

마이크로 가스터빈 열병합장치 성능특성 연구

Study on the Performance Characteristics of Micro Gas Turbine(MGT) Co-generation System

허 광 범† · 김 재 훈*

Kwang-beom Hur and Jae-hoon Kim

(2006년 7월 10일 접수 ; 2006년 8월 7일 심사완료)

Key Words : Micro Gas Turbine (마이크로 가스터빈), Heating Capacity(난방성능), Noise Measurement(소음측정), Co-generation(열병합 발전), Exhaust Gas Absorption Chiller(배가스 흡수식 냉온수기)

ABSTRACT

Micro gas turbine(MGT) has received attention recently as small-scale distributed power sources. With characteristics such as their small size, lightweight, low maintenance cost and minimal vibrations during operation, they are expected to become widespread in a wide range of applications, including residential and small-scale industrial use. It is very easier to start-up and stop the MGT system which is the friendly environmental power system has just below the 9 ppm NOx emission and good quality of noise level. The exhaust heat emitted by the MGT is in the form of about 300°C clean exhaust gas. The exhaust gas is suitable for absorption chiller/heater system. I has researched performance characteristics of the 60 kW class MGT-absorption chiller-heater system in the local condition. Variations of heat recovery from exhaust gas has measured according to micro gas turbine output of 15, 30, 45, 60 kW. From those results, the performance of the MGT-absorption chiller/heater system has been evaluated.

기 호 설 명

- W : 발전출력 [kW]
- Q : 소비가스열량 [kW]
- Q_{hw} : 온수열량 [kW]
- Q_{exh} : 배가스열량 [kW]
- \dot{m}_w : 냉온수유량 [l/min]
- COP : 성능계수
- T : 온도 [°C]
- η_e : 전기효율
- η_t : 총효율(난방)

- w : 냉온수
- h : 온수
- c : 냉수
- i : 흡수식냉온수기 입구
- o : 흡수식냉온수기 출구

1. 서 론

초소규모 지역분산형 전원은 전력산업의 패러다임 변화에 따라 우수한 가격경쟁력을 가지고 소비자에게 향후 서비스 될 것으로 예상하고 있으며 특히 발전과정에서 생긴 폐열은 건물난방 등에 유효하게 이용되면서 분산형 발전이 경쟁력을 얻어가고 있는 것이다. 또한 점점 높아져만가는 환경의식의 확산은 신규유연탄 발전소 건설의 큰 걸림돌로 작용하는 것이 사실이다. 새로이 강화되는 각종환경규제를 충족

† 책임저자; 정회원, 한국전력공사 전력연구원
E-mail : kbhur@kepri.re.kr
Tel : (042)865-5323, Fax : (042)865-5304
* 충남대학교 기계설계공학과

시키기 위한 기존 대용량발전소의 환경비용도 증가 추세에 있다. 유럽의 경우는 환경규제가 더욱 엄격하여 미국보다도 산업체에게 요구하는 환경수준이 높다. 초소형 분산형 발전시스템은 최악의 연료가 천연가스라 할 수 있으므로 환경운동가들의 이상이 되기도 한다⁽¹⁾.

MGT와 같은 개별 분산형 발전방식은 대규모 전력수송시의 송전장비설치로 인한 비용을 저감할 수 있고 전력계통과의 연계로 안정적 전원공급이 가능한 시스템이나 초기의 투자비 및 운영시의 경제성을 높이기 위해서는 발전 후 터빈으로부터 생성되는 배가스의 열을 최대한 회수하여 즉 열병합발전의 형식을 취하여 시스템 총 효율을 높여야 한다⁽¹⁾.

열회수의 방식으로 온수형태로 열을 회수할 경우 배가스 열교환기에 의해 회수가 가능하나 설치장소가 년중 연속으로 온수를 사용하여야 하는 제약이 있다. 그러나 배가스로부터 열원을 냉방, 난방과 같이 공조용으로 사용할 경우 이용시간대와 설치 장소 범위가 넓어져서 활용도가 커진다⁽¹⁾.

한국전력공사 전력연구원에서는 소형열병합발전의 보급활성화를 필요로 하는 국내의 상황에 부합하고자 60 kW급 MGT 배가스 구동 흡수식 냉/온수발생기에 대한 연구를 시행중이며 이 논문에서는 흡수식 냉온수기와 결합된 MGT 열병합시스템의 실증운전 결과에 대하여 소개하고자 한다.

2. 시스템 개요

MGT는 Capstone사 Model C60을 도입하여 계통-단독운전 혼합방식(dual mode)으로 설치하였으며 Table 1에 상세한 사양을 나타내었다⁽²⁾.

26 USRT급 배가스 흡수식 냉온수기(이하 EAC)는 한국전력공사 전력연구원에서 시뮬레이션을 통하여 60 kW급 MGT의 배가스를 열원으로 하는 2중+1중 겸용 흡수식냉온수기의 기초설계를 하고 국내 전문제작업체에서 일본업체의 협력 하에 상세설계 및 도면작성 후 제품을 제작하였으며 Table 2에 상세 사양을 정리하였다.⁽³⁾

Table 1 60 kW class MGT performance specifications

Characteristic	Performance
Power	60.0 kW(+0/-2kW)
Thermal efficiency	28%(±2) LHV
Heat rate	12,900 kJ/kWh
Fuel flow	8490,000 kJ/hr (HHV)
Exhaust temperature	305°C
Exhaust mass flow	0.48 kg/s
Total exhaust energy	591,000 kJ/hr
Emissions	NOx(<9ppm) @15%O ₂

Table 2 Performance specifications of the exhaust gas absorption chiller

Characteristic		Unit	Performance
Capacity	Cooling cap.	kW(USRT)	91.2(26)
	Heating cap.	kW(kcal/h)	96.2(82,700)
Hot/Cold water	Cold water inlet/outlet temp.	°C	12/7.6
	Hot water inlet/outlet temp.	°C	50.4/55
	Hot/cold water rate	ℓ/min	297.8
	Pressure drop in machine	kPa(mAq)	27.5(2.8)
Cooling water	Cooling water inlet/outlet temp.	°C	32/38
	Cooling water rate	ℓ/min	500
	Pressure drop in machine	kPa(mAq)	37.3(3.8)

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Micro gas turbine의 내부는 Fig.1과 같다. Generator, compressor와 turbine등 모든 회전하는 부품은 동일 회전축에 연결되어 있고 이 축은 air foil bearing으로 지지되어 최대 96,000 rpm으로 회전한다. Combustion chamber 외부는 recuperator로 싸여져 있어 이 곳에서 압축된 흡기공기와 배기가스 사이에 열교환이 이루어진다.

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 Fig. 3는 실제로 설치된 모습을 나타낸 것이다.

MGT와 그 배가스를 중심으로 한 다양한 열병합 발전방식의 성능시험을 위해 여러가지 열회수기기를 설치한 관계로 발생한 배가스를 지정된 기기기로만 투입이 가능하도록 배관에 damper를 설치하여 별도의 콘트롤박스에서 조정하였다.

MGT의 배열부하는 PC를 연결하여 Capstone 전용구동프로그램(CRMS)으로 조절하였다

EAC에서 냉/난방운전시 발생하는 냉/온수의 열량은 냉각탑을 순환하는 냉각수와 열교환을 통한 다음 다시 EAC로 들어가는 폐회로 방식이다.

시스템 내부의 주요측정부에 온도범위에 따라 K-type, T-type 열전대, 압력계 그리고 유량계를

부착한 후 데이터레코더를 통해 각종 측정값을 저장하였으며 EAC로 들어가는 배가스관에 배가스측정기를 부착하여 흡입된 배가스의 성분 및 온도를 측정하였다.

Fig. 3와 Table 1은 이 실험에서의 측정방법과 장치 셋업을 그림과 표로 나타내었다.

Fig. 4는 이 연구에서 설계/제작한 이중효용 흡수냉동 사이클을 나타내고 있다. 이중효용 흡수냉동 사이클이란 희유액을 농유액으로 만드는 재생기가 2개인 사이클이며 1차로 고온재생기에서 고압증기나 직접가열에 의해 증발된 수증기가 2차로 저온재

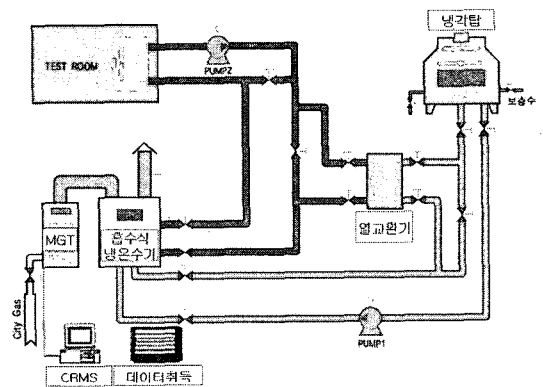


Fig. 2 Schematic diagram of the MGT-EAC system

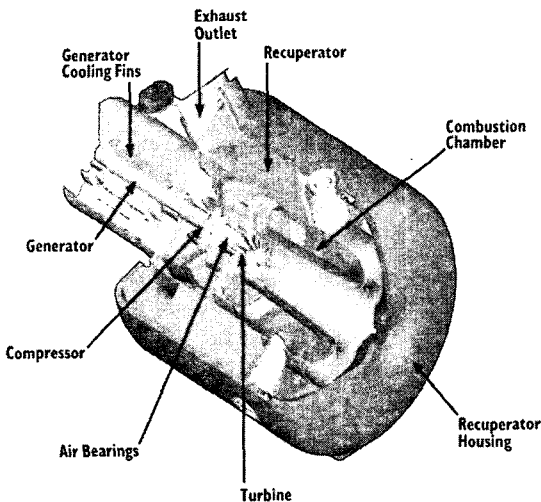


Fig. 1 Micro gas turbine configuration (Capstone Corp. USA)⁽²⁾

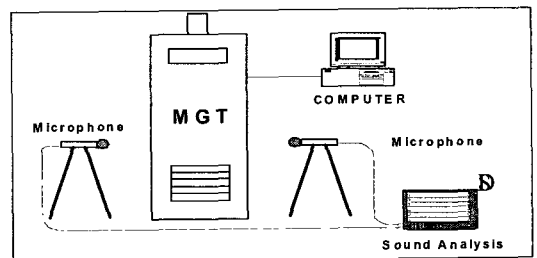


Fig. 3 MGT noise measurement set-up

Table 3 Noise measurement equipment

-	Model	Target	-
Microphone	B&K 4189 (B&K)	Sound pressure	Diameter : 1/2-inch frequency response : 6.8 Hz~20 kHz Free-field type
Sound analysis	Pulse 3022 (B&K)	Noise analysis	Frequency Scope : 20 Hz~25.6 kHz No. of channels : 7

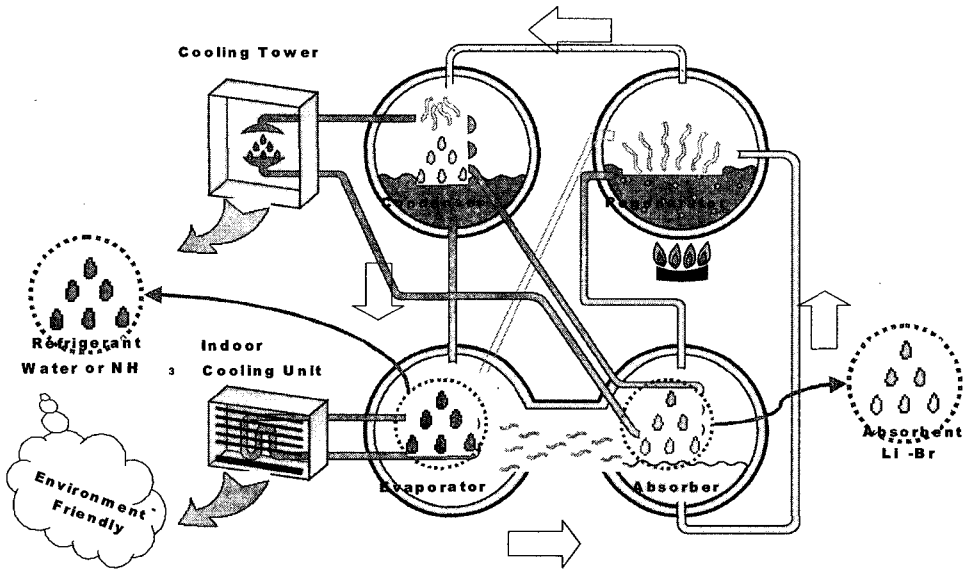


Fig. 4 Schematic diagram of single+double effect Li-Br water absorption cycle

생기로부터 온 중간용액속의 수분을 한번더 증발시킨다^(3,4).

3.2 실험방법

난방실험은 상온의 대기압하에서 수행하였으며 MGT의 전력부하를 15, 60, 45, 60 kW로 변동시켜 가며 일정시간 경과 후 시스템이 정상상태에 도달하면 그 때의 배열부하에 반응하는 EAC의 주요부위 온도, 흡입연료량 및 배가스성분(온도, O₂, N₂, CO₂ 량 등)을 측정하였다. EAC투입 배가스열량은 직접적인 측정이 어려운 관계로 측정된 배가스성분을 이용한 열손실법으로 구하였다.

냉방실험은 MGT의 정격부하(60 kW)에서 시간별 변화하는 데이터를 측정하는 방식으로 시행되었고 다른 내용은 난방실험시와 동일하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 MGT 운전성능특성

Fig. 5는 60 kW급 MGT의 기동시 운전특성을 보여주고 있다. PC에서 발전기의 기동이 이루어지며 전부하까지 약 200초에 도달한다. 기동시 NO_x를 측정한 결과 초기에는 다소 잠시 높았다가 정상운전에 도달하면 제작사가 제시한 9 ppm 이하로 배출된다⁽²⁾.

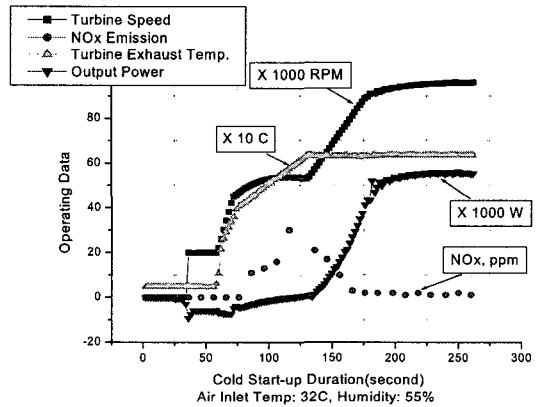


Fig. 5 Micro gas turbine startup curve

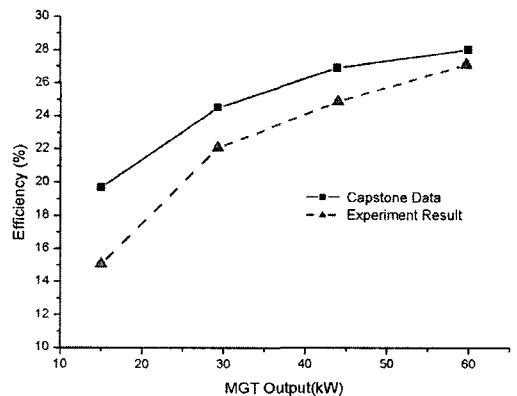


Fig. 6 MGT power vs. efficiency

Fig. 6은 MGT의 출력변화에 따른 전기효율을 도 시한 그래프로서 전기효율은 다음과⁽⁶⁾ 같이 계산하 였다.

$$\eta_e = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

15 kW 이하의 저출력 부분부하상태에서는 효율이 매우 낮지만 30 kW 이상되는 출력에서는 20% 이 상의 효율을 보인다. 실험 시 최고출력은 거의 60 kW에 근접했는데 이는 대기온도가 10°C 부근으로 ISO 기준보다 오히려 낮아서 대기온도로 인한 효율 저하가 없기 때문이고 제작사가 제시한 성능자료 및 관련자료와도 일치하는 경향이다^(5,6).

Fig. 7은 대기 온도에 따른 효율의 변화를 나타낸 그 래프이다. 대기 온도 변화 범위가 그다지 크지 않아서 효율의 현저한 저하가 나타나지는 않지만 대기 온도

가 19.5°C 인 경우 전기 효율은 약 1% 이상 감소 하였다. 이는 터빈류의 일반적인 특성처럼 MGT도 성능특성에 대기온도가 중요변수로 대기온도가 높아 질수록 공기밀도가 낮아져서 출력이 저하된다.

4.2 EAC 난방운전 특성

Fig. 8은 MGT 출력변화 시 Capstone사가 발표한 MGT배가스 출구온도와 실험에서 측정된 EAC의 입 구배가스 온도를 나타낸 그래프이다. 두 온도 사이 의 차이는 배가스 이동시의 방열로 인한 배관열손실 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 MGT출력변화시 EAC의 난방능력을 나 타낸 그래프이며 난방부하 계산식은⁽⁶⁾ 다음과 같다.

$$Q = \dot{m}_w (T_{ho} - T_{hi}) \quad (2)$$

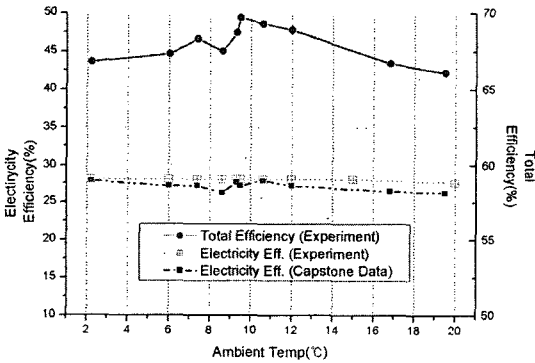


Fig. 7 Ambient temp vs. efficiency (at maximum load)

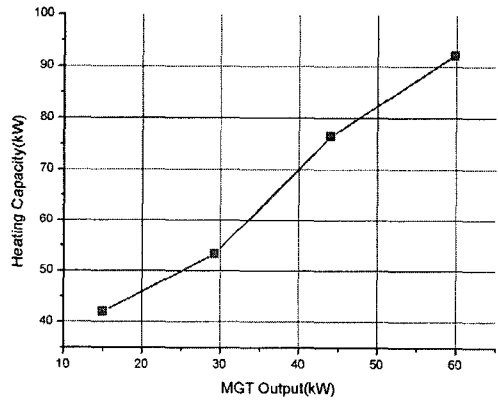


Fig. 9 MGT power vs. heating capacity

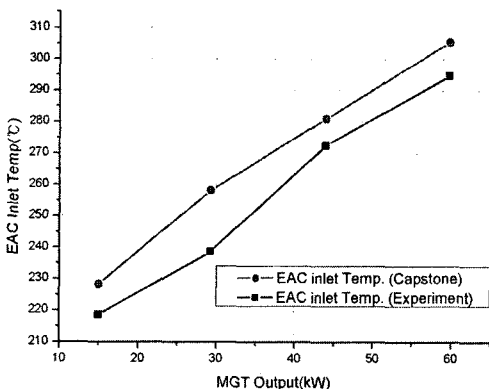


Fig. 8 MGT power vs. exhaust gas temp (at EAC inlet)

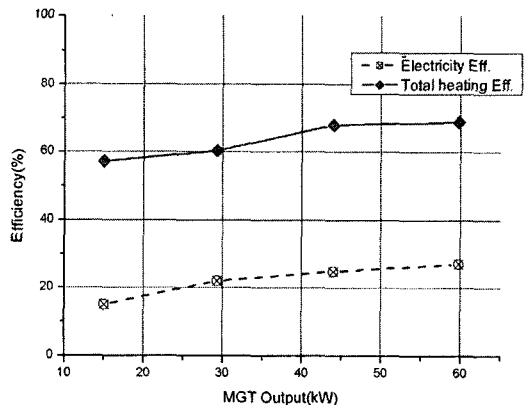


Fig. 10 MGT power vs. MGT's electric and heating system's total efficiency

배열부하가 증가할수록 난방능력이 선형적으로 증가하며 60 kW 출력시 92 kW의 난방능력을 나타내는데 설계출력인 96 kW에 비해 낮은 난방능력을 보이는 이유는 앞서 언급한 damper부의 열손실로 충분한 배가스 열량이 공급되지 못하기 때문이다.

Fig. 10은 MGT의 전기효율과 MGT-EAC 열병합시스템의 난방총효율을 나타낸 그래프이며 그 정의는 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\eta_t = \frac{W + Q_{hw}}{Q_f} \quad (3)$$

전기효율은 출력증가와 비례하여 증가하나 15 kW 이상 출력에서는 기율기가 감소하며 완만하게 증가하고 최고 25 kW의 출력시 총효율 65 % 정도가 되었다. 난방사이클에서는 흡수식냉온수기는 단순진공 온수보일러로 작동하며 배가스열량의 손실분으로 인해 비교적 저조한 총효율을 나타내었다.

4.3 MGT 운전 소음 측정 및 평가

MGT에서 발생하는 소음을 분석하고 소음저감 방안으로 적용된 방음패키지의 적용결과를 알아보기 위한 시험을 실시하였다. 소음 분석 방법은 MGT의 부하별(무부하, 5, 10, 15, 20, 25 kW)로 소음 크기 및 주파수 특성을 분석하였고, 흡음재를 설치하였을 때와 없을 때의 차이를 분석하였다. 마이크로 폰을 방음패키지 설치전후 동일한 위치에 부착하여 측정하였고 25 kW 출력시에도 앞서와 마찬가지로 흡음재 설치 전과 후의 큰 변화는 공기 흡입에 의한 유체소음 주파수가 크게 차이가 난다는 것이다. 소음도는 설치 전 78 dB(A), 설치 후 70 dB(A)로 8 dB(A)가 낮아졌다. MGT 소음 측정으로부터 소음은 turbine의 회전에 의해 발생하고 있음을 알 수 있다. 무부하에서 정상운전상태까지의 주파수 변화에서 알 수 있듯이 각 부하에서의 turbine 회전 주파수와 조화주파수 성분이 주요 소음원이다. 또한

Table 4 Result of noise measurement

	Before packaging (dB(A))	After packaging (dB(A))	Δ (dB(A))
No-load	65	62	3
15 kW	77	71	6
25 kW	78	70	8

MGT 전면부에서 공기 흡입에 의한 유체 소음도 발생하고 있음을 알 수 있다.

흡음재 설치 후 소음도는 설치 전에 비해 최대 8 dB(A)가 낮아졌음을 알 수 있다. 즉 흡음재 설치 효과가 있음을 알 수 있으며 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

5. 결 론

이 성능실험 수행 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 차세대 분산형 신전원으로 보급이 예상되는 마이크로 가스터빈의 소음 및 NOx 배출량에 있어서 우수한 환경성능을 나타내고 있다.

(2) MGT의 전기효율은 30 kW 이상 출력시 20 % 이상으로 유지되며 60 kW 출력시 27.1 %의 효율을 얻었다.

(3) MGT의 배열부하의 증가에 따라 EAC의 난방능력도 증가하고 60 kW 출력시 난방능력은 92.1 kW로 나타났다.

(4) MGT-EAC 열병합발전시스템의 난방운전 총효율은 MGT배열부하의 증가에 따라 선형적으로 증가하며 60 kW 출력시 68.9 %로 나타났다.

(5) MGT 소음 측정으로부터 소음은 터빈의 회전에 의해 발생하고 있음을 알 수 있다.

무부하에서 정상운전상태까지의 주파수 변화에서 알 수 있듯이 각 부하에서의 터빈회전 주파수와 조화주파수 성분이 주요 소음원이다. 또한 MGT 전면부에서 공기 흡입에 의한 유체 소음도 발생하고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Rhim, S. K., Hur, K. B., Sohn, W. S. and Choi, K. S., 2003, "Development of Grid Connection Power Technology for on Site Type Micro Gas Turbine", Report of KEPRI.

(2) Capstone Corporation, 2003 Micro Turbine Model C60 System Manual.

(3) Lee, Y. W., Sohn, W. S., Choi, K. S., Chae, J. M. and Han, J. O., 2003, "A Study on the

Absorption Chiller Operated by Exhaust Heat from Micro Gas Turbine” , Proceeding of the SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp. 742~747.

(4) Asano, H., Fujii, T., Wang, X., Origane, T., Katayama, M. and Inoue, U.. 2002, “An Exergy Analysis of LiBr–water Absorption Refrigerators” ,

Trans. of the JSRAE, Vol. 89, No. 4, pp. 301~312.

(5) Capstone Technical Reference 410005–001 Rev C 2004, “Capstone Model C60 Performance” .

(6) Hong, Y. S., 1995, “Fundamentals of Gas Turbine” , Chungmungak, pp. 10~13.