

차동기어장치를 적용한 입력축 연결방식 무단변속기의 동력흐름 및 효율해석에 관한 연구

김연수*, 최상훈**

Power Flow and Efficiency of Input Coupled type CVT combined Differential Gear Unit

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

ABSTRACT

Continuously variable transmission(CVT) combined differential gear unit has 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. It is known that such CVT can be classified into the input coupled type and the output coupled type according to the coupling location of continuously variable unit(CVU). In this paper, six different configurations of input coupled type CVT combined V-belt CVU and 2K-H I type differential gear unit are proposed. Some useful theoretical formula related to speed ratio, power flow and efficiency are derived and analyzed. The propriety of derived formula and theoretical analysis are proven by various experiments.

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

기호설명

z = number of teeth
 i_0 = gear ratio between ring and sun gear(z_r/z_s)
 η_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

차동기어장치를 적용한 무단변속기(CVT)는 소형 및 경량화 설계가 가능하고, 효율증대, 속도비 범위의 확대, 중립(geared neutral)상태 생성 등 많은 장점을 가지고 있다. 또한 다양한 무단변속기구(CVU) 중 V-벨트식 무단변속기구와 차동기어장치의 연결은 다양한 구성이 가능하고 각각의 구성은 동력흐름, 속도비, 효율 등이 서로 상이하며, 이와 같은 인자들은 변속장치 성능에 큰 영향을 미치게 된다^(1,2). 해외에서는 무단변속기구와 차동기어장치를

* 건국대학교 대학원

** 건국대학교 기계설계학과

조합한 무단변속기의 특성에 대한 많은 연구가 진행되었으나 대부분은 차동기어장치 고유의 기하학적 특성과 효율을 적용시키지 않아 실제효율과 큰 차이를 나타내거나 동력흐름에 대한 정량적인 기준이 제시되지 못했다^(3,4). 최근에는 이를 보완한 이론 효율해석과 동력흐름에 대한 연구가 진행되었으나 연결방법에 따른 다양한 구성의 제안과 이에 대한 특성해석이 수행되지 않아 구성들 사이의 상호 비교 및 평가가 이루어지지 못했다⁽⁵⁻⁸⁾. 국내에서도 무단변속기의 장점 및 중요성이 인식되면서 V-벨트식 무단변속기구를 중심으로 다양한 연구^(9,10)가 진행되었고, 자동차에 실용화된 바 있다.

본 논문에서는 다양한 무단변속기구 중 V-벨트식 무단변속기구와 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 입력축 연결방식(input-coupled type)으로 조합한 무단변속기의 6가지 구성을 제안하였고, 선행된 연구에서 제안된 해석방법⁽⁵⁻⁸⁾을 이용하여 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 V-벨트식 무단변속기구

V-벨트식 무단변속기구는 Fig.1과 같이 구동축과 중동축의 가변풀리를 좌우방향으로 이동시켜 변속하는 장치로서 벨트의 소재기술과 제어기술의 발전에 따라 최근 자동차용 무단변속기구로서 활용이 증대되고 있다.

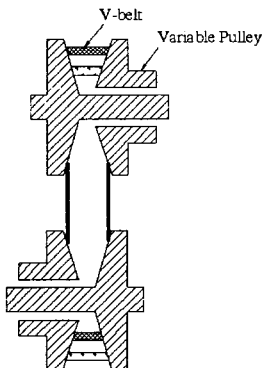


Fig. 1 V belt drive continuously variable unit

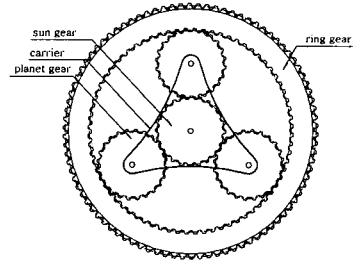


Fig. 2 2K-H I type differential gear unit

2.2 2K-H형 I 형식 차동기어장치

2K-H형 I 형식 차동기어장치는 Fig.2와 같이 태양기어(sun gear), 링기어(ring gear), 캐리어(carrier)를 기본축으로 하여 동심축으로 구성되며, 3개의 기본축은 어느 것도 고정되지 않고 독립적인 상대운동을 갖는다^(11,12).

링기어와 유성기어의 물림효율(η_{rp})과 태양기어와 유성기어의 물림효율(η_{sp})을 이용하여 캐리어가 고정될 때의 차동기어장치의 효율인 기본효율(η_0)은 다음식으로 정의한다^(5,11,12).

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

2.3 무단변속기구와 차동기어장치의 연결

Fig.3은 무단변속기구와 차동기어장치의 위치에 따라 구성방법을 분류한 것으로서 입력축과 무단변속기구가 직접 연결된 구성을 입력축 연결방식, 출력축과 무단변속기구가 직접 연결된 구성을 출력축 연결방식(output-coupled type)이라 하며⁽¹⁾, 본 논문에서는 입력축 연결방법에 대한 특성해석을 수행하였다.

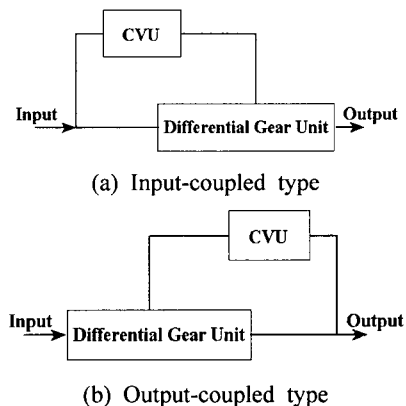


Fig. 3 Two basic configurations of CVT

2.4 동력흐름의 유형

무단변속기의 전달동력 흐름은 Fig.4와 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⁽¹⁾.

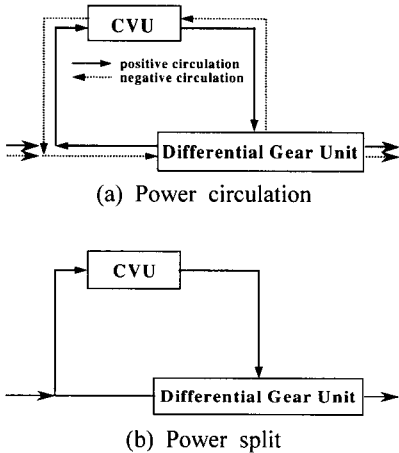


Fig. 4 Power circulation and power split of CVT

3. 무단변속기의 구성 및 이론식

3.1 입력축 연결방식 무단변속기의 구성

Fig.5는 Fig.1의 V-벨트식 무단변속기구와 Fig.2의 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 입력축 연결방식으로 조합한 무단변속기의 6가지 기본구성을 제안한 것이다. 또한 구성 1~6은 기어 f의 유무에 따라 차동기어장치의 링기어와 태양기어의 회전방향이 변화함에 따라 동력순환형과 동력분류형으로 각각 분류되므로 실제 구현 가능한 구성은 12가지가 된다.

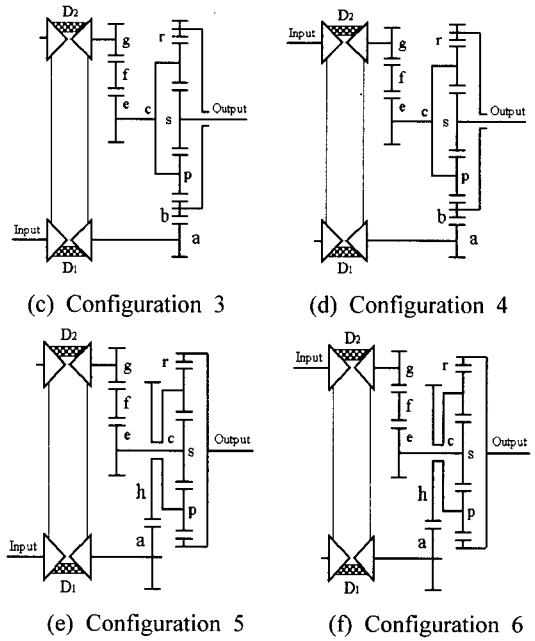
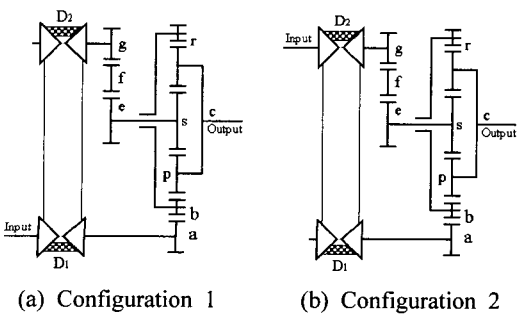


Fig. 5 Configurations of input-coupled type CVT

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⁽⁵⁻⁸⁾.

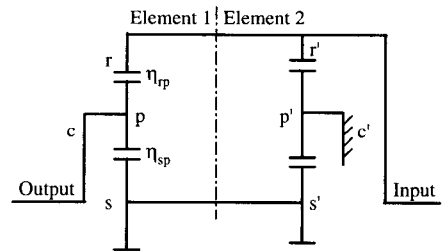


Fig. 6 Equivalent complex differential gear unit for configuration 1 included idler gear f

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

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

위식에서 i_{eq} 는 Fig.6의 element 2에서 캐리어 c'이

고정일 때 링기어 r과 태양기어 s'의 기어비이다. 또한 D₁, D₂는 V-벨트 풀리 직경이고, z_a, z_b, z_e, z_g는 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 태양기어 s와 링기어 r이 구동축이고 캐리어 c가 종동축이 된다. 따라서 요소 1은 r을 고정하고 s를 구동축, c를 종동축으로 하는 제1성분과 s를 고정하고 r을 구동축, c를 종동축으로 하는 제2성분의 합과 등가이다. 제1성분의 출력동력 P₀₁과 제2성분 출력동력 P₀₂는 다음과 같다.

$$P_{01} = \frac{i_{eq}}{i_{eq} - i_0} P_0 \quad (3)$$

$$P_{02} = -\frac{i_0}{i_{eq} - i_0} P_0 \quad (4)$$

식(3)과 (4)를 이용하면 P₀₂/P₀₁<0 이므로 기어 f가 있는 경우의 구성1은 동력순환형 무단변속기가 된다. 또한 P₀₁과 P₀₂는 i₀와 i_{eq}의 크기에 따라 동력 흐름 방향이 변화하는데 Fig.7-(a)와 같이 i_{eq}>i₀인 경우는 정방향 순환형, Fig.7-(b)와 같이 i_{eq}<i₀인 경우는 부방향 순환형이 된다.

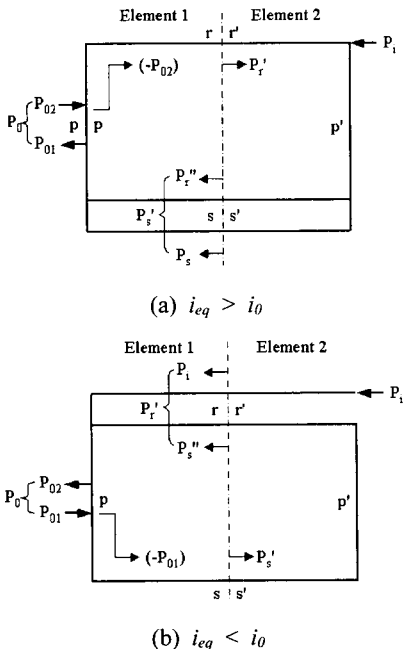


Fig. 7 Power flow of configuration 1 included idler gear f

Fig.7에서 P_r', P_s'은 element 2의 기어 r'과 s'의 전달 동력이며, P_r'', P_s''은 각각 순환되는 동력이다. 각 요소의 전달동력 관계식과 제1성분, 제2성분의 차동기어 장치 효율^(11,12)을 적용하면 전체 속도비(i), 이론효율(η), 동력흐름, 입력축의 동력(P_i)에 대한 V-벨트 및 차동기어장치의 전달동력 P_{cvu}, P_{diff}을 구할 수 있고 이들을 정리하면 Table 1, 2와 같다. 또한 Fig.5에서 동력순환형인 기어 f가 있는 구성 1, 2, 기어 f가 없는 구성 3, 4, 5, 6에 대한 이론식은 Table 1, 2와 같다.

무단변속기의 특성해석의 단순화를 위해 V-벨트의 효율을 η_{cvu}, 기어 a, b의 물림효율을 η_{ab}, 기어 e, f의 물림효율을 η_{ef}, 기어 f, g의 물림효율을 η_{fg}, 기어 a, h의 물림효율을 η_{ah}로 정의하면 상기의 동력순환형에서 element 2의 물림효율 η₀'은 다음과 같다.

기어 f가 있는 경우의 구성 1, 2, 3, 4에서는

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

기어 f가 없는 경우의 구성 1, 2, 3, 4에서는

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

기어 f가 있는 경우의 구성 5, 6에서는

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

기어 f가 없는 경우의 구성 5, 6에서는

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

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^(5,6).

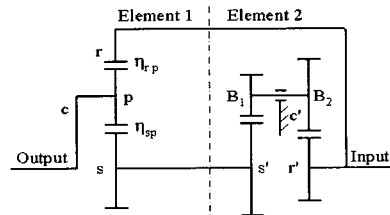


Fig. 8 Equivalent complex differential gear unit for configuration 1 without idler gear f

Fig.8에서 요소1의 제1성분과 제2성분 출력동력 P₀₁과 P₀₂를 구하면 항상 P₀₂/P₀₁>0이 성립하므로 기어 f가 없는 경우의 구성1은 동력분류형 무단변속기이며, 이때의 동력흐름은 Fig.9와 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(η)
1	Included	$i_{eq} > i_0$	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$\frac{i_{eq} - i_0}{1 + i_0} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0'(1 + \eta_0 i_0)(i_{eq} - i_0)}{(1 + i_0)(i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0)}$
		$i_{eq} < i_0$		$-\frac{i_0 - i_{eq}}{1 + i_0} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{(\eta_0 + i_0)(i_0 - i_{eq})}{(1 + i_0)(i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq})}$
	None	-	$-\frac{i_0 + i_{eq}}{1 + i_0} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 + i_0)(1 + \eta_0 i_0)(i_0 + i_{eq})}{(1 + i_0)\{ (1 + \eta_0 i_0) i_0 \eta_0' + (\eta_0 + i_0) i_{eq} \}}$	
2	Included	$i_{eq} > i_0$	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_b}{D_2 z_c z_a}$	$\frac{i_{eq} - i_0}{i_{eq}(1 + i_0)} \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{(1 + \eta_0 i_0)(i_{eq} - i_0)}{(1 + i_0)(i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0)}$
		$i_{eq} < i_0$		$-\frac{i_0 - i_{eq}}{i_{eq}(1 + i_0)} \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 + i_0)(i_0 - i_{eq})}{(1 + i_0)(i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq})}$
	None	-	$-\frac{i_{eq} + i_0}{i_{eq}(1 + i_0)} \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{\eta_0'(\eta_0 + i_0)(1 + \eta_0 i_0)(i_{eq} + i_0)}{(1 + i_0)\{ i_0(1 + \eta_0 i_0) + i_{eq} \eta_0'(\eta_0 + i_0) \}}$	
3	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$\frac{1 + i_0 + i_0 i_{eq}}{i_{eq}} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 + i_0 i_{eq})}{\eta_0 + i_0(1 + \eta_0' i_{eq})}$
	None	$1 + i_0 > i_0 i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$-\frac{1 + i_0 - i_0 i_{eq}}{i_{eq}} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 - i_0 i_{eq})}{(\eta_0 + i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}}$
		$1 + i_0 < i_0 i_{eq}$		$\frac{i_0 i_{eq} - (1 + i_0)}{i_{eq}} \frac{z_a}{z_b}$	$\frac{\eta_0(1 + i_0 - i_0 i_{eq})}{\eta_0 \eta_0'(1 + \eta_0 i_0) - i_0 i_{eq}}$
4	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$(1 + i_0 + i_0 i_{eq}) \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 + i_0 i_{eq})}{\eta_0'(\eta_0 + i_0) + i_0 i_{eq}}$
	None	$1 + i_0 > i_0 i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_2 z_c z_a}{D_1 z_g z_b}$	$-(1 + i_0 - i_0 i_{eq}) \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{\eta_0(1 + i_0 - i_0 i_{eq})}{(\eta_0 + i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}}$
		$1 + i_0 < i_0 i_{eq}$		$\{ i_0 i_{eq} - (1 + i_0) \} \frac{z_g}{z_e}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 - i_0 i_{eq})}{\eta_0 \eta_0'(1 + \eta_0 i_0) - i_0 i_{eq}}$
5	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{1 + i_0 + i_{eq}}{i_0} \frac{z_a}{z_h}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 + i_{eq})}{i_{eq} + \eta_0'(1 + \eta_0 i_0)}$
	None	$1 + i_0 > i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{(1 + i_0 - i_{eq})}{i_0} \frac{z_a}{z_h}$	$\frac{\eta_0(1 + i_0 - i_{eq})}{1 + \eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}}$
		$1 + i_0 < i_{eq}$		$\frac{i_{eq} - (1 + i_0)}{i_0} \frac{z_a}{z_h}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 - i_{eq})}{\eta_0 \eta_0'(\eta_0 + i_0) - i_{eq}}$
6	Included	-	$\frac{z_r'}{z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{1 + i_0 + i_{eq}}{i_0 i_{eq}} \frac{z_g}{z_c}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 + i_{eq})}{1 + \eta_0 i_0 + \eta_0' i_{eq}}$
	None	$1 + i_0 > i_{eq}$	$\frac{z_{B1} z_r'}{z_{B2} z_s'} = \frac{D_1 z_g z_h}{D_2 z_c z_a}$	$-\frac{(1 + i_0 - i_{eq})}{i_0 i_{eq}} \frac{z_g}{z_c}$	$\frac{\eta_0 \eta_0'(1 + i_0 - i_{eq})}{1 + \eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}}$
		$1 + i_0 < i_{eq}$		$\frac{i_{eq} - (1 + i_0)}{i_0 i_{eq}} \frac{z_g}{z_c}$	$\eta = \frac{\eta_0(1 + i_0 - i_{eq})}{\eta_0 \eta_0'(\eta_0 + i_0) - i_{eq}}$

Table 2 Power flows of the proposed CVT

config- ration	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	$i_{eq} > i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 \eta_0' i_0}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0} P_i$	positive circulation
		$i_{eq} < i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_{eq}}{i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_0}{i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq}} P_i$	negative circulation
	None	-	$P_{cvu} = \frac{i_{eq}(1+i_0)}{(i_0+i_{eq})(1+\eta_0 i_0)} P_0$	$P_{dif} = \frac{i_0(1+i_0)}{(i_0+i_{eq})(\eta_0+i_0)} P_0$	power split
2	Included	$i_{eq} > i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0 i_0}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_{eq}}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0' i_0} P_i$	negative circulation
		$i_{eq} < i_0$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_0}{i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 \eta_0' i_{eq}}{i_0 - \eta_0 \eta_0' i_{eq}} P_i$	positive circulation
	None	-	$P_{cvu} = \frac{i_0(1+i_0)}{(\eta_0+i_0)(i_{eq}+i_0)} P_0$	$P_{dif} = \frac{i_{eq}(1+i_0)}{(1+\eta_0 i_0)(i_{eq}+i_0)} P_0$	power split
3	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0'(\eta_0+i_0)}{\eta_0+i_0(1+\eta_0' i_{eq})} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0' i_0 i_{eq}}{\eta_0+i_0(1+\eta_0' i_{eq})} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0'(\eta_0+i_0)}{(\eta_0+i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}}{(\eta_0+i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}} P_i$	positive circulation
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0(1+\eta_0 i_0)}{i_0 i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_0 i_{eq}}{i_0 i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	negative circulation
4	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_0 i_{eq}}{\eta_0'(\eta_0+i_0) + i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0'(\eta_0+i_0)}{\eta_0'(\eta_0+i_0) + i_0 i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0^2 i_0 i_{eq}}{(\eta_0+i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0+i_0}{(\eta_0+i_0) - \eta_0^2 \eta_0' i_0 i_{eq}} P_i$	negative circulation
		$1+i_0 < i_0 i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_0 i_{eq}}{i_0 i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0)}{i_0 i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	positive circulation
5	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq} + \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0'(1+\eta_0 i_0)}{i_{eq} + \eta_0'(1+\eta_0 i_0)} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0^2 i_{eq}}{1+\eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{1+\eta_0 i_0}{1+\eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}} P_i$	negative circulation
		$1+i_0 < i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0' i_{eq}}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(\eta_0+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0 \eta_0'(\eta_0+i_0)}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(\eta_0+i_0)} P_i$	positive circulation
6	Included	-	$P_{cvu} = \frac{\eta_0'(1+\eta_0 i_0)}{1+\eta_0 i_0 + \eta_0' i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0' i_{eq}}{1+\eta_0 i_0 + \eta_0' i_{eq}} P_i$	power split
	None	$1+i_0 > i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0'(1+\eta_0 i_0)}{1+\eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}} P_i$	$P_{dif} = \frac{\eta_0^2 \eta_0' i_{eq}}{1+\eta_0 i_0 - \eta_0^2 \eta_0' i_{eq}} P_i$	positive circulation
		$1+i_0 < i_{eq}$	$P_{cvu} = \frac{\eta_0(\eta_0+i_0)}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(\eta_0+i_0)} P_i$	$P_{dif} = \frac{i_{eq}}{i_{eq} - \eta_0 \eta_0'(\eta_0+i_0)} P_i$	negative circulation

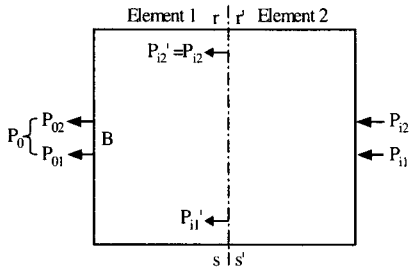


Fig. 9 Power flow of configuration 1 without idler gear f

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

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 윤활손실은 무시하고, 치면의 마찰손실만을 고려한 이론효율을 적용하였다^(11,12). V-벨트는 0.5~2.0의 변속범위를 가지며, 자체의 효율은 속도비에 따라 수행한 효율 측정실험 결과를 선형보간법을 이용하여 적용하였다.

Table 3 Specification of CVT

differential gear unit & other gears	
number of teeth	mating efficiencies
$Z_s=24, Z_B=24, Z_r=72$	$\eta_{rp}=0.992, \eta_{sp}=0.982$
$Z_f=18, Z_a=30, Z_h=90$	$\eta_{ef}=0.982, \eta_{fh}=0.982$
$Z_b=90, Z_c=27, Z_g=27$	$\eta_{eg}=0.982, \eta_{ab}=0.982$
	$\eta_{ah}=0.982$
continuously variable unit	
speed ratio	efficiency of CVU
0.50	0.938
0.66	0.904
1.00	0.870
2.00	0.824

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)이며, 6가지 구성의 특성해석 실험이 가능하도록 위치 변경이 가능하다. 요소 ③, ⑥은 각각 입력축과 출력축에 설치된 속도센서와 토크센서(120Nm)이며, 표시된 위치에서 축과 일체형으로 설치된다. 요소 ④는 고무 V-벨트식 무단변속기구이며 0.5~2.0의 변속범위를 가지면서 연속적으로 속도비의 조정이 가능하도록 제작되었다. 요소 ⑤는 2K-H형 I 형식 차동기어장치로서 Table 3과 같은 잇수를 가지며, 압력각은 20°이고 이끝높이가 모듈(2.5)과 동일한 표준 스퍼기어로 제작되었다. 요소 ⑦은 토크를 발생시키는 부하장치(100Nm)로서 전자기식 파터클(particle) 브레이크이다. 이 외에 각종 기어들은 Table 3과 같은 잇수를 가지며, 압력각, 모듈 등 주요제원은 차동기어장치와 동일하게 제작되었다.

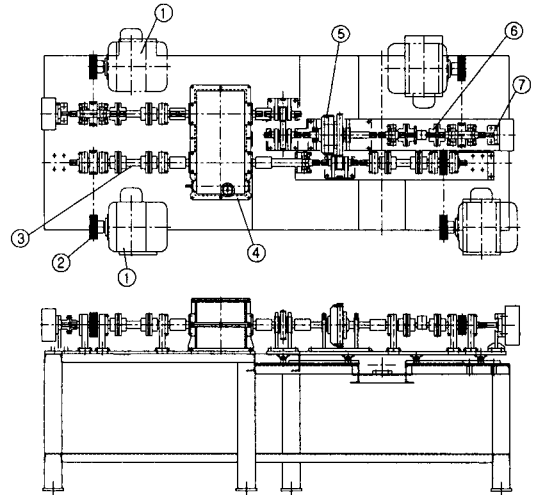


Fig. 10 Drawing of experimental bench

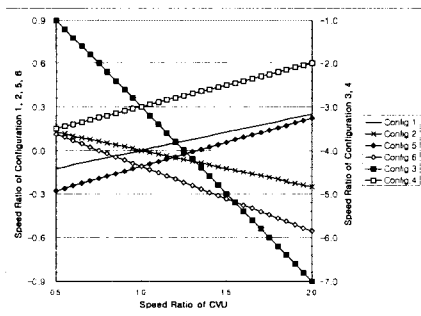
무단변속기는 전기모터에 의해 구동되며, V-벨트식 무단변속기구를 이용하여 속도비를 변화시키면서 부하장치로 토크를 발생시킨다. 따라서 입력축과 출력축의 측정된 토크와 각속도를 이용하여 효율을 계산할 수 있다.

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.

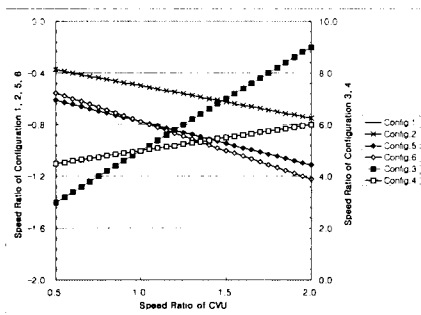
4.3 속도비

Table 2의 이론식을 이용하여 동력순환형과 동력분류형 무단변속기의 각각 6가지 구성에 대한 속도비를 해석한 결과는 Fig.11과 같다. 동력순환형의 경우 정회전, 중립, 역회전을 모두 구현할 수 있으나, 동력분류형의 경우 각각 한방향의 회전방향만을 구현할 수 있다. 구성 1, 2의 속도비는 동력분류형에서는 동일한 결과를 나타냈고 동력순환형에서는 중립점을 기준으로 회전방향만 반대이고 절대값은 동일한 결과를 나타냈다. 또한 구성 3, 4는 동력순환형과 동력분류형에서 큰 증속기능을 가졌으며, 동력순환형에서도 V-벨트식 무단변속기구의 변속범위를 크게 증가시키고 차동기어장치의 잇수비를 조정해야만 중립점을 가질 것으로 분석된다.

동력순환형과 동력분류형에 대한 각각의 6가지 구성의 속도비를 측정된 실험결과는 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.

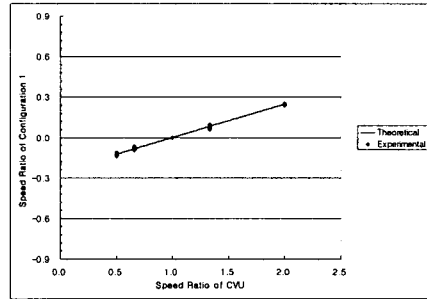


(a) Power circulation

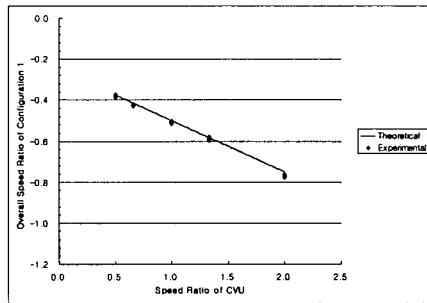


(b) Power split

Fig. 11 Theoretical speed ratios of CVT



(a) Power circulation



(a) Power split

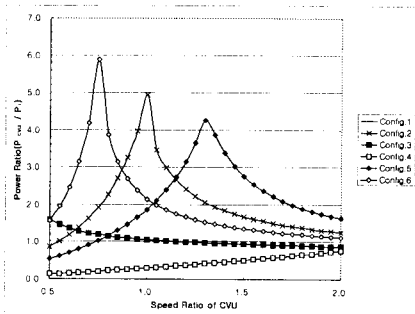
Fig. 12 Experimental results and theoretical result for speed ratio(configuration 1)

4.4 동력흐름

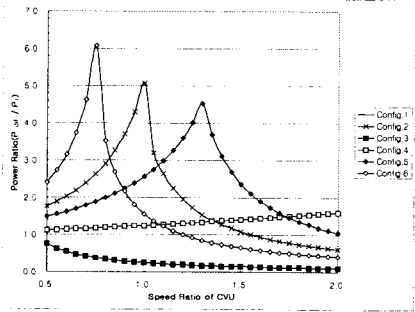
입력축의 동력에 대한 V-벨트식 무단변속기구의 전달동력의 비율(P_{CVU}/P_i)과 차동기어장치의 전달동력 비율(P_{diff}/P_i)의 해석 결과는 Fig.13, 14와 같다.

동력순환형의 경우 중립점에서 무단변속기구와 차동기어장치 모두 높은 동력 분담율을 나타냈다. 즉 중립점에서는 모든 동력이 순환되고 출력되는 동력은 0임을 의미한다.

동력분류형의 경우 V-벨트식 무단변속기구와 차동기어장치가 일정한 비율로 전체동력을 분담하여 전달한다. 즉 동일한 속도비에서 무단변속기구와 차동기어장치의 동력분담율 합은 1에 근사한 값을 나타내며, 1과 차이를 나타내는 것은 동력손실이 발생함을 의미한다. 각각의 구성은 무단변속기구의 감속구간보다 증속구간에서 차동기어장치의 동력분담율이 감소되고 무단변속기의 동력분담율이 증가되는 경향을 나타냈다. 이는 무단변속기구보다 자체 효율이 큰 차동기어장치의 동력분담율이 높은 감속구간에서 전체효율이 증대되고, 무단변속기구의 동력분담율이 증가하는 증속구간에서 전체효율이 감소하게 되는 원인이 된다.

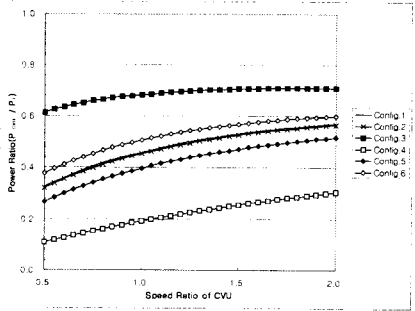


(a) Power ratios(P_{cvu} / P_i)

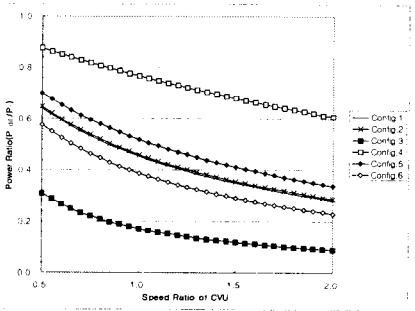


(b) power ratios(P_{dif} / P_i)

Fig. 13 Theoretical power ratios of power circulation



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



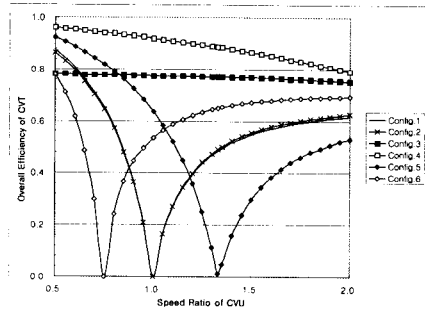
(b) power ratios(P_{dif} / P_i)

Fig. 14 Theoretical power ratios of power split

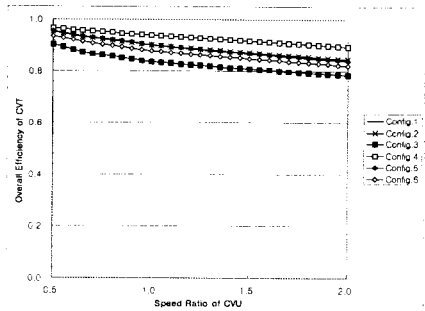
4.5 효율

동력순환형과 동력분류형의 각 6가지 구성에 대한 이론효율 해석결과는 Fig.15와 같다. 동력순환형의 경우 중립점에서 출력동력이 0이므로 효율은 0의 값을 나타내며, 중립점을 기준으로 속도비의 증가에 따라 효율은 증가한다. 구성 1, 2의 효율은 거의 동일한 결과를 나타냈으며, 구성 3, 4는 속도비와 동력흐름에서와 같이 중립점이 나타나지 않았다.

동력분류형의 경우는 동력순환형에 비해 전반적으로 높은 효율을 가지며, 무단변속기구가 감속 구간일 때 증속구간일 때 보다 상대적으로 높은 효율을 나타냈다. 동력순환형의 경우와 같이 구성 1, 2의 효율은 거의 동일한 결과를 나타냈으며, 구성 3은 타 구성에 비해 무단변속기구의 동력분담율이 상대적으로 작기 때문에 전구간에서 타 구성보다 효율이 높은 결과를 나타냈다.



(a) Power circulation



(a) Power split

Fig. 15 Theoretical efficiencies of CVT

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

력분류형의 이론효율과 실험을 통해 측정된 효율을 비교한 것이며, 근사한 경향을 보여준다. 이론결과와 실험결과의 차이는 구성요소의 관성, 모터와 전동축 사이의 V-벨트 손실, 전기모터의 효율, 실험기의 각종 틸새 및 베어링 손실 등이 복합적인 원인으로 작용한 것으로 분석된다.

3) 동력순환형과 동력분류형을 적절히 혼용하고, 각종 기어비 등을 최적화하면 중립점을 포함한 정회전, 역회전의 구현이 가능하면서 고효율의 무단변속기 개발이 가능할 것으로 분석된다

참고 문헌

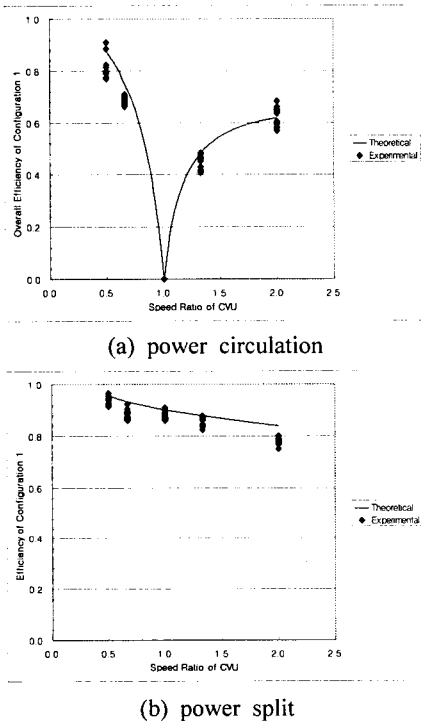


Fig. 16 Experimental results and theoretical result for efficiency (configuration 1)

5. 결 론

V-벨트식 무단변속기구와 2K-H형 I 형식 차동기어장치를 입력축 연결방식으로 결합시켜 구성 가능한 6가지 구성을 제안하고, 각각의 속도비, 동력흐름, 효율에 대한 이론식을 제안하였다. 또한 실험을 통해 이론해석의 타당성을 검증하였다.

1) 동력순환형은 정회전, 중립, 역회전이 모두 가능하지만 구성요소의 동력분담율이 높고 효율이 전반적으로 낮아진다.

2) 동력분류형은 구성요소의 동력분담율이 낮고 효율은 전반적으로 높지만 출력축이 한쪽방향으로만 회전 가능하다.

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. 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.
6. 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.
7. 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.
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, 10号, pp. 1053-1061, 1997.
9. 김광원, 김현수, "금속 V-벨트 CVT의 동력전달 특성과 변속비-부하토크-축력관계," 대한기계학회논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 349-357, 1990.
10. 김연수, 최상훈, "CVT-차동기어장치의 구성에 따른 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회 '99 춘계학술대회논문집, pp. 549-553, 1999.
11. 김연수, 최성욱, 최상훈, "2K-H형 유성기어장치의 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 3, pp. 200-207, 2000.
12. 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.