KIGAS Vol. 25, No. 4, pp 36~42, 2021
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.4.35

불꽃점화 엔진의 흡기관 분사를 위한 매립지가스 분사량의 측정 및 계산

김경수 · 최경호 · 전원일 · 김바다* · †이대엽**
인하대학교 건설기계공학과 석사과정, *인하대학교 건설기계공학과 박사과정,
**인하대학교 건설기계공학과/기계공학과 교수
(2021년 7월 9일 접수, 2021년 8월 26일 수정, 2021년 8월 27일 채택)

Measurements and Calculation of Injection Mass Rate of LFG for Intake Injection in Spark Ignition Engines

Kyoungsu Kim* · Kyungho Choi* · Wonil Jeon* · Bada Kim* · †Daeyup Lee*,**
Dept. of Construction Machinery Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea*
(Received July 9, 2021; Revised August 26, 2021; Accepted August 27, 2021)

요 약

쓰레기 매립지에 발생하는 매립지가스(Landfill gas)를 대기 중으로 방출할 경우에 매립지가스에서 많은 부분을 차지하고 있는 지구온난화 지수(global warming potential)가 높은 메탄가스를 배출하게 되어 기후변화에 악영향을 주게 되고, 매립지가스에 함유되어 있는 메탄을 내연기관의 연료로 활용하여 연소하여 발전을 하게 되면 이산화탄소 형태로 대기 중으로 배출하게 되어 온난화 지수를 낮추는 데도 기여를 할 수 있게 된다. 따라서 매립지가스를 내연기관을 이용한 발전용 연료로 사용하기 위해서 엔진의 열효율을 높이는 것이 중요하기 때문에 기존의 믹서 방식 기술을 이용한 연료공급 방식보다는 실린더별로 흡기포트에서 전자 제어 인젝터를 이용하여 기체 분사를 하는 방식의 연료공급 시스템을 사용하는 것이 필요하게 된다. 따라서 전자 제어 기체 분사 방식 기술을 이용하기 위해서는 매립지가스의 사용 조건에 따른 질량 유량을 정확히 측정하는 것이 중요하게 된다. 이를 위하여 본 연구에서는 매립지가스를 기체 분사할 경우에 분사량을 측정 및 계산하는 연구를 수행하였다.

Abstract - When the landfill gas generated at the landfill site is released into the atmosphere, methane gas with a high global warming potential is emitted, which adversely affects climate change. When methane contained in landfill gas is used as fuel for internal combustion engines and burned to generate electricity, it is emitted into the atmosphere in the form of carbon dioxide, which can contribute to lowering the global warming potential. Therefore, in order to use the landfill gas as fuel for power generation using an internal combustion engine, it is important to increase the thermal efficiency of the engine. Thus, it is necessary to use a fuel supply system in which gas is injected using an electronically controlled injector at an intake port for each cylinder rather than a fuel supply technology using the conventional mixer technology. In order to use the electronically controlled gas injection method, it is important to accurately measure the mass flow rate according to the conditions of using landfill gas. For this, a study was conducted to measure the injection amount and calculate them in order for the intake port gas injection of landfill gas.

Key words : landfill gas, global warming potential, injection mass, methane, intake port injection, duty

†Corresponding author:dylee@inha.ac.kr
Copyright ⓒ 2021 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

쓰레기 매립지에서 발생하는 매립지가스(Landfill gas)에는 지구온난화 지수(Global Warming Potential)가 21로 매우 높은[1] 메탄 가스를 포함하고 있어 대기 중으로 방출될 경우 기후변화 현상을 악화 시킬 수 있기 때문에 LFG의 적절한 처리는 매우 중요하고, 여러 가지 LFG 처리 및 연소 방법 중 하나는 메탄의 에너지(발열량)를 이용하기 위하여 발전용 내연기관 연료로 사용하는 것이다. LFG는 많은 성분으로 구성 되었고, 일반적으로 부피 기준으로 45 ~ 60 %의 메탄과 40 ~ 60 %의 이산화탄소로 구성이 된다. 또한 소량의 질소, 산소, 암모니아, 황화물, 수소, 일산화탄소 및 트리클로로에틸렌, 벤젠, 염화 비닐과 같은 비 메탄 유기 화합물(NMOC)등을 포함하고 있다. 매립지 사이트에 따른 LFG의 주요 성분의 비율과 편차는 Table 1과 같다.[2,3]

LFG의 저위발열량은 약 5 kWh/Nm^{3}로 메탄과 비교하여 약 50 % 수준이고, 본 연구에서는 LFG는 메탄과 이산화탄소로 구성(55 % : 45 % with uncertainty ± 2%)된 것으로 가정하여 연구를 수행하였다.

본 연구의 목적은 LFG를 발전기용 내연기관의 연료로 사용할 경우에 엔진의 효율을 증가시키고 배출가스 저감에도 유리한 흡기관 분사 방식의 기술을 적용하기 위하여 분사 조건에 따라 LFG의 분사량을 파악하기 위한 것이다.

Ⅱ. 흡기관 기체 분사 LFG 엔진

현재 상용화된 LFG 엔진은 약 50~65 %의 메탄과 27~40 %의 이산화탄소 혼합기를 연소할 수 있도록 되어 있다. 일반적으로 LFG 엔진은 CNG 엔진을 베이스로 개발되었기 때문에 천연가스와 LFG의 연소 특성을 비교하여 개발 및 운전 조건을 결정하는 것이 엔진의 효율 향상을 위하여 필요하다.

Table 1. Variation of LFG compositions depending on waste sites[2,3]

	CH4	CO2	N2	평균분자량
Site#1	45~60%	40~60%	2~5%	27.5~30.6
Site#2	47.4%	47%	3.7%	29.3
Site#3	54%	40%	4%	27.4
Site#4	56%	31%	10%	25.4
Site#5	35~56%	35~55%	0~20%	28.3~32.6
평균	41.6%	41.6%	6.2%	28.7
편차	±20.8%	±7.4%	±3.4%	±2.4%

발전기와 같은 정치형 엔진에서 기체 연료(CNG, LFG 등)를 사용하는 엔진에는 믹서 방식의 연료공급 기술을 일반적으로 적용하고 있으나 Fig. 1과 같이 연료 공급 장치의 기술 측면에서 믹서 방식 보다는 MPI(Multi point injection) 방식의 기술이 연비 및 출력 향상과 배출가스 저감 특성면에서 장점이 더 많다[4].

LFG를 발전기용 내연기관 연료로 사용하기 위해서는 엔진의 열효율을 높이는 것이 중요하기 때문에 기존의 믹서 방식을 이용한 연료공급 방식보다는 실린더별로 흡기포트에서 전자 제어 인젝터를 이용하여 기체 분사를 하는 방식의 연료공급 시스템을 적용하는 것이 필요하다. 또한, 전자 제어 기체 분사를 하게 되면 매립지가스의 구성 성분의 변화에 의한 에너지

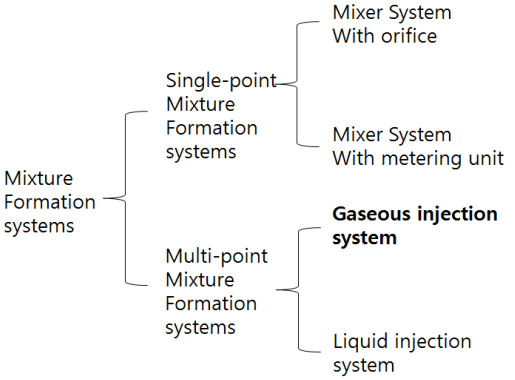


Fig. 1. Comparison of mixture formation systems for spark ignition engines.[4]

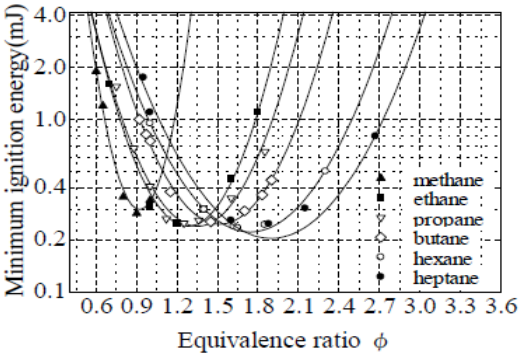


Fig. 2. Minimum ignition energy(MIE) of several hydrocarbons as function of equivalence ratio.[5]

(발열량) 변동 및 이에 따른 부하 변동 발생에 따른 엔진의 출력 제어 특성도 좋아지게 되어 발전의 품질도 향상이 되게 된다.

LFG 연료를 이용한 전자 제어에 의한 흡기관 분사 방식의 기술을 적용하기 위해서 LFG의 연소 특성과 함께 분사 조건에 따른 분사량을 파악하는 것이 중요하다.

Fig. 2[5]에 나타낸 바와 같이 탄화수소의 최소 점화 에너지(MIE)는 이론 당량비 부근에서 최소값을 갖고 희박한 조건에서 증가한다. 메탄은 당량비 변화에 따른 점화 에너지 변화가 다른 탄화수소에 비하여 매우 크기 때문에 메탄과 이산화탄소를 주성분으로 하는 LFG 연료를 안정적으로 연소를 하는 것은 용이하지는 않다. 따라서 정밀한 공연비 제어를 위해서 분사 조건에 따른 분사량을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

Ⅲ. LFG 분사량의 측정

전자 제어 인젝터를 이용한 LFG 연료의 분사량을 측정하기 위해 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 실험장치를 구성하여 분사 압력에 따른 분사량을 측정하였다.

메탄 또는 메탄을 포함한 LFG를 분사하기 위해 기체 분사 인젝터(H2001)를 peak& hold driver를 이용하여 구동을 하였고, 분사 기간과 duty 제어에는 마이크로 컨트롤러(Atmega328)을 이용하였다. Duty(%)의 의미와 분사 시기(SOI(start of injection) 및 EOI(end of injection))는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. EOI는 흡기 밸브가 최대로 열렸을 때로 가정을 하였고, 엔진의 회전수(rpm)는 1,800 rpm이 된다.

메탄은 공기보다 가볍기 때문에 밀도 차이로 대기 중에서 부력이 발생하기 때문에 공기보다 가벼운 기체를 분사 및 저장하고 질량을 측정할 수 있는 plenum을 Fig. 3과 같이 제작하여 사용하였다. 엔진의 흡기관 압력(부압)을 고려하여 주위압력은 0.8 bar로 설정하여 실험을 진행하였다.

IV 절에 기술한 바와 같이 분사 질량 유량은 T, p_1, p_2, k의 함수(식 (3))이고, 각각은 온도, 주위 압력, 분사 압력, 비열비를 의미한다. 실험에 사용된 기기의 특성에 따른 오차 분석[6]을 식(1)과 같이 하면

$$\frac{\triangle m}{m}=\sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)^2\left(\frac{\triangle T}{T}\right)^2+\left(\frac{\partial m}{\partial p_1}\right)^2\left(\frac{\triangle p_1}{p_1}\right)^2+\left(\frac{\partial m}{\partial p_2}\right)^2\left(\frac{\triangle p_2}{p_2}\right)^2+\left(\frac{\partial m}{\partial k}\right)^2\left(\frac{\triangle k}{k}\right)^2} \quad (1)$$

Table 2에 나타낸 바와 같은 분사량 측정 실험에 사용한 실험 기기만의 오차로 인하여 최대 약 0.8 %의 오차가 발생함을 알 수 있다. 동일한 조건에서 측정한 실험 데이터로부터 약 0.62 %의 평균 오차(deviation)가 발생하였기 때문에 측정 결과는 실험 기기 오차 이내인 것으로 추정을 할 수 있다.

기체 분사량을 측정하기 위해 우선 공기와 메탄을 사용하여 실험을 하였다. LFG 연료를 이용한 발전용

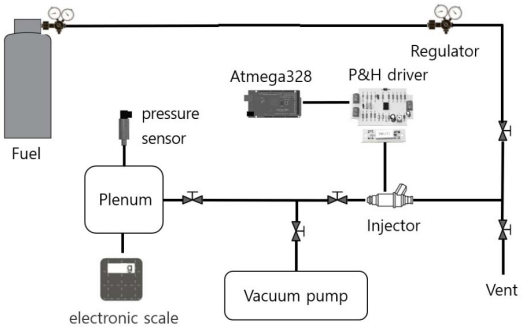


Fig. 3. A schematic of measurement system for injection mass.

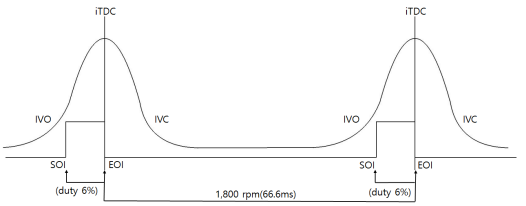


Fig. 4. Diagram for injection duty(%), SOI and EOI compared to intake valve lift.

Table 2. Specifications of experimental devices

Devices	Model	Specifications
Pressure sensor	Sensys	0~5 bar, 0.15 % FS
Regulator	Parker	0.5~8.5 bar
Vacuum pump	Shinkang	-
Injector	Hana H2001-AA-Blue	max. guage 1.7 bar Voltage 12V DC Resistance 1.3 Ohm Flow rate 130 L/min Pick & Hold 4A & 2A
Scale	CUX-6200H	±0.02g

대상 엔진(4 행정)을 1,800 rpm으로 운전 할 경우에 필요한 연료량을 고려하여 분사 기간을 4, 8, 12, 16, 20 ms로 설정을 하였다. 이러한 분사 기간(ms)은 각각 6, 12, 18, 24, 30 %의 duty(%)에 해당이 된다. Table 3에 나타낸 바와 같이 분사 압력($\triangle p$ = 연료 압력 - plenum 압력(주위 압력)) 조건은 1.9 bar 및 0.9 bar 로 하였고, 이때 분사 압력은 각각 2.7 bar 및 1.7 bar가 된다. 연료 분사는 plenum 내부로 하기 때문에 분사에 의하여 plenum 내부의 압력이 증가하게 되어 분사량이 증가할수록 Δp는 감소하게 된다. 단 분사된 질량에 의하여 plenum의 압력은 초기 압력에 비하여 최대 약 4.3 % 정도까지 압력이 증가하는 것으로 추산이 되어 분사량 증가에 따른 압력 증가는 크지 않은 것을 알 수 있다.

Table 3. Measured injection mass depending on time(duty)

Injection mass (g) / Time (ms), duty (%)	△P = 1.9 bar		△P = 0.9 bar	
	CH_4	Air	CH_4	Air
4 ms (6 %)	0.009	0.014	0.006	0.010
8 ms (12 %)	0.017	-	0.011	-
12 ms (18%)	0.023	-	0.014	-
16 ms (24 %)	0.029	0.044	0.017	0.031
20 ms (30 %)	0.032	-	0.020	-

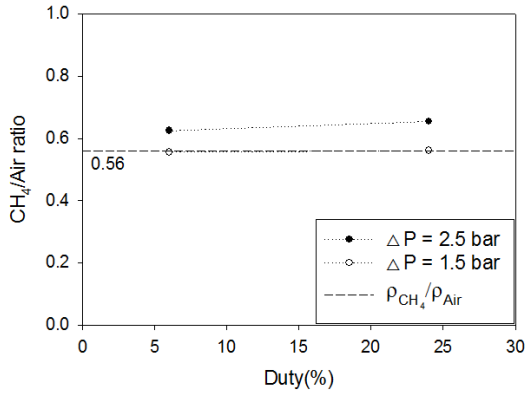


Fig. 5. Measured injection mass ratio for air and methane.

먼저 plenum 내부는 초기에 흡입 행정의 흡기관 부압을 가정하여 0.8 bar의 공기로 채우고 이후에 plenum에서 가까운 valve의 coupling을 분리하여 기체 분사 전 plenum 의 무게를 측정하였다. 초기 무게 측정을 완료한 후, valve의 coupling을 재결합하고 fuel tank의 value를 regulator의 게이지 압력 조건을 만족할 때까지 천천히 개방을 한다. Regulator의 게이지 압력이 실험 조건과 일치하면, 인젝터의 분사 기간을 설정 한 후, 200 회 분사를 진행하였다. 분사가 완료된 후, 연결된 coupling을 분리하고 plenum만의 무게를 측정하여 분사 전과 후의 plenum의 무게를 측정을 하여 분사된 연료의 무게를 측정하고 1 회 분사량을 계산하였다.

25 ℃, 0.8 bar에서 메탄의 밀도는 0.523 kg/cm^3, 공기의 밀도는 0.948 kg/cm^{3}이기 때문에 밀도비는 0.56 이다. Fig. 5에는 duty 6 % 및 24 %의 경우에 메탄/공기의 비를 나타낸 것으로 메탄과 공기의 분사량의 비는 밀도 비(≈분자량 비) 차이와 일치하는 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 기체 분사량 계산 모델

분사량 계산 모델은 Fig. 6과 같은 1 차원 압축성 유체 방정식을 이용하였다[7].

상태 1에서 상태 2까지 등엔트로피 과정으로 가정을 하고, 질량 유량은

$$\dot{m} = \rho_2 u_2 A_2 \tag{2}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ρ, u, A는 각각 밀도, 속도, 단면적을 나타낸다.

에너지 방정식에서 이상기체 가정 및 등엔트로피 가정을 적용하여 질량 유량 관계식을 구하면 식(3)과 같다.

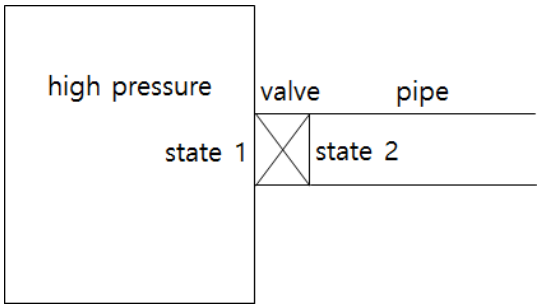


Fig. 6. Model for one dimensional compressible flow through a valve.

$$\dot{m} = \frac{p_1 A}{s_1}\sqrt{\left(\frac{2k^2}{k-1}\right)\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}\left\{1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}\right\}} \quad (3)$$

와 같이 분사량(질량유량)을 구할 수 있다. 여기서 k는 비열비이고 1과 2 상태는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다.

이 분사량 관계식은

$$p_1/p_2 > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{k/(k-1)} \quad (4)$$

으로 choked 되지 않은 조건에 해당이 된다. 본 연구의 실험 조건은 최대 $2.7(bar)/0.8(bar) = 3.375 > 0.171$ 로서 choked 되지 않은 조건임을 확인할 수 있다.

V. 비교 및 분석

실험으로부터 측정한 CH_4, 공기, $LFG(CH_4 : CO_2 = 55:45)$의 1 회 분사 유량의 측정 결과 및 비교는 Fig. 7과 같다. 분사압력과 주위 압력간의 압력 차이는 각각 $1.9\ bar$ 및 $0.9\ bar$의 조건에서 실험을 수행하였다.

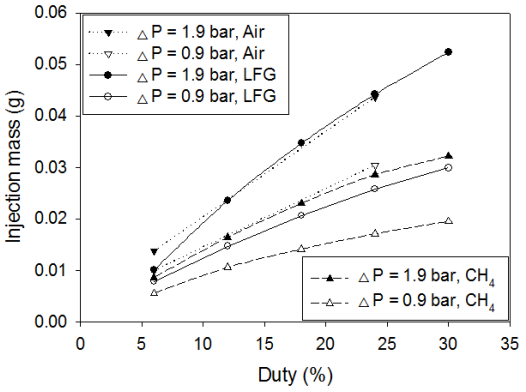
분사 기간의 duty(%)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 분사량이 증가하였고, duty와 분사 시간은 $duty(\%) = 1.5 \times t_{injection}(ms)$의 관계를 갖기 때문에 duty가 증가하면 비례하여 분사 시간이 증가하기 때문에 분사 유량(g/s)은 감소하는 경향으로 나타나게 된다.

Fig. 7의 결과를 분사비(CH_4/Air 및 LFG/Air)로 나타내면 Fig. 8과 같고, LFG의 분사량은 공기의 분사량과 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 LFG의 분자량과 공기의 분자량이 매우 유사(> 2 %)하기 때문이다.

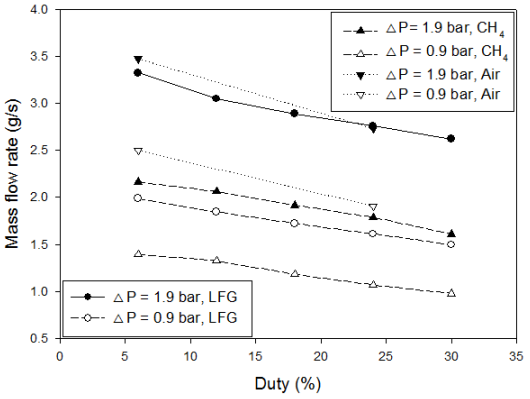
이 결과로부터 분사량의 차이는 각 물질의 밀도 및 분자량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 공기 및 LFG의 분사량은 CH_4와 비교하여 밀도(≈분자량) 차이만큼 증가한 것을 알 수 있고, 분사 기간(duty %)에 따른 분사량 비율에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. REFPROP[8]를 이용하여 온도에 따른 비열비와 밀도를 계산하여 비교한 결과는 Fig. 9와 같다.

측정 결과와 식 (3)을 이용하여 계산된 분사량은 Fig. 10과 같이 비교적 잘 일치함을 알 수 있고, 분사량은 물질의 분자량에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

식 (3)으로부터 LFG와 CH_4의 분사량(질량 유량)의 비를 구하면 식 (5)과 같고, 이 결과를 LFG와 CH_4의 분사량 비와 비교를 하면 Fig. 11과 같다.



(a) injection mass



(b) Injection mass flow rate

Fig 7. Comparison of measured injection mass flow rate for CH4, air, LFG.

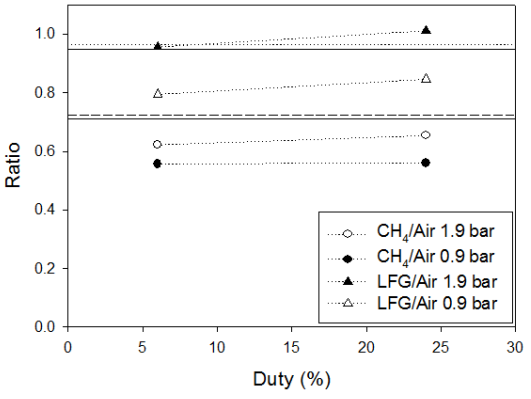
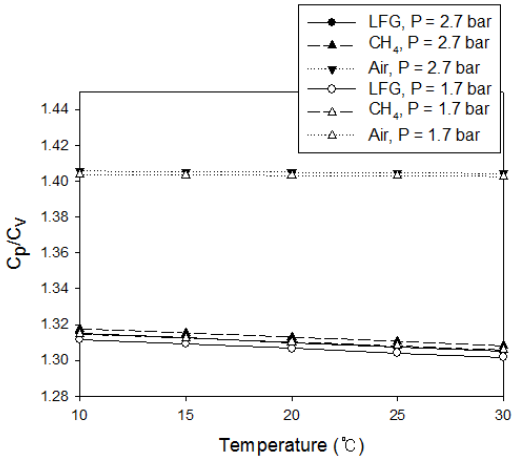
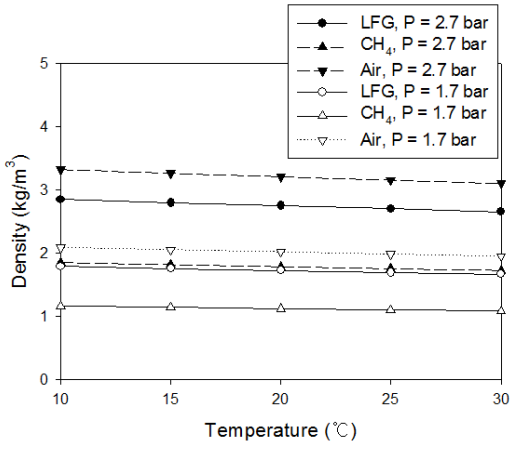


Fig. 8. Measured injection ratio for CH4/Air and LFG/Air, showing that LFG/Air is very close to unity.



(a) Ratio of specific heat



(b) Density

Fig. 9. Calculated ratio of specific heat and density of gases.

$$\frac{\dot{m}_{LFG}}{\dot{m}_{CH_4}} \approx \sqrt{\frac{M_{LFG}}{M_{CH_4}}} \approx \sqrt{\frac{28.6}{16}} \approx 1.34 \quad (5)$$

그동안 CH_4의 연소 특성에 대한 연구는 매우 많이 수행되었고 분사량에 대한 연구[9~11]도 수행 사례가 많기 때문에 CH_4과 LFG의 분자량 비를 이용하여 구성 성분이 다양한 LFG의 분사량을 추정하는 것도 가능하게 된다.

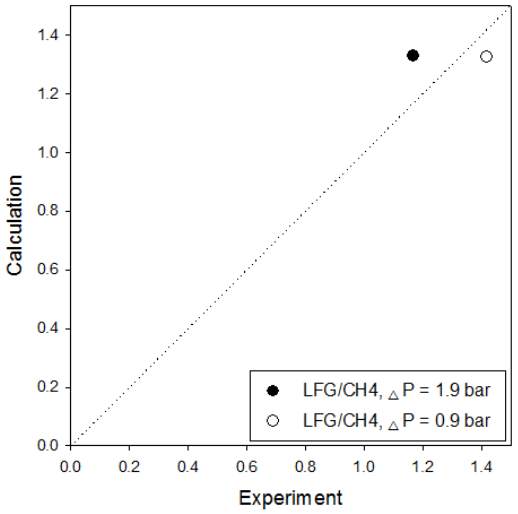


Fig. 10. Comparison between measured and calculated injection ratio between methane/air and LFG/air.

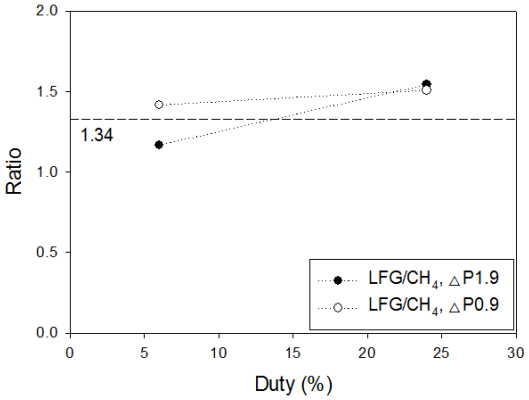


Fig. 11. Ratio of measured injection mass for LFG/CH4.

Ⅵ. 결 론

지구온난화 지수가 높고 메탄과 비교하여 약 50% 수준의 발열량을 갖고 있는 LFG를 발전용 내연기관 연료로 연소를 하는 경우, 열효율을 증가 시키기 위해서 기체 분사 방식의 기술을 이용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 분사 조건에 따른 LFG의 분사량을 측정 및 계산하기 위한 연구를 수행하였고, 주요 연구 결

과는 다음과 같다.

(1) 기체 분사 인젝터를 구동하기 위한 peak & hold 회로와 마이크로 컨트롤러로 구성된 구동 장치를 구성하였고, 공기보다 가벼운 기체의 분사량을 측정하기 위해서 plenum을 이용한 실험 장치를 구성하였다.

(2) 분사 압력과 주위 압력의 차이가 각각 1.9 bar 및 0.9 bar인 조건에서 duty(%)에 따른 분사량 측정 실험을 수행하였고, LFG의 분사량은 분자량이 유사한 공기와 유사하게 나타났다.

(3) 분사 유량 계산을 위하여 1차원 압축성 유체 방정식을 이용한 모델을 사용하였고, 실험 결과와 매우 유사한 경향을 나타내었다.

(4) 본 연구의 결과를 이용하여 그 동안 많이 연구가 된 메탄의 분사 특성 데이터와 분자량의 비를 이용하여 다양한 성분으로 구성된 LFG의 분사량 특성을 구하는 것이 가능함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업의 Non-CO2 온실가스 저감기술개발사업단(과제 번호 : E617-00241-07071-0)의 지원과 2021년도 산업통산자원부 스마트 건설기계 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

[1] https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials

[2] G. Narayanan, B. Shrestha, The Performance of a Spark Ignition Engine Fueled with Landfill Gases, SAE paper 2006-01-3428, (2006)

[3] Barte Klund, Ericp. Anderson, Barryl. Walker and don B . Burrows, Characterization of Landfill Gas Composition at the Fresh Kills Municipal Solid-Waste Landfill, Environ. Sci. Technol. 32, 2233-2237, (1998)

[4] H.P.Lenz, Mixture formation in spark-ignition engines, SAE, (1990)

[5] Lewis B. and von Elbe G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 3rd Ed., Academic Press, (1987)

[6] John R. Taylor, An introduction to error analysis. The study of uncertainlties in physical measurements, 2nd ed., University Science Books, (1997)

[7] J.H.Harlock, D.E.Winterbone, The thermodynamics and gas dynamics of internal-combustion engines, Clarendon Press, (1982)

[8] REFPROP, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database

[9] Edure, K., Kikuchi, S., Koyama, T., Kawashima, H. et al., ″Measurements on Injection Rate by LDA Flow Rate Meter,″ SAE Technical Paper 2015-01-2005, (2015)

[10] Hafizul Rahman Alias1, Mohd Fadzil Abdul Rahim, Muhamad Haziq Mohd Ismail Rodzi1, and Rosli Abu Bakar1, Effect of Injection Pressure, Injection Duration, and Injection Frequency on Direct Injector's Mass Flow Rate for Compressed Natural Gas Fuel Mohamad, MATEC Web of Conferences 225, 02008, (2018)

[11] Montanaro, A., Allocca, L., De Vita, A., Ranieri, S. et al., ″Experimental and Numerical Characterization of High-Pressure Methane Jets for Direct Injection in Internal Combustion Engines,″ SAE Technical Paper 2020-01-2124 , (2020)