

입력 분기식 하이브리드 동력전달계의 구조별 성능 분석

양 호림¹⁾, 김 남욱¹⁾, 조 성태²⁾, 임 원식³⁾, 차 석원¹⁾

Analysis of the Influence of an Architecture on Vehicle Performances

Horim Yang, Sungtae Cho, Wonsik Lim, Sukwon Cha

Key words : Input-split, HEV(Hybrid Electric Vehicle), FTP72 driving cycle, Fuel Economy, Acceleration performance, Lever length

Abstract : In the recent studies, various types of multi mode electric variable transmission ofr hybrid electric vehicle have been proposed. Multi mode electric variable transmission consists of two or more different type planetary gear hybrid powertrain system(PGHP), which can change its power flow type by means of clutches for improving transmission efficiencies. Generally the power flows can be classified into three different types such as input split, output split and compound split. In This paper, we present velocity and torque equations of the input-split powertrain and analyze its optimal performances. There are six combinations of the input-split powertrain, each combination has various lever length. We find optimal planetary gear ratios for fuel economy and acceleration performance, and compare performances of each combination.

Nomenclature

$R_{ENG}, R_O, R_{MG1}, R_{MG2}$: 입출력 및 모터 감속비
 $T_{ENG}, T_O, T_{MG1}, T_{MG2}$: 입출력 및 모터토크
 $W_{ENG}, W_O, W_{MG1}, W_{MG2}$: 입출력 및 모터속도
 η_{MG1}, η_{MG2} : 모터의 총방전 효율

subscrip

MMFD : Modified Method of Feasible Directions

1. 서론

환경에 대한 관심의 증대와 최근의 유가 급등으로 인해 하이브리드 전기자동차의 시장에서의 성공 가능성은 급격히 커지고 있으며, 세계각국의 주요 자동차 개발사들은 하이브리드 전기자동차를

차량양산하거나, 양산 계획을 발표하고 있다.

하이브리드 전기자동차의 개발 초창기에 존재했던 수많은 동력전달장치의 구조들은 실효성 및 성능이 검증된 구조들로 표준화가 이루어지고 있으며, 최근에는 혼다 사 및 유럽 자동차 업체를 중심으로 하는 병렬형 방식과 도요타 사를 중심으로 하는 동력 분기형 방식이 하이브리드 전기자동차용 동력전달장치의 주류를 이루고 있다. 특히 동력 분기형 방식은 별도의 변속기 없이도 변속과 하이브리드 전용의 기능을 수행할 수 있다는 장점으로 인해 도요타 사의 PRIUS

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yhrpro@naver.com
Tel : (02)880-8050
 - 2) 현대 자동차
E-mail : bangle@hyundai-motor.com
Tel :
 - 3) 서울산업대학교
E-mail : limws@snut.ac.kr
Tel : (02)970-6392

렉서스의 RX400H, GS450H 및 포드 사의 ESCAPE 등 이를 채용하는 차종이 늘어나고 있다. 하이브리드용 동력 분기형 동력전달계는 동력의 전달 방식에 따라 입력, 출력, 복합 분기의 세 가지로 나뉘질 수 있다. 이 중에서 입력분기 방식은 전기차 모드, 회생제동 모드 등 전기 모터를 단독으로 사용하는 모드에서 큰 장점을 갖고 있으며, 전 변속 구간에서 우수한 동력전달 효율을 갖고 있기 때문에 PRIUS를 비롯한 대부분의 시판 차량이 입력 분기식 동력전달계를 채용하고 있다.

2. 입력 분기식 동력전달계

입력 분기식 동력전달계는 일반적으로 한 개의 유성기어와 두 개의 모터 조합으로 이루어지며 한 개의 유성기어에는 선기어, 캐리어, 링기어의 세 개의 구동점이 존재한다. 이 중 두 개의 구동점에 각각 엔진과 제1 모터가 연결되며, 나머지 하나의 구동점에 변속기 출력 축과 제 2모터가 연결되게 된다. 엔진의 출력 중 일부는 제 1모터 또는 제 2모터를 통해 순환 또는 분기하게 되며, 일부는 출력 축으로 직접 전달되게 된다. 이와 같이 변속기에 입력되는 엔진의 동력이 두 개의 동력으로 분기되게 되므로 이를 입력 분기 구조라고 칭한다. Fig.1 은 대표적인 입력 분기식 하이브리드 파워트레인인 도요타 사의 THS(Toyota Hybrid System)의 동력 분기 개념도이다.

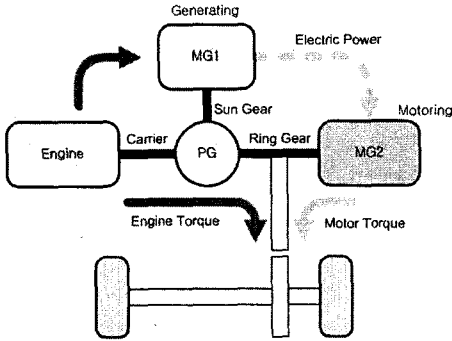


Fig. 1 Power flow of input split type hybrid powertrain.

2.1 입력 분기식 동력전달계의 종류

입력 분기식 동력전달계는 레버로 상사하여 표현할 수 있으며, 동력전달계의 입력은 엔진과 연결되고, 출력은 MG2(Motor Generator)와 연결되게 된다. 또한 엔진의 동력을 분기시키는 역할을 하는 MG1은 입력과 출력이 아닌 나머지 한 구동점에 연결되게 된다.

여기서 동력전달계의 출력부터 입력 사이의 레버 길이를 1로 정의하고 출력 점에서 MG1까지의 레버 길이를 α 라고 하면, 입력, 출력, MG1, MG2의 속도 토크 관계 식을 α 의 함수로 표현할 수 있다. α 는 유성기어의 선기어와 링기어의 잇수비 R과 입력, 출력, MG1을 각각 유성기어의 선기어, 링기어, 캐리어 중 어느

구동점에 연결하는가에 따라 결정되게 되며 모두 6가지의 조합을 갖게 된다. 그림3은 연결 상태에 따른 조합을 나타낸 것이다.

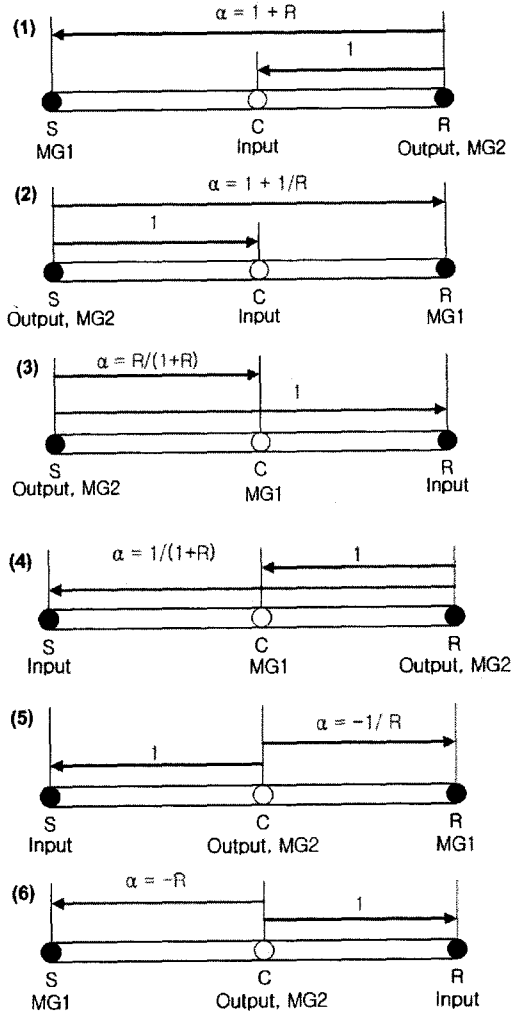


Fig. 2 Possible input split combination with single planetary gear system

2.2 속도 및 토크 관계식

입력 분기식 동력전달계의 입력, 출력, MG1, MG2간의 속도, 토크 관계식은 그림 3, 4와 같이 레버로 상사하여 표현할 수 있으며, 이외의해 정상상태 시 시스템의 속도, 토크 관계식을 식 (1), (2), (3)과 같이 유도할 수 있다.

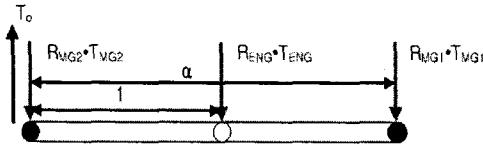


Fig. 3 Lever diagram for steady-state torque relationship

$$\sum M_{ENG} = R_{ENG} T_{ENG} + \alpha R_{MG1} T_{MG1} = 0$$

$$\therefore T_{ENG} = -\alpha \frac{R_{MG1}}{R_{ENG}} T_{MG1} \quad (1)$$

$$\sum M_{Input} = \frac{1}{R_o} T_o + (\alpha - 1) R_{MG1} T_{MG1} - R_{MG2} T_{MG2} = 0$$

$$\therefore T_o = -(\alpha - 1) R_o R_{MG1} T_{MG1} + R_o R_{MG2} T_{MG2} \quad (2)$$

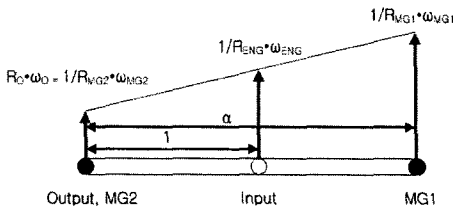


Fig. 4 Lever diagram for steady-state speed relationship

$$\frac{\frac{1}{R_{MG1}} w_{MG1} - R_o w_o}{\frac{1}{R_{ENG}} w_{ENG} - R_o w_o} = \alpha$$

$$\therefore w_o = \frac{1}{(\alpha - 1) R_o} \left(\frac{\alpha w_{ENG}}{R_{ENG}} - \frac{w_{MG1}}{R_{MG1}} \right)$$

$$= \frac{1}{R_o R_{MG2}} w_{MG2} \quad (3)$$

식 (1)에서 정상상태를 유지하기 위해 엔진의 토크에 대응되는 MG1의 요구 토크 및 원하는 시스템 출력을 얻기 위한 MG2의 요구 토크를 계산할 수 있다. 또한 식(2)에서 출력 속도에 대한 엔진 및 MG1 속도의 관계를 알 수 있다.

입력 분기식 동력전달계에서 MG1의 속도는 레버 길이 α , 감속비, 엔진 속도, 차 속에 의해 결정되며 토크는 레버 길이 α , 감속비 및 엔진 토크에 의해 결정된다. 또한 MG2의 속도는 오직 감속비와 차 속에 의해서만 결정되며 토크는 레버 길이 α , 감속비 그리고 MG1의 토크 및 시스템 요구 토크에 의해서 결정된다.

입력 분기식 동력전달계는 MG2가 시스템 출력에 직접 연결되게 되므로 엔진 및 MG1의 작동에 관계 없이 MG2만으로 출력 토크 및 속도를 제어할

수 있으며, 이는 엔진이 정지된 상태에서 운전되게 되는 전기차 모드 및 회생제동 모드에서 큰 이점을 갖게 된다.

3. 구조별 성능 결과

이 장에서는 앞에서 언급한 6가지 입력 분기 구조에 대해 연비 및 가속성능을 최적화하는 유성기어비를 찾고 시뮬레이션을 통해 그 때의 차량 성능을 알아보았다. 유성기어비는 선기어 이수에 대한 링기어 이수의 비가 1.5에서 3.0 사이의 값에서 최적화를 수행하였고 모터 및 입출력에 연결된 감속비는 없는 것으로 가정하였다. 모터 및 제너레이터 종류는 모두 동일한 종류를 사용하였다.

3.1 연비 시뮬레이터

연비 시뮬레이터는 matlab으로 구성하였으며 연비는 FTP72 사이클에서 시뮬레이션으로 얻어진 값을 사용하였다. 회생제동으로 인하여 얻어진 동력은 모두 저속에서 모터 모드로 사용한다고 가정하였으며 모터에 의한 엔진 동력 보조는 고려하지 않았다.

모터에 의한 동력 보조가 없으므로 입력 분기 시스템은 단순 변속기 역할만을 하게 되고 제너레이터에서 충전한 동력은 모터에서 사용하게 된다. 따라서 제너레이터의 충전 동력과 모터의 방전 동력이 같아야 하며 이는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\eta_{MG1} T_{MG1} w_{MG1} + \eta_{MG2} T_{MG2} w_{MG2} = 0 \quad (4)$$

입력 분기 구조는 엔진 속도 및 토크, 제너레이터 속도 및 토크, 모터 토크의 다섯 개의 변수를 가지고 있다. 이 다섯 개의 변수는 식 1,2,3,4의 네 개의 구속식으로 연관되어 있으므로 입력 분기 시스템은 자유도가 1인 시스템이다. 이 논문에서 사용한 연비 시뮬레이터에서는 엔진 속도를 변수로 놓고 가장 연비가 좋은 엔진 속도에서 엔진이 동작하도록 엔진과 모터의 상태 변수들을 결정한다. 엔진 속도는 주어진 엔진의 범위에 한정되며 최대 토크를 넘는 경우에는 작동하지 않는다. 또한 엔진의 작동은 모터의 속도에 의해서도 제한받는다.

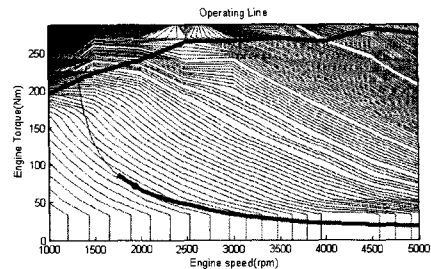


Fig. 5 엔진 작동점의 선정

Fig 5는 연비 시뮬레이터에서 엔진의 작동점을 결정하는 과정을 나타낸 것이다. 두꺼운 파란

색 실선이 가능한 엔진 작동점을 나타내며 가는 실선은 모터 속도에 의해 제한 받은 영역을 나타낸 것이다. 파란색 실선 영역 중 가장 연비가 좋은 점이 선택되며 이는 검은색 점으로 표현되어 있다.

3.2 가속성능 시뮬레이터

가속성능 시뮬레이터에서는 모터에 의한 동력 보수가 포함되어야 하므로 에너지 구속식이 없게 되고 출력속 속도가 결정되지 않기 때문에 한 개의 변수가 추가된다. 따라서 6개의 변수와 3개의 구속식을 가진 2자유도계 시스템이 된다. 가속성능 시뮬레이터에서는 모터와 체너레이터 토크, 엔진 속도를 세 개의 변수로 가정하고 각 상황에서 출력 토크가 가장 높은 동작점들을 찾는다. 아래의 Fig 6은 각 엔진 속도에서 출력 토크가 가장 높은 점을 나타낸 것이다.

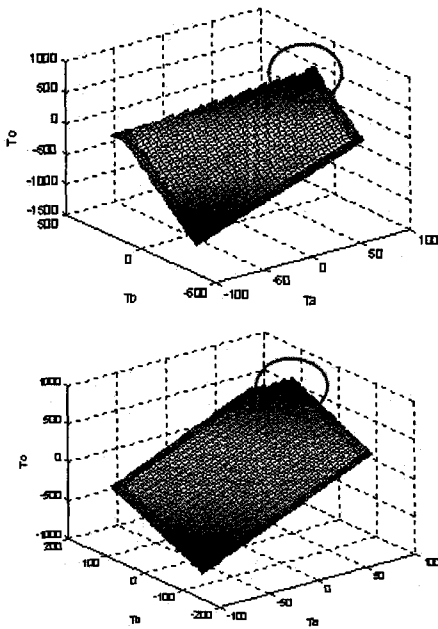


Fig. 6 엔진속도 1000, 3000rpm에서 최대 출력 토크를 내는 점

3.3 최적화 과정

최적화 프로그램으로는 Engineous Software사의 iSIGHT를 사용하였다. 최적화를 통해 연비 성능과 가속성능을 높이는 유성기어비를 각각 찾았으며 최적화 방법은 실험 계획법을 통해 다양한 초기값을 찾고 각 초기값에 대해 MMFD를 이용하여 최적해를 찾으려 하였다. 여기서 얻어진 최적값을 사용하여 연비 및 가속성능 시뮬레이션을 수행하였다.

3.4 시뮬레이션 결과

Table 1은 구조 1,2,3,4,5,6의 최적화된 유성기어비 및 연비, 가속성능 결과를 나타낸 것이다.

Table. 1 구조별 연비 및 가속성능 결과

구조	성능	최적 유성기어비	결과
1	연비 (km/L)	1.9	22.808
	가속성능 (sec)	3.0	5.75
2	연비 (km/L)	1.5	22.296
	가속성능 (sec)	1.5	6.73
3	연비 (km/L)	X	X
	가속성능 (sec)	1.5	7.28
4	연비 (km/L)	X	X
	가속성능 (sec)	3.0	6.55
5	연비 (km/L)	X	X
	가속성능 (sec)	1.5	5.23
6	연비 (km/L)	3.0	19.528
	가속성능 (sec)	1.5	4.43

Table 1에서 연비란에 X표가 있는 경우는 그 구조가 FTP72 사이클을 충족하지 못하였을 경우를 뜻한다. 일단 3번과 4번은 FTP72 사이클을 충족하지 못할뿐더러 가속성능 결과도 구조 중 가장 나쁜 결과를 보였다. 이 구조들은 단일 모드로는 사용이 불가능할뿐더러 2개 이상의 모드를 사용한다고 해도 장점이 비교적 낮을 것으로 생각된다. 1번과 2번 구조는 연비 및 가속성능이 전체적으로 우수한 결과를 보였다. 특히 연비 및 가속성능이 가장 우수한 1번 구조는 단일 모드로 사용하기에 가장 우수한 구조라고 생각된다. 5번과 6번 구조는 사이클을 충족하지 못하거나 연비가 낮아서 단일모드로는 사용이 불가능한 구조이다. 하지만 가속성능 결과가 우수하므로 2개 이상의 모드를 구성하였을 경우에 저속 모드로 사용할 경우 우수한 동력 성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 사용가능한 여섯 가지의 입력 분기 구조에 대해 최적화된 가속성능 및 연비 결과를 얻고 이 결과를 바탕으로 구조들을 평가하였다. 단일 모드를 위해서는 연비 및 가속성능이 전체적으로 우수한 1번 구조가 가장 좋을 것으로 생각되며 2개 이상의 모드를 조합한 시스템에서는 우수한 가속성능을 위해 5번과 6번 구조를 사용하는 것이 바람직하다.

References

- [1] Howard L. Benford, Maurice B. Leising, "The Lever Analogy A New Tool in Transmission Analysis", SAE Paper, 1981.
- [2] K. H. Jung, H. E. Kim, J. K. Kim, "Performance and Transmission Efficiency Analysis of 2-mode Hydro Mechanical Transmission", Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Volume 13, Number 1, p 90-98, 2005