

익렬유동 해석 기술동향



백 제 현 (포항공과대학교 기계공학과)

- '69-'73 서울대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '73-'75 한국과학원 기계공학과(석사)
- '75-'78 한국과학기술연구소 연구원
- '79-'84 Univ. of Iowa(박사)
- '84-'86 한국과학기술원 선임연구원
- '86-현재 포항공과대학교 기계공학과 교수

1. 서 론

터보기계 유동은 2차유동, 누설, horse-shoe와 유동 등의 와류유동에 지배되어 유체역학 현상에서 가장 복잡한 부류에 속한다. 대부분 층류, 난류 또는 천이 영역의 비압축성, 아음속, 천음속 또는 초음속 3차원 유동으로 어느 경우에는 이러한 모든 영역에 걸쳐 있을 수도 있으며 가끔은 박리현상도 수반한다. 또한 회전차 내의 유동은 항상 비정상상태의 절대유동장이며 다단유동에서는 절대유동과 상대유동 모두 비정상상태이다. 따라서 지배방정식은 강하게 얽혀 있고 경계조건 또한 대단히 복잡하다.

터보기계 유동에 관계되는 현상변수들로는 camber, blade-blade row 간격, hub-to-tip 그리고 leading-to-trailing 날개두께, 입사각, hub/tip ratio, tip clearance 등이 있으며 현상에 따라 많은 유동계수, 열계수가 관계되어 있는데 그중에는 Reynolds수, Mach수, rotation수, Richardson수, Prandtl수, Eckert수, Thoma상수, 유동각등이 있어 유동상태와 형상변수에 따라 지배 방정식과 유동해법이 달라진다.

대략 10~15년 전 CFD의 출현은 Euler 또는 Navier-Stoke 방정식을 해석하고자 하는 자극이 되어 지난 10년 동안 기법개발, 격자점형성, 난류모델링, 적절한 경계조건 부여, 전-후처리기술, 그리고 컴퓨터 기술분야에 있어서 중요한 발전이 있었다. 계산기법은 터보기계의 분석과 설계에 대한 효율적인 방법을 제공하여 유체기계 제작자들의 CFD활용은 과거 10여년간 현저하게 증가해 왔으며 제품 개발에 있어서 짧은 주기를 만드는 결과가 되었다. 그러나 현재까지 주로 실험을 병

행하여 왔으므로 CFD는 보조적인 수단이 되었으나, 대부분의 경우에 유체기계에 대한 실제 실험이 어렵고 불가능하므로 수치해석에 의존도가 점차 증가하고 있다.

터보기계 분야에서 실제 널리 적용되고 있는 수치해석 기법은 일반적으로 비점성 해법, 경계층 해법, Parabolized Navier-Stokes 해법 그리고 완전 Euler 또는 Navier-Stokes 해법으로 분리된다. 이들 중 앞의 두 기법들은 고전적인 기법으로 70년 초반부터 과거 20년 이상 널리 쓰여왔으므로 산업체에서 연구 및 설계도구로 체계가 잘 갖추어져 있다. 1970년대에 개발된 터보기계 유동해석을 위한 수치해석기법들에 관하여는 Adler(1980) 그리고 McNally and Sockol(1981)에 의하여 전반적인 review가 이루어졌으며 80년대의 일 에 대하여는 Lakshminarayana에 의하여 주로 2차원 그리고 3차원 Euler 또는 Navier-Stokes 방정식 해법을 위주로 종합되었다.

일반적으로 터보기계유동은 난류유동이므로 터보기계 내에 있어서 천이 그리고 모델링에 대하여는 Naraimha(1985)와 Mayle(1991)에 의하여 언급되었으나 현재 수준으로 볼 때 유동 예측에 있어서는 미흡한 상태이다.

본 기술분석은 터보기계 내 물리적 현상을 파악하기 위한 여러가지 수치해법에 대하여 정확도, 한계성, 효율, 적용범위에 대한 것을 언급함으로써 앞으로 터보기계의 설계 및 분석에 이러한 수치해법을 적용하는데 있어서 안내가 되었으면 한다.

2. 지배방정식과 경계조건

터보기계 응용에 가장 적합한 좌표계는 회전하는 원통좌표계가 될 것이며 이때 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rE)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{r} S$$

여기서 보존변수 Q , flux vector E, F, G 그리고 생성항 S 는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho W_r \\ \rho W_\theta \\ \rho W_z \\ \rho E \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho W_r \\ \rho W_r^2 + p - T_{rr} \\ \rho W_r W_\theta - T_{r\theta} \\ \rho W_r W_z - T_{rz} \\ \rho W_r H_0 - W_r T_{rr} - W_\theta T_{r\theta} - W_z T_{rz} + q_r \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho W_\theta \\ \rho W_\theta W_r - T_{\theta r} \\ \rho W_\theta^2 + p - T_{\theta\theta} \\ \rho W_\theta W_z - T_{\theta z} \\ \rho W_\theta H_0 - W_r T_{\theta r} - W_\theta T_{\theta\theta} - W_z T_{\theta z} + q_\theta \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho W_z \\ \rho W_z W_r - T_{rz} \\ \rho W_z W_\theta - T_{z\theta} \\ \rho W_z^2 + p - T_{zz} \\ W_z H_0 - W_r T_{rz} - W_\theta T_{z\theta} - W_z T_{zz} + q_z \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ p + \rho W_\theta^2 + \rho \Omega^2 r^2 + 2pr\Omega W_\theta \\ -\rho W_r W_\theta - 2pr\Omega W_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

층류유동에서는 위와같은 기본식에 상태방정식, Sutherland의 점성법칙, 일정 Pr수를 가정함으로써 예측이 가능하나 난류유동에서는 이외에 9개의 난류전단응력에 해당되는 부가 변수가 추가되므로 이에 대한 모델링이 요구된다.

난류모델링에 있어서 현재까지 여러가지 연구가 있었으며 다음과 같은 특징이 있다. 압력구배가 완만하고 박리되지 않은 유동에 있어서는 고차원모델이 필요없으며 단지 대수적인 eddy 점성 모델로 속도장 계산에 충분하다. 그러나 압력구배가 비교적 크며 박리되지 않은 유동에서는 $k-\epsilon$ 모델이 평균유동과 난류성분 예측이 가능하다. 그러나 이 모델은 등방성 조건 때문에 회전, 표면 곡률, 강한 3차원성, 또는 박리가 일어나는 곳에서는 사용이 부적합하다. 따라서 이러한 비등방성 요인을 고려한 모델링으로 많이 사용되는 것이 Reynolds Stress Model이나 이는 너무 많은 전달

방정식의 해를 구해야 하므로 현재 컴퓨터의 용량으로는 부적합하다. 따라서 이를 단순화하여 Algebraic Reynolds Stress Model(ARSM)이 적용되었으며 이중 가장 많이 사용되고 있는 것이 $k-\epsilon$ model과 ARSM이 복합된 모델이다. 즉 $k-\epsilon$ /ARSM 모델로서 회전, 곡률반경, shock에 의한 박리 등 3차원성 영향을 효율적이며 비교적 값싸게 얻을 수 있으므로 현실적인 방법이 될 수 있다. Hah (1984) 그리고 Hah와 Lakshminarayana(1980) 등은 ARSM 모델을 사용하여 rotor wake, 터빈 끝벽유동, tip clearance 유동 등의 터보기계 내부의 점성 유동 예측에 좋은 결과를 얻었다.

한편 유동에 대한 정확한 해석은 적합한 경계 조건에 달려있다. 터보기계에 대한 경계조건은 Scott(1985)에 의하여 정리되었다. 일반적으로 고체표면에서는 Navier-Stokes 방정식에서 점착조건이 주어지고 비점성유동에서는 접선속도성분만 존재하는 것으로 주어진다. 또한 온도에 관하여는 벽면온도 또는 온도의 법선방향구배가 주어진다. Inflow와 outflow 조건은 blade row에 영향을 받지 않도록 방정식형태에 달려 있다. 일반적으로 아음속 영역의 유입유동에서는 정체온도, 정체압력 그리고 유동각 또는 상대속도 성분으로 주어진다. 회전계에서 사용된다면 입구상의 정체압력과 온도 그리고 blade 속도가 주어져야 한다. 한편, 출구에서는 hub에서의 압력이 주어지고 반경방향으로의 분포는 반경방향의 압력평형 방정식에 의하여 결정된다.

3. 수치해법

수치해석에는 2단계 가정이 적용된다. 그 첫번째는 유동역학에 따른 방정식에 대한 가정이며 두번째는 이 방정식에 적용되는 이산화과정에서 생기는 가정이다. 가장 일반적인 경우는 비정상 Navier-Stokes 방정식으로 단순화 가정에 따라 다음과 같이 분류된다.

- 1) 비점성 유동
- 2) 경계층 방정식
- 3) Parabolized Navier-Stokes 방정식(PNS)
- 4) Thin-Layer Navier-Stokes 방정식(TLNS)

5) Full Navier-Stokes 방정식

6) Zonal technique

완전 Navier-Stokes 방정식을 푸는 것이 수치해석상 오차를 제외한다면 가장 정확하나 경제적인 측면에서 많은 투자가 들고 효율적이 되지 못한다. 따라서 복잡한 형상과 유동에 있어서는 각 영역에 따라 알맞은 가정을 둔 방정식과 기술을 이용하는 것이 바람직하다. 예를 들어 아음속 2차원 익렬 유동에서는 경계층방정식과 함께 비점성 유동방정식을 사용하는 것이 효율적이다. 터보기계에서 경우에 따라서는 유동방향 변경, 익형 두께 등과 같은 비점성 영향에 의하여 지배되는 경우도 있기 때문이다. 강한 3차원 shock과 이에 따른 경계층이 동반된 천음속 압축기에서의 유동과 같이 점성 유동특성이 강한 영역에서는 Navier-Stokes 방정식을 사용해야 할 것이다.

3.1. 비점성유동해법

비점성 유동해석은 주로 2차원에 제한되어 있다. 현재까지 터보기계 해석 및 설계에 널리 사용되었던 방법은 그림 1에 보인 S_1 과 S_2 평면으로 구성된 준 3차원 비점성해석방법으로 Wu가 1952년 주장하였다. 여기서 S_1 은 blade-to-blade 유동면이며 S_2 는 hub-to-tip 유동면으로 구성된 평면으로 이들 평면에 stream function이 정의되고 지배방정식이 형성되어 이를 해석하므로 일상적인 설계과정에 적용되어 왔다.

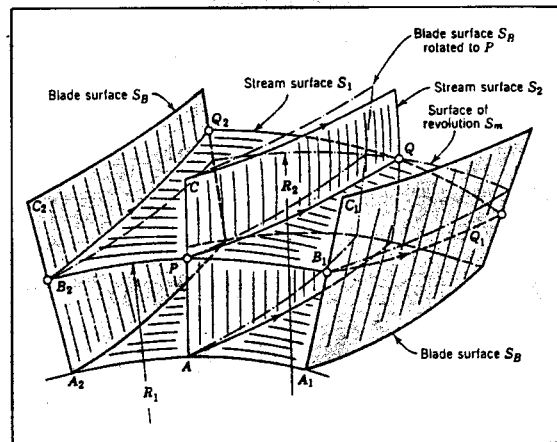


그림 1. Stream Surfaces in Cascade

여기에는 점성항도 개략적인 방법으로 적용되기도 하여 이를 이용하여 Krimmerman과 Adler (1978)는 Finite Element법을 Katsanis와 McNally (1968, 1977)등은 Finite Difference 법을 적용하기도 하였다. 그러나 3차원성과 점성효과가 지배적인 압축기유동에 있어서는 실험과 잘 일치하지 못한 것으로 미루어 전반적인 성능을 구하고자 하는 데에는 준 3차원해석이 유용하나 국부적인 특성을 파악하기 위하여는 Euler 또는 Navier-Stokes 해법이 요구되고 있다.

결과적으로 S_1 과 S_2 면 해석법은 그 간편성으로 아음속, 완만한 3차원 유동영역이 지배적인 터보기계의 설계과정에서 아주 유용하며 따라서 산업체에서 많이 사용되어 왔다.

3.2. 경계층방정식 해법

점성항에서 유동방향의 diffusion이 무시된 방정식으로 압력은 외부의 비점성해법에 의하여 주어지며 일반적으로 점성층이 얇은 경우에 적용된다. 많은 경우, 축류터빈 또는 축류압축기에서 익형의 경계층이 얇고 점성영역과 비점성 영역과의 상호작용이 작은 경우에는 경계층 방정식과 함께 비점성 방정식을 사용하여 전체유동장 및 손실 계산이 가능하다. 그러나 이것은 endwall이나 tip clearance등과 같은 부근에서는 효력이 없다. 이 방법으로는 적분법과 미분법이 사용되고 있는데 Anand와 Lakshminarayana(1978)는 Head의 entrainment식을 이용한 3차원 적분법을 이용하여 Penn State의 low-speed rotor에 적용하여 좋은 결과를 얻기도 하였다.

3.3. Parabolized Navier-Stokes 방정식해법

경계층 가정은 성립되지는 않으나, 완전 Navier-Stokes 방정식을 사용할 만큼 복잡하지 않은 경우에 사용된다. 이 해법에서는 경계층 방정식해법과는 달리, 벽에 수직된 방향으로의 압력구배를 포함하고 벽에 수직된 방향의 운동량방정식도 사용된다. 유동방향 구배가 작거나 비점성유동에

의하여 압력구배가 알려진 경우, 유동방향으로 진행하면서 계산을 수행하므로 계산시간과 저장용량을 줄일 수 있는 장점이 있다. Govindan과 Lakshminarayana(1988) 그리고 Kirtley et al.(1986) 등은 이 방법을 사용하여 cascade를 지나는 점성유동, end-wall 유동 등을 해석하였다.

3.4. Euler 방정식과 Navier-Stokes 방정식의 수치해법

Euler 방정식과 Navier-Stokes 방정식은 점성항의 유무에 따른 물리적현상의 차이가 있을 뿐 해석기법은 동일하여 여기에서 함께 설명하기로 한다. 또한 TLNS 기법도 단지 유동방향의 diffusion항이 무시된 것으로 이곳에서 설명하기로 한다. 여기에는 크게 Pressure-based Methods, Time-dependent method 그리고 Pseudo-Compressible Technique등이 널리 사용되고 있다.

a) Pressure-based Method

이는 속도와 압력을 연결하여 feed-back시켜 조정하는 방법으로 1967년 chorin에 의하여 주장되었으며 Moore(1985)에 의하여 터보기계에 적용되었다. 방법은 가정된 압력을 보정하기 위하여 미소변화량에 대한 보정을 시켜주는 PCM방법과 압력을 직접 구하는 PSM 방법으로 구분된다. 단순유동에 있어서는 PCM과 PSM방법 공히 잘 예측하나 익렬유동과 같이 복잡한 유동에서는 PSM 방법이 수렴속도가 빠름을 보여주었다. 현재까지 많은 연구노력 결과 Pressure-based Method에 많은 발전이 있었으며 난류 모델링도 상당한 수준으로 적용되고 있다. 해석기법에 따라 수렴속도가 다르며 일반적으로 CGS(Conjugate Gradient Scheme) 또는 PISO법이 ADI 또는 SIP-SOL 보다 수렴속도가 빠름을 보여 주고 있다. 그러나 압력계산에 수렴속도가 너무 느리며 비점성유동에 적용되지 못하는 것이 문제점으로 남아 있다.

터보기계에 적용된 예로는 Moore and Moore (1986, 1990), Hah(1984)등이 있으며 이중 Hah (1986)는 1단계의 준내재법의 예측자와 2단계의 준내재법인 보정자로 공간에 대한 3차 정확도를

가지고 여러가지의 터보기계 유동(디퓨저, 터빈 end-wall, tip leakage 유동)에 적용하여 그림 6의 결과와 같이 상당히 실험과 일치함을 보여주고 있으며 특히 tip flow에서는 좋은 결과를 보여주고 있다. 이러한 연유로 이 방법에 의한 유동해석은 물론 설계과정에서의 적용이 가능해지고 있다. 따라서 이 방법은 산업체, 즉 P&W, GE, Rolls Royce 등에 의하여 설계 및 성능 test 등에 널리 쓰이고 있다.

b) Time Marching Technique

이 방법은 Euler 또는 Navier-Stokes 방정식을 시간 진행법을 사용하여 쌍곡선형의 방정식형태로 만들어 효율적인 계산이 가능하도록 하였다.

장점으로는 모든 영역에 적용가능하고 쉽게 Vector화 할 수 있어 슈퍼컴퓨터의 사용이 가능하며 2차원 또는 3차원 익렬유동 또는 정-동익 상호 작용해석에도 적용가능한 점이다. 한편 단점으로는 시간반복계산에 따른 계산효율이 낮고 비압축성 또는 낮은 아음속 영역에서 부적합하다는 점이다.

시간 진행법으로는 외재적, 내재적법이 있으며 외재적 방법은 쉽게 vector화 할 수 있으나 시간 증분이 CFL수에 제한되어 수렴속도가 늦다는 점이며 내재적 방법은 CFL수에 제한은 안 받으나 역행렬계산에 의하여 속도 제한을 받고 있다. 터보유동계산에 적용된 방법으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) Lax-Wendroff Scheme
- 2) Predictor-Corrector Method
- 3) Runge-Kutta Technique

외재적 방법에 비하여 CFL 제한에 지배받지 않는 것으로 가장 널리 사용되고 있는 것으로 Briley와 McDonald(1976) 그리고 Beam과 Warming(1978)의 해법이며 여기에 ADI 또는 LU matrix 분해법을 적용하여 익렬유동해석에 응용되고 있다. 익렬에 적용한 최초의 예는 Steger et al.(1980)과 Shamroth et al.(1982)가 있다.

Kunz와 Lakshminarayana(1991)은 DFVLR에서 Schreiber(1988)이 수행한 입구 Mach수 1.5의 cascade 유동실험에 대한 계산을 Runge-Kutta 방법으로 수행하여 leading-edge shock을 비롯한 현상을 비교적 잘 모사하였으며 그 결과가 그림 2에 도

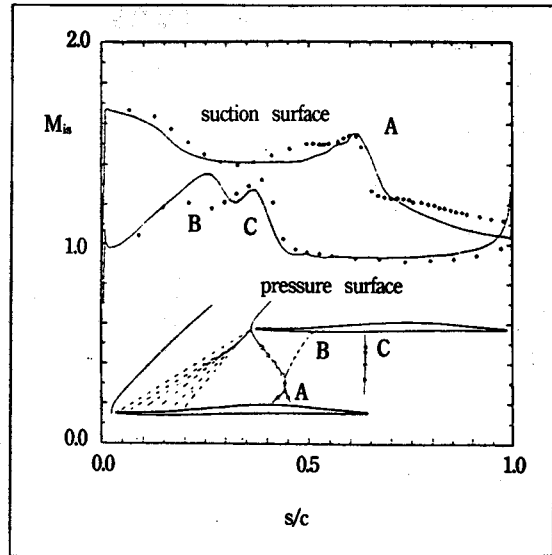


그림 2. Isentropic blade surface Mach numbers for the supersonic cascade (◇data : Schreiber, 1988 : _____ computation: Kunz and Lakshminarayana, 1990)

시되어 있다. 한편 Zimmerman(1990)은 turbine end wall에서의 유동을 모사하여 corner vortex, horse shoe vortex, 그리고 secondary vortex 그리고 이들의 최종적인 roll-up을 정성적으로 보여주었다.

전반적으로 외재적 방법은 터보기계내부의 복잡한 유동을 계산하는데 매우 유용하며 어느 방정식을 사용하는가는 유동형태 그리고 유체기계에 따라 달라져서 원심기계와 고속원심압축기는 Navier-Stokes식에 의하여 정확한 예측이 가능하나, 수력터빈등은 Euler code에 의하여도 만족할 만한 예측이 가능하다.

c) Pseudo-Compressibility Technuque

앞서 언급된 PCM 또는 PSM 방법과 같은 비압축성 해법은 수렴속도가 낮은 반면, 쌍곡선형의 해법이 효율적임이 증명되었다. 이와같은 점에 고안된 것이 Chorin(1967, 1968)의 준압축성 계수 β 를 채택한 준압축성해법이다. Warfield와 Lakshminarayana (1989)등은 Penn State의 실험용 압축기에 이 수치해법을 적용하여 측정결과와 잘 일치함을 보여 주었다. 그러나 결과의 안정성과

수렴속도가 β 에 따라 민감하므로 β 를 정할 수 있는 경험있는 수치해석 전문가가 요구된다는 점이 단점이다.

3.5. Zonal technique

앞서 언급된 반복법을 이용한 Navier-Stokes의 3차원 해를 구하는데 있어 많은 컴퓨터 저장용량과 계산시간이 소요됨을 알고 있으며, 이러한 기술의 산업체에서의 실제적용에는 효율성과 경제성이 필수적이다. 앞서 Navier-Stokes 방정식의 단순형태에 따라 Euler 방정식, PNS, TLNS등 여러 형태로 바뀌고 여기에 따라 계산 효율 및 경제성을 보았으며 한편으로는 이렇게 단순한 형태의 방정식은 유동의 전체영역에 적용될 수 없음을 알았다. 따라서 이러한 문제점을 해결하는 방법으로 유동영역을 여러개의 영역으로 분할하여 각 영역 특성에 맞는 방정식과 가정을 적용하고 이들을 전체적으로 재결합하여 해를 구하는 영역기법(Zonal techniques)이 고안되었다. 일반적으로 터보기계에 사용되는 조합으로는 점성/비점성 기술, 초음속/아음속 기법, 그리고 점성/점성기술이 있으며 그중 한 예가 그림 3에 나타나 있다.

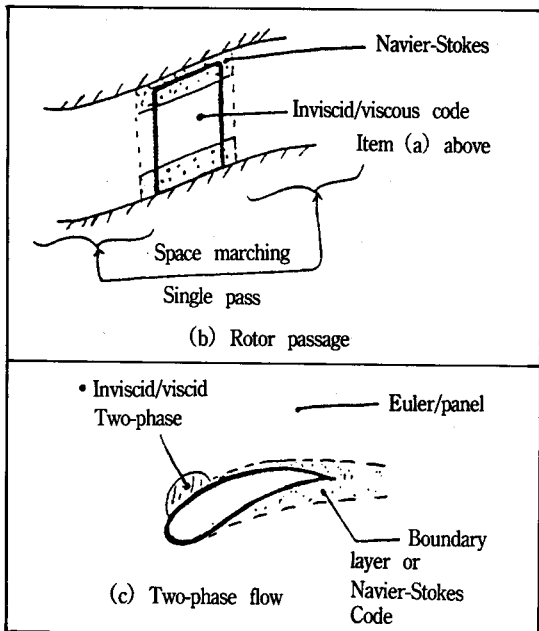


그림 3. Example for zonal technique

점성영향이 경계층에 한하여 작용할 때(경계층이 얇거나 두꺼울 경우) 경계층이론 또는 기타 단순화된 점성이론 영역과 중심부의 비점성영역을 구분하여 두 경계면에서의 경계층 두께의 영향을 고려, 결합하여 적용한다. Singh(1982)는 천음속 압축기 동익에 비점성유동과 압축성 경계층을 유한체적법을 적용하여 해석하였다. 그러나 이 해법에서는 전체적인 효과는 얻을 수 있으나 국부적인 효과는 정확히 얻을 수 없는 경우가 많다. 초음속 터보기계 유동에서는 경계층 영향에 의하여 초음속/아음속 영역법이 좀 더 효율적이다.

점성/점성기술 영역법은 표면에서는 Navier-Stokes식을 적용하여 유동방향으로는 PNS를 사용하므로 유동해석에 대한 효율성을 높이고 현상도 정확히 파악할 수 있다. 이를 이용하여 입구에서 chord의 25%길이까지 타원형방정식 영역으로 보고 그후는 parabolic 영역이 지배하고 표면부근에서는 타원형 영역을 적용하여 Navier-Stokes 방정식만에 의한 소요시간의 30%의 계산시간이 소요됨을 보여주었다.

3.6. Computational design

앞서 언급된 바와 같이 터보기계유동의 설계에서 강력한 수치해법의 사용에 많은 발전이 있었다. 많은 산업체에서 이미 그들의 기초설계로부터 수치해석에 의한 설계/분석 system을 적용하고 계속 보완해 왔었다.

설계에 적용되고 있는 방법으로 역설계법이 있는데 이는 유동 path에서 주어진 속도 또는 압력으로 부터 익형설계에 적용되는 것으로 현재는 주로 2차원에 제한되고 있다. 이중에는 Sanz(1983)에 의한 Hodograph법과 Dulikravich와 Sobieczky(1983)에 의한 가상적 기체개념법이 있는데 이를 이용하여 shock이 없는 익형설계가 가능하게 되었다. 이때 유동이 회전한다면 Euler법이 사용되어야 할 것이다. 이러한 방법은 일반적으로 역설계법과 분석이 적절히 결합되어 최적 날개와 annular 형상 설계에 적용할 수 있는 반복해법이 널리 사용되고 있다.

현재 대부분의 항공기엔진 회사들은 Euler 또는

Navier-Stoke Code를 반복사용하는데 있어서는 초기적인 단계에 있다. 일반적인 터보기계설계를 위한 방안은 그림 4와 같다. 이에 의하면 압력분포, 전체성능에 대한 설계 spec이 주어지면 panel code와 같은 예비설계 system에 의하여 주요깃수가 결정되고 이어서 상세 설계에서 익형과 diffuser에 대한 제 1차 설계가 된다. 그러한 뒤 최대효율을 위하여 형상최적화가 수행되는 것이다. 이 분석 system은 익형-익형간 계산, 경계층 계산, 3차원 시간증분법으로 구성되어 유로를 따라 원하는 속도, 압력분포가 되도록 형상 및 유로를 변경시킨다. 최종단계에서는 손실, 박리, shock의 경계층과의 작용영역들을 찾기 위하여 blade row에 대한 분석이 수행되며 이과정은 만족할 만한 성능 및 익형이 될 때까지 반복된다. 이때 Navier-Stokes 해법이 적용될 수도 있다.

4. 다단 터보기계유동 해석

제 3장에 언급된 내용은 단일익렬에 관한 해석을 위주로 터보기계내의 유동을 해석한 내용이다. 그러나 실제 터보기계는 정익과 동익의 연속된 익렬의 조합으로 구성되어 있어 주기적인 비정상 유동을 하고 있으며 이러한 주기적인 유동변수의 변화는 터보기계성능에 상당한 영향을 주고 있다. 따라서 정익-동익 형상에 대한 유동의 정확한 해석은 터보기계 성능 최적화에 필수적이다. 그러나 이 유동은 기본적으로 1) 비정상유동 2) 형상의 복잡 3) 난류와 층류의 주기적 변화 4) 정익과 동익간의 상대유동 때문에 극도로 복잡한 양상을 보여준다. 점성효과는 앞 익렬 와류의 뒷 익렬에 대한 영향으로 비정상유동에 지대한 영향을 주고 있으며 end-wall과 tip clearance 그리고

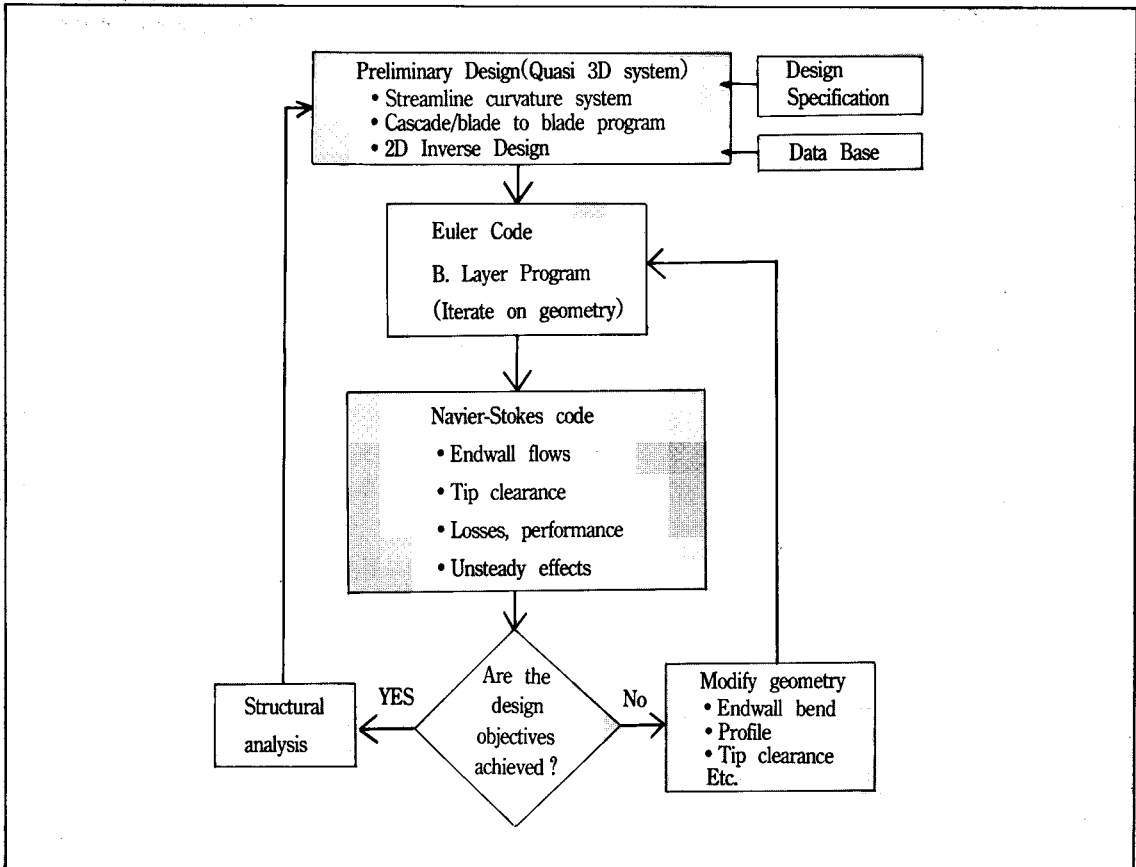


그림 4. Turbomachinery design: a suggested approach

익렬형상은 유동의 3차원특성에 영향을 주므로 성능해석에 포함되어야 정확한 성능예측이 가능하다.

4.1. 2차원 stator-rotor interaction

일반적으로 다단 터보기계는 축류형으로 hub에서 tip까지의 크기가 반경에 비하여 크지 않으므로 이를 2차원적으로 해석하여도 유용한 자료를 얻을 수 있다. 따라서 2차원 정-동익간의 상대운동을 고려한 다단 터보기계의 각단에서의 유동현상을 비정상해석이 수행되었다.

Erds et al(1977)는 비정상, 비점성 2차원 압축성유동에 대하여 blade-to-blade의 유면에 대하여 Euler 방정식에 MacCormack 알고리즘을 적용하고 경계면에서는 특성곡선법을 적용하였으며 정-동익 경계면에서는 phase shift법을 적용하여 해석하였다. 천음속 fan stage에 응용하여 전반적인 특성에 대하여 근사한 결과를 얻었으나 경계층 영역에서는 차이가 많음을 보여주었다.

Giles(1988)는 비정상 Euler 방정식에 Lax-Wendroff 계산법을 적용하였다. 그는 정익과 동익의 경계면에서 time-inclined computational plane을 사용하므로 정-동익의 pitch비가 다를 경우에 생기는 어려운 점을 해결하였으며 이 계산법을 고성능 제 1단 천음속 터빈에 적용하여 정익을 지난후에 연장된 oblique shock을 비롯한 비정상 특성을 확인하였다.

Jorgenson과 Chima(1989)는 유면을 따라서 비정상 Euler 또는 TLNS 방정식에 회전, 반경변화 등을 고려하여 준 3차원적으로 해석하였다. 수치해석에는 4단계 Runge-Kutta 수치해법을 적용하고 인공점성항을 추가하여 이를 단일유로 또는 다중유로에 적용하였다. 정-동익 경계면에서는 중첩된 가상격자를 사용하였다.

Lewis et al.(1987)는 유면을 따른 준 3차원 비정상 Euler 방정식에 외재적 hopscotch 수치해법을 적용하고 수치 안정성을 위하여 인공점성항을 추가하여 이산화하였다. pitch수가 다른 다중유로의 정-동익 배열에 대하여 phase-lagged주기 경계조건을 적용하여 해석하였다.

한편 Ray와 Madavan(1990)는 비정상 TLNS에 내재적 반복 상류차분법을 이용하여 수치해석하였다. 정-동익 경계면에서는 중첩격자를 사용하여 정-동익 pitch 길이를 같도록하여 계산하였다.

4.2. 3차원 stator-rotor interaction

2차원 유동해석으로는 회전, 또는 앞날개의 후류 등에 의한 영향이 파악되지 못하고 경계층에 의한 유동, 그리고 복잡한 익형 냉각 등에 의하여 3차원 유동해석의 필요성이 대두되기 시작하였다.

Koya와 Kotake(1985)은 비정상 3차원 Euler 방정식을 FVM을 이용하여 축류터빈의 정익과 동익으로 구성된 한단의 천음속 3차원 유동을 계산하였다. 이 해석에 있어서는 정익과 동익의 pitch 크기에 따라 2가지 경우로 나누고 특성곡선법으로 연결면에서의 유동 변수를 대류유동과 파동전파 운동에 의하여 산출하였다. 여기에서는 정-동익간의 경계면에 한개의 체적 cell을 중첩시켜서 두개의 다른 운동좌표계의 사용을 원활하게 하였다. 본 방법에서는 space-phase lag를 time-phase lag로 대치시키므로 정-동익렬에 대하여 각각 1개의 block passage만 사용할 수 있도록 하여 컴퓨터 용량과 계산시간을 줄일 수 있었다.

Ray(1987)는 비정상 TLNS에 FDM을 사용하여 축류터빈내의 1단 유동에 대하여 해석하였다. 여기에서 정익과 동익사이에서는 patched grid를 적용하여 상대운동을 처리하였으며 end wall과 tip clearance에서의 효과도 고려되었다. 그는 직교좌표계를 일반좌표계로 변환 후 3차정확도의 상류차분을 반복내재적 시간 증분법을 적용하고 stability를 위하여 4차항의 인공점성을 도입하여 수치해석하였다. 난류모델링으로는 Baldwin-Lomax를 사용하였으며 단위길이당 $Re=10^6/in$ 이다. 정익과 동익의 경계면에서는 한개의 격자 cell을 중첩시켜 구성하였고 동일 pitch 크기의 3차원 축류터빈에 적용하여 5 cycles(1 cycle은 한개의 pitch각 동안의 시간증분)동안 해석하였다. 구성된 복합형 격자계는 그림 5에 그리고 hub에서의 순간압력의 예가 그림 6에 도시되어 있으며 Dring(1981)의 실험결과와 비교하여 잘 일치됨을 보여주었다.

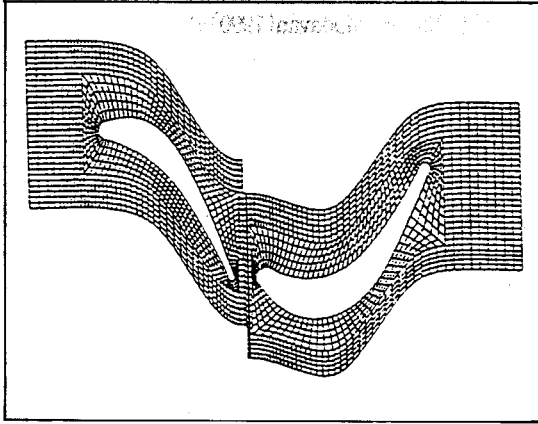


그림 5. Composite grid at midspan

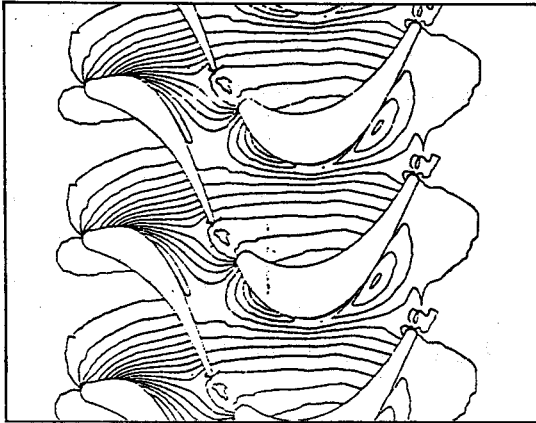


그림 6. Instantaneous pressure contours at the hub

한편 Madavan과 Ray(1993)는 Ray(1987)의 pitch각이 같은 경우에 이어 실제와 유사한 정/동익 비(3:4)를 사용하여 다중유로에 대한 Navier-Stoke 방정식을 적용하여 정-동익 상호작용을 3차원적으로 모사하므로써 정동익비 1:1인 단일 유로 유동보다 좀더 정확한 결과를 보여주었다. 이 결과에 의하면 정익에서는 단일유로 유동해석도 실제와 유사한 형태를 보여주나 동익에서는 다중유로에 의한 해석이 더욱 좋은 결과를 보여준다는 것을 알았다.(그림 7)

Denton(1992)는 1979년 Denton과 Singh의 3차원 비점성 방정식을 이용한 1단 터보기계(정-동익 1단) 유동해석법을 개선하여, Euler 방정식을 기본으로 점성항에 관한 개략방법을 적용하고 4단

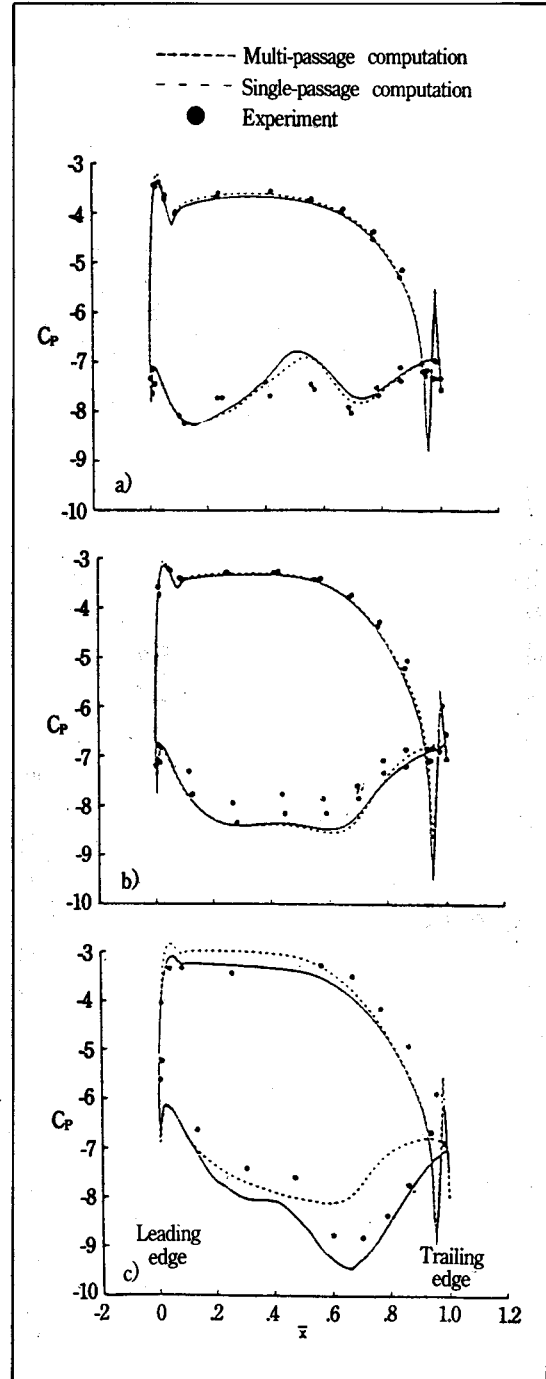


그림 7. Spanwise variation of time-averaged pressure distributions on the rotor: a) 2% span, b) 50% span, and c) 98% span

축류 터빈에서의 정익과 동익의 상대위치에 따른 상호작용에 의한 유동현상을 해석하였다. 그러나 이 방법 또한 전반적인 경향예측은 가능하나 정확한 예측에는 미흡한 편이다.

Dawes(1992)는 원통격자계의 적분보존형으로 표현된 완전 3차원 Reynolds 평균된 Navier-Stokes 방정식을 기본으로 하여 축대칭 body force를 포함시켜 사용하였으며 이를 2단계 외재적-1단계 내재적 방법으로 이산화하였다. 이를 Kovach와 Sandercock(1961)에 의해 보고된 NASALewis에서 실험된 축류5단 실험용압축기에 적용하였다. 여기서는 각 익렬내에서는 정상유동이라고 가정하고 각렬들은 익렬간의 경계 혼합면을 통하여 정보 교환을 하도록 하였다. 이 계산을 통하여 각익렬의 개별적 유동은 단으로 연결되었을 때와 많은 차이가 있었으며 다단으로 계산된 결과가 실험결과에 더욱 가깝게 일치함을 보여주었다.

5. 결 언

터보기계의 계산에는 그 형상과 유동특징에 따라 주어진 방정식과 이에 따른 해법기술이 다르다. Navier-Stokes 방정식이 바람직하나 분석 및 설계시 현재로는 유동장을 위한 가격대비 효율을 고려하여 수행되어야 하기 때문에 완전히 사용되고 있지 못하다. 그러나 이러한 경향은 컴퓨터 성능, 사용경비에 따라 앞으로 바뀔 것이다. 설계분야에 있어서, Navier-Stokes식에 관한 CFD는 현재로는 최종상태에서 문제되는 부분(박리, 역압력 구배 영역, 충격파 생성)을 점검하기 위하여 사용되고 있으나 앞으로는 설계 초기단계부터 적용될 것이다. 최종설계까지에는 수많은 반복적인 계산이 수행되어야 하므로 수치해석 code는 대단히 효율적이 되어야 한다. 따라서 컴퓨터 기술에 따른 계산시간의 절감이 이러한 N-S solution이 산업체에서 일반 도구가 되기 전의 필수 조건이 될 것이다.

현재로서는 영역분할법이 가장 효율적이므로 산업체에서 설계 및 분석에 적용되고 있으며 터보기계유동과 같은 복잡한 유동해석에 매우 유용하다. 여기에는 component의 선택이 중요하고

이에 따라 전체효율과 정확도가 차이가 난다. 또한 터보기계의 정확한 성능 예측을 위하여는 각 단, 또는 다단유동해석이 요구되며 효율적이고 정확한 해법과 난류 모델링에 대한 많은 연구가 병행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Anald, A. K., and Lakshminarayana, B., 1978, "Three Dimensional Turbulent Boundary Layer in A Rotating Helical Channel," ASME, *Journal of Fluid Engineering*, Vol.97, No.2, pp.197-210 (also see NASA CR 2888, 1977).
2. Dawes, W. N., 1992, "Toward Improved Through flow Capability: The Use of Three-Dimensional Viscous Flow Solvers in a Multistage Environment," *J. of Turbomachinery*, Vol.114, p.8.
3. Hah, C., and Lakshminarayanda, B., 1980b, "The Prediction of Two and three Dimensional Asymmetric Turbulent Wakes-A Comparison of Performance of Three Tyrbulent Models for the Effects of Curvature and Rotation," *AIAA Journal*, Vol.18, No.80, p.1196.
4. Ktasanis, T., and McNally, W. D., 1977, "Fortran Program for Calculating Velocities and Streamlines on the Hub-Shroud Mid Channel Flow Surface of an Axial-or Mixed Flow Turbomachine," Vol.I and II, NASA TN D 8430 and TN D 8431.
5. Kirtley, K., Warfield, M., and Lakshminarayana, B., 1986, "A Comparision of Computational Methods for Three Dimensional Turbulent Turbomachinery Flows," AIAA Paper 86-1599, (Synoptic in *J. Propulsion*, Vol.4, No.3, May 1988).
6. Krimmerman, Y., and Adler, D., 1978, "The Three Dimensional Flow Field in Turbo Impellers," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol.20, No.3.
7. Kunz, R., and Lakshminarayana, B., 1991a, "Three-Dimensional Navier Stokes Computation of Turbomachinery Flows Using an Explicit Numerical Procedure and a Coupled K_ϵ -Turbulence

- Model," ASME 92-GT-146, (to be published ASME *Journal of Turbomachinery*, 1991).
8. Lakshminarayana, B., 1991, "An Assessment of Computational Fluid Dynamics Techniques in the Analysis and Design of Turbomachinery-The 1990 Freeman Scholar Lecture," *J. of Fluid Eng.* Vol.113, p.315.
 9. Madavan, N.K. and Rai, M.M., 1993, "Multipassage Three Dimensional Navier-Stokes Simulation of Turbine Rotor-Stator Interaction," *J. of Propulsion and Power*, Vol.9, No.3, p.389.
 10. Mayle, R E., 1991, ASME IGTI Scholar Lecture, Gas Turbine Conference, Orlando, ASME paper 91GT261.
 11. McNally, W. D., and Sockol, P., 1981, "Computational Methods for Internal Flows with Emphasis on Turbomachinery," NASA TM 82764 (condensed version in *J. Fluids Engineering*, Vol.107, 1985).
 12. Moore, J. G., 1985, "An Elliptical Procedure for 3D Viscous Flow," in "3D Computation Techniques Applied to Internal Flows in Propulsion Systems," AGARD, LS-140.
 13. Moore, J., and Moore, J. G., 1986, "Performance Evaluation of Linear Turbine Cascade Using Three-Dimensional Viscous Flow Calculation," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.108.
 14. Rai, M. M., 1987, "Unsteady Three-Dimensional Navier Stokes Simulations of Turbine Rotor-Stator Interaction," AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd *Joint Propulsion Conference*, Sandiego, California.
 15. Scott, J. N., 1985, "Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations for 3D Internal Flows," AGARD LS140.
 16. Shamroth, S. J., McDonald, H., and Briley, W. R., 1982, "Application of Navier-Stokes Analysis to Transonic Cascade Flow Fields," *ASME Journal of Engineering for Power*.
 17. Singh, U. K., 1982, "Computation and Comparison with Measurements of Transonic Flow in an Axial Compressor Stage with Shock Boundary Layer Interactions," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol.104, pp.510-515.
 18. Steger, J. L., Pulliam, T. H., and Chima, R. V., 1980, "An Implicit Finite Difference Code for Inviscid and Viscous Cascade Flow," AIAA Paper 80-1427, AIAA 13th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Snowmass.
 19. Wu, C. H., 1952, "A General Theory of Three Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachine in Radial, Axial and Mixed Flow Types," NACA TN 2604.
 20. Zimmerman, H., 1990, "Calculation of Two-and Three-Dimensional Flow in a Transonic Turbine Cascade with Particular Regard to the Losses," AIAA Paper 90-1542.