

횡류팬 내부의 유동해석

Flow Analyses in a Cross-Flow Fan

이 형 건^{*1}, 박 형 구^{*2}

H. G. Lee and H. K. Park

Cross-Flow Fan(CFF) are widely used for industrial equipments and household electric appliances. A design method for CFFs, however, has not been well established because of the complexity of the internal flow. Numerical analysis was performed by using STAR-CD. In this study present the internal flow of CFF, which has varies pin number, and their flowrate were compared

Key Words : STAR-CD, ICEM-CFD, Cross-Flow Fan, Moving Mesh, Mesh Refinement, Blade

1. 서 론

흔히 횡류(Cross-Flow)팬 또는 접선(Tangential)팬이라고도 불리는 횡류팬은 독특한 2차원 Vortex유동을 발생시키며 블레이드를 두 번 통과함으로써 낮은 회전수에서도 높은 동압(Dynamic Pressure)을 얻을 수 있는 특성이 있다. 블레이드 충돌손실이 큰 관계로 30-40%의 낮은 정압효율을 갖지만 비교적 소형으로 많은 풍량을 낼 수 있고 운전소음이 적어 분리형 실내 공조기의 증발기용 송풍팬이나 건물 입구에서 공기의 유동을 차단하는 에어커튼, 그리고 실내공기를 순환시키는 Circulator등에 이용되고 있다.

횡류팬은 공기가 팬의 내부를 횡단하는 형태의 2차원 유동을 구성하는 특징을 가지고 있기 때문에 축방향의 유동을 무시할 수가 있어서 축류 또는 원심팬과 같이 필요한 유량의 증가를 위해 임펠러의 직경을 크게 하거나 회전수를 빠르게 하지 않고 임펠러의 길이만을 증가시킴으로써 필요한 유량을 얻을 수 있다.

또한 광범위한 회전수에서 작동이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 횡류팬은 1892년 Mortier에 의해서 발명되어 광산용 환기 시스템에 대형의 직경을 갖는 송풍기용 Fan으로 사용되었으나, 블레이드 충돌손실이 큰 관계로 효율은 비교적 낮아서 순수 연구분야에서만 사용되었다. 실제적인 연구와 적용은 1954년 Eck^[1]이 횡류팬 내부의 유동가시화를 행하여 팬 내부유동을 구성하는 편심와류의 구조가 발견하면서 활발하게 진행되고 있다.

지금까지의 연구 현황들을 살펴보면 Eck^[1]는 횡류팬의 전반적인 이론에 관하여 실험을 통하여 정리하였고, Yamafuji^[7]는 케이싱이 없는 횡류팬 임펠러 내부의 유동을 가시화 하였다. Murata^[6] 등은 그의 1차 연구에서 housing geometry를 체계적으로 변화시켜서 실험을 수행한 결과 스테빌라이저(stabilizer)와 팬 사이의 간격과 스크롤 형상, 스테빌라이저 설치각 등이 팬 성능을 결정하는 중요한 인자라는 것을 밝혀내었다. 2차 연구에서는 팬 내부의 편심와류에 관한 실험을 하여 횡류팬 내부의 유동패턴은 기준이 되는 유량계수 값에 따라 두 가지로 분류된다는 사실도 밝혀

*1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*2 정회원, 전남대학교 기계공학과

내었다.

컴퓨터를 이용한 유동해석은 최근에 다양하게 시도되고 있으며, 이지석^[9] 등은 V.E.M을 이용하여 격자체를 이용하지 않고 횡류팬의 유동해석을 하였으며, 비정상 유동해석은 해석 프로그램이 비정상해석, Moving Mesh, Sliding Interface 등을 처리할 수 있어야 하고 계산시간도 많이 소요되는 등 제약이 있지만 실험보다 먼저 실제 임펠러의 형상에 따른 유동의 변화를 예측할 수 있다는 장점과 고성능 컴퓨터 기술의 발달로 최근 응용되기 시작했다.

허남건^[10] 등은 FVM CODE인 STAR-CD를 이용하여 횡류팬 내부의 유동을 해석하고 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였으며, Sakai^[2] 등과 허남건등은 STAR-CD를 이용하여 열교환기가 부착된 횡류팬의 유동을 해석하였다.

본 연구에서는 전산유체 해석프로그램인 STAR-CD를 이용한 비정상 유동해석 방법을 이용하여 Fig. 1과 같은 형상을 갖는 횡류팬의 유동을 해석하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 기법

지배방정식은 비정상 비압축성 2차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, $k-\epsilon$ High Reynold 모델을 이용하여 난류유동해석을 하였으며, 이산화 방법은 STAR-CD에서 채용하는 FVM(Finite Volume Method)를 채택하였고, PISO 알고리즘을 이용하였다. 경계조건으로 Fan 외부에서는 Piezo-Pressure로 하였고, Fan외부의 Grid를 충분히 늘여 실제와 같은 조건이 되도록 하였다.

2.1.1 비압축성 Navier-Stokes 방정식

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad \rho \frac{du_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = -\frac{\partial (pu_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \tau_{ij} - q_j)$$

여기서 τ_{ij} 와 q_j 는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

$$q_i = -\frac{1}{(\gamma-1)} \left(\frac{\mu}{Pr_L} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial a^2}{\partial x_j}$$

2.1.2 $k-\epsilon$ 난류모델 방정식

난류에너지 (k) :

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) =$$

$$\mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

난류 소산율 (ϵ) :

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) =$$

$$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[u_i (P + C_{\epsilon 3} B_P) - \frac{2}{3} \left(u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \right. \\ \left. \times \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

위의 식들에서 변수 및 기호들은 다음과 같다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$P_B \equiv -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0,$$

2.2 해석형상

연구대상인 횡류팬은 대형 모터의 냉각 등에 사용되는 냉각FAN으로 측면에서 본 형상은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 내외경비와 블레이드의 형상은 일정하게 하고, 블레이드의 개수를 증가/감소시켜 속도벡터의 크기와 유량, 압력 등을 계산하였다.

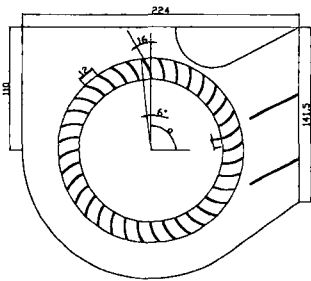


Fig. 1 Shape of a Cross-Flow Fan

- 내부 블레이드의 개수 : 26, 31, 36, 40
- 블레이드 두께 : 1mm
- 블레이드 길이 : 12mm
- 입구각(α) : 90°
- 출구각(β) : 16°
- FAN 외경 : 72mm
- FAN 내경 : 54mm

스테빌라이저와 팬 사이의 간격은 10mm이며, 스테빌라이저는 원형으로 사각형이나 삼각형 형태의 스테빌

라이저에 비해 팬 내부의 유동을 안정되게 하며, 소음이 적은 형태이다.

2.3 격자생성

전산유체해석에서 격자의 생성은 수렴된 해를 얻거나 계산결과와 정확성에 큰 영향을 미치므로 중요하다. 대부분의 해석과정에서 가장 많은 시간과 노력을 요하는 것이 격자생성이다. 현재는 많은 기업과 연구소에서 SAMM, PATRAN, IDEAS, GAMBIT등의 격자생성 프로그램을 이용하여 격자를 생성하고, STAR-CD에서 Importing과정을 거쳐 사용하거나 IGES 파일의 점 데이터나 선 데이터를 불러들여 PROSTAR 내의 전처리과정에서 Spline 처리나 격자의 투영을 통해 격자를 생성하여 사용한다.

본 연구에서는 CATIA 4.0을 이용하여 FAN과 외부 경계를 형성한 후 ICEM-CFD를 사용하여 팬 내부와 외부의 격자를 나누었다. STAR-CD에서는 PROSTAR 전처리과정에서 Moving Mesh 부위의 격자를 일정하게 조정하였으며, 유동이 많이 일어날것이라 예상되는 블레이드 주변에는 격자를 격자삽입방식(Mesh Refinement) 하는 과정을 거쳤다.

ICEM-CFD는 CFD(Computational Fluid Dynamics)와 구조해석(Structural Analysis)을 위한 전·후처리 목표로 개발되었으며, Multi-block Structured / Unstructured Hexahedral, Tetrahedral, 육면체와 사면체 격자에 대한 Hybrid grid, Pyramidal, Prismatic Cell 과 Cartesian Grid 등에 의한 격자를 생성한다.

본 연구에서는 Unstructured Hexahedral을 적용하여 각각의 블레이드 개수에 따라 30,000~40,000여개의 격자를 생성하였다. 블레이드 개수에 상관없이 날개 사이의 유로에서는 회전방향으로 12개의 격자를 생성하였고, 반경방향으로 16개의 격자를 생성하였다. 격자수가 일정하지 않은 부분에서는 Arbitrary Couple을 이용하여 격자의 연속성을 이어나갔다. 해석영역의 전체 모습은 Fig.2와 같다.

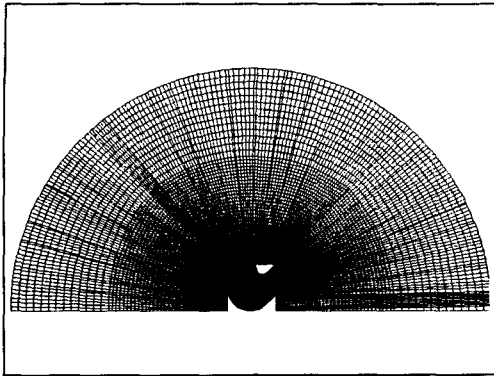


Fig. 2 Model of analysis region

2.4 해석조건

작동유체는 대기압 상태의 공기로 비압축성 유동이라 가정하였고, 물성치는 아래와 같다.

점성계수 : $1.81 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$

밀도 : $1.1855 [\text{kg}/\text{m}^3]$

경계조건은 경계 외부에서 Pizeo-Pressure로 두어 대기의 영향을 받도록 하였고, 팬 외부의 Mesh를 크게 확장하여 실제와 같은 조건을 두도록 하였다. 벽면에서는 No-Slip 경계조건을 적용하여 블레이드의 회전에 의한 강제유동이 생성되도록 하였다. 난류유동의 해석을 위해 채용한 $k-\epsilon$ 모델에서 난류강도(k)와 와도(ϵ)은 아래와 같이 정의하였다.

난류강도 : 3[%]

와도 : 0.001[m]

압력규정 : 0.0 [Pa]

2.5 해석방법

본 연구에서의 계산은 STAR-CD를 사용하였으며, ICEM-CFD에서 생성된 격자를 STAR-CD에서 Importing하여 회전하는 임펠러와 정지해있는 격자 사이에는 이동격자(Moving Mesh)를 사용하였다. 이

동격자 이벤트 모듈(Event Module)은 격자의 수에는 변화가 없고, 시간에 따라 격자의 위치가 차례로 변화해 나가는 경우에 정지격자와 이동격자 사이에서 이동하는 격자를 이벤트로 처리하여 이루어진다. 연구대상인 팬의 실제 회전속도와 같은 1600rpm의 속도를 갖도록 하였고, 이동격자가 1.92° 씩 이동할 때 1.92° 에 대한 이동시간을 0.0002s로 주었다.

계산영역의 외부 경계에서는 대기압의 압력경계조건을 주었고, 임펠러의 회전영역 격자와 그 주위의 고정격자의 경계는 경계접착(Attached Boundary)의 조건을 주어 경계면에서 매 시간간격(Time Step) 마다 바로 앞쪽의 경계와 맞물리게 유동영역의 연결을 새롭게 바꿔 주었다. 이때 0.0002s당 1.92° 씩 이동격자가 회전하며 이에 따라 격자의 결합(Connectivity)이 경계접착조건에 의해 바뀌게 된다.

이 경우 1회전당 187.5개의 시간간격이 필요하며, 계산은 흐름이 없는 초기조건에서 임펠러를 회전시켜 유동이 충분히 발달 할 때까지의 비정상 유동해석을 수행하였다.

사용된 컴퓨터는 IBM Work Station RS6000 으로 CPU 2GHz, RAM 512Mb로써 해석시간은 격자의 개수에 따라 5~6시간이 소요되었다.

3. 해석 결과

3.1 유동장

팬 내부의 유동이 충분히 발전 할 때까지는 8회전 정도가 소요되었으며, 그 이후로는 미소한 속도의 차이만 보일뿐 전체 유동의 유동 형태는 변하지 않았다.

Fig. 3 - Fig. 6 에서는 핀의 개수를 변화 시켰을 때의 속도벡터를 나타내었다. 횡류팬의 대표적인 특성중의 하나인 편심와류가 스테빌라이저 아랫부분에 생성되는 것을 확인 할 수 있다. 케이싱의 입구 쪽에서와 스테빌라이저의 출구부분에서는 유입되는 공기와 유출되는 공기가 겹치며 케이싱을 따라 작은 와류가 생성되는 것을 볼 수 있다. 이것은 팬의 성능을 저하시키

는 요인으로 입구 쪽 케이싱의 형태변화나 케이싱과 Fan의 간격을 조정함으로써 와류의 크기를 조정할 수 있다. 핀 개수 31일 때 팬의 입구 쪽 2차 와류의 크기가 가장 작게 나타남을 확인 할 수 있다.

속도벡터의 크기를 보면 핀의 개수가 많아질수록 최고 속도벡터의 크기도 커짐을 알 수 있는데, 팬의 성능에는 핀의 개수가 많을수록 좋은 것은 아니다. 각 핀 개수에 따른 유량의 변화는 Table 1 에 나타내었다. 본 연구에 적용한 내외경비 0.703의 횡류팬에서는 31개의 핀 개수가 적당함을 알 수 있다.

핀 개수	26	31	36	40
유량	9.66 m^2/s	10.6 m^2/s	10.0 m^2/s	10.3 m^2/s

Table 1. Variation of flowrate with respect to pin number

특이한 점은 스테빌라이저와 풍향안전핀 사이에서 출구 쪽 입에도 불구하고 팬으로 유입되는 유동이 발생하는 점이다. 이것은 풍향 안전핀이 스테빌라이저와 비슷한 역할을 하는 이유로 보이며, 유동의 유입/유출의 경계가 풍향 안전핀을 설치함으로써 스테빌라이저로부터 분리되어짐을 보여준다.

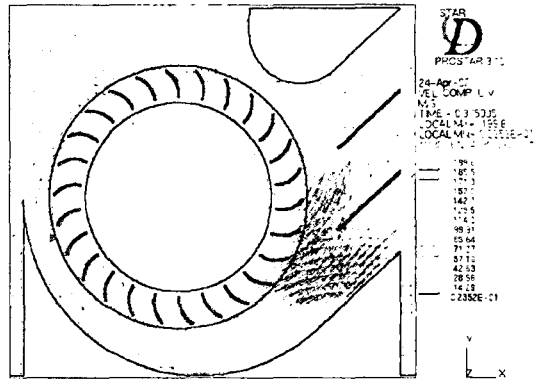


Fig. 4 Velocity vector (31 pin)

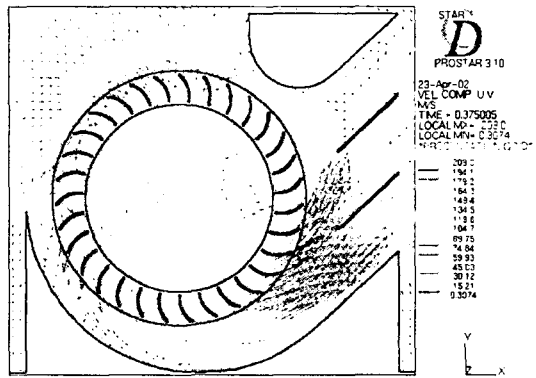


Fig. 5 Velocity vector (36 pin)

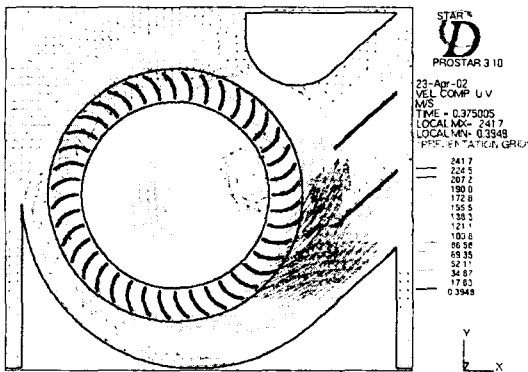


Fig. 3 Velocity vector (26 pin)

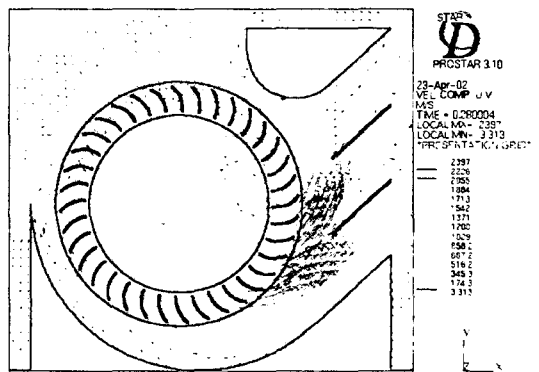


Fig. 6 Velocity vector (40 pin)

3.2 압력구배

Fig. 7은 핀 개수 31일 때 유동이 충분히 발달 한 후의 압력구배를 보여준다. 임펠러의 회전으로 인해 깃의 곡률 내부에서 강한 압력구배가 생성됨을 알 수 있고, 와류와 임펠러가 접치는 부위를 직접 확인 할 수 있다.

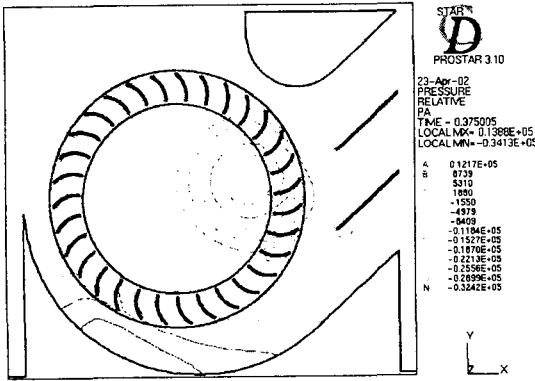


Fig. 7 Pressure contour (31 pin)

4. 결 론

본 연구에서는 이동격자(Moving Grid)를 이용하여 횡류팬의 비정상 유동해석을 수행하여 실험으로는 확인하기 힘든 임펠러 내부의 유동흐름을 알 수 있었고, 편심와류(eccentric vortex)의 형태와 위치를 확인 할 수 있었다. 이 결과는 과거 실험적으로 얻었던 결과들과 정량적으로는 다소 차이가 있었지만 정성적으로는 동일한 결과를 얻었다.

블레이드 주위의 압력분포와 속도벡터를 통해 주어진 경계조건 등의 적용이 이상적이었음을 확인하였으며, 횡류팬 해석의 한 방법으로 STAR-CD를 이용한 해석을 제시할 수 있었다. 또, 핀의 개수를 조정함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 팬 입구에서의 와류는 핀의 개수를 조정하여 그 크기를 줄일 수 있었다.
2. 핀의 개수를 단순히 늘리는 방법으로는 팬의 성능을

키울 수는 없었고, 내외경비 0.7에서는 31개의 핀을 적용했을 때 가장 큰 유량을 얻을 수 있었다.

3. 이동격자(Moving Grid)를 사용할 때 매 시간 간격마다 1-2개 정도의 격자간격만 이동시켰을 때 이동격자 이벤트모듈의 적용이 가능하였다.

참고문헌

- [1] Eck, B., Fans Pergamon Press(1973), pp 156-184
- [2] Sakai, Tokushige 'Numerical Analysis for the Air Flow of Cross Flow Fan' JSAE Vol.17, No2, 2000
- [3] 'STAR-CD v3.05 USERS GUIDE' Computational Dynamics L.T.D, UK, 1998
- [4] 박동섭, 맹주성, 이상환, '횡류팬 스테빌라이저 설계를 위한 실험적 고찰' 공기조화 냉동공학회 추계학술발표 논문집 1995
- [5] Tsurusaki, Kitagawa 'Visualization Measurement and Numerical Analysis of Internal Flow in Cross-Flow Fan' Journal of Fluids Engineering, september, 1997
- [6] Murata and Nisnihara 'An Experimental Study of Cross Flow Fan' JSME Vol.19, No129, 1976
- [7] Yamafuji 'Studies on the Flow of Cross-Flow Impellers' JSME Vol.18, No123, 1975
- [8] J.B. Combes 'Numerical modeling of the Flow in a Cross-Flow Fan ASME FED-Vol. 195 1994
- [9] 이지석, 이상환, 정성원 'V.E.M을 이용한 횡류팬 유동장 해석' 공기조화 냉동공학회 1995.
- [10] 김진성, 허남건, 김사량 '사각단면 공조관내 송풍을 위한 횡류팬 설계에 관한 연구' The First National Congress on Fluids Engineering 2000.