

LNG 냉열을 이용한 복합발전 플랜트의 성능향상에 관한 연구(I) - 복합화력 발전플랜트의 설계점 및 탈설계점 모델링 -

오세기 · 김병일
아주대학교 에너지학과

A Design Study for Improving Thermal Efficiency of Combined Cycle Power Plants using LNG Cold Energy - Design and Off-design Modelling of Gas-turbine Based Combined Cycle -

Se Kee Oh and Byung Il Kim
Department of Energy Study, Ajou University

요 약

복합화력 발전플랜트의 운전에서 특히 하절기의 철두부하시에 외기온도의 상승으로 인한 가스터빈의 출력 감소를 해결하기 위한 방법으로 LNG 연료가 보유하고 있는 냉열을 이용하여 압축기로 유입되는 공기 온도를 감소시키는 냉각시스템의 개념을 개발하고자 복합화력 발전플랜트에 대한 설계점 및 외기온도 변화에 대한 탈설계점 모델링 연구를 수행하였다. 대상 플랜트는 940 MW 서인천 복합 발전플랜트 모듈의 단위 블록을 선택하였으며 발전플랜트 전용 해석코드인 GateCycle을 이용하여 가스터빈과 증기사이클의 주요 기기 들에 대한 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 결과를 대상플랜트의 시운전결과와 비교하여 모델의 적정성을 검증하였다. 출력, 효율, 온도 및 유량 등 주요 설계인자들이 최대 ~1.3%의 상대오차 범위 안에서 만족할 만한 신뢰도를 갖는 것을 확인하였다. 탈설계점 성능해석은 본 논문과 관련한 연구의 주목적인 LNG 냉열에 의한 유입공기 냉각시스템 설계시의 경계변수인 외기온도 증가에 대한 각 사이클의 특성변화를 대상으로 하였다. 종합적으로 외기온도가 증가하면 압축기로 유입되는 공기의 양과 이에 대응하는 소요 연료량이 동시에 감소하므로 연소에 따른 가스터빈의 팽창비가 감소한다. 이로 인하여 외기온도 증가시에 가스터빈 출력감소율은 0.5%/°C로서 배기가스를 이용하는 증기사이클의 출력감소율 0.2%/°C에 비해 민감하므로 가스터빈 유입공기의 냉각시스템의 설계는 복합화력 발전 플랜트의 효율 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다.

Abstract— Operation of the gas turbine based combined cycles at peak periods, especially hot summer daytime used to be in difficulties of maintaining the rated power generation due to excessively high air temperature. Among various resolutions, it was considered to introduce an air cooling system design using LNG cold energy. In order to provide the bases for assessing the air cooling system, simulation models were developed for studying design and off-design performances of the combined cycle plant. Selected reference plant was a unit block of the 940 MW Suh-Incheon Combined Cycle Plant Module, of which the gas turbine and steam cycle equipment were modelled by making use of a power plant analysis code, GateCycle. The plant model was tested its validity through comparison with the plant data measured during the commissioning. Results showed that most of important design parameters including the power, efficiency, temperatures and flow rates were agreed within the maximum relative error of ~1.3%. As the off-design analysis was aiming at evaluating the effect of the cooling system on the plant performance characteristics during hot summer peak load, the variation of the ambient temperature should be bound up in the scope of

scenarios. On the whole, as the ambient temperature increases, both the mass flow rate of inlet air in the compressor and the associated demand of fuel gas decrease. The expansion ratio of the combustion gas then decreases. As a function of the air inlet temperature, the gas turbine power reduction rate was estimated to 0.5%/°C which is much higher than that of the steam cycle to 0.2%/°C. Therefore it can be said that the design of the cooling system for the compressor inlet air should contribute to improving the efficiency of the gas fired combined cycle during hot summer daytimes.

1. 서 론

우리 나라는 90년대에 들어서면서 원자력, 석유 및 석탄화력 보다는 환경친화성, 건설공기, 투자비, 입지조건 및 부하 추종성 등이 유리한 LNG 복합화력발전을 선호하고 있다. 1996년 10월 말 기준으로 LNG 복합화력의 설비용량은 총 발전량 중에서 13.2%에 이르는 6,299 MW에 달한다. 이러한 추세는 지속될 전망이어서 '95년에 개정된 장기전원 수급계획에 따르면 2010년에는 LNG 복합화력의 설비용량이 22,014 MW가 되어 총 전원구성의 27.2%를 차지할 것으로 전망되어 진다.

복합화력 발전플랜트는 주로 가스터빈을 주축으로 복합사이클^{*)}이 형성되는데 이는 최신 증기터빈 발전의 효율이 40%에 근접하는데 비해 가스터빈은 30%대의 효율에서 높은 온도의 배열을 방출하므로 이를 회수하여 증기터빈을 구동시켜 플랜트 전체의 효율을 높이기 위하여 개발되었다. 실제 Brayton Cycle로서의 가스터빈 시스템은 터빈으로 공급되는 연소가스의 온도가 대략 1,000°C에 이르러서 결과적으로 대기로 배출될 때 500°C에 가까운 고온가스상태이므로 상대적으로 열손실이 매우 크다.

그럼에도 불구하고 가스터빈의 출력은 압축기로 유입되는 공기의 온도에 반비례하므로, 첨두부하시 최대로서 공급안정성이 가장 중요하게 요구되는 하절기에 오히려 높은 대기온도의 영향으로 인해 압축기 입구온도가 높아 지므로 가스터빈의 출력은 정격출력에 미치지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 1998년도의 예상 LNG 복합화력 총 설비용량을 1,050만 kW로 추정할 때, 동년 하절기 첨두부하시에 예측되는 총 출력감소량은 150만 kW에 달할 것이다. 이러한 출력손실은 가스터빈의 특성에 따라 다소 차이가 있지만, 대략적으로 대기온도가 1°C 상승함에 따라 약 1%의 출력이 감소하고, 대기온도 감소 시에는 이와 유사한 비율로 출력이 증가한다고 볼 수 있다.

본 논문은 복합화력 발전플랜트의 운전특성으로써 하절기 첨두부하시 높은 외기온도로 인해 야기되는 가스터빈의 출력 감소문제를 해결하기 위한 방법으로 LNG 연료가 보유하고 있는 냉열을 이용하여 압축기로 유입되는 공기온도를 감소시키는 냉각시스템의 개념

을 개발하기 위해 먼저 기존의 복합화력 발전플랜트에 대해 설계점 및 외기온도 변화에 대한 탈설계점의 성능을 해석^{*)}할 수 있는 모델링 연구내용을 요약하고 있다.

대상 플랜트는 서인천 복합화력 발전소 제 2블록의 한 모듈을 선정하였으며 성능해석은 미국 EPRI(Electrical Power Research Institute)의 지원아래 1980년부터 가스 터빈 시스템설계를 주목적으로 개발된 GateCycle 코드 시스템을 이용하여 하였다. GateCycle은 가스터빈 제작사들의 설계사양들을 내장하고 있으므로 이를 이용하여 개발되는 시스템모델의 실용성이 신뢰도가 높다는 잇점이 있다.

2. 복합화력 발전플랜트 모델링

서인천 복합화력 발전소는 LNG를 연료로 하는 최신형 고효율 가스터빈 구동 복합사이클 발전시스템 단지로서 1992년에 제 1블록의 가동을 시작으로 지속적으로 확장·건설이 진행되고 있다. 현재 가동 중인 설비규모는 4기의 단위블록으로 구성되어 있으며 각 블록마다 가스터빈과 증기터빈 사이클이 단일축에 연결된 4개의 모듈로 나뉘어 있어, 모듈 당 출력이 약 940 MW로서 발전소의 총출력용량은 약 3,700 MW에 달한다.

각 모듈은 미국 General Electric사의 7F 계열 대용량 가스터빈과 고압·중압·저압의 3단계 증기터빈사이클의 복합시스템으로서 가스터빈이 150 MW, 증기터빈이 80 MW의 출력용량을 갖도록 설계되었다. 서인천화력에 설치된 GE 7F 계열 가스터빈의 종류는 초기의 MS7001F 및 MS7001FA로부터 최근에 건설된 모듈의 MS7001FA+에 이르기까지 매우 다양하며, 초기에 비하여 최신형 터빈의 경우에 터빈입구온도가 약 80°C, 정격출력이 약 10 MW 상승된 것으로 알려지고 있다.

뛰어난 부하조절 능력을 갖춘 대용량발전시스템으로서 서인천 복합화력의 설비상 특징으로는 DLN(Dry Low NOx) 버너를 도입하여 기존의 LNG 복합화력의 질소화합물 생성문제를 획기적으로 개선하였으며 경유를 보조연료로 사용할 수 있도록 설계된 점을 들 수 있다. Fig. 1은 서인천 복합화력의 단위모듈에 대한 공정 개략도이다.

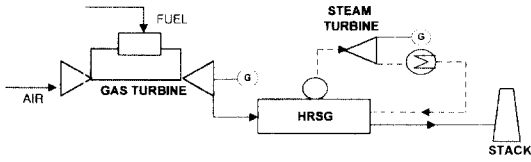


Fig. 1. Schematics of the Suh-Incheon Natural Gas Fired Combined Cycle Unit Module.

2-1. 가스터빈사이클 모델링

서인천 복합화력의 GE 7F 계열 가스터빈과 스팀터빈 사이클의 단일축 모듈에 대한 GateCycle의 모델은 Fig. 2 와 같다. 계산에 사용된 열역학적 물성치데이터로서 증기 및 물은 ASME 증기 테이블을 이용하였고, 배기가스는 PTC(Power Test Code) 4.4를 적용하였다. 설계기준으로서 외기조건은 온도 15°C, 기압 1.043 bar 및 상대습도 60%이고, 연료는 CH₄: 89.006%, C₂H₆: 8.735%, C₃H₈: 1.665%, i-C₄H₁₀: 0.266%, n-C₄H₁₀: 0.320% 및 N₂: 0.008%의 조성비를 갖는 천연가스로서 표준발열량을 49,346 kJ/kg이다⁹⁾.

Figure 2와 같이 가스터빈은 압축기, 연소기 및 팽창기로 구성된 가스터빈 본체와 팽창기 블레이드 냉각시스템으로 구분되며 터빈의 압축기와 팽창기는 각각 18단과 3단으로 구성되었다. 가스터빈 모델은 터빈의 설계점에서의 모델로부터 압축비, 폴리트로픽 효율, 터빈 입구유량과 노즐 입구면적을 계산하고 이로부터 탈설계점에서의 성능을 예측하는 절차로 수행하였다.

설계점의 압축기 모델은 설계제원으로 부터 소요동력 및 투입 공기량을 결정하기 위한 것이며, 탈설계점 모델은 설계점의 계산값들로부터 얻어지는 압축기 성능곡선(Performance Map)으로부터 계산되는 여러 변수들을 이용하여 열역학적 해석을 수행하는 것이다. 압축기의 성능곡선은 주어진 조건에서 압축기의 운전상태를 나타내는 지표로 사용되며, 설계점에 대하여 계산된 유량과 압축비가 탈설계점에서 운전되는 경우에 설계치로부터의 이탈정도를 분석하여 모델의 신뢰도 범위를 평가함으로써 기기의 운전가능성과 시스템 효율을 예측하는 기준이 된다. 본 논문에서는 설계점의 입력데이터로 압축비 13.5, 압축기 출구온도 375°C, 회전수 3600 rpm를, 그리고 성능곡선은 GateCycle에 내장된 라이브러리를 이용하여 탈설계점에서의 가스터빈 사이클의 성능해석을 수행하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 성능곡선을 압축기 효율과 공기량에 대해 나타낸 것이다.

연소기의 모델링은 압축기에서 추출되는 냉각공기량, 대기중의 수증기량, 질소화합물 제거를 위해 연소기로 투입되는 증기 또는 물의 량 그리고 연료의 유량을 입력으로 하여 다음의 식으로부터 에너지수지가 계산되어진다.

$$m_a^* H_a^* + m_v^* H_v^* + m_w^* Q = (m_a^* + m_v^*) H_g \tag{1}$$

여기서 m은 유량, H는 엔탈피, a는 건조공기, v는 수증기, g는 배기가스, 그리고 (+)와 (-)는 각각 터빈의 입

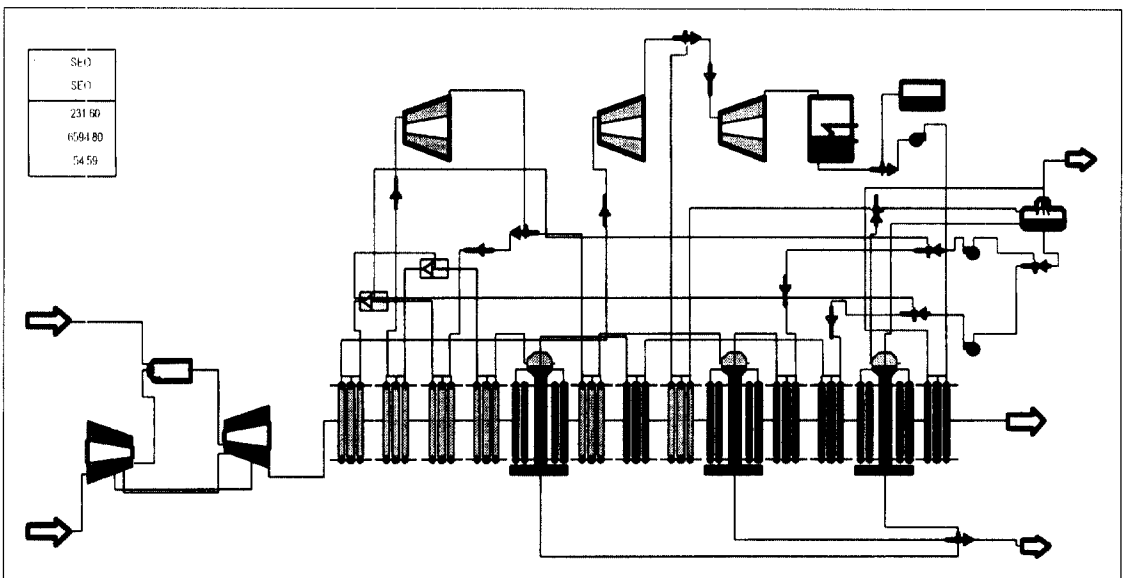


Fig. 2. Gate Cycle Model of the Suh-Incheon Natural Gas Fired Combined Cycle Unit Module.

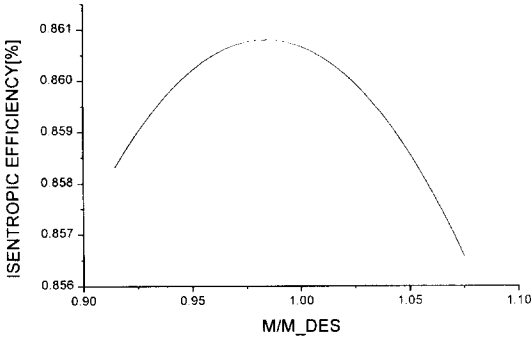


Fig. 3. Compressor Performance Curvature (Compressor Efficiency VS Air Flow Rate).

구와 출구를 나타낸다. 터빈입구에서의 가스온도를 1260°C로 일정하게 고정시키고 연소기의 에너지 수치로부터 연료의 유량을 계산하였다.

팬창기 모델은 터빈 출구온도 587°C에 대해 3단으로 구성된 팬창기의 각 단에서 효율을 계산하며 설계점에서의 온도, 압력 및 유량 입력값으로부터 터빈 입구의 단면적이 결정되면 이를 이용하여 탈설계점의 압력, 온도 및 유량을 계산한다. 터빈 블레이드 냉각공기는 압축기의 16단과 18단에서 각각 추출하도록 모델링 하였다. 가스터빈의 출력은 팬창기 입구온도가 높을수록 증가하지만 팬창기 블레이드의 재질에 따라 제한되는 최대 허용입구온도를 만족시키기 위하여 적절히 냉각되어야 하는데 이에 소요되는 냉각유량은 압축기 입구로 유입되는 공기유량의 약 15% 이상이 요구되므로 가스터빈 설계해석에서 이의 모델링이 매우 중요하다. 설계점에서 터빈의 냉각유량은 다음과 같이 냉각효율로부터 계산할 수 있다.

$$\Phi = \frac{T_{g, \max} - T_{\text{metal}}}{T_{g, \max} - T_{\text{cooling}}} \quad (2)$$

$$\frac{m_c/m_g}{m_{\text{surf}}/m_{\text{surf1}}} = C \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\max} - \Phi} \right)^{1.25} \quad (3)$$

여기서 Φ 는 냉각효율, $T_{g, \max}$, T_{metal} 및 T_{cooling} 은 각각 최대 가스온도, 금속온도 및 냉각공기온도를 나타내며, m_c 와 m_g 는 냉각공기와 가스의 유량, 그리고 Φ_{\max} 는 최대 냉각효율을 의미한다. 또한 C는 터빈 블레이드 냉각모델을 보정하는데 필요한 상수로서 일반적으로 Φ_{\max} 를 1로 가정하고 블레이드와 베인의 냉각효율과 냉각방식에 따라 게이트사이클에 내장된 값이 반복계산되면서 적합한 터빈 냉각모델에 따라 결정된다³⁾. $A_{\text{surf}i}$ 와 $A_{\text{surf}1}$ 은 각각 터빈의 i번째 단과 입구의 단면적을 나타낸다.

한편 탈설계점에서의 터빈 냉각유량은 식 (3)에서 구

한 설계점에서의 냉각유량에 대한 상대값으로서

$$m = m_{\text{des}} \frac{P_{\text{cool}}}{P_{\text{des}}} \sqrt{\frac{T_{\text{des}}}{T_{\text{cool}}}} \quad (4)$$

로 구할 수 있는데 이와 같은 냉각유량 때문에 팬창기의 등엔트로피 효율은 감소하게 된다. 상대값에 대한 기준값은 압축기 입구로 유입되는 공기유량의 약 15% 정도를 기준값으로 계산할 수 있다⁹⁾ 팬창기의 블레이드가 냉각되는 경우에 터빈효율은,

$$\eta_{T_{\text{cooled}}} = \eta_{T_{\text{uncooled}}} \left[1 - a \left(\frac{m_c}{m_g} \right)_{\text{nozzle}} - b \left(\frac{m_c}{m_g} \right)_{\text{bucket}} \right] \quad (5)$$

와 같이 계산된다. 여기서 η_T 는 팬창기의 등 엔트로피효율이며, 계수 a와 b는 터빈 제작자에 의해 제공되는 실험값들이다.

2-2. 증기사이클 모델링

복합화력에서 스팀사이클은 두 계통으로 나눌 수 있는데, 작동 유체의 상에 따라 분류되는 절탄기, 증발기 및 과열기의 세 가지 유형의 열교환기들이 중심이 되는 폐열회수보일러(HRSG)와 여기서 발생된 증기로 동력을 발생시키는 증기터빈시스템이다. GateCycle에서 HRSG 모델은 일반적으로 각 열교환기 내에서 전달되는 총열 전달량, q가 유효열전달계수(U), 전열면적(A) 및 온도차(ΔT)에 대해,

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (6)$$

의 관계를 만족하므로, 증발기에서의 최소온도접근차인

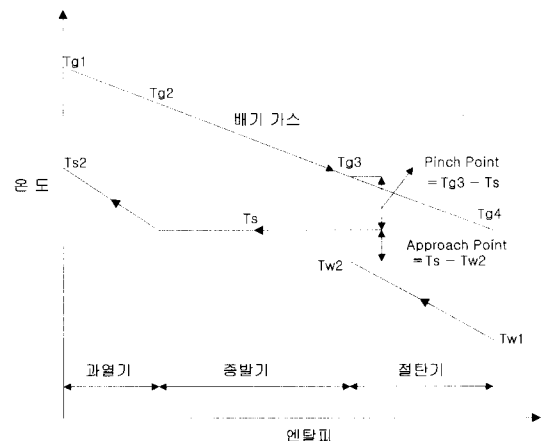


Fig. 4. HRSG Temperature Profile.

핀치(Pinch) 온도, 그리고 절단기로부터 증발기로 유입되는 급수온도와 증발온도 간의 차를 나타내는 접근(Approach) 온도를 결정하여야 한다. 핀치온도와 접근온도는 Fig. 4의 배기가스와 물/스팀의 온도 분포곡선으로부터 각 압력부에 대한 절단기 입구조건과 과열기 출구조건들을 알 수 있으므로 먼저 고압부에서 과열기에서의 적절한 압력강하를 가정하여 입력값으로 한다. 압력강하를 가정하게 되면 그 압력에 대한 포화온도는 수증기표로부터 알 수 있고 증발기에서의 핀치점을 가정하게 되면 아래의 식으로부터 증발기를 빠져나가는 배기가스의 온도를 결정할 수 있다. 결정된 온도파라미터값을 이용한 반복계산에 의해 열 및 물질수지방정식의 해를 구함으로써 HRSG의 설계점 특성이 확인된다. 여기서 얻어진 각 열교환기의 전열면적 및 압력손실을 입력상수로 하여 탈설계점에서의 성능을 계산하였다. GateCycle에서 증기터빈 시스템모델은 General Electric에서 개발한 Spencer 방법⁶⁾을 적용하였으며, 증기터빈을 고압, 중압 및 저압단으로 구분하여 각 단별 효율 계산이 가능하다. 탈설계점에서 부하, 온도 및 압력변화에 따른 유량은 다음의 식으로 계산되어진다.

$$m = C \sqrt[4]{\frac{P_b}{v_b} \sqrt{\frac{r-r^*}{1.0-r^*}}} \quad (7)$$

여기서 C_9 는 유량계수이며, P_b 와 v_b 는 각각 증기터빈 입구의 압력과 비체적, r 및 r^* 는 증기터빈 출구의 압력비와 일계압력비를 나타낸다.

3. 설계점 및 탈설계점 성능해석

LNG 냉열을 이용한 가스터빈 유입공기 냉각시스템을 개발하기 위한 참조플랜트로서 서인천 복합화력 발전소를 선정하고 앞 장에서 기술한 모델과 방법을 이용하여 설계점 및 탈설계점에서 성능해석을 수행하였다. 계산 결과에 대한 정확성과 신뢰성을 평가할 수 있도록 실험 데이터⁷⁾와 비교하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발된 GateCycle 모델에 의해 계산된 설계점에서의 주요 결과를 실험치와 비교할 때, 연료 유량에 있어 -1.3%의 최대 상대오차를 보이는 것을 비롯하여 전체적으로 ±0.1% 정도의 오차를 갖는 매우 정확한 모델임을 확인하였다. 따라서 기존의 복합화력 플랜트에 LNG 냉열을 이용한 냉각시스템 개념을 적용한 새로운 플랜트 설계의 타당성을 입증하고 그 효과를 정량적으로 분석하기 위해 반드시 수행되어야 하는 외기온도 변화에 따른 플랜트 성능의 변화를 적절히 파악할 수 있는 신뢰성 있는 기준을 정립하였다.

Table 1. Comparison of Calculated Results with Measured Design Parameters.

파라미터	단위	측정값	계산값
가스터빈 출력	kW	152,880	152,731
증기터빈 출력	kW	78,960	78,965
2블록 총출력	kW	231,840	231,696
효율	%	53.88	54.02
배기가스 유량	kg/sec	424.25	424.82
배기가스 온도	°C	587.4	587.2
연료 유량	kg/sec	8.722	8.609
터빈 입구온도	°C	1,260	1,259.5
압축기 출구온도	°C	-	375.1

탈설계점 해석은 외기온도를 0°C에서 30°C까지 변화시키면서 가스터빈과 증기사이클의 성능을 분석하였다. Fig. 5는 외기온도 증가에 따른 유입공기와 연료량의 변화를 나타내었는데, 유입공기량 및 연료량 모두 온도증가시에 선형감소함을 보여준다. 이는 온도가 증가하면 유입되는 공기의 밀도가 감소하여 일정한 공기/연료비를 만족하기 위해서는 공급되는 연료량도 대략 비례적으로 감소해야하기 때문이다. 이때 상대감소율은 유입공기량과 연료공급량이 함께 ~0.005°C 정도로 나타났다.

Figs. 6~8에 외기온도 증가에 따른 압축기 소모동력, 가스터빈 출구온도 및 배기가스량의 변화를 각각 나타내었다. 외기온도가 높아짐에 따라 단위체적당 유입되는 공기의 질량이 줄어들기 때문에 설계요구량의 공기를 유입하기 위해서 압축기 소모동력이 증가되어야 하고, 또한 터빈의 팽창비가 감소하므로 가스터빈의 출구온도는 증가하며 배출가스의 양은 감소한다.

분석결과에 의하면, 외기온도가 증가하면 유입공기의 양과 소요연료량이 동시에 감소하므로 연소에 따른 가스터빈의 팽창비가 감소하게 되고, 따라서 연소실로부터 가스터빈으로 공급되는 연소가스의 에너지 변환이 충분히 이루어지지 못한 상태에서 배출되므로 가스터빈

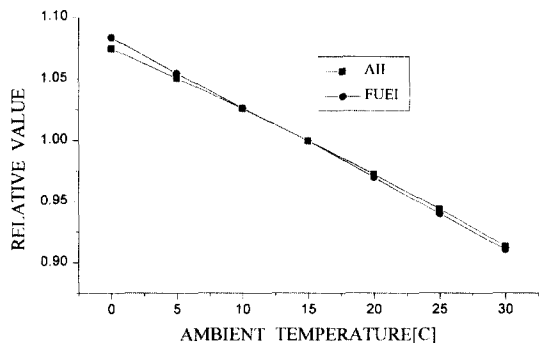


Fig. 5. Variations of Air Inlet Flow and Fuel Gas Demand as a Function of Ambient Temperature.

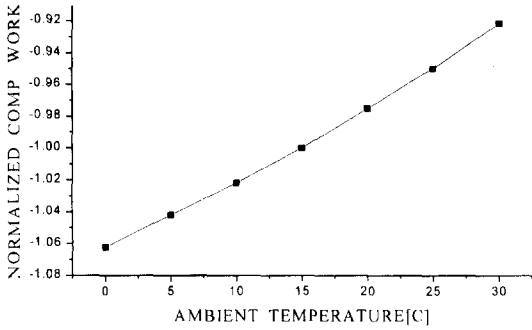


Fig. 6. Variation of Turbine Discharge Gas as a Function of the Ambient Temperature.

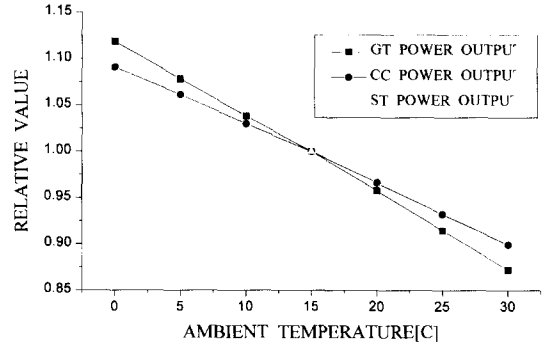


Fig. 9. Power Generation Change As a Function of the Ambient Temperature.

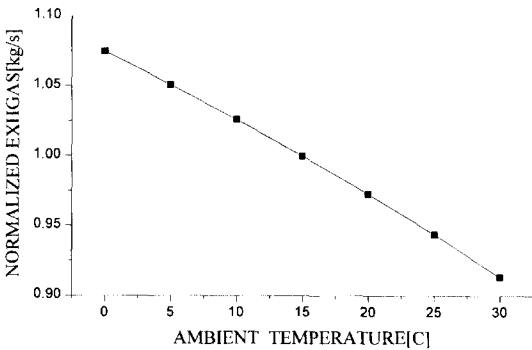


Fig. 7. Variation of the Gas Turbine Outlet Temperature.

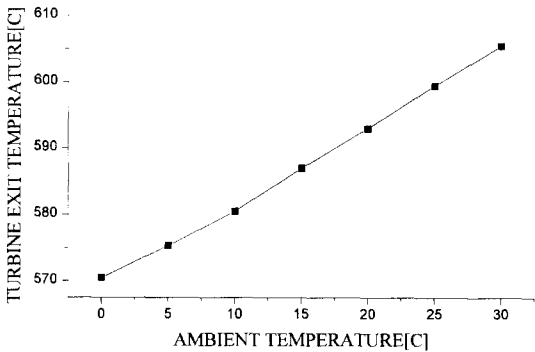


Fig. 8. Variation of the Gas Turbine Outlet Temperature.

의 출력이 감소하게 되고, HRSG에서의 증기 생성량도 감소하여 증기터빈의 출력 또한 감소한다. Fig. 9에 가스터빈, 증기터빈 및 복합사이클의 출력변화 경향을 나타내었다.

Fig. 9에 의하면 외기온도 증가에 따른 출력감소율이 증기터빈의 0.2%/°C에 비해 가스터빈에서 0.5%/°C로서 보다 민감함을 보이는데 이는 외기온도가 증가하면 배

기가스의 양은 그림 8에 나타난 바와 같이 감소하지만 가스터빈 출기온도 즉 배기가스 온도가 증가하므로 HRSG에 미치는 영향은 상대적으로 작기 때문이다. 결과적으로 복합사이클의 효율은 가스터빈시스템에 의해 보다 큰 영향을 받게 되므로 가스터빈에 유입되는 공기를 냉각시키는 시스템의 설계가 중요함을 알 수 있다.

4. 결 론

90년대에 들어서면서 LNG 복합화력이 국내 발전설 비계획에서 중요한 위치를 차지하기 시작하여 급속하게 성장을 거듭하는 이유 중에 하나로서 높은 부하추종성을 들 수 있다. 특히 단기부하변동이 심한 하절기에 안정적 전력수급을 유지하는데 매우 유용하다. 그럼에도 불구하고 외기온도 증가로 인해 정격출력에 제한을 받는 단점을 보완할 필요가 있고, 이를 위해 압축기로 유입되는 공기의 온도를 낮추는 냉각시스템에 대하여 다양한 연구들이 진행되고 있다.

본 논문은 압축기 유입공기 냉각시스템으로써 가스터빈의 연료인 LNG의 냉열을 이용하는 개념을 개발하기 위해 선행되어야하는 복합화력 발전플랜트의 설계점 및 탈설계점에 대한 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구 내용을 기술하였다. 1992년에 완공되어 운전 중인 940 MW 급 서인천 복합화력 모듈의 단위 블록을 대상 플랜트로 선택하여, 발전시스템 설계해석용 코드인 GateCycle을 이용하여 가스터빈 및 증기사이클의 주요 구성기기에 대한 성능해석 모델을 개발하였다.

개발된 모델의 타당성을 검증하고 신뢰도를 검증하기 위해 개발된 모델의 설계조건에서의 결과를 실제 플랜트의 측정치와 비교하였다. 복합발전 플랜트의 주요 설계인자인 출력, 효율, 온도 및 유량 등이 최대 1.3%에서 최소 0.1%의 상대오차 범위 안에서 실측값에 매우 접근하고 있으므로 모델의 신뢰성이 확인되었다.

탈설계점 성능해석은 LNG 냉열을 이용한 유입공기의 냉각시스템을 도입함으로써 복합발전 플랜트의 출력 증가 및 효율향상에 미치는 효과를 분석하는데 있다. 따라서 본 연구의 탈설계점은 설계기준온도 15°C로부터 외기온도가 벗어나는 상태로 정의하였으며, 이 때 주요 플랜트 성능인자들이 설계점으로부터 벗어나는 정도를 분석하였다. 성능해석 결과 외기온도가 증가하면 압축기로 유입되는 공기의 양과 연료량이 동시에 감소하지만, 공기의 압축시에 더 많은 에너지를 필요로 한다. 또 연소에 따른 연소가스의 팽창비가 감소하므로 팽창기로 배출되는 배출가스 엔탈피의 상대적 감소와 HRSG의 열전달량도 함께 감소한다.

정량적으로, 외기온도가 1°C 증가하면 유입공기와 연료공급량이 설계점으로부터 0.5% 감소하나 압축기의 소모동력은 0.47% 증가한다. 또한 터빈의 팽창비가 감소하면서 가스터빈 출구온도는 약 1.3°C 증가하지만 배출가스의 양이 약 0.53% 감소하여 결국 가스터빈의 출력은 0.5%/°C 감소한다. 이와 연계하여 증기터빈 사이클의 출력감소율도 0.2%/°C로 나타났다. 냉각시스템을 다른 시스템과 비교할 때 증발식 냉각시스템은 상대습도가 높은 곳에서는 냉각효율이 많이 떨어지게 되므로 우리나라 처럼 상대습도가 높은 곳에서는 적합한 냉각시스템은 아니라고 생각된다. 따라서 같은 대기 조건하에서는 LNG의 냉열을 이용한 냉각시스템의 냉각효율이 우수함을 예상할 수 있고, 요사이 많이 적용되고 있는 빙축열을 이용한 냉각방식과 비교할 때에는 부하변동에 대해 안정되고 효율적으로 운전되는 면에서는 떨어지지만 훨씬 복잡하고 비싼 냉동시스템이 요구된다는 점에서 LNG를 이용한 냉각시스템이 경제적으로나 냉

각능력면에서 우수하다고 생각된다.

결국 가스터빈으로 유입되는 공기를 냉각시키는 시스템은 복합화력 발전플랜트의 출력안정과 효율증대에 긍정적인 효과를 가져오며 LNG 냉열을 이용한 냉각시스템은 실용성이 클 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Rolf Kehlhofer, Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, The Fairmont Press, Inc., (1991).
2. I.S. Ondryas, et al.: Options in Gas Turbine Power Augmentation Using Inlet Air Chilling, Journ. of Engin. for Gas Turbines and Power, Vol. 113, pp. 203-211, April (1991).
3. M.R. Erbes, et al.: Off-Design Performance of Power Plants: An Integrated Gasification Combined-Cycle Example, Science, Vol. 237, pp. 379-383, (1987).
4. GateCycle User's Guide, ENTER Software, INC., (1995).
5. 한국가스공사 LNG 편람, (1985. 6).
6. Spencer, R.C., Cotten, K.C. and Cannon, C.N.: A Method for Predicting the Performance of Steam Turbine-Generator. 16,500 kw and Larger, Jpurn. of Engin. for Power, pp. 249-301, (1963).
7. 서인천복합 2블록 인수성능시험 결과보고서, KRC-PDS-92-16, 한국전력공사, (1992. 12).
8. "Gas-Turbine Evaluation (GATE) Computer Program: Thermodynamic Cycles, Methods, and Sample Cases", EPRI, (1983).
9. Cohen, H., et al.: "Gas Turbine Theory", 1996, 4th Edition, Longman.