

# 다중 블록 격자를 이용한 원뿔 직관 모양의 벌류트 유동의 수치해석

배 황<sup>\*1</sup>, 강 현 구<sup>1</sup>, 윤 주 식<sup>2</sup>, 박 기 철<sup>2</sup>, 장 근 식<sup>3</sup>

## NUMERICAL SIMULATION ON A VOLUTE OF STRAIGHT CONICAL DUCT TYPE BY MULTI-BLOCK GRID

H. Bae<sup>\*1</sup>, H.G. Kang<sup>1</sup>, J.S. Yoon<sup>2</sup>, K.C. Park<sup>2</sup> and K.S. Chang<sup>3</sup>

*Numerical investigation of a centrifugal compressor volute having a modified straight conical duct has been made. Three-dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations with  $k-\epsilon$  turbulence equation are solved. To avoid coordinate singularity at the central axis of the duct, multi-block H-type grid is generated on the circular cross-sections of the volute and stretched toward the solid wall boundary. We obtained numerical results with three different mass flow rates at the volute inlet, namely, with the inlet conditions that give small, medium and large mass flow rates at the outlet of the conical duct. Agreement with the experimental results is observed.*

**Key Words:** 다중 블록 격자, 원심압축기, 벌류트, 입구유동조건 (inlet flow conditions), RANS 방정식

### Nomenclature

$L_1$  : inlet length of straight volute  
 $L_2$  : volute length with constant outer diameter  
 $L_3$  : a half length of  $L_2$   
 $d_1$  : diameter of straight volute tongue  
 $d_2$  : diameter of straight volute outlet  
 $h_1$  : inlet height of straight volute  
 $h_2$  : length from inlet to center of volute  
 $V_R$  : radial or swirl velocity  
 $V_T$  : tangential or throughflow velocity  
 $P_s$  : static pressure  
 $V_{Ri}$  : radial or swirl velocity of inlet  
 $P_{ref}$  : reference static pressure ( $P_{ref} = \rho U_0^2/2$ )  
 $U_0$  : reference velocity ( $U_0^2 = 20\text{m/s}$ )  
 $\Theta$  : inlet velocity setting angle [degree]  
 $\rho$  : density

### 1. 서 론

원심 압축기에 연결된 벌류트는 임펠러에서 토출되는 고속의 공기를 모아 압력을 상승시키는 일종의 디퓨저로서, 여기에 모여드는 압축된 공기를 연소기나 터빈으로 연결 공급해주는 역할을 한다. 벌류트의 형상은 하류의 터빈 뿐만 아니라 역으로 상류의 임펠러의 유동장에도 압력 변화를 미치는 민감한 부분으로 압축기의 매우 중요한 요소가 된다. 예를 들면, 벌류트의 형상에 따른 압력손실은 압축기를 탈 설계점에 이르게 할 수 있으며, 이것은 가스터빈 전체의 작동 범위를 줄이고 효율을 낮게 만드는 원인이 될 수 있다. 탈 설계점에서 운전이 지속될 때는 벌류트 내 압력이 변화하고, 그 영향으로 인해 임펠러 출구의 유동장이 주기적으로 가/감속되며 특히, 높은 입구 압력 조건에서는 임펠러 자체가 손상되는 결과까지 초래하는 것으로 알려져 있다.

압축기의 로터나 임펠러, 디퓨저에 대한 연구들에 비해 벌류트에 대한 연구는 그 중요성에 비해 그리 많지 않다. 더구나 이에 관한 기존의 연구들은 벌류트 내 유동장에 대한 조사보다는 압축기 전체 성능에 대한 형상 변수들의 영향에 대한 조사가 주된 것이었으며, 연구방법에 있어서도 수치해석 보다는 실험에 의존해왔다. 실험 또한 원주방향의 정압변동과 전압손실 등에 관한 제한된 측정만이 가능하였다[1-4].

접수일: 2005년 8월 2일, 심사완료일: 2006년 2월 27일.

1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

2 정회원, (주식회사)뉴로스

3 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\* Corresponding author E-mail: hbae@kaist.ac.kr

문헌상으로 Escudir[5]는 일정한 원형 단면을 가지는 벌류트 내 유동을 LDV를 이용하여 측정 하였으며, 그 결과 중심부에서의 유동은 강체 회전을 하는 자유와류형태의 회전유동임을 보여 주었다. Van den Braembussche & Hande[6]는 원형 단면이 직선 축 방향으로 점점 증가하는 원뿔형의 관을 이용하여, 벽 근처에서의 회전 속도는 거의 일정하며 중심부에서는 강체 회전하는 와류 형태가 있음을 실험적으로 보여 주었다.

Ayder & Van den Braembussche[7]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 보여준다. Hagelstein[8] 등은 사각 단면을 가지는 벌류트 내 3차원 유동을 실험과 수치해석을 병행하여 조사하였으며 두 결과는 잘 일치하고 있다. 이들은 Navier-Stocks 방정식을 대신하여 벽마찰과 내부 전단 해석을 위한 2차 점성항을 가지는 Euler 방정식을 사용하였으나, 낮은 질량 유량으로 인해 유동박리가 발생하는 문제에 대해서는 계산상의 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 원형 단면을 가지는 원심 압축기 벌류트의 3차원 유동 해석을 수행하여 벌류트 형상 설계 및 성능 향상을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 3차원 원형 직관에서 점성 유동에 대한 기초 계산을 먼저 수행하였으며, 이를 3차원 벌류트 유동 해석에 확장 적용하였다. Braembussche & Hande[6]의 실험 결과와 비교하기 위해, 이들이 실험에 사용한 유동의 진행 방향에 대한 회전 성분이 무시된 직관 형태의 원뿔형 벌류트 모델을 선택하고, 유량변화가 유동장에 미치는 영향을 평가하기 위해 서로 다른 유량에 대한 수치 계산을 수행하였다. 이를 위해 출구 직경에 근거한 레이놀즈 수 ( $Re=2 \times 10^5$ )에 대하여 벌류트 입구 유동의 유입각과 입구 속도에 변화를 주어 수치 계산하여, 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 수치 해법

### 2.1 지배 방정식

비압축성 점성 유동에 대한 3차원 RANS 방정식을 지배 방정식으로 사용 하였으며, 비엇갈림(non-staggered) 격자계의 node 중심에서 유한 차분을 수행하였다. 대류항은 adaptive dissipation scheme을 이용하여 2차/3차 풍상 차분법 또는 2차 중앙 차분법을 선택할 수 있도록 하였다. 점성 플럭스는 2차 중앙 차분하여 이산화 하였으며, 확산항은 직교항과 비직교항으로 나누어, 직교항은 음성적(implicit)으로 비직교항은 양성적(explicit)으로 처리 하였다.

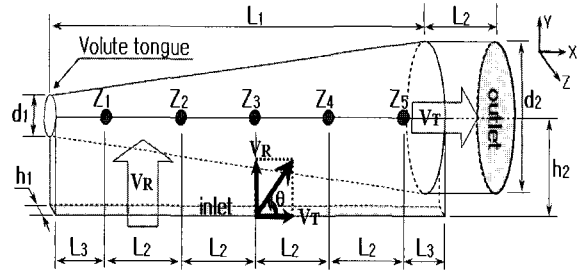


Fig. 1 Schematic of straight volute of conical shape

RANS 방정식의 레이놀즈 응력은 대표적인 2방정식인 모델인 k-ε 난류 모형식을 이용하여 난류 유동을 모사 하였다. k-ε 난류 모형식은 유동의 박리가 발생하는 부분에 대한 난류 모사에는 한계가 있다고 알려져 있으나, 급격한 형상 변화 따른 유동 박리가 일어나지 않는 유동에 대해서는 좋은 결과를 주고 있기 때문에 원심 압축기의 벌류트 유동의 난류 모사에 k-ε 모델식을 사용 하였다.

## 2.2 다중 블록 격자 형성 기법

### 2.2.1 벌류트 형상

Braembussche & Hande[6]의 실험 결과와 비교하기 위해 원형 단면을 가지며 축방향에 대해 단면적이 증가하는 원뿔형의 overhung 벌류트에 대해 계산을 수행하였으며 그 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이 형상은 벌류트 tongue에서부터 출구 방향으로 진행하면서 스크롤 형상의 일정한 곡률을 가지는 실제 원심 압축기의 벌류트와는 차이가 있다. 그러나 벌류트의 직경이 스크롤 형상의 곡률 반경에 비해 상당히 작은 경우에는 제1차적 가정으로 스크롤이 유체 유동에 미치는 영향 역시 무시할 수 있을 만큼 작은 것으로 생각할 수 있다. Table. 1에 직관의 형상 데이터를 제시 하였다. 실제 벌류트의 곡률 효과는 기 발표된 또 다른 논문[7]에서 다룬다.

Table. 1 Geometry of Volute[m]

L1	1.25
L2	0.25
L3	0.125
d1	0.012
d2	0.145
h1	0.1
h2	0.006

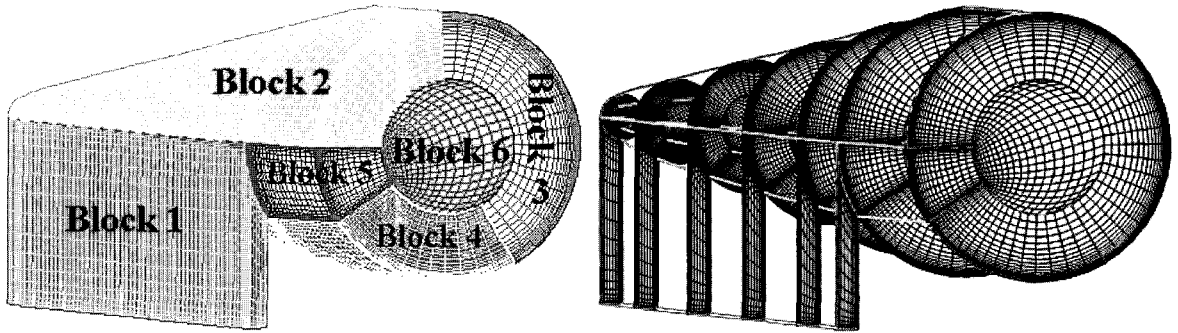


Fig. 2 Multi-block grid for a straight volute of conical shape

2.2.2 다중 블록 격자 형성

위의 Fig. 1에서 보는 바와 같이 원뿔 모양으로 형성된 원심 압축기의 직선형 벌류트는 유동이 유입되는 사각단면의 입구부와 유동이 유출되는 원형단면의 덕트 출구부를 가진다.

사각단면의 입구는 원의 단면적이 넓어지는 원뿔 모양의 벌류트 몸체의 바깥 외벽과 접선방향으로 연결되어 있으며, 두체는 이를 통해 덕트 내부 원주방향으로 유입된다. 이와 같이 사각 단면과 원형 단면의 서로 다른 형상으로 구성된 내부 유동을 수치 해석하기 위해서는 각 단면에 대한 정렬격자를 블록단위로 만들어 연결한 multi-block 개념으로 계산하는 것이 유리하다.

각각 독립된 격자계를 형성할 때, 원형 단면에 대한 격자를 O-type으로 형성하면 단면의 중심에서 좌표계의 특이점(singularity)이 발생한다. 본 연구에서와 같이 유한 차분을 이용하여 지배 방정식을 이산화하는 경우에는 이로 인해 계산상의 오류가 발생할 수 있기 때문에, O-type 격자 형성은 피하는 것이 좋다.

O-type 격자 형성 방법을 피하면서 원형 단면을 가지는 벌류트 몸체가 사각의 입구부와 만나도록 5개의 H-type multi-block 정렬 격자계로 구성된 격자 모양을 Fig. 2에 나타내었다.

원형 단면의 중심부분에 단면 직경의 1/2인 작은 원을 두고 여기에 H-type 격자 형성으로 특이점이 발생하는 것을 피했으며, 내부의 작은 원과 벌류트 외벽 사이를 4개의 블록으로 나뉘, 그중 하나의 블록을 사각단면의 입구부와 일치하도록 하였다. 또한 k-ε 방정식을 이용한 난류 유동 해석을 위해 벽법칙을 만족하도록 벽면으로 격자를 밀집시켰다.

2.3 경계 / 유동 조건

고체 벽면에 대한 유동변수는 no-slip 조건을 주었으며, 난류 모형 계산을 위해 벽법칙을 적용하여 고체 벽면으로부터 대수 영역 내의 첫 번째 격자점을 취하는 벽 함수를 사용하

였다.

다중 블록으로 이루어진 격자계의 경계면에서 유동변수들은 인접 블록의 내부 값으로 내삽 하였으며, 출구에서의 압력은 외삽 하였다.

입구의 속도는 실제 임펠러 출구의 값에 근거하면 순간 값은 변동이 있겠지만, 시간에 대해서는 일정한 값을 가진다고 가정하여 출구의 질량 유량과 레이놀즈수에 근거하여 상수로 주었다. 출구 직경에 근거한 레이놀즈수는  $2 \times 10^5$ 이다.

유량 변화에 따른 유동장을 측정하기 위해 직관 형태의 원뿔형 벌류트 모델의 입구부에 blockage와 guide vane을 설치하거나 guide vane의 각도를 조절하는 Braembussche & Hande[6]의 실험 조건을 본 해석에 적용하기 위해 입구에서의 속도와 유입각을 조절하여 유량을 조절하였다. 조절 범위를 실험조건 [6]과 비교하여 Table. 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1.1 3 차원 관유동의 난류 해석

원심 압축기의 벌류트는 임펠러의 출구에서 배출되는 유동을 디퓨저 원리로서 포집하여 연소기로 수송하는 관 시스템을 형성한다. 이때 벌류트의 단면은 여러 가지 설계조건에 따

Table .2 comparison of inlet condition with the experiment of Braembussche et.al

mass flow	inlet velocity setting angle of this study (θ)	condition of Braembussche et. al	
		vane setting angle(θ)	blockage
small	39	21	yes
optimal	50	40	no
large	60	0	no

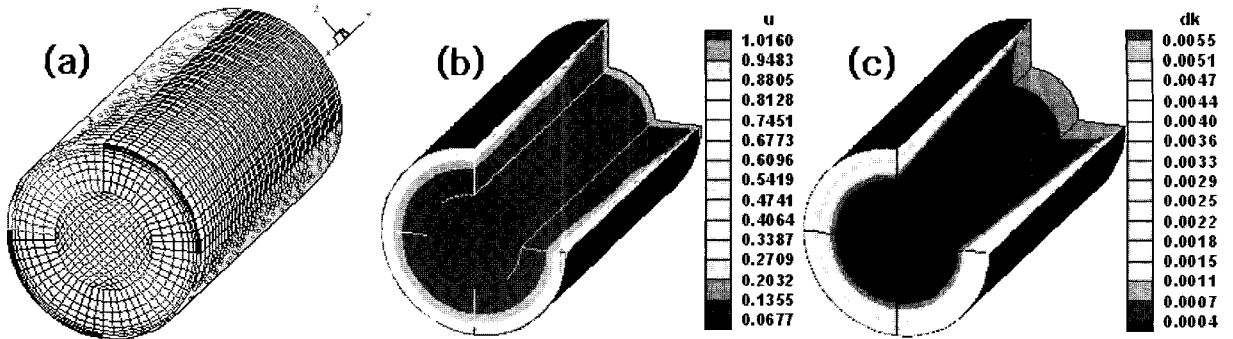


Fig. 3 (a) Multi-block grid for pipe flow of circular cross-section, (b) Three-dimensional velocity contour, (c) Three-dimensional turbulence kinetic energy contour

라 사각, 원형 또는 타원형의 단면을 가지게 된다. 본 연구에서는 축방향으로 커지는 원형 단면을 가지는 직선 벌류트의 3차원 유동을 해석하기 위해 먼저 일정한 원형단면의 직관에 다중 블록의 격자를 형성하여 계산에 사용되는 코드의 정확도를 검증하였다.

본 문제에서는 앞서 설명한 Fig. 2와 같은 개념의 multi-block 격자를 형성하였고 이를 Fig. 3(a)서 보였다. 난류 유동장 계산을 위해 벽면으로 격자를 밀집시켰으며 벽면에서의 유동은 no-slip 조건을 만족하도록 하였다. 입/출구 직경 대 길이 비는 1:30이고, 직관의 입구에서는 속도를 상수로 주었다. 이 때 레이놀즈수는  $2 \times 10^5$ 이다.

Fig. 3(b)에 축방향 속도 분포를 나타내었다. 입구의 상수 값에서 출발한 속도는 관을 따라 벽면 주위에 난류 운동 에너지가 Fig. 3(c)에서처럼 발달하면서 난류 유동장이 형성되고 있으며, 관의 출구 부근에서는 완전히 발달된 난류 속도 분포가 나타나고 있다. 다중 블록으로 형성된 격자들 간의 경계에서는 유동 값의 교환이 원활히 잘 이뤄지고 있음을 Fig. 3(c)에서 확인할 수 있다.

### 3.2 벌류트 수치 해석 결과

다음으로 원심 압축기에 연결된 X-방향의 직선 원형 단면 벌류트의 내부 유동을 계산하였다. 벌류트에 유동을 공급하는 사각단면의 입구부에서 유동조건을 세 가지로 취했다. 즉, 벌류트로 균일하게 유입되는 사각단면의 유동에서 유입부 벽면에 평행한 유동의 속도 분력( $V_R$  and  $V_T$ )을 조절하여 유입각도를 변화시킴으로써 벌류트 출구에서의 질량 유량이 과소, 적정 및 과다 유량이 되도록 조건을 변화시킨다. 계산 결과를 알아보기 위해, Fig. 1과 Fig. 2에서 보인바의 다섯 개의 서로 다른 단면 지점 ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  와  $Z_5$ )에서, 축에 직각인 Z-축 방향으로의 유동값, 즉  $V_R$ ,  $V_T$  와 압력  $P_s$  를 Braembussche et. al[6]의 실험결과와 비교하여 출력하였다.

Fig. 4-6은 위 세 가지 경우 (a), (b), (c)의 계산 결과를 실험치와 비교하여 나타낸 것이다. 각 그림의 좌측 세 frame은 Braembussche et. al[6]의 실험치이고, 우측 세 frame은 계산결과이다. 질량유량이 작은 Fig. 4의 경우, 즉 유입유동 속도 성분  $V_R$ 을 작게 취한 경우 (유동각이 유입부 단면에 대해 30도 일 때,  $\Theta=39^\circ$ ), 주어진 한 단면 상에서 지면에 수직인 Z-방향에 대해서, 그림(b)의 축방향 속도 성분  $V_T$ 의 분포는 유입부에서 들어오는 유동이 벌류트 몸체의 단면적 변화를 충분히 따라가지 못하기 때문에 중심에서의 속도가 충분히 발달하지

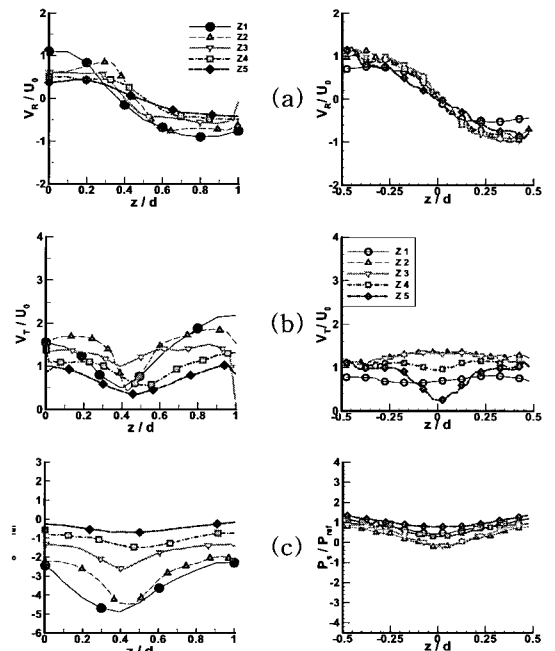


Fig. 4 Measured (solid symbol) and calculated (blank symbol) for a small mass flow rate: swirl (a), throughflow (b), velocity and static pressure (c)

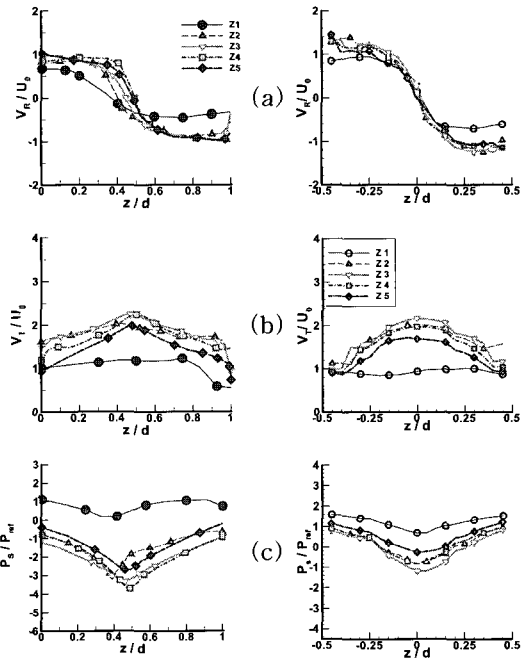


Fig. 5 Measured (solid symbol) and calculated (blank symbol) for an optimal mass flow rate: swirl (a), throughflow (b), velocity and static pressure (c)

못하고 벽면 근처의 주변부보다 작은 값을 보여준다. 이것은 Fig. 4의 (c)에서 나타난 정압분포에도 영향을 주어 출구 쪽으로 갈수록 유동에 의한 압력 강하의 영향이 낮아지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4의 그림(a)에서 벌류트 원형 단면에서 회전속도 성분  $V_r$  분포는 벌류트의 중심부에서 강제회전의 경향을 보이지만 벽면 부근에서는 오히려 회전속도 값이 특이하게 일정해지고 있다. 이것은 일반 회전 유동과 달리 벌류트의 회전 속도 성분이 가지는 특징[6]으로 알려져 있으며 실험치와 본 수치 해석 결과에서 모두 잘 나타나고 있다.

적절한 질량 유량에서는 ( $\Theta=50^\circ$ ), Fig. 5의 그림(b)에서 보듯이 축방향 속도 성분이 출구를 향해 가면서, 즉  $Z_1$ 에서  $Z_5$  쪽으로, 적절한 유량의 유입으로 인해 단면의 중심부에서 축방향 속도 성분  $V_t$ 가 충분히 잘 발달되어, 하류 쪽으로 진행하면서 이의 최대값이 증가하다가 출구부근에서 약간 줄어들고 있다. 이의 영향이 Fig. 5의 그림(c)의 정압분포에 반영되어 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5의 그림(a)의  $V_r$  회전속도 성분을 보면, 벌류트 tongue에서 출구까지 벌류트의 유동 특성인 중심부에서의 강제회전과 벽면부근에서의 일정한 속도 분포가 역시 나타나고 있다.

Fig. 6(b)에서 질량 유량이 많은 경우 ( $\Theta=60^\circ$ ), 질량 유량이 작은 경우와 반대로 축방향의 속도 성분이 과도하게 증가하

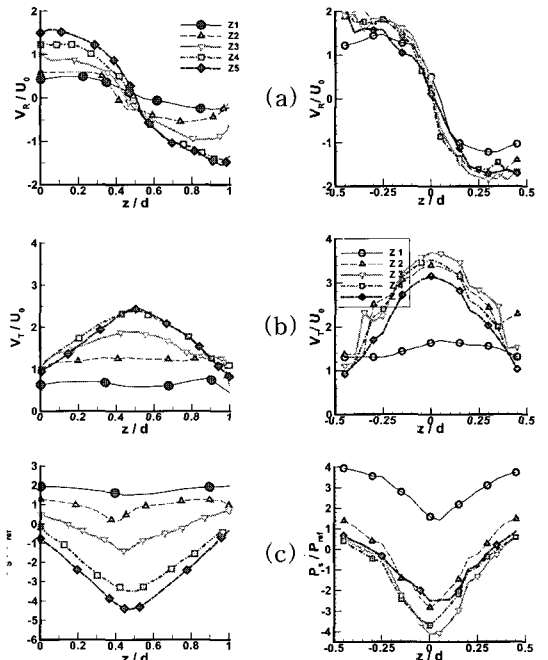


Fig. 6 Measured (solid symbol) and calculated (blank symbol) for a large mass flow rate: swirl (a), throughflow (b), velocity and static pressure (c)

고 있다. 회전속도 성분이 Fig. 6의 그림(a)에서처럼 벌류트 회전 유동의 특성을 역시 보이고 있지만, 벽면 근처에서의 속도 값이 과도 하게 증가하는 특징을 보여준다.

계산결과를 종합해보면 축방향 속도는 질량 유량의 증가에 따라 최대치가 증가 하고, 유량이 작을 때는 단면 중심에서의 속도가 오히려 주변의 속도보다 작아지며, 회전 속도는 단면의 중심에서 강제 회전 하고 벽면으로 가면서 그 값이 감소하지 않고 일정하게 유지하는 등 실험적인 경향과 대체로 잘 일치하고 있다. 정압 분포의 경우, 유량이 작으면 벌류트 하류로 진행하면서 전체적으로 증가하고, 유량이적당하거나 많을 경우에는 감소하다가 다시 조금 증가하고 있는 경향 역시 실험 결과[6]와 잘 일치하고 있다. 그러나 Braembussche et. al[6]의 실험에서 제시된 조건은 유동각과 레이놀즈수 그리고 원뿔형 직관 벌류트에 대한 형상 데이터에 머물고 있으며 질량 유량에 대한 정확한 수치가 제시되지 않아 본 연구에서는 다만, 유동각을 조절하여 질량 유량을 조절하였으며 이에 따라 실험과 계산 결과에 대한 절대적 정량 비교 분석 보다는 정성적 경향성을 평가하는 것으로도 의미가 있다고 본다.

Fig. 7(a)에 난류 운동 에너지 분포를 grey scale로 나타내었다. 입구를 통해 들어온 유동은 벌류트 하류에서 회전 유동으로 전환 되면서 난류 유동을 증가시키고 있으며, 벌류트의 약

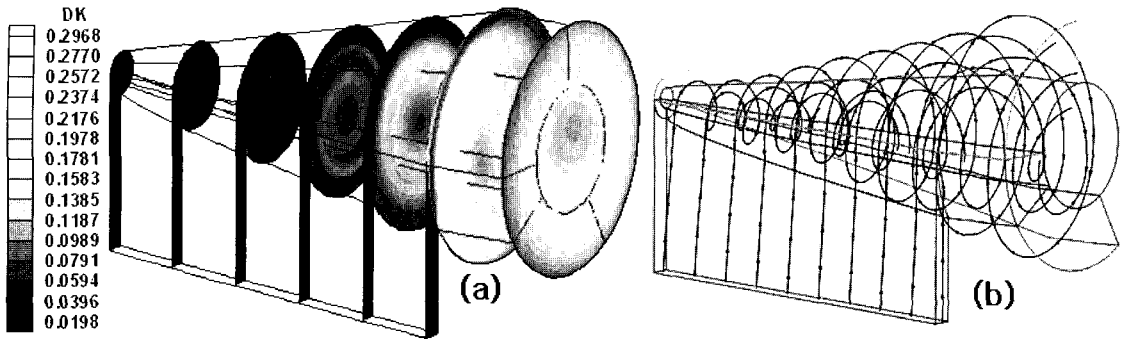


Fig. 7 Turbulence kinetic energy distribution and streamtrace for the straight volute of conical shape

절반 지점부터 본격적인 난류 거동을 보이고 있다. 벌류트의 단면적이 일정해지면서 입구가 끝나는 부분(Fig. 1의 Z5의 하류부분)에서 유동은 서로 교란되어 최대 난류 운동에너지를 발생시키고 있다. Fig. 7(b)에서 벌류트 내부의 회전 성분을 stream trace로 나타내었으며, 입구를 통해 유입된 유동은 벌류트 몸체에서 회전을 통해 하류 출구로 잘 진행하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

원심 압축기의 직선형 벌류트 내부 유동 해석을 위해 3 차원 Navier-Stokes 방정식을 유한 차분하고 비엇갈림 (non-staggered) 정렬 격자를 다중 블록으로 구성하였다. 난류 유동 모사를 위해서는 k- $\epsilon$  방정식 모델을 사용하였다. 본 논문에서는 벌류트의 내부 유동 해석을 위해, 벌류트의 직경이 길이에 비해 무시할 만큼 작다고 가정할 수 있는 경우를 고려하였다. 이 경우에는 원심 압축기 벌류트의 스크롤 형상에 따른 회전 효과가 배제되고 벌류트의 원주 방향으로 들어오는 임펠러 토출에 연계된 입구유동의 영향을 조사한 결과로서 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 질량유량이 작을 경우 벌류트의 중심부에서 축방향 속도의 결손이 발생 했으며, 이로 인해 출구부근의 정압은 유동에 의한 압력강하의 영향이 줄어들고 있다. 벌류트 원형 단면에 대한 회전 성분은 중심부에서 강제회전 후 벌류트의 벽면근처에서 일정한 회전 속도를 유지하고 있다.
- (2) 적절한 질량 유량을 유지할 때에 축방향 속도는 단면중심에서의 결손 없이 벌류트 하류 방향으로 유동이 진행하면서 축방향 속도의 최대값이 증가하다가 출구부근에서 약간 줄어들고 있으며 이 영향이 정압분포에 반영되었다. 회전속도 성분은 벌류트 하류로 진행하면서 벌류트의 회

전 속도 특성인 단면 중심부에서 강제회전을 보여주고 벽면부근에서는 회전 속도가 일정해지는 분포를 보였다.

- (3) 질량 유량이 많은 경우는 축방향의 속도 성분이 과도하게 증가하였고, 회전성분 역시 벌류트 회전 유동의 특성을 보이고 있지만, 벽면 근처에서의 속도 값이 과도 하게 증가하였다.
- (4) 난류 거동 모사를 위해 k- $\epsilon$  방정식을 이용하였는데, 급격한 형상 변화에 의한 유동의 박리가 없는 벌류트 내부 유동장의 난류 해석에 적절한 모형식이라고 판단하게 되었다.

#### 후 기

본 연구의 내용은 (주)뉴로스와의 산학협력과제 ‘마이크로 터빈 개발을 위한 압축기 유동 전산 해석’ 으로 이루어진 것으로, 지원에 대해 감사드립니다. 또한 연구방향 제시와 도움 말을 주신 항공우주연구원 김성구 박사께 감사의 말을 전합니다.

#### 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*, p.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, p.48-54.
- [5] Escudier, M., 1979 "Estimation of Pressure Loss in Ring-type Exit Chambers," *ASME Journal of fluids Engineering*, Vol.101, p.511-516.
- [6] Van den Braembussche, R.A., and Hande, B.M., 1990, "Experimental and Theoretical Study of the Swirling Flow in Centrifugal Compressor Volute," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.112, p.38-43.
- [7] Bae, H., Yoon, J.S., Park, K.C., and Chang, K.S., 2006, "원심 압축기 벌류트 3차원 유동의 수치해석," *대한기계학회논문집 B권*, 제30권, 제3호, p.222-229.
- [8] Ayder, E., and Van den Braembussche, R.A., 1994, "Numerical Analysis of the Three-Dimensional Swirling flow in Centrifugal Compressor Volute," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.116, p.462-468.
- [9] Hagelstein, 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, p.22-31.