

< 논문 >

원심 압축기 벌류트 3차원 유동의 수치해석

배 황[†] · 윤주식^{*} · 박기철^{*} · 장근식^{**}
(2005년 8월 11일 접수, 2006년 2월 3일 심사완료)

Numerical Study on the Three-Dimensional Centrifugal Compressor Volute Flow

Hwang Bae, Ju Sig Yoon, Ki Cheol Park and Keun-Shik Chang

Key Words: Centrifugal Compressor(원심압축기), Scroll Volute(스크롤 벌류트), Straight Conical Volute (원뿔형 직선 벌류트), Multi-block Grid(다중블록격자)

Abstract

Three dimensional turbulent flow in the scroll volute of centrifugal compressor has been numerically investigated in this paper by solving the Navier-Stokes equations and k-ε equation model. The computational grid for the flow field of the scroll volute has been constructed based on the multi-block grid concept, which is good to avoid the central grid singularity as well as to promote grid stretching toward the volute wall. Numerical result has been obtained for both the two- and three- dimensions. For the latter flow, result of the scroll volute flow is compared with that of the straight conical volute. This comparison has sorted out the characteristic features of the three-dimensional scroll-type volute flow of centrifugal compressor.

기호설명

- V_T : 벌류트의 축방향 속도성분
- V_R : 벌류트의 축에 대한 회전속도 성분
- Re : 레이놀즈 수
- L_1 : 원뿔형 직선 벌류트의 입구 길이
- L_2 : 직경이 일정한 원뿔형 직선 벌류트 길이
- L_3 : $L_2/2$
- d_1 : 벌류트 tongue의 직경
- d_2 : 벌류트 출구의 직경
- h_1 : 벌류트의 입구 높이
- h_2 : 직선 벌류트의 단면 중심과 입구와의 거리

1. 서론

산업현장에서 원심 압축기 벌류트를 개발함에 있어 모델을 제작하고 성능을 평가하기 위해 내부 유동장을 실험에 의해 직접 측정하는 것은 경제적, 시간적 이유로 인해 상당한 어려움이 있다. 기존의 연구들도 벌류트 내부 유동장과 같은 직접적인 연구 보다는 여러 가지 형상 변수들에 대한 성능 평가가 주된 연구 목적이었으며, 수치해석 보다는 실험에 의존해 왔다. 실험 또한 원주 방향의 정압변동과 전압의 손실 등에 의해 제한된 측정만이 가능하였다.⁽¹⁻⁴⁾

복잡한 형상을 가지는 원심형 터보기계의 로터나 임펠러의 유동장에 비해 벌류트의 형상과 유동장은 비교적 간단해 보이지만 계산은 그렇지 않다. 벌류트의 내부 유동은 임펠러로부터 디퓨저를 통해 벌류트의 접선방향 입구로 들어오는 유동을 모아 연소기나 터빈으로 공급하는 단순한

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학과
E-mail : hbae@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3751 FAX : (042)869-3710

* (주)뉴로스

** 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

연결 덕트 시스템으로 볼 수 있지만, 원, 타원 또는 사각 덕트 모양의 단면을 가진 스크롤 벌류트는 출구 방향으로 진행하면서 단면적이 넓어지고, 중심축이 하나의 원으로 구성된다. 벌류트 입구유동은, 임펠러에 연결된 디퓨저의 출구를 지나 벌류트 입구로 들어오는 공기유동이며, 이들 출/입구에서의 유동은 상호작용으로 인해 매우 불안정한 비정상 상태의 복잡한 유동을 발생하기 때문에, 무리 없이 원활한 시스템의 유동공급을 위해서는 벌류트 내부 유동장에 대한 고찰이 반드시 필요하다.

벌류트 내부 유동은 크게 두 가지의 회전 유동으로 구분된다. 벌류트의 입구를 통과한 유동은 벌류트내 초기 유동에서 단면의 중심축에 대해 2차원의 회전 유동 특성을 보이지만, 출구로 진행하면서 점점 더 3차원의 회전 특성을 나타낸다. 이러한 벌류트로 유입되는 유동의 성질과 벌류트내 유동의 회전 특성에 따라 벌류트 내의 압력 분포가 큰 영향을 받는다. 유량이 너무 많으면 단면에 대한 2차원 회전 유동 특성이 커져서 출구로의 유체 수송이 줄어드는 반면 압력 분포의 크기가 낮아지게 된다. 반면 유량이 너무 적으면 단면에 대한 2차원 회전 유동 특성이 줄어들고 출구 방향으로 진행하면서 압력 분포의 크기가 급하게 높아지게 된다. 이로 인해 탈 설계점에서의 운전에서 벌류트 내 압력분포는 불안정해 질 수 있다. 이처럼 복잡한 3차원 구조를 가지는 벌류트 내부 유동에 대한 전산해석은 벌류트의 공기역학적인 성능 향상을 위해서 대단히 필요하다.

Escudir⁽⁵⁾는 일정한 원형 단면을 가지는 벌류트내 유동을 LDV를 이용하여 측정 하였으며 그 결과 중심부에서의 유동이 강제 회전을 하는 자유 와류 형태의 회전 유동임을 보여 주었다. Van den Braembussche & Hande⁽⁶⁾는 축방향으로 원형 단면이 증가하는 원뿔형의 관을 이용한 실험을 통해 벽 근처에서의 회전 속도는 거의 일정하며 중심부에서는 강제 회전하는 와류 형태임을 보여 주었다. Ayder 등^(7,8)은 벌류트 내 3차원 유동장에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과로서 벌류트내 2차 유동이 압력 변화와 속도분포에 중대한 영향을 미치고 있음을 보여주었다.

벌류트에 의해 발생하는 원주 방향의 압력 분포 변동을 예측하는 모델들이 여러 선행 연구자들에 의해 제시되었으나 이들은 대부분 1차원 또는 2차

원의 간단한 것들이었다. 실제 벌류트 내 유동은 비정상 상태의 입구 유동 조건과 3차원의 기하학적 형상에 의해 영향을 받는다. 디퓨저를 통해 유입되는 입구 유동에 의해 벌류트 축에 대해 회전하는 유동과, 벌류트의 스크롤 형상 때문에 스크롤 축에 대해 회전하는 유동이라는 2축 방향 회전 유동 속도성분을 갖는 3차원 유동이기에 정확한 수치해석을 위해서는 3차원 해석 모델이 필요하다.

Ayder & Van den Braembussche⁽⁹⁾는 인공 소산항을 이용한 3차원의 오일러 방정식을 이용하여 타원 단면을 가지는 벌류트 내부 유동장 해석을 수행하였다. 그 결과는 실험치와 대체로 일치하고 있으나 전압 분포 계산에 대해서는 약간의 오차를 보이고 있다. Hagelstein⁽¹⁰⁾ 등은 사각 단면을 가지는 벌류트 내 3차원 유동을 실험과 수치해석을 병행하여 연구하였으며, 그 두 결과는 잘 일치하였다. 이들은 Navier-Stokes 방정식을 대신하여 벽마찰과 내부 전단 해석을 위한 2차 점성항을 가지는 Euler 방정식을 사용하였으나, 낮은 질량 유량으로 인해 발생하는 유동박리를 예측할 수 없는 등 계산상의 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 (주)뉴로스에서 개발한 “분산형 열병합 발전을 위한 마이크로 터빈”에 적용된 원형 단면을 가지는 원심 압축기 벌류트에 대한 3차원 유동 해석을 통해 벌류트의 형상 설계와 성능 향상을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 2차원 덕트 유동과 3차원 U자형의 원형 곡관에서 원형 단면을 가지는 관내 점성 유동에 대한 기초 연구를 수행한후 3차원 벌류트 유동 해석에 적용하였다. 스크롤형의 벌류트에 대한 3차원 회전 유동 특성을 알아보기 위해, 단면에 대한 2차원 회전 특성만을 가지는 원뿔형의 직선 벌류트의 결과를 스크롤 벌류트와 동일한 입구 조건에서 계산하여 제시하였다. 일반 곡선 좌표계에서 Navier-Stokes 방정식에 대해 유한 차분하여 계산하였으며, 압력-속도 수정을 위해서는 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

일반적인 3차원 유동장을 계산하기 위한 Navier-Stokes 방정식을 일반화하여 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t}(\rho q) = -\frac{\partial}{\partial \xi_i}(\rho U_i q) + \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\mu_{eff} G_{ij} \frac{\partial q}{\partial \xi_j} \right) + S_q \quad (1)$$

q 는 1, u , v , w , h , k , ϵ 으로 각각 연속방정식, 운동방정식, 에너지 방정식, 난류모델 방정식이다. J 는 좌표변환에 대한 Jacobian이고, U_i 는 체적가중 속도항이고, G_{ij} 는 diffusion metrics 이다. 이들은 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(x, y, z)}, \quad U_i = \frac{u_i}{J} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i}, \quad G_{ij} = \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_k} \quad (2)$$

2.2 수치 해법

대류항의 공간 이산화는 3차 upwind, 2차 upwind 또는 중앙차분과 적용 2차, 4차 소산항을 이용하였다. 점성항과 소스항 계산을 위해 2차 중앙차분법을 이용하였다. 난류와 같은 스칼라량 계산을 위해 1차 upwind를 사용하였다. 속도-압력 커플링과 연속방정식을 만족하는 유동장의 해석을 위해 매 시간 step의 마지막에 압력에 근거한 predictor/multi-corrector 해석 과정을 사용하였다. 비압축성 유동해석을 위해 타원형 압력 수정 방정식을 사용하여 발산을 줄이는 속도-압력 커플링을 사용하였다.

2.2.1 격자 형성

원형을 단면을 가지는 overhung 형태의 원심 압축기 벌류트 내부 유동을 수치적으로 해석하기 위해 다중 블록 기법을 사용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 사각 단면을 가지는 벌류트의 입구는 원형 단면을 가지면서 유동의 진행 방향에 대해 단면적이 넓어지는 형상의 몸체와 만나고 있다. 서로 다른 모양의 단면을 가지며 이들 단면의 면적 비 또한 큰 형상의 내부 유동을 단일 블록으로 형성하여 계산하는 것은 여러 가지 불리한 점이 많으며, 계산상의 오류를 발생 시킬 수도 있다. 원형 단면을 가지는 3차원 유동 계산 시 O-type 격자는 단면의 중심에서 singularity 가 발생하게 되고, 직교 좌표계에서 정렬 격자를 사용하여 유한 차분된 수치 해석에 있어 이것은 계산상의 오류를 발생시킬 수 있다. 본 수치 계산에서는 이러한 문제를 다중 블록 기법을 사용하여 해결하였다.

벌류트의 기하학적 형상에 의한 3차원 회전 특성을 알아보기 위해 Van den Braembussche⁽⁶⁾의 실험 조건과 동일한 원뿔형의 직선 벌류트를 사

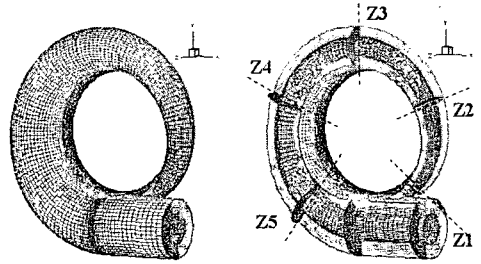


Fig. 1 Multi-block grid for a scroll volute

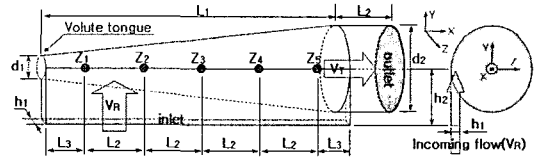


Fig. 2 Schematic for a straight conical volute

용하였다. Fig. 2에 그 형상을 나타내었으며, 스크롤 벌류트와 동일한 방법으로 격자를 형성 하였다. 벌류트 입구는 사각 단면을 가지는 덕트 형으로 하였으며, 벌류트 몸체는 원형 단면 내에 또 다른 작은 원형 단면을 두어 이 두 원을 다시 4개의 블록으로 나눠 서로 연결하였다. 높이가 일정한 사각 단면의 벌류트 입구와 원형의 벌류트 몸체를 동일한 격자수로 연결하여 두 부분이 만나는 지점에서 격자의 엇갈림이 없도록 하였다.

각 블록의 경계면에서의 속도와 압력값은 내부 격자의 계산값을 이용하여 내삽하였으며, 이것을 인접 격자의 내부 유동 계산에 필요한 경계값으로 사용하여 각 블록들 간의 계산에 필요한 일관성을 유지 하였다.

벌류트 내 유동장 해석을 위해 총 7개의 블록으로 구성된 다중 블록 격자는 유체를 운반하는 원형 단면의 관을 구성하는 161×21×21의 5개 블록과 유동의 입구부를 위해 161×21×21과 7×21×21의 2개 블록으로 구성된다. Z1에서 Z5까지의 단면에 대한 유동값을 결과에서 고찰 하였다.

2.3 유동 조건

(주)뉴로스에서 개발중인 스크롤 벌류트 입구의 높이는 0.012 m, 입구둘레는 0.8859m, 출구의 직경은 0.145 m이다. 원뿔 형상의 직선 벌류트의 입구 높이와 출구 직경은 스크롤 벌류트와 동일하며, 길이 $L1 = 1.25m$ 이고, $L2$ 는 $L1$ 의 1/5이며, $L3$ 는

L2의 1/2이다. (주)뉴로스에서 개발중인 마이크로 터빈의 정격 운전시 스크롤 벌류트에 요구되는 질량유량이 0.6 이므로 내부 유동에 대해 스크롤과 직선 벌류트 모두 질량 유량 0.6을 기준으로 하였으며 이때의 레이놀즈수는 출구직경에 근거하면 $Re = 3 \times 10^5$ 이다. 입구 속도는 임펠러의 출구 값을 이용하여 순간 값이 변하는 분포를 적용해야 하지만, 시간에 대한 평균을 고려하면 정상 상태로 가정할 수 있으므로 출구의 질량 유량과 레이놀즈수를 만족하는 상수 값으로 주었다. 이때, Fig. 2에 나타낸 원뿔 형상의 직선 벌류트의 속도 성분 V_T 와 V_R 의 벡터 합이 입구단면과 이루는 각은 원뿔형의 직관 벌류트를 이용한 실험을 통해 질량 유량의 변화가 벌류트 내부 유동에 미치는 영향을 평가한 Van den Braembussche⁽⁶⁾의 결과에 근거하였으며 최적의 질량 유량(본 연구에서는 0.6)을 위해 입구 각이 50도(Y축과 이루는 각이 40도)가 되도록 입구 속도를 주었다. 스크롤 벌류트도 같은 개념으로 입구 단면에 수직성분(V_R)과 접선성분(V_T)의 벡터 합이 입구 단면과 이루는 각이 50도가 되도록 하였다. 스크롤 벌류트와 원뿔형 직선 벌류트 각각의 계산 값은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타낸 Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 지점에서의 단면과 Z축 방향의 분포를 결과에서고찰 하였다. Fig. 1에서 Z1~Z5는 360도를 5등분하여 각각이 72도의 등간격을 이루고 있으며, Fig. 2에서 Z1~Z5는 L1을 5등분하여 각각 L2로 등간격을 이루도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난류 및 다중 블록 격자 검증

3.1.1 이 차원 관유동의 난류 해석

난류 유동장 해석을 위해 2방정식 모델인 $k - \epsilon$ 모델을 적용하였다. 직관의 직경(D) : 길이(L) 비가 1:30이고 $Re=40000$ 인 경우에 대해 난류 유동을 수치 해석 하여 기존의 결과들과 비교 하였다. 출구에서의 속도 프로파일을 Wilcox의 $k - \omega$ 모델식⁽¹¹⁾을 이용한 계산 결과와 비교하여 Fig. 3(a)에 나타내었으며, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 벽함수를 이용한 $k - \epsilon$ 모델식이 적용된 난류 계산 결과를 일반적인 난류 경계층 유동과 비교하여 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 그 결과 또한 잘 일치하고 있다.

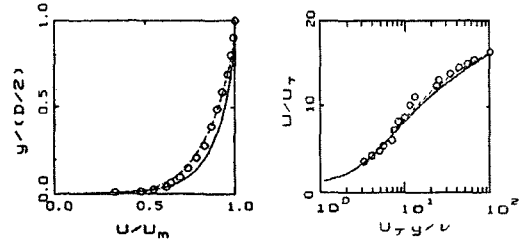


Fig. 3 U-velocity profiles (a) and Velocity profile of turbulence boundary layer (b): Result by Wilcox $k - \omega$ equation (solid line), experimental data (empty circle⁽¹¹⁾), result by $k - \epsilon$ equation (broken line). Both $L/D=30$, $Re=40000$

3.1.2 다중 블록 격자 검증

다중 블록 격자의 검증을 위해 U자형 원형 관을 사용하였다. 원심 압축기 벌류트 자체가 원형관의 벽면에서 유동이 유입되어 출구로 흘러가는 하나의 관 시스템으로 볼 수 있기 때문에 U자형 원형관이 검증에 적합하다고 판단되었다.

Fig. 4(a)에 다중 블록으로 이루어진 격자를 나타내었다. 원형 단면의 격자 형성은 벌류트와 동일한 방법을 사용하여 5개의 블록으로 나뉘었으며, 입구 유동은 완전 발달된 층류 속도 분포를 주었다. 이때 직경에 근거한 레이놀즈수는 2×10^5 이다. Fig. 4(b)에 U자형 원형관의 중심 단면(출구 A-A'과 입구 B-B'단면)에서 속도 벡터와 정압분포를 동시에 나타내었다. 유동은 관을 따라 진행하면서 U자형 곡관의 바깥 벽면을 따라 속도가 증가하고 안쪽 벽면을 따라서는 속도가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 압력 또한 입구에서부터 조금씩 증가하여 첫 번째 코너 바깥 벽면에 이르러 최대 압력 분포를 보이고 있으며 U자관의 안쪽과 바깥 벽면 사이에 비대칭의 압력 분포를 보이고 있다. 이것은 벽면과 마찰하는 힘에 의한 유체의 압력 분포가 벽면 안쪽과 바깥쪽의 속도 차에 의한 유체의 압력 분포 보다 훨씬 크다는 것을 잘 표현하고 있다. 곡선 구간을 지나 마지막 직선 구간에서의 압력은 출구로 진행하면서 낮아지는 분포를 보이고 있다. Fig. 4(c)에 나타낸 난류 운동 에너지 분포는 입구 영역의 직선 구간에서 벽면을 따라 난류 운동 에너지가 점차적으로 발달하고 있으며, 첫 번째 곡선 구간의 바깥 벽

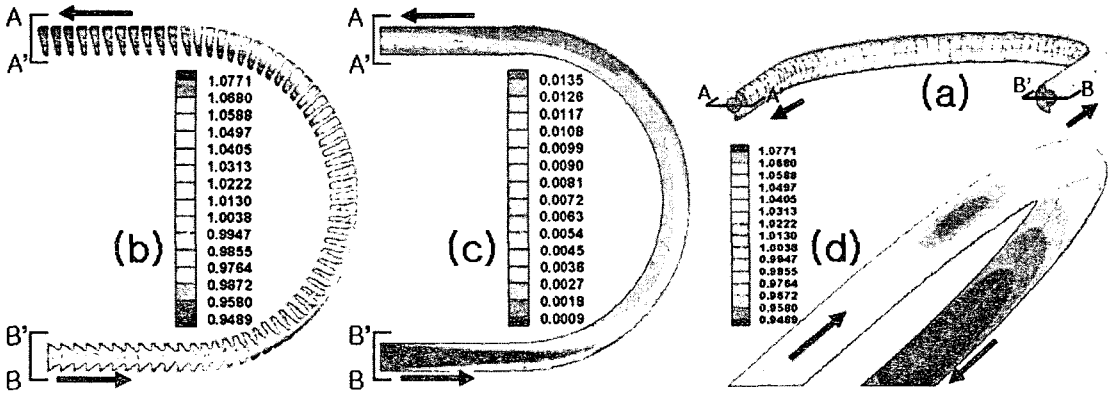


Fig. 4 (a) Grid of U-type pipe, (b) Velocity vector (arrows) and static pressure (color map) in the mid-plane of the U-type pipe, (c) Turbulence kinetic energy (color map) in the mid-plane of the U-type pipe, (d) Static pressure (color map) in the surface of the U-type pipe; $Re = 2 \times 10^5$, \longrightarrow : flow direction

면에서 난류 운동 에너지가 최대로 증가 하는 특성을 잘 나타내고 있다. Fig. 4(d)에 U자 관의 표면 압력 분포를 나타내었으며, 각 블록의 경계에서 압력 값의 분포 곡선이 매끄럽게 잘 연결되어 있는 것으로 보아 다중 블록 격자의 경계면에서 유동 값의 상호 교환이 잘 이뤄지고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 유동 해석

3.2.1 2차원 유동 특성

다중 블록 기법을 이용하여 격자계를 형성 하여 원형 단면을 가지는 overhung 형의 원심 압축기 벌류트의 내부 유동 특성을 해석 하였다. Fig. 1과 Fig. 2에 나타낸 Z1 ~ Z5 에서 Z축 방향으로 단면의 중심을 지나는 점들의 속도(V_T & V_R)와 정압 분포를 무차원화 시켜 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 좌측 3개의 그림은 스크롤 벌류트에 대한 속도(a,b)와 정압 분포(c)이고, 우측 3개의 그림은 원뿔형 직선 벌류트에 대한 속도(a,b)와 정압 분포(c)이다. 벌류트의 원형 단면에 수직인 속도 성분을 편의상 축방향이라 하면 스크롤 벌류트의 축방향 속도(V_T)는 원형 단면의 최소 직경에 근접한 부분인 Z1에서 상당히 불안정한 유동을 보이지만, Z2에서 Z5로 유동이 진행해 감에 따라 단면 중심부의 속도 분포가 상당히 안정적으로 발달하면서 Z5에서는 오히려 중심부의 속도 최대값이 줄어드는 특성을 보이고 있다. 원뿔형의 직선 벌류트 역시 Z1에서 불안정한 축방향 속

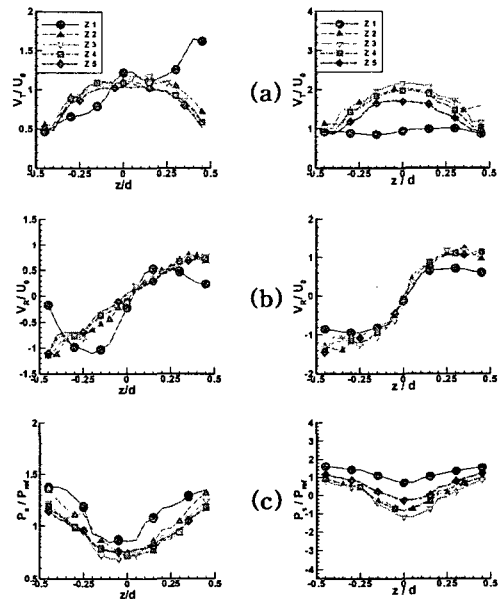


Fig. 5 Axial velocity (a), swirl velocity (b), static pressure (c), on the position Z1 to Z5; $Re = 3 \times 10^5$

도 분포를 보이지만 Z2에서 Z5로 가면서 스크롤 벌류트의 속도 분포와 잘 일치하는 축방향 속도 분포를 보이고 있다. 스크롤 벌류트의 원형 단면에 대한 회전 속도 성분(V_R) 역시 Z1에서는 불안정한 유동을 보이지만 다른 영역에서는 중심부에서 강제 회전하면서 벽면 가까이로 가면서 회전 속도가 일정해 지는 구간이 나타나고 있다. 원뿔형의 직선 벌류트의 회전 속도 역시 중심부

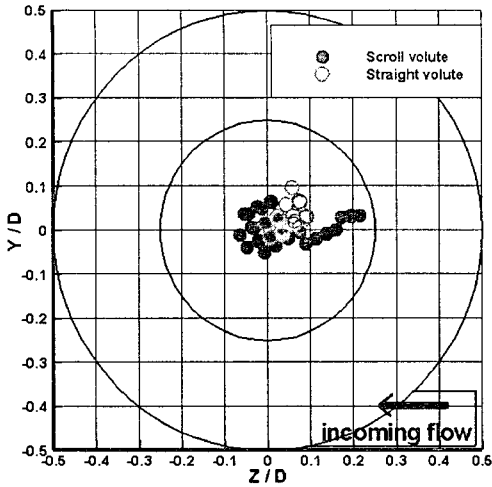


Fig. 6 Core distribution of swirl flow through the volute of scroll type and straight conical type, $Re = 3 \times 10^5$

에서 강제 회전하고 있으며, 벽면 가까이에서 회전 속도가 일정해지는 경향이 더 뚜렷하게 나타나고 있다. 이것은 벌류트의 회전 속도 분포의 고유한 특징⁽⁶⁾으로 본 계산 결과에서도 잘 나타나고 있다. 정압 분포는 단면의 중심부에서 최소값을 가지며 거의 대칭적인 분포를 보이고 있지만, 스크롤 벌류트의 정압 분포는 중심에서 약간 좌 편향된 지점(스크롤 벌류트의 입구쪽)에서 최소값이 나타나고 있다. 이것은 스크롤 벌류트의 기하학적 형상에 의한 전체적인 선회유동 특성이 반영된 것으로 사료된다.

3.2.2 벌류트 내부 유동의 회전 중심

원심 압축기 벌류트의 기하학적 형상에 의한 3차원 회전 특성을 알아보기 위해 Van den Braembussche et al.⁽⁶⁾가 실험에 사용한 원뿔 형상의 직선 벌류트와 동일한 모델(Fig. 1)을 이용해 수치 계산하여 스크롤 형상의 벌류트와 회전 중심의 위치를 비교하였다. Fig. 6에 그 위치를 나타내었으며, 스크롤 형상의 벌류트 내부 유동의 회전 중심 분포를 속이 채워진 원형으로, 원뿔 형상의 직선 벌류트 내부 유동의 회전 중심 분포를 속이 빈 원형으로 표시 하였다. 직선 벌류트 내부 유동의 회전 중심은 대체로 원형 단면의 중심과 벌류트의 입구쪽 상단으로 치우쳐져 있다. 반면, 스크롤 벌류트 내부 유동의 회전 중심은

원형 단면의 중심에서 좌우로 넓게 분포 되어 있다. 벌류트 원형 단면의 직경이 최소가 되는 지점인 벌류트 tongue 부분(Fig. 1 참조)에서부터 생성된 회전 유동이 출구를 향해 오면서 그 중심이 벌류트 입구부(우측)에서 벌류트 바깥 벽(좌측)으로 이동하고 있는 것이다. 이것은 직선 벌류트에서는 나타나지 않는 현상으로 스크롤 벌류트의 기하학적 특성상 입구를 통해 유입된 유동은 벌류트 몸체를 따라 크게 선회하게 되고 이로 인해 발생된 원심력의 영향으로 유동의 회전 중심이 벌류트의 바깥 벽(입구반대쪽 벽)으로 치우침으로 인해 발생하는 것으로 보인다. 벌류트 내부 유동 특성을 고찰함에 있어 이러한 기하학적 형상에 의한 3차원 유동도 고려되어야 한다.

3.2.3. 3 차원 유동 특성

3차원 유동 특성을 알아보기 위해 스크롤 벌류트와 직선 벌류트의 5 단면 (Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 Z1 - Z5)에 대한 축방향 속도(V_r) 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 스크롤 벌류트 유동인 (a)를 보면 단면에 수직한 유동 성분인 축방향 속도 (V_r : throughflow velocity)는 출구로 가면서 원형 단면의 중심에서 벌류트 입구쪽으로 치우친 벌류트 형상의 중심(벌류트 입구)에서 최대 속도 분포를 보이는 반면, (b)에 나타난 직선 벌류트의 축방향 속도는 단면의 중심에서 최대 속도 분포를 보이고 있다. 이것은 벌류트 입구를 통해 유입된 유동이 일차적으로 벽면과 마찰을 일으키며 회전 하면서 난류 혼합 유동 형태로 에너지 교환이 일어나고, 이차적으로 벌류트 몸체를 따라 선회하는 유동을 따라 출구로 이동하는 것과 무관하지 않을 것으로 보인다.

Fig. 8과 9에 나타난 정압 분포는 벌류트의 기하학적 형상을 따라 크게 선회하는 전체 유동장은 선회 외곽(벌류트 바깥 외벽)부를 따라 높은 정압 분포를 보이고 있다. 이것은 유동이 선회 하면서 벌류트 바깥 외벽에 가하는 원심력과 유동 자체의 마찰력에 의한 압력 특성에 기인하는 것으로 보인다. 이러한 이유로 인해 압력의 최소값은 타원 단면을 가지는 Ayder et al.⁽⁹⁾과 사각 단면을 가지는 Hagelstein et al.⁽¹⁰⁾의 스크롤 벌류트의 결과와 같이 벌류트 원형 단면의 중심이 아니라 약간 입구쪽으로 편향된 위치에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 원뿔형의

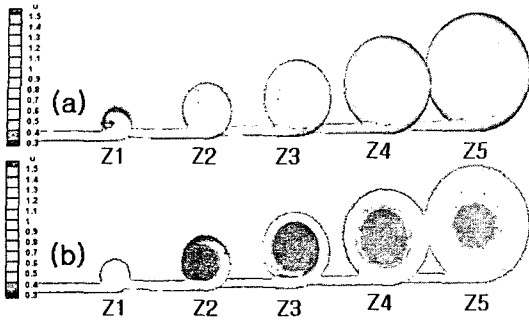


Fig. 7 Non-dimensional throughflow velocity for scroll volute (a) and straight conical volute (b)

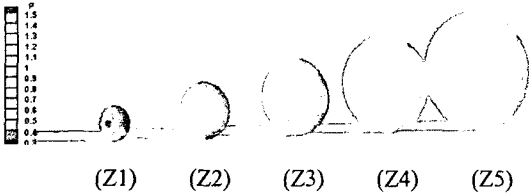


Fig. 8 Non-dimensional static pressure in the scroll volute

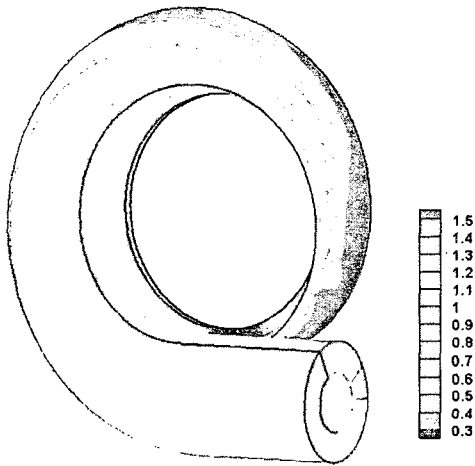


Fig. 9 Three-dimensional static pressure distribution

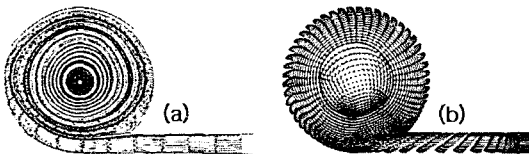


Fig. 10 Particle trace (a) and vector plot(b) at position Z3

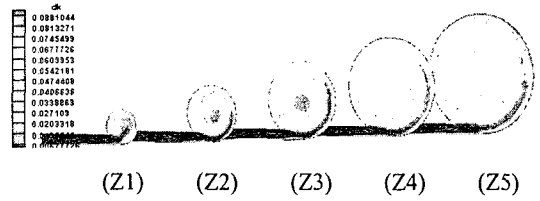


Fig. 11 Turbulence kinetic energy distribution

직관벌류트⁽⁶⁾에서는 나타나지 않는 스크롤 형상에 의한 선회 특성으로 볼 수 있다. 축방향 속도의 최대값이 이와 비슷한 영역에서 확인되는 것으로 보아 이러한 압력의 영향이 축방향 속도에도 영향을 주는 것으로 추측된다. Hillewaert et al.⁽¹²⁾가 제시한 스크롤 벌류트의 표면 정압 분포는 벌류트 출구로 가면서 벌류트 단면에 대한 회전 유동과 기하학적 형상에 따른 선회 유동의 영향으로 인해 약간 비틀림을 가지면서 낮아지게 되는데, Fig. 9을 보면 이러한 정압분포 특성이 잘 예측되고 있다.

3.2.4 난류 유동 특성

난류 운동 모사를 위해 2방정식 모델인 $k - \epsilon$ 방정식을 사용하였다. 급격한 형상의 변화가 없고, 유동의 박리가 일어나지 않는 영역에서의 난류 유동 모사에는 $k - \epsilon$ 방정식이 효과적이다. 벌류트 내부 유동의 박리 여부를 알아보기 위해 Z3 지점의 벌류트 원형 단면에 대해 (a) 속도 입자 추적 곡선(particle trace line)과 (b) 속도벡터를 Fig. 10에 나타내었다. 회전 유동 특성을 잘 예측하고 있으며 단면 전체에 유동 박리의 흔적은 보이지 않고 있다. (b) 속도벡터에서는 벽면에서의 점착 조건을 만족하며 난류 경계층이 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 11의 난류 운동 에너지를 통해서도 확인할 수 있다. 원형 단면의 스크롤 원심 압축기의 벽면을 따라 난류 운동 에너지가 활발해 지면서 운동량과 에너지의 교환이 활성화 되어 난류 경계층이 형성되며 벌류트의 입구를 통해 들어온 유동과 상호작용을 일으키며 다시 벽면을 따라 난류 운동 에너지가 활발해지는 영역이 확인 되고 있다. 이러한 결과를 통해 스크롤 원심 압축기 벌류트 유동의 난류 모사에 $k - \epsilon$ 방정식을 이용하는 것이 유효함을 알 수 있다.

4. 결 론

원뿔형의 직관과 스크롤형 원심 압축기 벌류트 내부 3차원 유동장을 다중 블록 격자와 Navier - Stokes 방정식을 이용해 해석하였다.

(1) 설계시 요구된 질량유량(0.6)에 대해 2차원 단면의 유동 특성을 관찰하여 유동에 대한 초기 값 설정의 적절성을 평가하였다. 벌류트 원형 단면에 수직한 속도(V_T)가 단면의 중심에서 잘 발달되고, 회전 성분 역시 단면의 중심부에서 강체 회전하고 벽면 가까이에서는 회전 속도가 일정해지는 벌류트 내부 유동 특성을 잘 예측하였다.

(2) 기하학적 형상에 의한 선회 유동이 없는 직선 벌류트 유동과 스크롤 벌류트 유동의 축방향 속도 성분을 비교한 결과, 기하학적 형상에 의한 선회 특성을 잘 예측하고 있음을 확인 하였다.

(3) 스크롤 벌류트의 원형 단면에 대한 정압이 벌류트의 입구 보다는 바깥 벽면에서 높고, 출구를 향해 진행하면서 표면의 정압 분포가 비틀러지는 것을 잘 예측하고 있다.

(4) 급격한 형상 변화에 의한 유동 박리가 없는 스크롤 벌류트의 내부 유동은 다중블록격자와 k - ϵ 방정식을 사용해 난류 모사가 유효함을 확인하였다. 그 결과를 통해 벽면을 따라 난류 경계층을 형성하면서 운동량과 에너지의 상호 교환이 잘 이루어지고 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2001 ~ 2004년, (주)뉴로스 와 위탁연구 계약에 의해 수행한 산학협력과제 ‘마이크로 터빈 개발을 위한 압축기 유동 전산 해석’의 연구내용을 바탕으로 이루어진 것입니다. 과제의 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

(1) Sitefel, W., 1972, "Experiences in the Development of Radial Compressors," in: *Advanced Radial compressors, von Karman Institute Lecture Series 50*.
 (2) Mishima, H. and Gyobu, I., 1978, "Performance Investigations of Large Capacity Centrifugal

Compressors," *ASME Paper No. 78-GT-3*.
 (3) Sideris, M. and Van den Braembussche, R., 1986, "Evaluation of the Flow in a Vaneless Diffuser Followed by a Volute," *Proc. of 3rd Int. Conf. On Turbocharging and Turbochargers*, London. I.M.E. Conf. Public. 1986-4, pp. 15~20.
 (4) Sideris, M. and Van den Braembussche, R., 1987, "Influence of a Circumferential Exit Pressure Distortion on the Flow in an Impeller and Diffuser," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, No. 1, pp. 48~54.
 (5) Escudier, M., 1979, "Estimation of Pressure Loss in Ring-type Exit Chambers," *ASME Journal of fluids Engineering*, Vol. 101, pp. 511~516.
 (6) Van den Braembussche, R. A. and Hande, B. M., 1990, "Experimental and Theoretical Study of the Swirling Flow in Centrifugal Compressor Volutes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 112, pp. 38~43.
 (7) Ayder, E. and Van den Braembussche, R. A., 1991, "Experimental Study of the Swirling Flow in the Internal Volute of a Centrifugal Compressor," *ASME paper No. 91-GT-7*.
 (8) Ayder, E., 1993, "Experimental and Numerical Analysis of the Flow in Centrifugal Compressor and Pump Volutes," Ph. D. thesis, VKI.
 (9) Ayder, E. and Van den Braembussche, R. A., 1994, "Numerical Analysis of the Three-Dimensional Swirling flow in Centrifugal Compressor Volutes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 462~468.
 (10) Hagestein, D., Hillewaert, K., Van den Braembussche, R. A., Engeda, A., Keiper, R. and Rautenberg, M., 2000, "Experimental and Numerical Investigation of the Flow in a Centrifugal Compressor Volute," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 22~31.
 (11) Wilcox, David C., 1993, "Turbulence Modeling for CFD," DCW Industries, Inc.
 (12) Hillewaert, K. and Van den Braembussche, R. A., 1999, "Numerical Simulation of Impeller-Volute Interaction in Centrifugal Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 603~608.