

# 사판식 액셜피스톤 수압 펌프 개발과 응용

## Development and Applications of swash plate type axial piston water hydraulic pump

함영복 · 안병철

Young Bog Ham and Byeung Cheol An

### 1. 서 론

수압펌프는 물의 수송 등의 이유로 오래전부터 일상 속에서 사용되어져 왔다. 기원전 200년경 그리스에서 공압의 아버지라 불리는 Ctesibius는 물시계 및 물 오르간(organ)에 수압(water hydraulic)을 이용하였다. 물을 작동유체로 하는 수압은 친환경적이며 인체에 무해하고, 간편하게 구할 수 있으며 관리, 재처리 역시 쉽다는 장점으로 인해 긴 역사속에서 사용되어져 왔다.

하지만 1906년 최초의 유압시스템이 Janney에 의해 개발되면서 산업분야 전반적인 부분에서 유압시스템으로 대체되었다. 하지만 최근 석유는 고갈 위험으로 인해 높은 비용이 들고, 환경오염을 유발하며, 후처리 과정 역시 높은 비용이 필요하기 때문에 수압이 재조명 받고 있다. 유압 펌프가 수압 펌프로 대체된다면 환경오염으로부터 안전하고 석유 자원의 절약, 폭발 위험성 저감, 청결성 등의 장점을 지니게 된다.

같은 원리와 구조로 작동하지만 유압펌프를 수압펌프로 대체하기 위해서는 작동유체의 물리적, 화학적 특성을 고려하여야 한다. 물은 기름에 비해 점도가 낮고, 윤활 성능이 부족하며, 증기압이 높고, 부식의 위험이 높다. 이로 인해 수압펌프의 각 부품은 점도와 윤활 조건의 검토가 필요하고, 상대운동이 발생하는 부분의 재질선정이 필수적이다. 이러한 기술은 최근까지 연구되어져 왔으며, 이를 통해 상당한 경우 유압시스템을 수압시스템으로 대체가 가능하게 되었다.

현재, 그리고 가까운 미래에는 단순한 유압펌프를 수압펌프로 대체하는 것이 아닌 수압펌프만이 적용되어야 하는 시스템을 위한 연구개발이 있을 것이다. 예를 들어 인체에 무해하고 청결성이 필요한 식품가공, 약품제조, 핵 발전 산업설비 등의 분야에는 유압시스템보다 수압시스템이 적합하다. 또한 담수화 플랜트와 같이 해수를 작동유체로 사용할 경우

에도 역시 수압펌프를 사용할 필요가 있다.

수압펌프의 역사는 유압펌프보다 길지만 성능면에서 유압펌프가 우수하기 때문에 유압펌프를 사용해왔다. 하지만 환경오염, 석유고갈 위험 등의 문제로 인해 다시 유압펌프를 수압펌프로 대체하고자 하는 노력이 있어왔다. 이러한 환경에서 국내에서도 수압펌프가 성공적으로 개발되었다. 그리고 현재와 가까운 미래에는 단순한 유압펌프를 대체하는 것이 아닌 수압펌프만이 사용가능한 시스템에 적용하는 것을 목표로 수압펌프가 연구개발 될 것이다.

### 2. 해외의 수압 피스톤 펌프

재료 기술과 트라이볼로지 기술의 발전으로 이미 많은 유압펌프가 필요에 따라 수압펌프로 대체되어 사용중이다. 특히 트라이볼로지 기술의 발전으로 인해 수윤활 하에서도 오일윤활과 유사하게 습동성을 갖도록 할 수 있게 되었다. Karl-Erik Rydberg는 수압펌프의 에너지 효율을 검토하였고<sup>1)</sup>, Xiongying Wang은 탄성체 피스톤을 이용한 누설 감소 메커니즘을 제안하였다<sup>2)</sup>. Tang Qunguo는 재료실험을 통해 PEEK 소재의 적합성을 확인하였다<sup>3)</sup>. 이러한 연구들을 토대로, 덴마크의 Danfoss, 일본의 Ebara 종합기술연구소 등은 이미 수압동력발생 펌프를 시판하고 있다.

수압펌프만의 독자적인 개발도 이루어졌는데, 대표적인 예가 잠수정용 해수압 펌프이다. 해수압 펌프는 해수 중에서 직접 작동유체를 공급받아 사용하고, 다시 토출하는 방식으로 사용된다.

### 3. 국내 수압 펌프의 개발

앞서 언급하였듯이, 수압펌프는 물의 물리적, 화학적 특성을 고려하여야 한다. 물은 기름에 비해 점도가 낮고, 윤활 성능이 떨어지며, 증기압이 높고, 부식의 위험이 높다. 해외 수압 선진국에서는 수십

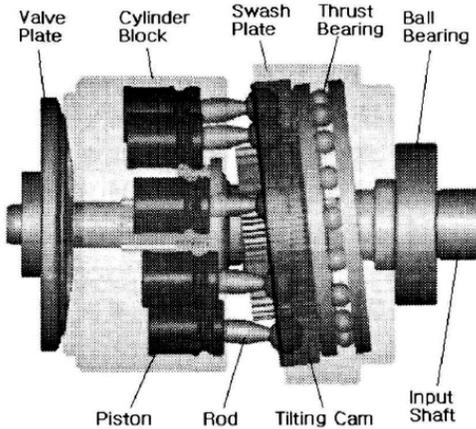


Fig. 1 Construction of swash plate type axial piston water hydraulic pump

년 전부터 수압 펌프가 개발되었고, 이 수압 펌프를 국산화 하기위한 노력이 있었다. 이러한 환경에서 2005년 한국기계연구원에서 사판 가변식 수압 피스톤 펌프가 개발<sup>4)</sup>되었다.

사판 가변식 수압 피스톤 펌프는 정유압식 변속기(hydrostatic transmission), 건설기계등과 같은 고압이 필요한 분야에서 주로 사용하는 대표적인 펌프이다. 이러한 펌프를 개발하기 위해선 크게 두 과정이 필요하다. 첫 번째는 저마찰/저누설로 구동되는 펌핑기구를 설계가 필요하고, 두 번째는 내부식성/내마모성의 소재를 선정하고 필요한 부분에 적용하는 것이다. Fig. 1은 개발된 사판 가변식 수압펌프의 구조이다.

### 3.1 수압펌프의 펌핑기구 설계

물은 기름에 비해 윤활성이 낮기 때문에 수압펌프는 유압펌프에 비해 마찰/마모가 더 크게 발생한다. 또한 물의 점도 역시 기름보다 낮기 때문에 체적효율을 높이기 위해서는 더 좁은 간극이 요구된다. 더 적은 간극은 더 큰 마찰을 발생시키기 때문에, 수압펌프는 마찰/마모에 대한 해결책이 필요하다.

피스톤 펌프에서 마찰이 발생하는 부분은 실린더 블록 내의 상대적 왕복운동이 발생하는 플런저형 피스톤이다. 마찰/마모는 피스톤의 끝단에 작용하는 축력이 원인이며, 이를 감소시키기 위한 피스톤 구조의 설계가 필요하다. 이러한 이유로 우리는 피스톤의 양 끝단을 구면으로 제작하여 볼-소켓 조인트형 피스톤 로드를 사용하였다. 이는 피스톤이 왕복운동을 할 때 축력을 받아도 구면 조인트가 축력을 어느정도 상쇄시켜 모서리 부분에 하중이 집중되는 것을 막을 수 있다.

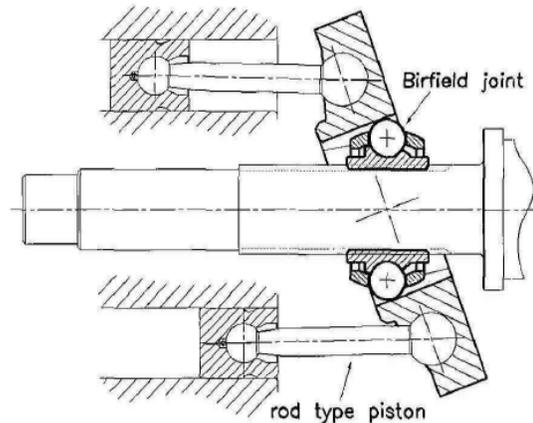


Fig. 2 Birfield joint for low friction/leakage water pumping mechanism

이와 같은 피스톤 로드를 구동하기 위해서 펌프의 입력축과 경사캠 사이에는 등속 조인트가 필요하다. 입력축이 구동하면서 경사캠을 회전시키고, 이를 통해 왕복운동이 발생하기 때문이다. 등속조인트로서, Birfield 조인트가 적용되었다.

수압 펌프의 피스톤에서 상대 미끄럼 운동이 발생하는 부분의 윤활 특성을 개선을 위하여 피스톤이 왕복운동할시 축력을 저감시킬 수 있는 저마찰/저누설 로드형 피스톤 기구를 적용하였다. 그리고 이를 구동하는 등속 조인트 기구인 Birfield Joint가 적용되었다. Fig. 2는 최종적으로 구성된 Birfield Joint와 끝단이 구형인 로드형 피스톤을 보여준다.

### 3.2 내부식성, 내마모성 소재의 선정

수압 펌프는 그 특성상 작동유체로 물을 사용하여야 하기 때문에 물로 인한 재료의 산화를 억제하여야 한다. 기름은 극성이 매우 낮아 이온화가 진행되지 않기 때문에 임의의 재료와 사용하여도 산화작용이 발생하지 않지만, 물은 극성이 존재하며 물속 전해질이 재료의 전자를 이동시키기 때문에 산화작용이 발생한다. 이러한 산화작용을 막기 위해 전체적인 재료를 스테인리스 스틸과 같은 내부식성 재료를 사용하여야 한다. 하지만 스테인리스 스틸은 마찰로 인한 마모가 심각하기 때문에 펌프의 내구성에 큰 영향을 준다. 따라서 피스톤과 실린더, 밸브 플레이트 접동부 그리고 피스톤 로드 구면부와 같이 상대운동으로 인한 마찰력이 크게 발생하게 되는 부분은 다른 재질을 사용하여야 한다.

앞서 서론에서 언급한 Tang Qunguo의 재료 선정 실험을 기반으로, 상대 미끄럼 운동부에는 엔지니어링 플라스틱이 적합하며, 그 중 가장 우수한 성능을

Table 1 Material properties of PEEK

Item	Value
Density [g/Cm]	1.42
Tensile strength [MPa]	1.24
Tensile elasticity modulus [MPa]	5900
Melting point [°C]	340
Water absorption [%]	0.3

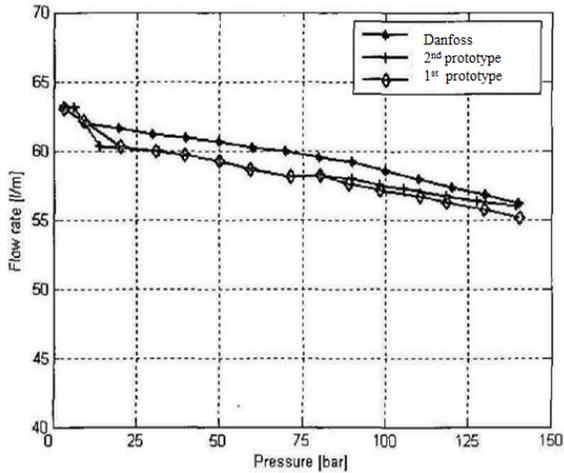


Fig. 3 The P-Q characteristic graph for each water hydraulic pump

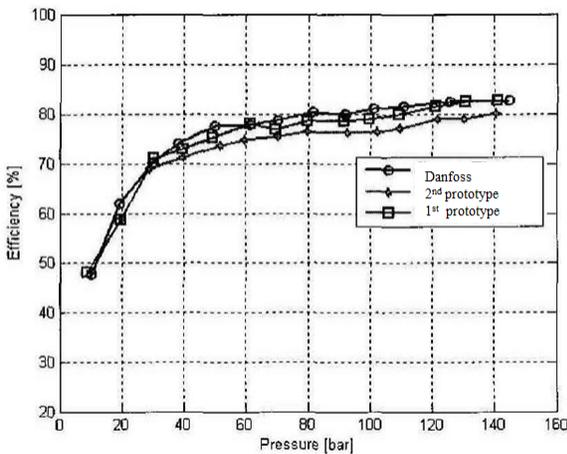


Fig. 4 The total efficiency graph for each water hydraulic pump

나타내는 PEEK소재를 채택하였다. PEEK 소재의 특성은 Table 1과 같다. 높은 밀도와 가격 등으로 인해, 스테인리스 스틸과 PEEK소재를 표면에 코팅하는 방식으로 적용하였다. 산화작용과 마모는 소재의 표면이 중요한 것이기 때문에 코팅만으로도 전체 소재를 사용하는 것과 같은 효과를 볼 수 있다.

### 3.3 수압 피스톤 펌프의 성능실험

성능시험을 위해 압력에 따른 펌프의 유량 변화를 측정하여 P-Q 특성을 확인하였다. 또한 앞서 언급한 수압펌프로 유명한 Danfoss사의 펌프와 이를 비교하였다. Fig. 3은 Danfoss사의 펌프와 한국기계연구원에서 개발된 1차시작품, 2차시작품 펌프의 P-Q특성을 그래프로 나타낸 것이다. 비록 Danfoss사의 펌프에 비해 성능이 조금 부족하지만 크게 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

또한 펌프의 전효율을 구하기 위해 토크, 회전수, 압력, 유량을 측정하였다. 펌프의 동력과 펌프의 축마력을 이용하여 구하는 펌프의 전효율은 아래의 식과 같다.

$$\eta = \frac{L_p}{L_s} \times 100\% \quad (1)$$

Fig. 4는 이를 통해 얻은 Danfoss사의 펌프와 한국기계연구원에서 개발된 펌프의 전효율을 보여준다. 전효율 역시 P-Q그래프와 마찬가지로 Danfoss사의 수압펌프가 가장 뛰어난 성능을 나타내지만 한국기계연구원에서 개발된 펌프 역시 비슷한 수준의 성능을 보여준다.

본 실험을 통해 우리는 수압펌프를 개발할 기술을 얻게 되었고, 실제 상용화 가능한 수압 펌프를 제작할 수 있었다. 수압 펌프만이 아닌 수압시스템 전체를 개발할 수 있는 가능성을 확인하였다.

## 4. 수압 펌프의 응용

유압 펌프를 수압 펌프로 대체하는 연구는 성공적으로 이루어졌다. 앞서 언급하였듯이 사판 가변식 피스톤 펌프는 동력전달이 필요한 정유압식 변속기, 건설기계등과 같은 고압이 필요한 분야에서 주로 사용하는 대표적인 펌프이며, 이를 수압 펌프로 대체할 수 있다.

이 사판식 액셀 피스톤 수압 펌프는 역삼투식 해수담수화 플랜트의 동력회수장치에 사용되었다.<sup>5)</sup> Fig. 5와 6은 각각 역삼투식 해수담수화 장치와 그곳에 사용된 정수압방식의 동력회수장치의 개요도이다. Fig. 5와 같이 역삼투식 해수담수화 장치에서 담수화되지 않은 농축된 해수는 그대로 토출되었다. 이 농축된 해수의 위치에너지를 이용하여 정수압방식으로 사판 액셀 피스톤 수압 모터를 회전시켜 에너지를 재활용 하는 방식이다. 이곳에 사용되는 정

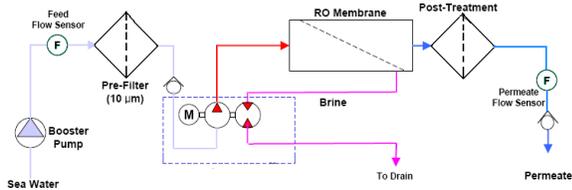


Fig. 5 Schematic diagram of reverse osmosis desalination

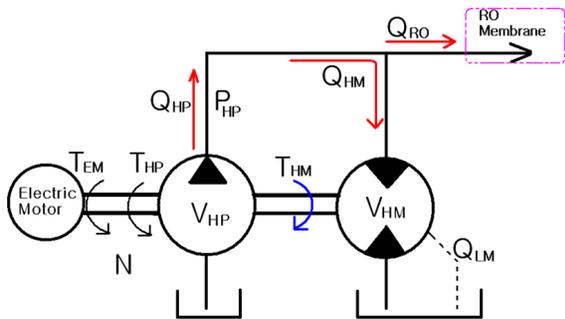


Fig. 6 Water hydrostatic type energy recovery devices

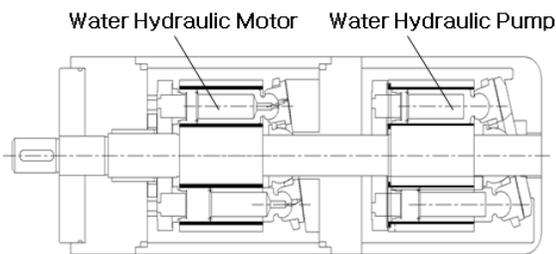


Fig. 7 Hydrostatic pump-motor serial connection structure

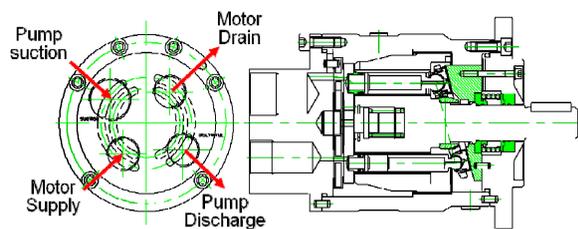


Fig. 8 Integrated water hydrostatic pump-motor for energy recovery

수압식 사판식 액셀 피스톤 수압 모터-펌프는 일반적으로 사용되는 정유압식과 같은 방식이며, 여기에 개발된 수압 펌프가 사용된다. 이렇게 사용된 펌프-모터는 Fig.7과 같이 나타난다. 최종적으로 펌프와 모터를 하나로 합친 일체형 수압식 펌프-모터가 Fig. 8과 같이 개발되었다.<sup>6)</sup>

또한 덴마크의 Danfoss사<sup>7)</sup>의 수압제품들을 몇 가

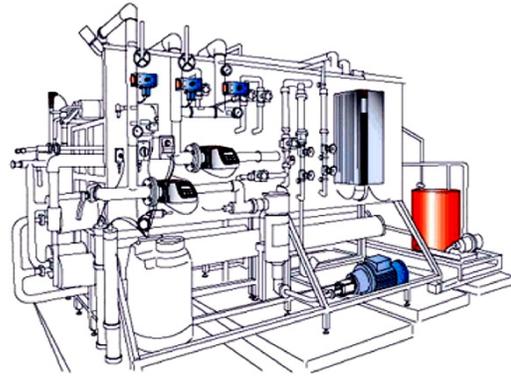


Fig. 9 Reverse-osmosis desalination plant



Fig. 10 Industrial cleaning device

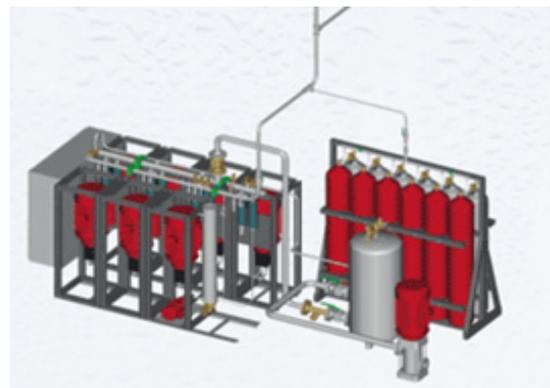


Fig. 11 High pressure water jet for fire fighting

지 소개하고자 한다. Fig. 9는 앞서 소개한 것과 같은 해수담수화 플랜트이다. 해수 담수화 플랜트는 해수 수송을 위해 수압 시스템이 필수적이다. 해수는 수돗물과 달리 다량의 부유물과 용해질로 인해 부식/마모로부터 더욱 안전해야한다. 따라서 해수 자체적인 유회 성능이 뛰어나야 한다. 이렇게 개발된 수압펌프 및 시스템은 수돗물, 기수, 해수모두 사용 가능하다. Fig. 10은 산업현장용 청소장비이다. 주로 산업현장은 넓은 부지와 오염되기 쉬운 환경에 다수의 인력이 투입된다. 청결한 환경의 구성이 필요하기 때문에 물청소가 필요하다. 물청소는 수돗

물을 작동유체로 사용하여 고압 토출을 하기 때문에 수압 시스템을 사용해야한다. 다수의 호스를 동시에 사용가능하며, 고압 토출시엔 지면에 고정하여 사용이 가능하다. 또한 대기 청소를 위해 액적으로 분무가 가능하다. 마지막으로 Fig. 11은 소방용 고압 워터젯 장비이다. 벽면, 혹은 소방차에 연결하여 사용시 반발력을 줄이기 위한 구조가 적용되어있다. 화재 장소에 소방수가 직접 접근하기엔 위험하므로 다량의 물을 장거리에서 고압으로 토출하기위한 수압시스템이 필요하다. 가연물에 직접 수분이 가해져야 하는데 화재현장은 고온으로 인해 가연물 주변에서 수분이 기화된다. 따라서 토출된 물이 가연물에 접촉할 수 있게 고압 분사가 필요하다. 또한 소규모 화재에선 온도 하강을 위해 액적 분무가 유리할 수 있다. 고압 분무가 더 작은 액적을 생성하기 때문에 고압 수압 펌프가 사용되어야 한다.

### 5. 결 론

유압 작동유로 석유계를 사용하므로 석유를 포함한 에너지의 고갈과 환경오염 문제는 시간이 지날수록 더 큰 이슈가 되고 있다. 또한 유압시스템 보다는 수압시스템 적용이 적합한 환경이 있을 수 있다. 윤활성과 내식성의 이유로 유압시스템이 사용되어져 왔지만 청정 생산환경 또는 환경오염 방지 지역에서는 수압시스템이 필수적이다. 기존의 유압부품 기술을 바탕으로 수압부품이 개발되어지고 있으며, 수압시스템을 적용해야하는 환경은 점점 증가하고 있다. 따라서 수압기기의 연구개발은 현시점에서 중요하다고 할 수 있다.

### References

- 1) K. E. Rydberg, "Energy Efficient Water Hydraulic Systems", ICFP, 2001
- 2) W. Xiongying and A. Yamaguchi, "The Performance of Water Hydraulic Pumps and Motors with Elastic Piston Mechanism", ISFP, pp. 617~622, 2003.

- 3) T, Qunguo, Z. Tiehua and Li Zhuangyun, "Experimental Investigation of the Wear Characteristics of Some Engineering Plastics Under Water Lubrication", ISFP, pp. 638~642, 2003
- 4) Y. B. Ham, J. H. Choi, J. H. Park and S. N. Yun, "Development of Variable Displacement Type Water Hydraulic Piston Pump", KSFC, Vol. 2, No. 3, pp. 14~19, 2005
- 5) Y. B. Ham, J. H. Choi, W. S. Seo, J. D. Jho, S. J. Park, "A study on the hydrostatic pressure exchanger", KSPSE, pp. 212-215, 2006
- 6) Y. B. Ham, Y. Kim, J. H. Noh, S. S. Shin, J. H. Park, "Design of Loss-reduction Mechanisms for Energy Recovery Devices in Reverse-osmosis Desalination systems." Journal of the KSPSE, pp. 5-9, 2012
- 7) Danfoss, DK-6430 Nordborg Danmark, www.danfoss.com, danfoss@danfoss.com, +45-7488-2222

### [저자 소개]

#### 함영복



E-mail : hyb665@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7157

2003년 금오공과대학교 기계공학과 박사. 2004년 일본 동경공대 및 야마나시 대 객원연구원. 1990년~현재 한국기계연구원 극한에너지기계연구실 책임연구원.

유압 피스톤 펌프 및 모터, 수압 피스톤 펌프, 압전 액추에이터를 적용한 펌프, 디스펜서, 약물 인젝션 디바이스 연구에 중사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 한국동력기계학회, 유공압건설기계학회 회원. 공학박사

#### 안병철



E-mail : abcn@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7542

2015년 경북대학교 기계공학과 학사졸업. 2016년 현재 UST 대학원 박사과정.

고압 워터 젯, 정밀 젯디스펜서, 유압 변속기 연구에 중사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 한국동력기계학회, 유공압건설기계학회의 회원