

# 차동기어장치를 적용한 출력축 연결방식 무단변속기의 특성해석에 관한 연구

최상훈\*, 김연수\*\*

## Characteristics on the Output Coupled Type CVT Combined Differential Gear Unit

Sang-Hoon Choi\*, Yeon-Su Kim\*\*

### ABSTRACT

Continuously variable transmission(CVT) mechanisms considered here combine the functions of a 2K-H I type differential gear unit and a V-belt continuously variable unit(CVU). One shaft of the V-belt CVU is connected directly to the differential gear unit and remaining shaft of it is linked to the output shaft. 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. In this paper six different mechanisms of output coupled type CVT are proposed. Some useful theoretical formula related to speed ratio, power flow and efficiency are derived and analyzed, and theoretical analysis are proven by various experiments.

**Key Words** : Continuously variable transmission(무단변속기), Differential gear unit(차동기어장치), Output coupled type(출력축 연결방식), Power flow(동력흐름), Efficiency(효율)

### 기호설명

$z$  = number of teeth  
 $i_0$  = gear ratio between ring and sun gear( $z_r/z_s$ )  
 $\eta_0$  = basic efficiency of differential gear unit  
 $P_i$  = input power  
 $P_o$  = output power  
 subscripts  
 $r$  : ring gear,  $s$  : sun gear,  $c$  : carrier  
 $p$  : planet gear, B1 : gear B1, B2 : gear B2  
 $h$  : gear h

### 1. 서론

다양한 무단변속기구(CVU) 중 V-벨트 구동방식은 구조가 간단하고 설계 및 제작이 용이하여 현재 실용화된 대부분의 무단변속기에 적용되고 있다. 그러나 V-벨트식은 대동력을 전달하는 경우 효율이 저하되고 수명이 단축되는 단점도 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하기 위한 하나의 방법으로 V-벨트에 차동기어장치를 결합시킨 무단변속기(CVT)가 제안되었다<sup>(1,2)</sup>. 이러한 무단변속기는 소형 및 경량화 설계가 가능하고, 효율증대, 속도비 범위의 확대,

\* 건국대학교 기계설계학과

\*\* 건국대학교 대학원

중립(gear neutral)상태 생성 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 무단변속기의 특성에 대한 많은 연구가 진행되었으나 대부분은 차동기어장치 고유의 기하학적 특성과 효율을 적용시키지 않아 실제 효율과 큰 차이를 나타내거나 동력흐름에 대한 정량적인 기준이 제시되지 못했으며<sup>(3-5)</sup> 연결방법에 따른 다양한 구성의 제안과 이에 대한 특성해석이 수행되지 않았다<sup>(6-9)</sup>. 최근 국내에서는 상기의 선행 연구를 발전시켜 V-벨트식 무단변속기기와 차동기어장치를 결합한 입력축 연결방식(input-coupled type) 무단변속기의 특성해석이 이루어졌다<sup>(10,11)</sup>.

본 논문에서는 기 수행된 입력축 연결방식 무단변속기 연구를 확장하여 V-벨트식 무단변속기기와 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 출력축 연결방식으로 결합시킨 무단변속기의 6가지 구성을 제안하고, 각각의 구성에 대한 속도비, 동력전달효율, 동력흐름에 대한 이론식을 제안하였다. 또한 동력흐름에 대한 정량적 기준을 제시하였으며, 이러한 조건에 따라 효율 및 속도비 측정실험을 수행하여 제안된 이론식의 타당성을 검증하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 출력축 연결방식 무단변속기

Fig.1은 무단변속기기와 차동기어장치의 위치에 따라 구성방법을 분류한 것으로서 입력축과 무단변속기기가 직접 연결된 구성을 입력축 연결방식, 출력축과 무단변속기기가 직접 연결된 구성을 출력축 연결방식(output-coupled type)이라 하며<sup>(1)</sup>, 본 논문에서는 출력축 연결방법에 대한 특성해석을 수행하였다.

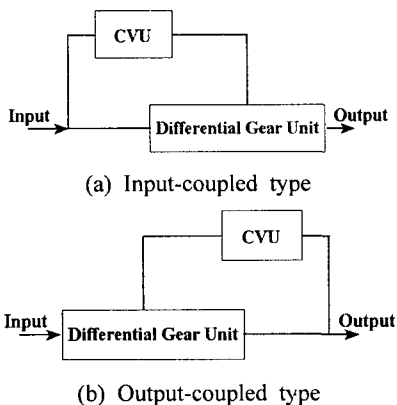


Fig. 1 Two basic configurations of CVT

### 2.2 무단변속기의 동력흐름

무단변속기의 전달동력 흐름은 Fig.2와 같이 동력순환형(power circulation)과 동력분류형(power split)으로 분류된다. 또한 동력순환형은 무단변속기구를 기준으로 출력축 방향으로 순환하는 정방향 순환형(positive circulation)과 반대방향으로 순환하는 부방향 순환형(negative circulation)으로 분류된다<sup>(1)</sup>.

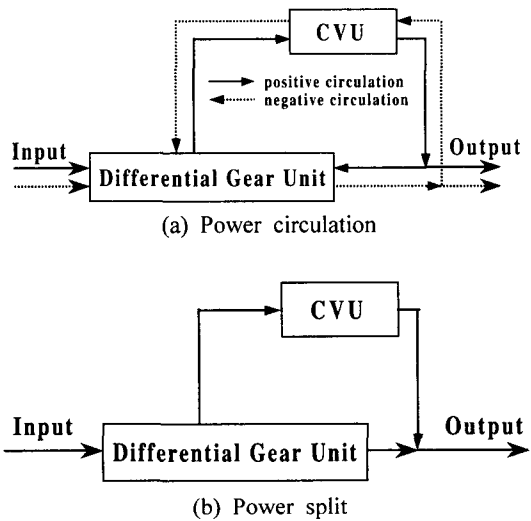


Fig. 2 Power circulation and power split of CVT

### 2.3 V-벨트식 무단변속기구

V-벨트식 무단변속기구는 Fig.3과 같이 구동축과 종동축의 가변풀리를 좌우방향으로 동시에 이동시킴으로써 속도비를 변화시키는 장치로서 최근 실용화가 이루어진 대부분의 자동차용 무단변속기에 적용되고 있다.

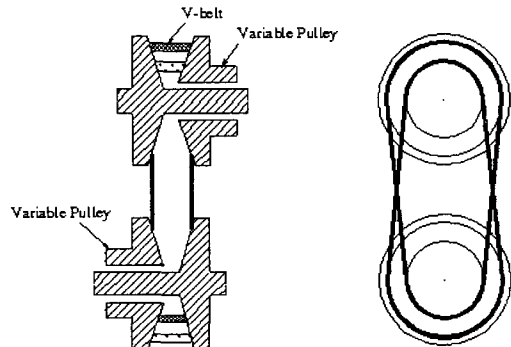


Fig. 3 V belt drive continuously variable unit

2.4 2K-H형 I 형식 차동기어장치

2K-H형 I 형식 차동기어장치는 Fig.4와 같이 태양기어(sun gear), 링기어(ring gear), 캐리어(carrier)를 기본축으로 하여 동심축으로 구성되며, 3개의 기본축은 어느 것도 고정되지 않고 독립적인 상대운동을 갖는다<sup>(12,13)</sup>.

링기어와 유성기어의 물림효율( $\eta_{rp}$ )과 태양기어와 유성기어의 물림효율( $\eta_{sp}$ )을 이용하여 캐리어가 고정될 때의 차동기어장치의 효율인 기본효율( $\eta_0$ )은 다음식으로 정의한다<sup>(6,12,13)</sup>.

$$\eta_0 = \eta_{rp} \eta_{sp} \tag{1}$$

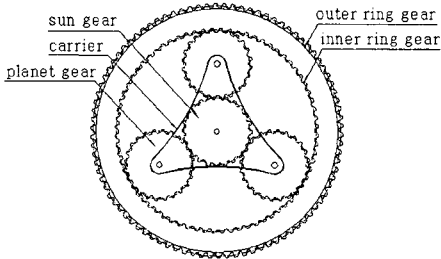


Fig. 4 2K-H I type differential gear unit

3. 무단변속기의 구성 및 이론식

3.1 출력축 연결방식 무단변속기의 구성

Fig.5는 Fig.3의 V-벨트식 무단변속기구조와 Fig.4의 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 출력축 연결방식으로 결합시킨 무단변속기로서 본 연구에서 제안한 6가지 기본구성을 보여준다. 각각의 구성은 아이들러 기어(idler gear) f의 유무에 따라 차동기어장치의 링기어와 태양기어의 회전방향이 변화하므로 동력순환형과 동력분류형으로 다시 분류된다. 따라서 Fig.5의 6가지 구성은 실제 12가지 구성으로 세분될 수 있다. 본 연구에서는 12가지 구성에 대한 속도비, 동력흐름, 동력전달효율 해석을 수행하였다.

3.2 동력순환형 무단변속기

구성 1에서 기어 f가 있는 경우에는 태양기어 s와 링기어 r의 회전방향이 서로 반대방향이 되므로 Fig.5(a)의 구성 1은 Fig.6과 같은 복합차동기어장치로 치환할 수 있다<sup>(6-11)</sup>.

Fig.5(a)와 Fig.6이 서로 등가이기 위해서는 식 (2)와 같은 관계식을 만족해야 한다.

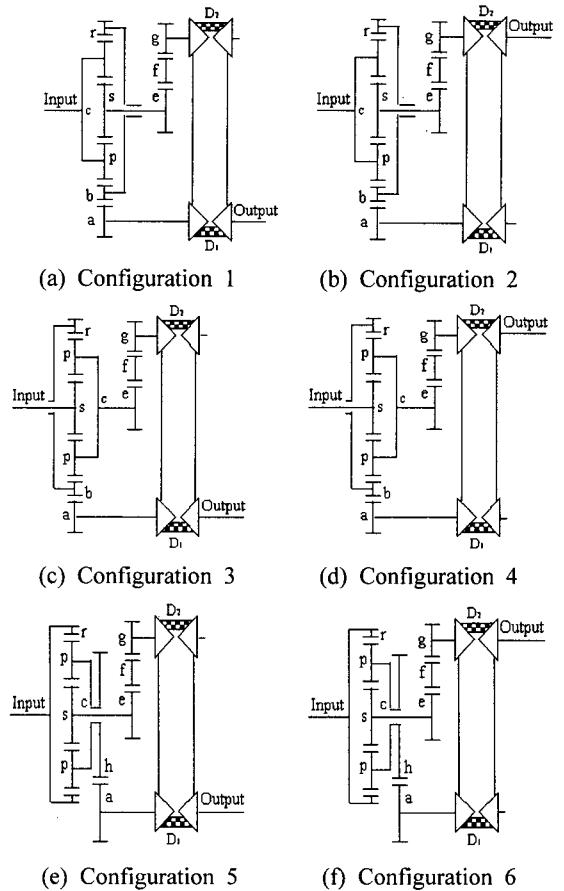


Fig. 5 Configurations of input-coupled type CVT

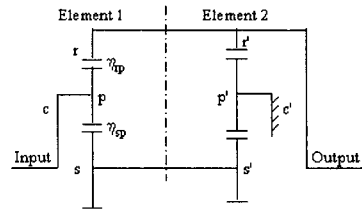


Fig. 6 Equivalent complex differential gear unit for configuration 1 included idler gear f

$$i_{eq} = \frac{z_r'}{z_s} = \frac{D_1}{D_2} \frac{z_g}{z_e} \frac{z_b}{z_a} \tag{2}$$

위식에서  $i_{eq}$ 는 Fig.6의 요소 2에서 캐리어 c'이 고정일 때 링기어 r'과 태양기어 s'의 기어비이다. 또한  $D_1, D_2$ 는 V-벨트 풀리 직경이고,  $z_a, z_b, z_e, z_g$ 는

기어 a,b,e,g의 잇수이며,  $z_r', z_s'$ 은 Fig.6에서 V-벨트에 해당되는 요소 2의 태양기어와 링기어의 잇수이다.

Fig.6의 요소 1은 캐리어 c가 구동축이고 링기어 r과 태양기어 s가 종동축이 된다. 따라서 요소 1은 r을 고정하고 c를 구동축, s를 종동축으로 하는 제1성분과 s를 고정하고 c를 구동축, r을 종동축으로 하는 제2성분의 합과 등가이다. 제1성분의 입력동력  $P_{i1}$ 과 제2성분 입력동력  $P_{i2}$ 는 다음과 같다.

$$P_{i1} = \frac{i_{eq}}{i_{eq} - i_0} P_i \quad (3)$$

$$P_{i2} = -\frac{i_0}{i_{eq} - i_0} P_i \quad (4)$$

$P_{i2}/P_{i1} < 0$ 이므로 기어 f가 있는 경우의 구성1은 동력순환형 무단변속기가 된다. 또한  $P_{i1}$ 과  $P_{i2}$ 는  $i_0$ 와  $i_{eq}$ 의 크기에 따라 동력흐름 방향이 변화하는데 Fig.7-(a)와 같이  $i_{eq} > i_0$ 인 경우는 정방향 순환형, Fig.7-(b)와 같이  $i_{eq} < i_0$ 인 경우는 부방향 순환형이 된다.

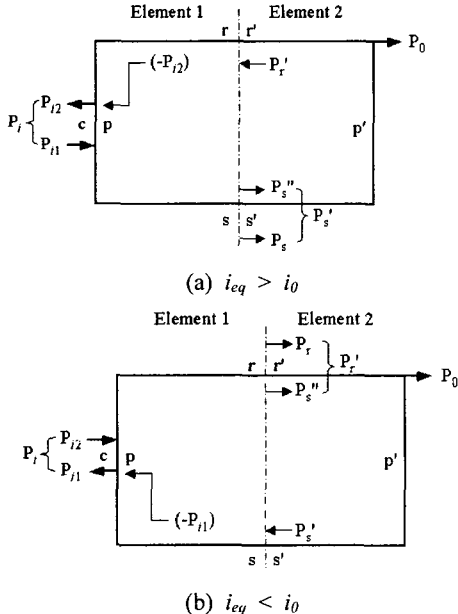


Fig. 7 Power flow of configuration 1 included idler gear f

Fig.7에서  $P_r', P_s'$ 은 요소 2의 기어 r과 s의 전달동력이며,  $P_r'', P_s''$ 은 각각 순환되는 동력이다. 각 요소의 전달동력 관계식과 제1성분, 제2성분의 차동기어

장치 효율<sup>(12,13)</sup>을 적용하면 전체 속도비(i), 이론효율( $\eta$ ), 동력흐름, 입력축의 동력( $P_i$ )에 대한 V-벨트 및 차동기어장치의 전달동력  $P_{cvs}, P_{diff}$ 을 구할 수 있고 이들을 정리하면 Table 1, 2와 같다. 또한 Fig.5에서 기어 f가 있는 구성 1, 2, 기어 f가 없는 구성 3, 4, 5, 6은 동력순환형이며 이론식은 Table 1, 2와 같다.

무단변속기 특성해석의 단순화를 위해 V-벨트의 효율을  $\eta_{cvs}$ , 기어 a, b의 물림효율을  $\eta_{ab}$ , 기어 e, f의 물림효율을  $\eta_{ef}$ , 기어 f, g의 물림효율을  $\eta_{fg}$ , 기어 a, h의 물림효율을  $\eta_{ah}$ 로 정의하면 동력순환형에서 요소 2의 물림효율  $\eta_0'$ 은 다음과 같다.

기어 f가 있는 경우의 구성 1, 2, 3, 4에서는

$$\eta_0' = \eta_{ab} \eta_{ef} \eta_{fg} \eta_{cvs}$$

기어 f가 없는 경우의 구성 1, 2, 3, 4에서는

$$\eta_0' = \eta_{ab} \eta_{eg} \eta_{cvs}$$

기어 f가 있는 경우의 구성 5, 6에서는

$$\eta_0' = \eta_{ah} \eta_{ef} \eta_{fg} \eta_{cvs}$$

기어 f가 없는 경우의 구성 5, 6에서는

$$\eta_0' = \eta_{ah} \eta_{eg} \eta_{cvs}$$

### 3.3 동력분류형 무단변속기

Fig.5-(a)의 구성 1에서 기어 f가 없는 경우는 태양기어 s와 링기어 r의 회전방향이 동일방향이므로 이 경우는 Fig.8과 같은 복합차동기어장치로 치환이 가능하다<sup>(6-11)</sup>.

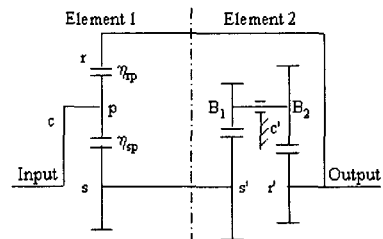


Fig. 8 Equivalent complex differential gear unit for configuration 1 without idler gear f

Fig.8에서 요소1의 제1성분과 제2성분 입력동력  $P_{i1}$ 과  $P_{i2}$ 를 구하면 항상  $P_{i2}/P_{i1} > 0$ 이 성립하므로 기어 f가 없는 경우의 구성1은 동력분류형 무단변속기이며 동력흐름은 Fig.9와 같다.

Fig.5의 무단변속기 중 동력분류형은 기어 f가 없는 구성 1, 2, 기어 f가 있는 구성 3, 4, 5, 6이며, 이들에 대한 이론식은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Speed ratios and efficiencies of the proposed CVT

config- ration	gear f	criteria of power flow direction	equivalent relations ( $i_{eq}$ )	speed ratios( $i$ )	overall efficiencies of CVT( $\eta$ )
1	Included	$i_{eq} > i_0$	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$\frac{1+i_0}{i_{eq}-i_0} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{(\eta_0' \eta_0 i_{eq} - i_0)(1+i_0)}{(\eta_0 + i_0)(i_{eq} - i_0)}$
		$i_{eq} < i_0$		$-\frac{1+i_0}{i_0 - i_{eq}} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{(1+i_0)(i_{eq} - \eta_0' \eta_0 i_0)}{\eta_0'(1+\eta_0 i_0)(i_{eq} - i_0)}$
	None	-	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{1+i_0}{i_0 + i_{eq}} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{\eta_0(1+i_0)\{i_0(\eta_0 + i_0) + \eta_0' i_{eq}(1+\eta_0 i_0)\}}{(1+\eta_0 i_0)(\eta_0 + i_0)(i_{eq} + i_0)}$
2	Included	$i_{eq} > i_0$	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$\frac{i_{eq}(1+i_0)}{i_{eq}-i_0} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{(1+i_0)(\eta_0 \eta_0' i_{eq} - i_0)}{\eta_0'(\eta_0 + i_0)(i_{eq} - i_0)}$
		$i_{eq} < i_0$		$-\frac{i_{eq}(1+i_0)}{i_0 - i_{eq}} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{(1+i_0)(i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0)}{\eta_0'(1+\eta_0 i_0)(i_{eq} - i_0)}$
	None	-	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_{eq}(1+i_0)}{i_{eq} + i_0} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{\eta_0(1+i_0)\{i_{eq}(1+\eta_0 i_0) + \eta_0' i_0(\eta_0 + i_0)\}}{(\eta_0 + i_0)(1+\eta_0 i_0)(i_{eq} + i_0)}$
3	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$\frac{i_{eq}}{1+i_0+i_0 i_{eq}} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{\eta_0' + \eta_0 i_0(\eta_0' + i_{eq})}{1+i_0+i_0 i_{eq}}$
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$-\frac{i_{eq}}{1+i_0-i_0 i_{eq}} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0) - i_0 i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_0 i_{eq})}$
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$		$\frac{i_{eq}}{i_0 i_{eq} - (1+i_0)} \frac{z_b}{z_a}$	$\frac{(\eta_0 + i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}}{\eta_0' \eta_0(1+i_0-i_0 i_{eq})}$
4	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$\frac{1}{(1+i_0+i_0 i_{eq})} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{(1+\eta_0 i_0) + \eta_0 \eta_0' i_0 i_{eq}}{1+i_0+i_0 i_{eq}}$
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$-\frac{1}{(1+i_0-i_0 i_{eq})} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0) - i_0 i_{eq}}{\eta_0 \eta_0'(1+i_0-i_0 i_{eq})}$
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$		$\frac{1}{i_0 i_{eq} - (1+i_0)} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{(\eta_0 + i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_0 i_{eq})}$
5	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0}{1+i_0+i_{eq}} \frac{z_h}{z_a}$	$\frac{(\eta_0 + i_0) + \eta_0 \eta_0' i_{eq}}{1+i_0+i_{eq}}$
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0}{(1+i_0-i_{eq})} \frac{z_h}{z_a}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(\eta_0 + i_0) - i_{eq}}{\eta_0 \eta_0'(1+i_0-i_{eq})}$
		$1+i_0 < i_{eq}$		$\frac{i_0}{i_{eq} - (1+i_0)} \frac{z_h}{z_a}$	$\frac{(1+\eta_0 i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_{eq})}$
6	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 i_{eq}}{1+i_0+i_{eq}} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 + i_0) + \eta_0 i_{eq}}{1+i_0+i_{eq}}$
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{i_0 i_{eq}}{(1+i_0-i_{eq})} \frac{z_e}{z_g}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(\eta_0 + i_0) - i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_{eq})}$
		$1+i_0 < i_{eq}$		$\frac{i_0 i_{eq}}{i_{eq} - (1+i_0)} \frac{z_e}{z_g}$	$\eta = \frac{(1+\eta_0 i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}}{\eta_0 \eta_0'(1+i_0-i_{eq})}$

Table 2 Power flows of the proposed CVT

config- uration	gear f	criteria of power flow direction	transmission powers of CVU( $P_{cvu}$ )	transmission powers of differential gear unit( $P_{dif}$ )	power flow
1	Included	$i_{eq} > i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_{eq}(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}-i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_0(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}-i_0)} P_i$	positive circulation
		$i_{eq} < i_0$	$P_{cvu} = \frac{i_{eq}(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_0-i_{eq})} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_0(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_0-i_{eq})} P_i$	negative circulation
	None	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_{eq}(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_0(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_{eq}+i_0)} P_i$	power split
2	Included	$i_{eq} > i_0$	$P_{cvu} = \frac{i_0(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}-i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_{eq}(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}-i_0)} P_i$	negative circulation
		$i_{eq} < i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_0(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_0-i_{eq})} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_{eq}(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_0-i_{eq})} P_i$	positive circulation
	None	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_0(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_{eq}+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_{eq}(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}+i_0)} P_i$	power split
3	Included	-	$P_{cvu} = \frac{1+\eta_0 i_0}{1+i_0+i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_0 i_{eq}}{1+i_0+i_0 i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{1+\eta_0 i_0}{1+i_0-i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_0 i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_0 i_{eq})} P_i$	positive circulation
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0+i_0}{\eta_0(i_0 i_{eq}-(1+i_0))} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_0 i_{eq}}{i_0 i_{eq}-(1+i_0)} P_i$	negative circulation
4	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_0 i_{eq}}{1+i_0+i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{1+\eta_0 i_0}{1+i_0+i_0 i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{i_0 i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_0 i_{eq})} P_i$	$P_{dif} = \frac{1+\eta_0 i_0}{1+i_0-i_0 i_{eq}} P_i$	negative circulation
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_0 i_{eq}}{i_0 i_{eq}-(1+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0+i_0}{\eta_0(i_0 i_{eq}-(1+i_0))} P_i$	positive circulation
5	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_{eq}}{1+i_0+i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0+i_0}{1+i_0+i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_{eq})} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0+i_0}{1+i_0-i_{eq}} P_i$	negative circulation
		$1+i_0 < i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_{eq}}{i_{eq}-(1+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{1+\eta_0 i_0}{\eta_0(i_{eq}-(1+i_0))} P_i$	positive circulation
6	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0+i_0}{1+i_0+i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_{eq}}{1+i_0+i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0+i_0}{1+i_0-i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_{eq}}{\eta_0(1+i_0-i_{eq})} P_i$	positive circulation
		$1+i_0 < i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{1+\eta_0 i_0}{\eta_0(i_{eq}-(1+i_0))} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 i_{eq}}{i_{eq}-(1+i_0)} P_i$	negative circulation

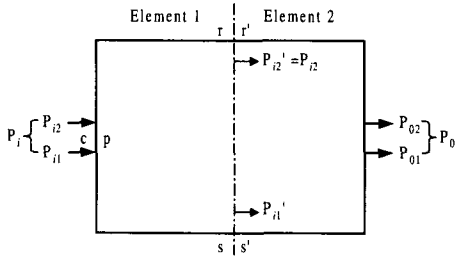


Fig. 9 Power flow of configuration 1 without idler gear f

#### 4. 해석 및 결과

##### 4.1 이론해석

Fig.5에서 제안된 무단변속기를 구성하는 V-벨트 및 차동기어장치, 각종 기어열의 주요제원은 Table 3과 같다. 차동기어장치 및 각종 기어열의 물림효율은 베어링손실과 윤활손실을 무시하고, 치면의 마찰손실만을 고려한 이론효율을 적용하였다<sup>(12,13)</sup>. V-벨트는 0.5~2.0의 변속범위를 가지며, 자체의 효율은 속도비에 따라 수행한 효율 측정실험 결과를 선형보간법을 이용하여 적용하였다<sup>(11)</sup>.

Table 3 Specification of CVT

differential gear unit & other gears	
number of teeth	mating efficiencies
$z_s=24, z_B=24, z_r=72$	$\eta_{rp}=0.992, \eta_{sp}=0.982$
$z_f=18, z_a=45, z_h=90$	$\eta_{er}=0.982, \eta_{fg}=0.982$
$z_b=90, z_c=50, z_g=25$	$\eta_{eg}=0.982, \eta_{ab}=0.982$
$\eta_{ah}=0.982$	
continuously variable unit	
speed ratio( $D_1/D_2$ )	efficiency of CVU
0.50	0.824
1.00	0.870
1.50	0.904
2.00	0.938

Table 1, 2에서 제시된 이론식과 Table 3의 각종 제원을 이용하여 이론해석을 수행하였다.

##### 4.2 실험기의 구성 및 실험방법

무단변속기의 특성해석 실험은 Fig.10과 같은 실험기를 제작하여 수행하였다. Fig.10에서 요소 ①은

무단변속기 구동용 교류전동기(11kW)이다. 요소 ②는 입력축과 출력축에 설치된 토크센서(120Nm)이며, 요소 ③은 입력축과 출력축에 설치된 속도센서로서 표시된 위치에서 축과 일체형으로 설치된다. 요소 ④는 고무 V-벨트식 무단변속기구이며 0.5~2.0의 변속범위를 가지면서 연속적으로 속도비 조정이 가능하도록 제작되었다. 요소 ⑤는 2K-H형 I형식 차동기어장치로서 Table 3과 같은 잇수를 가지며, 압력각은 20° 이고 이끝높이가 모듈(2.5)과 동일한 표준 스퍼기어로 제작되었다. 요소 ⑥은 토크를 발생시키는 부하장치(100Nm)로서 전자기식 파티클(particle) 브레이크이다. 이 외에 각종 기어들은 Table 3과 같은 잇수를 가지며, 압력각, 모듈 등 주요제원은 차동기어장치와 동일하게 제작되었다.

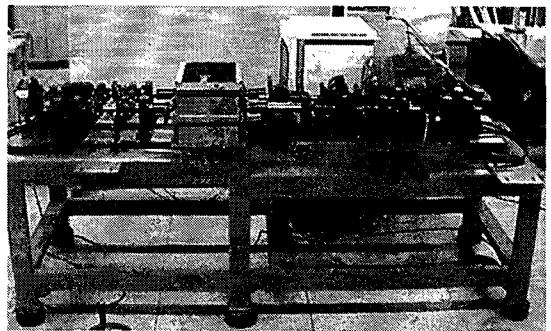
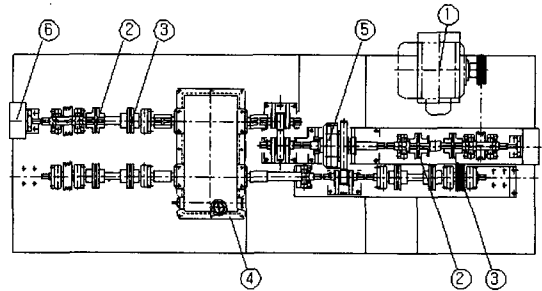


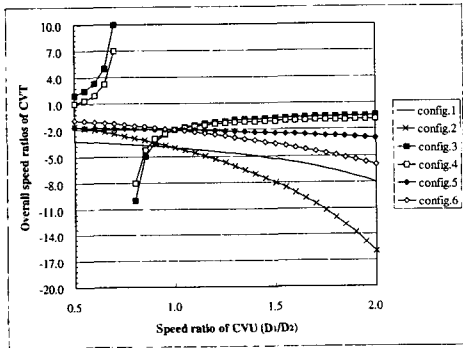
Fig. 10 Experimental bench for CVT

무단변속기는 전기모터에 의해 구동되며 V-벨트식 무단변속기구를 이용하여 속도비를 변화시킨다. 또한 부하장치를 통해 출력축에 부하를 가하면 토크가 발생하며 출력축과 입력축의 토크와 회전속도를 측정하여 효율과 속도비를 계산한다. 전기모터는 부하의 크기에 상관없이 설정된 일정한 회전속도를 유지할 수 있도록 속도제어를 수행하였다. 또한 각 조건에서 약 30분 정도의 무부하 작동을 수행한 후 특성해석 실험을 수행하였다.

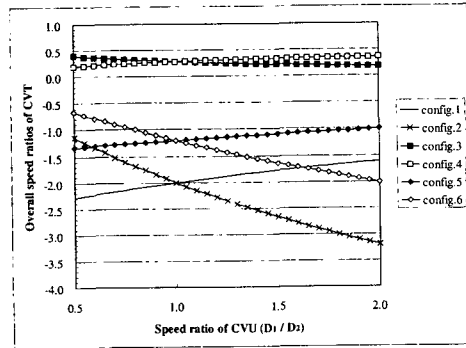
### 4.3 속도비

Table 1의 이론식을 이용하여 동력순환형과 동력분류형 무단변속기의 각각 6가지 구성에 대한 속도비를 해석한 결과는 Fig.11과 같다.

동력순환형의 경우 정회전과 역회전을 모두 구현할 수 있으나 Table 3과 같은 잇수열에서는 Fig.11-(a)와 같이 구성 3과 4만이 가능하고 구성 1,2,5,6은 역회전만을 구현한다. 차동기어장치의 잇수열과 각종 기어의 잇수를 변화시키면 모두 정회전과 역회전 구현이 가능하다. 그러나 정회전과 역회전의 변환 지점에서 속도비가 크게 증가하고 불연속이 되므로 변속기로서 사용하기는 곤란한 것으로 분석된다. 동력분류형의 경우 잇수열을 변화시키면 적절한 속도비를 얻을 수 있으나 Fig.11-(b)와 같이 한방향으로만 구동 가능하고 중립점이 발생하지 않는다.



(a) Power circulation

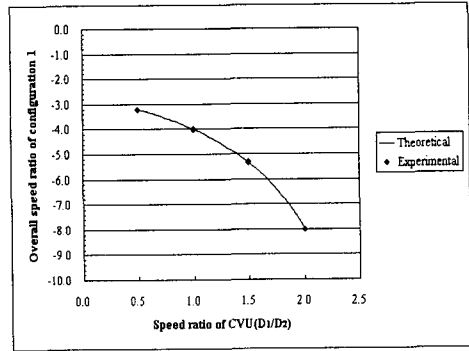


(b) Power split

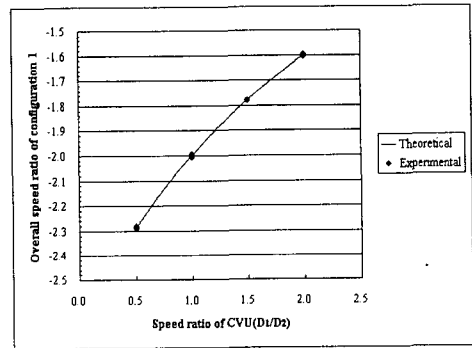
Fig. 11 Theoretical speed ratios of CVT

동력순환형과 동력분류형에 대한 각각의 6가지 구성의 속도비를 측정된 실험결과와 이론해석 결과와 거의 동일한 결과를 나타냈으며, 구성 1에 대한

실험결과와 이론해석 결과의 비교는 Fig.12와 같다. 따라서 각각의 구성에 대한 속도비 이론식의 타당성을 확인할 수 있었다.



(a) Power circulation



(a) Power split

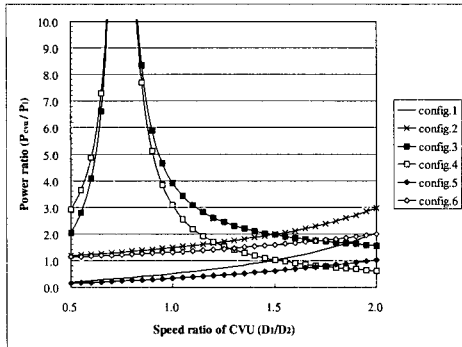
Fig. 12 Experimental results and theoretical result for speed ratio(configuration 1)

### 4.4 동력흐름

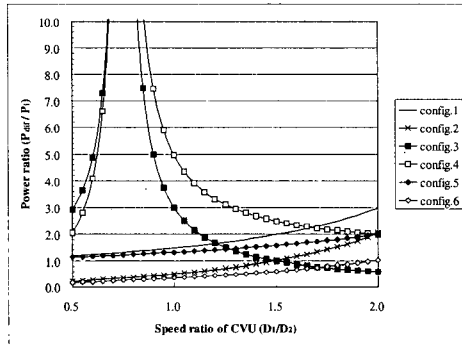
입력축의 동력에 대한 V-벨트식 무단변속기구의 전달동력의 비율( $P_{cvu}/P_i$ )과 차동기어장치의 전달동력 비율( $P_{diff}/P_i$ )의 해석 결과는 Fig.13, 14와 같다.

동력순환형의 경우 Fig.7과 같이 무단변속기 내부에서 순환되는 동력으로 인해 무단변속기구와 차동기어장치의 입력동력에 대한 동력분담율이 동력분류형에 비해 상대적으로 높으며, 특히 구성 3과 4의 경우 회전방향이 변환하는 지점에서 동력분담율이 크게 증가한다. 입력축 연결방식과는 달리 중립상태의 발생과 원활한 회전방향의 변환이 이루어지지 않는 출력축 연결방식 동력순환형은 동력분담율만이 높게 나타나므로 부품의 수명단축을 초래할 것으로 분석된다.





(a) Power ratios( $P_{cvu} / P_i$ )



(b) power ratios( $P_{dif} / P_i$ )

Fig. 13 Theoretical power ratios of power circulation

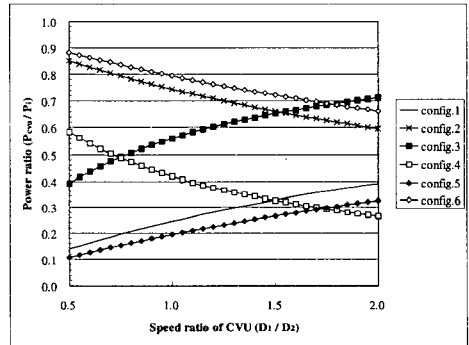
동력분류형의 경우 입력되는 전체동력을 V-벨트식 무단변속기구와 차동기어장치가 일정한 비율로 전체동력을 분담하여 전달한다. 즉 동일한 속도비에서 무단변속기구와 차동기어장치의 동력분담을 합은 1에 근사한 값을 나타내며, 1과 차이를 나타내는 것은 동력손실이 발생함을 의미한다. Table 3의 잇수열을 변화시키면 원하는 속도비를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 효율과 내구성이 차동기어장치에 비해 상대적으로 낮은 무단변속기구의 동력분담을 낮게 할 수 있으므로 이러한 특성을 적절히 이용하면 변속기의 동력전달효율 및 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4.5 효율

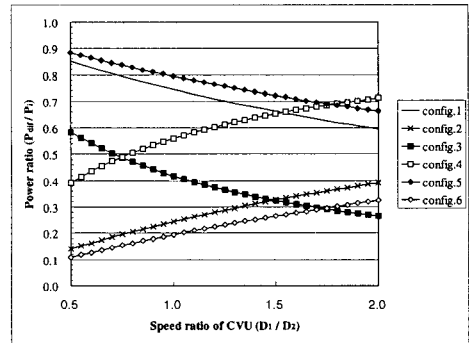
동력순환형과 동력분류형의 각 6가지 구성에 대한 이론효율 해석결과는 Fig.15와 같다. 동력순환형의 경우 Fig.7과 같이 출력측으로 출력되지 않고 변속기 내부에서 순환되는 동력으로 인해 동력분류

형에 비해 상대적으로 효율이 낮게 나타났다. 특히 구성 3과 4는 회전방향이 변하는 지점에서 출력동력이 0이 되므로 효율은 0의 값을 나타냈다. Table 3의 잇수열을 적당하게 변화시키면 나머지 구성들도 효율이 0이 되는 구간을 갖는다.

동력분류형의 경우는 동력순환형에 비해 전반적으로 높은 효율을 가지며, 특히 차동기어장치의 동력분담율이 높은 CVU의 속도비( $D_1/D_2$ )에서 효율이 높고 무단변속기구의 동력분담율이 높은 CVU 속도비( $D_1/D_2$ )에서 효율이 낮아진다. 따라서 원하는 속도비를 얻으면서 차동기어장치의 동력분담율을 높일 수 있는 잇수열을 선택하면 변속기의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.



(a) power ratios( $P_{cvu} / P_i$ )

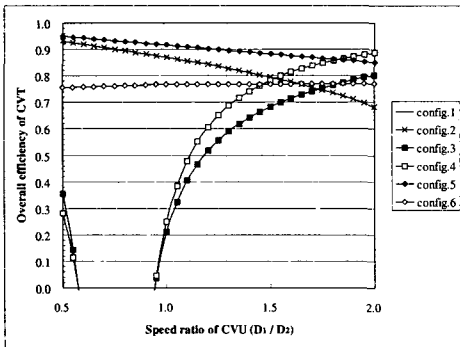


(b) power ratios( $P_{dif} / P_i$ )

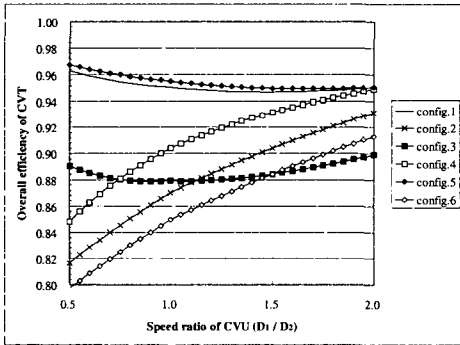
Fig. 14 Theoretical power ratios of power split

동력순환형과 동력분류형 각각의 6가지 구성에 대해 효율측정 실험을 수행한 결과 이론효율과 다소 차이를 나타냈지만 전반적으로 동일한 경향을 나타냈다. Fig.16은 구성 1에 대한 동력순환형과 동력분류형의 이론효율과 실험을 통해 측정된 효율을

비교한 것이며, 근사한 경향을 보여준다. 이론해석 결과와 실험결과의 차이는 이론해석 시에 Table 3 에서와 같이 실험을 통해 측정된 무단변속기구 효율을 변속구간에서 선형보간하여 적용한 것과 기어 열 효율해석에서 사용한 가정<sup>(11,12)</sup>, 실험기의 각종 틈새 및 베어링 손실 등이 복합적인 원인으로 작용한 것으로 분석된다.



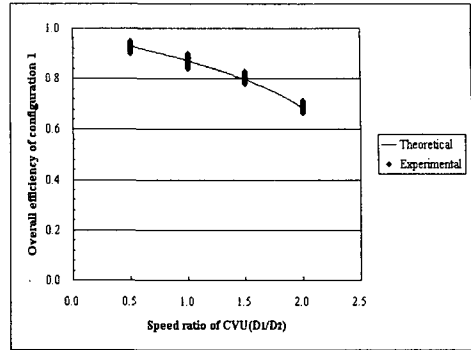
(a) Power circulation



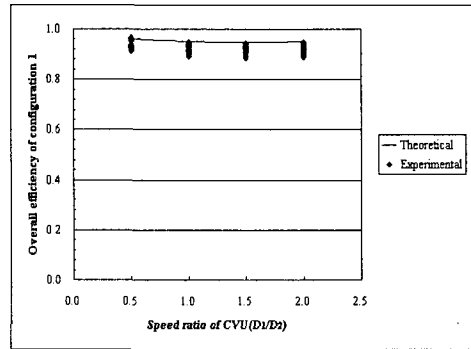
(a) Power split

Fig. 15 Theoretical efficiencies of CVT

Fig.16에서 보여준 구성 1의 효율실험 이외에도 구성 2, 3, 4, 5, 6에 대한 효율측정 실험을 수행한 결과 Fig.15의 이론적인 효율해석 결과와 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 무단변속기 각 구성의 측정된 효율은 Fig.16과 같이 각각의 속도비에서 일정 범위 내에 분포된 결과를 나타냈다. 이러한 효율분포는 모든 구성에서 약 7~8%의 범위를 나타냈으며 이의 원인은 상기의 이론효율 해석결과와 효율측정 실험결과의 차이점에 대한 원인과 동일한 것으로 분석된다. 각 구성에 대한 효율측정실험은 100회(속도비 당 25회)를 실시하였다.



(a) power circulation



(b) power split

Fig. 16 Experimental results and theoretical result for efficiency (configuration 1)

## 5. 결 론

V-벨트식 무단변속기구와 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 출력축 연결방식으로 결합시켜 구성 가능한 6가지 구성을 제안하였고, 각각의 구성에 대해 동력순환형과 동력분류형으로 구분하고 속도비, 동력흐름, 효율에 대한 이론식을 제안하였다. 또한 실험을 통해 이론해석의 타당성을 검증하였다.

1) 동력순환형은 정회전과 역회전의 구현이 모두 가능하지만 회전방향의 변환지점에서 속도비가 크게 증가하고 불연속이 되며, 구성요소의 동력분담율이 크게 증가하여 수명단축이 예상되며 효율이 낮아 변속기로서의 활용에 제한사항이 있다.

2) 동력분류형은 한방향 회전만을 구현하지만 구성요소의 동력분담율이 낮아 내구성 측면에서 유리하고 동력순환형에 비해 상대적으로 높은 효율을 가지므로 중립상태의 생성과 양방향 회전의 구현만 가능하면 고성능의 변속기로서의 활용이 가능하다.

## 후 기

본 논문은 2000년도 건국대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. G.White, "Properties of Differential Transmission," The Engineer, pp. 105-111, 1967.
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. 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.
4. Y.Zhang, B.Leduc, "Efficiency predetermination of planetary trains used as continuously variable power transmission," European journal Mech.Eng., Vol. 37, No. 3, pp. 169-173, 1992.
5. Y.Zhang, B.Leduc, "Power circulation in planetary trains used as continuously variable power transmission," European journal Mech.Eng., Vol. 38, No. 1, pp. 3-8, 1992.
6. 兩角宗晴, "遊星齒車と 差動齒車の 理論と 設計 計算法," 日刊工業新聞社, pp. 134-140, 1989.
7. 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.
8. 兩角宗晴, 岸 佐年, "差動齒車式無段變速機の力學的考察," 機械の研究, 49卷, 5号, pp. 570-578, 1997.
9. 兩角宗晴, 岸 佐年, "差動齒車式無段變速機の力學的考察(續)," 機械の研究, 49卷, 10号, pp. 1053- 1061, 1997.
10. 김연수, 최상훈, "CVT-차동기어장치의 구성에 따른 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회 '99 춘계학술대회논문집, pp. 549-553, 1999.
11. 김연수, 최상훈, "차동기어장치를 적용한 입력축 연결방식 무단변속기의 동력흐름 및 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회, Vol. 17, No. 3, pp. 141-150, 2000.
12. 김연수, 최성욱, 최상훈, "2K-H형 유성기어장치의 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 3, pp. 200-207, 2000.
13. Yeon-Su Kim, Sang-Hoon Choi, "Interference and Efficiency Analysis of the 2K-H I type Differential Gear Unit," International Journal of the KSPE, Vol. 1, No. 1, pp. 5-14, 2000.