

Original Article

Open Access

## 정유압-기계식 변속기의 성능 특성과 형식 선정을 위한 설계 변수

심동국<sup>1</sup> · 김경욱<sup>1\*</sup> · 한중수<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 바이오시스템공학전공

### Performance Characteristics of Hydro-mechanical Transmission and Design Parameters for Type Selection

Dong Guk Sim<sup>1</sup>, Kyeong Uk Kim<sup>1\*</sup>, Jung Soo Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, 151-921, Seoul Korea

(Received: October 11<sup>th</sup>, 2011; Revised: October 26<sup>th</sup>, 2011; Accepted: November 10<sup>th</sup>, 2011)

#### Abstract

Market demand for hydro-mechanical transmission (HMT) for agricultural tractors has increased recently. To select a type of HMT satisfying design conditions, performance characteristics of 12 HMT types must be understood. This study was conducted to provide tractor engineers with a guideline to select the most appropriate HMT type for their design requirements. Characteristics on speed reduction ratio, power transmission efficiency, power regeneration, lock-up angular velocity, output torque ratio and torque ratio of planetary gear train axis of the 12 HMT types were investigated and presented as either formula or graphical forms. A guideline to select proper HMT type was also presented using 2 parameter: lock-up angular velocity ( $\omega_L$ ) and torque ratio of the planetary gear train axis. In addition, effect of gear ratio of the planetary gear train on the power transmission efficiency was investigated and a guideline to select the best gear ratio was also presented.

**Keywords** : Hydro-mechanical transmission(HMT), Power Split transmission, Performance characteristics

#### 1. 서론

동력 분기형 변속기(power-split transmission)는 기계식 변속기의 잦은 변속과 정유압 변속기의 저효율 문제를 동시에 해결하기 위한 변속기로서, 최근 농업용 트랙터까지 그 적용 범위가 확대되고 있다. 트랙터에서 채택하고 있는 동력 분기형 변속기로서 가장 대표적인 형태는 HMT(Hydro-mechanical transmission)이다. HMT를 처음 적용한 농업용 트랙터는 1996년에 출시된 독일 Fendt 트랙터의 Vario시리즈이며, 이후 Steyer-Case의 S-Matic, Class의 HM-1, HM-II, John Deere의 Autopower, HewHolland의 TVT, MF의 Dyna-TV 등 HMT

를 적용한 대형 트랙터가 개발되었다. 국내에서도 2009년부터 130마력급 HMT 트랙터를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.

최근까지 HMT에 대한 연구는 주로 HMT의 형식에 따른 변속비, 전동 효율, 동력 순환(power regeneration) 등의 특성을 구명하고, 효과적인 유압 제어의 이론과 기술을 개발하기 위한 것이었다(Janulevicius and Giedra, 2008; Renius and Resch, 2005; Sung, 2007; Linares et al., 2010).

본 연구는 국내에서 진행되고 있는 HMT 개발 과제의 의사 결정에 필요한 HMT의 형식별 성능 특성을 제공하고, 설계 조건에 따라 최적의 HMT 형식을 결정하기 위한 설계 변수를 제시하기 위한 것이다.

\*Corresponding author: Kyeong Uk Kim  
Tel: +82-2-880-4602; Fax: +82-2-873-2049  
E-mail: kukim@snu.ac.kr

## 2. HMT의 형식별 성능 특성

### 가. HMT의 형식

HMT는 입력 동력을 2개의 경로 즉, 보통 기어열로 구성된 기계식 경로와 HST로 구성된 유압식 경로로 분기한 후 이를 다시 하나로 통합하여 출력하는 변속기로서, 유성 기어열을 통하여 동력을 분기하고 통합한다. 그림 1에서와 같이 동력을 통합하는 데 유성 기어열을 이용한 형식을 통합형 HMT (summarized HMT) 또는 Input-coupled HMT라고 하며, 동력을 분기하는 데 유성 기어열을 이용한 형식을 분리형 HMT (divided HMT) 또는 Output-coupled HMT라고 한다. 유성 기어열의 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축은 각각 HMT의 입력축 또는 출력축, 기계식 경로, 유압식 경로와 연결된다. 따라서 분리형 HMT와 통합형 HMT는 유성 기어열의 3축이 HMT의 입력축 또는 출력축, 기계식 경로, 유압식 경로와 연결되는 형식에 따라 표 1에서와 같이 각각 6개의 형식으로 구분할 수 있다.

### 나. 감속비

유성 기어열의 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축의 속도는

식 (1)과 같이 표현된다.

$$\omega_c(Z_s + Z_r) = \omega_s Z_s + \omega_r Z_r \quad (1)$$

where,  $\omega_c$  = angular velocity of carrier axis

$\omega_s$  = angular velocity of sun gear axis

$\omega_r$  = angular velocity of ring gear axis

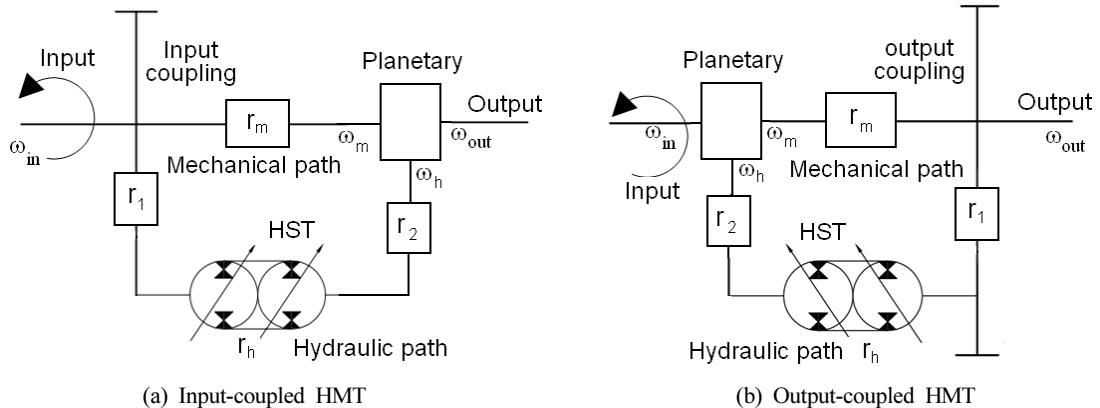
$Z_s$  = number of sun gear teeth

$Z_r$  = number of ring gear teeth

그림 1(a)의 Input-coupled HMT에서 HMT의 입력 속도가  $\omega_{in}$ 일 때 기계식 경로를 통하여 유성 기어열로 입력되는 속도는  $\omega_m = \omega_{in} r_m$  이고 유압식 경로를 통하여 입력되는 속도는  $\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$ 이다. Input-coupled HMT의 형식 1은 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축이 각각 기계식 경로, 유압식 경로, 출력축과 연결되므로  $\omega_s = \omega_m$ ,  $\omega_r = \omega_h$ ,  $\omega_c = \omega_{out}$  이 된다. 식 (1)을 적용하면

$$\omega_{out}(Z_s + Z_r) = \omega_{in} r_m Z_s + \omega_{in} r_1 r_h r_2 Z_r \quad (2)$$

이다. 따라서 감속비는



$\omega_{in}$ =input speed,  $\omega_{out}$ =output speed,  $\omega_m$ =speed of planetary axis connected to mechanical path,  $\omega_h$ =speed of planetary axis connected to hydraulic path,  $r_m$ =speed reduction ratio of mechanical path,  $r_1, r_2$ =speed reduction ratio before and after HST,  $r_h$ =speed reduction ratio of HST

Fig. 1 Types of HMTs.

Table 1 Types of HMTs

Input-coupled HMT				Output-coupled HMT			
Type	Mechanical path	Hydraulic path	Output shaft	Type	Input shaft	Mechanical path	Hydraulic path
1	Sun	Ring	Carrier	1	Carrier	Sun	Ring
2	Ring	Sun	Carrier	2	Carrier	Ring	Sun
3	Sun	Carrier	Ring	3	Ring	Sun	Carrier
4	Carrier	Sun	Ring	4	Ring	Carrier	Sun
5	Ring	Carrier	Sun	5	Sun	Ring	Carrier
6	Carrier	Ring	Sun	6	Sun	Carrier	Ring

**Table 2** Speed reduction ratio of HMT

Input-coupled HMT				
Type	Sun gear speed, $\omega_s$	Ring gear speed, $\omega_r$	Carrier speed, $\omega_c$	Speed reduction ratio
1	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\omega_{out}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} + r_1 r_h r_2 \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$
2	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\omega_{out}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = r_m \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} + r_1 r_h r_2 \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$
3	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\omega_{out}$	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = -r_m \frac{Z_s}{Z_r} + r_1 r_h r_2 \frac{Z_s + Z_r}{Z_r}$
4	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\omega_{out}$	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_r} - r_1 r_h r_2 \frac{Z_s}{Z_r}$
5	$\omega_{out}$	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = -r_m \frac{Z_r}{Z_s} + r_1 r_h r_2 \frac{Z_s + Z_r}{Z_s}$
6	$\omega_{out}$	$\omega_h = \omega_{in} r_1 r_h r_2$	$\omega_m = \omega_{in} r_m$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} - r_1 r_h r_2 \frac{Z_r}{Z_s}$
Output-coupled HMT				
Type	Sun gear speed, $\omega_s$	Ring gear speed, $\omega_r$	Carrier speed, $\omega_c$	Speed reduction ratio
1	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\omega_{in}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_s + Z_r}{\frac{1}{r_m} Z_s + \frac{1}{r_1 r_h r_2} Z_r}$
2	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\omega_{in}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_s + Z_r}{\frac{1}{r_1 r_h r_2} Z_s + \frac{1}{r_m} Z_r}$
3	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\omega_{in}$	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_r}{-\frac{1}{r_m} Z_s + \frac{1}{r_1 r_h r_2} (Z_s + Z_r)}$
4	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\omega_{in}$	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_r}{\frac{1}{r_1 r_h r_2} Z_s - \frac{1}{r_m} (Z_s + Z_r)}$
5	$\omega_{in}$	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_s}{-\frac{1}{r_m} Z_r + \frac{1}{r_1 r_h r_2} (Z_s + Z_r)}$
6	$\omega_{in}$	$\omega_h = \frac{\omega_{out}}{r_1 r_h r_2}$	$\omega_m = \frac{\omega_{out}}{r_m}$	$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_s}{-\frac{1}{r_1 r_h r_2} Z_r + \frac{1}{r_m} (Z_s + Z_r)}$

$$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} + r_1 r_h r_2 \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \quad (3)$$

가 된다. Output-coupled HMT 형식 1의 경우에는, 유성 기어열의 캐리어 축이 HMT의 입력축과, 선기어 축이 기계식 경로와, 링기어 축이 유압식 경로와 연결되므로, 유성 기어열에서 출력되는  $\omega_m$ 과  $\omega_h$  및 HMT의 입력 속도  $\omega_{in}$ 은 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{in} (Z_s + Z_r) = \omega_m Z_s + \omega_h Z_r \quad (4)$$

또한, 출력축의 속도는 각 경로의 감속비를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_m r_m = \omega_{out}$$

$$\omega_h r_2 r_h r_1 = \omega_{out}$$

이를 식 (4)에 대입하여 감속비를 구하면

$$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_s + Z_r}{\frac{Z_s}{r_m} + \frac{Z_r}{r_1 r_h r_2}} \quad (5)$$

가 된다. 같은 방법으로 표 1의 각 형식의 HMT에 대한 감속비를 구하면 표 2에서와 같다.

다. 동력 순환

그림 2에서와 같이 유성 기어열의 선기어, 링기어, 유성 기어에 작용하는 접선력  $W_t$ 는 모두 같다. 따라서 선기어, 링기어 케리어의 회전 반경을 각각  $R_s, R_r, R_c$ 라고 하면 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축에 작용하는 토크  $T_s, T_r, T_c$ 는 각각 다음과 같이 표현된다.

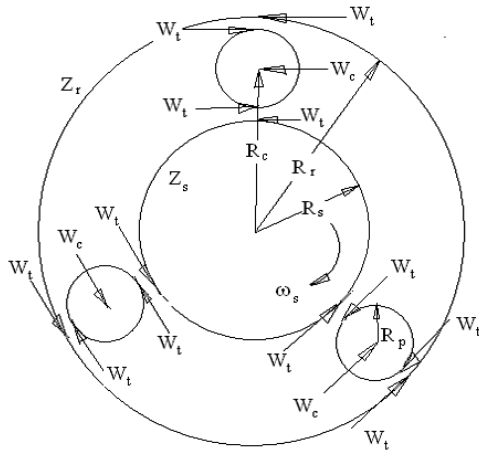


Fig. 2 Tangential forces acting on the planetary gear train.

$$T_s = 3W_tR_s, \quad T_r = 3W_tR_r, \quad T_c = 6W_tR_c$$

또한,  $2R_c = R_s + R_r$ 이므로

$$T_s = T_c \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \tag{6}$$

$$T_r = T_c \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \tag{7}$$

$$T_c = T_s + T_r \tag{8}$$

가 된다.

표 1의 Input-coupled HMT 형식 1의 경우, 선기어 축이 기계식 경로와, 링기어 축이 유압식 경로와 연결되고, 케리어 축에는 출력 토크  $T_{out}$ 이 작용하므로

$$T_s = T_m, \quad T_r = T_h, \quad T_c = T_{out}$$

이 된다. 따라서 식 (6), (7), (8)을 이용하면

$$T_m = T_s = T_{out} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \tag{9}$$

$$T_h = T_r = T_{out} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \tag{10}$$

where,  $T_m$  = torque to or from planetary axis connected to mechanical path

$T_h$  = torque to or from planetary axis connected to hydraulic path

이다.

HMT로 입력되는 동력  $P_{in} = T_{in}\omega_{in}$ 은 기계식 경로로 전달되는 동력과 유압식 경로로 전달되는 동력의 합으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \left( \frac{T_m r_m}{\eta_m} + \frac{T_h r_1 r_h r_2}{\eta_h} \right) \omega_{in} \\ &= \left( \frac{r_m}{\eta_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} + \frac{r_1 r_h r_2}{\eta_h} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \right) T_{out} \omega_{in} \end{aligned} \tag{11}$$

where,  $\eta_m$  = power transmission efficiency for mechanical path

$\eta_h$  = power transmission efficiency for hydraulic path

일반적으로 동력은 입력축에서 출력축으로 전달된다. 그러나 그 반대 방향 즉, 출력축에서 입력축 방향으로 동력이 전달되는 경우도 발생한다. 이러한 경우를 동력 순환(power regeneration)이라고 하며, 기계식 경로에서 동력 순환이 발생하기 위한 조건은 식 (11)에서

$$\frac{r_m}{\eta_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} T_{out} \omega_{in} < 0 \tag{12}$$

이다. 이 조건은  $T_{out} < 0$ 일 때 만족되며,  $T_{out} < 0$ 일 때는  $P_{in} = \frac{T_{out}\omega_{out}}{\eta}$ 이므로  $P_{in} > 0$ 이 되기 위해서는  $\omega_{out} < 0$ 가 되어야 한다. 즉, HMT의 출력 속도와 입력 속도의 방향이 반대이면 기계식 경로에서 동력 순환이 발생한다. 유압식 경로에서 동력 순환이 발생하기 위한 조건은

$$\frac{r_1 r_h r_2}{\eta_h} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} T_{out} \omega_{in} < 0 \tag{13}$$

이다. 식 (2)에서  $r_1 r_h r_2$ 를 구하여 식 (13)에 대입하여 정리하면

$$\frac{1}{\eta_h} (\omega_{out} - r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}) T_{out} < 0$$

가 되며, 이 조건은  $\omega_{out} < r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$  또는  $T_{out} < 0$ 일 때 만족된다.  $T_{out} < 0$ 일 때는 기계식 경로에서와 같이  $P_{in} > 0$ 를 위하여  $\omega_{out} < 0$ 가 되어야 하나,  $\omega_{out} < 0$ 이면  $\omega_{out} < r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$ 이 동시에 만족되므로  $\omega_{out} < 0$ 은 될 수 없고  $\omega_{out} > 0$ 이 되어야 한다. 따라서 HMT의 출력 속도가

$$0 < \omega_{out} < r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in} \quad (14)$$

이면 유압식 경로에서 동력 순환이 발생한다. 식 (14)에서  $r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$ 은 유압식 경로가 고정되었을 때 즉, 동력이 기계식 경로로만 전달될 때 HMT 출력 속도이다. 이 속도를 록업 속도(lock-up angular speed)  $\omega_L$ 이라고 하면 식 (14)는 다음과 같이 표현된다.

$$0 < \omega_{out} < \omega_L$$

Output-coupled HMT 형식 1의 경우에는 HMT의 입력 동력이 케리어 축으로 전달되고, 선기어와 링기어는 각각 기계식 경로와 유압식 경로로 연결되므로

$$T_s = T_m, \quad T_r = T_h, \quad T_c = T_{in}$$

가 된다. 식 (6), (7), (8)을 적용하면

$$T_m = T_{in} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$$

$$T_h = T_{in} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$$

$$T_{in} = T_m + T_h$$

이다. 기계식 경로와 유압식 경로를 통하여 HMT 출력축으로 전달된 토크는 각각  $\frac{1}{r_m} T_{in} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$ 와  $\frac{1}{r_1 r_h r_2} T_{in} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$ 가 되고, HMT의 입력 동력은

$$P_{in} = \frac{1}{\eta_m} \frac{T_{in}}{r_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{out} + \frac{1}{\eta_h} \frac{T_{in}}{r_1 r_h r_2} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \omega_{out} \quad (15)$$

가 된다. 따라서 기계식 경로에서 동력 순환이 발생하기 위한 조건은

$$\frac{1}{\eta_m} \frac{T_{in}}{r_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{out} < 0 \quad (16)$$

이고,  $\omega_{out} < 0$ 일 때만 이 조건이 만족된다. 즉, 출력 속도와 입력 속도의 방향이 반대일 경우에만 기계식 경로에서 동력 순환이 발생한다. 유압식 경로에서 동력 순환이 발생하는 조건은

$$\frac{1}{\eta_h} \frac{T_{in}}{r_1 r_h r_2} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \omega_{out} < 0 \quad (17)$$

이다. 표 2의 Output-coupled HMT 형식 1에 대한 감속비에서  $r_1 r_h r_2$ 를 구하여 식 (17)에 대입하면

$$\frac{1}{\eta_h} T_{in} \left( \omega_{in} - \frac{1}{r_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{out} \right) < 0$$

가 되며, 이 조건을 만족하는 경우는 HMT의 출력 속도가

$$\omega_{out} > r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_{in} \quad (18)$$

일 때이다. 식 (18)에서  $r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_{in}$ 은 Output-coupled HMT 형식 1에서 유압식 경로가 고정되었을 때 즉 동력이 기계식 경로로만 전달될 때 HMT의 출력 속도이다. 따라서 유압식 경로에서 동력 순환이 발생하기 위한 조건은 록업 속도로서 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{out} > \omega_L$$

이상과 같은 방법으로 표 1의 Input-coupled와 Output-coupled HMT의 모든 형식에 대한 록업 속도와 동력 순환이 발생하는 조건을 구하면 표 3에서와 같다.

#### 라. 전동 효율

HMT의 전동 효율은 입력 동력  $P_{in}$ 에 대한 출력 동력  $P_{out}$ 의 비로 정의되며, Input-coupled HMT 형식 1의 전동 효율은 식 (11)로부터 구하였다. 식 (11)에서  $T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_{out}}$ 이고, 식 (2)에서  $r_1 r_h r_2$ 를 구하여 식 (11)에 대입하면

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \left( \frac{1}{\eta_m} - \frac{1}{\eta_h} \right) + \frac{1}{\eta_h}} \quad (19)$$

가 된다. 출력 속도비를 록업 속도  $\omega_L = r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$ 에 대한 HMT 출력 속도의 비로 정의하면 즉,

**Table 3** Lock-up angular speed and conditions for power regeneration of HMT

Input-coupled HMT			
Type	Lock-up angular speed	Mechanical regeneration	Hydraulic regeneration
1	$\omega_L = r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$0 < \omega_{out} < \omega_L$
2	$\omega_L = r_m \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$0 < \omega_{out} < \omega_L$
3	$\omega_L = -r_m \frac{Z_s}{Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} > 0$	$\omega_L < \omega_{out} < 0$
4	$\omega_L = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$0 < \omega_{out} < \omega_L$
5	$\omega_L = -r_m \frac{Z_r}{Z_s} \omega_{in}$	$\omega_{out} > 0$	$\omega_L < \omega_{out} < 0$
6	$\omega_L = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$0 < \omega_{out} < \omega_L$
Output-coupled HMT			
Type	Lock-up angular speed	Mechanical regeneration	Hydraulic regeneration
1	$\omega_L = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$\omega_{out} > \omega_L$
2	$\omega_L = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$\omega_{out} > \omega_L$
3	$\omega_L = -r_m \frac{Z_r}{Z_s} \omega_{in}$	$\omega_{out} > 0$	$\omega_{out} < \omega_L$
4	$\omega_L = r_m \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$\omega_{out} > \omega_L$
5	$\omega_L = -r_m \frac{Z_s}{Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} > 0$	$\omega_{out} < \omega_L$
6	$\omega_L = r_m \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \omega_{in}$	$\omega_{out} < 0$	$\omega_{out} > \omega_L$

$$\omega_{nor} = \frac{\omega_{out}}{\omega_L}$$

이때, 전동 효율은 출력 속도비  $\omega_{nor}$ 의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{nor}} \left( \frac{1}{\eta_m} - \frac{1}{\eta_h} \right) + \frac{1}{\eta_h}} \quad (20)$$

동력 순환이 일어날 때의 전동 효율은 동력 순환이 아닐 때의 역수가 된다. 즉 기계식 경로에서 동력 순환이 일어나면 식 (20)에서  $\frac{1}{\omega_{nor}}$ 은  $\eta_m$ 이 되며, 유압식 경로에서 동력 순환이

일어나면  $\frac{1}{\eta_h}$ 는  $\eta_h$ 가 된다.

Output-coupled HMT의 형식 1에서  $P_{out}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{out} = \eta_m \frac{T_{in} Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{\omega_{out}}{r_m} + \eta_h \frac{T_{in} Z_r}{Z_s + Z_r} \frac{\omega_{out}}{r_1 r_2 r_h} \quad (21)$$

$T_{in} = \frac{P_{in}}{\omega_{in}}$ 과 Output-coupled HMT 형식 1의 감속비에서  $r_1 r_h r_2$ 를 구하여 식 (21)에 대입하면 전동 효율은 다음과 같이 표현된다.

**Table 4** Power transmission efficiency of HMT

Input-coupled HMT		
Power split	Mechanical regeneration	Hydraulic regeneration
$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{nor}} \left( \frac{1}{\eta_m} - \frac{1}{\eta_h} \right) + \frac{1}{\eta_h}}$ $\omega_{nor} > 1$	$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{nor}} \left( \eta_m - \frac{1}{\eta_h} \right) + \frac{1}{\eta_h}}$ $\omega_{nor} < 0$	$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{nor}} \left( \frac{1}{\eta_m} - \eta_h \right) + \eta_h}$ $0 \leq \omega_{nor} \leq 1$
Output-coupled HMT		
Power split	Mechanical regeneration	Hydraulic regeneration
$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \omega_{nor} (\eta_m - \eta_h) + \eta_h$ $0 \leq \omega_{nor} \leq 1$	$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \omega_{nor} \left( \frac{1}{\eta_m} - \eta_h \right) + \eta_h$ $\omega_{nor} < 0$	$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \omega_{nor} \left( \eta_m - \frac{1}{\eta_h} \right) + \frac{1}{\eta_h}$ $\omega_{nor} > 1$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{r_m} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} (\eta_m - \eta_h) + \eta_h \quad \frac{T_{out}}{T_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{\omega_{in}}{\omega_{nor} \omega_L} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}} \quad (23)$$

전동 효율을 록업 속도  $\omega_L = r_m \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_{in}$  에 대한 출력 속도의 비  $\omega_{nor} = \frac{\omega_{out}}{\omega_L}$  의 함수로 표현하면 식 (22)과 같다.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \omega_{nor} (\eta_m - \eta_h) + \eta_h \quad (22)$$

Input-coupled HMT의 경우에서와 같이, 기계식 경로에서 동력 순환이 발생하면 식 (22)에서  $\eta_m$  은  $\frac{1}{\eta_m}$  이 되며, 유압식 경로에서 동력 순환이 발생하면  $\eta_h$  는  $\frac{1}{\eta_h}$  가 된다.

같은 방법으로 표 1의 Input-coupled와 Output-coupled HMT의 모든 형식에 대한 전동 효율을 구하면 표 4에서와 같이 형식에 관계없이 동력이 분기될 때, 동력이 기계식 경로에서 순환될 때, 동력이 유압식 경로에서 순환될 때로 구분하여 나타낼 수 있다.

#### 마. 토크비

토크비는 출력 토크비와 유성 기어열 축 토크비로 구분하였다. 출력 토크비는 HMT의 입력 토크  $T_{in}$  에 대한 출력 토크  $T_{out}$  의 비로 정의하여, 감속비와 전동 효율로써 구하였다. 즉,

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_{out} \omega_{out}}{T_{in} \omega_{in}}$$

이므로, Input-coupled HMT 형식 1에 대한 출력 토크비는 출력 속도비  $\omega_{nor}$  의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

또한, HMT 입력 토크에 대한 유성 기어열의 3축 즉, 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축에 작용하는 유성 기어열 축 토크비는 각각

$$\frac{T_s}{T_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \quad (24)$$

$$\frac{T_r}{T_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \quad (25)$$

$$\frac{T_c}{T_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (26)$$

이다.

같은 방법으로 Output-coupled HMT 형식 1에 대한 출력 토크비를 구하면 식 (27)과 같다.

$$\frac{T_{out}}{T_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{\omega_{in}}{\omega_{nor} \omega_L} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}} \quad (27)$$

또한, 입력 토크에 대한 유성 기어열 축 토크비는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{T_s}{T_{in}} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$$

$$\frac{T_r}{T_{in}} = \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$$

$$\frac{T_c}{T_{in}} = 1$$

이와 같은 방법으로 표 1의 Input-coupled와 Output-coupled

**Table 5** Torque ratio of HMTs

Input-coupled HMT				
Type	Output torque ratio ( $\frac{T_{out}}{T_{in}}$ )	Sun gear axis ( $\frac{T_s}{T_{in}}$ )	Ring gear axis ( $\frac{T_r}{T_{in}}$ )	Carrier axis ( $\frac{T_c}{T_{in}}$ )
1	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$
2	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$
3	$-\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_r}{Z_s} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_r}{Z_s}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_r}$
4	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_r}{Z_s}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_r}$
5	$-\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s}{Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s}{Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_s}$
6	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s}{Z_r}$	$\frac{T_{out}}{T_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_s}$
Output-coupled HMT				
Type	Output torque ratio ( $\frac{T_{out}}{T_{in}}$ )	Sun gear axis ( $\frac{T_s}{T_{in}}$ )	Ring gear axis ( $\frac{T_r}{T_{in}}$ )	Carrier axis ( $\frac{T_c}{T_{in}}$ )
1	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$	$\frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$	1
2	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_r}{Z_s + Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$	$\frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$	1
3	$-\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s}{Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	1	$\frac{Z_r}{Z_s}$	$\frac{Z_s + Z_r}{Z_s}$
4	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_r} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	1	$\frac{Z_r}{Z_s}$	$\frac{Z_s + Z_r}{Z_s}$
5	$-\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_r}{Z_s} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{Z_s}{Z_r}$	1	$\frac{Z_s + Z_r}{Z_r}$
6	$\frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \frac{1}{r_m} \frac{1}{\omega_{nor}}$	$\frac{Z_s}{Z_r}$	1	$\frac{Z_s + Z_r}{Z_r}$

HMT의 모든 형식에 대한 출력 토크비와 유성 기어열 축 토크비를 구하면 표 5에서와 같다.

### 3. HMT 형식의 선택

#### 가. 선택 기준

HMT 형식의 선택 기준은 전동 효율과 출력 토크비 및 유성 기어열 축 토크비를 기본으로 하여 다음과 같이 설정하였다.

- 1) 전동 효율은 유압식 경로의 전동 효율보다 높고, 기계식 경로의 전동 효율보다 낮은 범위이어야 한다.
- 2) 동력 순환의 범위는 가능한 한 작아야 한다.

3) 출력 토크비는 가능한 한 커야 한다.

4) 유성 기어열의 3축에 작용하는 토크 부하는 가능한 한 작아야 한다.

#### 나. 전동 효율과 토크비

그림 3은 기계식 경로의 전동 효율이  $\eta_m = 0.9$ 이고 유압식 경로의 전동 효율이  $\eta_h = 0.75 (r_h \neq 0)$ 일 때 출력 속도비에 따라 Input-coupled와 Output-coupled HMT의 형식 1에 대한 전동 효율을 나타낸 것이다. 전동 효율이 유압식 경로의 전동 효율보다 높은 구간을 HMT의 사용 가능 속도라 하고, 이를 출력 속도비로 나타내면 Input-coupled HMT의 경우  $\omega_{nor} > 0.62$ 이었으며, Output-coupled HMT의 경우에는  $0 <$



$\omega_{nor} < 1.35$ 이었다. 따라서 전동 효율 면에서 Input coupled HMT는 출력 속도가 록업 속도보다 고속일 때 유리하며, Output-coupled HMT는 록업 속도보다 저속일 때 유리하다.

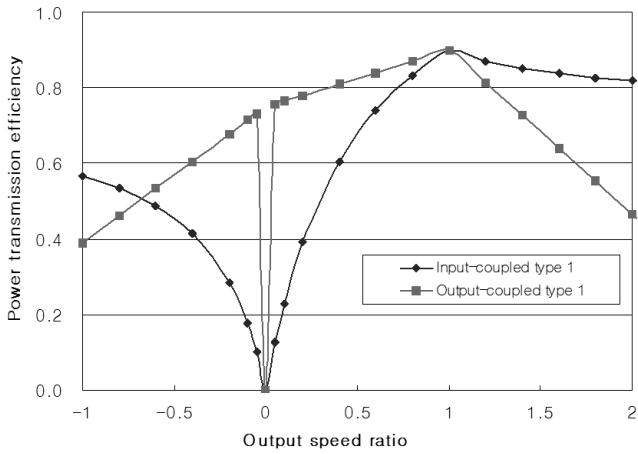
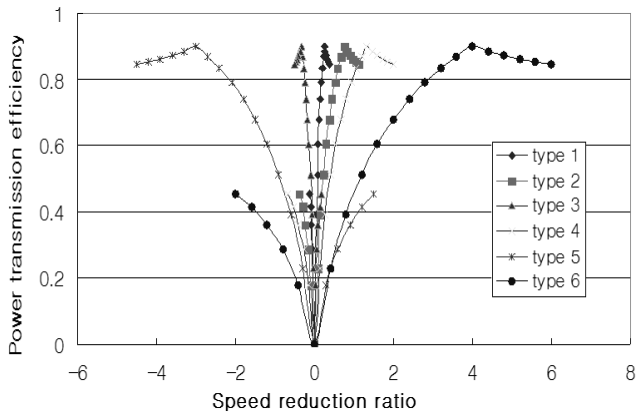


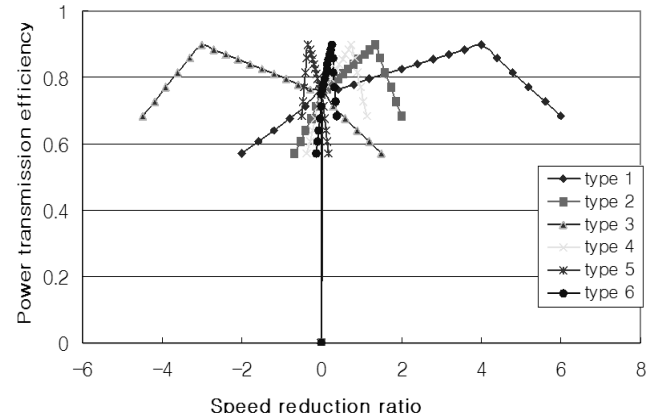
Fig. 3 Power transmission efficiency for input-coupled and output-coupled HMT type 1.

그림 4는 HMT 12 형식의 전동 효율을 감속비( $\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}}$ )에 따라 나타낸 것이다. 전동 효율이 최대일 때의 감속비는 HMT의 형식에 따라 다르기 때문에, 설계하고자 하는 HMT의 감속비에 따라 적합한 형식을 선택하여야 한다. Input-coupled HMT 형식 3과 5, Output-coupled HMT 형식 3과 5는 록업 속도의 방향이 출력 속도의 방향과 반대이다. 따라서 이 2가지 형식에서는 HMT의 사용 가능 구간에서 출력 속도의 방향을 역전시키기 위한 기어 장치가 요구된다.

그림 5는 선기어에 대한 링기어의 기어비가 1:3일 때 출력 속도비에 따라 HMT의 출력 토크비를 나타낸 것이다. 출력 속도가 0에 가까울수록 출력 토크가 크게 증가하기 때문에 HMT의 강도를 고려하여 출력 속도를 일정 속도 이상으로 제한하여야 한다. 같은 출력 속도비에서 HMT의 출력 토크비는 형식에 따라 최대 16배의 차이가 나기 때문에 형식 선택이 중요하다. 출력 속도비가 같을 때 출력 토크비는 록업 속도의 역수에 비례한다.

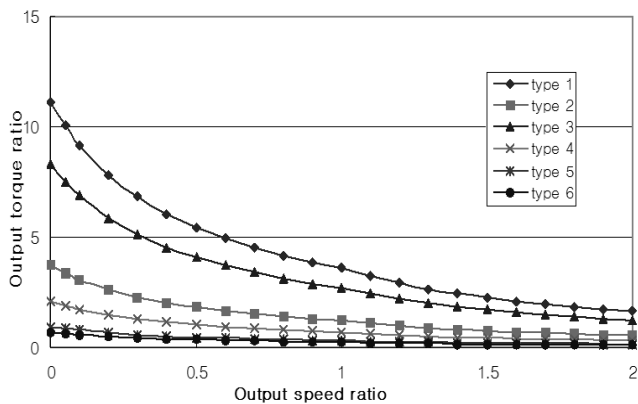


(a) Input-coupled HMT

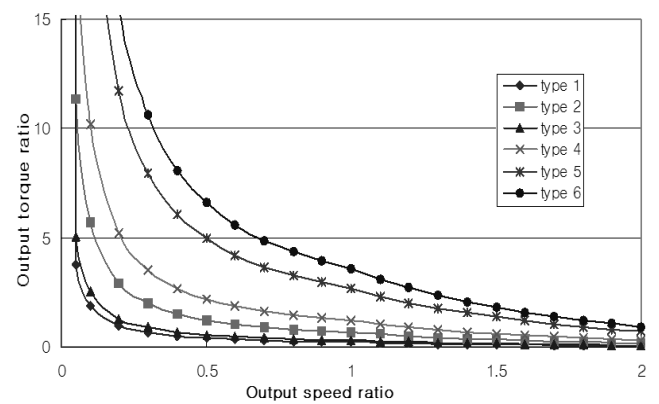


(b) Output-coupled HMT

Fig. 4 Power transmission efficiency of input-coupled and output-coupled HMTs.



(a) Input-coupled HMT



(b) Output-coupled HMT

Fig. 5 Output torque ratios vs. output speed ratio.

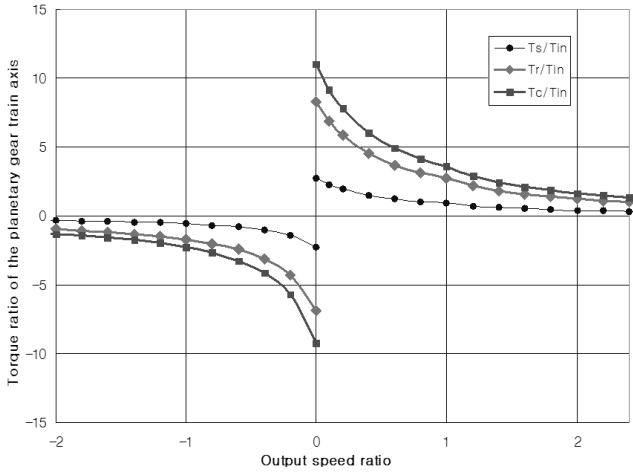


Fig. 6 Torque ratio of the planetary gear axis for input-coupled HMT type 1.

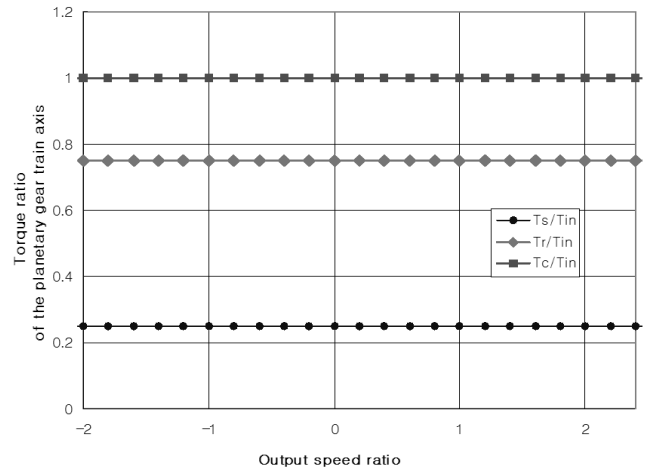


Fig. 7 Torque ratio of the planetary gear axis for output-coupled HMT type 1.

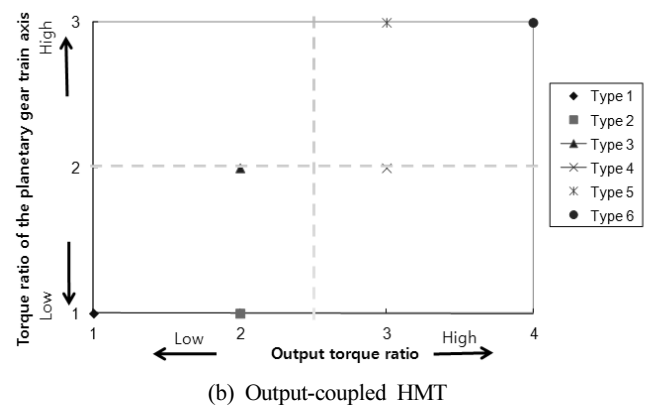
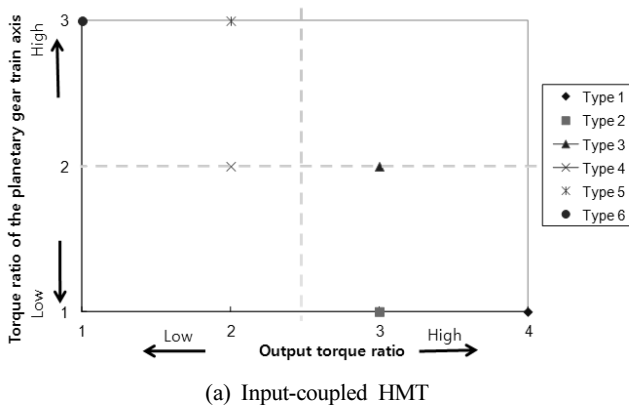


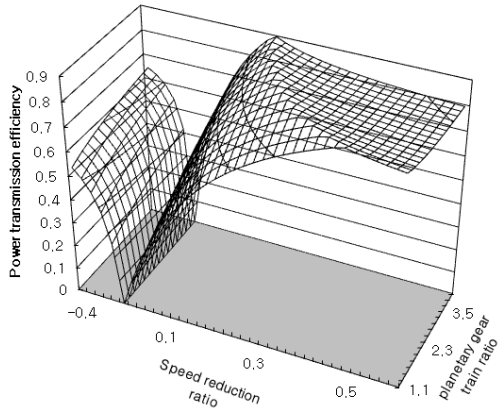
Fig. 8 HMT characteristics by type.

유성 기어열 축 토크비와 출력 속도비의 관계는 그림 6과 7에서와 같다. Input-coupled HMT 형식 1의 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축에 작용하는 토크는 모두 출력 속도가 0에 가까울수록 크게 증가하며, 크기는 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축 순이었다. 그러나 Output-coupled HMT 형식 1의 경우에는 그림 7에서와 같이 출력 속도비에 관계없이 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축에는 일정한 크기의 토크가 작용하며, 토크의 크기는 Input-coupled HMT에서와 같이 선기어 축, 링기어 축, 케리어 축 순이었다. 유성 기어열 축 토크비는 유성 기어열의 축을 설계할 때 고려하여야 한다.

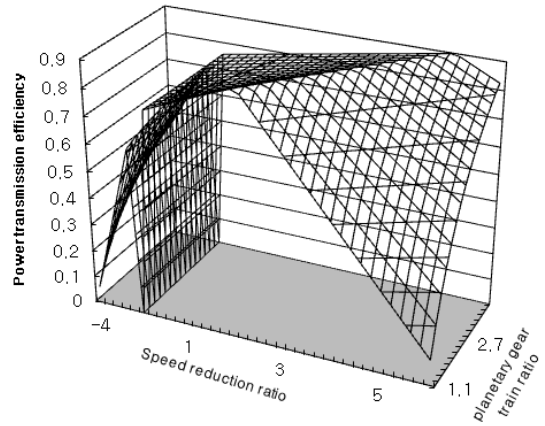
그림 7에서 제시한 형식 외의 형식들은 표 5에서와 같이 Input-coupled HMT에서 유성 기어열 축 토크는 출력 토크에 비례한다. 그러나 Output-coupled HMT에서 유성 기어열 축 토크는 입력 토크에 비례한다. 그림 6과 7에서와 같이 Input-coupled HMT의 경우 유성 기어열 축 토크비는 출력 속도비에 따라 크게 변하지만, Output-coupled HMT의 경우에는 출력 속도비에 관계없이 일정하다. 따라서 유성 기어열 축 토크

가 HMT의 내구성에 미치는 영향은 Output-coupled HMT에서보다는 Input-coupled HMT에서 더 크다.

그림 8은 록업 속도와 유성 기어열 축 토크비를 설계 변수로 하였을 때, 설계 변수에 따른 Input-coupled와 Output-coupled HMT의 형식별 특성을 비교한 것이다. 단 각 형식의 기계경로의 감속비( $r_m$ ), 유성 기어열 기어비는 같다고 가정하였다. 출력 토크는 록업 속도에 반비례하므로 록업 속도가 빠를수록 출력 토크가 작았다. 입력 토크에 대한 출력토크의 비를 상대적으로 비교하였다. 유성 기어열 축 토크비는 표 5를 기준으로 각 형식의 유성 기어열 3축 중 유성 기어열 축 토크비가 가장 큰 축을 기준으로 상대 비교하였다. Input-coupled HMT의 1, 2, 3형식은 출력 토크가 크고, 유성 기어열 축 토크는 작다. 4, 5, 6형식은 반대로 출력 토크가 작고 유성 기어열 축 토크는 크다. Output-coupled HMT의 1, 2, 3형식은 출력 토크가 작고 유성 기어열 축 토크도 작은 반면에 4, 5, 6형식 출력 토크와 유성 기어열 축 토크가 모두 크다. 출력 토크비와 유성 기어열 축토크비는 표 5와 같이 유성 기어열 기어

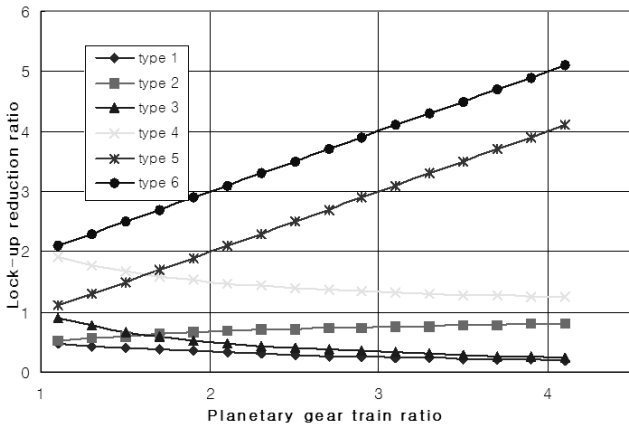


(a) Input-coupled HMT type 1

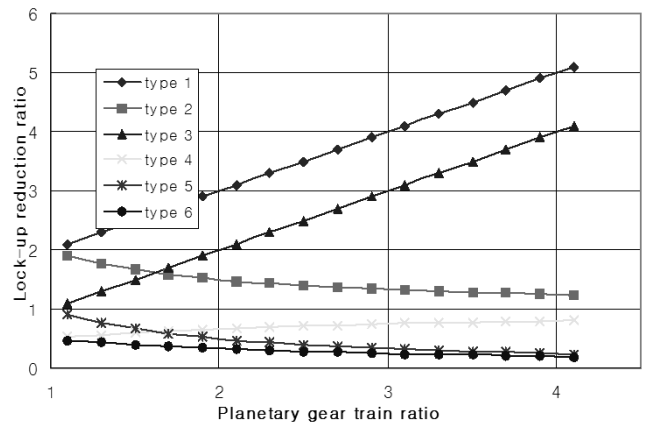


(b) Output-coupled HMT type 1

Fig. 9 Power transmission efficiency by speed reduction ratio and planetary gear train ratio.



(a) Input-coupled HMT



(b) Output-coupled HMT

Fig. 10 Lock-up reduction ratio vs. planetary gear train ratio.

비에 의해 그 절댓값은 변화하지만 그림 8의 상대적인 크기는 변하지 않는다.

#### 다. 유성 기어열 기어비

유성 기어열 기어비를 선기어에 대한 링기어의 기어비 ( $\frac{Z_r}{Z_s}$ )로 정의하여, 유성 기어열 기어비에 따라 HMT의 전동 효율을 나타내면 그림 9에서와 같다. 유성 기어열 기어비에 따라 HMT 최고 효율지점이 바뀌는 것을 알 수 있다. 이러한 전동 효율의 변화는 기어비에 따라 동력 순환의 영역이 변하기 때문에 일어난다.

전동 효율의 특성은 록업 속도에 따라 결정되며, 록업 속도는 유성 기어열 기어비에 따라 결정된다. 출력 속도가 록업 속도일 때의 감속비를 록업 감속비( $\frac{\omega_L}{\omega_{in}}$ )라고 정의하면 그림 10과 같이 HMT의 12 형식에 따른 유성 기어열 기어비와 록업 감속비의 관계를 나타낼 수 있다. 유성 기어열 기어비에

따라 록업 감속비가 비례적으로 변하는 형식은 Input-coupled HMT의 5형식과 6형식, Output-coupled HMT의 1형식과 3형식으로 4개 형식이며, 이 4개 형식을 제외하면 유성 기어열의 기어비가 록업 감속비에 미치는 영향은 크지 않았다. 록업 감속비의 크기는 Input-coupled HMT의 경우 6, 5, 4, 3, 2, 1형식 순이고, Output-coupled HMT의 경우에는 1, 2, 3, 4, 5, 6형식 순이었다. 그러나 2형식과 3형식의 록업 감속비는 유성 기어열 기어비에 따라 그 순위가 바뀔 수 있으며, 4형식과 5형식의 경우에도 동일하였다. 따라서 그림 8을 이용하여 1차로 HMT의 형식을 선정하고 그림 10을 이용하여 최종적으로 HMT의 형식과 유성 기어열 기어비를 결정하여야 한다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 HMT의 12개 형식에 대한 성능 특성을 제시하고, 형식 선정에 필요한 설계 변수를 제시하기 위하여 수행되

었다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

가. 12개 형식의 HMT에 대한 감속비, 동력 흐름, 전동 효율, 출력 토크비, 유성 기어열 축 토크비의 특성을 제시하였다.

나. HMT의 동력 흐름 및 전동 효율의 특성을 출력 속도비 ( $\omega_{nor}$ )의 함수로서 제시하였다.

다. HMT의 주요 설계 변수로서 록열 속도  $\omega_L$ 을 제안하였으며, 록열 속도에 따른 HMT의 특성은 다음과 같이 나타났다.

- 1) HMT의 사용 가능 속도는 록열 속도에 의하여 결정된다.
- 2) 록열 속도에 따라 동력 순환이 발생하므로 전동 효율은 록열 속도에 따라 결정된다.
- 3) 록열 속도가 느리면 출력 토크비가 증가하며, 록열 속도가 빠르면 출력 토크비가 감소하여 큰 출력 토크가 필요한 경우에는 출력축 이후에 감속 장치가 요구된다.

라. HMT의 주요 설계 변수로서 유성 기어열 축 토크비를 제안하였으며, 유성 기어열 축 토크비에 따른 HMT의 특성은 다음과 같다.

- 1) Input-coupled 경우 유성 기어열 축 토크비는 출력 속도비에 따라 감소하였으나, Output-coupled의 경우에는 출력 속도비에 관계없이 일정하였다.
- 2) 유성 기어열 축 토크비의 영향은 입력 토크가 유성 기어열에 의하여 일정한 비율로 분리되는 Output-coupled HMT보다 출력 토크가 유성 기어열에 의하여 일정한 비율로 분리되는 Input-coupled HMT가 더 크다.

마. 록열 속도와 유성 기어열 축 토크비에 따라 HMT의 형식을 선택하기 위한 방안을 제시하였다.

바. HMT의 록열 감속비에 따른 전동 효율 특성을 이용하여 유성 기어열 기어비를 결정하기 위한 방안을 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업 및 IT융합 차세대 농기계 종합기술지원사업으로 지원된 ‘100kw급 농용트랙터용 IT기술기반 무단변속기(HMT) 개발(과제번호: R09-1)’ 과제의 연구결과입니다.

## 참고 문헌

1. Sung, D. H. 2007. Power characteristics and design for power split transmission system. Unpublished doctoral thesis. Sungkyungkwan University, Suwon, Korea. (in Korean)
2. Janulevicius, A. and K. Giedra. 2008. Analysis of main dynamic parameters of split power transmission. Transport 23(2):112-118.
3. Renius, K. and R. Resch 2005. Continuously variable tractor transmissions. ASAE Distinguished Lecture 29, ASABE. St. Joseph. Michigan, USA.
4. Linares, P., V. Méndez and H. Catalán. 2010. Design parameters for continuously variable power-split transmissions using planetaries with 3 active shafts. Journal of Terramechanics 47:323-335.