

소형터보압축기 볼류트 내부의 3차원 점성 유동장 해석

김 동 원*, 김 윤 제**

An Analysis on Three-dimensional Viscous Flow Fields in the Volute Casing of a Small-size Turbo-compressor

D.-W. Kim, Youn J. Kim

Key Words: Small-size turbo-compressor(소형원심압축기), Volute (볼류트), Secondary flow(2차유동), Archimedes spiral(아르키메데스 나선),

Abstract

The flow fields in the volute casing of a small-size turbo-compressor at different flowrate (design point $\pm 20\%$) are studied by numerical analysis. The governing equations for three-dimensional, steady, viscous flow are solved using SIMPLE algorithm with commercial code of STAR-CD. Numerical results show that the three-dimensional flow pattern inside the volute casing of a small-size turbo-compressor is strongly influenced by secondary flows that are typically created by the curvature of the casing passages. The flow pattern in the casing also affects the performance of the turbo-compressor. In order to elucidate the loss mechanism through the volute, we prepared the secondary flow, velocity magnitude, and static pressure distribution at the four cross-sectional planes of the casing.

1. 서 론

소형 터보압축기 볼류트 내의 유동장은 볼류트 단면의 영향과 스윙(swirl) 유동, 회전차에서의 불균일한 유동 등으로 인하여 매우 강한 3차원 유동을 갖는다. 이러한 복잡한 유동으로 인해 볼류트 내부의 유동을 규명할 수 있는 해석적인 모델을 구하기가 어렵다. 따라서 과거에는 압축기 입, 출구부에 대해서 실험을 통해 전체 성능을 주로 측정하였다. 최근에는 압축기 각부의 개개 성능을 파악하기 위한 노력으로 LDA나 전산 유체역학(CFD)을 이용한 볼류트 내부 유동 해석이 이뤄지고 있는 실정이다. 볼류트는 별도의 에너지를 생성하지 않고, 회전차에 의해 작동유체에 가해

진 운동에너지를 압력에너지로 변환해 주는 역할을 한다. 때문에 일반적인 터보기계 설계에서는 볼류트의 역할을 무시하여 회전차와 디퓨저만을 고려하기도 한다. 그러나 잘못된 볼류트 설계는 볼류트와 회전차와의 상호작용으로 인해 회전차가 비효율적으로 작동하거나, 회전차에 의해 유체로 전달되는 에너지 중 많은 양이 마찰이나 스윙(swirl)등의 손실로 인해 소모될 수 있다. 따라서 최적 볼류트 형상을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 와류실 내의 각 단면에서 유속이 일정하고, 와류실 내의 볼류트 감기시작부로부터 출구로 향하여 단면적이 일정하게 증가하는 아르키메데스 나선형(Archimedes spiral)을 사용하였다.⁽¹⁾

Majidi⁽²⁾는 동심형과 아르키메데스 나선을 사용한 볼류트형 케이싱 내부의 3차원 점성 유동을 수치적으로 해석하였다. 펌프의 입구에서 출구까지를 해석영역으로 하여 회전차와의 상호관계와 케이싱 각 단면에서 정압, 속도, 2차유동

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
 ** 성균관대학교 기계공학과

(secondary flow)을 계산하였다. 또한, 2차유동이 성능에 미치는 영향이 크다는 사실을 수치해석 결과를 통하여 제시하였다.

Ayder와 Braembussche⁽³⁾는 실험과 수치해석을 통하여 타원형 와류실 내부 유동장을 측정하여 2차 유동의 발생원인과 3차원적인 형상을 고찰하였으며, 손실 메카니즘을 해석적으로 설명하였다. 또한, 단면에서의 속도 분포 뿐만 아니라 전압 및 정압 분포로 측정하였고, 실험결과를 토대로 손실식의 검증 및 새로운 손실 계수를 제시하였다.

Ciocan 등⁽⁴⁾은 산업용으로 사용되는 펌프의 와류실에 대해 LDA(laser-doppler anemometry)를 이용하여 볼류트 각단면의 3차원적인 속도 분포 및 2차 유동을 측정하였다. 또한, 볼류트 단면에서 LDA를 이용하는 속도 측정방법을 기술하였다. 실험결과를 통해 측정된 이차유동은 단면내 정압 분포에 영향을 미치며, 운동량 보존법칙에 의해 단면에 수직한 주유동은 볼류트 입구에서 출구로 갈수록 반경방향으로 치우치는 경향을 확인하였다.

본 연구에서는 공조용 소형터보압축기 볼류트 케이싱 내 각 단면에서의 3차원 점성 유동장을 상용코드인 STAR-CD⁽⁵⁾를 이용하여 해석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 해석모델의 격자계

수치해석 영역은 회전차를 제외한 디퓨저와 케이싱을 대상으로 하였다. 케이싱은 볼류트형을 적용하였다 (Fig. 1 참조). 아르키메데스 나선형으로 설계된 볼류트형의 격자는 Fig. 2와 같으며, 30×20×80 개의 노드를 갖는다. 격자수를 늘려가면서 수치해석을 하였는데, 위의 격자수 이상은 결과치에서 거의 차이를 보이지 않았다.

볼류트형은 수치해석에 용이하도록 경계밀착좌표계(body-fitted coordinates)를 이용하였으며, 엇갈림 격자계(staggered grid)를 사용하였다.

2.2 지배 방정식

공조용 터보압축기 볼류트 내의 유동 해석을 위해 연속방정식과 정상 상태의 난류유동을 해석하기 위한 시간 평균된 Navier-Stokes 방정식 (Reynolds 방정식), 그리고 에너지 방정식을 텐서

형태로 표현하면 각각 다음과 같다.

연속 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h - F_{h,j} - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (3)$$

여기서 τ_{ij} 는 점성항이고, $F_{h,j}$ 는 에너지 방정식의 확산항으로 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (4)$$

$$F_{h,j} = x \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_j h'} \quad (5)$$

Reynolds 응력항을 처리하기 위해 난류모델로는 2방정식 $k-\epsilon$ (high Reynolds number) 모델을 사용하였다. 위와 같은 비선형 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 이산화(discretization)하였고, 대류 및 확산항의 처리는 복합도식(hybrid scheme)을 사용하였다. 압축성 유동이므로 연속 방정식으로부터 밀도를 구하고 에너지 방정식을 이용하여 온도를 구하였다. 상태방정식을 이용하여 압력을 구한

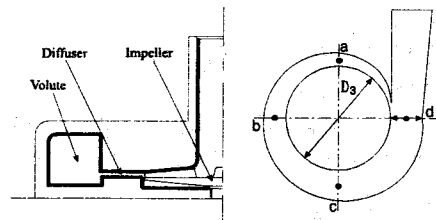


Fig. 1 Schematic diagram of the small-size turbo-compressor

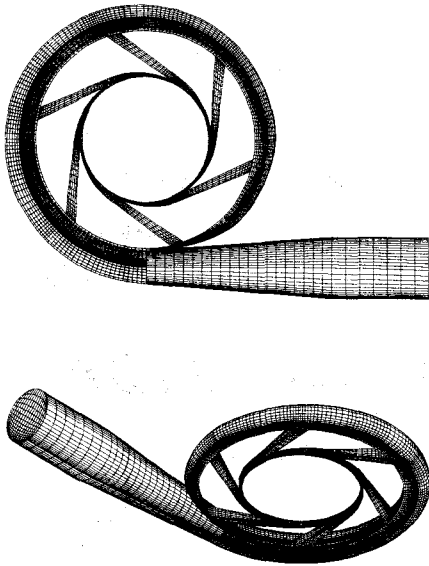


Fig. 2 Grid systems (30×20×80 nodes)

후, 이를 운동량 방정식에 대입하여 다시 속도를 구하는 과정을 택하였다. 유한체적법을 사용한 압축성 유동의 경우에는 압력을 지배하는 방정식이 별도로 주어지지 않기 때문에 연속방정식에서 간접적으로 압력을 구하는 방법을 사용하였다. 그러나 연속 방정식에는 압력이 포함되어 있지 않기 때문에 운동량 방정식과 조합시킬 필요가 있다. 여러 가지 조합방법이 있지만 본 연구에서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

2.3 경계조건

Figure 2에서 디퓨저 입구 부분은 입구 경계면을 나타내며, 와류실 출구는 출구 경계면을 각각 나타낸다. 입구 경계면에서는 모든 유동 변수 값이 지정되어야 하는데, 회전차 출구 조건으로부터 구할 수 있다. 본 연구는 회전차를 해석대상에서 제외하였으므로, 회전차 출구에서 해석 영역인 디퓨저 입구로 유입되는 유동이 원주방향으로 1차원 해석을 통해 구한 동일한 값을 갖는다고 가정하였다. 이러한 가정은 김동원 등⁽⁶⁾이 실험적 연구를 통하여 근사함을 보였다. 단, 이러한 가정은 설계유량에서 ±20%에서만 적용 가능할 것으로 사료된다.

벽면에서는 점착조건(non-slip condition)을 사용하였으며, 벽면에서의 수직방향 질량유량은 존재

하지 않게 된다. 출구 경계면에서는 일반적으로 유동변수 값에 대한 정보를 알기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 모든 유동 변수에 대하여 유선방향으로의 구배가 영인 Neumann 조건을 사용하였다.

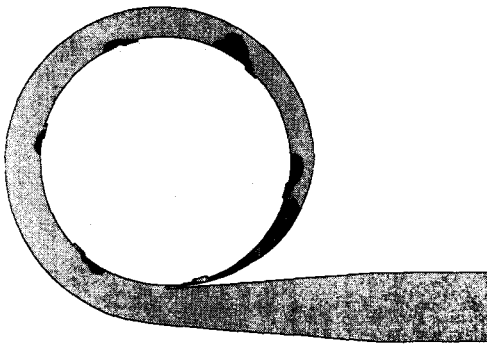
3. 결과 및 토론

본 연구에서 사용한 소형 터보압축기의 케이싱부 형상은 아르키메데스 나선을 이용하여 설계한 볼류트형으로 하였다. 설계유량에서 ±20% 범위 일 때 볼류트 내부의 유동변화를 파악하여 볼류트 내의 손실메카니즘을 규명하는데 목적이 있다. 수치해석 결과를 나타내는 그림에서의 점들은 Fig. 1에 표기한 4점의 위치와 동일한 곳이다.

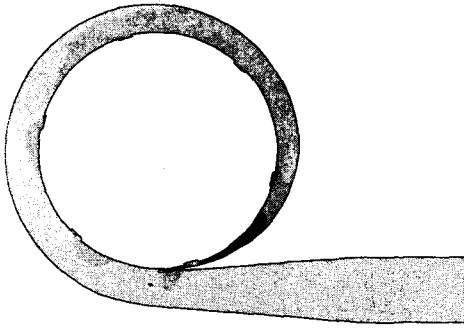
Figure 3은 볼류트 케이싱 중간 높이에서의 정압 분포를 나타낸다. 전체 해석범위에서 볼류트 감기시작부(volute tongue)에서 출구까지 점차적으로 정압이 상승하는 것을 볼 수 있다. 특히 설계유량점과 설계유량점의 1.2배인 유량에서는 볼류트 주위 정압분포가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 볼류트 주위의 압력이 거의 일정하므로 반경방향 추력에 의한 회전차의 이상 운전 발생 빈도가 작아짐을 알 수 있다.

Figure 4는 볼류트 각 단면에서의 2차유동 분포를 나타내고 있다. 유량이 증가하면서 2차 유동의 강도는 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 각 단면에서 비교해 보면 단면의 크기가 증가할수록, 즉 볼류트 감기시작부에서 출구로 갈수록 점점 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 볼 때 볼류트 출구쪽으로 갈수록 단면 설계시 좀더 세심한 주의가 요구된다 하겠다.

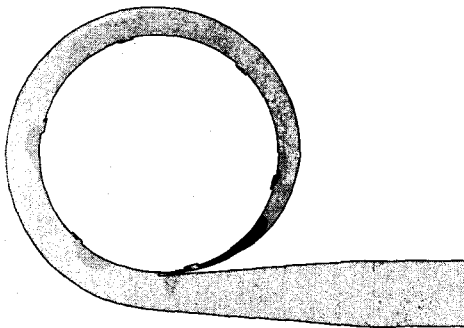
2차 유동과 상호관계가 있는 단면내의 정압분포는 Fig. 5에 도시하였다. 반경 방향으로 정압이 상승하는 결과를 모든 단면과 유량에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 디퓨저 출구에서 볼류트 내부로 유입되는 유속이 반경의 증가에 따라 유발되는 단면적 증가로 인해 점차 감소되어 나타나는 결과라고 추정할 수 있다. 동압을 정압으로 변환하는 기능을 하는 볼류트의 일반적인 역할을 각 단면의 정압상승 패턴을 통해 확인할 수 있다. D점에서의 유동은 볼류트 입구쪽이 바깥쪽보다 상대적으로 압력이 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 볼류트 출구와 재유입 영역사이 연결부위에



(a) $Q = 0.8 Q_d$

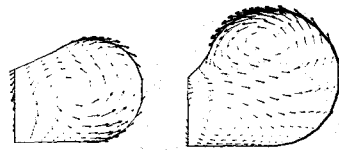


(a) $Q = Q_d$



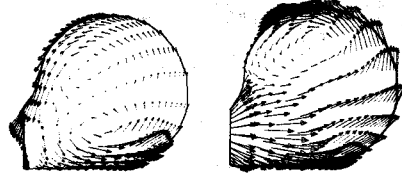
(a) $Q = 1.2 Q_d$

Fig. 3 Static pressure distribution at the midspan of the volute casings



point A

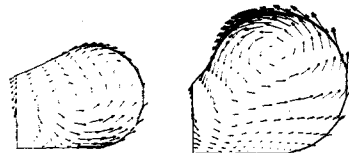
point B



point C

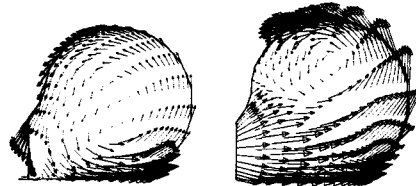
point D

(a) $Q = 0.8 Q_d$



point A

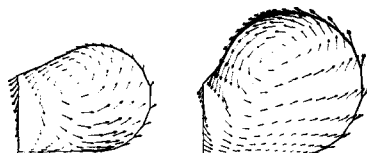
point B



point C

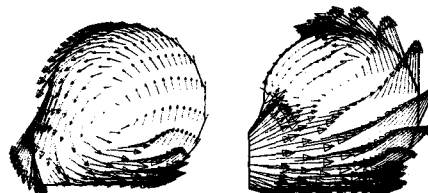
point D

(b) $Q = Q_d$



point A

point B



point C

point D

(b) $Q = 1.2 Q_d$

Fig. 4 Secondary flow distribution at different cross-sectional planes

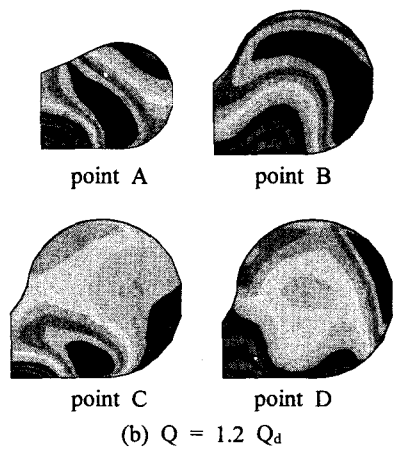
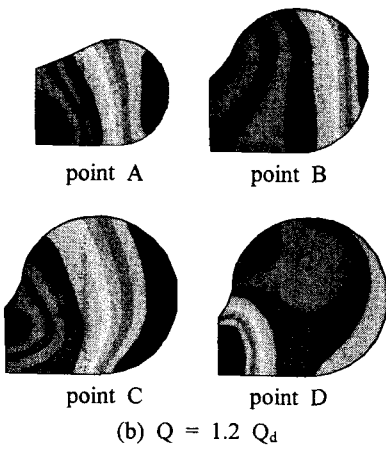
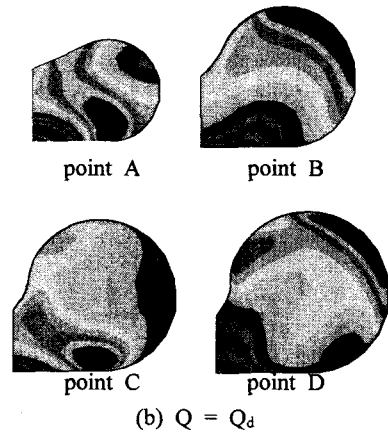
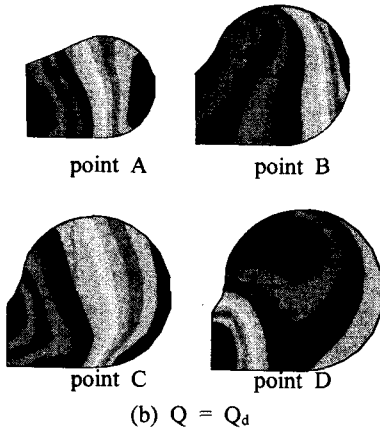
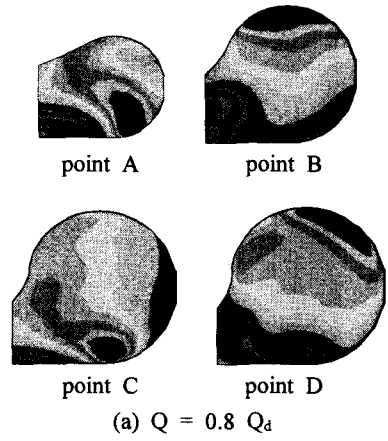
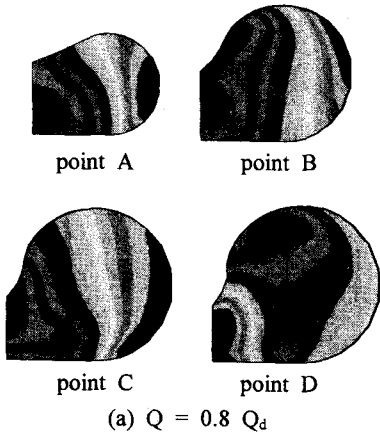


Fig. 5 Static pressure distribution at different cross-sectional planes

Fig. 6 Velocity magnitude distribution at different cross-sectional planes

서의 정체영역 발생에 기인한다고 할 수 있다. 따라서, 재유입 영역이 없도록 닫힌 구조를 한 볼류트의 성능이 우수함을 알 수 있다.⁽⁷⁾

볼류트에 유입된 유동은 Fig. 6으로 부터 확인 할 수 있는 것처럼, A단면에서는 볼류트의 하단면에, B단면에서는 볼류트의 상부면 등 4개의 단면에 볼류트의 위, 아래를 번갈아가며 최대 속도 영역이 발생함을 알 수 있다. 이는 볼류트로의 유입유동이 단면 형상에 의해 나선형으로 유출됨을 나타내고 있다. 이러한 나선유동은 2차유동을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에 사용된 원형에 가까운 형상보다는 반경 방향으로 긴 타원 모양을 적용하는 것이 이러한 나선구조의 유동형태를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 수치해석 기법을 사용하여 아르키메데스 나선을 사용하는 볼류트의 유량변화에 따른 유동 현상을 3차원 점성유동으로 가정하여 해석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 2차 유동이 볼류트 감기시작부에서 출구로 갈수록 점점 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 볼류트 출구쪽에 가까운 단면의 설계시 이러한 2차 유동 감소를 위한 설계가 요구된다.

(2) 볼류트 출구에서 감기 시작부로의 재유입 유동에 따른 손실을 줄이기 위해, 감기시작부가 막힌 구조를 한 볼류트의 성능이 우수할 것으로 사료된다.

(3) 볼류트 내의 나선구조 유동을 줄이기 위해 원형이나 사각형보다는 사다리꼴이나 타원형 처럼 반경 방향으로 긴 형상이 2차유동에 의한 손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Stepanoff, A. J., 1957, "Centrifugal and axial flow pumps", John Wiley & Sons, New York.
 (2) Majidi, K., 1998, "Numerical calculation of secondary flow in pump volute and circular casings using 3D viscous flow techniques", Proceedings of the 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. C, V.C, pp.

1459-1469.
 (3) Ayder, E. and Braembussche, R. A., 1994, "Numerical analysis of the three-dimensional swirling flow in centrifugal compressor volutes", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 462-468.
 (4) Ciocan, G. D., Mesquita A. L. A, and Kueny, J. L., 1996, "Three-dimensional flow patterns in a pump volute at nominal and off-design flow conditions by LDA measurements", Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 229-237.
 (5) STAR-CD User Documentation, 1999, "STAR-CD Methodology v3.1", Adapco and Computational Dynamics, London.
 (6) 김동원, 김홍식, 김윤제, 1999, "소형터보압축기의 와류실 형상이 반경방향 추력에 미치는 영향", 대한기계학회 1999년도 추계기계학회논문집 B, pp. 464-469.
 (7) Lee, Y. -T., Bein, T. W., 1998, "Performance evaluation of an air-conditioning compressor part II; volute flow predictions", Proceedings of the 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. C, V.C, pp. 1644-1653.