

트랙터 변속기의 부하 스펙트럼 개발†

Development of a Load Spectrum of Tractor Transmission

김 대 철* 김 경 옥* 이 주 완*

D. C. Kim K. U. Kim J. W. Lee

ABSTRACT

This study was intended to develop a load spectrum acting on a transmission of agricultural tractors. Transmission loads were measured at the input shaft of the transmission and final drive shaft of the tractors. The measurement were conducted in five field conditions at two speed levels under plowing operations in Korea.

Two torque transducers were developed for the respective load measurements and other necessary instrumentations were made to collect the data and store them in a data logger. The time-histories of the torque loads were analyzed and transformed into the load spectra using the rainflow counting and Smith-Watson-Topper methods. Comparisons of the load spectra developed under different conditions were made to investigate their characteristics. The effects on the load levels of soil and plowing speeds were also investigated. Finally, a load spectrum combining the results of the spectrum analysis was developed and proposed as a load source for the reliability test of transmissions.

주요용어(Key Words): 부하 스펙트럼(Load spectrum), 트랙터 변속기(Tractor transmission)

1. 서 론

변속기, 차동장치, 최종감속장치, 차륜 구동축을 포함하는 트랙터 전동라인은 트랙터의 크기와 제작 비용에 큰 영향을 미친다. 따라서, 전동라인에 대한 적절한 설계가 요구되며, 이를 위해서는 구동장치에 작용하는 부하에 대한 정확하고 충분한 데이터가 요구된다. 또한, 변속기의 내구성 시험에 있어서도 부하 조건으로 실제 농작업에서 측정된 부하를 적용하여야 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 필요성 때문에 독일, 미국 등 선진국에서는 자국의 농작

업 조건에 적합한 부하 스펙트럼을 개발하여 변속기 설계와 내구성 시험에 이용하고 있다. 그러나, 국내에서는 아직 각종 트랙터 작업에 대한 부하 스펙트럼이 개발되어 있지 않기 때문에 부하 스펙트럼을 이용한 전동라인의 설계와 내구성 시험은 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

트랙터는 다양한 환경에서 다양한 형태의 작업을 수행하고 있다. 트랙터 작업 중에서 비교적 작업시간이 길고, 부하가 큰 작업은 경운 작업이다. 따라서, 전동라인의 설계와 내구성 시험에는 경운 작업에 대한 부하 스펙트럼을 적용할 수 있다. 본 연구에

† 본 연구는 1997년도 학술진흥재단 공모과제(1977-0001-G00004)로 수행된 것입니다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

서는 변속기 설계와 내구성 시험에 적용할 수 있는 경운 작업의 부하 스펙트럼을 개발하기 위하여 수행되었다.

2. 연구사

Gerlach(1966)은 변속기 입력축의 속도와 토크를 측정하여 각종 작업 상태에서 변속기로 전달되는 기관 토크의 특성을 실험적으로 조사하였다. 그 결과에 의하면 쟁기 작업의 경우, 변속기 입력축의 피크 토크에 대한 빈도가 가장 높은 토크의 크기는 정격 토크의 88.6%에 해당되는 토크이었으며 표준 편차는 35.8% 정도이었다. 일반적으로 토크의 크기는 정규 분포를 나타내었으며, 정격 토크의 160% 이상인 토크의 발생 빈도는 10^5 사이클 이하이고, 110% 이하인 토크의 발생 빈도는 10^7 사이클 이상이었다고 하였다.

Renius(1976)는 KHD사의 측정 자료와 자신의 판단을 기초로 하여 변속기 입력축과 차륜 구동축에 대한 부하 스펙트럼을 제시하였다. 이 스펙트럼은 2륜 구동 트랙터에 대한 부하 스펙트럼으로서, 30~110 kW급 트랙터를 대상으로 하였다. 이 스펙트럼은 많은 실측 데이터를 기초로 하였으나, 일정한 기여군 또는 속도 범위에서 나타날 수 있는 스펙트럼의 차이를 무시하였으며, 한 곡선으로써 넓은 출력 범위와 모든 작업 조건을 포함시키려고 하였다.

3. 경운 작업의 실태 조사

경운 작업의 부하 스펙트럼을 개발하기 위하여 먼저, 국내에서 실시되고 있는 경운 작업의 실태를 조사하였다. 제주도를 제외한 전국을 지형과 토양 조건이 유사한 4개 지역으로 구분하고, 각 지역에서 경운 부하가 상대적으로 큰 2개 지역을 선택하여 총 19개 지역에서 이 지역에 보급된 T사의 35~52 ps급 트랙터 36대를 대상으로 다음 항목을 조사하였다. 지역 선택은 농기계 대리점이 추천한 곳으로 하였다.

가. 경운 작업기의 종류

나. 경심과 경폭

다. 경운 작업의 속도 단수

라. 연간 경운 작업 시간

실태 조사의 결과에 의하면, 국내에서 주로 사용되고 있는 경운 작업기는 이랑 쟁기와 반전 쟁기이었으며, 소수의 원판 쟁기가 함께 사용되고 있다. 경운 작업에서는 주로 H1단(10.3 km/h)과 M4단(7.6 km/h)을 변속 단수로 사용하고 있으며, H1단의 사용율은 51.4%로서 가장 높고 M4단을 포함하면 62.5%가 되었다. 경심은 논과 밭 모두 10~30cm 정도이었으며, 평균적으로 논은 17.3cm, 밭은 19.7cm 이었다. 경폭은 0.75~2.0m 정도로서 경운 작업기의 종류에 따라서 차이가 컸다. 연간 경운 작업 시간은 최저 21시간에서 최대 300시간으로, 평균 131시간이었으며, 100시간 미만인 44%, 100~200시간이 31%, 200~300시간이 25% 이었다.

4. 부하 측정

가. 계측 시스템의 구성

전동 라인의 부하는 변속기 입력축과 구동 차축에 작용하는 부하를 대상으로 하였다. 따라서, 변속기 입력축과 구동 차축에 작용하는 토크를 측정하기 위하여 각 축에 스트레인 게이지를 부착한 토크 변환기를 제작하여 설치하였다. 변속기 입력축에는 축방향과 45° 경사로 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 휘스톤 브리지 회로를 구성하고, 스트레인 게이지의 출력 신호는 비접촉식 무선 시스템을 이용하여 수신하였다. 그림 1은 변속기 입력축에 부착된 스트레인 게이지와 무선 시스템을 나타낸 것이다. 측도 설정 결과, 상관계수는 0.99998이었으며 정확도는 0.288(% FS)이었다.

구동 차축의 토크 변환기는 그림 2와 같이 차축과 휠디스크 사이에 설치하였으며, 구동 차축으로 전달된 토크가 토크 변환기를 통하여 휠디스크로 전달될 수 있도록 하였다. 토크 변환기에는 축방향과 45° 경사로 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 휘스톤

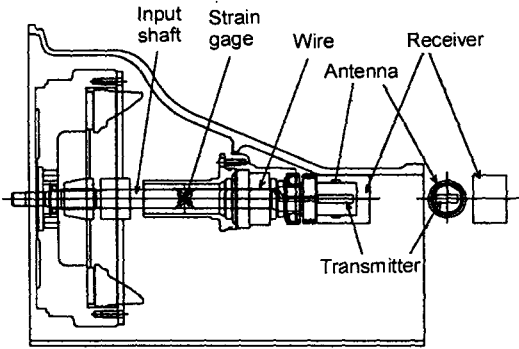


Fig. 1 Strain gages and a telemetry system installed on the input shaft of the gear box.

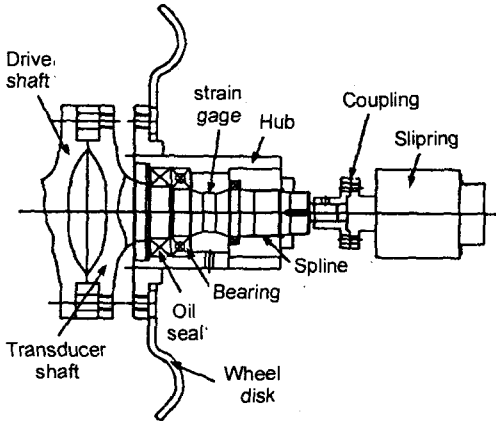


Fig. 2 Wheel torque meter mounted on driving wheel shaft.

브리지 회로를 구성하였으며, 스트레인 게이지의 감도를 높이기 위하여 게이지 부착 지점은 다른 부분에 비하여 직경을 작게 하였다. 스트레인 게이지의 출력 신호는 토크 변환기의 한 쪽 끝에 부착된 슬립링을 통하여 자료 수집장치로 전송되도록 하였다. 차축 토크 변환기에 대한 측도설정 결과, 상관계수는 0.99999이었으며 정확도는 0.561(% FS)이었다.

차축의 회전수는 슬립링의 회전부에 로터리 엔코더를 부착하여 측정하였으며, 기관의 회전수는 발전기에서 발생하는 펄스 수를 이용하여 측정하였다. 트랙터의 실제 주행속도는 레이더 속도 센서를 사용하여 측정하였다. 토크 변환기는 좌우 후륜에 모두

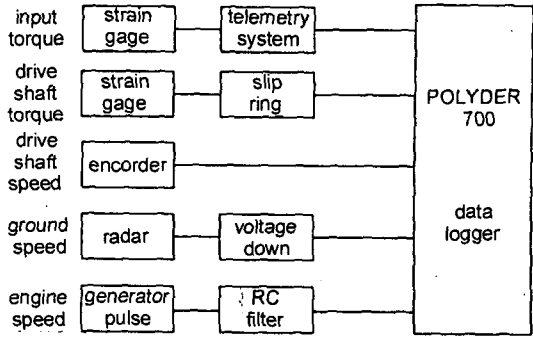


Fig. 3 Instrumentation for torque measurement.

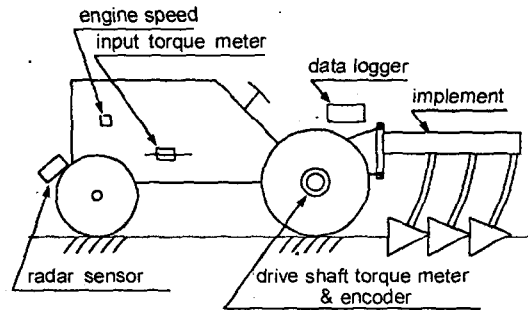


Fig. 4 Measuring instruments installed on experimental tractor.

설치하였으며, 로터리 엔코더는 우측 후륜에만 설치하였다. 그림 3은 측정 시스템의 블록 선도를 나타낸 것이며 그림 4는 각 계측 장치의 설치 위치를 나타낸 것이다.

나. 부하 측정

부하 측정은 용인의 밭 2개소(I, II), 수원의 논(III)과 밭(IV) 각 1개소, 철원의 논(V) 1개소로서, 지표면의 형태가 서로 다른 5개 포장에서 실시하였다. 각 포장의 토양 조건은 표 1에서와 같다. 표 1에서 포장 I은 개간한 후 10개월이 경과한 토양으로서, 경운한 적이 없는 포장이었으며, 포장 II는 경운 후 6개월이 지난 곳으로서 비교적 작업 부하가 작은 토양이었다. 포장 III은 콤팩인 작업 후 3일이 지난 토양이었으며, IV는 비가 온 후 5일이 경과한 밭으로 비교적

Table 1 Soil and surface conditions of field where load measurement was made

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

건조한 상태이었다. 포장 V는 20~30cm 높이로 객토한 논으로서 콤팩트 작업 후 10일이 지난 상태이었다.

토성은 미농무성법에 따라 결정하였으며, 콘지수는 밀면적이 645mm²이고 정각이 30°인 원추를 사용하여 측정하였다.

부하 측정에는 두 종류의 쟁기를 사용하였다. 포장 I, II, III, IV에서는 경폭이 75cm인 3련 양용 쟁기를 사용하였으며, 포장 V에서는 3련 양용 쟁기로는 작업이 불가능하여 경폭이 125cm인 3련 단용 쟁기를 사용하였다. 경심은 모두 15~20cm를 유지하도록 하였다.

작업 속도는, 일정한 기관 속도, 즉 정격 회전수 2,600 rpm을 유지한 상태에서, 7.6 km/h(M4단)과 10.3 km/h(H1단) 2수준으로 하였다. 타이어의 공기압은 전륜을 140 kPa, 후륜을 110 kPa로 유지하였다.

5. 부하 스펙트럼 작성

가. 토크-시간 선도

변속기 입력축 토크에는 기관의 폭발 행정에 의한 고주파 성분이 포함된다. 이 고주파 성분은 실린더 수에 따라 기관 속도의 2배, 4배, 8배, ...에 해당되는 주파수이다. 따라서, 부하 스펙트럼의 주파수 범위를 최소한 기관 속도의 4배까지 포함시키기 위해서는 니퀴스트(Nyquist) 주파수를 기관 속도의 4배로

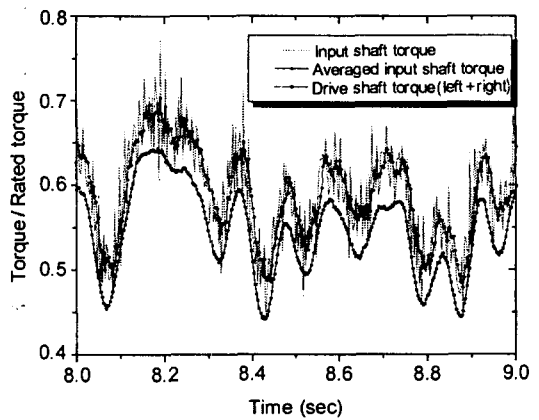


Fig. 5 Time histories of torques measured at transmission input and drive shafts.

하여 샘플링 속도를 구하여야 한다.

본 연구에서는 기관의 정격 속도가 2,600 rpm 이었기 때문에 샘플링 속도는 346 Hz가 된다. 이 샘플링 속도 부근에서 자료 수집 장치에 가장 적합한 샘플링 속도는 333.3 Hz 이었다. 따라서, 시간-토크 선도의 샘플링 속도는 333.3 Hz로 하였다. 1회의 데이터 측정시간은 자료 수집장치의 기억 용량에 적합한 45초로 결정하였으며, 각 시험별로 여러 번 측정하여 그 중 대표적인 데이터 2~4개를 선정하여 분석하였다.

그림 5는 변속기 입력축과 차륜 구동축의 토크 변화를 333.3 Hz로 샘플링한 임의의 1초간 시간-토크 선도를 나타낸 것이다.

나. 부하 스펙트럼

부하 스펙트럼은 측정된 시간 함수의 부하 토크를 빈도수의 함수로써 반대수지에 나타낸 것이다. 즉, 대수 눈금인 가로축에 부하의 빈도수를 나타내고, 세로축에 부하의 크기를 나타낸 것이다.

변속기 입력축과 구동축의 토크를 분석하는 데는 토크의 절대값보다 정격 토크에 대한 상대적인 크기가 중요하기 때문에 부하의 크기는 정격 토크에 대한 측정 토크의 비로서 나타내었다. 변속기 입력축에 대한 정격 토크는 기관의 정격 토크를 사용하였으며, 구동축 토크에 대한 정격 토크는 구동륜의 최대 이론 구동 토크를 사용하였다. 즉, 본 연구에서 사용한 트랙터의 정격 출력, 정격 속도, 구동륜의 반경, 구동륜에 작용하는 수직 하중이 각각 $P = 41\text{ps}$, $N_e = 2,600\text{rpm}$, $r = 0.626\text{m}$, $W = 8,550\text{N}$ 이었기 때문에 기관의 정격 토크, T_{ref} 와 구동륜의 최대 이론 구동 토크, T_{ref} 는 다음과 같이 계산되었다.

$$T_{ref} = \frac{736 \times 60P}{2\pi N_e} = \frac{736 \times 60 \times 40}{2\pi \times 2,600} = 110.8\text{Nm}$$

$$T_{ref} = C_r W_r = 0.8 \times 8,550 \times 0.626 = 4,282\text{Nm}$$

여기서, 구동륜의 견인 계수 C_r 는 0.8로 계산하였다.

측정 토크의 빈도수는 레인 플로우(rainflow counting) 카운팅 방법을 이용하여 결정하였으며, 스펙트럼에서는 예상 최대 토크를 32등분하여 각 구간에 해당되는 부하 토크의 빈도수로써 나타내었다. 또한, 스펙트럼의 부하를 계산할 때는 측정 토크의 평균값을 고려한 스미스 왓슨 테퍼(Smith Watson Tapper) 방법을 적용하였다.

스펙트럼에서 고주파 성분을 제거하기 위하여 이동 평균법으로써 측정 토크를 평활화(smoothing)하였다. 토크 데이터의 각 점에서 평활화를 위한 평균은 다음 식으로 계산하였다.

$$\bar{x}_i = \frac{x_{(i-n-1)} + \dots + x_{(i-2)} + x_{(i-1)} + x_i}{n}$$

여기서 n = 평균한 데이터 수

x_i = i 점의 측정 데이터의 값

\bar{x}_i = i 점의 평균 값

본 연구에서 평균화된 데이터의 수 n 은 기관의 회전수가 2,000 rpm 이상일 때, 고주파 성분이 67Hz 이상이므로, 샘플링 주파수 333.3 Hz를 67로 나누어서 구한 값 5로 하였다. n 값에 따른 부하 스펙트럼의 변화를 구명하기 위하여 그림 6에서와 같이 n 값을 각각 5와 10으로 하여 부하 스펙트럼을 구하고 이를 비교하였다. 토크 데이터를 평활화 하였을 때와 하지 않았을 때의 부하 스펙트럼에는 큰 차이가 나타났으나, 평균화된 값에 따른 차이는 나타나지 않았다. 따라서 평균화된 수를 5로 하여도 고주파 성분을 제거하는 데에는 충분한 것으로 판단하였다.

변속기 입력축 토크에서 고주파 성분은 그 크기가 정격 토크의 20% 이하로 적고, 주기적이기 때문에 부하 스펙트럼에서 그 영향을 제거하여도 이를 이용한 변속기 설계와 내구성 시험에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 변속기 입력축의 부하 스펙트럼은 평균화된 데이터 수를 5로 하여 평활화한 시간-토크 선도로부터 구하였으며, 최종 구동축의 부하 스펙트럼은, 전동 과정에서 고주파 성

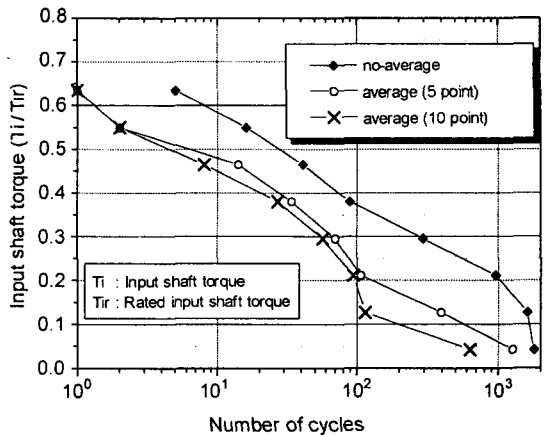


Fig. 6 Effects of averaging of input shaft torque.

본이 자연적으로 감소되기 때문에 실제 측정된 시간-토크 선도로부터 직접 구하였다.

다. 출발과 좌우 구동축의 부하 스펙트럼

그림 7은 쟁기 작업시 출발할 때와 정상적으로 작업할 때의 10초간, 최종 구동축에 대한 부하 스펙트럼을 나타낸 것이다. 출발의 경우 정상 작업에 비하여 부하의 크기는 감소되었으나, 변화의 경향은 유사하였다. 이러한 차이는 크지 않고 전체 작업 시간 중 짧은 시간에 해당한다. 따라서 부하 스펙트럼에서 출발의 영향은 고려하지 않았다.

좌측과 우측 구동축에 대한 부하 스펙트럼은 각각 그림 8과 9에서와 같이 좌같이 할 경우에는 좌측 구동축의 부하가 크게 나타났으며, 우같이 할 경우에는 우측 구동축의 부하가 크게 나타났다. 이는 쟁기에 작용하는 토양 반력의 측방향 성분이 좌같은 경우에는 우측으로, 우같은 경우에는 좌측으로 작용하여 각각 좌측과 우측 구동축의 부하를 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 그 차이는 13% 미만이었으며, 빈도수에 대한 부하의 크기는 같은 경향을 나타내었다. 부하 스펙트럼에서 구동축의 토크 부하는 좌우측 구동축 토크 부하의 합으로서 나타내었다.

6. 부하 스펙트럼 분석

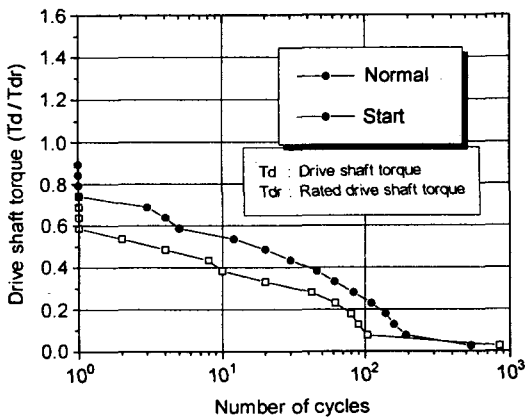


Fig. 7 Load spectra of drive shaft torque at starting and normal plowing operation.

가. 경운 속도의 영향

그림 10~13은 토양 III과 V 즉, 경운 부하가 중간 정도인 습답과 경운 부하가 가장 큰 객토답에서 경운 속도의 변화에 따른 변속기 입력축과 구동축의 부하 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이것은 경운 부하에 따른 경운 속도의 영향을 대표적으로 보기 위한

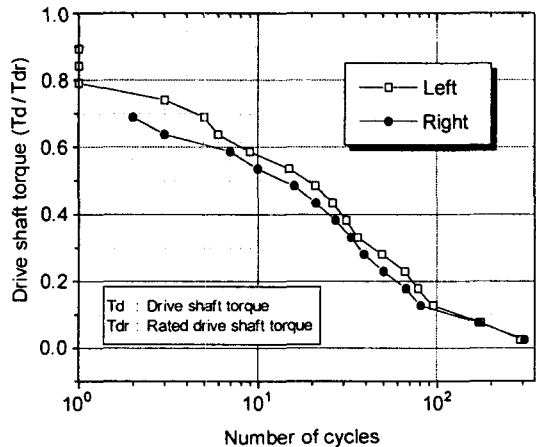


Fig. 8 Load spectra of left and right drive shaft torques when furrow was opened to left side by reversible plow with H1 gear.

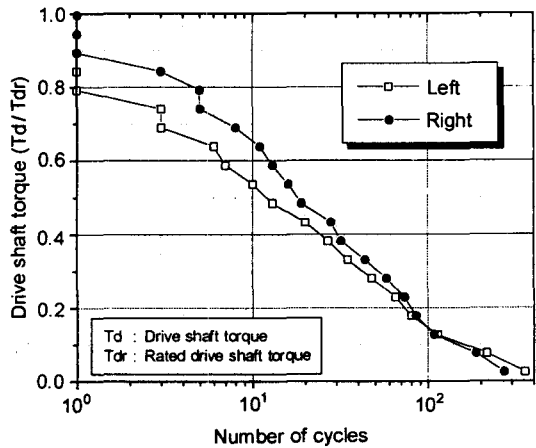


Fig. 9 Load spectra of left and right drive shaft torques when furrow was opened to right side by reversible plow with H1 gear.

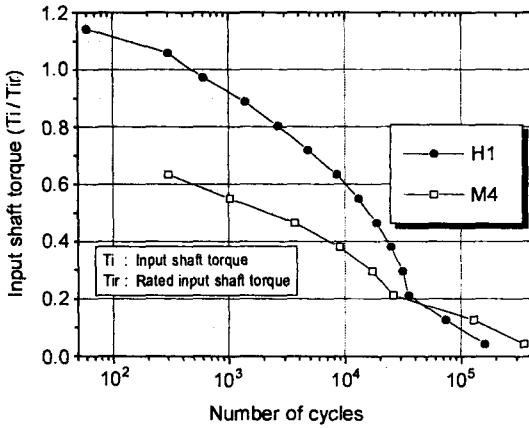


Fig. 10 Load spectra of input shaft at plot III.

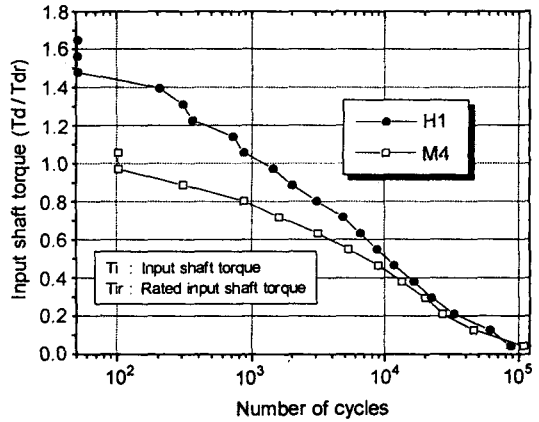


Fig. 12 Load spectra of input shaft at plot V.

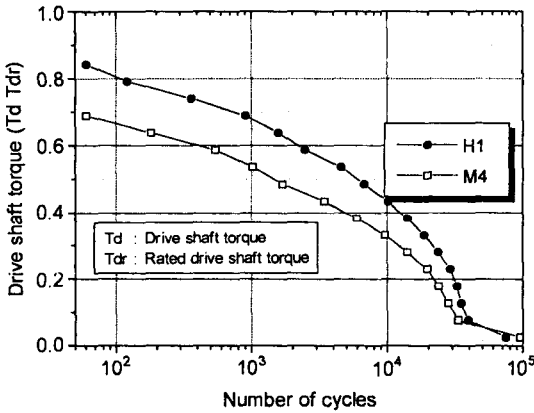


Fig. 11 Load spectra of drive shaft at plot III.

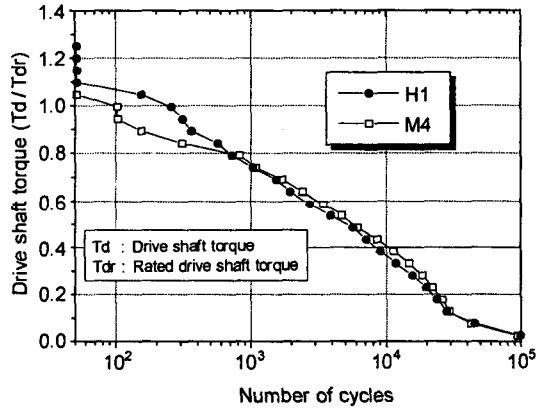


Fig. 13 Load spectra of drive shaft at plot V.

것으로 경운 속도가 증가되면 부하의 크기도 증가되었다. 즉, 같은 빈도수에서 경운 속도가 빠를수록 부하의 크기도 증가되었다. 특히, 빈도수가 낮은 고부하일수록 부하의 증가 폭이 더 컸다. 경운 속도의 영향은 구동축보다는 변속기 입력축에서 더 크게 나타났으며 또한, 경운 부하가 큰 객토담에서보다는 습담에서 더 크게 나타났다. 특히, 객토담에서 구동축의 경우 속도의 영향이 작은데 그 원인은 구동축에 최대의 슬립 부하가 걸리기 때문에 속도가 증가하여도 부하가 증가하지 않기 때문으로 판단된다.

나. 토양의 영향

그림 14~17은 각각 시험 토양 조건에서 중속 4단

(M4)과 고속 1단(H1)으로 작업하였을 때 변속기 입력축과 구동축의 부하 스펙트럼을 나타낸 것이다. 토양 조건에 따라 다양한 형태의 부하 스펙트럼이 나타났으나, 예상된 바와 같이 토양의 강도가 증가함에 따라 부하의 크기도 증가되었으며, 부하가 클수록 빈도수는 감소되었다. 특히, 토양 조건 V에서의 부하 스펙트럼은 상당히 큰 부하를 나타내는데 이것은 토양의 영향 뿐 아니라 다른 토양과는 달리 경폭이 큰 단용 쟁기를 사용한 영향도 포함되어 있다. 중속 4단에서 변속기 입력축의 부하 토크는 정격 토크의 0.6~1.0 범위이었으나, 고속 1단에서는 0.7~1.5으로 증가되었다. 또한, 구동축의 부하 토크도 중속 4단일 때 0.5~1.0 범위에서 고속 1단일 때는 0.5~1.1로 증가되었다.

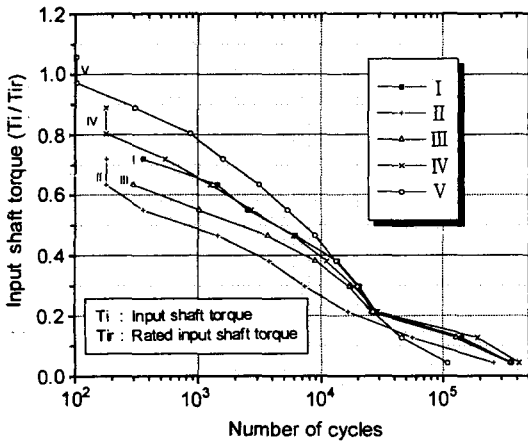


Fig. 14 Load spectra of input shaft under five soil conditions with M4 gear.

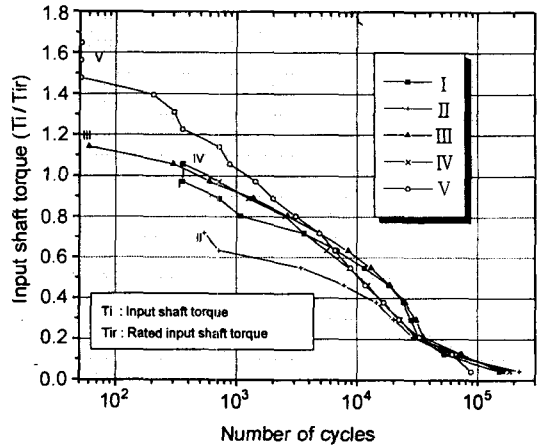


Fig. 16 Load spectra of input shaft under five soil conditions with H1 gear.

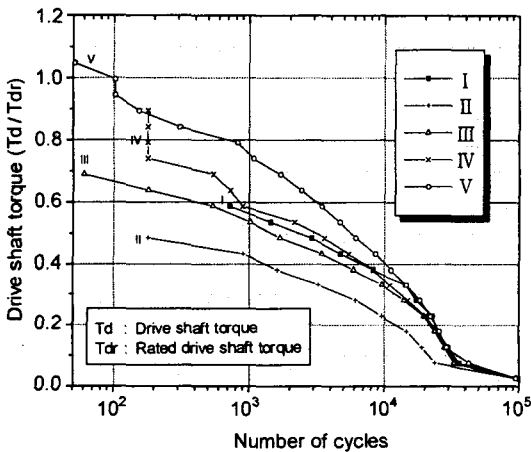


Fig. 15 Load spectra of drive shaft under five soil conditions with M4 gear.

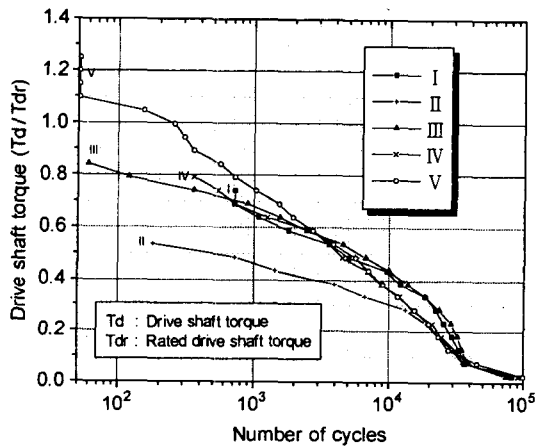


Fig. 17 Load spectra of drive shaft under five soil conditions with H1 gear.

변속기 입력축과 최종 구동축의 부하 토크를 비교하면, 변속기 입력축의 부하는 최종 구동축에서보다, 중속 4단에서는 최대 20%, 고속 1단에서는 최대 18%가 증가되었다. 이는 변속기 입력축에서 최종 구동축까지의 동력 손실, 관성 저항 등에 의한 것으로 판단된다.

다. 총부하 스펙트럼

총부하 스펙트럼은 일생 동안, 즉 수명 기간에 작용하게 될 부하와 그 빈도수를 스펙트럼으로 나타낸

것이다. 따라서, 일정 시간에 측정된 부하의 크기와 빈도수를 수명시간에 해당되는 빈도수로 나타내야 한다. 총부하 스펙트럼을 구하기 위한 트랙터의 수명은 10년으로 가정하였으며, 총 사용시간은 연간 경운 작업 시간을 300시간으로 하여 3,000시간으로 설정하였다.

총부하 스펙트럼은 경운 부하가 중간 정도인 수원의 논과 밭, 즉 토양 조건 III과 IV, 경운 부하가 큰 철원의 논, 즉 토양 조건 V의 2지역을 대상으로 작성하였다.

수원 지역은 전국을 대표할 수 있는 조건으로 가

정하였고, 중속 4단과 고속 1단의 사용 비율은 설문 조사의 결과에 따라 20:80으로 하였으며, 논과 밭의 비율은 전국 논과 밭의 면적 비율인 65:35로 하였다.

철원 지역에서는 쟁기 작업 부하가 크기 때문에 중속 4단의 사용율이 높다고 판단되어 중속 4단과 고속 1단의 비율을 40:60으로 하였으며, 논작업이 위주인 것을 고려하여 논에 대해서만 총부하 스펙트럼을 작성하였다.

수원지역과 철원지역의 부하 스펙트럼을 60:40의 비율로 합하여 국내에 적용할 수 있는 경운 작업에 대한 부하 스펙트럼을 작성하였다. 이 부하 스펙트럼은 국내의 일반적인 경운 작업 조건보다 좀 더 가혹한 조건을 가정한 것이다. 그림 18~19는 각각 이와 같은 방법으로 구한 변속기 입력축과 최종 구동축에 대한 총부하 스펙트럼을 나타낸 것이다.

총부하 스펙트럼에서 수원지역과 철원지역 및 2 지역을 모두 고려한 경우의 차이는 크게 나타나지 않았으나, 부하가 크고 빈도수가 작은 경우에는 철원지역의 부하가 수원지역보다 크게 나타났다. 이는 철원지역의 경운 부하가 수원 지역보다 크기 때문이다. 최대 부하는 변속기 입력축의 경우 정격 토크의 1.1~1.6배이고, 최종 구동축의 경우 0.9~1.2배 정도 이었다.

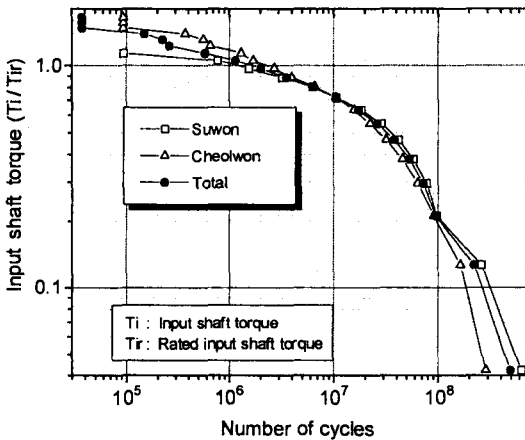


Fig. 18 Total load spectrum of input shaft.

국내 경운 작업에 대한 총부하 스펙트럼의 부하 수준은 수원지역과 철원지역의 중간 정도로 나타났으며, 이를 Renius(1976)와 Gerlach(1966)가 개발한 부하 스펙트럼과 비교하면 그림 20에서와 같이 같은 빈도수에서 부하의 크기가 작은 것으로 나타났다. 이는 Renius가 트랙터의 수명을 10,000시간으로 가정하였고, 또한 토양 강도가 국내보다 높았기 때문인 것으로 판단된다.

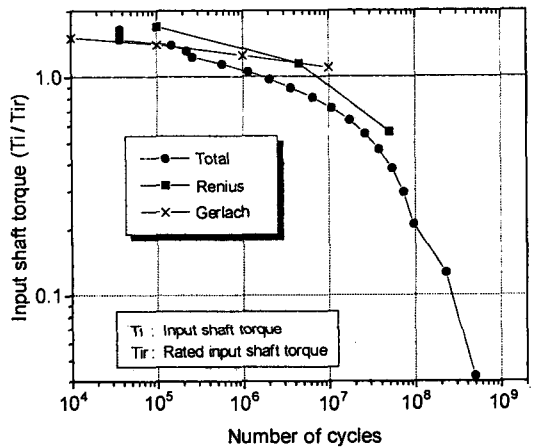


Fig. 19 Total load spectrum of drive shaft.

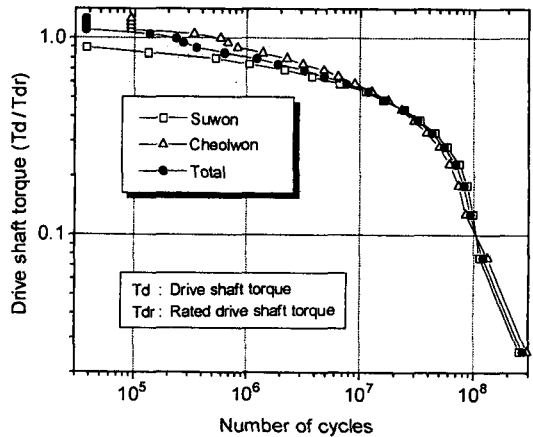


Fig. 20 Comparison of total load spectrum of input shafts of tractor with those developed by Renius and Gerlach.

7. 요약 및 결론

본 연구는 국내의 경운 작업 조건에서 트랙터의 변속기 입력축과 구동축에 작용하는 부하 스펙트럼을 개발하기 위하여 시도되었다.

국내의 경운 작업 실태를 조사하여, 그 결과에 따라 부하 측정 방법과 경운 작업 조건을 설정하였으며, 변속기 입력축과 최종 구동축의 토크 부하는 자체적으로 설계 제작한 각각의 토크 변환기를 변속기 입력축과 최종 구동축에 설치하여 측정하였다. 경운 부하는 용인의 밭 2개소, 수원의 논과 밭 각 1개소, 칠원의 논 1개소에서 경운 속도를 2수준으로 하여 측정하였다. 측정된 시간-토크 선도로부터 레인 플로우(Rainflow) 카운팅 방법과 Smith-Watson-Topper 방법을 이용하여 각각의 경운 조건에서 부하 스펙트럼을 작성하였다.

부하 스펙트럼의 분석 결과에 의하면, 급출발이 아닌 정상적인 출발일 경우, 부하 스펙트럼은 정상적인 경운 작업과 비교하여 부하의 크기만 작을 뿐 스펙트럼 형상은 큰 차이가 없었으며, 좌, 우 구동축에 대한 부하 스펙트럼에서도 형상의 차이는 나타나지 않았다. 경운 속도에 의한 부하 스펙트럼의 차이는 차륜 구동축에서 보다는 변속기 입력축에서 크게 나타났으며 속도가 빠를수록 같은 빈도수에서 큰 부하 토크를 나타내었다. 그러나, 토양 조건에 따라서는 부하의 크기뿐만 아니라 스펙트럼의 형상에서도 큰 차이가 나타났다.

본 연구에서 개발된 부하 스펙트럼은 경운 부하의 특성을 구명하고, 다양한 조건에서 부하 스펙트럼의 작성 방법을 정립하는 데 기여할 수 있을 것이다. 그러나, 보다 신뢰성이 높은 부하 스펙트럼을 개발하기 위해서는 후륜 뿐만 아니라 전륜에 대한 부하 토크를 측정하여야 하며, 다수의 지역에서 보다 가혹한 조건으로 장시간 경운 부하를 측정하여 통계적으

로 분석하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김대철. 1998. 트랙터 구동장치의 부하 스펙트럼 분석. 공학석사 학위논문. 서울대학교.
2. 이장무. 1995. 모드 해석의 이론과 응용. 서울대학교 기계설계학과. 제2판 3장. pp. 3-11.
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. Renius, K. Th. 1976. Lastund Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern. *Fortschr.-Ber. VDI-Z, Reihe 1, Nr. 49*. Düsseldorf, VDI-Verlag 1976.
10. Renius, K. Th. 1977. Application of cumulative damage theory to agricultural tractor design elements. *KONSTRUKTION* 29(3):85-93.