

압축기 분야 연구동향

차봉준*

1. 서 론

2007년 한 해 동안에 국내에서 발표된 압축기 관련 논문들을 유체기계공업학회(KFMA), 대한기계학회(KSME) 및 대한설비공학회(SAREF)를 대상으로 살펴보았다. 2005년도에 43편, 2006년도의 27편에 이어 2007년도인 지난해에서는 24편으로서 전년 대비 약간 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 국내 압축기 분야의 산업체 및 관련 기관들에 의한 연구 활동이 해가 갈수록 점점 위축되고 있다는 것을 알 수 있다. 본 연감에서는 압축기의 구동형식에 따라 터보형 압축기와 용적형 압축기로 구분하여 기술하였다.

2. 터보형 압축기

2.1 원심 압축기

원심압축기에 대한 2006년도의 연구실적은 총 5편으로서 내부유동해석이 2편, 나머지가 최적설계에 관한 논문이다. 원심압축기 내부 유동에 대한 연구로서 박한영 등⁽¹⁾은 기본설계 된 압축기 형상을 대상으로 압축기 주요 구성품의 3차원 형상과 자오면 형상에 대한 3차원 내부유동해석을 수행하였다. 이 과정에서 수치해석에 사용된 여러 기법을 서로 비교함으로써 향후 3차원 임펠러 블레이드 형상, 디퓨저 베인 및 리턴 채널 설계 개선뿐만 아니라 탈설계점 유동해석 등의 연구를 위한 참고자료를 도출하였다. 결론의 일부로서 수치해석에 사용된 실제기체 물성치 계산방법은 NIST의 Refprop과 RK 방정식을 이용한 두 가지 방법 모두가 유용하다는 것과 원심압축기의 수치해석에는 frozen rotor 기법을 사용하는 것이 비교적 타당한 결과를 얻을 수 있다고 언급하고 있다. 또 다른 유동해

석 연구로서 성선모 등⁽²⁾은 연료전지 자동차의 공기 공급시스템으로 사용되는 콤팩트한 원심압축기에 대해 입구 유로에서부터 벌류트까지 전체 구성요소들에 대한 3차원 유동해석을 수행함으로써 해석 대상 압축기에 대한 유동현상을 평가하였다. 해석결과를 입구유로, 임펠러 및 디퓨저, 벌류트로 구분하여 각각의 구성품들 내부에서 발생된 유동현상을 간략히 기술하고 있기 때문에, 소형 원심압축기 내부유동에 대한 전반적인 이해를 하는데 적절한 논문으로 사료된다.

최적설계에 관한 논문들은 3편으로서 압축기의 임펠러에 국한된 것이 아니라 주로 임펠러 출구에서의 디퓨저 및 볼류트 설계에 관한 것이 특징이라 할 수 있다. 박한영 등⁽³⁾은 R134a 냉매를 사용하는 냉동기용 다단 원심형 압축기를 대상으로 임펠러 출구의 저솔리디티 디퓨저 베인의 최적 설치각을 찾기 위한 수치적 시뮬레이션과 이를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 최적 설치각을 정의하기 위한 파라미터로서 전압력회복계수를 사용하였으며 본 연구에서는 압축기 설계점 상태에만 국한하여 분석하였는데, 이 해석 결과를 압축기 설계에 사용하기 위해서는 설계점 이외의 탈설계점에서의 대한 분석과정이 추가적으로 필요함을 언급하고 있다. 최적설계에 관한 대부분의 연구들이 주로 임펠러, 디퓨저, 볼류트 만을 고려해서 효율이나 유동상황을 개선시키는 방안들에 대한 것들에 비해 하경구 등⁽⁴⁾은 압축기 전체 시스템에 대해서 소요전력, 효율, 소음 및 크기를 모두 고려한 최적설계 방법에 대한 내용을 기술하고 있다. 그러나 아직 초기 단계이기 때문에 일차적으로 수립된 최적설계 방법을 소개하고 이 결과로 나온 모델을 시험을 통해 검증한 결과를 기술하였다. 유량 0.1kg/s, 압력비 1.5인 모델을 대상으로 최적설계를 수행하였으나 아직 초기 단계로서 이에 대한 유효성 확인이 더 필요할 것으로 예상하고 있다. 민재홍 등⁽⁵⁾은 소형 원심압축기 채널디퓨저의 최적 설계에 관한 내용을 발표하였는데, 여기서는 몇 개의 설계 결과에 대한 전산해석을 통해서 주어진 임펠

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹
E-mail : cha@kari.re.kr

리에 최적한 디퓨저 형상을 결정하는 내용을 기술하고 있다. 해석도구로는 상용 ANSYS CFX 11을 사용하여 채널 디퓨저 내부의 압력분포와 압력회복률을 분석하였다. 일반적인 논문으로서 저자는 이 결과들이 추후 초소형 2차원 원심압축기용 디퓨저의 최적 설계에 활용될 것으로 기대하고 있다.

2.2 축류 압축기

지난 해 축류 압축기에 대한 연구는 크게 특정 성능 파라메타가 압축기 성능에 미치는 영향에 관한 연구와 성능시험 및 성능 최적화 연구들로 나눌 수 있다. 압구스사마드 등⁽⁶⁾은 블레이드 표면조도가 압축기 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해서 sweep 이나 lean이 없는 기준 블레이드에 대한 수치해석 결과를 발표하였다. 여기서는 조도가 증가함에 따라 기준과 최적화된 블레이드에서 모두 효율과 전압력비 및 전온도비는 감소하고 마하수는 증가하는데 이는 조도의 부파에 따라 반경방향 유동이 증가하고 이에 따라 박리선이 상류쪽으로 이동하기 때문이라고 밝히고 있다. 해석결과, 조도로 인한 성능의 감소는 중첩선이 변형되기 전의 경우보다 변형 후 최적화된 블레이드에서 보다 크게 나타난다는 것을 기술하고 있다. 또 다른 블레이드 표면 조도에 관한 연구로서 임주현 등⁽⁷⁾은 선형 캐스케이드를 이용한 시험을 통하여 블레이드 중심선에서 평균 거칠기를 0.20 μm 에서 부터 5.31 μm 까지 변화시키면서 표면조도의 영향을 살펴보았다. 시험결과, 난류 박리는 거칠기의 정도가 증가함에 따라 블레이드 흡입면에서 발생되고 상류방향으로 이동함을 밝히고 있으며 또한 면적 평균 손실계수도 증가함과 동시에 deviation 각도와 피치방향 deviation 각도 완곡하게 압력면 방향으로 이동함을 발표하였다.

압축기 입구 유동의 경계층에 관한 논문으로서 백제현 등⁽⁸⁾은 경계층에 대한 고려 없이 균일한 속도를 입구 조건으로 수행된 기존의 많은 수치해석적 연구들에 반해 80년대 중반 이후부터 활발히 진행된 입구 경계층에 대한 여러 연구들을 단일 동익 압축기를 대상으로 요약하였다. 여기서는 입구 경계층이 정상유동에 미치는 영향과 압축기 손실에 미치는 영향, 선회실속에 미치는 영향들을 정리하였다. 김진욱 등⁽⁹⁾은 누수의 접선방향 속도변화가 축류압축기 정익 단의 공력 성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 캐스케이드 실험을 수행하였다. 연구방법으로써 일반적인 선형 캐스케

이스 풍동에 접선방향 누수의 속도를 변화시키기 위한 유로를 추가하여 실제 환경을 모사하였다. 이 논문에서는 누수접선방향의 속도의 증가가 와류유동 및 정익 허브에서 발생하는 손실을 감소시킨다는 것을 보여주고 있다. 비록 단단 정익에 대한 모사실험이지만 이 결과는 향후 동익 및 정익으로 구성된 다단 축류압축기에서 누수접선방향속도가 압축기 전체시스템에 미치는 영향을 연구하는데 좋은 기초 자료로 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

흔치 않은 주제로서 강영석 등⁽¹⁰⁾은 Alford 힘이라 불리우는 비균일 익단 간극에 의한 회전축 불안정 가진력에 대한 연구를 수행하였는데, 이 논문에서는 연속방정식과 운동량방정식을 이용한 1차원 모델링을 통해 내부 유동장이 변화하는 매커니즘을 예측하고 이 결과를 수치해석과 비교하여 예측방법에 대한 검증을 시도하였다. 해석결과, 모델링을 통해 예측한 Alford 힘의 분포가 수치해석 결과와 잘 일치하는 경향을 보였다고 언급하고 있으며 Alford 힘의 방향은 손실에 따른 압력장 및 속도분포에 기인하며 힘의 크기는 재분포된 유동장의 섭동량 크기에 영향을 받음을 발표하였다. 성능 파라메타에 관한 또 다른 연구로서 박태춘 등⁽¹¹⁾은 축류압축기의 공력성능과 효율에 영향을 미치는 날개 끝단의 누설과 정익열 상류에서의 정체지역 및 wake 등의 효과를 시험적으로 고찰한 내용을 발표하였다. 시험에는 저속 축류압축기를 사용하였으며 측정은 3공 피토판, 열선 유속계를 사용하여 선회 실속 현상을 측정하였다. 이 논문은 스톨 현상이 압축기 시스템에 미치는 영향을 규명하기 위한 기초연구로서 스톨이 발생하였을 때 셀의 거동과 유동을 파악하는데 역점을 두고 있다.

원심압축기의 경우와 달리 국내에 많지 않은 축류 압축기 시험설비에 대한 논문으로서 강영석 등⁽¹²⁾은 서울대가 보유한 4단 저속 시험용 축류압축기 시험설비에 대해서 실험장치 소개와 더불어 시험방법 및 계측기법 등을 기술하고 있다. 이 논문에서는 이 시험설비를 이용한 성능시험 결과를 예시함으로써 독자들의 이해를 돕고 있다. 아울러 이 시험설비가 향후 축류압축기의 설계, 성능개선 및 시스템 안정화 등에 중요한 데이터 베이스를 구축하는데 매우 긴요하게 사용될 것으로 기대하고 있다.

최적화에 관한 유일한 논문으로서 Choon-Man Jang 등⁽¹³⁾은 천음속 축류압축기 로터 블레이드 형상 최적화에 대한 연구를 수행하였는데, 이들은 blade

sweep, lean, skew 3가지를 변수로 하여 각각의 변수들이 압축기 단일 효율이 미치는 영향을 수치적으로 평가했다. 이 논문에서는 3가지 변수 중 blade sweep에 의한 블레이드 형상이 압축기 성능에 가장 민감한 것으로 보고하고 있다. 특히, backward 방향으로의 blade sweep와 블레이드 압력면 방향으로 skewed 된 블레이드 형상이 축류압축기에서 단일효율을 가장 효과적으로 증가시킨다는 사실을 밝히고 있다. 비정상 유동에 관한 논문은 단 1편만이 발표되었는데, 최민석 등⁽¹⁴⁾은 저속 축류 압축기에서 허브-코너 영역에서 발생하는 선회실속에 대한 3차원 전산해석 결과를 발표하였다. 이 논문에서는 허브-코너 선회실속이 축대칭 유동 외란을 발생시키고 이 외란은 블레이드 팁 누수 유동에 전달되어 로터의 회전수와 동일하게 회전하는 정지 실속 셀로 성장하게 되고 이 셀이 어느 일정 크기로 성장하게 되면 short-length-scale 선회 실속으로 된다는 점을 밝히고 있다.

3. 용적형 압축기

용적형 압축기로는 로터리 압축기, 사판식 압축기, 스크롤 압축기, 왕복동 압축기들이 있는데, 지난 2007년도에 발표된 논문들은 로터리 압축기 4편, 스크롤 압축기 3편, 왕복동 압축기 3편으로서 총 10편이 발표되었다.

3.1 로터리 압축기

로터리 압축기에 관한 논문으로서 김형우 등⁽¹⁵⁾은 CO₂ 급탕기 겸용 열펌프 시스템에 사용되는 고압식 2단 트윈 로터리 냉매 압축기에 대한 가스 인젝션의 영향에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 발표하였다. 이 논문에서는 가스 인젝션량이 증가 할수록 압축기 일, 냉동능력이 증가하여 결과적으로 COP가 향상된다는 사실을 몇 가지 케이스에서 계산한 결과로 설명하고 있다.

성능파라미터 분야의 연구로서 김우영 등⁽¹⁶⁾은 CO₂를 이용한 중간압 방식의 2단 트윈 로터리 압축기에 대한 성능해석 방법을 제시하고 해석결과와 실험결과를 비교함으로써 개발된 해석방법을 검증하였다. 해석에는 제어체적 내부의 압축 기체에 대한 해석모델과 누수체적 및 압축기의 운동부에 대한 동적모델을 사용하였다. 계산된 냉각용량, 압축기 입력값 및 COP를

파라미터로 하여 실험결과와 비교하였다. 압축기 토출 포트 크기에 대한 비교 연구결과, 압축기 성능은 토출 포트의 직경을 20% 증가하게 될 경우 약 3.5% 향상됨을 밝히고 있다. 또한 이들은 동일 압축기 형상에 대해서 오일의 용해도를 고려한 압축기 성능해석 연구 결과⁽¹⁷⁾를 발표하였다. 김호영 등⁽¹⁸⁾은 연료전지용 무급유 로터리 공기압축기의 최적설계에 관한 논문을 발표하였는데, 여기서는 압축기의 성능을 향상시키기 위한 방법의 하나로써 베인과 실린더 사이에 롤러를 적용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 성능해석 결과, 롤러를 적용할 경우, 베인 팁과 롤러 내면 사이의 마찰손실이 현저히 감소되기 때문에 압축기 효율이 약 8% 향상 된다는 것을 기술하였다.

3.2 스크롤 압축기

스크롤 압축기의 경우 3편 모두 최적설계에 관한 논문들이 발표되었다. 권태훈 등⁽¹⁹⁾은 압력비 2인 무급유식 스크롤 압축기에 대한 최적설계 연구결과를 발표하였는데, 이 논문에서는 축 방향 가스압력을 받는 스크롤 판의 선회운동 지지구조물에 주안점을 두고 선회반경을 2.0~4.0 mm 변화시키면서 스크롤 판의 마찰손실 변화를 살펴보았다. 저자는 냉각이 중요한 요소가 되는 무급유 압축기에서는 기계적 마찰손실이 적은 볼 베어링으로 된 편심 편을 선회운동 지지구조물로 선정하는 것이 좋은 선택이라고 언급하고 있다. 최적설계를 위한 기초 연구로서 김우영 등⁽²⁰⁾은 스크롤 압축기와 스크롤 팽창기에 대한 기본 구조와 중요치수 등을 구하고 이러한 개념 설계를 기초로 예상되는 성능을 해석하여 태양열 발전용 엔진으로서의 스크롤식 스틸링 엔진의 구현을 위한 개념설계를 수행하였다. 이 연구에서는 팽창기 및 압축기 직경이 각각 251 mm, 218 mm인 설계모델을 대상으로 성능해석을 한 결과, 순수 출력이 약 11.2kW이고 효율이 각각 93.73%, 92.87%임을 기술하고 있다. 최적설계를 위한 파라미터 연구로서 남보영 등⁽²¹⁾은 축 방향 누설을 최소화하기 위한 기구 중의 하나인 선회 스크롤 배압 방식에 있어서 배압실 압력을 최적으로 유지하기 위한 배압 제어밸브의 설계 및 이의 적용 사례에 대한 연구 결과를 발표하였다.

3.3 왕복동 압축기

Table 1 Domestic publications on compressor in 2005

	PUBLICATION						Total
	JOURNAL			CONFERENCE			
	KFMA	KSME	SAREK	KFMA	KSME	SAREK	
Centrifugal	1	-	-	1	3	-	5
Axial	4	1	-	2	2	-	9
Rotary	1	-	1	-	-	2	4
Swash Plate	-	-	-	-	-	-	-
Scroll	-	-	-	-	-	3	3
Reciprocate	-	-	-	1	-	2	3
General/Micro	-	-	-	-	-	-	-
Total	6	1	1	4	5	7	24

왕복동 압축기 분야에서는 성능시험과 맥동의 영향에 관한 연구결과들이 발표되었다. 김호영 등⁽²²⁾은 차량용 공기현가장치에 사용되는 무급유식 왕복동압축기의 성능을 측정하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하여 시뮬레이션을 교정한 후 이 시뮬레이션을 활용하여 압축기 구조나 밸브 등의 특성이 압축기 성능에 미치는 영향을 해석적으로 검토한 결과를 발표하였다. 여기서는 간단한 실험과 해석방법에 대한 언급과 더불어 두 결과들에 대한 비교를 시도하였다. 저자는 이 과정에서 개발된 시뮬레이션이 향후 설계변수 연구와 병행하여 흡입 밸브 및 토출 밸브에 대한 최적 설계기법에 활용될 것으로 기대하고 있다.

맥동의 영향에 대한 연구로서 이경환 등⁽²³⁾은 왕복동 압축기에 수반되는 맥동압력이 압축기 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하여 보다 향상된 성능의 압축기 설계를 위한 기초 연구를 수행하였다. 유사한 연구로서 이용호 등⁽²⁴⁾은 밀폐형 왕복동 압축기에서 네 가지 흡입라인의 구조변경에 따른 가스맥동 변화를 밸브 거동과 이와 연관된 실린더 내에서의 가스 압축 성능과의 전체적인 연계를 통한 해석을 수행하였다.

4. 결 론

2007년 한 해 국내에서 발표된 압축기 관련 논문을 유체기계저널(KFMA), 대한기계학회 논문집(KSME) 및 대한설비공학회 논문집(SAREK)과 각각의 학술대회 논문집을 중심으로 간단히 정리해 보았다. 분야별 게재 논문과 발표논문들을 Table 1에 학회별로 구분하여 표시하였다.

2007년에는 전년도에 발표된 27편의 논문 대비 약 89%에 불과한 24편의 논문이 발표되었는데, 터보형

압축기 58.4%, 로터리 압축기 16.6%, 스크롤 및 왕복동 압축기가 각각 12.5% 씩 발표된 분포를 보였다.

압축기 형식에 따라 발표 학술지가 구분되는 양상을 보여주고 있는데, 터보형 압축기는 100% 모두가 대한설비공학회를 제외한 두 학회를 통해 발표되었으며, 이와 대조적으로 용적형 압축기는 2편을 제외하고는 나머지 8편 모두(80%)가 대한설비공학회에서 발표되었다. 이러한 경향은 최근 몇 년 동안 동일하게 나타나고 있는데, 이것은 유체기계학회 및 대한기계학회에서는 발전용 가스터빈 또는 추진용 가스터빈 등과 같은 터보기계용 압축기들이 주 관심 대상인 반면, 대한설비공학회의 경우에는 냉방 시스템, 에너지 공급원 등과 같은 설비에 적용 되는 압축기에 관심이 집중되고 있음을 알 수 있다.

지난해에서는 발표된 논문들 대부분이 최적 설계 기술과 이를 위한 성능파라미터 연구들이 주류를 이루었는데, 2008년도에는 세계적인 추세에 따라 기존 설계기술을 한 단계 더 끌어올리기 위한 비정상 또는 탈설계 분야에 대한 첨단연구들이 보다 더 활발하게 진행되길 기대한다.

참고문헌

- (1) 박한영, 신유한, 이윤표, 김광호, 정진택, 오용훈, 김중성, "R134a 터보 냉동기용 2단 원심 압축기의 수치해석 기법과 내부유동 특성," 유체기계저널, 제10권 제4호, pp. 29~38.
- (2) 성선모, 강신형, 조경석, 김우준, "원심압축기 별류트 내부 유동에 관한 수치해석," 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 1839~1844.

- (3) 박한영, 신유환, 이윤표, 김광호, 정진택, 조용훈, 김종성, “디퓨저 베인 설치각 변화에 따른 R134a 원심압축기 성능 분석,” 대한기계학회 2007년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 235.
- (4) 하경구, 성선모, 강신형, “효율과 소음을 고려한 원심압축기의 임펠러, 디퓨저, 볼류트의 최적설계 방법,” 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 1785~1790.
- (5) 민재홍, 정진택, 이원석, 김대현, “초소형 2차원 원심압축기용 베인 디퓨저의 성능특성에 대한 수치해석적 연구,” 2007 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 227~233.
- (6) 압구사사마드, 김광용, “축류압축기 블레이드의 표면조도가 성능에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제10권 제3호, pp. 9~16.
- (7) 임주현, 손주혁, 김진옥, 송성진, “선형 압축기 캐스케이드에서 블레이드 표면거칠기가 유동에 미치는 영향,” 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, 1797~1802.
- (8) 백제현, 최민식, “입구 경계층이 압축기 내부 유동에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제10권 제5호, pp. 83~88.
- (9) 김진옥, 김동범, 송성진, “슈라우드 축류압축기에서 누수접선방향속도의 효과,” 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, 1791~1796.
- (10) 강영석, 강신형, “비균일 익단 간극을 가지는 축류 압축기의 유동장의 예측,” 2007 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 207~213.
- (11) 박대춘, 한정엽, 강신형, “4단 축류압축기의 내부 유동 특성에 관한 실험적 연구,” 2007 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 220~226.
- (12) 강영석, 박대춘, 임형수, 강신형, “축류압축기 시험설비 및 시험방법 소개,” 유체기계저널, 제10권 제5호, pp. 77~82.
- (13) Choon-Man Jang, Abdus Samad, Kwang-Young Kim, “Optimization of Rotor Balde Stacking Line Using Three Different Surrogate Models,” 유체기계저널, 제10권 제2호, pp. 22~31.
- (14) 최민석, 백제현, 오성환, 기덕중, “축류 압축기에서의 선회실속에 관한 3차원 수치해석,” 대한기계학회논문집 B권 제31권 제1호, 2007, pp. 68~75.
- (15) 김형우, 심재휘, 이용호, 김현진, “초임계 CO₂ 사이클에서 가스 인젝션이 압축기에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제10권 제2호, pp. 16~21.
- (16) 김우영, 안종민, 김현진, 조성욱, “CO₂ 2단 트윈 로타리 압축기 성능해석,” 대한설비공학논문집, Vol.19, no.1, pp. 19~28.
- (17) 김우영, 안종민, 김현진, 조성욱, “오일 용해도를 고려한 CO₂ 트윈 로타리 압축기 성능해석,” 대한설비공학회 2007 동계학술발표회 논문집, pp. 842~849.
- (18) 김호영, 이용호, 김현진, 주병수, “로터리 베인 공기 압축기 마찰손실 감소에 관한 연구,” 대한설비공학회 2007 하계학술발표회 논문집, pp. 9~14.
- (19) 권태훈, 심재휘, 김현진, “무급식 스크롤 공기압축기 최적설계,” 대한설비공학회 2007 하계학술발표회 논문집, pp. 3~8.
- (20) 김우영, 김현진, 김영민, 이상태, “스크롤 방식 스텔링 엔진용스크롤 압축기-팽창기 개념 설계,” 대한설비공학회 2007 동계학술발표회 논문집, pp. 397~403.
- (21) 남보영, 구인회, 한영창, 이건호, “차량용 전동기 스크롤 압축기의 배압제어밸브 설계,” 대한설비공학회 2007 동계학술발표회 논문집, pp. 410~415.
- (22) 김호영, 이용호, 김현진, “공기현가장치용 무급유 왕복동 공기 압축기의 성능실험 및 시뮬레이션,” 2007 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 214~219.
- (23) 이경환, Mohammad Shiddiqur Rahman, 정한식, 정효민, “왕복동 압축기의 스너머내 맥동압분포,” 대한설비공학회 2007 동계학술발표회 논문집, pp. 606~615.
- (24) 이용호, 김현진, “밀폐형 왕복동 압축기에서 흡입라인 가스맥동이 압축기 성능에 미치는 영향,” 대한설비공학회 2007 동계학술발표회 논문집, pp. 404~409.