

가스터빈엔진(GTE)의 동적 설계 기술 현황

김영철* · 이동환* · 심재호*

1. 서 론

가스터빈엔진 (Gas Turbine Engine, 이하 GTE) 설계기술은 성능설계기술과 신뢰도설계기술로 분류할 수 있다. 성능설계기술에는 ①열역학 사이클 해석기술, ②압축기, 터빈의 유로, 임펠러, 디퓨저의 설계기술, ③연소기 설계기술이 해당된다. 신뢰도 설계기술에는 ① GTE의 최적형상을 결정하는 회전체역학적 시스템설계기술과 ②베어링, 시일, 댐퍼, 기어 등과 같은 회전체 요소를 해석, 설계하는 GTE 요소설계기술, ③고온, 고압, 고응력 뿐만 아니라 회전체의 진동에 의한 임펠러, 정동익, 디스크 등의 각 기계부품의 조기파손방지를 위한 GTE 부품의 응력 및 피로해석설계기술이 있다. 특히 베어링, 시일, 댐퍼, 기어와 같은 핵심요소를 포함한 GTE의 시스템 및 요소설계기술은 고속회전시 발생하는 진동을 예측, 제어함으로 GTE의 안정적 운전과 요구수명 확보에 지대한 영향을 미치는 기술이다.

최근 GTE의 경우 에너지의 공급확대 요구에 부응하기 위해 고효율화, 고속화의 경향을 보이고 있으며, 이에 따라 운전속도에 이르기까지 다수의 공진주파수가 발생하는 유연축이나 박판 케이싱을 가진 시스템이 되므로 GTE의 안정성 및 신뢰성확보를 위해 회전체동역학적 해석을 통한 정밀한 동적거동의 예측 및 설계가 요구되고 있다.

2. GTE의 구조적 특징

Figure 1은 전형적인 항공기 GTE의 단면도를 보여 주는데, 종종 여러 개의 회전체와 케이싱, 마운트시스템으로 구성되어진다. 이 때 회전체와 케이싱의 구조는 얇고 유연한 구조를 가지므로 동적거동 예측에 있어

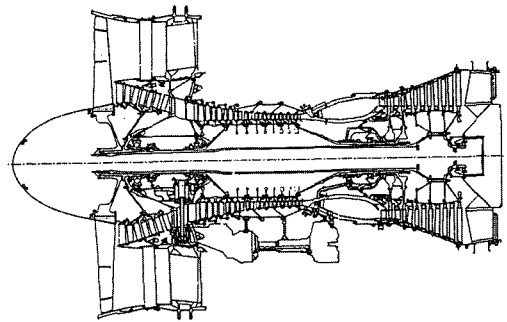


Fig. 1 Typical aircraft GTE

서 주의 깊게 모델링 되어져야 한다.

발전용 GTE는 실질적으로 터보축 엔진이기 때문에 그 열역학적 성능이나 설계는 항공용 GTE과 유사하다. 다만 항공기용과는 설계요구조건과 그 응용이 다를 뿐이다. GTE는 경량, 고성능, 원통형상의 특징으로 인해 항공기 동력기관으로 완전히 자리를 잡았으나, 지상에 설치하는 발전용 GTE의 경우 무게나 크기의 제약이 적고 경제성이 중요하게 된다.

일반적으로 항공용과 발전용 GTE을 구조면에서 비교하게 되면 다음과 같은 상이점이 있다. 즉 발전용 GTE의 경우 일반적으로 기초로 설치된 베어링대 위에 지지되는 것이 많다. 또 케이싱 내부의 베어링에 의해 지지되는 경우에도 케이싱을 기초로부터 지지되고 있는 위치와 케이싱 내의 베어링 위치와는 축방향으로 그다지 떨어지지 않는 경우가 많다. 따라서 베어링과 기초 사이의 강성이 높다. 그러므로 발전용 가스터빈의 경우 회전체 특성 외에 베어링에서 기초 사이의 동적특성을 고려하면 충분하고 케이싱의 특성을 고려하지 않아도 되는 경우가 많다.

반면 항공기용 GTE의 경우 회전체가 케이싱 내부의 베어링으로 지지되고 케이싱은 항공기에 설치되지만 베어링과 케이싱 사이의 지지점축방향의 위치는 상당히 떨어져 있는 경우가 많다. 그러므로 케이싱은 회

* 한국기계연구원 e-엔지니어링연구센터

E-mail : kyc@kimm.re.kr

전체의 불균형에 의해 주기적인 굽힘모멘트를 받는다. 이때 케이싱은 중량경감을 위해 강도적으로 허용가능한 두께를 가진 구조물로서 그 중량과 굽힘강성값은 회전체의 값과 비슷한 정도이다. 또 엔진을 지지하는 구조물의 강성은 지상용의 기초강성에 비해 아주 낮다. 따라서 케이싱 및 지지구조물의 진동특성이 회전체의 진동특성에 큰 영향을 미친다. 또 항공기의 경우 회전체를 동심의 다축구조로 채택하는 경우가 많다.

다음으로 베어링에 관해 고찰하면, 항공기용의 주베어링으로는 거의 예외없이 구름베어링을 사용하고 있다. 일반적으로 구름베어링은 강성계수가 크고 점성감쇠계수가 낮으므로 회전체진동에 대한 감쇠작용이 적고 회전체의 진동이 케이싱에 직접적으로 전달된다. 따라서 케이싱은 회전체와 비슷한 정도의 진폭으로 진동한다. 항공용 GTE의 진동저감을 위해서 스퀘즈필름댐퍼를 많이 사용한다. 이에 반해 발전용 GTE의 경우 텀핑패드베어링과 같은 유체동압베어링을 사용하는 경우도 많은데, 감쇠계수가 상대적으로 높다.

3. GTE 동적 설계 기법

GTE는 질량과 강성이 연속적으로 분포된 연속체로서 그 동적거동을 표현하기 위해서는 편미분방정식(Partial differential equation)이 사용되는데, 보통 전체 회전체를 질점(mass point)과 질량이 없는 보(massless beam)로 이루어진 작은 축요소(beam element)의 집합체로 간주하여 동적거동을 수치 계산한다. 회전체와 케이싱은 대부분 빔, 콘(cone), 평판(plate), 셸(shell) 구조로 구성되고, 그 강성은 비대칭빔(axisymmetric beam)으로 모델링 되어지기도 한다. 또한 많은

경우 회전체만 모델링하는 것으로는 GTE 전체의 거동을 정확히 예측하기 어렵고, 극히 무거운 케이싱을 가진 육상용 GTE라 할지라도 케이싱까지 고려하여 해석하는 것이 좋다. GTE 해석 기술로는 전달행렬법과 유한요소법 및 모달해석법이 있다.

전통적인 GTE의 동력학적 해석은 전달행렬법(Transfer Matrix Method)에 기초하고 있는데, Holzer 등이 회전체의 비틀림진동 해석에 적용한 이후 Myklestad와 Prohl에 의하여 회전체의 횡진동에 적용되었고, Lund에 의해서 회전체해석에 있어서 고려되어야 할 요소들이 대부분 포함된 연구가 진행되었다. 전달행렬법의 장점은 행렬크기가 요소의 수와 무관하게 항상 일정하여 계산이 비교적 간단하다는 점이다. 이에 비해 복잡한 구조물이나 여러 가지 요소들이 결합된 모델링에 있어서는 어려움이 있다. 전달행렬법의 이러한 문제들은 평균연성계수(averaged flexibility)와 변수변환법(change of variable scheme)을 사용하여 전달행렬의 계수의 크기를 적절히 조절(Colen, R.B. et al, 1982)함으로써 최소화 시킬 수 있다. 전달행렬법은 Fig. 2와 같이, 1개 회전축을 여러 개의 구간(span)으로 세분하고 다시 구간(span)을 절점(station point)과 질량이 없는 보(massless beam)의 2가지 요소로 되어 있는 절점요소(nodal element)의 집합체로 나타내어, 경간 내의 어느 한 절점요소 우단의 상태변수(state variable)를 좌단의 상태변수로 표현하는 방법이다.

반면 유한요소법은 Ruhl과 Booker가 굽힘변형과 Transverse inertia만을 고려하여 회전체 해석에 적용한 이후 Nelson과 Macvaugh가 Rotary Inertia, Gyroscopic Effect, 축방향 하중, 전단굽힘과 축방향 토크 등을 고려한다. 유한요소법은 전달행렬법에 비해 몇 가지 부

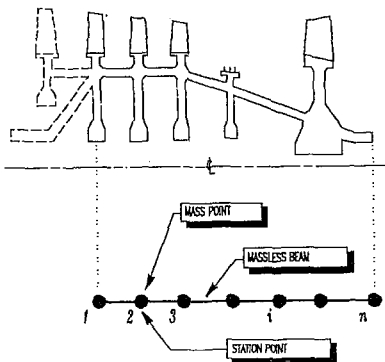


Fig. 2 Typical span model

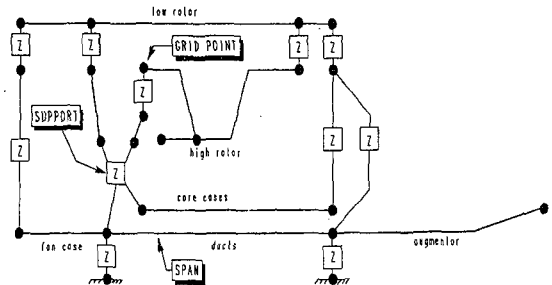


Fig. 3 Typical line diagram of GTE dynamic model

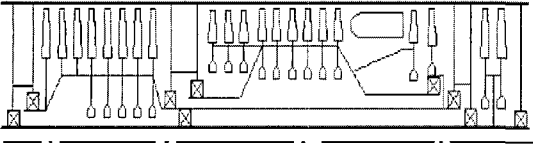


Fig. 4 Three shaft GTE configuration

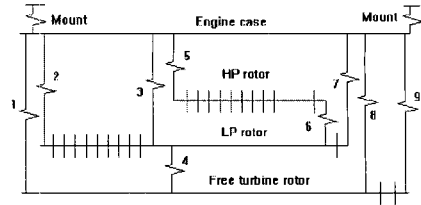


Fig. 5 Line diagram for three shaft GTE model

수적인 효과를 고려할 수 있고 복잡한 구조물의 모델링이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 유한요소법은 전달행렬법에 비해 많은 기억용량과 계산시간을 필요로 한다는 단점이 있다.

한편 GTE에서 얇은 막의 원추형 축요소들이 많이 사용되어지는데 이러한 부품들은 종종 전달행렬법에서 원통모양의 빔요소의 스태프로 모델화되어진다. 하지만 반대로 이러한 cone 요소들은 beam이론에 의해서 움직이지 않기 때문에 유한요소법에 의한 방법에 의해서는 위험속도 등 해석결과에 많은 영향을 미치게 된다.

전형적인 GTE 동적모델은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 line diagram으로 단순화시켜 표현할 수 있는데, grid point, span, support의 3가지 요소로 구성되어진다. 이 때 각 span은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 질량이 없는 빔 (massless beam)과 연결되어진 일련의 질량 (mass)로 구성되어진다.

4. GTE 동적 설계 절차

이 장에서는 GTE의 동적 거동 예측하고 진동설계를 수행하기 위한 주요절차를 소개한다. Fig. 4에서 보여지는 3축 구조의 GTE를 이용하여 GTE 진동 설계 절차를 소개하도록 한다.

- ① 우선 엔진모델에 관한 데이터를 준비하고, 가능한 실험 데이터 확보한다. 이 단계의 목적은 GTE 동적거동을 예측하기 위해 설계모델을 구성하는 단계이다. GTE의 동적 모델을 세우는 작업은 공학자에게 가장 중요한 단계라고 할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 GTE에 관해 동적모델링을 수행하여 그린 line diagram 예이다.
- ② GTE의 위험속도와 모드형상을 해석하고, 스트레인 에너지와 운동에너지 분포를 해석하며, 공진영역에서 지지구조물의 영향을 조사한다. 이 단계의 목적은 운전영역 내에서 가장 위험한 공진영역을 결정하고, 댐퍼나 유연요소 및 가속도계가 설치될 위치

를 선정하기 위한 것이다. 댐퍼가 없는 상태에서 스트레인에너지와 운동에너지를 분석하여 최대진동이 발생할 모드를 예측한 후, 적절한 댐퍼 및 위치 선정을 통해 진동의 증가 없이 공진점을 통과할 수 있도록 설계할 수 있다.

- ③ 각각 분리된 로터의 단일 불평형에 기인한 동기 강제진동 (synchronous forced response) 진폭응답을 해석한다. 이 단계의 목적은 GTE에서 진동레벨의 정량적 평가를 하기 위한 것이며, 댐퍼나 유연요소의 최종적인 수용여부도 판단할 수 있다. 가속도계가 설치된 위치에서의 응답을 비교하면 이론치와 설계치를 서로 비교할 수도 있다. Fig. 6은 Fig. 4의 GTE에 관해 동기 강제진동응답을 해석한 것이다.
- ④ 전체 GTE 시스템에 분포된 불평형에 기인한 강제진동 진폭응답을 해석한다. 가속도계 설치장소에서의 진동 속도, 회전체 지지점의 부하 레벨, 지지점의 강성 및 댐핑에 따른 회전체의 상대 변위 등을 결정한다.

이 단계의 목적은 보다 정교한 동적 응답의 정량적 평가와 회전체 지지구조물의 바람직한 동적특성을 결정하는 것이다. Fig. 7은 Fig. 4의 GTE에 관해 casing 및 각 회전축에서의 진동레벨의 선형동적거동을 나타

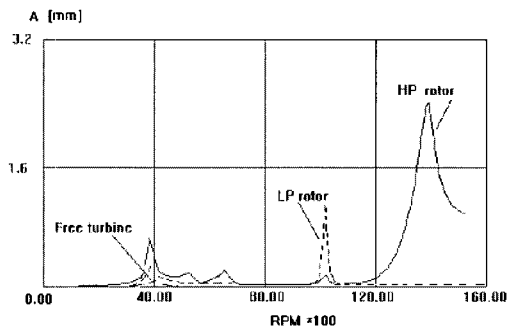


Fig. 6 Synchronous forced response of linear model

가스터빈엔진(GTE)의 동적 설계 기술 현황

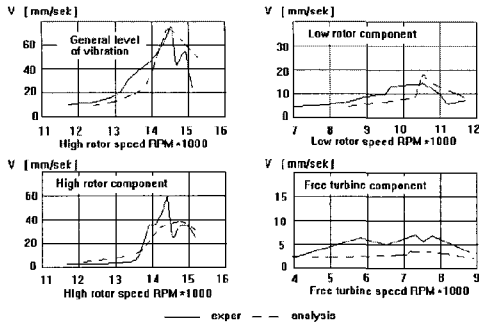


Fig. 7 Dynamic response characteristics of linear model

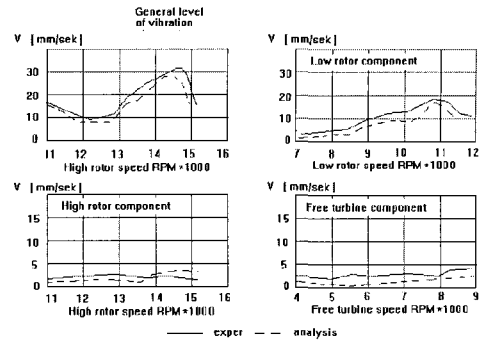


Fig. 9 Dynamic response characteristics of nonlinear model

낸 것이다. 케이싱의 진동레벨은 허용기준을 상당히 초과하고 있음을 볼 수 있으며, 스퀴즈 필름 댐퍼의 도입이 필요함을 알 수 있다.

⑤ 스퀴즈필름댐퍼 (squeeze film damper, Fig. 8 참조)와 같은 다양한 유연 감쇠 지지구조물의 동적 거동을 해석한다. 높은 선형성을 가진 구조물 설계 인자를 선택하고, 댐퍼의 설계, 분포된 불평형에 의한 비선형해석을 수행한다. 이 단계의 목적은 최적의 GTE 동적시스템을 설계하기 위함이다. 우선 스퀴즈필름댐퍼가 어디에 어떠한 구조로 설치되는 것이 좋은 지를 결정하고 그 동적 특성(강성 및 감쇠 특성)을 해석한다. 비선형해석은 반드시 중력과 분포된 불평형을 고려하여 수행되어야 한다. Fig. 9는 Fig. 4의 GTE에 대해 케이싱과 각각의 회전축에서의 진동레벨의 비선형 동적거동을 나타낸 것이며, Fig. 7과 비교하여 보았을 때 진동감쇠 효과를 확인할 수 있다.

⑥ 필요한 경우 특별한 문제의 해를 구한다. 이 단계의 목적은 운전중 발생 가능한 여러 가지 운전조건에서 GTE 동적거동을 확인하고자 하는 것이다. 예를 들면, 블레이드 이탈 (loss), 항공기 착륙, 회전체 러빙 (rubbing) 등과 같은 특별한 경우의 문제를 확인한다.

참고문헌

- (1) M.K.Leontiev, Gas-turbine dynamic response analysis through simulation, Proceedings of the international conference on rotating machine dynamics, ROTORDYNAMICS 92, Italy, 1992, pp. 1~10.

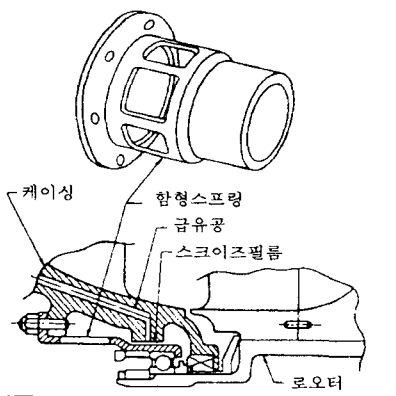


Fig. 8 squeeze film damper