

100kW급 보조동력장치용 압축기 성능시험

임병준* · 차봉준* · 양수석* · 이경진** · 백기영**

Performance test for the compressor of 100kW APU

Byeungjun Lim, Bongjun Cha, Sooseok Yang, Kyoungjin Lee, Kiyoung Baik

Key Words: Auxiliary Power Unit(보조동력장치), Centrifugal compressor(원심압축기), Performance test(성능시험), Diffuser(디퓨저)

Abstract

The performance test of a centrifugal compressor for APU(Auxiliary Power Unit) which is developed by the collaborative research of KARI and Samsung TechWin has been conducted. The investigated compressor consists of a curved inlet, a centrifugal impeller, a channel diffuser and a plenum chamber. The experiments were carried out in an open-loop centrifugal compressor test rig driven by a turbine. For three different diffusers, overall performance data were obtained at 80%, 90% and 97% of design speed. For the initially designed wedge-type diffuser, test results showed that the compressor was operated at a higher mass flow rate than the design requirement. By reducing the diffuser throat area, the compressor operating range was shifted to lower mass flow rate range. The test result of redesigned wedge-type diffuser showed high pressure loss. To reduce the diffuser loss, diffuser inlet radius was increased and airfoil-type of diffuser was adopted. This airfoil-type diffuser showed reasonable results in terms of design requirement.

기호설명

N	test RPM (%)
N _d	design requirement RPM (%)
P _T	total pressure
P _S	static pressure
Q _N	(mass flow rate)/(design point mass flow rate)
R	radius
A _{th}	(diffuser throat area)/(diffuser A throat area)
η_{T-T}	total-to-total efficiency
C _p	pressure recovery factor

아래첨자

0	ambient
1	inlet
2	impeller exit
3	diffuser exit
4	plenum

1. 서론

보조동력장치(APU: Auxiliary Power Unit)는 주 동력장치의 시동, ECS(Environmental Control System)의 공기 공급원 또는 비상발전시스템 등으로 사용되는 장치로서 주로 200마력 이하의 소형 가스터빈엔진이 많이 사용된다. 이러한 보조동력장치용 소형 가스터빈엔진에는 주로 원심압축기가 사용되는데 축류압축기에 비해 제작이 비교적 용이하고 단당 압축비가 크며 또한 유량작동범위가 넓고 또한 구조적으로 안정되어 긴 수명을 유지할 수 있다^(1,2,3).

현재 한국항공우주연구원과 삼성 테크윈은 100kW급 보조동력장치를 공동개발중이며 현재 시제품 1호기에 대한 시스템 성능시험을 수행하고 있다.

개발중인 상기 보조동력장치용 원심압축기는 입구유로, 임펠러, 디퓨저로 구성되어 있다. 고효율, 고압축비를 갖는 원심압축기를 개발하는 데

* 한국항공우주연구원
터보기계연구그룹
** 삼성 테크윈 엔진연구소

에는 고난도의 설계기법이 필요하며 특히 압축기에 요구되는 운용영역과 서지마진을 확보하기 위해서는 디퓨저가 매우 중요한 변수로 작용한다⁽⁴⁾. 임펠러의 경우에는 성능이 입증된 상용코드 등과 기타 자체 개발한 설계 코드 등이 많이 있으며 설계과정도 거의 체계화되어 있다. 또한 임펠러 유동해석 결과도 시험결과와 거의 일치하는 경향을 갖는 등 디퓨저에 비해 설계절차 및 결과에 대한 신뢰도가 높은 편이다⁽¹⁾. 그러나 디퓨저의 경우, 임펠러 출구유동이 제트류와 와류가 혼합된 상태에서 큰 회전 반경을 가지고 선회하는 매우 복잡한 유동구조를 갖는데 이러한 복잡한 디퓨저의 입구유동으로 인하여 디퓨저의 설계는 많은 부분이 경험식에 바탕을 둔 해석이나 시험결과에 의존한다. 많은 개발과제의 경우 여러 종류의 디퓨저 형상에 대한 시험을 통하여 설계요구조건을 만족하는 최적의 디퓨저를 결정하게 된다.

본 논문에서는 현재 개발중인 보조동력장치용 원심압축기에 대하여 3차에 걸쳐 wedge 형 디퓨저와 airfoil 형 디퓨저의 성능시험과 재설계 과정에 대하여 기술하였다.

2. 시험장치

2.1 성능시험기

압축기 성능시험기는 터빈으로 구동되는 개방형으로서 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 공기는 380 kW의 공기압축기에 의하여 최대 400 kPa까지 압축된 후 2단의 전기히터에 의해 620°C까지 가열된다. 가열된 공기는 구동터빈을 통해 대기로 팽창되면서 단일 회전축으로 연결된 압축기를 구동시킨다. 압축기 구동용 터빈과 축 계통은 현재 선박용으로 사용되고 있는 터보차저(NR-15R)로서 최대 회전수는 약 61,000 rpm이며 회전수는 스톱밸브(PCV-2)에 의해 조절된다. 터빈 팽창 조절밸브(PCV-5)는 터빈이 시동될 때 급격한 회전수 증가에 의한 축 계통 손상을 방지하기 위한 안전밸브이다.

대기로부터 압축기로 유입된 공기는 압력제어 밸브(PCV-3, PCV-4)에 의하여 압력이 조성되며 유로하류에는 압축기가 서지상태로부터 신속히 벗어나기 위한 서지안전밸브(PCV-6)를 설치하였다.

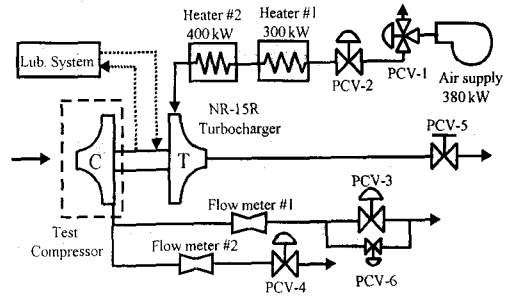


Fig. 1 Schematic diagram of a test facility

2.2 시험압축기

압축기는 굴곡진 입구형상과 임펠러 및 디퓨저로 구성되어 있으며 60,000 rpm의 설계점 속도에서 압력비 4.4, 효율 75%의 성능을 목표로 설계되었다. 입구형상은 실제로 압축기가 보조동력장치에 설치될 경우의 성능을 시험하기 위해서 굴곡진 형상으로 설계되었다(Fig. 2). 임펠러는 13개의 보조날개를 포함하여 26개의 날개로 구성되어 있다(Fig. 3). 설계점에서의 임펠러 출구 마하수는 1.05 이다.

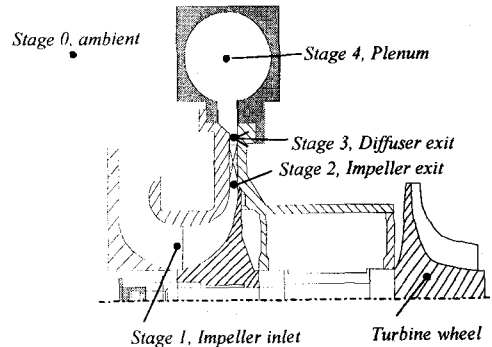


Fig. 2 Cross section of a compressor test rig

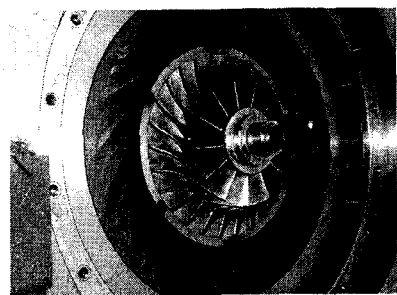


Fig. 3 Impeller

2.3 측정장비 및 자료획득장치

전반적인 압축기 성능을 평가하기 위해서 압력과 온도를 측정하였다. 측정위치는 Fig. 1과 같이 대기상태로부터 압축기 출구까지 몇 개의 단계로 구분하였다. 압축기 입구에서는 4개의 전압력 및 정압력과 정온도를 측정하였으며 임펠러와 디퓨저 출구에서 4개의 정압력과 압축기 출구에서 4개의 전압력 및 온도를 측정하였다. 측정장비에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽⁵⁾에 있다.

시험기 제어 및 자료획득은 Labview 소프트웨어를 이용하여 구성하였으며 시험 중 안전을 위해 불안정성 발생을 판단하기 위하여 설치한 진동 및 근접센서와 천이압력과 같은 고주파수 응답특성 신호들은 별도의 PC와 소프트웨어로 구성하였다.

3. 시험결과 및 검토

3.1 시험 디퓨저

본 시험에서는 성능시험기의 터빈 구동력과 운용 톱 간극의 변화에 따른 안전문제로 인하여 시험최대속도는 설계점 97%로 정하였고 설계점 속도의 80%, 90%, 97% 에서 압력비, 효율, 작동영역 등을 측정하였다.

압축기의 성능시험은 3가지 디퓨저(Fig. 4)에 대해 3차에 걸쳐 진행되었고 디퓨저 B와 C는 디퓨저 재설계 과정을 통하여 도출된 것이다. 초기 설계된 디퓨저는 넓은 유량작동범위를 만족하도록 서지마진을 늘리기 위하여 디퓨저 베인 형상이 약간의 캠버를 가지는 **profiled type** 디퓨저이다. (Diffuser A/A-1)⁽¹⁾. Table. 1은 각 디퓨저의 제원을 나타낸 것이다. 각 디퓨저의 설계과정은 다음의 시험결과에 함께 기술되었다.

Table. 1 List of 3 type diffuser

Diffuser	A	A-1	B	C
베인수	21	21	39	29
R_3/R_2	1.098	1.098	1.098	1.195
R_4/R_2	1.585	1.585	1.585	1.585
A_{th}	1	0.91	0.82	0.86

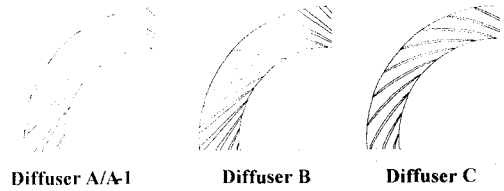


Fig. 4 3 type diffuser shape

3.2 성능시험결과

3.2.1 1차 성능시험결과

원심 압축기의 성능을 검증하기 위해 1차로 설계된 디퓨저(diffuser A)를 장착한 상태에서 성능시험을 수행하였다. 디퓨저 A는 wedge 형 단면을 가진 21개의 날개들로 구성되어 있다(Fig. 4 & Table.1).

성능시험결과 압축비와 효율이 설계요구조건과 근접하였으나 전체적으로 고유량쪽으로 치우친 결과를 보였다(Fig. 5, Fig. 6). 그림에서 설계요구 조건의 회전수는 각각 80%, 90%, 100%에서의 값들이다. 압축기의 성능은 임펠러와 디퓨저에 의해 크게 좌우되는데 1차 성능시험 결과로부터 임펠러의 경우 충분한 압축비를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 압축기 전체 작동영역이 고유량쪽으로 치우쳐 있고 작동영역이 좁은 것은 디퓨저 목 면적이 지나치게 크게 설계 되어있으며 임펠러 출구의 유동각과 베인각이 상당히 큰 mismatch를 가지기 때문으로 판단 되었다. 이러한 결과로부터 임펠러는 그대로 유지한 상태에서 디퓨저의 목 면적을 감소시켜 작동영역의 변화를 확인하여 디퓨저 재설계에 반영하였다.

1차 성능시험결과를 바탕으로 디퓨저의 목면적을 줄여 작동영역이 저유량쪽으로 이동가능 여부를 확인하기 위하여 디퓨저 베인의 높이를 감소시키는 방법으로 디퓨저 목면적을 9% 감소시켜 (Diffuser A-1) 추가시험을 수행하였다.

시험결과 97% 회전수에서 초킹유량이 약 5%정도 감소하였고 전체적으로 작동범위의 변화 없이 작동 영역이 저유량쪽으로 이동하였다(Fig.7, Fig. 8). 디퓨저 A 시험 후, 디퓨저 유로상의 흔적을 살펴보면 유로부 중간 정도에서 유동 박리의 흔적이 나타났으며 베인 형상을 분석한 결과 확산각이 약간 크게 설계된 것을 확인하였다. 따라서 베인 개수의 증대를 통하여 이러한 확산각을 줄

여 유동박리를 없애는 방향으로 재설계를 수행하였다. 또한 작동영역을 저유량쪽으로 이동시키기 위해 목 면적을 감소시키는 방향으로 디퓨저 재설계에 반영하였다. 시험 데이터를 분석한 결과, 디퓨저 입구의 유동각은 설계점 유량에서 디퓨저 입구 배인각도와 약 1.5도의 차이가 있는것으로 계산되어 이를 반영하여 디퓨저를 재설계 하였다.

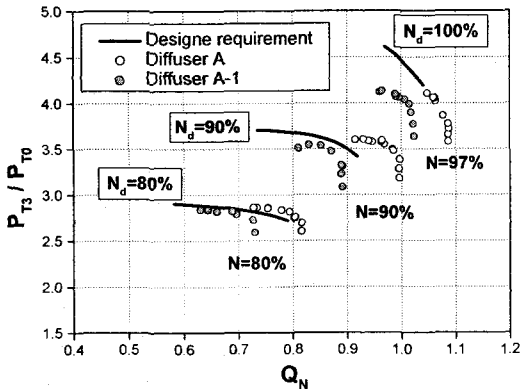


Fig. 5 Overall pressure ratio (Diffuser A, Diffuser A-1)

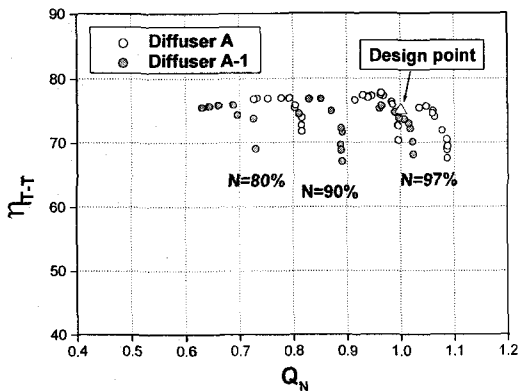


Fig. 6 Overall efficiency (Diffuser A, Diffuser A-1)

3.2.2 2차 성능시험결과

1차 성능 시험 결과를 반영하여 재설계를 수행하였는데 우선 유량과 작동 영역의 문제는 디퓨저 배인각을 디퓨저 A보다 작게 하여 목면적을 줄이고 앞에서 언급하였던 바와 같이 시험 결과를 이용하여 계산된 유동각과 일치하도록 하였으

며 배인의 개수를 늘려 디퓨저의 확산각을 줄여 손실을 줄이는 동시에 작동영역을 확보하도록 하였다.

재설계 디퓨저(Diffuser B)에 대한 시험결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 결과를 보면 유량 작동영역은 기존 디퓨저(Diffuser A)에 비해 저유량쪽으로 충분히 이동하였으나 작동범위는 여전히 좁은 결과를 나타내었다. 또한 압력비와 효율도 낮아지는 결과를 보였다. 이러한 결과는 디퓨저 목면적의 감소로 작동영역은 저유량쪽으로 이동하였으나 디퓨저에서의 손실이 증가했기 때문으로 판단된다.

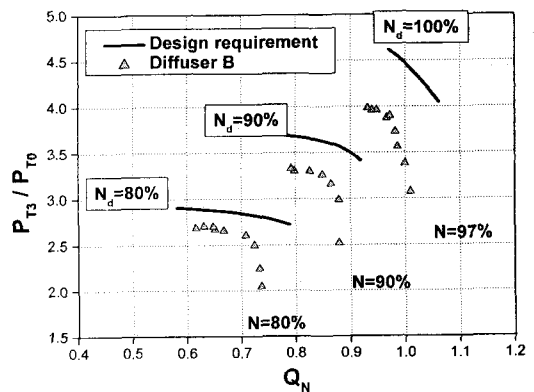


Fig. 7 Overall pressure ratio (Diffuser B)

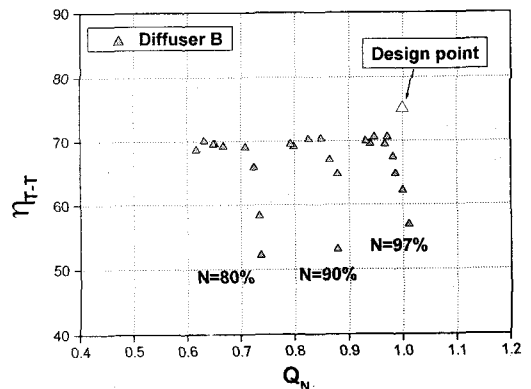


Fig. 8 Overall efficiency (Diffuser B)

디퓨저 B에서는 임펠러 출구에서 전압력을 측정하였는데 그 결과 임펠러 출구에서는 설계값과 유사한 충분한 전압력값을 보였지만 디퓨저 부분에서 손실이 크게 나타났다(Fig.9). 이는 디퓨저

베인각이 유동각과 상당한 차이를 보이거나 마하수가 상대적으로 크기 때문에 예상하였는데 시험 데이터를 분석한 결과 입사각이 크지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 두 번째로 재설계된 airfoil 디퓨저는 2차 성능 시험 결과를 반영하여 입구부의 손실을 줄이기 위하여 임펠러 출구로부터 디퓨저 입구까지의 거리를 증가시켜 디퓨저 입구에서의 마하수를 감소시키도록 하였으며 베인 형상을 airfoil 형으로 바꾸어 손실을 줄이도록 하는 동시에 디퓨저 내에서의 적절한 정압력 변환이 이루어지도록 설계하였다.

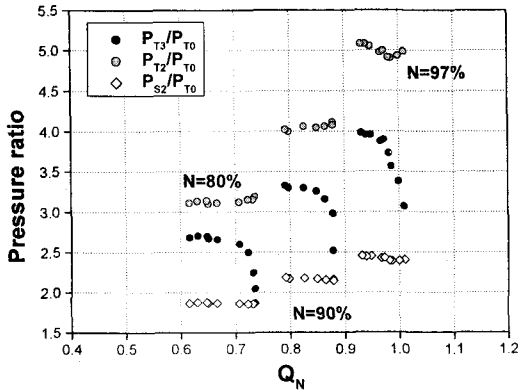


Fig. 9 Pressure ratio of Diffuser B

3.2.3 3차 성능시험결과

2차 성능시험결과를 반영하여 재설계한 Airfoil 형 디퓨저(디퓨저 C)에 대하여 성능시험을 수행하였다. 디퓨저 C의 형상과 제원은 Fig.4와 Table.1에 나타내었다. 3차 성능시험은 시험설비 문제로 plenum에서 측정된 전압력으로 계산된 전압력비와 효율로 성능곡선을 나타내었고 시험회전수는 설계회전수의 80%, 90%, 98%이다.

98% 회전수에서 압력비의 경우, 최대압력비가 설계요구조건에 근접한 값을 얻었으며 작동선의 모양도 디퓨저 B에 비해 서지마진이 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 10). 90% 회전수에서 서지점에 도달하기 전에 압력비가 저하되는 경향이 나타났는데 이러한 현상의 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

압력비의 경우에는 디퓨저 출구에서 plenum까지의 손실과 회전수의 영향을 고려해 볼 때 설계회전수에서는 설계요구조건을 충분히 만족할 것으로 판단된다. 효율의 경우는 설계요구조건에

다소 못 미치는 결과를 나타내었다(Fig. 11).

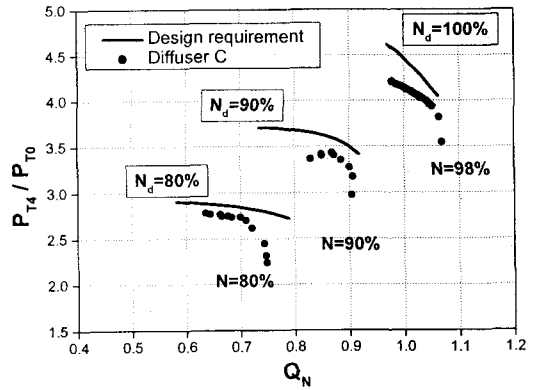


Fig. 10 Overall pressure ratio (Diffuser C)

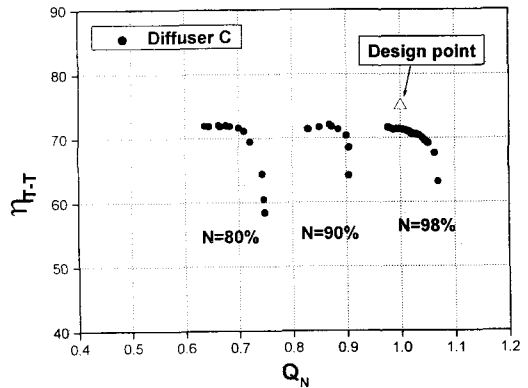


Fig. 11 Overall efficiency (Diffuser C)

3.3 시험결과비교 및 검토

디퓨저 C와 디퓨저 B의 성능을 비교하기 위하여 임펠러 출구와 디퓨저 출구사이의 압력회복계수를 계산하여 나타내었다(Fig. 12). 임펠러 출구에서 디퓨저 출구까지의 압력회복계수를 계산함으로써 임펠러 출구에서 디퓨저 입구까지의 베인 없는 공간(vaneless space)을 포함한 전체 디퓨저 시스템의 성능을 평가할 수 있다. 디퓨저 B의 경우는 임펠러 출구에서 측정된 전압력을 사용하였고 디퓨저 C의 경우는 임펠러 출구 정압력으로부터 전압력을 계산하여 사용하였다.

디퓨저 C의 경우, 디퓨저 B에 비해서 압력회복이 상승한 것을 볼 수 있는데 이것은 임펠러 출구에서 디퓨저 입구까지의 거리를 증가시켜 디퓨저 입구 마하수를 낮추고, 디퓨저 형상을 airfoil

형태로 바꾸어 손실을 낮추려는 설계의도와 일치하는 결과라고 판단된다.

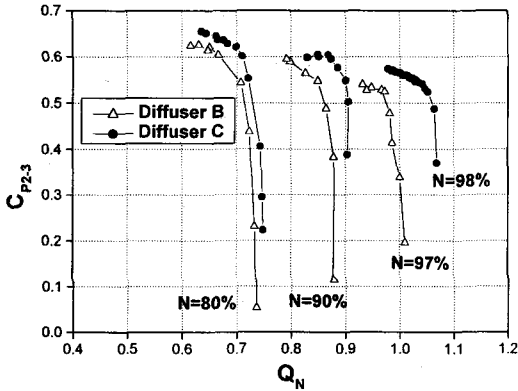


Fig. 12 Pressure recovery factor (Diffuser B, Diffuser C)

전반적으로 디퓨저 C의 경우는 디퓨저 B에 비해서 압력비가 상승되었고 설계점 부근의 회전수에서 서지마진도 증가하는 경향을 나타내었다. 압력비의 경우는 설계요구조건을 만족할 것으로 예상된다. 효율은 설계요구조건에 다소 못 미치는 경향이 나타났는데 효율향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

현재 항우연과 삼성 테크윈이 공동개발 중인 보조동력장치용 원심압축기의 성능시험을 수행한 결과, 압축기의 전반적인 성능은 설계요구조건을 만족하였다. 현재 보조동력장치용 엔진시스템시험이 진행중이며 엔진시험결과와 추가적인 압축기 성능시험을 통하여 최종 디퓨저를 선정할 예정이다.

1) 보조동력장치용 원심압축기 시험결과, 임펠러는 설계요구조건을 만족하는 충분한 압력비를 얻을 수 있었다.

2) 초기 설계된 wedge 형 디퓨저(디퓨저 A)의 경우, 유량작동영역이 고유량쪽으로 치우쳐 나타났고 디퓨저 목면적을 감소시킴으로써 작동영역이 저유량쪽으로 이동하는 것을 확인하였다.

3) 재설계된 wedge 형 디퓨저(디퓨저 B)의 경우, 디퓨저에서 손실이 크게 나타났으며 이러한 성능시험 결과를 반영하여 디퓨저 입구반경을 증

가시키고 airfoil 단면을 가진 디퓨저(디퓨저 C)를 재설계하였다.

4) Airfoil 형 디퓨저(디퓨저 C)의 성능시험결과, 설계요구조건을 만족할 것으로 예상되는 압력비를 얻었고 설계 회전수 부근에서 서지마진이 향상되는 효과를 얻었다. 효율은 설계요구조건에 다소 못 미치는 결과를 나타내어 효율향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 이대성 외, 2000, 보조동력장치개발, 과학기술부 연구보고서.
- (2) 이강이, 이시우, 김승우, 1996, "APU 개발동향 및 개념설계 절차", 한국항공우주학회지, 24권 제5호, pp.173~180.
- (3) S. Webb, 1995, "Technical Data To Support FAA's Advisory Circular on Reducing Emissions from Commercial Aviations", US EPA.
- (4) H. Tamaki et al, 1999, "The Experimental Study of Matching Between Centrifugal Compressor Impeller and Diffuser", Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp113~118.
- (5) 차봉준, 임병준, 양수석, 이대성, 2000, "팁 간극 영향으로 인한 원심 압축기 성능특성 시험연구", 제1회 한국유체공학학술대회 논문집, pp587~590.