

펌프 분야 연구동향

김 경 업*

1. 서 언

기원전 500년경 세워진 세계 7대 불가사의의 하나로 꼽히는 바빌론의 공중 정원은 실제로 공중에 떠 있는 것이 아니라 높이 솟아있다는 뜻으로 다음과 같은 역사를 갖고 있다. 네부카드네자르 2세는 바빌로니아의 왕이 되자 나라 사이의 동맹 형성을 위하여 메디아 왕국의 키악세레스 왕의 딸 아미티스를 왕비로 맞아들였다. 산이 많고 과일과 꽃이 풍성한 메디아에서 자란 왕비는 평탄하고 비가 잘 오지 않는 바빌론에 마음을 두지 못한 채 항상 아름다운 고향의 푸른 언덕을 그리워하였다. 이를 안타깝게 여긴 왕은 왕비를 위하여 메디아에 있는 그 어떤 정원보다 아름다운 정원을 바빌론에 만들라고 명령했다. 이하 중략. 그런데 비가 거의 오지 않아 사막과 같은 기후를 가진 바빌론에서 어떻게 4,364평이나 되는 큰 정원을 가꿀 수 있었을까? 수력 장치에 대해서는 2가지 설이 있다. 첫 번째 방법은 정원의 맨 위에 커다란 물탱크를 만들어 유프라테스 강의 물을 체인 펌프(chain pump)를 이용하여 길어 올렸다는 것이다. 두 번째 방법은 아르키메데스가 고안한 수력 장치로 물레방아를 타고 올라온 물을 나사 펌프를 통하여 꼭대기까지 퍼 올리는 구조이다. 두 가지 방식 중 어느 방식이 사용되었는지는 알 수 없다.

한편, 2004년 한해 동안 펌프와 관련된 연구가 국내에서는 활발히 진행되었는데, 주옥같은 많은 연구결과들이 학회의 논문집이나 각종 학술발표회를 통해 발표되었다. 본 논문에서는 2004년 국내 펌프분야의 연구동향을 살펴보기 위하여 유체기계저널 및 유체기계연구개발발표회 논문집, 대한기계학회논문집 및 춘계학술대회 논문집, 설비공학논문집을 대상으로 하였고, 총 32편 중 유체기계공업학회에서 19편, 대한기

계학회 11편, 대한설비공학회 2편이 게재된 것으로 조사되었다. 여기서 펌프분야의 논문들은 내용별로 분류하고, 그 연구동향을 분석하였는데, 작년에 비해 논문 편수는 약 1.5배 증가하였으며, 연구내용도 상당히 다양해진 것으로 나타났다.

2. 터보 펌프

우리나라는 2002년 11월 한국 최초의 액체로켓인 KSR-Ⅲ의 발사에 성공하였으며, 2000년에는 국가 우주개발 중장기 기본계획의 보완을 통해 자체 기술로 저궤도위성 우주발사체 개발 및 우주센터 건립을 마무리 짓고, 2015년까지 총 20기의 인공위성을 자체 보유한다는 계획을 수립해 두고 한국우주발사체(KSLV)의 개발에 전력하고 있다. 우주발사체의 개발에서 가장 핵심적인 기술 중 하나는 액체로켓의 추진체로 사용되는 산화제와 연료를 고압으로 연소실까지 이송시키는 터보펌프 개발 기술이다. 강정식 등⁽¹⁾은 한국항공우주연구소에서 개발한 극저온 터보펌프 성능시험설비의 설계과정과 시험기의 사양, 시운전 결과를 소개하였다.

터보펌프는 로켓 엔진의 액체 추진체를 연소기에서 요구되는 압력과 유량으로 공급하기 위한 가압시스템으로 극저온, 고속, 고압의 극한 작동환경 때문에 로켓엔진의 신뢰성에 가장 크게 영향을 주는 구성품이라 할 수 있다. 특히, 고속 회전하는 펌프 입구에서 공동화가 심각하게 발생할 경우, 양정 저하와 진동 등의 문제를 유발하기 때문에 이에 대한 방지 또는 제어의 중요성이 제기되어 왔다. 이종민 등⁽²⁾은 로템(구 MOBIS)에서 설계한 연료펌프에 대해 수력성능과 흡입성능 실험을 수행하였으며, 캐비테이션이 있을 때와 없을 때 인듀서의 점압분포에 관해 조사하였다.

터보펌프의 임펠러는 20,000~50,000 rpm의 높은 회전속도의 영향으로 캐비테이션이 쉽게 일어나게

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

된다. 그래서 임펠러 전방에 인듀서를 장착하여 정압을 상승시킴으로써 캐비테이션을 억제시킨다. 보통 인듀서는 텀 외류와 날개를 따라 어느 정도 캐비테이션이 발생한 상태에서 운전하게 되며 입구에서 발생한 기포가 출구로 전파되는 것을 방지하기 위하여 큰 현절비를 가진다. 홍순삼 등⁽³⁾은 기본형 인듀서에 대한 성능 특성을 고찰한 후에 현절비가 변할 경우 성능이 어떻게 변하는지 실험을 통하여 살펴보았다. 그리고 홍순삼 등⁽⁴⁾은 인듀서의 끝틈새를 형상 파라미터로 설정하고 정상상태 성능 및 비정상 캐비테이션 특성에 대하여 고찰하였다. 최창호 등⁽⁵⁾은 터보펌프의 흡입성능을 추가로 향상시키기 위하여 인듀서 앞에 소형의 보조 인듀서를 설치하여 성능실험을 수행하였으며, 아울러 주 인듀서의 익단 간극 크기에 따른 보조 인듀서가 흡입성능에 미치는 상관관계를 조사하였다.

발사체용 액체추진 로켓엔진에 사용되는 터보펌프 시스템은 구동 터빈, 연료 펌프 및 산화제 펌프로 구성되어 있다. 최범석 등⁽⁶⁾은 액체 메탄을 연료로 사용하는 고압 터보펌프 시스템 중 연료펌프의 인듀서, 임펠러 등 펌프 주요 부품의 상세 형상을 결정하고, 펌프 내부 유동에 대한 3차원 유동 해석을 수행하여 유동특성을 분석하고 설계된 펌프의 성능을 평가하였다. 또한, 김대진 등⁽⁷⁾은 연료 가압에 쓰이는 연료펌프에 대해 성능시험을 실시하여 그 결과를 정리하였다. 연료펌프에 대한 성능시험은 수력성능시험과 흡입 성능시험 두 종류로 나누어 실시되었다.

고압 터보펌프 개발의 여러 핵심 기술 가운데 베어링과 실의 설계 기술은 높은 신뢰도를 유지하기 위한 필수적인 기술로서 일반적으로 높은 회전수와 극저온 작동 환경을 고려할 때 설계 검증 및 신뢰성 확보가 요구된다. 양홍준 등⁽⁸⁾은 9.5톤급 액체로켓 엔진용 고압 터보펌프 개발 과정에서 수행한 극저온 베어링/실/재료 시험설비개발과 시험평가기술에 관한 연구내용을 요약하여 소개하였다.

3. 원심 및 사류 펌프

3.1 원심 펌프

원심펌프는 국내 대부분의 펌프 제조업체에서 생산하고 있는 가장 보편적인 펌프의 한 종류이다. 원심펌프는 산업현장에서 많은 에너지를 사용하고 있는 펌프이므로 높은 효율의 펌프를 생산하기 위해서는 실험과

해석적 연구 등을 통해 기술향상이 이루어져야 한다. 김동주 등⁽⁹⁾은 점성이 다른 5가지 유체 즉, 물과 설탕물 그리고 글리세린 수용액의 농도를 각각 달리하여 10%, 20%의 수용액으로 성능실험을 수행한 후 점성 유체를 이송하는 원심펌프 성능특성의 변화를 연구하였고, 그때의 수정계수식을 제안하였다. 또 김동주 등⁽¹⁰⁾은 점성이 다른 뉴턴유체와 비뉴턴유체를 이송하는 원심펌프의 성능에 관한 연구를 수행하였으며, 산업현장에서 참조할 수 있는 성능환산 수정식을 제안하였다.

세계 펌프시장은 해마다 약 6%씩 증가하고 있으며, 2006년에는 400억불이 넘을 것으로 예상되고 있다. 펌프 수요의 증가로 인하여 미국이나 일본과 같은 기술 선진국에서는 오래 전부터 여러 종류의 펌프에 대해서 상당한 기술을 축적해 오고 있다. 국내에서도 다양한 연구가 시도되고 있는데, 박성규 등⁽¹¹⁾은 소형 동력의 소방용 다단 원심펌프에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 CFD기법을 이용하여 소방펌프의 운전조건 변화에 따른 성능특성 고찰 및 향상방안에 대하여 연구하였다.

펌프를 장시간 운전하게 되면 베어링하우징과 오일의 온도가 상승하게 된다. 베어링하우징 온도가 상승함에 따라 오일 온도가 올라가면 오일의 점성이 낮아져 오일과 베어링의 점착성이 떨어지게 된다. 이로 인해 베어링 접촉부에서 윤활이 제대로 이루어지지 않아 베어링 표면 마찰계수가 커지게 되고, 결국 베어링의 마찰과 마모가 증대하여 펌프의 성능이 저하되는 결과를 초래한다. 한상규 등⁽¹²⁾은 오일의 점도와 양이 펌프 베어링하우징의 온도 및 오일의 온도에 미치는 영향을 분석하고, 펌프의 운전조건에 따른 베어링과 오일의 과열에 관한 영향을 평가하여, 펌프의 온도 상승 및 오일의 수명을 예측하고자 하였다.

3.2 사류 펌프

전산유체역학(CFD)은 컴퓨터의 눈부신 발전을 기반으로 모든 종류의 유체기계 설계 및 성능 검증에 이용되고 있다. 김진영 등⁽¹³⁾은 선박의 주 기관에 오일을 공급하는 주 윤활유 펌프에 대하여 펌프의 효율과 유량-양정 곡선의 기울기를 증가시킬 목적으로 펌프 유동장을 분석하고 이를 설계에 반영함으로써 성능이 개선된 모델을 개발하였다. 이 모델은 시제품으로 제작되었으며, 성능시험을 수행하여 설계결과를 검증하

였다.

4. 응적형 및 특수 펌프

4.1 응적형 펌프

제로터 (Gerotor) 펌프는 구조가 간단하고, 같은 크기의 다른 펌프에 비해 1회전당 토출유량이 많기 때문에 소형화에 유리하다. 또 두 치형 사이의 상대적 운동이 작기 때문에 기계 및 체적 효율이 크고, 장시간 사용에도 효율 변화가 적으므로 자동차의 엔진 윤활유 공급원 및 동력전달장치와 자동변속기의 유압원으로 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 가공기술의 발달로 각종 유압시스템에서 그 응용범위가 확대되고 있다. 남윤주 등⁽¹⁴⁾은 제로터 내의 불필요한 압력맥동을 제거하기 위해 측판의 포트에 설치된 피스톤 펌프의 릴리프 그루브와 베인 펌프의 노치에 관한 연구를 응용하여 제로터 펌프의 측판을 설계하였으며, 압력맥동에 관한 이론적 해석을 수행함으로써 측판의 설계변수 및 펌프의 작동환경에 관한 변수들이 압력맥동에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다.

4.2 특수 펌프

회전기계는 임펠러 회전을 통해 유체에 에너지를 전달하기 때문에 수력학적 동력은 에너지를 전달받는 유량과 임펠러 회전에 의한 각운동량 변화량의 곱에 의해 산출된다. 그러나 재생형 기계 (regenerative turbomachine)에서는 펌핑 유량이 아닌 순환 유량에 의해 에너지 전달이 이루어지며, 이는 펌핑 유량과 순환 손실에 의해 결정되는 종속변수이다. 따라서 순환 유동에 대한 정확한 모델 없이는 재생형 기계에 대한 정확한 성능 예측 및 설계가 어렵다. 유일수 등⁽¹⁵⁾은 재생형 기계에 대한 운동량 교환 이론의 개선에 목적을 두고 수력학적 해석에 필요한 변수들에 관한 일반화된 모델을 제시하고자 하였다. 한편, 재생형 기계는 낮은 비속도를 가지며, 효율이 낮다는 단점이 있다. 효율이 낮다는 것은 상대적으로 손실이 크다는 것을 의미하는데, 유일수 등⁽¹⁶⁾은 순환 손실에 대한 일반화된 모형을 제시함으로써 독립적으로 성능예측이 가능한 손실모델을 제시하고자 하였다.

재생펌프는 적은 유량으로 큰 압력을 발생시키기 때문에 소형 보일러용 펌프 또는 자동차용 연료펌프로

주로 사용된다. 자동차용 연료펌프로 사용되는 재생펌프는 약 3.8 bar의 균일한 압력으로 인젝터에 연료를 공급하는 역할을 한다. 이러한 재생펌프는 입구 케이싱과 출구 케이싱 사이에서 회전하는 임펠러 직경이 약 30 mm 정도로 상당히 소형이고, 7500 rpm으로 회전하기 때문에 내부에서 복잡한 3차원 유동이 발생한다. 강신형 등⁽¹⁷⁾은 자동차 연료펌프에 적합한 임펠러 형상을 디자인한 후 3차원 유동해석과 성능실험을 수행하였다.

5. 진공 및 마이크로 펌프

5.1 진공 펌프

진공기술은 반도체 생산기술의 핵심요소일 뿐만 아니라 평판 디스플레이를 비롯하여 전자, 재료, 식품, 의약 등의 산업, 핵융합 등의 미래 첨단 기술의 핵심으로서 그 수효는 막대하다. 진공펌프의 성능을 검사하기 위한 계통은 압력탱크, 진공탱크와 배관계통 등으로 구성되어 있다. 심우건 등⁽¹⁸⁾은 질소 공급탱크의 입구 압력에 대해서 압력전달 계통의 동특성을 특성곡선법을 사용하여 수치해석으로 분석하였다. 유량 전달관의 길이와 지름의 변화에 따라 중단 탱크 (압력탱크 혹은 진공탱크)의 압력 반응을 구하여 분석하였으며, 진공펌프의 배기속도를 실험적으로 구한 결과와 비교하였다.

5.2 마이크로 펌프

진공분야에 대한 연구는 항공우주산업과 반도체 산업의 급속한 성장으로 인하여 첨단 산업분야의 진공문제를 해결하는 과정에서 많은 발전을 하였다. 근래에는 금속재료 및 반도체 제조공정관련 산업분야에서 고정정 대유량이 요구되는 CVD (Chemical Vapor Deposition), 이온 주입, 에칭, 스퍼터링 등의 작업공정에 터보형 드래그펌프가 많이 이용되고 있다. 드래그 펌프는 고속으로 회전하는 날개에 의해 기체분자들이 매우 큰 운동량을 전달받아 연속적으로 진공공간으로부터 출구측으로 압축배기되게 하는 펌프이다. 권명근 등⁽¹⁹⁾은 원판형 드래그펌프 내부의 채널 형상에 대한 성능영향 중 나선형 형상의 원판형 회전자와 평평한 고정자 사이의 수직 간극 크기가 펌프 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 또, 권명근 등⁽²⁰⁾은 원판형

드래그펌프 회전자의 채널 유무에 따른 배기 특성을 실험적으로 연구하였다.

최근 MEMS와 마이크로 가공기술이 발전함에 따라 여러 종류의 마이크로 시스템들이 연구 개발되고 있다. 이 중 미소량의 유체를 제어하기 위한 마이크로 유체기기는 의료, 생물 및 화학 분야 등에서 폭넓게 응용될 수 있다. 마이크로 유체기기의 핵심소자인 마이크로 펌프는 마이크로 시스템 설계기술, 마이크로 가공기술, 마이크로 유체역학 등 다양한 지식과 첨단 기술을 필요로 하는 유체시스템이다. 마이크로 펌프는 운동방식 및 구조와 구동방식에 따라 여러 가지 종류가 있는데, 최근에는 제작 공정이 간단하고 응답성이 빠른 압전형 마이크로 펌프가 많이 연구되고 있다. 정진 등⁽²¹⁾은 압전 구동방식 마이크로 펌프에 대하여 압전효과를 계산하여 디스크의 변위를 계산하는 모델 및 멤브레인의 변위를 직접 모사하여 계산하는 모델을 각각 사용하여 수치해석을 수행하고, 변위 계산모델에 따른 압전 디스크의 거동 및 유동특성을 파악하고자 하였다. 또, 진상문 등⁽²²⁾은 박막이 주기적으로 진동하는 마이크로 펌프의 비정상 유동을 수치해석하여 최적의 순유량을 갖는 유동조건 및 펌프내부의 유동특성을 확인하고자 하였다.

많은 분자들은 수용액에서 양전하나 음전하를 띠고 있는데 이때 외부에서 전기장을 걸어주면 각 이온들은 반대 전하를 띤 전극으로 이동하게 된다. 이러한 원리를 이용한 공학적 응용사례로 Electrokinetic 펌프가 있다. 이 펌프는 펌프 내 움직이는 부분이 없고, 특히 높은 압력을 생산해내는 고유의 장점이 있다. 민정임 등⁽²³⁾은 다공성 매질을 이용한 Electrokinetic 펌프의 유체 유동을 예측하는 해석적 모델을 제시하고자 하였다.

6. 펌프의 성능평가 및 선정프로그램

물의 열역학적 특성을 이용하는 효율 측정방법은 유량의 측정없이 수력효율을 잴 수 있고, 측정의 불확도가 $\pm 1.5\%$ 이내이면서 측정제한조건이 10^{-3} K 단위 온도의 정확한 측정정도라는 점에서 비교적 용이하며 안정적인 측정기법이라 할 수 있다. 이러한 열역학적 측정법은 국제적으로 표준화된 방법으로 절차서가 제정되어 있으며, 이미 선진국에서는 이를 활용한 측정장비가 개발되어 적용이 점차 확대되고 있다. 권영준 등⁽²⁴⁾은 이 측정장비를 국내에 도입하여 실제로

적용한 시험사례를 고찰함으로써 열역학적 효율 측정방법의 보편적 적용성을 확인하고 관련기술의 축적을 도모하고자 하였다.

최근 산업용 펌프 제조업체에서는 고객지원 강화의 일환으로 새로운 마케팅 경향이 생겨나고 있는데, 바로 펌프 모델선정 소프트웨어의 개발 및 이를 활용한 영업이다. 이미 외국의 선도업체들은 이러한 경향을 예견하고 수년 전부터 펌프모델 선정프로그램을 개발하여 영업 및 기술지원에 활용하고 있으며, 대부분의 펌프관련업체들이 이러한 펌프 선정프로그램의 도입을 서두르고 있다. 김진권 등⁽²⁵⁾은 국내 펌프 제조업체와 공동으로 다양한 기능을 가진 펌프선정 소프트웨어를 개발하고 이를 소개하였다.

7. 특이 현상

7.1 이상 유동

펌프의 용도가 확대됨과 더불어 이용되는 유체도 다양한 종류에 이르러 지금은 천연가스·오일 흡인펌프와 하수도용 펌프 등 이상류(two-phase flow) 상태에서 펌프가 운전되는 경우도 드물지 않게 되었다. 뿐만 아니라 단상류 상태에서 운전하는 중 캐비테이션 발생에 의해 이상류 상태가 되는 등 다양한 흡입조건 하에서의 운전도 불가피하게 되었다. 김유택 등⁽²⁶⁾은 스크류식 원심펌프의 기액 이상류에서의 사용 가능성을 검토할 목적으로 임펠러 간극, 펌프 회전속도 및 보이드율을 파라미터로 기액 이상류시의 펌프 성능 실험 및 가시화 실험을 수행하였다. 또한, 김성운 등⁽²⁷⁾은 소형 단단 밀폐형 원심펌프를 대상으로 Lab VIEW를 사용하여 데이터를 수집하고 실험장치를 제어할 수 있는 기액 이상류 성능시험 설비를 구축하고, 회전속도를 변수로 펌프성능실험을 수행하여 재현성, 신뢰성 및 상사치를 확인하고자 하였다.

7.2 흡수정 내 와류 현상

펌프설비를 운영하다보면 캐비테이션, 서징, 수격현상 등 특이현상이 발생할 수 있다. 이 중 캐비테이션 현상은 펌프의 성능을 저하시키고 불안정한 운전을 초래하기 때문에 펌프관련 연구자들은 이에 대한 많은 관심과 대책을 수립하고 있다. 최근 흡수정 내 흡입배관 주위에서 보텍스(vortex)에 의한 물과 공기의 흡

입으로 발생하는 케비테이션 현상에 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 보텍스는 흡입 수면의 자유표면으로부터 주로 발생하는데, 이는 흡입수조의 형태에 따라 크게 좌우된다. 안인수 등⁽²⁸⁾은 기존 펌프장에 대한 흡수정 모형시험 (sump model test) 및 PIV 실험장비를 사용하여 보텍스 발생 여부를 검증하고 적절한 보텍스 방지장치 (anti-vortex device)를 설계함으로써 수도사업장 운영관리의 안정성을 확보코자 하였다. 이 연구는 우리학회 (펌프분과)와 한국수자원공사 (수도시설처)가 공동으로 수행하였다는 점에서 그 의미가 더욱 크며, 향후 연구과제를 통하여 흡수정의 형상 결정을 위한 설계기준을 수립하고자 한다.

7.3 수격 현상

1990년 이전 서울에서는 주로 송수펌프장에서 가장까지 직접 급수함으로써 수격현상이 크게 문제되지 않았으나, 1990년 이후 상수도시설 기본계획은 시민에게 수도물을 안정적으로 공급하기 위하여 대규모의 배수지를 급수지역 내의 높은 곳에 뚝으로써 수격현상에 대한 관심이 고조되었다. 즉, 무단수(無斷水) 급수체계를 구축하기 위하여 정수장에서 생산된 용수를 송수펌프와 송수관로를 통하여 여러 배수지로 공급하게 되었는데, 이에 따라 대규모 장거리 송수관로에서 발생하는 수격현상이 중요한 문제로 대두된 것이다. 김경엽 등^{(29),(30)}은 송수펌프장에서 수격현상에 대한 현장시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교분석함으로써 송수펌프장과 송수관로의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 검토 자료를 제공하고자 하였다. 라병필 등⁽³¹⁾은 자양 취수장에서 일산 정수장까지의 계통에서 현 취수량을 기준으로 현장시험을 실시하고, 이 결과에 의해 최대용량에 따른 안정성을 추정코자 하였다. 특히, 무인으로 운영되고 있는 취수펌프장의 안전설비로 설치되어 있는 압력릴리프밸브와 공기밸브의 역할, 펌프 토출밸브의 폐쇄시간 등을 전산모의해석과 현장실증을 통해 비교·분석함으로써 펌프장과 관로의 안정성을 확보하고자 하였다. 또, 김상균 등⁽³²⁾은 수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 판교가압장이 용수수요가 공급목표에 크게 미치지 못해 도수관로 손실수두가 작아 조절지 유입부의 잔류수두를 이용하기 위해 흡수정 가압방식에서 직결식 펌프장으로 운영되고 있어 이에 따른 수격현상에 대한 수치해석 및 현장시험 결과를 분석하여 직결식 가압장의

안전설비에 대한 재검토의 필요성 등 펌프장 및 도수관로의 안전성을 확보하기 위하여 몇 가지 보완되어야 할 사항들을 제시하고자 하였다.

참고문헌

- (1) 강정식, 김진선, 김진한, 2004, “극저온 펌프 성능시험설비의 개발,” 유체기계저널, 제7권, 제4호, pp. 47~52.
- (2) 이종민, 강신형, 이경훈, 2004, “터보 펌프의 케비테이션 실험,” 유체기계저널, 제7권, 제4호, pp. 16~23.
- (3) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, “현절비가 터보펌프 인두서의 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제4호, pp. 382~388.
- (4) 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, 2004, “끝틈새가 터보펌프 인두서의 성능에 미치는 영향,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 558~563.
- (5) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2004, “보조 인두서가 터보펌프의 흡입성능에 미치는 영향,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 552~557.
- (6) 최범석, 윤의수, 오형우, 2004, “고압 터보펌프용 연료펌프의 수력설계 및 성능 평가,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 341~346.
- (7) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, “터보펌프용 연료펌프의 성능 시험,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 655~659.
- (8) 양홍준, 김선용, 진형석, 우관제, 2004, “고압 터보펌프용 극저온 베어링&실&재료 시험 설비 개발,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 347~351.
- (9) 김동주, 노형운, 서상호, 2004, “점성이 높은 유체를 사용하는 펌프의 성능해석,” 유체기계저널, 제7권, 제2호, pp. 21~26.
- (10) 김동주, 노형운, 서상호, 2004, “뉴턴유체와 비뉴턴유체의 원심펌프 성능특성 비교,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 57~62.
- (11) 박성규, 노고섭, 김윤제, 2004, “운전조건 변화에 따른 소방펌프 성능특성 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 2011~2016.
- (12) 한상규, 강병하, 이봉주, 2004, “펌프 베어링

- 하우징에서 베어링과 오일의 과열 및 오일수명 예측,” 설비공학논문집, 제16권, 제5호, pp. 408~413.
- (13) 김진영, 정경남, 김주백, 양한조, 임신호, 2004, “선박용 주 윤활유 펌프의 성능 개선에 대한 연구,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 660~664.
- (14) 남윤주, 박명관, 2004, “제로터 펌프의 측판 설계,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제4호, pp. 406~414.
- (15) 유일수, 박무룡, 정명균, 2004, “비압축성 재생형 기계에 대한 개선된 운동량 교환 이론 (I),” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제10호, pp. 1238~1246.
- (16) 유일수, 박무룡, 정명균, 2004, “비압축성 재생형 기계에 대한 개선된 운동량 교환 이론 (II),” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제10호, pp. 1247~1254.
- (17) 강신형, 임형수, 류수현, 심창열, 2004, “소형 재생펌프의 3차원 성능 해석에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제12호, pp. 1600~1607.
- (18) 심우건, 임종연, 2004, “진공 펌프 성능 평가 계통의 동적 응답,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제11호, pp. 1359~1367.
- (19) 권명근, 황영규, 2004, “원판형 드래그펌프 회전자와 고정자 사이의 간극이 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제12호, pp. 1501~1510.
- (20) 권명근, 이수용, 황영규, 2004, “원판형 드래그펌프 회전자의 채널이 성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1703~1708.
- (21) 정진, 김동희, 김창녕, 2004, “수치 모델에 따른 압전 구동방식 마이크로 펌프의 유동특성에 관한 연구,” 설비공학논문집, 제16권, 제8호, pp. 707~713.
- (22) 진상문, 허남건, 2004, “무밸브 마이크로 펌프의 유동 특성에 관한 수치해석,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 748~753.
- (23) 민정업, 김성진, 김덕중, 2004, “EK Pumps 내의 유동 해석에 관한 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1857~1862.
- (24) 권영준, 서창덕, 정용채, 박장원, 2004, “열역학법에 의한 펌프의 수력효율측정,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 546~551.
- (25) 김진권, 전상규, 2004, “점도보정을 고려한 펌프선정 프로그램 개발,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 189~192.
- (26) 김유택, 남창도, 강호근, 이영호, 2004, “공기 유입시의 터보펌프 특성,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 43~48.
- (27) 김성운, 이상일, 김유택, 김성동, 이용선, 이영호, 2004, “단단 밀폐형 원심펌프의 기액이상류 성능시험 설비,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 49~53.
- (28) 안인수, 김성호, 김경업, 노형운, 이영호, 2004, “수리모형실험을 통한 펌프 흡입배관부 보텍스 현상 저감방안,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 193~198.
- (29) 김경업, 김점배, 2004, “원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상,” 유체기계저널, 제7권, 제1호, pp. 51~57.
- (30) 김경업, 김점배, 2004, “볼밸브를 사용한 송수 펌프장에서의 수격현상,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1697~1702.
- (31) 라병필, 김진만, 박종호, 김경업, 2004, “과도 수리현상 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 199~207.
- (32) 김상균, 이계복, 김경업, 2004, “직결식 펌프의 수격현상,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 208~216.