

수치해석 및 성능시험을 통한 원심압축기 성능 평가

강영석* · 박태춘* · 양수석*

Centrifugal Compressor Performance Assessment by Experiments and Numerical Simulations

Young-Seok Kang* · Tae-Choon Park* · Soo-Seok Yang*

초 록

본 연구에서는 허브 대 팁의 비가 큰 원심형 압축기의 성능시험을 수행하였으며, 이를 수치해석 결과와 비교하였다. 압력비의 경우 작동 회전수에서 성능시험과 수치해석의 결과의 경향이 일치하는 것을 확인하였다. 성능시험에서 임펠러의 성능은 매우 높게 나타났으나, 1단 및 2단 디퓨저에서 손실이 발생하여 전체적인 압력비 및 효율이 떨어지는 것을 확인하였다. 수치해석을 통해 내부 유동장을 확인한 결과 1단 디퓨저 및 2단 디스월러에서 격렬한 2차 유동으로 인한 유로차폐효과가 주 손실원인임을 확인하였다.

Key Words: Centrifugal Compressor(원심압축기), Performance Test(성능시험), Numerical Simulation(수치해석)

1. 서 론

원심압축기는 터보형 압축기의 한 종류로서 가스터빈, 산업용 공기압축기, 대형 터보냉동기, 터보차저, 고압 송풍기 등의 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 원심압축기는 축방향으로 흡입되는 작동유체가 임펠러를 통과하면서 반경방향으로 선회하여 전압력을 상승시키고, 임펠러 출구에서의 운동에너지를 디퓨저에서 확산시켜 정압으로 전환시키면서 압력을 상승시킨다. 일반적으로 원심압축기는 하나의 단에서 축류압축기에 비해 압력비가 높기 때문에 비교적 적은 유량에서 높은 압력비를 요구하는 산업기기에 장착되

어 사용된다.

항우연에서는 그 동안 가스터빈 엔진과 관련하여 다양한 원심압축기 개발과제를 수행해 왔으며, 최근에는 5MW급 가스터빈 개발사업과 관련하여 축류압축기 하류에 장착되는 원심압축기 성능시험을 수행하고 있다⁽¹⁾. 본 압축기의 특징은 축류형 압축기 하류에 장착되기 때문에 Hub 대 Tip 의 비가 일반 원심압축기보다 훨씬 큰 특징을 가지고 있어 훨씬 큰 0.85에 가까운 값을 가지고 있다. 이에 입출구 반경비가 그리 크지 않기 때문에 임펠러에 의해 공급되는 원심력이 크지 않아 압력비는 일반적인 원심 압축기에 비해 낮은 편이며, 효율은 높게 설계되어 있는 축류압축기와 비슷한 공력 성능 특성을 나타낸다.

본 연구에서는 항우연에서 보유 중인 대형 압축기 성능시험설비를 본 압축기의 성능시험을

* 한국항공우주연구원
연락처, E-mail: electra@kari.re.kr



Fig. 1. 항우연 보유 대형 압축기 시험설비

수행하였으며, 별도의 수치해석을 수행하여 이를 시험결과와 비교하고 성능특성을 분석하였다.

2. 항우연 압축기 시험설비

2.1 압축기 성능시험 설비 개요

항우연에서 보유 중인 대형 압축기 시험설비는 입구 덕트, 압축기 시험부, 출구 덕트, 압축기 구동부 등과 같이 크게 4가지로 구분될 수 있고, 입구 덕트에는 유동 조정기(flow conditioner), 유량계(flowmeter), 유동 안정기(stilling chamber), collector 등이 설치되어있고, 시험부에는 테스트하고자 하는 시험 압축기를 장착하는 곳이며, 구동부는 모터, 기어박스, 토크미터, 베어링캐리어로 구성되어 있다. 각각의 동력계는 커플링으로 체결되어 있다. 그림 1은 항우연이 보유한 압축기 성능시험설비를 사진으로 나타낸 것이다. 임펠러 구동축이 베어링 캐리어에 지지되어 있으며, 베어링 캐리어는 토크미터에, 토크미터는 기어박스를 통해 모터에 연결된다. 본 성능시험에 사용되는 압축기는 축 및 임펠러의 질량이 130kg에 이르기 때문에 회전 동특성 해석 및 이에 적합한 베어링 캐리어의 설계가 매우 중요하다. 본 시험을 위해 회전 시 공진 주파수가 운전점을 회피하도록 별도의 베어링 캐리어를 제작하였다. 기타 압축기 시험설비의 주요 사양은 표 1에 제시되어 있다.

Table 1. 항우연 대용량 압축기 시험설비 주요사항

최대 회전수	34,500 rpm
최대 압력비	20
압축기 종류	축류형/원심형
최대 질량유량	8 kg/s
최대 토크	610 Nm
최대 동력	2,240 kW

2.2 원심 압축기 개요

본 연구에서 성능시험을 수행한 압축기는 두산 5MW급 가스터빈에 사용되는 원심형 압축기이다. 원래 압축기는 쉬라우드 형식으로 제작이 되었으나 본 연구에서는 그림 2(a)와 같이 언쉬라우드 형식으로 바꾸어 압축기의 익단간극 특성을 살펴보고자 하였다. 본 연구에서는 Running Clearance를 0.5mm에 가깝게 하여 성능시험을 수행하였다. 원래 10단 축류 압축기의 하류에 장착되어 있어 입구 압이 매우 고압이나, 본 연구에서는 압축성 상사 조건을 고려하여 입구 조건을 대기압 및 대기온도로 설정하였다. 임펠러 상류에는 별도의 IGV를 장착하였으며, IGV의 두께 및 유동각은 10단 정익의 날개 두께 분포 및 10단 출구(임펠러 입구)에서의 유동각 분포를 고려하여 설계가 되었다. 임펠러 하류에는 그림 2 (b)와 같이 1단 디퓨저 및 2단 디퓨저가 장착되어 있으며 1단 디퓨저는 주로 정압 회복을 담당하며 2단 디퓨저에서는 정압회복 및 스월을 제거하여 연소기로 유동을 넘겨주는 역할을 수행한다.

2.3 수치해석

그림 3은 수치해석을 위해 구성한 CFD 격자이며 CFD코드는 상용 CFD코드인 CFX-Tascflow v.2.12 를 이용하였다. 압축성 유동에 대해 수치해석을 수행하였으며 k-epsilon 난류 모델을 사용하였다. 입구의 경계조건은 성능시험과 동일하게 대기 상태의 전압력, 전온도를 주었고 출구에

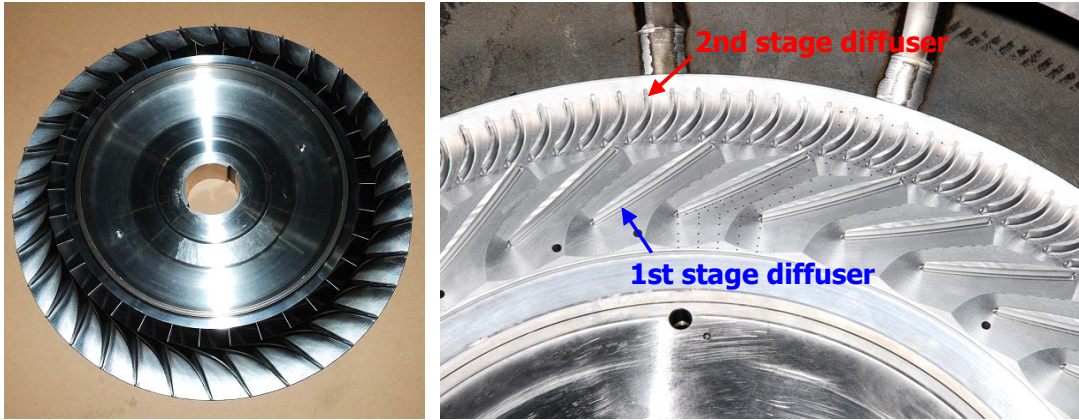


Fig. 2 (a) 언쉬라우드 원심 임펠러 및 (b) 1단 및 2단 디퓨저

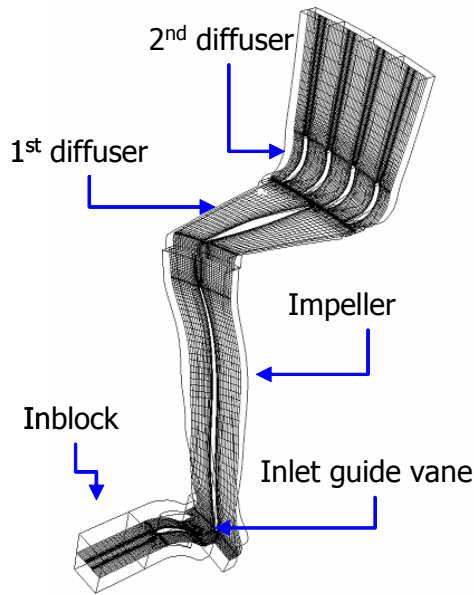


Fig. 3. 수치해석용 CFD 격자

서는 질량 유량을 경계조건으로 주어 이를 바꾸어 가며 유량을 조절하였다. 격자계는 총 50여만 개로 이루어져있고, 회전좌표계인 임펠러 격자계는 IGV 및 1단 디퓨저의 정지좌표계들과 Mixing plane 방법으로 연결하였으며, 2단 디퓨저와 1단 디퓨저는 Tascflow에서 제공하는 GGI 방법을 통해 연결하였다. 1단 디퓨저 1개에 대해 4개의 2단 디퓨저를 연결하였다.

3. 압축기 성능시험 결과

3.1. 레이놀즈수에 따른 성능 분석

본 연구에서와 같이 입구의 감압시험을 수행하기 위해서는 반드시 속도 상사 계수인 레이놀즈수에 따른 성능의 영향을 살펴보아야 한다. 일반적인 터보 기계의 레이놀즈수인 아래의 정의에 따른 경우

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (1)$$

본 압축기의 레이놀즈수는 약 1.15×10^7 로서, 일반적으로 알려진 레이놀즈수에 따라 성능이 변할 수 있다고 알려진 임계 레이놀즈수인 2×10^5 보다 크다.⁽²⁾ 임계 레이놀즈수가 날개의 코드 길이와 입구 속도로 계산하긴 하지만 레이놀즈수의 차이가 100배에 가깝게 차이가 나기 때문에 본 압축기의 레이놀즈수도 임계 레이놀즈수를 넘는다고 여겨진다. 본 연구에서는 이러한 사실을 실험적으로 확인하고자, 입구 전압력을 변화시켜가면서 레이놀즈수를 바꾸어 가면서 성능시험을 수행하였다. 그림 4는 입구 압력이 각각 1기압, 0.9기압, 0.8기압일 경우에 압축기 작동 회전수의 80%에서 성능시험을 수행한 결과를 보여준다. 입구의 전압력은 입구밸브를 제어함으로써 변화시킬 수 있다. 전체적으로 입구 압력의 변화에 큰 영향을 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 다만 입구 밸브 잠글수록 (입구 전압력을 떨어뜨릴수록) 입구의 유효면적의 변

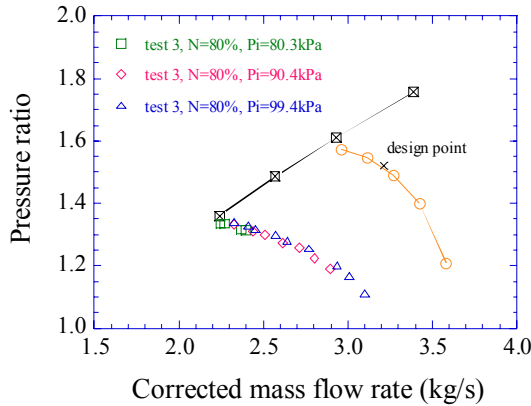


Fig. 4. 입구 압력에 따른 압축기 압력비곡선

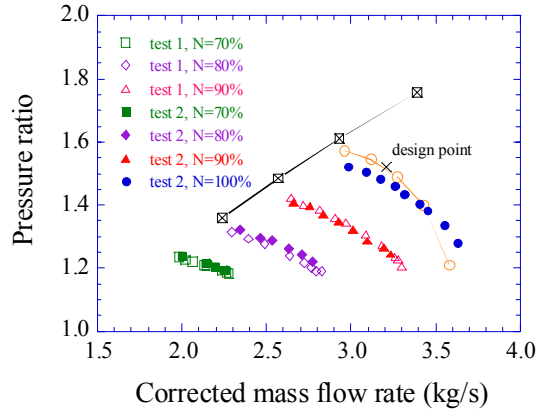


Fig. 5. 회전수에 따른 압축기 압력비 곡선

화에 따른 최대 흡입유량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 압축기 성능시험결과 및 수치해석결과

그림 5는 압축기 성능시험결과를 70%~100% 회전수에 대해 전압력비를 나타낸 그림이다. 전압력비는 Stilling chamber 및 Collector에서의 전압력을 측정하여 계산하였다. 100% 회전수에서 수치해석의 결과와 실험결과는 크게 다르지 않은 값을 나타내어 주었다. 현재 측정값은 설계점 대비 약 3% 정도 낮은 값을 나타내고 있다. 작동점의 값은 쉬라우드 타입 임펠러의 설계값으로, 향후 쉬라우드 압축기 성능 시험 시에는 작동점에 근접한 압력비가 나올 것으로 예상된다.

작동점에서 임펠러의 압력비는 약 1.7에 가까운 값을 보이는데, 이는 디퓨저에서의 손실이 매우 크다는 것을 의미한다. 디퓨저에서의 손실이 발생하는 이유를 살펴보기 위해 수치해석 결과를 비교해 보면 2단 디퓨저 부분에서의 큰 2차유동 영역이 형성됨을 확인할 수 있다. 이러한 2차유동은 1단 디퓨저 출구 wake영역이 흘러들어가는 2단 디퓨저 유로에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 유로 차폐 현상으로 인해 수치해석에서는 Choking현상이 실험에 비해 빨리 발생하는 것으로 예상된다. 향후 압축기 성능 개선을 위해 1단 및 2단 디퓨저 부분의 설계 개선이 요구된다.

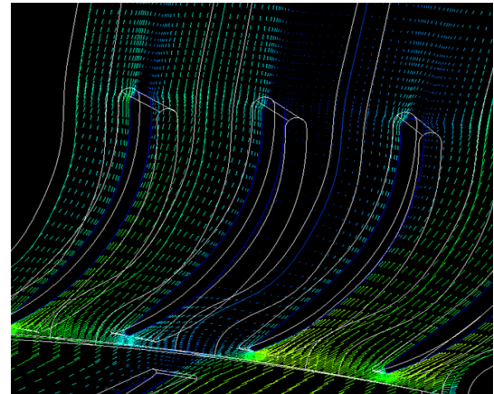


Fig. 6. 2단 디퓨저에서의 2차유동 현상

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부 항공우주부품 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 강정식, 임병준, 차봉준, 양수석, 이대성, "원심압축기의 기술동향," 항공우주산업기술동향 2권1호 (2004) pp. 64~69
2. S.L. Dixon, "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery 4th ED," Elsevier Science, 1998