

특집 4

건설기계 유압시스템 및 엔진-유압
통합제어 기술

Hydraulic System and Integrated Control of Construction Equipment



김동목 · 두산인프라코어
Dongmook Kim · Doosan Infracore



안현식 · 두산인프라코어
Hyeonsik Ahn · Doosan Infracore

1. 서론

현대의 기계분야는 안전, 배기규제, 연비, 주행성능 향상 등의 다양한 환경적인 배경과 지능화 기능에 익숙해져 가는 고객의 요구에 따라 점차 전자제어장치가 늘어가는 추세이다. 특히 자동차 분야가 그러한데, 요즘 출시되는 자동차들은 ESP/ABS/TCU 등의 다양한 전자제어기들이 적용되고 있다. 앞으로는 더욱 많은 전자제어기들이 지속적으로 추가 될 것으로 예상되고, 이에 따라 전자제어기들 간의 통합제어가 늘어나고 있다. 여기에 하이브리드 차량이 시장의 큰 부분을 차지하기 시작하면서 HCU까지 추가되어 요즘의 자동차는 움직이는 전자장치라는 말이 실감나는 세상이 되었다.

이에 반해 건설기계는 장비의 전자화가 자동차산업에 비해 느린 속도의 발전으로 시작되었다. 건설기계는 자동차와 달리 이동을 주목적으로 하지 않고 반복되는 작업을 주로 하기 때문에 부하의 변동 패턴은 비교적 일정한 편이다. 하지만 엔진에 걸리는 부하의 크기가 매우 크고 변동하는 주기가 빠르며 변동폭도 아주 크다. 이렇게 가혹한 조건에서 반복적이고 지속적으로 작업하므로 신뢰성과 내구성이 최우선시 되어, 자동차에 비해 전자제어의 도입과 발전이 상대적으로 늦게 이루어졌다.

하지만 근래에 들어 건설기계 업계에도 자동차와 유사한 전자화 현상과 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 선진업체를 포함한 많은 건설기계 제조기업들이 전자제어기들을 많이 적용하고 있으며, 대부분의 선진업체들은 자동차처럼 제어 간 통합제어 기술도 많이 적용되어 있다. 이는 건설기계의 주요 구성품(엔진, 유압시

스텝, 변속기)이 배기규제, 연비, 작업생산성 향상 등의 이유로 전자화되고 있기 때문이다.

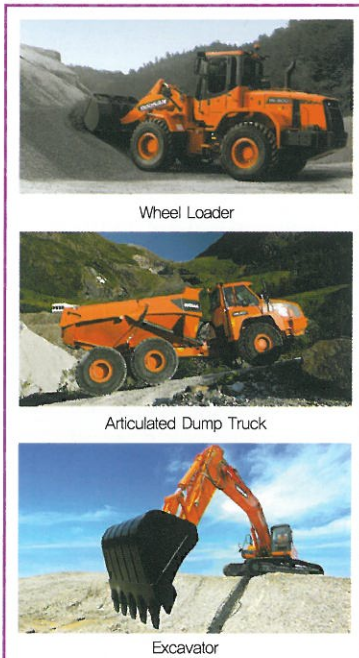
건설기계는 장시간 운용되고 큰 부하를 감당하기 위해서 연료 소모가 많은 편이라, 최근의 건설기계 업계는 연비를 개선하기 위한 전자제어 펌프, 전자제어 밸브 등을 적극적으로 적용하고 있다. 엔진도 자동차 분야처럼 배기규제 강화로 인해 전자제어 엔진이 대폭 도입되었다. 파워트레인으로 엔진, 유압, 변속기를 모두 가지고 있는 휠로더의 경우에는 더 나아가, 각각의 바퀴를 전기 모터로 직접 독립적으로 구동하는 하이브리드 휠로더의 개발도 활발하다.

2. 건설기계 파워트레인

통상 자동차에 있어서 파워트레인이라 함은 동력을 생성하고, 이를 도로 표면이나 물 또는 공기로 전달하는 주요 부품들을 의미하는데, 이렇게 해서 차량이 움직일 수 있도록 하는 동력생성, 전달에 관여하는 부품을 지칭한다. 흔히 엔진, 변속기 및 구동축, 차동기어 및 바퀴나 트랙 등을 의미하지만, 좀 더 광의의 개념으로 파워트레인은 차체를 추진시키기 위해 저장되어 있는 화학, 태양, 원자력 또는 위치에너지를 운동에너지로 변환하는데 사용되는 모든 요소나 부품을 의미하며, 여기에는 바퀴를 사용하지 않는 탈 것들에 대한 부품들도 포함하고 있다.

건설기계에는 대표적으로 굴삭기(Excavator), 도저(Dozer), 로더(Loader), 그레이더(Grader), 굴절식 덤프트럭(ADT), 스키드스티어 로더(SSL) 등 다양한 종류가 있다(그림 1). 각 장비들은 파워트레인의 구성에 따라 크게 두 가지 구성으로 나눌 수 있는데, 자동차와 유사하게 엔진과 변속기 및 유압시스템으로 구성된 경우가 있고, 변속기 없이 엔진과 유압시스템만 직결된 경우가 있다. 엔진, 변속기, 유압이 함께 있는 경우라 하더라도, 휠로더처럼 변속기와 유압시스템이 엔진으로부터 병렬로 파워를 공급받고, 자동차와 달리 유압시스템이 소모하는 파워의 비중이 크다는 점은 다르다.

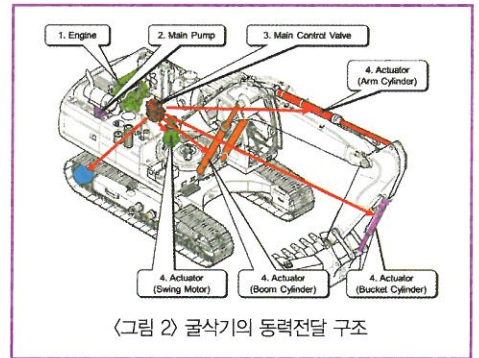
자동차와 달리 생산적인 일을 담당하는 작업기(Boom, Bucket)의 구동에 유압 에너지가 많이 소모되기 때문이다. 또다른 구분으로는 바퀴를 가지고 있어서 도로 주행을 할 수 있는 장비들과 트랙을 장착하여 험지를 운행할 수 있는 장비로 크게 구분할 수 있는데, 전자의 경우 주행을 위한 파워트레인은 자동차 시스템과 유사하나 트랙을 장착한 시스템의 경우 하부주행을 위한 동력 또한 유압을 사용하게 된다. 따라서 건설장비의 통상적인 기능들은 대부



〈그림 1〉 다양한 건설기계 장비

분 유압을 사용하여 작동되므로 건설장비에서의 파워트레인은 유압시스템으로 되어 있다고 해도 과언이 아니라 하겠다.

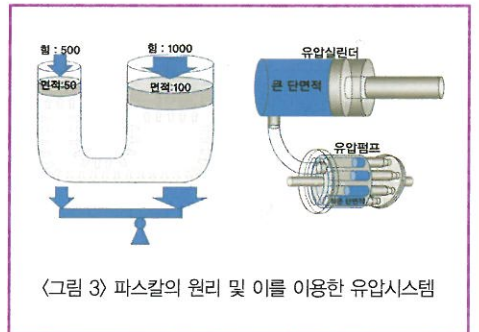
엔진이 유압시스템만을 구동하는 방식의 건설기계로 가장 대표적인 것이 굴삭기이다. 굴삭기 엔진은 변속기 없이 유압펌프를 직접 구동하며, 이를 통해 전체 유압시스템으로 차량과 작업을 움직인다. 굴삭기는 철로 공사에 사용하기 위해 1800년대에 창안되었는데, 초기에는 증기기관과 도르레 및 쇠줄 등에 의해 작동되었다. 2차 세계대전을 거치면서 비약적으로 발전한 유압기술과 내연기관이 채용되면서 현재와 같은 유압굴삭기가 등장하게 된다. 이로써 매우 강력한 힘을 발휘하는 현대적인 건설장비가 나타나게 된 것이다. 〈그림 2〉는 현재의 유압굴삭기의 동력전달 구조를 나타낸다.



〈그림 2〉 굴삭기의 동력전달 구조

엔진으로부터 유압펌프로 전달된 파워는 여러 유압 구동기(실린더/모터)로 유압 작동유를 통해 전달되는 것이다. 이러한 이유로 굴삭기는 휠로더처럼 변속기를 통해 주행 동력을 얻는 유형의 건설기계와 달리 엔진의 회전속도를 고정하여 운용되는 일정속도 제어방식을 사용한다. 엔진-유압펌프 시스템의 회전속도를 고정하면 유압시스템의 작동유 유량이 일정하게 유지되어 동일한 조이스틱 입력에 대해 동일한 작업기 속도나 파워를 유지할 수 있기 때문이다. 이러한 고정 속도 방식의 운전 전략도, 연비를 높이기 위한 엔진 가변속 제어가 활발히 적용되는 양상으로 바뀌고 있다.

“유압”은 유체(Fluid, 대부분 Mineral Oil)를 이용한 동력 생성, 변환, 전달 방법(Fluid Power)으로, 밀폐된 공간 내에서 유체에 작용하는 압력은 어디나 똑같다는 파스칼의 원리를 이용하여 간단하게 힘을 증대, 감소시킬 수 있다(그림 3). 이 때문에 큰 힘을 필요로 하는 각종 중장비의 구동 수단으로 유압을 사용하고 있으며, 기계 및 전기와 같은 다른 동력전달 수단에 비해 작은 체적에서도 높은 에너지 및 파워 밀도를 갖고 있다는 것이 가장 큰 장점으로 꼽힌다.



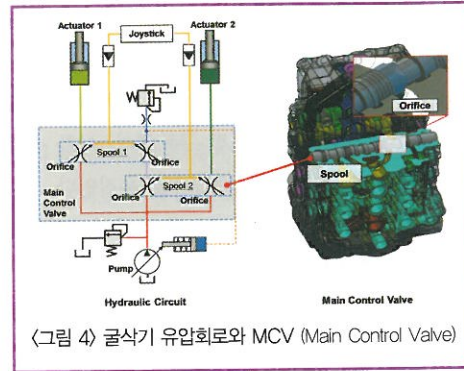
〈그림 3〉 파스칼의 원리 및 이를 이용한 유압시스템

이와 같은 이유 때문에, 이동형 장비(Mobile Equipment)의 동력전달 방법 및 장치로 가장 효과적이라 할 수 있을 것이다. 이 외에도 유압은 스파크를 일으키지 않고, 고온에서도 잘 작동한다는 점, 추가 에너지 없이도 힘과 토크를 일정한 상태로 유지할 수 있다는 점 및 저속에서도 높은 토크를 낼 수 있고 복잡한 기어, 체인, 벨트, 캠 및 링크 구조가 필요 없는 등의 많은 장점을 가지고 있기도 하다.

굴삭기에서는 엔진에서 발생한 회전력이 엔진에 직결된 메인펌프에 의해 유압으로 변환되고, 이를 메인 컨트롤밸브가 각 액츄에이터로 유량을 적절히 배분하며, 각 액츄에이터는 전달된 압유를 받아 직선 또는 회

전 운동으로 변환, 장비를 움직이게 된다. 즉, 주행을 포함한 거의 모든 기능이 유압에 의해 구동되며, 이 때문에 엔진, 메인펌프, 메인컨트롤밸브 및 액츄에이터를 굴삭기 파워트레인이라 할 수 있다(그림 4).

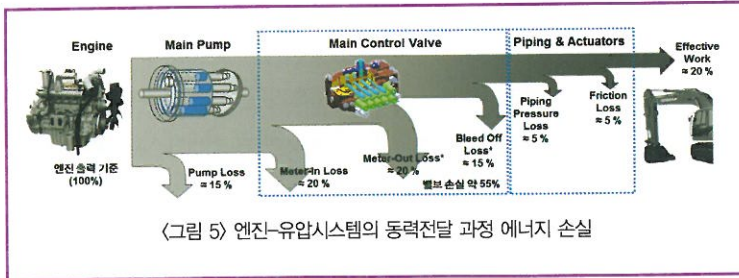
유압시스템에서는 유체를 압축하여 액츄에이터에 보냄으로써 한쪽 방향으로 작동을 시킬 수 있으나, 액츄에이터를 반대 방향으로 움직이도록 하기 위해, 즉 당기기 위해 유체에 음압을 걸지는 않는다. 유체에 음압을 걸어 팽창을 시키면 유체 내에 Cavitation이 발생하고, 이는 부품의 파손을 가져오게 되기 때문이다. 이런 특성 때문에 액츄에이터를 반대방향으로 움직이게 하기 위해서는 액츄에이터 반대편으로 압유를 보내야 하는데, 메인펌프가 만든 압유를 필요한 쪽으로 보내도록 방향을 전환하는 기능을 메인컨트롤밸브가 담당하고 있다. 중장비는 급격히 변하는 외부 부하의 방향과 크기에 따라 액츄에이터에 음압이 걸릴 수 있으며, 이런 경우 Cavitation이 발생하지 않도록 모든 액츄에이터 양쪽에 일정 이상의 압력이 유지되도록 설계 되어 있다.



〈그림 4〉 굴삭기 유압회로와 MCV (Main Control Valve)

이러한 특성은 메인컨트롤밸브의 미터링이라는 오리피스 효과로 구현되는데, 반드시 에너지 손실을 유발하게 된다. 이런 특징 외에도 다수의 액츄에이터가 소수의 펌프로부터 유압을 공급받아 사용함에 있어서 각 액츄에이터가 요구하는 부하압력이 다를 경우 펌프는 최대 압력을 공급해야 하며, 이 때 펌프가 만든 압유는 낮은 부하압력이 걸린 액츄에이터로만 공급되고 높은 부하압력이 걸린 액츄에이터로는 흐르지 않게 되므로 메인컨트롤밸브는 오리피스를 더 좁게 만들어 유량배분을 제어하게 되는데, 이 과정에서 많은 에너지 손실이 발생하게 된다. 〈그림 4〉에서와 같이, 오픈센터 타입 중 통상 네가콘(Negacon : Negative Flow Control)이라고 불리는 전형적인 굴삭기 유압시스템은 엔진 출력을 100으로 보았을 때, 메인컨트롤밸브에서 50% 이상의 에너지 손실이 발생하는 특징을 가진다.

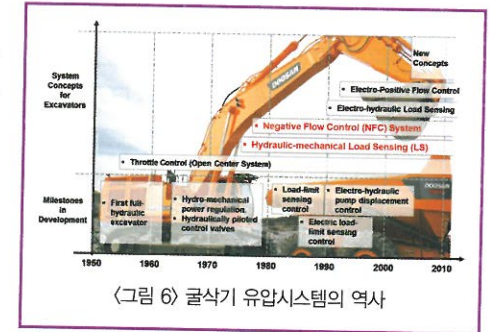
굴삭기 유압시스템은 작업장치를 움직이기 위한 동력전달 파워트레인으로서 크게 생산성, 제어성과 에너지 관점에서 설계, 개발된다. 〈그림 5〉에는 굴삭기에 적용된 유압시스템을 시대별로 정리하였다. 초기 굴삭기용 유압시스템이 등장한 이후 제어성을 향상시키고 에너지 효율을 높일 수 있는 여러가지 시스템들이 개발되어 왔으며, 가장 보편적으로 사용되고 있는 시스템은 네가콘(Negative Flow Control), 포지콘(Positive Flow Control) 및 로드센싱(Load Sensing) 시스템을 들 수 있는데 최근에는 전자화가 많이 진행되고 있다.



〈그림 5〉 엔진-유압시스템의 동력전달 과정 에너지 손실

특히 최근에는 지속적인 유가상승에 따라

TCO(Total Cost of Ownership) 관점에서 중장비의 연료소모량이 고객의 주요 구매 결정 요소(Key Buying Factor)가 되고 있으며, 이에 따라 에너지 효율을 높이기 위한 방향으로 다양한 연구들이 진행되고 있다. 미국의 National Fluid Power Association에서 2009년, 2012년에 발표한 유압 Technology Roadmap 6대 연구 도전 분야에서도 에너지 효율 향상이 첫번째로 포함되어 있다는 점은 이와 같은 현상을 대변한다 하겠다. 〈그림 5〉의 굴삭기 에너지 소요 다이어그램을 통해 알 수 있듯이 에너지 소모에 가장 영향을 많이 미치는 메인컨트롤밸브와 그 안에 구현된 회로 방식에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 전기, 유압, 기계식 하이브리드 기술 및 지능형 전자제어 기술이 채용되면서 예전에 비할 수 없을 만큼 높은 효율을 구현하고 있고, 당분간 이런 연구는 계속 진행될 것으로 보인다(그림 6).

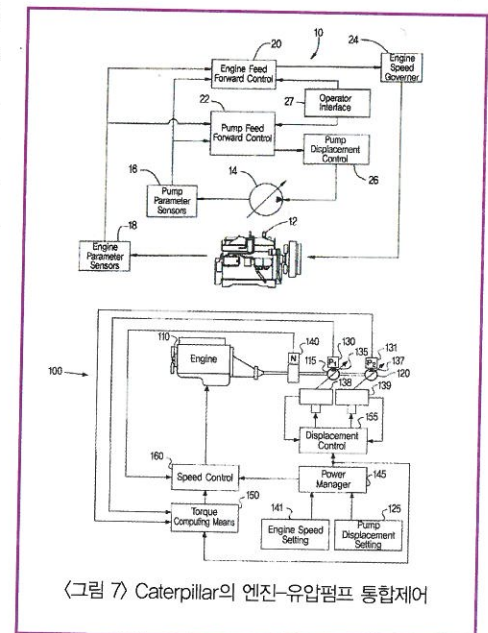


〈그림 6〉 굴삭기 유압시스템의 역사

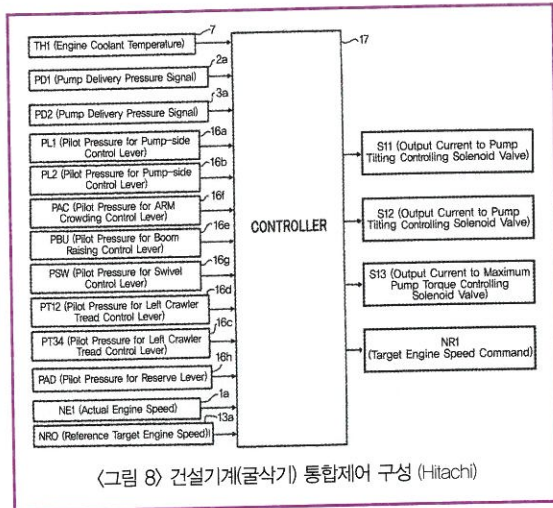
3. 통합제어 - Power Matching 및 Management

앞서 설명한 것처럼 건설기계에도 전자 제어 장치가 많이 적용되면서 통합제어 필요성도 함께 높아져 왔다. 건설기계의 통합제어는 주로 엔진제어기와 유압제어기 사이에서 이루어진다. 건설기계는 작업하는 동안 유압펌프로 공급되는 엔진의 파워 변동이 최소부터 최대까지 초 단위의 시간 안에도 빈번하다. 건설기계의 통합제어는 빈번한 부하 변동에 대응하기 위한 엔진-유압 Power Matching을 목적으로 시작되었다. 유압제어기는 유압펌프 정보를 CAN을 통해 엔진제어기에 전달하여, 엔진이 가혹한 운전조건에서도 효율적으로 동작하도록 돕는다. 또는 이와 반대로, 엔진제어기가 엔진의 운전 상태 정보를 유압제어기에 전달하여, 유압제어기가 효율적으로 장비를 구동할 수 있게 한다.

〈그림 7〉과 〈그림 8〉은 건설기계 시장의 선진업체인 일본의 히타치 건설기계와 미국의 캐터필러가 등록한 통합제어에 대한 특허들이다. 건설기계의 통합제어 경향은 1990년대부터 출원되기 시작한 특허들을 통해서 확인할 수 있다. 유압시스템 전자화가 연구되고 제품에 적용되면서 엔진제어기와 유압제어기가 다양한 정보들



〈그림 7〉 Caterpillar의 엔진-유압펌프 통합제어



〈그림 8〉 건설기계(굴삭기) 통합제어 구성 (Hitachi)

을 서로 교환하는 내용의 특허들이 나오기 시작한 것이다. Power Matching을 위한 통합 제어 특허의 내용도, 엔진-유압간 서로의 부하 정보를 주고받는 것도 있고, 환경변화에 따른 동작상태 정보를 주고받아 Power Matching 방법을 변동하는 특허도 있다.

건설기계의 통합제어가 자동차와 또 다른 점은 유압제어기가 차량제어기를 포함하는 상위제어기 역할을 하는 것이다. 휠로터처럼 변속기도 있는 유형의 건설기계는 TCU도 있지만 자동차처럼 BCM/ABS/ESP 등의 다른 전자제어기가 더 복잡하게 연결되어 있는 경우

와는 다르다. 즉, 건설기계의 통합제어는 엔진제어기와 펌프제어기 사이에서 대부분 이루어진다.

급격한 부하 변동이나 다양한 환경 변화에 대응하는 Power Matching을 목적으로 통합제어가 시작되었다면, 앞으로의 건설기계 통합제어는 연비를 올리고 작업생산성을 향상시키는 Power Management 방향으로 발전하고 있다. 건설기계는 승용차와 달리 고객이 장비를 통해 추구하는 목적이 투자 대비 수익으로 명확하기 때문이다. 이는 자동차 산업에서는 상용차의 경우와 유사하지만 주행 이외의 다양한 작업의 비중이 크다는 점에서는 여전히 다르다.

가장 먼저 시작된 Power Management 기술의 방향은 전체 시스템 효율을 향상시키는 방향으로 운전점을 이동하는 것이다. 엔진 효율지도를 고려해 효율이 좋은 방향으로 운전점을 이동하고, 유압시스템의 효율이 좋은 방향으로 운전을 유도한다. 현재까지는 대체로 유압펌프 용량을 늘리고, 이에 따라 엔진 운전점을 낮추거나(Down-speeding) 변동하는 제어전략들이 일반적으로 개발되고 있다. 이를 위해서 기존의 Power Matching에 대해서 엔진-유압의 운전정보를 주고받는 Power Management형 통합제어가 추가되고 있다. 또 다른 흐름은 운전자의 의도를 반영하여, 시스템 효율을 조금 손해 보더라도 장비를 사용하는 작업자의 전체 작업생산성을 향상시키는 것이다. 엔진과 유압시스템의 효율을 위해서는 효율이 좋은 쪽으로 운전점을 낮추지만, 고부하 순간처럼 작업자가 고출력을 필요로 하는 순간을 감지하여 해당 운전점으로 이동하는 것이다. 굴삭기에서는 Auto Acceleration 기능이 대표적이다.

4. 결론

자동차 분야의 기술동향과 유사하게, 건설기계도 전자화가 가속화되면서 전자제어기간 통합제어가 일반적인 기술이 되어가고 있다. 다만, 전자제어장치가 크게 엔진제어기와 유압제어기로 양분되어 통합제어의

복잡도가 작다는 점은 다르다. 건설기계 통합제어는 크고 급격한 부하변동에 대응하기 위한 Power Matching 개념의 접근으로 시작되었다. 이후 운전환경의 변화를 감지하여 이를 Power Matching의 변동에 적용하는 방향으로 발전하였다. 앞으로는 연비를 높이기 위한 다양한 Power Management 기술들이 건설기계 통합제어의 주된 방향이 될 것이다.

한 가지 중요한 점은, 건설기계 통합제어는 외부 부하와 작업자 의도를 반영하는 다양한 지능화 기능을 개발하는 방향으로 발전할 것이라는 점이다. 건설기계의 본분인 투자대비 작업생산성을 올리기 위한 다양한 아이디어의 지능화 기능의 개발이 자동차 분야보다 더 빨라질 것이다. 자동차보다 다양한 작업을 수행하기 위해 더 많은 제어 자유도를 가지고 있으며, 장비 운용을 위한 투자 대비 작업생산성을 높여야 한다는 핵심 가치가 훨씬 명확하기 때문이다. 또한, 자동차에 비해 통합제어에 관여하는 전자제어기의 수가 적다는 점도 발전 속도를 가속시키는 이유가 될 것이다. 앞으로 개발될 다양한 지능화 기능들이 적용될 때, 제어기 사이의 복잡도 증가가 상대적으로 적을 것이기 때문이다.

〈김동목 선임연구원 : dongmok.kim@doosan.com〉

한국자동차공학회
회의실 사용 안내

우리학회는 학회 회원 여러분과 자동차공학 관계자분들을 위해 각종 회의 및 강연, 세미나 등으로 사용할 수 있는 회의실을 마련하였습니다. 지하철 2호선 선릉역에 인접하여 교통이 아주 편리하오니 여러분의 많은 이용 바랍니다.

▶ 회의실 규모 및 사용료

구 분	시 간	소회의실 사용료 (14인용)			대회의실 사용료 (40인용)		
		법인회원	개인회원	일 반	법인회원	개인회원	일 반
오 전	09:00 ~ 12:00	30,000원	40,000원	50,000원	80,000원	100,000원	150,000원
오 후	13:30 ~ 17:00	30,000원	40,000원	50,000원	80,000원	100,000원	150,000원
중 일	10:00 ~ 17:00	50,000원	70,000원	90,000원	150,000원	180,000원	250,000원

▶ 기기 사용

- 빔프로젝트, 노트북 사용 가능 (유료)
- 스크린 설치(무료), 무선인터넷 가능
- 대회의실은 마이크 및 음향시설 사용 가능

구 분	기기 사용료 (각 1대 사용 기준)		
	법인회원	개인회원	일 반
중 일	30,000원	40,000원	50,000원
반 일	15,000원	20,000원	30,000원
1시간	10,000원	10,000원	15,000원

☆ 당 건물 30분 무료 주차 가능

☆ 문의처 : 한국자동차공학회 사무국 TEL : (02) 564-3971, E-mail : journal@ksae.org