

## 모드 전환 상수를 이용한 듀얼 모드 하이브리드 해석 방법

김 남욱<sup>1)</sup>, 양 호림<sup>2)</sup>, 안 국현<sup>3)</sup>, 조 성태<sup>4)</sup>, 박 영일<sup>5)</sup>, 이 장무<sup>6)</sup>

### Analysis of dual-mode hybrid by using mode change parameter

Namwook Kim, Horim Yang, Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Yoeng-il Park, Jang Moo Lee

**Key words** : Dual mode hybrid(듀얼 모드 하이브리드), Planetary gearset(유성 기어), Compound Split(복합 분기), HEV(하이브리드 자동차)

**Abstract** : Many researches about next generation vehicles are trending toward HEV which has better fuel economy than an internal-combustion engine. But existing HEV has some defects at specific running states(eg. highway running). It is possible that dual-mode hybrid system overcomes that defects. Mode change parameter,  $\gamma$  helps to analyse the mode changing of dual mode hybrid and is applied at a numerical analysis on testing the performance. There is an additional constraint when vehicles drive on engine mode. No power assistance of battery applies on engine mode. Because vehicles must be sustained by only engine power while vehicle drives on constant speed mode. At the conclusion of this paper, graphs show the ability of motors that satisfy the equilibrium of the lever system. Designers can roughly determine capacities of the motors, parameters of the lever system by this analysing method.

#### Nomenclature

$\gamma$  : mode change parameter, none

#### subscript

THS : Toyota Hybrid System

### 1. 서론

(돋움체 11pt 또는 Times New Roman 11pt)

여러 모로 자동차 업계에서 단연 화두가 되고 있는 하이브리드는 이미 도요타의 프리우스를 위시하여 상용화 및 대량 생산 체계의 발판을 마련했다고 여겨진다. 그러나 도요타의 THS 시스템의 경우 고속 주행 모드에서 동력 전달 효율이 급격히 나빠지는 단점이 있고, 마이크로 하이브리드의 경우 하이브리드 효과를 충분히 발휘할 수 없다는 단점을 안고 있다. 듀얼 모드 하이브리드 시스템은 이러한 단점을 보완할 수 있도록 고 변속비에서 효율이 좋은 시스템과 저 변속비에서 좋은 효율을 가지는 시스템 사이를 전환해가며 동력을 전달하는 시스템이다.

### 2. 복합 유성 기어 시스템

복합 유성 기어 시스템을 이용하여 듀얼 모드에 사용되는 복합 분기 구조의 동력 전달 시스템을 구성할 수 있다.

#### 2.1 복합 유성 기어의 구성

일반적으로 하나의 유성 기어에는 링기어, 선기어, 캐리어의 축이 외부의 동력과 연결된다. 각각의 축을 작동점이라 하면 세 개의 모든 작동

- 
- 1) 서울대학교(돋움체 8pt)  
E-mail : alde@vib.snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)883-8042
  - 2) 서울대학교  
E-mail : yhrpro@mailvib.snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)883-8042
  - 3) 서울대학교  
E-mail : kahn@mailvib.snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)883-8042
  - 4) 현대자동차  
E-mail : bangle@hyundai-motor.com  
Tel : (031)368-6198 Fax : (031)368-2417
  - 5) 서울산업대학교  
E-mail : yipark@snut.ac.kr  
Tel : (02)970-6352 Fax : (02)883-8042
  - 6) 서울대학교  
E-mail : leejm@gong.snu.ac.kr  
Tel : (02)880-1598 Fax : (02)883-8042

점을 이용하여 레버 해석을 하는 것이 일반적인 방법으로 제시되고 있다. 또한 두 개 이상의 유성 기어열을 연결하여 여러 개의 작동점을 만들어 낼 수 있는데 이와 같은 방법을 이용하여 설계 시 요구되는 적절한 비를 가진 작동점을 구성할 수가 있다.

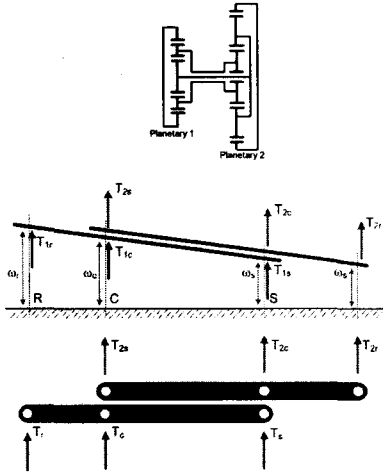


Fig. 1 Compound planetary gearset

Fig. 1은 두 개의 유성 기어가 연결되는 모습을 레버 상에서 표현한 것이다. 같은 방법으로 연결된 유성 기어의 수를 늘려 가면 일반적으로 최종적으로 얻어지는 작동점의 수는 다음과 같다.

$$n_{point} = N_{pl} + 2$$

( $N_{pl}$  = 유성기어 수)

## 2.2 기어비를 적용한 작동점 구성

복합 유성 기어의 작동점의 증가를 연결되는 각 유성기어의 기어비를 고려하면 다음 Fig. 2와 같다.

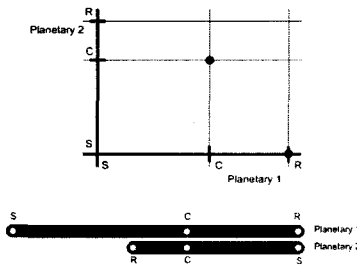


Fig. 2 Selecting for compounding

Fig. 2에서 가로축과 세로축은 각각 유성 기어 열의 작동점을 표현한다. 선택된 두 개의 점은 가로축의 R(ring gear)과 세로축의 S(sun gear), 그리고 가로축의 C(carrier)와 세로축의 C(carrier)의 교차점에 표시되어 있는데 이는 각각의 유성 기어가 교차되어 연결되는 작동점을

나타내고 있다. 두 개의 유성 기어가 연결되어 새로운 하나의 작동점이 추가적으로 발생되는데 이는 다음 Fig. 3에 표현되어 있다.

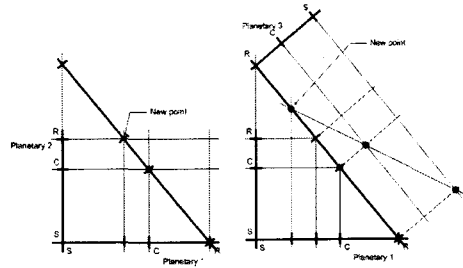


Fig. 3 Plotting of generated point

Fig. 3은 유성 기어 두 개가 조합되어 4개의 작동점을 만든 경우와 추가적으로 하나의 유성기어가 추가되어 모두 3개의 유성기어가 5개의 작동점을 만들어내는 경우를 표현하고 있다. Fig.3의 왼쪽 그림은 두 개의 유성기어가 연결될 때 연결에 관여하지 않은 작동점들이 레버상에 새로운 작동점을 만들어냄을 알 수 있다. 같은 방법으로 기어비가 다른 유성 기어가 조합되어 발생하는 작동점을 구해보면 다음과 같다.  $N_x$ 개와  $N_y$ 개의 작동점을 가진 레버가  $x$ 축과  $y$ 축 상에 존재할 때 이를 연결하기 위한 두 개의 포인트를 선정하는 모든 경우의 수는

$$\text{조합 수} = \frac{(N_x - 1)(N_y - 1)N_x N_y}{2}$$

이를 바탕으로 유성 기어 2개가 연결된 경우의 모든 조합의 경우 수는 18가지가 되고, 3개의 유성 기어가 연결될 경우 648가지, 4개의 유성 기어가 조합되어 6개의 작동점을 가진 복합 유성 기어 시스템은 38880 가지 조합으로 레버 시스템을 구성할 수 있다. 복합 유성 기어의 작동점을 구성하는 방법을 이용하여 항 후 동력 전달 시스템을 최적화 하는 작동점을 얻고 역으로 구성 가능한 복합 유성 기어 시스템을 추정할 수 있다. 일반적으로 1.5-3.0 사이에서 특정 기어 비를 가진 3개 정도의 유성 기어 시스템을 이용한 복합 유성 기어로 거의 모든 임의의 작동점 4개를 만족하는 시스템을 구성할 수 있다.

## 3. 하이브리드 동력 전달계 해석

하이브리드 동력 전달계가 안정적인 변속을 수행하기 위해서는 두 개 이상의 모터가 필요하다. 이는 정속 주행 시 배터리의 보조가 없을 경우에 변속을 가능하게 하면서 동력 전달계 내부의 평형 상태를 유지하는데 제너레이터와 모터가 동시에 필요하기 때문이다.

### 3.1 동력 전달계의 구성

Fig. 1에서 구성한 복합 유성기어를 통해 4 개의 작동점을 얻었다. 이를 출력축과 입력축, 모터 a와 모터 b가 독립적으로 연결될 수 있는 최소한의 작동점이 확보된 경우라고 가정할 수 있

고 이와 같은 시스템의 일반적인 구성은 다음 Fig. 4와 같다.

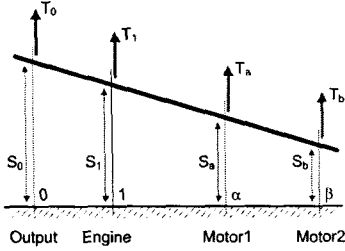


Fig. 4 lever system

Fig. 4에서 Output은 출력, Engine는 입력이며 각각의 위치는 0, 1,  $\alpha$ ,  $\beta$ 로 표현되어 있다. 과도 상태의 거동을 해석하기 위해서 Fig. 4에 표현된 레버 상에 각 동력원에 적용되는 관성을 적용하는 방법이 있으나 이 논문에서는 위의 동력 전달계를 이루는 레버 시스템의 평형만을 고려한 정상상태만을 다루기로 한다.

### 3.2 정속 주행 상태의 평형 관계

정속 주행의 가장 큰 특징은 배터리의 보조가 존재하지 않는다는 것이다. 이는 Fig. 4의 레버 시스템이 평형을 이루는 조건에 모터의 파워합이 '0'가 되는 조건이 추가됨을 의미한다. 이 경우 시스템의 효율은 기계적인 효율을 고려하지 않을 때, 모터간의 전기적인 동력 전달량에 의해 결정이 되는데 그 양이 많을수록 전기적인 에너지 손실이 커지므로 전체적인 시스템 효율을 저하시키는 요인이 된다. 다음은 토크 평형식과 모멘텀 평형식, 그리고 속도 구속식이다.

$$T_0 + T_1 + T_a + T_b = 0$$

$$T_1 + \alpha T_a + \beta T_b = 0, \text{ ('0'에서의 모멘트)}$$

$$S_a = (S_1 - S_0)\alpha + S_0$$

$$S_b = (S_1 - S_0)\beta + S_0$$

위의 식에 다음의 에너지 평형을 고려하면,

$$n_a T_a S_a + n_b T_b S_b = 0$$

이 얻어지고,  $r_t = \frac{S_1}{S_0}$ 의 변속비 변수를 도

입하여 무차원화된 토크 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$T_a = \frac{n_b \{ (r_t - 1)\beta + 1 \}}{(n_a - n_b)\alpha\beta(r_t - 1) + (n_a\beta - n_b\alpha)}$$

$$T_b = \frac{n_a \{ (r_t - 1)\alpha + 1 \}}{(n_b - n_a)\alpha\beta(r_t - 1) + (n_b\alpha - n_a\beta)}$$

$$T_0 = (\alpha - 1)T_a + (\beta - 1)T_b$$

만일 각 동력원에 감속비가 존재할 때, 모터 a의 경우 감속비가

$$R_{aA} = \frac{\text{실제모터속도}}{\text{감속후속도}}$$

라 정의하고 실제의 모터 토크와 속도를

$T_A, S_A$ 라 하면 다음의 관계가 만족되고 이는 다른 동력원에도 동일하게 적용할 수 있다.

$$T_a = R_{aA} T_A, S_a = \frac{1}{R_{aA}} S_A$$

감속비가 존재하는 경우로 일반화하여 해석하는 것은 모드 전환 시에 유용하게 이용될 수 있다.

## 4. 듀얼 모드 하이브리드의 모드 변환

듀얼 모드 하이브리드는 앞서 해석한 임의의 동력 전달계 시스템 두 개가 적용되어 각 주행 상태에서 유리한 시스템을 선택하여 주행하는 시스템이다.

### 4.1 듀얼 모드의 기본 구성

듀얼모드의 가장 큰 특징은 클러치를 이용하여 레버 시스템의 파라미터를 변화시킨다는 것이다.

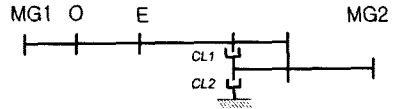


Fig. 5 Example of dual mode hybrid

위의 Fig. 5는 듀얼 유성 기어를 구성하는 시스템의 예다. 두 개의 레버 시스템이 클러치를 통해 연결되어 있는데 첫 번째 레버 시스템은 5개의 작동점을 가지므로 앞서 구한 식에 의해 최소 3개의 유성 기어열이 조합되어 이루어진 유성 기어 시스템이다. Fig.5의 구조는 두 개의 클러치가 작동하여 모드 전환을 수행한다. 구체적인 모드 전환 방법은 다음 Fig. 6을 통해 알 수 있다.

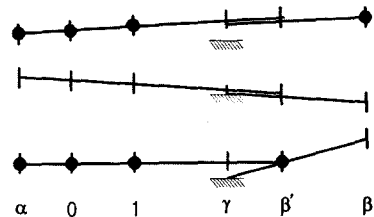


Fig. 6 Mode change of lever system

위의 Fig. 6은 차례대로 모드 1과 모드 전환 시점 그리고 모드 2를 나타내고 있다. 클러치 1이 잡혀 있을 때, 모드 1이 구현되는데 이 때 작동점은 0, 1,  $\alpha$ ,  $\beta$ 로 구성된다. 두 번째 레버 시스템은 클러치 1이 풀리고 클러치 2가 잡히는 순간을 표현하고 있는데 이 때  $\gamma$  작동점의 속도가 '0'이 되어 모드 전환 시의 클러치에 속도차가 발생하여 과도충격이 발생하는 것을 줄여준다. 마지막 레버 시스템은 모드 2의 상태로 주행하는 경우인데 이 때, 작동점은 0, 1,  $\alpha$ ,  $\beta'$ 로 구성되고 모터 2는 감속비를 갖게 된다.

## 4.2 모드 전환 상수 $\gamma$

4.1에서 언급했듯이 듀얼 하이브리드의 가장 큰 특징은 클러치를 통해 두 개의 동력 전달 시스템간의 전환을 유도한다는데 있다. 그러나 이 두 개의 동력 전달 시스템(모드 1과 모드 2의 레버 시스템) 간에는 일정한 관계가 성립하는데 이를 결정하는 상수를  $\gamma$ 로 정의한다.  $\gamma$ 는 클러치의 위치로 결정되며 이 값은 4개의 동력원 작동 점과는 무관하게 결정될 수 있고, 경우에 따라서는 모터 1의 작동점과 일치할 수도 있다.

$\gamma$ 는 모드 전환 시점과 모드 전환이 이루어졌을 때 모터의 감속비를 결정하게 된다. Fig. 6의 두 번째 그림은 모드 전환 시점을 나타내고 있는데 모드 전환 시점의 변속비를  $\gamma$ 를 통해서 표현하면 다음과 같다.

$$r_{change} = 1 - \frac{1}{\gamma}$$

그리고 모드 2에서 모터 2의 감속비는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R_{bB} = \frac{\beta - \gamma}{\beta' - \gamma}$$

모드 전환 변속비와 전환 후의 모터 감속비를  $\gamma$ 를 통해 표현하면 실제 수치적인 방법으로 가속 성능이나 연비 평가를 수행할 때, 모드 전환에 의한 영향을 효과적으로 반영할 수 있는 장점이 있다.

## 5. 동력 전달 시스템 해석 결과

모드 전환 상수  $\gamma$ 를 이용하여 모드 전환을 고려하여 무차원화된 모터의 작동 상태를 나타낼 수 있다.

### 5.1 작동점을 이용한 해석 결과

앞서 설명한 방법을 바탕으로 시스템의 해석을 수행할 수 있다. 임의의 파라미터를 입력하여 해석을 수행할 결과를 다음 Fig. 7에 표현하였다.

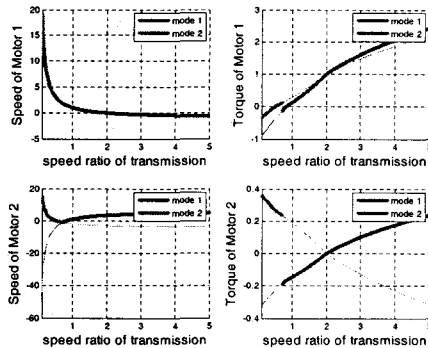


Fig. 7 Speed and torque of motor

Fig. 7은  $\alpha = -1, \beta = 6, \beta' = 2, \gamma = 3.39$ 로 입력한 결과이다. 가로축의 변속비는

$$ratio = \frac{engine\ speed}{output\ speed}$$

으로 정의하였으며 3.2에서 얻은 식을 바탕으로 감속비를 이용한 모터의 속도와 토크의 값을 수치적으로 나타내고 있다. 변속비가 약 0.8인 지점에서 모드 전환이 발생하는데 이 때 모터 2의 토크가 음의 값에서 양의 값으로 크게 변하면서 제어 특성이 나쁜 경우 과도 특성이 나타날 가능성이 있는 시스템이다.

Fig. 8은 시스템의 작동 효율을 나타내고 있다.

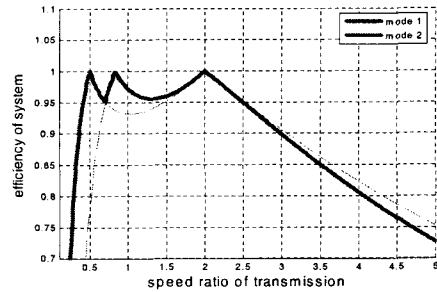


Fig. 8 Mode change and system efficiency

듀얼 모드 하이브리드는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 효율이 좋은 영역을 선택하여 작동하도록 모드를 전환하는 것이다. 일반적으로 효율이 1인 직결점(mechanical point)에서 모드 전환이 일어날 수 있으나 추가적인 작동점을 생성하면 Fig. 8의 경우처럼 직결점이 아닌 점에서 모드 전환이 가능하고 본 논문에서 언급한 모드 전환 상수  $\gamma$ 의 값이 그 전환 시의 변속비를 결정하게 된다.

## 6. 결론

복잡한 유성 기어의 구조를 가진 시스템의 경우도 3절에서 해석한 일반적 시스템으로 등가 해석이 가능하다. 본 논문에서는 모드 전환 상수  $\gamma$ 를 이용하여 모드 전환이 일어나는 변속비를 얻고 모드 전환 시에 각 모터의 속도가 연속을 이루도록 필요한 감속비를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 효율을 고려하여 변속이 이루어지는 시스템의 예제를 보여주고 같은 이러한 방법을 통해 듀얼 모드를 일반적으로 해석할 수 있음을 보였다.

## References

(바탕채 9pt)

- [1] Howard L. Benford, Maurice B. Leising. The Lever Analogy : A New Tool in Transmission Analysis.
- [2] Brendan Conlon, Comparative Analysis of Single and Combined Hybrid Electrically Variable Transmission Operating Modes, SAE 2005