

축류압축기의 Navier-Stokes설계를 위한 계산격자점 생성기법 연구

정 희택^{*1}

Computational Grid Generation for Navier-Stokes Design of Axial-Flow Compressors

H. T. Chung

A multiblock grid generation has been applied to a Navier-Stokes design procedure of a axial-flow compressors. A multiblock structure simplifies the creation of structured H-grids about complex turbomachinery geometries and facilitate the creation of a grid in the tip flow region. The numerical algorithm adopts the combination of the algebraic and elliptic method to create the internal grids efficiently and quickly. The input module is made of the results of the preliminary design, i.e., flow-path, aerodynamic conditions along the spanwise direction, and the blade profile data. The final grids generated from each module of the system are used as the preprocessor for the performance prediction of the sectional blade, the blade-stacking process and the 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.

Key Words: 격자 형성(Grid Generation), 블레이드(Blade), 터보기계(Turbomachinery), 다중블록(Multiblock), 대수기법(Algebraic Method)

1. 서 론

최근의 전산기 계산 능력-기억용량과 처리 속도-이 급속히 향상되고, 수치기법이 고도화됨에 따라, 예전에 실험과 경험에 의존했던 가스터빈 엔진 내부의 복잡한 유동장 해석은 전산기를 통한 이론적 예측이 어느정도 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 rig-test 전에 엔진의 공력 성능 예측을

할 수 있어서 시험에 의한 시행착오의 회수를 줄이고, 비용과 시간면에서 설계의 효율을 급격히 증가할 수 있다.[1-2]

축류압축기의 공력 설계는 간단한 경험식과 기존 데이터베이스에 의한 설계점 조건 및 주요 형상을 결정하는 설계 과정(design process)과 설계점 및 탈설계점 등 여러 운전조건에서의 엔진 성능을 예측하는 과정(analysis process)으로 나눌 수 있다. Navier-Stokes기법으로 엔진의 성능을 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 결과

^{*1} 정희원, 경성대학교 기계공학과 (항공기부품기술연구센터)

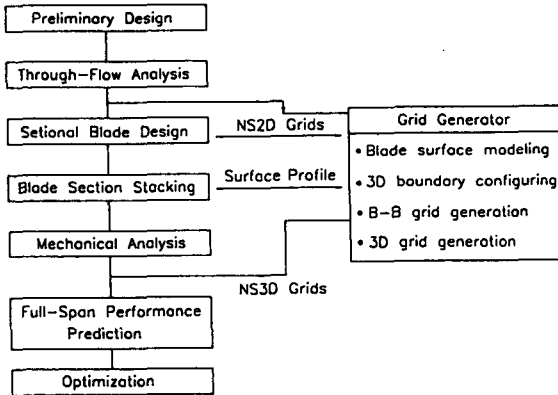


Fig.1 Navier-Stokes design procedure of axial flow compressors

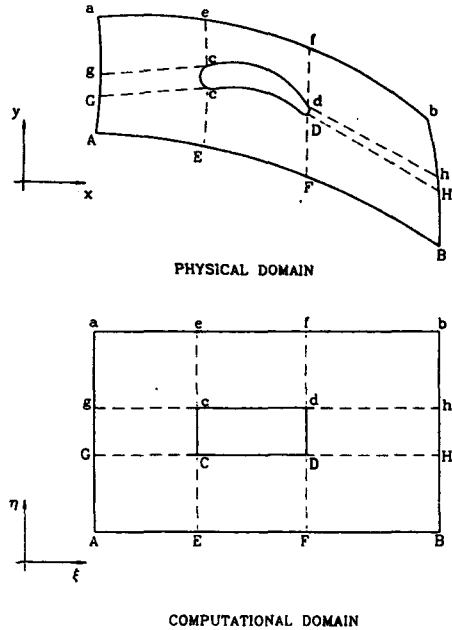


Fig.2 Grid structure on B-B plane

의 정확성 뿐만 아니라, 설계 과정의 효율성에 중요한 영향을 준다.

본 연구에서는 다단으로 구성된 압축성 터보기계의 Navier-Stokes 해석을 위한 계산격자점 생성 기법을 개발하고, 이를 축류압축기의 공력 설계 과정에 적용하였다. 이를 위하여 압축기의 성능 특성에 적합한 다중 블록 격자 구조 알고리즘과 유로 및 블레이드의 표면 형상처리 기법을 연구하고, 유동장 특성에 순응하는 내부격자점 생성프로그램을 개발하였다. 기존의 가스터빈 엔진의 압축기부 설계 과정에 적용하여 기법의 타당성과 효율성을 검증하였다.

2. 수치 기법

터보기계 익형의 공력설계는, 주어진 제약조건 및 운용 조건하의 요구사항들을 만족하는 최적의 형상을 결정하는 것으로, 익형 내부의 유동 해석이 필수적이다. Figure 1은, 전산기를 이용한 블레이드의 공력 형상 설계 과정과 격자형성

시스템의 관계를 표시한 것이다. 설계 과정은 1) 설계 제한 및 준3차원 해석법에 의한 기본 설계 과정, 2) 각 설계점 (B-B 면)에서의 최적 익형 형상 결정, 3) 용력과 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.[3] 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 일부- 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, 익렬 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), 확산제어 익형(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, 용력을 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 각단면의 형상정보를 재배치하고, 일정 분포함수값을 가지는 데이터끼리 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, 그외는 균일 간격을 취한다. 일정한 분포함수값에서의 각단면별 형상정보를 사용하여, 적당한 대수적 보간법으로 표현하면 3차원 곡면 형상 모델링이 완료된다.

2.2 경계격자점 형성

3차원 익렬 유동장은 익렬 입구에서의 유입류 조건, 블레이드 표면과 허브/팁면의 벽면 조건, 출구에서의 유출류 조건, 주기조건 의 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 결정하면, 3차원 경계 격자 구조를 형상화시킬 수 있다. 평균반경의 익형 길이(C_M)을 특성길이로,

유입구와 유출구의 위치(X_{in} , X_{out})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, span방향의 형상이 심한 경우는 4-10개 정도의 기본유선면이 필요하다.

2.3 B-B면에서의 내부격자점 형성

기본 유선면에서의 2차원 내부 격자점은 대수기법과 미분방정식법을 병행하면 빠른시간에 효율적으로 생성할 수 있다. 본연구에서는, 단위블록내에는 transfinite법을 사용하여 격자점을 형성하고, Poisson방정식법을 이용하여 블록간의 격자점간의 완만성을 개선하였다. [3]

다단블록 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 손쉽고, 빠른 시간에 구할 수 있다.

각 블록 간에는 상관관계가 없으므로, 블록경계면의 격자의 완만성이 보장되지 않는다. GRAPE 알고리즘과 같은 미분방정식 기법을 적용하면 이 문제를 해결 할 수 있다.

난류유동장의 경우 표면격자가 더욱 밀집되어야 한다. 예를 들어 Baldwin-Lomax와 같은 대수 모델을 사용할 경우, $y^+ = 1$ 로, 블레이드 표면의 수직 격자 간격은 $\Delta S_n = 1.0 \times 10^{-4}$ 을 유지하여야 한다. 이러한 경우에는 대수식을 이용한 grid-embedding 기법을 이용하여 경계층 격자를 재구성하면 격자형성 시간을 줄이고, 안정된 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,

$$X = x, \quad Y = r\theta = f(x)\theta \quad (1)$$

축좌표계와 직교좌표계의 관계식을 이용하면,

$$\begin{aligned} P(x, y, z) &= x \hat{i}_x + y \hat{i}_y + z \hat{i}_z \\ &= x \hat{i}_x + r \sin \theta \hat{i}_y + r \cos \theta \hat{i}_z \\ &= X \hat{i}_x + f(x) \sin\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_y + f(x) \cos\left(\frac{Y}{f(x)}\right) \hat{i}_z \\ &= P(X, Y, f(x)) \end{aligned} \quad (2)$$

로 좌표변환된다. 즉, 유선면의 2차원 격자점은

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

으로 직교좌표값을 갖는다.

3차원으로 중첩하여 보간하는 방법은 블레이드 형상 모델링의 3차원 중첩식-식(3)-과 유사한 대수내삽기법을 사용하면 된다. 즉, 임의의 2차원 계산영역(I,J)에서 span 방향의 4점, $P_1 = P(i,j,K-1)$, $P_2 = P(i,j,K)$, $P_3 = P(i,j,K+1)$, $P_4 = P(i,j,K+2)$ 를 이용하여, 구간 $K < k < K+1$ 상의 임의의 점 $P(i,j; k)$ 는,

$$P(i, j, k) = P(\zeta) = F_{CI}[P_1, P_2, P_3, P_4; \zeta] \quad (3)$$

여기서,

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

Span방향의 k 또는 ζ 는 벽면의 점성 경계층을 고려한 분포함수를 취한다.

3. 적용 결과

본 연구에서 개발된 격자형성 시스템을 축류 압축기의 설계 과정에 응용하였다. 적용된 모델은 산업용 가스터빈의 저압압축기인데, 회전수는 3600 rpm이고, 유량은 208.2 kg/s, 압력비는 4.07이다.[4] 전단은 입구안내익, 6단의 동익 및 정익으로 구성되어 있다. 이 중 1단 동익의 블레이드 형상 설계 및 공력해석 전처리과정을 수행하였다.

블레이드 설계를 위한 입력 데이터는 설계점에서의 준3차원 유동해석에 의한 기본설계 결과

에서 얻어진다. Figure 3는 1단 동익 주위의 유로 형상과 유선면을 나타낸다. 팁의 직경은 1.81 m로 일정하고, 허브입구경은 1.25 m, 출구경은 1.30 m 로, 허브의 유로경사각은 약 11.9° 이다. 설계점의 입구유동각은 허브에서 52.16° , 팁에서 64.984° 로 반경방향의 변화가 크다. 평균반경(50% span)에서의 유동굴절각은 약 10.09° 이다.

입사각과 편차각에 관한 경험식은 Lieblein과 Howell의 결과를 이용하였다.[5] 이 방법을 적용하면 블레이드 입출구의 날개각이 구해진다. 본 연구에서는 익형 형상은 Kovach 등이 제안한 변형된 NACA-65계열로, 코드길이 60%까지는 NACA-65 원형을 따르고, 그 이후는 날개 끝단까지 선형적으로 변화하도록 한 것이다. 날개 두께는 코드길이 0.4에서 최대 ($t/c=0.1$)이고, 캠버곡선은 단일 원호로 코드길이 0.5에서 최대 캠버를 가진다.[6] Figure 4에는 유선면에서의 익렬형상과 설계 유동각을 표시한 것이다. 반경방향으로 블레이드 형상과 유동각 변화가 큼을 알 수 있다. 블레이드는 38개이고, 평균반경에서의 중형비 (aspect ratio $AR = h/c$)를 2.0으로 두면 평균반경에서의 익형 길이는 13.56 cm 이다. 피치-코드비(s/c)를 허브에서 0.8, 팁에서 1.1로 두면 각유선면에서의 익형 길이가 결정된다.

블레이드의 형상이 결정되면, 설계점과 탈설계점에서의 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 유동 해석은 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.4)와, 기본설계에 의한 유로 형상(Fig.3), 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. Figure 5는 이를 고려한 격자 형태를 보여준다. 유입/출구의 위치는 평균방경의 축방향 익형 길이를 기준으로 $X/Cax = -0.8, +0.8$ 지점에 두었다. 자오면의 격자 분포(Fig.7)와 유선면의 블레이드 형상은 3차원 익형 유동해석의 계산 격자 형태를 좌우한다.

Figure 6은 2.3절의 다중블록 H-구조의 수치 기법으로 생성된 평균반경 (50%)에서의 2차원 내부 격자이다. 블레이드 표면 격자의 수직성이 양호하고, 주기경계면 부근에서 격자의 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

기본 유선면에서 생성된 2차원 격자점을 식 (3)의 선형 보간법에 적용하면, 임의의 유선면 (span 방향)의 내부 격자점을 구할 수 있다. 반경방향으로 익형의 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, ξ) \times 25(피치, η) \times 25(반경, ζ)로 두고, 주어진 입출구의 유동각을 이용하면 Fig.6과 같은 3차원 익형 유동해석을 위한 H-형의 경계 격자점 분포가 얻어진다. 최종 얻어진 3차원 익형 유동자의 계산격자는 Fig. 6과 같다. 허브와 선단면 부근은 익형 표면과 허브면의 경계층이 만나는 곳으로, 말발굽 오류가 발생하고, 통과와류의 발달이 시작되어 복잡한 3차원 유동 특성을 나타낸다. Figure 6(오른쪽)은 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 형성된 계산 격자는 터빈 익형 내부의 3차원 압축성 점성 유동 해석에 적합하다고 사

료된다.

4. 결 론

터보기계 익형 유동장 해석을 위한 다중블록 계산기법을 축류압축기의 공력설계 시스템에 적용하였다. NACA-65계열의 익형을 기본으로 하여, 산업용 가스터빈 저단 동익의 블레이드 형상을 결정하였고, Navier-Stokes기법에 의한 공력 해석을 위해 2차원 및 3차원 계산 격자점을 형성하였다. 수정된 설계전처리 시스템은 기본설계의 준3차원 해석 결과와 유로 형상 데이터를 입력 조건으로하고, 기능별로 독립된 4개의 모듈로 운영된다. 본 연구의 결과는 가스터빈엔진의 핵심 부품인 압축부, 터빈부의 엔진의 공력 설계 및 성능 예측에 전처리시스템으로 활용할 수 있다.

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 Turbomachinery-1994*, Seoul, Korea
- [3] 정 희택, 1996, "터보기계 익형유동해석을 위한 다중블록 격자 형성법", 한국전산유체공학회지, 1권, 1호, pp.19~25
- [4] 오 군섭 외 42인, 1994, "복합 열병합 발전플랜트의 국산화 설계 및 제작 기술 개발 (I)", 과학처 특정연구, 한국기계연구원, UCN019-127.M
- [5] Lieblein, S., 1960, "Incidence and Deviation Angle Correlations for Compressor Cascades", *J. Basic Eng. (trans. ASME)*, Vol.82
- [6] Kovach, K. and Sandercock, D., 1961, "Aerodynamic Design and Performance of Five Stage Transonic Axial Flow Compressor", *J. Eng. Power (trans. ASME)*, Vol.83