

원심압축기의 기술동향

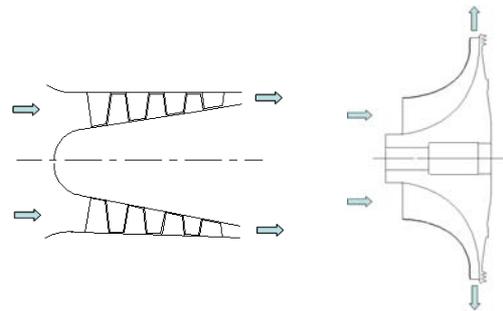
글 / 강정식 jskang@kari.re.kr, 임병준, 차봉준,
양수석

한국항공우주연구원 항공사업단 항공기술실 항공추진그룹

1. 서론

원심압축기는 터보형 압축기의 한 종류로서 가스터빈, 산업용 공기압축기, 대형 터보내동기, 터보차저, 고압 송풍기 등 압축공기(가스)가 사용되는 다양한 산업분야에서 사용되고 있다. 원심압축기는 날개의 회전을 통하여 작동 유체에 에너지를 전달하여 압력을 상승시키는데, [그림 1]에서 보는 것처럼 압축기 입구와 출구에서 유체의 방향이 축방향으로 흐르는 방식을 축류압축기(axial compressor)라 하고, 축방향으로 유입되어서 반경방향으로 흐르는 방식을 원심압축기(centrifugal compressor)라 한다. 원심압축기는 하나의 단에서의 압력비가 축류압축기에 비하여 높은 특징이 있다.

역사적으로는 19세기말에 산업이 발전하면서부터 사용되기 시작하여, 최초의 제트엔진인 Frank Whittle의 W1엔진과 Von Ohain의 HeW3B엔진에서도 원심압축기가 사용되어 비행을 성공한 이후 오늘날까지 대부분의 중소형 가스터빈엔진에서는 원심압축기가 사용되고 있다. 항우연에서는 설립이후 지금까지 가스터빈 엔진과 관련하여 몇 가지 종류의 원심압축기 개발과제를 수행해 왔으며, 또한 앞으로 항우연의 주력 연구사업이 될 KMH 사업에서도 주엔진, 이차동력장치(APU), 환경조절계통(ECS)에 원심압축기가 핵심 구성품으로 사용될 예정이다. 이 글에서는 원심압축기의 세계적인 기술개발 동향과 항우연의 기술개발 동향을 정리하였다.



(a) 축류압축기 (b) 원심압축기

그림 3 축류압축기와 원심압축기의 개념도

2. 기술동향

2.1 국외의 원심압축기 기술 동향

최근에 원심압축기의 기술이 소형화, 고성능화, 고압축비의 실현이 가능해짐에 따라 새로운 분야로의 응용이 시도되고 있다. 이 글에서는 최근에 세계적인 주목을 받고 있는 MEMS용 초소형 압축기 분야와, 마이크로터빈용 압축기, 그리고 초고압 압축기에 대하여 소개하였다.

2.1.1 MEMS 가스터빈용 초소형 원심압축기

휴대용 전자장비의 대중화로 인하여 집적화된 휴대용 전력생산기기의 필요성이 크게 요구되고 있는 현대의 상황에 부합하여 전력을 생산할 수 있는 초소형 MEMS 가스터빈엔진의 개발이 주목을 받고 있다. MEMS 가스터빈엔진은 기존의 배터리 방식보다 에너지 집적도가 높고 연료의 충전으로 재사용이 가능한 장점이 있다. 미국의 MIT를 중심으로 개발하고 있는 MEMS 가스터빈엔진에는 직경 4mm의 원심압축기가 사용되며, 압력비는 2~4이고, 회전수는 약 1,200,000rpm이어서 임펠러의 팁



그림 2. MEMS 가스터빈엔진을 위하여 MIT에서 개발중인 초소형 원심압축기. 직경이 4~8mm이며 임펠러의 톱속도는 500m/s에 이른다.

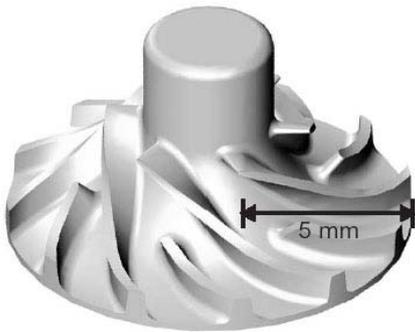


그림 3. Stanford 대학에서 개발 중인 초소형 원심압축기 임펠러의 모델. 직경이 12mm이며, 800,000rpm으로 회전한다

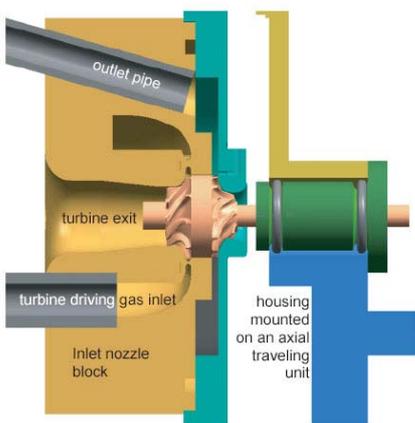


그림 4. Stanford대학에서 개발 중인 초소형 압축기 및 터빈의 시험기

10~100W의 속도(날개 출구 회전속도)는 약 500 m/s에 이른다. 유량이 상용 가스터빈 엔진에 비하

여 백만분의 1정도의 적은 양이고, 생산의 용이성을 위해 임펠러는 2차원 임펠러의 형상을 하고 있으며, 임펠러 출구의 날개 두께가 두꺼운 등 다양한 특징이 있다.[그림2] 일본의 Honda는 미국의 Stanford 대학과 공동으로 초소형 가스터빈을 개발하고 있으며, 여기에는 직경 12mm에 800,000 rpm으로 회전하는 원심압축기를 개발하고 있다. 이 압축기는 2차원 형상을 가진 MIT의 압축기와

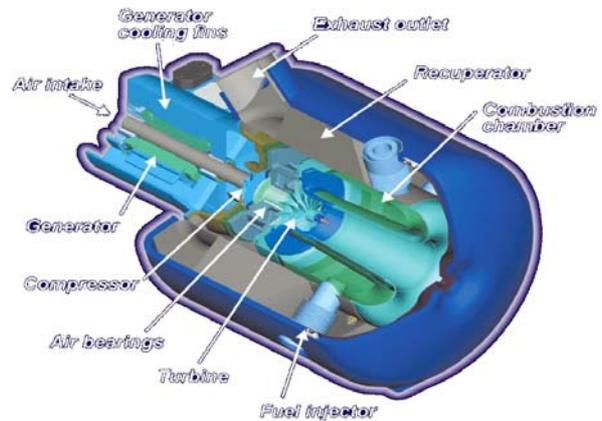


그림 5. Capstone사의 30kW급 마이크로터빈의 단면도

달리 효율을 고려하여 3차원 임펠러의 형상을 가지고 있다.[그림3,4] 이런 초소형 가스터빈 엔진의 개발이 성공한다면 기존의 배터리보다 에너지 집적도가 높고, 쉬운 충전의 장점으로 인하여 휴대용 에너지원으로서 용도가 아주 높을 것으로 기대된다.

2.1.2 마이크로터빈용 원심압축기

마이크로터빈은 앞서서도 언급되었듯이 발전용량이 약 30~350kW인 가스터빈과 발전기의 복합체로서 독립된 발전뿐 아니라 복합발전시스템(combined heat and power system)의 구성품으로서 근래에 세계적인 관심을 받고 있으며, 2000년도부터 상업용 제품이 나오기 시작하였다. 압축기는 1단의 원심압축기를 사용하며 터빈과 하나의 축에 연결되어 있고, 회전속도는 대개 60,000rpm이상의 고속이다. 미국의 Capstone사의 경우, 30kW급 마이크로터빈[그림5]의 회전속도는 96,000 rpm이고, 압력비는 3.64이며, 공기유량은 0.32 kg/s이고, 60kW급의 마이크로터빈은 회전속도는 96,000rpm이고, 압력비는 4.8이며, 공기유량은

0.5kg/s이다. Elliott Power System사는 압축비 4의 원심압축기를 장착한 80kW급의 마이크로터빈을 생산하며[그림6], ABB사(Turbec)는 70,000 rpm으로 회전하는 원심압축기를 장착한 100kW급의 마이크로터빈을 생산하고 있다.

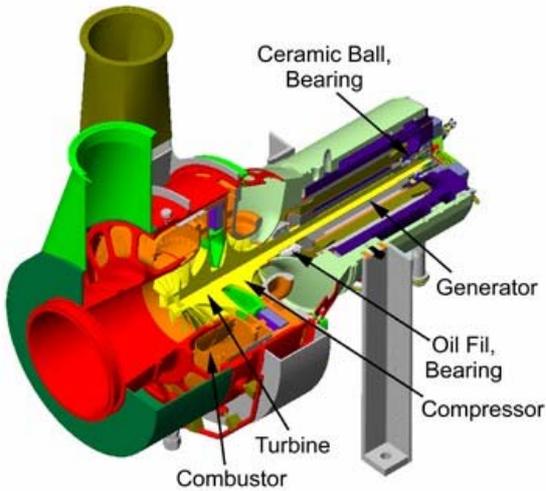


그림 6. Elliott Power System사의 80kW급 마이크로터빈의 단면도

업에서는 수백기압의 가스 압축이 필요하며 종래에



그림 8. 항우연이 보유하고 있는 2,300kW급 원심압축기 성능시험설비의 사진



그림 9 APU용 원심압축기의 임펠러 및 디퓨저의 사진

2.1.3 산업용 압축기

원심압축기는 가스터빈과 관련된 항공분야에서 사용될 뿐 아니라 산업용으로는 공기압축기와 프로세스(process) 압축기로도 사용된다. 프로세스용 압축기는 공기 외에 다른 종류의 가스를 압축하여



그림 7. 항우연이 삼성테크윈과 공동 개발한 1.2MW급 산업용 가스터빈의 1단 원심압축기 임펠러

정유산업(petro-chemical industry), 유전가스 산업(oil & gas industry), 정제용(refinery), 식품용(food industry) 등에 사용된다. 정유산업 및 유전가스 산

는 왕복동형 압축기(reciprocating compressor)가 독점적으로 사용되었으나, 최근에는 고용량에서 사용할 수 있는 원심압축기를 이용한 초고압 압축기의 개발이 중요한 이슈이다. GE는 Blue-C라는 이름의 2.5MW와 5MW급 압축기를 개발 완료단계에 있는데, 이 압축기는 6단의 원심압축기를 사용하여 가스를 130기압으로 가압하는 것이 가능하며, 2008년까지 12.5MW급의 압축기를 현장에 배치할 계획으로 연구/개발하고 있다. 일본의 미쯔비시중공업(Mitsubishi Heavy Industry)도 44.1 MPa로의 가압이 가능한 원심압축기를 2003년에 개발 완료하여 판매하고 있는 실정이다.

2.2 항우연의 원심압축기 기술 동향

2.2.1 산업용 가스터빈엔진의 2단 원심압축기

항우연에서는 환경조절계통의 개발을 위하여 최초로 원심압축기의 개발 연구가 수행되었다. 본격적인 원심압축기의 연구개발은 1.2MW급 산업용

가스터빈엔진을 개발하면서부터이며 원심압축기의 성능시험 설비를 구비하고 설계 및 성능시험을 수행하였다. 산업용 가스터빈은 2단의 원심압축기를 사용하며, 각각 압축비가 4.3과 4.1의 압축비로 설계되었고, 인두서에서 천음속현상을 고려하여 설계되었고, 고효율의 채널디퓨저를 채용하였다. [그림 7]은 1단 압축기 임펠러의 사진이며, [그림 8]에는 항우연에 설치하여 시험을 수행한 2,300kW급 압축기 시험설비의 사진을 나타내었다.

2.2.2 보조동력장치(APU)용 원심압축기

산업용 가스터빈의 성공적인 개발 이후 100kW급 보조동력장치(APU)의 개발을 수행하였다. 보조동력장치(APU: Auxiliary Power Unit)란 주동력원(Engine)의 보조동력원으로서 주엔진의 연료를 사용하여 시스템이 요구하는 각종 보조동력을 공급하는 장치를 말하며 그 형태는 왕복엔진에 비해 크기/무게/진동/수명/사용연료/운영고도 등에

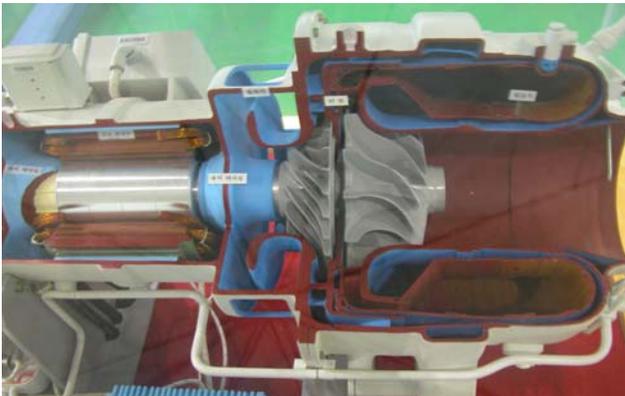


그림 10. 항우연과 삼성테크윈이 공동 개발한 100kW급 보조동력장치(APU)의 모델

서 월등한 장점을 지닌 완전한 가스터빈 형식을 택하고 있다. 이러한 보조동력장치는 군수, 민수 및 산업용 등으로 그 활용분야가 매우 다양하여 군용궤도 차량을 비롯한 각종 지상장비의 경우 보조전력 및 여압용 압축공기 공급과 환경제어시스템 (ECS)에 필요한 공압용으로, 그 밖의 민수/산업용으로는 대형건물의 전력발전용, 낙도, 건설현장 등에서 비상발전 등에 사용되고 있는 등 그 용도가 증가되고 있는 추세이다. 1960년 초반부터 출현하기 시작한 보조동력장치는 현재에 이르

면서 소형화, 경량화, 저연료소모율, 고비출력, 저획득/운영비용, 고신뢰성, 저정비성, 고고도 운용능력 등이 요구되어왔다. 항우연이 삼성테크윈과 공동 개발한 APU용 원심압축기는 채널 디퓨저와 디스월베인(deswirl vane)을 장착한 압축비 4.4의 고효율 임펠러[그림9]를 개발하여 장착하였다. 상세사양은 [표1]에 나타내었다. 이 압축기의 성능시험을 위하여 항우연은 소형 압축기 성능시험설비를

표 1. 항우연(KARI)과 삼성테크윈이 공동 개발한 APU용 원심압축기의 사양

	단위	사양
직경 (D ₂)	mm	164
회전수	rpm	60,000
압력비	-	4.4
유량	kg/s	0.98
단열효율	%	75
디퓨저 형식	-	채널 디퓨저
디퓨저 베인 수	-	39



그림 11. UAV의 터보샤프트 엔진용 원심압축기의 임펠러 사진

구축하여, 성능시험을 비롯하여 디퓨저의 성능연구, 틱간극 영향 등 다양한 시험을 수행하였다. [그림 10]은 개발 완성하여 실물크기로 제작한 APU 모델의 사진이다.

2.2.3 UAV를 위한 터보샤프트 엔진용 원심압축기

최근에는 UAV를 위한 터보샤프트엔진용 원심압축기의 개발과 마이크로터빈용 원심압축기의 개발을 진행하고 있다. UAV(Unmanned Aerial Vehicle)란 조종사가 없이 재사용이 가능한 기체에 추진기관이 장착되어, 반자동 또는 자동으로 원격조정

이 가능하며, 여러 종류의 임무 탑재체를 장착

표 2. 항우연이 개발 중인 UAV를 위한 터보샤프트 엔진용 원심압축기의 사양

	단위	사양
직경 (D ₂)	mm	87.36
회전수	rpm	105,000
압력비	-	3.8
유량	kg/s	0.432
단열효율	%	78
디퓨저 형식	-	베인 디퓨저
디퓨저 베인 수	-	23

가능케 함으로써 지구 대기권내에서 주어진 임무에 따라 일정기간 동안 임무를 수행할 수 있는 비행체를 의미한다. 최근에는 미국을 비롯한 선진국들을 중심으로 유인 전투기를 대신할 무인 전투기의 기술 개발에 큰 관심을 가지고 있는 것이 사실이고, 터보 제트나 터보 팬 엔진이 장착되는 무인 전투기의 개발에 막대한 비용을 투입하여 첨단 전자, 제어 기술을 결합한 무인 항공기의 개발이 현재 진행 중에 있는 상황이다. 항우연과 (주)뉴로스가 공동개발하고 있는 UAV를 위한 터보샤프트엔진은 엔진의 무게를 15kg이하로 개발하는 것이 목표이므로, 엔진의 경량화를

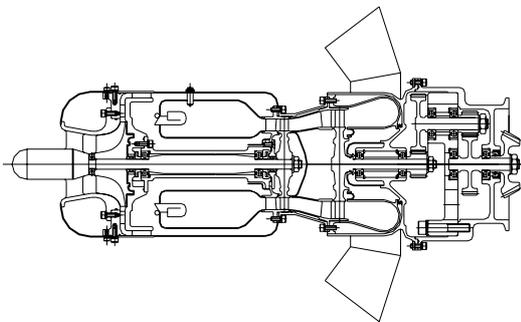


그림 12. 개발 중인 UAV용 엔진의 Layout. 왼쪽 부분에 발전기와 원심압축기가 있다.

위하여 로터시스템의 회전속도를 높게 설계하여 로터의 직경을 줄였으며, [그림12]에 엔진의 레이아웃(Layout)을 나타내었다. 압축기와 터빈, 고속발전부는 동일한 축으로 연결되어 있으며 회전수는 105,000rpm으로서, 압축기 임펠러의 직경이 88mm도 되지 않는 아주 작은 임펠러이다.[그림 11] 압축기의 상세사양은 [표2]에 나타내었다.

2.2.4 마이크로터빈용 원심압축기

마이크로 가스터빈 (또는 마이크로터빈, microturbine)은 일반적으로 발전용량이 약 30kW에서 350kW 이하인 소형 가스터빈을 의미하며, 최근까지 군사용 수송 차량(탱크 등)의 원동기나 군사용 비상 발전기의 원동기로 주로 사용되었다. 그런데 최근 기술의 발달과 비용의 절감으로 인하여 그 수요처가 폭발적으로 확대되고 있으며, 대표적으로 마이크로 열병합 시스템의 응용이 세계적으로 주목을 받고 있는 추세이다. 분산 발전용 마이크로 가스터빈 및 연료전지-가스터빈 하이브리드 (Hybrid) 발전시스템은 세계적인 발전분야의 틈새시장으로서 내수는 물론, 수출 신장을 통한 국가 기반 경제에 기여하리라 예상된다. 현재 항우연이 개발 중인 마이크로터빈은 55kW의 출력과 28%의 높은 열효율을 목표로 하므로 원심압축기 [그림13]는 81%의 높은 효율이 요구되는 사양이다. 압축기의 상세사양은 [표3]에 나타내었다.



그림 13. 마이크로터빈용 원심압축기의 임펠러

2.2.5 한국형다목적헬기(KMH)에서의 원심압축기

원심압축기는 항우연이 2004년부터 2012년까지 개발할 예정인 한국형다목적헬기(KMH)에도 핵심부품으로 사용될 예정이다. 주엔진에는 축류압축기와 원심압축기가 병행하여 사용되거나 또는 2단의 원심압축기가 사용될 수도 있다. [그림13]은 헬기엔진의 예로서 압축기는 2단의 축류압축기 후에 1단의 원심압축기를 사용하는 시스템이다. 항우연은 헬기 엔진의 개발 이전 단계로 지난 수년간 [그림 14]의 엔진을 설계, 해석하였다. 또한 KMH에 사용되는 APU에서도 1단의 원심압축기가 사용될 예정이며, 환경제어장치(ECS)에서도 저압의 원심

압축기가 사용될 예정이다. 그러므로 향후 항우연에서는 KMH와 관련하여 고성능 원심압축기의 설계, 성능평가 등의 연구를 진행할 예정이다.

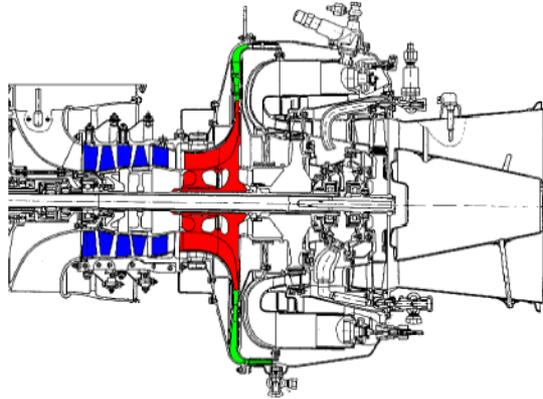


그림 14. 축류압축기와 원심압축기를 병행하는 헬기 엔진의 예. 항우연에서는 이 엔진에 대한 설계/연구를 통하여 KMH용 터보샤프트 엔진에 대한 예비연구를 수행해왔다. KMH의 주엔진에서는 2단의 원심압축기가 사용될 수도 있다.

권, 제1호, 2001, pp.30-37.

3. 강정식, 임병준, 차봉준, 양수석, 김승우, "UAV용 초소형 터보샤프트 엔진을 위한 압축기의 연구 개발", 유체기계저널, 제6권, 제4호, 2003, pp.94-97.
4. worldoil.com - Online Magazine Article : Columns - Sep. 2003.
5. Alan H. Epstein, "Millimeter-Scale, MEMS Gas Turbine Engines", ASME Paper No. GT2003-38866.
6. Sangkyun Kang, J.P., Johnston, Toshiyuki Arima, Minoru Matsunaga, Hideaki Tsuru & Fritz B. Prinz, "Micro-Scale Radial-flow Compressor Impeller Made of Silicon Nitride - Manufacturing and Performance", 2003, ASME Paper No. GT2003-38933.
7. 강정식, "원심압축기의 스톨 발단에 관한 실험적 연구", 서울대학교 공학박사학위논문, 2002, 2월.

3. 결론

본 원심압축기 기술동향에서는 최근에 세계적으로 원심압축기의 새로운 분야로 주목받고 있는 100W급 내외의 초소형 MEMS엔진용 원심압축기와 30~350kW급 마이크로터빈용 원심압축기와 수백 기압으로 압축이 가능한 초고압 원심압축기의 기술 동향을 소개하였다. 그리고 국내의 동향으로는 항우연이 지난 10여 년 동안 개발해 온 원심압축기를 소개하였다. 국내의 압축기 기술개발을 선도해 온 항우연은 지금까지 축적된 기술들을 보다 향상시키고 국내 관련 산업체로의 기술지원을 통한 국제 경쟁력 제고에 기여하고 있으며, KMH용 압축기 기술개발과 차세대 신기술 개발에 주력하고 있다.

참고문헌

1. Hartmut Krain, "Review of Centrifugal Compressor's Application and Development", ASME Paper No. GT2003-38971.
2. 차봉준, 임병준, 양수석, 이대성, "팁간극 영향으로 인한 원심압축기 성능특성 시험연구", 유체기계저널, 제4