

# 복합열병합 발전 플랜트의 설계기술 개발사업의 추진 전략

오 군 섭

## Development of Design Technology for Combined and Cogeneration Power Plant

Koon-Sub Oh

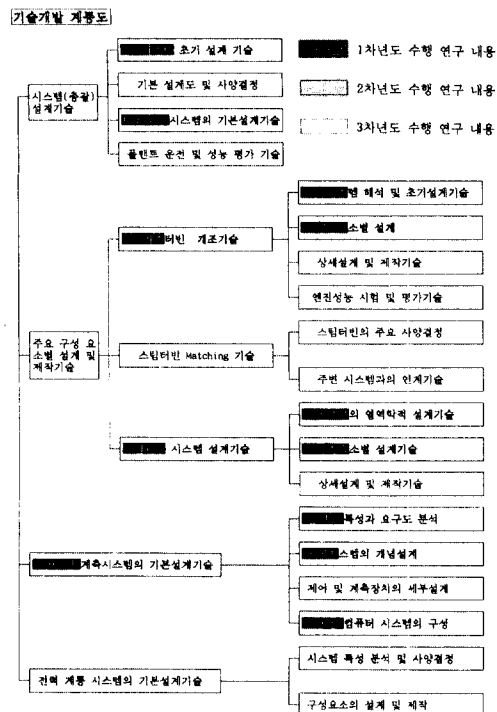


- 오군섭 (한국기계연구원 열유체시스템연구부)
- 1945년생
- 유체기계를 전공하였으며, 터보기계, 연소기계에 관심을 갖고 있다.

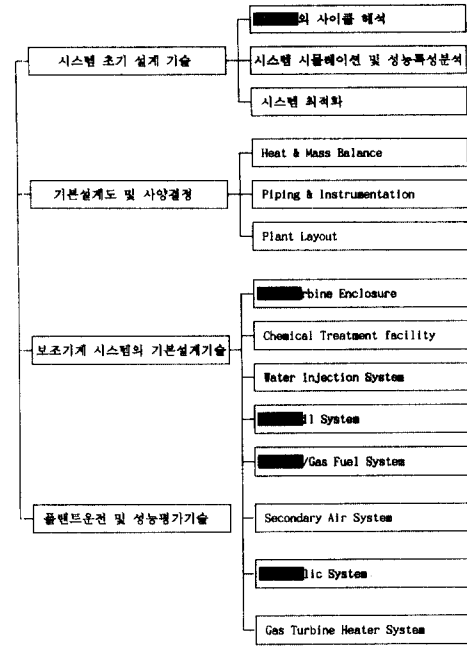
### 1. 머리말

**복**합열병합 발전 플랜트의 장점은 도시 근교에 발전 플랜트를 간단히 건설할 수 있으며, 공해를 크게 줄이면서 독립적인 발전이 가능하다는 측면에서 신도시, 신공업단지, 도서지방 등에서 아주 유리한 것으로 알려져 있다. 또한 가스 터빈 배기열을 이용하여 대규모 주거 지역이나 공업 단지내에서 필요한 난·냉방열이나 공업열원으로의 활용이 손쉬우며, 주변 시설이 복잡하지 않고, 개선된 연소기술에 의하여 공해를 크게 줄일 수 있다.

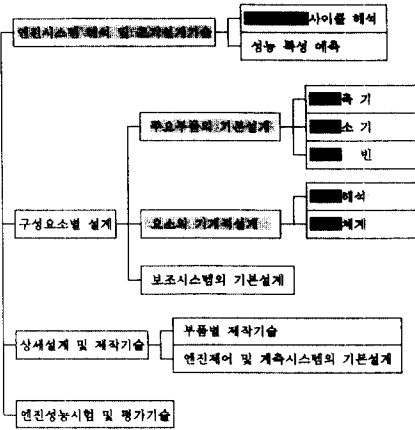
최근 들어 분당·일산·부천 지역 등에 열병합 플랜트가 건설되고 있으나 거의 모든 설계기술은 외국 기술에 의존되고 있으며, 국산화율도 극히 저조하여 '93년도에 완공된 부천 화력(473 MW)의 경우 약 30% 정도이다.



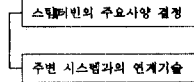
기초설계기술



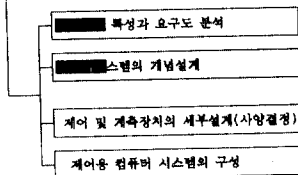
주요구성요소 설계 및 제작기술



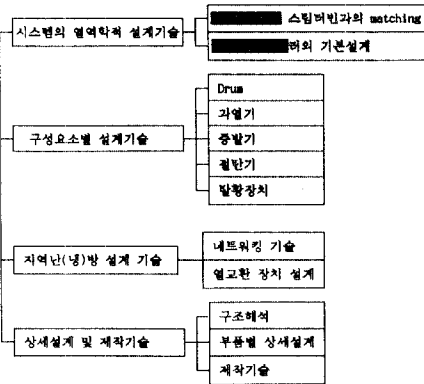
주요구성요소 설계 및 제작기술



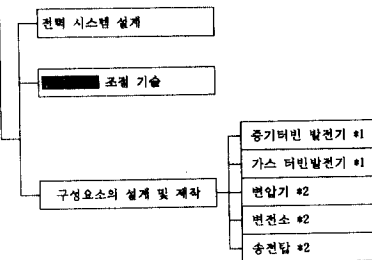
제어 및 계속시스템의 기본설계기술



주요구성요소 설계 및 제작기술



전력계통 시스템의 기본설계기술



복합열병합 발전 시스템은 가스 터빈, 스팀 터빈 등의 터보기계 기술을 근간으로 하며, 열회수장치 및 열교환장치의 설계기술, 각종 제어기술 등의 종합 설계기술로서 이미

선진국에서는 실용화된지 오래되었으며 우리나라에도 여러 종류의 플랜트가 도입되어 사용되고 있다.

현재 추진되고 있는 연구사업은 국제 공동

개발사업을 목표로 하고 있으며, 기술별로 참여 기관이 업무를 분담하여 수행되고 있으며 사업기간중 미국 UTC에 연구원을 파견하여 공동으로 수행하도록 되어 있다.

연차별 개발 계획에 따른 기술의 분류를 예시하면 다음과 같다.

## 2. 연구 사업의 추진 배경

### 2.1 플랜트 엔지니어링 기술 취약

국내의 기술 수준은 일부 부품의 설계, 제작은 가능하지만 열병합 발전 플랜트와 같은 종합 엔지니어링 기술은 취약하여, 종합적인 체계화 기술(integration)이 독자적으로 해결되지 못하고 있다.

가스 터빈의 용도는 electric power generation, combined cycle/cogeneration, pump/compressor drive, marine propulsion, off-shore platforms 등 아주 다양해져 회전기계의 동력원으로 널리 사용되고 있으나, 국내의 기술수준은 부품을 수입하여 단순 조립하거나, 완제품을 수입하여 단순 운영하는 후진국 수준에 있으며, 스팀터빈 기술은 중진국 수준으로서 유일하게 한국중공업이 제작 및 조립기술, 품질 인증기술 등은 확보하고 있으나, 독자적인 설계기술이 해결되지 않고 있다.

터보기계 기술이나, 발전설비 기술 등은 에너지원을 확보한다는 국가 전략적인 측면과 세계적인 기술개발 추세에 동참한다는 측면에서 연구개발의 필요성이 절실한 분야라 할 수 있다.

### 2.2 선진외국 기술습득 기회의 활용

가스터빈 설계기술은 선진국에서 일찍이 방위산업의 목적으로 막대한 개발비와 인력을 동원하여 개발한 기술로서 기술 후발국이 기술 유출을 극히 제한하는 분야로서 핵심

기술에의 접근이 봉쇄되어 왔다.

최근에 이르러 세계적인 항공산업의 불황 및 투자된 시설과 기술의 활용을 위하여 항공기 엔진의 산업용에의 응용을 위한 연구 개발이 이루어지고 있다. 미국의 Pratt & Whitney의 경우는 1989년에 25 MW급의 항공기 엔진을 개조 설계하여 발전 플랜트를 구성하여 세계 시장에 300여 기가 설치 운영되고 있으며, 48 MW급의 항공기 엔진을 산업용으로 개조하여 발전 플랜트를 구성하는 새로운 사업을 착수하고 있다. 또한 영국의 Rolls Royce의 경우는 38 MW급의 항공기 엔진을 산업용화하는 사업을 착수하는 것으로 알려지고 있다. 개조형 가스터빈과 고유형 가스터빈을 비교하면 표 1과 같은 장단점이 있다.

본 연구 개발은 미국의 UTC(United Technology Corporation)에서 주도하는 국제 공동개발 사업의 선행 연구로서 출발되었으며, 프로그램 내에는 미국의 TPM(Turbo Power & Marine System, UTC의 자회사), 독일의 SIEMENS, 스웨덴의 VOLVO 등이 UTC consortium을 형성하여 공동개발하는 것으로 기본 골격이 짜여져 있다. 특히 한국의 경우는 대한항공이 한국기계연구원 등과 consortium을 구성하여 참여하는 것으로 합의되어 있는 것이 특이한 점이다.

가스터빈 기술과 같은 첨단 기술은 개발에서 실용까지 약 20년의 기간과 20억 달러의 개발비용이 소요되는 대형 장기 사업으로서

표 1 개조형 가스터빈과 고유형 가스 터빈의 비교

항 목	개 조 형	개 발 형
개 발 비	저렴하다	비싸다
유 지 비	비싸다	싸다
기계적 안전도/신뢰도	크다	낮다
정비시간(Hr.)	10,000~40,000	25,000~100,000
정비기술	고도의 기술요구	일반숙련기술가능

몇 개 국가가 국제 공동으로 개발하여온 것이 일반적인 추세일 만큼 대규모의 투자가 요구되는 사업이다.

대한항공과 한국기계연구원의 경우는 본 국제 공동개발 사업에 처음부터 참여함으로써 첨단 핵심기술을 배울 수 있다는 특징 외에도 동종의 기술을 외국에서 도입할 때 부담하게 되는 막대한 기술료의 지불 없이 공업 소유권을 공유할 수 있다는 것은 아주 좋은 조건인 것이다.

### 3. 개발사업의 개요

개발사업의 개요는 Boeing 747급 엔진을 산업용 가스터빈으로 개조 설계하여 48 MW 급 발전플랜트를 구성하는 것이다. 사업 내용을 분류한다면 첫째 가스터빈 분야, 둘째 터빈보조기계 분야, 셋째 플랜트 분야, 넷째 제어 및 계측시스템 분야 등 크게 네 개 분야로 나눌 수 있다.

그림 1과 그림 2에 나타난 것이 PW4000 엔진과 FT4000 엔진으로 개조시의 비교 자료로서 주 개조 대상은 터보 팬을 제거하고, 저압 터빈 블레이드 및 베인의 설치, diffu-

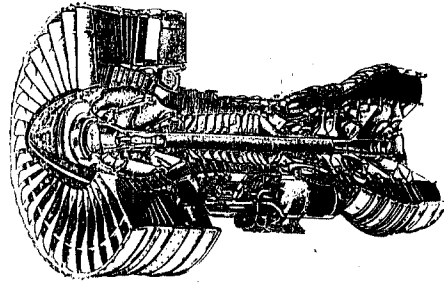


그림 1 개조형 엔진의 모양

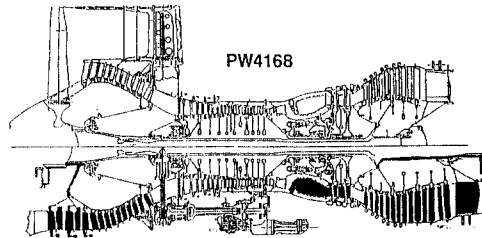


그림 2 PW4000과 FT4000의 비교

ser와 burner의 설치, 저압 터빈의 단수 추가, 출력축의 설치, 출력 터빈의 추가 등이 핵심 개조 설계 분야이며, 전체적인 축 길이의 변경을 피하도록 계획하고 있다.

핵심적인 기술개발 내용은 다음과 같다.

분 야	기 술 개 발 내 용
<input type="checkbox"/> 가스터빈분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Aero design                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• High/Low turbine</li> <li>• Power turbine</li> <li>• High/Low compressor</li> </ul> </li> <li>○ Combustor (개조부분)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• New dual fuel nozzle</li> <li>• Canted burner cans</li> <li>• New outer burner case</li> </ul> </li> <li>○ Vibration &amp; shafting                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• 동역학적 설계/해석</li> <li>• Turbine/compressor blade 설계</li> <li>• Shafting 설계</li> </ul> </li> <li>○ Heat recovery</li> </ul>

플랜트 설계

- Heat balance
- 전열설계
- Structure design
  - Shaft design
  - Inlet case
  - Outer case
  - Combuster
- Gas turbine enclosure
  - Gas turbine inlet air filter system
  - Gas turbine inlet silencer system
- Exhaust stack
  - Silencer
  - Silencer transition
  - Exhaust enclosure

보조 기계

- Generator enclosure
- Control enclosure
- Starter enclosure
- Liquid fuel system
- Gas fuel system
- Liquid Conditioning System
- Secondary air system
- Hydraulic system
- Gas turbine heater system
- Fire protection system
- Water wash system
- Steam generator control house
- Switchgear for steam turbine
- Gas compressor
- Water injection system
- Lube oil system
- Chemical treatment house
- Boiler feed pump
- Heat recovery system/boiler & heat exchanger

열회수시스템  
분 야

제어 및 계측  
분 야

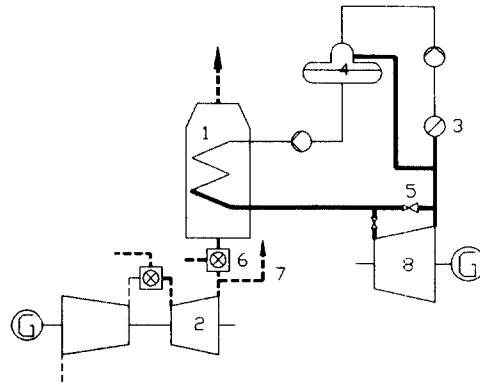
- High voltage switchgear
- Control & instrumentation
- High voltage switchgear
- Transformer

#### 4. 복합열병합 플랜트의 기본 구성

##### 4.1 시스템의 구성

복합열병합 플랜트는 기본적으로 가스터빈, 배열회수보일러(HRSG), 증기터빈 등으로 구성되어 있으며, 그림 3에 전형적인 계통도를 나타내었다.

가스터빈의 흡입구를 통하여 유입된 공기는 압축기에서 압축되어 연소실에서 연료와 혼합된 후 연소하면서 가스터빈을 구동한다. 가스터빈의 출력은 압축기와 발전기를 구동시키며, 이때 발생하는 고온의 배기가스를 배열회수보일러에 통과시켜 증기를 발생시킨다. 생성된 증기를 산업공정에 이용하거나 지역 난방 등에 사용하며, 또한 증기터빈을 구동시켜 2차 전력을 생산할 수 있다.



- 1 : 배열회수보일러
- 2 : 가스터빈
- 3 : 증기사용자(처)
- 4 : 순환수탱크/탈기
- 5 : 증기 저감장치
- 6 : 조연장치
- 7 : 비상용 연돌
- 8 : 배압증기터빈

그림 3 복합 열병합 발전의 전형적인 계통도 (배압터빈을 사용한 복합사이클 플랜트의 계통도)

##### 4.2 지역 난방용 복합열병합 플랜트

지역 난방이란 어느 특정 지역을 대상으로

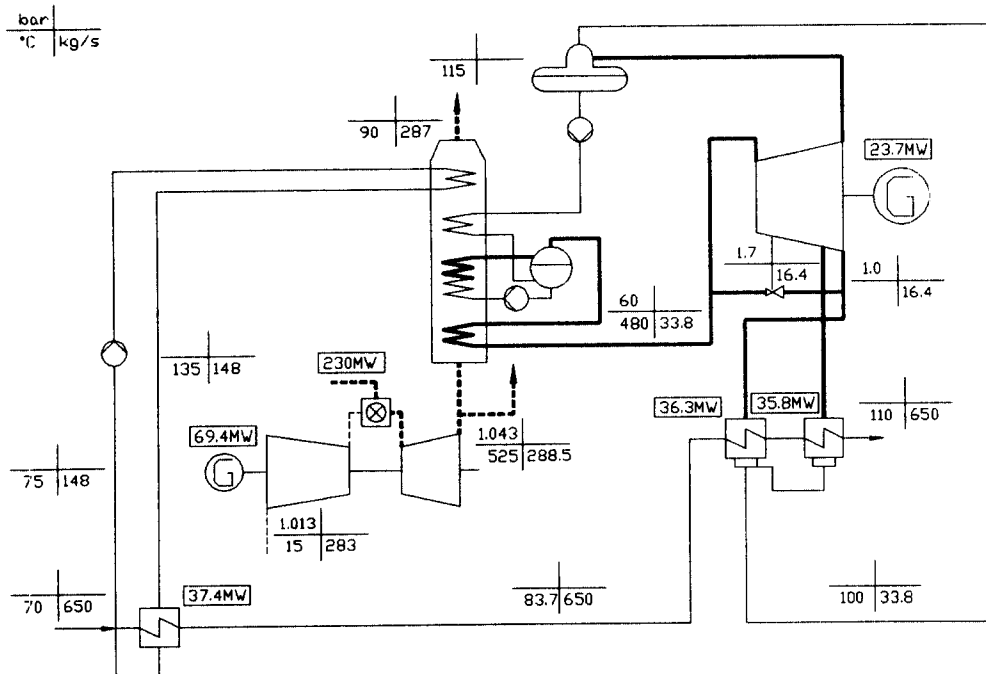


그림 4 지역 난방용 복합 열병합 플랜트의 예

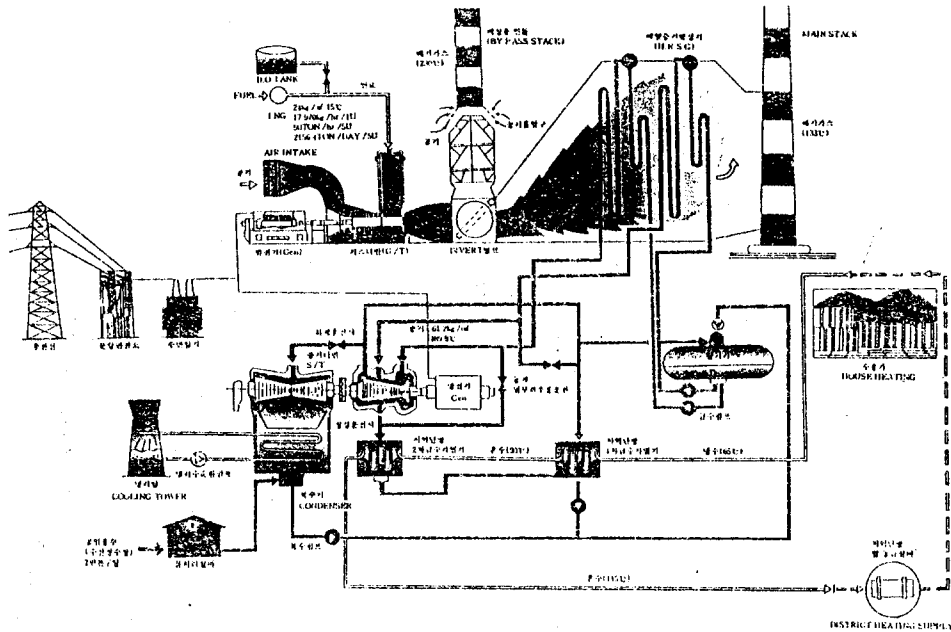


그림 5 분당 복합화력 발전소 계통도

대규모의 열원 설비를 건설하여 지역내에서 소요되는 난방 및 온수 열을 공급하는 방식이며, 지역 난방에 소요되는 열은 산업용으로 사용되는 공정용 증기열에 비해 온도가 낮기 때문에 기존 발전소의 폐열을 이용할 수 있고 독립된 열병합 플랜트를 건설할 경우에도 고효율로 운전할 수 있다는 장점이

표 2 지역 난방용 복합 열병합 플랜트의 주요 기술 자료

연료	천연 가스
가스터빈 생산 전력	69,400 KW
증기터빈 생산 전력	23,700 KW
플랜트 자체 소비 전력	1,000 KW
순 생산 전력	92,100 KW
지역 난방 회수 냉수 온도	70°C
지역 난방 공급 온수 온도	110°C
난방 이용 연량	109,500 KW
가스터빈 소비 열량(LHV)	230,000 KW
연료 이용률	87.6%
전열비	0.84
전력 생산비	40.05%

있다.

지역 난방 복합열병합 플랜트 구성의 한 예가 그림 4와 5인데 이 시스템은 비조연 방식으로 추기 배압 터빈을 사용한 단압식 복합 사이클 형태이다. 이에 대한 기술적 자료가 표 2에 주어졌다. 이 예에서는 지역 난방용 급수 가열기가 세 곳에 설치되어 있는데, 한 곳에서는 배열 에너지의 이용률을 증가시키기 위해 배열회수보일러의 끝단에 추가로 순환 루프를 설치하여 최종 배기가스에 의해 가열된 고온의 온수를 급수를 가열하고, 나머지 두 곳에서는 증기터빈의 배증기 및 추기를 이용하여 온수를 가열한다. 이때 난방에 이용되는 온수의 온도는 약 110~120°C 정도이다.

### 5. 연구사업 추진 전략

현재 본 연구사업은 국책연구사업 중간 핵심 기술과제의 형태로 '93년부터 2년차 연구가 대한항공과 협동으로 진행되고 있다.

그러나 본 연구 사업은 중장기적으로 추진

되어야 하므로 범부처적인 지원과 한국전력, 한국중공업 등 관련 업체와의 조합을 구성하여 국책 연구 사업화의 추진을 모색하고 있다.

연구사업의 성격이 가스터빈 설계기술과 같은 첨단기술과 시스템 엔지니어링 기술 등 복합적인 기술로 구성되어 있어, 산·학·연의 협동에 의한 중·장기적인 지원이 요구되는 분야이다.

### 5.1 연구조합의 구성

국내연구조합(KAL consortium)을 구성하여 설계 기술을 개발하고, 활용 및 수요 창출을 위하여 한국전력과 협력 체제를 갖춘다.

또한 국제공동 연구개발 사업과의 연계 수행을 위하여 UTC consortium과 공동 연구를 수행하기 위한 팀을 구성한다.

#### (1) 국내연구 조합(KAL consortium)

- 산업계 : 대한항공, 한일 개발 등의 참여
- 학 계 : 서울대, 인하대, 항공대 등 참여
- 연구계 : 한국기계연구원, 과학기술연구원 등

#### (2) UTC consortium

- UTC가 계획하는 개발팀에 KAL 및 KIMM의 연구팀 참여 양해
- 미국, 독일, 스웨덴, 한국이 개발 기금의 공동 출자
- 기술 특성에 따라 업무 분담

### 5.2 연구 사업의 활용 방안

(1) 50 MW급의 가스터빈이용 복합열병합 발전 플랜트의 시제플랜트의 건설 및 운영

- (2) 설치장소 : (1안) 대덕연구단지  
(2안) 영종도 국제 공항

#### (3) 운영방안

- 시제플랜트의 설치에 의한 연구 개발
- 상업화를 위한 문제점 파악

- 전력 및 난방 열원 공급
- 난·냉방열원의 공급
- UTC의 경우 이미 개발한 25 MW급의 플랜트를 공장내에 설치하여 실운영에 의한 보완 연구 수행

(1안) : 연구단지내의 연구소, 둔산 주거지역, 제3청사, 상가지역 회덕공단, 3첨단 공단

(2안) : 영종도내의 공항 전지역

### 5.3 사업의 기대 효과

#### (1) 기술적 파급효과

- 시스템 기술의 자립
  - 복합 열병합 발전 플랜트 기술
  - 열효율 40% → 80% 증가
  - 발전시스템 설계기술
  - 폐열활용 및 지역난방기술
  - 전자 제어 기술

- 터보 기계기술 자립
  - 중기터빈 설계기술
  - 가스터빈 설계기술
  - 성능시험 기술

#### (2) 경제적 파급효과

(국외)

- 열려진 동남아 시장에 수출 전략화
  - 플랜트 수출시장 2000년까지 380억불
- 구미 각국이 동남아 시장 공략에 혈안
  - 섬이 많은 지역적 특성에 적합한 기술임

(국내)

- 2000년까지 열병합발전 플랜트
  - 수요 → 14조 원
  - 기술자립시 → 130억불 수입대체

## 6. 1차년도 주요연구 결과

### 6.1 개조형 가스터빈 설계

#### 6.1.1 개조형 가스터빈 설계

- (1) 사이클 해석
- 탈설계 성능 해석을 통하여 FT4000의



basic cycle과 Inter-cooler가 채용된 사이클, 수퍼 차저가 있는 Inter-cooler가 채용된 사이클의 성능을 비교하였다. (그림 6 참조)

- UTC가 개발 보유하고 있는 SOAPP를 활용하여 52.6 MW급의 basic cycle이 Inter-cooler가 채용될시 출력이 약 2배가 증가된 103.8 MW급이 되며, 압축기 앞쪽에 수퍼 차저가 채용되는 경우에는 출력이 113.9 MW급으로 증가되었다. (표 3 참조)

(2) 압축기 설계

본 개조엔진에서는 고압압축기와 직렬되지 않고, 중간에 중간냉각기가 설치되므로, 이 부분의 입구 부분과 유로가 잘 형성되도록 설계하였다.

- 저단 압축기의 각 설계점에서의 열·유

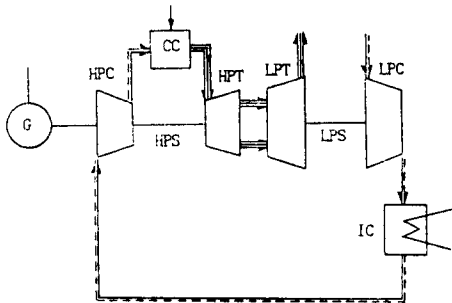


그림 6 변형된 중간냉각사이클

표 3 사이클별 성능 해석결과

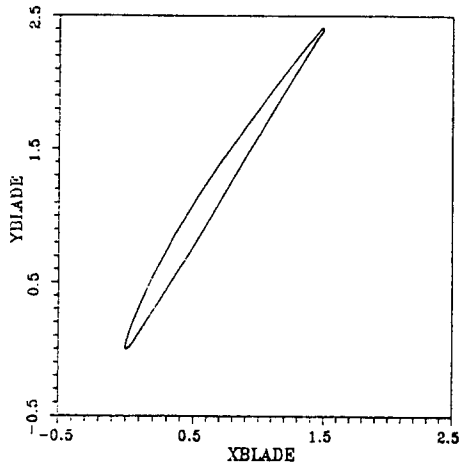
	Basic 사이클	IC1 사이클	IC1' 사이클
LPC	PR=3.7 Wc=375 pps	Pr=4.07 Wc=495 pps	PR=4.58 Wc=516.5 pps
HPC	PR=9.3 Wc=124 pps	PR=11.3 Wc=124 pps	PR=11.3 Wc=124 pps
T4	2476 F	2700.6 F	2700.6 F
TCA	29.4%	26.6%	26.6%
출력(MW)	52.5 MW	103.8 MW	113.9 MW
열 효율	41.4%	45.1%	45.85%

동 해석을 하였으며, 6단 회전익의 익형 설계를 하였다. (그림 7 참조)

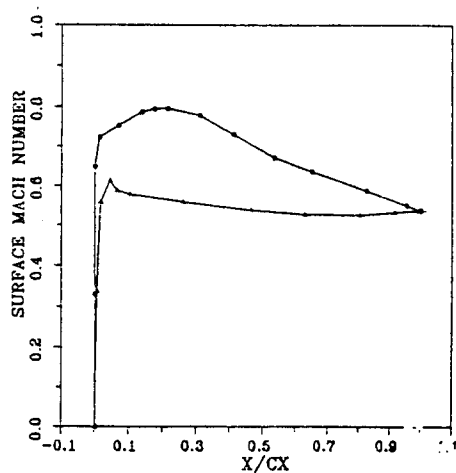
(3) 연소기 설계

<라이너 설계>

- 라이너와 격판 사이를 흐르는 냉각용 공기의 속도를 고려하여 볼 때, 격판높이는 10 mm 이상인 것이 바람직하다.
- 세라믹과 스테인리스강 사이의 경계온도의 설계조건을 만족시키기 위하여는 격판높이를 20 mm 이하로 하여야 하며, 각 계산조건에 대한 경계 온도값을



(a) Airfoil geometries



(b) Surface Mach Number Distribution

그림 7 블레이드 설계 결과(Rotor #6, 50%)

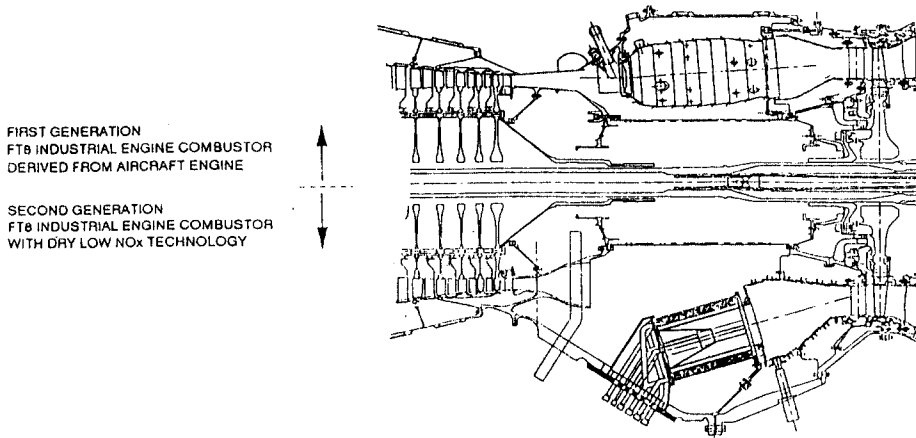


그림 8 항공기용과 개조형 연소기

고려하여 볼 때 10 mm 정도로 하는 것이 바람직하다.

- 따라서, 이상과 같은 계산결과로부터 라이너와 격판 사이의 간격 즉, 격판 높이는 10~15 mm 정도로 하는 것이 바람직함을 알 수 있다. (그림 8 참조)

(4) 회전체계 설계

복합 열병합 발전용 개조형 가스터빈의 독자적인 회전체 설계시스템 개발을 위해 당해년도(1차년도)에는 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 개조형 가스터빈의 동특성 해석을 위한 해석기법으로서 유한요소법과 전달 행렬법을 조합한 임피던스 행렬법에 대한 이론적 확립.
- 유연, 다축, 박판형의 개조형 가스터빈의 동특성을 보다 정확하게 예측, 분석하기 위한 회전체 역학적 형상 모델링 기법의 정립.
- Pratt & Whitney에서 PW4084 항공용 엔진의 개조형으로 개발중인 FT4000 산업용 가스터빈의 초기설계를 검증하기 위해 가스발생기의 저압축과 발전기를 연결하는 구동축의 설계 및 구동장치를 포함한 전체 시스템의 비틀림방향 및 횡방향 동특성 해석의 수행.

5) 요소의 기계적 설계

- 연구대상이 된 디퓨저케이스와 연소기 케이스의 정적해석과 플랜지가 받는 응력분포를 살펴봄으로써 케이스의 취약한 부위를 예측하였으며, 디퓨저와 연소기케이스, 연소기와 터빈케이스를 잇는 조인트 연결방식에 대해 조사하였고 볼트와 스냅 사용 여부에 따라 구조물에 국부적으로 작용하는 부하가 다른 것을 알 수 있었다.
- 2차원 유한요소해석을 통해 연소기와 디퓨저를 연결하는 부위의 강한 응력은 축방향으로 가해지는 장력의 영향보다는 엔진내의 최고 압력을 유지하는 케이스 내부 압력의 효과이며, 중량이 그리 중요한 인자가 되지 않는 산업용 엔진의 경우 연소기 플랜지의 형상을 고

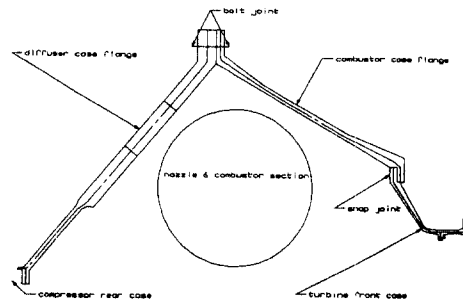


그림 9 FT4000디퓨저-연소기케이스의 배치도

치는 대신 두께를 굵게 하는 방법이 연구비를 줄이는데 효율적인 것으로 판단됐다. (그림 9 참조)

## 6. 맺음말

아직까지 국내에서 복합열병합 발전 플랜트와 같은 방대한 기술 분야를 연구개발의 대상으로 하여 과제화한 것이 흔하지 않다고 생각된다.

한국기계연구원의 경우도 기계류 부품의 개발 및 요소 기술에 대한 연구는 상당한 실적을 갖고 있으나, 기계시스템으로 종합화하는 깊이 있는 연구는 이루어지고 있지 못하며, 국내의 실정은 초기 단계에 있다.

특히 본 연구사업은 국제 공동연구 사업과 연계되어 있어 수행 방법상에 협의 조정되어야 할 부분이 많으며, 방대한 시스템과 업무내용에 비하여 연구 인력과 연구비 면에서는 상당한 지원이 필요하였다.

1차년도와 경험을 살려 보다 더 광범위한 연구팀의 구성과 각론적인 연구가 착수되기 위한 여건의 조성이 전제되어야 하겠다.

2차년도부터는 국제 공동연구 사업이 본격 협약되어 보다 더 밀도 있는 연구와 연구원의 UTC과제 문제가 거론될 것으로 기대되며, 연구원의 위상 문제나 처우문제, 자료협조가 원활하게 이루어지기 위한 노력이 필요하며, 연구원의 수행 업무도 명확하게 조정될 것이다.

그러나 1차년도와 연구를 통하여 UTC현장에서 시스템 기술에 대한 경험을 쌓을 수 있었으며, 각 기술 분야별로 형성된 신뢰성 있는 인력은 앞으로의 국제 공동 연구 개발 사업의 전망을 밝게 해 줄 것으로 생각된다. 특히 대부분의 연구원들이 가스터빈이라는 것을 대할 수 있는 기회가 흔치 않은데, 설계·제작하는 현장에서의 경험은 기술적인 자신감을 얻을 수 있어 커다란 수확이라 할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Burger, G. D., et. al., 1979, "Study of Blade Aspect Ratio on a Compressor Front Stage-Aerodynamic & Mechanical Design Report," *NASA CR-15955*.
- (2) Casper, J. R., et. al., 1980, "Calculation of Two-Dimensional Potential Cascade Flow Using Finite Area Method," *AIAA J.*, Vol. 18, pp. 103~109.
- (3) Cetin, M., et. al., 1989, "An Off-Design Loss and Deviation Prediction Study for Transonic Axial Compressor," *ASME 89-GT-324*.
- (4) Hobbs, D. E. and Weingold, H. D., 1984, "Development of Controlled Diffusion Airfoils for Multistage Compressor Application," *J. Eng. Gas Turb. & Power*(Tran. ASME), Vol. 106, pp. 271~278.
- (5) John Lewis, 1994, "Gas Turbine Performance Notes," Unpublished Notes.
- (6) Hong, Y. S., 1993, *Gas Turbine Engine*, Chung-Moon Publishing Co..
- (7) Unpublished Pratt & Whitney Lecture Notes, *Kauffman's Manual*.
- (8) Gasparovic, N. and Kim, J. W., 1987, "Partload Performance of the Intercooled Two-Shaft Gas Turbine with Power Output at Constant Speed on the High-Pressure Shaft," *ASME Paper No. 87-GT-3*.
- (9) McVey, J. B., Padget, F. C., Rosfjord, T. J., Hu, A. S., Peracchio, A. A., Schlein, B. and Tegel, D. R., 1993, "Evaluation of Low-NOx Combustor Concepts for Aeroderivative Gas Turbine Engines," *J. of Engi. for GT and Power*, Vol. 115.
- (10) Leonard, G. and Stegmaier, J., 1993, "Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low Emissions, Combustion System," *ASME Paper 93-GT-288*.

- (11) Snyder, T. S., Rosfjord, T. J., McVey, J. B., Hu, A. S. and Schlein, B. C., 1993, "Emission and Performance of a Lean-Premixed Gas Fuel Injection System for Aero-derivative Gas Turbine Engines," *ASME Paper*. 93-102