

펌프 분야 연구동향

김경엽*

1. 서 론

국내 펌프분야의 연구동향을 살펴보기 위하여 최근 3년(1999~2001) 동안 유체기계저널과 대한기계학회 논문집에 발표된 논문을 대상으로 그 내용을 분류하고 요약 정리하였다. 펌프는 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있으며, 그 종류 또한 매우 다양하므로 연구동향은 주로 펌프의 작동원리에 따라 분류하였다. 게재 논문 총 25편 중 10편이 원심펌프와 관련된 것인데, 이는 원심펌프가 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있다는 사실과 유관하다. 그밖에 사류펌프와 축류펌프가 각각 1편 그리고 진공펌프를 포함한 특수펌프가 4편으로 조사되었다. 또한 펌프의 성능평가 및 선정프로그램에 관한 논문 2편과 이상유동 및 수격현상에 관련된 논문 7편이 게재된 바 있다. 이처럼 펌프분야의 기술 논문은 그 내용이 점차로 다양화·전문화되고 있으며, 산업현장의 니드(needs)를 적극 반영해 나가고 있는 추세에 있다.

특기할 사항으로써 펌프와 관련된 논문은 유체기계저널이 발간되기 전(1998.8.31)까지는 대한기계학회 논문집에 주로 게재되었으나, 이제는 대부분 유체기계저널에 발표되고 있다는 사실은 주목할 만 하다. 이는 유체기계공업학회가 그만큼 활성화되고 있음을 뜻하며, 특히 펌프분야는 학회의 특성화 취지에 맞추어 학술적인 연구논문 뿐만 아니라 산업체에서 적용되고 있는 기술논문까지도 적극 동참토록 노력하였기 때문인 것으로 보인다. 한편, 펌프분야 연구동향 중 펌프진동과 관련된 부분은 회전체동력학분야에 포함시키는 것으로 보았고, 유압기기로써 주로 사용되고 있는 용적형 펌프는 제외시켰으나, 앞으로 광범위한 의미의 유체기계(또는 펌프)에 포함시켜 펌프분야 관련기술의 개발 및 확대에 더욱 힘써야 할 것으로 사료된다.

2. 원심 펌프

2.1 성능예측 및 유동해석

펌프 설계는 1980년대 중반까지도 주로 설계상수를 사용하는 방법이 펌프 시험과 결합되어 사용되었다. 이 설계방법에서는 Euler의 속도삼각형을 구하여 펌프 임펠러를 설계하고 있는데 설계상수는 과거에 성공적으로 설계된 펌프들에 대한 시험을 통하여 얻은 도표로서 이를 이용하여 임펠러 입·출구에서의 속도를 추정할 수 있다. 오형우 등⁽¹⁾은 펌프효율 및 캐비테이션을 억제하기 위한 유효흡입양정 그리고 생산 단가를 고려한 원심펌프의 최적 형상을 결정하는 설계 최적화 프로그램을 개발하였다.

원심펌프 내의 유동에서는 여러 가지 물리적인 현상으로 인하여 손실이 발생하는데 이런 손실들을 정확하게 예측하고 설계점과 탈설계점에서의 작동결과를 미리 예측하는 것은 펌프의 기본설계 과정에 있어서 매우 중요하다. 최영석 등⁽²⁾은 원심펌프 성능예측방법으로서 임펠러 내의 손실을 보다 간편하게 예측하기 위하여 두영역 모델 및 TEIS(Two Element In Series) 모델을 사용하였다. 이 모델에 사용되는 계수에 대하여 성능예측에 큰 영향을 미치는 인자들을 조사하였고, 각 계수의 범위에 따른 전양정 및 효율예측의 경향을 살펴보았다.

최근 들어 CFD는 수치기법, 격자 생성기법, 난류모델, 경계조건적 적용, 전처리 및 후처리 기법 그리고 컴퓨터 기술의 발달로 펌프의 설계와 실험에 의해서는 수행하기 힘든 복잡한 3차원 유동의 해석에 있어서 효율적인 수단이 되고 있다. 김원갑 등⁽³⁾은 물리적 반변 속도성분을 종속변수로 하는 해법을 도입하여 3차원 점성유동을 해석할 수 있는 전산코드를 개발하고, 이를 편흡입 원심펌프(모델 HES65-250)의 임펠러 내부 유동 해석에 적용하였다. 또한 최영석 등⁽⁴⁾은 상용 CFD 코드인 CFX-TASCflow를 사용하여 앞 모델의 임펠러

* 한국산업기술대학교 기계공학과
E-mail : kykim@kpu.ac.kr

내부유동을 해석하였으며, TASCflow에서 사용 가능한 수치기법과 난류모델 및 격자 등을 변화시켜가며 해석하였고 시험 값과 비교 평가하여 그 영향을 고찰하였다. 정경남 등⁽⁵⁾은 실제 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 양흡입 원심펌프의 임펠러 단독 모형과 케이싱까지 포함한 펌프 전체 모형에 대하여 상용 코드인 TASCflow를 이용하여 유동해석을 수행하였으며, 수치계산을 통하여 예측된 펌프의 성능을 시험 결과와 비교함으로써 설계 도구로서의 가능성을 살펴보았다.

허남건 등⁽⁶⁾은 고리 2, 3, 4호기 원자로 냉각재 펌프 케이싱의 건전성 평가를 위한 기본 자료를 제공하기 위하여 STAR-CD를 이용하여 정상 상태 및 과도 상태에 대한 유동해석을 수행하여 열전달 계수를 구하였다. 유동 해석 결과를 비교할 만한 실험 값이 없어 정량적이 비교는 할 수 없었지만 밀도의 증가에 따른 열전달 계수의 증가를 통하여 긍정적인 경향은 파악할 수 있었다.

2.2 성능실험 및 유동가시화

최근에는 수치해석기법의 진보에 따라 터보기계의 복잡한 3차원 내부 유동 기구의 해명이 시도되고 있지만 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계에 있어서는 실험적인 접근기법이 보다 정량적인 결과를 제시하는 경우가 많다. 이러한 배경으로부터 임유정 등⁽⁷⁾은 고속유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템을 구성하고 원심터빈펌프의 동정의 상호작용이 활발한 영역을 대상으로 속도벡터의 계측을 행하였다. 여기서 임펠러 회전속도는 여러 차례 변화시켰으며 이 때의 순간 및 시간평균 속도분포를 정량적으로 구하였다.

논클로그 펌프(non-clogging pump)는 임펠러 내의 유로를 넓게 하여 섬유, 고형물 및 이물질이 걸리지 않게 임펠러를 특수하게 설계한 펌프로서 펌프구경의 70% 정도 크기의 고형물도 수송 가능한 펌프이다. 따라서 논클로그 펌프는 정화 처리되지 않은 하수나 오수, 큰 고형물이 함유된 액체를 수송하는데 주로 쓰인다. 김동주 등⁽⁸⁾은 논클로그 펌프의 깃 수 변화가 펌프의 양정 및 효율 그리고 축동력에 미치는 영향에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 또한 어획한 생선을 하역하기 위하여 나선형으로 된 1매의 깃을 갖는 스크류식 원심펌프가 사용되기도 하는데, 임펠러 입구형상에 따른 실험을 아울러 수행하였다.

원흡입 임펠러의 경우 전면 측벽(shroud)과 후면 측

벽에 작용하는 정압에 차이가 있기 때문에 축방향으로 추력이 발생하는데, 후면에는 높은 출구압력이 작용하고 전면의 임펠러 입구에는 낮은 흡입압력이 작용하기 때문에 임펠러는 전면 방향으로의 축추력을 받는다. 홍순삼 등⁽⁹⁾은 축추력을 줄이기 위해 만든 밸런싱홀이 케이싱의 압력분포, 펌프성능, 축추력 등에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다.

펌프의 건전성은 성능적인 측면에서 뿐 만 아니라 구조적 관점에서 건전성을 유지하여야만 장기간 지속적으로 운전성을 보장할 수 있다. 박치용 등⁽¹⁰⁾은 이중벌류트로 구성된 축방향 양흡입 수평형 1단 원심펌프의 벌류트 케이싱 입구 부분 즉, 벌류트 혀(volute tongue)에서 발생된 균열에 대한 원인 분석 및 건전성 평가를 수행하였다. 펌프의 구조 건전성 평가를 위해 먼저 결합 생성 원인을 재질 분석과 파면 관찰을 통해 규명하고, 벌류트 혀의 균열 안정성을 평가하였다.

3. 사류 및 축류 펌프

사류펌프는 비속도가 원심펌프와 축류펌프의 중간에 위치하고 있으며 차단 양정, 차단 축동력이 축류펌프보다 적고 또한 동일 용량의 원심펌프보다 소형-경량화가 가능하다는 등의 이점이 있다. 이와 같은 이점 때문에 과거에 원심 및 축류펌프가 차지하였던 영역을 빠른 속도로 대체해 가고 있다. 이선기⁽¹¹⁾는 사류펌프의 임펠러 입구각 분포, 자오면 단면 형상 및 출구 유동형식이 동일하고 출구각 분포만이 상이한 3개의 임펠러를 설계, 제작하여 임펠러 출구각 변경에 의한 임펠러 내부유동 변화와 내부유동 변화가 부분유량 영역에서의 양정-유량 특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 실험은 펌프의 일반성능, 임펠러 입출구부의 유속분포, 유막법을 이용한 내부유동의 가시화, 임펠러 외주의 비정상 압력분포 등의 측정을 수행하였다.

수중 믹서는 물탱크에서 저속으로 회전하면서 축류 및 반경 방향으로 유체를 확산시키는 역할을 한다. 이 수중믹서는 환경산업분야에서 미생물을 이용한 오수 처리, 특히 탈질·탈인 등 혐기처리에 중요한 장치로 사용되고 있다. 최영석 등⁽¹²⁾은 상용 유동해석 코드인 FLUENT를 사용하여 프로펠러형 수중믹서에 대한 유동해석을 수행하였다. 임펠러의 형상과 관련된 중요 변수를 선정하여 이를 변화시켜 임펠러의 형상에 따른 모델 5가지를 생성하였다. 각 모델의 계산결과를 분석

하여 프로펠러형 수증막서의 설계에 있어서 주요 형상 변수가 어떻게 유동특성에 영향을 미쳐 결과적으로 수증막서의 성능에 영향을 주는 지를 수치결과를 분석하여 살펴보았다.

4. 진공 및 특수 펌프

4.1 진공펌프

최근 반도체 산업 및 제조업 분야에서와 같이 고청정 및 큰 유량(throughput)이 요구되는 경우에 부합되는 펌프로서 터보형 진공펌프의 활용은 매우 활발한 실정이다. 이러한 터보형 펌프는 크게 Holweck 형태인 원통에 나선형 채널이 있는 헬리컬 드래그펌프와 Siegbahn 형태인 원판에 채널이 있는 원판형 드래그펌프로 구분된다. 터보형 펌프는 대유량에 적합할 뿐만 아니라 10^{-6} torr 정도의 고진공으로부터 대기압까지 한 대의 펌프로도 기체를 압축·배기 할 수 있다. 허중식 등⁽¹³⁾은 헬리컬 드래그펌프에 대하여 이론적 및 실험적으로 성능해석을 수행하였고, 황영규 등⁽¹⁴⁾은 원판형 드래그펌프에 대하여 미끄럼 및 분자천이영역에서 이론적 및 실험적으로 압축 및 배기특성을 해석하였다.

루츠형 진공펌프는 $1 \sim 10^{-4}$ torr의 저·중 진공영역의 압력을 얻고자 할 때 많이 사용되는데, 이 압력 범위는 펌프의 작동범위 보다는 낮고 확산펌프의 작동범위 보다는 높은 것으로 알려져 있으며, 이러한 루츠형 펌프는 보통 탈수공정이나 가스 배기용, 분체 수송, 진공 청소기, 산소 부화막 등에 사용된다. 김현중 등⁽¹⁵⁾은 로브 형상 변화가 루츠형 진공펌프의 성능에 미치는 영향을 조사하였는데, 로브는 인벌류트형, 사이클로이드형, Cassini형 로브를 연구 대상으로 하였다. 로브 형상에 따른 간극의 영향을 수치해석과 실험을 통하여 분석하였고, 루츠형 진공펌프의 성능은 실험을 통하여 고찰하였다.

4.2 수분사 펌프

수분사펌프(water jet pump)는 보통의 펌프와는 달리 임펠러 없이 유체의 압력에너지를 속도에너지로, 속도 에너지를 다시 압력 및 위치 에너지로 바꾸어주는 일종의 에너지 교환장치로서 낮은 효율에도 불구하고 간단한 구조와 작동이 쉽다는 장점 때문에 산업 전반에 걸쳐 여러 가지 목적으로 사용되고 있다. 조장근 등⁽¹⁶⁾

은 수분사펌프 내의 유동현상을 파악하기 위하여 유동장 해석을 수행하였으며, 수분사펌프의 무차원 설계변수인 면적비, 노즐거리, 목길이 등에 대한 성능변수 연구를 수행하였다. 유동장 해석을 위하여 다중블록기법으로 격자를 형성하였고, 지배방정식으로는 3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

5. 펌프의 성능평가 및 선정프로그램

펌프의 성능곡선은 일정한 펌프 회전수에서 유량에 따른 압력상승, 동력 및 효율의 변화를 나타낸다. 펌프 성능을 측정하기 위한 전통적인 수력학적 방법에서는 오리피스, 노즐, 피토관, 초음파 유량계 등을 이용하여 유량을 측정하고, 압력 상승량과 펌프의 축 토크 및 회전수를 측정하여 펌프효율을 구한다. 전통적인 방법에 비해 널리 알려지지는 않았지만, 펌프를 통한 유체의 온도상승을 측정하여 펌프의 손실을 직접 평가하고, 이를 이용하여 효율을 평가하는 소위 열역학적 방법이 영국 AEMS(Advanced Energy Monitoring System)사에서 개발되어 Yatesmeter로 상품화되었다. 그러나 아직 우리 나라의 산업체에서는 이에 대한 직접적인 경험 없이 있었기 때문에 Yatesmeter에 대한 신뢰성을 확인할 수 없었다. 이러한 배경 하에서 강신형 등⁽¹⁷⁾은 먼저 실험실 내에서 전통적인 수력학적 방법에 의한 펌프 성능 측정결과와 Yatesmeter에 의해서 측정된 펌프 성능 측정결과를 비교·검토함으로써 열역학적 방법에 의한 펌프 성능 측정법의 신뢰성을 검토하였다.

유체기계공업학회 펌프분과에서 2000~2001년도 수행한 “광역상수도용 펌프의 규격 최적결정방법에 관한 연구”는 수도권 광역상수도용 펌프에 대해 최악의 조건으로 설계되었으나 용수 수요일, 관 조도계수, 수위 등의 사용조건이 설계조건과 큰 차이가 있어 실제 운영이 최적상태로 되지 못함에 따라 저효율과 과대한 에너지 소비가 발생하는 문제점을 전반적으로 조사·분석하여 대책을 제시함으로써 신규 광역상수도 사업을 계획할 때 펌프의 규격을 최적으로 운영이 가능하도록 설계하여 건설사업비 및 운영관리비를 절감하도록 하였다. 또한, 연구 결과를 상수도시설기준 관련부분의 개정에 반영 가능한 자료로 제시하였다. 노형운 등⁽¹⁸⁾은 펌프의 규격 최적결정방안에 대한 연구결과로부터 펌프/모터 규격선정 프로그램을 Visual Basic Program으로 개발하였다.

6. 특이 현상

6.1 이상 유동

일반적으로 펌프는 단상류 상태에서 사용되는 것으로서 이상류(two-phase flow) 상태가 되면 임펠러의 작용이 악화되어 운전이 불가능하게 되는 경우가 많다. 그러나 최근에는 로켓 엔진용 터보펌프, 원자력발전소용 냉각재 펌프, 해양유전개발 등의 문제와 관련하여 펌프를 기액(air-water) 이상류 상태에서 작동시킬 필요성이 강하게 부각되었다. 김유택 등^{(19),(20)}은 스크류식 원심펌프의 기액 이상류 특성 및 기액 이상류시의 펌프 성능에 미치는 내부 유동상태와 기포경의 영향을 조사하였다. 그리고 임펠러 간극, 유량계수 및 보이드율을 변수로 펌프 내 변동압력을 케이싱에 설치한 압력측정공을 통해 측정하고 그 특성을 조사하였다.⁽²¹⁾ 또한 이종철 등⁽²²⁾은 기액 2상 유동 시 원심펌프 성능 변화에 대한 유동특성을 파악하기 위하여 유입 기공률(void fraction) 변화에 따른 펌프성능변화에 대한 실험적 연구 및 원심펌프 임펠러 내 수치해석적 연구를 수행하였다.

6.2 수격 현상

펌프를 기동시키거나 정상운전 중 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승하거나 강하게 되어 수격현상(waterhammer)으로 인한 사고가 유발될 수 있다. 김정엽 등^{(23),(24)}은 팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구를 수행하였으며, 수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 취수펌프장에서 실시되었던 수격현상에 대한 현장시험 결과가 당초 설계에서 예측한 수격압 보다 높게 나타난 원인을 조사·분석하고, 취수펌프장의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 대책을 강구하였다. 또한, 김정엽⁽²⁵⁾은 에어챔버가 설치된 송수관로에서 수격현상에 대한 현장시험을 수행하고, 에어챔버의 입력변수 및 설계인자가 수격현상에 어떠한 영향을 미치는지 수치계산과 실험을 통하여 조사하였다.

참고문헌

(1) 오형우, 정명균, 김상철, 양근영, 하진수, 1999, “원

- 심 펌프의 최적 설계,” 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제2호, pp. 254~261.
- (2) 최영석, 심재혁, 강신형, 1999, “두영역모델을 사용한 원심펌프의 성능예측,” 유체기계저널, 제2권, 제1호, pp. 56~63.
- (3) 김원갑, 강신형, 2000, “원심펌프 임펠러의 성능에 대한 전산해석적 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제1호, pp. 10~18.
- (4) 최영석, 이용갑, 홍순삼, 강신형, 2001, “상용 CFD 코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능해석,” 유체기계저널, 제4권, 제1호, pp. 38~45.
- (5) 정경남, 박편구, 조현준, 이상구, 2001, “양쪽 흡입 원심펌프의 성능해석에 대한 연구,” 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 7~15.
- (6) 허남진, 김성원, 유기풍, 김승태, 2000, “원자로 냉각재 펌프의 과도 상태의 유동 및 열전달 해석 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제2호, pp. 24~30.
- (7) 임유청, 서민석, 이영호, 1999, “PIV를 이용한 터빈펌프의 동·정익 속도장 계측,” 유체기계저널, 제2권, 제1호, pp. 35~42.
- (8) 김동주, 서상호, 성순경, 1998 “논클로그 및 스크류식 원심펌프의 임펠러 형상이 펌프성능에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제1권, 제1호, pp. 81~89.
- (9) 홍순삼, 1999, “밸런싱홀이 원심 펌프의 성능과 축추력에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제4호, pp. 443~451.
- (10) 박치용, 김진원, 김양석, 2000, “원심펌프 별류트 허의 균열 원인분석 및 건전성 평가,” 유체기계저널, 제3권, 제4호, pp. 7~14.
- (11) 이선기, 2000, “임펠러 출구각이 펌프 내부유동 및 특성에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제3권, 제1호, pp. 28~36.
- (12) 최영석, 이재환, 김상일, 2000, “날개형상이 프로펠러형 수중믹서의 성능에 미치는 영향에 관한 수치적 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제2호, pp. 31~35.
- (13) 허중식, 우남섭, 황영규, 김윤제, 1999, “분자천이 영역에서 헬리컬 드래그펌프의 배기특성,” 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제12호, pp. 1614~1625.
- (14) 황영규, 허중식, 최육진, 2000, “원판형 드래그펌프의 배기특성에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제6호, pp. 860~869.
- (15) 김현중, 김윤제, 황영규, 2000, “로브 형상 변화가 루츠형 진공 펌프 성능에 미치는 영향,” 유체기계

- 저널, 제3권, 제2호, pp. 50~56.
- (16) 조장근, 박원규, 1999, “수분사 펌프의 유동 및 성능 해석,” 유체기계저널, 제2권, 제2호, pp. 64~73.
- (17) 강신형, 김진권, 홍순삼, Alex Yates, 2000, “열역학적 방법을 이용한 펌프 운전성능 평가법 검토,” 유체기계저널, 제3권, 제3호, pp. 25~30.
- (18) 노형운, 김제수, 박길문, 서상호, 이영호, 2001, “광역상수도용 펌프의 최적결정을 위한 펌프/모터 선정 프로그램 개발,” 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 22~27.
- (19) 김유택, 다나카카즈히로, 이영호, 마쯔모토요이치로, 1999, “공기 흡입이 소형 스크류식 원심펌프의 특성에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제2권, 제3호, pp. 37~44.
- (20) 김유택, 다나카 카즈히로, 이영호, 1999, “소형 스크류식 원심펌프의 기액 이상류 특성,” 유체기계저널, 제2권, 제4호, pp. 9~15.
- (21) 김유택, 최민선, 이영호, 2001, “기액 이상류시의 스크류식 원심펌프의 압력분포,” 유체기계저널, 제4권, 제3호, pp. 39~45.
- (22) 이종철, 김운제, 김철수, 2000, “기-액 2상유동에 따른 원심펌프 성능변화에 대한 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제3호, pp. 12~18.
- (23) 김경엽, 유택인, 2000, “팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제4호, pp. 52~58.
- (24) 김경엽, 오상현, 2001, “펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서의 수격현상,” 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 16~21.
- (25) 김경엽, 2002, “에어 챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상,” 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제2호, pp. 177~183.