



하이브리드 전기차 개발 현황 및 시사점

I. 서론

하이브리드 전기자동차 (Hybrid Electric Vehicle, HEV)란 내연기관 자동차에 모터와 배터리를 더하여 내연기관의 작동 효율을 개선하고 회생제동을 가능케 함으로써 자동차의 연료 사용을 줄일 수 있는 친환경 자동차를 말한다. 하이브리드차는 상대적으로 적은 비용으로 충분한 주행거리를 확보함과 동시에 연비를 획기적으로 향상시킬 수 있기 때문에, 세계적으로 강화되는 연비 및 배출가스 규제에 대응할 수 있는 현실적인 대안으로 떠오르고 있다. 차내 배출가스가 없는 배터리 전기자동차(Battery Electric Vehicle, BEV)와 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)

또한 미래의 친환경차로 각광 받고 있다. 하지만, 배터리의 에너지 밀도가 작기 때문에 충분한 주행거리 확보를 위해서는 대용량 배터리를 탑재해야 하며, 이에 따라 제조비용과 충전시간이 크게 증가하여 배터리 기술이 대폭 개선

배터리 전기차(BEV)의 경우 배터리의 낮은 에너지 밀도 및 높은 가격으로 인해 시장 확장에 어려움이 있고 연료전지 자동차(FCEV)의 경우 수소 생산과 충전 인프라를 확보해야만 하는 문제가 있다. 그렇기에 하이브리드 및 플러그인 하이브리드 전기차(HEV)가 미래의 환경규제에 대응할 수 있는 현실적인 대안으로 각광 받고 있다.

되지 않는다면 전기자동차(BEV)의 보급은 더딜 전망이다. 연료전지 자동차(FCEV)는 짧은 충전시간과 충분한 주행거리를 보장하는 이상적인 기술이지만, 비싼 가격과 수소 충전을 위한 보급 장치 확보 등 상용화에 제약이 많다. 그렇기 때문에 근 미래의 친환경차 시장은 하이브

1) HEV 대비 큰 용량의 배터리와 모터를 갖는 하이브리드차. 전기차 모드로 주행 가능한 거리가 크게 증가 함.



금 동 석
한국과학기술원
조선식녹색교통대학원



김 현 준
한국과학기술원
조선식녹색교통대학원

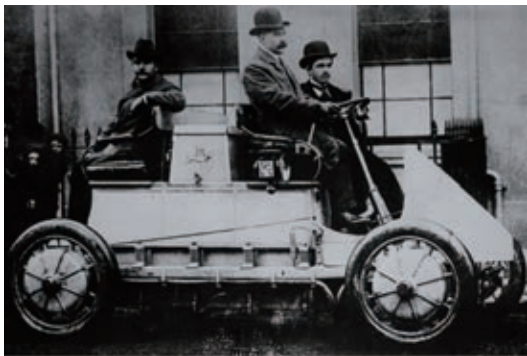
리드차(HEV) 및 플러그인 하이브리드 전기차 (Plug-in HEV, PHEV)¹⁾가 이끌 것으로 전망된다.

본고의 2장에서는 하이브리드차를 파워트레인 구조에 따라 구분하여 소개하고, 국내외 하이브리드차 시장 동향 및 연구 동향 분석을 통해 국내 하이브리드차 연구 개발이 직면한 문제에 대해 언급한 후 3장에서는 국내 하이브리드차 연구가 나아가야 할 길을 제시한다. 마지막으로 4장에서는 결론으로 끝맺음 한다.

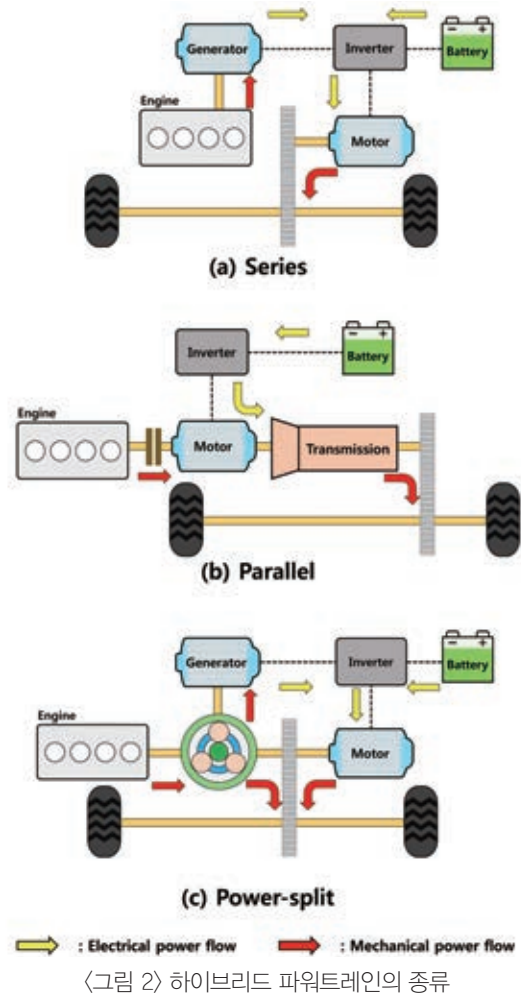
II. 하이브리드 전기차 개발 동향

1. 하이브리드 전기차 개요

최초의 하이브리드차는 1900년 초 페르디난드 포르쉐(Ferdinand Porsche)가 개발한 <그림 1>의 로너 포르쉐 믹스테(Lohner-Porsche Mixte) 였다. 초기 모델은 인휠 모터를 사용한 전륜 구동 전기 차였으나 축전지의 제한적인 용량과 수명 때문에 주행거리는 극히 짧았다. 또한 축전지의 과도한 무게는 현실성을 더욱 떨어뜨렸다. 결국, 페르디난드 포르쉐는 전기 차의 한계를 극복하기 위해 가솔린 엔진과 발전기를 채용하여 직렬하이브리드 전기 자동차를 개발하게 된다. 이를 통해 납축전지의 무게를 줄이고 주행거리를 크게 향상시킬 수 있었다.^[1] <그림 2(a)>와 같이 엔진과 차량의 구동 축이 기계적으로 분리되어 있는 직렬형 (Series type) 하이브리드차는 전기 자동차의 한계를 극복하는 가장 직관적인 방법으로, 최근에는 소형 엔진과 발전기를 장착하여 전기 차의 주행거리를 향상시켜주는 레인지 익스텐더(Range Extender) 방



<그림 1> Lohner-Porsche Mixte



<그림 2> 하이브리드 파워트레인의 종류

식으로 주로 사용되고 있다. 하지만, 엔진에서 생성된 기계 에너지가 제너레이터를 거쳐며 전기 에너지로 변환되고, 이 전기 에너지가 다시 모터를 거쳐며 기계에너지로 변환되어 차량을 구동하기 때문에 모터와 제너레이터의 크기가 크고 시스템 전반의 효율은 다른 형태에 비해 낮은 편이다. 그렇기에 주요 자동차 제조사들은 병렬형이나 동력분기형 파워트레인을 채택하고 있다. 일반적으로 병렬형(Parallel type) 구조는 기존 내연기관 자동차에 하나의 전기 기계를 추가하여 구현할 수 있다. 병렬형은 <그림 2(b)>에서 보듯이 모터를 엔진과 변속기 사이에 배치함으로써 비교적 적은 설계 변경을 통해 기존 내연기관 차량의 연비를 크게 개선할 수 있다. 하지만, 여전히 손실이 큰 변속기를 사용해야 하며 엔진의 작동 속도가 구동축의 속도에 구속되어 있기 때문에 항상 효율적



인 엔진 작동을 보장할 수 없다는 단점이 있다. 반면, 동력분기형(Power-split type)은 유단 변속기 대신 유성기어와 두 개의 모터를 사용하여 엔진을 차량에 연결 함으로써 무단 변속기(Continuous Variable Transmission, CVT)와 같은 역할을 수행 한다 (<그림 2(c)>참조). 이러한 전기 CVT의 사용으로 엔진 동력이 전기와 기계, 두갈래의(split) 길을 통해 전달될 수 있도록 해주며, 그 결과 직렬형과 같이 엔진을 항상 최적의 작동점에서 운영하면서도 대부분의 동력을 기계적으로 직접 차량축으로 전달 함으로써 다른 두 가지 파워트레인에 비해 시스템 효율을 최대로 끌어 올릴 수 있다. 게다가 최대 가속 상황에서는 제너레이터를 모터로 사용할 수 있어 가속 성능 또한 대폭 향상 시킬 수 있다는 장점이 있다. 다만 동력분기형의 이러한 잠재적 가능성을 모두 이끌어 낼 수 있는 구조를 찾고 다양한 주행상황에서 최적의 성능을 낼 수 있도록 제어하는 것이 상당히 어렵다는 단점이 있다.

2. 하이브리드차 시장 동향

국내외 자동차 제조사들은 동력분기형 또는 병렬형 중 각 회사들의 강점을 살릴 수 있는 파워트레인 구조를 선택하여 하이브리드차 시장에 진출해 있다. <그림 3> 토요타(Toyota)는 1997년 1세대 프리우스(Prius)를 출시한 이후 꾸준히 우수한 연비의 동력분기형 하이브리드 전기차 및 플러그인 하이브리드차를 출시하며 세계 하이브리드차 시장을 선도하고 있다. 1세대와 2세대 프리우스에서는 1개의 유성기어를 사용한 동력분기형 파워트레인을 사용하였으며, 3세대에서는 2개의 유성기어를 사용하며 연비 향상을 도모하였다. 또한 파워트레인 구조의 변형을 통해, 차급 별로 최상의 연비를 낼 수 있는 구조를 채택하고자 노력하고 있다. 제너럴 모터스(General Motors, GM)의 경우도 동력분기형을 사용한다는 점에서 토요타와 유사하나 다중모드를 갖는 플러그인 하이브리드차에 주력한다는 점이 다르다. 2012년 1세대 볼트에서는 2개의 전기차 주행 모드와 직렬형 하이브리드 모드, 동력분기형 하이브리드 모드의 조합을 통

	하이브리드 시스템	적용 차량	연비(km/liter)
TOYOTA	동력분기형	Prius	21.3
		Camry	17.4
GM	동력분기형	Volt	15.7
Ford	동력분기형	Fusion	17.9
		C-Max	17.0
Honda	동력분기형	Accord	20.0
	병렬형	Civic	19.1
KIA	병렬형	Sonata	16.2
		Optima	15.7

출처 : <http://www.fueleconomy.gov/>

<그림 3> 자동차 제조사 별 주력 하이브리드차



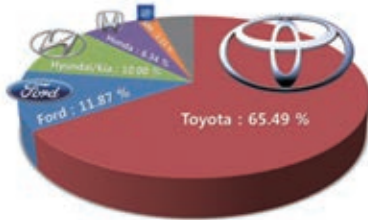
<그림 4> 2세대 볼트와 파워트레인 개략도

자동차 제조사들은 다양한 종류의 하이브리드차를 출시하고 있으며, 동력분기형 파워트레인을 선택한 토요타, 지엠, 포드가 시장을 주도하고 있다.

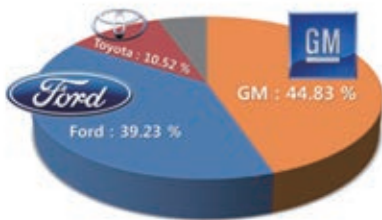
해 연비향상을 시도하였고, 최근에는 2개의 전기차 주행 모드와 병렬형 주행 모드, 2개의 동력분기형 주행 모드를 조합한 2세대 볼트를 출시하며 연비를 크게 개선할 것으로 보인다. <그림 4> 포드(Ford) 또한 2004년 프리우스와 유사한 형태의 동력분기형 파워트레인을 개발하고 토요타와 특히 협약을 통해 퓨전(Fusion)과 이스케이프(Escape) 하이브리드 등을 출시하며 하이브리드차 시장에서의 입지를 높여 나가고 있다. 일본의 또 다른 강호 혼다(Honda)도 1999년 병렬형하이브리드 인사이트(Insight)를 출시하며 비교적 이른 시기에 하이브리드차 시장에 뛰어 들었으나 연비 극대화에 너무 집중한 나머지 뒷좌석 누락과 폐쇄형 뒷바퀴 등으로 인해 시장에서 호응이 좋지 못하였다. 이후 시빅 하이브리드 등 병렬형 하이브리드차를 꾸준히 출시하였으나, 시장에서 주



〈그림 5〉 어코드 하이브리드와 파워트레인 개략도



(a) 하이브리드 차 시장 점유율



(b) 플러그인 하이브리드 차 시장 점유율

〈그림 6〉 미국 내 하이브리드 및 플러그인 하이브리드차 시장 점유율 (2014)^[2]

목 받을 만한 성과를 내지는 못하였다. 하지만, 최근 지능형 다중 모드 주행 시스템(intelligent Multi-Mode Drive)이라 명명한 독특한 동력분기형 파워트레인을 탑재하여 동급 차종 최고의 연비를 갖춘 2015년형 어코드 하이브리드를 출시하며, 하이브리드차 시장에서도 두각을 나타내기 시작하였다. 다만 혼다 어코드 방식은 변속기를 완전히 제거한 Series-Parallel 형태로써 비교적 큰 모터와 제너레이터가 필수적이고 이로 인해 가격이 높다는 단점이 있다. 한국을 대표하는 자동차 제조사인 현대기아자동차 그룹 역시 병렬형 파워트레인을 채택하여 쏘나타 하이브리드와 그랜저 하이브리드, K5 하이브리드, K7 하이브리드 등을 출시하며 다양한 차종에서 하이브리드 라인업을 갖추기 위해 노력하고 있다. 그 결과 현

국내외에서 새로운 동력분기형 배열 탐색을 위한 시도가 있어 왔지만 모든 가능성이 체계적으로 검토 되지는 못하였다. 그렇기에 획기적으로 성능이 향상된 최적의 배열을 찾기 위해서는 보다 체계적이고 효율적인 설계 방법론이 필요한 현실이다.

대기아 자동차의 하이브리드차 판매량은 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 하지만, 〈그림 6〉에서 알 수 있듯 여전히 미국 내 하이브리드차 및 플러그인 하이브리드차 시장은 동력분기형 파워트레인의 우수한 연비를 기반으로 토요타를 비롯한 포드와 제너럴 모터스가 시장을 주도하고 있음을 알 수 있다. 그리고 앞으로도 동력분기형 하이브리드 파워트레인 위주의 하이브리드차 시장이 지속적으로 유지 될 것으로 전망 된다.

3. 국내 외 하이브리드 전기차 연구 동향

대부분의 국내외 하이브리드차 연구는 에너지 운영전략(energy management)과 단품 효율 향상 등 하위시스템 디자인에 집중되어 있는 반면 획기적인 성능 향상이 가능한 파워트레인 배열 및 디자인 연구는 상대적으로 취약한 편이다. 에너지 운영 전략의 개선을 통해 특정 시스템의 연비 성능을 끌어 올릴 수는 있지만, 해당 시스템의 한계를 뛰어 넘을 수는 없다. 단품의 효율 개선하는 것 또한 유사한 어려움이 있다. 예를 들어 엔진의 경우 열효율이 카르노 효율을 넘을 수 없는 한계가 있고, 변속기의 경우 항상 변속기 오일에 잠겨 작동하기 때문에 지속적인 손실을 수반할 수밖에 없다. 특히 엔진과 모터 등의 단품 효율이 이론적인 한계 성능에 가까워짐에 따라 단품 향상을 통한 연비 개선 효과는 점점 줄어들고 있는 추세이다. 반면, 파워트레인의 배열과 디자인 변경을 통해 우수한 설계를 탐색한다면, 하이브리드차의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 특히, 동력분기형 파워트레인의 경우 직렬형이나 병렬형 대비 연비가 우수하며 배열에 따라 다양한 파워트레인의 구현이 가능하기 때문에 우수한 하이브리드차 파워트레인을 찾을 가능성이 상대적으로 크다. 하지만 동시에 넓은 설계 공간을 가지고 있어 체계적이고 효율적인 접근 방법을 필요로 한다.

이를 위해 국내에서는 2000년대 후반 동력분기형 하이브리드차의 새로운 배열^[2]과 디자인을 탐색하려는 시도가 있었으나 모든 가능성을 체계적으로 검토 하지 못

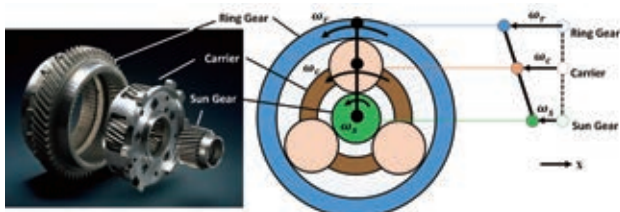


하였다.^[4-5] 해외에서도 최적의 설계를 탐색하는 것이 제어 전략이나 단품의 효율을 향상 시키는 것보다 적은 노력으로도 연비를 획기적으로 향상 시킬 수 있다는 것을 인지하고 배열 탐색 및 설계 최적화 연구에 집중하고 있다. Jinming Liu와 Hwei Peng은 두 개의 유성기어를 사용하는 동력분기형 파워트레인의 가능한 배열을 체계적으로 분석하며 배열 연구의 중요성을 언급하였다.^[6] 최근에는, Xiaowu Zhang 외 2인이 한 개의 유성기어와 클러치를 사용하는 다중모드 동력분기형 하이브리드 파워트레인의 다양한 설계를 체계적으로 고려하여 최적의 다중모드 동력분기형 배열과 디자인을 찾으려는 노력이 있었다.^[7] 그러므로 국내에서도 동력분기형 하이브리드 파워트레인의 배열과 설계 문제를 체계적으로 정립하고 연구를 수행하여 새로운 원천기술을 개발해야할 시점이다.

III. 국내 하이브리드 전기차 개발 방향 제언

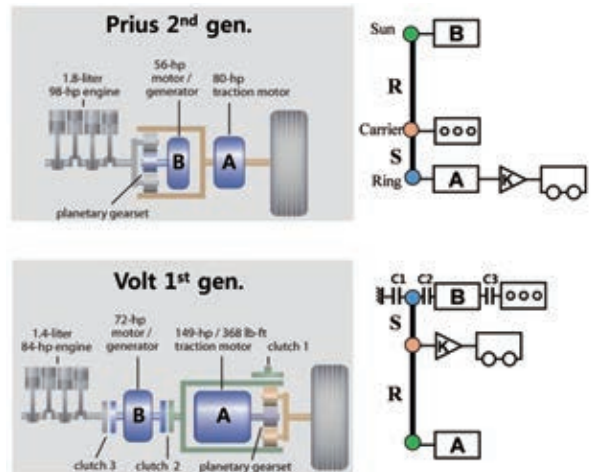
1. 동력분기형 하이브리드차의 설계

본 절에서는 독자들이 동력분기형 파워트레인의 설계에 보다 친숙해 질 수 있도록 동력분기형 파워트레인 설계 문제에 대해 간략히 소개하고자 한다. 첫째로 동력분배 장치인 유성기어를 소개한다. 유성기어(Planetary Gear, PG)는 <그림 7>와 같이 선(Sun, S) 기어, 캐리어(Carrier, C) 그리고 링(Ring, R) 기어로 구성되어 있다. 각 축의 회전 반경이나, 기어 잇 수에 따라 속도 비와 토크 비가 결정 되는데, 이러한 관계를 간단히 나타내기 위해 지렛대 비유법(lever analogy)이 사용되곤 한다. 지렛



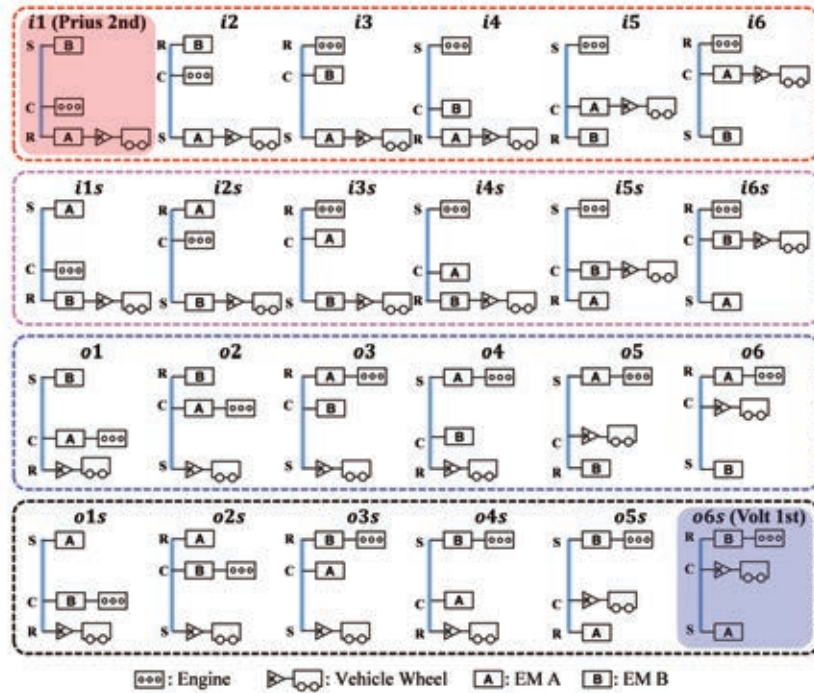
<그림 7> 유성기어와 지렛대 비유

2) 동력분기형 파워트레인에서는 유성기어 간 연결, 그리고 엔진, 모터, 제너레이터 등과 같은 단품과 유성기어의 연결에 따라 다양한 배열이 만들어 질 수 있다.



<그림 8> 프리우스와 볼트의 지렛대 표현 (위: 프리우스 2세대, 아래: 볼트 1세대)^[8]

대 비유에서는 유성기어 각 축이 지렛대 위의 하나의 점 (node)으로 나타내어지는데, 각각의 점의 수평 방향 이동 거리가 유성기어의 각 축의 회전 속도를 의미 한다. 그리고 각 축에 작용하는 토크는 각 노드에 작용하는 수평 방향의 힘으로 나타낼 수 있게 된다. 그러므로 지렛대 비유법을 이용하면 유성 기어의 작동을 보다 직관적으로 이해할 수 있게 된다. 그리고 동력분기형 파워트레인은 이 지렛대의 각 노드에 엔진, 모터, 제너레이터 그리고 차량 구동축을 연결하는 것으로 간략화 하여 표현 할 수 있게 된다. <그림 8>은 대표적인 동력분기형 하이브리드차인 프리우스와 볼트의 파워트레인을 지렛대를 이용하여 나타낸 것이다. 두 파워트레인 모두 동력분기형 이지만, 유성기어와 단품 간의 연결에서 큰 차이를 보인다. <그림 8>의 프리우스의 경우 유성기어의 선기어에 제너레이터가 캐리어에 엔진이 그리고 링기어에 모터와 구동축이 함께 연결 된 입력 분기(input-split) 구조이다. 그리고 볼트의 하이브리드 모드는 링기어에 제너레이터와 엔진이 함께 연결되고 캐리어에 구동축이 그리고 선 기어에 모터가 연결 된 출력 분기(output-split) 구조를 취하고 있다. 이 둘은 같은 동력분기형 하이브리드이지만, 유성기어와 단품의 연결이 달라짐에 따라 성능에 큰 차이를 보이는 대표적인 예이다. 이처럼 동력분기형 하이브리드는 배열이 달라짐에 따라 연비 및 가속 성능이 크게 변하고 심지어 작동 불가능한 배열이 되기도 한다. 그렇기 때문에 우



〈그림 9〉 1개의 유성기어로 구현 가능한 24가지 동력분기형 배열

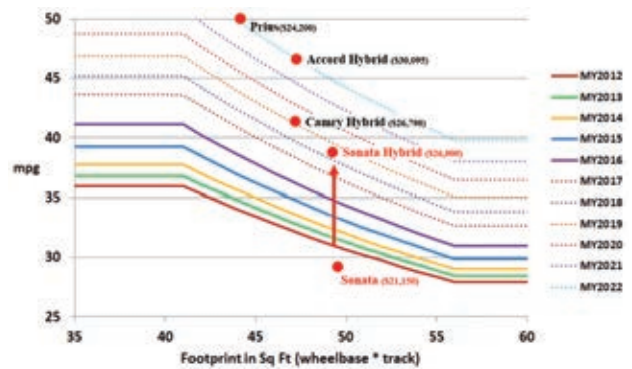
수한 동력분기형 파워트레인 설계를 찾기 위해서는 가능한 배열을 체계적으로 분석하고 이 중 좋은 설계를 찾아야만 한다. 하지만, 여기서 한 가지 문제에 직면하게 된다. 1개의 유성기어를 사용할 경우에는 〈그림 9〉와 같이 24개의 배열만이 가능하지만, 유성기어의 개수가 증가함에 따라 가능한 배열의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문이다. 특히 동력분기형 파워트레인에서 중요한 설계 변수인 유성기어의 선/링 기어 비와 종 감속 기어 비를 설계 변수로 고려할 경우 모든 설계 공간에 대해 연비와 가속성을 평가하는 것은 사실상 불가능해진다. 그러므로 우수한 동력분기형 하이브리드차 설계를 찾기 위해서는 설계 공간을 체계적으로 정의하고 축소하여 성능을 효율적으로 비교 분석할 수 있는 방법을 도입해야만 할 것이다.

근래의 하이브리드 차 연구는 주로 연비 향상에 초점이 맞춰져 있었지만 가속 성능 및 차량의 가격 또한 중요한 요인이므로 하이브리드차 설계 시 함께 고려되어야만 한다.

어 자동차 제조사들이 매년 더 우수한 연비를 갖는 자동차를 출시하도록 하고 있다. 그 결과 근래의 하이브리드차 연구는 주로 연비 향상에 초점이 맞춰져 있었고 상대적으로 가속 성능은 주목 받지 못하였었다. 하지만 가속 성능은 소비자가 자동차를 구입할 때 중요

2. 성능 지표 : 연비, 가속 성능, 가격

하이브리드차의 여러 성능 지표 중 연비와 같은 경우엔 〈그림10〉과 같이 연비 향상을 촉진하는 법률이 제정되



〈그림 10〉 매년 엄격해지는 미국의 연비 규제정책 :

CAFE(Corporate Average Fuel Economy, 차급에 따라 연비 하한을 정하여 자동차 제조사들이 매년 연비를 개선하도록 하는 정책, 주요 하이브리드차들은 미래의 연비 규제에 대응할 수 있는 것을 알 수 있음^[9])



시 하는 요소 중 하나이며 자동차를 설계함에 있어 필수로 고려되어야 하는 사항이다. 하지만 그렇다고 높은 연비와 우수한 가속성능을 위해 가격 적인 측면 또 한 소홀히 할 수 없는 것이 현실이다. 그렇기에 이들을 함께 고려하지 않고, 한 가지 요소만을 고집한다면 소비자의 호응을 얻지 못할 것이고, 결국은 혼다 인사이트와 같이 역사의 뒤안길로 사라져 버리게 될 것임이 분명하다. 따라서, 연비와 가속 성능이 모두 우수함과 동시에 소비자의 기대에 부응하는 가격 경쟁력을 갖춘 하이브리드차 개발 노력이 필요한 시점이다.

VI. 결론

지금까지 하이브리드 전기차 개발 동향을 살펴보고 향후 연구가 필요한 부분들을 짚어보았다. 직렬형, 병렬형과 동력분기형 하이브리드 파워트레인의 구조적 특징과 각각의 장단점을 살펴보았다. 그리고 하이브리드차 시장 동향을 제조사별로 살펴보았다. 이를 통해 시장을 주도하고 있는 자동차 제조사인 토요타와 포드, 지엠은 우수한 성능의 동력분기형 파워트레인을 채택하여 소비자로부터 선택을 받았다는 것을 알 수 있었다. 또한 국내외 연구 동향을 통해 기존 하이브리드 전기차 연구가 어떤 한계가 있는지 알아보았다. 이러한 하이브리드차 동향을 통해 국내 하이브리드 전기차 개발이 어떤 방향으로 나아가야 하는지를 제시하였다. 동시에 국내 연구진 또한 동력분기형 하이브리드차 연구에 쉽게 뛰어 들 수 있도록 동력분기 하이브리드차 파워트레인에 대한 깊이 있는 설명을 더하였다. 마지막으로, 보다 우수한 성능의 하이브리드차 개발을 위해서는 연비와 가속 성능 그리고 배출가스 규제까지 함께 고려하여 세계적인 수준의 성능을 갖춘 동력분기형 파워트레인 원천기술 개발이 절실하다는 것을 강조 하고자한다.

참고 문헌

- [1] Lohner-Porsche Mixte Hybrid, <http://www.ultimatecarpage.com/car/3456/Lohner-Porsche-Mixte-Voiturette.html>
- [2] 주요 제조사별 차량의 연비: <http://www.fueleconomy.gov>
- [3] 미국 내 (플러그인) 하이브리드차 점유율: <http://www.hybridcars.com/september-2014-dashboard>
- [4] H. Yang, S. Cho, N. Kim, W. Lim, and S. Cha (2007). Analysis of Planetary gear hybrid powertrain system part 1: Input split system, International Journal of Automotive Technology, 8(6), 771-780.
- [5] H. Yang, B. Kim, Y. Park, W. Lim, and S. Cha (2009). Analysis of planetary gear hybrid powertrain system part 2: Output split system, International Journal of Automotive Technology, 10(3), 381-390.
- [6] Liu, Jiming, and Hwei Peng. "A systematic design approach for two planetary gear split hybrid vehicles." Vehicle System Dynamics 48, no. 11 (2010): 1395-1412.
- [7] Zhang, Xiaowu, Hwei Peng, and Jing Sun. "A Near-Optimal Power Management Strategy for Rapid Component Sizing of Multimode Power Split Hybrid Vehicles." Control Systems Technology, IEEE Transactions on 23, no. 2 (2015): 609-618.
- [8] <http://greenanswers.com/question/what-technology-difference-between-toyota-prius-a/>
- [9] CAFE 규제 전망 : https://en.wikipedia.org/wiki/Corporate_Average_Fuel_Economy



금동석

- 2003년 5월 B.S. Worcester Polytechnic Institute, Mechanical Engineering
- 2005년 5월 M.S. University of Michigan, Ann Arbor, Mechanical Engineering
- 2010년 5월 Ph.D. University of Michigan, Ann Arbor, Mechanical Engineering
- 2010년 6월~2012년 3월
Visiting Research Scientist, General Motors Global R&D Propulsion Systems Lab.
- 현재 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 조교수

〈관심분야〉

하이브리드 전기차 최적 제어 및 설계
자율주행자동차 인지, 판단 및 제어 알고리즘



김현준

- 2009년 8월 아주대학교 학사
- 2015년 8월 한국과학기술원 석사
- 현재 한국과학기술원 박사과정

〈관심분야〉

하이브리드 전기차 최적 제어 및 설계