

## 두산중공업의 소형가스터빈 개발

이 글에서는 가스터빈과 관련하여 국내에서 현재 활발히 기술개발을 진행하고 있는 두산중공업(주)의 기술개발 배경과 현황에 대하여 간단히 기술하고자 한다.

### 배 경

가스터빈 사업과 관련하여 두산중공업에서는 1980년대 후반 들어 국내 복합 발전용 가스터빈 수요를 목표로 해외업체와 공동으로 조립생산 사업을 추진하였으며 이를 위하여 가스터빈 조립공장과 시운전공장을 1993년 준공하였고, 연간 10대의 대형 가스터빈과 17대의 중형 가스터빈 조립생산 라인을 구축한 바 있다. 그 결과 38MW급 가스터빈을 국내 최초로 조립 제작 완료하여 공급하였으며, 이것이 국내 복합발전시장 진입하는 첫 시도였다. 하지만 추가적인 사업 범

위 확대를 위해 '90년대 후반 대형 발전용 가스터빈 사업에 대해 대대적인 타당성 조사를 하였으나 당시의 국내의 경제 사정으로 인하여 본격적으로 추진되지 못하였다.

최근 국내외의 발전시장에서는 대규모 발전설비의 설치한계 및 환경문제 등으로 인하여 발전 페러다임의 변화에 따른 신속적 전원공급을 위한 중·소규모 단위의 발전설비의 필요성이 증대되고 있다. 비연소 발전원인 연료전지는 열효율이 매우 높고 공해물질 배출이 거의 없어 차세대 동력원으로 가장 각광을 받고 있어 전 세계적으로 상용화 개발이 활

발하게 추진되고 있지만, 아직도 설치비용이 매우 높아 본격적인 동력원으로는 응용되지 못하고 있다. 풍력 및 태양광은 전기 생산이 연속적이지 못하고, 가격 경쟁력이 떨어져 장거리 송전이 불가능한 특수한 경우를 제외하고는 본격적으로 활용하기에는 아직 문제가 많다. 연소 동력원 중에서도 가장 널리 사용되는 디젤/가스 엔진(왕복동 엔진)은 다양한 종류의 제품들이 상용화되어 있어 비교적 저렴한 가격으로 설치가 가능하며 열효율도 비교적 높다. 그러나 다양한 종류의 연료를 사용할 수가 없고 환경 친화성이 약한 단점 때문에 차세대

동력원으로는 부적합하다. 특히, 원 동 기 의 NOx 배출량이 50ppm 이하로 규제될 경우, 추가적인 환경부담 비용으로 인하여 가격경쟁력이 현저히 떨어질 것으로 판단된다. 그러나 소형 가스터빈의 경우 디젤 엔진에 비하여 오염물질 배출이 10% 이내로 친환경성이 매우 높으며, 또 지난 수십여 년간 집중적인 기술 개발에 힘입어 현재 재생사이클(recuperative)에서 40%까지 효율을 달성함에 따라, 그 동안의 최대 단점인 낮은 열효율 문제를 극복함으로써 산업체 전반에 걸쳐 적용 가능성이 매우 증가할 것으로 예상된다. 이와 같이 몇 가지 가능성 있는 후보들 중에서 환경친화성과 함께 경제적으로 구현 가능한 축적된 기술 등을 종합적으로 고려할 때 소형 가스터빈이 분산 발전용 동력원로서 우선적으로 사용될 것으로 예상된다.

현재 정부에서도 기후변화협약 및 에너지 위기에 대응하기 위해 고효율/저공해 발전시스템인 소형 열병합 발전용량을 현재 100MW 수준에서 2017년까지 2,700MW 수준으로 확대 보급할 예정(2차 전원 공급계획, 산자부, 2004)이다. 그러나 국내에서는 열병합발전 용량 확대라는 계획만 수립되어 있고, 실제 열병합발전에 필요한 하드웨어(hardware)의 확보가 미미한 상황으로서 선진 기술보유국들의 국내

두산중공업은 이번 소형가스터빈 개발을 통하여 앞으로 예상되는 다양한 발전시장에 대응하고 발전설비전문업체로서의 위상을 강화하고 사업영역을 확대하고자 한다.

시장 침투에 뚜렷한 대처 방안이 없는 실정이다. 따라서, 정부의 열병합 보급 정책을 적극적으로 활용하여 국내 시장 확보 및 시장선점을 위해서 현 시점에서 소형 가스터빈 개발이 반드시 필요하다.

특히 가스터빈은 미래 발전시스템으로 예상되는 가스터빈/연료전지 하이브리드 시스템, IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) 등에 핵심 부품으로 사용되므로, 두산중공업과 같은 발전설비전문업체로서는 위상 강화 및 사업영역 확대를 위해서도 가스터빈에 대한 기술이 필수적으로 요구되었다. 또한, 소형 가스터빈 기술 확보 시 소재산업과 연계하여 중대형 가스터빈 고온부품 사업 참여 및 가스터빈 기술을 공유하는 산업용 터보기기류 등 타 사업분야로 사업 확장이 가능하며, 향후 두산이 중대형 가스터빈 분야로 사업 확대 시 출발점이 될 수 있으므로 회사의 미래 사업 성장 동력을 확보하는 차원에서 기술 개발 필요성이 크게 부각되었다. 이러한 관점에서 두산중공업에서는 1년에 걸쳐 자체 및 해외 전문기관

컨설팅을 통해 가스터빈 사업타당성을 검토 하였으며, 이를 기초로 기술 개발 및 사업계획을 수립하고 2005년 하반기 부터 소형 가스터빈 개발을 본격적으로 착수하게 되었다.

### 가스터빈 기술 확보

가스터빈 개발과 관련하여 어떤 기술을 어떻게 확보할 것인가는 매우 중요한 문제이다. 왜냐하면, 가스터빈에 요구되는 고유한 특성 때문에 기술 확보가 여타 첨단 분야 못지 않게 어렵다. 가스터빈의 경우 구성을 이루는 압축기, 연소기, 터빈 등의 부분품들이 서로 간에 열역학적, 공력학적, 회전 역학적 결합이 잘 이루어져야 시스템으로서 올바른 성능을 얻을 수 있기 때문에 많은 요소 기술들이 복합적으로 결합되어야 한다. 이 때문에 반복적인 설계과정이 필요하고 또 많은 경험적인 특성이 내포되어 있으며 부분품 개발 시기뿐 아니라 결합된 완제품에 대한 성능시험도 장시간 이루어져야 하기 때문에 많은 비용과 시행착오가 뒤따르기 쉽다.

중에서 두산중공업에서는 가스터빈 기술을 이미 보유하고 있는 업체와 전략적 제휴를 통하여 가스터빈 모델을 공동 개발하는 방법을 선택하여 비교적 적은 비용 및 위험성으로 가스터빈 모델 및 설계기술을 확보하고자 하였다.

두산중공업은 개발이 종료되는 시점에서 단위 출력당 단가 및 유지 보수 측면에서 경쟁력 우위의 발전용 가스터빈 제품을 개발하기 위해서 해외 선진업체와 기술협력체계를 통하여 제품개발(생산/설계능력 확보)을 추진하고, 이와 병행하여 독자적으로는 국내외 산·학·연 전문연구인력을 활용하여 설계 원천기술 및 신기술을 확보하는 Midentry 전략을 선택하는 것이 최선의 방법으로 평가되었다. 아울러 부분품 제작 및 시험은 국내외 인프라를 충분히 활용함으로써 소형 발전용 가스터빈과 관련한 국내의 기술 수준을 제고하는 기회로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 가스터빈 개발 방법

산업용 가스터빈의 개발 방법으로는 용도에 적합하게 처음부터 각 구성품을 개발하여 가스터빈 전체를 개발하는 방법과 기존의 가스터빈을 개조·개발하는 방법 등으로 크게 나눌 수 있다. 각각의 경우 고유의 장단점이 있으나 처음부터 설계된 가스터빈에 비해 개조·개발하는 것은 기

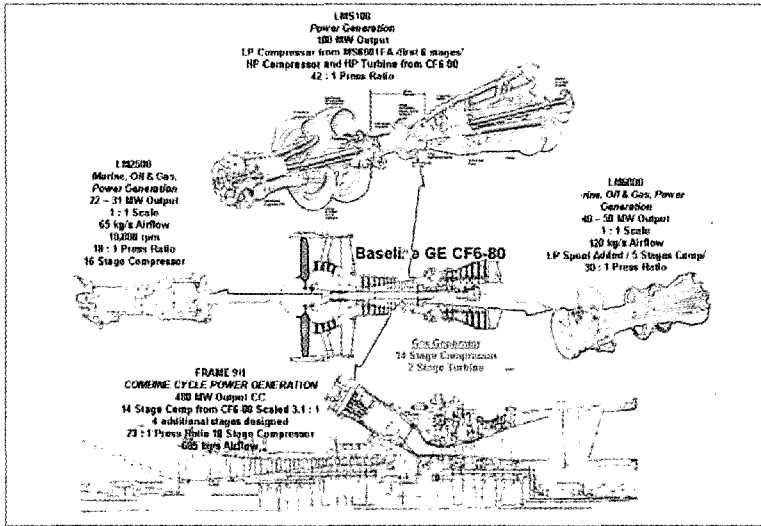


그림 1 GE 개조 개발 방법

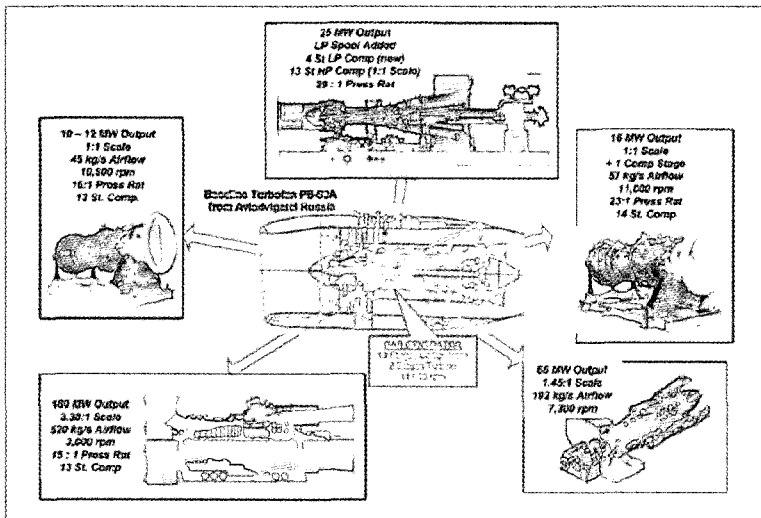


그림 2 러시아 개조 개발 방법

따라서 개발 업체의 목적, 개발 비용, 인원 및 기술수준 등을 고려하여, 현실적이고 실현 가능한 개발 추진 전략의 수립이 필수적으로 요구된다. 가스터빈 기술 확보 방법은 1) 자체개발 : 국내 기술 및 자원은 가스터빈 개발에 필요한 모든 기술을 자체적으로

확보, 2) 공동개발 : 해외선진업체와 전략적 제휴를 통하여 가스터빈 모델을 공동으로 개발하고, 설계 기술은 국내외 전문연구기관과 연계하여 핵심설계기술을 확보, 3) 기술전수 : 해외 선진업체로부터 모든 기술을 전수 받아서 확보 등이 있다. 제시된 방법

존 엔진의 설계인자들에 대해 높은 정확성과 신뢰성을 갖기 때문에 높은 효율성, 개발 리스크 및 비용 절감 등의 이점이 있다. 전 세계 항공용뿐만 아니라 발전용 가스터빈시장을 리드하고 있는 GE(General Electric) 사는 높은 기술이 적용된 항공용 가스터빈을 개조하여 다양한 산업용 가스터빈을 개발하고 있다.

마찬가지로 러시아는 군수산업에 엄청난 투자를 통하여 군용항공 공기에 사용할 목적으로 여러 종류의 가스터빈엔진을 개발하였고 구 소련의 붕괴와 함께 이러한 공장들은 자생력 약화와 함께 심각한 경영난에 빠지게 되었다. 따라서 기존의 항공용 엔진을 이용한 산업용 가스터빈 파생형 모델을 개발하여 민수산업으로 전환을 시도하고 있다.

많은 선진 가스터빈사들이 이와 같이 새로운 엔진을 개발하고자 할 때 보수적으로 설계된 Base Frame 엔진으로부터 성능개선을 통하여 개발하는 데 이는 설계인자들을 높은 정확성과 신뢰성을 확보할 수 있고 개발 리스크와 비용을 저감할 수 있기 때문이다.

### 가스터빈 출력 결정

개발 소형가스터빈의 출력을 5MW급으로 결정한 이유는 크게 기술적인 측면과 사업적인 측면 두 가지로 나눌 수 있다. 가스터

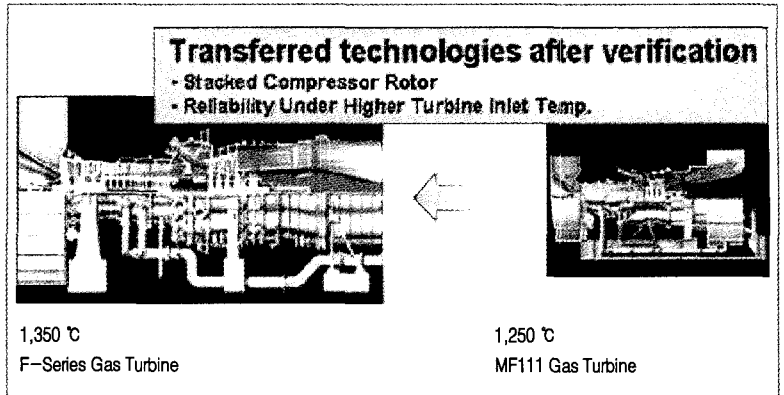


그림 3 MHI 가스터빈 기술개발 방법

빈기술 확보차원에서 선진 대형 가스터빈의 대표적인 후발업체인 MHI(Mitsubishi Heavy Industry)의 개발사례를 참조하면 1986년 MHI는 엔진개발 비용 및 위험성을 최소화하면서 대형 가스터빈에 적용 가능한 F 가스터빈기술을 시험하고 축적하기 위하여 12MW급 소형가스터빈 MF-111을 개발하였다.

사업적인 측면에서 분산전력 및 열병합용으로 5년 이내에 국내외에 형성될 것으로 판단되는 열병합 시스템의 구성에 있어 피스톤엔진, 스팀터빈, 가스터빈, 마이크로터빈 또는 연료전지 등 다양한 원동기(prime engines)의 사용이 가능하지만 이중에서도 가스터빈은 컴팩트한 크기, 적은 구성품, 부하변동에 대한 빠른 응답성 및 신속한 설치가 가능한 특징을 지니고 있어 분산전원 시장의 전력생산을 위한 가장 효과적인 원동기 중의 하나로 고려되고 있다. 그리고 4~5MW 이상

의 출력에서 가스터빈의 구매가격은 가스엔진에 비해 경쟁력을 확보하고 있고 고품질의 열공급이 가능하여 열병합 응용부문에 있어 이점을 지니고 있다.

### 개발 규격

Base Frame으로 활용할 수 있는 입증된 가스터빈을 이미 확보하고 있는 해외기술협력선과 공동개발을 통하여 국내시장이 구체적으로 활성화되는 시점인 2010년대를 목표로 세계 최상급 소형가스터빈을 개발하는 것이 목표이다. 따라서 소형가스터빈의 설계목표를 선정하기 위하여 시장조사, 경쟁사 모델의 벤치마킹 및 현장조사를 수행한 후 최종개발규격을 확정하였다. 그리고 5MW 소형가스터빈의 이름을 DGT-5로 명명하였다.

사실 소형 가스터빈의 범주에 속하는 5MW급 엔진은 구성품의 크기 때문에 효율향상에 특정 한

기술협력선과 Base Frame을 이용한 공동개발을 통하여 개발 리스크를 최소화하고 선진기술 습득에 목표를 두고 DGT-5 소형가스터빈엔진의 개념설계를 완료하였다.

인해 엔진 성능은 출력용량에 따라 민감하게 영향을 받게 된다. 발전용 소형가스터빈의 출력 대비 발전효율을 비교해보면 DGT-5는 현존하는 5MW급 가스터빈엔진에서 최고효율을 보유하고 있는 것을 알 수 있다.

### DGT-5 개념 설계

두산중공업은 Base Frame의 기본형상 및 설계 데이터를 이용하여 DGT-5에 대한 개념설계를 기술협력선과 공동 수행하였다. DGT-5는 발전용 가스터빈으로 부하변동이 거의 없이 일정한 회전수에서 작동하므로 구조적으로 간단한 단축 가스터빈으로 선정하였다. 구체적으로 DGT-5는 10단 축류압축기와 1단 원심압축기의 혼합형 압축기, 8개의 Semi-Silo 형태의 저공해 연소기, 3단 축류터빈으로 구성하였다.

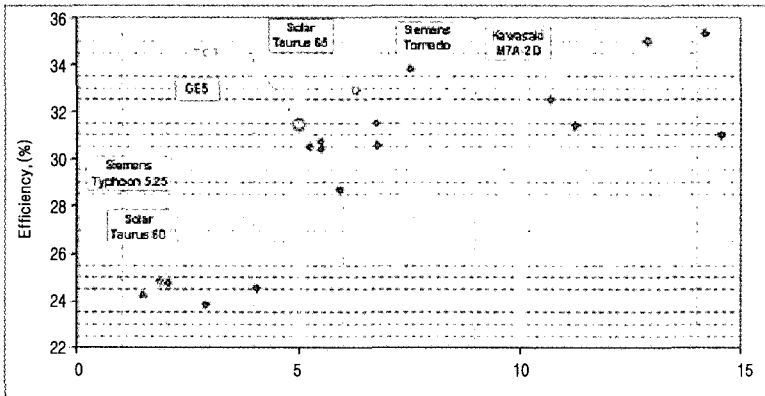


그림 4 경쟁 모델의 출력변화에 따른 엔진 효율 비교

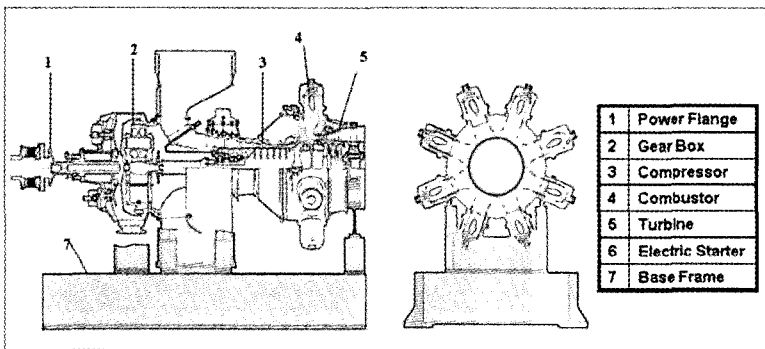


그림 5 DGT-5 개념설계 형상

계를 가지게 된다. 연소온도 (firing temperature)를 높임으로써 높은 엔진 비출력을 얻을 수 있고 동일 출력 시의 엔진 공기유량을 저감시켜 구성품 크기를 줄일 수 있다. 하지만 크기가 줄어들면 공력학적 손실증가로 효율은 감소하게 된다. 또 다른 중요한 기술적 문제는 냉각기술

의 효율성이다. 크기가 감소할수록 내부 냉각유로의 제작이 복잡해질 뿐만 아니라 외부 가열면과 내부 냉각면의 비율을 효과적으로 구현하기 어렵게 된다. 따라서 소형 블레이드 냉각 유로의 제작은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하므로 단순화된 냉각시스템이 선호된다. 상기 설명된 요인으로

### 엔진 성능

설계점 성능해석은 선택된 여러 가지의 열역학적 설계변수들을 이용하여 설계점의 운전 특성을 모사하는 과정으로 정상 작동 시 가스터빈의 출력, 연료소모량, 그리고 열효율 등이 분석된다. 이러한 분석 결과들은 설계 목표값들과 비교를 통하여 새로운 열역학적 설계변수들을 선택하는 반복 작업을 통해 최적의 설계변수

들을 찾게 된다. DGT-5의 목표 열효율을 만족하기 위해서는 터빈입구온도는 1,100°C 이상이 되어야 하며, 1,000°C 이하에서는 압력을 아무리 증가하여도 목표 열효율을 만족할 수 없음을 확인할 수 있다. 따라서 터빈입구온도 1,100°C, 1,200°C에서 압력비는 각각 14, 12.5에서 DGT-5 목표 열효율을 만족한다.

### 압축기 설계

엔진성능에서 요구되는 공력성능을 만족하면서 축방향 길이를 줄여 회전진동 특성을 향상시키기 위하여 전체 압축기의 구성을 축류압축기 10단과 원심압축기 1단으로 설계하였다. 유로형상은 산업용 가스터빈에서 많이 사용되고 있는 일정한 허브직경을 갖게 설계하였고 원심압축기는 틱 간격에 의해서 발생하는 손실을 줄이기 위하여 슈라우드(shroud) 임펠러로 설계하였다. 축류 압축기 로터는 각 단의 디스크를 전자빔 용접하여 하나의 드럼을 이루는 디스크-드럼(disc & drum) 구조이며 원심임펠러 디스크와 핀(pin) 연결하여 토크가 전달되도록 설계하였다. 그리고 로터 전면 베어링은 틸팅패드(tilting pad) 저널베어링과 트러스트 저널베어링으로 구성되어 있다.

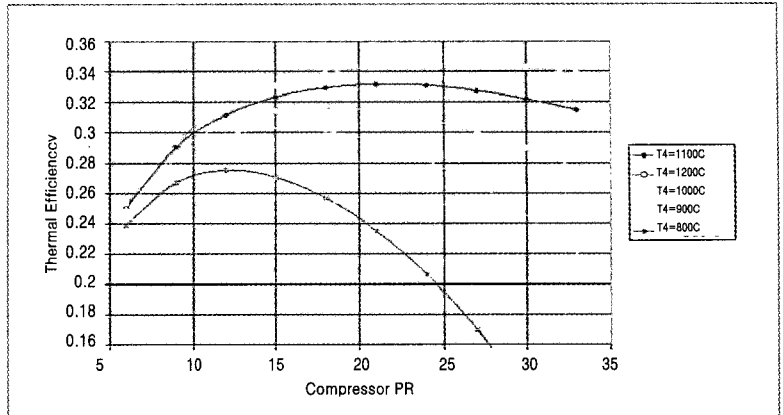


그림 6 압축비에 따른 가스터빈 효율변화

### 연소기 설계

연소기의 유동 유입은 역류(reverse flow)방식의 semi-silo 연소기 형태로 설계되었다. 압축기 후단에 반경방향으로 설치되는 8개의 라이너로 구성되며, 각각의 라이너는 독립된 케이싱 내부에 설치되었다. 연료 노즐은 메인노즐(main nozzle)과 파일럿 노즐(pilot nozzle)로 나뉘며 파일럿 노즐은 중앙에 위치하고 메인노즐은 이를 둘러싸고 있는 형태로 각각 스왈러(swirler)가 부착되어 있어 압축공기와 연료를 혼합하며 파일럿 화염은 메인 화염의 화염안정성을 확보하는 역할을 담당한다. 각 연소 통마다 점화기가 위치하며 플라즈마-토치 방식으로 선정하였다.

### 터빈 설계

터빈 직경, 평균반경 유로형상 및 단수를 결정하기 위하여 최대 달성 가능한 터빈효율, 연소기와 연결 용이성 및 공기냉각이 적용되는 단수의 최소화 등이 고려되었다. 터빈 블레이드는 효율증대 및 동적 특성을 안정화시키기 위해서 슈라우드 형태로 설계하였으며 fir tree 설계로 블레이드와 디스크를 결합하였으며 로터는 디스크 구조이며 각 디스크는 핀(pin)으로 연결되어 있다. 로터 후면 지지방식은 오일댐퍼를 가진 롤러 베어링으로 채택하였다.

### 이차유로 설계

Base frame에 비해서 높은 효율을 위해 1,100°C급의 터빈입구온도가 요구되고 수명이 30% 증가되었다. 이를 만족하기 위하여 터빈 1단 블레이드와 노즐, 그리고 2단 노즐에 대하여 대류냉각 시스템을 사용한 공기냉각 방

식을 적용하고 압축기의 여러 지점에서 공기를 추출하게 설계하였다.

### 맺음말

두산중공업에서 개발하고자 하는 소형 가스터빈은 용량이 5MW 규모로, 현재 분산전원 후보들 중에서 환경친화성과 함께 경제적으로 구현 가능한 기술 등을 종합적으로 고려할 때 분산형 전원시장을 주도할 것으로 전망된다.

소형 가스터빈 시장 특성은 중대형 가스터빈에 비해 시장 진입이 상대적으로 용이하며, 국내의

경우 국내 메이커(maker) 부재로 시장이 활성화 되지 않은 상황이지만 정부의 열병합 활성화 정책 및 전력산업구조 개편 등을 감안할 경우 2010년을 전후하여 시장이 본격적으로 형성될 것으로 예상된다.

따라서 필수적으로 획득해야 할 소형가스터빈 기술 확보는 해외 선진업체와의 기술 제휴 및 전문기관과의 연계를 바탕으로 가스터빈 핵심기술을 확보하는 전략으로 추진하고 있으며, 이와 병행하여 기술개발 Risk를 줄이고 향후 사업성을 개선하기 위하여 국내 전문 기관들과 연계하여

공동으로 개발함으로써 전체적으로 국내의 가스터빈 관련 기술을 진일보하는 계기를 마련하고자 한다.

가스터빈은 현재 및 미래 발전 설비 시스템의 핵심요소(key component)로서 기술 확보 시 시너지효과로 중대형 가스터빈용 고온 부품 등 타 사업 분야로의 기술 파급 효과가 크므로, 정부개발자금 활용과 선진업체와의 기술협력이 가능한 현 시점에서 기술개발과 사업화를 추진하는 경우 비용과 risk를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

## 기계용어해설

### 열병합 발전(CHP : Combined Heat and Power Plant)

에너지를 효율적으로 이용하기 위해 동일 연료원으로부터 열과 전기를 동시에 생산하여 공급하는 시스템. 즉 증기터빈, 가스 터빈 등 각종 엔진으로 발전기를 구동해 전기를 생산하고, 구동기에서 발생하는 배열을 거두어 에너지를 효율적으로 사용 한다

### 분산전원(Dispersed Generation)

단일 말단 수용가를 위해 계획하고 설치하는 소규모의 환경친화적 설비를 분산전원이라고 보고 있다. 즉, 태양광발전, 연료전지, 마이크로터빈, 풍력발전이 여기에 포함될 수 있다. 다른 한편에서는 발전용량의 규모나 에너지원의 종류에 상관없이 수용가 근방에 설치된 설비를 분산전원이라고 보기도 한다. 여기에는 수백 MW의 전력을 생산하는 열병합 발전설비가 포함될 수 있다.

### 복합발전(Combined Cycle)

열효율 향상을 위해 두 종류의 열 사이클을 조합하여 발전하는 방식. 복합 사이클 중 가장 대표적인 것은 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클을 결합하여 하나의 발전 플랜트로 운용하는 방식