

건설기계의 에너지 절약 기술에 대하여 Energy Saving Technology on Construction Equipment

이흥선 · 이민희 · 원진희 · 김병수
H. S. Lee, M. H. Lee, J. H. Won and B. S. Kim

1. 서 론

최근 지속적인 국제적인 오일가격 인상과 더불어 건설기계의 연료소비를 저감이 요구되고 있다.

건설기계는 자연의 화석에너지를 열, 기계, 유압에너지 등으로 변환하여 사용하므로 에너지 손실도 발생하게 되는데 시스템의 고효율화의 의한 연료 소비를 저감이 기술개발의 주류를 이루고 있으며 종합적인 연료소비율 저감과 작업효율 증대를 위하여 조작성 향상은 물론 엔진과 유압시스템 개선, 구조물의 경량화 등에 여러 분야에서 다양한 기술개발이 이루어지고 있다. 그 대표적인 것들을 소개한다.

2. 엔진제어 시스템

건설기계용 엔진은 그 용도가 토목 공사와 채석등에 쓰이기 때문에 운용비용 절감을 위해 연료소비율 저감이 배기가스 정화와 병행하여 가장 중요한 과제가 되고 있다.

먼저 배기가스 규제 대상 가스성분인 NOx는 연소실 내의 온도가 급격히 고온이 됨으로써 흡입한 공기 중에 질소와 산소가 결합함으로써 발생된다. 따라

서 연소를 늦춰서 그 온도를 낮춰주면 NOx의 발생량을 제어하는 것이 가능하다. 이 때문에 일반적인 방법으로써 폭넓게 실시되고 있는 것이 연소실내로 연료를 늦게 분사시키는 방법이다. 그러나 이 방법은 연료효율이 최적이 되는 연료 분사시기 보다도 늦게 분사하기 때문에 연료소비율 악화를 초래한다. 이 연료소비율 악화를 방지하기 위해서는 분사시기를 늦춤으로써 발생하는 연료소비율이 악화되지 않도록 해야 할 필요가 있고 그 방법으로는 고압에서의 연료분사에 의해 분사된 연료를 보다 미세화 하는 방법, 연료실내에서의 공기의 유동을 개선해서 공기와 연료의 혼합을 좋게 하는 방법, 또한 흡입 공기 온도를 낮춰서 흡입공기량을 증가하는 동시에 연료분사시기의 지연량을 줄이는 방법 등이 있다.

그림 2는 당사에서 적용중인 Common Rail Fuel System의 개략도이다.

제2차 배기가스규제 대응 엔진에 이러한 기술들이 적용 되었으며, 대다수의 엔진에서 제1차 배기가스규제 보다도 연료소비율을 낮게 하는데 성공하고 있다. 건설기계의 동력원으로는 주로 디젤엔진이 사용되고 온로드의 배기가스 규제와 병행해서 2006년에는 배기가스규제(제3차 규제)도 예정되어 있다. 배기가스

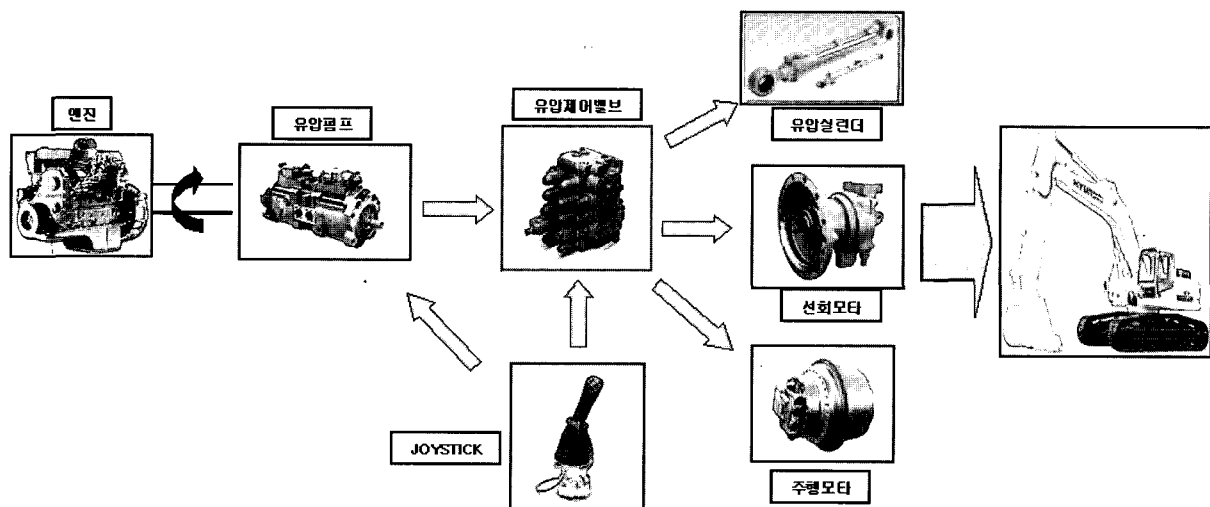


그림 1 코먼 레일 연료 시스템

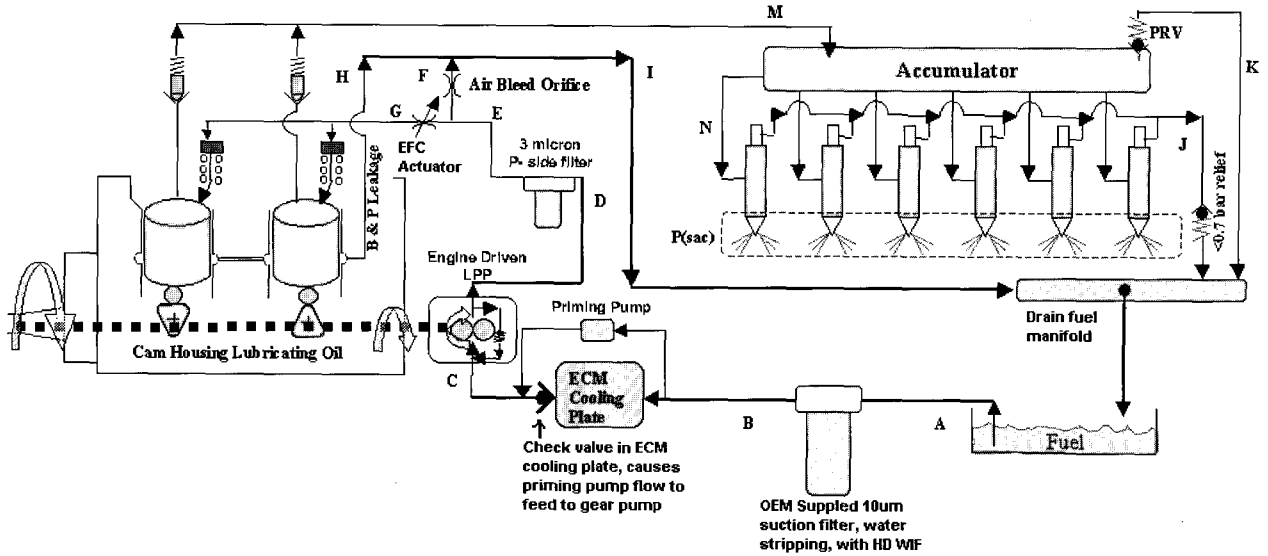


그림 2 코먼 레일 연료 시스템

정화와 연비절감은 기본적으로 양립되는 것이 곤란하고 제3차규제 대응 디젤엔진에서는 엔진 자체 개량에 크게 기대하기는 어려운 상황이다. 따라서 여러 건설기계 메이커들은 앞으로도 시스템 전체의 효율을 높이고 연비절감을 함께 달성하기 위해 IT기술을 구사한 관리 시스템 적용을 추진하고 있다.

3. 유압 시스템에서의 에너지 절감

유압시스템에서의 에너지 절감대책은 「펌프 유량 제어에 따른 에너지 절감」, 「효율적 유량분배에 따른 에너지 절감」, 「재생 에너지의 유효이용에 따른 에너지 절감」 그리고 「유압 부품의 효율향상에 따른 에너지 절감」의 4가지로 설명할 수 있다.

3.1 펌프 유량제어에 따른 에너지 절감

중대형굴삭기에서는 그림 3에 표시된 특성을 갖는 네거티브 컨트롤식 펌프 유량제어를 채택하고 있다. 이것은 조이스틱 레버 조작량, 즉 액추에이터 및 모터류에 압유를 분배 공급하기 위한 컨트롤밸브 제어 스펙의 스트로크에 따라 펌프 토출유량을 증감시켜서 불필요한 펌프 유량을 발생시키지 않음으로써 에너지 절감을 달성하는 방법이다. 그림 4에 나타낸 바와 같이, 일을 수행하지 않는 조건, 즉 컨트롤밸브 스펙이 모두 중립에 있을 때에는 센터바이패스 통로를 통해 탱크로 귀환되는 유량에 따른 압력을 감지하여 가변 피스톤펌프에 피드백하여 펌프의 사관을 최소로 줄여줌으로써, 엔진에 불필요한 부하를 경감

하여 연비를 개선하는 것이다.

향후 연구개발방향으로는 유압 컴포넌트의 고압화로 효율향상을 통한 에너지 절감은 어느 정도 한계에 다다랐다는 생각에서 앞으로는 전자제어기술을 구사하는 방법으로 에너지를 절감하는 방법이 주류가 될 것으로 예상된다. 전자제어에 따른 엔진, 펌프의 효율향상에 덧붙여 컨트롤밸브의 제어도 전자 제어화 함으로써 작업내용과 부하조건에 따라 자동적으로 유량분배를 실시해서 에너지 손실을 줄이고 작업효율을 높여 에너지 절감을 꾀하는 것이 가능해질 것이다. 일례로 해외 메이커의중대형굴삭기용 유압시스템으로 국내 적용중인 네거티브 컨트롤 방식 외에 포지티브 컨트롤, 로드센싱 컨트롤 방식 등이 있으며, 국내에서도 각 시스템의 장점을 조합한 컨버전스가 시도되고 있다.

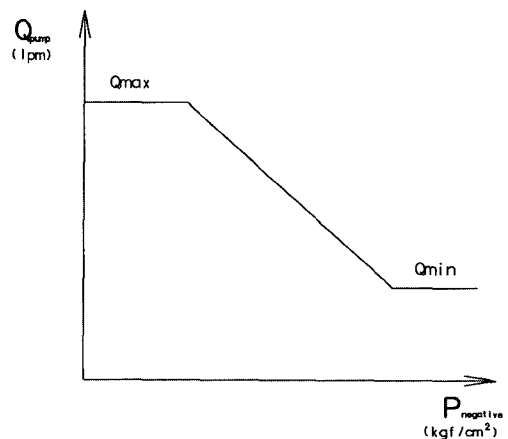


그림 3 부(負) 펌프 제어시의 유량특성

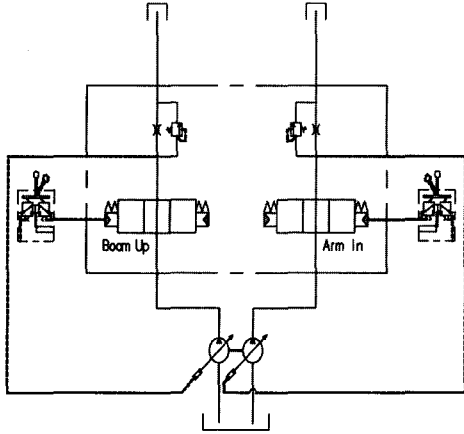


그림 4 부(負) 펌프 제어 시스템

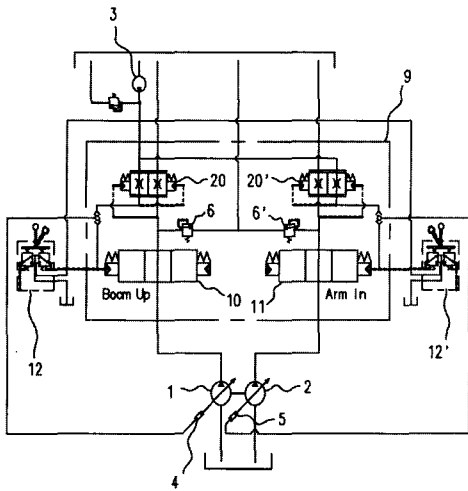


그림 5 변형된 Pump-M.C.V 제어 시스템

그림 5는 종래의 네거티브 방식의 컨트롤밸브에 압력전환밸브를 포함하여 구성한 것으로, 간편히 포지티브 컨트롤 방식으로의 전환이 가능함으로써 복잡한 서클밸브 구조의 포지티브 압력센싱 밸브의 불필요해지며, 보다 빠른 응답성과 부하의 경중에 영향을 많이 받는 액추에이터를 제어하는 컨트롤밸브 제어스풀의 파일럿 압력만을 직접 펌프 제어하도록 하여 작동효율의 극대화, 전체적인 장치의 비용절감 및 장치의 유지보수를 절감할 수 있는 효과가 있다. 또한, 포지티브 센싱 밸브 방식을 종래의 릴리프 방식에서 서보 밸런스 방식으로 변환함으로써 정밀한 센싱이 가능하며, 간단한 부품을 변경하거나 혹은 조정을 통해 유압펌프 토출유량의 제어범위를 쉽게 변경할 수 있는 효과가 있다.

고압, 소유량화에 의해 에너지 절감을 꾀하는 것도 가능하지만 35MPa를 훨씬 초과하는 고압화는 액추에이터와 배관의 고압화에 따른 비용증가를 동반하기 때문에 그다지 기대할 수 없다.

또한, 유압 모터를 이용한 유압 에너지의 회생과 플라이휠과 대형 어큐뮬레이터를 사용해서 유압 에너지를 축적하거나 혹은 배터리를 사용해서 전기에너지를 축적해서 동력원으로 재이용하는 방법에 따라 에너지 절감을 꾀하는 것도 비용절감을 실현가능할 것으로 보인다.

3.2 효율적 유량배분에 따른 에너지 절감

기존의 굴삭기에서는 작업 내용마다 액추에이터로 최적의 유량배분을 실시하기 때문에 모니터 상의 스위치에 의해 Work-Mode(봄 우선 모드와 선회우선 모드)를 변환해서 작업에 대응한 최적의 유량배분을 실시해 작업효율 향상을 얻고 있다. 그렇지만 작업내용이 변함에 따라 작업자가 일일이 모드를 변환해야 하는 번거로움이 있다. 반면, 작업자 레버 조작량에 따라 봄 우선과 선회우선이 자동적으로 부드럽게 변환되는 시스템을 채택함에 따라 작업내용에 맞는 최적의 유량분배를 통해 작업성을 향상시키도록 하고 있다. 예를 들면, 굴삭기 작업장치 동작을 제어하는 메인 컨트롤 밸브 내 가변 오리피스를 설치하고, 이를 제2 봄 스펴에 설치함으로써, 봄 실린더 및 암 실린더에 공급되는 유량배분을 리모트 컨트롤 밸브의 봄 상승 신호량에 따라 제어되도록 하여 상대적 우선 동작이 이루어지도록 하고, 가변 오리피스의 면적을 제어하기 위한 추가적인 밸브 등이 필요 없기 때문에 비용 및 고장요소 등을 배재함과 동시에, 운전자에게는 보다 손쉬운 조작성을 통하여 운전자의 피로를 경감할 수 있게 된다. 이 때문에 에너지를 보다 실효성 있게 이용할 수 있게 되었고 작업 효율도 보다 높여 에너지 절약이 실현되었다.

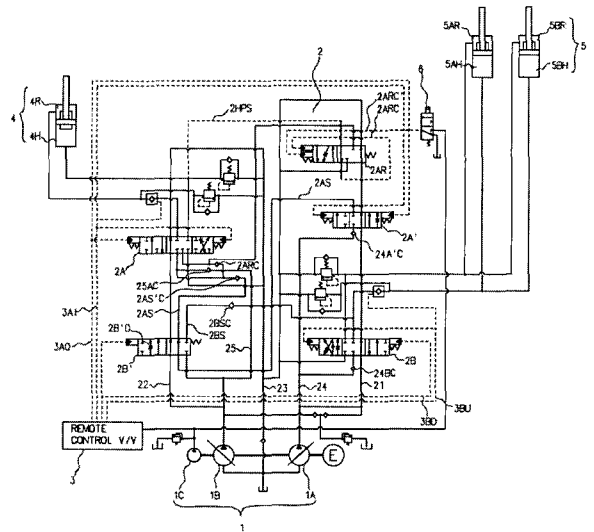


그림 6 가변 오리피스 제어 시스템 예

3.3 재생에너지의 유효이용에 따른 에너지 절감
굴삭기의 붐 하강 및 암 인 회로에는 재생회로가 컨트롤밸브에 내장되어있어서 복귀하는 유량의 일부를 유효하게 이용가능하기 때문에 에너지 저감을 꾀하고 있다.

현재 모델에서는 이전 모델과 비교해 재생비율을 증가시킴으로써 대폭적인 사이클 타임의 단축을 실현하고 있다. 재생비율 증가를 꾀하는 방법으로 당사에서 적용한 별칭형 재생 스펴를 이용하는 것은 실린더 헤드부측의 압력을 비례적으로 감지하여 재생유량을 조절함과 동시에 재생유량을 최대 100%까지 가능하며, 솔레노이드 밸브 등을 이용하여 재생유량을 강제 차단시킴으로써 수평 정지 작업 등과 같은 미세 조작성의 향상을 도모할 수 있고, 실린더 헤드부측 압력에 따른 재생유량을 결정함에 있어서 재생용 메인 스펴의 노치(notch) 형상변경으로 쉽게 유량을 조절할 수 있어 조작성이 향상되고, 암 인 재생용 메인 스펴의 헤드부측 자기압 센싱(sensing) 및 재생유량 강제 차단을 하는 파일럿 포트의 반대편 파일럿 포트에 인가할 때 메인 컨트롤 밸브의 공간 활용의 극대화를 이룰 수 있다.

기타 상기한 사항 이외에도 여러 가지 시뮬레이션 툴과 실장비 시험을 통하여 각 유압 컴포넌트의 효율향상, 각 배관의 압력손실 저감 등을 도모하여 에너지 절감을 꾀하고 있다.

3.4 주요 유압 기능품의 효율 향상에 따른 에너지 절감

유압기능품의 효율향상을 목표로 종래 시스템에서

의 덤핑작업에 따른 각 기능품 에너지 손실 데이터를 분석해본 결과 유압펌프와 컨트롤밸브에서의 에너지 손실이 전체의 거의 2/3를 점하고 있는 것으로 판명되었다. 특히 컨트롤밸브에는 여러 가지 기능들이 집약되어 있고 내부 유로가 복잡하게 되어 있는 등, 스펴 사이즈와 기능상의 제약이 있기 때문에 통로압손을 대폭적으로 줄이는 것이 곤란하기 때문에 에너지 손실비율이 높아지고 있는 것이다. 따라서, 3차원 해석 툴을 활용하여 충분한 강도를 확보하면서 가능한 한 유로를 넓히는 것이 가능하도록 함으로써 압손을 대폭 절감하는 것이 가능하다.

또한 컨트롤밸브에 장착되는 메인 릴리프밸브의 압력 오버라이드 특성을 대폭 개선해서 릴리프압 근처에서의 유량을 저감함으로써 에너지 손실을 낮추고 펌프 유량을 유효하게 사용하여 결과적으로 에너지 절감을 실현할 수 있다.

4. 전기-유압 제어 시스템

연비 개선의 방법으로 건설장비의 동력원인 엔진 출력과 유압시스템 구동원인 펌프의 파워를 효율적으로 사용할 수 있도록 엔진·펌프 파워를 최적의 조건으로 설정하고 유지 하도록 제어하는 시스템을 예로 들 수 있다. 엔진과 펌프의 출력을 효율적으로 사용하는 방법으로 당사에서는 New CAPO(Computer Aided Power Optimization) 시스템을 채택하고 있다. 이러한 시스템의 제어 방법으로는 파워 모드, 작업 모드 및 Auto idle 기능을 그 예로 들 수 있다.

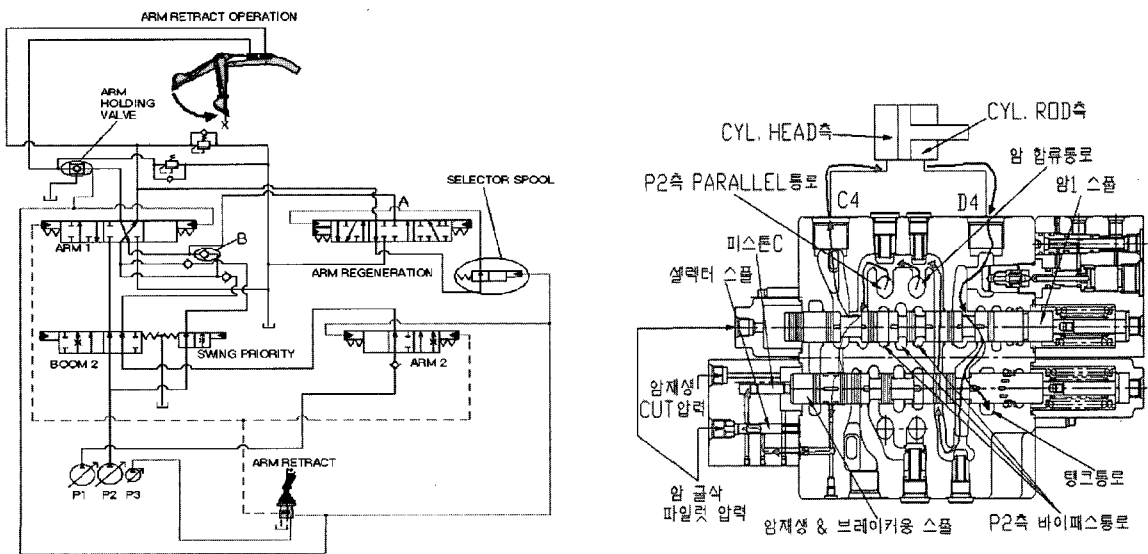


그림 7 외부 유량 재생 시스템

파워 모드는 마력 설정하는 방법에 있어서 작업시 장비를 최대 어느 정도의 마력과 속도를 사용할 것인가를 결정하고 그 마력 범위에서 작업을 행할 수 있도록 엔진과 펌프의 마력 설정을 몇 종류로 구분한다. 이렇게 구분된 파워 모드(당사 M, H, S mode)를 운전자가 작업조건에 맞게 선택하도록 제작되어 있다. 그러나 이러한 파워 모드 선택기능은 작업 조건에 따라 운전자가 별도의 스위치를 사용하여 파워 모드의 종류를 변경하여야 하는 불편함과 작업조건 대비 파워 설정이 과도한 상태에서 작업함으로 불필요한 에너지가 사용되는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하는 방법으로 엔진·펌프의 출력을 사용자의 작업장치 사용조건을 감지하여 엔진 및 펌프의 출력을 자동으로 설정하고 변경하도록 하는 엔진·펌프제어 기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 따라서 당사에서 이러한 단점을 해결하기 위한 방법으로 운전자가 조작하는 작업레버의 조작량에 비례하여 적절한 영역에서 엔진 및 펌프의 마력이 가변되도록 제어하는 제어기술이 있다. 이러한 제어기술은 연료소모량을 저감하는 효과와 동시에 조작성 및 작업성향상에 효과가 있다.

작업 모드는 유압시스템의 유량을 작업 조건에 따라 유로 변경 또는 유량을 변경함으로써 동일한 엔진 및 펌프의 출력조건에서 에너지의 사용 효율을 증대시키는 시스템으로 장비 제어가 작업 조건에 따라 유로 및 유량을 자동으로 설정 변경하는 기능이다.

Auto idle 기능은 작업자가 작업 장치를 무 조작 상태로 일정시간 이상 유지하는 것을 장비 제어가 감지하여 엔진회전수를 자동적으로 떨어뜨리는 기능이다. 이때 자동으로 떨어지는 엔진회전수는 조작성과 매연 발생의 문제점 때문에 Low idle로 설정하지 않고 엔진의 상태를 감안한 조작성과 매연 발생의 문제점이 없는 엔진회전수를 선정한다.

상기와 같이 무조작 시간동안 엔진회전수를 떨어뜨리는 방법을 통해 불필요한 연료소비를 억제하여 연료절감의 효과와 CO₂의 배출량을 저감하는 등의 효과가 있다.

5. 향후 동향

향후 기술개발의 방향을 살펴보면 엔진관련해서는 전자제어화의 확대, VG(Variable Geometry) 터보급 흡기계통의 가변제어, 고성능화도 검토되고 있다고 생각된다. 또한 열효율 향상을 위해서 터보 컴파운드와 같은 배기 에너지의 재이용과 세라믹 등의 단열 재료 사용에 의한 냉각손실 저감도 재검토되고 있다. 또한 자동차업계 등에서 선행되고 있는 전동화를 들 수 있다. 예를 들면, ISG(Integrated Starter Generator)의 사용과 전원의 42V화로 보기류의 전동화를 통해서 연비절감을 꾀하는 것과 고성능 전지와 함께 전동모터와의 하이브리드화 등이 있다.

한편, 유압 시스템에 관해서는 유압 기능품들의

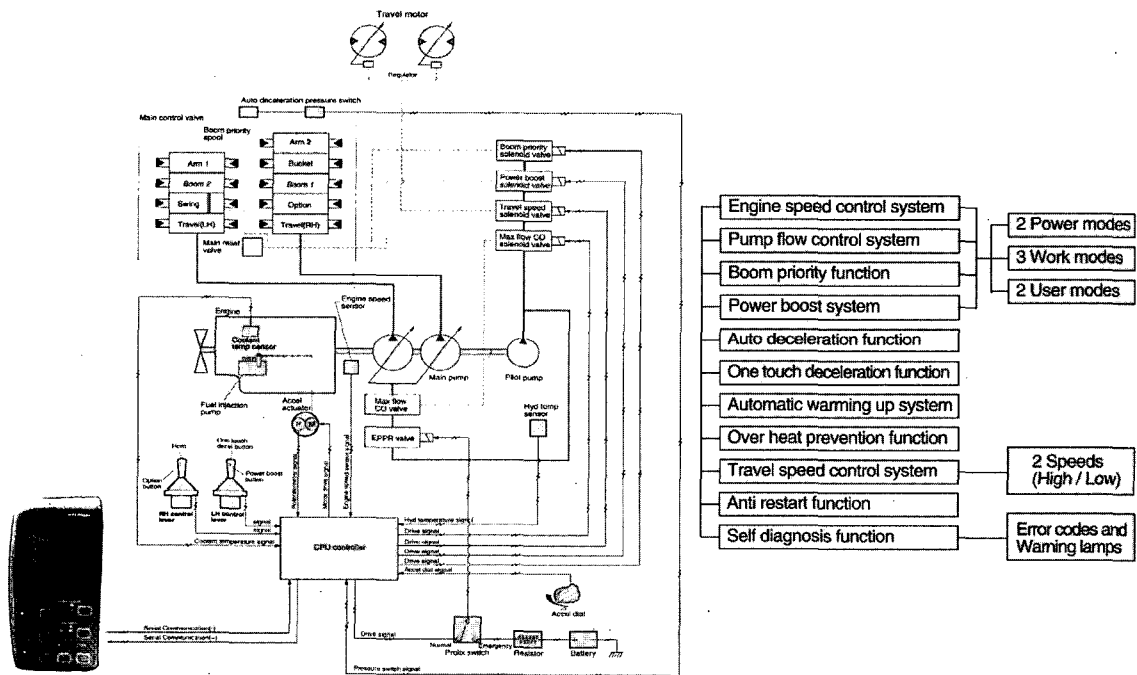


그림 8 굴삭기 전기-유압 제어 시스템

Hard화로서 효율향상을 통해 에너지 절감이라는 어느 정도 한계에 다다랐다는 생각에서 앞으로는 전자제어기술을 구사하는 방법으로 에너지를 절감하는 방법이 주류가 될 것으로 예상된다. 전자제어에 따른 엔진, 펌프의 효율향상에 덧붙여 컨트롤 밸브의 제어도 전자제어화 함으로써 작업내용과 부하조건에 따라 자동적으로 유량분배를 실시해서 에너지 손실을 줄이고 작업효율을 높여 에너지 절감을 꾀하는 것이 가능해졌다.

고압, 소유량화에 의해 에너지 절감을 꾀하는 것도 가능하지만 350bar를 훨씬 초과하는 고압화는 액추에이터와 배관의 고압화에 따른 비용 증가를 동반하기 때문에 그다지 기대할 수 없다. 또한, 유압 모터를 이용한 유압 에너지의 회생과 플라이휠과 대형 어큐물레이터를 사용해서 유압 에너지를 축적하거나 혹은 배터리를 사용해서 전기에너지를 축적해서 동력원으로 재이용 하는 방법 등에 따라 에너지 절감과 아울러 비용절감에도 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

[저자 소개]

이민희



E-mail : minilee@hhi.co.kr

Tel : 052-230-8803

1960년 9월 1일생

1985년 인하대학교 기계공학과 졸업.

동년 현대중공업 입사,

1992년 아주대학교대학원졸업, 대학졸업

후 건설기계개발관련 중사, 유공압시스템

학회, 대한기계학회 회원

[저자 소개]

원진희



E-mail : jinhappy@hhi.co.kr

Tel : 052-230-8922

1966년 6월 23일생

1993년 명지대학교 전기공학과 졸업,

1995년 명지대학교대학원 졸업,

동년 현대중공업 입사

[저자 소개]

이홍선(책임저자)



E-mail : hsl@hhi.co.kr

Tel : 052-230-2092

1949년 10월 20일생

1977년 한양대학교 기계공학과 졸업,

現 현대중공업 상무,

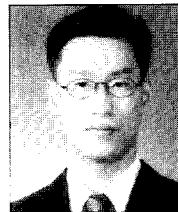
2002년 경희대학교대학원졸업, 건설기계기

술사, 유공압시스템학회 부회장, 대한기계

학회 회원

[저자 소개]

김병수



E-mail : kbs07@hhi.co.kr

Tel : 052-230-8797

1973년 10월 2일생

2000년 울산대 자동차공학과 졸업. 동년

현대중공업 입사, 유공압시스템학회, 대한

기계학회 회원