

하고 적절한 설비관리를 해야 보일러 설비의 심각한 문제를 방지할 수 있다.

특히 온도 압력이 높은 발전용 보일러는 과·재열기 튜브의 수명소비가 많고 사용연료가 열악한 산업용 보일러(소각로, 부생가스, 바이오 매스 등) 등은 크리프 영역이 아닌 증발기 튜브에서 부식, 마모 등에 의한 수명 소비가 많다.

따라서 보일러 튜브의 잔존 수명평가는 설비의 특성에 적절한 방법으로 평가되고 설비 관리 자료로 활용되어야 할 것으로 사료된다.

본 원고는 EPR에서 발간한 boiler tube failure and theory의 “보일러 튜브 잔존 수명평가” 내용을 번역하고 필자가 주석한 것임

대형 천연가스엔진 고효율화를 위한 기술개발

* 본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

1. 머리말

앞서 개최한 洞爺湖 Summit에서 선진국 G8은 2050년까지 세계전체의 CO₂ 배출량을 적어도 50% 삭감 달성목표를 UN기후변화협약 전 체결국과 공유하고 채택할것을 요청하기로 합의하였다. 이와같은 장기적 목표를 향한 계획은 단기적으로는 기존의 에너지절약기술을 전개하는데 있어서 가속이 필요하다. 그 중에서 보급이 촉진되고있는 천연가스 Cogeneration System의 누적 설치량은 전국적으로 약 4,000kW에 달하고 특히 발전효율이 높은 중 대형 (1~6MW) 가스엔진의 도입사례가 현저하다. 그 이유로 (1) 종래에는 전기와 함께 증기 등의 열수요가 많아 가스터빈의 도입사례가 많이 보였으나 근래에는 전기를 많이 소비하는 금속가공이나 금속가

공 업종의 고객을 중심으로 보다 발전효율이 높은 가스엔진의 수요가 높아졌다. (2) 도시부분에서의 고기능빌딩이나 대형 복합시설, 공공 중요시설 등의 전력 Security의 확보 관점에서 대형 분산전원의 설치 Needs가 높아진것 등의 배경을 생각할 수 있다(그림-1).

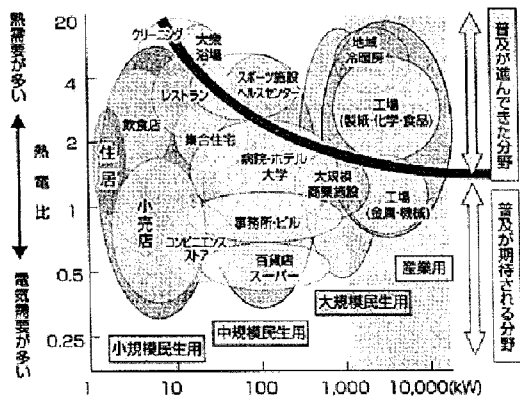
이와같은 수요경향 하에서 독립행정법인 신에너지·산업기술종합개발기구와의 공동연구로 사단법인 일본가스협회와 미쓰비시중공업(주)가 「超고효율 천연가스엔진 Combined System 기술개발」사업 (이하: 사업)을 수탁하여 2005~2007년도 말에 걸친 기술개발사업에 착수하였다.

여기서는 이 사업추진의 성과에 관하여 보고한다.

2. 기술개발성과

2.1 개발성과의 개요

본 사업에서는 발전출력과 발전효율이 세계 최고수준인 超고효율 가스엔진(천연가스 연료)과 가스엔진 Combined System(엔진의 배열을 재 이용하여 출력·효율향상을 시키는 시스템)의 기술개발을 실시하였다. 사업의 개발목표를 [표-1]에 표시하였다. 본 사업에서는 8MW급 기술의 실증으로서 6MW급 가스엔진으로 실증시험을 실시하였으므로 그의 개발목표를 [표-2]에 표시하였다.



[그림-1] Cogeneration 시장분석

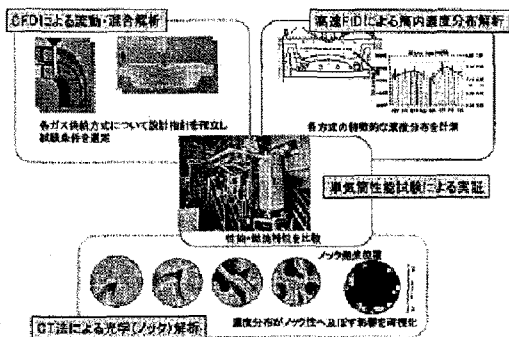
[표-1] 개발목표

구분	항목	개발목표
초고효율 가스엔진개발	발전출력	8MW급
	발전효율	48%LHV 이상
	종합효율	80%LHV 이상
	NOx	320ppm 이하 (O2=0%)
Combined 기술개발	발전출력	8MW급
	발전효율	50%LHV 이상

[표-2] 6MW급 가스엔진의 개발목표

구분	항목	개발목표
초고효율 가스엔진개발	발전출력	6MW급
	발전효율	48.6%LHV 이상
	종합효율	80%LHV 이상
	NOx	320ppm 이하 (O2=0%)
Combined 기술개발	발전출력	6MW급
	발전효율	48.3%LHV 이상

초고효율 가스엔진의 개발에서는 고효율화의 장벽인 노킹을 억제하기 위한 신 연소방식으로 대형가스엔진에서는 세계에서 예가 없는 농도분포제어에 착수하였다. 즉 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 활용한 농도분포형성법의 고안, 대형가스엔진을 향한 이번 개발에 성공한 FFID법(Fast-response Flame Ionized Detection)의 농도계측분포나 CT법(Computed tomography)에 의한 화염발광해석의 CFD 검증, 단기통 시험에서의 성능확인을 조합하여 最先端기술을 구사함에 따라 EGR(Exhausted gas Recirculation)을 포함한 급기류 이용방식에 의한 농도분포제어기술을 확립, 신연소방식의 개발에 성공하였다([그림-2]).

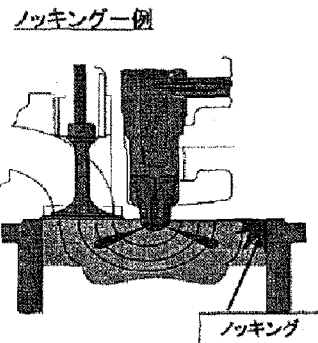
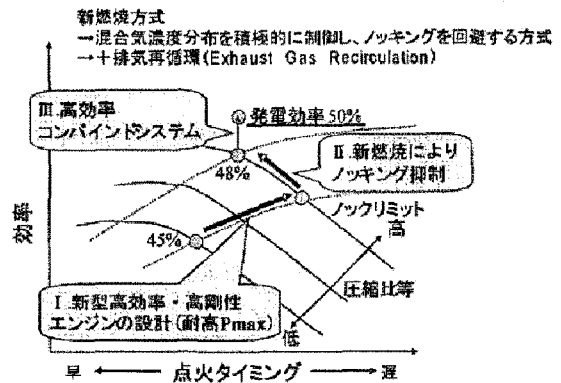


[그림-2] 신연소방식의 검증 Approach

또한 고효율화를 위하여 단기통 시험에 의한 Swirl (시린다 중심축 주위를 작동가스의 선회류) 등의 엔진 제원의 최적화 연구, 주변기술로 고효율 과급기의 채택, 통내압 증대에 대응하는 엔진 내압 강화나 급배기압 손실 저감 등의 기술개발을 실시하였다.

이를 위하여 엔진부품에 관하여 FEM 해석을 실시하여 중량과 응력 저감의 검토를 실시하여 대기통 엔진의 Compact화 기술개발을 실시하였다. 이상의 고효율화를 위한 요소기술개발의 성과를 첨가하여 8MW급으로 전개 가능한 18기통의 6MW급 대기통 실증시험설비를 설계 제작하여 신연소방식을 채택한 엔진 성능시험을 실시하였다. 그 결과 [표-1], [표-2]에 표시한 개발 목표를 상회하는 결과를 얻었다.

가스엔진 Combined 기술개발에서는 二流體 Cycle (과열증기를 연소실에 취입하는 Cycle) 및 Hybrid Turbo Compound System (왕복동 내연기관과 출력 터빈의 兩方에서 작동가스가 다단 팽창함에 따라 외부에 출력을 발생하는 하나의 시스템)에 착수하였다. 가스엔진에서는 세계 최초의 기술인 二流體 사이클의 단기통시험을 실시하여 고효율화의 가능성을 확인하였다. Hybrid Turbo Compound는 세계 최대급인 250kW Hybrid Turbo Compound기의 단체성능 시험결과를 근간으로 사이클 계산에 의하여 고효율화의 가능성을 확인하였다. 최종적으로 양방식의 개발기술을 비교하여 실용성이 높은 Hybrid Turbo Compound System를 18기통 실증기에 탑재하여 실증시험을 실시한 결과 발전출력 6MW급, 발전효율 48.5% LHV로 나타나 목표를 상회하는 결과를 얻었다([그림-3]).



[그림-3] 고효율화 추진과 Knocking

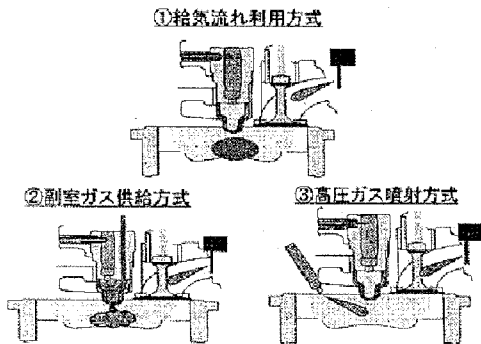
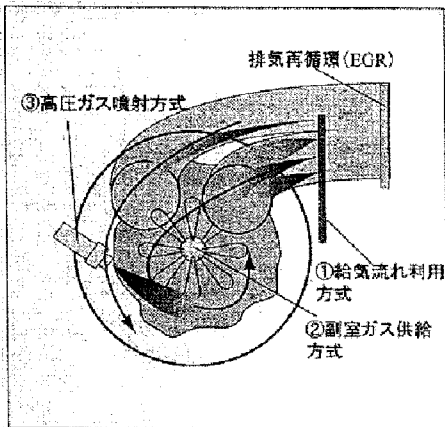
2.2 개발성과의 상세설명

(1) 초고효율 가스엔진의 개발

a. 신연소방식에 의한 효율향상기술의 개발

副室式 Micro Pilot 작화방식의 대형가스엔진을 대상으로 종래 시도해 보지 않았던 濃度分布制御와 배기 재순환의 조합에 의한 녹킹 제어에 착수하여 다음의 성과를 얻었다(그림-4).

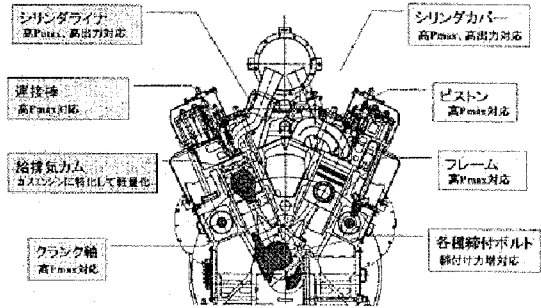
- (a) 혼합기 농도분포를 제어 가능한 가스공급방식을 CFD에 의한 사전검토와 단기통 시험으로 실증한 결과 給氣流 이용방식(연소실에 농도 분포를 형성하기 위하여 급기포트 내의 급기류를 이용하여 연료공급유치를 연구하여 연료가스를 공급하는 방식)이 유망하다는것을 명백히 하였다.
- (b) CFD 해석 및 FFID에 의한 濃度分布側, CT법에 의한 녹킹해석과 화염발생 관찰을 이용하여 농도 분포제어지침을 확립하였다.
- (c) 가스공급방식으로 급기류방식을 이용하여 한층 녹킹억제에 효과적인 「中央 Lean」농도분포(주연소실의 중심부근에 연료농도가 희박한 농도 분포 형태)를 실현하는데 성공하여 효율향상기술을 확립하였다.



[그림-4] 연소가스 공급방식

b. 엔진 Compact화 기술

효율향상에 수반하여 筒内 입력의 상승, 출력증가 및 엔진 Compact화의 검토를 실시하여 Cylinder Liner, Piston, 連接棒, 크랭크샤프트 등의 주요부품에 관하여 안전율을 확보하고 減肉 輕量化가 가능한 목표를 얻었다(그림-5).

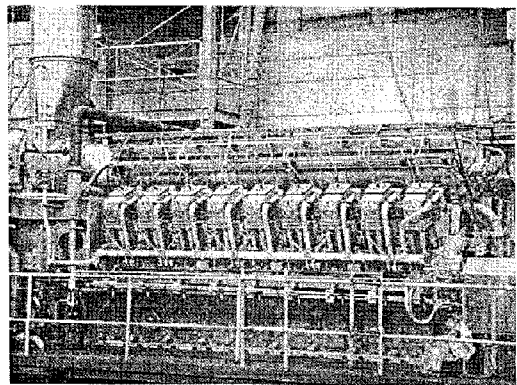


[그림-5] 엔진Compound화에관한 검토항목

c. 최적 연소제어기술의 개발

6MW급 가스엔진으로 발전효율 46.6%LHV (8MW급 환산으로 48%LHV)를 달성하기 위하여 6MW급 다기통 시험설비를 설계 제작하였다(그림-6). 최적 엔진 제원 등의 단기통 시험에서 효율향상기술개발과 엔진 Compact화 기술개발의 성과를 반영시킴과 동시에 주변기술의 효율향상기술을 적용하였다. 또한 농도분포제어 등의 최적 연소제어기술을 적용하여 실증시험을 행하고 아래와 같은 성과를 얻었다.

- (a) 6MW급 가스엔진에 있어서 발전효율 47.4%LHV, 종합효율 80.0%(8MW급 환산으로 발전효율 48.8%LHV, 종합효율 80.9%), NOx 120ppm을 달성하고 목표를 만족시키는 결과를 얻었다.
- (b) 다기통 실증기용의 효율향상기술에서 고효율 과급기의 채택, 연소실 용적의 저감설계, 크랭크실 브로바이가스 회수장치의 추가, CFD를 활용한 급



[그림-6] 6MW급 실증기 개관

배기압損 저감설계, 피스톤링 수를 저감설계하고 목표 발전효율을 달성할 수 있는 목표를 얻었다.

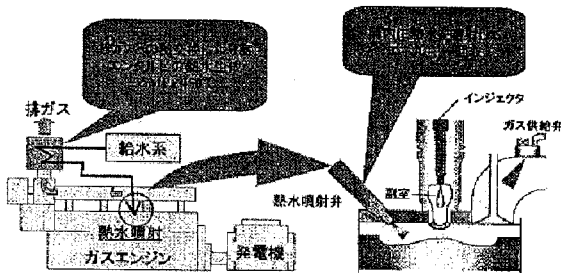
(2) 가스엔진 콤팩트 시스템의 개발

a. 二流體사이클에 의한 통내 연소기술의 개발

가스엔진에서는 세계 최초인 超臨界水에 의한 二流體 사이클의 기술개발에 착수하였다.

[그림-7]에 이류체사이클의 개념도를 표시하였다. 배 가스 배열로부터 35MPa, 450℃의 초임계수를 생성, 통내에 噴射하여 통내 Work에 의한 에너지 회수를 꾀 하는것이다. 금번 개발한 초임계수 발생장치, 급수장치 및 초임계수 분사변을 단기통 시험기에 설치하여 성능 시험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (a) 超磁歪材를 사용한 초임계수 분사弁을 설계제작 시험하여 응답성이나 분사량 등의 성능확인을 하였다.
- (b) 단기통 시험을 하여 발전효율이 6MW급에서 최대 1.6pt% 향상하는것이 확인되었다.
- (c) 초임계수의 온도, 분사량, 분사시기의 효과에 관하여 단기통시험을 실시하고 효율향상에는 초임계수의 比엔탈피를 증가시키는것이나 엔진의 열발생시기에 맞추어 분사하는것이 중요하다는것을 알았다.

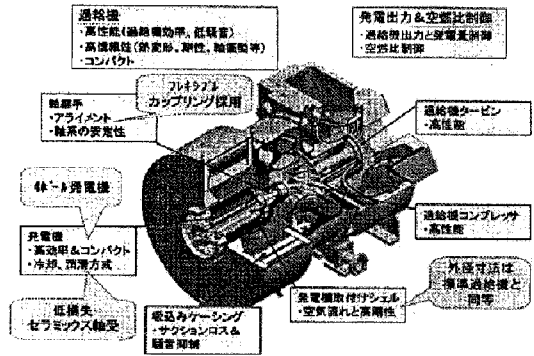


[그림-7] 이류체사이클의 개념도

b. Hybrid turbo Compound 기술의 개발

Hybrid turbo Compound 기술은 과급기의 로터 측에 고속발전기를 직결, 잉여 배가스 에너지를 전기로 추출하고 Hybrid 과급기를 이용하여 엔진의 Matching으로 최대의 발전효율을 얻는 시스템 기술을 말한다. [그림-8]에 Hybrid 과급기의 구성을 표시하고 검토결과를 아래에 표시하였다.

- (a) 사이클계산을 이용하여 Hybrid Yurbo Compound와 엔진을 조합한 경우의 성능을 예측하고 효율향상이 실현되는 과급기 터빈과 터빈 노즐의 사양을 抽出하였다.
- (b) 사이클 계산결과에 의하여 최적화된 사양에서는 6MW급으로 엔진 單體時에 비하여 발전효율이 1.7pt% 향상된 시산결과를 얻었다.

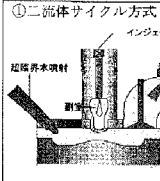
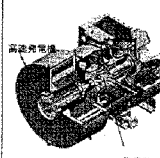


[그림-8] Hybrid 과급기의 구성

c. 시스템 실증

二流體 사이클 방식과 Hybrid Turbo Compound 방식의 검토결과 兩方式 공히 효율향상의 관점에서 대략 동등한 Potential을 갖고 있으나 조기 실용화의 관점에서 Hybrid Turbo compound 방식을 시스템 실증으로 채택하였다([표-3]).

시스템의 실증시험은 계통을 模擬한 디젤발전기와 부하시험장치를 고속발전기의 출력측에 설치하여 시험을 실시하였다. 그 결과 6MW급으로 발전효율 48.5%LHV(8MW급 환산으로 50.2%LHV)를 달성하여 목표 이상의 성과를 얻었다.

概要	効率向上効果	実用化に向けての課題
①二流體サイクル方式  超臨界水噴射 ガスエンジンの排熱から超臨界水を生成、筒内へ噴射しエネルギー回収	+1.6pt%	<ul style="list-style-type: none"> ・ 送給機前の非ガスからも熱回収する必要がある ・ 排気管内での低圧損失な熱交換器が必要 ・ 超臨界水に対し耐食性のある噴射弁針弁、ノズルシート材の選定
②ハイブリッドターボコンパウンド方式  高速発電機 ガスエンジンの排ガスエネルギーからハイブリッド過給機にて発電	+1.7pt%	<ul style="list-style-type: none"> ・ タービンノズルの選定などガスエンジン本体とのマッチング ・ ハイブリッドターボ発電機とエンジン負荷の制御方法

[표-3] 二流體사이클과 Hybrid 과급기의 비교

3. 맺는말

冒頭に 소개한 국제적인 CO₂ 삭감을 위한 決定 前後 국내에서는 2006년 4월에 실시한 개정 에너지절약법에 의하여 에너지절약·CO₂ 삭감에의 機運은 높아지고 천연가스 Cogeneration에 주어진 역할은 依然히 크다.

금번 새로 대규모의 전력수요가 있는 고객을 향하여 대형 가스엔진 Cogeneration의 기술개발을 추진하여 왔으나 이것을 기회로 실용화를 위한 각종 기술개발항목을 清理하여 고객의 Needs에 밀착된 고성능기가 시장에 도입되기를 바란다.