

## 6σ(sigma)기법을 활용한 대형건물의

### 열병합발전시스템 효율 개선

#### 요 약

효과적인 에너지활용을 위하여 초대형빌딩 내에 설치한 열병합발전시스템은 최근 LNG 가격의 급격한 상승으로 인한 운전비용 등의 증가로 투자비회수기간이 길어지는 등의 경제적인 어려움에 직면해 있다. 따라서 본 프로젝트에서는 절기별 공기비중 변동 등에 따른 공기인입량 조정 등을 통하여 발전기의 발전효율 개선을 이루었으며, 폐열회수 흡수식 냉동기와 별도 열원에 의해 작동되는 냉온수기의 Load Balance 조정 등에 따라 폐열회수 장치의 폐열회수율을 향상시키는 등 6 시그마의 다양한 분석기법을 응용하여 열병합 발전시스템의 전반적인 효율 향상이 가능하도록 개선하였다.

#### 1. 서론

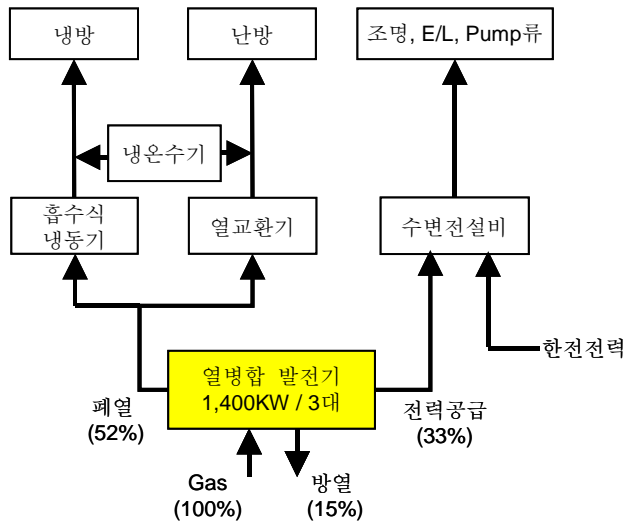
서울에 위치한 초대형빌딩(연 건평 141,550 m<sup>2</sup>)내에 설치되어 있는 열병합발전설비는 LNG 를 연료로 사용하는 엔진 Type 발전기로서 발전기 출력은 1400Kw, 전압은 3,300V, 주파수는 60Hz 이며, 상시 2 대 운전을 기본 조건으로 하고, 냉방시는 발전기 폐열을 이용하여 흡수식냉동기 310RT × 2 대를 가동하여 냉방 및 전산실용 항온항습 설비를 가동하고, 난방시는 폐열회수용 열교환기에 의해 난방을 실현토록 설계되었으며, 본 시스템의 폐열회수 조건은 Input Energy 100% 기준 전력 33%, 폐열 재활용 52%로써 85%의 Energy 회수가 가능한 System 으로 설계되었다.

그러나 초기 설계단계에서의 경제성 추정시 업무용 기준 가스 요금은 382.62 원/N m<sup>3</sup>였으나, 준공 후 운전시점 기준 가스요금은 499.84 원/N m<sup>3</sup>으로 30.6% 인상되었으며 상대적으로 전력요금은 낮은 수준으로 인상되어 한전단가는 Kw/h 당 80.8 원→88.6 원(업무용 을 13,000Kw 수전기준)으로 9.7% 인상된 것으로 추정되었으나, 자체 발전단가는 77.4 원→109.2 원으로 41.1% 상승되었으며, 아울러 실제 운전시에는 당초 설계기준에 비해 발전 효율 및 폐열회수율 등이 낮게 나타나 운전비용이 증가하는 등의 문제로 인하여, 투자비 회수기간은 설계당시 예상 시 5.4 년에서 운전시점에서는 7.9 년으로 추정되는 등 경제성 측면에서 비효율적인 면이 나타나고 있어, 이를 개선키 위해 통계적 품질개선기법인 6 시그마방법론에 의해 열병합발전설비의 효율을 개선시킨 사례에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 대형빌딩의 열병합발전설비 개요

Fig.1 은 본 빌딩의 열병합시스템 구성도이다. 발전기는 미국 Waukesha 제품으로 Model 명은 VHP9500 GL 로 3 대가 설치되어 있으며 이중 상시 운전은 2 대 가동 조건으로 설정되어 있다. Table.1 에는 열병합 설비의 내역을 나타냈으며, Table.2 는 발전기의 사양을 표기 하였다. 한편 본 열병합 시스템의 Heat Balance 는 Table.3 에 나타낸 바와 같다. Table.3 에서 나타낸 바와 같이 본 열병합 발전설비는 Input Energy 100% 기준 전력 33%, 폐열 재활용 52%로써 85%의 Energy 회수가 가능한 System 으로 설계되었다.

<Fig.1> 열병합 시스템 구성도



<Table.1> 열병합 설비 내역

EQUIPMENT SCHEDULE				
EQUIPMENT		Q'y	Unit Capa	Mark
Cogeneration		3	1,400 Kw	
Absorption C/H		3	1,200 USRT	C/H
Turbo Chiller		1	310 USRT	T.C
Absorption Chiller		2	310 USRT	A.C
Cooling Tower		7	1,000 USRT	
Heat Exch.	Heating	2	1,480 Mcal/h	HX-1
	Aux. Radiat'g	2	2,220 Mcal/h	HX-2
	Preht'g	2	744 Mcal/h	HX-4
	Aux. Radiat'g	2	607.5Mcal/h	HX-5
	Aux. Heating	1	1,500 Mcal/h	HX-6
	Coolant	3	833 Mcal/h	HX-7

	Exh.Gas	3	740 Mcal/h	HX-8
--	---------	---	------------	------

한편 발전효율은 열병합 발전기에서 사용되는 인입가스량 vs 전력생산량을 열량으로 환산한 비율로써 본 논문에서는 y1 으로 표기하며 수식으로는 다음과 같이 표기한다.

$$\text{발전 효율} : y1 = (\text{전력사용량} \times 860 \text{ Kcal}) / (\text{가스소모량} \times 9,510\text{Kcal})$$

또한 폐열회수율은 열병합 발전기에서 사용되는 가스의 총열량중 이를 JW(Jacket Water) 및 IW (Intercooler Water)에 의해 회수하여 재활용하는 열량과의 비로써 y2 로 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{폐열 회수율} : y2 &= \frac{JW\text{회수 열량 (Kcal)} + IW\text{회수 열량 (Kcal)}}{\text{가스소모 열량 (Kcal)}} \\ &= \frac{\text{폐열 회수 열량 (Kcal)}}{\text{가스소모 열량 (Kcal)}} \end{aligned}$$

Generator Spec	
Description	Data
Electric Prime Power	1,400 Kw
Voltage	3,300 V
Frequency	60 Hz
Fuel (L.H.V)	L.N.G(9,900KCAL/N m³)

### 3. 열병합 발전 시스템 효율개선방안

열병합발전시스템에 영향을 미치는 주요인자로는 각호기별로 발전효율이 다르게 나타나고 있었으며, 특히 2 호기의

발전효율이 낮았는데 발전효율은 이는 발전기 호기별로 공기 인입량이 다르기 때문이다. 하절기에는 외기온도가 상승되어 공기의 부피가 커지므로 특히 하절기의 발전효율이 나쁘게 나타나고 있었다.

< Table.2> 발전기 사양

<Table 3> 열병합시스템 Heat Balance

Fuel Consumption		361.7 N m <sup>3</sup> /h
Circulation	Flow Rate	185 m <sup>3</sup> /h
Water	Temp.	85 → 93°C

HEAT BALANCE			
Input Energy			3581 Mcal/H
Generator Output			1400 Kw
Heat Rejection	Coolant	WJ	833 Mcal/H
		I.C/LC	406 Mcal/H
	Exhaust		969 Mcal/H
	Radiation		169 Mcal/H
	TOTAL		2377Mcal/H
Heat Rejection	Coolant	WJ	833 Mcal/H
		I.C/LC	406 Mcal/H
	Exhaust		651 Mcal/H
	TOTAL		1890Mcal/H
Efficiency	Electricity		33.60%
	Heat		52.80%
	TOTAL		86.40%

### 3.1 발전효율 개선

#### 3.1.1 연소 공기 흡입량에 따른 발전효율 향상

동절기인 2000년 12월~2001년 2월까지 각 호기별 발전효율을 분석한 결과 Fig.2 예서와 같이 각 호기별로 발전효율의 차이가 있음을 Box Plot Graph를 통해 확인하였고 이를 ANOVA(Analysis Of Variance:분산분석)를 통해 확인한 결과 통계적으로 차이가 있음이 입증되었다.

One-way ANOVA: 11, 22, 33

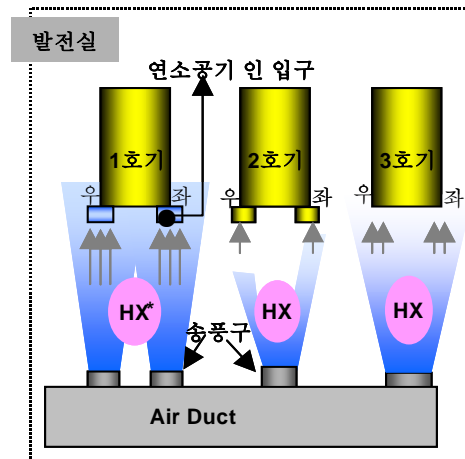
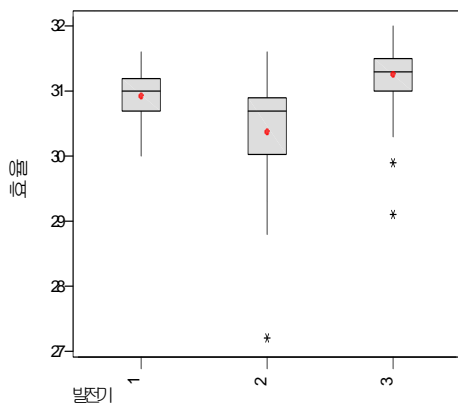
P-Value = 0.000

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----
11	145	0.30895	0.00429	(----*----)
22	103	0.30704	0.00867	(-----*-----)
33	128	0.31137	0.00496	(----*----)
Pooled StDev = 0.00600				-----+-----+-----+-----
				0.3060    0.3080    0.3100    0.3120

이의 원인으로서는 Fig.3 및 Table.4 에 나타난 바와 같이 각 호기별로 연소 공기 인입량에 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 2 호기 연소공기 송풍구 Duct 개선을 통하여 Table 5.에서와 같이 연소공기량을 개선시켰으며, 이에 따라 발전효율이 나뉘던 2 호기의 발전효율이 Fig.4 에서와 같이 개선되었음을 확인하였다.

<Fig.2> 호기별 발전효율 Box Plot    <Fig.3> LG 강남타워 발전기 Layout 및 Air 인입현황



<Table.4> 호기별 인입공기량 비교

(단위 : m<sup>3</sup>)

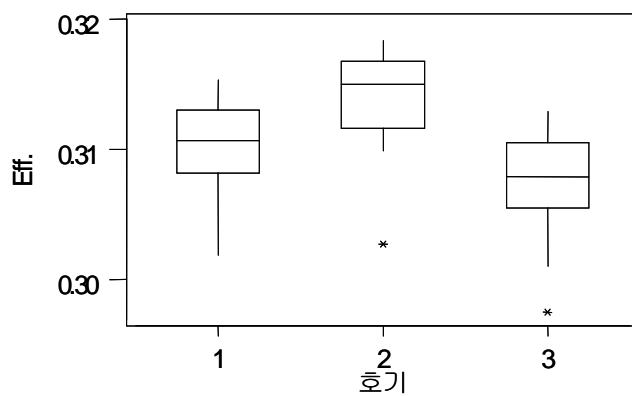
	1 호기	2 호기	3 호기
개선 전	13,590	12,485	12,942
개선 후	13,590	13,305	13,250
비 고		6.6%증가	2.4%증가

<Table.5> 개선 전/후 인입공기량 비교

(단위 : m<sup>3</sup>)

	1 호기	2 호기	3 호기
좌	6,932	6,234	6,423
우	6,658	6,251	6,519
계	13,590	12,485	12,942

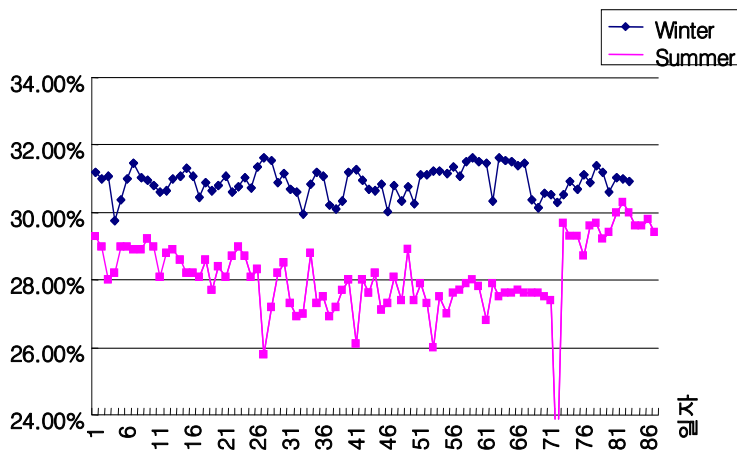
<Fig.4> 개선후 호기별 발전효율 비교



### 3.1.2 하절기 발전효율 개선

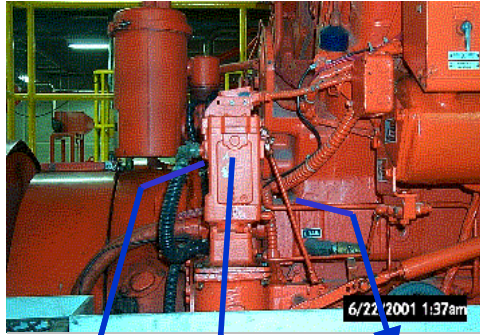
Fig.5 는 2000. 11~2001. 2 월까지의 동절기와 2000 년 6~9 월까지 하절기 발전효율을 분석한 결과로써, 하절기의 발전효율이 동절기에 비해 낮게 나타나고 있는데 이에 대한 원인으로서는 발전기의 저부하 운전 및 외기온도 상승에 따라 공기부피가 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 이중 발전기 저부하 운전은 연료 공급용 Actuator 의 Limit Switch 의 동작 Point 를 제작사에서 상당히 민감하게 설정하였기 때문에 공기 부피증가 등으로 공기 vs 연료 비율등의 연소조건이 다소라도 흔들릴 경우 바로 발전기가 Trip 되도록 설정되어 있었다. 따라서 이를 Fig.6 에서와 같이 외기온도가 상승되어 연료 vs 공기의 비율이 다소 유동성이 있더라도 정격운전이 가능토록 조절하였고, 이에 따라 Fig.7 에서와 같이 2000 년 하절기에 비해 2001 년도 하절기의 발전효율이 현저히 개선되었음을 확인하였다.

<Fig.5> 동/하절기 발전 효율 비교

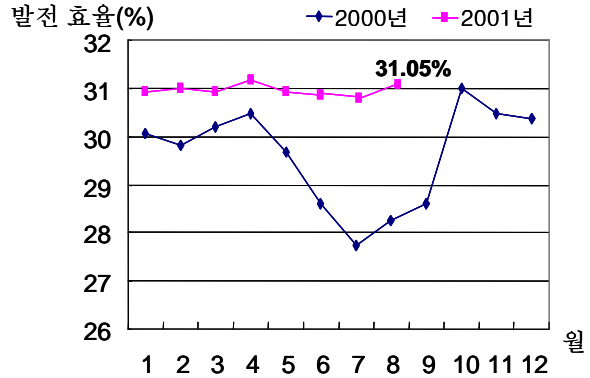


<Fig.6> Limit Switch 조절 사진

<Fig.7> 월별 발전 효율 비교



Limit Switch (뒷면에 있음) Actuator (상하운동) Actuator 구동 Arm (Limit S/W를 작동시킴)

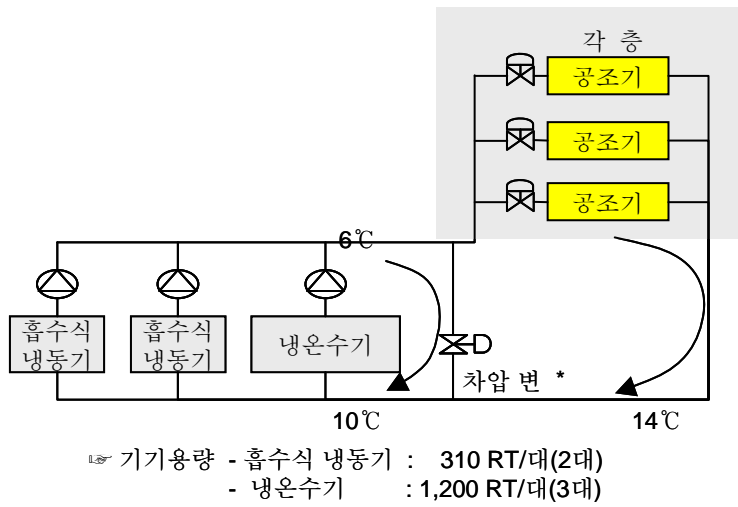


### 3.2 폐열회수율 개선

#### 3.2.1 냉동기/냉온수기 Load Balance 조절

Fig.8 은 본 시스템이 적용된 빌딩의 냉방시스템 구성도이다. 흡수식냉동기(Absorption Chiller)는 발전기 엔진의 냉각수(Jacket Water:93°C)를 열원으로 6°C의 냉수를 생산하여 빌딩의 냉방에 활용하며 용량은 310RT 이다. 냉온수기(Chiller Heater)는 LNG 를 연료로 열원을 공급받아 역시 6°C의 냉수를 생산하여 냉방에 활용토록 구성되어 있으며 용량은 1200RT 로 3 대가 설치되어 있다. 흡수식 냉동기 2 대 가동시의 용량인 620RT 보다 냉방부하 용량이 작은 경우는 흡수식 냉동기만으로 냉방을 실시하지만, 흡수식 냉동기의 용량보다 냉방부하 용량이 커질 경우에는 추가로 냉온수기를 가동하여 냉방을 실시하는데, 이 경우 흡수식 냉동기의 용량에 비해 냉온수기의 용량이 4 배 가까이 크기 때문에 Fig.9 에서와 같이 냉온수기 가동초기에 흡수식 냉동기의  $\Delta t$  가 적어지므로 결과적으로 흡수식 냉동기의 일량이 줄어들게 되고 이를 폐열이 아닌 별도의 LNG 를 열원으로 하는 냉동기가 커버하게 되므로 폐열회수율이 떨어지는 등의 비효율 요인이었다. 이를 개선키 위해 부하분석결과 냉방에 지장이 없는 냉수온도의 범위는 9°C 미만이라는 것을 확인하였다. 따라서 폐열회수 흡수식 냉동기는 냉수의 생성온도를 설계기준인 6°C로 설정하고 냉온수기의 경우 냉수 생성온도를 6°C에서 8°C로 조정한 결과 Fig.10 에서와 같이 냉온수기와 흡수식 냉동기의  $\Delta t$  가 비슷하게 나타나 2001 년 8 월의 평균 폐열회수율은 과거에 비해 7% 향상된 42.8%를 나타내었다.

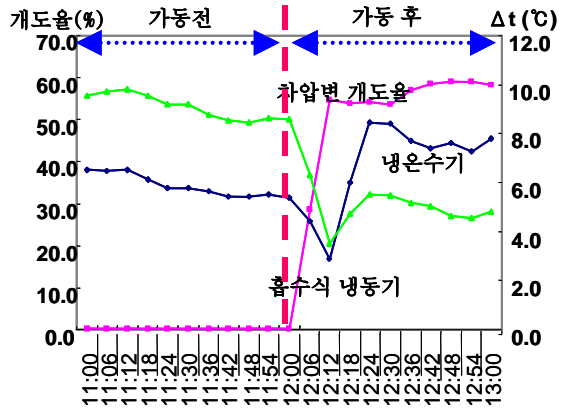
<Fig.8> 냉난방 시스템 구성도



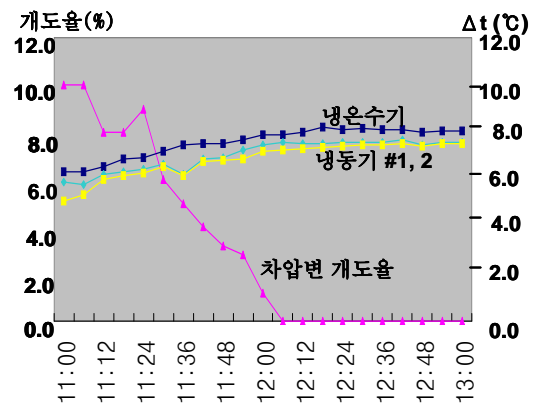
### 3.2.2 기타 폐열회수율 개선활동

그 밖에도 흡수식 냉동기의 폐열 회수율을 향상시키기 위해 흡수액 희액 댐퍼 재 Setting, Main 차압변 조정, 옥틸 알코올 주입, 냉매 추출 및 Balancing 작업등을 통하여 Fig.11 에서와 같이 흡수식 냉동기의  $\Delta T$  가 상향 안정화 되었음을 확인하였다.

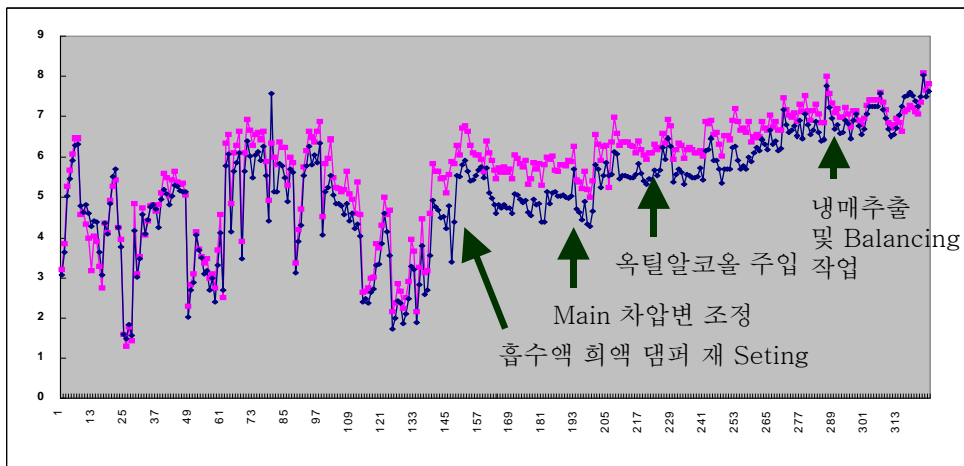
<Fig.9> 냉동기 가동전후 냉동기/냉온수기 상태비교



<Fig.10> 냉온수기 냉수 생성온도 조정 후 비교



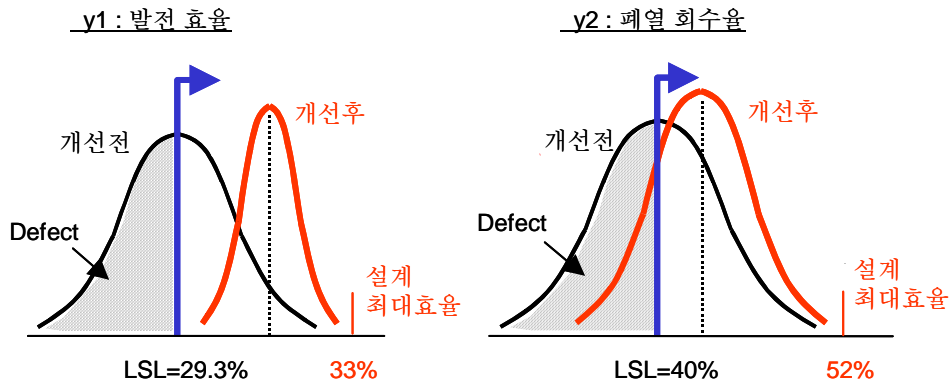
<Fig.11> 흡수식 냉동기 Δt 변화추이



#### 4. 결론 및 향후 과제

앞에서와 같은 개선활동으로 발전효율 및 폐열회수율에 대한 산포가 Fig.12 에서와 같이 개선되었음을 알 수 있었고 이를  $\sigma$ (Sigma)수준으로 환산해보면 y1(발전효율)은 개선 전 1.51 $\sigma$ 에서 개선 후 5.9 $\sigma$ 로 현저히 개선되었으며, y2(폐열회수율)은 개선 전 1.58 $\sigma$ 에서 개선 후 2.99 $\sigma$ 로 개선되었다.

<Fig.12> 열병합 발전 개선 전/후 산포 비교



그러나 본문에서 밝힌 바와 같은 효율 개선활동도 중요하지만 향후에 Gas 요금 등의 추가 상승시는 Operation Cost의 증가 등으로 인하여 자체 발전단가가 한전단가에 비해 높아지는 등의 현상으로 인해 자체 열병합발전이 장애가 있으리라 예상된다.

또한 최근 계획중인 대형건물에서도 열병합발전설비 도입에 대하여 많은 검토가 이루어 지고 있으나, 경제성 측면으로 인해 다소 주춤하고 있는 실정이다.

따라서 향후 국가적인 에너지 수급 측면, 특히 하절기 최대전력량 억제 등의 측면에서 효율적이라고 판단되는 빌딩용 열병합 발전설비를 더욱 많이 도입할 필요가 있으며, 이를 위해서는 현행의 Gas 요금체계 등을 대폭 개선하여 조기에 투자비 회수 등의 경제성이 확보되도록 하여야 하며, 이 밖에도 세제 혜택 등의 정책적인 배려가 꼭 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 이승복, 한국 FM 학회국제심포지엄학술지, 건물에너지관리 프로세스에 관한 연구, 1998
2. 김광우, 한국 FM 학회학술지, 건물 에너지 관리, 1997
3. Waukesha Engine Div., Waukesha Gas Engine/Generation Opr'n Manual, 1997
4. Woodward Governor, Governor Operation Manual, 1991

5. Honeywell-German, Care Program Manual, 1998
6. 박정로, 초고층건물 공기수배관계 냉수감압시스템 압력제어 설계에 관한 연구, 1997
7. 창조건축, LG K/T Construction Document vol.Ⅲ-B Mechanical Calculation, 1996
- 8.한일 MEC, LG 강남타워 신축공사 기계설비 설명서, 1999