

열병합발전의 최신기술 전망

이 자료는 일본 열병합발전센터의 '97 심포지움에서 동 센터 회장이 발표한 자료를 번역한 것임. -편집자-

1. 고온 가스터빈과 「시스템 에너지」 기술의 진전

(1) 1,500℃급 가스터빈

미쓰비시 중공업(주)은 풍부한 실적을 토대로 1993년부터 1,500℃급 차세대 대용량 가스터빈 501G/701G를 개발하여 왔으나 60Hz용, 시장용 501G기에 대해서는 본체제작을 완료하고 1997년 2월부터 동사(다카스나) 제작소내의 기기검증설비에 설치하여 장기실증시험에 들어갔다. 50Hz용 701G기는 1997년 12월에 공장실부하운전, 1998년 10월부터 동북전력(주)동 니이가다 발전소에서 시운전, 1999년 7월에는 상업운전을 개시할 예정이다. 가스터빈의 단체의 열효율은 38%이상(LHV), 복합사이클의 경우 종합효율은 58%이상(LHV)을 내다보고 있다. 연소기에는 처음으로 증기냉각을 채용, 터빈의 동익은 전면각 냉각, 전면 열차단 코팅을 하였다.

(2) 세라믹 가스터빈

통상산업성 공업기술원 “뉴선샤인계획”으로 1988년부터 진행되어온 300kw급 열병합발전용 세라믹 가스터빈 프로젝트도 마무리 단계를 맞아 1998년도로서 종료된다. 터빈입구온도 1,350℃ 단체효율 42%이상(LHV)를 목표로 하였으나 301형(IHI), 302형(KHI) 모두가 낮을지라도 단기간내 목표성능이 달성될 것이다. 301형은 1축 재생식 302형은 2축 재생식이고 어느것이나 축류터빈이다. 세라믹 가공은 301형이 KGK사, 302형이 京세라믹에서 하였고 재료는 어느것이나 질화규소(Si₃N₄)이다. 301형의 기본형 터빈은 TIT가 1,200℃ 경우 열효율 30.5%를 달성, 1,250℃이상의 온도에서 약 50분의 운전시간을 기록하였다. 302형은 TIT가 1,350℃에 도달하여 열효율이 37.0%라는 세계최고치를 달성하였고 운전시간도 TIT 1,300℃에서 12시간 이상의 연속운전을 기록하고 있다. 금후 TIT 1,200℃에서 1,000시간의 장시간 운전시험 및 열효율 42%를 목표로 하고 있다.

미국에서는 승용차용 100kw급 가스터빈을 목표로 1979-1987년의 8년간 AGT(Advanced Gas Turbine Program) 계획이 진행되었다.

AGT-100(DDA)는 TIT 1,288℃의 2축재생식, AGT-101(Ford)는 1,372℃의 1축재생식을 목표로 하였으나 운전시간은 양자 공히 100시간 정도에 끝났고 열효율은 목표치의 60% 정도였다. 원인은 주로 열교환기나 실부분의 누설이다. 결국 노즐, 열교환기등 정지부품의 세라믹화에 성공하였으나 로-타는 성공하지 못하여 미국은 세라믹 가스터빈 개발을 일단 체념한 것같이 보였다. 그러나 일본등에 자극을 받아 DOE는 다시 1992-1998년(7년간)의 CSGT(Ceramic Stationary Gas Turbine Project) 계획을 수립하였다.

Allied Signal, KYOCERA, NGK등으로부터 세라믹 부품의 공급을 받아 Solar Turbine사가 열병합발전용 Centaur 50(5MW)의 초단터빈, 노즐, 연소기등을 세라믹화하였기 때문에 TRIT(로타입구 온도) 1,121℃, 열효율 31.3%로 실용화에 달성할 목표를 설정하고 있다. 1997년 1월부터 3월에 걸쳐 San Diego 공장에서의 시험을 전부 마치고 4월부터 California주 Bakersfield에 있는 ARCO(Atlantic Richfield Co)사의 석유채굴 현장에서 4,000시간 계속 내구시험에 들어갔다.

이 최초의 기기는 Dupon제 Sic/Sic의 CFCC 연소기 라이너, NGK사제 SN-88노즐, Allied Signal제 AS-800동익을 사용하고 있다. 1997년 6월 일본 파인 세라믹협회 주최의 CGT 해외조사단이 센디에고 공장을 방문하였는데 텔레비 모니터 화면에서는 TRIT 1,010℃에서 425시간의 운전기록을 나타내었다. 여기에는 13회의 기동정지를 포함하고 있다. 이 TRIT 1,010℃에서 4,000시간 현장엔진 시험종료후는 엔진을 개방하여 비파괴검사 잔류응력 검사등을 한후 1998년에는 AS-800급 및 KYOCER의 SN-281의 동익으로 교환하여 TRIT를 1,121℃로 올려 4,000시간 내구시험을 할 예정이다. 지금까지 일본은 약간 앞서가고 있다고 생각하지만 미국도 종반 강한 추격을 보여 리-드를 허용할 것이라는 관측이 있다. 일본도 TIT를 낮추드

라도 내구시험에 들어갈 필요가 있다. 수년전까지 마음 한구석에 세라믹 부품에 대한 일말의 우려 내지 불안이 남아 있었으나 425시간 안정된 것을 보고 불신은 완전히 없어졌다.

구라파에서는 볼보사가 중심이 되어 추진되고 있는 AGATA(Advanced Gas Turbine for Automobiles) 계획이 있다. 이 프로젝트는 EURECA 계획의 일환으로 1987년에 100kw 자동차용 주기엔진으로 시작하였으나 부분부하의 효율이 낮기 때문에 1993년에 하이브리드 전기구동자동차의 배터리를 충전용으로 60kw기를 개발하는 계획으로 변경되어 다시 시작하였다. 푸조, 르노사등도 부품의 제작에 가담하고 있으나 실질은 볼보사에서 끌고나가고 있다. 세라믹부품은 레디얼 터빈로타, 축매연소기, 재생열교환기에 한정되어 주로 스웨덴의 세라마사에서 공급받고 있다. 1996년까지 4년간에 약 일화 25억엔의 예산으로 세라믹부품타당성 시험을 하였으나 이후 계속된 상황은 불분명하다.

롤스로이스사 등에서는 항공기용 엔진에 적용하는 CMC(Ceramic Matrix Composites)에 주력하였고, 탄화규소/알루미늄 복합재료가 많기쉬운 터빈팁실용으로 드디어 실용화되었다.

TBC(Thermal Barrier Coating)에 관하여는 구미에서도 실용화 되어있다.

(3) ABB사의 "Sequential Combustion"

1993년도에 영국의 Bourne mouth에서 미국 기계학회가 주최한 COGEN-TURBO-93이 개최되었다. 이때 ABB사의 SEV(Sequential Environment)가 소개되었다. 그림1의 개념도에서 보는 바와 같이 초단연소기기의 다음에 1단의 터빈을 설치하여 팽창시켜 온도를 내린 가스에 다시 연료를 주입하여 재열한다.

이것을 다단으로 반복시키면 터빈은 등온팽창에 가까워 그다지고압으로 하지 않아도 효율이 상승하고 배기온도도 올라가기 때문에 복합사이클이나 리파워링에 적용하기 쉽다. Self-igniting에서 Lean-burn, TIT는 1,200°C에 NOx도 적다는 설명이다. 일본이

일찌기 다루었던 "고효율터빈개발" 국가프로젝트는 1,500°C, 55기압의 재열사이클을 목표로 하여 실패하였으나 ABB사의 이와같은 방법에는 생각이 미치지 못했다. ABB사는 그후의 기술을 GT/24 GT26기로 실용화하여 복합사이클이나 리파워링용의 기간기술로 육성하고 있다. 그림 2에 GT26을 사용하여 낡은 석탄화력 플랜트를 리파워링한 예를 나타내었다. 이 플랜트는 독일 라인강 연안 karlsruhe의 바텐베르크 전력회사의 라인하펜발전소 4호기로 출력 100MW, 1964년 운전을 개시하여 이미 100,000시간 가동하고 있다. 보일러를 철거하고 GT26과 배열 열교환기로 교환하였는데 GT26은 출력(발전단) 241MW 단체효율 38.2%, 압축기 압력비 30, 배기유량 543kg/s, 배기온도 610°C, NOx<25ppm(천연가스15%, O₂), 압축기 축류 22단, 터빈축류 5단, 연소기 2부, 길이 12.3×폭 5×높이 5.5m, 중량 335톤 배가스 열교환기에서 155bar 540

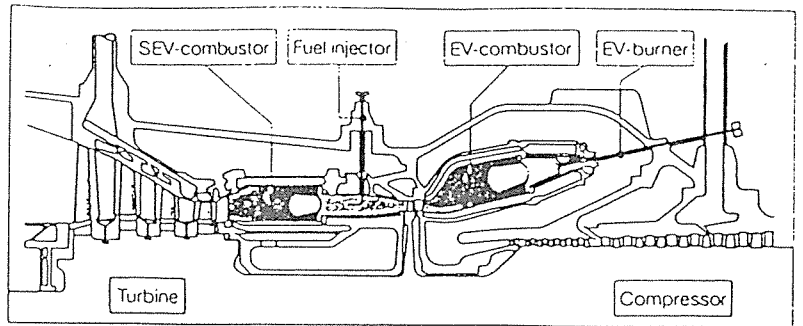


그림1. ABB사 GT26형기의 "Sequential Combustion" 개념도

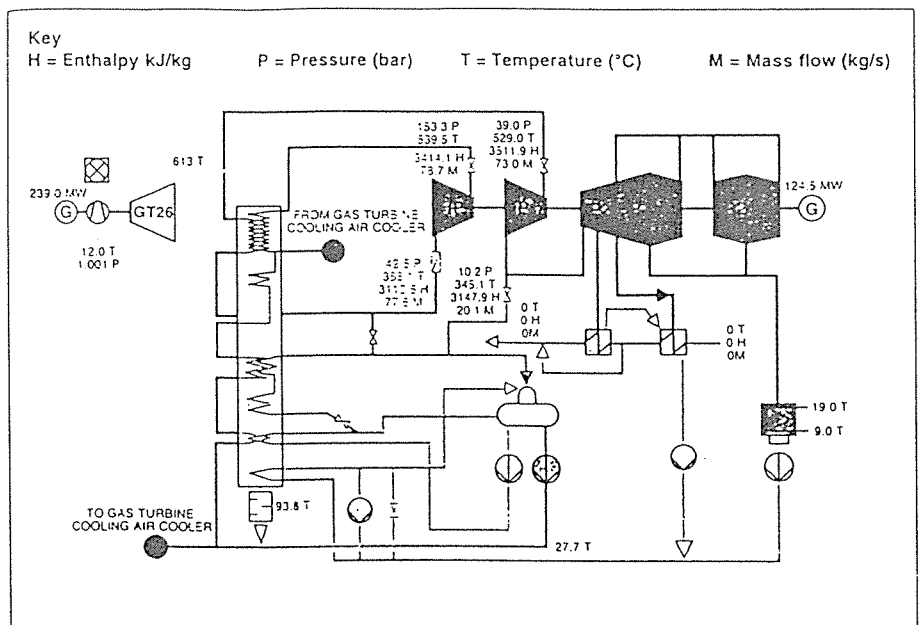


그림2. ABB사 GT26에 의한 석탄화력의 리파워링

℃의 증기를 생산하여 기존의 BBC제 증기터빈을 구동한다. 증기의 재열온도는 530℃이다.

이러한 리파워링 결과 우선 증기터빈 출력이 단체의 경우 100MW에서 120MW로 증가하고 가스터빈과 병합하여 360MW가 되며 열효율은 38%에서 58.2% (LHV)로 증대하였다.

ABB사에 의하면 가스터빈: 증기터빈 출력이 대개 2:1의 경우 복합사이클로서의 최대점인데 이번 리파워링에서 거의 이상적인 조합을 이루고 있다. 다시 말하면 GT26을 사용한 리파워링의 최초로서 이와 같은 조건을 충족한 것이 가끔 있었지만 놀라운 출력증가와 효율상승이다. "Sequential Combustion"이 "시스템에너지" 기술의 강력한 무기라는 것을 유감없이 나타내었다.

(4) 시스템 에너지의 극치 : 네델란드의 세계 최대 슈퍼쓰레기 소각 발전

ABB사에 대항하여 Siemens사의 가스터빈을 이용한 "시스템 에너지" 기술의 최적사례가 나타났다. 남부 네델란드 전력회사 EPZ가 중심이 되어 설립된 AZN사가 1997년 2월에 Moerdijk에서 운전 개시한 발전출력 339MW의 플랜트이다. 이 플랜트는 남부 네델란드 쓰레기를 연 600,000톤(550톤/일×3 소각로) 소각하는 플랜트에서 100bar, 400℃의 증기를 얻어 Siemens KWH사의 V64.3형 가스터빈(출력 60MW)×3기의 배기에서 510℃로 가열되어 증기터빈으로 보내진다.

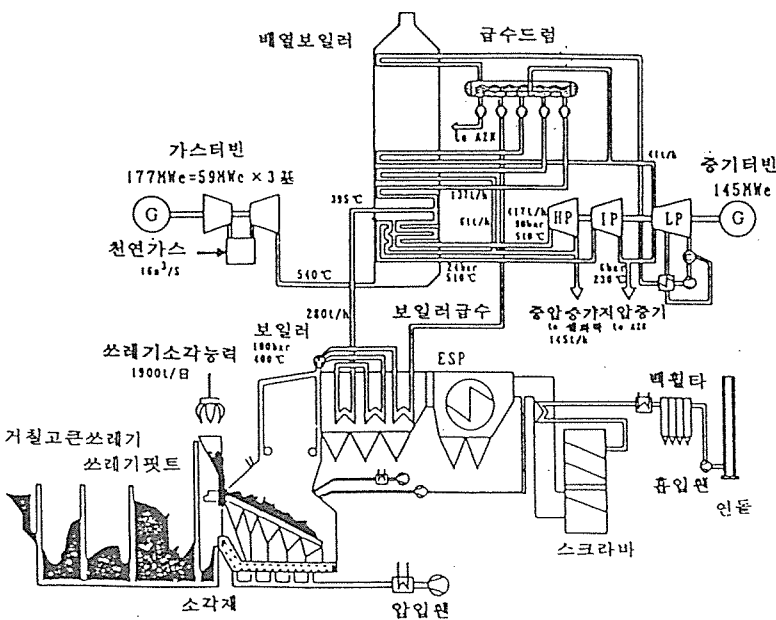


그림3. 네델란드 Moerdijk 의 세계최대 슈퍼쓰레기발전 열병합발전

V64.3형 가스터빈은 압축기 축류 17단, 터빈축류 4단, 배기량 186kg/s, 배기온도 540℃로 넓은 작동 범위에 거의 일정치를 확보하도록 설계되어 있고 복합사이클이나 리파워링에 좋은 상태이다. 증기터빈에는 139t/h의 증기를 보내어 180MW의 출력을 낸다. 증기의 일부 145t/h를 23.5bar 322℃ 조건으로 운하를 넘어 인접해 있는 Shell의 화학공장에 보내고 있다. 발전단효율 52% 이상이고 종합효율은 64%라고 한다. 네델란드는 선진국중에서도 덴마크 다음으로 CO₂ 배출삭감에 열심인 나라이다. 그 기술의 대책필두에 열병합발전을 들고 있다. 예에서 말한 바와 같이 1,600톤/일의 소각과 145t/h의 증기를 보내는 산업용 열병합발전을 조합하여 34만 kw의 발전을 하는것은 시스템 에너지의 극치이다. 쓰레기를 소각하여 CO₂로 배출하기만 하던 쓰레기 소각장이 고효율의 발전소로 변하였고 그 발전전력만큼 기존의 석탄화력을 정지하는 것이 가능하여 CO₂ 삭감에는 이중의 효과를 가져다 주었다.

2. 소형 가스터빈 기술의 발전

최근 ASME TURBO EXPO등 전시회에서 눈을 끌기 시작한 것은 20~200kw급 소형 가스터빈 전시이다. 아직 시장에 나와 있지는 않지만 열병합발전용 또는 자동차용으로 주목할만 하다. 특히 규제 완화에서 가능하게 된 「멘슨 열병합」용의 강력한 무기로 주목되고 있다. 이하에 몇가지를 정리하여 둔다.

(1) Capstone Turbine Corporation (Tarzana, CA, USA)

터보 EXPO'96에서 발견된 것이 Capstone Turbine Corporation제의 "Pint-size" Gas Turbine Generator이었다. 사장인 Paul Craig씨는 항공용 보조발전기(APU)용 100~3000HP 가스터빈, 포드사에서 자동차용 세라믹가스터빈, 그후 Allied Signal Garrett사에서 터보차지등을 다루어왔다.

이들의 경험을 살려 저비용 대량생산의 소형가스터빈 발전을 만들려는 생각으로 1988년에 이 회사를 설립하였다. 지금 Allied Signal이나 Elliot사등 소형가스터빈을 만들고 있는 다른회사에 비하여 2년은

앞서가고 있다고 한다.

그들의 개발철학은 모두 입증된 기술을 조합시켜 완성시키는 것이지만 압력비도 압축기, 터빈의 재료도, 온도도, 정적부품의 구조도, 모두 터보차지의 기술이고 다만 항공업계에서 25년간 사용되어온 에어베어링 기술을 도입하였다는 것이 포인트이다. 몇가지의 독특한 것도 있지만 재료와 가공법은 모두 확립된 기술을 이용하였다.

출력범위는 10~100kw로 생각되지만 현재는 TIT 700℃ 정도로, 출력 30kw(15℃,35℃에서 24kw), 열효율 30%, NOx 9ppm(O₂ 15%), Co 9ppm(O₂15%), 발전기포함 본체중량 75kg, 카바포함 182kg, 판매가격 550\$/kw를 목표로 하고있다.

다만, 연간 10만대 생산조건하에서 가격이다. 정비는 본체가 공기베어링이며 물도 기름도 사용하지 아니하기 때문에 불필요하고 1P 휠터의 교환만으로 40,000시간동안 정비가 불필요하다고 한다. 용도는 현재로 한정되어 있다고 생각하지 않지만 수요대수가 많은 것은 하이부릿드 전기자동차일 것이다. 현재의 것은 배기온도가 260~270℃로 낮기 때문에 자동차용 열병합에는 약간 불리하지만 흡수식 냉온수기에는 꼭 맞기때문에 맨손 열병합 발전용으로 검토할 가치가 있을 것이다. 또한, 모빌하우스의 공조, 비상용 발전기등의 용도도 생각할 수 있다. 1997년 후반에는 일본에 시험용 맨손이 나올것으로 본다.

(2) Elliott Energy Systems (Jacksonville, FL, USA)

ASME Turbo Expo '97에서는 Elliott사의 TA-45형 가스터빈 발전기가 눈에 띄었다. 출력 45kw, 116,000rpm, 압력비 4.1, TIT 1,010℃, 재생열교환기부착 단체효율 30%, 발전기는 터빈에 직결되어 인버터에서 주파수 변환한다. 유류용 베어링, 길이 1,626×폭 762×높이 864mm의 패키지에 들어있고 중량은 136kg 이하라고 한다. 본체가격 13,500\$(3.6만엔/kw)로 추정, 배열열교환기를 넣으면 3,100\$이 증가한다. 이 시스템의 가스컴프렛사는 Blachmer사의 제품으로 상기 가격에는 이것을 포함하고 있다.

(3) NREC (Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, MA, USA)

Ingersoll-Rand Co의 자회사이지만 PowerWorks의 상품명으로 30kw-200kw의 소형가스터빈을 개발중에 있다. 재생열교환기 부착 단체효율이 33%, 열병합발전을 한경우 총효율은 91%이상이라고 한

다. 패키지는 길이 889×폭 1,016×높이 1,778mm, 중량 908kg, 이것은 감속치차로 발전기를 구동하고 있다.

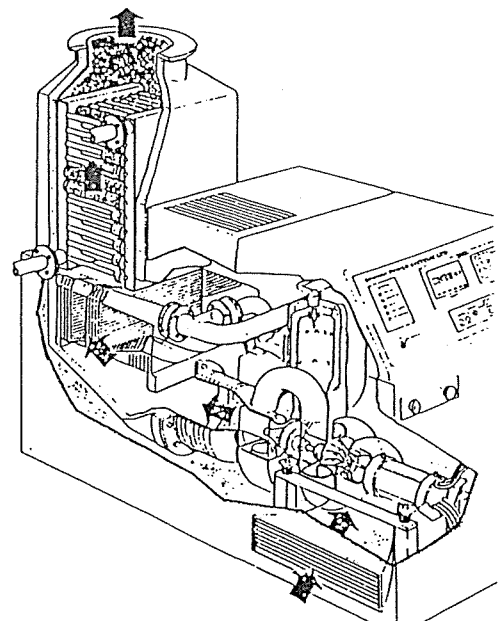
NOx는<9ppm(O₂ 15%), CO는 25ppm(O₂ 15%), 수명은 60,000hr, 정비간격은 8,000시간, 가격은 미정으로 있으며 가스콘은 자사에서 개발중이라고 한다. 이 가스터빈은 열병합발전뿐만 아니라 HFC-134a를 냉매로한 압축기를 구동하는 최대 400RT,COP 2.1(HHV)이라고 하는 가스터빈 냉각장치도 있다.

(4) Mega Limburg (Maastricht, Netherland)

1997년 5월 네델란드 암스텔담에서 "The World Sustainable Energy Trade Fair"에 네델란드 Mega Limburg사의 소형가스 가스터빈 열병합발전이 전시되었다. 이 회사는 남부 네델란드의 에너지관련 7사가 출자하여 1997년 1월 1일에 설립되었다. 시스템의 전기출력 60kwe, 열출력 238kw(95℃ 온수), 종합열효율 87%, 패키지 규격은 길이 2,000×폭 800×높이1,500(열교환기출구)mm,중량 850kg으로 콤팩트하다.

가스터빈의 제조자는 영국 사잔프톤의 Bowman Power Systems Ltd. (BPS)사인데, 동사는 Turbogem 시리즈로 불리우는 25~500kWe의 가스터빈발전기를 제작하고 있다. 이 시스템은 축류압축기1단, 압력비4.66,축류터빈1단,회전수105,000rpm으로 발전기 직결형이고 배가스온도는 527℃이다.

카다로그에 들고 있는 열병합발전 고객은 병원, 노인주택, 업무용빌딩, 슈퍼마켓, 학교, 소규모 지역난방, 집합주택, 레저센타등이다. 아래 그림은 시스템의 구조를 나타내고 있고 가격은 미정이다.



Mega Limburg사의 60kW. 소형 열병합발전 시스템