

## LNG 냉열을 이용한 복합발전시스템의 성능향상에 관한 연구

오세기, 김병일, 이 찬\*  
아주대학교 에너지학과  
수원대학교 기계공학과\*

### 요 약

본 연구에서는 복합발전시스템의 외기온도 변화로 인한 출력저하 문제를 극복할수 있는 LNG 냉열 이용 복합발전 시스템을 제안하였다. 본 연구에 의해 제안된 LNG 냉열 이용 복합발전 시스템의 타당성을 검토하기 위해 ASPEN과 GateCycle을 이용한 시뮬레이션 모델을 구성하였고, 모델에 의해 예측한 결과를 실제 발전소 성능시험결과와 비교하여, 본 시뮬레이션 방법의 예측정확도를 검증하였다. 본 시뮬레이션 방법을 토대로 LNG 냉열을 이용하여 가스터빈의 유입공기를 냉각시켰을 경우의 복합발전 시스템 성능변화를 분석하였다. 그 결과 LNG 냉열을 이용하여 유입공기를 원하는 온도까지 냉각시켜 하절기에도 출력을 일정하게 유지시킬수 있음을 확인할 수 있었고, 이를 위한 가스터빈과 LNG 간의 열교환기 설계기준도 제시하였다.

### 1. 서 론

우리 나라는 최근 지속적인 경제활성화와 소득수준의 향상에 따라 전력수요가 급증하는 추세를 보이고 있으며 전력수요는 매년 그 최대수요가 기록을 갱신하고 있는 실정이어서 예비율을 충분히 확보하여 안정적 전력공급을 위한 대처가 시급한 형편이다. 이에 대응하고자 90년대 초부터 원자력, 석유 및 석탄발전소보다 환경, 건설기간, 입지조건 및 투자비등이 유리한 LNG 복합발전소를 건설, 운영 및 계획중에 있으며 국내의 LNG 복합발전소는 주로 침두부하용으로 널리 사용되고 있다. 그러나 국내의 경우는 특히 하절기에 침두부하 수요가 집중되나, 복합발전용 가스터빈의 출력특성은 압축기 입구공기의 온도에 반비례하므로, 하절기에 입구공기의 온도가 대기온도의 상승으로 인하여 높아져, 가스터빈의 출력은 오히려 감소하여 정격출력을 내지 못하고 있는 실정이다[3].

본 연구에서는 이러한 출력감소 문제를 해결하고자 LNG 냉열을 이용하여 가스터빈의 유입공기를 냉각시킴으로써 하절기에도 일정출력을 낼 수 있는 복합발전시스템에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 현재 운전중인 서인천 복합발전소를 대상 공정으로 하고, 발전플랜트 전용해석 코드인 GateCycle을 이용하여 LNG 냉열작용에 의해 야기되는 가스터빈의 탈설계점 효과를 고려할수 있도록 복합사이클 시뮬레이션 모델을 구성하였다. LNG 냉열을 이용한 가스터빈 유입공기의 냉각시스템에 대해서는 Aspen Plus를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 복합발전소 및 냉각시스템의 결합을 통해 구성되는 LNG 냉열 복합발전소에 대해서 냉각조건을 변화시켜 가며, 복합발전사이클의 성능을 예측하는 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수해석결과를 통하여, 하절기 외기 온도가 상승하는 경우에도 LNG 냉열을 이용하여 일정 출력이 가능한 복합발전시스템을 제시할수 있었다.

### 2. LNG 냉열 복합사이클 시뮬레이션 방법

#### 2-1. 복합사이클 시뮬레이션

본 연구에서 대상으로 하는 복합발전 플랜트는 현재 운전중인 서인천 복합발전 플랜트이며 GE사의 7F 가스터빈과 3압, 자연순환식의 폐열회수보일러(HRSG), 재열 증기터빈으로 구성되어 있

다. 본 연구대상의 냉각시스템을 결합한 복합사이클의 공정을 Fig.1에 나타내었다. 본 연구에서 복합사이클 성능분석을 위해 사용한 프로그램은 GateCycle로서, GateCycle을 이용하여 본 연구에서 구성한 요소별 모델은 다음과 같다:

#### 가. 열역학적인 data base

GateCycle 프로그램은 공기, 연료-공기 혼합물, 물-증기 혼합물에 대한 열역학적인 데이터를 사용한다. 본 연구에서는 스팀과 물의 열역학적 성질에 대해서는 1967 ASME Steam Property Formulation-최대 압력 : 152.16 bar, 최대 온도 : 1370℃을 사용하고, 11가지 성분-H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, AR, H<sub>2</sub>S COS H<sub>2</sub>O-에 대한 가스의 성질은 PTC(Power Test Codes) 4.4 Formulation을 사용하였다[5]. 설계점의 기준 외기조건은 15℃, 1.0043bar, 상대습도는 60%이며, 연료의 발열량은 49345.76kJ/kg이며, 연료의 조성은 Table1에 나타내었다.

Table1. LNG 연료조성

CH <sub>4</sub>	89.006	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.735	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.665
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.266	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.320	N <sub>2</sub>	0.008

#### 나. 팽창기(expander)

팽창기 모델링을 위해 GateCycle은 팽창과정의 상세한 단별(stage-by-stage)분석을 수행한다. 본 연구에서 사용한 팽창기는 3단으로 구성되어 있으며, 설계점에서 결정된 폴리트로픽 효율은 터빈 효율의 변화에 대한 제작자의 데이터가 없는 경우에는 탈설계점에서도 일정하게 유지된다고 가정한다. 또한 본 연구는 팽창기가 질식조건(choking condition)에서 작동한다고 가정하였고, 그때의 질식유량은 다음의 함수식을 사용하여 예측한다[1].

$$\frac{m\sqrt{T}}{AP} = const$$

이때 P : 팽창기입구 압력, T : 팽창기입구 온도, A : 터빈의 목(throat) 면적 이다. 그러므로 팽창기가 탈설계점에서 작동하는 경우에는 설계조건에서 계산된 노즐 목면적과 입구온도, 유량을 사용하여 위의 함수식을 만족하도록 터빈 입구압력을 계산한다. 그리고 이 압력을 상위 스트림의 구성요소(예를 들면, 압축기 등)에 전달한다. 또한 팽창기로 들어오는 블레이드 냉각공기는 상응하는 압력조건인 압축기 중간단에서 추출되며, 그 유량은 블레이드의 냉각흐름효율(cooling flow effectiveness)과 냉각방식에 의해 결정된다[4].

#### 다. 압축기

압축기의 압축과정 계산과정은 주어진 단열효율 및 압축비에 대해 폴리트로픽 관계식을 적용하여, 압축기 출구의 열역학적 상태를 구한다. 그러나 압축기의 압축비 및 효율은 작동조건에 따라 변화되므로, 본 연구에서는 탈설계점 작동시에는 압축기 성능곡선으로부터 그때의 압축비 및 효율을 읽어들이어 탈설계점 효과를 고려할 수 있게 압축기모델을 구성하였다[8]. 본 연구에서는 GateCycle에서 제공하는 Frame7의 성능곡선을 사용하였다.

#### 라. 연소기

GateCycle에서 연소기의 모델링은 에너지방정식으로부터, 설정된 팽창기입구온도를 충족할수

있도록, 필요한 연료-공기를 화학정량론적으로(stoichiometric) 계산하여 연료소모량을 계산한다[8].

**마. 스팀사이클**

HRSRG는 3압의 절탄기, 증발기, 과열기등 일련의 열교환기로 구성되었으며, 저압 증발기의 발생 증기는 탈기용 증기로 사용하도록 구성하였다. 배기가스의 현열을 최대한 회수하기 위하여 급수 예열기를 설치하였다. 설계점에서는 스트림의 입출력조건-온도, 압력-으로부터 각 열교환기의 전 열면적을 결정하고, 탈설계점에서는 결정된 전열면적으로부터 외부조건 변화에 대해 각 입출력 스트림의 조건들이 결정된다.

**2.2 냉각시스템 시뮬레이션**

· 압축기의 입구온도를 감소시키는 방법으로는 증발식, 흡수식, 빙축열을 이용한 냉각시스템등 여러 가지가 있다. 상온·상압에서 LNG는 -162℃의 극저온상태로 존재하다가 기화되어 가스터빈 연소실로 공급된다. 일반적으로 기화시에는 해수와의 열교환으로 LNG가 보유하고 있는 냉열을 방출하고 있는데 그 양은 NG 액화시 생산된 NG의 약 14%에 해당하는 양을 연소시켜 액화동력으로 사용한 것이다[7].

본 연구에서는 이러한 LNG의 냉열이, 공기와 열교환을 통해, 압축기로 공급되는 공기의 온도를 감소시키도록 냉각시스템을 구성하였고, 냉각시스템의 시뮬레이션은 Aspen Plus를 이용하여 수행하였다. Fig 1.에서 가스터빈 시스템의 앞부분에서와 같이, 본 연구에서 고려한 냉각공정은 1개의 열교환기와 가열기 및 유량조절이 가능한 분배기와 혼합기로 구성하였으며 외기와 LNG가 열교환을 통하여 외기온도를 원하는 온도까지 냉각시키고 가열기에 의해 연소실 공급온도까지 가열된 후 연소실로 공급된다.

**3. 시뮬레이션 기법의 검증 및 매개변수 연구**

본 시뮬레이션 기법의 예측정확도를 검증하기 위해 현재 운영중인 서인천 복합발전소의 성능시험결과와 예측결과를 비교,검토하였다. Table 2에서 볼수 있듯이, 성능예측결과가 시험자료에 비교하여 상대오차범위 1% 이내의 매우 정확한 신뢰성을 보여주고 있다. 그러므로, 본 연구에서 제안된 시뮬레이션방법이 LNG냉열 복합발전소의 매개변수연구에도 유용함을 알수있다.

**Table 2. 서인천 복합발전소 성능예측 및 시험결과의 비교**

항 목	단 위	Reference(GE)	Model	비고
가스 터빈	KW	152880	152731.1	Gen.eff=0.99
스팀 터빈	KW	78960	78965.02	Gen.eff=0.99
복합 사이클	KW	231840	231696.1	
효 율	%	53.88	54.02	LHV/NET
배기가스 유량	Kg/sec	424.25	424.82	
배기가스 온도	℃	587.4	587.17	
연료 유량	Kg/sec	8.722	8.6087	
터빈 입구 온도	℃	1260	1259.51	
압축기 출구 온도	℃	-	375.05	

LNG 냉열효과에 대한 매개변수 연구를 수행하기 전에, 일차적으로 GateCycle로 시뮬레이션한 온도변화에 따른 공기의 양과 연료의 양을 입력값으로, 냉각시스템을 시뮬레이션한 결과 열악조건인 30℃에서는 15℃까지, 0℃인 경우에는 -12℃까지 냉각이 가능하였다. 이때 열교환기의 최소온도차는 5℃로 가정하였으며, 이러한 가정에 결정된 일정한 전열면적(152.075 SQM)에 대해

LNG와 공기를 열교환시킨후의 온도와 유량 및 LNG를 연소실 공급온도인 25℃까지 가열한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. LNG와 공기를 열교환시킨 결과값

Amb. Temp[℃]	Outlet Air		Outlet LNG		Heat Duty in	Heat Duty in
	Temp[℃]	Mass [kg/s]	Temp[℃]	Mass [kg/s]	HX[kcal/s]	Heater[kcal/s]
15	5.067	437.3589	10.99	9.0803	1835.84	-
20	7.72	431.6135	17.24	8.9441	1832.71	15.792
25	10.21	426.4867	22.01	8.8242	1833.89	39.730
30	12.5	421.5057	27.31	8.7198	1831.04	711.12

### <매개변수 연구결과>

앞서 검증된 시뮬레이션 기법을 바탕으로 매개변수 연구를 수행하였다. 먼저 압축기 모델링에 사용된 압축기 성능곡선을 Fig.2에 나타내었다. Fig.3에서는 외기온도가 증가함에 따라 가스터빈과 스팀터빈, 사이클의 전체 출력이 감소함을 시뮬레이션 결과를 보여주었고 있다. 이때 출력값은 외기 온도 15℃인 경우의 값에 대한 비율로 표현하였다. Fig.3에서 볼수 있듯이, 외기온도가 증가함에 따라 가스터빈 출력감소의 정도가 스팀터빈의 비해 크다는 것을 알 수가 있고, 그 결과로 사이클의 전체 출력 또한 감소됨을 쉽게 알 수가 있었다. 따라서 외기온도 변화에 따른 가스터빈의 출력변화는 곧 전체 사이클의 출력변화에 큰 영향을 미침을 알 수가 있었다. Fig.4에서는 외기온도에 따른 공기와 연료의 양의 변화를 외기온도 15℃인 경우를 기준으로 표현하였다. LNG냉열효과에 대해서는 먼저 공기의 온도를 최대 5℃까지 냉각한다는 것과 공기와 열교환된 LNG를 연소실 공급온도인 25℃까지 가열한다는 가정하에 매개변수연구를 수행하였다. Fig.4에서 보여지듯이, 외기온도에 따라 공기유량과 연료량이 거의 같은 비율로 감소함으로써 가스터빈의 출력감소에 영향을 미치는 것을 알 수가 있었다. Fig.5에서는 LNG와 공기를 열교환시킨 후의 열교환기 출구온도에 대해 나타내었다. 공기는 최대 5℃까지 냉각이 가능하였고, LNG는 최대 27℃까지 가열되어 연소실로 공급되었다. 외기온도가 30℃인 경우는 공기의 열원이 충분하여 LNG의 추가가열이 필요하지 않음을 알 수가 있다. Fig.6과 7에서는 같은 외기 온도조건에서 공기를 냉각한 경우와 그렇지 않은 경우를 출력과 효율에 대해 나타내었다. 외부 공기를 냉각한 경우는 냉각하지 않은 경우와 비교해서 가스터빈인 경우 12-20MW의 출력차이를 보였다.

### 3. 결론

여름철에 외기온도의 상승으로 인한 가스터빈의 출력감소를 LNG의 냉열을 이용하여 회복시킬수 있는 LNG 복합발전시스템을 제안하였다. 본 연구의 시뮬레이션 결과를 통해, LNG 냉열을 이용하여 여름철에도 일정출력을 내는 복합발전 시스템의 구성이 가능함을 보여주었고, 이에 필요한 복합사이클과 LNG를 이용한 공기냉각시스템간의 연계설계조건 및 설계기준도 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 분석결과들은 -162℃의 극저온상태의 LNG와 공기간의 초저온 열교환장치(cryogenic heat exchanger)설계에도 유용하게 사용될수 있을것으로 기대된다.

### 4. 참고 문헌

1. Michael R. Erbes, et al., "GateCycle Performance Analysis of the LM2500 Gas Turbine Utilizing Low Heating Value Fuels", ASME IGTI-Vol. 8, ASME COGEN-TURBO, 1993
2. M. De Lucia, et al., "Benefits of Compressor Inlet Air Cooling for Gas Turbine Cogeneration Plants", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, pp.

598-603, 1996

3. "가스터빈 출력향상 시스템 타당성 조사연구", 전력연구원, 1995
4. 김동섭, 노승탁, "단축 가스터빈 엔진의 부분부하 성능예측", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(II), pp. 292-297, 1995
5. "Gas-Turbine Evaluation(GATE) Computer Program : Thermodynamic Cycles, Methods, and Sample Cases", EPRI, 1983
6. H. Cohen, et al., "Gas Turbine Theory", 1996, 4th Edition, Longman
7. 김동수, "ASPEN Plus를 이용한 LNG 인수기지용 냉열발전 시스템 성능 연구", 아주대학교 석사학위 논문, 1994
8. GateCycle User's Guide, 1989-1995
9. ASPEN Plus User's Guide, 1993

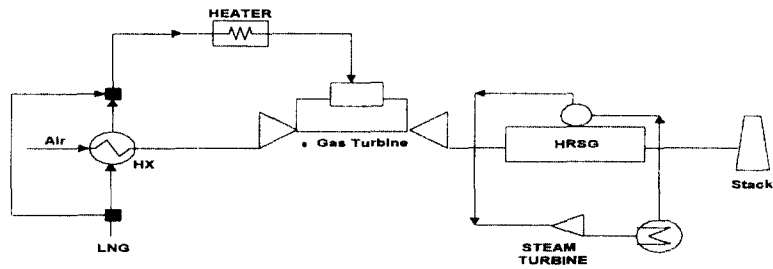


Fig.1 Combined Cycle Power Plant with Air Cooling System

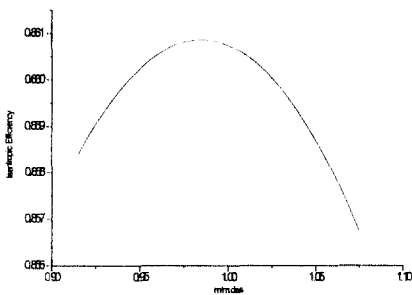


Fig.2 Compressor Isentropic vs Normalized Mass Flowrate

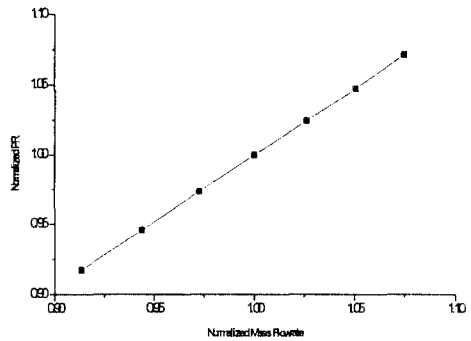


Fig.3 Normalized Pressure Ratio vs Normalized Mass Flowrate

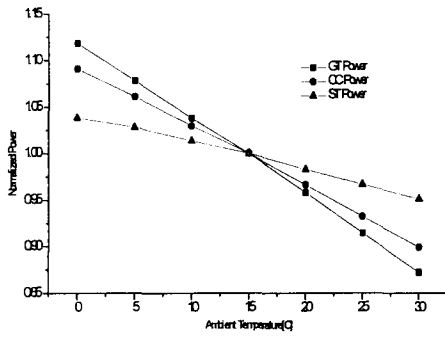


Fig.4 Power Output with Ambient Temperature

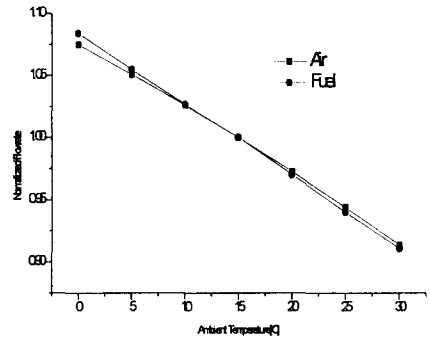


Fig.5 Air & Fuel Flowrate with Ambient Temperature

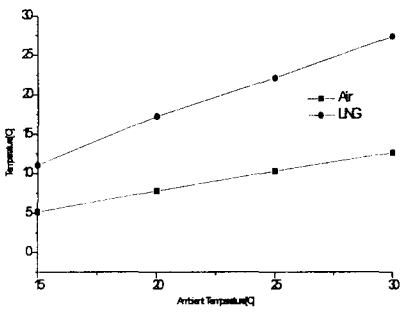


Fig.6 Air & LNG Outlet Temperature of Heat Exchanger

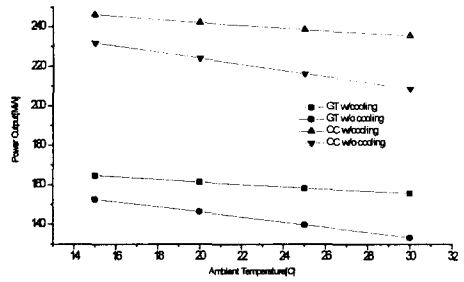


Fig.7 Effect of Power Output with Air Cooling

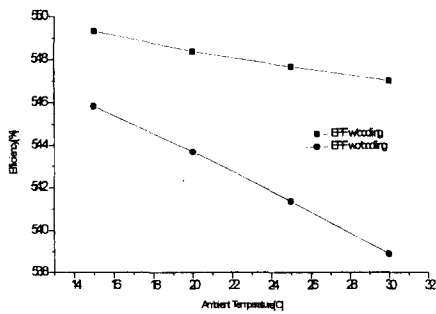


Fig.8 Effect of Cycle Efficiency with Air Cooling