

가스터빈 설계 및 해석 기술

김수용* · 오종식* · 박무룡*

1. 가스터빈 성능해석 분야

가스터빈의 성능해석은 가스터빈을 구성하는 부분품들을 열역학적으로 즉, 부분품간 유량의 보존, 회전수 일치, 일의 보존 등의 법칙을 만족시키면서 전 작동영역에서 엔진의 목표한 성능을 나타내도록 조사하는 분야이다. 가스터빈 성능해석은 크게 설계점 결정과 탈설계 성능해석 분야로 나뉘고 있다. 설계점 결정은 엔진의 구성, 사이클 변수, 부분품 성능의 수준 그리고 엔진의 크기 등이 개발코자하는 사양에 맞추어 결정되는 과정을 가리킨다. 일반적으로 설계점은 엔진의 수명기간 중 가장 많은 시간대에 운전되어지는 작동조건을 지칭하는데 산업용인 경우 ISO 정격일 때의 운전조건을 말한다. 엔진의 기하학적 구조가 설계점에

의하여 고정되면 엔진의 가타 작동조건에 대한 성능해석을 실시하게 되는데 이 과정을 탈설계 성능해석이라고 한다. 탈설계 성능해석을 위하여 부분품 고유의 성능특성도가 요구되지만 새로운 엔진을 개발하는 경우 고유의 test rig 실험을 거친 성능특성도가 없는 경우 유사한 성능도를 map scaling 과정을 거쳐 개발코자하는 설계 사양에 맞추어 새로이 제작한다. 한국기계연구원(KIMM)에서는 1994년 이후 가스터빈의 성능해석 분야와 관련하여 새로운 프로그램의 자체 개발 뿐 아니라 외국의 우수한 프로그램들을 확보하여 설계 역량을 높이기 위한 노력을 기울여 왔다. 현재 KIMM에서는 다양한 사이클 형태에 대한 설계점 결정 및 부분부하 성능해석이 가능하며 또 과도성능을 예측할 수 있는 프로그램을 개발한 경험도 있다. 아래표 Table 1은

Table 1 가스터빈 성능해석 관련 기술

구 분	주요기술 내용
설계점 성능해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Optimum Cycle Selection ▶ Optimum Engine Sizing 기술개발 ▶ 유체 특성(Fluid Properties) 예측기술
탈설계 성능해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 구성품 Map Scaling 기술 ▶ 부분부하 성능예측기술
과도상태 성능해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 과도상태 운전시 작동특성 예측기술 <ul style="list-style-type: none"> - 급작가속/급작감속 성능예측기술 - 천이가속/천이감속 예측기술 - Cold start 가속 성능예측기술
터빈 냉각에 따른 성능해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 냉각기류에 대한 열적, 유체역학적 모델링 ▶ 분사위치 및 방법에 따른 성능변화 분석기술 ▶ 냉각Passage 유로해석
불균일 입구유동분포에 따른 성능해석	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Inlet Flow Distortion에 따른 성능해석 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - Method of Parallel Compressor modelling - 압축기 Surge prediction
보조 및 2차유동 관련 성능 해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 2차유동이 축추력 및 출력에 미치는 성능예측 ▶ Sealing 냉각공기 추출, 투입에 따른 성능변화 예측 ▶ 2차유동 열전달 예측기술

* 한국기계연구원, 열·유체시스템부
E-mail : soykim@mailgw.kimm.re.kr

가스터빈 성능해석 시 확보되어야 할 중요 기술들을 보여주고 있다.

2. 압축기 설계

압축기의 경우 원심 및 축류압축기로 구분할 수 있는데 엔진의 성능해석으로부터 요구되는 공기의 유량과 압축비, 그리고 효율 등을 만족하면서 동시에 탈설계 영역에 걸쳐 운용이 가능하도록 공력 설계 변수와 이에 따른 유로 현상, 그리고 블레이드 형상 등을 결정한다. 압축기 성능에 주요 영향을 미치는 변수로는 익말단 간극의 크기와 단하중 그리고 서지 마진 등이 있다. 이러한 공력설계 과정을 통하여 압축기의 기본 형상들이 결정되면 블레이드 형상을 중심으로 응력 및 진동해석을 통한 구조적안정성 검토를 거쳐게되며 만일 이에 문제가 발생할 경우 공력성능의 저하를 최소화 하는 범위에서 구조적 불안정성을 제거하는 재설계 과정을 거친다. 일반적으로 축류 압축기 설계 과정은 다음과 같이 요약될 수 있다. 제1단계로는 시장조사 결과 요구되는 목표사양에 대한 시스템 설계(사이클해석)를 통하여 선정된 압축기 설계 사양에 따라 1차원적 유로설계를 실시한다. 대표적인 설계 사양으로는 전압축비, 전효율, 입구공기량, 입구 온도 및 전압력 그리고 회전수 등이다. 제 2단계에는 1차원적 성능예측결과 설계된 평균반경에서의 설계사양에 대하여 유동해석을 통하여 탈설계 영역에서 각 회전수(일반적으로 50~100%)에서 서지점와 초크간 성능예측 계산을 수행하여 압축기 전단의 성능곡선을 확보한다. 제 3단계는 2차원 공력설계인데 여기서는 유선곡률법을 이용하여 준3차원적 해석 및 재설계를 실시함으로써 3차원 형상설계의 기초자료를 확보한다. 제4단계는 압축기 공력설계 과정에서 가장 중요한 블레이드 3차원 형상 설계이다. 마지막 단계는 설계된 블레이드와 유로의 3차원 형상에 대하여 3차원 수치유동해석을 실시한다.

Table 2는 압축기 설계 기술과 관련한 세부 기술을 보여주고 있다.

3. 연소기 설계

연소기는 압축기로부터 나온 고온 고압의 공기를 연료와 반응시켜 높은 에너지를 갖게 하고 이를 터빈으로 전달하여 기계적 에너지를 얻게 하는 역할을 수행한다. 가스터빈 연소기 설계는 이론 또는 경험식들

Table 2 압축기 설계 기술과 관련한 세부 기술

세부 기술	주요 기술 내용
1차원 설계/성능해석 기술	- 손실모델의 비교검토 - Interstage Bleeding - Surge/ Choke 예측
준3차원 유동해석 기술	- HS & BB 유면해석 - 점성손실 효과의 반영 - BB 편차각 예측
3차원 형상설계 기술	- Inverse Method - Blade Stacking - Custom-tailored Blade
3차원 수치유동해석 기술	- 3차원, 친음속, 난류유동 - Rotor/Stator Interaction - Tip Clearance
축류 cascade의 유동실험 기술	- 다양한 손실모델의 평가 - IGV/Diffuser & Stator - 최적 입사각 및 편차각 - Down-sizing의 영향연구
다단축류압축기의 성능시험 기술	- Scale-down 다단압축기 - 실험적 성능곡선도 확보 - 실험적 Surge 곡선 - Down-sizing의 영향연구

로부터 연소기의 형상을 결정하는 기본설계 부분과 기본 설계에 의하여 얻어진 기본형상을 실험적 또는 수치적 방법에 의하여 검증하여 기본형상에 대한 수정을 행하는 상세설계 부분을 크게 나눌 수 있다. 연소기의 경우 같은 사양이 주어진다 하여도 연소기의 형태 및 치수는 설계자에 따라 상이할 수 있는데 이는 각 설계자에 따라 초기 설계 시부터 다른 접근 방법이 다르기 때문이다. 연소기기술개발과 관련한 주요 관심사는 Emission제어에서 특성시간에 의한 Emission제어 연소방법 개선에 의한 Emission 제어등있다. 전자의 경우 연료 액적의 잔류 시간과 소규모 혼합율 변화, 대규모 혼합율 변화, 동질 반응율에 의한 변화 등이 있으며 후자의 경우 가변형상 연소, 다단 연소, 예혼합, 예증발, 과농희박 및 희박예혼합 연소 촉매 연소 등에 의한 방법 등이 있다. KIMM에서는 연소기 설계 개발용 독자적으로 개발한 프로그램(KAKOM)이 있으며 94년 이후 가스터빈 개발 및 시험 경험을 통하여 관련 기술들을 축적하여 온 바 있다.

4. 터빈 설계

연소기를 나오는 고온 고압의 가스터빈 부에서 팽창과정을 통하여 출력을 생산하게 된다. 발전용 및

Table 3 터빈 설계 관련 주요기술내용

세부기술	주요 기술 내용
설계기술 - 초기형상결정 - 시스템 설계 - 성능예측	- 주요 크기 결정 - 설계인자도출 - 기본 성능 예측
저 NOx 연소기술개발 - NOx 생성특성 연구 - 저 NOx 연소기술	- NOx 생성기구 규명 - 저 NOx 연소기술을 적용한 연소기의 설계 및 성능실험 - 실험실 규모
연료노즐 및 선회기설계 기술개발	- 노즐 설계기술 - 무화특성평가 (저부하시 고려) - 모드별 연소특성평가
라이너 설계기술개발	- 라이너 설계 및 성능평가 기술 (냉각기술포함) - 적용기술의 비교평가
Diffuser 및 Transition piece 설계기술 개발	- Diffuser 및 Transition piece 설계 및 성능평가 기술 - 냉각기술 개발 - 적용기술의 비교평가
연소특성 및 계측기술 개발 - 화염 안정성 연구 - 점화 특성 연구 - 유동장 계측기술 - NOx 계측기술	- 화염의 안정성 평가 - 점화특성 평가 - 연소기내의 온도, 농도 및 속도 등 계측기술 개발 - NOx 등의 배기가스 측정기술 개발
반응유동해석기술개발 - 모델 연소기 - 개발 연소기	- 난류 및 연소 모델링 - 모델 및 시제품 연소기에 적용
성능평가기술개발	- 성능실험장치 설계 - 연소성능실험

Mechanical drive용으로 사용되는 터빈 부의 크기 및 단은 시스템이 요구하는 출력에 의하여 좌우되나 제작, 가격 및 시스템의 안정성을 고려하여 터빈의 단수를 결정하게 된다. 일반적으로 터빈 기본 형상의 결정은 평균반경해석에 의하여, 내부 유로 해석은 유선 곡률법에 의하여 수행한다.

Table 3은 터빈 설계 관련 주요기술 내용을 보여주고 있다.

5. 열전달 및 2차유로 설계

가스터빈 설계에 있어 냉각 및 유로설계는 사이클 해석 차원에서 터빈 블레이드 표면온도 및 연소기 출구온도 그리고 엔진 시스템의 효율과 성능을 고려하여 필요한 냉각공기의 량과 위치를 결정한 후 이를 엔진의

Table 4 열전달 및 2차유로 설계 관련 기술내용

구 분	주요 기술 내용
기본공력설계	- 터빈시스템 열역학적해석 기술 - 1D 공력성능 예측기술 - Advanced Vortex Method에 의한 기본설계기술 - 기본형상 설계기술
최적형상설계	- Inverse Method에 의한 익형 형상설계 - Direct Method에 의한 익형 형상설계 - 2D 익형 형상 공력설계기술 - 3D 익형 형상 공력설계기술 - 준최적제어이론을 이용한 2차원 및 3차원 터빈 형상 설계기법 - 최적 익형 설계 알고리즘 개발 - 익형형상 설계시스템의 전산화
터빈의 유동각 예측에 관한 기술개발	- Streamline curvature 방법에 의한 유로계산 기술 - Turbine Flow Path 설계기술 - 최적 입사각선정기법 개발 - 3D 유동각 분포선정기법 개발 - 정익-동익 상호작용에 따른 최적유동각선정기법개발
성능예측 기술	- 설계점 성능예측기술 - 손실모델 개발기술 - 탈계점 성능예측기술 - 유동해석기술 - 열전달 예측기술
성능시험기술	- 익형 성능 실험기술 (케스케이드, 정동익 간섭, 손실, 등) - 축류형 터빈 공력 성능 실험기술 - 냉각유로에 따른 익형의 열전달 시험 - 기타 열전달 및 2차유로는 2차유도 담당자로 분류
2차유로설계 기술	- 2차유로 해석기술 (축방향 Load, 열전달예측) - 익형내부의 Cold air 유로 설계기술 - 기타 열전달 및 2차유로는 2차유도 담당자로 분류
연결부 설계 기술	- 터빈 연결부(Exhaust, Disk) 설계기술 - Fir tree 설계기술 - 기타 여러부들은 Mechanical Design part에서 담당
압축성 3차원 유동해석기술	- 시간전진기법을 이용한 보존형 Navier-Stokes방정식의 해석기법 - 2방정식 및 레이놀즈 응력난류모델의 3차원 유동장에의 적용 - 3차원 정렬적자계 구성기법 - 이중시간전진법을 이용한 비정상 유동장해석기법 - 팁간극효과의 예측을 위한 블록정렬적자계생성기법 - 2차유동으로 인한 손실예측 기법

Table 5 열전달 및 2차유로 설계 기술 내용

구분	주요 기술 내용
막냉각 기술	<ul style="list-style-type: none"> · Nozzle, Bucket 막냉각 최적설계 기술 (분사홀, 분사각 및 배열 등) · 막냉각 효율 예측 및 측정 기술 · 막냉각홀 제작 기술 · 온도분포 및 열응력 해석 매칭 기술
충돌제트냉각 기술	<ul style="list-style-type: none"> · Nozzle 충돌제트냉각 최적 설계 기술 · 충돌제트 냉각성능 예측 및 측정 기술 · 온도분포 및 열응력 해석 매칭 기술
블레이드 내부 대류 냉각기술	<ul style="list-style-type: none"> · 내부유로 설계 및 난류 촉진체 설계제작 기술 · 대류 냉각성능 예측 및 측정 기술 · 온도분포 및 열응력 해석 매칭기술
연소실 라이너 및 천이부 냉각기술	<ul style="list-style-type: none"> · 열부하 해석 및 요소수명 예측기술 · 천이부 대류냉각 열전달 해석 기술 · 연소실 복사열전달 해석 기술
2차유로 설계기술	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 냉각유로망 해석기술 · 2차 냉각유로망 해석 및 DB구축 · Labyrinth내부유동해석기술 · 압력강하 해석 및 축하중 매칭 기술 ▶ 냉각유로 열회로망 해석기술 · 2차유로 열회로망 해석 및 DB구축 · 2차유로 열전달해석 기술 · 열부하 해석 및 냉각시스템 매칭 기술 · 가스터빈 냉각시스템 Integration 기술

여러 형상 조건 및 공력설계, 소재의 제한조건을 만족 시켜 가면서 결정하게 된다. 이러한 과정을 위하여 설계자는 여러 작동 조건에서 엔진 내부의 누설량, 냉각 공기 유량의 분포 그리고 엔진 내부의 공기 및 연소가스의 압력 분포 또 엔진 내부의 각 표면의 열전달 계수 등을 계산하게 된다. 이를 위하여는 엔진의 누설 그리고 냉각공기의 유로를 유로로서 구분하고 이를 상호 연관짓는 관계를 정의함으로써 유동의 네트워크를 모델링한다. Table 5는 열전달 및 2차유로 설계 관련 기술내용을 보여주고 있다.

6. 회전체 설계

가스터빈은 신뢰성, 안정성 및 경량 등의 장점을 지니고 있으나 시스템이 원활히 정격속도에 도달하기 위해서는 회전체 역학적 해석을 통하여 엔진의 정밀한 동적거동 예측 및 이에 대한 설계가 요구된다. 가스터빈은 열역학적 사이클 측면에서 압축기, 연소기 터빈 등으로 구분할 수 있으나 회전체 설계 차원에서는 이를 회전부와 비회전부로 분류하여 검토한다. 가

스터빈 신뢰도 및 안정성 확보를 위한 회전역학적 설계 기준은,

1. 가능한 한 운전범위 내에서 위험속도를 피할 것
2. 정격속도가 시스템의 위험속도보다 클 경우 위험속도에서의 동적응답을 최소화 할 것
3. 운전범위내에서 회전체 구조물과 관련한 진동 및 전달력을 최소화하여 피로파괴 가능성을 최소화할 것
4. 시스템 효율 향상을 위하여 압축기 터빈의 정동의 선단과 축케이싱간의 간격을 최소화하되 선단 및 Seal의 마찰 접촉을 최소화 할 것
5. 비틀림 진동에 의한 공진 및 불안정 영역을 피할 것 등이다.

회전체의 동특성 해석 기법으로는 전달행렬법, 유한요소법, 부분구조합성법 등이 있다. 회전체 설계와 밀접한 관련을 갖는 베어링 선정 및 설계는 1.시스템의 위험속도 통과 시 진동을 최소화하고 2. 위험속도를 가급적 운전범위 밖에 위치하게 하고 회전축계의 진동으로부터 지지구조물들을 절연시킬 것 시스템의 안정성을 보장하는 기준을 가지고 수행한다. Table 6은 회전체 해석관련 기술별 내용을 보여주고 있으며 Table 7은 블레이드 진동

Table 6 회전축계 해석 관련기술

구분	주요 기술 내용
회전축계 설계/해석	<ul style="list-style-type: none"> -회전축계 모델링 기법 -블레이드/디스크/로터 연성 해석 -Foundation & Support frame modelling -회전체 지지구조물 연성해석 -회전축-베어링-casing-support-foundation 통합설계시스템 구축
베어링 설계기술	<ul style="list-style-type: none"> -Iso-viscous analysis for preliminary system design -Thermal effect -Pad flexibility effects -베어링 최적 형상설계 기법 구축
Gas Seal 설계 기술	<ul style="list-style-type: none"> -Labyrinth seal 설계 기술 -Honey comb seal 설계기술 -Brush seal 설계기술
상태진단 및 제어기술	<ul style="list-style-type: none"> -Shaft crack detection Bearing failure analysis Blad rubbing/failure Misalignment analysis Expert system 구축기술

Table 7 블레이드 진동기술 관련 내용

세부 연구개발 과제	주요 기술 내용
고유진동해석 및 공진회피설계	- 3차원 블레이드 모델링 - 공진회피 반복설계 - 모달시험
공력외력해석 및 검증실험	- 난류유동 해석결과와 공력계산처리 프로그램 - Water Table 상사실험
감쇠 미커니즘 평가 및 모델개발	- 재료/공력감쇠 해석 - 기계감쇠 시험평가 - 기계감쇠 모델링기법
강제진동해석 및 동응력평가	- 정상속도 강제진동해석 - 가감속 과도강제진동 해석 - 동응력 해석평가
고온 열구조해석	- 선형 열응력해석 - 고온 물성치변화 고려 비선형 열응력해석 - 열점탄소성해석
누적손상 피로수명 해석	- 피로해석 모델개발 - 누적손상 수명예측

6. 결 론

가스터빈을 개발에 요구되는 설계 및 해석 기술들을 요약하여 보았다. 그러나 이러한 기술들은 실제 가스터빈 시작품 개발과 연계되어 실험 값들과 비교됨으로서 특정 가스터빈의 특성에 맞게 활용되어질 수 있다. 현재 국내에서도 90년대 중 가스터빈 개발과 관련하여 많은 관심이 고조되면서 요소 기술들에 대한 확보가 많이 이루어졌다고 판단된다. 그러나 최근 들어 가스터빈의 경우 개발과 관련된 인적자원이 개발에 요

구되는 시간, 투자 금액이 크게 요구되고 IMF이후 가스터빈 기술 개발에 대한 연구 의욕이 주춤하고 있어 국외 가스터빈 기술 개발분야에서 해외 업체나 연구활동이 점차 활발해지는 상반적인 추세를 보며 이들에 대한 기술 종속이 2000년대 들어 더욱 심해질 것으로 판단되어 우려된다. 현재 가스터빈이 적용되는 분야가 점차 확대되고 있고 또 그동안 문제시되어 왔던 소재 및 냉각기술의 혁신으로 가스터빈기관이 기타 동력기관에 비하여 2000년 이후 뚜렷하게 유리한 고지를 점령할 것으로 보이며 가스터빈 수요는 계속적인 증가를 할 것으로 보인다. 더욱이 가스터빈 분야가 군사적 측면과 중요하게 연결되어 외국으로부터의 기술확보가 쉽지 않음을 생각할 때 한국이 2000년대 외국과 과학 기술 및 군사력 차원에서 경쟁하고자 할 경우 반드시 가까운 시일 내에 확보해야할 분야라고 판단된다. 이를 위하여 우선 국내의 가스터빈기술 관련 연구소 및 몇몇 가스터빈 부품 제작 업체들이 생산하는 품목에 대하여 경쟁력을 가질 수 있도록 다양한 형태의 지원이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 오군섭 외, 22인, 1998, “대형발전용 가스터빈 개발을 위한 세부기획조사”, UCN199-588.M, 한국기계연구원.
2. 김수용 외 16인, 1998, “발전용 가스터빈 개념설계에 관한 연구”, UCN 2000-613.M, 한국기계연구원.
3. 노승탁 외 2인, 1998, 대형발전용 가스터빈의 해외 기술 개발 동향 조사 연구“, 서울대학교 터보 동력 기계연구 센터.