

## 차동기어장치와 V-벨트식 변속기구를 결합한 무단변속기의 성능

최상훈\*

### Performance of CVTs Composed of a Differential Gear Unit and a V-belt Drive

Sang-Hoon Choi\*

#### ABSTRACT

Continuously variable transmission (CVT) mechanisms considered here combine the functions of a K-H-V type differential gear unit and a V-belt type continuously variable unit (CVU). As combining the functions of a K-H-V type differential gear unit and a V-belt type CVU, 24 different mechanisms are presented. Some useful theoretical formula related to speed ratio, power flow and efficiency are derived and analyzed. These mechanisms have many advantages which are the decrease of CVT size, the increase of overall efficiency, the extension of speed ratio range, and the generation of geared neutral.

**Key Words** : continuously variable transmission(무단변속기), input coupled(입력축 연결), output coupled(출력축 연결), power circulation(동력순환), power split(동력분류)

#### 1. 서론

무단변속기는 다양한 종류가 개발되어 사용되고 있으나, 이들 대부분은 자체적으로 중립(geared neutral)을 구현할 수 없거나 동력전달 효율과 수명 측면에서 기존의 기어변속기보다 불리한 단점을 가지고 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 단점들을 제거하기 위해 무단 변속기구에 차동기어장치를 결합시킨 형태의 무단 변속기에 대한 연구가 진행되었고, 이러한 형태는 무단변속기의 소형 및 경량화 설계를 가능하게 하였으며, 동력전달 효율의 증대 및 변속 범위의 확대, 그리고 중립의 생성과 출발장치를 요구하지 않는 등 많은 장점을 갖는 것으로 분석되었다<sup>(2-10)</sup>.

최근 국내에서는 V-벨트식 무단변속기구에 2K-H I 형식과 II 형식 차동기어장치를 결합시켜 입력축 연결방식과 출력축 연결방식에 대한 다수의 동력순환형과 동력분류형 구성들을 제안하고, 제안된 구성에 대해 효율, 동력흐름 및 동력 분담율, 속도비의 이론식을 유도하여 실험을 통해 타당성을 검증하였다<sup>(8-11)</sup>. 또한 동력순환형과 동력분류형을 결합시킴으로써 자체적으로 후진, 중립, 전진을 모두 구현할 수 있으면서 효율과 동력분담율을 개선한 복합형 무단변속기를 제안하였다<sup>(11-14)</sup>.

본 논문에서는 K-H-V형 차동기어장치와 V-벨트식 무단변속기구를 입력축 연결방식과 출력축 연결방식으로 결합시킨 24가지 구성을 제안하고, 각

2002년 5월 3일 접수

\* 건국대학교 기계항공공학부

각의 구성에 대한 속도비, 동력전달효율, 동력흐름에 대한 이론식을 제안하였다. 또한 제안된 무단변속기의 특성해석을 수행하였으며, 이에 따른 2가지의 복합형 무단변속기를 제안하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 V-벨트식 무단변속기구

V-벨트식 무단변속기구는 Fig. 1과 같이 구동축과 중동축 가변풀리의 회전반경을 동시에 변화시킴으로써 속도비를 연속적으로 변화시킬 수 있다.

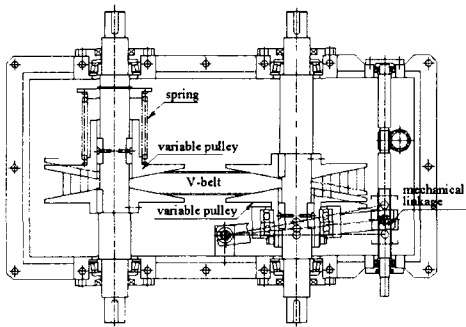


Fig. 1 V-belt type continuously variable unit

### 2.2 K-H-V형 차동기어장치

K-H-V형 차동기어장치는 Fig. 2와 같이 내접기어인 링기어 r과 외접기어인 유성기어 p, 캐리어 c, 그리고 링기어와 동심축인 s로 구성된다. 또한 링기어와 유성기어의 물림효율( $\eta_{rp}$ )을 기본효율( $\eta_0$ )로 정의한다<sup>(15)</sup>.

$$\eta_0 = \eta_{rp} \quad (1)$$



Fig. 2 K-H-V type differential gear unit

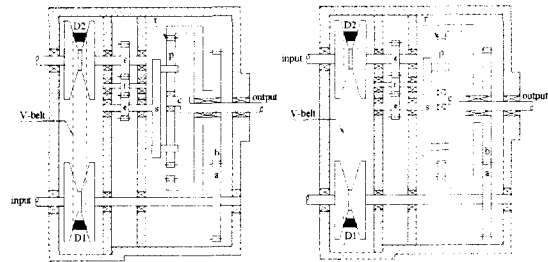
### 2.3 구성방법 및 동력흐름

무단변속기구가 입력축에 직접 연결되는 입력축 연결방식(input coupled type)과 출력축에 연결되는 출력축 연결방식(output coupled type)이 있다. 또한 출력동력의 일부가 변속기 내부를 순환하는 동력순환형(power circulation)은 순환하는 방향에 따라 정방향 순환형(positive circulation)과 부방향 순환형(negative circulation)으로 분류된다. 동력분류형(power split)은 전체 입력동력을 무단변속기구와 차동기어장치가 일정 비율로 분담하여 전달하는 동력흐름이다<sup>(1)(3)(11)</sup>.

## 3. 기본구성의 구조 및 이론

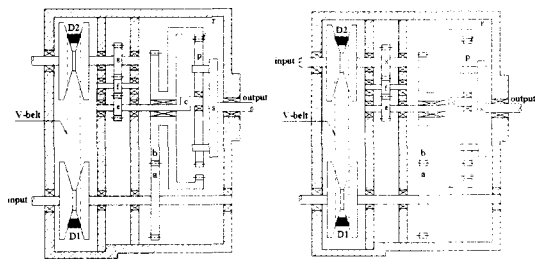
### 3.1 기본구성

V-벨트식 무단변속기구와 K-H-V형 차동기어장치의 연결방법은 입력축 연결방식 6가지, 출력축 연결방식 6가지가 가능하다. 입력축 연결방식의 기본구성은 Fig. 3과 같으며, 각 구성은 기어 f의 유무에 따라 동력흐름이 변화하므로 기본구성은 실제 12가지가 된다. 출력축 연결방식의 경우는 입력축 연결방식의 입력축과 출력축이 서로 뒤바뀐 형태이므로 마찬가지로 실제 기본구성은 12가지가 된다.



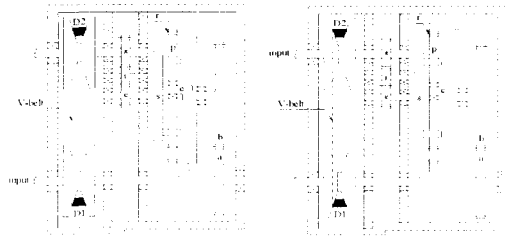
(a) configuration 1

(b) configuration 2



(c) configuration 3

(d) configuration 4



(e) configuration 5 (f) configuration 6

Fig. 3 Input coupled type configurations composed of V-belt type CVU and differential gear unit

3.2 입력축 연결방식

속도비, 효율, 동력흐름 및 동력분담율에 대한 이론식의 유도는 실험적으로 증명된 선행연구와 동일한 방법으로 수행되었다(8~11).

3.2.1 동력 순환형

Fig. 3(a)에서 기어 f가 없는 구성 1은 링기어 r과 유성기어 p가 서로 동일한 방향으로 회전하므로 Fig. 4와 같은 복합차동기어장치로 치환될 수 있다. 여기서 요소 1은 K-H-V형 차동기어장치이고 요소 2는 무단변속기구를 치환하는 것이며, 캐리어 c'은 고정된다.

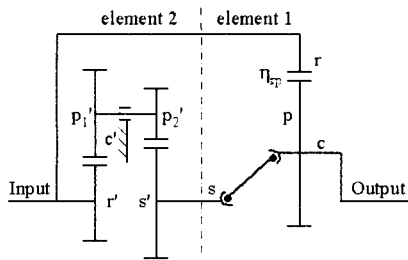


Fig. 4 Equivalent differential gear unit for input coupled configuration 1 without an idler gear f

Fig. 4와 같은 복합차동기어장치와 기어 f가 없는 구성 1이 서로 동가이기 위해서는 다음 식을 만족해야 한다.

$$i_{eq} = \frac{z_r' z_{p2}'}{z_s' z_{p1}'} = \frac{D_1}{D_2} \frac{z_g}{z_e} \frac{z_b}{z_a} \quad (2)$$

$i_{eq}$ 는 Fig. 4에서 요소 2의 기본 속도비이며,  $z_{p1}'$ ,  $z_{p2}'$ 은 기어  $p_1'$ ,  $p_2'$ 의 잇수이다. 또한  $D_1$ ,  $D_2$ 는 가변 폴리 직경이고,  $z_a$ ,  $z_b$ ,  $z_c$ ,  $z_g$ 는 Fig. 3(a)에서 기어 a, b, e, g의 잇수이다.

Fig. 4에서 요소 1은 r을 고정시키고 p를 구동축, c를 중동축으로 하는 제1성분과 p를 고정하고 r을 구동축, c를 중동축으로 하는 제2성분의 합과 등가가 된다. 제1성분의 출력  $P_{01}$ 과 제2성분 출력  $P_{02}$ 는 차동기어장치의 기본속도비( $i_0$ ), 구성요소의 전달 토크비와 회전 속도비를 이용하여 전체출력  $P_0$ 에 대해 정리할 수 있으며, 아이들러 기어 f가 없는 구성 1은 항상  $P_{02}/P_{01} < 0$ 이 성립하므로 동력은 항상 순환하게 된다.

또한 Fig. 3(a)와 Fig. 4에서 구성요소의 각속도비를 이용하여 아이들러 기어 f가 없는 구성 1에 대한 속도비( $i$ ), 이론효율( $\eta$ ), 입력동력  $P_i$ 에 대한 무단변속기구의 동력분담율( $P_{CVU}/P_i$ )과 차동기어장치의 동력분담율( $P_{dif}/P_i$ )을 정리하면 Appendix 1과 같다. 또한 다른 동력순환형인 기어 f가 없는 구성 2, 3, 4, 기어 f가 있는 구성 5, 6에 대해 유사한 방법으로 이론식을 정리하면 Appendix 1과 같다. 여기서 무단변속기구의 효율을  $\eta_{CVU}$ , 기어 a, b의 물림 효율을  $\eta_{ab}$ , 기어 e, f의 물림 효율을  $\eta_{ef}$ , 기어 f, g의 물림 효율을  $\eta_{fg}$ , 기어 e, g의 물림 효율을  $\eta_{eg}$ 로 정의하면 요소 2의 효율  $\eta_0'$ 은 다음과 같다.

기어 f가 없는 구성 1, 2, 3, 4에서는

$$\eta_0' = \eta_{ab} \eta_{eg} \eta_{CVU} \quad (3)$$

기어 f가 있는 구성 5, 6에서는

$$\eta_0' = \eta_{ab} \eta_{ef} \eta_{fg} \eta_{CVU} \quad (4)$$

3.2.2 동력분류형

Fig. 3(a)와 같이 기어 f가 있는 구성 1은 기어 p, r이 서로 반대방향으로 회전하므로 Fig. 5와 같은 복합차동기어장치로 치환될 수 있다. Fig. 5와 Fig. 3(a)와 같이 기어 f가 있는 구성 1이 서로 동가이기 위해서는 식(5)를 만족해야 한다.

$$i_{eq} = \frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1}{D_2} \frac{z_g}{z_e} \frac{z_b}{z_a} \quad (5)$$

동력순환형과 마찬가지로 Fig. 5에서 요소 1은 제1성분과 제2성분으로 분리한다. 기어  $f$ 가 있는 구성 1에 대한 각 성분의 출력  $P_{01}$ ,  $P_{02}$ 는  $P_{02}/P_{01} > 0$ 이 성립하므로 항상 동력분류형이 된다. 동력분류형인 기어  $f$ 가 있는 구성 1, 2, 3, 4, 기어  $f$ 가 없는 구성 5, 6에 대한 이론식을 정리하면 Appendix 2와 같다. 또한 요소 2의 효율  $\eta_0$ 의 경우 기어  $f$ 가 있는 구성 1, 2, 3, 4에서는 식(4), 기어  $f$ 가 없는 구성 5, 6에서는 식(3)과 동일하다.

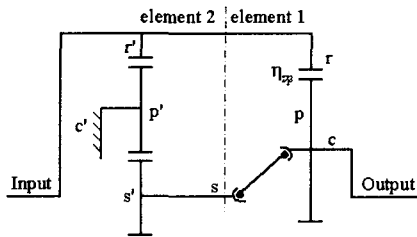


Fig. 5 Equivalent differential gear unit for input coupled configuration 1 with an idler gear  $f$

### 3.3 출력축 연결방식

출력축 연결방식은 입력축 연결방식과 동일한 조건에서 동일한 동력흐름을 갖는다. 따라서 동력순환형과 동력분류형으로 분리하여 이론식을 유도하며 동력분류형에 대한 이론식을 정리하면 각각 Appendix 3과 같다.

## 4. 기본구성의 특성해석

### 4.1 설계 파라미터

Appendix 1-3에서와 같이 기본구성의 속도비, 효율, 동력분담율 등의 특성은 K-H-V형 차동기어 장치의 기본속도비( $i_0$ ), 기어비  $z_b/z_a$ ,  $z_g/z_c$ 에 의해 변화한다. 따라서 이들 3가지 변수를 설계 파라미터로 정의하고, Table 1과 같은 조건으로 이들에 대한 기본구성들의 특성해석을 수행한다.

특성해석에 사용된 각종 구성요소의 효율은 Table 2와 같다. 무단변속기구 효율은 4개의 속도비에 대해 수행된 효율측정 실험 결과를 이용하여 선형보간법으로 적용하였다<sup>(8~11)</sup>. 또한 차동기어장치 및 각종 기어열의 물림효율은 모든 기어는 백래쉬가 없는 표준 스퍼기어이고 베어링손실과 윤활손실은 무시되며, 동력 전달손실은 오직 치면의 마찰손

실(마찰계수는 0.1)에 의한다는 가정 하에 해석된 결과를 이용하였다<sup>(16)(17)</sup>.

Table 1 Parameter ranges for parametric analysis

parameters	ranges	remarks
$z_r/z_s$	2.0 ~ 4.0	$z_b/z_a = 2.0$ $z_g/z_c = 1.0$
$z_b/z_a$	1/3 ~ 3.0	$z_r/z_s = 3.0$ $z_g/z_c = 1.0$
$z_g/z_c$	1/3 ~ 3.0	$z_r/z_s = 3.0$ $z_b/z_a = 2.0$

Table 2 Efficiencies of gears and the CVU

2K-H II type differential gear unit & gear trains	
$\eta_{rp1} = \eta_{sp2} = \eta_{ef} = \eta_{fg} = \eta_{eg} = \eta_{ab} = 0.982$	
V-belt type continuously variable unit	
speed ratios	efficiency of the CVU
0.50	0.938
0.66	0.904
1.00	0.870
2.00	0.824

### 4.2 입력축 연결방식 기본구성

입력축 연결방식에 대한 동력순환형 6개 구성과 동력분류형 6개 구성에 대해 Appendix 1과 2, Table 1, 2를 이용하여 3개의 설계 파라미터 변화에 대한 특성해석을 수행하였다.

#### 4.2.1 동력순환형의 특성

차동기어장치의 기본 속도비 증가에 따라 구성 1, 4, 5의 중립점은 무단변속기구의 속도비 2.0의 방향으로 이동하지만, 구성 2, 3, 6은 0.5의 방향으로 이동하는 경향을 갖는다. 기어비  $z_b/z_a$ 와  $z_g/z_c$ 에 대해서는 구성 3, 4의 경향은 기본속도비의 경우와 동일하지만, 구성 1, 2, 5, 6은 반대이다.

Fig. 6은 차동기어장치의 기본속도비 변화에 따른 동력순환형 구성 1의 효율을 해석한 결과이다. 구성 1, 3, 5의 속도비 기울기는 양의 값이며, 구성 2, 4, 6은 음의 값이다. 기본 속도비 증가에 따라 구성 1, 2의 속도비 기울기는 감소하지만 구성 3, 4, 5, 6의 경우는 증대된다. 기어비  $z_b/z_a$ 의 증가에 대해서는 구성 1, 2, 5, 6은 기본 속도비의 경향과 동

일하지만 구성 3, 4는 반대이다. 또한 기어비  $z_g/z_c$ 에 대해서는 구성 3, 4, 5, 6은 기본 속도비와 동일한 경향같지만 구성 1, 2는 반대이다.

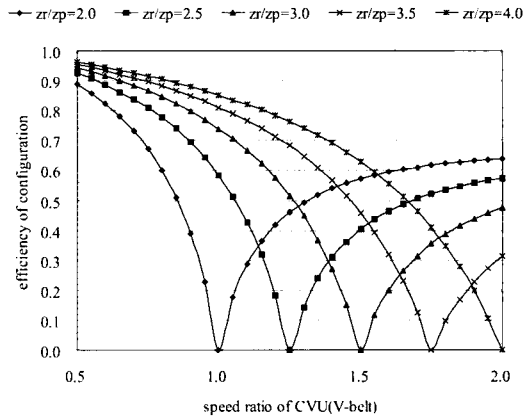


Fig. 6 Efficiencies of input coupled type configuration 1(power circulation) as the gear ratio  $z_r/z_p$

Fig. 7은 차동기어장치의 기본 속도비 변화에 따른 동력순환형 구성 1의 속도비를 해석한 결과이다. 동력순환형의 중립점에서는 출력되는 동력이 없고 모두 변속기 내부에서 순환하므로 입력동력 ( $P_i$ )에 대한 무단변속기구의 동력분담율( $P_{cvu}/P_i$ )과 차동기어장치의 동력분담율( $P_{dif}/P_i$ )은 최대값이 되며, 설계 파라미터에 대해 효율과 동일한 경향을 갖는다.

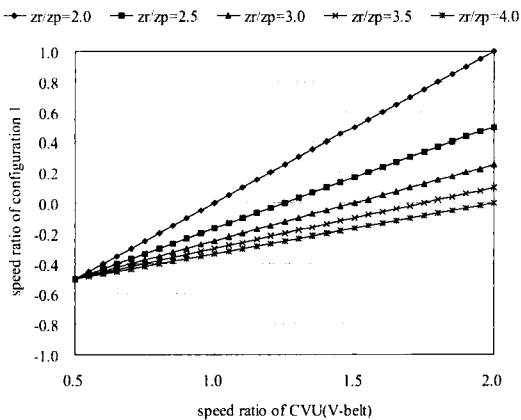


Fig. 7 Speed ratios of input coupled type configuration 1(power circulation) as the gear ratio  $z_r/z_p$

Fig. 8은 기본속도비 변화에 따른 동력순환형 구성 1의 동력분담율을 해석한 결과이다.

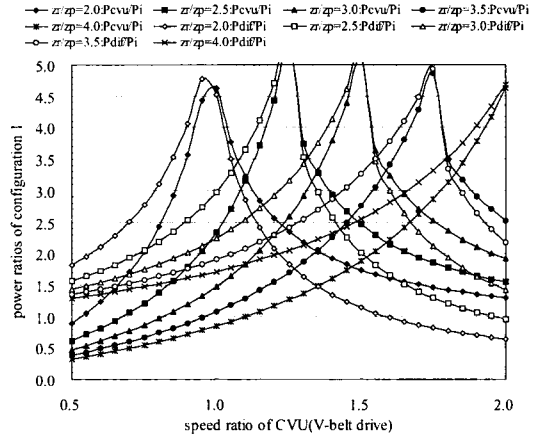


Fig. 8 Power ratios of input coupled type configuration 1(power circulation) as the gear ratio  $z_r/z_p$

Fig. 7에서 속도비가 0이 되는 중립점을 기준으로 회전방향이 변환하므로 동력순환형은 그 자체만으로 후진, 중립, 전진을 모두 구현할 수 있으나 Fig. 6과 같이 높은 효율을 일정하게 유지하지 못하고, Fig. 8과 같이 높은 동력분담율을 가지므로 소형, 경량화 설계가 곤란하며 각종 부품의 내구성에 문제점을 발생시킬 수 있다.

#### 4.2.2 동력분류형의 특성

차동기어장치의 기본 속도비 증가에 따라 구성 1, 4, 5의 효율은 비례하지만 구성 2, 3, 6의 효율은 반비례한다. 기어비  $z_b/z_a$ 와  $z_g/z_c$ 의 변화에 대해 구성 1, 2, 5, 6은 기본 속도비의 경우와 반대의 효율 경향을 나타내지만 구성 3, 4는 동일하다.

Fig. 9는 기본 속도비 변화에 대한 동력분류형 구성 1의 효율과 속도비를 해석한 결과이다. 모든 구성의 속도비 크기 및 기울기는 음의 값을 갖는다. 구성 1, 2, 5, 6의 경우 속도비 크기 및 기울기는 차동기어장치의 기본 속도비와 기어비  $z_b/z_a$ 의 증가에 대해 감소하는 반면 기어비  $z_g/z_c$ 의 증가에 대해서는 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 구성 3, 4는 이와 반대의 경향을 나타낸다.

무단변속기구보다 효율이 높은 차동기어장치의 동력분담율은 효율과 동일한 경향인 반면 무단변속

기구의 효율과는 반대의 경향을 갖게 된다. Fig. 10은 Table 1과 같은 조건으로  $z_r/z_p$  변화에 따른 동력분류형 구성 1에 대한 무단변속기구와 차동기어장치의 동력분담을 해석 결과이다.

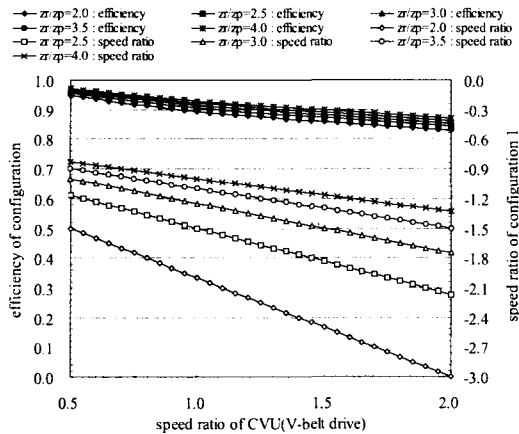


Fig. 9 Efficiencies and speed ratios of input coupled type configuration 1 as the gear ratio  $z_r/z_p$

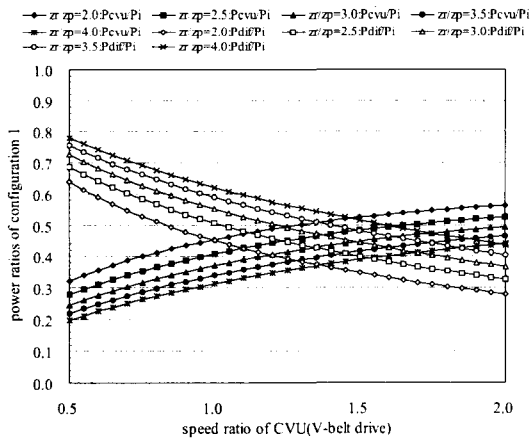


Fig. 10 Power ratios of input coupled type configuration 1 (power split) as the gear ratio  $z_r/z_p$

동력분류형은 동력순환형에 비해 상대적으로 높은 효율을 유지하며, Fig. 10과 같이 구성요소의 동력분담율이 매우 낮은 특성을 갖는다. 그러나 Fig. 9와 같이 동력분류형은 중립 생성이 불가능하다는 단점이 있다.

### 4.3 출력축 연결방식 기본구성

#### 4.3.1 동력순환형의 특성

출력축 연결방식의 동력순환형은 중립점에 해당되는 부근에서 무한대로 발산하는 쌍곡선 형태의 속도비와 매우 큰 동력분담율을 가지며, 출력축의 회전방향이 변환하는 상당히 넓은 영역에서 효율이 0이 된다. 따라서 출력축 연결방식의 동력순환형은 무단변속기로서 사용하기가 곤란하다.

#### 4.3.2 동력분류형의 특성

출력축 연결방식 동력분류형의 효율은 3가지 설계 파라미터에 대해 입력축 연결방식의 경우와 거의 동일한 경향을 갖으며, 입력축 연결방식에 비해 무단변속기구의 속도비 변화에 대해 거의 일정한 효율을 갖는 특징을 갖는다.

출력축 연결방식은 동력순환형을 사용할 수 없으므로 복합형 무단변속기의 구현은 불가능하다. 그러나 역회전이 필요하지 않고 무단변속이 요구되는 기계에 출력축 연결방식의 동력분류형을 사용하면 전체 변속범위 내에서 일정한 효율을 구현할 수 있을 것으로 분석된다. 또한 입력축 연결방식의 효율과는 달리 무단변속기구와 차동기어장치의 동력분담율과 거의 무관한 독립적인 경향을 갖는다.

## 5. 복합형 무단변속기

### 5.1 복합형 무단변속기의 설계

복합형 무단변속기는 동력순환형과 동력분류형을 결합시켜 Fig. 11과 같이 후진, 중립, 언더 드라이브(under drive), 오버 드라이브(over drive)를 모두 구현하면서, 고효율과 낮은 동력분담율을 구현하는 변속기이다. 따라서 입력축 연결방식은 복합형 무단변속기에 적용할 수 있으나, 출력축 연결방식은 적용할 수 없다. Fig. 11과 같이 입력축 연결방식의 동력순환형과 동력분류형을 결합시켜 하나의 무단변속기로 작동시키기 위해서는 다음과 같은 설계 요구사항을 만족해야 한다.

첫째 동력흐름의 변환점(transition point)을 기준으로 동력순환형과 동력분류형은 각각 서로 반대되는 속도비 기울기를 가져야 한다.

둘째 동력흐름의 변환점에서는 동력순환형과 동력분류형은 동일한 속도비를 가져야 한다. 본 논문에서는 변환점에서의 속도비를 0.5로 설정하였다.

셋째 복합형 무단변속기가 후진, 중립, 언더 드라이브, 오버 드라이브를 구현하기 위해서는 동력순환형은 반드시 중립점을 포함해야 하며, 동력분류형의 속도비는 1.0 이상을 구현해야 한다.

넷째 복합형 무단변속기를 구성하는 각종 기어의 잇수비는 변속기의 소형화 및 경량화를 위해 지나치게 크지 않아야 한다.

변환점의 속도비와 구성기어의 잇수비는 차량의 요구사양(최고속도, 가·감속, 등판능력, 변속기 설치공간 및 중량, 연비 등)을 종합적으로 고려하여 결정해야 한다. 본 논문은 차량의 요구사양을 고려하는 단계가 아니며, 요구성능(후진, 중립, 전진)을 모두 구현 가능하면서 효율과 동력분담을 특성(항상)을 만족하는 복합형 무단변속기의 구조를 제안하는 것이다. 따라서 상기의 일반적인 4가지 설계 요구사항을 설정하였다.

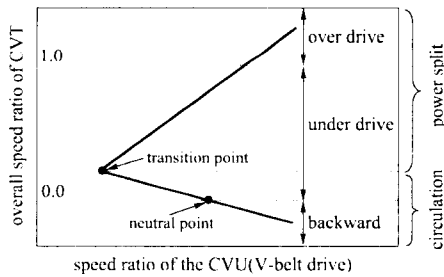


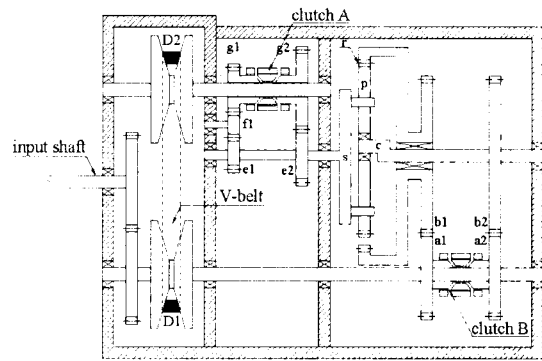
Fig. 11 Power flow modes and speed ratio ranges for the compound CVT

입력축 연결방식의 6가지 동력순환형과 6가지 동력분류형에 대한 3개의 설계 파라미터에 대한 특성해석 결과를 이용하여 상기의 설계 요구사항을 만족하는 복합형 무단변속기를 개발하였다. 이 과정에서 성능 구현을 위해 요구되는 클러치의 수가 최소가 되고, 각종 구성기어들의 잇수비가 과대하지 않아 실용화의 가능성이 매우 높은 2가지의 대표적인 복합형 무단변속기에 대한 구조와 그 성능을 분석하기로 한다.

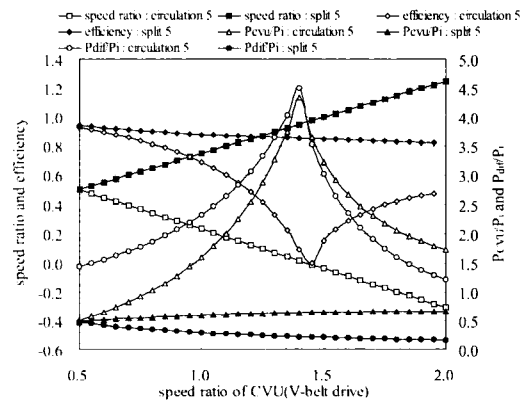
5.2 순환형 구성 5와 분류형 구성 5의 복합형

Fig. 3(e)에서 아이들러 기어 f가 있는 구성 5와 기어 f가 없는 구성 5를 결합시킨 복합형 무단변속기이다. 그 구조는 Fig. 12(a)와 같고 2개의 클러치

A, B만 필요로 하며, 클러치 A, B가 왼쪽으로 동시에 이동하면 동력분류형을 구현한다. Fig. 12(b)는  $z_f/z_p=2.0$ ,  $z_{b1}/z_{a1}=0.65$ ,  $z_{g1}/z_{c1}=1.08$ ,  $z_{b2}/z_{a2}=2.0$ ,  $z_{g2}/z_{c2}=1.0$ 일 때의 제안된 복합형 무단변속기의 성능을 해석한 결과이다. 여기서  $z_{b1}$ ,  $z_{a1}$ ,  $z_{g1}$ ,  $z_{c1}$ ,  $z_{b2}$ ,  $z_{a2}$ ,  $z_{g2}$ ,  $z_{c2}$ 는 기어  $b_1$ ,  $a_1$ ,  $g_1$ ,  $c_1$ ,  $b_2$ ,  $a_2$ ,  $g_2$ ,  $c_2$ 의 잇수를 의미한다.



(a) structure of the compound CVT



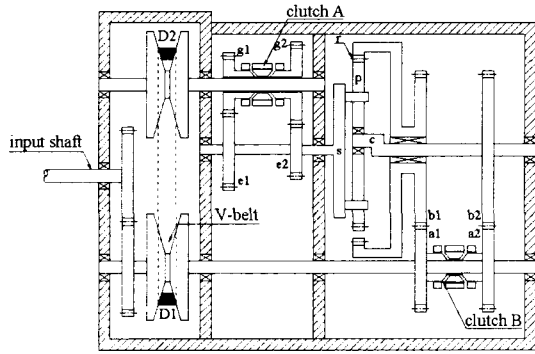
(b) characteristics on the compound CVT

Fig. 12 Compound CVT composed of power circulation 5 and power split 5

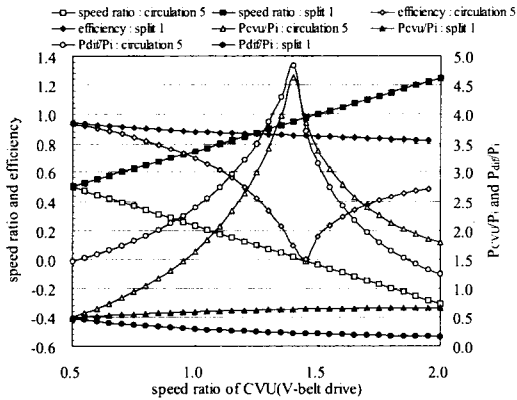
5.3 순환형 구성 1과 분류형 구성 5의 복합형

Fig. 3(a)에서 기어 f가 없는 구성 1과 Fig. 3(c)에서 기어 f가 없는 구성 5를 결합시킨 복합형이다. Fig. 13(a)와 같이 2개의 클러치 A, B가 요구되는 복합형 무단변속기로서 클러치 A, B가 왼쪽으로 이동하면 동력순환형을 구현하고, 이와 반대방향으로

로 이동하면 동력분류형을 구현한다. 각종 구성기어의 잇수비가  $z_r/z_p=2.0$ ,  $z_{b1}/z_{a1}=2.6$ ,  $z_{g1}/z_{e1}=0.54$ ,  $z_{b2}/z_{a2}=2.0$ ,  $z_{g2}/z_{e2}=1.0$ 일 때 복합형 무단변속기 성능은 Fig. 13(b)와 같다.



(a) structure of the compound CVT



(b) characteristics on the compound CVT

Fig. 13 Compound CVT composed of power circulation 5 and power split 1

### 6. 결론

V-벨트식 무단변속기구조와 K-H-V형 차동기어장치를 결합하여 입력축 연결방식의 12가지 기본구성과 출력축 연결방식의 12가지 기본구성을 제안하고, 각각의 속도비, 효율, 동력흐름, 동력분담율에 대한 이론식을 유도하였다. 또한 제안된 기본구성의 동력순환형과 동력분류형을 결합시킨 복합형 무단변속기를 개발하고 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 입력축 연결방식의 동력순환형은 후진, 중립, 전진이 모두 가능하지만, 구성요소의 동력분담율이 높고 전체 변속구간 내에서 고효율을 유지하기 곤란하다. 반면 동력분류형은 변속구간 내에서 구성요소의 동력분담율이 낮고 높은 고효율을 유지할 수 있지만, 중립과 후진을 구현할 수 없다.
- 2) 출력축 연결방식의 동력순환형은 정회전과 역회전의 구현이 모두 가능하지만 회전방향의 변환지점에서 속도비가 크게 증가하고 불연속이 되며, 구성요소의 동력분담율이 크게 증가하므로 무단변속기로 활용할 수 없다.
- 3) 동력분류형을 사용할 경우 전체 변속구간에서 무단변속기구의 속도비에 따라 변화가 적은 출력축 연결방식을 사용하는 것이 유리하다.
- 4) 제안된 복합형 무단변속기는 동력순환형과 동력분류형을 따로 사용할 경우보다 효율과 동력분담율을 개선시킬 수 있다.

### 참고문헌

1. N. H. Beachley, A. A. Frank, "Principles and Definitions for Continuously Variable Transmissions with Emphasis on Automotive Application," ASME Paper 80-C2/DET-95, 1980.
2. R.H.Macmillan, P.B. Davies, "Analytical Study of Systems for Bifurcated Power Transmission," Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 7, No. 1, pp. 40-47, 1965.
3. G.White, "Properties of Differential Transmission," The Engineer, pp. 105-111, 1967.
4. D.Yu, N.Beachley, "On the Mechanical Efficiency of Differential Gearing," ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 107, pp. 61-67, 1985.
5. Y.Zhang, B.Leduc, "Efficiency predetermination of planetary trains used as continuously variable power transmission," European journal of Mech. Eng., Vol. 37, No. 3, pp. 169-173, 1992.
6. R.Wohl, T.Long, V.H.Mucino, and J.E.Smith, "A Model for a Planetary-CVT Mechanism : Analysis and Synthesis," SAE Paper 930065, 1993.
7. 兩角宗晴, 岸 佐年, "差動齒車式 無段變速機의 力學的考察," 機械の研究, 49卷, 5号, pp. 570-578, 1997.



8. 김연수, 최상훈, "차동기어장치를 적용한 입력측 연결방식 무단변속기의 동력흐름 및 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권, 제11호, pp. 141-150, 2000.
9. 최상훈, 김연수, "차동기어장치를 적용한 출력측 연결방식 무단변속기의 특성해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제3호, pp. 205-216, 2000.
10. Yeon-Su Kim and Sang-Hoon Choi, "Experimental Study on the Input Coupled type CVT combined a Differential Gear and a V-Belt type CVU," Int'l. J. of the KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 43-55, 2001.
11. 김연수, "V-벨트 기구와 차동기어장치를 이용한 복합형 무단변속기의 설계," 건국대학교 박사학위논문, 2002.
12. R. W. Roberts, "Continuously Variable Transmission with Synchronous shift," US Patent No. 4589303, 1984.
13. S. Hanachi, "A Study of the Dynamics of a Split-Torque, Geared-Neutral Transmission Mechanism," Journal of Mechanical Design, Vol. 112, pp. 261-270, 1990.
14. 兩角宗晴, 岸 佐年, 古川豊, "差動齒車式無段變速機の力學的考察と試作," 自動車技術會論文集, 46号, pp. 45-49, 1990.
15. 兩角宗晴, 遊星齒車と差動齒車の理論と設計計算法, 東京, pp. 8-31, 1989.
16. 김연수, 최성욱, 최상훈, "2K-H형 유성기어장치의 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권, 제3호, pp. 200-207, 2000.
17. Yeon-Su Kim and Sang-Hoon Choi, "Interference and Efficiency Analysis of 2K-H I Type Differential Gear Unit," Int'l. J. of the KSPE, Vol. 1, No. 1, pp. 5-14, 2000.

Appendix 1 Speed ratios, power ratios and efficiencies for six power circulation modes in input coupled system

config- ration	criteria of power flow direction	equivalent relations ( $i_{c,q}$ )	speed ratios( $i$ )	overall efficiencies of CVT( $\eta$ )	power ratio of CVU( $P_{c,v}/P_i$ )	power ratio of differential gear unit( $P_{d,g}/P_i$ )
1	$i_{c,q} < i_0$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$-\frac{i_0 - i_{c,q}}{i_0 - 1} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{(\eta_0 i_0 - 1)(i_0 - \eta_0)(i_0 - i_{c,q})}{\eta_0(i_0 - 1)[i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)]}$	$\frac{i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0(i_0 - 1) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{i_0(i_0 - \eta_0)}{i_0(i_0 - 1) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_{c,q} > i_0$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{i_{c,q} - i_0}{i_0 - 1} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0'(i_0 i_{c,q} - 1)(i_0 - \eta_0)(i_0 - i_{c,q})}{(i_0 - 1)[i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)]}$	$\frac{\eta_0' i_{c,q}(i_0 - \eta_0)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_0(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_0(\eta_0 i_0 - 1)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_0(\eta_0 i_0 - 1)}$
2	$i_{c,q} < i_0$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$-\frac{i_0 - i_{c,q}}{i_{c,q}(i_0 - 1)} \frac{z_a}{z_c}$	$\frac{\eta_0'(i_0 i_{c,q} - 1)(i_0 - \eta_0)(i_0 - i_{c,q})}{\eta_0(i_0 - 1)[i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)]}$	$\frac{\eta_0' i_0(i_0 - \eta_0)}{i_0(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0(i_0 - 1) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_{c,q} > i_0$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{i_{c,q} - i_0}{i_{c,q}(i_0 - 1)} \frac{z_a}{z_c}$	$\frac{(\eta_0 i_0 - 1)(i_0 - \eta_0)(i_0 - i_{c,q})}{(i_0 - 1)[i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)]}$	$\frac{i_0(\eta_0 i_0 - 1)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_0(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{i_{c,q}(i_0 - \eta_0)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' i_0(\eta_0 i_0 - 1)}$
3	$i_0 > i_{c,q}(i_0 - 1)$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$-\frac{z_a}{z_b} [i_0 - i_{c,q}(i_0 - 1)]$	$\frac{\eta_0 [i_0 - i_{c,q}(i_0 - 1)]}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{i_0}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_0 < i_{c,q}(i_0 - 1)$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{z_a}{z_b} [i_{c,q}(i_0 - 1) - i_0]$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_{c,q}(i_0 - 1) - i_0]}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$	$\frac{\eta_0' i_{c,q}(i_0 - \eta_0)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_0}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$
4	$i_0 > i_{c,q}(i_0 - 1)$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$-\frac{z_a}{z_c} \frac{i_0 - i_{c,q}(i_0 - 1)}{i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_0 - i_{c,q}(i_0 - 1)]}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_0}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0 - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_0 < i_{c,q}(i_0 - 1)$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{z_a}{z_c} \frac{i_{c,q}(i_0 - 1) - i_0}{i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0 [i_{c,q}(i_0 - 1) - i_0]}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$	$\frac{\eta_0' i_0}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$	$\frac{i_{c,q}(i_0 - \eta_0)}{i_{c,q}(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_0}$
5	$i_{c,q} > i_0 - 1$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$\frac{z_a}{z_b} \frac{i_{c,q} - (i_0 - 1)}{i_0}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_{c,q} - (i_0 - 1)]}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_{c,q}}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0'(i_0 - 1)}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_{c,q} < i_0 - 1$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{z_a}{z_b} \frac{(i_0 - 1) - i_{c,q}}{i_0}$	$\frac{(i_0 - 1) - i_{c,q}}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0' i_{c,q}}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$	$\frac{i_0 - \eta_0}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$
6	$i_{c,q} > i_0 - 1$	$D_{z_g z_b}$ $D_{z_c z_a}$	$\frac{z_a}{z_c} \frac{i_{c,q} - (i_0 - 1)}{i_0 i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0 [i_{c,q} - (i_0 - 1)]}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0 i_0 - 1}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$	$\frac{i_{c,q}}{i_{c,q} - \eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)}$
	$i_{c,q} < i_0 - 1$	$D_{z_g z_a}$ $D_{z_c z_b}$	$\frac{z_a}{z_c} \frac{(i_0 - 1) - i_{c,q}}{i_0 i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0' [(i_0 - 1) - i_{c,q}]}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0'(i_0 - \eta_0)}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_{c,q}}{(i_0 - \eta_0) - \eta_0' \eta_0 i_{c,q}}$

Appendix 2 Speed ratios, power ratios and efficiencies for six power split modes in input coupled system

configuration	equivalent relations ( $i_{eq}$ )	speed ratios( $i$ )	overall efficiencies of CVT( $\eta$ )	power ratios of CVU( $P_{cvu}/P_i$ )	power ratios of differential gear unit ( $P_{dg}/P_i$ )
1	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 + i_{eq}}{i_0 - 1} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)(i_0 + i_{eq})}{(i_0 - 1)(i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0)}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{(i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0)}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_0}{(i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0)}$
2	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 + i_{eq}}{i_{eq}(i_0 - 1)} \frac{z_g}{z_c}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 i_0 - 1)(i_0 + i_{eq})}{(i_0 - 1)(\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0)}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_0}{\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 i_0}$
3	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-[i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)] \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)]}{i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + \eta_0' i_0}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}(i_0 - \eta_0)}{i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + \eta_0' i_0}$	$\frac{\eta_0' i_0}{i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + \eta_0' i_0}$
4	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}{i_{eq}} \frac{z_g}{z_c}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)]}{\eta_0' i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + i_0}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{\eta_0' i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + i_0}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}(i_0 - \eta_0)}{\eta_0' i_{eq}'(i_0 - \eta_0) + i_0}$
5	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_{eq} + (i_0 - 1)}{i_0} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_{eq} + (i_0 - 1)]}{i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}{i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$
6	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_{eq} + (i_0 - 1)}{i_0 i_{eq}} \frac{z_g}{z_c}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 [i_{eq} + (i_0 - 1)]}{\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}{\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{\eta_0' i_{eq}' + \eta_0' \eta_0 (i_0 - \eta_0)}$

Appendix 3 Speed ratios, power ratios and efficiencies for six power split modes in output coupled system

configuration	equivalent relations ( $i_{eq}$ )	speed ratios( $i$ )	overall efficiencies of CVT( $\eta$ )	power ratios of CVU( $P_{cvu}/P_i$ )	power ratios of differential gear unit ( $P_{dg}/P_i$ )
1	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 - 1}{i_0 + i_{eq}} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{(i_0 - 1)(\eta_0' \eta_0 i_{eq} + i_0)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}(i_0 - 1)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$	$\frac{i_0(i_0 - 1)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$
2	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_{eq}(i_0 - 1)}{i_0 + i_{eq}} \frac{z_c}{z_g}$	$\frac{(i_0 - 1)(\eta_0' i_{eq} + \eta_0' i_0)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$	$\frac{i_0(i_0 - 1)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}(i_0 - 1)}{(i_0 - \eta_0)(i_0 + i_{eq})}$
3	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{1}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}(\eta_0 i_0 - 1) + \eta_0' i_0}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$	$\frac{i_{eq}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_0}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$
4	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_{eq}}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)} \frac{z_c}{z_g}$	$\frac{i_{eq}(\eta_0 i_0 - 1) + \eta_0' \eta_0 i_0}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_0}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$	$\frac{i_{eq}(\eta_0 i_0 - 1)}{i_0 + i_{eq}(i_0 - 1)}$
5	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0}{i_{eq} + (i_0 - 1)} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{\eta_0' \eta_0 i_{eq} + (\eta_0 i_0 - 1)}{\eta_0' [i_{eq} + (i_0 - 1)]}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq} + (i_0 - 1)}$	$\frac{\eta_0' i_0 - 1}{\eta_0' [i_{eq} + (i_0 - 1)]}$
6	$\frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 i_{eq}}{i_{eq} + (i_0 - 1)} \frac{z_c}{z_g}$	$\frac{\eta_0' i_{eq} + \eta_0' (\eta_0 i_0 - 1)}{\eta_0' [i_{eq} + (i_0 - 1)]}$	$\frac{\eta_0' i_0 - 1}{\eta_0' [i_{eq} + (i_0 - 1)]}$	$\frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq} + (i_0 - 1)}$