

매립가스 마이크로가스터빈 배가스 분석에 관한 실험적 연구

박정극*, 허광범, 임상규, 오일홍, 이인화

Experimental Study of the Landfill Gas Fuelled Micro Gas Turbine Exhaust Gas Analysis

Jungkeuk Park*, Kwangbeom Hur, Sanggyu Rhim, Ilhong Oh and Inhwa Lee

Abstract

MGT fuelled by landfill gas was tested to asses feasibility of its exhaust gas application for CO₂ enrichment. The exhaust gas was analyzed during start-up and normal operation with different MGT load conditions. Due to the changes of air/fuel ratio and combustion mode, O₂, CO₂, CO and NO_x concentration were varied within wide ranges during the MGT start-up. Especially, NO_x emission level was increased up to 20.01 ppmv. Different tendencies of O₂, CO₂, CO and NO_x concentrations were observed with MGT output changes. O₂ and CO concentrations were shown to be decreased and NO_x and CO₂ concentrations were shown to have opposite trends. NO_x emission level (0.8~1.88 ppmv) was very low compared to other types of combustion based power generation equipment. Unburned hydrocarbon emission level was substantially decreased with MGT load increase. Especially, C₂H₄ concentration was below the detection limit(0.2 ppmv) around the nominal load condition. The exhaust gas from landfill gas fuelled MGT system was shown to be feasible for CO₂ fertilization. Concentrations of major components were within or below the maximum allowable ranges.

Key words

LFG(Landfill Gas)(매립가스), MGT(마이크로가스터빈), CO₂ enrichment(CO₂ 시비), Siloxane(실록산)

(접수일 2011. 8. 24, 수정일 2011. 9. 2, 게재확정일 2011. 9. 2)

* 한국전력공사 전력연구원

■ E-mail : jkpark@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5385 ■ Fax : (042)865-5679

1. 서론

도시고형폐기물의 혐기성 소화 공정에서는 CH₄가 포함된 매립가스가 생산된다. 매립가스에 포함된 다양한 요소들 가운데 CH₄는 CO₂와 더불어 대표적인 온실가스에 해당하지만 동시에 가장 단순한 탄화수소 연료이기도 하다. 매립가스의 CH₄ 농도는 거의 70%를 넘지 않기 때문에 매립가스는 천연

가스와 비교할 때 발열량이 상대적으로 낮지만 일부 상용화된 연소 시스템에 의해 전기와 열로 전환될 수 있다. 그러나 CH₄와 함께 매립가스를 구성하는 CO₂는 화염온도, 연소속도를 감소시키고 화염 안정화 영역을 좁힌다⁽¹⁾. 또한 CO₂에 의한 연료 희석 효과는 배기가스 조성에 영향을 주어 보일러, 가스엔진, 가스터빈 및 연료 전지와 같은 매립가스 에너지 전환 시스템의 운전 특성을 변화시킬 수 있다.

1990년 대 후반 이후, MGT(Micro Gas Turbine, 마이크로 가스터빈)는 매우 낮은 NOx 배출 농도, 유지·보수상의 이점 그리고 우수한 부하 추종 성능으로 인해 큰 관심의 대상이 되어 왔다. 또한 혐기소화가스의 경우 발열량에 따른 연료 압력 조건이 충족될 경우 CH₄ 농도가 35%까지 낮은 경우에도 MGT에 적용될 수 있어 매립가스 및 바이오가스 에너지 전환 시스템에 다수 적용된 바 있다⁽²⁾. MGT의 배가스는 온도가 약 300 °C 정도로 높아 폐열회수를 통한 에너지의 추가 회수가 가능할 뿐만 아니라, 배가스 내 NO_x, SO_x, CO 및 UHC(미연 탄화수소)의 배출 수준이 매우 낮아 농업 분야에서 CO₂ 소스로 적용될 수 있는 잠재력 또한 가지고 있다⁽³⁾.

높은 CO₂ 농도에 의한 광합성 반응 촉진 효과 및 그에 따른 식물 성장 향상 효과는 Jaffrin 등 (2003)과 Klaaring 등 (2006)을 비롯한 다수의 실험적인 연구를 통해 확인 된 바 있는데 실험 결과에 따르면 오이, 토마토 등의 작물 생산량이 크게 증가하였다^{(4),(5)}. CO₂ 시비(CO₂ fertilization)에 의한 C3 작물 성장 개선 효과는 농업 및 원예 분야에 폭넓게 적용되고 있다. 현재는 경제적 이익 극대화를 위해 순수 CO₂가 아닌 저렴하면서 품질이 높은 CO₂ 소스를 구하는데 관심이 쏠리고 있는데 드라이아이스, 연소가스 및 유기성폐기물 등을 이용한 다양한 방법이 시도되고 있다. 연소가스의 경우 비용적인 측면에서 가장 적합하나 UHC와 CO 성분 포함에 의해 식물 생장이 악영향을 받을 수 있다는 점에서 적용이 쉽지는 않다. 그러나 Table 1에 요약된 최대 허용 농도 기준을 만족시킬 수 있다면 저렴하면서도 효과가 큰 CO₂ 소스가 될 수 있다. 최대 허용농도 범위가 상당히 넓은 것은 출처에 따라 허용농도가 크게 변하기 때문이다.

천연가스-MGT 배가스 내의 NO_x, SO_x 및 C₂H₄ 농도는 식물 성장에 영향을 끼치지 않을 정도로 낮아 CO₂ 시비에 활용

Table 1. Maximum allowable concentrations of CO₂ source for CO₂ fertilization^{(6),(7)}

Components	Maximum allowable concentration (ppm)
C ₂ H ₄	0,008~0,5
SO ₂	0,1~0,5
NO _x	0,1~0,5
C ₃ H ₆	10~50
CO	100~500
CO ₂	2,000~30,000

될 수 있는 것으로 밝혀졌다⁽⁷⁾.

이미 언급된 바와 같이 연료 조성은 연소 안정성을 결정짓는 매우 중요한 요소의 하나이다. 따라서 CO₂ 또는 N₂에 의한 연료 희석이 연소 안정성과 오염물질 배출에 어떤 영향을 미치는가에 대한 기초 연구가 수행된 바 있다^{(8),(9)}. 특히 CH₄/N₂ 바이오가스를 연료로 한 MGT의 운전 특성 또한 분석된 바 있다⁽²⁾. 그러나 CO₂로 희석된 연료가 상용 원동기의 운전 특성에 어떤 영향을 미치는가에 대해 많은 연구가 수행되지는 않았다.

본 연구에서는 매립가스 MGT의 배기가스 분석을 통해 CO₂의 희석 효과가 MGT 배가스 특성에 끼치는 영향은 물론 배기가스의 CO₂ 시비 적용 가능성을 실험을 통해 분석하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 매립가스 MGT 발전 및 CO₂ 시비 유리온실 시스템의 개략도이다. 전체 시스템은 매립가스 연료화, MGT 발전 그리고 유리온실 배가스 주입 부분으로 구성된다.

매립가스 연료화시스템은 H₂S, NH₃, 실록산화합물, 입자상 물질 및 수분을 제거하고 원동기가 원하는 압력까지 압축하는 역할을 수행한다. 수분 존재 하에서 금속 부품의 부식 및 연소 후 고온 부식을 유발하는 H₂S 제거는 KOH 침착활성

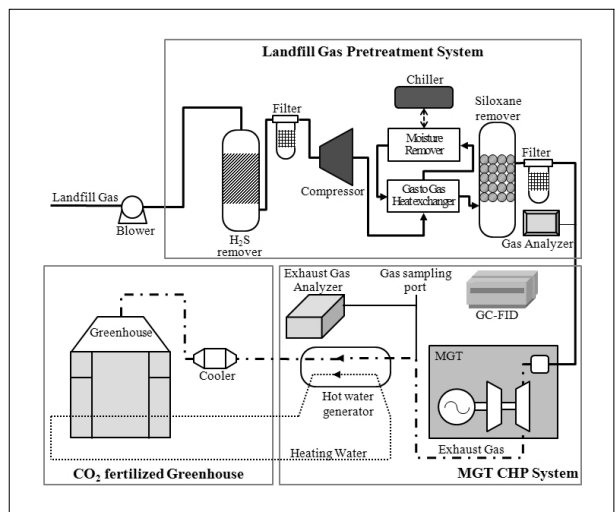


Fig. 1 Schematic diagram of landfill gas-MGT CHP system with greenhouse for CO₂ supplement

탄에 의해 이루어지고 연소 후 SiO₂ 로 변환되어 터빈 블레이드, 리큐퍼레이터 등에 퇴적되어 성능 저하를 유발하는 실록산화합물은 야자계 활성탄에 의해 제거된다. 실록산화합물의 연소 기반 원동기 및 촉매 후처리 시설에 대한 악영향은 1990년대 말 보고된 이후 큰 관심의 대상이 되어 왔다. 부식 환경 조성 및 터빈 블레이드 손상의 원인이 되는 액상 수분의 유해성은 칠러에 의한 열교환 이후 가온을 통해 공급 온도와 이슬점 온도 차이를 크게 하여 제거한다. 연료화 된 매립가스는 30kW 용량의 MGT(CR-30, Capstone)에 공급되며 배가스는 폐열회수 및 냉각 열교환기를 거쳐 대기로 내보내지거나 유리온실로 주입되어 농작물 생산 촉진 효과를 관찰하는데 활용된다.

매립가스 내 CH₄ 농도는 NDIR 방식의 측정기(Mamos-400와 GEM 2000 plus)를 이용하여 MGT 입구에서 측정하였다. MGT 배가스는 배기가스 열교환기 입구에서 샘플링하여 O₂, CO₂, CO, NOx 및 SOx의 경우 Horiba 사의 PG-250로 측정하며 UHC의 경우 GC-FID(Perkin Elmer ARNEL)을 이용하여 분석하였다.

Table 2는 실험에 적용된 연료 가스의 조성과 특성을 요약한 것이다. 각 실험 조건에 대해 연료 성상이 동일하지 않은 것은 다수의 포집점에서 공급되는 매립가스의 성상이 주변 조건에 따라 큰 변화를 보이기 때문이다.

주어진 연료를 이용하여 MGT의 출력을 가능한 범위에서 변화시켜가며 기동시와 정상 운전 중 배가스 조성의 변화를 측정 및 분석하였다.

Table 2. Components and average properties of fuels used for experiments

Components for analysis	O ₂ , CO ₂ , CO, NOx and SOx		UHC
	Start-up	Normal operation	Normal operation
CH ₄ (% , AVG)	46,3	57,9	55,7
CO ₂ (% , AVG)	37,4	34,7	35,1
O ₂ (% , AVG)	1,8	0,8	1,1
HHV (Kcal/Nm ³ , AVG)	4,454	5,569	5,358

3. 결과 및 토론

3.1 MGT 기동 시 배가스 조성

Fig. 2-5는 MGT 기동 시 첫 5분간 O₂, CO₂, CO 및 NOx 농도 변화 경향을 그래프로 나타낸 것이다. O₂ 농도의 변화 경향은 CO₂ 농도 변화 경향의 정반대 양상을 보이는데 이는 시동 시 연소 모드 전환 및 공연비 변화에 기인하는 것으로 보인다. 기동 시에는 pilot injector에 의해 확산 화염이 생성되며 안정화 된 이후에는 그 외 3개의 injector에 의해 희박 예혼합 화염이 생성된다. 즉, 공연비는 시간에 따라 감소하게 되어 그래프에 나타난 바와 같이 기동 후 30초 부근에서 O₂와 CO₂ 농도는 각각 최소값과 최대값을 보인 후 증가하여 일정하게 유지된다.

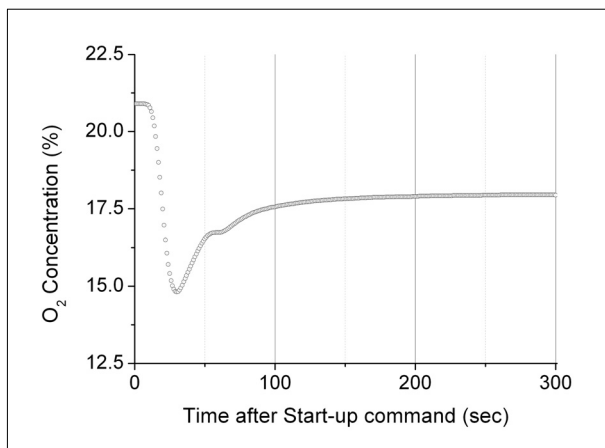


Fig. 2 O₂ concentration change during start-up for 5 minutes

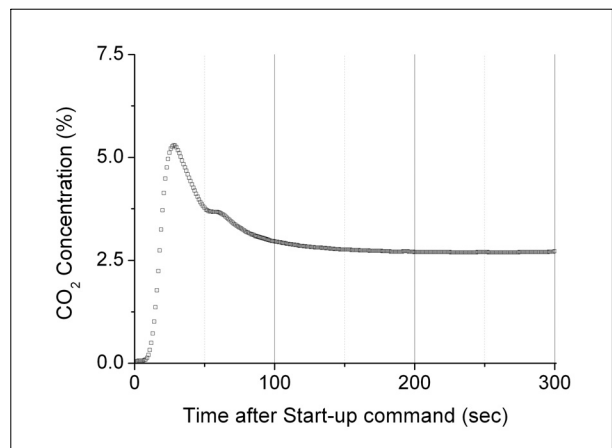


Fig. 3 CO₂ concentration change during start-up for 5 minutes

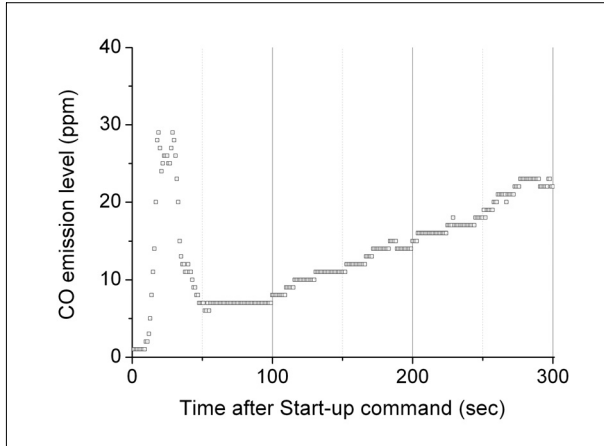


Fig. 4 CO concentration change during start-up for 5 minutes

CO 농도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 연소 초기 피크값을 기록하고 감소한 후 기동 후 약 60초 이후에는 지속적으로 증가하는 경향을 보였는데 이는 기동 초기 공연비 증가에 의한 것으로 보인다.

MGT 기동 시 NOx 농도는 매우 급격히 변화했다. NOx 농도는 기동 후 35초가 지난 지점에서 20ppmv에 가까운 값을 기록한 후 급격히 일반 운전 수준으로 감소하였다. 기동 시 관찰된 최대값은 실험에 사용된 MGT 제작사가 보증하는 값인 9ppmv를 두 배 이상 상회하는 수준에 해당한다. NOx 농도가 급격하게 변화하는 것 또한 공연비 변화에 따른 연소 온도 변화에 기인하는 것으로 보인다. O₂ 최소값, CO₂ 최대값, CO 피크값 및 NOx 피크값이 발생된 시간이 상당히 일치한다

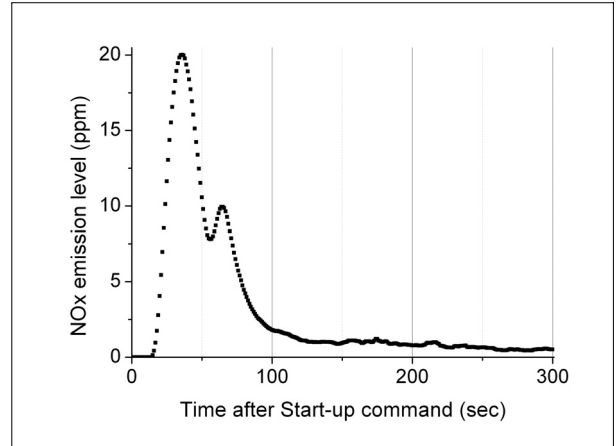


Fig. 5 NOx concentration change during start-up for 5 minutes

는 점은 주목할 만하다.

3.2 MGT 부하별 배가스 조성 변화

MGT의 운전 특성은 부하 조건에 따라 크게 영향을 받는다. 특히 오염물질의 배출은 연료 희석과 탈설계 운전에 의해 큰 차이를 보인다.

Fig. 6-7은 연료가스 내 CH₄ 평균 농도가 57.9%인 경우 MGT 부하에 따라 O₂ 및 CO₂ 농도 변화를 나타낸 것이다.

MGT 부하가 17.5 에서 30kW까지 증가하는 동안 배가스 내 O₂ 농도는 18.64에서 18.22%로 감소한 반면 CO₂ 농도는 2.27에서 2.54%로 증가하였다. 두 성분의 부하에 대한 반대

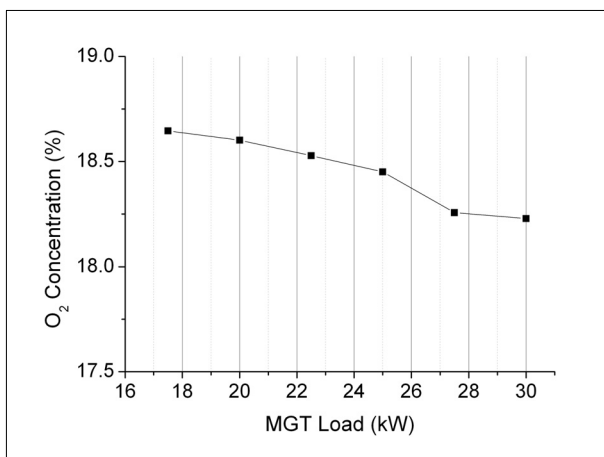


Fig. 6 O₂ concentration change with different MGT output (average CH₄ in fuel gas = 57.9%)

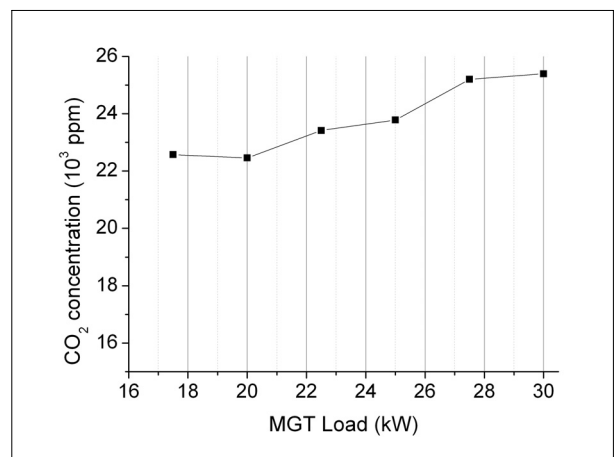


Fig. 7 CO₂ concentration change with different MGT output (average CH₄ in fuel gas = 57.9%)

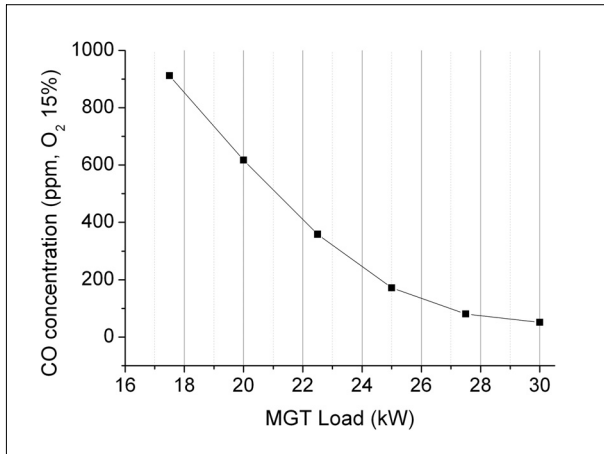


Fig. 8 CO concentration change with different MGT output (average CH₄ in fuel gas = 57.9%)

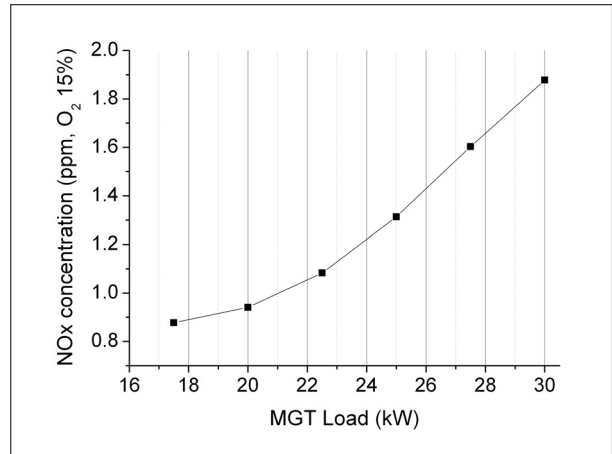


Fig. 9 NOx concentration change with different MGT output (average CH₄ in fuel gas = 57.9%)

경향은 공연비의 변화에 기인하는 것으로 보인다. MGT 부하가 증가함에 따라 터빈은 연료에 비해 적은 양의 공기를 흡입하기 때문에 CO₂ 농도는 증가하고 O₂ 농도는 감소한다. 천연가스 연료가 1.6%인 것에 비해서⁽¹⁰⁾, 배가스 내 CO₂ 농도는 정격 출력 시 2.54%로 상당히 높으며 대기 중 CO₂ 농도에 비해서는 60배 이상 높아 CO₂ 시비에 적합하다.

Fig. 8 과 9는 정상 운전 중 MGT 부하 변화에 따라 배가스 내 CO와 NO_x 배출 농도의 변화 경향을 나타낸 것이다. 배출 농도는 대기 중 CO, NO 및 THC (총 탄화수소) 농도가 거의 0에 가깝다는 가정에 따라 O₂ 15%를 기준으로 보정되었다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 CO 배출 농도는 MGT 출력이 30에서 17.5kW까지 감소함에 따라 30.16에서 804.26ppmv (O₂ 15% 기준)까지 급격하게 증가하였다. CO 배출 농도의 증가는 낮은 출력 조건에서 연소 불안정성이 급속하게 증가하였기 때문이다. 정격 출력 하에서의 CO 배출 농도는 제품 규격인 40ppmv(O₂ 15% 기준)을 만족한다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 NO_x 배출 농도는 MGT 부하에 비례한다. NO_x 농도는 MGT 부하 증가에 따라 0.88에서 1.88ppmv(O₂ 15% 기준)로 증가하였다. NO_x 배출 농도는 제품 규격에 명시된 수준인 9ppmv(O₂ 15% 기준)에 크게 못 미쳤고 천연가스를 연료로 한 30kW MGT에 대한 실험적 연구에서 관찰된 수준인 4~35ppmv(부하 50~100%)에 비해서도 크게 낮은 값이다⁽¹¹⁾.

MGT 연소기에서 생성되는 NO_x는 주로 thermal NO_x 기작에 의한 것인데⁽¹²⁾ thermal NO_x 기작에서 가장 중요한 인

Table 3. Result of UHC analysis in the exhaust with different MGT loads (average CH₄ content=55.7%)

MGT load (kW)	Concentration (ppmv)		
	THC	CH ₄	C ₂ H ₄
22,5	129	102,7	3,0
29,4	16	13	< 0,2

자는 연소 온도와 N₂의 체류 시간이다. 동일한 운전 조건에서 화염 또는 연소 온도는 공연비에 영향을 받는다. 낮은 부하 조건에서 공연비의 증가는 화염 온도의 감소로 이어지고 따라서 thermal NO_x 생성량이 감소하게 된다.

Table 3은 MGT 부하에 따른 배가스 내 UHC 농도의 분석 결과이다. 매립가스 내 CH₄ 평균 농도가 55.7%인 경우 배가스 내 미연탄화수소 농도는 MGT 부하 증가에 따라 급격하게 감소하여 정격 출력 부근에서는 16ppmv 낮은 값을 나타내었다. C₂H₄의 경우 MGT 출력이 22,5kW인 경우 3,0ppmv이 검출되었으나 출력이 29,0kW 이상인 경우에는 검출 한계 (0,2ppmv)를 하회하였다. 터빈 출력에 따른 THC 배출 경향은 천연가스 연료의 100kW급 MGT에 대한 실험 결과와 유사하다⁽⁷⁾. 배가스 내 CH₄ 농도는 C₂H₄ 농도보다 높으며 이들 두 성분은 배가스 내 UHC 중 약 80%를 차지한다.

앞서 살펴본 바와 같이 CO₂ 농도는 대기 농도 대비 60배 이상으로 CO₂ 시비를 위한 CO₂ 소스로 충분히 활용이 가능하다. O₂ 농도의 경우 대기조건과 크게 차이가 나지 않고 CO 농도 또한 높지 않아 유리온실 주입 시 작업 환경의 악영향을 초래하지 않을 것으로 보인다. NO_x 농도는 희석 비율이 10배

만 되어도 허용 범위를 만족하며 가장 중요한 성분인 C_2H_4 의 경우에도 검출 한계를 하회하여 매립가스를 연료로 한 MGT 배가스를 CO_2 시비에 적용하는 것은 기술적으로 전혀 문제가 없을 것으로 보인다.

4. 결론

매립가스를 연료로 하는 MGT 열병합발전시스템의 배가스 분석 및 이를 기반으로 한 배가스의 CO_2 시비 적용 타당성 평가를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) MGT 기동 시 공연비 및 연소 모드의 변화에 따라 O_2 , CO_2 , CO 및 NO_x 배출 농도 수준은 매우 넓은 범위에서 변화였다. 특히 NO_x 배출 수준은 규격값의 2배 이상인 20.01ppmv 까지 증가하였다.
- (2) MGT의 출력이 감소하는 경우 O_2 , CO_2 , CO 및 NO_x 배출 농도 수준은 다른 경향을 나타내었다. 특히 가스터빈 출력 감소에 따라 CO_2 와 NO_x 농도는 감소하였고 O_2 및 CO 농도는 증가하였다.
- (3) NO_x 농도는 제작사 규격값인 9ppmv는 물론 천연가스를 연료로 하는 MGT에 대한 실험 결과값(4~35ppmv)에 크게 못 미치는 것으로 나타나 매립가스 적용 시 NO_x 배출 성능이 보다 우수하였는데 이는 CO_2 의 연료 희석 효과에 기인하는 것으로 보인다.
- (4) 매립가스를 연료로 하는 경우 CO_2 농도는 천연가스를 연료로 하는 경우에 비해 상당히 증가하여 다른 성분 조건을 만족하는 경우 농업 분야 CO_2 소스로 배가스를 활용할 수 있을 것으로 보인다.
- (5) MGT 배가스 내의 UHC 농도는 가스터빈 출력 증가에 따른 연소 안정성 증가로 인해 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 특히 연소가스의 CO_2 시비 적용에 있어 식물 생장에 가장 민감한 성분인 C_2H_4 는 정격 출력 부근에서 검출 한계값인 0.2ppmv를 하회하는 것으로 나타났다.
- (6) 매립가스를 연료로 하는 MGT 발전시스템 배가스가 유리 온실 내 CO_2 농도를 최대 1,600ppmv까지 희석하여 시비하는데 있어 식물 생장에 영향을 주는 성분들의 농도는 모두 최대 허용 농도 범위를 만족할 수 있을 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 한국중부발전(주)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] C. E. Lee, C. H. Hwang, 2007, "An Experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels", Fuel, Vol. 86, pp. 649-655.
- [2] J. K. Park, K. B. Hur, S. K. Rhim, H. Kang, 2011, "An analysis of CH_4/N_2 rich biogas production, fuel treatment process and microturbine application", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol.28, pp. 126-132.
- [3] 박정국, 허광범, 임상규, 이인화, 2009, "소규모 매립가스 자원화를 위한 마이크로터빈 열병합발전 및 유리온실 농도 증가 시스템의 타당성 연구", 한국신재생에너지학회지, Vol. 5, pp. 9-14.
- [4] A. Jaffrin, N. Bentounes, A. M. Joan, S. Makhoul, 2003, "Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth", Biosystems Engineering, Vol. 86, No. 1, pp. 113-123.
- [5] H.-P. Kläring, C. Hauschild, A. Heißner, B. Bar-Yosef, 2007, "Model-based control of CO_2 concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield", Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 143, No. 3-4, pp. 208-216.
- [6] I. Lemay, M. Leveille, 2010, "Safe and effective CO_2 enrichment in the garden", Maximum Yield USA, Vol. 10, pp. 80-86.
- [7] C. Norén, 2002, "Evaluation of CO_2 -fertilization of a greenhouse with flue gases from a microturbine", Svenskt Gastekniskt Center Report A32, Malmö, Sweden.
- [8] C. Cohé, C. Chauveau, I. Gökalp, D. F. Kurtuluş, 2008, " CO_2 addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH_4 air flames", Proceedings of the Combustion Institute 32, pp. 1803-1810.
- [9] J. I. Seo, N. I. Kim, H. D. Shin, 2008, "An experimental study of the fuel dilution effect on the propagation of methane-air tribrachial flames", Combustion and Flame, Vol. 153, pp. 355-366.
- [10] A. Y. Petrov, A. Zaltash, D. T. Rizy, S. D. Labinov, 2002, "Environmental aspects of operation of a gas-fired

microturbine-based CHP system”, Proceedings of the 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, 23-27 September 2002, Pittsburgh, PA, USA.

[11] F. E. Pierce, 2007, “Summary of results from testing a 30-kW-microturbine and combined heat and power (CHP) system”, Federal Energy Management Program,

U.S. Department of Energy, DOE/EE-0316.

[12] H. I. Onowiona, V. I. Ugursal, 2006, “Residential cogeneration systems: review of the current technology”, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, pp. 389-431.

박정극



1999년 연세대학교 기계공학과 공학사
2003년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과
공학석사
2005년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : jkpark@kepri_re.kr)

허광범



1993년 성균관대학교 기계공학과 공학사
2000년 충남대학교 대학원 기계설계공학과
공학석사
2008년 충남대학교 대학원 기계설계공학과
공학박사
1992년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 책임연구원
(E-mail : kbhur5798@hanmail.net)

임상규



1982년 중앙대학교 기계공학과 공학사
1982년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소 책임연구원
(E-mail : sk6432@kepco.co.kr)

오일홍



2010년 조선대학교 환경공학과 입학

현재 조선대학교 환경공학과 공학석사 재학중
(E-mail : love25t@paran.com)

이인화



1983년 고려대학교 화학공학과 공학사
1985년 고려대학교 화학공학과 공학석사
1990년 고려대학교 화학공학과 공학박사

현재 조선대학교 환경공학과 교수
(E-mail : ihlee@chosun.ac.kr)