

< 論 文 >

터어보 回轉車 內의 3次元 流動의 數值計算

趙 江 來* · 方 寧 錫**

(1986年 7月 4日 接受)

Calculation of Three-Dimensional Flow in Turbo Impellers

Kang-Rae Cho and Young-Seouck Bang

Key Words; Three Dimensional Flow(3次元流動), Axial Flow Impeller(軸流回轉車), FEM Analysis(FEM 해석), B-B Flow(B-B 流動), Numerical Calculation(數值計算)

Abstract

A three-dimensional calculation is presented on the basis of Wu's theory of quasi-three-dimensional flow in turbo impellers. For the calculation of flow on the Blade-to-Blade stream surface, the finite element method is applied. In this work it is shown that the Kutta condition and the periodicity can be satisfied rationally by the technique of combining a basic through flow in the flow passage and a circulating flow around the blade. The results of numerical calculation are compared with those of the exact solution of the the Gostelow's straight cascade and of the experimental results of pressure distribution on the rotating blade surface. It is found that the numerical solutions are in good agreement with the theoretical solution and the experimental results.

기 호 설 명

A : 유한요소의 면적

B : 블록케이지 인자

b^* : 결합계수

C : 익현장

C_1 : 식 (8)로 정의되는 적분상수

C_p : 압력계수

E, F, G : 식 (19)의 계수

\vec{f} : 비축대칭 외력 벡터

h : 엔탈피

I : Rothalpy

k_{ij} : 요소 시스템 매트릭스

K : 전체 시스템 매트릭스

L_i : 요소 경계상에서의 플럭스벡터

m : 단위 깊이당 두 피치를 흐르는 질량유량

N : 날개수

N_i : 내삽함수

\vec{n} : 단위 법선벡터

p : 정 압

Q : 식 (12)로 정의된 함수

q : 열플럭스

R : 가스상수

R_i : 식 (25)로 정의되는 요소 벡터

R : 전체 시스템 벡터

r, ϕ, z : 원통좌표계

* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 연세대학교 대학원

- S : 엔트로피 또는 피치
- T : 정적 온도
- t : 시간
- U : 주속도
- \vec{u} : 내부에너지
- \vec{W} : 상대속도
- x : Fig. 6, 8, 9에서의 축방향
- \hat{x} : 익형방향
- α : 영 각
- Γ : 유한요소의 경계
- γ : 설치각
- ρ : 밀도
- ϕ : 유동함수
- $\vec{\Psi}$: 전체 해 벡터
- $\vec{\omega}$: 각속도 벡터

첨 자

- A, B, C, D, E, F : Fig. 2에서의 위치
- i, j, k, l, m, n : 후연을 둘러싼 요소번호
- in, i : 입구 상태량
- p : 압력면
- s : 부압면
- r, ϕ, z : 상태량의 각 방향성분
- st : 정적 상태량
- 1, 2 : 두가지 기본유동(1 : 기본통과유동, 2 : 순환유동)
- (e) : 임의의 요소

1. 序 論

터어보機械의 合理的인 設計와 性能豫測을 위해서는 內部流動을 정확히 예측할 필요가 있다. 터어보기계의 내부유동은 非定常 3次元 粘性 및 壓縮性 流動이며 이를 직접 계산하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 내부유동의 本質的인 부분에 주목하여 計算이 가능한 수준까지 터어보機械의 內部流動은 단순화되어야 한다. 3차원 회전차의 내부유동은 일반적으로 정상 비점성으로 단순화된다. 정상 비점성의 3차원 모델은 C.H.Wu가 제시한 準3次元 모델⁽¹⁾과 完全3次元 모델⁽²⁾로 구분된다. Wu의 모델은 정상 비점성의 3차원유동을 두개의 서로 교차하는 流動面, 즉 B-B(Blade-to-Blade)면과 H-S(Hub-to-Shroud)면으로 구분하여 각각의 유동을 2次元 問題로 대체한 것이며 유동의 解는 두 면의 해가 수렴할 때까지 반복계산함으로써 구해진다. 특히 B-B面 流動計算은 Kutta 조건 및 周期性條件을

만족시키는 방법과 여기에 따른 境界條件을 어떻게 정할 것인가에 그 성공 여부가 달려있다. 따라서 B-B 유동은 H-S 유동보다 훨씬 어려운 문제이며 이에 관한 연구가 계속되고 있다.

Adler와 Krimerman⁽³⁾은 날개 形狀을 잘 묘사할 수 있는 有限要素法을 이용하여 B-B 流動을 해석하였다. 그들은 流動의 周期性과 Kutta 條件을 동시에 만족시키기 위해 매 反復計算마다 停滯流線을 修正하는 방법을 택했다. 그러나 이 방법에는 정체유선을 수정하는데 일정한 方向設定이 어렵다는 단점이 있다⁽⁴⁾. 이러한 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 De Vries와 Norrie의 방법⁽⁵⁾을 수정·발전시킨 방법을 사용한다. De Vries와 Norrie들은 단독익 또는 임의의 형상의 물체를 지나는 理想流動에서 새개의 유동함수를 사용하여 Kutta 조건을 만족시킬 수 있음을 제시한 바 있다. 저자들은 단독익의 경우에 두개의 유동함수만으로도 성공적으로 해를 구할수 있음을 확인한 바 있다⁽⁶⁾. 이 두가지 流動函數는 물리적으로 주기성을 만족시킴으로써 정하는 通過流動과 Kutta 條件을 만족시키도록 정하는 循環流動으로 되어 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 준 3차원 유동에서 문제가 되는 B-B 유동만을 대상으로 하고 여기에 두개의 유동함수를 이용해서 數值計算한다. 이 방법의 정당성을 입증하기 위해 계산결과를 理論解⁽⁸⁾와 비교하고 또 실제유동과의 關係를 보기 위해 실험결과와도 비교하여 Wu에 의한 정상 비점성 유동의 準3次元的 數值計算方法의 有效性을 제시한다.

2. 理 論

2.1 支配方程式

터어보機械의 回轉翼列을 지나는 非粘性, 壓縮性, 定常, 3次元 流動의 基本方程式은 z 軸에 대해 일정한 角速度 $\vec{\omega}$ 로 회전하는 相對圓筒座標系에서 다음과 같이 표시된다.

$$\text{連續方程式: } \vec{r} \cdot \frac{\vec{W}}{Dt} + \frac{D \ln \rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\text{運動方程式: } \frac{D \vec{W}}{Dt} - \omega^2 \vec{r} + 2 \vec{\omega} \times \vec{W} = -\frac{1}{\rho} \vec{r} P \tag{2}$$

$$\text{에너지方程式: } \frac{Du}{Dt} - p \frac{D(\rho^{-1})}{Dt} = q \tag{3}$$

$$\text{狀態方程式: } p = \rho RT \tag{4}$$

지금 익렬내의 流動場을 Fig. 1과 같이 B-B면과 H-S면들로 나누고 Wu⁽¹⁾의 방법에 따라 B-B 유동면

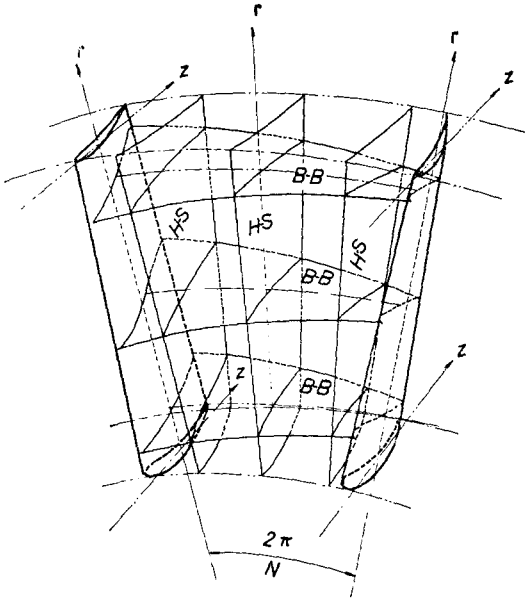


Fig. 1 B-B and H-S stream surface

에 대한 支配方程式을 표시하면 亞音速의 경우 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \ln B \rho}{\partial \phi} - \frac{n_\phi}{n_r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial \phi} \right. \\ & \left. + \frac{\partial \ln B \rho}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + \frac{(B \rho)^2}{\partial \phi / r \partial \phi} \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial I}{\partial \phi} \right. \\ & \left. + \frac{T}{r} \frac{\partial S}{\partial \phi} + f_\phi + \frac{W_r}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \phi} \right. \\ & \left. - W_r \left(-\frac{W_\phi}{r} + 2\omega \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

이 식에서 $\partial/\partial\phi$ 등은 相對流面을 따르는 ϕ 방향의 微分등을 의미한다. 만일 B-B면이 완전한 圓筒面이라면 이러한 미분기호는 보통의 미분으로 된다. 그리고 식중의 I 는 상대유동에서의 쏜엔탈피, 즉 Rotherly로 정의되고 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$I = h + \frac{1}{2} W^2 - \frac{1}{2} U^2 \quad (6)$$

그리고 B 는 B-B 유면에서의 준 3차원적인 연속방정식을 적분하기 위해서 도입된 積分因子로서 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{D \ln B}{Dt} = -C_1 + \frac{n_z}{n_r} \frac{W_z}{r} \quad (7)$$

단, $C_1 = -\frac{1}{n_r} \left(\frac{n_r}{r} \frac{\partial(W_r r)}{\partial r} + n_\phi \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi} + n_z \frac{\partial W_z}{\partial z} \right)$ (8) 과 같다.

여기서 n_r, n_ϕ, n_z 는 각각 r, ϕ, z 방향의 단위법선 벡터이다. 적분인자인 B 는 유면의 局部的 두께에 비례하는 량으로서 Blockage factor 라고 불리며 이것

은 기하학적 형상뿐 아니라 유동상태에 따라서도 달라진다. f_ϕ 는 유동면이 원동면에서 이탈되어 있을 때 나타나는 非軸對稱外力으로

$$f_\phi = -\frac{n_\phi}{n_r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \omega^2 r \right) \quad (9)$$

와 같이 정의된다. 식 (5)에 도입된 流動函數의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \phi} &= r B \rho W_z \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} &= -B \rho W_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

이제 식 (5)로 주어지는 橢圓形의 非線形偏微分方程式은 다음과 같은 형태로 변형된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{r \partial \phi} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi}{r \partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (11) \\ & Q = \frac{B \rho}{\partial \phi / r \partial \phi} \left[-\frac{\partial I}{r \partial \phi} + T \frac{\partial S}{r \partial \phi} + W_r \frac{\partial W_r}{r \partial \phi} \right. \\ & \left. + \frac{W_r W_\phi}{r} - 2\omega W_r + f_\phi \right] \end{aligned} \quad (12)$$

이 형태의 主方程式은 有限要素法에 의해 비교적 쉽게 풀릴 수 있다. 식 (11)에서 $B \rho$ 및 제 3항은 유동함수 ϕ 의 함수이므로 이들을 알려진 값이라고 한다면 이 방정식은 Quasi-harmonic-Poisson 방정식의 형태가 되며 선형편미방정식으로서 취급할 수 있어 반복계산에 의해 선형적으로 풀 수 있게 된다.

2.2 境界條件

B-B 유동에서는 유동장의 경계에서의 경계조건뿐 아니라 後緣에서의 Kutta 조건과 익렬퍼치간 流動의 周期性條件이 만족되어야 한다. 이 조건들은 서로 관련되어 있고 지배방정식은 前節에 언급한 바와 같이 반복계산하는 과정에서 線形式이라고 보고 있으므로 이 방정식을 만족시키기 위해서 서론에서 언급했듯이 流動函數 ϕ 는 다음과 같이 두개의 유동함수 ϕ_1, ϕ_2 의 線形式으로 나타내야 한다⁽⁷⁾.

$$\phi = \phi_1 + b^* \phi_2 \quad (13)$$

여기서 b^* 는 Kutta 조건으로부터 결정되는 순환의 강도를 나타내는 계수가 된다. 식 (11), (12)에서 ϕ_1 과 ϕ_2 는 다음의 방정식들을 만족시키는 함수임을 알 수 있다.

$$\frac{\partial}{r \partial \phi} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi_1}{r \partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{r \partial \phi} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi_2}{r \partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{B \rho} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \right) = 0 \quad (15)$$

B-B 면에서의 境界를 Fig. 2와 같이 택하면 ϕ_1, ϕ_2 및 ϕ 의 경계조건은 Table 1과 같다. ϕ_1, ϕ_2 에 대한 경계조건으로부터 이들이 물리적으로 각각 익렬을 통

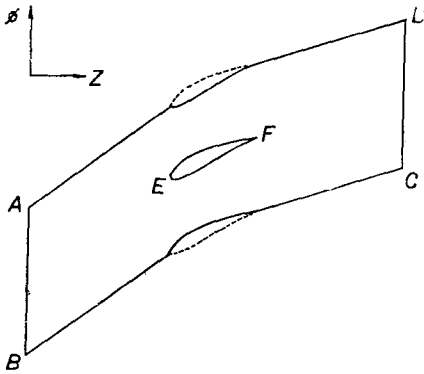


Fig. 2 Boundary of B-B stream surface

Table 1 Boundary conditions on B-B stream surface

Section	ψ_1	ψ_2	$\psi = \psi_1 + b^*\psi_2$
AB	$m \frac{\phi - \phi_B}{\phi_A - \phi_B}$	1	$m \frac{\phi - \phi_B}{\phi_A - \phi_B} + b^*$
BC	0	1	b^*
CD	$m \frac{\phi - \phi_C}{\phi_D - \phi_C}$	1	$m \frac{\phi - \phi_C}{\phi_D - \phi_C} + b^*$
AD	m	1	$m + b^*$
EF	$\frac{1}{2}m$	0	$\frac{1}{2}m$

과하는 통과유동과 익주위의 순환유동을 나타냄을 알 수 있다.

이 Table 1에서 m 는 2 피치를 흐르는 단위 폭당의 질량流量的을 의미한다.

Kutta 조건은 익의 壓力面과 負壓力面을 따라 흘러 온 流動이 後緣에서 壓力 또는 速度가 일치하는 것을 의미하므로

$$|\vec{W}_p| = |\vec{W}_s| \tag{16}$$

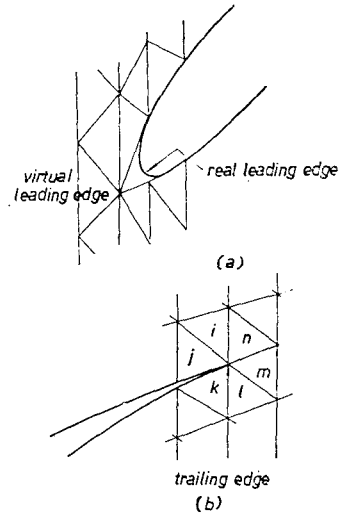
으로 주어진다. 後緣에서의 壓力面과 負壓力面상의 速度를 Fig. 3과 같이 後緣을 둘러싼 要素들의 平均 速度로 나타내면 식 (16)의 Kutta 조건은 다음과 같이 표시된다.

$$|\vec{W}_i + \vec{W}_j + \vec{W}_n| = |\vec{W}_k + \vec{W}_l + \vec{W}_m| \tag{17}$$

식 (17)에서의 \vec{W}_i 등은 유동함수 ψ_1, ψ_2 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{W}_i = \vec{W}_{i1} + b^*\vec{W}_{i2} \tag{18}$$

식 (17), 식 (18)에서 다음 식으로 표시되는 b^* 에 관한 2차방정식이 얻어지고 b^* 가 결정될 수 있다.



(a) Near leading edge (by Denton's grid)
(b) Near trailing edge for Kutta condition
Fig. 3 Finite element mesh distribution

$$Eb^{*2} + 2Fb^* + G = 0 \tag{19}$$

따라서

$$b^* = \frac{-F + \sqrt{F^2 - EG}}{E} \tag{20}$$

여기서

$$\begin{aligned} E &= W^2_{s22} + W^2_{s\phi2} - (W^2_{p22} + W^2_{p\phi2}) \\ F &= (W_{s21}W_{s22} + W_{s\phi1}W_{s\phi2}) \\ &\quad - (W_{p21}W_{p22} + W_{p\phi1}W_{p\phi2}) \\ G &= (W^2_{s21} + W^2_{s\phi1}) - (W^2_{p21} + W^2_{p\phi1}) \end{aligned} \tag{21}$$

이다.

이 식에서 첨자 p, s 는 익형의 壓力面과 負壓力面을, z 와 ϕ 는 각각 z, ϕ 방향의 速度성분을, 그리고 1, 2는 유동의 구분을 뜻하고 있다. 평방근안의 $F^2 - EG$ 는 식 (21)에 의해 항상 양의 값을 가지므로 b^* 의 값은 실수가 된다. 또 식 (20)에서의 또 하나의 b^* 의 값 $(-F - \sqrt{F^2 - EG})/E$ 는 Table 1에 주어진 通過流動의 迎角範圍에서 볼 때 妥當性이 없으므로 無緣根이 된다. 이상과 같이 하여 식 (20)에 의해 b^* 가 결정되면 식 (13)에 의해 全體流動場이 결정된다. 다음에 周期性條件은 다음 네가지 과정에 의해 만족될 수 있다.

- (1) 구해진 전체유동장으로부터 上流와 下流에서의 停滯流線을 구한다.
- (2) 정체유선을 상하 1 피치 이동시켜서 새로운 計算領域을 형성한다.

(3) 이 유동장에서의 解를 구하고 다시 정체유선을 구한다.

(4) 앞서 구해진 정체유선과 비교하여 收斂이 이루어질 때까지 위의 과정을 반복한다.

2.3 數值計算

식 (11)의 주방정식을 有限要素에 적용하면 다음과 같은 行列式으로 표시되는 선형대수방정식이 얻어진다⁽⁹⁾.

$$[k_{ij}]^{(e)} \{\phi_j\}^{(e)} = \{L_i\}^{(e)} + \{R_i\}^{(e)} \quad (22)$$

$$[k_{ij}]^{(e)} = \iint_{A^{(e)}} \left(\frac{1}{B\rho} \right)^{(e)} \left[\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dA^{(e)} \quad (23)$$

$$\{L_i\}^{(e)} = \int_{\Gamma^{(e)}} \left(\frac{1}{B\rho} \right)^{(e)} \frac{\partial N_i}{\partial n} \vec{n} N_k \phi_k d\Gamma^{(e)} \quad (24)$$

$$\{R_i\}^{(e)} = - \iint_{A^{(e)}} Q^{(e)} N_i dA^{(e)} \quad (25)$$

이 식에서 첨자 (e)는 임의의 유한요소를 의미하고 A^(e), Γ^(e)는 각각 요소의 面積과 要素를 둘러싸고 있는 경계선을 표시한다. N_i는 三角形要素에 대한 內插函數⁽⁹⁾이다. 식 (22)를 전체석영역에 대해 조합하면 다

음과 같은 형태의 연립방정식이 얻어진다.

$$[K]\{\Psi\} = \{R\} \quad (26)$$

이상의 流動計算法은 식 (26)의 반복계산과 Kutta 條件 및 周期性條件을 만족시키는 반복계산으로 구분된 계산흐름도를 Fig. 4에 나타낸다.

3. 實 驗

本 研究에서의 數值計算의 妥當性과 有效性을 확인하기 위하여 실험에서 측정된 回轉翼面상의 壓力分布와 수치계산 결과를 비교한다.

실험에서 사용한 送風機는 自由渦流形으로 설계된 軸流送風機이며 케이싱 내경은 504mm, 허브比는 0.588 회전익은 두께가 10%인 NACA 65 系이며⁽¹⁰⁾, 翼弦長은 60mm, 회전수는 1,385rpm 이다.

壓力測定은 회전익 중간스팬에서 設計迎角 α=11.5°와 또 하나의 非設計迎角 α=15.6°에 대해 실시했으며 영각오차는 風量調節에 의해 ±0.1° 이내로 들어가도록 하였다. 익면상의 압력측정위치는 Fig. 5와 같고 회전익의 압력은 직경 φ1의 구멍을 통해서 壓力取出裝置⁽¹⁰⁾에 의해 밖으로 끌어내어 측정하였고 測定値는 압력측정구멍 위치에서의 값이 되도록 遠心力補正을 하였다.

4. 結果 및 考察

B-B 流動計算에 대해 本 研究에서 시도된 Kutta 조건의 適用方法과 有限要素解析方法의 타당성을 검토하기 위해 Gostelow의 直線靜止翼列의 理論結果⁽⁸⁾와 비교하였다. 비교익렬의 數值計算에는 Table 2와 같은 메쉬가 이용되었다. 사용된 컴퓨터機種은 CDC 6000 Series의 CYBER 170-825이다.

Gostelow⁽⁸⁾가 等角寫像法에 의해 구한 압력 분포와 본 연구의 계산결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 두 結果는 비교적 잘 일치하고 있다. 전연군방의 負壓面에서 약간의 차이가 나타나 있는 것은 要素網을 구성하

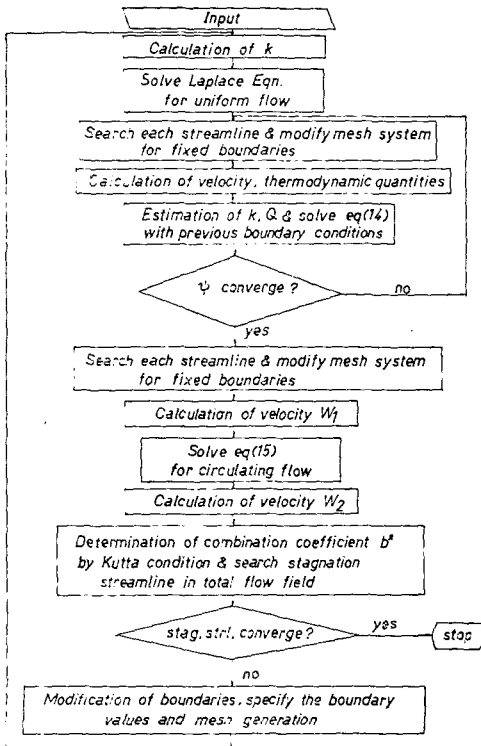


Fig. 4 Flow chart

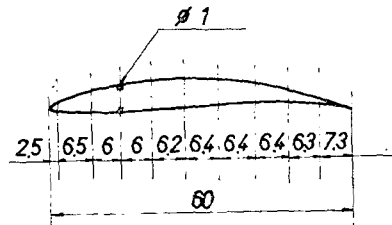


Fig. 5 Position of pressure measuring holes

Table 2 Computational data

Characteristics	Gostelow	NACA
Number of nodes	190	270
Number of elements	304	456
Number of nodes on blade surface	22	22
Half band width	12	16
Number of iteration	10	11
CPU time(sec)	45	72
Convergency limit	10^{-4}	10^{-4}

는데 Denton⁽¹¹⁾ (Fig. 3)의 방법에 의해 前緣의 위치를 실제위치보다 뒤어 나오게 한 점과 기점의 위치를 전연(또는 전연의 연장선상)에 고정시킨 것에 기인한 것으로 생각된다. 그러나 壓縮機에 사용되는 익형처럼 전연이 뾰족하고 가는 익형의 경우에는 이상과 같은 문제는 최소화될 수 있다. 前緣이 뾰족한 날개의 경우에는 날개 앞부분을 정확히 묘사할 수 있는 曲線形要素를 사용하여 岐點位置근방에서 要素의 크기를 미세하게 취하고 그 수를 늘림으로써 해결될 수 있을 것이다. 한편 後緣에서는 理論値와 計算値가 거의 일치하고 있으므로 Kutta 조건의 적용방법에는 문제가 없는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 유동장의 等速度線을 보여주고 있다. 그림으로부터 유동의 周期性이 잘 만족되어 있음을 알 수 있다.

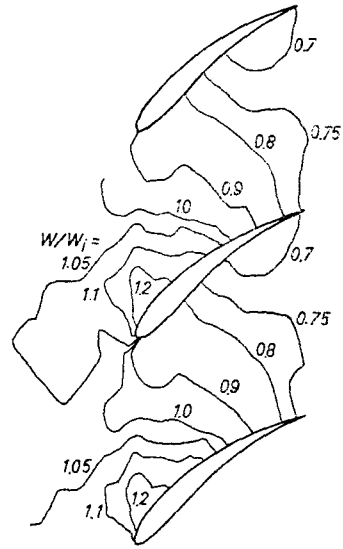


Fig. 7 Iso-velocity contours of Gostelow's cascade

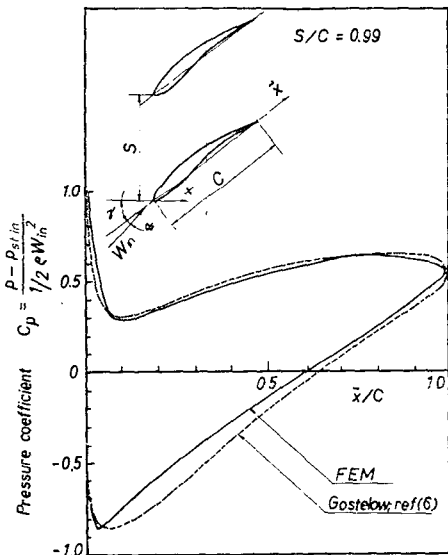


Fig. 6 Pressure distributions of Gostelow's cascade with stagger angle $\gamma=37.5$ deg. and attack angle $\alpha=11.6$ deg

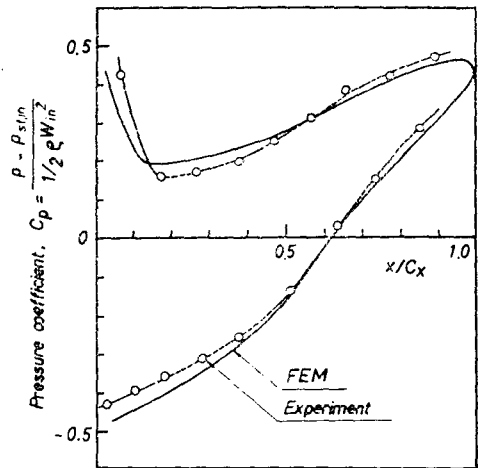


Fig. 8 Pressure distributions on blade surface at the midspan of rotor (NACA 650910) under the attack angle $\alpha=11.5$ deg. (design condition)

Fig. 8과 Fig. 9는 實驗用 送風機의 回轉翼列에서 측정된 壓力分布과 有限要素法에 의한 수치해를 비교한 것이다. Table 2에서는 이 계산에 사용된 메쉬구 구성을 보여주고 있다. Fig. 8은 設計點($\alpha=11.5^\circ$)에서의 압력분포이며 계산치와 실험치가 잘 일치하고 있다. Fig. 9는 設計點보다 流量이 12.5% 적은 경우이며 壓力面에서 약간 차이가 나타나 있다. 이 차이의 원인은 非設計點에서의 B-B 流動面이 圓筒面에서 벗

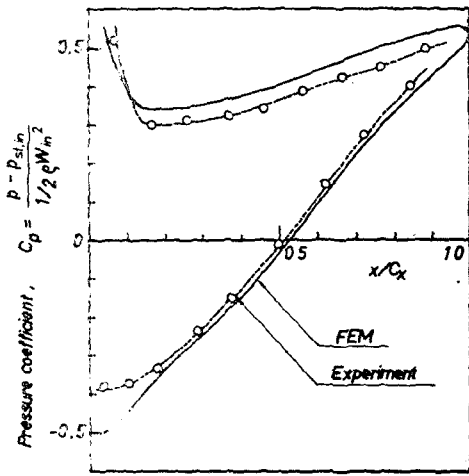


Fig. 9 Pressure distributions on blade surface at the midspan of rotor(NACA 650910) under the attack angle $\alpha=15.6\text{deg}$. (off-design condition: 12.5% reduction from design flow rate)

어나기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 문제는 B-B 면과 H-S 면의 準 3次元의인 교차반복계산에 의해 해결될 수 있을 것이다.

이상의 結果로부터 設計點에서의 B-B 流動은 본 연구에서의 계산방법에 의해 準 3次元적으로 해석될 수 있음이 확인되었고 비설계點에서도 境界層剝離에 의한 失速點까지는 비교적 잘 일치한다. 그러나 보다 정확하게 계산하기 위해서는 準 3次元 유동의 반복계산에 의해 해석되어야 한다.

5. 結 論

터보機械의 回轉翼列의 壓縮性 流動을 準 3次元적으로 해석한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) B-B 流動을 通過流動과 循環流動으로 구분함으로써 Kutta 條件과 周期性 條件이 합리적으로 만족될 수 있었으며 그 結果는 理論解와 잘 일치하였다.

(2) 準 3次元의 유동해석 結果는 設計點에서 잘 일치하며 이 計算方法은 失速이 일어나지 않는 범위내의 非設計點에서도 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 1983, 4년도 한국과학재단 연구비 지급에 의해 이루어진 것으로 동재단에 감사의 뜻을 표

하는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) Wu, C.H., "A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachinery of Axial, Radial and Mixed Flow Types", NACA TN 2604, 1952
- (2) Denton, J.D., "A Time Marching Method for 2 and 3 Dimensional Blade-to-Blade Flows", ARC R&M No. 3775, 1975
- (3) Adler, D., Krimerman, Y., "Calculation of the Blade-to-Blade Compressible Flow Field in Turbo Impellers Using the Finite Element Method," J. Mech. Eng. Sci., I. Mech. Eng., Vol. 19, No. 3, pp. 108~112, 1977
- (4) 조강래, "축류터보기계의 H-S 면과 B-B 면상의 유동의 수치해석", 대한기계학회논문집, 제 7 권, 제 2 호, pp. 153~160, 1983
- (5) De Vries, G., Norrie, D.H., "The Application of the Finite Element Technique to Potential Flow Problem", Trans. ASME, J. Appl. Mech., pp. 798~802, 1971
- (6) 방영석, "유한요소법에 의한 Joukowski 익형의 성능평가에 관한 연구," 연세대학교 기계공학과 석사학위논문, 1983
- (7) 조강래, 방영석, 이 열, "유한요소법에 의한 축류 유체 기계의 B-B 유동해석", 대한기계학회추계 학술대회 초록집, pp. 262~265, 1984
- (8) Gostelow, J.P., "Potential Flow Through Cascade-A Comparison Between Exact and Approximate Solutions", ARC CP, No. 807, 1964
- (9) Huebner, K. H., Thornton, E.A., *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons, New York, 1975
- (10) Cho, K.R., et al., "Studies on the Tip Clearance Flow in Axial Flow Turbomachinery", Yonsei Non Chong, Vol. XII, p. 231, 1975
- (11) Denton, J. D., "Time dependent Methods for Turbomachinery Flow, Calculation and Application to Fully Three-dimensional Problems", Lecture Note 10, *Fluid Dynamics of Turbomachinery*, ASME Turbomachinery Institute, Iowa Univ., 1980