

# 축류압축기의 공력설계를 위한 대화형 계산격자점 생성 프로그램 개발

정희택\*

## Interactive System of Computational Grid Generation for Aerodynamic Design of Axial Flow Compressors

Hee-Taeg Chung\*

*Key Words: Grid Generation(격자 생성), Blade(블레이드), Turbomachinery(터보기계), Multi-block(다중블록), Algebraic Method(대수기법), Interactive Mode(대화형), Axial Flow Compressor(축류압축기)*

### ABSTRACT

An interactive mode of grid generation system has been developed for a Navier-Stokes design procedure of axial flow compressors. The present grid generator adopts the multiblock H-grid structure, which simplifies the creation of computational grids about complex turbomachinery geometries and facilitate the manipulation of multiple grid blocks for multirow flow fields. The numerical algorithm adopts the combination of the algebraic and elliptic method to create the internal grids efficiently and quickly. The system consists of four separated modules, which are linked together with a common graphical user interface. The system input is made of the results of the preliminary design. The final grids generated from each module of the system are used as the preprocessor for the performance prediction of the two-or three-dimensional flow simulation inside the blade passage. Application to the blade design of the LP compressor was demonstrated to be very reliable and practical in support of design activities. This customized system are coupled strongly with the design procedure of the turbomachinery cascades using the Navier-Stokes technique.

### 1. 서론

최근의 전산기 계산 능력인 기억용량과 처리 속도가 급속히 향상되고, 수치기법이 고도화됨에 따라, 예전에 실험과 경험에 의존했던 가스터빈

엔진 내부의 복잡한 유동장 해석은 전산기를 통한 이론적 예측이 어느 정도 가능하게 되었다.

유선면상의 익렬 내부의 2차원 압축성 점성유동장을 정확히 예측함으로써 기존의 익렬 풍동 실험을 대체할 수 있고, 비정상 3차원 Navier-Stokes 방정식의 수치해를 구하는 기법이 발달함에 따라 실제 성능시험(rig-test) 전에 엔진의 공

\* 경상대학교 기계공학과 (항공기부품기술연구센터)

력 성능 예측을 할 수 있어서 시험에 의한 시행착오의 회수를 줄이고, 비용과 시간면에서 설계의 효율을 급격히 증가할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

가스터빈 엔진 설계에 유동해석 기법 적용이 활발하고, 관련된 전용 해석 코드에 많은 관심과 연구가 진행됨에 따라, 터보기계 익렬 유동 전용 격자 생성 시스템이 개발되어, 유동해석 코드와 연결하여서 사용하고 있다. Soni와 Shih<sup>(3)</sup>는 기존의 범용코드를 터보기계 전용으로 수정하였고, Shoemaker와 Hah<sup>(4)</sup>는 자체 개발한 익렬유동해석 코드에 적합한 구조의 복합형 H격자 생성 코드를 개발하였다. NASA에서 개발된 IGB Grid<sup>(5)</sup>는 H, O, C 등 여러 유형의 격자계에 적용할 수 있다. 최근에는, 국내에서도 터빈 내부의 3차원 점성 익렬 유동 해석을 위한 H-형 계산격자점 생성 코드<sup>(6)</sup>가 개발되었다. 그러나, 기존의 연구 결과는 터보기계 익렬 유동해석과 관련된 것이 대부분이고, 공력설계 과정과 연관된 연구는 아직 시도되지 않고 있다.

축류압축기의 공력 설계는 간단한 경험식과 기존 데이터베이스에 의한 설계점 조건 및 주요형상을 결정하는 설계 과정(design process)과 설계점 및 탈설계점 등 여러 운전조건에서의 엔진 성능을 예측하는 과정(analysis process)으로 나눌 수 있다. Navier-Stokes 기법으로 공력성능을 예측하기 위해서는 설계 데이터를 유동장 시뮬레이션에 맞게 재구성하고, 예상되는 유동 특성에 적합하도록 계산격자점을 생성하여야 한다. 이러한 전처리 시스템은 설계 과정과 성능 예측 과정을 연결시켜 주므로, 유동 해석 결과의 정확성 뿐만 아니라, 설계 과정의 효율성에 중요한 영향을 준다.

본 연구의 목적은 축류압축기의 Navier-Stokes 설계를 위한 전용 전처리 전산시스템을 개발하는 것이다. 이를 위하여 압축기의 공력특성 예측 과정으로 사용되는 3차원 점성 유동해석기법에 적합한 계산격자점 생성 알고리즘을 개발하고, 이를 설계과정에 연결할 수 있도록 전산시스템화 하였다. 기존의 가스터빈 엔진의 압축기부 설계

과정에 적용하여 기법의 타당성과 효용성을 검증하였다.

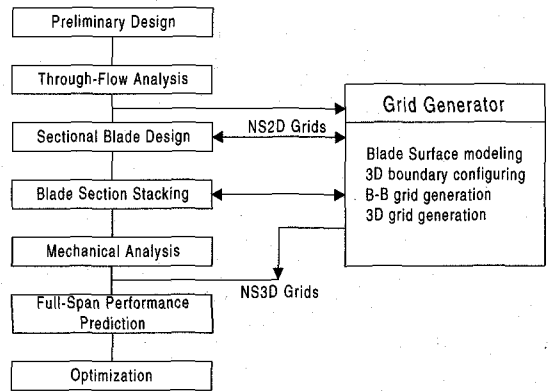


Fig. 1 Application of grid generation system to Navier-Stokes design procedure of axial compressors

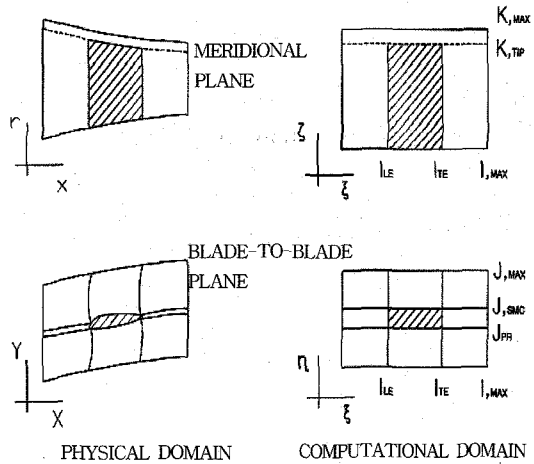


Fig. 2 Multi-block H-grid structure for axial-flow turbomachines

## 2. 수치 기법

터보기계의 공력설계는, 주어진 제약조건 및 운용 조건하의 요구사항들을 만족하는 최적의 형상을 결정하는 것으로, 익렬 내부의 유동 해석이 필수적이다. Fig. 1은 전산기를 이용한 축류압축기의 공력설계 과정과 격자생성 시스템의 관계를

표시한 것이다. 설계 과정은 1) 설계 제한 및 준3차원 해석법에 의한 기본 설계 과정, 2) 각 설계점 (blade-to-blade plane; B-B면)에서의 최적 익형 형상 결정, 3) 응력과 진동을 고려한 3차원 익형 중첩, 4) 벽면을 고려한 3차원 익형의 공력 특성 해석으로 나누어진다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 블레이드의 기하학적인 형상과 내부유동장 특성에 적합한 다단 블록 H-형 격자구조를 채택하였다.<sup>(7)</sup> 계산격자 생성과정은, 블레이드의 형상 결정 및 3차원 모델링, 기본 유로 형상과 공력 조건을 이용한 3차원 경계 형상화 및 경계 격자점 분포, 각 단면에서의 2차원 내부격자점 생성 및 span방향의 3차원 격자의 재구성 등 4단계로 구성된다. 따라서, 각 모듈의 결과는, 2차원 최적 블레이드 형상 설계시 공력 특성 해석의 일부인 B-B면 해석 전처리 시스템, 블레이드의 3차원 중첩과 형상 모델링 및 3차원 익형 유동 해석을 위한 전처리 시스템으로 사용된다. 축류형 터보기계의 Navier-Stokes 설계를 위한 계산격자점 생성 기법을 설명하면 다음과 같다.

## 2.1. 블레이드의 형상 모델링

평균반경에서의 1차원 해석으로 기본 유로 형상이 결정되고, 익형 유선면에서의 준3차원 유동 해석법에 의해, 입출구의 유동각과 유속이 결정되면, 블레이드의 형상을 설계하게 된다.

축류압축기 익형에는 미국의 NACA-65와 영국의 C-계열이 아음속에 쓰이고, 그 외에 천음속용으로 DCA (Double Circular Arc), 확산제어익형(Control Diffusion Airfoil ; CDA) 등이 사용되고 있다. NACA-65 계열에 관한 실험 데이터와 경험식이 널리 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 이를 기본형상으로 채택하였다.

주어진 단면(blade-to-blade plane)에서 설계점과 예상 운전 조건을 만족하는 최적의 2차원 익형 형상을 결정하고, 응력을 고려한 중첩선을 따라 블레이드 형상을 중첩하면 최종의 3차원 익형

설계가 종료된다.

각 단면에서 주어진 형상정보의 좌표값은 그 간격이 불균일하고, 정보의 일관성이 없어, 3차원 곡면 형상을 형성하기가 어려운 경우가 많다. 형상모델링 곡선식을 이용하여 각 단면의 형상정보를 재배치하고, 일정 분포함수값을 가지는 데이터끼리 스패(span) 방향으로 모델링하면, 손쉽고, 유용한 곡면을 얻을 수 있다. 재배치에 사용되는 분포함수는, 유동특성을 고려하면 블레이드면의 격자 형성에 유리하다. 예를 들어, 유동특성의 변화가 심하고, 곡률변화가 심한 블레이드의 선단 및 끝단은 밀집시키고, 그 외는 균일 간격을 취하면, 분포함수는 다음과 같은 형태를 가진다.

$$S_L \cdot F_L(i) \quad (i=1, \dots, i_L)$$

$$S(i) = S_L + F_C(i) \quad (i=i_L, \dots, i_T) \quad (1)$$

$$1 - S_T \cdot F_L(i_N - i) \quad (i=i_T, \dots, i_N)$$

여기서,

$$F_L(i) = \frac{e^{a i} - e^a}{e^{a i_N} - e^a}, \quad F_C(i) = \frac{1 - S_L - S_T}{i_T - i_L} (i - i_L)$$

일정한 분포함수값에서의 각 단면별 형상정보를 사용하여, 적당한 대수적 보간법으로 표현하면 3차원 곡면 형상 모델링이 완료된다.

## 2.2. 경계격자점 형성

3차원 익형 유동장은 익형 입구에서의 유입류 조건, 블레이드 표면과 허브/팁면의 벽면 조건, 출구에서의 유출류 조건, 주기조건의 4가지 경계조건을 가진다. 경계면의 형상과 격자 분포에 따라 내부 격자 구조가 결정될 뿐만 아니라, 유동해의 결과에도 큰 영향을 미친다.

블레이드의 형상과 span방향의 입출구 유동각을 이용하여, 경계 격자 기준점의 위치를 결정하

면, 3차원 경계 격자 구조를 형상화시킬 수 있다. 평균반경의 익형 길이(C, M)을 특성길이로, 유입구와 유출구의 위치(Xin, Xout)를 고정시킨다. Span방향의 격자분포함수는, 허브와 팁의 경계 점성 유동장을 고려하여 분포시킨다.

기본유선면은 2차원 내부 격자점이 생성되는 면(B-B면)을 지칭한다. 좌표변환식을 이용하여, 각 기본유선면에서의 경계좌표값을 구한다. 기본유선면의 갯수는 블레이드의 3차원 형상변화와 유로 형상에 좌우된다. 2차원 익형의 경우 2개 (허브 및 팁면)이고, span방향으로 형상의 변화가 심한 경우는 4~10개 정도의 기본유선면이 필요하다.

### 2.3. B-B면에서의 내부격자점 형성

기본 유선면에서의 2차원 내부 격자점은 대수 기법과 미분방정식법을 병행하면 빠른시간에 효율적으로 생성할 수 있다. 본 연구에서는, 단위블록내에는 transfinite법을 사용하여 격자점을 형성하고, Poisson방정식법을 이용하여 블록간의 격자점간의 완만성을 개선하였다.<sup>(7)</sup>

다단 블록 격자계 내부의 각각의 블록은 형상이 단순하므로, 간단한 대수식으로도 완만성과 수직성, 격자 조밀성 등을 만족하는 격자를 생성할 수 있다. 경계면의 격자점을 이용하여, 선형 transfinite 내삽법으로 각 블록의 내부 격자점을 손쉽게, 빠른 시간에 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

각 블록 간에는 상관관계가 없으므로, 블록경계면의 격자의 완만성이 보장되지 않는다. Poisson방정식을 이용한 GRAPE 알고리즘<sup>(9)</sup>과 같은 미분방정식 기법을 적용하면 이 문제를 해결 할 수 있다.

난류유동장의 경우 표면격자가 더욱 밀집되어야 한다. 예를 들어 Baldwin-Lomax<sup>(10)</sup>와 같은 대수 모델을 사용할 경우,  $y^+ = 1$ 로, 블레이드 표면의 수직 격자간격은  $\Delta S_\eta = 1.0 \cdot 10^{-4}$ 을 유지하여야 한다. 이러한 경우에는 대수식을 이용한 grid-imbedding기법<sup>(6)</sup>을 이용하여 경계층 격자를 재구성하면 격자형성 시간을 줄이고, 안정

된 격자계를 구할 수 있다.

### 2.4. 3차원 격자 생성

기본유선면에서 생성된 격자점을 이용하여, 보간법으로 3차원 내부 격자점을 만든다. 2차원면(B-B면)에서 구한 격자점은 다음과 같이 좌표변환식을 이용하여 직교 좌표계로 전환시킨다.

유선면상의 점을 (X,Y)좌표로 표시하고, 유선면의 형상이  $r=f(x)$  로 주어지면,

$$X = x, \quad Y = r\theta = f(x)\theta \quad (2)$$

축좌표계와 직교좌표계의 관계식을 이용하면,

$$\begin{aligned} P(x, y, z) &= x \hat{i}_x + y \hat{i}_y + z \hat{i}_z \\ &= x \hat{i}_x + r \sin \theta \hat{i}_y + r \cos \theta \hat{i}_z \\ &= X \hat{i}_x + f(x) \sin\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_y + f(x) \cos\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_z \\ &= P(X, Y, f(x)) \end{aligned} \quad (3)$$

로 좌표변환된다. 즉, 유선면의 2차원 격자점은

$$P [X(I, J), Y(I, J); m] = P(x, y, z) = P(i, j, K) \quad (4)$$

으로 직교좌표값을 갖는다.

3차원으로 중첩하여 보간하는 방법은 블레이드 형상 모델링의 3차원 중첩식과 유사한 대수내삽기법을 사용하면 된다. 즉, 임의의 2차원 계산영역(I, J)에서 span 방향의 4점, P1= P(i, j, K-1), P2= P(i, j, K), P3= P(i, j, K+1), P4= P(i, j, K+2)를 이용하여, 구간  $K < k < K+1$  상의 임의 점 P(i, j, k)는,

$$P(i, j, k) = P(\zeta) = F_{cl}[P_1, P_2, P_3, P_4; \zeta] \quad (5)$$

여기서,

$$\zeta = -1/3 + 2/3(k-K) \quad ; \quad \zeta \in [0, 1]$$

Span방향의  $k$  또는  $l$  는 벽면의 점성 경계층을 고려한 분포함수를 취한다.

### 3. 프로그램 운영 체계

본 연구에서 개발된 축류압축기 전용 계산격자점 생성 전산시스템은 Fig. 3과 같이 4개의 주프로그램으로 구성되고, 각 결과는 7개의 data file로 입·출력된다.

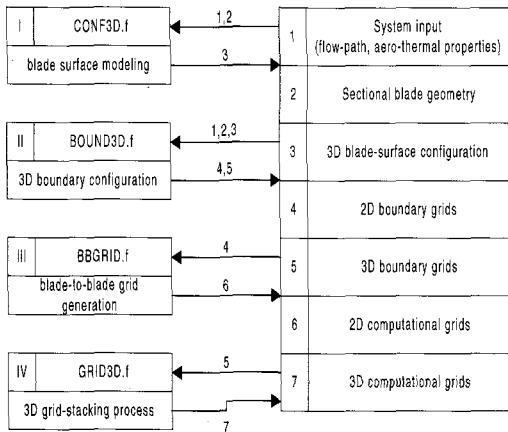


Fig. 3 Computing system of the present grid generator

시스템의 입력 데이터는, 기본 설계와 준3차원 해석 결과에 의한 주 유로형상, 각 설계점의 열유동조건 및 단면의 블레이드 형상 정보다.

이 조건을 이용하여, 2절에서 언급된 수치알고리즘으로, 단계별로 계산이 수행된다. 즉, 블레이드 형상 정보를 이용한 3차원 형상 모델링 (CONF3D.f), 기본 유로형상과 공력조건을 이용한 다중블록 H-형의 3차원 경계 형상화 및 경계격자점 분포 (BOUND3D.f), 각 단면에서의 2차원 내부격자점 형성 (BBGRID.f) 및 span방향의 3차원 격자의 재구성 (GRID3D.f)의 순서로 계산격자 생성 작업이 진행된다.

각 모듈의 출력 data file은 그 다음 모듈의 기능 수행시 입력조건으로 사용된다. 최종 결과는,

단면 블레이드 형상설계용 2차원 계산격자점과 최종 블레이드의 형상 최적화를 위한 3차원 익렬 유동해석 계산격자점이 생성된다. 부수적으로, 블레이드의 3차원 형상 모델링 결과는 구조설계 및 해석을 위한 전처리데이터로 제공될 수 있다.

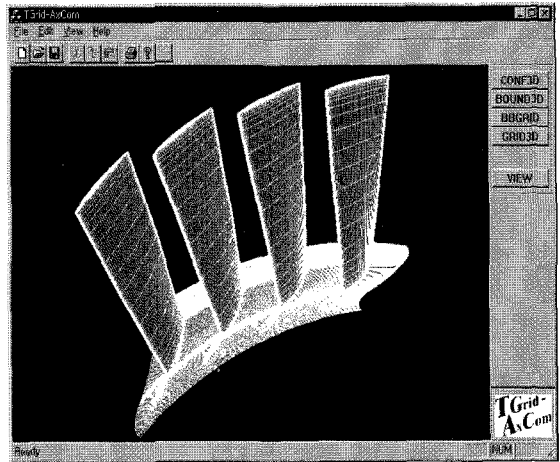


Fig. 4 Graphical user interface of the present grid generator

본 전산시스템은 사용자의 편의를 위해서 Fig. 4와 같이 대화형 모드(Graphic User Interface; GUI)로 구축되어 있다. 각 단계별로 생성된 결과는, 3차원 그래픽 범용 소프트웨어인 OpenGL을 사용하여 전산 가시화하였다. 각 모듈의 입력변수를 조절하여 원하는 형태의 격자가 생성되도록 과정을 반복하면 된다. 사용환경은 MS-Windows NT이고, Pentium 133 MHz이상의 퍼스널 컴퓨터에서 운용될 수 있다.

### 4. 적용

본 연구에서 개발된 계산격자점 생성 시스템을 축류압축기의 설계 과정에 응용하였다. 적용된 모델은 산업용 가스터빈의 저압 압축기인데, 회전수는 3600 rpm이고, 유량은 208.2 kg/s, 압력비는 4.07이다.<sup>(11)</sup> 전단은 입구안내익, 6단의 동익

및 정의으로 구성되어 있다. 이 중 1단 동익의 블레이드 형상 설계 및 공력해석 전처리과정을 수행하였다.

설계점에서의 준 3차원 유동해석에 의한 기본 설계 결과로부터 Fig. 5와 같은 블레이드 공력설계를 위한 입력데이터가 얻어진다. Fig. 5(a)는 1단 동익 주위의 유로 형상과 유선면을 나타낸다. 입사각과 편차각에 관한 경험식은 Lieblein의 결과<sup>(12)</sup>를 이용하였다. 이 방법을 적용하면 Fig. 5(b)와 같이 단면별 블레이드 입출구의 날개각이 구해진다.

본 연구에서는 블레이드 형상은 Kovach<sup>(13)</sup> 등이 제안한 변형된 NACA-65계열의 익형이다. 블레이드는 38개이고, 평균반경에서의 중횡비(aspect ratio ;  $AR = h/c$ )는 2.0으로 두었다. 피치-코드비( $s/c$ )를 허브에서 0.8, 팁에서 1.1로 두면 각 유선면에서의 블레이드 길이가 결정된다. 이 결과를 블레이드 형상 모델링 모듈(CONF3D.f)에서 형상화시키면, 각 단면과 3차원 형상의 블레이드 설계 결과가 얻어진다. Fig. 6에는 1단 동익의 블레이드 형상과 유선면에서의 익렬형상과 설계 유동각을 표시한 것이다. 반경방향으로 블레이드 형상과 유동각 변화가 크음을 알 수 있다.

블레이드의 형상이 결정되면, 설계점과 탈 설계점에서의 블레이드 성능을 예측하여야 한다.

Navier-Stokes 기법을 이용하면, 기존의 실험에 의한 경험식의 부정확성을 개선하고, 익렬 내부의 유동 특성을 상세히 규명할 수 있어 설계변수에 의한 공력 특성을 잘 파악할 수 있다. 유선의 2차원 점성 유동해석은 블레이드 공력 설계의 기본이 된다. 저압단부에서는 반경방향의 유동 조건 및 블레이드 형상 변화가 크므로, 허브/팁 벽면 부근의 경계층 유동 특성, 누설 손실 메카니즘을 예측하여야 한다. 앞에서 설계된 블레이드의 형상 정보(Fig. 6)와, 기본설계에 의한 유로 형상(Fig. 5), 입출구 유동각 분포가 익렬 유동해석의 계산격자점 형성을 위한 입력 조건이 된다.

경계면의 형상과 격자 분포 등은 유동 해석 결과에 큰 영향을 준다. 3차원 익렬 내부의 유동장은 익형의 표면 뿐만 아니라 익형의 선단/끝단, 허브 및 팁 부근에서 점성경계층 유동장이 형성되어 유동변수의 변화가 크다. Fig. 7은 이를 고려한 격자 형태를 보여준다. 유입/출구의 위치는 평균반경의 축방향 익형 길이를 기준으로  $X/Cax = -0.8, +0.8$  지점에 두었다. 자오면의 격자 분포(Fig. 7)와 유선면의 블레이드 형상(Fig. 6)은 3차원 익렬 유동해석의 계산 격자 형태를 좌우한다.

Fig. 8은 2.3절의 다중블록 H-구조의 수치기법으로 생성된 평균반경 (50%)에서의 2차원 내부 격자이다. 블레이드 표면 격자의 수직성이 양호

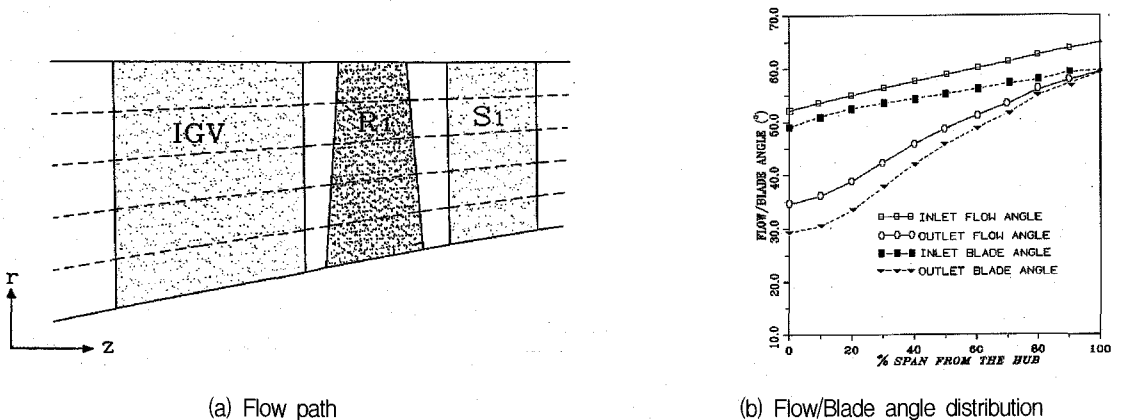


Fig. 5 System input for the grids generation of 1st rotor of LP compressors

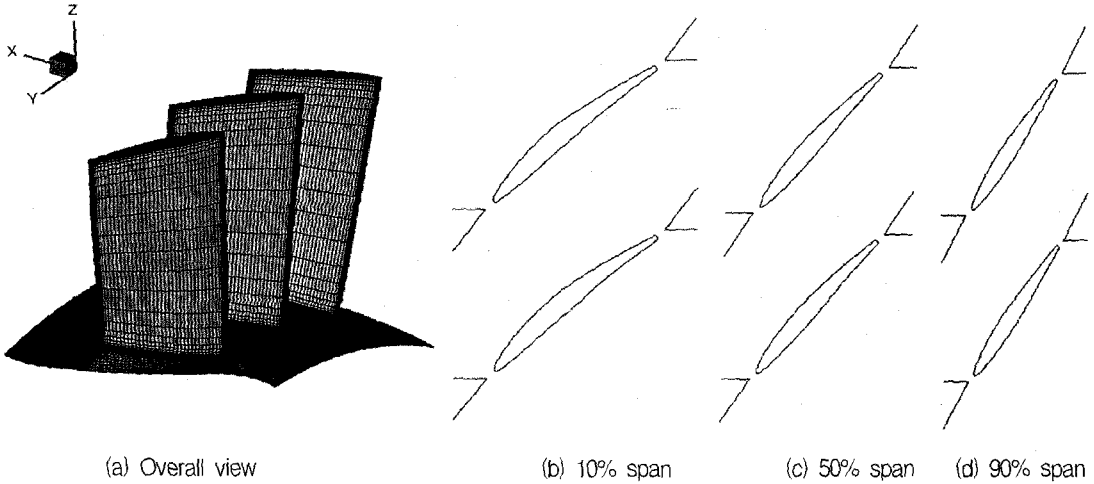


Fig. 6 Blade profiles of 1st rotor

하고, 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 미분변화율이 연속적이지 못하면 수치해가 발산하는 경우도 있다. 본 연구 결과는 블레이드 선단이나 끝단의 격자 상태가 모두 만족할 만하다.

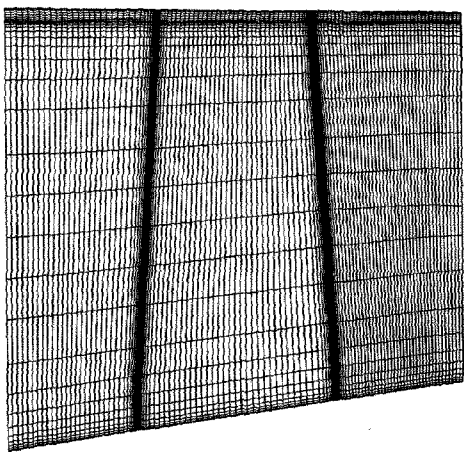


Fig. 7 Computational grids in the meridional plane

기본 유선면에서 생성된 2차원 격자점을 식 (5)의 선형 보간법에 적용하면, 임의의 유선면 (span 방향)의 내부 격자점을 구할 수 있다. 반경방향으로 블레이드의 형상과 유동각 변화가 크므로, 2차원 격자가 형성되는 기본 유선면은 11개로 두었다. 식 (2)를 이용하여 B-B면의 좌표계 (X, Y)를 직교좌표계(x, y, z)로 변환시킨다. 격자수는 125(유동,  $\xi$ ) $\times$ 25(피치,  $\eta$ ) $\times$ 25(반경,  $\zeta$ )로 두고, 주어진 입출구의 유동각을 이용하면 3차원 익형 유동해석을 위한 H-형의 경계 격자점 분포가 얻어진다. 최종 얻어진 3차원 익형 유동장의 계산격자는 Fig. 9와 같다. 본 연구에서 채택하고 있는 다중블록 격자구조는 동익과 같이 턱부근의 누설유동장 해석에 유리하다. Fig. 9는 이 부근의 격자 상태를 확대하여 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 B-B면의 격자 상태가 양호하고, 반경방향의 격자 분포가 벽면 부근에 밀집되어 있다. 또한, 2차원 격자의 중첩이 대수적으로 형성되기 때문에 격자의 연속성이 보장된다. 따라서, 본 방법으로 생성된 계산 격자점은 압축기 내부의 3차원 압축성 점성 유동 해석에 적합하다고 사료된다.

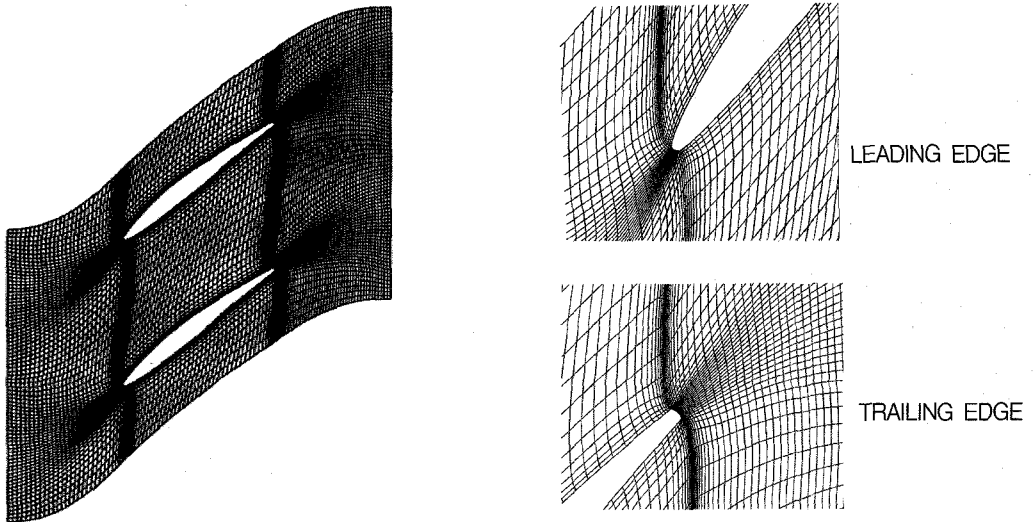


Fig. 8 Computational grids for 2D cascade flow simulations at 50% span

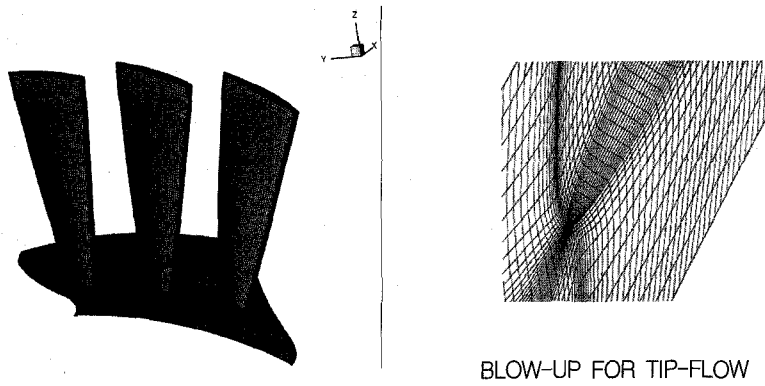


Fig. 9 Computational grids for 3D cascade flow simulations

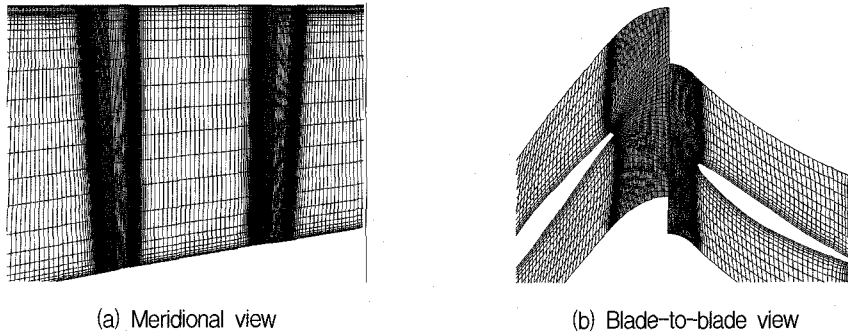


Fig. 10 Computational grids for rotor-stator interaction flow simulations



본 프로그램은 다단으로 구성된 압축기의 다익렐(multi-row) 유동장에도 적용할 수 있다. 2절의 기법을 각 단별로 반복 적용하여 그 결과를 유로를 따라 블록간 중첩하면 된다. 1단의 동·정익 간섭 유동장에 적용한 결과가 Fig. 10에 도시되어 있다. 동익부는 블레이드 팁과 엔진 케이싱간의 누설 유동장을 고려하였고, 동익과 정익 등 간섭 유동장이 생기는 입출구부는 sliding mesh법<sup>(11)</sup>을 적용할 수 있도록 격자점이 분포되어 있음을 알 수 있다. 평균반경에서의 2차원 내부 격자를 주 유로방향으로 중첩시키면 Fig. 10(b)와 같은 형상이 된다. 각 단마다 사용된 격자수는 같다. 인접면(interfacing surface) 부근은 정동의 간섭 유동이 생성되고, 각 단별로 입출구 유동 조건이 부과되는 곳이므로, 채택된 격자 구조와 생성된 계산격자점의 상태에 따라 유동 해석 결과에 큰 영향을 미친다. 본 연구가 채택하는 알고리즘은 유동해가 채택하는 인접면의 경계 조건 처리법에 따라 다른 격자 구조 시스템에도 쉽게 변형할 수 있는 장점이 있다.

## 5. 결 론

축류압축기의 Navier-Stokes설계를 위한 계산 격자점 생성 프로그램을 개발하고 이를 공력설계 과정에 적용하였다. NACA-65계열의 익형을 기본으로 하여, 산업용 가스터빈 저단 동익의 블레이드 형상을 결정하였고, Navier-Stokes기법에 의한 공력해석을 위해 2차원 및 3차원 계산격자점을 형성하였다. 계산격자점 생성 시스템은 기본설계의 준 3차원 해석 결과와 유로 형상 데이터를 입력 조건으로 하고, 기능별로 독립된 4개의 모듈로 운영된다. 시스템의 효율적인 사용을 위하여 GUI환경을 구축하여 사용자의 편리를 도모하였다.

본 연구에서 채택한 계산격자점 생성 알고리즘은 가스터빈 엔진의 압축부나 터빈부와 같은 복잡한 기하학적 구조와 유동장 특성에 순응하고, 공력설계 과정과 직결되어 있다. 연구결과로 얻

어진 전산프로그램은 대화형의 운영체계를 채택하므로, 축류압축기와 같은 압축성 터보기계의 전산설계 시스템으로 사용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술재단 지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- (1) Sanger, N.L., 1994, "Design of a Low Aspect Ratio Transonic Compressor Stage Using CFD Technique," ASME Paper 94-GT-236
- (2) Coons, L.L., 1994, "Large Commercial Engine Turbomachinery Design Using a Fully Viscous Navier-Stokes Code," Collq. on Turbo-machinery-1994, Seoul, Korea
- (3) Soni, B and Shih, M., 1991, "TIGER: Turbo-machinery Interactive Grid Generation," Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Grid Generation
- (4) Shoemaker, J. and Hah, C., 1993, "BGRIDI: Interactive Three-Dimensional Turbomachinery Grid Generation System with Application," AIAA 93-0430
- (5) Beach, T.A. and Hoffman, G., 1990, "IGB Grid: User's Manual," NASA CR-189104
- (6) 정희택, 1996, "3차원 터빈 익렬유동해석을 위한 격자형성법," 한국항공우주학회지, 24권, 1호, pp.64-72
- (7) 정희택, 1996, "터보기계 익렬유동해석을 위한 다중블록 격자 형성법," 한국전산유체공학회지, 1권, 1호, pp.19-25
- (8) Soni, B., 1994, Grid Short Course, POSTECH, Pohang, Korea

- (9) Steger, J. and Sorenson, R., 1979, "Automatic Mesh Point Clustering Near a Boundary in Grid Generation with Elliptic Differential Equations," J. Comput. Phys., Vol 33, pp.405-410
- (10) Baldwin, B.S. and Lomax, H., 1978, "Thin-Layer Approximation and Algebraic Method for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-257.
- (11) 오 군섭 외 42인, 1994, "복합 열병합 발전 플랜트의 국산화 설계 및 제작 기술 개발 (I)", 과기처 특정연구, 한국기계연구원, UCN019-127.M
- (12) Lieblein, S., 1960, "Incidence and Deviation Angle Correlations for Compressor Cascades," J. Basic Eng. (trans. ASME), Vol.82, pp.575-587
- (13) Kovach, K. and Sandercock, D., 1961, "Aerodynamic Design and Performance of Five Stage Transonic Axial Flow Compressor," J. Eng. Power (trans. ASME), Vol.83, pp.303-321
- (14) Rai, M., 1987, "Unsteady Three-Dimensional Navier-Stokes Simulations of Turbine Rotor-Stator Interactions," AIAA Paper 87-2058.