

마이크로 가스터빈 발전시스템 운전신뢰성평가

Evaluation of Operation Reliability for Micro Gas Turbine(MGT) Power Generation System

허 광 범* · 김 재 훈*

Kwang-beom Hur and Jae-hoon Kim

(2007년 3월 5일 접수 ; 2007년 4월 16일 심사완료)

Key Words : Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Grid-connection(계통연계), Performance Evaluation(성능평가), Noise Reduction(소음 저감), Sound Isolation Package(방음 패키지)

ABSTRACT

As Decentralized Generation(DG) becomes more reliable and economically feasible, it is expected that a higher application of DG units would be interconnected to the existing grids. This new market penetration of DG technologies is linked to a large number of factors like technologies costs and performances, interconnection issues, safety, market regulations, environmental issues or grid connection constrains. This paper describes the procedures and results for the mechanical, electrical, and environmental tests of MGT on actual grid-connection under Korean regulations. As one of the achievements, the simulation model of MGT was developed, so that it will be able to analyze or propose new distributed generation system using MGT. The field test was conducted in order to respond to a wide variety of needs for noise reduction and utilization and its performance was evaluated in consideration of its operational problems. The MGT is successfully supplying electricity to Korean grids with satisfying various regulations. The suggested strategy and experience for the evaluation of the distributed generation will be used for the introduction of other distributed generation technologies into the grid in the future.

1. 서 론

에너지자원이 부족하고 막대한 양의 에너지를 수입에 의존하는 국내현실에서 에너지의 효율적 이용은 국가 경쟁력 향상과 직결되는 중요한 문제이다. 이와 함께 환경친화적이고 전력 peak shaving 및 계절별 천연가스의 수급 불균형 해소 등 복합적인 에너지 문제 등을 동시에 해결할 수 있는 신전원의 기술개발이 시급한 과제이기도 하다. 이에 대한 방

안으로서, 다양한 수요 분산거점에 전천후 설치하여 전력 및 냉난방 열을 생산, 안정적으로 공급하는 방법으로서 분산형 마이크로 가스터빈(MGT) 열병합 발전시스템의 기술개발 및 보급활성화를 들 수 있으며, 특히 대규모 발전소 건설에 따른 부담과 송전/열수송 손실을 줄일 수 있는 안정적인 신전원이라 할 수 있다. 90년대 미국의 경제성장을 끌어온 정보통신산업의 발전이 다소 주춤하면서 2000년대 들어 에너지 기술의 시대가 오고 있다고 미국의 투자자들이 주장하고 있다. 즉 IT산업에서 ET산업으로의 전환을 예고하고 있는 것이다. 이는 에너지기술의 기업군으로 투자금이 급증하고 있는 가시적인 현상으로 증명되는데 여기의 에너지기술산업 중 마이크로 터빈 분야의 개발이 주목을 받고 있다⁽¹⁾. 이 논문

† 교신저자 : 정희원, 한국전력공사 전력연구원
E-mail : kbhur2374@yahoo.co.kr
Tel : (011) 852-5619, Fax : (042) 865-5304
* 충남대학교 기계설계공학과

서는 분산형 마이크로 가스터빈의 국내 적용성을 염두에 둔 최적화 적용을 위하여 친환경적인 요소인 흡음재 제작 설치를 통한 운전 소음 저감과 각종 성능평가 시험을 통하여 확보한 데이터를 토대로 마이크로 가스터빈의 운전신뢰성을 평가하고자 하였으며, 향후 차세대 환경친화형 분산전원으로 확대 적용이 예상됨을 파악할 수 있었다.

2. 분산형 MGT 발전기술 분석

2.1 분산형 MGT 발전 시스템의 해외 기술개발 동향

미국의 Capstone사가 1998년에 28 kW급 마이크로 터빈을 이용한 분산 발전시스템을 세계최초로 상용화 함으로서 새로운 시장을 연 이래, 60 kW급을 2002년에 상용화 하였고, 현재 출력 200 kW급 전기

효율 32~35%의 차세대 마이크로 가스터빈을 개발 중이며 2004년에 상용화 할 예정이다. Capstone사는 현재까지 3,000대의 마이크로 터빈을 전세계에 공급하였고 총 운전시간 3,134,325시간을 달성하였다⁽²⁾. Fig. 1은 미국 Capstone사의 30 kW급 MGT 코어 단면도이다.

일본은 환경친화적 계통연계 및 독립운전이 가능한 분산형 전원개발을 위하여 총 550대 이상의 마이크로 가스터빈을 일본내에 설치하여 실증실험 및 운전중이다. 전력회사, 가스회사 및 독립 전력사업자(IPP)에서 경쟁적으로 기술개발 및 사업화를 추진중이며 이는 정부의 각종규제완화에 의하여 더욱 힘을 얻고 있다. 특히, 동경전력은 1999년부터 마이크로 가스터빈 운전특성 평가연구를 수행중이며 분산형

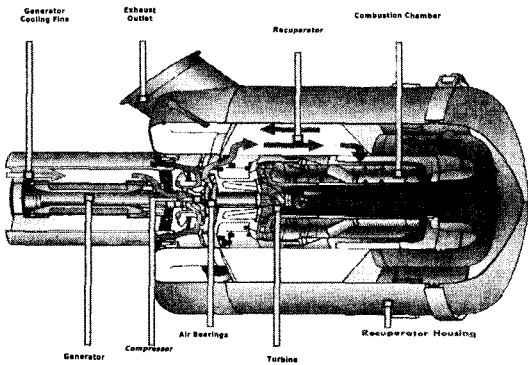


Fig. 1 30 kW MGT section view(Capstone, USA)

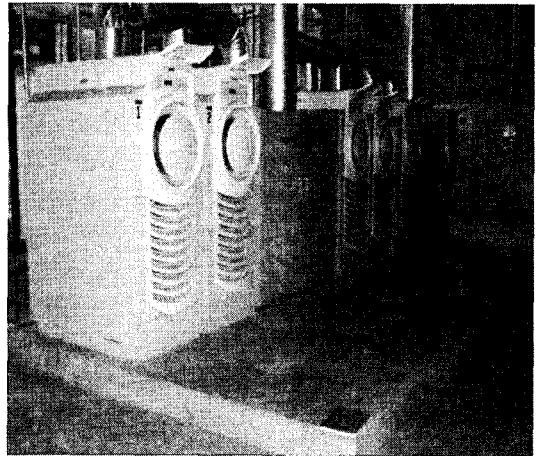


Fig. 2 MGT 6 units & hot water system(UCLA, CA)

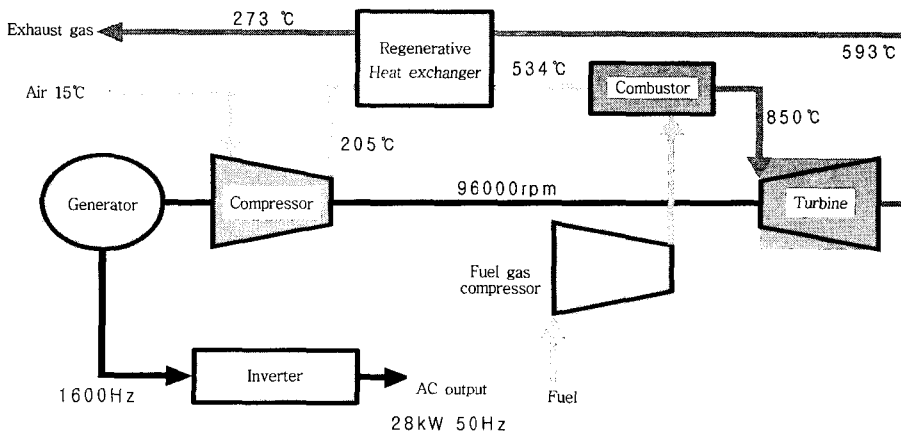


Fig. 3 30 kW MGT heat balance

전원공급 자회사로 마이에너지를 설립('00)하여 본격적인 on-site 자가발전사업을 개시하였다⁽³⁾.

Fig. 2는 미국 캘리포니아의 대학교에서 운영중인 마이크로 터빈 열병합 발전시스템의 사진이며, 수요 관리 측면에서 운영되고 있으며 이용률이 아주 높은 상태이다.

2.2. 분산형 전원으로서 마이크로 가스터빈 (MGT) 기술의 특성

Fig. 3은 미국 Capstone사의 30 kW MGT의 핵심 부품과 각 부분별 열평형도를 보여주고 있다.

MGT의 혁명적인 기술은 크게 세가지로 나누어 볼 수 있다.

(1) 단일축으로 된 압축기와 터빈사이 공기베어링이 채용되어 rotor 자체회전으로 공기막이 형성,

浮上되어 96,000 rpm의 초고속 회전한다. 따라서 기존의 oil lubrication 계통이 생략되기 때문에 설비가 간단해지고 주기적인 정비가 불필요하며 운전의 신뢰성도 함께 높아지는 것이다.

(2) 분당 약 10만 회전하는 2~4극 영구자석발전기에서 발생하는 고주파의 교류전력을 정류기를 통해 일단 직류로 변환하고 인버터를 통해 최종적으로 50~60 Hz의 교류를 발생시키기 때문에 발전기를 주파수에 맞춘 특정회전수를 실현하기 위한 감속기가 불필요하여 설비가 매우 간단해지고 소형화 할 수 있다.

(3) 재생사이클을 채택하여 터빈 배기가스와 연소기에 들어가기전 압축공기를 열교환 시켜 기존 가스터빈의 열효율 15%(저위발열량 기준)를 획기적으로 증가시켜 약 30%에 육박하는 고효율 가스터빈 발전이 가능하다.

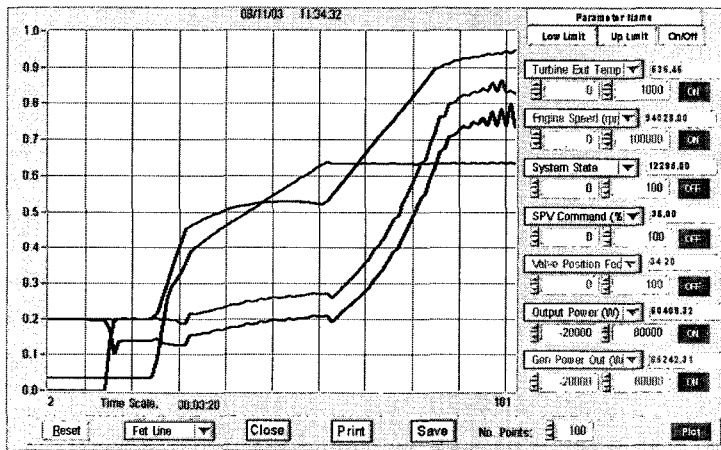


Fig. 4(a) 60 kW MGT start-up curve(gid-connection, fuel: NG)

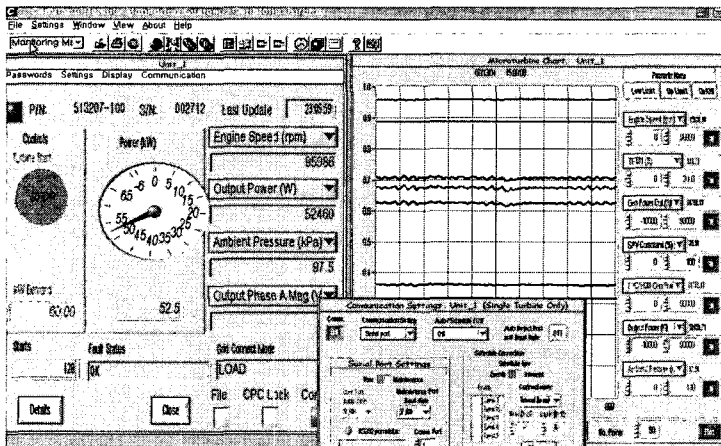


Fig. 4(b) 60 kW MGT monitoring screen

3. 분산형 마이크로 가스터빈 운전특성 분석

3.1 운전특성 분석

Battery pack이 내장되어 단독운전(stand-alone)이 가능하며 engine control module, load control module, battery control module을 통하여 기동, 정지 및 전부하 운전범위내 자동운전이 가능하다⁽²⁾. 또한, remote control system을 도입하여 원격제어 및 실시간 운전감시가 가능하며 특히, 가스터빈 회전수, 배기가스 온도, SPV(smart proportional valve)의 개도등 다양한 운전정보를 취득하여 최적의 운전기법을 확보할 수 있다.

Fig. 4(a)는 60 kW MGT의 냉간기동 특성을 보여 주고 있으며, Fig. 4(b)는 운전제어 컴퓨터의 제어 화면으로써 운전 조작이 아주 용이함을 알 수 있다.

3.2 60 kW급 마이크로 가스터빈 설치 및 계통 연계 운전

MGT설치에 있어 가장 중요한 고려사항은 신선한 공기의 원활한 유입과 배기가스의 배출이며, 이는 대기온도의 MGT성능에 미치기 때문이다. 마이크로 가스터빈 제작사인 미국 Capstone사에서 제시한 설치 권장 조건⁽²⁾중 실외설치를 만족시켰고 동시에 충분한 주변공간의 확보로 MGT 유지보수 시 필요한

작업공간도 확보할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 국내 최초로 계통연계 운전시스템을 설치, 준공한 60 kW MGT(미국 Capstone사 제작)의 현장 사진이다.



Fig. 5 60 kW MGT grid-connection model(KEPCO KEPRI, Daejeon)

Table 1 60 kW-MGT performance specification⁽²⁾

Items	Performance specification
Nominal power	60.0(+0/-2)kW
Thermal efficiency	28.0(+/-2) % LHV
Fuel flow rate(LHV)	184,223.8 kcal/hr
Exhaust gas temperature	305°C
Exhaust mass flow rate	0.48 kg/s

(Condition : ISO)

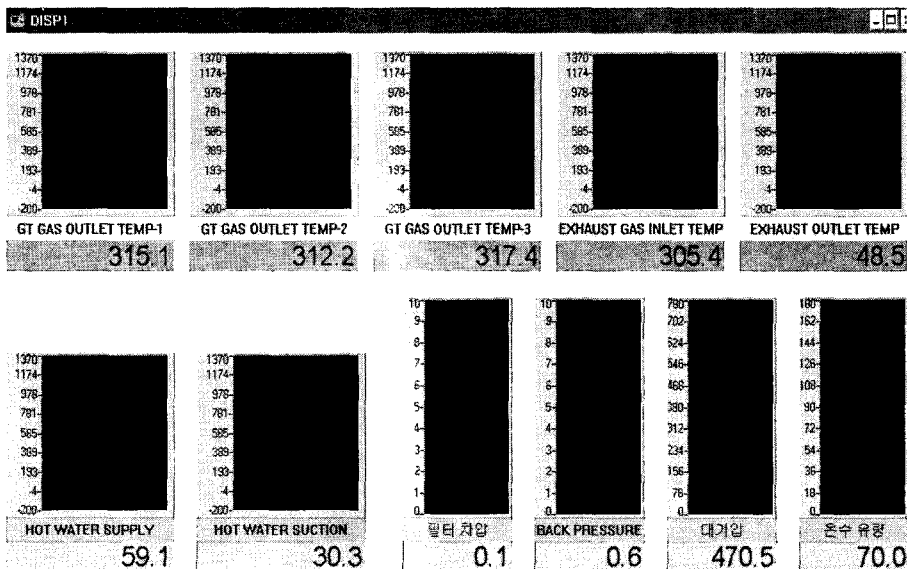


Fig. 6 60 kW MGT performance test screen(temp : 22.5°C, output : 54.8 kW)

3.3 성능시험 및 평가

60 kW급 마이크로 가스터빈의 미국 Capstone사에서 제시한 천연가스 연료사용 시 성능사양은 Table 1과 같다⁽²⁾.

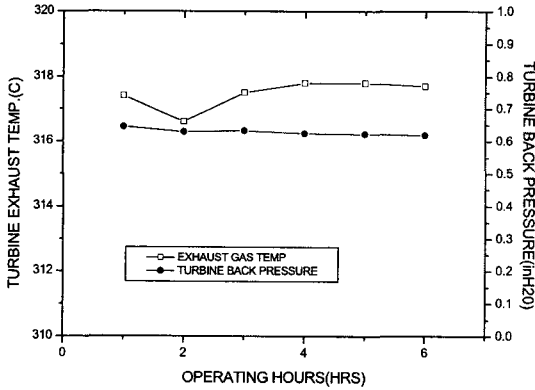


Fig. 7 MGT TET & back pressure(temp : 22.5°C, output : 54.8 kW)

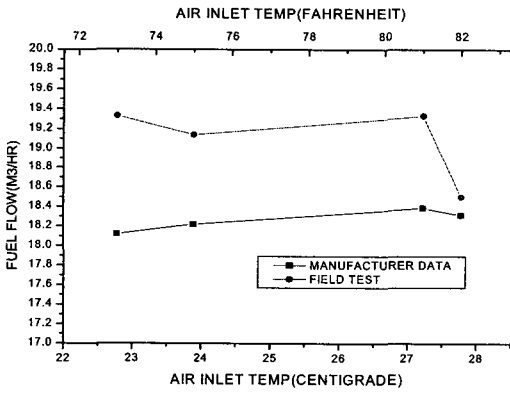


Fig. 8 MGT fuel flow data-1(output : 54.8~54.1 kW)

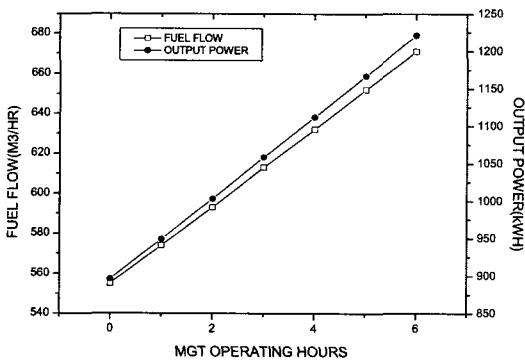


Fig. 9 MGT fuel flow data-2(field test output : 54.8 ~ 54.1 kW)

Fig. 6에서는 마이크로 가스터빈의 최적의 성능평가를 위하여 기본 운전화면에 제시된 데이터 이외에 추가적인 온도, 압력, 유량 계측기를 특설하여 실시간 데이터 취득이 가능하도록 구축된 운전감시 화면을 보여주고 있다.

Figs. 7~9의 그래프는 60 kW급 마이크로 가스터빈의 연속운전을 통하여 취득한 성능평가와 관련된 인자인 배기가스 온도(turbine exhaust temperature, TET), 터빈 배압(back pressure), 연료유량을 나타내고 있으며 측정된 데이터는 양호함을 나타내고 있다.

3.4 계통연계 운전 특성 시험

마이크로 가스터빈의 계통연계 운전 시 전력품질 감시를 위하여 Fig. 10과 같은 운전감시 시스템을 운영중에 있으며, 운전중 실시간 전력품질 데이터를 취득 분석 할 수 있다. 미국에서도 실제 적용을 위한 계통연계 시험 및 절차가 개발되었다^(3,4).

(1) 주파수

산자부고시에 의한 주파수 정격운전범위는 60 ± 0.2 Hz 이며 실제운전은 60 ± 0.1 Hz으로 운전하고 있다. 발전기 기동 시, 출력을 절반으로 낮출 경우 및 MGT를 정지시킬 경우 모두 주파수의 큰 변화가 없게 나타났다. 측정시간 동안의 주파수 범위는 최저 59.92 Hz 최고 60.07 Hz로 주파수 범위를 벗어 나지 않고 있어 상태는 매우 양호하다.

(2) 플리커(Flicker)

IEC 61000-3-3, 7, 11에서 규정하고 있는 저전압 계통의 플리커 계수의 한계치는 단시간 플리커 ($P_{st}=10$ 분) 1 이하, 장시간 플리커($P_{lt}=2$ 시간) 0.65 이하로 하고 있다⁽⁵⁾.

기동 당시 P_{st} 는 최대 0.57을 지시하였고 퇴근시간인 18시 전후에 0.58을 지시하였으며 출력강하 및 정지 시에는 영향을 거의 미치지 않았다. 즉, 저압계통에 연결된 MGT의 P_{st} 는 양호한 값을 나타내었다.

또한, 장기 플리커 P_{lt} 는 초기 기동 시 0.34의 값을 나타내었고 그 이후 0.33의 값을 나타내어 MGT 운전에 대한 변화가 거의 없어 양호하다.

(3) 고조파

국내 한전의 전압고조파(THDv) 기준은 66 kV 이하

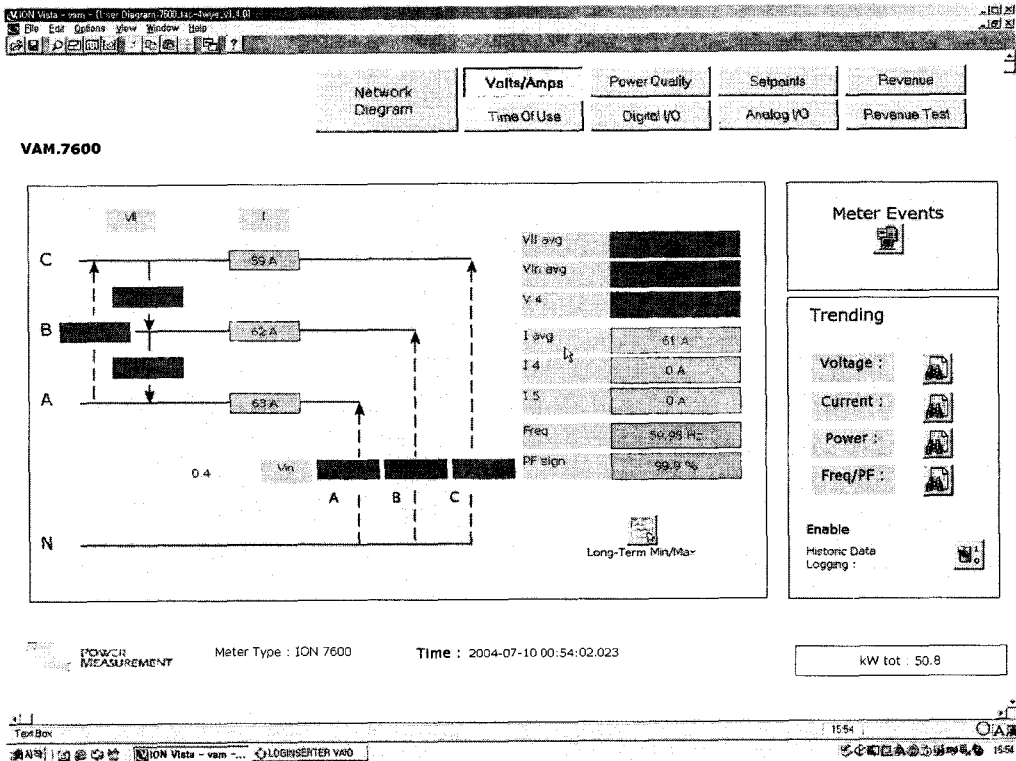


Fig. 10 Power quality monitoring system

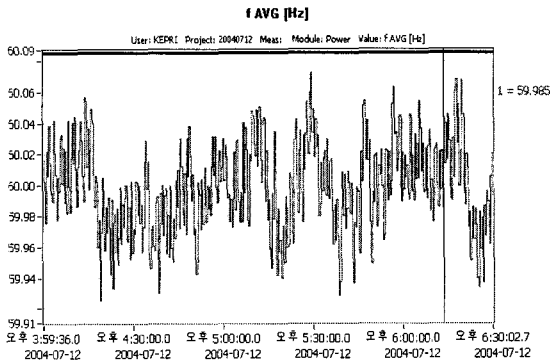


Fig. 11 MGT frequency analysis

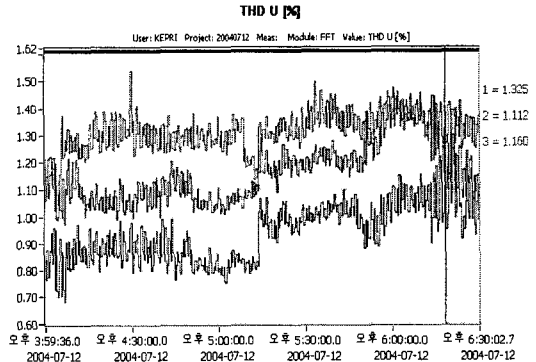


Fig. 12 Harmonic distortion analysis

에서 최대 3%를 한계로 하고 있다. 계통에 연계된 MGT에서의 THDv는 최대 1.5%, 최소 0.68%의 값을 나타내었으며 이는 매우 양호한 상태를 알 수 있다.

주파수, 플리커(Pst, Plt) 및 전압고조파의 품질을 측정한 결과 전체적으로 매우 양호한 결과 값을 얻었다.

3.5 30 kW-MGT 운전 소음 측정 및 방음패키지 제작

MGT에서 발생하는 소음을 분석하고 소음저감 방안으로 적용된 방음패키지의 적용결과를 알아보기 위한 시험을 실시하였다.

Fig. 13와 Table 2는 이 실험에서의 측정방법과 장치 셋업을 그림과 표로 나타내었다.

설비나 장치의 소음을 평가하기 위해서는 음향파워(sound power)를 측정해야 한다. 흔히 말하는 소음 측정(sound pressure)은 음원으로부터의 거리 및 음파가 존재하는 음향환경에 의해 좌우되는 반

면, 음향파워는 주위환경에 대해 거의 무관하며 음원의 시끄러움을 나타내는 고유한 표현수단이다. 음향파워를 측정하기 위해서는 무향실이나, 공간이 넓고 주위 소음이 없는 장소에서 실시해야 하는 것이 원칙이나, 현실적으로 이러한 여건을 조성하는 것이 어렵기 때문에, 이번 소음 시험에서는 음압 측정(sound pressure)으로 대신 하였다.

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. 마이크로폰을 방음패키지 설치전후 동일

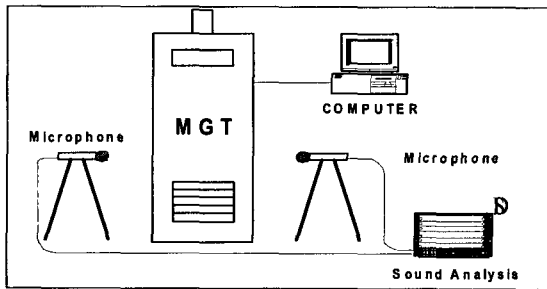


Fig. 13 MGT noise measurement set-up

Table 2 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

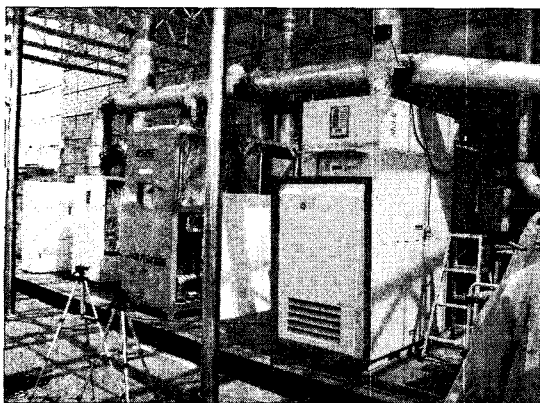


Fig. 14 Sound isolation package installation(NST, 50t)

한 위치에 부착하여 측정하였고 Fig. 14는 sound isolation package의 설치사진을 보여주고 있다.

Figs. 15~16에서는 25 kW 출력 시 흡음재 설치 전과 후의 큰 변화는 공기 흡입에 의한 유체소음 주파수가 크게 차이가 난다는 사실과 소음도는 설치 전 78 dB(A), 설치 후 70 dB(A)로 8 dB(A)가 낮아짐을 보여주고 있다.

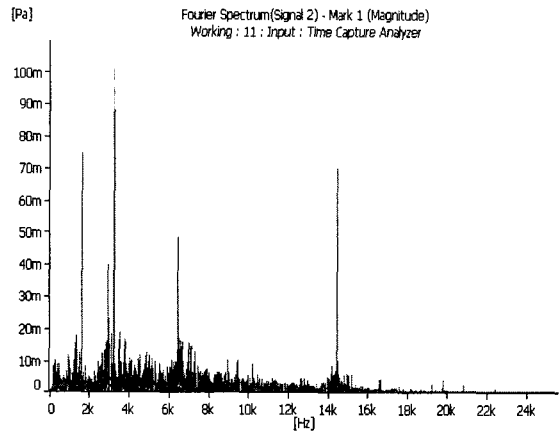


Fig. 15 25kW-output frequency analysis(red: before package, green: after package)

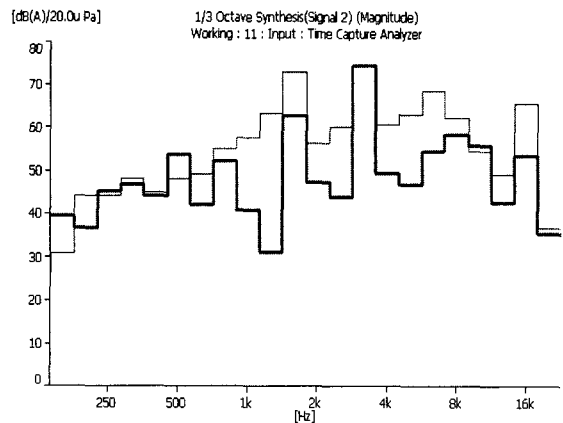


Fig. 16 25 kW-output noise analysis (red: before package, green: after package)

Table 3 Result of noise measurement

Power output	Before (dB(A))	After (dB(A))	Δ (dB(A))
0	65	62	3
15 kW	77	71	6
25 kW	78	70	8

3.6 운전소음 측정 및 방음패키지 적용

MGT의 소음 분석 및 흡음재 설치 전후의 소음도 측정결과는 다음과 같다.

(가) 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 MGT 전면부에서 공기 흡입에 의한 유체 소음도 발생하고 있음을 알 수 있다⁽⁶⁾.

(나) 흡음재 설치 전과 후의 소음을 비교해 보면, 흡음재 설치 전에는 공기흡입에 의한 유체소음이 전 주파수에 걸쳐 분포하고 있는 반면, 설치 후에는 주로 turbine 회전에 의한 소음이 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

(다) 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 3에 정리하였다.

4. 결 론

현재 미국 및 일본 등 선진국에서 활발히 기술개발과 적용이 이루어지고 있는 마이크로 가스터빈 발전기술은 최소 단위면적을 통하여 친환경적인 차세대 고품질 전원으로 자리매김하고 있으며 향후 국내에도 적용이 증가하리라 예상한다. 이 연구논문에서는 이러한 마이크로 가스터빈의 성능시험을 통하여 국내 적용성을 평가하였다. 마이크로 가스터빈 발전 성능을 효율적으로 평가함으로써 운전조작성의 편리함과 신뢰성을 확보하는 데 큰 기여를 할 수 있었으며 중요한 평가항목은 아래와 같다.

- 기본성능(정격·부분부하효율, 기동 정지특성)
- 운전 조작성 평가(원격조작 및 계측)

- 전력품질 특성평가(고조파, 플리커, 주파수 등)
- 마이크로 가스터빈 계통연계 운전시험 수행
- 소음 및 배출가스 등 환경특성 평가

특히, 마이크로 가스터빈이 차세대 분산형 신전원으로 확대 보급이 예상되는 가운데, 운전소음 저감용 방음패키지를 제작하여 적용함으로써 도심에 적용 가능한 환경친화성을 확보하였으며, 향후 국가적 차원의 유효에너지 이용률 증대를 위하여 기여하는 바가 크다고 생각한다.

참 고 문 헌

- (1) Kashiwagi Takao, Hashimoto Naoto, Kanaya Toshinobu., 2001, Micro Power Revolution, Vol. 2, pp. 107~115.
- (2) Capstone Corporation, 2003, "MicroTurbine Model C60 System Manual", Vol. 3 pp. 57~98.
- (3) Rhim, S. K., Hur, K. B., Sohn, W. S., and Choi, K. S., 2003, "Development of Grid Connection Power Technology for on Site Type MGT", Report of KEPRI., pp. 128~168.
- (4) IEEE 519, 2002, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard Board. 1992[7] IEC 61000-3-3 Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-voltage Supply Systems, pp. 88~98.
- (5) IEC 61000-3-5, 1994, Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-voltage Power Supply Systems, pp. 122~154.
- (6) Hur, K.-B. and Kim, J.-H. 2006, "Study on the Performance Characteristics of MGT Co-generation System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 16 No. 9 pp. 964~970.