

건설중장비용 독립 미터링 밸브의 해결 과제

윤 소 남 책임연구원 / 한국기계연구원 에너지기계연구본부
ysn688@kimm.re.kr

1. 서론

1년 전인 2016년 가을에 “건설중장비용 독립 미터링 밸브(IMV)의 연구동향”이라는 제목으로 독립 미터링 밸브(Independent Metering Valve, 이하 IMV라 함)에 대해서 간단히 소개할 기회가 있었으며, 건설중장비에 있어서 화두가 되고 있는 에너지 절약 측면에서의 IMV의 동향 및 가능성을 제시한 바 있다. 마찬가지로 1년이 지난 오늘에 있어서도 IMV는 분명히 필요한 기술이라는 생각을 가진다. 기존의 문헌들을 보면, 기존 굴삭기의 스톱 밸브 방식 대신에 IMV 방식을 사용하게 되면 에너지 효율을 높일 수 있다는 보고 내용만 있지, IMV를 장착하게 되면 어떠한 문제가 있으며, 운용을 어떻게 해야 높은 효율을 얻을 수 있는지에 대한 내용은 거의 없다. IMV를 쳐다보는 저자의 입장에서는 에너지 절약뿐만 아니라 단순성, 제어성, 가격 및 유지/보수 등에 관해서도 고려를 해야만 한다고 생각하고, 이를 위해서는 단순히 에너지 절약이라는 설계인자만으로 해결이 어려운 것들이 있어 소개하려고 한다.

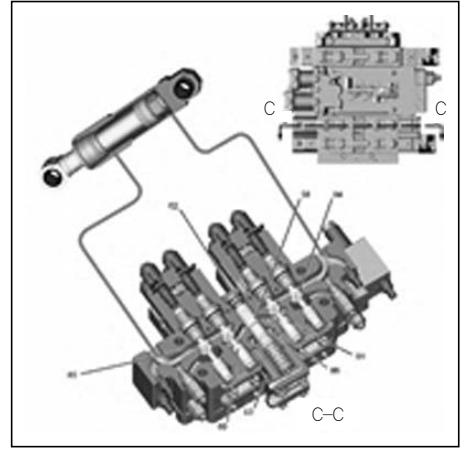
유튜브(YouTube)에서 “Hybrid Valve Boosts Cat 390 F Efficiency and Performance” 혹은 “Independent Metering Valve”의 키워드로 자료를 조사해 보면, 캐터필러 담당자로부터 캐터필러 굴삭기에 장착되어 있는 IMV 기술 및 IMV를 통한 에너지 절약 상황에 대해서 간단히 들을 수 있다. 결론은 이미 캐터필러에서 상품화하여 산업계에 사용되고 있으며, 현실적으로 상당한 에너지 절약이 이루어지고 있는 보고를 하고 있어, 서둘러 국내에서도 해결해야만 되는 과제 중의 하나라고 할 수 있다. 또한, 기존 연구 내용들에 대한 분석도 이루어져, 향후 국내에서 개발되는 IMV에 대해 사전지식을 갖추어 놓을 필요가 있다고 사료된다. 동시에 개발 관점에서 고려해야만 되는 설계 변수들을 찾고, 산업계에서 요구하는 기능들을 갖춘 IMV를 시장에 내놓을 필요가 있다.

일반적으로 유압밸브는 정특성, 동특성, 내구 및 내환경성, 그리고 신뢰성이 먼저 고려되어야 하는데, 이 해결에서는 기존의 스톱 방식에서 IMV 방식으로 바뀌는 과정에서 어떠한 변수들을 먼저 고려해야 하는지에 대

건설중장비용 독립 미터링 밸브의 연결 과제



a) 캐터필러 390F 굴삭기



b) IMV 시스템 개념도

그림 1. IMV가 장착된 캐터필러 390F 모델

해서 생각해 보고, 주요 관심 대상인 에너지 절약, 단순성, 제어성, 가격 및 유지/보수 측면에서 IMV 자체 및 IMV를 내장한 MCV(Main Control Valve) 조립체에 요구되는 필요충분조건 및 설계 계획에 대해서 살펴보기로 한다.

2. IMV 자체로서 해결해야 되는 과제

굴삭기에 장착되어 있는 붐 및 암 실린더는 기본적으로 전,후진 작동 모드가 있으며, 작동 모드들은 PE(Power Extension), HSRE(High Side Regeneration Extension), LSRE(Low Side Regeneration Extension), PR(Powered Retraction) 및 LSR(Low Side Regeneration Retraction)으로 나뉜다. 또한, Powered Recuperation 및 High Side Recuperation를 통하여 실린더를 정지시키는 모드도 필요하다.

그림 2는 PE(Powered Extension) 모드를 보이는 것

으로, Boom-up 시에 제어하는 모드이다. 이때는 실린더의 움직임이 인장이고, 외부 부하의 방향은 압축이다. 유체의 흐름으로 공급 측은 유압 펌프 → 밸브 K_{sa} → 실린더 A이며, 출구 측 흐름은 실린더 B → 밸브 K_{bt} → 탱크 이다. 이러한 모드를 수행하기 위하여 IMV로 사용되는 유량제어밸브는 밸브 K_{sa} → 밸브 K_{bt} 가 열리게 되는데, $P_s > P_a$ 이기 때문에 밸브 K_{sa} 의 열림량 조절이 가

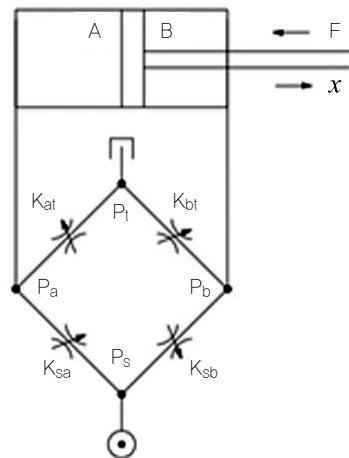


그림 2. PE(Powered Extension) 모드 동작 회로



고객 맞춤형 밸브와 밸브해석진단 서비스

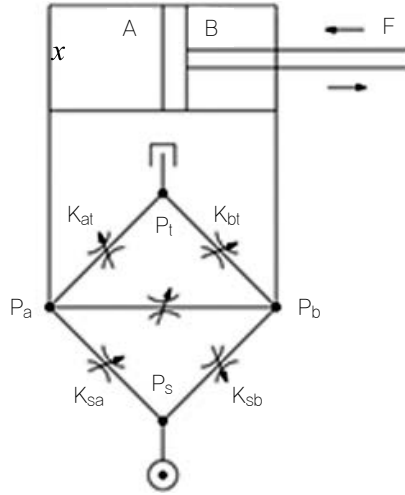


그림 3. HSRE(High Side Regeneration Extension) 모드 동작 회로

능하고, $P_b > P_t$ 이기 때문에 밸브 K_{bt} 열림량 조절이 가능하다. PE 모드에서 닫히는 밸브는 $K_{sa} \rightarrow K_{at}$ 이며, $P_s > P_b$ 이고, $P_a > P_t$ 이기 때문에 밸브 K_{sb} 및 밸브 K_{at} 는 완벽하게 차단이 가능하다.

그림 3은 HSRE 모드의 예를 보여주는 것으로 Boom-up 모드라고도 한다. 실린더의 움직임은 인장이고, 외부하의 움직임은 압축인 상태이다. 유체의 공급 측 흐름은 유압펌프 \rightarrow 밸브 $K_{sa} \rightarrow$ 실린더 A이고, 출구 측 흐름은 실린더 B \rightarrow 밸브 $K_{sb} \rightarrow$ 밸브 $K_{sa} \rightarrow$ 실린더 A가 된다. 이러한 동작을 하기 위해서는 비례전자 밸브의 열림 동작은 밸브 $K_{sa} \rightarrow$ 밸브 K_{sb} 가 되고, 밸브의 닫힘 동작은 밸브 $K_{at} \rightarrow$ 밸브 K_{bt} 가 된다. 이때 밸브 열림 동작에서는 $P_s > P_a$ 이기 때문에 밸브 K_{sa} 를 이용하여 유량을 제어할 수 있으며, $P_b > P_t$ 이기 때문에 밸브 K_{bt} 를 완벽하게 차단할 수 있다. 그러나 압력 P_b 및 P_s 가 부하 변동에 따라서 불안정하게 변할 수 있기 때문에 안정적으로 P_b 에서 P_a 로 넘겨줄 수 있는 새로운 밸브가 필요하다. 또한 실린더 B의 유량을 실린더 A로 보내기 위한 쉬운 방법으로 P_a 와 P_b 사이에 IMV를 설치하면 쉽게 실린더 B의 유

량을 재활용할 수 있다.

그림 2 및 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 HSRE 모드인 경우에는 4/3 방식 스플 밸브를 이용하여 구현이 불가능한 모드이기 때문에 4개의 2/2 방식 밸브를 독립적으로 사용하여 제어를 수행해야만 한다. 또한, 그림 2 및 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 2/2 방식 밸브이면 양방향으로 구동이 되어야만 하는 경우에는(특히 Powered Recuperation 및 High Side Recuperation 모드) 반드시 2/2 방식 밸브일지라도 양방향 제어가 가능해야 한다. 이를 위해서는 기존의 방식과는 전혀 새로운 방식의 밸브가 제안되고 제작되어야 한다.

3. IMV가 내장된 MCV 과제

(1) 에너지 절약성(효율 성능)

최근의 모든 기기 및 기계 시스템을 설계할 때에 최우선적으로 고려되는 부분이 에너지(연료) 절약이라 할 수 있다. 건설중장비, 특히 굴삭기는 매우 열악한 환경에서 운용되는 동시에 작업장 투입 후의 사용 시간이 길기 때

건설중장비용 독립 미터링 밸브의 애결 과제

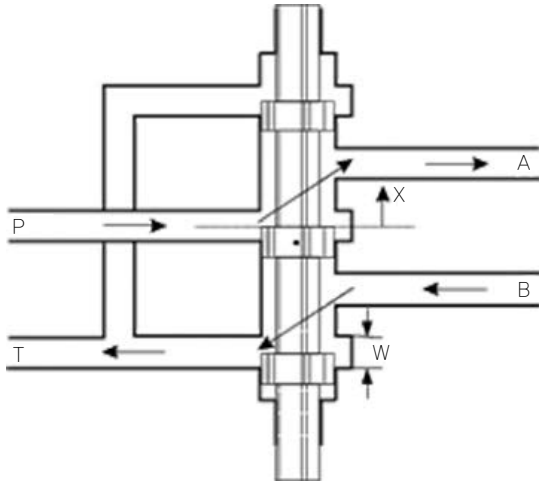


그림 4. 스펴 밸브의 교축 현상 설명도

문에 연료 또한 엄청난 양을 소모하게 된다. 때문에 엔진을 비롯하여 많은 유압기기들의 성능을 향상시켜 에너지 절약을 꾀하는 연구들이 지속적으로 이루어지고 있으며, 성능 향상의 한계에 이르렀다고 할 정도로 상당한 수준이라 할 수 있다. 반면에 MCV인 경우는 스펴 형식(그림 4 참조)을 사용하고 있어 하나의 스펴을 이용하여 양방향을 동시에 제어하는 경우에는 스펴 개구면적의 변화에 따라서 교축이 이루어져 원하지 않는 압력 손실(구조적으로 P → A 방향을 제어할 때, B → T 방향도 동시에 교축이 이루어짐)이 일어나게 되고, 비례하여 연료 소모가 일어나고 있는 실정이다. 그림 4와 같이 4/2 혹은 4/3 방식인 경우는 구조적으로 좌우 대칭형이기 때문에 교축 손실은 피할 수가 없다. 따라서, 최근에는 캐터필러를 비롯한 선진 굴삭기 기업들이 4/3 방식 스펴 형식 밸브 대신에 2/2 방식 포켓 혹은 스펴 밸브를 이용하여 에너지 절약을 꾀하고 있다.

또한, 2/2 방식 포켓 혹은 스펴 밸브를 사용한다고 해도, 저소비전력형 비례솔레노이드 설계/제작, 무마찰 구동 포켓 및 스펴 설계/제작, 그리고 교축이 적은 유압 라인 형상 설계/제작에도 많은 연구들이 이루어지고 있다.

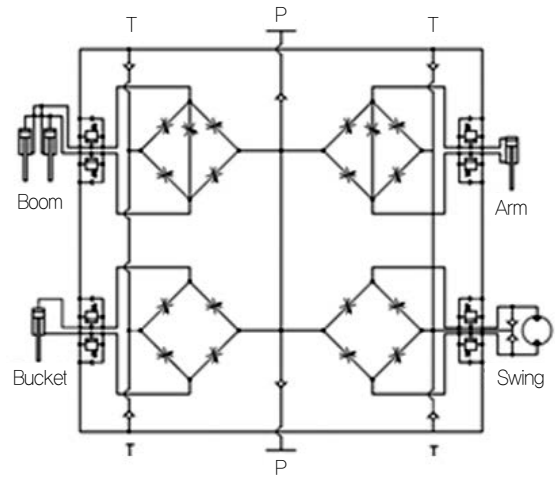


그림 5. 완전 독립형 IMV가 내장된 MCV 회로

(2) 단순성

그림 5는 완전 독립형 IMV가 내장된 MCV 회로를 보이는 것이다. 일반적으로 IMV는 2/2 방식인 동시에 대용량의 유량을 제어해야 하기 때문에 2단 혹은 3단으로 이루어져 있다. 일반적으로 2단 혹은 3단으로 이루어져 있는 밸브들은 비례솔레노이드의 소비 동력을 줄이기 위하여 내부 혹은 외부 파이로트를 사용하고 있다. 굴삭기에 사용되는 IMV인 경우는 제어성과 동시에 단순성을 고려해야 하는데, 외부 파이로트를 사용하게 되면, 18개의 IMV를 제어할 수 있는 보조 파워 유닛을 별도로 설치해야 하는 문제가 발생한다. 이 경우에는 기존 4개의 스펴 방식에서 18개의 독립적인 IMV로 교체되는 과정에서 상당한 공간을 요구하게 되는데, 거기에다 보조 파워 유닛을 별도로 설치하게 되는 경우는 굴삭기 하부 공간을 늘려야 하는 문제점이 발생하게 된다. 따라서, 별도의 독립적인 파이로트용 파워 유닛을 사용하려면 작은 용량으로 18개의 밸브 제어가 가능하도록 아주 작은 파이로트 유량을 필요로 하는 밸브의 설계가 요구된다. 또한, 2단 혹은 3단을 구성할 때 아주 간단한 로직 밸브 혹은 일체형 밸브의 설계를 통하

여 단순성을 향상시키는 방안이 필요하다.

반면에 내부 파이로트를 사용하는 경우에는 붐, 암, 선회, 주행 등 독립적인 동작 수행 및 복합동작을 고려하고, 부하의 변화를 고려하여 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

한편, 내부 파이로트이거나 외부 파이로트를 사용하는 방식에도 부하의 변동 혹은 다수의 비례밸브들이 복합적으로 제어될 때 압력 소스의 변동을 최소화하기 위하여 적절한 축압기 설치가 바람직하다.

(3) 제어성

그림 5에서 언급했던 바와 같이 내부 파이로트를 사용하는 경우에는 붐, 암, 선회, 주행 등 독립적인 동작 수행 및 복합동작 수행에 따라 부하가 변하고, 더불어 압력이 변하게 되어 내부 파이로트 압력을 언제나 일정하게 보내지 못한다. 따라서 복합동작을 수행하는 범위가 매우 제한적이게 되고, 제어성이 나빠지게 되는 경우가 발생하기 때문에 우수한 제어 규칙이 적용되어야 하는 문제가 발생한다.

반면에 외부 파이로트를 사용하면, 별도의 독립적인 파워 유닛을 쓰기 때문에 언제나 작업자가 원하는 압력을 안정적으로 공급할 수 있는 장점이 있다.

스플 형식이나 포핏 형식에서 공통적으로 설계되어져야 되는 부분은 밸브 작동 시에 충격이 가해지는 현상이 발생해서는 안 된다. 이는 먼저 운전자의 승차감을 불안하게 하고, 작업 효율 저하시키는 요인이 되기 때문이다. 따라서, 포핏 형식인 경우는 개구 면적 변화를 다양하게 구현할 수 있는 구조 설계가 필요하고, 스펀형식인 경우는 다양한 종류의 노치 설계가 필요하다. 또한, 비례 유량 제어 밸브를 이용하여 정량적인 유량 제어를 하기 위해서는 로드 센싱 회로를 갖추고 있어야 한다.

(4) 가격

독립 유량 제어 기구를 굴삭기에 적용하려면 기본적

으로 350bar 및 500lpm 이상의 성능을 가지는 IMV가 필요하게 되는데, 밸브의 구성은 비례솔레노이드 및 앰프, 파이로트 제어용 밸브 및 메인 유량제어밸브로 이루어진다. 기본적으로 비례솔레노이드에 있어서는 B-H 특성이 결정되어 있고, 기본적으로 가격이 결정되어 있기 때문에 제어콘 설계 및 제작 방법을 통하여 가공 가격을 절감하는 방안이 요구되고, 파이로트 제어용 밸브에 있어서는 솔레노이드 일체형이 바람직하다 사료된다. 파이로트 제어용 밸브에 있어서도 이미 재료에 대한 가격은 결정되어 있기 때문에 단순한 구조를 가지면서 가공이 쉬운 설계가 중요하다. IMV에서 가격을 결정짓는 제일의 인자가 메인 밸브라 사료된다. 메인 밸브는 기본적으로 포핏 혹은 스펀을 사용하게 되는데, 포핏인 경우는 파이로트 밸브와 일체형 제작이 가능한데 비하여, 스펀형인 경우는 일체형 제작이 곤란하다. 만약에 일체형으로 제작하면 유지 및 보수성을 고려해야 하며, 스펀형으로 제작하면 스펀의 노치 설계 및 누설방지 방안에 대한 계획이 필요하다. 따라서 전술한 모든 요소들이 가격 상승 요인을 유발시킨다.

(5) 유지 및 보수성

굴삭기에 IMV를 장착하거나 기본적으로 18 세트의 밸브 및 앰프가 필요하게 되면 그만큼 고장 요소가 많아지게 되는 단점이 있다. 일체형 IMV인 경우에 있어서는 부품의 분리 조립을 할 수 없으며, 조립체의 일부 부품이 고장 나더라도 단순 부품의 교체가 안 되고, 일체형 밸브 전체를 교체해야 하기 때문에 가격적인 면에서 매우 분리하다.

반면에 스펀 형식인 경우는 스펀/슬리브의 공차 범위 내에서 조립하는 기술만 정립되면, 고장 난 부분에 대해서 쉽게 분리 후 새로운 부품을 교체할 수가 있다. 일체형이나 스펀 분리형 모두 정비에 까다로운 단점은 있으나, 두 형식을 단순 비교하면 스펀 형식이 유리할 수 있다.



건설중장비용 독립 미터링 밸브의 애결 과제

3. 결 론

본고에서는 최근의 핫 이슈인 건설중장비용 독립 미터링 밸브(IMV)에 대해서, 만약에 개발을 할 경우에 어떠한 문제점들이 예상되며, 어떠한 변수들을 설계인자로 가져갈 것인지에 대해서 고찰하였다. 해설을 작성하는 저자도 IMV에 대해서 많은 부분 이해하지 못하고 있고, 아직까지도 IMV에 대해서 상당 부분이 상세히 고찰되어야 한다고 생각되지만, 조심스런 의견을 정리하면 다음과 같다.

가) 에너지 절약성 측면에서는 포펫 형식이나 스펴형식이나 IMV 방식이면 모두 우수하다 사료된다. 그러나 단순성, 제어성, 유지/보수성을 고려한 설계가 되어야 할 것이다.

나) 단순성 측면에서는 일체형이 유리할 것으로 사료된다. 왜냐하면, 로직 혹은 스펴 형태로 밸브 블럭에 삽입하는 경우는 복잡한 회로 설계가 이루어지고, 조립에

어려움이 있으며, 가공수가 많아지는 단점이 있다.

다) 제어성 측면에서는 외부의 독립적인 파이로트 파워 유닛을 사용하는 것이 유리하다 사료된다. 메인 유압 소스를 사용하게 되면, 부하의 변동에 따라서 제어 압력이 변동될 가능성이 많다. 반면에 외부의 독립적인 파이로트 파워 유닛을 사용하게 되면, 언제나 일정하고 안정적인 압력 공급이 이루어지는 장점이 있다. 전술한 두 가지 경우 모두 안정된 제어를 위하여 축압기 설치를 고려해야 한다.

라) 유지/보수 측면에서는 스펴형식이 장점이 있을 것으로 사료된다. 일반적으로 굴삭기 1대당 약 18개의 IMV가 사용된다고 가정하면, 유지/보수 측면에서 밸브에 문제가 발생했을 때에 일체형인 경우는 전체를 교환해야 하는 문제가 있어 가격면에서 많은 손해가 예상된다. 분리형일 경우는 문제가 있는 부품만 교환 가능하기 때문이다.

〈참고문헌〉

1. http://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators/large-excavators.
2. S. A. Nahian, et al. "Introduction of Independent Metering Valve for Energy Saving Excavator System", Journal of Drive and Control 12(1), pp. 45-52, 2015.
3. Milos Vukovic, et al. "The Next Generation of Fluid Power Systems", Procedia Engineering 106, pp. 2 - 7, 2015.
4. Song Liu, et al. "Programmable Valves Enable Both Precision Motion Control and Energy Saving" An ASAE Meeting Presentation, 2005.
5. Amir Shenouda, et al. "Optimal Mode Switching for a Hydraulic Actuator Controlled With Four Valve Independent Metering Configuration" IJFP-9 No. 1 pp. 35-43, 2008