

# 기계유압식 동력장치의 성능 + Performance of Mechanical-Hydraulic Transmission

|         |          |          |
|---------|----------|----------|
| 김상헌 *   | 신범수 *    | 곽규선 *    |
| 정회원     | 정회원      | 정회원      |
| S.H.Kim | B.S.Shin | K.S.Kwak |

## 1. 서론

동력전달방식은 여러 가지가 있으나 작동 속도범위가 넓고 저속에서 높은 토크를 가지며 무단으로 구동되는 변속기와 같은 이상적인 동력장치의 관한 연구는 많지 않았다. 대부분의 내연기관은 출력속도가 저속이거나 아주 높은 고속인 경우 낮은 토크와 고연비가 발생하고 중속에서는 높은 토크와 저연비가 나타난다.(정오진,1996) 이러한 내연기관의 특성을 이용하여 주행제어를 최적화 하는 무단변속기에 관한 연구는 많이 발표되었으나 외부부하가 큰 상태에서 저, 고속에서 높은 효율을 낼 수 있는 무단변속기에 관한 연구는 그 수가 적은 현실이다. 무단변속기 중 정 유압 방식은 가변 용량형 유압펌프와 고정 또는 가변용량형 유압모터를 조합한 유압변속기(본 실험에서 유압변속기는 가변용량형 유압펌프와 고정용량형 유압모터)를 사용하여 무단 변속을 하는데 모든 동력이 유압변속기만을 통하여 전달되는 방식과 동력이 유압변속기와 기계식 전동장치인 유성기어 변속기 등으로 구성된 동력전달장치에서 서로 분산되어 전달되는 기계유압식으로 나뉘어진다.

소형 농 작업기인 ss기 등의 자율주행을 위해 사용한 유압변속기는 무단변속기로 연속적인 변속시에도 급작스러운 가속도 변화 및 변속충격을 느낄 수 없고 연속적인 변속비 범위 내에서 동력의 단속 없이 중립 상태를 유지할 수 있어 주행제어가 용이하다는 장점이 있어 자율 주행을 위한 동력전달에 적합하다. 그러나 소형 ss기의 자율주행을 위해 사용한 유압변속기는 일반적인 경우와 같이 외부부하가 많고 저속인 경우 낮은 토크를 가지므로 효율이 낮고 적절한 주행에 문제가 있다는 단점이 있다. 그러나 기계유압식 동력전달장치의 경우 유압변속기의 장점을 그대로 이용하면서 유성기어 변속기에 의한 기계식 동력전달을 함으로 효율을 높일 수 있는 장점이 있어 농업기계 동력전달장치에 이용될 때 저,고속에서 높은 토크를 내어 효율을 높이고 주행을 용이하게 할 수 있다.

본 실험에서는 외부부하에 따른 기계유압식 동력전달장치의 속도의 변화 폭 및 전달동력과 효율을 측정하고 유압변속기만을 사용한 경우의 전달동력 및 효율과 비교하여 기계유압식 동력전달장치의 성능을 평가하는 동시에 적정 작업조건을 찾아 기계유압식 동력전달장치를 사용하는 농작업기의 설계에 필요한 기초 자료를 얻고자 한다.

---

+ 본 연구는 96년도 농림특정연구사업의 연구결과중 일부임

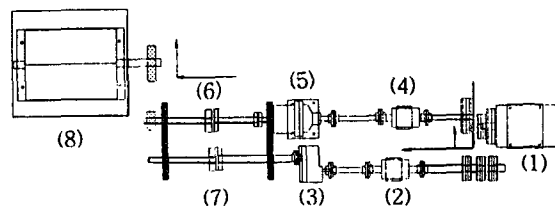
\* 강원대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험장치 및 구성

저속이고 부하토크가 큰 상황에서 높은 토크를 전달하고 효율을 높이기 위하여 유압변속기와 유성기어 변속기를 함께 이용할 수 있는 기계유압식 동력전달장치를 아래 그림1과 같이 구성하였다. 유압변속기는 2.7hp, 정격속도 3600rpm이고 최고 사용압력 150kgf/cm<sup>2</sup>, 최고 출력토크 20.58Nm인 DAIKIN사의 제품인 BDU-10L DMF를 사용하였다. 유성기어 변속기는 선기어 잇수는 28, 암의 잇수는 34, 링기어 잇수는 62개를 가지는 것으로 제작하였으며 선기어 부분을 유성기어 변속기의 입력으로 하였고 링기어 부분을 유압변속기에 의해 입력으로 속도를 조정할 수 있도록 하고 암 부분에 유압변속기와 동시에 부하를 가해서 유압변속기와 유성기어 변속기의 출력동력을 구할 수 있는 동력계와 연결하여 출력측으로 사용하였다. 유성기어 변속기의 속도비인  $e$  값은 -0.45이다. 유압변속기와 유성기어 변속기의 입력동력은 각 부분의 토크변환기를 통하여 측정하였으며 출력동력은 동력계를 이용하여 측정하였다.

기계유압식 동력전달장치는 동력의 일부를 기계적인 변속장치인 유성기어 변속기를 통해 전달하며 유성기어의 변속을 위해 유압장치인 유압변속기의 출력을 이용하는 구조로 되어있다. 기계유압식 동력전달장치는 2가지 방법의 전동을 구성할 수 있다. 첫째는 일반적인 경우로 유압변속기만을 이용하여 전동하는 경우로 이때는 유성기어 변속기 출력 측에 있는 전자클러치를 분리시키고 유압변속기 출력 측에 전자클러치를 연결하여 동력이 전달되도록 하였고 둘째는 부하토크가 크고 저속인 경우 동력은 유성기어 변속기를 통해서 바퀴 측에 전달되며 변속은 유성기어 변속기의 링 기어를 유압변속기로 구동시켜 CVT(Continuously Variable Transmission)의 기능을 하는 방법으로 이 경우는 유압변속기 출력 측의 전자클러치를 분리시키고 유성기어 출력 측에 전자클러치를 연결하여 동력이 전달되도록 하였다.



(1):Motor, (2)(4):Torque transducer, (3):HST, (5):Planeatgear, (6)(7):Electronic clutch, (8):Dynamometer

**Fig.1 Composition of experimental equipment.**

### 나. 실험방법

기계유압식 동력장치에서 유성기어 변속기의 암을 통해 동력을 부하측에 전달할 때 효율과

입출력동력을 측정하기 위해 유성기어 변속기의 입력속도는 845rpm, 640rpm으로 하였고 유압변속기의 입력속도는 2800rpm으로 하였다. 유성기어 변속기 입력동력은 유성기어 변속기의 선기어에 전달되고 유압변속기 출력동력은 링기어에 전달되어 유성기어 변속기 내부의 기어비에 의해 암을 통해 동력이 출력된다. 유압변속기의 사판각은 정, 역회전  $0^\circ, 3^\circ, 7^\circ, 13^\circ$ 로 하였다. 유성기어 변속기의 출력축을 통해 나온 동력은 타이밍 풀리를 이용하여 2:1로 감속하여 동력계에 전달하였다. 동력계에서는 부하토크를 단계별로 12Nm, 24Nm, 36Nm을 가했으며 각각의 부하토크에서의 출력동력을 측정하였다. 유성기어 변속기의 링기어축과 유압변속기의 출력축 간의 전동방법은 2:1의 기어비를 가지는 기어로 연결하였다.

#### 다. 기계유압식 전동장치의 이론적인 힘 분석

유압변속기의 사판각을 조정하여 유성기어변속기의 링기어 회전속도를 변화하고 동력계에서 부하토크를 단계적으로 주었을 때 측정된 입출력토크와 입출력속도를 기초로 유성기어 변속기에서 암과 선기어 및 링기어에 가해지는 힘과 토크를 구하였으며 이를 이용하여 유압변속기의 출력토크 및 효율을 구하였다. 유압변속기의 사판각이 정회전 방향이며 입력동력이 가해지는 링기어가 시계방향이면 선기어도 시계방향으로 회전하고 이에 암이 시계방향으로 회전하며 출력동력을 전동하는 경우 유성기어 변속기내의 유성기어에 가해진 힘 분포는 그림2와 같다. 암은 출력이 되고 선기어, 링기어는 입력이 되며 정회전인 경우 선기어와 링기어에서 유성기어에 가해진 가상 힘을 합쳐서 암 축의 출력이 된다.

우선 유성기어 변속기의 링기어의 토크와 회전속도를 이용하여 유압변속기의 출력토크와 출력속도를 구하였고 유성기어 변속기의 입력동력을 입력 축에 설치한 토크변환기를 통해 측정한 입력토크와 입력속도를 이용하여 구하였다. 유성기어 변속기에서 측정된 입력토크는 유성기어 변속기의 선기어 토크가 되므로 선기어를 구동하는 힘은 토크를 잇수 28인 기어의 반지름으로 나누어서 구해진다.

$$F_s = T_s / Z_s \quad (1)$$

여기서)  $F_s$  = 선기어의 힘(  $kg_f$  ),  $T_s$  = 선기어의 입력토크(kgm)

$$Z_s = \text{선기어의 반지름 (잇수28개)}$$

다음 동력계에서 부하토크를 가했을 때 동력계에서 측정된 출력토크는 암의 토크이므로 유성기어 변속기의 중심부에서 암까지의 거리로 나누어 암의 힘을 구하였다.

$$F_a = T_a / Z_a \quad (2)$$

여기서)  $F_a$  = 암의 힘(  $kg_f$  ),  $T_a$  = 암의 토크(kgm),  $Z_a$  = 암의 길이 (잇수 45개)

유성기어 변속기의 중심부에서 암 끝단까지의 거리는 선기어 와 유성기어의 반지름의 합이며 잇수 45인 기어의 반지름에 해당된다. 또한 동력계 전까지의 장치를 돌려주는 유압변속기의 무부하 토크가 존재한다. 따라서 동력계를 연결하지 않았을 때 기계유압식 장치의 무부하 소요동력을 이용하여 유압변속기의 입력동력과 링기어속도를 구하여 이를 무부하 토크

와 무부하 동력으로 계산하였다.

유성기어 변속기의 링기어의 힘은 앞에서 구한 암의 힘에서 선기어의 힘의 차를 이용하여 구하고 여기에 링기어까지의 거리인 링기어 반지름(잇수 62)을 곱하여 링기어의 토크를 구하였다.

$$F_r = F_a - F_s \quad (3)$$

$$T_r = F_r * Z_r \quad (4)$$

여기서)  $F_r$  = 링기어의 힘,  $T_r$  = 링기어의 토크,  $Z_r$  = 링기어의 반지름 (잇수 62)  
e값 -0.45를 이용하여 링기어의 속도를 구하고 유압변속기 출력축과 유성기어 변속기의 링기어가 2:1로 감속되므로 여기에 2를 곱하여 유압변속기의 출력속도를 구하였다.

$$-e = \frac{N_r * 2 - N_a}{N_s - N_a} \quad (5)$$

여기서)  $e$  = e 값 (-0.45),  $N_r$  = 링기어의 속도(rpm)

$N_a$  = 암의 속도(rpm),  $N_s$  = 선기어의 속도(rpm)

본 실험 장치의 구조상 유압변속기의 출력과 유성기어 변속기의 입력이 각 전동 유니트를 구동하는 무부하 소요동력을 담당한다. 전동 유니트에는 기어와 전동축 등의 mass inertia가 존재하는데 본 연구에서는 실험적으로 해석하였다. 즉 유성기어 변속기에 외부에서 토크가 가해지며 암에 전달되고 그림1과 같이 유성기어 변속기의 입력축인 선기어와 링기어에 동일한 힘으로 가해진다. 유압변속기의 출력토크는 링기어를 통해 전달된 외부 부하토크 외에 전동 유니트를 구동하는 무부하 토크를 더하여 구해진다. 따라서 유압변속기의 출력토크와 출력속도를 이용하여 실험에 의해 얻어진 유압변속기의 성능표에 의해 유압변속기 및 전체 기계 유압변속기의 효율을 구할 수 있다. 유압변속기의 사판각을 역회전으로 변화하면 링기어의 회전속도는 반시계방향이 되고 유성기어 변속기내에서 힘 분포는 그림3과 같다. 유성기어 변속기의 유성기어에 가해진 힘 분석에서 선기어는 시계방향, 링기어는 반시계방향이며 링기어의 회전속도가 작을 경우 유성기어 변속기의 유성기어 축에 연결된 암의 회전방향은 선기어 방향과 같이 시계방향이나 링기어의 회전속도가 커질 경우 암의 속도는 반시계방향이 된다. 이론적인 힘 분석 방법은 정회전인 경우와 같다.

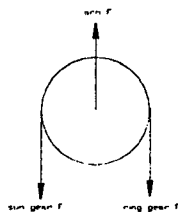


Fig.2 Force balance of planetary gear transmission for forward rotation.

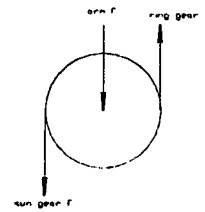


Fig.3 Force balance for planetary gear transmission for backward rotation.

### 3. 결과 및 고찰

기계유압식 동력전달장치의 전달동력 및 효율을 유압변속기만을 이용하여 구동하는 경우와 비교하기 위해 실험을 한 결과는 다음과 같다.

**Table 1 Comparison of efficiency between mechanical-hydraulic and hydraulic transmission at output torque 12 Nm and input speed 845rpm.**

| angle of swash plate | input power of hst(hp) | input power of planetary gear(hp) | total output power (hp) | output power of hst(hp) | eff. of mech-hydra. (%) | eff. of hst (%) |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| forward 3            | 1.64                   | 0.45                              | 0.34                    | 0.48                    | 39.15                   | 22.56           |
| forward 7            | 2.04                   | 0.44                              | 0.45                    | 0.84                    | 52.18                   | 41.67           |
| forward 13           | 4.09                   | 0.40                              | 0.68                    | 1.71                    | 53.16                   | 48.65           |
| backward 0           | 1.03                   | 0.44                              | 0.19                    | -                       | -                       | -               |
| backward 3           | 0.90                   | 0.32                              | 0.00                    | 0.11                    | 8.83                    | 47.77           |
| backward 7           | 2.47                   | -0.33                             | 0.08                    | 0.75                    | 38.78                   | 46.96           |
| backward 13          | 5.72                   | -0.37                             | 0.33                    | 1.31                    | 30.62                   | 35.14           |

우선 이론적 계산과정에서 구한 무부하 동력을 동력계 출력동력과 더하고 유압변속기의 입력동력과 유성기어 변속기의 입력동력을 더하여 효율을 구한 결과를 유압변속기만을 사용한 경우의 실험 값과 비교하였을 때 유성기어 변속기의 입력속도가 845rpm이고 동력계의 부하토크가 12Nm일 때 정회전인 경우, 효율이 유압변속기만을 사용한 경우보다 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 역회전인 경우의 효율을 비교하였을 때 기계유압식 동력장치를 사용하였을 때가 유압변속기만을 사용하였을 때보다 효율이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 기계유압식 동력전달장치에서 유압변속기의 출력속도가 역회전이 되어 유성기어의 링기어에 동력이 전달될 때 동력이 유성기어 변속기의 선기어를 통해 역류가 되어 입력동력을 더 소요하기 때문이다. 기계유압식 동력전달장치를 사용할 경우 유압변속기만을 사용하였을 때보다 효율이 5%내지 15%정도 증가한다.

**Table 2 Comparison of efficiency between mechanical-hydraulic and hydraulic transmission at output torque 12 Nm and input speed 640rpm.**

| angle of swash plate | input power of hst(hp) | input power of planetary gear(hp) | total output power (hp) | output power of hst(hp) | eff. of mech-hydra. (%) | eff. of hst (%) |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| forward 3            | 1.64                   | 0.37                              | 0.28                    | 0.18                    | 22.83                   | 5.48            |
| forward 7            | 2.19                   | 0.39                              | 0.40                    | 0.60                    | 38.63                   | 27.85           |
| forward 13           | 3.31                   | 0.36                              | 0.66                    | 1.90                    | 69.87                   | 66.46           |
| backward 0           | 0.82                   | 0.24                              | 0.41                    | -                       | -                       | -               |
| backward 3           | 1.71                   | -0.01                             | 0.13                    | 0.18                    | 19.04                   | 18.71           |
| backward 7           | 2.82                   | -0.05                             | 0.01                    | 0.29                    | 11.08                   | 12.41           |
| backward 13          | 4.26                   | -0.11                             | 0.15                    | 0.76                    | 22.27                   | 23.94           |

유성기어 변속기의 입력속도가 640rpm이고 동력계의 부하토크가 12Nm일 때, 정회전인 경

우 이론적 계산과정에서 구한 무부하 동력을 동력계 출력동력과 더하고 유압변속기의 입력 동력과 유성기어 변속기의 입력동력을 더하여 효율을 구한 결과를 유압변속기만을 사용한 경우의 실험 값과 비교하였을 때, 유성기어 변속기의 입력속도가 845rpm이고 부하토크가 12Nm인 경우와 마찬가지로 효율이 유압변속기만을 사용한 경우보다 높게 나타나고 역회전인 경우의 효율을 비교하였을 때는 기계유압식 동력장치를 사용하였을 때가 유압변속기만을 사용하였을 때보다 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

그러나 유성기어 변속기의 입력속도가 845rpm인 경우가 입력속도 640rpm인 경우보다 정, 역회전인 경우 모두 효율이 더 높아짐을 알 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 실험에서는 외부부하에 따른 기계유압식 동력전달장치의 속도의 변화 폭 및 전달동력과 효율을 측정하고 유압변속기만을 사용한 경우의 전달동력 및 효율과 비교하여 기계유압식 동력전달장치의 성능을 평가하여 기계유압식 동력전달장치를 사용하는 농작업기의 설계에 필요한 기초 자료를 얻고자 하였다.

가. 기계유압식 변속기의 유성기어에 작용하는 힘을 이론적으로 분석한 결과 입출력에서 측정된 토크에서 계산된 힘과 일치하였다.

나. 기계유압식 동력전달장치를 사용할 경우 유성기어 변속기의 입력속도에 관계없이 동일한 유압변속기의 입력속도와 부하토크에서 정회전인 경우, 유압변속기만을 사용한 경우보다 효율이 5%내지 15%정도 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 역회전인 경우 기계유압식 동력전달장치를 사용한 경우 유압변속기만을 사용한 경우보다 효율이 떨어짐을 알 수 있는데 이는 기계유압식 동력전달장치에서 유압변속기의 출력속도가 역회전이 되어 유성기어의 링기어에 동력이 전달될 때 동력이 유성기어 변속기의 선기어를 통해 역류가 되어 입력동력을 더 소요하기 때문이다.

다. 기계유압식의 유성기어 입력속도가 높은 경우 효율이 증대되었다.

#### 5.참고문헌

1. 강희석, "폐회로 유압변속기의 설계", 서울대학교 공학석사 학위논문, 1987.
2. 정오진, "유압기계식 무단 변속장치의 동특성 해석 및 제어에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1996.
3. Maistrelli,R., "Pruely Hydrostatic High Ratio Transmission", SAE paper 790042, 1979. paper 841099, 1984.
4. Russell,W. and Henke, P.E., "Fluid Power System and Circuits", Hydraulics & Pneumatics Magazine, 1983.
5. Stroemple, P.J. and Stricklin, C., "An Automotive Style Hydrostatic Transmission Control", SAE paper 851505, 1985.