

원심 압축기 볼루트 성능 해석

김우준* · 오창훈** · 조경석***

Numerical Study on Performance of Centrifugal Compressor Volute

Woojune Kim*, Changhoon Oh** and Kyungseok Cho***

Keywords : Centrifugal Compressor, Volute, Degree of Experiment

Abstract

A volute (or scroll) of a centrifugal compressor collects the flows from impeller or diffuser, and passes it to a pipe at the exit. This flow still contains some kinetic energy which is not converted into pressure at diffuser, thus volute designer must concern the way to minimize losses. This study defines some variables which determine the shape of volute, and carry out computational analysis based on Design of Experiment to optimize the performance of volute.

1. 서론

원심형 공기 압축기의 압축부는 크게 임펠러, 디퓨저, 볼루트 3개 부분으로 구분된다. 흡입 공기는 임펠러를 통과하면서 운동에너지를 얻는데, 이를 효과적으로 압력으로 전환하는 것이 압축부 설계에서 중요한 부분이다. 디퓨저는 출구로 가면서 면적이 넓어지는 원형의 고리 형상을 띄는 것이 일반적이다. 유체의 연속성에 의해 유동은 디퓨저 출구로 가면서 속도가 감소하게 되고, 감소한 운동에너지가 압력으로 전환된다. 일반적으로 디퓨저의 크기가 클수록 출구에서 잔여 동압의 양이 줄어드나, 시스템의 크기를 고려하여 적정 수준을 결정한다. 디퓨저는 내부 공간에 설치된 베인의 유무에 따라 베인리스 디퓨저와 베인리스 디퓨저로 구분한다. 베인은 유동의 회전 성분을 제거하여 압력이 효과적으로 회복되도록 유도하나 베인리스 디퓨저에 비해 작동영역이 좁은 단점이 있다. 본 연구에서 설계한 소형 압축기는 넓은 작동영역이 필요한 제품이므로 베인리스 디퓨저를 적용하였다.

볼루트는 디퓨저를 통과한 유동을 모아 출구로 보내는 일반적인 기능 외에도, 디퓨저에서 압력으로 전환되지 않은 잔여 동압을 정압으로 전환하는 기능을 수행한다. 그러나 과거 수행된 대부분의 연구는 임펠러의 공력 설계 및 디퓨저와의 매칭에 관심을 보였을 뿐, 볼루트의 성능 최적화에 관한 연구는 부족했다. 최근에는 Braembussche[1] 등이 전산 유체 역학을 이용한 수치 해석 및 실험적 연구를 수행

하고 있다.

디퓨저에서 반경 방향으로 토출된 유동을 모으는 과정에서 볼루트 벽면과의 마찰 및 유동의 급격한 방향 전환은 압력 손실을 유발한다. 따라서, 대부분의 볼루트 설계는 원주방향으로 각운동량이 보존되는 Pfleiderer 방법 또는 원주방향의 단면에서 속도가 일정하게 유지되는 Stepanoff 의 방법으로 설계하는 것이 일반적이다. 그러나, 기존의 방법은 볼루트 형상 설계의 자유도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 볼루트의 형상을 결정하는 주요 인자를 설정하고, 실험 계획법에 의한 유동해석을 수행하여 설계 인자 변경에 따른 볼루트 성능을 예측하였다.

2. 볼루트 설계 및 실험 계획법

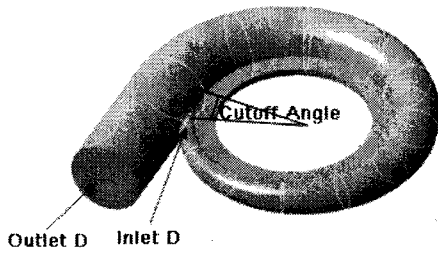
2.1 설계 변수 선정

그림1 처럼 볼루트의 형상을 결정하는 설계 변수로 스크롤 전개가 시작되는 부분의 지름 (Inlet D), 전개가 끝나는 부분의 지름 (Outlet D), 원주 방향으로 스크롤 전개 방식 (Scroll), Tongue의 위치 (Cutoff Angle) 4개 인자를 설정하였다. Inlet D, Outlet D, Scroll 전개 방식에 따라 원주 방향 단면적의 넓이가 결정되고, Cutoff Angle 은 볼루트의 회전 각도를 결정한다. 스크롤 전개 방식은 Exponential, Linear, Logarithm 세 가지 방식을 택했는데, Inlet D 와 Outlet D 의 차이가 작아질수록 Exponential 과 Logarithm 전개 방식은 Linear 방식과 유사하게 수렴한다.

* 한라공조(주) 기술연구소, wjkim3@mail.hcc.co.kr

** 한라공조(주) 기술연구소, choh3@mail.hcc.co.kr

*** 한라공조(주) 기술연구소, kscho@mail.hcc.co.kr



<그림1> 주요 설계 변수

<표3> 4인자 3수준 다구찌 L9 설계

No	Inlet D	Outlet D	Cutoff	Scroll
1	10	40	10	EXP
2	10	50	20	LIN
3	10	60	30	LOG
4	15	40	20	LOG
5	15	50	30	EXP
6	15	60	10	LIN
7	20	40	30	LIN
8	20	50	10	LOG
9	20	60	20	EXP

2.2 실험 계획 수립

블루트 형상 변경에 따른 성능 변화를 파악하기 위해, 임펠러와 베인리스 디퓨저는 동일하게 유지하였다. 해석에 사용된 임펠러의 형상 및 베인리스 디퓨저의 주요 재원은 <표1> 과 같다.

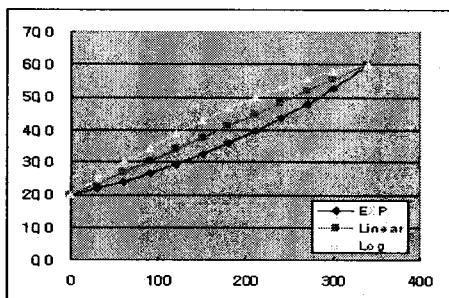
<표1> 임펠러 및 디퓨저 주요 재원

Impeller	R1 hub (mm)	11.25
	R1 tip (mm)	22.5
	R2 (mm)	50
	b (mm)	4
	β_1 (deg)	60
	β_2 (deg)	30
Vaneless Diffuser	R (mm)	130

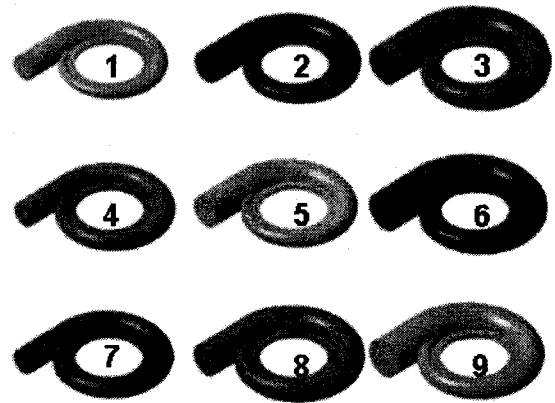
해석에 사용된 고정된 디퓨저의 출구 면적은 약 2,050mm²이다. Outlet D 수준은 블루트의 출구 면적과 디퓨저의 출구 면적이 일치하는 경우를 기준으로 삼고 (50), +10/-10 수준에서 상하위 인자를 설정하였다. 또한 Inlet D는 최대값이 Outlet D의 최소값보다 크지 않은 범위에서 3수준을 결정하였다.

<표2> 설계 인자별 수준 결정

	Lv1	Lv2	Lv3
Inlet D	10	15	20
Outlet D	40	50	60
Cutoff Angle	10	20	30
Scroll	EXP	LIN	LOG



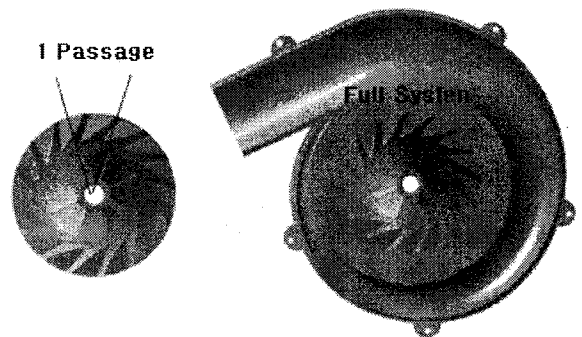
<그림2> 스크롤 전개 방식에 따른 각도 별 지름 분포



3. 유동 해석 및 결과

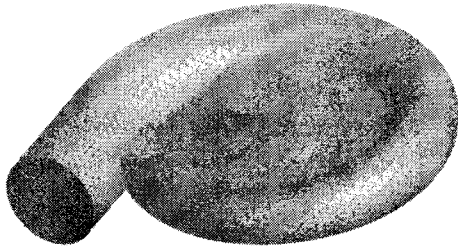
3.1 모델링 및 격자 생성

일반적으로 임펠러의 유동 해석은 하나의 유로에 대해 해석을 실시하고 원주방향으로 동일한 유동장이 반복되는 것으로 간주한다. 그러나 블루트가 포함된 유동 해석의 경우 원주 방향별로 유동 특성이 달라지게 되므로 임펠러의 모든 블레이드를 함께 계산해야 한다. 따라서 격자수 및 해석 시간이 크게 증가하나, 실제 시스템과 동일한 조건에서 성능을 예측할 수 있다.



<그림3> 임펠러-블루트 연성 해석 모델링

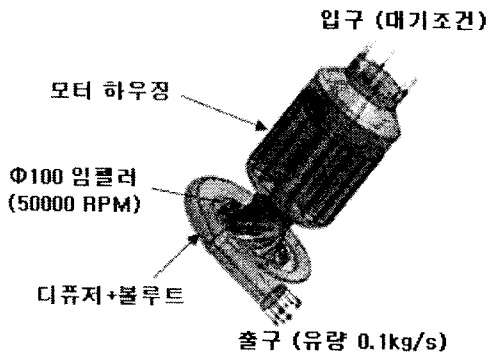
격자는 ICEM-CFD 를 사용하여 Tetramesh 로 생성하였고, 임펠러의 블레이드 부근은 Hexa 형태의 Prism Layer 를 추가하였다. 총 격자수는 임펠러 60만 개, 블루트-디퓨저가 20만 개, 입구 덕트 20만 개로 총 100만 개의 격자를 사용하였다. 격자 작업을 완료한 임펠러-블루트는 그림4와 같다.



<그림4> 임펠러-블루트 격자

3.2 경계조건 및 해석

해석은 3차원 Navier-Stokes 해석 코드인 ANSYS CFX5 를 이용하였다. 베이스 모델인 공기 압축기의 실제 형상을 고려하여 해석시 입구의 덕트를 포함하였다. 임펠러의 회전수는 50,000 RPM, 입구는 대기조건이고 출구 유량은 0.1 kg/s 이다. 덕트와 임펠러 입구, 임펠러 출구와 디퓨저 입구의 경계면은 Frozen Rotor 로 처리하였다.



<그림4> 해석 모델 (입구 덕트 포함)

<표4> 경계 조건 및 해석 조건

Inlet Total Pressure	101325 Pa
Inlet Total Temperature	300K
Outlet Mass Flow Rate	0.1 kg/s
Operating Speed	50,000 RPM
Turbulence Model	k-e
Domain of Interface	Frozen Rotor

3.3 유동 해석 결과

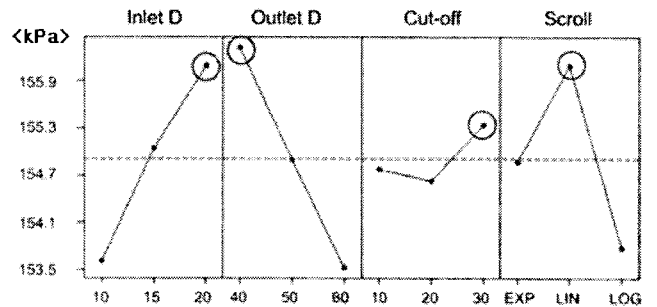
모델별 성능은 블루트 출구의 정압, 디퓨저와 블루트의 압력 회복 계수(Cp) 및 손실 계수 (K) 를 이용하여 비교하였다. 압력 회복 계수는 임펠러에서 얻은 동압을 정압으로 전환하는 정도를 나타내며, 손실 계수는 디퓨저-블루트를 통과하는 동안 손실된 동압의 양을 나타낸다. 각각의 정의는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{P_{01} - P_1} \quad (1)$$

$$K = \frac{P_{02} - P_{01}}{P_{01} - P_1} \quad (2)$$

표5 에서 보는 것 처럼 성능 해석 결과 9개 샘플 모두 출구 압력이 150 kPa 이상으로 설계 타겟을 만족한다. 디퓨저-블루트의 성능 계수 Cp, K 는 5번-7번 순이나, 압축부 전체의 효율 및 출구 압력은 7번이 가장 우수하다. 이것은 임펠러의 전효율 차이에 기인하는데, 블루트의 형상에 따라 임펠러 출구의 부하조건이 달라지면서 임펠러 효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 모든 해석에서 블루트 출구부의 전압과 정압은 거의 차이가 없는데, 이는 임펠러에서 발생한 대부분의 동압이 디퓨저-블루트를 통과하며 정압으로 변환되거나 손실된 것을 의미한다.

출구 압력을 변수로 하여 4개 설계 인자의 영향을 분석한 결과 Inlet D=20, Outlet D=40, Cutoff Angle=30 deg, Scroll=Linear 의 경우 가장 좋은 성능을 내는 것으로 예측되었다. 상기 인자가 나타내는 수준은 샘플 7번의 설계 변수와 일치한다. 다구짜 L9 분석 결과에 의하면 실험 계획을 실시한 구간에서는 Inlet D 가 크고 Outlet D 가 작을수록 블루트는 좋은 성능을 보인다.



<그림5> 다구짜 L9 주인자 분석

<표5> 해석 수행 결과

No	Impeller Outlet				Volute Outlet				Performance			
	Pstatic	Ptotal	Tstatic	Ttotal	Pstatic	Ptotal	Tstatic	Ttotal	Cp	K	η _{it, impeller}	η _{it, system}
1	135,916	164,576	330.8	349.3	154,826	157,195	347.3	348.8	0.660	0.258	0.905	0.822
2	135,383	163,678	330.5	348.8	154,478	155,359	348.1	348.6	0.675	0.294	0.903	0.802
3	137,226	166,367	330.9	349.6	151,499	152,182	349.0	349.4	0.490	0.487	0.921	0.748
4	136,875	164,760	330.7	348.7	155,044	157,120	347.6	348.9	0.652	0.274	0.918	0.819
5	135,467	163,727	330.5	348.9	155,412	156,369	348.2	348.8	0.706	0.260	0.902	0.811
6	136,933	166,148	331.1	349.8	154,705	155,222	350.0	349.6	0.608	0.374	0.914	0.784
7	139,239	169,038	332.0	350.9	159,103	161,154	349.1	350.4	0.667	0.265	0.928	0.844
8	138,075	166,875	331.4	350.0	154,811	155,815	349.1	349.8	0.581	0.384	0.919	0.788
9	137,197	166,202	331.2	349.8	154,376	155,005	348.6	349.0	0.592	0.386	0.915	0.791

4. 결 론

1) 볼루트의 기본 설계 변수를 선정하고, 실험 계획법에 의한 유동 해석을 실시하였다.

2) 다구찌 L9 분석 결과, 실험 계획을 수행한 영역 내에서는 Inlet D 가 크고, Outlet D 가 작을수록 성능이 좋은 것으로 예측되었다.

참고문헌

- [1] K. Hillewaert and R.A. Van den Braembussche, 1999, " Numerical Simulation of Impeller-Volute Interaction in Centrifugal Compressors," Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 603-608
- [2] David Japikse and Nicholas C. Baines, 1994, " Introduction to turbomachinery," Concept ETI.
- [3] David Japikse, 1996, " Centrifugal Compressor Design and Performance," Concept ETI.
- [4] 김동원, 김윤재, 2002, " 케이싱 형상 변화가 소형 터보압축기 성능에 미치는 영향," 설비공학논문집, 제14권 제12호, pp. 1031-1038
- [5] 조형희, 최항철, 김광호, 정진택, 2004, " 초소형 2차원 원심 압축기의 성능 특성에 관한 연구," Proceedings of the 3rd NCFE
- [6] S.L. Dixon, 1998, " Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, " Butterworth Heinemann Publications