

분산발전 시스템용 마이크로 터빈

· 전 승 배 | 삼성테크윈(주) 파워시스템 연구소, 수석연구원
e-mail : cseung2@samsung.co.kr

이 글에서는 미래의 초소형 분산발전 시스템의 동력원으로 선진국에서 경쟁적으로 개발하고 있는 500kW 이하 마이크로 터빈의 시장동향과 기술적 특성 및 국내 기술현황에 대하여 알아본다.

정보통신 및 컴퓨터 등의 IT 산업의 급속한 발전은 인간의 작업환경과 전력공급형태에 큰 변화를 일으키고 있다. 과거 대형 산업단지나 대형 건물의 사무실에서 집단적으로 행해지던 인간의 작업환경은 인터넷의 보편화와 함께 소형 사무실이나 가정의 개인용 컴퓨터 등을 이용하여 행해지는 개별적인 형태로 급속히 변화되고 있으며, 이에 따라 더욱 분산화된 작은 스케일의 전력이 요구되고 있다. 고도의 기술 집약적인 IT 산업에서는 양질의 99.99%의 높은 신뢰성과 안정성을 가지는 전력이 요구된다. 그러나 현재의 노후화된 발전 및 송배전 설비를 이용하는 중앙집중식 시스템으로는 이러한 요구를 충족시킬 수 없다.

많은 전문가들은 이러한 산업 구조의 변화가 원자력 등의 대형 발전설비를 이용한 중앙집중식 시스템으로부터 복합발전, 열병합발전 등을 중심으로 한 중소형

분산발전 시스템으로의 변화를 가속시키고, 이러한 가운데 초소형 분산발전 시스템을 중심으로 한 새로운 전력시장이 형성될 것이라고 예측하고 있다. 영국의 Economist 지는 20세기 말 무선 전화기가 인간의 생활환경을 변화시킨 것만큼이나 21세기에는 초소형 발전설비의 보편화가 우리의 산업 환경을 혁신적으로 변화시킬 것으로 전망했다.

이 글에서는 미래의 초소형 분산발전 시스템의 동력원으로 선진국에서 경쟁적으로 개발하고 있는 500kW 이하 마이크로 터빈의 시장동향과 기술적 특성 및 국내 기술현황에 대하여 알아본다.

마이크로 터빈 시장동향

가스터빈은 타 동력원 대비 신뢰성 있는 양질의 전기를 생산할 수 있고, 단위면적 당 출력이 높아 입지의 선정에 유리하고, 환경 오염 물질의 배출이 매우 적은 환

경친화성을 가지고 있으며, 열병합을 할 경우 높은 열효율을 실현할 수 있다는 장점들을 가지고 있다. 현재까지는 주로 중대형 복합발전 및 열병합 발전용으로 수백 MW에서 수십 MW 크기의 제품들이 분산발전 시장에서 급격히 시장을 넓혀 나가고 있다. 미국을 위시한 선진국에서는 1990년 중반부터 마이크로 터빈을 이용한 코제너레이션 시스템의 개발에 박차를 가하여 현재 수십 kW에서 수백 kW의 제품들이 출시되고 있다. 마이크로 터빈은 왕복동 엔진에 비해 효율측면에서 다소 뒤지며, 초기 취득가격이 높다는 단점이 있으나, 설치 공간이 적고 유지·보수가 편리하여 경제성이 우수하고 소음 및 공해 측면에서 뛰어난 성능을 가지고 있어 소형 분산발전 시스템으로서 활용성이 가장 높은 제품으로 인식되고 있다.

1998년 미국의 Capstone 사가 세계 최초로 30kW 급 마이크로

터빈 발전시스템을 상용화한 이래 Honeywell, Elliot(Bowman), PWC, Turbec 사 등이 상용화된 제품을 출시하고 있고, 가까운 일본에서도 미츠비시중공업, 가와사키중공업, 토요다 터빈 시스템 등이 경쟁적으로 개발에 참여하고 있다.

마이크로 터빈의 강점은 천연가스, LPG, 가솔린, 동유, 알콜, Bio-mass 등 다양한 종류의 연료를 사용하여 기존 발전시스템 대비 신뢰성과 안정성이 뛰어난 양질의 전력을 공급할 수 있다는 것과 공해배출 물질이 아주 적다는 것이다. 마이크로 터빈은 전기를 일으키는 냉난방기로서 전기뿐 아니라 대량의 열을 사용하는 병원, 복지시설, 목욕탕, 호텔, 스포츠 센터, 대형식당 등에 발전기 및 열병합발전기로 판매되고 있다. 미국에서는 맥도날드 사 등 대형 식품업체, 월마트 등 대형유통업체 등이 자사점포에 마이크로 터빈 열병합 시스템을 도입하려고 준비하고 있고, 일본에서도 편의점 로손과 다이와 하우스 등이 자사의 공장, 점포 및 호텔 등에 도입을 계획하고 있다. 이와 함께 동경가스 등 가스회사들은 기존의 가스 판매에 국한된 사업영역에서 벗어나 전기와 열을 동시에 판매하는 종합에너지 공급업체로 변신하기 위한 일환으로서 본격적으로 마이크로

터빈 코젠 시스템의 경제성 평가 시험을 수행하고 있다.

미국 에너지성의 자료에 따르면 세계 발전설비 용량은 1999년을 기준으로 3,180GW에 이르고 있으며, 2010년까지 향후 10년간 신규 발전설비 증설규모는 1,415GW에 이를 것으로 예측하고 있다. 신규 발전설비 증설의 20%를 \$500/kW급의 분산발전설비로 대체할 경우 세계 분산발전 시장은 2000년 60억 달러에서 2010년 530억 달러 규모로 급증할 것으로 예상되며, 그 중 마이크로 터빈의 시장규모는 2010년에 50억 달러 규모의 성장할 것으로 전망된다.(Global Equity Research, UBS Warburg LLC, 2001)

마이크로 터빈 구조 및 핵심 요소기술

마이크로 터빈은 항공기 전원 공급용 보조동력장치(APU)를 자동차용 터보차저의 양산기술을

이용하여 생산하면 저가의 하이브리드 자동차 동력공급장치 및 발전용 동력장치를 구현할 수 있다는 개념에서 출발하였다.

그림 1은 마이크로 터빈 열병합발전시스템의 개념도와 Capstone 사의 마이크로 터빈 해체도를 나타낸다. 1단의 원심압축기에서 압축된 공기는 리큐퍼레이터에서 예열된 후 연소기로 공급된다. 연소기에서 가열된 고온 고압의 가스는 터빈에서 팽창을 하며 압축기와 고속발전기를 회전시켜 발전을 한다. 고속발전기는 시동시 압축기를 구동하는 모터의 역할과 정상운전시 고주파수의 교류전력을 발생시키는 발전기의 역할을 한다. 리큐퍼레이터는 전열면적 극대화를 통한 효율 상승을 위하여 가늘고 긴 유로를 가지도록 설계되어 있어 훌륭한 소음기의 기능을 가진다. 리큐퍼레이터 후방에서 배열회수장치를 이용하여 증기나 온수를 생산하면 열병합 효율은 75~80%에 달해 충분한 시장경쟁력을 가지는

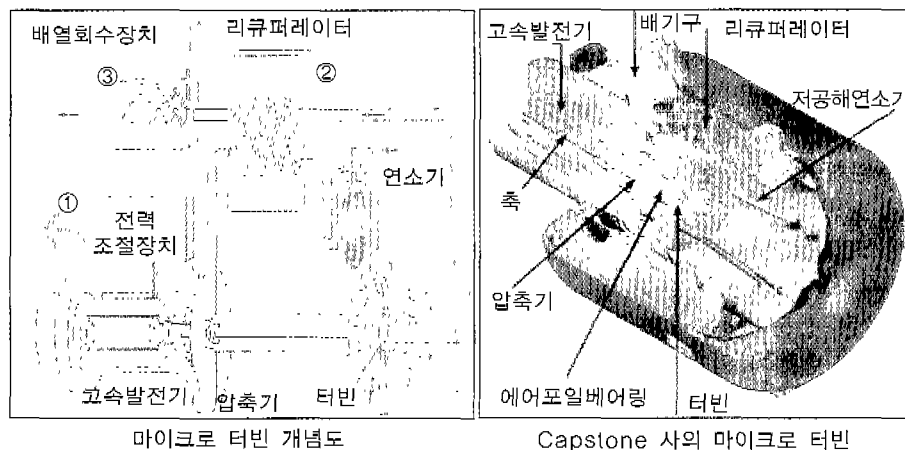


그림 1 마이크로 가스터빈

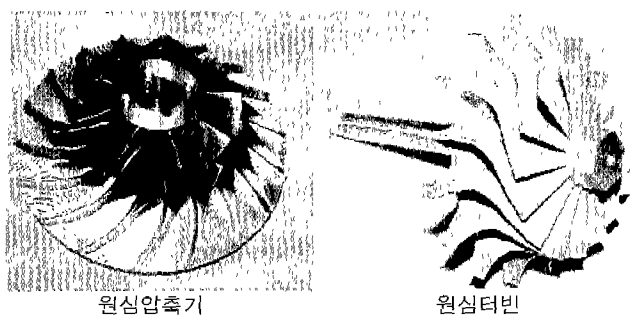


그림 2 마이크로 터빈용 원심압축기와 원심터빈

발전 시스템이 된다. 축계를 보면 원심압축기와 원심터빈이 고속발전기와 동축으로 연결되어 에어포일베어링에 의해 지지되는 간단한 구조를 취하여 기존의 소형 가스터빈 발전시스템 대비 기아 박스 및 오일 윤활 시스템을 생략하여 부품수를 획기적으로 축소하였다.

마이크로 터빈의 핵심요소기술로는 고효율 원심압축기 및 원심터빈, 저공해연소기, 고효율 리큐퍼레이터, 고속발전기, 발전된 고주파 교류를 요구하는 저주파 교류로 변환시키는 전력변환장치, 그리고 축계를 지지하는 에어포일베어링 등을 들 수 있다.

그림 2는 마이크로 터빈에서 사용되고 있는 원심압축기의 임펠러와 터빈의 로터를 보여준다. 마이크로 터빈용 원심압축기와 터빈은 소형임에도 불구하고 각각 80%와 87%의 높은 효율이 요구되는데, 효율은 공력적인 고효율 설계기술 외에도 제작 정도에 의해 많은 영향을 받으므로 제작기술이 매우 중요하다. 그림의 임펠러는 5축 밀링머신으로 가공한 것이나, 마이크로 터빈의 임펠러는 제조원가의 절감을 위하여

코널 계열의 내열재료를 로스트왁스 방법으로 정밀 주조하여 제작된다. 에어포일베어링에 걸리는 축하중의 조절과 스트레스(hoop stress)의 저감을 위해 고온의 터빈 입구 허브(hub)부는 조가비 모양으로 파낸 형상을 하고 있다.

그림 3은 Honeywell 사의 75kW 마이크로 터빈에 장착된 저공해 연소기를 나타낸다. 이 연소기는 연료와 공기를 완전히 균일하게 혼합하여 연소영역에 공급하고, 안정연소영역의 하한에 근접한 공연비에서 작동하도록 하여 화염온도를 낮추어 NOx의 생성을 억제하는 예혼합 희박연소방식을 채용하고 있다. 이 연소기는 NOx 생성량이 20ppm 미만으로 우수한 공해물질 배출 특성을 가지고 있다. 선진사들은 연료-공기 혼합기를 가연한계 이하의 온도에서 촉매로 산화시켜 10ppm 이하로 NOx 배출량을 극소화시킨 촉매 연소방식의 저공해 연소기의 상용화 개발에 박차를 가하고 있다.

고속발전기는 50,000~60,000rpm으로 회전하며 고주파 교류를 발생시키는 장치이다. 고속으로 회전하

는 로터는 자속밀도가 높은 SmCo 영구자석을 고강도의 인코넬 리테이너로 감싼 구조를 가지고 있다. 고속발전기는 고속회전에 의한 원심력으로 리테이너가 큰 스트레스를 받으므로 직경의 증가를 통한 발전용량 증대에는 제한이 있다. 길이를 증가시킬 경우 축계의 위험속도가 낮아져 큰 진동을 유발하는 위험속도를 통과하여 운전해야 한다는 어려움이 발생한다. 그러나 에어포일베어링의 감성 및 감쇠특성과 하중지지 능력이 크게 향상되어 위험속도 이상에서 운용되는 제품도 개발이 되고 있다. 향후 에어포일베어링으로 지지되는 고속발전기의 발전용량은 계속 증대될 수 있을 것으로 예측된다.

전력조정장치는 시동시 배터리로부터 전압을 공급받아 점화회전수까지 축을 구동하기 위한 고전압 직류 생성용 부스터와 송압된 고전압 직류를 고주파수의 교류로 변환하기 위한 모터링 인버터를 내장하고 있다. 마이크로 터빈이 정상 운전될 때 고속발전기에서는 고주파 교류가 발생되는데 전력조정장치는 이 고주파 교류를 직류로 바꾸는 컨버터와 직류를 사용처에 알맞은 저주파 교류로 바꾸는 인버터를 내장하고 있다.

에어포일베어링은 항공기 환

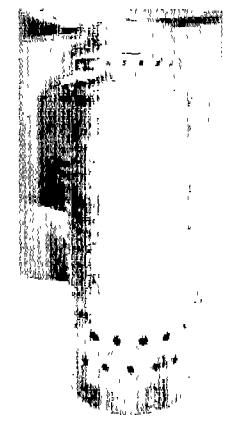


그림 3 저공해 연소기

경제어장치(ECS)의 ACM(air cycle machine)에서 오랜 기간 검증된 기술이다. 축이 회전하면 축과 포일 사이의 웨지부로 공기가 유입되어 압력장이 형성되며, 이 압력장에 의해 축은 포일로부터 떨어져 무접촉 상태로 회전한다. 마이크로 터빈에서는 보다 무거운 축계를 지지하기 위해 범프형 또는 멀티레이어형 에어포일 베어링이 주로 사용된다.

Capstone 사의 에어포일베어링은 그림 4와 같이 세 개의 얇은 판 스프링이 120도 간격으로 축을 지지하며, 판 스프링의 뒤에서는 물결모양의 작은 범퍼가 판을 지지하는 구조를 하고 있다. 판 스프링의 뒷면에 설치된 물결모양의 작은 범퍼는 댐퍼로서의 역할을 하며, 베어링의 하중 지지능력을 증대시킨다. 축은 저속 회전시 판과 접촉하며, 일정 회전수 이상에서 판으로부터 분리된다. 따라서 가속과 감속시 판과 축의 응착을 막기 위하여 PTFE라는 특수한 고체 윤활재가 판의 표면에 피복되어 있다.

에어포일베어링의 구현에서 간과할 수 없는 기술적 문제는 고속회전으로 인해 접성유체에서 발생하는 발열과 고속발전기에서의 발열을 적절한 냉각시스템을 구성하여 해소시켜 주어야 한다는 것이다. 에어포일베어링으로 지지되는 고속발전기 축계의 냉각문제는 Elliot 사가 에어포일베어링을 포기하고 Oil 저널베어링으로 전환한 계기

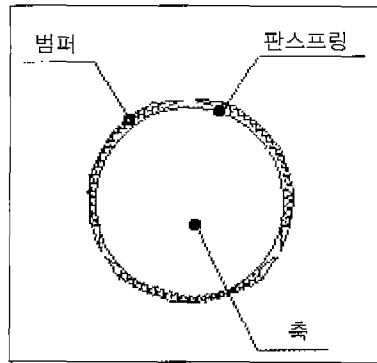


그림 4 범프형 에어포일베어링

가 되었다는 후문이 들릴 정도로 초기 마이크로 터빈 개발에서 가장 어려운 기술적 문제점의 하나였다. Capstone, Honeywell 사 등은 냉각기술의 향상 및 냉각시스템개선을 통해 이러한 문제를 해결하였다.

리큐퍼레이터는 마이크로 터빈의 효율향상에 있어 빼어 놓을 수 없는 핵심장치이다. 리큐퍼레이터가 없는 마이크로 터빈은 14~15%의 낮은 효율을 가지나 리큐퍼레이터를 통해서 배열을 회수하여 현재 25~28%에 이르는 높은 효율을 얻고 있다. 리큐퍼레이터는 전열면 밀도가 1,600m²/m³에 이르는 그림 5와 같은 물결형 핀(wavy fin)을 전열면으로 사용한다.

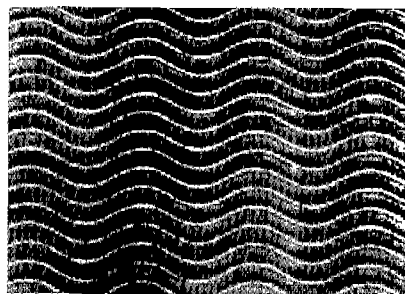


그림 5 물결형 전열면

Solar 사는 전열면을 두께 0.08mm의 얇은 SUS 347이나 인코넬 박판을 높이 2.4mm 폭 0.8mm 정도의 가늘고 긴 물결형 유로가 형성되도록 접어서 만든다. 그림 6은 미국의 Solar Turbine사에서 설계 제작하여 Honeywell사에 공급한 프라이머리 서피스(Primary Surface)형 리큐퍼레이터의 구조를 나타낸다. 기본단위인 에어셀(air cell)은 두 장의 물결형 핀을 그림과 같이 포개고 그 양단을 티그 용접하여 제작된다. 리큐퍼레이터는 요구되는 전열면적에 따라 에어셀을 적층하여 제작되며, 연소가스와 압축공기가 얇은 면들 사이에 두고 직접열교환을 하는 형태를 취하고 있어 90%의 높은 효율을 가지며, 전열면들이 구속되지 않고 열응력에 강한 구조로 40,000시간의 긴 수명을 가진다. 일본의 Toyo 라디에이터사가 자동차용 라디에이터 제작기술을 이용하여 개발한 Honeywell사의 리큐퍼레이터는 fin과 plate를 적층한 후 브레이징 접합하는 플레이트-핀형을 택하고 있다. 그러나 고온에서 사용되므로 내열재료의 낮은 열전도율로 인한 핀

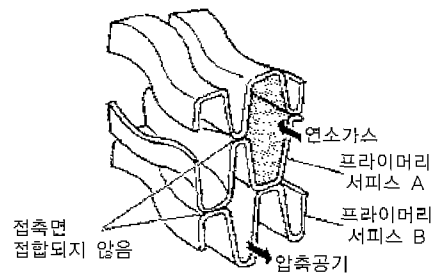


그림 6 프라이머리 서피스 열교환기 개념도

효율의 저하로 최대효율이 85% 정도인 것으로 알려져 있다.

국내 마이크로 터빈 관련기술

미국에서는 DOE의 ATS(advanced turbine system) 프로그램을 통해 효율목표 40%의 고효율을 2세대 마이크로 터빈의 개발을 위한 노력이 본격적으로 진행되고 있다. 압축기와 터빈의 설계 개선을 통한 압축비와 효율의 향상, 내열재료의 개선과 냉각기술의 향상을 통한 터빈 입구온도 및 효율 향상 등이 폭넓게 연구되고 있다. 일본에서는 공업기술원의 선사인 계획의 일환으로 가와사키중공업을 중심으로 진행한 세라믹가스터빈 개발 프로젝트를 통해 42.1%의 효율을 이미 달성한 바 있다.

국내의 항공용 및 대형 산업용 가스터빈 개발기술 및 인프라스트락처는 미국, 영국, 프랑스, 일본 등의 선진국 수준에 크게 뒤쳐져 있으나, 소형 가스터빈 개발기술 및 인프라스트락처는 대형 국책과제를 통하여 상당부분 갖추어져 있다. 국내에서는 국책과제를 통하여 두 개의 소형 산업용 가스터빈이 운용 가능한 수준으로 개발된 바 있다. 삼성항공(현 삼성테크윈)이 중심이 되어 산학연 공동으로 산업자원부의 공기반과제를 통해 1997년에 개발한 1.2MW 산업용 가스터빈은 효율 27%의 고효율 발전용 엔진으로 국내에서 개발된 가스터빈의 효시이다. 이 과제를 통하여 소형 가스터빈의 설계, 시험 기술을 습

득하고, 압축기, 연소기 성능시험설비와 개발엔진 시험설비 등을 갖추게 되었고, 터빈 냉각 블레이드 등의 정밀주조 관련 제조기술의 기반을 구축할 수 있었다. 과기부 민군겸용사업으로 삼성테크윈을 중심으로 항공우주연구원 및 서울대학교 터보동력연구소가 공동으로 개발하고 있는 보조동력장치(APU)는 마이크로 터빈과 같이 가스터빈과 동축에 연결된 고속발전기를 통해 발전하는 구조를 가지고 있다. APU는 발전만 할 경우 14%의 효율로 90kW의 전력을 생산할 수 있는 소형가스터빈으로 현재 부하성능 시험 및 내구성 시험이 진행되고 있다.

가스터빈은 아니지만 마이크로 터빈의 핵심 요소기술과 관련하여 언급되어야 할 개발사례는 과기부의 중점연구개발사업으로 삼성테크윈이 중심이 되어 개발한 150마력 차세대 초소형 압축기이다. 2단의 원심압축기가 동축에 연결된 고속모터에 의해 구동되며, 에어포일베어링에 의해 지지되는 구조를 가진 이 압축기는 이와 같은 형태로 개발된 세계 최초의 터보압축기로 마이크로 터빈에 사용된 핵심기술인 고속모터와 에어포일베어링 기술이 적용되어 있다. 마이크로 터빈용 리큐퍼레이터도 현재 통산부의 항공공기반 사업을 통해 추진되고 있는 가스터빈용 고효율 열교환기 개발 사업을 통해 개발이 진행되고 있다.

마이크로 터빈의 핵심요소기술과 관련한 국내의 기술기반은 지

금 어느 정도 갖추어져 가고 있다. 소형 상가건물, 다가구 주택, 아파트 단지, 공장 등 밀집된 주거환경을 가지고 있는 국내의 여건은 마이크로 터빈을 이용한 열병합 발전을 하기에 적합한 환경과 시장규모를 가지고 있다. 마이크로 터빈 시장은 GE, ABB, P&W, RR, Westinghouse 등이 독점하고 있는 대형 가스터빈 시장과는 달리 이제 시작되는 시장이며, 국내에서 축적된 소형 가스터빈 설계 제작기술을 이용하여 비교적 적은 개발비로도 경쟁력 있는 제품의 개발과 시장참여가 가능한 분야이다. 최근 GE는 이 시장의 잠재력을 인식하여 Honey-well 사의 마이크로 터빈 부분을 인수하여 본격적인 경쟁에 뛰어 들 준비를 하고 있고, P&W 사도 이 용도의 ENT400엔진 개발에 박차를 가하고 있는 상황이다. 이러한 사실에 비추어 볼 때 향후에는 몇몇 소규모 회사들이 기술개발에 치중하였던 지금까지와는 다른 양상으로 마이크로 터빈 시장이 전개되어 나갈 것이라고 전문가들은 예측하고 있다. 따라서 관련 기관들은 엄청난 국내의 시장규모를 인식하고 다른 선진국들과 같이 마이크로 터빈의 연구개발 및 초기투지에 대한 종합적인 계획을 수립할 필요가 있다. 과거 자동차나 반도체, 정보통신 산업의 육성 때와 같이 이 분야에 대한 집중투자를 통해 마이크로 터빈 발전시스템을 미래 대한민국의 수출 주도 상품으로 키워 나아가야 할 것이다.