

LES에 의한 관류팬의 전산유동해석 Computational Flow Analysis of a Cross-Flow Fan by LES

김장권 · 오석형
J. K. Kim and S. H. Oh

(접수일 : 2010년 8월 9일, 수정일 : 2010년 11월 9일, 채택확정 : 2010년 11월 10일)

Key Words : Cross-Flow Fan(CFFan, 관류팬), Dynamic Subgrid-Scale Model(동 아격자크기 모델), Eccentric Vortex(편심와류), Large Eddy Simulation(LES, 대와동모사), Rear-Guider(리어가이더), Room Air-Conditioner(RAC, 룸에어콘), Stabilizer(스테빌라이저)

Abstract : The computational flow analysis using LES technique was carried out to investigate the flow characteristics of a RAC chassis consisting of a rear-guider, a stabilizer and a cross-flow fan. The commercial SC/Tetra software was used in this analysis. In view of the results so far achieved, the distribution trends of static pressure and velocity vector of central region except the edges of a CFFan are similar regardless of the number of revolution, and an eccentric vortex exists around the bottom blade of a CFFan. Also, a reverse flow is found in the region between stabilizer and CFFan. Moreover, near the edges of a CFFan, an eccentric vortex is separated to two vortexes. Also these vortexes increase the velocity near a rear-guider, and guide the flow near a rear-guider into stabilizer inlet. Therefore, the reverse flow region is formed in the bottom of a CFFan.

1. 서 론

관류팬은 1893년 Mortier의 발명특허¹⁾를 통해 최초로 도입된 후, 초창기에는 Eck, Laakso, Coaster, Zenkner 등 많은 연구자들에 의해 연구되었다²⁾. 그 후 Murata 등²⁾, Ilberg 등³⁾, Porter 등⁴⁾, Preszler 등⁵⁾에 의해 연구 내용이 더욱 발전되었으며, 이들 연구들은 현재에도 에어컨이나 통풍장치, 에어컨트에 이르기까지 널리 응용되고 있다.

일반적으로 벽걸이형 룸에어콘(이하 RAC라고 함)의 실내기에 설치되는 관류팬은 Fig. 1과 같이 실내의 고온공기를 흡입하여 열교환기를 거치면서 저온공기를 실내로 순환시키는 역할을 한다. 이때 저온공기는 관류팬의 블레이드(blade)를 두 번 관통하여 하부전면으로 루버(louver)를 통해 토출하게 된다. 따라서 RAC 실내기의 내부 유동은 리어가이더(rear guider)의 형상과 관류팬과의 틈새, 그리고 스테빌라이저(stabilizer)의 간극과 설치각도에 따라 많은 성능 변화를 가져오게 되는데, 특히 스테빌라

이저 근방에 존재하는 편심와류(eccentric vortex)에 따라 관류팬의 유동특성이 크게 달라진다고 보고되고 있다^{1,7)}.

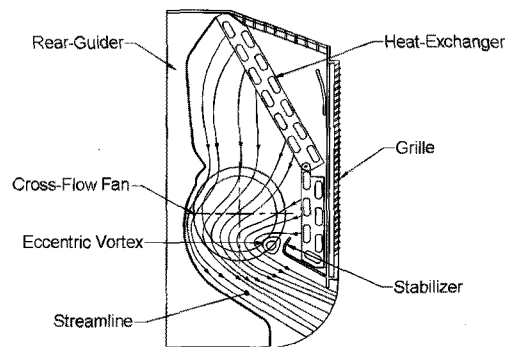


Fig. 1 Configuration of indoor room air-conditioner.

Porter 등⁴⁾과 Toffolo 등⁷⁾은 관류팬의 가시화실험을 통해 편심와류 궤적에 가장 크게 영향을 미치는 케이싱 부분은 리어가이더이고, 스테빌라이저는 편심와류를 생성하는 역할을 한다고 하였다. 특히 최대유량영역에서는 편심와류의 중심이 스테빌라이저쪽 날개 경로내에서 일어난다고 하였다. 또 Tsurusaki 등⁸⁾은 익근차(impeller) 원주상에 중심을 갖는 편심

김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848
오석형 : 군산대학교 기계공학부

와류영역과 유체수송을 행하는 관류유동역이 존재 함으로 편심와류의 크기와 세기를 쉽게 결정할 수 가 없고, 유동장이 케이싱 형상에 강하게 영향을 받 기 때문에 동일한 익근차에도 케이싱에 의해서 그 성능이 다르게 된다고 하였다.

한편, 국내에서도 관류팬에 대한 연구가 1990년대 후반부터 실험이나 수치해석을 통해 집중적으로 연구되었다. 여기서 Koo⁹⁾는 RAC의 내부구조를 형성 하는 스테빌라이저의 다양한 형상과 설치 위치, 그 리고 스크롤의 형상 및 공기토출구의 형상변화에 따 른 성능변화를 연구하였다. 또 Cho 등¹⁰⁾은 복잡한 관류팬의 내부유동장을 해석하기 위해 비정상 전산 기법을 도입하였으며, Chung 등¹¹⁾은 관류팬의 성능 해석에 RNG k-ε 난류모델을 적용하여 같은 grid 시 스템을 가지고서도 표준 k-ε 모델에 의한 것보다 더 정확도가 높은 성능을 예측하였다. 또 Hur 등^{12~16)}은 상용소프트웨어인 STAR-CD를 이용하여 sliding grid system과 표준 k-ε 모델 등을 적용하여 관류팬 의 성능을 해석하였다.

그러나 지금까지 모든 영역의 유동구조에 영향을 주는 RANS보다는 좀 더 일반적이고, 형상에 덜 의존한다는 이유로 수치해석의 정확도가 높다고 잘 알려진 LES(large eddy simulation) 기법^{17,18)}을 관류 팬의 유동해석에 적용한 논문은 아직까지 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 기 발표된 연구^{19~21)}를 바탕으로 RAC 실내기의 성능에 영향을 미치는 최적조건으로 제시된 결과들을 이용하여 모델화한 RAC 실내기의 내부 유동장을 해석하고자 유한체 적법(FVM)에 기초한 열유체 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.7)²²⁾를 사용하였다. 최종 결과를 얻어 내기에 앞서 다양한 RANS 모델들(표준 k-ε, RNG k-ε, realizable k-ε, SST k-ε 등)을 가지고 RAC 모델 외부를 대기압인 정지유체로 하여 많은 해석 을 시도하였다. 그러나 모두 리어가이더측 관류팬의 유입구에서 역류현상이 발생하여 정상적인 유동이 얻어진다고 판단할 수 없었으므로, 본 연구에서는 유동구조의 형상에 덜 의존하는 LES 기법을 적용하 였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 관류팬의 상세한 기

하학적 치수를 나타내고 있다. 관류팬은 외경이 106 mm이고, 길이가 237 mm이다. 또, 날개(blade)는 입 구각이 90°이며, 출구각이 25.71°로 총 32개가 등피 치로 배치되어 있다. 또 Fig. 3은 관류팬을 중심으 로 배치된 리어가이더와 스테빌라이저의 설계인자 를 나타낸 그림이다. 이에 대한 상세 제원은 Table 1과 같다.

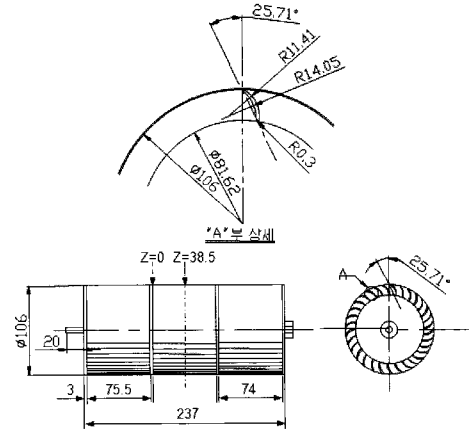


Fig. 2 Geometry configuration of a cross-flow fan

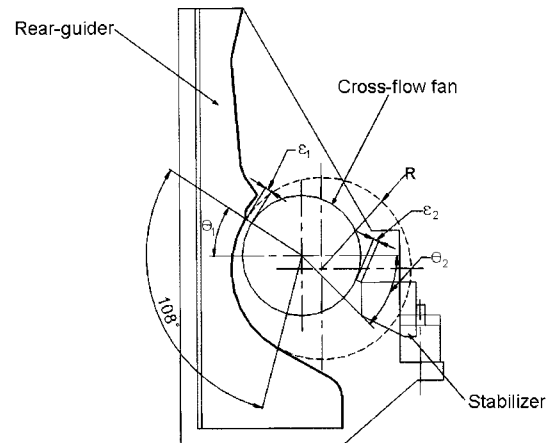


Fig. 3 Geometry configuration of indoor RAC

Table 1 Design factors of indoor RAC

Design Factor	Specification
ϵ_1	8 mm
ϵ_2	7 mm
θ_1	33°
θ_2	55°
R	87.5 mm

본 연구에서 해석된 모델은 Fig. 4와 같이 Fig. 3 의 RAC 실내기를 덕트로 에워쌓아 덕트를 외란이 없는 정지 상태인 공간으로 설정하였다. 여기서

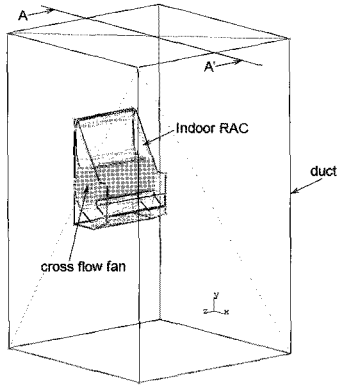


Fig. 4 Configuration of indoor RAC model

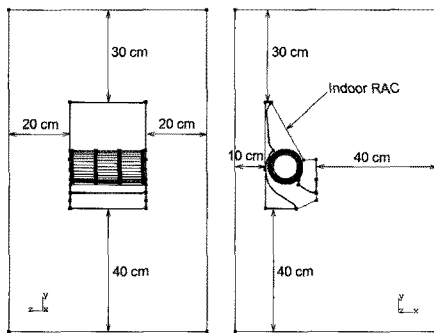
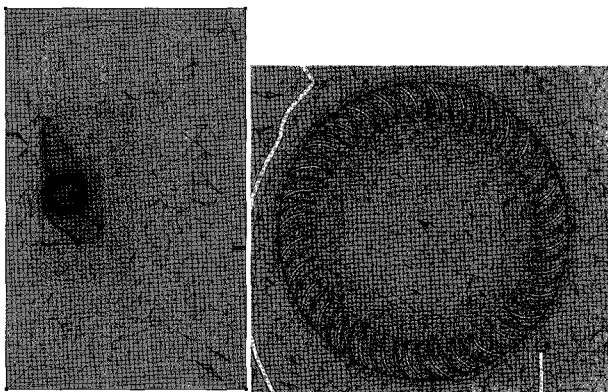


Fig. 5 Geometry configuration of indoor RAC model



(a) View A-A' (b) Detailed cross-flow fan
Fig. 6 Mesh configuration of indoor RAC model

RAC 실내기와 덕트가 이루는 기하학적 체원은 Fig. 5와 같다. 또 Fig. 6은 Fig. 4의 격자(mesh) 형상을 보여주고 있다. 해석모델의 형상 중 Fig. 2의 관류팬과 Fig. 3의 RAC 실내기는 3차원 상용 전용 소프트웨어인 Catia(ver.5)를 가지고 3차원형상으로 모델링하여 각각의 "stl" 파일로 만든 다음, 이들을 전처리 소프트웨어인 SC/Tetra-pre(ver.7)를 이용하여 각각 불러들인 뒤 경계조건을 부여하여 모델과 일들을 만든 후 서로 합체하여 격자크기를 제어할

수 있는 "Octree"기능을 이용하여 격자파일로 만들었다. 기본 격자는 4면체와 피라미드를 조합한 비정형격자(unstructured mesh)기법으로 Fig. 6(a)와 같이 총 5,927,232개의 요소(element)를 생성하였다. 이때 해의 수렴성을 높이기 위해 관류팬의 날개와 RAC 실내기의 샤시(chassis) 및 덕트의 바깥 경계면에는 각각 프리즘층(prism layer)을 삽입하였다.

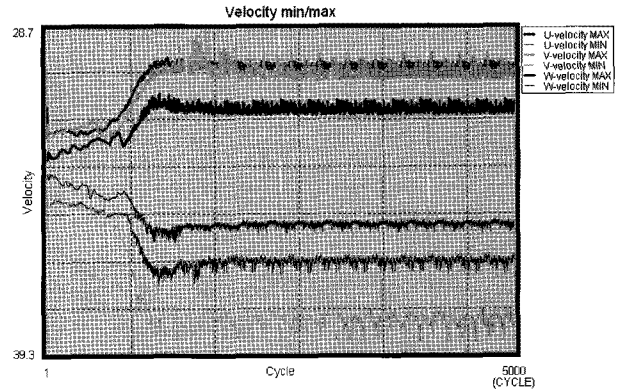
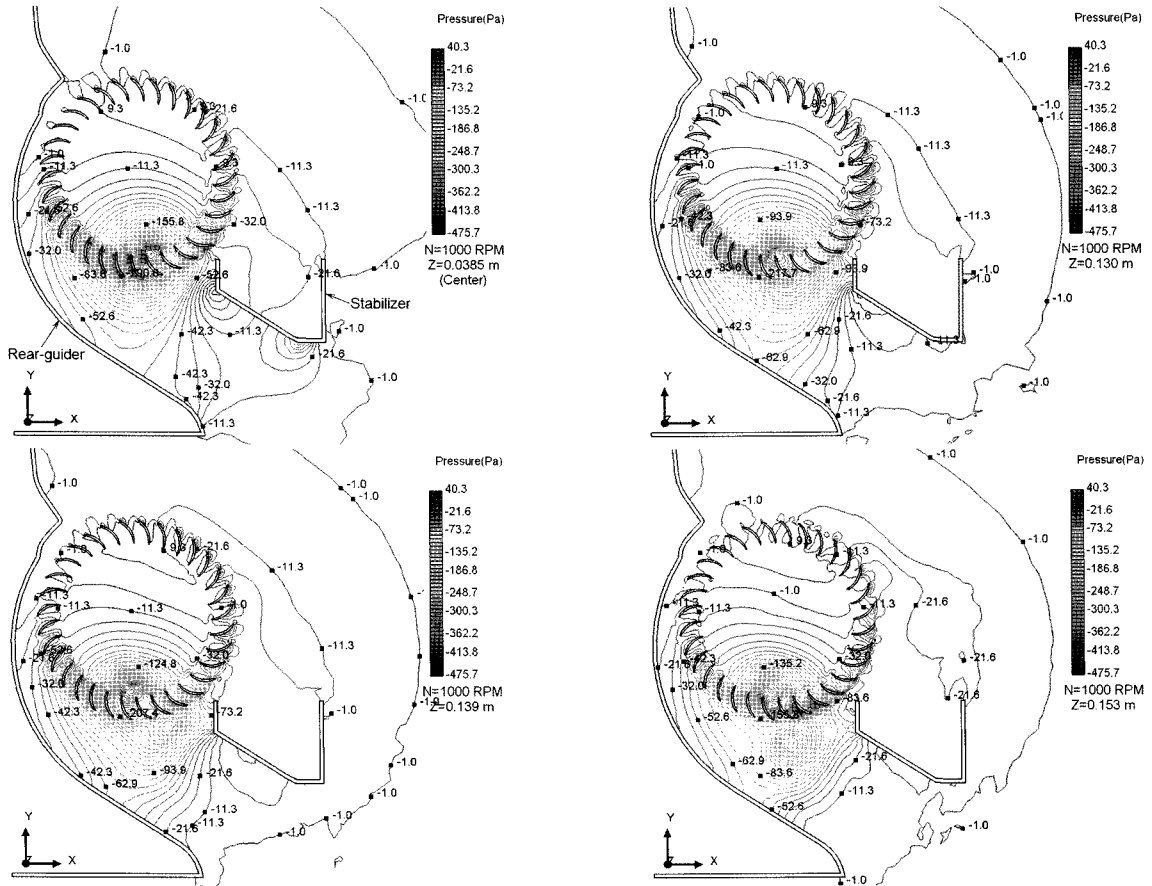


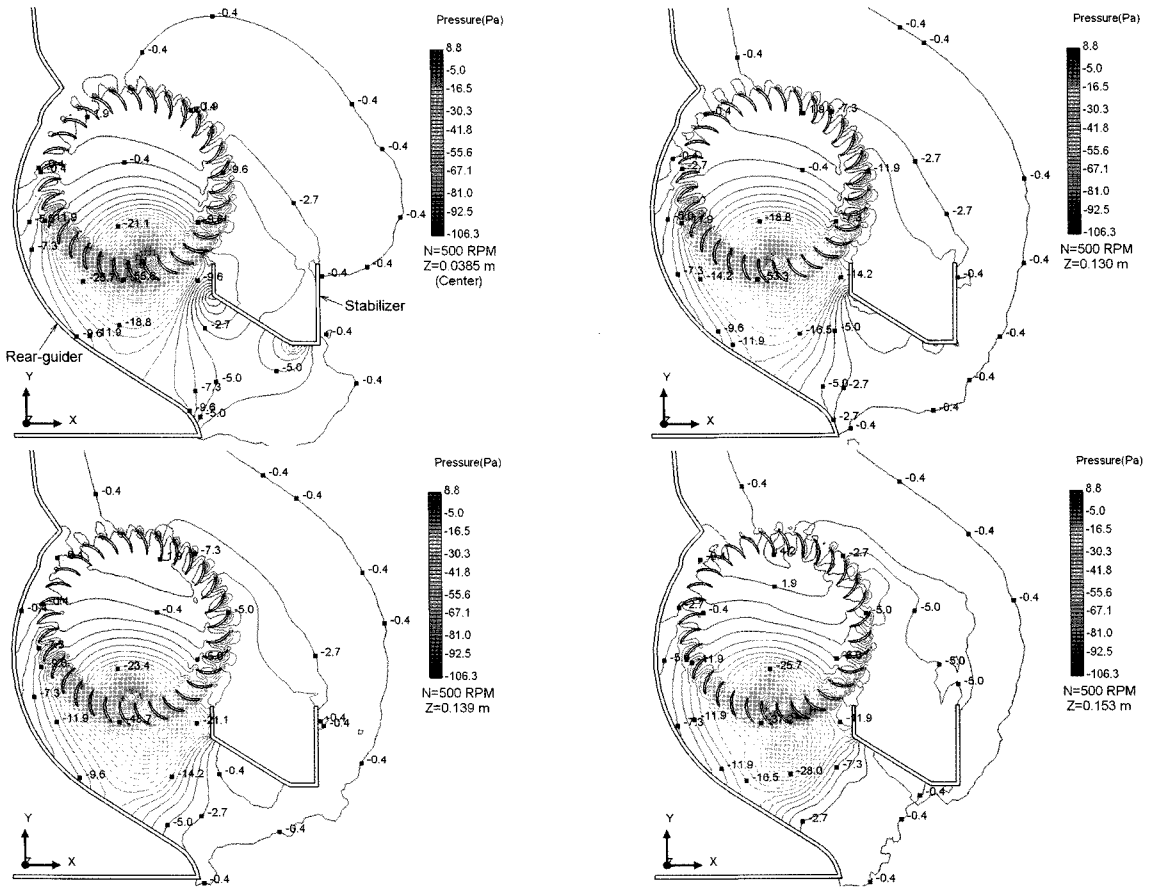
Fig. 7 Velocity histories after executing transient calculation

2.2 수치기법

본 연구에서 적용한 경계조건을 살펴보면, Fig. 4의 덕트는 대기압인 정지유체로, 그리고 RAC 실내기 샤시의 벽(wall) 조건은 점착(no-slip)조건으로 각각 설정하였다. 또, 관류팬은 회전체이므로 벽조건을 격자속도가 벽속도와 같다고 설정하고, 벽함수는 대수법칙을 이용하였다. 관류팬의 회전속도는 실제 제품에서 "강"운전조건으로 사용하는 RAC 회전수를 고려하여 1000 rpm을 선정하였으며, 또 유동의 차이점을 쉽게 비교하기 위해 회전수 차이를 크게 벌려 500 rpm을 적용하였다. 또 회전속도는 격자의 이동요소조건(moving element condition)을 제어하는 내부명령어인 "ALE0"를 이용하여 회전수를 반영하였다. 한편, LES의 난류모델에는 동 아격자 크기 모델(dynamic subgrid-scale model)을 사용하였으며, 시간미분항은 2차 implicit기법을, 그리고 대류항은 2차 중앙차분(central difference)기법을 각각 적용하였다. 또 시간간격(time step)은 500 rpm과 1000 rpm에 대하여 관류팬의 원주속도와 격자의 최소크기를 고려하여 각각 계산한 0.0002초와 0.0004초로 정하였으며, Fig. 7과 같이 모든 속도성분들의 최대/최소값들이 비교적 일정한 패턴을 유지하는 것을 확인하면서 5000회까지 비정상해석(transient analysis)으로 계산하였다. 이때, 5000회의 비정상해



(a) $N=1000$ RPM



(b) $N=500$ RPM

Fig. 8 Static pressure distributions in the X-Y plane

석계산에 대한 평균 Courant수는 1.213이었으며, 최대 Courant 수는 16.9215이었다. 또, 본문에서는 500회까지 해석한 비정상상태의 해를 바탕으로 결과들을 분석하였다. 한편, Fig. 4에서와 같이 수직 (y)방향에는 중력의 영향을 고려하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압분포

Fig. 8은 Fig. 5의 우측그림과 같이 X-Y평면 내에서 회전수 1000 RPM과 500 RPM으로 각각 해석한 정압분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 8(a)에서와 같이 회전수 1000 RPM에서 얻어진 X-Y평면 내에서 관류팬의 절반길이에 해당하는 $Z=0.0385$ m에서의 정압분포는 관류팬 하단 날개 주변(원주상)에서 가장 작은 크기를 나타내 편심와류(eccentric vortex)가 존재함을 보여주는 반면, 관류팬 상단부에서는 정압분포가 상대적으로 크게 나타나며, 관류팬과 마주하는 스테빌라이저 선단부에서도 비교적 큰 크기의 정압분포를 보이고 있다. 특히 관류팬과 스테빌라이저 사이 공간에서는 정압의 크기가 음, 양으로 반전되어 나타나 관류팬에서 분출한 속도가 스테빌라이저 입구측으로 역류하는 경향을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 회전수 500 RPM에서 해석한 Fig. 8(b)의 결과에서도 유사하게 확인할 수가 있다.

한편, 관류팬 절반길이인 위치($Z=0.0385$ m)로부터 벗어나 관류팬의 한쪽 측면 가장자리에 가까워질수록 편심와류를 나타내는 최저 정압의 위치는 관류

팬 하단부의 날개 입구를 중심으로 스테빌라이저측에서 리어가이더쪽으로 약간 이동함을 알 수 있다. 특히 RAC 샷시 폭의 19% 길이만큼 가장자리로부터 떨어진 $Z=0.139$ m인 위치에서는 관류팬 날개 안쪽과 바깥쪽을 중심으로 정압분포의 중심이 두 개로 분리되어 나타나며, 관류팬 측판에 근접한 위치($Z=0.153$ m)에서는 완전히 분리되어 나타나고 있다. 이것은 가장자리로 갈수록 벽면의 영향을 더 많이 받기 때문으로 사료된다. 이와 같은 현상은 회전수에 관계없이 거의 동일한 모습을 나타내고 있다.

한편, Fig. 9는 관류팬 중심축으로부터 아래방향으로 0.055 m 떨어진 관류팬 하단부의 X-Z평면 내에서 회전수별로 해석한 정압분포를 나타낸 그림이다. 두 회전수에 관계없이 정압분포는 절대크기가 서로 다르지만 거의 동일한 모습을 보이며, 최저 크기를 나타내는 정압분포의 영역이 RAC 샷시 폭의 약 74%에 해당하는 영역까지 동일하게 확대되어 나타나며, 양측 가장자리 쪽으로 약 26%에 해당하는 영역에서는 RAC 샷시의 벽 영향으로 스테빌라이저 근처까지 확대됨을 알 수 있다.

3.2 유동분포

Fig. 10은 관류팬의 X-Y평면 내에서 회전수 1000 RPM과 500 RPM에서 각각 해석한 속도벡터분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 10(a)에서와 같이 회전수 1000 RPM에서 얻어진 관류팬의 절반길이에 해당하는 $Z=0.0385$ m에서 유동속도의 크기는 관류팬 하단 날개 원주상에 존재하는 편심와류를 기준으로 왼쪽의 관류팬 하단

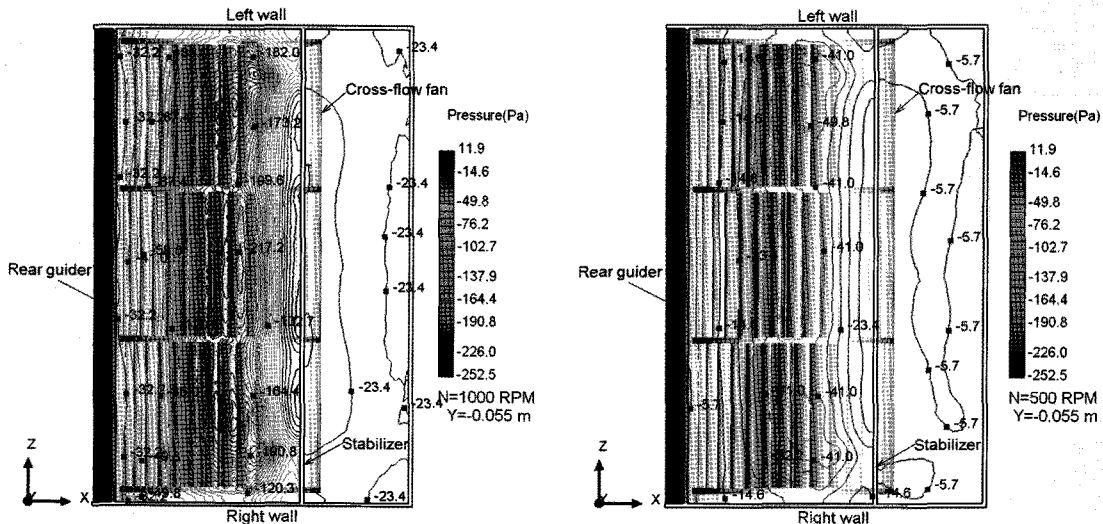
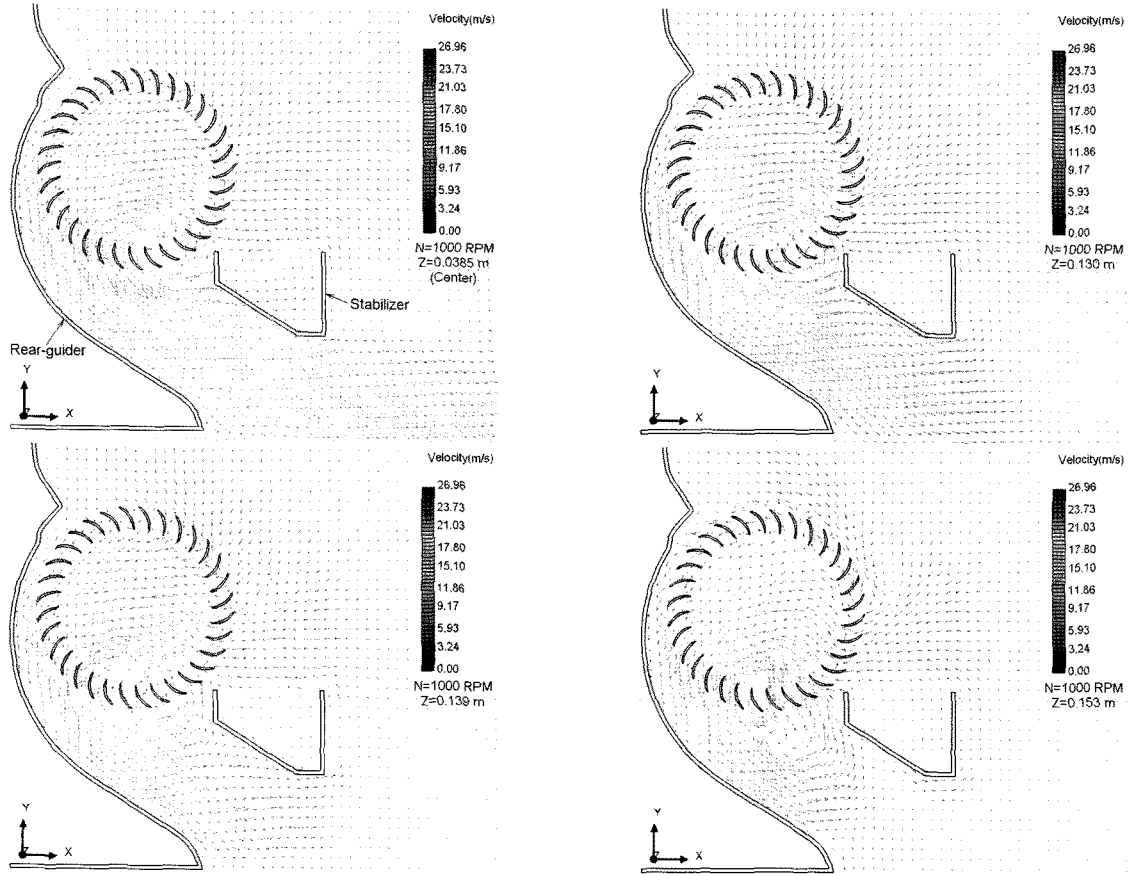
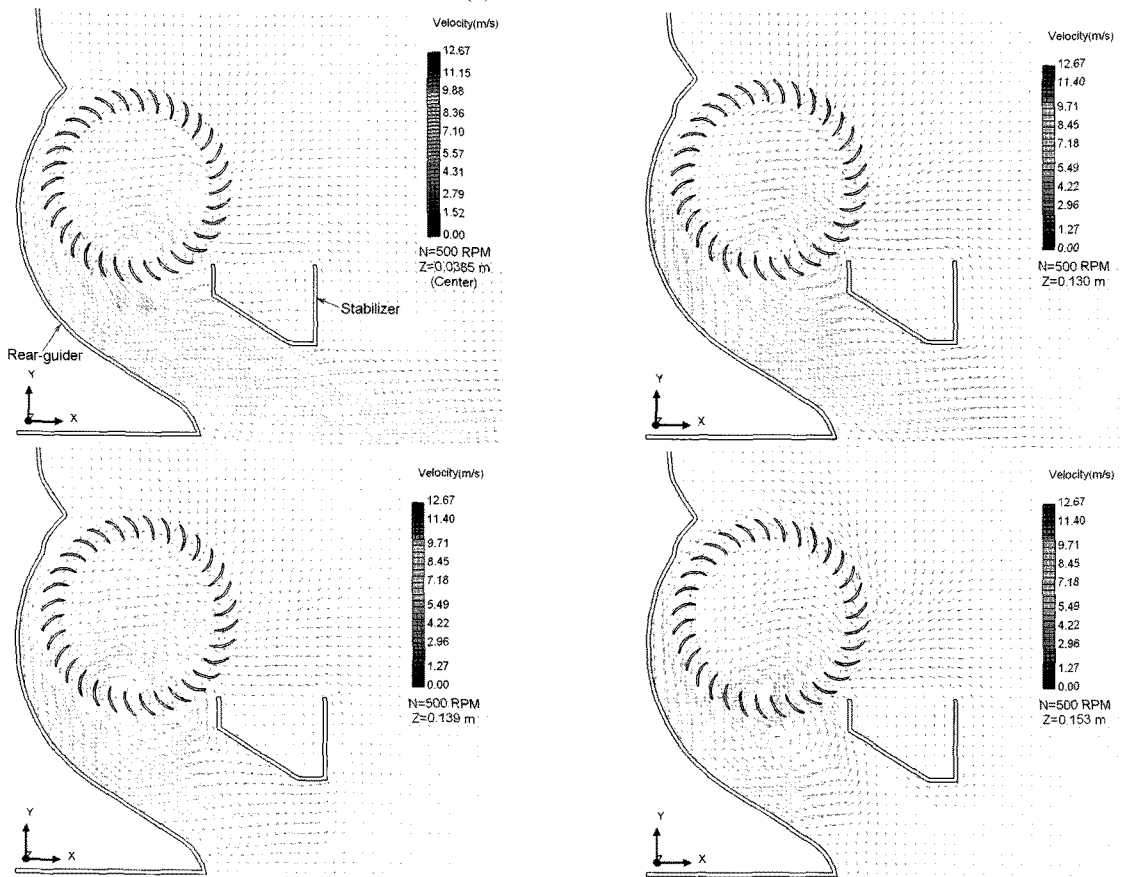


Fig. 9 Static pressure distributions in the X-Z plane



(a) N=1000 RPM



(b) N=500 RPM

Fig. 10 Velocity vector distributions in the X-Y plane

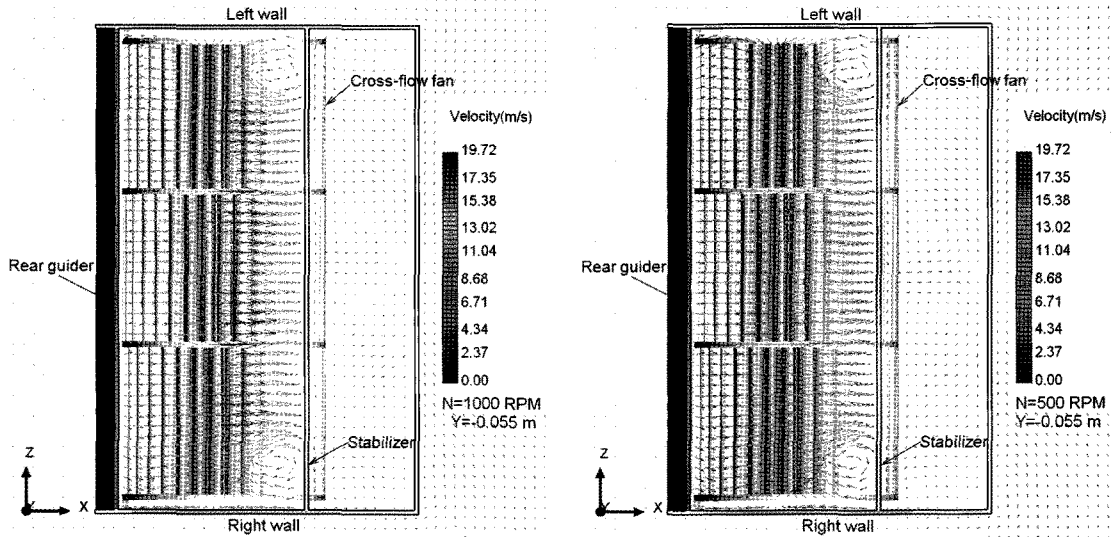


Fig. 11 Velocity vector distributions in the X-Z plane

날개바깥 부근에서 가장 빠르게 나타나며, 편심와류 우측으로는 스테빌라이저가 위치해 있어 스테빌라이저 입구측에서 약간의 역류현상이 발생하고 있다. 또 스테빌라이저 입구측을 제외하고는 리어가이더와 스테빌라이저측 모두 박리유동이 없이 매끄럽게 토출구를 빠져 나감을 알 수 있다. 이 같은 현상은 회전수 500 RPM에서 얻어진 Fig. 10(b)에서도 거의 동일함을 확인할 수가 있다. 따라서 본 연구에 적용된 RAC의 리어가이더와 스테빌라이저의 기하학적 치수들은 비교적 최적조건임을 확인할 수가 있다. 또 RAC 샷시 가장자리로부터 샷시 폭의 약 26%에 해당하는 영역($Z=0.130$ m)을 제외한 관류팬 중심부에서의 유동속도분포는 크게 관류팬 하단부 날개 원주상에 존재하는 편심와류영역과 이를 제외한 영역에서는 정상적으로 RAC 입구부의 공기를 토출구로 배출시키는 관류유동역으로 나눌 수가 있다. 이것은 Tsurusaki 등⁸⁾의 연구결과와도 일치하고 있다.

그런데, 관류팬 한쪽 끝단인 가장자리로 갈수록 관류팬 하단 날개 원주상에 존재하던 편심와류는 리어가이더 쪽으로 그 중심이 약간 치우쳐 2개의 와류로 점차 분리되어 편심와류의 영향이 관류팬 하단부에서 넓게 나타나 스테빌라이저 쪽으로 향하는 관류유동역을 축소시킴으로 관류팬 하단부를 빠져나온 유동은 리어가이더 근방에서 상대적으로 큰 유동속도를 보여주는 반면, 스테빌라이저 입구 쪽으로는 와류에 의해 역류 현상이 강하게 작용하여 결국 리어가이더 토출 끝단부에서 유동박리현상이 나

타나며, 스테빌라이저 입구측으로는 유동이 꺾어져 역류하는 모습을 보여주고 있다. 특히, 관류팬 한쪽 끝단부에 해당하는 $Z=0.153$ m에서는 역류현상이 심해 토출기류가 RAC 토출구 밖으로 전혀 빠져나가지 못하고 있다.

한편, 관류팬 중심축에서 아랫방향으로 0.055 m 떨어진 관류팬 하단부의 X-Z평면 내에서 속도벡터 분포를 해석한 Fig. 11에서도 알 수 있듯이 관류팬을 빠져나온 토출기류는 리어가이더와 스테빌라이저 사이 통로를 빠져나오면서 RAC 샷시 폭의 약 74%에 해당하는 영역까지는 회전수에 관계없이 출구쪽으로 향하고 있음을 보여준다. 그러나 RAC 샷시 폭의 약 26%에 해당하는 관류팬 양측면 가장자리에서는 스테빌라이저측에서 토출기류가 역류하여 재순환하는 모습을 보여주는데, 이것은 회전수에 관계없이 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

LES기법을 적용하여 RAC 실내기의 성능에 영향을 미치는 관류팬 주변의 내부 유동장을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) RAC 샷시 폭의 약 74%에 해당하는 중앙부근에서의 정압 및 속도벡터의 분포 경향은 회전수에 관계없이 유사하게 나타나며, 관류팬 하단 날개 원주상에는 정압이 가장 작은 편심와류가 존재하며, 스테빌라이저 입구측에서는 편심와류에 의한 역류 현상이 발생한다.

2) 환류팬의 좌우 가장자리로 갈수록 RAC 사시 폭의 약 26%에 해당하는 영역에서는 편심와류의 위치가 변함을 예측할 수 있으며, 편심와류는 2개로 분리되어 스테빌라이저측의 환류유동역을 축소시켜, 리어가이더 측의 유동속도를 증가시키는 반면, 와류에 의해 스테빌라이저측으로 토출기류를 유도하는 역할을 한다.

후 기

이 논문은 2009학년도 군산대학교 대학자체 학술 공모과제 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 2010년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. P. Mortier, 1893, "Fan or Blowing Apparatus", U. S. Patent No. 507445.
2. S. Murata and K. Nishihara, 1976, "An Experimental Study of Cross Flow Fan (1st Report, Effects of Housing Geometry on the Fan Performance)", Bulletin of the JSME, Vol. 19, No. 129, pp. 314~321.
3. H. Ilberg and W. Z. Sadeh, 1965, "Flow Theory and Performance of Tangential Fans", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 180, Part 1, No. 19, pp. 481~491.
4. A. M. Porter and E. Markland, 1970, "A Study of the Cross Flow Fan", Journal Mechanical Engineering Science, Vol. 12, No. 6, pp. 421~431.
5. L. Preszler and T. Lajos, 1972, "Experiments for the Development of the Tangential Flow Fan", Proc. of the 4th Conference on Fluid Machinery, Budapest, Akademiai Kiado, pp. 1071~1082.
6. A. Morita et al., 1986, "Development of Wall-Mounted Type Residential Air Conditioner", Technical Review, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., pp. 263~268.
7. A. Toffolo, A. Lazzaretto and A. D. Martegani, 2004, "An Experimental Investigation of the Flow Field Pattern within the Impeller of a Cross-Flow Fan", Experimental Thermal and Fluid Science, article in press.
8. H. Tsurusaki et al., 1993, "Study of Cross-Flow Fan Internal Flow by Flow Visualization (1st Report, Discussion of Measured Results by Particle-Tracking Velocimetry)", Trans. of JSME (Series B), Vol. 59, No. 568, pp. 3743~3748.
9. H. M. Koo, 1999, "An Experimental Study on the Influences of Some Basic Design Parameters on the Performance Characteristics of the Cross-Flow Fan System in Air-Conditioner", Trans. of KSME (Part B), Vol. 23, No. 6, pp. 695~702.
10. Y. Cho, Y. J. Moon and S. W. Jin, 1999, "Numerical Prediction of Cross-Flow Fan Performance and Noise Characteristics by Unsteady Flow Computations", Proc. of KSME Spring Annual Meeting, pp. 417~422, KSME 99S234.
11. M. K. Chung, S. W. Jin and K. S. Cho, 2001, "A Numerical Analysis of Split Type RAC Indoor Unit and Its Application to Design", Proc. of SAREK 2001 Summer Annual Meeting, pp. 1038~1042, 2001-S-177.
12. N. K. Hur, W. Kim and S. H. Kang, 1999, "A Numerical Study on Flow through a Cross Flow Fan : Effect of Blade Shapes on Fan Performance", J. of Fluid Machinery, Vol. 2, No. 1, pp. 96~102.
13. 이형건, 박형구, 2002, "횡류팬 내부의 유동해석", 한국전산유체공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 65~70.
14. 전용두, 이종수, 2002, "횡류팬 유로최적화를 위한 수치실험", 유체기계공업학회 2002년도 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 147~151.
15. 김동원, 이준화, 박성관, 김운제, 2002, "수치해석적기법을 이용한 횡류팬 성능평가", 유체기계공업학회 2002년도 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.152~157.
16. D. W. Kim, H. S. Kim, S. K. Park and Y. J. Kim, 2005, "Analysis on Flow Fields and Performance of a Cross-Flow Fan with Various Setting Angles of a Stabilizer", J. of

- Computational Fluids Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 107~112.
17. K. S. Yang, 1995, "Improvement on Large-Eddy Simulation Technique of Turbulent Flow", Trans. of KSME, Vol. 19, No. 7, pp. 1691~1701.
 18. D. S. Jang, Y. W. Lee, D. H. Doh, D. S. Bae and N. S. Kim, 2000, "Numerical Analysis on Flow Field Around a Bluff Body by LES(I)", J. of KSPSE, Vol. 4, No. 3, pp. 40~47.
 19. J. K. Kim and K. J. Jeong, 2005, "Study on the Aerodynamic Performance of a Cross-Flow Fan for the Various Design Factors of an Indoor Room Air-Conditioner", J. of KSPSE, Vol. 9, No. 3, pp. 33~38.
 20. J. K. Kim, 2005, "Experimental Study on the Aerodynamic Performance Characteristics for Various Design Factors in the Maximum Flowrate range of a Cross-Flow Fan", J. of KSPSE, Vol. 9, No. 3, pp. 44~49.
 21. J. K. Kim, 2005, "Experimental Study on the Surface Pressure Characteristics of a Rear-Guider for the Various Design Factors of a Cross-Flow Fan", J. of KSPSE, Vol. 9, No. 3, pp. 50~57.
 22. SC/Tetra(Version 7), 2007, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.