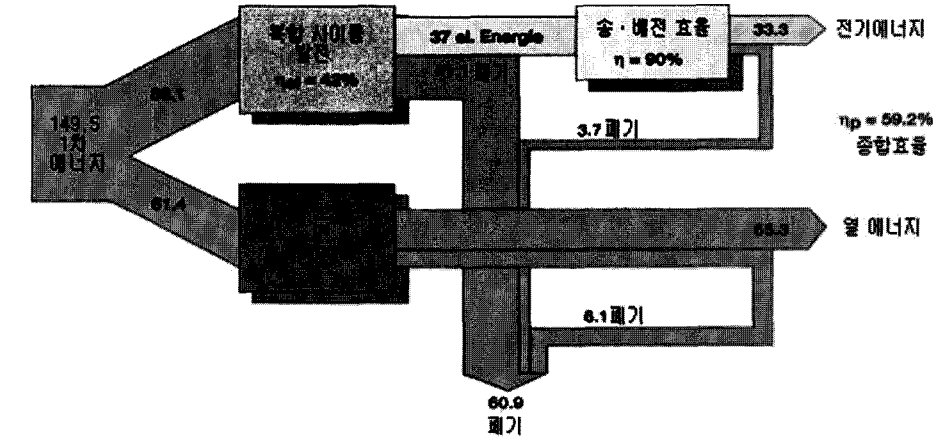
소형 열병합발전 국산화 현황 및 기술동향

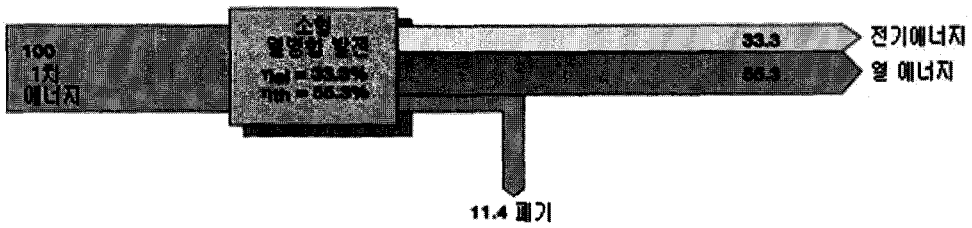
최재준〈한국에너지기술연구원 선임연구원〉

1. 서 론

열병합발전시스템은 기존 발전기가 발전 전용으로 발전 과정에서 발생하는 열을 인위적으로 방열시켜 소비하는 데 비하여 배열과 방열을 회수하여 이를 온수나 증기 형태로 물 또는 작동유제와 열교환을 하여 폐열을 적극적으로 활용하는 시스템이다. 때문에, 열병합발전 시스템을 사용하면 발전 전용 발전기로 전



(a) 기존 시스템의 에너지소비 형태



(b) 열병합발전시스템의 에너지소비 형태

그림 1. 기존 시스템과 소형열병합발전시스템의 에너지소비율 비교

기를 발생시키고, 열전용 보일러로 열을 얻는 방식보다 30[%] 정도의 효율 향상을 가져올 수 있다고 알려져 있다. 그림 1은 기존 시스템과 열병합발전 시스템의 에너지소비, 효율의 차이를 보여주고 있다. 기존의 시스템에서는 전기에너지 33.3과 열에너지 55.3을 획득하기 위하여 1차에너지 149.5가 필요하며, 소형열병합발전을 이용할 경우에는 1차에너지 100이 필요한 것을 보여주고 있다.

기술한 바 대로 열병합발전시스템을 사용할 경우 기존 발전소와 열전용 보일러 조합보다 국가 에너지의 30[%] 정도가 절약됨에도 불구하고 가스로 생산할 수 있는 전기 가격과 실제 한전에서 부과되는 전기 가격의 괴리로 말미암아 열병합발전시스템의 가시적 경제성이 상당 부분 약화되어 열병합발전시스템의 보급에 어려움을 겪고 있다. 특히, 2008년부터 시작된 국제 유가의 불안으로 인하여 LNG 공급 원가가 심하게 인상되는 데에 비하여 전기 가격의 변동은 별로 없어 가장 고급 에너지인 전기 가격보다 LNG 가스 가격이 훨씬 더 비싸져 산업용과 업무용에서의 열병합발전시스템 설치는 이미 투자비용 회수가 불가능하다는 판단을 하고 있으며, 그나마 누진제로 인하여 전기요금 단가가 비싼 공동주택 쪽에서만 이미 설치되어 있는 열병합발전시스템을 운전하고 있으며, 새롭게 난방방식을 변경하는 공동주택 측에서는 가스비의 증가 추이와 전기료의 증가 추이를 감안하여 향후 열병합발전시스템 운전비용을 예상, 신규로 온수·난방을 위하여 열병합발전시스템을 도입하려는 시도를 하려는 곳이 점점 감소되고 있는 추세이다.

열병합발전시스템의 건물이나 공동주택단지 적용 시 용량 산정에 있어서는 대부분 열추종 운전을 할 수 있도록 유도한다. 즉, 필요한 최소 열용량을 담당할 수 있도록 열병합발전시스템의 용량을 산정하여 항상 100[%]의 열을 사용할 수 있어야 하며, 이렇게 용량을 산정하여 설치하고 사용할 때에 국가적인 에너지 절약뿐만 아니라 수요처의 경비 절약에도 도움이 된다. 일부 공동주택단지에서 전기 가격의 누진제 때문에 기저 열부하 이상 용량의 열병합발전시스템을 설치하고 잉여 열부하는 냉각시켜서 버리는 경우가 있는데, 이는 국가적 관점에서의 에너지 손실로 이어진다. 열병합발전시스템의 용량 산정은 열부하의 기저부하만 담당할 수 있도록 선정하면 열부하의 모자란 부분은 열전용 보일러를 설치하여 보충하여 주며, 전기부하의 모자란 부분은 한전에서 수전받아 사용할 수 있다.

가스엔진 열병합발전시스템은 높은 전기 효율의 장점을 가지고 있어 전기를 많이 필요로 하거나 열에너지가 많이 필요 없는 곳에서 선호한다. 일반적으로 [MW] 이하의 부하가 필요할 때에는 높은 수준의 열에너지가 필요 없는 경우에 가스엔진 열병합발전시스템을 선택하게 된다. 가스엔진 열병합발전시스템은 30~40[%] 이상의 높은 전기효율과 가스터빈에 비하여 저렴한 원동기 값을 장점으로 하여 공동주택단지 등에서 많이 사용하고 있다.

가스터빈 열병합발전시스템은 가스엔진 열병합발전시스템보다 전기효율이 높지는 않지만, 가스엔진이 냉각수로 회수되는 열 등 높지 않은 준위의 에너지를 많이 발생시키는 데에 비하여 가스터빈은 모든 열에너지가 배기열의 형태로 발생되기 때문에 높은 준위의 열에너지를 확보할 수 있어서 사용되기도 한다. 또한 용량이 [MW]급 이상으로 커지게 되면 가스엔진 열병합발전시스템과 시스템 가격에 있어서 역전현상이 일어나기 때문에 [MW]급 이상의 열병합발전시스템은 가스터빈 열병합발전시스템을 채용하는 경우가 많다. 가스터빈은 연속연소에 의하여 동력을 얻기 때문에 폭발에 의하여 동력을 얻는 가스엔진에 비하여 소음이 작은 장점이 있으며, 연소제어가 가스엔진보다 용이하여 유해배기가스 배출 면에서 뛰어나다. 이와 같은 이유에서 수십 [kW]급 마이크로터빈 열병합발전시스템이 가스엔진 열병합발전시스템보다 전기효율도 작고, 가격도 훨씬 비싸지만 시장의 일부분을

차지할 수 있는 것이다.

기본적인 원동기인 내연기관, 터빈 시스템 외에도 더 큰 전기효율을 얻기 위하여, 더 적은 유해배출물을 발생시키기 위하여, 보다 다양한 연료를 사용할 수 있도록 하기 위하여 다양한 원동기를 이용한 열병합발전시스템이 연구·개발되고 있다. 유기랭킨사이클(ORC; Organic Rankine Cycle) 이용 열병합발전시스템은 마이크로터빈 같은 시스템의 배열에 연결되어 전력을 생산하여 전기 출력을 최대로 만들어 주며, 지열같은 저온의 열원에서도 동력을 생산할 수 있도록 하여 준다. 비슷한 개념으로 접근 가능한 스털링엔진을 이용한 열병합발전시스템 또한 주목받고 있는데, 스털링엔진은 저온의 열원으로 발전할 수 있어 태양열, 지열 등에서 전력을 생산해 내는 역할을 할뿐만 아니라 다양한 열원의 사용이 가능하여 바이오매스, 목재 연료 등을 이용하여 발전하는 데에 적합하다. 또한, 스털링엔진은 일반적인 원동기인 내연기관이나 터빈 시스템에 비하여 소음·진동이 작고, 배기가스 또한 청정하게 만들기 쉬우므로 차세대 동력원으로서의 기대가 유망하며, 현재 유럽을 비롯한 선진국에서 가정용 열병합발전시스템의 원동기로서 주목을 받고 있다.

2. 가스엔진 열병합발전시스템

최근 우리나라에서도 여러 가지 열병합발전에 대한 지원정책으로 아파트 단지를 중심으로 소형 열병합발전의 보급이 확대되고 있으며, 이중에서도 300[kW]급의 가스엔진 열병합발전시스템이 가장 많이 보급되고 있다.

현재 우리나라에서 사용되고 있는 소형 열병합발전시스템은 대부분 외국에서 도입해 온 것으로서 도입 및 설치비가 국내에서 생산된다면 책정되는 값과 많이 차이가 나지는 않지만 유지, 보수시 도입국에서 기술자가 파견되어야 하여 보수기간도 상당히 길고, 외국의 비싼 자재를 사용해야 하는 등 유지, 보수비 또한 상당히 비싼 실정이다. 이러한 이유로 국내에서 생산되는 열병합발전시스템이 필요하다는 인식을 가지게 되었고, 2004년부터 "고효율 저공해 소형 엔진 열병합발전시스템 상용화 개발" 과제가 산업자원부 주관으로 수행되었다. 본 과제는 중대형 사업으로서 한국에너지기술연구원에서 총괄책임을 맡고, 세부주관으로서 엔진 및 ECU 개발에 한국기계연구원과 (주)템스, 두산인프라코어, 발전기 및 통합제어기 개발에 한국전기연구원과 젠테크파워, 배열회수 부분에 한국에너지기술연구원과 (주)태봉산업, 시스템 통합 및 최적화 부분에 보국전기공업(주), 시스템 실증 및 평가 부분에 한국에너지기술연구원이 공동으로 연구하여 개발하게 되었다.

현재까지 우리나라의 기술로는 열병합발전시스템용 엔진 자체는 제작한 예가 있고, 외국에 수출도 하는 등의 노력을 기울이고는 있지만, 엔진을 제어할 수 있는 ECU(Engine Control Unit) 등의 부대시설의 개발은 전무한 상태이다. 또한 발전기, 열교환기 등의 구성품은 국내 자체 생산이 가능하지만, 이를 종합하여 시스템으로 만들 수 있는 기술 또한 보유하고 있지 못하며, 전체 시스템을 제어할 수 있는 기술도 개발된 적이 없다. 해외에서 시스템을 도입하여 설치하고 운전하기는 하지만, 이를 평가할 수 있는 방법 또한 정립되지 않아 각국의 평가방법과 기준이 다름에도 불구하고 국내 기준을 세울 수 없고, 제조사의 스펙을 그대로 신뢰할 수 밖에 없는 실정이다.

일반적으로 가스엔진 열병합발전시스템의 효율은 시스템 용량이 증가할수록 함께 증가하는 경향이 있다. 수[MW] 이상의 용량의 가스엔진은 같은 용량의 가스터빈의 가격과 비슷하고, 전기출력 5[MW] 정도의 시스템 정도 되면 가스터빈의 가격이 같은 용량의 가스엔진보다 저렴하게 되므로 가스터빈에 비하여 높은 전기효율에도 불구하고 가스엔진 열병합발전시스템은 5[MW] 용량 이하의 시스템만 개발되는 경향이

있다. 이에 〔MW〕급 가스엔진 열병합발전시스템의 개발이 필요하게 되었고, 2007년부터 "1〔MW〕급 가스엔진 열병합발전시스템 상용화 개발" 과제가 에너지관리공단 지원, 보국전기공업(주) 총괄 및 시스템 분야 담당, 한국에너지기술연구원에서 배열회수보일러(HRSG; Heat Recovery Steam Generation) 개발과 시스템 평가·실증 분야를 담당하여 2010년까지 1단계 연구개발을 마치도록 되어 있다. 1〔MW〕급 가스엔진 열병합발전시스템은 전기출력 40〔%〕 이상, 열출력 40〔%〕 이상을 목표로 하고 있으며, 열출력 중 일부는 배열회수보일러를 이용하여 증기를 생산하는 데에 사용되며 일부는 온수를 생산하여 증기 수요가 있는 곳에 적합하도록 구성되어 있어 병원, 제지공장, 빵공장 등 증기가 직접적으로 필요한 곳에 증기를 직접 공급할 수 있도록 되어 있다.

3. 300〔kW〕급 가스엔진 열병합발전시스템 개발

열병합발전 시스템에 사용된 엔진은 두산인프라코어(주)에서 제작된 V형 12기통 22L 엔진이 사용되었으며 각 실린더 사이즈는 128×142〔mm〕, 1.83L로서 스퀘어 엔진에 가까우며, 압축비는 10.5 : 1이다. 엔진 운전속도는 60〔Hz〕를 맞추기 위하여 1,800〔rpm〕으로 고정되도록 제어하였고, 이론공연비 연소가 이루어지도록 스로틀로 연료량과 공기량을 조절하였다. 또한 기존의 엔진을 가스엔진 열병합발전시스템에 부합되도록 피스톤 보울(piston bowl)을 가공하였고, 불꽃점화기관에 적합하도록 압축비를 변경하였으며, 흡기 밸브 형상과 밸브 시트를 개조하였다.

본 연구에서는 300〔kW〕급 가스엔진 열병합발전시스템에 사용되는 ECU 개발뿐만 아니라 ICM (Ignition Control Management), KDM(Knocking Detecting Module)을 설계, 제작하여 본 열병합발전시스템이 최적화될 수 있도록 하였다. 특히, KDM의 자체 개발, 국산화는 엔진에서 노킹이 일어나는 조건을 파악하고, 노킹을 억제하는 데에 많은 도움을 주었으며, 추후 타 시스템에도 적용되어 엔진의 노킹 현상을 예방할 수 있게 해 줄 수 있다.

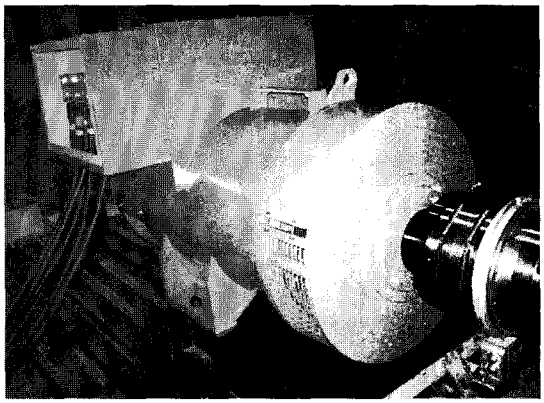
본 개발 연구에 사용된 엔진은 이론공연비 연소엔진(rich burn engine)으로서 연료와 공기가 이론공연비에 맞추어서 공급되기 때문에 삼원촉매(three-way catalyst)의 사용이 가능하다. 본 시스템에 삼원촉매를 장착하여 NOx 와 CO, HC를 동시에 제어하도록 하였고, 약간의 희박 연소와 과농 연소를 반복하여 closed loop 제어에 의하여 공연비를 제어함으로서 삼원촉매의 전환효율을 증가시켜 배기물질을 저감하도록 노력하였다.

소형 가스엔진 열병합발전시스템에 사용될 목적으로 설계, 제작된 발전기는 자려식 회전계자형 브러시리스 동기발전기이며, 정격용량은 445〔kVA〕, 전압 380〔V〕, 속도 1,800〔rpm〕일 때에 60〔Hz〕의 주파수를 출력하도록 되어 있다. 목표효율은 96〔%〕 이상이었으며, 열병합발전시스템에 패키징이 되어야 하기 때문에 컴팩트한 크기가 요구되었다.

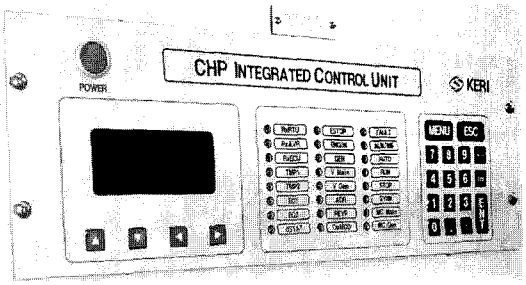
최종적으로 만들어진 동기발전기의 효율은 97.1〔%〕로서 목표치인 96〔%〕를 상회하였고, 전압변동률은 전범위에서 0.3〔%〕보다 작게 측정되었다. 전압 왜형률(Total harmonics distortion; THD)은 부하 전범위에서 3.0〔%〕보다 훨씬 작은 값을 기록하였다.

제작된 고효율 동기발전기용 자동전압조절장치(Automatic voltage regulator)를 제작하여 전압의 품질을 높였고, 열병합발전시스템 전체를 컨트롤할 수 있는 통합제어기(Integrated control unit; ICU)를 제작하였다. ICU는 전압/주파수/유효전력/무효전력 제어, 운전모드제어 등의 엔진 발전기 제어와 냉각수/온수/배기가스 온도 검출, 경보, 펌프/밸브 제어 등의 열병합 제어, 엔진 과속도, 냉각수 과온,

오일압력 이상, 과/저전압, 과/저주파수, 역상, 역전력등에서 시스템을 보호할 수 있는 등의 기능을 가지고 있다.



(a) 동기발전기



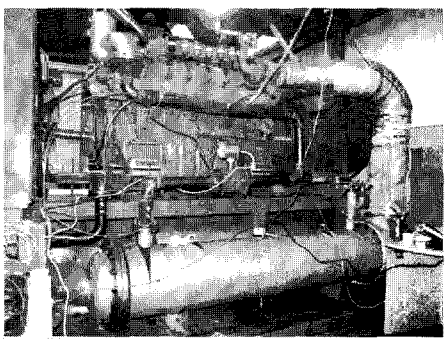
(b) 열병합발전시스템 제어반

그림 2. 발전기 및 통합제어기

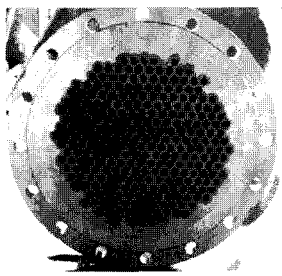
본 열병합발전시스템에서의 배열회수는 크게 두 부분으로 나누어진다. 첫째는 엔진의 배기가스로부터 열을 회수하는 배기가스 열교환기이고, 둘째는 오일과 엔진 냉각수, 온수라인과의 열을 교환하는 물-물 열교환기이다. 물-물 열교환기의 경우에는 판형 열교환기를 사용하도록 설계하였고, 배기가스와 엔진 냉각수와의 열교환은 5차의 설계 과정을 통하여 쉘 앤 튜브형(Shell & Tube type) 열교환기가 담당하도록 설계, 제작하였다.

배기가스열교환기에서는 180[kW]의 열을 회수하도록 설계되었으며, 전체 시스템의 열교환은 540[kW]가 되도록 설계되어 있다. 엔진에서 배출되는 배기가스는 삼원촉매를 거쳐서 배기가스열교환기 입구에 도달할 때 518[℃]가 되며, 열교환 후에 온도가 120[℃]로 내려간다. 배기가스열교환기 후단에서의 배기가스 온도가 120[℃]가 넘으면 열교환을 충분히 하지 못하는 것이므로 시스템의 효율이 떨어지는 것이 되며, 120[℃]가 되지 않으면 수년간 장기 운전시 배기가스의 NOx 성분이 열교환기를 부식시키는 저온부식현상이 나타나서 열교환기의 수명을 단축시키므로 배기가스열교환기 후단의 배기가스 온도를 120[℃]에서 많이 벗어나지 않게 하는 것이 중요하다.

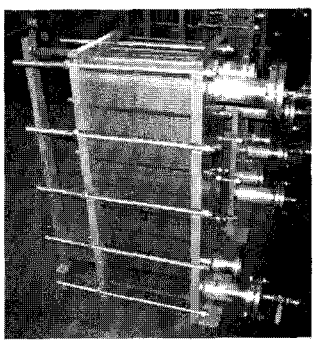
수치 해석을 통하여 시스템 전체의 최적 설계를 하였으며, 방음 패키지 및 프레임 등을 자체설계하여 제



(a) 배기가스열교환기



(b) 배기가스열교환기 단면



(c) 판형 열교환기

그림 3. 열병합발전시스템에 설치된 열교환기

작하였다. 전체 시스템의 크기는 3,800×2,200×2,400[mm]로서 벤치마킹했던 M사 열병합발전시스템의 크기(4,200×2,100×2,600[mm])보다 컴팩트하게 제작되었다. 엔진 냉각수 온도가 올라가서 부피가 팽창하는 것을 고려하여 팽창탱크(Expansion tank)를 설치하였으며, 가스측에는 가스가 역류하는 것을 방지하기 위하여 역화 밸브를 장착하였다. 각 시스템 구성기기들에 대한 목표성능조건을 확립하였으며 각 구성기기들에 대한 소음특성을 파악하여 시스템의 방음대책에 관한 연구를 실시하였다. 또한 엔진 등에서 발생하는 진동특성을 분석하여 진동별로 적합한 방진대책을 적용하였으며, 이러한 소음과 진동특

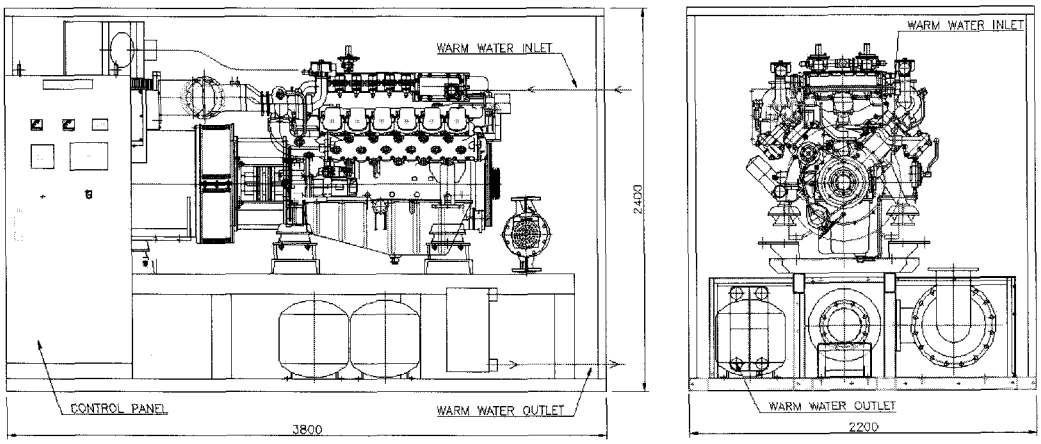


그림 4. 최종 설계된 열병합발전시스템의 구성

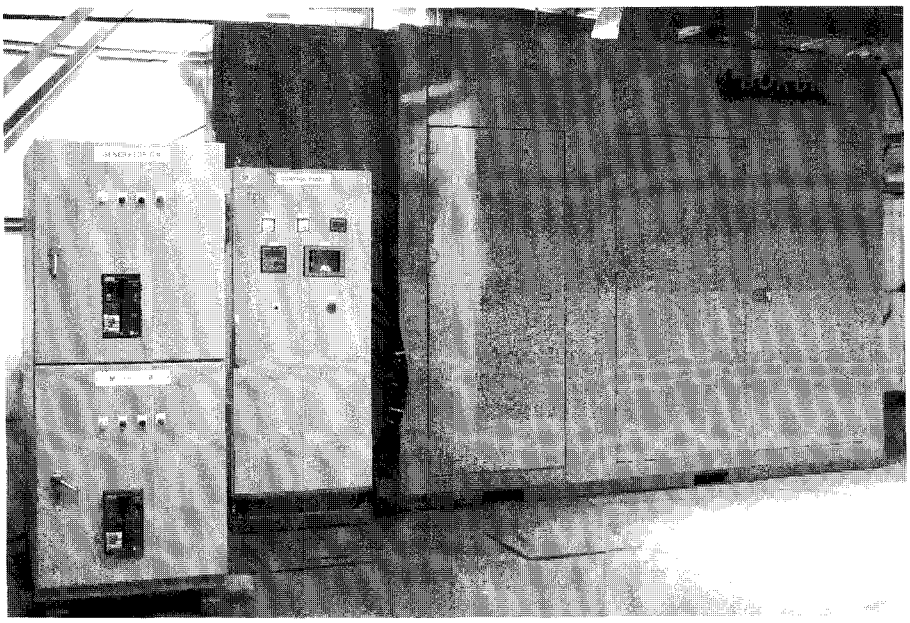


그림 5. 개발된 300[kW]급 가스엔진 열병합발전시스템

성을 고려하여 Enclosure를 설계 및 제작하였다.

열병합보일러시스템의 평가로서는 JIS 코드(Japanese industrial standard code - JIS B 8122)를 참고하여 시동시험, 보호장치작동시험, 전압변동시험, 조속성능시험, 부하운전시험, 연속운전시험, 배기가스측정, 소음측정시험 등을 수행하였으며, 시스템 운전이 양호하게 이루어지는 것을 확인하였고 ISO코드(International standardization organization - ISO 8528)를 근거로 성능의 정도를 판별하였다. 2단계 연구로서 경기도 평택에 위치하고 있는 (주)이엔페이퍼 평택공장이 채택되어 현재 실증시험중이다. 2008년 8월까지 현장 설치를 완료한 후 72시간 연속운전 시험을 거쳐서 현재까지 실증시험을 진행하고 있으며, 특별한 오류 없이 실증시험이 지속되고 있어 국산 가스엔진 열병합발전시스템의 안정성과 내구성에 대한 인식을 재고할 수 있는 실험이 될 수 있을 것이다.

4. 65[kW]급 마이크로터빈 열병합발전시스템 개발

마이크로터빈은 1980년대 말부터 미국의 캡스톤, 엘리어트 등 유수한 기업들이 풍부한 개발자금과 고도의 기술력을 바탕으로 1998년도에 첫 상용 제품을 시장에 내놓은 이래 현재는 매우 수준이 높은 단계로 발전되어 여러 가지 모델의 상품이 세계시장에 속속 출현하고 있다. 우리나라에서도 기후변화협약 및 분산전원장치로서 기능하게 될 마이크로터빈 열병합발전 시스템에 대한 기술개발이 2001년 12월부터 산업자원부의 개발자금 지원에 의해 중대형연구과제의 형태로 여러 기관이 컨소시엄을 이루어 본격적인 개발이 시작되었다. 이 연구사업은 벤처기업인 (주)뉴로스를 총괄주관기관으로 하고, 한국에너지기술연구원, 항공우주연구원, 한국전기연구원 등이 협력하여 55[kW]급 마이크로터빈 열병합발전 시스템 시제품 형태의 개발을 목표로 하는 1단계 3년간의 연구개발

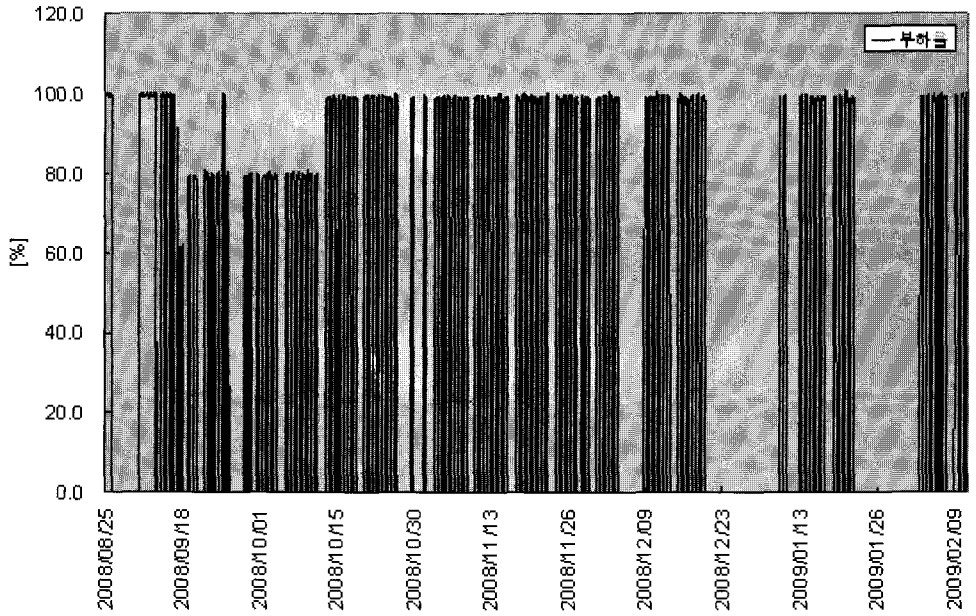


그림 6. 가스엔진 실증 시험 - 시간별 부하율

이 성공리에 마무리되었으며, 2005년 11월부터 상품화 설계 및 제작과 더불어 현장 실증 시험을 거치는 2단계 3년간의 연구가 현재 진행되고 있다. 마이크로터빈 열병합발전시스템에 부합하는 성능평가 규격을 새로 제작하였고, 마련되는 성능평가 규격이 현장에 부합되는지를 시전에 알아보기 위하여 대덕연구단지 내의 GS칼텍스 중앙연구소에 캡스톤C60마이크로터빈 열병합발전 시스템을 구축하여 현장 적용 시험을 진행하고 있다. 2009년도 중으로는 (주)뉴로스에서 제작한 국산 마이크로터빈 열병합발전시스템 시제품에 대한 실험실 기본성능시험과 현장실증시험을 진행할 계획이며, 2009년 과제가 마무리되어 상용화를 준비할 계획을 갖고 있다.

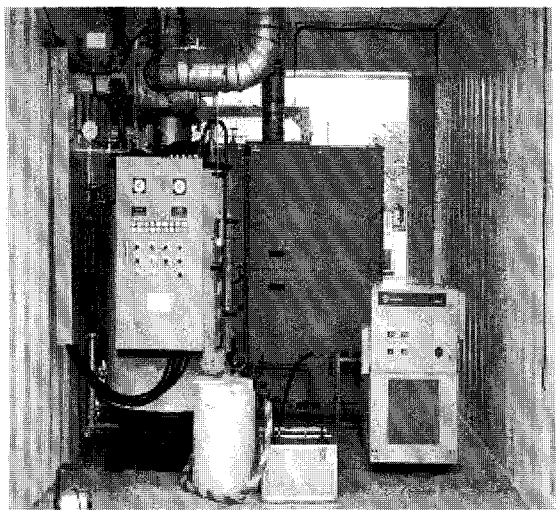


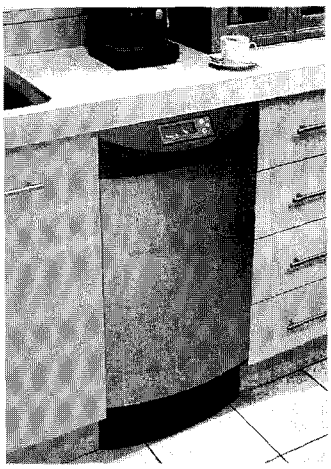
그림 7. 현장 실증시험 중인 C60 마이크로터빈 열병합 발전 시스템

마이크로터빈 열병합발전시스템 개발 이외에도 소형 가스터빈 코어에 대한 개발을 전력기반기금의 지원을 받아 두산중공업에서 진행하고 있다. 현재는 5[MW]급 소형 가스터빈 코어를 개발하고 있으며, 가스터빈 코어가 개발됨과 동시에 가스터빈 열병합발전시스템 개발에 착수하여 열병합발전시스템으로 제작할 계획을 가지고 있다. 개발될 가스터빈 코어는 전기출력 5[MW] 이상, 발전효율 30[%] 이상, NOx 배출 25[ppm](@ 15[%] O_2) 이하를 목표로 하여 현재 제작중이다.

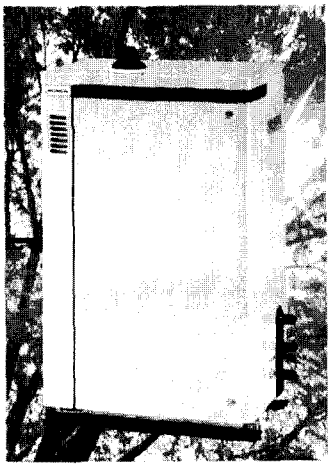
5. 스털링엔진 열병합발전시스템 개발

초소형열병합발전시스템의 베이스엔진의 하나인 스털링엔진은 내연기관 또는 터빈 시스템과 같이 작동유체가 내부에 있지 않고, 외부에서 열만 전달하여 기관을 구동시키는 형태인 외연기관으로서 기존의 화석연료는 물론 바이오매스 등 열원 선택이 자유로워 현존하는 저공해, 고효율 연소 기법을 모두 적용할 수 있으며, 지열 · 태양열 등 신에너지와 각종의 폐열 또한 열원으로 이용가능하며, 폭발 행정이 존재하지 않기 때문에 소음이 적어 차세대 저공해 엔진 시스템으로서의 각광을 받고 있다.

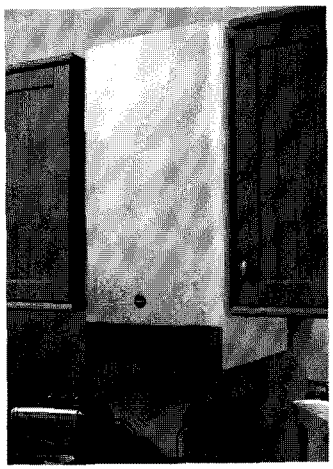
전세계적으로 가정용 보일러를 대체할 수 있는 가정용 열병합발전시스템(발전출력 1[kW] 내외, 보조보일러를 포함하여 가정 내 난방 · 온수 담당)이 주목을 받으면서 초소형 가스엔진 열병합발전시스템과 초소형 스털링엔진 열병합발전시스템이 여러 나라에서 개발 · 상용화 되고 있다. 일본의 Honda사는 단기통 가스엔진을 이용한 1[kW]급 열병합발전시스템인 EcoWill(미국 제품명 FreeWatt)을 개발하여 자국과 미국에서 상용화하고 있다. 본 초소형 가스엔진 열병합발전시스템은 스털링엔진 열병합발전시스템에 비하여 높은 전기효율의 장점을 가지고 시장을 장악하고 있으나, 소음이 있어 가정 내에 설치하여 사용하기에는 어려운 면이 있다. 유럽 등지에서 개발되고 있는 스털링엔진 열병합발전시스템은 비록 전기효율은 높지 않지만, 소음 · 진동이 거의 없어 가정 내에서 사용하기에 부족함이 없으며 청정한 배기가스를 내세워 가정용 열병합발전시스템 시장을 개척해 나가고 있다. 영국의 Microgen Engine Company는 미국



(a) WhisperGen 1[kW]급 스털링엔진 열병합발전 시스템



(b) Honda사의 EcoWill 1[kW]급 가스엔진 열병합발전시스템



(c) Baxi 사의 1.1[kW]급 스털링엔진 열병합발전시스템

그림 8. 가정용 열병합발전시스템

Sunpower사에서 개발된 Free-piston 스털링엔진을 기반으로 하는 전기출력 1.1[kW]의 스털링엔진 발전기를 개발하고, 영국의 Baxi 사 등과 함께 열병합발전시스템을 개발하여 상용화 추진 중에 있다. 뉴질랜드의 WhisperTech에서는 1[kW]급 스털링엔진 열병합발전시스템을 AC 버전과 함께 DC 버전도 함께 개발하여 가정용 열병합발전시스템 시장뿐만 아니라 요트, 잠수함 등에서 사용할 수 있는 시스템을 개발하여 상용화하고 있다.

◇ 저 자 소 개 ◇

최재준(崔栽準)
1974년 9월 30일생. 1997년 KAIST 기계공학과 졸업. 2005년 동대학원 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원.