LES에 의한 PAC용 시로코팬의 3차원 전산유동해석

Three-Dimensional Computational Flow Analysis of a Sirocco Fan for a Package Air Conditioner by LES

김장권*† · 오석형**

J. K. Kim*† and S. H. Oh**

(접수일 : 2012년 04월 10일, 수정일 : 2012년 05월 03일, 채택확정 : 2012년 05월 10일)

Key Words : Computational Flow Analysis(전산유동해석), Dynamic Subgrid-Scale Model(동 아격자크기모델), Large Eddy Simulation(LES, 대와동모사), Package Air-Conditioner(PAC, 패키지에어컨), Single Inlet Sirocco Fan(단흡입 시로코팬)

Abstract : The computational flow analysis using LES technique was carried out to investigate the flow characteristics of a sirocco fan under the maximum flowrate condition. The commercial SC/Tetra software was used for this unsteady and three-dimensional numerical analysis. In consequence, because a flow is unstable within the range of about 50% of a housing depth from a bellmouth around the cutoff region, the passing flow through the blade cascade occurred on the X-Y plane is a slow or a reverse with approaching to the housing inlet. Also, the secondary flow shows on the radial plane of a housing, and its vortex center exists within about 33% of a housing depth from a bellmouth except the cutoff region. Moreover, the flow occurring on the exit plane of a sirocco fan shows a complex secondary flow.

1. 서 론

시로코팬(sirocco fan)은 날개(blade)수가 많아 다른 팬에 비해 소형크기로도 고정압, 고풍량을 발휘할 수 있고, 비소음 레벨이 비교적 낮아, 주로 에어컨 등 공조기에서 기류 순환과 저소음 운전을 목적으로 현재까지도 많이 사용되고 있다.

시로코팬의 성능향상에 대한 연구는 최근까지 공력성능을 만족하면서 저소음 운전이 가능하도록 하는 설계변수 결정에 대한 내용이 많았는데, 이것은 에어컨 관련 시장이 국내외적으로 급팽창해진 것과 무관하지 않다고 본다.

Morinushi¹⁾는 시로코팬 단품을 대상으로 기하학적 변수들 중 공력성능과 소음에 대한 영향을 실험적으로 상세히 검토하였으며, Kim²⁾은 패키지 에어컨(package air-conditioner, PAC) 실내기에 저소음운

전을 목적으로 시로코팬을 적용하고자 실내기의 시스템저항을 최소화한 후, 임펠러(impeller)의 대구경화를 시도하여 낮은 회전수에서도 흡입공기량을 최대화시키는 연구를 한바가 있다. 그러나 이런 상황에서 시로코팬의 최적화 설계가 제대로 이루어졌다는 확신이 없었기 때문에, Kim³⁾은 주어진 PAC 실내기의 시스템저항을 만족하며 고성능 저소음 운전이 가능하도록, 시로코팬 임펠러의 주요 설계인자들을 결정하고자 다구찌(Taguchi) 실험방법을 적용한 바가 있다. 또 Yoo 등⁴⁾은 자동차용 시로코팬의 성능에 영향을 미치는 벨마우스(bellmouth)간격, 하우스(housing)팽창각도 및 설단부(cutoff)가 위치하는 각도들을 실험하였고, 레이저유속계를 이용하여 내부 유동장도 측정한바가 있다. 근래 들어서는 컴퓨터를 이용한 전산해석이 보편화되면서 Ha 등⁵⁾은 STAR-CD를 이용하여 시로코팬의 3차원 유동해석을 표준

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

**오석형 : 군산대학교 기계공학부

*J. K. Kim(corresponding author) : Department of Power System Engineering, KunSan National University.
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

**S. H. Oh : School of Mechanical & Automotive Engineering, KunSan National University.

$k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하여 수행한바 있으며, Jeon 등⁶⁾은 OTR용 시로코팬의 비정상상태의 3차원유동에 대한 공력소음을 해석하기 위해 FLUENT를 사용하여 RNG $k-\varepsilon$ 난류모델을 적용한바 있다. 또 Lee 등⁷⁾은 자동차용 시로코팬의 3차원유동을 연구하기 위해서 FLUENT를 사용하여 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델을 적용하였으며, Park 등⁸⁾은 레인지후드용 시로코팬의 3차원 유동해석에 CFX를 사용하여 SST $k-\omega$ 난류모델을 적용하였다. 그러나 다양한 척도(scale)를 갖는 난류 와(eddy)들에 의해 조직화된 난류유동을 정확히 해석하기 위해서는 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)보다는 수치해석의 정확도가 더 높고 잘 알려진 LES (large eddy simulation)기법⁹⁾을 이용하여야 하는데, 아직까지 시로코팬의 유동해석에 이 LES기법을 적용한 논문은 찾아보지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 PAC에 적용하기 위해 개발된 단흡입 시로코팬²⁾을 가지고 그동안 실험만으로는 알 수 없었던 3차원 비정상상태의 유동장 특성을 면밀하게 분석하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 시스템저항이 0인 최대유량영역에서 유한체적법에 기초한 상용 유동해석 프로그램인 SC/Tetra(ver.8)를 사용하여 LES기법을 적용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 시로코팬 모델의 기하학적 치수를 상세하게 나타낸 평면도와 측면도이다. 본 시로코팬은 Fig. 2(a)와 같이 한쪽 측면으로만 흡입하는 단흡입 형태를 갖는다. 여기서 임펠러의 날

Fig. 1 Geometry configuration of a sirocco fan

Fig. 2 Schematic diagram of a sirocco fan

개는 전굴형(forward-curved type)이며, 주판(main plate) 형태는 모터를 공기흡입부에 설치할 경우 공기흡입면적의 감소로 시스템저항이 증가하는 것을 방지하기 위해 모터를 주판 후면에 설치 가능하도록 돔(dome)형태로 설계하였다²⁾. 그 밖의 시로코팬에 대한 상세 설계인자들은 Table 1과 같다.

Table 1 Design factors of a sirocco fan

Design Factor	Specification
Blade camber type	Beam deflection arc
Outer diameter	300 mm
Inner diameter	255 mm
Blade width	156 mm
Impeller width	160 mm
Blade number	87.5 mm
Blade setting angle	23.13°
Blade entry angle	25.04°
Blade discharge angle	159.38°
Blade thickness	2(max)
Bellmouth diameter	292 mm
Bellmouth curvature radius	5 mm
Bellmouth clearance	5 mm
Cutoff clearance	26.3 mm
Cutoff angle	0°
Cutoff curvature radius	20 mm
Housing width	180 mm
Housing expansion angle(α)	6.36°
Housing curve type	Archimedes $R = 150 + 0.2918\theta$

본 연구에서 해석한 시로코팬 모델은 Fig. 1 및 Fig. 2(a)와 같이 시로코팬의 플랜지(flange)를 중심으로 하부에는 3차원 방향에서 모든 공기가 유입 가능하도록 공기 흡입용 덕트를 만들어 시로코팬을 에워쌌으며, 플랜지 상부에는 토출기류를 모든 방향에서 충분히 나타낼 수 있도록 토출용 덕트를 두었다. 한편, Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 대한 철망(wire) 형태의 격자(mesh) 형상을 보여주고 있다. 또 체적 격자를 나타내는 Fig. 3은 Fig. 2(b)를 X방향과 Z방향으로 반쪽인 위치에서 절단하여 나타낸 그림이다. 특히 본 시로코팬 모델은 임펠러와 하우징을 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)를 가지고 3차원형상으로 모델링하여 각각의 ".stl" 파일로 만든 다음, 이들을 전처리 소프트웨어인 SC/Tetra-pre를 이용하여 각각 불러들인 뒤 경계조건을 부여하여 모델파일들을 만든 후 서로 합체하여 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree"기능을 이용하여 격자파일을 만들었다. 이때, 비정형격자(unstructured mesh)기법으로 생성된 기본격자는 SC/Tetra-solver에서 유동이 난류일 때 벽(wall)표면 근처에서의 벽속도분포는 무차원 벽거리($y^+ = u_\tau y / \nu$)가 $y^+ \leq 5$ 일 때는 $u^+ = y^+$ 로, 그리고 $5 < y^+ < 30$ 일 때는 $u^+ = 5 \ln y^+ - 3.05$ 로, 그리고 $30 < y^+ < 1000$ 일 때는 $u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5$ 로 각각 계산하기 때문에, 해의 정확성과 해석의 경제성을 동시에 고려해서 정해야 한다. 여기서 u_τ 는 마찰속도이며, y 는 벽표면으로부터 떨어진 거리이다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 4면체와 피라미드를 조합하여 약 3,414,913개의 요소(element)로 Fig. 3과 같이 만들었다. 또한 해의 수렴성을 높이기 위해 시로코팬의 임펠러와 하우징 및 플랜지에는 각각 프리즘층

Fig. 3 Mesh configuration of a sirocco fan model

Fig. 4 Non-dimensional wall distance

(prism layer)을 삽입한 결과, 본 연구에서는 Fig. 4에서와 같이 시로코팬과 하우징 내부에서 y^+ 가 약 $11 < y^+ < 300$ 에 위치하고 있어, 벽표면 근처에서 벽함수가 잘 반영되었음을 알 수 있다.

2.2 수치기법

본 연구에서 적용한 경계조건을 살펴보면, Fig. 2(a)의 덕트는 대기압인 정지유체로, 그리고 시로코팬 하우징의 벽 조건은 점착(no-slip)조건으로 각각 설정하였다. 또 시로코팬의 임펠러는 회전체이므로 벽조건을 격자속도가 벽속도와 같다고 설정하고, 벽함수는 대수법칙을 이용하였다. 임펠러의 회전속도는 실제 제품에서 “강” 운전조건으로 사용하는 회전수를 고려하여 660 rpm을 선정하였다. 또 회전속도는 격자의 이동요소조건(moving element condition)을 제어하는 내부명령어인 “ALE0”를 이용하여 회전수를 반영하였다. 한편, LES의 난류모델에는 동 아격자크기 모델(dynamic subgrid-scale model)을 사용하였으며, 시간미분항은 2차 implicit기법을, 대류항은 2차 중앙차분(central difference)기법을 각각 적용하였다. 또 초기시간간격(Δt_1)은 660 rpm에 대하여 시로코 임펠러의 원주속도와 격자의 최소크기를 고려하여 계산한 $\Delta t_1 = 0.00025$ 초로 정하였으며, Courant수는 1로 하였다. 이를 토대로 계산된 질량유량의 안정성을 살펴보기 위해 100,000회까지 비정상상태로 계산을 하였다. 그 결과, Fig. 5에서와 같이 변동(fluctuation)을 보이는 질량유량(mass flux)은 약 3만회 이후부터 비교적 안정된 일정한 패턴을 유지함을 알 수 있다. 참고로 본 논문에서는 충분히 안정적인 모습을 보여주는 시간 $\Delta t = 0.872$ 초에 해당하는 10만회의 해를 바탕으로 결과들을 분석하였다. 이때, 본 해석을 컴퓨터 CPU에서 수행하는데 걸린 시간은 회당 약 6.47초였다.

Fig. 5 Calculating process result of transient analysis

3. 계산결과 및 고찰

3.1 최대유량 검증

Fig. 6은 본 시로코팬의 실제모델을 웬테스터로부터 얻어낸 정압(p_s)대 풍량(Q)의 공력성능이다. 여기서 실험값을 커브피팅(curve-fitting)한 곡선으로부터 $p_s = 0$ 인 대기압을 만족하는 최대유량을 추정하면, $Q = 0.57096 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 얻을 수 있다. 그러나 해석을 통해 얻어진 본 연구의 평균질량유량은 Fig. 5에서 $\dot{m} = 0.68695 \text{ kg}/\text{s}$ 로 나타나, 이것을 20°C 공기의 비중량 $\gamma = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 을 이용하여 체적유량(Q)으로 환산하면, 그 결과는 $Q = 0.57008 \text{ m}^3/\text{s}$ 임을 알 수 있다. 따라서 본 연산결과가 실험에 의한 풍량 대비 약 0.15% 부족함을 보이고 있으나, 이것은 매우 정확한 유량예측결과를 보여준다고 볼 수 있다.

Fig. 6 Performance curve of a sirocco fan model

3.2 임펠러 날개사이의 유동분포

Fig. 7은 X-Y평면 내에서 Z방향의 위치에 따라

임펠러를 구성하는 날개열(blade cascade) 사이의 상대속도에 의한 벡터분포를 나타낸 그림이다. 여기서 나타낸 상대속도벡터의 분포들은 Fig. 1과 Fig. 2(a)에서 정의한바와 같이 시로코팬 하우징의 확대가 시작하는 설단부에 해당하는 ①지점($\theta = 0^\circ$)을 포함하여 반시계방향의 90° 간격으로 나누어진 ②지점($\theta = 90^\circ$), ③지점($\theta = 180^\circ$) 및 ④지점($\theta = 270^\circ$)에서 각각 얻어진 것들이다. 그리고 $Z=0 \text{ m}$ 의 위치는 Fig. 1에서도 알 수 있듯이 시로코 임펠러의 주판바닥을 의미한다.

Fig. 7(a)의 설단부 ①지점에서의 벡터분포는 주판으로부터 10 mm 떨어진 $Z=-0.01 \text{ m}$ 에서는 날개 입구측 흡입면(suction surface) 일부 영역에서만 재순환(recirculation)하는 유동모습이 보이나, 날개 출구측에서는 유동이 날개열 사이를 정상적으로 빠져나감을 알 수 있다. 또 주판으로부터 각각 50 mm 및 90 mm가 떨어진 $Z=-0.05 \text{ m}$ 및 $Z=-0.09 \text{ m}$ 에서는 주판 벽의 영향이 적어지면서 흡입면 근처에서 발생하는 재순환유동은 현저히 줄어들지만 유동은 전체적으로 가속되어 날개열 사이를 정상적으로 빠져나가고 있다. 그러나 시로코팬 흡입구로부터 각각 30 mm와 10 mm 떨어진 $Z=-0.13 \text{ m}$ 및 $Z=-0.15 \text{ m}$ 에서는 속도가 현저히 감소하여 날개열 사이에서 유동이 거꾸로 흐르거나 재순환하는 모습까지도 보여주고 있다.

시로코팬의 하우징이 90° 로 확대된 Fig. 7(b)에서의 유동은 주판에 가까운 위치일수록 날개 입구측 흡입면 일부에서만 재순환유동이 미소하게나마 여전히 존재하며, $Z=-0.09 \text{ m}$ 에서는 정상적으로 유동이 날개사이를 빠져나가는 모습을 보여주고 있다. 그러나 $Z=-0.13 \text{ m}$ 이후에서는 유동속도가 현저히 감소하여 역류성을 보이며, $Z=-0.15 \text{ m}$ 에서는 역류속도가 더 증가하여 날개 압력면(pressure surface) 근처에서도 유동이 재순환하는 모습이 나타나고 있다.

또 시로코팬의 하우징이 180° 로 확대된 Fig. 7(c)의 $Z=-0.13 \text{ m}$ 이내에서 날개사이를 통과하는 유동은 역류나 재순환 없이 정상적으로 이루어지고 있다. 다만 $Z=-0.13 \text{ m}$ 에서는 날개사이를 빠져나가는 속도가 현저히 감소하여 시로코팬 흡입구 근처인 $Z=-0.15 \text{ m}$ 에서는 여전히 역류 및 재순환유동 분포를 보여주고 있다.

한편, 하우징이 270° 로 확대된 Fig. 7(d)에서의 날개사이를 빠져나가는 유동은 전체적으로 다른 하우징 확대각의 경우에 비해 가장 빠른 속도크기를 보이나, 날개 흡입면을 중심으로 일부 박리된 모습도

Fig. 7 The distributions of relative velocity vector in the blade cascade of X-Y plane

(a) Vector profiles

(b) Total velocity magnitude profiles

Fig. 8 The distributions of vector and total velocity magnitude in the X-Y plane

보이고 있다. 다만, 시로코웬 흡입구 근처인 $Z=-0.15$ m에서는 날개를 통과하는 속도는 매우 느려지며, 약간은 역류성도 보이는 불안정한 유동을 나타내고 있다. 이 같은 현상은 시로코웬 흡입구로 들어오는 축방향(Z 방향) 공기가 반경방향으로 꺾일 때 임펠러 흡입구측 보다는 주판 쪽으로 더 큰 속도로 향하여 날개사이로 들어가기 때문이다.

3.3 하우징 내의 유동분포

Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)는 X - Y 평면 내에서 Z 방향의 위치에 따라 각각 나타낸 벡터 및 속도분포들이다. 시로코웬 입구측에서 30 mm 떨어진 $Z=-0.13$ m에서의 속도분포는 점선으로 나타낸 ㉠지역에서 특히 상대적으로 낮은 속도크기를 보여주며, 이곳의 일부유동은 설단부를 거쳐 하우징 출구 밖으로 빠져나가고, 또 다른 일부유동은 설단부와 임펠러 사이 틈새를 통해 하우징 안으로 다시 유입하는 재순환유동이 된다. 결국 이 유동은 체적효율에 영향을 미치는 누설 유량으로 존재한다. 또 설단부로부터 90° 회전한 ㉡지점(Fig. 2(a) 참조)까지도 속도가 낮게 나타나 하우징의 반경이 증가하는데도 불구하고 유동은 불안정하게 발달하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상은 하우징 안쪽으로 들어갈수록 점차 줄어들지만, $Z=-0.09$ m까지는 지속됨을 알 수 있다. 또한 설단부 근처에서 발생하는 재순환유동은 벨마우스로부터 하우징 안쪽으로 들어갈수록 $Z=-0.05$ m까지는 그 영역이 점점 커져 하우징 출구면 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. 이 같은 원인은 하우징의 반경이 가장 큰 Fig. 2(a)에서 정의한 ㉣지점에서 형성된 임펠러를 빠져나온 ㉥영역과 같은 빠른 속도가 하우징 안쪽으로 들어갈수록 점차 그 영역이 커져, 설단부 근처에서 발생하는 재순환유동을 하우징 출구면 쪽으로 밀어내고 있기 때문이다. 이로 인해 하우징 출구면에서 형성되는 속도는 매우 불균일한 크기분포를 나타내며, 결국 이것은 Fig. 9에서도 볼 수 있듯이 하우징 출구면에서 복잡한 2차유동(secondary flow)을 유도하는 원인으로 작용한다. 한편, $Z=-0.05$ m 이후 임펠러 주판에 가까울수록 임펠러를 빠져나온 공기속도는 상대적으로 크게 상승하여 하우징과 임펠러 사이 공간을 가득 채우며 빠져나가 하우징면적이 확대되는 구간에서의 속도분포는 충분히 발달하여 비교적 큰 크기를 나타내고 있다. 그러나 임펠러 주판에 가장 가까운 $Z=-0.01$ m에서는 벽면의 영향으로 인해 임펠러 및 하우징에서 형성되는 속도는 다소 줄어들며, 하우

Fig. 9 Flow characteristics in the air-discharge plane of a housing

징 출구면 근처에서 충분히 발달하지 못하고, 불균일한 속도크기분포를 보여주고 있다.

Fig. 9(a)는 하우징 출구면상에서 Y 방향으로 하우징을 빠져나가는 벡터가 갖는 속도크기분포를 나타내며, Fig. 9(b)는 하우징 출구면상에서 2차유동을 나타내는 벡터분포이다. Fig. 9(a)에 나타낸 속도분포는 약 20%의 날개폭에 해당하는 임펠러 주판에 가까운 영역의 중앙부근에서 가장 큰 크기를 나타내며, 일부는 설단부 쪽으로, 또 다른 일부는 하우징 확대율이 가장 큰 영역(그림 우측)쪽을 향해 확장하면서 속도크기가 감소하며, 그 영향이 하우징 전방 쪽으로 꺾여 설단부까지 넓은 영역에 걸쳐 나타나고 있다. 한편, Fig. 9(b)에 나타난 하우징 후면부의 2차유동은 투영된 임펠러 내부에서는 설단부 쪽으로 향하고, 임펠러를 벗어나서는 하우징 확대율이 가장 큰 공간 쪽으로 유동방향이 바뀌어 하우징 전면부로 회전되어 발달하고 있다. 이때 일부유동은 하우징 후면으로부터 하우징 깊이의 약 60% 위치인 점 ㉠에 회전중심을 두고 시계방향으로 회전하며, 회전유동에 참여하지 못하는 또 다른 일부유동은 급격히 임펠러 회

전방향으로 꺾여 하우징 전방을 따라 설단부 쪽으로 빠르게 발달하며 하우징 후면부에서 형성된 2차유동과 섞이는 매우 복잡한 유동모습을 보여주고 있다. 이때 점선으로 표시된 ㉔영역에서는 상대적으로 속도가 낮은 공간이 공존하고 있다.

Fig. 10은 $X=0$ m인 Y-Z평면에서 그리고 $Y=0$ m인 X-Z평면에서 각각 Z방향으로 잘라 나타낸 속도벡터 분포들이다. Fig. 10(a)의 경우, 임펠러의 회전에 의해 임펠러로 유입되는 유동은 돔형 주판을 따라 좌우로 나뉘는데, 하우징 공간이 큰 좌측(Fig. 2(a)의 ㉓지점)보다는 우측(㉑지점)의 설단부로 들어가는 유동이 약간 더 빠른 속도를 보이며 날개로 들어가지만, 주판 안쪽에서는 속도가 감소되고 있다. 또 임펠러 날개를 거쳐 하우징으로 들어간 유동은 설단부 근처에서는 벨마우스로부터 Z방향으로 하우징 깊이의 약 50%인 영역을 중심으로 유동방향이 반전되는 불안정한 유동분포를 보이나, 좌측의 하우징 내에서는 벨마우스로부터 Z방향으로 하우징 깊이의 약 33%인 지점에서 와류 중심을 둔 뚜렷한 재순환유동인 2차유동의 존재를 보여주고 있다. 이와 같은 영향은 시로코팬 흡입부 근처의 임펠러 날개열이나 하우징 내에서 유동이 역류되거나 속도가 저하되는 원인

으로 작용한다. 또 Fig. 10(b)의 경우, 그림의 좌측인 ㉒지점보다는 우측인 ㉔지점 쪽으로 돔형 주판을 따라 더 빠르게 임펠러 날개 쪽으로 빨려 들어가 하우징 내에서는 두 곳 모두 뚜렷한 재순환유동을 보이고 있다. 참고로 ㉒지점과 ㉔지점에서 와류중심은 벨마우스로부터 Z방향으로 각각 하우징 깊이의 약 25%와 33%의 위치에서 나타나고 있다. 특히 하우징의 반경이 증가함에 따라 임펠러 날개로 흡입되는 유속은 더 빨라짐을 알 수 있다.

4. 결 론

LES기법을 적용하여 PAC에 적용하기 위한 돔형 주판을 갖는 단흡입 시로코팬의 유동장 특성을 3차원 비정상상태로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1). 설단부의 하우징 내에서 형성된 날개열을 통과하는 유동은 벨마우스로부터 하우징 깊이의 약 50% 이내에서 역류가 발생한다.
- 2). 설단부를 벗어나 하우징이 확대하면서 날개열을 통과한 하우징 내 유동은 벨마우스로부터 하우징 깊이의 약 33% 위치 내에 와류중심을 둔 재순환하는 2차유동이 존재하며, 이를 중심으로 날개열을 통과하는 유동 방향은 바뀌게 된다.
- 3). 설단부와 임펠러 사이 통로를 통해 누설되는 재순환유동은 하우징 벨마우스로부터 $Z=-0.13$ m까지 나타난다.
- 4). 하우징의 반경이 증가함에 따라 임펠러 날개로 흡입되는 유속은 더 빨라짐을 알 수 있다.
- 5). 시로코팬 출구단면에서 발생하는 유동은 복잡한 구조의 2차유동을 보여준다.

참고 문헌

1. Morinushi, K., 1987, "The Influence of Geometric Parameters on F.C. Centrifugal Fan Noise", ASME J. of vibration, acoustics, stress, and reliability in design, Vol. 109, pp. 227-234.
2. Kim, J. K., 1995, "Study on the Development for Low Noise Package Air-Conditioner", Trans. of the KSME, Vol. 19, No. 10, pp. 2710-2719.
3. Kim, J. K., 1999, "An Experimental Study on the Optimum Design of Sirocco Fan by Using Taguchi Method", Trans. of the KSME (Part

(a) In the Y-Z plane($X=0$ m)

(b) In the X-Z plane($Y=0$ m)

Fig. 10 Velocity vector distributions

- B), Vol. 23, No. 6, pp. 761-768.
4. Yoo, S. Y. and Lee, D. W., 2002, "An Experimental Study on Performance and Flow Characteristics of Automotive Sirocco Fan", Trans. of the SAREK, Vol. 14, No. 11, pp. 954-963.
5. Ha, J. H. and Moon, Y. J., 2000, "Computational Analysis of the Three-Dimensional Flow Characteristics and Performance of Sirocco Fan", Trans. of the SAREK, Vol. 12, No. 7, pp. 674-679.
6. Jeon, W. H., Rew, H. S., Song, S. B. and Shon, S. B., 2004, "A Study on the Flow and Aero-acoustic Characteristics of the Sirocco Fan of OTR(Over The Range)", J. of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 17-23.
7. Lee, D. W. and Yoo, S. Y., 2004, "A Numerical Study for Performance of Automotive HVAC System", Trans. of the SAREK, Vol. 16, No. 11, pp. 1084-1091.
8. Park, S. T., Choi, Y. S., Park, M. S., Kim, C. H. and Kwon, O. M., 2005, "A Study on the Performance Characteristics of the Sirocco Fan in a Range Hood", J. of Fluid Machinery, Vol. 8, No. 2, pp. 9-15.
9. SC/Tetra(Version 8), 2010, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.