

압축기 분야 연구동향

강정식*

1. 서 론

2009년 한 해 동안에 국내에서 발표된 압축기 관련 논문들을 유체기계공업학회(KFMA), 대한기계학회(KSME) 및 대한설비공학회(SAREF), 한국항공우주학회(KSAS)를 대상으로 살펴보았다. 대한기계학회지는 국문논문과 영문논문집인 Journal of Mechanical Science and Technology를 모두 포함하였다. 논문의 수는 2005년도에 43편, 2006년도에 27편, 2007년도에 24편, 2008년도에 25편에 이어 2009년에는 38편으로서 전년도에 비하여 50% 가량 증가하였다. Table 1에는 2009년도에 발표된 논문들의 수를 분야별로 분류하여 나타내었다. 본 연감에서는 압축기의 구동형식에 따라 크게 터보형 압축기와 용적형 압축기로 구분하여 기술하였다.

2. 터보형 압축기

2.1 원심 압축기

원심압축기에 대한 2009년도의 연구실적은 총 15.5편으로서 2008년도의 6편에 비하여 월등히 증가하였다. 논문수가 증가한 가장 큰 이유는 터보냉동기의 개발사업이 활성화 되면서 냉매용 원심압축기의 논문수가 8편으로 증가하였기 때문이다. 박준영 등^(1,2,3)은 개발사업이 진행되고 있는 터보냉동기용 냉매압축기의 개발 내용을 무급유 직결구동 소형터보냉매압축기⁽¹⁾, 빙축열용 중형 터보냉매압축기 및 냉동기⁽²⁾, 터보냉매압축기 고효율화 설계원천기술개발⁽³⁾로 나누어 상세하게 설명하였다. 이와 관련하여 조용훈⁽⁴⁾은 빙축열용 터보냉매압축기 및 냉동기 기술개발에 관하여 일반적인 기술현황을 발표하였으며, 박준영 등⁽⁵⁾은 터보냉매압축기를 개발하기 위한 핵심기술을 공력설계, 고속 모터, 회전체 시스템, 성능평가로 나누어서 연구를 수행하였다. 박주훈 등⁽⁶⁾은 R134a를 사용하는 터보냉동기용 원심압축기의 공력설계와 상용유동해석프로그램을 이용한 수치해석을 수행하였고, 최민욱 등⁽⁷⁾도 상용프로그램을 사

용하여 R134a용 냉매원심압축기 내부의 유동해석을 수행하였다. 김정훈 등⁽⁸⁾은 터보냉매압축기의 성능시험 평가를 위한 KS와 JIS등의 기준에 대하여 연구하였다.

원심압축기 설계부분에서는 김진혁 등⁽⁹⁾이 원심압축기의 임펠러 3차원 형상설계에서 많이 사용되는 베지어 다항식에 최적설계의 개념을 도입하였다. 삼차원 RANS 해석과 신경회로만 기법을 결합한 수치 최적화를 사용하고 목적함수로 압축기의 등엔트로피 효율을 사용한 결과 최적화된 설계는 압축기의 효율을 1% 향상시키는 결과를 얻었다. 이정우 등⁽¹⁰⁾은 비속도가 통상의 원심압축기 범위보다 매우 낮은 수소 가스용 원심압축기의 설계를 위하여 파이프형 원심임펠러를 설계하고 유동해석을 수행하였다. 압축기의 스톨 및 서지부분에서는 강경준 등⁽¹¹⁾이 깃없는 디퓨저 내부에서 선회실속이 발생하는 현상을 저속의 물을 이용한 상사시험리그래서 PIV를 사용하여 측정된 연구와 Ahn 등⁽¹²⁾이 Thrust 자기베어링을 이용하여 원심압축기의 틈간극을 조절함으로써 서지 현상을 제어하는 연구가 있었다. 그리고 이안성 등⁽¹³⁾은 8개의 원심임펠러가 연결된 압축기 로터에 대하여 실제 운전속도에서 밸런싱을 수행하여 압축기의 진동량을 낮추는 연구를 수행하였다. 산업체에서는 제품의 개발 중심으로 연구가 진행되었는데 윤주식 등⁽¹⁴⁾은 300마력의 저압 원심압축기를 개발한 과정을 공력설계, 베어링 및

Table 1 Domestic publications on compressor in 2009

	PUBLICATION							Total
	JOURNAL				CONFERENCE			
	KFMA	KSME	SAREF	기타	KFMA	KSME	SAREF	
Centrifugal	4	1			9	1.5		15.5
Axial	5	1			7	1.5		14.5
Rotary							2	2
Swash Plate (Diaphragm)					1			1
Scroll								
Reciprocate	1						2	3
General	1			1				2
Total	11	2	0	1	17	3	4	38

* 한국항공우주연구원 항공엔진팀
E-mail : jskang@kari.re.kr

고속 모터 설계, 구조해석 및 성능시험 등의 일련의 과정을 소개하였으며, 박누가 등⁽¹⁵⁾은 5MW급 발전용 가스터빈에 사용될 쉬라우드가 있는 원심임펠러의 구조 안전성을 평가하기 위하여 펠렛 등을 포함한 삼차원 구조해석과 진동해석을 수행한 결과를 제시하였다.

2.2 축류 압축기

2008년도에 7페이지인 축류압축기 분야 연구 논문이 2009년도에는 14.5편으로 100%이상 논문수가 증가할 정도로 연구가 활발하였다. 이것은 차세대 압축기 다분야 통합 기술 개발 과제 등 관련 연구들이 활발히 진행되었기 때문으로 이해된다. 홍상원 등^(16,17)은 다단 축류압축기를 최적설계하기 위한 방법으로 다분야 통합 설계(Multidisciplinary Design Optimization, 이하 MDO) 방법을 도입하여 압축기의 공력성능 향상과 구조 안전성 증가를 목적함수로 설정하여 최적설계하는 방법을 연구하였다. 기존의 반응면 기법뿐 아니라⁽¹⁶⁾ 인공신경망 이론을 적용한 MDO 방법⁽¹⁷⁾으로 압축기의 최적 설계 방법을 연구하였다. 고성호 등⁽¹⁸⁾은 천음속 축류압축기에 대하여 유체와 구조의 상호 작용을 고려한 Fluid Structure Interaction (FSI)방식의 수치해석 연구를 수행하였다. MDO를 적용한 방법 이외에도 축류압축기의 설계에 대한 연구가 수행되었다. 송재욱 등⁽¹⁹⁾은 선진국들의 최신 축류압축기의 연구 개발 기술을 소개하며 두산중공업에서 개발하고 있는 5MW급 가스터빈 엔진의 압축기를 소개하였으며, 강영석 등^(20,21)은 다단 축류압축기의 1차원 설계부터 3차원 유동해석까지 설계과정을 상세히 소개하였고⁽²⁰⁾, 소개한 방법을 적용하여 3단 천음속 축류압축기를 설계한 예를 제시하였다.⁽²¹⁾ 박준영 등⁽²²⁾은 축류압축기를 설계하기 위한 평균반경해석 프로그램을 개발하였으며 개발한 프로그램으로 수행한 설계점 및 탈설계점에서의 성능해석 결과를 시험결과와 비교하여 개발한 프로그램이 축류압축기 설계에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

압축기 내부의 유동해석에 대한 연구는 황유준 등⁽²³⁾과 고성호 등⁽²⁴⁾에 의하여 진행되었다. 황유준 등⁽²³⁾은 축류압축기에서 정상상태 유동해석과 비정상상태 유동해석을 수행하여 그 결과를 시험결과와 비교하였는데 정상상태의 유동 해석의 경우 고정좌표계와 회전좌표계 사이의 인터페이스에서 수치해석의 오차가 발생하는 결과를 확인하였다. 고성호 등⁽²⁴⁾은 천음속 축류압축기에서 IGV가 있는 경우와 없는 경우에 각각 유동해석을 수행하여 IGV가 있는 경우에 압축기 블레이드에서의 충격파를 줄일 수 있는 것을 관찰하였다. 성능시험 부분에서는 박태춘 등⁽²⁵⁾이 천음속 축류압축기의 공력리그 시험을 위하여 리그를 설계한 결과를 발표하였다.

축류압축기에서의 스톨 및 서지에 대한 연구도 활발히 진행되었다. 임형수 등⁽²⁶⁾은 4단 저속 축류압축기에서 실험을 통하여 모드(mode), 스톨셀의 특성에 대하여 연구하였으며, 모드보다 완전 발달된 스톨셀의 회전속도가 더 빠르며 스톨셀은 full span stall 임을 실험을 통하여 입증하였다. 그리고 임형수 등⁽²⁷⁾은 앞의 4단 압축기 시험리그에서 1단 동익의 상단 팁(Tip)에 인젝션(injection) 노즐을 설치하여 스톨을 제어하는 연구를 수행하였으며 Tip injection을 통하여 압축기의 운전영역이 확장되는 것을 관찰하였다. 그간 국내에서는 스톨의 특성에 대한 연구가 대부분이었으나 본 연구는 실험을 통해 스톨 및 서지의 제어를 시도하여 압축기의 운전영역을 확장시킨 점에서 의의가 큰 연구결과이다. 최광진 등⁽²⁸⁾은 수치해석을 통하여 압축기의 케이싱 그루브가 스톨 및 성능에 미치는 영향을 연구하여 그루브가 서지마진을 6.38% 향상시키는 결과를 얻었으며 이것은 블레이드 앞전에서 발생한 팁 누설 와류의 변화가 블레이드의 흡입면에서의 순환 유동을 안정화시키기 때문인 것을 발견하였다. 김상혁 등⁽²⁹⁾은 수치해석을 통하여 압축기 블레이드에서의 스톨현상을 연구하였으며 7개의 블레이드에 대하여 비정상 유동해석을 수행하여 스톨이 발생하는 현상을 모사하였다. 김혜림 등⁽³⁰⁾은 터보열펌프에 사용되는 터보압축기에 서지 특성에 관한 1차원 비선형 모델을 개발하여 특정 작동조건에서 서지의 형태를 예측하였으며 서지의 특성을 결정하는 파라미터를 발견하였다.

3. 용적형 압축기

용적형 압축기로는 로터리 압축기, 사판식 압축기, 스크롤 압축기, 왕복동 압축기들이 있는데, 지난 2009년도에 발표된 논문들은 로터리 압축기 2편, 왕복동 압축기 3편, 다이어램 압축기 1편, 압축기 비교연구 2편으로서 총 8편이 발표되었다. 이 중에서 2편만이 공기를 매질로 하는 압축기이고 나머지는 공기가 아닌 이산화탄소, 수소등의 가스를 압축하는 압축기에 대한 연구결과라는 특징이 있다. 올해에는 특히 CO2를 매질로 하는 압축기에 대한 연구논문이 세 편이 발표되었다.

3.1 로터리 압축기

로터리 압축기에 대하여 발표된 두 편의 논문은 모두 이산화탄소(CO₂)를 냉매로 사용하는 로터리 압축기에 대한 연구이다. 김경재 등⁽³¹⁾은 이산화탄소를 냉매로 사용하는 로터리 압축기에서 오일이 함유될 때에 오일의 양을 측정하였으며 운전 주파수가 증가할수록 오일 토출량도 증가하는 것을 발견하였으며 운전조건에 따른 오일 토출량의 상관관계식을 제안하였

다. 김우영 등⁽³²⁾은 이산화탄소를 냉매로 하는 트윈 로타리 압축기에 대한 연구에서 입구의 T 형상의 흡입구에서 일어나는 흡입가스 맥동 현상을 모사하기 위하여 Helmholtz 공명기 모델을 적용하여 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 압축기의 성능도 시험과 해석결과가 잘 일치하는 결과를 얻었다.

3.2 왕복동 압축기

김영철 등⁽³³⁾은 복소벡터를 이용하여 In-line 형, Opposed 형, V형 등 다양한 이단 왕복동 압축기의 구조에 대하여 관성력을 계산하는 방법을 제시하였으며, 각각의 압축기에 대하여 관성력 및 관성모멘트가 최고로 저감되는 최적의 평형률을 찾을 수 있었다. 김성준 등⁽³⁴⁾은 병렬로 운전되는 대형 왕복동 압축기의 가스 맥동을 줄이기 위한 연구의 일환으로서 음향전달 매트릭스를 적용하여 가스맥동을 해석하는 방법을 개발하였고, 이를 이용하여 각 밸브에서의 가스 맥동과 플렌지에서의 맥동 그리고 연결 배관이 맥동에 미치는 영향 등을 연구하였다. 라흐만 등⁽³⁵⁾은 왕복동 압축기의 연결 파이프에서 압력 맥동을 줄이기 위하여 유동해석과 실험을 수행하였으며 압축기 운전 조건에 따른 맥동의 변화와 압력 손실 등을 연구하였다.

3.3 다이어프램 압축기

윤현기 등⁽³⁶⁾은 두가지의 다공판 형태를 가진 초고압 다이어프램 압축기의 특성을 연구하기 위하여 유체-구조 연성해석(FSI)을 수행하였다. 유동장은 CFX12를 사용하여 해석하고 구조는 Ansys solver를 사용하였으며 FSI 해석을 위해서는 Ansys multi-field를 사용하였으며, 이를 통하여 다공판 형상에 따른 압력 변화 및 밸브의 거동 등을 연구하였다.

3.4 압축기 비교

Kim 등⁽³⁷⁾은 CO₂의 압축기 위하여 스크롤 압축기, 2단 트윈 로타리 압축기 및 두 개의 실린더를 가진 왕복동 압축기를 사용할 경우의 체적효율 및 단열효율 등의 성능 특성을 비교하였다. 왕복동 압축기가 기계적 효율 측면에서는 가장 유리하였고, 압력 맥동은 스크롤 압축기가 가장 좋은 특성을 보였다. 백기영 등⁽³⁸⁾은 LNG 분야에서 사용되는 가스압축기의 연구개발 동향에 대한 기고에서 LNG 수요 증가등 국내외의 긍정적인 요인들로 인하여 가스압축기의 개발이 필요하고 경쟁력 있는 제품 개발을 위한 방안을 제시하였다.

4. 결 론

2009년 한 해 국내에서 발표된 압축기 관련 논문을 유체기

계저널(KFMA), 대한기계학회 논문집(KSME) 및 대한설비공학회 논문집(SAREK)과 각각의 학술대회 논문집을 중심으로 간단히 정리해 보았다. 분야별 게재논문과 발표논문들을 Table 1에 학회별로 구분하여 표시하였다.

2009년에는 총 38편의 논문이 발표되었는데, 터보형 압축기 약 80%(30편)이고 용적형 압축기가 약 20%(8편)인 분포를 보였다.

올해의 압축기 분야에서의 연구의 특징을 서술한다면 원심 압축기 분야에서는 터보냉동기용 원심압축기에 대한 연구결과가 많았고, 축류압축기에서는 MDO등의 기법을 적용한 최적설계와 관련한 연구가 많았으며, 용적형 압축기에서는 이산화탄소용 압축기에 대한 연구나 압력 맥동 감소에 관한 연구등 친환경적인 목적의 연구가 많았다고 할 수 있겠다. 향후에도 지속적으로 우수한 연구결과들이 발표되기를 희망한다.

참고문헌

- (1) 박준영, 황준현, 윤의수, 2009, “냉동기용 고효율 터보냉매압축기 개발-제1회 : 무급유 직결구동 소형터보냉매압축기 개발,” 유체기계저널, 제12권, 제4호, pp. 84~88.
- (2) 박준영, 조용훈, 윤의수, 2009, “냉동기용 고효율 터보냉매압축기 개발-제2회 : 병축열용 중형 터보냉매압축기 및 냉동기 개발,” 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 88~92.
- (3) 박준영, 박무룡, 최상규, 윤의수, 2009, “냉동기용 고효율 터보냉매압축기 개발-제3회 : 터보냉매압축기 고효율화 설계 원천기술 개발,” 유체기계저널, 제12권, 제6호, pp. 65~69.
- (4) 조용훈, 2009, “병축열용 터보 냉매압축기 및 냉동기 기술 개발,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 411~418.
- (5) 박준영, 박철훈, 최상규, 윤의수, 2009, “터보 냉매압축기 핵심 설계기술개발,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 419~420.
- (6) 박주훈, 강경준, 신유환, 김광호, 이윤표, 정진택, 김종성, 2009, “병축열용 R134a 원심압축기 공력설계와 수치해석,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 421~426.
- (7) 최민욱, 주원구, 박준영, 최상규, 윤의수, 2009, “2단 터보 냉매압축기의 제1단 유동에 대한 수치해석,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 429~430.
- (8) 김정훈, 강대경, 함재호, 2009, “터보 냉매압축기의 성능시험 평가 기준안 개발,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 427~428.
- (9) 김진혁, 최재호, 김광용, 2009, “자오면 형상을 고려한 원심압축기 임펠러 최적설계,” 유체기계저널, 제12권, 제3호, pp. 7~12.
- (10) 이정우, 강신형, 2009, “수소 재순환 시스템에서의 파이프형 원심 임펠러의 설계 및 성능 특성,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 619~624.

- (11) 강경준, 신유환, 김광호, 이윤표, 2009, “2차원 원심압축기의 깃없는 디퓨저에서의 선회 실속,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 613~618.
- (12) Ahn, H. J. Park, M. S., Sanadgol, D., Park, I. H., Han, D. C. and Maslen, E. H., 2009, “A pressure output feedback control of turbo compressor surge with a thrust magnetic bearing actuator,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 1406~1414.
- (13) 이안성, 김병욱, 2009, “가솔린 탈황공정 압축기의 운전속도 밸런싱을 통한 MCS의 확장,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 607~608.
- (14) 윤주석, 서자원, 김종선, 김경수, 2009, “300마력 저압 터보 압축기 개발,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 609~612.
- (15) 박누가, 윤태준, 김동훈, 하진용, 2009, “5MW급 소형 가스 터빈 Shrouded Impeller 구조 안전성 평가,” 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 114.
- (16) 홍상원, 이세일, 강형민, 이동호, 강영석, 양수석, 2009, “다 단 축류압축기의 다분야 통합 최적설계,” 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 72~78.
- (17) 홍상원, 이세일, 강형민, 이동호, 강영석, 양수석, 2009, “인공신경망 이론을 적용한 3단 축류압축기의 다분야 통합 최적설계,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 319~320.
- (18) 고성호, 한승열, 양수석, 강영석, 2009, “천음속 축류압축기에 대한 FSI 수치해석,” 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 84~87.
- (19) 송재욱, 이성룡, 이상언, 2009, “축류압축기 기술개발 동향,” 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 61~65.
- (20) 강영석, 박태춘, 양수석, 2009, “다단 고부하 축류압축기 공력 설계 및 성능 평가,” 유체기계저널, 제12권 제5호, pp. 66~71.
- (21) 강영석, 박태춘, 양수석, 2009, “다단 고부하 축류압축기 공력 설계 및 구조 안전성 평가,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 315~316.
- (22) 박준영, 박무룡, 최범석, 송재욱, 2009, “평균반경해석법을 이용한 축류압축기 성능해석 프로그램,” 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제2호, pp. 141~148.
- (23) 황유준, 강신형, 2009, “정상 및 비정상 수치계산을 통한 축류압축기의 성능 및 유동해석 비교,” 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회 논문집, pp. 132~137.
- (24) 고성호, 광영균, 한승열, 김연태, 2009, “IGV의 유무에 따른 압축기의 성능변화,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 631~636.
- (25) 박태춘, 강영석, 양수석, 2009, “고부하 천음속 압축기의 성능시험 리그 설계,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 317~318.
- (26) 임형수, 임영천, 송성진, 강신형, 양수석, 2009, “다단 축류 압축기의 스톨 특성에 대한 실험적 연구,” 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 79~83.
- (27) 임형수, 임영천, 송성진, 강신형, 양수석, 2009, “축류압축기 팁 인젝션시 스톨 특성에 대한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 321~326.
- (28) 최광진, 김진혁, 김광용, 2009, “케이싱 그루브가 존재하는 축류압축기의 성능특성 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 625~630.
- (29) 김상혁, 백제현, 2009, “수치해석을 통한 축류압축기에서의 선회실속에 관한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 75~76.
- (30) 김혜림, 송성진, 김길영, 2009, “터보열펌프의 서지특성에 관한 모델링,” 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회 논문집, pp. 104~107.
- (31) 김경재, 이익수, 장병하, 2009, “CO2 압축기의 운전조건과 오일토출의 상관분석에 관한 실험적 연구,” 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 299~304.
- (32) 김우영, 안종민, 김현진, 조성욱, 2009, “T-형상 흡입 판로를 갖는 CO2 트윈 로타리 압축기에서 흡입 압력 맥동,” 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 305~310.
- (33) 김영철, 안국영, 2009, “이단 왕복동 공기압축기 구조에 따른 관성력 비교,” 유체기계저널, 제12권, 제4호, pp. 23~29.
- (34) 김성준, 김현철, 김현진, 2009, “병렬 운전되는 대형 왕복동 압축기의 가스맥동 분석,” 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 910~915.
- (35) 라호만, 이경환, 이광성, 정한식, 정효민, 2009, “왕복동식 압축시스템에 연결된 파이프 내부의 유동특성에 관한 CFD 와 실험,” 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 1513~1520.
- (36) 윤현기, 최범석, 박무룡, 박준영, 2009, “다공판 형상에 따른 다이어프램 압축기의 FSI 해석,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 177~178.
- (37) Kim, H. J., Kim, W. Y. and Ahn, J. M., 2009, “Performance Comparison of Various Types of CO2 Compressors for Heat Pump Water Heater Application,” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 17, No. 4, pp.115~122.
- (38) 백기영, 서동혁, 안배석, 2009, “가스 압축기 소재 및 개발 동향,” 유체기계저널, 제12권, 제4호, pp. 76~80.