

사판 가변식 수압 피스톤 펌프 개발 Development of Variable Displacement Type Water Hydraulic Piston Pump

함영복 · 최준혁 · 박중호 · 윤소남

Y. B. Ham, J. H. Choi, J. H. Park and S. N. Yun

1. 서론

우리가 알고 있는 것보다 인류는 오래전부터 수압(water hydraulics)을 사용하여 왔다. 일례로 BC 200년경 알렉산드리아의 Ctesibus는 피스톤 2개로 이루어진 물을 펌핑하는 수압장치를 만들었다는 기록이 있다. 최초의 유압(oil hydraulics)시스템이 1906년 Janney에 의하여 발명된 것을 감안하면, 그 역사가 아주 길다.

하지만 유압시스템의 등장으로 수압시스템은 유압시스템에 밀려 특수한 환경(핵 발전, 화학공장, 식품공장)에서만 사용되어 왔었다. 그러나 1990년대 들어 환경과 에너지절약이 중시되면서부터 수압시스템에 대한 관심이 높아 졌으며, 오일(oil)에너지 절약과 지구의 환경 공해로부터 보호하기 위해, 광범위하게 보급된 석유계 작동유를 사용하는 기존 유압시스템과 비교할 때, 100% 오일에너지 절약효과가 있는 물을 작동유체로 하는 수압시스템(water hydraulic system)의 연구가 활발해졌다. 오일이 아닌 물을 사용하는 수압시스템은 환경오염 측면뿐만 아니라 화재에 대한 안정성이 우수하며 작동유체에 대한 손쉬운 구매와 관리, 재처리 과정 등의 장점으로 독일, 일본, 덴마크 등의 외국에서는 수압제품에 대한 기술 개발 및 제품의 연구와 생산이 급격한 증가 추세에 있다.

수압기기의 구조는 유압기기의 구조와 대부분 유사하나 작동유체의 저점도 특성을 고려하여 윤활 조건을 검토하고, 내식/내마모성 재질 선정은 물론 주요 윤활 부분에 대한 정압베어링 설계기술이 필요하며, 재료기술과 트라이볼로지(tribology) 기술이 진보되어 수(water)윤활하에서도 오일윤활과 동등하게 습동성을 갖는 재료의 이용이 가능하게 되어 안정성, 에너지 절약, 환경보전의 측면에서 유압시스템보다 우수한 수압시스템의 개발이 적극 필요한 상황이다.

수압시스템을 위한 기술 및 제품 개발을 위해서는, 기본 구성요소인 수압동력 발생용 사판식 피스톤 펌프

개발이 필수적이며, 그 구조는 기존 유압 피스톤 펌프와 유사하게 구성되나 내부부품의 재질선정 및 윤활 설계기술 등이 새롭게 확보되어야 한다.

수압시스템은 앞으로 발전 가능성이 큰 분야이며, 그림 1에 나타난 것처럼 그 활용과 적용 분야가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 지금까지는 제1기, 제2기로 표시된 영역의 분야에서만 한정되었던 사용범위가 점점 확대, 증가되어서 앞으로 유압시스템을 대체할 수 있을 것으로 예상되어진다.

유럽과 일본의 수압선진국들은 이미 상용화된 수압제품을 생산하고 있는 상황이며, 유압시스템 분야와 마찬가지로 수압 분야에서도 중국의 발전 속도가 빠를 것으로 예상되어지는 상황에서, 앞으로 수압시스템 분야의 발전과 수출경쟁에 대비하여 수압에 대한 연구가 시급하다고 생각되어진다.

특히 수압시스템의 동력공급원인 펌프의 경우, 저압의 수압은 원심펌프(centrifugal pump)를 사용하여 수압을 발생시킬 수 있지만 고압 사용영역에 동력원으로 대응할 수 없으며, 수십 MPa(수백 bar) 정도의 압력과 연속 토출이 가능한 수압 동력발생용 피스톤 펌프 개발이 필요하다.

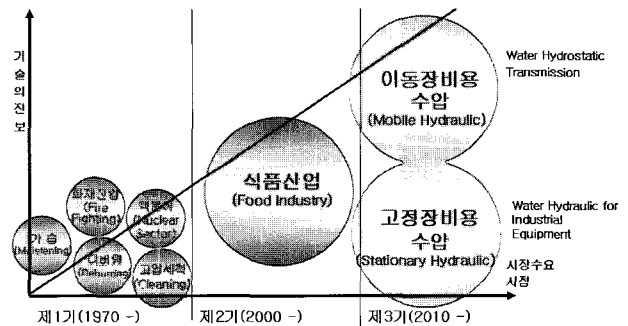


그림 1 수압기술의 진보

2. 수압펌프 기술의 연구현황

수압시스템의 동력발생장치인 수압 피스톤 펌프의

경우를 살펴보면 구조는 유압 피스톤 펌프의 구조와 대부분 유사하나, 그 부품은 특별한 설계개념이 요구될 뿐만 아니라 작동유체의 저점도 특성을 고려한 윤활 조건의 검토, 내부 상대운동부분의 내식/내마모성 재질 선정 및 주요 윤활 부분에 대한 정압베어링 설계기술이 필요하다. 최근까지 재료기술과 트라이볼로지(tribology) 기술이 진보되어 수(water)윤활 하에서도 오일윤활과 동등하게 습동성을 갖는 재료의 이용이 가능하게 되었다.

그림 2는 중국의 HUST(Huazhong University of Science & Technology: 화중과기대)의 Songlin Nie 와 Zhungyun Li 는 해수압(海水壓)펌프를 개발함에 있어 사판/슬리퍼 패드, 피스톤/실린더 보어, 실린더 블록/밸브 플레이트에 엔지니어링 세라믹스, 강화 플라스틱 등의 내마모성 합금재료 조합으로 실험한 실험장비와 수압펌프의 사진이다³⁾.

스웨덴의 Linkoping 대학의 Karl-Erik Rydberg는 수압시스템의 에너지 효율 관점에서 각 설계인자를 검토했다⁴⁾. 또한 Xiongying Wang는 탄성체 피스톤(elastic piston)을 채택하여 압력에 의해 팽창하면서 누설손실(leakage loss)을 감소시킬 수 있는 메카니즘을 제안하였다⁵⁾.

Tang Qunguo는 PA1010, PEEK, TX, NSM재료에 대해서 레이저 용융 적층법과 세라믹 스프레이 코팅법으로 표면처리된 스테인레스 강 사판과 상호 마모시험을 수행하여 PEEK 재료의 우수성을 검증한 바 있다⁶⁾.

이 밖에도 덴마크 Danfoss 사의 Nessie Water Hydraulics와 일본의 Ebara 종합기술연구소 등에서는 수압동력발생 펌프와 모터, 컨트롤 밸브등의 수압장비가 생산 및 판매되고 있으며, 일본 동경공대 Kitakawa 교수 실험실, Sophia 대학의 Ikeo 교수 실험실, Yokohama 국립대 Sanada 교수 실험실에서 수압시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그림 3은 수압선진국의 몇가지 수압펌프제품들을 나타낸 것이다.

국내에서는 2003년도 에너지절약기술개발사업을 통해 한국기계연구원에서 수압시스템 구성을 위해 가장 기초가 되는 수압피스톤펌프의 개발을 수행하였으며, 수압 피스톤 펌프의 내부 상대미끄럼 운동부에 윤활특성을 개선시키기 위해 피스톤 왕복운동 시 축력을 저감할 수 있는 저마찰/저누유 피스톤기구와 이를 구동하기 위한 등속조인트기구를 제안하였고, 수압피스톤 펌프를 구성하는 내식/내마모 재료로써 채택한 스테인레스 강(STS420, STS304)과 엔지니어링

링 플라스틱들(예: PEEK)의 기본적인 마모 실험을 통하여, 재료의 특성을 확인하고 그 적용성을 검토하고 있다.

현재 수압펌프 시제품의 개발을 통해 수압기기 대표 회사인 Danfoss사의 수압펌프의 성능비교 실험을 수행하고 있다. 1차, 2차 시제품 펌프를 통하여 Danfoss사의 동일 사양의 펌프와 유사한 성능을 얻을 수 있었으며, 시제품의 구조를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

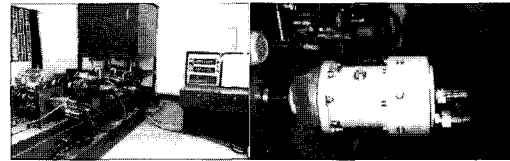


그림 2 해수용 수압펌프(HUST, 중국)

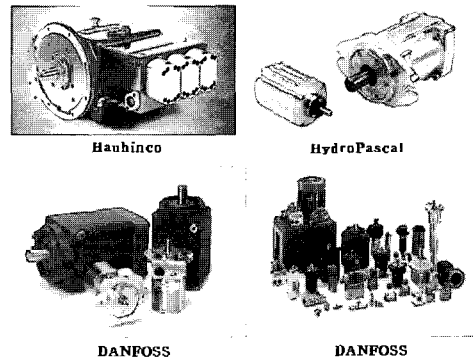


그림 3 국외의 수압펌프제품

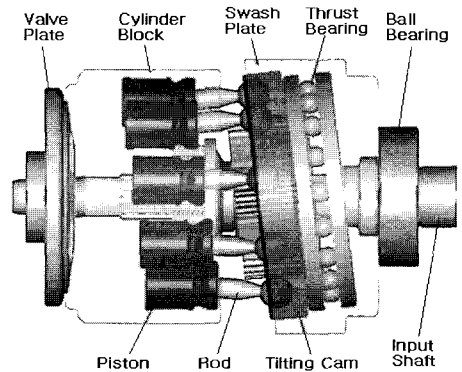


그림 4 국내에서 개발된 수압펌프의 구조

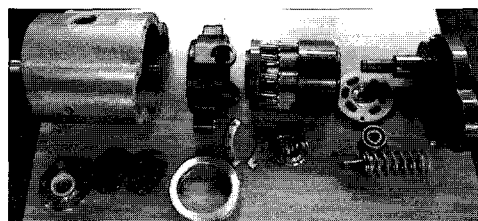


그림 5 수압펌프 시제품(KIMM)

3. 수압 피스톤 펌프의 특징

3.1 저마찰, 저누유 수압 펌핑기구 설계

본 연구에서는 그림 8 과 같은 수압 피스톤 펌프의 내부 상대미끄럼 운동부에 윤활특성을 개선시키기 위해 피스톤 왕복운동 시 축력을 저감할 수 있는 저마찰/저누유 피스톤기구와 이를 구동하기 위한 등속조인트기구를 혁신적으로 제안하였다.

피스톤 펌프에 있어서 가장 큰 마찰이 존재하는 부분은 실린더 블록 내에서 상대적인 왕복운동을 하는 플런저형 피스톤이며, 그 구조는 그림 6에 나타내었다. 심한 마찰과 마모는 플런저형 피스톤의 양 끝단 모서리부에 작용하는 축력(lateral force)이 원인이기 때문에, 이 축력을 감소시킬 수 있는 새로운 피스톤 구조의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 이 축력을 감소시킬 수 있는 방안으로써, 그림 7과 같이 양 끝단이 구면으로 형성된 볼-소켓 조인트형 피스톤 로드들을 적용시켰다. 이는 피스톤이 실린더 블록의 보어 내부에서 왕복 운동을 하면서 축력을 받더라도 구면 조인트 부가 축력을 상쇄시키도록 하여 모서리부에 의한 집중 하중을 피할 수 있게 한다.

그러나, 이러한 로드형 피스톤을 적용할 경우에는 특별한 보조 구동 메카니즘을 요구한다. 기존의 플런저형 피스톤 기구에서는 펌프 입력축이 회전될 때 피스톤이 사판 위를 미끄러져 왕복운동하면서 축력이 발생하는 구조이지만, 로드형 피스톤 기구는 입력축 구동에 의해 경사 캠이 회전하면서 왕복운동하기 때문에 펌프 입력축과 경사 캠 사이에는 등속조인트(constant velocity joint)로서 그림 8 과 같은 버필드 조인트(Birfield Joint)가 필요하게 된다.

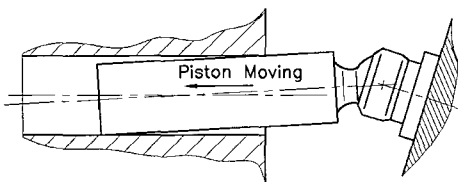


그림 6 플런저 피스톤의 경사진 운동

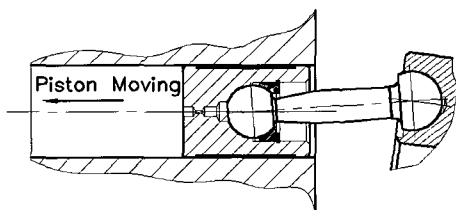


그림 7 로드형 피스톤의 평행운동

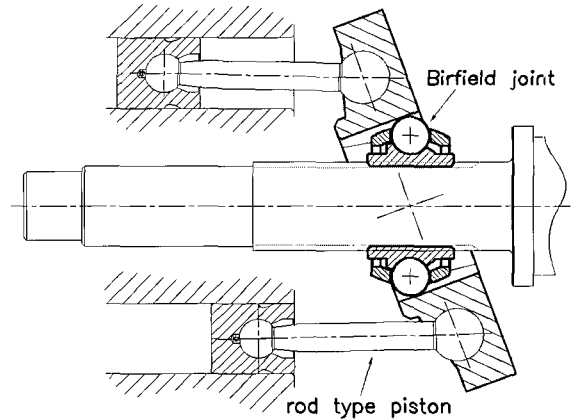


그림 8 Birfield Joint와 로드형 피스톤을 적용한 수압 피스톤 펌프의 구조

3.2 내식/내마모성 소재의 선정

수압 펌프의 특성상 물에 의한 부식과 유압 펌프와 비교하여 윤활성이 떨어지는 점은 피할 수가 없다. 그러므로 수압펌프에서 내식/내마모성의 소재의 선정과 적용은 중요한 문제이다. 펌프의 모든 부품을 스테인레스로 가공 하였을 경우 가공품 사이의 마찰과 마모가 심하게 되며, 펌프의 내구성에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 마찰력이 크게 발생하는 밸브플레이트 섹션부와 실린더-피스톤부, 피스톤 로드 구면부와 같은 부분에는 서로 다른 재질을 채택하여 구성하는 것이 좋다.

그러나 물과 접촉하며, 내식성과 충분한 강도를 모두 갖춘 금속은 스테인레스강과 알루미늄 계열의 비철합금으로 한정된다. 스테인레스강과 알루미늄합금의 경우 재질의 단가가 높을 뿐 아니라 그 생산 단가와 펌프의 자체하중이 증가하는 문제점으로 나타나며, 마찰이 심한 부위에 같은 재질의 금속을 사용하는 것은 고체마찰 시 마모량이 크고, 경우에 따라 압착되어서 파손되는 현상이 발생할 수 있어서 일반적으로 피하는 구성이다.

수압 피스톤 펌프에 있어서 적합한 소재를 선정하는 것은 매우 중요하다. 특히 선정된 재료가 갖춰야 할 특성은 우수한 내식성과 내마모성이다. 왜냐하면 작동유체로 사용되는 물(tap water)은 윤활성이 적고 부식을 일으키는 원인이 되기 때문이다. 또한 물은 기존 오일과 비교할 때 더 낮은 점도를 갖기 때문에, 유압 펌프와 동일한 체적 효율을 가지고 정상적인 작동을 하기 위해서는 상대 미끄럼운동부의 더 작은 간극을 요구한다. 즉, 줄어든 간극은 더 큰 마찰을 동반하기 때문에 누유와 마찰을 방지할 수 있는 내마모 특성이 필요한 것이다. 이러한 소재가 적용되어

야만 하는 주요 상대 미끄럼부위는 실린더 보어와 피스톤, 로드형 피스톤의 볼과 소켓, 그리고 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이 이다. 최근 재료분야에 관련된 기술이 비약적으로 발전함에 따라, 다양한 목적에 적용 가능한 기능성 소재 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 많은 수압 관련 선행기술을 볼 때, 상대 미끄럼 운동부에는 PA1010, PEEK, TX, NSM과 같은 엔지니어링 플라스틱이 다양한 특성으로 인하여 그 활용도가 매우 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 개발하고자 하는 수압 피스톤펌프의 주요 내식/내마모성 소재로써, 수압피스톤 펌프에 일반적으로 사용되고 성능이 우수하다고 연구되었던 PEEK를 채택하였으며, 펌프내부소재의 대부분을 차지하는 스테인레스강(STS420)에 코팅하여 적용하였다. 이러한 연구결과를 토대로 내식/내마모성 소재 조합으로 PEEK와 스테인레스강(STS420, STS304)의 기본 특성을 알아보고, 마모 실험을 수행하여 적합성을 검증하였다.

PEEK에 대한 주요 기계적 그리고 물리적 특성은 표 1과 같으며, 스테인레스강은 일반적으로 경도가 높고 내식성, 내열성이 좋은 특성으로 인해 보온병, 칼, 노즐 등에 많이 적용되고 있다.

최종 선정된 PEEK를 피스톤 펌프 회전 시 마찰이 발생하는 3곳의 마찰 면에 코팅하여 내식/내마모성을 향상시키고자 하였다. 코팅하여 적용한 부분은 실린더보어와 피스톤사이, 피스톤 틸팅 캠과 피스톤 로드 구면부, 밸브플레이트와 실린더 사이이며, 그림 9와 같다.

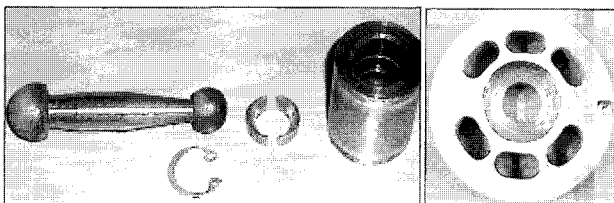


그림 9 PEEK 코팅된 부품들

표 1 PEEK소재의 기계적/물리적 특성

Item	Value
Density[g/Cm]	1.42
Tensile strength[MPa]	124
Tensile modulus of elasticity[MPa]	5900
Melting point[°C]	340
Water absorption[%]	0.3

4. 수압 피스톤 펌프의 성능시험 방법 및 결과

본 연구의 개발품은 수압 피스톤펌프이며, 최종 개발품인 수압펌프의 성능은 기존의 유압펌프에 적용된 성능시험방법을 적용하여, 성능을 시험 할 수 있으며, 수압펌프 선진국인 덴마크 Danfoss사의 수압 펌프의 성능시험을 동일한 조건에서 수행하여 비교함으로써 최종 개발품의 성능을 평가하였다.

4.1 수압 피스톤 펌프 성능시험

4.1.1 압력맥동 측정시험

수압펌프의 부하압력 크기에 따른 압력맥동 주파수의 변화를 분석하기 위해 수압펌프의 입력속도를 일정하게(1,000rpm)하고 부하압력을 가변 시켜가면서 압력맥동을 측정하였다. 그 중 그림 10과 그림 11은 부하압력이 90bar일 때의 압력맥동의 모습이다. 맥동 파형의 형태는 유사해 보이나 Danfoss사의 수압펌프에 비하여 맥동파형의 진폭은 다소 큼을 알 수 있다.

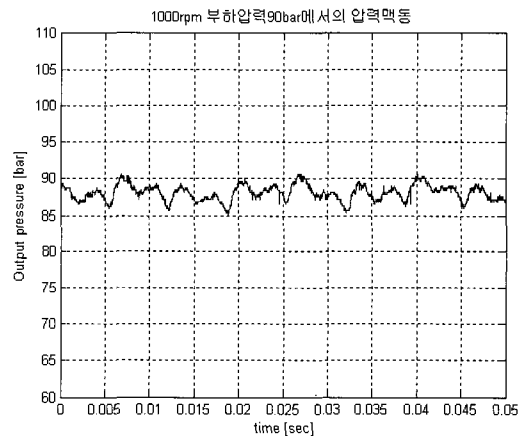


그림 10 Danfoss사의 수압펌프의 맥동파형

$$P_{out}=90\text{kgf/cm}^2, \delta_{ripple}=4.7\text{kgf/cm}^2$$

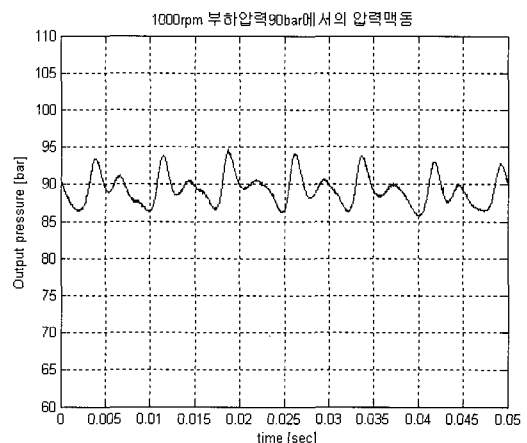


그림 11 수압펌프 2차시제품의 맥동파형

$$P_{out}=90\text{kgf/cm}^2, \delta_{ripple}=6.8\text{kgf/cm}^2$$

4.1.2 수압펌프의 P-Q 특성실험

펌프 성능 시험으로 압력 증가에 따른 펌프의 유량 변화를 측정 하여 보았다. 그림 12에서 나타낸바와 같이 Danfoss사 펌프의 P-Q특성이 가장 좋은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 본 연구의 결과물인 1, 2차년도 시작품의 P-Q 특성은 비교 대상 펌프인 Danfoss 펌프에 비하여 다소 유량특성이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나, 1차년도 시작품에 비하여 2차년도 시작품이 고압에서의 유량특성이 다소 좋아졌음을 알 수 있었다.

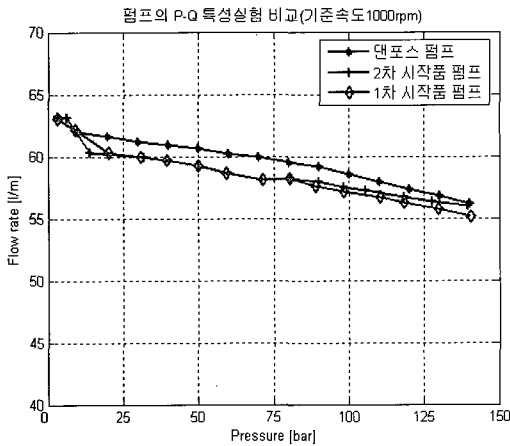


그림 12 압력-유량 특성측정 결과

4.1.3 펌프 효율 측정실험

측정된 토크(T)와 회전수(rpm), 압력(P), 유량(Q) 데이터를 이용하여 수압펌프의 전효율을 측정해보았다. 펌프의 전효율은 식(1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 L_p 는 펌프 동력, L_s 는 펌프 입력인 축마력(제동마력)이다.

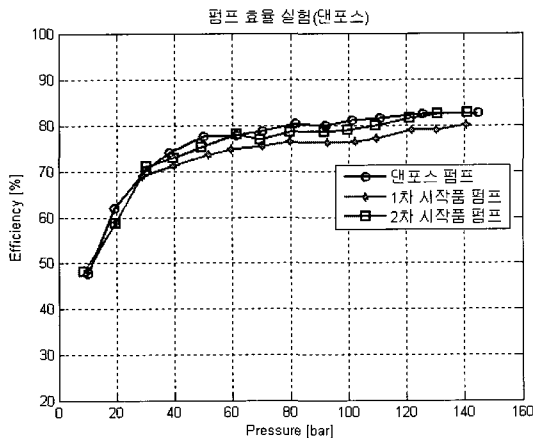


그림 13 수압 펌프의 전효율 측정결과

그림 13에서와 같이 펌프별 전효율은 P-Q특성실험에서도 나타난바와 같이 Danfoss사 펌프의 전효율이 다소 높게 나타났다. 펌프별 유형은 P-Q특성 실험과 유사하였으며, 2차년도 시제품 펌프의 전효율이 1차년도에 비하여 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결 론

세계시장은 점점 무공해, 청정 동력원을 원하고 있다. 유압은 그동안 소형의 장비로 큰 힘을 만들 수 있는 시스템으로서 각광 받아왔으나 작동유체가 석유계 광물질 유이기 때문에 환경오염을 피할 수 없으며, 석유계자원을 전량수입에 의존하는 우리현실에 맞추어 에너지절약차원에서 청정산업분야를 중심으로 점차적으로 유압시스템을 수압시스템이 대체해 나갈 것으로 예상된다.

본 연구를 통해 물을 작동유체로 하는 각종 액츄에이터에 수압동력을 공급할 수 있는 가변용량형 사판식 수압 피스톤 펌프를 개발하였으며, 수압 시스템은 물을 작동유체로 사용함으로써 환경오염을 일으키지 않으며, 또한 에너지 절약효과를 갖는다. 뿐만 아니라 유압시스템의 단점인 폭발위험성과 청결성 문제를 수압시스템 개발을 통해 해결할 수 있다.

본 연구를 통해 수압시스템을 구성하는 핵심부품인 수압펌프를 국산화 개발한 것을 시작으로, 수압 시스템용 밸브, 실린더, 모터 등을 개발할 수 있는 초석이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) E. Trostmann, "Water Hydraulics Control Technology", Marcel Dekker, Inc.
- 2) 浦田暎三, 宮川新平著, "水壓驅動技術入門 : アクアドライブシステム" 日刊工業新聞社, 2002. 7.
- 3) N. Songlin and Z. Li, "Design Techniques for Water Hydraulic Axial Piston Pumps(Motors)", NFPA, I00-16.5, pp. 581~590, 2000.
- 4) K. E. Rydberg, "Energy Efficient Water Hydraulic Systems", ICFP, 2001.
- 5) W. Xiongying, and A. Yamaguchi, "The Performance of Water Hydraulic Pumps and Motors with Elastic Piston Mechanism", ISFP, pp. 617~622, 2003.
- 6) 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.

- 7) 官川新平, “アクアドライブシステム”, (水壓システムの現状とマーケット, (주)荏原總合研究所, 水壓システムセンター.
- 8) 山莊登, “유압 산업계가 안고 있는 기술 및 시장의 과제와 전망”, 日刊工業新聞社, pp. 10~17, ISSN:0387-1045.
- 9) 上達政夫, “수압 구동 시스템 : 하우징고사의 수압기술; 독일의 선진 수압기기와 그 응용”, 日本工業出版, pp. 20~25, ISSN:0914-6253.
- 10) M. Takashima and A. Yuge, “물 유회환 수압 펌프의 개발”, 日本由空壓學會, pp. 620~623, ISSN:1343-4608.
- 11) S. Oshima, “수압 시스템 개발의 방향성 : 저압 영역”, 日本由空壓學會, pp. 648~651, ISSN:1343-4608.
- 12) S. Kubo, “수압 시스템 개발의 방향성 : 고압 영역”, 日本由空壓學會, pp. 645~647, ISSN:1343-4608

[저자 소개]



함영복(책임저자)
 E-mail : hyb665@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7157
 1965년 10월 23일생 (음)
 1987년 금오공과대학교 기계공학과 학사 과정 졸업, 1990년 금오공과대학교 기계공학과 석사 과정 졸업, 2003년 금오공과대학교 박사 과정 졸업. 1990년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 일본유공압학회, 자동차공학회의 회원

[저자 소개]



최준혁
 E-mail : ppsyco@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7168
 1977년 1월 15일생
 2002년 군산대학교 기계공학부 학사 과정 졸업, 2005년 군산대학교 석사 과정 졸업, 2005년 한국기계연구원 위촉연구원

[저자 소개]



박중호
 E-mail : jhpark@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7607
 1968년 6월 19일생 (양)
 1993년 전남대학교 기계공학과 학사 과정 졸업, 1996년 동경공업대학 석사 과정 졸업, 1999년 동경공업대학 박사과정졸업(정밀기계시스템전공), 1999~2004년 동경공업대학 정밀공학연구소 조교수, 2004년~현재 한국기계연구원 선임연구원, 대한기계학회, 일본기계학회, 한국정밀공학회의 회원

[저자 소개]



윤소남
 E-mail : ysn688@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7155
 1963년 07월 29일생
 1986년 제주대학교 기관학과 학사 과정 졸업, 1990년 부경대학교 기계공학부 석사 과정 졸업, 1994년 부경대학교 기계공학부 박사 과정 졸업(유압제어전공), 1994년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 한국정밀공학회의 회원, 대한기계학회, 동력기계공학회의 회원, 한국자동차공학회의 회원