

하이브리드 전기자동차용 동력전달계 및 제어기술

- 김 달 철 | 현대자동차 선행개발센터, 선임연구원
e-mail : tckim@hyundai-motor.com
- 박 종 진 | 현대자동차 선행개발센터, 선임연구원
- 조 성 태 | 현대자동차 선행개발센터, 선임연구원
- 김 철 수 | 현대자동차 선행개발센터, 수석연구원

이 글에서는 환경차량으로서는 최초로 판매되고 있는 하이브리드 전기자동차의 종류와 동력전달계 제어기술 및 신기술 동향에 대하여 소개하고자 한다.

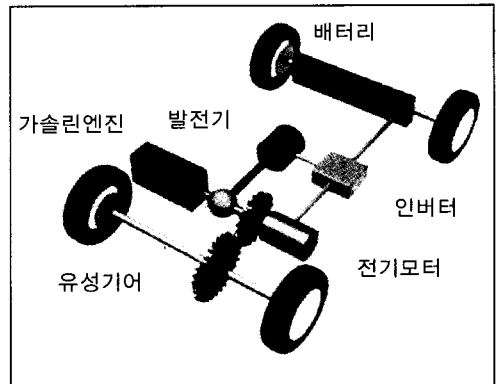
하이브리드 차량은 20세기 초반부터 내연기관의 출력 부족을 보완하는 목적으로 전기모터를 이용하는 개념에서 시작되었으나, 내연기관의 성능 향상과 더불어 전기모터 및 배터리 성능의 한계에 의하여 큰 발전을 이루지 못하였다. 또한 하이브리드 차량은 전기모터를 이용하여 차량을 작동하고 엔진은 전기모터에 요구되는 전기에너지를 공급하기 위한 발전기 구동장치로서 사용하는 직렬형 하이브리드 차량이 상용차 위주로 개발되었으나, 현재는 환경문제 및 석유자원 고갈에 의한 주변적 원인으로 승용차량 대상으로 큰 발전이 이루어지고 있다. 현재까지는 하이브리드 차량 개발 및 하이브리드 관련 기술과 부품개발은 일본을 중심으로 이루지고 있으며, 양산판매

역시 일본 차량 메이커에서만 시행하고 있는 실정이다. 이 글에서는 지금까지 양산된 하이브리드 차량에 대한 파워트레인 및 제어기술에 대한 소개와 현재 추진되고 있는 신기술에 대하여 설명하고자 한다.

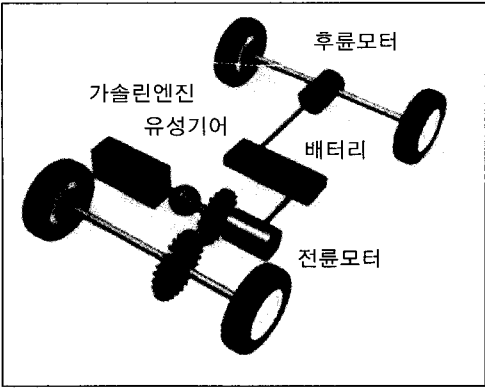
하이브리드 차량 동력전달계

하이브리드 차량은 크게 동력전달계의 구성방식에 따라 직렬형, 병렬형 및 변환형으로 구분된다. 직렬형은 앞서 설명된 바와 같이 엔진을 발전기 구동원으로 사용하여 전기에너지를 생성하는 보조 동력 장치 (APU : Auxiliary Power

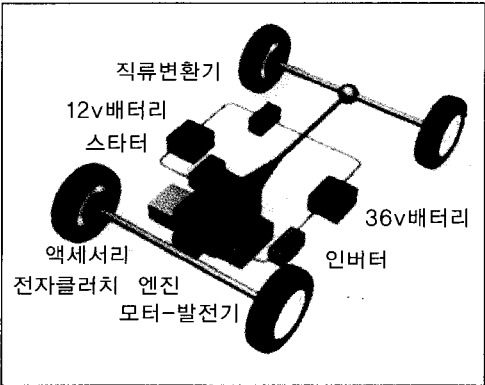
Unit)로서 사용하며, 차량구동은 순수전기차와 마찬가지로 전기모터에 의하여 이루어진다. 이와 같은 직렬형 구조의 하이브리드 차량은 화석연료로부터 각각 발전기, 배터리의 전기에너지 및 화학에너지로의 변환과 다시 전기모터에 의한 기계에너지로의 변환 등 에너지 변환과정이 잦은



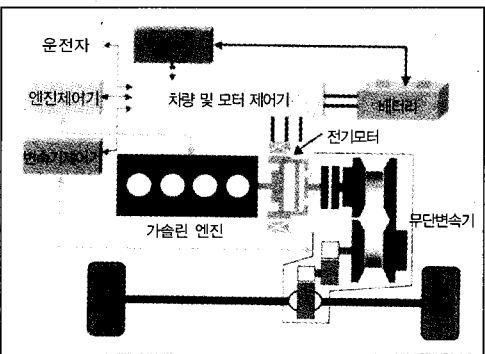
도요타 프리우스 하이브리드 동력전달계



도요타 에스티마 하이브리드 동력전달계



도요타 크라운 하이브리드 동력전달계



현대자동차 베르나 하이브리드 동력전달계

관계로 에너지 효율면에서 불리하며, 또한 큰 배터리 용량을 요구하는 단점을 가지고 있다. 이에 비하여 병렬형 하이브리드 차량은 엔진과 전기모터가 동시에 차량을 구동하는 구조로서 직렬형

사이트는 엔진과 변속기 사이에 10kW 박형 BLDC 모터를 삽입한 병렬형 구조를 가지며 1.0ℓ 린번엔진과 무단변속기의 채택 및 차체경량화, 공기역학 구조 개선 등을 통하여 일본 도심 모드

에 비하여 높은 에너지 효율과 함께 소형의 배터리를 요구하는 장점을 가지고 있지만 복잡한 동력전달계 제어를 요구하는 단점이 있다. 변환형 하이브리드 차량은 일반적으로 동력단속장치의 상태에 따라 직렬형과 병렬형 구조가 변환되는 구조를 가지고 있다.

세계에서 최초로 양산된 하이브리드 차량은 '97년 12월 발매된 도요타의 프리우스이다. 프리우스는 일반적으로 개발되고 있던 동력전달계 구조를 탈피하여 유성기어를 이용하여 무단변속 기능 및 동력단속을 구현하는 복합형 구조로 이루어진 독자적인 THS (Toyota Hybrid System)을 탑재하였으며, 1.5ℓ 가솔린 엔진과 30kW 구동모터 및 15kW 발전기를 채택하였다. 혼다는 이에 대응하여 세계 최고 연비를 자랑하는 인사이트를 개발 '99년 이후 판매를 시작하였다. 인

에서 35km/ℓ의 연비성능을 실현하였다. 닛산은 1.8ℓ 가솔린 엔진과 17kW 전기모터, 발전기 및 무단변속기를 이용하여 클러치의 접속상태에 따라 직렬형과 병렬형의 변환이 가능한 하이브리드 차량인 티노 하이브리드 전기자동차를 개발 판매하였으나, 현재는 판매를 중단한 실정이다. 북미에서는 GM이 LA4모드 연비 34km/ℓ를 목표로 하는 컨셉카 개념의 하이브리드 차량인 프리셉트를 개발하고 있으며, 포드에서는 이스케이프를 2003년 양산목표로 개발 중에 있다. 2001년 이르러 도요타에서는 THS 구조를 유지하면서 기존 프리우스에서 문제되었던 동력성능을 향상시킨 New 프리우스를 발표하였고 4WD차량으로는 세계 최초로 하이브리드 시스템을 도입한 에스티마 하이브리드 전기자동차를 개발 판매를 시작하였다. 에스티마 하이브리드 전기자동차는 전륜에는 엔진, 전기모터, 유성기어와 무단변속기를 채택한 THS-C라는 신구조의 하이브리드 시스템을 도입하고 후륜에는 18kW 전기모터와 1단감속기로 이루어진 동력전달계를 구성함으로써 기존 4WD 차량대비 연비 성능 향상과 더불어 조향성, 제동성능을 향상시켰다. 또한 도요타는 기존의 크라운에 3kW급 전기모터를 이용하여 엔진의 아이들/스탑기능을 구현함으로써 연비향상을 도모한 마일드 하이브리드 개념을 채택 이를 시판하고 있다. 크라운에 적용된 마일드 하이브리드 개념은 엔진과 보기류를 전

자클러치로 분리시켜 엔진 정지 시에도 전기모터를 이용하여 보기류 구동이 가능한 구조로 이루어져 있다. 혼다는 인사이트의 연속선으로 기존의 시빅에 인사이트의 IMA 시스템을 도입한 시빅 하이브리드 전기자동차를 개발 2001년 12월부터 판매를 시작하였다. 위와 같이 하이브리드 차량은 현재까지 일본 차량 메이커를 통하여 양산되기 시작하였으며, 도요타와 혼다는 하이브리드 시스템을 전차종 라인업에 확장하는 계획을 세우고 이를 진행하고 있는 실정이다. 국내에서는 현대자동차가 1995년 제1회 서울모터쇼에 출품된 FGV-1을 시작으로 1999년에 제3회 FGV-2 서울모터쇼 전시와 아반떼 하이브리드 전기자동차 개발에 이어 2000년에 베르나 하이브리드 전기자동차를 개발하였다. 현대자동차에서 개발한 하이브리드 전기자동차는 모두 전기모터를 엔진과 변속기에 사이에 삽입한 병렬형 구조를 가지며, 베르나 하이브리드 전기자동차의 경우 1.6ℓ 가솔린 엔진과 10kW 전기모터 및 무단변속기로 이루어진 하이브리드 시스템을 구성하고 있다. 또한 전기에너지 저장장치로서 니켈-수소형식의 배터리를 탑재하고 있다. 베르나 하이브리드 전기자동차는 가속시에는 전기모터가 차량에 요구되는 구동력의 일부를 출력함으로써 엔진의 동력 분담을 덜어주고 감속시에는 차량제동에 의하여 소모되었던 에너지를 전기모터를 이용하여 재흡수하고 이를 다음 가

속시에 사용함으로써 연료소모를 저감시킬 수 있다. 또한 차량 정지상태에서는 엔진을 정지시키고 재출발시 전기모터를 이용하여 부드러운 시동을 수행함으로써 아이들시 불필요하게 발생된 에너지 소모를 방지할 수 있다. 현대자동차는 또한 직렬형 하이브리드 시스템을 갖춘 카운티 하이브리 전기버스를 개발하고 있다.

하이브리드 차량 제어기술

하이브리드 전기차의 경우 기존의 내연기관과는 상이한 동력 전달계를 채용하고 있으므로 이를 위한 전용의 주행 제어 기법이 요구된다.

기존 내연기관 차량의 경우 차량의 주행 제어를 위해서는 운전자의 페달 입력과 차속을 감지하여 변속기를 제어하는 정도가 요구되었으나, 하이브리드 전기차는 전동기와 배터리를 전기적인 요소가 추가됨으로써 이들의 동작을 적절히 제어할 필요가 있다.

하이브리드 전기차에 있어서 차량의 주행 제어 기법은 매우 중요한 부분으로 비록 하드웨어적으로 잘 설계된 차량이라도 주행 제어 기법이 제대로 적용되지 못한다면, 의도한 만큼의 연비 향상 효과를 얻기는 힘들다. 이러한 하이브리드 전기차용 주행 제어 기법 중 대표적인 것들을 설명하면 다음과 같다.

아이들 스탱/스타트 제어전략
아이들 스탱/스타트 전략은 하이브리드 전기차에 적용되는 대

표적인 제어 전략으로 차량이 정지해 있을 때 엔진을 정지시키고 재출발시 다시 엔진을 시동함으로써 정차시 낭비되는 불필요한 연료 소모와 배기 가스의 배출을 줄이는데 목적이 있다.

이 기법은 원래 내연기관 차량용으로 고안된 것이나, 기존의 내연기관 차량용 스탱터의 용량으로는 부드러운 엔진의 재시동이 어려우므로, 현재는 하이브리드 전기차에만 적용되고 있다.

아이들 스탱/스타트 기능을 사용할 시의 문제점은 차량이 재출발할 시 부드러우면서도 빠른 엔진의 시동이 가능하여야 하고, 과도 충격 등을 운전자가 느끼지 않도록 엔진과 전동기를 제어해야 한다는 점이다.

또한 재시동시 배기가스의 배출량을 줄일 수 있도록 배기장치를 제어하는 기술 또한 필요하다.

아이들 스탱/스타트 기능으로 인해 향상되는 연비는 차량이 주행하는 도로의 형상에 따라 다르나 일반적으로 5~7% 수준으로 알려져 있다.

이러한 아이들 스탱/스타트 제어기술은 비교적 소용량의 전동기와 저성능, 저전압의 배터리로도 구현가능하기 때문에 특히 유럽 쪽의 하이브리드 전기차 연구는 아이들 스탱/스타트 기능의 구현만이 가능한 저렴한 마일드 하이브리드 전기차 개발에 집중되고 있다.

파워 어시스트 제어전략
기존 내연기관 차량에서 엔진의 용량은 평균적으로 요구되는

동력 용량에 비해 과다하게 선정되어 있다. 이는 엔진만으로 차량의 모든 동력 요구량을 충족시켜야 하므로 차량의 최대 가속성을 기준으로 엔진의 용량이 선정되기 때문이다.

그러나 대부분의 주행 상황에서 엔진에 요구되는 동력은 엔진의 최대 가용 동력의 20~30% 수준이므로 엔진은 대부분 저출력 영역에서 운행되게 되고 일반적으로 이런 영역에서의 효율은 매우 낮은 편이다.

따라서 하이브리드 전기차에서는 전동기를 장착하여 순간적인 가속이 요구되는 시점에서는 전동기의 동력을 추가적으로 사용하는 파워어시스트 제어 전략을 채용하고 있다.

파워어시스트 전략의 이점은 첫째로 적은 용량의 엔진으로도 충분한 가속 성능을 낼 수 있으므로 기존 내연 기관 차량에 장착되는 엔진 보다 작은 엔진을 쓸 수 있다는 점이다.

작은 용량의 엔진을 사용함으로써 질량 절감의 효과를 얻을 수 있고, 이로 인해 하이브리드화로 인한 질량 증가 요인을 상쇄할 수 있다. 또한 엔진이 보다 고 출력 영역에서 작동되게 되므로 전체적인 엔진 작동 효율이 올라가게 되고 결과적으로 차량의 연비를 향상시킬 수 있다.

둘째로는 운전자의 동력 요구량이 급격히 변할 경우 과도 상태에서의 동력 변화를 전동기가 담당함으로써 엔진의 급격한 운전 영역 변화로 인한 연료 소모량이 나 배기 가스 배출량의 증대를 막

을 수 있다는 점이다.

로드레벨링 제어전략

하이브리드 전기차 주행 제어의 기본적인 개념은 엔진의 효율이 낮은 곳에서는 전동기를, 엔진의 효율이 높은 곳에서는 엔진을 사용하여 차량 전체의 효율을 향상시키는 것이다.

이렇게 엔진, 전동기를 포함하는 차량 구동 시스템에 요구되는 부하를 전체 시스템의 작동 효율을 향상시키는 쪽으로 동력을 분배하는 전략을 로드레벨링이라고 한다.

로드레벨링 전략을 충분히 적용하기 위해서는 전기 구동 모드가 가능할 정도로 고용량의 전동기/배터리 시스템이 필요하므로 하이브리드 시스템의 가격이 상승하게 되는 단점이 있다.

또한 단순히 엔진의 효율만을 고려하여 로드레벨링 제어전략을 구현할 경우, 전체적인 시스템 효율은 오히려 저하할 가능성이 있으므로 전동기의 충방전 효율을 포함한, 전체 에너지의 흐름을 고려하여 로드레벨링 제어 전략을 구현하여야 한다.

일본 도요다 사의 경우, 프리우스에 적용된 로드레벨링 제어 전략을 뉴 프리우스에서는 전체 시스템 효율을 고려하도록 개선함으로써 차량의 연비를 향상시킬 수 있었다.

회생제동 제어전략

기존의 내연기관 차량에서 제동의 에너지는 모두 브레이크에서의 열 에너지로 소산되게 된다.

그러나 하이브리드 전기차의 경우는 전동기를 발전기로 구동하여 제동에너지를 다시 회생하여 사용하는 것이 가능하다.

이때 회생되는 에너지의 양은 마찰 브레이크의 사용량과 발전 효율에 의해 크게 좌우되나, 일반적으로 마찰 시스템을 병행하여 사용할 경우 5~6% 정도의 연비 절감 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

회생제동시 에너지 회수율을 증대시키기 위해서는 전동기의 제어, 변속장치의 변속비 제어 등의 하이브리드 동력원들의 소프트웨어적인 제어기술뿐만 아니라 브레이크 시스템의 하드웨어적인 개선이 필요하다. 즉, 전동기로 인한 회생 브레이크량을 고려하여 운전자의 제동감을 해치지 않은 범위 내에서 마찰 브레이크의 작용량을 조절할 수 있는 브레이크 시스템을 설계하여야 한다.

하이브리드 차량 기술 동향

2001년까지 양산된 하이브리드 전기차는 일본 도요다의 프리우스, 이스티마, 크라운 등과 혼다의 인사이트, 시빅 등으로 주로 일본 업체가 하이브리드 기술을 주도하고 있으며, 특히 가솔린 엔진을 장착한 병렬 형식이 주류를 이루고 있다. 그러나 2002년에 들어서는 유럽의 폭스바겐, 발레오 등을 중심으로 디젤엔진을 사용하는 42V 시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 일본의 히노, 닛산 등에서는 배터리의 부족한 성능을 보완하기 위해 올트

라 커패시터를 장착하는 새로운 형식의 하이브리드 차량의 개발이 이루어지고 있다.

반면 미국에서는 정부와 민간기업의 공동 프로젝트로 다양한 하이브리드 전기차 개발 계획이 진행되었으나, 일본, 유럽에 비해서는 신기술 발표가 저조한 편이다.

일본의 혼다 자동차는 인사이트, 시빅 하이브리드 등을 발표하였으나, 도요다와는 달리 스타터-알터네이터 형식의 병렬형 하이브리드 만을 개발/출시하고 있다.

혼다의 경우는 엔진, 차체의 개선을 통한 연비 향상효과에 더욱 집중하고 있으며, 복잡한 하이브리드 시스템을 채용하기보다는 아이들 스탑/스타트, 회생제동, 간단한 동력보조 정도만이 가능한 시스템을 적용함으로써 제조원가 향상 요인을 최대한 줄이려는 의도를 보이고 있다.

닛산 디젤은 세계 최초로 울트라 커패시터를 장착한 병렬형 하이브리드 트럭을 2002년 6월부터 판매하고 있다. 닛산 디젤의 커패시터 하이브리드 트럭은 회

생 제동에너지를 대부분 커패시터가 회생하여 주므로 회생 에너지로 인한 연비 절약효과뿐 아니라, 마찰 브레이크의 소모를 최소한으로 줄여 줌으로써 브레이크 교체 비용 및 보수 기간을 줄이는 부가적인 효과가 있다.

특히 버스, 트럭 등의 상용차에서는 제동시 마찰 브레이크를 보조하기 위해서 리타더를 추가적으로 사용하게 되는데 이를 전동기로 대체함으로써 리타딩 시의 에너지 회생과 가속시의 동력 보조를 수행할 수 있다. 일본 히노 자동차의 HIMR은 이를 구현한 대표적인 시스템이다.

유럽 업체의 경우는 도요다 프리우스와 같이 대용량의 전동기/배터리 시스템을 적용할 경우 제조원가의 상승분을 상쇄할 만큼의 연비 향상 효과를 보기는 힘들다는 판단 하에 최소한의 비용만으로 구현이 가능한 42V 시스템의 개발에 집중하고 있다.

특히, 발레오 등에서는 에어컨, 히터 등의 공조장치와 엔진의 냉각 계열을 모두 전기 구동 및 전

자 제어화함으로써 엔진의 악세서리 부하를 줄여서 결과적으로 소용량 엔진의 사용을 가능하게 하는 기술을 개발하고 있다.

활발하게 신기술이 발표되고 있는 병렬형에 비하여 직렬형 하이브리드 전기차의 개발은 적은 편이다. 이는 직렬형의 경우 엔진으로 발전기를 구동시키고 발전기에서 생산된 전력으로 전동기를 구동시키는 방식을 사용하기 때문에 병렬형에 비해 필연적으로 효율이 떨어지기 때문이다.

그러나 직렬형은 엔진을 일정 영역에서 정속 운행하는 것이 가능하기 때문에 소음, 진동이나 배기가스 측면에서 많은 이점을 갖고 있으며, 이 때문에 도심 주행용 등의 특수한 목적으로 개발되고 있다. 일본 닛산 디젤의 커패시터 하이브리드 버스나 현대자동차의 카운티 하이브리드 버스는 이러한 직렬형의 이점을 활용하기 위해 개발된 차량들이다. 또한 직렬형에서 얻어진 개발 기술은 그대로 연료 전지 자동차의 개발에 이어질 수 있다는 장점이 있다.

오리피스(Orifice)

오리피스는 계통 내의 특정한 지점이나 영역에 지정된 압력을 유지하기 위한 장치로서 계통설계에서 매우 중요한 역할을 한다. 즉, 상류에서는 특별한 기능을 수행하기 위해 높은 압력을 유지시켜야 할 필요가 있으나, 하류에서는 이 기능이 필요치 않

은 경우 낮은 압력으로 유지하는 것이 기기의 대형화를 피할 수 있어 경제적이다. 이러한 압력 강하를 얻기 위해 오리피스가 많이 사용된다. 그러나 밸브에서와 마찬가지로 오리피스 양단의 압력차가 크면 캐비테이션이 발생할 가능성이 높아지므로 이를 고려한 설계가 요구된다.