

## 터빈 공력설계 기술 현황

최범석\* · 박무룡\*

### 1. 서 론

가스터빈 엔진은 보통 상온, 상압의 공기를 압축기에서 압축하고, 가압된 공기와 연료를 연소시켜 고온, 고압의 연소가스를 발생시켜, 터빈에서 연소가스로부터 에너지를 회수하여 기계적인 에너지로 변환시키는 장치이다. 가스터빈은 다른 엔진들에 비하여 상대적으로 높은 비출력 (specific power)의 장점으로 인한 소형, 경량의 특성 때문에 손쉽게 설치가 요구되는 비상용 발전설비로서의 수요가 점차 증가하고 있으며, 최근 심각한 사회적 문제가 되고 있는 공해문제의 해결을 위한 청정 동력원으로서 가스터빈 엔진을 이용한 열병합 (cogeneration) 및 복합 (combined cycle) 발전설비의 설치가 세계적으로 확대되고 있다.

터빈은 구심터빈과 축류터빈으로 구분된다. 구심터빈은 단단하면서도 축류터빈에 비하여 높은 출력을 낼 수 있으며, 가격도 축류형에 비하여 저렴하다는 장점이 있다. 축류터빈은 일반적으로 구심터빈에 비하여 효율이 높고, 고온, 고속의 작동조건에서의 응력이나 구조 등의 여러 가지 이점이 있다. 일반적으로 구심터빈은 크기가 작은 마이크로 가스터빈에 많이 사용되고 있으며, 높은 출력을 얻기 위한 대형 시스템이나 고효율화가 요구되는 가스터빈용으로는 축류형이 주로 사용된다.

일반적으로 가스터빈의 성능을 표시할 수 있는 인자로 출력 (output power)과 열효율 (thermal efficiency)을 들 수 있다. 가스터빈의 성능 향상을 위하여 수십년간 수많은 이론적, 실험적 및 수치해석적 연구를 수행해 왔다. 가스터빈의 열효율은 출력이 증가함에 따라 증가하며, 최근 열효율을 높이기 위한 기술적인 노력이 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

터빈의 고효율화를 위하여서는 온도의 상승과 아을

러 내부에서 발생되어지는 공력 손실을 최소화 하여야 한다. 고온 연소가스에 냉각공기의 혼합에 따른 터빈에서의 단별 부하, 팽창비, 효율 예측을 정확히 하여 기본 설계를 수행하여야 한다. 터빈 익렬 내에서는 앞전과 뒷전에서 발생하는 복잡한 와류, 끝벽에서의 경계층의 증가와 익형의 곡면에 따라 2차유동의 현상, 유로 내의 유로와류와 말굽와류의 발생, 점성효과에 의한 익렬표면의 경계층, 정익과 동익의 상호작용으로 인한 비정상유동 등과 같은 복잡한 3차원 유동현상이 발생한다. 터빈의 고효율화를 위해서는 이들의 복잡한 효과를 고려한 설계가 필요하다<sup>(1)</sup>.

국내의 중공업 업체 중 대형 발전용 가스터빈과 관련된 사업을 수행하는 업체는 한국중공업, 현대중공업, 한라중공업 등이 있으나 기술수준은 거의 GE, Westinghouse Electric, Siemens-KWU 등 외국의 선진 가스터빈 회사의 제품을 일부 면허생산 및 조립수준에 머물고 있고, GE의 Offset 프로그램 등을 통하여 일부 기술을 전수받고 있으나 이 기술은 20~30년 이상 지난 기술로 그 활용도가 매우 낮다.

국외의 연구개발 현황으로는 생산전문업체에서 공력설계에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. GE, P&W, 웨스팅하우스, ABB, 지멘스 등의 선진 업체에서 각자의 설계 기술을 보유하고 있으며 이를 이전하고 있지 않다. 이외에도 러시아에서도 대형가스터빈의 공력설계기술을 확보하고 있으며 PO LMZ 및 NPO CKTI와 같은 업체가 해당된다. 외국의 선진 가스터빈 업체에서는 그동안 터빈의 익형을 설계하기 위한 연구가 개발되어져 이들의 양산 제품에 이를 적용하고 있다. 하지만 이들 각각의 업체가 가지고 있는 설계 방법은 알려져 있지 않다. 이들의 기술 간에도 어떠한 호환성이 있는 것은 아니다.

### 2. 터빈 블레이드 공력설계 절차

터빈 설계시에는 정상 운전조건에서의 최대효율을

\* 한국기계연구원 에너지기계연구센터

E-mail : bschoi@kimm.re.kr,  
mrpark@kimm.re.kr

언을 수 있도록 하는 것이 일차적인 설계목표이다. 뿐만 아니라 탈설계점에서의 운전성능의 유연성도 중요한 목표이며, 최대수명 및 최소소수비용 등도 설계시의 중요한 요소로 설계철학에 반영된다. 터빈의 일반적인 설계절차를 Fig. 1과 같이 요약할 수 있다.

터빈의 설계는 설계요구사항을 결정하는 것으로부터 시작된다. 터빈의 설계사항은 가스터빈 시스템의 개념설계 과정에서 결정된다. 설계점 결정은 시스템의 구성품들 간의 유량 보존, 회전수 일치, 일의 보존 등의 법칙을 만족하면서 열역학적 관점에서 압축비, 터빈 입구온도, 공기유량, 사이클 형태 및 개략적인 Layout 등을 고려하여 결정한다. 터빈 설계자는 결정된 설계점에서 터빈의 요구 성능을 만족시킬 수 있는지 검토하여 필요시 설계 변수 값들에 대한 수정을 반복하면서 설계사항을 결정하게 된다. 대표적인 설계사항은 요구되는 동력 (각종 손실을 포함한 압축기 구동 동력과 순수 축동력의 합), 질량유량, 터빈입구온도, 터빈입구압력, 회전속도, 최대직경 및 팽창비 등으로 터빈설계 요구조건이나 전체시스템의 개념설계 (시스템설계)로부터 결정된다. 블레이드를 내각하는 터빈의 경우 각 단의 정익과 동익으로 공급되는 냉각공기의 양과 온도, 압력도 계산해야 한다.

설계사항이 결정되면 평균적인 반경을 따라 1차원적인 유로설계를 하고 터빈의 입구에서 출구까지 발생하는 여러 가지 손실에 대한 다양한 손실모델들을 적용하여 평균반경을 따른 열역학 및 유체역학적인 해석을 한다. 평균반경에서 설계된 터빈 형상에 대하여 탈설계점 (off-design point)에서의 성능을 예측하고 다른 구성품들과의 매칭 (matching)을 검토해야 한다. 다음은 유선곡률법 (streamline curvature method) 등에 의한 2차원적 축대칭 성능해석을 수행하고 평균반경 해석에 대한 수정·보완하여, 허브에서 팁까지 유동변수들의 반경방향 변화를 계산한다. 계산된 유동변수들로부터 입사각 (incidence angle)과 편차각 (deviation angle)에 대한 실험 데이터를 사용하여 블레이드의 입·출구각을 결정한다.

다음 단계에서는 일정 반경에서 블레이드의 입·출구각, 유동각 등의 설계변수를 이용하여 2차원적인 블레이드 형상 (profile)을 설계한다. NACA계열이나 DCA 계열 등의 정형화된 블레이드를 사용하는 압축기와는 달리, 터빈 블레이드의 형상설계는 설계자에 따라 설계방법도 다양하고 같은 조건에서 설계된 형상도 천차만별일 수 있다. 블레이드 단면형상 설계는 압축성 유

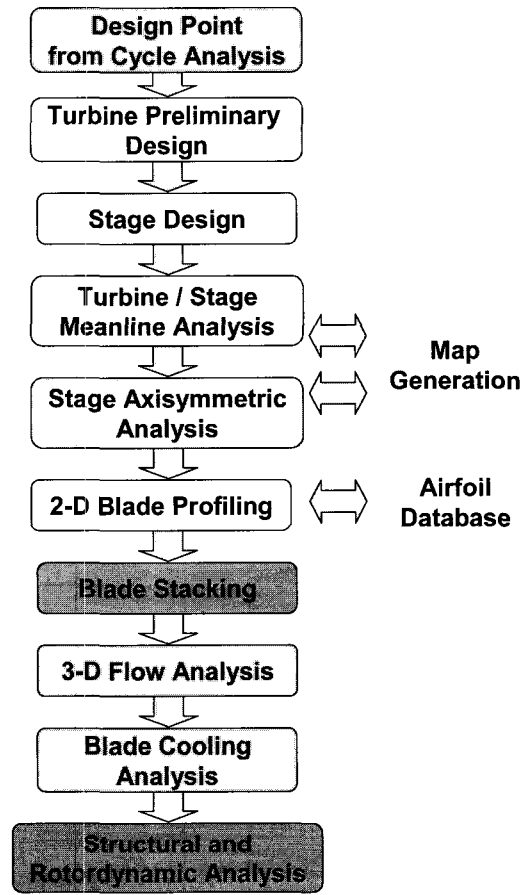


Fig. 1 Turbine Design Workflow

동해석과 더불어 최적화 기법을 이용하여 블레이드 형상을 최적화시킨다. 블레이드 단면형상을 결정하고 나면 각 반경위치에서 설계된 2차원 블레이드 단면형상을 반경방향으로 쌓아 올려 (stacking) 3차원 블레이드 형상을 완성한다. 과거에는 단면형상의 무게중심을 반경방향의 한 직선상에 쌓아 올리는 방법이 대부분이었으나 최근에는 다양한 적층 (stacking) 방법이 연구되고 사용되고 있다.

설계된 3차원 블레이드에 대한 비점성 혹은 점성 3차원 유동해석을 수행하여 공력특성을 평가하여 설계 성능 및 1차원/2차원 성능해석의 결과와 비교하여 설계 변경 인자를 추출하게 된다. 유동해석 결과로부터 열전달, 열구조 및 진동 해석을 위한 조건들도 추출하게 된다. 유동해석 결과로부터 경계층해석을 수행하여 층류에서 난류로 천이되는 지점을 예측하고 층류, 천이, 난류 영역에서의 외부 열전달 계수를 구한다. 블레이드

내부 냉각유로에서의 열전달은 유로망해석을 통하여 열전달 계수를 계산한다. 블레이드 내외부의 열전달 특성과 원심력, 흡입면과 압력면의 압력차 등을 이용해서 열구조 해석을 수행하여 안정성을 확인해야 한다.

### 3. 기본공력설계 및 1차원 성능해석

기본공력설계 및 성능해석 단계에는 Preliminary Design, Stage Design, Meanline Analysis, Off-design Performance Prediction, Map Generation 등이 포함된다. 기본 공력설계 기술은 비교적 오래 전부터 개발되어 왔으며, 이 단계에서는 단수를 결정해야 하고 각 단에서의 출력도 배분시켜야 하며 각 단의 정익 및 동익 블레이드의 개수를 결정하는 과정이다. 또한 자오면 (meridional plane)상의 터빈 유로 형상, 각 단의 정익과 동익의 유동각 및 블레이드 입-출구각, 익형 코드 (chord) 길이 등을 결정하게 된다.

시스템 개념설계와 일차원 기본설계 과정은 간단한 열역학적·유체역학적인 관계식으로 계산되나 이 과정에는 각 가스터빈 제작사 마다 고유의 설계경험 및 실험 데이터가 사용되고 있다. 가스터빈 엔진의 제작경비, 무게 등은 90% 정도가 기본설계 (시스템 및 구성품) 단계에서 결정된다<sup>(1)</sup>. 일단 설계가 완료되었거나 상세설계 단계에서 기본설계의 수정이 요구되면 많은 시간과 비용을 감수해야 하므로 시스템 개념설계와 구성품 기본설계 과정에는 각별한 주의가 요구된다.

GE, 웨스팅하우스, P&W, ABB, 지멘스 등의 선진 제작업체들은 각자의 설계기술을 보유하고 있으나 기술이전은 철저히 봉쇄하고 있다. 하지만 상용화된 설계 소프트웨어들 (Concept NREC의 AXIAL 및 AXCAD, Softinway의 AxSTREAM 등)이 판매되고 있어 설계경험과 노하우가 부족한 설계자들에게는 도움이 될 수 있다. 터빈의 열성능 해석에 관한 NASA의 연구가 Glassman<sup>(2)</sup>에 의해 소개되었으며, 냉각공기의 영향에 의한 효과를 보완하였다<sup>(3)</sup>.

터빈 설계를 위한 요구조건들은 흔히 다음과 같은 파라미터들로 특성화시킨다.

$$\frac{\dot{W}\sqrt{T_{oin}}}{P_{oin}}, \frac{C_p\Delta T}{T_{oin}}, \frac{N}{\sqrt{T_{oin}}}, \eta$$

터빈 설계과정에서는 다음과 같은 변수들을 결정해

야한다.

- Number of Stage
- Stage Mean Diameter
- Annulus Area and Shapes
- Work Split Between Stages
- Vortex Flow Distribution
- Stage Reaction
- Radial Distribution of Work and Mass Flow
- Pitch/Chord Ratio and Aspect Ratio
- Blade Profile Design

또한 터빈 설계시에는 다음과 같은 제한조건들을 고려해야 한다.

- Blade Centrifugal and Thermal Stress
- Disc Centrifugal Stress
- Maximum Diameter for Installation
- Blade Cooling
- Overall Weight

터빈은 항상 설계점에서만 운전하는 것이 아니라 부하의 변동, 온도, 압력의 변화에 따라 다양한 운전조건에서 작동하게 된다. 기본설계된 터빈의 설계변수들로부터 여러 가지 회전수에서의 총압력 손실을 예측하고 터빈 효율 및 출력의 변화를 파악하여 터빈의 특성을 작성하여 압축기, 연소기와의 매칭을 확인하여 탈설계점에서 시스템의 안정적인 운전을 도모해야 한다. 탈설계점 성능이 나쁜 압축기와의 매칭에 어려움이 있어 엔진시동이 어렵고 압축기의 서지마진 (surge margin)을 확보하기 어려워서 안정적인 운전이 어려워진다. 터빈의 설계점 및 탈설계점 성능해석에는 여러 가지 손실모델이 사용되는데 최근들어 유동해석 및 정밀한 실험을 통해 손실모델의 개선 및 탈설계 성능해석의 정확도를 높이고 있다.

### 4. 와류설계 및 축대칭 유동해석

터빈 내부의 유동은, 유체에 작용하는 압력과 관성력의 균형으로 표현되는 반경방향 평형조건 (radial equilibrium requirements)을 만족시켜야 한다. 속도삼각형이 이러한 역학적 균형조건을 만족시키면서 쌓아올려지면 일정한 형식이 이루어지는데 이것을 와류형식이라 한다. 이 단계에서는 평균반경에서 구해진 설계변수들을 손실을 최소화할 수 있도록 반경방향으로

재분포시킨다.

기본형상 설계단계에서는 평균반경에서의 유동특성을 해석하였다. 익형의 3차원 형상을 설계하기 위해서는 반경방향으로의 변화를 고려해서 해석해야 한다. 이를 위해서는 유동이 비점성이고 축대칭인 것으로 가정하여 유선곡률법과 같은 축대칭해석을 하게 된다. 계산을 위한 지배방정식은 연속방정식과 반경방향의 유동을 고려한 반경방향 평형방정식 외에, 기하학적 조건과 유동에 따른 손실 및 오일러 일 방정식이 적용된다. 흔히 와류형식 설계시 축대칭 해석결과를 반영하여 속도삼각형을 반경방향으로 재분포시키는 절차를 반복적으로 수행하며 와류특성의 반경방향 분포를 최적화시키기 위해 최적화 기법을 도입하기도 한다.

전산해석을 위한 컴퓨터 기술과 수치해석 기법이 충분히 발달하기 이전에는 완전한 3차원 형식의 반경방향 평형방정식을 실제 설계에 적용할 수가 없었기에, 이 방정식을 쉽게 이용할 수 있는 형태로 단순화시켜 설계에 사용하였다. 대표적인 형태가 자유와류형 (free vortex type)과 일정반동형 (constant reaction type)이다. 대표적인 와류형식들은 Horlock<sup>(4)</sup>에 의해 잘 정리되어 있다. 자유와류형은 블레이드의 길이가 짧을 경우 속도분포가 자연스럽고 정익과 동익 모두 매우 효율이 높다. 그러나 블레이드의 길이가 길어지면 과도하게 뒤틀린 익형이 되어, 기계적 안정성이 떨어지고 팁에서의 반동도가 너무 높고 팁 누설손실이 커지는 단점이 있다. 일정반동형 블레이드는 자유와류형의 단점을 보완할 수 있으나 자유와류형의 장점이 없다.

완전 3차원 Navier-Stokes 방정식의 전산해석이 가능해지면서 터빈 설계자들은 더 이상 자유와류 개념에 연연해하지 않을 수 있었다. 해외의 선진 가스터빈 제작회사들은 자유와류형보다 효율적인 블레이드 설계를 위해서 여러 해 동안 새로운 설계를 수행하고 시험해왔다. 1984년부터 GE는 각 단의 효율을 최대화하기 위해 “controlled vortex” 개념을 도입하여 반경방향 유동분포를 설계하는 개발 프로그램을 시작하였다. 이 프로그램은 1990년부터 “advanced vortex design”이라는 이름으로 많은 설계와 시험을 수행하며 확장되었다. Advanced vortex design은 controlled vortex 개념에 variable tangential lean (혹은 compound lean)을 결합한 형태로 다음과 같은 특성을 가지고 있다<sup>(5)</sup>.

- 각 단의 기하학적 형상과 운전조건에 따른 효율이 최대가 되도록 반경방향으로 유동을 분포시킨다.
- 전통적인 블레이드와 같은 정도의 전체적인 기계적

강도를 가지면서 더 나은 공력성능을 가지는 블레이드 형상을 사용하므로 날개 개수를 줄일 수 있다. 따라서 전체 블레이드의 표면적을 줄일 수 있어 형상손실 (profile loss)도 감소한다.

- 정익에 variable tangential lean이 사용되어 전체 단 효율이 증가한다.
- 동익의 루트(root)부분 성능 개선을 위해 루트의 반동도를 높이고, 팁 반동도를 약간 낮추어 팁 누설을 줄인다.

## 5. 블레이드 단면형상 설계 및 블레이드 적층

터빈 블레이드의 설계는 설계변수에 의해 설계하는 방법 이외에도 설정된 유동변수에 따라 역설계하는 등 다양한 기법이 제안되고 있다. 설계된 블레이드는 원심력 등의 외부적인 요인에 의한 구조적인 문제 및 냉각공기에 의한 영향도 고려하여야 한다. 이러한 종합적인 영향을 고려한 3차원 블레이드 설계기술의 확보가 필수적이다.

블레이드의 단면형상을 결정하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 캠버라인 (Camberline)과 블레이드의 두께를 결정하는 방법이 하나이고, 다른 하나는 압력면과 흡입면의 형상을 따로 생성하는 방법이다. 캠버라인과 두께를 결정하는 방법은 보통 블레이드의 두께가 상대적으로 얇고 stagger각이 작은 압축기나 구심형 터빈에 주로 사용된다. 그에 비해 블레이드가 상대적으로 두껍고 stagger각이 터빈의 노즐과 로터 블레이드의 형상설계에는 흡입면과 압력면의 형상을 따로 결정짓는 방법이 사용된다.

캠버라인과 블레이드 두께 분포를 결정짓는 방법에서는 이미 익형의 특성이 잘 알려진 NACA Series나 C4 블레이드 등이 사용되고 있으나 최근에는 유동해석과 연계하여 최적 형상을 결정짓는 방법도 많이 사용된다. 흡입면과 압력면의 형상을 결정하는 방법에는 블레이드의 형상변수들을 정의하고 형상변수들을 조절하여 흡입면과 압력면의 형상을 설계하는 방법과 흡입면과 압력면의 형상을 몇 개의 control points로 정의하는 Bezier 곡선으로 나타내서 형상을 설계하는 방법이 가장 많이 사용된다.

블레이드의 2차원 단면형상을 쌓아 올리는 방법은 전통적으로 단면의 무게중심을 반경방향의 한 축에 쌓는 방식이 오랫동안 사용되어 왔으나 최근 들어서는 적층 (stacking) 축이 원주방향으로 기울어진 tangential

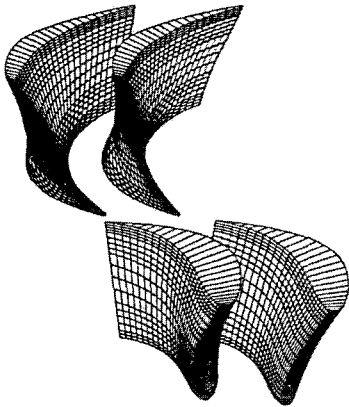


Fig. 2 Tangential lean이 적용된 노즐과 로터 블레이드

lean이나 추흐름 방향으로 기울어진 meridional lean이 블레이드 설계에 많이 사용된다. 특히 meridional lean은 최근에 설계되는 대부분의 노즐 블레이드에 적용되는 추세이며 로터 블레이드에서도 많이 이용된다. Tangential lean은 4절에서 설명된 바와 같이 반경방향으로 반동도를 재분포 시킴으로써 블레이드의 안정성을 높이고 손실을 줄여 효율을 극대화시킨다. Fig. 2에는 compound lean이 사용된 노즐의 형상을 보여주고 있으며, compound lean은 블레이드의 허브쪽과 팁쪽의 경사가 반대방향으로 되어 있고, 최근에 개발되는 터빈의 노즐에 많이 적용되고 있다. 이런 적층 방법은 블레이드와 허브면이나 슈라우드 벽면이 만나는 부분에서 발생하는 말굽과류를 약화시켜 이차유동 손실을 감소시키는 것으로 알려져 있다.

### 6. 3차원 유동해석 및 열구조해석

최근 컴퓨터의 급속한 발달과 수치해석 기법의 발전에 힘입어 복잡한 기하학적 형상과 물리적 현상을 해석할 수 있는 상용 CFD 소프트웨어가 개발되어 산업체에서도 제품의 고효율화, 신제품 개발기간 단축 및 원가절감을 위해 전산유체역학을 제품 설계에 직접 적용할 수 있게 되었다. 가스터빈 개발사들은 요즘 수치적 시뮬레이션과 최적화 기법을 이용해 반복 설계를 하고 최종 설계안이 나오면 실험을 통해서 성능을 확인하고 제작에 들어가면서 설계시간을 반 이상으로 줄일 수 있고 설계의 수준도 높일 수 있었다.

주어진 유량, 온도, 압력 등의 조건을 만족하는 터빈

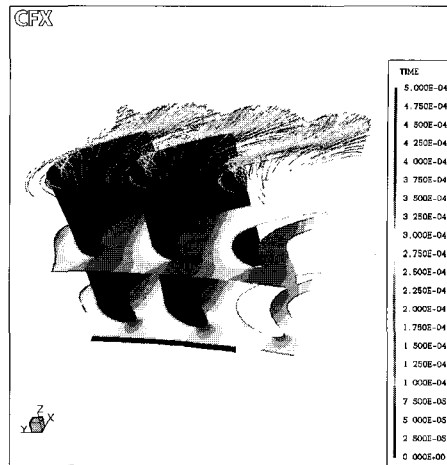


Fig. 3 허브면, 중간면에서의 압력분포 및 팁 부근의 streaklines

블레이드의 일차적인 설계를 마친 후 설계된 블레이드의 공력특성을 파악하고 설계개선을 하기 위해서는 터빈 내부유동의 해석이 필요하다. 또한 형상만을 알고 있는 기존의 터빈 블레이드의 설계개념과 설계조건을 파악하기 위해서는 유동해석은 필수적이다. Fig. 3은 점성 3차원 압축성 유동해석의 결과로 압력분포를 보여준다. CFD 해석에서 얻어지는 속도분포 (혹은 압력분포)로부터 경계층의 천이와 외부열전달을 예측하게 되며 열구조해석, 진동해석의 기초자료를 제공한다.

근래에 들어서는 유동해석과 구조해석을 동시에 수행하는 유동/구조 상호작용 (Fluid/Structural Interaction) 해석도 많이 시도하고 있으며, 특히 고온 고압에서 작동되는 터빈 블레이드의 안전성은 압력구배와 온도구배, 원심력 등에 의한 응력이 모두 고려되어야 하므로 유동해석과 열전달 해석, 구조해석이 함께 수행되어야 하는 경우도 있다. Fig. 4에는 유동해석과 함께 수행된 열구조해석의 결과를 보여준다.

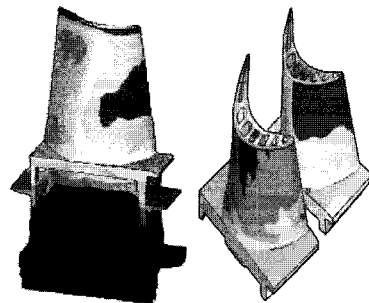


Fig. 4 Thermo-structural stress distribution

## 7. 설계시스템 및 최적화 설계

대부분의 가스터빈 제작회사들은 2절에서 설명한 바와 같은 여러 단계의 설계절차와 설계 프로그램들을 통합한 설계 시스템을 구축하여 설계의 자동화 및 일관성을 기하고, 보다 성능이 좋은 가스터빈 엔진을 설계하면서도 설계기간을 크게 단축하고 있다. 설계시스템을 구현하기 위해서는 설계 프로세스의 인테그레이션이 중요하며 각 프로세스에서의 입출력들이 표준화되어 통합적으로 관리되어야 하고, 분산 환경 하에서 협업설계가 가능한 방향으로 개발되고 있다. Pratt and Whitney의 TADSYS, GE의 TADS, Mitsubishi의 TDSYS 등이 전산설계 시스템의 예이다. 이들은 대부분 유사한 설계절차를 가지나 각 프로그램들이나 데이터베이스는 각 회사마다의 고유자산이다.

터빈 설계 프로세스는 성능해석 결과와 설계 데이터베이스를 이용한 수정설계를 반복적으로 수행한다. 최적화 알고리즘을 이용해서 최적화 루틴을 사용하게 되면 자동적으로 최적의 형상을 도출할 수 있다. 상용

화된 터빈 설계프로그램들 중에도 AxSTREAM과 같이 자체적으로 최적화 알고리즘을 내장하고 있는 것도 있으며, AXIAL이나 AXCAD 같은 프로그램은 다른 상용 최적화 소프트웨어인 iSIGHT를 위한 built-in interface를 제공하고 있다. 최적화 기법도 종래에는 목적함수의 구배를 이용하는 기법을 주로 사용하였으나 요즘은 반응면기법, 유전자 알고리즘 뿐만 아니라 품질공학 기법 등 다양한 고급의 최적화 기법들을 사용하고 있다.

최근에는 터빈의 최적화 설계에도 유동특성 분야에만 국한되는 것이 아니라 유체, 열전달, 구조, 회전체 진동 등의 다분야 최적설계 (Multidisciplinary Design Optimization)가 가스터빈 선진 업체들의 개발 방향이다. Fig. 5에는 다분야 최적화를 이용한 터빈 설계절차의 예를 보여준다.

전산설계 시스템들은 대부분 최적화프로그램을 가지고 있어 많은 설계 loop를 돌면서 최적의 설계조건 및 설계형상을 도출한다. 특히 블레이드 2차원 형상설계에 있어서는 설계 프로그램, 유동해석 프로그램 및

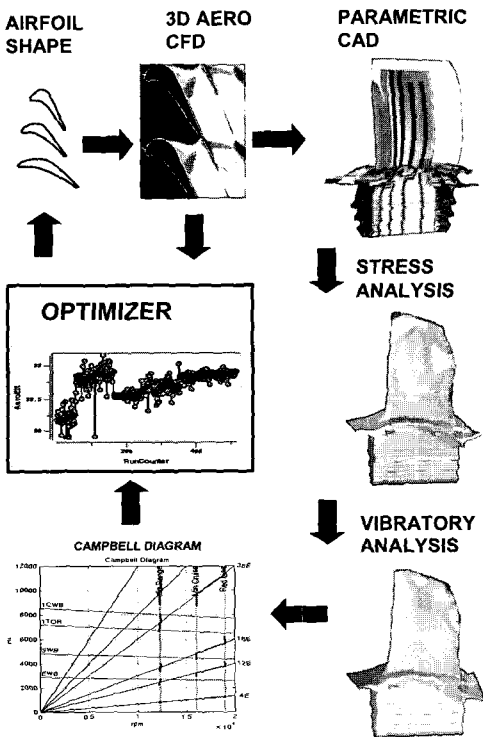


Fig. 5 Multidisciplinary Design Optimization Processes

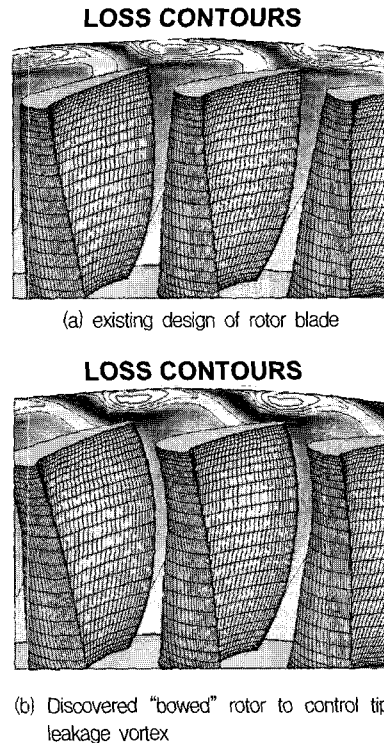


Fig. 6 3D Shape Optimization Based On Hybrid Genetic Algorithm & Rule System(Pratt & Whitney)

최적화 프로그램을 연결하여 많은 반복 계산을 거치며 최적형상을 구해낸다. Fig. 6에는 3차원 유동해석과 최적화 기법을 이용해서 설계한 터빈 블레이드의 형상과 손실분포의 형태를 비교하여 보여주고 있다.

### 참고문헌

- (1) Gregory, B. A., 1999, "Considerations for the Aerodynamic Optimazation of a Turbine," in VKI Lecture Series 1999-02.
- (2) Glassman, A. J., 1992, "Computer Code for Preliminary Sizing Analysis of Axial-Flow Turbines," NASA CR-4430.
- (3) Glassman, A. J., 1994, "Enhanced Capabilities and Updated Users Manual for Axial-Flow Turbine Preliminary Sizing Code TURBAN," NASA CR-195405.
- (4) Horlock, J. H., 1973, "Axial Flow Compressors," Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York.