

축류압축기 시험설비 및 시험방법 소개

강영석* · 박태준* · 임형수** · 강신형***

1. 서 론

가스터빈 내 압축 시스템의 기본적인 목적은 열역학적 사이클을 따라 작동하는 유체에 필요한 만큼의 압력 상승을 제공하는 것이다. 이러한 열역학적 사이클은 등엔트로피 과정 또는 등온과정으로 구성되는 브레이튼 사이클(Brayton cycle)과 에릭슨 사이클(Ericsson cycle)로 구성되고, 특히 압축기는 유체에 일(work)을 하여 엔탈피(enthalpy)를 증가시키고 이후 연소기에서 등압 과정으로 연료를 연소시킨다.

이러한 압축 시스템은 압축 과정동안 엔탈피 및 압력 상승을 달성하는 방식에 따라 축류식, 원심식, 혼합식 등으로 나뉘고, 특히 축류압축기는 각각 동익(rotor)과 정익(stator)으로 구성된 일련의 회전 익렬과 정익 익렬이 교대로 배열되어 있다. 이러한 익렬은 한 쌍의 정익렬과 동익렬이 회전축에 대하여 고리 형태로 정렬되어 하나의 단(stage)을 구성하고, 이러한 단은 회전축을 따라 연속적으로 배치된다.

축류압축기 내 각 단에서의 압축 과정은 두 가지의 중요한 특성을 가지는데, 먼저 동익은 접선 방향의 운동량을 증가시킴으로써 작동 유체에 운동 에너지를 전달한다. 즉 유체에 일을 하여 전엔탈피(total enthalpy)와 전압력(total pressure)을 증가시킨다. 두 번째로, 동익과 정익은 공기역학적 확산(diffusion)을 통해 이러한 운동 에너지의 상승을 열에너지 즉, 정엔탈피(static enthalpy)와 정압력(static pressure)의 상승으로 변환시킨다. 한편 확산 가능한 최대량은 역압력구배 영역에서의 경계층 박리(separation)로 인해 제한되기 때문에, 한 단에서의 압력 상승비는 다른 압력 과정에서보다 상대

적으로 작은 값을 가진다. 하지만 이러한 두 과정을 여러 단에서 연속적으로 반복함으로써 현대의 축류압축기는 싱글 스푼(single spool)에서 고효율 상태에서 상당히 높은 압력비를 가질 수 있다. 특히 이러한 이유로 길이는 늘어나지만 단위 입구 면적당 고유량의 이점을 가지므로 항공 추진 시스템에서 자주 선택되어진다.

국내에서도 발전용 가스터빈 엔진 및 항공기 엔진 국산화 사업에 힘입어 축류압축기에 대한 관심이 높아지고 이에 대한 연구도 좀 더 활성화될 것이라 생각된다. 이에 본 논문에서는 서울대학교 기계항공공학부에서 보유 중인 저속 축류압축기 시험 설비와 관련된 연구에 대해 간략히 설명하도록 하겠다.

2. 축류압축기 소개 및 성능 시험

2.1 실험 장치

서울대에서 보유 중인 저속 시험용 축류압축기(Low Speed Research Compressor, 이하 LSRC)는 GEAE사에서 보유 중인 LSRC를 기본으로 제작되었다. GEAE사의 LSRC는 각 단의 지름이 1.5 m인데 비해 서울대에서 제작한 LSRC는 지름을 1.0m로 줄이되 회전 속도를 높여 상사성을 맞추도록 하였다. 각 단의 날개는 GEAE사가 개발한 엔진 깃(Wiseler, 1977)을 주 모델로 하여 제작하였으며 입구 안내깃(IGV) 53개, 동익이 각 단마다 54개 그리고 정익이 각 단마다 74개로 구성되어 있으며 구조적으로 동일한 4개의 단으로 구성되어 있다. 정익단은 각 단 혹은 전체를 원주방향으로 한 피치(pitch)의 약 2.3배에 해당되는 거리를 이송할 수 있어 인덱싱(indexing)이나 클러킹(clocking)의 영향을 살펴볼 수 있도록 설계되었다. 1단과 2단은 상류 영향을 고려하기 위한 단이며 실제 유동장 측정은 3단에서 이루어진다. 4단 축류압축기의 구동을 위해 직류모터를 사용하며 기여박

* 한국항공우주연구원

** 서울대학교 대학원

*** 서울대학교

E-mail : electra@kari.re.kr

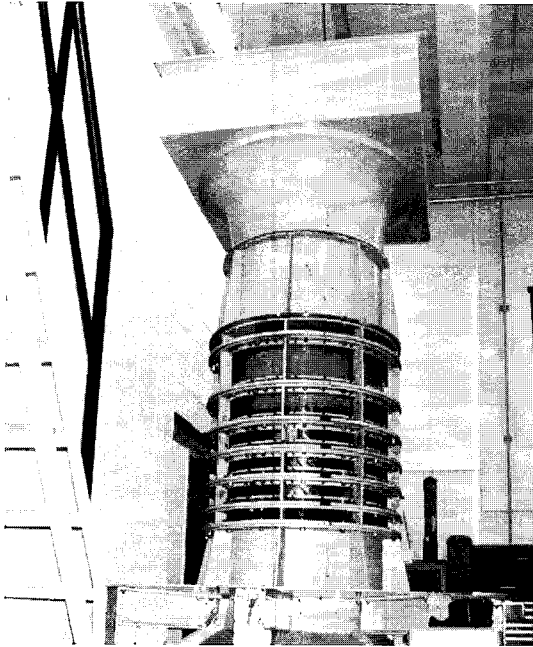


그림 1. 서울대에서 보유중인 4단 축류압축기 시험장비
스에서 그 방향을 90° 바꿔주어 구동을 한다.

2.2 성능 시험 방법

시운전을 마친 축류압축기 내부 유동장 실험을 위해 제 3단 동익 및 정익의 입, 출구에서 압력 및 속도를 측정하였다. 압축기는 800rpm으로 구동되고 설계유량, 고 유량, 저유량 등 세 가지 유량에 대하여 실험하였다. 측정 위치는 출구로부터 11 mm 하류, 정익 출구로부터 18 mm 하류에서 측정하였고 정익에서의 한 피치의 길이는 39.3 mm 이며 한피치를 10등분하여 정익렬을 원주방향으로 이송시키면서 측정하였다. 열선 및 피토판은 2상 스테핑 모터에 장착하여 yaw각을 동익 출구에서는 30°, 정익 출구에서는 60°로 설정하였다. 이송장치는 5상 스테핑 모터를 이용하여 허브에서 팁까지 반경방향으로 센서를 이송시키면서 비등간격 21지점(허브로부터 2% 지점에서 98% 지점까지 측정, 1%=0.75mm)에서 압력과 유속을 측정하였다. 그 다음 원주방향으로 한 피치의 1/10간격으로 정익렬을 1단부터 4까지 각각 10번 이송시켜서 한 피치에 대하여 2차원 측정이 가능하도록 하였다.

압력 측정을 위해 일반 피토판과 United Sensor 사의 코브라형 3공 피토판(125-16-D-16-CD)을 사용하였고

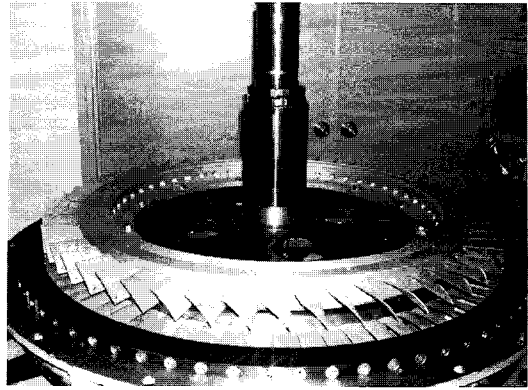


그림 2. 서울대 보유 LSRC 의 동익단

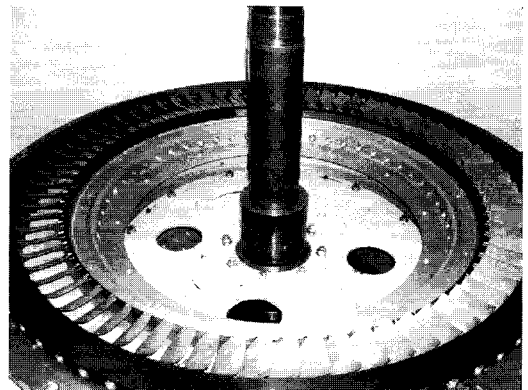


그림 3. 서울대 보유 LSRC 의 정익단

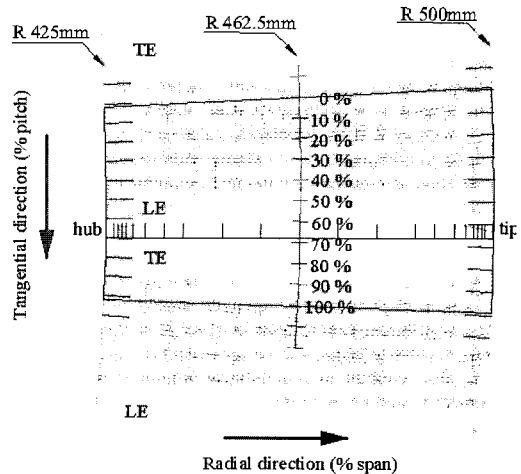


그림 4. 3단 정익 출구에서의 압력, 속도 측정 위치

내부 유동의 속도 및 유동각 측정을 위해서는 Dantec사의 X형(55p64)의 열선유속계(CTA)를 사용하였다.

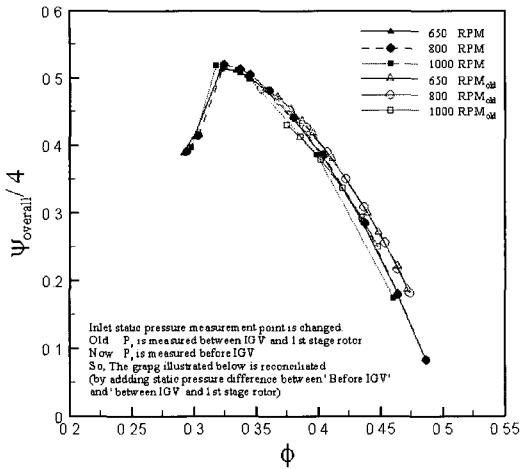


그림 5. LSRC 1단의 평균압력상승 곡선

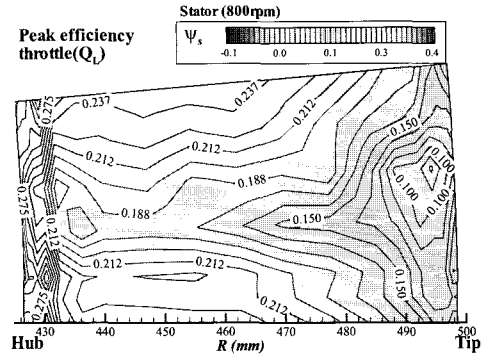
2.3 성능 시험 결과

성능시험은 650, 800, 1000 rpm에 대해서 수행하였으며 출구밸브를 조절함으로써 유량을 바꾸어가며 성능시험을 수행하였다. 상사성을 고려하여 아래와 같이 무차원화된 유량계수와 압력상승계수를 정의하여 그림 5의 성능 곡선을 작성하였다.

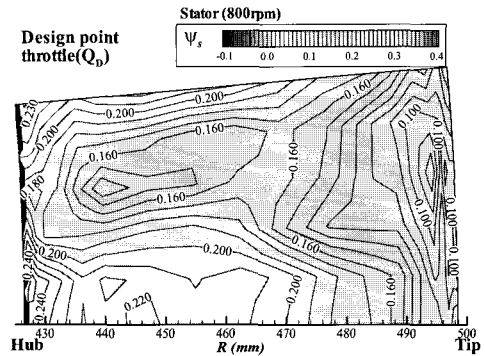
$$\phi = C_x / U \quad (1)$$

$$\psi = \frac{p - p_1}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2)$$

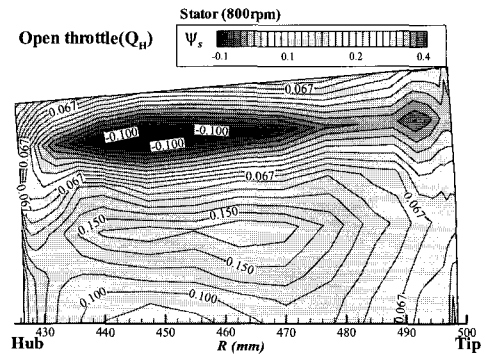
여기서 C_x , U , p , p_1 , ρ 는 각각 축방향속도, 날개 톱 회전속도, 정압력, 입구 정압력 그리고 공기의 밀도를 나타낸다. 압력상승곡선은 전체단의 압력상승량을 단수만큼 나누어 한 단에서의 평균 압력상승량을 살펴보고자 하였다. 성능시험은 여러 차례에 걸쳐 수행하였으며 전체적으로 회전수에 상관없이 하나의 성능곡선을 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 압축기의 최고 효율은 스톨 근처에서 발생하고 실제 작동유량은 이보다 큰 유량계수가 0.40 부근이다. 밸브를 열었을 때 최대 유량은 0.48 정도이다. 이렇게 세 유량계수에서 압력 상승 특징을 살펴보기 위해 정익단 출구에 이송장치를 이용하여 계측한 정압력을 그림 6에 표시하였다. 작동 유량의 경우 정체지역 (그림 4의 80% 부근)에서 압력 상승량이 작고 그 이외의 영역에서 압력 상승량이 증가한다. 최고 효율 유량에서는 50% 피치 부근에서 정압 작고 허브 지



(a) 최고효율유량에서의 압력상승계수



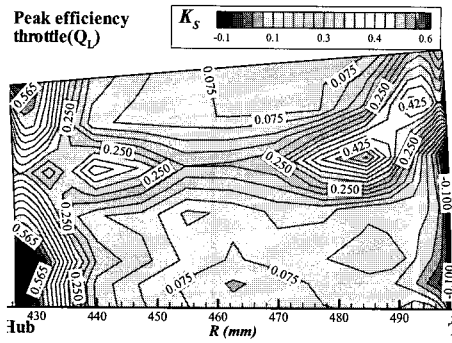
(b) 작동유량에서의 압력상승계수



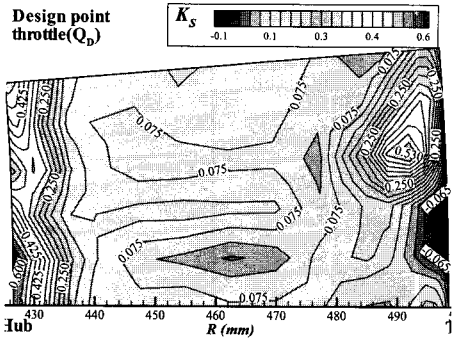
(c) 최대유량에서의 압력상승계수

그림 6. 유량에 따른 정익 출구에서의 압력상승계수 분포도

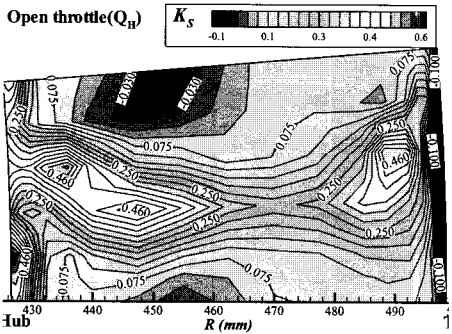
역에서는 오히려 압력이 높게 나타나는데 이후 그림 7의 손실계수 분포에서 원인을 찾을 수 있다. 한편 최대 유량에서는 20%피치 부분에서는 압력의 상승량이 거의 없거나 오히려 음의 값을 가진다. 고유량에서 전체적인 압력 상승량은 줄어드는 반면에 흡입면의 경우 속도가 빨라져 그림에서와 같이 흡입면 근처에서 상대적으로 압력이 줄어들었기 때문이라 생각된다.



(a) 최고효율유량에서의 전압손실계수



(b) 작동유량에서의 전압손실계수



(c) 최대유량에서의 전압손실계수

그림 7. 유량에 따른 정익 출구에서의 전압손실계수의 분포도

한편 출구에서의 손실계수를 살펴보기 위해 아래와 같이 전압손실계수를 정의하였다.

$$p_t = p + \frac{1}{2} \rho C^2 \quad (3)$$

$$K_s = \frac{p_{t3} - p_t}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (4)$$

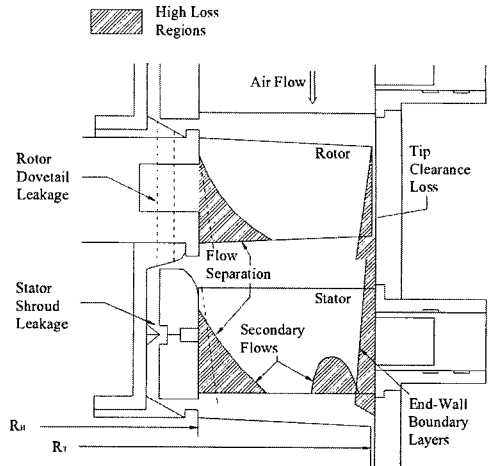


그림 8. 다단 축류압축기에서의 손실 발생 개념도

여기서 C_x , p_{t3} , p_t 는 각각 절대속도, 3단 동익 입구에서의 전압력, 3단 정익 출구에서의 전압력을 나타낸다. 작동유량에서는 후류에 의한 손실이 허브와 팁에서 뚜렷하게 나타나는 반면 주유동 영역에서는 약하게 나타난다. 반면에 최고효율유량과 최대유량에서는 손실 분포를 통해 정확한 후류 지역을 감지할 수 있다. 또한 후류에 의한 손실은 주유동 영역보다 허브와 팁에서 먼저 일어나는데 이것은 팁과 허브부분이 주유동 영역에 비해 후연에서의 블레이드 굴곡이 증가하여 출구에서의 유동각이 커지기 때문에 후류가 먼저 일어나게 된다. 또한 정익의 허브에서는 슈라우드 셸 간극에서의 누설과 벽면의 경계층성장 및 유동박리에 의해 손실이 높게 발생하는 지역임을 손실 분포를 통해 알 수 있다. 그림 8은 일반적인 다단축류 압축기에서의 손실발생이 나타나는 원인을 나타낸 도식도이다. 그림에서 알 수 있듯이 동익의 날개 양 끝단에서는 유동박리와 경계층 성장 그리고 팁 부근에서의 누설 등에 의해 이 부근에서 높은 손실이 발생하게 되며 이러한 경향은 정익에서도 슈라우드 셸 간극에 의한 유량 누설 및 날개 양 끝단에서의 손실로 이어진다. 이러한 내부 유동장 특성 파악은 날개의 공력학적 특성을 파악하여 축류압축기의 성능과 효율을 향상시키는데 있어 중요한 참고자료가 될 것이다.

3. 비정상 유동 계측

현재 서울대 유동과 설계실험실의 LSRC를 이용하여 축류압축기의 비정상 유동에 관련된 연구를 수행 중에 있다. 압축기의 내부 유동은 터빈과 달리 확산유동

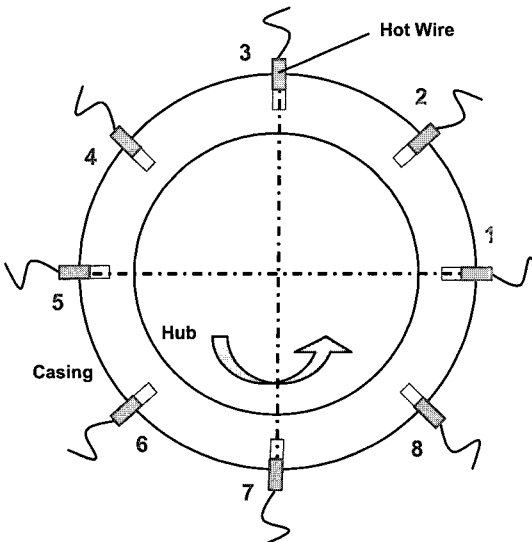


그림 9. 비정상 응답 측정을 위한 Hot-wire 배치

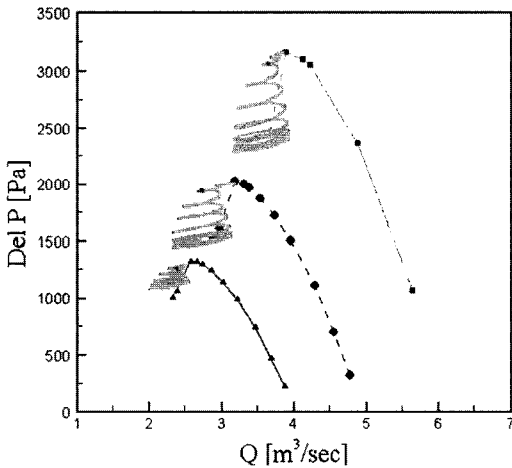


그림 10. 회전수에 따른 압축기의 비정상 응답

(diffusion flow)이므로 항상 역압력 구배에 놓여 있다. 따라서 경계층의 성장에 의한 유동의 박리가 쉽고 이로 인한 실속(stall)이나 서지(surge)가 발생하기도 하여 가스터빈 전체의 성능 및 시스템에 큰 영향을 준다. 이러한 관점에서 볼 때에 압축기는 가스터빈 엔진의 성능 안정성에 큰 영향을 미치는 부품 중 하나이므로, 탈설계점에서의 유동 예측, 설계 시 서지 마진 확보 등 세심한 주의와 고도의 기술이 요구된다. 또한 실속이나 서지 등이 발생하기 이전에 선행신호(precursor)를 감지하여 이를 시스템의 불안전성을 사전에 예측하고 이를 제어하는 기술에 대한 연구도 꾸준히 이어지고 있다. 서울대 유동

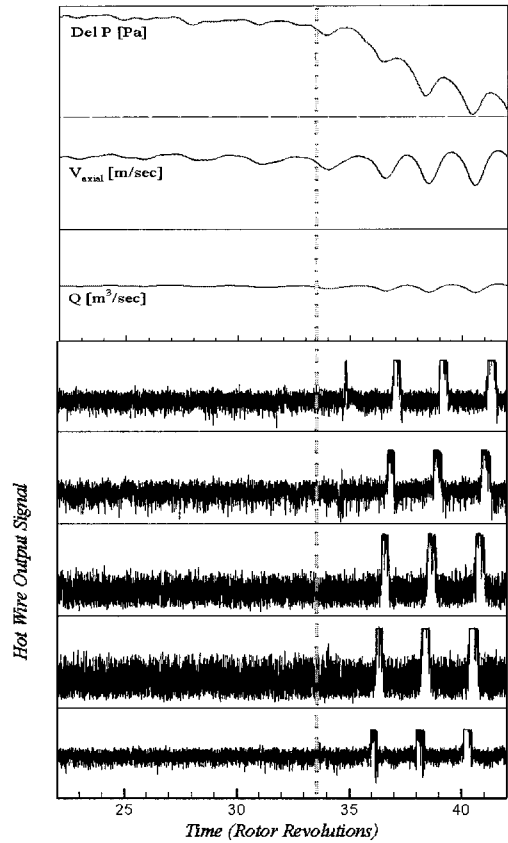


그림 11. 압력, 속도, 유량에서의 스톨 발단 신호

과 설계 실험실에서도 비정상 유동에 대해 관심을 가지고 본격적인 연구에 앞서 비정상 유동 계측을 위한 선행 연구들을 수행하였으며 이를 간단히 소개하도록 하겠다.

비정상 유동을 측정하기 위해서 유동을 안정화 시키며 데이터를 측정하는 성능시험과는 달리 빠른 응답속도를 가지는 센서를 설치하여 유동장 신호를 받는다. 이를 위해 축류압축기 1단 입구와 4단 출구에 5kHz의 응답을 받는 압력센서를 설치하여 실시간으로 차압을 측정한다. 또한 그림 9에서와 같이 45도 간격으로 3단 정익 하류에 열선을 설치하여 고속으로 속도장 데이터를 받아낸다. 그림 10은 유량을 줄여가면서 실시간으로 차압을 측정한 그림으로 전형적인 스톨 특성을 보여주고 있다. Day 등에 의하면 최고 압력 상승량보다 더 작은 압력에서 발생하는 스톨은 일반적으로 Modal 형태의 스톨이라 하는데 서울대 LSRC에서도 이러한 경향을 보여주고 있다. 그림 11은 스톨영역에 들어갈 때에 압력, 속도, 유량의 그래프와 열선에서 감지한 raw data를 나타낸다. 압력과 유량의 변화가 주기성을 나타내기 시작하

였으며 시간에 따라 스톨셀이 회전하는 것이 raw data에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 스톨셀의 회전 속도는 동익의 회전수의 40~60%로 알려져 있는데 서울대 LSRC의 스톨셀 회전수는 압축기 회전수의 50% 정도이다.

4. 맺음말

지금까지 소개한 것처럼 서울대 유동과 설계 실험실에서는 국내 대학 중 처음으로 축류압축기 시험장비를 구축하여 다양한 연구를 수행 중에 있다. 현재 수행중인 성능시험 그리고 비정상 유동 시험 등을 통해 압축기의 설계, 성능 개선, 시스템 안정화 등을 위한 중요한 데이터베이스를 구축할 예정이다. 이러한 자료들은 관련된 연구 결과들은 관련 학회에서 논문 등으로 발표할 예정이다.

5. 참고문헌

- [1] Wisler, D.C., 1977, "Core Compressor Exit Stage Study Volume I : Blading Design," NASA CR-135391.
- [2] Wisler, D.C., 1980, "Core Compressor Exit Stage Study Volume II : DATA and Performance Report for the Baseline Configuration," NASA CR-159498.
- [3] Wisler, D.C., 1980, "Core Compressor Exit Stage Study Volume III : Data and Performance Report for the Screening Test Configurations," NASA CR-159499.
- [4] Wisler, D.C., 1981, "Core Compressor Exit Stage Study Volume IV : Data and Performance Report for the Best Stage Configuration," NASA CR-165357.
- [5] T.R. Camp, L.J. Day, 1998, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 120 03, pp. 393-401
- [6] 한정엽, 2006, "4단 축류압축기의 공력성능 평가에 관한 실험적 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문