

단단 축류 터보기계의 유동해석을 위한 계산격자점 생성 프로그램의 개발 및 적용

정희택*1, 박준영*2, 백제현*3

Computational Grid Generator for Flow Analysis of Single Stage Axial Turbomachinery with Its Applications

H.T. Chung, J.Y. Park and J.H. Baek

An integrated grid generation has been developed for a Navier-Stokes simulation of flow fields inside multistaged turbomachinery. The internal grids are generated by the combination of algebraic and elliptic methods. The interactive mode of the present system is coupled efficiently with the design results and flow solvers. Application to several types of axial-flow turbomachines was demonstrated to be reliable and practical as the pre-processor of the computational fluid engineering for gas turbine engines.

Key Words: 축류 터보기계(Axial-flow Turbomachinery), 나비에 스톡스 방정식(Navier-Stokes Equation), 계산격자점 (Computational Grid), 익렬(Cascade), 단단 (Multistage)

1. 서 론

가스터빈 엔진의 주요 핵심부품인 압축기나 터빈부 등은 단단으로 구성되고 주유로 및 블레이드의 기하학적인 형상이 복잡하며, 내부 유동장이 비정상, 압축성, 3차원 점성 유동 특성이 있다. Navier-Stokes 방정식을 이용하여 엔진의 공력 특성을 예측하기 위해서는 설계 데이터를 유동장 시뮬레이션에 맞게 재구성하고, 예상되는 유동특성에 적합하도록 계산 격자점을 생성하여야 한다. 생성된 계산격자점은 설계과정과 성능 예측 과정을 연결시켜 주므로, 유동 해석

결과의 정확성 뿐만 아니라, 설계 과정의 효율성에도 중요한 영향을 준다.

터보기계 내부의 유동장 시뮬레이션에 소요되는 총 작업시간(wall-clock time) 중 70~90%가 전처리 과정인 계산 격자점 생성에 차지한다.[1] 유동해석에 대한 범용 상용프로그램에 격자점 생성 모듈이 있지만, 터보기계에 적용하기에는 고도의 기술이 필요하고, 대부분 사용 범위의 제약이 따른다. 이러한 사용상 불편으로, 터보기계의 내부 유동장 연구자들은 유동 해석 코드에 적합한 격자 생성 프로그램을 자체 개발하고 있는 실정이다.[2,3]

본 연구에서는 가스터빈 엔진의 공력 성능 예측에 적합한 계산격자점 생성 기법을 개발하고, 이를 유동장 해석에 적용하여 기법의 타당성과 효율성을 검증하고자 한다.

*1 정희원, 경상대학교 수송기계공학부

*2 학생회원, 포항공과대학교 대학원

*3 정희원, 포항공과대학교 기계공학과

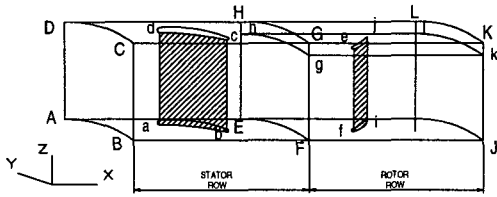


Fig. 1 Computational flow fields for numerical simulation of single stage axial turbomachines

2. 이 론

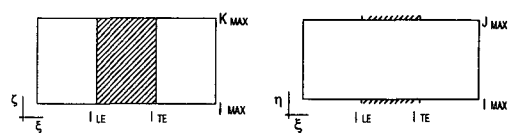
다단형 축류 터보기계 내부의 유동 특성을 Navier-Stokes 방정식으로 수치해석을 하기 위해서는 Fig. 1과 같은 유동 영역이 설정된다. A-B-C-D면으로 전단의 유동이 유입되어 I-J-K-L면으로 유동이 다음단으로 유출된다. 정익부는 전형적인 3차원 익렬유동장으로 블레이드 표면과 허브, 쉬라우드 부근에서 경계층 유동을 유발한다. 동익부는 허브면과 블레이드가 회전하여 팁부근(g-k-l-h 와 G-K-L-H 사이의 공간)에서 복잡한 누설 유동이 추가로 발생한다. 정익부와 동익부가 인접하는 E-F-G-H면 부근은 블레이드 간의 상호 간섭으로 비정상 유동현상을 야기시킨다.

본 연구의 목표는 이러한 내부 유동장 해석에 적합한 계산격자점 생성 기법을 개발하는 것이다. 이를 위해 채택한 계산격자점의 구조와 생성 알고리즘 및 개발된 전산 시스템의 운영체계를 설명하면 다음과 같다.

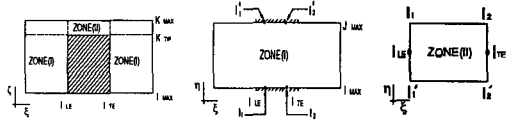
2.1 계산 격자점 구조

익렬 유동의 수치해석에는 H-형, O-형, D-형의 3가지 형태가 기본 격자계로 사용된다. 유동특성에 보다 적합하게 하기 위해서 O-H, C-H 등 복합 격자계가 채택되기도 한다. 익렬의 기하학적인 형상과 내부 유동의 특성에 따라 각 격자계 별로 장단점을 가지며, 유동 해석의 경계조건 처리법에도 영향을 준다.

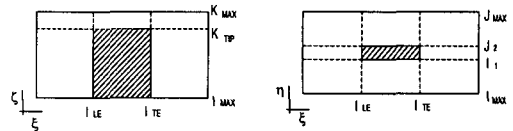
다단 익렬의 유동영역의 기본은 단익렬이다. 본 연구에서는 H-형을 기본형으로 하여 Fig. 2와 같이 3가지 형태의 격자형을 선정하여, 유동



(a) H-grid type excluding tip region



(b) H-H composite grid type including tip region



(c) Multi-block H-grid type including tip region

Fig. 2 Grid structures for rotor cascades

장에 따라 선택하도록 하였다.

(a)형-Fig. 2(a)-은 표준 H-형 격자계의 3차원 확장형으로, 정익부의 3차원 유동장에 적합하다. 동익부의 유동해석에도 팁부분의 블레이드 형상을 변형하여 이 구조를 채택하기도 한다.

(b)형-Fig. 2(b)-는 팁 부근의 누설유동을 고려하여 2개의 영역을 설정하였다. 각각의 영역은 H-형이고, 블레이드와 팁이 인접하는 부분인 I_1 - I_2 - I'_1 - I'_2 -면은 격자가 서로 연결(pathching)되도록한 구조이다. 이 경우 유동장 해석영역도 2영역이 된다.

Fig. 2(c)는 H-형을 변형한 다중블록 H-형 구조로, 표준 H-형보다 격자의 수직성을 개선하고, 격자점의 생성이 용이하도록 한 구조이다.[4] 이는 동익의 누설을 고려한 유동장 해석 시 계산영역이 1개이므로 편리한 점도 있다.

2.2 계산 격자점 생성기법

여러 개의 익렬로 구성된 다단 터보기계의 유동해석을 위한 계산 격자점은, 1) 설계된 형

상데이터-유로, 블레이드 등-를 유동해석에 적합하게 재구성하는 과정, 2)익렬간의 interface와 표면의 점성유동을 고려한 경계면에서의 격자점 분포 과정, 3) 각 익렬에서의 내부 격자점 생성 과정이다. 익렬별로 생성된 내부격자점은 통합(integration)하여 유동해석의 전처리 조건으로 사용된다. 본 연구에서 사용한 기법을 각 과정별로 설명하면 다음과 같다.

2.2.1 형상 데이터의 재구성

기본 설계 과정에서의 주요 결과 중, 주유로 형상, 단면에서의 블레이드 형상 데이터, 입·출구에서의 유동각 등이 계산 격자점 생성과정의 입력자료가 된다.

유로나 블레이드 형상 자료는, 정보의 일관성이 없으므로 익렬 유동 해석에 맞게 재구성하여야 한다.

각 단면의 블레이드에서 주어진 형상 데이터는 대수 곡선식과 분포함수 등을 사용하여 재구성한다. 예를 들어 블레이드 선단과 끝단 등과 같이 곡률변화가 심하고 유동치가 급격히 변하는 곳은 밀집시키고, 그 외는 균일 간격으로 분포시킨다. 식(1)은 본 연구에서 사용한 분포함수이다.

$$S(i) = \begin{cases} S_L \cdot F_L(i) & (i=1, \dots, i_L) \\ S_L + F_C(i) & (i=i_L, \dots, i_T) \\ 1 - S_T \cdot F_L(i_N - i) & (i=i_T, \dots, i_M) \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_L(i) &= \frac{e^{a_i} - e^a}{e^{a_{i_N}} - e^a} \\ F_C(i) &= \frac{1 - S_L - S_T}{i_T - i_L} (i - i_L) \end{aligned} \quad (146)$$

유선면에 관한 기하학적인 데이터는 단익렬별로 재구성하고, 형상에 적합한 함수의 형태를 도출한다.

2.2.2 경계 격자점 분포

익렬간의 인접면인 입출구에서 격자점 분포가 일치하도록 일관성있게 경계 격자점을 분포시킨다.

각 익렬 내의 경계 격자점은 3차원 점성 유동장의 특성과 유동의 경계조건에 맞게 분포시킨다. 유동장의 경계조건은, 익렬 입구에서의 유입류 조건, 블레이드 표면과 허브·팁면의 벽면 조건, 출구에서의 유출류 조건, 주기조건의 4가지이다.

경계면의 형상과 격자 분포에 따라 내부 격자 구조가 결정될 뿐만 아니라, 유동해의 결과에도 큰 영향을 미친다. 경계선의 형상은 Bezier 곡선을 입출구의 유동각, 블레이드의 캠버형상을 고려하여 적용하였다.[4]

Span 방향의 격자점은 허브와 팁, 누설 유동 영역 등의 점성 경계층 유동장을 고려하여 식(1)과 유사한 분포함수를 적용하였다.

2.2.3 내부격자점 생성

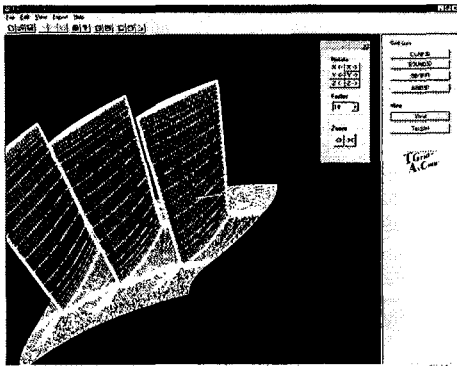
각 익렬별로 경계면에서의 격자점이 분포되면, 유동해석을 위한 내부 격자점을 생성하게 된다. 블레이드의 형상에 따라 기본 유선면을 설정하여, 각 기본 유선면- Fig. 2의 $\xi-\eta$ 면-에서의 2차원 격자점을 생성하여 span방향으로 중첩시키면 최종 3차원 내부 격자점을 얻을 수 있다.

기본 유선면에서의 2차원 내부 격자점은 대수기법과 미분방정식법을 병행하면 빠른시간에 효율적으로 생성할 수 있다. 본 연구에서는, 2차원 유동 영역을 특성별로 7개의 블록으로 설정하여 각 블록간은 식(2)와 같은 선형 transfinite 법을 사용하여 격자점을 형성하고, Poisson방정식법을 이용하여 블록간의 격자점 간의 완만성을 개선하였다.[4] Bladwin_Lomax 모델과 같은 난류모델을 적용하는 경우에는 경계층 내부에 격자가 더욱 밀집하여야 한다. 이 경우에는 대수적 grid-inbedding기법을 이용하여 격자를 재구성하였다.[3]

기본 유선면에서 생성된 격자점을 이용하여, 보간법으로 3차원 내부 격자점을 만든다. 기본 유선면 상의 점을 (X,Y)좌표로 표시하고, 유선면의 형상이 $r=f(x)$ 로 주어지면,

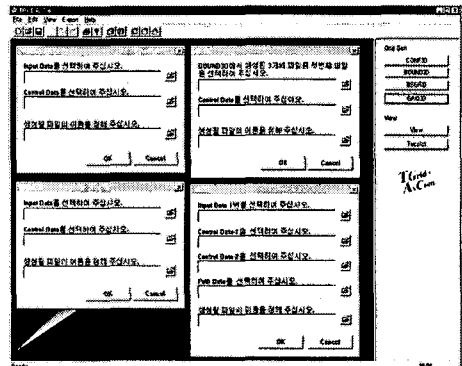
$$X = x, \quad Y = r\theta = f(x)\theta \quad (3)$$

축좌표계와 직교좌표계의 관계식을 이용하여,



$P(x, y, z)$

(a) Graphical displayer



을 생성할 수 있다. BBGRID에서의 2차원 유동

(b) Program modulator

Fig. 3 Graphical view of the present grid generator (TGrid)

$$\begin{aligned}
 &= x \hat{i}_x + y \hat{i}_y + z \hat{i}_z \\
 &= x \hat{i}_x + r \sin \theta \hat{i}_y + r \cos \theta \hat{i}_z \quad (4) \\
 &= X \hat{i}_x + f(x) \sin\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_y + f(x) \cos\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_z \\
 &= P(X, Y, f(x))
 \end{aligned}$$

로 좌표변환된다.

3차원으로 중첩하여 보간하는 방법은 대수 내삽기법을 사용하면 된다.[2] Span방향의 k 또는 ζ 는 벽면의 점성 경계층을 고려한 분포함수를 취한다.

2.3 프로그램의 구성 및 운영체제

2.2절의 알고리즘을 바탕으로 Fig. 3과 같이 축류형 터보기계 전용 전산시스템을 구축하였다. 본 전산시스템은 사용자의 편의를 위해서 대화형 모드(Graphic User Interface; GUI)로 구축되어 있다. 각 단계별로 생성된 결과는, 3차원 그래픽 범용 소프트웨어인 OpenGL을 사용하여 전산 가시화하였다.[5]

기능별로 4개의 주프로그램으로 구성된다. 설계된 형상정보를 유동해석용으로 모델링(CONF3D), 경계면의 격자점 분포(BOUND3D), 기본단면에서의 2차원 내부격자점 형성(BBGRID) 및 span방향의 3차원 격자의 재구성(GRID3D) 등이다.

프로그램은 Fig.3(b)의 modulator에 의해 각 단열렬(single row cascade)별로 진행한다. Fig.2의 3가지 유형에 따라 선택적으로 격자점

해석을 위한 계산격자점이, GRID3D에서는 3차원 유동해석을 위한 계산 격자점이 생성된다. 부수적으로, CONF3D의 결과는 구조설계 및 해석을 위한 전처리데이터로 제공될 수 있다. 정의과 동적이 연속된 다열렬(multi row cascades)의 경우 BOUND3D에서 interface에서의 경계조건 처리법 등을 고려하여 경계 격자점을 분포시키면, 단열렬 별로 얻어진 최종 내부 격자점을 통합하기만 하면 된다.

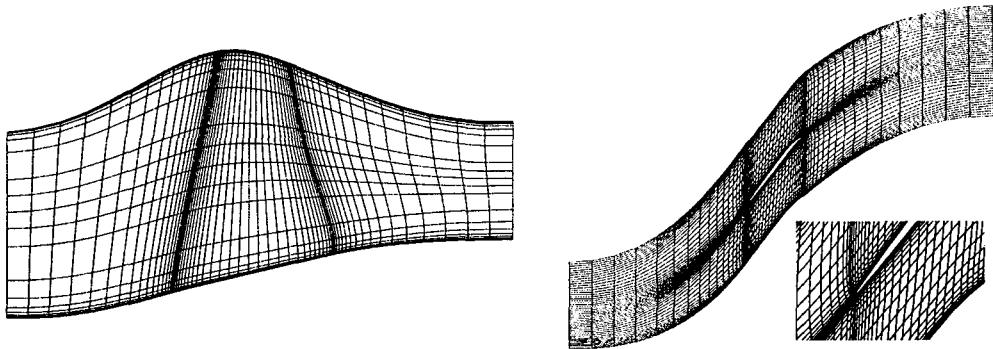
3. 적용

본 연구에서 개발된 계산격자 생성 프로그램의 유동장 해석 적용 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같이 3가지 경우에 대해서 적용하였다.

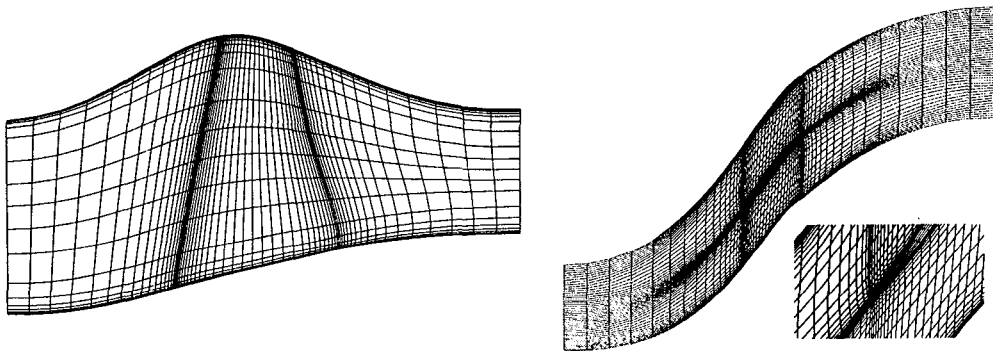
3.1 3차원 동익 유동장의 적용

첫 번째 적용 모델인 NASA rotor 67 은 NASA에서 설계된 천음속 팬으로, 다양한 실험과 계산 검증이 이루어져 왔다.[6] CDA형으로 설계된 블레이드는 뒤틀린 3차원 형상을 취하고, 설계압력이 1.63으로 높고, 입구압력 1.38로 고속회전을 하므로, 복잡한 3차원 유동이 예측된다.

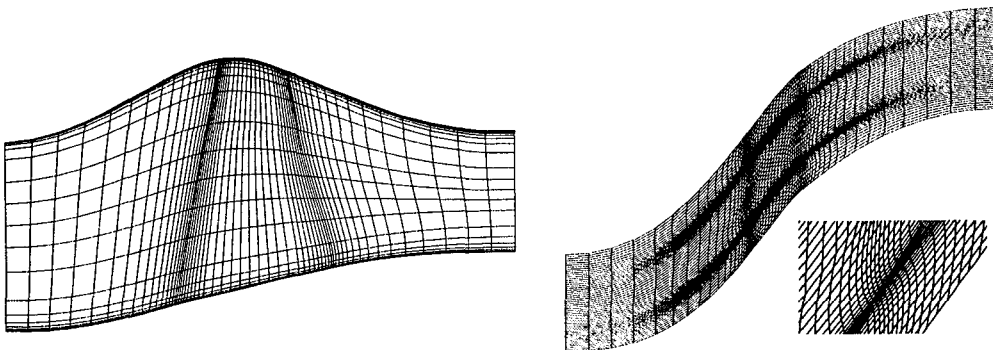
Fig. 2의 3가지 격자 구조에 따라 유동해석용 계산격자점을 생성하면 Fig. 4와 같은 결과를 얻는다.



(a) H-grid type excluding tip region



(b) H-H composite grid type including tip region



(c) Multi-block H-grid type including tip region

Fig. 4 Computational grids for three dimensional simulation of NASA Rotor67

Fig. 4(a)는 표준 H-형의 구조-Fig.2 의 (a) 형-로, 전형적인 3차원 익렬형이다. 주유동방향(ξ)으로 63개, 피치방향(η)으로 25개, span방향(ζ)으로 25개 등 총 39,375 개의 계산 격자점을 사용하였다. 자오면(meridional plane: $\xi-\eta$)에서의 격자는 경계층 점성 유동에 맞게 블레이드 표면과 허브 및 팁 부근에 격자가 밀집되어 있다. 압축기의 경우 유동 굴절각이 작으므로, 유선면(blade-to-blade plane: $\xi-\zeta$)의 격자는 전반적으로 완만하나, 블레이드 선단과 끝단 부근은 격자의 찌그러짐이 심하다.

Fig. 4(b)는 팁부근의 누설 유동을 고려하여 계산영역을 블레이드를 기준으로 2영역으로 설정한 격자형의 구조-Fig.2 의 (b) 형-이다. 영역 1의 격자수는 주유동방향(ξ)으로 63개, 피치방향(η)으로 25개, span방향(ζ)으로 25개 등 총 39,375 개이고, 영역2의 경우는 ξ -방향으로 27개, η 방향으로 25개, span방향(ζ)으로 5개 등 총 3,375개이다. 자오면에서의 격자는 누설 유동에 맞게 팁 부근에 격자가 밀집되어 있다. 누설 유동이 형성되는 부분의 격자를 유선면에서 도시한 그림(Fig. 2(b) 오른쪽)을 보면, 2 영역의 인접 격자가 연결(patching)되어 있음을 확인할 수 있다.

다중블록 H-형의 구조로 격자를 생성하면 Fig. 4(c)와 같다. 격자의 수직성이 앞의 두 경우보다 양호하고, 특히, 블레이드 선단과 끝단은 격자 찌그러짐을 거의 볼 수 없다. 누설유동이 형성되는 부분의 격자를 도시한 그림을 Fig. 4(b)와 비교해 보면, 이 구조의 장점을 확인할 수 있다.

일반 압축성 유동장에 적용하는 3차원 비점성 유동해석 코드를 터보기계 익렬 유동에 맞도록 난류모델과 경계조건을 보완하여 본 유동장 해석에 적용하였다.[7,8] 대수적 grid-embedding (2.2.3절 참조)를 Fig. 4의 격자에 적용하여, 난류 유동장에 적합한 조밀 격자(fine grid)를 재구성하였다. 유동장의 수치 계산은 슈퍼컴퓨터인 HP X-Class Exemplar (200 MHz급)에서 수행되었다. 입·출구에서의 질량 유속(mass flow

rate)변화가 0.1 %에서 정상상태의 수렴조건에 도달하는데 50,000번의 반복 계산이 요구되었다.

위 3가지 격자형 중 간단한 구조인 (a)형을 해석한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 압축기의 부압면은 유동의 변화가 큰 부분으로 동익의 3차원 압축성 점성 유동 특징이 잘 나타나는 지역이다. Fig. 5(a),(b)는 이 부분에서의 유선과 상대마하수 분포를 나타낸 것이다. 부압면의 선단에서 충격파와 경계층 상호작용에 의한 유동의 박리 현상이 나타남을 예측할 수 있다. Fig. 5(c)는 팁부근-30 % span-에서의 압력변화를 도시하였다. 블레이드 선단에서 발생한 충격파가 익렬 유동장으로 전파됨을 관찰할 수 있다.

3.2 2차원 익렬 유동장의 적용

두 번째 적용 대상은, 산업용 가스터빈 엔진의 저단 압축부의 1단 정익 블레이드의 공력해석 과정이다.[9] 평균반경 (50% span)인 경우, 입구에서의 유동각 45.77°, Mach수 0.572이고, 유동굴절각이 23.56°이다. 블레이드의 형상은 NACA-65계열을 기본으로 하였다.

Fig. 6은 다중블록 H-형의 구조-Fig.2 의 (c) 형-로 생성된 익렬 내부 격자점 분포를 나타낸 것이다. 블레이드 표면에 96개, 주유동방향(ξ)으로 257개, 피치방향(η)으로 81개 등 총 20,817 개의 계산격자점을 사용하였다. 블레이드 표면 격자의 수직성이 양호하고, 주기경계면 부근에서 격자가 완만하고 연속적으로 생성되었다. 블레이드 선단 및 끝단 부근은, 주기경계선과 익형 표면이 교차하는 곳으로, 유동 현상이 복잡하고, 기하학적인 변화가 심하다. 격자의 상태에 따라 수치해의 결과에 영향을 받는다. 계산격자가 완만하지 않거나, 격자의 미분 변화율이 연속적이지 못하면 수치해가 발산하는 경우도 있다. 계산격자점 생성 결과는 블레이드 선단이나 끝단의 격자 상태가 모두 만족할 만하다. 블레이드 표면 등 경계층면의 격자조밀성은 $\Delta S_{\eta} = 1.0 \times 10^{-4}$ 으로 난류 유동장에 적합하다.

내부의 유동장은 열유동해석 범용 전산프로그램인 FLUENT를 사용하였다.[10] 난류유동해석을 위해서는 일반적으로 많이 사용되고 있

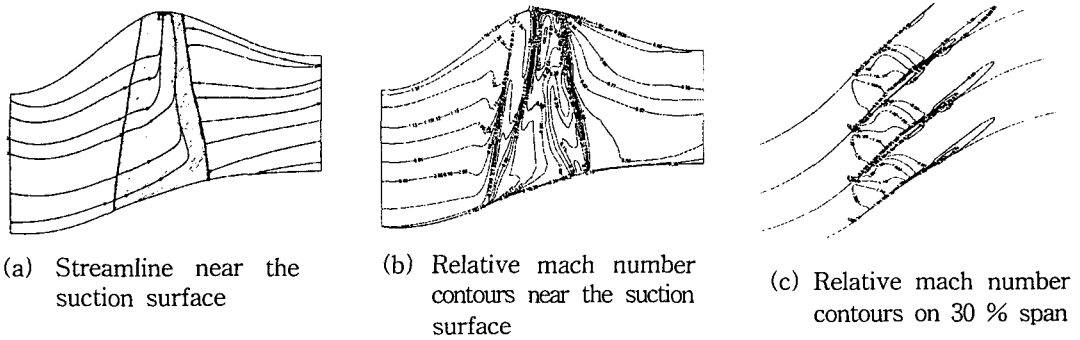


Fig. 5 Numerical results for NASA Rotor 67 by Fig.6-(a) grids

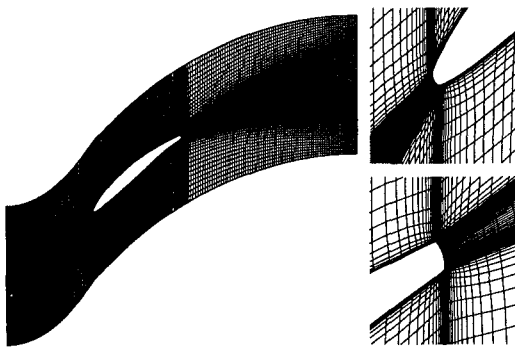


Fig. 6 Multi-block H grid for two-dimensional axial compressor cascades



Fig. 7 Computed streamline inside blade passages

는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 선택하였다. 유동장의 수치 계산은 워크스테이션(IBM R/S 6000모델, 128MB급)에서 수행되었다. 유동변수의 평균 변화, 즉 상대오차가 0.1 %에서 정상상태로 가정하였는데, 3,000번의 반복계산으로 4시간의 계산 시간(CPU time)이 소요되었다.

Fig. 7은 익렬 내부의 순간 유선을 나타낸 것이다. 순간 유선 형상은 블레이드 선단의 정체점의 위치, 후류의 압축성 점성 유동장 특성 등에 관한 정보를 보여 준다. 선단부근의 유선 형태를 보면 정체점이 블레이드의 선단 하반부에서 형성됨을 알 수 있다. 이 결과는, 설계된 입사각이 너무 커서 양실속 현상이 나타났음을 예측할 수 있다. 끝단 부근과 후류에서의 유동 형태를 보면 출구 유동각이 예상보다 큼을 알 수 있다. 이 결과로부터 유동의 굴절 정도가 설계조건보다 적다. 따라서, 출구의 편차각과 익렬 충실도를 조정할 필요가 있다.

3.3 단단 압축기의 설계과정 적용

본 연구에서 개발된 격자생성 시스템의 설계 과정 적용 타당성을 검토하기 위해서 시험용 가스터빈엔진의 압축부의 1단에 적용하였다.[11] Fig. 8은 기본설계 결과 중 유로 형상과 평균반경에서의 익렬 형상을 나타낸 것이다. 1단의 압축비는 1.22이고, 회전수는 10,000이며, 동익 팁에서의 유속을 마하수 0.997로 설계한 아음속 압축기이다. 평균반경(50% span)인 경우, 입구 상대 마하수는 0.783, 입구에서의 유동굴절각은 26.7° (동익), 44.1° (정익)이다. Mach수 0.572이고, 유동굴절각이 23.56° 이다.

설계된 1단 축류압축기의 공력 성능 해석을 위하여, 동익부는 2영역 H-형의 구조-Fig.2 의

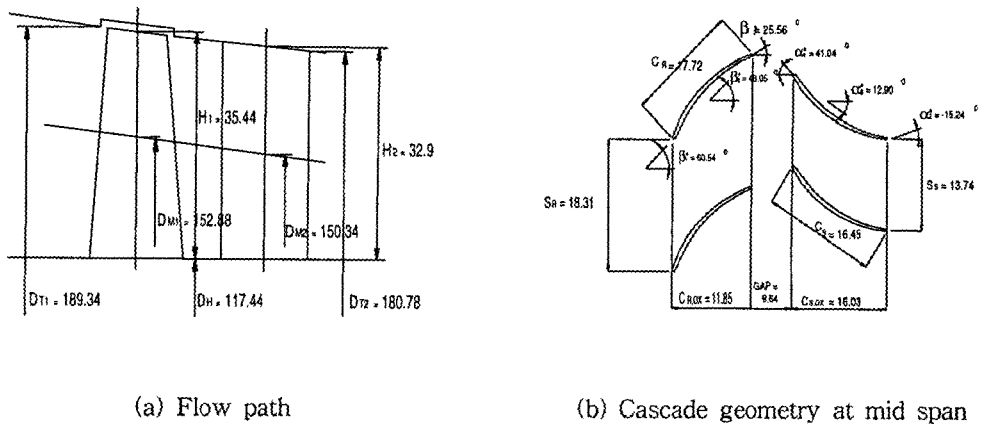


Fig. 8 Cascade geometry of 1st stage for compression part of KIMM test engine

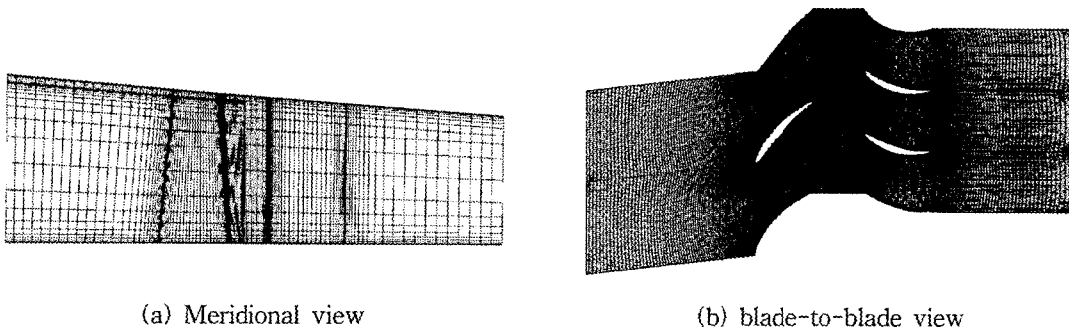


Fig. 9 Computational grids for KIMM 1st compressor

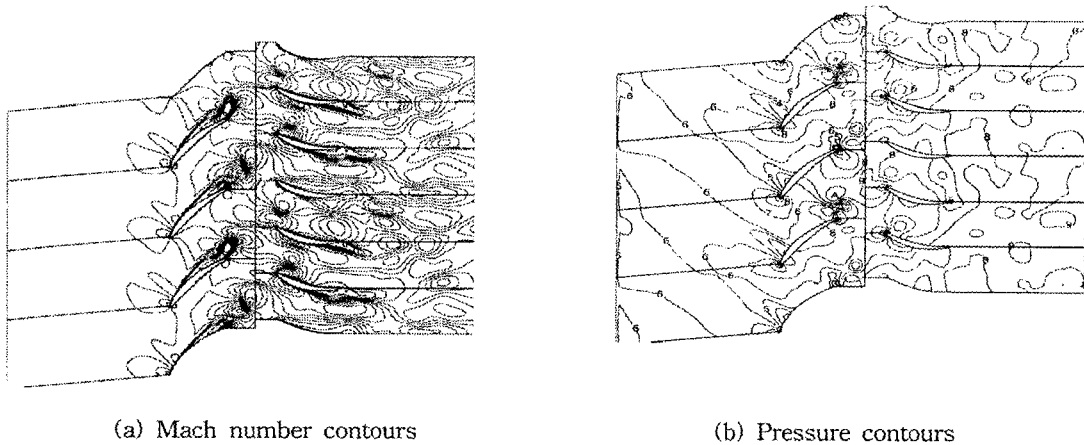


Fig. 10 Numerical results by two dimensional analysis

(b) 형-로, 정익부는 1영역 H-형의 구조-Fig.2의 (a)형-으로 내부 격자점을 생성하였다. 유동입구는 동익의 축방향 길이의 2배에 위치시키고, 출구지역은 정익의 축방향 길이의 2배에 두었다. 동익부의 유동 영역에는 주유동방향(ξ)으로 178개, 피치방향(η)으로 55개, span방향(ζ)으로 49개 등 총 479,701 개의 격자점을 두었다. 이 중 ξ 방향의 블레이드 표면격자는 67개이고, 팁부근의 누설유동을 위해서 span방향(ζ)으로 17개의 격자점을 주었다. 정익부의 경우는 ξ -방향으로 158개, η 방향으로 45개, span방향(ζ)으로 45개 등 총 319,950 개 이다. Fig. 9에는 최종 형성된 내부격자점이 나타나 있다. Fig. 9(a)는 자오면상의 격자점 분포를 초기의 성김격자(coarse grid)로 나타낸 것이다. 이 그림에 의하면 (b)형에 의한 동익부의 격자와 (a)형에 의한 정익부의 격자의 구조상 차이를 알 수 있다.

1단 익렬내의 유동장 시뮬레이션을 위하여 Fig.6(b)와 같은 조밀 격자로 평균 유선면 (50% span)에서 2차원 유동 해석을 수행하였다. 2차원 비정상 비점성 유동해석 코드를 점성 유동에 맞도록 수정하여 압축기 익렬내부의 정동익 간섭 유동해석에 적용하였다.[12] 유동장의 수치 계산은 HP 735 워크스테이션에서 수행되었다. 1 주기(동익이 1 피치 이동하는데 소요되는 시간)동안 1,000번의 시간 간격으로 나누어 계산하였다. 1 주기당 무차원화 된 시간으로 1.46이 걸리며, 컴퓨터의 실제산 시간은 250분이 소요되었다. 평균반경에서 2차원 점성 유동 해석한 결과 중 5/16주기에서의 압축성 변화 상태가 Fig. 10에 나타나 있다. 익렬 간의 간섭(rotor-stator interaction)에 의한 비정상 유동 특성을 잘 보여주고 있다.

4. 결 론

가스터빈 엔진과 같은 다단형 축류 터보기계의 유동장 해석을 위한 계산격자점 생성 기법을

개발하고, 사용자의 편의를 위한 전산시스템 체계를 구축하였다. 대수기법과 편미분 방정식기법을 병용하여 격자 생성 시간이 단축되었고, 설계 결과와 유동해석 코드간의 연결로 터보기계 전용성의 효율을 도모하였다.

2차원 압축기의 익렬 유동장, 3차원 천음속팬 유동장, 1단 압축기의 설계 과정 등에 적용하여 프로그램의 유용성을 검증하였다. 본 연구에서 개발된 격자생성 프로그램은 Navier-Stokes 방정식에 의한 터보기계 익렬 내부의 비정상 3차원 압축성 점성 유동 해석의 전처리 과정으로 사용할 수 있다.

후 기

이 논문은 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] Soni, B.K., "Grid Short Course : Practical Numerical Grid Generation", POSTECH, Pohang, Korea, 1994
- [2] Shoemaker, J. and Hah, C., "BGRID: Interactive Three-Dimensional Turbomachinery Grid Generation System with Application", AIAA 93-0430, 1993
- [3] 정희택, "3차원 터빈 익렬 유동해석을 위한 계산 격자점 형성법", 한국항공우주학회지, 24권, 1호, pp. 64~72, 1996
- [4] 정희택, "터보기계 익렬유동해석을 위한 다중블록 격자 형성법", 한국전산유체공학회지, 1권, 1호, pp. 19~25, 1996
- [5] Wright Jr, R. and Sweet, M., OpenGL Superbible, WAITE GROUP PRESS, 1998
- [6] Strazisar, A., et. al., "Laser Anemometer Measurement in a Transonic Axial-Flow Fan Rotor", NASA TP-2879, 1989
- [7] Choi, S. H. , "Numerical Analysis of Steady/

- Unsteady Compressible Flow Fields using Finite Volume TVD Scheme”, Ph. D. Dissertation, Pohang University of Science and Technology, 1994
- [8] Baldwin, B.S. and Lomax, H., “Thin-Layer Approximation and Algebraic Method for Separated Turbulent Flows,” AIAA Paper 78~257, 1978
- [9] 오군섭 외 42인, “복합 열병합 발전 플랜트의 국산화 설계 및 제작 기술 개발 (I)”, 과학기초 특정연구, 한국기계연구원, UCN019-127. M, 1994
- [10] FLUENT User Manual(Release 4.4), Fluent Inc., 1996
- [11] 오군섭 외, “터보기계 설계 기술 개발에 관한 연구”, 한국기계연구원 보고서, UCN031-521. M, 1996
- [12] Kim, H., et. al., “Numerical Analysis of the Two-Dimensional Flow through a Stage of an Axial Compressor”, 5th Asian Int. Conf. on Fluid Machinery, pp. 725-731, 1997