

대형 가스터빈 엔진 개발 과정

한상조 · 서정민 · 최범석*

1. 서 론

근대 산업사회의 급속한 발달과 함께 전기 사용량의 증가는 새로운 형태의 동력발생 장치를 요구하게 되었다. 근대에 가장 일반적으로 사용된 동력 발생장치는 화석연료를 사용하여 증기터빈을 구동시키는 화력발전의 형태였다. 그러나 산업화가 진행되며 더욱 많은 전력 생산이 요구되었고, 증기터빈과 결합된 가스터빈 발전소가 많은 부분을 담당하게 되었다. 우리가 현재의 발전소에서 많이 보고 있는 가스터빈은 2차 세계대전을 통하여 급속히 발전하였으며, 초기에는 낮은 열효율 때문에 발전용 보다는 무게 당 높은 출력으로 인하여 항공용으로 주로 개발되어 왔다. 2차 세계 대전 이후 가스터빈은 발전용, 기계 구동용, 선박용, 차량용으로 다양한 분야에서 발전되어 왔고 각각의 분야별로 요구되는 특성에 맞추어 발전되어 왔다. 발전용 가스터빈은 1940년대 스위스 Benau 발전소에서 27MW, 17MW 발전기의 운전이 시작되었다. 당시로서는 획기적인 30%전후의 열효율을 달성하였으나, 복잡한 사이클, 내열재료, 연료, 높은 초기투자 등의 문제로 초기의 가스터빈 발전은 성공하지 못하였다.⁽¹⁾ 이후 발전용 가스터빈의 주류는 1축의 단순 사이클로 발전하였고, 현재는 30% 중반의 열효율과 100MW이상의 출력을 실현하였다. 또 터빈의 배기온도가 600°C 전후이기 때문에 증기터빈과 결합한 복합사이클을 이용하여 50%대의 높은 열효율을 실현하였다.⁽²⁾ 따라서 전 세계적으로 발전용 가스터빈 플랜트는 복합사이클의 형태로 증가하고 있다.

본 논문에서는 가스터빈 중에서 발전용으로 사용되는 대형 가스터빈의 설계에 필요한 기술들에 대하여 다루어 보고자 한다.

2. 가스터빈 설계 절차

2.1 가스터빈의 개념설계 과정

개념설계 과정은 가스터빈 엔진 설계의 초기단계에 특성 수요자의 요구나 개발시점의 수요전망 등을 바탕으로

현재 및 개발 완료시점까지의 기술수준으로 설계 및 제작이 가능한 범위 내에서 개발대상 가스터빈의 출력과 같은 기본적인 사양을 결정하고 열역학적 사이클 해석을 통해서 성능해석을 수행하여 구성품들의 출력, 효율이나 가스터빈 전체 시스템의 성능결정에 중요한 요소인 압축비나 터빈 입구온도와 같은 모든 기술적 사양들을 최적화시켜 결정하는 과정이다.⁽³⁾

2.1.1 열역학적 설계변수의 선택

설계하려는 가스터빈 엔진의 용도와 용량에 따라 엔진의 형태와 출력이 결정되면 이를 바탕으로 최적의 열역학적 설계변수들을 결정한다. 압축비, 터빈입구와 출구에서의 온도, 유량, 회전수를 바탕으로 Brayton cycle에 기초한 열역학적 계산을 통해서 구하며, 가스터빈의 주요 구성품별 압력 손실량, 단열효율, 터빈 냉각을 위한 bleed air량 등 경험적 설계 변수들은 가스터빈 설계관련 data base로부터 구한다.⁽⁴⁾

2.1.2 설계점 가스터빈 성능해석

선택된 설계변수들을 이용하여 설계점에서의 가스터빈 운전특성을 열역학적 사이클 해석을 통하여 전산 simulation하는 과정으로 정상 작동시 가스터빈의 출력, 연료 소모량, 열효율 등이 분석되어 설계 목표값들과 비교를 통해 최적의 설계변수들을 구한다.

2.1.3 탈설계점 가스터빈 성능해석

설계된 가스터빈에 부분부하나 과부하가 걸리거나 입구 유동조건이 바뀌는 경우, 또는 시동 직후의 천이과정과 같은 탈 설계점에서의 가스터빈 엔진 작동특성을 simulation하는 과정으로 가스터빈 엔진 회전수의 변화 및 부하량 변화에 따른 출력 등의 변화가 분석되어진다. 탈 설계점에서의 성능해석은 효율보다는 출력의 변화폭이나 안정성 문제 등이 집중적으로 검토되어 진다.

2.2 가스터빈의 기본설계 과정

개념설계 과정에서 가스터빈 전체 시스템에 관련된 기본

* 한국기계연구원 에너지계연구본부
† 교신저자, E-mail : bschoi@kimm.re.kr

설계변수의 선택이 완료되면 여기서 주어지는 각 component 별의 설계사양이나 설계변수들을 기초로 해서 각각의 구성 component 별로 기본설계를 하게 된다. 이 과정은 주로 압축기와 연소기 그리고 터빈과 같은 가스터빈 핵심 구성 component 들의 형상이 결정되는 과정으로써 각 component 별로 공력설계를 통한 형상결정과 구조해석을 통한 검증 및 수정작업이 반복된다.

2.2.1 축류 압축기 기본설계 과정

가스터빈의 전체적인 효율은 압축비와 터빈 입구온도의 영향을 크게 받으므로 전압력 손실을 줄이면서 효율적으로 목표하는 압력비로 작동유체를 압축시키는 역할을 하는 압축기의 설계는 터빈 설계에서 매우 중요하다. 하지만 압축기에서 압력을 증가시키는 과정에서 전파실속, 써어지 등 시스템의 안정성을 해치는 문제가 발생하기 쉬우며 따라서 이러한 현상들의 발생을 회피하도록 설계하는 것이 중요한 관심사이다.

1) 압축기 설계사양 결정

개념설계를 통해 구한 component 별 설계조건 및 사양으로부터 압축기의 주요 설계제원인 압축기의 형태, 유량, 효율, 압축단수, 압축비, 회전수 등을 결정한다.

2) 압축기 유로의 1차원 형상설계

결정된 설계사양으로부터 압축기의 전반적이고 개략적인 유로형상을 결정하는 과정으로 mean path line 1차원 해석을 통하여 임펠러의 평균 반경 설계와 축대칭 설계가 행해진다.

3) 압축기 세부 형상설계

개략적인 형상설계 결과를 구체화시키는 과정으로 단순한 유로 형상을 결정한 뒤에 설계하고자 하는 압축기의 입구로부터 출구까지의 속도 삼각형 분포를 고려하여 블레이드의 두께와 블레이드의 시위길이, 방향 각도분포 등을 정해줌으로써 IGV, 동익 정의의 상세 형상 설계를 행한다.

4) 유동해석

가정을 통해 단순화된 2차원 면에서의 유동해석과 압축기 내부의 전체적인 3차원 유동해석을 통해 압축기 내에서의 유동흐름이 설계자의 의도대로 이루어지고 있는지 확인하는 과정이다. 이 과정에서 실속영역 발생이나 충격파의 발생 등에 대한 확인 작업과 이를 해결하기 위한 블레이드의 형상을 바꿔주는 반복작업이 이루어지며 이 과정에서 얻어지는 블레이드 표면의 속도, 압력, 온도 등의 분포는 구조해석에서 입력정보로 사용되어진다.

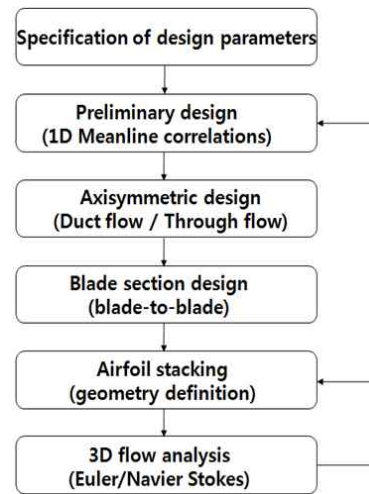


Fig. 1 임펠러 설계 flow chart

5) 압축기 성능해석

설계점에서의 목표성능을 기준으로 설계된 압축기는 탈설계점 영역에서의 압축기 성능예측을 비롯한 여러 가지 성능해석 과정을 거친다. 이 과정에서 압축기의 성능곡선도의 작성을 통하여 써어지 등 안정성 관련 사항들이 검토되어지며 결과들은 검토를 거쳐 압축기 반복 설계의 입력조건으로 사용되어진다.

2.2.2 연소기 기본설계 과정

연소기의 설계는 전반적인 설계과정에 설계자의 경험과 실험적 요소가 크게 반영된다. 설계과정에서 중요한 설계관점은 압력손실이나 변동압력의 수준을 낮추면서 연소기내의 온도분포 조절을 통한 연소기 벽면의 열응력 분포의 최소화 와 배기가스의 속도 및 온도 분포를 적절히 배분하여 터빈의 효율을 높이면서 터빈 블레이드의 냉각문제를 개선할 수 있도록 하는 것이다.

1) 연소기 설계사양

가스터빈의 설계사양으로부터 결정되는 연소기의 설계조건은 연소기 입구에서 유입되는 공기의 압력, 온도, 유량과 출구에서의 가스 온도, 그리고 연료의 유량과 공급압력 등으로 구분되는 연소기 작동조건, 연소효율과 전압력손실, pattern factor 등으로 나타나는 연소기 성능 사양, 연료의 종류와 연소기 제어방식으로 구분되어 진다.

2) 기본적 Layout 결정

결정된 연소기의 설계사양으로부터 연소기의 형태와 유로방식을 결정하고 그 밖의 연소기의 크기, 연료 노즐의 배관과 점화기 및 연료 분사노즐, 그리고 화염 전파관의 설치 개수나 위치 등과 같은 기본적 layout를 결정하게 된다.

3) 연소설계

이 과정은 경험으로부터 축적되어온 착화 및 화염이동의 특성, pattern factor, metal 온도, 배기가스의 특성, 압력 손실, 변동압력 수준, 그리고 신뢰성이나 운전특성에 관련된 표준 data들이 중요한 역할을 하게 되는 과정으로 연소조건 선정, 공기 배분설계, 그리고 열전달 및 냉각에 관한 설계를 하게 된다. 연소조건 선정은 압력손실이나 연소화학의 길이 등이 결정되어진다. 공기 배분 설계에서는 각 hole의 기하학적 면적 등을 실험 연소시험 결과와 3차원 유동 해석 결과를 반영하여 설계한다. 열전달 및 냉각설계는 연소기의 metal 온도와 화염온도 등의 추정으로부터 연소조건에 따른 냉각 공기량과 heat balance에 따른 압력손실 범위 등을 고려하여 연소기의 냉각방식과 구조를 선정한다.

4) 주요 부품 형상설계

연소기의 case 및 liner 반경과 길이를 포함한 연소기의 형상과 크기, 냉각구조, 그리고 공기 hole 위치 및 반경, swirl 유동의 숫자와 형상, 연료 분사노즐 개수와 spray angle, 착화기나 화염전과관의 위치 및 개수 등의 상세한 형상을 설계한다.

5) 성능예측

연소기의 성능예측은 설계과정에 일부 수치해석방법을 적용하여 설계의 의도대로 과정이 진행되는지 확인하는 과정을 거치나 대부분의 성능예측은 시험, 평가를 통해서 이루어진다. 평가는 요소시험, 대기압 시험, 실압시험으로 이루어진다.

2.2.3 축류터빈의 기본설계 과정

가스터빈에서의 중요 설계관점은 터빈 블레이드 상에서의 속도와 압력분포가 적절하도록 블레이드를 설계함으로써 팽창하는 배기가스로부터 충분한 운동에너지를 흡수하는 것이다. 하지만 블레이드의 creep이나 부식, 피로파괴에 의한 수명단축은 가스터빈 전체의 maintenance에 큰 영향을 주므로 이를 방지하기 위한 블레이드 냉각 문제가 중요한 과제가 된다.

1) 터빈 설계사양

개념설계의 설계 조건 및 사양으로부터 터빈의 형태, 유량, 효율, 단수, 회전수 등을 결정한다.

2) 터빈 유로형상 설계

터빈 유로형상 설계는 1차원적 설계와 축대칭류 설계로 이루어진다. 1차원적 설계로 터빈의 단수, 회전수, 블레이드의 높이나 평균 반지름과 같은 1차원적 유로의 크기와 단별 부하의 배분의 선정과 같은 단설계와 손실예측 모델에 의한

블레이드의 시위길이, 블레이드의 숫자, tip clearance, 그리고 aspect ratio와 같은 blade row의 변수들이 결정된다. 축대칭류 설계는 유선곡률법에 의해 자오면상에서의 유동해석을 통해 터빈의 유로형상과 각 익렬에서의 출입구 조건을 결정하여 속도 삼각형과 반동도 등을 구한다.

3) 터빈 블레이드 설계

속도 삼각형 및 여러 설계변수들을 이용하여 블레이드의 camber line과 path profile을 계산하여 2차원 블레이드 익형을 구하는 과정으로 blade to blade 2차원 유동해석을 통하여 확인하는 과정을 거치게 된다. 그 후 설계된 기본단면에서의 익형을 기본으로 익단면 stacking과정을 통해서 완성된 3차원 블레이드의 형상을 결정하는 과정으로 반경방향 유동 성분들에 대한 사항들이 추가로 고려된다.

4) 터빈 내부 3차원 유동해석

가정을 통해 단순화된 2차원 면에서의 유동해석과 터빈 내부의 전체적인 3차원 유동해석을 통해 터빈 내에서의 유동흐름이 설계자의 의도대로 이루어지고 있는지 확인하는 과정이다. 이 과정에서 실속영역 발생이나 충격파의 발생 등에 대한 확인 작업과 이를 해결하기 위한 블레이드의 형상을 바꿔주는 반복작업이 이루어진다. 특히 터빈의 역할은 작동유체의 운동량을 기계적 회전 에너지로 바꾸어 주는 것이므로 블레이드가 pressure side와 suction side에서의 압력 분포가 중요한 설계관점이 된다.

5) 터빈 성능해석

탈설계점 영역에서의 터빈 성능예측을 비롯한 여러 가지 성능해석 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 터빈의 성능곡선이 작성되며 이러한 결과들은 검토를 거쳐 터빈의 반복설계의 입력조건으로 사용되어진다.

6) 냉각의 설계

냉각의 설계는 설계된 익형과 유동조건, 그리고 익면에서의 정압 열전달을 분포를 고려하여 터빈 블레이드의 내부 냉각 유로의 구조를 설계하고 냉각 공기량을 설정하여 열전달 현상해석을 하여 금속온도 확인이나 내외면 열전률, 그리고 필립효율과 탄성 열응력 계산 등을 통해서 설계제원을 만족하는 방향으로 내부 냉각유로나 냉각 공기량 설정을 반복하여 계산하게 된다.

2.3 가스터빈의 상세설계 과정

기본설계 과정을 통하여 결정되어진 압축기와 연소기, 그리고 터빈 등의 주요 component들의 형상을 기초로 해서 궁극적으로 시제품 제작이 가능한 상세한 설계도면을 작성하는 과정을 상세설계 과정이라고 한다. 여기서의 상세한 설계

도면 작성이란 가스터빈을 구성하는 모든 부품들의 형상에 대한 정확한 정보와 함께 부품 제작 시 사용할 소재의 사양과 제작설비, 그리고 공정이 고려된 제작에 필요한 모든 정보에 대한 결정을 의미한다. 상세설계 과정에서는 기본설계 과정에서 설계되어진 압축기와 터빈, 그리고 연소기를 제외한 블레이드 디스크나 casing, 그 밖의 연료 공급계통이나 점화계통, 또는 윤활계통과 제어 계통을 포함하는 보조 기구들을 상세 설계하는 과정들이 포함된다.

2.3.1 구성부품의 응력 및 열해석

작동유체의 압력분포 및 운동량 변화로 인해서 블레이드와 디스크 등에 가해지는 하중, 회전부의 고속회전에 의해서 발생하는 원심하중을 입력조건으로 하여 유한요소법을 이용하여 정확한 부품의 응력분포를 예측한다. 이 때 연소기, 터빈 등과 같이 고온 하에서 작동하는 부품들은 열해석을 수행하여 온도의 분포를 얻고, 그 온도분포에 의해서 발생하는 열응력을 고려한다. 응력해석 과정에서는 연소기, 터빈 디스크의 볼트 구멍과 슬롯 등에서 발생하는 응력집중 현상에 특별한 관심을 두게 된다. 압축기, 터빈 블레이드의 상세설계 시에는 응력에 의해서 휨, 처짐이 일어나는 양을 고려하여 바깥 케이싱과의 간격을 설정해야 하며, 연소기 라이너와 같이 고온하에서 작동하는 부품은 열팽창에 의해서 변형되는 것을 고려한 형상설계가 이루어져야 한다.

2.3.2 주요 부품의 진동해석

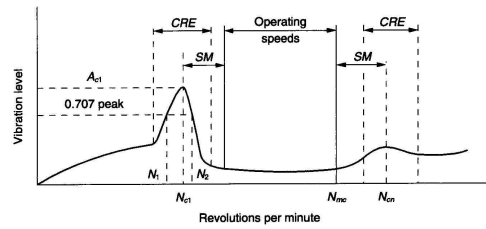
부품의 정적 구조해석을 끝마친 후에는 진동해석을 통해서 각 부품의 동특성을 점검한다. 일반적으로 압축기, 터빈 로우터와 같이 회전하는 부분에 진동이 발생하는 경우 치명적이며 특히, 블레이드는 디스크에 비해 작동유체의 가진에 의해서 공진을 일으킬 가능성이 매우 높다. 후류 등에 의한 강제진동은 블레이드의 고유진동수를 이용하여 캠벨 다이어그램을 작성하여 공진여부를 예측한다. 블레이드에서 플러터에 의한 자가 가진이 일어날 수 있는 것으로 블레이드의 reduced frequency를 구함으로써 동적인 안정여부를 판단한다.

2.3.3 주요 부품의 수명계산

응력해석으로 구성품들의 피로수명을 예측한다. 피로의 종류로는 진동응력에 의한 고주기 피로, 가스터빈 엔진의 시동과 중지로 인한 저주기 피로, 그리고 블레이드 팁 부위의 부식으로 인한 부식피로 등이 있다. 이러한 피로수명은 Goodman 다이어그램을 이용하거나 Coffin 식을 이용하여 주어진 응력 또는 변형을 범위에 대한 피로수명을 얻는다.

2.3.4 로우터 조립체 설계

압축기와 터빈 등을 포함하는 회전축, 그것을 지지하는 베



- N_{c1} = Rotor 1st critical, center frequency, cycles per minute,
- N_{cn} = Critical speed, nth,
- N_{mc} = Maximum continuous speed, 105 percent,
- N_1 = Initial (lesser) speed at 0.707 x peak amplitude (critical),
- N_2 = Final (greater) speed at 0.707 x peak amplitude (critical),
- $N_2 - N_1$ = Peak width at the half-power point,
- AF = Amplification factor,
- $$= \frac{N_{c1}}{N_2 - N_1}$$
- SM = Separation margin,
- CRE = Critical response envelope,
- A_{c1} = Amplitude at N_{c1} ,
- A_{cn} = Amplitude at N_{cn} .

Note: The shape of the curve is for illustration only and does not necessarily represent any actual rotor response plot.

Fig. 2 로터 반응도 및 정의

어링과 댐퍼 등을 합해서 로우터 조립체라고 한다. 이 로우터 조립체의 회전속도와 선회속도가 일치하는 경우 임계속도라고 하며 가스터빈의 회전속도가 임계속도에 가까운 경우에는 공진에 의한 과도한 변형으로 로우터 조립체 또는 베어링의 파손을 초래한다. 따라서 적절한 임계속도를 갖도록 로우터 조립체의 형상과 재질을 결정하고 베어링의 강성을 결정한다.

2.3.5 재료의 선정

가스터빈 엔진은 다양한 온도 분포 및 응력조건을 가질 뿐 아니라 산화와 부식 등 매우 복잡한 환경을 제공한다. 그러므로 이러한 가스터빈의 구성부품의 재료 선정시에는 기본적인 물성치 외에도 크리이프 강도, 피로 강도, 파괴 인성, 부식성, 그리고 산화성 등에 대한 고려가 초기에 이루어져야 한다. 또한 이러한 안전성뿐만 아니라, 구조성, 성형성, 기계 가공성 및 용접성, 그리고 경제적 측면도 고려되어야 한다.⁽⁵⁾

참고문헌

- (1) Hyong Youngsik, "Gas Turbine Theory," Chungmoongak, 1995.
- (2) Korea Institute of Machinery&Materials, "Large Gas Turbine Development Proposal for Power Generation," Research reprints, 1998.
- (3) D.E. Brandt, R.R. Wesorick, "GE Gas Turbine Design Philosophy," 38th GE Turbine State of the Art Technology Seminar, GE Power Generation, 1994.
- (4) Cho Younguk, Choi Taewon, Kang Ji-Il, "Gas Turbine

- Engine,” Chungyun, 1994.
- (5) Samsung Techwin, “Industrial small gas turbine development research,” Ministry of Commerce and Ministry of Science, 1992.