

# 건설기계의 에너지 효율 제고를 위한 비-하이브리드 신기술에 관한 리뷰 A Review on New Non-hybrid Technologies to Improve Energy Efficiency of Construction Machineries

조중선<sup>1\*</sup>

Joong Seon Joh

Received: 11 May. 2016, Revised: 04 Jul. 2016, Accepted: 13 Jul. 2016

**Key Words** : Construction Machinery(건설기계), Non-hybrid(비-하이브리드), Energy Efficiency(에너지 효율), Throttling Loss(쓰로틀손실), IMV(독립적 미터링제어밸브), Displacement Control(변위제어), CPR(커먼 압력 레일), Hydraulic Transformer(유압변환기)

**Abstract**: New non-hybrid approaches to improve energy efficiency of construction machineries are reviewed in this paper. Hydraulic systems are classified into four classes according to Backé's classification and commercially promising new technologies are carefully chosen in each class. IMV, 3-Line CPR, Closed Circuit Displacement Control of Differential Cylinder, and Throttle-less Secondary Control are chosen as representative non-hybrid new technologies. Key principle of each technology is explained and representative references which run through each technology are selected. Advantages and weaknesses of each technology are discussed and compared from the view point of construction machinery manufacturers.

## 1. 서 론

유압시스템의 고유하고 독보적인 장점은 높은 압력밀도(Power density)이다. 이는 주로 실린더의 존재에 기인하며, 유압시스템 산업계는 상대적으로 낮은 에너지 효율에도 불구하고 틈새시장(niche market)에서 독점적인 영역을 구축하고 있다. 일본 Kobelco 건설기계의 2007년 자료에 의하면 유압식 굴삭기의 경우 엔진 출력의 20%만이 실제 작업에 사용된다고 언급하고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 꾸준히 제기되고 있는 유한한 화석연료의 문제와 더욱 강화되고 있는 GHG(Greenhouse gas) 배출량규제정책<sup>2)</sup>은 유압시스템 중에서도 특히 건설기계의 에너지효율 제고를 압박

하고 있다.

현재 에너지 효율 제고를 위하여 많은 건설기계가 1960년대 후반<sup>3)</sup> 젊은 기술자들에 의해 그 개념이 태동된 Load-sensing(이하 LS라 함)을 기반으로 시스템을 구성하고 있다. 그러나 이러한 구성도 하나의 펌프로 두 개 이상의 액츄에이터(Actuator)를 동시에 구동할 경우 최대 부하의 압력에 맞춰 펌프 토출압력이 결정되는 특성에 의해 나머지 액츄에이터의 부하 특성에 따라 에너지 손실이 클 수도 있음은 잘 알려진 사실이다. Williamson 등은 유압식 굴삭기의 경우 이러한 손실이 총 에너지 손실의 40%에 이를 수도 있음을 보였다.<sup>4)</sup>

건설기계의 에너지 효율을 높이기 위한 시도는 20세기 말부터 지금까지 꾸준히 진행되고 있으며, 크게 하이브리드 방식과 비-하이브리드 방식으로 나눌 수 있다. 하이브리드 방식은 하이브리드 자동차의 성공에 힘입은 일본이 상용화에서 가장 앞서가고 있으나<sup>1)</sup> 자동차 산업과 특성이 매우 다른 건설기계 업계의 대표적인 상용화 기술로 자리매김을 할지 여부는 쉽게 단정 짓기 어렵다. 또한 비-하이브리드 방식은 전

\* Corresponding author: jsjoh@changwon.ac.kr  
Department of Control & Instrumentation Engineering,  
Changwon National University, Changwon 51140, Korea  
Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기에너지 저장장치와 전기 모터를 사용하지 않는 기술로써 고효율 건설기계를 위한 의미 있는 시도로 판단된다.

건설기계의 에너지 효율을 높이기 위한 비-하이브리드 방식의 신기술은 최근 약 15년 동안 유럽의 몇몇 학술대회를 통하여 유럽 주도로 수 백편의 논문이 발표되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 에너지 효율 제고를 위하여 제안된 비-하이브리드 방식의 신기술들을 조사하여 대표적인 기술들을 선정 및 분류하였으며, 각 기술의 핵심원리와 대표적인 참고문헌들을 소개하여 관련 분야의 산업종사자와 연구자들에게 체계적인 접근이 가능하도록 함으로써 차세대 건설기계 개발을 위한 참고가 될 수 있도록 하였다.

## 2. 비-하이브리드 방식 신기술의 분류

현재 대부분의 건설기계는 스펠형식의 방향제어 밸브를 채용하고 있다. 이 시스템은 장점과 단점이 있다. 장점은 미터-인(Meter-in) 오리피스(Orifice)와 미터-아웃(Meter-out) 오리피스가 기계적으로 결합(Mechanically coupled)되어, 별도의 센서나 복잡한 제어기 없이도 하나의 액추에이터가 조이스틱 한 개의 변위로 제어되는 구조적 단순함이다. 반면에 에너지 효율 측면에는 근본적인 단점이 있다. 첫 째로, 전 영역의 동작을 위해 설계된 스펠밸브의 특성에 의해 미터-인과 미터-아웃 오리피스에서의 불필요한 쓰로틀손실(Throttling Loss)을 피할 수 없다. 둘째로, 액추에이터의 4-Q동작(4-Quadrant Operation)에서 활용 가능한 위치 및 운동에너지의 재생(Regeneration)<sup>5)</sup>과 회수(Recuperation)<sup>5)</sup>가 어려운 구조이다. 최근의 비-하이브리드 방식의 연구는 쓰로틀손실 절감과 활용 가능한 에너지의 효과적 재활용을 통한 에너지 효율의 제고에 초점이 맞춰져 있다. 물론 이러한 이득은 일반적으로 센서 및 유압요소의 추가를 통한 원가 상승과 상대적으로 복잡한 제어 시스템을 필요로 한다.

1995년 독일 IFAS의 Backé는 유압시스템의 제어방법을 그림1과 같이 4가지 클래스로 구분하였다.<sup>6)</sup> IFAS에서는 2014년에 최근 10여년의 유압 기술 개발을 반영한 새로운 분류를 발표하였다<sup>7)</sup>. 그러나 본 논문에서는 간결한 내용 전개를 위하여 Backé의 분류를 채용하였다. 클래스I은 대부분의 유압시스템이 채용하고 있는 방식으로 유압펌프와 방향제어 밸브를 이용한 쓰로틀제어(Throttling Control)를 의미한다. 클래스II는 CPR(Common Pressure Rail)과 방향제어 밸브를 이용한 쓰로틀제어를 의미하며, 클래스III은 가변용량 유압펌프를 이용한 변위제어(Displacement Control)로써 클래스I과 클래스II의 쓰로틀손실을 배제시키기 위한 방법이다. 마지막으로 클래스IV는 클래스II와 같이 CPR을 사용하되 쓰로틀손실을 제거하는 방법으로 볼 수 있다. 클래스I과 클래스III은 주제어(Primary Control), 클래스II와 클래스IV는 부제어(Secondary Control)라고 분류되기도 한다.

브를 이용한 쓰로틀제어를 의미하며, 클래스III은 가변용량 유압펌프를 이용한 변위제어(Displacement Control)로써 클래스I과 클래스II의 쓰로틀손실을 배제시키기 위한 방법이다. 마지막으로 클래스IV는 클래스II와 같이 CPR을 사용하되 쓰로틀손실을 제거하는 방법으로 볼 수 있다. 클래스I과 클래스III은 주제어(Primary Control), 클래스II와 클래스IV는 부제어(Secondary Control)라고 분류되기도 한다.

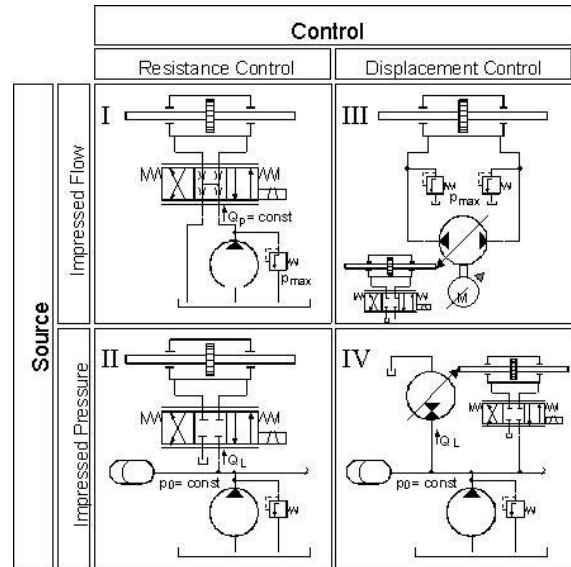


Fig. 1 Methods of Controlling Hydraulic Power

에너지 효율 제고를 위한 비-하이브리드 신기술 개발에 관한 연구는 위의 4가지 클래스에서 모두 진행되고 있다. 본 논문에서는 ‘클래스I-신기술’ 등으로 부르며 단기 및 중장기적 상용화 가능성을 고려하여 선정한 각 클래스별 신기술은 표1과 같다.

Table 1 New Non-hybrid Technologies in Four Classes of Hydraulic Power System

Class	New Technology
I	IMV
II	3-Line CPR
III	Closed Circuit Displacement Control for Differential Cylinder
IV	Hydraulic Transformer Multi-Chamber Cylinder

IMV를 쓰로틀제어를 의미하는 클래스I으로 분류하는 것은 무리가 있지만, 나머지 세 클래스에 속하지 않아 편의상 클래스I으로 분류하였다.

Backé의 4가지 클래스 분류에 속하지 않지만 건설

기계의 에너지 효율 제고라는 본 논문의 관점에서 볼 때 중장기적으로 건설기계 산업계에서 관심을 가질 수 있는 신개념의 요소기술로써 Artemis사에서 개발한 DDP(Digital Displacement Pump)와 Innas BV의 플로팅컵펌프(Floating Cup Pump)가 있다. DDP는 기존의 피스톤펌프 기술과 전자제어기술을 결합하여 유압펌프의 부분토출유량을 근원적으로 제거한 고효율의 가변유량펌프이다. 또한 플로팅컵펌프는 Innas BV에서 개발한 플로팅컵(Floating Cup)이라는 신개념을 이용한 고효율의 유압펌프이다.

### 3. 비-하이브리드 신기술

#### 3.1 클래스-I 신기술: IMV

본 논문에서 선정한 신기술 중에서 건설기계 업계에서 양산화에 가장 큰 관심의 모으는 기술은 미터-인과 미터-아웃 오리피스를 독립적으로 제어하는 IMV(Independent Metering Valve)기술이다.<sup>8)</sup> 문헌에 따라서는 SMISMO (Seperate Meter-In Seperate Meter-Out)<sup>9)</sup> 또는 프로그래머블 밸브(Programmable Valve)<sup>10)</sup>라고도 부른다.

2절에서 잠시 언급한 바와 같이 IMV를 클래스-I로 분류하는 것은 다소 무리가 있다. IFAS의 2014년 새 분류에서는 주제어도 부제어도 아닌 컨덕티브 제어(Conductive Control)라는 항목으로 분류하였는데<sup>7)</sup>, 원리상으로 보면 제어 알고리즘에 따라 유량이 변하는 궤환제어로 보는 것이 타당하다.

##### 3.1.1 IMV의 기본 구성 및 핵심 원리

IMV 구성의 핵심은 차동실린더(Differential Cylinder)의 미터-인 및 미터-아웃 오리피스를 분리하는 것이다. 기본적으로 그림 2에 보인 것과 같이 두 개의 스펴형 3/3비례제어밸브를 사용하는 방식<sup>11)</sup>과 네 개 또는 그 이상의 포핏형 2/2비례제어밸브를 사용하는 방식<sup>5,8,9,12)</sup>으로 나눌 수 있다.

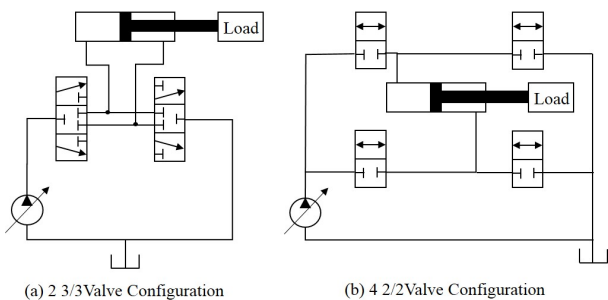


Fig. 2 Different Configurations of IMV  
IMV기술의 핵심원리는 각 밸브의 독립적 제어에

의해 불필요한 쓰로틀손실을 최소화시키는 것과 에너지 재생과 회수를 극대화시키는 것이다. 그림2 (a) 구성의 목적은 미터-인 및 미터-아웃 오리피스를 독립적으로 제어하여 쓰로틀손실을 최소화하는 것이다. 이 구성으로는 에너지 재생이나 회수가 불가능하다. 그러나 스펴형밸브를 채용함으로써 밸브 자체의 검증된 내구성이나 제어의 상대적 간결함이 장점이 될 수 있다. 그림2 (b)는 에너지 재생뿐만 아니라 회수도 가능하다. IMV기술을 이용하여 에너지 효율을 제고시키는 요소 중에서 가장 비중이 큰 것이 에너지 회수이다.<sup>5)</sup> 따라서 그림2 (b) 구성이 에너지 효율 제고의 측면에서 보았을 때 보다 더 효과적인 구성이다.

#### 3.1.2 장단점 및 주요 연구개발 방향

IMV기술의 장점은 기존 시스템에서 구성상 크게 벗어나지 않는다는 것이다. IMV기술 채용 시스템 구성에 따른 원가의 증가도 상대적으로 크지 않으며, 휠로더(Wheel Loader)에 적용하였을 경우 표준 작업 싸이클(Duty Cycle)에서 약 20%의 에너지 효율 개선 결과를 보였다.<sup>5)</sup> 그러나 기존 시스템 대비 상대적으로 많은 센서와 이에 의존한 복잡한 제어 알고리즘을 필요로 한다. 또한 상용화된 밸브의 비 다양성도 향후 많은 발전이 필요한 분야이다.

IMV기술의 연구는 주로 효율적인 제어 전략(Control Strategy)의 개발과 빠른 응답속도 및 구조적 안정성이 높은 밸브의 개발에 집중되고 있다. 제어 전략은 시스템이 준-정적(Quasi-static)거동이라는 가정 하에 이루어지고 있는 것이 보통이며, 스웨덴의 Linköpings대학<sup>5,9,13)</sup>과 이와 밀접한 산학협동 관계를 맺고 있는 Parker-Hannifin Co.<sup>14,15,16)</sup> 및 미국의 HUSCO사<sup>8,17,18)</sup>의 연구가 활발하다. 동적 모델링에 기초하여 IMV 시스템의 제어에 관한 연구<sup>12,19)</sup>도 있으나 다자유도 시스템으로의 확장이 아직 미해결 상태이다. 준-정적거동 가정하의 제어전략은 그림3에 보인 바와 같은 차동실린더의 4-Q동작과 밀접한 관계가 있다. 그림3의 I과 IV상한은 레지스트모드(Resistive Mode)를 나타내고 II와 III상한(Quadrant)은 오버러닝모드(Over-running Mode)를 나타낸다. IMV의 제어전략의 핵심은 센서를 통해 현재의 동작 상한(Quadrant)을 알아낸 후 에너지 효율을 극대화시키는 방향으로 모드전환(Mode Switching)을 수행하는 알고리즘을 개발하는 것이다. 이때 모드전환 시 발생할 수 있는 급격한 압력 변화와 이에 따른 급격한 속도

변화에 의한 진동을 고려한 제어전략의 개발이 중요한 문제이다.

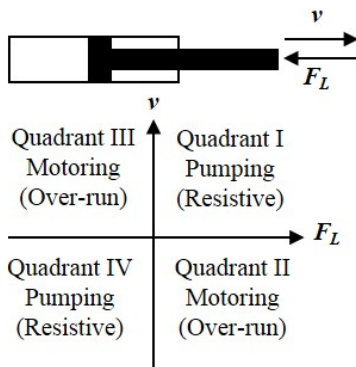


Fig. 3 Definition of 4-Q Operation of Differential Cylinder

IMV용 밸브 개발은 크게 보아 다음과 같이 세 가지로 나눌 수 있다.

- ① 스푼형(Spool Type) 3/3비례제어밸브
- ② 포핏형(Poppet Type) 2/2비례제어밸브
- ③ 디지털밸브

스푼형 3/3/밸브는 그림2 (a)에 보인 IMV구성에 적합한 형태로 Eaton사의 Ultronic ZTS16 Twin Spool Valve<sup>20)</sup>가 널리 사용된다. 기존 시스템의 큰 변화 없이 쓰로틀손실을 최소화시키기 위한 목적에 적합하다. 물론 에너지재생용 2/2 ON/OFF밸브를 추가하여 좀 더 효율적인 회로구성이 가능하다. 그러나 IMV기술을 완전히 구현하기 위해서는 양방향 포핏형 2/2비례제어밸브가 필요하다. Eaton사의 단방향 Valvistor 밸브와 Parker Hannifin사의 양방향 Valvistor밸브 그리고 HUSCO사의 INCOVA밸브가 대표적이다.

Valvistor란 Valve와 Transistor의 합성어로 스웨덴 Linköpings대학의 Andersson에 의해 IMV기술의 연구를 위해 개발된 포핏형 단방향 비례제어밸브이다.<sup>21)</sup> Valvistor는 전자소자인 트랜지스터와 같이 작은 파일럿유량(Pilot Flow)으로 큰 유량(Flow)을 제어한다는 의미이다. 이를 Eaton사에서 상용화시켰으며 Linköpings대학과 Parker Hannifin사에서 양방향으로 변형시켜 특허출원한 상태이다.<sup>5,13,14,15,22)</sup> Valvistor의 특징은 운동하는 질량이 포핏 하나뿐이라는 점이다. 반면에 INCOVA밸브는 Valvistor와 마찬가지로 유량 증폭의 기능을 하는 양방향 비례제어밸브이나 운동하는 두 개의 질량으로 이루어져 있다.<sup>23)</sup> 따라서 동특성의 측면에서 양방향 Valvistor가 유리할 수도 있을 것으로 판단되나 INCOVA밸브는 아직 정확한 스펙이 제공되는 일반 상용품이 아니므로<sup>24)</sup> 정확한 판

단은 내릴 수 없다. 그러나 두 제품 모두 유량 증폭 제어의 특성을 가지므로 온도 변화와 점성의 변화 등에 밸브의 특성이 민감할 수밖에 없다. 사용자 입장에서 이는 대한 검토가 매우 중요하다는 점을 강조한다.

이러한 문제에 착안한 아이디어가 핀란드의 Tampere대학에서 개발한 디지털밸브이다.<sup>25)</sup> 이는 오리피스 면적이 서로 다른(주로 2진 급수 형태) ON/OFF 밸브를 복수 개(주로 4개)로 병렬 연결하여 그 조합(2<sup>n</sup>)에 의하여 비례제어밸브를 근사화 시키는 원리이다. 아직 상용화되지 않은 상태<sup>26)</sup>이나 크기, 복잡한 제어 알고리즘 등의 단점과 함께 구조적 단순함, 강인성(Robustness), 고장 허용(Fault Tolerance) 등의 장점 또한 많으므로 안정적인 하드웨어만 상용화된다면 그 용도가 매우 다양해질 것으로 판단된다.

### 3.2 클래스II-신기술: 3-LINE CPR

클래스II의 핵심은 CPR이다. CPR은 전기시스템의 전력망(Power Grid)처럼 거의 일정한 압력선을 만들고 여기에 각종 유압 액추에이터를 연결시키는 개념이다. CPR의 장점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 모듈화된 시스템 설계가 가능
- ② 동력원(Power Source)을 독립적으로 설계
- ③ 어큐뮬레이터(Accumulator)의 사용으로 에너지 회수가 용이함
- ④ 어큐뮬레이터(Accumulator)의 사용으로 펌프는 듀티싸이클(Duty Cycle)의 평균유량만 공급할 수 있는 용량으로 축소(Downsizing) 가능. 따라서 엔진 용량도 축소 가능.
- ⑤ 펌프와 부하가 서로 독립적(Load Independence)이고 부하간의 간섭(Load Interaction)도 없음
- ⑥ CPR의 높은 시스템 압력이 항상 대기하고 있어서 빠른 응답(Fast Response)이 가능함.

이런 장점에도 불구하고 차동실린더를 쓰로틀 밸브를 통해서 연결하면 기존 시스템보다 쓰로틀 손실이 커지게 되므로 에너지 효율이 너무 낮아 의미가 없게 된다. 이런 효율의 문제를 해결하며 CPR의 장점과 쓰로틀제어의 조작 용이성을 목표로 한 기술이 3-Line CPR이다.

#### 3.2.1 3-Line CPR의 기본 구성 및 핵심 원리

그림4는 3-Line CPR의 기본 구성을 나타낸다. 3-Line CPR은 펌프의 토출 압력인 HP-Line과 탱크

압력인 TP-Line 사이에 중간 크기의 압력인 IP-Line을 추가하여 작동모드를 다양화시킴으로써 쓰로틀손실을 줄이려는 시도이다. 핵심원리는 차동실린더 양 챔버(Chamber)의 압력을 측정하여 가장 적절한 작동모드를 선택하는 제어전략이다.

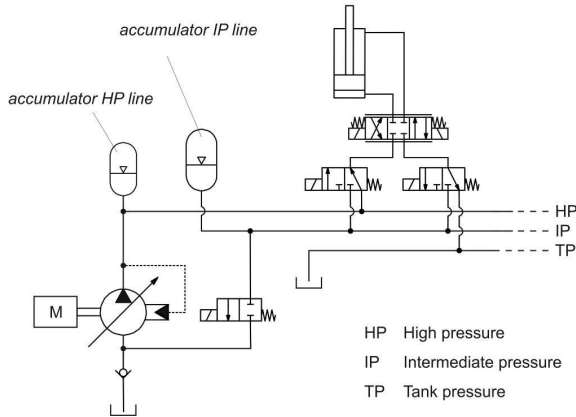


Fig. 4 Configuration of 3-Line CPR

그림 5는 부하에 따른 3-Line CPR 작동모드의 개념을 나타낸다.<sup>27,28,29)</sup>

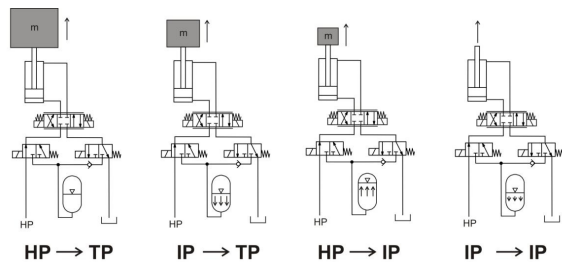


Fig. 5 4 Different Operation Modes of 3-Line CPR

### 3.2.2 장단점 및 주요 연구개발 방향

3-Line CPR의 장점은 CPR시스템의 장점과 쓰로틀 제어의 조작 용이성을 동시에 추구하며 에너지 효율을 제고시킬 수 있다는 것이다. 단점은 쓰로틀 제어의 특성에 기인하여 에너지 효율 향상에 한계가 있을 수밖에 없다는 점과 기존 시스템 수준의 제어성을 확보하기 위한 연구가 필수적이라는 점이다. 휠로더에 적용하여 실험한 결과 약 20%의 에너지효율 향상 효과를 보고하였다.<sup>29)</sup> 그러나 CPR시스템의 많은 장점을 고려하였을 경우 의미가 있는 기술로 판단된다.

3-Line CPR의 주요 연구 방향은 시스템의 특성에 따른 정교하고 효율적인 제어전략 알고리즘을 개발하는 것과 작동모드의 변환 중에도 피스톤의 속도가 일정하게 유지되도록 하는 것이다. 작동모드 변환 시 발생할 수 있는 진동 현상은 특히 중요한 문제로 보고되고 있다.<sup>27,28,29)</sup>

### 3.3 클래스III-신기술: 차동실린더의 폐회로 변위 제어

가변 용량 펌프를 사용한 폐회로 변위 제어(Closed Circuit Displacement Control)는 구성의 단순함과 쓰로틀 손실이 없는 에너지 효율 측면에서의 장점으로 유압모터나 비-차동형(Nondifferential-type)인 양로드형 실린더(Double Rod Cylinder)에 오래 전부터 사용되어 온 기술이다. 이들 액추에이터의 특징은 유입 유량(Input Flow)과 환원 유량(Return Flow)이 동일하다는 것이다. 그러나 건설기계에서 사용되는 차동실린더는 유입과 환원 유량의 불일치(Mismatch)로 폐회로 변위 제어의 대상이 아니었으나 1994년에 비로소 유의미한 특허가 출원되었다.<sup>30)</sup> 이 특허의 핵심은 차동실린더의 불일치 유량을 소용량의 유량공급장치(Fluid Supply System)로 필요에 따라 공급하거나 저장한다는 것이다. 이 특허의 존재를 모르는 상황에서 개념이 매우 유사한 실용적 회로가 2000년에 독일 함부르그공과대학(2004년에 미국 퍼듀대학으로 옮겨 퍼듀대학이 이 분야 연구의 중심이 됨)에서 제안되고 실험도 진행되었다.<sup>31,32)</sup> 이 기술이 본 논문에서 선정한 클래스III-신기술이다.

#### 3.3.1 차동실린더의 폐회로 변위 제어의 기본 구성 및 핵심 원리

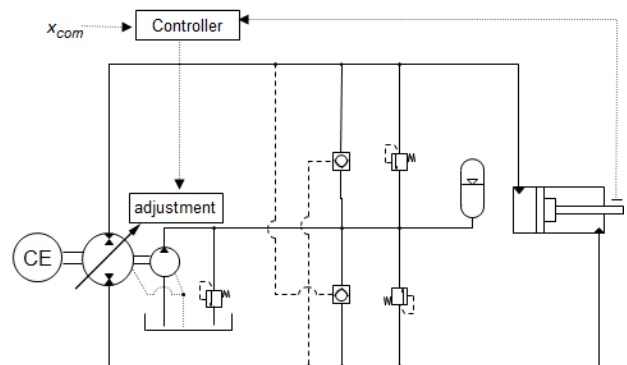


Fig. 6 Configuration of Closed Circuit Displacement Control System

그림 6에서 볼 수 있듯이 이 회로의 주요 구성은 차동실린더에 유량을 보내주는 가변유량펌프, 소규모의 차지펌프(Charge Pump)와 어큐물레이터(Accumulator)로 구성된 불일치유량 보상장치 그리고 차동실린더의 낮은 압력 챔버(Chamber)를 센싱(Sensing)하여 불일치유량 보상장치와 연결시켜주는 두 개의 파일럿-동작 체크밸브(Pilot-operated Check Valve)이다.

이 기술의 핵심 아이디어는 두 개의 파일럿-동작 체크밸브에 있다. 그림3의 4-Q동작에 따른 동작 원리는 다음과 같다.

① 1상한의 경우: 피스톤챔버가 낮은 압력이고 펌프에서 헤드챔버로 압력유를 공급한다. 피스톤챔버의 환원유량이 부족하므로 어큐물레이터에서 보상유량을 공급한다.

② 2상한의 경우: 피스톤챔버가 낮은 압력이고 환원유량인 헤드챔버의 압력유가 펌프를 모터모드로 작동시킨다. 토출 유량이 피스톤챔버의 수용 유량을 초과하므로 과잉 유량은 어큐물레이터에 저장된다.

③ 3상한의 경우: 헤드챔버가 낮은 압력이 되며 펌프에서 피스톤챔버로 압력유를 공급한다. 헤드챔버의 유량이 환원유량이 되며 과잉 유량은 어큐물레이터로 저장된다.

④ 4상한의 경우: 헤드챔버가 낮은 압력이 되며 환원유량인 피스톤챔버의 압력유가 펌프를 모터모드로 작동시킨다. 헤드챔버에 공급되는 유량이 부족하므로 어큐물레이터에서 보상유량을 공급한다.

### 3.3.2 장단점 및 주요 연구개발 방향

이 기술의 최대 장점은 이론적으로 손실이 전혀 없다는 점이다. 따라서 매우 높은 에너지 효율을 기대할 수 있다. 5톤 규모의 실험용 소형 굴삭기 대상 실험에서 40%의 높은 에너지 효율 향상을 보고하였다.<sup>33)</sup> 그러나 이 시스템의 효율은 펌프의 효율에 직결되므로 펌프가 부분 부하(Partial Loading)로 작동될 경우의 낮은 효율 문제는 더 높은 전체 시스템 효율 향상을 위하여 해결하여야 할 과제이다.

액츄에이터마다 폐회로 변위제어 회로를 독립적으로 구성해야 한다는 것이 최대의 약점이다. 따라서 굴삭기와 같이 자유도가 많은 건설기계의 경우 부피의 문제가 대두된다. 불일치유량 보상장치는 모든 액츄에이터가 공유할 수 있으나 펌프의 개수는 시스템의 원가 상승 요인이 될 수 있다. 뿐만 아니라 개별 펌프의 용량은 액츄에이터의 최대 부하 상황에 맞추어 설계되어야 하므로 용량이 커지는 경향이 있다. 따라서 시스템 전체의 펌프 용량이 커지게 되고 이는 엔진의 용량과도 연결된다.

현재 이 기술의 주된 연구 방향은 최적의 파워 관리 전략(Optimal Power Management Strategy)이다.<sup>34,35,36,37)</sup> 이 연구에서는 엔진의 속도제어까지 전체 에너지 효율 제고의 범주에 포함시키며 55%의 연비 향상 결과를 보고하고 있다.<sup>36)</sup>

### 3.4 클래스IV-신기술: Throttle-less CPR

클래스II의 3-Line CPR은 현재 상용화된 유압요소들만을 이용해서 의미 있는 에너지효율 향상과 함께 CPR의 장점을 이용할 수 있는 현실적인 기술이지만, CPR의 장점을 완전히 활용하려면 쓰로틀손실이 없는 방법이어야 한다. 차동실린더에 대해 주목할 만한 신기술은 유압변환기와 멀티챔버실린더(Multi-Chamber Cylinder)를 활용하는 기술이라고 판단된다. 유압변환기 관련 기술은 네덜란드 INNAS BV의 IHT(INNAS Hydraulic Transformer)가 독보적이며 상용화에 매우 근접한 상황이다.<sup>38)</sup> 따라서 본 논문에서 유압변환기는 IHT를 의미한다.

#### 3.4.1 IHT의 기본구성 및 핵심 원리

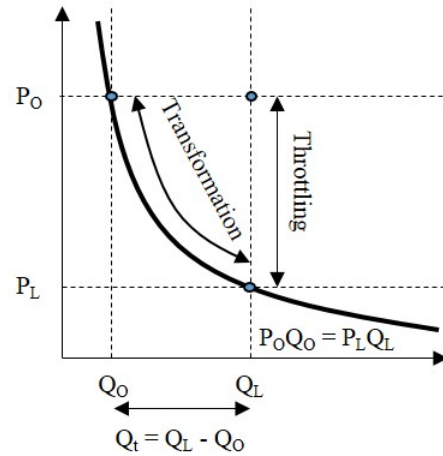


Fig. 7 Throttling vs. Transforming of Hydraulic Power

그림7은 유체일률(Hydraulic Power)의 두 가지 서로 다른 천이 과정을 보여주며 검은색 포물선은 일정 일률(Constant Power)을 나타낸다. 공급측 압력이  $P_0$  이고 사용자측 압력이  $P_L$  이라할 때, 사용자측 요구 유량이  $Q_L$  이라면 쓰로틀에 의한 방법은 공급측에서도 유량  $Q_L$  을 공급하며 쓰로틀밸브로  $\Delta P (= P_0 - P_L)$  만큼의 압력강하를 발생시키게 된다. 이는 열 발생을 통한 에너지 손실이 된다. 변환(Transformation)을 통해 사용자측의  $P_L Q_L$  의 일률을 달성하려면 공급측의 유량( $Q_0$ )은  $P_0 Q_0 = P_L Q_L$  에 의해  $Q_0 < Q_L$  이 된다. 따라서 유압변환기는 유량을 보충해 줄 제3의 포트(Port)가 필요하게 된다.

재래식 유압변환기(Conventional Hydraulic Transformer)는 두 개(이 중 적어도 하나는 가변 용량)의 유압 펌프/모터를 직렬로 결합시켜 구성하였으나 낮은 효율, 큰 부피, 높은 원가의 문제로 거의 사

용되지 못하였다. 네덜란드의 INNAS BV는 1997년에 한 개의 고정용량 사축식 피스톤펌프를 사용하여 유압변환기(IHT)를 고안하였다.<sup>39)</sup> 이 기술의 핵심 원리는 기존 펌프의 두 포트(180° 원호 각)를 가진 고정식 밸브판(Valve Plate) 대신 회전 가능한 세 포트(120° 원호 각) 밸브판을 사용하는 것이다. 따라서 IHT의 제어 명령은 그림8에 보인 것과 같이 밸브판의 회전각( $\delta$ )이다. 각 포트는 공급측, 사용자(액추에이터)측 그리고 탱크와 연결된다.

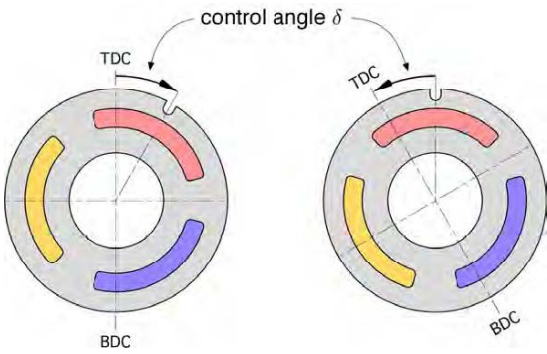


Fig. 8 Rotational Valve Plate of IHT

초기의 시제품(Prototype)은 Bosch Rexroth의 고정식 사축피스톤펌프(피스톤 개수 7개)를 사용하였기에 에너지 효율이 사용된 펌프보다 평균적으로 6% 정도 낮았지만(이는 주로 포트의 120° 원호 각에 기인함) 재래식 유압변환기보다는 약 13%의 효율 향상을 보였다.<sup>39)</sup> 에너지 효율을 근본적으로 높이기 위해서는 피스톤의 수를 늘려야(최소 18개 이상으로) 하므로 구조의 획기적인 변화가 필요하였으며, 2002년 그림9와 같은 플로팅컵(Floating Cup) 구조의 IHT를 발표하였다.<sup>40)</sup>

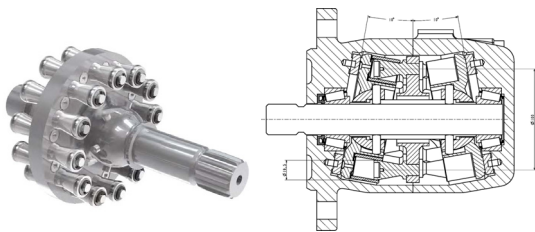


Fig. 9 Structure of Floating Cup

대칭 구조의 플로팅컵은 토크평형(Torque Balance)과 함께 피스톤 수의 획기적 증가가 가능한 구조로 전 동적 범위에서 평균 93%의 효율을 보고하였다.<sup>41)</sup> 이 플로팅컵 구조와 3포트 밸브플레이트를 적용한 모델이 현재 상용화 준비 중인 IHT<sup>38)</sup>이며 4-Q 동작

을 위한 모델<sup>42)</sup>도 발표되었다. 그림 10은 IHT를 이용한 차동실린더 제어 회로의 예시이다.

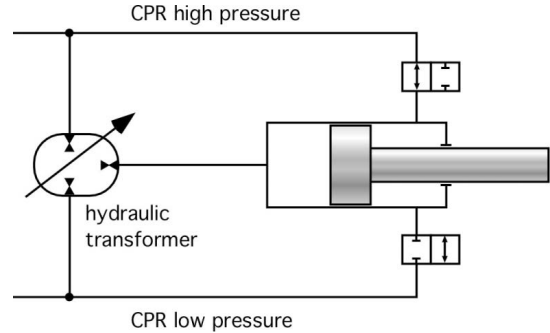


Fig. 10 An Example of IHT-Differential Cylinder Connection

### 3.4.2 IHT의 장단점 및 연구개발 방향

IHT의 장점은 CPR의 장점을 최대한 활용할 수 있는 상용화에 근접한 기술이라는 점이다. 쓰로틀손실이 없으므로 전체 시스템의 효율은 CPR 자체의 효율이 좌우한다고 볼 수 있다. 단점은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 액추에이터마다 전용 IHT가 필요하므로 건설기계의 원가 상승과 설치공간의 문제이다. 둘째는 복잡한 컨트롤 알고리즘이 필요하다는 점이다. 차동실린더 각 챔버의 압력을 측정하여 4-Q 동작의 각 상한마다 적절한 IHT 제어를 하여야 하므로 건설기계 시스템 개발자의 관점에서는 많은 노력과 시행착오를 겪어야 할 것이다. 현재 IHT 자체는 기술적으로 안정된 상태로 볼 수 있고 이를 이용한 실제 시스템 개발에 대한 연구가 향후 연구 방향이라 판단된다.

참고로 2009년에 미국의 발명가 Bishop에 의해 개발된 디지털 유압변환기<sup>43,44)</sup>라는 기술도 있으나 상용화의 관점에서 아직 주목할 단계는 아닌 것으로 판단되어 본 논문에서는 제외하였다. 그러나 지속적인 관심을 기울일 가치는 있다고 판단된다.

### 3.4.3 멀티챔버실린더의 기본구성 및 핵심 원리

쓰로틀손실 없이 CPR을 활용하는 방법은 유압변환기를 통해서 압력을 부하가 요구하는 수준으로 변환시키는 것과 압력은 그대로 유지한 상태로 힘을 발생시키는 피스톤의 면적을 가변시키는 것이다. 멀티챔버실린더란 3개 이상의 챔버를 갖는 실린더를 의미하며 그림 11은 4-챔버실린더와 CPR에서의 기본적인 응용회로를 보인다.<sup>45)</sup> 그림11에서 볼 수 있듯이 CPR과 멀티챔버실린더 그리고 각 챔버와 CPR를 연

결시켜 주는 ON/OFF밸브들이 이 시스템의 기본 구성이다.

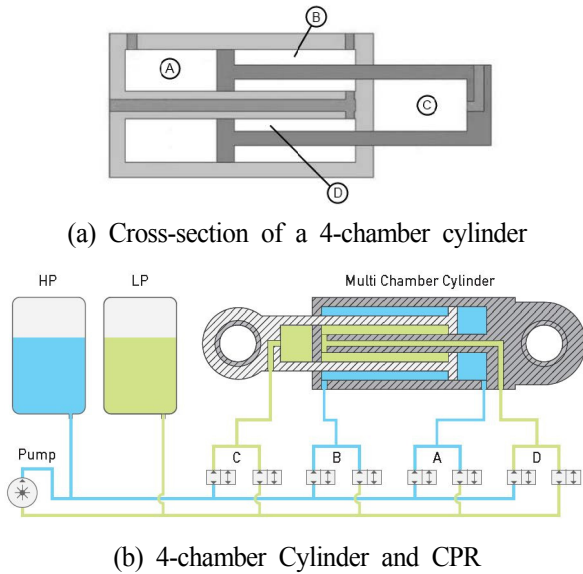


Fig. 11 Transforming High Pressure on CPR Using Multi-chamber Cylinder

이 기술의 핵심 원리는 각 챔버의 면적비에 있다. 그림11 (a)에 보인 4-챔버 실린더의 면적비는  $A_A : A_B : A_C : A_D = 8 : 4 : 2 : 1$ 이다. 여기에서 챔버 A와 C의 압력은 피스톤을 전진시키고 B와 D의 압력은 피스톤을 후퇴시킨다. ON/OFF밸브의 쓰로틀손실을 무시할 수 있다면 각 챔버의 압력은  $P_{HP}$ 와  $P_{LP}$ 의 두 상태(2 States) 중 하나가 된다. 따라서 4-챔버 실린더의 유효력(Effective Force)는 16가지(즉,  $2^4$ )가 되며

$$F_{eff} = P_A A_A - P_B A_B + P_C A_C - P_D A_D$$

로 계산된다. 이제 부하(Load)를 측정하여 이와 가장 근사한 ON/OFF밸브의 조합을 선택하는 것이 핵심 원리이다.<sup>46)</sup> 그림11의 구성으로 LS기반 시스템 대비 약 60%의 에너지효율 향상이 보고되었다.<sup>46)</sup>

### 3.4.4 멀티챔버실린더의 장단점 및 연구개발 방향

이 기술의 장점은 간단한 시스템 구성으로 CPR의 장점을 활용하며 매우 높은 에너지 효율을 얻을 수 있다는 것이다. 심지어 CPR의 장점에 기인하여 기존의 LS기반 시스템보다 원가가 낮아질 수 있다고 판단된다. 문제는 이산적인 유효력의 낮은 분해능(Resolution)에 있다. 이를 보완하는 것이 이 기술의 연구방향이며 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

- ① 챔버 수 증설
- ② 3-Line CPR의 활용

### ③ 제환제어(Feedback Control)의 적용

멀티챔버실린더는 이미 핀란드의 유압실린더 전문기업인 Norrhydro Oy에 의해 NorrDigi™라는 이름으로 ON/OFF밸브와 일체화된 제품이 상용화되었다.<sup>47)</sup> 그림12는 NorrDigi™ 6-챔버 실린더의 유효력 분해능을 보여준다.

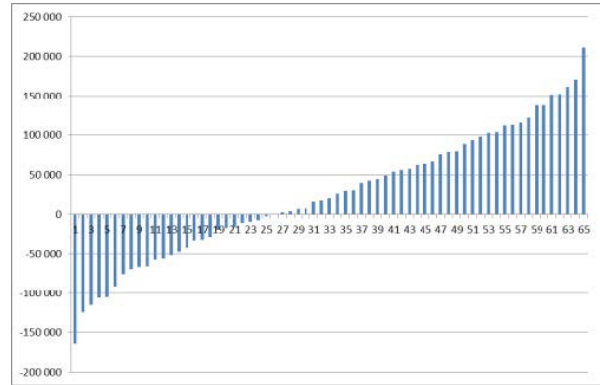


Fig. 12 Effective Forces of 6-Chamber Cylinder

멀티챔버실린더의 부족한 분해능을 향상시키는 방안의 하나로 3-Line CPR을 사용할 수 있다.<sup>48,49,50)</sup> 이 경우 4-챔버 실린더의 유효력 조합이 16가지에서 81가지(즉,  $3^4$ )로 증가한다. 그림12의 6-챔버 실린더에 3-Line CPR을 적용하였을 경우 729(즉,  $3^6$ )로 증가한다. Norrhydro Oy에서는 그림13 와 같이 3-Line CPR과 멀티챔버실린더를 적용한 시험용 건설기계를 발표하였다.<sup>48)</sup> 따라서 CPR 상의 멀티실린더 활용 시 유효력 분해능의 문제가 심각하지는 않을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 기본적으로 힘 제어시스템(Force Control System)인 부제어 시스템(Secondary Control System)을 안정화시키기 위한 방편으로 위치 정보를 이용한 페루프제어를 활용할 경우 2-Line CPR과 4-챔버 실린더의 구성만으로도 만족할 만한 제어성능이 가능함을 보고하기도 하였다.<sup>46)</sup>

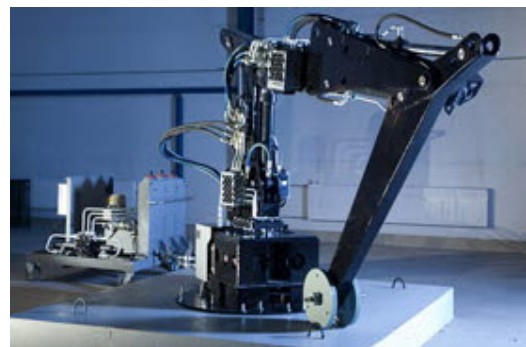


Fig. 13 Prototype Machine Using 3-Line CPR and Multi-chamber Cylinders



### 3.5 신개념 유압펌프

Backé가 분류한 4가지 클래스 중 어느 하나에 속하는 것은 아니지만 본 논문의 목적인 건설기계의 에너지 효율 제고와 관련해서 주목할 만한 기술이 고효율의 신개념 유압펌프이다. 문헌상의 여러 시도 중에서 본 논문에서는 상용화에 성공한 것으로 판단(아직 용량 별 대량생산 체제의 제품은 아님)할 수 있는 두 가지 기술을 선정하여 기술한다.

#### 3.5.1 DDP(Digital Displacement Pump)

디지털변위펌프(Digital Displacement Pump, 이하 DDP라 함)는 1990년에 영국 Edinburgh대학의 Salter 교수에 의해 조력발전시스템에 사용할 목적으로 개발되었다.<sup>51)</sup> 이 DDP의 초기 모델은 고정 사판각의 사판식피스톤펌프를 기본으로 하고 있어 모든 피스톤이 최대 행정(Full stroke)을 한다. 여기에 고속 스위칭이 가능한 두 개의 ON/OFF 솔레노이드 밸브를 각 실린더에 설치하여 낮은 압력의 탱크와 높은 압력의 부하측 유체 흐름을 디지털제어기로 제어한다. 각 솔레노이드 밸브의 적절한 제어에 의하여 부분유량(Partial flow)에 의한 효율 저하가 없는 고효율의 가변용량펌프를 구현하는 것이 핵심이다. 이 구조의 DDP는 1993년 고정된 편심(Eccentricity)량을 이용하는 고정용량식 레디알피스톤펌프(Fixed Displacement Radial Piston Pump)의 구조로 변경된다.<sup>52)</sup> 이를 통하여 하나의 원동기에 복수 개의 펌프를 뱅크(Bank) 구조로 연결시킬 수 있게 되었다.

시뮬레이션 및 제어기술 연구를 위한 DDP의 모델링은 연구 목적에 따라 기구학적(Kinematic) 모델링과 동적(Dynamic) 모델링으로 나눌 수 있다. Ehsan 등은 기구학적 모델을 토대로 한 DDP의 성능을 연구<sup>53,54)</sup> 하였으며, Yigen<sup>55)</sup>은 동적모델을 제시하였다. Merrill 등은 가변 용량(Variable Displacement)을 위한 고압 및 저압 밸브 제어 전략 알고리즘을 제안하였다.<sup>56,57)</sup>

이 DDP 원천기술은 1994년 Edinburgh대학의 Salter 교수 연구그룹에 의해 설립된 Artemis Intelligent Power사<sup>58)</sup>에서 상용화 관련 기술을 개발하고 있다. Artemis Intelligent Power사는 2010년 미쓰비시중공업 그룹의 자회사가 되어 주로 DD 기술을 채용한 풍력 발전시스템개발에 주력하고 있고, 건설기계への 응용 권한은 Sauer Danfoss사로 이전하였다. 그러나 DD 기술 관련 원천 기술 개발은 모두 Artemis Intelligent Power사에서 이루어지고 있다.<sup>59)</sup> 2015년에 최초의 상용화된 96cc/rev 용량의 유압 펌프 모델인 E-dyn 96

DDP가 출시되었다. 4개까지의 뱅크(Bank)구조 연결이 가능하며, 부분유량(Partial flow) 하에서도 성능 저하가 크지 않은 특징을 보이고 있다.<sup>60)</sup> 그림14는 Artemis Intelligent Power사가 제공하는 펌프의 도출유량에 따른 효율 변화를 보여준다.

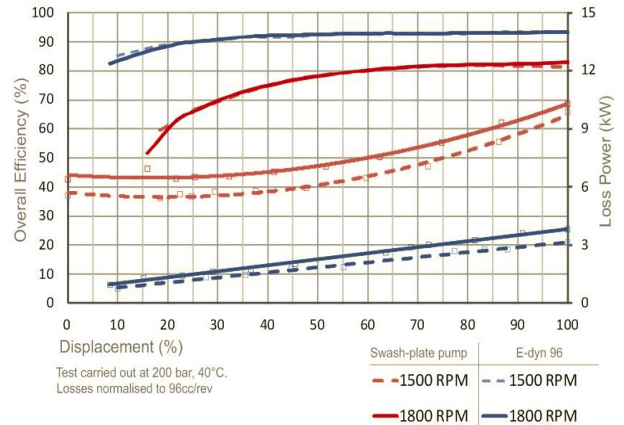


Fig. 14 Comparison of overall efficiency: DD pump vs. swash-plate pump

DDP는 아직 다양한 용량의 상용화된 유압 펌프는 아니다. 그러나 부분유량(Partial flow)에서도 크게 저하되지 않는 효율 특성은 부하변동이 심한 건설기계 에겐 특히 적합하다 할 수 있다. Artemis Intelligent Power사는 건설기계의 LS기반 시스템을 DDP로 단순 교체만 해도 약 30%의 효율 향상을 이룰 수 있으며, DDP 전용 시스템으로 개발하였을 경우 약 60%의 효율 향상을 기대할 수 있다고 주장하고 있다.<sup>61)</sup> 또 하나의 유망한 연구는 클래스III의 폐회로 변위제어에 의 응용이다. 폐회로 변위제어 시스템의 효율은 펌프 자체의 효율에 시스템 전체의 효율이 좌우된다. 따라서 부분유량(Partial flow)에서도 효율이 거의 변함없고 뱅크(Bank)구조가 용이한 DDP는 클래스III의 매우 중요한 요소기술이라 할 수 있다.

#### 3.5.2 Floating Cup Pump

플로팅컵 펌프(Floating Cup Pump)는 INNAS BV에서 유압변환기의 효율 제고를 위한 연구의 산물인 플로팅컵 기술을 유압펌프 개발로 연결시킨 것이다. IHT의 회전 가능한 3-포드 밸브플레이트 대신에 기존의 피스톤식 유압펌프와 마찬가지로 고정식 2-포드 밸브플레이트를 사용한 고효율의 고정용량형 플로팅컵 펌프를 발표하였다.<sup>62,63)</sup> 그림15는 플로팅컵 펌프를 보여준다.

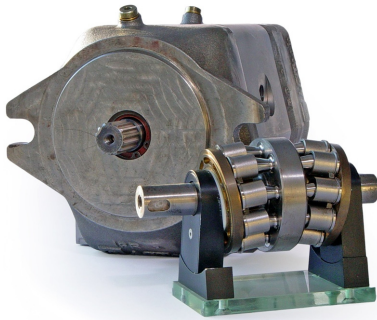


Fig. 15 Floating Cup Pump

가변용량펌프로의 개발은 2005년에 발표<sup>63)</sup>되었으며 기존의 피스톤펌프보다 우수한 성능을 보인다. 그림 16은 피스톤펌프와 비교한 토크효율을 나타낸다.

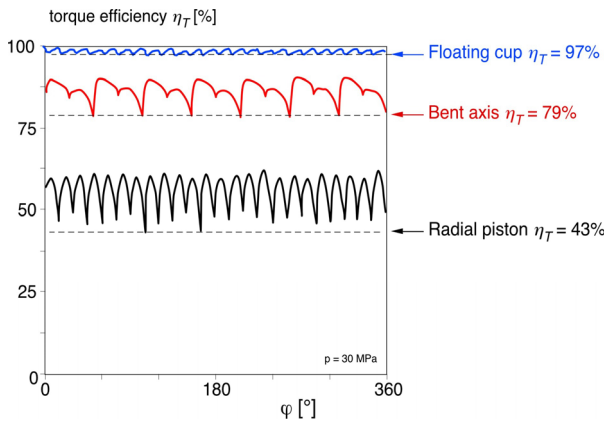


Fig. 16 Comparison of Torque Efficiency: Floating Cup Pump vs. Piston Pumps

#### 4. 건설기계 상용화 관점에서의 고찰

클래스I의 IMV기술은 건설기계 업계에서 양산화에 가장 근접한 기술로 판단된다. 스웨덴의 Parker Hannifin AB는 Linköpings대학과 산학협동을 통하여 원천기술 개발에 상당한 성과를 보이고 있으며<sup>5,13,14,15,16)</sup>, 국내의 IMV기술도 양산화에 도달한 수준이다. 클래스II의 3-Line CPR의 경우, 독일의 KIT(Karlsruhe Institute of Technology)에서 휠로더에 적용하여 제어전략 및 에너지 효율 향상을 실험하였다.<sup>28,29)</sup> 미국 퍼듀대학의 Ivantysynova는 5톤짜리 소형 굴삭기를 개조하여 클래스III의 변위제어를 채용한 시험용 굴삭기를 제작하였다.<sup>33)</sup> 그리고 클래스IV의 유압변환기의 경우, IHT를 활용한 건설기계 시작품 제작이 보고된 사례는 없으나 시뮬레이션 차원에서의 시스템 구성은 다수 발견된다. 멀티챔버실린더를

이용한 시작품은 핀란드의 Norrhydro Oy에서 3-Line CPR 기반 하에서 제작하였다.<sup>48)</sup>

본 논문에서는 비-하이브리드 신기술을 표2와 같이 비교 요약하였다. 여기에서 H는 높음, M은 중간 그리고 L은 낮음을 의미하나 상대적인 의미이다. 즉, 에너지 효율 향상이 L이라 해서 그 효과가 미미하다는 의미가 아니다. 3-Line CPR의 경우 20%의 에너지 효율이 향상된 실험 결과를 발표하였으며<sup>29)</sup> H의 경우 약 60% 정도의 효율 향상을 의미한다.<sup>46)</sup> ㉠은 에너지 효율의 향상을 나타낸다. ㉡는 핵심 부품 또는 시스템 구성을 위한 필요 요소의 시장 준비상황을 의미하나 시스템 완성에 필요한 제어기까지 포함하는 것은 아니다. ㉢는 기존 시스템에 익숙한 기술자의 관점에서 기술의 상이함 정도를 나타내며, ㉣는 완성된 시스템의 동작이 제어알고리즘에 어느 정도 의존적인지를 의미한다. ㉤는 기존 시스템과의 원가 차이를 나타내며 L은 큰 차이가 없는 정도를 의미한다.

Table 2 Comparison of Non-hybrid New Technologies

Technology		㉠	㉡	㉢	㉣	㉤
IMV	3/3 Valve	L	H	L	L	L
	Valvister	M	H	M	H	M
	Incova	M	H	M	H	M
	Digital Valve	M	L	H	H	M
3-Line CPR		L	H	M	H	M
Displacement Control		H	H	H	M	H
Hydraulic Transformer		H	H	H	H	H
Multi-chamber Cyl.		H	H	H	H	M

(Note) H: High, M: Medium, L: Low

- ㉠ Energy Efficiency
- ㉡ Readiness of Commercialization
- ㉢ Technical Difference to LS-Based System
- ㉣ Control Algorithm Dependency
- ㉤ Cost Compared to LS-Based System

관련 산업계의 관점에서 살펴보면 원가상승의 부담이 가장 적은 기술로 1개의 2/2 에너지재생밸브가 포함된 2개의 3/3밸브 IMV가 안정적인 결과를 내줄 것으로 판단된다. 4개의 포핏형 양방향 2/2비례제어 밸브를 사용하는 완전한 IMV기술의 구현은 밸브의 내구성과 안정된 제어알고리즘이 확보될 경우 매우 효과적일 것으로 판단된다. CPR기반으로 제품 설계 개념을 설정하였을 경우에는 3-Line CPR이 가장 빠른 결과를 내줄 것으로 판단되나 기존 시스템 수준

의 제어성능 확보가 매우 중요한 요소일 것이다. 멀티채퍼실린더의 사용 또한 원가 상승의 큰 부담 없이 높은 효율을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 이 시스템은 실제 건설기계에 사용될 수준의 제어 알고리즘에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

원가 상승이 가장 큰 기술로는 클래스III의 폐회로 변위제어와 클래스IV의 유압변환기를 채용한 부제어 (Secondary Control)이다. 신개념의 DDP나 플로팅컴퓨터와 결합시킨다면 클래스III의 폐회로변위제어는 넓은 작동 범위에서 매우 높은 에너지 효율 향상을 기대할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 유압변환기는 핵심 요소기술의 완성도가 매우 높고 에너지 효율 향상 또한 매우 클 것으로 기대될 뿐만 아니라, 유압식 하이브리드 자동차나 풍력 또는 조력발전 등 응용분야가 다양할 것으로 판단되어 전략적으로 시스템 설계 및 제어기술을 확보할 필요도 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 건설기계의 에너지 효율 제고를 위한 비-하이브리드 신기술에 대한 리뷰를 수행하였다. 유압시스템을 4가지 클래스로 분류한 Backé의 분류에 따라 유망한 기술을 각 클래스별로 선정하였으며, 각 기술의 핵심원리와 엄선된 참고문헌을 제시함으로써 관련 산업계에 참고가 되도록 하였다. 또한 각 기술을 에너지 효율, 원가 등 5가지 요소를 토대로 정성적 평가를 시행하여 비교하였다.

건설기계분야에 기존 시스템과는 전혀 다른, 에너지 효율이 매우 높고 유해물질 배출이 적은 시스템으로의 전환이 중장기적으로 요구될 가능성도 있다고 판단된다. 이를 위해서 유럽을 중심으로 지난 15년간 집중적인 연구가 진행되고 있으며 수백편의 논문이 발표되었다. 네덜란드의 유압기술자 Achten의 다음 말로 본 논문의 결론을 대신한다. “The good news is that, if the hydraulic industry succeeds in achieving these goals, it creates enormous potential in application where mechanical and electrical transmissions have come to an end. - 좋은 소식은 바로 이것이다. 만일 유압산업계가 기술혁신의 목표에 도달한다면 기계식이나 전기식의 동력전달장치가 막다른 골목에 도달한 응용분야에서 엄청난 잠재력을 창조할 것이다.”<sup>64)</sup>

### 후 기

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

### References

- 1) M. Kagoshima, T. Nanjo and A. Tsutsui, “Development of New Hybrid Excavator”, Kobelco Technology Review, No. 27, 2007, (available from [http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr\\_27/039-042.pdf](http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_27/039-042.pdf))
- 2) [www.kyotoprotocol.com/](http://www.kyotoprotocol.com/)
- 3) Eaton, “Eaton Medium Duty Piston Pumps: Load Sensing Systems Principle of Operation”, No. 03-206, November 1992
- 4) C. Williamson, J. Zimmerman and M. Ivantysynova, “Efficiency Study of an Excavator Hydraulic System Based on Displace-Controlled Actuators”, ASME/Bath Workshop on Fluid Power and Motion Control (FPMC08), Bath, UK, 2008
- 5) B. Eriksson, “Control Strategy for Energy Efficient Fluid Power Actuators: Utilizing Individual Metering”, M.Sc. Thesis, Linköpings University, pp. 19-20, 2007
- 6) W. Backé, “Hydraulic Drives with High Efficiency”, Fluid power systems and technology, Vol. 2, pp. 45-73, 1995
- 7) M. Murrenhoff, S. Sgro and M. Vukovic, “An Overview of Energy Saving Architectures for Mobile Applications: A framework to classify mobile hydraulic systems”, Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Fluid Power Conf., Aachen, Germany, 2014.
- 8) K. Tabor, “A Novel Method of Controlling a Hydraulic Actuator with Four Valve Independent Metering Using Load Feedback”, SAE International Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, 2005
- 9) A. Jansson and J. Palmberg, “Seperate Controls of Meter-in and Meter-out Orifices in Mobile Hydraulic Systems”, SAE International Off-highway and Powerplant Congress and Exposition, 1990
- 10) R. Book and C. Goering, “Programmable Electrohydraulic Valve”, SAE International

- Off-highway and Powerplant Congress and Exposition, 1999
- 11) J. Aardema, "Hydraulic Circuit Having Dual Electrohydraulic Control Valves", U. S. Patent 5,568,759, 1996
  - 12) C. DeBoer and B. Yao, "Velocity Control of Hydraulic Cylinders with Only Pressure Feedback", Proc. of IMECE'01, 2001 ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 1-9, Nov. 11-16, 2001, N.Y., USA
  - 13) B. Eriksson, "Mobile Fluid Power Systems Design: with a Focus on Energy Efficiency", Ph.D. Thesis, Linköpings University, 2010
  - 14) Parker Hannifin AB, "Fluid Valve Arrangement", US Patent No. US 2011/0017310 A1, Jan. 27, 2011
  - 15) Parker Hannifin Co., "Fluid Valve Arrangement", US Patent No. US 2013/0074955 A1, Mar. 28, 2013
  - 16) Parker Hannifin Co., "Independent Metering Valve for Mobile Equipment", International Patent No. WO 2015/164321 A1, Oct. 29, 2015
  - 17) K. Tabor, "Optimal Velocity Control and Cavitation Prevention of a Hydraulic Actuator Using Four Valve Independent Metering", SAE International Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, 2005
  - 18) J. Pfaff, "Distributed Electro-Hydraulic Systems for Telehandlers", The 50<sup>th</sup> National Conf. on Fluid Power, March 16-18, pp. 779-784, 2005
  - 19) S. Liu and B. Yao, "Coordinate Control of Energy Saving Programmable Valves", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 34-45, 2008
  - 20) Eaton, "Ultronics ZTS16 Twin Spool Valve", Technical Sheet, 2010
  - 21) B. Andersson, "On thr Valvistor - A Proportionally Controlled Seat Valve", Ph.D. Thesis No. 108, Division of Fluid Power Control, Linköpings University, 1984
  - 22) B. Eriksson, J. Larsson and J. Palmberg, "A Novel Valve Concept Including the Valvistor Poppet Valve", HIDRAVLICNA KRMILJA, Ventil 14, pp. 438-442, 2008
  - 23) P. Opdenbosch, "Auto-calibration and Control Applied to Electro-hydraulic Valves", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2007
  - 24) HUSCO International, "INCOVA" brochure, 2007 (Available at <http://www.incova.com/>)
  - 25) M. Linjama, K. Koskinen and M. Vilenius, "Accurate Trajectory Tracking Control of Water Hydraulic Cylinder with Non-ideal ON/OFF Valves", Int. J. of Fluid Power 4, No. 1, pp. 7-16, 2003
  - 26) M. Linjama et al., "Mechatronic Design of Digital Hydraulic Micro Valve Package", ELSEVIER Procedia Engineering 106, pp. 97-107, 2015
  - 27) P. Dengler, J. Groh and M. Geimer, "Valve Control Concepts in a Constant Pressure System with an Intermediate Pressure Line", 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Hydraulics and Pneumatics, June 1-3, 2011
  - 28) P. Dengler et al., "Efficiency Improvement of a Constant Pressure System Using an Intermediate Pressure Line", 8<sup>th</sup> Int. Fluid Power Conf., Dresden, Germany, March 26-28, 2012
  - 29) P. Dengler and R. Dombrowski, "Efficient Optimization of Hydrostatic System Using an Intermediate Line", 7<sup>th</sup> FPNI PhD Symposium on Fluid Power, Reggio Emilia, Italy, June 27-30, 2012
  - 30) A. Hewett, "Hydraulic Circuit Flow Control", U.S. Patent No. 5,329,767, 1994
  - 31) M. Ivantysynova, "Displacement Controlled Linear and Rotary Drives for Mobile Machines with Automatic Motion Control", SAE International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Milwaukee, Wisconsin, Sept. 11-13, 2000
  - 32) R. Rahmfeld, "Development and Control of Energy Saving Hydraulic Servo Drives for Mobile Systems", Ph.D. Thesis, Technical University of Hamburg-Harburg, 2002
  - 33) J. Zimmerman, E. Busquets and M. Ivantysynova, "40% Fuel Savings by Displacement Control Leads to Lower Working Temperatures - A Simulation Study and Measurements", Proceedings of the 52<sup>nd</sup> National Conf. on Fluid Power, Las Vegas, USA, March 2011
  - 34) C. Williamson, "Power Management for Multi-Actuator Mobile Machines with Displacement Controlled Hydraulic Actuators", Ph.D. Thesis,

- Purdue University, 2010
- 35) R. Hippalgaonkar and M. Ivantysynova, "Optimal Power Management of Hydraulic Hybrid Mobile Machines – Part I: Theoretical Studies, Modeling and Simulation", *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 138, 2016
  - 36) R. Hippalgaonkar and M. Ivantysynova, "Optimal Power Management of Hydraulic Hybrid Mobile Machines – Part 2: Machine Implementation and Measurement", *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 138, 2016
  - 37) E. Busquets and M. Ivantysynova, "Toward Supervisory-Level Control for the Energy Consumption and Performance Optimization of Displacement-Controlled Hydraulic Hybrid Machines", *Proceedings of 10<sup>th</sup> IFK Int. Conf. on Fluid Power*, Dresden, Germany, March 2016
  - 38) <http://www.innas.com/>
  - 39) P. Achten, Z. Fu and G. Vael, "Transforming Future Hydraulics: A New Design of a Hydraulic Transformer", *The 5<sup>th</sup> Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP*. Vol. 97, 1997
  - 40) P. Achten et al., "Dedicated Design of the Hydraulic Transformer", *3<sup>rd</sup> Int. Fluid Power Conf.*, Aachen, Germany, March 2002
  - 41) P. Achten, "A Hydraulic Transformer with a Swash Block Control Around Three Axis of Rotation", *Key Note Speech, 8<sup>th</sup> IFK*, Dresden, Germany, March 28, 2012 (available at <http://www.innas.com/>)
  - 42) P. Achten et al., "A Four-Quadrant Hydraulic Transformer for Hybrid Vehicles", *11<sup>th</sup> Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'09*, June 2-4, 2009, Linköping, Sweden
  - 43) E. Bishop, "Digital Hydraulic System", U.S. Patent No. 7,475,538 B2, 2009
  - 44) E. Bishop, "Digital Hydraulic System", U.S. Patent No. 8,286,426 B2, 2012
  - 45) D. Gier and G. Gerardus, "Hydraulic Cylinder for Use in a Hydraulic Tool", *European Patent No. EP 1 580 437 A1*, 2005
  - 46) M. Linjama et al., "Secondary Controlled Multi-Chamber Hydraulic Cylinder", *11<sup>th</sup> Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'09*, Linköping, Sweden, June 2-4, 2009
  - 47) <http://www.norrhydro.com/>
  - 48) A. Sipola, J. Makitalo and J. Hautamaki, "The Product Called NORRDIGI™", *5<sup>th</sup> Workshop on Digital Fluid Power*, Tampere, Finland, Oct. 24-25, 2012
  - 49) A. Amico et al., "Investigation of a Digital Hydraulic Actuation System on an Excavator Arm", *13<sup>th</sup> Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP2013*, Linköping, Sweden, June 3-5, 2013
  - 50) K. Heybroek and E. Norlin, "Hydraulic Multi-Chamber Cylinders in Construction Machinery", *In Hydraulikdagarna*, Linköping, Sweden, March 16-17, 2015
  - 51) S. Salter, "Improved Fluid-working Machine", *European Patent No. 0 494 236 B1*, 1990
  - 52) S. Salter and W. Rampen, "The Wedding Cake Multi-eccentric Radial Piston Hydraulic Machine with Direct Computer Control of Displacement", *Proc. of the 10<sup>th</sup> Conference on Fluid Power*, pp. 47-64, 1993
  - 53) Md. Ehsan, W. Rampen and S. Salter, "Computer Simulation of the Performance of Digital-Displacement Pump-Motors", *FPST-Vol. 3, Fluid Power Systems and Technology: Collected Papers ASME*, pp. 19-24, 1996
  - 54) Md. Ehsan, W. Rampen and S. Salter, "Modeling of Digital-Displacement Pump- Motors and Their Application as Hydraulic Drives for Nonuniform Loads", *Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 210-215, 2000
  - 55) C. Yigen, "Control of a Digital Displacement Pump", *M.Sc. Thesis*, Aalborg University, 2012
  - 56) K. Merrill, M. Holland and J. Lumkes, "Efficiency Analysis of a Digital Pump/Motor as Compared to a Valve Plate Design", *7<sup>th</sup> Int. Fluid Power Conference*, 22-24 March 2010, Aachen, Germany, pp. 313-324, 2010
  - 57) K. Merrill and J. Lumkes, "Operating Strategies and Valve Requirements for Digital Pump/Motors", *Proc. of 6<sup>th</sup> FPNI-PhD Symp. West Lafayette 2010*, pp. 249-258, 2010
  - 58) <http://www.artemisip.com/>
  - 59) Personal communication with Dr. Rampen of Artemis Intelligent Power Co. Ltd.

- 60) Artemis Co. Ltd., "Technical Sheet: E-dyn 96 Industrial Pump", 2015 (available from <http://www.artemisip.com/sites/default/files/docs/Industrial%20pump%20leaflet%202015-04-03.pdf>)
- 61) <http://www.artemisip.com/applications/off-road>
- 62) P. Achten, "Designing the Impossible Pump", Proc. Hydraulikdaggar, Linköpings, Sweden, 2003
- 63) P. Achten et al., "Design and Testing of an Axial Piston Pump Based on the Floating Cup Principle", 8<sup>th</sup> Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'03, Tampere, Finland, May 7-9, 2003
- 64) P. Achten, "Convicted to Innovation in Fluid Power", Proc. IMechE Vol. 224 Part I: J. Systems and Control Engineering, pp. 619-621, 2010