

## 펌프 분야 연구동향

김 경 업\*

### 1. 서 론

펌프는 인류 역사상 가장 오래된 기계류 중의 하나이다. 그 역사는 고대 이집트 시대까지 거슬러 올라가는데, 아르키메데스의 스크류 펌프는 BC1000년경에 개발되었다. 왕복펌프는 로마 시대에 출현하였으며, 인력이나 동물의 힘 또는 풍·수력 등을 이용하여 수세기 동안 광범위하게 사용되었다. 이후 증기동력의 출현으로 기계적인 효율은 크게 향상되었고, 원심펌프의 개발로 훨씬 많은 유량과 매우 큰 동력을 다룰 수 있게 되었다. 곧, 원심펌프가 여러 응용분야에서 왕복펌프를 대체하였고, 현재 금액 기준으로는 세계 펌프시장의 절반 정도를 차지하게 되었다. 오늘날 펌프는 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있으며, 그 종류 또한 매우 다양하다. 펌프 시장은 그 용도에 따라 건축설비용, 농공업용, 상하수도용, 제지용, 식음료용, 석유화학용, 발전소용 등으로 분류할 수 있으며, 펌프 구조도 각각의 응용분야에 적합하도록 설계되고 있다.

한편, 참여정부가 출범한 2003년 한해 동안 펌프와 관련된 연구가 국내에서는 활발히 진행되었으며, 주옥 같은 많은 연구결과들이 학회의 논문집이나 각종 학술 발표회를 통해 발표되었다. 본 논문에서는 2003년 국내 펌프분야의 연구동향을 살펴보기 위하여 유체기계 저널 및 유체기계연구개발발표회 논문집, 대한기계학회 논문집, 설비공학논문집 및 하계·동계학술발표대회 논문집을 대상으로 하였는데, 총 21편 중 유체기계공업학회에서 14편, 대한기계학회 2편, 대한설비공학회 5편이 게재된 것으로 조사되었다. 여기서 펌프분야의 논문들은 내용별로 분류하고, 그 연구동향을 분석하였는데, 최근 차세대 성장동력원으로서 각광받고 있는 마이크로 펌프를 본 논문의 펌프분야 연구대상에 새롭게 포함시켰다.

### 2. 터보 펌프

액체로켓에서는 연료와 산화제를 연소실에 공급하기 위하여 터보펌프를 사용한다. 특별히 경량화 및 고압정과 고유량을 요구하는 액체로켓의 펌프 시스템에서는 주 임펠러 전방에 인듀서를 장착하여 정압을 상승시켜 캐비테이션 현상을 줄이며 더불어 임펠러의 성능을 최대화하게 된다. 따라서 액체로켓에 사용되는 터보펌프의 성능을 증가시키기 위한 노력의 일환으로 인듀서의 캐비테이션 억제와 인듀서 유동장 특성에 관한 연구는 현재까지 계속되어 오고 있다. 홍순삼 등<sup>(1)</sup>은 새로 설계된 인듀서의 성능 및 유동 특성을 살펴보기 위하여 인듀서 출구에서의 유동장을 3공 프로브를 이용하여 측정하였다. 측정된 유동 데이터는 인듀서의 1차원 설계 모델 및 3차원 유동해석의 검증에 이용되고 따라서 궁극적으로는 보다 효율적인 인듀서 설계에 이용될 것으로 기대하고 있다. 또한, 홍순삼 등<sup>(2)</sup>은 터보펌프 인듀서에서 발생하는 회전 캐비테이션, 캐비테이션 서지 등의 비정상 캐비테이션에 대하여 고찰하였고, 인듀서 날개각이 인듀서의 캐비테이션 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

터보펌프설계에서 인듀서와 임펠러의 상호작용을 고려하는 것은 매우 중요하다. 인듀서를 임펠러 앞에 장착함으로써 흡입성능은 개선되지만 인듀서의 효율이 임펠러의 효율에 비하여 상대적으로 낮으므로 전체 펌프의 효율은 떨어지게 된다. 또한 인듀서 출구 블레이드 각에 의하여 임펠러 입구에 예선회가 존재하므로 효율 최적화를 위해서는 임펠러의 입구각을 적절히 설계하여야 한다. 이에 따라 최창호 등<sup>(3)</sup>은 인듀서/임펠러 상호작용에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

한국항공우주연구원에서는 우리나라의 액체로켓 개발계획에 따라 지난 수년 간 터보펌프의 개발연구를 수행하였으며, 2002년부터는 극저온 유체를 사용한 터보펌프 성능시험설비의 확보계획을 가지고 시험설비를

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

설계하고 제작해 왔다. 강정식 등<sup>(4)</sup>은 이 극저온 터보펌프 성능시험설비의 설계과정과 시험기의 사양 및 특징 그리고 앞으로의 계획 등을 소개하였는데, 극저온 유체를 사용한 터보펌프의 연구는 우리나라에서는 처음이므로 안정적이면서도 실질적인 액체 산소와 성질이 가까운 액체 질소를 사용하여 연구를 수행할 계획이다. 첫 번째 단계로 액체 질소를 사용한 극저온 시험기를 설계·구축하고, 다음 단계에서는 이 실험설비를 이용하여 개발하는 터보펌프의 극저온 성능 및 캐비테이션 성능을 연구하는 것을 목표로 극저온 터보펌프 성능시험기를 개발해 왔으며, 현재 설계를 마치고 시험기 설치공사를 마무리하고 있는 중이다.

이러한 터보펌프는 단위 중량당 에너지 발생효율이 높게 설계되어야 하며, 저 점도 액체연료의 사용에 따른 -190℃ 이하의 극저온 환경특성에서도 작동이 가능하여야 한다. 이관호 등<sup>(5)</sup>은 러시아와의 공동연구에 사용되었던 산화제 펌프와 연료 펌프 그리고 터빈에 대한 대체 가능한 소재들의 물성치 및 특성에 대해서 비교·분석하였다.

장거리 로켓의 액체 추진 모터에서는 액화된 연료와 산화제를 고압으로 분사하여 연소시키는 터보펌프가 핵심부품 중의 하나이다. 터보펌프는 고속회전으로 입구 압력이 감소하기 때문에 캐비테이션이 발생하기 쉽다. 펌프에서 캐비테이션 현상이 발생하면 펌프의 성능이 급속히 저하되고 소음이 발생하며 비정상 진동이 발생한다. 캐비테이션에 따른 이러한 성능 저하를 막기 위한 장치로 펌프의 입구에 인듀서를 설치한다. 강신형 등<sup>(6)</sup>은 기존 연구용 인듀서 모델을 이용하여 인듀서의 기본적인 성능과 입출구의 유동장 그리고, 캐비테이션 특성을 연구하였다. 또한, 이종민 등<sup>(7)</sup>은 현대모비스에서 설계한 연료펌프에 대해 수력 성능과 흡입 성능 실험을 수행하였으며, 캐비테이션이 있을 때와 없을 때 인듀서의 정압분포에 관해 살펴보았다.

### 3. 원심 및 사류 펌프

#### 3.1 원심 펌프

터보펌프에 있어서 무엇보다도 해결하여야 할 과제의 하나는 정상 토출량을 넘는 공기량의 펌프내의 유입에 의한 유로폐쇄와 양수불능의 미케니즘을 들 수 있다. 스크류식 원심펌프는 넓은 유로를 갖고 있기 때문에 일반적인 원심펌프에 비해 유로폐쇄를 관찰하기

쉽다. 김유택<sup>(8)</sup>은 공기흡입에 의한 양수불능의 미케니즘을 명확히 하기 위하여 스크류식 원심펌프에 있어서 유로폐쇄 발생시의 펌프흡입압력, 토출압력, 액상유량, 축토크, 펌프회전수 등의 펌프특성을 측정하고, 단상류 및 보이드율의 변화에 따른 펌프 특성과 비교하였다. 또한, 그 때의 펌프 내부의 가시화 실험과 비교하여 유로폐쇄, 양수불능 및 운전회복시의 특성을 조사하였다.

산업현장에서 펌프로 양수하는 액체는 흙탕물, 오수, 폐수, 펄프 등과 같이 고점성 유체가 많지만 현실적인 문제로 인하여 펌프성능시험은 청수를 사용한다. 고점성 유체의 펌프성능시험은 작동유체의 종류에 관계없이 청수로 시험한 뒤 HI 규격상의 수정방법으로 환산하여 고점성 유체에 대한 펌프성능특성을 파악하고 있다. 그러나 적용된 유체마다 펌프성능특성이 달라지므로 정확히 규격을 적용하기에는 무리가 있다. 이에 따라 노형운 등<sup>(9)</sup>은 점성이 다른 세가지 유체 즉, 물과 설탕물 그리고 글리세린에 대하여 성능실험을 수행하여 고점성 유체를 이송하는 원심펌프의 성능특성 변화를 연구하였다.

한편, 수중모터펌프의 유지 보수를 위해서는 펌프를 수시로 인양할 필요가 있으므로 배관과 펌프의 탈착이 쉽도록 자동탈착장치(automatic discharge connector)가 일반적으로 사용되고 있다. 수중에 장착된 자동탈착장치는 펌프의 운전에 따른 압력상승 및 운동량의 변화에 의하여 결합부에 틈새가 발생할 수 있으며, 이러한 틈새를 통하여 누수가 발생하게 된다. 누수에 의한 유량손실은 전체 펌핑 시스템에 손실을 유발하게 되고 결국 에너지 낭비로 이어지게 되므로 이에 대한 손실을 최소로 하는 자동탈착장치의 개발은 에너지 절약 관점에서 매우 중요하다. 최영석 등<sup>(10)</sup>은 틈새로 인한 누수가 펌핑 시스템에 어떤 영향을 미치는지를 이론적으로 규명하고, 자동탈착장치의 구조 개선을 통한 새로운 모델을 제작 시험하여 성능 개선에 관한 연구를 수행하였다.

#### 3.2 사류 펌프

펌프의 토출유동에 의한 반작용을 추진력으로 이용하는 워터제트(waterjet) 추진 선박의 경우, 기존의 프로펠러 형식보다 가속능력, 조향 및 제동성능이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 또한 워터제트 추진시스템은 회전수가 동일하다면 선속에 관계없이 거의 일정한 동력을 흡수하기 때문에 과부하가 감소되어 평균 기계수

명이 상대적으로 길다. 이러한 이유로 최근에 선박용 추진장치로서 워터제트 시스템의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 워터제트 추진용 펌프의 형식은 대개 사류형의 무차원 비속도 영역에 속한다. 윤의수 등<sup>(11)</sup>은 기존의 터보기계 성능예측 및 최적설계기법을 바탕으로 워터제트 추진시스템에 적합한 사류형 펌프에 대한 최적설계 및 성능해석을 수행하였다. 이러한 일련의 기본설계 및 상세설계를 통하여 모델펌프를 설계하고, 이의 제작·성능시험 과정을 반복하여 목표성능을 만족하는 워터제트 추진용 사류펌프를 개발하였다.

## 4. 응적형 및 특수 펌프

### 4.1 응적형 펌프

자동차 동력기관 중 가장 핵심적인 장치인 엔진은 운전시 온도가 폭발행정의 순간적 최고값으로 약 2000 °C 까지 올라가며 평균적으로 약 800 °C 정도를 유지한다. 따라서 실린더의 벽과 피스톤의 접동면, 크랭크축 베어링, 캠축 베어링 등에는 끊임없이 윤활유를 공급하는 것이 매우 중요하다. 이러한 윤활유의 연속적인 공급을 위하여 다양한 오일펌프가 사용되고 있으며, 이 중 제로터(gerotor)형 오일펌프는 간단한 형상과 설치공간의 효율성 및 정량적인 유량제어의 용이함 등의 이유로 널리 사용되고 있다. 원찬식 등<sup>(12)</sup>은 수치해석 상의 문제점 및 여러 가지 해석 인자들의 영향 등을 고려하여 제로터형 오일펌프 내의 유동해석을 수행하였다.

### 4.2 특수 펌프

작은 유량에서 큰 양정을 낼 수 있는 재생펌프(regenerative pump)는 고압을 필요로 하는 자동차 연료공급 장치의 연료펌프 및 가정용수용 펌프로 널리 사용되고 있다. 그러나 재생펌프는 유체의 마찰에 의한 압력변화로 양정을 상승시키는 원리에 의해 발생하는 마찰손실과 유체가 임펠러와 수로 사이에서 순환유동을 하면서 발생하는 난류의 영향으로 효율이 매우 낮다. 최영석 등<sup>(13)</sup>은 사이드 채널형 재생펌프의 성능에 영향을 미치는 형상요소들과 손실계수들을 파악하고, 변수 변화에 따른 펌프의 성능예측을 실행하여 실험값과 비교하여 타당성을 검토하였으며, 성능예측결과로서 펌프 설계의 방향을 제시하고자 하였다.

심창열 등<sup>(14)</sup>은 다양한 자료를 확보하기 위하여 재

생펌프의 내부 유동을 수치해석하였다. 그러나 누설유동을 고려하지 않은 상태에서 해석을 하였기에 그 성능이 실험값과 차이가 났으며, 펌판과 로터 사이의 누설유동에 대한 수치해석을 별도로 수행하여 누설량을 예측하는 새로운 경험식을 제시하였다. 또 계산된 3차원 유동 데이터를 활용하여 1차원 분석을 수행하여 운동량 전달과 재순환 유동에 대하여 검토하였다. 임형수 등<sup>(15)</sup>은 선행되어진 연구를 바탕으로 재생펌프의 성능에 영향을 주는 요인을 크게 주요인파 부요인으로 분류하였다. 주요인은 날개 혹은 임펠러 형상에 의한 요인으로, 부요인은 간극, 입·출구의 수력손실에 의한 요인으로 분류하였다. 연구에서는 현재 상용되는 재생펌프에 있어서 주요인, 부요인의 성능에 대한 영향을 알아보고자 현재 사용되고 있는 자동차 재생펌프 임펠러를 3가지 다른 형상으로 제작하여 성능실험을 수행하였다. 그리고 각각의 요인이 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

## 5. 마이크로 펌프

최근 미세제작(micro-fabrication) 기술공정의 발전에 힘입어 미소기계(micromachine)들이 점차 실용화되고 있으며, 여기에는 압력, 온도, 속도, 등의 물리량 측정장치, 선형-비선형 움직임을 만드는 액츄에이터, 의학적 기구 등이 있다. 이와 더불어 미소기계의 성능향상을 위한 유동특성의 해석과 설계에 관한 연구가 요구되어지고 있다. 현재 개발되고 있는 다양한 미소 응용장치들은 유체를 이송해주는 펌프가 필요하며, 따라서 마이크로 펌프에 대한 연구들이 널리 이루어지고 있다. 미소기계에서는 표면-부피비가 매우 커지므로 표면에서의 효과가 상대적으로 더 중요해진다. 또한, 저레이놀즈수의 효과로 인해 점성력이 관성력에 비하여 상대적으로 크게 작용한다. 이는 기존 고레이놀즈수에서 사용되던 관성력을 이용하는 펌프들의 구동효과가 작아지게 됨을 의미하며, 이를 해결하기 위해 연구자들마다 다양한 구동방식의 펌프를 제안, 개발하고 있다. 이 중 점성구동 펌프는 다른 방식의 마이크로 펌프에 비해 상대적으로 구조가 간단하며 혈장과 같이 손상을 피해야 하는 유체를 이송시킬 수 있다. 또한, 정상상태 연속유동을 만들어 낼 수 있는 특징을 갖고 있다. 그러나 매우 제한된 압력부하에서만 유량이 발생되며 효율도 상당히 낮은 결점을 가지고 있다. 이에 따라 맹주성 등<sup>(16)</sup>은 성능향상을 위하여 한 쌍의 회전 실린더를 가지는 펌프를 제안했으며, 수치해석을 통해

기존의 펌프와 성능을 비교하였다.

마이크로 펌프는 마이크로 플루이딕 시스템에서 소량의 유량을 조절해야 하므로, 마이크로 펌프의 펌프 유량을 정확히 알아내는 것이 매우 중요하다. 그러나 마이크로 펌프는 보통 가장 작은 채널(channel)의 크기가 수십  $\mu\text{m}$  정도이며, 진동수로 수십  $\text{Hz}$ ~수백  $\text{Hz}$ 를 사용하기 때문에 그 크기와 진동 주기의 크기가 매우 작아 실험적 관찰을 통하여 유동현상을 관찰하는데 적지 않은 어려운 점이 있다. 이에 따라 김동희 등<sup>(17)</sup>은 마이크로 펌프의 3차원 유체역학적 수치해석을 통하여 유체의 순유량을 구하고, 실험값과 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하고 박막(membrane)의 변위과형과 주파수에 따른 펌프 유량의 변화를 연구하였다. 또한, 정진 등<sup>(18)</sup>은 디퓨저/노즐을 이용한 압전구동방식 마이크로 펌프에 대하여 수치해석을 수행하고, 주파수 변화에 따른 유동특성을 파악하고자 하였다. 압전 세라믹의 압전효과를 이용하여 구동하는 방식은 다른 구동 방식에 비해 변위가 크고 큰 힘을 낼 수 있으며 구조가 간단하다는 장점을 갖고 있어 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다. 한동석 등<sup>(19)</sup>은 다양한 디퓨저의 형태에 따른 유량 변화를 알아보고, 마이크로 펌프의 디자인을 변화시켰을 때 성능특성 연구를 수치해석을 통하여 수행하였다.

## 6. 펌핑 시스템 및 수격 현상

### 6.1 펌핑 시스템

최근 이라크 전쟁 등으로 인해 급격하게 유가가 상승하여 국가적으로 에너지 수급체계의 적신호가 나타나고 있다. 이로 인하여 에너지 다소비 업종과 유화업종의 국제경쟁력 약화 및 수익성 저하가 크게 문제시되고 있다. 이에 따라 각 산업체에서는 에너지 절약을 기업생존의 한 전략으로 지정할 만큼 부단한 노력을 기울이고 있다. ESCO(Energy Service Company) 제도는 1992년 국내에 최초로 도입되어, 최근 2~3년 동안 사업규모 및 등록업체수 면에서 활발한 활동을 벌이고 있다. 이호준 등<sup>(20)</sup>은 펌프 에너지를 절약할 수 있는 방법의 일환으로 수요처의 조건을 검토한 후 펌프의 임펠러 직경을 커팅함으로써 얼마만큼의 에너지를 절감할 수 있는지에 대해서 실제 사례를 통해 설명하고 있다. 시스템 진단은 울산 소재 Y 화학공장의 PTA 공정 PAC 냉각수용 펌프를 그 연구대상으로 하였다.

### 6.2 수격 현상

대형 선박의 경우 배관 계통이 복잡하고 여러 가지 방식으로 운영되므로 통상의 수격작용과는 다른 요인에 의한 사고가 빈번히 발생하고 있다. 그러나 실제 현장에서 발생하는 사고의 유형은 아직까지 체계적으로 정리되어 있지 않으며, 각 조선소나 선사별로 사고 원인의 분석 및 내부 교육자료로서 활용되고 있는 실정이다. 김정진 등<sup>(21)</sup>은 실제 조선소의 건조선박에서 발생하였던 수격현상에 의한 사고들 중 펌프 배관계통 사고를 현장 측면에서 분석하고, 이를 방지할 수 있는 방안을 운전방법의 측면과 설계개선의 측면에서 고찰하였다. 그 결과 대형 선박 펌프계통에서의 수격사고의 가장 큰 원인은 관내 부압이 형성되었거나, 펌프 토출밸브를 빨리 열었을 경우로 조사되었다.

### 참고문헌

- (1) 홍순삼, 구현철, 차봉준, 김진한, 2003, "터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성," 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 38~44.
- (2) 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, 2003, "터보펌프 인듀서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 333~339.
- (3) 최창호, 김진한, 2003, "액체로켓용 터보펌프 인듀서/임펠러 상호작용에 대한 연구," 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 50~57.
- (4) 강정식, 김진선, 김진한, 2003, "극저온 터보펌프 성능시험설비의 개발," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 340~345.
- (5) 이관호, 전성민, 김진한, 2003, "터보펌프 소재의 기계적 물성치 검토에 관한 연구," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 346~352.
- (6) 강신형, 염기태, 2003, "터보 펌프 인듀서의 성능 및 유동실험," 유체기계저널, 제6권, 제1호, pp. 6~13.
- (7) 이종민, 강신형, 이경훈, 2003, "터보 펌프의 캐비테이션 실험," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 353~360.
- (8) 김유택, 2003, "공기흡입에 의한 스크류식 원심펌프의 양수불능 특성에 관한 연구," 유체기계저널, 제6권, 제3호, pp. 58~63.
- (9) 노형운, 서상호, 김동주, 2003, "고점성용 펌프의 성능해석," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 367~370.

- (10) 최영석, 이경용, 이창한, 이종훈, 2003, “수중펌프의 Leakage-free 자동탈착장치 개발”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 23~28.
- (11) 윤의수, 오형우, 안종우, 2003, “위터제트 선박추진용 사류펌프의 설계 및 성능해석”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 41~46.
- (12) 원찬식, 허남건, 권성호, 2003, “자동차용 제로터형 오일 펌프의 유동 해석”, 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 7~13.
- (13) 최영석, 이경용, 강신형, 2003, “사이드채널형 연료 펌프의 성능예측”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 29~33.
- (14) 심창열, 강신형, 2003, “재생펌프의 유동해석 및 누설유동에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제8호, pp. 1015~1022.
- (15) 임형수, 강신형, 2003, “재생펌프의 성능 특성에 관한 실험적 연구”, 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 361~366.
- (16) 맹주성, 최형일, 조성찬, 2003, “한 쌍의 실린더를 가지는 점성구동 마이크로 펌프의 성능 해석”, 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제9호, pp. 1256~1261.
- (17) 김동희, 김창녕, 2003, “디퓨저/노즐 마이크로 펌프 내에서의 유동에 대한 수치해석적 연구”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 427~432.
- (18) 정진, 김동희, 김창녕, 2003, “압전소자를 이용한 마이크로 펌프의 유동특성에 관한 수치해석적 연구”, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 357~362.
- (19) 한동석, 정시영, 김동환, 원찬식, 윤석진, 2003, “디퓨저를 이용한 마이크로 펌프의 CFD 해석”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 445~450.
- (20) 이호준, 양판석, 오시덕, 서기명, 2003, “시스템 해석을 통한 펌프 에너지 절감에 관한 사례연구”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 526~531.
- (21) 김정진, 최민선, 조대환, 2003, “선박 배관계에서의 수격현상에 관한 연구”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 470~475.