



고효율 복합 발전 기술



손정락
한국기계연구원 극한에너지기계연구실 책임연구원

1. 개황

복합 발전이란 고효율(Combined Cycle) 복합사이클 발전 기술이다. 가스터빈 기반의 상부 사이클에서 전기를 생산할 때 발생된 고온의 배기가스를 배열회수 증기발생기(HRSG: Heat Recovery Steam Generator)에서 증기로 변환시켜 증기터빈 기반 하부 사이클에서

추가적으로 전기를 생산하는 방식이다. 가스터빈의 특성 상 다양한 연료를 사용할 수 있지만 천연가스를 주로 사용하며, 국내에서는 액화천연가스(LNG: Liquefied Natural Gas)를 주로 사용하기 때문에 LNG 복합 발전이라 부르기도 한다. 한편, 최근 들어 석탄을 가스화시켜 연료로 사용하는 IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle) 발전 기술도

복합 발전을 토대로 하고 있다.

복합 발전은 연료의 화학적 에너지를 최대한 이용하여 전력을 생산하기 때문에 다른 발전 기술에 비해 열효율이 월등히 높은 고효율 발전 기술이다. 또한 주기에 해당하는 가스터빈은 부하 추종 능력이 뛰어나기 때문에 기저 부하 운전뿐만 아니라 첨두부하 운전용으로 널리 사용되고 있다. 또한, 상부 사이클의 배기가스로부터 회수된 열을 이용하여 추가적으로 전력을 생산하고 지역난방을 위한 탄력적인 열 생산도 가능하기 때문에 열병합 발전용으로 각광을 받고 있다.

하부 사이클에서 추가적인 전력 생산이 가능한 복합 발전의 장점은 상부 사이클 가스터빈의 높은 터빈 입구온도로부터 비롯된다. 일반적으로 복합 발전용 가스터빈의 터빈 입구온도는 1350°C 이상이며, 터빈에서 팽창된 배기가스 온도는 550~600°C 수준으로 증기 터빈 기반의 하부 사이클 구동에 충분한 조건이다. 이와 함께 최근 소재 기술의 발달로 인한 터빈 입구온도의 상승은 상부 사이클인 가스터빈의 열효율을 40% 수준으로 높일 수 있기 때문에 복합 발전의 효율은 더욱 올라가게 된다.

복합 발전의 또 다른 장점은 환경 친화성이다. 대부분의 복합 발전은 LNG(혹은 천연가스)를 연료로 사용하기 때문에 석탄을 사용하는 경우보다 CO₂ 발생량이 줄어들 뿐만 아니라, 발전 설비 자체의 고효율 특성으로 연료 소모량이 감소되어 CO₂ 발생은 더욱 줄어들었다. 또한, 지난 10여 년 동안 지속적으로 연구되어 개발된 예혼합 희박연소 기술은 별도의 탈

질 설비 없이도 질산화물 배출량을 9ppm 이하 수준으로 유지하는데 큰 도움이 되고 있다.

다만, 높은 터빈온도로 인하여 터빈 블레이드를 비롯한 부품 수명이 제한적이기 때문에 초기 설치비용 대비 유지 보수비용이 높은 단점이 있다. 이러한 상황을 감안하여 복합 발전 설비를 제공하는 OEM사들은 설비 판매 시 자사의 고온부품 공급을 위한 장기 구매계약(LTSA: Long Time Service Agreement)을 요구하고 있어 발전사들에게 큰 부담이 되고 있다.

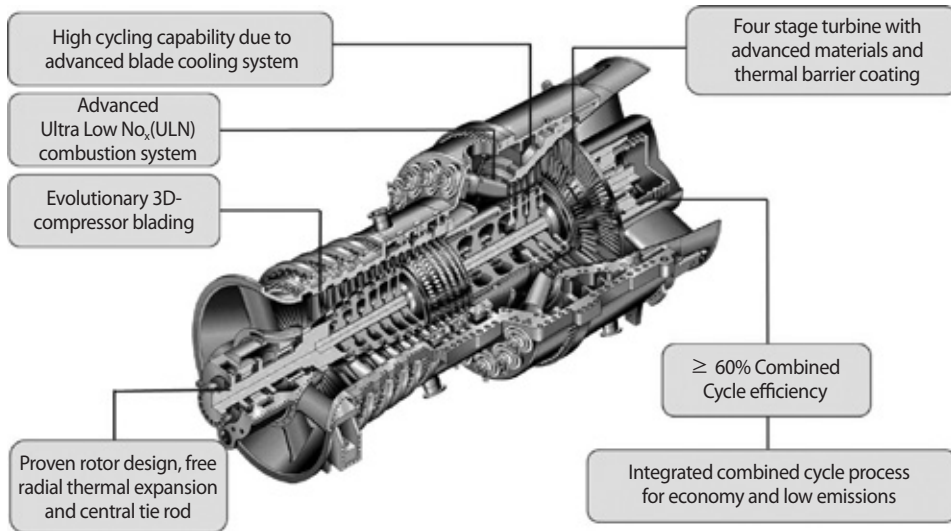
또한, 우리나라는 천연가스 수입이 되지 않을 뿐만 아니라 육로가 아닌 해상을 통해 LNG가 수입되고 있기 때문에 LNG를 주 연료로 사용하는 복합 발전소의 발전단가에 큰 부담이 되고 있다. 이러한 상황 때문에 상대적으로 천연가스 공급이 원활한 국가들과는 복합 발전의 운용 특성이 다를 수밖에 없었다. 하지만, 최근 들어 비전통 가스인 셰일가스 공급 확대로 천연가스의 가격 하락과 러시아로부터 PNG 형태의 천연가스 직도입 여부가 논의됨에 따라 국내 복합 발전의 역할 변화가 모색되는 시점이다.

2. 현황 및 동향

복합 발전의 기술은 주기기인 가스터빈 기술 수준에 따라 구분되며, 그중에서도 터빈 입구온도 수준에 따라 일반적으로 [표 1]과 같이 분류된다. 복합 발전 기술은 1980년대 이후 매 10년 주기로 진화하고 있

[표 1] 복합 발전 기술 추세

구분	최초출시	터빈 입구 온도	효율		출력			
			단순	복합	60Hz		50Hz	
					단순	복합	단순	복합
D급	1980년대	1100°C급	35%급	50%급	~110MW	~160MW	~140MW	~210MW
F급	1990년대	1300°C급	37%급	55%급	~180MW	~280MW	~310MW	~460MW
G급	2000년대	1400°C급	38%급	58%급	~280MW	~390MW	~330MW	~500MW
H급	2010년대	1500°C급	40%급	60%급	~320MW	~460MW	~460MW	~670MW



[그림 1] 복합 발전용 H급 최신 가스터빈 모델 : Siemens SGT5-8000H

으며, 그 결과 2010년도 이후부터는 터빈 입구온도 1500°C, 복합 발전 효율 60% 수준의 고효율 모델이 대세를 이루고 있다.

또한 F급 수준의 경우 500MW급 발전을 위해서는 가스터빈 2대와 증기터빈 1대로 구성된 2×1형 모델이 두 개(가스터빈 4대, 증기터빈 2대)가 필요하였으나, 최근 고출력 터빈이 개발됨에 따라 H급의 경우에는 단축의 1×1형 모델 한 개로 발전이 가능하여 그 형태가 무척 단순해 졌다. 더구나 Mitsubishi 등 일부 OEM사에서는 단축의 1×1형 모델로 1,000MW급 발전이 가능한 모델들을 출시함으로써 원자력이나 석탄 화력발전소 규모인 1,000MW급을 가스터빈 한 대와 증기터빈 한 대로 운영 가능한 수준에까지 이르렀다.

전 세계적으로 천연가스(LNG 포함)를 연료로 사용하는 복합발전 설비는 2010년 현재 1,311GW 수준이며, 발전량은 4,444TWh 규모이다. 그중에서도 미국의 복합 발전 시장은 설비 기준으로 580GW, 발전량 기준으로 약 1,000TWh로 세계에서 가장 큰 규모이다. OEM사로는 미국의 GE가 전체 시장의 42.3%로서 가장 큰 규모를 차지하고 있으며, 독일의 Siemens(27.9%)가 그 뒤를 잇고 있다. 또한, 최근

들어 일본의 Mitsubishi(8.8%)가 주목할 만한 성장세를 보이고 있다.

국내의 경우 2011년 현재 전체 설비 용량 79,351MW 중 복합 발전의 비중은 19,799MW(집단에너지로 분류된 열병합용 복합 발전 제외)로 약 25% 수준이며, 석탄 화력(30.9%)보다는 비중이 작고, 원자력(23.6%)보다는 비중이 큰 규모이다. 반면, 발전량 규모에서는 기저부하 운전용으로 주로 사용되는 석탄 화력에 비해 첨부 부하 운전용으로 사용되는 복합 발전의 비중은 상대적으로 낮은 편이다.

국내 복합 발전 현장에는 다양한 해외 OEM사 모델들이 설치되어 있으며, 복합 발전의 주기기인 가스터빈을 기준으로 GE의 점유율(용량 기준 34%, 대수 기준 42%)이 가장 높은 편이다. 또 국내 복합 발전 사업 초기에 주로 설치된 Westinghouse의 점유율(용량 기준 24%, 대수 기준 30%)이 그 뒤를 잇고 있다.

최근 국내에서도 세계적인 추세에 따라 Siemens와 Mitsubishi의 점유율이 꾸준히 증가되고 있는 상황이다. 특히 2014년 준공 예정인 국내 8개 신규 복합 발전소들은 전량 Siemens 및 Mitsubishi의 최신 모델인 H급 수준의 모델들로 구성되어 있다. 이러한 최신


모델들은 복합 발전 효율을 60%대로 높여주기 때문에 연료 절감 효과가 크다. 따라서 비싼 LNG를 사용하고 있는 국내 복합 발전의 발전단가 부담을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 최신 모델의 도입은 높은 이용률(Availability)과 신뢰도(Reliability)를 요구하는 측면에서 또 다른 위험 요인이 존재한다.

3. 향후 전망

복합 발전 시장은 지금까지 첨두부하 운전용을 중심으로 성장해 왔으며 앞으로도 이러한 추세는 당분간 계속될 것으로 전망된다. 부하 변동과 우수한 응답 특성에 따른 부하 추종 운전 성능은 복합 발전의 가장 큰 장점 중의 하나이다. 부하 변동 운전과 관련된 시장은 재생에너지(풍력, 태양광 등) 발전의 보급이 확대됨에 따라 Back-up 설비용 시장으로 확대 성장할 것으로 전망된다. 즉, 재생에너지 발전은 태양 일조 시간과 풍력 변동에 따라 발전 가능한 시간대가 제한적일 수밖에 없으므로 반드시 보조 발전 설비가 필요하다. 이를 위해서는 청정연료(천연가스) 사용이 요구되며 신속 부하 응답이 가능한 복합 발전이 유일한 대안이다. 이러한 시장 환경에 부응하기 위해서 OEM사들은 H급 위주의 고효율 모델 출시와 함께 기존의 F급 출력규모에서 부하 추종 운전 성능을 더욱 개선시킨 모델들을 출시하고 있다.

이와 함께 중장기적으로는 기저부하 운전용 시장도 함께 성장할 것으로 예상된다. 2011년 일본 대지진으로 인한 후쿠시마 원전 사고는 전 세계적으로 원자력 발전의 안전성에 대해 다시 한번 생각해 보는 계기가 되었다. 그 결과 독일 등 일부 국가들이 원자력 발전 신규 건설을 중단한 상태이며, 그 대안으로 천연가스를 연료로 사용하는 복합 발전의 기저 부하용 시장이 성장하고 있다. 이러한 상황이 지속되면 2000년대 들어 고효율, 고효출력을 목표로 기술 투자가 이루어진 H급 모델 시장이 확장될 것으로 전망된다.

복합 발전의 기술 주기로 보아 2010년대에는 Post-H급 모델에 대한 기술 개발이 이루어지고 이와 관련된 시장은 2020년대에 형성될 것으로 전망된다. 실제로 일본의 Mitsubishi는 일본 정부 지원을 받아 현재 J급(세계적 분류로는 H급에 해당) 모델의 후속 모델에 해당하는 터빈 입구온도 1700°C급 모델 개발을 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

국내에서는 2008년부터 5년간에 걸친 개발 기획 과정을 거쳐 국가 지원 기술 개발 사업의 형태로 F급 복합 발전용 가스터빈 개발이 착수되었다. 이를 계기로 그 간 전량 해외 OEM사로부터 직수입돼 형성된 국내 복합 발전 시장의 국산화를 위한 기술적 기반이 구축될 것으로 전망된다. 그러나 2020년 이후 명실상부한 세계 복합 발전 시장 진입을 위해서는 지금부터 다시 Post-H급 가스터빈 기술 개발을 준비할 시점이다. 



[그림 2] F급 모델에 H급 기술을 접목시킨 신속 부하 응답용 모델 : GE 7F 7-Series