

30kW 급 합성가스 열병합 시스템 개발 및 효율 성능평가

박일건^{1†} · 김상태¹ · 노귀성²

¹(주)평화엔지니어링연구원, ²(주)엔진텍

(2019년 12월 4일 접수: 2019년 12월 25일 수정: 2019년 12월 28일 채택)

Development and efficiency evaluation of 30kW scale syngas cogeneration system

Il-Gun Park^{1†} · Sang-Tae Kim¹ · Gwi-Sung Noh²

¹Pyunghwa Engineering Consultants Ltd. R&D Institute, ²Engine Tech Co., Ltd.

(Received December 4, 2019; Revised December 25, 2019; Accepted December 28, 2019)

요약 : 본 연구에서는 합성가스의 에너지화를 위한 가스엔진 성능 평가를 수행하였다. 회전수 1800 rpm 조건에서 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 증가에 따른 엔진출력(kW_m)과 열효율(%)을 평가한 결과, 공기과잉률 λ 1.4에서 엔진출력 34 kW_m를 나타냈으며, 공기과잉률이 증가할수록 엔진 열효율은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 엔진출력 34 kW_m 조건에서 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 증가시 열효율이 34.2%, 36.9%, 37.2%, 37.4%, 38.1%로 증가하였고, 발전출력을 통한 종합효율은 발전출력 30 kW_e 부하조건에서 38.7 kg/h의 연료를 소모하여 32.1%의 발전효율과 냉각수와 배기가스에서의 열회수를 통해 57.3 kW의 폐열을 회수하여 53.8%의 열을 회수하여 총 85.8%의 종합효율을 보이는 것으로 나타났다.

주제어 : 휘발성유기화합물, 밀러 사이클, 합성가스, 가스엔진, 에너지화

Abstract : In this paper, Gas engine was tested for the energy of synthesis gas. As excess air ratio increase 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 in 1800 rpm and synthesis gas, thermal efficiency generally decrease and power generation was 34 kW_m at λ 1.4. And excess air ratio increase 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 in power generation 34 kW_m, thermal efficiency generally increase 34.2%, 36.9%, 37.2%, 37.4%, 38.1%. Total efficiency through power generation consumes 38.7 kg/h of fuel at 30 kW_e load and recovers 57.3% of waste heat by recovering 57.3 kW of waste heat through 32.1% power generation efficiency and heat recovery from cooling water and exhaust gas. The total efficiency was 85.8%.

Keywords : VOCs, Miller cycle, Synthesis gas, Gas engine, Energy recovery

[†]Corresponding author
(E-mail: igpark@pec.kr)

1. 서론

대기상에 대표적인 오염물질인 VOCs는 종류나 양적인 면에서 팽창하고 있는 추세이다[1]. 광화학반응에 의한 오존 생성에 막대한 영향을 끼치고 있으며[2,3], 스모그의 원인이 되는 오존 및 광화학 산화성 물질 등의 2차적 피해를 만들고 자동차에서 배출되는 연소 배기가스 중의 SO_x, NO_x와 함께 최근 심각한 대기오염으로 분류되고 있는 물질이다[4,5].

VOCs는 대기환경 중에서 화석연료를 포함한 각종 유기화합물의 생산과 사용, 자동차 이용에 따른 각종 대기오염물질과 함께 다양한 형태로 발견되고 있다[6,7]. 배출원별 VOCs 배출량은 일반적으로 이동 배출원인 자동차와 유기용제를 다량 사용하는 도장시설 등이 전체 VOCs 배출량의 약 80% 내외를 차지하며, 2005년 이후 유기용제를 사용하는 시설에서 배출되는 VOCs의 발생량이 점차 증가되고 있는 실정이다.

이중 VOCs 배출원별로 에너지화가 가능한 분야를 예측해보면, 유류 저장시설, 도장 및 인쇄시설로 분류할 수 있다. 2011년 기준으로 유류 저장시설에서 휘발되는 유류는 약 6,986 톤이며, 도장 및 인쇄업 등과 같은 유기용제 사용 시설에서 휘발되는 용제는 210,825 톤으로 전체 VOCs 발생량의 약 75%에 해당된다.

VOCs를 제거하기 위한 국내개발은 진행된 사례가 많으나, VOCs를 에너지화하는 연구는 현재까지 실험실 규모의 실험만이 이루어진 실정이며, 상용화한 사례는 전무하다[8,9]. 해외 선진국 역시 VOCs 처리에 대한 기술이 개발되어 있으나, 주로 VOCs 처리목적에 주안점을 두었을 뿐, VOCs 회수, 에너지화, 재활용 기술은 여전히 연

구단계에 있다[10]. VOCs를 에너지화할 경우 기존 연소 보일러 방식에 비하여 상당히 우수하고, SO_x 및 NO_x 배출량을 감소시킬 수 있는 장점이 있으며, 사업장에 적용할 경우 VOCs 제거뿐만 아니라 에너지 생산을 통한 비용절감 효과를 가져올 것으로 사료된다. 또한 이러한 기술이 중, 소형 규모의 시스템 개발에도 점차적으로 적용될 것으로 보여지고 있다[11,12].

따라서, 본 연구에서는 사업장에서 발생하는 VOCs를 회수하여 에너지 생산이 가능한 에너지 회수형 통합발전플랜트를 구축하기 위하여 가스 엔진을 개발하고, 성능평가를 통한 적용가능성을 도출하였다.

2. 실험

2.1. 실험 조건

실험에 사용된 합성가스 연료 조성은 Table 1과 같이 H₂ 49.2%, N₂ 21.8%, CO₂ 16%, CO 12.9%, CH₄ 0.2%로 이 중 불활성 가스인 N₂와 CO₂가 38%를 차지하고 있으며, 불활성 가스는 연소안정성에 크게 영향을 줄 수 있는 단점을 가지고 있다[13,14]. 가연성 가스는 H₂, CO, CH₄는 구성되어 있으며, CH₄의 비율은 미미한 수치이다. 합성가스 연료의 저위 발열량을 계산한 결과 1,673 kcal/Nm³으로 천연가스 9,300 kcal/Nm³의 18% 수준으로 연료 측면에서 발열량 자체로만 본다면 상당히 낮은 열량을 가지고 있으며, 연소 측면에서 H₂가 절대적인 특성을 나타낸다. 30 kWe 발전출력을 기준으로 35%의 발전효율로 연료의 공급량을 계산해보면 요구되는 총 에너지가 85.7 kW로 이를 합성가스의 저위발

Table 1. Composition of Synthesis gas

NO	Syn Gas	Vol. Rate %	LHV (Low Heating Value)			Molecular Weight g/mol	Mass kg/Nm ³
	Unit		MJ/Nm ³	kcal/Nm ³	MJ/kg		
1	H ₂	49.23	10.8	2,580	120.1	2.016	0.090
2	N ₂	21.8				28.014	1.250
3	CO ₂	16.01				44.009	1.963
4	CO	12.89	12.6	3,010	10.1	28.01	1.250
5	CH ₄	0.17	35.8	8,552	50.0	16.043	0.716
6	Total	100.1	7.0	1,673	60.5		0.793

열량인 $1,673 \text{ kcal/Nm}^3$ 를 기준으로 유량을 계산하면 약 $44 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 이며 계산되어진 연료유량에 적합한 연료계 시스템의 사양을 선정하였다.

2.2. 실험 장치

본 연구에서 목표로 하는 30 kW_e 급의 발전출력을 위한 가스엔진은 현재 국내에 상용화된 엔진이 없는 실정이다. 발전용 가스엔진의 경우, 국내 전기 주파수인 60 Hz 를 기준으로 $1,800 \text{ rpm}$ 으로 상용운전이 가능해야 하므로 엔진의 회전수에 따른 토크 특성과 내구성을 고려해야 한다. 베이스엔진인 D4DA 엔진(Hyundai Motor Company)은 통상 $1,600 \sim 2,000 \text{ rpm}$ 영역에서 최대 토크 특성을 가지고 있어 $1,800 \text{ rpm}$ 의 회전수 영역을 필요로 하는 발전용 내연기관에 적합하며, 100 bar 이상의 높은 폭발 압력을 견디기 위해 고강성 구조로 설계가 되어 있어 본 연구에 적합한 엔진으로 판단된다.

베이스엔진의 경우 24 hr 연속 운전을 기준으

로 50 kW_m 이상의 출력이 가능하며, 연속운전이 가능하므로 30 kW_e 급의 발전기용으로는 내구 성능이 충분하고, 가스엔진으로 전환 시 합성가스 연료 사용에 따른 약 $30 \sim 40\%$ 의 출력 감소, 열효율을 증대시키기 위한 밀러사이클 적용에 따른 약 $10 \sim 15\%$ 출력 감소를 고려하면 최소 50% 이상의 여유 출력을 확보가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 실험을 수행하기 위한 엔진은 최대출력, 연소 type, 압축비가 개선되었으며, 그 외 항목은 기존 엔진 제원과 동일하다.

2.3. 가스엔진 성능평가 방법

디젤엔진을 베이스로 하여 개발된 가스엔진이 정상적으로 개발되었는지 성능검증이 필요하며, 34 kW_m 급 가스엔진 구성도는 Fig. 1과 같다.

연소 방식에 따라 가스의 이론적인 공기와 연료비를 맞추어 연소하는 이론공연비 방식과 공기의 과잉상태에서 연소가 이루어지는 희박연소 방식으로 구분할 수 있다. 엔진 효율 측면에서는

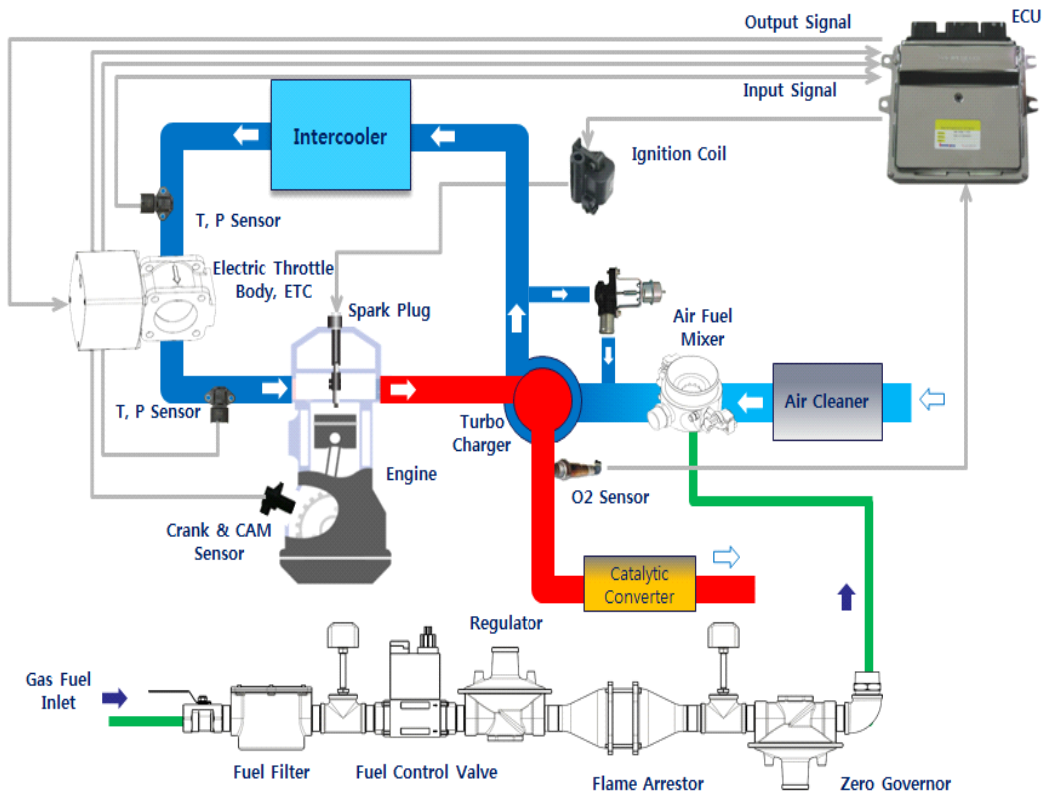


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

이론적으로 희박연소 방식이 이론공연비 방식에 비해 상대적으로 높은 열효율을 구현한다[15]. 또한 온실가스 저감에 기여할 수 있으므로 희박연소 조건을 적용하였다. 회전수 1800 rpm 조건에서 합성가스를 이용하여 공기과잉률 증가에 따른 34 kW_m 급 가스엔진의 엔진출력 및 열효율에 대한 성능평가를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 가스엔진 성능평가

합성가스 연료 중에 수소의 비율이 50% 정도로 일반적인 엔진의 밸브 타이밍을 적용할 경우 흡기계로의 역화가 발생하는 것은 선행연구를 통해 확인할 수 있다. 따라서 합성가스 엔진을 위한 캠 샤프트가 제작되기 이전에 천연가스를 통해 엔진의 기본 성능 데이터를 측정하였다.

Fig. 2는 천연가스를 이용한 개발된 가스엔진의 기초 성능평가에 대한 결과를 나타내고 있다. 천연가스 시험 시 희박연소 조건으로 시험을 진행하였으며 1,800 rpm에서 공기과잉률 λ 1.46에서 61 kW_m의 출력과 36.2%의 열효율을 달성하였다. 성능평가 시 천연가스에 대한 발열량은 가스공사에 공시가 되어 있으며 저위발열량이 9,206 kcal/Nm³, 고위발열량 10,200 kcal/Nm³을 기준으로 가스의 밀도는 0.7809 kg/Nm³을 적용하였다. 앞서 기술한 것과 같이 합성가스 연료 사용 조건과 밀러 사이클 적용시의 여유 출력을 50% 확보한 것으로 나타났다.

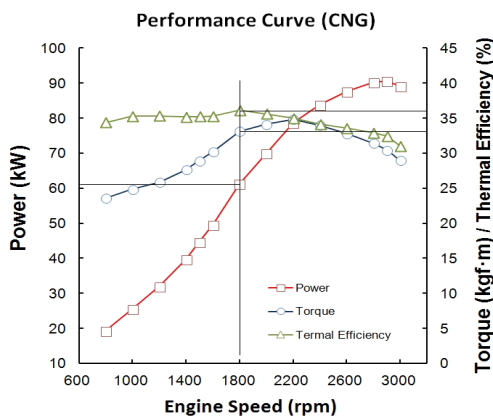


Fig. 2. Base performance test of gas engine.

3.2. 합성가스 성능평가

Fig. 3과 Fig. 4는 도출된 회전수로 합성가스를 이용하여 34 kW_m 급 가스엔진의 성능평가를 수행한 결과이다. 회전수 1800 rpm 조건에서 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 증가에 따른 엔진출력(kW_m)과 열효율(%)를 평가하였다. Fig. 3는 각각의 공기과잉률 구간에서 엔진의 최대 출력과 최대 출력점에서의 최대 열효율을 나타낸 그래프로 공기과잉률이 증가할수록 연료 대비 공기의 양이 증가하는 희박연소 조건에 의해 출력이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 열효율의 경우 λ 1.1~1.4 구간에서 약 38%로 균일한 분포를 보이고 있으며, 공기과잉률 λ 1.4에서 엔진 출력 34 kW_m로 λ 1.5 이후 영역에서는 목표 출력에 도달하지 못하는 결과를 얻었다. 엔진의 목표 출력은 발전기 동체효율 88%를 적용하여 발전출력 30 kW_e에 해당하는 34 kW_m 엔진출력 조건이므로 Fig. 4와 같이 34 kW_m 출력조건에서 부분 부하시의 최대 열효율 조건에 대한 실험을 진행하였다. 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 증가시 열효율이 34.2%, 36.9%, 37.2%, 37.4%, 38.1%로 증가하는 경향을 보였다. 이는 λ 1.4에서 엔진이 최대 출력점에 근접 할수록 열효율이 증가하는 경향과 일치하는 현상을 보이고 있으며 λ 1.4 이하의 구간에서는 부분 부하 조건에 해당하므로 열효율이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 연구의 목표인 엔진출력 34 kW_m, 공기과잉률 λ 1.4에서 최대 열효율 38.1%를 도출하였다.

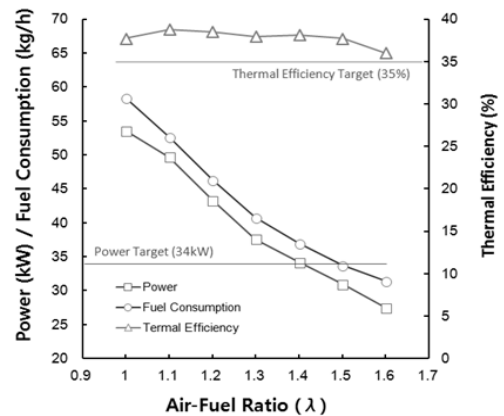


Fig. 3. Power(kW) and Thermal efficiency (%) according to Air-Fuel Ratio.

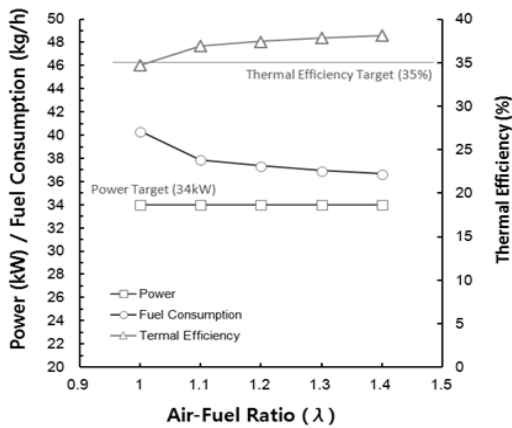


Fig. 4. Thermal efficiency(%) according to Air-Fuel Ratio(operating at 34 kW_m).

합성가스를 이용한 성능시험은 수소의 역화 현상을 방지하기 위해 흡기 밸브의 밸브타이밍을 변경하고, 효율 증대를 위해 흡기 밸브의 밸브 닫힘 시점을 지연시킨 Miller Cam을 적용하였다. 먼저 발전기 적용 시 60Hz에 해당하는 엔진 회전수인 1,800 rpm 구간에서 엔진의 최대 성능 특성을 확인하였다. 공기와 연료의 비율인 공기과잉률(λ)을 1 ~ 1.6 까지 변화하여 시험을 진행한 결과 가연한계가 넓은 수소의 특성으로 인해 희박한 연소 구간에서도 연소 안정성을 보였으며, 공기과잉률 1에서 최대 출력인 53.6 kW_m을 나타내었고, 공기과잉률 1.4 영역까지는 목표로 하는 출력인 34 kW_m을 달성할 수 있는 것으로 확인되었다. 연료소모량을 바탕으로 한 열효율 또한 35% 이상으로 양호한 효율 특성을 나타내었다. 30 kW_e의 발전출력을 내기 위해 발전기 동체효율 88.3%를 적용한 엔진의 요구 출력이 34 kW_m 이므로, 해당 출력을 고정한 상태에서 부분부하 영역의 효율 특성을 확인해 본 결과 공기과잉률 1에서 열효율 34.7%로 1차년도 목표에 0.3% 못 미치는 결과를 나타내었으나, 공기과잉률 1.1~1.4까지는 35% 이상의 안정적인 열효율을 확인하였으며, 공기과잉률 1.4에서는 최대효율인 38.1%를 달성하였다. 특히 수소의 빠른 연소 특성과 불활성 가스, 낮은 연소온도로 인해 전 구간에 걸쳐 질소 산화물이 현저히 낮은 특성을 확인하였다.

밀러캠 EIVC Type2(E2) 사양을 적용하여 실험한 결과 높은 압축압력에 의한 노킹 현상으로 정상적인 실험을 할 수 없는 상황이었으며, 흡기

기간 각도가 짧은 EIVC Type1 (E1)의 사양을 적용하여 실험한 결과 마찬가지로 높은 압축압력에 의한 노킹이 발생하여 압축비를 저감시킨 사양으로 실험을 진행하였다.

실험결과 L2 사양 대비 E1 사양의 최대출력은 약 10% 상승하는 반면 전부하 효율은 1~2% 포인트 감소하는 결과를 얻었다. 그러나 L2 사양의 경우 역화현상으로 인한 위험성이 있었던 반면 E1 사양의 경우 역화현상이 발생하지 않아 안정적인 실험을 할 수 있었으며, 향후 최적화된 압축비 적용을 통해 효율을 증대시킬 계획이다. 연료 중의 50% 정도의 수소를 포함한 합성가스 연료 특성상 출력을 고려하지 않는 경우 천연가스와는 달리 공기과잉률 2.5에서도 안정적인 운전이 가능하나 발전출력 30 kW_e에 해당하는 34 kW_m 출력기준으로 공연비 변화에 따른 연료소모량과 효율을 비교한 결과 공기과잉률 1.3~1.4에서 최대 효율을 나타내는 것을 확인하였다.

3.3. 30 kW 합성가스 열병합 시스템 종합효율 평가

합성가스를 이용한 가스엔진 종합 성능시험을 위해 Table. 1의 혼합가스를 이용하여 가스조성을 모사하였으며, 각 용기별로 조성비 $\pm 0.3\%$ 이하의 오차범위 이내에서 합성가스 조성을 완료하였다.

발전출력을 통한 종합효율은 발전출력 30 kW_e 부하조건에서 38.7 kg/h의 연료를 소모하여 32.1%의 발전효율과 냉각수와 배기가스에서의 열회수를 통해 57.3 kW의 폐열을 회수하여 53.8%의 열을 회수하여 총 85.8%의 종합효율을 보이는 것으로 나타났다(Table 2).

4. 결론

본 연구에서는 합성가스를 에너지화하기 위하여 가스엔진의 성능 평가를 진행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 회전수 1800 rpm 조건에서 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 증가에 따른 엔진출력(kW_m)과 열효율(%)을 평가한 결과, 공기과잉률 λ 1.4에서 엔진출력 34 kW_m를 나타냈으며, 공기과잉률이 증가할수록 엔진 열효율은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

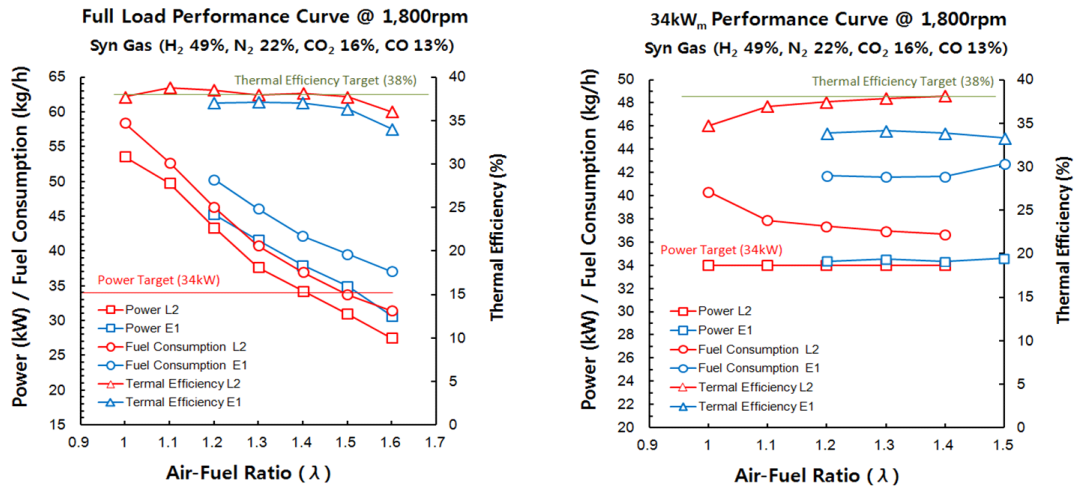


Fig. 5. comparison of L2/E1 performance test result.

Table 2. Total efficiency performance test result

Engine Speed	Elec. Power	Coolant IN	Coolant OUT	Oil Temp.	Exh. Temp.	Fuel Mass	Coolant Flow	Heat Recovery	Electric Effi.	Therm. Effi.	Total Effi.
rpm	kW	°C	°C	°C	°C	kg/h	LPM	kW	%	%	%
1800	30	35.2	43.4	90.4	479.5	38.7	112	57.3	32.1	53.8	85.8

둘째, 엔진출력 34 kW_m 조건에서 공기과잉률이 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 증가 시 열효율이 34.2%, 36.9%, 37.2%, 37.4%, 38.1%로 증가하는 경향을 보였다.

셋째, 발전출력을 통한 종합효율은 발전출력 30 kW_e 부하조건에서 38.7 kg/h의 연료를 소모하여 32.1%의 발전효율과 냉각수와 배기가스에서의 열회수를 통해 57.3 kW의 폐열을 회수하여 53.8%의 열을 회수하여 총 85.8%의 종합효율을 보이는 것으로 나타났다.

향후 본 연구를 통해 도출된 결과는 휘발성유기화합물이 다량 발생하는 사업장에 적용하여 VOC 저감 및 에너지화에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 지원을 받아 수행한 결과임.

(에너지기술개발사업, #20162010104680)

References

1. H. S. Kim, J. H. Kim, J. H. Ryu, etc., "Recent trends for the removal and the application technology of VOCs in process gas", *Journal of Energy & Climate Change*, Vol.12, No.2, pp. 165-177, (2017).
2. C. Coeur, V. Jacob, P. Foster, "Aerosol formation from the gas-phase reaction of hydroxyl radical with the natural hydrocarbon bornyl acetate", *Atmospheric Environment*, Vol.33, No.10, pp. 1615-1620, (1999).
3. A. Guenther, N. Hewitt, D. Erickson, R. Fal, "A global model of natural volatile organic compound emissions", *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.100, No.D5, pp. 8873-8892, (1995).
4. L. C. Michael, "Development and evaluation of a procedure for determining volatile organics in water", *Environmental science & technology*, Vol.22, No.5, pp. 565-570, (1988).
 5. P. Shao, J. An, J. Xin, F. Wu, J. Wang, D. Ji, Y. Wang, "Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China", *Atmospheric Research*, Vol.176, pp. 64-74, (2016).
 6. Y. F. Wang, C. F. Peng, H. P. Chao, "Sorption of volatile organic compounds on organic substance-modified titanate nanotubes", *Aerosol and Air Quality Research*, Vol.15, pp. 2688-2699, (2015).
 7. W. Hong-li, J. Sheng-ao, L. Sheng-rong, H. Qing-yao, L. Li, T. Shi-Kang, C. Chang-hong, "Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China", *Science of the Total Environment*, Vol.607, pp. 253-261, (2017).
 8. Y. H. Lim, J. Y. Lee, J. R. Shin, J. S. Choi, B. H. Park, "Study of toluene decomposition using nonthermal plasma and catalyst", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.31, No.4, pp. 541-548, (2014).
 9. B. U. Hong, S. H. Kim, S. Y. Hwang, G. P. Lee, H. Kim, "1LI-4 Development of eco-friendly process technology for energy recovery from volatile organic compounds corresponding fine dust", *The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry Research paper Abstract*, Vol.2017, No.1, pp. 115, (2017).
 10. H. Sui, P. An, X. Li, S. Cong, L. He, "Removal and recovery of o-xylene by silica gel using vacuum swing adsorption", *Chemical Engineering Journal*, Vol.316, pp. 232-242, (2017).
 11. S. Y. Hwang, G. B. Lee, J. E. Park, J. H. Kim, S. Kim, B. Hong, "Removal and recycling of volatile organic compounds (VOCs) adsorbed on activated carbons using in-situ vacuum system", *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol.16, pp. 7827-7836, (2019).
 12. F. I. Khan, A. K. Ghoshal, "Removal of volatile organic compounds from polluted air", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.13, pp. 527-545, (2000).
 13. E. K. John, A. Q. Ather, M. J. Grieve, "Advanced Engine Management Using on-Board Gasoline Partial Oxidation Reforming for Meeting Super-ULEV (SULEV) Emission Standards", *SAE technical paper*, (1999).
 14. K. D. Isherwood, J. R. Linna, P. J. Loftus, "Using on-Board Fuel Reforming by Partial Oxidation To Improve SI Engine Cold-Start Performance and Emissions", *SAE transactions*, pp. 411-419, (1998).
 15. C. W. Park, Y. Choi, S. M. Oh, C. G. Kim, G. H. Lim, "The Effect of the Excess Air Factor on the Emission Characteristics of the SI Engine Fueled with Gasoline-Ethanol and Hydrogen Enriched Gas", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.33, No.5, pp. 334-342, (2009).