

트랙터 구동장치의 부하 스펙트럼 분석

Analysis of Load Spectrum of Tractor Drive Line

김대철*	이주완**	김경욱**
정회원		정회원
D.C.Kim	J.W.Lee	K.U.Kim

1. 서론

변속기, 차동장치, 최종감속장치, 차륜 구동축 등을 포함하는 구동장치는 전체 트랙터의 크기와 제작비용에 큰 영향을 미친다. 따라서 구동장치에 대한 적절한 설계가 필요하며, 이를 위해서는 구동장치에 작용하는 부하에 대한 정확하고 충분한 데이터가 요구된다. 또한, 설계 검증에 위한 실내 내구시험에 있어서도 실제 농작업 조건에서 측정된 부하를 적용하여야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 필요성 때문에 독일, 미국 등 선진국에서는 자국의 농작업 조건에서 개발한 부하 스펙트럼을 이용하여 트랙터 변속기의 설계와 내구성 시험을 수행하고 있다. 그러나 국내에서는 아직 농작업 조건을 고려한 부하 스펙트럼이 개발되어 있지 않다. 따라서, 부하 스펙트럼을 기초로 한 구동장치의 설계 및 내구성 시험이 이루어지지 못하고 있다.

트랙터는 다양한 형태의 작업을 다양한 작업 환경에서 수행하고 있다. 트랙터 작업 중에서 경운 작업은 작업 시간이 길고 부하가 가장 큰 작업이므로 경운 작업의 부하를 구동장치의 설계와 신뢰성 시험에 적용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 각종 토양 조건에서 경운 작업시 구동장치에 작용하는 부하를 측정하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 경운 작업 실태 조사

본 연구에서는 실험 방법과 부하 스펙트럼 작성의 근거를 마련하기 위하여 엔진 출력 범위가 35~52 ps에 해당하는 트랙터를 대상으로 전국 19개 지역, 36명의 농민에게 설문 조사를 실시하였다.

나. 실험 장치 구성

변속기 입력 토크를 측정하기 위하여 변속기 입력축에 축방향과 45° 경사로 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 휘스톤 브리지 회로를 구성하였다. 스트레인 게이지의 출력 신호는 비접촉식 무선 시스템을 이용하여 수신하였다. 그림 1은 변속기 입력축에 스트레인 게이지

* 동양물산기업(주)

** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

와 무선 시스템이 부착된 모습을 나타낸 것이다.

차륜 구동축 토크 변환기는 그림 2와 같이 차륜 구동축과 구동 타이어의 휠디스크 사이에 부착할 수 있도록 설계하였으며, 토크 변환기의 센서는 4개의 스트레인 게이지를 토크 변환기 축에 축방향과 45° 경사로 부착하여 휘스톤 브리지 회로를 구성하였다. 센서 부착 부위는 감도를 높이기 위하여 다른 부분보다 직경을 작게 하였으며 스트레인 게이지의 출력 신호는 토크 변환기 한쪽 끝에 부착된 슬립링을 통하여 자료수집장치로 전송 되도록 하였다.

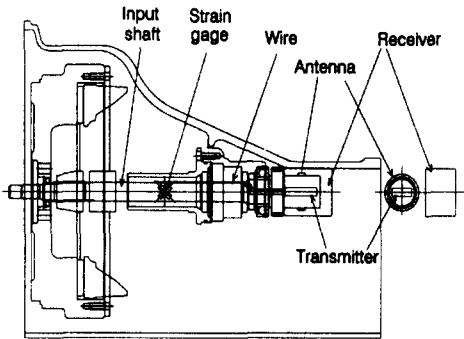


Fig. 1. Input torque meter designed for input shaft of transmission

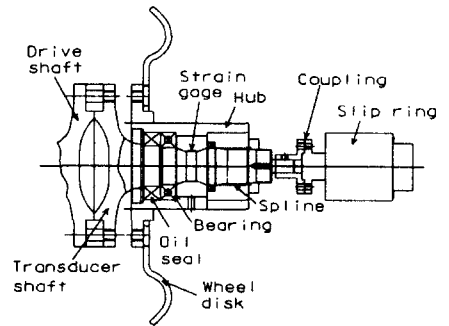


Fig. 2. Wheel torque meter mounted on driving wheel shaft

차륜 구동축 회전수는 차륜 토크 변환기에 연결된 슬립링의 회전부에 로터리 엔코더를 부착하여 측정하였고, 트랙터의 실제 주행속도는 트랙터 선단에 레이더 센서를 부착하여 측정하였다. 엔진 회전수는 발전기에서 발생하는 펄스수를 이용하여 측정하였다. 측정 시스템을 블록선도로 나타내면 그림 3과 같다.

나. 실험방법

시험용 트랙터에 실험 장치를 그림 4와 같은 위치에 부착하고, 쟁기는 3점 히치에 부착하였다. 차륜 구동축 토크 변환기는 후륜의 좌, 우 2개소에 설치하고, 로터리 엔코더는 후륜 우측에만 설치하였다. 본 연구에서는 후륜의 부하만 측정할 수 있도록 실험 장치를 구성하였기 때문에 구동 방식은 후륜 구동으로 설정한 후 실험하였다.

포장 시험은 5개의 서로 다른 토양에서 실시하였으며 토양 조건은 표 1과 같다. 지역별로는 용인의 밭 2개소, 수원의 논과 밭 각 1개소, 철원의 논 1개소이다. 부하 측정은 M4단 (7.6 km/h)과 H1단(10.3 km/h)으로서 변속 단수 2수준, 좌갈이와 우갈이 2수준으로 실시하였으며, 엔진 회전수는 정격 회전수로, 경심은 15~20 cm로 하였다. 그리고 포장 시험시 자료 수집 장치의 샘플링 속도는 333.3 Hz로 설정하였다.

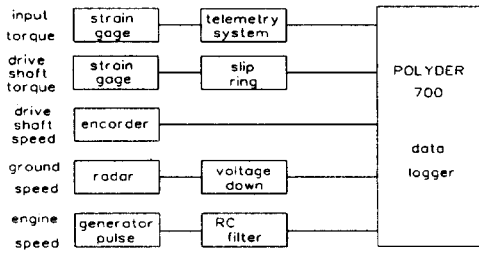


Fig. 3. Block diagram of data acquisition system

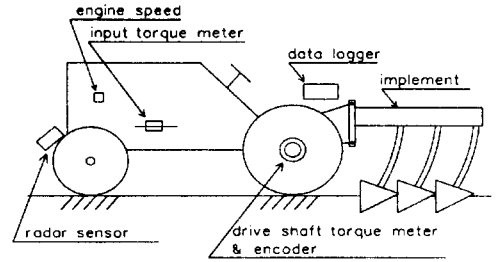


Fig. 4. Measuring instruments installed on experimental tractor

Table 1. Soil conditions of plots used for load measurement

Plot	Location	Surface type	Soil type	Mean cone index at depth of, kPa			Mean Moisture content, %
				0 cm	5 cm	10cm	
I	Yongin	Dry Field	Sand	735	931	-	23.2
II	Yongin	Dry Field with grass	Sand	46	600	846	25.3
III	Suwon	Paddy field with stubble	Loamy sand	407	584	600	30.5
IV	Suwon	Dry Field with grass	Sand	423	593	858	24.2
V	Cheolwon	Paddy field with stubble	Sandy loam	692	907	-	35.6

다. 부하 스펙트럼 분석

부하 스펙트럼은 트랙터가 전형적인 작업 조건에서 작업을 수행할 때 측정된 시간 함수의 부하를 통계적으로 처리하여 직교 좌표계의 세로축에 부하 수준, 가로축에 각 부하 수준의 빈도수를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 레인플로우법(Rainflow counting)을 이용하여 각각의 부하에 대한 발생 빈도를 결정하였다. 레인플로우법은 토크의 평균 응력과 응력의 크기를 고려하여 변형율-시간 선도에서 변형율 히스테리시스 루프를 세는 방법이다.

부하 스펙트럼의 부하 크기를 계산할 때는 평균 하중을 고려하는 Smith-Watson-Tapper식을 이용하였고, 빈도수는 예상되는 부하의 최대값을 32등분하여 각 구간에서의 빈도수를 세었다.

3. 결과 및 고찰

가. 경운 작업 실태

경운 작업의 변속 단수는 H1단이 51.4%로 사용 빈도가 가장 높고 M4단을 포함하면 그

사용 빈도는 전체의 62.5%를 차지하였다. 경운 작업의 경심은 논과 밭 모두 10~30cm 정도였고, 평균적으로 논은 17.3cm, 밭은 19.7cm이었다. 연간 경운 작업 시간은 최저 21시간에서 최대 300시간으로, 평균 131시간이었다.

나. 부하 스펙트럼

작성된 부하 스펙트럼을 비교 분석한 결과 급출발이 아닌 경우 출발시의 부하 스펙트럼은 정상 작업에서 보다 부하의 크기만 작을 뿐 스펙트럼 형상에는 차이가 없었으며, 좌,우 구동축의 부하 스펙트럼에서도 그 차이는 크지 않았다. 변속기 입력축 부하는 엔진 폭발에 의한 고주파 성분이 포함되어 있기 때문에 연속한 5개의 부하 토크를 평균하여 작성한 부하 스펙트럼이 보다 유용한 것으로 판단되었다. 경운 속도의 변화에 따른 부하 스펙트럼의 차이는 차륜 구동축 보다 변속기 입력축에서 크게 나타났으며 속도가 빠를수록 같은 빈도수에서 큰 부하 토크를 나타내었다. 토양 조건의 변화에 따른 차이는 부하 스펙트럼의 크기 뿐 아니라 형상에서도 큰 차이가 나타났으며 결과는 그림 5, 6, 7, 8과 같다.

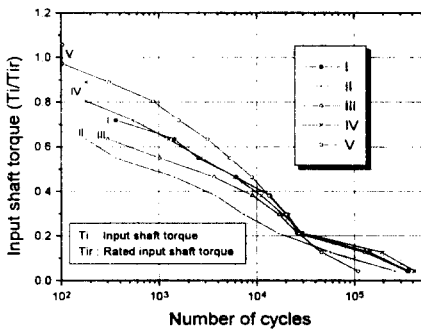


Fig. 5. Load spectra of input shaft under five soil conditions with M4 gear

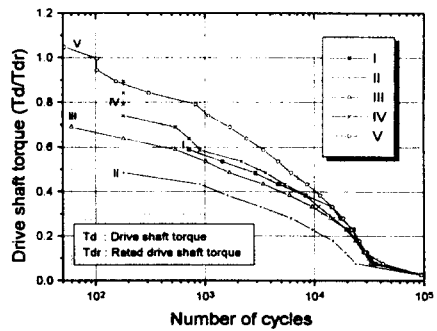


Fig. 6. Load spectra of drive shaft under five soil conditions with M4 gear

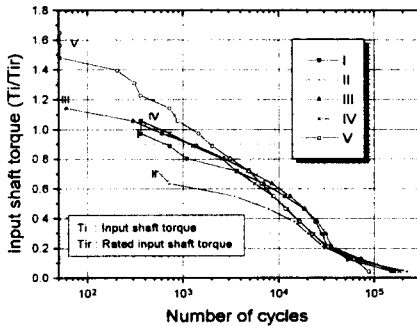


Fig. 7. Load spectra of input shaft under five soil conditions with H1 gear

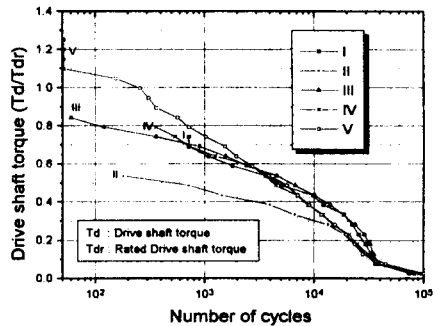


Fig. 8. Load spectra of drive shaft under five soil conditions with H1 gear

다. 종합 부하 스펙트럼

종합적인 부하 스펙트럼을 작성하기 위해서는 각각의 실험 조건에서 얻은 결과들을 적절한 비율로 더하여 수명 시간만큼 시간을 늘여야 한다. 트랙터의 수명을 10년으로 가정하여 총 사용시간을 3000시간으로 하였다. 이 때, H1단과 M4단의 사용 비율은 80대 20이었고, 연간 최대 쟁기 작업 시간은 300시간이었다. 수원지역의 종합 부하 스펙트럼을 전국을 대표하는 조건으로 가정하였고, 속도에 따른 비율은 설문 조사의 결과를 따랐으며, 논과 밭의 비율은 전국 논과 밭의 면적 비율인 65대 35로 계산하였다. 철원 지역의 경우에는 쟁기 작업 부하가 크기 때문에 M4단의 사용율이 높다고 판단되어 H1단과 M4단의 비를 60대 40으로 하였으며, 논작업이 위주인 것을 고려하여 논에 대해서만 종합 부하 스펙트럼을 구하였다. 또한, 철원에서 종합적인 부하 스펙트럼과 수원에서의 종합적인 부하 스펙트럼을 40대 60의 비율로 더하여 전체 종합적인 부하 스펙트럼을 작성하였는데, 이것은 국내의 일반적인 조건보다 가혹한 조건을 가정한 것이다. 종합적인 부하 스펙트럼은 그림 9, 10과 같다.

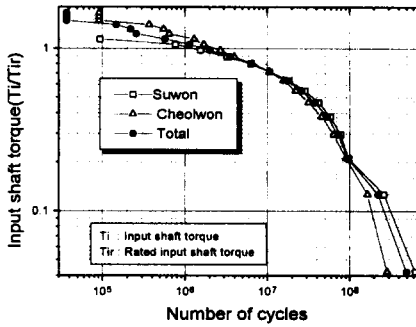


Fig. 9. Total load spectrum of input shaft in log-log scale

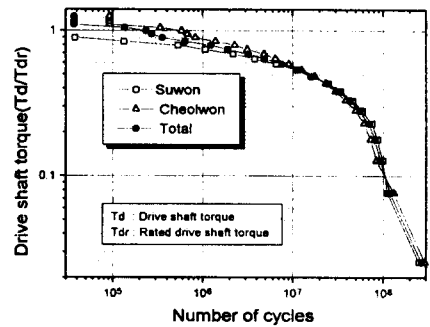


Fig. 10. Total load spectrum of drive shaft in log-log scale

4. 요약 및 결론

본 연구는 국내의 농작업 조건에서 트랙터 구동장치에 작용하는 부하 스펙트럼을 분석하기 위한 것으로서, 경운 작업시 구동장치에 작용하는 부하를 측정하기 위한 포장 실험을 실시하였다.

부하 측정에 앞서 설문 조사를 실시하여 경운 작업 실태를 조사하였으며, 설문 조사 결과에 따라 부하 측정 방법을 결정하고, 부하 스펙트럼을 작성하였다. 또한, 부하를 측정하기 위하여 변속기의 입력축 토크 변환기와 차륜 구동축 토크 변환기를 제작하여 계측용 트랙터에 설치하였다.

부하 측정은 용인의 밭 2개소, 수원의 논과 밭 각 1개소, 철원의 논 1개소의 토양을 대상으로 변속 단수 2수준으로 실시하였다.

측정된 부하 토크를 레인플로우(Rainflow)법과 Smith-Watson-Topper법을 이용하여 부하 구간별 빈도수로 나타내었다.

부하 스펙트럼을 비교 분석한 결과 급출발이 아닌 경우 출발시의 부하 스펙트럼은 정상 작업에서 보다 부하의 크기만 작을 뿐 스펙트럼 형상에는 차이가 없었으며, 좌,우 구동축의 부하 스펙트럼에서도 차이는 크지 않았다. 경운 속도의 변화에 따른 부하 스펙트럼의 차이는 차륜 구동축 보다 변속기 입력축에서 크게 나타났으며 속도가 빠를수록 같은 빈도수에서 큰 부하 토크를 나타내었다. 토양 조건의 변화에 따른 차이는 부하 스펙트럼의 크기 뿐 아니라 형상에서도 큰 차이가 나타났다.

본 연구에서 구한 부하 스펙트럼은 국내에서 이루어지고 있는 경운 작업의 부하 특성을 구명하고 부하 스펙트럼의 작성 방법을 정립하는 데 기여할 수 있을 것이다. 보다 정확한 부하 스펙트럼을 개발하기 위해서는 후륜 뿐만 아니라 전륜에 대한 부하 토크도 측정하고, 보다 가혹한 조건으로 다수의 지역에서 장시간 부하 측정을 실시해야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 이장무. 1995. 모달해석의 이론과 응용. 서울대학교 기계설계학과. 제2판 3장: 3-11
2. 김대철. 1998. 트랙터 구동장치의 부하 스펙트럼 분석. 공학석사 학위논문. 서울대학교.
3. Anderson, G., E. Rowe and H. Spencer. 1974. A tractor rear wheel torque meter. *Journal of Agricultural Engineering Research* 19: 365-369.
4. Bannantine. J. A., J. J. Comer and J. L. Handrock. 1990. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
5. Gerlach, A. 1966. Field measurement of tractor transmission forces. *Transactions of the ASAE* 9(5): 707-712.
6. Glinka, G. and J. C. P. Kam. 1987. Rainflow counting algorithm for very long stress histories. *International Journal of Fatigue* 9(3): 223-228.
7. Grubisic, V. 1994. Determination of load spectra for design and test. *International Journal of Vehicle Design* 15(1/2): 8-25.
8. Jenane, C. and L. L. Bashford. 1992. Field evaluation of tractive efficiency using a wireless torque meter. *Applied Engineering in Agriculture* 8(2): 141-145.
9. Luoyang Research Institute. 1994. *Tractor design handbook*.
10. Renius, K. Th. 1976. Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern. *Fortschr.-Ber. VDI-Z, Reihe 1, Nr.49*. Düsseldorf, VDI-Verlag 1976.
11. Renius, K. Th. 1977. Application of cumulative damage theory to agricultural tractor design elements. *KONSTRUKTION* 29(3): 85-93.