

농업용 트랙터의 기계유압식 변속기에 대한 동력전달 특성 분석 Analysis of Power Transmission Characteristics on the Hydromechanical Transmission for Agricultural Tractor

박영준 · 김수철 · 이근호

Young Jun Park, Su Chul Kim and Geun Ho Lee

1. 서 론

트랙터는 농업 생산에 필요한 여러 종류의 작업기를 견인하고 구동하는 등 다양한 기능을 수행하는 복합 기계로서, 주로 로터리나 쟁기를 이용한 논농사 작업이나 모어, 로더, 베일러 등의 다양한 작업기를 이용한 작업을 수행한다. 이와 같이 트랙터는 승용차와는 달리 다양한 필드 작업을 목적으로 하는 기계이므로 엔진에서 작업기로 동력을 전달하는 변속기의 중요도가 매우 크다¹⁾.

최근 농업용 트랙터가 대형화됨에 따라 연비, 작업 효율, 작업 편의성 및 승차감을 향상시키기 위하여 트랙터용 변속기도 무단 변속기(CVT, continuously variable transmission)로 변화되는 추세이다. 무단변속기는 동력을 전달하는 구조에 따라 다양한 방법이 있으며, 트랙터용 무단변속기로는 정유압 방식(hydrostatic type, HST)과 기계유압식 방식(hydromechanical type, HMT)이 주로 사용된다.

HST는 동력전달과정에서 직접적인 기계접촉이 없으므로 내구성이 우수하고, 출력밀도가 매우 높으며 설치공간이 작다는 장점이 있다. 또한, 저속에서 기동력이 우수하고 변속 시에 충격이 거의 없으며, 전·후진 조작이 용이하다. 그러나 효율이 낮다는 치명적인 단점으로 인하여 소형 트랙터에 주로 적용된다²⁾.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 HST와 기계식 변속기를 결합한 HMT가 개발되었다. HMT는 베리에이터(variator) 역할을 하는 HSU(hydrostatic unit)와 유성기어세트(PGS, planetary gearset)로 구성된다. HMT는 HSU를 통하여 동력의 일부를 전달하고 나머지 동력은 HSU보다 상대적으로 효율이 높은 기계식 변속기를 통하여 전달하기 때문에 HSU의 무단변속기 능과 기계식 변속기의 높은 효율을 갖는 장점이 있다. 또한, 엔진을 최적 운전 곡선(OOL, optimal operating line)상에서 운전되도록 제어할 수 있기 때문에 배기가스 감소, 연비개선, 운전 성능향상이 가

능하다³⁾.

본 연구는 트랙터용 HMT의 동력전달 특성 분석을 위한 네트워크 모델을 개발하고, 개발된 모델을 상용 소프트웨어⁴⁾를 이용하여 검증하며, 검증된 네트워크 모델로 HMT가 장착된 트랙터의 동력 특성을 분석하기 위하여 수행되었다.

2. 연구대상 트랙터용 HMT

연구 대상 HMT는 그림 1과 같이 PGS, HSU 및 기타 기어트레인으로 구성된 주변속 장치, 4단의 부변속 장치와 전후진 변속 장치로 구성된다. 기계식 변속부인 PGS는 복합 PGS와 볼프람(Wolfram) PGS가 복합적으로 구성되어 있고⁵⁾, 주변속장치의 출력이 캐리어(C)일 때는 복합 PGS로, 출력이 유성 2단 선기어(S2)일 때는 볼프람 PGS로 작동하며, 엔진의 동력을 HSU와 부변속 장치로 분기하는 역할을 한다. 유압식 변속부인 HSU는 HMT가 무단 변속을 수행할 수 있도록 베리에이터로서의 역할을 한다.

부변속 장치와 전후진 변속 장치에 장착된 6개의 클러치는 기능에 따라 출력축의 회전방향을 결정하는 방향클러치(KF, KR)와 변속비를 조절하는 속도클러치(K1, K2, K3, K4)로 분류되며, 변속비가 결정되기 위해서는 방향클러치와 속도클러치에서 각각 1개씩 총 2개의 클러치가 결합되어야 한다.

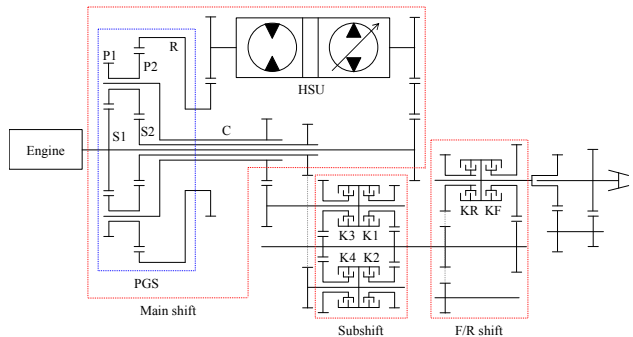


Fig. 1 Schematic structure of HMT for tractor

3. HMT 주변속 장치의 네트워크 모델

그림 2는 HMT의 주변속 장치를 네트워크 모델로 나타낸 것으로, 기어, HSU 등의 전동 요소와 축으로 구성되며, 노드와 축은 각각 15개로 설정되었다. 그림 2에서 G1-G3은 기어세트, i_1 - i_3 은 G1-G3의 기어비를 나타낸 것이다. 엔진으로부터 기어와 HSU를 거쳐 PGS로 전달된 동력은 주변속 장치가 1단 또는 3단일 경우(그림 1의 클러치 K1 또는 K3가 연결될 때) PGS의 캐리어(C)에서 출력축(shaft 14)으로 전달되며, 2단 또는 4단일 경우(그림 1에서 클러치 K2 또는 K4가 연결될 때) PGS의 2단 선기어(S2)에서 출력축으로 전달된다.

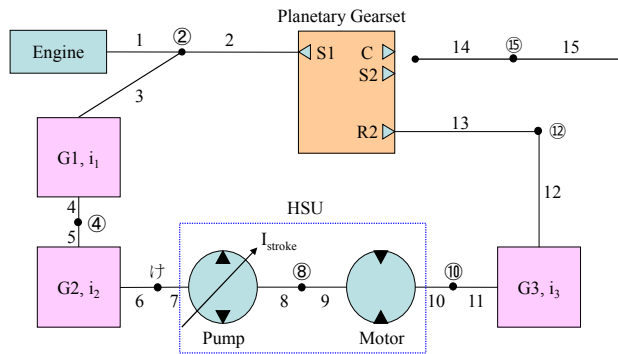


Fig. 2 Network model of main shift

그림 2의 네트워크 모델에 대하여 각 노드에서의 토크, 속도 관계식은 식 (1)과 (2)와 같이 정리할 수 있다^{6,7,8}.

$$\vec{M}_\omega \cdot \vec{\omega} \cdot \vec{\beta}_\omega \quad (1)$$

$$\vec{M}_T \cdot \vec{T} = \vec{\beta}_T \quad (2)$$

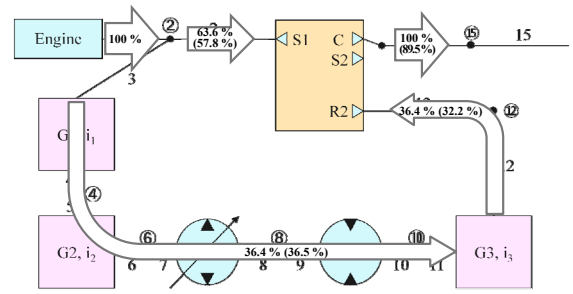
여기서, \vec{M}_ω , \vec{M}_T 는 각각 속도, 토크 방정식의 계수로 구성되는 정방행렬, $\vec{\omega}$, \vec{T} 는 각 노드에서의 속도, 토크 벡터, $\vec{\beta}_\omega$, $\vec{\beta}_T$ 는 주어진 입력 속도와 토크로 구성된 경계값 벡터이다.

4. HMT의 동력전달 특성 분석

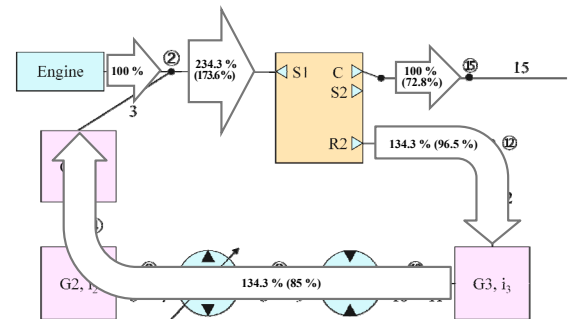
4.1 HMT 주변속 장치의 동력 특성 분석

개발된 네트워크 모델에 대해서 식 (1)과 (2)를 이용하여 HSU 스트로크에 따른 HMT 주변속 장치의 토크, 속도, 동력, 효율을 계산하였으며, 그 결과는

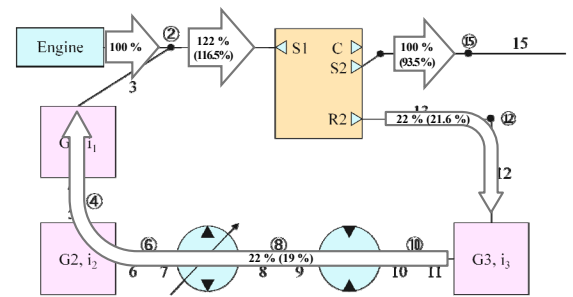
그림 3과 같다.



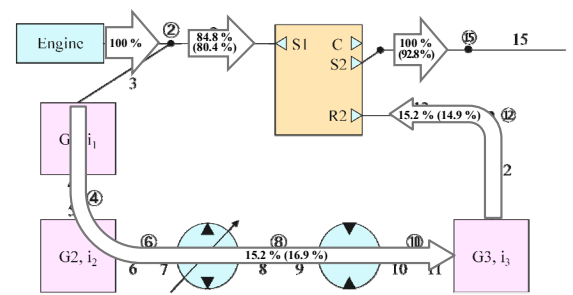
(a) Carrier output & $I_{stroke} = -0.5$, power-split



(b) Carrier output & $I_{stroke} = +0.5$, power-circulation



(c) Sun 2 output & $I_{stroke} = -0.5$, power-circulation



(d) Sun 2 output & $I_{stroke} = +0.5$, power-split

Fig. 3 Power flow of HMT main shift wrt output and HSU stroke

그림 3(a)는 I_{stroke} 가 -0.5이고 주변속 장치가 1단 또는 3단일 때의 해석 결과이다. 그림의 화살표에 표시된 수치는 입력 동력에 대한 동력 흐름의 퍼센트 비율이며, 괄호 밖의 수치는 동력 손실을 고려하지 않

을 때, 괄호 안의 수치는 동력 손실을 고려했을 경우의 비율을 나타낸 것이다. 엔진 동력은 HMT의 입력 동력이 되며 축 1, 2, 3이 만나는 노드 ②에서 HSU와 PGS의 S1로 동력이 분기된다. HSU로 전달된 동력은 다시 PGS의 R2로 전달되어 PGS에서 합쳐지며 전체 효율은 89.5%이다.

그림 3(b)는 그림 3(a)와는 I_{stroke} 만 +0.5로 다르고, 나머지 조건은 동일한 경우의 해석 결과이다. 축 1, 2, 3이 만나는 노드 ②에서 HMT의 입력 동력과 HSU로부터 순환된 동력이 합쳐져서 PGS의 S1로 전달된다. PGS의 R2에서 HSU로 순환된 동력은 엔진 동력의 85%나 된다. 축 2는 엔진 동력보다 173.6% 큰 동력이 작용하므로, 축 2와 관련된 전동 요소의 강도 설계 시 주의해야 한다. HMT 주변속 장치의 전체 효율은 72.8%이며, 효율이 낮은 이유는 엔진 동력의 85%에 해당하는 순환 동력이 상대적으로 동력 손실이 큰 HSU에 전달되기 때문이다.

그림 3(c)와 3(d)는 주변속 장치가 2단 또는 4단일 때의 해석 결과로서, 그림 3(a), 3(b)와는 반대로 I_{stroke} 이 -0.5일 때 동력 순환이 발생하고, I_{stroke} 이 +0.5일 때 동력 분기가 발생한다.

HMT는 대부분 펌프 동력분기 구조를 채택하고 있기 때문에 일부 변속 구간에서는 동력이 순환하여 입력 동력보다 큰 동력이 변속기 구성 요소에 전달된다. 그러므로 HMT 설계 시 HSU의 용량을 초과하는 동력이 전달되지 않도록 설계해야 하며, 클러치, 기어, 축 등의 전동 요소의 강도 설계도 고려해야 한다. 또한, 큰 동력이 HSU를 경유할 때 HSU의 동력 손실이 커져서 전체적으로 HMT의 효율을 감소시킬 수 있다.

4.2 HMT 가 장착된 트랙터의 동력 특성 분석

네트워크 모델을 이용하여 트랙터 주행속도에 따른 HSU 스트로크, 효율 및 주행 성능을 분석하였다.

그림 4는 주행속도에 대한 트랙터의 HSU 스트로크 변화와 동력 전달 효율을 그래프로 나타낸 것이다. HMT는 HSU 스트로크가 0.87에서 주변속 1단으로 출발한다. HSU 스트로크가 0.87에서 -0.72로 변화함에 따라 주행 속도가 증가하며 스트로크가 -0.72가 되면 주행 속도는 9.68 km/h가 되고 주변속 2단으로 변속된다. 변속은 클러치 대 클러치(clutch-to-clutch) 제어에 의해 이루어진다. 주변속 2단에서 주행 속도를 증가시키기 위해서는 HSU 스트로크를 -0.72에서 0.03까지 변화시켜야 하며, 스트로크가 0.03이 되면

주행 속도는 13.18 km/h가 되고 주변속 3단으로 변속된다. 주변속 3단에서 주행 속도 증가를 위해서는 HSU 스트로크를 0.03에서 -0.72까지 변화시키며, 스트로크가 -0.72이 되면 주행 속도는 24.89 km/h가 되고 주변속 4단으로 변속된다. 주변속 4단에서는 HSU 스트로크를 -0.72에서 +1까지 변화시킬 수 있으며 stroke이 +1일 때 트랙터는 45.56 km/h의 최대 속도에 도달한다. 이와 같이 HMT는 주변속 장치의 구성에 따라 HSU 스트로크를 연속적으로 변화시켜 변속을 수행하며 트랙터의 주행 속도를 결정한다.

트랙터의 효율은 그림 4와 같이 각 변속단마다 주행 속도가 증가함에 따라 증가하다가 최대 효율점에 도달한 후 다시 감소하는 형태를 나타낸다. HMT의 동력 전달 효율은 각 변속단에서 HSU 스트로크가 0일 때 가장 높게 나타나는데, 그 이유는 동력 손실이 큰 HSU로의 동력 전달이 없고 모든 동력이 기어트레인으로 구성된 기계식 변속부만으로 전달되기 때문이다.

그림 5는 주행 속도에 대한 트랙터의 구동륜 토크를 도시한 것으로 트랙터 출력축의 토크-속도 특성을 나타낸 것이다. 트랙터의 동력원인 디젤 엔진은 출력이 일정하고 토크와 속도가 서로 반비례 관계인 이상적인 토크-속도 특성과는 거리가 멀다. 즉, 출력과 토크는 어떤 한계 속도에 이를 때까지 계속 증가되거나 한계 속도를 지나면 급격히 감소하며, 최대 출력은 최대 토크가 발생하는 속도보다 항상 높은 속도에서 발생한다. 그러나 변속기를 사용함으로써 출력축의 토크-속도 특성을 이상적으로 변경할 수 있다. HMT는 그림 5와 같이 다른 종류의 변속기에 비하여 구동륜에서의 토크-속도 특성을 좀 더 이상적으로 변경해 준다.

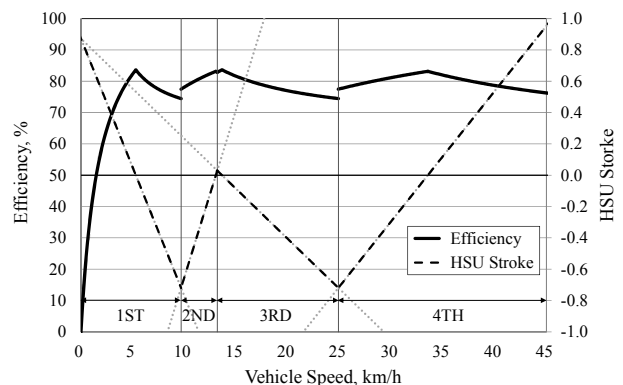


Fig. 4 HSU stroke and efficiency curve for tractor with HMT

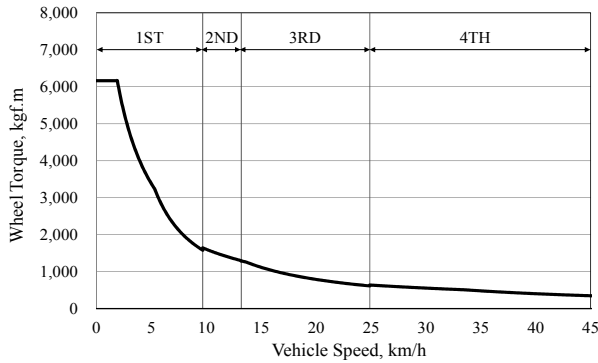


Fig. 5 Torque-speed curve for tractor with HMT

5. HMT의 네트워크 모델 검증

개발된 네트워크 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여 상용 소프트웨어⁴⁾를 이용한 모델 검증을 수행하였다. 그림 6은 상용 소프트웨어를 이용한 HMT 모델을 도시한 것이다. 상용 소프트웨어는 기계식 변속부인 PGS와 유압식 변속부인 HSU로 구성된 페루프 시스템을 반복 계산하여 유압펌프, 유압모터 및 출력축의 토크와 속도를 얻는다.

엔진의 토크와 속도를 290.11 Nm와 2300 rpm로 하였을 때 주행 속도에 따른 트랙터의 효율과 구동륜의 토크를 비교하였다. 비교 분석 결과, 두 모델에서 효율과 구동륜 토크의 결과가 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 그러므로 개발된 네트워크 모델은 HMT의 동력 전달 특성을 해석하는데 적합하다고 판단된다.

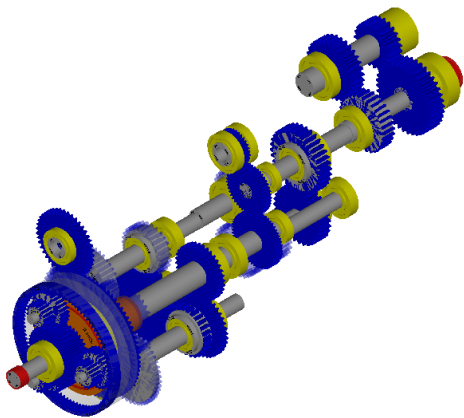


Fig. 6 HMT model using commercial software

6. 결 론

본 연구의 목적은 트랙터용 HMT에 대한 네트워크 모델을 개발하고, 개발된 모델을 상용 소프트웨어를 이용하여 검증하며, 검증된 모델로 HMT가 장착된 트랙터의 동력 전달 효율과 구동륜의 토크 등 동력 전달 특성을 분석하는 것이다.

주변속 장치의 동력 전달 특성을 분석하기 위하여 HSU, 기어 등 전동 요소의 동력 손실이 고려된 네트워크 모델을 개발하였다.

개발된 네트워크 모델을 이용하여 주변속 장치의 동력 전달 특성을 해석하였으며, HSU의 스트로크에 따라 주변속 장치의 동력이 분기될 수도, 순환될 수도 있음을 확인하였다.

개발된 네트워크 모델을 확장하여 HMT가 장착된 트랙터의 동력 전달 특성인 HSU 스트로크, 효율 및 구동륜의 토크를 분석하였다. HMT는 HSU 스트로크를 연속적으로 변화시켜 변속을 수행하며 트랙터의 주행 속도를 증가시킨다. 트랙터의 효율은 각 변속단마다 주행 속도가 증가함에 따라 증가하다가 최대 효율점에 도달한 후 다시 감소하는 형태를 나타낸다.

개발된 네트워크 모델을 검증하기 위하여 트랙터의 효율과 구동륜 토크에 대한 해석 결과를 상용 소프트웨어의 해석 결과와 비교하였다. 비교 분석 결과, 두 모델에서 효율과 구동륜 토크의 결과가 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 그러므로 개발된 네트워크 모델은 HMT의 동력 전달 특성을 분석하는데 매우 적합하다고 판단된다. 또한, 검증된 네트워크 모델은 다른 형태의 HMT에 대한 동력 성능과 효율을 예측하는데 활용될 수 있다고 생각된다.

참고 문헌

- 1) C. E. Goering, M. L. Stone, D. W. Smith and P. K. Turnquist, *Off-road vehicle engineering principles*, The American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Miami, USA (2003).
- 2) T. Muto, H. Kato, K. Sakamoto and H. Yamada, Digital control of hydrostatic transmission system driven by differential pulse width modulation, *Transaction of the JSME*, 61(590) (1995) 3983-3990.
- 3) G. H. Lee, D. S. Kim and D. S. Jung, Concept design for HCVT(hydro-mechanical-type continuously variable transmission) for city bus application, *SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition*, Illinois, USA (2004).
- 4) KISSSoft AG, *KISSSoft Release 03/2012 User Manual*, Bubikon, Switzerland (2013).
- 5) J. Looman, *Zahnradgetriebe-grundlagen, konstruktionen, anwendungen in fahrzeugen*, Springer, Berlin, Germany (2009).
- 6) D. H. Sung, H. E. Kim, G. H. Lee and H. S. Kim, Power transmission characteristics of a

hydromechanical transmission, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 25 (11) (2001) 1854-1862.

- 7) D. H. Sung, H. E. Kim, G. H. Lee and H. S. Kim, Analysis of power characteristics for a hydromechanical transmission considering HSU flow loss, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 26 (6) (2002) 1149-1158.
- 8) D. H. Sung, Power characteristics and design for power split transmission system, Unpublished doctoral thesis, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (2007).

[저자 소개]

박영준

E-mail : yjpark77@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7994

2006년 서울대학교 바이오시스템공학과 (농업기계) 공학박사. 2006년~현재 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 선임연구원 풍력발전기 기어박스(중속기, 피치/

요 감속기), 건설기계/농기계 변속기 관련 연구에 종사. 유공압건설기계학회, 대한기계학회, 한국생산제조시스템학회, 한국기계가공학회, 한국농업기계학회 등의 회원, 공학박사



[저자 소개]

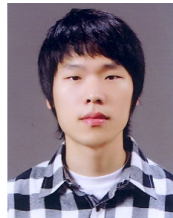
김수철

E-mail : sckim@lsmtron.com

Tel : 031-688-5408

2010년 서울대학교 바이오시스템공학과 석사. 2010년~현재 엘에스엠트론 중앙연구소 주임연구원. 2013년~현재 서울대학교 바이오시스템공학과 박사과정.

트랙터 변속 시스템 설계에 종사. 한국농업기계학회, 한국자동차공학회 등의 회원, 공학석사



이근호

E-mail : ghlee762@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7161

1997년 University of Connecticut (USA) 기계공학과 공학박사. 1997년~현재 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원(연구실장)

건설기계, 풍력발전기 등 산업용 기계시스템의 동력전달장치 관련 연구에 종사. 유공압건설기계학회, 대한기계학회, 한국생산제조시스템학회 등의 회원, 공학박사.

