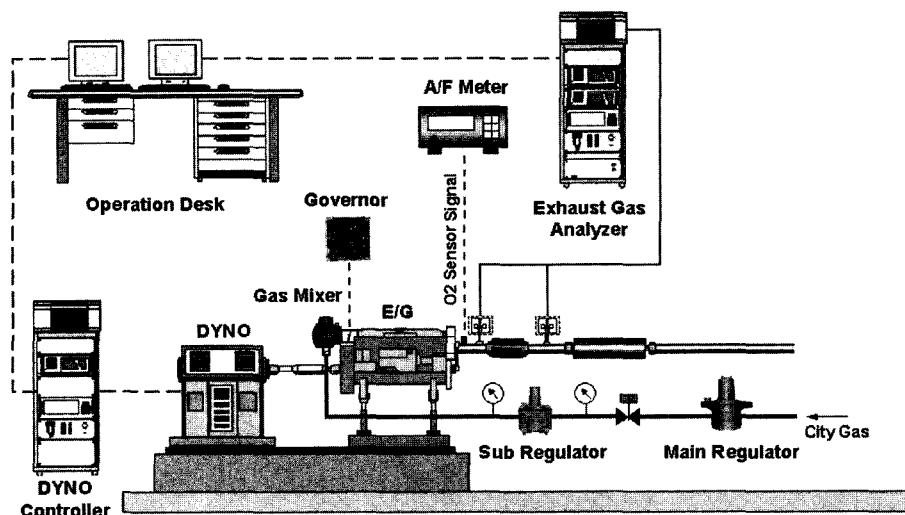


Fig. 1 Schematic diagram of engine test system

여 이론공연비 운전시에 엔진 정격출력 11kW @1,800rpm에서 28.2%의 열효율을 얻을 수 있었다. 본 보에서는 효율을 보다 개선하기 위하여 점화시기를 최적화하였다.

엔진의 점화시기는 통상 최대토크 점화시기인 MBT(minimum spark advance for best torque)로 최적화하는 것이 일반적이나, 본 연구에서 개발하는 가스엔진은 정격출력이 11kW@1800rpm(발전출력 약 10kW에 상당)이기 때문에 당해 회전속도 및 출력에서 최고효율을 얻을 수 있도록 점화시기를 최적화하였다(이하, MBE : minimum spark advance for best efficiency). 실험에 의해 확인한 바에 의하면 MBT와 MBE 점화시기는 동일하였고, 다만 MBT시험의 경우에는 점화시기의 변경에 따라서 토크가 변화하는 점만이 상이하였다.

Fig. 2에 목표출력 11kW@1,800rpm에서 점화시기를 변경하였을 때의 열효율의 변화를 나타낸다. 가솔린에 대비한 천연가스의 느린 연소속도에 기인하여 베이스엔진의 11°BTDC보다 점화시기를 6° 진각한 17°BTDC에 최적 효율점이 위치함을 볼 수 있으며, 최적화 전의 28.2%보다 약 1% 상승한 29.2%의 효율을 나타내고 있다. 참고로 이 값은 일본의 오사카가스와 앤마디젤이 공동 개발한 동급 희박연소 엔진의 효율과 유사하다.<sup>9)</sup>

이 때의 점화시기 변화에 따른 NOx 배출농도는 Fig. 3에서와 같다. 측매컨버터 전단에서는 점화시기의 진각에 따라서 NOx 배출농도가 증가하여 17°BTDC에서 약 800ppm의 높은 배출농도를 나타내나, 후단에서는 어느 점화시기 조건에서도 10ppm 이하의 아주 낮은 배출농도를 나타내어 현행 환경부 규제치인 500ppm@13% O<sub>2</sub><sup>7)</sup> 보다 현저히 낮은 값을 나타낼 수 있다. 참고로 현행 가스엔진 열병합발전설비의 NOx 배출규제는 산소농도 13%인 조건에서의 배출농도로 환산된 값에 대해 적용하여, 측정된 NOx와 O<sub>2</sub> 배출농도를 사용하여 식 (1)에 의해 환산된다.

$$NOx_{13\%O_2} = NOx_{mea} \cdot \frac{(21 - 13)}{(21 - O_2_{mea})} \quad (1)$$

where, NOx<sub>13%O<sub>2</sub></sub> : NOx at 13% O<sub>2</sub> Condition (ppm)

NOx<sub>mea</sub> : Measured NOx (ppm)

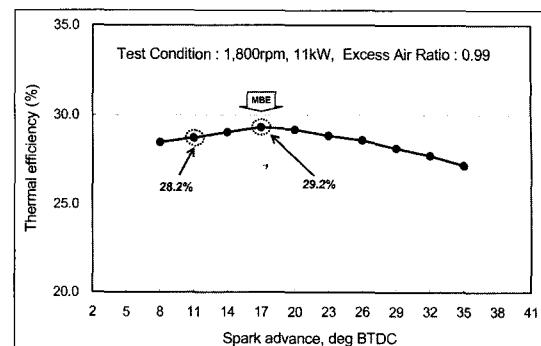


Fig. 2 Thermal efficiency of gas engine

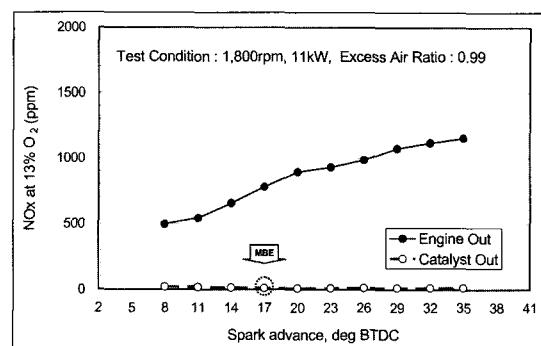


Fig. 3 NOx emissions from gas engine

O<sub>2</sub>mea : Measured O<sub>2</sub> (%)

### 3.2 공기과잉률 변화에 따른 성능특성

전술한 이론공연비 엔진에서 점화시기를 최적화하여 29.2%의 열효율을 얻을 수 있었으나, 희박연소를 통해 보다 효율을 개선하기 위하여 공기연료비를 변화시킨 여러 조건에 대하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4에 정격출력 11kW@1800rpm을 유지하면서 공기과잉율을 변화시켜 측정한 삼원촉매 전·후단의 NOx 및 O<sub>2</sub> 배출농도를 나타내며, Fig. 5 및 Fig. 6에는 이 때의 THC 및 CO 배출농도를 나타낸다. 각각의 배출농도는 배기ガ스中 산소농도 13% 기준으로 환산한 값이다. 공기과잉율 1.5를 초과하는 조건에서는 유입 연료량의 부족으로 엔진의 목표 출력을 유지할 수 없었기 때문에 실험을 실시하지 않았다.

Fig. 4에 의하면, 공기과잉율이 희박한 쪽으로 이동할 수록 측매컨버터 전단에서 배출되는 NOx가 점차 저하하여, λ = 1.5인 조건에서는 엔진 배출

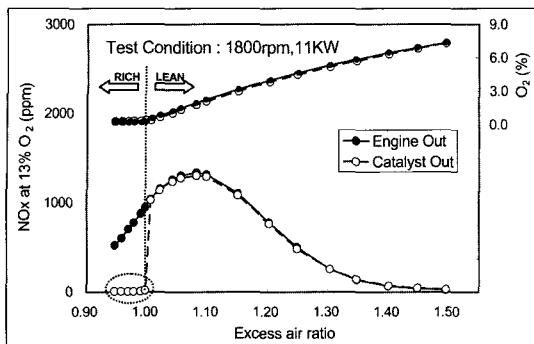
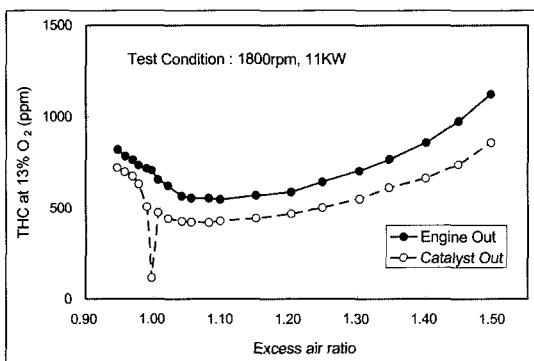
Fig. 4 NOx and O<sub>2</sub> emissions from gas engine

Fig. 5 THC emissions from gas engine

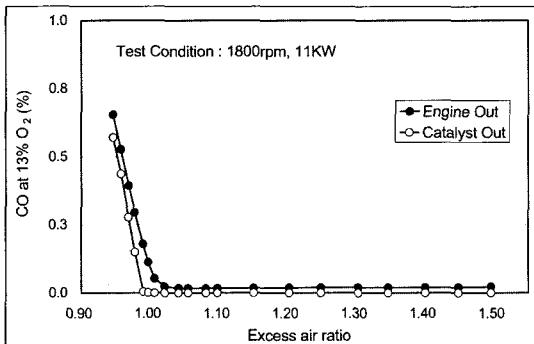


Fig. 6 CO emissions from gas engine

NOx 농도가 40ppm 정도까지 감소하고 있다.

촉매컨버터 후단의 배출농도를 살펴보면,  $\lambda \leq 1.0$ 의 농후혼합기에서는 촉매컨버터의 정화작용에 따라서 NOx 배출농도가 크게 저하하나,  $\lambda > 1.0$ 의 희박혼합기에서는 촉매컨버터의 정화율이 급격히 저하하여, 촉매컨버터 전단 즉 엔진 자체에서 배출되는 농도와 거의 유사한 값을 나타내고 있다.

Fig. 5, 6에 의하면, 촉매컨버터 전단의 THC와 CO

는 일반 가솔린엔진에서와 유사한 거동을 나타내나, 촉매 후단의 THC는  $\lambda = 1.0$  부근의 아주 좁은 영역을 제외하고는 그다지 감소하지 않는다. 이는 천연가스엔진의 THC에는 메탄이 90%정도를 차지하는 데에 대해 본 연구에서 사용한 가솔린엔진용 촉매컨버터에서는 메탄의 정화효율이 극히 나쁘기 때문임에 기인하는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup>

### 3.3 희박연소엔진의 효율 최적화

위의 결과를 참고하여 목표출력인 11kW@ 1,800 rpm에서 공기과잉율  $\lambda$ 를 1.5으로 설정하고, 점화시기를 최적화하여 열효율을 최적화하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8에 11kW@1,800rpm, 공기과잉율 1.5인 조건에서 점화시기를 변화시켰을 때의 엔진 열효율과 촉매컨버터 전 후단의 NOx 배출농도를 나타낸다.

Fig. 7에 의하면  $\lambda = 1.5$ 인 희박연소 운전조건에서는 느린 화염전파속도에 기인하여 전술한 이론공연비 연소보다 점화시기를 12° 진각한 29°BTDC에서 최고 효율점이 나타나며, 엔진의 효율은 이론공연비연소에서의 29.2% 보다 크게 향상된 33.6%를 나타내고 있다. 이러한 희박연소 조건에서도 엔진 운전성의 악화는 인지할 수 없었으며, 연소압력을 측정하지 않았기 때문에 연소변동율(COV : coefficient of variation)을 확인할 수는 없었으나, 0.1초 간격으로 1분동안 측정한 CO 및 THC의 촉매전 순시배출농도의 변화가 평균값에서 ±2.0% 미만을 나타내었음이 이를 뒷받침한다.

한편, Fig. 8의 NOx 배출농도를 살펴보면 점화시

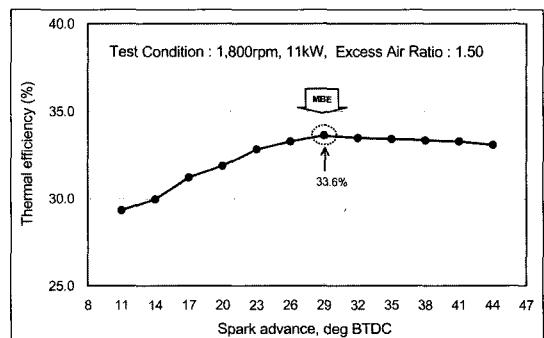


Fig. 7 Thermal efficiency of gas engine

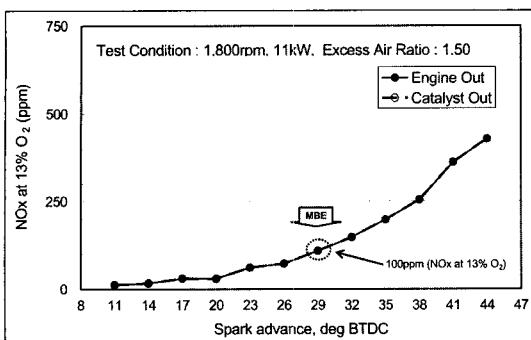


Fig. 8 NOx emissions from gas engine

기의 진각에 따라 그의 농도가 급격히 증가하여 점화시기 17°BTDC인 경우의 36ppm에서 29°BTDC인 경우에는 약 100ppm으로 증가하고 있다. 또한, 희박연소에 따른 삼원촉매의 NOx 정화효율의 급격한 악화에 기인하여, 촉매 전후단 공히 동일한 NOx값을 나타냄을 볼 수 있다.

전술한 바와 같이 가스 열병합 발전설비의 현행 NOx 규제치는 500ppm@13% O<sub>2</sub>이나, 2005년도에는 50ppm으로 대폭 강화된다. 이러한 강화된 배출규제는 삼원촉매를 장착한 이론공연비 전소엔진에서는 대응이 가능하나, 희박연소엔진에서는 대응할 수 없을 것으로 생각된다. 따라서, 희박연소엔진에서 2005년 NOx규제를 만족하기 위해서는 선택적 촉매 환원법(SCR : Selective Catalytic Reactor) 등 NOx 후처리기술을 적용해야 할 것으로 생각된다. 그러나, 희박연소용 NOx 후처리장치는 특히 소형일수록 가격이 높아지는 단점이 있다.

Fig. 9에 이론공연비 전소엔진과 희박연소엔진의 배기ガ스온도를 대비하여 나타낸다. 전자는 최고효율 점화시기에서 배기온도가 약 590°C를 나타냄에 대하여 후자는 약 500°C로 저하하여, 희박연소엔진에서는 엔진 효율은 증가하나, 배기온도가 90°C 정도 낮아지기 때문에 발전측면에서 유리해지는 반면 배열 회수량은 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 10에 1,800rpm의 운전조건에서 엔진 부하를 0kW에서 11kW로 급격히 변화시켜 이때의 기동특성을 이론공연비 전소엔진과 희박연소엔진을 대비하여 나타낸다. 이론공연비 전소엔진에서는 약 6초에 엔진 회전속도가 안정화되나 희박연소엔진에서

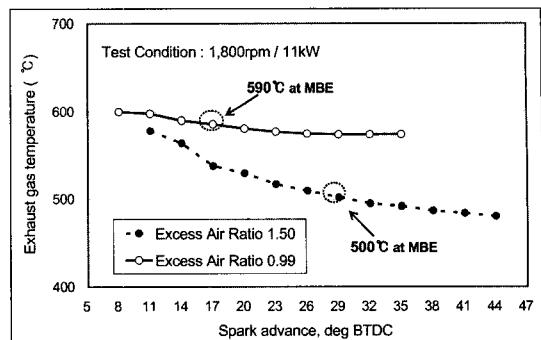


Fig. 9 Exhaust gas temperatures of gas engine

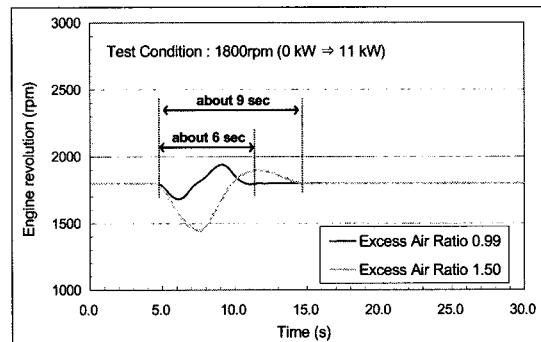


Fig. 10 Transient characteristics of gas engine



Fig. 11 Prototype gas engine and generator

는 3초가 증가한 약 9초에서 안정되어 희박연소의 경우가 기동특성은 다소 악화함을 볼 수 있으며, 이는 희박연소에 따른 느린 연소속도에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 11에 발전기와 연계한 프로토타입 가스엔진의 전경을 나타내며, Table 2에 주요제원을 나타낸다. 현재, 열병합 발전시스템과 연계한 성능평가 및 엔진 내구개발 등을 시도하고 있다.

Table 2 Specifications of prototype gas engine

Item	Specifications
Type of engine	Spark ignited natural gas engine
Number of cylinder	4 cylinder
Displacement	1,498cc
Bore × Stroke	78 × 78.4 mm
Compression ratio	9.4
Fuel	City gas (natural gas)
Type of combustion	Stoichiometric / Lean burn
Thermal efficiency (engine)	29.2% / 33.6% (Stoichiometric / Lean burn)
Fuel consumption at nominal power (m <sup>3</sup> /h)	3.384 / 2.952 (Stoichiometric / Lean burn)
Nominal generation power	9.8kW @ 1,800rpm
NOx at Stoichiometric (3 way catalyst) / Lean burn	under 10ppm / about 100ppm @ nominal power
Noise	under 82 dB

#### 4. 결 론

배기량 1,500cc의 가솔린엔진을 천연가스엔진으로 개조하여 이론공연비방식과 희박연소방식 각각에 대해 점화시기 및 효율을 최적화하였다. 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) 정격출력인 11kW@1,800rpm(발전출력 약 10 kW)에서, 이론공연비방식의 경우에 열효율 29.2%, 희박연소방식의 경우에 열효율 33.6%의 우수한 열효율을 나타내는 열병합발전용 천연가스엔진을 개발하였다.
- 2) 이론공연비 엔진에서는 촉매후단의 NOx 배출농도가 10ppm 이하인 우수한 배출특성을 나타내었으나, 희박연소 엔진에서는 100ppm의 배출농도를 나타내었다. 이론공연비 엔진은 2005년도의 NOx 규제에 대응 가능하나, 희박연소엔진에서는 선택적 촉매환원법 등을 적용하여 NOx의 배출량을 보다 낮추어야 할 것으로 생각된다.
- 3) 희박연소 엔진의 경우에 엔진의 열효율은 증가하나 배기가스온도가 이론공연비 엔진에 비해 저하하여, 발전효율은 개선되는 반면 배열회수 측면에서는 마이너스효과를 나타낸다.
- 4) 희박연소 엔진에서는 느린 연소속도에 기인하여 이론공연비 엔진에 비해 엔진의 기동특성이 다소 악화한다.
- 5) 본 엔진은 열병합발전용으로 개발되었으나, GHP(Gas engine Heat Pump)-용의 엔진으로도 적용이 가능할 것으로 생각된다.

#### References

- 1) Educogen, A Guide to Cogeneration, Contract No.XVII/4.1301, p.49, 2001.
- 2) Educogen, The Future of CHP in the European Market, Project No.XVII/4.1301, p.88, 2001.
- 3) R.G. Broomquist, J. Nimmons and M. Spurr, Combined Heat & Power, WSUCEP01-013, Washington State University, p.117, 2001.
- 4) Environmental Protection Agency, National CHP Roadmap, U.S. DOE and EPA, p.42, 2001.
- 5) Y. J. Lee, Y. D. Pyo, G. C. Kim, Y. H. Kwon and S. D. Oh, "Performance Characteristics of a 10kW Gas Engine for Generation Package," Transaction of SAREK, Vol.15, No.8, pp.697-703, 2003.
- 6) T. Yoshimoto, "Application of Micro Gas Engine," Energy Conservation, Vol.52, No.11, pp.31-34, 2000.
- 7) Ministry of Environment, Law of Air Quality Management, 2003.
- 8) Y. J. Lee and G. C. Kim, "Effect of Gas Composition on Fuel Economy and Exhaust Emissions of Natural Gas Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.123-131, 1999.
- 9) C. J. Lee, J. I. Ryu, S. D. Oh, Y. D. Pyo and Y. J. Lee, "An Optimization of 10kW Class Gas Engine for Micro Cogeneration Package," 2003 Spring Conference Proceeding, KSAE, pp. 1043-1048, 2003.