

수압 구동 시스템

- 일본에서의 연구 과제와 동향 -

Water Hydraulic Systems

- Research Issues and Tendency in Japan -

박성환 · 北川 能

S. H. Park and A. Kitagawa

1. 서론

동력 전달 매체로서 물이 사용된 것은 역사적으로 매우 오래 된 일이다. 그러나 압축된 물을 이용하여 동력을 전달하는 공학적 의미의 수압 구동 시스템이 최초로 사용된 것은 Joseph Bramah가 수압 구동 프레스를 개발하여 특허를 취득한 1795년부터라고 할 수 있다¹⁾. Joseph Bramah가 생존했던 19세기에는 특히 영국을 중심으로 수압 구동 시스템이 폭 넓게 사용되고 있었다. 당시 London Hydraulic Power Company는 수도물과는 별도의 고압으로 압축된 물을 공급하는 펌프시설을 런던과 근교 도시의 여러 곳에 건설하여, 수압 구동용 크레인, 도개교(lifting bridge), 프레스, 윈치 등 각종 기기의 구동용으로 공급하였다. 그러나 당시의 수압 구동 기술은 내부 누설, 마모, 마찰, 부식, 에너지 손실 등의 많은 문제점을 가지고 있었으나, 간단하고 효율적으로 큰 출력을 발생시킬 수 있는 특징 때문에 약 100여 년간 폭넓게 사용되었다.

1900년 이후부터 전기 기술의 발전 및 유압 구동 시스템의 등장으로 동력 전달 매체로서의 물의 사용은 감소하기 시작하였으며, 1906년 미국 전함 Virginia호의 함포(warship gun) 시스템의 구동과 제어에 유압이 사용되면서부터 근대적 유압 구동 기술의 역사가 시작되었다. 동력 전달 매체로 물 대신 석유계의 작동유를 사용함으로써 시스템의 윤활 특성을 획기적으로 개선할 수 있게 되었으며, 동시에 소형화와 고압화가 실현됨에 따라 현재 유압 구동 시스템은 파워 밀도가 가장 높은 시스템으로서 항공기, 자동차, 해양 분야는 물론 가공기계, 건설기계 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 유압 구동 시스템의 많은 장점에도 불구하고, 피할 수 없는 단점인 작동유의 누설에 의한 환경오염과 화재의 위험성 등이 환경성과 안전성을 중요시하는 현대 사회에서 많은 문제점으로 대두되고 있는 실정이다.

한편, 약 15년 전부터 환경 친화성을 매우 중요시 하는 북유럽을 중심으로 자연 친화적인 구동 시스템인 현대적 의미의 수압 구동 시스템에 대한 관심이 고조되기 시작했다. 현대적 의미의 수압 구동 시스템이란, 19세기에 널리 사용되었던 내부 누설, 마모, 마찰, 부식, 에너지 손실 등의 문제점을 가진 시스템과는 달리, 현대의 발전된 재료기술과 가공기술 및 윤활 관련 각종 기술을 유압 관련 기술과 접목하여, 현재 폭 넓게 사용되고 있는 유압 구동 시스템과 유사한 성능과 효율을 발휘할 수 있는 순수한 물을 동력 전달 매체로 사용한 시스템을 의미한다.

현재 수압 구동 시스템에 관한 연구는 유럽과 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 유럽의 경우, 영국 University of Bath의 CPTMC, 스웨덴 Linköping University의 FluMes, 핀란드 Tampere University of Technology의 IHA, 독일 Aachen University의 IFAS등 대학을 중심으로 한 대규모의 연구 그룹이 유압, 공기압, 수압기술을 총괄하는 Fluid Power 기술에 관한 연구, 교육 및 컨설팅에 적극적으로 참여하고 있으며, 특히 핀란드 Tampere University of Technology의 IHA와 스웨덴 Linköping University의 FluMes는 공동으로 국제학술회의를 주최하며 유럽의 수압 관련 연구를 주도하고 있다. 한편, 일본에서의 수압 관련 연구는 유럽에서의 연구 방식과 상이한 면이 존재한다. 즉, 일본의 수압 관련 연구는 유럽에서 대학 중심의 대규모 연구 그룹이 주도하는 것과는 달리, 유압 관련 기술의 발전에 이바지해 온 각 대학의 많은 학자들과 세계적인 유압 메이커로 성장한 유압 기기의 생산 기업이 각각 독자적으로 연구와 개발을 진행하고 있다. 그리고 이러한 대학과 기업의 독자적 연구를 일본 Fluid Power System 학회(JFPS)의 수압 구동 시스템 연구 위원회와 일본 Fluid Power 공업회(JFPA)의 수압 관련 연구 위원회가 유기적으로 총괄하며 정보 교환 및 상호 보완을 주도하여, 비교적 많은 수

압 관련 연구 결과가 보고되고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 각종 연구 결과들은 매우 분산되어 있으며, 기업 연구 개발의 특수성 때문에 상세한 내용은 공개되고 있지 않는 것이 현재의 실정이다.

저자는 현재 일본 Fluid Power System 학회(JFPS) 산하의 「수압 구동 추진 연구위원회」에서 활동하면서 파악한 일본에서의 수압 구동 시스템에 관한 연구 과제와 동향을 가능한 공개된 자료를 근간으로 소개하고자 한다. 단, 본 해설기사의 내용은 저자의 개인적인 의견임을 추가적으로 미리 밝혀둔다.

2. 수압 관련 기초 연구

일본에 석유계 작동유를 사용한 유압 기술이 소개된 것은 1950년대의 일이다²⁾. 당시 일본에서는 터빈 오일과 엔진 오일 및 수입에 의존한 석유계 작동유가 사용되었다. 1970년대에 이르러 일본은 자체 기술로 고품질의 석유계 작동유를 생산하게 되었으며, 이때 이미 H.Yamaguchi는 석유계 작동유에 비하여 윤활 특성이 열등한 물의 작동유체로서의 사용 가능성을 고찰하였다³⁾. 한편, 유압 관련 기술 개발을 장려하기 위하여 작동 유체에 관한 다양한 연구가 진행되었다. 그 중에서 재단법인 기계진흥협회의 지원에 의한 수압과 관련된 연구과제는 다음과 같다.

- 1) 유압 시스템의 난연성 작동유에 관한 연구(1978~1980 : 참가회사 38개 사)
- 2) 고탍수 작동액을 사용한 액압 구동 시스템에 관한 연구(1981~1986 : 참가회사 62개 사)
- 3) 수압 구동 시스템에 관한 자주 연구(1993)

이상과 같이 일본에서는 대학과 기업의 그룹 연구를 통해서 이미 오래 전부터 수압 관련 선행 연구가 진행 되어왔다.

한편, 수압 구동 시스템에 관한 연구의 필요성과 중요성에 관한 인식이 고조됨에 따라 일본 Fluid Power System 학회(JFPS) 산하에 제 1기의 연구 위원회인 「수압 시스템 연구 위원회」가 1997년부터 2년간의 활동 계획으로 구성되어 수압 구동 시스템의 현황과 과제 및 동향을 조사 분석하였다⁴⁾. 이 위원회는 대학과 기업의 연구자들로 구성되어 있으며, 전문 분야에 따라 고압그룹(14[MPa] 이상), 중압그룹(14[MPa]~3.5[MPa]), 저압그룹(3.5[MPa]이하)으로 나누어 활동하였다. 그 중 고압그룹은 석유계 작동유

대신 물을 사용했을 때의 문제점을 중점적으로 분석하였다. 보고서에 의하면 수압용 고압 컴퍼넌트의 설계에서 가장 문제가 되는 부분은 습동면의 윤활에 관한 부분으로, 이 그룹은 금속과 플라스틱, 세라믹 등 신소재의 응용 가능성을 고찰하였고, 일부 부품의 직접 마찰을 줄일 수 있는 새로운 설계법도 제안하였다. 중압 분야는 일반적으로 유압 구동 시스템이 가장 많이 사용되고 있는 부분으로, 제어성과 환경성을 고려할 때 전기 구동 시스템이 가장 바람직한 대안으로 제시되고 있는 분야이기도 하다. 그러므로 중압그룹은 중압범위에서 수압 구동 시스템 사용의 장점과 단점 비교 분석하였다. 저압 분야는 현재 주로 공기압 구동 시스템이 사용되고 있는 분야이지만, 청정성과 고정도, 고강성을 필요로 하는 시스템에서는 수압 구동 시스템이 매우 유용하다. 그러므로 저압 그룹은 저압 분야의 현황과 수압 시스템의 응용분야 등을 조사 분석하였다. 그 후, 수압 구동의 연구 개발 활동에 대한 연속적인 요망에 부응하기 위하여 제 2기의 연구위원회인 「수압 구동 시스템 연구 위원회」가 2000년부터 2년 간에 걸쳐 일본 Fluid Power System 학회(JFPS) 산하에 다시 구성되었다. 연구 위원은 WG1(응용 분야), WG2(기기, 설계, 윤활), WG3(시스템, 해석)의 3개의 Working Group으로 나뉘어, 현황의 파악, 문제점의 도출, 최신 정보의 취득 등에 주력하였다. 제 1기의 연구위원회가 종료한 후 2년 밖에 경과하지 않은 시점에도 불구하고 많은 최신 정보를 습득하여 성과 보고서에 수록하였다. 2002년부터는 제 3기의 연구 위원회인 「수압 구동 추진 연구 위원회」가 연이어 구성되어 현재까지 활동하면서 수압 구동 시스템의 현황과 문제점 파악 및 수압 관련 신기술에 관한 정보 교환 등을 활발하게 추진하고 있다.

일본 Fluid Power 공협회(JFPA)는 일본 소형 자동차 진흥회로부터 기계 공업 진흥 자금의 보조를 받아 1998년부터 2000년까지 3년 간의 계획으로 「환경 친화형 수압 구동 시스템에 관한 조사 연구 위원회」를 설치하여 Aqua Drive System의 실용화에 관한 조사 연구 활동을 진행해 왔으며, 3년 간의 사업 성과를 정리한 영문판과 일본어판의 “Aqua Drive System - A Technical Guide”를 발행하여 Aqua Drive System의 보급을 위해 노력하고 있다. 그 후, 계속해서 2001년부터는 수압 구동 시스템의 실용화를 위해서 해결되어야 하는 우선 과제를 도출하여 조사하고, 실용화를 위한 지침을 마련하기 위한

「Aqua Drive 기술의 실용화에 관한 조사 연구」를 현재까지 진행해 오고 있으며, 그 외에도 “Aqua Drive System의 잠재 시장에 관한 조사 연구”도 현재 진행 중에 있다.

한편, 다년간 축적된 수압 구동 관련 자료를 바탕으로 수압관련 도서의 출판도 이어져, 2002년에는 수압 구동의 원리, 수압 기기, 물의 관리, 응용 예 등을 알기 쉽게 설명한 “수압 구동 기술 입문”이라는 일본어판 해설서가 E. Urata, S. Miyakawa에 의해 발행되었으며⁵⁾, 2003년에는 일본 Fluid Power System 학회(JFPS)의 30주년 기념 사업의 일환으로 “수압 구동 교과서”도 출판되었다.

또한, 일본 유공압 공협회(JHPA)가 일본 Fluid Power 공협회(JFPA)로, 일본 유공압 학회(JHPS)가 일본 Fluid Power System 학회(JFPS)로 각각 1999년과 2001년에 명칭을 바꾼 것은, 기존의 유압과 공기압에 관련된 제반 사업 분야에 수압 관련 연구도 포함시킨 것을 명시하기 위한 이유도 일부 포함되어 있으며, 나아가서 미국의 NFPA, 영국의 BFPA 등과 맥락을 같이 하기 위한 신속한 대응이라고 할 수 있다. 이와 같은 현상만으로도 일본에서의 수압 구동 시스템에 대한 관심이 어느 정도인가를 단적으로 알 수 있다.

한편, 일본에서는 수압 구동 시스템에 관하여 두

종류의 용어가 혼용되고 있음을 주목해야 한다. 일본 Fluid Power System 학회(JFPS)를 중심으로 하는 연구 그룹은 수압 구동 시스템을 Fluid Power System의 한 분야로 분류하여 수압 시스템(Water Hydraulic System)으로 칭하고 있다. 그러나, 일본 Fluid Power 공협회(JFPA)를 중심으로 하는 연구 그룹은 19세기에 흥행했던 초기 단계의 수압 기술과 비교해서 완전히 다른 새로운 하이테크 수압 기술이라는 의미에서 Aqua Drive System(ADS)로 칭하고 있으나, 내용 면에서는 전혀 다른바가 없다.

3. 수압 구동 시스템의 채용 현황

수압 구동 시스템에 관한 연구는 현재 일본 Fluid Power System 연구의 새로운 분야로 각광을 받고 있으며, 기업에서도 많은 연구 투자가 이루어지고 있음에도 불구하고, 극히 제한된 분야에서만이 실용화되고 있다. 따라서, 본 절에서는 현재 일본의 수압 구동 시스템의 연구자들에게 대표적인 잠재적 시장으로 인식되고 있는 아래의 11개 분야에 관하여, 현재 사용되고 있는 구동 시스템(유압, 공기압, 전기 구동)의 문제점과 과제 등 현황을 제시함으로써 수압 구동 시스템에 의한 대체 및 보완 시장에 관한 전망을 고찰하였다.

분야	요구성능	현재 채용 시스템	현재의 문제점	수압구동시스템을 채용할 경우		수압시스템에 관한 견해
				기대효과	문제점	
수문, 하천용 게이트	양호한 응답성과 고출력이 우선순위가 높은 요구성능이다. 다음 순위의 요구 성능으로는 제어의 정확성이다. 또한, 하천에서 사용되기 때문에 환경성도 우선순위가 높다. 주변비용과 신뢰성, 초기비용이 낮을 것도 요구된다.	유압기기·전동 기기가 메인 공압기기도 일부 존재. (일부 시스템에서는 수압기도 도입이 진행 중) ※유압과 전동의 비용 내역은 유압 20%, 전동 80%	누유에 의한 하천의 오염에 각별한 주의가 요구된다. 또, 높은 조작비용, 에너지 효율이 낮은 점 등도 큰 문제점으로 대두된다. 주변비용이 높고, 옥외에서 물과 직접 접촉되는 시스템이므로 각종 고장의 문제점이 대두된다.	환경성이 우수한 부분에 대한 평가가 매우 높다. 또한 액추에이터의 설치 장소를 제약하지 않기 때문에 새로운 수문의 창출의 가능성이 있다.	옥외에서 사용되기 때문에, 저온시의 액누출 문제와 대책이 대두된다. 또한 장치의 특성상 장시간의 무가동 체류가 예상되기 때문에 부식 등이 우려된다.	사용자(각 자치단체)는 초기비용을 중시하여, 환경성 등의 필요성에 맞는 초기 비용의 문제가 해결되지 않으면 도입은 좀처럼 진행되지 않을 것으로 생각된다.
가정용 엘리베이터	양호한 응답성/고출력, 제어의 정확도가 우선순위가 높은 요구특성이다. 다음으로 초기비용, 주변비용이 낮을 것도 요구된다. 또한 가정 내에서 사용되기 때문에 환경성, 안전성이 중시된다.	전동 유압 ※유압과 전동의 비용 내역은 유압 20%, 전동 80%	에너지 비용이 높고, 소음문제, 높은 작동비용, 누유 등, 소방법 대책 등의 주변비용이 드는 것.	방화·방재대책에 효과가 있다. 또한 환경성이 좋아 가정환경에 적당하다.	시간경과에 따른 수질의 열화, 녹 발생 가능성에 대한 대책, 높은 초기비용 등이 문제시되고 있다.	아직 시장성이 낮고, 전체적인 설치 비용이 높다는 견해를 가지고 있다. 수압을 도입하는 부가가치가 좀 더 커지지 않으면 도입 할 이 유가 없다.

분야	요구성능	현재 채용 시스템	현재의 문제점	수압구동시스템을 채용할 경우		수압시스템에 관한 견해
				기대효과	문제점	
무대장치·놀이기구	<무대 승강기> 제어의 정확도, 정숙성, 양호한 응답성/고출력이 우선순위가 높은 요구성능이다. <관람차> 양호한 응답성과 고출력이 우선순위가 높은 요구성능이다. 또 낮은 초기비용도 요구된다.	<무대 승강기> 전동, 유압 <관람차> 유압	<무대 승강기> 구동시스템의 대형화(전동), 누유·운용비용이 높음(유압) <관람차> 누유 발생의 위험성, 주변비용과 방화·방폭대책, 위험물 취급 자격자의 필요(유압)	<무대 승강기> 환경성이 매우 높다. <관람차> 기름과 달리, 매체의 누출에도 제품의 오염이 없는 것이 장점이다.	<무대 승강기> 구동제어의 신뢰성 문제, 초기비용이 높은 점 등. <관람차> 유지 보수성 등에 대한 불안.	<무대 승강기> 전동제어로 만족하고있으므로 비용면으로 우위에 있지 않으면 채용은 어렵다. <관람차> 놀이기구 전체에 전동기구의 평가가 높아, 유압에서 전동으로 이행하고 있다.
간호기구	<리프트> 시스템의 콤팩트성이 가장 우선순위가 높은 요구특성이다. 다음으로 초기비용이 낮고, 병원·복지시설·가정에서 사용되므로 쌍방의 안전성이 요구된다. 저압성도 요구된다. <베드> 시스템의 콤팩트성이 높게 요구되고, 작동비용이 낮을 것도 우선순위가 높은 요구특성이다.	<리프트> 유압 전동(비서보계) 수압 <베드> 전동(비서보계) ※ 간호기구의 비용 내역은 유압 10%, 전동 85%, 수압 5%	<리프트> 오일의 교환·처리(유압), 옥외·물 근처에서의 사용의 문제(전동), 이물의 혼입에 의한 마힘·고장(수압) <베드> 장치의 크기, 중량에 비하여 출력이 작다(전동)	<리프트> 물 근처에서의 채용이 가능. 저압특성이 있어 충격의 완화가 가능한 점 <베드> 환경성·안전성·위생성이 우수하다.	<리프트> 장소에 따라 구동압력이 일정하지 않고, 초기비용이 고가 <베드> 배관에 따라 압력이 일정하지 않고, 파워 유닛을 사용한 경우 장치가 대형화된다.	<리프트> 업계에서 수압기는 상당히 인지되어 있지만, 기술적인 결점도 지적되고 있어, 수압에서 전동으로 옮겨가는 기업도 있다. <베드> 초기비용이 높은 이상, 전동을 상회하는 이점이 없어 채용되기 힘들다.
디스크 전용성형기	안전성, 양호한 응답성/고출력, 제어의 정확도, 청정성/위생성(CD/DVD 등 디스크의 제조는 크린룸에서 행해지므로 높은 청정성이 요구된다.)	유압 전동(서보계) 유압과 전동의 하이브리드	(유압) 누유 등의 발생에 의해, 제품의 오염이 발생할 가능성이 있다. 또한 에너지 효율이 낮다.	디스크 생산공장은 타 분야의 공장에 비하여 청정성이 더욱 중요시되는 경향이 있어 수압 구동의 청정성과 위생성은 이점이 있다.	새로운 방식의 부품조달에 대한 안감이 있다.	제어의 정확성이 중요하므로 수압 구동은 환경성이 뛰어나다는 것만으로는 어렵기 어렵고, 가격 면과 제어성능에 연구노력을 더할 필요가 있다.
반도체 몰딩장치	제어의 정확도가 가장 크게 요구된다. 다음으로 낮은 초기비용/작동비용, 양호한 응답성/고출력도 요구된다. 또한 클린룸에서 사용되므로 청정성/위생성, 환경성 등도 요구된다.	유압·전동 위주이다. 일반 공압·수압기도 있다.	유압의 경우, 누유 등에 의한 제품의 오염이 발생할 가능성이 있다. 또한 기름먼지의 발생으로 인해 주위 환경이 나빠진다.	환경성이 좋은 점이 크게 평가되고 있다.	액체의 점성이 낮아 예상되는 누수, 누 대책. 이것이 원인이 되어 유지·보수비용이 높아지는 문제가 있다.	ISO 인증의 영향, 동종 타사의 채용 등으로, 업계 내에서의 관심이 크게 높아지고 있다. 실적의 축적, 사용자의 인지도 향상 등으로 유압을 대체하는 구동시스템으로 보급이 기대된다.
식품기계	식품공장에서 사용되는 기계이므로, 제품을 오염시키지 않기 위한 청정성/위생성이 크게 요구되고, 다음으로 제어의 정확도, 응답성/높은 파워밀도도 요구되고 있다.	유압기기·공압기기·전동기기(병용의 경우도 있음)	일부의 메이커의 지적으로, 제어의 정확성, 응답성, 낮은 강성 등의 성능면에 관한 문제점이 높아지고 있다.	위생면이 대단히 중요시되고있는 장소에 사용하는 것이므로, 위생성이 기대된다.	녹과 누수에 의한 배선에의 영향. 또 유체가 온도변화의 영향을 받기 쉬운 점이 부각되고 있다.	청정성과 안전성은 우수하지만 사용실적이 부족하여 실제 채용에 대한 상당한 불안감을 가지고 있다.
수중개발기계	양호한 응답성/고출력, 초기비용/운영비용/주변비용이 낮고, 고수압하에서 사용되므로 안전성이 중시된다.	전동 유압(병용)	파워 밀도가 작고, 구동시스템의 대형화, 제어의 정확성이 부족하다.	구동시스템의 소형경량화, 환경성이 뛰어나.	현재의 기기보다 고비용이 예상된다. 채용실적이 없기 때문에 신뢰성에도 문제가 있다.	신뢰성이 부족하다. 특수한 장소에서 사용되므로 내구성이 중요하다. 채용하기 위해서 더 많은 실적이 필요하다.

분야	요구성능	현재 채용 시스템	현재의 문제점	수압구동시스템을 채용할 경우		수압시스템에 관한 견해
				기대효과	문제점	
원자력 설비 (제어봉구동부)	안전성, 고도의 기계적 안정성이 요구된다. 또한 그것을 실현할 주변비용이 낮을 필요가 있다.	비등수형 경수로의 CRDM (제어봉 구동기구, 수압)	수압구동의 경우, 누수대책이 문제가 된다. (원자력 발전소는 미세한 기계적 문제도 사회적으로 크게 취급되므로 안전성의 확보에 세심한 주의를 기울이고 있다.)	유체의 입수가 용이하고, 유체가 불연성이므로 비교적 안전성이 높은 이점이 있다.	배관상의 누수의 위험성이 있다. 원자력 발전소에서는 누수된 물이 방사능을 띠고 있는 경우도 있어 중대한 문제가 된다.	고도의 신뢰성이 요구되는 원자력 발전소에서는 국내외에 사용실적이 없는 전혀 새로운 기구를 사용하는 것은 어렵고, 현재 사용되고 있는 수압구동의 사용범위를 넓히는 것은 어렵다.
제지 기계	양호한 응답성/고출력, 낮은 초기비용. 종이의 제조 공정에서 물·기름을 꺼리는 환경성이 필요.	유압 전동(비 서보계) 공압 ※공압, 전동, 공압 비용 내역은 전동 95%, 유압 5% 미만, 공압 근소	누유·기름먼지의 발생(유압). 주변비용이 높고 에너지 비용이 높다. 옥외·물 부근에서의 사용이 문제점이 된다.	청정성이 있고, 방재 효과의 기대	수압구동 시스템을 채용할 경우 습동부의 마모와 빙점 아래에서 동결시의 대책이 필요하다.	제품의 시장성이 부족하므로 총 비용·신뢰성의 면에서 타기기에 열세이다.
쓰레기 처리 설비	시스템의 콤팩트성, 양호한 응답성/고출력(전 구동 시스템 공통) 안전성(크레인), 제어의 정확도(화격자/덤퍼/투입문/크레인), 낮은 초기비용(덤퍼/투입문)	쓰레기 소각로의 연소 스토커의 구동(유압) 쓰레기 투입문의 개폐(유압, 공압) 파쇄기의 구동(유압) 쓰레기 크레인의 구동(유압) 압력제어 덤퍼의 구동(유압, 전동) 화격자의 구동(공압)	압력제어 덤퍼와 쓰레기 투입문의 전동기구를 이용한 경우, 제어의 정확성이 떨어지고, 에너지 비용이 높은 것이 문제로 된다. 또한 쓰레기 크레인의 유압구동부는 고온에서의 작동성에 유념해야하는 경우도 있다.	환경오염의 경미성 및 화재와 방재의 위험성이 없는 것은 높이 평가된다. 수압구동이 비용과 파워, 장치의 콤팩트성의 면에서 유압과 동등한 성능을 발휘한다면, 채용 가능성도 있다.	누수와 동결에 의한 성능저하가 유의된다. 공압과 같이 콤팩트성이 부족한 점이 있다. 또한 실적이 없는 장치는 사용되기 어렵다.	수압구동시스템의 보급은 우선 유압과 동등한 가격대, 특성을 달성할 때의 문제라고 보여진다.

이상과 같은 현황에 근거하여 볼 때, 안전성(방폭, 방재), 환경성, 청정성(위생성), 시스템의 콤팩트성(출력/중량), 양호한 응답성, 고출력이 요구되는 시스템의 구동에는 수압 구동 시스템이 최적의 시스템이라는 것을 알 수 있다. 그러나 현황에서 나타난 바와 같이 수압 시스템에 대한 업계의 인지도는 아직 매우 낮은 상태이며, 고가의 초기비용과 사용실적의 부족으로 인한 사용자의 불안감 또한 수압 구동 시스템의 도입을 꺼리는 이유가 되고 있다. 그러나 인간의 삶의 질의 향상 및 환경 친화성이 강조되는 시대적 변화와 더불어 수압 구동 시스템의 저변이 확대되면 자연스럽게 수압 구동 시스템의 수요는 더욱 증가하게 될 것이다.

4. 수압용 컴포넌트의 개발 현황

4.1 수압 제어용 밸브

(1) 수압용 서보밸브⁶⁻⁷⁾

1992년 Ebara Research Co., Ltd.,는 E. Urata와의 공동연구를 통해 수압용 서보밸브를 개발하여, 현재 시판 중에 있다. Fig. 1은 수압용 서보밸브의 외관을 나타낸다.

전체적인 구조는 유압용 서보밸브와 매우 유사한 구조로 구성되어 있으며, 토크모터, 노즐-플래퍼 기구, 4방향 스톱, 스톱 위치 검출용 LVDT 등으로 구성된 2단식 밸브이다. 그러나 물의 낮은 윤활 특성으로 인해 발생할 수 있는 스톱의 고착 현상을 방지하기 위하여, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 유압용 서보

밸브에서는 일반적으로 채용되고 있지 않은 정압 베어링(hydrostatic bearing)을 스푼의 양단에 설치한 것이 특징이다. 또, 종래의 유압용 밸브에서는 정압 베어링을 사용하는 경우, 베어링 부분을 통과한 유체를 탱크로 되돌리는 것이 일반적인 방법이었으나, 수압용 서보밸브에서는 정압 베어링에 사용된 대부분의 물을 다시 노즐-플래퍼 기구에서 사용하는 구조를 채용하여 동력 손실을 저감한 것도 또 다른 특징이라고 할 수 있다. 그리고 녹의 발생으로 인한 동작 불량 및 캐비테이션(cavitation)·괴식 현상에 의한 성능 저하를 방지하기 위하여 밸브 본체와 주요부품은 스테인리스 강(stainless steel)을 사용하였으며, 스푼(spool) 및 슬리브(sleeve)는 세라믹 재료를 사용하였다. 현재 시판되고 있는 수압용 서보밸브의 정격압력은 14[MPa]이며, 정격유량은 80[l/min]과 10[l/min]의 두 종류가 있다.

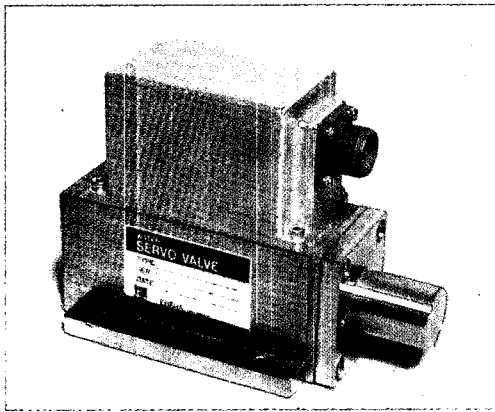


Fig. 1 Water hydraulic servo valve

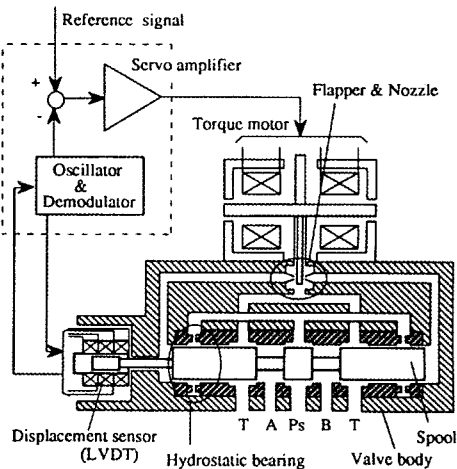


Fig. 2 Structure of water hydraulic servo valve

Komatsu Ltd.는 Fig. 3에 보인 수중 작업용 로봇의 제어용 밸브로서 직동형 포펫 타입의 서보밸브를

개발하였다^{8~9)}. 이 서보밸브는 순수한 물에서 사용되는 일반적 수압용 밸브와는 달리 특수용도(해수용)로 개발되었으며, 내부 누설을 최소화하기 위하여 포펫 타입을 채용하고 있다. 밸브의 구동에는 스트로크는 매우 작지만 일반적인 솔레노이드에 비하여 큰 출력을 낼 수 있고, 응답성도 뛰어난 piezoelectric ceramic element를 사용하였으며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 밸브의 스트로크를 증폭하기 위한 기계적 메카니즘이 채용되어 있다. 일반용이 아닌 특수 용도로 개발된 본 밸브의 정격 유량은 4.5[l/min]이며, 응답주파수는 200[Hz]이다.

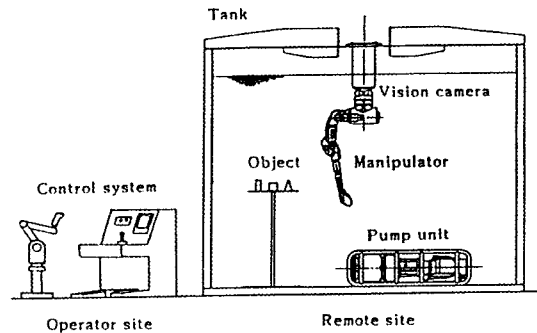


Fig. 3 Seawater hydraulic robot

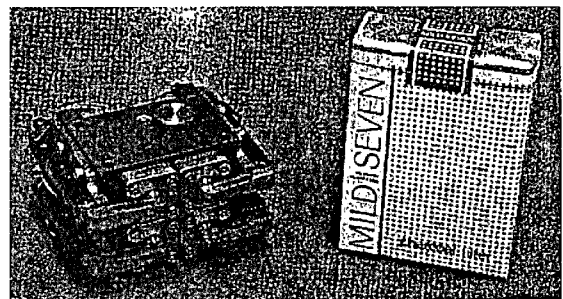
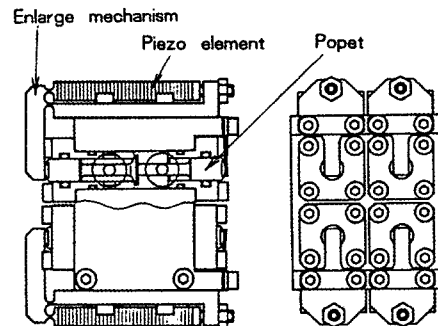


Fig. 4 Structure of seawater hydraulic servo valve

(2) 수압용 비례전자밸브¹⁰⁾

유압 구동 시스템의 일반적인 제어 밸브로 널리 사용되고 있는 비례전자밸브에 상응하는 제품으로, 2001년에 Ebara Research Co., Ltd.,는 수압용 비례

전자밸브를 개발하였다. 수압용 비례전자밸브의 외관은 Fig. 5와 같다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 수압용 비례전자밸브는 직동형 비례 솔레노이드, 스톱, 슬리브, 스톱, 스톱의 위치 검출용 LVDT로 구성되어 있으며, 수압용 서보밸브와 마찬가지로 스톱의 고착 현상을 방지하기 위하여 정압 베어링 방식을 채용하고 있다. 또, 스톱의 양단으로부터 탱크와 연결되는 유로에 설치된 댐핑 오리피스(damping orifice)는 저점성의 수중에서 스톱이 안정되게 작동할 수 있도록 댐핑 작용을 부여한다. 개발된 수압용 비례전자밸브의 정격압력은 7[MPa]이며, 정격유량은 35[l/min]이다.

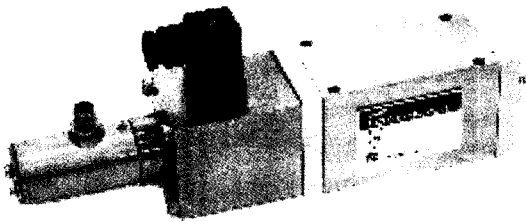


Fig. 5 Water hydraulic proportional control valve

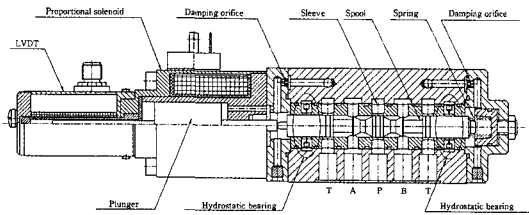


Fig. 6 Structure of water hydraulic proportional control valve

(3) 수압용 고속전자밸브¹¹⁾

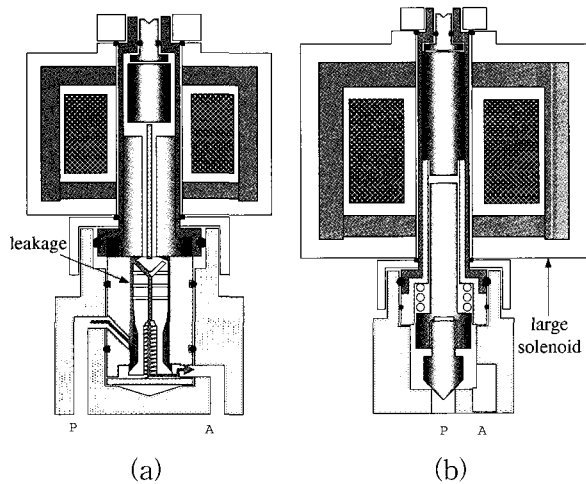


Fig. 7 Comparison of candidate for water hydraulic high speed solenoid valve

수압용 서보밸브나 비례전자밸브의 경우, 일반적으로 스톱을 이용한 슬라이드 형식의 구조를 채용하고 있기 때문에 점성이 낮은 순수한 물을 작동 유체로 사용하는 경우에는 내부 누설을 피할 수가 없다. 그러므로 스톱과 슬리브 사이의 틈새(clearance) 가공에 정밀성이 요구되며, 이는 밸브의 가격 상승 요인으로 작용하게 된다. 따라서 현재 시판되고 있는 수압용 서보밸브와 비례전자밸브는 매우 고가이다. 또 사용상에 있어서도, 밸브의 틈새가 매우 정밀하기 때문에 오염에도 매우 취약하며, 유지 보수에도 많은 노력이 필요하다. 또한, 서보밸브와 같이 노즐-플래퍼 방식으로 구동되는 경우는 손실 유량이 큰 단점도 가지고 있다. 그러므로 수압 시스템을 설치비용 및 사용 편의성 면에서 보다 보편화하기 위해서는 구동 회로가 간단하고, 내부 누설이 거의 없으며, 구조가 간단하며, 오염에도 매우 강한 특성을 가진 수압용 고속전자밸브의 실용화가 필요하다. 따라서, 본 저자는 2001년 유압용 고속전자밸브와는 전혀 다른 새로운 구조의 수압용 고속전자밸브를 개발하였다. Fig. 7의 (a)는 유압용 고속전자밸브의 구조를 나타낸다. 유압용 고속전자밸브는 구동용 솔레노이드를 소형화하기 위해 밸런스 피스톤 타입의 포켓을 사용하고 있다. 그러나 점성이 낮은 물을 작동 유체로 사용하는 경우에는 밸런스 피스톤 부분을 통해 내부 누

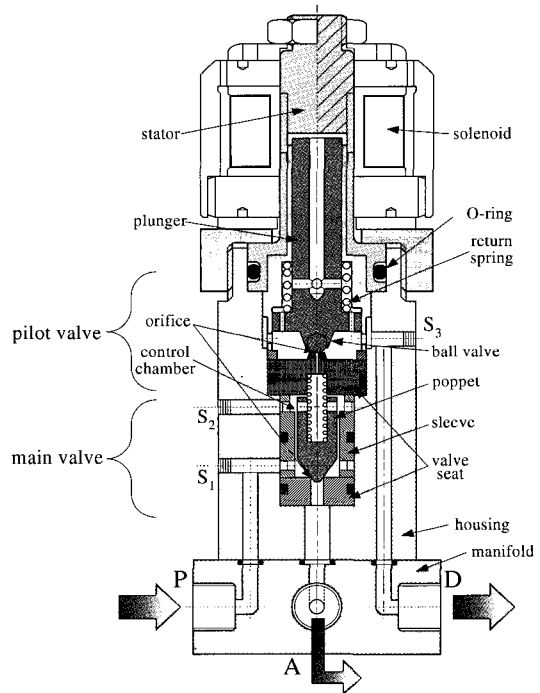


Fig. 8 Structure of water hydraulic high speed solenoid valve

설이 발생하게 된다. 그러므로 내부 누설을 방지하기 위해서는 Fig. 7의 (b)에 나타난 구조가 최적이지만, 유량과 압력의 증가에 따라 구동용 솔레노이드가 매우 커지는 단점이 있다. 그러므로 내부 누설이 없는 대용량 고압의 수압용 고속전자밸브는 Fig. 8과 같은 구조로 설계하였다. 이 밸브는 포켓형의 메인 밸브와 볼 형식의 파일럿 밸브로 구성된 2단식 밸브이며, Fig. 9에 나타난 바와 같이 포켓형 메인 밸브와 슬리브 사이의 누설 유량을 파일럿 유량으로 이용하여 구동되는 밸브이다.

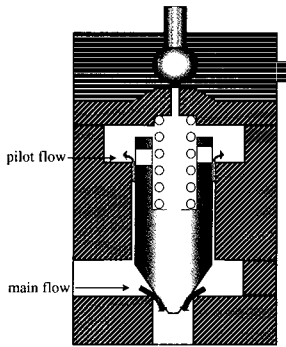


Fig. 9 Proposed two-stage mechanism

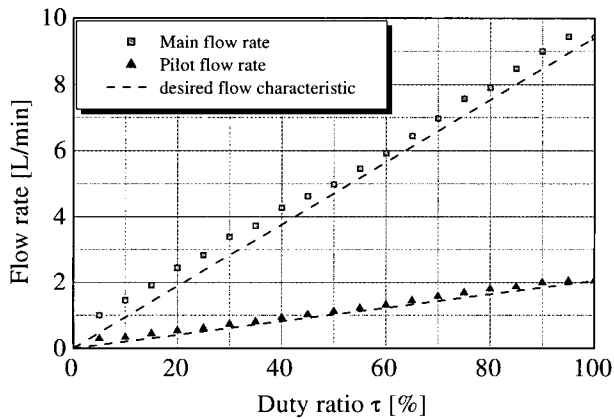


Fig. 10 Flow characteristics according to duty ratio

볼 형식의 파일럿 밸브는 고속구동용 전자 회로에 의해 약 2[ms]의 응답성을 가지고 구동되며, 반송파 주파수 50[Hz]의 PWM제어에 의하여 구동된 고속전자밸브는 Fig. 10에 보인 바와 같이 양호한 유량 제어 특성을 가짐을 확인하였다. 실험용으로 제작된 수압용 고속전자밸브는 실험용 수압 파워유닛의 성능을 고려하여 정격 압력 14[MPa], 정격 유량 9[l/min]로 설계되었지만, 이 밸브의 구조는 대용량, 고압 밸브를 목적으로 설계된 것이므로 용도에 따라 용량의 변경이 가능하다. Fig. 11은 실험용으로 제작된 고속전자밸브의 외관을 나타낸다.

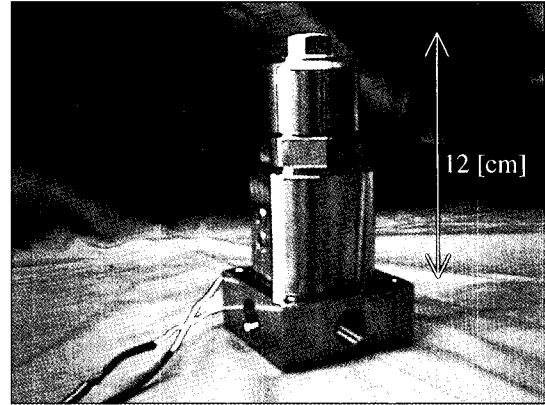


Fig. 11 Appearance of developed valve

(4) 수압용 릴리프 밸브¹²⁾

Nabco Ltd.는 1991년부터 수압 구동 시스템에 관한 연구를 시작하였으며, S.Hsyashi와의 공동 연구를 통하여 수압용 릴리프 밸브를 개발하였다. 이 연구를 통하여 S.Hsyashi는 수압용 릴리프 밸브의 수학 모델을 유도하였으며, 수압용 릴리프 밸브의 설계 및 변경에 필요한 시뮬레이션 프로그램도 완성하였다. 한편, E.Urata등은 정격압력 7[MPa], 14[MPa]의 2단식 릴리프 밸브의 개발에 관한 연구결과를 1997년 발표하였다. 이 연구에서는 수동식과 piezoelectric 제어방식의 압력 설정 기능을 갖춘 두 종류의 릴리프 밸브를 소개하였으며, 각각 양호한 압력 오버라이드 특성을 확인하였다.

4.2 수압용 펌프

Mitsubishi Heavy Industries Ltd.는 두 종류의 수압용 펌프를 개발하였다. Fig. 12는 종래의 유압 펌프와는 다른 특수 구조의 수압용 펌프를 나타낸다. 물의 낮은 점성으로 인하여 발생하는 내부 누설을 방지하기 위하여 소프트 패키징(soft packing)과 체크 밸브를 이용한 특수 설계 방법을 채용함으로써 펌프의 구동부와 피스톤 메카니즘을 분리한 구조의 펌프이다¹³⁾.

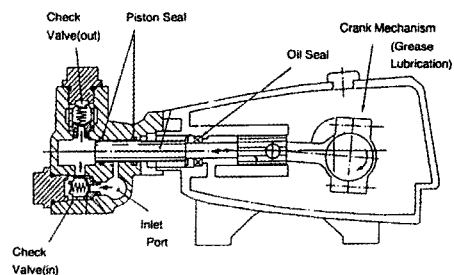


Fig. 12 Special design for water hydraulic pump

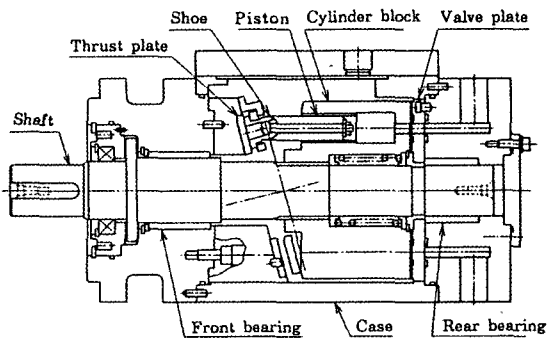


Fig. 13 Construction of axial piston type water hydraulic pump

Fig. 13은 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.가 개발한 종래의 유압용 액셀 피스톤 펌프와 유사한 형태의 수압 펌프이다¹⁴⁾. 전체적인 구조는 변화가 없지만, 내부의 베어링을 슬라이딩 타입으로 설계하였으며, 케이싱 내부의 물이 이들 베어링의 윤활에 사용되는 특징을 가지고 있다. 이러한 설계법의 채용으로 약 1.0[kW/kg]의 출력/중량 비를 실현하였다. 공급압력 21[MPa]에서 이 펌프의 기계효율은 94%, 용적효율은 86%이며 전효율은 81%이다.

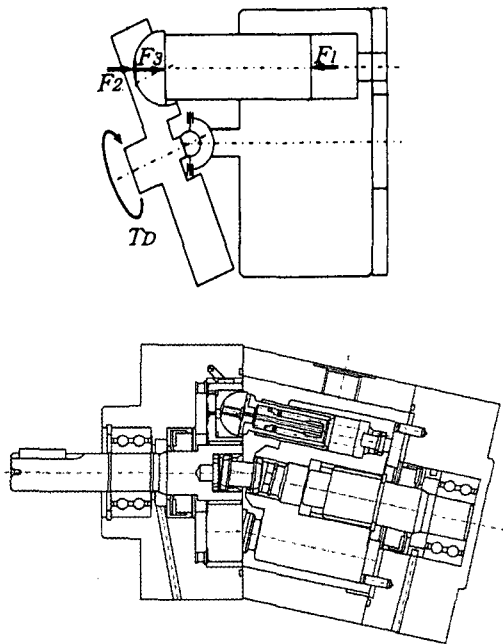


Fig. 14 Bent axis type water hydraulic piston pump

1989년 Kayaba Industry Co., Ltd. 와 프랑스의 Bronzavia Air-equipment는 해수용 컴포넌트의 공동 개발 연구를 시작하여 해수용 펌프, 해수용 제어 밸

브, 해수용 실린더의 시제품 개발에 성공하였으며, 최근에는 수압용 펌프도 개발하였다. Fig. 14에 나타난 이 펌프는 구조면에서 유압용 사축식 액셀 피스톤 펌프와 매우 유사하다. 그러나 기존의 구형 슈(shoe)와는 달리 반구형 슈(hemispheric shoe)를 채택함으로써 피스톤에 발생하는 횡력을 대폭 개선하여 각 습동부의 윤활 상태를 개선하였다. 그리고 습동부의 재료도 마찰을 최소화하기 위하여 레진(resin)과 세라믹 재료를 사용하였다. 그리고 금속 마찰 부분은 정압 베어링(hydrostatic bearing)을 사용하여 직접 마찰을 방지하였다¹⁵⁾.

Komatsu Ltd. 가 개발한 Fig. 15의 해수용 펌프는 Fig. 3에 나타난 수중 작업용 로봇의 구동을 위해서 개발되었다^{8~9)}. 해수용 펌프로서의 특징은 각 습동부와 회전부에 요구되는 형상과 강도에 맞게 내해수용 습동 재료를 사용한 것이다. 즉 모든 베어링과 마찰 부분에 CFRP와 세라믹을 사용하여, 윤활 특성을 대폭 개선한 함으로써 유압 펌프와 동등한 구조를 가진 해수용 펌프를 실현하였다.

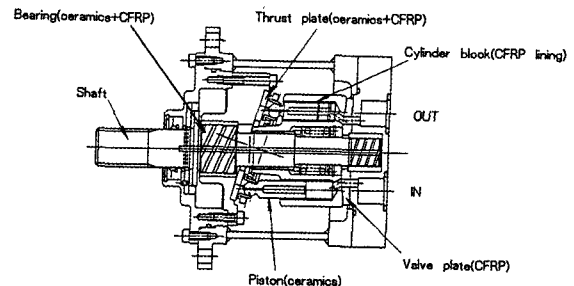


Fig. 15 Structure of seawater hydraulic pump

4.3 수압용 액추에이터

(1) 수압용 모터¹⁶⁾

Ebara Research Co., Ltd.,는 1999년에 Fig. 16에 나타난 저압용 수압 모터를 개발하였다. 저압용 수압 모터는 제빵 공장과 같이 청정성이 요구되는 시스템에 적합하다. 한편, 기존에 사용되고 있는 전기 모터의 경우는 출력 면에서 약하며, 전체 시스템을 물로 세척할 필요성이 있는 시스템에서는 사용이 불가능한 단점이 있다. 최대압력 2.0[MPa]의 저압용으로 설계된 이 모터는 베인(vane) 모터이며, 공업용 플라스틱과 스테인리스 강으로 구성되어 있다. 특히 이 모터는 매우 경량으로 전체무게가 약 0.7[kg] 정도이다.

Fig. 3에 나타난 수중 작업용 로봇 암의 구동을 위하여 Komatsu Ltd.는 해수용 요동 모터도 개발하였

다⁸⁻⁹). Fig. 17은 해수용 요동 모터의 구조와 외관을 나타낸다. 내부 누설을 방지하기 위하여 특수한 베인 실(vane seal)을 사용하고 있으며, 본체와 중요부품은 티타늄과 알루미늄 합금으로 구성되어 있다.

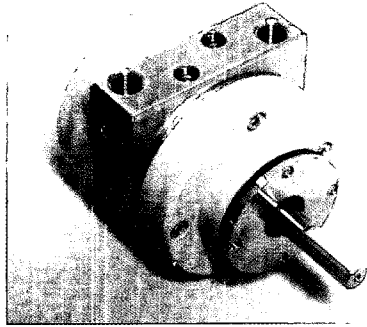


Fig. 16 Low-pressure water hydraulic motor

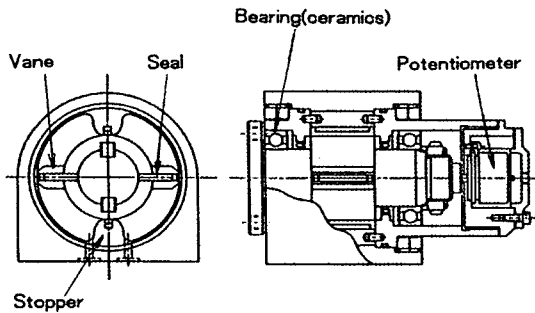


Fig. 17 Sea water hydraulic motor

일반 가정용의 수도 밸브에 연결해서 구동할 수 있는 저압용 수압 모터가 동경공업대학교 Kitagawa 연구실에서 개발되었다¹⁷⁾. 이 모터의 구동원리는 Fig. 18에 나타난 바와 같이 호스로 통과하는 물이 로터를 회전시키는 형태이며, 감속기를 이용하여 토크를 증폭시켜 사용하도록 구성되어 있으며, 목욕탕 내의 장애자 보조용 리프트 등에 사용 가능하다. 이 모터의 특징은 기계적인 구동부와 유체가 직접 접촉하지 않으므로, 경우에 따라서 다소 오염된 물을 사용하는 시스템에서도 응용 가능한 것이다.

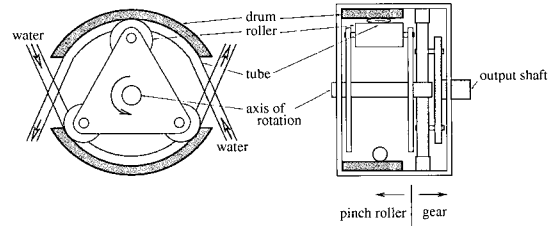


Fig. 18 Concept of I.P motor

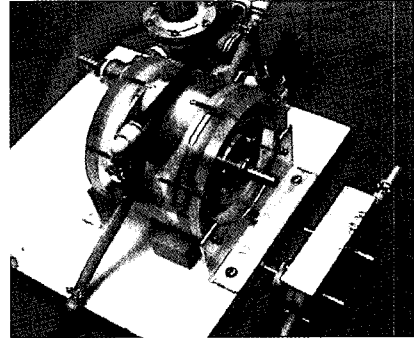


Fig. 19 Inner touching pinch roller type motor

(2) 수압용 실린더¹⁸⁾

순수한 물을 작동 유체로 사용하는 수압 실린더의 사용조건은 수압용 펌프 등 제반 장치의 성능을 고려할 때 최고 수온 50°C전후, 최고 압력 14[MPa]정도로 그다지 엄격하지는 않다. 그러나 일본 공업 규격 JIS에 규정된 유압실린더의 성능과 상응하는 성능의 실린더를 제작하기 위해서는 물의 낮은 점성으로 인하여 매우 엄격한 실링(sealing) 기술이 요구된다. 기존의 유·공압 실린더에 주로 사용되는 습동부의 실링 재료인 에라스토마, 엔지니어링 플라스틱 등을 수압용 실린더에 그대로 이용하면 초기 단계에는 양호한 특성을 나타내지만, 내구성의 문제가 대두된다. Nabco Ltd.는 이러한 문제점들을 고려하여 내구성 실험에서 충분한 성능이 확인된 4불화에틸렌수지, 폴리에틸렌수지 등을 이용한 실(seal)의 형상과 부착 방법 등에 관해 심도 깊은 연구를 진행하고 있다. Fig. 20은 현재 Nabco Ltd.가 시판하고 있는 다양한 형태의 수압 실린더를 나타낸다.

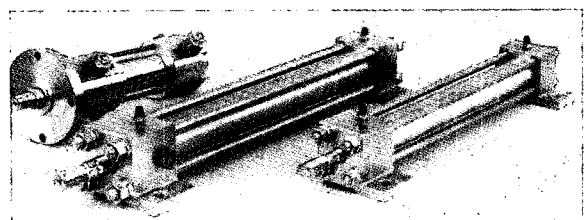


Fig. 20 Water hydraulic cylinder

5. 수압 구동 시스템의 응용 예

5.1 자동 탈골기

현재, 식품 관련업계의 환경은 위생 안전성이 매우 엄격하게 강조되고 있다. 그러나 식육 가공 등의 식품 제조 공정은 수작업에 의존하는 경우가 많아, 위생 안전성과 작업자의 노동 환경을 동시에 만족시키기는 곤란한 경우가 많다. 즉, 위생 안전성과 품질 관리를 위해 작업장의 온도를 저온으로 엄격하게 관리하는 경우 작업자의 노동 환경은 열악해진다. 그러므로 자동화에 의한 위생 안전성과 품질 관리를 실현하고, 세정성도 뛰어난 식육 가공 기계의 실현을 위해서는 수압 구동 시스템이 절대적으로 필요하다. Fig. 21은 닭고기의 뼈를 자동으로 추출하는 수압 구동 자동 탈골기를 나타낸다. 이 장치는 Maekawa Co.와 Ebara Research Co., Ltd.,의 협력으로 완성되었다.



Fig. 21 Automatic food manufacturing machine

5.2 반도체 몰딩 프레스

반도체의 제조 공정은 대부분 크린룸의 내부에서 이루어지며, 극도의 청정성을 요구한다. 그러므로 일

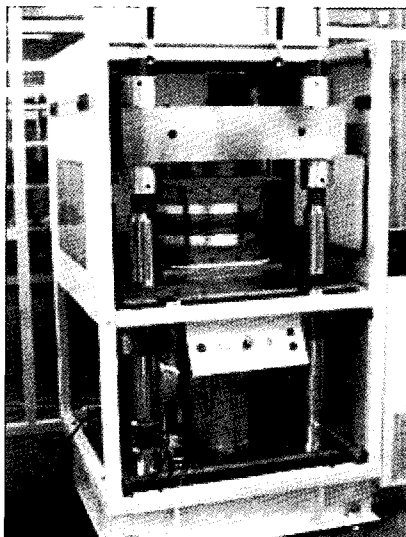


Fig. 22 Water hydraulic molding press

반적으로 전기 장치가 많이 사용되고 있으나 프레스 등 고출력을 요구하는 장치에는 전기 시스템의 사용이 불가능하다. Yokohama National University, Nabco Ltd., Ebara Research Co., Ltd., TOWA는 공동연구를 통하여 반도체 몰딩을 위한 수압 구동 프레스를 개발하였다.

5.3 침수 방지용 게이트

일반적으로 자동 게이트는 전동식이 많이 보급되어 있으나, 집중호우시 일반 가정용 주차장 등의 침수 방지를 위한 게이트는 물과 직접적으로 접하는 시스템이므로 수압 구동 시스템을 이용하는 것이 편리하다. Fig. 23은 Hitachi Zosen Corporation이 제작한 수압 구동 침수 방지용 게이트를 나타낸다.

5.4 수압용 리프트

수영장 등과 같이 물과 직접 접촉하는 장소에서 장애인들의 활동을 도울 수 있는 리프트의 구동 시스템으로는 수압 시스템이 가장 바람직하다.

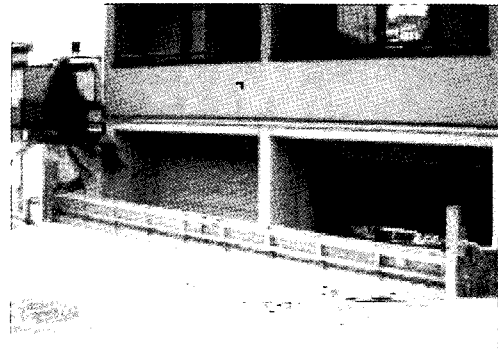


Fig. 23 Water hydraulic driven gate

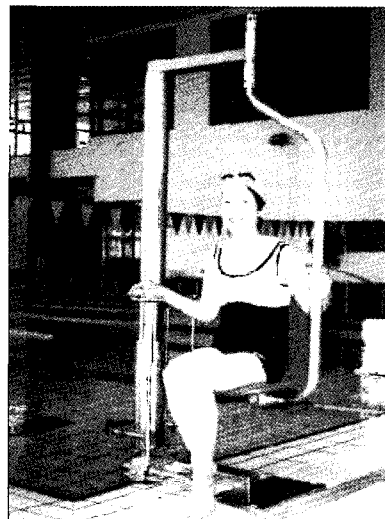


Fig. 24 Water hydraulic lift at pool side

Fig. 24는 Kayaba Industry Co., Ltd.가 개발한 장애자 보조용 수압 구동 리프트를 나타낸다. 그 외에도 수영장 수심을 가변적으로 조절하기 위하여 수영장을 바닥 전체를 수압 실린더로 구동하는 가변 수심 수영장 등 물과 직접 접촉하는 환경에서의 수압 구동 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

6. 결 론

수압 구동 기술은 아직은 전기, 유압, 공기압 등과 비교해서 신뢰성, 내구성의 향상 등 극복해야 될 문제점이 많다. 또, 제품 가격도 고가이며 요소기기의 공급도 충분하다고 할 수 없으며 수요도 한정되어 있는 것이 사실이다. 그러나 신소재, 신기술의 개발이 급속도로 진행되고 있는 현실을 반영하여, 주변의 하이테크기술을 적절히 적용하면 전기, 유압, 공기압의 뒤를 이어 제 4의 구동 기술로서 실용화되고 폭 넓게 보급 될 수 있을 것이다.

장래의 시장 동향면에서도, 현재 사회적인 배경인 ISO14000의 보급, HACCP의 보급, 위생 안전성의 강조, 환경관련 수요의 증가, 인구의 고령화에 따른 복지 기기의 수요 증가 등에 힘입어 수압 구동 기술의 개발은 보다 가속화되고 그 시장이 확대 될 것으로 사료된다. 이러한 시대적 흐름 속에서 현재 일본은 지금까지 유·공압 분야를 연구해왔던 많은 연구자들이 조직적으로 수압 구동 시스템의 개발과 연구에 참여하고 있으며, 기업들도 수압 관련 상품에 관한 기술적 주도권을 장악하기 위해 보다 적극적인 투자와 연구 개발을 진행하고 있다. 국내에서도 지난 수십 년 간 많은 요소 기술을 수입에 의존해 왔던 유·공압 산업의 전철을 밟지 않기 위해서는 지금부터라도 수압 구동 시스템에 관한 투자 및 연구 개발에 적극적으로 참여해야 될 것으로 사료된다.

7. 참고문헌

- 1) J. Bramah, "Obtaining and applying motive power", HM Patent Office, Pat. 2045, 1795.
- 2) M. Okada, "Hydraulic Oil", Journal of the Japan Hydraulics & Pneumatics Society, Vol. 23, No. 7, pp. 708~713, Nov. 1992. (in Japanese)
- 3) A. Yamaguchi, "Tap Water-Possibility as a Hydraulic Fluid", Journal of the Japan Hydraulics & Pneumatics Society, Vol. 9, No. 4, pp. 205~210, Jul. 1978. (in Japanese)
- 4) S. Miyakawa, "Research Committee on Water Hydraulic System", Journal of the Japan Hydraulics & Pneumatics Society, Vol. 29, No. 7, pp. 638~640, Nov. 1998. (in Japanese)
- 5) 浦田暎三, 宮川新平, "水壓驅動技術入門", 日刊工業新聞社, 2002.
- 6) C. Yamashina, S. Miyakawa and E. Urata, "Development of Water Hydraulic Cylinder Position Control System", Third JHPS International Symposium on Fluid Power, No. 108, pp. 55~60, 1996.
- 7) E. Urata and S. Miyakawa, "On the Dynamics of Water Hydraulic Servo Valve-an Estimate for Mathematical Models-", The Fifth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP97, Vol. 1, pp. 291~305, 1997.
- 8) H. Yoshinada, T. Yamazaki, T. Suwa and T. Naruse, "Design and Control of Manipulator System Driven by Seawater Hydraulic Actuator", Proceedings of the Second International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR 92), pp. 359~364, Nov. 1992.
- 9) H. Yoshinada, T. Yamazaki, T. Suwa, T. Naruse and H. Ueda, "Seawater Hydraulic Actuator System for Subsea Manipulator", 91 ISART, pp. 559~566, 1991.
- 10) T. Takahashi and C. Yamashina, "Development Water Hydraulic Proportional Control Valve", Ebara technical report, No. 193, pp. 3~9, Nov. 2001.
- 11) S. H. Park, A. Kitagawa, M. Kawashima, J. K. Lee and P. Wu, "A Development of Water Hydraulic Highspeed Solenoid Valve", 5th. JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol. 1, pp. 137~142, 2002.
- 12) S. Hayashi, T. Nakanishi, T. Hayase, M. Jyotatsu and H. Kawamoto, "Numerical Simulation of Dynamic Characteristics of Water Hydraulic Relief Valve", Proc. JHPS Autumn meeting, pp. 16~18, 1998. (in Japanese)

- 13) T. Oomichi and A. Tanaka, "Development of Water Hydraulic Servo Control System Considering Water Characteristic", Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers (C), Vol. 62, No. 599, pp. 2612~2619, Jul. 1996. (in Japanese)
- 14) M.Takashima, K. Saki, A. Yuge and A. Tanaka, "Development of High Performance Components for Pollution Free Water Hydraulic System", Third JHPS International Symposium on Fluid Power, No. 107, pp. 49~54, 1996.
- 15) S. Teraoka, K. Inoue and T. Ito, "Development of a Water Hydraulic Pump using a Novel Mechanism", Proc. JHPS Spring meeting, pp. 79~81, 1998. (in Japanese)
- 16) M. Shinoda, C. Yamashina and S. Oshima, "Development of A Low-Pressure Water Hydraulic motor", 5th. JFPS International Symposium on Fluid Power", Vol. 1, pp. 187~192, 2002.
- 17) H. Tsukagoshi, S. Nozaki and A. Kitagawa, "Versatile Water Hydraulic Motor Driven by Tap Water", International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2000, CD-ROM F-AII-2-1, Oct.31-Nov.5, 2000.
- 18) 赤松俊介, "水壓驅動システム用シリンダ, 油空壓技術, pp. 12~15, 2000.

[저자 소개]



박 성환(책임저자)

E-mail : shpark@cm.ctrl.titech.ac.jp

Tel : +81-3-5734-3085

1967년 11월 8일생.

1996년 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 박사 학위 취득

1998년 일본학술진흥회(JSPS) 외국인 특별연구원(Tokyo Institute of Technology).

2001년 영국 Royal Society Post-doctoral

Fellow(University of Bath, the Centre for P.T.M.C). 2002년 일본 Tokyo Institute of Technology Visiting Researcher. 전기·유압 서보 시스템의 설계 및 제어, 수압 제어용 고속 전자밸브의 개발, 수압 시스템의 제어에 종사, 일본 Fluid Power System 학회 회원, 수압 구동 추진 연구위원회 위원, 공학박사.

[저자 소개]



北川 能 (Ato Kitagawa)

E-mail : kitagawa@cm.ctrl.titech.ac.jp

Tel : +81-3-5734-2550

1947년 10월 18일 생.

1984년 Tokyo Institute of Technology 조교수. 1991년 Tokyo Institute of Technology 공학부 제어공학과 교수.

2000년 Tokyo Institute of Technology 대학원 이공학연구과 기계제어시스템전

공 교수. 유체 제어, 유체 구동 로봇, 생체협조 유체 시스템 등의 연구에 종사. 일본 기계 학회, 계측 자동제어 학회, 일본 Fluid Power System 학회 등의 회원, 수압 구동 추진 연구위원회 위원, 공학박사. URL: <http://www.cm.ctrl.titech.ac.jp>