

압축기 분야 연구동향

강정식*

1. 서 론

2008년 한 해 동안에 국내에서 발표된 압축기 관련 논문들을 유체기계공업학회(KFMA), 대한기계학회(KSME) 및 대한설비공학회(SAREF), 한국항공우주학회(KSAS)를 대상으로 살펴보았다. 대한기계학회는 국문논문과 영문논문집인 Journal of Mechanical Science and Technology를 모두 포함하였다. 논문의 수는 2005년도에 43편, 2006년도에 27편, 2007년도에 24편에 이어 2008년에는 25편으로서 전년도와 비슷한 수준이다. Table 1에는 2008년도에 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 2008년도의 연구실적은 총 6편으로서 시험과 설계를 수행한 논문이 2편, 설계 또는 해석만 수행한 논문이 4편이다. 국내에서 헬리콥터의 APU용 원심압축기를 개발하면서 삼성테크윈과 서울대를 중심으로 APU용 천음속 압축기에 대한 설계 및 해석 연구를 수행하였다. 최재호 등⁽¹⁾은 천음속 원심압축기를 설계하고 3차원 유동해석을 통해 유동장을 분석한 후 리그 시험을 통하여 설계 결과를 만족하는 결과를 얻었다. 성선모 등⁽²⁾은 최재호⁽¹⁾와 동일한 압축기에 대하여 익단 누설유동을 고려한 상세한 유동해석을 수행하여 설계점, 초킹 조건 및 서지 근처 조건에서 누설유동이 임펠러 내부에서 어떤 유동 특성을 보이는지를 연구하였다. 특히 누설유동과 주유동과의 상호작용

과 이로 인한 엔트로피의 변화를 기술한 점이 주요한 결과이다.

압축기 설계 기법에 대한 연구로는 김진혁 등⁽³⁾과 최재호⁽⁴⁾가 연구하였다. 김진혁 등⁽³⁾은 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. 최재호⁽⁴⁾는 압축기 설계에서 서지마진이라는 파라미터를 도입하였다. 기존의 통상적인 설계 방법은 압축기 설계 후 서지마진 해석을 통해 서지마진을 계산한 후 필요시 압축기 수정설계를 수행하는 과정이지만 이 연구에서는 압축기 설계시 수치최적화 기법을 사용하였는데 이 때 목적함수로서 설계점에서 유량대 압력비의 기울기를 사용하면 자동적으로 서지마진이 증가됨을 알 수 있었다. 이 연구에서 제시한 유량대 압력비의 기울기 개념으로 정의한 목적함수를 최적화 문제의 목적함수로 사용한다면 서지점에 대한 직접적인 예측이 없더라도 서지점의 증가를 고려할 수 있으므로 원심압축기 최적설계를 효율적으로 수행할 수 있는 방법으로 평가된다.

김홍원 등⁽⁵⁾은 선박용 터보차저에 사용되는 원심압축기에 대하여 연구하였다. 통상적으로 선박용 터보차저는 효율과 작동영역을 고려하여 캐스캐이드 디퓨저가 사용되는데 캐스캐이드 디퓨저는 전세계적으로도 설계개념이 정립되지 않아서 좋은 설계 결과를 위해서는 몇 개의 디퓨저를 설계/제작하여 시험평가하는 과정이 많이 사용된다. 이 연구에서도 3가지(2가지의 캐스캐이드 디퓨저와 1가지의 채널디퓨저)의 디퓨저에 대하여 비교 연구를 수행하여 압력면과 흡입면의 압력 차이가 작아서 손실이 낮고 초킹 유량도 큰 캐스캐이드 디퓨저가 최적의 디퓨저임을 알 수 있었다.

박한영 등⁽⁶⁾은 수치해석을 통하여 2차원 임펠러에 대한 연구를 수행하였다. 2차원 임펠러는 효율이 낮지

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

만 3차원 형상 제작이 어려운 초소형 MEMS 엔진에서의 적용 가능성으로 인해 많이 연구되어져 왔다. 2차원 임펠러의 가장 큰 손실 원인중의 하나는 임펠러 출구에서의 갑작스러운 면적 확대에 의한 Sudden expansion loss 인데 이 연구에서는 이와 관련하여 임펠러의 입출구 유로면적비가 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 임펠러 출구면적이 좁은 임펠러는 임펠러 출구에서 갑작스런 확산에 의하여 손실이 커져서 성능이 낮으며, 출구 면적이 커지면 출구에서의 확산에 의한 손실은 작지만 임펠러 내부에서의 손실이 증가하는 것을 확인하였다. 그래서 이 연구에서는 임펠러의 성능은 입출구 면적비가 약 2.26일 때가 최적인 것을 알 수 있었다.

2.2 축류 압축기

2007년도에 이어 2008년도에서 터보 압축기 분야에서 원심압축기 보다 축류압축기에 대한 연구결과가 많았다. 이것은 서울대학교에 연구용 압축기인 4단 저속 축류압축기(low speed research compressor, LSRC)가 본격적으로 연구결과를 나타내면서 시험논문 3편, 해석 논문 2편이 발표된 영향이 크다.

박태춘 등⁽⁷⁾은 저속 축류압축기에서 상세유동을 측정하기 위한 기초연구로서 X-열선을 이용하여 유동을 측정하는 검정하는 방법에 대하여 연구하였다. 박태춘 등⁽⁸⁾은 상기의 연구결과를 서울대학교의 LSRC에 적용하여 압축기의 동익(rotor) 및 정익(stator)의 후류에서 유동장을 측정하였다. 날개 후연에서 발생하는 후류와 날개 끝벽에서의 경계층의 생성과 간극에서의 누설에 의한 손실을 연구하였다. 그리고 8개의 I형 열선을 사용하여 스톨에 대한 연구를 수행하여 1개의 스톨 셀을 측정하고 전파속도 등을 측정하였다. 임형수 등⁽⁹⁾은 서울대학교의 LSRC에서 8개의 고속응답압력센서를 사용하여 국내에서는 처음으로 축류압축기에서의 스톨 발단에 대하여 연구하였다. 8개의 고속응답압력센서에서 동시에 측정된 데이터를 공간푸리에변환(Spatial Fourier Transform) 등을 사용하여 스톨이 처음 발생하는 조건 전후에서의 스톨 발단 과정에 대하여 연구하였으며 스톨이 발생하면서 유량이 약 2.5% 감소하면서 스톨셀(stall cell)이 완전히 발달하는 현상을 관찰하였다.

강영석 등⁽¹⁰⁾은 축류압축기에서 비균일 익단간극에 의하여 발생하는 Alford힘에 대하여 연구하였다. 서울대학교의 LSRC에 대하여 모델링을 수행하여 연구를

하였으며 유량계수가 높아짐에 따라 유로 차폐효과가 커지게 되어 축방향 속도의 섭동량이 커지는 현상 등을 발견하였다. 강영석 등⁽¹¹⁾은 수치해석 방법을 사용하여 압축기 내부의 이차유동에 의하여 발생하는 손실 및 유로차폐 효과를 정량적으로 밝혀내고 이를 간단히 예측할 수 있는 방법을 고안하여 타 연구에 활용할 수 있게 하였다.

압두스 사마드 등⁽¹²⁾은 천음속 축류압축기에서 효율 및 압력비를 증가시키기 위하여 RANS 해석과 가중평균 대리모델을 결합한 최적화 기법으로 압축기 블레이드의 형상을 최적화 하였다. 최적 설계된 형상들의 블레이드 내부 유동장을 분석함으로써 효율 최적화 과정등을 통해 약 1.4%의 효율이 증가되는 유동 메커니즘을 파악하였다. 또한 Abdus 등⁽¹³⁾은 RANS 해석과 단일 목적함수 및 다중 목적함수를 사용하는 최적화 기법을 축류압축기 블레이드 설계에 적용하여 단일 목적함수를 사용하는 경우보다 다중 목적함수를 사용하는 방법이 두 목적함수의 결과를 더욱 상승시키는 결과를 얻었다.

2.3 터보 압축기 일반

강정식 등⁽¹⁴⁾은 압축기와 터빈, 가스터빈 엔진 등 터보기계의 시험에서 넓게 사용되는 레이크(Rake)에 대한 소개와 데이터 분석방법에 대하여 소개하였다. 국내에서는 I형 레이크가 일반적으로 사용되어져 왔으나 압축기나 터빈의 출구에서와 같이 스월(swirl)이 있는 유동에서는 I형보다는 Arc형 레이크가 적합하며 레이크의 적용시 전온도와 전압력 뿐만 아니라 부가적으로 유동 속도 및 유동각 등을 추산할 수 있는 데이터 분석 방법도 설명하였다. 강영석 등⁽¹⁵⁾은 터보압축기의 전산 수치해석에 대한 연구동향을 소개하였다. 비정상 유동해석을 통하여 최근의 압축기에서 화두가 되고 있는 스톨 발단에 대한 연구가 수치해석 방법으로도 연구가 진전되고 있는 상황에 대하여 설명하였으며, 유체와 구조가 상호작용을 일으키는 FSI(Fluid Structure Interaction)의 연구 동향에 대해서도 소개하였다.

3. 용적형 압축기

용적형 압축기로는 로터리 압축기, 사판식 압축기, 스크롤 압축기, 왕복동 압축기들이 있는데, 지난 2008년도에 발표된 논문들은 로터리 압축기 4편, 왕복동

Table 1 Domestic publications on compressor in 2008

	PUBLICATION						Total
	JOURNAL			CONFERENCE			
	KFMA	KSME	SAREK	KFMA	KSME	SAREK	
Centrifugal	3	-	-	3	-	-	6
Axial	2	2	-	3	-	-	7
Rotary	1	-	1	-	-	2	4
Swash Plate	-	-	-	-	-	-	0
Scroll	-	-	1	-	-	-	1
Reciprocate	-	1	1	1	-	2	5
General/Micro	2	-	-	-	-	-	2
Total	8	3	3	7	0	4	25

압축기 5편, 스크롤 압축기 1편으로서 총 10편이 발표되었다.

3.1 로터리 압축기

김현진 등⁽¹⁶⁾은 연료전지용 로터리 압축기에 대한 연구를 수행하였다. 기존의 연료전지용 압축기는 스크롤식, 로터리식, 스크류식 등 다양한 형식의 압축기가 제안되고 있으나 아직은 압축기 효율이 낮을 뿐 아니라 제품의 신뢰성을 확인할 수 없고, 제품군도 다양하지 않은 문제가 있는 점을 착안하여 이 연구에서는 베인 로터리형으로 새로운 구조의 연료전지용 공기압축기에 대한 개념설계를 수행하였다. 2kW급 연료전지에 대하여 로터리 압축기 개념설계를 수행하고 높은 수준의 효율을 가진 압축기를 설계하였다. 안종민 등⁽¹⁷⁾은 히트 펌프 사이클의 효율을 향상시키기 위하여 2단의 트윈 로터리 압축기를 연구하였다. 1단 2실린더 구조에서 2단 2실린더 트윈 구조로 변경할 경우 토출계 재설계를 통하여 압축기 일은 2.39% 감소하였고, 냉방능력은 4.64% 증가하였으며 COP는 6.96% 향상되었다. 또한 안종민 등⁽¹⁸⁾은 환경 친화적인 자연냉매인 이산화탄소를 사용한 1단 2실린더 형식의 로터리 압축기의 형상 최적화를 위한 연구를 수행하였다. 설계를 위한 성능해석 프로그램을 작성하였고 시험결과와 비교하여 프로그램을 검증한 후 행정체적이 4cc인 1단 2실린더 로터리 압축기를 설계하였다. 조홍현 등⁽¹⁹⁾은 환경 친화적인 자연 냉매인 이산화탄소를 사용하는 시스템에서 트윈 로터리 압축기를 적용할 경우의 성능 특성을 연구하였다.

3.2 왕복동 압축기

김철영 등⁽²⁰⁾은 복소벡터를 이용하여 대향형, In-line 형, V형 등 다양한 이단 압축기의 구조에 대하여 관성력을 계산하는 방법을 제시하였다. 그래서 각각의 2단 압축기에 대하여 관성력 및 관성모멘트가 최고로 절감되는 최적의 평형률을 찾을 수 있었다. Bae 등⁽²¹⁾은 냉장고 등에 사용되는 용적형 압축기에서 1개의 실린더를 가지고도 부하조절이 가능한 압축기를 개발하였다. 냉각시스템에 사용되는 압축기는 냉방 부하의 변동에 따라 압력비나 유량 등을 조절할 필요가 있는데 이 연구에서는 정방향과 역방향의 피스톤의 스트로크를 다르게 설계하여 하나의 실린더를 가진 왕복동 압축기에서도 냉방부하의 변화가 가능하도록 설계하였으며 이것은 냉각시스템의 효율을 향상시키는 결과를 나타내었다.

이용호 등^(22,23)은 왕복동식 압축기의 실린더에 보조 흡입구를 설치하여 압축기의 효율과 용량을 증대시키는 연구를 수행하였다. R134a를 냉매로 사용하는 압축기에서 보조 흡입구에 체크밸브가 없는 경우는 COP가 1.66% 향상되는 결과를 나타내었으며, 체크밸브가 있는 경우에는 1.99%의 COP 향상을 나타내었다.

이경환 등⁽²⁴⁾은 왕복동식 수소 압축기의 토출구 유동을 수치해석 방법을 사용하여 모사하여 유동특성을 연구하였다. 2단 왕복동식 압축기에 대하여 유동해석을 수행한 결과 토출구의 특정 지점에서 높은 속도와 난류운동에너지 분포 일치하는 것을 확인하여 손실이 발생하는 영역을 확인할 수 있었으며 이 방법으로 도입하면 왕복동식 압축기의 성능 개선에 도움을 줄 것으로 보인다.

3.3 스크롤 압축기

권태훈 등⁽²⁵⁾은 연료전지용 스크롤 압축기의 개념설계 연구를 수행하였다. 연료전지용 압축기는 현재 로타리 압축기가 주류이지만 향후로는 로타리 압축기에 비하여 고효율, 저소음, 저진동 특성을 지닌 스크롤 압축기가 많이 사용될 것이 기대되며 이를 위한 개념설계 연구를 수행하였다.

4. 결 론

2008년 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 게재논문과 발표논문들을 Table 1에 학회별로 구분하여 표시하였다.

2008년에는 총 25편의 논문이 발표되었는데, 터보형 압축기 60%(15편)이고 용적형 압축기가 40%(10편)인 분포를 보였다. 압축기 형식에 따라 발표 학술지가 구분되는 양상을 보여주고 있는데, 터보형 압축기는 87%가 유체기계 저널에 발표되었으며, 대한설비공학회에는 전혀 발표되지 않았다. 반면에 용적형 압축기는 70%(7편)가 대한설비공학회에 발표되었다. 한국항공우주공학회는 관련 논문이 발표되지 않았다.

올해의 압축기 분야에서의 연구의 특징을 서술한다면 터보형 압축에서는 최적설계와 관련한 연구가 많아지고 있다는 점이고, 용적형 압축기에서는 자연 친화성과 고성능화라고 할 수 있겠다. 향후에도 지속적으로 우수한 연구결과들이 발표되기를 희망한다.

참고문헌

(1) 최재호, 이진수, 조현준, 이성준, 전승배, 2008, "항공용 APU의 천음속 원심압축기 설계 및 시험평가," 2008년도 유체기계연구개발 발표회, pp. 178~179.
 (2) 성선모, 강신형, 최재호, 이진수, 2008, "천음속 원심 압축기 내부 유동의 수치해석," 2008년도 유체기계 연구개발 발표회, pp. 379~384.
 (3) 김진혁, 김광용, 2008, "자오면 형상을 고려한 원심 압축기 임펠러 최적설계," 2008년도 유체기계연구 개발 발표회, pp. 385~390.
 (4) 최재호, 2008, "서지 마진 증가를 고려한 원심압축

기 설계 최적화," 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 38~45.
 (5) 김홍원, 하지수, 김봉환, 2008, "박용 터보차저의 원심압축기의 디퓨저 형상변경에 따른 성능비교 및 유동특성 평가 연구," 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 55~63.
 (6) 박한영, 신유환, 최향철, 김광호, 정진택, 2008, "임펠러의 유로 면적비가 2차원 원심압축기의 성능에 미치는 영향," 유체기계저널, 제1권, 제5호, pp. 22~29.
 (7) 박태춘, 강영석, 한정엽, 강신형, 2008, "연구용 저속 축류압축기의 상세 유동 측정기법 연구," 2008년도 유체기계연구개발 발표회, pp. 180~181.
 (8) 박태춘, 한정엽, 강신형, 2008, "연구용 저속 축류압축기의 내부 유동 특성에 관한 실험적 연구," 유체기계저널, 제11권, 제6호, pp. 54~63.
 (9) 임형수, 조민기, 강신형, 송성진, 2008, "축류압축기의 스톨 발단에 관한 연구," 2008년도 유체기계연구개발 발표회, pp. 169~175.
 (10) 강영석, 박태춘, 강신형, 2008, "설계점 및 탈설계점에서 비균일 익단 간극을 가지는 축류압축기의 유동장 예측," 유체기계저널, 제11권, 제6호, pp. 46~53.
 (11) 강영석, 박태춘, 양수석, 2008, "압축기 내부 손실 및 유로차폐효과에 대한 연구," 2008년도 유체기계연구개발 발표회, pp. 176~177.
 (12) 압두스 사마드, 김광용, 최재호, 2008, "가중평균대리모델을 사용한 천음속 압축기 블레이드 최적화," 대한기계학회논문집 B권, 제32권, 제4호, pp. 317~326.
 (13) Samad, A. & Kim, K. Y., 2008, "Multi-objective optimization of an axial compressor blade," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 999~1007.
 (14) 강정식, 안이기, 2008, "압축기 성능시험용 레이크의 사용 및 데이터 분석 방법," 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 77~81.
 (15) 강영석, 양수석, 2008, "터보 압축기 전산수치해석 최신 기술 동향," 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 71~76.
 (16) 김현진, 이용호, 김호영, 2008, "연료전지용 베인 로타리 공기 압축기 설계," 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 29~37.
 (17) 안종민, 김현진, 2008, "트윈 로타리 압축기의 행

- 정 체적비가 압축기 성능에 미치는 영향,” 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 171~176.
- (18) 안종민, 김현진, 조성욱, 2008, “1단 2실린더 CO2 압축기의 실린더 형상 최적 설계,” 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 119~124.
- (19) 조홍현, 이호성, 백창현, 김용찬, 조성욱, 2008, “트윈로타리 압축기 적용 냉방 및 급탕 겸용 이산화탄소 시스템의 성능특성에 관한 연구,” 설비공학 논문집, 제20권, 제4호, pp. 230~237.
- (20) 김영철, 안국영, 2008, “이단 왕복동 공기압축기 구조에 따른 관성력 비교,” 2008년도 유체기계연구개발 발표회, pp. 442~447.
- (21) Bae, Y. J., Kim, J. B., Kim, J. K. & Chang, Y. J., 2008, “Mode change design for capacity modulation in reciprocating compressor,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, No. 7, pp. 1391~1399.
- (22) 이용호, 김현진, 2008, “보조 흡입구가 장착된 왕복동 압축기의 성능분석,” 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 163~170.
- (23) 이용호, 김현진, 2008, “보조 흡입구가 장착된 왕복동 압축기의 성능분석,” 설비공학논문집, 제20권, 제10호, pp. 637~644.
- (24) 이경환, Mohammad, S. R., 정한식, 정효민, 2008, “왕복동식 수소압축기의 토출구 유동에 관한 CFD 해석,” 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 561~566.
- (25) 권태훈, 안종민, 김현진, 심재휘, 2008, “연료전지용 스크롤 공기압축기 개념설계,” 설비공학논문집, 제20권, 제2호, pp. 113~120.