

소형 가스엔진 발전기의 배기가스 폐열을 이용한 바이오가스 개질 가능성에 관한 실험적 연구

차효석¹ · 김태수¹ · 엄태준¹ · 정충수¹ · 전광민² · 송순호^{2†}
¹연세대학교 대학원 기계공학과, ²연세대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Possibility of Biogas Reforming using the Waste Heat of a Small-Sized Gas Engine Generator

HYOSEOK CHA¹, TAESOO KIM¹, TAEJUN EOM¹, CHOONGSOO JUNG¹,
KWANG MIN CHUN², SOONHO SONG^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Grad. School of Yonsei Univ., 50, Yonsei-ro,
Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, Korea

²School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, Korea

Abstract >> This study has been carried out the experiment for the possibility of biogas reforming using waste heat. The source of this waste heat is the exhaust gas from a small-sized gas engine generator. For recovering the waste heat, Two-stage heat exchanger is manufactured. The two-stage heat exchanger is composed of a heat exchanger for the exhaust gas and a heat exchanger for the water. This two-stage heat exchanger is used for reforming the biogas by means of on-site hydrogen production at the small-sized gas engine generator. The two-stage heat exchanger is coupled with the biogas reformer which is a kind of catalytic reformer. To confirm a heat recovery efficiency of the two-stage heat exchanger, temperature differences of inlet and outlet locations are measured. Also, the variations of syngas concentrations with various biogas flow rates are investigated. As a result using manufactured two-stage heat exchanger, the biogas can be reformed from waste heat recovery. This experiment suggests that the exhaust gas heat exchanger is available for reforming the biogas.

Key words : Gas engine generator(가스엔진 발전기), Biogas(바이오가스), Syngas(합성가스), Reforming(개질), Reformer(개질기), Two-stage heat exchanger(2단계 열교환기)

1. 서 론

최근 석탄, 석유와 같은 화석 연료의 고갈 문제와 사용 후 발생하는 배기오염 물질로 인한 지구온난화 문제는 전 세계적으로 해결해야 할 과제이며, 이를 해결하기 위해 다수의 연구자들은 신재생 에너지 개

발에 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라는 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법’ 제 2조의 규정에 의거 ‘기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을 포함하여 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지’로 정의하고, 태양열, 태양광, 바이오, 풍력, 수력, 해양, 폐기물, 지열 등의 8개 분야 재생에너지와 연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지 등의 3개 분야

[†]Corresponding author : soonhosong@yonsei.ac.kr
[접수일 : 2011.10.25 수정일 : 2012.6.5 게재확정일 : 2012.6.22]

신에너지로 분류하고 있다.

다양한 신재생 에너지 중에서 바이오가스(biogas)는 음식물 쓰레기 및 축산 분뇨, 하수슬러지 등의 유기성 폐기물을 혐기성 소화(anaerobic digestion)와 같은 생물학적 방법으로 처리하여 얻을 수 있다¹⁾. 메탄(CH₄)과 이산화탄소(CO₂)를 주성분으로 하는 바이오가스는 원료에 따라서 차이가 있지만, 바이오가스 내 메탄의 비율은 44~67.9%정도이고, 이산화탄소 비율은 24~41%정도이다²⁾. 그러므로 바이오가스는 메탄이 주성분인 천연가스의 대체연료로써 가능성이 있으나 적은 메탄 함량으로 인한 낮은 발열량을 가지는 단점이 있다³⁾. 이러한 바이오가스의 단점들을 개선하여 연소 효율을 높이기 위해 바이오가스 내 이산화탄소를 제거⁴⁾하거나, 바이오가스에 수소(hydrogen)를 첨가하는 방법들이 연구되고 있다.

수소는 단위 질량당 에너지 밀도가 높고, 다른 탄화수소 연료에 비하여 단위 질량당 높은 발열량을 가지 있다. 뿐만 아니라, 연소 시 화염전파속도(flame propagation velocity)가 다른 연료에 비해 상대적으로 빠르다는 특성을 가지고 있기 때문에 연료에 첨가하여 전체적인 연소 효율을 높일 수 있다. 이와 관련하여 많은 연구들에서 수소 첨가가 연소 효율 개선에 효과적이라는 사실이 검증되었다⁵⁾. 이러한 수소의 효과는 우리의 선행 연구인 수소가 첨가된 바이오가스 엔진 발전기 연구에서도 확인되었으며, 결과적으로 바이오가스에 수소 첨가로 가스엔진 발전기의 발전 효율 개선을 달성할 수 있었다⁶⁾.

하지만, 수소는 밀도가 매우 작기 때문에 단위 부피 당 에너지 밀도는 매우 작은 단점이 있다. 또한 기체 중 가장 큰 열전도율을 가지고 있으며, 화염전파가 빠르고, 점화 에너지가 작기 때문에 쉽게 점화가 일어날 수 있으므로 가스 상태로 존재하는 수소의 저장 및 운반에 대한 문제점을 갖고 있다. 현재 다양한 측면에서 수소의 저장과 운반의 문제점을 해결하기 위한 연구가 진행 중이다⁷⁾.

탄화수소 연료로부터 수소가 포함된 합성가스(synthetic gas, syngas)를 생성시키는 것을 연료 개질(fuel reforming)

이라하며, 연료 개질은 크게 수증기 개질(steam reforming), 부분산화 개질(partial oxidation reforming), 이산화탄소 개질(carbon dioxide reforming), 자율 개질(auto-thermal reforming)로 구분되는데, 바이오가스의 경우 그 자체로 이산화탄소 개질 반응을 통해 합성가스 생성이 가능하고, 이산화탄소 개질 뿐 아니라, 고온 영역에서 수분을 공급해주면 하나의 개질반응에 지배적인 것이 아닌, 다양한 개질반응을 통하여 수소가 생성된다^{8,9)}.

따라서 본 연구에서는 수소의 저장과 운반의 문제점이 발생하지 않도록, on-site방식으로 가스엔진발전기에서 배기가스 폐열을 이용한 바이오가스 개질 가능성을 실험을 통하여 검증하는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

2.1.1 가스엔진발전기

본 연구에서는 30kW급 소형 가스엔진 발전기를 이용하였다. (주) HANATECH에서 제작한 것으로 4기통의 배기량 2286cc 디젤 엔진을 기반으로 개조하였으며 압축비는 13:1이고 점화방식은 스파크(spark) 점화방식을 채택하였다. 공기와 연료의 혼합기를 압축하여 공급할 수 있는 터보차저(turbocharger)를 장착하였고, 최고 출력은 25.4kW이다. 실제 형상과 주요 사양은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

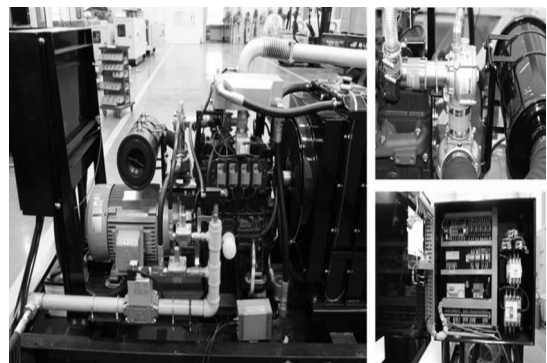


Fig. 1 Gas engine generator

Table 1 Specifications of the gas engine generator

Type	Vertical water-cooled 4-stroke diesel engine
Displacement	2286cc
Cylinder number	4
Compression ratio	13:1
Maximum speed	1800 rpm
Ignition system	Spark ignition
Intake system	Turbocharger
Maximum power	25.4 kW

2.1.2 열교환기

Fig. 2는 실제 엔진 배기가스 폐열 회수를 위한 열교환기의 도면이다. 1단계로 아래쪽에 위치한 열교환기에서 배기가스와 열교환 후, 아직 고온의 배기가스에서 더 많은 열을 회수하기 위해 2단계로 위쪽 열교환기에서 개질기 내부로 공급되는 물과 한 번 더 열교환하는 two-stage 열교환기를 제작하였다.

열교환기의 성능을 극대화하기 위해 총 길이가 1132 mm인 1단 열교환기 내부에는 외경 21.7mm 관 14개를 설치하였고, 총 길이 732mm의 2단 열교환기에도 1단에서 사용한 동일한 규격의 내관 14개를 삽입하였다. 또한, 열교환기 주변을 단열재로 감싸 열손실을 최소화 하였으며, 배기가스가 유입되는 입구 부분의 온도와 바이오가스와 열교환이 끝난 후의 배기가스 온도, 물과 열교환 후의 배기가스 온도를 측정하기 위해 각 부분에 열전대(thermocouple)를 설치하였다.

또한, 상온의 물이 열교환기로 들어가 배기가스와 열교환한 후 배출되는 물의 온도를 측정하기 위해 물 배출구에 열전대를 설치하였으며, 바이오가스 입구와 출구에도 열전대를 설치하여 열교환기의 성능을 확인하였다.

2.1.3 바이오가스 개질기 및 촉매

Fig. 3은 제작된 바이오가스 개질 반응기의 모습이다. 개질기의 크기는 촉매 적재용량을 고려하여 내경 143mm, 외경 163mm로 설계하였다. 개질 반응기 내부에는 Fig. 4의 가격이 저렴하고, 유일한 금속 촉매

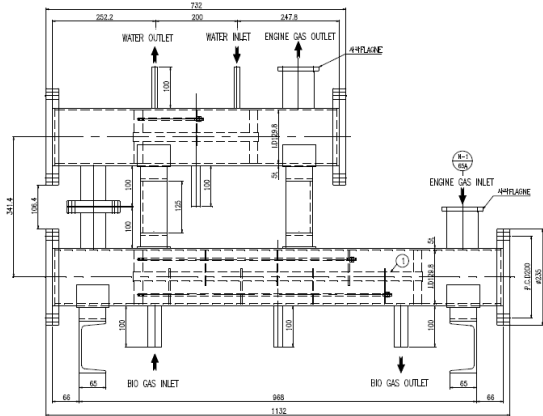


Fig. 2 Two-stage heat exchanger

인 Nickel based steam reforming catalyst, HiFUELTM R110(Johnson matthey company)를 사용하였으며, 개질기 내부에 촉매 1kg을 채워 최소 250°C 이상부터 바이오가스 개질 반응을 유도한다. 앞서 제시된 열교환기에서 배기가스와 열교환기 1단에서 온도가 상승한 바이오가스는 열교환기 2단 부분에서 열교환을 통하여 온도가 상승된 물과 함께 개질 반응기 입구로 유입되게 된다. 이 때 물은 배기가스의 높은 온도에 의하여 수증기상태가 된다. 이렇게 유입된 바이오가스와 수증기는 개질 반응기 내에서 촉매에 의해 개질 반응이 일어나게 되고, 반응 후의 가스는 개질 반응기 후단으로 나오게 된다. 이 때, 개질 반응을 위한 촉매 활성 온도를 유지하기 위해 추가적으로 필



Fig. 3 Biogas reformer



Fig. 4 Nickel based steam reforming catalyst, HiFUELTM R110

요한 에너지는 개질기 외부에서 가스버너를 이용하여 공급되며, 반응 후 생성된 가스는 일부분 샘플링하여 수분을 제거한 후 가스 분석기(SWG 200-1)로 가스의 성분을 분석하게 된다.

2.2 실험조건

가스엔진 발전기의 출력의 출력을 12kW로 고정시키고, 엔진 터보차저 후단의 온도가 470°C에 도달하도록 하여서 실험을 진행하였으며, 가스엔진 발전기는 메탄을 사용하여 구동시켰다.

개질 반응을 위한 촉매로는 금속 촉매인 Nickel based steam reforming catalyst를 사용하여 바이오가스 개질 반응을 유도하였으며, 촉매의 질량은 모두 10kg으로 동일하게 사용하였다.

본 실험에서는 바이오가스 내 포함된 메탄과 이산화탄소의 비율이 60%:40%로 혼합된 혼합가스를 사용하여 실험을 수행하였고, 전체 바이오가스 유량은 2, 5, 10, 20(L/min)으로 변화시켜 유량에 따른 개질된 합성가스의 조성 변화를 확인하였다.

개질기 내부에서 바이오가스와 촉매와의 다양한 개질 반응 중에, 물의 공급 여부에 따른 추가적인 반응을 위하여 개질기 내부로 물을 공급해 주었는데, 이번 연구에서는 물을 공급하지 않은 조건과, 물 5ml를 공급한 조건의 두 실험 결과를 비교하였다. 개질을 하기 위한 바이오가스와, 물은 열교환기를 통과한 후 온도가 상승된 상태에서 개질기 내부로 공급되었다.

Table 2 Experimental condition for biogas reforming

Engine output power	12 (kW)
Temperature at the back of turbocharger	470 (°C)
Catalyst	Nickel based steam reforming catalyst
Amount of catalyst	10 (kg)
Composition of biogas	60 : 40 (CH ₄ :CO ₂)
Biogas flow rates	2 / 5 / 10 / 20 (L/min)
Supply of water	0 / 5 (ml/min)

다음의 Table 2은 바이오가스 촉매 개질 실험 조건을 간략하게 보여준다.

3. 실험결과

3.1 폐열회수용 열교환기 실험

Fig. 5는 실제 엔진의 배기가스로부터 폐열을 바이오가스와 물을 회수하여 회수한 결과를 보여준다. 엔진에서 배출되는 배기가스(온도 a)는 초기 약 175°C

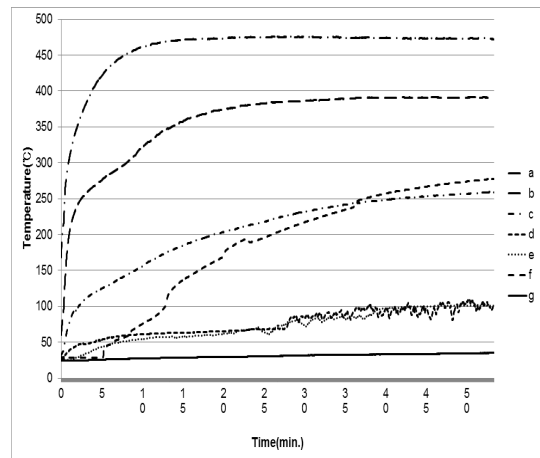


Fig. 5 Result of the heat exchanger test (a: engine exhaust manifold, b: heat exchanger inlet, c: 1-stage heat exchanger outlet, d: 2-stage heat exchanger outlet, e: water outlet, f: biogas outlet, g: biogas inlet)

Table 3 Heat recovery efficiency of the heat exchanger

	1 Stage (biogas)	2 Stage (water)	Total
Heat recovery efficiency	33.3	41.0	74.3

로 시작하여 10여분 후 약 470°C로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 터보차저를 지나고 열교환기 입구에서의 배기가스 온도(온도 b)는 초기 약 60°C로 시작하여 5분 후 약 390°C로 유지되었다. 바이오가스 와 열교환한 후의 배기가스 온도(온도 c)는 시간이 지날수록 증가하여 약 260°C에 도달하였으며, 배기가스와 열교환한 후의 바이오가스 온도(온도 f)는 이보다 다소 높은 약 277°C에 도달하였다. 열교환기 2단에서 물과 배기가스가 열교환을 하게 되는데, 물과 열교환한 후의 배기가스 온도(온도 d)는 초기 25°C에서 약 100°C로 유지되었으며, 배기가스로부터 열을 회수하여 가열된 물의 온도(온도 e)도 약 100°C에 도달하였고, 이 구간에서 물이 수증기로 기화되는 현상을 관찰 할 수 있었다.

이러한 실험 결과를 바탕으로 열교환기의 폐열 회수율을 계산해보면 Table 3과 같다.

$$\eta = \frac{(T_{ex.inlet} - T_{ex.outlet})}{T_{ex.inlet}} \times 100 \quad (1)$$

η = 열 회수율(heat recovery efficiency) (%)

$T_{ex.inlet}$ = 열교환기 입구에서의 배기가스 온도 (°C)

$T_{ex.outlet}$ = 열교환기 출구에서의 배기가스 온도 (°C)

위의 Table 3에서 확인 할 수 있듯이, 단열을 통한 열손실이 없다고 가정한다면 배기가스로부터 바이오가스와 물을 이용하여 폐열을 회수 할 때의 열 회수율은 각각 33.3(%), 41.0(%) 임을 확인할 수 있다.

3.2 바이오가스 개질 반응기 실험

바이오가스 개질 실험은 크게 바이오가스에 수분

이 없는 조건과 물이 분당 5ml 유입되는 조건에서 실험을 수행하였으며, 바이오가스 유량 변화에 따른 합성가스 생성 경향을 확인하였다.

3.2.1 수분이 없는 조건에서 개질 실험

바이오가스 개질 반응기 전단에서 물 주입을 하지 않은 경우에는 바이오가스 만이 개질 반응기로 유입되어 개질 반응이 일어나게 된다. 이 때 유량이 달라짐에 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

수분이 포함되지 않은 조건에서는 유량이 가장 작은 2L/min에서 생성가스에 포함된 총 합성가스의 농도가 최대 약 20 %임을 확인할 수 있었고, 유량이 증가함에 따라 수소와 일산화탄소의 농도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 유량이 증가함에 따라 바이오가스가 개질 촉매와 반응하는 시간이 상대적으로 줄어들어 발생하는 결과이다.

바이오가스의 유량이 작을 경우 합성가스의 생성 농도는 높게 나타나지만, 생성량은 작다는 사실을 확인할 수 있었다. 반면에, 바이오가스의 유량이 크면 생성 농도는 작지만, 반응에 참여하는 바이오가스가 많기 때문에 그 생성량은 상대적으로 많았다. 그러나 개질기 외부에서 가스버너로 공급하는 에너지가 동일한 경우, 유량이 증가할수록 개질 반응기 내부의

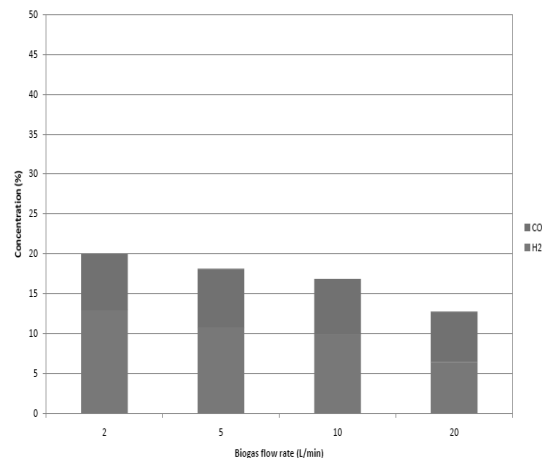


Fig. 6 Variation in syngas concentrations as a function of various biogas flow rates (without water)

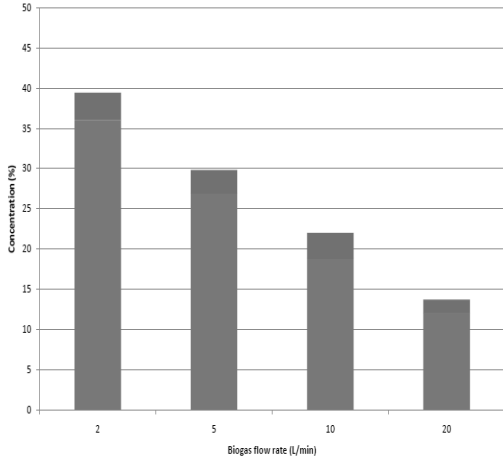


Fig. 7 Variation in syngas concentrations as a function of various biogas flow rates (with water, 5 ml/min)

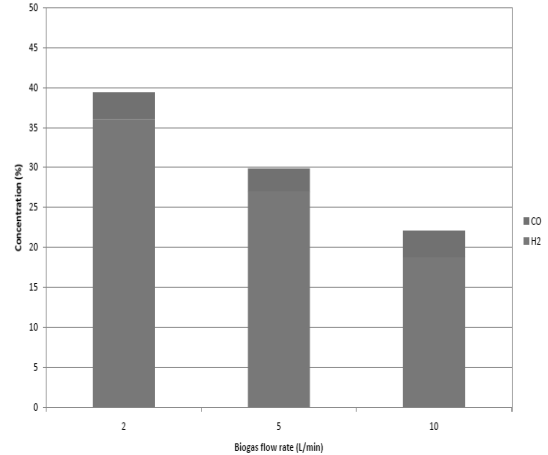


Fig. 8 Variation in syngas concentrations as a function of various biogas flow rates using the heat exchanger (with water, 5 ml/min)

촉매 온도는 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 수분이 있는 조건에서 개질 실험

일정량의 수분이 포함된 바이오가스를 이용한 개질 반응 테스트를 수행하였다. 주입되는 물의 양은 유량에 관계없이 모두 5ml/min으로 동일하게 하였으며, 그 이외의 조건은 앞서 수행한 수분이 없는 테스트와 동일하게 유지하였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 수분이 포함된 바이오가스 개질 반응의 경우에는 수소의 농도가 급격히 증가하였으며, 바이오가스의 유량이 작을수록 생성되는 합성가스의 농도는 증가하는 경향이 나타났다.

특히, 바이오가스 유량이 2L/min인 조건에서 수분이 포함될 경우 합성가스의 생성 농도는 약 40%였는데, 이러한 수치는 수분이 포함되지 않은 경우의 합성가스 생성 농도의 약 2배에 해당하는 농도이다.

이러한 결과가 나타난 것은 수분이 없는 바이오가스 개질 반응에서는 메탄의 이산화탄소 개질 반응($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$)만이 진행되었지만, 수분이 포함된 바이오가스 개질 반응에서는 개질 반응으로 생성된 일산화탄소의 수성가스 전이반응($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$)과 메탄의 수증기 개질 반응($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$)이 추가적으로 이루어졌기 때문

이다. 이러한 결과는 앞서 진행된 바이오가스 촉매 개질 기초 실험에서의 결과와 유사한 경향을 보이며, 바이오가스 개질 시 반드시 수분이 필요함을 확인시켜 주었다.

3.3 열교환기와 바이오가스 개질 반응을 연계한 실험

실험을 거쳐 성능을 확인한 열교환기와 바이오가스 개질 반응을 연계하여 바이오가스 개질 반응을 수행하였으며, 수분이 존재하는 조건에서 유량을 변화시키기에 따라 나타나는 합성가스의 농도를 확인하였다.

Fig. 8은 열교환기와 연계된 바이오가스 개질 반응을 이용한 실험에서 수분이 존재하는 조건에서의 바이오가스 유량별 합성가스 생성 농도 변화를 보여준다. 앞서 개질 반응기만의 실험 결과와 거의 유사한 농도 변화 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 개질기 온도 약 265~300°C에서 바이오가스 유량 2LPM일 경우 메탄은 55.3%, 이산화탄소는 17% 전환되었으며, 바이오가스 유량 5LPM일 경우 메탄 41.0%, 이산화탄소 13.3%가 전환되어 가장 높은 전환율을 보였다. 바이오가스 유량 10LPM일 경우에는 메탄 28.8%, 이산화탄소 11.0%가 전환되었다. 열교환

기를 거쳐 가열된 바이오가스와 물을 사용하였기 때문에, 개질 반응기만을 이용한 실험보다 수분 주입에 따른 촉매 온도 저하 현상이 덜 나타났지만 여전히 수분 주입 후 온도가 떨어지는 현상이 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 배기가스 폐열을 2단계로 회수하여 개질 반응에 활용하기 위한 열교환기와 실제 사이즈의 바이오가스 개질 반응기를 제작하였으며, 이를 이용한 실험을 수행하였다. 이를 통하여 배기가스의 폐열을 효과적으로 회수하는 방법과 회수한 열을 개질 반응에 이용하여 합성가스를 생성시키는 기술이 실현가능함을 확인하였다. 이와 더불어 수분 주입을 통한 수소 생성 증가 현상을 확인하였다. 따라서 향후 개질 반응에 필요한 효과적인 추가 에너지 전달 방법과 수분량 조절 등과 같은 부분의 추가적인 연구가 진행되어 완전한 통합 시스템이 구축된다면 장치 적용을 통한 바이오가스 엔진 효율 향상이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20113030100010)

참 고 문 헌

1. Holm-Nielsen, J. B., Seadi, T. A. and Oleskowicz-Popiel, P., "The future of anaerobic digestion and biogas utilization", *Bioresource Technology*, Vol. 100, 2009, pp. 5478-5484.
2. S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala, "Trace compounds of biogas from different biogas production plants", *Energy*, Vol. 32, No. 8, 2007, pp. 1375-1380.
3. J. K. Jensen, A. B. Jensen, "Biogas and natural gas fuel mixture for the future", 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, 2000.
4. Harasimowicz, M., Orluk, P., Zakrzewska-Trznadel, G. and Chmielewski, A. G., "Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, 2007, pp. 698-702.
5. Akansu, S. O., Dulger, Z., Kahraman, N. and Veziroglu, T. N., "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, 2004, pp. 1527-1539.
6. H. Cha, T. Kim, T. Eom, K. M. Chun, S. Song, "A study of the generating efficiency and NO_x emissions of a 30kW gas engine generator with hydrogen addition", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 313-318.
7. B. Kim, H. Sung, Y. Lee, S. Lee, J. Cho, K. Ahn, "Operating strategy optimization of metal hydride based hydrogen supply system", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 5, 2011, pp. 625-633.
8. Bradford, M. C. J. and Vannice, M. A., "CO₂ Reforming of CH₄", *Catalysis Reviews*, Vol. 41:1, 1999, pp. 1-42.
9. T. Kim, H. Cha, T. Eom, S. Song, K. M. Chun, "Study on characteristics of biogas catalytic reforming for fabrication of a biogas reformer", *KSME Thermal Engineering Division Annual Spring Conference*, 2011, pp. 32-37.