

축류터빈 블레이드 공력설계 기술 현황

최범석* · 오군섭* · 박무룡*

1. 서 론

가스터빈의 성능 향상을 위하여 경량화, 고효율화라는 요구조건을 만족시키기 위하여 지난 수십년간 공학자들은 수많은 이론적, 실험적 및 수치해석적 연구를 수행해 왔다. 터빈의 공력설계 초기단계에서는 1차원 해석 등의 비교적 단순하고 잘 알려진 이론들이 사용된다. 그러나 이러한 단순함의 이면에는 복잡한 열유동 특성을 반영하기 위해 가스터빈 생산업체마다 가지고 있는 설계 및 성능시험에 대한 수많은 경험과 data base가 들어 있다. 또한 1차 설계된 터빈의 공력특성을 풍부한 시험설비를 동원하여 검증하고 보정한다. 선진 가스터빈업체들은 이렇게 확보된 핵심 공력설계 기술은 외부의 가스터빈 개발업체로 이전되는 것을 적극적으로 차단하고 있다. 국내의 후발업체들이 이 기술을 확보하기 위해서는 이론적인 계산만으로 될 수가 없고 각 터빈의 성능시험을 수행하고 이를 설계에 반영하고 설계기술을 보완하는 과정을 반복하여야 한다. 이러한 개발과정에는 많은 연구인력과 경비, 시간이 소요되므로 시행착오를 최소화하는 노력이 필요하다.

본 원고에서는 터빈 블레이드의 공력설계 절차를 간단히 설명하고 중요한 몇 가지 설계과정에 대하여 최근 연구동향과 기술을 소개하고자 한다. 그러나 다루는 내용이 너무 광범위해서 자세한 설명보다는 소개하는 수준이 될 것이다. 또한, 블레이드의 설계성능에 대한 시험평가 등의 실험적인 설계 검증·평가의 절차는 본 원고의 내용에 포함시키지 않았다.

2. 터빈 블레이드 공력설계 절차

터빈설계시 추구하는 설계목표는 정상 운전조건에

서의 최대효율뿐만 아니라 탈설계점에서의 최적운전성능, 최대수명 및 최소소수비용 등 설계자나 제작회사에 따라 차이가 있으며 그에 따라 설계철학도 다양하다. 터빈의 일반적인 설계절차를 Fig. 1에 나타내었다.

터빈의 설계는 설계요구사항을 결정하는 것으로부터 시작된다. 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 냉각하는 터빈의 경우 각 단의 정익과 동익으로 공급되는 냉각공기의 양과 온도, 압력도 계산해야 한다.

두 번째 단계로는 시스템설계를 통하여 선정된 터빈 설계사항에 대하여 평균적인 반경을 따라 1차원적

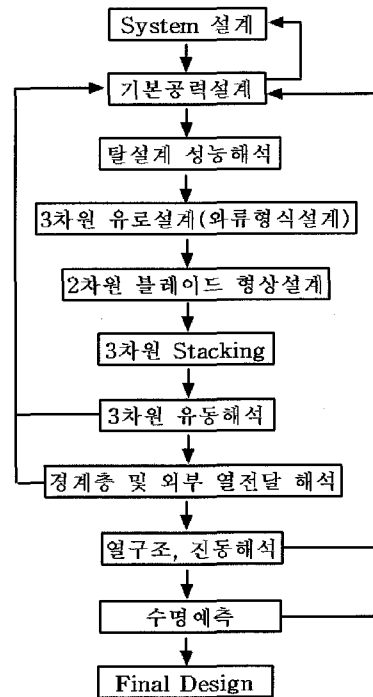


Fig. 1 터빈 블레이드 공력설계 절차

* 한국기계연구원 열유체환경연구부
E-mail : bschoi@kimm.re.kr,
kssoh@kimm.re.kr,
mrpark@kimm.re.kr

인 유로설계를 하는 과정이다. 이 단계에서는 터빈의 입구에서 출구까지 발생하는 여러가지 손실에 대한 다양한 손실모델들을 적용하여 평균반경을 따라 열역학 및 유체역학적인 설계를 수행한다.

다음 단계에서는, 평균반경에서 설계된 터빈 형상에 대하여 설계점(design point) 및 탈설계점(off-design point)에서의 성능을 예측하고 다른 구성품들과의 매칭(matching)을 검토해야 한다. 탈설계 성능해석은 기동 시나 부분부하 운전조건에서 시스템의 원활한 운전을 위해 필수적이다.

네 번째 단계는 반경방향 변화에 따른 블레이드의 입·출구각을 결정짓는 단계이다. 먼저 축대칭이라는 가정 하에서 유선곡률법(streamline curvature method)에 의한 2차원적 성능해석을 수행하고 평균반경해석에 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.

다섯 번째 단계에서는 일정 반경에서 블레이드의 입·출구각, 유동각 등의 설계변수를 이용하여 2차원적인 블레이드 형상(profile)을 설계한다. NACA계열이나 DCA계열 등의 정형화된 블레이드를 사용하는 압축기와는 달리, 터빈 블레이드의 형상설계는 설계자에 따라 설계방법도 다양하고 같은 조건에서 설계된 형상도 천차만별일 수 있다. 블레이드 단면형상 설계는 압축성 유동해석과 더불어 최적화 설계를 수행하는 것이 최근의 추세이다.

여섯 번째 단계는 각 반경위치에서 설계된 2차원 블레이드 단면형상을 반경방향으로 쌓아 올려(stacking) 3차원 블레이드 형상설계를 완성하게 된다. 과거에는 단면형상의 무게중심을 반경방향의 한 직선상에 쌓아 올리는 방법이 대부분이었으나 최근에는 다양한 stacking 방법이 연구되고 사용되고 있다.

일곱 번째 단계에서는 설계된 3차원 블레이드에 대한 비점성 혹은 점성 3차원 유동해석을 수행하여 공력 특성을 평가하고 열전달, 열구조 및 진동 해석을 위한 기초자료를 제공한다.

마지막 세 단계는 공력설계에서 직접적으로 수행하는 내용은 아니나 공력설계와 밀접한 관계를 가지며 공력설계 과정과 설계 데이터를 교환한다. 유동해석 결과로부터 경계층해석을 수행하여 층류에서 난류로 천이 되는 지점을 예측하고 층류, 천이, 난류 영역에서의 외

부 열전달 계수를 구한다. 블레이드 내부 냉각유로에서의 열전달은 네트워크해석을 통하여 열전달 계수를 계산한다. 블레이드 내·외부의 열전달 특성과 원심력, 흡입면과 압력면의 압력차 등을 이용해서 열구조 해석을 수행한 후, 블레이드의 진동특성을 해석하여 필요 시 공력수정설계의 guide line을 제시한다. 이러한 설계루트는 수차례에서 수십차례 반복 수행되어 최적의 블레이드 형상을 설계해야 한다.

3. 공력설계 주요 기술 현황

3.1 기본공력설계

터빈의 고효율화를 위하여서는 입구온도의 상승과 아울러 내부에서 발생되어지는 공력 손실을 최소화 하여야 한다. 고온 연소가스에 냉각공기의 혼합에 따른 터빈에서의 단별 부하, 팽창비, 효율 예측을 정확히 하여 기본 설계를 수행해야 한다. 터빈 익렬내에서는 선단과 후단에서 발생하는 복잡한 와류, 끝벽에서의 경계층의 증가와 익형의 곡면에 따라 2차유동 현상, 유로내의 유로와류와 말굽와류의 발생, 점성효과에 의한 익렬표면의 경계층, 정익과 동익의 상호작용으로 인한 비정상유동 등과 같은 복잡한 3차원 유동현상이 발생한다. 터빈의 고효율화를 위해서는 이들의 복잡한 유동효과를 고려한 설계가 필요하다.

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.⁽¹⁾ 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 자사의 설계기술을 보유하고 있으나 기술이전은 철저히 봉쇄하고 있다.

하지만 일부 엔지니어링 회사에서도 상용화된 설계 소프트웨어들(Concept ETI의 TAXIG, AXIAL 등)을 판매하고 있어 설계경험과 노하우가 부족한 설계자들에게는 도움이 될 수 있다. 터빈의 열성능 해석에 관한 NASA의 연구가 Glassman⁽²⁾에 의해 소개되었으며, 냉각공기의 영향에 의한 효과를 보완하였다.⁽³⁾ Glassman의 설계방법은 국내에서도 많이 알려져 있으며 자주 사용되고 있다.

3.2 탈설계 성능해석

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 특성도를 작성하여 압축기, 연소기와의 매칭을 확인하여 탈설계점에서 시스템의 안정적인 운전을 도모해야 한다. 탈설계점 성능이 나쁘면 압축기와의 매칭에 어려움이 있어 엔진시동이 어렵고 압축기의 서지마진(surge margin)을 확보하기 어려워져 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. 탈설계 성능예측 방법은 Ainley & Mathieson,⁽⁴⁾ Glassman,⁽⁵⁾ Schmidt⁽⁶⁾ 등에 의해 소개되었다.

3.3 와류형식 설계(Vortex Design)

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

3.3.1 자유와류형과 일정반동형

컴퓨터 하드웨어와 최신 CFD 기법의 급속한 발달이 이루어지기 전에는 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. 자유와류형은 동익 전·후에서 유면의 반경과 선회속도의 곱이 일정한 값을 가지는 와류형식으로 터빈 뿐만 아니라 대부분의 회전 유체기계에서 오래전부터 사용되어 왔으며 지금까지도 많은 분야에서 사용되고 있다. 일정반동형은 반경에 상관없이 반동도가 일정하도록 설계되는 와류형식으로 압축기, 송풍기 등의 설계에 자주 사용되었다. 대표적인 와류형식들은 Horlock⁽⁷⁾에 의해 잘 정리되어 있다. 자유와류형은 블레이드의 길이가 짧을 경우 속도분포가 자연스럽게 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.

3.3.2 Advanced Vortex Blading

완전 3차원 Navier-Stokes 방정식의 전산해석이 가능해지면서 터빈 설계자들은 더 이상 자유와류 개념에 연연해하지 않을 수 있었다. 해외의 선진 가스터빈 제작회사들은 자유와류형 보다 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.⁽⁸⁾

- 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.

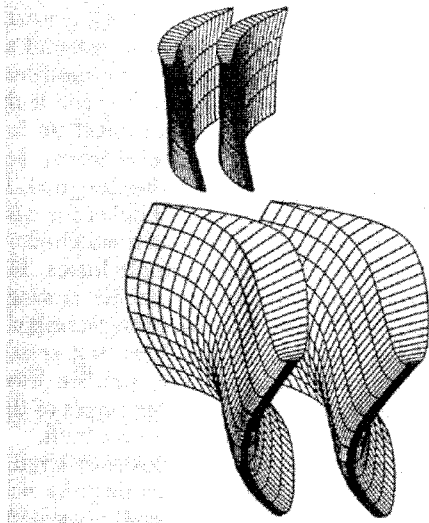


Fig. 2 Advanced vortex 설계된 스팀터빈 정익과 동익

- 동익의 루트(root)부분 성능 개선을 위해 루트의 반동도를 높이고, 팁 반동도를 약간 낮추어 팁 누설을 줄인다.

Fig. 2는 advanced vortex 개념으로 설계된 스팀터빈의 정익과 동익의 형상이다.

3.4 블레이드 2차원 단면형상 설계

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.

익형의 형상을 설계하기 위한 기법으로는 단순히 표면의 압력이나 속도분포를 바탕으로 형상을 계산하는 inverse 방법이 있으나 이는 수학적 조건의 한계와 입력조건의 선정에 어려움이 있으므로 이를 역설계 과정에 적용하기에는 부적절하다. 그 외에도 한 개나 여러 개의 다항식을 이용하여 활용하는 방법이 있으나 단순한 wing의 형상을 설계시에는 적절하나 익형에 부하계수가 증대하게 되면 곡률의 변화가 증대하게 되어 형상을 나타내기에는 부적절하다. 그외에도 복소함수를 사용하는 Joukowski 변환에 의한 설계방법이 있으나 단순한 wing의 형상에 적용가능하며 익형의 부하가 커지게 되면 적용이 용이하지 않다. 따라서 설계 변수

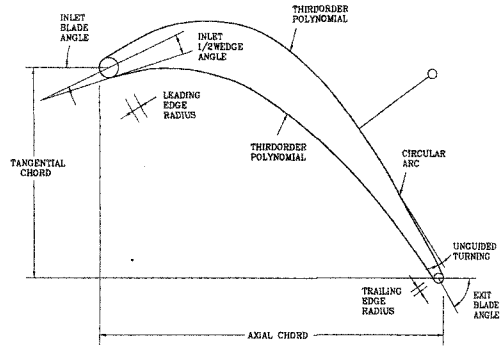


Fig. 3 블레이드 설계변수들의 정의

Table 1 터빈 블레이드 설계변수

11 Design Parameters	Remark
Airfoil Radius (R)	Configuration parameter
Axial Chord (c_x)	From stagger angle
Tangential Chord (c_t)	From stagger angle
Unguided Turning (ζ)	Optimization
Inlet Blade Angle (β_{in})	From Design Point
Inlet Wedge Angle (ϵ_{in})	Structural design
Leading Edge Radius (r_{le})	Structural design
Exit Blade Angle (β_{out})	From Design Point
Trailing Edge Radius (r_{te})	Structural design
Number of Blades (N)	Configuration parameter
Throat (σ)	Configuration parameter

의 설정에 따라 형상을 설계하게 되면 이러한 변수들은 새로운 개발을 위한 설계 시 활용도가 높게되고 최적화를 위한 변수의 설정에 도움이 된다.⁽⁹⁾ Fig. 3과 Table 1은 블레이드 형상 설계와 관련된 형상변수들의 한 예를 보여준다.

Table 1과 같은 설계변수들이 설정한 후 Fig. 3과 같은 형태의 블레이드 형상(profile)을 생성하기 위해서 익형 표면의 곡선을 표현하는 여러 가지 방법이 있다. 간단한 다항식 형태, spline 곡선, Bezier 곡선, NURBS 면 등의 방법이 있으며 지금까지는 spline 곡선과 Bezier 곡선이 가장 많이 사용되어 왔으나 최근에는 NURBS 면의 이용이 늘고 있다.

3.5 Stacking Method

블레이드의 2차원 단면형상을 쌓아 올리는 방법은 전통적으로 단면의 무게중심을 반경방향의 한 축에 쌓는 방식이 오랫동안 사용되어 왔으나 최근 들어서는 stacking 축이 원주방향으로 기울어진 tangential lean이나 주흐름 방향으로 기울어진 meridional lean이 블레이드 설

계에 많이 사용된다. 특히 meridional lean은 최근에 설계되는 대부분의 노즐 블레이드에 적용되는 추세이며 로터 블레이드에서도 많이 이용된다. Tangential lean은 3.3.2절에서 설명된 바와 같이 반경방향으로 반동도를 계분포 시킴으로써 블레이드의 안정성을 높이고 손실을 줄여 효율을 극대화시킨다.

3.6 3차원 유동해석

주어진 유량, 온도, 압력 등의 조건을 만족하는 터빈 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. 터빈의 설계에 있어서 정확도는 다소 떨어지나 빠른 해석결과를 제공할 수 있는 준3차원해석과 계산 시간과 정확도 모두에서 어느 정도 이상의 이점이 있는 비점성 3차원해석 및 다소 계산시간이 소요되지만 정확한 계산결과를 제공할 수 있는 점성 3차원 유동해석이 사용되고 있다. Fig. 4와 5는 점성 3차원 압축성 유동해석의 결과로 압력분포 및 streakline들과 블레이드 표면 Mach수의 분포를 보여준다. Fig. 5와 같은 속도분포(혹은 압력분포)로부터 경계층의 천이와 외부열전달을 예측하게되며 열구조해석, 진동해석의 기초자료를 제공한다.

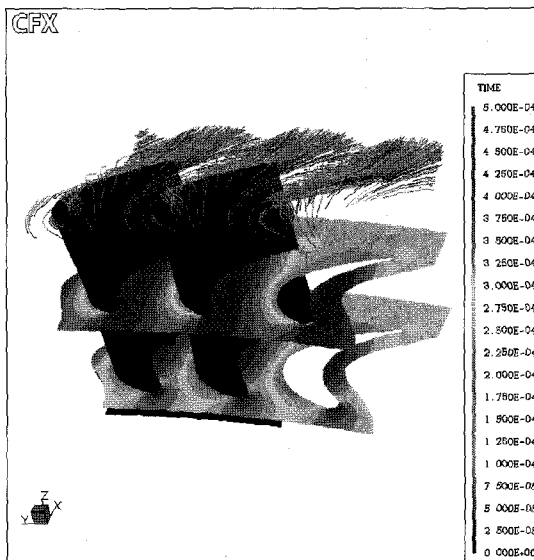


Fig. 4 허브면, 중간면에서의 압력분포 및 팁 부근의 streaklines

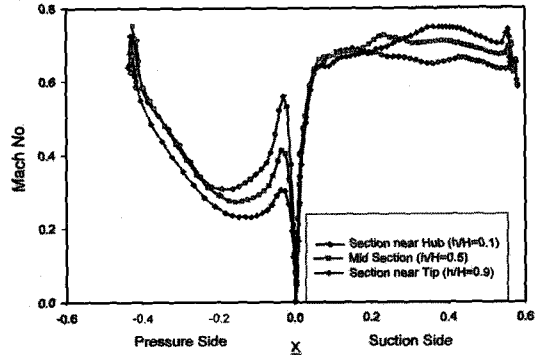


Fig. 5 블레이드 표면 Mach수 분포

3.7 설계자동화 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. Pratt and Whitney의 TADSYS, GE의 TADS, Mitsubishi의 TDSYS 등이 전산설계 시스템의 예이다. 이들은 대부분 유사한 설계절차를 가지나 각 프로그램들이나 데이터베이스는 각 회사마다의 고유자산이다.

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 최적화 프로그램을 연결하여 많은 반복 계산을 거치며 최적형상을 구해낸다.

5. 맺음말

터빈 블레이드의 공력설계 절차에 대하여 기본 기술과 최근 기술현황을 소개하였다. 선진 가스터빈 업체들은 오랫동안 축적한 기술을 바탕으로 advanced vortex, compound lean 등 성능을 높이는 설계기법을 계속적으로 개발하여 실제 블레이드에 적용하고 있으며, 여러 가지 설계 프로그램들을 통합한 전산설계 시스템을 구축하여 짧은 기간 내에 높은 효율 터빈 설계할 수 있는 능력을 보유하게 되었다. 국내에서는 가스터빈 및 스팀터빈에 대한 연구가 미약하지만 일부 기관들을 중심으로 부분적으로나마 설계기술의 개발이 이루어지고 있어 국내 유체기계 설계기술의 발전을 기대해본다.

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) Ainley, D. G. and Mathieson, G. C. R., 1957, "A Method of Performance Estimation for Axial Flow Turbines," ARC R&M 2974, Aeronautical Research Council, England, pp. 1957.
- (5) Glassman, A. J., 1994, "Modeling Improvements and Users Manual for Axial-Flow Turbine Off-Design Computer Code AXOD," NASA CR-195370.
- (6) Schmidt, J. F., 1995, "Off-Design Computer Code for Calculating Aerodynamic Performance of Axial-Flow Fans and Compressors," NASA CR-198362.
- (7) Horlock, J. H., 1973, "Axial Flow Compressors," Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York.
- (8) Cofer, IV, J. I., et. al., 1996, "Advances in Steam Path Technology," in 39th GE Turbine State-of-the-Art Technology Semina.
- (9) 조수용, 오군섭, 최범석, 2000, "축류형 터빈 익형의 역설계 및 형상설계를 위한 설계변수에 관한 연구," 유체기계저널, 3권, 2호, pp. 7~14.